作物学报 ACTA AGRONOMICA SINICA 2026, 52(3): 908−921 http://zwxb.chinacrops.org/
ISSN 0496-3490; CN 11-1809/S; CODEN TSHPA9 E-mail: zwxb301@caas.cn

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2026.51054

氮肥减施协同绿肥过腹还田可降低青海高原小麦农田温室气体排放

李晓龙[1] 严清彪[2] 李正鹏[2] 殷 文[1] 樊志龙[1] 胡发龙[1,*] 韩 梅[2,*] 柴 强[1]

[1] 省部共建干旱生境作物学国家重点实验室 / 甘肃农业大学农学院, 甘肃兰州 730070; [2] 青海大学农林科学院, 青海西宁 810016

摘 要: 针对青海高原及高寒地区小麦生产氮肥施用量高、温室气体排放量大等问题, 探究绿肥不同还田方式及小麦季不同施氮量对小麦农田温室气体排放和产量的影响, 为该区小麦可持续生产提供理论依据和技术支撑。试验于2023—2024 年在青海大学农林科学院试验站进行, 采用裂区试验设计, 主区为小麦季 3 个施氮水平: 常规施氮(225 kg hm^{-2}, N2)、减施氮肥 30% (158 kg hm^{-2}, N1)和不施氮(0 kg hm^{-2}, N0); 裂区基于上一年度绿肥设置 3 种还田方式: 地上部移除仅根茬还田(RR)、地上部过腹联合根茬还田(SDRR)、地上部及根茬全量还田(RROS)。结果表明, 减氮 30%结合绿肥过腹+根茬还田(N1SDRR)处理显著降低温室气体排放: CO_2 排放总量较减氮 30%全量还田(N1RROS)降低 4.2%; N_2O 排放总量、CH_4 吸收总量较 N1RROS 降低 19.1%、提升 15.8%; 全球增温潜势(GWP)较 N1RROS 降低 5.0%。N1SDRR 处理小麦籽粒产量较 N1RROS 提高 4.1%, 温室气体排放强度(GHGI)较 N1RROS 降低 14.6%, 实现减排稳产。此外, N1SDRR 处理土壤有机质、铵态氮含量较 N1RROS 提升 9.1%、22.8%, 土壤硝态氮含量较 N1RROS 降低 10.0%; 土壤蔗糖酶、脲酶活性较 N1RROS 分别提高 3.2%、7.8%, 但土壤亚硝酸还原酶、硝酸还原酶活性分别降低 11.9%、5.7%, 表明该模式通过提升土壤有机质、调控铵/硝态氮平衡同步降低温室气体排放并维持生产力。随机森林模型进一步表明, 土壤蔗糖酶、籽粒产量及土壤有机质是调控温室气体排放强度的关键因子, 优化施氮与绿肥还田方式会对土壤碳、氮含量产生影响, 可显著降低单位产量碳排放。因此, 氮肥减施 30%结合绿肥地上部过腹联合根茬还田可改善土壤理化因子和酶活性, 有效降低温室气体排放, 稳定小麦籽粒产量, 是青海高原及高寒地区小麦农田稳产减排的适宜管理措施。

关键词: 氮肥减施; 绿肥还田; 温室气体; 产量; 土壤因子

Combing nitrogen fertilizer reduction with green manure returning via livestock digestion decreased greenhouse gas emissions in wheat fields at the Qinghai Plateau

Li Xiao-Long[1], Yan Qing-Biao[2], Li Zheng-Peng[2], Yin Wen[1], Fan Zhi-Long[1], Hu Fa-Long[1,*], Han Mei[2,*], and Chai Qiang[1]

[1] State Key Laboratory of Arid Land Crop Science / College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; [2] College of Agriculture and Forestry, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China

Abstract: To address challenges in wheat production in high-altitude and cold regions—such as excessive nitrogen fertilizer use and substantial greenhouse gas emissions—this study investigated the effects of different green manure return methods and nitrogen application rates during the wheat growing season on greenhouse gas emissions and crop yield, providing a theoretical basis

本研究由国家重点研发计划项目(2021YFD1700204), 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-22-G-12)和甘肃农业大学伏羲青年人才培育项目(Gaufx-05Y09)资助。

This study was supported by the National Key R&D Program (2021YFD1700204), the China Agriculture Research System of MOF and MARA (CARS-22-G-12), and the Fuxi Youth Talent Cultivation Project of Gansu Agricultural University (Gaufx-05Y09).

* 通信作者(Corresponding authors): 胡发龙, E-mail: hufl@gsau.edu.cn; 韩梅, E-mail: hanmei20061234@sina.com

第一作者联系方式: E-mail: Lixl2317609170@163.com

Received (收稿日期): 2025-06-04; Accepted (接受日期): 2025-10-30; Published online (网络出版日期): 2025-11-05.

URL: https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20251104.1752.006

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

and technical support for sustainable wheat cultivation in these regions. Field experiments were conducted from 2023 to 2024 at the College of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, using a split-plot design. The main plots included three nitrogen application levels: conventional nitrogen application (225 kg hm^{-2}, N2), a 30% reduction in nitrogen application (158 kg hm^{-2}, N1), and no nitrogen application (0 kg hm^{-2}, N0). Based on the previous year's green manure, three return methods were tested: root stubble return after removal of the upper plant (RR), combined return of root stubble and processed upper plant (SDRR), and full return of above-ground parts and roots (RROS). Results showed that reducing nitrogen by 30% combined with green manure incorporation and stubble return (N1SDRR) significantly mitigated greenhouse gas emissions. Total CO_2 emissions decreased by 4.2% compared to full nitrogen reduction with full manure return (N1RROS), while total N_2O emissions decreased by 19.1%, and net CH_4 uptake increased by 15.8%. The global warming potential (GWP) was reduced by 5.0% compared to N1RROS. The N1SDRR treatment also increased wheat grain yield by 4.1% and reduced the greenhouse gas emission intensity (GHGI) by 14.6%, effectively balancing emission reduction with yield stability. Additionally, soil organic matter and ammonium nitrogen content increased by 9.1% and 22.8%, respectively, while nitrate nitrogen decreased by 10.0% compared to N1RROS. Soil sucrase and urease activities increased by 3.2% and 7.8%, respectively, whereas nitrite reductase and nitrate reductase activities decreased by 11.9% and 5.7%. This model demonstrates the potential to reduce greenhouse gas emissions while maintaining productivity through the enhancement of soil organic matter and regulation of ammonium/nitrate nitrogen balance. A random forest model further identified soil sucrase activity, grain yield, and soil organic matter as key factors influencing greenhouse gas emission intensity per unit yield. Adjusting nitrogen fertilization rates and green manure return methods significantly reduced carbon emissions per unit yield by affecting soil carbon and nitrogen dynamics. Therefore, reducing nitrogen fertilizer by 30% in combination with above-ground green manure incorporation and stubble return can improve soil physicochemical properties and enzyme activity, effectively lower greenhouse gas emissions, and stabilize wheat grain yield. This represents a promising management strategy for achieving both yield stability and emission reduction in wheat farmland on the Qinghai Plateau and other alpine regions.

Keywords: reduced application of nitrogen fertilizer; green manure returning to the field; greenhouse gases; yield; soil factors

农业生产是全球温室气体排放的重要来源, 随着近年来追求高产, 氮肥过量施用现象依然严峻[1]。大量氮肥输入土壤, 不仅加速硝化与反硝化作用, 增加强温室气体 N_2O 排放, 还显著提升单位产量碳排放强度[2]。因此, 探索高效的氮肥减施措施是推动农业绿色转型的关键路径[3]。种植绿肥能替代主栽作物 20%~40%化学氮肥, 有效降低化肥使用量[4]。并且, 绿肥还田通过改变土壤理化性质及酶活性, 对 CO_2、CH_4 和 N_2O 排放起双向调控作用[5]。因此, 种植绿肥并通过绿肥过腹+根茬还田等措施或许是减少化学氮肥使用量和降低农田温室气体排放的有效措施[6]。

现有研究广泛验证了绿肥对农田生态系统温室气体的减排潜力[7]。与传统休闲相比, 冬闲期种植紫云英可比传统休闲降低稻季 CH_4 排放 18.3%~24.6%, 其机制涉及绿肥腐解形成活性有机碳调控甲烷菌与甲烷氧化菌的代谢平衡, 并增强土壤团聚体稳定性以减少氮素淋失[8-9]。北方高寒生态系统中, 毛叶苕子与箭筈豌豆混播可使麦田土壤 N_2O 排放降低 14.7%~21.5%, 这主要归因于生物固氮作用减少化肥投入, 以及根系分泌物通过调节 *nirK* 和 *nosZ* 基因丰度优化氮转化路径[10-11]。此外, 绿肥还田通过改善土壤物理结构, 提高孔隙连通性促进 O_2 扩散, 来抑制厌氧环境下 N_2O 生成[12]。然而, 传统绿肥直接还田存在局限: 豆科绿肥等高 C/N 物料在分解初期易形成局部厌氧区域, 促进反硝化作用导致 N_2O 排放激增[13]; 这些现象表明, 绿肥直接还田存在加重农田温室气体排放的风险。综合来看, 突破绿肥直接还田导致的碳氮快速矿化与流失瓶颈, 是提升其减排效益的关键。羊粪等畜禽有机肥具有高 C/N、缓释分解及养分释放-作物需求耦合的特性[14]。并且, 绿肥过腹后有机肥还田对青海高原土壤质量提升及小麦增产展现出一定减排增效优势[12-13]。

青海高原地区小麦收获后尚有热量盈余, 且秋季休闲时间较长、光热资源浪费严重, 适于种植绿肥作物[12]。因此, 将绿肥地上部生物量经牛羊过腹转化有机肥后再施入农田, 可能是同步实现氮肥减施和农田温室气体减排的可行途径[15-17]。然而, 目前关于绿肥过腹+根茬还田对农田温室气体排放影响的研究较为匮乏, 其减排机制尚不明晰, 尤其是对青藏高寒农区等生态脆弱区域的温室气体排放研究鲜有报道。为此, 本研究聚焦于青海高原及高寒地区, 基于麦后复种绿肥模式, 通过设置绿肥不同还田方式和小麦不同施氮水平, 测定小麦生育期内温室气体排放量、籽粒产量、土壤理化性质和酶活性指标, 理清土壤特性与温室气体排放强度之间的关系, 旨在阐明绿肥过腹+根茬还田协同减氮减排的土壤生物化学机制, 评估其减排增效潜力, 以期

为青海高原乃至高寒生态脆弱区小麦生产及构建“绿肥-畜牧-农田”可持续种养循环体系提供理论依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于 2023—2024 年在青海大学农林科学院试验地进行, 该基地位于青海省西宁市城北区甘里铺镇莫家庄(36°56'N, 101°74'E, 海拔 2314 m), 属高原大陆性气候, 年平均风速 1.58 m s^{-1}, 平均气温 6.1℃, 平均降雨量 494 mm, 日照时长 2470 h。土壤类型为栗钙土, 0~20 cm 土壤理化性质如下: pH 8.2, 有机质 15.80 g kg^{-1}, 全氮 1.27 g kg^{-1}, 速效磷 10.20 mg kg^{-1}, 速效钾 157.00 mg kg^{-1}。2023 年和 2024 年试验区作物生长季逐日平均气温及降水量如图 1 所示。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计, 主区为小麦季 3 个施氮水平: 常规施氮(N2, 225 kg hm^{-2})、减施氮肥 30% (N1, 158 kg hm^{-2})和不施氮(N0, 0 kg hm^{-2}), 副区设置绿肥季 3 种还田方式: 仅根茬还田(RR)、过腹+根茬还田(SDRR)、全量还田(RROS)。共 9 个处理, 每个处理 3 次重复, 小区面积 15 m^2 (5 m×3 m)。

供试春小麦品种为青春 38 号, 供试绿肥为箭筈豌豆与青稞混播, 箭筈豌豆品种为西牧 333, 播种量为 180 kg hm^{-2}, 青稞品种为昆仑 15 号, 播种量为 52.5 kg hm^{-2}。肥料施用氮肥为尿素(N 46%)按基肥∶追肥= 8∶2 分施, 磷肥为过磷酸钙(P_2O_5 15%)施用量为 95 kg hm^{-2}。2 个试验年度内, 绿肥分别于 2022 年 8 月 8 日、2023 年 8 月 5 日播种, 于 2022 年 10 月 18 日、2023 年 10 月 16 日翻压。2022 年和 2023 年绿肥地上部生物产量见表 1。绿肥刈割后处理: 仅根茬还田(翻压深度 15 cm)、过腹+根茬还田(翻压深度 15 cm)、全量还田(翻压深度 15 cm)。小麦于 3 月中旬条播(密度 675×10^4 粒 hm^{-2}, 行距 12 cm), 7 月下旬收获。试验中灌水和田间管理采用统一标准。

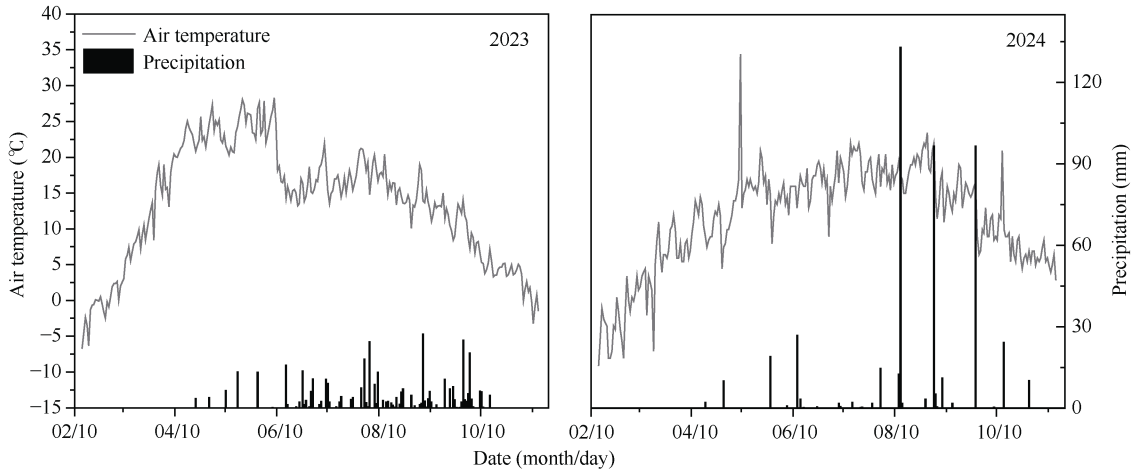


图 1 试区 2023–2024 年逐日平均气温及降水量
Fig. 1 Daily average temperature and precipitation in the test area from 2023 to 2024

表 1 不同处理绿肥干鲜重
Table 1 Dry and fresh weight of green manure under different treatments (kg hm^{-2})

施氮水平 N fertilizer application rate	绿肥还田方式 Green manure incorporation method	2022		2023	
		绿肥鲜重 Fresh weight of green manure	绿肥干重 Dry weight of green manure	绿肥鲜重 Fresh weight of green manure	绿肥干重 Dry weight of green manure
N2	RR	14,933	5988	15,218	6391
	SDRR	16,288	6924	16,806	7450
	RROS	15,803	6972	16,470	7237
N1	RR	13,466	5575	13,752	5817
	SDRR	16,022	6651	16,138	6780
	RROS	15,355	6284	15,425	6301

(续表 1)

施氮水平 N fertilizer application rate	绿肥还田方式 Green manure incorporation method	2022		2023	
		绿肥鲜重 Fresh weight of green manure	绿肥干重 Dry weight of green manure	绿肥鲜重 Fresh weight of green manure	绿肥干重 Dry weight of green manure
N0	RR	12,933	5432	13,120	5420
	SDRR	13,911	5842	14,025	5974
	RROS	13,266	5585	13,436	5490

N2、N1、N0 分别为传统施氮(N 225 kg hm^{-2})、减氮 30% (N 158 kg hm^{-2})和不施氮(N 0 kg hm^{-2}); RR、SDRR、RROS 分别为仅根茬还田、过腹+根茬还田、全量还田。

N2, N1, and N0 represent conventional nitrogen application (225 kg hm^{-2}), 30% nitrogen reduction (158 kg hm^{-2}), and no nitrogen application (0 kg hm^{-2}), respectively. RR, SDRR, and RROS represent root stubble return only, stubble return with processed above-ground biomass, and full return of above-ground biomass and roots, respectively.

1.3　测定指标及方法

1.3.1　绿肥过腹还田折算羊粪施用量　　绿肥过腹还田折算羊粪施入量公式如下:

$$\text{羊粪施入量} = \frac{\text{绿肥地上部重量}\times\text{绿肥地上部含氮量}\times\text{回收率}}{\text{腐熟羊粪含氮量}} \quad (1)$$

式中, 绿肥地上部重量于 10 月落霜后统一刈割并称重; 采用 SkalaR 生产的全自动碳形态氮分析仪测定绿肥地上部含氮量, 取值见表 2; 回收率为绿肥经羊采食后形成羊粪和羊尿中氮含量占绿肥总氮含量的比值, 取值 60.1% [18]; 腐熟羊粪含氮量取值 1.5% (表 3)。

1.3.2　温室气体排放总量　　CO_2、CH_4 及 N_2O 排放: 采用静态箱法采集 CO_2、CH_4 及 N_2O 气体, 气相色谱仪(Angilent, HP4890D)测定 CO_2、CH_4 及 N_2O 浓度。静态箱材质为不锈钢, 规格 50 cm×50 cm×60 cm。静态箱内装有空气混合风机、空气压力平衡管、温度计和样品采集管。静态箱覆盖白色棉套以达到隔热目的。底座上端为可嵌入静态箱的水槽, 测定时向水槽内加水密封静态箱。底座下端伸入土壤以固定底座于土壤中, 底座伸入土壤的铁皮有均匀分布圆孔, 以减少对作物生长的妨碍。每隔 15 d 测定 1 次。每次测定从上午 09:00—12:00, 每隔 10 min 抽取 1 次箱内气体, 共抽取 3 次。采集后将样品带回实验室, 48~72 h 内完成样品分析[19]。取样代表性及误差控制措施: 15 d 的采样频率设定基于青海高原春小麦生育期的关键阶段(分蘖、拔节、抽穗、灌浆)均持续约 15 d; 在采样时根据点位特点, 在空间分布上选取多个代表性位置进行采样或采集混合样, 以降低单点瞬时波动对结果的影响, 有效监控并校正分析过程中的潜在误差。CO_2、CH_4 以及 N_2O 排放总量计算如下:

$$f = \sum_{i=1}^{n} \frac{F_i - F_{i-1}}{2} \times d \times 24 \times 10^{-2} \quad (2)$$

式中, F_i、F_{i-1} 分别为第 i 次、第 i–1 次被测温室气体排放通量; d 为第 i 次与第 i–1 次观测间隔天数; 24 为每天小时数, 10^{-2} 为单位换算; n 为气体测定总次数; f 为生育期内气体排放总量。

表 2　绿肥干草基本养分含量

Table 2　Basic nutrient content of green manure (%)

年份 Year	全碳 Total C	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K
2022	47.36	3.31	0.27	3.20
2023	48.37	3.37	0.25	3.34

表 3　供试腐熟羊粪基本养分含量

Table 3　Basic nutrient content of decomposed sheep manure (%)

年份 Year	有机质 Organic matter	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K
2022	50.82	1.46	0.44	0.32
2023	51.33	1.44	0.43	0.31

静态箱气室温度: 将温度计固定于静态箱顶部开孔的橡胶塞内, 待静态箱安装好准备 10 min 后进行第 1 次读数, 然后每隔 10 min 记录 1 次, 共计 3 次。气室温度与采集气体相对应, 即每次读数完立刻进行气体样本的采集。

1.3.3 全球增温潜势 全球增温潜势(global warming potential, GWP)计算公式如下:

$$GWP = f\mathrm{CO_2} \times \frac{12}{44} + f\mathrm{N_2O} \times \frac{28}{44} \times 298 + f\mathrm{CH_4} \times \frac{12}{16} \times 25 \quad (3)$$

式中, *GWP* 为全球增温潜势, $f\mathrm{CO_2}$、$f\mathrm{N_2O}$ 及 $f\mathrm{CH_4}$ 分别为土壤 CO_2 (kg C hm^{-2})、N_2O (kg N hm^{-2})和 CH_4 (kg C hm^{-2})排放总量; 12/44、28/44、12/16 分别为将 CO_2、N_2O、CH_4 净排放量换算为 CO_2 排放量的系数; 298 为 N_2O 相对于 CO_2 百年尺度上的增温潜势倍数; 25 为 CH_4 相对于 CO_2 百年尺度上的增温潜势倍数[20]。

1.3.4 小麦籽粒产量 各小区除保护行外单独收获, 风干脱粒后称重计产, 使用 PM-8188 谷物水分测定仪测定小麦籽粒含水率, 取 3 次均值, 按照 13%含水量标准折合计算小麦籽粒产量[21]。

1.3.5 温室气体排放强度 温室气体排放强度(greenhouse gas emission intensity, GHGI)计算公式如下:

$$\mathrm{GHGI} = \frac{\mathrm{GWP}}{\mathrm{Y}} \quad (4)$$

式中, GWP 为全球增温潜势, Y 为小麦籽粒产量[22]。

1.3.6 土壤容重 在采样点使用环刀法测定 0~20 cm 土层的土壤容重, 具体计算方法如下:

$$\mathrm{R_s} = \frac{(\mathrm{m_2} - \mathrm{m_1})}{\mathrm{v}} \quad (5)$$

式中, R_s 为土壤容重(g cm^{-3}), m_1 为环刀重量(g), m_2 为环刀和烘干样重量(g), v 为环刀容积(cm^{-3}) [23]。

1.3.7 土壤生化特性 采用五点取样法于 2023 年、2024 年小麦收获后用内径 3.5 cm 的土钻采集 0~20 cm表层土壤, 将土样挑去残渣后过 0.25 mm筛备用, 用于土壤化学特性测定。其余样品装入自封袋放入冰盒内, 带回实验室并存放于 4℃冰箱内用于土壤酶活性测定。

土壤酶活性: 使用科铭公司提供的试剂盒测定土壤脲酶、蔗糖酶、硝酸还原酶、亚硝酸还原酶活性。采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定脲酶活性, 采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定蔗糖酶活性, 采用格里斯试剂比色法测定硝酸还原酶活性, 采用亚硝酸盐消失量比色法测定亚硝酸还原酶活性[24]。

剩余样品在常温避光条件下风干、磨细过 0.25 mm筛网后用于土壤化学指标分析。采用重铬酸钾容量法测定土壤有机质含量, 采用电位法测定pH, 水土比为1∶2.5 [24]。采用法国AMS Alliance公司生产的Smart Chem 450全自动间断化学分析仪测定铵态氮和硝态氮含量, 采用美国SkalaR公司生产的SNC-100全自动碳形态氮分析仪[25]测定全氮含量。

1.4 数据处理与分析

使用 Office Excel 2021 软件汇总并整理试验数据, 采用 SPSS27.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA)和多重比较(Duncan)等统计分析工作, 利用 SPSS27.0 软件中一般线性模型的单变量全因子模型进行主效应与互作效应分析。使用 R 语言“linkET”包进行 Mantel 检验, 借助“Random Forest”包分析随机森林模型, 使用 Origin 2022 软件完成图表绘制。

2 结果与分析

2.1 氮肥减施及不同绿肥还田方式对温室气体排放的影响

2.1.1 氮肥减施及不同绿肥还田方式下土壤CO_2、CH_4、N_2O排放总量 主效应分析表明, 年份对土壤CO_2、N_2O排放总量影响显著, 但对土壤CH_4吸收总量无显著影响; 施氮水平、绿肥还田方式对土壤CO_2、CH_4、N_2O排放总量均影响显著; 施氮水平和绿肥还田方式二者互作效应仅对土壤CO_2排放总量影响显著, 但对CH_4吸收总量、N_2O排放总量无显著影响; 而年份、施氮水平及绿肥还田方式三者互作效应对土壤CO_2、CH_4、N_2O排放总量均无显著影响(表4)。2个试验年度内, 不同施氮水平下, N1土壤CO_2、N_2O排放总量较N2分别降低8.7%、27.9%, 较N0分别提高10.6%、9.0%; 土壤CH_4吸收总量较二者分别提高9.3%、20.1%。不同绿肥还田方式下, SDRR处理土壤CO_2、N_2O排放总量较RROS处理分别降低5.1%、15.2%, 较RR分别提高1.6%、7.2%; 土壤CH_4吸收总量与RROS无显著差异, 较RR提高17.4%。二者交互作用下, N1SDRR处理土壤CO_2、N_2O排放总量较N2SDRR分别降低3.2%、28.1%, 较N1RROS分别降低4.2%、19.1%; 土壤CH_4吸收总量较二者分别提高6.3%、15.8%。因此, 氮肥减施结合过腹+根茬还田能有效提高小麦农田CH_4吸收总量, 同时降低CO_2、N_2O排放总量, 可为温室气体减排提供依据。

表 4　不同处理下 CO_2、CH_4、N_2O 排放总量
Table 4　Total emissions of CO_2, CH_4, and N_2O under different treatments (kg hm^{-2})

年份 Year	施氮水平 N fertilizer application rate	绿肥还田方式 Green manure incorporation method	CO_2 排放总量 Total CO_2 emission	CH_4 排放总量 Total CH_4 emission	N_2O 排放总量 Total N_2O emission
2023	N2	RR	8170.36 bc	−0.86 bc	1.64 a
		SDRR	8193.34 bc	−0.97 a	1.71 a
		RROS	8618.59 a	−0.85 bc	1.82 a
	N1	RR	7254.49 ef	−0.91 ab	1.51 b
		SDRR	7960.73 cd	−0.97 a	1.24 d
		RROS	8213.75 b	−0.86 bc	1.52 b
	N0	RR	7167.66 f	−0.83 cd	1.39 c
		SDRR	7209.16 ef	−0.82 cd	1.20 d
		RROS	7796.60 de	−0.67 d	1.48 bc
2024	N2	RR	7856.82 de	−0.84 cd	1.66 a
		SDRR	8197.12 bc	−0.97 ab	1.71 a
		RROS	8562.81 a	−0.87 cd	1.81 a
	N1	RR	7272.90 fg	−0.93 bc	1.50 b
		SDRR	7922.77 cd	−1.10 a	1.22 c
		RROS	8363.27 ab	−0.86 cd	1.52 b
	N0	RR	6989.27 h	−0.86 cd	1.34 bc
		SDRR	7265.79 gh	−0.85 cd	1.18 c
		RROS	7780.09 ef	−0.64 d	1.46 b
年份 Year (Y)			**	ns	**
施氮水平 N fertilizer application rate (NL)			**	*	**
绿肥还田方式 Green manure incorporation method (GM)			**	*	**
施氮水平×绿肥还田方式 NL × GM			**	ns	ns
年份×施氮水平×绿肥还田方式 Y × NL × GM			ns	ns	ns

处理同表 1。小麦生育期 CO_2 和 N_2O 总量表现为排放, CH_4 总量表现为吸收。*代表 $P < 0.05$; **代表 $P < 0.01$; ns 代表无显著性差异。不同小写字母代表处理间具有显著差异($P < 0.05$)。

Treatments are the same as those given in Table 1. Total CO_2 and N_2O emissions during the wheat growth period were expressed as emissions, while CH_4 was expressed as net uptake. * indicates $P < 0.05$; ** indicates $P < 0.01$; ns indicates no significant difference. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

2.1.2　氮肥减施及不同绿肥还田方式对全球增温潜势的影响　　主效应分析表明, 年份、施氮水平、绿肥还田方式及施氮水平和绿肥还田方式二者互作效应均显著影响全球增温潜势, 而年份、施氮水平及绿肥还田方式三者互作效应对全球增温潜势影响不显著(图 2)。2 个试验年度内, 不同施氮水平下, N1 土壤 GWP 较 N2 降低 6.1%, 较 N0 提高 12.3%。不同绿肥还田方式下, SDRR 处理土壤 GWP 较 RROS 降低 4.8%, 较 RR 提高 2.3%。二者交互作用下, N1SDRR 处理土壤 GWP 较 N2SDRR 降低 4.6%, 较 N1RROS 降低 5.0%。另外, N1SDRR 处理土壤 GWP 较 N2RR 降低 2.4%, 表明氮肥减施结合过腹+根茬还田对全球增温潜势具有一定调控作用。

2.2　氮肥减施及不同绿肥还田方式对小麦籽粒产量的影响

主效应分析表明, 年份、施氮水平、绿肥还田方式及施氮水平和绿肥还田方式二者互作效应均显著影响小麦籽粒产量, 而年份、施氮水平及绿肥还田方式三者互作效应对小麦籽粒产量影响不显著(图 3)。2 个试验年度内, 不同施氮水平下, N1 处理小麦籽粒产量较 N2 降低 28.7%, 较 N0 提高 38.7%。不同绿肥还田方式下, SDRR 处理籽粒产量较 RROS 和 RR 分别提高 5.3%和 18.8%。二者交互作用下, N1SDRR 籽粒产量略低于 N2SDRR, 但两者差异不显著, 且 N1SDRR 籽粒产量较 N1RR 和 N1RROS 分别提高 8.8%和 4.1%。此外, N1SDRR 籽粒产量较

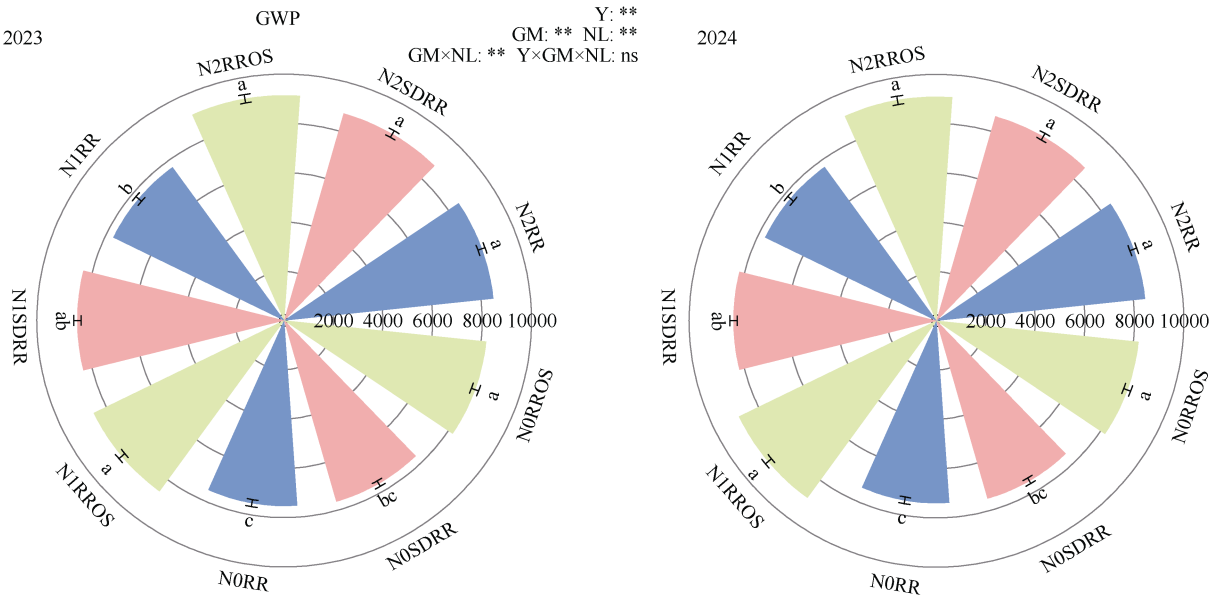


图 2 不同处理下全球增温潜势

Fig. 2 Global warming potential under different treatments

处理同表 1。GWP: 全球增温潜势; Y: 年份; GM: 绿肥还田方式; NL: 施氮水平。*代表 $P < 0.05$; **代表 $P < 0.01$; ns 代表无显著性差异。不同小写字母代表处理间具有显著差异($P < 0.05$)。

Treatments are the same as those given in Table 1. GWP: global warming potential; Y: year; GM: green manure incorporation method; NL: N fertilizer application rate. * indicates $P < 0.05$; ** indicates $P < 0.01$; ns indicates no significant difference. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

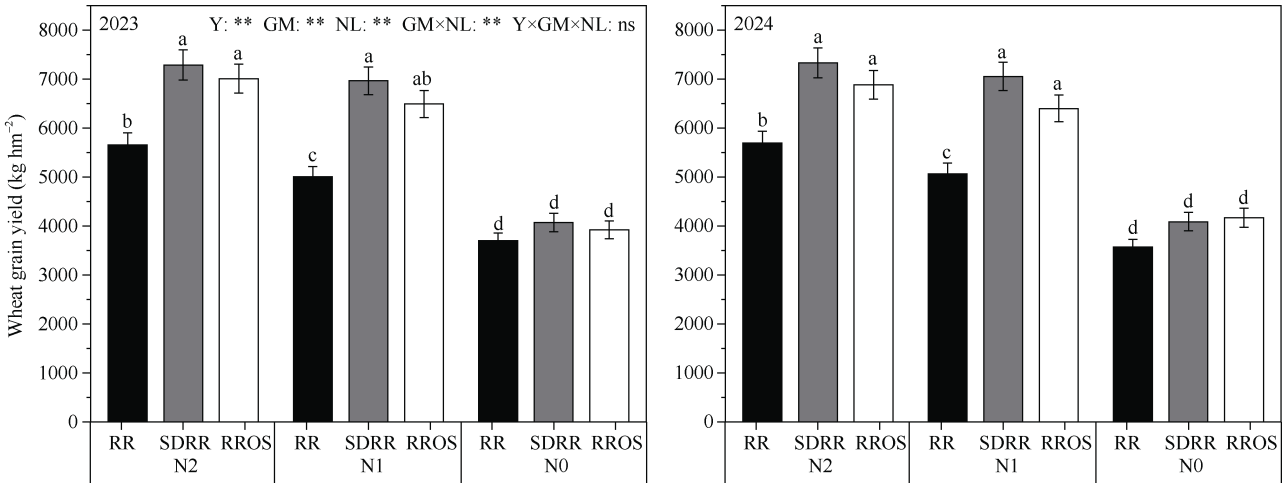


图 3 不同处理下小麦籽粒产量

Fig. 3 Effects of different treatments on wheat grain yield

处理同表 1，缩写同图 2。**代表 $P < 0.01$; ns 代表无显著性差异。不同小写字母代表处理间具有显著差异($P < 0.05$)。

Treatments are the same as those given in Table 1, and abbreviations are the same as those given in Fig. 2. ** indicates $P < 0.01$; ns indicates no significant difference. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

N2RR 提高 23.5%，产量增幅明显。因此，氮肥减施结合过腹+根茬还田能有效提高小麦籽粒产量。

2.3 氮肥减施及不同绿肥还田方式对温室气体排放强度的影响

主效应分析表明，年份、绿肥还田方式对温室气体排放强度影响显著，而施氮水平及其与绿肥还田方式二者交互效应对温室气体排放强度影响均不显著，且年份、施氮水平及绿肥还田方式三者互作效应对温室气体排放强度影响均不显著(图 4)。2 个试验年度内，不同施氮水平下，N1 处理温室气体排放强度与 N2 无显著差异，较 N0 降低 19.6%。不同绿肥还田方式下，SDRR 处理温室气体排放强度较

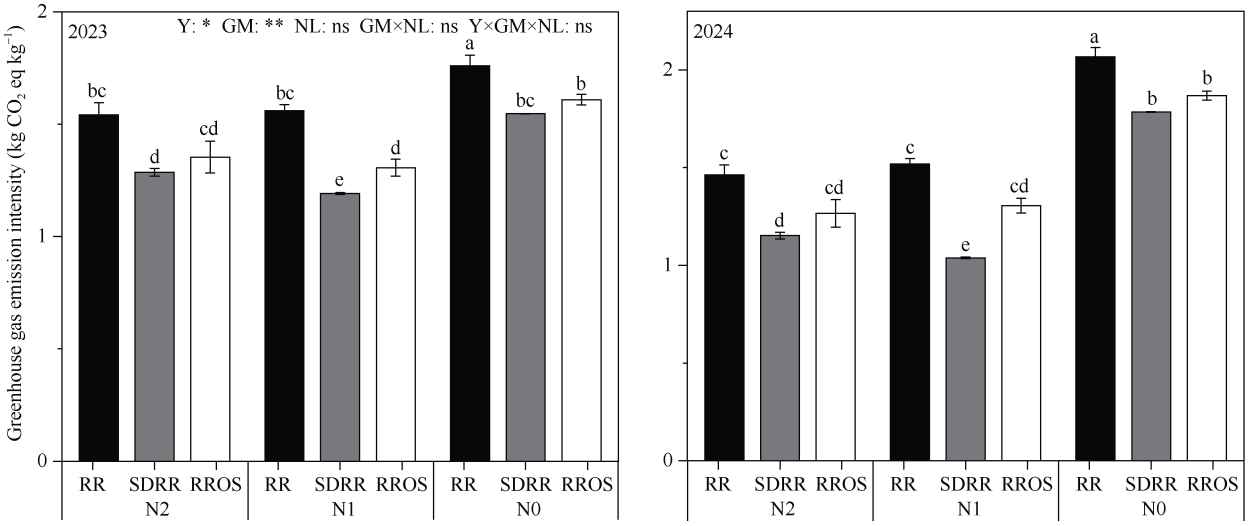


图 4　不同处理下温室气体排放强度

Fig. 4　Greenhouse gas emission intensity under different treatments

处理同表 1, 缩写同图 2。*代表 $P < 0.05$; **代表 $P < 0.01$; ns 代表无显著性差异。不同小写字母代表处理间具有显著差异($P < 0.05$)。Treatments are the same as those given in Table 1, and abbreviations are the same as those given in Fig. 2. * indicates $P < 0.05$; ** indicates $P < 0.01$; ns indicates no significant difference. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

RROS 和 RR 分别降低 6.9%和 18.8%。二者交互作用下, N1SDRR 处理温室气体排放强度较 N2SDRR 和 N1RROS 分别降低 8.5%和 14.6%。另外, N1SDRR 处理温室气体排放强度较 N2RR 降低 25.8%。因此, 氮肥减施结合过腹+根茬还田能有效降低小麦农田温室气体排放强度。

2.4　氮肥减施及不同绿肥还田方式对土壤理化性质和土壤酶活性的影响

2.4.1　氮肥减施及不同绿肥还田方式对土壤理化性质的影响　　主效应分析表明, 年份、施氮水平、绿肥还田方式及二者交互效应对土壤理化指标均影响显著(容重除外), 而年份、施氮水平及绿肥还田方式三者互作效应对土壤理化指标影响均不显著(表 5)。2 个试验年度内, 不同施氮水平下, N1 土壤有机质、铵态氮、硝态氮含量较 N2 分别降低 4.2%、7.0%、7.8%, 较 N0 分别提高 16.7%、6.3%、7.6% (图 5)。N1 处理土壤容重、pH 与 N2 无显著差异。不同绿肥还田方式下, SDRR 处理土壤有机质、铵态氮含量较 RROS 分别提高 9.1%、17.4%, 但硝态氮含量降低 8.9%; SDRR 处理土壤有机质、铵态氮含量较 RR 分别提高 23.5%、22.3%。二者交互作用下, N1SDRR 处理土壤有机质、铵态氮、硝态氮含量较 N2SDRR 分别降低 3.1%、3.7%、3.0%; 土壤有机质、铵态氮含量较 N1RROS 处理分别提高 9.1%、22.8%, 但土壤硝态氮含量较之降低 10.0%。因此, 氮肥减施结合过腹+根茬还田通过改善土壤理化因子, 提高了小麦农田土壤养分含量。

表 5　年份、施氮水平及绿肥还田方式对土壤理化特性的交互分析

Table 5　Interaction analysis of nitrogen application levels and green manure return methods on soil physical and chemical properties across years

指标 Indicators	年份 Year (Y)	施氮水平 N fertilizer application rate (NL)	绿肥还田方式 Green manure incorporation method (GM)	施氮水平×绿肥还田方式 NL × GM	年份×施氮水平×绿肥还田方式 Y × NL × GM
容重 BD	*	ns	*	*	ns
酸碱度 pH	**	**	**	*	ns
有机质 SOM	**	**	**	**	ns
铵态氮 NH_4^+-N	**	**	**	**	ns
硝态氮 NO_3^--N	**	**	**	**	ns

*代表 $P < 0.05$; **代表 $P < 0.01$; ns 代表无显著性差异。

BD: bulk density; SOM: organic matter; NH_4^+-N: ammonium nitrogen; NO_3^--N: nitrate nitrogen. * indicates $P < 0.05$; ** indicates $P < 0.01$; ns indicates no significant difference.

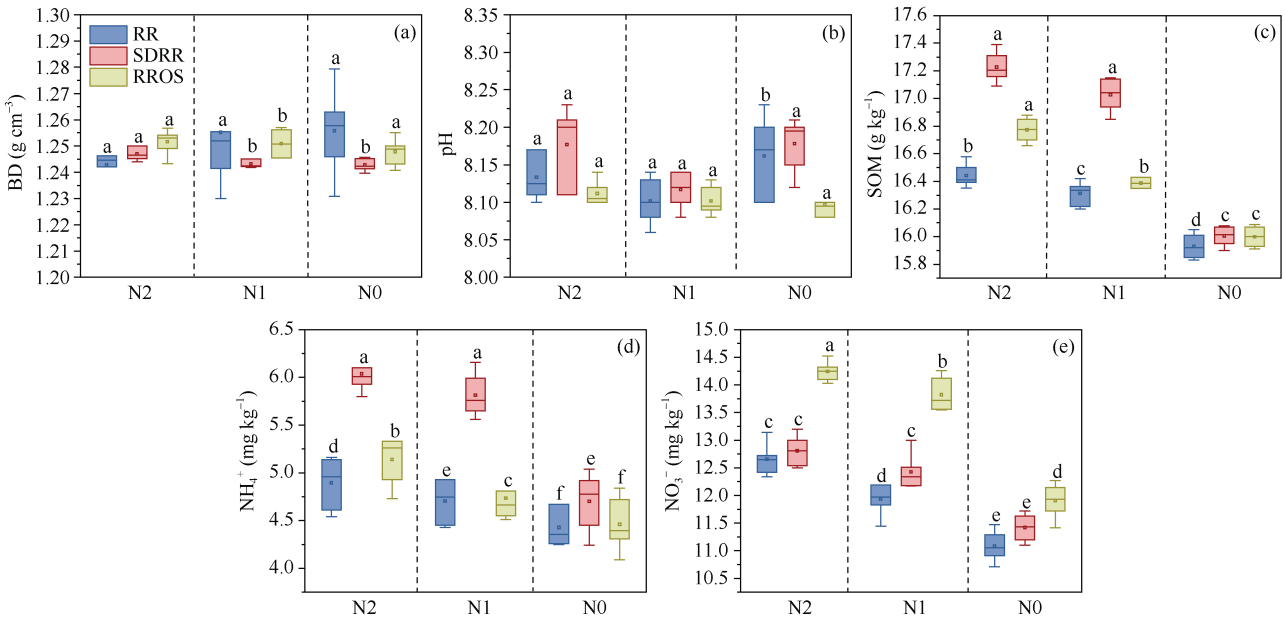


图 5 不同处理下土壤理化指标

Fig. 5 Soil physicochemical properties under different treatments

处理同表 1，缩写同表 5。图中不同小写字母代表处理间具有显著差异($P < 0.05$)。

Treatments are the same as those given in Table 1, and abbreviations are the same as those given in Table 5. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

2.4.2 氮肥减施及不同绿肥还田方式对土壤酶活性的影响 主效应分析表明，年份、施氮水平显著影响土壤脲酶、蔗糖酶、亚硝酸还原酶、硝酸还原酶活性；绿肥还田方式对土壤脲酶、蔗糖酶、硝酸还原酶活性影响显著，但对土壤亚硝酸还原酶活性影响不显著；而施氮水平、绿肥还田方式二者交互效应仅对土壤硝酸还原酶活性影响显著，但对土壤脲酶、蔗糖酶、亚硝酸还原酶活性影响不显著；年份、施氮水平及绿肥还田方式三者互作效应对土壤酶活性指标影响均不显著(图 6)。2 个试验年度内，不同施氮水平下，N1 处理土壤亚硝酸还原酶、硝酸还原酶活性较 N2 分别降低 3.2%、3.8%，但蔗糖酶活性较 N2 提高 6.2%；土壤脲酶、蔗糖酶、亚硝酸还原酶、硝酸还原酶活性较 N0 分别提高 18.2%、9.0%、9.3%、12.9%。不同绿肥还田方式下，SDRR 处理土壤亚硝酸还原酶、硝酸还原酶活性较 RROS 分别降低 12.1%、5.2%，但脲酶活性提高 7.8%；土壤脲酶活性较 RR 提高 6.2%，但土壤亚硝酸还原酶活性降低 7.0%。二者交互作用下，N1SDRR 处理土壤亚硝酸还原酶、硝酸还原酶活性较 N2SDRR 分别降低 8.8%、9.4%，但土壤脲酶活性提高 5.8%；土壤蔗糖酶、脲酶活性较 N1RROS 分别提高 3.2%、7.8%，但土壤亚硝酸还原酶、硝酸还原酶活性分别降低 11.9%、5.7%。因此，氮肥减施结合过腹+根茬还田有利于改善土壤酶活性，进而提高小麦农田土壤养分含量。

2.5 土壤特性与全球增温潜势、籽粒产量及温室气体排放强度的综合分析

相关性分析表明，有机质含量、硝态氮含量、铵态氮含量及蔗糖酶活性、脲酶活性、硝酸还原酶活性与籽粒产量、全球增温潜势和温室气体排放强度均呈显著正相关，而容重、亚硝酸还原酶活性与籽粒产量、全球增温潜势和温室气体排放强度均呈显著负相关。其中，有机质含量、铵态氮含量、硝态氮含量、蔗糖酶活性、脲酶活性对小麦籽粒产量解释值较大(0.5 ≤ Mantel's r)，有机质含量、硝态氮含量、脲酶活性对全球增温潜势解释值较大(0.5 ≤ Mantel's r)，而有机质含量、铵态氮含量、硝态氮含量、蔗糖酶活性、脲酶活性和硝酸还原酶活性对温室气体排放强度解释值较大(0.5 ≤ Mantel's r) (图 7-a)。为深入探究影响温室气体排放强度的关键驱动因子及其相对贡献，并揭示内在作用规律，构建随机森林模型。该模型能够有效处理复杂、非线性的关系，并通过变量重要性评估，客观识别对温室气体排放强度影响最大的因子。结果表明，土壤蔗糖酶活性、籽粒产量和有机质含量是调控温室气体排放强度的最主要的影响因子，其总贡献率高达 48% (图 7-b)。综上，氮肥减施结合过腹+根茬还

田通过调控有机质含量、蔗糖酶活性等土壤特性来增强土壤固碳能力、优化养分利用效率, 同时调控全球增温潜势降低并且实现籽粒产量提升, 进而降低温室气体排放强度, 为温室气体减排提供科学依据。

3　讨论

3.1　氮肥减施及不同绿肥还田方式对土壤温室气体排放的影响

氮肥减施是降低农田温室气体排放的重要措施[26]。本研究发现, 减施氮肥 30%可显著降低土壤 CO_2 和 N_2O 的排放总量, 较常规施氮分别减少 8.7%和 27.9%, 同时提升土壤对 CH_4 的吸收能力, 较常规施氮增加 9.3%。这一结果与前人关于减氮增效的研究结论一致[27-28]。过量氮肥施用通过硝化与反硝化作用加剧土壤 N_2O 排放, 而氮肥减施能减少土壤中硝态氮和铵态氮积累, 从而降低微生物驱动的反硝化作用底物供应强度[29]。本研究发现, 减氮 30%处理下土壤硝态氮含量较常规施氮降低 7.8%, 这可能是土壤 N_2O 排放显著减少的直接原因。此外, 氮肥减施降低土壤亚硝酸还原酶和硝酸还原酶活性, 较常规施氮分别降低 3.2%和 3.8%, 表明氮代谢关键酶活性受到抑制, 进一步削弱氮素向土壤 N_2O 的转化效率[30]。然而, 氮肥减施对土壤 CO_2 排放的影响具有双重性。一方面, 氮肥减施减少土壤中可溶性氮的输入, 可能降低微生物活性, 从而减缓有机碳的矿化速率; 另一方面, 本研究减氮 30%处理土壤 CO_2 排放总量较不施氮提高 10.6%, 这可能与减氮后绿肥还田对土壤碳库的补充作用有关。过腹+根茬

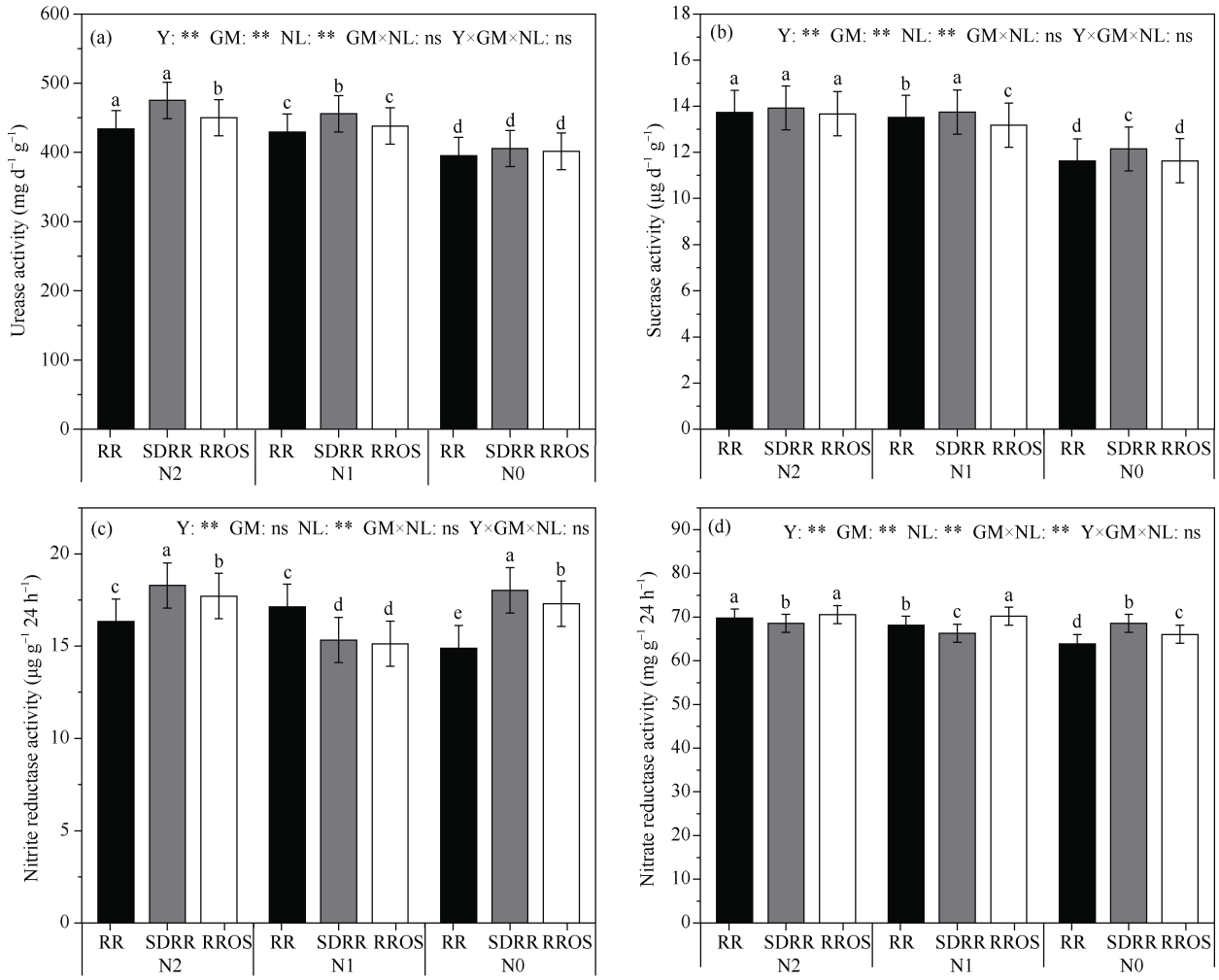


图 6　不同处理下土壤生物学指标

Fig. 6　Soil biological indexes under different treatments

处理同表 1, 缩写同图 2。**代表 $P < 0.01$; ns 代表无显著性差异。不同小写字母代表处理间具有显著差异($P < 0.05$)。

Treatments are the same as those given in Table 1, and abbreviations are the same as those given in Fig. 2. ** indicates $P < 0.01$; ns indicates no significant difference. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

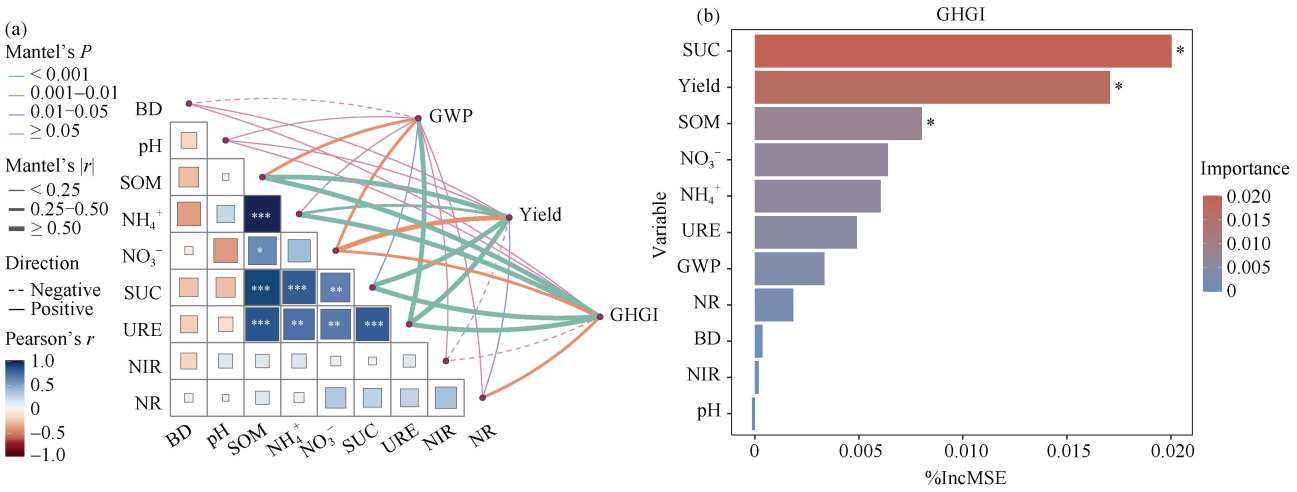


图 7 土壤特性与全球增温潜势、籽粒产量及温室气体排放强度的相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis between soil properties and global warming potential, grain yield, and greenhouse gas emission intensity

图(a)为全球增温潜势、籽粒产量及温室气体排放强度与土壤理化指标的 R 语言"linkET"包构建的曼特尔检验；线条的宽度和细度表明全球增温潜势、籽粒产量及温室气体排放强度与土壤理化指标之间关系的强弱；实线代表正相关，虚线代表负相关；方格的颜色表示土壤因子之间的相关性。图(b)为温室气体排放强度的 R 语言 RandomForest 包构建的随机森林模型分析，采用构建模型(ntree = 500, mtry = sqrt(p))，通过 70%训练集建模，并计算 OOB 误差；使用剩余 30%测试集计算 RMSE 和 R^2 验证精度。模型经 OOB 验证(误差率 14.2%)和独立测试集验证(R^2 = 0.873, RMSE = 0.153)，确认蔗糖酶、产量和有机质为%IncMSE 指标的前三大主导因子。图中*代表 P < 0.05; **代表 P < 0.01; ***代表 P < 0.001。BD: 容重; pH: 酸碱度; SOM: 有机质; NH_4^+: 铵态氮; NO_3^-: 硝态氮; SUC: 蔗糖酶; URE: 脲酶; NIR: 亚硝酸还原酶; NR: 硝酸还原酶; GWP: 全球增温潜势; Yield: 籽粒产量; GHGI: 温室气体排放强度。

(a) Mantel test constructed using the R package "linkET", showing the correlations between GWP, yield, GHGI, and soil physicochemical indicators; Line width and thickness reflect the strength of relationships; solid lines indicate positive correlations, dashed lines negative correlations; Square colors indicate correlations among soil factors. (b) Random forest analysis of GHGI using the R package RandomForest (ntree = 500, mtry = sqrt(p)), with 70% of data used for model training and OOB error calculation, and 30% for RMSE and R^2 validation. The model was validated with an OOB error rate of 14.2% and test set results of R^2 = 0.873 and RMSE = 0.153. Sucrase enzyme activity, grain yield, and organic matter were identified as the top three variables based on %IncMSE. * indicates P < 0.05; ** indicates P < 0.01; *** indicates P < 0.001. BD: bulk density; pH: potential of hydrogen; SOM: organic matter; NH_4^+: ammonium nitrogen; NO_3^-: nitrate nitrogen; SUC: sucrase; URE: urease; NIR: nitrite reductase; NR: nitrate reductase; GWP: global warming potential; Yield: grain yield; GHGI: greenhouse gas emission intensity.

还田处理通过绿肥过腹后有机肥还田增加有机质输入，为微生物提供额外的碳源，促进土壤 CO_2 的释放[31]。这一现象表明，氮肥减施需结合绿肥还田方式优化碳氮比，以平衡碳固存与矿化过程[32]。

绿肥还田方式显著影响土壤温室气体排放的动态[31-32]。本研究中，过腹+根茬还田处理表现最优，土壤 CO_2 和 N_2O 排放总量较全量还田分别降低 5.1%和 15.2%，且 CH_4 吸收量较仅根茬还田提高 17.4%。这种差异主要源于绿肥过腹+根茬还田对土壤理化性质和酶活性的双重调控[5]。绿肥过腹+根茬还田处理显著提升土壤有机质和铵态氮含量，较全量还田分别提高 9.1%和 22.8%。有机质增加通过提高土壤 C/N，减缓绿肥腐解速率，避免短期内大量可溶性碳输入引起"激发效应"，从而降低土壤 CO_2 的排放峰值[33]。此外，绿肥过腹+根茬还田处理下土壤容重较全量还田降低 4.1%，增强了土壤通气性，可能通过增强氧化环境抑制反硝化作用，这与土壤 N_2O 排放显著降低密切相关。绿肥过腹+根茬还田处理提高了土壤蔗糖酶活性，较全量还田提高 3.2%，蔗糖酶活性提升加速复杂碳化合物的分解，可能通过增加微生物对碳的竞争性利用，间接抑制反硝化菌活性[34]。相关性分析显示，土壤有机质、硝态氮、铵态氮含量及蔗糖酶、脲酶、硝酸还原酶活性与籽粒产量、全球增温潜势和温室气体排放强度均呈显著正相关，凸显土壤碳氮库动态及关键酶活性在协同影响作物生产和温室气体排放中的枢纽作用。

3.2 氮肥减施及不同绿肥还田方式对小麦产量及温室气体排放强度的影响

不同绿肥还田结合氮肥减施能提高作物产量及其稳定性[35]。本研究中，减氮 30%结合绿肥过腹+根茬还田处理产量虽较常规施氮结合绿肥过腹+根茬还田略有差异，但较减氮 30%全量还田提高了 4.1%，表明绿肥过腹+根茬还田通过优化养分供应弥补减氮造成的氮素亏缺。绿肥经反刍动物消化后形成羊粪还田，其 C/N 显著高于直接翻压，且腐解速率较慢，可延长氮素释放周期，与小麦需肥高峰

期同步[36]。此外, 减氮 30%结合绿肥过腹+根茬还田处理下土壤有机质和铵态氮含量较减氮 30%全量还田分别提高 9.1%和 22.8%, 表明绿肥过腹+根茬还田通过提升土壤缓释养分库, 增强了氮素供应能力。这与前人研究提出的“绿肥还田-微生物活化-养分缓释”路径相符, 进一步验证了绿肥过腹+根茬还田在减氮条件下维持产量的可行性[14]。本研究发现, 氮肥减施 30%并未导致小麦籽粒产量显著下降, 减氮 30%处理产量较不施氮提高 38.7%, 且与常规施氮的差异仅为 28.7%。这一结果表明, 在青海高原特殊的高寒气候条件下, 适度减氮可通过优化氮素利用效率维持产量稳定[37]。然而, 减氮对温室气体排放强度的影响具有复杂性。尽管减氮 30%处理全球增温潜势较常规施氮降低 6.1%, 但温室气体排放强度与常规施氮无显著差异, 这可能与产量下降幅度较小有关。

温室气体排放强度是衡量农业生产碳效率的核心指标[38]。本研究发现, 减氮 30%结合绿肥过腹+根茬还田处理的温室气体排放强度较常规施氮和减氮全量还田分别降低 8.5%和 14.6%, 其减排效应主要归因于以下 3 个方面: (1) N_2O 排放显著抑制, N_2O 的产生主要受硝化与反硝化作用驱动, 而减氮直接减少硝化底物的输入, 此外, 绿肥过腹+根茬还田通过降低绿肥 C/N, 缩短腐解周期, 减少反硝化作用碳源供应, 同时抑制硝化螺菌属(*Nitrospira*)丰度, 从而削弱了化-反硝化链式反应[39]; (2) CH_4吸收能力的增强, 可能与土壤氧化还原电位的改善有关, 绿肥过腹还田提高土壤有机质含量, 促进甲烷氧化菌活性, 而减氮减少土壤水分滞留, 减少甲烷菌的厌氧环境; (3) 碳释放与作物需肥的同步性, 绿肥过腹+根茬还田处理下, 纤维素降解酶活性提升延缓有机碳矿化速率, 使 CO_2 排放峰值延后, 减少生育期前期的无效碳损失, 从而降低单位产量的碳排放强度[40-41]。随机森林模型进一步表明, 土壤蔗糖酶活性、籽粒产量及有机质含量是调控温室气体排放强度的关键因子。减氮 30%结合绿肥过腹+根茬还田处理下, 土壤蔗糖酶活性较减氮 30%全量还田提高 3.2%, 表明其通过加速多糖分解, 促进微生物对稳定态碳的利用, 减少易分解碳的短期矿化[42]。然而, 本研究仅基于 2 年田间试验, 未来需结合长期定位试验和区域适应性研究, 深入评估“绿肥过腹+根茬还田”模式在青海高原及其他高寒生态区的推广潜力。此外, 本研究温室气体监测主要集中于麦田生育期, 因缺乏高频监测可能遗漏短期排放高峰, 导致潜在低估。未来需在追肥后进行高频监测, 以全面评估该模式对高原农田的潜在影响。

4　结论

氮肥减施 30%结合绿肥地上部过腹联合根茬还田显著降低青海高原小麦农田土壤温室气体排放, CO_2、N_2O 排放量较常规施氮分别减少 3.2%、28.1%, 同时 CH_4 吸收量提高 6.3%, 全球增温潜势降低 4.6%。小麦籽粒产量与常规施氮无显著差异, 但温室气体排放强度较常规施氮降低 8.5%。有机质、铵态氮含量较全量还田分别提高 9.1%和 22.8%, 硝态氮含量降低 10.0%。土壤有机质、蔗糖酶活性增强抑制氮素转化关键酶活性, 优化碳氮代谢路径, 降低反硝化底物供应协同调控温室气体排放强度, 实现减排与稳产。因此, 氮肥减施 30%结合绿肥地上部过腹联合根茬还田可作为青海高原及高寒地区小麦农田稳产减排、资源合理利用的高效种植模式。

References

[1] Fu H, Zhao K, Xie X, et al. Contribution of nitrogen management to greenhouse gas emission reduction: a case study of China. Environ Sci Technol, 2025, 59: 9072–9081.

[2] 张继宁, 张鲜鲜, 孙会峰, 等. 秸秆热解炭化及还田应用过程碳足迹核算研究进展. 应用与环境生物学报, 2025, 31: 1499–1512.
Zhang J N, Zhang X X, Sun H F, et al. Research status and prospects of carbon footprint calculation in the process of straw pyrolysis charcoalization and application to field. Chin J Appl Environ Biol, 2025, 31: 1499–1512 (in Chinese with English abstract).

[3] dos Reis Martins M, Ammann C, Boos C, et al. Reducing N fertilization in the framework of the European Farm to Fork strategy under global change: impacts on yields, N_2O emissions and N leaching of temperate grasslands in the Alpine region. Agric Syst, 2024, 219: 104036.

[4] Behera S D, Garnayak L M, Sarangi S K, et al. Green manure-based nitrogen management in rice and zero tillage in succeeding toria and sweet corn sustain system yield and soil quality in Eastern India. Agronomy, 2025, 15: 475.

[5] Dash P K, Bhattacharyya P, Padhy S R, et al. Optimizing sustainability in rice-based cropping systems: a holistic approach for integrating soil carbon farming, energy efficiency, and greenhouse gas reduction strategies via resource conservation practices. Agron Sustain Dev, 2025, 45: 11.

[6] 李新华, 董红云, 朱振林, 等. 秸秆还田方式对黄淮海区域小麦-玉米轮作制农田土壤周年温室气体排放的影响. 土壤与作物, 2019, 8(3): 280–287.
Li X H, Dong H Y, Zhu Z L, et al. The impact of straw returning to the field on annual greenhouse gas emissions in wheat-corn

rotation farmland soil in the Huang-Huai-Hai region. Soil Crop, 2019, 8(3): 280–287 (in Chinese with English abstract).

[7] 樊志龙, 柴强, 曹卫东, 等. 绿肥在我国旱地农业生态系统中的服务功能及其应用. 应用生态学报, 2020, 31: 1389–1402.
Fan Z L, Chai Q, Cao W D, et al. The service functions and applications of green manure in China's dryland agricultural ecosystem. Chin J Appl Ecol, 2020, 31: 1389–1402 (in Chinese with English abstract).

[8] 常单娜, 刘春增, 李本银, 等. 翻压紫云英对稻田土壤还原物质变化特征及温室气体排放的影响. 草业学报, 2018, 27(12): 133–144.
Chang D N, Liu C Z, Li B Y, et al. The impact of treated purple cloud bean on the transformation characteristics of reducing substances in paddy soil and greenhouse gas emissions. Acta Pratac Sin, 2018, 27(12): 133–144 (in Chinese with English abstract).

[9] 董红敏, 李玉娥, 陶秀萍, 等. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策. 农业工程学报, 2008, 24(10): 269–273.
Dong H M, Li Y E, Tao X P, et al. Greenhouse gas emissions and mitigation technologies for agricultural sources in China. Trans CSAE, 2008, 24(10): 269–273 (in Chinese with English abstract).

[10] 高嵩涓, 周国朋, 曹卫东. 南方稻田紫云英作冬绿肥的增产节肥效应与机制. 植物营养与肥料学报, 2020, 26: 2115–2126.
Gao S J, Zhou G P, Cao W D. The effect and mechanism of increasing yield and saving fertilizer by using purple clover as winter green manure in southern rice fields. J Plant Nutr Fert, 2020, 26: 2115–2126 (in Chinese with English abstract).

[11] Zhou G P, Fan K K, Gao S J, et al. Green manuring relocates microbiomes in driving the soil functionality of nitrogen cycling to obtain preferable grain yields in thirty years. Sci China Life Sci, 2024, 67: 596–610.

[12] Yang W S, Cui H H, Liu Q, et al. Effect of nitrogen reduction by chemical fertilization with green manure (*Vicia sativa* L.) on soil microbial community, nitrogen metabolism and yield of *Uncaria rhynchophylla* by metagenomics. Arch Microbiol, 2024, 206: 106.

[13] 肖玉涛, 李正鹏, 严清彪, 等. 秋闲期复种翻压绿肥对后茬作物春小麦产量、氮残留和 N_2O 排放的影响. 青海大学学报, 2024, 42(1): 9–16.
Xiao Y T, Li Z P, Yan Q B, et al. The effects of intercropping green manure during the autumn off season on spring wheat yield, nitrogen residue, and N_2O emissions in subsequent crops. J Qinghai Univ, 2024, 42(1): 9–16 (in Chinese with English abstract).

[14] 韩梅, 高嵩娟, 李正鹏, 等. 青海高原长期复种绿肥毛叶苕子对土壤氨氧化细菌和氨氧化古菌的影响. 干旱地区农业研究, 2021, 39(4): 102–108.
Han M, Gao S J, Li Z P, et al. Effects of long-term intercropping of green manure with hairy leafy goosefoot on soil ammonia-oxidizing bacteria and archaea in the Qinghai Plateau. Agric Res Arid Areas, 2021, 39(4): 102–108 (in Chinese with English abstract).

[15] 吴红, 刘海霞, 周明夏, 等. 羊粪还田对巨峰葡萄园土壤理化性质的影响. 广东农业科学, 2018, 45(12): 32–37.
Wu H, Liu H X, Zhou M X, et al. Effects of sheep dung on soil physical and chemical properties in a giant grape vineyard. Guangdong Agric Sci, 2018, 45(12): 32–37 (in Chinese with English abstract).

[16] 杨丹, 叶祝弘, 肖珣, 等. 化肥减量配施有机肥对早稻田温室气体排放的影响. 农业环境科学学报, 2018, 37: 2443–2450.
Yang D, Ye Z H, Xiao X, et al. Effects of reduced fertilizer application and organic fertilizer on greenhouse gas emissions in early rice fields. J Agro-Environ Sci, 2018, 37: 2443–2450 (in Chinese with English abstract).

[17] 张岳芳, 郑建初, 陈留根, 等. 麦秸还田与土壤耕作对稻季 CH_4 和 N_2O 排放的影响. 生态环境学报, 2009, 18: 2334–2338.
Zhang Y F, Zheng J C, Chen L G, et al. The effects of straw returning to the field and soil tillage on CH_4 and N_2O emissions during the rice season. Ecol Environ Sci, 2009, 18: 2334–2338 (in Chinese with English abstract).

[18] Niyigena V, Coffey K P, Philipp D, et al. Intake, digestibility, rumen fermentation and nitrogen balance in sheep offered alfalfa silage with different proportions of the tannin-rich legume sericea *Lespedeza*. Anim Feed Sci Technol, 2024, 308: 115863.

[19] 黄瑶, 刘宁, 胡启良, 等. "紫云英×油菜"混播还田及减施氮肥对双季稻田温室气体排放的影响. 核农学报, 2024, 38: 976–984.
Huang Y, Liu N, Hu Q L, et al. Effects of mixed sowing and returning of "Purple clover × rape" to the field and reduced nitrogen fertilizer application on greenhouse gas emissions in double-cropping rice fields. J Nucl Agric Sci, 2024, 38: 976–984 (in Chinese with English abstract).

[20] 刘亚龙, 王鹏飞, 于爱忠, 等. 绿肥还田条件下减氮对河西绿洲灌区玉米产量及 N_2O 排放的影响. 作物学报, 2025, 51: 771–784.
Liu Y L, Wang P F, Yu A Z, et al. Effects of nitrogen reduction on corn yield and N_2O emission in Hexi Oasis irrigation district under the condition of green manure returning to the field. Acta Agron Sin, 2025, 51: 771–784 (in Chinese with English abstract).

[21] 肖倩, 武升, 刘莹, 等. 不同有机养分替代化肥对小麦产量、氮肥利用率及土壤肥力的影响. 农业环境科学学报, 2023, 42: 2291–2300.
Xiao Q, Wu S, Liu Y, et al. Effects of different organic nutrient substitutes on wheat yield, nitrogen fertilizer utilization rate and soil fertility. J Agro-Environ Sci, 2023, 42: 2291–2300 (in Chinese with English abstract).

[22] 李晓立, 何堂庆, 张晨曦, 等. 等氮量条件下有机肥替代化肥对玉米农田温室气体排放的影响. 中国农业科学, 2022, 55: 948–961.
Li X L, He T Q, Zhang C X, et al. Effects of organic fertilizer substitution on greenhouse gas emissions in corn fields under nitrogen-limited conditions. Sci Agric Sin, 2022, 55: 948–961 (in Chinese with English abstract).

[23] 文雪, 温艳茹, 刘宝, 等. 黑土区不同耕作措施对土壤水分和玉米产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2024, 30: 1447–1460.
Wen X, Wen Y R, Liu B, et al. Effects of different tillage practices on soil water and maize yield in black soil areas. J Plant Nutr Fert, 2024, 30: 1447–1460 (in Chinese with English abstract).

[24] 鲍士旦. 土壤农化分析(第 3 版). 北京: 中国农业出版社, 2000. pp 211–241.
Bao S D. Soil Agrochemical Analysis, 3rd edn. Beijing: China Agricultural Press, 2000. pp 211–241 (in Chinese).

[25] 王相宜, 黄红心, 鞠鲤懋, 等. 不同肥料投入对有机菜田土壤

质量的影响. 中国农业大学学报, 2024, 29(6): 197–205.
Wang X Y, Huang H X, Ju L M, et al. Effects of different fertilizer inputs on soil quality in organic vegetable fields. J China Agric Univ, 2024, 29(6): 197–205 (in Chinese with English abstract).

[26] 林斌, 徐孟, 汪笑溪. 中国农业碳减排政策、研究现状及展望. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30: 500–515.
Lin B, Xu M, Wang X X. China's agricultural carbon emission reduction policy, research status and prospect. Chin J Eco-Agric, 2022, 30: 500–515 (in Chinese with English abstract).

[27] 马艳芹, 钱晨晨, 孙丹平, 等. 施氮水平对稻田土壤温室气体排放的影响. 农业工程学报, 2016, 32(增刊 2): 128–134.
Ma Y Q, Qian C C, Sun D P, et al. The effect of nitrogen application levels on greenhouse gas emissions from paddy field soils. Trans CSAE, 2016, 32(S2): 128–134 (in Chinese with English abstract).

[28] 朱相成, 张振平, 张俊, 等. 增密减氮对东北水稻产量、氮肥利用效率及温室效应的影响. 应用生态学报, 2016, 27: 453–461.
Zhu X C, Zhang Z P, Zhang J, et al. Effects of increased density and reduced nitrogen on rice yield, nitrogen fertilizer efficiency, and greenhouse effect in Northeast China. Chin J Appl Ecol, 2016, 27: 453–461 (in Chinese with English abstract).

[29] 李艳勤, 刘刚, 红梅, 等. 优化施氮对河套灌区氧化亚氮排放和氨挥发的影响. 环境科学学报, 2019, 39: 578–584.
Li Y Q, Liu G, Hong M, et al. Effects of optimized nitrogen application on nitrous oxide emissions and ammonia volatilization in the Hetao irrigation district. Environ Sci Letters, 2019, 39: 578–584 (in Chinese with English abstract).

[30] 唐艳芬, 续勇波, 郑毅, 等. 小麦蚕豆间作对根际土壤氮转化微生物的影响. 农业资源与环境学报, 2016, 33: 482–490.
Tang Y F, Xu Y B, Zheng Y, et al. Effects of intercropping wheat and broad beans on nitrogen transformation microorganisms in rhizosphere soil. J Agric Resour Environ, 2016, 33: 482–490 (in Chinese with English abstract).

[31] Wang K, Ding W C, Yang X S, et al. The components and aromaticity of dissolved organic matter derived from aquatic plants determine the CO_2 and CH_4 emission potential. Water Res, 2025, 281: 123685.

[32] 全紫曼, 漆燕, 周泽弘, 等. 山黧豆还田与氮肥减施对稻田土壤活性有机碳组分及酶活性的影响. 草业科学, 2024, 41: 1057–1067.
Quan Z M, Qi Y, Zhou Z H, et al. The effects of returning mountain black beans to the field and reducing nitrogen fertilizer application on the active organic carbon components and enzyme activity in paddy soil. Pratac Sci, 2024, 41: 1057–1067 (in Chinese with English abstract).

[33] Wiemken V, Ineichen K. Seasonal fluctuations of the levels of soluble carbohydrates in spruce needles exposed to elevated CO_2 and nitrogen fertilization and glucose as a potential mediator of acclimation to elevated CO_2. J Plant Physiol, 2000, 156: 746–750.

[34] 邢力, 张玉铭, 胡春胜, 等. 长期不同养分循环再利用途径对农田土壤养分演替规律与培肥效果的影响研究. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30: 937–951.
Xing L, Zhang Y M, Hu C S, et al. Study on the influence of long-term different nutrient recycling pathways on the succession law and fertilization effect of farmland soil nutrients. Chin J Eco-Agric, 2022, 30: 937–951 (in Chinese with English abstract).

[35] Zhang J L, Nie J, Cao W D, et al. Long-term green manuring to substitute partial chemical fertilizer simultaneously improving crop productivity and soil quality in a double-rice cropping system. Eur J Agron, 2023, 142: 126641.

[36] 宫秀杰, 钱春荣, 于洋, 等. 我国玉米秸秆还田现状及效应研究进展. 江苏农业科学, 2017, 45(9): 10–13.
Gong X J, Qian C R, Yu Y, et al. Research progress on the status and effect of corn straw returning to field in China. Jiangsu Agric Sci, 2017, 45(9): 10–13 (in Chinese with English abstract).

[37] 段连学, 马祥, 琚泽亮, 等. 减氮配施有机肥对'青海甜燕麦'光合特性和产量的影响. 草地学报, 2022, 30: 471–478.
Duan L X, Ma X, Ju Z L, et al. The effects of nitrogen reduction and the application of organic fertilizer on the photosynthetic characteristics and yield of Qinghai sweet oats. Acta Agrest Sin, 2022, 30: 471–478 (in Chinese with English abstract).

[38] Pei Y, Chen X W, Niu Z H, et al. Effects of nitrogen fertilizer substitution by cow manure on yield, net GHG emissions, carbon and nitrogen footprints in sweet maize farmland in the Pearl River Delta in China. J Clean Prod, 2023, 399: 136676.

[39] 向伟, 王雷, 刘天奇, 等. 生物炭与无机氮配施对稻田温室气体排放及氮肥利用率的影响. 中国农业科学, 2020, 53: 4634–4645.
Xiang W, Wang L, Liu T Q, et al. Effects of biochar and inorganic nitrogen on greenhouse gas emissions and nitrogen fertilizer utilization in paddy fields. Sci Agric Sin, 2020, 53: 4634–4645 (in Chinese with English abstract).

[40] 李新华, 朱振林, 董红云, 等. 秸秆不同还田模式对玉米田温室气体排放和碳固定的影响. 农业环境科学学报, 2015, 34: 2228–2235.
Li X H, Zhu Z L, Dong H Y, et al. Effects of different straw returning modes on greenhouse gas emissions and carbon sequestration in cornfields. J Agro-Environ Sci, 2015, 34: 2228–2235 (in Chinese with English abstract).

[41] 程曼, 解文艳, 杨振兴, 等. 黄土旱塬长期秸秆还田对土壤养分、酶活性及玉米产量的影响. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27: 1528–1536.
Cheng M, Xie W Y, Yang Z X, et al. Effects of long-term straw returning on soil nutrients, enzyme activity and corn yield in loess dryland. Chin J Eco-Agric, 2019, 27: 1528–1536 (in Chinese with English abstract).

[42] 贾伟, 周怀平, 解文艳, 等. 长期秸秆还田秋施肥对褐土微生物碳、氮量和酶活性的影响. 华北农学报, 2008, 23(2): 138–142.
Jia W, Zhou H P, Xie W Y, et al. Effects of long-term straw returning and autumn fertilization on microbial carbon, nitrogen, and enzyme activity in brown soil. Acta Agric Boreali-Sin, 2008, 23(2): 138–142 (in Chinese with English abstract).