

引用格式: 周迪萱, 桂仁意, 雷吉, 等. 雷竹林袋控释肥的养分释放特性及对竹笋产量的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(2): 373–382. ZHOU Dixuan, GUI Renyi, LEI Ji, *et al.* Nutrient release characteristics of bagged controlled-release fertilizer in Lei bamboo forest and its effect on bamboo shoot yield[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(2): 373–382.

雷竹林袋控释肥的养分释放特性及对竹笋产量的影响

周迪萱¹, 桂仁意¹, 雷吉¹, 吴斌², 邓世鑫¹

(1. 浙江农林大学 森林食物资源挖掘与利用全国重点实验室/竹子研究院, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 数学与计算机科学学院, 浙江 杭州 311300)

摘要: 【目的】袋控释肥具有通过生物可降解材料包裹肥料并控制养分释放的特点。研究雷竹 *Phyllostachys violascens* 林袋控释肥使用效果, 以减少肥料损失, 提高养分利用率, 进而提高雷竹笋产量。【方法】在研究区随机选取 12 块雷竹林试验小区, 设置袋控释肥与撒施复合肥、穴施复合肥和不施肥(对照)等 4 种处理, 重复 3 次, 并通过测定不同处理下氨挥发、径流液与渗漏液中氮磷钾质量分数、袋控释肥外观与质量等指标, 分析不同处理在养分流失、肥料利用率、笋产量等方面的差异。【结果】袋控释肥能显著降低土壤氨挥发以及径流渗漏损失的养分, 其中袋控释肥处理的累积氨挥发量比撒施复合肥、穴施复合肥处理分别降低了 35.5%、40.5%。袋控释肥相比撒施复合肥和穴施复合肥土壤渗漏液中全氮、全磷、全钾分别减少了 33.9%~40.9%、41.3%~45.1%、36.7%~39.7%; 袋控释肥相比撒施肥和穴施复合肥土壤径流液中全氮、全磷分别减少了 22.8%~29.2%、36.4%~44.3%。且袋控释肥在雷竹林中的肥效期为 5.0 个月, 肥料完全释放的时间为 6.5 个月, 袋控释肥施用前期的释放速度较慢, 在施肥后第 2~3 月时释放速率达到最大。袋控释肥处理氮磷钾的表观利用率均大于撒施复合肥处理, 其中氮的表观利用率提高了 27.7%, 是撒施复合肥处理的 2.9 倍。袋控释肥处理的笋产量达 14.74 t·hm⁻², 分别比对照、撒施复合肥处理提高了 62.1% 和 25.8%。【结论】袋控释肥能有效地提高雷竹林笋产量和肥料的利用率, 同时降低养分流失和对环境的污染。图 6 表 3 参 34

关键词: 雷竹; 袋控释肥; 肥料利用率; 养分流失; 竹笋产量; 环境保护

中图分类号: S723.7 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)02-0373-10

Nutrient release characteristics of bagged controlled-release fertilizer in Lei bamboo forest and its effect on bamboo shoot yield

ZHOU Dixuan¹, GUI Renyi¹, LEI Ji¹, WU Bin², DENG Shixin¹

(1. National Key Laboratory for Development and Utilization of Forest Food Resources/Institute of Bamboo Research, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. College of Mathematics & Computer Science, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] Bag controlled release fertilizer has the characteristics of wrapping the fertilizer and controlling the nutrient release through biodegradable materials. The study of bag controlled release fertilizer for Lei bamboo (*Phyllostachys violascens*) forests was carried out in order to reduce the loss of fertilizers and improve the nutrient utilization rate, which in turn increased the yield of Lei bamboo shoots. [Method] 12 experimental plots of Lei bamboo forest were randomly selected, and 4 treatments were set up, namely, bag controlled release fertilizer, spreading compound fertilizer, hole-applied compound fertilizer, and no fertilizer (the control) with each treatment replicated for 3 times. The differences in nutrient loss, fertilizer utilization, and bamboo shoot yield among different treatments were analyzed by determining the indexes such as ammonia

收稿日期: 2024-03-06; 修回日期: 2024-08-10

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目 (LQ24C160008, LTGC23C160002)

作者简介: 周迪萱 (ORCID: 0009-0006-8495-198X), 从事竹林培育研究。E-mail: zdx9902@163.com。通信作者: 邓世鑫 (ORCID: 0000-0001-8619-099X), 讲师, 博士, 从事竹子笋芽萌发调控机制与笋用林培育技术研究。E-mail: dengsx789@163.com

volatilization, the changes of N, P, and K contents of runoff and seepage liquid, and the changes in the appearance and quality of bagged controlled-release fertilizer under different treatments. [Result] Bag controlled-release fertilizer significantly reduced soil ammonia volatilization as well as nutrients lost by runoff leakage, in which the cumulative ammonia volatilization of bag controlled release fertilizer treatments was reduced by 35.5% and 40.5% compared to sprinkled compound fertilizer and hole-applied compound fertilizer, respectively. The amount of total nitrogen, total phosphorus and total potassium in the soil leachate of bagged controlled-release fertilizers was reduced by 33.9%–40.3%, 41.3%–45.1% and 36.7%–39.7%, respectively, compared with that of sprinkler-applied fertilizers and hole-applied fertilizers. Bagged controlled-release fertilizers reduced the amount of total nitrogen and phosphorus in soil runoff liquid by 22.8% to 29.2% and 36.4% to 44.3%, respectively, compared to spreading fertilizers and hole-applied compound fertilizers. And the fertilizer efficacy period of bagged controlled-release fertilizer in Lei bamboo forest was about 5.0 months, and the time of complete release of fertilizer was 6.5 months. The release rate of bagged controlled-release fertilizer was slower in the early stage of application, and the rate of release reached the maximum in the 2nd–3rd month after the application of fertilizer. The apparent utilization rate of nitrogen, phosphorus and potassium in the bag controlled-release fertilizer treatment was greater than that in the spreading compound fertilizer treatment, in which the apparent utilization rate of nitrogen was increased by 27.7%, which was 2.9 times higher than that in the spreading compound fertilizer treatment. The shoot yield of bag controlled-release fertilizer treatment reached $14.74 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, which was 62.1% and 25.8% higher than that of the control and spreading compound fertilizer treatment, respectively. [Conclusion] Bag-controlled release fertilizer effectively enhance the shoot yield of Lei bamboo and the efficiency of fertilizer utilization, while concurrently mitigating nutrient loss and environmental pollution. [Ch, 6 fig. 3 tab. 34 ref.]

Key words: *Phyllostachys violascens*; bag-controlled fertilization; fertilizer utilization; nutrient loss; bamboo shoot yield; environmental protection

雷竹 *Phyllostachys violascens* 是禾本科 Poaceae 竹亚科 Bambusoideae 刚竹属 *Phyllostachys* 植物, 是一种优良的笋用竹种, 具有经济价值高、笋期早、产量高、笋味鲜美等特点^[1]。为了提升雷竹林的产量和经济价值, 竹农通常采用集约经营的方式, 而集约经营的雷竹林在年年采笋的同时存在着“去老留新”的现象, 且采伐后残留的竹茬分解缓慢, 养分回报率低^[2], 营养成分流失严重^[3], 导致了雷竹林生产力下降, 降低了竹笋产量^[4]。施肥能够改变竹林地土壤性质, 提高土壤持水能力, 增加有效的元素含量^[5], 是提高林分生产力最直接有效的方法之一^[6]。雷竹林年施肥量高达 $2\,250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 是国际和国内平均施肥水平的 7~18 倍^[7]。过度施肥导致了竹林土壤酸化、板结, 增加了生物毒性铝含量, 影响根系健康和养分转运, 进而引发竹林退化^[8–11]。

袋控释肥是一种新的肥料技术, 它通过特殊的包装方式来控制养分的释放, 以适应作物的生长需求, 是解决化肥滥用造成的资源浪费和环境污染问题的有效途径^[2]。已有研究显示, 与传统施肥方式相比, 袋控释肥能减少化肥施用量^[12], 稳定持续供应养分, 有利于提高养分利用率^[13]。袋控释肥改善养分释放和提高产量已在番茄 *Solanum lycopersicum*^[14]、葡萄 *Vitis vinifera*^[15]、桃树 *Prunus persica*^[16] 等得到验证, 但袋控释肥在雷竹林地中的养分释放特性以及对笋产量的影响等缺乏系统研究。

本研究以健康的雷竹林为对象, 研究袋控释肥与传统撒施复合肥、穴施复合肥和不施用肥料在养分流失、肥料利用率、笋产量等方面的变化情况, 以期雷竹林袋控释肥的应用提供理论依据。

1 研究区与方法

1.1 研究区概况

样地位于浙江农林大学潘母岗实验基地, $30^{\circ}18'15''\text{N}$, $119^{\circ}33'31''\text{E}$, 属中亚热带季风气候区, 温暖

湿润, 四季分明, 具有春多雨、夏湿热、秋气爽、冬干冷的气候特征, 全年降水量为 1 628.6 mm, 全年平均气温为 16.4 °C, 全年日照时数为 1 847.3 h。土壤发育自第四纪砂岩母质的铁铝土, 基本理化性质为: pH 6.3, 有机质 25.0 g·kg⁻¹, 全氮 1.7 g·kg⁻¹, 有效氮 149.0 mg·kg⁻¹, 有效磷 317.4 mg·kg⁻¹, 速效钾 186.3 mg·kg⁻¹。

1.2 供试肥料

供试袋装肥由杭州临安益微配方肥料有限公司提供, 外包装为玉米淀粉袋。每袋大小为 10 cm×10 cm, 其中分别含有尿素 150 g, 过磷酸钙 20 g, 硫酸钾镁 30 g。每个玉米淀粉袋上打有直径为 0.2 mm 的小孔 5 个。根据课题组前期研究结果^[17], 穴施、撒施所用肥料按尿素:过磷酸钙:硫酸钾镁=15:2:3 的质量比, 均匀混合后备用。

1.3 方法

1.3.1 试验设置 处理时间为 2020 年 5 月 30 日至 2021 年 4 月 11 日。在 2020 年 5 月 30 日前完成试验小区的修建, 安装径流液、渗漏液和氨挥发的收集装置。采用随机区组试验设计, 选取相邻且坡度相同 (12.5°) 的 12 块 2 m×10 m 地块作为试验小区(图 1), 各小区之间用宽为 60 cm、厚为 5 mm 的铝塑板隔开, 铝塑板插入土壤约 40 cm 深, 高出地面 20 cm。设置 4 种施肥处理: ①撒施复合肥 3.6 kg(根据竹农生产中采用的 1 800 kg·hm⁻² 施肥量换算), SF; ②袋控释肥, 2×9 (列×袋, 每袋 200 g), BF; ③穴施复合肥, 2×9 (列×穴, 每穴 200 g), HF; ④不施肥, ck。每个处理重复 3 次。撒施

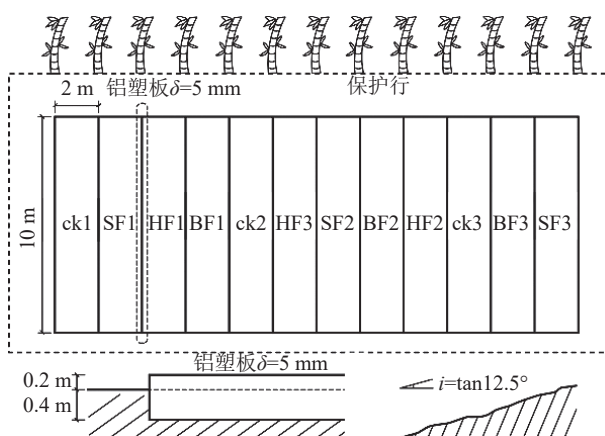


图 1 样地示意图

Figure 1 Schematic diagram of the test plots

复合肥处理为施用肥料后对雷竹林地进行翻垦, 翻垦深度为 20 cm, 袋控释肥和穴施处理为先将雷竹林地进行翻垦, 翻垦深度也为 20 cm, 再将袋控释肥和穴施复合肥施用在 20 cm 深土层中。

1.3.2 降水量收集 在研究区旁设置雨量筒, 统计施肥后 6 个月内的降水量。

1.3.3 氨气收集 土壤氨挥发采用原位测定——通气法来收集氨气^[18]。用内径为 20 cm, 高 20 cm 的聚氯乙烯 (PVC) 管制成, 管内放有 2 块蘸有质量浓度为 2% 的硼酸溶液的黑色海绵 (厚 2 cm, 直径 21 cm), 下层海绵距离地面约 8 cm, 上层海绵与 PVC 管顶部持平。选取的 12 个小区中, 每个小区内随机放置 3 个氨挥发收集装置。施肥后隔 1 d 取出下层海绵并迅速放入塑封袋中密封, 同时更换新的蘸有 2% 硼酸溶液的海绵, 共取 51 次。上层海绵根据干湿情况, 4~8 d 更换 1 次。取下的海绵带回实验室, 用 300 mL 1.0 mol·L⁻¹ 的氯化钾溶液分 3~5 次加入塑封袋中反复挤压海绵得到氨浸提液, 然后用 0.01 mol·L⁻¹ 的盐酸溶液滴定, 计算并记录氨挥发量。

1.3.4 径流液收集 每个小区之间用铝塑板隔开避免径流液流入相邻的小区内, 小区底部设置规格为 160 cm×140 cm×160 cm (高×底×高) 的塑料天沟, 收集小区内的地表径流液。天沟集水槽底部有 1 个直径 1 cm 的出水口, 用塑料管连接 1 个 25 L 的塑料蓄水桶, 使收集的径流液流入蓄水桶中。降雨后收集蓄水桶中的径流液样品 (共取样 14 次), 取样前测量每个小区收集径流液的总体积, 摇匀后抽取 0.5 L 水样带回实验室待测, 并清空蓄水桶内剩余液体。

1.3.5 渗流液收集 雷竹竹鞭主要分布在 0~30 cm 的土层, 占整个土层的 86%。雷竹根鞭系统养分的吸收也主要发生在这一土层中, 因此把 30 cm 深度线作为养分越出土壤-雷竹根鞭系统的界限, 渗漏到 30 cm 深度以下的养分则视为淋失^[19]。在 12 个小区内分别安装渗漏液收集装置, 渗漏液通过打有排水孔且用渗水布包裹的塑料板流入收集的塑料管中 (共取样 14 次), 然后流入预先埋在剖面坑底部的 25 L 蓄水桶中。通过记录的每个时间段内渗漏液的体积和测量的氮磷钾质量浓度计算出每个时间段内通过渗漏损失的养分量。

1.3.6 测定项目 用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定全氮,用靛酚蓝比色法测定氨态氮,采用双波长比色法测定硝态氮,采用磷钼蓝比色法测定全磷,采用火焰光度计法测定全钾。2021年3月3日(出笋第1天)开始调查笋产量至笋期结束,1~2 d调查1次。氮肥利用率计算公式^[20]:氮(磷、钾)表观利用率=[施肥区雷竹氮(磷、钾)积累量-空白区雷竹氮(磷、钾)积累量]/施肥量 $\times 100\%$;肥料农学效率=(施肥区雷竹笋产量-对照区雷竹笋产量)/施肥量,单位为 $\text{t}\cdot\text{kg}^{-1}$;肥料偏生产力=雷竹笋产量/施肥量,单位为 $\text{t}\cdot\text{kg}^{-1}$;各器官氮(磷、钾)积累量=各器官生物量 $\times$ 氮(磷、钾)质量分数,单位为 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

1.4 数据处理

利用 Excel 2019 对数据进行统计处理和绘图,利用 SPSS 并采用 Duncan 法进行数据多重比较 ($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 施肥处理与土壤氨挥发的关系

对不同施肥处理下氨挥发速率的研究发现:SF、HF 和 BF 处理氨挥发速率的变化趋势均呈先上升后下降的特点,BF 处理显著 ($P<0.05$) 减缓了氨挥发速率(图 2A)。在 SF 与 HF 处理下,第 1 天就有氨挥发,且氨挥发量高于 BF 处理,氨挥发速率的峰值出现的时间依次为 SF、HF、BF,分别为施肥后第 4、8、64 天,BF 处理峰值出现较晚,推迟了 56~60 d。3 种施肥处理下氨挥发速率峰值从大到小依次为 SF ($12.11 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{hm}^{-2}$)、HF ($7.00 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{hm}^{-2}$)、BF ($1.48 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{hm}^{-2}$)。BF 在施肥后第 24~94 天的氨挥发速率大于 ck。

由图 2B 可知:随着施肥时间的延长,SF 与 HF 处理累积的氨挥发总量显著高于 ($P<0.05$) BF 处理,BF 处理的氨挥发速率相对较低且持续时间较长。SF 和 HF 处理的累积氨挥发量分别于施肥后第 8 天和第 14 天呈快速增加趋势。BF 处理在施肥前期累积的氨挥发量与 ck 未出现显著差异,在 BF 处理下的第 24 天才出现氨挥发现象。SF 与 HF 累积的氨挥发量分别在第 16 天、第 24 天后保持稳定,而 BF 处理累积氨挥发量在第 94 天后保持稳定,BF 处理的累积氨挥发量显著低于 ($P<0.05$) SF 与 HF 处理。

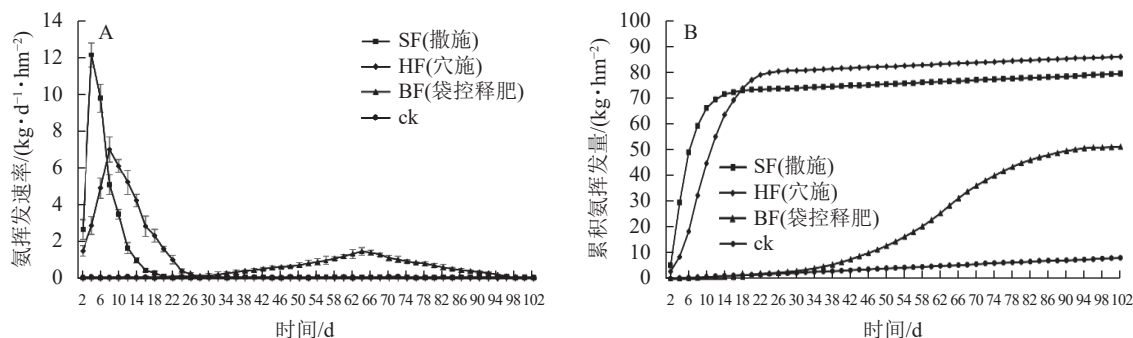


图 2 不同施肥处理氨挥发速率与累积氨挥发总量的变化

Figure 2 Variations in ammonia volatilization rates and cumulative ammonia volatilization quantities under 4 fertilization treatments

2.2 施肥处理与径流液中氮磷钾质量浓度的关系

图 3A~C 中,BF 径流液中的硝态氮与氨态氮质量浓度在前期显著低于 ($P<0.05$) SF 与 HF 处理。在 SF 与 HF 处理下,径流液中硝态氮均在第 22 天达到峰值,径流液中的氨态氮于第 16 天、第 8 天达到峰值。在 BF 处理下,径流液中硝态氮和氨态氮分别在第 99 天、第 92 天达到峰值,其质量浓度分别为 5.34 、 $6.22 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,显著小于 ($P<0.05$) SF 与 HF 处理。

图 3D 中,SF 和 HF 处理下径流液中全磷质量浓度整体随着施肥时间的增加逐渐降低至 ck 水平,而 BF 处理径流液中全磷质量浓度随着施肥时间的增加先升高后下降。BF 处理全磷质量浓度直到施肥第 38 天后才比 ck 高。而 SF 和 HF 处理下径流液中全磷质量浓度显著高于 ($P<0.05$) ck,且在施肥后第 61 天内径流液中全磷质量浓度显著高于 ($P<0.05$) BF,分别高出 $21.8\%\sim 318.6\%$ 和 $9.9\%\sim 339.6\%$ 。SF、HF 和 BF 处理下径流液中全磷质量浓度的峰值分别在施肥第 22 天 ($2.11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、第 25 天 ($1.80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和第 92 天 ($1.47 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 出现,BF 处理径流液中的全磷质量浓度峰值出现的时间分别比 SF、

HF 处理晚 70 和 67 d, 且峰值低 30.3% 和 18.3%。

图 3E 中 SF 与 HF 处理下的径流液中的全钾质量浓度均在处理后的第 8 天和第 16 天达到峰值。BF 处理下的径流液中的全钾质量浓度在第 92 天达到峰值, 为 $3.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 峰值出现时间相较于其他处理推迟 76~84 d, 质量浓度比 SF 与 HF 处理下降 16.3% 和 35.1%。

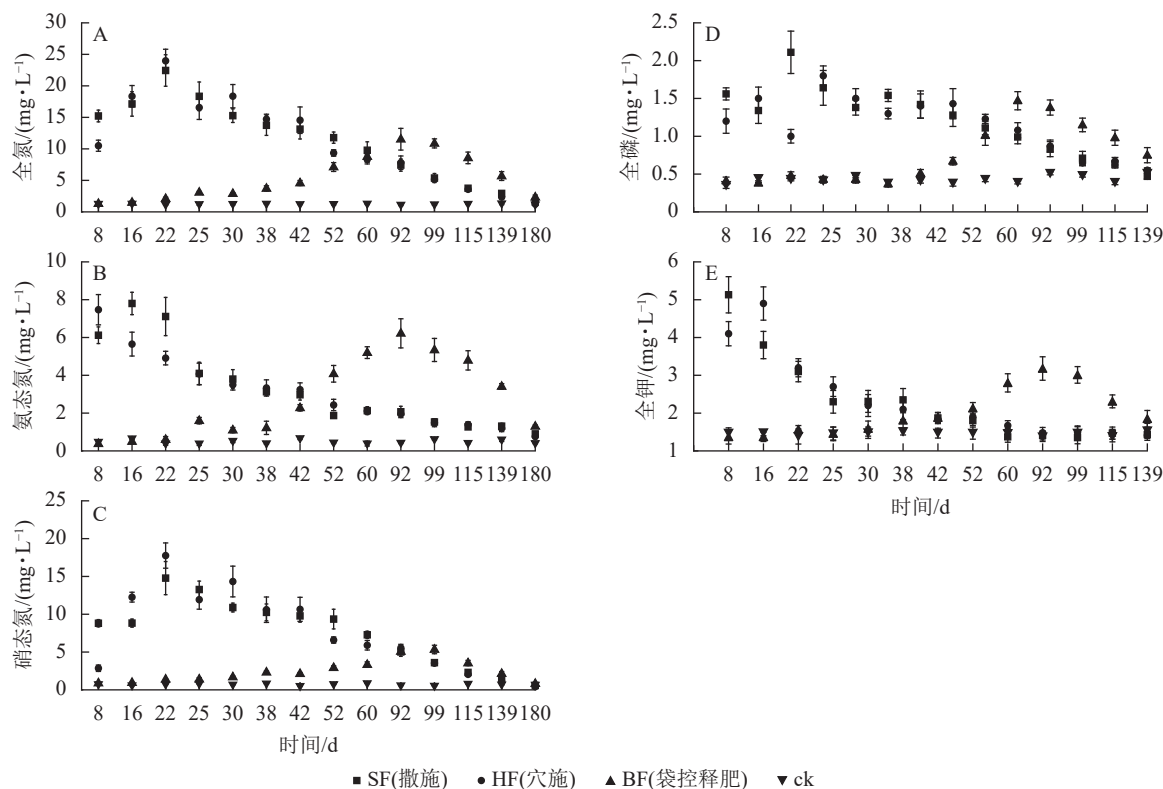


图 3 不同施肥处理下径流液中氮、全磷、全钾质量浓度的变化

Figure 3 Variations in nitrogen (N), total phosphorus (P), and total potassium (K) concentrations in runoff under 4 fertilization treatments

2.3 施肥处理与渗漏液中氮磷钾质量浓度的关系

SF、HF 和 BF 处理渗漏液中的全氮、硝态氮质量浓度的变化趋势均为先上升后下降 (图 4A~C), 不同施肥处理下渗漏液的全氮质量浓度峰值出现的时间分别为第 25 天、第 22 天、第 92 天; 硝态氮的峰值出现的时间与全氮的情况相同。SF 和 HF 处理下渗漏液中氨态氮质量浓度在施肥后第 16 天第 1 次取样就达到了峰值, 然后慢慢减小, 袋控施肥处理下渗漏液的氨态氮质量浓度先缓慢上升再下降。在最后一次取样时各处理的氮质量浓度降低至 ck 水平。

由图 4D 可见: SF 和 HF 处理下径流液中全磷质量浓度呈先上升后下降的趋势, 均在第 22 天达到峰值, 分别为 5.57 和 $5.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。BF 处理后, 渗漏液中全磷质量浓度从第 52 天开始显著 ($P < 0.05$) 上升, 且在第 92 天渗漏液中全磷质量浓度达到峰值 $3.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 显著 ($P < 0.05$) 小于 SF 和 HF 处理, 然后渗漏液中全磷质量浓度下降, 并在第 180 天降低至 ck 水平。

由图 4E 可见: SF 和 HF 处理下渗漏液中全钾质量浓度持续下降, 且前期下降的速度较快。BF 处理下渗漏液中全钾质量浓度呈先上升后下降的趋势, 上升速度将慢且平缓, 全钾质量浓度峰值仅为 $6.51 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 显著小于 ($P < 0.05$) SF 处理的 $16.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 HF 处理的 $18.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.4 施肥处理与渗漏液中氮磷钾流失总量的关系

表 1 是从开始施肥 5 月 30 日到取样结束 (11 月 26 日) 渗漏液中总流失养分量。SF 和 HF 处理土壤渗漏液中全氮、硝态氮、氨态氮、全磷、全钾的流失总量均显著高于 ck 和 BF 处理, 而 SF 和 HF 处理之间没有显著差异。HF 处理随渗漏液流失的养分最多, 而 BF 流失的养分最少。BF 相比 SF 对土壤渗漏液中全氮、全磷、全钾量分别减少了 33.9%、41.3%、36.7%, 比 HF 分别减少了 40.9%、45.1%、39.7%。BF 处理通过渗漏方式损失的全氮、全磷、全钾量分别占施肥量 8.84%、4.89%、8.27%。

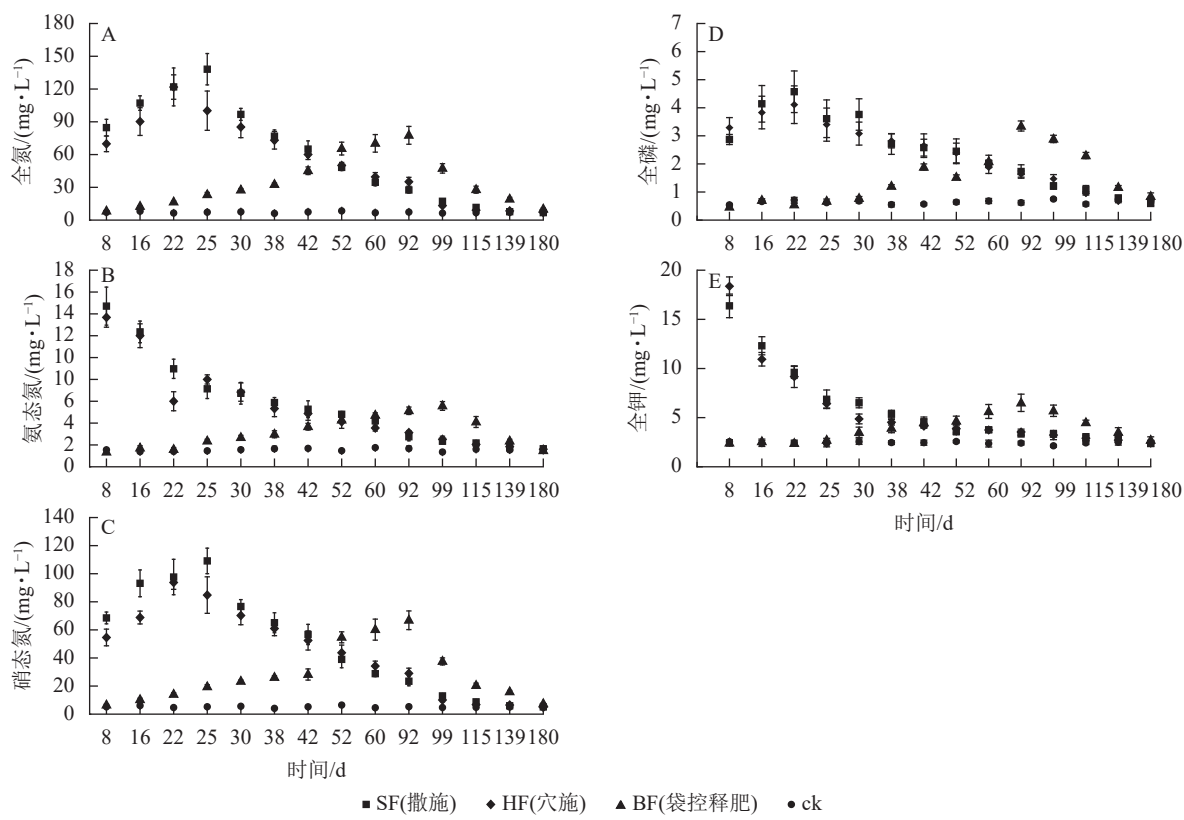


图 4 不同施肥处理下渗漏液中氮、全磷、全钾质量浓度的变化

Figure 4 Alterations in nitrogen (N), total phosphorus (P), and total potassium (K) concentrations in leachate across 4 fertilization treatments

表 1 不同施肥处理下土壤渗液中氮磷钾流失总量的比较

Table 1 Comparison of the loss of nitrogen, phosphorus and potassium in soil leakage under 4 fertilization treatments

处理	全氮		硝态氮		氨态氮		全磷		全钾	
	流失总量/ (kg·hm ⁻²)	占施氮 量/%	流失总量/ (kg·hm ⁻²)	占施氮 量/%	流失总量/ (kg·hm ⁻²)	占施氮 量/%	流失总量/ (kg·hm ⁻²)	占施磷 量/%	流失总量/ (kg·hm ⁻²)	占施钾 量/%
SF	84.30±6.75 a	13.38	72.13±7.12 a	11.45	6.61±1.13 a	1.05	4.07±0.75 a	8.14	7.76±0.89 a	13.06
HF	94.32±4.55 a	14.97	82.37±7.82 a	13.07	6.93±1.72 a	1.10	4.36±1.13 a	8.73	8.15±1.31 a	13.72
BF	55.72±3.56 b	8.84	45.36±6.01 b	7.20	3.90±0.74 b	0.62	2.39±0.37 b	4.89	4.92±0.76 b	8.27
ck	17.66±3.11 c		13.25±1.50 c		2.03±0.45 c		0.82±0.41 c		3.31±0.35 c	

说明：不同小写字母表示同一指标不同处理间差异显著(P<0.05)。数值为平均值±标准误。

2.5 施肥处理与径流液中氮、磷、钾流失总量的关系

表 2 结果表明：不同施肥处理径流液中全氮、硝态氮、氨态氮、全磷、全钾流失总量与 ck 相比都有不同程度的上升。各施肥处理之间土壤径流液中全氮、硝态氮、氨态氮、全磷、全钾流失量均为 BF 处理最小，SF 和 HF 处理之间的差异不显著。BF 处理通过地表径流的方式损失的全氮、全磷、全钾量分别为 1 311.72、121.65、341.92 g·hm⁻²，且仅占施肥量的 0.21%、0.24%、0.58%。BF 相比 SF 土壤径流液中全氮、全磷与全钾量分别下降了 30.28%、44.27%、14.49%，比 HF 土壤径流液中全氮、全磷、全钾量分别减少了 23.97%、36.43%、11.28%。

2.6 袋控释肥外观和质量随时间的变化

施肥第 15 天后，袋装肥的外观无明显的变化。施肥第 45 天后，袋装肥表层玉米淀粉初步被分解，袋子变得透明。施肥第 75 天后袋装肥包装袋已明显透明，第 105 天后袋中的肥料明显减少，且肥料的颗粒也相对减少(图 5A)。

BF 施入土壤后肥料的质量随着时间的增加而下降，且肥料质量减少的速率呈先增后减的趋势。施肥 30 d 后 BF 肥料的养分仅释放 10.06%。在施肥第 75~90 天时，肥料释放的相对质量最高。在施肥第 135 天后，BF 释放了 75.0% 的养分，施肥第 195 天后 BF 的养分已基本全部释放(图 5B)。

表 2 不同施肥处理下土壤径流液中氮磷钾流失量的比较

处理	全氮		硝态氮		氨态氮		全磷		全钾	
	流失总量/ (g·hm ⁻²)	占施氮 量/%	流失总量/ (g·hm ⁻²)	占施氮 量/%	流失总量/ (g·hm ⁻²)	占施氮 量/%	流失总量/ (g·hm ⁻²)	占施磷 量/%	流失总量/ (g·hm ⁻²)	占施钾 量/%
SF	1 881.47±152.85 a	0.30	1 235.56±140.85 a	0.20	501.39±34.58 a	0.08	218.29±16.04 a	0.44	399.87±27.90 a	0.67
HF	1 725.37±100.27 a	0.27	1 084.51±61.35 a	0.17	477.13±38.61 a	0.08	191.36±10.92 a	0.38	385.41±14.82 a	0.65
BF	1 311.72±70.53 b	0.21	836.63±59.18 b	0.13	352.37±39.29 b	0.06	121.65±9.03 b	0.24	341.92±26.82 a	0.58
ck	351.73±32.89 c	—	187.53±15.93 c	—	103.84±11.68 c	—	71.96±7.05 c	—	254.93±22.41 b	—

说明：不同小写字母表示同一指标不同处理间差异显著($P<0.05$)。数值为平均值±标准误；—表示无此数值。

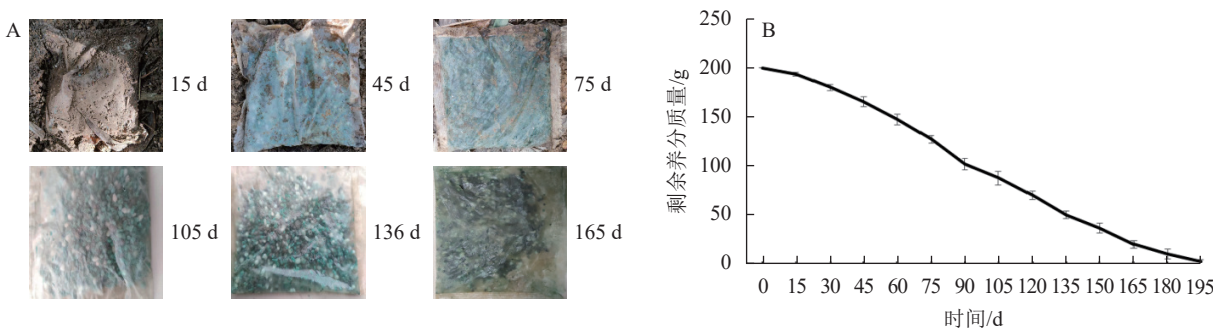


图 5 BF 与肥料质量随时间的变化

Figure 5 Temporal changes in bag-based controlled-release fertilizers and their nutrient quality

2.7 不同施肥处理对肥料利用率的影响

由表 3 可知：BF 处理氮、磷、钾的表观利用率比 SF 分别显著提高了 27.7%、6.5%、9.5% ($P<0.05$)。此外，BF 处理还显著提高了氮肥偏生产力和氮肥农学效率，分别比 SF 处理提高了 25.7% 和 114.8% ($P<0.05$)。

2.8 不同施肥处理对雷竹笋产量的影响

图 6 为不同施肥处理后第 2 年笋产量的统计图。在不施肥的情况下，笋产量仅为 9.09 t·hm⁻²，而 SF 和 BF 处理均能提高雷竹林的笋产量，分别达 11.72 和 14.74 t·hm⁻²，产量比 ck 处理分别显著提高了 28.93% 和 62.14% ($P<0.05$)。此外，BF 处理下笋产量比 SF 处理显著提高了 25.75% ($P<0.05$)。

3 讨论

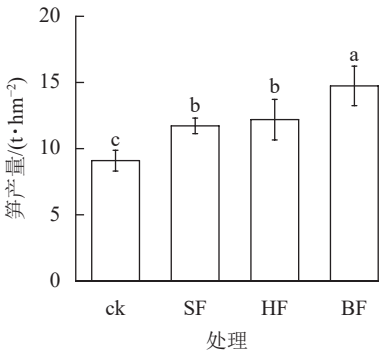
土壤中营养元素的损失不仅会降低土壤肥力和植物产量，还会对环境产生不利影响^[21]。在传统的施肥处理下，普通肥料养分释放快，易通过挥发、渗漏和地表径流等途径损失^[22]。控释肥料通过延长释放持续时间来控制释放速率，已被证明是一种有效解决这些问题的方案。

本研究发现 BF 和 SF、HF 氨挥发速率有显著差异，BF 的累积氨挥发量变化曲线更加平缓，相较于 HF 和 SF 处理，峰值出现延迟了 56~60 d，BF 处理的累积氨挥发量比 SF、HF 分别降低了 35.48%、40.47%，这与王建等^[23] 和孙克君等^[24] 在袋控释肥相关研究中结果相近。因为 SF 与 HF 处理无法有效防止肥料和土壤相互接触，氮被迅速溶解和水解以产生大量的挥发氨并导致氮在短时间内损失^[25]，施肥后

表 3 不同施肥处理对雷竹肥料利用率的影响

处理	表观利用率/%			氮肥农学效率/(kg·kg ⁻¹)	氮肥偏生产率/(kg·kg ⁻¹)
	氮	磷	钾		
SF	14.64±1.24	12.17±1.30	32.62±2.31	5.08±1.14	22.65±1.14
BF	42.38±6.54*	18.69±2.35*	42.13±1.81*	10.91±2.62*	28.48±2.62*

说明：*表示差异显著($P<0.05$)。数值为平均值±标准误。



不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

图 6 不同施肥处理后第 2 年笋产量的统计图

Figure 6 Second-year shoot yield of fertilization treatments

早期土壤氨态氮含量更高^[26]。与普通的施肥方式相比, BF能有效缓解氮的溶解与释放, 保证土壤中的氮缓慢增加并保持一定浓度, 削弱氨态氮与硝态氮的挥发, 有利于提高肥料利用率。

BF处理雷竹林土壤渗漏液和径流液中的氮、磷、钾质量浓度的峰值出现时间相比SF和HF晚, 且峰值显著更低, BF在稻田中的应用也有类似的效果^[27]。这可能是由于BF缓慢释放的机制减少了因快速溶解和流失而导致的养分损失^[28]。而BF处理下土壤径流液与渗透液中的养分质量浓度均高于ck, 这是因为在肥料释放的过程中, 其释放速度除了与肥料本身和施肥方式有关以外, 还与土壤环境有关, 这其中包括土壤的含水率、温度、pH、微生物等^[29], 包膜缓控释肥的养分释放速率随土壤含水量的降低而降低^[30]。本样地夏季降雨量较大, 土壤田间持水量相对较高, 导致BF释放速度也较快。此外, 未施肥的土壤渗漏液中依然存在养分的流失, 可能是因为长期集约经营导致土壤氮磷钾累积量明显上升。

BF在雷竹林中持续释放时间长达195 d, 这与郑祥洲等^[31]的研究结果类似。这表明BF具有较好的缓释特性并可延长肥效期, 但是适合于雷竹林应用的最佳包膜厚度还需要进一步的研究。

本研究BF与ck和SF处理相比显著提高了笋产量。这与控释肥在水稻 *Oryza sativa*^[32]、棉花 *Gossypium hirsutum*^[33]等研究的结果相同。BF处理还显著提高了氮肥偏生产力和氮肥农学效率。同时BF的养分释放速率与植物整个发育阶段的需肥量基本一致, 提高作物产量同时还避免施入过量养分造成环境污染^[34]。

4 结论

本研究首次比较了在雷竹林地中施用袋控释肥与撒施复合肥、穴施复合肥等不同施肥处理下, 土壤氮挥发, 径流液与渗漏液中氮、磷、钾质量浓度, 肥料利用率, 笋产量以及袋控释肥外观与质量变化等, 发现袋控释肥相较于传统施肥方式, 能够有效提高雷竹林中肥料利用率与笋产量, 降低对环境的污染。

5 参考文献

- [1] ZHANG Tao, LI Yongfu, CHANG S X, *et al.* Converting paddy fields to Lei bamboo (*Phyllostachys praecox*) stands affected soil nutrient concentrations, labile organic carbon pools, and organic carbon chemical compositions [J]. *Plant and Soil*, 2013, **367**(1/2): 249–261.
- [2] GUAN Fengying, XIA Mingpeng, TANG Xiaolu, *et al.* Spatial variability of soil nitrogen, phosphorus and potassium contents in Moso bamboo forests in Yong'an City, China [J]. *Catena*, 2017, **150**: 161–172.
- [3] 胡昱彦, 庄舜尧, 郭益昌, 等. 不同施肥模式对雷竹林氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2019, **33**(3): 51–57.
HU Yuyan, ZHUANG Shunyao, GUO Yichang, *et al.* Effect of different fertilization patterns on nitrogen and phosphorus loss in a bamboo forest [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(3): 51–57.
- [4] 江泽慧. 世界竹藤[M]. 北京: 中国林业出版社, 2008.
JIANG Zehui. *Bamboo and Rattan in the World*[M]. Beijing: Chinese Forestry Publishing House, 2008.
- [5] 王勤, 孙孟瑶, 遆建航, 等. 垦复结合施肥对毛竹林生长及土壤理化特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2020, **35**(4): 13–17.
WANG Qin, SUN Mengyao, TI Jianhang, *et al.* Effects of ploughing and fertilization combination on new culm growth and soil physicochemical properties of Moso bamboo forest [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, **35**(4): 13–17.
- [6] 肖琳, 冯为迅, 罗志忠, 等. 生物炭和生物炭基肥对林木生长和土壤肥力的影响[J/OL]. 华南农业大学学报, 2024-08-06[2024-08-10]. DOI: [10.7671/j.issn.1001-411X.202406002](https://doi.org/10.7671/j.issn.1001-411X.202406002).
XIAO Lin, FENG Weixun, LUO Zhizhong, *et al.* Effects of biochar and biochar-based fertilizer on forest growth and soil fertility[J/OL]. *Journal of South China Agricultural University*, 2024-08-06[2024-08-10]. DOI: [10.7671/j.issn.1001-411X.202406002](https://doi.org/10.7671/j.issn.1001-411X.202406002).
- [7] LI Yongfu, JIANG Peikun, CHANG S X, *et al.* Organic mulch and fertilization affect soil carbon pools and forms under intensively managed bamboo (*Phyllostachys praecox*) forests in southeast China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, **10**(4): 739–747.

- [8] 叶绿涵, 陈露蔓, 吕倩, 等. 不同氮磷比施肥对雷竹笋用林笋末期碳氮磷生态化学计量的影响[J]. 四川农业大学学报, 2023, **41**(1): 42–53.
YE Lühan, CHEN Luman, LÜ Qian, *et al.* Effects of different nitrogen and phosphorus ratios on ecological stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphorus at the end of shoot growth in *Phyllostachys violascens* stand [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2023, **41**(1): 42–53.
- [9] ZONG Yutong, LI Zichuan, GUI Renyi, *et al.* Manganese losses induced by severe soil acidification in the extensive Lei bamboo (*Phyllostachys violascens*) plantation stands in Eastern China[J/OL]. *Chemosphere*, 2023, **339**: 139669[2024-03-01]. DOI: [10.1155/2000/97127](https://doi.org/10.1155/2000/97127).
- [10] 季海宝, 孙晓, 桂仁意, 等. 集约经营对雷竹林土壤与植株铝含量的影响[J]. 林业科学, 2014, **50**(1): 15–20.
JI Haibao, SUN Xiao, GUI Renyi, *et al.* Influence of intensive management on soil extractable Al and *Phyllostachys praecox* Al content[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, **50**(1): 15–20.
- [11] 冷华南, 郑康乐, 李国栋, 等. 毛竹种子萌发和幼苗生长对铝胁迫的反应[J]. 浙江林学院学报, 2010, **27**(6): 851–857.
LENG Huanan, ZHENG Kangle, LI Guodong, *et al.* Aluminum stress with seed germination and seedling growth in *Phyllostachys pubescens* [J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2010, **27**(6): 851–857.
- [12] 刘荣宁, 张守仕, 彭福田. 袋控缓释肥对桃幼树生长发育的影响[J]. 果树学报, 2008, **25**(4): 491–495.
LIU Rongning, ZHANG Shoushi, PENG Futian. Effect of bag- controlled release fertilizer on the growth and development of young peach trees [J]. *Journal of Fruit Science*, 2008, **25**(4): 491–495.
- [13] 张守仕, 谢克英, 常介田, 等. 肥料袋控缓释对苹果新根生长和氮素吸收的影响[J]. 核农学报, 2023, **37**(1): 140–147.
ZHANG Shoushi, XIE Keying, CHANG Jietian, *et al.* Effects of bag controlled-release fertilizer on apple new born root growth and nitrogen absorption [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2023, **37**(1): 140–147.
- [14] 梁新安, 张守仕, 梁芳芳, 等. 袋控缓释肥对日光温室番茄生长发育及土壤氮素淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2015, **29**(3): 306–310.
LIANG Xin'an, ZHANG Shoushi, LIANG Fangfang, *et al.* Effects of bag controlled release fertilizer on tomato growth and soil nitrogen leaching in greenhouse [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, **29**(3): 306–310.
- [15] 孙占育, 郭春会, 刘小菊. 袋控缓释肥对克瑞森葡萄产量和品质的影响[J]. 西北林学院学报, 2011, **26**(6): 85–87, 148.
SUN Zhanyu, GUO Chunhui, LIU Xiaojun. Effects of bag controlled slow release fertilizer on the yield and quality of crimson seedless [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011, **26**(6): 85–87, 148.
- [16] ZHANG Yafei, LUO Jingjing, PENG Futian, *et al.* Application of bag-controlled release fertilizer facilitated new root formation, delayed leaf, and root senescence in peach trees and improved nitrogen utilization efficiency[J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, **12**: 627313[2024-03-01]. DOI: [10.3389/fpls.2021.627313](https://doi.org/10.3389/fpls.2021.627313).
- [17] 钟意. 袋控缓释肥氮素释放特性及其在雷竹林的应用效果研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
ZHONG Yi. *Nitrogen Release Characteristics of Bag Controlled Release Fertilizer and Its Effect on Phyllostachys violascens Growth*[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2019.
- [18] 徐万里, 汤明尧, 马正强, 等. 新疆绿洲棉花种植体系土壤氨挥发损失原位监测[J]. 西北农业学报, 2011, **20**(9): 197–201.
XU Wanli, TANG Mingyao, MA Zhengqiang, *et al.* In situ monitoring of the losing of ammonia volatilization from soil in Xinjiang Oasis Cotton Cropping Systems [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2011, **20**(9): 197–201.
- [19] 陈明亮. 雷竹林分地下鞭系统构型及其细根特征研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
CHEN Mingliang *A Research on Characteristics of Both Rhizome and Fine Root of Phyllostachys praecox Stand*[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013.
- [20] CHEN Zhaoming, WANG Qing, MA Junwei, *et al.* Impact of controlled-release urea on rice yield, nitrogen use efficiency and soil fertility in a single rice cropping system[J/OL]. *Scientific Reports*, 2020, **10**: 10432[2024-03-01]. DOI: [10.1038/s41598-020-67110-6](https://doi.org/10.1038/s41598-020-67110-6).
- [21] CAMERON K C, DI H J, MOIR J L. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review [J]. *Annals of Applied Biology*, 2013, **162**(2): 145–173.
- [22] 陈佳寅, 黄程鹏, 郑梦琦, 等. 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[J]. 浙江农林大学学报, 2023, **40**(3): 540–549.
CHEN Jiayin, HUANG Chengpeng, ZHENG Mengqi, *et al.* Effects of substituting organic fertilizer and biochar-based

- fertilizer instead of chemical fertilizer on nitrogen and phosphorus runoff loss in sweet potato sloping farmland [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(3): 540–549.
- [23] 王建, 诸葛玉平, 彭福田, 等. 袋控肥对土壤氮挥发、氧化亚氮和二氧化碳排放的影响[J]. 水土保持学报, 2013, **27**(6): 294–297, 304.
- WANG Jian, ZHUGE Yuping, PENG Futian, *et al.* Effect of paper package fertilization on soil ammonia volatilization, nitrous oxide and carbon dioxide emission [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, **27**(6): 294–297, 304.
- [24] 孙克君, 毛小云, 卢其明, 等. 几种控释氮肥减少氮挥发的效果及影响因素研究[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(12): 2347–2350.
- SUN Kejun, MAO Xiaoyun, LU Qiming, *et al.* Mitigation effect of several controlled-release N fertilizers on ammonia volatilization and related affecting factors [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, **15**(12): 2347–2350.
- [25] XIAO Yuansong, PENG Futian, ZHANG Yafei, *et al.* Effect of bag-controlled release fertilizer on nitrogen loss, greenhouse gas emissions, and nitrogen applied amount in peach production [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **234**: 258–274.
- [26] 曹善郢, 周家树, 张少博, 等. 生物质炭基尿素和普通尿素对毛竹林土壤氧化亚氮通量的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2023, **40**(1): 135–144.
- CAO Shanzhi, ZHOU Jiashu, ZHANG Shaobo, *et al.* Effects of biochar-based urea and common urea on soil N_2O flux in *Phyllostachys edulis* forest soil [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(1): 135–144.
- [27] 范伟国, 杨洪强, 王超, 等. 包膜掺混肥对苹果园土壤养分、果实产量和品质的影响[J]. 西北农业学报, 2018, **27**(4): 545–553.
- FAN Weiguo, YANG Hongqiang, WANG Chao, *et al.* Effect of blending-coated fertilizer on soil nutrient contents, apple yield, and fruit quality [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2018, **27**(4): 545–553.
- [28] 叶玉适, 梁新强, 周柯锦, 等. 节水灌溉与控释肥施用对太湖地区稻田土壤氮素渗漏流失的影响[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(1): 270–279.
- YE Yushi, LIANG Xinqiang, ZHOU Kejin, *et al.* Effects of water-saving irrigation and controlled-release fertilizer application on nitrogen leaching loss of paddy soil in Taihu Lake region [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(1): 270–279.
- [29] 刘俊松, 吴雅萍, 左思杰, 等. 控释肥养分释放机理及其影响因素研究进展[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2020, **42**(4): 464–470.
- LIU Junsong, WU Yaping, ZUO Sijie, *et al.* Research advances on nutrients release mechanisms and influencing factors in controlled release fertilizers [J]. *Journal of Hubei University (Natural Science)*, 2020, **42**(4): 464–470.
- [30] 高帅帅, 王火焰, 周健民, 等. 土壤水分对包膜尿素养分释放特性的影响[J]. 土壤, 2018, **50**(2): 277–283.
- GAO Shuaishuai, WANG Huoyan, ZHOU Jianmin, *et al.* Effects of soil moisture on nutrient release from coated urea in soils [J]. *Soils*, 2018, **50**(2): 277–283.
- [31] 郑祥洲, 樊小林, 周芳, 等. 核芯肥料、包膜厚度对控释肥养分释放性能的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, **37**(11): 207–211, 218.
- GUO Xiangzhou, FAN Xiaolin, ZHOU Fang, *et al.* Effect of kernel fertilizer and coating thickness on nutrient release characteristics of controlled release fertilizer [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2009, **37**(11): 207–211, 218.
- [32] 陈贵, 鲁晨妮, 石艳平, 等. 不同缓控释肥搭配脲铵对水稻产量、氮素利用效率和土壤养分的影响[J]. 浙江农业学报, 2021, **33**(1): 122–130.
- CHEN Gui, LU Chenni, SHI Yanping, *et al.* Effect of different controlled-release fertilizers with urea ammonium on yield, nitrogen use efficiency and soil nutrients of rice [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2021, **33**(1): 122–130.
- [33] TIAN Xiaofei, LI Chengliang, ZHANG Min, *et al.* Effects of controlled-release potassium fertilizer on available potassium, photosynthetic performance, and yield of cotton [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2017, **180**(5): 505–515.
- [34] SHAVIV A. Advances in controlled-release fertilizers [J]. *Advances in Agronomy*, 2001, **71**: 1–4.