

·灌溉技术与装备·

文章编号: 1672-3317(2023)08-0063-10

## 灌溉方式对旱区农田温室气体排放影响的 Meta 分析

宋娟娟<sup>1,2</sup>, 高晓东<sup>1,3\*</sup>, 蔡耀辉<sup>1,3</sup>, 于流洋<sup>1,3</sup>, 宋小林<sup>4</sup>, 李昌见<sup>3</sup>, 赵西宁<sup>1,3</sup>

(1.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2.西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 3.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 4.西北农林科技大学园艺学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:**【目的】综合评估不同灌溉方式对农田温室气体排放的影响, 并分析其产生差异的驱动机制。【方法】本研究采用 Meta 分析方法, 在中国知网和 Web of Science 搜集关于不同灌溉方式对温室气体排放的相关文献, 共提取 37 篇文献, 176 组观测数据, 分析了不同灌溉方式下温室气体排放的差异, 并解释了土壤水分分布造成土壤环境因子变化进而导致温室气体排放产生差异的机制。【结果】与滴灌相比, 漫灌、沟灌、地下滴灌对 CO<sub>2</sub> 排放量的影响没有显著差异, 喷灌显著增加了 CO<sub>2</sub> 排放量 ( $p < 0.05$ ); 漫灌、沟灌、喷灌显著增加了 N<sub>2</sub>O 排放量 ( $p < 0.05$ ), 但与滴灌相比, 地下滴灌的 N<sub>2</sub>O 排放量没有显著差异; 与滴灌相比, 漫灌、沟灌、喷灌、地下滴灌对 CH<sub>4</sub> 排放量的影响没有显著差异。沟灌方式下, 土壤温度  $T$  是影响土壤 CO<sub>2</sub> 排放的关键因素, 铵态氮、土壤温度和土壤充水孔隙度 (WFPS) 是影响土壤 N<sub>2</sub>O 排放的关键因素; 漫灌方式下, 硝态氮是影响土壤 CO<sub>2</sub> 排放的关键因素, 铵态氮、土壤温度和土壤充水孔隙度是影响土壤 N<sub>2</sub>O 排放的关键因素; 喷灌方式下, 土壤充水孔隙度是影响土壤 N<sub>2</sub>O 排放的关键因素; 地下滴灌方式下, 土壤温度是影响土壤 CO<sub>2</sub> 排放的关键因素, 硝态氮和土壤充水孔隙度是影响土壤 N<sub>2</sub>O 排放的关键因素; 滴灌方式下, 硝态氮、铵态氮和土壤充水孔隙度是影响土壤 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 排放的关键因素, 另外, 土壤温度也是影响土壤 CO<sub>2</sub> 排放的关键因素。【结论】建议旱区农田灌溉减少喷灌及漫灌、沟灌的使用, 大范围推广滴灌及地下滴灌技术。

**关键词:** 灌溉方式; 土壤水分分布; 温室气体排放; Meta 分析

中图分类号: S275.9

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023024

OSID:



宋娟娟, 高晓东, 蔡耀辉, 等. 灌溉方式对旱区农田温室气体排放影响的 Meta 分析[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(8): 63-72.

SONG Juanjuan, GAO Xiaodong, CAI Yaohui, et al. Effects of Irrigation Methods on Greenhouse Gas Emissions from Arid Farmlands: A Meta-analysis[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(8): 63-72.

### 0 引言

【研究意义】自 1750 年以来, 大气中 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> 等温室气体浓度增加速度较快, 预计到 21 世纪末, 全球平均温度将上升 2 °C<sup>[1]</sup>。农业生产作为温室气体重要排放来源, 产生的温室气体排放量约占全球温室气体排放量的 13%, 其中农业排放的 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> 排放量分别占人类活动温室气体排放量的 18%、52%、84%<sup>[2-3]</sup>, 因此, 农业管理措施对减少温室气体排放具有重要意义。在干旱和半

干旱地区, 节水灌溉技术 (如滴灌、喷灌等) 迅速发展。截至 2020 年底, 我国节水灌溉面积已经达到 5.67 hm<sup>2</sup><sup>[4]</sup>, 灌溉方式带来土壤水分的动态变化差异影响土壤温度、养分及微生物活性<sup>[5]</sup>, 因此可能会对土壤 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> 排放产生影响<sup>[6]</sup>。

【研究进展】棉花漫灌的土壤 CO<sub>2</sub> 排放量明显小于滴灌<sup>[7-8]</sup>; 但也有研究<sup>[9]</sup>表明, 马铃薯盆栽试验中漫灌与滴灌 2 种灌溉方式下土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量无显著差异; 亦有研究<sup>[10]</sup>发现, 冬小麦滴灌方式下土壤 CO<sub>2</sub> 排放量会显著小于漫灌处理。出现较大差异可能是由于土壤环境因子及灌溉制度不同, 进而影响土壤微生物活性及土壤呼吸。同时有关灌溉方式对 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 排放影响的研究结果<sup>[9-13]</sup>也发现了一些不一致的结论。因此, 在农田生态系统温室气体排放研究中必须对相关结果进行有效的整合分析, 明确灌溉方式对温室气体排放的影响, 进而明确其出现差异的原因。

Meta 分析是对同一主题下的多项研究结果运用

收稿日期: 2023-01-20 修回日期: 2023-04-12 网络出版日期: 2023-05-15  
基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1900700); 国家自然科学基金项目 (52209069); 陕西省重点研发计划项目 (2020ZDLNY07-04, 2022NY-064, 2021NY-167); 唐仲英基金会项目; 中央高校基本科研业务费专项 (2452020242, 2452022020); 陕西省青年科技新星项目 (2019kJXX-069)

作者简介: 宋娟娟 (1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: 2287513167@qq.com

通信作者: 高晓东 (1985-), 男, 研究员, 主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: gao\_xiaodong@nwfau.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

统计学手段进行整合分析的一种方法,该方法可以综合多项独立研究的数据,系统分析相关处理的影响指标,对其研究成果进行定量评价,有效地避免单一研究所得结论的片面性。【切入点】目前,国内外关于不同灌溉方式的 Meta 分析主要集中在水分利用效率和产量<sup>[14-16]</sup>,农田管理措施对温室气体排放效应的 Meta 分析大多集中在耕作<sup>[17-19]</sup>、施肥<sup>[20-21]</sup>、秸秆还田<sup>[22-23]</sup>、生物炭<sup>[24-26]</sup>等方面,而灌溉方式对温室气体排放方面的综合分析大多基于稻田 CH<sub>4</sub><sup>[23,27]</sup>或 N<sub>2</sub>O 排放<sup>[28]</sup>,针对旱区不同灌溉方式下温室气体排放的 Meta 分析较少。

【拟解决的关键问题】因此,本研究采用 Meta 分析方法,研究不同灌溉方式对 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> 的影响,探讨造成不同灌溉方式下温室气体排放产生差异的关键驱动因素,为了解灌溉方式对温室气体排放的影响和缓解旱区农田温室气体排放提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

本研究通过对 Web of Science (<https://www.webofscience.com/>) 和中国知网 (<https://www.cnki.net>) 数据库进行检索,收集了截至 2021 年 9 月国内外发表的有关灌溉方式对温室气体排放和作物产量影响的田间和设施试验论文,中文检索词包括“灌溉方式”或“滴灌”或“地下滴灌”或“喷灌”或“沟灌”或“漫灌”和“温室气体”或“CO<sub>2</sub>”或“N<sub>2</sub>O”或“CH<sub>4</sub>”(英文检索词包括 Irrigation method, Drip irrigation, Subsurface drip irrigation, Sprinkler irrigation, Furrow irrigation, Flood irrigation, Greenhouse gas, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>) 等及其组合,共检索到中文文献 4 506 篇,英文文献 5 494 篇。

对检索到的文献按以下筛选标准进行筛选:①试验为田间原位观测试验且监测作物整个生育期的温室气体排放;②文中详细描述试验地点、时间、试验设计和水分管理等基本信息;③文献研究结果互相具有独立性,重复发表的文献选择最早发表的予以纳入,其余排除;④文献至少包括 2 种灌溉方式,排除水稻田;⑤文中要给出排放通量或累积排放量,对于原文中没有给出的,笔者依据生育期内平均排放通量与累积排放量的关系进行推算。根据筛选标准初步筛选后获得文献 118 篇,符合筛选文献经过全文浏览后纳入的文献数量 43 篇,另外根据以上标准筛选文献时,符合“包括漫灌或沟灌或喷灌或地下滴灌的,同时又包含 2 种或 2 种以上灌溉方式下的温室气体排放”标准的文献较少,唯有以

滴灌作为对照组纳入的文献数量较多,因此根据文献中灌溉方式的不同对筛选的数据进行分类,以滴灌为对照组,漫灌、喷灌、沟灌、地下滴灌为试验组,同一研究的不同处理组合被认为是不同数据组;若为多年试验,则不同年份的测量值也被认为是不同数据组,最终获得 37 篇文献(中文 19 篇,英文 18 篇),178 组数据。

提取的信息包括:①试验的基本信息:试验地点、年平均降水量、年平均气温、作物类型和试验处理;②土壤性质:土壤质地、pH 值、土壤水分及硝态氮、铵态氮;③目标数据:试验期间各处理的土壤温室气体排放通量及累积排放量平均值、样本量、标准差(standard deviation, SD),对于文献中没有给出 SD 的研究,则 SD 假定为平均值的 1/10<sup>[29-30]</sup>。文献中的数据有 4 种呈现形式:文字描述、表格、折线图与柱状图。对文字描述及表格中的数据直接提取;对以折线图与柱状图呈现的数据,则采用 GetData Graph Digitizer 2.20 软件进行提取。

### 1.2 数据分析

利用 OpenMEE 软件进行整合分析,反应比的自然对数(lnRR)作为效应值,计算式为:

$$\ln RR = \ln(X_t/X_c) = \ln X_t - \ln X_c, \quad (1)$$

式中: X<sub>t</sub>、X<sub>c</sub> 分别为试验组(漫灌、喷灌、沟灌、地下滴灌)和对照组(滴灌)中温室气体排放量的平均值;lnRR 是无单位指数,其正负值表示温室气体排放量随灌溉方式的变化而增加或减少。

为了更直观地反映灌溉方式对农田土壤温室气体排放效应,将效应值转化为变化率(Z):

$$Z = (\exp(\ln RR) - 1) \times 100\%. \quad (2)$$

单个效应值对应的研究内方差(V<sub>lnRR</sub>)的计算式为:

$$V_{\ln RR} = \frac{S_t^2}{N_t S_t^2} + \frac{S_c^2}{N_c S_c^2}, \quad (3)$$

式中: S<sub>t</sub>、S<sub>c</sub> 分别为试验组(漫灌、喷灌、沟灌、地下滴灌)和对照组(滴灌)中温室气体排放量的标准差, N<sub>t</sub>、N<sub>c</sub> 分别为试验组(漫灌、喷灌、沟灌、地下滴灌)和对照组(滴灌)中温室气体排放量的样本量。

为了确定灌溉方式对温室气体排放的总体响应,选择混合效应模型计算累积效应值(lnRR<sub>+</sub>):

$$\ln RR_+ = \frac{\sum_{i=1}^k \omega_i L_i}{\sum_{i=1}^k \omega_i}, \quad (4)$$

式中: ω<sub>i</sub> 为第 i 个研究的权重, L<sub>i</sub> 为第 i 个研究的效应值。

根据 95% 置信区间来判断结果的显著性,如果 95% 置信区间包含 0,说明 Meta 分析的结果不显著,

即对照组和试验组的差异不显著。如果 95%置信区间不包含 0，认为 Meta 分析结果显著：若 95%置信区间的最小值大于 0，表示试验组显著提高了温室气体排放；若其最大值小于 0，则表示试验组显著降低了温室气体排放。

## 2 结果与分析

### 2.1 灌溉方式对农田土壤温室气体排放量的影响

温室气体排放量对不同灌溉方式的响应如图 1 所示。由图 1 可知，灌溉方式对 CO<sub>2</sub> 排放量有显著影响 ( $p < 0.05$ )。与滴灌相比，喷灌显著增加了 CO<sub>2</sub> 排放量 ( $p < 0.05$ )，其平均效应值为 0.352，其

他 3 种灌溉方式的 CO<sub>2</sub> 排放量与滴灌的差异不显著 ( $p > 0.05$ )。灌溉方式显著影响 N<sub>2</sub>O 排放量 ( $p < 0.05$ )。与滴灌相比，沟灌、漫灌、喷灌显著增加了 N<sub>2</sub>O 排放量 ( $p < 0.05$ )，其平均效应值分别为 0.549、0.246、0.329；滴灌和地下滴灌的 N<sub>2</sub>O 排放量无显著差异 ( $p > 0.05$ )；不同灌溉方式农田 N<sub>2</sub>O 排放量排序为：沟灌 > 喷灌 > 漫灌 > 滴灌 = 地下滴灌。灌溉方式对 CH<sub>4</sub> 排放量无显著影响 ( $p > 0.05$ )。旱区灌溉方式对 CH<sub>4</sub> 排放量的影响不显著，且基本保持吸收状态。图中的数值代表数据样本数，点和误差线分别代表效应值及其 95% 的置信区间，\* 表示在  $p < 0.05$  水平下显著相关。

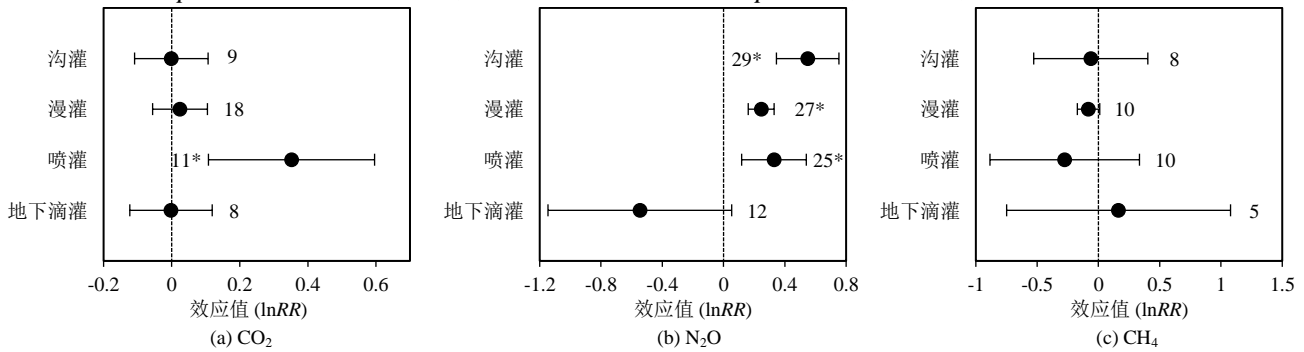


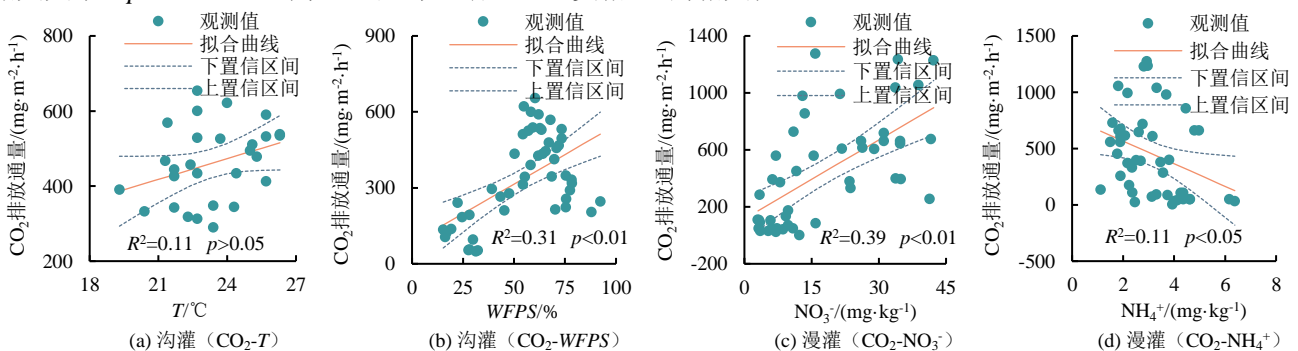
图 1 温室气体排放量对不同灌溉方式的响应

Fig.1 The response of greenhouse gas emissions to different irrigation methods

### 2.2 不同灌溉方式下土壤环境因子与 CO<sub>2</sub> 排放通量相关性分析

不同灌溉方式下土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量与土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、土壤温度 *T*、土壤充水孔隙度 (Water Filled Pore Space, *WFPS*) 的相关性如图 2 所示，沟灌和地下滴灌下的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 及漫灌方式下的土壤温度无法提取动态观测数据，无法进行相关性分析，故部分处理无相关分析图。由图 2 可知，沟灌方式下，土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量与土壤温度正相关，但关系并不显著 ( $p > 0.05$ )；与土壤 *WFPS* 表现为极显著的正相关关系 ( $p < 0.01$ )， $R^2$  为 0.31，对解释沟灌方式下 CO<sub>2</sub> 排放通量变化贡献较大。漫灌方式下，土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量与土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 表现为极显著的正相关关系 ( $p < 0.01$ )， $R^2$  为 0.39，对解释漫灌方式下 CO<sub>2</sub> 排放通量变化的贡献较大；与土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 表现为显著的负相关关系 ( $p < 0.05$ )， $R^2$  为 0.11；与土壤 *WFPS* 负相

关，但关系并不显著 ( $p > 0.05$ )。地下滴灌方式下，土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量与土壤温度表现为极显著的正相关关系 ( $p < 0.01$ )， $R^2$  为 0.57，对解释地下滴灌方式下 CO<sub>2</sub> 排放通量变化的贡献较大；与土壤 *WFPS* 正相关，但关系并不显著 ( $p > 0.05$ )。滴灌方式下，土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量与土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 表现为极显著的正相关关系 ( $p < 0.01$ )， $R^2$  为 0.43，对解释滴灌方式下 CO<sub>2</sub> 排放通量变化的贡献较大；与土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 表现为显著的负相关关系 ( $p < 0.05$ )， $R^2$  为 0.10；与土壤温度表现为极显著的正相关关系 ( $p < 0.01$ )， $R^2$  为 0.64，对解释滴灌方式下 CO<sub>2</sub> 排放通量变化的贡献较大；与土壤 *WFPS* 表现为显著的负相关关系 ( $p < 0.05$ )， $R^2$  为 0.03。不同灌溉方式下土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量与土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 正相关，与土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 负相关，与土壤温度 *T* 正相关；灌溉方式影响土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量与土壤 *WFPS* 的相关性。



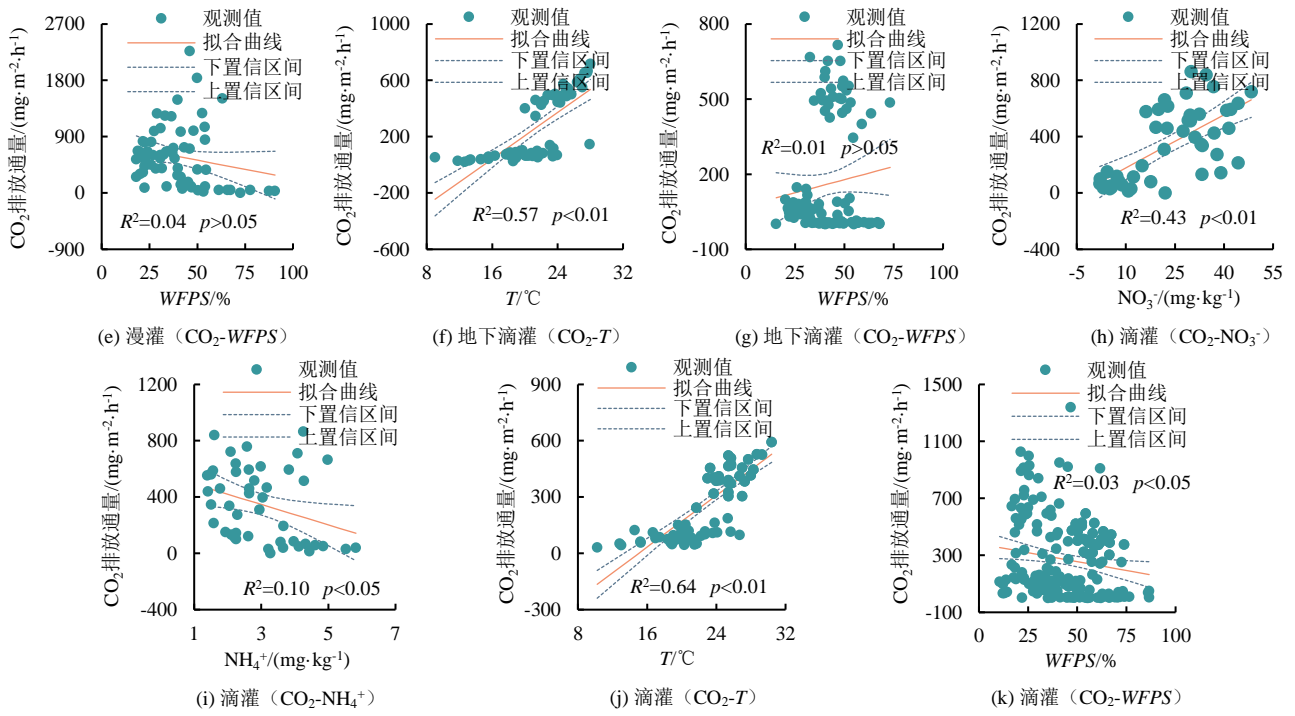


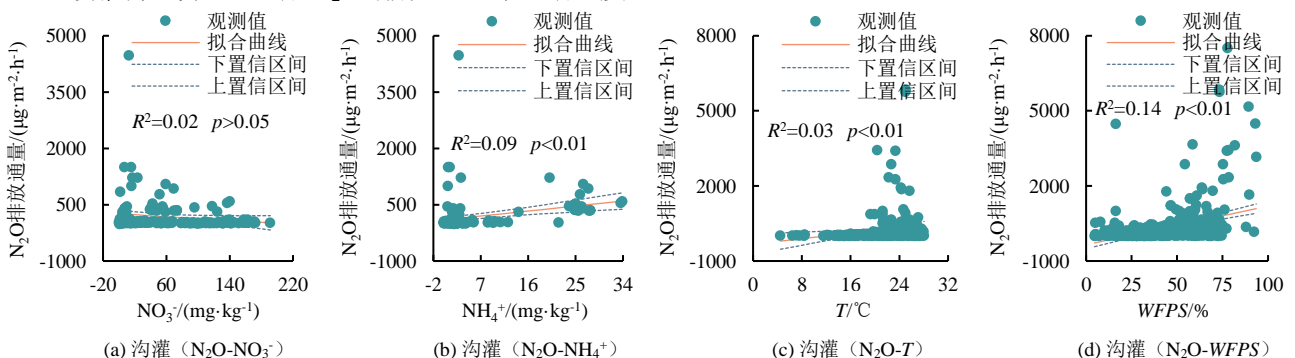
图 2 不同灌溉方式下 CO<sub>2</sub> 与土壤环境因子的相关性

Fig.2 The correlation of carbon dioxide with soil environmental factors under different irrigation methods

### 2.3 不同灌溉方式下土壤环境因子与 N<sub>2</sub>O 排放通量相关性分析

不同灌溉方式下土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量与土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、土壤温度 T、土壤 WFPS 的相关性如图 3 所示，喷灌方式下的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>无法提取动态观测数据，无法进行相关性分析，故部分处理无相关分析图。由图 3 可知，沟灌方式下，土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量与土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>负相关，但并不显著 ( $p>0.05$ )；与土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>表现为极显著的正相关关系 ( $p<0.01$ )， $R^2$  为 0.09；与土壤温度表现为极显著的正相关关系 ( $p<0.01$ )， $R^2$  为 0.03；与土壤 WFPS 表现为极显著的正相关关系 ( $p<0.01$ )， $R^2$  为 0.14，对解释沟灌方式下 N<sub>2</sub>O 排放通量变化的贡献较大。漫灌方式下，土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量与土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>正相关，但并不显著 ( $p>0.05$ )；与土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>表现为显著的正相关关系 ( $p<0.05$ )， $R^2$  为 0.06；与土壤温度表现为极显著的负相关关系 ( $p<0.01$ )， $R^2$  为 0.07；与土壤 WFPS 表现为极显著的正相关关系 ( $p<0.01$ )， $R^2$  为 0.08。喷灌方式下，土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量与土壤温度

负相关，但并不显著 ( $p>0.05$ )；与土壤 WFPS 表现为极显著的正相关关系 ( $p<0.01$ )， $R^2$  为 0.13，对解释喷灌方式下 N<sub>2</sub>O 排放通量变化的贡献较大。地下滴灌方式下，土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量与土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>表现为显著的正相关关系 ( $p<0.05$ )， $R^2$  为 0.68，对解释地下滴灌方式下 N<sub>2</sub>O 排放通量变化的贡献较大；与土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>和土壤温度负相关，但并不显著 ( $p>0.05$ )；与土壤 WFPS 表现为显著的负相关关系 ( $p<0.05$ )， $R^2$  为 0.05，对解释地下滴灌方式下 N<sub>2</sub>O 排放通量变化的贡献较小。滴灌方式下，土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量与土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>表现为极显著的正相关关系 ( $p<0.01$ )， $R^2$  为 0.06；与土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>表现为极显著的正相关关系 ( $p<0.01$ )， $R^2$  为 0.11，对解释滴灌方式下 N<sub>2</sub>O 排放通量变化的贡献较大；与土壤温度负相关，但并不显著 ( $p>0.05$ )；与土壤 WFPS 表现为极显著的正相关关系 ( $p<0.01$ )， $R^2$  为 0.09。灌溉方式影响土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量与土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、土壤温度 T 和土壤 WFPS 的相关性。



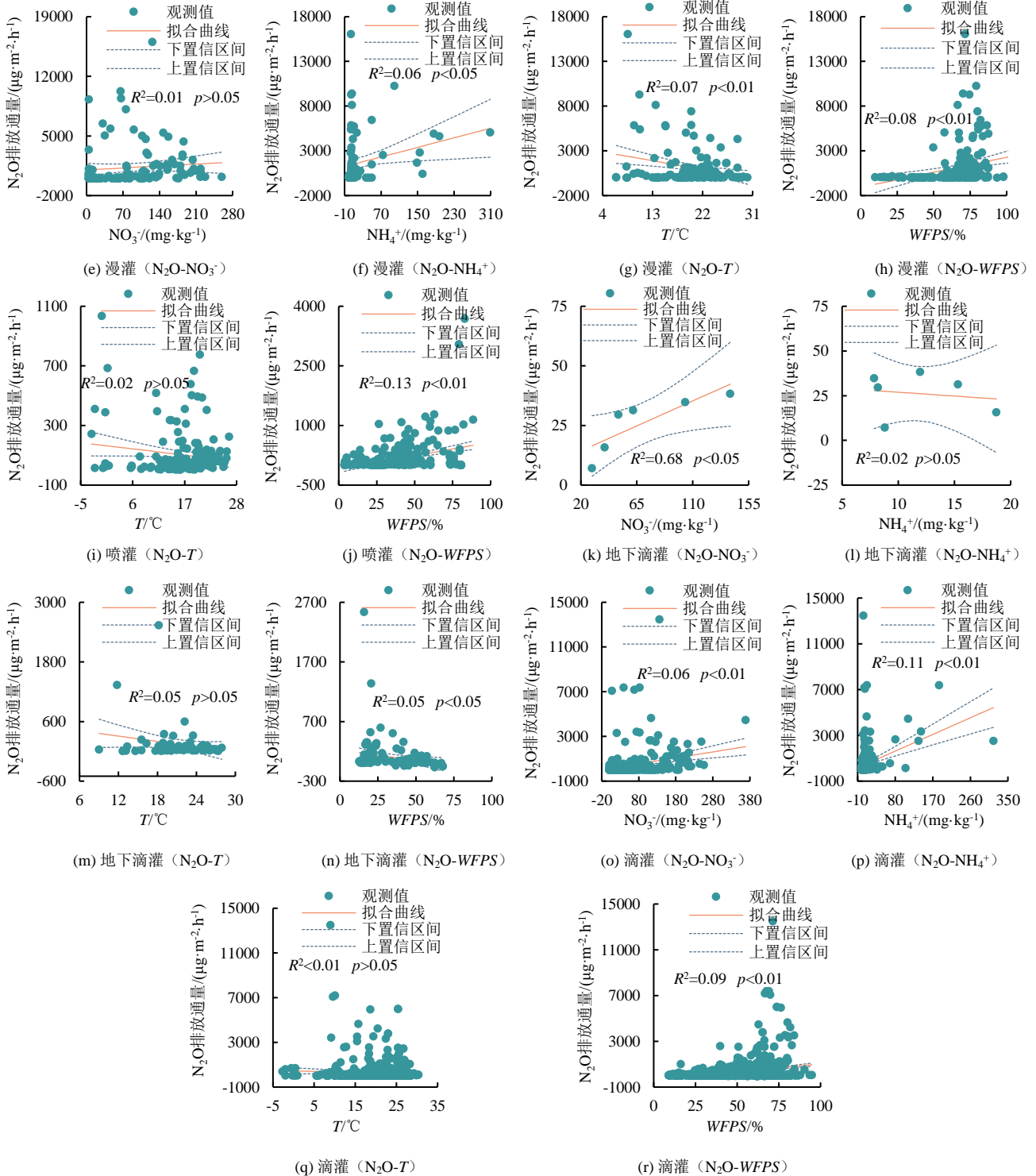


图 3 不同灌溉方式下 N<sub>2</sub>O 与土壤环境因子的相关性

Fig.3 The correlation of nitrous oxide with soil environmental factors under different irrigation methods

### 3 讨论

灌溉方式会改变土壤水分分布，进而影响土壤通气性、土壤温度和养分（图 4）。表层土壤是温室气体排放的重要来源，表层土壤的通气性、温度、养分（硝态氮、铵态氮、可溶性有机碳）对根系呼吸和微生物活性有着重要的影响，进而会影响土壤温室气体排放。

水分是影响温室气体排放的重要环境因子。图 5

是漫灌、沟灌、喷灌、滴灌及地下滴灌的土壤剖面水分分布示意图。由图 5 可知，漫灌后整个计划湿润层的土壤含水率几乎都处于田间持水率；沟灌借助重力和毛管力作用，使水分向沟底和两侧沟壁入渗<sup>[31]</sup>，与漫灌相比湿润体体积变小，地面湿润面积缩小，再分布后土壤剖面平均含水率降低；喷灌能够控制灌水量和灌水时间，均匀湿润地表土壤，水分以颗粒状快速进入土壤并下渗，含水率分布相对均匀<sup>[32]</sup>；滴灌和地下滴灌均为局部灌溉，滴灌仅湿



润植株附近的土壤表层，其湿润体呈半椭圆状<sup>[33-35]</sup>，与传统灌溉（漫灌、沟灌）相比，土壤蒸发减少，土壤养分大多储存在土壤表层，减少了养分淋溶，与喷灌相比，滴灌的水分全部滴入滴头附近的土壤，水分大量堆积，使得水分辐射的有效范围较小<sup>[36]</sup>；地下滴灌通过埋于地下的滴灌管直接将水肥灌入作物根系活动层，再通过毛管力及重力湿润周围土体，其湿润体呈椭圆状<sup>[35]</sup>，土壤表层保持干燥，有效减少地表蒸发损失。地下滴灌较滴灌湿润体内水分增加，以滴头为中心在土壤湿润体内呈高含水率区。

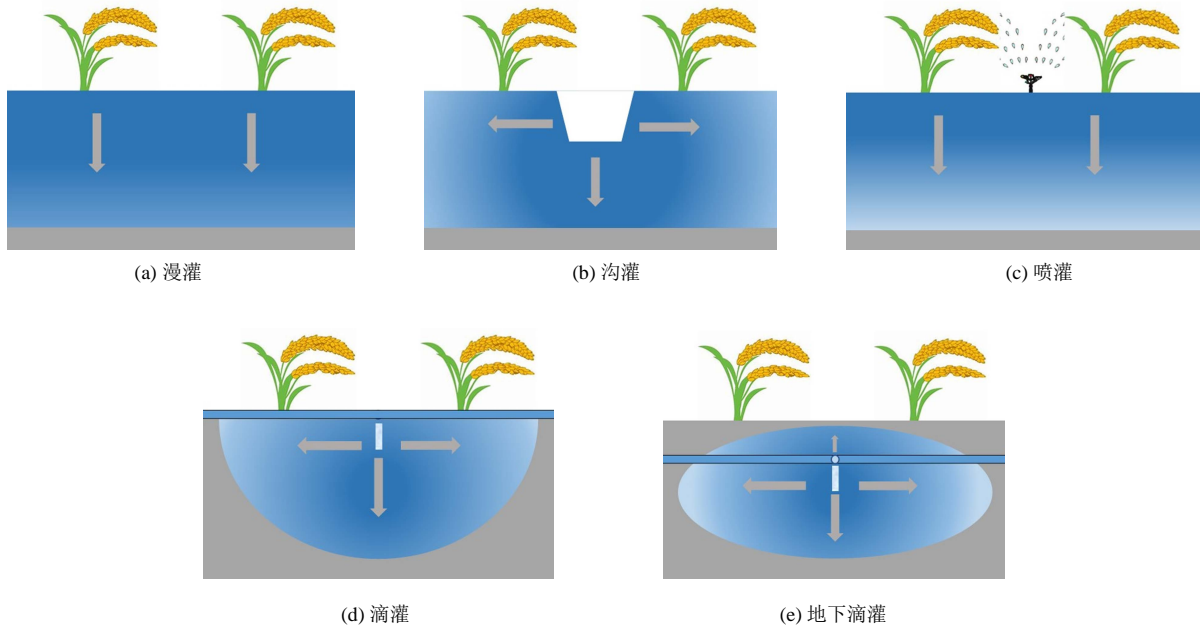


图5 不同灌溉方式下土壤水分剖面分布示意图

Fig.5 The schematic diagram of soil water profile distribution under different irrigation methods

灌溉作为重要的农田管理措施，不仅可以在水分亏缺时补充水分满足作物生长需求，还会补给土壤养分促进微生物活动，加快有机碳分解，从而影响根系生长和土壤碳排放<sup>[37]</sup>。一般来说，灌溉农田释放的  $\text{CO}_2$  较雨养农田增加约 13%<sup>[38]</sup>。Meta 分析结果表明，与滴灌相比，喷灌显著增加了  $\text{CO}_2$  排放，这与 Wang 等<sup>[39]</sup>、Guardia 等<sup>[40]</sup>的研究结果一致。这是因为与滴灌相比，喷灌水分辐射的有效范围更大，在覆盖区域水分均匀喷洒在表层土壤<sup>[36]</sup>，而后由表层入渗至深层；而滴灌水分主要聚集在滴头附近的土壤，以此为中心横向及纵向入渗，因此喷灌的表层土壤充水孔隙度高，且灌溉的有效范围大<sup>[36]</sup>，可以促进作物的生长发育、土壤微生物的活动<sup>[41-42]</sup>、根系呼吸和根系生物量的增加<sup>[43]</sup>，从而提高土壤  $\text{CO}_2$  排放。滴灌、地下滴灌会造成土壤部分干燥、部分湿润的干湿交替现象频繁发生，随着干湿交替次数的增加，土壤中可获得的有机质库受到限制，微生物的代谢底物减少，使土壤的湿润脉冲减少，

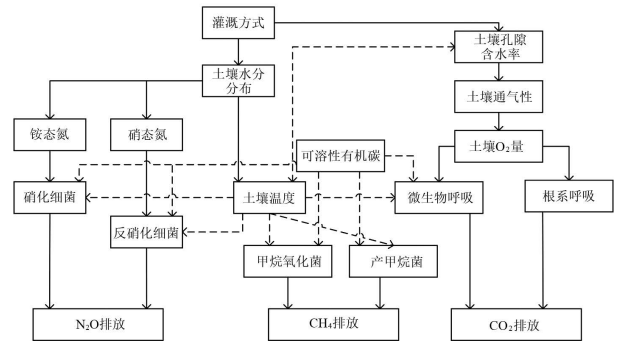


图4 灌溉方式影响温室气体排放的过程

Fig.4 Processes influencing impacts of irrigation method on greenhouse gas emissions

土壤碳、氮矿化量降低<sup>[38]</sup>，另外，Borken 等<sup>[44]</sup>研究发现，在干旱、半干旱地区，湿润脉冲对碳、氮矿化有显著影响，有机质库随着干旱持续时间和强度的增加而增大，由于漫灌和沟灌灌水周期长，干旱持续时间和强度增加，因此长期干燥的土壤遇水湿润后，土壤有机质矿化和微生物活性增强，从而导致滴灌和地下滴灌的  $\text{CO}_2$  排放量低于漫灌和沟灌。但是当漫灌、沟灌一次灌水量过大时，其土壤湿度过高、土壤通气性降低<sup>[45]</sup>，使得土壤中  $\text{O}_2$  的扩散受到限制，微生物活动受到一定程度的抑制<sup>[9]</sup>，导致土壤  $\text{CO}_2$  排放量相对降低。因此，与滴灌相比，漫灌和沟灌的土壤  $\text{CO}_2$  排放量虽然不同，但并没有显著差异。

不同的灌溉方式会通过调整水分分布来改变土壤蒸发，进而对土壤温度造成影响，土壤温度的升高会提高植物和微生物呼吸作用及促进土壤有机质降解为可溶性有机碳（微生物的重要能量来源），提高微生物活性，进而导致  $\text{CO}_2$  排放增加。在一定范围内，

土壤水分和温度的升高会增强微生物的繁殖及代谢能力, 提高微生物活性, 从而促进土壤  $\text{CO}_2$  排放, 关于  $\text{CO}_2$  排放的相关性分析也表明, 随着土壤温度增加,  $\text{CO}_2$  排放也会显著增加<sup>[46-47]</sup>。 $\text{CO}_2$  排放与土壤  $WFPS$  表现出不同的相关关系, 这可能是因为漫灌方式灌水量大, 表层土壤  $WFPS$  接近饱和, 土壤  $WFPS$  越高, 土壤通气性越差, 因此漫灌方式下  $\text{CO}_2$  排放与土壤  $WFPS$  负相关; 而滴灌  $\text{CO}_2$  排放与土壤  $WFPS$  负相关的原因可能是因为某些试验区气温或太阳辐射较高, 使得在土壤  $WFPS$  较低的情况下也呈现高  $\text{CO}_2$  排放。同时, 相关性分析发现,  $\text{CO}_2$  排放与土壤  $\text{NO}_3^-$  正相关, 这与周晓丽等<sup>[48]</sup>、李晓密等<sup>[49]</sup>研究结果一致, 可能是因为土壤  $\text{NO}_3^-$  为植物和微生物生长提供了所需的 N 素, 使得根系呼吸和微生物活动增强, 从而促进了  $\text{CO}_2$  排放;  $\text{CO}_2$  排放与土壤  $\text{NH}_4^+$  负相关, 这与杜世宇<sup>[50]</sup>、王鸿飞<sup>[51]</sup>研究结果一致, 可能是因为土壤  $\text{NH}_4^+$  大部分被微生物自身繁殖利用<sup>[52]</sup>, 形成了其他复杂化合物, 并没有产生  $\text{CO}_2$ 。

与滴灌相比, 地下滴灌的  $\text{N}_2\text{O}$  排放量没有显著差异, 但是沟灌、漫灌、喷灌的  $\text{N}_2\text{O}$  排放量显著增加, 这与 Kuang 等<sup>[53]</sup>、王广帅<sup>[37]</sup>、Ye 等<sup>[54]</sup>、张亚捷等<sup>[55]</sup>研究结果一致。 $\text{N}_2\text{O}$  排放主要是由硝化和反硝化作用产生, 其排放强度与土壤充水孔隙度有明显关系: 土壤充水孔隙度较低时, 硝化作用占主导; 随着土壤充水孔隙度增加, 土壤孔隙逐渐被水充满, 阻碍了  $\text{O}_2$  在土壤中的扩散, 形成土壤厌氧环境, 反硝化作用增强, 土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量增加; 当土壤  $WFPS$  增加到大于 60% 时, 硝化和反硝化细菌共同作用产生的  $\text{N}_2\text{O}$  最多<sup>[56]</sup>。滴灌和地下滴灌的水分主要聚集在滴头附近, 而后横向及纵向入渗, 其在表层土壤的平均含水率远低于沟灌、漫灌和喷灌, 而表层土壤是  $\text{N}_2\text{O}$  排放的重要来源<sup>[57]</sup>, 所以沟灌、漫灌、喷灌的  $\text{N}_2\text{O}$  排放量明显高于滴灌和地下滴灌。

土壤温度和土壤  $WFPS$  是影响  $\text{N}_2\text{O}$  排放的关键驱动因素<sup>[58]</sup>, 一般来说, 随着土壤温度和土壤  $WFPS$  增加,  $\text{N}_2\text{O}$  的排放速率提高<sup>[54, 59-61]</sup>, 然而相关性分析发现, 地下滴灌方式下  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量与土壤  $WFPS$  负相关, 这可能是因为提取的土壤数据多为 0~20 cm 表层土壤数据, 土壤充水孔隙度受灌溉的影响不显著。另外, 相关性分析发现沟灌方式下  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量与土壤温度显著正相关, 漫灌、喷灌、滴灌、地下滴灌方式下  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量与土壤温度负相关, 这与江雨倩<sup>[62]</sup>、王艳丽<sup>[63]</sup>得出的试验结果类似, 可能是因为漫灌、喷灌、滴灌、地下滴灌方式下均有个别试验在试验前期施用基肥, 使得土壤温度逐渐上升期间,  $\text{N}_2\text{O}$  排放逐渐降低。 $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$  分别是硝

化和反硝化作用的重要底物,  $\text{NH}_4^+$  水解后为硝化过程提供底物, 而硝化过程的产物  $\text{NO}_3^-$  又可以参与反硝化过程<sup>[64]</sup>, 在土壤中添加铵态氮或硝态氮之后, 硝化过程和反硝化过程协同发生, 会加快  $\text{N}_2\text{O}$  的排放速率<sup>[49, 57]</sup>。

本研究利用 Meta 分析方法对不同灌溉方式下的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$  排放量进行了初步整合及定量分析, 并针对不同灌溉方式产生的环境因子差异来进行与温室气体排放的相关性分析, 可以在一定程度上反映灌溉方式对温室气体排放的影响机制, 但也存在局限性: 灌溉的温室气体排放受多种因素影响, 这些因素之间存在一定的交互作用, 本研究仅对土壤  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、土壤温度及土壤  $WFPS$  进行分析, 而其他会对温室气体排放产生影响的因素, 如可溶性有机碳、pH 值、微生物量及活性等没有涉及; 另外, 尽管本研究搜集了 37 篇符合所有筛选条件的文献, 但分类到不同灌溉方式下进行相关性分析时的数据较少甚至缺乏, 未来的田间试验工作可增加滴灌、漫灌处理以及对环境因子的长期监测, 这样可以对不同灌溉方式下温室气体排放的差异进行更为客观的量化, 以便为缓解农田温室气体排放提供参考依据。

## 4 结论

1) 在干旱、半干旱地区, 与滴灌相比, 喷灌会显著增加  $\text{CO}_2$  排放量; 沟灌、漫灌、喷灌会显著增加  $\text{N}_2\text{O}$  排放量; 灌溉方式对  $\text{CH}_4$  排放量没有显著影响。

2) 土壤  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、土壤温度  $T$  和土壤  $WFPS$  均会影响土壤  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  排放通量, 但影响程度各不相同。

3) 基于农田温室气体排放的角度, 建议旱区农田灌溉中减少喷灌及漫灌、沟灌的使用, 大范围推广滴灌及地下滴灌技术。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

## 参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis[EB/OL]. IPCC, [2022-10-08]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- [2] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [EB/OL]. IPCC, [2022-10-08]. <https://www.globalchange.gov/browse/reports/ipcc-climate-change-2013-physical-science-basis>.
- [3] IPCC. Climate Change 2014: The Physical Science Basis [EB/OL]. IPCC, [2022-10-08]. <https://www.globalchange.gov/browse/reports/ipcc-climate-change-2014-impacts-adaptation-and-vulnerability>.
- [4] 李晓晴. 全国节水灌溉面积达 5.67 亿亩——近 30 年农业用水总量维持稳定[N]. 人民日报, 2021-07-08(14).
- [5] 张西超. 灌溉方式对设施土壤温室气体排放及其微生物特性的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.  
ZHANG Xichao. Effects of irrigation methods on emission

- characteristics of greenhouse gases and microbiologic properties from facilities soil[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016.
- [6] 杨静怡. 降水变化下人工草地土壤剖面温室气体排放时空动态的影响机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.  
YANG Jingyi. Mechanism of soil greenhouse gas emission in soil profile under precipitation changes in artificial grassland[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2022.
- [7] 张前兵, 杨玲, 王进, 等. 干旱区不同灌溉方式及施肥措施对棉田土壤呼吸及各组分贡献的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(12): 2 420-2 430.  
ZHANG Qianbing, YANG Ling, WANG Jin, et al. Effects of different irrigation methods and fertilization measures on soil respiration and its component contributions in cotton field in arid region[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(12): 2 420-2 430.
- [8] ZHANG Q B, YANG L, XU Z Z, et al. Effects of cotton field management practices on soil CO<sub>2</sub> emission and C balance in an arid region of Northwest China[J]. Journal of Arid Land, 2014, 6(4): 468-477.
- [9] 陶丽佳, 王凤新, 顾小小. 膜下滴灌对土壤 CO<sub>2</sub> 与 CH<sub>4</sub> 浓度的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(3): 330-336.  
TAO Lijia, WANG Fengxin, GU Xiaoxiao. Influence of drip irrigation under plastic film mulching on concentrations of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(3): 330-336.
- [10] MEHMOOD F, WANG G S, GAO Y, et al. Impacts of irrigation managements on soil CO<sub>2</sub> emission and soil CH<sub>4</sub> uptake of winter wheat field in the North China plain[J]. Water, 2021, 13(15): 2 052.
- [11] 薛建福, 濮超, 张冉, 等. 农作措施对中国稻田氧化亚氮排放影响的研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 1-9.  
XUE Jianfu, PU Chao, ZHANG Ran, et al. Review on management-induced nitrous oxide emissions from paddy ecosystems[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(11): 1-9.
- [12] 王维汉, 毛前, 严爱兰. 滴灌下青椒地 N<sub>2</sub>O 排放规律研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(7): 31-34.  
WANG Weihang, MAO Qian, YAN Ailan. N<sub>2</sub>O emission from green pepper field under drip irrigation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(7): 31-34.
- [13] WU J, GUO W, FENG J F, et al. Greenhouse gas emissions from cotton field under different irrigation methods and fertilization regimes in arid Northwestern China[J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014: 407-432.
- [14] YU L Y, ZHAO X N, GAO X D, et al. Improving/maintaining water-use efficiency and yield of wheat by deficit irrigation: A global meta-analysis[J]. Agricultural Water Management, 2020, 228: 105-106.
- [15] CHENG M H, WANG H D, FAN J L, et al. A global meta-analysis of yield and water use efficiency of crops, vegetables and fruits under full, deficit and alternate partial root-zone irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2021, 248: 106-107.
- [16] LI H R, MEI X R, WANG J D, et al. Drip fertigation significantly increased crop yield, water productivity and nitrogen use efficiency with respect to traditional irrigation and fertilization practices: A meta-analysis in China[J]. Agricultural Water Management, 2021, 244: 106-107.
- [17] SHAKOOR A, SHAHBAZ M, FAROOQ T H, et al. A global meta-analysis of greenhouse gases emission and crop yield under no-tillage as compared to conventional tillage[J]. Science of the Total Environment, 2021, 750: 142-149.
- [18] HUANG Y W, REN W, WANG L X, et al. Greenhouse gas emissions and crop yield in no-tillage systems: A meta-analysis[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 268: 144-153.
- [19] XU C, HAN X, BOL R, et al. Impacts of natural factors and farming practices on greenhouse gas emissions in the North China Plain: A meta-analysis[J]. Ecology and Evolution, 2017, 7(17): 6 702-6 715.
- [20] YANG T, LI F B, ZHOU X Y, et al. Impact of nitrogen fertilizer, greenhouse, and crop species on yield-scaled nitrous oxide emission from vegetable crops: A meta-analysis[J]. Ecological Indicators, 2019, 105: 717-726.
- [21] DING W C, XU X P, HE P, et al. Improving yield and nitrogen use efficiency through alternative fertilization options for rice in China: A meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2018, 227: 11-18.
- [22] WANG H M, ZHENG J, FAN J L, et al. Grain yield and greenhouse gas emissions from maize and wheat fields under plastic film and straw mulching: A meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2021, 270: 108-110.
- [23] SANCHIS E, FERRER M, TORRES A G, et al. Effect of water and straw management practices on methane emissions from rice fields: A review through a meta-analysis[J]. Environmental Engineering Science, 2012, 29(12): 1 053-1 062.
- [24] WU Z, ZHANG X, DONG Y B, et al. Biochar amendment reduced greenhouse gas intensities in the rice-wheat rotation system: Six-year field observation and meta-analysis[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 278: 107-115.
- [25] JEFFERY S, VERHEIJEN F G A, KAMMANN C, et al. Biochar effects on methane emissions from soils: A meta-analysis[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 101: 251-258.
- [26] CAYUELA M L, VAN ZWIETEN L, SINGH B P, et al. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 191: 5-16.
- [27] GU X Y, WENG S M, LI Y E, et al. Effects of water and fertilizer management practices on methane emissions from paddy soils: Synthesis and perspective[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(12): 7 324.
- [28] QIU H N, YANG S H, JIANG Z W, et al. Effect of irrigation and fertilizer management on rice yield and nitrogen loss: A meta-analysis[J]. Plants, 2022, 11(13): 1 690.
- [29] YU L Y, GAO X D, ZHAO X N. Global synthesis of the impact of droughts on crops' water-use efficiency (WUE): Towards both high WUE and productivity[J]. Agricultural Systems, 2020, 177: 102-110.
- [30] TIAN K, ZHAO Y C, XU X H, et al. Effects of long-term fertilization and residue management on soil organic carbon changes in paddy soils of China: A meta-analysis[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 204: 40-50.
- [31] 薛红利. 宽垄沟灌土壤水分运移研究及数值模拟[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2018.  
XUE Hongli. Study and numerical simulation of soil water migration under the wide ridge furrow irrigation[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2018.
- [32] 郭英姿. 交替微灌对土壤湿润体及大棚蔬菜生长的影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.  
GUO Yingzi. Effects of alternate micro-irrigation on moist soil body and vegetable in greenhouse[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.
- [33] 任勇瑾. 丘陵山区果树滴(渗)灌土壤水分移动规律试验研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2019.  
REN Yongjin. Experimental study on soil moisture movement of fruit tree drip and infiltrating irrigation in hilly and mountainous area[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2019.
- [34] 吴卫熊, 张廷强, 何令祖, 等. 滴灌条件下山区典型土壤水分运移规律分析[J]. 节水灌溉, 2017(2): 5-8.  
WU Weixiong, ZHANG Tingqiang, HE Lingzu, et al. Analysis of soil-water movement characteristics of hill area soil under the condition of drip irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2017(2): 5-8.
- [35] MONJEZI M S, EBRAHIMIAN H, LIAGHAT A, et al. Soil-wetting front in surface and subsurface drip irrigation[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management, 2013, 166(5): 272-284.
- [36] 屈声杰. 两种灌水方式对设施葡萄土壤水分及果实性状的影响[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2021.



- QU Shengjie. Effects of sprinkler irrigation and drip irrigation on soil moisture changes and delayed grape fruit characters[D]. Qinhuangdao: Hebei Normal University of Science & Technology, 2021.
- [37] 王广帅. 灌溉模式对华北平原冬小麦农田温室气体排放和土壤微生物群落的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- WANG Guangshuai. Effects of irrigation patterns on greenhouse gas emission and soil microbial community of winter wheat field in North China plain[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [38] 师梦娇. 灌溉方式与灌水量对番茄生长及土壤温室气体排放的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- SHI Mengjiao. Effects of irrigation patterns and amounts on tomato growth and soil greenhouse gas emissions[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018.
- [39] WANG G S, LIANG Y P, ZHANG Q, et al. Mitigated CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions and improved irrigation water use efficiency in winter wheat field with surface drip irrigation in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 163: 403-407.
- [40] GUARDIA G, CANGANI M T, ANDREU G, et al. Effect of inhibitors and fertigation strategies on GHG emissions, NO fluxes and yield in irrigated maize[J]. *Field Crops Research*, 2017, 204: 135-145.
- [41] ENTRY J A, FUHRMANN J J, SOJKA R E, et al. Influence of irrigated agriculture on soil carbon and microbial community structure[J]. *Environmental Management*, 2004, 33(1): S363-S373.
- [42] ENTRY J A, MILLS D, MATHEE K, et al. Influence of irrigated agriculture on soil microbial diversity[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 40(1): 146-154.
- [43] LYU G H, KANG Y H, LI L, et al. Effect of irrigation methods on root development and profile soil water uptake in winter wheat[J]. *Irrigation Science*, 2010, 28(5): 387-398.
- [44] BORKEN W, MATZNER E. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(4): 808-824.
- [45] AGEHARA S, WARNCKE D D. Soil moisture and temperature effects on nitrogen release from organic nitrogen sources[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(6): 1 844-1 855.
- [46] 肖辉林, 郑习健. 土壤变暖对土壤微生物活性的影响(英文)[J]. *土壤与环境*, 2001(2): 138-142.
- XIAO Huilin, ZHENG Xijian. Effects of soil warming on soil microbial activity[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2001(2): 138-142.
- [47] 王洁茹, 陈居田, 赵俊辉, 等. 不同土地利用方式下温度对土壤 CO<sub>2</sub> 排放的影响[J]. *曲阜师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 46(1): 100-104.
- WANG Jieru, CHEN Jutian, ZHAO Junhui, et al. Effects of temperature on soil CO<sub>2</sub> emission under different land use patterns[J]. *Journal of Qufu Normal University (Natural Science)*, 2020, 46(1): 100-104.
- [48] 周晓丽, 王琳, 张艺磊, 等. 硝态氮源及碳源有效性对土壤 N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 排放的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2016, 33(2): 170-175.
- ZHOU Xiaoli, WANG Lin, ZHANG Yilei, et al. Effect of the availability of nitrate nitrogen and carbon source on N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emission from soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(2): 170-175.
- [49] 李晓密, 伦小秀, 陈琪, 等. 不同施肥处理下冬小麦-夏玉米轮作农田温室气体的排放[J]. *环境化学*, 2014, 33(4): 591-596.
- LI Xiaomi, LUN Xiaoxiu, CHEN Qi, et al. Greenhouse gas emission from a winter wheat-summer maize crop rotation farmland under different fertilization treatments[J]. *Environmental Chemistry*, 2014, 33(4): 591-596.
- [50] 杜世宇. 水氮耦合对设施土壤温室气体排放的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- DU Shiyu. Interactive effects of irrigation and nitrogen fertilization on greenhouse gas emissions from greenhouse soil[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.
- [51] 王鸿飞. 水稻秸秆添加对黑土不同种稻年限土壤温室气体排放的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022.
- WANG Hongfei. Effect of rice straw addition on soil greenhouse gas emissions in black soil with different rice planting years[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022.
- [52] CHEN X F, LIU M, KUZYAKOV Y, et al. Incorporation of rice straw carbon into dissolved organic matter and microbial biomass along a 100-year paddy soil chronosequence[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 130: 84-90.
- [53] KUANG W N, GAO X P, TENUTA M, et al. A global meta-analysis of nitrous oxide emission from drip-irrigated cropping system[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(14): 3 244-3 256.
- [54] YE X H, HAN B, LI W, et al. Effects of different irrigation methods on nitrous oxide emissions and ammonia oxidizers microorganisms in greenhouse tomato fields[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 203: 115-123.
- [55] 张亚捷, 牛海山. 两种灌溉系统对宁夏葡萄园土壤氧化亚氮排放的影响[J]. *中国科学院大学学报*, 2016, 33(2): 178-186.
- ZHANG Yajie, NIU Haishan. Influences of two irrigation systems on soil N<sub>2</sub>O emissions from vineyards in Ningxia, China[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2016, 33(2): 178-186.
- [56] CAO W C, LIU S, QU Z, et al. Contribution and driving mechanism of N<sub>2</sub>O emission bursts in a Chinese vegetable greenhouse after manure application and irrigation[J]. *Sustainability*, 2019, 11(6): 1 624.
- [57] 曹文超. 设施菜田土壤硝化、反硝化 N<sub>2</sub>O 产生特征及影响因素[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- CAO Wenchao. Contributions of nitrification and denitrification to N<sub>2</sub>O production as affected by C and O<sub>2</sub> availability in greenhouse vegetable soils[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.
- [58] LIU R, HAYDEN H L, SUTER H, et al. The effect of temperature and moisture on the source of N<sub>2</sub>O and contributions from ammonia oxidizers in an agricultural soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53(1): 141-152.
- [59] AKIYAMA H, MCTAGGART I P, BALL B C, et al. N<sub>2</sub>O, NO, and NH<sub>3</sub> emissions from soil after the application of organic fertilizers, urea and water[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2004, 156(1): 113-129.
- [60] HOU H J, CHEN H, CAI H J, et al. CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from Lou soils of greenhouse tomato fields under aerated irrigation[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 132: 69-76.
- [61] 张西超, 叶旭红, 韩冰, 等. 灌溉方式对设施土壤温室气体排放的影响[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(10): 1 487-1 496.
- ZHANG Xichao, YE Xuhong, HAN Bing, et al. Effects of irrigation methods on emissions of greenhouse gases from facilities soil[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(10): 1 487-1 496.
- [62] 江雨倩. 滴灌施肥对设施菜地土壤 N<sub>2</sub>O 和 NO 排放的影响及其减排贡献[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
- JIANG Yuqian. Effects of fertigation on N<sub>2</sub>O and NO emissions in greenhouse vegetable fields and the contribution for mitigation[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017.
- [63] 王艳丽. 京郊设施菜地水肥一体化条件下土壤 N<sub>2</sub>O 排放的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- WANG Yanli. N<sub>2</sub>O emissions from a vegetable field with fertigation management under greenhouse conditions in Beijing suburbs[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [64] 王琳, 周晓丽, 马银丽, 等. 铵态氮源和碳源对土壤 N<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 释放的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2016, 33(1): 23-28.
- WANG Lin, ZHOU Xiaoli, MA Yinli, et al. Effect of ammonium nitrogen source and carbon source on the CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions of soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(1): 23-28.

## Effects of Irrigation Methods on Greenhouse Gas Emissions from Arid Farmlands: A Meta-analysis

SONG Juanjuan<sup>1,2</sup>, GAO Xiaodong<sup>1,3\*</sup>, CAI Yaohui<sup>1,3</sup>, YU Liuyang<sup>1,3</sup>,  
SONG Xiaolin<sup>4</sup>, LI Changjian<sup>3</sup>, ZHAO Xining<sup>1,3</sup>

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 4. College of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** **【Objective】** Irrigation methods modulate soil water and root-induced activity thereby influencing gas emissions from soil. In this paper, we analyze the effects of different irrigation methods on greenhouse gas emissions from farmland and the associated underlying mechanisms. **【Method】** The analysis was based on meta-analysis. Experimental results published in journals included in CNKI and Web of Science were used in the analysis. A total of 37 papers with 176 datasets were analyzed to assess the variation in greenhouse gas emissions with irrigation methods, as well as the underlying mechanisms. **【Result】** Compared to drip irrigation, flood irrigation, furrow irrigation and subsurface drip irrigation did not show significant difference in CO<sub>2</sub> emissions, while sprinkler irrigation significantly increased CO<sub>2</sub> emissions ( $p < 0.05$ ). Flood irrigation, furrow irrigation and sprinkler irrigation increased N<sub>2</sub>O emissions ( $p < 0.05$ ), but no significant difference between subsurface drip irrigation and drip irrigation was found in N<sub>2</sub>O emissions. There was no significant difference in CH<sub>4</sub> emissions between different irrigation methods. In furrow irrigation, soil temperature was the key factor influencing CO<sub>2</sub> emissions. Soil NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, temperature, and soil water-filled pore space (*WFPS*) were the key factors affecting N<sub>2</sub>O emissions. Soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup> played a pivotal role in CO<sub>2</sub> emissions in flood irrigation, while soil NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, temperature, and soil water content influenced N<sub>2</sub>O emissions most. Sprinkler irrigation predominantly influenced soil *WFPS* and hence N<sub>2</sub>O emissions. Subsurface drip irrigation impacted soil temperature and hence CO<sub>2</sub> emissions; soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and *WFPS* combined influencing N<sub>2</sub>O emissions. Drip irrigation influenced soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, *WFPS* and soil temperature, thereby affecting CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions. **【Conclusion】** Replacing sprinkler irrigation and traditional flood irrigation and furrow irrigation by drip irrigation in arid regions can reduce greenhouse gas emissions from soils.

**Key words:** irrigation method; soil water distribution; greenhouse gas emission; Meta-analysis

责任编辑: 白芳芳