

水稻秸秆添加对不同种稻年限黑土 CH₄ 排放特征的影响

王鸿飞, 吴怡慧, 张 瑞, 安 晶, 张玉玲*, 虞 娜, 邹洪涛

(沈阳农业大学 土地与环境学院/农业农村部东北耕地保育重点实验室/土肥高效利用国家工程研究中心, 辽宁 沈阳 110866)

摘 要:【目的】评估水稻秸秆添加对东北地区不同种稻年限黑土 CH₄ 的排放的影响, 以期为黑土水稻田秸秆还田提供理论依据。【方法】不同种稻年限 (0、12、35、62 和 85 a) 黑土, 分别设不添加 (CK) 和添加 1% 水稻秸秆 (S) 处理, 进行淹水培养试验 (培养温度为 20 ℃, 淹水层为 1 cm), 测定土壤 CH₄ 排放通量及累积排放量, 比较不同种稻年限土壤对水稻秸秆添加响应的差异。【结果】在淹水培养期间 (150 d), 添加水稻秸秆处理各种稻年限土壤 CH₄ 排放通量 (0.00~3.33 mg kg⁻¹ d⁻¹) 显著 ($P > 0.05$) 高于未添加秸秆处理 (0.00~0.13 mg kg⁻¹ d⁻¹), 未添加和添加水稻秸秆处理土壤 CH₄ 排放主要集中于淹水培养的前 80 d 和 60 d。未添加水稻秸秆处理土壤 CH₄ 累积排放量为 0.04~4.45 mg kg⁻¹, 不同年限稻田土壤 CH₄ 累积排放量差异不显著 ($P > 0.05$)。添加水稻秸秆处理土壤 CH₄ 累积排放量为 29.64~91.08 mg kg⁻¹, 显著高于未添加水稻秸秆处理 ($P < 0.05$), 且 12 a 和 35 a 土壤 CH₄ 累积排放量显著高于 0 a、62 a 和 85 a ($P < 0.05$)。未添加和添加水稻秸秆处理土壤 CH₄ 累积排放量与土壤有机碳、可溶性有机碳氮和铵态氮含量呈显著正相关 ($P < 0.01$)。添加水稻秸秆处理土壤 CH₄ 累积排放量还与土壤 β -葡萄糖苷酶活性呈显著负相关 ($P < 0.05$), 土壤 CH₄ 累积排放量增量也与土壤有机碳含量也呈显著线性正相关 ($P < 0.01$)。水稻秸秆添加后土壤可溶性有机氮含量是影响土壤 CH₄ 排放的直接因素, 土壤可溶性有机碳和铵态氮含量及 β -葡萄糖苷酶活性是影响土壤 CH₄ 排放的间接因素。【结论】水稻秸秆添加显著促进了黑土不同种稻年限土壤 CH₄ 排放, 种稻年限越长, 水稻秸秆添加后土壤 CH₄ 排放量越少。本试验条件下, 黑土种稻年限大于 35 年时, 水稻秸秆还田带来的土壤 CH₄ 排放量相对较小。

关 键 词: 水稻秸秆还田; 黑土; CH₄ 排放; 土壤有机碳; 稻田土壤

中图分类号: S156 文献标识码: A 文章编号: 0564-3945(2022)06-1421-10

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022042001

王鸿飞, 吴怡慧, 张 瑞, 安 晶, 张玉玲, 虞 娜, 邹洪涛. 水稻秸秆添加对不同种稻年限黑土 CH₄ 排放特征的影响 [J]. 土壤通报, 2022, 53(6): 1421 - 1430

WANG Hong-fei, WU Yi-hui, ZHANG Rui, AN Jing, ZHANG Yu-ling, YU Na, ZOU Hong-tao. Effect of Rice Straw Addition on CH₄ Emission in Black Soil with Different Rice Planting Years[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(6): 1421 - 1430

【研究意义】我国稻田面积约为 0.3×10^8 hm², 约占世界稻田土壤面积 (1.67×10^8 hm²) 的五分之一^[1]。CH₄ 是全球变暖的主要温室气体之一, 稻田土壤是 CH₄ 排放的重要来源^[2]。水稻秸秆还田是保持土壤肥力, 改善土壤结构, 增加土壤有机碳含量的常见农业措施^[3]。东北地区黑土开垦种稻是土地利用的重要方式, 水稻秸秆还田已成为我国东北黑土地保护的重要措施。因此, 开展水稻秸秆还田对黑土稻田土壤 CH₄ 排放影响的研究, 对于评估东北黑土水稻田秸秆还田的温室效应及水稻秸秆的合理利用具有重要意义。【前人研究进展】大量研究表明, 水稻秸秆还田能够促进稻田土壤 CH₄ 排放^[4-7], CH₄ 排

放量受施肥^[5]、土壤温度 and 水分影响^[3-4]。Zhu 等^[5-6]研究发现淹水条件下水稻秸秆添加土壤 CH₄ 排放量明显增加, 但水稻秸秆还田配施无机肥后可显著降低土壤 CH₄ 排放量^[5]。Zhang 等^[4]研究表明水稻秸秆添加土壤在好氧培养期间无 CH₄ 产生, 但在随后淹水培养 2 周内, 土壤 CH₄ 排放速率较快, 土壤 CH₄ 排放量随前期好氧培养时土壤温度的增加而显著下降。一些研究也证实有氧条件下外源碳的添加和高温对土壤 CH₄ 的排放没有显著影响^[8-10], 但也有研究发现好氧条件下水稻秸秆添加可显著增加土壤 CH₄ 排放通量和累积排放量^[11]。淹水条件下稻田土壤有机质厌氧分解产生大量的 CH₄, 土壤 CH₄ 排放明显增

收稿日期: 2022-04-20; 修订日期: 2022-06-23

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0300707-A04) 和国家自然科学基金项目 (41571280、41101276、41907005) 资助

作者简介: 王鸿飞 (1996-), 男, 内蒙古巴彦淖尔人, 在读研究生, 主要从事土壤有机碳转化方面研究。E-mail: 1163860763@qq.com

*通讯作者: E-mail: zhangyuling@syau.edu.cn

加^[12], 但在水稻种植过程中, 控制灌溉能够有效的减少稻田土壤 CH₄ 排放^[13-16]。Wu 等^[17] 研究发现水分、秸秆及其交互作用对土壤 CH₄ 累积排放量均有显著影响, 但秸秆覆盖对土壤 CH₄ 排放的影响小于比秸秆混入还田。Wang 等^[18] 研究显示土壤 CH₄ 排放量与秸秆施用量呈正相关, 秸秆添加后的有效基质增加对 CH₄ 排放有促进作用。肖小平等^[19] 研究发现免耕还田土壤 CH₄ 平均排放速率低于较旋耕还田和翻耕还田。土地利用方式对土壤 CH₄ 排放有较大影响^[20-21], 沼泽地改成旱地导致了土壤 CH₄ 排放从强源到弱汇的转变^[20]。由此可见, 秸秆还田后土壤 CH₄ 排放量因土壤环境条件、还田用量、还田方式及土地利用方式的不同而异。【本研究切入点】东北黑土有机质含量高, 开垦种植水稻不同年限土壤的养分状况及性质产生很大变化^[22-23], 水稻秸秆添加对黑土不同种稻年限土壤 CH₄ 的排放速率及其排放量的影响如何? 目前尚不清楚。因此, 开展水稻秸秆添加对东北黑土不同种稻年限土壤 CH₄ 排放的影响, 对于评估水稻秸秆还田对黑土稻田土壤 CH₄ 排放和水稻秸秆的合理利用具有重要意义。【拟解决的问题】以东北典型黑土不同种稻年限土壤为研究对象, 研究淹水条件下水稻秸秆添加对黑土不同种稻年限土壤 CH₄ 排放通量和累积排放量的影响, 探讨土壤 CH₄ 排放的影响因素, 为明确黑土稻田土壤 CH₄ 排放效应及水稻秸秆合理利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验黑土采自黑龙江省绥化市庆安县。庆安县位于黑龙江省中部, 小兴安岭南麓向松嫩平原的过渡地带, 地理位置为 137°30'~128°35' E, 46°30'~47°35' N, 气候属寒温带大陆性季风气候, 温热湿润, 年平均日照时数为 2599 h, 年平均气温 1.69 ℃, 无霜期 128 d, 年平均降水量 577 mm, 是黑土的典型区域, 自然植被以草甸植被为主, 土壤由黄土性沉积物发育而成^[23]。经过项目组调查, 在研究区域选取了以自然草甸植被为主的未开垦黑土 (0 a, 作为对照土壤) 及开垦种稻 12、35、62 和 85 a 稻田土壤为研究对象。各年限稻田土壤田块的气候和地形条件几乎一致, 均不施有机肥, 每年施用化肥量大致相同, 但年限之间的化肥种类和使用量存在一定差异, 水分管理等措施也大致相同。采样时, 分别将对照土壤和各年限稻田土壤作为一个采样单元, 每个采样单元选取面积约 2~3 亩大致相同的 3 个子单元, 即 3 次重复。每个子单元“S”型布点、采集 5~8 点土样混匀后作为 1 个土壤样本, 采样深度为 0~20 cm。挑出土壤样本可见水稻根系和杂物, 自然风干备用。供试土壤的地理坐标及基本性质见表 1。供试水稻秸秆的有机碳含量为 419.33 g kg⁻¹, 全氮含量为 9.15 g kg⁻¹, C/N 为 45.83。

表 1 供试土壤的地理坐标及基本性质
Table 1 Geographical information and basic properties of the soil samples

年限 Year (a)	地理坐标 Geographic coordinates	pH	有机碳 Organic C (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	C/N	碱解氮 Alkaline N (mg kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg kg ⁻¹)
0	127.466° E, 47.031° N	5.0 c	38.8 bc	3.8 a	10.2 d	324.2 a	19.3 b	144.7 b
12	127.470° E, 47.026° N	5.6 a	45.7 a	3.7 a	12.5 bc	267.3 b	34.7 ab	150.9 b
35	127.476° E, 47.028° N	5.4 ab	42.5 ab	3.3 a	12.8 a	238.4 c	35.5 ab	144.3 b
62	127.479° E, 47.027° N	5.5 ab	34.7 cd	2.7 b	12.7 ab	218.0 d	34.6 ab	125.6 a
85	127.476° E, 47.033° N	5.4 b	31.1 d	2.5 b	12.4 c	163.6 e	37.3 a	124.4 a

注: 不同小写字母表示5个年限间差异显著 (P<0.05)。

1.2 室内培养试验

不同种稻年限土壤 (0、12、35、62 和 85 a) 分别设不添加水稻秸秆处理 (CK) 和添加 1% 水稻秸秆处理 (S), 总计 10 个处理, 分别记为 CK₀、CK₁₂、CK₃₅、CK₆₂、CK₈₅、S₀、S₁₂、S₃₅、S₆₂、S₈₅, 每处理 3 个重复。培养试验温度为 20 ℃, 依据黑龙江绥化市庆安县地区水稻生长季 (5~9 月) 月平均气温 (14.3~23.9 ℃) 设置; 水分依据水稻生长季的

淹水条件设置约 1 cm 淹水层。

为了恢复和稳定土壤微生物群落, 将事先过 5 mm 筛的风干土样, 加入蒸馏水调至 40% 土壤孔隙含水量 (WFPS) ^[4-5,24], 置于 25 ℃ 黑暗培养箱预培养 2 周。将预培养的供试土壤 80 g (以干土计) 分别放在专用培养瓶 (420 ml) 中, 再将事先剪成小于 6 mm 的小段、60 ℃ 烘干的水稻秸秆按设计的用量添加至培养瓶中 (为防止秸秆漂浮, 平铺于土层

中间), 之后向所有密闭培养瓶中加入蒸馏水至约 1 cm 淹水层(相同培养瓶中的水量相等)。每一处理共计 18 个培养瓶, 其中 3 个培养瓶进行密闭, 其余 15 个培养瓶用保鲜膜封口, 扎若干数量小孔通气; 并将所有培养瓶置于 20 ℃ 恒温培养箱中培养 150 d。所有培养瓶中水土比相同, 培养条件基本一致。每 3~5 d 重量法补充水分, 以维持水分平衡。

在培养过程中, 密闭培养瓶分别在第 7、15、30、45、60、80、100、130 和 150 d, 用 60 ml 注射器抽取 50 ml 气体样本放入 100 ml 真空袋中, 以测定 CH₄ 浓度; 每次气体采集后分别将未添加和添加处理培养瓶置于试验室无干扰处通气 10 min 以维持瓶内气体状态, 培养过程中水分几乎不损失, 不进行补水。其余培养瓶分别在第 5、15、30、60 和 150 d 时进行破坏性土壤样本采集, 每次采集后土壤含水量自然降到 40%WFPS 时, 鲜土样密封置于 4 ℃ 冰箱保存, 用于测定土壤可溶性有机碳氮、铵态氮含量和 β -葡萄糖苷酶。

1.3 测定方法

气体样品中 CH₄ 浓度用 Agilent 7890B 气相色谱仪进行分析, 分析柱为 Porapak Q 填充柱, 柱箱温度为 60 ℃, 所用载气为高纯度 N₂, CH₄ 的测定采用氢气检测器(FID), 工作温度为 250 ℃, 使用气相色谱仪时均用国家标准计量中心的标准气体进行标定。

土壤有机碳(SOC)、全氮(N)采用元素分析仪(Elementar Vario EL III, 德国)测定; 可溶性有机碳(DOC)、可溶性有机氮(DON)采用 0.5 mol L⁻¹ K₂SO₄ 溶液浸提(液土比 5:1), 浸提液中有机碳含量采用重铬酸钾容量法测定, 浸提液中总氮含量采用 3% 碱性过硫酸钾氧化—AA3 流动分析仪(Bran + Luebbe, 德国)测定, 浸提液中铵态氮(NH₄⁺-N)采用 AA3 流动分析仪测定, 总氮与铵态氮的差值即为 DON; β -葡萄糖苷酶采用酶联免疫分析(ELISA)试剂盒测定; 其它指标均采用常规方法测定。

1.4 数据计算

土壤 CH₄ 排放通量(F_i , mg kg⁻¹ d⁻¹)和累积排放量(F , mg kg⁻¹)^[5,25]:

$$F_i = \frac{C_i \times (V_1 + \alpha \times V_2) \times M \times \frac{273}{273+t}}{22.4 \times m \times d} \quad (1)$$

$$F = \sum_{i=1}^n F_i \times d \quad (2)$$

式中, C_i 为第 i 次取样时各处理排放的 CH₄-C 浓度(ppm); t 为 CH₄ 测定时的温度(25 ℃), V_1 为培养瓶实际填充气体的体积(m³); V_2 为培养瓶中水分的体积(m³); α 为根据亨利定律所计算的 CH₄ 在水中的溶解度, 为 0.0329^[25]; M 为 C 的摩尔质量, 为 12 g mol⁻¹, m 为供试土壤干土质量(kg), d_i 为第 i 次取样时段的培养天数(d), n 为取样次数。

1.5 统计分析

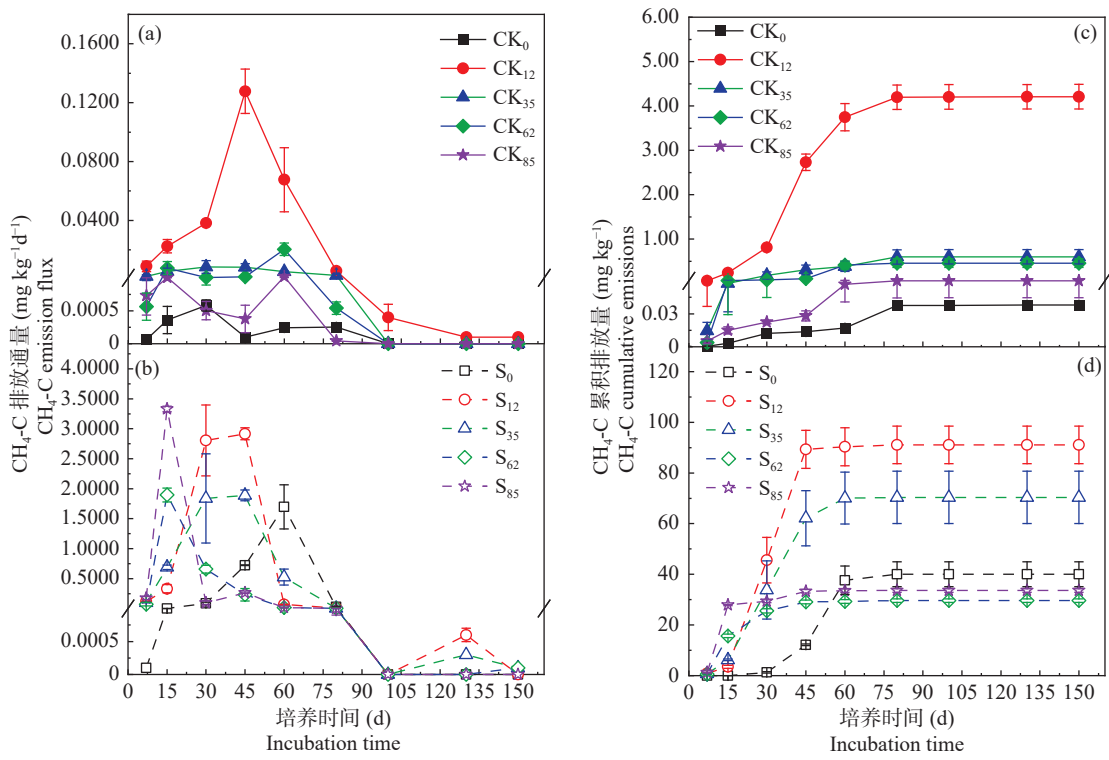
采用 WPS Office 11.1.0.10495-release 进行数据整理, 采用 Origin 2017 软件进行绘图, 运用 SPSS Statistics 22 软件进行统计分析。试验数据处理间差异显著性采用双因素方差分析进行检验, 用邓肯法进行多重比较($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤 CH₄ 排放通量和累积排放量

未添加和添加水稻秸秆处理土壤 CH₄ 排放主要集中在淹水培养 80 d 内, 而后变化较为平缓; 在培养期间, 添加水稻秸秆处理土壤 CH₄-C 排放通量(0.00~3.331 mg kg⁻¹ d⁻¹)高于未添加秸秆处理土壤(0.00~0.13 mg kg⁻¹ d⁻¹)(图 1a 和图 1b)。在整个培养期, 未添加水稻秸秆处理, 土壤 CH₄ 累积排放量约在 80 d 时趋于稳定, 而添加水稻秸秆处理土壤 CH₄ 累积排放量约在 60 d 时趋于稳定(图 1c 和图 1d), 表明水稻秸秆添加土壤 CH₄ 排放的时间相对缩短; 添加水稻秸秆处理, 在培养 45 d 时, 各年限稻田土壤 CH₄ 累积排放量均高于对照土壤, 而在培养 60 d 后, 种稻 62 和 85 a 土壤 CH₄ 累积排放量要低于对照土壤, 但种稻 12 和 35 a 土壤 CH₄ 累积排放量仍高于对照土壤(图 1d)。总体上, 添加水稻秸秆和种稻年限以及二者的交互作用对土壤 CH₄ 累积排放量均有显著影响(表 2)。

在淹水培养结束(150 d)时, 未添加水稻秸秆处理土壤 CH₄-C 累积排放量为 0.04~4.54 mg kg⁻¹, 各年限之间土壤 CH₄ 累积排放量无显著差异($P > 0.05$); 添加水稻秸秆处理土壤 CH₄-C 累积排放量为 29.64~1.08 mg kg⁻¹, 均显著高于未添加秸秆处理($P < 0.05$)(图 2), 各年限土壤 CH₄-C 排放量增加 29.18~86.87 mg kg⁻¹, 12 a(S₁₂)、35 a(S₃₅)土壤 CH₄ 排放量及其增量均显著高于对照土壤(S₀)、62(S₆₂)和 85 a(S₈₅)($P < 0.05$)。进一步分析发现, 在淹水培养 150 d, 未添加和添加水稻秸秆处理



注:CK 代表不添加秸秆处理和 S 代表添加秸秆处理,下标数字代表种稻年限。下同。

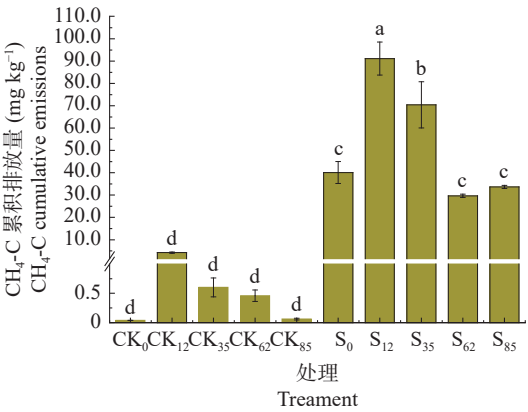
图 1 不同处理土壤 CH₄ 排放通量及累积排放量的动态变化

Fig.1 Dynamic changes of emission flux and cumulative emissions of soil CH₄ from different treatments

表 2 土壤 CH₄ 累积排放量的双因素方差分析结果(P 值)

Table 2 Results of two factor analysis of variance of soil CH₄ cumulative emissions (P value)

因素 Factor	培养时间 (d) Incubation time								
	7	15	30	45	60	80	100	130	150
秸秆	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
年限	< 0.01	< 0.01	> 0.05	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
秸秆 × 年限	< 0.01	> 0.05	> 0.05	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01



注:不同小写字母表示 10 个处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 培养结束时不同处理土壤 CH₄ 累积排放量

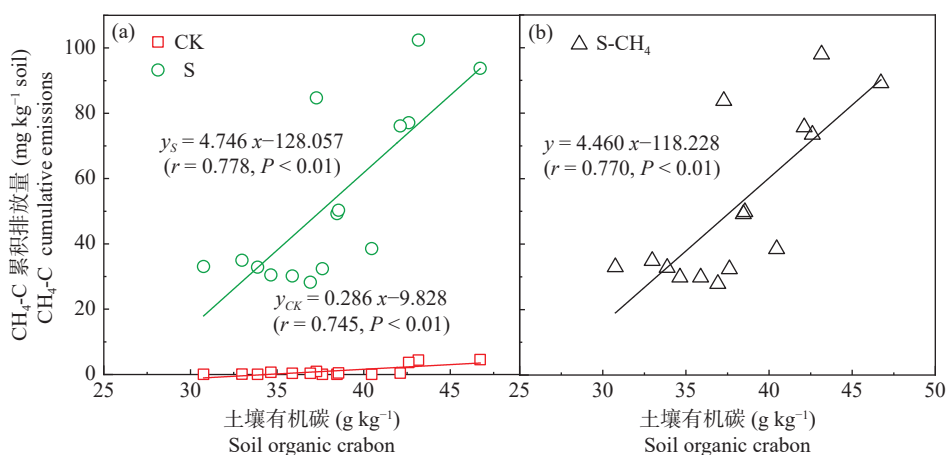
Fig.2 Soil CH₄ cumulative emissions at the end of incubation of different treatments

土壤 CH₄ 累积排放量、添加水稻秸秆处理土壤 CH₄ 累积排放量增量与培养前土壤有机碳含量均呈显著

线性正相关 (图 3)。

2.2 土壤可溶有机碳氮和铵态氮含量及 β -葡萄糖苷酶活性

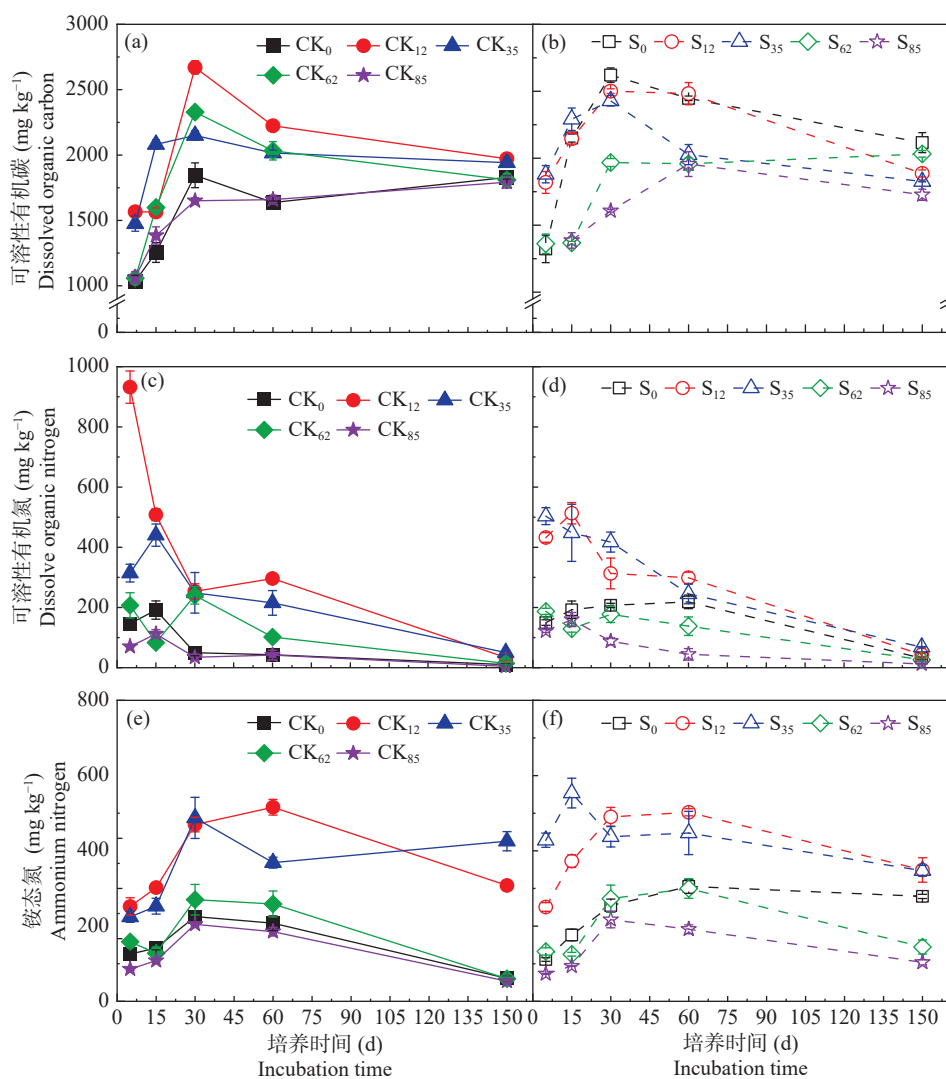
淹水培养过程中,未添加和添加水稻秸秆处理土壤 DOC 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均随着培养时间延长呈先上升后下降的趋势,土壤 DON 含量随着培养时间的延长呈下降趋势,但三者含量均在 30~60 d 期间较高 (图 4)。未添加和添加水稻秸秆处理土壤 DOC、DON 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均含量均随种稻年限增加呈先增加后降低趋势。与未添加水稻秸秆处理相比,添加水稻秸秆后 S₀、S₁₂、S₃₅、S₆₂ 和 S₈₅ 处理土壤 DOC 平均含量分别增加了 610.99、168.15、158.28、-27.74 和 12.62 mg kg^{-1} , DON 平均含量分别增加了 71.73、-84.73、82.6、2.24 和 32.69 mg kg^{-1} , $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均含量分别增加了 72.98、23.45、90.93、19.84



注: (a) 为不添加秸秆 (CK) 和添加秸秆 (S) 处理 CH_4 排放量, (b) 为添加秸秆 (S) 处理较不添加秸秆处 (CK) 处理相比的 CH_4 排放增量。数据为三次重复样本数据。

图 3 土壤 CH_4 排放量 (150 d) 与土壤有机碳含量的关系

Fig.3 Relationship between the soil CH_4 cumulative emissions (150 days) and soil organic carbon content



注: CK 代表不添加秸秆处理和 S 代表添加秸秆处理, 下标数字代表种稻年限。

图 4 不同处理土壤可溶性有机碳氮和铵态氮含量的动态变化

Fig.4 Dynamic changes of DOC, DON and NH_4^+ -N in different treatments

和 8.36 mg kg⁻¹。秸秆添加和种稻年限及二者的交互作用对土壤 DOC、DON 和 NH₄⁺-N 含量均有显著影响 (表 3)。相关分析发现, 未添加水稻秸秆土壤 DOC、DON 和 NH₄⁺-N 含量与土壤有机碳含量均呈显著正相关 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.696、0.771 和 0.805; 添加水稻秸秆后土壤 DOC、DON 和 NH₄⁺-N 含量与土壤有机碳含量也均呈显著正相关 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.822、0.847 和 0.798。

淹水培养过程中, 未添加和添加水稻秸秆处理土壤 β -葡萄糖苷酶活性均随着培养时间延长呈先上升后下降的趋势, 在 15~60 d 期间含量较高, 60 d 之后处于稳定的趋势; 添加水稻秸秆处理土壤 β -葡

表 3 土壤可溶有机碳氮和铵态氮含量及 β -葡萄糖苷酶活性的双因素方差分析的结果(P 值)

Table 3 Results of two-way ANOVA of DOC, DON, NH₄⁺-N and β -glucosidase activity (P value)

因素 Factor	DOC	DON	NH ₄ ⁺ -N	β -glucosidase
秸秆	< 0.01	< 0.01	< 0.01	> 0.05
年限	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.05
秸秆 $\times$ 年限	< 0.01	< 0.01	< 0.05	< 0.01

注: DOC: 可溶性有机碳, DON: 可溶性有机氮, NH₄⁺-N: 铵态氮, β -glucosidase: β -葡萄糖苷酶。

萄糖苷酶活性在培养前期略有所下降, 但各年限土壤之间的数值相接近 (图 5)。种稻年限及添加秸秆与种稻年限的交互作用对 β -葡萄糖苷酶活性均影响显著 (表 3)。

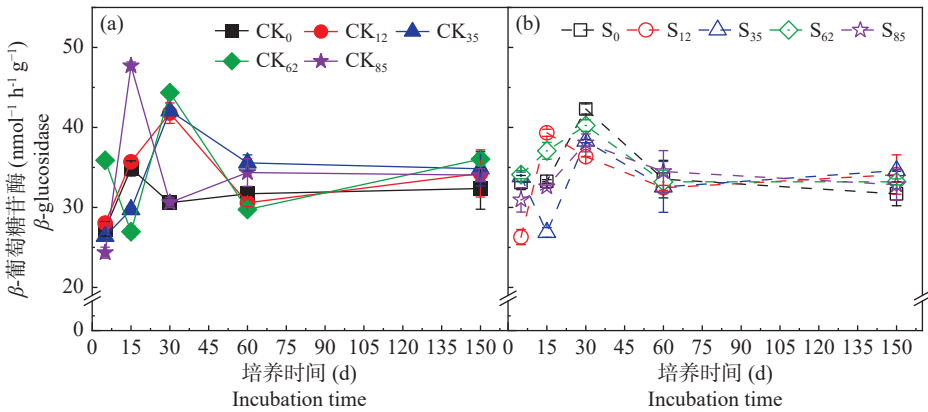


图 5 不同处理土壤 β -葡萄糖苷酶活性的动态变化
Fig.5 Dynamic changes of soil β -glucosidase activity in different treatments

2.3 土壤 CH₄ 排放的影响因素分析

培养结束时, 未添加和添加水稻秸秆处理土壤 DOC、DON 和 NH₄⁺-N 含量与土壤 CH₄ 排放量之间

具有显著正相关; 添加水稻秸秆处理土壤 β -葡萄糖苷酶活性与土壤 CH₄ 排放量之间则具有显著负相关 (表 4)。

表 4 土壤可溶性有机碳氮和铵态氮含量、 β -葡萄糖苷酶活性与土壤 CH₄ 累积排放量相关性分析
Table 4 Correlation analysis between the soil CH₄ cumulative emissions and DOC, DON, NH₄⁺-N and β -glucosidase activity

处理 Treatment	指标 Index	DOC	DON	NH ₄ ⁺ -N	β -glucosidase	CH ₄ 累积排放量 CH4 cumulative emissions
CK	DOC	1	0.903**	0.924**	0.400	0.719**
	DON		1	0.927**	0.237	0.896**
	NH ₄ ⁺ -N			1	0.184	0.710**
	β -glucosidase				1	0.271
S	DOC	1	0.772**	0.769**	-0.206	0.677**
	DON		1	0.976**	-0.453	0.884**
	NH ₄ ⁺ -N			1	-0.532*	0.868**
	β -glucosidase				1	-0.517*

注: DOC: 可溶性有机碳, DON: 可溶性有机氮, NH₄⁺-N: 铵态氮, β -glucosidase: β -葡萄糖苷酶。*, **分别表示0.05, 0.01显著水平。

由于未添加秸秆处理土壤 DOC、DON 和 NH₄⁺-N 含量之间具有自相关, 添加秸秆处理土壤 DOC、

DON、NH₄⁺-N 含量和 β -葡萄糖苷酶活性之间也具有自相关, 进一步通过多元回归分析和通径分析发现,

未添加秸秆土壤 DON 对土壤 CH₄ 排放的直接途径系数最大且为正值 (1.724), DOC 对土壤 CH₄ 排放直接途径系数次之, 为负值 (-0.769), DOC 和 NH₄⁺-N 通过 DON 对土壤 CH₄ 排放的间接途径系数均很大, 分别为 1.557 和 1.598; 添加秸秆土壤 DON 对土壤 CH₄ 排放的直接途径系数也最大且为正值 (0.996), DOC 和 NH₄⁺-N 通过 DON 对土壤 CH₄ 排放的间接途径系数均很大, 分别为 0.769 和 0.972; 但 β -葡萄糖苷酶活性通过 DON 对土壤 CH₄ 排放的间接途径系数却为负值 (-0.451)。由此可见, 添加秸秆土壤 DON 含量是影响土壤 CH₄ 排放的直接因素, DOC、NH₄⁺-N 和 β -葡萄糖苷酶活性是影响土壤 CH₄ 排放的间接因素。

3 讨论

稻田土壤 CH₄ 排放受生物因素和非生物因素的综合影响^[26]。水稻秸秆添加对土壤环境的影响很大, 不仅提高了土壤有机质含量, 而且也向土壤中提供了氮和钾等矿质元素^[27], 同时也能够增加土壤微生物

数量和土壤酶活性^[28-29]。土壤可溶性有机碳和可溶性氮是微生物生长和代谢所需的重要碳、氮源^[30], 也是产甲烷菌生长的重要底物^[31]。本研究中, 无论是否添加水稻秸秆, 土壤 DOC、DON 和 NH₄⁺-N 含量均与土壤有机碳含量呈显著正相关 ($P < 0.01$), 这表明不同种稻年限土壤有机碳含量显著差异 (表 1), 是影响土壤可溶性有机碳和可溶性氮含量的重要因素。秸秆添加和种稻年限及二者的交互作用对土壤 DOC、DON 和 NH₄⁺-N 含量 (表 3), 进而显著影响 CH₄ 排放量 (表 4)。水稻秸秆添加显著促进了土壤 CH₄ 排放 (图 2), CH₄ 排放量增量则与土壤有机碳含量呈显著正相关 (图 3)。本研究中添加水稻秸秆土壤中可溶性有机碳与有机氮的比值有所下降, 可溶性有机氮含量是影响土壤 CH₄ 排放的直接因素 (表 5)。这说明秸秆分解会产生不稳定化合物且易于矿化分解, 这将为土壤微生物提供充足的碳源和氮源, 也会为产甲烷菌提供了充足的底物, 促进产甲烷菌的生长^[32], 进而促进了含碳有机物质向 CH₄ 转化^[33]。

表 5 土壤 CH₄ 累积排放量的影响因素的途径分析
Table 5 Path analysis of influencing factors for CH₄ cumulative emissions

处理 Treatment	指标 Index	直接途径系数 Direct path coefficient	间接途径系数 Indirect path coefficient			
			DOC	DON	NH ₄ ⁺ -N	β -glucosidase
CK	DOC	-0.128		1.557	-0.710	
	DON	1.724	-0.116		-0.713	
	NH ₄ ⁺ -N	-0.769	-0.118	1.598		
S	DOC	0.065		0.769	-0.195	0.039
	DON	0.996	0.050		-0.247	0.085
	NH ₄ ⁺ -N	-0.254	0.050	0.972		0.100
	β -glucosidase	-0.188	-0.013	-0.451	0.135	

注: DOC: 可溶性有机碳, DON: 可溶性有机氮, NH₄⁺-N: 铵态氮, β -glucosidase: β -葡萄糖苷酶。

土壤 β -葡萄糖苷酶能够催化水解芳基或烷基与糖基原子团之间的糖苷键生成葡萄糖, 因此 β -葡萄糖苷酶可以作为土壤微生物能量碳需求的指示物^[34]。本研究中, 添加水稻秸秆土壤 β -葡萄糖苷酶活性受种植年限及添加秸秆和种稻年限交互作用的影响显著 (图 5), 添加水稻秸秆土壤 CH₄ 排放量与 β -葡萄糖苷酶活性呈显著负相关 (表 4), 说明添加水稻秸秆和不同种稻年限土壤的理化性质共同影响着土壤 β -葡萄糖苷酶活性。土壤 β -葡萄糖苷酶活性高低会影响有机质分解, 进而影响土壤 CH₄ 排放, 这一结果与袁武等^[35]的研究结果相一致。稻田土壤中不

同机制控制着碳循环相关的胞外酶活性和 CH₄ 排放^[35], 外源水稻秸秆输入在为微生物提供新鲜底物的同时, 也促进了土壤中老化腐殖质对胞外酶的吸附, 这种被老化腐殖质吸附结合的胞外酶仍具有一定的活性, 并且具有较强的纤维素抗分解能力^[36]。此外, 较高的碳循环相关的胞外酶活性能够提高土壤微生物碳利用率, 促进土壤有机碳积累或固定^[37-38], 进而减少 CH₄ 排放。

淹水条件下在培养初期好氧微生物的活性较强, 易矿化有机质分解会消耗大量的 O₂, 从而增加土壤中的厌氧条件^[39], 而兼性厌氧细菌和厌氧菌更适应在

培养后期生长,为产甲烷菌提供了适宜的环境^[40]。土壤 CH₄ 产生是厌氧微生物分解有机质的最后步骤,土壤淹水后电子受体如 NO₃⁻、Mn⁴⁺、Fe³⁺和 SO₄²⁻依次还原,无机电子受体耗尽,随后 CH₄ 大量产生,进而使 CH₄ 排放产生了滞后^[41]。本研究显示,未添加水稻秸秆土壤在淹水条件下培养 15 d 时才表现出较高 CH₄ 排放通量,而添加水稻秸秆后土壤 CH₄ 排放通量峰值出现的时间早,种稻年限越长其峰值出现的时间越早,土壤 CH₄ 排放趋于稳定的时间也相对短(图 1)。这说明水稻秸秆添加后土壤中新鲜的碳基质增加,微生物更喜欢新鲜的碳基质^[5],进而减弱了 CH₄ 排放的滞后性,当微生物将新鲜的碳基质耗尽后,CH₄ 排放量降低,这一研究结果与大多数研究结果相同^[4-6]。

4 结论

淹水培养条件下水稻秸秆添加可显著促进不同种稻年限黑土 CH₄ 排放通量和累积排放量。添加水稻秸秆后土壤可溶性有机氮含量是影响 CH₄ 排放的直接因素,而土壤可溶有机碳、铵态氮含量及其 β-葡萄糖苷酶活性是影响土壤 CH₄ 排放量的间接因素。添加水稻秸秆后不同种稻年限 CH₄ 累积排放量与其有机碳含量密切关系,黑土种稻年限大于 35 年时,土壤有机碳含量下降,水稻秸秆添加后土壤 CH₄ 累积排放量相对较少。

参考文献:

- [1] Faostat database[DB]. December 18, 2020.
- [2] Lelieveld J, Crutzen P J, Dentener J. Changing concentration, lifetime and climate forcing of atmospheric methane[J]. *Tellus Series Biochemical & Physical Meteorology*, 1998, 50(2): 128 – 150.
- [3] Tang S, Cheng W, Hu R, et al. Simulating the effects of soil temperature and moisture in the off-rice season on rice straw decomposition and subsequent CH₄ production during the growth season in a paddy soil[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2016, 52(5): 739 – 748.
- [4] Zhang Y, Hou W, Chi M, et al. Simulating the effects of soil temperature and soil moisture on CO₂ and CH₄ emissions in rice straw-enriched paddy soil[J]. *Catena*, 2020, 194: e104677.
- [5] Zhu Z, Ge T, Luo Y, et al. Microbial stoichiometric flexibility regulates rice straw mineralization and its priming effect in paddy soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 121: 67 – 76.
- [6] Zhu Z, Zeng G, Ge T, et al. Fate of rice shoot and root residues, rhizodeposits, and microbe-assimilated carbon in paddy soil-Part 1: Decomposition and priming effect[J]. *Biogeosciences*, 2016, 13(15): 4481 – 4489.
- [7] 曹明, 朱启林, 汤水荣, 等. 添加秸秆及其生物质炭对淹水条件下砖红壤 N₂O 和 CH₄ 排放的影响[J]. *土壤通报*, 2021, 52(4): 895 – 902.
- [8] Yan X, Akiyama H, Yagi K, et al. Global estimations of the inventory and mitigation potential of methane emissions from rice cultivation conducted using the 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23(2): 1 – 15.
- [9] Huang S, Sun Y, Yu X, et al. Interactive effects of temperature and moisture on CO₂ and CH₄ production in a paddy soil under long-term different fertilization regimes[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2016, 52(3): 285 – 294.
- [10] Nakajima M, Cheng W, Tang S, et al. Modeling aerobic decomposition of rice straw during the off-rice season in an Andisol paddy soil in a cold temperate region of Japan: Effects of soil temperature and moisture[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2016, 62(1): 90 – 98.
- [11] 王瑞. 秸秆添加对土壤温室气体排放和溶解性有机碳 DOC 组分的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [12] Carlson K M, Gerber J S, Mueller N D, et al. Greenhouse gas emissions intensity of global croplands[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(1): 63 – 68.
- [13] Chu G, Wang Z, Zhang H, et al. Alternate wetting and moderate drying increases rice yield and reduces methane emission in paddy field with wheat straw residue incorporation[J]. *Food and Energy Security*, 2015, 4(3): 238 – 254.
- [14] Haque M M, Kim G W, Kim P J, et al. Comparison of net global warming potential between continuous flooding and midseason drainage in monsoon region paddy during rice cropping[J]. *Field Crops Research*, 2016, 193: 133 – 142.
- [15] Nie T, Chen P, Zhang Z, et al. Effects of irrigation method and rice straw incorporation on CH₄ emissions of paddy fields in Northeast China[J]. *Paddy and Water Environment*, 2019, 18(1): 111 – 120.
- [16] Hadi A, Inubushi K, Yagi K. Effect of water management on greenhouse gas emissions and microbial properties of paddy soils in Japan and Indonesia[J]. *Paddy Water Environ*, 2010, 8(4): 319 – 324.
- [17] Wu X, Wang W, Xie K, et al. Combined effects of straw and water management on CH₄ emissions from rice fields[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 231: 1257 – 1262.
- [18] Wang N, Yu J G, Zhao H Y, et al. Straw enhanced CO₂ and CH₄ but decreased N₂O emissions from flooded paddy soils: Changes in microbial community compositions[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 174: 171 – 179.
- [19] 肖小平, 伍芬琳, 黄凤球, 等. 不同稻草还田方式对稻田温室气体排放影响研究[J]. *农业现代化研究*, 2017, 28(5): 629 – 632.
- [20] Jiang S, Wang Y, Hao Q, et al. Effect of land-use change on CH₄ and N₂O emissions from freshwater marsh in Northeast China[J].

- Atmospheric Environment, 2009, 43(21): 3305 – 3309.
- [21] Lang M, Cai Z, Chang S X. Effects of land use type and incubation temperature on greenhouse gas emissions from Chinese and Canadian soils[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11(1): 15 – 24.
- [22] 迟美静. 黑土开垦种稻土壤团聚体及其组分有机碳的变化特征[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- [23] 迟美静, 侯 玮, 孙 莹, 等. 东北黑土区荒地开垦种稻后土壤养分及pH值的变化特征[J]. *土壤通报*, 2018, 49(3): 546 – 551.
- [24] Cheng W, Tsuruta H, Chen G, et al. N₂O and NO production in various Chinese agricultural soils by nitrification[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 6(6): 53 – 963.
- [25] Cheng Y, Yagi k, Akai H. Changes in concentration and $\delta^{13}\text{C}$ value of dissolved CH₄, CO₂ and organic carbon in rice paddies under ambient and elevated concentrations of atmospheric CO₂[J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36(5): 813 – 823.
- [26] Bao Q, Xiao K, Chen Z, et al. Methane production and methanogenic archaeal communities in two types of paddy soil amended with different amounts of rice straw[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2014, 8(2): 72 – 385.
- [27] Sander B O, Samson M, Buresh R J. Methane and nitrous oxide emissions from flooded rice fields as affected by water and straw management between rice crops[J]. *Geoderma*, 2014, 235-236(4): 355 – 362.
- [28] 闫 超. 水稻秸秆还田腐解规律及对土壤养分和酶活性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
- [29] Zhang D, Cui R, Fu B, et al. Shallow groundwater table fluctuations affect bacterial communities and nitrogen functional genes along the soil profile in a vegetable field[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 146: 103368.
- [30] An T, Schaffer S, Zhuang J, et al. Dynamics and distribution of ¹³C-labeled straw carbon by microorganisms as affected by soil fertility levels in the Black Soil region of Northeast China[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2015, 51(5): 605 – 613.
- [31] Bhattacharyya P, Roy K S, Neogi S, et al. Effects of rice straw and nitrogen fertilization on greenhouse gas emissions and carbon storage in tropical flooded soil planted with rice[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 124: 119 – 130.
- [32] 高焕平. 秸秆与氮肥调节C/N比对潮土温室气体排放及土壤理化性质的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2018.
- [33] Li M, Xue L, Zhou B, et al. Effects of domestic sewage from different sources on greenhouse gas emission and related microorganisms in straw-returning paddy fields[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 718: 30917 – 30923.
- [34] Cui Y, Fang L, Guo X, et al. Ecoenzymatic stoichiometry and microbial nutrient limitation in rhizosphere soil in the arid area of the northern Loess Plateau, China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2018, 116: 11 – 21.
- [35] 袁 武, 靳振江, 程跃扬, 等. 岩溶湿地和稻田的土壤酶活性与CO₂和CH₄排放特征[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(14): 2897 – 2906.
- [36] 万忠梅, 宋长春. 土壤酶活性对生态环境的响应研究进展[J]. *土壤通报*, 2009, 40(4): 951 – 956.
- [37] 宋长春, 宋艳宇, 王宪伟, 等. 气候变化下湿地生态系统碳、氮循环研究进展[J]. *湿地科学*, 2018, 16(3): 424 – 431.
- [38] 陈 贵, 赵国华, 张红梅, 等. 长期施用有机肥对水稻产量和氮磷养分利用效率的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2017, (1): 92 – 97.
- [39] Pandey A, Mai V T, Vu D Q, et al. Organic matter and water management strategies to reduce methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in Vietnam[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 196(1): 137 – 146.
- [40] Bayer C, Zschock T, Pedrosa G M, et al. A seven-year study on the effects of fall soil tillage on yield-scaled greenhouse gas emission from flood irrigated rice in a humid subtropical climate[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 145: 118 – 125.
- [41] Yao H R, Conard R, Wassmann R, et al. Effect of soil characteristics on sequential reduction and methane production in sixteen rice paddy soils from China, the Philippines, and Italy[J]. *Biogeochemistry*, 1999, 47(3): 269 – 295.

Effect of Rice Straw Addition on CH₄ Emission in Black Soil with Different Rice Planting Years

WANG Hong-fei, WU Yi-hui, ZHANG Rui, AN Jing, ZHANG Yu-ling*, YU Na, ZOU Hong-tao
(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University / Northeast key Laboratory of Cultivated Land Conservation,
Ministry of Agriculture and Villages / National Engineering Research Center for Efficient
Use of Soil and Fertilizer, Shenyang 110866, China)

Abstract: [Objective] The effect of rice straw addition on soil CH₄ emission in Black soil with different rice planting years in Northeast China needed to be evaluated, which will provide to provide a theoretical basis for the return of rice straw in paddy field of Black soil. [Method] Flooding incubation experiment in a laboratory for 150 days (at 20 °C, with 1 cm water-flooded layer) was carried out, and 1% rice straw was added to black soils with different rice planting years (0, 12, 35, 62 and 85 years), and the soil without rice straw addition was used as the control. The CH₄ emission flux and cumulative emissions from soil were determined. [Result] During flooding incubation period (150 days), the soil CH₄ emission flux (0.00 - 3.33 mg kg⁻¹ d⁻¹) from the treatments with rice straw was significantly higher than that from the treatments without rice straw (0.00 - 0.13 mg kg⁻¹ d⁻¹). The CH₄ emission from the treatments without and with rice straw mainly occurred in the first 80 days and the first 60 days, respectively. The cumulative emissions of soil CH₄ from the treatments without rice straw were 0.04 - 4.45 mg kg⁻¹, there was no significant difference in soil CH₄ cumulative emissions in different rice planting years ($P > 0.05$). The cumulative emissions of soil CH₄ from the treatments with rice straw were 29.64 - 91.08 mg kg⁻¹, which was significantly higher than that of without rice straw treatments ($P < 0.05$), and the cumulative emissions of soil CH₄ from 12 years and 35 years were significantly higher than that of 0 year, 62 years and 85 years ($P < 0.05$). The cumulative emissions of CH₄ from the treatments without and with rice straw positive correlated significant ($P < 0.01$) with soil organic carbon (SOC), dissolve organic carbon (DOC), dissolve organic nitrogen (DON) and NH₄⁺-N. The cumulative emissions of CH₄ from the treatments with rice straw negatively correlated significantly ($P < 0.05$) with β -Glucosidase activity, the cumulative emission increment of CH₄ positive correlated significant ($P < 0.01$) with SOC and DON in the treatments with rice straw addition, which means that the SOC and DON are the main affecting factors for CH₄ emission. While the DOC, NH₄⁺-N and β -glucosidase activities were the indirect factors affecting soil CH₄ emission. [Conclusion] These results suggest that the addition of rice straw significantly promotes the CH₄ emission in Black Soil with different rice planting years, the longer the years of rice planting, the soil CH₄ emission is relatively lower. Therefore, the soil CH₄ emission increases from the treatments with rice straw addition is relatively small in more than 35-year rice planting Black soils

Key words: Rice straw returning; Black soil; CH₄ emission; Soil organic carbon; Paddy soil

[责任编辑：韩春兰]