

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2025.06.034

CSTR:32310.14.stbcbx.2025.06.034

杨贵婷, 陆超, 徐焯红, 等. 施用生物炭对果园土壤氮磷时空分布与流失阻控的影响[J]. 水土保持学报, 2025, 39(6):224-236.

YANG Guiting, LU Chao, XU Yehong, et al. Effect of biochar application on spatiotemporal distribution and loss control of nitrogen and phosphorus in orchard soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6):224-236.

施用生物炭对果园土壤氮磷时空分布与流失阻控的影响

杨贵婷¹, 陆超¹, 徐焯红¹, 马啸驰¹, 马艳¹, 罗佳¹, 郭德杰¹, 韩寿鹤²

(1.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 国家农业环境六合观测实验站, 南京 210014;

2.长江大学生命科学学院, 湖北 荆州 434025)

摘要: [目的] 探讨生物炭与有机肥配施对桃园氮磷流失路径、土壤理化性质及生产效益的调控机制, 评估其在果园面源污染防治与可持续生产中的协同效应。 [方法] 在江苏省南京市六合区竹镇镇开展为期2 a的田间原位试验, 设置化学氮肥(CF)、有机肥+化学氮肥(SHCF)、有机肥+化学氮肥+生物炭(SHBCF)3个处理, 采集地表径流、渗漏水 and 不同深度土壤样品, 分析氮磷含量及土壤理化性质, 并测定桃树产量、果实品质及经济效益。 [结果] SHBCF处理径流液总氮和总磷流失量较SHCF分别显著降低22.6%和41.9%, 且与CF处理无显著差异; SHBCF渗漏水平均硝态氮、总氮和总磷浓度较SHCF显著降低24.3%、27.53%和73.4%; 开花期, SHBCF处理的表层土壤pH较CF和SHCF显著提高0.67~0.81个单位; 在开花期和坐果期, SHBCF与SHCF处理相比较, 土壤硝态氮和有效磷在0~40 cm土壤分别显著提高31.6%~55.4%和17.8%~80.4%, 在40~80 cm土壤分别显著降低17.3%~52.8%和21.4%~37.09%。2024年SHBCF处理桃子产量较CF和SHCF分别提高23.2%和8.2%; 净收益和可溶性固形物含量较CF分别显著提高19.5%和11.4%, 与SHCF无显著差异。 [结论] 生物炭添加可优化土壤氮磷时空分布, 减少径流与渗漏养分流失, 缓解土壤酸化, 同步提高产量与果实品质, 兼具环境与经济效益, 是一种值得推广的果园施肥模式, 但其长期效应需进一步研究验证。

关键词: 生物炭; 氮磷径流流失; 氮磷渗漏流失; 果园; 养分迁移

中图分类号: S156.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)06-0224-13

Effect of Biochar Application on Spatiotemporal Distribution and Loss Control of Nitrogen and Phosphorus in Orchard Soil

YANG Guiting¹, LU Chao¹, XU Yehong¹, MA Xiaochi¹, MA Yan¹, LUO Jia¹, GUO Dejie¹, HAN Shouhe²

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, National Agro-Environmental Observation and Experiment Station, Liuhe, Nanjing 210014, China; 2. College of Life Sciences,

Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434025, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the regulatory mechanisms of the combined application of biochar and organic fertilizer on nitrogen (N) and phosphorus (P) loss pathways, soil physicochemical properties, and production benefits in peach orchards, and to evaluate their synergistic effects in controlling non-point source pollution and promoting sustainable production in orchards. [Methods] A two-year in-situ field experiment was conducted in Zhuzhen Town, Liuhe District, Nanjing City, Jiangsu Province. Three treatments were established: chemical nitrogen fertilizer (CF), organic fertilizer + chemical nitrogen fertilizer (SHCF), and organic fertilizer + chemical nitrogen fertilizer + biochar (SHBCF). Surface runoff, leachate, and soil samples at different depths were collected to analyze N and P contents and soil physicochemical properties. Additionally, peach yield, fruit quality, and economic benefits were measured. [Results] Compared with the SHCF treatment, the SHBCF

收稿日期: 2025-05-24

修回日期: 2025-07-13

录用日期: 2025-07-25

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-09-26

资助项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1700804-01)

第一作者: 杨贵婷(1994—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事农田土壤养分高效利用与面源污染源头阻控研究。E-mail: 18364881532@163.com

通信作者: 马艳(1971—), 女, 博士, 研究员, 主要从事土壤改良与功能肥料研制及其环境效应研究。E-mail: mayan@jaas.ac.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

treatment significantly reduced total N and P losses in runoff by 22.6% and 41.9%, respectively, with no significant difference from the CF treatment. The average concentrations of nitrate-N, total N, and total P in leachate of SHBCF were significantly reduced by 24.3%, 27.53%, and 73.4% compared with SHCF. Meanwhile, the topsoil pH under SHBCF treatment was significantly higher by 0.67–0.81 units relative to both CF and SHCF. At both the flowering and fruit setting stages, compared with SHCF, SHBCF treatment significantly increased soil nitrate nitrogen and available phosphorus content by 31.6%–55.4% and 17.8%–80.4%, respectively, in the 0–40 cm soil layer, while significantly reducing them by 17.3%–52.8% and 21.4%–37.09% in the 40–80 cm soil layer. In 2024, the peach yield under SHBCF treatment increased by 23.2% and 8.2%, respectively, compared with the CF and SHCF treatments. The net income and soluble solid content were significantly increased by 19.5% and 11.4%, respectively, compared with the CF treatment, with no significant difference from the SHCF treatment. [Conclusion] Biochar addition can optimize the spatiotemporal distribution of soil N and P, reduce nutrient losses through runoff and leaching, alleviate soil acidification, and simultaneously improve yield and fruit quality, demonstrating both environmental and economic benefits. Therefore, it is a fertilization mode worthy of promotion in orchards, though its long-term effects require further investigation.

Keywords: biochar; nitrogen and phosphorus runoff loss; nitrogen and phosphorus leaching loss; orchard; nutrient migration

Received: 2025-05-24

Revised: 2025-07-13

Accepted: 2025-07-25

Online(www.cnki.net): 2025-09-26

随着全球农业集约化进程加快,化肥过量施用导致的土壤退化与氮磷非点源污染问题日益严峻^[1]。第二次全国污染源普查(2017)数据显示,农业源贡献了全国总氮排放量的46.5%和总磷排放量的67.2%,其中农业源总氮和总磷排放量的23.7%来自耕地。果园生态系统因化肥投入量大、施肥频次高的特性已逐渐成为氮磷流失的关键风险区域^[2-3]。国家统计局^[4]数据显示,2019年,我国果园总面积为1 226万hm²,约占耕地总数的10%。果园在产生可观经济效益的同时,长期过量施用化肥导致的问题,如土壤板结、次生盐渍化及氮磷养分流失引发的面源污染风险日益严峻^[5-6]。因此,寻求既能维持果园生产力又能有效控制氮磷流失的技术方案,已成为保障果园生态系统可持续发展的关键。

针对化肥过量施用的环境负效应,有机肥与化肥配施被广泛视为改善土壤肥力、降低化肥依赖的重要途径。已有研究^[7]表明,有机无机配施可显著提高土壤有机质,改善土壤理化性质,并提高果园经济效益。然而有机肥与化肥配施对氮磷流失的调控作用仍存在争议。另有研究^[8]指出,有机肥的缓慢释放特性虽能补充土壤有机质,但过量的有机氮磷在雨季易随径流大量流失,反而加剧面源污染风险。果园生草栽培技术已被证实可通过植被覆盖减少30%~50%的径流氮磷流失,并改善土壤团

聚体结构^[9]。但无论全园生草还是带状生草,都对施肥、喷药等生产管理产生影响,增加田间管理成本,限制其规模化应用^[10]。因此,开发既能提升土壤肥力又能阻控养分流失的新型农艺措施,已成为果园可持续发展领域亟待突破的关键科学问题。

生物炭是由生物质在缺氧条件下经高温热裂解产生的富碳、高度芳香化的固体材料,近年来在农业面源污染防治领域展现出巨大潜力^[11]。作为新型多功能材料,生物质炭独特的多孔结构赋予其极高的比表面积和丰富的孔隙,使其具备强大的吸附能力^[12]。已有研究^[13]证实,生物炭能够通过物理吸附与化学络合作用固定土壤氮磷养分,降低其在径流与淋溶过程中的损失。同时,生物炭还可优化土壤孔隙结构,提升持水保肥能力,增加土壤微生物群落活性,实现土壤肥力与作物生产力的协同提升^[14-15]。尽管生物炭在农业领域的应用研究已取得诸多进展,但现有研究大多集中在大田作物体系或室内模拟环境,对于果园生态系统,尤其是桃园生态系统的研究相对匮乏。桃园具有独特的生态环境和种植管理模式,其土壤特性、根系分布、施肥方式等与大田作物存在显著差异。尤其是在自然降雨条件下,生物炭对桃园土壤中氮磷时空分布、迁移转化规律及其环境效应的影响机制及对桃树产量、果实品质 and 经济效益的综合影响鲜有报道。

基于上述研究背景,本研究以桃园生态系统为

研究对象,通过设置化学氮肥(CF)、有机肥+化学氮肥(SHCF)、有机肥+化学氮肥+生物炭(SHBCF)3种处理,开展为期2a的田间原位监测试验。研究目标包括:1)解析生物炭对土壤氮磷时空分布特征的影响;2)量化不同处理下径流与渗漏液中氮磷浓度及流失负荷,揭示生物炭对养分迁移路径的调控机制;3)评估生物炭施用对桃树产量、果实品质及经济效益的综合效应。以期揭示生物炭在桃园生态系统中调控氮磷迁移与流失的关键机制,为果园面源污染防控与可持续发展提供科学依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江苏省南京市六合区竹镇镇果子王生态创意博览园内(118°38'01"E,32°31'45"N),该地属亚热带季风气候,年平均气温16.5℃。当地年平均降水量1060.8mm,降水主要分布在6—9月,其中汛期雨量约占全年总量的60%~70%。桃园土壤的基本理化性质为:有机质20.5g/kg,全氮1.20g/kg,全

磷1.23g/kg,铵态氮5.6mg/kg,硝态氮15.2mg/kg,有效磷12.0mg/kg,pH5.82。

1.2 试验设计

试验共分为3个处理,分别为化学氮肥(CF)、有机肥+化学氮肥(SHCF)、有机肥+化学氮肥+生物炭(SHBCF),每个处理设置4个重复,共12个小区,每个试验小区内包含2棵桃树。每个小区面积为20m²(5m×4m)。以5a生晚熟桃品种“秋雪”为试材,种植密度为2.5m×4.0m,收获期在8月下旬。有机肥施用量为21.74t/hm²,杉木屑生物炭施用量为3.0t/hm²。有机肥的养分含量为有机质375.1g/kg,氮2.19%,全磷1.68%,全钾2.61%。杉木屑生物炭的比表面积为65.2m²/g,pH6.65,阳离子交换量17.8cmol/kg,全氮0.91%,全磷0.18%,全钾0.27%,有机质652.0%。2a供试有机肥均为自制羊粪堆肥,杉木屑生物炭由河南厚森环保科技有限公司提供。其余肥料均为市售普通尿素(N46.0%)、过磷酸钙(P₂O₅12.0%)和硫酸钾(K₂O52.0%)。基肥于每年2月施用,并在开花期(4月中旬)和坐果期(5月下旬)完成追肥(表1)。

表1 施肥方案

Table 1 Fertilization schemes

编码	处理	有机肥和化肥 总养分投入 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O	基肥 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O		追肥 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O	
			有机肥施用量	化肥施用量	开花期 化肥施用量	坐果期 化肥施用量
CF	全量化肥	600-375-525		420-375-263	180-0-52.5	0-0-210
SHCF	有机肥+化肥	1080-735-1095	480-360-570	420-375-263	180-0-52.5	0-0-210
SHBCF	有机肥+化肥+生物炭	1080-735-1095	480-360-570	420-375-263	180-0-52.5	0-0-210

基肥施肥方式为沟施,施肥位置见图1,施肥深度为40cm。试验于2023年2月至2025年2月开展为期2a的田间原位监测。田间日常管理和病虫害防控均按照农户常规进行。

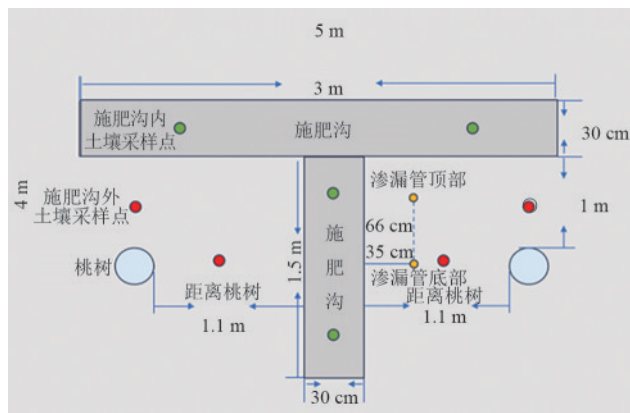


图1 小区内施肥沟、渗漏管和土壤取样点位置示意

Fig. 1 Schematic diagram of fertilization ditch, leaching pipe, and soil sampling point locations in experimental plot

1.3 样品采集

于2023年2月在试验小区内安装径流收集装置,为防止发生侧渗和串灌,每个小区均用PVC挡板做隔离(地上15cm,地下15cm)。每个小区均配有1个单独的排水口和径流桶用于采集地表径流水。并在2023年的6月19日和7月8日及2024年的6月30日、7月12日和9月18日收集地表径流。首先用刻度尺测量各个径流桶内水深度,并计算径流水体积,充分混匀后,每个径流池用干净塑料瓶取500mL径流液,水样置于4℃保存,并立即带回实验室分析。取样结束,打开径流池阀门,将径流桶内的径流水排干并清洗干净后关闭排水阀。

于2023年8月在小区内安装渗漏管,位置见图1,并在2024年4月15日、4月27日、5月17日、6月25日、7月17日、8月23日和9月24日采集渗漏水样品。渗漏管材质为白色PVC管,直径10cm,长度132cm,顶

端设可开启管盖(用于取水样),底端封闭(防止渗漏),整体以60°倾角埋于土壤中,收集75~115 cm土层的渗漏液。为避免土壤颗粒堵塞渗水通道,管外壁包裹尼龙纱布。其安装流程为:使用钻孔机在选定点位以60°倾角向下钻孔,将包裹尼龙纱布的渗水管缓慢插入孔内,确保渗漏液可沿管壁流入管内。插入后,通过浇灌泥水填充钻孔与管壁间隙,以减少渗漏水的侧向流动。

果实成熟期,于每棵树树冠中部外侧东、南、西、北4个方位,选4~5个大小相近的健康果实测品质。同时全量采收每棵桃树果实,称重后换算为单位面积产量。2024年,在桃树开花期、坐果期及收获期,采集0~20、20~40、40~60、60~80 cm土层样品(施肥沟内外取样点见图1)。新鲜土样去根及杂质后分2份,1份4℃保存,1份风干过2 mm筛待测。

1.4 分析测定方法

土壤理化性质分析具体方法参照《土壤农化分析》^[16]:pH计测定土壤pH(水土比2.5:1);电导仪测定土壤电导率(EC)(水土比2.5:1);土壤样品用2 mol/L KCl浸提(土水比1:10),采用连续流动注射分析仪测定浸提液中硝、铵态氮含量;土壤有效磷含

量用0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提后采用钼锑抗比色法测定。参照《水和废水监测分析方法(第4版)》^[17]:水样中铵、硝态氮含量采用连续流动注射分析仪测定。水样全氮和全磷分别采用碱性过硫酸钾消煮—紫外分光光度法和碱性过硫酸钾消煮—钼蓝比色法测定。果实可溶性固形物含量,又称白利糖度,使用手持便携式数字折射仪测定;总酸含量用NaOH滴定以酒石酸计。日降雨量数据通过M4-U型系列水位雨量计获得。

1.5 数据处理

总氮和总磷流失量为监测周期中每次径流水中总氮和总磷浓度与径流水体积乘积之和。利用SPSS 29.0软件进行数据统计分析,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($p < 0.05$)。图形绘制使用Origin 2021软件。

2 结果与分析

2.1 研究区内自然降雨状况

图2为研究区内2023年和2024年汛期(6—9月)日降雨量。2023年日降雨量达50 mm以上的有3次,分别是2023年6月18日、7月7日和9月12日。在2024年日降雨量达50 mm以上的有3次,分别是在2024年6月28日、7月10日和9月16日。

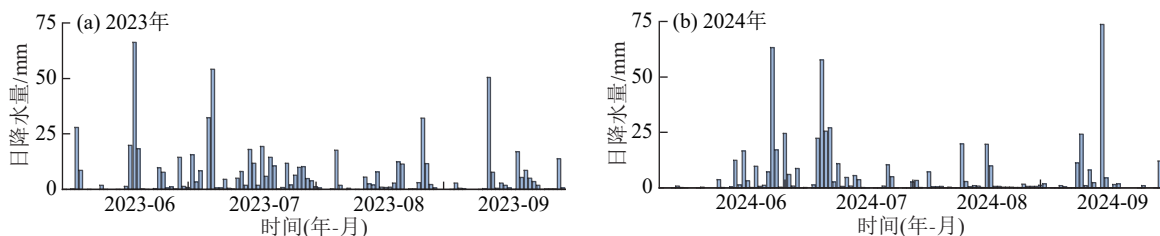


图2 研究区内2023年和2024年6—9月日降雨量

Fig. 2 Daily rainfall from June to September in 2023 and 2024 in the study area

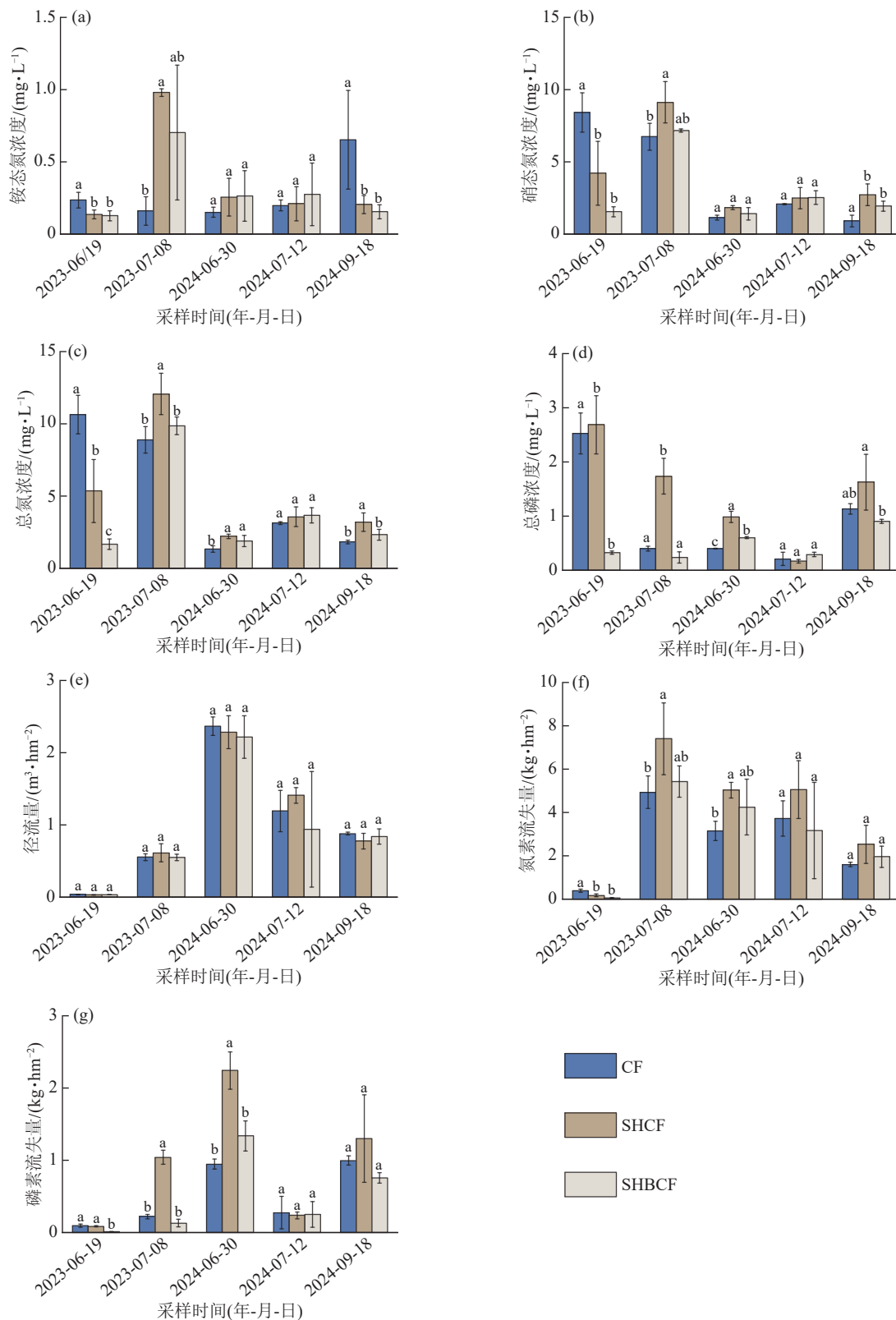
2.2 桃园土壤氮磷径流损失

由图3可知,不同施肥处理之间的氮、磷径流损失具有显著差异。在2023年6月19日,CF处理的径流液铵态氮浓度显著高于SHCF与SHBCF($p < 0.05$),表明传统化肥的速效性导致铵态氮快速释放。然而,在2023年7月8日强降雨事件后,SHCF的铵态氮浓度激增至0.98 mg/L,较CF提高512.5%,反映出有机肥中氮素在土壤中转化后,若受到强降雨影响也可迅速迁移,导致养分流失;而SHBCF的浓度较SHCF降低28.6%,但差异未达显著水平。至2024年9月收获期,CF的铵态氮浓度仍显著高于SHCF和SHBCF($p < 0.05$)。

硝态氮流失呈阶段性波动。2023年6月,CF的径流液硝态氮浓度分别较SHCF和SHBCF提高99.5%和446.1%,表明传统化肥在初期引发高淋溶风险。至2023年7月,SHCF的硝态氮浓度反超CF

处理,显著增加35.2%,而SHBCF较SHCF降低21.3%,但差异未达显著水平。各采样期内不同施肥处理之间的径流量均无显著差异(图3E),表明养分流失的差异主要归因于处理间土壤养分赋存状态和迁移行为的不同,而非水量差异所致。

2023年6月19日,CF处理的总氮浓度达10.64 mg/L,较SHCF与SHBCF处理分别显著升高98.9%和537.1%($p < 0.05$),而SHBCF总氮浓度较SHCF显著降低68.8%,说明生物炭施用有助于大幅度削减氮素向地表水体迁移的风险。在2023年6月19日,SHBCF和SHCF处理的总氮流失量均较CF显著降低。2023年7月,SHCF的氮素流失量较CF显著提高50.1%。而SHBCF处理在同期较SHCF减少26.6%,但差异未达显著水平。在2024年9月18日SHBCF的总氮浓度显著低于SHCF处理27.5%($p < 0.05$)。



注: 图柱上方不同小写字母表示同一采样日期不同施肥处理间差异显著 ($p < 0.05$)。

图 3 不同处理不同时间径流铵态氮、硝态氮、总氮、总磷浓度以及氮和磷流失量

Fig. 3 Concentrations of ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, total nitrogen, total phosphorus, and runoff loss of nitrogen and phosphorus at different times under different treatments

总磷方面,各时期 SHCF 处理均表现出较高浓度,特别是在 2023 年 7 月,其总磷浓度分别较 CF 与 SHBCF 提高 335.0% 与 625.0% ($p < 0.05$),说明有

机质中磷素在剧烈降雨冲刷下易被活化释放,造成磷素表层积累与迁移风险。SHBCF 处理各时期总磷浓度均显著低于 SHCF (降低 38.8%~88.1%),进

一步证实生物炭对磷素的缓释调控与表层固定效应显著,有助于减缓农业面源污染。对于磷素流失量,2023年7月SHCF处理较CF高出近4.7倍,而SHBCF较SHCF显著下降87.6% ($p < 0.05$),在2024年6月和9月的监测中,SHBCF处理仍保持明显的减磷效应(分别降低40.3%和41.8%)。综上,SHCF存在养分累积释放的高风险,而SHBCF则能有效降低养分流失强度,表现出更好的生态安全效益。

由图4可知,不同施肥处理的径流量无显著差

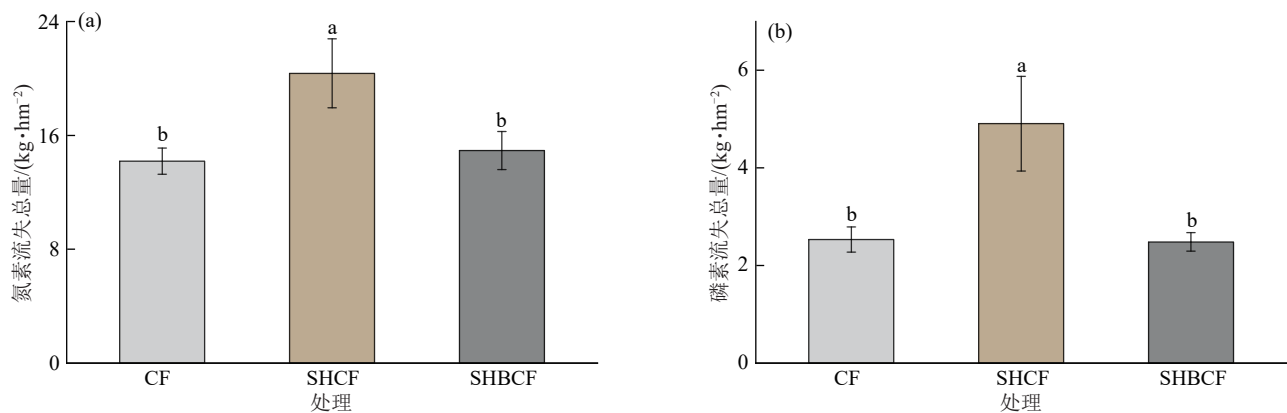


图4 不同施肥处理下氮和磷径流流失总量

Fig. 4 Total runoff losses of nitrogen and phosphorus under different fertilization treatments

2.3 桃园土壤氮、磷渗漏损失

不同施肥模式对渗漏液中铵态氮、硝态氮、全氮及全磷浓度的影响存在显著时空分异(图5)。SHCF处理的铵态氮浓度在4月27日和5月17日显著高于CF与SHBCF ($p < 0.05$),表明有机肥释放的铵态氮在早期矿化速率较高,易在强降雨条件下向下迁移。相比之下,SHBCF处理铵态氮浓度与CF相近,未表现出显著增加,说明生物炭的加入可能通过吸附或缓释机制减缓铵态氮的纵向迁移。整体来看,土壤渗漏液的硝态氮浓度随采样日期逐渐降低。SHCF处理在生长季前期(4月15日至5月17日)硝态氮浓度达128.1~173.5 mg/L,显著高于CF ($p < 0.05$),其峰值出现在4月27日(173.5 mg/L)。然而,SHBCF处理在同期(4月27日)硝态氮浓度较SHCF降低26.7%,表明生物炭具有一定的硝态氮截留能力。在6—8月,SHBCF处理的硝态氮截留效率呈波动趋势。6月25日,SHBCF浓度较SHCF降低39.5%,而8月23日仅降低25.9%。在9月24日,SHBCF处理的硝态氮浓度较CF处理显著升高129.1%。

SHCF处理的总氮浓度在4月较CF处理显著增加17.4%~55.7%,有机肥与化肥配施在前期易形成氮素积累并向下淋失;4月15日和5月17日,SHBCF

异,而不同施肥处理的总氮与总磷流失量呈现显著差异。SHBCF的总氮流失量为14.19 kg/hm²,总磷流失量为2.53 kg/hm²,与CF处理均无统计学差异;而SHCF的总氮和总磷流失量分别达20.36、4.91 kg/hm²,总氮流失量较CF与SHBCF分别显著增加43.5%和36.4% ($p < 0.05$),总磷流失量较CF与SHBCF分别显著增加94.1%和97.9% ($p < 0.05$),研究结果表明,施用生物炭可有效缓解有机肥与化肥配施引起的果园面源污染风险。

处理的总氮浓度较SHCF处理显著降低27.5%和11.2%,进一步证实生物炭对早期氮素下渗的阻控效果。至果实膨大期(7月17日)和收获期(8月23日),SHBCF处理的总氮浓度较SHCF显著降低39.6%和32.1%。9月24日SHBCF处理的总氮浓度显著高于CF处理81%,可能由生物炭吸附解吸导致的,生物炭在前期可能吸附氮素并至饱和,后期又逐步解吸释放氮素。

4月27日和5月17日SHCF处理的总磷浓度分别达到0.33、0.43 mg/L,较CF处理提高297.6%和271.3% ($p < 0.05$),表明有机肥中的磷素在矿化与强降雨共同驱动下存在快速下渗趋势。然而SHBCF处理在相同时期的总磷浓度均降至0.030 mg/L,较SHCF降低90.7%~93.3%,反映出生物炭对有效磷的强吸附固定作用。在雨季(6月25日至8月23日),SHCF处理的总磷浓度波动较大(0.04~0.20 mg/L),而SHBCF处理始终维持在0.02~0.04 mg/L的低水平,说明生物炭表现出强稳定的磷素迁移阻控能力。直至9月24日,SHBCF处理的总磷浓度仍显著低于SHCF处理 ($p < 0.05$),表明生物炭对果园土壤磷素淋失具有长期抑制作用。

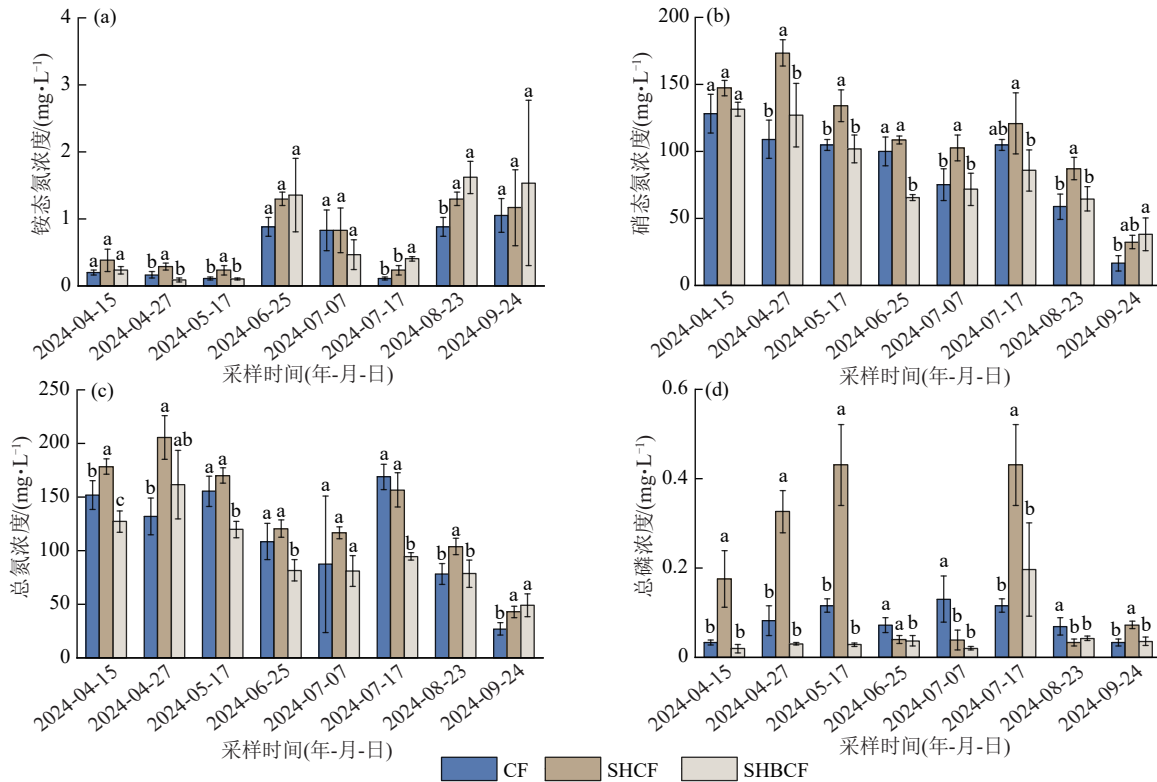


图 5 不同处理不同时间渗滤液氨态氮、硝态氮、总氮和总磷浓度

Fig. 5 Concentrations of ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, total nitrogen, and total phosphorus in leachate at different times under different treatments

2.4 桃园土壤理化性质

在整个生育期,SHBCF处理显著提高土壤pH,表现出较强的酸化缓解能力(图6a)。开花期0~20 cm土层pH达6.66,较CF和SHCF分别提高0.67和0.81个单位($p < 0.05$),表明生物炭中的碱性成分有助于中和土壤酸性。进入坐果期,SHCF处理在20~40 cm土层pH下降至5.74,显著低于CF,表明有机肥与化肥配施存在加剧土壤酸化的风险;而SHBCF在60~80 cm深层仍维持较高pH(6.73),说明其调节能力可延伸至剖面深层。至收获期,SHCF处理表层(0~40 cm)pH降至4.71~4.82,降幅较大(较CF下降1.7个单位),而SHBCF处理仍维持在6.06。进一步比较各处理间深层(40~80 cm)pH差异发现,SHBCF较SHCF显著提升0.3~1.1个单位($p < 0.05$),表明生物炭对整体土壤剖面酸化缓解效果显著。整体而言,各处理的土壤EC随土层深度逐渐降低。SHCF和SHBCF处理EC在不同生育期和不同深度土层均显著高于CF处理($p < 0.01$)(图6b)。在坐果期,SHBCF处理在0~20、20~40 cm土层EC较SHCF降低37.3%和17.0%($p < 0.05$),说明生物炭可能通过增强阳离子交换和吸附能力,减缓盐分在根际区的富集风险。

SHBCF处理显著提高表层铵态氮含量,尤其在开花期0~40 cm土壤铵态氮含量均高于CF和SHCF处理(图6c),可能与生物炭对铵态氮的吸附固定及其

改善微环境有关。值得注意的是,SHBCF在收获期60~80 cm土层铵态氮显著低于CF(降低50.7%),表明生物炭在抑制铵态氮淋失方面具有优势。在开花期,SHCF处理在0~40 cm土壤硝态氮含量较CF显著提高72.3%~73.2%,而SHBCF在0~40 cm土壤中的硝态氮含量较SHCF提高31.6%~51.9%($p < 0.05$)(图6d)。SHCF在40~60 cm土层硝态氮含量较CF提高82.4%,且深层(60~80 cm)硝态氮积累量增加24.4%,SHBCF处理的60~80 cm土层硝态氮含量较SHCF显著降低52.7%。说明生物炭施用不仅促进浅层硝态氮积累,同时有效控制其向土壤深层迁移,降低淋溶风险。在坐果期和收获期,SHBCF处理在表层硝态氮含量持续高于SHCF,提升幅度达17.5%~55.4%,进一步验证生物炭对速效氮素的保蓄效应。

开花期,SHCF处理在0~20 cm土层有效磷含量较CF显著提高45.6%($p < 0.05$),SHCF在40~60 cm深层土壤有效磷含量较CF激增616.6%。而SHBCF处理在0~40 cm土层有效磷含量较SHCF显著增加28.8%~80.4%($p < 0.05$),同时在40~80 cm土层显著低于SHCF23.8%~37.1%(图6e),表明生物炭可调节磷素在剖面中的垂直分布。坐果期与收获期的趋势与开花期一致,说明施用生物炭可以长期吸附土壤有效磷,增加表层土壤有效磷含量,抑制磷素向土壤深层迁移。

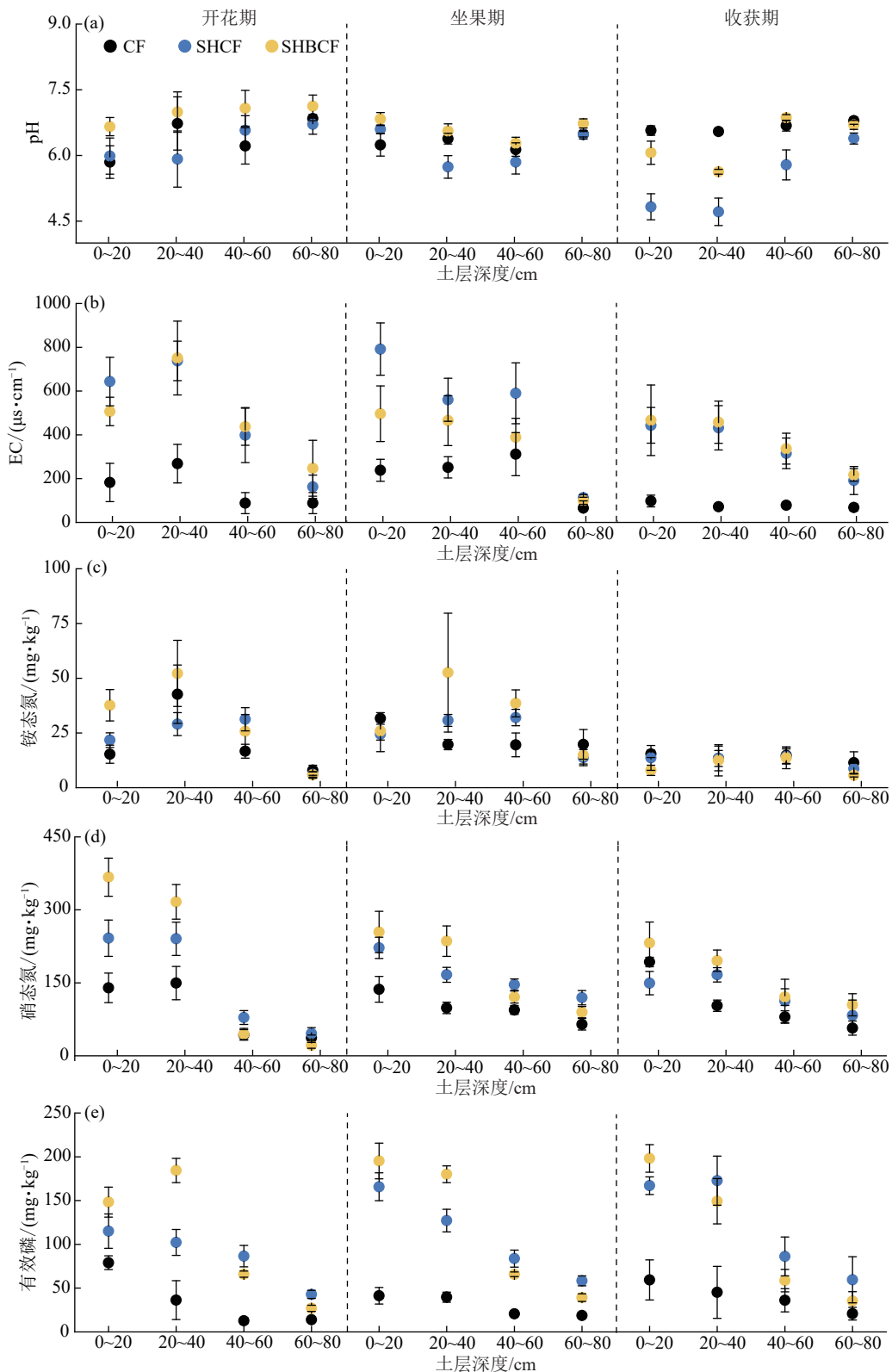


图 6 不同处理桃树不同生育期施肥沟内土壤 pH、EC、铵态氮、硝态氮和有效磷含量

Fig. 6 Soil pH, EC, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, and available phosphorus content in fertilization ditches at different growth stages of peach trees under different treatments

施肥沟外土壤 pH 呈现显著的时间动态性与空间异质性(图 7a)。整体而言,在开花期和坐果期,各施肥处理不同深度的土壤 pH 无显著差异。在收获期,SHCF 处理的不同土层 pH 较 CF 处理显著降低 0.26~0.87 个

单位,说明有机肥与化肥的联合施用在后期可能通过有机酸累积等途径加剧局部土壤酸化。而 SHBCF 与 SHCF 处理无显著差异。可能因生物炭扩散作用有限,因此其酸碱调控作用未能有效延伸至沟外区域。

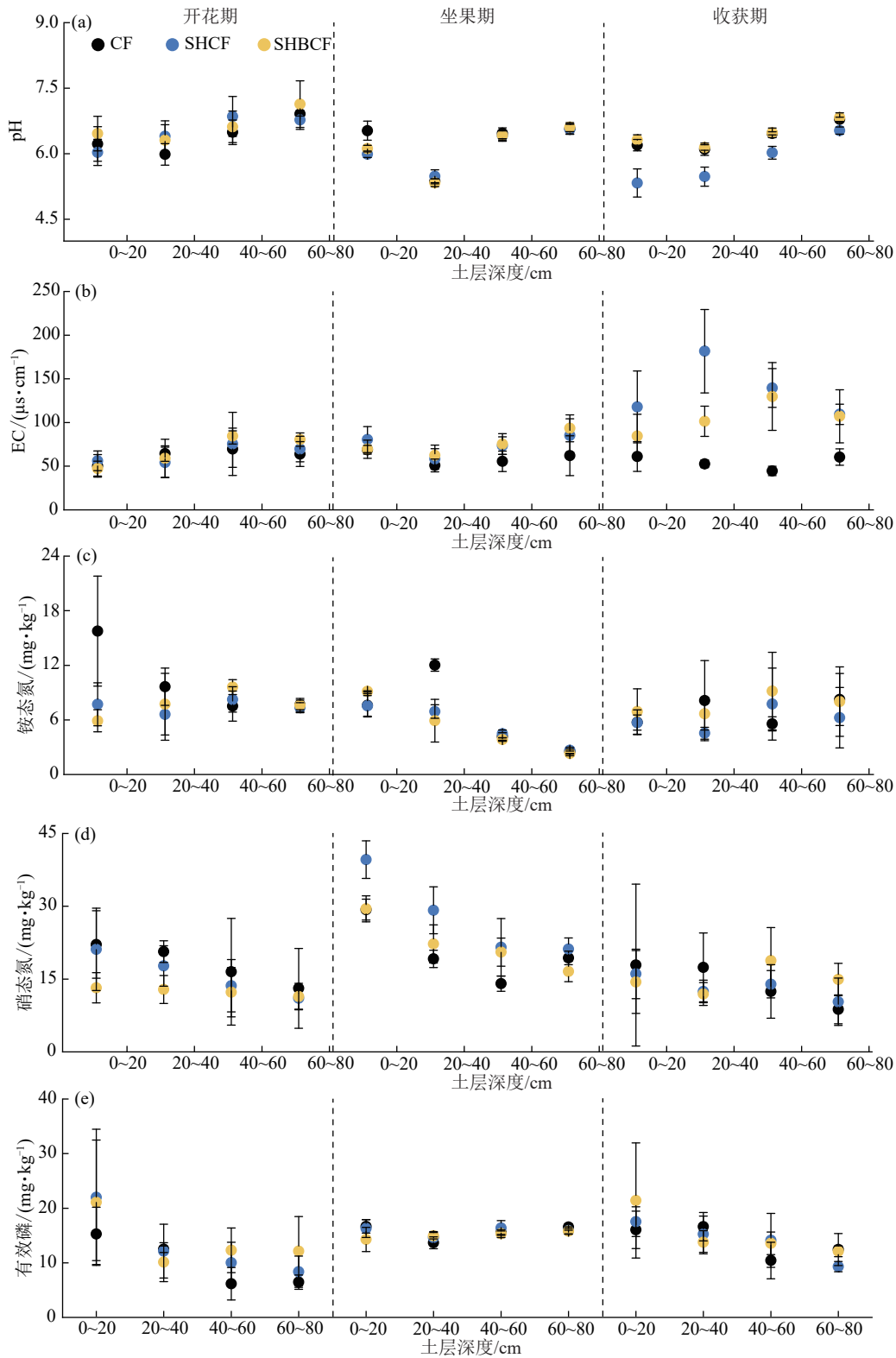


图7 不同处理桃树不同生育期施肥沟与桃树之间土壤pH、EC、铵态氮、硝态氮和有效磷含量

Fig. 7 Soil pH, EC, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, and available phosphorus content in soil between fertilization ditches and peach trees at different growth stages under different treatments

各处理在开花期与坐果期EC差异不显著,说明施肥初期溶解性离子的横向迁移尚处于缓慢扩散阶段。至收获期,SHCF处理的各土层EC显著高于CF,增幅达80.8%~244.5%,表明随着养分矿化与水分移动,部分溶解性盐类可迁移至沟外中远距离区

域(图7b)。值得注意的是,SHBCF处理在20~40 cm土层的EC值显著低于SHCF 78.1%,但在其余土层与SHCF无显著差异,提示生物炭可能在一定土层范围内降低水溶性盐分迁移强度,但其拦截作用存在剖面限制。

SHCF 处理在开花期 0~20 cm 与坐果期 20~40 cm 土层铵态氮含量分别较 CF 显著降低 51.0% 与 42.5%, 而 40~60 cm 土层则略有升高 (6.9%)。SHBCF 在 20~40 cm 铵态氮含量与 SHCF 相当, 但在 40~60 cm 显著低于 SHCF 14.1% ($p < 0.05$), 说明生物炭有助于阻控铵态氮向下层土壤迁移。收获期各处理间差异不显著 (图 7c)。硝态氮方面, 开花期 SHBCF 处理在 20~40 cm 土层含量显著低于 CF 60.6% ($p < 0.05$), 表明生物炭对初期硝态氮淋失具有一定拦截作用。坐果期, SHCF 处理在 0~60 cm 各层硝态氮显著高于 CF 35.1%~53.3%; 而 SHBCF 处理在 0~20、20~40、60~80 cm 土层均显著低于 SHCF (下降 27.8%~34.4%), 说明其对硝态氮具有良好的多层拦截效应。至收获期, 各处理间差异不显著 (图 7d)。整体来看, 各处理之间的施肥沟外有效磷含量在不同生育期均无显著差异 (图 7e), 说明肥料沟施对沟外区域磷素的影响范围有限, 可能因磷素迁移性低、吸附性强所致。

全生育期内, 施肥沟内外土壤 pH、硝态氮和有效磷均呈极显著正相关, 说明这些指标在横向空间上具有一致性变化趋势, 反映出施肥处理对沟内外土壤环境的联动影响。EC 和铵态氮的相关性未达显著水平 (表 2)。开花期, 施肥沟内外的 pH 和有效磷显著正相关; 坐果期, 仅硝态氮呈极显著正相关; 收获期, pH、EC 和有效磷均呈显著正相关。在垂直空间上, 表层 (0~20 cm) 土壤 pH 呈极显著正相关; 在 20~40 cm 土层中, 施肥沟外各指标相关性均不显著; 40~60 cm 施肥沟内外土壤 pH、铵态氮、硝态氮和有效磷均呈显著正相关;

60~80 cm 施肥沟内外土壤 pH、EC、铵态氮和有效磷均呈显著正相关。

表 2 施肥沟内和施肥沟外土壤在不同生育期和不同土层下各理化指标的相关性

Table 2 Correlation of physicochemical properties of soil inside and outside fertilization ditches at different growth stages and in different soil layers

生育期与 土层深度/cm	pH	EC	铵态氮	硝态氮	有效磷
全生育期	0.538***	0.007ns	-0.030ns	0.237**	0.290**
开花期	0.413**	0.246ns	-0.136ns	0.131ns	0.382**
坐果期	0.108ns	-0.079ns	0.127ns	0.604***	-0.209ns
收获期	0.859***	0.506***	-0.035ns	0.129ns	0.406**
0~20	0.586***	0.076ns	-0.091ns	-0.196ns	0.076ns
20~40	0.230ns	-0.019ns	-0.040ns	-0.222ns	-0.131ns
40~60	0.533***	0.132ns	-0.334*	0.337*	0.349*
60~80	0.784***	0.388*	-0.477**	0.413*	0.167ns

注: *、**和***分别表示在 $p < 0.05$ 、 $p < 0.01$ 、 $p < 0.001$ 水平上具有显著相关性; ns 表示相关性不显著。

2.5 桃子产量与净收益

由表 3 可知, SHBCF 的桃子产量在 2023 年与 CF、SHCF 处理无显著差异, 表明生物炭的加入在首年可能尚未充分发挥其对产量的增效作用。SHBCF 处理在 2024 年产量达 18.14 t/hm², 较 CF 和 SHCF 分别提高 23.2% 和 8.2% ($p < 0.05$)。反映出生物炭长期施用可显著增加果树产量。SHBCF 处理的肥料成本在 2024 年较 CF 提高 160.6%, 然而 2024 年 SHBCF 处理的净收益较 CF 提高 19.5%, 但与 SHCF 无显著差异。

表 3 2023 年和 2024 年桃子产量和净收益

Table 3 Peach yield and net income in 2023 and 2024

年份	处理	产量/ (t·hm ⁻²)	总收益/ (万元·hm ⁻²)	肥料成本/ (万元·hm ⁻²)	人工杂费/ (万元·hm ⁻²)	农药费/ (万元·hm ⁻²)	土地租赁费/ (万元·hm ⁻²)	净收益/ (万元·hm ⁻²)
2023	CF	12.61a	18.91a	1.05	1.20	0.30	0.90	15.46a
	SHCF	13.02a	19.53a	2.12	1.35	0.30	0.90	14.86a
	SHBCF	12.51a	18.77a	2.75	1.50	0.30	0.90	13.33a
2024	CF	14.45c	21.67c	1.05	1.20	0.30	0.90	18.22b
	SHCF	16.76b	25.14b	2.12	1.35	0.30	0.90	20.48a
	SHBCF	18.14a	27.21a	2.75	1.50	0.30	0.90	21.76a

注: 同列不同小写字母表示不同施肥处理间差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

2.6 桃子品质

2023 年和 2024 年各处理间硝酸盐含量和总酸度无显著差异 (表 4), 但 2024 年所有处理硝酸盐含量显著升高。这一变化可能与长期施肥导致的氮素沉积与土壤矿化作用增强有关。在 2023 年,

SHCF 处理的可溶性固形物含量显著高于 CF 和 SHBCF 处理, 而在 2024 年, SHBCF 处理可溶性固形物含量较 CF 处理显著增加 11.4%, 表明长期施用生物炭可能通过改善土壤结构和养分供应能力, 提升果实品质。

表 4 不同施肥处理的桃子品质

Table 4 Peach quality under different fertilization treatments

年份	处理	硝酸盐/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	可溶性固形物/ ($^{\circ}\text{Brix}$)	总酸度/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
2023	CF	41.03a	3.40c	3.95a
	SHCF	41.37a	4.25a	3.63a
	SHBCF	44.14a	3.73b	3.69a
2024	CF	131.84a	7.72b	1.47a
	SHCF	138.28a	7.85ab	1.62a
	SHBCF	126.99a	8.60a	1.50a

3 讨论

3.1 生物炭施用对桃园氮磷流失的影响及其调控机制

在农业面源污染防治研究中,生物炭的吸附固持作用被认为是阻断氮磷迁移的核心机制之一。本研究表明,在强降雨事件中,SHBCF处理的总磷浓度较SHCF和CF处理显著降低38.8%~88.1%(图3),这可能是由于生物炭表面铁/铝氧化物位点与磷酸根形成内球络合物,以及微孔结构对颗粒态磷的物理拦截^[17]。SHBCF处理通过生物炭的吸附缓冲效应,将总氮和总磷流失量控制在与CF相近水平(图4)。

在本研究中,桃园氮磷径流损失的动态监测结果(图3和图4)揭示不同施肥模式对养分迁移的显著差异。CF处理在首次强降雨中表现出较高的总氮浓度,可能与化肥氮素的速效释放特性直接相关,SHCF处理虽包含等量化肥投入(表1),但其首次降雨的总氮浓度较CF处理显著降低,反映有机肥对化肥氮素的初期吸附缓冲效应^[19]。然而后期SHCF的径流液的氮素流失量较CF显著增加或差异不显著。SHCF处理的总磷和总氮流失量较传统化肥处理增加近1倍(图4),在本研究中,并不是有机肥替代化肥,而是在化肥的基础上增施有机肥,说明有机肥过量施用其中的颗粒态磷和水溶性有机磷在径流冲刷下易形成突发性污染负荷。生物炭在与有机肥配施时,能有效减缓这些污染负荷的突发性释放,减少面源污染的风险。

SHCF处理中渗漏液硝态氮浓度在绝大多数时期均显著高于CF处理,可能是由于有机肥的大量投入带入更多的氮素。而SHBCF处理较SHCF处理显著降低25.9%~39.5%,表明生物炭的加入能有效抑制硝态氮的流失。直至9月24日,SHBCF处理硝态氮浓度反超CF处理129.1%。可能与生物炭吸附位点饱和后的解吸过程有关^[20]。生物炭的吸附作用并非单向的,而是具有时间和环境依赖性的。因此,在长期施用生物炭的过程中,需要进一步研究其吸附—解吸的动态平衡,以便精确预测其对氮素流失的

控制效果。总体来看,SHBCF处理对磷素的阻渗效果显著优于氮素。在4月27日和5月17日总磷浓度较SHCF显著降低90.7%~93.3%,SHBCF处理总磷浓度始终 $<0.04\text{ mg/L}$,而SHCF处理波动达 $0.04\sim 0.20\text{ mg/L}$ 。至收获期,SHBCF处理总磷浓度仍较SHCF低58.3%。已有研究^[21]表明,生物炭可吸附磷酸盐并减少其淋溶量;也有研究^[22]表明,当向生物炭中添加生物可降解有机质时,即有机肥与生物炭配施下磷的吸附能力显著增强,可能是由于填充氧化生物炭的微孔,从而形成对磷酸盐的不可逆吸附。因此,生物炭与有机肥的配施不仅能改善土壤养分供应,还能有效减少磷素向水体迁移。

3.2 生物炭施用对桃园土壤理化性质的影响

从土壤理化性质来看,生物炭的添加显著改善土壤酸碱度和养分分布。SHBCF处理的表层土壤pH较CF和SHCF分别提高0.67、0.81个单位。而在本研究中的杉木屑生物炭pH为6.65,但其阳离子交换量为 17.8 cmol/kg 。已有研究^[23]表明,当生物炭的pH接近土壤pH时,生物炭的碱度将不再对土壤pH产生明显的影响。在本研究中添加生物炭后pH增加的机制之一可能是由于生物炭中大量的灰分和碱性阳离子。生物炭碱性阳离子的释放,特别是 Ca^{2+} 和 K^{+} ,可在土壤胶体负电荷位点置换可交换性 Al^{3+} 和 H^{+} ,有效增加土壤pH^[24]。另一个可能的机制是由生物炭添加引发的有机阳离子的脱羧化,因为微生物对有机阳离子的攻击增加,微生物可能会消耗土壤溶液中多余的 H^{+} ,从而增加土壤pH^[23],在以后的研究中应当继续关注生物炭对桃园土壤微生物的影响。SHCF处理在收获期出现表层土壤酸化(pH降至4.82),可能与有机肥矿化过程中有机酸积累有关^[25]。已有研究^[26]表明,葡萄园中开沟施用有机肥可以显著降低土壤pH,而在本研究中生物炭的pH缓冲效应有效缓解因沟施有机肥导致的土壤酸化。在氮素管理方面,SHBCF处理显著提高表层土壤硝态氮含量,并有效减少速效氮向深层土壤的迁移,表明其在氮素淋失控制方面具有重要作用。在有效磷的调控方面,SHBCF处理通过调节磷的垂直分布,显著提高表层土壤(0~40 cm)的有效磷含量,降低40~80 cm土层有效磷含量,减少磷向深层土壤的迁移。综上所述,SHBCF处理不仅能够有效改善土壤pH,还能通过增加表层土壤中有效磷和硝态氮的含量,降低深层土壤速效养分含量,可有效控制氮磷淋失,为土壤酸化治理和农业可持续发展提供重要的技术支持。

3.3 生物炭施用对果实产量和品质的影响

SHBCF 处理在第 2 a(2024 年)产量较 CF 和 SHCF 分别提高 23.2% 和 8.3%。在本研究中,施用生物炭降低氮磷径流和渗漏流失,在开花期和坐果期显著提高表层土壤硝态氮和有效磷含量。已有研究^[27]表明,生物炭添加可通过促进微生物活性,并借助对养分的吸附/解吸作用实现养分的持续供应,进而显著提高作物产量与肥料利用率。生物炭提升土壤 pH 至 6.66,缓解 SHCF 处理导致的土壤酸化(pH 降至 4.82),土壤 pH 已被证明对土壤微生物成分有很大影响,接近中性的土壤 pH(6.5~7.0)更有利于微生物群落的生长,促进桃树对养分的吸收利用^[28]。此外,SHBCF 处理的桃子可溶性固形物含量较 CF 显著提高 11.4%,表明生物炭与有机肥-化肥的配施不仅改善土壤供肥能力,还优化果实品质。然而,本研究仅覆盖 2 a 的监测周期,生物炭的长期环境效应和经济效益仍需进一步跟踪评估。综上所述,生物炭与有机肥-化肥配施能够有效调控果园土壤氮磷时空分布,减少面源污染风险,同时提升土壤质量和作物产量。未来研究需进一步探究生物炭在不同土壤类型和气候条件下的作用机制,优化生物炭施用量和施用方式,为果园生态系统的绿色低碳发展提供更完善的理论和实践依据。

4 结论

1)在有机肥与化肥配施的基础上,添加生物炭可显著减少果园径流和渗漏的氮磷流失,降低有机肥与化肥配施的氮磷流失风险。

2)施用生物炭可显著提升果园表层土壤 pH,缓解由于沟施有机肥导致的土壤酸化;提高表层土壤速效氮磷浓度,降低深层土壤速效氮磷浓度,抑制速效养分向深层土壤迁移。

3)施用生物炭可显著提升桃子产量、品质及净收益,产量较有机肥与化肥配施处理显著提高 8.2%,净收益较仅施化肥处理显著提高 19.5%。因此,生物炭-有机肥-化肥联用技术兼具环境与经济效益,是果园绿色施肥的可行模式,但其长期效应(如吸附饱和后的养分释放、微生物群落响应)需结合多区域、长周期试验进一步验证。

参考文献:

[1] 安志装,索琳娜,刘宝存.我国农业面源污染研究与展望[J].植物营养与肥料学报,2024,30(7):1422-1436.
AN Z Z, SUO L N, LIU B C. Prospect and research on agricultural non-point source pollution in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 30(7): 1422-1436.

[2] MILOŠEVIĆ T, MILOŠEVIĆ N, MLADENOVIĆ J. The influence of organic, organo-mineral and mineral fertilizers on tree growth, yielding, fruit quality and leaf nutrient composition of apple cv. 'Golden Delicious Reinders'[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 297: e110978.
[3] ZHAO H Y, LAKSHMANAN P, WANG X Z, et al. Global reactive nitrogen loss in orchard systems: A review[J]. Science of the Total Environment, 2022, 821: e153462.
[4] SONG K, QIN Q, YANG Y F, et al. Drip fertigation and plant hedgerows significantly reduce nitrogen and phosphorus losses and maintain high fruit yields in intensive orchards[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2023, 22(2): 598-610.
[5] 罗自威,陶晶霞,侯凯捷,等.养分优化管理实现蜜柚高产高效和降低碳排放[J].植物营养与肥料学报,2022, 28(4):688-700.
LUO Z W, TAO J X, HOU K J, et al. Optimized nutrient management improves fruit yield and fertilizer use efficiency and reduces carbon emissions in pomelo production [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28 (4):688-700.
[6] MA Y C, LI Z W, DENG C X, et al. Effects of tillage-induced soil surface roughness on the generation of surface-subsurface flow and soil loss in the red soil sloping farmland of southern China[J]. Catena, 2022, 213: e106230.
[7] ZHANG M H, SUN D Y, NIU Z R, et al. Effects of combined organic/inorganic fertilizer application on growth, photosynthetic characteristics, yield and fruit quality of *Actinidia chinensis* cv 'Hongyang'[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 22: e00997.
[8] LIU Z J, RONG Q L, ZHOU W, et al. Effects of inorganic and organic amendment on soil chemical properties, enzyme activities, microbial community and soil quality in yellow clayey soil[J]. PLoS One, 2017, 12(3): e0172767.
[9] 宋科,秦秦,郑宪清,等.水肥一体化结合植物篱对减缓果园土壤氮磷地表径流流失的效果[J].水土保持学报, 2021, 35(3):83-89.
SONG K, QIN Q, ZHENG X Q, et al. Effect of drip fertigation combined with plant hedgerows on reducing nitrogen and phosphorus loss by soil surface runoff in orchard [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3):83-89.
[10] DING W T, ZVOMUYA F, CAO M Y, et al. Ground cover management improves orchard soil moisture content: A global meta-analysis [J]. Journal of Hydrology, 2024, 633: e130710.
[11] ZHAO Y F, HU Z J, LU Y P, et al. Facilitating mitigation of agricultural non-point source pollution and improving soil nutrient conditions: The role of low temperature

- co-pyrolysis biochar in nitrogen and phosphorus distribution[J]. *Bioresource Technology*, 2024, 394: e130179.
- [12] WANG H X, XU J L, SHENG L X. Preparation of straw biochar and application of constructed wetland in China: A review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 273: e123131.
- [13] 余辉, 方荣杰, 余佳峻, 等. 生物炭对西南喀斯特区石灰土水分入渗特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(5): 225-235.
- YU H, FANG R J, YU J J, et al. Effect of biochar on water infiltration characteristics of limestone soil in southwest karst area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(5): 225-235.
- [14] 兰宇, 孟军, 韩晓日, 等. 生物炭基产品及其对土壤培肥改良效应的研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(7): 1396-1412.
- LAN Y, MENG J, HAN X R, et al. Advances in research on biochar-based products and their effects on soil fertility improvement[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(7): 1396-1412.
- [15] 刘月芹, 马泉, 陈凤, 等. 生物炭基菌剂的制备及应用效果研究[J]. *西安工程大学学报*, 2025, 39(1): 26-32.
- LIU Y Q, MA Q, CHEN F, et al. Research on the preparation and application effect of biochar-based bacterial agent[J]. *Journal of Xi'an Polytechnic University*, 2025, 39(1): 26-32.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. *Soil and agricultural chemistry analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [17] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 中国环境科学出版社, 2002: 254-258.
- Editorial Committee of Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods, State Environmental Protection Administration of China. *Water and wastewater monitoring and analysis methods* [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 254-258.
- [18] MAGHSOODI M R, HOSSEINI H, GHODSZAD L, et al. Nutrient recovery in pyrolysis biochars for agricultural applications-Biochemical compositions and nutrient extraction techniques [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2025, 218: e108237.
- [19] 马纪龙, 姬丽, 马琨, 等. 有机肥等氮量替代化肥对玉米氮素吸收利用及土壤氮素淋失的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2025, 33(2): 286-300.
- MA J L, JI L, MA K, et al. Effects of substituting chemical nitrogen by organic nitrogen on nitrogen uptake and utilization of maize and soil nitrogen leaching[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2025, 33(2): 286-300.
- [20] FENG B C, JIN R S, WANG J M, et al. Application of biochar from desorption perspective: Targeting adsorption properties of biochar and its desorption-recovery ability[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2025, 218: 674-681.
- [21] BANIK C, BAKSHI S, ANDERSEN D S, et al. The role of biochar and zeolite in enhancing nitrogen and phosphorus recovery: A sustainable manure management technology[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 456: e141003.
- [22] YANG L, WU Y C, WANG Y C, et al. Effects of biochar addition on the abundance, speciation, availability, and leaching loss of soil phosphorus [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 758: e143657
- [23] WEI B L, PENG Y C, JEYAKUMAR P, et al. Soil pH restricts the ability of biochar to passivate cadmium: A meta-analysis[J]. *Environmental Research*, 2023, 219: e115110.
- [24] ARWENYO B, VARCO J J, DYGERT A, et al. Contribution of modified P-enriched biochar on pH buffering capacity of acidic soil [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 339: e117863.
- [25] ADEKIYA A O, EJUE W S, OLAYANJU A, et al. Different organic manure sources and NPK fertilizer on soil chemical properties, growth, yield and quality of okra [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): e16083.
- [26] WU L N, JIANG Y, ZHAO F Y, et al. Increased organic fertilizer application and reduced chemical fertilizer application affect the soil properties and bacterial communities of grape rhizosphere soil [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): e9568.
- [27] MARCIŃCZYK M, OLESZCZUK P. Biochar and engineered biochar as slow- and controlled-release fertilizers [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 339: e130685.
- [28] WANG R, ZHANG H C, SUN L G, et al. Microbial community composition is related to soil biological and chemical properties and bacterial wilt outbreak [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): e343.