



CO₂浓度升高对稻田CH₄和N₂O排放的影响 ——Meta分析

于海洋^{1,2}, 王天宇^{1,2}, 黄琼^{1,2}, 宋开付^{1,2}, 张广斌¹, 马静¹, 徐华^{1*}

1. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

* 通讯作者, E-mail: hxu@issas.ac.cn

收稿日期: 2021-01-15; 收修改稿日期: 2021-09-01; 接受日期: 2021-09-22; 网络版发表日期: 2021-11-29

国家重点研发计划项目(编号: 2017YFD0300105)、国家自然科学基金项目(批准号: 41877325)和中国科学院青年创新促进会项目(编号: 2018349)资助

摘要 CO₂浓度升高对稻田生态系统碳(C)氮(N)循环具有重要作用, 阐明CO₂浓度升高对稻田CH₄和N₂O排放的影响是农业生产应对全球气候变化的重要组成部分. 文章采用Meta分析的方法, 讨论了不同CO₂浓度升高状况和田间管理措施条件下CO₂浓度升高对稻田CH₄和N₂O排放的影响, 结果可为未来气候条件下稻田温室气体减排提供参考. 结果表明: 整体平均而言, CO₂浓度升高显著增加稻田CH₄排放(增幅为23%, $P < 0.05$), 同时显著降低稻田N₂O排放(降幅为22%, $P < 0.05$). CO₂浓度升高对稻田CH₄和N₂O排放的影响程度与CO₂熏气年限和CO₂浓度梯度有关. CO₂熏气年限 ≥ 10 a时, CO₂浓度升高同时显著降低稻田CH₄和N₂O排放, 降幅分别为27%和53%($P < 0.05$); 随CO₂浓度梯度上升, CO₂浓度升高对稻田CH₄排放的促进作用呈现先减弱后增强的趋势, 而对稻田N₂O排放的影响则由促进作用变为抑制作用. 不同N肥施用量、秸秆还田、水分管理和水稻品种等田间管理措施不同程度地影响稻田CH₄和N₂O排放对CO₂浓度升高的响应. 无秸秆和半量秸秆还田时, CO₂浓度升高显著促进稻田CH₄排放(增幅分别为27%和49%, $P < 0.05$), 而全量秸秆还田时, CO₂浓度升高对稻田CH₄排放无显著影响($P > 0.05$); 随秸秆还田量的增加, CO₂浓度升高对稻田N₂O排放的抑制作用不断增强. 对比持续淹水, 间歇灌溉条件下CO₂浓度升高减弱了对稻田CH₄排放的促进作用, 却增强了对稻田N₂O排放的抑制作用. 未来CO₂浓度升高条件下, 建议推广全量秸秆还田和间歇灌溉相结合的稻田管理措施, 并辅以优化N肥管理和选育“高产低排”水稻品种等方法, 达到最优的“增产减排”效果. 此外, 有必要进行多尺度、多要素和多方法的综合研究, 以期有效降低稻田CH₄和N₂O排放对CO₂浓度升高响应的不确定性.

关键词 CO₂浓度升高, 稻田, CH₄, N₂O, 田间管理措施, Meta分析

中文引用格式: 于海洋, 王天宇, 黄琼, 宋开付, 张广斌, 马静, 徐华. 2022. CO₂浓度升高对稻田CH₄和N₂O排放的影响——Meta分析. 中国科学: 地球科学, 52(3): 517–527, doi: [10.1360/SSTe-2021-0015](https://doi.org/10.1360/SSTe-2021-0015)

英文引用格式: Yu H, Wang T, Huang Q, Song K, Zhang G, Ma J, Xu H. 2022. Effects of elevated CO₂ concentration on CH₄ and N₂O emissions from paddy fields: A meta-analysis. Science China Earth Sciences, 65(1): 96–106, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9848-2>

1 引言

IPCC第五次评估报告中指出, 工业革命以来, 全球CO₂浓度大幅增加; 在温室气体排放量中等情景下, 预计2100年CO₂浓度将达到538~670 μmol mol⁻¹ (IPCC, 2014). CO₂浓度持续升高是全球气候变化的主要驱动力, 对陆地生态系统可产生一系列连锁反应, 深刻地影响人类农业生产活动(潘根兴, 2013). 稻田生态系统是农业生产的重要组成部分, 同时也是CH₄和N₂O的重要人为排放源(蔡祖聪等, 2009). 据估算, 稻田CH₄和N₂O排放约占农业源温室气体排放总量的15%和11% (Sun等, 2018; Sauniois等, 2020). CO₂浓度升高通过增强光合作用速率提高水稻产量的同时, 也能够影响水稻对养分的需求量和利用效率, 进而直接或间接地影响稻田CH₄和N₂O排放(van Groenigen等, 2011; 江瑜, 2017; Liu等, 2018). 因此, 在全球气候变化的情况下, 如何有效维持(或提高)水稻产量的同时又能减少稻田温室气体排放, 已成为水稻生产科学地应对气候变化的重要挑战.

水稻种植过程中, 田间管理措施显著影响稻田CH₄和N₂O排放, 例如, 氮(N)肥施用、秸秆还田、水分管理以及水稻品种等(蔡祖聪等, 2009). 研究表明, N肥施用促进稻田N₂O排放, 但对稻田CH₄排放的影响并不统一(Zheng等, 2006; Yao等, 2020). 秸秆还田显著促进稻田CH₄排放(Jiang等, 2017; Jiang等, 2019; Qian等, 2020), 但也能够减少稻田N₂O排放(马静, 2008; 易琼和唐拴虎, 2015; 夏仕明等, 2017). 对比持续淹水, 间歇灌溉显著降低稻田CH₄排放, 但同时也能导致更多稻田N₂O排放(徐华等, 2000; 李香兰等, 2008). 此外, 对于不同水稻品种, 高产水稻稻田CH₄和N₂O排放速率显著低于低产水稻品种, 因而可选育“高产低排”水稻品种, 提高水稻收获指数, 降低稻田温室气体排放(van der Gon等, 2002; 江瑜, 2017). CO₂浓度升高与田间管理措施可通过类似的机制影响稻田CH₄和N₂O排放. 例如, 秸秆还田与CO₂浓度升高均能够增加产CH₄底物供应, 促进稻田CH₄排放(Qian等, 2020). 尽管van Groenigen等(2011)和Liu等(2018)已采用Meta分析方法对前人研究结果进行了关于CO₂浓度升高对稻田CH₄和N₂O排放的影响及其机制的总结, 但其并未涉及CO₂熏气年限和CO₂浓度梯度等试验状况对稻田CH₄和N₂O排放的影响. 此外, 基于不同CO₂浓度升高模拟平台的

稻田CH₄和N₂O排放的响应研究已有大量报道, 但其结果往往受到特定的环境因素所限制. 因此, 有必要综合分析不同田间管理措施条件下CO₂浓度升高对稻田CH₄和N₂O排放的影响.

本文通过收集目前已发表的关于CO₂浓度升高对稻田CH₄和N₂O排放影响的文献数据(Ziska等, 1998; Allen等, 2003; Inubushi等, 2003; Xu等, 2004; Cheng等, 2006; Zheng等, 2006; Cheng等, 2008; Tokida等, 2010; 马红亮等, 2010; Xie等, 2012; Yun等, 2012; Bhattacharyya等, 2013; Fumoto等, 2013; Pereira等, 2013; 周超等, 2013; Han等, 2016; 王从, 2017; Sun等, 2018; Wang等, 2018a, 2018b; Qian等, 2020; Yao等, 2020; 马嫒, 2020), 采用Meta分析方法系统、定量地探究不同CO₂浓度升高状况以及田间管理措施条件下CO₂浓度升高对稻田CH₄和N₂O排放的影响, 以期探求未来气候条件下可实现稻田温室气体减排的水稻生产合理管理措施.

2 材料与方法

2.1 数据来源与选取

基于Web of Science和中国知网(CNKI)等多种中英文数据库, 以“二氧化碳浓度升高或CO₂升高”“水稻或稻田”“甲烷或CH₄”和“氧化亚氮或N₂O”为关键词, 检索2020年12月前发表的关于CO₂浓度升高对稻田CH₄和N₂O排放影响的文献. 所筛选的文献不包含宏观评价类或综述类论文(Gurevitch等, 2018), 筛选标准为: (1) 必须同时包含正常CO₂浓度和CO₂浓度升高条件下CH₄或N₂O排放的观测结果; (2) CH₄和N₂O排放必须在水稻全生育期内进行测定, 文中包含水稻生育期内的CH₄或N₂O排放总量, 或可通过CH₄和N₂O排放通量等数据计算得到; (3) 不同的CO₂浓度升高平台必须确定其CO₂熏气年限; (4) 文献中必须给出其他田间管理措施(如N肥施用、秸秆还田、水稻品种以及水分管理等)的细节. 最终筛选出符合标准的有效文献23篇, 提取出157组数据. 此外, 文中还包含本文作者2016~2018年在江苏扬州稻田FACE平台的18组田间实测数据. 因此, 本文共计175组(CH₄和N₂O分别112和63组)可分析的独立样本. 有效文献中涉及的具体试验地点和农田管理措施分别如图1a和1b所示.

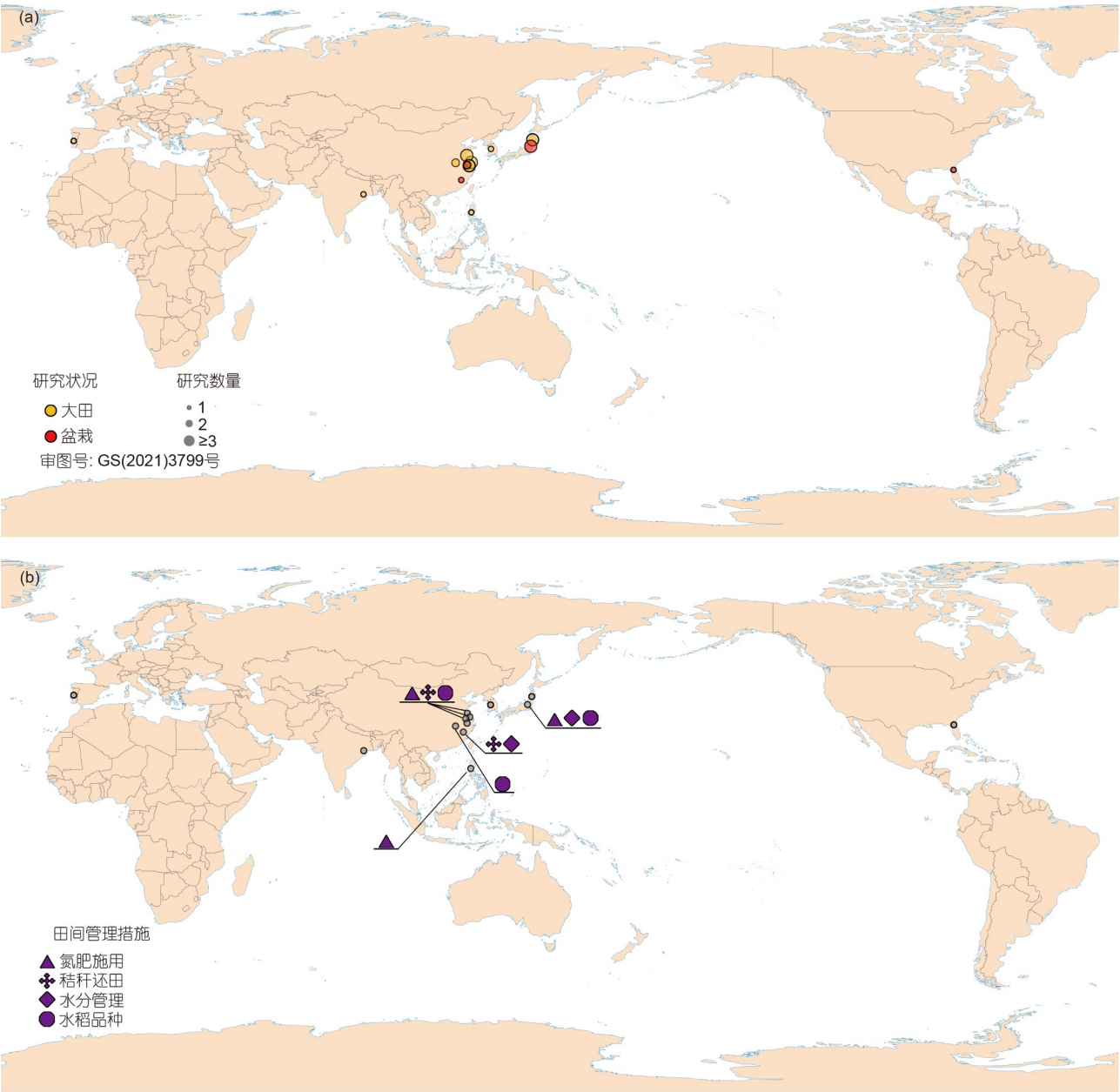


图 1 稻田CH₄和N₂O排放对CO₂浓度升高响应研究的试验地点(a)和田间管理措施(b)的全球分布
世界地图底图为小8开暖色示意地图版, 来自自然资源部标准地图服务系统, 网址: <http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>

2.2 数据处理与分析

CO₂浓度升高对稻田CH₄和N₂O排放的影响可进一步通过分组进行解释: 一方面, 针对CO₂浓度升高的状况可分为研究平台、CO₂熏气年限、CO₂浓度梯度; 另一方面, 按照田间管理措施可分为N肥施用、秸秆还田、水分管理、水稻品种等(表1). 采用Metawin 2.0

进行分析, 通过随机效应模型计算效应值lnR(Hedges等, 1999):

$$\ln R = \ln(X_{\text{ECO}_2} / X_{\text{ACO}_2}), \quad (1)$$

式中, X_{ECO_2} 和 X_{ACO_2} 分别代表CO₂浓度升高处理和正常CO₂浓度处理CH₄和N₂O累积排放量的平均值.

表 1 数据分组依据

研究状况	CO ₂ 浓度升高条件		田间管理措施			
	CO ₂ 熏气年限 (a)	CO ₂ 浓度梯度 (μmol mol ⁻¹)	N肥施用 (kg ha ⁻¹)	秸秆还田 (kg ha ⁻¹)	水分管理	水稻品种
大田 盆栽	<5	50~150	≤150	无 (0)	持续淹水 间歇灌溉	籼稻 粳稻
	5~10	150~250	150~300	半量 (0~1500)		
	≥10	250~350	≥300	全量 (≥1500)		

本研究通过de Graaff等(2006)的方法, 利用试验重复数计算权重*Weight*:

$$Weight = (N_{ECO_2} \times N_{ACO_2}) / (N_{ECO_2} + N_{ACO_2}), \tag{2}$$

式中, *Weight*为效应值对应的权重, *N*_{ECO₂}和*N*_{ACO₂}分别代表CO₂浓度升高处理和正常CO₂浓度处理试验重复数.

为直观表达不同CO₂浓度升高状况和田间管理措施条件下CO₂浓度升高对稻田CH₄和N₂O排放的促进作用或抑制作用, 通过变换得到稻田CH₄和N₂O排放的百分率:

$$EF = (e^{\ln R} - 1) \times 100\%, \tag{3}$$

式中, *EF*为CO₂浓度升高处理相对于正常CO₂浓度处理稻田CH₄和N₂O排放增加或下降的百分比.

采用拔靴法计算通过4999次迭代计算效应值的95%置信区间(95%CI_s). 若95%CI_s与0不相交, 则表明效应值显著; 反之, 不显著. 若组间异质性检验值对应的*P*值小于0.05, 则表示组间有显著差异.

3 结果

3.1 不同CO₂浓度升高条件下CO₂浓度升高对稻田CH₄和N₂O排放的影响

如图2所示, 整体平均而言, CO₂浓度升高显著促进稻田CH₄排放, 增幅为23%(*P*<0.05), 同时显著降低稻田N₂O排放, 降幅为22%(*P*<0.05). 盆栽和大田试验条件下, CO₂浓度升高使稻田CH₄排放分别显著增加21%和24%(*P*<0.05, 图2a), 同时使稻田N₂O排放分别显著降低62%和17%(*P*<0.05, 图2b). 对于不同CO₂熏气年限而言, CO₂熏气年限<5a时, CO₂浓度升高显著增加稻田CH₄排放, 增幅为33%(*P*<0.05), 却显著降低稻田N₂O排放, 降幅为29%(*P*<0.05); CO₂熏气年限

5~10a时, CO₂浓度升高同时显著增加稻田CH₄和N₂O排放, 增幅分别为27%和29%(*P*<0.05); 然而, CO₂熏气年限≥10a时, CO₂浓度升高却又同时显著降低稻田CH₄和N₂O排放, 降幅分别为27%和53%(*P*<0.05). 对于不同CO₂浓度梯度而言, CO₂浓度梯度为50~150μmol mol⁻¹时, CO₂浓度升高使得稻田CH₄和N₂O排放分别显著增加35%和45%(*P*<0.05); 而CO₂浓度梯度为150~250和250~350μmol mol⁻¹时, CO₂浓度升高显著增加稻田CH₄排放(增幅分别17%和47%, *P*<0.05), 却又显著降低稻田N₂O排放(降幅分别为44%和62%, *P*<0.05). 异质性分析表明, CO₂熏气年限和CO₂浓度梯度均显著影响稻田CH₄排放对CO₂浓度升高的响应; 而试验平台、CO₂熏气年限以及CO₂浓度梯度均显著影响稻田N₂O排放对CO₂浓度升高的响应(表2).

从现有文献数据分析结果可知, 随CO₂熏气年限的增加, CO₂浓度升高对稻田CH₄排放的正效应从第5a开始逐渐减弱, 而CO₂熏气年限≥10a时, 正效应变为负效应(图3a). 对于稻田N₂O排放而言, 随CO₂熏气年限的增加, 从第5a开始, CO₂浓度升高对稻田N₂O排放的负效应逐渐减弱而后变为正效应, 而CO₂熏气年限≥10a时, 其正效应又变为负效应(图3b). 相关分析显示, 不同熏气年限之间, 稻田CH₄和N₂O排放存在显著差异(*P*<0.01, 表2); 并随CO₂熏气年限的增加, CO₂浓度升高对稻田CH₄和N₂O排放影响发生显著变化(*P*<0.0001, 图3).

进一步分析发现, 相同CO₂熏气年限条件下, CO₂浓度梯度从50~150μmol mol⁻¹上升至150~250μmol mol⁻¹时, CO₂浓度升高对稻田CH₄排放的促进作用减弱, 对稻田N₂O排放的影响呈“先促进后抑制”的趋势(图4). 相同CO₂浓度梯度条件下, 随CO₂熏气年限的增加, CO₂浓度升高对稻田CH₄排放的促进作用也呈现不断减弱的趋势, 特别是CO₂浓度梯度为150~250μmol mol⁻¹时, 促进作用逐渐变为抑制作用(图4a). 对于稻

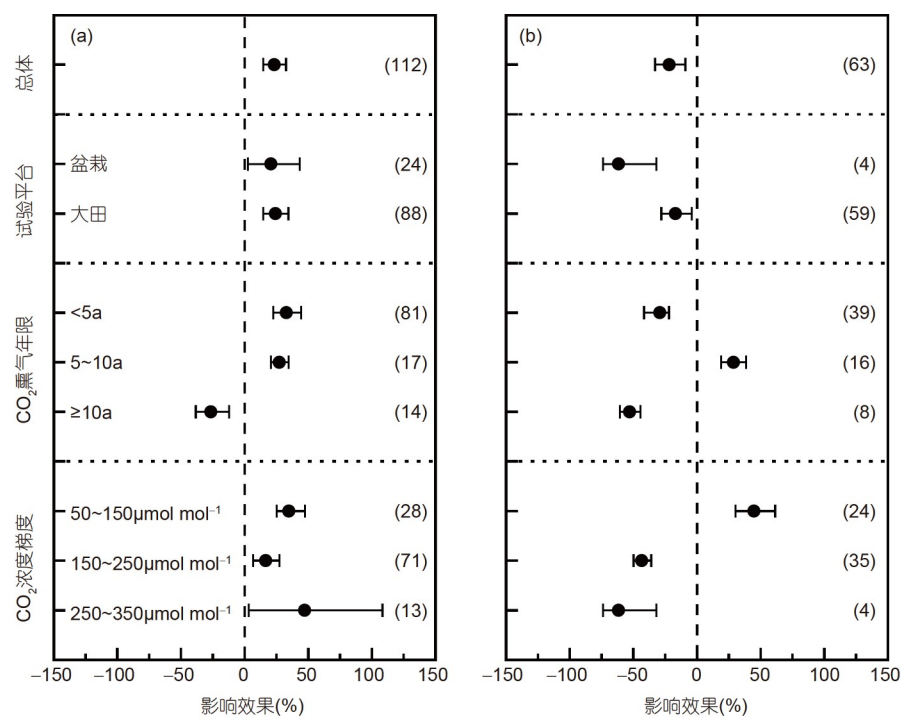


图 2 不同的CO₂浓度升高条件下稻田CH₄(a)和N₂O(b)排放对CO₂浓度升高的响应
误差线表示95%CI, 括弧中的数字表示相应指标的样本量

表 2 CO₂浓度升高对不同响应变量影响的组间异质性(Q_b)^{a)}

分组变量	组别	自由度	Q_b 值	P 值
CH ₄ 排放	研究平台	1	0.03	0.74
	CO ₂ 熏气年限	2	6.40	<0.01
	CO ₂ 浓度梯度	2	1.27	0.08
	N肥施用	2	0.23	0.83
	秸秆还田	2	2.62	<0.01
	水分管理	1	0.02	0.79
	水稻品种	1	0.09	0.56
N ₂ O排放	研究平台	1	4.11	0.01
	CO ₂ 熏气年限	2	9.61	<0.01
	CO ₂ 浓度梯度	2	22.9	<0.01
	N肥施用	2	2.12	0.16
	秸秆还田	2	5.6	<0.01
	水分管理	1	0.27	0.51
	水稻品种	1	6.17	<0.01

a) 加粗的 P 值表示CH₄和N₂O排放受不同的CO₂浓度升高条件或田间管理措施的显著影响

田N₂O排放而言, CO₂浓度梯度为50~150μmol mol⁻¹时, 随CO₂熏气年限的增加, CO₂浓度升高对稻田N₂O排放的促进作用显著降低($P<0.05$); CO₂浓度梯度为

150~250μmol mol⁻¹时, 随CO₂熏气年限的增加, CO₂浓度升高对稻田N₂O排放的抑制作用逐渐增强($P>0.05$, 图4b).

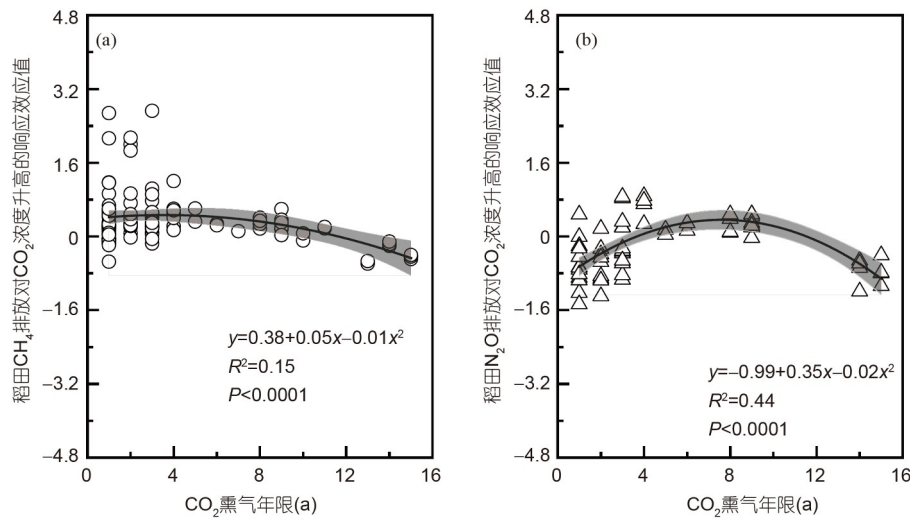


图3 CO₂熏气年限对稻田CH₄(a)和N₂O(b)排放的影响

阴影部分表示95%CI

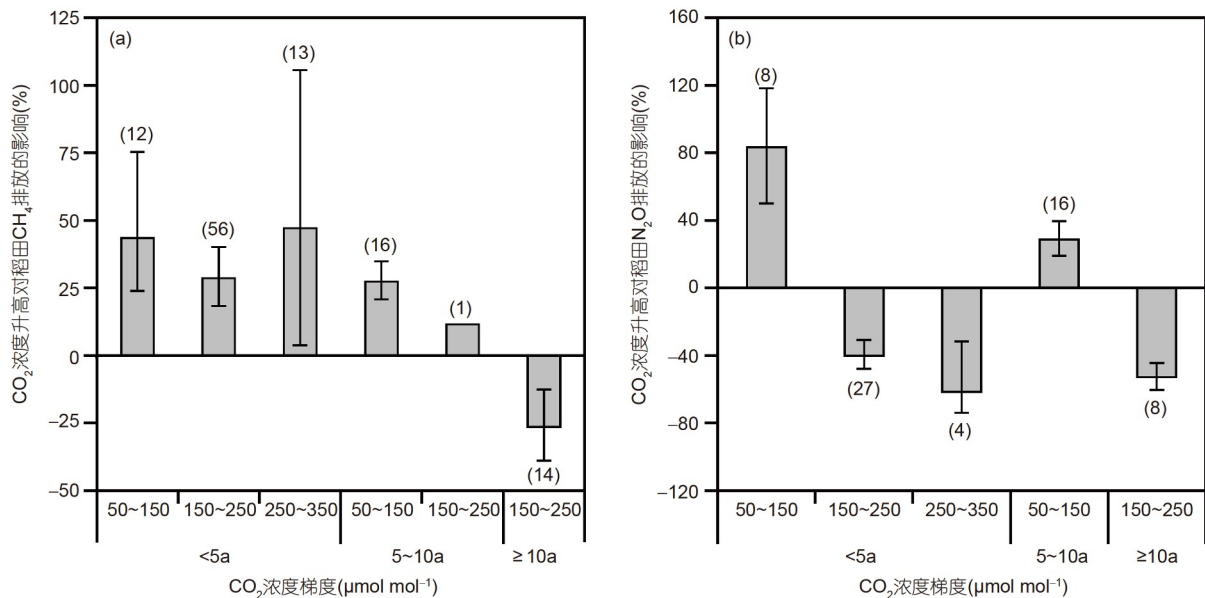


图4 不同CO₂熏气年限和浓度梯度条件下稻田CH₄(a)和N₂O(b)排放对CO₂浓度升高的响应

误差线表示95%CI, 括弧中的数字表示相应指标的样本量

3.2 不同田间管理措施下CO₂浓度升高对稻田CH₄和N₂O排放的影响

不同N肥施用量的条件下, CO₂浓度升高均显著增加稻田CH₄排放, 增幅为17~27% ($P < 0.05$), 却显著减少稻田N₂O排放, 降幅为34~38% ($P > 0.05$), 除施N量为150~300 kg ha⁻¹ (图5)。随N肥施用量的增加,

CO₂浓度升高对稻田CH₄排放促进作用逐渐减弱, 而对稻田N₂O排放的抑制作用先减弱后增强。无秸秆和半量秸秆还田条件下, CO₂浓度升高使稻田CH₄排放分别显著增加27%和49% ($P < 0.05$); 而全量秸秆还田条件下, CO₂浓度升高对稻田CH₄排放则无显著影响 ($P > 0.05$)。对比无秸秆和半量秸秆还田条件, 全量秸

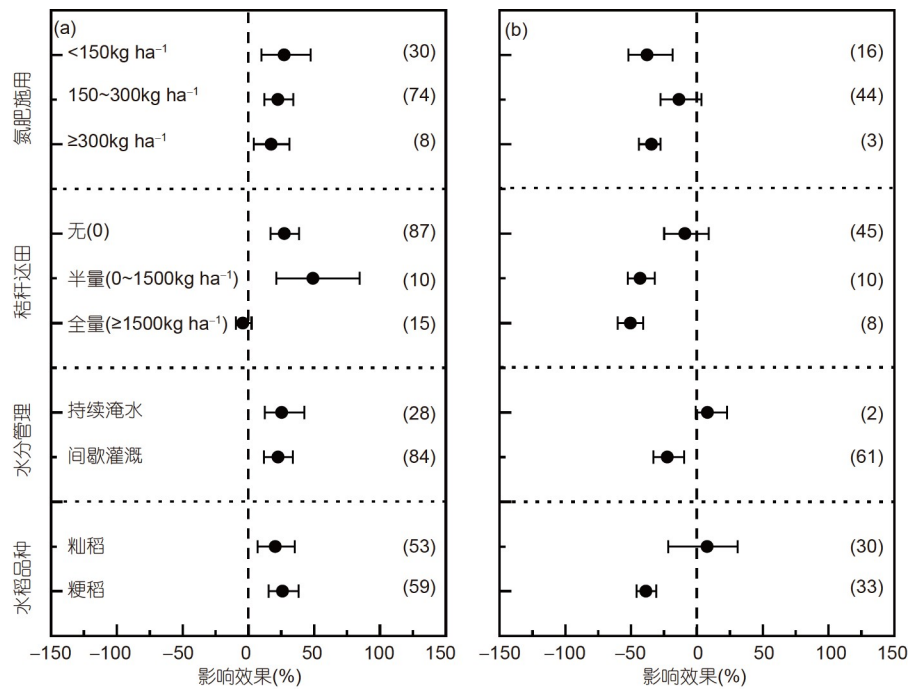


图 5 不同田间管理措施条件下CO₂浓度升高对稻田CH₄(a)和N₂O(b)排放的影响

秆还田显著降低CO₂浓度升高对稻田CH₄排放促进作用($P < 0.05$, 图5a). 无秸秆还田条件下, CO₂浓度升高对N₂O排放的抑制作用并不显著; 而半量和全量秸秆还田条件下, CO₂浓度升高显著降低稻田N₂O排放, 降幅分别为43%和51%($P < 0.05$, 图5b). 不同水分管理情况下, CO₂浓度升高均显著促进稻田CH₄排放, 增幅为23~25%; 对比持续淹水条件, 间歇灌溉降低CO₂浓度升高对稻田CH₄排放的促进作用, 但未达到显著水平(图5a). 持续淹水条件下, CO₂浓度升高对稻田N₂O排放则无显著影响, 而间歇灌溉条件下, CO₂浓度升高却显著降低稻田N₂O排放, 降幅为23%($P < 0.05$, 图5b). 不同水稻品种条件下, CO₂浓度升高对稻田CH₄排放的影响无显著差别; 对比粳稻, 种植籼稻情况下, CO₂浓度升高对稻田CH₄排放的促进作用降低(图5a). 然而, 种植籼稻情况下, CO₂浓度升高对稻田N₂O排放无显著影响, 而种植粳稻情况下, CO₂浓度升高却显著降低稻田N₂O排放39%($P < 0.05$, 图5b). 异质性分析表明, 仅秸秆还田显著影响稻田CH₄排放对CO₂浓度升高的响应; 对于稻田N₂O排放而言, 秸秆还田和水稻品种均会显著影响其对CO₂浓度升高的响应(表2).

4 讨论

4.1 不同CO₂浓度升高状况下稻田CH₄和N₂O排放对CO₂浓度升高的响应

CO₂浓度升高显著增加稻田CH₄排放(图2a), 这与人Meta分析的结果基本一致(van Groenigen等, 2011; van Groenigen等, 2013; Liu等, 2018; Qian等, 2020). 其原因可能是CO₂浓度升高促进了水稻植株生长, 使得水稻残落物和根系分泌物增加, 为稻田土壤提供了更多的产甲烷底物, 从而促进稻田CH₄排放(Inubushi等, 2003; Qian等, 2020). 本研究结果显示, 不同的CO₂浓度升高平台、CO₂熏气年限和CO₂浓度梯度对稻田CH₄排放的影响存在一定差异. van Groenigen等(2013)的Meta分析结果发现, 与盆栽试验相比, 大田试验条件下CO₂浓度升高对稻田CH₄排放的促进作用减弱. 然而, 本研究结果认为, 大田试验并未减弱CO₂浓度升高对稻田CH₄排放的促进作用, 但其95%CI在盆栽试验95%CI内(图2a), 这表明大田试验比盆栽试验在CO₂浓度升高影响稻田CH₄排放方面具有更好的模拟效果. 本研究认为, 随CO₂熏气年限的增加, 稻田CH₄排放的促进作用逐渐减弱, 特别是CO₂熏气年

限 ≥ 10 a时, CO₂浓度升高显著抑制稻田CH₄排放, 降幅达27% ($P < 0.05$, 图2a和图3a)。这表明, 稻田CH₄排放对CO₂浓度升高的响应程度随CO₂熏气年限的变化可能具有不确定性。另外, 目前国内外开展的关于CO₂浓度升高的试验大多属于骤增试验(Allen等, 2020), 而骤增的CO₂浓度往往高估了植物-土壤系统的微生物群落响应(Klironomos等, 2005), 这可能会降低微生物对土壤C、N的利用效率, 从而减少CH₄产生和排放。实际上, CO₂浓度升高是一个缓慢过程, 并非骤增结果, 这可能影响稻田CH₄排放对CO₂浓度升高的响应程度。在本研究中, 尽管CO₂浓度梯度为250~350 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ 时, 稻田CH₄排放显著增加47%, 但CO₂浓度升高50~150和150~250 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ 会导致稻田CH₄排放显著增加35%和17%(图2a)。这表明, 在一定范围内, 随CO₂浓度梯度的上升, CO₂浓度升高对稻田CH₄排放的促进作用逐渐降低(图2a和图4a)。此外, 同一CO₂浓度梯度水平下, 随CO₂熏气年限的增加, CO₂浓度升高对稻田CH₄排放的促进作用也逐渐降低(图4a)。这进一步佐证了不同CO₂熏气年限下, CO₂浓度升高对稻田CH₄排放的影响存在显著差异。

以往单一控制实验的数据显示, CO₂浓度升高对稻田N₂O排放的影响并不一致, 有的显著增加(Bhattacharyya等, 2013; Pereira等, 2013; Wang等, 2018a), 有的显著减少(Yao等, 2020), 还有的无显著影响(Xu等, 2002; 王从, 2017)。Liu等(2018)的Meta分析结果表明, CO₂浓度升高对稻田N₂O排放无显著影响(+10%, 95% CIs为-22~26%)。在此基础上, 本研究通过增加研究样本数量发现, 整体平均而言, CO₂浓度升高却显著降低稻田N₂O排放, 降幅达22%(图2b), 这与Liu等(2018)的研究结果并不一致。CO₂浓度升高显著减少稻田N₂O排放的可能机制是CO₂浓度升高能够提高土壤N素利用率, 减少产N₂O底物, 从而减少稻田N₂O排放(Yao等, 2020)。对比盆栽试验, 大田试验显著降低CO₂浓度升高对稻田N₂O排放的抑制作用(图2b), 这可能与大田试验受控于较为复杂的环境因素, 而盆栽试验单一变量的针对性较强有关。目前, 关于不同的CO₂熏气年限和浓度梯度对稻田N₂O排放的影响未见报道。本研究表明, CO₂熏气年限由<5a增加到5~10a时, CO₂浓度升高对稻田N₂O排放的抑制作用逐渐变为促进作用; 而当CO₂熏气年限 ≥ 10 a时, CO₂浓度升高对稻田N₂O排放的促进作用又逐渐变为抑制作用(图2b和图

3b)。其原因可能是, 短期CO₂熏气年限(<5a)时, 水稻植株的N肥有效利用率提高, 减少稻田土壤N素盈余, 从而导致CO₂升高降低稻田N₂O排放(Yao等, 2020); 而随CO₂熏气年限增加到5~10a时, 人为持续N肥施用导致土壤N素含量并未减少(Cheng等, 2016), 但CO₂浓度升高刺激了相关微生物的生长, 从而促进稻田N₂O排放; 长期CO₂熏气年限(≥ 10 a)时, 土壤N素矿化速率增加(Wu等, 2020), 导致微生物可利用的N素含量降低, 进而导致稻田N₂O排放减少。此外, 本研究结果发现, 随CO₂浓度梯度水平的不断升高, CO₂浓度升高对稻田N₂O排放的促进作用逐渐变为抑制作用(图2b和图4b), 这可能是由于低CO₂浓度升高水平刺激相关微生物的生长和活性, 促进稻田N₂O产生和排放; 而高CO₂浓度升高水平抑制相关微生物的生长和活性, 从而抑制稻田N₂O产生和排放。

4.2 不同田间管理措施下稻田CH₄和N₂O排放对CO₂浓度升高的响应

N肥施用是调控稻田CH₄排放的关键因子之一, 势必会影响稻田CH₄排放对CO₂浓度升高的响应效果。本研究表明, N肥施用情况下, CO₂浓度升高显著增加稻田CH₄排放, 但随N肥施用量的增加, CO₂浓度升高对稻田CH₄排放的促进作用却逐渐降低(图5a)。其原因可能是N肥施用量的增加促进水稻生长, 增加O₂通过植株进入土壤, 促进稻田CH₄氧化(王毅勇等, 2008)。整体而言, N肥施用情况下, CO₂浓度升高对稻田N₂O排放呈现抑制作用, 这与Yao等(2020)单一控制试验的研究结果一致。N肥施用量<150 kg ha⁻¹时, CO₂浓度升高对稻田N₂O排放抑制作用效果最好, 这表明可通过优化N肥管理, 减少稻田N₂O排放(图5b)。

秸秆还田也是影响稻田温室气体排放的重要因素。本研究发现, 无秸秆和半量秸秆还田时, CO₂浓度升高显著促进稻田CH₄排放, 而全量秸秆还田条件下, CO₂浓度升高对稻田CH₄排放的促进效果显著降低(图5a), 这与Qian等(2020)的研究结果一致。随秸秆还田量的增加, CO₂浓度升高对稻田CH₄排放的促进作用显著降低, 原因可能是秸秆还田条件下, CO₂浓度升高显著增加了稻田CH₄氧化菌的群落丰度(Qian等, 2020)。无秸秆还田条件下, CO₂浓度升高对稻田N₂O排放无显著影响, 而半量或全量秸秆还田时, CO₂浓度升高显著降低稻田N₂O排放(图5b)。其原因可能是, 秸秆还田增加

了外源C投入,增加了微生物对无机N的需求,导致暂时性的土壤N固定,进而减少了稻田 N_2O 排放(Yao等, 2020). 因此, CO_2 浓度升高条件下, 全量秸秆还田有利于稻田 CH_4 和 N_2O 排放减排, 对可持续农业发展和环境保护具有重要作用.

稻田水分管理影响土壤水分状况, 进而影响稻田温室气体排放. 本研究结果表明, CO_2 浓度升高对间歇灌溉稻田 CH_4 排放的促进作用略低于对持续淹水稻田的促进作用; 对于不同水分管理措施, CO_2 浓度升高对稻田 CH_4 排放的影响并没有明显差异(图5a). 间歇灌溉条件下, CO_2 浓度升高显著降低稻田 N_2O 排放, 而持续淹水条件下, 抑制作用并不明显(图5b). 这表明, 间歇灌溉条件下, CO_2 浓度升高对稻田 CH_4 和 N_2O 的减排效果具有一致性.

不同水稻品种的稻田温室气体排放存在一定差异, 且产生差异的原因具有不确定性. 对比籼稻, 粳稻种植情况下, CO_2 浓度升高对稻田 CH_4 排放的促进作用略高, 而对稻田 N_2O 排放的抑制作用更强(图5). 其可能原因, 一方面是粳稻分蘖数对 CO_2 浓度升高的促进作用更敏感, 导致稻田 CH_4 排放增强(王从, 2017); 另一方面是粳稻的光合速率对 CO_2 浓度升高的响应较弱, 导致C/N降低, 进而导致稻田 N_2O 排放降低(Liu等, 2018).

4.3 不确定性

首先, 不同时间和空间尺度下, 稻田 CH_4 和 N_2O 排放对 CO_2 浓度升高的响应可能存在一定差异. 例如, 已发表的研究报道中, 大部分试验选址主要位于温带和亚热带地区, 而C、N循环过程最为活跃的热带地区相对偏少(王从, 2017), 这势必会导致稻田温室气体排放对 CO_2 浓度升高响应的评估存在一定的区域差异. 本研究中, 稻田 CH_4 和 N_2O 排放对 CO_2 浓度升高的响应随 CO_2 熏气年限的增加以及一定程度的 CO_2 浓度梯度的上升而显著降低(图4), 这表明, 未来气候条件下 CO_2 浓度升高对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响具有不确定性. 其次, 田间管理措施不同程度地影响稻田 CH_4 和 N_2O 排放对 CO_2 浓度升高的响应(图5), 然而, 目前多环境因素共同作用下稻田温室气体排放对 CO_2 浓度升高响应的试验研究相对较少(王从, 2017). 此外, CO_2 浓度升高对植物地下根系生长、土壤C、N循环过程以及微生物生物量与功能等的影响及机制目前尚不清楚(牛书丽等, 2020). 因此, 阐明未来气候条件下稻田温室气体排放

对不同因素与 CO_2 浓度升高的交互作用的响应及机制还需进一步深入探究. 当然, 数据整合自身可能有一定的局限性, 不同试验之间的方法差异(处理方法、测定频率)使得总体结果存在不确定性(牛书丽等, 2020), 这需要通过数据-模型融合等方法更准确地评估和预测未来气候变化情景下稻田的温室气体排放.

综上, 未来气候条件下稻田 CH_4 和 N_2O 排放对 CO_2 浓度升高的响应研究可能还需多尺度(时间和区域)、多要素(气候、土壤和人为因素)和多方法(观测、模型、数据-模型融合)的系统探索, 以期有效降低其评估的不确定性.

5 结论

(1) 整体平均而言, 对比正常 CO_2 浓度, CO_2 浓度升高显著增加稻田 CH_4 排放, 增幅为23%($P<0.05$), 同时, 显著降低稻田 N_2O 排放, 降幅为22%($P<0.05$).

(2) CO_2 熏气年限、秸秆还田显著影响稻田 CH_4 排放对 CO_2 浓度升高的响应, 而 CO_2 熏气年限、 CO_2 浓度梯度、秸秆还田以及水稻品种也会不同程度地影响稻田 N_2O 排放对 CO_2 浓度升高的响应.

(3) 长期 CO_2 浓度升高($\geq 10\text{a}$)或秸秆还田条件下, CO_2 浓度升高均降低稻田 CH_4 和 N_2O 排放; 间歇灌溉条件下, CO_2 浓度升高降低稻田 CH_4 排放促进作用的同时, 能够显著减少稻田 N_2O 排放. 因此, 为确保未来气候条件下稻田 CH_4 和 N_2O 的有效减排, 建议结合间歇灌溉和全量秸秆还田措施, 通过优化N肥管理和选育“高产低排”水稻品种等方法, 达到最优的“增产减排”效果.

(4) 未来气候条件下, 可能还需进行多尺度(时间和区域)、多要素(气候、土壤性质和人为因素)和多方法(观测、模型、数据-模型融合)等的综合研究, 以期有效降低未来气候变化情境下稻田 CH_4 和 N_2O 排放对 CO_2 浓度升高的响应评估和拓展的不确定性.

参考文献

- 蔡祖聪, 徐华, 马静. 2009. 稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放. 合肥: 中国科学技术大学出版社
- 江瑜. 2017. 水稻植株生产力和物质分配对稻田温室气体排放的影响及其机理. 博士学位论文. 南京: 南京农业大学
- 李香兰, 马静, 徐华, 曹金留, 蔡祖聪, 八木一行. 2008. 水分管理对水稻生长期 CH_4 和 N_2O 排放季节变化的影响. 农业环境科学学报,

- 27: 535–541
- 马红亮, 朱建国, 谢祖彬, 刘钢, 曾青. 2010. 自由大气CO₂浓度升高对稻田CH₄排放的影响研究. 农业环境科学学报, 29: 1217–1224
- 马静. 2008. 秸秆还田和氮肥施用对稻田CH₄和N₂O排放的影响. 博士学位论文. 南京: 中国科学院南京土壤研究所
- 马婷. 2020. 增温增CO₂及施氮水平对双季稻温室气体排放的影响. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院
- 牛书丽, 王松, 汪金松, 夏建阳, 于贵瑞. 2020. 大数据时代的整合生态学研究——从观测到预测. 中国科学: 地球科学, 50: 1323–1338
- 潘根兴. 2013. 气候变化对中国若干作物和动物生产的影响. 中国农业科学院, 46: 4397–4398
- 王从. 2017. 稻麦轮作生态系统温室气体排放对大气CO₂浓度和温度升高的响应研究. 博士学位论文. 南京: 南京农业大学
- 王毅勇, 陈卫卫, 赵志春, 顾江新. 2008. 三江平原寒地稻田CH₄、N₂O排放特征及排放量估算. 农业工程学报, 24: 170–176
- 夏仕明, 陈洁, 蒋玉兰, 陈璐, 刘贺, 刘立军. 2017. 稻田N₂O排放影响因素与减排研究进展. 中国稻米, 23: 5–9
- 徐华, 邢光喜, 蔡祖聪, 鹤田治雄. 2000. 土壤水分状况和质地对稻田N₂O排放的影响. 土壤学报, 37: 499–505
- 易琼, 唐拴虎. 2015. 稻田温室气体CH₄和N₂O排放影响因素及其减排措施研究进展. 广州农业科学, 4: 141–146
- 周超, 刘树伟, 张令, 张旭辉, 潘根兴, 邹建文. 2013. 温度和CO₂浓度升高对稻田CH₄的影响: T-FACE平台观测研究. 农业环境科学学报, 32: 2077–2083
- Allen Jr. L H, Albrecht S L, Colón-Guasp W, Covell S A, Baker J T, Pan D, Boote K J. 2003. Methane emissions of rice increased by elevated carbon dioxide and temperature. *J Environ Qual*, 32: 1978–1991
- Allen Jr. L H, Kimball B A, Bunce J A, Yoshimoto M, Harazono Y, Baker J T, Boote K J, White J W. 2020. Fluctuations of CO₂ in free-air CO₂ enrichment (FACE) depress plant photosynthesis, growth, and yield. *Agric For Meteorol*, 284: 107899
- Bhattacharyya P, Roy K S, Neogi S, Dash P K, Nayak A K, Mohanty S, Baig M J, Sarkar R K, Rao K S. 2013. Impact of elevated CO₂ and temperature on soil C and N dynamics in relation to CH₄ and N₂O emissions from tropical flooded rice (*Oryza sativa* L.). *Sci Total Environ*, 461–462: 601–611
- Cheng W G, Sakai H, Hartley A, Yagi K, Hasegawa T. 2008. Increased night temperature reduces the stimulatory effect of elevated carbon dioxide concentration on methane emission from rice paddy soil. *Glob Change Biol*, 14: 644–656
- Cheng W G, Yagi K, Sakai H, Kobayashi K. 2006. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations on CH₄ and N₂O emission from rice soil: An experiment in controlled-environment chambers. *Biogeochemistry*, 77: 351–373
- Cheng Y, Zhang J B, Zhu J G, Liu G, Zhu C W, Wang S Q. 2016. Ten years of elevated atmospheric CO₂ doesn't alter soil nitrogen availability in a rice paddy. *Soil Biol Biochem*, 98: 99–108
- de Graaff M A, van Groenigen K J, Six J, Hungate B, van Kessel C. 2006. Interactions between plant growth and soil nutrient cycling under elevated CO₂: A meta-analysis. *Glob Change Biol*, 12: 2077–2091
- Fumoto T, Hasegawa T, Cheng W, Hoque M M, Yamakawa Y, Shimono H, Kobayashi K, Okada M, Li C, Yagi K. 2013. Application of a process-based biogeochemistry model, DNDC-Rice, to a rice field under free-air CO₂ enrichment (FACE). *J Agric Meteorol*, 69: 173–190
- Gurevitch J, Koricheva J, Nakagawa S, Stewart G. 2018. Meta-analysis and the science of research synthesis. *Nature*, 555: 175–182
- Han X G, Sun X, Wang C, Wu M X, Dong D, Zhong T, Thies J E, Wu W X. 2016. Mitigating methane emission from paddy soil with rice-straw biochar amendment under projected climate change. *Sci Rep*, 6: 24731
- Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. 1999. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. *Ecology*, 80: 1150–1156
- Inubushi K, Cheng W, Aonuma S, Hoque M M, Kobayashi K, Miura S, Kim H Y, Okada M. 2003. Effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on CH₄ emission from a rice paddy field. *Glob Change Biol*, 9: 1458–1464
- IPCC. 2014. Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press
- Jiang Y, Qian H Y, Huang S, Zhang X Y, Wang L, Zhang L, Shen M, Xiao X, Chen F, Zhang H, Lu C, Li C, Zhang J, Deng A, van G K J, Zhang W. 2019. Acclimation of methane emissions from rice paddy fields to straw addition. *Sci Adv*, 5: eaau9038
- Jiang Y, van Groenigen K J, Huang S, Hungate B A, van Kessel C, Hu S, Zhang J, Wu L, Yan X, Wang L, Chen J, Hang X, Zhang Y, Horwath W R, Ye R, Linquist B A, Song Z, Zheng C, Deng A, Zhang W. 2017. Higher yields and lower methane emissions with new rice cultivars. *Glob Change Biol*, 23: 4728–4738
- Klironomos J N, Allen M F, Rillig M C, Piotrowski J, Makvandi-Nejad S, Wolfe B E, Powell J R. 2005. Abrupt rise in atmospheric CO₂ overestimates community response in a model plant-soil system. *Nature*, 433: 621–624
- Liu S W, Ji C, Wang C, Chen J, Jin Y G, Zou Z H, Li S Q, Niu S L, Zou J W. 2018. Climatic role of terrestrial ecosystem under elevated CO₂: A bottom-up greenhouse gases budget. *Ecol Lett*, 21: 1108–1118
- Pereira J, Figueiredo N, Goufo P, Carneiro J, Morais R, Carranca C, Coutinho J, Trindade H. 2013. Effects of elevated temperature and

- atmospheric carbon dioxide concentration on the emissions of methane and nitrous oxide from Portuguese flooded rice fields. *Atmos Environ*, 80: 464–471
- Qian H Y, Huang S, Chen J, Wang L, Hungate B A, van K C, Zhang J, Deng A X, Jiang Y, van G K J, Zhang W J. 2020. Lower-than-expected CH₄ emissions from rice paddies with rising CO₂ concentrations. *Glob Change Biol*, 26: 2368–2376
- Saunois M, Stavert A R, Poulter B, Bousquet P, Canadell J G, Jackson R B, Raymond P A, Dlugokencky E J, Houweling S, Patra P K, Ciais P, Arora V K, Bastviken D, Bergamaschi P, Blake D R, Brailsford G, Bruhwiler L, Carlson K M, Carrol M, Castaldi S, Chandra N, Crevoisier C, Crill P M, Covey K, Curry C L, Etiope G, Frankenberg C, Gedney N, Hegglin M I, Höglund-Isaksson L, Hugelius G, Ishizawa M, Ito A, Janssens-Maenhout G, Jensen K M, Joos F, Kleinen T, Krummel P B, Langenfelds R L, Laruelle G G, Liu L, Machida T, Maksyutov S, McDonald K C, McNorton J, Miller P A, Melton J R, Morino I, Müller J, Murguía-Flores F, Naik V, Niwa Y, Noce S, O'Doherty S, Parker R J, Peng C, Peng S, Peters G P, Prigent C, Prinn R, Ramonet M, Regnier P, Riley W J, Rosentreter J A, Segers A, Simpson I J, Shi H, Smith S J, Steele L P, Thornton B F, Tian H, Tohjima Y, Tubiello F N, Tsuruta A, Viovy N, Voulgarakis A, Weber T S, van Weele M, van der Werf G R, Weiss R F, Worthy D, Wunch D, Yin Y, Yoshida Y, Zhang W, Zhang Z, Zhao Y, Zheng B, Zhu Q, Zhu Q, Zhuang Q. 2020. The global methane budget 2000–2017. *Earth Syst Sci Data*, 12: 1561–1623
- Sun X, Han X G, Ping F, Zhang L, Zhang K S, Chen M, Wu W X. 2018. Effect of rice-straw biochar on nitrous oxide emissions from paddy soils under elevated CO₂ and temperature. *Sci Total Environ*, 628-629: 1009–1016
- Tokida T, Fumoto T, Cheng W, Matsunami T, Adachi M, Katayanagi N, Matsushima M, Okawara Y, Nakamura H, Okada M, Sameshima R, Hasegawa T. 2010. Effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) and soil warming on CH₄ emission from a rice paddy field: Impact assessment and stoichiometric evaluation. *Biogeosciences*, 7: 2639–2653
- van der Gon H A C D, Kropff M J, Van Breemen N, Wassmann R, Lantin R S, Aduna E, Corton T M, van Laar H H. 2002. Optimizing grain yields reduces CH₄ emissions from rice paddy fields. *Proc Natl Acad Sci USA*, 99: 12021–12024
- van Groenigen K J, Osenberg C W, Hungate B A. 2011. Increased soil emissions of potent greenhouse gases under increased atmospheric CO₂. *Nature*, 475: 214–216
- van Groenigen K J, van Kessel C, Hungate B A. 2013. Increased greenhouse-gas intensity of rice production under future atmospheric conditions. *Nat Clim Change*, 3: 288–291
- Wang B, Li J L, Wan Y F, Li Y, Qin X B, Gao Q Z, Waqas M A, Wilkes A, Cai W W, You S C, Zhou S H. 2018a. Responses of yield, CH₄ and N₂O emissions to elevated atmospheric temperature and CO₂ concentration in a double rice cropping system. *Eur J Agron*, 96: 60–69
- Wang C, Jin Y G, Ji C, Zhang N, Song M Y, Kong D L, Liu S W, Zhang X H, Liu X Y, Zou J W, Li S Q, Pan G X. 2018b. An additive effect of elevated atmospheric CO₂ and rising temperature on methane emissions related to methanogenic community in rice paddies. *Agr Ecosyst Environ*, 257: 165–174
- Wu Q C, Zhang C Z, Liang X Q, Zhu C W, Wang T Y, Zhang J B. 2020. Elevated CO₂ improved soil nitrogen mineralization capacity of rice paddy. *Sci Total Environ*, 710: 136438
- Xie B H, Zhou Z X, Mei B L, Zheng X H, Dong H B, Wang R, Han S H, Cui F, Wang Y H, Zhu J G. 2012. Influences of free-air CO₂ enrichment (FACE), nitrogen fertilizer and crop residue incorporation on CH₄ emissions from irrigated rice fields. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 93: 373–385
- Xu Z J, Zheng X H, Wang Y S, Han S H, Huang Y, Zhu J G. 2002. Effects of elevated atmospheric CO₂ on CH₄ and N₂O emissions from paddy fields. *Chin J Appl Ecol*, 13: 1245–1248
- Xu Z, Zheng X, Wang Y, Han S, Huang Y, Zhu J, Butterbach-Bahl K. 2004. Effects of elevated CO₂ and N fertilization on CH₄ emissions from paddy rice fields. *Glob Biogeochem Cycle*, 18: GB3009
- Yao Z S, Wang R, Zheng X H, Mei B L, Zhou Z X, Xie B H, Dong H B, Liu C Y, Han S H, Xu Z J, Butterbach-Bahl K, Zhu J G. 2020. Elevated atmospheric CO₂ reduces yield-scaled N₂O fluxes from subtropical rice systems: Six site-years field experiments. *Glob Change Biol*, 27: 327–339
- Yun S I, Kang B M, Lim S S, Choi W J, Ko J, Yoon S, Ro H M, Kim H Y. 2012. Further understanding CH₄ emissions from a flooded rice field exposed to experimental warming with elevated [CO₂]. *Agric For Meteorol*, 154-155: 75–83
- Zheng X H, Zhou Z X, Wang Y S, Zhu J, Wang Y L, Yue J, Shi Y, Kobayashi K, Inubushi K, Huang Y, Han S H, Xu Z J, Xie B H, Butterbach-Bahl K, Yang L X. 2006. Nitrogen-regulated effects of free-air CO₂ enrichment on methane emissions from paddy rice fields. *Glob Change Biol*, 12: 1717–1732
- Ziska L H, Moya T B, Wassmann R, Namuco O S, Lantin R S, Aduna J B, Abao Jr. E, Bronson K F, Neue H U, Olszyk D. 1998. Long-term growth at elevated carbon dioxide stimulates methane emission in tropical paddy rice. *Glob Change Biol*, 4: 657–665

(责任编辑: 李彦)