

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2024.31035

稻麦复种模式下氮肥与稻秸互作对小麦产量和 N₂O 排放影响及推荐施肥研究

陆汝华¹ 王文轩² 曹 强¹ 田永超¹ 朱 艳¹ 曹卫星¹ 刘小军^{1,*}

¹ 南京农业大学国家信息农业工程技术中心 / 智慧农业教育部工程研究中心 / 农业农村部农作物系统分析与决策重点实验室 / 江苏省信息农业重点实验室, 江苏南京 210095; ² 人文与社会发展学院, 江苏南京 210095

摘 要: 优化氮肥施用和秸秆还田技术为途径的农业管理措施被认为是提升农业可持续性的有效手段, 然而当前关于氮肥和秸秆还田对小麦产量和 N₂O 排放影响的研究仍十分有限。为此, 本研究基于 2000—2022 年发表的关于长江中下游流域氮肥和秸秆投入下小麦产量和 N₂O 排放变化的文献, 运用随机森林建模, 定量分析氮肥和秸秆还田对小麦产量和 N₂O 排放的影响, 并结合情景设置进行了特定地点的小麦产量和 N₂O 排放模拟, 同时评估了碳排放强度(CEE)和净生态系统经济效益(NEEB)。结果表明, 建立的区域尺度小麦产量与 N₂O 排放对氮秸互作响应的随机森林模型, 验证结果 R² 分别为 0.66 和 0.65, RMSE 分别为 0.70 和 1.11。结果表明施氮量和土壤有机质是影响小麦产量和 N₂O 排放的重要因素。综合来看, 达到最大产量所需的氮肥量为 208~212 kg hm⁻², 达到最小 CEE 所需的氮肥量为 113~130 kg hm⁻², 达到最高的 NEEB 所需的氮肥量为 202~205 kg hm⁻², 其中在 6.75 t hm⁻² 的秸秆投入下施用 202 kg hm⁻² 的氮肥可以获得最高的生态收益 1.37 万元。优化氮肥和秸秆投入具备减少作物碳排放强度并获得最大净生态环境效益的潜力。

关键词: 施氮量; 秸秆投入; 小麦; N₂O; 排放模型; 推荐施肥

Research on the effects of nitrogen fertilizer and rice straw return on wheat yield and N₂O emission and recommended fertilization under rice-wheat rotation pattern

LU Ru-Hua¹, WANG Wen-Xuan², CAO Qiang¹, TIAN Yong-Chao¹, ZHU Yan¹, CAO Wei-Xing¹, and LIU Xiao-Jun^{1,*}

¹ National Engineering and Technology Center for Information Agriculture, Nanjing Agricultural University / Engineering and Research Center for Smart Agriculture, Ministry of Education / Key Laboratory for Crop System Analysis and Decision Making, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / Jiangsu Key Laboratory for Information Agriculture, Nanjing 210095, Jiangsu, China; ² College of Humanities & Social Development, Nanjing 210095, Jiangsu, China

Abstract: The optimization of agricultural practices such as nitrogen and straw input may be an effective option for maintaining environmental sustainability. However, previous studies on the effects of nitrogen and straw inputs on wheat growth and N₂O emission reduction were limited. Therefore, the present study was based on the literature published from 2000 to 2022 about wheat yield and N₂O emissions under different nitrogen and straw inputs amendment in the middle and lower reaches of the Yangtze River, a random forest (RF) model of wheat yield and N₂O emission was constructed. And the influence of nitrogen and straw inputs on wheat yield and N₂O emissions was quantified. Based on the developed model, wheat yield and N₂O emission simulations at the experimental site were carried out in combination with scenario settings, and the carbon emission intensity (CEE) and net ecosystem economic benefits (NEEB) were evaluated. The results were as follow: On the regional scale, an RF

本研究由国家重点研发计划项目(2022YFD2301402), 南京农业大学三亚研究院(NAUSY-ZD01)和国家自然科学基金项目(32071903)资助。This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFD2301402), the Hainan Institute of Nanjing Agricultural University (NAUSY-ZD01), and the National Natural Science Foundation of China (32071903).

* 通信作者(Corresponding author): 刘小军, E-mail: liuxj@njau.edu.cn, Tel: 025-84396804

第一作者联系方式: E-mail: 2020101177@njau.edu.cn

Received (收稿日期): 2023-06-04; Accepted (接受日期): 2023-10-23; Published online (网络出版日期): 2023-11-30.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20231129.1348.004>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

model was established for the response of wheat yield and N_2O emission to the application of nitrogen fertilizer and straw returning. The verification results were R^2 of 0.66 and 0.65, and RMSE of 0.70 and 1.11, respectively. Quantifying the importance of independent variables showed that nitrogen application rate and soil organic matter were essential for yield and N_2O models. For nitrogen fertilizer and straw management under different targets, the amount of nitrogen fertilizer required to achieve the highest yield was 208–212 kg hm^{-2} , the amount of nitrogen fertilizer required to achieve the minimum CEE was 113–130 kg hm^{-2} , and the amount of nitrogen fertilizer required to achieve the highest NEEB was 202–205 kg hm^{-2} , of which the highest ecological benefit of 13,669.18 CHY could be obtained by applying 202 kg hm^{-2} nitrogen fertilizer under the straw input of 6.75 t hm^{-2} . Our results indicate that optimizing nitrogen fertilizer and straw inputs has the potential to reduce crop carbon emission intensity and maximize net ecological and environmental benefits.

Keywords: nitrogen application rate; straw inputs; wheat; N_2O ; emission model; fertilizer recommendation

小麦对粮食安全做出了巨大贡献^[1], 提供了人类饮食中约 20% 的热量和蛋白质^[2]。农业作为一氧化二氮(N_2O)的最大排放源, 占全球人为 N_2O 排放量的 56%~81%, 对全球气候变化具有重大影响^[3]。农田管理实践(如秸秆投入和施肥)会影响土壤中的生化和水文条件, 进而调节作物生长和 N_2O 排放^[4]。长江中下游地区是我国重要的小麦主产区, 研究不同的氮肥和秸秆投入如何影响小麦产量和 N_2O 排放对于制定区域农业可持续施肥管理至关重要。

作物产量的增加依赖于基因型、环境因素(包括气候和土壤条件)和农业管理之间复杂的相互作用。近年来, 作物生产依赖于越来越多的氮肥投入来追求更高的产量, 但作物生长速度和产量的增加并没有与氮肥施用量的增加相匹配^[5]。与此同时, 施用尿素等含氮化肥在维持作物产量的同时, 也为 N_2O 的合成提供了基质。已有研究表明, 氮素含量与直接 N_2O 排放之间呈线性函数关系或者非线性关系^[6-8], 这都表明不断增加氮肥施用量会导致 N_2O 排放量迅速增加^[9]。此外, 秸秆还田对土壤 N_2O 排放的影响也十分复杂, 秸秆还田显著影响生物地球化学 C 和 N 循环, 从而影响 N-痕量气体的产生和排放, 作物秸秆滞留可能通过影响相对 C 和 N 的可用性以及在土壤通气状态调节土壤 N_2O 通量方面发挥多种作用^[10-11]。一般来说, 秸秆还田会刺激 N_2O 的产生, 因为作物秸秆分解为硝化菌/反硝化菌提供了底物, 促进了反硝化进程^[12]。此外, 秸秆还田对 N_2O 排放有负面影响或没有显著影响^[13]。最近的研究表明, 氮肥与秸秆配合使用是提高氮素利用效率和土壤肥力的有效策略^[14], 因为组合施用可以克服施用单一肥料的缺点, 可以提高作物产量, 提高土壤肥力并缓解温室气体排放。Huang 等^[15]的研究发现, 麦玉轮作中优化的氮肥施用量与秸秆还田相结合, 大大增加了产量和降低了产量尺度的 N_2O 排放。Akhtar 等^[16]的研究也发现 9000 kg hm^{-2} 的玉米秸秆还田配合减氮 20%被认为是提高作物产量和减少土壤 N_2O

排放的可行性技术。在长江中下游地区, 氮肥和秸秆合理配施, 是否可以平衡土壤碳氮, 改善农田生态效应, 并显著提高产量, 是本文的主要研究目标。

小麦产量形成和 N_2O 排放通常受到区域尺度下不同土壤、气象和管理措施的综合影响, 而秸秆和氮肥投入广泛应用的前提, 是揭示其不同地区的小麦增产与 N_2O 减排效应的驱动因素, 才能更好地权衡小麦的养分需求和环境影响并进行指导施肥管理, 从而实现 N_2O 排放减少和作物产量稳定。目前探索产量措施响应的田间试验通常只设置固定的氮肥和秸秆投入梯度和选用特定地点的小麦品种, 因此结果很难外推到所有的生长环境中。基于大型数据集的统计方法可以更全面地了解产量-投入关系, 机器学习(Machine learning, ML)模型提供了一种强大的方法来研究作物管理和生长环境之间的复杂相互作用, 因为它们能够基于集成学习方法处理预测变量与目标变量之间的复杂关系, 被广泛应用在 N_2O 排放量预测^[17]、产量预测^[18]和施肥推荐^[19]。然而, 目前鲜少关于应用 ML 模型预测氮秸互作下的麦田 N_2O 排放和产量并用于推荐施肥措施报道。鉴于此, 本研究首先基于随机森林(Random forest, RF)算法对长江中下游区域不同氮肥和秸秆投入对小麦产量和 N_2O 排放变化响应进行建模、验证和评估。然后利用验证的模型和不同氮肥和秸秆投入情景设置对小麦产量和 N_2O 累积排放量进行估计, 并评估不同氮肥和秸秆投入下的碳排放强度(Carbon emission efficiency, CEE)和净生态系统经济效益(Net ecosystem economic benefits, NEEB), 为根据不同目标的环境友好型的氮肥和秸秆投入措施提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究检索了 2000—2022 年在 Web of Science 和中国知网关于稻麦轮作区下麦田 N_2O 排放、氮肥处理、秸秆投入、产量的中英文论文。以下搜索词

作为关键词:“秸秆还田”“氮肥”“ N_2O ”“温室气体”“产量”,“Straw return”“nitrogen fertilizer”“greenhouse gas”“GHG”“GWP”。不同的关键词之间使用“AND”表明并列关系。符合标准的研究被纳入并进行分析:(1)所有摘录文献必须是在野外开展的田间试验,且用的是静态箱-气相色谱法;(2)还田的秸秆必须是水稻秸秆且麦田研究必须在长江中下游地区;(3)文献的结果都可以直接从表或图或文本中获取。

搜集相关文献后,需要对录入的数据进行异常值剔除的预处理,数据库从超过 323 篇下载的文献中,筛选了 30 篇符合标准的文献^[20-49],涉及产量观测数据为 80 条,氧化亚氮观测数据为 184 条。文献数据地点主要分布在江苏省、安徽省和湖北省。其中,江苏省的数据地点主要包括:南京市(32.0°N, 118.8°E)、(32.48°N, 118.6°E)、(31.93°N, 118.98°E),镇江市(31.97°N, 119.3°E),扬州市(32.58°N, 119.2°E)、(32.58°N, 119.7°E), (苏州市(31.4°N, 120.42°E)、(31.53°N, 120.7°E)、(31.55°N, 120.62°E)、(31.53°N, 120.92°E)、(31.53°N, 120.68°E),南通市(31.68°N, 121.9°E),无锡市(31.45°N, 120.42°E)。安徽省的数据点主要包括:滁州市(32.0°N, 118.13°E),芜湖市(31.15°N, 118.13°E),巢湖市(31.65°N, 117.68°E)、(31.6S°N, 117.67°E)。湖北省的数据点主要包括:黄冈市(30.02°N, 115.57°E),荆门市(30.88°N, 112.8°E),襄阳市(32.02°N, 112.07°E)。

1.2 数据分析

1.2.1 CEE 和 NEEB 的计算 CEE 是单位产量下的碳排放强度变化,又称碳排放强度,由于碳排放强度变化的计量单元主要是旱地作物化肥施用引起的 N_2O 直接排放,CEE 计算如下:

$$CEE = N_2O/Yield \quad (1)$$

N_2O 表示麦田 N_2O 累积排放量并转化为二氧化碳当量($kg CO_2\text{-eq } hm^{-2}$), Yield 表示小麦产量($kg hm^{-2}$)。

净生态系统经济预算(NEEB)是根据粮食产量成本、农业投入成本和碳成本计算出来的^[50],如下所示:

$$NEEB = \text{粮食产量成本} - \text{农业活动成本} - \text{碳成本} \quad (2)$$

在这项研究中,粮食产量成本是根据当前粮食价格(小麦, 2286 CHY t^{-1})和粮食产量计算得出的^[51]。农业活动成本包括氮肥成本($3.6 CHY kg^{-1} N$)^[52],碳成本是当前碳贸易价格($56.38 CHY t^{-1} CO_2\text{-eq}$)和 GWP 的乘积^[53]。在本研究中,不考虑机械耕作、小麦

种子、其他肥料、灌溉、化学农药(除草剂+杀虫剂+杀菌剂)、秸秆处理和机械收割等的农业活动成本。

1.2.2 皮尔逊相关分析 利用 IBM SPSS Statistic 26 进行皮尔逊相关分析,本研究的重点是使用皮尔逊相关系数(公式 3)分析 2 个变量之间的关系,其值介于-1 和+1 之间。

$$r = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中, n 是总样本大小, x_i 和 y_i 是用索引 i 的单个样本点, $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 分别表示是样本的平均值。

1.2.3 RF 模型的构建 RF 是经典的监督学习算法,本研究中的 RF 算法使用 Python 软件(版本 3.8)实现,并通过计算每个特征的平均不纯度减少量对特征重要性进行排序^[54]。

1.2.4 模型的检验与评价 本研究采用标准差(Standard deviation, SD)和变异系数(Coefficient of variation, CV)被用来表征总试验数据的分离分散程度。CV 越大,则所有数据包含的可能性就越多。SD 和 CV 的计算如下:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{i=1}^K (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

$$CV = \frac{SD}{\text{Mean}} \quad (5)$$

本研究通过比较实际值和模拟值之间 1:1 线的决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE),并结合 1:1 图来描述模型对小麦生产力和温室气体排放的预测效果。具体计算如下:

$$R^2 = r^2 = \frac{\left(\frac{\sum_i^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_i^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_i^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2}{1} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (O_i - P_i)^2}{n-1}} \quad (7)$$

式中, $\bar{x}$ 为总样本的均值, K 是样本的数量。公式(6)和(7)中 O_i 表示实测数值, P_i 表示模拟数值, $\bar{O}$ 表示实测数值的均值, $\bar{P}$ 表示模拟数值的均值。

1.3 数据处理

利用 Microsoft Excel 2016 软件建立数据库, Origin pro 2022 软件绘制图表和数值化。

2 结果与分析

2.1 区域尺度小麦产量和 N₂O 排放效应模型的构建

2.1.1 N₂O 排放与模型输入参数之间的关系 从表 1 发现, 长江中下游搜集的数据中 pH、土壤有机质(Soil organic matter, SOM)、年降雨量(LT_Prec)、土壤总氮(Total nitrogen, TN)和 N₂O 排放量(Cum N₂O)的 CV 值均较大, 其中 N₂O 排放量的 CV 值达到 81.82%。这些结果表明数据可以代表实际生产场景中的大多数可能情况, 因此数据可用于分析更通用的小麦 N₂O 排放情况。通过皮尔逊相关分析, 从相关系数可以看出, 在区域尺度上, N₂O 排放量与施氮量(N rate)、施肥次数(Split N)和年平均温度(LT_Temp)呈显著正相关, 相关系数在 0.16~0.23 之间, 随着施氮量的增加, 麦田引起的 N₂O 排放越多。其中 pH 和土壤有机质(SOM)与 N₂O 排放量呈现负相关, 相关系数分别为-0.20 和-0.29。然而年降雨量(LT_Prec)与 N₂O 排放量之间的相关性并不明显, 这可能与年降雨量与当季降雨量之间存在误差, 增加了对 N₂O 排放的响应的不确定性。在长江中下游地区中, 秸秆还田量对的小麦 N₂O 排放量会有一定的抑制作用, 但并不显著(图 1)。

2.1.2 产量和 N₂O 排放效应模型构建与验证

基于收集的文献数据和 RF 方法, 将数据集根据无秸秆投入($S=0$)、小于 4.50 t hm⁻² 的秸秆投入

($0<S<4.5$)和大于 4.50 t hm⁻² 的秸秆投入($S>4.50$)进行划分, 构建了小麦产量和 N₂O 排放效应模型。结果表明, RF 模型可以预测不同区域氮肥和秸秆投入下的小麦产量和累积 N₂O 排放量。小麦产量模型训练和测试集 R^2 介于 0.66~0.96, RMSE 介于 0.35~0.70 t hm⁻², 验证结果达到显著水平($P<0.001$)。产量在各秸秆投入下差异不大。对于温室气体而言, N₂O 模型训练和测试集 R^2 介于 0.65~0.85, RMSE 介于 0.81~1.11 kg hm⁻², 验证结果达到显著水平($P<0.001$), N₂O 累积排放随着秸秆投入的增加而增加(图 2)。

2.1.3 特征重要性分析 本研究中小麦产量和 N₂O 排放效应模型分别考虑不同的自变量, 不同自变量对模型重要性的量化结果如图 3 所示。经过模型选择, 对应于产量模型, N rate 对于产量-RF 模型的平均不纯度减少最多, 达到 0.43, 而 SOM、LT_Prec、LT_Temp 对于产量-RF 模型的平均不纯度减少达到 0.12~0.14, 在区域尺度上 N rate、SOM、LT_Prec、LT_Temp 和土壤 pH 是影响产量形成的最重要变量。对于 N₂O 模型, SOM、N rate 和 TN 对于 N₂O-RF 模型的平均不纯度减少达到 0.17~0.22, 而 LT_Prec、LT_Temp 在 N₂O-RF 模型的贡献度较低, 并不能区分作物种植的季节性, 很大程度上弱化了不同种植季节之间的温度和降水量差异。

表 1 田间管理措施、生态因子与 N₂O 排放量的描述统计

Table 1 Descriptive statistics of field management practices, ecological factors and N₂O emission

指标 Indicator	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准偏差 SD	标准差系数 CV (%)
N rate	0	300	181.89	82.29	45.24
Split N	1	3	2.63	0.50	19.19
Straw rate	0	8.25	1.45	2.40	164.83
pH	5.88	8.09	6.79	0.64	9.43
SOM (g kg ⁻¹)	11.00	57.90	20.42	7.78	38.10
TN (g kg ⁻¹)	0.51	2.90	1.53	0.46	30.06
LT_Temp (°C)	15.10	19.95	15.96	0.46	2.89
LT_Prec (mm)	750.00	1890.30	1117.32	174.31	15.60
Cum_N ₂ O (kg hm ⁻²)	0.13	7.74	2.42	1.98	81.82

SOM: 土壤有机质; TN: 土壤总氮; LT_Temp: 年平均温度; LT_Prec: 年平均降雨量; Cum_N₂O: N₂O 排放量。

SOM: soil organic matter; TN: total nitrogen; LT_Temp: the annual average temperature; LT_Prec: the annual average precipitation; Cum_N₂O: cumulative N₂O emission.

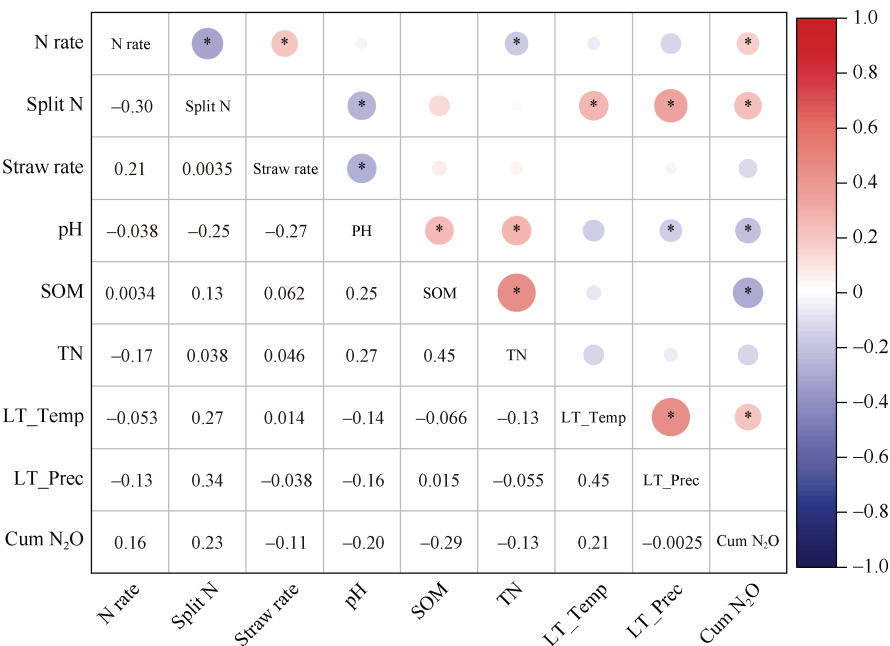


图 1 田间管理措施、生态因子与 N₂O 排放量之间的皮尔逊相关性热图
Fig. 1 Pearson correlation heatmap of field management practices, ecological factors and N₂O emission
缩写同表 1。Abbreviations are the same as these given in Table 1.

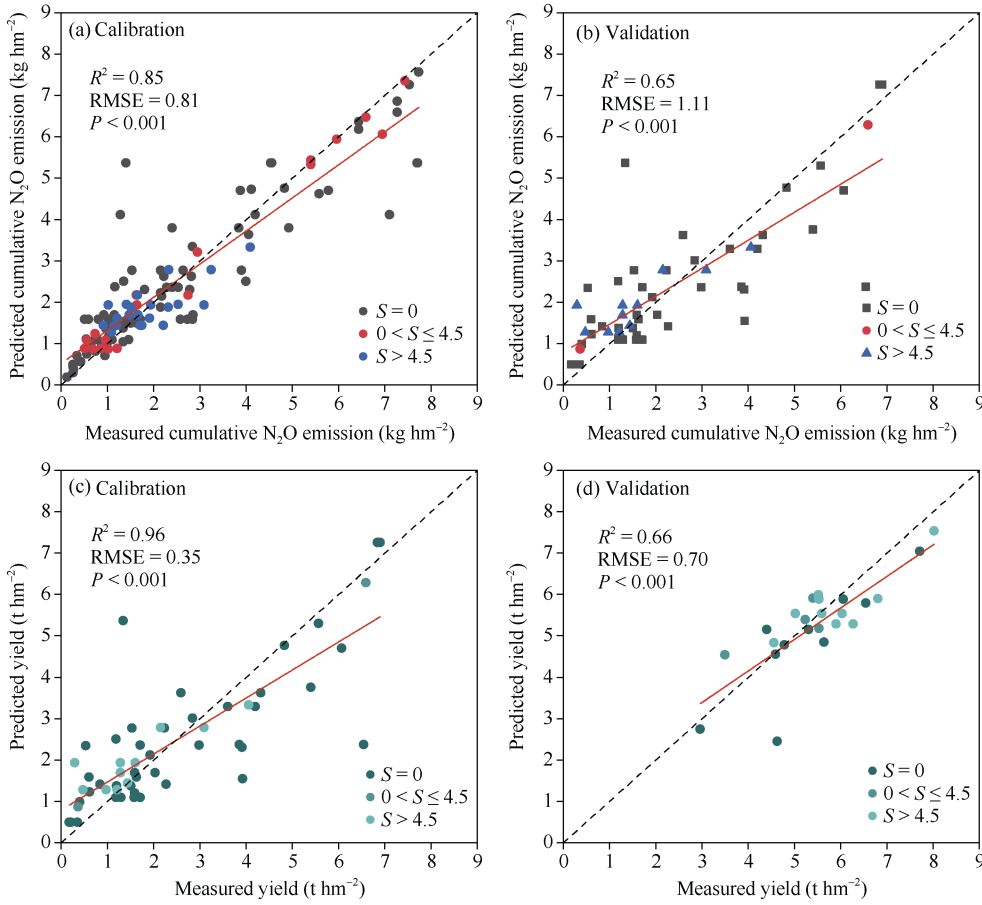


图 2 N₂O 排放和小麦产量模型的训练与验证结果
Fig. 2 Calibrations and validations of N₂O emission and wheat yield RF models

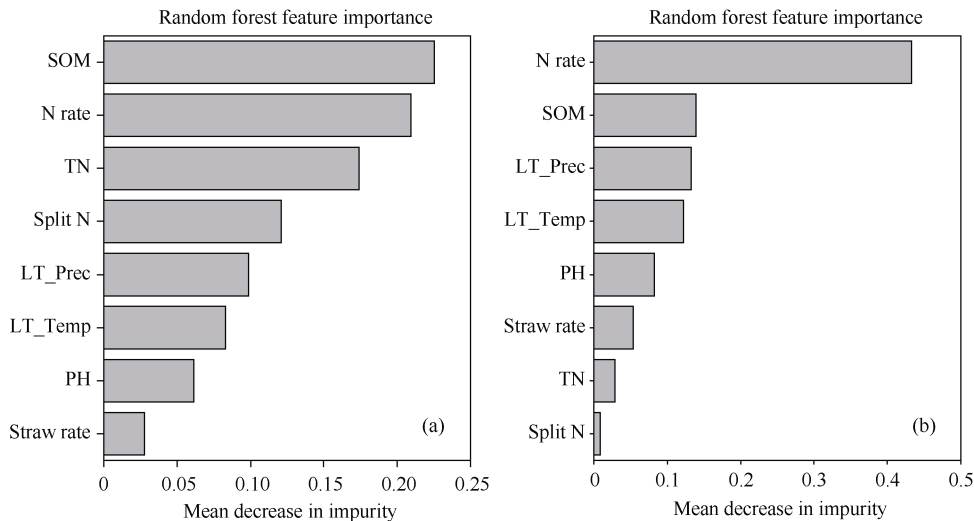


图 3 各个模型中的特征重要性

Fig. 3 Independent importance of each RF model

a: 一氧化二氮; b: 产量。缩写同表 1。a, N₂O; b, yield. Abbreviations are the same as those given in Table 1.

2.2 不同目标下的氮肥和秸秆投入措施推荐

2.2.1 不同情景下的小麦产量和 N₂O 排放量模拟及函数构建 通过在如皋的田间试验中获取实测数据(SOM=13.34 g kg⁻¹, TN=1.5 g kg⁻¹, Split N=2 次、LT_Prec =1145.28 mm、LT_Temp =17.49℃、pH 8.2), 并设置秸秆投入水平为 0、2.25、4.50 和 6.75 t hm⁻² 和氮肥投入水平为 0 到 300 kg hm⁻² 作为情景参数, 基于所构建的产量和 N₂O 效应模型对该地不同情景下的小麦产量和 N₂O 累积排放量进行估算, 并对反演的产量采用一元二次方程进行拟合以及对反演的 N₂O 累积排放量采用线性方程和指数方程进行拟合, 拟合方程如表 2 所示, 其中 N₂O 排放与施氮量之间的方程的斜率随秸秆投入先增加后减少, 表现秸秆的增加可能会对矿化氮进行固持, 减少了 N₂O 排放生成的底物。而产量函数中负值的系数随着秸秆投入而降低, 秸秆投入在较低氮肥投入下会抑制小麦的前期生长从而抑制了产量形成, 而第二个系数为正值, 则随着秸秆投入的增加而逐渐递增, 表现为

随施肥量增加, 可以有效地满足小麦生长所需要的氮素营养, 从而形成合理的群体保证产量, 并且随着施肥量的增加, 秸秆后期的养分效益逐渐显现出来, 表现出函数在较大的氮肥投入下产量会表现为秸秆投入高于无秸秆投入, 并且一定程度上秸秆的养分可以替代化学肥料的养分用于生产。

2.2.2 面向不同目标下的氮肥和秸秆投入推荐及效益评估 基于表 2 的模型计算出不同秸秆还田量和氮肥投入下的 CEE 和 NEEB 如图 4 所示, 对于 N₂O 排放随氮肥投入无论是呈现线性增长还是指数增长, 在不同的秸秆投入下, 小麦的 CEE 变化均表现为随氮肥量增加而呈现先降低后升高的趋势, 在 CEE 评估下, 不同秸秆投入下施用氮肥以 113~130 kg hm⁻² 为边界线, 低于该氮肥投入水平 N₂O 排放的增加会低于产量的增加, 直到 CEE 的边界施氮量, 后面继续增加施肥, 产量的增长速度是低于 N₂O 排放量的增长的, 表现为 N₂O 排放-氮肥投入呈现凹形的增长曲线, 而产量-氮肥投入呈现凸性的增长曲

表 2 不同秸秆还田量情景的 N₂O 累积排放和小麦产量模拟模型

Table 2 Simulation model of cumulative N₂O emission and wheat yield under different scenarios of straw returning to the field

处理 Treatment	N ₂ O 累积排放量 Cumulative N ₂ O emissions (kg hm ⁻²)		产量 Yield (t hm ⁻²)
	LINEAR	EXPONENT	
S0	$y = 0.0077x + 1.0226$	$y = 1.1281e^{0.004x}$	$y = -0.1111x^2 + 47.077x + 1506.0$
S2.25	$y = 0.0078x + 1.1241$	$y = 1.2180e^{0.0038x}$	$y = -0.1117x^2 + 46.961x + 1526.2$
S4.50	$y = 0.0071x + 1.2914$	$y = 1.3763e^{0.0033x}$	$y = -0.1197x^2 + 49.842x + 1489.9$
S6.75	$y = 0.0069x + 1.2907$	$y = 1.3727e^{0.0033x}$	$y = -0.1205x^2 + 50.221x + 1491.4$

S0、S2.25、S4.50、S6.75 分别代表秸秆投入水平为 0、2.25、4.50 和 6.75 t hm⁻²。

S0, S2.25, S4.50, and S6.75 represent the straw input levels of 0, 2.25, 4.50, and 6.75 t hm⁻², respectively.

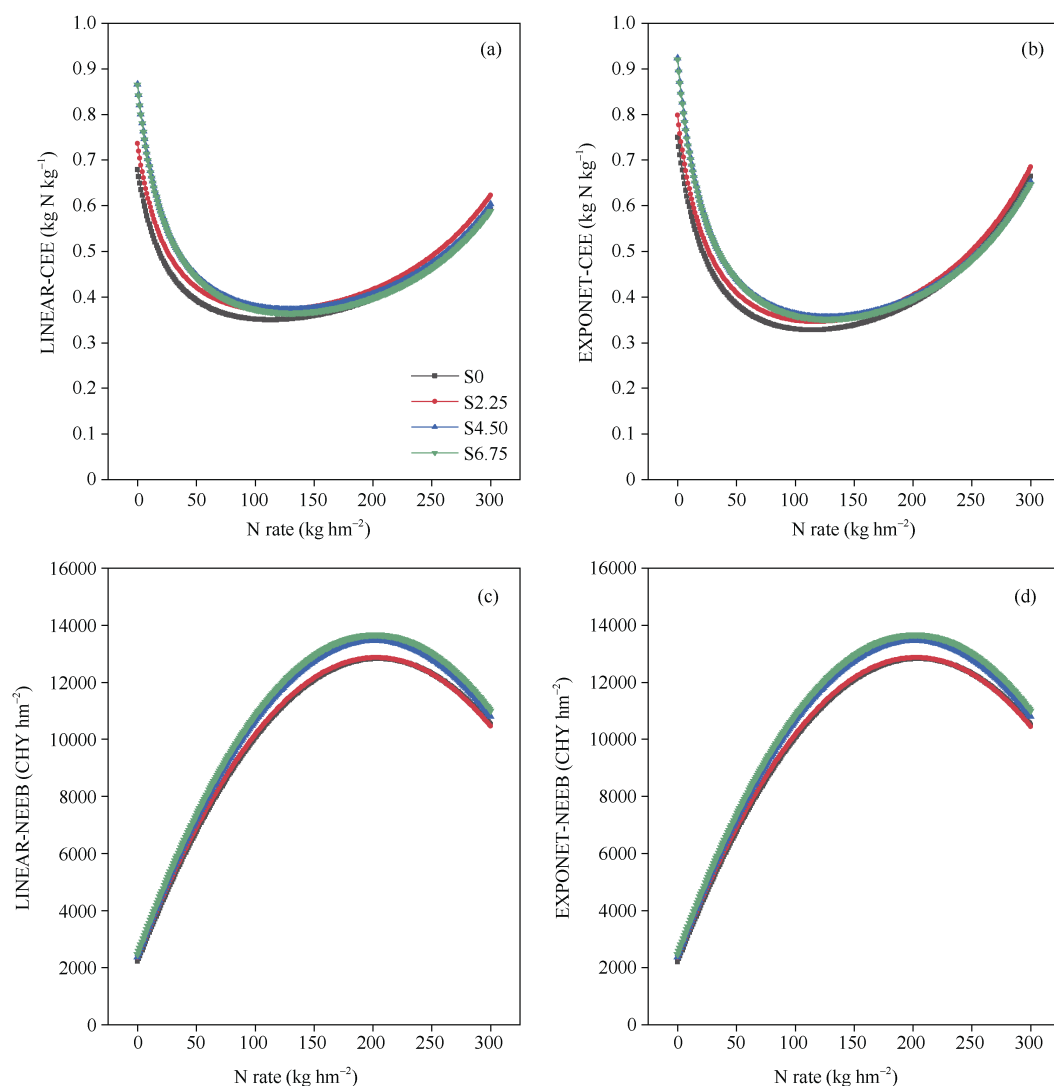


图 4 不同氮肥和秸秆投入下的 CEE 和 NEEB 响应

Fig. 4 Response of CEE and NEEB to different N and straw application

处理同表 2。Treatments are the same as those given in Table 2.

表 3 不同目标下小麦施氮量和秸秆量投入及其净生态环境效益

Table 3 Nitrogen and straw inputs of wheat under different targets and their net ecological and environmental benefits

模型 Model	秸秆量 Straw rate (t hm ⁻²)	施氮量 N rate (kg hm ⁻²)	收益 Benefit (CHY)
Yield-max	0	212	12,816.00
	2.25	210	12,851.00
	4.50	208	13,453.00
	6.75	208	13,657.88
CEE-LINEAR	0	113	10,702.22
	2.25	116	10,934.81
	4.50	129	12,029.94
	6.75	130	12,255.24
CEE-EXPONENT	0	114	10,750.49
	2.25	117	10,981.24
	4.50	127	11,951.29
	6.75	127	12,135.69

(续表 3)

模型 Model	秸秆量 Straw rate (t hm ⁻²)	施氮量 N rate (kg hm ⁻²)	收益 Benefit (CHY)
NEEB-LINEAR	0	205	12,829.70
	2.25	203	12,863.29
	4.50	201	13,464.20
	6.75	202	13,669.00
NEEB-EXPONENT	0	205	12,830.40
	2.25	203	12,864.52
	4.50	201	13,464.99
	6.75	202	13,669.18

线。而 NEEB 则表现为先升高后下降的趋势, 这体现出将环境影响通过计算环境经济成本的形式进行考虑, 增加氮肥投入所增加的产量收益是远大于其带来的环境成本, 因此以 NEEB 最佳为目标下推荐氮肥用量更侧重于保证作物产量的稳定, 同时减少了为追求产量最高下施肥所引起的环境影响。从表 3 可以看到, 观察到在不同秸秆投入下产量最高、CEE 最低、NEEB 最高下的氮肥施用量以及经济收益。在 0~6.75 t hm⁻² 的秸秆投入下, 达到产量最高所需的氮肥量为 208~212 kg hm⁻², 并且随秸秆投入的增加, 达到产量最高所需的氮肥量有所下降。在不同的秸秆投入中, 小麦达到 CEE 最低所需氮肥量在 113~130 kg hm⁻², 其净生态收益也是最少的, 而达到最高 NEEB 所需氮肥则在 202~205 kg hm⁻², 其中 6.75 t hm⁻² 的秸秆投入下施用 202 kg hm⁻² 的氮肥可以获得最高的生态收益 13,669.18 元。

3 讨论

3.1 麦田 N₂O 排放的主要驱动因素

麦田的 N₂O 排放受到管理措施(施氮量、秸秆还田、施肥次数)的影响。本研究中, 氮肥施用与 N₂O 排放通量呈现正相关, 同时也是 N₂O-RF 模型中的主要贡献因子。其次, 氮肥的分次施用通常被认为比一次性施用排放更低^[55]。但本研究中 Split N 与 N₂O 排放量呈现正相关关系, 与前人的研究有点差异, 可能是由于在长江中下游地区多次施肥容易碰上降雨, 从而激发更高的 N₂O 排放。此外, 秸秆的掺入和表面覆盖在长期试验中极大地影响了 N₂O 排放量^[56]。前人研究也表明, 对于土壤 N₂O 排放, 秸秆还田具有抑制作用^[57]、促进^[58]或无显著的影响效果^[59]。本研究结果表明, 秸秆还田量与 N₂O 排放的相关分析呈现负相关, 这些不一致的发现可能归因于秸秆还田量和土壤类型的差异^[50]。本研究的土壤

N₂O 排放量在构建的指数模型中也发现了随着秸秆投入呈现先增加后减少的趋势(表 2)。施氮肥和秸秆还田都可能会刺激 N₂O 排放^[60]。此外, 本研究中基于 Pearson 相关分析发现, N₂O 排放受到了年平均温度的显著影响, 较高的温度通常会通过反硝化作用增加农田生态系统中土壤 N₂O 的排放量^[61]。前人研究表明, SOM 和土壤 N 含量也是影响土壤 N₂O 排放变化的重要因素^[62]。在考虑土壤 N 含量的作用时, pH 对于 N₂O 排放量的预测并没有具有较高的特征重要性, 这与前人的研究是一致的^[63]。本研究揭示了土壤 N₂O 排放的控制因素是复杂的, 虽然气候因素(如年平均气温、年降雨量)、土壤理化性质(如土壤 pH 值、SOM)显著影响土壤 N₂O 排放, 但作为硝化和反硝化作用底物的土壤 N 含量(土壤总氮), 在土壤 N₂O 排放中也起到关键作用。

3.2 RF 预测产量和 N₂O 排放的可行性

了解和量化中国长江中下游流域的产量和 N₂O 排放量对于保证产量和减少环境污染至关重要。由于区域内气候、土壤和管理制度的变异性, 综合探究不同氮肥和秸秆投入的响应是复杂的。最近, 机器学习技术已成功应用于农业生产, 以研究各种农艺指标^[18]。作为一种流行的基于决策树的集成机器学习算法, RF 可以处理变量之间的非线性效应和复杂的相互作用。通过 RF 模型的模拟, N₂O 排放和产量的估算是基于数据驱动的, 而不依赖于预先指定的方程或函数形式。在这里, 我们将有关天气、管理和土壤状况的大型数据集与 RF 算法相结合, 以识别中国长江中下游流域的稻麦轮作区的 N₂O 排放量和产量。对于 N₂O 排放来说, 使用线性模型仅靠基础土壤数据和施氮量无法准确预测, 而 RF 模型对稻田下 N₂O 总排放量的预测是显著优于其他模型的^[64]。RF 模型也已被用于预测玉米田的 N₂O 排放和 N 淋溶^[65]。而对于产量来说, 大量 Meta 分析的研

究已经表明土壤理化性质, 人为管理措施以及氮肥和秸秆使用量是主导产量变异的主要因素^[55,66]。因此, 本研究中使用 RF 模型模拟不同氮肥和秸秆投入下麦田的产量和 N_2O 总排放量是可行的, 该模型考虑了变量的非线性响应, 获取优异的性能 ($R^2 = 0.65\sim 0.96$)。在本研究中, 模型模拟由于忽略了几个因素而存在一些局限性。在这里, 我们搜集的数据中多是来自田间试验数据, 大多是基于小麦的基本苗在 225 万公顷进行试验, 从而简化了现实生产中的密度响应, 这意味着改进氮肥和秸秆的投入并不是孤立地进行, 而是要与其他管理措施相结合, 例如增加密度, 以扩大氮肥和秸秆投入的养分利用率。其次是需要通过考虑本研究无法解决的其他可能因素(例如倒伏、病虫害风险)来改进 N_2O 排放和产量预测。此外, 我们的 N_2O 排放和产量模型是使用 RF 算法开发的, 但仍可能存在一些不足, 进一步可以通过结合更多生物物理因子和机器学习建模来改进 N_2O 排放和产量的评估。尽管存在这些限制, 模型的良好性能表明, 气候-土壤数据集与机器学习技术相结合是研究影响 N_2O 排放和产量变化的有效方法。

3.3 麦田优化施肥方案推荐

化肥施用不当导致养分失衡、利用效率低下, 对环境造成大量损失, 已成为我国小麦生产系统的普遍现象。然而, 确定合适的施肥量仍然是基于科学的养分管理的基础。以往农民通常根据当地田间试验或过去的经验使用固定的氮肥施用量, 容易造成环境污染^[67]。

早期的施肥研究是基于粮食产量目标出发, 基于经验分析的方法对产量/投入之间的关系进行定量, 从而推荐施肥策略, 相较于农户方案降低了氮肥施用量并提高作物产量, 但忽略了环境问题^[68-70]。在考虑环境成本方面, 前人研究通过预测油菜籽产量、种植者的利润和 EONR 值, 从而为加拿大东部的油菜籽生产提供环境经济最佳的 N 推荐^[19]。而优化施氮量并不能完全满足最佳氮肥管理, 一次性撒肥、施肥不足、施肥过量、秸秆不合理使用等传统田间管理方式在中国许多地区的小农户中仍然存在。在本研究中, 通过结合特定地点的情景设置反演数据构建的产量一元二次模型发现, 随氮肥投入增加, 产量呈现先增后减趋势。当秸秆还田量大于 4.5 t hm^{-2} 时, 本研究构建的产量模型反演的产量高于无秸秆投入处理, 因此秸秆还田可以是提高作物产量

的有效措施之一, 但同时会受到氮肥配施量的影响与调控, 通过改善管理实践是实现以更少的投入生产稳定的粮食和减少温室气体排放的重要策略。

目前追求优化策略组合以提高粮食产量和降低环境成本, 仍然缺乏对不同目标下的施肥措施策略组合进行综合的评估。本研究中, 选用碳排放强度作为排放最低下的生态环境效益的定量评估, 而 NEEB 则结合作物产量、农业活动和全球变暖潜能值的成本^[50], 进而考虑生态环境效益。经济效益通常是农民改善农艺管理和政策制定者提出有效农业政策的主要动力, 本研究表明, 在不同秸秆投入下达到 CEE 最低, 会随着秸秆投入的增加氮肥施用也有所增加, 并获得更高的 NEEB。这可能与 CEE 评估下的施肥推荐中, 为保证排放最低的前提是以牺牲产量为代价的。而相较于 CEE 评估, NEEB 评估有助于以货币为基础的方式让农民更容易评估科学决策, 并鼓励他们采用环境友好型管理。与低秸秆投入相比, 在较高的秸秆投入下减少了氮肥施用并获得了更高的 NEEB, 结果有利于鼓励农民采用秸秆还田技术, 有益于人们减少购买氮肥的成本并有助于减少人们焚烧秸秆的行为。总而言之, 秸秆还田在实际农业生产中具备固碳减排的潜力, 配施合适的氮肥可以获得更好的 NEEB, 前人研究也与本试验的结果相似^[16]。

4 结论

在稻麦复种模式下, 麦田 N_2O 排放因秸秆投入和施肥不同存在显著差异, 表现为 N_2O 的累积排放量随施氮量和秸秆还田量的增加而显著增加。在区域尺度上, 通过搜集长江中下游地区上氮肥和秸秆投入对小麦产量与 N_2O 排放的相关文献数据, 并建立了 RF 效应模型, 验证结果表明模型拟合情况良好, 结果表明氮肥和秸秆投入的小麦产量和 N_2O 排放会受到人为管理因素、土壤因素和气候因素的影响。基于开发的模型结合情景设置进行了试验地点的小麦产量和 N_2O 排放模拟, 并评估了碳排放强度和净生态环境经济效益。若追求高产, 所需氮肥量为 $208\sim 212 \text{ kg hm}^{-2}$, 若以达到最小碳排放为目标, 所需氮肥量在 $113\sim 130 \text{ kg hm}^{-2}$, 若要实现最大生态经济效益, 所需氮肥则是在 $202\sim 205 \text{ kg hm}^{-2}$, 其中在 6.75 t hm^{-2} 的秸秆投入下施用 202 kg hm^{-2} 的氮肥可以获得最高的生态收益 13,669.18 元。优化氮肥和秸秆投入能在顺应绿色生产的前提下收获理想的经济效益, 未来应用前景广阔。

References

- [1] Reynolds M, Foulkes J, Furbank R, Griffiths S, King J, Murchie E, Parry M, Slafer G. Achieving yield gains in wheat. *Plant Cell Environ*, 2012, 35: 1799–1823.
- [2] Van Dijk M, Morley T, Rau M L, Saghai Y. A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050. *Nat Food*, 2021, 2: 494.
- [3] Smith K A. Changing views of nitrous oxide emissions from agricultural soil: key controlling processes and assessment at different spatial scales. *Eur J Soil Sci*, 2017, 68: 137–155.
- [4] Cowan N, Levy P, Maire J, Coyle M, Leeson S R, Famulari D, Carozzi M, Nemitz E, Skiba U. An evaluation of four years of nitrous oxide fluxes after application of ammonium nitrate and urea fertilisers measured using the eddy covariance method. *Agric For Meteorol*, 2020, 280: 107812.
- [5] Meng Q F, Yue S C, Hou P, Cui Z L, Chen X P. Improving Yield and Nitrogen Use Efficiency Simultaneously for Maize and Wheat in China: a review. *Pedosphere*, 2016, 26: 137–147.
- [6] Millar N, Urrea A, Kahmark K, Shcherbak I, Robertson G P, Ortiz-Monasterio I. Nitrous oxide (N₂O) flux responds exponentially to nitrogen fertilizer in irrigated wheat in the Yaqui Valley, Mexico. *Agric Ecosyst Environ*, 2018, 261: 125–132.
- [7] Song X T, Liu M, Ju X T, Gao B, Su F, Chen X P, Rees R M. Nitrous oxide emissions increase exponentially when optimum nitrogen fertilizer rates are exceeded in the North China Plain. *Environ Sci Technol*, 2018, 52: 12504–12513.
- [8] Duan J Z, Shao Y H, He L, Li X, Hou G G, Li S N, Feng W, Zhu Y J, Wang Y H, Xie Y X. Optimizing nitrogen management to achieve high yield, high nitrogen efficiency and low nitrogen emission in winter wheat. *Sci Total Environ*, 2019, 697: 12.
- [9] Lyu J L, Yin X H, Dorich C, Olave R, Wang X H, Kou C L, Song X. Net field global warming potential and greenhouse gas intensity in typical arid cropping systems of China: a 3-year field measurement from long-term fertilizer experiments. *Soil Tillage Res*, 2021, 212: 105053.
- [10] Chen H H, Li X C, Hu F, Shi W. Soil nitrous oxide emissions following crop residue addition: a meta-analysis. *Glob Chang Biol*, 2013, 19: 2956–2964.
- [11] Wang J, Zhu B, Zhang J B, Muller C, Cai Z C. Mechanisms of soil N dynamics following long-term application of organic fertilizers to subtropical rain-fed purple soil in China. *Soil Biol Biochem*, 2015, 91: 222–231.
- [12] Huang T, Gao B, Christie P, Ju X. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in a double-cropping cereal rotation as affected by nitrogen and straw management. *Biogeosciences*, 2013, 10: 7897–7911.
- [13] Ambus P, Jensen E S, Robertson G P. Nitrous oxide and N-leaching losses from agricultural soil: influence of crop residue particle size, quality and placement. *Phyton-Ann Rei Bot*, 2001, 41: 7–15.
- [14] Yang L, Muhammad I, Chi Y X, Wang D, Zhou X B. Straw return and nitrogen fertilization to maize regulate soil properties, microbial community, and enzyme activities under a dual cropping system. *Front Microbiol*, 2022, 13: 823963.
- [15] Huang T, Yang H, Huang C C, Ju X T. Effect of fertilizer N rates and straw management on yield-scaled nitrous oxide emissions in a maize-wheat double cropping system. *Field Crops Res*, 2017, 204: 1–11.
- [16] Akhtar K, Wang W Y, Ren G X, Khan A, Enguang N, Khan A, Feng Y Z, Yang G H, Wang H Y. Straw mulching with inorganic nitrogen fertilizer reduces soil CO₂ and N₂O emissions and improves wheat yield. *Sci Total Environ*, 2020, 741: 140488.
- [17] Glenn A J, Moulin A P, Roy A K, Wilson H F. Soil nitrous oxide emissions from no-till canola production under variable rate nitrogen fertilizer management. *Geoderma*, 2021, 385: 114857.
- [18] Cao J, Zhang Z, Tao F, Zhang L, Luo Y, Zhang J, Han J, Xie J. Integrating multi-source data for rice yield prediction across China using machine learning and deep learning approaches. *Agric For Meteorol*, 2021, 297: 108275.
- [19] Wen G, Ma B L, Vanasse A, Caldwell C D, Smith D L. Optimizing machine learning-based site-specific nitrogen application recommendations for canola production. *Field Crops Res*, 2022, 288: 108707.
- [20] Chen S, Huang Y, Zou J. Relationship between nitrous oxide emission and winter wheat production. *Biol Fert Soils*, 2008, 44: 985–989.
- [21] Gao X, Lan T, Deng L, Zeng M. Mushroom residue application affects CH₄ and N₂O emissions from fields under rice-wheat rotation. *Arch Agron Soil Sci*, 2017, 63: 748–760.
- [22] Guo L, Zhang L, Liu L, Sheng F, Cao C, Li C. Effects of long-term no tillage and straw return on greenhouse gas emissions and crop yields from a rice-wheat system in central China. *Agric Ecosyst Environ*, 2021, 322: 107650.
- [23] Guo T, Luan H, Song D, Zhang S, Zhou W, Liang G. Combined fertilization could increase crop productivity and reduce greenhouse gas intensity through carbon sequestration under rice-wheat rotation. *Agronomy (Basel)*, 2021, 11: 103390.
- [24] He H, Li D, Pan F, Wang F, Wu D, Yang S. Effects of nitrogen reduction and optimized fertilization combined with straw return on greenhouse gas emissions and crop yields of a rice-wheat rotation system. *Int J Plant Prod*, 2022, 16: 669–679.
- [25] He H, Zhang T, Yao Y, Yang W, Busayo D, Wen X, Chen X, Yang X, Yang S, Ma Y. Tillage methods on greenhouse gas emissions and yields of rice-wheat rotation system in east China polder area. *Int J Plant Prod*, 2021, 15: 485–498.
- [26] Hu N, Wang B, Gu Z, Tao B, Zhang Z, Hu S, Zhu L, Meng Y. Effects of different straw returning modes on greenhouse gas emissions and crop yields in a rice-wheat rotation system. *Agric Ecosyst Environ*, 2016, 223: 115–122.
- [27] Ji Y, Liu G, Ma J, Xu H, Yagi K. Effect of controlled-release fertilizer on nitrous oxide emission from a winter wheat field. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2012, 94: 111–122.
- [28] Li S H, Guo L J, Cao C G, Li C F. Effects of straw returning levels on carbon footprint and net ecosystem economic benefits from rice-wheat rotation in central China. *Environ Sci Pollut Res*, 2021, 28: 5742–5754.
- [29] Liu G, Ma J, Yang Y, Yu H, Zhang G, Xu H. Effects of straw incorporation methods on nitrous oxide and methane emissions from a wheat-rice rotation system. *Pedosphere*, 2019, 29: 204–215.
- [30] Liu S, Qin Y, Zou J, Liu Q. Effects of water regime during

- rice-growing season on annual direct N_2O emission in a paddy rice-winter wheat rotation system in southeast China. *Sci Total Environ*, 2010, 408: 906–913.
- [31] Ma E, Zhang G, Ma J, Xu H, Cai Z, Yagi K. Effects of rice straw returning methods on N_2O emission during wheat-growing season. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2010, 88: 463–469.
- [32] Ma Y C, Kong X W, Yang B, Zhang X L, Yan X Y, Yang J C, Xiong Z Q. Net global warming potential and greenhouse gas intensity of annual rice-wheat rotations with integrated soil-crop system management. *Agric Ecosyst Environ*, 2013, 164: 209–219.
- [33] Wang H, Shen M, Hui D, Chen J, Sun G, Wang X, Lu C, Sheng J, Chen L, Luo Y, Zheng J, Zhang Y. Straw incorporation influences soil organic carbon sequestration, greenhouse gas emission, and crop yields in a Chinese rice (*Oryza sativa* L.)-wheat (*Triticum aestivum* L.) cropping system. *Soil Tillage Res*, 2019, 195: 104377.
- [34] Xia L, Wang S, Yan X. Effects of long-term straw incorporation on the net global warming potential and the net economic benefit in a rice-wheat cropping system in China. *Agric Ecosyst Environ*, 2014, 197: 118–127.
- [35] Xiang J, Liu D, Ding W, Yuan J, Lin Y. Effects of biochar on nitrous oxide and nitric oxide emissions from paddy field during the wheat growth season. *J Clean Prod*, 2015, 104: 52–58.
- [36] Yang B, Xiong Z, Wang J, Xu X, Huang Q, Shen Q. Mitigating net global warming potential and greenhouse gas intensities by substituting chemical nitrogen fertilizers with organic fertilization strategies in rice-wheat annual rotation systems in China: a 3-year field experiment. *Ecol Eng*, 2015, 81: 289–297.
- [37] Yao Z, Zheng X, Wang R, Xie B, Butterbach-Bahl K, Zhu J. Nitrous oxide and methane fluxes from a rice-wheat crop rotation under wheat residue incorporation and no-tillage practices. *Atmos Environ*, 2013, 79: 641–649.
- [38] Yao Z, Zheng X, Xie B, Mei B, Wang R, Butterbach-Bahl K, Zhu J, Yin R. Tillage and crop residue management significantly affects N-trace gas emissions during the non-rice season of a sub-tropical rice-wheat rotation. *Soil Biol Biochem*, 2009, 41: 2131–2140.
- [39] Zhang L, Zheng J, Chen L, Shen M, Zhang X, Zhang M, Bian X, Zhang J, Zhang W. Integrative effects of soil tillage and straw management on crop yields and greenhouse gas emissions in a rice-wheat cropping system. *Eur J Agron*, 2015, 63: 47–54.
- [40] Zou J, Huang Y, Lu Y, Zheng X, Wang Y. Direct emission factor for N_2O from rice-winter wheat rotation systems in southeast China. *Atmos Environ*, 2005, 39: 4755–4765.
- [41] 江波, 杨书运, 马友华, 贺非, 左怀峰, 范东福, 杨小兵. 耕作方式对圩区冬小麦温室气体排放通量的影响. 安徽农业大学学报, 2014, 41: 241–247.
- Jiang B, Yang S Y, Ma Y H, He F, Zuo H F, Fan D F, Yang X B. Effects on emission of greenhouse gas by different tillage treatments to winter wheat in polder areas. *J Anhui Agric Univ*, 2014, 41: 241–247 (in Chinese with English abstract).
- [42] 靳红梅, 沈明星, 王海候, 陆长婴, 常志州, 郭瑞华. 秸秆还田模式对稻麦两熟农田麦季 CH_4 和 N_2O 排放特征的影响. 江苏农业学报, 2017, 33: 333–339.
- Jin H M, Shen M X, Wang H H, Lu C Y, Chang Z Z, Guo R H. Influence of straw returning patterns on CH_4 and N_2O emission during wheat-growing season in a rice-wheat double cropping system. *Jiangsu J Agric Sci*, 2017, 33: 333–339 (in Chinese with English abstract).
- [43] 牛东, 潘慧, 丛美娟, 尹萍, 吴浩, 孙娟, 朱新开, 郭文善. 氮肥运筹和秸秆还田对麦季土壤温室气体排放的影响. 麦类作物学报, 2016, 36: 1667–1673.
- Niu D, Pan H, Cong M J, Yin P, Wu H, Sun J, Zhu X K, Guo W S. Effect of nitrogen application ratio and straw returning on soil greenhouse gas emission during wheat growing period. *J Triticeae Crops*, 2016, 36: 1667–1673 (in Chinese with English abstract).
- [44] 孙国峰, 郑建初, 陈留根, 何加骏, 张岳芳. 配施猪粪对麦季 CH_4 和 N_2O 排放及温室效应的影响. 生态与农村环境学报, 2012, 28: 349–354.
- Sun G F, Zheng J C, Chen L G, He J J, Zhang Y F. Effects of application of pig manure in combination with chemical fertilizers on CH_4 and N_2O emissions and their greenhouse effects in wheat field. *J Ecol Rural Environ*, 2012, 28: 349–354 (in Chinese with English abstract).
- [45] 孙国峰, 郑建初, 陈留根, 何加骏, 张岳芳. 沼液替代化肥对麦季 CH_4 、 N_2O 排放及温室效应的影响. 农业环境科学学报, 2012, 31: 1654–1661.
- Sun G F, Zheng J C, Chen L G, He J J, Zhang Y F. Effects of chemical fertilizers substitution by biogas slurry on CH_4 and N_2O emissions and their greenhouse effects in wheat field. *J Agro-Environ Sci*, 2012, 31: 1654–1661 (in Chinese with English abstract).
- [46] 王海云, 邢光熹. 不同施氮水平对稻麦轮作农田氧化亚氮排放的影响. 农业环境科学学报, 2009, 28: 2631–2646.
- Wang H Y, Xing G X. Effect of nitrogen fertilizer rates on nitrous oxide emission from paddy field under rice-wheat rotation. *J Agro-Environ Sci*, 2009, 28: 2631–2636 (in Chinese with English abstract).
- [47] 张翰林, 吕卫光, 郑宪清, 李双喜, 王金庆, 张娟琴, 何七勇, 袁大伟, 顾晓君. 不同秸秆还田年限对稻麦轮作系统温室气体排放的影响. 中国生态农业学报, 2015, 23: 302–308.
- Zhang H L, Lyu W G, Zheng X Q, Li S X, Wang J Q, Zhang J Q, He Q Y, Yuan D W, Gu X J. Effects of years of straw return to soil on greenhouse gas emission in rice/wheat rotation systems. *Chin J Eco-Agric*, 2015, 23: 302–308 (in Chinese with English abstract).
- [48] 张岳芳, 陈留根, 朱普平, 张传胜, 盛婧, 王子臣, 郑建初. 秸秆还田对稻麦两熟高产农田净增温潜势影响的初步研究. 农业环境科学学报, 2012, 31: 1647–1653.
- Zhang Y F, Chen L G, Zhu P P, Zhang C S, Sheng J, Wang Z C, Zheng J C. Preliminary study on effect of straw incorporation on net global warming potential in high production rice-wheat double cropping systems. *J Agro-Environ Sci*, 2012, 31: 1647–1653 (in Chinese with English abstract).
- [49] 邹建文. 稻麦轮作生态系统温室气体(CO_2 、 CH_4 和 N_2O)排放研究. 南京农业大学博士学位论文, 江苏南京, 2005.
- Zou J W. A Study on Greenhouse Gases (CO_2 , CH_4 and N_2O) Emission from Rice-winter Wheat Rotations in Southeast China. PhD Dissertation of Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu, China, 2005 (in Chinese with English abstract).
- [50] Zhang Z S, Guo L J, Liu T Q, Li C F, Cao C G. Effects of tillage

- practices and straw returning methods on greenhouse gas emissions and net ecosystem economic budget in rice wheat cropping systems in central China. *Atmosph Environ*, 2015, 122: 636–644.
- [51] Li S H, Guo L J, Cao C G, Li C F. Effects of straw returning levels on carbon footprint and net ecosystem economic benefits from rice-wheat rotation in central China. *Environ Sci Pollut Res*, 2021, 28: 5742–5754.
- [52] Xia L L, Xia Y Q, Li B L, Wang J Y, Wang S W, Zhou W, Yan X Y. Integrating agronomic practices to reduce greenhouse gas emissions while increasing the economic return in a rice-based cropping system. *Agric Ecosyst Environ*, 2016, 231: 24–33.
- [53] Li B, Fan C H, Zhang H, Chen Z Z, Sun L Y, Xiong Z Q. Combined effects of nitrogen fertilization and biochar on the net global warming potential, greenhouse gas intensity and net ecosystem economic budget in intensive vegetable agriculture in southeastern China. *Atmosph Environ*, 2015, 100: 10–19.
- [54] Lu R, Zhang P, Fu Z, Jiang J, Wu J, Cao Q, Tian Y, Zhu Y, Cao W, Liu X. Improving the spatial and temporal estimation of ecosystem respiration using multi-source data and machine learning methods in a rainfed winter wheat cropland. *Sci Total Environ*, 2023, 871: 161967.
- [55] Guo C, Liu X, He X. A global meta-analysis of crop yield and agricultural greenhouse gas emissions under nitrogen fertilizer application. *Sci Total Environ*, 2022, 831: 154982.
- [56] Muhammad I, Wang J, Sainju U M, Zhang S H, Zhao F Z, Khan A. Cover cropping enhances soil microbial biomass and affects microbial community structure: a meta-analysis. *Geoderma*, 2021, 381: 114696.
- [57] Zhang Y Y, Liu J F, Mu Y J, Pei S W, Lun X X, Chai F H. Emissions of nitrous oxide, nitrogen oxides and ammonia from a maize field in the North China Plain. *Atmosph Environ*, 2011, 45: 2956–2961.
- [58] Liu C Y, Wang K, Meng S X, Zheng X H, Zhou Z X, Han S H, Chen D L, Yang Z P. Effects of irrigation, fertilization and crop straw management on nitrous oxide and nitric oxide emissions from a wheat-maize rotation field in northern China. *Agric Ecosyst Environ*, 2011, 140: 226–233.
- [59] Yao Z S, Zheng X H, Xie B H, Mei B L, Wang R, Butterbach-Bahl K, Zhu J G, Yin R. Tillage and crop residue management significantly affects N-trace gas emissions during the non-rice season of a subtropical rice-wheat rotation. *Soil Biol Biochem*, 2009, 41: 2131–2140.
- [60] Garcia-Ruiz R, Gomez-Munoz B, Hatch D J, Bol R, Baggs E M. Soil mineral N retention and N₂O emissions following combined application of ¹⁵N-labelled fertiliser and weed residues. *Rapid Commun Mass Spectr*, 2012, 26: 2379–2385.
- [61] Wang Y Y, Hu Z H, Shang D Y, Xue Y, Islam A, Chen S T. Effects of warming and elevated O₃ concentrations on N₂O emission and soil nitrification and denitrification rates in a wheat-soybean rotation cropland. *Environ Pollut*, 2020, 257: 113556.
- [62] Bhattacharyya P, Nayak A K, Mohanty S, Tripathi R, Shahid M, Kumar A, Raja R, Panda B B, Roy K S, Neogi S, Dash P K, Shukla A K, Rao K S. Greenhouse gas emission in relation to labile soil C, N pools and functional microbial diversity as influenced by 39 years long-term fertilizer management in tropical rice. *Soil Tillage Res*, 2013, 129: 93–105.
- [63] Li Z, Zeng Z, Song Z, Tian D, Huang X, Nie S, Wang J, Jiang L, Luo Y, Cui J, Niu S. Variance and main drivers of field nitrous oxide emissions: a global synthesis. *J Clean Prod*, 2022, 353: 131686.
- [64] Jiang Z W, Yang S H, Chen X, Pang Q Q, Xu Y, Qi S T, Yu W Q, Dai H D. Controlled release urea improves rice production and reduces environmental pollution: a research based on meta-analysis and machine learning. *Environ Sci Pollut Res*, 2022, 29: 3587–3599.
- [65] Villa-Vialaneix N, Follador M, Ratto M, Leip A. A comparison of eight metamodeling techniques for the simulation of N₂O fluxes and N leaching from corn crops. *Environl Mod Software*, 2012, 34: 51–66.
- [66] Qiu H H, Wei W L. Crop straw retention influenced crop yield and greenhouse gas emissions under various external conditions. *Environ Sci Pollut Res*, 2021, 28: 42362–42371.
- [67] Rasouli S, Whalen J K, Madramootoo C A. Review: reducing residual soil nitrogen losses from agroecosystems for surface water protection in Quebec and Ontario, Canada: best management practices, policies and perspectives. *Can J Soil Sci*, 2014, 94: 109–127.
- [68] Qin Z, Myers D B, Ransom C J, Kitchen N R, Liang S Z, Camberato J J, Carter P R, Ferguson R B, Fernandez F G, Franzen D W, Laboski C A M, Malone B D, Nafziger E D, Sawyer J E, Shanahan J F. Application of machine learning methodologies for predicting corn economic optimal nitrogen rate. *Agron J*, 2018, 110: 2596–2607.
- [69] 刘新伟, 龚德平, 巩细民, 王巍, 娄希凤, 韩玲君, 杨德桦, 赵竹青. 湖北江北农场小麦肥效试验与施肥推荐. 麦类作物学报, 2012, 32: 338–343.
- Liu X W, Gong D P, Gong X M, Wang W, Lou X F, Han L J, Yang D H, Zhao Z Q. Fertilizer effect on wheat and recommendation offertilizer for wheat production in Jiangbei farm. *J Triticeae Crops*, 2012, 32: 338–343 (in Chinese with English abstract).
- [70] 周琦, 李岚涛, 张露露, 苗玉红, 王宜伦. 氮肥和播种量互作对冬小麦产量、生长发育和生态场特性的影响. 作物学报, 2023, 49: 3100–3109.
- Zhou Q, Li L T, Zhang L L, Miao Y H, Wang Y L. Effects of interaction of nitrogen level and sowing rate on yield, growth, and ecological field characteristics of winter wheat. *Acta Agron Sin*, 2023, 49: 3100–3109 (in Chinese with English abstract).