

生物炭配施硝化/脲酶抑制剂及秸秆覆盖对 红壤茶园氮磷淋失影响

廖启元¹, 李粤丰¹, 詹慧秀², 童成立², 方贤滔², 王 聪¹, 吴金水², 沈健林²

(1. 广西大学林学院, 广西森林生态与保育重点实验室, 亚热带农业生物资源保护与利用国家重点实验室, 南宁 530004; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125)

摘 要: [目的] 为探究生物炭协同硝化/脲酶抑制剂配施及秸秆覆盖等管理措施在野外原位条件下对茶园氮磷淋失的影响, 以期对茶园的氮磷淋失阻控提供科学依据。[方法] 以亚热带地区红壤丘陵茶园为研究对象, 通过设置不施肥(CK)、常规施肥(CON)、生物炭添加(BC)、生物炭+硝化/脲酶抑制剂(BNI)和秸秆覆盖(RS)共 5 个处理。在 1 a 的观测期间内监测土壤理化性质变化及自然降雨条件下各处理淋溶液氮磷流失。[结果] 观测期间, 相较于 CON 处理, BNI 处理土壤铵态氮和硝态氮质量分数最高且分别高出 2.8% 和 72.8%。BNI 处理土壤铵态氮和硝态氮质量分数高促进淋溶液总氮浓度的提高。各处理土壤氮磷淋溶主要发生于春夏多雨时期, BC 处理淋溶系数最高, 为 24.3%, RS 处理淋溶系数最低, 为 8.3%。对淋溶液总氮流失量, BNI 处理(275.0 kg/hm²)最高, RS 处理(65.9 kg/hm²)最低; 对淋溶液总磷流失量, 其流失形态以颗粒态磷为主, BC 处理(201.5 g/hm²)最高, RS 处理(32.4 g/hm²)最低。相较于 CON 处理, RS 处理淋溶液总氮流失量减少 43.6%; BNI 和 RS 处理淋溶液总磷流失量分别降低 39.1% 和 77.2%。[结论] 结合茶园土壤植物可利用养分含量及氮磷淋失的阻控能力, 秸秆覆盖是减少茶园氮磷流失有效的管理措施。

关键词: 生物炭; 硝化抑制剂; 脲酶抑制剂; 秸秆覆盖; 茶园; 淋溶; 养分流失

中图分类号: S157

文献标识码: A

Effects of Biochar Combined with Nitrification/Urease Inhibitor and Straw Mulching on Nitrogen and Phosphorus Leaching in Red Soil Tea Plantations

LIAO Qiyuan¹, LI Yuefeng¹, ZHAN Huixiu², TONG Chengli², FANG Xiantao²,
WANG Cong¹, WU Jinshui², SHEN Jianlin²

(1. Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Subtropical Agro-Bioresources, College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Key Laboratory of Agro-Ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of biochar combined with nitrification/urease inhibitors and straw mulching on nitrogen and phosphorus leaching under in situ field conditions, aiming to provide scientific evidence for controlling nitrogen and phosphorus leaching in tea plantations. [Methods] A red soil hillslope tea plantation in the subtropical region was selected as the study area. Five treatments were established: no fertilization (CK), conventional fertilization (CON), biochar addition (BC), biochar combined with nitrification/urease inhibitors (BNI), and straw mulching (RS). Over a one-year observation period, changes in soil physicochemical properties and leaching losses of nitrogen and phosphorus under natural rainfall conditions were monitored. [Results] During

收稿日期: 2025-01-26

修回日期: 2025-03-06

录用日期: 2025-03-21

资助项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1700801); 国家自然科学基金项目(42477378, 42161144002)

第一作者: 廖启元(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤氮磷循环研究。E-mail: 1762354141@qq.com

通信作者: 沈健林(1982—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事碳氮磷循环及环境效应研究。E-mail: jlshen@isa.ac.cn

王聪(1989—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事土壤碳氮循环研究。E-mail: wangcuriel@foxmail.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

the observation period, compared to the CON treatment, the BNI treatment exhibited the highest soil ammonium nitrogen and nitrate nitrogen mass fractions, which were 2.8% and 72.8% higher, respectively. The higher ammonium nitrogen and nitrate nitrogen levels in the BNI treatment led to an increase of total nitrogen concentration in the leaching solution. Soil nitrogen and phosphorus leaching primarily occurred during the rainy spring and summer seasons. The BC treatment showed the highest leaching coefficient at 24.3%, while the RS treatment had the lowest at 8.3%. For total nitrogen loss in leaching solution, the BNI treatment (275.0 kg/hm²) was highest, and the RS treatment (65.9 kg/hm²) was the lowest. For total phosphorus loss, particulate phosphorus was the dominant form of loss, with the BC treatment yielding the highest loss (201.5 g/hm²) and the RS treatment the lowest (32.4 g/hm²). Compared with the CON treatment, the RS treatment reduced total nitrogen loss in leaching solution by 43.6%, while the BNI and RS treatments decreased total phosphorus loss by 39.1% and 77.2%, respectively. [Conclusion] Considering both soil plant-available nutrient content and the effectiveness in controlling nitrogen and phosphorus leaching, straw mulching is an effective management practice for reducing nitrogen and phosphorus losses in tea plantations.

Keywords: biochar; nitrification inhibitor; urease inhibitor; straw mulching; tea plantation; leaching; nutrient loss

Received: 2025-01-26

Revised: 2025-03-06

Accepted: 2025-03-21

茶树(*Camellia sinensis*)是我国重要的经济作物之一。随着社会经济的高速发展,茶叶的种植面积在不断扩大。《“十四五”全国种植业发展规划》对茶产业的发展规划明确提出到2025年全国茶园面积要达到267万hm²,产量达300万t^[1]。为追求更高的经济利益,茶农往往向茶园投入大量的化肥。我国约有30%的茶园存在氮肥过量施用现象,50%的茶园存在磷肥过量施用现象,尤其在湖南、江西和四川等地^[2]。过量的氮磷投入增加其在土壤中的残留量和损失量,不仅影响茶叶的产量与品质,也增加茶园及周边区域环境污染的风险^[3-5]。地下淋溶是茶园土壤氮磷主要水体流失途径(地表径流和地下淋溶)之一^[6],探究能确保茶叶效益还能兼顾减少氮磷淋失的管理措施十分必要。

目前,生物炭添加、施用新型肥料或硝化/脲酶抑制剂和秸秆还田覆盖等管理措施是农田土壤养分流失常用阻控技术^[7-8]。相关研究^[9-11]通过土柱淋溶试验发现,在茶园土壤中添加生物炭可以提高土壤pH,促进土壤酶活性,增加茶园土壤的保水保肥能力。但也有模拟试验^[12-14]发现,生物炭的添加增大土壤氮磷流失的风险。硝化抑制剂能抑制土壤内亚硝化细菌活性,从而延缓铵态氮转化为硝态氮的速度,脲酶抑制剂可以通过抑制脲酶的活性来减缓尿素水解^[15]。有研究^[16-17]发现,生物炭和硝化/脲酶双抑制剂联合配施能减少稻田和小麦土壤氮素淋失40%以上。秸秆覆盖能增加土壤地表糙度,保水截流,减少土壤受到阳光的直接辐射。有研究^[18-20]表明,秸秆覆盖可以增加土壤有机质、碱解氮、有效磷、全氮和

全磷质量分数,并且还能有效降低地表径流的氮磷流失。虽然目前关于茶园土壤氮磷流失研究已有不少成果,但对茶园土壤氮磷淋失的研究主要集中于原状土柱试验和模拟盆栽试验,在自然条件下原位观测亚热带红壤茶园土壤氮磷淋失对生物炭协同硝化/脲酶抑制剂配施及秸秆覆盖等管理措施的响应研究较少。

本研究以亚热带红壤丘陵茶园为研究对象,通过设置常规施肥、生物炭添加、生物炭+硝化/脲酶抑制剂和秸秆覆盖等管理措施,在2023年5月至2024年4月开展氮磷淋失的周年监测,结合土壤理化性质及降雨等气象因子测定,明确茶园在这些管理措施下氮磷淋失的时间动态规律及关键环境因子的影响机制,以期亚热带红壤丘陵茶园氮磷淋失阻控提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖南省长沙县金井镇,该区域为中亚热带季风气候,年平均气温17.5℃,年平均降雨量1390mm,70%的年降雨量集中在每年的4—6月。试验地位于湖南湘丰茶叶集团的百里茶廊产业带(28°35'N, 113°20'E),海拔105m。该试验地于2022年建立,供试茶树的品种为“湘波绿”,土壤类型为花岗岩风化壳母质上发育的红壤。研究区域0~20cm土壤的基本理化性质为pH 4.29, SOC 24.1 g/kg, TN 1.98 g/kg, TP 0.53 g/kg, TK 33.1 g/kg。

1.2 试验设计

本研究观测时间为2023年5月至2024年4月,

共设置 5 个处理,每个处理 3 次重复(由于各处理内茶垄淋溶液化学性质差异不大,不同处理间茶垄差异显著,所以每个处理设置 3 个茶行和 1 个茶垄取样点用于加权计算反映茶园淋溶的整体情况)。试验地研究区域总面积 840 m²,各处理平均面积 168 m²,各小区平均面积 56 m²。各处理于 2022 年试验开始时均已设置完成,不同处理具体为:1)不施肥处理(CK);2)生物炭添加(BC):施用量为 28 t/hm²,为 0~20 cm 土层土壤重量的 1%,于 2022 年试验开始时一次性施用;3)生物炭+硝化/脲酶抑制剂(BNI):生物炭施用量为 28 t/hm²,于 2022 年试验开始时一次性施用,抑制剂施用量为氮肥施用量 1%;4)秸秆覆盖(RS):秸秆覆盖用量为 14 t/(hm²·a);5)常规施肥(CON):当地茶农常规施氮量 600 kg/(hm²·a)。氮肥采用尿素(折合成纯 N 450 kg/hm²)和菜籽饼有机肥(折合成纯 N 150 kg/hm²)配合施用,其中菜籽饼有机肥施于 2023 年 12 月,尿素施于 2023 年 4、9 月。供试生物炭与菜籽饼有机肥理化性质见表 1。氮肥施用方式为茶垄单侧沟施,施于 10~15 cm 土层,并覆土防止氮素损失。磷肥施用量 68 kg/hm²(折合成纯 P),肥料为过磷酸钙,施于 2023 年 4 月。其他管理措施按当地习惯进行,2023 年各处理管理措施同 2022 年一致。考虑到施肥和管理成本,本试验选择的茶园总面积有限,为减少不同处理间相邻排列的交叉污染,且本茶园地力相对均一,各样地未随机排列。而是处理随机排列后,3 个重复样地紧

挨排列。具体田间试验设计和施肥量分别见图 1 和表 2。

表 1 生物炭与菜籽饼肥理化性质
Table 1 Physicochemical properties of biochar and rapeseed cake fertilizer

类别	pH	SOC/ (g·kg ⁻¹)	TN/ (g·kg ⁻¹)	TP/ (g·kg ⁻¹)	TK/ (g·kg ⁻¹)
生物炭	9.48	484	7.3	2.0	24.2
菜籽饼肥	5.59	459	45.1	28.2	14.0

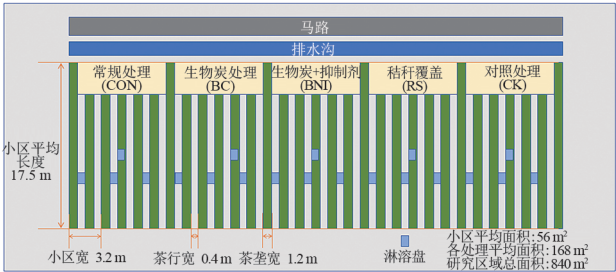


图 1 田间试验设计

Fig. 1 Field experimental design

1.3 样品采集与分析方法

1.3.1 样品采集 1)淋溶盘布置:将长 0.4 m、宽 0.3 m 且底部具有一定坡度的淋溶盘以开挖掩埋的方法埋入各小区土壤 0.6 m 深度处,再将 1.2 m 高和直径 0.16 m 的圆管埋入土中并用 PVC 导流管连接淋溶盘用于收集淋溶水样,具体见图 2。每个处理布置 4 个淋溶盘(3 个小区茶行间各布置 1 个,随机 1 个小区茶垄布置 1 个),5 个处理布置 20 个淋溶盘。

表 2 各处理施肥量

Table 2 Fertilizer application rates under different treatments		kg/hm ²		
处理	2023 年 4 月		2023 年 9 月	2023 年 12 月
	P	N	N	N
不施肥(CK)	0	0	0	0
常规施肥(CON)	68	300	150	150
生物炭添加(BC)	68	300	150	150
生物炭+DMPP+NBPT(BNI)	68	300	150	150
秸秆覆盖(RS)	68	300	150	150

注:DMPP 为硝化抑制剂;NBPT 为脲酶抑制剂;施肥量折合为纯 N 和纯 P。

2)淋溶液样品采集:用淋溶盘收集各处理的淋溶水样,采集频率为每月 1 次。采集样品时使用抽水泵抽净圆管中淋溶液,记录淋溶水量体积并采集 250 mL 样品及时运回实验室存于一 18℃冰柜待测。

3)土壤样品采集:在不同处理的小区内,采用直径为 2.5 cm 的土钻通过五点取样法采集 0~20 cm 土层土壤,剔除可见凋落物和根系后,混匀装入自封袋,带回实验室。一部分以鲜样保存于 4℃冰箱内备用,剩余土样放置在通风阴凉处自然晾干,避免阳光照射,风干后挑出土样中的根系、石头等杂物,研磨

过 20 目筛,部分再研磨过 100 目筛,密封保存,采集频率为 2 次/月。

4)降雨量数据由试验基地自动气象站记录。

1.3.2 样品分析 1)水样分析方法以《水和废水监测分析方法》(2002)为准,测定指标包括总氮(TN)、铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、总磷(TP)和可溶态总磷(STP)。淋溶样品 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 浓度在经过 0.45 μm 水系滤膜过滤后均直接用连续流动分析仪(AA3)测定;TN 和 TP 分别采用碱性过硫酸钾和过硫酸钾消解后用连续流动分析仪(AA3)测定浓度。

2) 土壤样品分析测定: 土壤 pH 采用酸度计 (PHS-3C 型) 测定 (土水比为 1:2.5)。土壤铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 和硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 采用 K_2SO_4 (0.5 mol/L) 溶液浸提 (30 g 土样添加 80 mL 浸提液), 用连续流动分析仪 (AA3) 测定。土壤绝对含水率 (土壤含水率) 采用烘干称重法测定。土壤可溶性有机碳 (DOC) 采用 TOC 仪法测定。土壤体积质量采用田间环刀法于 2024 年 4 月 27 日测定。

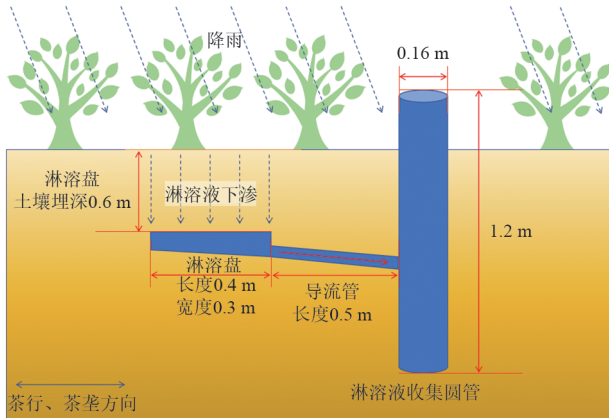


图 2 淋溶盘原理示意

Fig. 2 Schematic diagram illustrating working principle of leaching pan

1.4 数据分析

为体现茶园淋溶整体情况, 将处理内各小区监测到的指标先按茶行和茶垄的宽度 (小区茶行和垄长度一致) 进行加权处理。计算公式为:

$$I(\text{leaching}) = \frac{0.4I(\text{TS}) + 1.2I(\text{TR})}{1.6} \quad (1)$$

式中: $I(\text{leaching})$ 为淋溶液各指标加权值, 指标包括淋溶体积 $V(\text{leaching})$ 和氮磷各组分浓度 $C(\text{leaching})$; $I(\text{TS})$ 为茶行监测值; $I(\text{TR})$ 为茶垄监测值; 0.4 为小区茶行宽度, m; 1.2 为小区茶垄宽度, m; 1.6 为小区茶行和茶垄总宽度, m。结果与分析均以加权值计算获得。

每公顷淋溶量和淋溶深度计算公式为:

$$Q(\text{leaching}) = \frac{10V(\text{leaching})}{0.12} \quad (2)$$

$$L(\text{leaching}) = \frac{Q(\text{leaching})}{10} \quad (3)$$

式中: $Q(\text{leaching})$ 为每公顷淋溶量, m^3/hm^2 ; $L(\text{leaching})$ 为淋溶深度, mm; 0.12 为淋溶盘面积, m^2 ; $V(\text{leaching})$ 为淋溶体积, L; 10 为换算系数。

每公顷淋溶液各组分流失量计算公式为:

$$Q_N(\text{leaching}) = \frac{C_N(\text{leaching})Q(\text{leaching})}{1\,000} \quad (4)$$

$$Q_P(\text{leaching}) = C_P(\text{leaching})Q(\text{leaching}) \quad (5)$$

式中: $Q_N(\text{leaching})$ 为淋溶液不同氮素组分的流失量, kg/hm^2 ; $C_N(\text{leaching})$ 为淋溶液不同氮素组分的流失浓度, mg/L ; $Q_P(\text{leaching})$ 为淋溶液不同磷素组分的流失量, g/hm^2 ; $C_P(\text{leaching})$ 为淋溶液不同磷素组分的流失浓度, mg/L 。

淋溶系数的计算公式为:

$$\beta(\text{leaching}) = \frac{L(\text{leaching})}{L(\text{Rain})} 100\% \quad (6)$$

式中: $\beta(\text{leaching})$ 为淋溶系数; $L(\text{leaching})$ 为淋溶深度, mm; $L(\text{Rain})$ 为降雨量, mm。

总氮和总磷损失率的计算公式为:

$$\text{LR}_N(T) = \frac{Q_N(T) - Q_N(\text{CK})}{600} 100\% \quad (7)$$

$$\text{LR}_P(T) = \frac{Q_P(T) - Q_P(\text{CK})}{68} 100\% \quad (8)$$

式中: $\text{LR}_N(T)$ 为除 CK 外各处理的总氮损失率; $Q_N(T)$ 为除 CK 外各处理总氮流失量, kg/hm^2 ; $Q_N(\text{CK})$ 为 CK 处理总氮流失量, kg/hm^2 ; $\text{LR}_P(T)$ 为除 CK 外各处理总磷损失率; $Q_P(T)$ 为除 CK 外各处理总磷流失量, kg/hm^2 ; $Q_P(\text{CK})$ 为 CK 处理总磷流失量, kg/hm^2 ; 600 为氮素施用量 (折合成纯氮, kg/hm^2); 68 为磷素施用量 (折合成纯磷, kg/hm^2)。

试验数据分别采用 Microsoft Excel 2022、SPSS 2019、Origin 2022 和 Canoco 5 软件完成数据的计算、统计分析和图形绘制。不同处理差异显著性采用单因素方差分析 (One-way ANOVA)。

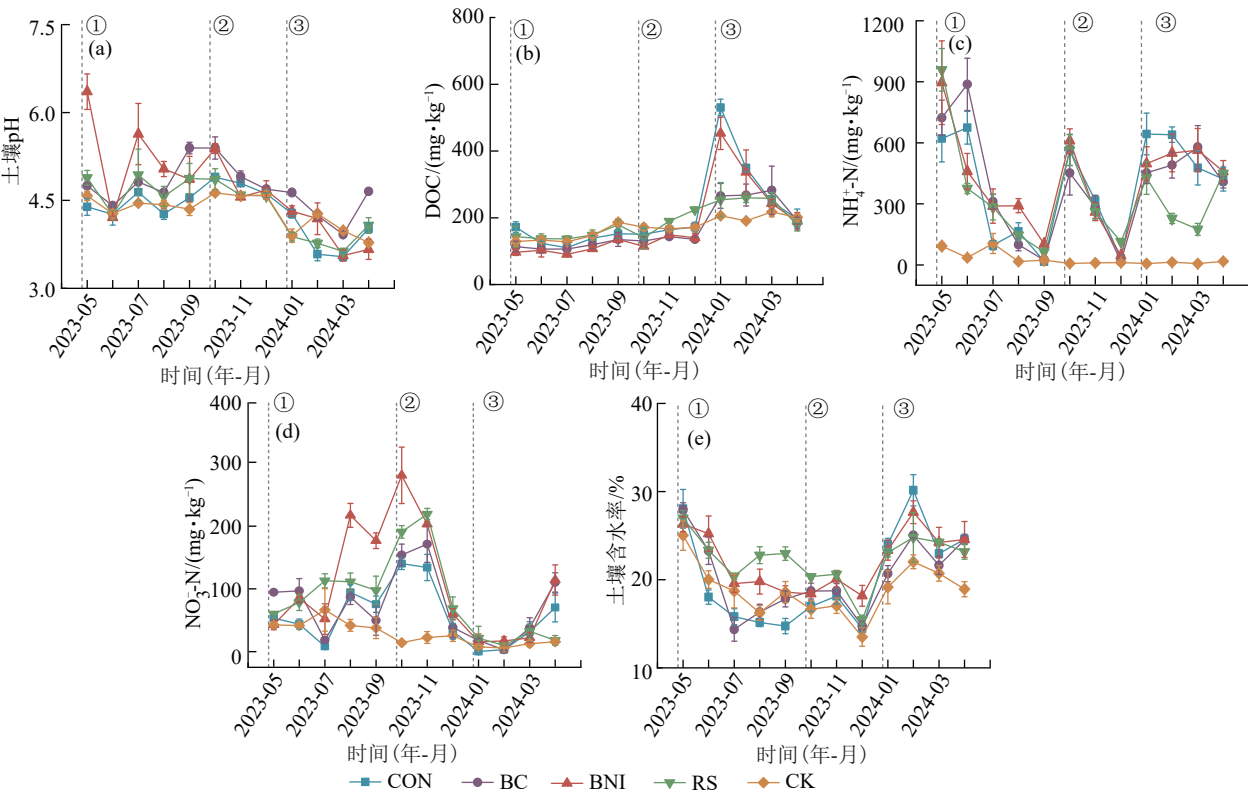
2 结果与分析

2.1 生物炭配施硝化/脲酶抑制剂及秸秆覆盖对茶园土壤理化性质的影响

观测期间茶园各处理 0~20 cm 土层土壤理化性质动态特征见图 3。除 CK 外, 各处理土壤理化性质变化特征相似, 土壤 pH 在 2023 年 9 月施肥后逐渐下降。菜籽饼肥促进各处理土壤 DOC 质量分数的增加, 在 2023 年 12 月施用菜籽饼肥后, CON 和 BNI 处理 DOC 质量分数陡增, 分别达 530.2、452.9 mg/kg 。施肥显著提高土壤铵态氮质量分数, 且菜籽饼肥因其缓释特性使施肥后土壤铵态氮质量分数下降速率显著低于尿素。对于土壤硝态氮, 其在 2024 年 1—3 月质量分数较低, 可能是因为冬季气温低, 硝化细菌不活跃, 硝化作用弱导致。硝化抑制剂降低土壤硝态氮质量分数, 增加土壤铵态氮质量分数, 但 BNI 处理土壤硝态氮质量分数在 2023 年 8—10 月显著高于

其他处理,最高达 281.0 mg/kg,其原因可能与生物炭改善土壤通气性,促进硝化作用有关。总体上,对于土壤 pH,各施肥处理较 CON 处理均增加,其中 BC 和 BNI 处理增加显著($p<0.05$)(表 3)。对于土壤 DOC,CON 处理最高,且显著高于 BC 处理($p<0.05$),BC、BNI 和 RS 处理相较于 CON 处理分别降低 18.3%、14.0% 和 6.8%。对于土壤无机氮,RS 处理土壤铵态氮质量分数显著低于其他施肥处理($p<0.05$),相较于 CON 处理,RS 减少 17.0%。BNI 处理

土壤铵态氮质量分数最高,且高出 CON 处理 2.8%,差异不显著。除 CK 外各处理相较于 CON 均显著增加土壤硝态氮质量分数($p<0.05$),BC、BNI 和 RS 处理分别增加 26.0%、72.8% 和 43.1%。对于土壤体积质量,除 CK 外,各处理间差异不显著,BC 处理相较于 CON 处理土壤体积质量降低比率最大,达 3.5%。各施肥处理间土壤含水率差异不显著,其中 CON 和 BC 处理土壤含水率较 BNI 和 RS 处理较低,分别为 20.2% 和 20.3%。



注:图 3a、图 3b、图 3c、图 3d 和图 3e 分别为各处理土壤 pH、DOC 质量分数、铵态氮质量分数、硝态氮质量分数和含水率动态变化;图中①为 4 月施氮肥和磷肥时间,②和③分别为 9 月和 12 月施氮肥时间。

图 3 观测期间茶园不同处理土壤理化性质动态变化

Fig. 3 Dynamic changes in soil physicochemical properties under different treatments in tea plantation during observation period

表 3 观测期间茶园不同处理平均土壤理化性质

Table 3 Mean soil physicochemical properties under different treatments in tea plantation during observation period

处理	pH	DOC/(mg·kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/(mg·kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N/(mg·kg ⁻¹)	土壤含水率/%	体积质量/(g·cm ⁻³)
CON	4.32±0.03b	203.9±1.1a	399.7±20.4a	58.9±6.2c	20.2±1.6ab	1.42±0.01ab
BC	4.70±0.03a	166.6±19.6b	410.8±14.0a	74.2±4.4b	20.3±1.2ab	1.37±0.02b
BNI	4.71±0.02a	175.4±6.6ab	425.9±14.7a	101.8±4.3a	22.2±1.0a	1.38±0.01ab
RS	4.40±0.04b	190.0±1.9ab	331.9±14.8b	84.3±7.8b	22.4±0.8a	1.38±0.02ab
CK	4.34±0.01b	168.7±1.4b	28.0±2.0c	27.7±2.5d	18.9±0.9b	1.44±0.01a

注:表中数据为平均值±标准差;不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

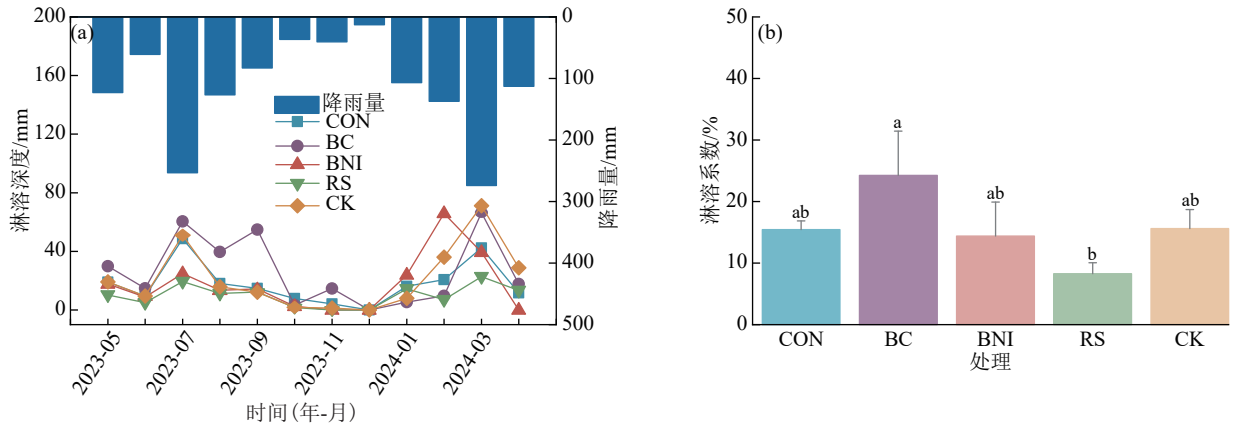
2.2 生物炭配施硝化/脲酶抑制剂及秸秆覆盖下降水量与淋溶深度关系

观测期间,各处理淋溶深度变化趋势相似,且淋溶产生量与降水量显著相关,淋溶液主要产生于春夏多雨时期,10—12 月淋溶液较少(图 4a)。在各

处理中,CK、BC 和 RS 处理单次最大淋溶深度位于 2024 年 3 月,分别为 71.2、66.4、22.7 mm。BNI 和 CON 处理单次最大淋溶深度分别为 65.9、48.6 mm,分别在 2024 年 2 月和 2023 年 7 月。研究结果显示,各处理淋溶系数中,BC 处理的系数为 24.3%,显著高

于 RS 处理(8.3%)($p < 0.05$)(图 4b),其原因可能与 BC 处理施加生物炭提高土壤孔隙度和导水率促进

水分入渗,RS 处理施加秸秆增强土壤保水能力且减缓水分入渗有关。



注:图 4a 为各处理淋溶深度与降雨量动态变化;图 4b 为各处理淋溶系数特征。

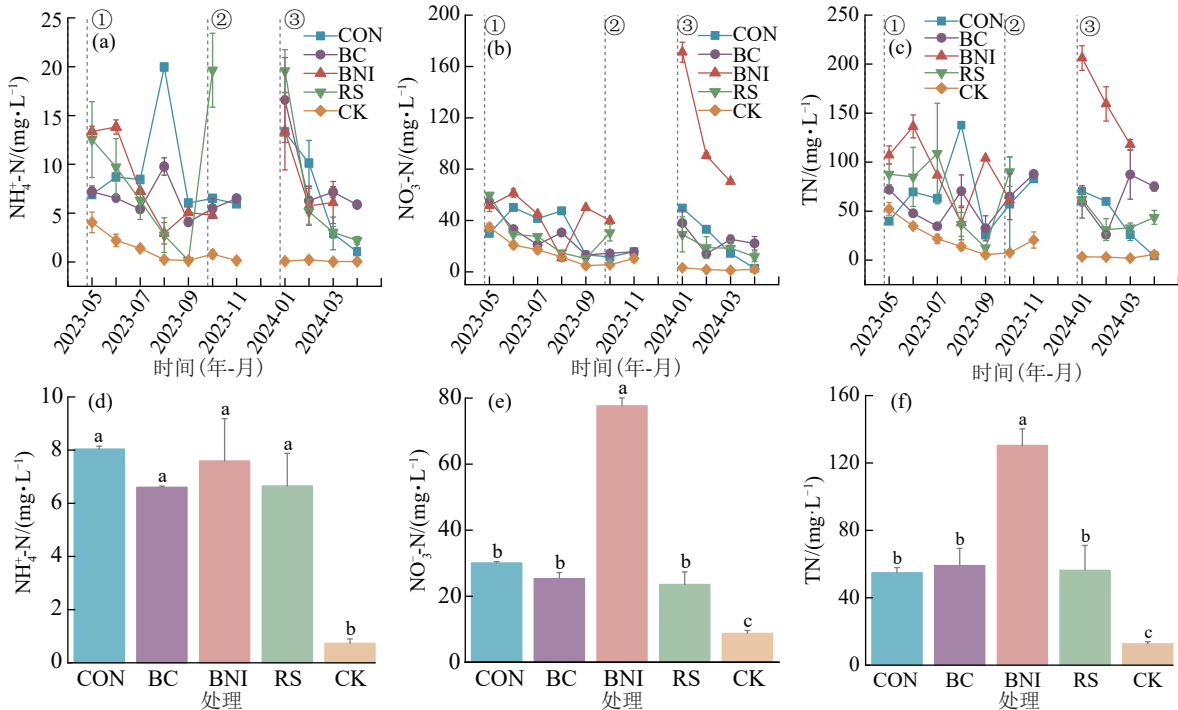
图 4 观测期间茶园淋溶深度与降雨量特征

Fig. 4 Leaching depth and rainfall characteristics in tea plantation during observation period

2.3 生物炭配施硝化/脲酶抑制剂及秸秆覆盖对氮素淋失的影响

从图 5 可以看出,各处理硝态氮质量浓度水平比铵态氮质量浓度更高,且 BNI 处理硝态氮和总氮质量浓度在 1—3 月突出(图 5b 和图 5c),高于其他处理。总体来看,各施肥处理中淋溶液铵态氮质量浓度差异不显著,其中 CON 处理最高(图 5d),达 8.0 mg/L,BC 处

理最低,为 6.6 mg/L,BC 处理较 CON 处理低 17.5%。其余 BNI 和 RS 处理淋溶液铵态氮质量浓度较 CON 处理分别低 5.0% 和 16.2%。淋溶液硝态氮质量浓度和总氮质量浓度均为 BNI 处理最高(图 5e 和图 5f),分别为 77.7、130.4 mg/L,显著高于其他处理($p < 0.05$)。CON、BC 和 RS 处理间淋溶液硝态氮质量浓度和总氮质量浓度差异不显著。



注:图 5a、图 5b 和图 5c 分别为各处理淋溶液铵态氮、硝态氮和总氮质量浓度动态变化;图 5d、图 5e 和图 5f 分别为各处理淋溶液铵态氮、硝态氮和总氮平均质量浓度特征;图中①、②和③分别为 4 月、9 月和 12 月施肥时间。

图 5 观测期间茶园淋溶液氮素质量浓度特征

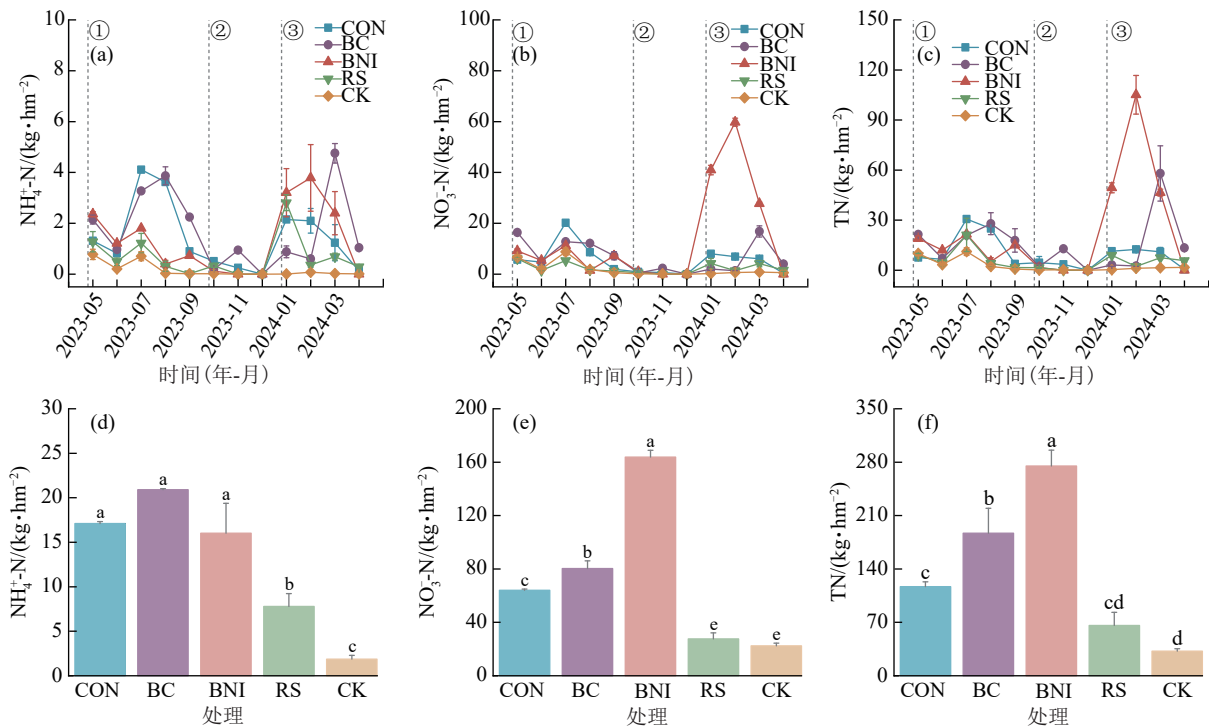
Fig. 5 Nitrogen mass concentration characteristics in leaching solution of tea plantation during observation period

观测期间茶园淋溶液氮素流失量特征见图 6。结果显示,茶园淋溶液氮素流失主要发生于 1—9 月,与降雨的主要发生时间一致。CON、BC 和 BNI 处理铵态氮

流失量在 2—3、7—8 月存在明显高于其他处理的峰值(图 6a)。1—3 月 BNI 处理硝态氮和总氮流失量突出,高于其他处理(图 6b 和图 6c)。在施肥处理中,淋溶液

铵态氮流失总量BC处理最高(图6d),达20.9 kg/hm²。相较于CON处理铵态氮流失总量,BNI和RS处理分别降低6.4%和54.4%,BC处理增加22.2%。BNI处理硝态氮和总氮流失量显著高于其他处理($p<0.05$) (图6e和图6f)。相较于CON处理硝态氮流失总量,RS处理降低56.9%,BC和BNI处理分别增加25.5%

和156.0%。相较于CON处理(116.8 kg/hm²)总氮流失总量,RS处理(65.9 kg/hm²)分别降低43.6%,BC(187.0 kg/hm²)和BNI处理(275.0 kg/hm²)分别增加60.1%和135.5%。各施肥处理中铵态氮流失量占总氮流失量比率为5.8%~14.6%,硝态氮流失量占总氮流失量比率为41.9%~59.6%。



注:图6a、图6b和图6c分别为各处理淋溶液铵态氮、硝态氮和总氮流失量动态变化;图6d、图6e和图6f分别为各处理淋溶液铵态氮、硝态氮和总氮全年累积流失量特征;图中的①、②和③分别为4月、9月和12月施氮肥时间。

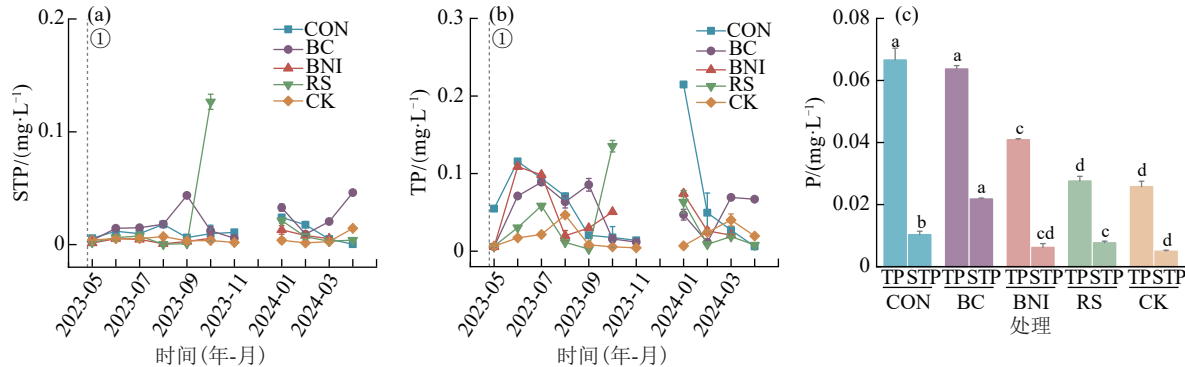
图6 观测期间茶园淋溶液氮素流失量特征

Fig. 6 Nitrogen loss characteristics in leaching solution of tea plantation during observation period

2.4 生物炭配施硝化/脲酶抑制剂及秸秆覆盖对磷素淋失的影响

观测期间茶园淋溶液磷素质量浓度见图7。研究结果显示,各处理的淋溶液磷素质量处于较低水平(图7a和图7b)。

对于可溶态总磷质量浓度(图7c),相较于CON处理,BC处理显著增加,BNI和RS显著减少($p<0.05$)。对于总磷质量浓度,各施肥处理均低于CON处理并且CON处理与BNI和RS处理差异显著($p<0.05$)。



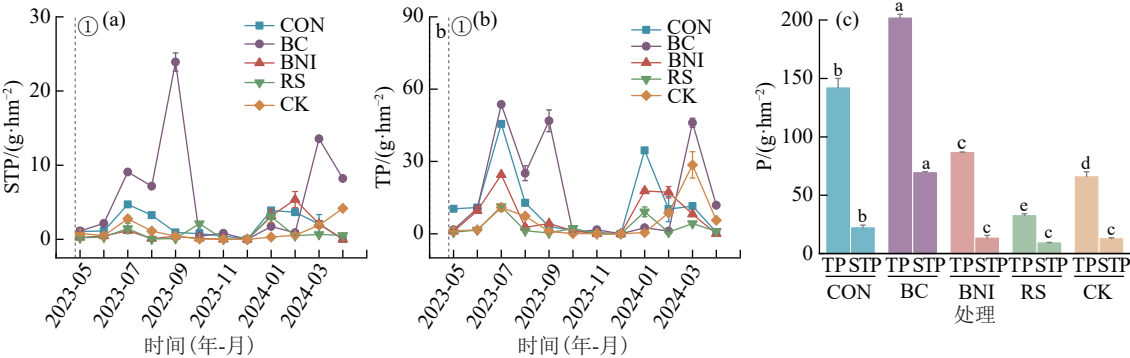
注:图7a和图7b分别为各处理淋溶液可溶态总磷和总磷质量浓度动态变化;图7c为各处理淋溶液可溶态总磷和总磷平均质量浓度特征;图中①为4月施磷肥时间。

图7 观测期间茶园淋溶液磷素质量浓度特征

Fig. 7 Phosphorus mass concentration characteristics in leaching solution of tea plantation during observation period
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

研究结果显示,茶园淋溶液可溶态总磷和总磷流失主要发生于1—9月(图8a和图8b),与降雨主要发生时间一致。BC处理淋溶液可溶态总磷和总磷流失量在3月、7月和9月有明显峰值,单月可溶态总磷和总磷流失量最高分别为23.9、53.7 g/hm²。在施肥处理中,BC处理淋溶液可溶态总磷和总磷流失总量最高且显著高于其他处理,分别为69.0、201.5 g/hm²($p<0.05$)(图8c)。RS处理淋溶液总磷

流失量最低,且显著低于其他处理,为32.4 g/hm²($p<0.05$)。相较于CON处理,对于可溶态总磷流失量BC处理提高214.8%,BNI和RS处理分别降低40.3%和59.0%;对于总磷流失量BC处理提高42.3%,BNI和RS处理总磷流失量分别降低39.1%和77.2%。各处理可溶态总磷流失量占总磷流失量比为15.17%~34.26%,说明颗粒态磷是磷素流失的主要形态。



注:图8a和图8b分别为各处理淋溶液可溶态总磷和总磷流失量动态变化;图8c为各处理淋溶液可溶态总磷和总磷全年累积流失量特征;图中①为4月份施磷肥时间。

图8 观测期间茶园淋溶液磷素浓度及流失量特征

Fig. 8 Phosphorus concentration and loss characteristics in leaching solution of tea plantation during observation period

2.5 肥料氮磷损失及应用

各处理总氮和总磷损失率见表4。BNI和BC处理总氮损失率分别为40.5%和25.8%,显著高于其他处理($p<0.05$)。CON和RS处理总氮损失率分别为14.1%和5.6%,RS处理总氮损失率较CON处理低,但差异不显著。说明相较于CON处理,BNI和BC处理显著促进总氮损失,RS处理减少总氮损失。BC处理总磷损失率为0.20%,显著高于其他处理($p<0.05$)。CON、BNI和RS的总磷损失率分别为0.11%、0.03%和0%,BNI和RS处理总磷损失率显著低于CON处理($p<0.05$)。说明相较于CON处理,BC处理显著促进总磷损失,BNI和RS处理显著降低总磷损失($p<0.05$)。

各处理肥料淋失量(氮磷损失率与氮磷施肥量

之积)与可减施量(CON处理与各处理肥料淋失量之差)见表5。结果显示,RS处理可减施50.8 kg/hm²氮肥;BNI和RS处理分别可减施55.3、76.1 g/hm²磷肥。BC处理氮肥和磷肥可减施量及BNI处理氮肥可减施量均为负值,说明其不能减少肥料施用。肥料减施还需要进一步结合茶树氮磷吸收,经过多年试验来验证。

表4 各处理总氮和总磷损失率

Table 4 Total nitrogen and total phosphorus loss rates for each treatment %

处理	TN	TP
CON	14.1±1.1c	0.11±0.01b
BC	25.8±5.4b	0.20±0a
BNI	40.5±3.4a	0.03±0c
RS	5.6±2.9c	0d

表5 各处理肥料淋失量及可减施量对比

Table 5 Comparison of fertilizer leaching losses and potential reduction in application amounts among treatments

处理	N肥		P肥	
	肥料淋失量/(kg·hm ⁻²)	可减施量/(kg·hm ⁻²)	肥料淋失量/(g·hm ⁻²)	可减施量/(g·hm ⁻²)
CON	84.6	0	76.1	0
BC	154.8	-70.2	135.9	-59.9
BNI	242.8	-158.3	20.7	55.3
RS	33.7	50.8	0	76.1

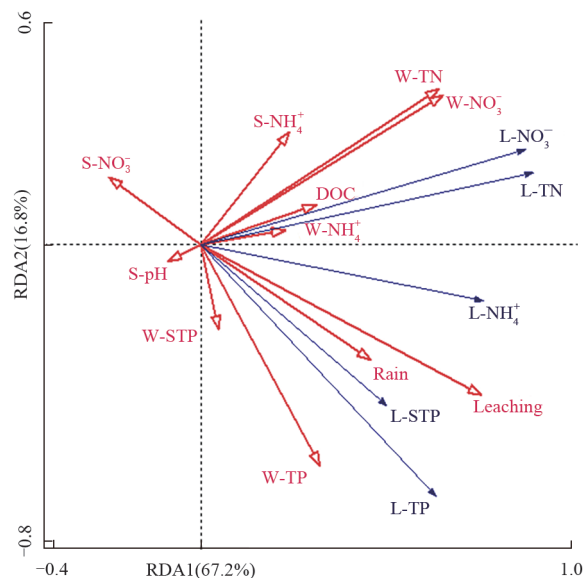
注:N肥和P肥的肥料淋失量和可减施量折合纯N和纯P。

2.6 茶园氮磷流失与环境因子冗余分析

将茶园淋溶液总氮、铵态氮、硝态氮、可溶态总

磷和总磷流失量作为响应变量,淋溶液总氮、铵态氮、硝态氮、可溶态总磷、总磷质量浓度、土壤pH、土

壤铵态氮、土壤硝态氮、土壤DOC质量分数、降雨量和淋溶深度作为环境变量。选择RDA模型进行冗余分析见图9。结果显示,第1主轴解释度为67.2%,第2主轴解释度为16.8%。淋溶液氮素流失量与淋溶液总氮、铵态氮、硝态氮、总磷质量浓度、土壤铵态氮、DOC质量分数、降雨量和淋溶深度呈正相关,与土壤硝态氮质量分数和土壤pH呈负相关。淋溶液可溶态总磷和总磷流失量与淋溶液可溶态总磷、总磷、总氮、铵态氮、硝态氮质量浓度、土壤DOC质量分数、降雨量和淋溶深度呈正相关,与土壤硝态氮质量分数和土壤pH呈负相关。



注:图中 $L-NH_4^+$ 为淋溶液铵态氮; $L-NO_3^-$ 为硝态氮; $L-TN$ 为总氮; $L-STP$ 为可溶态总磷; $L-TP$ 为总磷流失量; $W-NH_4^+$ 为淋溶液铵态氮; $W-NO_3^-$ 为硝态氮; $W-TN$ 为总氮; $W-STP$ 为可溶态总磷; $W-TP$ 为总磷质量浓度; $S-pH$ 为土壤pH; $S-NO_3^-$ 为土壤硝态氮; $S-NH_4^+$ 为土壤铵态氮; DOC 为DOC质量分数; $Rain$ 为降雨量和 $Leaching$ 为淋溶深度。

图9 观测期间茶园淋溶液氮磷流失与环境因子RDA冗余分析
Fig. 9 Redundancy analysis (RDA) of nitrogen and phosphorus leaching losses and environmental factors in tea plantation during observation period

3 讨论

3.1 生物炭添加及秸秆覆盖对淋溶系数的影响

淋溶系数反映在同一降水条件下不同碳氮管理措施的淋溶深度和淋溶难易程度,而土壤的孔隙结构决定土壤水分的入渗过程、持水容量和动力学特征,是影响淋溶系数的关键因素^[21]。本研究中,BC处理相较于CON处理显著提高土壤淋溶系数。其原因可能是生物炭的添加改变土壤的原有结构,增加土壤的孔隙大小与分布^[22-23]。一方面土壤孔隙度的增加提高土壤持水容量,在降雨到来时,地表水分能

够更快地入渗,减少地表径流的产生,使得BC处理相较于其他处理,土壤中降雨后留存的水量更多,增加可能发生淋溶下渗的水量基础^[24];另一方面,生物炭与土壤结合形成团聚体,促进土壤中大孔隙的形成,增加土壤中非毛细孔隙和毛细孔隙的比例,使得土壤中的水分在重力作用下能够更快地淋溶下渗^[25-27]。本研究中RS处理相较于其他管理措施淋溶系数最小。一方面虽然RS处理与BC处理一样能够在降雨到来时减少地表径流发生,但是RS处理秸秆覆盖能够发挥截流作用避免降雨与土壤表层直接接触并保存部分水分于覆盖层中,使水分能够缓慢横向分散减少垂直入渗量^[28]。另一方面,秸秆分解后能够提高土壤中有机质质量分数,有机质含有大量的亲水基团,而且有机质能够促进土壤小孔隙的生成,提高土壤持水能力,减少淋溶下渗水量。可能是RS处理淋溶系数相较于其他管理措施最小的原因^[29]。综合而言,淋溶系数主要受到水分入渗量和土壤孔隙结构的影响。BC处理提高土壤孔隙度和非毛细孔隙占比,增大淋溶系数。RS处理通过降低水分垂直入渗量和提高土壤小孔隙占比,使淋溶系数减少。

3.2 生物炭配施硝化/脲酶抑制剂及秸秆覆盖对淋溶液氮素浓度的影响

淋溶液氮磷浓度与淋溶深度是组成淋溶液氮磷流失的直接因子。本研究中淋溶液硝态氮浓度BNI处理显著高于其他处理($p < 0.05$),从动态变化上(图5b)可以发现,在9月之前,BNI处理淋溶液硝态氮质量浓度与其他施肥处理差别不大,但在12月施加菜籽饼肥之后,BNI处理淋溶液硝态氮质量浓度显著高于其他处理。其原因可能是脲酶抑制剂和硝化抑制剂存在有效期,在10—12月这段淋溶“空窗期”中,硝化抑制剂和脲酶抑制剂失效后土壤中的铵态氮质量分数高,且生物炭添加改善土壤通气性,促进硝化作用,从而BNI处理淋溶液硝态氮质量浓度显著高于其他处理^[30-31]。该结果在土壤平均理化性质(表3)中得到证明。BNI处理土壤铵态氮和硝态氮质量分数最高,且硝态氮质量分数显著高于其他处理($p < 0.05$)。本研究中,BC和RS处理淋溶液硝态氮质量浓度相较于CON处理有所降低,BC处理低于CON处理原因可能是生物炭存在多孔结构,并提高土壤阳离子交换量,增强土壤对硝态氮的吸附能力^[32-33];RS处理低于CON处理原因可能是RS处理水分存储能力强,减少土壤中水分对硝态氮的冲刷,减少淋溶液中硝态氮的质量分数^[34]。淋溶液中硝态氮是淋溶液总氮的主要组分,

淋溶液硝态氮质量浓度变化主导着淋溶液总氮质量浓度的变化,所以各处理淋溶液总氮质量浓度变化特征同淋溶液硝态氮质量浓度变化相似^[35]。该结果也在 RDA 分析(图 9)中得到验证,即淋溶液总氮质量浓度和淋溶液硝态氮质量浓度在 RDA 分析中呈正相关。

3.3 生物炭配施硝化/脲酶抑制剂及秸秆覆盖对淋溶液磷素浓度的影响

茶园土壤呈酸性,磷素施入土壤后易与土壤中 Al^{3+} 和 Fe^{3+} 等金属阳离子结合从而被土壤固定,相较于氮素更难流失,所以淋溶液总磷质量浓度相较于淋溶液氮素质量浓度更低^[36],与本研究结果一致。本研究中,淋溶液总磷质量分数 BNI 和 RS 处理显著低于 BC 处理($p < 0.05$)。RS 处理淋溶液总磷质量浓度低的原因可能与 RS 处理氮素淋溶液质量浓度较低原因一致,与 RS 处理持水能力强相关^[34]。BC 处理总磷质量浓度高说明单独添加生物炭不能减少淋溶液中总磷的淋失,其原因可能是一方面生物炭主要通过其比表面加大和孔隙多的特性对磷素进行物理吸附,而物理吸附的磷不稳定,易被淋失^[37]。另一方面,生物炭添加提高土壤孔隙度,减少地表径流增加水分入渗使 BC 处理淋溶系数高,土壤中磷素受到重力水的冲刷作用强,促进磷的淋失。BNI 处理淋溶液总磷质量浓度显著低于 BC 处理,说明生物炭和硝化/脲酶抑制剂配施相较于单独施用生物炭能更好地降低淋溶液中磷素质量浓度。其原因可能是硝态氮和磷酸根同为阴离子,与土壤胶体的吸附点位存在竞争,BNI 处理土壤硝态氮质量分数高,占据土壤胶体表面更多的吸附位点,减少土壤胶体对磷素的吸附,从而降低颗粒态磷质量分数,而淋溶液磷素流失主要形态为颗粒态磷,土壤中颗粒态磷的减少降低淋溶液中总磷的质量浓度^[12,38]。

本研究中,相较于 CON 处理,BNI 处理和 BC 处理总氮流失量及损失率显著增加,RS 处理总氮流失量有所降低,总氮流失率显著降低,说明对氮素的阻控上 RS 处理效果更佳。相较于 CON 处理,BC 处理总磷流失量和损失率显著增加,BNI 和 RS 处理总磷流失量和损失率显著降低,说明对磷素的阻控上,BNI 和 RS 处理效果更佳。结合土壤中植物可吸收利用的养分含量上看,RS 处理能够在保证茶园效益的同时减少土壤中氮磷养分的淋失。

4 结 论

1) 观测期间,相较于 CON 处理,RS 处理减少 17.0% 土壤铵态氮质量分数,差异显著。其他处理土壤铵态氮质量分数与 CON 处理差异不显著。除 CK 外各

处理相较于 CON 均显著增加土壤硝态氮质量分数,BC、BNI 和 RS 处理分别增加 26.0%、72.8% 和 43.1%。

2) 各处理淋溶主要发生于春夏多雨时期,BC 处理淋溶系数最高,为 24.3%,RS 处理淋溶系数最低,为 8.3%。

3) BC 和 BNI 处理淋溶系数及土壤铵态氮和硝态氮质量分数较高,导致其淋溶液总氮流失量和损失率显著高于 RS 处理。相较于 CON 处理,RS 处理通过减少淋溶液产生来阻控氮素流失,淋溶液总氮流失量减少 43.6%。

4) 淋溶液总磷流失形态以颗粒态磷为主,BC 处理因淋溶系数高使其总磷流失量和损失率显著高于 CON、BNI 和 RS 处理。相较于 CON 处理,BNI 和 RS 处理通过减少颗粒态磷流失和淋溶液产生来达到阻控磷素淋失的目的,淋溶液总磷流失量分别降低 39.1% 和 77.2%。

结合茶园土壤养分及氮磷淋失的阻控能力,RS 处理是减少茶园氮磷淋失有效的管理措施。后续可以在此基础上结合茶园径流和泥沙中氮磷的流失对本研究进行扩展优化。

参考文献:

- [1] 农业农村部关于印发《“十四五”全国种植业发展规划》的通知[J].中华人民共和国农业农村部公报,2022(2):26-43.
Notice of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs on the issuance of the "14th Five-Year Plan" national planting industry development plan[J].Bulletin of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China,2022(2):26-43.
- [2] 倪康,廖万有,伊晓云,等.我国茶园施肥现状与减施潜力分析[J].植物营养与肥料学报,2019,25(3):421-432.
NI K, LIAO W Y, YI X Y, et al. Fertilization status and reduction potential in tea gardens of China[J].Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2019,25(3):421-432.
- [3] 曾立雄,肖文发,黄志霖,等.三峡库区兰陵溪小流域养分流失特征[J].环境科学,2013,34(8):3035-3042.
ZENG L X, XIAO W F, HUANG Z L, et al. Characteristics of nutrient loss of lanlingxi watershed in the Three Gorges Reservoir area[J].Environmental Science,2013,34(8):3035-3042.
- [4] 韩晓飞,高明,谢德体,等.减磷配施有机肥对紫色土旱坡地磷素流失的消减效应[J].环境科学,2016,37(7):2770-2778.
HAN X F, GAO M, XIE D T, et al. Reduction effect of reduced phosphorus fertilizer and combining organic fertilizers on phosphorus loss of purple soil sloping field [J].Environmental Science,2016,37(7):2770-2778.
- [5] 吴金水,李勇,李裕元,等.亚热带区域农业面源污染流域源头防控机理与技术示范[J].农业现代化研究,2018,39(6):1009-1019.

- WU J S, LI Y, LI Y Y, et al. Controlling mechanisms and technology demonstrations of agricultural non-point source pollution in subtropical catchments[J]. Research of Agricultural Modernization, 2018, 39(6): 1009-1019.
- [6] AHUJA L R, SHARPLEY A N, YAMAMOTO M, et al. The depth of rainfall-runoff-soil interaction as determined by ^{32}P [J]. Water Resources Research, 1981, 17(4): 969-974.
- [7] 付时丰, 许莹, 牛世伟, 等. 旱田土壤氮淋失阻控措施研究进展[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(6): 161-168.
- FU S F, XU Y, NIU S W, et al. Research progress of control measures for soil N leaching in dry farmland[J]. Environmental Science and Technology, 2020, 43(6): 161-168.
- [8] 蒋炳伸, 沈健林, 王娟, 等. 秸秆还田稻田土壤生物有效性磷及水稻磷吸收[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 309-317.
- JIANG B S, SHEN J L, WANG J, et al. Effect of straw incorporation on biologically-based phosphorus fractions and phosphorus uptake by rice in paddy field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 309-317.
- [9] VAN ZWIETEN L, KIMBER S, MORRIS S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. Plant and Soil, 2010, 327(1): 235-246.
- [10] 王峰, 陈玉真, 尤志明, 等. 生物黑炭对强酸性茶园土壤氮淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 111-115.
- WANG F, CHEN Y Z, YOU Z M, et al. Effect of biochar (*Camellia sinensis*) addition on nitrogen leaching in strong acid tea garden soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(1): 111-115.
- [11] CAO D Y, LAN Y, CHEN W F, et al. Successive applications of fertilizers blended with biochar in the soil improve the availability of phosphorus and productivity of maize (*Zea mays* L.)[J]. European Journal of Agronomy, 2021, 130: e126344.
- [12] 张一, 李厚华, 何绪生, 等. 不同外源添加物质对土壤磷素淋溶和迁移特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(5): 151-156, 222.
- ZHANG Y, LI H H, HE X S, et al. Effect of different external materials on the leaching and movement characteristics of soil phosphorus[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(5): 151-156, 222.
- [13] LI Y Y, FENG G, TEWOLDE H, et al. Soil, biochar, and nitrogen loss to runoff from loess soil amended with biochar under simulated rainfall[J]. Journal of Hydrology, 2020, 591: e125318.
- [14] HARDIE M A, OLIVER G, CLOTHIER B E, et al. Effect of biochar on nutrient leaching in a young apple orchard[J]. Journal of Environmental Quality, 2015, 44(4): 1273-1282.
- [15] 石艳星. 脲酶/硝化双抑制剂缓释肥对番茄产量、品质及氮素利用率的影响研究[D]. 河北保定: 河北农业大学, 2014.
- SHI Y X. Effects of urease/nitrification inhibitor application on tomato yield, quality and the influence of nitrogen utilization research[D]. Baoding, Hebei: Agricultural University of Hebei, 2014.
- [16] HE T H, YUAN J J, XIANG J, et al. Combined biochar and double inhibitor application offsets NH_3 and N_2O emissions and mitigates N leaching in paddy fields[J]. Environmental Pollution, 2022, 292: e118344.
- [17] LAN T, HE X Q, WANG Q, et al. Synergistic effects of biological nitrification inhibitor, urease inhibitor, and biochar on NH_3 volatilization, N leaching, and nitrogen use efficiency in a calcareous soil-wheat system[J]. Applied Soil Ecology, 2022, 174: e104412.
- [18] 齐龙波, 周卫军, 郭海彦, 等. 覆盖和间作对亚热带红壤茶园土壤磷营养的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 593-597.
- QI L B, ZHOU W J, GUO H Y, et al. Phosphorus nutrient characteristics of tea plantation soils under rice-straw mulch and white-clover intercropping in hilly red-soils of South China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(3): 593-597.
- [19] 单武雄, 罗文, 肖润林, 等. 连续5年施菜籽饼肥和稻草覆盖对茶园土壤生态系统的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 472-476.
- SHAN W X, LUO W, XIAO R L, et al. Effect of 5-year rapeseed cake fertilization and straw mulching on tea plantation soil ecosystem[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(3): 472-476.
- [20] WANG K K, REN T, YAN J Y, et al. Straw returning mediates soil microbial biomass carbon and phosphorus turnover to enhance soil phosphorus availability in a rice-oilseed rape rotation with different soil phosphorus levels[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2022, 335: e107991.
- [21] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 40-45.
- LI Z, WU P T, FENG H, et al. Simulated experiment on effect of soil bulk density on soil infiltration capacity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(6): 40-45.
- [22] TAMMEORG P, SIMOJOKI A, MÄKELÄ P, et al. Short-term effects of biochar on soil properties and wheat yield formation with meat bone meal and inorganic fertiliser on a boreal loamy sand[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2014, 191: 108-116.
- [23] CASTELLINI M, GIGLIO L, NIEDDA M, et al. Impact of biochar addition on the physical and hydraulic properties of a clay soil[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 154: 1-13.
- [24] 孙宁婷, 王小燕, 周豪, 等. 生物炭种类与混施深度对紫色土水分运移和氮磷流失的影响[J]. 土壤学报,

- 2022, 59(3):722-732.
- SUN N T, WANG X Y, ZHOU H, et al. Effects of kind and incorporation depth of biochars on water movement and nitrogen and phosphorus loss in purple soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(3):722-732.
- [25] 齐瑞鹏, 张磊, 颜永毫, 等. 定容重条件下生物炭对半干旱区土壤水分入渗特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(8):2281-2288.
- QI R P, ZHANG L, YAN Y H, et al. Effects of biochar addition into soils in semiarid land on water infiltration under the condition of the same bulk density[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(8):2281-2288.
- [26] 王识然, 张琪, 王宇, 等. 垄沟秸秆覆盖还田对耕层土壤结构性及含水量的影响[J]. *吉林农业大学学报*, 2021, 43(5): 581-584.
- WANG S R, ZHANG Q, WANG Y, et al. Effects of furrows straw mulching on structure and water content of topsoil[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2021, 43(5):581-584.
- [27] 屠丹, 毛天旭. 添加生物炭对喀斯特地区黄壤饱和导水率的影响[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(5):108-113.
- TU D, MAO T X. Effect of biochar addition on saturated hydraulic conductivity of yellow soil in karst areas[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(5):108-113.
- [28] 张晴雯, 陈尚洪, 刘定辉, 等. 农业措施对玉米季坡耕地水沙过程的调控效应[J]. *核农学报*, 2016, 30(7):1395-1403.
- ZHANG Q W, CHEN S H, LIU D H, et al. Effects of agricultural activities on runoff, sediment and erodibility of purple soil from sloping cropland[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2016, 30(7):1395-1403.
- [29] 郑凤君, 王雪, 李生平, 等. 免耕覆盖下土壤水分、团聚体稳定性及其有机碳分布对小麦产量的协同效应[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(3):596-607.
- ZHENG F J, WANG X, LI S P, et al. Synergistic effects of soil moisture, aggregate stability and organic carbon distribution on wheat yield under No-tillage practice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(3):596-607.
- [30] 李涛, 石元亮, 李学文, 等. NBPT 在土壤中的降解及其影响因子[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(9):1082-1086.
- LI T, SHI Y L, LI X W, et al. Degradation and its affecting factors of NBPT in soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(9):1082-1086.
- [31] 茶正早, 林钊沐, 罗微. 德国新型硝化抑制剂 DMPP[J]. *安徽农学通报*, 2007, 13(12):46-48.
- CHA Z Z, LIN Z M, LUO W. German novel nitrification inhibitor DMPP[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2007, 13(12):46-48.
- [32] 陶朋闯, 陈效民, 靳译文, 等. 生物质炭与氮肥配施对旱地红壤微生物量碳、氮和碳氮比的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1):231-235.
- TAO P C, CHEN X M, JIN Z W, et al. Effects of biochar combined with nitrogen fertilizers on microbial biomass C, N and carbon-to-nitrogen ratio of upland red soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(1):231-235.
- [33] 李卓瑞, 韦高玲. 不同生物炭添加量对土壤中氮磷淋溶损失的影响[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(2):333-338.
- LI Z R, WEI G L. Effects of biochar with different additive amounts on the leaching loss of nitrogen and phosphorus in soils[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(2):333-338.
- [34] 马胜兰, 况福虹, 林洪羽, 等. 秸秆还田量对川中丘陵冬小麦-夏玉米轮作体系土壤物理特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(7):1344-1358.
- MA S L, KUANG F H, LIN H Y, et al. Effects of straw incorporation quantity on soil physical characteristics of winter wheat-summer maize rotation system in the central hilly area of Sichuan basin[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(7):1344-1358.
- [35] PIONKE H B, GBUREK W J, SCHNABEL R R, et al. Seasonal flow, nutrient concentrations and loading patterns in stream flow draining an agricultural hill-land watershed[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 220(1/2):62-73.
- [36] 李娟. 不同施肥处理对稻田氮磷流失风险及水稻产量的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- LI J. Effects of different fertilization treatments on rice yield and the risk of nitrogen and phosphorus losses from paddy field[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [37] 代银分, 李永梅, 范茂攀, 等. 不同原料生物炭对磷的吸附-解吸能力及其对土壤磷吸附解析的影响[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2016, 36(5):345-351.
- DAI Y F, LI Y M, FAN M P, et al. The study on phosphorus sorption-desorption capacity of different biochar and the effects of its amendment to soil[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2016, 36(5):345-351.
- [38] 褚军, 薛建辉, 金梅娟, 等. 生物炭对农业面源污染氮、磷流失的影响研究进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(4):409-415.
- CHU J, XUE J H, JIN M J, et al. Review of researches on effects of biochar in reducing nitrogen and phosphorus losses with agricultural nonpoint source pollution[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(4):409-415.