

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.011.

苗欢, 乔云发, 唐煜杰, 等. 短时暴雨条件下秸秆和生物炭还田对水稻磷素表观利用率的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 241-246.

Miao Huan, Qiao Yunfa, Tang Yujie, et al. Effects of Straw and Biochar Return on the Apparent Utilization Efficiency of Phosphorus in Rice Under the Condition of Short-Time Rainstorm[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 241-246.

短时暴雨条件下秸秆和生物炭还田对 水稻磷素表观利用率的影响

苗欢, 乔云发, 唐煜杰, 冯茜, 岳娅, 薛海清, 苗淑杰

(南京信息工程大学 应用气象学院, 南京 210044)

摘要: [目的] 探究短时暴雨对水稻磷素流失的影响, 阐明秸秆和生物炭还田下水稻磷素的利用效果, 为稻田土壤磷素管理提供科学依据。[方法] 采用盆栽试验和人工模拟降雨的方式, 设置暴雨强度为 4 mm/h(20 h) 和 80 mm/h(1 h), 选取秸秆(NPK+S) 和生物炭(NPK+B) 两种还田物料, 分析了不同处理对水稻磷素含量、积累量和表观利用率的影响。[结果] 短时暴雨条件下, 添加秸秆和生物炭能提高水稻磷素含量、积累量和表观利用率。与 NPK 处理相比, NPK+B 处理根 TP 含量增加了 41.84%, 秸秆 TP 含量增加了 38.43%, NPK+S 和 NPK+B 处理水稻磷素积累量增加了 21.95%, 60.14%, NPK+S 和 NPK+B 处理水稻表观利用率增加了 21.96%, 60.10%, 均达到显著水平。长时暴雨条件下, 与 NPK 处理相比, NPK+S 和 NPK+B 处理根 TP 含量增加了 28.67%, 33.59%, NPK+B 处理秸秆 TP 含量增加了 48.52%, NPK+S 和 NPK+B 处理籽粒 TP 含量增加了 17.15%, 39.28%, NPK+S 和 NPK+B 处理水稻体内磷素积累量增加了 35.70%, 74.71%, NPK+S 和 NPK+B 处理水稻表观利用率增加了 35.66%, 74.70%, 均达到显著水平。[结论] 不同暴雨强度条件下, 添加秸秆和生物炭均能够有效固持水稻磷素养分, 提高磷素表观利用率, 降低养分流失风险, 施加生物炭的效果优于秸秆。而且, 在相同降雨量前提下, 长时暴雨的固持效果要好于短时暴雨。

关键词: 短时暴雨; 水稻; 磷素表观利用率; 秸秆还田; 生物炭

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0241-06

Effects of Straw and Biochar Return on the Apparent Utilization Efficiency of Phosphorus in Rice Under the Condition of Short-Time Rainstorm

Miao Huan, Qiao Yunfa, Tang Yujie, Feng Qian, Yue Ya, Xue Haiqing, Miao Shujie

(School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the effect of short-term rainstorm on phosphorus loss of rice, clarify the utilization effect of rice phosphorus under straw and biochar return, and provide scientific basis for soil phosphorus management in paddy fields. [Methods] Based on pot experiment and artificial rainfall simulation, we set the rainstorm intensities respectively at 4 mm/h(20 h) and 80 mm/h(1 h), selected straw(NPK+S) and biochar(NPK+B) as two kinds of returning materials in order to analyze the effects of different treatments on phosphorus content, accumulation and apparent utilization efficiency of rice. [Results] Under the condition of short-time rainstorm, the addition of straw and biochar can improve the phosphorus content, accumulation, apparent utilization efficiency of rice. Compared with the NPK treatment, the NPK+B treatment increases the TP content of root by 41.84% and straw by 38.43%, the NPK+S and NPK+B treatments increase the phosphorus accumulation in the rice by 21.95% and 60.14%, the apparent utilization efficiencies of rice in the NPK+S and NPK+B treatments increase by 21.96% and

收稿日期: 2022-06-14

修回日期: 2022-10-14

资助项目: 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金(BE2022312); 江苏省农业科技自主创新资金[CX(21)3170]

第一作者: 苗欢(1998—), 女, 黑龙江佳木斯人, 硕士研究生, 研究方向为农业气象。E-mail: miaohuan2020@163.com

通信作者: 苗淑杰(1975—), 女, 黑龙江讷河人, 博士, 教授, 主要从事土壤-作物对气候变化的适应机制研究。E-mail: sjmiao2015@nuist.edu.cn

<http://stbcj.paperonice.org>

60.10%, all reach to the significant level. Under the condition of long-time rainstorm, compared with the NPK treatment, the NPK+S and NPK+B treatments increase the root TP content by 28.67% and 33.59%, the TP contents of the straw NPK+B treatment increases by 48.52%, NPK+S and NPK+B treatments increase grain TP content by 17.15% and 39.28%, NPK+S and NPK+B treatments increase phosphorus accumulation by 35.70% and 74.71%, apparent utilization efficiencies of NPK+S and NPK+B treatments increase by 35.66% and 74.70%, they all reach to the significant level. [Conclusion] Under different rainstorm intensity conditions, the addition of straw and biochar can effectively retain the phosphorus nutrient of rice, improve the apparent utilization efficiency of phosphorus, and reduce the risk of nutrient loss. The effects of adding biochar are better than those of adding straw. Moreover, based on the premise of the same amount of rainfall, the retention effects of long-time rainstorm are better than that of short-time rainstorm.

Keywords: short-time rainstorm; rice; apparent utilization efficiency of phosphorus; straw return; biochar

水稻是我国南方主要粮食作物,磷肥的施用有效缓解土壤磷缺乏,改善了水稻对磷的吸收利用,是保证水稻增产、稳产的重要农业举措^[1-2]。水稻田磷肥用量过高或管理不当会直接降低磷肥表观利用效率和增加农业面源污染风险。我国湖泊、水库等地表水体中的磷大部分来自农业面源污染。第一次全国污染源普查公报的结果显示^[3],种植业总磷年流失量为10.87万t,占农业源的38.18%,主要原因是农田中的肥料磷仅有10%~20%为农作物所利用。磷从农田土壤向地表水体的迁移主要受降雨-径流的驱动,当降雨径流发生时,土壤磷以水溶态和颗粒态形式随径流向水体迁移,以农田土壤磷流失为主的农田非点源污染是造成水体富营养化日趋严重的重要原因之一^[4]。农田土壤磷素径流流失除了与土壤本身性质有关外,还受到雨强、坡度、土地利用方式、植被覆盖以及种植模式等因素的影响^[5]。已有研究表明,降雨量和降雨强度是影响土壤磷素流失的直接因素^[6-7],短时暴雨对土壤磷素流失影响显著。

短时暴雨是指短时间内降水量达到或超过暴雨的强降水^[8],具有突发性强、局地性、单点性、对农田养分流失大等特点。夏季江苏省暴雨频发,雨强较大且集中,多以短时暴雨为主^[9]。稻田施用磷肥后,不能完全被作物吸收利用,当短时暴雨发生时,引起土壤磷素流失,严重影响磷素表观利用率。研究短时暴雨对稻田地表水磷素变化规律对控制稻田磷素输出、减轻面源污染、提高肥料利用率具有重要意义。为了降低和有效控制水稻田磷素损失,提高磷素表观利用率,前人已经做了一些研究。整体来看,秸秆还田和施加生物炭是两个比较有效的途径。秸秆还田作为一项重要有机培肥措施,改善土壤结构,蓄水保墒、减少地表径流,提高作物磷肥表观利用率^[10],增加作物产量。生物炭是由生物质在缺氧条件下高温热解生成的产物,因其巨大的比表面积和丰富的官能团结构,作为吸附剂受到广泛

关注^[11]。生物炭对水溶液中的磷也有良好的吸附性能,生物炭不但能增加土壤团聚体数量,而且能够提高作物对土壤有效磷的利用效率^[12]。研究表明,向土壤施加生物炭能够增加土壤磷素含量,提高土壤磷素有效性^[13]。可见,添加生物炭是提高水稻磷素表观利用率的又一个有效途径。农田磷素的流失与降雨强度密切相关。目前,国内外已重视暴雨引起稻田土壤磷素流失的影响,并进行了秸秆和生物炭还田对水稻磷素表观利用率的影响研究。然而,针对不同暴雨强度与还田物料对稻田磷素流失规律的影响研究还很薄弱。本研究以水稻田为研究对象,通过模拟相同降雨量,不同降雨强度(短时暴雨和长时暴雨),研究不同暴雨强度条件下,秸秆和生物炭还田对水稻磷素表观利用率的影响,为合理利用秸秆和生物炭应对暴雨引起的稻田磷素流失影响研究提供依据,实现稻田磷素高效利用和减少农业面源污染。

1 材料与方法

1.1 试验区基本概况

盆栽模拟试验在南京信息工程大学农业气象试验站(32.0°N, 118.8°E)进行,试验站位于亚热带湿润气候区,年均气温15.6℃,降水量1100mm。供试土壤质地为壤质黏土(黏粒含量26.1g/kg),土壤类型为水稻土,pH值为6.2,全氮1.45g/kg,有机碳19.4g/kg,速效磷16.2mg/kg,速效钾112.6mg/kg。供试水稻品种为扬粳805,生物炭为小麦秸秆烧制而成(购于河南誉中奥农业农业科技有限公司),含碳量650g/kg,pH值为10.24,小麦秸秆还田。

1.2 试验设计

水稻于5月20日浸种,5月24日播种,6月20日移栽。所用PVC桶(高40cm,直径29cm),每盆装土14.1kg。肥料分别在6月22日施基肥,肥料为复合肥(N,P₂O₅,K₂O质量比为15:15:15),施肥

量为 0.55 g/kg;7 月 5 日分蘖肥,尿素施肥量为 0.06 g/kg;8 月 10 日施穗肥,尿素施肥量为 0.06 g/kg。

试验设置两个因素,模拟暴雨设置两个暴雨强度,分别为长时暴雨(4 mm/h)和短时暴雨(80 mm/h),其中 4 mm 降雨 20 h,80 mm 降雨 1 h,降雨设备为高空喷淋模拟降雨;另一个为还田物料,设 3 个处理,分别是对照(NPK),秸秆还田(NPK+S),生物炭(NPK+B),每种处理设置 3 个重复,秸秆和生物炭于移栽前施入土壤。根据江苏省近 10 a 暴雨发生时间和强度,在水稻分蘖中期进行一次模拟暴雨。所有水样采集,均用移液管吸取水面下 5 cm 水样 50 ml 放入离心管中。

1.3 测定项目

水稻成熟期取样,测定根、秸秆和籽粒的生物量,烘干样粉碎备用。

1.4 数据处理与分析

$$W = g \times g_p + r \times r_p + s \times s_p \tag{1}$$

$$P = p_a / p_r \times 100\% \tag{2}$$

式中:W 为磷素积累量(g/盆);g 为籽粒生物量;g_p 为籽粒磷含量;r 为根部生物量;r_p 为根部磷含量;s 为秸秆生物量;s_p 为秸秆磷含量;P 为磷素表观利用

率(%);p_a 为植物吸磷量;p_r 为磷肥用量。

采用 Excel 2016 软件整理数据,SAS 8.0 软件对数据进行双因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 水稻生物量

暴雨强度显著影响水稻生物量积累(表 1),暴雨强度对水稻秸秆生物量积累有阻碍作用。短时暴雨后,NPK,NPK+S 和 NPK+B 处理秸秆分别降低了 9.92%,13.89%,19.83%,而对根和籽粒影响不显著。长时暴雨后,与 NPK 处理相比,NPK+S 处理根、秸秆和籽粒分别增加了 19.26%,9.67%,16.45%,NPK+B 处理根、秸秆和籽粒分别增加了 32.42%,23.23%,24.97%;短时暴雨过后,与 NPK 处理相比,NPK+S 处理根和籽粒分别增加了 16.08%,11.34%,NPK+B 处理根和籽粒分别增加了 31.19%,19.12%,但 NPK+S 处理和 NPK+B 处理对秸秆影响不显著。由此可见,暴雨强度和还田物料分别对生物量产生显著影响,但两者交互作用没有显著影响,添加秸秆和生物炭可以有效减少磷素的流失,有助于水稻生物量的积累。

表 1 暴雨强度对水稻生物量的影响

Table 1 Effects of rainstorm intensities on rice biomass					g/盆
暴雨强度	还田物料	根	秸秆	产量	总量
长时暴雨	NPK	20.77±0.27b	63.33±1.99bc	19.91±0.4e	104.00±1.35d
	NPK+S	24.77±1.50ab	69.62±1.84ab	23.19±0.17bc	117.57±0.93b
	NPK+B	27.50±1.33a	74.47±2.34a	24.89±0.21a	126.86±0.97a
短时暴雨	NPK	20.73±0.38b	54.44±1.15d	19.70±0.50e	93.53±1.79e
	NPK+S	24.07±0.54ab	57.07±0.84cd	21.93±0.28cd	104.61±1.55d
	NPK+B	27.20±0.86a	59.71±0.59cd	23.47±0.34ab	111.27±0.95c
F 值					
暴雨强度(R)		0.20	95.39**	12.12**	158.85**
还田物料(M)		24.93**	14.75**	84.99*	109.57**
R * M		0.06	1.93	1.87	4.30**

注:同列不同小写字母表示不同处理间在(p<0.05)存在显著差异。* 表示 p<0.05 差异显著,** 表示 p<0.01 差异极显著。

2.2 水稻磷素含量

短时暴雨降低了水稻根、秸秆和籽粒中磷含量,NPK+S 处理对根和籽粒差异显著。暴雨强度对水稻根、秸秆和籽粒中磷含量的影响见图 1。从图中可看出,相较于长时暴雨,短时暴雨后,NPK,NPK+S,NPK+B 处理分别降低了水稻籽粒中磷含量 7.83%,8.12%,10.67%,NPK+S 处理降低了水稻根部磷含量为 17.94%,具有显著差异(p<0.05)。而 NPK+S 和 NPK+B 处理对水稻秸秆不显著。长时暴雨后,NPK+S 和 NPK+B 处理比 NPK 处理籽粒 TP 含

量增加了 17.15%,39.28%,NPK+S 和 NPK+B 处理比 NPK 处理秸秆 TP 含量增加了 18.66%,48.52%,NPK+S 和 NPK+B 处理比 NPK 处理根 TP 含量增加了 28.67%,33.59%;短时暴雨后,NPK+S 和 NPK+B 处理籽粒 TP 含量增加了 16.77%,34.99%,NPK+S 和 NPK+B 处理比 NPK 处理秸秆 TP 含量增加了 10.71%,38.43%,NPK+S 处理和 NPK+B 处理比 NPK 处理根 TP 含量增加了 10.71%,41.84%。由此可见,施加秸秆和生物炭可促进水稻对磷素的吸收,水稻磷含量有所升高。

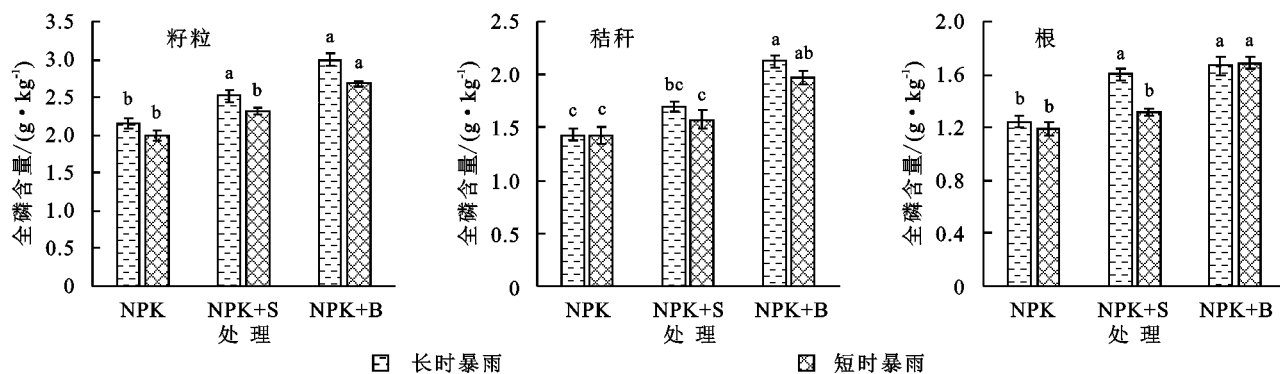


图1 暴雨强度对水稻全磷含量的影响

Fig. 1 Effect of rainstorm intensity on total phosphorus content in rice

2.3 水稻磷素积累量

短时暴雨不利于水稻磷素的积累,如图2所示,相较于长时暴雨,短时暴雨后,NPK,NPK+S和NPK+B处理分别降低了水稻磷素积累量11.41%,20.38%,18.80%,各处理磷素积累量均表现为NPK+B>NPK+S>NPK。长时暴雨后,与NPK处理相比,NPK+S和NPK+B处理的磷素积累量增加了35.70%,74.71%,NPK+B比NPK+S处理的水稻磷素积累量增加了28.75%;短时暴雨后,与NPK处理相比,NPK+S和NPK+B处理的磷素积累量增加了21.95%,60.14%,NPK+B比NPK+S处理的水稻磷素积累量增加了31.31%。秸秆还田后水稻磷素积累量是NPK处理的1.2倍,添加生物炭后,水稻磷素积累量是NPK处理的1.6倍。结果表明,短时暴雨后,水稻磷素积累量较低,但是添加秸秆和生物炭处理后,水稻磷素积累量有所增加。两种降雨强度下,添加秸秆和生物炭均有显著性差异($p<0.05$),且添加生物炭的效果最好。

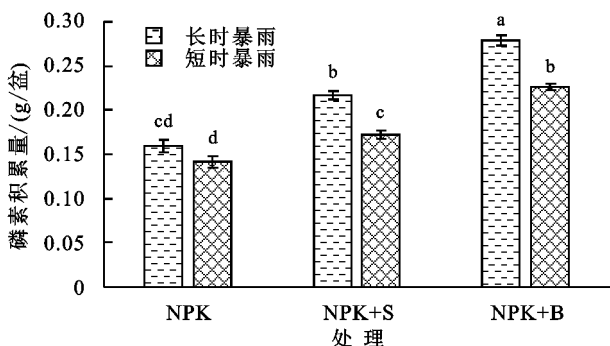


图2 暴雨强度对水稻磷素积累量的影响

Fig. 2 Effect of rainstorm intensity on phosphorus accumulation in rice

2.4 水稻磷素表观利用率

短时暴雨降低水稻磷素表观利用率,为11.4%~20.4%(图3)。暴雨强度对NPK+B和NPK+S处理影响显著,而对NPK处理影响不显著。水稻磷素表观利用率整体表现为NPK+B>NPK+S>NPK,

短时暴雨后,施加生物炭处理下水稻磷素表观利用率更好一些,远高于对照处理。长时暴雨后,与NPK处理相比,NPK+S和NPK+B处理的水稻磷素表观利用率分别提高35.66%,74.70%,NPK+B比NPK+S处理的水稻磷素表观利用率提高28.77%,短时暴雨后,与NPK处理相比,NPK+S和NPK+B处理磷素表观利用率分别提高21.96%,60.10%;其中,NPK+B比NPK+S处理的水稻磷素表观利用率提高了31.27%。结果表明,短时暴雨后,在土壤上进行秸秆和生物炭还田,可显著提高水稻对土壤磷素的吸收利用,秸秆和生物炭处理下均有显著性差异($p<0.05$)。

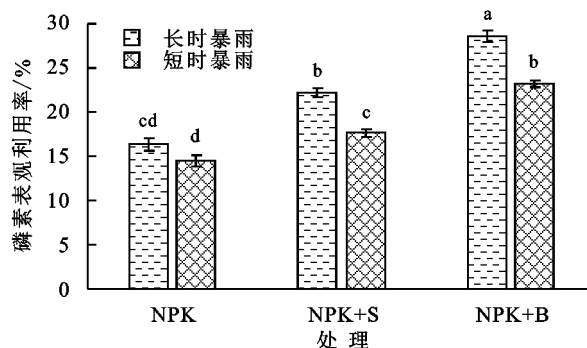


图3 暴雨强度对水稻磷素表观利用率的影响

Fig. 3 Effect of rainstorm intensity on phosphorus apparent utilization efficiency in rice

3 讨论

暴雨强度是影响磷素流失的主要因素,且暴雨强度越大,磷素流失量越大,利用率就越低^[14]。在不同暴雨强度条件下,暴雨强度越大,磷素流失量越大,且流失量与暴雨强度呈正相关关系,这与张晓花等^[15]的研究相同。这可能是因为暴雨强度越大,会使田面水养分的浓度增加,从而使磷素流失的风险增加^[16]。

施用秸秆和生物炭可提高作物生物量、产量和磷素利用率,研究结果与Zhang等^[17]得出一致的结论。农田施用秸秆和生物炭是农业资源循环利用的一项重要举措,秸秆还田处理能够减少稻田地表径流量,

武爱莲等^[18]研究发现,这是因为秸秆还田保护了土壤的良好结构,增加土壤的蓄水能力和土壤含水量,使土壤保持较高的入渗速率和抗冲性,抑制水分的蒸发。同时,均匀覆盖表土可减弱雨滴的动能,防止雨滴击溅,阻隔雨水与土壤的直接击打作用。秸秆的添加又增加地表糙率度,阻延流速,降低水流能量,减轻降雨对土壤的剥离作用^[19],使磷素流失量降低。肥料表观利用率是表示养分利用率的常用指标,通过产量与施肥量的关系来描述作物对肥料的利用率^[20]。两种暴雨强度条件下,施用秸秆和生物炭能够提高根、秸秆和籽粒的磷素含量、积累量以及磷素表观利用率。Strelko等^[21]研究表明,生物炭可通过对磷等营养元素的强烈吸附,将它们固定在土壤的表层,从而促进水稻生长、营养物质的吸收、干物质的积累和提高磷肥表观利用率。

本研究结果表明秸秆和生物炭还田可减少磷素的流失,增加水稻根、秸秆和籽粒的磷素含量,提高磷素的积累量和磷素表观利用率,对生物量具有促进作用,有显著的增产效果,还能缓解土壤养分供应不足的情况。其中,施用生物炭处理影响显著,这是因为生物炭抑制土壤中可溶性磷与其他离子的结合,提高磷肥表观利用率,促进植物对磷的吸收^[22]。生物炭能缓慢释放自身营养元素补充土壤养分含量,疏松结构有利于土壤肥力保持^[23],施用生物炭促进了水稻各组织对磷素的吸收。秸秆还田补充了农田生态系统的土壤养分,微生物迅速繁殖,通过调节土壤与化肥养分的释放强度和速率,促进土壤养分在水稻体内的代谢^[24],经由根系、茎叶向籽粒转运,提高作物磷素积累量。因此,施用秸秆和生物炭在促进农作物生产和提高土壤供磷能力方面具有重要作用^[25]。

秸秆炭化还田可以减少磷素的流失,暴雨强度对水稻根、秸秆和籽粒的磷素含量、积累量和表观利用率有阻碍作用。然而,施加生物炭可以降低磷素的流失,提高了水稻磷素利用率,有利于水稻磷素的吸收和利用,提高水稻产量。秸秆还田同时也促进了水稻对土壤磷素的吸收利用,原因可能是秸秆的加入,增强了土壤微生物的活动性^[19],提高磷活性,促进了土壤磷素有效化。

4 结论

稻田磷素流失易受暴雨强度影响,不同暴雨强度条件下水稻生物量以及磷素的含量、积累量和表观利用率均有所降低。而且,在相同降雨量前提下,长时暴雨的固持效果要好于短时暴雨。秸秆和生物炭还

田是减少土壤磷素流失的有效措施,可以提高水稻生物量和产量,不同暴雨强度条件下秸秆和生物炭还田能显著提高水稻生物量以及磷素的含量、积累量和表观利用率,其中,添加生物炭的效果更好。因此可以通过生物炭还田等措施来增强对土壤磷素的吸附能力,从而固持土壤养分,减少磷素的流失,不仅可以促进农业生产,还可以从源头上减轻农业面源污染。

参考文献:

- [1] 张淑香,张文菊,沈仁芳,等.我国典型农田长期施磷土壤肥力变化与研究展望[J].植物营养与肥料学报,2015,21(6):1389-1393.
Zhang S X, Zhang W J, Shen R F, et al. Variation of soil quality in typical farmlands in China under long-term fertilization and research expedition[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015,21(6):1389-1393.
- [2] Wang Y, Zhao X, Guo Z Y, et al. Response of soil microbes to a reduction in phosphorus fertilizer in rice-wheat rotation paddy soils with varying soil P levels [J]. Soil and Tillage Research, 2018,181:127-135.
- [3] 环境保护部,国家统计局,农业部.第一次全国污染源普查公报[Z].北京,2010.
- [4] 叶玉适,梁新强,李亮,等.不同水肥管理对太湖流域稻田磷素径流和渗漏损失的影响[J].环境科学学报,2015,35(4):1125-1135.
Ye Y S, Liang X Q, Li L, et al. Effects of different water and nitrogen managements on phosphorus loss via runoff and leaching from paddy fields in Taihu Lake basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015,35(4):1125-1135.
- [5] 田太强.施肥与耕作对紫色土坡耕地地表径流氮磷流失及作物产量的影响[D].重庆:西南大学,2014.
Tian T Q. The effect of nitrogen and phosphorus loss and crop yield under different fertilization level and tillage mode in slope cropland of purple soil [D]. Chongqing: Southwest University, 2014.
- [6] 袁敏.湘南红壤丘陵区不同生态种植模式下土壤磷钾流失特征[D].北京:中国农业科学院,2013.
Yuan M. Characteristics of Phosphorus and Potassium Loss Under Different Ecological Planting Patterns in Hilly Red Soil Region of Southern Hunan Province [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [7] 刘娟,张乃明,于泓,等.模拟降雨条件下潮土磷素流失特征及影响因素研究[J].土壤与作物,2021,10(2):177-186.
Liu J, Zhang N M, Yu H, et al. Characteristics and influencing factors of phosphorus loss from fluvo-aquic soil under simulated rainfall conditions [J]. Soils and Crops, 2021,10(2):177-186.
- [8] 张美花,张炜月.2013—2018年福州地区短时暴雨特征分析[J].海峡科学,2020(8):8-11.

- Zhang M H, Zhang W Y. Analysis of short-time rain-storm characteristics in Fuzhou region from 2013 to 2018[J]. *Staits Science*, 2020(8):8-11.
- [9] 沈澄, 颜廷柏, 刘冬晴, 等. 2008—2012 年南京短时强降雨特征分析[J]. *气象与环境学报*, 2015, 31(1):28-33.
- Shen C, Yan T B, Liu D Q, et al. Characteristics of short-time heavy precipitation from 2008 to 2012 in Nanjing[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2015, 31(1):28-33.
- [10] Soltangheisi A, Rodrigues M, Coelho M J A, et al. Changes in soil phosphorus lability promoted by phosphate sources and cover crops[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 179:20-28.
- [11] 连神海, 张树楠, 刘锋, 等. 不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2022, 43(7):3692-3698.
- Lian S H, Zhang S N, Liu F, et al. Phosphorus adsorption characteristics of different biochar types and its influencing factors[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(7):3692-3698.
- [12] Picolo A, Mbagwu J S C. Effects of different organic waste amendments on soil microaggregates stability and molecular sizes of humic substances[J]. *Plant and Soil*, 1990, 123:27-37.
- [13] 占亚楠, 王智, 孟亚利. 生物炭提高土壤磷素有效性的整合分析[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(4):1185-1193.
- Zhan Y N, Wang Z, Meng Y L. Biochar addition improves soil phosphorus availability: A meta-analysis[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(4):1185-1193.
- [14] 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.
- [15] 张晓花, 王克勤, 宋娅丽, 等. 有机肥施用量对滇中烤烟农田生态系统氮磷平衡的影响[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(6):28-36.
- Zhang X H, Wang K Q, Song Y L, et al. Effects of organic fertilizer application on nitrogen and phosphorus balance in flue-cured tobacco sloping farmland in central Yunnan Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(6):28-36.
- [16] 缪杰杰, 刘运峰, 胡宏祥, 等. 不同施肥模式对稻田氮磷流失及产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5):86-93.
- Miao J J, Liu Y F, Hu H X, et al. Effects of different fertilization modes on nitrogen and phosphorus loss and yield in paddy fields[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(5):86-93.
- [17] Zhang A F, Cui L Q, Pan G X, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake Plain, China[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2010, 139(4):469-475.
- [18] 武爱莲, 王劲松, 董二伟, 等. 施用生物炭和秸秆对石灰性褐土氮肥去向的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(1):176-185.
- Wu A L, Wang J S, Dong E W, et al. Effect of application of biochar and straw on fate of fertilizer N in cinnamon soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1):176-185.
- [19] 靳玉婷, 刘运峰, 胡宏祥, 等. 持续性秸秆还田配施化肥对油菜-水稻轮作周年氮磷径流损失的影响[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(9):1937-1951.
- Jin Y T, Liu Y F, Hu H X, et al. Effects of continuous straw returning with chemical fertilizer on annual runoff loss of nitrogen and phosphorus in rice-rape rotation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(9):1937-1951.
- [20] 徐壮, 王婉瑕, 徐磊, 等. 水稻磷素吸收与转运分子机制研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(5):1378-1385.
- Xu Z, Wang W X, Xu L, et al. Research progress in molecular mechanism of rice phosphorus uptake and translocation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(5):1378-1385.
- [21] Strelko V, Malik D J, Streat M. Characterisation of the surface of oxidised carbon adsorbents[J]. *Carbon*, 2002, 40(1):95-104.
- [22] Gundale M J, Deluca T H. Charcoal effects on soil solution chemistry and growth of *Koeleria macrantha* in the ponderosa pine/Douglas-fir ecosystem[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 43:303-311.
- [23] 张斌, 刘晓雨, 潘根兴, 等. 施用生物质炭后稻田土壤性质、水稻产量和痕量温室气体排放的变化[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(23):4844-4853.
- Zhang B, Liu X Y, Pan G X, et al. Changes in soil properties, yield and trace gas emission from a paddy after biochar amendment in two consecutive rice growing cycles[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(23):4844-4853.
- [24] Zhao X L, Wang H Y, Lu D J, et al. The effects of straw return on potassium fertilization rate and time in the rice-wheat rotation [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2019, 65(2):176-182.
- [25] 王昆昆, 廖世鹏, 任涛, 等. 连续秸秆还田对油菜水稻轮作土壤磷素有效性及作物磷素利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(1):94-104.
- Wang K K, Liao S P, Ren T, et al. Effect of continuous straw returning on soil phosphorus availability and crop phosphorus utilization efficiency of oilseed rape-rice rotation. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(1):94-104.