

有机肥和炭基肥替代化肥对甘薯坡耕地径流氮磷损失的影响

陈佳寅, 黄程鹏, 郑梦琦, 李子鸿, 王佳雨, 姜培坤

(浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 311300)

摘要: 【目的】探讨施用有机肥和炭基肥对甘薯 *Ipomoea batatas* 坡耕地土壤氮磷径流流失量及形态的影响, 探索径流养分流失量和土壤化学性质之间的关系【方法】采用随机区组设计, 共设置 4 种施肥处理: 不施肥、常规化肥、50% 质量分数有机肥+50% 质量分数化肥 (有机肥 50% 替代)、炭基肥, 在 5 个时间点测定甘薯坡耕地径流及土壤中不同形态氮磷质量浓度及质量分数, 计算氮磷流失量与流失系数。【结果】径流总氮、颗粒态氮、硝态氮和铵态氮质量浓度存在峰值效应, 不同径流的产流中有有机肥 50% 替代和炭基肥效应不同。与常规化肥处理相比, 有机肥 50% 替代和炭基肥分别减少了每年总氮径流流失量的 48.1% 和 39.6%, 而总磷则降低了 26.1% 和 32.7%。有机肥 50% 替代和炭基肥处理改变了径流氮磷形态组成, 减少了肥料径流流失系数。总氮 ($R^2=0.49$) 和总磷 ($R^2=0.48$) 径流流失量与土壤硝态氮呈显著正相关 ($P<0.05$)。土壤有效磷分别能解释总氮和总磷径流流失量的 60% 和 41%。【结论】有机肥 50% 替代和炭基肥是减少坡耕地养分径流损失的有效措施, 有机肥 50% 替代更适合用于减少甘薯坡耕地径流氮流失, 而炭基肥更适用于减少径流磷流失。图 7 表 2 参 33

关键词: 有机肥; 炭基肥; 坡耕地; 径流氮磷流失

中图分类号: S506 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2023)03-0540-10

Effects of substituting organic fertilizer and biochar-based fertilizer instead of chemical fertilizer on nitrogen and phosphorus runoff loss in sweet potato sloping farmland

CHEN Jiayin, HUANG Chengpeng, ZHENG Mengqi, LI Zihong, WANG Jiayu, JIANG Peikun

(College of Environment and Resources, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] This study aims to explore the effects of applying organic fertilizer and biochar-based fertilizer instead of chemical fertilizer on the amount and form of soil nitrogen and phosphorus loss from runoff in the sloping farmland of sweet potatoes (*Ipomoea batatas*), and to analyze the relationship between nutrient runoff loss and soil chemical properties. [Method] A randomized block design was used to investigate the effects of organic fertilizer and biochar-based fertilizer on nitrogen and phosphorus runoff loss in sweet potato sloping farmland. There were 4 treatments: no fertilizer, conventional fertilizer, 50% organic fertilizer instead of chemical fertilizer, and 100% biochar-based fertilizer. [Result] The concentration of total nitrogen, particulate nitrogen, nitrate-nitrogen, and ammonium-nitrogen in runoff had a peak effect, and the effect of organic fertilizer substitution and biochar-based fertilizer differed in different runoff events. Compared with conventional chemical fertilizer, organic fertilizer and biochar-based fertilizer reduced the annual nitrogen runoff loss by 48.1% and 39.6%, respectively, while total phosphorus decreased by 26.1% and 32.7%.

收稿日期: 2022-05-22; 修回日期: 2022-10-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41907074); 浙江省科学技术厅重点研发项目 (2019C03121)

作者简介: 陈佳寅 (ORCID: 0000-0003-0032-8842), 从事农业面源污染治理研究。E-mail: JYchen503415858@163.com。通信作者: 姜培坤 (ORCID: 0000-0002-2311-2350), 教授, 从事农业资源与环境研究。E-mail: jiangpeikun@zafu.edu.cn

respectively. The substitution of organic fertilizer and biochar-based fertilizer for chemical fertilizer changed the form and composition of nitrogen and phosphorus in runoff and decreased the runoff loss coefficient of fertilizer. The loss of total nitrogen ($R^2=0.49$) and total phosphorus ($R^2=0.48$) was positively correlated with soil nitrate-nitrogen ($P<0.05$). Soil available phosphorus explained 60% and 41% of total nitrogen and total phosphorus runoff loss, respectively. [Conclusion] Applying organic fertilizer and biochar-based fertilizer instead of chemical fertilizer are effective measure to reduce nutrient runoff loss in sloping farmland. 50% organic fertilizer is more suitable for reducing nitrogen runoff loss in sweet potato sloping farmland, while biochar-based fertilizer is more suitable for reducing phosphorus runoff loss. [Ch, 7 fig. 2 tab. 33 ref.]

Key words: organic fertilizer; biochar-based fertilizer; slope farmland; nitrogen and phosphorus runoff loss

过量施用无机肥导致地表水体富营养化和土壤退化，从而使土壤生产力下降^[1-4]。因此，优化养分管理措施，减少土壤氮磷的流失和提高肥料利用效率迫在眉睫。有机肥和炭基肥替代化肥是减少环境污染和维持作物产量的有效选择^[5-7]，两者均是通过调整土壤养分供应与作物养分需求，以达到增加肥料利用效率和减少氮磷流失的目的。有机肥养分供应速率取决于有机物质的矿化^[8]，炭基肥则取决于生物质炭和包覆材料的溶解与扩散^[6]。有机肥替代化肥能减少稻田氮素淋溶和径流损失 8.7%~25.6%^[9-10]并提高水稻 *Oryza sativa* 产量 21%~24%^[11]，水稻氮素利用效率随有机肥比例的增高而增高，但有机肥比例超过 75% 则氮素利用效率降低^[10]。炭基肥能减少烟草 *Nicotiana tabacum* 地氮素淋溶损失的 6.45%~8.36%，但减少氮素淋溶效应量随炭基肥添加量的增加而降低^[12]。有机肥及炭基肥替代化肥对氮素利用效率和产量的影响效应量大小受肥料类型、施用量、替代率、栽培类型和作物种类影响。如相比尿素，炭基肥能分别提高茶 *Camellia sinensis*、肉桂 *Cinnamomum cassia* 和甜瓜 *Cucumis mel* 产量 43%、166% 和 176%^[13]。坡耕地土壤有着更高侵蚀风险，且即使同为坡耕地，种植甘薯 *Ipomoea batatas* 比荒草和谷子的侵蚀风险更高^[14]。由于氮磷流失方式的间歇性、流失时间的随机性、流失机制的复杂性、流失途径和流失量的不确定性^[15]，坡地强化径流的条件下，甘薯坡耕地采用有机肥和炭基肥替代化肥的措施对氮磷养分径流损失的影响难以预测。本研究旨在探讨有机肥和炭基肥替代化肥对甘薯坡耕地土壤径流氮磷流失质量浓度、径流氮磷流失量及其形态的影响，同时分析了径流养分流失量和土壤化学性质之间的关系，以期甘薯坡耕地径流流失情况和施肥管理措施提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于浙江省杭州市临安区板桥镇葱坑村 (30°05'27.64"N, 119°44'03.44"E)。该区属亚热带湿润季风气候，四季分明，年日照时数为 1 946 h，无霜期为 239 d，年平均气温为 15.8 °C，年平均降水量为 1 629 mm。海拔为 150 m，土壤为红壤土类黄红壤亚类。

1.2 试验设计

按照随机区组设计 4 个施肥处理 (表 1)：不施肥 (对照)、常规化肥、50% 质量分数有机肥+50% 质量分数化肥 (有机肥 50% 替代)、炭基肥，每个处理重复 3 次，小区面积为 30 m²。为防止发生侧渗和串灌，各小区之间均用水泥浇灌了宽 20 cm，深 30 cm 的水泥墙。每个小区均配有 1 个单独的排水口和坡地径流池用于采集地表径流水。甘薯 ‘清香’ *I. batatas* ‘Qingxiang’ 等高起垄栽插薯苗，行距 50 cm，株距 30 cm，密度为 6.8 万株·hm⁻²。2020 年 6 月 8 日施基肥，6 月 9 日移栽插秧，7 月 20 日施追肥，肥料均匀撒施后翻耕，肥料施于土层 0~5 cm 处。于 2020 年 10 月 24 日收获。

1.3 径流和土壤样品采集及处理

分别在 2020 年的 6 月 22 日、7 月 1 日、7 月 7 日、7 月 12 日、7 月 17 日、7 月 30 日及 9 月 21 日收集地表径流，先测量径流池水位高度以计算径流量，再将池内径流水充分搅匀，最后在池中不同部位、不同深度用采水器进行多点混合采集。水样置于 4 °C 保存，并带回实验室即刻处理。

收获甘薯后，每个小区随机选择 5 个位置采集 0~20 cm 土层土样，充分混合后组成一个土样。在土

表1 施肥方案

Table 1 Fertilizer types and rates

处理	施用量/(kg·hm ⁻²)		m(氮):m(五氧化二磷): m(氧化钾)
	基肥	追肥	
不施肥(对照)	0	0	0:0:0
常规化肥	尿素 195.66; 钙镁磷肥 500.00; 硫酸钾 577.00	尿素 195.66; 钙镁磷肥500.00; 硫酸钾 577.00	90:60:300
50%质量分数有机肥+50%质量 分数化肥(有机肥50%替代)	菜籽饼900.00; 尿素 97.67; 钙镁磷肥312.67; 硫酸钾 559.67	菜籽饼900.00; 尿素 97.67; 钙 镁磷肥312.67; 硫酸钾 559.67	90:60:300
炭基肥	炭基肥500.00; 钙镁磷肥291.67; 硫 酸钾480.67	炭基肥500.00; 钙镁磷肥291.67; 硫酸钾480.67	90:60:300

说明: 尿素中氮质量分数为 46%; 钙镁磷肥中五氧化二磷质量分数为 12%; 硫酸钾中氧化钾质量分数为 52%; 菜籽饼中 $m(\text{氮}):m(\text{五氧化二磷}):m(\text{氧化钾}):m(\text{碳})=5.0:2.5:1.0:46.0$, 有机质质量分数为 85%; 炭基肥由遂昌绿金有机肥有限公司研制, $m(\text{氮}):m(\text{五氧化二磷}):m(\text{氧化钾}):m(\text{碳})=18:5:10:25$, 直径为 2~4 mm。其中, 生物质炭质量分数为 12%, 由稻草通过在 400~500 °C 缓慢热解, 在无氧条件下热解 1 h。生物炭质比表面积和孔体积分别为 224.2 m²·g⁻¹ 和 0.11 cm³·g⁻¹。

壤样品采集过程中, 使用不锈钢容重环刀(直径 5.05 cm, 高 5.00 cm)采集土壤容重样品。将样品分为 2 份, 1 份湿土除去可见的根, 过 2 mm 筛, 用于测定土壤铵态氮和硝态氮。另 1 份风干, 除去可见的根和有机物, 然后木盘研磨并过 2 mm 筛, 用于测定土壤 pH、速效钾、有效磷。再从过 2 mm 筛土壤样品中挑选部分土样用玛瑙研钵研磨并过 0.15 mm 筛, 用于测定土壤有机碳、总氮、总磷和总钾。

1.4 样品分析

径流水样总氮、可溶性氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894—1989)测定。径流水样总磷和可溶性磷采用过硫酸钾消解钼蓝比色法(GB 11893—1989)。径流水样铵态氮和硝态氮采用间断分析仪测定。采用 pH 计法测定径流水样 pH。

土壤样品中的有机碳和总氮采用元素分析仪测定; 土壤全磷采用高氯酸-硫酸消煮、钼锑抗比色法测定; 土壤全钾采用氢氧化钠熔融、火焰光度法测定; 土壤有效磷采用 0.030 mol·L⁻¹ 氟化铵-0.025 mol·L⁻¹ 盐酸浸提、钼锑抗比色法测定; 土壤速效钾采用醋酸铵浸提、火焰光度法测定; 土壤硝态氮、氨态氮采用氯化钾浸提—间断分析仪测定。

1.5 计算和统计分析

氮磷流失量 (R , kg·hm⁻²): $R = \sum_{i=1}^n C_i V_i$; 氮磷流失系数 (C_r): $C_r = (R_m - R_0)/R_f$; 颗粒态氮 (PN) 质量浓度 (N_p , mg·L⁻¹): $N_p = N_T - N_D$; 颗粒态磷 (PP) 质量浓度 (P_p , mg·L⁻¹): $P_p = P_T - P_D$; 可溶性有机氮 (DON) 质量浓度 (N_{DO} , mg·L⁻¹): $N_{DO} = N_D - N_N - N_A$ 。其中: C_i 为第 i 次径流水中氮、磷的质量浓度 (mg·L⁻¹); V_i 为第 i 次径流水的体积 (m³); n 为总径流次数; R_m 为不同施肥类型氮磷流失量; R_0 为不施肥氮磷流失量; R_f 为不同施肥类型肥料施用量; N_T 为总氮 (TN) 质量浓度 (mg·L⁻¹); N_D 为可溶性总氮 (DN) 质量浓度 (mg·L⁻¹); P_T 为总磷 (TP) 质量浓度 (mg·L⁻¹); P_D 为可溶性总磷 (DP) 质量浓度 (mg·L⁻¹); N_N 为硝态氮 (NN) 质量浓度 (mg·L⁻¹); N_A 为铵态氮 (AN) 质量浓度 (mg·L⁻¹)。

利用 SPSS 26.0 进行数据统计分析, 采用单因素方差分析和邓肯法多重比较检验不同处理间的差异显著性 ($P < 0.05$)。利用主成分分析 (PCA) 确定径流氮磷及其形态之间相互依存的结构。利用冗余分析 (RDA) 检查土壤特性与土壤径流氮磷及其形态之间的关系。

2 结果与分析

2.1 不同处理下径流产流时间对不同形态氮磷质量浓度和 pH 的影响

重复测量模型(图 1)表明: 不同处理、径流产流时间及其相互作用对径流总氮、颗粒氮、硝态氮和铵态氮质量浓度均存在显著影响 ($P < 0.05$), 地表径流总氮、颗粒氮、硝态氮和铵态氮质量浓度存在峰值效应, 并且不同径流产流过程中不同处理的影响也不同。施肥初期, 与常规化肥相比, 有机肥 50% 替代和炭基肥处理的径流总氮质量浓度分别减少了 58.4% 和 49.0%; 颗粒氮质量浓度分别减少了 84.5% 和 78.3%; 硝态氮质量浓度分别减少了 32.1% 和 26.4%; 铵态氮质量浓度分别减少了 66.1% 和 80.0%。施肥

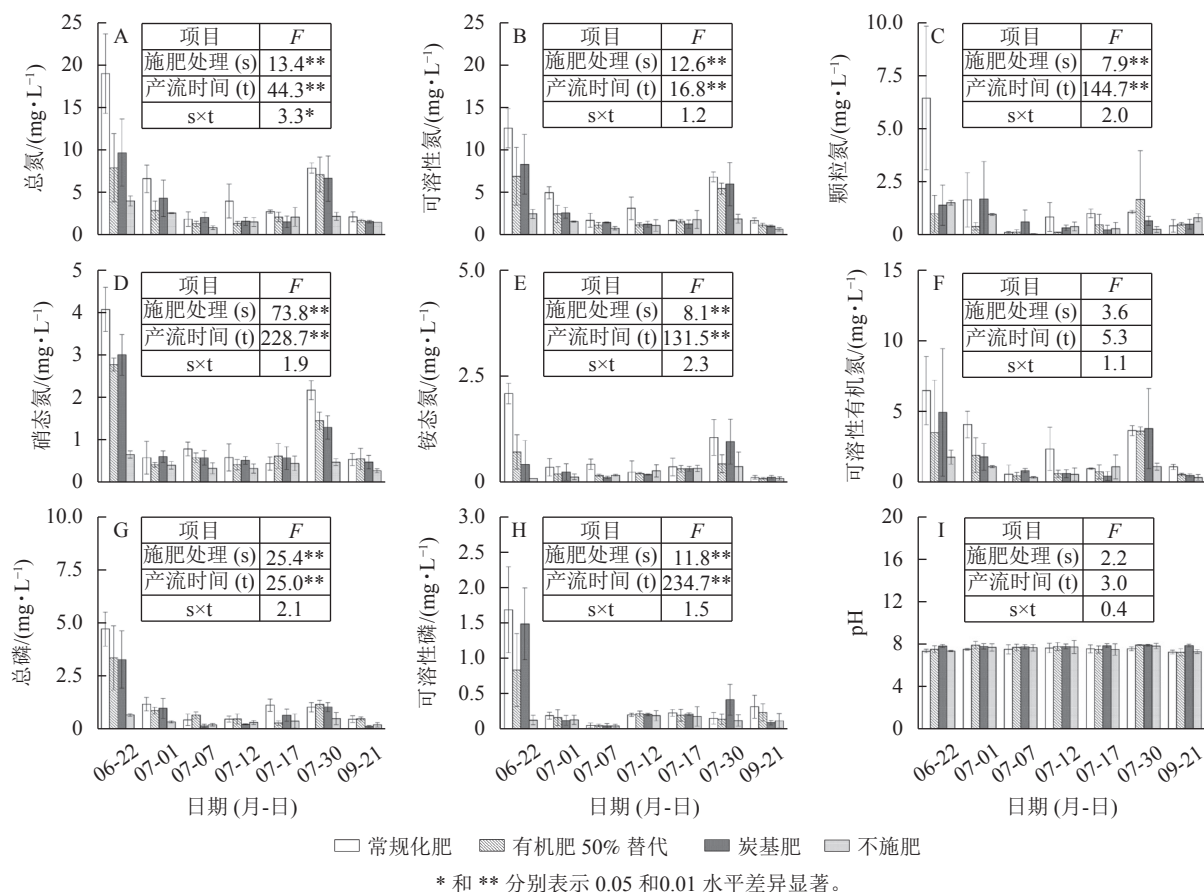


图 1 不同处理不同时间径流中不同形态氮磷质量浓度和 pH

Figure 1 Effects of fertilizer types and runoff dates on nitrogen, phosphorus contents and pH value in the runoff

中后期, 常规化肥、有机肥 50% 替代和炭基肥对径流中总氮、颗粒氮、硝态氮和铵态氮质量浓度的影响较小。

不同处理和径流产流时间显著影响径流可溶性氮和总磷质量浓度 ($P < 0.05$), 且不同肥料类型的影响趋向一致。无论径流产流时间如何变化, 有机肥 50% 替代处理的径流中可溶性氮和总磷质量浓度分别为 5.23、1.03 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 炭基肥处理的径流中分别为 2.85、0.91 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均显著低于常规化肥处理 (分别为 8.59 和 1.33 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。

径流产流时间显著影响径流可溶性有机氮和可溶性磷质量浓度 ($P < 0.05$), 但两者并不受不同处理的影响 ($P > 0.05$)。另外, pH 并不随径流产流时间变化而变化 ($P > 0.05$), 常规化肥处理中 pH 值 (7.45) 低于有机肥 50% 替代 (7.62) 和炭基肥 (7.79) 处理。

2.2 不同处理下径流产流时间对不同形态氮磷流失量的影响

由图 2A 可见: 在 7 次径流产流中, 不同处理的径流流失量均无显著差异 ($P > 0.05$)。对于常规化肥处理, 第 1 次降雨的径流氮素流失量占全年径流流失总量的 46.2%, 在这个时期, 有机肥 50% 替代和炭基肥处理可分别减少总氮流失量 1.78 和 1.25 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、硝态氮流失量 0.29 和 0.21 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、铵态氮流失量 0.27 和 0.32 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、可溶性有机氮 0.64 和 0.30 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。由图 2B 可见: 第 1 次降雨时径流中的磷素流失量占全年径流流失总量的 53.9%。有机肥 50% 替代和炭基肥处理可分别减少总磷流失量的 35.3% 和 32.1%、可溶性磷流失量的 54.3% 和 13.5%、颗粒磷流失量的 24.9% 和 42.3%。

2.3 不同处理对径流总氮和总磷流失量及其流失系数的影响

由图 3A 和图 3B 可见: 不施肥处理每年径流中的总氮和总磷流失量分别为 2.27 和 0.40 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。常规化肥处理每年径流总氮流失量是 7.75 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 分别是有机肥 50% 替代处理 (4.02 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 和炭基肥处理 (4.68 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 的 1.93 和 1.66 倍。有机肥 50% 替代和炭基肥处理每年径流总磷流失量分别为 1.22、1.11 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 是常规化肥处理 (1.65 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 的 73.9% 和 67.4%。

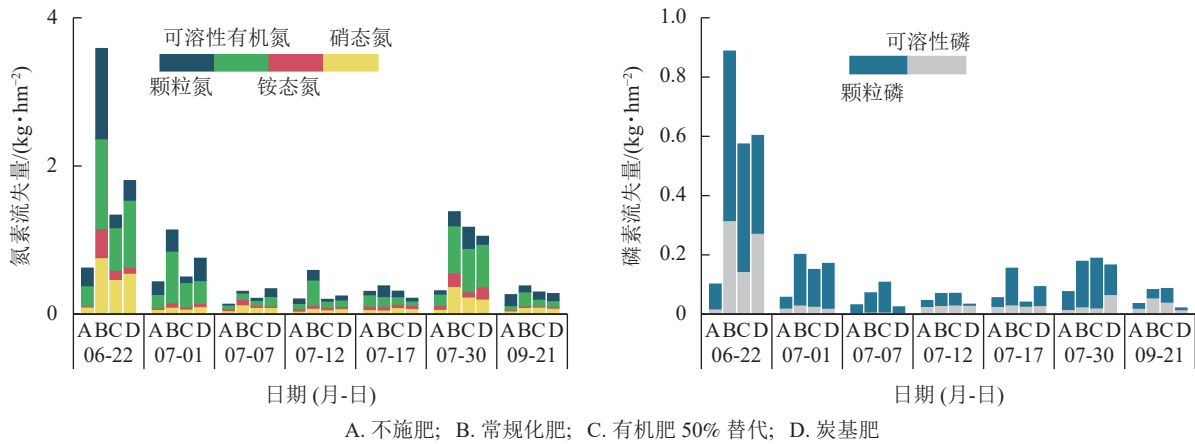
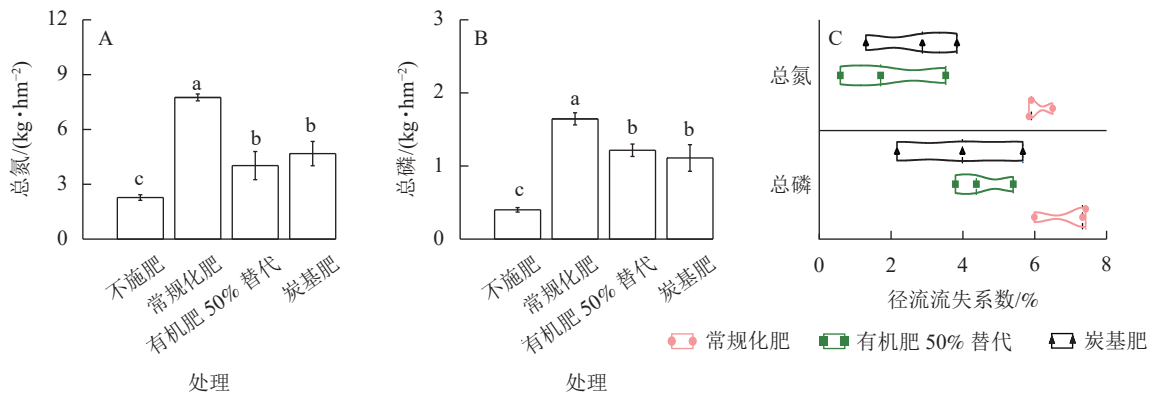


图2 不同处理不同时间径流中不同形态氮磷素流失量

Figure 2 Effects of fertilizer types on different fractions of nitrogen and phosphorus loss rate in runoff in different runoff dates

由图3C可见：常规化肥、有机肥50%替代和炭基肥处理总氮流失系数分别为6.09%、1.94%和2.67%，而总磷流失系数分别为6.91%、4.53%和3.94%。相比常规化肥，有机肥50%替代和炭基肥处理的总氮流失系数分别降低了68.09%和56.11%，而总磷流失系数分别降低了34.54%和43.00%。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图3 不同处理的径流中总氮(A)和总磷(B)的流失量及径流系数(C)

Figure 3 Effects of fertilizer types on total nitrogen (A) and total phosphorus (B) loss rate and runoff coefficients (C) in the runoff

2.4 不同处理对土壤化学性质的影响

从表2可见：与常规化肥处理相比，有机肥50%替代和炭基肥处理的土壤有机碳、全磷、全钾、有机氮、铵态氮和有效钾质量分数都有所提高，但除了炭基肥处理显著提高了土壤有机碳质量分数 ($P < 0.05$) 外，其余处理均未达显著水平。且与常规化肥处理相比，有机肥50%替代和炭基肥处理的硝态氮和有效磷质量分数分别显著降低了18.1%~26.2%和45.0%~65.0% ($P < 0.05$)。

2.5 不同处理对径流不同形态氮磷组分的影响

与常规化肥处理相比，有机肥50%替代处理使硝态氮和可溶性有机氮的占比分别提高了28%和

表2 不同处理土壤化学性质

Table 2 Effects of fertilizer types on soil properties

处理	pH	有机碳/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全磷/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全钾/ ($g \cdot kg^{-1}$)	有机氮/ ($g \cdot kg^{-1}$)	硝态氮/ ($mg \cdot g^{-1}$)	铵态氮/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	有效磷/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	有效钾/ ($mg \cdot kg^{-1}$)
不施肥	5.62 bc	11.39 b	0.36 a	31.15 a	1.93 a	36.30 b	5.08 a	9.30 b	179.60 b
常规化肥	5.51 c	11.08 b	0.33 a	27.56 a	1.93 a	49.10 a	6.28 a	26.00 a	241.60 ab
有机肥50%替代	5.66 b	13.63 ab	0.41 a	27.73 a	2.10 a	40.28 b	7.72 a	9.10 b	212.10 ab
炭基肥	5.91 a	14.54 a	0.30 a	29.22 a	2.17 a	36.20 b	5.57 a	14.30 b	269.40 a

说明：同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

46%，但使铵态氮和颗粒态氮的占比分别减少了 9% 和 18%；炭基肥处理则使硝态氮和可溶性有机氮的占比分别提高了 26% 和 46%，但使铵态氮和颗粒态氮的占比分别减少了 8% 和 20% (图 4A)。常规化肥处理的可溶性磷占比 (30%) 高于有机肥 50% 替代处理 (25%)，而低于炭基肥处理 (40%) (图 4B)。

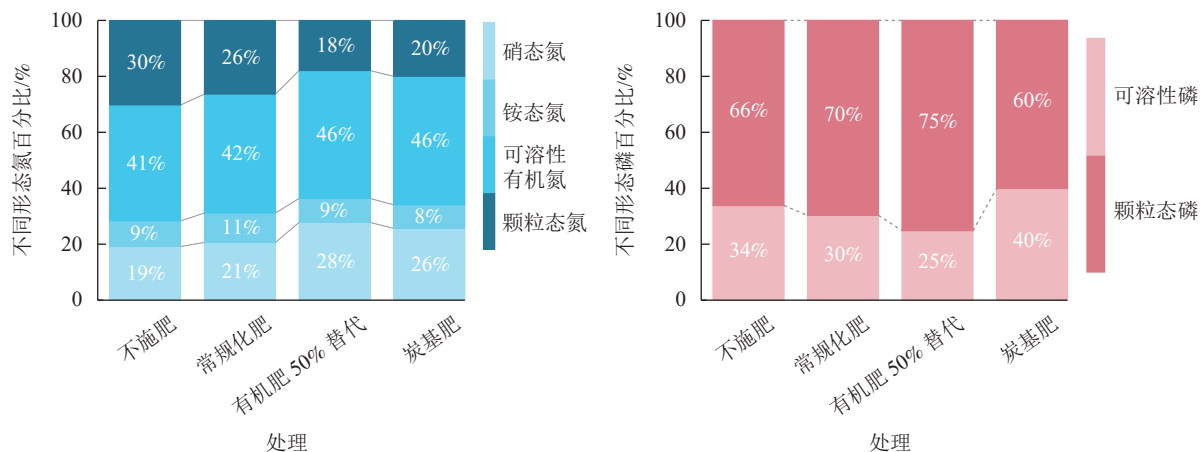


图 4 不同处理径流中不同形态氮磷组分

Figure 4 Effects of fertilizer types on proportions of nitrogen and phosphorus fractions in the runoff

2.6 径流氮磷组分和土壤化学性质之间的关系

主成分分析 (图 5A) 发现：2 个轴解释了径流氮磷形态组成中总变异的 90.1%，其中主成分 1 对氮磷径流流失形态的贡献率为 78.97%，这意味着横坐标是主要的变异因素。本研究中，径流氮磷组分分为 3 个主要组分，并且在主成分 1 的因素上，有机肥 50% 替代和炭基肥处理与不施肥、常规化肥处理均显著分开，这表明甘薯坡耕地土壤在经过不同施肥处理后，其径流中氮磷的组分与对照、常规处理相比发生了显著的变化，而有机肥 50% 替代和炭基肥处理之间的径流氮磷组分趋于一致。冗余分析中两坐标轴能够解释 75.86% 的关系信息，说明该结果可较好地反映土壤的化学性质和径流氮磷及其形态之间的关系。冗余分析 (图 5B) 显示：土壤有效磷质量分数与径流氮磷形态组成呈正相关 ($F=7.0, P=0.007$)，尤其是常规化肥处理土壤中硝态氮、铵态氮、可溶性有机氮、可溶性总氮、总氮、颗粒态磷、可溶性总磷和总磷径流失量。

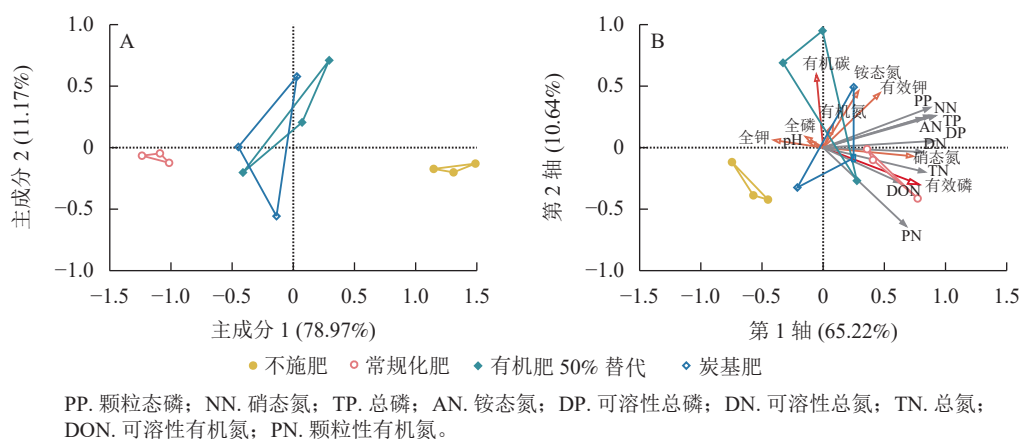


图 5 不同处理径流中氮磷组分的主成分分析 (A) 和冗余分析 (B)

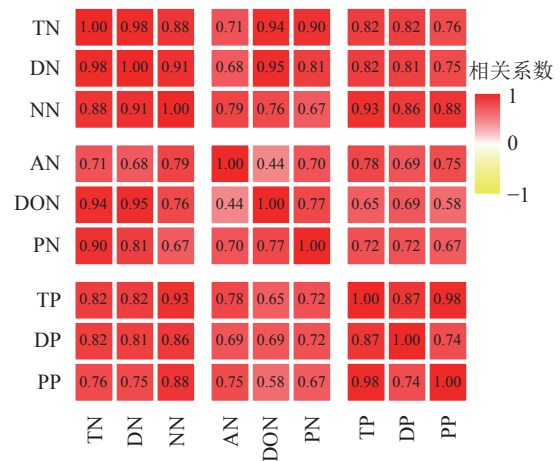
Figure 5 Principal component analysis (A) and redundancy analysis (B) of nitrogen and phosphorus fractions in different fertilizer types

总氮与硝态氮、铵态氮、可溶性有机氮、颗粒态氮和可溶性氮的相关系数分别为 0.88、0.71、0.94、0.90 和 0.98。意味着氮素之间转化是相互依赖和相互转化的。总磷与可溶性磷和颗粒态磷之间的相关系数分别为 0.87 和 0.98，表明各个形态的磷组分间存在显著正相关 ($P < 0.05$)。甚至总氮与总磷的相关系数为 0.82，即两者之间也呈显著正相关 (图 6)，意味着氮和磷流失量之间为协变关系。径流氮磷流失与土壤化学性质息息相关，如土壤硝态氮能解释径流总氮和总磷的 49% 和 48% 的变化。径流总氮

($R^2=0.60$) 和总磷 ($R^2=0.41$) 流失量随土壤有效磷质量分数增大而增大 (图 7)。

3 讨论

本研究表明：有机肥 50% 替代和炭基肥处理可减少甘薯坡耕地径流总氮质量浓度。在施肥初期，随着施肥时间延长，它们的效应大小甚至方向趋向一致，这可能与作物生长和施肥有关，在施肥初期植株的保水保肥能力较弱，刚施入的肥料未完全与土壤相结合，易于流失。而氮作为植株生长过程中需求量较大的元素，被植株吸收较多，因此土壤径流中各处理氮的质量浓度大幅降低。而孔文杰^[16]研究发现：有机肥和炭基肥对甘薯坡耕地径流总磷质量浓度的影响不随施肥时间推移而变化。然而，有机肥和炭基肥对稻田和蔬菜径流总磷和总氮的质量浓度影响则相反^[17]，表明在不同种植模式下有机肥和炭基肥影响径流养分质量浓度的效应是不同的。



TN. 总氮; DN. 可溶性总氮; NN. 硝态氮; AN. 铵态氮; DON. 可溶性有机氮; PN. 颗粒态氮; TP. 总磷; DP. 可溶性总磷; PP. 颗粒态磷。

图 6 径流中氮磷形态之间的相关关系

Figure 6 Correlations between runoff nitrogen and phosphorus

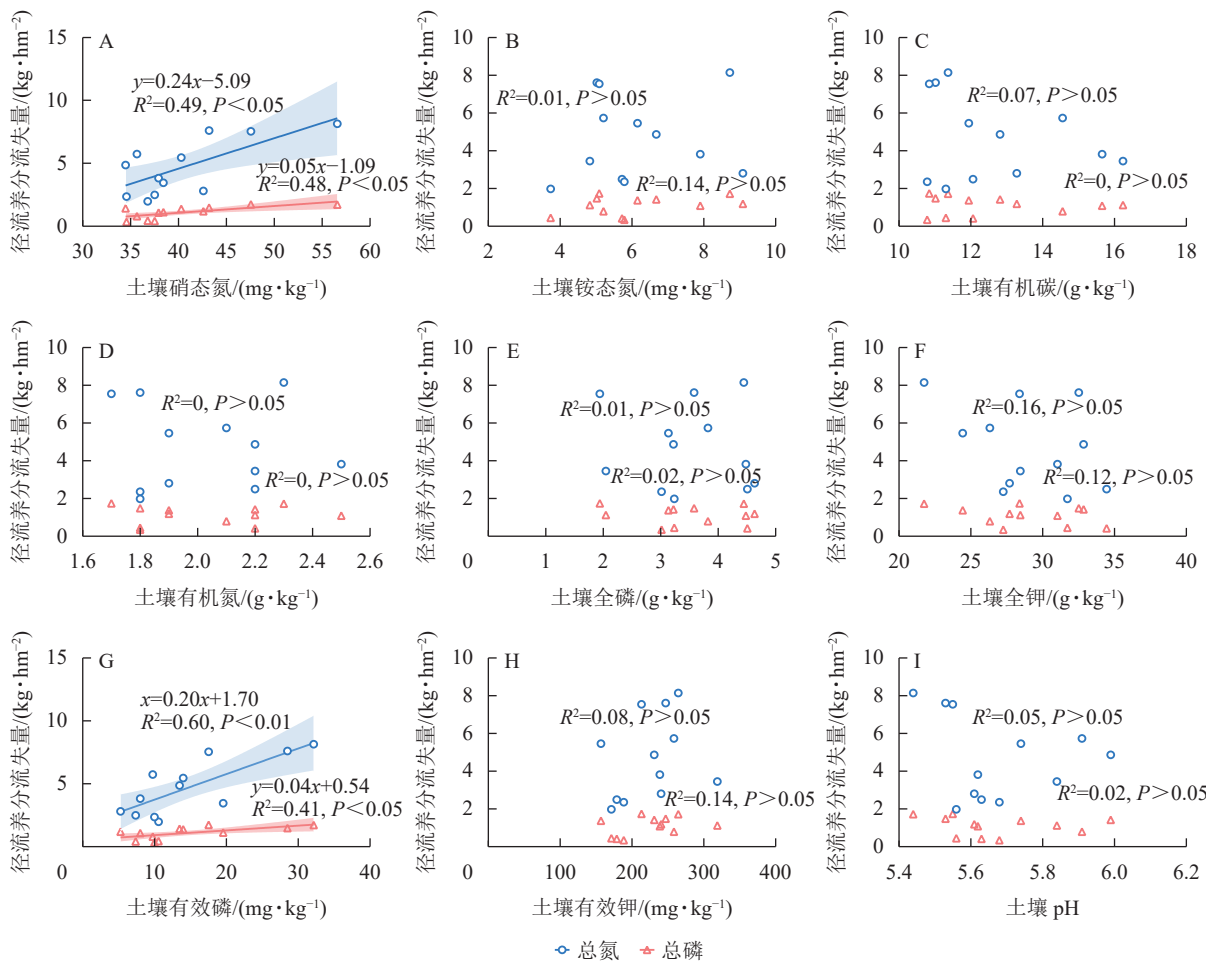


图 7 径流养分流失量和土壤氮磷钾不同形态质量分数及 pH 之间的相关关系

Figure 7 Relationships between runoff nutrient loss and soil nitrogen, phosphorus, potassium contents and pH

不同肥料会影响径流中不同形态氮磷组成，如有机肥 50% 替代和炭基肥处理均较常规化肥处理可分别提升硝态氮、可溶性有机氮的占比，同时降低铵态氮、颗粒态氮的占比。这是由于有机肥的氮素矿化

释放速率慢，以硝态氮和铵态氮形态存在于土壤和径流中相对少，不易发生损失^[18]。王静等^[19]研究发现：炭基肥对径流中氮磷产生影响的原因可能是增强了土壤持水能力，进而提高可溶性磷和硝态氮含量。肥料类型是影响甘薯氮磷径流流失量的一个重要因素。本研究有机肥 50% 替代处理较常规化肥处理减少了径流总氮和总磷的流失量，降低了总氮和总磷流失系数，与已有研究结果相同^[20-22]。这表明有机肥无论是对菜田、稻田还是坡耕地都能起到减少径流总氮流失量，并能减少坡耕地和菜田径流总磷流失量。然而，有机肥对减少菜地、稻田和坡耕地径流氮磷流失量存在差异^[23]。炭基肥处理较常规化肥处理可减少径流氮、磷总量，降低总氮和总磷流失系数，与已有研究结果^[24-25] 相同。

脱云飞等^[26]、陈晓鹏等^[27] 研究证明：土壤有效磷、硝态氮的质量分数是影响径流氮磷流失量主要因素。本研究表明：径流总磷的流失量与土壤有效磷质量分数呈正相关，磷的移动性很小，径流中有效磷的累积流失量主要取决于径流对地表的冲刷和浸提，有效磷质量分数高的土壤能够有效指示径流携带的含磷量^[28]，同时王莺等^[29]、刘晓玲等^[30] 在山核桃 *Carya cathayensis* 林和稻田上研究发现：土壤有效磷的质量分数与径流总磷流失量的关系与甘薯田基本一致。而地表径流氮素主要来源于土壤表层氮素的冲刷、溶出和淋溶，土壤硝态氮质量分数与径流总氮的流失量呈正比，王琼等^[31] 对土壤中硝态氮会直接影响径流中氮的流失进行过研究，而徐爱国等^[32] 在稻田和菜田中证明土壤硝态氮质量分数与径流液总氮流失量并没有显著相关性，表明土壤硝态氮质量分数预测总氮径流流失量因土地利用方式而异^[33]。

4 结论

本研究结果表明：①有机肥 50% 替代和炭基肥处理显著影响径流氮磷流失；相比较常规化肥处理，分别降低径流总氮质量浓度的 58.4% 和 49.0%，降低径流总磷质量浓度的 22.6% 和 31.6%；降低总氮流失量的 48.1% 和 39.6%，降低总磷流失量的 26.1% 和 32.7%。②有机肥 50% 替代和炭基肥处理改变了径流氮磷形态的组成，相比较常规化肥处理显著降低了径流氮磷养分流失系数；有机肥 50% 替代和炭基肥处理的总氮流失系数分别降低了 68.09% 和 56.11%，总磷流失系数分别降低了 34.54% 和 43.00%。③有机肥和炭基肥施用主要是减少施肥前期氮磷养分的流失。随着施肥时间的延长，有机肥和炭基肥在减少氮磷径流流失与常规化肥施肥并无区别，意味着肥效逐渐递减效应和作物吸收的平衡。④土壤化学性质是影响径流氮磷流失量的主要因素。其中土壤硝态氮的质量分数仅可预测甘薯坡耕地土壤养分的流失，土壤有效磷的质量分数可以指示土壤的养分流失。因此，施用有机肥和炭基肥显著影响了径流氮磷流失，但不同肥料之间影响效果存在差别，比较而言，有机肥 50% 替代化肥处理更适合用于减少甘薯坡耕地径流氮流失，而炭基肥更适用于减少径流磷流失。合理的施肥措施可以有效减少土壤径流氮磷的流失。

5 参考文献

- [1] CUI Pingyang, FAN Fenagliang, YIN Chang, *et al.* Long-term organic and inorganic fertilization alters temperature sensitivity of potential N₂O emissions and associated microbes [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, **93**: 131 – 141.
- [2] PAERL H, HALL N, PEIERLS B, *et al.* Evolving paradigms and challenges in estuarine and coastal eutrophication dynamics in a culturally and climatically stressed world [J]. *Estuaries and Coasts*, 2014, **37**(2): 243 – 258.
- [3] GUO J, LIU X, ZHANG Y, *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands [J]. *Science*, 2010, **327**(5968): 1008 – 1010.
- [4] LIANG L Z, ZHAO X Q, YI X, *et al.* Excessive application of nitrogen and phosphorus fertilizers induces soil acidification and phosphorus enrichment during vegetable production in Yangtze River Delta, China [J]. *Soil Use and Management*, 2013, **29**(2): 161 – 168.
- [5] STANLEY N, MAHANTY B. Preparation and characterization of biogenic CaCO₃-reinforced polyvinyl alcohol-alginate hydrogel as controlled-release urea formulation [J]. *Polymer Bulletin*, 2019, **77**(2): 529 – 540.
- [6] SIM D H H, TAN I A W, LIM L L P, *et al.* Encapsulated biochar-based sustained release fertilizer or precision agriculture: a review[J/OL]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **303**: 127018[2022-05-20]. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127018.
- [7] ZHANG Xiaoying, FANG Qunchao, ZHANG Tao, *et al.* Benefits and trade-offs of replacing synthetic fertilizers by animal manures in crop production in China: a meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2020, **26**(2): 888 – 900.

- [8] LIU Bin, WANG Xiaozhong, MA Lin, *et al.* Combined applications of organic and synthetic nitrogen fertilizers for improving crop yield and reducing reactive nitrogen losses from China's vegetable systems: a meta-analysis[J/OL]. *Environmental Pollution*, 2021, **269**: 116143[2022-05-20]. doi: 10.1016/j.envpol.2020.116143.
- [9] XIA Longlong, LAM S K, WOLF B, *et al.* Trade-offs between soil carbon sequestration and reactive nitrogen losses under straw return in global agroecosystems [J]. *Global Change Biology*, 2018, **24**(12): 5919 – 5932.
- [10] XIA Longlong, LAM S K, YAN Xiaoyuan, *et al.* How does recycling of livestock manure in agroecosystems affect crop productivity, reactive nitrogen losses, and soil carbon balance? [J]. *Environmental Science Technology*, 2017, **51**(13): 7450 – 7457.
- [11] PAN Genxing, ZHOU Ping, LI Zhipeng, *et al.* Combined inorganic/organic fertilization enhances N efficiency and increases rice productivity through organic carbon accumulation in a rice paddy from the Tai Lake region, China [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2009, **131**(3): 274 – 280.
- [12] LI Yunlong, CHENG Jianzhong, LEE Xinqing, *et al.* Effects of biochar-based fertilizers on nutrient leaching in a tobacco-planting soil [J]. *Acta Geochimica*, 2018, **38**(1): 1 – 7.
- [13] SCHMIDT H, PANDIT B H, CORNELISSEN G, *et al.* Biochar-based fertilization with liquid nutrient enrichment: 21 field trials covering 13 crop species in Nepal [J]. *Land Degradation and Development*, 2017, **28**(8): 2324 – 2342.
- [14] 肖继兵, 孙占祥, 刘志, 等. 降雨侵蚀因子和植被类型及覆盖度对坡耕地土壤侵蚀的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, **33**(22): 159 – 166.
- XIAO Jibing, SUN Zhanxiang, LIU Zhi, *et al.* Effects of rainfall erosion factor, vegetation type and coverage on soil erosion of sloping farmland [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, **33**(22): 159 – 166.
- [15] WEI Zhibiao, YING Hao, GUO Xiaowei, *et al.* Substitution of mineral fertilizer with organic fertilizer in maize systems: a meta-analysis of reduced nitrogen and carbon emissions [J/OL]. *Agronomy*, 2020, **10**(8): 1149[2022-05-20]. doi: 10.3390/agronomy10081149.
- [16] 孔文杰. 油稻轮作下有机无机肥配施对作物产量及氮磷流失的影响[J]. *作物杂志*, 2013(3): 63 – 66.
- KONG Wenjie. Effects of integrated fertilization with commercial organic manure and chemical fertilizers on plant yields and the loss of nitrogen and phosphorus in runoff in rape-rice rotation system [J]. *Crops*, 2013(3): 63 – 66.
- [17] 姚金玲, 张克强, 郭海刚, 等. 不同施肥方式下洱海流域水稻-大蒜轮作体系氮磷径流损失研究[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(11): 2287 – 2296.
- YAO Jinling, ZHANG Keqiang, GUO Haigang, *et al.* Nitrogen and phosphorus runoff losses during rice-garlic rotation in Erhai Lake basin under different fertilization methods [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(11): 2287 – 2296.
- [18] 褚军, 薛建辉, 金梅娟, 等. 生物炭对农业面源污染氮、磷流失的影响研究进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, **30**(4): 409 – 415.
- CHU Jun, XUE Jianhui, JIN Meijuan, *et al.* Review of researches on effects of biochar in reducing nitrogen and phosphorus losses with agricultural nonpoint source pollution [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, **30**(4): 409 – 415.
- [19] 王静, 付伟章, 葛晓红, 等. 玉米生物炭和改性炭对土壤无机氮磷淋失影响的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(12): 2810 – 2820.
- WANG Jing, FU Weizhang, GE Xiaohong, *et al.* Effects of corn biochar and modified carbon on leaching of inorganic nitrogen and phosphorus in soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(12): 2810 – 2820.
- [20] 吴俊, 樊剑波, 何园球, 等. 不同减量施肥条件下稻田田面水氮素动态变化及径流损失研究[J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(9): 1561 – 1566.
- WU Jun, FAN Jianbo, HE Yuanqiu, *et al.* Dynamics of nitrogen and runoff loss in ponding water of paddy field under different fertilization practices [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(9): 1561 – 1566.
- [21] 郭智, 周炜, 陈留根, 等. 施用猪粪有机肥对稻麦两熟农田稻季养分径流流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, **27**(6): 21 – 25.
- GUO Zhi, ZHOU Wei, CHEN Liugen, *et al.* Effects of pig manure application on surface runoff losses of during the paddy season in intensive rice-wheat rotation field [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, **27**(6): 21 – 25.
- [22] 韩笑, 席运官, 田伟, 等. 有机肥施用模式对环水有机蔬菜种植氮磷径流的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2021, **29**(3): 465 – 473.

- HAN Xiao, XI Yunguan, TIAN Wei, *et al.* Effects of different organic fertilization patterns on the nitrogen and phosphorus runoff losses in organic agriculture in watershed areas [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, **29**(3): 465 – 473.
- [23] 陈秋会, 席运官, 王磊, 等. 太湖地区稻麦轮作农田有机和常规种植模式下氮磷径流流失特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(8): 1550 – 1558.
- CHEN Qiuhui, XI Yunguan, WANG Lei, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus runoff losses in organic and conventional rice-wheat rotation farmland in Taihu lake region [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(8): 1550 – 1558.
- [24] 方晨露, 简永旗, 吴家森, 等. 单季稻氮磷吸收及径流流失对不同肥料施用的响应[J]. *浙江农林大学学报*, 2021, **38**(6): 1187 – 1194.
- FANG Chenlu, JIAN Yongqi, WU Jiasen, *et al.* Response of nitrogen and phosphorus uptake and runoff loss in single cropping rice to different fertilization treatments [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, **38**(6): 1187 – 1194.
- [25] 张崑, 徐坚, 鲁长根, 等. 不同施肥对稻-菜种植模式氮磷吸收及径流流失的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2021, **38**(4): 784 – 791.
- ZHANG Kun, XU Jian, LU Changgen, *et al.* Effects of different fertilizer types on nitrogen and phosphorus nutrient absorption and runoff loss in rice-vegetable rotation system [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, **38**(4): 784 – 791.
- [26] 脱云飞, 沈方圆, 杨翠萍, 等. 滇中高原降雨对不同地类土壤磷素、有机质和pH变化的影响[J]. *生态环境学报*, 2020, **29**(5): 942 – 950.
- TUO Yunfei, SHEN Fangyuan, YANG Cuiping, *et al.* Effects of rainfall on phosphorus, organic matter and pH in different land use types in middle Yunnan plateau [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, **29**(5): 942 – 950.
- [27] 陈晓鹏, 周蓓蓓, 彭遥, 等. 模拟降雨下纳米碳对风沙土硝态氮迁移特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, **31**(6): 52 – 57.
- CHEN Xiaopeng, ZHOU Beibei, PENG Yao, *et al.* Effect of nano-carbon on nitrate nitrogen transport in aeolian sandy soil under simulated rainfall [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, **31**(6): 52 – 57.
- [28] 高杨, 宋付朋, 马富亮, 等. 模拟降雨条件下3种类型土壤氮磷钾养分流失量的比较[J]. *水土保持学报*, 2011, **25**(2): 15 – 18.
- GAO Yang, SONG Fupeng, MA Fuliang, *et al.* Comparison of loss amount of nitrogen, phosphorus and potassium in three types of soil under simulated rainfall [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, **25**(2): 15 – 18.
- [29] 王莺, 陆荣杰, 吴家森, 等. 山核桃林闭合区内径流氮磷流失特征[J]. *浙江农林大学学报*, 2018, **35**(5): 802 – 809.
- WANG Ying, LU Rongjie, WU Jiasen, *et al.* Nitrogen and phosphorus loss in runoff and sediment for a closed zone of a *Carya cathayensis* stand [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2018, **35**(5): 802 – 809.
- [30] 刘晓玲, 宋照亮, 单胜道, 等. 畜禽粪肥施加对嘉兴水稻土总磷、有机磷和有效磷分布的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2011, **28**(1): 33 – 39.
- SONG Xiaoling, SONG Zhaoliang, SHAN Shengdao, *et al.* Total soil P, soil organic P, and soil available P with long-term application of pig manure in paddy soils [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2011, **28**(1): 33 – 39.
- [31] 王琼, 荣湘民, 李法云, 等. 太子河源头水源涵养林不同植被类型矿质态氮流失特征及其对环境因子的响应[J]. *水土保持学报*, 2017, **31**(3): 216 – 223.
- WANG Qiong, RONG Xiangmin, LI Fayun, *et al.* Mineral nitrogen loss in different types of vegetation and its response to environmental factors in the water conservation forest in the headstream of Taizi River [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, **31**(3): 216 – 223.
- [32] 徐爱国, 冀宏杰, 张认连, 等. 太湖水网地区原位模拟降雨条件下不同农田类型氮素流失特征研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, **16**(4): 809 – 816.
- XU Aiguo, JI Hongjie, ZHANG Renlian, *et al.* Nitrogen losses under simulated rainfall conditions in different cropping lands of Taihu Lake region [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, **16**(4): 809 – 816.
- [33] 杨翠萍, 脱云飞, 张岛, 等. 降雨对不同土地利用类型土壤水氮变化特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, **33**(6): 220 – 226.
- YANG Cuiping, TUO Yunfei, ZHANG Dao, *et al.* Effects of rainfall on soil water and nitrogen change characteristics under different land uses [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(6): 220 – 226.