

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

肆秩芳华担使命 踔厉扬帆向未来  
——庆祝厦门大学环境学科创立40周年



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年11月

第43卷 第11期  
Vol.43 No.11

目次

厦门大学环境学科创立40周年专栏

新污染物共排放对生态环境监测和管理的挑战 ..... 王佩, 黄欣怡, 曹致纬, 吴朝阳, 吕永龙 (4801)

河口-近海环境新污染物的环境过程、效应与风险 ..... 王新红, 于晓璇, 王思权, 殷笑晗, 钱韦旭, 林晓萍, 吴越, 刘畅 (4810)

海水痕量营养盐和金属的分子光谱分析方法研究进展 ..... 袁东星, 黄勇明, 王婷 (4822)

环境水体中硫化物的分析方法: 从实验室分析到原位监测 ..... 李鹏, 林坤德, 袁东星 (4835)

环境水体中无机砷现场分析方法研究进展 ..... 薄光永, 陈钊英, 弓振斌, 马剑 (4845)

海洋痕量元素采样技术和分析方法的发展及展望: 厦门大学痕量元素平台建设进展 ..... 黄勇明, 周宽波, 陈耀瑾, 张楠, 杨俊波, 戴民汉, 曹知勉, 蔡毅华 (4858)

聚乙烯微塑料的微生物降解研究进展 ..... 骆苑蓉, 钱义谦, 齐雅楠 (4869)

水稻土中氮素对微生物固氮的扰动及效应机制 ..... 王锋, 张静, 周少余, 王鸿辉, 李建, 赵聪媛, 黄鹏, 陈铮 (4876)

中国海洋生态毒理学研究中的毒性测试生物 ..... 史天一, 洪海征, 王明华, 谭巧国, 史大林 (4888)

中国油气系统甲烷逸散排放估算 ..... 陈春赐, 吕永龙, 贺桂珍 (4905)

2015~2020年厦漳泉地区大气氨排放清单及分布特征 ..... 李香, 吴水平, 姜炳祺, 刘怡靖 (4914)

九龙江口微塑料与抗生素抗性基因污染分布特征 ..... 程宏, 陈荣 (4924)

厦门湾沙滩沉积物微塑料污染特征 ..... 姚蕊, 刘花台, 李永玉, 刘潇雅, 吴海波, 王新红 (4931)

九龙江口-厦门湾海域中溶解态痕量金属的时空分布特征与影响机制 ..... 戚柳倩, 岳新利, 钟灏文, 王棋, 王德利, 陈能汪 (4939)

福建省流域-近海溶解氧时空格局与低氧调控机制 ..... 杨艾琳, 杨芳, 李少斌, 余其彪, 陈能汪 (4950)

厦门西溪河口沉积物活性磷的分布特征及迁移转化机制 ..... 潘峰, 蔡宇, 郭占荣, 王新红 (4961)

改性生物炭固定床对模拟湖水体中  $Mn^{2+}$  的吸附 ..... 赵浩, 叶志隆, 王佳妮, 蔡冠竟 (4971)

基于表面增强拉曼光谱技术的饮用水中痕量恩诺沙星和环丙沙星快速检测 ..... 徐婧, 郑红, 卢江龙, 刘国坤 (4982)

紫外驱动高级氧化法降解水体中的磷酸三苯酯 ..... 徐子文, 印红玲, 熊远明, 宋娇娇, 谯扬 (4992)

研究报告

2019年秋季海南省4次臭氧污染过程特征及潜在源区分析 ..... 符传博, 陈红, 丹利, 徐文帅 (5000)

伊犁河谷夏季  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  中水溶性无机离子浓度特征和形成机制 ..... 陈巧, 谷超, 徐涛, 周春华, 张国涛, 赵雪艳, 吴丽萍, 李新琪, 杨文 (5009)

城区与郊区  $PM_{2.5}$  污染及传输特征差异性 ..... 齐鹏, 周颖, 程水源, 白伟超 (5018)

南京北郊 BTEX 特征及健康风险评估 ..... 冯悦政, 安俊琳, 张玉欣, 王俊秀 (5030)

我国陆域水体系统表层水中微塑料生态风险评估 ..... 孙晓楠, 陈浩, 贾其隆, 朱奕, 马长文, 叶建锋 (5040)

东江流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析 ..... 陈优良, 邹文敏, 刘星根, 曾金凤, 李丹, 郑汉奕 (5053)

长江与黄河源丰水期地表水中汞的分布特征、赋存形态及来源解析 ..... 刘楠涛, 吴飞, 袁巍, 王训, 王定勇 (5064)

青藏高原湖泊水环境特征及水质评价 ..... 刘智琦, 潘保柱, 韩语, 李刚, 王韬轶 (5073)

基于水化学与硫同位素的卡林型金矿区岩溶水地球化学特征及控制因素 ..... 查学芳, 吴攀, 李学先, 陈世万, 黄家琰, 李清光, 陈思睿 (5084)

丹江口水库真核浮游植物群落分布特征及其与环境因子的关系 ..... 贺玉晓, 买思婕, 任玉芬, 李卫国, 赵同谦, 马寅男 (5096)

镉沸石对磷和重金属的吸附与底泥钝化性能 ..... 王哲, 朱俊, 李雯, 闫德馨, 董雯, 刘玉玲, 李家科 (5106)

基于宏基因组与宏转录组分析石化废水生物处理系统脱氮功能菌群 ..... 章旭, 周佳佳, 周珉, 罗西子, 严新杰, 刘勇弟, 厉巍 (5115)

寒冷地区 IFAS + 磁混凝污水厂菌群结构和抗生素抗性基因分析 ..... 杜文琰, 姚俊芹, 马辉英, 胡渊鑫, 张春雷, 陈银广 (5123)

中国旱作农田一氧化氮排放及减排: Meta 分析 ..... 田政云, 吴雄伟, 吴媛媛, 魏佳楠, 白鹤, 顾江新 (5131)

硝化抑制剂对我国蔬菜生产产量、氮肥利用率和氧化亚氮减排效应的影响: Meta 分析 ..... 刘发波, 马笑, 张芬, 梁涛, 黎亮武, 王军杰, 陈新平, 王孝忠 (5140)

不同施肥措施对热带地区稻菜轮作体系土壤  $CH_4$  和  $N_2O$  排放的影响 ..... 邵晓辉, 汤水荣, 孟磊, 伍延正, 李金秋, 缙广林 (5149)

不同水分条件下土地利用方式对我国热带地区土壤硝化过程及  $NO$  和  $N_2O$  排放的影响 ..... 唐瑞杰, 胡煜杰, 赵彩悦, 赵炎, 袁新生, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (5159)

基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征 ..... 刘孝严, 樊亚男, 刘鹏, 吴秋梅, 胡文友, 田康, 黄标 (5169)

基于 EBK 插值预测和 GDM 模型的襄州区耕地土壤重金属时空分布及来源变化分析 ..... 高浩然, 周勇, 刘甲康, 程晓明, 郭嵩, 江衍, 谭恒鑫 (5180)

基于 GIS 对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析 ..... 张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 魏琪琪, 陈锋 (5192)

老化作用对生物炭钝化白云鄂博矿区碱性土壤中  $Cd^{2+}$  的影响 ..... 王哲, 程俊丽, 卞园, 郑春丽, 王维大, 姜庆宏 (5205)

磁性氧化铁/桑树杆生物炭的制备及其对砷污染土壤溶解性有机碳和砷形态的影响 ..... 芦琳, 颜利玲, 梁美娜, 成官文, 朱宗强, 朱义年, 王敦球 (5214)

牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响 ..... 赵丽芳, 黄鹏武, 杨彩迪, 卢升高 (5224)

磷、锌和镉交互作用对小白菜生长和镉累积的影响 ..... 帅祖革, 刘汉燧, 崔浩, 魏世强 (5234)

重庆开州区菜地土壤抗生素污染特征及潜在生态环境风险评估 ..... 方林发, 叶莘莘, 方标, 范晓霞, 高坤鹏, 李士洋, 陈新平, 肖然 (5244)

基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应 ..... 侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 周国清, 尤号田, 韩小文 (5253)

黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征 ..... 许小明, 张晓萍, 何亮, 郭晋伟, 薛帆, 邹亚东, 易海杰, 贺洁, 王浩嘉 (5263)

土壤多功能性对微生物多样性降低的响应 ..... 陈桂鲜, 吴传发, 葛体达, 陈剑平, 邓扬悟 (5274)

氮添加对不同坡度退化高寒草甸土壤真菌多样性的影响 ..... 苏晓雪, 李希来, 李成一, 孙华方 (5286)

碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比 ..... 李辉, 庞博, 朱法华, 孙雪丽, 徐静馨, 王圣 (5294)

中国能源消费碳排放的空间化与时空动态 ..... 郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 顾斌斌, 杜海波 (5305)

京津冀及周边地区“2+26”城市结构性调整政策的  $CO_2$  协同减排效益评估 ..... 杨添祺, 王洪昌, 张辰, 朱金伟, 崔宇韬, 谭玉玲, 束榭 (5315)

我国塑料污染防治政策分析与建议 ..... 李欢, 朱龙, 沈茜, 贺亚楠, 邓义祥, 安立会 (5326)

《环境科学》征订启事 (4821) 《环境科学》征稿简则 (5213) 信息 (5052, 5191, 5273)

# 硝化抑制剂对我国蔬菜生产产量、氮肥利用率和氧化亚氮减排效应的影响: Meta 分析

刘发波<sup>1,2</sup>, 马笑<sup>1,2</sup>, 张芬<sup>1,2</sup>, 梁涛<sup>3</sup>, 黎亮武<sup>4</sup>, 王军杰<sup>1,2</sup>, 陈新平<sup>1,2</sup>, 王孝忠<sup>1,2\*</sup>

(1. 西南大学资源环境学院, 长江经济带农业绿色发展中心, 重庆 400715; 2. 西南大学农业科学研究院, 重庆 400715; 3. 重庆市农业科学院, 重庆 401329; 4. 广西大学农学院, 南宁 530004)

**摘要:** 我国蔬菜生产系统由于长期过量施肥导致氮肥利用率低和环境问题严重, 氮肥配施硝化抑制剂是降低活性氮损失、增加蔬菜产量和提高氮肥利用率的有效策略, 然而缺乏系统研究. 基于数据整合分析的方法, 系统分析了氮肥配施硝化抑制剂 [ 双氰胺 (DCD)、3,4-二甲基吡唑磷酸盐 (DMPP) 和 2-氯-6-三氯甲基吡啶 (NP) ] 对我国蔬菜生产的产量、植株氮吸收、氮肥利用率和氧化亚氮减排效应的影响, 进一步揭示不同田间管理措施对其效果的影响. 结果表明, 氮肥配施硝化抑制剂能够显著提高蔬菜产量 (9.2%)、植株氮吸收 (10.4%) 和氮肥利用效率 (11.2%), 同时减少氧化亚氮排放 (28.4%). 不同硝化抑制剂类型中, NP 对增产效应和氧化亚氮减排效应的影响幅度最高, 分别为 16.1% 和 32.0%, 其次是 DMPP 和 DCD. 硝化抑制剂在不同氮肥用量中能提高蔬菜产量 (6.7%~14.7%) 和减少氧化亚氮排放 (14.6%~36.8%). 在中性和碱性菜地土壤中, 硝化抑制剂的增产效应和氧化亚氮减排效应的影响幅度较酸性土大. 硝化抑制剂在露地栽培、根菜类和叶菜类的条件下对产量的增加和氧化亚氮的减排效果较好. 主成分分析表明, 土壤总氮含量和土壤 pH 是影响硝化抑制剂对蔬菜产量形成和驱动氧化亚氮排放的主要因素. 综上, 硝化抑制剂是实现蔬菜系统提质增效、节肥减排的重要举措. 同时, 农户应根据土壤和田间管理措施选择适宜硝化抑制剂类型, 以最大限度提高其有效性.

**关键词:** 蔬菜; 硝化抑制剂; 产量; 氮肥利用率; 田间管理; 氧化亚氮排放

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)11-5140-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202112046

## Impact of Nitrification Inhibitors on Vegetable Production Yield, Nitrogen Fertilizer Use Efficiency and Nitrous Oxide Emission Reduction in China: Meta Analysis

LIU Fa-bo<sup>1,2</sup>, MA Xiao<sup>1,2</sup>, ZHANG Fen<sup>1,2</sup>, LIANG Tao<sup>3</sup>, LI Liang-wu<sup>4</sup>, WANG Jun-jie<sup>1,2</sup>, CHEN Xin-ping<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-zhong<sup>1,2\*</sup>

(1. Interdisciplinary Research Center for Agriculture Green Development in Yangtze River Basin, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Academy of Agricultural Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 401329, China; 4. College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** Due to the long-term excessive fertilization in the vegetable system in China, nitrogen use efficiency (NUE) is low, and the environmental problem is serious. Nitrogen fertilizer combined with nitrification inhibitor is an effective strategy to alleviate the loss of active nitrogen and increase vegetable yield. However, systematic research on the above is lacking. Meta-analysis was used to systematically analyze the effects of nitrogen fertilizer combined with nitrification inhibitors [ dicyandiamide (DCD), 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP), and 2-chloro-6-(trichloromethyl) pyridine (NP) ] on the yield, plant nitrogen uptake, nitrogen fertilizer use efficiency, and nitrous oxide emission reduction effects in vegetable production in China. This study further revealed the impacts of different field management measures on their effects. The results showed that the combination of nitrogen fertilizer and nitrification inhibitor could significantly increase vegetable yield (9.2%), plant nitrogen uptake (10.4%), and nitrogen fertilizer use efficiency (11.2%) but reduce nitrous oxide emissions (28.4%). Among the different types of nitrification inhibitors, NP had the highest impact on the yield-increasing effect and the nitrous oxide emission reduction effect, which were 16.1% and 32.0%, respectively, followed by that of DMPP and DCD. Nitrification inhibitors could significantly increase vegetable yield (6.7%~14.7%) and reduce N<sub>2</sub>O emissions (14.6%~36.8%) in different nitrogen fertilizer rates. In neutral and alkaline vegetable soil, the yield-increasing effect and the reduction effect of nitrous oxide were higher than those in acidic soil. Nitrification inhibitors had significant effects on yield increase and nitrous oxide reduction under the conditions of greenhouse or open-field cultivation, root vegetables, and leafy vegetables. Principal component analysis (PCA) showed that soil total nitrogen content and soil pH were the main factors that promoted the increase in vegetable yields and drove nitrous oxide emissions under the application of nitrification inhibitors. In summary, nitrification inhibitors were an important measure to achieve the goal of improving quality and fertilizer use efficiency, while saving fertilizer and reducing emissions in vegetable production. Farmers should choose suitable types of nitrification inhibitors according to soil and field management measures to maximize their effectiveness.

**Key words:** vegetables; nitrification inhibitor; yield; nitrogen use efficiency; field management; nitrous oxide emission

我国蔬菜产业快速发展,截至2019年我国蔬菜种植面积是1980年的6.6倍,占我国农作物种植面积12.6%<sup>[1]</sup>.然而,我国蔬菜产业一直处于小农户主导、高肥料投入和高环境代价的生产模式<sup>[2]</sup>.大幅增加化肥的施用并没有带来蔬菜产量的增加,反而导致较低的氮肥利用效率<sup>[3,4]</sup>.氮肥的大量损失

极大地干扰了N的生物地球化学循环,对水、空气

收稿日期: 2021-12-05; 修订日期: 2022-03-07

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目 (U20A2047); 西南大学博士启动基金项目 (SWU118077)

作者简介: 刘发波 (1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为蔬菜养分资源管理与调控, E-mail: rocky\_liu981381250@163.com

\* 通信作者, E-mail: wxz20181707@swu.edu.cn

和土壤造成了严重的环境问题<sup>[5~7]</sup>。蔬菜生产系统是氧化亚氮( $N_2O$ )排放的热点系统,排放量平均值为 $3.91 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,较其他作物系统高 $1.2 \sim 4.2$ 倍<sup>[8]</sup>。因此,寻求减少 $N_2O$ 排放、提高氮肥利用率的有效措施以实现蔬菜稳产增产和降低环境代价,对实现我国蔬菜绿色发展至关重要。

硝化抑制剂(NIs)能够延缓土壤中铵态氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )向硝态氮( $\text{NO}_3^--\text{N}$ )转化,延长 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 在土壤中存留的时间,增加土壤基质对 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 生物吸收和吸附,减少活性氮损失<sup>[9,10]</sup>,因而被认为是提高氮肥利用率、促进作物生产和降低环境污染的有效措施之一。先前国内外学者通过 Meta 分析对硝化抑制剂的农学效应以及环境代价等方面进行了研究<sup>[11~13]</sup>,结果表明,硝化抑制剂能够提高作物产量 $5.0\% \sim 20.0\%$ 和氮肥利用效率 $4.0\% \sim 18.0\%$ ,提高作物品质,增加农民收益,同时减少 $37.0\% \sim 48.0\%$ 氮淋洗损失,减少 $38.0\% \sim 57.0\%$ 的 $N_2O$ 和 $\text{NO}$ 排放。以上研究主要集中于粮食系统或整个农作物系统<sup>[12,14]</sup>,而针对蔬菜作物较为系统和较为具体评价硝化抑制剂的田间应用效果的研究目前还较少。近年来硝化抑制剂在蔬菜生产的应用效果受到越来越多的关注,有研究重点关注其对区域蔬菜产量、土壤氮转化特征和单一途径活性氮损失的影响<sup>[15,16]</sup>。如 Min 等<sup>[17]</sup>的田间试验结果表明,减氮配施硝化抑制剂 2-氯-6-三氯甲基吡啶(NP)使番茄产量增加 $23.0\% \sim 36.0\%$ ,同时降低 $37.0\%$ 的 $N_2O$ 排放。然而,受田间管理、区域土壤特性、作物种类和硝化抑制剂类型等多种因素的影响,硝化抑制剂的田间应用效果有很大的差异。Fan 等<sup>[18]</sup>的研究表明,硝化抑制剂在低 pH 土壤上增加蔬菜产量和减少 $N_2O$ 排放的趋势均不明显。Zhang<sup>[19]</sup>的研究表明过量氮肥的施用导致土壤大量的氮盈余会掩盖硝化抑制剂的增产效果,削弱 $N_2O$ 的减排潜力。有研究指出<sup>[20]</sup>,添加双氰胺(DCD)并不影响集约化蔬菜轮作系统 $N_2O$ 排放,而 NP 有显著缓解 $N_2O$ 排放的效果。而设施栽培较大的灌溉水量和持续较高的土壤温度,加速硝化抑制剂的下层迁移,缩短其半衰期从而有效性降低<sup>[21]</sup>。我国蔬菜种植区域广泛,与其他作物相比蔬菜生产条件较为复杂,由于蔬菜生育期较短,复种指数高,同时具有设施和露地不同的栽培方式,因此,系统评价硝化抑制剂在我国蔬菜不同田间生产条件下的应用效果对硝化抑制剂在我国蔬菜生产中全面推广具有更为重要的指导意义。

硝化抑制剂是增加蔬菜产量、提高氮肥利用率和降低活性氮损失的重要举措,双氰胺(DCD)、3,4-二甲基吡啶磷酸盐(DMPP)和 2-氯-6-三氯甲基

吡啶(NP)这 3 种硝化抑制剂在农业生产中应用最为普遍,然而缺乏系统研究其在农业生产中的作用效果。尽管当前基于 Meta 分析的方法探究硝化抑制剂在蔬菜生产影响受到越来越多的关注,然而先前的研究重点关注于对 $N_2O$ 排放或产量单一指标的影响,缺乏对产量、氮肥利用率、植株氮吸收和活性氮损失的综合影响,同时缺乏探究硝化抑制剂作用效果的驱动因子分析。本研究收集整理了国内外学者发表的资料,运用整合分析的方法,系统量化了 DCD、NP 和 DMPP 这 3 种硝化抑制剂对我国蔬菜产量、植株氮吸收、氮肥利用率和 $N_2O$ 排放等方面综合影响,同时,阐明了区域土壤特性、管理措施和蔬菜类型等因素对 3 种硝化抑制剂应用效果的影响,进而明确影响硝化抑制剂对蔬菜生产田间应用效果的关键驱动因子,对指导我国蔬菜绿色生产中优化施肥策略的制定有重要的借鉴意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据收集及筛选

本研究数据来源于 2021 年 6 月之前发表于中国知网、Web of science 和 Google Scholar 这 3 个文献数据库,以“蔬菜(vegetable)”、“硝化抑制剂(nitrification inhibitor)”、“ $N_2O$  排放( $N_2O$  emission)”、“蔬菜产量(vegetable yield)”和“氮肥利用效率(nitrogen use efficiency, NUE)”等作为关键词进行文献的搜索,并进行筛选。筛选的标准为:①试验研究必须来自大田试验,而非盆栽或土柱试验;②同一试验必须包括至少一对配对的对照组和处理组,对照组为不施用硝化抑制剂,处理组为施用硝化抑制剂,且对照组和处理组氮肥用量一致;③至少完成一季蔬菜全生育期的研究,所测定的指标至少包含 $N_2O$ 排放量、蔬菜产量、NUE 和植株氮吸收等其中一项。硝化抑制剂类型包括双氰胺(DCD)、3,4-二甲基吡啶磷酸盐(DMPP)和 2-氯-6-三氯甲基吡啶(NP)。数据收集过程中,如果数据是以图的形式展示,利用 GetData Graph Digitizer 2.24 软件来获得。基于以上筛选标准,获取有效文献 22 篇,采集了 117 组数据。收集的内容包括:作者、标题、试验时间、采样点、土壤类型、土壤 pH 值、有机质含量、土壤总氮含量、硝化抑制剂种类、氮肥用量、植株氮吸收量、氮肥利用效率、 $N_2O$ 累积排放量和所涉及指标的标准差等。

为明确影响硝化抑制剂应用效果的主要驱动因素,本研究将这些驱动因子划分为:土壤特性、蔬菜类型和田间管理措施(硝化抑制剂类型、栽培类型、氮肥用量),具体分类见表 1。其中蔬菜类型

主要分成叶菜类、果菜类和根菜类这3类. 叶菜类蔬菜主要包括空心菜、苋菜和白菜等, 果菜类蔬菜

主要包括黄瓜、辣椒和茄子等, 根菜类蔬菜主要是萝卜.

表 1 数据分类

Table 1 Data classification

土壤 pH 值	田间管理措施			蔬菜类型
	NIs 类型	栽培类型	N 肥用量/kg·hm <sup>-2</sup>	
pH > 7.5 (碱性)	NP	GH(设施)	<200	叶菜类
6.5 ≤ pH ≤ 7.5 (中性)	DMPP		200 ~ 400	果菜类
pH < 6.5 (酸性)	DCD	OP(露地)	>400	根菜类

## 1.2 数据分析

单位产量N<sub>2</sub>O排放量计算公式为:

$$\text{单位产量N}_2\text{O排放量} = \frac{\text{单位面积N}_2\text{O排放量}}{\text{产量}} \quad (1)$$

本研究采用 Meta 分析的方法研究了氮肥配施硝化抑制剂的条件下对蔬菜产量、植株氮吸收、NUE 和 N<sub>2</sub>O 排放量的影响. 计算过程采用 Hedges 等<sup>[22]</sup>的计算方法, 计算每一组数据的效应值(RR), 通过自然对数的转化以量化氮肥配施硝化抑制剂(NIs)条件下对各变量的响应程度, 计算公式如下:

$$\text{RR} = \ln\left(\frac{X_t}{X_c}\right) = \ln(X_t) - \ln(X_c) \quad (2)$$

式中,  $X_t$  表示添加硝化抑制剂处理(处理组)的平均值,  $X_c$  表示只施用化肥处理(对照组)的平均值.

另外, 权重( $w$ )、权重响应比(mean RR)、mean RR 的标准误、95%的置信区间(CI)和由硝化抑制剂的添加引起既定变量的变化率( $C$ )可通过下式计算:

$$w = \frac{1}{S_t^2/(n_t \times X_t^2) + S_c^2/(n_c \times X_c^2)} \quad (3)$$

$$\omega = n_t \times n_c / (n_t + n_c) \quad (4)$$

$$\text{meamRR} = \frac{\sum_{i=1}^j w_i \times \text{RR}_i}{\sum_{i=1}^j w_i} \quad (5)$$

$$S(\text{meanRR}) = 1 / \left( \sqrt{\sum_{i=1}^j w_i} \right) \quad (6)$$

$$95\% \text{ CI} = \text{meanRR} + 1.96S(\text{meanRR}) \quad (7)$$

$$C = (e^{\text{RR}} - 1) \times 100\% \quad (8)$$

式中,  $S_t$  和  $S_c$  分别表示处理组的标准差和对照组的标准差;  $n_t$  和  $n_c$  分别表示处理组和对照组的样本量; 如果一些研究中没有给出相应的标准差, 则以公式(4)计算权重<sup>[23]</sup>. 采用卡方检验(K-S test)对每一项变量的效应值进行正态分布检验, 发现并非所有都符合正态分布(图1). 对不符合正态分布的变量的效应值进行非参数 bootstrap 分析(重取样过程,  $n = 10\,000$ 次迭代). 运用 OpenMEE 软件采用随机效应模型最大似然法进行每一类别变量的效应值、权重效应比及其 95% CI 的计算<sup>[24]</sup>, 并运用 Origin 作随机森林图. 如果 95% CI 包含零值表明该变量中处理组与对照组没有显著差异( $P > 0.05$ ). 同时, 采用 SPSS V20.0 (IBM, Chicago, USA) 对处理组和对照组、以及不同 NIs 类型的产量、植株氮吸收、NUE 以及 N<sub>2</sub>O 排放量进行单因素方差分析, 采用 LSD 检验计算显著性( $P < 0.05$ ). 利用主成分分析(PCA), 采用 Origin 软件分析了土壤理化性质与 N<sub>2</sub>O 排放量和产量的关系.

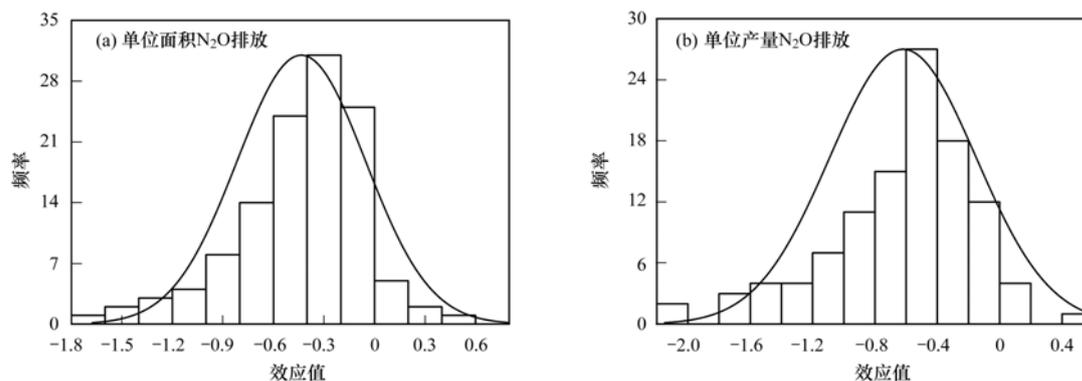


图 1 氮肥配施硝化抑制剂条件下 N<sub>2</sub>O 排放的样本分布频率

## 2 结果与分析

### 2.1 硝化抑制剂对蔬菜生产和N<sub>2</sub>O排放的影响

由图 2 可知, 相比于施用氮肥(未添加硝化抑制剂), 氮肥配施硝化抑制剂增加了 9.2% (95% 置信区间: 7.8%~10.7%) 的蔬菜产量, 植株氮吸收和氮肥利用率分别提高了 10.4% (95% 置信区间: 5.4%~15.7%) 和 11.2% (95% 置信区间: 8.0%~14.6%), 同时, 单位面积和单位产量 N<sub>2</sub>O 排放分别减少了 28.4% (95% 置信区间: -27.3%~-29.5%) 和 42.1% (95% 置信区间: -32.7%~-50.2%)。

### 2.2 不同生产条件下硝化抑制剂对产量、植株氮吸收和 NUE 的影响

相比于施用氮肥(未添加硝化抑制剂), 3 种类型硝化抑制剂均能显著增加蔬菜产量[图 3(a)], DCD、DMPP 和 NP 增产幅度分别为 4.6%、7.7% 和 16.1%。不同施氮量下硝化抑制剂对蔬菜产量有显著影响, 施氮量 <200、200~400 和 >400 kg·hm<sup>-2</sup> 时增产幅度分别为 14.7%、9.8% 和 6.7%。在不同 pH 条件下, 土壤 6.5 ≤ pH ≤ 7.5 时增产幅度最高(14.2%)。硝化抑制剂的添加对露地蔬菜的增产幅度(11.4%) 高于设施蔬菜(5.9%)。在所有蔬菜类型中, 对根菜类和叶菜类蔬菜增产效果显著, 分别为 13.8% 和 9.3%。

相比于施用氮肥(未添加硝化抑制剂), 硝化抑制剂 NP 对植株氮吸收显著提高了 12.4%, 而 DCD (4.2%) 和 DMPP (5.3%) 均无显著影响[图 3(b)]。从氮肥用量看, 随着氮肥用量和土壤 pH 增加, 硝化抑制剂对蔬菜氮吸收的提高效果逐渐降低;

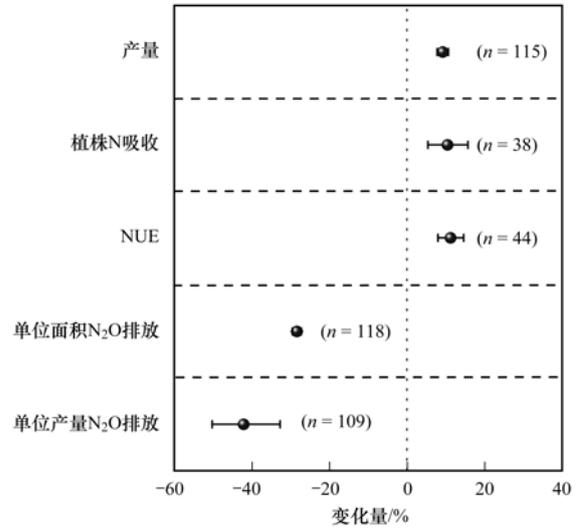


图 2 氮肥配施硝化抑制剂对蔬菜产量、植株 N 吸收、NUE 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响

Fig. 2 Effect of nitrogen fertilizer combined with nitrification inhibitor on vegetable yield, plant N uptake, NUE, and nitrous oxide emission

氮肥配施硝化抑制剂显著提高了叶菜类蔬菜的植株氮吸收, 为 11.4%, 且高于果菜类(5.1%)。不同栽培类型间植株氮吸收对氮肥配施硝化抑制剂的响应差异不显著。NP 和 DMPP 对氮肥利用率增加效果高于 DCD, 硝化抑制剂在露地蔬菜、施氮量 <200 kg·hm<sup>-2</sup>、中性或碱性土壤、根菜类和果菜类的条件下对提升氮肥利用率效果显著[图 3(c)]。

### 2.3 不同生产条件下 N<sub>2</sub>O 减排效应对硝化抑制剂的响应

在单位面积上[图 4(a)]: 氮肥配施不同硝化抑制剂类型 DCD、DMPP 和 NP 分别减少 N<sub>2</sub>O 排放 23.6%、22.4% 和 32.0%; 当氮肥施用量为 <200、

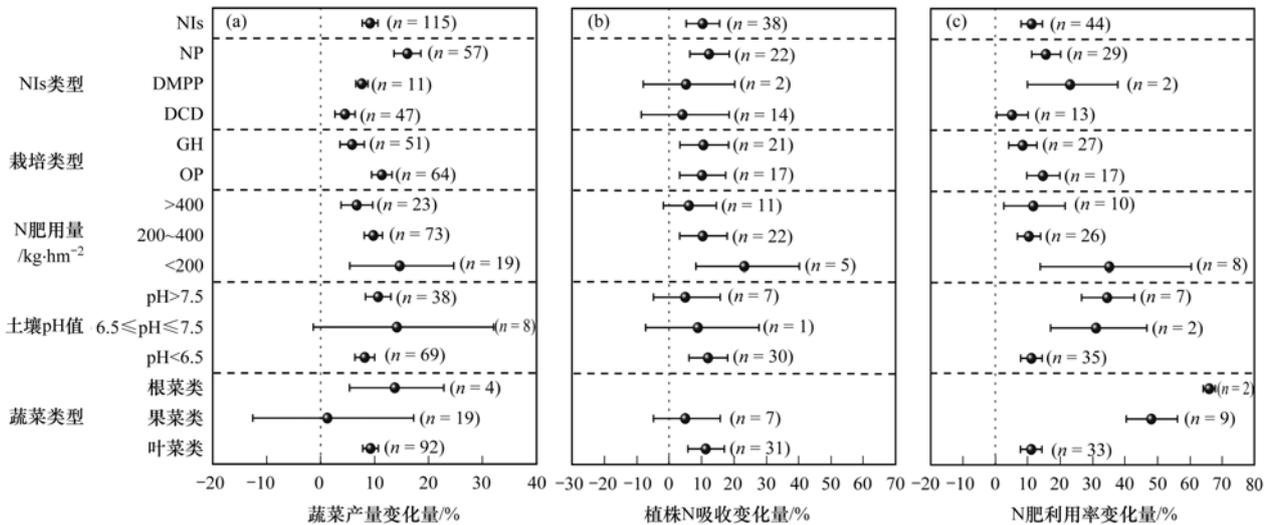


图 3 氮肥配施硝化抑制剂在不同生产条件下对蔬菜产量、植株 N 吸收和 NUE 的影响

Fig. 3 Effect of nitrogen fertilizer combined with nitrification inhibitor on vegetable yield, plant N uptake, and NUE under different production conditions

200 ~ 400 和 > 400  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时  $\text{N}_2\text{O}$  的减排幅度分别为 14.6%、27.3% 和 36.8%。在  $6.5 \leq \text{pH} \leq 7.5$  的土壤中减少  $\text{N}_2\text{O}$  排放的幅度最大 (43.2%)，其次是  $\text{pH} > 7.5$  (34.2%) 和  $\text{pH} < 6.5$  (27.4%) 的土壤；氮肥配施硝化抑制剂对露地栽培  $\text{N}_2\text{O}$  减排幅度较设施栽培高 13.0%；叶菜类、果菜类和根菜类蔬菜  $\text{N}_2\text{O}$  减排幅度分别为 28.3%、27.4% 和 34.2%。

在单位产量上 [图 4(b)]：NP 的  $\text{N}_2\text{O}$  减排效果最

高 (46.2%)，较 DCD 和 DMPP 分别高 7.8% 和 10.7%；当氮肥施用量为 < 200、200 ~ 400 和 > 400  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时  $\text{N}_2\text{O}$  的减排幅度分别为 44.2%、42.9% 和 37.3%；硝化抑制剂在  $\text{pH} < 6.5$ 、 $6.5 \leq \text{pH} \leq 7.5$  和  $\text{pH} > 7.5$  的菜地土壤上分别减少  $\text{N}_2\text{O}$  排放 40.1%、52.2% 和 44.1%；露地栽培和设施栽培分别减少  $\text{N}_2\text{O}$  排放 41.4% 和 43.2%；叶菜类、果菜类和根菜类蔬菜  $\text{N}_2\text{O}$  减排幅度分别为 42.3%、47.3% 和 37.8%。

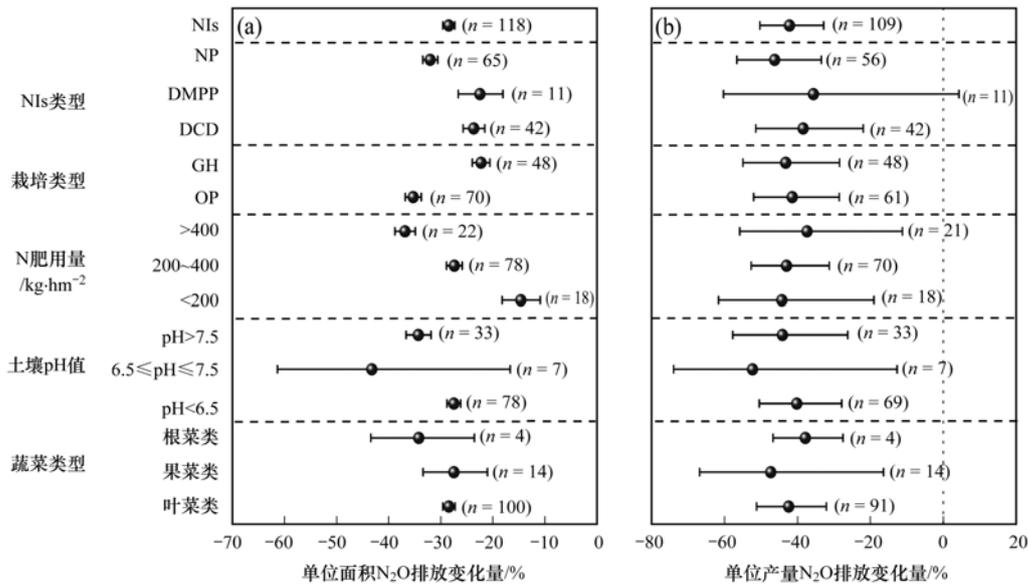


图 4 氮肥配施硝化抑制剂在不同生产条件下对蔬菜生产单位面积和单位产量  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响

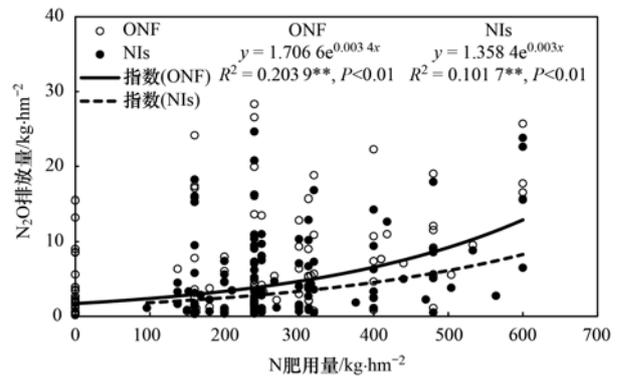
Fig. 4 Effect of nitrogen fertilizer combined with nitrification inhibitor on nitrous oxide emissions per unit area and per unit yield under different vegetable production conditions

## 2.4 施用硝化抑制剂条件下氮肥用量和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的关系

本研究将施用氮肥 (未添加硝化抑制剂) 和氮肥配施硝化抑制剂条件下  $\text{N}_2\text{O}$  排放量和氮肥用量进行曲线拟合 (图 5)，结果表明，不论是只施用氮肥还是氮肥配施硝化抑制剂条件下， $\text{N}_2\text{O}$  排放量随施氮量的增加呈指数函数形式增长。然而，氮肥配施硝化抑制剂条件下，氮肥用量与  $\text{N}_2\text{O}$  排放量的响应曲线较施用氮肥 (未添加硝化抑制剂) 的响应曲线平缓，即氮肥用量越大，氮肥配施硝化抑制剂比施用氮肥 (未添加硝化抑制剂) 的  $\text{N}_2\text{O}$  排放量增长缓慢，这进一步说明硝化抑制剂的应用能有效地减少菜地土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的排放。

## 2.5 施用硝化抑制剂条件下影响蔬菜产量和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的因素分析

利用主成分 (PCA) 分析了在氮肥配施硝化抑制剂的前提下，土壤 pH 值、土壤总氮含量 (TN)、有机碳含量 (SOC)、碳氮比 (C/N) 和氮肥用量与  $\text{N}_2\text{O}$  排放量和蔬菜产量的关系 (图 6)。主成分分析筛选出前两个主成分，累积方差分别为 61.7%、59.8%。



ONF 表示施用氮肥 (未添加硝化抑制剂)；  
NIs 表示氮肥配施硝化抑制剂

图 5 氮肥配施硝化抑制剂条件下氮肥用量和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的关系

Fig. 5 Relationship between the amount of nitrogen fertilizer and nitrous oxide emission under the condition of combined application of nitrogen fertilizer and nitrification inhibitor

通过主成分分析发现，土壤中的总氮含量是影响蔬菜生产  $\text{N}_2\text{O}$  排放和蔬菜产量的主要因素，并且总氮含量与蔬菜  $\text{N}_2\text{O}$  排放和产量呈正相关性。然而，在氮肥配施硝化抑制剂的条件下氮肥用量和  $\text{N}_2\text{O}$  排放、蔬菜产量的关系正相关性较弱。土壤中的 C/N 与蔬

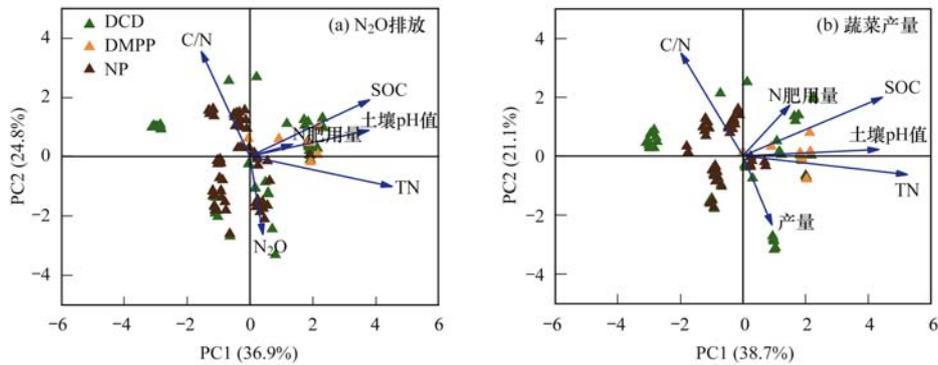


图 6 氮肥配施硝化抑制剂条件下土壤理化性质和氮肥用量与 $N_2O$ 排放和蔬菜产量的主成分分析

Fig. 6 Principal component analysis of soil physical and chemical properties, nitrogen fertilizer rate, and  $N_2O$  emission and vegetable yield under combined application of nitrogen fertilizer and nitrification inhibitor

菜 $N_2O$ 排放和产量都呈负相关关系。

### 3 讨论

#### 3.1 硝化抑制剂对蔬菜产量和 $N_2O$ 排放的影响

硝化抑制剂可抑制土壤硝化作用中的氨氧化细菌(AOB)和氨氧化古菌(AOA)或相关酶活性<sup>[25]</sup>, 延缓铵态氮向硝态氮的转换, 有效地延长氮肥的肥效和阻止氮素流失<sup>[26]</sup>, 同时土壤中的盐基离子如 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 和 $Mg^{2+}$ 的淋溶损失相应降低<sup>[27]</sup>, 增加作物对氮素、盐基离子的吸收量, 进而增加作物产量提高氮肥利用率。另一方面, 能保持长时间高含量的铵态氮, 有效缓解硝态氮的累积, 减少土壤反硝化底物浓度<sup>[28,29]</sup>, 从而减少土壤中的 $N_2O$ 排放。本研究结果表明, 与施用氮肥(未添加硝化抑制剂)相比, 氮肥配施硝化抑制剂显著增加蔬菜产量 9.2%, 提高植株氮吸收 10.4% 和氮肥利用率 11.2%, 同时, 显著减少 $N_2O$ 排放 28.4% (图 2)。硝化抑制剂对蔬菜系统的增产效应稍高于粮食作物系统(7.0%)<sup>[30]</sup>, 但是对 $N_2O$ 减排效果低于粮食作物系统(50.0%)<sup>[12,14]</sup>。Yang 等<sup>[12]</sup>对 DCD 和 DMPP 的田间应用效果进行整合分析发现, DCD 和 DMPP 对蔬菜作物的增产效果均高于粮食作物。Gao 等<sup>[31]</sup>的研究发现硝化抑制剂对蔬菜系统 $N_2O$ 减排效果(26.0%)显著低于小麦(47.0%)和水稻系统(49.0%)。由于蔬菜作物特殊的生物学特性(根系浅, 养分吸收能力弱; 生育期短, 复种指数高; 养分需求量大)和社会经济学特性<sup>[32]</sup>(肥料投入成本高, 单位产量施肥成本低, 误导农民大量施肥), 造成大量水分和肥料的投入, 尤其是氮肥。两个系统的水肥投入的巨大差异造成土壤理化性质(土壤 pH 和有机质含量等)和土壤含水量的不同<sup>[33]</sup>, 导致硝化抑制剂在两种作物系统具有明显差异。硝化抑制剂在蔬菜和粮食系统对 $N_2O$ 减排效果差异较大, 主要因为两个系统间土壤本底、氮肥施用量和作物类型的不一致, 共同

导致土壤硝化或反硝化的反应底物浓度出现差异, 最终影响硝化抑制剂的 $N_2O$ 减排效果。例如, 过量施用氮肥导致菜地土壤酸化严重, 土壤 pH 值和碳氮比较粮食作物农田土壤低, 硝化-反硝化过程相关微生物活性弱, 降低 $N_2O$ 排放强度<sup>[33,34]</sup>, 是导致硝化抑制剂在蔬菜系统对 $N_2O$ 的减排效果低于粮食作物系统的原因之一。

#### 3.2 不同生产条件下硝化抑制剂对蔬菜产量和 $N_2O$ 排放的影响

土壤 pH 是调控硝化抑制剂应用效果的主要因素之一(图 6)。本研究表明, 硝化抑制剂能够显著提高中性和碱性土壤上的蔬菜产量, 但对酸性土壤增产效果不明显[图 3(a)], 这与先前研究结果一致<sup>[35]</sup>。导致这一差异的原因在于, 氮肥的施入极大激发中性和碱性土壤的硝化作用<sup>[36]</sup>, 而低 pH 条件下土壤硝化作用微弱<sup>[37]</sup>; 高强度的硝化作用保证作物苗期充足的氮素营养供应, 且硝化抑制剂的添加有效地延长氮肥肥效, 满足作物后期的生长对氮素营养的需求<sup>[26]</sup>, 有助于作物产量的增加, 进而提高氮肥利用率。 $N_2O$ 主要由微生物的硝化和反硝化作用产生, 硝化作用为反硝化过程提供底物来源<sup>[38]</sup>。硝化作用是一个以氨氧化菌(AOB)和氨氧化古菌(AOA)为主导的生化过程。有研究证实<sup>[39]</sup>, 土壤 pH 主导着氨氧化微生物的生态位, 在中性和碱性土壤的硝化作用 AOB(氨氧化细菌)发挥主要作用, AOA(氨氧化古菌)主导着酸性土壤的硝化作用。Beeckman 等<sup>[25]</sup>基于文献综述发现, DCD、DMPP 和 NP 这 3 种硝化抑制剂对 AOB 的抑制效果显著高于 AOA。因此, 硝化抑制剂降低反硝化底物的供应强度在碱性和中性土中大于酸性土<sup>[12]</sup>, 进而解释了本研究中硝化抑制剂对 $N_2O$ 的减排幅度在中性和碱性菜地土壤要高于酸性土的原因。

在不同氮肥用量下, 硝化抑制剂对蔬菜的增产

效应和 $N_2O$ 减排效应有所差异. 本研究结果显示, 氮肥配施硝化抑制剂的条件下, 氮肥用量与产量呈负相关性[图 6(b)], 即随着氮肥用量增加, 硝化抑制剂的增产效应呈降低的趋势[图 4(a)]. Min 等<sup>[17]</sup>通过田间试验表明, 氮肥用量相对较低时配施硝化抑制剂能更有效地促进蔬菜的增产, 提高氮肥利用率, 并且这一趋势在其他作物上也得到了证实<sup>[40,41]</sup>. 本研究中, $N_2O$ 排放量随氮肥用量的增加以指数函数形式响应(图 5), 这与李巧玲<sup>[42]</sup>和邱炜红等<sup>[43]</sup>的研究得出不同蔬菜季土壤 $N_2O$ 排放量因氮肥用量增多以指数增加的结果相一致. 此外, 本研究中添加硝化抑制剂的 $N_2O$ 排放与氮肥用量的响应曲线在只施用氮肥曲线之下, 且随着氮肥用量的增加, 差距逐渐增大(图 5), 从而解释了本研究中随着氮肥用量的增加, 硝化抑制剂减少 $N_2O$ 排放的作用效果随之增加的原因.

DMPP、DCD 和 NP 是当前施用最为广泛的 3 种硝化抑制剂, 不同类型硝化抑制剂对蔬菜的增产效应和 $N_2O$ 减排效应存在差异<sup>[31,44]</sup>. 本研究中 NP 和 DMPP 对蔬菜的增产幅度、提高氮肥利用率和 $N_2O$ 减排幅度均优于 DCD. Gao 等<sup>[31]</sup>通过 Meta 分析评估了常用的 3 种硝化抑制剂对作物和环境的效益发现, 添加硝化抑制剂能够使作物增产 5.8% ~ 12.0%, 减少 30.4% ~ 60.1%  $N_2O$ 排放, 同时 DMPP 和 NP 提高氮肥利用率的效果高于 DCD. 不同硝化抑制剂增加作物产量和抑制 $N_2O$ 排放的能力取决于其本身的特性<sup>[45]</sup>、用量<sup>[46]</sup>和土壤生态条件<sup>[47]</sup>等, 而这些因素的叠加效应增大了不同类型硝化抑制剂田间应用效果的差异性.

从不同栽培类型来看, 硝化抑制剂在露地栽培中的增产效应和 $N_2O$ 减排的能力要高于设施栽培[图 3(a)和图 4(a)]. 可能原因在于, 一方面设施蔬菜以果菜类为主, 露地蔬菜以叶菜类和根菜类为主, 本研究结果显示硝化抑制剂对果菜类的增产作用和 $N_2O$ 减排幅度均低于叶菜类和根菜类蔬菜; 另一方面, 设施栽培氮肥用量远高于露地菜地<sup>[48]</sup>, 这种过量氮肥的投入可能掩盖硝化抑制剂促进设施菜地增产的效果. 由于长期过量氮肥的施用, 设施菜地土壤 pH 随种植年限增加而显著降低<sup>[49,50]</sup>, 较露地菜地而言, 设施菜地土壤酸化和盐渍化严重<sup>[51]</sup>; 此外, 设施蔬菜灌水频繁, 增加表层土壤硝酸盐向下层的迁移, 硝酸盐淋洗量增加<sup>[52]</sup>, 减少 $N_2O$ 的排放, 这些因素可能会降低硝化抑制剂对设施蔬菜的增产效应和 $N_2O$ 减排效果.

### 3.3 不确定分析

本研究基于 Meta 分析的研究方法, 综合量化了

氮肥配施硝化抑制剂在不同生产条件下对蔬菜产量、植株氮吸收、NUE 和 $N_2O$ 排放的影响程度. 然而, 本研究也存在一些不确定性. 首先, 由于缺乏足够的样本, 在数据分类时土壤因素只考虑土壤 pH 值的影响, 因而不能全面评估不同土壤理化性质下添加硝化抑制剂的影响; 其次, 3 种类型硝化抑制剂应用于蔬菜生产样本量并不均匀并且有关硝化抑制剂对根菜和果菜类蔬菜田间应用效果的研究相对较少, 导致在比较不同类型硝化抑制剂、硝化抑制剂对不同类型蔬菜的田间应用效果的差异时准确性降低. 因此, 为了更准确的评价硝化抑制剂对我国蔬菜增产效应和 $N_2O$ 减排效应的影响, 未来需要在多个地点进行多种蔬菜品种多年持续的田间研究.

## 4 结论

(1) 在我国蔬菜生产系统中, 氮肥配施硝化抑制剂能够显著提高蔬菜产量(9.2%)、植株氮吸收(10.4%)和氮肥利用率(11.2%), 同时减少 $N_2O$ 排放(28.4%).

(2) 不同硝化抑制剂类型中, NP 和 DMPP 对增产效应、提高氮肥利用率和 $N_2O$ 减排效应的影响幅度强于 DCD. 硝化抑制剂在不同氮肥用量中能提高蔬菜产量(6.7% ~ 14.7%)和减少 $N_2O$ 排放(14.6% ~ 36.8%). 硝化抑制剂在酸性或是碱性菜地、设施或是露地栽培、根菜类和叶菜类的条件下对产量的增加和 $N_2O$ 的减排效果较好.

(3) 土壤总氮含量和土壤 pH 是硝化抑制剂施用条件下促进蔬菜产量形成和驱动 $N_2O$ 排放的主要因素.

### 参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴-2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [2] Wang X Z, Zou C Q, Zhang Y Q, et al. Environmental impacts of pepper (*Capsicum annuum* L) production affected by nutrient management: a case study in Southwest China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 171: 934-943.
- [3] Li B, Bi Z C, Xiong Z Q. Dynamic responses of nitrous oxide emission and nitrogen use efficiency to nitrogen and biochar amendment in an intensified vegetable field in southeastern China[J]. GCB-Bioenergy, 2017, 9(2): 400-413.
- [4] Song X Z, Zhao C X, Wang X L, et al. Study of nitrate leaching and nitrogen fate under intensive vegetable production pattern in northern China[J]. Comptes Rendus Biologies, 2009, 332(4): 385-392.
- [5] Coskun D, Britto D T, Shi W M, et al. Nitrogen transformations in modern agriculture and the role of biological nitrification inhibition[J]. Nature Plants, 2017, 3(6), doi: 10.1038/nplants.2017.74.
- [6] Xiong Z Q, Xie Y X, Xing G X, et al. Measurements of nitrous oxide emissions from vegetable production in China[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(12): 2225-2234.

- [ 7 ] Min J, Lu K P, Sun H J, *et al.* Global warming potential in an intensive vegetable cropping system as affected by crop rotation and nitrogen rate[J]. *Clean: Soil, Air, Water*, 2016, **44**(7): 766-774.
- [ 8 ] Wang X Z, Zou C Q, Gao X P, *et al.* Nitrous oxide emissions in Chinese vegetable systems: a meta-analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **239**: 375-383.
- [ 9 ] Adhikari K P, Chibuike G, Saggari S, *et al.* Management and implications of using nitrification inhibitors to reduce nitrous oxide emissions from urine patches on grazed pasture soils-A review [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **791**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148099.
- [ 10 ] Tei F, De Neve S, de Haan J, *et al.* Nitrogen management of vegetable crops [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, **240**, doi: 10.1016/j.agwat.2020.106316.
- [ 11 ] Sha Z P, Ma X, Wang J X, *et al.* Effect of N stabilizers on fertilizer-N fate in the soil-crop system: a meta-analysis [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, **290**, doi: 10.1016/j.agee.2019.106763.
- [ 12 ] Yang M, Fang Y T, Sun D, *et al.* Efficiency of two nitrification inhibitors (diacyandiamide and 3, 4-dimethylpyrazole phosphate) on soil nitrogen transformations and plant productivity: a meta-analysis [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**, doi: 10.1038/srep22075.
- [ 13 ] Abalos D, Jeffery S, Sanz-Cobena A, *et al.* Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **189**: 136-144.
- [ 14 ] Kanter D R, Searchinger T D. A technology-forcing approach to reduce nitrogen pollution [J]. *Nature Sustainability*, 2018, **1**(10): 544-552.
- [ 15 ] Zhang F, Liu F B, Ma X, *et al.* Greenhouse gas emissions from vegetables production in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **317**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128449.
- [ 16 ] 郭广正, 张芬, 沈远鹏, 等. 减氮配施硝化抑制剂对大白菜农学和环境效应评价 [J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**(10): 2307-2315.
- Guo G Z, Zhang F, Shen Y P, *et al.* Comprehensive assessment of the agronomic and environmental effects of N application rate reduction combined with nitrification inhibitor on Chinese cabbage [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(10): 2307-2315.
- [ 17 ] Min J, Sun H J, Kronzucker H J, *et al.* Comprehensive assessment of the effects of nitrification inhibitor application on reactive nitrogen loss in intensive vegetable production systems [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, **307**, doi: 10.1016/j.agee.2020.107227.
- [ 18 ] Fan C H, Li B, Xiong Z Q. Nitrification inhibitors mitigated reactive gaseous nitrogen intensity in intensive vegetable soils from China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**: 480-489.
- [ 19 ] Zhang X. A plan for efficient use of nitrogen fertilizers [J]. *Nature*, 2017, **543**(7645): 322-323.
- [ 20 ] Zhang M, Fan C H, Li Q L, *et al.* A 2-yr field assessment of the effects of chemical and biological nitrification inhibitors on nitrous oxide emissions and nitrogen use efficiency in an intensively managed vegetable cropping system [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, **201**: 43-50.
- [ 21 ] Singh J, Saggari S, Giltrap D L, *et al.* Decomposition of diacyandiamide (DCD) in three contrasting soils and its effect on nitrous oxide emission, soil respiratory activity, and microbial biomass-an incubation study [J]. *Soil Research*, 2008, **46**(7): 517-525.
- [ 22 ] Hedges LV, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology [J]. *Ecology*, 1999, **80**(4): 1150-1156.
- [ 23 ] Chen G, Liu S B, Xiang Y Z, *et al.* Impact of living mulch on soil C: N: P stoichiometry in orchards across China: a meta-analysis examining climatic, edaphic, and biotic dependency [J]. *Pedosphere*, 2020, **30**(2): 181-189.
- [ 24 ] Wallace B C, Lajeunesse M J, Dietz G, *et al.* *OpenMEE*: intuitive, open-source software for meta-analysis in ecology and evolutionary biology [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2017, **8**(8): 941-947.
- [ 25 ] Beeckman F, Motte H, Beeckman T. Nitrification in agricultural soils: impact, actors and mitigation [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2018, **50**: 166-173.
- [ 26 ] Nair D, Baral K R, Abalos D, *et al.* Nitrate leaching and nitrous oxide emissions from maize after grass-clover on a coarse sandy soil: Mitigation potentials of 3, 4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110165.
- [ 27 ] Elrys A S, Raza S, Elnahal A S M, *et al.* Do soil property variations affect diacyandiamide efficiency in inhibiting nitrification and minimizing carbon dioxide emissions? [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **202**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110875.
- [ 28 ] Cui P Y, Fan F L, Yin C, *et al.* Urea-and nitrapyrin-affected N<sub>2</sub>O emission is coupled mainly with ammonia oxidizing bacteria growth in microcosms of three typical Chinese arable soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **66**: 214-221.
- [ 29 ] Yang L Q, Zhu G D, Ju X T, *et al.* How nitrification-related N<sub>2</sub>O is associated with soil ammonia oxidizers in two contrasting soils in China? [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **770**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143212.
- [ 30 ] Thapa R, Chatterjee A, Awale R, *et al.* Effect of enhanced efficiency fertilizers on nitrous oxide emissions and crop yields: a meta-analysis [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2016, **80**(5): 1121-1134.
- [ 31 ] Gao J C, Luo J F, Lindsey S, *et al.* Benefits and risks for the environment and crop production with application of nitrification inhibitors in China [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2021, **21**(1): 497-512.
- [ 32 ] Wang X Z, Dou Z X, Shi X J, *et al.* Innovative management programme reduces environmental impacts in Chinese vegetable production [J]. *Nature Food*, 2021, **2**(1): 47-53.
- [ 33 ] Wang R, Min J, Kronzucker H J, *et al.* N and P runoff losses in China's vegetable production systems: loss characteristics, impact, and management practices [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **663**: 971-979.
- [ 34 ] He T H, Yuan J J, Xiang J, *et al.* Combined biochar and double inhibitor application offsets NH<sub>3</sub> and N<sub>2</sub>O emissions and mitigates N leaching in paddy fields [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **292**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.118344.
- [ 35 ] Qasim W, Xia L L, Lin S, *et al.* Global greenhouse vegetable production systems are hotspots of soil N<sub>2</sub>O emissions and nitrogen leaching: A meta-analysis [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **272**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.116372.
- [ 36 ] Cui P Y, Fan F L, Yin C, *et al.* Long-term organic and inorganic fertilization alters temperature sensitivity of potential N<sub>2</sub>O emissions and associated microbes [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, **93**: 131-141.

- [37] Wang Z H, Meng Y, Zhu-Barker X, *et al.* Responses of nitrification and ammonia oxidizers to a range of background and adjusted pH in purple soils[J]. *Geoderma*, 2019, **334**: 9-14.
- [38] Charles A, Rochette P, Whalen J K, *et al.* Global nitrous oxide emission factors from agricultural soils after addition of organic amendments; a meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, **236**: 88-98.
- [39] Li Y Y, Chapman S J, Nicol G W, *et al.* Nitrification and nitrifiers in acidic soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **116**: 290-301.
- [40] Chen H, Zhou J, Li B, *et al.* Yield-scaled N<sub>2</sub>O emissions as affected by nitrification inhibitor and overdose fertilization under an intensively managed vegetable field; a three-year field study [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **206**: 247-257.
- [41] Sun H J, Zhang H L, Powlson D, *et al.* Rice production, nitrous oxide emission and ammonia volatilization as impacted by the nitrification inhibitor 2-chloro-6-(trichloromethyl)-pyridine[J]. *Field Crops Research*, 2015, **173**: 1-7.
- [42] 李巧玲. 硝化抑制剂对蔬菜地生态系统氮肥响应曲线的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.  
Li Q L. Effect of nitrification inhibitor on the response curve of nitrogen fertilizer in vegetable ecosystem[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.
- [43] 邱伟红, 刘金山, 胡承孝, 等. 不同施氮水平对菜地土壤N<sub>2</sub>O排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(11): 2238-2243.  
Qiu W H, Liu J S, Hu C X, *et al.* Effects of nitrogen application rates on nitrous oxide emission from a typical intensive vegetable cropping system [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, **29**(11): 2238-2243.
- [44] Woodward E E, Edwards T M, Givens C E, *et al.* Widespread use of the nitrification inhibitor nitrapyrin: Assessing benefits and costs to agriculture, ecosystems, and environmental health[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55**(3): 1345-1353.
- [45] Barth G, von Tucher S, Schmidhalter U. Influence of soil parameters on the effect of 3,4-dimethylpyrazole-phosphate as a nitrification inhibitor[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, **34**(2): 98-102.
- [46] 王雪薇, 刘涛, 褚贵新. 三种硝化抑制剂抑制土壤硝化作用比较及用量研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, **23**(1): 54-61.  
Wang X W, Liu T, Chu G X. Inhibition of DCD, DMPP and Nitrapyrin on soil nitrification and their appropriate use dosage [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, **23**(1): 54-61.
- [47] 孙志梅, 武志杰, 陈利军, 等. 硝化抑制剂的施用效果、影响因素及其评价[J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(7): 1611-1618.  
Sun Z M, Wu Z J, Chen L J, *et al.* Application effect, affecting factors, and evaluation of nitrification inhibitor; a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, **19**(7): 1611-1618.
- [48] 黄绍文, 唐继伟, 李春花, 等. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, **23**(6): 1480-1493.  
Huang S W, Tang J W, Li C H, *et al.* Reducing potential of chemical fertilizers and scientific fertilization countermeasure in vegetable production in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, **23**(6): 1480-1493.
- [49] Ju X T, Kou C L, Christie P, *et al.* Changes in the soil environment from excessive application of fertilizers and manures to two contrasting intensive cropping systems on the North China Plain[J]. *Environmental Pollution*, 2007, **145**(2): 497-506.
- [50] Tian D S, Niu S L. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, **10**(2), doi: 10.1088/1748-9326/10/2/024019.
- [51] Shen W S, Lin X G, Shi W M, *et al.* Higher rates of nitrogen fertilization decrease soil enzyme activities, microbial functional diversity and nitrification capacity in a Chinese polytunnel greenhouse vegetable land[J]. *Plant and Soil*, 2010, **337**(1-2): 137-150.
- [52] Bai X L, Zhang Z B, Cui J J, *et al.* Strategies to mitigate nitrate leaching in vegetable production in China; a meta-analysis[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(15): 18382-18391.

## CONTENTS

Challenges Regarding the Co-emission of Emerging Pollutants to Eco-environmental Monitoring and Management .....	WANG Pei, HUANG Xin-yi, CAO Zhi-wei, <i>et al.</i> (4801)
Environmental Process, Effects and Risks of Emerging Contaminants in the Estuary-Coastal Environment .....	WANG Xin-hong, YU Xiao-xuan, WANG Si-quan, <i>et al.</i> (4810)
Research Progress of Analytical Methods with Molecular Spectroscopy for Determination of Trace Nutrients and Metals in Seawaters .....	YUAN Dong-xing, HUANG Yong-ming, WANG Ting (4822)
Research Progress on the Determination of Sulfide in Natural Waters: From Laboratory Analysis to In-Situ Monitoring .....	LI Peng, LIN Kun-de, YUAN Dong-xing (4835)
Advances in On-site Analytical Methods for Inorganic Arsenic in Environmental Water .....	BO Guang-yong, CHEN Zhao-ying, GONG Zhen-bin, <i>et al.</i> (4845)
Advances and Prospect of Sampling Techniques and Analytical Methods for Trace Elements in the Ocean; Progress of Trace Element Platform Construction in Xiamen University .....	..... HUANG Yong-ming, ZHOU Kuan-bo, CHEN Yao-jin, <i>et al.</i> (4858)
Biodegradation of Polyethylene Microplastic: A Review .....	..... LUO Yuan-rong, QIAN Yi-qian, QI Ya-nan (4869)
Mechanism and Environmental Effect on Nitrogen Addition to Microbial Process of Arsenic Immobilization in Flooding Paddy Soils .....	WANG Feng, ZHANG Jing, ZHOU Shao-yu, <i>et al.</i> (4876)
Toxicity Testing Organisms for Marine Ecotoxicological Research in China .....	SHI Tian-yi, HONG Hai-zheng, WANG Ming-hua, <i>et al.</i> (4888)
Estimating Methane Fugitive Emissions from Oil and Natural Gas Systems in China .....	CHEN Chun-ci, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen (4905)
Atmospheric NH <sub>3</sub> Emission Inventory and Its Tempo-spatial Changes in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region from 2015 to 2020 .....	LI Xiang, WU Shui-ping, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (4914)
Distribution of Microplastic and Antibiotic Resistance Gene Pollution in Jiulong River Estuary .....	..... CHENG Hong, CHEN Rong (4924)
Pollution Characteristics of Microplastics in Sediments of Xiamen Bay Beach .....	..... YAO Rui, LIU Hua-tai, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (4931)
Spatial and Temporal Distribution and Influencing Factors of Dissolved Trace Metals in Jiulong River Estuary and Xiamen Bay .....	..... QI Liu-qian, YUE Xin-li, ZHONG Hao-wen, <i>et al.</i> (4939)
Spatiotemporal Characteristics of Dissolved Oxygen and Control Mechanism of Hypoxia (Low Oxygen) in the Watershed-Coastal System in Fujian Province .....	..... YANG Ai-lin, YANG Fang, LI Shao-bin, <i>et al.</i> (4950)
Distribution, Migration, and Transformation Mechanism of Labile Phosphorus in Sediments of Xixi River Estuary, Xiamen .....	..... PAN Feng, CAI Yu, GUO Zhan-rong, <i>et al.</i> (4961)
Adsorption of Mn <sup>2+</sup> by Modified Biochar Fixed Bed in Simulated Lakes and Reservoir Waters .....	..... ZHAO Jie, YE Zhi-long, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (4971)
Rapid Detection of Trace Enrofloxacin and Ciprofloxacin in Drinking Water by SERS .....	..... XU Jing, ZHENG Hong, LU Jiang-long, <i>et al.</i> (4982)
Degradation of Triphenyl Phosphate in Water by UV-driven Advanced Oxidation Processes .....	..... XU Zi-wen, YIN Hong-ling, XIONG Yuan-ming, <i>et al.</i> (4992)
Characteristics and Potential Sources of Four Ozone Pollution Processes in Hainan Province in Autumn of 2019 .....	..... FU Chuan-bo, CHEN Hong, DAN Li, <i>et al.</i> (5000)
Characterization and Formation Mechanism of Water-soluble Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> in Summer in the Urban Agglomeration of the Ili River Valley .....	..... CHEN Qiao, GU Chao, XU Tao, <i>et al.</i> (5009)
Difference in PM <sub>2.5</sub> Pollution and Transport Characteristics Between Urban and Suburban Areas .....	..... QI Peng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (5018)
Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Northern Suburbs of Nanjing .....	..... FENG Yue-zheng, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (5030)
Ecological Risk Assessment of Microplastics Occurring in Surface Water of Terrestrial Water Systems across China .....	..... SUN Xiao-nan, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i> (5040)
Scale Effects of Landscape Pattern on Water Quality in Dongjiang River Source Watershed .....	..... CHEN You-liang, ZOU Wen-min, LIU Xing-gen, <i>et al.</i> (5053)
Mercury Speciation, Distribution, and Potential Sources in Surface Waters of the Yangtze and Yellow River Source Basins of Tibetan Plateau During Wet Season .....	..... LIU Nan-tao, WU Fei, YUAN Wei, <i>et al.</i> (5064)
Water Environmental Characteristics and Water Quality Assessment of Lakes in Tibetan Plateau .....	..... LIU Zhi-qi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (5073)
Karst Hydrogeochemical Characteristics and Controlling Factors of Carlin-type Gold Mining Area Based on Hydrochemistry and Sulfur Isotope .....	..... ZHA Xue-fang, WU Pan, LI Xue-xian, <i>et al.</i> (5084)
Characteristics of Eukaryotic Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Danjiangkou Reservoir .....	..... HE Yu-xiao, MAI Si-jie, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (5096)
Adsorption of Phosphate and Heavy Metals by Lanthanum Modified Zeolite and Its Performance in Sediment Inactivation .....	..... WANG Zhe, ZHU Jun, LI Wen, <i>et al.</i> (5106)
Metagenomic and Metatranscriptomic Analysis of Nitrogen Removal Functional Microbial Community of Petrochemical Wastewater Biological Treatment Systems .....	..... ZHANG Xu, ZHOU Jia-jia, ZHOU Min, <i>et al.</i> (5115)
Bacterial Community Structure and Antibiotic Resistance Gene Changes in IFAS + Magnetic Coagulation Process Wastewater Treatment Plant in Cold Regions .....	..... DU Wen-yan, YAO Jun-qin, MA Hui-ying, <i>et al.</i> (5123)
Nitric Oxide Emissions from Chinese Upland Cropping Systems and Mitigation Strategies: A Meta-analysis .....	..... TIAN Zheng-yun, WU Xiong-wei, WU Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Nitrification Inhibitors on Vegetable Production Yield, Nitrogen Fertilizer Use Efficiency and Nitrous Oxide Emission Reduction in China: Meta Analysis .....	..... LIU Fa-bo, MA Xiao, ZHANG Fen, <i>et al.</i> (5140)
Effect of Different Fertilization Treatments on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region, China .....	..... SHAO Xiao-hui, TANG Shui-rong, MENG Lei, <i>et al.</i> (5149)
Effects of Land-use Conversion on Soil Nitrification and NO & N <sub>2</sub> O Emissions in Tropical China Under Different Moisture Conditions .....	..... TANG Rui-jie, HU Yu-jie, ZHAO Cai-yue, <i>et al.</i> (5159)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of the Yangtze River Economic Belt Based on Bibliometric Analysis .....	..... LIU Xiao-yan, FAN Ya-nan, LIU Peng, <i>et al.</i> (5169)
Spatial and Temporal Distribution and Source Variation of Heavy Metals in Cultivated Land Soil of Xiangzhou District Based on EBK Interpolation Prediction and GDM Model .....	..... GAO Hao-ran, ZHOU Yong, LIU Jia-kang, <i>et al.</i> (5180)
Identification of Soil Heavy Metal Sources Around a Copper-silver Mining Area in Ningxia Based on GIS .....	..... ZHANG Kou-kou, HE Jing, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5192)
Effect of Aging on Stabilization of Cd <sup>2+</sup> Through Biochar Use in Alkaline Soil of Bayan Obo Mining Area .....	..... WANG Zhe, CHENG Jun-li, BIAN Yuan, <i>et al.</i> (5205)
Preparation of Magnetic Iron Oxide/Mulberry Stem Biochar and Its Effects on Dissolved Organic Carbon and Arsenic Speciation in Arsenic-Contaminated Soils .....	..... LU Lin, YAN Li-ling, LIANG Mei-na, <i>et al.</i> (5214)
Effects of Oyster Shell Powder and Lime on Availability and Forms of Phosphorus and Enzyme Activity in Acidic Paddy Soil .....	..... ZHAO Li-fang, HUANG Peng-wu, YANG Cai-di, <i>et al.</i> (5224)
Effects of Interaction of Zinc and Cadmium on Growth and Cadmium Accumulation of <i>Brassica campestris</i> L. ....	..... SHUAI Zu-ping, LIU Han-yi, CUI Hao, <i>et al.</i> (5234)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in Vegetable Field in Kaizhou, Chongqing .....	..... FANG Lin-fa, YE Ping-ping, FANG Biao, <i>et al.</i> (5244)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Carbon Storage in the Source Region of the Yellow River Based on InVEST and GeoSoS-FLUS Models and Its Response to Different Future Scenarios .....	..... HOU Jian-kun, CHEN Jian-jun, ZHANG Kai-qi, <i>et al.</i> (5253)
Carbon Sequestration Characteristics of Different Restored Vegetation Types in Loess Hilly Region .....	..... XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, HE Liang, <i>et al.</i> (5263)
Response of Soil Multifunctionality to Reduced Microbial Diversity .....	..... CHEN Gui-xian, WU Chuan-fa, GE Ti-da, <i>et al.</i> (5274)
Effect of Nitrogen Addition on Soil Fungal Diversity in a Degraded Alpine Meadow at Different Slopes .....	..... SU Xiao-xue, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (5286)
Comparative Energy Consumption Structure and Mode between China and Major Energy-Consuming Countries Under the Background of Carbon Emission Reduction .....	..... LI Hui, PANG Bo, ZHU Fa-hua, <i>et al.</i> (5294)
Spatialization and Spatio-temporal Dynamics of Energy Consumption Carbon Emissions in China .....	..... HAO Rui-jun, WEI Wei, LIU Chun-fang, <i>et al.</i> (5305)
Carbon Dioxide Mitigation Co-effect Analysis of Structural Adjustment Measures in the "2+26" Cities in the Jing-Jin-Ji Region and Its Surroundings .....	..... YANG Tian-qi, WANG Hong-chang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (5315)
Policy Analysis in Plastic Pollution Governance and Recommendations in China .....	..... LI Huan, ZHU Long, SHEN Qian, <i>et al.</i> (5326)