نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴
19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025
مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran
۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

ردیابی سرنوشت اوره در سامانه گیاه–خاک با استفاده از نیتروژن–۱۵ و برآورد تلفات گازی

رایحه میرخانی[۱و۲*]، مهدی شرفاء[۱]، مهسا جباری ملایری[۳]، بهنام ناصریان خیابانی[۲]، گرد درکن[۴]، کریستوف مولر[۵]

[۱] دانشگاه تهران، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی خاک، ایران

[۲] پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای، ایران

[۳] وزارت نیرو، موسسه تحقیقات آب، گروه محیط زیست، ایران

[۴] آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (سایبرزدرف)، آزمایشگاه مدیریت خاک، آب و تغذیه گیاه، اتریش

[۵] مرکز لیبیش برای بوم‌شناسی کشاورزی و پژوهش‌های تأثیرات اقلیمی، دانشگاه یوستوس لیبیش، گیسن، آلمان

*rmirkhani@aeoi.org.ir/rayehemir@gmail.com

چکیده

مدیریت نیتروژن یک کار چالش‌برانگیز است و دستیابی به امنیت غذایی و سازگاری با محیط زیست مستلزم ارزیابی‌های جامع و به‌کارگیری تکنیک‌های نوین است. این پژوهش با بهره‌گیری از تکنیک ایزوتوپی نیتروژن-۱۵ و محاسبه درصد نیتروژن مشتق شده از کود (%Ndff) در مزرعه گندم و در یک خاک آهکی انجام شد و اثر کاربرد اوره و اوره در ترکیب با مهارکننده نیتریفیکاسیون و استفاده از هورمون گیاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. در تیمار ترکیبی، عملکرد دانه و کاه-کلش به ترتیب ۱۵٪ و ۷٪ افزایش یافت. در حالی که %Ndff در گیاه در تیمار اوره ۳۱٪ و در تیمار ترکیبی ۲۶٪ بود و به‌ترتیب حدود ۱۹ و ۱۳ کیلوگرم از کود نیتروژن اضافه شده در خاک باقیمانده بود. راندمان مصرف نیتروژن (NUE) در تیمار ترکیبی به روش تفاضلی ۲۳٪ افزایش و با شاخص %Ndff، ۸٪ کاهش نشان داد. از نیتروژن مصرفی، ۲۷٪ در تیمار اوره و ۳۳٪ در تیمار ترکیبی به‌صورت آمونیاک تصعید شد، در حالی‌که میزان انتشار گاز گلخانه‌ای نیتروزاکساید کمتر از ۰/۵٪ در تیمارها بود. توصیه‌هایی مانند به‌کارگیری مهارکننده‌ها یا هورمون‌ها زمانی معتبرند که منطبق با شرایط اقلیمی و خاکی، ارتقای عملکرد و NUE را هدف قرار دهند و با استفاده از تکنیک‌های نوین و ارزیابی‌های جامع انجام گیرند.

واژگان کلیدی: خاک آهکی، درصد نیتروژن مشتق شده از کود، گندم آبی، مهارکننده نیتریفیکاسیون، هورمون گیاهی

مقدمه

نیتروژن کلیدی‌ترین عنصر غذایی برای پایداری تولید در سامانه‌های زراعی است، اما بخشی بزرگ از کود نیتروژنی پس از مصرف از چرخه گیاه خارج می‌شود و کارایی مصرف جهانی آن پایین است. افزودن کودهای نیتروژنی اگرچه به منظور افزایش عملکرد گیاه انجام می‌شود، اما با دو چالش اساسی همراه است؛ نخست آنکه بخش قابل توجهی از کود در خاک‌های آهکی به دلیل شرایط pH بالا به‌صورت تصعید آمونیاک از دست می‌رود (Pan et al., 2016)، و دوم آنکه ورود مقادیر زیاد نیتروژن معدنی به خاک سبب تشدید فعالیت میکروبی و در نهایت انتشار گاز نیتروزاکساید (N_2O) به‌عنوان یکی از گازهای گلخانه‌ای کلیدی می‌شود (Hergoualc'h et al., 2019). چنین اتلاف‌هایی نه‌تنها راندمان مصرف نیتروژن[۱] (NUE) را کاهش می‌دهد،

[۱] Nitrogen Use Efficiency

بلکه اثرات نامطلوب زیست‌محیطی به‌دنبال دارد (Liu et al., 2020) و ضرورت مدیریت دقیق نیتروژن را برای دستیابی به کشاورزی پایدار برجسته می‌سازد. تکنیک ایزوتوپی نیتروژن-۱۵ راهکاری منحصربه‌فرد برای ردیابی سرنوشت نیتروژن فراهم می‌کند (Liang et al., 2020). در این تکنیک، محاسبه شاخص درصد نیتروژن مشتق شده از کود[۲] (%Ndff) به ما کمک می‌کند، بدون اتکا به تیمار شاهد، درک روشن‌تری از سرنوشت نیتروژن اضافه شده بصورت کود داشته باشیم.

بر این اساس، هدف این پژوهش استفاده از نیتروژن-۱۵ برای تعیین سرنوشت اوره مصرفی در گیاه و خاک و برآورد تلفات گازی نیتروژن در شرایط خاک آهکی بود. استفاده ترکیبی کود اوره پوشش‌دار شده همراه با مهارکننده نیتریفیکاسیون (نیتراپیرین[۳]-NP) و اسپری هورمون گیاهی (اسید جیبرلیک[۴]-GA_3) به‌عنوان رویکردی مطرح شده است که می‌تواند عملکرد گیاهان زراعی مانند گندم و ذرت را افزایش داده و همزمان انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهد (Dawar et al., 2021; Dawar et al., 2022). پرسش اصلی این پژوهش آن است که آیا این ترکیب پیشنهادی علاوه بر افزایش عملکرد محصول، قادر است راندمان مصرف نیتروژن را نیز بهبود بخشد و در مسیر کشاورزی پایدار مؤثر واقع شود؟ برای پاسخ به این پرسش علاوه بر ردیابی نیتروژن در سامانه گیاه و خاک، بررسی دقیق تلفات گازی از مسیر تصعید گاز آمونیاک و انتشار گاز نیتروزاکساید نیز صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

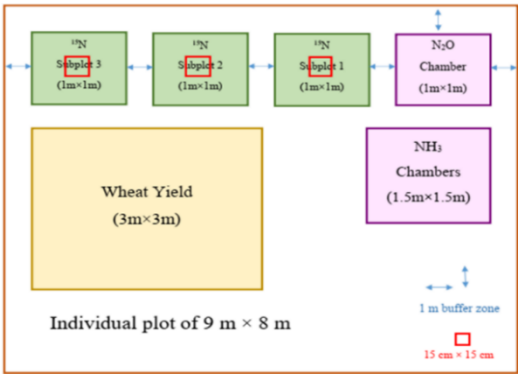
این پژوهش در مزرعه آموزشی و پژوهشی دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران (کرج) و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تیمار و پنج تکرار اجرا شد. تیمارها شامل شاهد (بدون کود نیتروژن)، تیمار اوره و تیمار ترکیبی (اوره پوشش‌دار شده با نیتراپیرین و کاربرد هورمون رشد اسید جیبرلیک) بودند. میزان کود اوره مصرفی در دو تیمار کودی، ۳۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار بود که در سه تقسیط مساوی و در مراحل پنجه‌زنی (GS 21)، طویل شدن ساقه (GS 32) و چکمه‌ای (GS 40) اعمال شدند. محلول‌پاشی GA_3 تنها در یک مرحله پیش از گلدهی (GS 33-34) انجام شد.

[۲] Nitrogen in the plant derived from ^{15}N labeled fertilizer

[۳] Nitrapyrin

[۴] Gibberellic acid

به منظور بررسی شاخص %Ndff و NUE-^{15}N، از روش استفاده از کود نشاندار شده با نیتروژن-۱۵ و طراحی سه میکروپلات اختصاصی برای نیتروژن-۱۵ در داخل هر پلات اصلی استفاده شد. در میکروپلات‌ها، اوره نشاندار شده با نیتروژن-۱۵ با توجه به زمان مصرف کود و با همان میزان مصرف نیتروژن، جایگزین کود اوره معمولی شد. ابعاد هر میکروپلات ۱ متر در ۱ متر بود و بین میکروپلات‌ها فاصله بافری به طول ۱ متر در نظر گرفته شد، تا انتقال نیتروژن-۱۵ به میکروپلات‌های مجاور به حداقل برسد (شکل ۱).



شکل ۱- نمایی از طراحی داخل هر پلات

برای این مطالعه، اوره نشاندار شده با نیتروژن-۱۵ با سطح غنی‌شده ۵/۱۹ اتم درصد اضافه استفاده شد. نمونه‌های گیاه (دانه و کاه-کلش) و خاک پس از برداشت برای اندازه‌گیری درصد نیتروژن و نسبت $^{15}N/^{14}N$ داخل کپسول‌هایی از جنس قلع توزیع شدند و با دستگاه طیف‌سنج جرمی نسبت ایزوتوپی[۵] (IRMS) در آزمایشگاه مدیریت خاک و آب و تغذیه محصول[۶] FAO/IAEA (SWMCN) آنالیز شدند. برای محاسبه %Ndff، نیاز به اندازه‌گیری اتم درصد اضافه نیتروژن-۱۵ در نمونه‌های برداشت شده بود، که این داده‌ها با استفاده از دستگاه IRMS بدست آمد.

$$\%Ndff = \left(\frac{\%^{15}N\ excess\ in\ sample}{\%^{15}N\ excess\ in\ fertilizer}\right) \times 100 \quad (۱)$$

برای تعیین تلفات نیتروژن از مسیر تصعید آمونیاک، از روش محفظه‌های نیمه‌استاتیک[۷] حاوی نوار فوم پلی‌اورتان آغشته به اسید سولفوریک (۱ مول در لیتر) و گلیسرول ۵٪ (V/V) استفاده شد. نوارها به طور روزانه تعویض و میزان آمونیاک جذب شده پس از استخراج و تقطیر به روش کجلدال اندازه‌گیری شد. تلفات تجمعی آمونیاک و در نهایت فاکتور تصعید گاز آمونیاک از مجموع تلفات روزانه در طول دو هفته پس از هر تقسیط کودی برآورد گردید. اندازه‌گیری میزان انتشار گاز N_2O با استفاده از روش محفظه استاتیک اصلاح شده[۸] انجام شد. نمونه‌های گاز در فواصل زمانی مختلف پس از هر تقسیط کود برداشت شده

[۵] Isotope Ratio Mass Spectrometer
[۶] Soil and Water Management and Crop Nutrition
[۷] Semi-static chambers
[8] Modified static chamber method

و غلظت N_2O در نمونه‌ها با استفاده از کروماتوگراف گازی[9] در دانشگاه جاستوس لیبیگ گیسن[10] اندازه‌گیری و در نهایت انتشار تجمعی و فاکتور انتشار محاسبه شد. تجزیه و تحلیل‌های آماری بر اساس طرح بلوک‌های کامل تصادفی و همچنین کنتراست متعامد و آزمون HSD توکی (تفاوت معنی‌دار) برای مقایسه میانگین تیمارها با استفاده از نرم‌افزار SAS (Statistical Analysis System, version 9.4) انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج مربوط به عملکرد نشان داد که اوره به کار رفته در ترکیب با NP و GA_3 اثر معنی‌داری ($p < 0.01$) بر عملکرد دانه و کاه-کلش در مقایسه با دو تیمار دیگر داشت (جدول ۱). تیمار ترکیبی در مقایسه با تیمار اوره، عملکرد دانه را ۱۵٪ و عملکرد کاه-کلش را ۷٪ افزایش داد. با این وجود، درصد نیتروژن در دانه و کاه-کلش تحت تأثیر کاربرد NP و GA_3 قرار نگرفت.

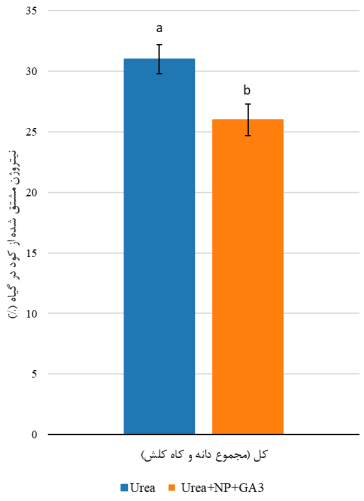
جدول۱- تاثیر تیمارهای آزمایشی بر عملکرد و درصد نیتروژن (میانگین ۵ تکرار ± انحراف معیار)

تیمارها	عملکرد دانه (تن در هکتار)	عملکرد کاه وکلش (تن در هکتار)	درصد نیتروژن دانه	درصد نیتروژن کاه -کلش
تیمار شاهد	۶/۶ ± ۰/۴ c	۹/۶ ± ۰/۴ c	۱/۴ ± ۰/۱	۰/۵ ± ۰/۰
تیمار اوره	۸/۷ ± ۰/۲ b	۱۱/۷ ± ۰/۱ b	۱/۷ ± ۰/۲	۰/۵ ± ۰/۰
تیمار ترکیبی	۱۰/۰ ± ۰/۳ a	۱۲/۵ ± ۰/۱ a	۱/۶ ± ۰/۱	۰/۵ ± ۰/۰

اوره در ترکیب با NP و GA_3 به‌طور معنی‌دار ($p < 0.05$) مقدار کل نیتروژن مشتق شده از کود در گیاه (%Ndff) را تحت تاثیر قرار داد (شکل ۲). %Ndff در تیمار اوره به تنهایی ۳۱٪ و در تیمار ترکیبی کاهش یافته و حدود ۲۶٪ بوده است.

نتایج محاسبه راندمان مصرف نیتروژن (NUE) به دو روش تفاضلی و ایزوتوپی در جدول ۲ نشان داده شده است. مقادیر NUE در صورت استفاده از روش تفاضلی برای تیمار اوره و تیمار ترکیبی به ترتیب ۴۸٪ و ۵۹٪ بود. در صورت استناد به روش تفاضلی برای NUE، بین دو تیمار کودی تفاوت معنی‌دار وجود دارد و اوره در تیمار ترکیبی، NUE را به میزان تقریباً ۲۳٪ افزایش داده است. مقادیر $NUE-^{15}N$ در تیمار کودی اوره و تیمار ترکیبی به ترتیب ۳۸٪ و ۳۵٪ بدست آمد و تفاوت معنی‌داری در این دو تیمار کودی مشاهده نشد. علاوه بر پایین بودن مقادیر NUE در روش ایزوتوپی نسبت به روش تفاضلی، روش ایزوتوپی کاهش ۸ درصدی را در تیمار ترکیبی نشان داد.

[9] Gas Chromatograph
[10] Justus Liebig University (Gießen)



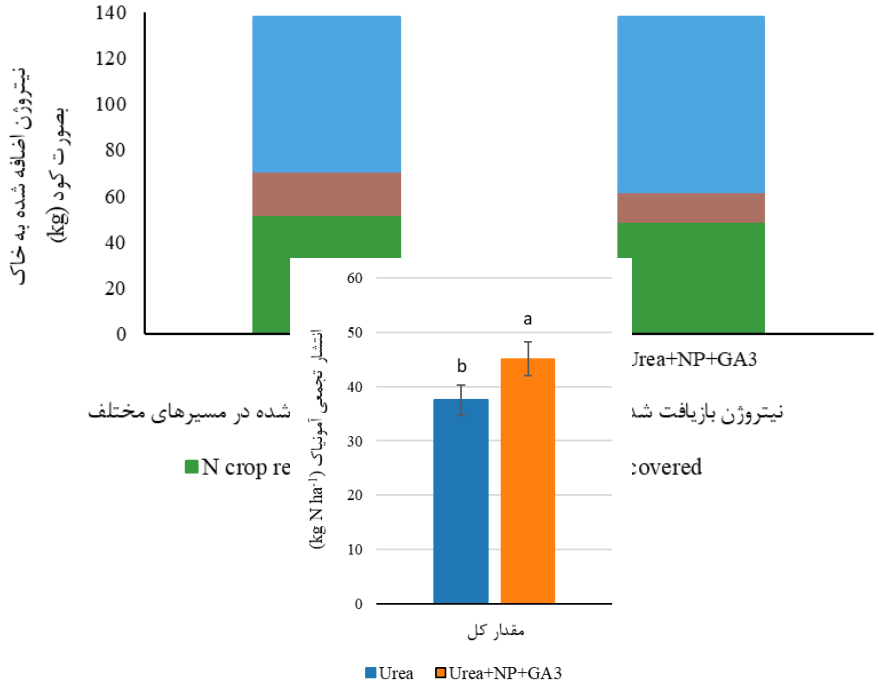
شکل ۲- درصد نیتروژن مشتق شده از کود اوره نشاندار در گیاه (خطوط عمودی انحراف معیار را نشان می‌دهد)

جدول ۲- راندمان مصرف نیتروژن به روش تفاضلی و روش ایزوتوپی (میانگین ۵ تکرار ± انحراف معیار)

تیمارها	راندمان مصرف نیتروژن (روش تفاضلی)	راندمان مصرف نیتروژن روش ایزوتوپی
تیمار شاهد	***	***
تیمار اوره	۴۸ ± ۳ b	۳۸ ± ۳
تیمار ترکیبی	۵۹ ± ۴ a	۳۵ ± ۳

در این مطالعه، ۳۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار، معادل ۱۳۸ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، طی سه تقسیط استفاده شده است. سرنوشت ۱۳۸ کیلوگرم نیتروژن اضافه شده در تیمارهای کودی در شکل ۳ نشان داده شده است. در تیمارهای اوره و ترکیبی به ترتیب حدود ۵۲ و ۴۹ کیلوگرم از نیتروژن اضافه شده بصورت کود توسط اندام هوایی جذب شده است. همچنین به ترتیب حدود ۱۹ و ۱۳ کیلوگرم از کود نیتروژن اضافه شده در تیمار اوره و تیمار ترکیبی در خاک باقیمانده است.

شکل ۳- نیتروژن بازیافت شده از کود اوره مصرفی در گیاه، باقیمانده در خاک و تلف شده در مسیرهای مختلف



میزان انتشار تجمعی آمونیاک ناشی از کاربرد کود در شکل ۴ نشان داده شده است. مقادیر کل نیتروژن متصاعد شده در تیمارهای اوره و ترکیبی به ترتیب برابر با ۳۷/۵ و ۴۵/۷ کیلوگرم نیتروژن در هکتار بوده است و با توجه به کاربرد ۱۳۸ کیلوگرم نیتروژن در هکتار بصورت کود، ضرایب انتشار فاکتور آمونیاک به ترتیب ۲۷٪ و ۳۳٪ برای تیمار اوره و تیمار ترکیبی می‌باشد. به این ترتیب پوشش‌دار کردن کود اوره با NP، باعث افزایش تصعید آمونیاک به میزان تقریباً ۲۲٪ شده است. در این مطالعه، فاکتور انتشار N_2O بعد از اعمال تیمارهای کودی و طی یک بررسی ۱۹۰ روزه بین ۰/۲۳-۰/۴۸ درصد بود.

شکل ۴- انتشار تجمعی آمونیاک در تیمارهای کودی (خطوط عمودی انحراف معیار را نشان می‌دهد)

جدول ۳- تاثیر تیمارهای آزمایشی بر انتشار تجمعی و فاکتور انتشار گاز نیتروزاکساید

تیمارها	انتشار تجمعی N_2O ($kg\ N_2O\text{-}N\ ha^{-1}$)	فاکتور انتشار N_2O (درصد)
تیمار شاهد	۰/۸۰ ± ۰/۰۸ ^{c}	***

تیمار اوره	۱/۴۵ ± ۰/۱۳ a	۰/۴۸
تیمار ترکیبی	۱/۱۱ ± ۰/۱۰ b	۰/۲۳

تیمار ترکیبی موجب افزایش معنی‌دار عملکرد شد و برآورد راندمان مصرف نیتروژن به روش تفاضلی نیز تائیدی بر ارتقاء NUE بود. با این حال، ردیابی ایزوتوپی نیتروژن-۱۵، نشان داد که سهم نیتروژن مشتق‌شده از کود در گیاه و خاک در تیمار ترکیبی کاهش یافته و هم‌زمان تلفات گازی از مسیر تصعید آمونیاک نیز افزایش یافته است. این هم‌گرایی داده‌ها بیانگر آن است که روش ایزوتوپی، در شرایط این مطالعه، درک جامع‌تر و واقع‌بینانه‌تری از راندمان مصرف نیتروژن و سرنوشت کود اضافه شده در سامانه خاک و گیاه فراهم ساخته است.

نتیجه‌گیری

اگرچه مهارکننده‌های نیتریفیکاسیون توسط نهادهای بین‌المللی همچون IPCC به‌عنوان راه‌کاری دوستدار محیط‌زیست معرفی شده و استفاده جهانی از آن‌ها رو به گسترش است، اما توصیه به کارگیری این مواد باید با دقت و متناسب با شرایط خاکی و اقلیمی صورت گیرد. نتایج این مطالعه نشان داد که در خاک‌های آهکی، با وجود آنکه انتشارگاز گلخانه‌ای N_2O به‌طور متوسط حدود نصف مقادیر گزارش‌شده در مناطق معتدل است، میزان تصعید آمونیاک در این شرایط بیش از دو برابر خاک‌های مناطق معتدل می‌باشد. از این رو، استفاده از این قبیل مهارکننده‌ها می‌تواند همچون یک شمشیر دولبه عمل کرده و با وجود کمک به کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای نیتروزاکساید، منجر به افزایش تلفات گازی از مسیر تصعید گاز آمونیاک گردد. بنابراین، پیش از توصیه گسترده این ترکیبات در خاک‌های آهکی، لازم است ارزیابی‌های جامع‌تر در ابعاد اقتصادی و زیست‌محیطی انجام گیرد تا اطمینان حاصل شود که به‌کارگیری آن‌ها واقعاً همسو با اصول کشاورزی پایدار خواهد بود.

منابع

Dawar, K., Khan, A., Sardar, K., Fahad, S., Saud, S., Datta, R., Danish, S. (2021). Effects of the nitrification inhibitor nitrapyrin and mulch on N_2O emission and fertilizer use efficiency using ^{15}N tracing techniques. Science of the Total Environment, 757,143739. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143739.

Dawar, K., Rahman, U., Alam, S.S., Tariq, M., Khan, A., Fahad, S., Datta, R., Danish, S., Saud, S., Noor, M. (2022). Nitrification inhibitor and plant growth regulators improve wheat yield and nitrogen use efficiency. Journal of plant growth regulation, 41, 216-226. https://doi.org/10.1007/s00344-020-10295-x.

Hergoualc'h, K., Akiyama, H., Bernoux, M., Chirinda, N., del Prado, A., Kasimir, A., MacDonald, J.D., Ogle, S.M., Regina, K., Van der Weerden, T.J. (2019). N2O Emissions from Managed Soils, and CO2 Emissions from Lime and Urea Application. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Permanent link to cite or share this item: https://hdl.handle.net/10568/112778.

Liang, H., Shen, P., Kong, X., Liao, Y., Liu, Y., Wen, X. (2020). Optimal nitrogen practice in winter wheat-summer maize rotation affecting the fates of ^{15}N-labeled fertilizer. Agronomy, 10, 521. https://doi.org/10.3390/agronomy10040521.

Liu, L., Zhang, X., Xu, W., Liu, X., Li, Y., Wei, J., Wang, Z., Lu, X. (2020). Ammonia volatilization as the major nitrogen loss pathway in dryland agro-ecosystems. Environmental Pollution, 265, 114862. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114862.
Pan, B., Lam, S.K., Mosier, A., Luo, Y., Chen, D. (2016). Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: a global synthesis. Agriculture, Ecosystems & Environment, 232, 283-289. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.019.

Abstract

Tracing the fate of urea in the soil–plant system using ^{15}N isotope and assessing gaseous losses

Rayehe Mirkhani [1, 2*], Mehdi Shorafa [1], Mahsa Jabari [3], Behnam Naserian Khiabani [2], Gerd Dercon [4], Christoph Müller [5]
[1] Department of Soil Science Engineering, University of Tehran, Iran
[2] Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Iran
[3] Ministry of Energy, Water Research Institute, Environment Department, Iran
[4] Soil and Water Management and Crop Nutrition Laboratory, Joint FAO/IAEA Centre of Nuclear Techniques in Food and Agriculture, Seibersdorf, Austria
[5] Liebig Centre for Agroecology and Climate Impact Research, Justus Liebig University, Giessen, Germany
*Corresponding author: rmirkhani@aeoi.org.ir/rayehemir@gmail.com

Effective nitrogen management is essential to balance food production with environmental sustainability. In this study, ^{15}N isotopic tracing was employed to quantify the nitrogen in the plant derived from ^{15}N labeled fertilizer in irrigated wheat grown on calcareous soil, and to evaluate the effects of urea applied alone or in combination with a nitrification inhibitor and a plant growth hormone. The combined treatment increased grain and straw yields by 15% and 7%, respectively. %Ndff was 31% under urea, declining to 26% under the combined treatment, with approximately 19 and 13 kg N ha^{-1} of fertilizer-derived nitrogen retained in the soil, respectively. Nitrogen use efficiency (NUE) estimated using the difference method improved by 23% under the combined treatment, whereas NUE based on %Ndff decreased by 8%. Ammonia volatilization accounted for ~27% of applied N under urea and ~33% under the combined treatment, while nitrous oxide emissions remained below 0.5% across treatments. Recommendations such as the use of inhibitors or hormones are justified only when aligned with soil and climatic conditions, explicitly targeting yield improvement and NUE enhancement, and supported by advanced techniques and comprehensive evaluation.

Keywords: Calcareous soil; Nitrogen in the plant derived from ^{15}N labeled fertilizer (%Ndff); Irrigated wheat; Nitrification inhibitor; Plant growth hormone