

DOI: 10.11766/trxb202102050078

王瑞, 施卫明, 李奕林. 磷肥减施对集约化露天菜地周年磷损失削减效果评价[J]. 土壤学报, 2023, 60 (1): 224–234.

WANG Rui, SHI Weiming, LI Yilin. Evaluation of Phosphate Fertilizer Reduction on Annual Phosphorus Loss under Intensive Open-field Vegetable Production[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60 (1): 224–234.

磷肥减施对集约化露天菜地周年磷损失削减效果评价*

王 瑞^{1, 2}, 施卫明¹, 李奕林^{1†}

(1. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 集约化菜地因高量施肥以及大水漫灌导致其在农田磷污染排放中的占比最高, 目前已成为种植业磷损失的优先阻控对象。在定量评估菜地周年磷损失量的基础上, 明确蔬菜合理的磷肥投入阈值范围, 通过源头控制菜地磷的迁移、流失, 对于有效降低中国农业面源污染造成的环境压力具有重要意义。以太湖流域露天菜地为研究对象, 设置农民习惯施肥(对照)和减量施肥处理(减施 20%、30%、50%和 100%), 通过为期一年的蔬菜轮作试验, 明确土壤磷素环境阈值及磷素周年径流流失特征。结果表明, 菜地磷环境阈值为 $78.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 所有处理土壤表层有效磷(Olsen-P)含量均超过环境阈值。随施磷量的减少, 菜地总磷(TP)径流损失浓度降低, 并主要以可溶性磷(DP)流失形态为主, DP/TP 比例为 50.1%~63.1%。磷径流损失负荷呈现出明显的季节性特征, 夏秋季磷素流失量为 $1.93 \sim 3.26 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以 P 计), 占全年磷素流失通量的 59.2%~63.2%。结构方程模型结果表明, 当季施磷量直接且极显著影响 TP 流失浓度, 并且 TP 流失浓度对 TP 流失负荷存在极显著的正向影响, 影响系数为 0.97。菜地施肥处理的磷肥流失系数在 1.36%~3.33%, 减磷 50%的流失系数最低。与对照相比, 随施磷量的减少, 磷径流损失削减效果越好, 减磷 100%的削减率达 41.5%。四季蔬菜种植中, 减磷 20%和减磷 30%处理的蔬菜产量和对照无显著差异, 减磷 20%处理出现增产趋势。综合考虑环境风险和经济产量, 推荐露天菜地减施 20%~30%的磷肥比较适宜。

关键词: 磷; 环境阈值; 径流; 露天菜地; 流失负荷

中图分类号: X523; S157.2 文献标志码: A

Evaluation of Phosphate Fertilizer Reduction on Annual Phosphorus Loss under Intensive Open-field Vegetable Production

WANG Rui^{1, 2}, SHI Weiming¹, LI Yilin^{1†}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: 【Objective】Intensive vegetable fields have been the priority control projects for phosphorus (P) loss in farming due to massive fertilization and flood irrigation, accounting for the highest proportion of P pollution from farmlands. Therefore, (i)

* 国家重点研发计划项目(2017YFD0200200/08)和国家自然科学基金项目(31872957)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFD0200200/08) and the National Natural Science Foundation of China (No. 31872957)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: ylli@issas.ac.cn

作者简介: 王 瑞(1993—), 女, 山东枣庄人, 博士研究生, 主要从事蔬菜磷素高效利用生理机制及菜地磷面源污染研究。E-mail: rwang@issas.ac.cn

收稿日期: 2021-02-15; 收到修改稿日期: 2021-08-25; 网络首发日期(www.cnki.net): 2021-10-25

quantifying the assessment of the annual P loss of vegetable fields, (ii) clarifying the reasonable threshold range of phosphate fertilization for vegetables, and (iii) controlling P migration and loss from vegetable fields through the source are of great significance for effectively reducing the environmental pressure caused by agricultural non-point source pollution. 【Method】 A plot experiment in the Tai Lake Basin with conventional fertilization and phosphate fertilization reduction treatments was conducted in a perennial and open vegetable field. The one-year vegetable rotation experiments focused on clarifying the environmental threshold of P and annual P runoff loss characteristics. There were five treatments, conventional fertilization (CK), reduction of 20% (P-20), 30% (P-30), 50% (P-50), and 100% (P-100) based on conventional P fertilization. 【Result】 The environmental threshold of soil P in the tested vegetable fields was $78.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. During the whole experimental period, Olsen-P content in the soil surface of different treatments exceeded the leaching threshold. The results of annual total P (TP) runoff loss concentration in vegetable fields showed that with the decrease of phosphate fertilization input, the annual loss concentration of TP decreased. Also, dissolved P (DP) was the dominant form of P species, accounting for 50.1%~63.1%. Runoff loss loads of P showed seasonal characteristics, with the amount of P loss in a summer-autumn season ($1.93\sim 3.26 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), accounting for 59.2%~63.2% of the annual P loss flux. Based on the structural equation modeling (SEM), the amount of phosphate fertilizer had a direct and extremely significant effect on TP loss concentration. Furthermore, TP loss concentration had a positive and extremely significant impact on TP runoff loss load with a path coefficient of 0.97. The loss coefficients of P were between 1.36% and 3.33%, and the lowest loss coefficient was in the P-50 treatment. With a decreased amount of P applied, the reduction ratio of P runoff loss increased, and a P loss reduction rate of 41.5% was recorded in the P-100 treatment. Treatments of P-20 and P-30 had no significant yield reduction during a three-successive vegetable growth period in a year compared with CK. 【Conclusion】 Taking environmental risk and economic yield into consideration, it is appropriate to reduce between 20%~30% P fertilizer application based on conventional phosphate fertilizer rate for open vegetable fields in Tai Lake region.

Key words: Phosphorus; Environmental threshold; Runoff; Open vegetable field; Loss loads

蔬菜种植业在我国发展迅速, 1987 年我国蔬菜播种面积为 $5.57\times 10^6 \text{ hm}^2$, 2018 年蔬菜播种面积达到 $19.98\times 10^6 \text{ hm}^2$, 近 30 年我国蔬菜总产量增加了 2.59 倍^[1]。但当前我国蔬菜种植体系磷肥施用过量的现象较为普遍。黄绍文等^[2]在对我国蔬菜种植区进行为期 3 年的大规模调研中发现, 菜地单季化肥用量高达 $1\ 092 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 为农作物的 3.3 倍, 其中化学磷肥超量现象最为严重, 设施及露天菜地分别达到菜地磷肥推荐用量的 5.4 倍及 5.9 倍。Yan 等^[3]的研究表明, 我国菜地的磷肥年投入量为 $83\sim 636 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (以 P 计, 下同), 蔬菜带走的磷一般为每年 $20\sim 52 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 从而导致菜地盈余大量的磷, 年盈余量最高可达 $588 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。这种“供远大于求”的施肥方式导致大量磷肥在土壤中累积, 进而增加环境污染风险。菜地磷的损失风险较粮田更大, 菜地磷损失占整个种植业磷损失比重较高。Wang 等^[4]研究发现, 相较于粮田而言, 菜地磷径流单位面积损失量以及周年总排放量均高于农田, 菜地单季总磷 (TP) 径流损失量为 $3.45 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 周年 TP 径流排放量为 $0.33 \text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$, 分别是旱地作物的 2.75

倍、稻田的 6.60 倍。2020 年 9 月太湖水质监测结果表明, 太湖为轻度污染、轻度富营养, 主要污染指标为总磷^[5]。在太湖流域, 随着种植结构的改变, 太湖地区稻田种植体系已不是农田磷流失的最大来源, 菜园磷流失负荷估算量为 3 000 t, 为稻田的 10.3 倍, 菜园成为了目前种植业磷流失的优先控制对象^[6]。菜地磷污染排放及阻控也受到越来越多的关注。

目前磷径流损失阻控措施主要分为两大类, 一是通过源头管理减少潜在的磷损失, 包括减施、保护性耕作和优化种植结构; 二是通过生态工程措施减少磷径流, 例如植物过滤带、生态沟渠等^[7-9]。生态工程措施一般需要相对较大的空间, 而源头减施磷肥是有效措施之一, 尽管磷肥减施可有效降低磷损失, 但蔬菜对磷的需求量高^[10], 过量减施可能会造成蔬菜减产, 因此如何通过优化减施在实现降低磷损失的同时, 达到稳产甚至增产的双赢效果, 对于发展绿色可持续的蔬菜种植产业意义重大。目前关于减磷对磷径流损失影响的研究多集中于玉米、水稻等粮食作物^[11-13]及单季蔬菜上^[14], 缺少菜地磷肥减施对周年磷径流损失影响的研究。菜地复种指

数高,太湖流域每年种 3~4 茬蔬菜^[15],菜地一年多茬加之每季高量的磷肥投入导致大量磷残留于土壤中,加剧土壤磷的损失风险。以往的研究^[4]发现,磷径流损失存在时间尺度上的不均衡性,其中夏秋季磷径流损失占全年磷总损失量的 89%,有效降低夏秋季磷径流损失对于削减菜地磷排放意义重大。因此本研究选取太湖流域典型露天菜地,连续周年监测菜地的磷素流失,研究不同磷肥减施量下,磷的环境阈值、磷径流损失的季节性特征以及磷流失负荷的影响因素。最终评价磷肥减施对菜地总磷(TP)年流失负荷削减效果,为菜地养分优化管理、面源污染源控制提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验地位于江苏省无锡市宜兴市周铁镇和洩村的阳溪生态蔬果种植专业合作社蔬菜生产基地

(31°23' N, 119°58' E),属于亚热带季风气候区,年均气温 15~17℃,年平均降水量 1 000~1 200 mm,试验田前茬为连续 7 年露天大白菜种植。供试土壤类型为潮土,质地为粉质壤土,基本理化性状见表 1。

1.2 试验设计

试验共设 5 个处理:对照(CK),农户习惯施磷水平,每季施用 150 kg·hm⁻²(以 P₂O₅计,下同);在农户习惯施磷基础上减施 20%(P-20),120 kg·hm⁻²;减施 30%(P-30),105 kg·hm⁻²;减施 50%(P-50),75 kg·hm⁻²;减施 100%(P-100),即不施磷肥。每个处理 3 次重复,随机排列。试验中化肥采用尿素(46% N)、钙镁磷肥(12% P₂O₅)和硫酸钾(50% K₂O)。有机肥为商品有机肥(6 000 kg·hm⁻²,有机质含量大于等于 45%,N+P₂O₅+K₂O≥7%),每季作为基肥一次性施入。磷肥于移栽时穴施,氮(200 kg·hm⁻²)、钾(以 K₂O 计)(300 kg·hm⁻²)肥于每季蔬菜缓苗后在每棵苗旁穴施,采用人工开沟,覆土盖肥。

表 1 供试土壤基本理化性状

Table 1 Physico-chemical properties of the tested soil

土壤类型	蔬菜类型	pH	有机质 Soil organic matter/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen(TN) (g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus (TP) / (g·kg ⁻¹)	全钾 Total potassium/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali hydrolysable nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Olsen-P/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Readily available potassium / (mg·kg ⁻¹)
潮土 ^①	辣椒季 ^②	6.35	15.80	0.87	0.81	11.83	91.88	71.11	74
潮土 ^①	乌塌菜季 ^③	6.15	15.01	0.81	0.82	11.48	77.18	66.77	101
潮土 ^①	包菜季 ^④	6.12	17.40	0.97	0.93	11.62	99.23	81.70	63

①Fluvo-aquic soil, ②Chilli pepper season, ③Savoy season, ④Cabbage season

试验采用辣椒-乌塌菜-包菜的轮作模式,均采用育苗移栽种植方式,且每季蔬菜施肥量一致。第一茬辣椒于 2019 年 5 月 22 日移栽,8 月 22 日收获。乌塌菜于 2019 年 9 月 25 日移栽,11 月 30 日收获。第三茬包菜于 2019 年 12 月 6 日移栽,2020 年 4 月 26 日收获。每季收获期各小区蔬菜单独收获并测定经济产量(辣椒计果实产量、乌塌菜和包菜计菜心产量)。以梅花型采样法采集土壤样品,每小区选取 5 个点分别采集 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 深度的非根际土,不同深度土样分别混匀后经风干、

过筛测土壤有效磷(Olsen-P)及氯化钙磷(CaCl₂-P)含量。以土壤 Olsen-P 含量与 CaCl₂-P 含量分别为横轴和纵轴进行双线性模型拟合,2 条直线之间有一个明显的突变转折点,转折点相对应的 Olsen-P 含量即为该土壤磷素损失的“突变点”,并以此作为环境阈值表征土壤磷流失潜能。

小区面积为 50 m²(10 m×5 m),各小区用聚氯乙烯(PVC)板(厚 3 mm,埋入地下 85 cm,露出地面 15 cm)隔开,以减少水串流、侧渗。每个小区对应一个径流池,用于收集地表径流。径流池

容积为 0.80 m^3 (长 100 cm , 宽 80 cm , 高 100 cm), 上设活动盖板用于清淤以及防止雨水等进入池内。每个小区排水口处理设 1 支 PVC 塑料管道, 用于连接小区和径流池。降水产生径流后, 用直尺量取径流池水面高度, 计算径流液体积, 同时将径流水搅匀后, 采集 100 mL 的径流液带回实验室置于 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱冷藏, 并在一周内完成样品分析测试。每次采集完径流液后, 用抽水泵将径流水抽干, 并清洗径流池, 以便于下次收集径流液。

1.3 分析测定方法

土壤 Olsen-P 测定: 采用碳酸氢钠法测定, 用 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ (pH 8.5) 浸提后钼锑抗分光光度法测定; 土壤 CaCl_2 -P 测定: 用 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ (土水比为 1: 5) 浸提后钼锑抗分光光度法测定。

径流液总磷 (TP) 浓度测定: 用过硫酸钾消解未经过滤的水样, 用钼锑抗分光光度法测定; 径流液可溶性磷 (DP) 浓度测定: 用过硫酸钾消解经 $0.45 \text{ }\mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤后的水样, 钼锑抗分光光度法测定; 径流液颗粒态磷 (PP) 浓度为 TP 和 DP 的差值。

1.4 数据分析及处理

单次养分径流负荷 / ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) = [小区单次径流磷浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) \times 单次径流水体积 (L) / 10^6] \times $10000 \text{ (m}^2)$ / 小区面积 (m^2)。

周年养分径流负荷 / ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) = Σ 单次养分径

流负荷

磷流失系数 / % = (施磷肥处理的磷流失负荷 - 不施磷肥处理的磷流失负荷) \times 100 / 施磷量。

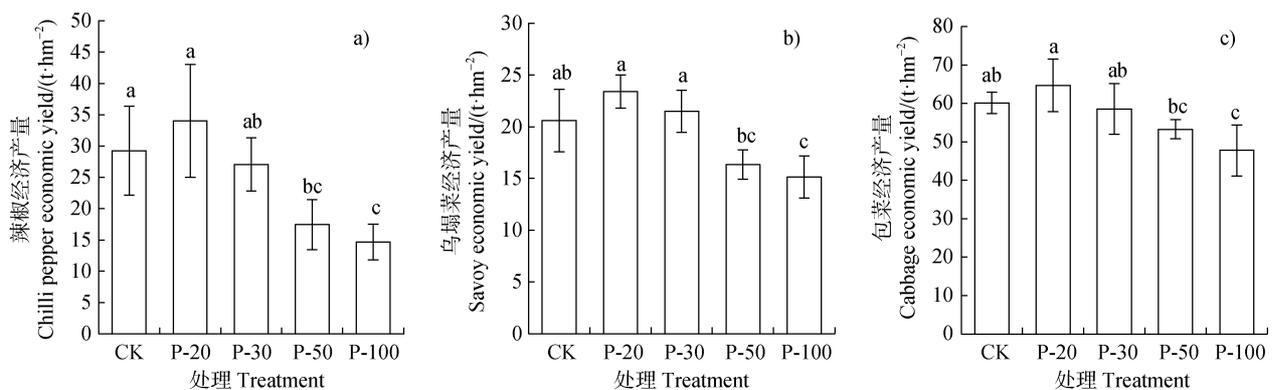
削减率 / % = (常规施磷的磷流失负荷 - 减磷处理的磷流失负荷) \times 100 / 常规施磷的磷流失负荷。

采用 Excel 2003 程序和 SPSS statistics 20 统计分析软件进行分析处理数据, 包括单因素方差分析 (One-way ANOVA) 差异显著性检验, 比较不同处理间在 $P < 0.05$ 的显著性水平, 使用 SPSS 20 和 Amos Graphics CLI 22.0 进行结构方程模型分析, Origin 2018 软件作图。

2 结 果

2.1 减磷对蔬菜经济产量的影响

在辣椒季, 与 CK 相比, P-20 处理提高了辣椒的产量, 提高幅度为 16.29% , 但增产效应未达到显著水平 (图 1a)。与 CK 相比, P-50 和 P-100 处理显著减少了辣椒的产量, 减产幅度分别为 40.32% 和 49.89% 。在乌塌菜季, 与 CK 相比, P-20 和 P-30 处理提高了乌塌菜的产量, 增产幅度分别为 13.59% 和 4.37% , 但增产效果未达显著性水平 (图 1b)。与 CK 相比, P-50 和 P-100 乌塌菜的产量分别降低了



注: CK: 农民习惯施磷; P-20: 在农户习惯施磷基础上减施 20%; P-30: 在农户习惯施磷基础上减施 30%; P-50: 在农户习惯施磷基础上减施 50%; P-100: 不施磷肥。图中不同字母代表差异显著 ($P < 0.05$)。下同。 Note: CK: Conventional P fertilization; P-20: Reduction of 20% based on conventional P fertilization; P-30: Reduction of 30% based on conventional P fertilization; P-50: Reduction of 50% based on conventional P fertilization; P-100: No P fertilization. Different letters represent significant difference ($P < 0.05$). The same as below.

图 1 不同施磷处理下蔬菜经济产量 (a. 辣椒, b. 乌塌菜, c. 包菜)

Fig. 1 Vegetable economic yield under different phosphate fertilizer treatments (a. chilli pepper, b. savoy, c. cabbage)

20.63%和 26.46%，P-100 减产效应更为明显，与 CK 相比达显著水平。第三茬减磷处理对包菜经济产量的影响中，CK 与 P-20、P-30 处理之间包菜产量无显著差异；P-50 和 P-100 处理显著降低了包菜的产量，减产幅度分别为 11.42%和 25.87%（图 1c）。

2.2 减磷条件下露天菜地不同形态磷流失季节性特征

研究表明，雨强、雨量和施肥量是地表径流磷流失的几个主要影响因素^[16]。在本研究中，2019 年 5 月 22 日至 2020 年 5 月 20 日期间共产生 8 次径流。按照季节将一年划分为春夏季（3—6 月）、夏秋季（6—9 月）、秋冬季（9—12 月）及冬春季（12—次年 3 月）。辣椒种植期间产生径流 4 次，季节属于夏秋季；休耕期间产生 2 次径流，分别属于秋冬季和春夏季；包菜种植期间产生 2 次径流，正处于冬春

及春夏季。由图 2a 所示，前 4 次 TP 径流浓度呈下降趋势，CK 处理的 TP 浓度为 2.23~3.01 mg·L⁻¹，其他减磷处理的 TP 浓度为 1.29~2.90 mg·L⁻¹。相对于第 4 次径流，第 5 次径流各处理的 TP 浓度呈上升趋势，且随施磷量减少呈现小幅下降趋势：其中 CK 处理的 TP 浓度平均为 2.75 mg·L⁻¹，P-20、P-30、P-50、P-100 处理的 TP 平均浓度分别为 2.48、2.44、2.00 和 1.86 mg·L⁻¹。TP 径流浓度的谷值出现在第 6 次径流，CK、P-20、P-30、P-50 和 P-100 处理的 TP 平均浓度分别为 0.68、0.64、0.59、0.54 和 0.43 mg·L⁻¹。各处理间 TP、DP 和 PP 浓度变化趋势基本一致（图 2b、图 2c），其中以 DP 流失形态为主，DP/TP 比例为 50.1%~63.1%，且随着施磷量的增加，DP/TP 比例呈增加趋势，但未达显著水平。

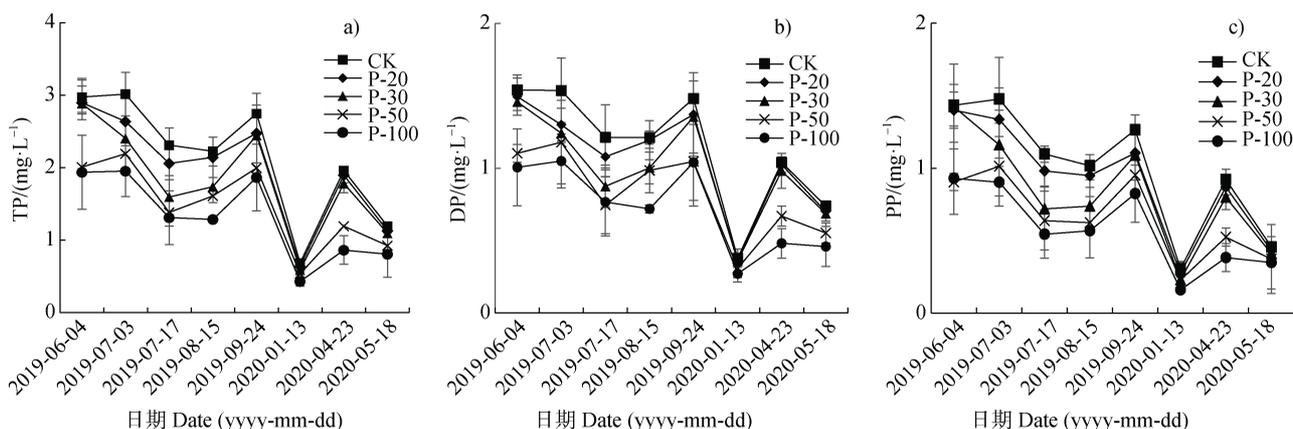


图 2 不同施磷处理下菜地径流浓度 (a. 总磷 (TP), b. 溶解态磷 (DP) 和 c. 颗粒态磷 (PP))

Fig. 2 Concentration of total P (TP, a), dissolved P (DP, b), and particulate P (PP, c) in vegetable fields under different phosphate fertilizer treatments

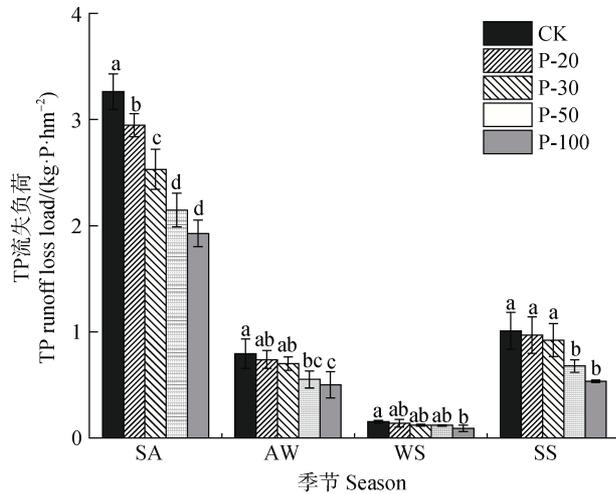
2.3 减磷条件下露天菜地磷流失负荷的季节性特征

图 3 表明，露天菜地 TP 径流负荷呈明显的季节性变化，其中以夏秋季 TP 流失量最高，其次为春夏季，冬春季 TP 流失量最小。不同施肥处理之间，夏秋季、秋冬季、冬春季和春夏季 TP 流失量分别为 1.93~3.26、0.50~0.79、0.09~0.15、0.53~1.01 kg·hm⁻²。不同处理间菜地通过地表径流 TP 流失量表现为：CK>P-20>P-30>P-50>P-100（图 3）。减磷处理可降低地表径流中 TP 流失量，在夏秋季，与 CK 相比，P-20、P-30、P-50 及 P-100 处理分别减少 TP 流失量 9.55%、22.34%、34.16%和 40.84%；方差分析结果显示，CK 与不同减磷处理的 TP 径流流失量差异均达显著水平。在秋冬季，与 CK 相比，

P-50 和 P-100 处理显著减少 TP 流失量，分别减少 30.59%和 36.89%。在冬春季，以 P-100 处理降低地表径流中 TP 流失量的效果最为显著，与对照相比，P-100 处理减少 41.81% TP 流失量。在春夏季，与 CK 相比，P-20、P-30 处理 TP 流失量无显著差异，P-50 和 P-100 处理的 TP 径流损失量显著降低 32.88%和 47.06%。

2.4 减磷条件下露天菜地磷流失的周年通量及流失率

以年度磷径流负荷来计算，露天菜地磷流失负荷随化肥磷用量增加而增加，减施磷肥可有效减少菜地磷的径流损失（表 2）。与 CK 相比，P-20、P-30、P-50 和 P-100 处理分别减少 TP 流失量 8.15%、



注: SA: 夏秋季, AW: 秋冬季, WS: 冬春季, SS: 春夏季。Note: SA: Summer-autumn, AW: Autumn-winter, WS: Winter-spring, SS: Spring-summer.

图3 不同施磷处理下菜地 TP 流失负荷季节性特征
Fig. 3 Seasonal characteristics of TP runoff loss load in vegetable fields under different phosphate fertilizer treatments

18.1%、33.0%和 41.5%，磷径流损失削减率随着施磷量

的减少而增加,以不施磷处理的磷径流削减效果最为明显。在本研究中,菜地磷径流损失主要以 DP 形态流失, DP 的流失负荷占总磷的 53.4%~55.7%。施肥量是影响磷径流损失的重要因素,在本研究中,施用磷肥导致的地表径流 TP 流失量为 0.45~2.17 kg·hm⁻²,随径流排出菜地的磷素中有 1.36%~3.33%是施用的化肥磷素, P-50 处理的流失系数最低,为 1.36%。

2.5 露天菜地土壤磷素环境阈值

以土壤 Olsen-P 含量作为横坐标, CaCl₂-P 含量为纵坐标,利用两段式直线模型进行模拟分析,找出拐点确定土壤磷素环境阈值。由图 4 可知,当土壤 Olsen-P 低于某一数值(78.9 mg·kg⁻¹)时,土壤 CaCl₂-P 增加缓慢,但当土壤中 Olsen-P 浓度大于该数值时,土壤 CaCl₂-P 快速增加,即环境损失风险变大。CK、P-20、P-30、P-50、P-100 处理的 0~20 cm 根际土壤 Olsen-P 含量分别为 98.3~180.4、114.6~175.8、108.5~217.0、112.8~203.1、98.3~161.3 mg·kg⁻¹,所有处理的 0~20 cm 菜地根际土壤 Olsen-P 含量均已超过环境阈值。

表 2 不同施肥处理的磷流失周年通量及流失率

Table 2 Annual flux and loss rate of P loss under different fertilizer treatments

处理 Treatment	TP/ (kg·hm ⁻²)	DP/ (kg·hm ⁻²)	PP/ (kg·hm ⁻²)	流失系数 Loss coefficient/%	削减率 Reduction rate/%
CK	5.22a	2.79a	2.43a	3.31	-
P-20	4.79b	2.57b	2.22a	3.33	8.15
P-30	4.28c	2.34c	1.94b	2.67	18.1
P-50	3.50d	1.95d	1.55c	1.36	33.0
P-100	3.05e	1.69e	1.36c	-	41.5

注:同列不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。Note: Means followed by different lowercase letters within the same column of each item were significantly different at 5% level.

2.6 露天菜地磷流失负荷的影响因素

土壤 Olsen-P、CaCl₂-P、磷流失浓度均与磷环境损失有关,为进一步探究磷损失与土壤磷库及施磷量的关系,对露天菜地 TP 流失负荷与土壤 Olsen-P 含量、CaCl₂-P 含量及施磷量进行了相关性分析。结果表明,TP 损失负荷与土壤 CaCl₂-P 含量和施磷量分别呈显著($P<0.05$)与极显著($P<0.01$)正相关,但与土壤中 Olsen-P 含量无显著相关关系(表 3)。TP 损失负荷与 TP 流失浓度呈极显著正相关关系($P<0.01$,表 3)。基于结构方程模型,通

过极大似然法估计 TP 流失负荷、TP 流失浓度、土壤 Olsen-P 含量、CaCl₂-P 含量及施磷量之间的路径系数,根据土壤环境影响磷流失的因果关系,定量地得出施磷量及土壤 Olsen-P、CaCl₂-P 含量对磷流失的影响大小。结构方程模型的拟合指标卡方自由度比(χ^2/df)、近似误差平方根(RMSEA)、拟合指数(GFI)及相对拟合指数(CFI)均达到拟合指数要求(表 4),表明该模型在表征露天菜地磷流失及其影响因素间的相互关系时较合理可靠。由结构方程模型拟合结果可知,施磷量对 TP 流失浓度影

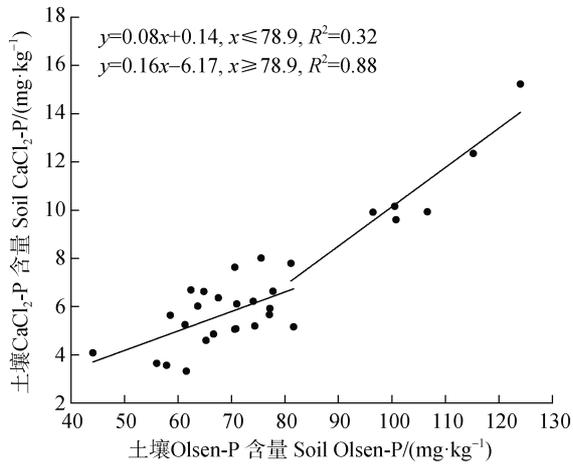


图4 露天菜地土壤 Olsen-P 含量与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量的关系
Fig. 4 Relationship between Olsen-P and $\text{CaCl}_2\text{-P}$ concentration in an open vegetable field

响是极显著的 ($P < 0.01$), 因子载荷量为 0.80; 并且 TP 流失浓度极显著影响 TP 流失负荷 ($P < 0.01$), 因子载荷量为 0.97 (图 5)。施磷量与土壤 Olsen-P 含量对土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量的直接影响系数分别为 0.31 和 0.25, 土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量对 TP 流失浓度的直接影响系数为 0.15, 但均未达到显著水平。

3 讨论

3.1 露天菜地磷损失特征及减排效果

土壤磷水平是决定农田磷素流失的首要因素, 在一定程度上可反映出土壤磷素流失的潜能。目前大量研究通过“突变点”法判断土壤磷素流失潜能的阈值及其流失的潜力。“突变点”法是 Hesketh

和 Brookes^[17]提出的, 即用土壤 Olsen-P 含量与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量分别为横轴和纵轴作相关曲线, 曲线上的转折点相对应的 Olsen-P 含量即为该土壤的磷素淋溶的“突变点”; 当土壤 Olsen-P 含量低于“突变点”时, 不会发生磷素流失; 反之, 当土壤 Olsen-P 含量高于“突变点”值时, 就会发生磷素流失。近年来我国研究者针对菜地土壤磷素环境阈值做了大量研究, 土壤磷环境阈值因种植区域、土壤类型、种植模式及种植年限的变化而差异较大, 目前我国菜田土壤 Olsen-P 的环境阈值集中在 $33.8 \sim 96.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[15, 18-24]。在对太湖流域典型露天菜地的研究中发现, 菜地的磷素环境阈值为 $78.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 4)。所有处理的土壤有效磷含量均超过环境阈值, 这意味着太湖流域露天菜地存在较大的磷损失风险。

本研究发现, 与常规施肥相比, 减磷处理可有效降低径流液中 TP 浓度 (图 2)。但即使是在 P-100 处理下径流液中 TP 浓度仍远远高于我国《地表水环境质量标准》(GHZB 1-1999)^[25]V 类水中规定的 TP 浓度限值 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。这主要是因为菜地磷素盈余量大, 土壤长期施肥富集的磷成为径流水中磷流失的主要贡献者, 在降雨作用下伴随着地表径流而发生的土壤侵蚀作用会使土壤中积累的磷素随水力作用发生迁移^[26]。

虽然农田径流事件具有随机性, 但在特定的土壤和环境条件下, 又呈现出一定的规律性。通过对太湖流域露天菜地为期一年的连续监测可以看出, 磷径流损失浓度呈现出明显的季节性特征。夏秋季发生径流的次数最多, 各处理的 TP 径流液浓度显

表3 露天菜地磷流失负荷与土壤 Olsen-P、 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 及施磷量的相关关系

Table 3 Relationship of TP runoff loss load with soil Olsen-P, $\text{CaCl}_2\text{-P}$, and phosphate fertilizer input in an open vegetable field

指标 Index	TP 流失负荷	TP 流失浓度	施磷量		
	TP runoff loss load	TP runoff concentration	Olsen-P	$\text{CaCl}_2\text{-P}$	Phosphate fertilizer input
TP 流失负荷 TP runoff loss load	1				
TP 流失浓度 TP runoff concentration	0.97**	1			
Olsen-P	0.23	0.26	1		
$\text{CaCl}_2\text{-P}$	0.40*	0.42*	0.29	1	
施磷量 Phosphate fertilizer input	0.80**	0.85**	0.11	0.34	1

注: *, 在 0.05 水平上显著相关; **, 在 0.01 水平上显著相关。下同。 Note: *, Correlation is significant at the 0.05 level; **, Correlation is significant at the 0.01 level. The same below.

表 4 结构方程模型拟合结果检验

检验指标	评价标准	结果
Inspection index	Evaluation criterion	Result
卡方自由度比 χ^2/df	<3	0.87
近似误差平方根 RMSEA	<0.05	0
拟合指数 GFI	>0.90	0.95
相对拟合指数 CFI	>0.90	1

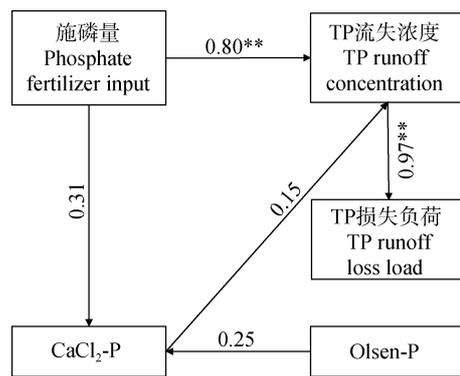


图 5 露天菜地磷损失的结构方程模型路径图

Fig. 5 Structural equation model path diagram of P loss in an open vegetable field

著高于其他季节(图 2)。这与其他人的研究结果^[27]一致。太湖流域菜地磷径流损失主要集中于 6—8 月降雨集中分布的梅雨和台风季期间, 11 月均未发生径流事件, 1 月、2 月和 10 月的径流量也很小^[27]。本研究中, 秋冬季磷径流浓度也呈现较高的水平, 这是因为第五次径流液收集时间(2019 年 9 月 24 日)正处于休耕期, 菜地处于裸地状态。地表植被覆盖度也是影响磷素径流的重要因素, 研究^[28]表明, 作物覆盖面积越小, 总磷流失量越多。这是因为地表所覆盖的植被可以截留降雨, 减少降雨与土壤的直接接触, 起到了缓冲作用; 同时作物根系增强了对土壤的固结作用, 可有效降低降雨导致的土壤侵蚀和养分流失^[7, 29]。降雨时植被的覆盖度小, 对雨水的截留作用弱, 因而径流流量大^[30]。因此可以认为, 秋冬季径流液 TP 浓度的增加与此时菜地土壤无蔬菜种植有关。同时, 在夏季雨水多发季节, 露天菜地应增加蔬菜种植密度, 减少地表裸露面积, 以期减少养分流失量。

菜地 TP 年流失负荷的结果表明, 太湖流域菜地常规施肥条件下 TP 年流失负荷为 $5.22 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (表 2)。研究表明, 太湖流域稻-麦轮作体系常规施

肥水平下 TP 年平均径流总量为 $1.08 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[31], 本研究结果显示菜地磷年径流损失远远高于太湖流域其他种植体系。在本研究中, 随施肥量的减少, TP 年流失负荷降低, 削减率为 8.15%~41.5%(表 2)。黄宗楚等^[32]也认为磷的流失量随农田施肥量增大而增加。但也有研究结果得到相悖的结论: 谢真越等^[14]在常规施肥的基础上分别减少 20%和 30%投入, 结果表明, 常规施肥、减施肥料 20%和 30%处理在种植苦瓜的监测期内 TP 累积流失负荷由高到低依次为减施肥料 30% ($2.9 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、减施肥料 20% ($2.4 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、常规施肥 ($1.7 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。可能是因为较短的监测期内, 施肥不是影响菜地径流中磷素流失的主要因子, 长期施肥是造成菜地径流中磷素流失加剧最根本的原因^[33]。同时, 其试验的减肥处理不仅减少了磷肥的施用, 也减少了氮肥、钾肥和有机肥的用量, 这种处理可能会导致苦瓜的长势弱小, 覆盖面积小, 从而增加了磷素的流失量。TP 径流负荷也呈明显的季节性变化, 露天菜地磷素流失总量整体上由高到低依次为夏秋季、春夏季、秋冬季、冬春季, 夏秋季磷素流失量为 $1.93 \sim 3.26 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 占了全年磷素流失通量的 59.2%~63.2%(图 3)。王子臣等^[34]研究表明, 在不考虑湿沉降和径流泥沙的情况下, 太湖流域露天菜地磷素流失总量整体呈夏秋季高于冬春季, 夏秋季磷素流失量为 $7.32 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 磷素流失系数为 1.31%。但其夏秋季磷素流失量高于本试验的结果, 这可能与土壤磷的本底值有关, 其试验前的土壤全磷含量为 $1.03 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效磷含量为 $105.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均高于本试验土壤。

磷随地表径流流失的形态分为 PP 和 DP, 许多研究表明, 土壤磷素径流的主要形态是 PP^[33, 35]。但在本研究中, 土壤磷素径流主要以 DP 的形式流失, 占了 TP 流失负荷的 53.4%~55.7%(表 2)。同时, 随着施肥量的增加, DP/TP 比例呈增加趋势, 但未达显著水平(图 2)。由于本试验土壤 Olsen-P 含量均大于磷环境阈值(图 4), 因此在土壤有效磷过饱和的情况下, 液相磷损失大于固相。最新的研究结果^[36]表明, 在长江流域, 磷素自上游向下游的输送形态由 20 世纪初以 PP 为主变化为 2017—2018 年以 DP 为主。PP 含量主要受降雨溅蚀与径流侵蚀作用的影响, 虽然降雨随时间变化较大, 但高强度的降雨大多发生在作物覆盖程度较高的时段, 明显

减少了降雨-径流过程对表层土壤的剥蚀,因此地表径流中 PP 含量低于 DP 含量^[37]。

3.2 减磷措施下露天菜地磷径流损失变化原因的探讨

磷素流失的主要影响因素包括降雨量、降雨侵蚀力、径流量、泥沙量、磷流失浓度等。本研究中,结合相关性分析及结构方程模型研究施磷量、径流 TP 浓度、土壤 Olsen-P 及 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量对磷径流损失负荷的影响。结果表明,TP 流失负荷与 TP 流失浓度、施磷量和土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量显著相关(表 3)。进一步通过结构方程模型得出,施磷量直接影响磷径流 TP 流失浓度,TP 流失浓度直接显著影响 TP 损失负荷(图 5)。这也意味着当季施磷量是磷径流损失的主要且直接的影响因素。本研究中,施用磷肥导致的地表径流 TP 流失量为 $0.45\sim 2.17\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,随径流排出菜地的磷素中有 $1.36\%\sim 3.33\%$ 是当季施用的化肥磷素,磷的流失量随施肥量增大而增加(表 3)。Wang 等^[4]通过定量评估我国蔬菜地磷径流损失量及其影响因素的结果也表明,当季磷肥投入量是磷径流损失的主控因素。这主要是因为土壤中大多数磷易被吸附沉淀固定,而肥料磷可快速转化为不溶态,新形成的不溶态磷在土壤中的可利用性和流动性均高于土壤磷库(残留态磷),因此当季磷肥施用量对磷损失影响更大^[4]。在本研究中,与 CK 相比,减施 $20\%\sim 100\%$ 磷肥可减少 $8.15\%\sim 41.5\%$ TP 流失量(表 3)。因此菜地磷肥减施能直接有效地减少磷的损失。

3.3 太湖流域露天菜地磷肥推荐施用量

在本试验中,尽管所有处理的土壤表层 Olsen-P 含量均大于磷环境阈值,但每季仍需施用大量磷肥才能保障高产。与 CK 相比,P-50 和 P-100 处理均显著降低辣椒、乌塌菜和包菜的产量(图 1)。在减磷的第一季辣椒和第三季包菜中,与对照相比,P-30 处理虽然未表现显著的减产效应,但与 CK 相比,P-30 处理辣椒和包菜产量均呈下降趋势(图 1a,图 1c),但在乌塌菜季中 P-30 反而有增产趋势。推测这是因为:(1)辣椒作为果菜,相对于叶菜而言,对磷的需求高^[3],盲目减施磷肥会造成大幅度减产。(2)包菜作为叶菜,虽然需磷量低于果菜,但若每季持续减磷可能会存在减产风险。因此,在太湖流域蔬菜种植体系中,综合考虑季节、蔬菜类型、蔬菜产量及磷素损失量时,在夏秋季推荐在常规施磷

的基础上减少 20%的磷肥,既可以保证蔬菜不减产,同时也能减少磷素损失;在秋冬季种植乌塌菜时,推荐在常规施磷的基础上减少 30%的磷肥;在春季种植包菜时,推荐在常规施磷的基础上减少 20%的磷肥投入。

4 结 论

太湖流域有着丰富的河网水系和充沛的降水,这也是蔬菜种植得天独厚的条件,但降雨集中,雨量大又易产生地表径流及土壤侵蚀。由于菜地长期大量地施磷肥,使得土壤磷盈余量大,从而增加了土壤磷素的损失风险。从蔬菜地养分减排的环境效应与蔬菜产量的农学效应协调统一的角度出发,本研究推荐在常规施磷的基础上减少 $20\%\sim 30\%$ 的磷肥,既可保证蔬菜不减产,同时也能减少磷素损失。由于在降雨集中分布的梅雨和台风季节最易发生径流事件,在此期间进行的翻耕和施肥等农事活动会大大增加养分由农田生态系统的输出。因此,露天菜地在夏秋季应避免低密度种植,减少施肥频率与强度。

参考文献 (References)

- [1] Ministry of Agriculture, PRC. China agriculture statistical report[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017. [中华人民共和国农业部.中国农业统计资料[M].北京:中国农业出版社,2017.]
- [2] 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 Fertilizers, 2017, 23(6): 1480-1493. [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.]
- [3] Yan Z J, Liu P P, Li Y H, et al. Phosphorus in China's intensive vegetable production systems: Overfertilization, soil enrichment, and environmental implications[J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42(4): 982-989.
- [4] 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.
- [5] China National Environment Monitoring Centre. National surface water quality report[R]. 2020, 9: 30. [中国环境监测总站.全国地表水水质月报[R].2020,9:30.]

- [6] Min J, Ji R T, Wang X, et al. Changes in planting structure and nitrogen and phosphorus loss loads of farmland in Taihu Lake region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28 (8): 1230—1238. [闵矩, 纪荣婷, 王霞, 等. 太湖地区种植结构及农田氮磷流失负荷变化[J]. *中国生态农业学报*, 2020, 28 (8): 1230—1238.]
- [7] Zu Y Q, Yang J, Zhan F D, et al. Effects of straw mulching on non-point source pollution loading from cultivated land with maize and broccoli[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28 (6): 155—160. [祖艳群, 杨静, 湛方栋, 等. 秸秆覆盖对玉米和青花农田土壤面源污染负荷的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28 (6): 155—160.]
- [8] Wu M, Tang X Q, Li Q Y, et al. Review of ecological engineering solutions for rural non-point source water pollution control in Hubei Province, China[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2013, 224 (5): 1—18.
- [9] Zhan F D, Fu Z X, Yang J, et al. Effects of maize intercropping on characteristics of surface runoff pollution from vegetables fields in Dianchi watershed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32 (4): 847—855. [湛方栋, 傅志兴, 杨静, 等. 滇池流域套作玉米对蔬菜农田地表径流污染流失特征的影响[J]. *环境科学学报*, 2012, 32 (4): 847—855.]
- [10] Fohse D, Claassen N, Jungk A. Phosphorus efficiency of plants. 1. External and internal P requirement and P uptake efficiency of different plant-species[J]. *Plant and Soil*, 1988, 110: 101—109.
- [11] Gong R, Liu Q, Rong X M, et al. Effects of reduced phosphorus on maize yield and P surface runoff in embankment upland[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2014 (20): 18—20. [龚蓉, 刘强, 荣湘民, 等. 南方丘陵区旱地减磷对玉米产量及磷径流损失的影响[J]. *湖南农业科学*, 2014 (20): 18—20.]
- [12] Lü Y M, Wu Y M, Li H D, et al. Effects of dynamic changes of nitrogen and phosphorus concentrations in surface water of paddy field under different fertilizer rate[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34 (4): 349—355. [吕亚敏, 吴玉红, 李洪达, 等. 减肥措施对稻田田面水氮、磷动态变化特征的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, 34 (4): 349—355.]
- [13] Li E Y, Qiu Y Q, Peng P Q, et al. Effects of reduction and control nitrogen and phosphorous on maize yield and surface runoff in red soil slopes of Dongting Lake[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25 (4): 32—35. [李恩尧, 邱亚群, 彭佩钦, 等. 洞庭湖红壤坡地减氮控磷对玉米产量和径流氮磷的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25 (4): 32—35.]
- [14] Xie Z Y, Zhuo M N, Li D Q, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss by runoff from vegetable fields under different fertilization levels[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22 (8): 1423—1427. [谢真越, 卓慕宁, 李定强, 等. 不同施肥水平下菜地径流氮磷流失特征[J]. *生态环境学报*, 2013, 22 (8): 1423—1427.]
- [15] Wang C R, Hu Z Y, Yang L Z, et al. Risk of phosphate leaching loss from soil of vegetable plot in the typical region of Taihu Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25 (1): 76—80. [王彩绒, 胡正义, 杨林章, 等. 太湖典型地区蔬菜地土壤磷素淋失风险[J]. *环境科学学报*, 2005, 25 (1): 76—80.]
- [16] Hu Z P, Zheng X M, Huang Z C, et al. Nitrogen and phosphorus loss by surface runoff in farm land in Shanghai[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38 (2): 310—313. [胡志平, 郑祥民, 黄宗楚, 等. 上海地区不同施肥方式氮磷随地表径流流失研究[J]. *土壤通报*, 2007, 38 (2): 310—313.]
- [17] Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29 (1): 105—110.
- [18] Liu L, Wang L, Xu W Q, et al. Environmental threshold and prevention of soil phosphorus leaching in greenhouse soils[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, 34 (S1): 197—203. [刘蕾, 王凌, 徐万强, 等. 设施土壤磷素淋失环境阈值及防控措施[J]. *华北农学报*, 2019, 34 (S1): 197—203.]
- [19] Liu L, Zhang G Y, Gao J, et al. Reduction effect of reduced fertilization on nitrogen and phosphorus loss in agriculture in Chongli[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2019, 23 (6): 82—87. [刘蕾, 张国印, 郜静, 等. 减量施肥对崇礼区农业氮磷流失的削减效应[J]. *河北农业科学*, 2019, 23 (6): 82—87.]
- [20] Luo Q D, Zhuang Y H, Li Y. Threshold values on phosphorus leaching of vegetable soils in Fuzhou[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 27 (4): 373—378. [罗泉达, 庄远红, 李延. 福州市蔬菜地土壤磷淋失的“阈值”研究[J]. *福建农业学报*, 2012, 27 (4): 373—378.]
- [21] Li A F, Zhang M K. Accumulation and environmental risk of nitrogen and phosphorus in vegetable soils with different plantation history in northern Zhejiang[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29 (1): 122—127. [李艾芬, 章明奎. 浙江平原不同种植年限蔬菜地土壤氮磷的积累及环境风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29 (1): 122—127.]
- [22] Qin H L, Quan Z, Liu X L, et al. Phosphorus status and risk of phosphate leaching loss from vegetable soil of different planting years in suburbs of Changsha[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43 (9): 1843—1851. [秦红灵, 全智, 刘新亮, 等. 长沙市郊不同种植年限菜地土壤磷状况及淋失风险分析[J]. *中国农业科学*, 2010, 43 (9): 1843—1851.]
- [23] Jiang B, Lin X Y, Zhang Y S. Phosphorus status and

- index for predicting environmental risk of phosphorus leaching in typical vegetable soils of Hangzhou[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Science)*, 2008, 34 (2): 207—213. [姜波, 林咸永, 章永松. 杭州市郊典型菜园土壤磷素状况及磷素淋失风险研究[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2008, 34 (2): 207—213.]
- [24] Wang X J, Liao W H, Liu J L. Phosphorus leaching from vegetable fields and impact factors[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2006, 21 (4): 67—70. [王新军, 廖文华, 刘建玲. 菜地土壤磷素淋失及其影响因素[J]. *华北农学报*, 2006, 21 (4): 67—70.]
- [25] State Environmental Protection Administration. Environmental quality standards for surface water: GHZB 1-1999[S]. Beijing: China Environment Science Press, 2000. [国家环境保护总局. 地表水环境质量标准 GHZB 1-1999[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000.]
- [26] Wang D H, Liang C H. Transportation of agriculture phosphorus and control to reduce the phosphorus loss to water: A review[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11 (2): 183—188. [王道涵, 梁成华. 农业磷素流失途径及控制方法研究进展[J]. *土壤与环境*, 2002, 11 (2): 183—188.]
- [27] Gao C, Zhu J Y, Zhu J G, et al. Phosphorus exports via overland runoff under different land uses and their seasonal pattern[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25 (11): 1543—1549. [高超, 朱继业, 朱建国, 等. 不同土地利用方式下的地表径流磷输出及其季节性分布特征[J]. *环境科学学报*, 2005, 25 (11): 1543—1549.]
- [28] Li J, Li Z B, Li P, et al. Effect of vegetation pattern on phosphorus loss character under simulate rainfall condition[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24 (4): 27—30. [李婧, 李占斌, 李鹏, 等. 模拟降雨条件下植被格局对径流总磷流失特征的影响分析[J]. *水土保持学报*, 2010, 24 (4): 27—30.]
- [29] Tao P, Wang S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in Southwest China[J]. *Catena*, 2012, 90 (1): 53—62.
- [30] Huang Y F, Zhang L P, Hong H S, et al. An experimental research on soil erosion and nitrogen, phosphorus losses under vegetation covers[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23 (4): 735—739. [黄云凤, 张璐平, 洪华生, 等. 不同土地利用对流域土壤侵蚀和氮、磷流失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23 (4): 735—739.]
- [31] 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. [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.]
- [32] Huang Z C, Zheng X M, Yao C X. The study of nonirrigated farmland nitrogen and phosphorus loss with surface runoff in Shanghai[J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2007, 19 (1): 6—10. [黄宗楚, 郑祥民, 姚春霞. 上海旱地农田氮磷随地表径流流失研究[J]. *云南地理环境研究*, 2007, 19 (1): 6—10.]
- [33] Zeng Z B, Li M J, Yao J W, et al. Impacts of custom fertilization on N and P losses by runoff in vegetable fields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26 (5): 34—43. [曾招兵, 李盟军, 姚建武, 等. 习惯施肥对菜地氮磷径流流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26 (5): 34—43.]
- [34] Wang Z C, Qiu D, Du Y Y, et al. Characteristics of surface runoff and nitrogen and phosphorus losses in typical vegetable field of Taihu Lake Basin[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2012, 28 (6): 1501—1504. [王子臣, 邱丹, 堵燕钰, 等. 太湖流域典型菜地地表径流及氮磷流失特征[J]. *江苏农业学报*, 2012, 28 (6): 1501—1504.]
- [35] Yang L X, Yang G S, Yuan S F, et al. Characteristics of soil phosphorus runoff under different rainfall intensities in the typical vegetable plot of Taihu Basin[J]. *Environmental Science*, 2007, 28 (8): 1763—1769. [杨丽霞, 杨桂山, 苑韶峰, 等. 不同雨强条件下太湖流域典型蔬菜地土壤磷素的径流特征[J]. *环境科学*, 2007, 28 (8): 1763—1769.]
- [36] Hu M P, Liu Y M, Zhang Y F, et al. Long-term (1980-2015) changes in net anthropogenic phosphorus inputs and riverine phosphorus export in the Yangtze River basin[J]. *Water Research*, 2020, 177: 115779.
- [37] Jiao P J, Xu D, Wang S L, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses from farmland under nature rainfall[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29 (3): 534—540. [焦平金, 许迪, 王少丽, 等. 自然降雨条件下农田地表产流及氮磷流失规律研究[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29 (3): 534—540.]

(责任编辑: 陈荣府)