

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.001.

叶志成, 朱青, 廖凯华, 等. 天目湖流域茶园不同施肥水平与方式对茶叶品质和土壤氮磷淋失浓度的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 53-60, 68.
YE Zhicheng, ZHU Qing, LIAO Kaihua, et al. Effects of Different Fertilization Levels and Methods on Tea Quality and Leaching Concentrations of Nitrogen and Phosphorus in Soil in Tianmu Lake Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 53-60, 68.

天目湖流域茶园不同施肥水平与方式对茶叶品质和土壤氮磷淋失浓度的影响

叶志成^{1,2}, 朱青¹, 廖凯华¹, 李恒鹏¹, 赖晓明¹, 李保杰³, 刘亚^{1,2}

(1.中国科学院南京地理与湖泊研究所 流域地理学重点实验室, 南京 210008;

2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.南京信息工程大学 环境科学与工程学院, 南京 210044)

摘要: [目的]出于对天目湖流域水环境保护的需要,揭示施肥对茶叶品质和土壤氮磷淋失的影响机制,遴选流域内茶园最佳施肥模式,进而为天目湖流域面源污染治理提供理论支撑。[方法]基于长期定位试验,考虑了两种施肥方式(传统复合肥 CF 和优化缓释肥 OF),并设置了 CF/OF₁ (214.73, 74.26 kg/hm²), CF/OF₂ (245.40, 84.86 kg/hm²), CF/OF₃ (306.75, 106.08 kg/hm²) 和 CF/OF₄ (368.10, 127.30 kg/hm²) 4 个氮磷施用水平,以探讨其对天目湖茶园土壤氮磷淋失浓度和茶叶品质的影响。[结果]在同等施肥水平下,相较于 CF 处理,基于 OF 的茶园土壤溶解性总氮、硝态氮、溶解性总磷和正磷酸盐淋失浓度分别减少 40.22%~82.31%, 44.86%~62.39%, 26.67%~96.36% 和 20.00%~97.29%;不同施肥水平和方式对茶叶水浸出物含量的影响很小(变化范围 47.4%~48.7%),但对茶叶酚氨比的影响显著,其中 2022 年春茶以 CF₄ 最低(2.52),其次为 CF₁ (2.71) 和 OF₁ (2.76)。[结论]综合考虑茶叶品质和土壤氮磷淋失浓度等因素,采用 OF₁ 施肥模式可在确保研究区茶叶品质不降低的条件下有效减少土壤的氮磷淋失。

关键词: 天目湖流域; 茶园; 面源污染; 缓释肥; 氮磷淋失

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0053-08

Effects of Different Fertilization Levels and Methods on Tea Quality and Leaching Concentrations of Nitrogen and Phosphorus in Soil in Tianmu Lake Basin

YE Zhicheng^{1,2}, ZHU Qing¹, LIAO Kaihua¹, LI Hengpeng¹, LAI Xiaoming¹, LI Baojie³, LIU Ya^{1,2}

(1.Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology,

CAS, Nanjing 210008, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.School of

Environmental Science & Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: [Objective] According to the need for water environmental protection in the Tianmu Lake Basin, the effect mechanism of fertilization on tea quality and soil nitrogen (N) and phosphorus (P) leaching was revealed, and the optimal fertilization model of tea plantations in the basin was selected, so as to provide theoretical support for the control of non-point source pollution in Tianmu Lake Basin. [Methods] Basing on long-term located experiments, two fertilization methods such as conventional fertilization (CF) and optimizing fertilization (OF) were considered in this research, and four different N and P application levels, including CF/OF₁ (214.73 and 74.26 kg/hm²), CF/OF₂ (245.40 and 84.86 kg/hm²), CF/OF₃ (306.75 and

收稿日期: 2022-06-04

修回日期: 2022-07-05

资助项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(42125103); 国家自然科学基金面上项目(42171077); 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目(BK202200420); 中国科学院 A 类战略性先导科技专项“美丽中国生态文明建设科技工程”(XDA23020403); 中国科学院青年创新促进会基金(2020317); 中国科学院南京地理与湖泊研究所自主部署科研项目(NIGLAS2022GS10)

第一作者: 叶志成(1999—), 男, 安徽马鞍山人, 硕士研究生, 研究方向为氮磷生物地球化学循环。E-mail: yezhicheng21@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 廖凯华(1984—), 男, 江西吉安人, 博士, 副研究员, 主要从事农业面源氮磷流失模拟与控制研究。E-mail: khliiao@niglas.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

106.08 kg/hm²) and CF/OF₄ (368.10 and 127.30 kg/hm²) were designed to discuss the effects on N and P leaching concentration and tea quality in Tianmu Lake tea plantation. [Results] Under the same fertilization level, compared with CF treatment, the OF treatment had lower leaching concentration of dissolved total nitrogen, nitrate nitrogen, dissolved total phosphorus and orthophosphate in soil of tea plantation which decreased by 40.22%~82.31%, 44.86%~62.39%, 26.67%~96.36% and 20.00%~97.29%, respectively. Different fertilization levels and methods had little effect on the tea water extract content (ranging from 47.4% to 48.7%), but had a great effect on phenol/ammonia ratio of tea. Phenol/ammonia ratio in 2022 spring tea under CF₄ treatment was the lowest (2.52), followed by CF₁ treatment (2.71) and OF₁ treatment (2.76). [Conclusion] Considering tea quality and soil N and P leaching concentration, OF₁ model can both ensure a high quality of the tea and effectively reduce the N and P leaching in soil in the research area.

Keywords: Tianmu Lake Basin; tea plantations; non-point source pollution; slow-release fertilizer; nitrogen and phosphorus leaching

土壤中的氮磷是植物生长所必需的营养元素,也是湖库和水库等水体富营养化的重要诱因之一。自“绿色革命”以来,施用合成氮磷肥是实现农业高产的主要手段,近几十年我国肥料施用量的持续增加,为农业生产力的大幅度提高做出了重要贡献。然而,由于氮磷利用率不高,农业面源污染问题也日趋严重^[1]。其中,氮磷淋失是氮磷循环过程中的关键环节,不合理、粗放式的施肥方式会导致土壤中多余的氮磷溶解在壤中流中进入地表水和地下水,因此淋失过程是面源氮磷损失的主要途径之一^[2-3]。因此,研究土壤氮磷淋失特征对于保护区域水环境具有重要的现实意义。虽然控制面源污染亟需减少氮磷淋失,但同时也要提高农产品质量以满足全球日益增长的消费需求以及改善农产品质量和保证营养安全^[4]。以往在农业生产实践中,主要通过增施肥料来提高作物品质,然而施肥量与作物品质之间并非简单的线性关系,而当施肥量过大,作物品质将不会随施肥量增加而提高,甚至会导致品质下降^[5],且进一步加剧农业生态系统氮磷淋失^[6]。近年来,权衡农产品质量与农业生产环境效益之间的关系,成为农业生态和环境经济交叉学科研究的前沿热点^[7]。因此,在保障农产品质量的前提下,通过合理施肥实现氮磷减排是需要研究的关键科学问题。

太湖流域上游天目湖地区工农业生产发达,所产生的潜在氮磷污染物数量很大,面源氮磷流失过程也非常复杂,面源污染已严重制约了该区域社会经济可持续发展^[8]。尤其是近年来,天目湖流域剧烈的土地利用变化(如林地开发为茶园)严重影响了面源氮磷输移,这是因为茶园施肥量的大量增加,加上不合理、粗放式的施肥方式,导致茶树对氮磷的利用效率很低,进而加剧了面源氮磷输移,导致了流域水质下降和水体富营养化等问题^[9-10]。前人对于坡地茶园氮

磷流失的研究主要关注地表径流过程^[11-12],但由于天目湖流域丘陵山区中小区尺度的试验场地地表径流产流极少,氮磷主要以壤中流的形式流失^[13],因此本文主要关注氮磷的淋失过程。基于此,本研究以天目湖流域茶园生态系统为研究对象,通过长期的定位监测,对比和分析两种施肥方式下4个氮磷施用水平对茶叶品质和土壤氮磷淋失浓度的影响,并遴选出一种最适宜推广的茶园施肥模式,这对于平衡区域农业经济和水环境保护具有很重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区与试验样地概况

研究区位于中国科学院南京地理与湖泊研究所“天目湖流域生态观测研究站”(北纬 31°16′8″,东经 119°24′32″)(图 1),该地区气候为亚热带季风性气候,夏热冬温,四季分明,无霜期长,多年平均温度 17.3℃,7 月份温度最高,均温为 31.2℃,1 月份温度最低,均温为 2.9℃。多年平均降水量为 1 165.3 mm,降水主要集中在 6—9 月份,相当于全年降水量的 65%。试验场地处于低山丘陵区,由于长期的降雨冲刷,坡面侵蚀作用明显,土层较薄,平均坡度为 9°,接近天目湖流域平均种植坡度。坡面土壤类型为黄棕壤,砾石含量较高,透水性和透气性较好,坡面底部土壤为石英砂岩和火成岩等母岩,透水性差,水分难以下渗,主要以侧向的壤中流的形式运移。

1.2 施肥对比试验设计

天目湖流域生态观测研究站中 8 个 5 m×20 m 的标准径流小区于 2017 年 12 月建成,坡度 20°,各径流小区之间建有混凝土墙,墙体露出地面 20 cm,埋入地下 10 cm,修建时尽量不破坏土层。每个径流小区茶树数量约为 75 株,长势较均一,等高线种植,一般每年的 4 月份开始采茶,持续 15~25 d。采茶结束

后对茶树进行统一修剪,剪除上年度下半年以来生长的冠层,修剪后的枝叶平铺于行间,任其自由腐烂。除采茶和修剪之外,不定期对茶园进行人工除草,拔除的杂草平铺于茶树行间。本次试验在标准径流小区共设计 8 个施肥对比处理组,分别为 CF₁ (折氮量 214.73 kg/hm²,折磷量 74.26 kg/hm²),传统施肥;CF₂ (折氮量 245.40 kg/hm²,折磷量 84.86 kg/hm²),传统施肥;CF₃ (折氮量 306.75 kg/hm²,折磷量 106.08 kg/hm²),传统施肥;CF₄ (折氮量 368.10 kg/hm²,折磷量 127.30 kg/hm²),传统施肥;OF₁ (折氮量 214.73 kg/hm²,折磷量 74.26 kg/hm²),优化施肥;OF₂ (折氮量 245.40 kg/hm²,折磷量 84.86 kg/hm²),优化施肥;OF₃ (折氮量 306.75 kg/hm²,折磷量 106.08 kg/hm²),优化施肥;OF₄ (折氮量 368.10 kg/hm²,折磷量 127.30 kg/hm²),优化施肥。其中,传统

施肥 3 月基肥为菜籽饼(折氮磷钾率分别为 4.60%,1.08%,1.16%)和金正大复合肥(N-P₂O₅-K₂O=15-15-15),11 月追加复合肥;优化施肥 3 月基肥为菜籽饼和茂施缓释肥(N-P₂O₅-K₂O=18-9-20),11 月追肥为草酰胺氮肥(折氮率 31.80%),钙镁磷肥(折磷率 5.24%)以及农用硫酸钾(折钾率 41.49%)(表 1)。另外,考虑到坡地养分容易从坡顶往坡脚流失的规律,除了 CF₃ 为空间均一化施肥外,其余小区均为空间差异化施肥,即坡顶、坡上、坡中和坡脚的施肥量分别为坡面平均施肥量增肥 15%、增肥 5%、减肥 5%和减肥 15%。施肥时,离茶树基部 15 cm 处挖开深 10 cm 的浅沟,然后施肥,并覆盖土壤,以减少氨挥发的影响。小区的其他管理措施如除草、收获等均保持一致以尽量减少其他因素的影响。

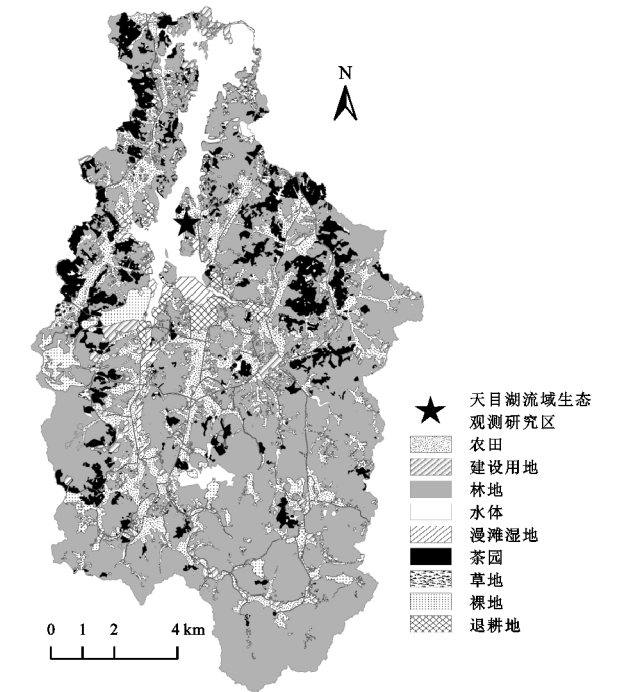


图 1 研究区位置和天目湖流域生态观测站茶园坡地小区实景

表 1 小区施肥方案

项目	CF ₁	CF ₂	CF ₃	CF ₄	OF ₁	OF ₂	OF ₃	OF ₄
11 月基肥	2100 kg/hm ² 菜籽饼 + 525 kg/hm ² 复合肥	2400 kg/hm ² 菜籽饼 + 600 kg/hm ² 复合肥	3000 kg/hm ² 菜籽饼 + 750 kg/hm ² 复合肥	3600 kg/hm ² 菜籽饼 + 900 kg/hm ² 复合肥	2100 kg/hm ² 菜籽饼 + 525 kg/hm ² 缓释肥	2400 kg/hm ² 菜籽饼 + 600 kg/hm ² 缓释肥	3000 kg/hm ² 菜籽饼 + 750 kg/hm ² 缓释肥	3600 kg/hm ² 菜籽饼 + 900 kg/hm ² 缓释肥
					74.3 kg/hm ² 草酰胺氮肥	84.9 kg/hm ² 草酰胺氮肥	106.1 kg/hm ² 草酰胺氮肥	127.3 kg/hm ² 草酰胺氮肥 + 1012.4 kg/hm ² 钙镁磷肥
3 月追肥	262.50 kg/hm ² 复合肥	300 kg/hm ² 复合肥	375 kg/hm ² 复合肥	450 kg/hm ² 复合肥	+590.6 kg/hm ² 钙镁磷肥	+675.0 kg/hm ² 钙镁磷肥	+843.7 kg/hm ² 钙镁磷肥	1012.4 kg/hm ² 钙镁磷肥 + 26.3 kg/hm ² 农用硫酸钾

1.3 样品采集与数据处理

在径流小区的坡上、坡中和坡下位置各设一个土壤水样监测点,在土层底部放入自行研制的土壤渗漏液采集器,从 2019 年 12 月—2021 年 9 月以大约每月一次的频率采集土壤水分渗漏液带回实验室,放入冰柜冷藏,采集来的样品用 0.45 μm 的 Whatman

GF/C 滤膜过滤后,送至中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室,利用 Skalar 流动分析仪测定溶解性总氮浓度(DTN),溶解性总磷浓度(DTP),硝态氮浓度(NO₃⁻-N),铵态氮浓度(NH₄⁺-N),正磷酸盐浓度(PO₄³⁻-P),将同一小区 3 个监测点的平均值作为观测值。每个样点旁均安装

了土壤水分自动检测探头(EC-5 探头),分布在 30, 50 cm 两个深度,每隔 10 分钟监测样点不同深度的体积含水量。用 hoboware pro 软件将数据(2020 年 8 月—2021 年 7 月)从采集器导出(图 2)。将 2021 年、2022 年春季采得的茶叶样品送至农业农村部茶叶质量监督检测测试中心,测得样品水浸出物、茶多酚和游离氨基酸等茶叶品质指标,并根据茶多酚和氨基酸的比值计算酚氨比,该比值越小,表明茶汤的鲜

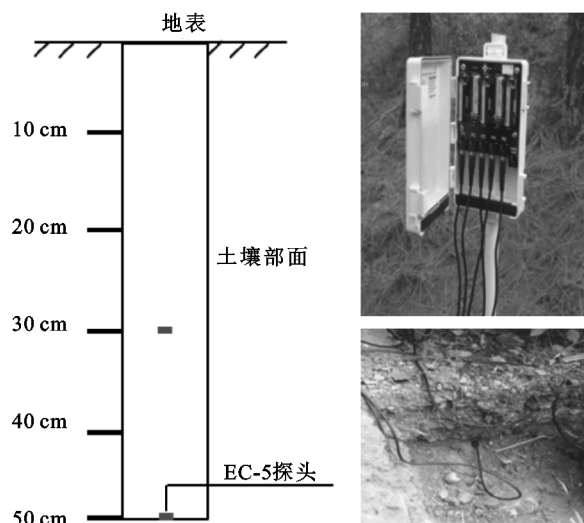


图2 土壤水分采集器与渗漏液采集器示意图

2 结果与分析

2.1 土壤水分变化情况

2020 年 8 月—2021 年 7 月坡面土壤水分含量变化见图 3。两个深度水分变化趋势基本一致,受降雨和蒸发条件控制。30 cm 深的土壤水分含量在 14.56%~43.17%,平均水分含量为 21.36%;50 cm 深的土壤水分含量在 13.25%~42.23%,平均水分含量为 18.29%。从全年来看,春夏两季土壤水分含量变化较快,秋冬两季土壤水分含量较稳定,反映在曲线上为 3—8 月曲线起伏频繁,9 月—次年 2 月曲线比较稳定,这主要由于春夏两季降雨较多并且土壤蒸发、植物蒸腾作用较强。

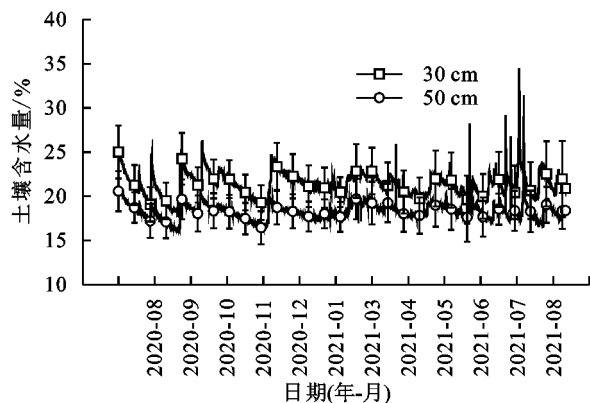


图3 坡地小区土壤含水量变化

爽度和醇和度越好,即茶叶品质越高。采得的各项数据采用 Microsoft Excel, SPSS 和 Origin 作数据处理与作图分析。对于土壤水分数据采用拉依达准则处理,对其进行计算处理得到标准偏差,确定一个区间,凡超过这个区间的数据视作随机误差,予以剔除。对不同小区氮磷淋失浓度数据采用独立样本 t 检验和单因素方差检验来进行差异显著性分析,对施肥水平与淋失浓度进行相关性分析。



2.2 各小区土壤氮磷淋失浓度特征差异

2019 年 12 月—2021 年 9 月各个小区的氮淋失浓度变化见图 4,总体来看, NO_3^- -N, NH_4^+ -N 和 DTN 淋失浓度都呈下降趋势,2020 年 NO_3^- -N, NH_4^+ -N 和 DTN 淋失浓度平均值分别为 58.98, 17.47, 60.07 mg/L。2021 年 NO_3^- -N, NH_4^+ -N 和 DTN 淋失浓度平均值分别为 24.20, 2.83, 39.63 mg/L,同比下降 59%, 83%, 34%。

各个小区 NO_3^- -N, NH_4^+ -N 和 DTN 淋失浓度的平均值、标准差和 t 值见表 2。不同的施肥方式对各个小区氮淋失浓度造成了明显的差异,对比传统施肥与优化施肥,除了 CF/OF₂ 这一组外,其他 3 组 NO_3^- -N, NH_4^+ -N 和 DTN 淋失浓度均存在显著性差异。优化施肥的小区 NO_3^- -N, NH_4^+ -N 和 DTN 淋失浓度平均值分别为 3.00, 33.85, 45.85 mg/L,传统施肥的小区 NO_3^- -N, NH_4^+ -N 和 DTN 淋失浓度平均值分别为 32.32, 60.04, 112.09 mg/L,分别是优化施肥小区的 10.77, 1.77, 2.44 倍,可以看出施用缓释肥对降低氮的淋失浓度有着显著效果。

在同一施肥方式下,不同施肥水平小区的 NH_4^+ -N 的淋失浓度存在显著性差异(图 5),其中传统组呈正相关关系($r=0.33$, $p=0.02 \leq 0.05$),而优化组呈负相关关系($r=-0.37$, $p=0.01 \leq 0.01$)。不同小区的 NO_3^- -N 和 DTN 淋失浓度,虽没有统计学意义上的差异,但其与施肥量的关系与 NH_4^+ -N 相似。对比空

间单一化和空间差异化的施肥模式,氮的淋失浓度差异也很明显,采用空间单一化的 CF₃ 的 DTN 淋失浓度是其他小区的 1.46~4.96 倍,说明了空间差异化的施肥方式对氮淋失有明显的削弱作用。

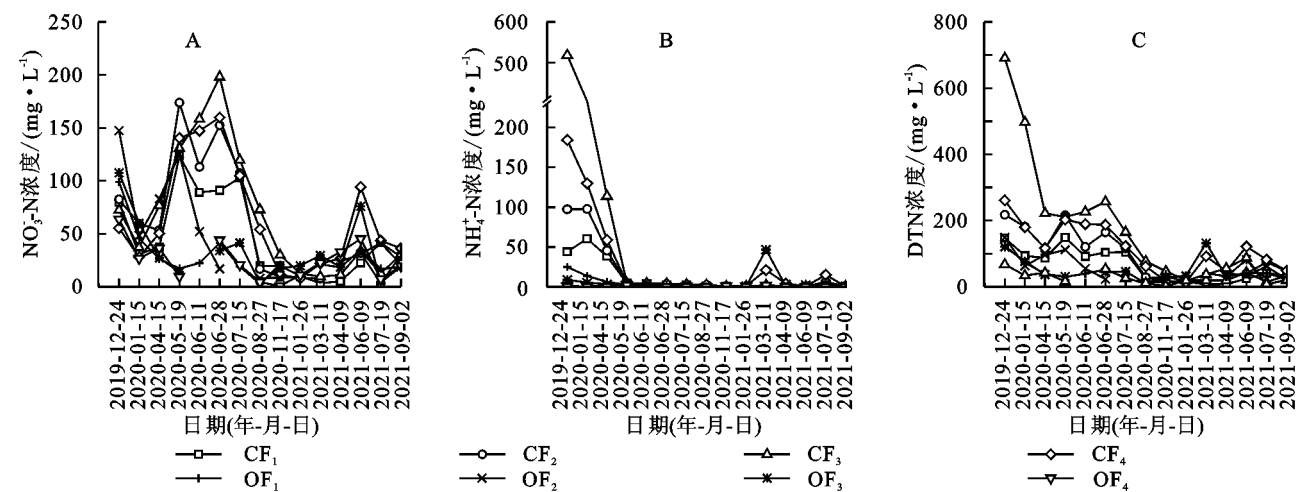
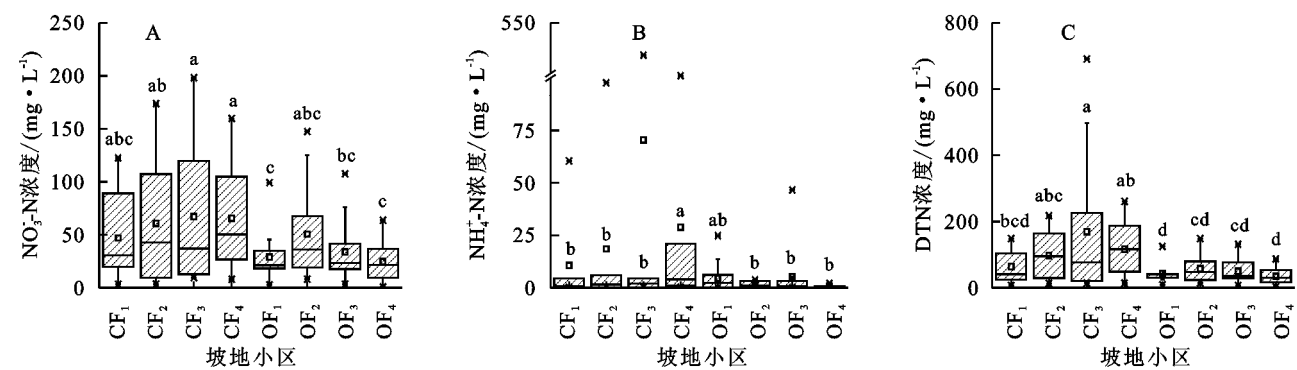


图 4 坡地小区硝态氮(NO₃⁻-N)、铵态氮(NH₄⁺-N)和溶解性总氮(DTN)淋失浓度变化

表 2 不同施肥方式氮淋失浓度差异

处理	NO ₃ ⁻ -N/ (mg · L ⁻¹)	<i>t</i> 值	NH ₄ ⁺ -N/ (mg · L ⁻¹)	<i>t</i> 值	DTN/ (mg · L ⁻¹)	<i>t</i> 值
CF ₁	46.99±39.28	2.21 *	1.32±1.54	-1.31	64.20±49.15	2.13 *
OF ₁	23.52±11.31		2.90±3.89		36.74±7.95	
CF ₂	60.67±56.73	1.62	1.70±2.02	0.09	97.54±74.79	1.72
CF ₂	33.45±23.26		1.64±1.44		57.32±42.17	
CF ₃	67.07±59.52	2.37 *	1.72±1.7	0.44	132.25±139.42	2.13 *
OF ₃	28.02±20.96		1.42±1.65		49.94±38.58	
CF ₄	65.47±51.00	2.91 *	4.96±6.41	2.46 *	116.17±74.35	4.04 **
OF ₄	24.62±18.14		0.39±0.47		34.19±24.67	

注:表中数据为均值±标准差,*代表 $p<0.05$,**代表 $p<0.01$,下同。



注:图中箱型上端和下端分别为上、下四分位数,箱型内横线为中位数,小方块为均值,叉号为最值;图中不同小写字母表示差异性显著($p<0.05$),下同。

图 5 不同小区硝态氮(NO₃⁻-N)、铵态氮(NH₄⁺-N)和溶解性总氮(DTN)淋失浓度对比

2019 年 12 月—2021 年 9 月各个小区的磷淋失浓度变化见图 6。总体来看,PO₄³⁻-P 和 DTP 淋失浓度都是呈明显下降趋势,2020 年 PO₄³⁻-P 和 DTP 淋失浓度平均值分别为 1.00,1.36 mg/L。2021 年 PO₄³⁻-P 和 DTP 淋失浓度平均值为 0.25,0.32 mg/L,同比下降 75%,76%。其中 CF₃ 的 DTP 淋失浓度最大,平均为 4.68 mg/L。优化施肥的 4 个小区 DTP 淋失浓度都很小,平均为 0.13 mg/L。而传统施肥的 4 个小区 DTP 淋失浓度平均值为 1.80 mg/L,是优化施肥小区的 13.85 倍。除了 CF/OF₁ 这一组对比,在相同施肥量的情况下,传统施肥小区与优化施肥小区的 PO₄³⁻-P 和 DTP 淋失浓度均存在显著性差异(表 3)。

各个小区磷淋失浓度的不同主要体现在差异化施肥和单一施肥的对比(图 7),差异化施肥的小区

DTP淋失浓度都很低,平均值为 0.43 mg/L,而单一施肥的 CF₃ 的 DTP 淋失浓度平均值为 4.68 mg/L,

是差异化施肥处理组的 10.88 倍,与其他小区均有显著性差异。

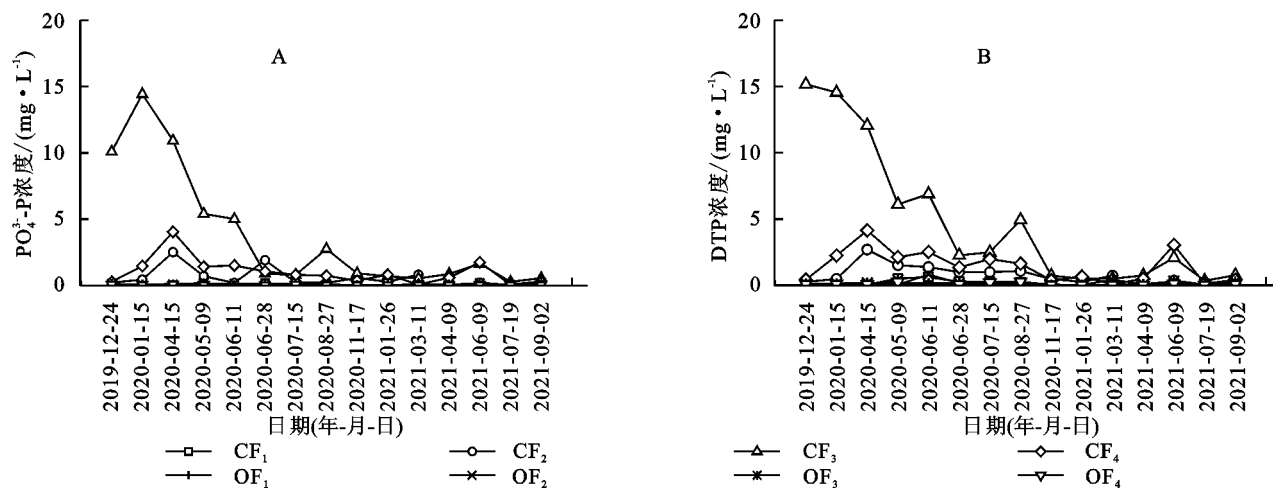


图6 坡地小区正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)和溶解性总磷(DTP)淋失浓度变化

表3 不同施肥方式氮淋失浓度差异

处理组	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	t 值	DTP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	t 值	处理组	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	t 值	DTP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	t 值
CF ₁	0.05 ± 0.05	1.00	0.15 ± 0.14	0.91	CF ₃	2.95 ± 3.59	2.99 *	4.68 ± 5.25	3.32 *
OF ₁	0.04 ± 0.03		0.11 ± 0.06		OF ₃	0.08 ± 0.07		0.17 ± 0.13	
CF ₂	0.32 ± 0.25	3.83 *	0.67 ± 0.49	4.27 **	CF ₄	0.80 ± 0.56	5.12 **	1.45 ± 1.22	4.30 **
OF ₂	0.04 ± 0.04		0.09 ± 0.06		OF ₄	0.03 ± 0.02		0.09 ± 0.07	

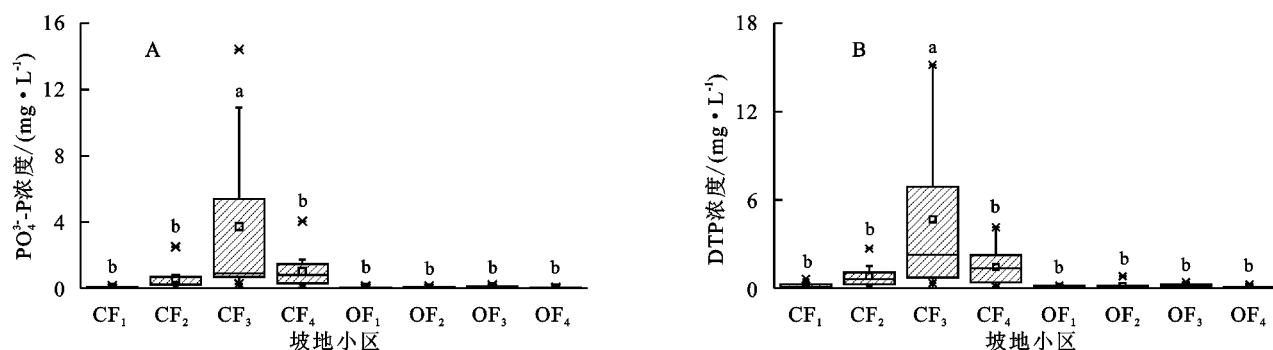


图7 不同小区正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)和溶解性总磷(DTP)淋失浓度对比

2.3 各小区茶叶品质差异

茶叶的品质通常由酚氨比、水浸出物等指标来评判,酚氨比为茶多酚与茶叶中游离氨基酸的比值,水浸出物是茶叶中能被沸水溶解的物质。这两项指标与茶叶滋味、香气和营养价值密切相关,对于茶叶的品质起到了决定性的作用。8个坡地小区 2021 年和 2022 年春茶茶叶的茶多酚含量、氨基酸含量、水浸出物含量和酚氨比数据见图 8。其中,茶叶水浸出物含量在 47.4%~48.7%,变化幅度较小。对于 2021 年春茶,CF₁—CF₄ 茶叶酚氨比分别为 2.92, 3.38, 3.10, 3.13, 平均值为 3.13, OF₁—OF₄ 茶叶酚氨比分别为 3.45, 3.66, 3.13, 3.03, 平均值为 3.32; 2022 年春茶 CF₁—CF₄ 茶叶酚氨比分别为 2.71, 2.87, 2.91, 2.52, 平均值为 2.78, OF₁—OF₄ 茶叶酚氨比分别为 2.76, 2.82, 2.81, 3.32, 平均值为 2.93, 对比 2021

年平均下降 10.54%~11.74%,茶叶品质有所提高。

3 讨论

3.1 不同施肥水平与方式对土壤氮磷淋失浓度的影响

从本试验的结果来看,施用传统肥料的小区 and 施用缓释肥的小区在氮磷淋失浓度上具有显著差异,除去 CF/OF₂ 这一组对比之外,坡地小区硝态氮和 DTN 的淋失浓度均存在显著性差异,而铵态氮的淋失浓度则无显著性差异(表 2)。这是由于一部分氨态氮会在硝化细菌作用下转化为硝态氮^[14],导致渗漏液中硝态氮浓度远远高于铵态氮的浓度,并且茶树属于典型的喜铵厌硝的植物,会优先吸收铵态氮^[15],造成渗漏液中的铵态氮浓度极低,导致 CF/OF₂ 对比不显著。虽然磷的淋失浓度整体结果都很小,但是

除了 CF/OF₁ 这一组对比,其他组的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 DTP 的淋失浓度对比均存在显著性差异,甚至达到极显著的程度(表 3)。CF/OF₁ 的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 DTP 淋失浓度差异不显著可能是由于施肥量相对较少,肥料中释

放出来的磷元素大多被植物吸收或被转化成颗粒态磷,溶解在土壤水中的磷基数较小^[16],虽然从浓度数值上有所减少,但是没有达到显著性程度,缓释肥的优化效果不够明显。

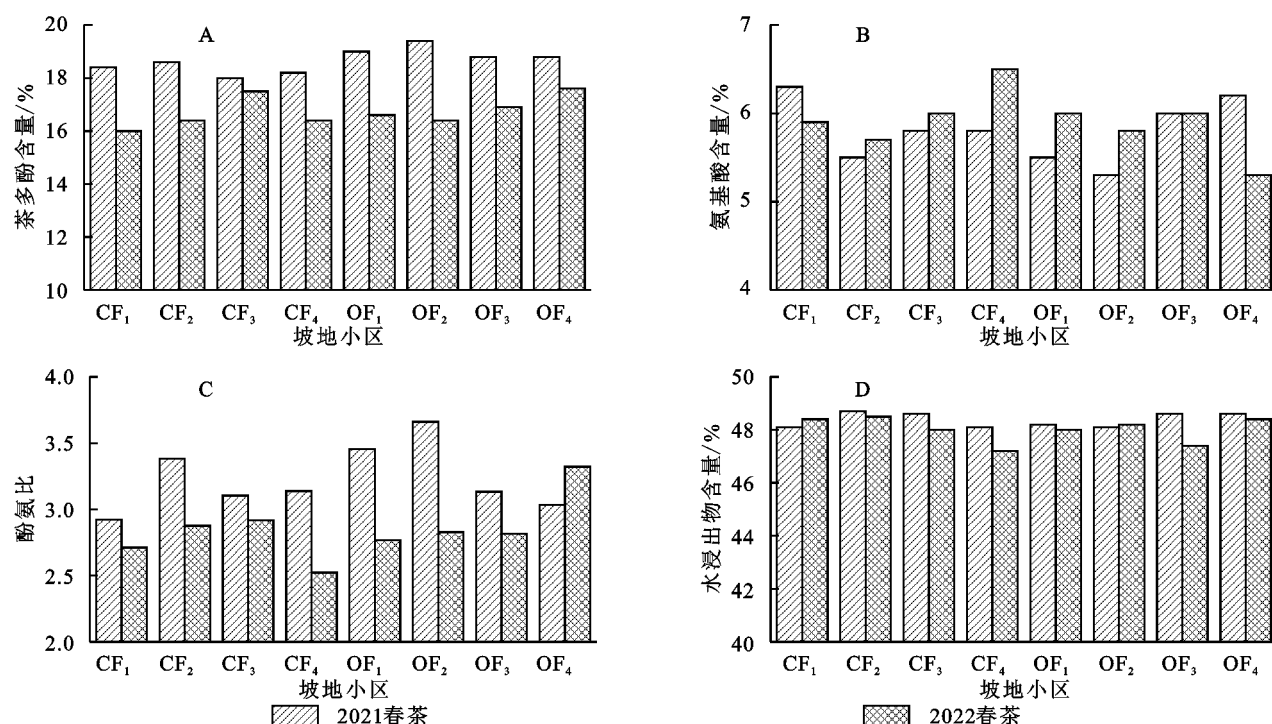


图8 坡地小区茶叶茶多酚含量、氨基酸含量、酚氨比和水浸出物含量对比

对比传统复合肥和优化缓释肥,在折氮量和折磷量相同的情况下氮磷淋失浓度存在显著性差异的原因是缓释肥料施入土壤后肥料养分比普通化肥释放慢^[17],避免了大量营养物质被溶解后淋失到作物根系层之下,使土壤中的氮磷浓度维持在一定的水平,持续供应作物所需要的营养,并且在降水事件发生时,发生大规模淋失事件的风险较小。前人的研究也显示缓释肥养分损失少,利用率高,可以在减少施用量的情况下使土壤中仍保持满足作物生长的营养水平^[18]。杜建军等^[19]研究结果表明,控/缓释氮肥比普通尿素降低 30% 以上的氨挥发损失,减少 60% 以上的淋溶损失。张优等^[20]发现在茶园施用包膜肥料+双氰胺可以有效抑制茶园土壤中的硝化作用,从而使土壤中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量降低,减少径流损失和地下水污染,减少水体富营养化的风险。

虽然不同施肥水平对 DTN 和 DTP 的淋失浓度存在影响,但是没有达到显著水平,这可能是由于茶树作为多年生植物,对土壤有一定的调节能力,单年的施肥量并不会对土壤水中的 DTN 和 DTP 的浓度产生显著影响。但是对比空间均一化和差异化两种施肥模式,发现前者 DTN 和 DTP 的淋失浓度数倍于后者,空间差异化施肥表现出很强的氮磷淋失削减

能力。在茶园生产种植过程中,大多数农民缺乏对环境后果的考虑,不考虑坡地本身的特性,往往采取不科学的均一施肥方式,而重力会使坡上的营养物质向坡下运移,最终会导致处在坡底的作物比坡顶的作物接触到更多的肥料,造成坡顶作物缺乏营养而坡底的作物营养盈余,影响茶园的肥料利用效率。

3.2 不同施肥水平与方式对茶叶品质的影响

在本试验中,2022 年春茶的酚氨比普遍低于 2021 年,这是由于试验小区的茶树于 2020 年刚种植,2021 年正处于生长期,所吸收的营养物质大多被茶树根部和躯干部所利用,影响到茶叶的发育,故而影响茶叶品质。因此,本试验的结果以 2022 年的茶叶品质数据为主要依据。

本次研究发现,不同施肥水平与方式对茶叶水浸出物的影响很小,但对酚氨比的影响比较明显,这与陈勋等^[21]的研究结果一致。茶树作为一种多年生植物,在冬季茶树根系停止生长和地上部深度休眠的情况下,依然具有较强的氮素吸收、并向地上部转运的能力,吸收的氮素储存于茶树的根系、枝条和成熟叶中,为春季茶树新梢生长分配和利用^[22]。研究表明,春茶生长所需的氮素有 70% 是茶树体内储存的,春茶萌发后新吸收的氮素只占 30%^[23]。缓释肥作为一

种有效期长的肥料,可以持续供应茶树所需要的营养物质。通过施用缓释肥,可以适量减少施肥量,降低施肥次数,在节约经济成本和人力成本的同时,仍可以保证茶叶品质^[24-25]。

除了施用适宜的肥料之外,合适的施肥水平对茶树生长也有促进作用。实际的农业生产中,农民倾向于多施肥来达到作物提质的目的,但是超过一定范围后,作物品质将不会随施肥量增加而提高,甚至导致品质下降。在本试验中,随着施肥量的增加,茶多酚含量呈上升趋势,CF₁—CF₄的氨基酸含量也呈上升趋势,但OF₁—OF₄的氨基酸含量呈下降趋势(图8)。其中,施肥量最多的OF₄产出的茶叶氨基酸含量最低,酚氨比最高,品质反而最差。这可能是由于施用肥量过多,并且缓释肥释放持续时间长,导致土壤中的氮磷浓度过高,使茶树新梢中的氨基酸含量减少^[26],从而使茶叶酚氨比上升。前人的研究也表明,土壤环境中过高的氮磷浓度会使茶叶中带有苦涩味的精氨酸增加,降低茶叶的品质^[27]。而相同施肥量的CF₄由于施用的是传统复合肥,释放出的氮磷迅速淋失到了作物根系层之下,反而有利于茶叶的品质,但随之也带来了不容忽视的环境问题。综上所述,肥料及其施用量与茶叶品质息息相关,因此在茶园施肥时,要因地制宜,制定合适的施肥模式,才能最大化肥料的利用效率,提升茶叶的品质。

本研究通过对比不同施肥水平(不同折氮磷量)和方式(传统复合肥和优化缓释肥)对CF₁—CF₄和OF₁—OF₄共8个坡地小区的茶叶品质(水浸出物和酚氨比)和渗漏液中氮磷(DTN, NO₃⁻-N, NH₄⁺-N, DTP和PO₄³⁻-P)淋失浓度所产生的影响并分析其原因,综合考虑环境因素和作物质量等因素,遴选出OF₁为最优的施肥模式,可以作为天目湖流域茶园的参考施肥模式。后续研究将进一步考虑茶叶产量和肥料投入成本,定量评估减量施肥条件下天目湖茶园氮磷减排潜力及其环境经济效益。

4 结论

(1) 在同一施肥方式下,OF₁—OF₄的DTN和DTP淋失浓度分别为2.70~148.75 mg/L和0.02~15.17 mg/L,显著低于CF₁—CF₄(分别为6.74~690.72 mg/L和0.02~0.82 mg/L),平均减少59%,92%。

(2) 在同一施肥水平下,均一化施肥小区氮磷淋失浓度(14.45~690.72 mg/L和0.35~15.18 mg/L)显著高于差异化施肥小区(6.63~131.59 mg/L和

0.092~0.43 mg/L)。

(3) 不同施肥水平与方式对茶叶水浸出物的影响较小(变化范围47.4%~48.7%),但对酚氨比有比较明显的影响,其中2022年春茶以CF₄最低(2.52),其次为CF₁(2.71)和OF₁(2.76)。综合考虑水环境保护以及茶叶品质等因素,采用OF₁施肥模式能够在不影响茶叶品质的前提下,显著降低坡地土壤氮磷淋失浓度,有助于控制农业面源污染,值得在天目湖流域茶区推广应用。

参考文献:

- [1] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等.中国农业面源污染形势估计及控制对策: I. 21世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J].中国农业科学,2004,37(7):1008-1017.
- [2] 胡玉婷,廖千家骅,王书伟,等.中国农田氮淋失相关因素分析及总氮淋失量估算[J].土壤,2011,43(1):19-25.
- [3] 杨旺鑫,夏永秋,姜小三,等.我国农田总磷径流损失影响因素及损失量初步估算[J].农业环境科学学报,2015,34(2):319-325.
- [4] Wang M, Wang L, Cui Z, et al. Optimizing management of mulched fertigation systems to improve maize production efficiency in Northeast China[J]. Agronomy Journal, 2019,111(6):3140-3149.
- [5] 卢树昌,陈清,张福锁,等.河北省果园氮素投入特点及其土壤氮素负荷分析[J].植物营养与肥料学报,2008,14(5):858-865.
- [6] 蔡祖聪,颜晓元,朱兆良.立足于解决高投入条件下的氮污染问题[J].植物营养与肥料学报,2014,20(1):1-6.
- [7] 钟秀明,武雪萍.我国农田污染与农产品质量安全现状、问题及对策[J].中国农业资源与区划,2007,28(5):27-32.
- [8] 廖凯华,吕立刚.东南湿润区坡面土壤水文过程研究进展与展望[J].地理科学进展,2018,37(4):476-484.
- [9] 杨林章,王德建,夏立忠.太湖地区农业面源污染特征及控制途径[J].中国水利,2004(20):29-30,5.
- [10] 杨超杰,贺斌,段伟利,等.太湖典型丘陵水源地水质时空变化及影响因素分析:以平桥河流域为例[J].长江流域资源与环境,2017,26(2):273-281.
- [11] 刘宗岸,杨京平,杨正超,等.苕溪流域茶园不同种植模式下地表径流氮磷流失特征[J].水土保持学报,2012,26(2):29-32,44.
- [12] 席运官,陈瑞冰,李国平,等.太湖流域坡地茶园径流流失规律[J].生态与农村环境学报,2010,26(4):381-385.
- [13] 聂小飞,李恒鹏,黄群彬,等.天目湖流域丘陵山区典型土地利用类型氮流失特征[J].湖泊科学,2013,25(6):827-835.
- [14] 杨金玲,张甘霖,周瑞荣.皖南丘陵地区小流域氮素径流输出的动态变化[J].农村生态环境,2001,17(3):1-4.

- [7] 张宽地,王光谦,孙晓敏,等.坡面薄层水流水动力学特性试验[J].农业工程学报,2014,30(15):182-189.
- [8] 李毅,邵明安.草地覆盖坡面流水动力参数的室内降雨试验[J].农业工程学报,2008,24(10):1-5.
- [9] 孟铖铖,张会兰,杨坪坪.模拟植被类型及空间配置对坡面流水动力学特性的影响[J].水土保持学报,2017,31(2):50-56.
- [10] 赵健,魏天兴,陈致富,等.陕西吴起县退耕还林地不同植被水土保持效益分析[J].水土保持学报,2010,24(3):31-34.
- [11] 张晓艳,周正朝.黄土高原地区草地植被调控土壤水蚀机理的研究进展[J].草业科学,2015,32(1):64-70.
- [12] Coppola A, Basile A, Wang X, et al. Hydrological behavior of micro-biotic crusts on sand dunes: Example from NW China comparing infiltration in crusted and crust-removed soil[J]. Soil & Tillage Research, 2011, 117(34/43).DOI:10.1016/j.still.2011.08.003.
- [13] 张侃侃,卜崇峰,高国雄.黄土高原生物结皮对土壤水分入渗的影响[J].干旱区研究,2011,28(5):808-812.
- [14] 戴全厚,喻理飞,薛筵,等.植被控制水土流失机理及功能研究[J].水土保持研究,2008,15(2):32-35.
- [15] 徐震,高建恩,赵春红.草地植被结构对坡面流水动力学特性的影响研究[J].水利规划与设计,2018,12(6):112-117.
- [16] 董万荣,朱兴平,何增化,等.定西黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀规律研究[J].水土保持通报,1998,18(3):1-9.
- [17] 张宽地.坡面径流水动力学特性及挟沙机理研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2011.
- [18] Forster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics: I. velocity relationships[J]. Transactions of the Asae, 1984, 27(3):790-796.
- [19] Gilley J E, Kottwitz E R, Simanton J R. Hydraulic characteristics of rills[J]. Transactions of the Asae, 1990, 33(6):1900-1906.
- [20] Kinast S, Meron E, Yizhaq H, et al. Biogenic crust dynamics on sand dunes[J]. Physical Review E, 2013, 87(2).DOI:10.1103/PhysRevE.87.020701.
- [21] 许欢欢,张宝琦,汪建芳,等.黄土高原典型生物结皮对坡面产流产沙过程的影响[J].水土保持通报,2021,40(6):8-13.
- [22] 高婵婵,赵传燕,王超,等.黑河上游天老池流域不同植被下土壤理化性质和入渗特征[J].水土保持学报,2016,30(1):117-121.
- [23] 卜崇峰,张朋,叶菁,等.陕北水蚀风蚀交错区小流域苔藓结皮的空间特征及其影响因子[J].自然资源学报,2014,29(3):490-499.
- [24] 李盼盼,李彬彬,王兵,等.模拟氮沉降对白羊草地群落特征及其坡面流水动力特性的影响[J].农业工程学报,2020,36(16):52-61.

(上接第60页)

- [15] Yang Y Y, Li X H, Ratcliffe R G, et al. Characterization of ammonium and nitrate uptake and assimilation in roots of tea plants[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2013, 60(1):91-99.
- [16] 李裕元.坡地磷素迁移研究进展[J].水土保持研究, 2006, 13(5):1-4.
- [17] Hauck R D. Nitrogen in Crop Production [M]. Sheffield, UK: American Society of Agronomy, 1984.
- [18] 曹兵,徐秋明,任军,等.延迟释放型包衣尿素对水稻生长和氮素吸收的影响[J].植物营养与肥料报,2005,11(3):352-356.
- [19] 杜建军,毋永龙,田吉林,等.控/缓释肥料减少氨挥发和氮淋溶的效果研究[J].水土保持学报,2007,21(2):49-52.
- [20] 张优,王东辉,吕闰强.缓释氮肥在茶园中施用效果研究[J].安徽农业科学,2008,36(2):651-652,678.
- [21] 陈勋,王红娟,毛迎新,等.缓释配方肥在茶树上的应用初探[J].湖北农业科学,2015,54(22):5625-5628,5640.
- [22] Ma L F, Shi Y Z, Ruan J Y. Nitrogen absorption by field-grown tea plants (*Camellia sinensis*) in winter dormancy and utilization in spring shoots[J]. Plant and Soil, 2019, 442:127-140.
- [23] Okano K, Komaki S, Matsuo K. Remobilization of nitrogen from vegetative parts to sprouting shoots of young tea (*Camellia sinensis* L.) plants[J]. Japanese Journal of Crop Science, 1994, 63(1):125-130.
- [24] 韩文炎,马立锋,石元值,等.茶树控释氮肥的施用效果与合理施用技术研究[J].植物营养与肥料学报,2007, 13(6):1148-1155.
- [25] 林燕萍,黄毅彪,胡泽波,等.氮肥减量下缓释肥对武夷岩茶品质的影响[J].茶叶通讯,2020,47(2):221-226.
- [26] 邓敏,徐泽,胡留杰,等.不同氮营养水平对福鼎大白茶产量及品质的影响[J].西南农业学报,2012,25(4):1330-1333.
- [27] Ruan J, Haerdter R, Gerendas J. Impact of nitrogen supply on carbon/nitrogen allocation: a case study on amino acids and catechins in green tea [*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze] plants[J]. Plant Biology, 2010, 12(5):724-734.