نشریه مدیریت اراضی/ جلد ۸ / شماره ۲ / ۱۳۹۹
10.22092/lmj.2020.126592.194

مروری بر مطالعات مدیریت زراعی در کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای نیتروز اکساید از خاک‌های کشاورزی

مراد میرزایی [۱]، رایحه میرخانی، منوچهر گرجی اناری و مهدی شرفا

دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
mirzaei.morad95@ut.ac.ir
کارشناس ارشد پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.
rmirkhani@aeoi.org.ir
استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
mgorji@ut.ac.ir
استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
mshorafa@ut.ac.ir

دریافت: شهریور ۱۳۹۸ و پذیرش: دی ۱۳۹۸

چکیده

انتشار گازهای گلخانه‌ای دی اکسید کربن (CO_2)، نیتروز اکساید (N_2O) و متان (CH_4) به آتمسفر و اثرات آن‌ها بر تغییر اقلیم یکی از بزرگترین نگرانی‌های امروزی است. فعالیت‌های کشاورزی به دلیل تأثیر قابل توجه بر پویایی کربن و نیتروژن، دارای اثرات مستقیم و غیرمستقیم بر انتشار گازهای گلخانه‌ای از خاک می‌باشد. نیتروز اکساید گاز گلخانه‌ای قوی بوده و پتانسیل گرمایش جهانی آن ۲۹۸ برابر بیشتر از دی اکسید کربن است. بیشترین میزان انتشار نیتروز اکساید مربوط به فعالیت‌های کشاورزی بوده و به طور عمده از طریق فرآیندهای نیترات‌سازی و نیترات‌زدایی در خاک‌ها اتفاق می‌افتد. عوامل مختلف زیست محیطی و مدیریتی تأثیر قابل توجه بر تشکیل و انتشار این گاز گلخانه‌ای دارند. این مقاله مروری، قابلیت روش‌های مختلف مدیریت زراعی را برای کاهش انتشار نیتروزاکساید از خاک‌های کشاورزی ارزیابی می‌کند. مدیریت صحیح بقایای گیاهی، بکارگیری روش‌های نوین خاک‌ورزی حفاظتی و آبیاری و همین‌طور گنجاندن محصولات لگوم در تناوب از جمله راهکارهای موثر در کاهش انتشار نیتروز اکساید هستند. همچنین بهبود کارایی مصرف نیتروژن با استفاده از بازدارنده‌های نیترات سازی، اوره‌آز و کودهای آهسته رهش منجر به کاهش تشکیل و انتشار این گاز می‌گردد. تشخیص منشأ انتشار نیتروز اکساید با استفاده از فناوری‌های نوین نیز اهمیت قابل ملاحظه‌ای در انتخاب و اجرای عملیات زراعی مطلوب و در نتیجه جلوگیری از انتشار بیشتر این گاز گلخانه‌ای دارد. بنابراین با توجه به پتانسیل قابل توجه مدیریت صحیح زراعی در کاهش انتشار این گاز، بکارگیری و عملیاتی نمودن هر یک از راهکارهای مدیریتی ارائه شده در این مقاله می‌تواند سهم قابل توجهی در کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای نیتروزاکساید از خاک و در نتیجه جلوگیری از پدیده تغییر اقلیم و گرمایش جهانی و همچنین افزایش تولید پایدار محصولات کشاورزی به دنبال داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، کشاورزی، گرمایش جهانی، نیترات زدایی، نیترات سازی

---

[۱]- آدرس نویسنده مسئول: گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

مقدمه

امروزه جهان با مشکلات متعددی مواجه است که از مهمترین آن‌ها می‌توان به نبود امنیت غذایی، کمبود آب، تخریب خاک، کمبود انرژی، افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییر اقلیم اشاره کرد. ارتباط مستقیمی بین این مسائل و استفاده پایدار از منابع وجود دارد (لال، ۲۰۰۷). پدیده تغییر اقلیم به تأثیر فعالیت‌های بشر بر روی اقلیم اشاره دارد. گازهایی مانند دی اکسید کربن[1]، متان[2]، نیتروز اکساید[3]، بخار آب، اوزون[4] و کلروفلوروکربن‌ها[5] به عنوان گازهای گلخانه‌ای شناخته می‌شوند. افزایش مداوم غلظت گازهای گلخانه‌ای تولید شده در اثر فعالیت‌های نامطلوب بشری، به عنوان یک لایه عایق گرمایی عمل نموده و باعث جذب تابش گرمایی ساطع شده از زمین و افزایش دمای اتمسفر می‌شود که نتیجه این امر گرمایش جهانی و پدیده تغییر اقلیم می‌باشد (هوقتون، ۲۰۰۵).

گازهای گلخانه‌ای اصلی شامل دی اکسید کربن، متان و نیتروز اکساید هستند (عورتل و همکاران، ۲۰۱۶) که در مقیاس جهانی سهم آنها در انتشار گازهای گلخانه‌ای به ترتیب حدود ۶۰، ۱۵ و ۶ درصد می‌باشد (جدول ۱). نیتروز اکساید یکی از گازهای گلخانه‌ای اصلی و تخلیه کننده اوزون اتمسفری است و پتانسیل گرمایش جهانی به ترتیب ۲۹۸ و ۱۶ برابر بیشتری نسبت به دی اکسید کربن و متان در طی یک دوره ۱۰۰ ساله را دارا می‌باشد. تشدید فعالیت‌های کشاورزی از قبیل افزایش استفاده از کودهای شیمیایی (۱۰۳ مگاتن نیتروژن در سطح جهانی در سال ۲۰۱۰)، افزایش جمعیت بشر و تغییر در رژیم غذایی، استفاده ناکارآمد از آب آبیاری، افزایش تولید محصول، استفاده از کودهای حیوانی در اراضی کشاورزی و چراگاه‌ها و همچنین عملیات مدیریتی که منجر به افزایش معدنی شدن نیتروژن آلی خاک و تجزیه کربن می‌شود از قبیل کشت و کار، حذف و سوزاندن بقایا، عدم استفاده از تناوب زراعی منجر به افزایش انتشار نیتروزاکساید به اتمسفر می‌شوند (زمان و همکاران، ۲۰۱۲). غلظت چند نوع از گازهای گلخانه‌ای از زمان انقلاب صنعتی به طور قابل توجهی تغییر کرده است که از دلایل عمده آن می‌توان به احتراق سوخت‌های فسیلی، تغییر کاربری اراضی و فعالیت‌های کشاورزی از قبیل شخم زدن، سوزاندن بقایای گیاهی، استفاده بی‌رویه و نامناسب از کودهای شیمیایی و دامی اشاره کرد (شکل ۱). با توجه به اهمیت پدیده تغییر اقلیم و نقش قابل توجه فعالیت‌های کشاورزی در تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای نیتروزاکساید به عنوان یکی از گازهای گلخانه‌ای اصلی و تأثیرگذار بر پدیده تغییر اقلیم، این مقاله به با هدف بررسی ساز و کارهای تشکیل و انتشار نیتروز اکساید در خاک‌های کشاورزی و تشریح عوامل موثر بر آن‌ها و همین‌طور ارائه راه هکارهای کارآمد مدیریتی در کاهش انتشار این گاز گلخانه‌ای تهیه گردید.

نقش فعالیت‌های کشاورزی در انتشار گازهای گلخانه‌ای

تخمین‌ها حاکی از آن است که حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد سطح زمین برای اهداف کشاورزی استفاده می‌شود، از این رو تأثیر فعالیت‌های کشاورزی بر روی اقلیم از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است (رجینا و همکاران، ۲۰۱۰). کشاورزی سهم قابل توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای بویژه متان، دی اکسید کربن، نیتروزاکساید و گرمایش جهانی دارد (نواز و همکاران، ۲۰۱۷)، به طوری که فعالیت‌های کشاورزی منجر به انتشار جهانی ۵۰ < درصد متان، ۳۶ درصد نیتروزاکساید و ۱۴ درصد دی اکسید کربن می‌گردد (توبیلو و همکاران، ۲۰۱۴). خاک‌ورزی فشرده به وسیله گاوآهن برگردان‌دار، استفاده از مواد شیمیایی در کشاورزی و سوزاندن بقایای گیاهی از جمله فعالیت‌های اصلی هستند که منجر به انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شوند (نواز و همکاران، ۲۰۱۷). فعالیت‌های کشاورزی به دلیل تأثیر بر پویایی کربن و نیتروژن، دارای اثرات مستقیم و غیرمستقیم بر انتشار گازها و در نتیجه

[1] Carbon dioxide (CO_2)
[2] Methane (CH_4)
[3] Nitrous oxide (N_2O)
[4] Ozone (O_3)
[5] Chlorofluorocarbons (CFCs)

گرمایش جهانی می‌باشند (وانگ و همکاران، ۲۰۱۳b). در قرن گذشته عملیات کشاورزی مسئول انتشار بیشتر نیتروز اکساید در اتمسفر بوده است (لال، ۲۰۰۷). غلظت اتمسفری نیتروز اکساید از ۲۷۰ پی پی بی در سال ۱۷۵۰ تا ۳۱۸/۶ پی پی بی در سال ۲۰۰۴ افزایش ۱۸ درصدی داشته و در حال حاضر به میزان ۰/۸ پی پی بی در سال افزایش می‌یابد (لال، ۲۰۰۷). کشاورزی بزرگترین منبع تولید کننده N_2O مصنوعی می‌باشد به طوری که خاک‌های کشاورزی تقریباً ۴ تراگرم N_2O در سال تولید می‌کنند (ری و همکاران، ۲۰۱۲). منابع اصلی انتشار نیتروز اکساید کاربرد کودهای شیمیایی نیتروژنه در خاک‌ها، احتراق سوخت‌های فسیلی و بعضی ساز و کارهای طبیعی است که در زیست‌بوم‌های آبی و خشکی اتفاق می‌افتد. میزان افزایش سالیانه از ۰/۲ تا ۰/۳ درصد متغیر است. جدول ۲ منابع اصلی نیتروز اکساید در جهان در طی دهه ۱۹۹۰ به تفکیک منابع مصنوعی و طبیعی را نشان می‌دهد، تقریباً ۳۸ درصد انتشارات جهانی مرتبط با منابع مصنوعی می‌باشد و کشاورزی عامل مهمی (۱۵/۸۲ درصد) درانتشارات جهانی است؛ بنابراین، هر راهکاری که با هدف کاهش غلظت گازهای گلخانه‌ای باشد باید بر بخش کشاورزی تمرکز کند زیرا این منبع اصلی نیتروز اکساید است. علاوه بر این، کاهش هدررفت نیتروژن به اتمسفر به فرم نیتروز اکساید می‌تواند کارایی استفاده از نیتروژن در دسترس برای گیاهان و در نتیجه عملکرد محصول را افزایش دهد.

تولید نیتروز اکساید در خاک

چرخه نیتروژن در شکل ۲ آورده شده است. باکتری‌های همزیست و آزادزی N_2 اتمسفری را با استفاده از آنزیم نیتروژناز (به عنوان کاتالیست برای شکستن پیوند سه تایی N_2) به فرم آمونیاک (NH_3) تثبیت می‌کنند. در خاک، آمونیاک (NH_3) می‌تواند به یون آمونیوم (NH_4^+) تبدیل شود و سپس در یک فرآیند سه مرحله‌ای که نیترات سازی[۱] نامیده می‌شود به یون نیترات (NO_3^-) اکسیده می‌شود. یون‌های نیتریت (NO_2^-) و نیترات (NO_3^-) در طی نیترات سازی تولید می‌شوند و ممکن است در طی فرآیند نیترات زدایی[۲] احیا گردند. احیاء گام به گام نیترات (NO_3^-) به N_2 بوسیله چهار آنزیم که تولید کننده ترکیبات بینابینی نیتریت (NO_2^-)، نیتریک اکسید (NO) و نیتروز اکساید (N_2O) می‌باشند انجام می‌گردد. همچنین در طی آمونیفیکاسیون نیترات (NO_3^-) به آمونیوم (NH_4^+)، احیا نیترات می‌تواند اتفاق افتد که نتیجه آن تولید نیتروز اکساید (N_2O) می‌باشد (تامسون و همکاران، ۲۰۱۲).

عوامل موثر بر انتشار نیتروز اکساید

ایچنر (۱۹۹۰) عوامل تأثیرگذار بر انتشار نیتروز اکساید ناشی از فعالیت‌های کشاورزی را به صورت زیر دسته‌بندی کرد. عوامل مدیریتی شامل نوع کود شیمیایی، میزان کاربرد، روش کاربرد، زمان‌بندی کاربرد، سامانه خاک-ورزی، بقایای گیاهی، استفاده از دیگر مواد شیمیایی، نوع محصول، آبیاری و کربن و نیتروژن باقیمانده از محصولات و کودهای شیمیایی و عوامل زیست محیطی نیز دما، بارش، میزان رطوبت خاک، میزان کربن آلی خاک، نسبت کربن به نیتروژن، نوع خاک، فشردگی خاک، موقعیت توپوگرافیکی، وضعیت اکسیژن خاک، تخلخل خاک، واکنش شیمیایی خاک، چرخه‌های یخ زدن و ذوب شدن و فراوانی و فعالیت ریزجانداران را در بر می‌گیرد.

عوامل زیست محیطی

دما و رطوبت اهمیت قابل ملاحظه‌ای در فرآیندهای نیترات سازی و نیترات زدایی دارد. چون این عوامل از جمله عوامل تعیین کننده فعالیت ریزجانداران محسوب می‌شود. علاوه بر این، دما و رطوبت نه تنها بر انتشار نیتروز اکساید بلکه همچنین بر پخشیدگی آن به اتمسفر تأثیر قابل توجه دارند (دیویدسون و سوانک، ۱۹۸۶). تحت شرایط معتدل، میزان تبدیل نیتروژن اندک

[۱] Nitrification

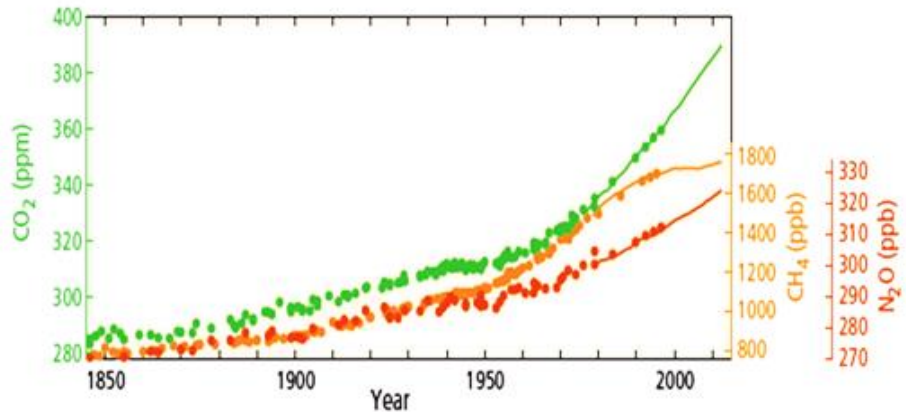
[۲] Denitrification

است و با افزایش دما افزایش می‌یابد (برینتراپ و همکاران، ۲۰۰۰). یک رابطه نمایی بین دمای خاک و تولید N_2O وجود دارد که این بخاطر توسعه مکان‌های کوچک غیرهوازی در خاک می‌باشد که هنگامی که دما افزایش می‌یابد منجر به افزایش نیترات زدایی می‌شود (اسمیث و همکاران، ۲۰۱۸).

رطوبت خاک یک پارامتر خیلی مهم و موثر بر انتشار گازها از خاک می‌باشد به دلیل اینکه فعالیت میکروبی و تمامی فرآیندهای مرتبط با آن را کنترل می‌کند. افزایش رطوبت خاک نیز باعث افزایش انتشار نیتروز اکساید می‌شود (گیاکومینی و همکاران، ۲۰۰۶)، زیرا هر دو فرآیندهای نیترات سازی و نیترات زدایی متأثر از رطوبت خاک هستند (دیویدسون و سوانک، ۱۹۸۶). ولی با این وجود، تحت شرایط رطوبت خیلی زیاد، تولید نیتروز اکساید کاهش می‌یابد اما موقعی که تناوب‌های رطوبتی با دوره‌های متوالی خشک و مرطوب وجود دارد انتشار نیتروز اکساید افزایش می‌یابد (برینتراپ و همکاران، ۲۰۰۰). دلیل این امر این است که اگرچه رطوبت خاک فعالیت میکروبی را افزایش می‌دهد اما رطوبت خیلی زیاد مانع فعالیت میکروبی می‌گردد. فضای منافذ پر شده از آب خاک به عنوان مهمترین عامل تأثیرگذار بر جریان N_2O در خاک‌های کشاورزی است (کاستیلانو و همکاران، ۲۰۱۰) که این بخاطر نقش آن بر تهویه و میزان O_2 در تعیین سهم نیترات سازی و نیترات زدایی برای تولید N_2O می‌باشد (شکل ۳).

جدول ۱- پتانسیل گرمایش جهانی[1] و زمان اقامت در اتمسفر[2] گازهای گلخانه‌ای اصلی

گاز گلخانه‌ای	فرمول شیمیایی	پتانسیل گرمایش جهانی برای افق زمانی ۱۰۰ ساله $kg\ CO_2\ ha^{-1}\ y^{-1}$	زمان اقامت در اتمسفر (سال)
نیتروز اکساید	N_2O	۲۹۸	۱۱۴
متان	CH_4	۲۵	۱۲
دی اکسید کربن	CO_2	۱	متغیر



شکل ۱- انتشارات مصنوعی اخیر گازهای گلخانه‌ای (برگرفته از فائو/ آژانس بین المللی انرژی اتمی،۲۰۱۸)

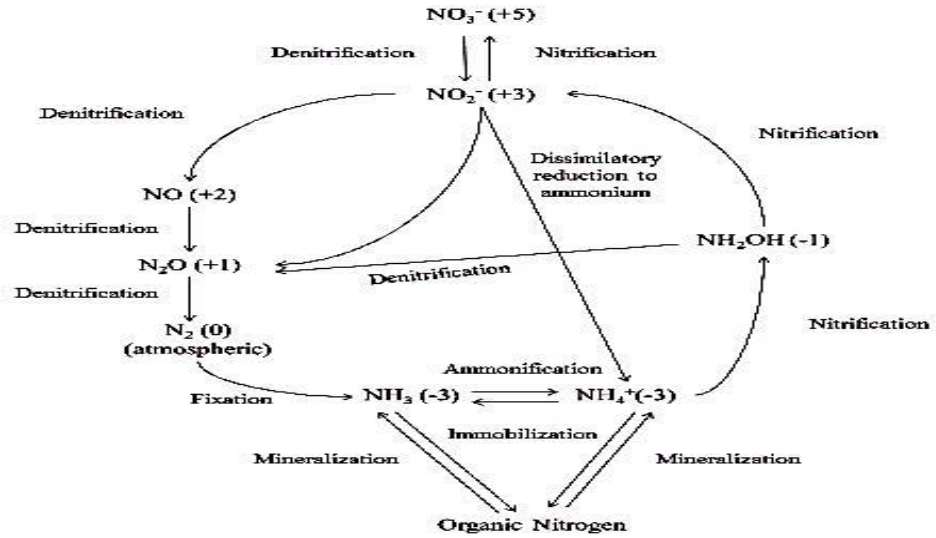
[1] Global Warming Potential (GWP)

[2] Atmospheric residence time

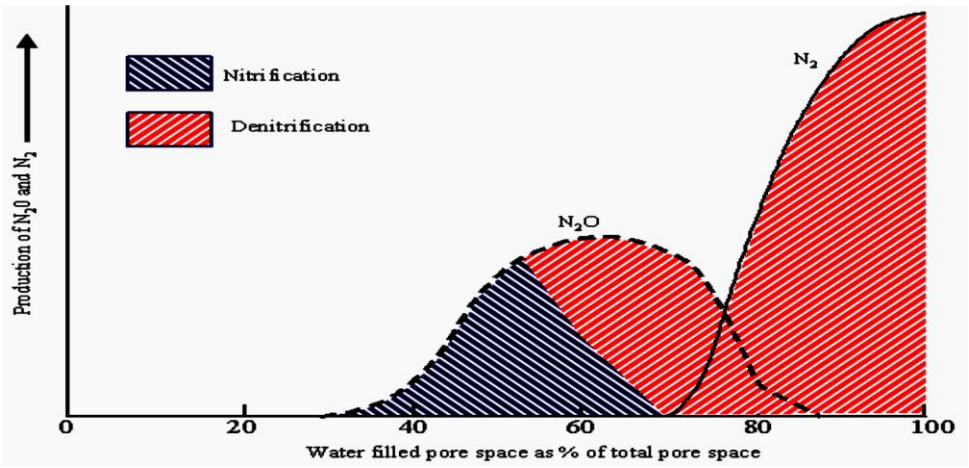
جدول ۲- منابع اصلی انتشار نیتروز اکساید به اتمسفر

منبع	$N\text{-}N_2O$ ($Tg\ N\ year^{-1}$)
مصنوعی	
احتراق سوخت های فسیلی و فرآیندهای صنعتی	۰/۷
کشاورزی	۲/۸
تغییر کاربری اراضی و جنگل	–
غیره	۳/۲
کل	۶/۷
طبیعی	
خاک های تحت پوشش بومی	۶/۶
اقیانوس‌ها	۳/۸
رعد و برق	–
شیمی اتمسفر	۰/۶
کل	۱۱
کل	۱۷/۷

دنمن و همکاران (۲۰۰۷)



شکل ۲- چرخه نیتروژن: حالت‌های اکسیداسیون و فرآیندها (برگرفته از سیگنور و همکاران، ۲۰۱۳)



شکل ۳- اثر افزایش رطوبت خاک (درصد منافذ پر از آب) بر انتشار گازهای نیتروز اکساید (N_2O) و دی نیتروژن (N_2) (گرانلی، ۱۹۹۴)

فشردگی خاک که متأثر از عملیات زراعی از قبیل نوع سیستم کاشت و روش‌های خاک‌ورزی است (بوایزارد و همکاران، ۲۰۰۲) نیز یک عامل مهم است که تعیین کننده غالب بودن نیترات سازی و نیترات زدایی در خاک به خاطر اثرات آن بر تهویه می‌باشد. کاهش تخلخل خاک که در نتیجه فشردگی بوجود می‌آید منجر به افزایش مقدار خاک غیرهوازی بخاطر افزایش مقدار فضای منافذ پر از آب و کاهش پخشیدگی اکسیژن می‌شود. این پدیده منجر به افزایش تولید N_2O می‌شود (بیسو و همکاران، ۲۰۱۰). انتشار نیتروز اکساید همچنین ممکن است متأثر از موقعیت زمین‌نما باشد چون این پارامتر بر عوامل دیگر دخیل در انتشار نیتروز اکساید از قبیل پراکنش رطوبت، میزان کربن آلی و حاصلخیزی خاک اثرگذار است. نواحی با پستی و بلندی کمتر در مقایسه با اراضی دارای پستی و بلندی دارای رطوبت و ماده آلی بیشتری می‌باشند، بنابراین، تنفس ریزجانداران و مصرف اکسیژن به طور بالقوه بیشتر است و این مساله بر تولید نیتروز اکساید تأثیرمی‌گذارد (دیویدسون و سوانک، ۱۹۸۶). نسبت نیتروز اکساید متصاعد شده از خاک‌ها همچنین متأثر از نوع خاک می‌باشد (استیون و لوقلین، ۱۹۹۸). خاک‌های رسی تمایل به نشان دادن انتشار بیشتر نیتروز اکساید نسبت به خاک‌های شنی دارند (برینتراپ و همکاران، ۲۰۰۰) و مدیریت نیتروژن ممکن است انتشار نیتروز اکساید را به ویژه در خاک‌های ریزبافت افزایش دهد (تان و همکاران، ۲۰۰۹).

عامل مهم دیگر تأثیرگذار بر انتشار نیتروز اکساید از خاک، اسیدیته است، زیرا از فعالیت آنزیم نیتروز اکساید ردوکتاز در pH پایین و در حضور اکسیژن ممانعت بعمل می‌آید. به طور کلی، اگر نیترات زدایی منبع اصلی نیتروز اکساید است، مقادیر pH زیادتر انتشار نیتروز اکساید خاک را کاهش می‌دهد اما اگر نیترات سازی فرآیند اصلی تولید نیتروز اکساید باشد، افزایش pH تولید نیتروز اکساید را تحریک می‌کند. بر طبق یافته‌های بریمنر (۱۹۹۷) تولید نیتروز اکساید به وسیله فرآیند نیترات زدایی در شرایط افزایش غلظت نیترات و pH پایین خاک مطلوب است. در pH پایین، انتشار نیتروز اکساید بزرگتر خواهد بود زیرا یک بخش کوچکی از این گاز به N_2 احیا می‌گردد (چاپیوس-لاردی و همکاران، ۲۰۰۷)؛ بنابراین، اسیدی شدن مداوم خاک‌های کشاورزی از طریق استفاده اضافی از کودهای شیمیایی نیتروژن می‌تواند به طور قابل توجهی انتشار نیتروز اکساید را افزایش دهد در حالی که تنظیم دقیق pH خاک به وسیله آهک‌دهی انتشارات را کاهش می‌دهد (تامسون و همکاران، ۲۰۱۲). کربن آلی خاک کنترل کننده مهم دیگر تولید نیتروزاکساید و دی نیتروژن در خاک‌ها و رسوبات می‌باشد. چون دنیتریفیکاتورها شدیداً هتروتروف بوده و کربن آلی قابل دسترس را به عنوان دهنده الکترون استفاده می‌کنند و به طور غیر مستقیم بر غلظت اکسیژن خاک‌های هوازی تأثیر می‌گذارند (گروفمن و همکاران، ۱۹۸۷). با این حال، اثر کربن قابل دسترس بر مقدار نیتروزاکساید و دی نیتروژن تولید شده و متصاعد شده از خاک‌ها و همین طور نسبت بین دو گاز با توجه به غلظت نیترات خاک و درصد منافذ پر از آب (WFPS) متغیر است (زمان و همکاران، ۲۰۰۸a؛ ۲۰۰۸b). کربن قابل دسترس بر واکنش‌های نیتریفکاسیون و نیترات زدایی تأثیر می‌گذارد (بریمنر، ۱۹۹۷) و می‌تواند تولید نیتروز اکساید را افزایش دهد (برینتراپ و همکاران، ۲۰۰۰)؛ زیرا این می‌تواند رشد و فعالیت میکروبی را تحریک کند و کربن آلی مورد نیاز به وسیله دنیتریفیکاتورها را فراهم کند (کامرون وهمکاران، ۲۰۱۳). علاوه بر این، رشد میکروبی منجر به مصرف اکسیژن شده و شرایط غیر هوازی موردنیاز برای نیترات زدایی را ایجاد می‌نماید.

نسبت کربن به نیتروژن نیز تأثیر قابل توجهی بر انتشار گاز نیتروزاکساید دارد. تغییر شکل نیتروژن در خاک-ها شامل دو فرآیند زیستی مهم آلی شدن (جذب) است که جذب نیتروژن بوسیله ریزجانداران و تبدیل آن به نیتروژن آلی است و معدنی شدن (آمونیفیکاسیون) است که تبدیل نیتروژن آلی به آمونیاک است (شکل ۲). تعادل بین معدنی شدن و آلی شدن بستگی به نسبت C/N و بقایای افزوده شده دارد. خاک و بقایای گیاهی با یک نسبت C/N کوچک

(کمتر از ۳۰)، معدنی شدن در آن‌ها نسبت به آلی‌شدن غالب است و نیتروژن قابل دسترس می‌تواند به وسیله گیاهان جذب شود یا در فرآیندهای میکروبی استفاده شود. حضور بقایا با نسبت C/N زیاد در سطح خاک ممکن است آلی شدن کود شیمیایی نیتروژن‌دار افزوده شده را افزایش دهد (باگز و همکاران، ۲۰۰۰) و بنابراین واکنش‌های نیترات زدایی و انتشار نیتروز اکساید را کاهش دهد. در مواقعی که هیچ بقایایی و یا بقایایی با نسبت C/N کم در سطح خاک وجود دارد، آلی شدن نیتروژن احتمالاً اتفاق نمی‌افتد و در نتیجه نیتروژن بیشتر برای نیترات سازی و نیترات زدایی قابل دسترس خواهد بود و انتشار بیشتر نیتروز اکساید ممکن است اتفاق افتد (باگز و همکاران، ۲۰۰۰).

عوامل مدیریتی تأثیرگذار بر تشکیل نیتروز اکساید

علاوه بر اثر شرایط اقلیمی، عملیات مدیریت زراعی نیز می‌تواند بر تولید نیترواکساید اثرگذار باشد. در میان عملیات مدیریتی، روش‌های مختلف خاک‌ورزی، مدیریت بقایای گیاهی، عملیات آبیاری، الگوی کاشت و کاربرد کودهای شیمیایی نیتروژنه (معدنی یا آلی) از اهمیت زیادی برخوردارند (گروفمن و همکاران، ۲۰۰۹). اثرات عملیات خاک‌ورزی بر انتشار نیتروز اکساید حاصل تغییرات ایجاد شده در ساختمان خاک، تهویه خاک، فعالیت میکروبی، میزان تجزیه بقایا و میزان معدنی شدن نیتروژن و همین‌طور دما و رطوبت خاک است. در سامانه خاک‌ورزی مرسوم به خاطر بهم خورگی لایه‌های سطحی خاک، غلظت اکسیژن در خاک افزایش یافته و در نتیجه انتشار نیتروز اکساید کاهش می‌یابد (باگز و همکاران، ۲۰۰۶). حضور بقایای گیاهی در سامانه بی‌خاک‌ورزی باعث افزایش رطوبت، افزایش فعالیت میکروبی نزدیک سطح خاک و در نتیجه مصرف اکسیژن شده و منجر به ایجاد مکان‌های کوچک غیرهوازی می‌گردد (باگز و همکاران، ۲۰۰۶). انتشار نیتروز اکساید متأثر از ترکیب بیوشیمیایی بقایای گیاهی افزوده شده به خاک نیز می‌باشد (گومز و همکاران، ۲۰۰۹)، زیرا نگهداری بقایای گیاهی در سطح خاک بر پویایی و در نتیجه فراهمی نیتروژن در خاک و همچنین فرآیندهای نیترات سازی و نیترات زدایی اثر می‌گذارد. انتشار نیتروز اکساید همچنین بستگی به مرحله فنولوژیکی محصول یا وضعیت تجزیه بقایا دارد؛ زیرا این در ارتباط با نسبت C/N می‌باشد. فرناندز و همکاران (۲۰۱۵) فراهمی نیترات بیشتر و انتشار نیتروز اکساید بیشتری در طی مرحله بلوغ لوبیا و سویا را گزارش کردند که که علت این امر با مرگ و میر ریشه و آزادسازی نیتروژن از ریشه‌ها و گره‌ها بود. لیو و همکاران (۲۰۱۱)، انتشار نیتروز اکساید را در تناوب زراعی در چین مطالعه کردند و نشان دادند که ترکیب کردن کاه و کلش گندم و ذرت به طور قابل توجهی دمای خاک و در نتیجه فعالیت آنزیمی نیتریفیکاتورها و دنیتریفیکاتورها را تحریک و تولید نیتروز اکساید میکروبی را افزایش داد.

کوددهی نیتروژن نیز از عومل مدیریتی تأثیرگذار بر تشکیل نیتروزاکساید در خاک می‌باشد. انتشار نیتروز اکساید به وسیله نیترات سازی و نیترات زدایی بستگی به میزان نیتروژن در خاک (آکیاما و همکاران، ۲۰۱۰) و همچنین کودهای شیمیایی نیتروژن‌دار بکاربرده شده در خاک دارد (سیگنور و همکاران، ۲۰۱۳). استفاده از کودهای شیمیایی نیتروژن‌دار به طور مستقیم بر میزان آمونیوم و نیترات قابل دسترس در خاک اثرگذار است. هر چه مقدار نیتروژن به فرم آمونیوم در خاک بیشتر باشد، فرآیند نیترات سازی بیشتر است (لیو و همکاران، ۲۰۰۵)، چون نیتریت تشکیل شده در طی فرآیند نیترات سازی در صورت محدودیت اکسیژن می‌تواند به عنوان پذیرنده الکترون استفاده شود و باعث هدررفت نیتروز اکساید شود. موقعی که نیترات در خاک زیاد باشد، انتشارات نیتروز اکساید بیشتر خواهد بود (زاناتا و همکاران، ۲۰۱۰). همچنین زمانی که نیترات قابل دسترس کاهش می‌یابد، انتشار نیتروز اکساید به دلیل کاهش فرآیند نیترات زدایی کمتر می‌شود (هلیبرند و همکاران، ۲۰۰۸). از طرف دیگر، کوددهی نیتروژن منجر به تولید بیومس بیشتر و در نتیجه مقدار بیشتر بقایای گیاهی و منبع کربن در خاک می‌گردد که این باعث افزایش انتشار نیتروز اکساید برای یک دوره طولانی بعد از

کاربرد کود شیمیایی نیتروژن‌دار می‌شود (هلیبرند و همکاران، ۲۰۰۸). علاوه بر این، نوع کود شیمیایی نیز بر انتشار نیتروز اکساید اثرگذار است. در کل، کودهای شیمیایی آمونیومی انتشار نیتروز اکساید را آهسته‌تر نسبت به کودهای شیمیایی نیتراتی افزایش می‌دهند چون منابع نیتراتی سریعاً وارد فرآیند نیترات زدایی می‌شوند، در حالی که منابع آمونیاک باید قبل از نیترات زدایی فرآیند نیترات سازی را طی کنند. اثرات متقابل کودهای شیمیایی نیتروژنی و دیگر عوامل تأثیرگذار بر انتشار نیتروز اکساید نیز باید مد نظر قرار گیرد. کاربرد کود شیمیایی در آب و هوای خشک منجر به انتشار کمتر نیتروز اکساید نسبت به کاربرد آن در شرایط مرطوب می‌گردد (ژانگ و هان، ۲۰۰۸).

تناوب زراعی، انتخاب گونه‌های گیاهی، مدیریت بقایا و استفاده از محصولات پوششی، عوامل حیاتی موثر بر عملکرد و کارایی جذب نیتروژن در محصولات و در نتیجه کاهش انتشار نیتروز اکساید از خاک می‌باشند (سانز-کوبنا و همکاران، ۲۰۱۴). سامانه‌های مختلف تناوب زراعی اثرات متفاوتی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند (ژو و همکاران، ۲۰۱۴). به کارگیری سامانه‌های مناسب تناوب محصول، قابلیت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را از طریق کاهش استفاده از کودهای شیمیایی ، کاهش هدررفت کربن به اتمسفر و در نتیجه افزایش ترسیب کربن خاک باعث می‌گردند (چائون و همکاران، ۲۰۱۷). تناوب زراعی با اثر بر چرخه‌های کربن و نیتروژن نقش مهمی در کاهش انتشار گاز های گلخانه‌ای و سازگاری با تغییر اقلیم دارد. گنجاندن محصولات لگوم در تناوب به عنوان یک راهکار موثر در کاهش انتشار نیتروز اکساید عمل می‌کند (جنسن و همکاران، ۲۰۱۲)، زیرا این محصولات دارای قابلیت تثبیت نیتروژن بوده و در نتیجه استفاده از آن‌ها در تناوب زراعی، نیازی به استفاده از کودهای شیمیایی نیتروژنه که یک محرک کلیدی در انتشار نیتروزاکساید از خاک است نمی‌باشد (تلیز-ریو و همکاران، ۲۰۱۵).

اقدامات مفید برای کاهش انتشار نیتروز اکساید

بکارگیری بازدارنده‌های نیترات سازی[1] (NIS)، بازدارنده‌های اوره‌آز[2] (UIS) و کودهای آهسته‌رهش، اصلاح روش آبیاری، استفاده از ذغال زیستی[3]، مدیریت کوددهی (جدول ۳) و استفاده از فنون هسته‌ای از جمله راهکارهای مفید در کاهش تولید و انتشار گاز گلخانه‌ای نیتروزاکساید از خاک می‌باشند. بازدارنده‌های نیترات سازی پاسخ آنزیمی برای مرحله اول نیترات سازی (اکسیداسیون NH_4^+ به NO_2^-) را غیرفعال می‌کنند. استفاده از این مواد با کاهش میزان نیترات سازی و متعاقباً سوبسترا برای نیترات زدایی، ممکن است منجر به کاهش انتشار نیتروز اکساید از ۳۰ تا ۵۰ درصد شود (هورفانو و همکاران، ۲۰۱۵). بازدارنده‌های نیترات سازی در دامنه وسیعی از شرایط کشاورزی- اقلیمی استفاده می‌شوند (گیلسانز و همکاران، ۲۰۱۶). محدودیت اصلی برای اعمال بازدارنده‌های نیترات سازی افزایش هزینه‌های کوددهی می‌باشد (تیمیلسنا و همکاران، ۲۰۱۵)؛ اما این می‌تواند به وسیله افزایش باروری محصول جبران شود (آبالوس و همکاران، ۲۰۱۴a). افزایش بالقوه در کارایی استفاده از نیتروژن محصول ممکن است هدررفت نیتروژن را کاهش و بنابراین میزان نیتروژن شیمیایی مصرفی و هزینه‌های کوددهی را کاهش دهد (آبالوس و همکاران، ۲۰۱۴a). بازدارنده‌های نیترات سازی همچنین به عنوان یک راهکار مهم برای کاهش انتشار نیتروز اکساید از کودهای شیمیایی نیتروژنه قلمداد می‌شوند (زاناتا و همکاران، ۲۰۱۰). بازدارنده‌های اوره‌آز از طریق بازدارندگی فعالیت آنزیم اوره‌آز در خاک، تبدیل اوره به آمونیوم را کاهش می‌دهند. با کاهش غلظت آمونیوم در محلول خاک قابلیت انتشار آمونیاک نیز کاهش می‌یابد (ساگار و همکاران، ۲۰۱۳). بازدارنده‌های اوره‌آز با جلوگیری موقت از فعالیت آنزیم اوره‌آز، آزادسازی نیتروژن در آب و خاک را کنترل نموده و در نتیجه منجر به همزمانی بهتر بین نیتروژن و تقاضای محصول می‌گردند که در نهایت باعث بهبود کارایی مصرف نیتروژن و کاهش هدررفت آن

[1] Nitrification Inhibitors (NIS)
[2] Urease Inhibitors (UIS)
[3] Biochar

بفرم‌های گازی می‌گردد (ساگار و همکاران، ۲۰۱۳). استفاده از کودهای شیمیایی آهسته‌رهش یک راهکار مهم برای کاهش انتشار نیتروز اکساید ایجاد شده به وسیله کودهای نیتروژنه می‌باشد، چون این کودها عناصر غذایی را به صورت آهسته آزاد می‌کنند (شاویو، ۲۰۰۱).

از آنجایی که رطوبت خاک و بویژه درصد منافذ پر از آب از عوامل کلیدی تأثیرگذار بر هدررفت نیتروز اکساید از خاک می‌باشد (گارسیا-مارکو و همکاران، ۲۰۱۴)، از این رو استفاده از روش‌های مناسب آبیاری قابلیت تقلیل نیتروز اکساید را دارا می‌باشند (گاردیا و همکاران، ۲۰۱۶). آبیاری می‌تواند انتشار نیتروز اکساید را در مقایسه با عدم آبیاری به وسیله افزایش فراهمی آب خاک، فعالیت میکروبی، معدنی شدن کربن و نیتروژن و تنفس افزایش دهد (ساینجو و همکاران، ۲۰۱۰). انتشار نیتروز اکساید در خاک‌های غرقابی به خاطر آبیاری بیش از حد و یا بارندگی، از طریق نیترات زدایی افزایش می‌یابد (اسنایدر و اسلاتون، ۲۰۰۱). مقادیر کمتر آب بکاربرده شده در آبیاری قطره‌ای زیر سطحی یا رو سطحی از طریق دفعات آبیاری زیاد، نواحی خشک و مرطوبی را در خاک ایجاد می‌کند و در کل رطوبت خاک را کاهش و شرایط را برای نیترات سازی نسبت به نیترات زدایی مطلوب نموده و انتشار نیتروز اکساید را کاهش می‌دهد (سانچز-مارتین و همکاران، ۲۰۱۰a). ذغال زیستی یک محصول غنی از کربن است که به وسیله تجزیه گرمایی ماده آلی تحت شرایط منابع محدود اکسیژن و دمای کمتر از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد تولید می‌شود (لهمن و همکاران، ۲۰۰۶). ذغال زیستی با هدف استفاده در خاک تولید می‌شود (لهمن و همکاران، ۲۰۰۶). تحقیقات اخیر نشان داده است که زغال زیستی ممکن است انتشار نیتروز اکساید را از خاک‌های کشاورزی کاهش دهد. ساز و کارهای متعددی در مورد علت کاهش انتشار نیتروز اکساید در اثر استفاده از زغال زیستی گزارش شده است. بسیاری از محققین جذب آمونیوم توسط سطوح دارای بار منفی زغال زیستی و از این طریق کاهش پتانسیل برای نیترات سازی را به عنوان یک ساز و کار موثر در کاهش نیتروز اکساید گزارش کرده‌اند (فلبر و همکاران، ۲۰۱۴). نگهداری نیترات به وسیله زغال زیستی و در نتیجه کاهش نیترات زدایی نیز به عنوان یک ساز و کار بالقوه پیشنهاد شده است که نیترات ممکن است توسط زغال زیستی از طریق تبادل آنیونی (کامیاما، ۲۰۱۲)، نگهداری در منافذ زغال زیستی (پریندرگاست- میلر و همکاران، ۲۰۱۱)، یا پیوند پل کاتیونی (موخرجی، ۲۰۱۱) نگهداشته شود. تغییر خصوصیات فیزیکی خاک شامل تهویه و جرم مخصوص ظاهری به وسیله زغال زیستی یکی دیگر از ساز و کارهای پیشنهاد شده است که منجر به کاهش انتشار نیتروز اکساید می‌گردد (روگوسکا و همکاران، ۲۰۱۱). قلیائیت زیاد حاصل از خاکستر ذغال زیستی و در نتیجه افزایش pH باعث کاهش نیترات زدایی شده و منجر به تبدیل نیتروزاکساید به دی نیتروژن از طریق نیترات زدایی می‌گردد (وان زویتن و همکاران، ۲۰۱۰) بیان شده است. علاوه بر این، کایولا و همکاران (۲۰۱۳) اعلام کردند که زغال زیستی به عنوان حامل الکترون، به حرکت الکترون‌ها به باکتری‌های احیا کننده نیتروز اکساید کمک نموده و از این طریق، احیاء نیتروز اکساید به دی نیتروژن را افزایش می‌دهد. استفاده بهینه از کودهای شیمیایی نیتروژنی (میزان و زمان کاربرد) و همین طور انتخاب دقیق نوع کود استفاده شده، برای کاهش انتشار نیتروز اکساید و افزایش کارایی و کاهش نیتروژن اضافی استفاده شده در خاک ضروری است (سانز-کوبنا و همکاران، ۲۰۱۶). بهترین اقدامات مدیریتی[1] (BMP) در استفاده از کودهای شیمیایی نیتروژنی به منظور کاهش انتشار نیتروز اکساید در جدول ۴ آورده شده است.

[1] Best Management Practices (BMP)

جدول ۳- سهم عوامل مدیریتی در کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای نیتروزاکساید در سامانه‌های کشاورزی (سانز-کوبنا و همکاران، ۲۰۱۷)

مدیریت زراعی	راهکار کاهشی	درصد کاهش
کوددهی بهینه	تنظیم کوددهی متناسب با نیاز محصول	۳۰-۵۰
	کودآبیاری	۳۰-۵۰
	جایگزینی کودهای شیمیایی با کوددهای دامی	۲۰-۵۰
استفاده از کودهای دامی و مایع	تزریق کود دامی مایع	۱۰
	ترکیب نمودن سریع کوددامی با خاک پس از کاربرد	۱۰
استفاده از بازدارنده‌ها	استفاده از بازدارنده‌های نیترات سازی	۳۰-۵۰
	استفاده از بازدارنده‌های اوره آز	۳۰-۶۰
بکارگیری تناوب زراعی و محصولات پوششی	محصولات پوششی	۱۰
اصلاح روش آبیاری	فناوری‌های نوین آبیاری	۵۰-۷۰
استفاده از بقایای گیاهی و فرآورده‌های صنعتی زراعی	خاکپوش بقایای گیاهی	۵۰-۷۰
	ترکیب نمودن بقایای گیاهی با خاک	۵۰-۷۰
	استفاده از فرآورده‌های جانبی	۵۰-۷۰
کاربرد بیوچار	استفاده از بیوچار	۵۰

جدول ۴- بهترین عملیات مدیریتی کود شیمیایی نیتروژن‌دار برای کاهش انتشار نیتروز اکساید از خاک‌ها

بهترین عملیات مدیریتی	مرجع
کاربرد به موقع کود نیتروژن به تناسب توانایی محصول برای استفاده کارآتر از آن	آگولرا و همکاران (۲۰۱۳b)
کاربرد یکنواخت کود نیتروژن و حیوانی و اجتناب از استفاده در خاک های یخزده و غرقاب	گرانلی (۱۹۹۴)
تقسیط کود شیمیایی اوره برای کاهش تصاعد آمونیاک و انتشار نیتروز اکساید	دی کلین و همکاران (۲۰۰۱)
تزریق کود دامی مایع یا ترکیب سریع کود دامی جامد به درون خاک‌ها به وسیله شخم	وان درزاگ و همکاران (۲۰۱۱)
ساخت امکانات ذخیره‌سازی (برای فضولات حیوانی) با هوادهی مناسب و مدیریت رطوبت	دی کلین و همکاران (۲۰۰۱)
پایین نگه داشتن غلظت نیترات در خاک در فصل غیرزراعی	دی کلین و همکاران (۲۰۰۱)
اجتناب از آیش مزارع با کاشت محصولات پاییزه و شخم سریع و کاشت محصولات جدید	سانگیثا و همکاران (۲۰۰۹)
کم خاک‌ورزی در علفزارهای دائمی به منظور ایجاد پوشش در انتهای فصل رشد	پترسن و همکاران (۲۰۱۱)
کاهش مصرف کود شیمیایی و یا چرای شدید در پاییز در خاک‌های علفزار	انجمن بین المللی تغذیه گیاهان[1] (۲۰۱۲)
اجتناب از تراکم خاک و فرسایش در اراضی کشاورزی	یامولکی و جارویس (۲۰۰۲)

اندازه‌گیری‌های ایزوتوپ پایدار نیز اطلاعاتی را در مورد فرآیندهای کشاورزی فراهم می‌کند که در صورت استفاده از روش‌های مرسوم دست‌یابی به این اطلاعات امکانپذیر نیست. استفاده از این روش در انتخاب و اجرای عملیات زراعی مطلوب و همچنین راهکارهای مدیریتی مناسب در جلوگیری یا کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مفید می‌باشد. از آنجایی که به طور معمول ۲۵ تا ۵۰ درصد کودهای شیمیایی نیتروژنه مصرفی در سامانه گیاه- خاک هدر می‌رود از این رو با بکارگیری عملیات مدیریتی بهتر، پتانسیل قابل توجهی برای کاهش انتشار نیتروز اکساید و دیگر ترکیبات نیتروژن وجود دارد (هالوارسون و همکاران، ۲۰۱۴). اندازه‌گیری‌های ایزوتوپ پایدار[2] دارای مزیت‌هایی نسبت به تکنیک‌های غیر هسته‌ای در جهت شناسایی اثرات روش‌های مدیریتی مختلف بر انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. انتشار نیتروز اکساید از خاک با استفاده از کروماتوگرافی گاز[3] (GC) انجام می‌گیرد ولی این روش قادر به تشخیص منشأ انتشار نیتروز اکساید (نیترات زدایی یا نیترات سازی) نمی‌باشد و این تنها به وسیله اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های پایدار امکانپذیر است. تاکنون چندین روش برای شناسایی منشأ تولید نیتروز اکساید از طریق مسیرهای تولید آن توسعه یافته است. بیشتر این روش‌ها بیان می‌کنند که نیتروز اکساید یا از نیترات‌سازی و یا از نیترات زدایی

1 International Plant Nutrition Institute (IPNI)
2 Stable Isotopes
3 Gas Chromatography (GC)

حاصل می‌شود. روش‌های ایزوتوپی منشأ نیتروز اکساید را شناسایی نموده و سهم هر یک از این فرآیندها در افزایش نیتروز اکساید متصاعد شده در اتمسفر را مشخص می‌کند (سوتکا و همکاران، ۲۰۰۶). همچنین این روش قادر به تشخیص انتشار نیتروز اکساید حاصل از نیتروژن موجود در کود شیمیایی استفاده شده یا نیتروژن خاک می‌باشد. روش‌های ایزوتوپی براساس ایزوتوپ‌های پایدار ^{18}O و ^{15}N هستند و می‌توانند به طور وسیعی به فراوانی طبیعی[1] و روش‌های غنی‌سازی[2] تمایز پیدا کنند. لینزمیر و همکاران (۲۰۰۱) دریافتند که با استفاده از اندازه‌گیری‌های N^{15} در نیتروز اکساید انتشار یافته مشخص گردید که ۴۰-۱۰ درصد آن مربوط به کود شیمیایی نیتروژن و ۹۰-۶۰ درصد مربوط به نیتروژن خاک بود.

پیشنهادهای ترویجی

هدف اصلی این تحقیق ارائه راهکارهای مطلوب مدیریت زراعی به منظور کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای نیتروزاکساید از خاک می‌باشد. به این منظور در ابتدا به ساز و کارهای تشکیل و انتشار این گاز گلخانه‌ای و همین طور عوامل تأثیر گذار بر آن پرداخته شد و در ادامه روش‌های مطلوب مدیریت زراعی به منظور کاهش انتشار این گاز گلخانه‌ای بیان گردید. نگهداری بقایای محصول در خاک به جای سوزاندن و خارج نمودن آن‌ها، استفاده از روش‌های نوین خاک‌ورزی حفاظتی به جای خاک‌ورزی مرسوم و همین‌طور گنجاندن محصولات لگوم در تناوب از جمله راهکارهای موثر در کاهش انتشار نیتروز اکساید هستند. بازدارنده‌های نیترات سازی، بازدارنده‌های اوره‌آز و کودهای آهسته‌رهش منجر به همزمانی بهتر بین نیتروژن و تقاضای محصول، کاهش آلودگی‌های زیست محیطی و در نهایت باعث بهبود کارایی مصرف نیتروژن و کاهش هدررفت آن بفرم های گازی از قبیل نیتروزاکساید می‌گردند. بکارگیری روش‌های نوین آبیاری از قبیل آبیاری قطره‌ای و کودآبیاری نیز باعث افزایش کارایی استفاده از نیتروژن و کاهش انتشار نیتروز اکساید می شود. استفاده بهینه از کودهای شیمیایی نیتروژنی، تقسیط کود به جای استفاده یکباره آن، جایگذاری کودهای آلی درون خاک به جای کاربرد سطحی آن نیز از جمله بهترین اقدامات مدیریتی هستند که پتانسیل قابل توجهی برای کاهش انتشار نیتروز اکساید را دارا می‌باشند. فناوری‌های هسته‌ای نیز به جهت تشخیص منشأ انتشار نیتروز اکساید (نیترات سازی یا نیترات زدایی) اهمیت قابل ملاحظه‌ای در انتخاب و اجرای عملیات زراعی مطلوب و جلوگیری از انتشار این گاز گلخانه‌ای دارد؛ بنابراین بکارگیری و عملیاتی نمودن راهکارهای ارائه شده در این مقاله به عنوان رهیافتی مهم در جهت کاهش انتشار گاز گلخانه ای نیتروزاکساید و در نتیجه جلوگیری از پدیده گرمایش جهانی پیشنهاد می‌گردد.

فهرست منابع

1. Abalos, D., S, Jeffery., A, Sanz-Cobena., G, Guardia., and A.Vallejo. 2014a. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency. Agriculture, Ecosystems & Environment. 189: 136-144.
2. Aguilera, E., L, Lassaletta., A, Sanz-Cobena., J, Garnier., and A. Vallejo. 2013b. The potential of organic fertilizers and water management to reduce N_2O emissions in Mediterranean climate cropping systems. A review. Agriculture, Ecosystems & Environment. 164:32-52.
3. Akiyama, H., X, Yan., and K.Yagi. 2010. Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N2O and NO emissions from agricultural soils: meta-analysis. Global Change Biology. 16(6): 1837-1846.
4. Baggs, E. M., J, Chebii., and J. K. Ndufa. 2006. A short-term investigation of trace gas emissions following tillage and no-tillage of agroforestry residues in western Kenya. Soil and Tillage Research. 90(1-2): 69-76.

[1] Natural Abundance

[2] Enrichment Techniques

5. Baggs, E. M., R. M, Rees., K. A, Smith., and A. J. A. Vinten. 2000. Nitrous oxide emission from soils after incorporating crop residues. Soil use and management. 16(2): 82-87.
6. Bessou, C., B, Mary., J, Leonard., M, Roussel., E, Grehan., and B. Gabrielle. 2010. Modelling soil compaction impacts on nitrous oxide emissions in arable fields. European Journal of Soil Science. 61(3): 348-363.
7. Boizard, H., G, Richard., J, Roger-Estrade., C, Dürr., and J. Boiffin. 2002. Cumulative effects of cropping systems on the structure of the tilled layer in northern France. Soil and Tillage Research. 64(1-2): 149-164.
8. Bremner, J. M. 1997. Sources of nitrous oxide in soils. Nutrient cycling in Agroeco systems. 49(1-3): 7-16.
9. Brentrup, F., J, Kusters., J, Lammel., and H. Kuhlmann. 2000. Methods to estimate on-field nitrogen emissions from crop production as an input to LCA studies in the agricultural sector. The international journal of life cycle assessment. 5(6): 349.
10. Cameron, K. C., H. J, Di., and J. L. Moir. 2013. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. Annals of Applied Biology. 162(2): 145-173.
11. Castellano, M. J., J. P, Schmidt., J. P, Kaye., C, Walker., C. B, Graham., H, Lin., and C. J. Dell. 2010. Hydrological and biogeochemical controls on the timing and magnitude of nitrous oxide flux across an agricultural landscape. Global Change Biology. 16(10): 2711-2720.
12. Cayuela, M. L., M. A, Sánchez-Monedero., A, Roig., K, Hanley., A, Enders., and J. Lehmann. 2013. Biochar and denitrification in soils: when, how much and why does biochar reduce N 2 O emissions?. Scientific reports. 3: 1732.
13. Chapuis-Lardy, L. Y. D. I. E., N, Wrage., A, Metay, J. L, CHOTTE., and M. Bernoux. 2007. Soils, a sink for N_2O? A review. Global Change Biology. 13(1): 1-17.
14. Cha-un, N., A, Chidthaisong., K, Yagi., S, Sudo., and S.Towprayoon. 2017. Greenhouse gas emissions, soil carbon sequestration and crop yields in a rain-fed rice field with crop rotation management. Agriculture, ecosystems & environment. 237: 109-120.
15. Davidson, E. A., and W. T. Swank. 1986. Environmental parameters regulating gaseous nitrogen losses from two forested ecosystems via nitrification and denitrification. Applied and Environmental Microbiology. 52(6): 1287-1292.
16. de Klein, C. A., R. R, Sherlock., K. C, Cameron., and T. J. van der Weerden. 2001. Nitrous oxide emissions from agricultural soils in New Zealand—a review of current knowledge and directions for future research. Journal of the Royal Society of New Zealand. 31(3): 543-574.
17. Denman, K. L., A, Chidthaisong., P, Ciais., P. M, Cox., R. E, Dickinson., D, Hauglustaine., .. P. L. D. S. and Dias. 2007. Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. International Panel on Climate Change. 499-587.
18. Eichner, M. J. 1990. Nitrous oxide emissions from fertilized soils: summary of available data. Journal of environmental quality. 19(2): 272-280.
19. FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture. 2018. Standard Operating Procedure for Gas Flux Measurement.
20. Felber, R., J, Leifeld., J, Horak., and A. Neftel. 2014. Nitrous oxide emission reduction with greenwaste biochar: comparison of laboratory and field experiments. European Journal of Soil Science. 65(1): 128-138.
21. Fernandez, F. G., R. E, Terry., and E. G. Coronel. 2015. Nitrous oxide emissions from anhydrous ammonia, urea, and polymer-coated urea in Illinois cornfields. Journal of environmental quality. 44(2): 415-422.
22. Garcia-Marco, S., S. R, Ravella., D, Chadwick., A, Vallejo., A. S, Gregory., and L. M. Cardenas. 2014. Ranking factors affecting emissions of GHG from incubated agricultural soils. European journal of soil science. 65(4): 573-583.
23. Giacomini, S. J., C. P, Jantalia., C, Aita., S. S, Urquiaga, and B. J. R. Alves. 2006. Nitrous oxide emissions following pig slurry application in soil under no-tillage system. Pesquisa Agropecuaria Brasileira. 41(11): 1653-166.
24. Gilsanz, C., D, Baez., T. H, Misselbrook., M. S, Dhanoa., and L. M. Cardenas. 2016. Development of emission factors and efficiency of two nitrification inhibitors, DCD and DMPP. Agriculture, Ecosystems & Environment. 216: 1-8.

25. Gomes, J., C, Bayer., F, de Souza Costa., M, de Cassia Piccolo., J. A, Zanatta., F. C. B, Vieira., and J. Six. 2009. Soil nitrous oxide emissions in long-term cover crops-based rotations under subtropical climate. Soil and Tillage Research. 106(1): 36-44.
26. Granli, T. 1994. Nitrous oxide from agriculture. Norwegian Journal of Agricultural Sciences. 12: 128.
27. Groffman, P. M. 1987. Nitrification and denitrification in soil: a comparison of enzyme assay, incubation and enumeration methods. Plant and soil. 97(3): 445-450.
28. Groffman, P. M., E. A, Davidson., and S. Seitzinger. 2009. New approaches to modeling denitrification. Biogeochemistry. 93(1-2): 1-5.
29. Guardia, G., A, Tellez-Rio., S, Garcia-Marco., D, Martin-Lammerding., J. L, Tenorio., M. A, Ibanez, and A.Vallejo. 2016. Effect of tillage and crop (cereal versus legume) on greenhouse gas emissions and Global Warming Potential in a non-irrigated Mediterranean field. Agriculture, ecosystems & environment. 221:187-197.
30. Halvorson, A. D., C. S, Snyder, A. D, Blaylock., and S. J. Del Grosso. 2014. Enhanced-efficiency nitrogen fertilizers: Potential role in nitrous oxide emission mitigation. Agronomy Journal. 106(2): 715-722.
31. Hellebrand, H. J., V, Scholz., and J. Kern. 2008. Fertiliser induced nitrous oxide emissions during energy crop cultivation on loamy sand soils. Atmospheric Environment. 42(36): 8403-8411.
32. Houghton, J. (2005). Reports on Progress in Physics. Global warming. 68: 1343-1403.
33. Huérfano, X., T, Fuertes-Mendizabal., M. K, Dunabeitia., C, González-Murua., J. M, Estavillo., and S. Menéndez. 2015. Splitting the application of 3, 4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP): Influence on greenhouse gases emissions and wheat yield and quality under humid Mediterranean conditions. European Journal of Agronomy. 64: 47-57.
34. International Plant Nutrition Institute (IPNI) (2012). 4R Plant Nutrition : A manual for improving the management of plant nutrition, North American version. In: Bruuslema, et al. (eds.), International Plant Nutrition Institute, Norcross, GA, USA.
35. Jensen, E. S., M. B, Peoples., R. M, Boddey., P. M, Gresshoff., H, Hauggaard-Nielsen., B. J, Alves., and M. J. Morrison. 2012. Legumes for mitigation of climate change and the provision of feedstock for biofuels and biorefineries. A review. Agronomy for sustainable development. 32(2): 329-364.
36. Kameyama, K., T, Miyamoto., T, Shiono., and Y. Shinogi. 2012. Influence of sugarcane bagasse-derived biochar application on nitrate leaching in calcaric dark red soil. Journal of Environmental Quality. 41(4): 1131-1137.
37. Lal, R. 2007. World soils and global issues. Soil & tillage research.
38. Lehmann, J., J, Gaunt., and M. Rondon. 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems–a review. Mitigation and adaptation strategies for global change. 11(2): 403-427.
39. Linzmeier, W., R, Gutser., and U. Schmidhalter. 2001. Nitrous oxide emission from soil and from a nitrogen-15-labelled fertilizer with the new nitrification inhibitor 3, 4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP). Biology and Fertility of Soils. 34(2): 103-108.
40. Liu, C., K, Wang., S, Meng., X, Zheng., Z, Zhou., S, Han.,... and Z. Yang. 2011. Effects of irrigation, fertilization and crop straw management on nitrous oxide and nitric oxide emissions from a wheat–maize rotation field in northern China. Agriculture, Ecosystems & Environment. 140(1-2): 226-233.
41. Liu, X. J., A. R, Mosier., A. D, Halvorson., and F. S. Zhang. 2005. Tillage and nitrogen application effects on nitrous and nitric oxide emissions from irrigated corn fields. Plant and Soil. 276(1-2): 235-249.
42. Mukherjee, A., A. R, Zimmerman., and W. Harris. 2011. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. Geoderma. 163(3-4): 247-255.
43. Nawaz, A., R, Lal., R. K, Shrestha., and M. Farooq. 2017. Mulching Affects Soil Properties and Greenhouse Gas Emissions Under Long-Term No-Till and Plough-Till Systems in Alfisol of Central Ohio. Land Degradation & Development. 28(2): 673-681.
44. Oertel, C., J, Matschullat., K, Zurba., F, Zimmermann., and S. Erasmi. 2016. Greenhouse gas emissions from soils—A review. Chemie der Erde-Geochemistry. 76(3): 327-352.

45. Petersen, S. O., J. K, Mutegi., E. M, Hansen., and L. J. Munkholm. 2011. Tillage effects on N_2O emissions as influenced by a winter cover crop. Soil Biology and Biochemistry. 43(7): 1509-1517.
46. Prendergast-Miller, M. T., M, Duvall., and S. P. Sohi. 2011. Localisation of nitrate in the rhizosphere of biochar-amended soils. Soil biology and Biochemistry. 43(11): 2243-2246.
47. Reay, D. S., E. A, Davidson., K. A, Smith., P, Smith., J. M, Melillo., F, Dentener., and P. J. Crutzen. 2012. Global agriculture and nitrous oxide emissions. Nature climate change. 2(6): 410.
48. Regina, K., and L. Alakukku. 2010. Greenhouse gas fluxes in varying soils types under conventional and no-tillage practices. Soil and Tillage Research. 109(2): 144-152.
49. Rogovska, N., D, Laird., R, Cruse. P, Fleming., T, Parkin., and D. Meek. 2011. Impact of biochar on manure carbon stabilization and greenhouse gas emissions. Soil Science Society of American Journal. 75(3): 871-879.
50. Saggar, S., J, Singh., D. L, Giltrap., M, Zaman., J, Luo., M, Rollo.,... and T. J. Van der Weerden. 2013. Quantification of reductions in ammonia emissions from fertiliser urea and animal urine in grazed pastures with urease inhibitors for agriculture inventory: New Zealand as a case study. Science of the Total Environment. 465:136-146.
51. Sainju, U. M., W. B, Stevens., T, Caesar-TonThat., and J. D. Jabro. 2010. Land use and management practices impact on plant biomass carbon and soil carbon dioxide emission. Soil Science Society of America Journal. 74(5): 1613-1622.
52. Sanchez-Martín, L., A, Meijide., L, Garcia-Torres., and A. Vallejo. 2010a. Combination of drip irrigation and organic fertilizer for mitigating emissions of nitrogen oxides in semiarid climate. Agriculture, ecosystems & environment. 137(1-2): 99-107.
53. Sangeetha, M., R, Jayakumar., and C. Bharathi. 2009. Nitrous oxide emission from soils–a review. Agricultural Reviews. 30(2): 94-107.
54. Sanz-Cobena, A., D, Abalos., A, Meijide., L, Sanchez-Martin., and A.Vallejo. 2016. Soil moisture determines the effectiveness of two urease inhibitors to decrease N_2O emission. Mitigation and adaptation strategies for global change. 21(7): 1131-1144.
55. Sanz-Cobena, A., S, García-Marco., M, Quemada., J. L, Gabriel., P, Almendros., and A. Vallejo. 2014. Do cover crops enhance N_2O, CO_2 or CH_4 emissions from soil in Mediterranean arable systems?. Science of the total environment. 466: 164-174.
56. Sanz-Cobena, A., L, Lassaletta., E, Aguilera., A, Del Prado., J, Garnier., G, Billen.,... and D. Plaza-Bonilla. 2017. Strategies for greenhouse gas emissions mitigation in Mediterranean agriculture: A review. Agriculture, ecosystems & environment. 238: 5-24.
57. Shaviv, A. 2001. Advances in controlled-release fertilizers. 1-49.
58. Signor, D., C. E. P, Cerri., and R. Conant. 2013. N_2O emissions due to nitrogen fertilizer applications in two regions of sugarcane cultivation in Brazil. Environmental Research Letters. 8(1): 015013.
59. Smith, K. A., T, Ball., F, Conen., K. E, Dobbie., J, Massheder., and A. Rey. 2018. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. European journal of soil science. 69(1): 10-20.
60. Snyder, C.S., and N.A. Slaton. 2001. Rice production in the United States: An overview. Better Crops. 85(3): 3-7.
61. Stevens, R. J., and R.J. Laughlin. 1998. Measurement of nitrous oxide and di-nitrogen emissions from agricultural soils. Nutrient Cycling in Agroecosystems. 52(2-3):131-139.
62. Sutka, R. L., N. E, Ostrom., P. H, Ostrom., J. A, Breznak., H, Gandhi., A. J, Pitt., and F. Li. 2006. Distinguishing nitrous oxide production from nitrification and denitrification on the basis of isotopomer abundances. Applied Environmental Microbiology. 72(1): 638-644.
63. Tan, I. Y., H. M, van Es, Duxbury., J. M, Melkonian., J. J, Schindelbeck., R. R, Geohring., L. D., ... and B. N. Moebius. 2009. Single-event nitrous oxide losses under maize production as affected by soil type, tillage, rotation, and fertilization. Soil and Tillage Research. 102(1): 19-26.
64. Tellez-Rio, A., S, García-Marco., M, Navas., E, Lopez-Solanilla., R. M, Rees., J. L, Tenorio., and A. Vallejo. 2015. Nitrous oxide and methane emissions from a vetch cropping season are

changed by long-term tillage practices in a Mediterranean agroecosystem. Biology and fertility of soils. 51(1): 77-88.

65. Thomson, A. J., G, Giannopoulos., J, Pretty., E. M, Baggs., and D. J. Richardson. 2012. Biological sources and sinks of nitrous oxide and strategies to mitigate emissions. 1157-1168.
66. Timilsena, Y. P., R, Adhikari., P, Casey., T, Muster., H, Gill., and B. Adhikari. 2015. Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns. Journal of the Science of Food and Agriculture. 95(6): 1131-1142.
67. Tubiello, F. N., M, Salvatore., R. D, Condor Golec., A, Ferrara., S, Rossi., R, Biancalani,... and A. Flammini. 2014. Agriculture, forestry and other land use emissions by sources and removals by sinks. Statistics Division, Food and Agriculture Organization. Rome.
68. Van Zwieten, L., S, Kimber., S, Morris., A, Downie., E, Berger., J, Rust., and C. Scheer. 2010. Influence of biochars on flux of N_2O and CO_2 from Ferrosol. Soil Research. 48(7): 555-568.
69. VanderZaag, A. C., S, Jayasundara., and C. Wagner-Riddle. 2011. Strategies to mitigate nitrous oxide emissions from land applied manure. Animal Feed Science and Technology. 166: 464-479.
70. Wang, Y. Y., C. S, Hu., H, Ming., Y. M, Zhang., X. X, Li , W. X, Dong., and O.Oenema. 2013b. Concentration profiles of CH_4, CO_2 and N_2O in soils of a wheat–maize rotation ecosystem in North China Plain, measured weekly over a whole year. Agriculture, ecosystems & environment. 164: 260-272.
71. Yamulki, S., and S. Jarvis. 2002. Short-term effects of tillage and compaction on nitrous oxide, nitric oxide, nitrogen dioxide, methane and carbon dioxide fluxes from grassland. Biology and Fertility of Soils. 36(3): 224-231.
72. Zaman, M., M. L, Nguyen., and S. Saggar. 2008b. N_2O and N_2 emissions from pasture and wetland soils with and without amendments of nitrate, lime and zeolite under laboratory condition. Soil Research. 46(7): 526-534.
73. Zaman, M., M. L, Nguyen., A. J, Gold., P. M, Groffman., D. Q, Kellogg, and R. J. Wilcock. 2008a. Nitrous oxide generation, denitrification, and nitrate removal in a seepage wetland intercepting surface and subsurface flows from a grazed dairy catchment. Soil Research. 46(7): 565-577.
74. Zaman, M., M. L, Nguyen., M, Simek., S, Nawaz., M. J, Khan., M. N, Babar., and S. Zaman. 2012. Emissions of nitrous oxide (N_2O) and di-nitrogen (N_2) from the agricultural landscapes, sources, sinks, and factors affecting N_2O and N_2 ratios. In Greenhouse gases-emission, measurement and management. InTech.1-32.
75. Zanatta, J. A., C, Bayer., F. C, Vieira., J, Gomes., and M. Tomazi. 2010. Nitrous oxide and methane fluxes in South Brazilian Gleysol as affected by nitrogen fertilizers. Revista Brasileira de Ciencia do Solo. 34(5): 1653-1665.
76. Zhang, J., and X. Han. 2008. N_2O emission from the semi-arid ecosystem under mineral fertilizer (urea and superphosphate) and increased precipitation in northern China. Atmospheric Environment. 42(2): 291-302.
77. Zhou, W., T. F, Lv., Y, Chen., A. P, Westby., and W. J. Ren. 2014. Soil physicochemical and biological properties of paddy-upland rotation: a review. The Scientific World Journal, 2014.

A Survey of Agronomic Management Studies Aimed at Mitigating Nitrous Oxide Emissions from Agricultural Soils

M. Mirzaei [1], R. Mirkhani, M. Gorji Anari, and M. Shorafa

Ph.D Student, Department of Soil Science and Engineering, Tehran University, Tehran, Iran. ***mirzaei.morad95@ut.ac.ir***
Senior Researcher, Nuclear Agriculture School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran. ***rmirkhani@aeoi.org.ir***
Professor, Department of Soil Science and Engineering, Tehran University, Tehran, Iran. ***mgorji@ut.ac.ir***
Professor, Department of Soil Science and Engineering, Tehran University, Tehran, Iran. ***mshorafa@ut.ac.ir***

Received: September 2019 and Accepted: January 2020

Abstract

A major concern in our modern world is the emission of the greenhouse gases carbon dioxide (CO_2), nitrous oxide (N_2O), and methane (CH_4) into the atmosphere and their effects on climate change. Due to their significant impacts on carbon and nitrogen dynamics, agricultural activities have both direct and indirect effects on soil greenhouse emissions. Nitrous oxide is a potent greenhouse gas with a global warming potential of 298 times that of carbon dioxide. Most N_2O emissions are agriculturally-induced, occurring due to nitrification and denitrification processes in soils and strongly affected by various environmental and soil management factors. The present review paper attempts to evaluate the capability of different agronomic management practices in mitigating nitrous oxide (N_2O) emissions from agricultural soils. Proper management of crop residues, application of new methods of conservation tillage and irrigation techniques, and inclusion of legume crops in crop rotation programs are reportedly among the measures effective in reducing nitrous oxide emissions. Moreover, the use of nitrification and urease inhibitors as well as sustained-release fertilizers to improve nitrogen use efficiency might lead to reduced nitrous oxide formation and emission. From a different perspective, the use of novel technologies to identify the sources of nitrous oxide is of great importance in the selection and application of proper farm operations aimed at preventing further greenhouse emissions. It is expected that the agronomic management strategies proposed herein might have significant contributions to reducing nitrous oxide emission from soils, abating or preventing global climate change and the associated global warming, and achieving sustainable agricultural production.

Keywords: Agriculture, Climate change, Denitrification, Global warming, Nitrification

[1] Corresponding author: Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Karaj, Iran.