



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

巢湖流域种植模式改变对养分表观平衡及土壤化学性质的影响

周楠楠, 王京京, 王家嘉, 宋朝辉, 杨文斌, 左双宝, 王赢

引用本文:

周楠楠, 王京京, 王家嘉, 宋朝辉, 杨文斌, 左双宝, 王赢. 巢湖流域种植模式改变对养分表观平衡及土壤化学性质的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(4): 772–781.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0497>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

河西绿洲灌区膜下滴灌水稻氮素平衡及氮肥投入阈值研究

唐文雪, 马忠明, 罗双龙, 段誉

农业资源与环境学报. 2023, 40(4): 763–771 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0048>

洱海流域不同种植模式稻田生态系统服务价值评估

普燕爽, 陈建军, 祖艳群, 刘淑艳, 张克强, 李元

农业资源与环境学报. 2022, 39(5): 958–966 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0237>

粪肥增施对水稻产量和氮素利用效率的影响

刘泰, 王洪媛, 杨波, 魏静, 贺鹏程, 王玉龙, 刘宏斌

农业资源与环境学报. 2022, 39(3): 545–555 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0096>

红叶甜菜-花生和油葵-花生轮作修复土壤Cd的能力

涂鹏飞, 谭可夫, 陈璘涵, 杨洋, 袁婧, 陈奕暄, 杨耀东, 曾清如

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 609–614 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0065>

有机替代对长江流域水稻产量和籽粒含氮量的影响

任科宇, 陆东明, 邹洪琴, 王慧颖, 许发辉, 卢昌艾, 段英华

农业资源与环境学报. 2022, 39(4): 716–725 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0380>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

周楠楠, 王京京, 王家嘉, 等. 巢湖流域种植模式改变对养分表观平衡及土壤化学性质的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(4): 772–781.

ZHOU N N, WANG J J, WANG J J, et al. Effects of planting pattern change on apparent nutrient balance and soil chemical properties in Chaohu Lake basin [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(4): 772–781.

巢湖流域种植模式改变对养分表观平衡及土壤化学性质的影响

周楠楠¹, 王京京¹, 王家嘉², 宋朝辉¹, 杨文斌¹, 左双宝⁴, 王赢^{1,2,3*}

(1. 安徽师范大学生态与环境学院, 皖江流域退化生态系统的恢复与重建省部共建协同创新中心, 安徽 芜湖 241003; 2. 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 安徽养分循环与资源环境省级实验室, 合肥 230001; 3. 安徽师范大学化学与材料科学学院, 分子基材料安徽省重点实验室, 安徽 芜湖 241003; 4. 巨石集团有限公司, 巨石复合材料研究院, 浙江 桐乡 314500)

摘要:为明确巢湖流域内的农田养分平衡状况, 制定面源污染防控措施, 本研究以巢湖流域传统休耕-水稻种植模式($n=26$)作为参照, 选取该区域典型的大棚番茄-水稻轮作模式(由休耕-水稻种植模式转变而来, $n=26$)为研究对象, 探究不同种植模式下的养分盈亏状况, 并分析种植模式改变对土壤化学性质的影响。结果表明, 休耕-水稻种植模式下氮盈余 $34.02 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 其盈余率为 16.7%; 磷和钾分别亏损 2.96 、 $13.71 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 两者亏损率分别为 9.1% 和 19.7%。大棚番茄-水稻轮作模式下氮、磷、钾盈余量分别为 589.27 、 194.93 、 $144.22 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 三者盈余率分别为 61.5%、66.4%、26.9%。长期大量施肥下, 大棚番茄-水稻轮作导致土壤积累硝态氮、铵态氮、有效磷和速效钾含量分别为休耕-水稻种植模式土壤的 50.05、7.05、1.95 倍和 1.72 倍。对比休耕-水稻种植模式, 大棚番茄-水稻轮作模式下过量施用氮肥导致土壤 pH 平均下降了 0.83 个单位, 电导率平均增加了 $0.73 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, 该模式下土壤呈明显的酸化和盐渍化趋势。研究表明, 当前巢湖流域大棚番茄-水稻轮作模式下的养分收支呈盈余状态, 土壤积累了大量速效养分, 存在一定的流失风险。

关键词:巢湖; 设施栽培; 养分平衡; 土壤酸化; 次生盐渍化

中图分类号: S158; S153

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2023)04-0772-10

doi: 10.13254/j.jare.2022.0497

Effects of planting pattern change on apparent nutrient balance and soil chemical properties in Chaohu Lake basin

ZHOU Nannan¹, WANG Jingjing¹, WANG Jiajia², SONG Zhaohui¹, YANG Wenbin¹, ZUO Shuangbao⁴, WANG Ying^{1,2,3*}

(1. Center of Cooperative Innovation for Recovery and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Wanjiang City Belt, School of Ecology and Environment, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China; 2. Anhui Provincial Key Laboratory of Nutrient Recycling, Resources and Environment, Soil and Fertilizer Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230001, China; 3. Anhui Laboratory of Molecule-Based Materials, School of Chemistry and Materials Science, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China; 4. Jushi Institute of Composite Materials, Jushi Group Co. Ltd., Tongxiang 314500, China)

Abstract: As one of the five largest freshwater lakes in China, Chaohu Lake is facing the serious problem of eutrophication. The nutrient

收稿日期: 2022-07-26 录用日期: 2022-11-16

作者简介: 周楠楠(1985—), 女, 安徽淮南人, 博士, 讲师, 主要从事农田养分循环及环境效应研究。E-mail: nannanzh@ahnu.edu.cn

*通信作者: 王赢 E-mail: gleaner@foxmail.com

基金项目: 安徽省自然科学基金项目(1708085QD88, 2008085QD162); 安徽高校协同创新项目(GXXT-2020-075); 分子基材料安徽省重点实验室开放基金项目(fzj19012); 养分循环与资源环境安徽省重点实验室开放基金项目; 安徽师范大学校立项目(2018XJJ55, 2018XJJ56, 2018XJJ81, 2018XJJ94); 安徽省留学人员创新项目

Project supported: The Natural Science Foundation of Anhui Province(1708085QD88, 2008085QD162); The University Synergy Innovation Program of Anhui Province(GXXT-2020-075); The Foundation of Anhui Laboratory of Molecule-Based Materials(fzj19012); The Foundation of Anhui Provincial Key Laboratory of Nutrient Recycling; The Foundation of Anhui Normal University(2018XJJ55, 2018XJJ56, 2018XJJ81, 2018XJJ94); The Anhui Provincial Foundation for Overseas Students

balance of farmland in the Chaohu Lake basin is not clear, which restricts the formulation of non-point source pollution prevention and control measures. To determine the nutrient surplus or loss status under the different planting patterns and analyze the influence of planting pattern changes on soil chemical properties, two planting patterns in the Chaohu Lake basin were applied and compared: the traditional fallow-rice planting pattern ($n=26$), which was used as a reference, and the typical greenhouse tomato-rice rotation pattern ($n=26$). The results showed that, under the fallow-rice planting pattern, the nitrogen (N) surplus was $34.02 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, and the surplus rate was 16.7%. Phosphorus (P) and potassium (K) decreased by $2.96 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and $13.71 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively, and the loss rates were 9.1% and 19.7%, respectively. Under the greenhouse tomato-rice rotation pattern, the N, P, and K surpluses were 589.27, 194.93 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, and 144.22 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively, and the surplus rates were 61.5%, 66.4%, and 26.9%, respectively. After long-term excessive fertilization, the nitrate N, ammonium N, available P, and available K contents in the soil under the greenhouse tomato-rice rotation pattern were 50.05, 7.05, 1.95, and 1.72 times higher than those under the fallow-rice pattern, respectively. Compared with the fallow-rice pattern, the excessive application of N fertilizer under the greenhouse tomato-rice rotation pattern resulted in the soil pH decreasing by an average decrease of 0.83 units and an average electroconductivity increase of $0.73 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, showing an obvious trend of acidification and salinization. The results indicates that the nutrient budgets under the current greenhouse tomato-rice rotation pattern are in surplus, and the soils have accumulated a large amount of available nutrients, which have a certain risk of nutrient loss.

Keywords: Chaohu Lake; facility cultivation; nutrient balance; soil acidification; secondary salinization

我国设施蔬菜种植面积从1978年的5 300 hm^2 增长到2020年的 $4.05 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占全球设施蔬菜种植面积的80%左右^[1]。与传统大田作物相比,设施蔬菜栽培复种指数高^[2],化肥投入量大,过量施肥现象普遍存在^[3]。过多的养分投入不仅会降低肥料利用效率,导致养分大量积累^[4],还会造成土壤理化性状恶化^[5]、水体富营养化^[6]、大气污染^[7-8]以及生物多样性降低^[9]等一系列环境生态问题。在分析过量施肥的环境风险时,养分收支平衡是一项重要指标,量化养分收支、分析其盈亏有助于评价肥料施用是否合理、农业生产是否可持续^[10-11]。

巢湖作为我国五大淡水湖泊之一,其水质决定了周围城镇的用水安全,流域内种植业面源污染对巢湖水体的影响不容忽视^[12]。有研究发现引起巢湖水体富营养化的主要污染指标为总氮、总磷^[13-14],张之源等^[15]经过近10 a的连续巢湖水质监测,发现非点源污染的总氮贡献率达49%,总磷贡献率达40%。王雪蕾等^[16]的研究表明:2010年巢湖流域总氮产生量为1 900.3 t,入河量为846.5 t;总磷为244.1 t,入河量为76 t;农业面源污染中氮素污染贡献最大,贡献率达52.5%。为追求更高的经济效益,且得益于区位优势和水资源优势,一些分布于城市附近的大型湖泊流域内的大量稻田转变为设施蔬菜田^[17-18],巢湖流域同样呈现此类转变趋势^[19],存在农业面源污染风险^[20-22]。当前关于巢湖流域种植模式改变对养分平衡和土壤性质的影响尚不明确。农业种植过程中盈余的养分是面源污染的重要源头,而巢湖流域设施蔬菜农田养分平衡研究的缺少导致较难对其盈余量进行科学评估,

从而制约了该区域面源污染的防控。

依据农村面源污染治理的“4R”理论^[23],即源头减量(Reduce)、过程阻断(Retain)、养分再利用(Reuse)和生态修复(Restore),从源头控制污染物的产生被认为是防治农业面源污染的最佳对策^[24]。鉴于此,本研究以巢湖流域传统的休耕-水稻种植模式为参照,选取当地典型的大棚番茄-水稻轮作模式(均由休耕-水稻种植模式转变而来)为研究对象,分析种植模式改变对养分平衡和土壤化学性质的影响,以期为该区域合理施肥、从源头降低养分负荷、保障集约化生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域农业种植概况

研究区域位于安徽省巢湖市巢湖东北岸中埠镇($117^{\circ}42' \sim 117^{\circ}47' \text{ E}$, $31^{\circ}37' \sim 31^{\circ}42' \text{ N}$)(图1),土壤类型为黄棕壤。该区域温度适宜,全年平均气温约 $15 \sim 16^{\circ}\text{C}$,年降水量平均约为1 100 mm,全年降水主要集中在6—8月,年平均湿度为77%,属于亚热带和温带过渡性的副热带季风气候。

该区域农田曾以单季水稻种植(休耕-水稻)为主,2000年后部分农田陆续转变为大棚番茄-水稻轮作模式。当前,休耕-水稻和大棚番茄-水稻轮作为巢湖流域典型的种植模式^[25]。休耕-水稻模式下,每年6月上旬移植水稻幼苗,10月中下旬收获,11月至次年5月休耕。大棚番茄-水稻轮作模式下,每年12月下旬移栽番茄幼苗,次年5月下旬拆棚进行田地修整,随后种植水稻。

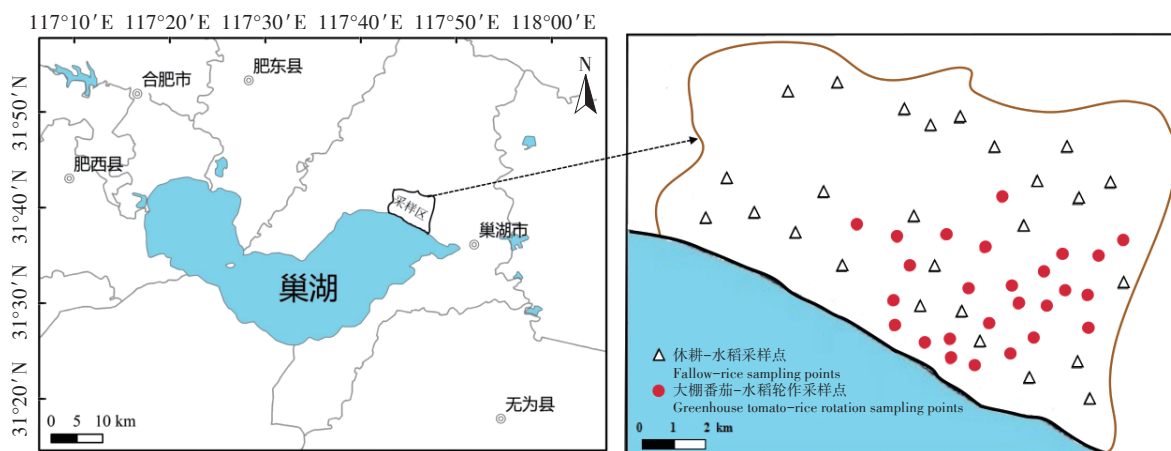


图1 研究区域位置及采样点分布

Figure 1 The location of the study area and distribution of sampling points

在前期对巢湖周围农田种植情况大范围调查的基础上,本研究选择两种种植模式的代表性田块各26块(图1),研究区域农田面积约为800 hm²。大棚番茄-水稻轮作田块的选择主要考虑种植年限和施肥差异。26块大棚番茄-水稻农田的轮作年限为1~10 a,均值为4.3 a,离散程度较大(变异系数为58.9%)。轮作模式中,相较于水稻种植,大棚番茄种植除了化肥外还施用了有机肥(鸡粪肥),且各种肥料的施用量较大,田块间施肥量差异较大(表1)。轮作模式施用的复合肥品牌较多、养分含量不统一,N、P₂O₅、K₂O含量范围分别为13%~21%、6%~17%、13%~30%。休耕-水稻为传统种植模式,不存在种植年限差异,具体的施肥时间及施肥量与大棚番茄-水稻模式中的水稻种植情况类似,不同田块间施肥差异较小。

1.2 样品采集与分析

本研究旨在对比分析两种种植模式对土壤的长期影响,为尽量减少施肥措施对土壤的短期扰动,于

两种种植模式结束后的休耕期(2019年12月)采集0~20 cm深度的土壤样品。取样时每个田块按“之”字形取5个样点,混合成一个土壤样品。土壤样品过1 mm筛后分为两部分,一部分自然风干用于测定土壤理化性状,另一部分鲜样直接测定土壤铵态氮、硝态氮含量。2019年5月、10月分别采集番茄(收获期多次采集番茄成熟果实,收获期结束后采集植株)、水稻样品以测定氮、磷、钾含量,取样时采用对角线法于各田块作物长势均匀区域选取3个采样点并采集植物地上部,每个采样点面积为1 m×1 m。

土壤全氮采用杜马斯燃烧法(EURO EA 元素分析仪, Eurovector, 意大利)测定;全磷采用NaOH熔融-钼锑抗比色法测定;全钾采用氢氟酸消解-火焰光度法(TAS-990原子吸收分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司)测定;硝态氮采用酚二磺酸比色法测定;铵态氮采用KCl浸提-靛酚蓝比色法测定;有效磷采用NaHCO₃提取-钼锑抗比色法测定;速效

表1 大棚番茄-水稻轮作模式种植情况

Table 1 Cropping status under greenhouse tomato-rice pattern

作物 Crop	施肥时间 Applying time	施肥种类 Fertilizer type	施肥量 Applying amount	
			均值 Mean/(kg·hm ⁻²)	变异系数 CV/%
水稻 Rice	6月上旬	复合肥	225.4	2.3
	6月下旬	尿素	119.6	1.7
	8月中旬	尿素	119.6	1.7
		复合肥	225.0	2.3
大棚番茄 Greenhouse tomato	12月下旬	复合肥	666.7	14.1
		有机肥	17 708.3	10.9
	3月上旬	尿素	250.8	17.8
	4月上旬	复合肥	128.8	17.5
		复合肥	128.8	17.5

钾采用NH₄OAc浸提-火焰光度法(TAS-990原子吸收分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司)测定;有机质采用重铬酸钾容量法测定。土壤pH和电导率(EC)采用玻璃电极法(DZS-708L,上海雷磁仪器有限公司)测定,测定pH时土水比为1:2.5,测定EC时土水比为1:5。

植株样品的全氮采用H₂SO₄-H₂O₂消解奈氏比色法测定,全磷采用H₂SO₄-H₂O₂消解钒钼黄比色法测定,全钾采用H₂SO₄-H₂O₂消解火焰光度法(TAS-990原子吸收分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司)测定。研究区域蔬菜田施用的鸡粪购于当地一家大型养鸡场,在施用有机肥(12月)前,从该养鸡场采集经堆腐晒干的5份成品有机肥样品,并统计各农田实际施用量。有机肥样品中全氮含量检测采用蒸馏法测定,全磷采用钒钼黄比色法测定,全钾采用火焰光度法^[26](TAS-990原子吸收分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司)测定。

采用雨量记录仪(HD2013-D,北京北方大河仪器仪表有限公司)记录降雨量,并收集水样,分析其氮、磷、钾浓度,计算湿沉降量。当地主要灌溉时期为定植期和坐果期,采用流速仪(LSH10-1QC型超声波多普勒流速流量仪,博意达科技,中国)分别测量每块农田每次灌溉水通量,并收集上述两个时期的灌溉水样,带回实验室检测氮、磷、钾浓度,并计算灌溉输入养分量。水样中氮的测定采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法,磷的测定采用钼酸铵分光光度法,钾的测定采用火焰原子吸收分光光度法。

1.3 数据处理与分析

大面积区域内的养分平衡研究较难在每块农田设置仪器监测全部的养分流通项(如径流、淋溶及挥发等),因此通常采用养分表观平衡率反映,即考虑养分主要的输入与输出间的平衡来反映,不计作物栽培过程中的养分损失及非共生固氮等养分输入^[20],计算公

式如下:
养分输出量(kg·hm⁻²·a⁻¹)=收割携走植株生物量(kg·hm⁻²·a⁻¹)×植株养分含量(kg·kg⁻¹) (1)

养分盈亏量(kg·hm⁻²·a⁻¹)=养分输入量(kg·hm⁻²·a⁻¹) - 养分输出量(kg·hm⁻²·a⁻¹) (2)

养分输入量主要考虑化肥和有机肥输入、湿沉降以及灌溉水所带养分。养分输出量主要考虑作物收割携走量。

养分盈亏率=(养分盈亏量/养分输入量)×100% (3)

由于单个农田内每年的施肥类型、施肥量相似,每年的作物产量及养分含量波动较小,因此每年间的养分平衡差别较小。本研究将年均养分平衡量乘以设施栽培年限得到养分总平衡量,计算公式如下:

养分总平衡量(kg·hm⁻²)=年均养分平衡量(kg·hm⁻²·a⁻¹)×栽培年限(a) (4)

数据采用SPSS 20.0进行统计分析,采用独立样本*t*检验(Independent samples *t* test)分析两种种植模式间的差异,采用皮尔森相关分析(Pearson correlation analysis)评估因子间的关系。

2 结果与分析

2.1 两种种植模式对土壤养分的影响

大棚番茄-水稻轮作土壤有效态养分含量均显著高于休耕-水稻土壤,前者硝态氮、铵态氮、有效磷和速效钾的平均含量分别为后者的50.05、7.05、1.95倍和1.72倍(表2)。说明大棚番茄-水稻轮作土壤有效态养分累积明显。相比休耕-水稻土壤,大棚番茄-水稻轮作土壤中全磷和有机质含量分别显著增加了9.0%和13.0%(*P*<0.05)。两种种植模式间土壤全氮和全钾含量差异不显著。

由表3可知,大棚番茄-水稻轮作土壤pH值显著低于休耕-水稻土壤,pH均值下降了0.83个单位,表

表2 两种种植模式土壤养分含量
Table 2 Soil nutrient contents under the two cropping patterns

种植模式 Cropping pattern	全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus/ (g·kg ⁻¹)	全钾 Total potassium/ (g·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	硝态氮 Nitrate nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)	铵态氮 Ammonium nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/ (mg·kg ⁻¹)
休耕-水稻 Fallow-rice	1.35±0.10a	0.67±0.06b	19.30±1.28a	25.49±2.37b	2.70±1.32b	0.44±0.19b	51.67±7.04b	120.69±29.89b
大棚番茄-水稻 Greenhouse tomato-rice	1.42±0.16a	0.73±0.09a	21.95±3.06a	28.81±2.96a	135.14±79.91a	3.10±2.92a	100.73±21.86a	207.50±82.11a

注:表中数据为平均值±标准差(*n*=26),同一养分指标数据后的不同字母表示两种种植模式间差异显著(*P*<0.05)。下同。
Note: Data in the table are Mean±SD(*n*=26). Different letters for the same nutrient index indicate significant differences between two cropping patterns (*P*<0.05). The same below.

表3 两种种植模式的土壤pH与EC

Table 3 Soil pH and EC under the two cropping patterns

种植模式 Cropping pattern	pH	EC/($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)
休耕-水稻 Fallow-rice	6.13±0.18a	0.20±0.07b
大棚番茄-水稻 Greenhouse tomato-rice	5.30±0.53b	0.93±0.27a

明大棚番茄-水稻轮作土壤酸化现象明显。大棚番茄-水稻轮作土壤EC值显著高于休耕-水稻土壤,EC均值增加了 $0.73\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$,次生盐渍化明显。

2.2 两种种植模式的养分表现平衡

休耕-水稻种植模式下化肥为氮、磷、钾的主要输入途径,分别占总输入量的92.6%、96.4%、85.9%,其中氮盈余 $34.02\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,其盈余率为16.7%,磷和钾分别亏损 2.96 、 $13.71\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,两者亏损率分别为9.1%、19.7%(表4)。

大棚番茄-水稻轮作模式下,以化肥形式输入的氮、磷、钾分别占总输入量的54.5%、42.9%、44.5%,有机肥途径输入的氮、磷、钾分别占总输入量的43.9%、56.8%、53.8%,表明有机肥同样是该模式下农田养分的重要来源。在不考虑有机肥输入时,氮和磷分别盈余 168.52 、 $28.58\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,两者盈余率分别为31.4%和22.6%,而在考虑有机肥后,氮和磷盈余量分别增加至 589.27 、 $194.93\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,同时氮和磷盈余率升高至61.5%和66.4%。在不考虑有机肥输入时,钾呈明显的亏损状态,亏损量为 $144.06\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,在考虑有机肥后,则有 $144.22\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的钾盈余,其盈余率为26.9%,表明该地区大棚番茄-水稻轮作模式下有机肥为重要的钾源。

2.3 养分平衡与土壤养分之间的相关性

大棚番茄-水稻轮作模式下氮的总平衡量与土

壤硝态氮含量、磷的总平衡量与土壤有效磷含量、钾的总平衡量与土壤速效钾含量之间均存在显著的正相关关系(图2),这表明部分轮作农田中养分输入长期远高于输出导致土壤中累积了大量速效养分。

由图2a可知,大棚番茄-水稻轮作模式农田氮的总平衡量波动范围较大($565.83\sim 5\ 989.59\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),这主要是由于该地区缺乏科学施肥指导,不同农户施肥习惯差异较大,且设施栽培年限不同。氮的总平衡量较大的波动造成了不同田块间土壤硝态氮差异明显($43.15\sim 362.14\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。同样的情况也存在于磷的总平衡($165.78\sim 2\ 121.95\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)与有效磷($55.56\sim 158.66\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、钾的总平衡($112.43\sim 1\ 374.79\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)与速效钾($106.03\sim 386.33\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)之间(图2b~图2c)。

大棚番茄-水稻轮作土壤中硝态氮含量与EC值呈显著正相关(图3),表明硝态氮的积累是引起土壤盐渍化的主要原因之一。硝态氮和氢离子是硝化反应的产物,而硝态氮含量与pH值呈显著负相关(图4),表明大量施用氮肥后的硝化进程可能是导致土壤酸化的一个重要原因。不同农田中氮的总平衡的差异导致积累硝态氮波动范围较大(图2a),因此各农田盐渍化和酸化的程度不同,EC值范围为 $0.45\sim 1.56\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$,pH范围为 $4.47\sim 6.21$ 。

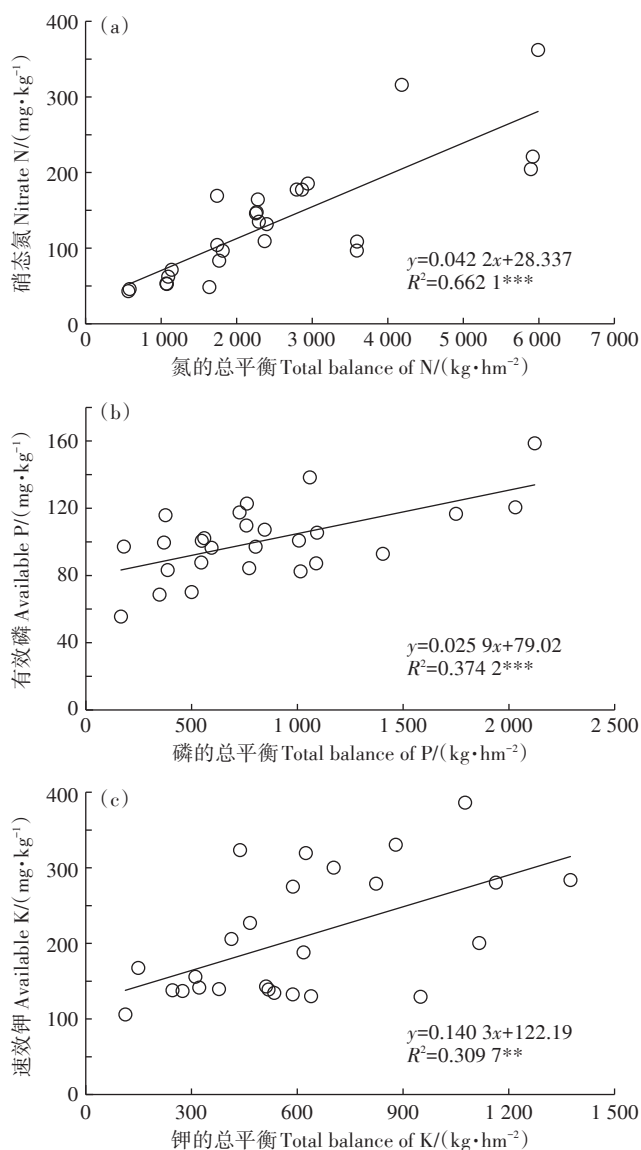
3 讨论

3.1 两种种植模式对农田养分平衡状况的影响

大棚番茄-水稻轮作模式下湿沉降途径养分输入量低于休耕-水稻,灌溉水途径养分输入量高于休耕-水稻(表4),这是由于前者每年在固定时间内覆棚,单位面积土壤接收湿沉降量较低,且多出一季番

表4 两种种植模式下年均养分平衡($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)Table 4 Annual nutrient balance under the two cropping patterns($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)

项目 Project	休耕-水稻 Fallow-rice(n=26)			大棚番茄-水稻轮作 Greenhouse tomato-rice(n=26)		
	氮 N	磷 P	钾 K	氮 N	磷 P	钾 K
化肥 Chemical fertilizer	189.18±7.36b	31.44±5.13b	59.84±4.95b	522.37±16.50a	125.75±14.63a	238.95±13.97a
有机肥 Organic fertilizer	0	0	0	420.95±13.07	166.78±12.52	288.93±12.37
湿沉降 Wet deposition	10.9	0.7	4.5	8.1	0.6	3.5
灌溉水 Irrigation water	4.3	0.5	5.3	6.8	0.6	6.3
养分输入 Nutrient input	204.38±7.36b	32.61±5.13b	69.64±4.95b	958.25±21.05a	293.45±19.26a	537.16±18.66a
养分支出 Nutrient output	170.30±4.72b	49.58±2.12b	83.38±7.54b	368.98±15.95a	98.40±9.70a	392.89±24.14a
养分平衡(不包括有机肥) Nutrient balance (excluding organic fertilizer)	34.02±6.32b	-2.96±4.91b	-13.71±6.81a	168.52±16.35a	28.58±11.83a	-144.06±22.31b
养分平衡(包括有机肥) Nutrient balance (including organic fertilizer)	34.02±6.32b	-2.96±4.91b	-13.71±6.81b	589.27±19.82a	194.93±14.71a	144.22±20.58a



表示相关性达到 $P<0.01$ 极显著水平,*表示相关性达到 $P<0.001$ 极显著水平。下同。

indicates the correlation was significant at $P<0.01$ level, *indicates the correlation was significant at $P<0.001$ level. The same below.

图2 大棚番茄-水稻轮作模式下氮的总平衡与土壤硝态氮、磷的总平衡与土壤有效磷以及钾的总平衡与土壤速效钾间的关系
 Figure 2 Relationships between total balance of N and soil nitrate N, total balance of P and soil available P, and total balance of K and soil available K under greenhouse tomato-rice rotation pattern

茄种植,灌溉水量较大。

施肥输入的养分是决定养分盈余率的最主要因素^[21]。我国设施蔬菜生产过程中,过量施肥现象十分普遍^[27-28]。刘衍等^[29]对北京各地区设施蔬菜的施肥情况调查发现,大棚蔬菜氮、磷、钾平均投入量分别为593、317、438 kg·hm⁻²,养分超标率高于72%。Ju等^[30]

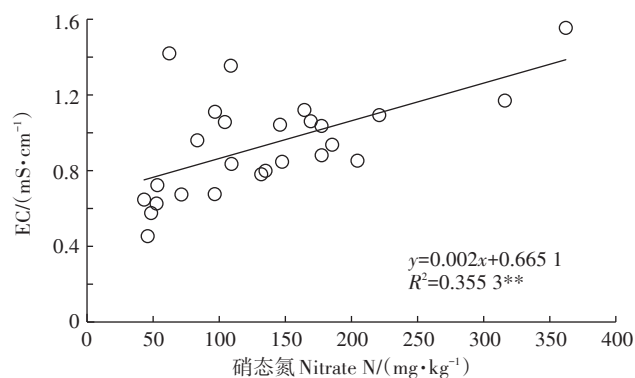


图3 大棚番茄-水稻轮作模式下土壤硝态氮与EC的关系
 Figure 3 Relationship between soil nitrate N and EC under greenhouse tomato-rice rotation pattern

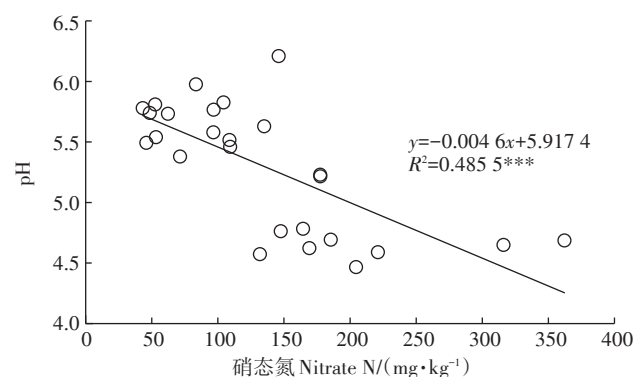


图4 大棚番茄-水稻轮作模式下硝态氮与pH的关系
 Figure 4 Relationship between soil nitrate N and pH under the greenhouse tomato-rice rotation pattern

在山东省开展研究发现,设施蔬菜栽培中的氮、磷、钾输入量分别达到4 670、1 409、1 916 kg·hm⁻²,养分盈余率分别高达93%、95%、77%。参照养分盈余量10%~30%为轻度过量、30%~60%为中度过量、大于60%为重度过量的划分标准^[31-33],本研究区域内大棚番茄-水稻轮作模式下氮、磷投入重度过量,钾中度过量,造成大量养分积累。即使不考虑有机肥和土壤有机氮的矿化所提供的植物有效氮,化肥氮投入仍有明显的盈余(168.52 kg·hm⁻²·a⁻¹),减量空间较大。此外,作为对照的休耕-水稻种植模式下氮属于轻度过量,磷属于合理,钾属于不足。

结合表1数据及研究区域面积可估算出该区域内氮、磷、钾盈余量分别为427.60~483.96、132.63~174.88、75.98~143.46 t。农田养分盈余与养分流失相关性较强,对流域河流水质有直接影响^[34-36]。因此,本研究区域盈余的养分可能在灌溉、降雨等因素的驱动下进入流域水体,增加面源污染风险。研究表明,

农业面源污染的总氮、总磷是巢湖富营养化的主要因素之一^[13,15]。王雪蕾等^[16]研究发现巢湖流域总氮、总磷产生量分别为1 900.3、244.1 t,入河量分别为846.5、76.0 t,其中农业面源污染对氮素污染贡献率(52.5%)最大,其研究中单位面积氮、磷盈余量低于本研究,这主要是因为:①其研究对象为广义巢湖流域(3市8县,面积1.4万km²),包含了大量的居民区和林地等,而本研究以氮、磷投入量较高的农田为主;②其研究时间为2010年,而近十几年来巢湖流域化肥施用量逐年上升^[13]。随着巢湖流域蔬菜种植面积稳步增加,由此引发的环境风险也相应增大。因此减少进入巢湖水体氮、磷的关键在于从源头减少肥料的施用、降低盈余量,使农田养分收支趋于平衡^[37]。

3.2 大棚番茄-水稻轮作下土壤速效养分的积累及其环境风险

养分盈余率是评判农田养分管理的重要指标。以氮为例,随着投入量增加,氮盈余量从负值到零再到正值的变化过程能够反映出消耗土壤氮、合理施氮和过量施氮的状况^[38]。

Li等^[39]和Du等^[40]研究发现当施氮量大于300 kg·hm⁻²时大棚番茄已经达到或接近最高经济产量。本研究中轮作农田施氮量远高于该值,导致部分土壤累积了大量硝态氮。由于硝态氮带负电荷,不易被土壤胶体吸附,因此极易随水迁移,一旦施用过,易通过径流造成水体富营养化,或通过淋溶污染地下水^[41-42]。同时,土壤硝态氮在硝化与反硝化过程中产生的N₂O还会加剧温室效应,而人类生产活动造成的N₂O排放中约有80%归因于农业^[43]。此外,过量施氮还会造成蔬菜硝酸盐含量超标^[44-45],硝酸盐进入人体后被还原成亚硝酸盐进而对健康产生威胁^[46-48]。因此,合理调整氮肥施用量、减少土壤硝态氮积累,是研究区域蔬菜种植亟需解决的问题。

参照全国土壤普查养分分级标准^[49],26个轮作农田土壤有效磷含量均超过40 mg·kg⁻¹,过量积累现象明显。轮作模式下土壤中大量积累的磷在灌溉等因素的驱动下,可能影响巢湖水质,因此应注意适当控制磷肥的施用量。参照该标准^[49],11块农田速效钾含量为中等水平、3块含量较高、12块呈高水平,表明钾长期大量盈余状态导致部分农田过量积累速效钾,这部分农田具有一定的钾肥减施空间。

通过上述分析,研究区域轮作模式下氮、磷、钾输入量均具有减施潜力。基于养分收支平衡理论,按照鸡粪肥平均施用量17 791.7 kg·hm⁻²及碱解氮、

有效磷和速效钾当季释放率39.9%、24.6%和78.8%计算^[50],轮作模式中通过化肥输入的氮、磷、钾应为201.0、57.4、165.2 kg·hm⁻²,因此在当前化肥平均输入量的基础上可分别减少61.5%、54.4%、30.9%。平衡养分收支、减少养分盈余量可有效缓解氮磷流失引起的水体污染,降低硝态氮淋失造成的人类健康危害。

3.3 种植模式改变对土壤化学性质的影响

参照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)中土壤酸碱度分级标准,轮作模式农田土壤介于酸性土壤与强酸性土壤之间。番茄生长的适宜pH值为5.0~7.0,而土壤酸性过强会影响正常生理活动^[51]。本研究中有9块农田的pH值低于5.0,随着集约化栽培的持续,未来会有更多的农田不适宜番茄种植。

依据高峻岭等^[52]的研究,研究区域内26个休耕-水稻种植模式农田土壤均处于低盐度等级,而26个大棚番茄-水稻轮作模式农田土壤中有11个处于超高盐度等级、6个处于高盐度等级、7个处于中盐度等级,说明大棚番茄-水稻轮作农田土壤次生盐渍化现象较严重。番茄正常生长的EC临界值为0.8 mS·cm⁻¹^[53],因此该轮作模式可能影响部分农田番茄的生长。

水旱轮作中淹水管理致使土壤处于还原厌氧状态,硝化作用受到一定抑制,而且排水、淋溶会带走大量根层土壤可溶性盐分,从而能够改善土壤酸化、盐渍化问题^[54-55]。但是在本研究中,由于大量施肥,轮作模式农田土壤呈明显的酸化、盐渍化趋势。因此,合理减少化肥(特别是氮肥)的施用、降低硝化进程、控制硝态氮的积累,是保障研究区域农业可持续发展的关键。通过相关性分析可得知,土壤硝态氮含量可作为有效的指征参数,即当控制硝态氮含量低于67.45 mg·kg⁻¹时,土壤次生盐渍化和土壤酸化可能得到有效改善。

4 结论

(1)巢湖流域休耕-水稻种植模式农田中氮轻度盈余,磷基本平衡,钾为亏损状态;大棚番茄-水稻轮作模式农田中氮、磷养分平均盈余率分别为61.5%、66.4%,均属于重度过量,钾的平均盈余率为26.9%,属于中度过量,存在一定的流失风险。

(2)巢湖流域大棚番茄-水稻轮作模式下氮、磷、钾肥具有一定的减施潜力,基于养分收支平衡理论,在当前化肥平均输入量的基础上可分别减少61.5%、

54.4%、30.9%。

(3)相比休耕-水稻种植模式,大棚番茄-水稻轮作模式下肥料的不合理施用造成部分土壤积累了大量速效养分,后者的硝态氮、铵态氮、有效磷和速效钾含量分别为前者的50.05、7.05、1.95倍和1.72倍。过量施用氮肥造成了轮作农田土壤pH平均下降0.83个单位,EC平均增加0.73 mS·cm⁻¹,酸化和次生盐渍化趋势明显。

参考文献:

- [1] ZHANG Z L, SU D, TANG Y, et al. Plastic shed soil salinity in China: Current status and next steps[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 296: 126453.
- [2] HUANG Q Y, TANG S H, FAN X L, et al. Higher economic benefits and changes in soil fertility due to intensifying winter crop rotation in double-rice cropping systems[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 157: 103773.
- [3] ZHANG B Z, LI Q, CAO J, et al. Reducing nitrogen leaching in a subtropical vegetable system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 241: 133-141.
- [4] YU C Q, HUANG X, CHEN H, et al. Managing nitrogen to restore water quality in China[J]. *Nature*, 2019, 567(7749): 516-520.
- [5] ZHANG X M, GUO J H, VOGT R D, et al. Soil acidification as an additional driver to organic carbon in major Chinese croplands[J]. *Geoderma*, 2020, 366: 114234.
- [6] 程谊, 张金波, 蔡祖聪. 气候-土壤-作物之间氮形态契合在氮肥管理中的关键作用[J]. *土壤学报*, 2019, 56(3): 507-515. CHENG Y, ZHANG J B, CAI Z C. Key role of matching of crop-specific N preference, soil N transformation and climate conditions in soil N nutrient management[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(3): 507-515.
- [7] TIAN H Q, YANG J, XU R T, et al. Global soil nitrous oxide emissions since the preindustrial era estimated by an ensemble of terrestrial biosphere mode: magnitude, attribution, and uncertainty[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(2): 640-659.
- [8] LIU X, ZHANG Y, HAN W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. *Nature*, 2013, 494(7438): 459-462.
- [9] CLARK C M, TILMAN D. Loss of plant species after chronic low-level nitrogen deposition to prairie grasslands[J]. *Nature*, 2008, 451(7179): 712-715.
- [10] 巨晓棠, 谷保静. 氮素管理的指标[J]. *土壤学报*, 2017, 54(2): 281-296. JU X T, GU B J. Indexes of nitrogen management[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(2): 281-296.
- [11] 姜茜, 孙炜琳, 朱立志. 浙江省农田养分平衡的时空变化及环境风险分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(2): 335-344. JIANG Q, SUN W L, ZHU L Z. Analysis of temporal and spatial variations of nutrient balance and its environmental risk in Zhejiang Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(2): 335-344.
- [12] 冯雪娇, 林晨, 熊俊峰, 等. 不同来源的非点源污染对湖泊氮磷浓度的影响: 以巢湖流域为例[J]. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(1): 64-75. FENG X J, LIN C, XIONG J F, et al. Effects of nonpoint source pollution from different sources on lake nitrogen and phosphorus: a case study of Chaohu Lake basin[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(1): 64-75.
- [13] WANG Y P, KONG X Z, PENG Z L, et al. Retention of nitrogen and phosphorus in Lake Chaohu, China: implications for eutrophication management[J]. *Environment Science and Pollution Research*, 2020, 27(33): 41488-41502.
- [14] 朱庆春. 巢湖水体富营养化成因分析及治理对策[J]. *安徽农学通报*, 2017, 23(9): 97-98. ZHU Q C. Cause analysis and governance measures of eutrophication in Chaohu Lake[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2017, 23(9): 97-98.
- [15] 张之源, 王培华, 张崇岱. 巢湖富营养化状况评价及水质恢复探讨[J]. *环境科学研究*, 1999, 12(5): 45-48. ZHANG Z Y, WANG P H, ZHANG C D. Study on the eutrophication in Chaohu Lake and its remediation[J]. *Research of Environmental Sciences*, 1999, 12(5): 45-48.
- [16] 王雪蕾, 王新新, 朱利, 等. 巢湖流域氮磷面源污染与水华空间分布遥感解析[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(5): 1511-1519. WANG X L, WANG X X, ZHU L, et al. Spatial analysis on diffuse pollution and algal bloom characteristic with remote sensing in Chao Lake basin[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(5): 1511-1519.
- [17] WANG Y, LI K, TANAKA T, et al. Soil nitrate accumulation and leaching to groundwater during the entire vegetable phase following conversion from paddy rice[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2016, 106(3): 325-334.
- [18] 冯云钰. 基于氮磷减排的设施蔬菜-稻田耦合模式的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017. FENG Y Y. Research on the greenhouse vegetables-paddy field coupled mode for nitrogen and phosphorus reduction[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [19] 孙丽, 马友华, 何传龙, 等. 巢湖流域减量施肥对番茄产量品质和土壤硝态氮的影响[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(25): 250-255. SUN L, MA Y H, HE C L, et al. The effect of fertilizer application on tomato production, quality and soil nitrate in Chaohu Lake basin[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(25): 250-255.
- [20] 冀宏杰, 张连连, 武淑霞, 等. 太湖流域农田肥料投入与养分平衡状况分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2008(5): 70-75. JI H J, ZHANG R L, WU S X, et al. Analysis of fertilizer input and nutrient balance of farmland in Taihu watershed[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2008(5): 70-75.
- [21] WANG Y, TANAKA T, INOUE H, et al. Annual nutrient balance and soil chemical properties in heavy multiple cropping system in the coastal area of southeast Lake Dianchi, Yunnan Province, China[J]. *Plant Production Science*, 2015, 18(3): 323-335.
- [22] WANG Y, TANAKA T, LI K Z, et al. Decreasing input-output balance by reducing chemical fertilizer input without yield loss in intensive cropping system in the coastal area of southeast Lake Dianchi, Yunnan Province, China[J]. *Plant Production Science*, 2016, 19(1): 81-90.
- [23] 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 agriculture non-point source pollution in countryside in China: general countermeasures and technologies[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1): 1-8.
- [24] 薛利红, 杨林章, 施卫明, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践: 源头减量技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 881-888. XUE L H, YANG L Z, SHI W M, et al. Reduce-retain-reuse-restore technology for the controlling the agriculture non-point source pollution in countryside in China: source reduction technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 881-888.
- [25] 赵磊. 巢湖市中垭镇水稻+设施番茄“千斤粮万元钱”生产模式简析[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(13): 59-60. ZHAO L. Analysis of rice+greenhouse tomato model in Zhongzhao Town, Chaohu City[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2019, 25(13): 59-60.
- [26] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. LU R K. Methods for soil agrochemical analysis[M]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [27] WANG Y, LI K Z, TANAKA S T T, et al. Soil nitrate accumulation and leaching to groundwater during the entire vegetable phase following conversion from paddy rice[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2016, 106(3): 325-334.
- [28] KIANPOOR K Y, HUANG B, HU W Y, et al. Environment soil quality and vegetable safety under current greenhouse vegetable production management in China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 307: 107230.
- [29] 刘衍, 郭利娜, 贾羽旋, 等. 北京市设施蔬菜施肥状况及减施潜力分析[J]. 中国蔬菜, 2020(9): 71-81. LI K, GUO L N, JIA Y X, et al. Analysis of fertilization status and potential of fertilizer reduction in greenhouse vegetable fields in Beijing[J]. *China Vegetables*, 2020(9): 71-81.
- [30] 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: 497-506.
- [31] 方玉东, 封志明, 胡业翠, 等. 基于GIS技术的中国农田氮素养分收支平衡研究[J]. 农业工程学报, 2007(7): 35-41. FANG Y D, FENG Z M, HU Y C, et al. Balance of field nitrogen nutrient input/output using GIS technology in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007(7): 35-41.
- [32] 方玉东, 胡业翠, 封志明. 基于GIS技术的中国农田磷素养分收支平衡研究[J]. 资源科学, 2008(5): 725-731. FANG Y D, HU Y C, FENG Z M. GIS study of phosphorus nutrient input/output in China at the county level[J]. *Resources Science*, 2008(5): 725-731.
- [33] 方玉东, 胡业翠, 封志明, 等. 基于GIS技术的中国农田钾素养分收支平衡研究[J]. 土壤, 2009, 41(2): 185-191. FANG Y D, HU Y C, FENG Z M, et al. Balance of farmland potassium nutrient input/output in China based GIS[J]. *Soils*, 2009, 41(2): 185-191.
- [34] WOLI K P, NAGUMO T, KURAMOCHI K, et al. Evaluating river water quality through land use analysis and N budget approaches in livestock farming areas[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 329(1/2/3): 61-74.
- [35] 曹宁, 曲东, 陈新平, 等. 东北地区农田土壤氮、磷平衡及其对面源污染的贡献分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006(7): 127-133. CAO N, QU D, CHEN X P, et al. Analysis of the contribution to non-point pollution made by balanced fertilizer in north-west China[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2006(7): 127-133.
- [36] 马广文, 香宝, 银山, 等. 长江流域农业区非点源氮的平衡变化及其区域性差异[J]. 环境科学研究, 2009, 22(2): 132-137. MA G W, XIANG B, YIN S, et al. Budget changes and district of non-point source nitrogen in agricultural fields in the Yangtze River basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(2): 132-137.
- [37] 巨晓棠. 理论施氮量的改进及验证: 兼论确定作物氮肥推荐量的方法[J]. 土壤学报, 2015, 52(2): 249-261. JU X T. Improvement and validation of theoretical N rate(TNP): discussing the methods for N fertilizer recommendation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(2): 249-261.
- [38] 巨晓棠, 张翀. 论合理施氮的原则和指标[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 1-13. JU X T, ZHANG C. The principles and indicators of rational N fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(1): 1-13.
- [39] LI H H, LIU H, GONG X W, et al. Optimizing irrigation and nitrogen management strategy to trade off yield, crop water productivity, nitrogen use efficiency and fruit quality of greenhouse grown tomato[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 245: 106570.
- [40] DU Y D, CAO H X, LIU S Q, et al. Response of yield, quality, water and nitrogen use efficiency of tomato to different levels of water and nitrogen under drip irrigation in northwestern China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(5): 1153-1161.
- [41] 程谊, 黄蓉, 余云飞, 等. 应重视硝态氮同化过程在降低土壤硝酸盐浓度中的作用[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1326-1331. CHENG Y, HUANG R, YU Y F, et al. Role of microbial assimilation of soil NO_3^- in reducing soil NO_3^- concentration[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(6): 1326-1331.
- [42] 张丽娟, 巨晓棠, 刘辰深, 等. 北方设施蔬菜种植区地下水硝酸盐来源分析: 以山东省惠民县为例[J]. 中国农业科学, 2010, 43(21): 4427-4436. ZHANG L J, JU X T, LIU C S, et al. A study on nitrate contamination of ground water sources in areas of protected vegetable-growing fields: a case study in Huimin County, Shandong Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(21): 4427-4436.
- [43] GRUDA N, BISHIS M, TANNY J. Impacts of protected vegetable cultivation on climate change and adaptation strategies for cleaner production: a review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 225: 324-339.
- [44] BIAN Z H, WANG Y, ZHANG X Y, et al. A review of environment effects on nitrate accumulation in leafy vegetables grown in controlled environments[J]. *Foods*, 2020, 9(6): 732.
- [45] AHMED M, RAUF M, AKHTAR M, et al. Hazards of nitrogen fertilizers and ways to reduce nitrate accumulation in crop plants[J]. *Environment Science and Pollution Research*, 2020, 27: 17661-17670.
- [46] VELZEN A, SIPS A, SCHOTHORST R C, et al. The oral bioavailability

- ty of nitrate from nitrate-rich vegetable in humans[J]. *Toxicology Letters*, 2008, 181(3):177-181.
- [47] CHAN T. Vegetable-borne nitrate and nitrate and the risk of methaemoglobinemia[J]. *Toxicology Letters*, 2011, 200(1/2):107-108.
- [48] SONG P, WU L, GUAN W X. Dietary nitrates, nitrites, and nitrosamines intake and the risk of gastric cancer: A meta-analysis[J]. *Nutrients*, 2015, 7(12):9872-9895.
- [49] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京:农业出版社, 1992. National Soil Survey Office. Soil survey technology in China [M]. Beijing: Agriculture Press, 1992.
- [50] 赵明, 陈雪辉, 赵征宇, 等. 鸡粪等有机肥料的养分释放及对土壤有效铜、锌、铁、锰含量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(2):47-50. ZHAO M, CHEN X H, ZHAO Z Y, et al. Releasing of N, P and K of organic fertilizers and their effects on the contents of available Cu, Zn, Fe and Mn in soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(2):47-50.
- [51] PUTRANTA H, PERMATASARI A K, SUKMA T A, et al. The effect of pH, electrical conductivity, and nitrogen (N) in soil at Yogyakarta special region on tomato plant growth[J]. *TEM Journal*, 2019, 8(3):860-865.
- [52] 高峻岭, 宋朝玉, 黄绍文, 等. 青岛市设施蔬菜施肥现状与土壤养分状况[J]. 山东农业科学, 2011(3):68-72. GAO J L, SONG C Y, HUANG S W, et al. Current status of greenhouse vegetable fertilization and soil nutrient in Qingdao City[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2011(3):68-72.
- [53] BRITO F, PIMENTA T M, HENSCHER J M, et al. Elevated CO₂ improves assimilation rate and growth of tomato plants under progressively higher soil salinity by decreasing abscisic acid and ethylene levels[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2020, 176:104050.
- [54] 蔡祖聪, 张金波, 黄海琦, 等. 强还原土壤灭菌防控作物土传病的应用研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(3):469-476. CAI Z C, ZHANG J B, HUANG H Q, et al. Application of reductive soil disinfestation to suppress soil-borne pathogens[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(3):469-476.
- [55] IKENAGA S, ENDO Y, INAMURA T. Spatial variability of soil properties in contiguous small-scale paddy fields under paddy-upland crop rotation[J]. *Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, 81(3):207-214.