Environmental Pollutions and Sustainable Urban Development, Summer 2025, Vol. 2, Issue 2, Serial No. 6, pages 1-23

"Review article" DOI: 10.82460/jepsud.2025.1213159

Strategies to mitigate greenhouse gas emissions from rice production

Sajjad Shaker Kouhi*, Mohammad Rabiee

Department of Agronomy and Plant Breeding, Rice Research Institute, Rasht, Iran
*Corresponding author: s.shaker@areeo.ac.ir
(Received: 26 July 2025, Accepted: 26 August 2025)

Abstract
Global warming, caused by the rising concentration of greenhouse gases (GHG), is one of the most serious environmental challenges of the present era. Agricultural soils serve as major sources of important GHG such as methane (CH_4), nitrous oxide (N_2O), and carbon dioxide (CO_2). Rice (*Oryza sativa* L.), a staple food for more than half of the world's population, is also one of the largest contributors to GHG emissions from the agricultural sector. Population growth and the increasing demand for rice have raised serious concerns about future emissions from rice cultivation. Therefore, identifying appropriate strategies to mitigate GHG emissions from rice production is urgent. This review article aims to investigate the mechanisms of GHG emissions from rice fields, the factors influencing these emissions, and strategies to reduce them. Modifying conventional crop management practices can have a significant impact on lowering GHG emissions from rice fields. In this context, the adoption of appropriate management approaches such as water management, fertilizer management, residue management, conservation tillage, biochar application, rice-aquatic animal integrated systems, direct seeding, and the selection of suitable cultivars can contribute to mitigating GHG emissions while simultaneously supporting the sustainability of rice production.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Climate change, Global warming potential, Carbon dioxide, Methane, Nitrous oxide

دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز
فصل‌نامهٔ آلودگی‌های محیطی و توسعهٔ پایدار شهری

دورهٔ ۲، شمارهٔ ۲، پیاپی ۶
تابستان ۱۴۰۴، صفحات ۲۳-۱

«مقالهٔ مروری»

DOI: 10.82460/jepsud.2025.1213159

استراتژی‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولید برنج

سجاد شاکرکوهی*، محمد ربیعی

بخش تحقیقات اصلاح و تهیهٔ بذر، مؤسسهٔ تحقیقات برنج کشور، رشت، ایران

*نویسندهٔ مسئول مکاتبات: s.shaker@areeo.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۰۴، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴)

چکیده

گرمایش جهانی ناشی از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای، یکی از جدی‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در عصر حاضر است. خاک‌های کشاورزی به عنوان منبع گازهای گلخانه‌ای مهمی مانند متان (CH_4)، اکسید نیتروژن (N_2O) و دی‌اکسید کربن (CO_2) عمل می‌کنند. برنج به عنوان غذای اصلی بیش از نیمی از جمعیت جهان، از مهم‌ترین منابع انتشار گازهای گلخانه‌ای بخش کشاورزی به شمار می‌رود. رشد جمعیت و افزایش تقاضا برای برنج در آینده، نگرانی‌های جدی را در مورد انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از کشت این محصول ایجاد کرده است. بنابراین، اتخاذ راهکارهای مناسب جهت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولید برنج ضروری می‌باشد. از این‌رو، مقالهٔ مروری حاضر با هدف بررسی مکانیسم‌های انتشار گازهای گلخانه‌ای از مزارع برنج، عوامل مؤثر بر انتشار گازهای گلخانه‌ای و استراتژی‌هایی جهت کاهش تولید این گازها انجام شد. ایجاد تغییر در مدیریت مرسوم زراعی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از مزارع برنج داشته باشد. در همین راستا، استفاده از شیوه‌های مدیریتی مناسب مانند مدیریت آب، مدیریت مناسب کود، مدیریت بقایا، خاک‌ورزی حفاظتی، کاربرد بیوچار، سیستم تلفیقی برنج-آبزیان، کاشت مستقیم برنج و انتخاب ارقام مناسب می‌تواند در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و در عین حال، پایداری تولید برنج مؤثر باشد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، پتانسیل گرمایش جهانی، دی‌اکسید کربن، متان، اکسید نیتروژن

مقدمه

تغییرات اقلیمی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی قرن بیست و یکم محسوب می‌شود. میانگین دمای سالانهٔ جهانی به دلیل افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌طور قابل توجهی در حال افزایش است. در صورتی‌که سرعت گرمایش جهانی کنترل نشود، میانگین دما تا پایان قرن حاضر حدود ۲/۲ تا ۶/۴ سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت (۱). از بین تمام گازهای گلخانه‌ای که در نتیجهٔ فعالیت‌های انسانی منتشر می‌شوند، دی‌اکسید کربن (CO_2)، متان (CH_4) و اکسید نیتروژن (N_2O) به دلیل طول عمر زیاد و بازتابش امواج، بیش‌ترین تأثیر را بر تغییرات اقلیمی دارند (۲). متان و اکسید نیتروژن در مقایسه با دی‌اکسید کربن به میزان کم‌تری منتشر می‌شوند، اما قابلیت گرمایش جهانی بیش‌تری دارند. به‌طوری‌که، متان ۲۸ درصد و اکسید نیتروژن ۳۱۰ درصد نسبت به دی‌اکسید کربن از پتانسیل گرمایش جهانی[1] بیش‌تری برخوردار هستند (۳). کشاورزی و فعالیت‌های مرتبط با آن مانند تغییر کاربری اراضی، عملیات خاک‌ورزی، کاربرد کودهای شیمیایی، استفاده از ماشین‌آلات و سوخت، با سهم ۱۰ تا ۱۷ درصدی، نقش عمده‌ای در انتشار گازهای گلخانه‌ای برعهده دارند. به گونه‌ای که، حدود ۴۷ درصد از انتشار متان و ۸۴ درصد از انتشار اکسید نیتروژن را به خود اختصاص می‌دهند (۴).

برنج (*Oryza sativa* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات زراعی در جهان است که به عنوان رژیم غذایی اصلی بیش از نیمی از جمعیت کرهٔ زمین، نقش کلیدی در امنیت غذایی ایفا می‌کند. حدود ۱۶۰ میلیون هکتار (۱۱ درصد) از زمین‌های کشاورزی جهان هر ساله به کشت برنج اختصاص می‌یابد (۵). مصرف جهانی برنج به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و از ۱۵۷ میلیون تن در سال ۱۹۶۰ به ۵۲۰ میلیون تن در سال ۲۰۲۲ رسیده است. انتظار می‌رود تا سال ۲۰۳۰ حدود ۶ درصد دیگر نیز افزایش یابد (۶). مزارع برنج یکی از مهم‌ترین منابع انتشار گازهای گلخانه‌ای محسوب می‌شوند و به‌ترتیب حدود ۱۱ درصد و ۳۰ درصد از انتشار جهانی اکسید نیتروژن و متان بخش کشاورزی را به خود اختصاص می‌دهند (۷). تولید برنج بالاترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را در بین تمام محصولات کشاورزی دارد. به عنوان مثال، پتانسیل گرمایش جهانی تولید برنج به‌ترتیب ۴۶۷ درصد و ۱۶۹ درصد بیش‌تر از تولید گندم و ذرت می‌باشد (۸). در نتیجه، برای مقابله با این چالش دوگانه، یعنی پاسخگویی به افزایش تقاضای برنج و جلوگیری از افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای از اراضی شالیزاری، ارائهٔ راهکارها و شیوه‌های مدیریتی که علاوه بر پایداری تولید برنج موجب کاهش اثرات زیست‌محیطی شود، ضروری به نظر می‌رسد. از این رو، بررسی حاضر فرآیندهای تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای از خاک‌های شالیزاری و عوامل مؤثر بر آن‌ها و هم‌چنین، شیوه‌های مدیریتی مناسب برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولید برنج را مورد بحث قرار می‌دهد.

[1] Global Warming Potential

مکانیسم‌های انتشار گازهای گلخانه‌ای از شالیزار

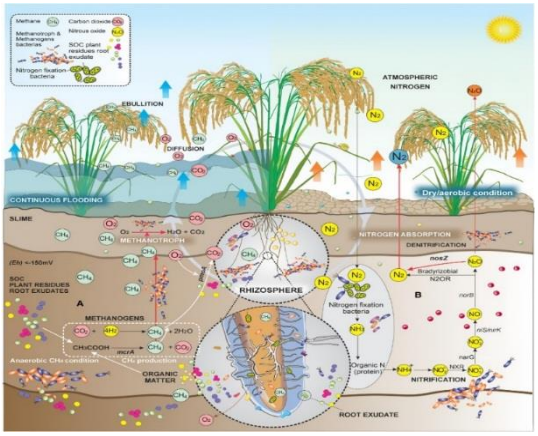
- تولید و انتشار متان

تولید متان در خاک‌های شالیزاری یک فعالیت متابولیکی میکروبی[1] است که توسط متانوژن‌ها[2] (باکتری‌های تولید کنندهٔ متان) صورت می‌گیرد. این فرآیند زمانی اتفاق می‌افتد که متانوژن‌ها در عمق خاصی از خاک تحت شرایط محیطی مناسب و با منابع کربن کافی در دسترس باشند (۹). شرایط بی‌هوازی مسیر بیوشیمیایی تولید متان است، زیرا شرایط بی‌هوازی عملکرد متانوژن‌ها را بهبود می‌بخشد و منجر به برداشت کربن آلی و تبدیل آن به متان از طریق فرآیندی به نام متانوژنز می‌شود (۱۰). متانوژن‌ها در لایهٔ بی‌هوازی خاک تجمع یافته و فقط از طیف محدودی از سوبستراها مانند H_2 و CO_2 استفاده می‌کنند. بنابراین، هر چه منابع کربن بیش‌تری قادر به تولید سوبستراهای متابولیکی برای متانوژن‌ها باشند، میزان انتشار متان بیش‌تر می‌شود (۱۱). علاوه بر این، عوامل محیطی مانند دما، رطوبت خاک، نوع خاک و پتانسیل ردوکس بر تولید متان تأثیرگذار هستند (۱۲). متان پس از تولید در خاک‌های شالیزاری، از طریق سه مسیر اصلی به جو منتقل می‌شود. این مسیرها شامل انتشار متان محلول از طریق سطح مشترک آب – هوا و خاک – آب (فاز مایع)، جوشش، فوران و رهاسازی متان از رسوبات زیر سطح آب و هم‌چنین، انتشار متان از طریق آئرانشیم ریشهٔ گیاه برنج به جو می‌باشد (۱۳). همان طور که در شکل (۱-الف) نشان داده شده است، هم‌زیستی میکروب‌های تولیدکننده و اکسیدکنندهٔ متان و حفظ ارتباط بین میکروب‌ها و محیط توسط گیاه برنج، می‌تواند فرصت‌هایی را برای کاهش انتشار متان از خاک‌های شالیزاری فراهم کند. بر این اساس، ترشحات ریشهٔ برنج می‌تواند از طریق تأثیر بر فعالیت‌های میکروبی در ریزوسفر، موجب افزایش اکسیداسیون متان توسط باکتری‌های متانوتروف[3] شود (۷).

دما به عنوان مهم‌ترین عامل مؤثر بر تولید و الگوی انتشار متان می‌باشد، زیرا تأثیر مستقیمی بر فعالیت میکروارگانیسم‌های مربوطه دارد. افزایش دما برای افزایش فعالیت میکروبی متانوژن‌ها مفید است. محدودهٔ بهینهٔ دما برای فعالیت متانوژن‌ها ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌گراد می‌باشد (۱۴و۱۵). گزارش شده که تولید متان در دمای ۳۰ سانتی‌گراد چندین برابر بیش‌تر از دمای ۱۵ سانتی‌گراد است (۱۶). میزان رطوبت خاک نیز بر تولید متان مؤثر می‌باشد. افزایش رطوبت خاک و در نتیجه ایجاد شرایط بی‌هوازی، منجر به افزایش تولید متان می‌شود (۱۷). نوع خاک و عوامل مختلف خاکی می‌توانند به طور مستقیم یا غیرمستقیم بر فرآیند تولید، اکسیداسیون و انتشار متان تأثیرگذار باشند. به عنوان مثال، غلظت اکسیژن خاک نقش کلیدی در اکسیداسیون متان ایفا می‌کند (۱۸). محققان با بررسی تأثیر بافت خاک بر میزان انتشار متان، گزارش کردند که انتشار متان از خاک لومی- رسی- شنی به طور قابل توجهی بیش‌تر از خاک لومی- شنی است (۱۹). پتانسیل ردوکس خاک یکی دیگر از عوامل مؤثر بر تولید متان می‌باشد. محیط‌های با پتانسیل ردوکس بالا که سرشار از اکسیژن هستند، اکسیداسیون متان را تسهیل می‌کنند. برعکس، محیط‌های با پتانسیل

[1] Microbial Metabolism
[2] Methanogen
[3] Methanotroph

ردوکس پایین که فاقد اکسیدکننده‌های قوی مانند اکسیژن هستند، برای آزادسازی متان مساعد می‌باشند (۱۸). گیاه برنج و مرحلهٔ رشد آن نیز تأثیر قابل توجهی بر میزان تولید و انتشار متان دارد. در مراحل پنجه‌زنی و خوشه‌دهی برنج، افزایش سلول‌های آئرانشیم و فعالیت فتوسنتزی زیاد، بسترها و مسیرهای بیش‌تری را برای تولید و انتقال متان فراهم می‌کند (۲۰). علاوه بر این، گزارش شده که بیش از ۹۰ درصد از کل انتشار متان به جو توسط گیاه برنج و از طریق آئرانشیم صورت می‌گیرد و فقط ۵ تا ۱۰ درصد از کل انتشار متان از طریق دو مسیر دیگر انجام می‌شود (۲۱).



شکل (۱): شماتیک تولید متان (الف) و اکسید نیتروژن (ب) در خاک‌های شالیزاری (۷)

- تولید و انتشار اکسید نیتروژن

تبدیل میکروبی نیتروژن منجر به تولید اکسید نیتروژن در خاک می‌شود. نیتریفیکاسیون[1] و دنیتریفیکاسیون[2] دو واکنش میکروبی نیتروژن هستند که توسط نیتریفایرها[3] (مانند گونه‌های *نیتروباکتر*[4] و *نیتروزوموناس*[5]) و دنیتریفایرها[6] (مانند گونه‌های *سودوموناس*[7]، *پاراکوکوس*[8] و *باسیلوس*[9]) انجام می‌شوند (۲۲). نیتریفیکاسیون مسیر اصلی تولید اکسید نیتروژن در شرایط هوازی است، در حالی که، دنیتریفیکاسیون مسیر تولید اکسید نیتروژن در شرایط بی‌هوازی می‌باشد (۲۳). همان طورکه در شکل (۱-ب) نشان داده شده است، نیتریفایرها، آمونیوم را به دی‌اکسید نیتروژن و سپس به نیترات، اکسید می‌کنند و به طور غیر مستقیم در تولید اکسید نیتروژن نقش دارند. نیتریفایرها به‌ویژه در شرایطی که اکسیژن خاک محدود است، باعث تبدیل نیتروژن به اکسید نیتروژن به جای نیترات می‌شوند (۷). برای وقوع دنیتریفیکاسیون در محیط با اکسیژن محدود (بی‌هوازی)، وجود منبعی از کربن آلی برای متابولیسم باکتری‌ها ضروری است، هم‌چنین نیترات کافی به عنوان پذیرندهٔ الکترون باید در دسترس باشد (۲۴). میزان کاربرد کود نیتروژن، شیوه‌های مدیریت آب و pH خاک از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر میزان انتشار اکسید نیتروژن از خاک‌های شالیزاری می‌باشند (۲۵). خاک‌های شالیزاری به دلیل شرایط غرقابی طولانی مدت، دارای ویژگی‌های منحصر به فردی بوده که منجر به ایجاد لایه‌های اکسیدکننده و احیاکننده در لایه کشت شده می‌شوند. هنگامی که کود نیتروژن به خاک شالیزار اضافه می‌شود، در لایهٔ اکسید شده در سطح مشترک خاک - آب، نیترات تشکیل می‌شود، سپس به سمت پایین به لایهٔ احیا شده می‌رود و در آن‌جا

[1] Nitrification
[2] Denitrification
[3] Nitrifiers
[4] Nitrobacter
[5] Nitrosomonas
[6] Denitrifiers
[7] Pseudomonas
[8] Paracoccus
[9] Bacillus

نیترات‌زدایی شده و اکسید نیتروژن را به عنوان یک محصول واسطه ایجاد می‌کند (۲۶).

در شرایط غرقابی، گیاه برنج به عنوان عاملی برای انتقال گازهای محلول در خاک (مانند اکسید نیتروژن) به اتمسفر عمل می‌کند. برخلاف تولید متان، فرآیندهای میکروبی دخیل در تولید اکسید نیتروژن به مقدار نیتروژن موجود در خاک وابسته هستند که این موضوع، اهمیت کود نیتروژن را به عنوان نیروی محرکهٔ اصلی انتشار اکسید نیتروژن نشان می‌دهد (۷). با فرض این‌که نیتروژن کافی در دسترس باشد، افزایش رطوبت خاک منجر به افزایش تولید اکسید نیتروژن می‌شود (۱۰). محققان گزارش کردند که با افزایش رطوبت خاک، انتشار اکسید نیتروژن به‌صورت تصاعدی افزایش می‌یابد (۲۷). نتایج بررسی وی[1] و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد که در رطوبت خاک بیش از ۷۰ درصد، اکسید نیتروژن شکل اصلی انتشار نیتروژن از خاک است. pH خاک رابطهٔ معکوسی با میزان تولید اکسید نیتروژن دارد (۲۸). گزارش شده که با افزایش pH خاک، انتشار اکسید نیتروژن کاهش می‌یابد (۱۸). محققان گزارش کردند که میزان انتشار اکسید نیتروژن از خاک‌های آهکی با pH بالا در مقایسه با خاک‌های با pH کم‌تر، ۳۹ درصد کم‌تر می‌باشد. افزایش انتشار اکسید نیتروژن در pH پایین خاک، به فراهمی بیش‌تر فسفر و افزایش فعالیت جوامع میکروبی تولید کنندهٔ اکسید نیتروژن نسبت داده شده است (۲۹).

- تولید و انتشار دی‌اکسید کربن

انتشار دی‌اکسید کربن از سیستم‌های کشاورزی از طریق تنفس گیاه، اکسیداسیون کربن آلی در خاک و بقایای گیاهی، استفاده از سوخت‌های فسیلی و کاربرد نهاده‌ها صورت می‌گیرد (۳۰). انتشار دی‌اکسید کربن از خاک‌های کشاورزی به تعاملات پیچیده بین آب و هوا و خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک بستگی دارد (۳۱). بسته به فعالیت‌های میکروبی، مواد آلی در خاک تجزیه شده و منجر به آزادسازی و انتشار گازهای مختلف از خاک، به‌ویژه دی‌اکسید کربن می‌شوند (۳۲). در خاک‌های شالیزاری (غرقابی) دی‌اکسید کربن کمتری در مقایسه با متان و اکسید نیتروژن تولید می‌گردد، زیرا این خاک‌ها از شرایط بسیار نامناسبی جهت اکسیداسیون کربن برخوردار بوده و باعث تجمع بیش‌تر کربن در خاک و انتشار کمتر دی‌اکسید کربن به جو می‌شوند (۳۳). سوزاندن بقایای گیاهی، استفاده از کود اوره، خاک‌ورزی و تنفس گیاهان و میکروارگانیسم‌ها، از جمله عوامل انتشار دی‌اکسید کربن از شالیزارها هستند (۱۰). انتشار دی اکسید کربن تحت تأثیر فعالیت‌های ریشه و فرآیندهای میکروبی قرار دارد، به‌طوری‌که ذخیرهٔ کربن خاک توسط میکروارگانیسم‌ها به دی‌اکسید کربن تبدیل می‌شود (۳۳). برنج به عنوان یک گیاه سه‌کربنه به دلیل تنفس نوری، کارایی کم‌تری از نظر جذب دی‌اکسید کربن نسبت به گیاهان چهارکربنه دارد. بنابراین، دی‌اکسید کربن بیش‌تری منتشر می‌کند (۱۰). کود اوره نیز بر انتشار دی‌اکسید کربن مؤثر است. استفاده از کود اوره باعث کاهش تثبیت دی‌اکسید کربن در خاک‌های شالیزاری می‌شود. اوره در حضور آب و آنزیم‌های اوره‌آز به آمونیوم (NH_4^+)، هیدوکسید (OH^-) و بی‌کربنات (HCO_3) تبدیل می‌گردد. بی‌کربنات تشکیل‌شده در این فرآیند در

[1] Wei

نهایت به دی‌اکسید کربن و آب تبدیل می‌شود. بیش‌تر کربن موجود در اوره به‌صورت دی‌اکسید کربن آزاد می‌گردد. از آنجایی‌که کود اوره حاوی ۱۲ گرم کربن به ازای هر ۲۸ گرم نیتروژن است، این امر منجر به تولید پتانسیل گرمایش جهانی معادل ۱/۶ کیلوگرم دی‌اکسید کربن در هر کیلوگرم اوره می‌شود (۳۴).

راهکارهای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از مزارع برنج

- مدیریت آب

مدیریت آب در طول دورهٔ رشد برنج یکی از عوامل کلیدی کنترل کنندهٔ انتشار گازهای گلخانه‌ای است. نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد که شیوه‌های مدیریت آب مانند آبیاری تناوبی، زهکشی میان‌فصل[1]، آبیاری کنترل‌شده و آبیاری با استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده در مقایسه با روش غرقابی، موجب کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از مزارع برنج می‌شود (جدول (۱)). آبیاری تناوبی به دلیل تغییر رطوبت، پتانسیل ردوکس و اکسیژن خاک، انتشار متان را کاهش می‌دهد. آبیاری تناوبی اکسیژن بیش‌تری را به خاک وارد کرده و در نتیجه شرایط بی‌هوازی خاک را محدود می‌کند (۳۵). نتایج بررسی جیانگ[2] و همکاران در سال ۲۰۱۹ (۳۶) نشان داد که آبیاری تناوبی موجب کاهش ۶۴ درصدی انتشار متان در مقایسه با غرقابی مداوم شد. محققان گزارش کردند که آبیاری تناوبی از طریق افزایش سولفات و آهن فریک، باعث به تأخیر انداختن تولید متان پس از غرقاب مجدد خاک شد. با این حال، آبیاری تناوبی می‌تواند اکسیژن کافی را برای فرآیند نیتریفیکاسیون و تولید اکسید نیتروژن فراهم کرده و هم‌چنین با بهبود هوادهی خاک، انتشار اکسید نیتروژن به جو را آسان‌تر کند. نتایج آن‌ها نشان داد که اگرچه آبیاری تناوبی موجب افزایش انتشار اکسید نیتروژن شد، اما در مقایسه با شرایط غرقابی مداوم، موجب کاهش پتانسیل گرمایش جهانی و انتشار کل گازهای گلخانه‌ای به میزان ۵ تا ۷۳ درصد شد (۳۷). آبیاری تناوبی می‌تواند از طریق کاهش فسفر خاک، موجب تغییر در فعالیت میکروبی و در نتیجه، کاهش انتشار اکسید نیتروژن شود (۳۸).

جدول (۱): اثر شیوه‌های مدیریت آبیاری بر انتشار گازهای گلخانه‌ای و پتانسیل گرمایش جهانی در تولید برنج

روش آبیاری	انتشار متان	انتشار اکسید نیتروژن	پتانسیل گرمایش جهانی	منبع
آبیاری تناوبی	کاهش ۷۲ درصد	کاهش ۷۰-۱۲ درصد	کاهش ۷۲ درصد	(۳۹)
زهکشی میان‌فصل	کاهش ۶۳ درصد	-	کاهش ۶۰ درصد	(۴۰)
زهکشی میان‌فصل	کاهش ۵۲ درصد	-	کاهش ۴۷ درصد	(۴۱)
استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده	کاهش ۸۴ درصد	کاهش ۲۸ درصد	کاهش ۶۶ درصد	(۴۲)
آبیاری تناوبی	کاهش ۳۵ درصد	-	کاهش ۳۵ درصد	(۴۳)
آبیاری کنترل شده	کاهش ۱۱ درصد	کاهش ۶ درصد	کاهش ۵ درصد	(۴۴)

زهکشی میان‌فصل شیوه‌ای از مدیریت آب است که در فاصلهٔ زمانی بین حداکثر پنجه‌زنی و ابتدای رشد زایشی برنج انجام می‌شود. در این روش، شالیزار به گونه‌ای زهکشی شده که سطح خاک به مدت ۷ تا ۱۰

[1] Mid-season Drainage

[2] Jiang

روز در وضعیت غیرغرقاب قرار می‌گیرد. با اجرای زهکشی میان‌فصل اکسیژن کافی در اختیار ریشهٔ برنج قرار می‌گیرد و علاوه بر افزایش عملکرد برنج، موجب خارج شدن مواد سمی، نظیر سولفیدها و اسیدهای آلی از منطقهٔ فعالیت ریشه و افزایش شرایط اکسیداتیو خاک می‌شود (۱۰). نتایج محققان نشان داد که به‌کارگیری زهکشی میان‌فصل از طریق ایجاد شرایط هوازی در خاک، شرایط نامناسبی را برای فعالیت باکتری‌های تولید کنندهٔ متان ایجاد می‌کند. آن‌ها گزارش کردند که زهکشی میان‌فصل در مقایسه با غرقاب مداوم، موجب کاهش ۲۷ درصدی پتانسیل گرمایش جهانی شد (۴۵). در مطالعه‌ای دیگر، کاهش ۷۲ درصدی پتانسیل گرمایش جهانی با به‌کارگیری زهکشی میان‌فصل در مقایسه با غرقاب مداوم، گزارش گردید (۴۶). گزارش شده که آبیاری کنترل شده، موجب کاهش قابل توجه انتشار گازهای گلخانه‌ای از مزارع برنج در مقایسه با شرایط غرقابی می‌شود (۴۷). هم‌چنین، نتایج آزمایشی دیگر بیانگر کاهش ۲۷ درصدی پتانسیل گرمایش جهانی از مزارع برنج با اجرای آبیاری کنترل شده در مقایسه با غرقاب مداوم بود (۴۸).

استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده برای آبیاری مزارع برنج، رویکردی مؤثر جهت کاهش مصرف کود نیتروژن و کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای از جمله متان می‌باشد (۱۸). در بررسی اثر آبیاری زیرسطحی با فاضلاب تصفیه‌شده بر عملکرد برنج، گزارش گردید که حتی با عدم مصرف کود نیتروژن، استفاده از این سیستم آبیاری باعث عملکرد مطلوب برنج شد. علاوه بر این، انتشار متان از مزارع برنج، ۸۰ درصد کاهش یافت (۴۹). نتایج آزمایشی دیگر نشان داد که آبیاری اراضی شالیزاری با فاضلاب تصفیه‌شده ضمن افزایش عملکرد کمی و کیفی برنج، موجب کاهش ۹۵ درصدی انتشار متان شد (۵۰).

- کشت مستقیم برنج

کشت مستقیم بذر، یکی از راهکارهای مؤثر جهت کاهش مصرف آب، کاهش هزینهٔ تولید و تسهیل در امر کاشت برنج می‌باشد. علاوه بر این، کشت مستقیم به دلیل صرفه‌جویی در مصرف انرژی و سوخت‌های فسیلی، پتانسل زیادی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از مزارع برنج دارند (۵۱ و ۵۲). عملیات گل‌خرابی در کشت سنتی برنج (کشت نشایی) موجب برهم‌زدن ساختار خاک و افزایش تخریب مواد آلی خاک توسط متانوژن‌ها می‌شود. در مقابل، کشت مستقیم می‌تواند تراکم خاک را افزایش داده و از انتشار گازهای گلخانه‌ای به جو جلوگیری کند (۵۳). نتایج بررسی اثر کشت مستقیم برنج بر انتشار گازهای گلخانه‌ای در کشور اندونزی نشان داد که کشت مستقیم نسبت به کشت نشایی موجب کاهش ۴۷ درصدی انتشار متان شد، اما از نظر میزان انتشار اکسید نیتروژن هیچ تفاوت معنی‌داری بین این دو روش مشاهده نشد. هم‌چنین، پتانسیل گرمایش جهانی در کشت مستقیم ۴۶ درصد کم‌تر بود (۵۴). گزارش شده که کشت مستقیم برنج در مقایسه با کشت نشایی، موجب کاهش ۳۰ درصدی پتانسیل گرمایش جهانی شد (۱۸). محققان گزارش کردند که میزان انتشار متان در کشت مستقیم برنج ۸ تا ۹۲ درصد کم‌تر از کشت نشایی است (۵۵). نتایج آزمایشی دیگر نشان داد که کشت مستقیم برنج نسبت به کشت نشایی، منجر به کاهش ۸۲ درصدی انتشار متان شد. هم‌چنین، پتانسیل

گرمایش جهانی در این روش ۳۴ درصد کم‌تر بود (۵۶).

- خاک‌ورزی حفاظتی

شیوه خاک‌ورزی به دلیل تغییر در ساختار، رطوبت و دمای خاک و هم‌چنین توزیع بقایای گیاهی، می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته باشد (۵۷ و ۵۸). خاک‌ورزی متداول از طریق برهم زدن و هوادهی خاک موجب آزاد شدن کربن آلی محافظت‌شده در خاک، تجزیهٔ مواد آلی، تغییر پتانسیل ردوکس، افزایش انتشار کربن خاک، کاهش اکسیداسیون متان و در نتیجه افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود (۵۹). نتایج مطالعات مختلف نشان‌دهندهٔ کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از مزارع کشت مستقیم برنج با استفاده از روش بدون خاک‌ورزی است (جدول (۲)). در آزمایشی اثر سیستم‌های کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی متداول بر انتشار گازهای گلخانه‌ای از مزارع برنج در ژاپن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کم‌خاک‌ورزی موجب کاهش ۴۳ درصدی انتشار فصلی متان در مقایسه با خاک‌ورزی متداول شد (۶۰). هم‌چنین، نتایج بررسی پاندی[1] و همکاران (۲۰۱۲) نشان داد که کاهش دفعات خاک‌ورزی به‌طور قابل توجهی موجب کاهش انتشار متان از مزارع برنج گردید. آن‌ها دلیل این امر را به افزایش چگالی ظاهری خاک، کاهش کسر حجمی منافذ بزرگ خاک و تجزیهٔ کم‌تر مواد آلی نسبت دادند (۶۱). احمد[2] و همکاران (۲۰۰۹)، تأثیر سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی بر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در کشت مستقیم برنج را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که کشت بدون خاک‌ورزی، انتشار متان و پتانسیل گرمایش جهانی را به‌ترتیب ۲۸ درصد و ۱۲ درصد نسبت به خاک‌ورزی متداول کاهش داد. با این حال، تأثیر قابل توجهی بر انتشار اکسید نیتروژن نداشت (۶۲). گزارش شده که سیستم بدون خاک‌ورزی با حفظ تراکم خاک، زمان ماندگاری متان در خاک را افزایش داده و در نتیجه با افزایش احتمال اکسیداسیون آن توسط باکتری‌های متانوتروف، موجب کاهش انتشار متان به جو می‌شود (۶۳).

جدول (۲): مقایسهٔ اثر خاک‌ورزی متداول و بدون خاک‌ورزی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای در کشت مستقیم برنج

روش خاک‌ورزی	انتشار متان	انتشار اکسید نیتروژن	انتشار دی‌اکسید کربن	منبع
	(کیلوگرم در هکتار)			
بدون خاک‌ورزی	۰/۲	۵/۷۳	۲۱۳۴	(۶۴)
خاک‌ورزی متداول	۳/۹	۵/۸۴	۲۸۴۳	
بدون خاک‌ورزی	۲۷۹	–	–	(۶۵)
خاک‌ورزی متداول	۳۸۱	–	–	
بدون خاک‌ورزی	۶۳	–	–	(۶۶)
خاک‌ورزی متداول	۸۹	–	–	
بدون خاک‌ورزی	۲۹۷	–	۱۰۵۵۳	(۶۷)
خاک‌ورزی متداول	۷۲۱	–	۱۶۳۲۸	

[1] Pandey
[2] Ahmad

- مدیریت کود

مدیریت مناسب کود یکی دیگر از عوامل مؤثر بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از مزارع برنج می‌باشد. مصرف بهینهٔ کود بر اساس نیاز محصول، انتخاب کود مناسب، زمان و روش مناسب کوددهی، استفاده از کودهای آهسته رهش[1] و استفاده از مهارکننده‌های نیتریفیکاسیون و اوره‌آز، از جمله راهکارهای بهبود راندمان مصرف کود و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به شمار می‌روند (۱۸، ۳۳ و ۶۸). تنها یک‌سوم کود نیتروژن مورد استفاده به طور مؤثر توسط گیاه برنج جذب می‌شود و دو سوم باقی‌مانده، عمدتاً از طریق فرآیندهایی مانند تبخیر آمونیاک، نیترات‌زدایی، آبشویی و رواناب سطحی وارد محیط زیست می‌گردد (۶۹). افزایش کاربرد کود نیتروژن به دلیل افزایش محتوای نیتروژن خاک، بستری برای فرآیندهای نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون فراهم کرده و موجب افزایش تولید اکسید نیتروژن می‌شود (۷۰). هم‌چنین، کود نیتروژن از طریق افزایش فعالیت متانوژن‌ها و تسریع تجزیهٔ مواد آلی، انتشار متان از خاک‌های اسیدی را افزایش می‌دهد (۷۱). در مقابل، ورود مقادیر کم‌تر نیتروژن به خاک باعث رقابت بین گیاهان و میکروارگانیسم‌ها برای جذب نیتروژن شده و با کاهش محتوای نیتروژن خاک، انتشار اکسید نیتروژن کاهش می‌یابد (۳۳). بنابراین، کاهش میزان مصرف کود نیتروژن به‌طوری‌که منجر به کاهش عملکرد محصول نشود، می‌تواند به‌طور مستقیم انتشار متان و اکسید نیتروژن را کاهش دهد. از طرف دیگر، کاهش تقاضا و تولید کم‌تر کود نیتروژن، به‌طور غیرمستقیم موجب کاهش انتشار دی‌اکسید کربن می‌شود (۶۸). نتایج بررسی وانگ[2] و همکاران (۲۰۲۴) نشان داد که کاهش مصرف کود نیتروژن در کشت برنج به مدت پنج سال، موجب کاهش ۳۲ درصدی محتوای نیترات خاک و در نتیجه، کاهش انتشار اکسید نیتروژن شد (۷۲). محققان گزارش کردند که کاهش ۳۳ درصدی مصرف کود نیتروژن در کشت برنج، تأثیر قابل توجهی بر انتشار متان ندارد، اما موجب کاهش ۲۷ درصدی انتشار اکسید نیتروژن می‌شود (۳۳).

نوع کود مورد استفاده نیز نقش مهمی در میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. کاربرد کودهای نیتروژنه بر پایهٔ آمونیوم بر کاهش تولید متان تأثیرگذار است، زیرا غلظت بیش‌تر آمونیوم در خاک از طریق افزایش فعالیت باکتری‌های متانوتروف می‌تواند منجر به افزایش اکسیداسیون متان شود (۷۳). در آزمایشی گزارش شد که کاربرد کود سولفات آمونیوم در مقایسه با کود اوره، انتشار متان از مزارع برنج را ۲۳ درصد کاهش داد (۷۴). هم‌چنین، گزارش شده که استفاده از کود پتاسیم از طریق کاهش پتانسیل ردوکس خاک و تحریک اکسیداسیون متان می‌تواند موجب کاهش تولید و انتشار متان شود (۱۰). در همین راستا، نتایج بابو[3] و همکاران در سال ۲۰۰۶ نشان داد که کاربرد ۳۰ کیلوگرم پتاسیم در هکتار در مقایسه با عدم کاربرد آن، باعث کاهش ۴۹ درصدی انتشار متان از مزارع برنج شد (۷۵). استفاده از مهارکننده‌های نیتریفیکاسیون و اوره‌آز و هم‌چنین کودهای نیتروژنی با رهایش آهسته، می‌تواند راندمان مصرف نیتروژن را افزایش داده و با کاهش تلفات نیتروژن از طریق تبخیر، نیتریفیکاسیون

[1] Slow-release Fertilizers

[2] Wang

[3] Babu

و آبشویی، موجب کاهش انتشار اکسید نیتروژن شود (۷۶). نتایج مینگ[1] و همکاران در سال ۲۰۲۴ نشان داد که استفاده از مهارکننده‌های نیتریفیکاسیون، موجب کاهش ۲۴ تا ۲۵/۳ درصدی متان از مزارع برنج شد (۷۷). این امر تا حدی زیادی به این دلیل است که مهارکننده‌های نیتریفیکاسیون قادر به مهار آنزیم‌های میکروبی مسئول تبدیل آمونیوم به نیترات هستند (۷۸). مهارکننده‌های نیتریفیکاسیون هم‌چنین می‌توانند از طریق تجمع آمونیوم در آب، باعث تبخیر آن شوند (۷۹).

- کاربرد بیوچار

بیوچار ماده جامد غنی از کربن پایدار که محصول جانبی تجزیهٔ حرارتی مواد آلی تحت شرایط محدود اکسیژن در یک محیط کنترل شده است. بیوچار از پتانسیل بالایی برای ترسیب کربن در خاک و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای برخوردار است (۸۰ و ۸۱). کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از مزارع برنج با کاربرد بیوچار توسط محققان مختلف گزارش شده است (۳۳، ۸۲ و ۸۳). نتایج بررسی ژیائو[2] و همکاران (۲۰۱۸) نشان داد که که استفاده از بیوچار کاه برنج به میزان ۲۰ و ۴۰ تن در هکتار، به‌ترتیب موجب کاهش ۲۹/۷ و ۱۵/۶ درصدی انتشار متان از مزارع برنج در مقایسه با عدم کاربرد آن شد (۸۴). در آزمایشی گزارش شد که استفاده از بیوچار، انتشار متان و اکسید نیتروژن از مزارع برنج را به‌ترتیب به میزان ۳۰ درصد و ۵۵ تا ۷۲ درصد کاهش داد (۸۵). هم‌چنین در آزمایشی دیگر گزارش شد که کاربرد بیوچار، انتشار متان از مزارع برنج را به‌طور متوسط ۱۳ درصد کاهش داد که دلیل این امر به کاهش چگالی ظاهری خاک، افزایش pH خاک، افزایش فراوانی متانوتروف‌ها و افزایش اکسیداسیون متان نسبت داده شد (۸۶).

بیوچار به دلیل مهار فرآیندهای نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون و بی‌حرکتی میکروبی نیتروژن، می‌تواند باعث کاهش تولید اکسید نیتروژن در خاک شود (۸۷). نتایج بررسی ژانگ[3] و همکاران در سال ۲۰۱۲ نشان داد که کاربرد بیوچار سبب بهبود کیفیت خاک، افزایش عملکرد برنج و کاهش انتشار اکسید نیتروژن می‌شود (۸۸). محققان گزارش کردند که کاربرد بیوچار تولید شده از کاه و کلش، موجب افزایش ۲۲ درصدی ترسیب کربن و کاهش ۳۵ درصدی انتشار اکسید نیتروژن از مزارع برنج شد (۱۰). تأثیر هم‌زمان بیوچار و سایر روش‌ها نیز به‌طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. برای مثال، اعمال هم‌زمان بیوچار و شیوه‌های مدیریت آب (آبیاری تناوبی و زهکشی میان‌فصل)، انتشار متان را به‌طور مؤثرتری نسبت به کاربرد بیوچار، کاهش دهد (۸۹). نتایج بررسی تأثیر هم‌زمان کاربرد بیوچار و کود بر انتشار گازهای گلخانه‌ای از مزارع برنج نشان داد که کاربرد مقدار زیادی بیوچار همراه با مقدار متوسطی از کود، بهترین ترکیب برای کاهش انتشار متان است. دلیل این امر به افزایش pH خاک، افزایش فعالیت باکتری‌های متانوتروف و افزایش اکسیداسیون متان نسبت داده شد (۹۰).

- مدیریت بقایا

مدیریت صحیح بقایای برنج می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته باشد.

[1] Ming
[2] Xiao
[3] Zhang

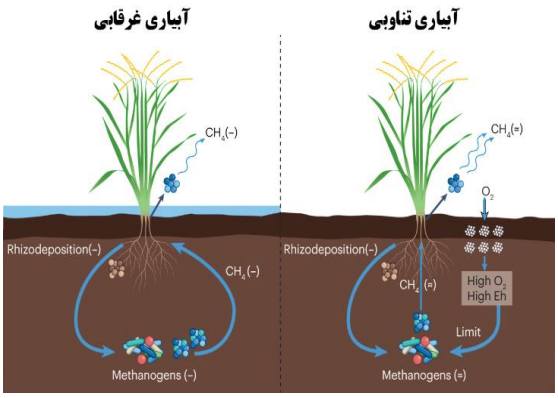
کاه برنج از ترکیبات آلی مختلف مانند سلولز، همی‌سلولز، لیپیدها، پروتئین‌ها، لیگنین و غیره تشکیل شده است و سهم هر یک از ترکیبات در افزایش نرخ انتشار گازهای گلخانه‌ای متغیر است (۱۰). سوزاندن بقایای برنج که یکی از آسان‌ترین و ارزان‌ترین روش‌ها جهت تسریع در آماده‌سازی زمین برای کشت بعدی است، موجب افزایش انتشار دی‌اکسید کربن به جو می‌شود (۹۱). اختلاط بقایا با خاک به دلیل توانایی در افزایش کربن خاک، به عنوان روشی سازگارتر با محیط‌زیست در نظر گرفته می‌شود. با این حال، اگر این روش نیز به‌طور صحیح انجام نشود، احتمال افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای وجود دارد (۱۸). نتایج آزمایشی نشان داد که اگرچه بازگرداندن کاه برنج به خاک می‌تواند انتشار اکسید نیتروژن را به‌طور مؤثری کاهش دهد، اما این مزیت با افزایش قابل توجه متان و دی‌اکسید کربن کاملاً خنثی شد. دلیل این امر این‌گونه بیان شد که متانوژن‌ها در این شرایط می‌توانند سوبسترای بیش‌تری برای زنده‌ماندن، فعالیت و در نتیجه، تولید متان و دی‌اکسید کربن داشته باشند (۹۲). گزارش شده که با بازگرداندن مداوم کاه برنج به خاک، میزان انتشار متان از ۱۸۵ درصد به ۲۸۹ درصد افزایش یافت (۹۳). محققان برای حل این مشکل، کاه برنج را به‌مدت یک هفته از طریق یک سوبسترای میکروبی تجزیه کردند و بعد از بازگرداندن کاه به خاک، به این نتیجه رسیدند که میزان انتشار متان کاهش یافت (۹۴). علاوه بر این، گزارش شده که اختلاط زودهنگام کاه با خاک می‌تواند موجب کاهش انتشار متان شود (۹۵). به عنوان مثال، نتایج مطالعه‌ای نشان داد که اختلاط بقایای برنج با خاک بلافاصله پس از برداشت محصول با استفاده از دیسک، منجر به تجزیهٔ هوازی بقایا و کاهش انتشار متان شد (۶۳). هم‌چنین گزارش شده که اختلاط زودهنگام کاه برنج با خاک در اوایل زمستان، باعث کاهش ۱۱ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای در مقایسه با اختلاط کاه در بهار گردید (۱۰).

حذف کاه از مزارع یکی دیگر از روش‌های مدیریت بقایای برنج برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. نتایج آزمایشی نشان داد که حذف کامل کاه برنج در مقایسه با اختلاط آن با خاک، به طور مؤثرتری باعث کاهش انتشار متان، اکسید نیتروژن و دی‌اکسید کربن شد (۶۴). در مطالعه‌ای دیگر گزارش شد که حذف کاه موجب کاهش ۳۵ تا ۸۳ درصدی انتشار متان، کاهش ۲۶ تا ۵۰ درصدی انتشار اکسید نیتروژن و کاهش ۵۶ درصدی پتانسیل گرمایش جهانی از مزارع برنج گردید (۹۶). هم‌چنین، گزارش شده که حذف کاه برنج در مقایسه با بازگرداندن آن به خاک موجب کاهش انتشار متان و دی‌اکسید کربن شد (۹۷).

- انتخاب ارقام

ارقام مختلف برنج به دلیل ویژگی‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی متفاوت، دارای ظرفیت متفاوتی از نظر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای به جو هستند. به‌طوری که تفاوت در میزان انتشار متان و اکسید نیتروژن بین گونه‌های مختلف برنج به‌ترتیب به ۶ و ۱۴ برابر می‌رسد (۲). بنابراین، انتخاب رقم مناسب می‌تواند به عنوان یک استراتژی امیدوارکننده برای به حداقل رساندن انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه متان، در نظر گرفته شود (۱۸). گیاه برنج انتشار متان را از طریق دو مکانیسم اصلی تنظیم می‌کند. تعادل بین این مکانیسم‌ها، تفاوت در میزان انتشار متان در بین ارقام برنج را تعیین می‌کند. در مکانیسم اول گیاه برنج از طریق رسوب ریزوسفری، سوبستراهایی برای

متانوژن‌ها فراهم می‌کند (۹۸). تولید متان تحت تأثیر کیفیت ترشحات ریشه قرار می‌گیرد. به عنوان مثال، ترشحات ریشه‌ای حاوی مقادیر بیش‌تری کربوهیدرات، بیان ژن‌های تولیدکنندهٔ متان را در جامعهٔ میکروبی خاک افزایش می‌دهد (۹۹). در مکانیسم دوم گیاه برنج می‌تواند با آزادسازی اکسیژن شعاعی[1] از طریق آئرانشیم به ریزوسفر، اکسیداسیون متان را تحریک کند. این میزان اکسیداسیون متان اغلب با افزایش سطح آزادسازی اکسیژن شعاعی افزایش می‌یابد (۱۰۰). بنابراین گونه‌های برنج با رسوب ریزوسفری بیش‌تر، می‌توانند تولید متان را افزایش دهند. در حالی که، گونه‌های دارای سیستم ریشه‌ای بزرگتر و قوی‌تر، می‌توانند اکسیداسیون متان را تقویت کنند. ایجاد تعادل بین این دو مکانیسم از طریق انتخاب ارقام با شاخص برداشت[2] بیش‌تر و انتخاب ارقام با زیست‌تودهٔ بیش‌تر، به کاهش انتشار متان کمک می‌کند (۵۸). همان‌طورکه در شکل (۲) نشان داده شده است، انتخاب ارقام با شاخص برداشت بالا تحت شرایط غرقابی، موجب کاهش انتشار متان از مزارع برنج می‌شود. شاخص برداشت بالا موجب افزایش مقدار فتوسنتز اختصاص داده شده به دانه‌ها و کاهش رسوبات ریزوسفری می‌گردد، که به نوبهٔ خود، در دسترس بودن سوبسترا برای متانوژن‌ها را کاهش داده، در نتیجه منجر به کاهش تولید و انتشار متان می‌شود. هم‌چنین تحت شرایط آبیاری تناوبی، استفاده از این ارقام تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر میزان انتشار متان ندارد (۵۸).

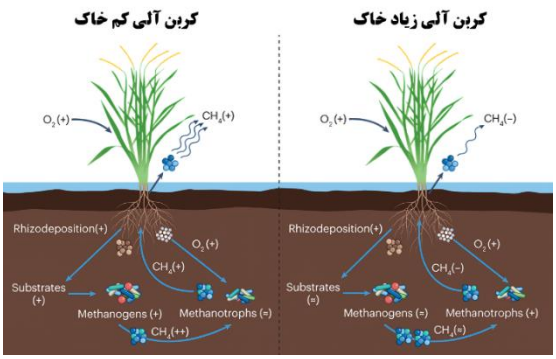


شکل (۲): تأثیر ارقام برنج با شاخص برداشت بالا بر انتشار متان، تحت شرایط غرقابی و آبیاری تناوبی (۵۸)

+، ++، − و ≃ به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ اثرات مثبت، بسیار مثبت، منفی و تقریباً برابر هستند.

کشت ارقام برنج با زیست‌تودهٔ بالا در خاک‌های با ذخایر کربن آلی زیاد، موجب کاهش انتشار متان می‌شود. در مقابل، کشت این ارقام در خاک‌های با ذخایر کربن آلی کم، انتشار متان را افزایش می‌دهد (شکل (۳)). گیاهان بزرگتر عموماً دارای سیستم ریشه‌ای بزرگتری هستند که می‌توانند اکسیژن بیش‌تری را آزاد کرده و اکسیداسیون متان توسط باکتری‌های متانوتروف را تسهیل کنند (۱۰۱). گزارش شده که ارقام برنج دارای زیست‌تودهٔ بالا، انتشار متان را از خاک‌های با سطوح بالای کربن آلی، صرف نظر از این‌که منبع کربن از مواد آلی موجود در خاک یا از طریق اختلاط کاه با خاک باشد، حدود ۲۴ درصد کاهش می‌دهند (۱۰۲).

[1] Radial Oxygen
[2] Harvest Index



شکل (۳): تأثیر ارقام برنج با زیست‌تودهٔ بالا بر انتشار متان از خاک‌های با ذخایر کربن آلی کم و زیاد (۵۸)

+، ++، – و ≈ به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ اثرات مثبت، بسیار مثبت، منفی و تقریباً برابر هستند.

ارقام برنج مقام به تنش خشکی از طریق کاهش مصرف آب می‌توانند باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای شوند (۲ و ۱۸). گزارش شده که استفادهٔ ارقام برنج مقاوم به خشکی موجب کاهش انتشار گازهای متان و اکسید نیتروژن به‌ترتیب به میزان ۸ تا ۱۰ درصد و ۱۱ تا ۱۳ درصد شد. هم‌چنین، پتانسیل گرمایش جهانی نیز به‌وسیلهٔ این ارقام ۱۰ تا ۱۳ درصد کاهش یافت (۳۷). نتایج بررسی ژانگ[1] و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد که استفاده از رقم برنج با کارایی مصرف آب بالا و مقاوم به تنش خشکی (Hanyou73)، منجر به کاهش ۸ تا ۲۱ درصدی انتشار متان، ۲۰ تا ۷۶ درصدی انتشار اکسید نیتروژن و ۱۱ تا ۲۰ درصدی پتانسیل گرمایش جهانی شد (۱۰۳). نتایج مطالعات مختلف نشان‌دهندهٔ کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط گونه‌های هیبرید در مقایسه با گونه‌های غیرهیبرید برنج می‌باشد (۱۰۶-۱۰۴). محققان گزارش کردند که ارقام هیبرید برنج (CLXL729، XL753 و CLXL745) نسبت به رقم خالص، موجب کاهش انتشار متان از اراضی شالیزاری شدند (۷). در آزمایشی دیگر گزارش شد که میزان انتشار دی‌اکسید کربن از مزارع برنج کشت شده با ارقام هیبرید در مقایسه با مزارع کشت شده با ارقام خالص، ۱۹ درصد کم‌تر بود (۱۰۷).

هم‌چنین، نتایج بررسی‌ها نشان دهندهٔ هم‌بستگی مثبت بین ارتفاع بوتهٔ برنج با انتشار متان است. بنابراین، ارقام برنج پاکوتاه نسبت به ارقام پابلند، برای کاهش انتشار کربن سودمندتر هستند (۱۰ و ۱۸). طول دورهٔ رشد برنج نیز عامل مهمی در تعیین میزان انتشار متان می‌باشد (۵۸). گزارش شده که رقم برنج با طول دورهٔ رشد سه ماه نسبت به رقم با طول دورهٔ رشد چهار ماه، از میزان انتشار متان کم‌تری برخوردار بود (۱۰). علاوه بر این، گزارش شده که ارقام برنج پرمحصول به دلیل افزایش تخصیص مواد فتوسنتزی برای بهبود شاخص برداشت، کاهش منبع کربن مورد نیاز برای باکتری‌های تولید کنندهٔ متان و دارابودن صفت پاکوتاهی، موجب کاهش انتشار متان می‌شوند (۵۸ و ۱۰۸).

- سیستم تلفیقی برنج و آبزیان

سیستم تلفیقی برنج و آبزیان در اراضی شالیزاری، یک استراتژی مؤثر برای افزایش بهره‌برداری از منابع و توسعهٔ کشاورزی اکولوژیک است. تحرک گونه‌های آبزی در سیستم‌های تلفیقی از طریق اختلاط آب در سطوح مختلف، موجب افزایش غلظت اکسیژن محلول در آب و تغییر هضم بی‌هوازی به هضم هوازی شده و به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند (۱۰۹ و ۱۱۰). نتایج پژوهش‌های مختلف نشان‌دهندهٔ کاهش قابل توجه در میزان انتشار متان از اراضی شالیزاری با به‌کارگیری سیستم‌های تلفیقی است (۱۱۱

[1] Zhang

و ۱۱۲). گونه‌های آبزی به‌ویژه آن‌هایی که از سطوح پایین‌تر آب تغذیه می‌کنند مانند ماهی کپور و خرچنگ، با حرکت خود موجب برهم زدن لایه‌های خاک شده و بر فرآیندهای تولید متان تأثیر می‌گذارند (۱۱۳). محققان کاهش انتشار متان در سیستم تلفیقی برنج و ماهی را به کاهش پتانسیل ردوکس خاک و افزایش فراوانی باکتری‌های اکسیدکنندهٔ متان نسبت دادند (۱۱۴). سان[1] و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند که کشت تلفیقی برنج و خرچنگ در مقایسه با سیستم تک‌کشتی، انتشار متان را به میزان ۱۹/۶ – ۱۸/۱ درصد و پتانسیل گرمایش جهانی را به میزان ۲۲ – ۱۶/۸ درصد کاهش داد (۱۱۵). هم‌چنین گزارش شده که در سیستم تلفیقی برنج و اردک، اردک می‌تواند غلظت اکسیژن محلول در آب را از طریق تحرک و جستجو برای علوفه افزایش داده و موجب کاهش انتشار متان شود (۱۱۶).

گزارش شده که در سیستم تلفیقی، گونه‌های آبزی موجب افزایش اکسیژن محلول در آب، کاهش دنیتریفیکاسیون و کاهش انتشار اکسید نیتروژن می‌شوند (۱۱۷). محققان دلایل کاهش انتشار اکسید نیتروژن در سیستم‌های تلفیقی را این گونه بیان کردند که رشد برنج می‌تواند به‌طور مستقیم نیتروژن غیرآلی را از آب و خاک جذب کرده و در نتیجه نیتروژن موجود برای تولید و انتشار اکسید نیتروژن را کاهش دهد. علاوه بر این، برنج مواد جامد معلق در آب را از طریق ساقه‌ها و ریشه‌های خود جذب کرده و آزاد شدن نیتروژن از رسوب و مواد جامد معلق را سرکوب می‌کند. هم‌چنین، تکان خوردن بوته‌های برنج بر اثر باد موجب انتشار اکسیژن از سطوح بالاتر آب به سطوح پایین‌تر و بهبود شرایط هوازی در عمق آب شده و در نتیجه تولید اکسید نیتروژن ناشی از دنیتریفیکاسیون کاهش می‌یابد (۱۱۸).

نتیجه‌گیری

متان و اکسید نیتروژن، مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای انتشار یافته از مزارع برنج هستند که از طریق فرآیندهای متانوژنز، نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون تشکیل می‌شوند. دما، رطوبت خاک، پتانسیل ردوکس خاک، نوع خاک و مرحلهٔ رشد گیاه برنج از عوامل اصلی تأثیرگذار بر تولید متان به شمار می‌روند.

تولید اکسید نیتروژن تحت تأثیر میزان کاربرد کود نیتروژن، مدیریت آب و pH خاک قرار می‌گیرد. روش‌های مدیریت آب از جمله آبیاری تناوبی و زهکشی میان‌فصل، اگرچه ممکن است در مواردی باعث افزایش انتشار اکسید نیتروژن شوند، اما در مجموع از پتانسیل قابل توجهی برای کاهش انتشار متان و پتانسیل گرمایش جهانی در مقایسه با آبیاری غرقابی برخوردار هستند. تغییر شیوهٔ کشت نشایی برنج به کشت مستقیم، از دیگر اقدامات زراعی موفق برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. مدت زمان اشباع یا غرقاب خاک در کشت مستقیم برنج نسبت به کشت نشایی ۲۰ تا ۴۰ روز کم‌تر بوده و در نتیجه شرایط لازم برای فرآیند متانوژنز و تولید متان محدود می‌شود. روش بدون خاک‌ورزی به دلیل عدم استفاده از ماشین‌آلات و حفظ تراکم خاک، به عنوان بهترین گزینه برای کاهش پتانسیل گرمایش جهانی از مزارع کشت مستقیم برنج مطرح می‌باشد.

حذف کامل کاه برنج و یا اختلاط زودهنگام آن با خاک می‌تواند به طور مؤثری خطر انتشار گازهای

[1] Sun

گلخانه‌ای را کاهش دهد. ارقام هیبرید برنج به دلیل تحمل بیش‌تر به تنش‌های محیطی در مقایسه با ارقام غیرهیبرید از توانایی بیش‌تری برای کاهش پتانسیل گرمایش جهانی برخوردار هستند. ارقام هیبرید با دارا بودن منافذ بیش‌ترِ ریشه، می‌توانند اکسیژن بیش‌تری را برای متانوتروف‌ها در خاک فراهم کرده و باعث افزایش اکسیداسیون متان شوند.

نتایج مطالعات بیانگر کاهش انتشار متان و اکسید نیتروژن از سیستم تلفیقی برنج – آبزیان در مقایسه با سیستم تک‌کشتی برنج می‌باشد.

در مجموع نتایج این مطالعه نشان داد که اتخاذ شیوه‌های مدیریتی به‌صورت جداگانه یا ترکیبی می‌تواند تغییرات اقلیمی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای از مزارع برنج را به حداقل رسانده و باعث پایداری تولید برنج شود.

این مطالعه اهمیت انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولید برنج و تأثیر آن‌ها بر گرمایش جهانی و راه‌کارهای کاهش انتشار این گازها را برجسته می‌کند. با اتخاذ یک رویکرد جامع که علاوه بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای موجب پایداری تولید برنج شود، آیندهٔ کشت برنج را می‌توان به گونه‌ای سوق داد که با مدیریت پایدار زیست‌محیطی و امنیت غذایی هم‌سو باشد. سیاست‌ها و استراتژی‌های کاهش یا حذف انتشار گازهای گلخانه‌ای از مزارع برنج، بسته به منطقه یا کشور خاص می‌تواند متفاوت باشد و به کمک‌های مالی نهادهای دولتی وابسته است. با این حال، برای اجرای مؤثر چنین شیوه‌هایی باید تمام موانع اجتماعی، اقتصادی، آموزشی و سیاسی برطرف شود.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافعی برای اعلام ندارند.

منابع

[1] IPCC, 2023, Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Lee, H., Romero, J., (Editors), IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115.

[2] Ji, Y., Zhou, Y., Li, Z., Feng, K., Sun, X., Xu, Y., Wu, W., Zou, H., 2024, Carbon footprint research and mitigation strategies for rice-cropping systems in China: A review. Frontiers in Sustainable Food Systems, 8, 1375092.

[3] Basheer, S., Wang, X., Farooque, A.A., Nawaz, R.A., Pang, T., Neokye, E.O., 2024, A Review of greenhouse gas emissions from agricultural soil. Sustainability, 16, 4789.

[4] Springmann, M., Freund, F., 2022, Options for reforming agricultural subsidies from health, climate, and economic perspectives. Nature Communications, 13, 1.

[5] Bodie, A.R., Micciche, A.C., Atungulu, G.G., Rothrock Jr., M.J., Ricke, S.C., 2019, Current trends of rice milling byproducts for agricultural applications and alternative food production systems. Frontiers in Sustainable Food Systems, 3, 47.

[6] Bin Rahman, A.N.M.R., Zhang, J., 2023, Trends in rice research: 2030 and beyond. Food and Energy Security, 12, e390.

[7] Hosseiniyan Khatibi, S.M., Adviento-Borbe, M.A., Dimaano, N.G., Radanielson, A.M., Ali, J., 2025, Advanced technologies for reducing greenhouse gas emissions from rice fields: Is hybrid rice the game changer. Plant Communications, 6, 101224.

[8] Linquist, B.A., Adviento-Borbe, M.A., Pittelkow, C.M., van Kessel, C., van Groenigen, K.J., 2012, Fertilizer management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: A quantitative review and analysis. Field Crops Research, 135, 10.

[9] Wang, S., Liu, Y., Zhang, F., Jin, K., Liu, H., Zhai, L., 2024, Methane emissions sources

and impact mechanisms altered by the shift from rice-wheat to rice-crayfish rotation. Journal of Cleaner Production. 434, 139968.
[10] Hussain, S., Peng, S., Fahad, S., Khaliq, A., Huang, J., Cui, K., Nie, L., 2015, Rice management interventions to mitigate greenhouse gas emissions: A review. Environmental Science and Pollution Research, 22, 3342.
[11] Lim, J.Y., Kang, Y.G., Sohn, K.M., Kim, P.J., Galgo, S.J.C., 2022, Creating new value of blast furnace slag as soil amendment to mitigate methane emission and improve rice cropping environments. Science of the Total Environment, 806, 150961.
[12] Li, J., Li, Y., Wan, Y., Wang, B., Waqas, M.A., Cai, W., Guo, C., Zhou, S., Su, R., Qin, X., Gao, Q., Wilkes, A., 2018, Combination of modified nitrogen fertilizers and water saving irrigation can reduce greenhouse gas emissions and increase rice yield. Geoderma, 315, 1.
[13] Davamani, V., Parameswari, E., Arulmani, S., 2020, Mitigation of methane gas emissions in flooded paddy soil through the utilization of methanotrophs. Science of the Total Environment, 726, 138570.
[14] Mitra, B., Minick, K., Miao, G., Domec, J.C., Prajapati, P., McNulty, S.G., Sun, G., King, J.S., Noormets, A., 2020, Spectral evidence for substrate availability rather than environmental control of methane emissions from a coastal forested wetland. Agricultural and Forest Meteorology, 291, 108062.
[15] Liu, J., Valach, A., Baldocchi, D., Lai, D.Y.F., 2022, Biophysical controls of ecosystem- scale methane fluxes from a subtropical estuarine mangrove: Multiscale, nonlinearity, asynchrony and causality. Global Biogeochemical Cycles, 36, e2021GB007179.
[16] Gan, Y., Qiu, Q., Liu, P., Rui, J., Lu, Y., 2012, Syntrophic oxidation of propionate in rice field soil at 15 and 30 °C under methanogenic conditions. Applied and Environmental Microbiology, 14, 4923.
[17] Dai, S., Ju, W., Zhang, Y., He, Q., Song, L., Li, J., 2019, Variations and drivers of methane fluxes from a rice-wheat rotation agroecosystem in eastern China at seasonal and diurnal scales. Science of the Total Environment, 690, 973.
[18] Chen, Y., Guo, W., Ngo, H.H., Wei, W., Ding, A., Ni, B., Hoang, N.B., Zhang, H., 2024. Ways to mitigate greenhouse gas production from rice cultivation. Journal of Environmental Management, 368, 122139.
[19] Kim, S.H., Lee, J.H., Lim, J.S., Shinogi, Y., Lee, C.H., Oh, T.K., 2018, Effects of rice straw application on methane emission from rice paddy fields. Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University, 63, 387.
[20] Barton, L., Hoyle, F.C., Stefanova, K.T., Murphy, D.V., 2016, Incorporating organic matter alters soil greenhouse gas emissions and increases grain yield in a semi-arid climate. Agriculture, Ecosystems & Environment, 231, 320.
[21] Komiya, S., Noborio, K., Katano, K., Pakoktom, T., Siangliw, M., Toojinda, T., 2015, Contribution of ebullition to methane and carbon dioxide emission from water between plant rows in a tropical rice paddy field. International Scholarly Research Notices, 23901.
[22] Kuypers, M.M.M., Marchant, H.K., Kartal, B., 2018, The microbial nitrogen-cycling network. Nature Reviews Microbiology, 16, 263.
[23] Wu, L., Tang, S., Hu, R., Wang, J., Duan, P., Xu, C., Zhang, W., Xu, M., 2023, Increased N_2O emission due to paddy soil drainage is regulated by carbon and nitrogen availability. Geoderma, 432, 116422.
[24] McLain, J.E.T., Martens, D.A., 2006, N_2O production by heterotrophic N transformations in a semiarid soil. Applied Soil Ecology, 32, 253.
[25] Ali, I., Zhao, Q., Wu, K., Ullah, S., Iqbal, A., Liang, H., Zhang, J., Muhammad, I., Amanullah, Khan, A., Khan, A.A., Jiang, L., 2022, Biochar in combination with nitrogen fertilizer is a technique: To enhance physiological and morphological traits of Rice (*Oryza sativa* L.) by improving soil physio-biochemical properties. Journal of Plant Growth Regulation, 41, 2406.
[26] Xing, G., Zhao, X., Xiong, Z., Yan, X., Xu, H., Xie, Y., Shi, S., 2009, Nitrous oxide emission from paddy fields in China. Acta Ecologica Sinica, 29, 45.
[27] Li, H., Song, X., Wu, D., Wei, D., Ju, X., 2024, Digestate induces significantly higher N_2O emission compared to urea under different soil properties and moisture. Environmental Research, 241, 117617.

systems: A global meta- analysis. Field Crops Research, 234, 47.
[37] Feng, Z.Y., Qin, T., Du, X.Z., Sheng, F., Li, C.F., 2021, Effects of irrigation regime and rice variety on greenhouse gas emissions and grain yields from paddy fields in central China. Agricultural Water Management, 250, 106830.
[38] Adhikary, P.P., Mohanty, S., Rautaray, S.K., Manikandan, N., Mishra, A., 2023, Alternate wetting and drying water management can reduce phosphorus availability under lowland rice cultivation irrespective of nitrogen level. Environmental Monitoring and Assessment, 195, 1420.
[39] Loaiza, S., Verchot, L., Valencia, D., Guzmán, P., Amezquita, N., Garcés, G., Puentes, O., Trujillo, C., Chirinda, N., Pittelkow, C.M., 2024, Evaluating greenhouse gas mitigation through alternate wetting and drying irrigation in Colombian rice production. Agriculture, Ecosystems & Environment, 360, 108787.
[40] Martínez-Eixarch, M., Beltrán-Miralles, M., Guéry, S., Alcaraz, C., 2022, Extended methane mitigation capacity of a mid-season drainage beyond the rice growing season: A case in Spain. Environmental Monitoring and Assessment, 194, 648.
[41] Liu, X., Zhou, T., Liu, Y., Zhang, X., Li, L., Pan, G., 2019, Effect of mid-season drainage on CH_4 and N_2O emission and grain yield in rice ecosystem: A meta-analysis. Agricultural Water Management, 213, 1028.
[42] Phung, L.D., Pham, D.V., Sasaki, Y., Masuda, S., Takakai, F., Kaku, N., Watanabe, T., 2020, Continuous sub-irrigation with treated municipal wastewater for protein-rich rice production with reduced emissions of CH_4 and N_2O. Scientific Reports, 10, 5485.
[43] Habib, M.A., Islam, S.M.M., Haque, M.A., Hassan, L., Ali, M.Z., Nayak, S., Dar, M.H., Gaihre, Y.K., 2023, Effects of irrigation regimes and rice varieties on methane emissions and yield of dry season rice in Bangladesh. Soil Systems, 7, 41.
[44] Sriphirom, P., Chidthaisong, A., Towprayoon, S., 2019, Effect of alternate wetting and drying water management on rice cultivation with low emissions and low water used during wet and dry season. Journal of Cleaner Production, 223, 980.
[28] Wei, L., Liu, X., Qin, C., Xing, W., Gu, Y., Wang, X., Bai, L., Li, J., 2022, Impacts of soil moisture and fertilizer on N_2O emissions from cornfield soil in a Karst watershed, SW China. Atmosphere, 13, 1200.
[29] Žurovec, O., Wall, D.P., Brennan, F.P., Krol, D.J., Forrestal, P.J., Richards, K.G., 2021, Increasing soil pH reduces fertiliser derived N_2O emissions in intensively managed temperate grassland. Agriculture, Ecosystems & Environment, 311, 107319.
[30] Nishimura, S., Yonemura, S., Minamikawa, K., Yagi, K., 2015, Seasonal and diurnal variations in net CO_2 flux throughout the year from soil in paddy field. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 120, 63.
[31] Min, S., Rulík, M., 2020, Comparison of carbon dioxide (CO_2) fluxes between conventional and conserved irrigated rice paddy fields in Myanmar. Sustainability, 12, 5798.
[32] Hossain, M.B., Rahman, M.M., Biswas, J.C., Miah, M.M.U., Akhter, S., Maniruzzaman, M., Maniruzzaman, M., Choudhury, A.K., Ahmed, F., Shiragi, M.H.K., Kalra, N., 2017, Carbon mineralization and carbon dioxide emission from organic matter added soil under different temperature regimes. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 6, 311.
[33] Gupta, K., Kumar, R., Baruah, K.K., Hazarika, S., Karmakar, S., Bordoloi, N., 2021, Greenhouse gas emission from rice fields: A review from Indian context. Environmental Science and Pollution Research, 28, 30551.
[34] Snyder, C.S., Bruulsema, T.W., Jensen, T.L., Fixen, P.E., 2009, Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. Agriculture, Ecosystems & Environment, 133, 247.
[35] Liao, P., Sun, Y., Zhu, X., Wang, H., Wang, Y., Chen, J., Zhang, J., Zeng, Y., Zeng, Y., Huang, S., 2021, Identifying agronomic practices with higher yield and lower global warming potential in rice paddies: A global meta-analysis. Agriculture, Ecosystems & Environment, 322, 107663.
[36] Jiang, Y., Carrijo, D., Huang, S., Chen, J., Balaine, N., Zhang, W., van Groenigen, K.J., Linquist, B., 2019, Water management to mitigate the global warming potential of rice

[45] Towprayoon, S., Smakgahn, K., Poonkaew, S., 2005, Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice fields. Chemosphere, 59, 1547.
[46] Itoh, M., Sudo, S., Mori, S., Saito, H., Yoshida, T., Shiratori, Y., Suga, S., Yoshikawa, N., Suzue, Y., Mizukami, H., Mochida, T., Yagi, K., 2011, Mitigation of methane emissions from paddy fields by prolonging midseason drainage. Agriculture, Ecosystems & Environment, 141, 359.
[47] Yang, S., Peng, S., Xu, J., Luo, Y., Li, D., 2012, Methane and nitrous oxide emissions from paddy field as affected by water-saving irrigation. Physics and Chemistry of the Earth , Parts A/B/C, 53-54, 30.
[48] Hou, H., Peng, S., Xu, J., Yang, S., Mao, Z., 2012, Seasonal variations of CH_4 and N_2O emissions in response to water management of paddy fields located in southeast China. Chemosphere, 89, 884.
[49] Phung, L.D., Miyazawa, M., Pham, D.V., Nishiyama, M., Masuda, S., Takakai, F., Watanabe, T., 2021, Methane mitigation is associated with reduced abundance of methanogenic and methanotrophic communities in paddy soils continuously sub-irrigated with treated wastewater. Scientific Reports, 11, 7426.
[50] Pham, D.D., Suhono, A.H.B., Kaku, N., Masuda, S., Takakai, F., Watanabe, T., 2021, Methane and nitrous oxide emissions from paddy fields with no fertilizer use under continuous irrigation with treated municipal wastewater. Environmental Science and Pollution Research, 28, 23420.
[51] Mishra, J.S., Poonia, S.P., Kumar, R., Dubey, R., Kumar, V., Mondal, S., Dwivedi, S.K., Rao, K.K., Kumar, R., Tamta, M., Verma, M., Saurabh, K., Kumar, S., Bhatt, B.P., Malik, R.K., McDonald, A., Bhaskar, S., 2021, An impact of agronomic practices of sustainable rice-wheat crop intensification on food security, economic adaptability, and environmental mitigation across eastern Indo-Gangetic Plains. Field Crops Research, 267,108164.
[52] Reddy, K.S., Parihar, C.M., Panneerselvam, P., Sarkar, A., Patra, K., Bharadwaj, S., Sena, D.R., Reddy, G.S., Sinha, A., Dhakar, R., Kumar, V., Nayak, H.S., 2025, Meta-analysis of yield-emission trade-off in direct seeded vs. puddled transplanted rice: Towards a cleaner and sustainable production. Cleaner Environmental Systems, 16, 100238.
[53] Liu, M., Wu, X., Li, M., Xiong, T., Li, C., Tang, Y., 2024, Innovative no-till seeding technology improves yield and nitrogen use efficiency while reducing environmental pressure in wheat after rice harvesting. Soil and Tillage Research, 235, 105908.
[54] Susilawati, H.L., Kartikawati, R., Sutriadi, M.T., Setyanto, P., 2019, The opportunity of direct seeding to mitigate greenhouse gas emission from paddy rice field. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 393, 012042.
[55] Kumar, V., Ladha, J.K., 2011, Direct seeding of rice: Recent developments and future research needs. Advances in Agronomy, 111, 297.
[56] Pathak, H., Sankhyan, S., Dubey, D.S., Bhatia, A., Jain, N., 2013, Dry direct-seeding of rice for mitigating greenhouse gas emission: Field experimentation and simulation. Paddy and Water Environment, 11, 593.
[57] Rabiee, M., Majidian, M., Alizadeh, M.R., Kavoosi, M., 2021, Evaluation of energy use efficiency and greenhouse gas emission in rapeseed (*Brassica napus* L.) production in paddy fields of Guilan province of Iran. Energy, 217, 119411.
[58] Qian, H., Zhu, X., Huang, S., Linquist, B., Kuzyakov, Y., Wassmann, R., Minamikawa, K., Martinez-Eixarch, M., Yan, X., Zhou, F., Sander, B.O., Zhang, W., Shang, Z., Zou, J., Zheng, X., Li, G., Liu, Z., Wang, S., Ding, Y., van Groenigen, K.J., Jiang, Y., 2023, Greenhouse gas emissions and mitigation in rice agriculture. Nature Reviews Earth & Environment, 4, 716.
[59] Sainju, U.M., Jabro, J.D., Caesar-TonThat, T., 2010, Tillage, cropping sequence, and nitrogen fertilization effects on dry land soil carbon dioxide emission and carbon content. Journal of Environmental Quality, 39, 935.
[60] Harada, H., Kobayashi, H., Shindo, H., 2007, Reduction in greenhouse gas emissions by no-tilling rice cultivation in Hachirogata polder, northern Japan: Life-cycle inventory analysis. Soil Science and Plant Nutrition, 53, 668.
[61] Pandey, D., Agrawal, M., Bohra, J.S., 2012, Greenhouse gas emissions from rice crop

with different tillage permutations in rice-wheat system. Agriculture, Ecosystems & Environment, 159, 133.
[62] Ahmad, S., Li, C., Dai, G., Zhan, M., Wang, J., Pan, S., Cao, C., 2009, Greenhouse gas emission from direct seeding paddy field under different rice tillage systems in central China. Soil and Tillage Research, 106, 54.
[63] Chirinda, N., Arenas, L., Katto, M., Loaiza, S., Correa, F., Isthitani, M., Loboguerrero, A.M., Martínez-Barón, D., Graterol, E., Jaramillo, S., Torres, C.F., Arango, M., Guzmán, M., Avila, I., Hube, S., Kurtz, D.B., Zorrilla, G., Terra, J., Irisarri, P., Tarlera, S., LaHue, G., Scivittaro, W.B., Noguera, A., Bayer, C., 2018, Sustainable and low greenhouse gas emitting rice production in Latin America and the Caribbean: A review on the transition from ideality to reality. Sustainability, 10, 671.
[64] Wei, L., Yi, S., Hua, Z., Jin, Y., Guo-Hong, H., 2007, Greenhouse gas emissions from northeast China rice fields in fallow season. Pedosphere, 17, 630.
[65] Ali, M.A., Lee, C.H., Lee, Y.B., Kim, P.J., 2009, Silicate fertilization in no tillage rice farming for mitigation of methane emission and increasing rice productivity. Agriculture, Ecosystems & Environment, 132, 16.
[66] Li, D., Liu, M., Cheng, Y., Wang, D., Qin, J., Jiao, J., Li, H., Hu, F., 2011, Methane emissions from double-rice cropping system under conventional and no tillage in southeast China. Soil and Tillage Research, 113, 77.
[67] Li, C., Zhang, Z., Guo, L., Cai, M., Cao, C., 2013, Emissions of CH_4 and CO_2 from double rice cropping systems under varying tillage and seeding methods. Atmospheric Environment, 80, 438.
[68] Pittelkow, C.M., Adviento-Borbe, M.A., Hill, J.E., Six, J., van Kessel, C., Linquist, B.A., 2013, Yield-scaled global warming potential of annual nitrous oxide and methane emissions from continuously flooded rice in response to nitrogen input. Agriculture, Ecosystems & Environment, 177, 10.
[69] Erdeng, M., Jing, M., Hua, X., Zucong, C., Kazuyuki, Y., 2010, Effects of rice straw returning methods in wheat-growing season on CH_4 emissions from following rice-growing season. Ecology and Environment, 19, 729.
[70] Nabavi Pelesaraei, A., Shaker Kouhi, S., Bagher Dehpour, M., 2013, Modeling and optimization of energy inputs and greenhouse gas emissions for eggplant production using artificial neural network and multi-objective genetic algorithm. International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research, 1, 1478.
[71] Tang, J., Qian, H., Zhu, X., Liu, Z., Kuzyakov, Y., Zou, J., Wang, J., Xu, Q., Li, G., Liu, Z., Wang, S., Zhang, W., Zhang, J., Huang, S., Ding, Y., van Groenigen, K.J., Jiang, Y., 2024, Soil pH determines nitrogen effects on methane emissions from rice paddies. Global Change Biology, 30, e17577.
[72] Wang, J., Xie, R., He, N., Wang, W., Wang, G., Yang, Y., Hu, Q., Zhao, H., Qian, X., 2024, Five years nitrogen reduction management shifted soil bacterial community structure and function in high-yielding 'super' rice cultivation. Agriculture, Ecosystems & Environment, 360, 108773.
[73] Banger, K., Tian, H., Lu, C., 2012, Do nitrogen fertilizers stimulate or inhibit methane emissions from rice fields? Global Change Biology, 18, 3259.
[74] Ali, M.A., Farouque, M.G., Haque, M., Kabir, A., 2012, Influence of soil amendments on mitigating methane emissions and sustaining rice productivity in paddy soil ecosystems of Bangladesh. Journal of Environmental Science and Natural Resources, 5, 179.
[75] Babu, Y.J., Nayak, D.R., Adhya, T.K., 2006, Potassium application reduces methane emission from a flooded field planted to rice. Biology and Fertility of Soils, 42, 532.
[76] Bordoloi, N., Baruah, K.K., Hazarika, B., 2020, Fertilizer management through coated urea to mitigate greenhouse gas (N_2O) emission and improve soil quality in agroclimatic zone of Northeast India. Environmental Science and Pollution Research, 27, 11919.
[77] Ming, Y., Ningxi, G., Jiatong, Z., Zhanhan, H., Zixuan, C., Di, S., Hongtao, Z., 2024, Enhanced-efficiency nitrogen fertilizer provides a reliable option for mitigating global warming potential in agroecosystems worldwide. Science of the Total Environment, 907, 168080.

[78] Zhang, M., Wang, W., Tang, L., Heenan, M., Xu, Z., 2018, Effects of nitrification inhibitor and herbicides on nitrification, nitrite and nitrate consumptions and nitrous oxide emission in an Australian sugarcane soil. Biology and Fertility of Soils, 54, 697.
[79] Xia, L., Lam, S.K., Chen, D., Wang, J., Tang, Q., Yan, X., 2017, Can knowledge-based N management produce more staple grain with lower greenhouse gas emission and reactive nitrogen pollution? A meta-analysis. Global Change Biology, 23, 1917.
[80] Lehmann, J., Cowie, A., Masiello, C.A., Kammann, C., Woolf, D., Amonette, J.E., Cayuela, M.L., Camps-Arbestain, M., Whitman, T., 2021, Biochar in climate change mitigation. Nature Geoscience, 14, 883.
[81] Wang, J., Ciais, P., Smith, P., Yan, X., Kuzyakov, Y., Liu, S., Li, T., Zou, J., 2023, The role of rice cultivation in changes in atmospheric methane concentration and the global methane pledge. Global Change Biology, 29, 2776.
[82] Yang, S., Xiao, Y., Sun, X., Ding, J., Jiang, Z., Xu, J., 2019, Biochar improved rice yield and mitigated CH_4 and N_2O emissions from paddy field under controlled irrigation in the Taihu Lake region of China. Atmospheric Environment, 200, 69.
[83] Liu, X., Mao, P., Li, L., Ma, J., 2019, Impact of biochar application on yield–scaled greenhouse gas intensity: A meta–analysis. Science of the Total Environment, 656, 969.
[84] Xiao, Y., Yang, S., Xu, J., Ding, J., Sun, X., Jiang, Z., 2018, Effect of biochar amendment on methane emissions from paddy field under water–saving irrigation. Sustainability, 10, 1371.
[85] Qi, L., Pokharel, P., Ni, C., Gong, X., Zhou, P., Niu, H., Wang, Z., Gao, M., 2020, Biochar changes thermal activation of greenhouse gas emissions in a rice-lettuce rotation microcosm experiment. Journal of Cleaner Production, 247, 119148.
[86] He, T., Yuan, J., Luo, J., Lindsey, S., Xiang, J., Lin, Y., Liu, D., Chen, Z., Ding, W., 2020, Combined application of biochar with urease and nitrification inhibitors have synergistic effects on mitigating CH_4 emissions in rice field: A three-year study. Science of the Total Environment, 743, 140500.
[87] DeLuca, T.H., MacKenzie, M.D., Gundale, M.J., Holben, W.E., 2006, Wildfire-produced charcoal directly influences nitrogen cycling in forest ecosystems. Soil Science Society of America Journal, 70, 448.
[88] Zhang, A., Bian, R., Pan, G., Cui, L., Hussain, Q., Li, L., Zheng, J., Zheng, J., Zhang, X., Han, X., Yu, X., 2012, Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles. Field Crops Research, 127, 153.
[89] Shen, Q., Wang, H., Lazcano, C., Voroney, P., Elrys, A., Gou, G., Li, H., Zhu, Q., Chen, Y., Wu, Y., Meng, L., Brookes, P.C., 2024, Biochar amendments to tropical paddy soil increase rice yields and decrease N_2O emissions by modifying the genes involved in nitrogen cycling. Soil and Tillage Research, 235, 105917.
[90] Iboko, M.P., Dossou-Yovo, E.R., Obalum, S.E., Oraegbunam, C.J., Diedhiou, S., Brümmer, C., Témé, N., 2023, Paddy rice yield and greenhouse gas emissions: Any trade-off due to co-application of biochar and nitrogen fertilizer? A systematic review. Heliyon, 9, e22132.
[91] Singh, G., Gupta, M.K., Chaurasiya, S., Sharma, V.S., Pimenov, D.Y., 2021, Rice straw burning: A review on its global prevalence and the sustainable alternatives for its effective mitigation. Environmental Science and Pollution Research, 28, 32125.
[92] He, Z., Cao, H., Qi, C., Hu, Q., Liang, J., Li, Z., 2024, Straw management in paddy fields can reduce greenhouse gas emissions: A global meta-analysis. Field Crops Research, 306, 109218.
[93] Hou, P., Li, G., Wang, S., Jin, X., Yang, Y., Chen, X., Ding, C., Liu, Z., Ding, Y., 2013, Methane emissions from rice fields under continuous straw return in the middle-lower reaches of the Yangtze River. Journal of Environmental Sciences, 25, 1874.
[94] Jumat, F., Abdul Rahman, M.H., Abu Bakar, S., Shakri, N.A., Kamaruzaman, R., Abu Bakar, N.A., Rashid, M.A., Suptian, M.F.M., Ab Malek, R., Zulkifle, N.L., 2023, Field data on pre-season rice straw degradation using a microbial substrate and the effects on methane

emissions during rice cultivation. Data in Brief, 49, 109383.
[95] Belenguer-Manzanedo, M., Alcaraz, C., Camacho, A., Ibáñez, C., Català-Forner, M., Martínez-Eixarch, M., 2022, Effect of post-harvest practices on greenhouse gas emissions in rice paddies: Flooding regime and straw management. Plant and Soil, 474, 77.
[96] Romasanta, R.R., Sander, B.O., Gaihre, Y.K., Alberto, M.C., Gummert, M., Quilty, J., Nguyen, V.H., Castalone, A.G., Balingbing, C., Sandro, J., Correa Jr., T., Wassmann, R., 2017, How does burning of rice straw affect CH_4 and N_2O emissions? A comparative experiment of different on-field straw management practices. Agriculture, Ecosystems & Environment, 239, 143.
[97] Koga, N., Tajima, R., 2011, Assessing energy efficiencies and greenhouse gas emissions under bioethanol-oriented paddy rice production in northern Japan. Journal of Environmental Management, 92, 967.
[98] Yuan, Q., Pump, J., Conrad, R., 2012, Partitioning of CH_4 and CO_2 production originating from rice straw, soil and root organic carbon in rice microcosms. PLOS One, 7, 49073.
[99] Ding, H., Liu, T., Hu, Q., Liu, M., Cai, M., Jiang, Y., Cao, C., Effect of microbial community structures and metabolite profile on greenhouse gas emissions in rice varieties. Environmental Pollution, 306, 119365.
[100] Zheng, H., Fu, Z., Zhong, J., Long, W., 2018, Low methane emission in rice cultivars with high radial oxygen loss. Plant and Soil, 431, 119.
[101] Conrad, R., 2007, Microbial ecology of methanogens and methanotrophs. Advances in Agronomy, 96, 1.
[102] Jiang, Y., van Groenigen, K.J., Huang, S., Hungate, B.A., van Kessel, C., Hu, S., Zhang, J., Wu, L., Yan, X., Wang, L., Chen, J., Hang, X., Zhang, Y., Horwath, W.R., Ye, R., Linquist, B.A., Song, Z., Zheng, C., Deng, A., Zhang, W., 2017, Higher yields and lower methane emissions with new rice cultivars. Global Change Biology, 23, 4728.
[103] Zhang, X., Sun, H., Bi, J., Yang, B., Zhang, J., Wang, C., Zhou, S., 2022, Estimate greenhouse gas emissions from water-saving and drought-resistance rice paddies by deNitrification-deComposition model. Clean Technologies and Environmental Policy, 24, 161.
[104] Brye, K.R., Rogers, C.W., Smartt, A.D., Norman, R.J., Hardke, J.T., Gbur, E.E., 2017, Methane emissions as affected by crop rotation and rice cultivar in the Lower Mississippi River Valley, USA. Geoderma Regional, 11, 8.
[105] Smartt, A.D., Brye, K.R., Rogers, C.W., Norman, R.J., Gbur, E.E., Hardke, J.T., Roberts, T.L., 2016, Characterization of methane emissions from rice production on a clay soil in Arkansas. Soil Science, 181, 57.
[106] Liao, P., Sun, Y., Jiang, Y., Zeng, Y., Wu, Z., Huang, S., 2019, Hybrid rice produces a higher yield and emits less methane. Plant, Soil and Environment, 65, 549.
[107] Taghavi, S.M., Mendoza, T.C., Acero Jr., B., Li, T., Siddiq, S.A., Yorobe Jr., J., Li, Z., Ali, J., 2017, Carbon dioxide equivalent emissions of newly developed rice varieties. Journal of Agricultural Science, 9, 107.
[108] Gogoi, N., Baruah, K.K., Gupta, P.K., 2008, Selection of rice genotypes for lower methane emission. Agronomy for Sustainable Development, 28, 181.
[109] Liu, S., Hu, Z., Wu, S., Li, S., Li, Z., Zou, J., 2016, Methane and nitrous oxide emissions reduced following conversion of rice paddies to inland crab-fish aquaculture in southeast China. Environmental Science and Technology, 50, 633.
[110] Wu, S., Hu, Z., Hu, T., Chen, J., Yu, K., Zou, J., Liu, S., 2018, Annual methane and nitrous oxide emissions from rice paddies and inland fish aquaculture wetlands in southeast China. Atmospheric Environment, 175, 135.
[111] Fang, K., Yi, X., Dai, W., Gao, H., Cao, L., 2019, Effects of integrated rice-frog farming on paddy field greenhouse gas emissions. International Journal of Environmental Research and Public Health, 16, 1930.
[112] Sun, G., Sun, M., Du, L., Zhang, Z., Wang, Z., Zhang, G., Nie, S., Xu, H., Wang, H., 2021, Ecological rice-cropping systems mitigate global warming - A meta-analysis. Science of the Total Environment, 789, 147900.
[113] Bashir, M.A., Liu, J., Geng, Y., Wang, H., Pan, J., Zhang, D., Rehim, A., Aon, M., Liu, H., 2020, Co-culture of rice and aquatic animals: An integrated system to achieve production and environmental sustainability. Journal of Cleaner Production, 249, 119310.

[114] Frei, M., Becker, K., 2005, Integrated rice-fish culture: Coupled production saves resources. Natural Resources Forum, 29, 135.
[115] Sun, Z., Guo, Y., Li, C., Cao, C., Yuan, P., Zou, F., Wang, J., Jia, P., Wang, J., 2019, Effects of straw returning and feeding on greenhouse gas emissions from integrated rice-crayfish farming in Jianghan Plain, China. Environmental Science and Pollution Research, 26, 11710.
[116] Sheng, F., Cao, C.-G., Li, C.-F., 2018, Integrated rice-duck farming decreases global warming potential and increases net ecosystem economic budget in central China. Environmental Science and Pollution Research, 25, 22744.
[117] Wang, Q., 2018, Regulation on and mechanism of greenhouse gas emissions of circular agriculture ecosystem of planting and breeding in paddy. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 26, 633.
[118] Li, F., Feng, J., Zhou, X., Xu, C., Jijakli, M.H., Zhang, W., Fang, F., 2019, Impact of rice-fish/shrimp co-culture on the N_2O emission and NH_3 volatilization in intensive aquaculture ponds. Science of the Total Environment, 655, 284.