

目次

加速能源转型与产业结构调整的环境健康协同效益评估:以京津冀鲁地区为例	杨玺, 孙奕生, 常世彦, 李胜悦, 郑昊天, 王书肖, 张希良 (3627)
基于不同电力需求的中国减排降碳协同增效路径	向梦宇, 王深, 吕连宏, 张楠, 白梓函 (3637)
城市碳达峰碳中和行动评估方法与应用	张保留, 白梓函, 张楠, 吕连宏, 阳平坚 (3649)
基于可解释性机器学习的城市 O ₃ 驱动因素挖掘	董佳奇, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 张辉辉, 牛月圆, 段小琳 (3660)
基于响应曲面法的臭氧生成敏感性分析	朱禹寰, 陈冰, 张雅茹, 刘晓, 李光耀, 舍静, 陈强 (3669)
基于 WRF-CMAQ/ISAM 模型的榆林市夏季 O ₃ 来源解析	王伊凡, 仝纪龙, 陈羽翔, 林鑫, 刘永乐, 敖丛杰, 刘浩天 (3676)
基于轻量级梯度提升机的南京大气臭氧浓度预测	朱珈莹, 安俊琳, 冯悦政, 贺婕, 张玉欣, 王俊秀 (3685)
2022 年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析	李婷苑, 陈靖扬, 龚宇, 沈劲 (3695)
夏季对流层臭氧辐射强迫对华北地区天气和空气质量的影响	杜楠, 陈磊, 廖宏, 朱佳, 李柯 (3705)
气象、本地光化学生成和外围传输对长沙市 2018~2020 年臭氧污染趋势变化影响的识别	杨俊, 杨雷峰, 丁华, 谢丹平, 刘妍妍, 余涛, 吕明, 袁自冰 (3715)
2000~2021 年成渝城市群 PM _{2.5} 时空变化及驱动机制多维探测	徐勇, 郭振东, 郑志威, 戴强玉, 赵纯, 黄雯婷 (3724)
基于 GTWR-XGBoost 模型的四川省 PM _{2.5} 小时浓度估算	吴迪, 杜宁, 王莉, 吴宇宏, 张少磊, 周彬, 张显云 (3738)
2013~2021 年邢台 PM _{2.5} 重污染过程输送和增长特性	江琪, 盛黎, 靳雨晨, 王继康, 尤媛, 王飞 (3749)
基于高分辨率在线观测数据分析上海市城区秋冬季大气有机气溶胶化学特征及污染来源	朱书慧 (3760)
机动车尾气碳质气溶胶排放因子及其稳定碳同位素特征	于鸣媛, 王谦, 付明亮, 戈畅, 谢峰, 曹芳, 章炎麟 (3771)
沈阳工业区夏季 VOCs 组成特征及其对二次污染形成的贡献	关璐, 苏枫枫, 库盈盈, 胡建林, 于兴娜 (3779)
疫情管控期间深圳市城区 VOCs 的变化特征及减排效果评估	云龙, 林楚雄, 李成柳, 邱志诚, 古添发, 李光程, 张明棣, 郭健锋 (3788)
西安市冬季道路扬尘中有机质组成特征及其氧化潜势	王擎雯, 陈庆彩, 王超, 王瑞鹤, 刘国瑞, 李豪, 李艳广 (3797)
淮北孙疃矿区地表尘中多环芳烃类化合物的污染特征及致癌风险评价	徐振鹏, 钱雅慧, 洪秀萍, 罗钟庚, 高秀龙, 梁汉东 (3809)
雄安建设初期白洋淀水质时空差异及其对降雨和土地利用的响应	王子铭, 杨丽虎, 宋献方 (3820)
流域尺度污染溯源模拟-优化防控方法:以铜陵市顺安河流域为例	刘国王辰, 陈磊, 李佳奇, 张钰晨, 赵奕欣, 刘妍琪, 沈珍瑶 (3835)
南昌市浅层地下水水质评价及监测指标优化	郑紫吟, 储小东, 徐金英, 马志飞 (3846)
闪电河流域“三水”氢氧同位素特征及水体转换分析	杨丽娜, 贾德彬, 高瑞忠, 苏文旭, 卢方园, 郝玉胜 (3855)
金沙江丰富类和稀有类浮游真核微生物的分布特征与影响因素	燕炳成, 崔戈, 孙胜浩, 王沛芳, 王超, 吴程, 陈娟 (3864)
嘉陵江不同干扰断面河道沉积物细菌群落多样性	竹兰萍, 张拓, 李佳宁, 王佳颖, 郭伟亮, 徐飞, 张富斌 (3872)
水库水深变化对不同浮游微生物群落及网络互作关键种的影响	王洵, 廖琴, 王沛芳, 袁秋生, 胡斌, 邢小蕾, 徐浩森 (3881)
典型工业区地下水细菌群落多样性特征与环境因子响应初探	吴建强, 张书源, 王敏, 陈敏, 叶文娟, 熊丽君, 黄沈发 (3892)
太湖流域肥料施用策略调整对典型作物系统氮磷流失的影响	俞映倬, 王逸之, 杨根, 杨林章, 段婧婧, 韩雪梅, 薛利红 (3902)
基于机器学习的长江流域农田氮径流流失负荷估算	张有福, 潘哲祺, 陈丁江 (3913)
千岛湖地区上梧溪流域地表径流非点源氮污染分类识别	俞珂, 严璇, 唐张轩, 张方方, 何圣嘉, 姜培坤 (3923)
沱江和涪江水系干支流氮磷营养盐的空间分布特征	李子阳, 周明华, 徐鹏, 陈露, 刘祥龙, 林洪羽, 江南, 任兵, 张博文 (3933)
外秦淮河底泥污染及疏浚效果	张沐, 任增谊, 张曼, 赵琼, 尹洪斌 (3945)
新污染物多环芳烃衍生物的来源、分布与光化学行为	葛林科, 王子宇, 曹胜凯, 车晓佳, 朱超, 张蓬, 马宏瑞 (3957)
镉砷在针铁矿界面共吸附的相互作用机制	苏子贤, 刘赛红, 管玉峰, 陶亮 (3970)
环糊精催化 Fe-TAML 催化剂的制备及其活化 H ₂ O ₂ 氧化水中有机微污染物	刘清泉, 蔡本哲, 蔡喜运 (3978)
Co(II) 活化过一硫酸盐降解氨基三甲膦酸的性能及反应机制	朱敬林, 汪舒 (3990)
微塑料诱导下污泥造粒潜能变化及微生物富集特征	谢晴帆, 俞楠, 张妮, 谢周云, 单珂欣, 吴亦馨, 唐力, 夏静芬, 杨国靖 (3997)
中国农田土壤 Cd 累积分布特征及概率风险评价	王静, 魏恒, 潘波 (4006)
渝东南典型地质高背景区土壤重金属来源解析及污染评价	蒋玉莲, 余京, 王锐, 王佳彬, 李瑜, 余飞, 张云逸 (4017)
基于 PMF 模型的农田土壤重金属暴露风险综合评价:以浙江省某电子垃圾拆解区为例	方嘉, 何影, 黄乃涛, 支裕优, 傅伟军 (4027)
乌鲁木齐市郊农田土壤及农作物中多环芳烃的污染特征及风险评价	范悦, 曹双瑜, 艾力江·努尔拉, 于芸云江·吗米提敏, 阿不都艾尼·阿不里, 谢宣宣, 古丽斯坦·阿不都拉, 刘河疆 (4039)
荒漠绿洲土壤抗生素抗性基因分布特征及驱动机制	黄福义, 周曙仡, 苏建强, 朱永官 (4052)
近 15 年我国土壤抗生素污染特征与生物修复研究进展	赵晓东, 乔青青, 秦宵睿, 李晓晶, 李永涛 (4059)
改性生物炭修复砷镉复合污染土壤研究进展	吕鹏, 李莲芳, 黄晓雅 (4077)
沼液还田对土壤-作物系统重金属累积的影响:Meta 分析	赵奇志, 杨志敏, 孔凡靖, 熊海灵, 朱康文, 陈玉成 (4091)
两种铁改性生物炭对微碱性砷镉污染土壤的修复效果	梁欣冉, 何丹, 郑墨华, 付庆灵, 胡红青, 朱俊 (4100)
秸秆离田对土壤 Cd 生物有效性及水稻 Cd 积累的影响	王子钰, 周航, 周坤华, 谭文韬, 蒋毅, 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4109)
秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质	赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 王丽, 赵英 (4119)
基于环境 DNA 的复合污染土壤生物评价和胁迫诊断	黄湘云, 钟文军, 刘训杰, 毕婉娟, 钱林皓, 张效伟 (4130)
地质高背景区土壤-玉米重金属综合质量评价	张传华, 王钟书, 张力, 刘燕 (4142)
浙江省蔬菜生产系统重金属污染生态健康风险	张述敏, 刘翠玲, 杨桂玲, 邓美华 (4151)
生物炭配施磷肥对土壤养分、酶活性及紫花苜蓿养分吸收的影响	刘鑫裕, 王冬梅, 张泽洲, 张鹏, 樊桐桐 (4162)
低密度聚乙烯微塑料对空心菜生长和生理特征的影响	周颖, 蒋文婷, 刘训悦, 朱高荻, 唐荣贵, 章海波, 蔡延江 (4170)
沼液施用对麦茬口期土壤微生物群落结构特征及功能的影响	乔宇颖, 奚辉, 李娜, 陈喜靖, 沈阿林, 喻曼 (4179)
大同铅锌尾矿不同污染程度土壤细菌群落分析及生态功能特征	刘泽勋, 庄家尧, 刘超, 郑康, 陈玲 (4191)
马尾松采伐迹地火烧黑炭对土壤有机碳组分和碳转化酶活性的影响	姚智, 焦鹏宇, 吴晓生, 严强, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (4201)
《环境科学》征订启事(3648)	
《环境科学》征稿简则(3659)	
信息(3714, 4150, 4178)	

太湖流域肥料施用策略调整对典型作物系统氮磷流失的影响

俞映惊¹, 王逸之¹, 杨根¹, 杨林章¹, 段婧婧¹, 韩雪梅^{2*}, 薛利红^{1*}

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业部长江下游平原农业环境重点实验室, 南京 210014; 2. 苏州市吴中区农业环境与土壤肥料站, 苏州 215104)

摘要:太湖流域种植业肥料施用强度普遍较高,且以化学肥料为主要形态.因肥料投入不适宜,种植业氮、磷流失问题显著.2015年以来,各地区积极对种植业肥料施用策略进行调整,但当前工作主要基于粮食作物系统且仍停留在化肥施用总量削减和有机肥施用面积提升层面上,缺少菜地、果园、茶园作物系统的相关数据以及对农业环境问题的响应.对此,以苏州市吴中区为太湖流域典型农区代表,研究2019~2021年稻田、菜地、果园和茶园这4类作物系统肥料策略调整对氮、磷流失的影响.结果表明,肥料源养分投入强度的调控是决定氮、磷流失的关键;适宜的有机肥替代比例有助于降低氮、磷流失风险,但有机肥施用需考虑时机并尽可能搭配农用机械.肥料效率是兼顾农业生产过程环境友好、生产主体经济效益的核心,也是后期肥料施用策略调整的导向.稻田系统的肥料施用策略调整应重视养分中不同元素配比,菜地系统应以种植结构调整为抓手,茶园、果园系统可从复合系统视角制定同时满足茶、果生长的施肥策略,助力构建满足农业绿色发展需求的作物系统.

关键词:氮、磷流失;作物系统;肥料策略;太湖流域;稻田;菜地;果园;茶园

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)07-3902-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202207149

Effects of Fertilizer Application Strategy Adjustments on Nitrogen and Phosphorus Loss from Typical Crop Systems in Taihu Lake Region

YU Ying-liang¹, WANG Yi-zhi¹, YANG Bei¹, YANG Lin-zhang¹, DUAN Jing-jing¹, HAN Xue-mei^{2*}, XUE Li-hong^{1*}

(1. Key Laboratory of Agricultural Environment of the Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Suzhou City Wuzhong District Agricultural Environment and Soil Fertilizer Station, Suzhou 215104, China)

Abstract: The intensity of crop farming fertilizer input is generally high in the Taihu Lake Region, with chemical fertilizer as the main form. Due to inappropriate fertilizer application, nitrogen and phosphorus loss have occurred, causing serious agricultural non-point source pollution. The Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China has launched the “zero-growth action for chemical fertilizer use” and “replacement action with organic fertilizer” (“two actions” for short) campaigns since 2015. Local agricultural sectors adjusted fertilizer application strategies of crop farming to respond to the call of two actions. However, the current research is still focusing on reducing the total amount of fertilizer application and increasing the area of organic fertilizer application, which is mainly based on grain crops. The study of agricultural environment problems is still lacking, especially in vegetable, orchard, and tea systems. Therefore, a study was carried out in the typical agricultural area of Suzhou City Wuzhong District from 2019 to 2021. Based on the data of the amount of nitrogen and phosphorus removal by harvest crops and soil nitrogen and phosphorus residual in paddy, vegetable, orchard, and tea systems, the loss was estimated. The responses of nitrogen and phosphorus loss from typical crop systems to fertilizer application strategy adjustments were studied through analysis of different factors. The results showed that fertilizer application rate was the key to control nitrogen and phosphorus loss. Additionally, the suitable replacement ratio of organic fertilizer could further reduce the loss risk. It should be noted that the urgent demand for nutrients in crop growth should be considered to determine the timing of organic fertilizer application, and agricultural machinery should be used to assist organic fertilizer application to reduce labor output if possible. Fertilizer efficiency was the core of environmental friendliness and economic benefits of crop farming. Hence, improving fertilizer efficiency should be the guidance of fertilizer application strategy adjustment. Our suggestions on the adjustment of fertilizer application strategy in different crop systems in the study area are as follows: attention should be paid to the nitrogen, phosphorus, and potassium input ratio in paddy systems to further reduce nitrogen and phosphorus loss. Planting structure adjustment should be emphasized in vegetable systems to promote fertilizer efficiency. The strategy to satisfy both tea and orchard growth from a composite system perspective would help to build crop systems that meet the needs of green agricultural development.

Key words: loss of nitrogen and phosphorus; crop systems; fertilizer application strategy; Taihu Lake Region; paddy field; vegetable plot; orchards; tea plantation

太湖流域农耕历史悠久,自古享有“鱼米之乡”的美誉.水稻是该流域的主要粮食作物,而特色果、菜、茶种植也应有尽有.因地处我国东部经济发达区域,2010年前后太湖流域种植业肥料投入强度普遍较高,且以化学肥料为主要养分来源.研究数据显示,太湖流域稻田系统仅稻季的平均施氮量即超过 $350\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,以化肥为主要养分来源^[1,2];菜地系统单季蔬菜种植的施氮量在 $300\sim 500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,全

年投入量可超过 $1\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[3,4];以桃为代表的果园系统全年施氮量在 $300\sim 800\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间,化肥源养分贡献占比约一半^[5];以高产为目的的茶园

收稿日期: 2022-07-13; 修订日期: 2022-09-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1700801); 江苏现代农业产业技术体系项目(JATS(2021)120)

作者简介: 俞映惊(1986~),女,博士,副研究员,主要研究方向为农田养分循环和面源污染, E-mail: colleen_yu@163.com

* 通信作者, E-mail: 836837495@qq.com; nxjuelihong@gmail.com

系统施氮量达 $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 有机肥来源的养分占比不足 30%^[6~8]. 在如此肥料施用策略下, 太湖流域典型作物系统的当季肥料效率不足 40%, 且存在较高的土壤氮、磷盈余^[9,10]. 由于太湖流域水网密布, 农田到水系的距离大多不足百米. 在灌溉和降水的驱动下, 土壤中盈余的氮、磷极易发生流失, 进入周边水系, 引发农业面源污染^[11,12]. 《全国第二次污染源普查公报》数据显示, 2017 年仅种植业来源的氮、磷流失量就高达 71.95 万 t 和 7.62 万 t, 分别占到总污染排放量的 23.7% 和 24.2%^[13]. 对此, 我国自“十一五”起已启动诸多科研专项, 研究结果表明, 以源头(农田内部)为切入点, 通过减少化肥施用量^[14~17]、调整肥料种类^[18,19]和结构^[20,21]等肥料施用策略调整减少氮、磷排放, 是实现种植业面源污染防控最为有效的手段之一^[22].

“十三五”以来, 农业农村部以农业绿色发展为目标, 以农业生产投入品(化肥和农药)为抓手, 组织开展“化肥使用量零增长行动”^[23]和“果菜茶有机肥替代化肥行动”^[24](简称两个“行动”), 力求通过肥料施用策略调整, 实现化肥的减量增效和氮、磷减排. 苏州市吴中区作为太湖流域的农业生产重要区域, 是农业农村部两个“行动”的先行区域, 于 2020 年在全区尺度上实现了化肥使用量 5% 的减少(较 2015 年年鉴数据^[25]). 值得注意的是, 肥料作为种植业最重要的生产投入品之一, 对其投入总量和投入结构进行调整, 势必影响到作物系统的多个方面. 首先, 肥料作为作物生长养分来源, 施用策略的调整直接决定着作物产量输出及氮、磷养分利用率; 其次, 土壤中氮、磷养分的盈余情况也随之发生变化, 而这部分养分正是发生流失、贡献农业面源污染的主要来源^[12,26]; 此外, 肥料施用策略调整改变了生产主体用于购买肥料(化肥或有机肥)的资金投入以及施用这些肥料产生的劳务费用, 将继而影响生产主体的经济收益, 经济收益的改变又决定着调整后的肥料施用策略是否能够得到生产主体的认可并自发运作.

现有关于两个“行动”的成果展现尚且停留在化肥使用总量、有机肥施用面积等指标上, 且以粮食作物为主要数据产出, 缺少菜地、果园和茶园系统的相关数据, 也未对农业环境问题(如氮、磷流失风险)予以回应. 肥料施用策略调整对稻田、菜地、果园和茶园这 4 大典型作物系统生产、环境和经济的具体影响如何, 化肥减量和有机肥替代哪一项是影响作物系统氮、磷流失风险的关键因素, 不同作物系统是否还存在进一步减量增效的空间, 这些问题有待解答. 对此, 本研究以苏州市吴中区为典型太

湖流域农业种植区, 调研该区域在 2019~2021 年对两个“行动”在稻田、菜地、果园和茶园这 4 类作物系统的践行情况; 通过对年际肥料源养分生产效率和收获期土壤氮、磷流失风险的估算, 研究不同作物系统对肥料施用策略调整的响应; 参比 2015 年数据^[25], 分析各作物系统在时间轴上肥料源养分投入变化特征以及氮、磷流失的变化趋势, 结合对策略影响下经济效益的变化分析, 预判支持各作物系统肥料增效减排的技术方向, 以期持续推进化肥减量增效, 破解农业环境问题提供支持.

1 材料与方法

1.1 肥料施用策略调研

本研究以苏州市吴中区为太湖流域的典型农业生产区, 以种植不同类型作物的生产主体为样本单元. 连续 3 a(2019~2021 年), 对稻田、菜地(包含大棚蔬菜、露天蔬菜、水生蔬菜)、果园(包含枇杷、杨梅、柑橘)和茶园这 4 类作物系统全年肥料施用情况展开调研. 调研以生产主体的耕作面积大小为导向, 兼顾不同镇区不同典型作物的覆盖情况选择具体调研对象. 调研涵盖临湖镇、胥口镇和金庭镇等 10 个农业生产镇, 每种作物选取主要分布的 2~6 个镇区开展调研, 数据对作物面积的覆盖度达 68%~99%. 对生产主体进行走访和调研的内容主要包括: 肥料品种和其中氮、磷、钾含量, 不同品种肥料施用量, 农产品产量, 用于肥料施用和作物收获的经费投入等.

1.2 作物产出信息统计

对不同类型作物, 以生产主体为样本单元, 以年际为时长, 分别进行作物产量统计. 对于同时种植不同类型作物(如拥有枇杷和茶这 2 类作物)的生产主体, 分别对不同类型作物进行产量统计. 对于一年多茬(如菱角、四叶菜等水生蔬菜)或同时种植多种作物(如同时种植番茄、青菜等蔬菜)的生产主体, 统计该类作物的全年所有产出, 以面积相除, 作为该生产主体该类作物的产量. 此外, 同步统计各类作物当年市场售卖价格. 对于涉及多种作物的生产主体, 根据每种作物产量和单价, 进行加权平均, 作为该生产主体该类作物当年的售卖均价.

1.3 土壤样品采集及指标测定

作物采摘或收获后, 采集样本单元土壤样品. 稻田系统土壤样品采集于每年 11 月; 水生蔬菜、露天蔬菜和大棚蔬菜系统土壤样品分别采集于每年的 9、11 和 12 月; 枇杷、杨梅和柑橘系统土壤样品分别采集于每年的 5、6 和 11 月; 茶园系统土壤样品采集于每年 5 月. 此后, 检测土壤 pH、碱解氮(凯式法, Foss Scino KT260, 中国)、速效磷(钼锑抗比色法, SHIMADZU

UV-1800,日本)和有机质(重铬酸钾氧化-比色法,Thermo FLASH 2000 NC Analyzer)含量^[27].

1.4 数据处理及统计分析

1.4.1 养分投入的变化率

根据每年生产主体的肥料施用策略调研结果,明确每个生产主体对某类作物系统单位面积年际养分(以纯N、P₂O₅和K₂O合计)投入总量,以2015年该类作物系统的年际投入数据为参照,计算养分投入变化率(负值为减投,正值为增投),见式(1):

$$R_{\text{rd}} = (I_{\text{NPK}} \div I_{\text{CK}} - 1) \times 100\% \quad (1)$$

式中, R_{rd} 为养分投入变化率(%); I_{NPK} 为某类作物系统单位面积年际养分投入总量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); I_{CK} 为2015年该类作物系统的年际养分投入总量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$).

1.4.2 有机肥替代比例

根据每年生产主体的肥料施用策略调研结果,明确每个生产主体对某类作物系统单位面积年际有机肥来源养分(以纯N、P₂O₅和K₂O合计)投入总量,计算有机肥替代比例,见式(2):

$$R_{\text{tp}} = (IO_{\text{NPK}} \div I_{\text{NPK}}) \times 100\% \quad (2)$$

式中, R_{tp} 为有机肥替代比例(%); IO_{NPK} 为某类作物系统单位面积年际有机肥来源养分投入总量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$).

1.4.3 肥料效率

在明确每个生产主体某类作物产量和对应年际养分投入总量的基础上,以偏生产力为指标衡量肥料效率,即单位重量养分的作物产出,见式(3):

$$\text{PFP} = Y \div I_{\text{NPK}} \quad (3)$$

式中,PFP为肥料效率($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$); Y 为生产主体某类作物产量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$).

1.4.4 氮、磷流失风险

将作物采摘、收获后土壤中碱解氮含量和速效

磷含量作为该系统年际的氮盈余和磷盈余,这部分未被作物吸收利用的养分具有较高的流失风险,易以径流、淋溶等途径在后期发生损失^[12,26].为明确氮、磷流失系数,在统计相关文献系数范围的基础上^[28~30],结合太湖流域前期已有研究中稻田系统^[31,32]、菜地系统^[3,4]和果园系统^[5]肥料施用量、土壤养分盈余和氮、磷流失量的具体实测数据和环境发展专报^[33]中对太湖流域农田氮、磷流失规律的解析,校准和缩小系数范围,为不同水分管理习惯下农田系统分别确定氮、磷流失系数.根据流失系数分别估算氮流失量和磷流失量,进行叠加,作为各系统氮、磷流失量,见式(4)~(6):

$$N_{\text{loss}} = N_{\text{surplus}} \times \text{Con}_N \quad (4)$$

式中, N_{loss} 为氮流失量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); N_{surplus} 为作物采摘收获后土壤的氮盈余($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); Con_N 为氮流失系数(%),水田系统(稻田系统、水生蔬菜系统)氮流失系数设为20%,其他旱作系统设为11%^[28,29].

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{surplus}} \times \text{Con}_P \quad (5)$$

式中, P_{loss} 为磷流失量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); P_{surplus} 为作物采摘收获后土壤的磷盈余($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); Con_P 为磷流失系数(%),水田系统(稻田系统、水生蔬菜系统)磷流失系数设为5%,其他旱作系统设为4%^[30].

$$\text{NPL} = N_{\text{loss}} + P_{\text{loss}} \quad (6)$$

式中,NPL为氮、磷流失量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$).

1.4.5 生产经济收益

本研究对各类作物系统经济收益的测算以产量对应的农产品售卖作为经济收益,以用于肥料购买(化学肥料和有机肥料)和农产品采摘加工的支出作为成本投入,两者差值作为净收益.此处计算不包括土地租赁费用.各类农产品、肥料和采摘加工的具体计算依据见表1.

表1 不同作物系统农业生产的生产投入和农产品售卖产出等计算依据

Table 1 Calculation basis for input and output of agricultural products and materials in different crop systems

项目	系统	种类	售卖单价 ¹⁾ /元·kg ⁻¹	采收加工成本/元·kg ⁻¹	肥料单价/元·kg ⁻¹
作物系统	稻田	大米	6	4	
	菜地	大棚蔬菜	5	1	
		露天蔬菜	4	1	
		水生蔬菜	20	6	
	果园	杨梅	30	6	
		枇杷	50	6	
		柑橘	6	4	
	茶园	茶叶	800	200	
肥料	化学肥料	尿素			3.2
		复合肥			3.6
	有机肥料				0.6

1) 农产品售卖单价和采收加工成本主要基于2019~2021年规模化生产主体的售卖均价和平均采收加工成本数据估算而来;种植稻田生产主体以加工后可食用的大米作为售卖的主要载体,因此采收加工成本较高,售卖价格在5~12元·kg⁻¹不等,以6元·kg⁻¹的大米为主要产出;大棚蔬菜和露天蔬菜的种类虽多,以叶菜和茄果两类为主,售卖均价在2~8元·kg⁻¹和3~10元·kg⁻¹不等,因大棚蔬菜可以在秋冬予以持续供应,年售卖单价略高于露天蔬菜;吴中区的水生熟菜包括:茭实、莲藕、菱角和四叶菜等,采收加工成本较高,售卖均价在8~200元·kg⁻¹不等,根据吴中区范围几种水生蔬菜的总产出量,设计权重,计算得水生蔬菜的售卖均价20元·kg⁻¹和平均采收加工成本6元·kg⁻¹;果园和茶园系统中杨梅、枇杷、柑橘和茶叶的售卖价格年际波动不大且不同生产主体间差异有限,规模化生产主体的售卖单价和采收加工成本数据具有代表性

1.4.6 模型分析

将肥料施用策略中的养分投入、有机肥替代以及肥料效率、氮、磷流失作为影响因子,估算不同类型作物系统中生产经济收益对因子的响应.回归模型如下:

$$AI_t = \alpha_0 + \sum_k \alpha_k \text{Controls}_{kt} + \varepsilon_t \quad (7)$$

式中, t 为单一年份某种作物系统中的样本单元; AI_t 为 t 样本的生产经济收益; α_0 为回归模型中的常量; α_k 为 k 控制变量对应的回归系数; k 为回归模型中的单一变量单元; Controls_{kt} 为对应 t 样本的 k 控制变量; ε_t 为 t 样本的残差.

1.4.7 统计分析

本研究采用 SPSS 19.0 中 Duncan 法对每类作物不同有机肥替代比例下的氮、磷流失风险、偏生产力、养分投入以及每类作物肥料效率和氮、磷流失风险的年际变化数据进行差异显著性分析 (ANOVA, $P < 0.05$); 最小二乘法模型 (ordinary least square) 估算氨挥发排放对不同影响因子的响应情况; 采用 Microsoft Excel 软件对数据进行制图.

2 结果与讨论

2.1 养分减施对氮、磷流失和肥料效率的影响

数据显示,肥料投入与氮、磷流失有着良好的线性关系[图 1(a)、1(c)、1(e)和 1(g)].4 类作物系统中,稻田系统、枇杷系统、水生和露天蔬菜系统具有较大的线性斜率,说明这 4 类作物系统氮、磷流失对养分投入的变化更为敏感,减少肥料源养分投入可有效降低对这些作物系统的流失风险控制.考虑到作物在一定时间内用于生长、结实的养分需求是一定的,种植季结束后土壤中速效态氮、磷是未被作物吸收利用的养分盈余,有较高的流失风险^[26].此前大量研究已验证,基于测土配方和作物供需的肥料减投,可以在满足作物生长的前提下,有效降低稻田^[14]、菜地^[3]和茶园系统^[34]与坡耕地环境下的氮、磷流失^[17],也是未来农田系统养分运作的一大趋势^[12,22].

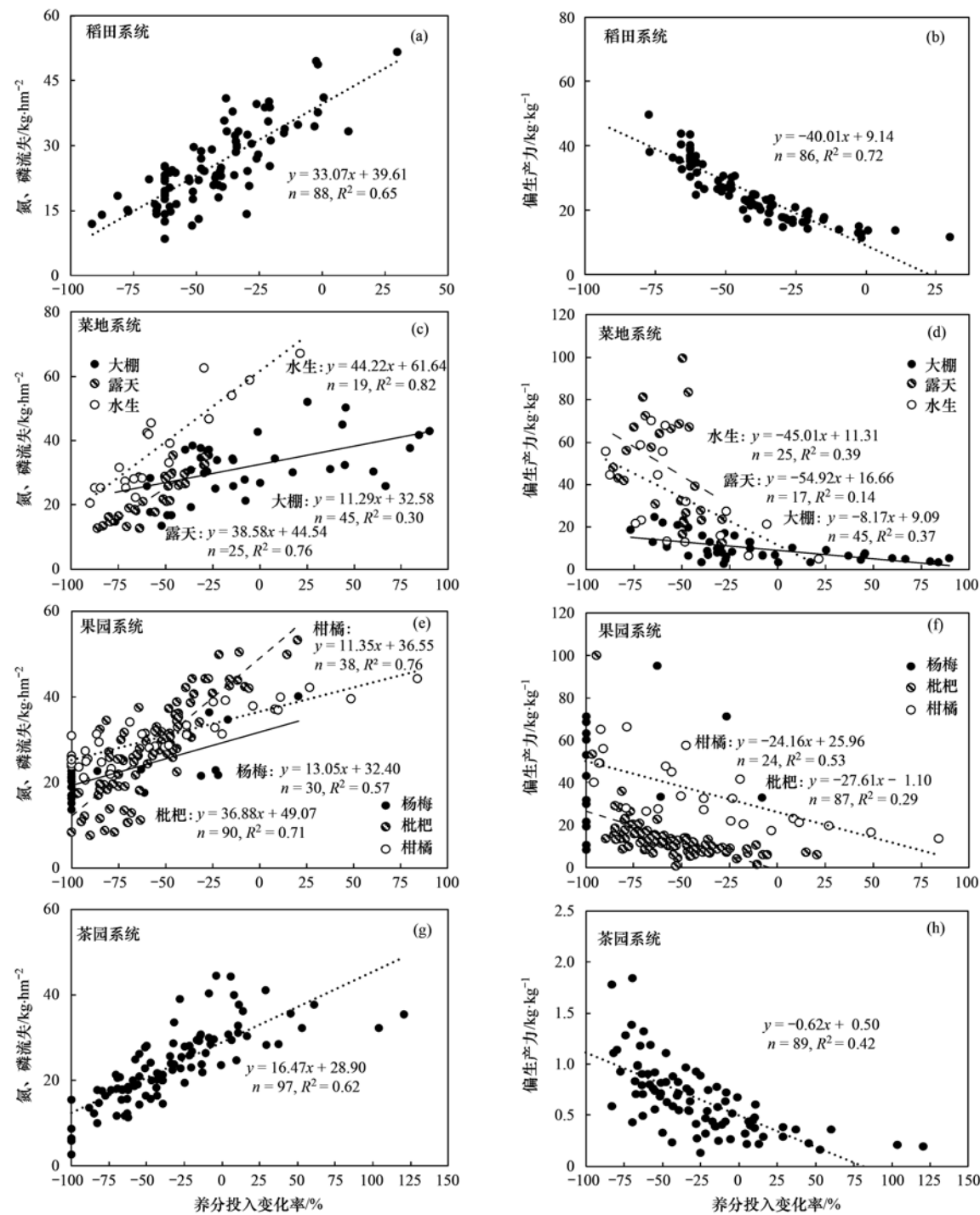
另一方面,从偏生产力对养分投入变化的响应数据来看,养分减投可一定程度提高水稻系统和柑橘系统的肥料效率[图 1(b)和 1(f)].菜地系统中,大棚蔬菜相较于水生和露天蔬菜系统,养分投入变化对其肥料效率的影响较小[斜率较小,图 1(d)].杨梅系统数据显示,该系统的养分投入变化并不会影响肥料效率[无法进行线性拟合,图 1(f)].提高肥料效率,是减少养分投入条件下保障作物产量的

前提^[35].Xin^[15]通过分析近 20 年粮食作物数据发现,养分过量投入现象仍十分普遍,这是导致肥料效率低下的主要原因,相似的结论也体现在菜地^[3]和果园^[5]系统之中.本调研发现偏生产力对养分投入量变化的不敏感,说明这些作物系统的农产品产出对当前形势下养分投入的依赖性不强,换言之产地环境中已有大量的养分盈余^[26],也暗示着当前养分配比存在不合理的可能.

2.2 有机肥替代对氮、磷流失和肥料效率的影响

不同作物生长对有机质的需求差异,将调研数据中每类作物系统的有机肥替代比例以 25% 为距进行数据样本分割,比较不同有机肥替代比例范围下的氮、磷流失风险和偏生产力的影响.有机肥大多施用作基肥,不同于化学肥料,其中养分并非速效形态,因此,在整个作物生长期乃至更久的时间段,处于缓慢矿化、释放的状态,因此,其对氮、磷流失的影响具有较强的不确定性.本次调研的研究数据显示,有机肥替代比例的提升可能会增加种植季结束后土壤中速效养分含量,以此加大氮、磷流失风险(图 2).前期亦有不少研究认为,有机肥不合理施用将增加农田氮、磷流失风险^[36~40].

值得注意的是,当有机肥替代比例高达一定数值后(75%~100%或全量有机肥),氮、磷流失风险又会有所减少.考虑到有机肥施用对机械和劳动投入有较为特殊的需求,因此将不同有机肥替代比例下的养分投入削减情况进行了统计.结果显示,采用较高有机肥替代比例这一肥料施用策略的生产主体,往往会一定程度降低养分投入量(表 2).尤其是全量有机肥施用条件下,养分投入的削减在稻田、果园和茶园系统中均达到了显著(表 2).虽然,对多数作物系统而言,有机肥替代对氮、磷流失的影响未达到显著(图 2),但不同作物系统氮、磷流失风险峰值所在的有机肥替代比例范围仍存在一定差异.稻田系统和菜地系统中有机肥替代比例在 25%~75% 时,氮、磷流失风险较高[图 2(a)和 2(c)];果园系统和菜地系统较高的氮、磷流失风险出现在替代比例 50%~100% 范围内[图 2(e)和 2(g)].与之对应的是,菜地、果园和茶园系统在有机肥替代 25%~75% 范围内有着显著高于其他代替范围的养分投入量(表 2).值得注意的是,若仅增加有机肥替代比例不减少投入强度(表 2),稻田和茶园系统的氮、磷流失并不会由此减少[图 2(a)和 2(g)],蔡佳佩等^[37]对稻田系统田面水氮、磷养分浓度的研究亦证明了此观点,而现阶段尚未见茶园系统的相关报道.



横坐标为参比 2015 年养分投入变化率, 正值为增加, 负值为减少

图 1 氮、磷流失和偏生产力对养分投入变化的响应

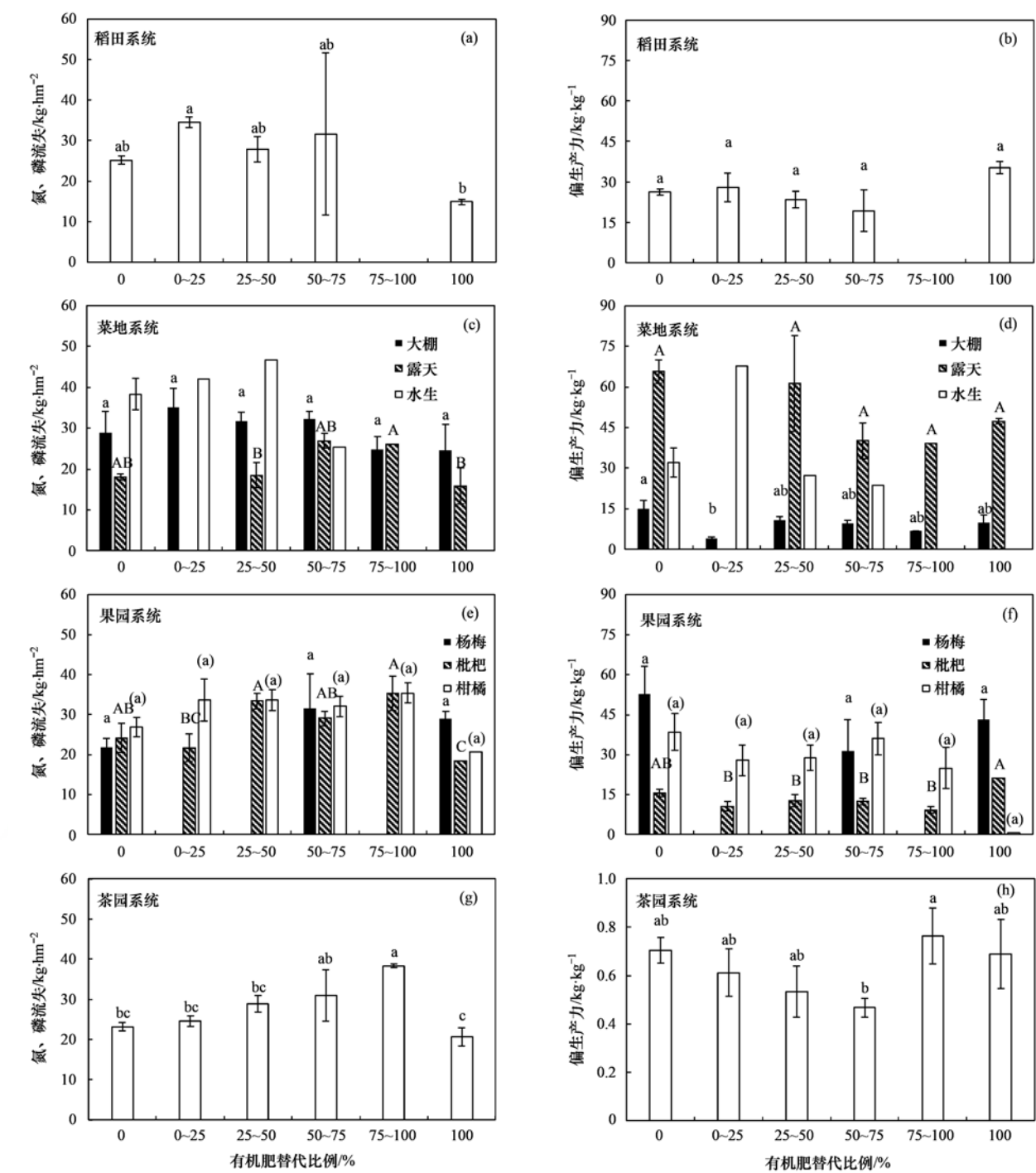
Fig. 1 Responses of nitrogen and phosphorus loss and partial productivity to nutrient inputs

表 2 不同有机肥替代比例下养分投入变化率¹⁾/%

Table 2 Change in nutrient input under different replacement ratios of organic fertilizer/%

系统	有机肥替代比例范围/%					
	0	0~25	25~50	50~75	75~100	100
稻田	-42.95 ± 2.44a	-43.56 ± 4.56a	-38.18 ± 4.78a	-14.13 ± 31.20a	—	-76.67 ± 6.35b
菜地	-48.24 ± 6.90b	-42.86 ± 34.15ab	-28.45 ± 7.77a	-30.63 ± 6.68a	-19.59 ± 11.78a	-50.89 ± 14.44ab
果园	-76.67 ± 5.10b	-63.64 ± 8.10b	-40.41 ± 6.81a	-49.52 ± 4.59a	-27.62 ± 9.05a	-76.41 ± 5.83b
茶园	-33.88 ± 5.10b	-19.04 ± 10.71ab	-5.29 ± 15.52a	-6.69 ± 15.89a	-8.72 ± 13.69a	-60.21 ± 6.04c

1) 同行相同小写字母表示统计学差异不显著 ($P > 0.05$) ; “—”表示无该比例范围样品



对不同作物系统或不同作物类型的氮、磷流失风险和偏生产力分别进行统计分析,相同字母表示统计学差异不显著($P \geq 0.05$);菜地系统中,小写字母为大棚蔬菜的统计学结果,大写字母为露天蔬菜的统计学结果,水生蔬菜由于样本过少,未能进行统计分析;果园系统中,不含括号的小写字母为杨梅的统计学结果,大写字母为枇杷的统计学结果,含小括号的小写字母为柑橘的统计学结果

图2 不同有机肥替代范围内的氮、磷流失和偏生产力

Fig. 2 Nitrogen and phosphorus loss and partial productivities under different replacement ratios of organic fertilizer

尽管,有机肥替代带来的肥料效率(以偏生产力表示)差异在多数作物系统中未达到显著,然而,由于养分投入总量也发生着变化,有机肥施用比例改变对肥料效率的影响途径较为复杂.首先,有机肥和化肥的配施往往会较纯化肥施用的策略增加养分投入量(表2),若对作物产量促进效果不显著,则偏生产力将呈现下降趋势[图1(b)、1(d)、1(f)和1

(h)].其次,随着有机肥替代比例的提升,养分投入量在多个作物系统中显著下降,稻田、果园、茶园系统在有机肥全量替代条件下具有较高的偏生产力[图1(b)、1(f)和1(h)].但是,有机肥中养分需矿化后才能被作物吸收利用,因此当季利用效率往往不高^[38].菜地系统全量有机肥施用不能满足作物生长对速效养分的需求,因此对产量产生了负面作用,

偏生产力有所降低[图 1(d)].由此可见,为特定土壤环境下的不同作物系统寻找适宜的有机肥替代比例,对于提高肥料效率、降低氮、磷流失风险,是至关重要的.

2.3 区域尺度年际变化

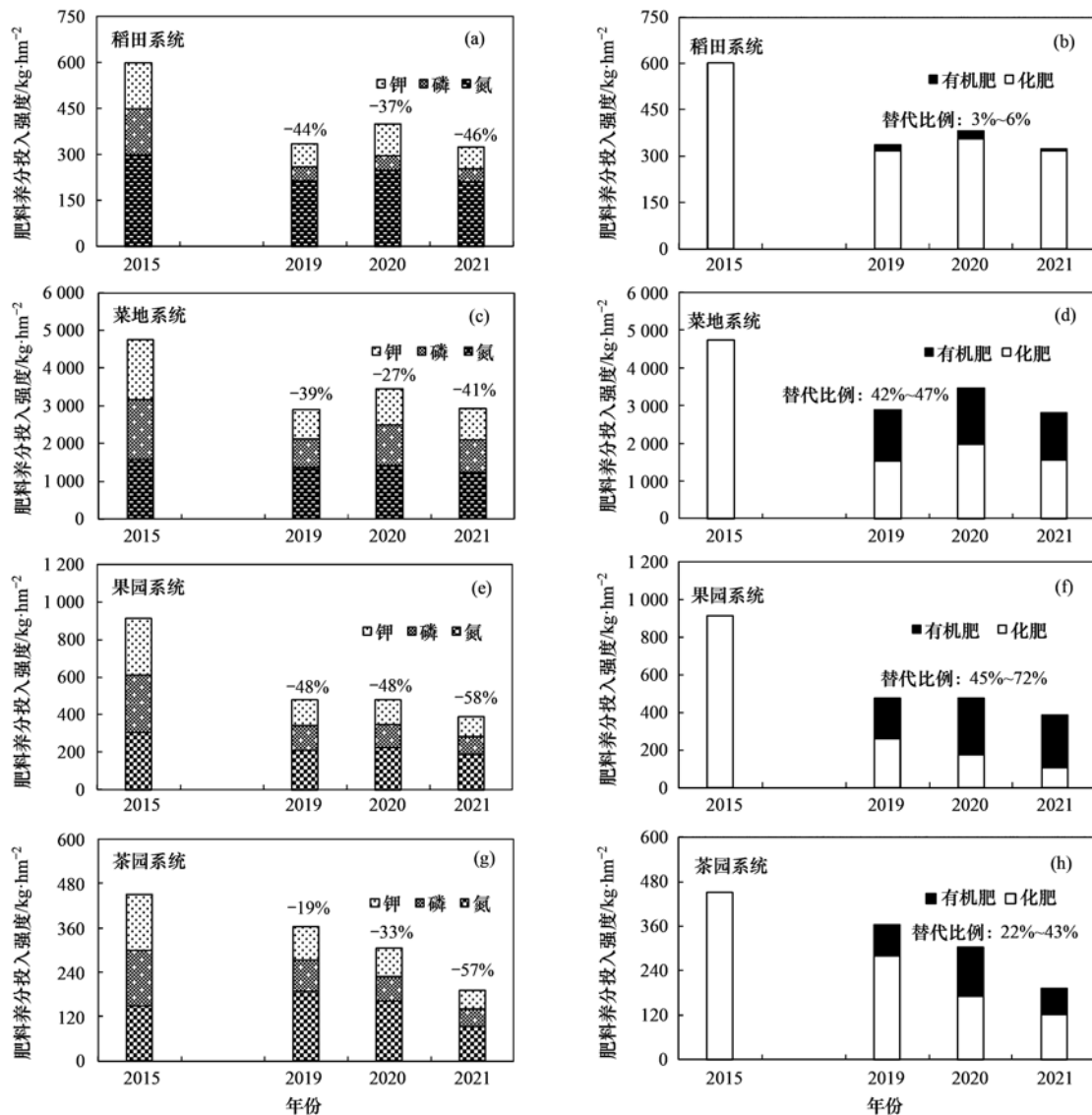
2.3.1 养分投入强度、配比及有机肥替代的年际变化

从养分投入强度上看,相比于 2015 年的肥料施用数据,近 3 年各类典型作物系统的养分投入强度均有显著下降.其中,果园和茶园系统养分投入强度的下降幅度最大,2021 年数据较 2015 年削减超过一半[图 3(e)和 3(g)];稻田系统养分投入强度削减幅度在 37%~46%之间[图 3(a)];菜地系统在 27%~41%之间[图 3(c)].

从养分配比上看,稻田系统显著减少了磷的投

入[图 3(a)].考虑到当地稻田土壤普遍具有较为充足的磷素水平(数据未显示),且水稻生长对磷的依赖较小^[41],稻田系统对磷投入的调控将有助于降低其流失风险[图 1(a)]^[10,42].此外,菜地、果园和茶园系统均减少了磷钾的投入强度[图 3(e)].果园系统的产出为果实结实部分,当前较低的磷钾投入可能会对作物的生殖生长带来不利影响^[43].对于茶园系统而言,稳定氮和充足磷的供给是收获优质新叶的关键,近 3 年,茶园系统氮投入强度较为稳定,磷投入强度及占比均下降显著,可能会一定程度改变茶叶品质^[7].

从有机肥替代比例上看,稻田系统仍以化肥为主要肥料种类[图 3(b)],菜地系统有机肥替代比例已接近一半[图 3(d)],果园系统则超过一半[图 3(f)],茶园系统相对较低[图 3(h)].对稻田系统



以 2015 年的肥料养分投入情况为参比,(a)、(c)、(e)和(g)柱子上所标数字为 2015 年的数值变化率,

负值表示减少,正值增加;(b)、(d)、(f)和(h)标明了有机肥的替代比例

图 3 不同作物系统肥料养分投入强度、组成和有机肥占比的年际变化

Fig. 3 Interannual changes in fertilizer input intensity, nutrient composition, and ratio of organic fertilizer in different crop systems

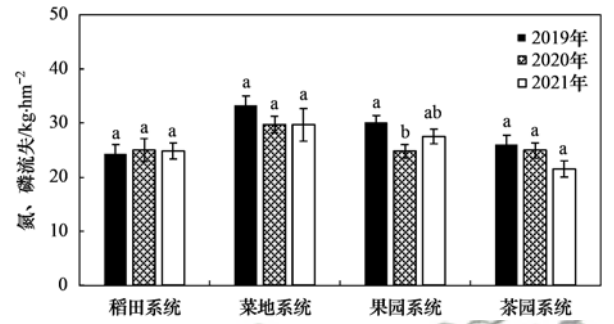
而言,若缺乏适宜配套机械辅助,有机肥大比例替代可能会大大增加用工成本.对菜地系统而言,基于当前的有机肥替代比例,在保证产量的基础上进一步提升的空间并不算大.前期关于菜地系统有机肥替代的研究多以 20%~75% 作为适宜替代比例进行推荐^[26].此外,虽然有机肥施用有利于维持土壤环境氮、磷稳定[图 2(c)],但是菜地系统作物生长速率大,对养分需求较急,有机形态养分的供应力能否满足蔬菜生长所需,是值得关注的.对果园系统而言,当前较高的有机肥替代比例主要得益于农户对有机肥提升果品作用的认知以及对植物源有机废弃物(豆粕)回用传统的延续^[43,44].对于多数位处坡耕地环境的茶园而言,有机肥表施效果较差,而传统固态有机肥运输和开沟施用均增加了人工成本的投入.因此,茶园系统有机肥替代比例的提升需依赖农机的配套和高浓度液体有机肥的应用推广.

2.3.2 区域氮、磷流失风险的年际变化

本次调研区域的肥料施用策略调整主要推行于“十三五”初期,因此,2019~2021 年区域范围内菜地、果园和茶园系统氮、磷流失风险虽仍有下降趋势,但年际间变化并不显著(图 4).4 类作物系统中,菜地系统的氮、磷流失风险最高,稻田和茶园系统相对较低.菜地系统由于年种植季较多,养分投入的绝对量是其他作物系统的 10 倍左右[图 3(c)],而氮、磷流失风险仅相较其他作物系统提升 38%,充分说明菜地系统拥有较大物质流通量,调整该系统肥料施用策略对降低氮、磷流失风险的意义很大^[3,45].

此外,果园和稻田系统的养分投入强度相近,由于果园系统作物收获后的土壤中仍有较高的养分残留且水田和旱作地的流失系数存在差异^[28,30],果园

系统较稻田系统具有更高的氮、磷流失风险,而有关果园系统的肥料施用策略探索略显不足.值得注意的是,2020 年果园系统氮、磷流失风险有较明显的下降(图 4),与之对应的是该年有机肥施用比例的明显提升[图 3(f)],这暗示着在养分投入量固定前提下有机肥替代比例的提升将会是降低果园系统氮、磷流失风险的有效手段.



对不同作物系统的年际氮、磷流失情况分别进行统计分析,相同小写字母表示某种作物系统氮、磷流失年际差异在统计学上不显著($P>0.05$)

图 4 不同作物系统氮、磷流失的年际变化
Fig. 4 Interannual changes in nitrogen and phosphorus loss in different crop systems

2.4 肥料施用策略应对经济收益的兼顾

在保证生产的前提下,为太湖流域典型作物系统寻找影响氮、磷流失风险的主要因素,是本研究的目的之一.已有数据表明,养分投入量的调控是决定氮、磷流失风险的关键(图 1),但是,从生产主体角度,以其经济收益的增长为结果的肥料施用策略的调整才具有实操性和自发运作的能力.关于生产经济收益的回归分析显示(表 3),肥料施用策略本身(养分投入和有机肥替代比例调控)对多数作物生产经济收益的影响并不显著,而肥料效率却能够显著影响生产经济收益.

表 3 生产经济收益对肥料施用策略、肥料效率和氮、磷流失的响应¹⁾

Table 3 Response of economic benefits to fertilizer application strategy, fertilizer efficiency, and nitrogen and phosphorus loss					
类型	项目	生产经济收益			
		稻田系统	菜地系统	果园系统	茶园系统
肥料施用策略	养分投入	0.321 (0.208)	3.248 (2.960)	-10.072 (5.347)	6.124 ** (1.198)
	有机肥替代	-0.336 ** (0.096)	-5.111 (3.176)	3.652 (3.851)	0.609 (1.004)
肥料效率	偏生产力	0.017 *** (0.003)	0.297 *** (0.049)	0.298 *** (0.068)	9.100 *** (1.003)
流失风险	氮、磷流失	0.01 (0.03)	0.191 * (0.102)	0.224 (0.172)	0.122 ** (0.055)
常量		1.034 *** (0.140)	5.568 (4.620)	14.032 * (7.816)	2.743 (1.738)
R^2		0.391	0.383	0.173	0.527
样本量		86	87	127	90

1) *** 表示 $P<0.01$, ** 表示 $P<0.05$, * 表示 $P<0.1$; 括号内数字表示系数的标准误差

肥料施用策略本身对生产经济收益影响不显著,很大程度和肥料购置在生产过程总经济投入占比较低有关.除菜地系统的肥料购置经济投入占比高于 30%,稻田、果园和茶园系统的肥料投入占比

均低于 10%(图 5).从养分投入角度,茶园系统的养分投入对经济收益有促进作用.前期研究发现,土壤中养分通常不能满足茶树生长需要,施用肥料对茶叶产量促进作用显著^[46,47],比起用于肥料购置的

经济投入,肥料投入带来的茶园产量提升更为显著;此外,生产主体对有一定量肥料投入的茶园有着更高的采收积极性,将尽可能采摘芽期茶叶,促成商品茶产出.从有机肥替代角度,有机肥替代比例的提升减少了稻田系统的经济收益.这从侧面说明了当前稻田系统有机肥替代比例较低[图3(b)]的原因是有机肥大比例替代会显著提高大田作物(此处为稻田系统)的用工成本.因此,适宜的配套机械和技术指导是推广有机肥施用必不可少的前提条件.不同于稻田和菜地系统,果园和茶园系统的经济收益呈现出对有机肥替代正反馈(未达到显著),前期也有相关研究证实适宜比例的有机肥替代更有利于提高茶园、果园系统的产量和品质^[8],由此提升经济收益.因此,相较于稻田系统,果园和茶园系统有机肥替代更易被生产主体接受.

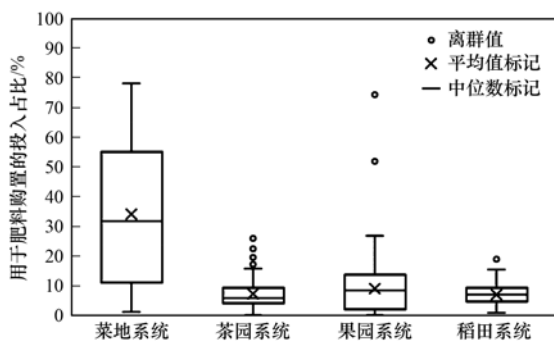


图5 不同作物系统用于肥料购置的经济投入占比

Fig. 5 Proportion of economic inputs for fertilizer acquisition in different crop systems

肥料效率提升对生产经济收益影响显著(表3).这充分说明,后期肥料施用策略的调整应以提升肥料效率为导向.较为意外的是,菜地和茶园系统的氮、磷流失风险和生产经济收益呈现正相关,即具有较高氮、磷流失的生产主体(数据单元)往往能够获取更高的经济收益(表3),这说明菜地和茶园系统作物产量对肥料源养分投入有着较强的依赖性.这可能与菜地系统养分配比不合理^[48],以及果园系统土层对氮、磷保持力较弱有关^[8,34].菜地和茶园系统氮、磷流失风险和生产经济收益的正相关性,更说明相比于氮、磷流失量的绝对值削减,以提升肥料效率为目标从多个方向着力调整肥料施用策略,才能实现环境效益和经济收益兼顾.

3 建议

(1)稻田系统进一步削减养分投入强度的余地已不大,宜从调整元素比例方面入手,进一步降低氮、磷流失风险.

(2)菜地系统肥料施用强度的调整与蔬菜作物

的选择息息相关,在保证产量的基础上进一步提升菜地系统有机肥替代比例的空间并不算大,调整种植结构将是未来菜地系统肥料提效减排的关键.

(3)该区域有不少面积的茶树种植于果树下,从茶-果复合系统的角度出发,制定同时满足茶、果生长的施肥策略,将更有利于减少茶、果养分争夺,提升肥料利用效率,构建共生生境.

4 结论

(1)养分投入强度的调控是决定氮、磷流失的关键,基于测土配方和作物供需的养分投入调控可以在保产前提下,有效降低作物系统的氮、磷流失风险.

(2)有机肥替代并非多多益善,在适宜养分投入范围内的适宜比例有机肥替代才能进一步降低氮、磷流失风险.由于有机肥中养分非速效态,施用时机需考虑作物对养分需求的缓急.稻田系统有机肥替代应以适宜的配套机械和技术指导为前提.相较于稻田,果园和茶园系统有机肥替代更易被生产主体接受.

(3)以提升肥料效率为导向的肥料施用策略调整将更有利于增加生产主体的经济收益.菜地和茶园系统的肥料施用策略调整要兼顾好环境效益和生产主体的经济收益,以此保证策略具有自发运作能力.

参考文献:

- [1] 席运官, 田伟, 李妍, 等. 太湖地区稻麦轮作系统氮、磷径流排放规律及流失系数[J]. 江苏农业学报, 2014, **30**(3): 534-540.
Xi Y G, Tian W, Li Y, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses and loss coefficients in rice-wheat rotation system in Taihu Lake basin[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2014, **30**(3): 534-540.
- [2] 王海, 席运官, 陈瑞冰, 等. 太湖地区肥料、农药过量施用调查研究[J]. 农业环境与发展, 2009, **26**(3): 10-15.
- [3] Min J, Zhao X, Shi W M, et al. Nitrogen balance and loss in a greenhouse vegetable system in southeastern China [J]. Pedosphere, 2011, **21**(4): 464-472.
- [4] Shi W M, Yao J, Yan F. Vegetable cultivation under greenhouse conditions leads to rapid accumulation of nutrients, acidification and salinity of soils and groundwater contamination in South-Eastern China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2009, **83**(1): 73-84.
- [5] 刘之广, 陈宝成, 张民, 等. 模拟条件下太湖直湖港地区桃园土壤不同施肥处理氮磷淋失特征[J]. 水土保持学报, 2014, **28**(3): 227-231.
Liu Z G, Chen B C, Zhang M, et al. Nitrogen and phosphorus leaching of peach orchard in Zhihugang region of Tai Lake with different fertilization treatments under simulated condition [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, **28**(3): 227-231.
- [6] 张国芹, 孙灵湘, 顾俊荣, 等. 肥料运筹对不同茶果间作模式碧螺春茶叶产量与品质的影响[J]. 中国农学通报, 2018,

- 34(18): 59-64.
- Zhang G Q, Sun L X, Gu J R, *et al.* Effects of fertilization on yield and quality of Biluochun tea cultivated in different tea-fruit intercropping plantations [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(18): 59-64.
- [7] 唐劲驰, 吴利荣, 吴家尧, 等. 初投产茶园氮磷钾配比施用与产量、品质的关系研究[J]. 茶叶科学, 2011, 31(1): 11-16.
- Tang J C, Wu L R, Wu J Y, *et al.* Relations between tea yields & quality and applied ratio of NPK fertilizers in the initial production tea garden [J]. Journal of Tea Science, 2011, 31(1): 11-16.
- [8] 唐海波, 刘强, 彭建伟, 等. 有机无机肥配施及稻草覆盖对中南丘陵茶园氮磷径流流失的影响[J]. 湖南农业科学, 2015, (1): 56-59, 63.
- Tuo H B, Liu Q, Peng J W, *et al.* Combining application of organic and inorganic fertilizer and straw mulching on nitrogen and phosphorus runoff losses in South-central hilly tea garden [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2015, (1): 56-59, 63.
- [9] 俞映惊, 薛利红, 杨林章, 等. 生物炭添加对酸化土壤中小白菜氮素利用的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 759-767.
- Yu Y L, Xue L H, Yang L Z, *et al.* Effect of biochar application on pakchoi (*Brassica chinensis* L.) utilizing nitrogen in acid soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(4): 759-767.
- [10] 汪玉, 赵旭, 王磊, 等. 太湖流域稻麦轮作农田磷素累积现状及其环境风险与控制对策[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 829-835.
- Wang Y, Zhao X, Wang L, *et al.* Accumulation, Environmental risk and control of phosphorus in rice/wheat rotation farmland in Taihu lake watershed [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(5): 829-835.
- [11] 杨林章, 施卫明, 薛利红, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——总体思路与“4R”治理技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 1-8.
- Yang L Z, Shi W M, Xue L H, *et al.* Reduce-Retain-Reuse-Restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: general countermeasures and technologies [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(1): 1-8.
- [12] Gu B J, Ju X T, Chang J, *et al.* Integrated reactive nitrogen budgets and future trends in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(28): 8792-8797.
- [13] 第二次全国污染源普查公报[J]. 环境保护, 2020, 48(18): 8-10.
- The second national pollution source census bulletin [J]. Environmental Protection, 2020, 48(18): 8-10.
- [14] 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 等. 减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5405-5413.
- Jiang H B, Zhang K Q, Zou H T, *et al.* Effects of different fertilization patterns on nitrogen leaching loss from paddy fields under reduced nitrogen [J]. Environmental Science, 2021, 42(11): 5405-5413.
- [15] Xin L J. Chemical fertilizer rate, use efficiency and reduction of cereal crops in China, 1998-2018 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2022, 32(1): 65-78.
- [16] Liang K M, Zhong X H, Huang N R, *et al.* Nitrogen losses and greenhouse gas emissions under different N and water management in a subtropical double-season rice cropping system [J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 46-57.
- [17] 罗东海, 王子芳, 龙翼, 等. 化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(3): 1286-1295.
- Luo D H, Wang Z F, Long Y, *et al.* Effect of optimized fertilization and biochar application on phosphorus loss in purple soil sloping farmland [J]. Environmental Science, 2020, 41(3): 1286-1295.
- [18] Yao Y L, Zhang M, Tian Y H, *et al.* Urea deep placement in combination with Azolla for reducing nitrogen loss and improving fertilizer nitrogen recovery in rice field [J]. Field Crops Research, 2018, 218: 141-149.
- [19] Ke J, He R C, Hou P F, *et al.* Combined controlled-released nitrogen fertilizers and deep placement effects of N leaching, rice yield and N recovery in machine-transplanted rice [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 265: 402-412.
- [20] Zhang M, Tian Y H, Zhao M, *et al.* The assessment of nitrate leaching in a rice-wheat rotation system using an improved agronomic practice aimed to increase rice crop yields [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 241: 100-109.
- [21] Hofmeier M, Roelcke M, Han Y, *et al.* Nitrogen management in a rice-wheat system in the Taihu Region: recommendations based on field experiments and surveys [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 209: 60-73.
- [22] 俞映惊, 杨林章, 李红娜, 等. 种植业面源污染防治技术发展历程分析及趋势预测[J]. 环境科学, 2020, 41(8): 3870-3878.
- Yu Y L, Yang L Z, Li H N, *et al.* Situation analysis and trend prediction of the prevention and control technologies for planting non-point source pollution [J]. Environmental Science, 2020, 41(8): 3870-3878.
- [23] 中华人民共和国农业农村部. 关于印发《到2020年化肥使用量零增长行动方案》和《到2020年农药使用量零增长行动方案》的通知[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/nybgb/2015/san/201711/t20171129_5923401.htm, 2017-11-29.
- [24] 中华人民共和国农业农村部. 关于印发《开展果菜茶有机肥替代化肥行动方案》的通知[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/nybgb/2017/derq/201712/t20171227_6130977.htm, 2017-02-08.
- [25] 苏州市吴中区发展和改革委员会, 苏州市吴中区统计局. 吴中统计年鉴(2015) [M]. 北京: 方志出版社, 2015.
- Suzhou Wuzhong Development and Reform Bureau, Suzhou Wuzhong District Bureau of Statistics. 2015 Wuzhong statistical yearbook [M]. Beijing: Publishing House of Local Records, 2015.
- [26] Ju X T. Direct pathway of nitrate produced from surplus nitrogen inputs to the hydrosphere [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(4), doi: 10.1073/pnas.1321334111.
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [28] 陈丁江, 吕军, 金树权, 等. 非点源污染河流的水环境容量估算和分配[J]. 环境科学, 2007, 28(7): 1416-1424.
- Chen D J, Li J, Jin S Q, *et al.* Estimation and allocation of water environmental capacity in nonpoint source polluted river [J]. Environmental Science, 2007, 28(7): 1416-1424.
- [29] Liu X, Sheng H, Jiang S Y, *et al.* Intensification of phosphorus cycling in China since the 1600s [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(10): 2609-2614.
- [30] Yu Y L, Hu Y, Gu B J, *et al.* Reforming smallholder farms to mitigate agricultural pollution [J]. Environmental Science and

- Pollution Research, 2022, **29**(10): 13869-13880.
- [31] Cao Y S, Sun H F, Liu Y Q, *et al.* Reducing N losses through surface runoff from rice-wheat rotation by improving fertilizer management[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(5): 4841-4850.
- [32] 薛利红, 俞映惊, 杨林章. 太湖流域稻田不同氮肥管理模式下的氮素平衡特征及环境效应评价[J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 1133-1138.
- Xue L H, Yu Y L, Yang L Z. Nitrogen balance and environmental impact of paddy field under different N management methods in Taihu lake region [J]. Environmental Science, 2011, **32**(4): 1133-1138.
- [33] 钱玲, 韩巍, 托娅, 等. 摸清规律, 创新技术—助力农田面源污染的靶向控制[J]. 环境发展专报, 2020, **16**: 1-7.
- [34] 王剑, 王肖君, 斯圆丽, 等. 平衡减量施肥和行间配植对白茶园氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2021, **35**(3): 69-76.
- Wang J, Wang X J, Si Y L, *et al.* Effects of balanced reduced fertilization and inter-row planting on nitrogen and phosphorus loss in white tea garden [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, **35**(3): 69-76.
- [35] Dimkpa C O, Fugice J, Singh U, *et al.* Development of fertilizers for enhanced nitrogen use efficiency-Trends and perspectives[J]. Science of the Total Environment, 2020, **731**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139113.
- [36] 武升, 邢素林, 马凡凡, 等. 有机肥施用对土壤环境潜在风险研究进展[J]. 生态科学, 2019, **38**(2): 219-224.
- Wu S, Xing S L, Ma F F, *et al.* Review on potential risk of soil environment from organic fertilizer application [J]. Ecological Science, 2019, **38**(2): 219-224.
- [37] 蔡佳佩, 朱坚, 彭华, 等. 有机肥施用对田面水氮磷流失风险的影响[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(1): 210-217.
- Cai J P, Zhu J, Peng H, *et al.* Effects of organic fertilizer on the risk of nitrogen and phosphorus loss in soil surface water [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(1): 210-217.
- [38] 徐云连, 马友华, 吴蔚君, 等. 农田中有机肥氮磷流失的研究[J]. 中国农学通报, 2017, **33**(14): 75-80.
- Xu Y L, Ma Y H, Wu W J, *et al.* Nitrogen and phosphorus loss under organic fertilizer application in farmland [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, **33**(14): 75-80.
- [39] 刘沙沙, 李兵, 张古彬, 等. 有机肥替代化肥对豫东地区上海青生长及氮磷利用的影响[J]. 农学学报, 2019, **9**(8): 14-18, 47.
- Liu S S, Li B, Zhang G B, *et al.* Effects of organic fertilizer replacing chemical fertilizer on growth and N/P utilization ratio in brassica campestris in east Henan [J]. Journal of Agriculture, 2019, **9**(8): 14-18, 47.
- [40] McDowell R W, Sharpley A N. Variation of phosphorus leached from Pennsylvanian soils amended with manures, composts or inorganic fertilizer[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2004, **102**(1): 17-27.
- [41] 朱文彬, 汪玉, 王慎强, 等. 太湖流域典型稻麦轮作农田稻季不施磷的农学及环境效应探究[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(6): 1129-1135.
- Zhu W B, Wang Y, Wang S Q, *et al.* Agronomic and environmental effects of P fertilization reduction in rice-wheat rotation field in Taihu Lake Region of Southeast China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(6): 1129-1135.
- [42] Wang Y, Zhao X, Guo Z Y, *et al.* Response of soil microbes to a reduction in phosphorus fertilizer in rice-wheat rotation paddy soils with varying soil P levels [J]. Soil and Tillage Research, 2018, **181**: 127-135.
- [43] 胡国智, 闫森, 熊韬, 等. 适宜有机肥替代化肥氮比例提高甜瓜养分吸收、产量和品质[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, **28**(2): 260-268.
- Hu G Z, Yan M, Xiong T, *et al.* Optimum chemical fertilizer N substitution with organic manure N improves nutrient uptake, yield, and quality of muskmelon in Xinjiang [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, **28**(2): 260-268.
- [44] 陶云彬, 杨佳佳, 章日亮, 等. 有机肥替代、化肥养分调控对土壤理化性状、枇杷果实品质和产量的影响[J]. 浙江农业科学, 2019, **60**(9): 1540-1541, 1543.
- Tao Y B, Yang J J, Zhang R L, *et al.* Effects of substituting with organic fertilizer and nutrients regulation of chemical fertilizer on physical and chemical properties of soil, quality and yield of loquats [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2019, **60**(9): 1540-1541, 1543.
- [45] 俞映惊, 薛利红, 杨扬, 等. 生物炭对菜地土壤氮平衡及酸碱缓冲能力的影响[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(12): 1947-1955.
- Yu Y L, Xue L H, Yang Y, *et al.* Influence of biochar addition on soil nitrogen balance and buffering capacity for vegetable soil [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(12): 1947-1955.
- [46] 唐颖, 吴家尧, 黎健龙, 等. 茶园滴灌施肥的增产提质及土壤养分效应研究[J]. 茶叶科学, 2013, **33**(1): 85-90.
- Tang H, Wu J Y, Li J L, *et al.* Study on the influence of drip irrigated fertilization on tea yields, quality and soil nutrient effect [J]. Journal of Tea Science, 2013, **33**(1): 85-90.
- [47] 李相楹, 张珍明, 张清海, 等. 茶园土壤氮磷钾与茶叶品质关系研究进展[J]. 广东农业科学, 2014, **41**(23): 56-60.
- Li X Y, Zhang Z M, Zhang Q H, *et al.* Research progress of relationship among nitrogen, phosphorus, potassium and tea quality [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, **41**(23): 56-60.
- [48] 李盟军, 姚建武, 王荣辉, 等. 不同养分管理措施下常年菜地蔬菜生长及氮素径流特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, **21**(5): 1190-1199.
- Li M J, Yao J W, Wang R H, *et al.* Effects of different nutrition management on vegetable growth and runoff characteristics of soil nitrogen in perennial vegetable field [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, **21**(5): 1190-1199.

CONTENTS

Assessing the Environmental and Health Co-benefits of Accelerated Energy Transition and Industrial Restructuring: A Case Study of the BTHS Region	YANG Xi, SUN Yi-sheng, CHANG Shi-yan, <i>et al.</i> (3627)
Synergistic Paths of Reduced Pollution and Carbon Emissions Based on Different Power Demands in China	XIANG Meng-yu, WANG Shen, LÜ Lian-hong, <i>et al.</i> (3637)
Evaluation Method and Application for Urban Carbon Peaking & Neutrality Performance	ZHANG Bao-liu, BAI Zi-han, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3649)
Revealing Driving Factors of Urban O ₃ Based on Explainable Machine Learning	DONG Jia-qi, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (3660)
Sensitivity Analysis of Ozone Formation Using Response Surface Methodology	ZHU Yu-huan, CHEN Bing, ZHANG Ya-ru, <i>et al.</i> (3669)
Analysis of O ₃ Sources in Yulin City in Summer Based on WRF-CMAQ/ISAM Model	WANG Yi-fan, TONG Ji-long, CHEN Yu-xiang, <i>et al.</i> (3676)
Atmospheric Ozone Concentration Prediction in Nanjing Based on LightGBM	ZHU Jia-ying, AN Jun-lin, FENG Yue-zheng, <i>et al.</i> (3685)
Meteorological Formation Mechanisms and Potential Sources of an Ozone Pollution Process in Winter of 2022 in Guangdong Province	LI Ting-yuan, CHEN Jing-yang, GONG Yu, <i>et al.</i> (3695)
Impact of Summer Tropospheric Ozone Radiative Forcing on Meteorology and Air Quality in North China	DU Nan, CHEN Lei, LIAO Hong, <i>et al.</i> (3705)
Identification of Impacts from Meteorology and Local and Transported Photochemical Generation on Ozone Trends in Changsha from 2018 to 2020	YANG Jun, YANG Lei-feng, DING Hua, <i>et al.</i> (3715)
Spatio-temporal Variation and Multi-dimensional Detection of Driving Mechanism of PM _{2.5} Concentration in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration from 2000 to 2021	XU Yong, GUO Zhen-dong, ZHENG Zhi-wei, <i>et al.</i> (3724)
Estimation of PM _{2.5} Hourly Concentration in Sichuan Province Based on GTWR-XGBoost Model	WU Di, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (3738)
Transmission and Growth Characteristics of Severe PM _{2.5} Pollution Events from 2013 to 2021 in Xingtai, Hebei	JIANG Qi, SHENG Li, JIN Yu-chen, <i>et al.</i> (3749)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Urban Shanghai During Cold Season Based on High Time-resolution Measurements of Organic Molecular Markers	ZHU Shu-hui (3760)
Emission Factors of Carbonaceous Aerosol and Stable Carbon Isotope for In-use Vehicles	YU Ming-yuan, WANG Qian, FU Ming-liang, <i>et al.</i> (3771)
Composition Characteristics of Volatile Organic Compounds and Associated Contributions to Secondary Pollution in Shenyang Industrial Area in Summer	GUAN Lu, SU Cong-cong, KU Ying-ying, <i>et al.</i> (3779)
Characteristics of VOCs and Assessment of Emission Reduction Effect During the Epidemic Lockdown Period in Shenzhen Urban Area	YUN Long, LIN Chu-xiong, LI Cheng-liu, <i>et al.</i> (3788)
Characteristics of Organic Matter Composition and Oxidation Potential in Road Dust in Winter in Xi'an	WANG Qing-wen, CHEN Qing-cai, WANG Chao, <i>et al.</i> (3797)
Contamination Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Compounds in Surface Dust of Suntuan Mining Area in Huaibei	XU Zhen-peng, QIAN Ya-hui, HONG Xiu-ping, <i>et al.</i> (3809)
Spatial-temporal Variation in Water Quality and Its Response to Precipitation and Land Use in Baiyangdian Lake in the Early Stage of the Construction of Xiong'an New Area	WANG Zi-ming, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (3820)
Simulation of Pollution Apportionment and Optimization of Control Methods in Watershed Scale: A Case Study of the Shun'an Watershed in Tongling City	LIU Guo-wangchen, CHEN Lei, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (3835)
Evaluation of Shallow Groundwater Quality and Optimization of Monitoring Indicators in Nanchang	ZHENG Zi-yin, CHU Xiao-dong, XU Jin-ying, <i>et al.</i> (3846)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics and Influencing Factors of "Three Waters" in Shandian River Basin	YANG Li-na, JIA De-bin, GAO Rui-zhong, <i>et al.</i> (3855)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Abundant and Rare Planktonic Microeukaryotes in Jinsha River	YAN Bing-cheng, CUI Ge, SUN Sheng-hao, <i>et al.</i> (3864)
Bacterial Community Diversity in Channel Sediments of Different Disturbance Sections of the Jialing River	ZHU Lan-ping, ZHANG Tuo, LI Jia-ning, <i>et al.</i> (3872)
Effects of Reservoir Water Depth on Different Plankton Communities and Keystone Species of Network Interaction	WANG Xun, LIAO Qin, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (3881)
Correlation Between the Diversity Characteristics of Groundwater Bacterial Community and Environmental Factors in Typical Industrial Areas	WU Jian-qiang, ZHANG Shu-yuan, WANG Min, <i>et al.</i> (3892)
Effects of Fertilizer Application Strategy Adjustments on Nitrogen and Phosphorus Loss from Typical Crop Systems in Taihu Lake Region	YU Ying-liang, WANG Yi-zhi, YANG Bei, <i>et al.</i> (3902)
Estimation of Cropland Nitrogen Runoff Loss Loads in the Yangtze River Basin Based on the Machine Learning Approaches	ZHANG Yu-fu, PAN Zhe-qi, CHEN Ding-jiang (3913)
Classification and Identification of Non-point Source Nitrogen Pollution in Surface Flow of the Shangwu River Watershed in the Qiandao Lake Region	YU Ke, YAN Yan, TANG Zhang-xuan, <i>et al.</i> (3923)
Spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in the Main Stream and Typical Tributaries of Tuojiang River and Fujiang River	LI Zi-yang, ZHOU Ming-hua, XU Peng, <i>et al.</i> (3933)
Sediment Pollution and Dredging Effect of Waqinhui River	ZHANG Mu, REN Zeng-yi, ZHANG Man, <i>et al.</i> (3945)
Critical Review on Environmental Occurrence and Photochemical Behavior of Substituted Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	GE Lin-ke, WANG Zi-yu, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (3957)
Cadmium and Arsenic Interactions During Co-adsorption onto Goethite	SU Zi-xian, LIU Sai-hong, GUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Catalyst Cyclodextrin-Fe-TAML to Activate H ₂ O ₂ and Oxidize Organic Micropollutants in Water	LIU Qing-quan, CAI Ben-zhe, CAI Xi-yun (3978)
Performance and Reaction Mechanism of Co(II) Mediated Activation of Peroxymonosulfate for Degrading Nitrilotris (Methylene Phosphonic Acid)	ZHU Jing-lin, WANG Shu (3990)
Change in Granulation Potential and Microbial Enrichment Characteristics of Sludge Induced by Microplastics	XIE Qing-fan, YU Nan, ZHANG Ni, <i>et al.</i> (3997)
Accumulation Characteristics and Probabilistic Risk Assessment of Cd in Agricultural Soils Across China	WANG Jing, WEI Heng, PAN Bo (4006)
Source Analysis and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Geological High Background Area in Southeastern Chongqing	JIANG Yu-lian, YU Jing, WANG Rui, <i>et al.</i> (4017)
Integrated Analysis on Source-exposure Risk of Heavy Metals in Farmland Soil Based on PMF Model: A Case Study in the E-waste Dismantling Area in Zhejiang Province	FANG Jia, HE Ying, HUANG Nai-tao, <i>et al.</i> (4027)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Farmland Soil and Crops in the Suburbs of Urumqi	FAN Yue, CAO Shuang-yu, Nuerla Ailijiang, <i>et al.</i> (4039)
Distribution and Driving Mechanisms of Antibiotic Resistance Genes in Desert-Oasis Continuum	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yidan, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4052)
Characteristics of Antibiotic Contamination of Soil in China in Past Fifteen Years and the Bioremediation Technology: A Review	ZHAO Xiao-dong, QIAO Qing-qing, QIN Xiao-rui, <i>et al.</i> (4059)
Modified Biochar for Remediation of Soil Contaminated with Arsenic and Cadmium: A Review	LÜ Peng, LI Lian-fang, HUANG Xiao-ya (4077)
Effect of Biogas Slurry Return to Field on Heavy Metal Accumulation in Soil-crop System: A Meta-analysis	ZHAO Qi-zhi, YANG Zhi-min, KONG Fan-jing, <i>et al.</i> (4091)
Remediation Effect of Two Iron-modified Biochars on Slightly Alkaline Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	LIANG Xin-ran, HE Dan, ZHENG Zhao-hua, <i>et al.</i> (4100)
Effects of Straw Removal Measure on Soil Cd Bioavailability and Rice Cd Accumulation	WANG Zi-yu, ZHOU Hang, ZHOU Kun-hua, <i>et al.</i> (4109)
Application of Desulphurized Gypsum with Straw to Improve Physicochemical Properties of Saline-alkali Land in Yellow River Delta	ZHAO Hui-li, YU Jin-yi, LIU Tao, <i>et al.</i> (4119)
Biological Evaluation and Key Stress Factor Diagnosis of Compound Contaminated Soil Based on Environmental DNA	HUANG Xiang-yun, ZHONG Wen-jun, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4130)
Comprehensive Quality Assessment of Soil-Maize Heavy Metals in High Geological Background Area	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (4142)
Ecological Risk and Health Risk of Heavy Metal Pollution in Vegetable Production System of Zhejiang Province	ZHANG Shu-min, LIU Cui-ling, YANG Gui-ling, <i>et al.</i> (4151)
Effect of Biochar with Phosphorus Fertilizer on Soil Nutrients, Enzyme Activity, and Nutrient Uptake of <i>Alfalfa</i>	LIU Xin-yu, WANG Dong-mei, ZHANG Ze-zhou, <i>et al.</i> (4162)
Effects of Low-density Polyethylene Microplastics on the Growth and Physiology Characteristics of <i>Ipomoea aquatica</i> Forsk	ZHOU Ying, JIANG Wen-ting, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4170)
Effects of Biogas Slurry Application on Soil Microbial Communities Structure and Function During Wheat-rice Stubble Period	QIAO Yu-ying, XI Hui, LI Na, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Soil Bacterial Community Structure and Ecological Function Characteristics in Different Pollution Levels of Lead-zinc Tailings in Datong	LIU Ze-xun, ZHUANG Jia-yao, LIU Chao, <i>et al.</i> (4191)
Effect of Fire-deposited Charcoal on Soil Organic Carbon Pools and Associated Enzyme Activities in a Recently Harvested <i>Pinus massoniana</i> Plantation Subjected to Broadcast Burning	YAO Zhi, JIAO Peng-yu, WU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (4201)