

陈慧娜,王 忍,黄 璜,等. 不同稻田生态种养模式对双季稻产量和 CH_4 排放规律的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(2):242–246.
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2023.02.036

不同稻田生态种养模式对双季稻产量和 CH_4 排放规律的影响

陈慧娜,王 忍,黄 璜,陈 灿,马微微,陈 璐,吕广动
(湖南农业大学农学院/湖南省稻田生态种养工程技术研究中心,湖南长沙 410128)

摘要:为探究不同稻田生态种养模式的 CH_4 排放规律,设置单一种稻(CK)、稻田养鱼(RF)、稻田养泥鳅(RL)、稻田养鸭(RD)4 个处理,进行双季稻大区试验。结果表明:RF、RL、RD 的 CH_4 排放通量在早、晚稻 CH_4 排放最高峰分别较 CK 降低 6.38~9.81、6.28~9.72 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。RF、RL、RD 的全年 CH_4 排放量分别较 CK 降低 44.62%、39.25%、29.60% ($P < 0.05$),双季稻总产量较 CK 增加了 5.82%~11.94% ($P < 0.05$),双季稻单位产量增温潜势分别较 CK 降低了 46.78%、44.44%、36.26% ($P < 0.05$),RF、RL 全年 CH_4 排放量显著低于 RD,降低率分别为 21.34% 和 16.68%。各生态种养处理早、晚稻的水稻生物量在齐穗期至成熟期均高于 CK,早、晚稻成熟期土壤有机质较 CK 分别高出 19.47%~58.11% 和 6.15%~56.21%。早、晚稻 CH_4 排放高峰的 CH_4 排放通量均与土壤有机质含量显著负相关,相关系数分别为 -0.806 和 -0.955。3 种稻田生态种养模式均具有固碳减排的作用,且能显著提高当季稻谷产量,均可作为水稻绿色生产模式进行推广。

关键词:稻田生态种养;双季稻;甲烷;产量

中图分类号:S511.04;S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1002–1302(2023)02–0242–05

温室效应是全球共同面临的环境问题, CH_4 是作为重要的温室气体之一,其温室效应是 CO_2 的 28 倍^[1],对大气温室效应的贡献占 19%^[2]。稻田是 CH_4 排放的重要来源之一,排放量占比达 6%^[3]。围绕我国提出的“碳达峰”和“碳中和”目标,如何采取措施减少稻田 CH_4 排放,达到固碳减排,成为热

点研究课题。大量研究表明,稻田生态种养能减少稻田 CH_4 排放高峰期的排放通量和稻季 CH_4 排放总量^[4–6]。稻田生态种养作为一种传统农业文化与现代农业技术相结合的水稻绿色生产方式,因其模式多样,适应性广,效益可观,在我国迅速推广和发展,2020 年全国稻渔综合种养面积达到 253 万 hm^2 ,平均水稻产量为 7.5 t/hm^2 ,湖南稻田生态种养面积超过 33 万 hm^2 ^[7]。湖南作为双季稻区和稻田生态种养活跃区,研究稻田生态种养模式下双季稻的 CH_4 排放规律意义重大。本研究选取稻鸭、稻鱼、稻鳅这 3 种主流稻田生态种养模式,研究其对双季稻稻田 CH_4 排放的影响,为稻田生态种养在固碳减排方面的应用提供参考。

收稿日期:2022–03–01

基金项目:湖北水稻生态优质技术集成与示范(编号:2018YFD0301003)。
作者简介:陈慧娜(1996—),女,湖南娄底人,硕士,主要从事稻田生态种养模式研究。E-mail:897976455@qq.com。

通信作者:黄 璜,博士,教授,主要从事农田生态种养研究, E-mail:hh863@126.com;陈 灿,博士,副教授,主要从事稻田生态种养研究, E-mail:CC973@126.com。

[28]李润根,曾慧兰,曾建梅. 基于高通量测序的连作百合土壤细菌群落多样性研究[J]. 宜春学院学报,2021,43(3):85–91.

[29]李 丹,靳鲲鹏,李小霞,等. 基于高通量测序技术的玉米不同生育时期土壤细菌多样性变化[J]. 山西农业科学,2019,47(9):1569–1572.

[30]刘 阳,王馨悦,陈 拓,等. 可培养细菌多样性及抗辐射-抗氧化相关性特征:以库姆塔格沙漠东缘为例[J]. 中国环境科学,2021,41(12):5921–5932.

[31]罗 旦,陈吉祥,程 琳,等. 陕北沙化区 3 种主要植物根际土

壤细菌多样性与土壤理化性质相关性分析[J]. 干旱区资源与环境,2019,33(3):151–157.

[32]Yang J K, Zhang J J, Yu H Y, et al. Community composition and cellulase activity of cellulolytic bacteria from forest soils planted with broad-leaved deciduous and evergreen trees [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2014, 98(3):1449–1458.

[33]隋夕然,王 妍,刘云根,等. 典型喀斯特区云南松林土壤养分和细菌群落对海拔的响应[J]. 浙江农业学报,2021,33(12):2348–2357.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

于 2019 年 3—11 月,在湖南省长沙县路口镇明月村进行双季稻大田试验。试验前土壤的基础理化性质:全氮含量为 1.64 g/kg,全磷含量为 0.50 g/kg,全钾含量为 22.71 g/kg,速效磷含量为 21.87 mg/kg,碱解氮含量为 112.35 mg/kg,有机质含量为 13.57 g/kg,pH 值 5.95。

1.2 供试材料

供试水稻品种:早稻为中早 35;晚稻为中早 39(翻秋栽培)。放养试验品种:鸭子为绿头野鸭,鱼为鲫鱼,泥鳅为本地泥鳅。

1.3 试验设计与田间管理

设置单一种稻(CK)、稻田养鱼(RF)、稻田养泥鳅(RL)、稻田养鸭(RD)进行大区试验,每个大区面积设为 667 m²,共 4 个大区。采取双季稻种植制度,早稻季于 2019 年 4 月 20 日整田,4 月 22 日插秧,移栽株距为 20 cm,移栽行距为 25 cm,每穴 3~4 株秧苗。开始整田时施入基肥,基肥施用量为氮肥总量的 70%、钾肥总量的 90% 和全量的磷肥,分蘖期追施氮肥总量的 30% 和剩余的 10% 的钾肥,后期不再追肥。3 种化肥的总量分别为:氮肥纯 N 为 150 kg/hm²,N:P₂O₅:K₂O 为 1.0:0.5:1.0。早稻于 7 月 20 日收割,晚稻季于 7 月 21 日整田,7 月 23 日移栽,插秧规格与施肥方式同早稻试验。晚稻化肥的施用总量分别为:氮肥纯 N 为 150 kg/hm²,N:P₂O₅:K₂O 为 1.0:0.5:0.8。晚稻灌浆后期收获鸭子,10 月 12 日收获晚稻。

稻鸭共生试验田在水稻移栽返青后(7~15 d)放养 2 周龄的雏鸭,放养密度为 150 羽/hm²,于水稻齐穗期收鸭,养鸭区域围网,可用尼龙网,田周搭建鸭棚,养鸭前期于每日傍晚补给少量饲料,既保证每羽鸭每天所需食物又不使饲料残余,后期不再投食。稻鱼共生试验田每小区放 1 000 尾左右本地小鲫鱼,全长 7~10 cm,平均体质量 20 g/尾,放鱼区除围沟外还进行“十”字形挖沟,沟宽 40 cm,沟深 50 cm。稻鳅共生试验田四周开围沟,沟宽 40 cm,沟深 30 cm,在田埂四周插入不易腐烂的厚塑料薄膜,插入泥土深度为 30 cm,防止泥鳅钻洞逃逸。投入 5 cm 长的鳅苗 20 万尾/hm²,鳅苗放养前需用浓度为 3% 的食盐水消毒处理,待消毒水中大部分泥鳅浮头时,将泥鳅迅速捞起放入田中。养鱼区和养

鳅区均不投饵。水稻单作模式试验田水肥以传统水稻单作模式管理。

1.5 观测指标与方法

1.5.1 CH₄ 气体测定 使用静态暗箱法采取稻田气体样品,取样箱规格 50 cm×50 cm×120 cm,水稻返青后开始取样,在无雨天 09:00—11:00 取样,每隔 7 d 取 1 次气样,直至水稻成熟。每个取样点每次连续取样 4 次,每隔 10 min 取 1 次,取样后立即将气体转移至 18 mL 真空的玻璃管中,在湖南省农业科学院环境研究所采用 Agilent 7890A 气相色谱仪检测分析气体样品。根据样品甲烷浓度与时间的关系曲线计算取样时稻田的甲烷的排放通量,计算公式参考陈璐等的研究^[8]。

1.5.2 生物量的测定 于水稻分蘖期、孕穗期、齐穗期、灌浆期、成熟期,根据各时期的平均茎蘖数每个小区随机采取水稻植株样品 5 蔸,用水洗净泥土,分根、茎、叶、穗包装。105 ℃ 杀青 30 min,80 ℃ 烘干至恒质量,称质量。试验中水稻“生物量”指的是单株生物量。

1.5.3 水稻产量的测定 于水稻收获前 1 d,每个小区采取有代表性的水稻植株 5 蔸,进行考种,计算理论产量。于水稻收获当天,每个小区随机割取 3 个 1 m² 的样方,脱粒后晒干,风选称质量并计算实际产量。

1.5.4 土壤有机质含量的测定 采用重铬酸钾容量法测定土壤有机质含量。

1.7 统计分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 25.0 软件进行图表制作与数据的统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同稻田生态种养模式稻田甲烷排放通量

由图 1 和图 2 可以看出,各处理在投放养殖动物前(5 月 3 日,8 月 3 日)的甲烷排放通量无明显差异,投放养殖动物后,各生态种养处理不同程度降低田间的甲烷排放通量。早晚稻稻田甲烷排放通量各有 2 个峰,早稻最高峰出现在灌浆期,第二峰出现在分蘖盛期,晚稻相反,最高峰在分蘖盛期产生,第二峰产生在灌浆期至成熟期。早稻各生态种养处理延迟并降低甲烷排放最高峰,晚稻 RF、RL 处理的甲烷排放曲线在高峰过后趋于平缓。相较于 CK,早稻 RF、RL、RD 甲烷排放最高峰分别较 CK 降低 9.81、6.38、7.12 mg/(m²·h),晚稻 RF、RL、RD 甲烷排放

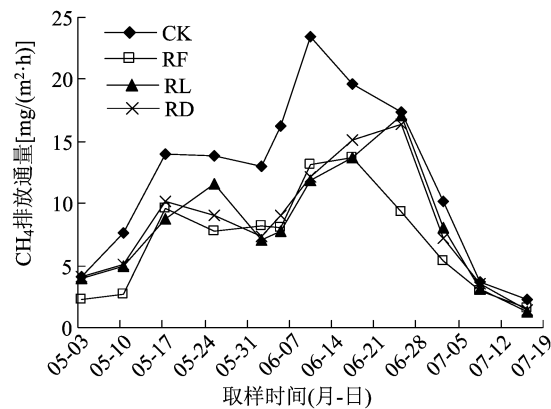


图1 早稻不同稻田生态种养模式甲烷排放通量季节变化

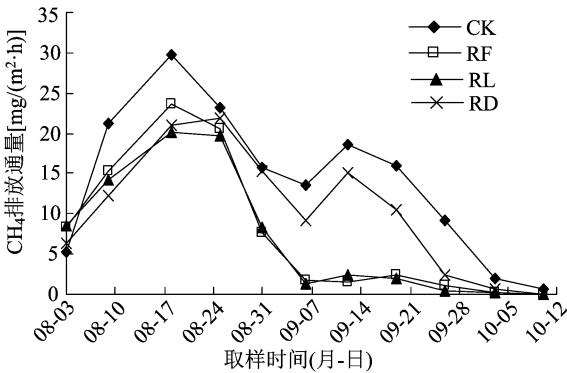


图2 晚稻不同稻田生态种养模式甲烷排放通量季节变化

最高峰分别较 CK 降低 6.28、9.72、8.85 mg/(m²·h)。2.2 不同稻田生态种养模式甲烷周年排放量及其增温潜势

由表 1 可知,CK 早稻和晚稻的甲烷排放总量最高,增温潜势最大,各生态种养处理早、晚稻甲烷排

放总量和增温潜势均显著低于 CK。CK 全年甲烷排放总量为 478.28 kg/hm²,RF、RL、RD 全年甲烷排放量分别较 CK 降低 213.43、187.73、141.58 kg/hm²,降低率达 44.62%、39.25%、29.60%,均达到显著差异。各生态种养处理中 RF、RL 全年甲烷排放量显著低于 RD,降低率分别为 21.34% 和 16.68%。CK 处理的周年增温潜势为 11 957.12 kg/hm²(CO₂ 当量),RF、RL、RD 周年增温潜势分别较 CK 降低了 44.62%、41.34%、29.60%。各处理中,RF 全年甲烷排放量和周年增温潜势最低,显著低于 CK 和 RD。

从表 2 可知,各处理的早、晚稻产量均表现为 CK < RF < RL < RD,CK 的双季稻总产量为 13 861.50 kg/hm²,RF、RL、RD 双季稻总产量分别较 CK 增加了 806.20、1 164.10、1 654.65 kg/hm²,增幅达 5.82%、8.40%、11.94%,达到显著性差异。RD 双季稻总产量较 RF 和 RL 分别高出 5.79% 和 3.37%,差异显著。不同处理早、晚稻的单位产量增温潜势均存在显著差异,CK 的单位产量增温潜势最大,早稻 RF 单位产量增温潜势最小,晚稻 RL 单位产量增温潜势最小,RF、RL、RD 双季稻单位产量增温潜势均显著低于 CK,分别较 CK 降低了 46.78%、44.44%、36.26%。

2.3 不同稻田生态种养模式的水稻生物量

由图 3、图 4 可知,各生态种养处理早、晚稻的水稻生物量在齐穗期至成熟期均高于 CK,且早稻季的灌浆期、晚稻季齐穗期和灌浆期达到显著性差

表 1 不同稻田生态种养模式甲烷周年排放量及其增温潜势

处理	双季稻甲烷排放量 (kg/hm ²)			增温潜势 (CO ₂ 当量,kg/hm ²)		
	早稻	晚稻	排放总量	早稻	晚稻	周年
CK	225.41a	252.88a	478.28a	5 635.17a	6 321.95a	11 957.12a
RF	132.53c	132.32c	264.85c	3 313.23c	3 308.06c	6 621.28c
RL	158.29b	122.26c	280.55c	3 957.28b	3 056.48c	7 013.75c
RD	154.74b	181.96ab	336.70b	3 868.43b	4 548.96b	8 417.39b

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著(P<0.05),下表同。

表 2 不同稻田生态种养模式的甲烷排放强度

处理	产量 (kg/hm ²)			甲烷排放强度 (CO ₂ 当量,kg/hm ²)		
	早稻	晚稻	双季稻	早稻	晚稻	双季稻
CK	6 456.75c	7 398.75d	13 861.50c	0.87a	0.85a	1.71a
RF	6 790.80b	7 869.90c	14 667.70b	0.49d	0.42c	0.91c
RL	6 820.50b	8 205.15b	15 025.65b	0.58b	0.37d	0.95c
RD	7 075.95a	8 440.20a	15 516.15a	0.55c	0.54b	1.09b

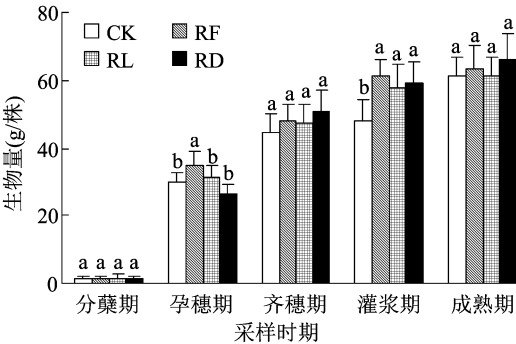


图3 不同生态种养模式对早稻生物量的影响

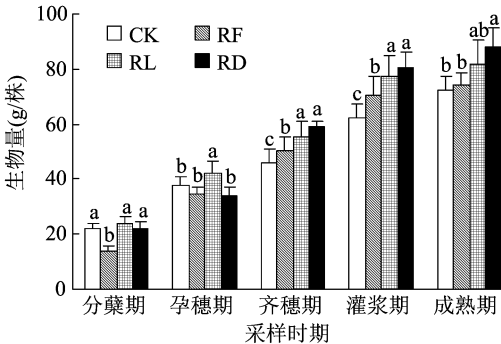


图4 不同生态种养模式对晚稻生物量的影响

异,成熟期均以 RD 处理的水稻生物量最高,且在晚稻季与对照达到显著性差异。早稻灌浆期各处理的水稻生物量表现为 RF>RD>RL>CK,其中 RF、RD、RL 的生物量均显著高于 CK 的 48.31 g,分别高出 26.95%、20.12%、22.83%。晚稻齐穗期、灌浆期、成熟期各处理的生物量均表现为 RD>RL>RF>CK,RD、RL、RF 处理的水稻生物量分别较 CK 高出 27.82%~28.92%、20.48%~23.94%、9.27%~12.89%,且均存在显著差异。

2.4 不同稻田生态种养模式对土壤有机质的影响

由图 5、图 6 可知,除早稻齐穗期外,各生态种养处理的早、晚稻各时期土壤有机质均高于 CK,

RD、RL 处理分蘖期和成熟期的土壤有机质含量均显著高于 CK,且分蘖期较 CK 分别高出 20.88%~22.77%和 20.88%~31.68%,成熟期较 CK 分别高出 19.47%~58.11%和 6.15%~56.21%。

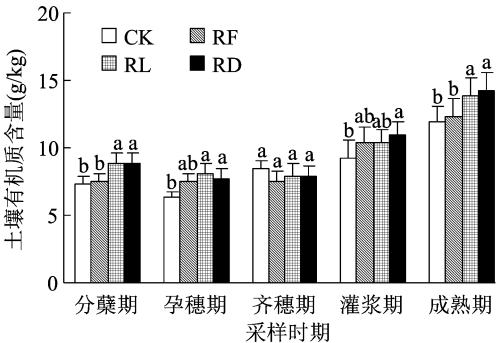


图5 不同稻田生态种养模式对早稻土壤有机质的影响

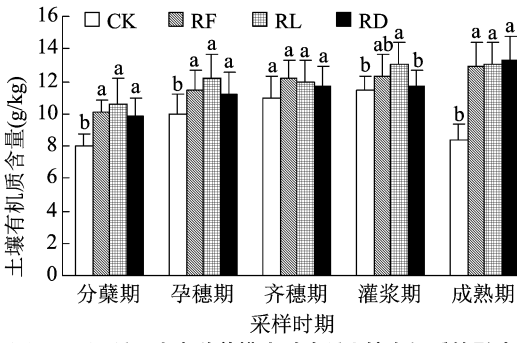


图6 不同稻田生态种养模式对晚稻土壤有机质的影响

3.6 甲烷排放的相关性分析

由相关性分析可知,早、晚稻高峰甲烷排放通量与 pH 值呈正相关,与水稻生物量、有机质呈负相关,其中早稻高峰甲烷排放通量与有机质的相关系数为 -0.806 ($P<0.05$),晚稻高峰甲烷排放通量与有机质的相关系数为 -0.995 ($P<0.05$)。早、晚稻甲烷排放总量、周年甲烷排放总量与水稻生物量、产量均呈负相关,均未达到显著差异水平(表 3)。

表 3 甲烷排放的相关性分析

项目	相关系数				
	早稻高峰甲烷排放通量	晚稻高峰甲烷排放通量	早稻甲烷排放量	晚稻甲烷排放量	周年甲烷排放量
生物量	-0.637	-0.12	-0.499	-0.311	-0.370
产量			-0.761	-0.609	-0.667
有机质	-0.806 *	-0.955 *			

4 讨论与结论

稻田生态种养通过田间养殖动物的活动改变了土壤物理、化学和生物学特征,从而对土壤温室

气体排放产生影响。多数研究认为,稻田生态种养模式能够减少土壤 CH₄ 的排放^[9-10],稻鸭模式整个放鸭期间的甲烷排放通量明显低于对照,稻鸭模式土壤 CH₄ 排放减少了 12.8%~19.4%^[11]。本研究

结果显示,RF、RL、RD 在早、晚稻甲烷排放高峰期的 CH_4 排放通量均明显低于对照,且 3 种模式的全年甲烷排放量分别较 CK 降低 44.62%、39.25%、29.60% ($P < 0.05$),周年增温潜势分别较 CK 降低了 44.62%、41.34%、29.60%。原因可能是养殖动物在田间游动、踩踏和觅食等活动减少了杂草对氧气的消耗,改善了田间通气状况,使水体和土壤溶解氧增加,改善了土壤的氧化还原状况,抑制甲烷菌的生长活性,提高甲烷氧化菌的活性,减少了 CH_4 的产生量,加快了 CH_4 的再氧化,从而减少 CH_4 的排放^[12-13]。有研究显示稻鱼模式减排甲烷 6.4%~15%^[14-15],也有研究显示同样淹水的稻蟹模式增加了 25.4%~36.8% 的 CH_4 排放^[16]。本研究结果显示 RF 全年甲烷排放量和周年增温潜势最低,显著低于 CK 和 RD,这与陈璐等的研究结果^[8]相似。

王忍等研究发现稻田养鸭能提有效高水稻生物量和产量,产量增幅为 11.8%~15.67%^[17]。本研究亦有相似结果,RF、RL、RD 的双季稻总产量较 CK 增加了 5.82%~11.94% ($P < 0.05$),水稻成熟期 RD 的水稻生物量显著高于 CK。多数研究显示稻田生态种养能提高土壤有机质含量^[17-19],本研究表明,3 种生态种养模式早、晚稻成熟期土壤有机质较 CK 分别高出 19.47%~58.11% 和 6.15%~56.21%,且相关性分析显示早、晚稻甲烷排放高峰的甲烷排放通量均与土壤有机质含量显著负相关,相关系数分别为 -0.806 和 -0.955。其原因可能是稻田生态种养模式下,田间引入养殖动物后,围绕养殖动物排泄物、分泌物的微生物群落增加,与产甲烷菌竞争资源,加速掉落物分解的同时又抑制了产甲烷菌的数量和活性,从而增加了土壤有机质含量,又减少了甲烷的排放,说明稻田生态种养兼具固碳和减排的双重作用,因此稻鱼、稻鳅、稻鸭 3 种生态种养模式均可作为水稻绿色生产模式进行推广。

参考文献:

- [1] Zhang W, Yu Y Q, Huang Y, et al. Modeling methane emissions from irrigated rice cultivation in China from 1960 to 2050 [J]. *Global Change Biology*, 2011, 17 (12): 3511–3523.
- [2] Bhatia A, Pathak H, Jain N, et al. Global warming potential of manure amended soils under rice – wheat system in the Indo – Gangetic Plains [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39 (37): 6976–6984.
- [3] Christopher B, Vicente R, David Jon Dokken, et al. Climate change 2014 impacts, adaptation, and vulnerability [M]. Cambridge University Press, 2014: 6–15.
- [4] 温婷, 赵本良, 章家恩. 稻鸭共作中 CH_4 和 N_2O 排放规律及影响因素 [J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39 (7): 1442–1450.
- [5] 周玲红, 魏甲彬, 成小琳, 等. 南方冬季种养结合模式对双季稻田 CH_4 和 CO_2 排放的影响 [J]. *生态与农村环境学报*, 2018, 34 (5): 433–440.
- [6] 王强盛. 稻田种养结合循环农业温室气体排放的调控与机制 [J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26 (5): 633–642.
- [7] “十三五”中国稻渔综合种养产业发展报告 [J]. *中国水产*, 2022 (1): 43–52.
- [8] 陈璐, 陈灿, 黄璜, 等. 厢作免耕下生态种养对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40 (6): 1354–1365.
- [9] 李文博, 刘少君, 叶新新, 等. 稻田综合种养模式对土壤生态系统的影响研究进展 [J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37 (10): 1292–1300.
- [10] Sun G, Sun M, Du L S, et al. Ecological rice – cropping systems mitigate global warming – A meta – analysis [J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 789: 147900.
- [11] 袁伟玲, 曹凑贵, 李成芳, 等. 稻鸭、稻鱼共作生态系统 CH_4 和 N_2O 温室效应及经济效益评估 [J]. *中国农业科学*, 2009, 42 (6): 2052–2060.
- [12] Xu G C, Liu X, Wang Q S, et al. Integrated rice – duck farming mitigates the global warming potential in rice season [J]. *The Science of the Total Environment*, 2017, 575: 58–66.
- [13] Sheng F, Cao C G, Li C F. Integrated rice – duck farming decreases global warming potential and increases net ecosystem economic budget in central China [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 25 (23): 22744–22753.
- [14] 展茗, 曹凑贵, 汪金平, 等. 复合稻田生态系统温室气体交换及其综合增温潜势 [J]. *生态学报*, 2008, 28 (11): 5461–5468.
- [15] 刘小燕, 黄璜, 杨治平, 等. 稻鸭鱼共栖生态系统 CH_4 排放规律研究 [J]. *生态环境*, 2006, 15 (2): 265–269.
- [16] Wang A, Ma X Z, Xu J, et al. Methane and nitrous oxide emissions in rice – crab culture systems of Northeast China [J]. *Aquaculture and Fisheries*, 2019, 4 (4): 134–141.
- [17] 王忍, 伍佳, 吕广动, 等. 稻草还田 + 稻田养鸭对土壤养分及水稻生物量和产量的影响 [J]. *西南农业学报*, 2020, 33 (1): 98–103.
- [18] 佘国涵, 彭成林, 徐祥玉, 等. 稻虾共作模式对涝渍稻田土壤理化性状的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25 (1): 61–68.
- [19] 陈晓云, 孙文涛, 于凤泉, 等. 稻蟹生态种养模式对稻田土壤肥力及生产效益的影响 [J]. *土壤通报*, 2021, 52 (5): 1165–1172.