



降雨强度及有机无机肥配施对太湖地区典型菜地氮磷动态流失过程的影响

程明琨, 闵 炬, 张艳颖, 王雨荷, 郝雅琼, 施卫明

Effects of rainfall intensity and combined application of organic and inorganic fertilizer on the dynamic process of nitrogen and phosphorus loss in typical vegetable plots in the Taihu Lake region

CHENG Mingkun, MIN Ju, ZHANG Yanying, WANG Yuhe, HAO Yaqiong, and SHI Weiming

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12357/cjea.20240090>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

洪泽湖地区麦稻两熟农田及杨树林地降雨径流对地下水水质的影响

Effects of rainfall and runoff on the groundwater quality in farmland and poplar forestland in the area of Hung-tse Lake

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(7): 1097–1104

有机肥施用模式对环水有机蔬菜种植氮磷径流的影响

Effects of different organic fertilization patterns on the nitrogen and phosphorus runoff losses in organic agriculture in watershed areas

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(3): 465–473

太湖地区种植结构及农田氮磷流失负荷变化

Changes in planting structure and nitrogen and phosphorus loss loads of farmland in Taihu Lake region

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(8): 1230–1238

黑土区农田氮磷淋溶消减措施

Mitigation of nitrogen and phosphorus leaching from black soil croplands in Northeast China

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 113–118

降雨对吉林省黑土区雨养春玉米农田氮磷淋溶的影响

Effects of rainfall on nitrogen and phosphorus leaching in rainfed spring maize black soil farmland in Jilin Province, China

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(1): 19–28

有机无机肥配施对滨海盐渍农田土壤盐分及作物氮素利用的影响

Effects of partial substitution of organic nitrogen for inorganic nitrogen in fertilization on salinity and nitrogen utilization in salinized coastal soil

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(3): 441–450



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12357/cjea.20240090

CSTR: 32371.14.cjea.20240090

程明琨, 闵炬, 张艳颖, 王雨荷, 郝雅琼, 施卫明. 降雨强度及有机无机肥配施对太湖地区典型菜地氮磷动态流失过程的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(2): 265-277

CHENG M K, MIN J, ZHANG Y Y, WANG Y H, HAO Y Q, SHI W M. Effects of rainfall intensity and combined application of organic and inorganic fertilizer on the dynamic process of nitrogen and phosphorus loss in typical vegetable plots in the Taihu Lake region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(2): 265-277

降雨强度及有机无机肥配施对太湖地区典型菜地氮磷动态流失过程的影响*

程明琨^{1,2}, 闵炬^{2**}, 张艳颖², 王雨荷³, 郝雅琼², 施卫明^{1**}

(1. 佛山科学技术学院国际膜生物学与环境研究中心 佛山 528000; 2. 中国科学院南京土壤研究所/土壤与农业可持续发展国家重点实验室 南京 210008; 3. 安徽师范大学生命科学学院 芜湖 241000)

摘要: 以往研究多关注菜地氮磷径流流失系数、流失量的研究,对菜地氮磷径流流失动态过程研究尚缺乏。为此,本文选择在降雨频繁、径流发生量高的太湖地区,开展降雨强度及有机无机肥配施对菜地氮磷流失过程影响的研究,以此为太湖地区菜地氮磷面源污染防控提供科学依据。本试验采用田间模拟降雨的方法,设置55和110 mm·h⁻¹两个降雨强度,不施氮(-N)、不施磷(-P)、施纯化肥(N+P)、有机无机肥配施(1/4MN+1/3MP)和施纯有机肥(MN+MP)5个处理,观测不同降雨强度及施肥处理下径流氮磷各组分浓度随时间的变化特征和对氮磷径流流失量的影响。结果表明:与N+P处理相比,在55和110 mm·h⁻¹降雨强度下,1/4MN+1/3MP处理可使径流初损历时分别延后7.0和5.3 min。在产流0~25 min,各处理径流总氮浓度在5.5~25.1 mg·L⁻¹间波动;产流25~60 min,各处理径流总氮浓度在5.3~14.0 mg·L⁻¹间波动。在55和110 mm·h⁻¹降雨强度下,N+P和MN+MP处理的总氮流失量分别最高,与其相比,1/4MN+1/3MP可减少21.9%~44.7%的总氮流失。产流0~35 min,各处理径流总磷浓度在0.31~3.20 mg·L⁻¹间波动;产流35~60 min,各处理总磷浓度在0.35~1.60 mg·L⁻¹间波动。在55和110 mm·h⁻¹降雨强度下,MN+MP处理总磷流失量最高,与MN+MP处理相比,1/4MN+1/3MP可减少65.4%~69.0%的总磷流失。综上,1/4MN+1/3MP处理可延长初损历时;在产流0~25和0~35 min分别是控制径流氮和磷流失的关键时期,有机无机肥配施可有效减少氮磷流失。

关键词: 蔬菜地; 模拟降雨; 降雨强度; 有机无机配施; 氮磷流失; 地表径流; 面源污染

中图分类号: X52; X592; S365

Effects of rainfall intensity and combined application of organic and inorganic fertilizer on the dynamic process of nitrogen and phosphorus loss in typical vegetable plots in the Taihu Lake region*

CHENG Mingkun^{1,2}, MIN Ju^{2**}, ZHANG Yanying², WANG Yuhe³, HAO Yaqiong², SHI Weiming^{1**}

(1. International Research Center for Membrane Biology and Environment, Foshan University, Foshan 528000, China; 2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences / State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Nanjing 210008, China; 3. College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China)

* 国家重点研发计划项目(2021YFD1700801)资助

** 通信作者: 闵炬,主要从事农田面源污染防控和植物营养方面的研究, E-mail: jmin@issas.ac.cn; 施卫明,主要从事植物营养、肥料与农产品质量和环境污染研究, E-mail: wmshi@issas.ac.cn

程明琨,主要从事菜地土壤氮利用增效与环境减排研究。E-mail: 897077347@qq.com

收稿日期: 2024-02-29 接受日期: 2024-05-29

* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2021YFD1700801).

** Corresponding authors: MIN Ju, E-mail: jmin@issas.ac.cn; SHI Weiming, E-mail: wmshi@issas.ac.cn
Received Feb. 29, 2024; accepted May 29, 2024

Abstract: Although previous studies have focused on the coefficients of nitrogen and phosphorus runoff loss and the amounts of nitrogen and phosphorus loss from vegetable fields, there is a lack of research examining the dynamic process characteristics of nitrogen and phosphorus runoff loss from vegetable fields. In this study, we investigated the effects of rainfall intensity and the combined application of organic and inorganic fertilizers on the process of nitrogen and phosphorus loss from vegetable fields in the Taihu Lake region. This study was conducted to provide scientific evidence for preventing and controlling nitrogen and phosphorus surface pollution in vegetable fields in the Taihu Lake region, where rainfall is frequent, and the amount of runoff is high. For this purpose, we established two intensities of field-simulated rainfall (55 and 110 mm·h⁻¹) and set the following five fertilizer treatments: no nitrogen (-N), no phosphorus (-P), application of pure chemical fertilizer (N+P), combined application of organic and inorganic fertilizers (1/4MN+1/3MP), and application of pure organic fertilizer (MN+MP). The dynamic changes in the concentrations of each form of nitrogen and phosphorus in the runoff over time and the total nitrogen and phosphorus runoff loss under different rainfall intensities and fertilizer application treatments were monitored. The results revealed that compared with N+P treatment, the 1/4MN+1/3MP treatment reduced the initial runoff production time by 7.0 min and 5.3 min at 55 mm·h⁻¹ and 110 mm·h⁻¹ rainfall intensities. During the initial 25 min of runoff, the total nitrogen concentration of runoff among treatments fluctuated between 5.5 and 25.1 mg·L⁻¹, whereas, during the 25–60 min of runoff, the total nitrogen concentration of different treatments fluctuated between 5.3 and 14.0 mg·L⁻¹. The highest total nitrogen concentration in runoff was detected in N+P and MN+MP treatments at rainfall intensities of 55 and 110 mm·h⁻¹, respectively; and 1/4MN+1/3MP treatment reduced the total nitrogen runoff loss by 21.9%–44.7%. During the 0–35 min period of runoff, the total phosphorus concentration of runoff in different treatments fluctuated between 0.31 and 3.20 mg·L⁻¹, whereas during the 35–60 min of runoff, the total phosphorus concentration of runoff in different treatments fluctuated between 0.35 and 1.60 mg·L⁻¹. The highest concentration of total phosphorus in runoff was detected in the MN+MP treatments at both assessed rainfall intensities. Compared with MN+MP treatment, 1/4MN+1/3MP treatment reduced the total phosphorus runoff loss by 65.4%–69.0%. In summary, the 1/4MN+1/3MP treatment applied in this study can prolong the duration of the initial loss of nitrogen and phosphorus, with initial periods of 0–25 and 0–35 min being identified as the key periods for controlling nitrogen and phosphorus loss in runoff, respectively. Moreover, the combined application of organic and inorganic fertilizers was found to effectively reduce the runoff loss of nitrogen and phosphorus.

Keywords: vegetable field; simulated rainfall; rainfall intensity; combined application of organic and mineral fertilizer; nitrogen and phosphorus loss; surface runoff; non-point source pollution

我国是蔬菜生产和消费大国,截至 2019 年蔬菜种植面积达 2.52×10^7 hm²,占世界种植面积的 42.2%^[1]。太湖地区光热水资源丰富,适宜蔬菜生长,菜地面积增长迅速。农民为维持蔬菜高产稳产,往往投入大量氮磷化肥,这些氮磷化肥在当季的利用率较低,仅为 12%~18.0% 和 6.1%~17.4%^[2-3],因此大量盈余的氮磷养分将流失到环境中,从而导致面源污染问题日益严峻,尤其在水网交错的太湖地区,径流是氮磷流失的主要途径之一。有研究发现菜地径流氮磷流失系数分别为 1.85%~13.1% 和 0.07%~3.95%;夏秋季是蔬菜氮磷径流流失的高峰时期,占整个生长季的 44%~89%^[4]。降雨是农田径流发生的主要驱动力,且降雨强度、坡度、施肥量、施肥措施和土壤物理性质等显著影响氮磷径流流失^[5-7]。前人在 30.0~148.2 mm·h⁻¹ 降雨强度下开展径流氮磷流失研究发现,0~55 min 是裸地径流中硝态氮的高浓度时期^[7];稻田模拟降雨产流后 0~5 min 是径流氮浓度的高峰期,20~30 min 是氮素快速流失期^[8];麦田模拟降雨产流后 0~20 min 是径流总氮、总磷浓度高峰期,随后浓度逐渐降低至平稳^[9];菜地模拟降雨研究发现,产流 0~15 min 后总磷和硝态氮浓度迅速降低并呈波动趋

势^[10]。Chen 等^[11]发现有机无机肥配施可改善土壤结构,强化持水能力,培肥土壤,并提高产量等,在蔬菜施肥上应用广泛。国内外有关施肥对径流氮磷流失影响的研究也较多,如 Evanylo 等^[12]和 Shan 等^[13]研究表明,蔬菜生产中单施有机肥可导致径流氮浓度的升高,有机无机肥配施可减少 27.4%~36.3% 的氮流失;黄东风等^[14]研究发现,有机无机肥配施可使径流氮和磷流失分别降低 22.9%~67.2% 和 10.7%~45.6%。然而,以往研究多关注菜地氮磷径流流失系数和流失量,对菜地氮磷动态流失过程的影响鲜见报道。为此,本研究以太湖地区菜地为对象,研究降雨强度及有机无机肥配施对氮磷流失过程的影响,以期以太湖地区菜地氮磷面源污染防控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

本研究的田间试验区位于江苏省宜兴市漳渎村(31°17'13"N, 119°54'20"),紧邻太湖,试验小区地块平整无坡度。该地区为亚热带季风气候,年平均气温 17.4 °C,年平均无霜期约 240 d,年平均日照时数 1 700 h;年均降水量 1 177 mm,降雨高峰期在 7—9 月,

占全年降雨量的 40% 左右, 因此模拟降雨试验主要在该时期进行。供试土壤为露天蔬菜土壤, 土壤质地为砂壤土, 土壤有机质、全氮和有效磷含量分别为 $22.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $1.61 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $100.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH (H_2O) 6.25, 土壤含水量 33.0%。

1.2 试验处理

本试验在等氮磷水平下设置 5 个施肥处理, 分别为: 不施氮 (-N) 和不施磷 (-P) 对照, 施纯化肥 (N+P)、有机无机肥配施 (1/4MN+1/3MP) 和施纯有机肥 (MN+MP), 除两个对照外, 剩余 3 个处理施氮、磷量相同, 各处理氮磷肥施用量见表 1。施用的化学氮肥和磷肥分别为尿素和过磷酸钙; 施用的有机肥为商品有机肥, 养分含量分别为 N 2.3%、 P_2O_5 1%、 K_2O 1.6%。

表 1 不同施肥处理的氮磷肥施用量
Table 1 Nitrogen and phosphorus application rates under different treatments $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

处理 Treatment	N			P_2O_5		
	合计 Total	有机氮 Organic nitrogen	化肥氮 Inorganic nitrogen	合计 Total	有机磷 Organic phosphorus	化肥磷 Inorganic phosphorus
-N	0	0	0	200	200	0
-P	500	0	500	0	0	0
N+P	500	0	500	200	0	200
1/4MN+1/3MP	500	125	375	200	66.67	133.33
MN+MP	500	500	0	200	200	0

各处理钾肥投入量为 $348 \text{ kg}(\text{K}_2\text{O})\cdot\text{hm}^{-2}$, 灌水等田间管理措施各小区相同。试验于 2023 年 7 月开展, 试验地块自 2022 年 11 月在该处理下连续种植 2 季蔬菜。供试作物为生菜 (*Lactuca sativa*), 品种为‘盈科耐抽苔 5 号’。

根据历年降雨量和极端天气暴雨特点, 各施肥处理下均设置 2 个降雨强度, 分别为 55 和 $110 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, 降雨历时均为 1 h。

1.3 样品采集测定

试验在开始降雨时记录初损历时, 产流后记录径流量, 在产流后 5、10、15、20、25、30、35、40、45、50、55、60 min 分别取 300 mL 混合均匀的径流水样, 每场降雨共采集 12 个径流水样。产流第 60 min 降雨停止, 后续径流不再产生。

降雨前每个小区按“S”型布点, 采集 6 个点的 0~20 cm 土壤样品, 混合后采用四分法留样, 测定土壤基础理化性质。土壤 pH 使用酸度计测定, 测定水土比为 2.5 : 1; 土壤有机质用重铬酸钾-浓硫酸氧化(外加热法), 硫酸亚铁溶液滴定法测定; 土壤速效氮用 $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钾溶液浸提, 硝态氮 (NO_3^- -N) 用双波长紫外分光光度法测定, 铵态氮 (NH_4^+ -N) 用靛酚

小区面积 30 m^2 , 小区长 6 m, 宽 5 m, 每个处理 3 个重复, 共 15 个小区。

试验于 2023 年 7 月选择晴朗无风天气开展。采用室外人工模拟降雨系统, 使用下喷式模拟降雨装置进行人工降雨。该装置由多级离心泵、储水箱、供水管、过滤器等组成供水系统和降雨系统, 可通过改变喷头孔径和压力改变降雨强度, 可变强度范围为 $55\sim 475 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, 均匀系数为 80%。径流收集装置主要由 PVC 隔板和径流收集桶组成, 在各小区内设置四周用 PVC 隔板包围的长 1 m、宽 1 m 的模拟降雨径流观测微区, 隔板入土 30 cm, 高出地面 20 cm, 其中一块隔板开孔连接径流收集管, 以保证径流发生后所有地表径流可汇入集流桶中。

蓝比色法测定; 土壤速效磷用 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHCO_3 溶液浸提, 钼锑抗比色法测定^[15]。径流量使用体积法测定, 径流水 NO_3^- -N 用双波长紫外分光光度法测定, NH_4^+ -N 用靛酚蓝比色法测定; 径流水可溶性总氮 (STN) 和可溶性总磷 (STP) 使用 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后分别使用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法和过硫酸钾氧化-钼蓝比色法测定; 径流总氮 (TN) 和总磷 (TP) 分别使用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法和过硫酸钾氧化-钼蓝比色法测定^[16]。径流水颗粒态氮 (PN)、颗粒态磷 (PP)、可溶性有机氮 (SON) 和可溶性无机氮 (SIN) 使用差减法进行计算, 计算方法分别为: $\text{PN}=\text{TN}-\text{STN}$ 、 $\text{PP}=\text{TP}-\text{STP}$ 、 $\text{SON}=\text{STN}-\text{NH}_4^+$ -N- NO_3^- -N、 $\text{SIN}=\text{STN}-\text{SON}$ 。

1.4 数据计算与分析

氮、磷流失量计算方法如下式:

$$L_{N/P} = \sum_{i=1}^n \left(V_i \frac{c_i + c_{i-1}}{2 \times 100000 \times A} \right) \quad (1)$$

式中: $L_{N/P}$ 为氮、磷流失量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), V_i 为径流量 (mL), c_i 为第 i 个径流水样氮、磷浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), c_{i-1} 为第 $i-1$ 个径流水样氮、磷浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), A 为径流小区面积 (m^2)。

径流氮肥贡献率(%) = [施氮肥处理氮流失量
($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) - 不施氮肥处理氮流失量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)]/
施氮肥处理氮流失量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) $\times 100$ (2)

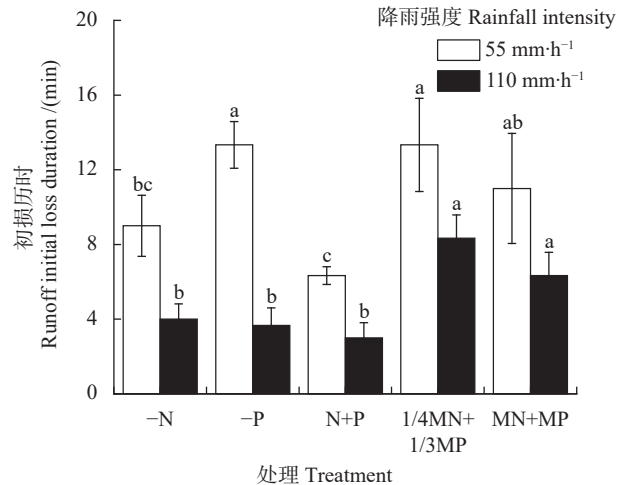
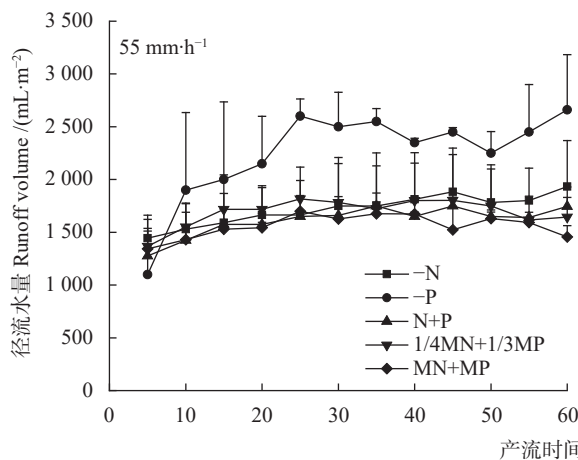
本研究采用 Microsoft Excel 2023 软件进行数据统计与分析,采用 Origin 2023 绘图,采用 SPSS 26.0 软件进行方差分析和 Duncan 法进行多重比较 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对径流初损历时和径流水量的影响

通过观测降雨后径流初损历时发现(图 1),随着降雨强度的提高,初损历时缩短。施纯化肥(N+P)处理初损历时最短,在 55 和 110 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 降雨强度下分别为 6.3 和 3.0 min(图 1); 1/4MN+1/3MP 处理初损历时最长,在 55 和 110 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 降雨强度下分别达 13.3 和 8.3 min(图 1),相比 N+P, 2 种降雨强度下分别延后了 7.0 和 5.3 min ($P < 0.05$)。

在两种降雨强度下,各处理径流量随时间总体呈平缓上升趋势(图 2)。在 55、110 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 降雨强度下,产流后持续降雨的 1 h 内,单位面积径流量分别从 1 100.0~1 443.3 $\text{mL} \cdot \text{m}^{-2}$ 升高到 1 456.7~2 660.0 $\text{mL} \cdot \text{m}^{-2}$ 、从 2 450.0~3 750.0 $\text{mL} \cdot \text{m}^{-2}$ 升高到 3 530.0~4 800.0 $\text{mL} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在 55 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 降雨强度下,产流后 15~60 min, MN+MP 处理在各时间节点(除 25 和 40 min 外)的径流量低于 N+P 处理,平均低 4.20%。在 110 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 降雨强度下, -N 处理的径流量最高, N+P 处理径流量最低,比 -N 和 -P 处理低 20.76%~29.28%。



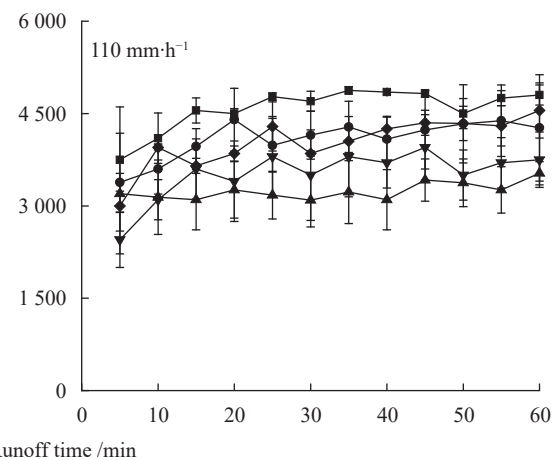
各处理说明见表 1,不同小写字母表示同一降雨强度下各处理间差异显著 ($P < 0.05$)。The detail information of each treatment is shown in Table 1. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments under the same rainfall intensity ($P < 0.05$)。图 1 不同施肥处理和降雨强度对径流初损历时的影响

Fig. 1 Effects of different fertilization treatments and rainfall intensities on runoff initial loss duration

2.2 不同施肥处理对径流氮浓度的影响

径流 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化如图 3A 和 3B 所示。在 55 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 降雨强度下各施肥处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在 0.014~0.025 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 波动。110 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 降雨强度下, -N 径流 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度水平最低,平均浓度为 0.017 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 其他处理降雨全过程 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在 0.08~0.22 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 间波动; MN+MP 处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度随时间变化总体呈上升趋势,增幅 32.0%。

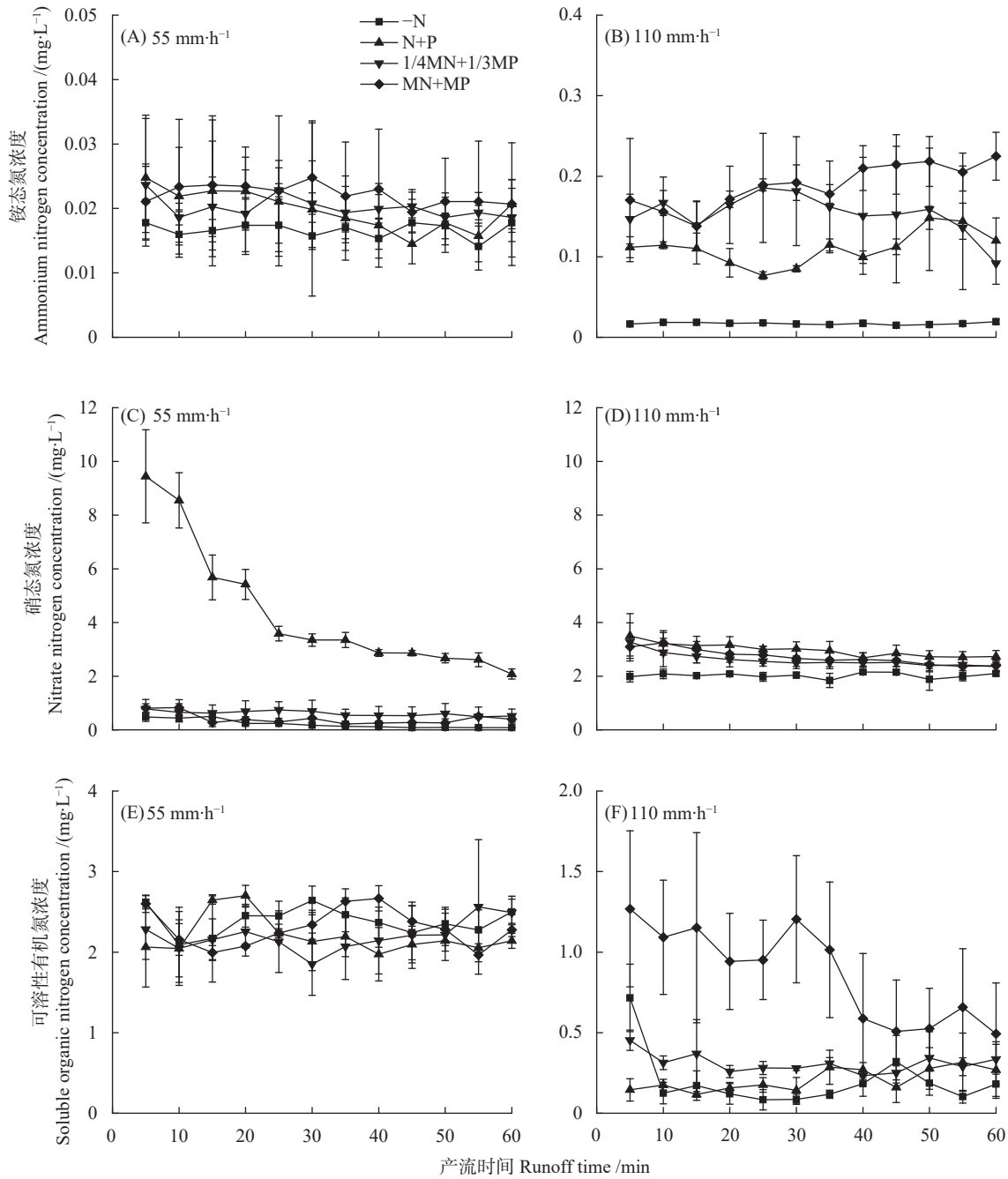
径流 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度变化如图 3C 和 3D 所示。55 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 降雨强度下,产流后 0~25 min N+P 处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度降低幅度较大,产流 25 min 时同产流 5 min 浓



各处理说明见表 1。The detail information of each treatment is shown in Table 1。

图 2 不同施肥处理和降雨强度对径流量的影响

Fig. 2 Effects of different fertilization treatments and rainfall intensities on runoff volume



各处理说明见表 1。The detail information of each treatment is shown in Table 1.

图 3 不同施肥处理和降雨强度对径流铵态氮、硝态氮和可溶性有机氮浓度的影响

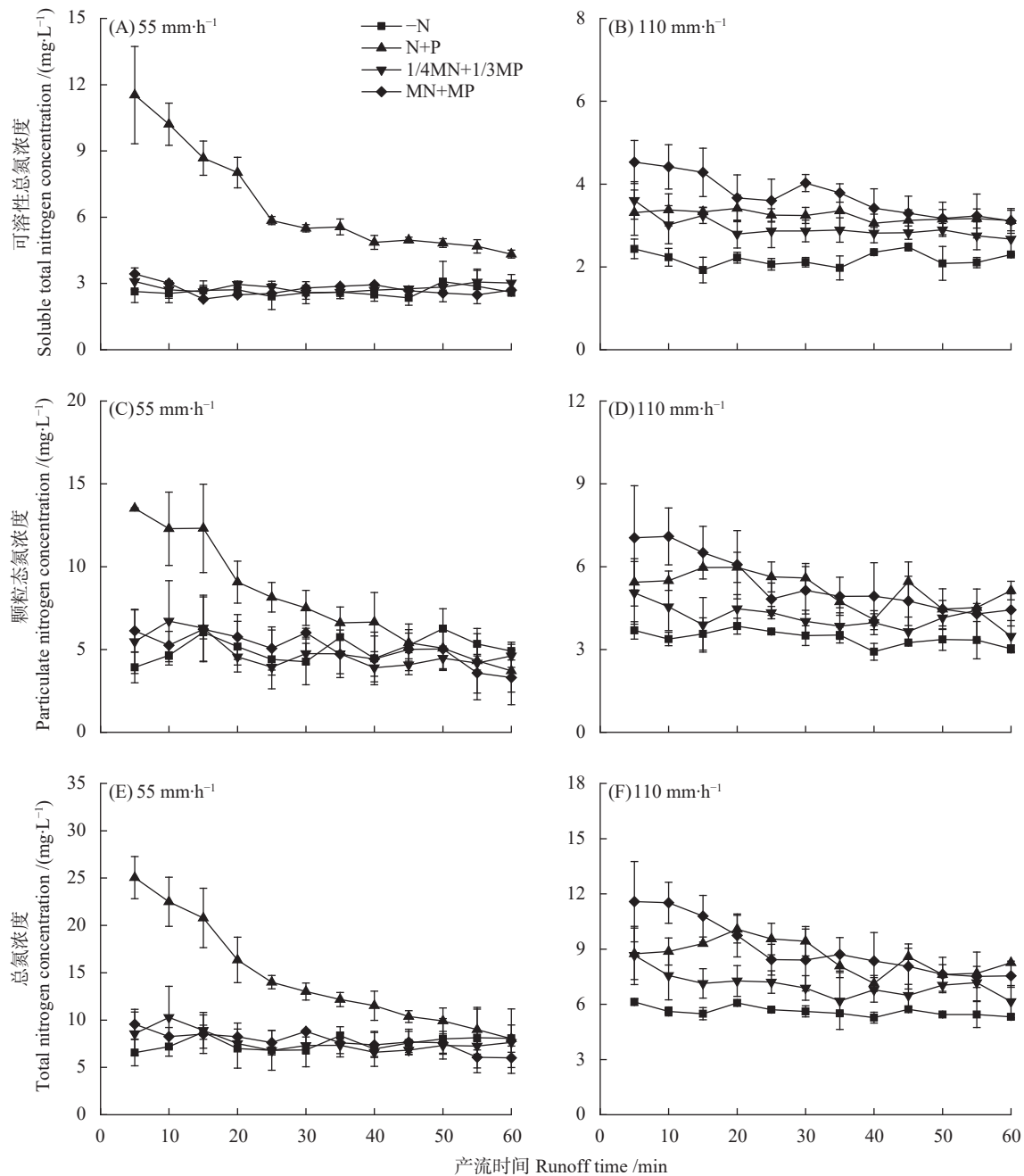
Fig. 3 Effects of different fertilization treatments and rainfall intensities on concentrations of ammonium nitrogen, nitrate nitrogen and soluble organic nitrogen in runoff

度 ($9.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 相比降低 58.5%; -N、1/4MN+1/3MP 和 MN+MP 处理 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度为 $0.4\text{--}0.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。110 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度下, 径流 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度变化不大 ($1.9\text{--}3.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。

径流可溶性有机氮浓度变化如图 3E 和 3F 所示。55 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度下, 各处理径流可溶性有机氮浓度在 $1.9\text{--}2.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 间波动。110 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度下, -N、N+P、1/4MN+1/3MP 处理径流可溶性有机氮浓

度在 $0.10\text{--}0.72 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 间波动, MN+MP 处理可溶性有机氮浓度在产流后 30~60 min 总体呈降低趋势, 与产流 30 min 时径流可溶性有机氮浓度 ($1.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 相比, 持续产流 60 min 时可溶性有机氮浓度降低 59.0%。

降雨强度为 55 和 110 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, 径流可溶性总氮、颗粒态氮和总氮浓度变化如图 4 所示。55 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度下, N+P 处理的可溶性总氮、颗粒



各处理说明见表 1。The detail information of each treatment is shown in Table 1.

图 4 不同施肥处理和降雨强度对径流可溶性总氮、颗粒态氮和总氮浓度的影响

Fig. 4 Effects of different fertilization treatments and rainfall intensities on concentrations of soluble total nitrogen, particulate nitrogen and total nitrogen in runoff

态氮和总氮浓度随时间推移均呈降低趋势, 产流 60 min 时, 降幅为 62.5%~72.5%。与产流 5 min 时径流总氮浓度相比, N+P 处理产流 25 min 时总氮浓度降低 44.1%; -N、1/4MN+1/3MP 和 MN+MP 处理随时间变化波动较平稳, 总氮平均浓度为 6.0~11.6 mg·L⁻¹。110 mm·h⁻¹ 降雨强度下, 各处理可溶性总氮、颗粒态氮和总氮平均浓度顺序总体呈 MN+MP>N+P>1/4MN+1/3MP>-N; MN+MP 处理在产流 0~25 min 内可溶性总氮、颗粒态氮和总氮平均浓度随时间总体

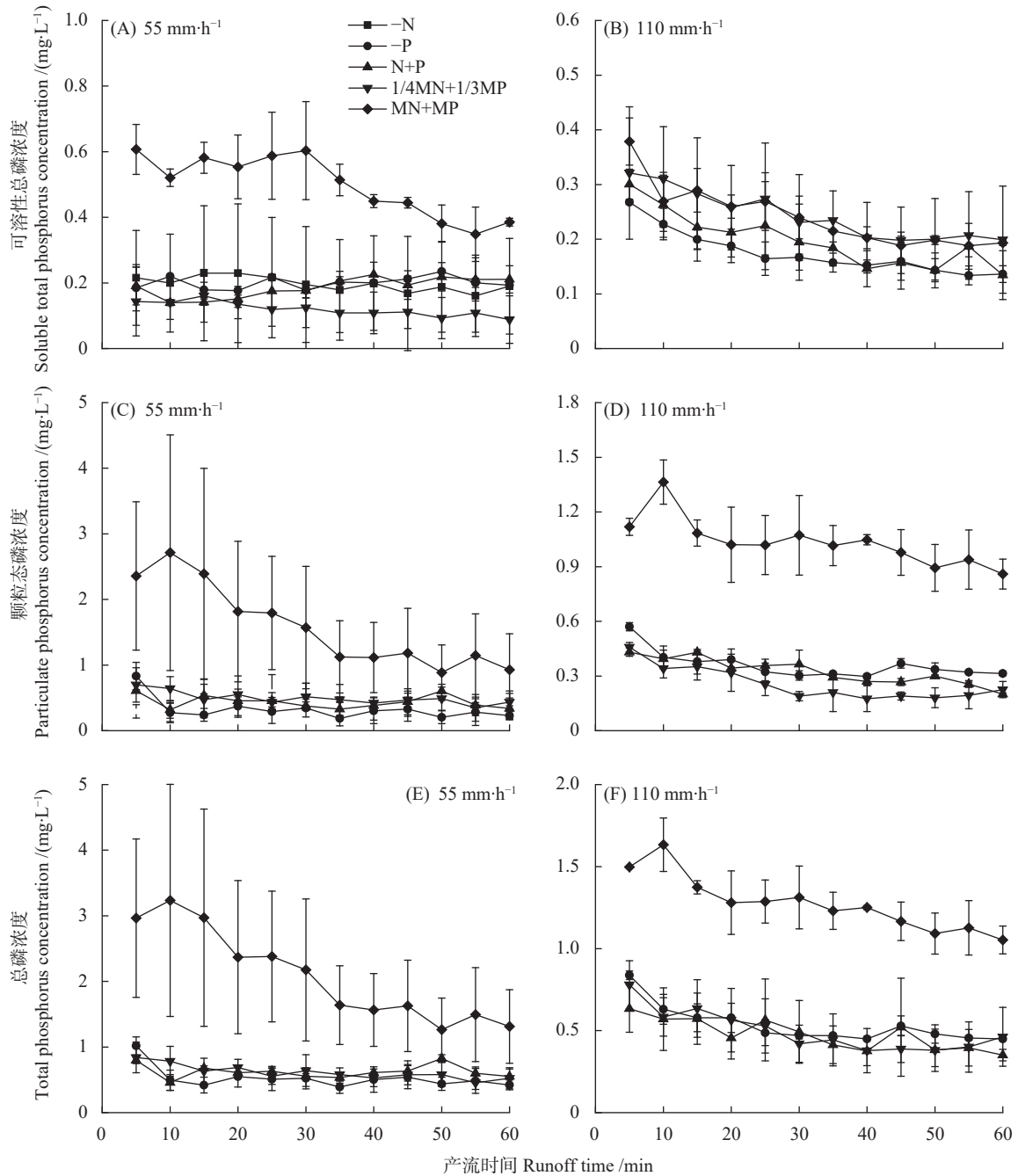
均呈降低趋势, 浓度分别从 4.5 mg·L⁻¹、7.0 mg·L⁻¹ 和 11.6 mg·L⁻¹ 降低到 3.6 mg·L⁻¹、4.8 mg·L⁻¹ 和 8.4 mg·L⁻¹, 随后在产流 25~60 min 逐渐趋于平稳; 除 MN+MP 处理外, 其他处理可溶性总氮、颗粒态氮和总氮浓度随时间变化不剧烈, 浓度分别在 1.9~3.6 mg·L⁻¹、2.9~6.0 mg·L⁻¹ 和 5.3~10.1 mg·L⁻¹ 范围内波动。在产流 0~25 min, 所有处理径流总氮浓度在 5.7~25.1 mg·L⁻¹ 间波动; 在产流 25~60 min, 所有处理总氮浓度在 5.3~14.0 mg·L⁻¹ 间波动。

2.3 不同施肥处理对径流磷浓度的影响

55 和 110 mm·h⁻¹ 降雨强度下径流可溶性总磷、颗粒态磷和总磷浓度变化如图 5 所示。55 和 110 mm·h⁻¹ 降雨强度下, MN+MP 处理径流总磷浓度最高, 平均分别为 2.08 和 1.28 mg·L⁻¹; MN+MP 颗粒态磷和总磷的平均浓度比 N+P 高 167.2%~262.9%; 且总磷在 10~60 min 呈降低趋势, 降低幅度达 35.6%~59.4%。55 mm·h⁻¹ 降雨强度下, 与产流 5 min 时相比,

产流 0~35 min 时所有处理总磷浓度降低 30.9%~61.7%; 110 mm·h⁻¹ 降雨强度下, 各处理总磷浓度降低幅度小。

1/4MN+1/3MP、N+P 和 -P 可溶性总磷、颗粒态磷和总磷在 55 mm·h⁻¹ 降雨强度下分别为 0.09~0.23 mg·L⁻¹、0.19~0.83 mg·L⁻¹ 和 0.39~1.02 mg·L⁻¹; 在 110 mm·h⁻¹ 降雨强度下分别为 0.13~0.32 mg·L⁻¹、0.18~0.57 mg·L⁻¹ 和 0.35~0.84 mg·L⁻¹。在产流 0~



各处理说明见表 1。The detail information of each treatment is shown in Table 1.

图 5 不同施肥处理和降雨强度对径流可溶性总磷、颗粒态磷和总磷浓度的影响

Fig. 5 Effects of different fertilization treatments and rainfall intensities on soluble total phosphorus, particulate phosphorus and total phosphorus concentrations in runoff

35 min, 所有处理径流总磷浓度在 $0.39\sim 3.23\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 间波动; 在产流 35~60 min, 所有处理总磷浓度在 $0.35\sim 1.64\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 间波动。

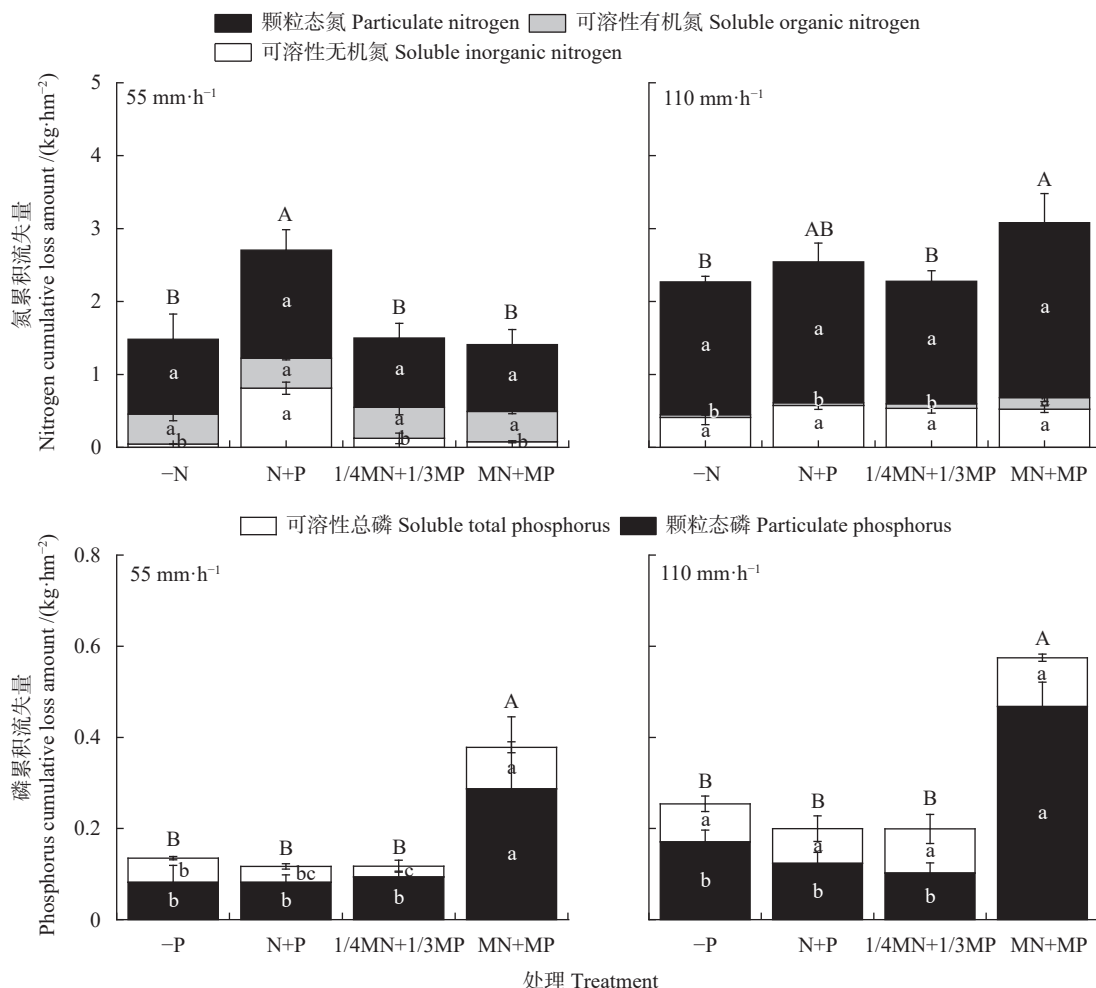
2.4 不同施肥处理对径流氮磷流失量的影响

55 和 $110\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度氮累积流失量如图 6 所示。55 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度下, 从氮流失组分来看, N+P 可溶性无机氮和总氮比 -N 分别高 94.4% 和 73.3% ($P<0.05$)。110 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度下, 与 -N 相比, MN+MP 总氮累积流失量升高 36.3% ($P<0.05$)。颗粒态氮在 55 和 $110\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度下是总氮流失的主要成分, 占总氮累积流失量的 55%~66% 和 73%~80%。在 55 和 $110\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度下, N+P 和 MN+MP 处理总氮流失量分别最高; 与最高值相比, 1/4MN+1/3MP 能减少总氮累积流失 21.9%~44.7%。

55 和 $110\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度磷累积流失量如图 6 所示。与 N+P 处理相比, 55 和 $110\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度下 MN+MP 径流总磷累积流失量显著提高 188.0% 和 223.8% ($P<0.05$), 可溶性总磷累积流失量分别高出 162.2% ($P<0.05$) 和 40.9%。颗粒态磷在 55 和 $110\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度下是总磷流失的主要成分, 占总磷累积流失量的 61%~80% 和 51%~67%。与 MN+MP 处理相比, 1/4MN+1/3MP 能减少总磷流失的 65.4%~69.0%, 使磷流失保持在不施肥水平。

2.5 不同施肥处理对径流流失的表观肥料贡献比的影响

通过差减法估算了两种降雨强度及不同施肥处理下径流流失的表观肥料贡献比(表 2)。55 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降雨强度下, N+P 处理径流总氮表观氮肥贡献率比



各处理说明见表 1。不同大写字母表示各处理间总氮/总磷流失量差异显著 ($P<0.05$), 不同小写字母表示各处理间同一形态氮/磷差异显著 ($P<0.05$)。The detail information of each treatment is shown in Table 1. Different uppercase letters indicate significant differences in total nitrogen or total phosphorus runoff losses among treatments at $P<0.05$ level. Different lowercase letters indicate significant differences in the same form of nitrogen or phosphorus runoff losses among treatments at $P<0.05$ level.

图 6 不同施肥处理和降雨强度对不同形态氮和磷累积流失量的影响

Fig. 6 Effects of different fertilization treatments and rainfall intensities on cumulative runoff loss of different forms of nitrogen and phosphorus

有机替代化肥施肥处理 (1/4MN+1/3MP 和 MN+MP) 显著高 109.3%~327.0% ($P<0.05$); 随着有机肥替代化肥比例增加, 径流总氮表观氮肥贡献比降低, 可溶性总氮和颗粒态氮的径流流失表观氮肥贡献比也呈相似趋势。110 mm·h⁻¹ 降雨强度下, MN+MP 处理总氮及各组分径流表观氮肥贡献比最高, 较其他处理高 64.9%~1 057.7% ($P<0.05$)。分析径流磷表观磷肥贡献比 (表 2) 发现, 两种降雨强度下颗粒态磷径流流失的肥料贡献比均高于可溶性总磷。除 N+P 处理, 各处理总氮流失中来自肥料氮的贡献比例较低 (4.1%~25.7%); 所有处理总磷流失中来自肥料磷的贡献比例较高, 达 56.1%~60.8%; 氮和磷流失中, 颗粒态氮和磷

来自肥料的贡献均较多, 颗粒态氮和颗粒态磷表观肥料平均贡献比分别为 20.6% 和 66.1%。

2.6 不同施肥处理对土壤速效氮和速效磷的影响

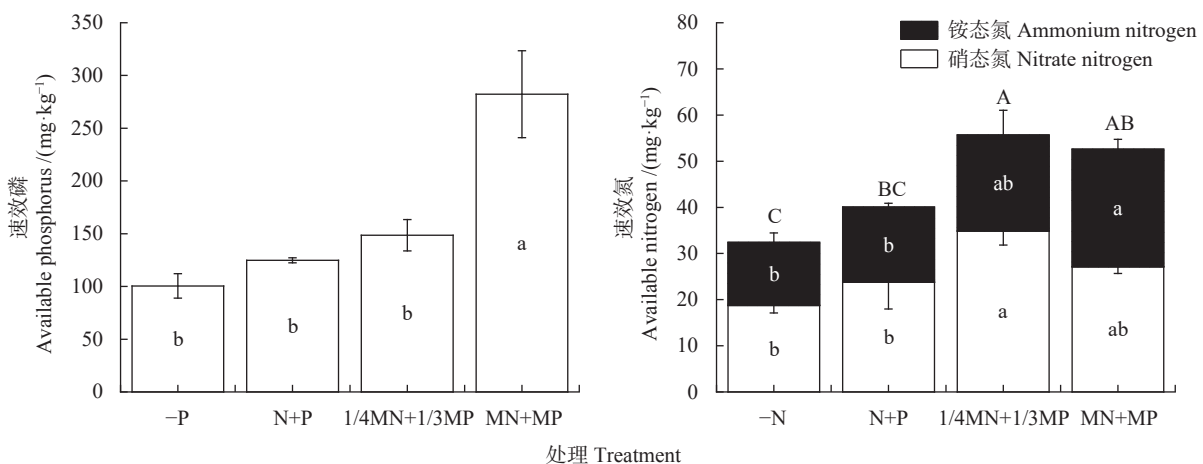
在模拟降雨前, 不同施肥处理土壤速效氮和速效磷含量如图 7 所示。1/4MN+1/3MP 处理速效氮含量最高 (55.7 mg·kg⁻¹), 与其他处理相比高 5.9%~71.9%。MN+MP 处理 NH₄⁺-N 含量最高, 与其他处理相比高 22.4%~86.6%。1/4MN+1/3MP 处理 NO₃⁻-N 含量高于其他处理 28.6%~86.2%。MN+MP 处理速效磷含量最高 (282.2 mg·kg⁻¹), 比其他处理显著高 90.1%~181.0% ($P<0.05$)。与 N+P 处理相比, MN+MP 处理土壤速效磷显著提高 126.2% ($P<0.05$), 土壤速

表 2 不同施肥处理和降雨强度对径流流失表观氮、磷肥贡献比的影响

Table 2 Effects of different fertilization treatments and rainfall intensities on apparent nitrogen and phosphorus contribution ratios to runoff loss %

降雨强度 Rainfall intensity (mm·h ⁻¹)	处理 Treatment	肥料氮占氮径流的表观贡献比 Apparent contribution ratio of fertilizer nitrogen to nitrogen runoff			肥料磷占磷径流的表观贡献比 Apparent contribution ratio of fertilizer phosphorus to phosphorus runoff		
		总氮 Total nitrogen	可溶性总氮 Soluble total nitrogen	颗粒态氮 Particulate nitrogen	总磷 Total phosphorus	可溶性总磷 Soluble total phosphorus	颗粒态磷 Particulate phosphorus
		55	N+P	53.8±1.1a	63.1±7.2a	45.6±4.8a	
	1/4MN+1/3MP	25.7±8.1b	24.4±12.8b	26.5±12.3ab			
	MN+MP	12.6±4.0b	12.6±12.9b	11.6±4.4b	60.8±8.0	41.6±3.9	68.6±5.2
110	N+P	9.5±3.2b	3.1±2.4b	13.1±6.3a			
	1/4MN+1/3MP	4.1±1.1b	2.6±1.1b	5.1±1.2a			
	MN+MP	25.5±0.10a	30.1±3.8a	21.6±14.2a	56.1±2.9	22.8±10.4	63.7±1.4

径流氮或磷表观氮或磷肥贡献比(%)=(施氮或磷肥处理的氮或磷流失量-不施氮或磷肥处理的氮或磷流失量)/施氮或磷肥处理的氮或磷流失量×100。不同小写字母表示同一降雨强度下不同处理间差异显著($P<0.05$)。Apparent contribution ratio of fertilizer N or P to N or P runoff loss (%) = (N or P runoff loss in N or P application treatments - N or P runoff loss in treatments without N or P application) / N or P runoff loss in N or P application treatments × 100. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments under the same rainfall intensity ($P<0.05$).



各处理说明见表 1。不同小写字母表各处理间速效磷/同一形态氮差异显著 ($P<0.05$), 不同大写字母表示各处理间速效氮差异显著 ($P<0.05$)。The detail information of each treatment is shown in Table 1. Different lowercase letters indicate significant differences in the same form of nitrogen or available phosphorus among treatments at $P<0.05$ level. Different uppercase letters indicate significant differences in available nitrogen among treatments at $P<0.05$ level.

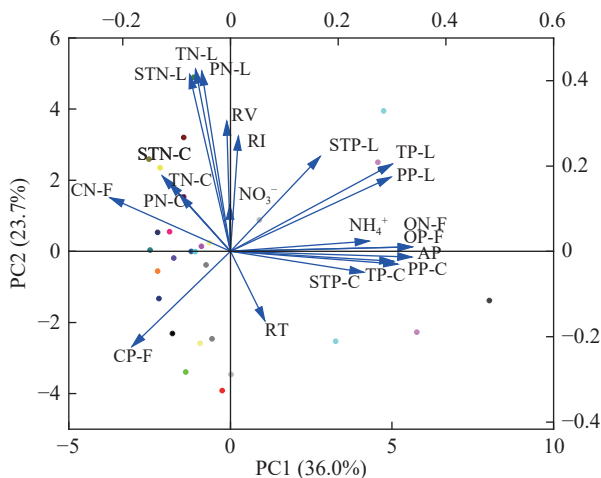
图 7 不同施肥处理下土壤速效氮和速效磷含量

Fig. 7 Soil available nitrogen and available phosphorus contents under different fertilization treatments

效氮提高 31.3%。

2.7 径流氮磷流失影响因素分析

对径流氮磷累积流失量和施肥处理等数据进行主成分分析,结果如图 8 所示。第一轴(PC1)和第二轴(PC2)解释值分别为 36.0% 和 23.7%,第一和第二主成分反映的信息量占总信息量的 59.7%。径流量(RV)、化肥氮施用量(CN-F)、降雨强度(RI)和径流各形态氮浓度(PN-C、STN-C 和 TN-C)与径流总氮流失量(TN-L)呈正相关,说明随着降雨强度(RI)和化肥氮施用量(CN-F)的增加,径流总氮流失(TN-L)增加。土壤速效磷(AP)、径流各形态磷浓度(PP-C、



RI: 降雨强度; RV: 径流量; RT: 径流初损历时; NO₃⁻: 土壤硝态氮含量; NH₄⁺: 土壤铵态氮含量; CN-F: 化肥氮施用量; ON-F: 有机氮肥施用量; PN-C: 颗粒态氮浓度; STN-C: 可溶性总氮浓度; TN-C: 总氮浓度; PN-L: 颗粒态氮流失量; STN-L: 可溶性总氮流失量; TN-L: 总氮流失量; AP: 土壤速效磷含量; CP-F: 化肥磷施用量; OP-F: 有机磷肥施用量; PP-C: 颗粒态磷浓度; STP-C: 可溶性总磷浓度; TP-C: 总磷浓度; PP-L: 颗粒态磷流失量; STP-L: 可溶性总磷流失量; TP-L: 总磷流失量。点表示试验处理,箭头表示影响因素。两个矢量箭头角度的余弦代表其相关关系,角度越小,相关性越高。箭头线条越长说明因素贡献越大。RI: rainfall intensity; RV: runoff volume; RT: runoff initial loss duration; NO₃⁻: soil nitrate nitrogen content; NH₄⁺: soil ammonium nitrogen content; CN-F: chemical nitrogen fertilizer application level; ON-F: organic nitrogen fertilizer application level; PN-C: particulate nitrogen concentration; STN-C: soluble total nitrogen concentration; TN-C: total nitrogen concentration; PN-L: particulate nitrogen loss; STN-L: soluble total nitrogen loss; TN-L: total nitrogen loss; AP: soil available phosphorus content; CP-F: chemical phosphorus fertilizer application level; OP-F: organic phosphorus fertilizer application level; PP-C: particulate phosphorus concentration; STP-C: soluble total phosphorus concentration; TP-C: total phosphorus concentration; PP-L: particulate phosphorus loss; STP-L: soluble total phosphorus loss; TP-L: total phosphorus loss. Dots are experimental treatments, and arrows indicate influencing factors. The cosine of the angle between two vector arrows represents their correlation, with smaller angles indicating higher correlation. The longer the arrow line, the greater the contribution of the factor.

图 8 径流氮磷流失影响因素 PCA 分析图

Fig. 8 PCA analysis of influencing factors of runoff nitrogen and phosphorus loss

STP-C 和 TP-C) 和有机磷肥用量(OP-F)同总磷流失量(TP-L)呈正相关,然而化肥磷施用量(CP-F)和总磷流失量(TP-L)呈负相关关系。

3 讨论

袁培栋等^[17]发现随着降雨强度的提高,单施有机肥处理对氮的流失削减作用降低,这与本文中 110 mm·h⁻¹降雨强度下 MN+MP 径流氮流失量高于其他处理的结果一致。可能是单施有机肥使土壤容重降低,促使土壤形成无机-有机复合体和微团聚体^[18],径流中颗粒态氮来源于 0.25 mm 以下的团聚体流失^[19],随着降雨强度增大,土层表面细小颗粒随水流流失也随之增大。另外,高降雨强度下总氮流失以颗粒态为主,因此氮累积流失量增大。唐倩等^[20]发现在烤烟(*Nicotiana tabacum*)种植过程中有机肥施用量越高,地表径流中颗粒态氮占总氮比值越高。同时,降雨强度越大,产沙量越大,地表颗粒态氮从而随径流流失的量就越大。有机肥氮形态主要以有机氮为主,本试验中 MN+MP 处理可溶性有机氮累积流失量在 110 mm·h⁻¹降雨强度下均高于其他处理,这可能也是总氮累积流失量高于其他处理的原因之一。

本研究中,有机无机肥配施(1/4MN+1/3MP)在 55 和 110 mm·h⁻¹降雨强度下的总氮累积流失量均小于施纯化肥(N+P)处理,这与陈永高等^[21]的研究结果一致。与常规施化肥氮相比,有机无机肥配施可以降低 34.2%~44.8% 菜地氮径流流失量,菜地径流磷流失系数也降低 39.63%^[22-23]。有机肥无机肥配施能使小青菜(*Brassica chinensis*)产量达到或超过常规施化肥氮肥水平^[24]。有机肥替代化肥有利于番茄(*Solanum lycopersicum*)根系的生长,50% 有机肥替代化肥有利于番茄根长、总根体积和地下部干重等指标的提高^[25],根系对水土的固持和对氮的吸收减少了氮流失。有机无机肥配施为土壤微生物提供了利于微生物繁殖的碳源,有机肥的施入使得土壤微生物对氮的固持率提高 14.9%~15.3%,并减少了氮流失风险^[26]。本试验中,与 55 mm·h⁻¹降雨强度相比,110 mm·h⁻¹降雨强度下初损历时缩短,随着瞬时降雨强度的增大,土壤水迅速蓄满,产流提前。在不同施肥处理中,和施纯化肥处理(N+P)相比,两种降雨强度下,有机无机肥配施处理(1/4MN+1/3MP)将初损历时延后 5.3~7.0 min。唐柄哲^[27]在旱地进行了 60~120 mm·h⁻¹强度的模拟降雨发现,与单施化肥相比,有机无机肥配施将初损历时延后 16.0%~35.1%。本研究中,有机肥替代化肥的处理(1/4MN+1/3MP 和 MN+

MP) 初损历时均长于施化肥处理, 这可能与土壤物理性质和土壤水分有关。本试验中, 55 mm·h⁻¹ 降雨强度下径流 NO₃⁻-N 浓度在 0~25 min 的降低幅度较大, 而 110 mm·h⁻¹ 降雨强度下 NO₃⁻-N 浓度在整个降雨过程变化不明显。这可能是因为 55 mm·h⁻¹ 降雨强度下, 雨滴冲刷土表, 致使土表 NO₃⁻-N 不断溶解出来, 随着降雨进行, 土表逐渐积水, 雨滴的冲击作用降低, NO₃⁻-N 浓度呈不断降低趋势^[28]。在 110 mm·h⁻¹ 降雨强度下, 强降雨使土表迅速积水并产生大量径流水, 雨水的浸润作用不明显, 因此 NO₃⁻-N 浓度变化不明显。

本研究中, 施纯有机肥处理 (MN+MP) 在不同降雨强度下磷累积流失量均高于施化肥处理, 原因可能是施用有机肥能提高碱性磷酸酶活性, 促进土壤有机磷的水解, 将有机态的磷单酯转化为无机的正磷酸盐^[29], 这也与图 7 中单施有机肥土壤速效磷含量高于其他处理的结果相对应, 从而提高了磷流失风险。本研究结果发现, 0~35 min 是径流磷浓度迅速降低的关键时期, 这与 Zhou 等^[30] 的 0~30 min 是径流总磷浓度降低的关键时期的研究结果相似。长期施用有机肥增加了土壤中的有机胶体, 可与黏土颗粒结合并增强对磷的吸附, 使土壤胶体磷含量升高, 径流发生时, 大量土壤颗粒受雨水冲刷后随径流水流失, 增加了胶体磷的流失风险^[31]。有机肥肥效长且具有维持地力的功效, 有机肥磷多难以被土壤微生物降解, 易分解部分少, 残留的有机肥提高了径流磷流失风险^[32]。同时, 有机肥的氮磷比值小, 单施有机肥会使土壤磷累积^[33]。在土壤中无机磷比有机磷更容易与矿物元素结合, 有机肥中的腐殖质更容易包裹铁、铝、钙的氧化物, 降低对磷的结合, 有机磷在土壤中更容易移动^[34]。等量磷投入下, 投入有机肥导致的土壤 Olesn-P 增加量是投入化肥的 3 倍^[35], 有机肥的连续施用导致了磷的大量累积, 提高了磷流失风险。在降雨侵蚀中磷流失常以颗粒吸附形态发生迁移。有研究指出, 单施有机肥的产沙量、泥沙流失负荷和径流量均高于常规化肥施用, 而产沙量和颗粒态磷的流失显著相关, 进一步导致单施有机肥处理的颗粒态磷随泥沙径流水大量流失, 水土流失是磷养分流失的重要原因之一^[36]。

4 结论

本研究发现, 相比纯化肥处理, 菜地进行有机无机肥配施, 在 2 种降雨强度下均可延长径流初损历时。2 种降雨强度下, 相比产流 25~60 min, 产流

0~25 min 内各处理的径流总氮平均浓度较高; 产流 0~35 min 比 35~60 min 径流总磷平均浓度高; 产流 0~25 和 0~35 min 是控制菜地氮和磷流失的关键时期, 应在此时期及时截流阻控, 降低氮磷流失风险。在 55 和 110 mm·h⁻¹ 降雨强度下, N+P 和 MN+MP 处理的总氮流失量分别最高, 与此相比, 1/4MN+1/3MP 处理可减少 21.9%~44.7% 的氮流失, 这主要是由于颗粒态氮流失量的减少; MN+MP 处理径流总磷流失量最高, 与其相比, 1/4MN+1/3MP 处理可减少 65.4%~69.0% 的总磷流失, 这主要是由于颗粒态磷流失的减少。

参考文献 References

- [1] 辛竹琳, 崔彦娟, 杨小微, 等. 全球蔬菜产业现状及中国蔬菜育种发展路径研究进展[J]. 分子植物育种, 2022, 20(9): 3122-3132
XIN Z L, CUI Y J, YANG X W, et al. Current situation of global vegetable industry and research progress of vegetable breeding development path in China[J]. Molecular Plant Breeding, 2022, 20(9): 3122-3132
- [2] 黄梓翀, 刘善江, 孙昊, 等. 我国蔬菜肥料利用率现状与提高对策[J]. 蔬菜, 2021(7): 43-50
HUANG Z C, LIU S J, SUN H, et al. Current situation and improvement countermeasures of fertilizer utilization rate in vegetables of China[J]. Vegetables, 2021(7): 43-50
- [3] LI B, BI Z C, XIONG Z Q. Dynamic responses of nitrous oxide emission and nitrogen use efficiency to nitrogen and biochar amendment in an intensified vegetable field in southeastern China[J]. GCB Bioenergy, 2017, 9(2): 400-413
- [4] 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] 左海军, 张奇, 徐力刚, 等. 农田土壤氮素径流损失的影响因素及其防治措施研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(6): 64-67
ZUO H J, ZHANG Q, XU L G, et al. Influencing factors of nitrogen runoff loss from farmland soil and its prevention measures[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(6): 64-67
- [6] 杨旺鑫, 夏永秋, 姜小三, 等. 我国农田总磷径流损失影响因素及损失量初步估算[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(2): 319-325
YANG W X, XIA Y Q, JIANG X S, et al. Influencing factors and estimation of total phosphorus runoff from farmlands in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(2): 319-325
- [7] 潘忠成, 袁溪, 李敏. 降雨强度和坡度对土壤氮素流失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 9-13
PAN Z C, YUAN X, LI M. Effects of rainfall intensity and slope gradient on soil nitrogen loss[J]. Journal of Soil and Water

- Conservation, 2016, 30(1): 9–13
- [8] 严磊, 邓旭哲, 薛利红, 等. 不同雨强和植被盖度对稻田径流及氮素流失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(12): 2761–2769
YAN L, DENG X Z, XUE L H, et al. Effects of different rainfall intensities and vegetation coverages on runoff and nitrogen loss from rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(12): 2761–2769
- [9] YAN L, XUE L H, PETROPOULOS E, et al. Nutrient loss by runoff from rice-wheat rotation during the wheat season is dictated by rainfall duration[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 285: 117382
- [10] 关荣浩. 冀南地区不同降雨强度与施肥对菜地氮磷流失影响[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020
GUAN R H. Effects of different rainfall intensity and fertilization on the loss of nitrogen and phosphorus in vegetable fields in southern Hebei[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2020
- [11] CHEN M M, ZHANG S R, LIU L, et al. Combined organic amendments and mineral fertilizer application increase rice yield by improving soil structure, P availability and root growth in saline-alkaline soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 212(1): 105060
- [12] EVANYLO G, SHERONY C, SPARGO J, et al. Soil and water environmental effects of fertilizer-, manure-, and compost-based fertility practices in an organic vegetable cropping system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 127(1/2): 50–58
- [13] SHAN L N, HE Y F, CHEN J, et al. Nitrogen surface runoff losses from a Chinese cabbage field under different nitrogen treatments in the Taihu Lake Basin, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 159: 255–263
- [14] 黄东风, 王果, 李卫华, 等. 不同施肥模式对蔬菜产量、硝酸盐含量及菜地氮磷流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(5): 5–10
HUANG D F, WANG G, LI W H, et al. Effects of different kinds of fertilization modes on yield, nitrate's content of vegetable and loss of nitrogen and phosphorus in vegetable field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(5): 5–10
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
BAO S D. Soil Agrochemical Analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [16] 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, 2000
LU R K. Methods of Soil Agrochemical Analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [17] 袁培栋, 张鹏程, 何为媛, 等. 模拟降雨下不同农作措施紫色土坡耕地氮磷流失特征[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2021, 19(6): 69–76
XI P D, ZHANG P C, HE W Y, et al. Response of nitrogen and phosphorus losses to different farming treatments in purple sloping farmland under simulated rainfall[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2021, 19(6): 69–76
- [18] 蔺忠龙, 浦勇, 郭怡卿, 等. 生物有机肥对植烟土壤-烤烟生长及品质影响的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(13): 6709–6711
LIN Z L, PU Y, GUO Y Q, et al. Research progress on effects of bio-organic fertilizer on soil, the growth and quality of flue-cured tobacco[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(13): 6709–6711
- [19] 黄满湘, 章申, 晏维金. 农田暴雨径流侵蚀泥沙对氮磷的富集机理[J]. *土壤学报*, 2003, 40(2): 306–310
HUANG M X, ZHANG S, YAN W J. Sediment enrichment mechanisms of nitrogen and phosphorus under simulated rainfall conditions[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(2): 306–310
- [20] 唐倩, 王克勤, 宋娅丽, 等. 有机肥对滇中红壤烤烟坡耕地氮磷流失的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(6): 106–116
TANG Q, WANG K Q, SONG Y L, et al. Effects of organic fertilizer on nitrogen and phosphorus loss in flue-cured sloping farmland of red soil in central Yunnan[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2020, 48(6): 106–116
- [21] 陈永高, 张瑞斌. 不同施肥模式对太湖流域农田土体氮磷流失与营养累积的影响[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(2): 115–119
CHEN Y G, ZHANG R B. Effects of fertilization patterns on loss of soil nitrogen, phosphorus and nutrients accumulation in farmlands of Taihu Lake basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(2): 115–119
- [22] 周俊. 有机无机肥料配施对集约化蔬菜生产碳氮足迹的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2019
ZHOU J. Assessment of carbon and nitrogen footprints for intensive vegetable production with partially substituting inorganic with organic fertilizer strategies[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019
- [23] 郭智, 刘红江, 陈留根, 等. 有机肥施用对菜地磷素径流流失及磷素表观利用率的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 181–186
GUO Z, LIU H J, CHEN L G, et al. Effects of organic manure application on phosphorus (P) losses by surface runoff and apparent P use efficiency in the vegetable field of Chinese waxgourd (*Benincasa hispida* Cogn.)[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2): 181–186
- [24] 武星魁, 姜振萃, 陆志新, 等. 有机肥部分替代化肥氮对叶菜产量和环境效应的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(3): 349–356
WU X K, JIANG Z C, LU Z X, et al. Effects of the partial replacement of chemical fertilizer with manure on the yield and nitrogen emissions in leafy vegetable production[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(3): 349–356
- [25] 祝海燕, 田素波, 李春雷, 等. 化肥减量配施生物有机肥对口感型番茄生长及品质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(19): 125–130
ZHU H Y, TIAN S B, LI C L, et al. Effects of reduced chemical fertilizer combined with bio-organic fertilizer on growth and quality of taste tomato[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023,

- 51(19): 125–130
- [26] LIANG B, YANG X Y, MURPHY D V, et al. Fate of ^{15}N -labeled fertilizer in soils under dryland agriculture after 19 years of different fertilizations[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49(8): 977–986
- [27] 唐柄哲. 不同施肥类型及耕作方式下紫色土坡耕地径流氮、磷流失研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016
TANG B Z. Study on nitrogen and phosphorus loss process of purple soil under different fertility and tillage[D]. Chongqing: Southwest University, 2016
- [28] GAO B, WALTER M T, STEENHUIS T S, et al. Investigating ponding depth and soil detachability for a mechanistic erosion model using a simple experiment[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 277(1): 116–124
- [29] CHEN X D, JIANG N, CHEN Z H, et al. Response of soil *phoD* phosphatase gene to long-term combined applications of chemical fertilizers and organic materials[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 119: 197–204
- [30] ZHOU P G, ZHANG D H, ZHUANG L, et al. Assessment of runoff nutrients loss in *Phyllostachys praecox cv. prevernalis* forest land under simulated rainfall conditions[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(17): 21874–21886
- [31] BI Q F, LI K J, ZHENG B X, et al. Partial replacement of inorganic phosphorus (P) by organic manure reshapes phosphate mobilizing bacterial community and promotes P bioavailability in a paddy soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 134977
- [32] AJIBOYE B, AKINREMI O O, RACZ G J. Laboratory characterization of phosphorus in fresh and oven-dried organic amendments[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(3): 1062–1069
- [33] 李欣忱. 有机肥还田氮磷径流特性及河岸缓冲生态拦截技术[D]. 重庆: 重庆大学, 2021
LI X C. Nitrogen and phosphorus runoff characteristics of organic fertilizer returning and riparian buffer ecological interception technology[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021
- [34] ANDERSON B H, MAGDOFF F R. Relative movement and soil fixation of soluble organic and inorganic phosphorus[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(6): 2228–2233
- [35] LI H, HUANG G, MENG Q, et al. Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China. A review[J]. *Plant and Soil*, 2011, 349(1): 157–167
- [36] 钱婧. 模拟降雨条件下红壤坡面菜地侵蚀产沙及土壤养分流失特征研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015
QIAN J. Research on eroded sediment yield and nutrient loss characteristics from sloping vegetable fields of red soils under artificial simulation of rainfall[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015