

目次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势 杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)

交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测 郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)

基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素 张江艳 (1888)

基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径:以南京某国家级开发区为例 李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)

高校碳排放核算与分析:以北京A高校为例 曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)

北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素 俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)

碳排放权交易价格与全要素生产率:来自中国的证据 吴雪萍 (1926)

中国城市PM_{2.5}和PM₁₀时空分布特征和影响因素分析 李江苏, 段良荣, 张天娇 (1938)

2017~2021年苏皖鲁豫交界区域PM_{2.5}和O₃时空变化特征及影响因素 陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)

疫情管控期西安PM_{2.5}和O₃污染特征及成因分析 原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)

苏南五市秋冬季PM_{2.5}化学组成特征和空间差异 冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)

湖北咸宁细颗粒物PM_{2.5}来源 罗怡, 朱宽广, 陈璞琬, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)

邢台氨减排对京津冀PM_{2.5}改善的溢出效益 边泽君, 闻超玉, 郎建垒, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)

聊城市冬季PM_{2.5}载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析 张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)

高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征 郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)

北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例:高新技术产业的环境影响 王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海滨, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)

高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析 雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)

水环境中抗病毒毒物的存在、行为与风险 葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)

黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险 王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤锋 (2054)

藏东多曲河流域总富集水化学特征及控制因素 李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)

西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源 张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)

基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程 孟令华 (2096)

丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素 张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)

金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素 王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴玺, 安永会 (2118)

德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价 刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王橦橦 (2129)

典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征 许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)

抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析 王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)

过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能 曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲子, 李大鹏, 黄勇 (2160)

矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应 刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张彤 (2171)

生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展 孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)

微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制 练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠军, 陈波 (2195)

紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制 马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)

土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应 郭善嵩, 胡思, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)

鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度 喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)

典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系 刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琼, 周瑞娟, 李霖 (2233)

污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响 郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)

宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)

大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制 郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)

基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演 叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)

秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响 叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林科 (2292)

长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响 王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)

土壤盐分变化对N₂O排放影响:基于Meta分析 黄艺华, 余冬立, 史祯琦, 胡磊, 潘永春 (2313)

基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 郑慧玲, 郑辉峰 (2321)

基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟 张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)

防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)

长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)

冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响 鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)

辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)

高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征 张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)

生物炭与不同类型氮肥施肥对菜地土壤反硝化细菌群落的影响 柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)

大岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征 马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)

基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法 张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 郇允兵 (2417)

基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)

西南不同类型紫色土pH变化、重金属累积与潜在生态风险评估 张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)

重庆某铁矿周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析 廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)

金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)

赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果 刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)

施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响 张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

土壤盐分变化对 N₂O 排放影响: 基于 Meta 分析

黄艺华^{1,2}, 余冬立^{1,2*}, 史祯琦^{1,2}, 胡磊^{1,2}, 潘永春^{1,2}

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 210098; 2. 江苏省农业水土资源高效利用与固碳减排工程研究中心, 南京 210098)

摘要: N₂O 是导致臭氧层空洞和全球变暖的主要大气污染物, 农业生产活动是其主要来源, 而土壤盐分则是影响 N₂O 排放的关键因素. 基于 21 篇同行评议文献中 528 对实验组及对照组形成的数据集, 运用 R 语言 Metafor 软件包进行 Meta 分析, 进而评估土壤盐分对土壤 N₂O 排放的影响. 结果表明, 土壤盐分累积对 N₂O 排放量有显著正效应, 中度和高度盐渍土 N₂O 排放量比非盐渍土高 75.57% 和 28.85%. 室内培养实验测定结果表明, 林地和农田的土壤盐渍化导致 N₂O 排放量增加 124.79% 和 131.64%, 而野外定位监测试验结果表明, 草地、裸地和农田中, 土壤盐分对 N₂O 排放的影响均不显著. 盐分对 N₂O 排放的影响趋势则因土壤 (NH₄⁺:NO₃⁻)、pH、土壤砂粒含量和粉粒含量的差异而发生改变, 影响程度依次是: (NH₄⁺:NO₃⁻)>pH>砂粒含量>粉粒含量. 通过揭示土壤盐分升高对不同土地利用类型下 N₂O 排放的刺激作用, 明确了环境因子和盐分交互作用对 N₂O 排放的影响, 对土壤盐渍化地区 N₂O 排放预防阻控和环境改善具有重要科学意义.

关键词: N₂O 累积排放量; 盐渍化; 反硝化作用; 土地利用方式; Metafor 软件包

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-2313-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202304130

Effect of Different Soil Salinities on N₂O Emission: A Meta-analysis

HUANG Yi-hua^{1,2}, SHE Dong-li^{1,2*}, SHI Zhen-qi^{1,2}, HU Lei^{1,2}, PAN Yong-chun^{1,2}

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Province Engineering Research Center for Agricultural Soil-Water Efficient Utilization, Carbon Sequestration and Emission Reduction, Nanjing 210098, China)

Abstract: N₂O is the main air pollutant that causes the ozone hole and global warming. Agricultural production activities are the cause of soil N₂O production, and soil salinity is the key factor affecting N₂O emissions. In order to evaluate the effect of soil salinity on N₂O emissions, we used the Metafor software package of R language to analyze the data sets formed by 528 pairs of experimental and control groups in 21 peer-reviewed literatures. The results showed that soil salt accumulation had a significant positive effect on N₂O emissions. The N₂O emissions of moderately and highly salinized soils were 75.57% and 28.85% higher than those of non-saline soils, respectively. The results of laboratory experiments showed that salt had no significant effect on N₂O emissions in grassland and bare land, whereas for forest land and farmland soil, soil salinization led to an increase in N₂O emissions of 124.79% and 131.64%, respectively. However, the results of field experiments showed that the influence of soil salinity on N₂O emissions was not significant in grassland, bare land, and farmland. The influence trend of salinity on N₂O emission was changed by the difference in soil (NH₄⁺:NO₃⁻), pH, soil sand content, and silt content. The degree of influence of environmental factors on N₂O emission was (NH₄⁺:NO₃⁻)>pH>sand content>silt content. Our research revealed the stimulating effect of increasing soil salinity on N₂O emissions from different land use types. We identified the interaction of environmental factors and salinity on N₂O emissions. This article has important scientific significance for reducing N₂O emissions in salinized land soil and improving the environment.

Key words: N₂O cumulative emission; salinization; denitrification; land use pattern; Metafor software package

N₂O 是导致臭氧层破坏和全球变暖的主要大气污染物, 虽然与 CO₂ 相比其在大气中的含量很低, 但增温潜势却是 CO₂ 的 298 倍^[1]. 农业生产活动导致土壤成为 N₂O 排放的主要来源, 而土壤盐分是影响 N₂O 排放的关键因素. 全球约有 8.3 亿 hm² 土地受到土壤盐渍化影响^[2], 仅我国存在土壤盐渍化问题的土地面积就高达 1 亿 hm²^[3], 主要分布于东北、华北、西北及沿海地区. 盐分通过直接影响微生物功能基因丰度^[4-8]和土壤阴阳离子组成^[9,10], 从而影响硝化过程和反硝化过程^[11], 间接使得生态系统氮循环发生改变. 针对 N₂O 排放, 盐分分别在 N₂O 的生成和逸散过程中体现其影响, 即调节相关酶的活性^[12]和 N₂O 在土壤溶液中的溶解度^[13].

有研究表明, 低盐渍化水平下, 盐分与 N₂O 排放呈负相关, 且 N₂O 排放量对盐分变化的响应较强

烈, 而高盐渍化情况下, 盐分与 N₂O 排放呈正相关, 但 N₂O 排放量变化幅度较小^[13]. 而其他研究表明, N₂O 排放量随着盐分的增加先增加后降低^[14]. 此外, 无机氮含量、土壤 pH、土壤质地和温度等环境因子是影响 N₂O 排放的直接因素^[15], 而在空间变化上, 土地利用类型是影响 N₂O 对盐分变化响应的间接因素^[13,16]. 不同土地利用类型中土壤生物因素与环境因素交互影响, 导致土壤 N₂O 排放过程对盐分变化的响应机制十分复杂. 但目前, 由于各项研究对土壤盐渍化水平的划分不统一, 对土壤盐分梯度变化如何影响 N₂O 排放, 以及环境因子作用下盐分对 N₂O

收稿日期: 2023-04-16; 修订日期: 2023-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177393, U20A20113)

作者简介: 黄艺华(1998-), 女, 硕士, 主要研究方向为土壤氮素循环与温室气体, E-mail: huangyihu@hhu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: shedongli@hhu.edu.cn

排放量变化趋势的影响如何等问题还没有达成共识. 因此, 整合同一研究主题的实证分析案例以进行定量总结, 得出 N₂O 排放对盐分变化的总体响应趋势十分必要.

本文通过收集不同土地利用类型和实验条件下盐渍土 N₂O 排放规律的相关研究, 将盐分按照美国盐土实验室标准划分为非盐渍土、轻度盐渍土、中度盐渍土和重度盐渍土, 结合土壤的理化参数进行分析, 确定生物因素和环境因素交互作用下, 土壤盐分变化对 N₂O 排放的作用及其影响机制, 以期为盐渍化地区土壤 N₂O 排放调控提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 数据收集

通过 Web of Science 核心合集和中国知网, 以“盐度 (salinity)”“电导率 (EC)”“氮 (nitrogen)”“N₂O”“N(氮)”为关键词, 检索到 1989~2023 年期间有关盐分对氮素循环影响的文章 10 079 篇. 所选文献纳入标准如下.

(1) 可直接从文本、表格或图片中计算或提取平均值、样本量和标准偏差或标准误差.

(2) 为减少误差, 提取不同盐分处理下实验周期大于一个季度的野外定位监测试验和实验周期大于一个月的室内培养实验测定的 N₂O 累积排放量数据或平均值, 并提取实验结束时土壤的 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 含量.

(3) 包含盐渍化处理和盐渍化对照的室内培养实验和野外定位监测试验的 N₂O 排放量数据, 且

至少有 3 个重复, 盐渍化处理包括: ①人为向土壤添加梯度盐分水溶液; ②长期使用盐水灌溉; ③盐分含量高的内陆土壤和沿海湿地土壤. 非盐渍化处理包括: 低盐分原状土壤和淡水脱盐土壤.

(4) 研究内容不包括施肥和淹水等其他处理. 从文献中获得的数据包括作者、实验地点、实验方法、土壤容重、土壤盐度、土壤水分、实验温度、土壤 pH、土壤质地(砂粒、粉粒和黏粒含量)和土壤的 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 含量(对于盐分含量高的原状土壤, NH₄⁺:NO₃⁻ 为原始土壤铵态氮和硝态氮含量的比值, 对于人为添加盐分导致土壤盐分含量高的土壤, NH₄⁺:NO₃⁻ 为实验培养周期结束后土壤铵态氮和硝态氮含量的比值)、N₂O 累积排放量和处理组与对照组的样本量(*n*). 由于每篇文献的盐度测定方法不同, 盐度表示方法有电导率(EC_{1:1}、EC_{1:1.25}、EC_{1:1.5})和含盐量(%)等, 根据美国盐土实验室的标准^[17]将电导率统一换算成 EC_e, 将土壤盐化程度划分为非盐渍化、轻度盐渍化、中度盐渍化和重度盐渍化这 4 个水平(表 1), 并将列入研究案例的室内培养实验测定的 N₂O 累积排放量(以 N 计)统一为 mg·kg⁻¹, 将野外定位监测试验测定的 N₂O 累积排放量(以 N 计)统一为 kg·hm⁻². 在土地利用方式的划分中, 裸地指无植被覆盖的地块, 草地指草本植物群落覆盖的地块, 农田指长期种植农作物的地块, 林地指木本植物群落覆盖的地块(表 2). 通过 Web Plot Digitizer 4.6 软件对文献中的图表信息进行数字化, 最后累计纳入文献共计 21 篇(表 2), 包括 528 对处理组和对照组数据.

表 1 土壤盐化分级标准

Table 1 Soil salinization grading standards

土壤盐化程度		非盐化	轻度	中度	重度
EC _e / dS·m ⁻¹		0~2	4~8	8~16	>16
	苏打	<0.1	0.3~0.5	0.5~0.7	>0.7
含盐量/%	氯化物和氯化物+硫酸盐	<0.2	0.4~0.6	0.6~1.0	>1.0
	硫酸盐为主	<0.3	1.0~2.0	2.0~3.0	>3.0

1.2 数据分析

以非盐渍化水平下的 N₂O 累积排放量为对照, 其他 3 个盐分水平为处理, 使用 R 4.2.0 软件 Metafor 包^[34]的 escalc 命令计算盐分对 N₂O 累积排放量影响的效应值(*y_i*)和案例内方差(*v_i*). 用最大似然法估算案例间方差(τ^2), 通过案例内和案例间方差对每个研究案例赋予权重(*w_i*), 通过随机效应模型计算累积效应值(\bar{y}). 公式如下:

$$y_i = \ln R = \ln \frac{y_e}{y_c} \quad (1)$$

$$v_i = \frac{s_e^2}{n_e y_e^2} + \frac{s_c^2}{n_c y_c^2} \quad (2)$$

式中, *y_e*、*s_e* 和 *n_e* 为处理组的均值、标准差和样本量, *y_c*、*s_c* 和 *n_c* 为对照组的均值、标准差和样本量.

$$w_i = \frac{1}{v_i + \tau^2} \quad (3)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^k w_i y_i}{\sum_{i=1}^k w_i} \quad (4)$$

表 2 研究案例主要信息

Table 2 Overview of the studies used for analysis

序号	国家	采样点	实验方法	土地利用方式	主要影响因素	文献
1	中国	44°32'N, 86°21'E	室内实验	农田	土壤质地、盐分和温度	[18]
2	中国	32°44'N, 120°52'E	室内实验	农田 裸地	盐分和水分	[14]
3	中国	44°32'N, 86°31'E; 44°20'N, 86°16'E	室内实验	农田	盐分和土壤质地	[19]
4	中国	37°35'~38°12'N, 118°33'~119°20'E	室内实验	草地 林地	盐分和水分	[13]
5	中国	25°57'N, 119°24'E; 26°01'N, 119°37'E	野外实验	草地	盐分和温度	[20]
6	澳大利亚	30°19'S, 149°46'E	室内实验	农田	盐分	[21]
7	美国	46°13'N, 96°53'W	室内实验	农田	盐分和水分	[22]
8	中国	25°55'~26°0'N, 119°20'~119°30'E	室内实验	草地	盐分和 SO ₄ ²⁻	[23]
9	中国	44°18'N, 86°02'E	野外实验	农田	盐分、NO ₃ ⁻ 、NH ₄ ⁺ 和水分	[24]
10	中国	33°24'~34°06'N, 119°59'~120°30'E	室内实验	草地	盐分和植被	[25]
11	美国	46°16'N, 97°15'W	室内实验	农田	盐分和氮肥	[12]
12	美国	44°18'N, 86°02'E	室内实验	农田	盐分和水分	[26]
13	英国	53°14'N, 4°00'W	室内实验	草地	盐分和氮肥(NH ₄ ⁺ 和 NO ₃ ⁻)	[27]
14	中国	40°54'N, 107°9'E	室内实验	农田	盐分和氮肥	[28]
15	澳大利亚	34°49'S, 150°39'E	室内实验	草地	盐分、硝酸盐	[29]
16	中国	37°36'N, 117°49'E	野外实验	农田	盐分和 NO ₃ ⁻	[4]
17	美国	31°0'~32°0'N, 81°30'~82°0'W	室内实验	林地	盐分	[9]
18	美国	—	室内实验	林地	盐分、NH ₄ ⁺ 和 NO ₃ ⁻	[30]
19	中国	40°10'~41°20'N, 106°25'~112°E	室内实验	农田	盐分和 NH ₄ ⁺	[31]
20	美国	33°35'N, 116°06'W	野外实验	裸地	盐分和有机的肥	[32]
21	中国	44°18'N, 86°03'E	野外实验	农田	盐分和氮肥	[33]

$$95\% \text{ CI} = \bar{y} \pm 1.96 \times \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^k w_i}} \quad (5)$$

式中， w_i 为单个研究的权重， \bar{y} 为累积效应值，95% CI为 y_i 的 95% 置信区间[如果 95% 的置信区间不与零重叠，则认为具有显著性差异($P < 0.05$)，反之不显著]。

使用 Higgins I^2 统计和 Q 检验评估数据的异质性程度，当 Q 和 I^2 越大，则 y_i 越离散，数据的整体异质性越高，表明有其他因素造成了这种偏离，需要引入解释变量，用混合效应模型计算解释变量对效应值的影响，当数据均质时， Q_i 服从 $K-1$ 的卡方分布，则不需要引入解释变量。用 Q_m 评估解释变量对效应值的影响程度， Q_m 在 $P < 0.05$ 时解释变量对效应值有显著影响。计算公式如下：

$$Q_i = \sum_{i=1}^k w_i (y_i - \bar{y})^2 \quad (6)$$

$$I^2 = \frac{\tau^2}{\tau^2 + \frac{(k-1) \sum w_i}{(\sum w_i)^2 - \sum w_i^2}} \quad (7)$$

$$Q_m = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^k w_{ij} (\bar{y}_j - \bar{y})^2, \quad \bar{y}_j = \frac{\sum_{i=1}^k w_{ij} y_{ji}}{\sum_{i=1}^k w_{ij}}$$

$$w_j = \sum_{i=1}^k w_{ij} \quad (8)$$

$$Q_i = Q_m + Q_e \quad (9)$$

式中， Q_i 为数据的整体异质性， Q_m 为由某一已知因素引起的异质性， Q_e 为未知因素的残留异质性， \bar{y}_j 为解释变量的水平为 j 时的累积效应值， w_i 为对应权重。

采用 SPSS 进行偏相关分析以确定盐分和非生物因素之间的相关度。在 3 个变量中，任意两个变量之间的偏相关系数是在控制剩下的一个变量的作用后计算得到的，称为一阶偏相关系数，公式如下：

$$r_{xy(z)} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2) - (1 - r_{yz}^2)}} \quad (10)$$

式中， $r_{xy(z)}$ 为控制变量 z 时，变量 x 与 y 的偏相关系数， r_{xy} 、 r_{xz} 和 r_{yz} 分别为变量 x 与 y 、 x 与 z 和 y 与 z 之间的简单相关系数。

在 4 个变量中，任意两个变量之间的偏相关系数是在控制其余两个变量的影响后计算得到的，称为二阶偏相关系数，二阶偏相关系数是由一阶偏相

关系数求得, 公式如下:

$$r_{xy(z_1, z_2)} = \frac{r_{xy(z_1)} - r_{x(z_2, z_1)} r_{y(z_2, z_1)}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2) - (1 - r_{yz}^2)}} \quad (11)$$

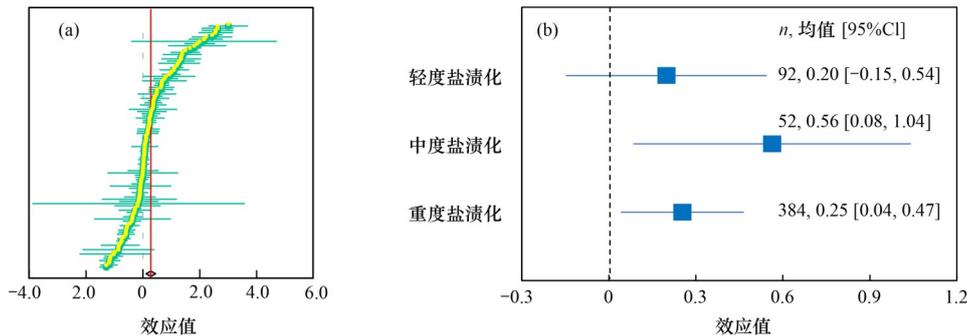
式中, $r_{xy(z_1, z_2)}$ 为控制变量 z_1 和 z_2 时, 变量 x 与 y 的偏相关系数, $r_{xy(z_1)}$ 为控制变量 z_1 时, 变量 x 与 y 的一阶偏相关系数, $r_{x(z_2, z_1)}$ 为控制变量 z_1 时, 变量 x 与 z_2 的偏相关系数, $r_{y(z_2, z_1)}$ 为控制变量 z_1 时, 变量 y 与 z_2 的偏相关系数.

存在 3 个或更多控制变量时, 通过类推计算 x 和 y 的偏相关系数.

2 结果与讨论

2.1 盐分对 N_2O 排放的影响

通过随机效应模型计算得到, 盐分对 N_2O 排放量影响的累计效应值为 0.28 [$P = 0.0012$, CI: (0.11, 0.45)], $Q_1 = 16572.8$, $\tau^2 = 0.76$, $I^2 = 99.46\%$ [图 1(a)], 表明盐分对 N_2O 排放有显著正影响且每个案例之间呈现显著异质性, 需要引入解释变量分析其他环境因子对效应值的影响. 通过亚组分析表



(a) 中的灰色虚线为 0 效应值, 红线表示盐渍土 N_2O 累积平均效应值

图 1 不同盐分水平对 N_2O 排放的影响

Fig. 1 Effects of different salinity levels on N_2O emission

2.2 不同土地利用方式下盐分对 N_2O 排放的影响

室内培养实验测定结果表明, 草地和裸地土壤中盐分变化对 N_2O 排放影响不显著, 而林地和农田的土壤盐渍化导致 N_2O 排放量增加 124.79% 和 131.64% [计算公式: $(e^{\bar{v}} - 1) \times 100\%$, 图 2(a)]. 有研究表明, 林地土壤中盐分含量增高会促进硝化作用^[39]; Chauhan 等^[40]研究也表明, 林地土壤中盐度为 $23.53 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, 亚硝酸盐氧化细菌 (nitrite-oxidizing bacteria, NOB) 和氨氧化细菌 (ammonia-oxidizing bacteria, AOB) 的丰度分别为 $0.24 \times 10^4 \text{ g}^{-1}$ 和 $0.12 \times 10^4 \text{ g}^{-1}$, 而盐度为 $13.09 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, NOB 和 AOB 的丰度分别为 $0.12 \times 10^4 \text{ g}^{-1}$ 和 $0.04 \times 10^4 \text{ g}^{-1}$, 土壤硝化细菌数量随土壤盐分含量增加显著增加. 因此, 林地土壤中盐分提高导致 N_2O 累积排放量增加的主要

原因, 与非盐渍化相比, 轻度盐渍化对 N_2O 排放量影响不显著, 中度和重度盐渍化使得 N_2O 排放量分别提高 75.57% 和 28.85% [计算公式: $(e^{\bar{v}} - 1) \times 100\%$ ^[35], 图 1(b)].

在本研究中, 随机效应模型中 Q_1 的 P 值显示盐分和 N_2O 排放量呈现极显著相关 [图 1(a)]. 盐分变化引起土壤 N_2O 排放过程的差异一方面归结于盐离子化学作用改变了土壤中 NH_4^+ 吸附和释放过程, 调节了 NH_4^+ 可利用性, 以及改变了 N_2O 在土壤中的溶解度. 同时, 更多学者将盐分对 N_2O 排放过程的影响归因于硝化-反硝化微生物对盐分胁迫的耐受性差异. Li 等^[36]研究发现, 盐渍土和非盐渍土细菌群落组成和丰度存在显著差异, 在盐渍土壤中, 亚硝酸盐还原微生物群落的丰度增加导致 N_2O 排放量增加 [亚硝酸盐还原过程由 *nirS* 基因编码的亚硝酸盐还原酶 (*cdl-nir*) 和含 Cu 的 *nirK* 基因编码的亚硝酸还原酶 (*Cu-nir*) 催化^[37]]. Han 等^[38]研究发现, 土壤含盐量从 $<0.5\%$ 增加到 0.7% 时, 土壤 N_2O 还原酶的应激细胞亲和力和显著降低, N_2O 排放量增加.

原因是硝化作用的增强. Ghosh 等^[12]研究发现, 盐渍化农田土壤 N_2O 排放量比非盐渍化农田提高 42.2%, 且盐渍化农田土壤 N_2O 排放量主要归因于硝化-反硝化共同作用^[41]. Li 等^[14]研究发现, 盐渍土 NO_2^- 含量高于非盐渍土, 盐渍土中以 NO_2^- 为底物的硝化细菌反硝化过程受到促进, 导致 N_2O 排放量增加.

野外定位监测试验结果表明, 草地、裸地和农田中, 盐分对 N_2O 排放的影响均不显著 [图 2(b)]. 有研究表明, 室内培养实验对单一变量进行控制且控制较为精准, 而野外定位监测试验由于样地占地面积大等因素不能准确控制单一变量^[42], 导致土壤有机氮、有机碳、pH 和土壤机械组成等不一致, 而这些因素共同影响 N_2O 产生过程. 此外, Helton 等^[43]研究表明, 在室内培养实验中,

随盐分升高, NH₄⁺在土壤孔隙水中累积, 进而导致 N₂O 排放量增加, 而在野外定位监测试验中,

土壤 NH₄⁺含量随盐分升高而降低, 导致 N₂O 排放随之降低.

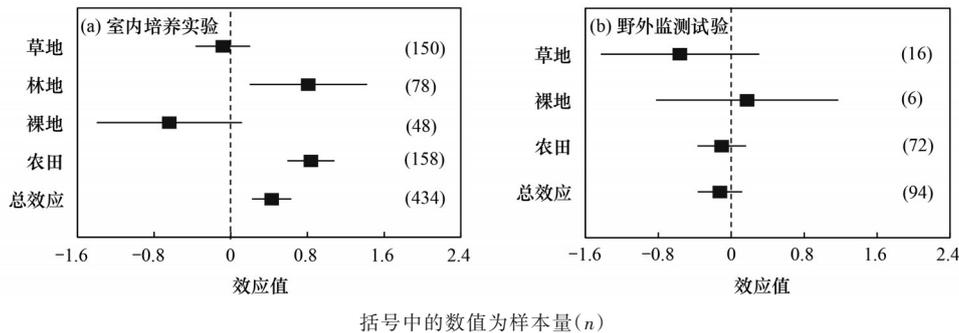


图 2 不同土地利用方式下盐分对 N₂O 排放的影响

Fig. 2 Effects of salinity on N₂O emissions under different land use patterns

2.3 影响盐渍化土壤 N₂O 排放的环境因素分析

通过 SPSS 进行偏相关分析并利用混合效应模型对盐分和环境因子交互作用进行分析, 发现盐分对 N₂O 排放的影响受土壤的 NH₄⁺:NO₃⁻、pH、土壤砂粒含量和粉粒含量影响, 影响程度依次是: (NH₄⁺:NO₃⁻) > pH > 砂粒含量 > 粉粒含量 (表 3、表 4 和图 3).

表 3 效应值 (y_i) 影响因素的偏相关系数

Table 3 Partial correlation coefficient of influencing factors of effect size (y_i)

序号	相关参数	偏相关系数	P 值	样本量
1	NH ₄ ⁺ :NO ₃ ⁻	0.500	0.001	354
2	pH	0.381	0.001	486
3	TN	0.157	0.327	358
4	温度	-0.034	0.768	454
5	砂粒含量	0.244	0.047	240
6	粉粒含量	0.223	0.048	240
7	黏粒含量	0.223	0.048	240

盐分对 N₂O 排放量影响的效应值随 NH₄⁺:NO₃⁻ 增大而显著增大, 即随 NH₄⁺:NO₃⁻ 增大, 盐分对 N₂O 排放促进作用增大 (表 4 和图 3). 有研究发现, 土壤 NH₄⁺ 含量升高为高盐土壤 N₂O 产生过程提供底物^[44], 且添加 NH₄⁺ 比添加 NO₃⁻ 对 N₂O 产生的促进作用更强^[45], 从而导致 NH₄⁺:NO₃⁻ 与 N₂O 排放量呈线性正相关关系^[26]. Xie 等^[46] 研究表明, 盐分升高加速 NH₄⁺ 从土壤中释放, 同时导致参与异化硝酸盐还原为铵, 亚硝酸还原和反硝化过程相关细菌的基因丰度增加, 促进过程 1 和过程 2, 从而导致 NH₄⁺ 增加, NO₃⁻ 降低和 N₂O 累积排放量增加.



盐分对 N₂O 排放量影响的效应值随土壤 pH 增大而增大 (表 4 和图 3). 这是由于 pH 升高时, 受盐碱胁迫影响, N₂O 还原酶活性受到抑制^[47], 导致 N₂O 还

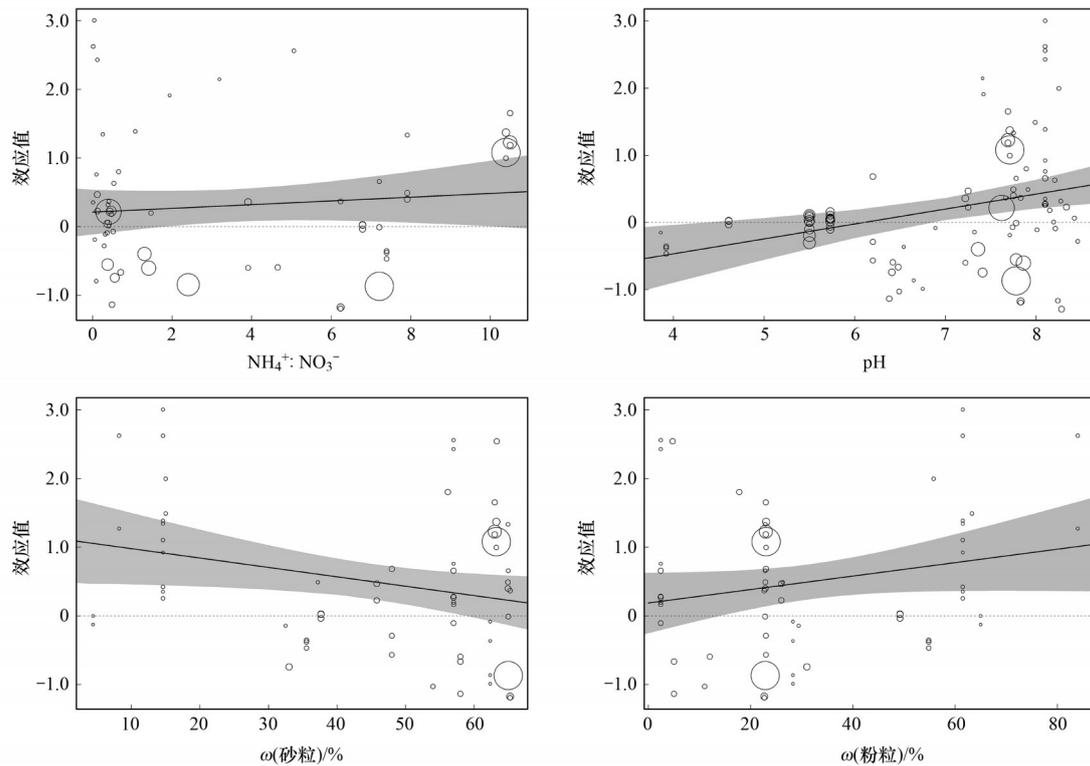
表 4 效应值 (y_i) 与环境因子之间的关系

Table 4 Relationships between effect size (y_i) and environmental factors

因素	公式	样本量	Q _m	P 值
单因素	y _i = 0.216 + 0.027 × (NH ₄ ⁺ :NO ₃ ⁻)	354	0.677	0.411
	y _i = -0.900 + 0.168 × pH	486	5.855	0.016
	y _i = -0.056 + 0.011 × 砂粒含量	240	4.603	0.032
	y _i = 0.791 - 0.012 × 粉粒含量	240	4.809	0.028
	y _i = 0.353 - 0.003 × 黏粒含量	240	0.179	0.672
多因素	y _i = 0.200 × pH - 0.014 × 粉粒含量 - 0.512	204	24.627	0.003

原酶竞争电子的能力变弱, 当电子供体不足时, N₂O 无法被还原, N₂O 排放量增加^[48]. Duan 等^[49] 研究表明, 自养硝化过程产生的 N₂O 与 pH 呈现指数正相关关系, pH 升高时土壤 NH₄⁺ 生成速率增大, 而较高的 NH₄⁺ 含量为自养硝化作用提供了底物. 此外, pH 升高导致土壤 AOB *amoA* 基因丰度增高, 从而导致 N₂O 排放量增加^[50].

盐分对 N₂O 排放影响效应值随土壤砂粒含量增多而增大, 随粉粒含量增多而减小 (表 4 和图 3). 表明随着砂粒含量增多, 盐分对 N₂O 排放促进作用增强, 而随着粉粒含量增多, 盐分对 N₂O 排放表现为抑制作用. 土壤质地通过影响土壤氧气有效性、阳离子交换量和与 N₂O 产生相关的微生物活性等, 进而影响 N₂O 排放. Zhou 等^[51] 在高砂粒含量土壤中研究表明, 土壤盐渍化显著促进氮矿化速率, 导致土壤 NH₄⁺ 增加 11.7%, 为 N₂O 产生提供底物, 从而增加高砂粒含量土壤的 N₂O 排放. 此外, 也有研究表明真菌反硝化作用是引起受盐影响的高砂粒含量土壤产生 N₂O 的主要过程, 由于真菌反硝化系统缺乏 *nosZ* 基因, 不具备将 N₂O 还原为 N₂ 的能力, 使其能产生更多 N₂O. 粉粒含量高的土壤气体扩散率和氧气有效性均较低, 提高了 N₂O 还原为 N₂ 的速率, 同时抑制自养硝化作用对 N₂O 产生的贡献, 使 N₂O 排放



圆点大小为单组数据的权重(w_i)大小,灰色阴影部分为95%置信区间带,黑线为数据点的线性拟合

图3 效应值与环境因子之间的关系

Fig. 3 Relationship between effect size and environmental factors

量较低^[32,52].此外,粉粒含量高的土壤有较低的 NO_3^- 还原率和较高的阳离子交换量,土壤能吸附较多的 NH_4^+ ,从而降低通过硝化过程产生 N_2O 的底物来源^[53].

3 结论

(1)通过Meta分析发现盐分促进 N_2O 排放,不同盐分水平对 N_2O 排放的影响程度为:中度盐渍化>重度盐渍化>轻度盐渍化.

(2)室内培养实验结果表明,林地和农田的土壤盐渍化导致 N_2O 排放量增加124.79%和131.64%,而野外定位监测试验结果表明,草地、裸地和农田中,盐分对 N_2O 排放的影响均不显著.

(3)($\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$)、pH、砂粒和粉粒含量与盐分交互作用共同影响 N_2O 排放,这些因素对效应值的影响程度依次是:($\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$)>pH>砂粒含量>粉粒含量.($\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$)、pH、砂粒含量增加时,盐分升高促进 N_2O 排放.粉粒含量增加时, N_2O 排放受到抑制.

参考文献:

[1] 刘朝荣,朱俊羽,李宇阳,等.太湖氧化亚氮(N_2O)排放特征及潜在驱动因素[J].环境科学,2022,43(8):4118-4126.
Liu C R, Zhu J Y, Li Y Y, et al. Emission of nitrous oxide(N_2O) from lake Taihu and the corresponding potential driving factors[J]. Environmental Science, 2022, 43(8): 4118-4126.

[2] Minhas P S, Ramos T B, Ben-Gal A, et al. Coping with salinity in irrigated agriculture: Crop evapotranspiration and water management issues [J]. Agricultural Water Management, 2020, 227, doi: 10.1016/j.agwat.2019.105832.
[3] 王伟,王志,于亮,等.沧州市滨海盐碱区土壤盐渍化特征[J].环境监测管理与技术,2021,33(6):68-71.
Wang W, Wang Z, Yu L, et al. Characteristics of soil salinization in coastal saline alkali area of Cangzhou [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2021, 33(6): 68-71.
[4] Ma L J, Guo H J, Min W. Nitrous oxide emission and denitrifier bacteria communities in calcareous soil as affected by drip irrigation with saline water[J]. Applied Soil Ecology, 2019, 143: 222-235.
[5] Mazhar S, Pellegrini E, Contin M, et al. Impacts of salinization caused by sea level rise on the biological processes of coastal soils-A review[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10, doi: 10.3389/fenvs.2022.909415.
[6] Franklin R B, Morrissey E M, Morina J C. Changes in abundance and community structure of nitrate-reducing bacteria along a salinity gradient in tidal wetlands [J]. Pedobiologia, 2017, 60: 21-26.
[7] Lin Y X, Hu H W, Deng M L, et al. Microorganisms carrying *nosZ* I and *nosZ* II share similar ecological niches in a subtropical coastal wetland[J]. Science of the Total Environment, 2023, 870, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162008.
[8] You X W, Wang X, Sun R X, et al. Hydrochar more effectively mitigated nitrous oxide emissions than pyrochar from a coastal soil of the Yellow River Delta, China [J]. Science of the Total Environment, 2023, 858, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159628.
[9] Marton J M, Herbert E R, Craft C B. Effects of salinity on denitrification and greenhouse gas production from laboratory-incubated tidal forest soils[J]. Wetlands, 2012, 32(2): 347-357.

- [10] 周慧, 史海滨, 郭珈玮, 等. 有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N₂O 排放的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(8): 3811-3821.
Zhou H, Shi H B, Guo J W, *et al.* Effects of the combined application of organic and Inorganic fertilizers on N₂O emissions from saline soil[J]. Environmental Science, 2020, **41**(8): 3811-3821.
- [11] Wang C J, Hu H Y, Shi J J, *et al.* Copper-ion-mediated removal of nitrous oxide by a salt-tolerant aerobic denitrifier *Halomonas* sp. 3H [J]. Environmental Technology & Innovation, 2023, **30**, doi: 10.1016/j.eti.2023.103045.
- [12] Ghosh U, Thapa R, Desutter T, *et al.* Saline-sodic soils: potential sources of nitrous oxide and carbon dioxide emissions? [J]. Pedosphere, 2017, **27**(1): 65-75.
- [13] Zhang L H, Song L P, Wang B C, *et al.* Co-effects of salinity and moisture on CO₂ and N₂O emissions of laboratory-incubated salt-affected soils from different vegetation types[J]. Geoderma, 2018, **332**: 109-120.
- [14] Li Y W, Xu J Z, Liu B Y, *et al.* Enhanced N₂O production induced by soil salinity at a specific range [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, **17**(14): 5169.
- [15] Shen Y W, Zhu B. Effects of nitrogen and phosphorus enrichment on soil N₂O emission from natural ecosystems: A global meta-analysis [J]. Environmental Pollution, 2022, **301**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.118993.
- [16] Song L P, Zhang L H, Shao H B, *et al.* Fluxes of CO₂ and CH₄ under different types of coastal salt marshes of the yellow river delta: Dynamic changes and driving factors across different seasons [J]. Jökull Journal, 2014, **63**(12): 63-75.
- [17] Zaman M, Shahid S A, Heng L. Guideline for salinity assessment, mitigation and adaptation using nuclear and related techniques[M]. Cham: Springer, 2018.
- [18] Yu Y X, Li X, Zhao C Y, *et al.* Soil salinity changes the temperature sensitivity of soil carbon dioxide and nitrous oxide emissions[J]. CATENA, 2020, **195**, doi: 10.1016/j.catena.2020.104912.
- [19] Yu Y X, Zhao C Y, Zheng N G, *et al.* Interactive effects of soil texture and salinity on nitrous oxide emissions following crop residue amendment[J]. Geoderma, 2019, **337**: 1146-1154.
- [20] Wang X M, Hu M J, Ren H C, *et al.* Seasonal variations of nitrous oxide fluxes and soil denitrification rates in subtropical freshwater and brackish tidal marshes of the Min River estuary[J]. Science of the Total Environment, 2018, **616-617**: 1404-1413.
- [21] Maucieri C, Zhang Y, McDaniel M D, *et al.* Short-term effects of biochar and salinity on soil greenhouse gas emissions from a semi-arid Australian soil after re-wetting [J]. Geoderma, 2017, **307**: 267-276.
- [22] Thapa R, Chatterjee A, Wick A, *et al.* Carbon dioxide and nitrous oxide emissions from naturally occurring sulfate-based saline soils at different moisture contents [J]. Pedosphere, 2017, **27** (5) : 868-876.
- [23] Wang C, Tong C, Chambers L G, *et al.* Identifying the salinity thresholds that impact greenhouse gas production in subtropical tidal freshwater marsh soils[J]. Wetlands, 2017, **37**(3): 559-571.
- [24] Zhang W, Zhou G W, Li Q, *et al.* Saline water irrigation stimulate N₂O emission from a drip-irrigated cotton field [J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science, 2016, **66**(2): 141-152.
- [25] Jin X B, Huang J Y, Zhou Y K. Impact of coastal wetland cultivation on microbial biomass, ammonia-oxidizing bacteria, gross N transformation and N₂O and NO potential production [J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, **48**(4): 363-369.
- [26] Adviento-Borbe M A A, Doran J W, Drijver R A, *et al.* Soil electrical conductivity and water content affect nitrous oxide and carbon dioxide emissions in intensively managed soils [J]. Journal of Environmental Quality, 2006, **35**(6): 1999-2010.
- [27] Sánchez-Rodríguez A R, Chadwick D R, Tatton G S, *et al.* Comparative effects of prolonged freshwater and saline flooding on nitrogen cycling in an agricultural soil [J]. Applied Soil Ecology, 2018, **125**: 56-70.
- [28] Wei Q, Xu J Z, Liao L X, *et al.* Water salinity should be reduced for irrigation to minimize its risk of increased soil N₂O emissions [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, **15**(10), doi: 10.3390/ijerph15102114.
- [29] Dang D M, Macdonald B, Warneke S, *et al.* Available carbon and nitrate increase greenhouse gas emissions from soils affected by salinity[J]. Soil Research, 2017, **55**(1): 47-57.
- [30] Ardón M, Helton A M, Bernhardt E S. Salinity effects on greenhouse gas emissions from wetland soils are contingent upon hydrologic setting: a microcosm experiment [J]. Biogeochemistry, 2018, **140**(2): 217-232.
- [31] 杨文柱, 孙星, 焦燕. 盐度水平对不同盐渍化程度土壤氧化亚氮排放的影响[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(10): 3826-3832.
Yang W Z, Sun X, Jiao Y. Effect of salinity gradient on nitrous oxide emissions from different salinization soil [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(10): 3826-3832.
- [32] Reddy N, Crohn D M. Effects of soil salinity and carbon availability from organic amendments on nitrous oxide emissions [J]. Geoderma, 2014, **235-236**: 363-371.
- [33] 张文, 周广威, 闵伟, 等. 长期咸水滴灌对棉花产量、土壤理化性质和 N₂O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(8): 1583-1590.
Zhang W, Zhou G W, Min W, *et al.* Effects of drip irrigation with saline water on cotton yield, soil physical and chemical properties, and soil N₂O emission [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(8): 1583-1590.
- [34] Viechtbauer W. Conducting meta-analyses in R with the metafor package[J]. Journal of Statistical Software, 2010, **36**(3): 1-48.
- [35] 杨灵芳, 孔东彦, 刁静文, 等. 氮沉降对陆地生态系统土壤有机碳含量影响的 Meta 分析[J]. 环境科学, 2023, **44**(11): 6226-6234.
Yang L F, Kong D Y, Diao J W, *et al.* Meta analysis on the effects of nitrogen addition on soil organic carbon content in terrestrial ecosystems [J]. Environmental Science, 2023, **44**(11): 6226-6234.
- [36] Li Y Q, Chai Y H, Wang X S, *et al.* Bacterial community in saline farmland soil on the Tibetan plateau: responding to salinization while resisting extreme environments [J]. BMC Microbiology, 2021, **21**(1), doi: 10.1186/s12866-021-02190-6.
- [37] Kuypers M M M, Marchant H K, Kartal B. The microbial nitrogen-cycling network [J]. Nature Reviews Microbiology, 2018, **16**(5): 263-276.
- [38] Han H, Song B, Song M J, *et al.* Enhanced nitrous oxide production in denitrifying *Dechloromonas aromatica* strain RCB under salt or alkaline stress conditions [J]. Frontiers in Microbiology, 2019, **10**, doi: 10.3389/fmicb.2019.01203.
- [39] Azam F, Müller C. Effect of sodium chloride on denitrification in glucose amended soil treated with ammonium and nitrate nitrogen [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2003, **166**(5): 594-600.

- [40] Chauhan R, Datta A, Ramanathan A L, *et al.* Factors influencing spatio-temporal variation of methane and nitrous oxide emission from a tropical mangrove of eastern coast of India[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **107**: 95-106.
- [41] 彭毅, 李惠通, 张少维, 等. 秸秆还田、地膜覆盖及施氮对冬小麦田 N_2O 和 N_2 排放的影响[J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1668-1677.
Peng Y, Li H T, Zhang S W, *et al.* Effect of film mulching, straw retention, and nitrogen fertilization on the N_2O and N_2 emission in a winter wheat field [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1668-1677.
- [42] 张旭. 植被条件下坡面水流特性实验研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.
Zhang X. Experimental study on water flow characteristics of slope under vegetation conditions [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2019.
- [43] Helton A M, Ardón M, Bernhardt E S. Hydrologic context alters greenhouse gas feedbacks of coastal wetland salinization [J]. *Ecosystems*, 2019, **22**(5): 1108-1125.
- [44] Jia J, Bai J H, Wang W, *et al.* Salt stress alters the short-term responses of nitrous oxide emissions to the nitrogen addition in salt-affected coastal soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **742**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140124.
- [45] Deng L, Huang C B, Kim D G, *et al.* Soil GHG fluxes are altered by N deposition: New data indicate lower N stimulation of the N_2O flux and greater stimulation of the calculated C pools [J]. *Global Change Biology*, 2020, **26**(4): 2613-2629.
- [46] Xie R R, Rao P Y, Pang Y, *et al.* Salt intrusion alters nitrogen cycling in tidal reaches as determined in field and laboratory investigations [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **729**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138803.
- [47] 巩有奎, 冯华, 任丽芳, 等. pH 调控反硝化除磷过程 PAOs-GAOs 竞争及 N_2O 释放特性[J]. *环境科学与技术*, 2021, **44**(7): 145-153.
Gong Y K, Feng H, Ren L F, *et al.* Utilization of pH to regulate the PAOs-GAOs competition and N_2O release in denitrification phosphorus removal process [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **44**(7): 145-153.
- [48] 廖正伟, 贺酰淑, 陈宣, 等. pH 值对短程反硝化及 N_2O 释放特性影响[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2019, **51**(4): 605-609.
Liao Z W, He X S, Chen X, *et al.* Effect of pH values on shortcut denitrification and nitrous oxide emission [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2019, **51**(4): 605-609.
- [49] Duan P P, Zhou J, Feng L, *et al.* Pathways and controls of N_2O production in greenhouse vegetable production soils [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, **55**(3): 285-297.
- [50] Duan P P, Song Y F, Li S S, *et al.* Responses of N_2O production pathways and related functional microbes to temperature across greenhouse vegetable field soils [J]. *Geoderma*, 2019, **355**, doi: 10.1016/j.geoderma.2019.113904.
- [51] Zhou M H, Butterbach-Bahl K, Vereecken H, *et al.* A meta-analysis of soil salinization effects on nitrogen pools, cycles and fluxes in coastal ecosystems [J]. *Global Change Biology*, 2017, **23**(3): 1338-1352.
- [52] Wang Y A, Fu X, Wu D M, *et al.* Agricultural fertilization aggravates air pollution by stimulating soil nitrous acid emissions at high soil moisture [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55**(21): 14556-14566.
- [53] Jarecki M K, Parkin T B, Chan A S K, *et al.* Greenhouse gas emissions from two soils receiving nitrogen fertilizer and swine manure slurry [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, **37**(4): 1432-1438.

CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and PM ₁₀ in Chinese Cities	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shandong, and Henan from 2017 to 2021	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM _{2.5} and O ₃ Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM _{2.5} Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N ₂ O Emission: A Meta-analysis	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity	LU Ze-rang, CHEN Jia-yan, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohu River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chang, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seedling Systems	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)