

平衡减量施肥和行间配植对白茶园氮磷流失的影响

王 剑, 王肖君, 斯圆丽, 姚龙仁, 左 婷, 郭晓颖, 罗凌迅, 倪吾钟

(浙江大学环境与资源学院, 浙江省农业资源与环境重点实验室, 杭州 310058)

摘要:安吉白茶经济效益高, 施肥量大, 茶园氮磷流失已成为西苕溪流域农业面源污染的主要来源之一。通过 2 个生长周期的野外径流小区试验连续观测了减量施肥和行间配植乔木控制白茶园氮磷径流损失的效应。试验设置习惯施肥处理(CK)、减氮减磷处理(T1)、减磷+配植合欢处理(T2)和减氮减磷+配植合欢处理(T3)4 个处理, 各处理重复 2 次。结果表明: 行间配植合欢处理(T2、T3)2 个观测周期的径流量、泥沙量显著小于无行间配植处理(CK、T1) ($P < 0.05$)。CK 处理 2 个观测周期径流总氮及各形态氮的累积流失量均显著大于其他 3 个处理, 泥沙氮素累积携出量显著大于 T3 处理 ($P < 0.05$); CK 处理 2 个观测周期径流总磷及无机磷的累积流失量均显著大于其他 3 个处理, 泥沙磷素累积携出量显著大于 T2 和 T3 处理 ($P < 0.05$)。白茶园氮素流失以径流水为主, 磷素流失以径流泥沙为主。减施氮磷、行间配植和两者结合均能有效削减白茶园氮磷流失, 减氮减磷与行间配植的组合措施效果更好, 推荐的施肥和植被管理技术为 $N\ 270\ kg/hm^2$, $P_2O_5\ 90\ kg/hm^2$, 行间配植合欢密度 200 株/ hm^2 。

关键词: 白茶; 减量施肥; 行间配植; 氮; 磷; 径流损失

中图分类号: S714.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)03-0069-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.03.010

Effects of Balanced Reduced Fertilization and Inter-row Planting on Nitrogen and Phosphorus Loss in White Tea Garden

WANG Jian, WANG Xiaojun, SI Yuanli, YAO Longren,

ZUO Ting, GUO Xiaoying, LUO Lingxun, NI Wuzhong

(Zhejiang Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

Abstract: Anji white tea has high economic benefits, and large amount of chemical fertilizer has been applied in Anji white tea, while nitrogen and phosphorus loss in tea garden has been one of main sources of agricultural non-point pollution in the Xitiao River Basin. This study continuously observed the effects of fertilization reduction and inter-row planting of trees on controlling nitrogen and phosphorus loss in the runoff of white tea garden through field runoff plot experiment with two growth cycles. The experiment included four treatments, which were conventional fertilization (CK), nitrogen and phosphorus reduction (T1), phosphorus reduction with inter-row planting of *Albizia julibrissin* (T2), and nitrogen and phosphorus reduction with inter-row planting of *A. julibrissin* (T3), and each treatment had two replicates. The results showed that the runoff and sediment amounts of inter-row planting treatments (T2, T3) were significantly less than those of the treatments with no inter-row planting (CK, T1) ($P < 0.05$) in each growth cycle. During the two observation cycles, the cumulative losses of total nitrogen, all nitrogen fractions, total phosphorus and inorganic phosphorus in runoff water of treatment CK were all significantly higher than those of the other three treatments, the cumulative nitrogen outputs in sediment of treatment CK was significantly higher than those of treatment T3, and the cumulative phosphorus outputs in sediment of treatment CK was significantly higher than those of treatment T2 and T3 ($P < 0.05$). Nitrogen loss in white tea garden was mainly with

收稿日期: 2020-11-04

资助项目: 农业农村部农业绿色发展先行先试支撑体系建设专项(安吉县)(NG/LS2020-71-05); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07101-012)

第一作者: 王剑(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事养分资源高效利用与农业面源污染研究。E-mail: 21814149@zju.edu.cn

通信作者: 倪吾钟(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要从事新型肥料研制与养分资源管理、植物营养与环境胁迫诊断等研究。E-mail: wznz@zju.edu.cn

runoff water, and phosphorus loss was mainly with runoff sediment. Reduction of nitrogen and/or phosphorus application, inter-row planting and the combination of the two measures could effectively decrease the runoff loss of nitrogen and phosphorus in the white tea garden, and the combined measures of nitrogen and phosphorus reduction with inter-row planting were more effective. Thus, the fertilization doses of N 270 kg/hm², P₂O₅ 90 kg/hm², and inter-low planting density of 200 plants/hm² *A. julibrissin* were recommended for the local white tea culture.

Keywords: white tea; reduced fertilization; inter-row planting; nitrogen; phosphorus; runoff loss

太湖水体富营养化是我国面临的水体污染主要问题,影响人们生活并且制约区域经济的可持续发展,而农业面源污染是导致水体富营养化的主要原因。已有研究^[1]表明,农业生产中损失的氮肥、磷肥是农业面源污染中水土流失型污染的主要来源。据统计^[2],太湖流域面积 3.69×10^4 km²,是中国经济最发达的区域之一,人口以及环境压力极大。浙江省安吉县地处太湖流域源头的西苕溪流域,是太湖上游的重要水系之一,西苕溪流域的氮磷污染物会对太湖水环境质量产生直接的影响。陈诗文等^[3]研究表明,在丰水期和枯水期,西苕溪上游支农农田径流对水体营养盐的贡献率分别达到 40% 和 35%,所以控制农田径流中的氮磷流失是解决太湖流域水体富营养化的有效手段。而经济林地时常进行翻耕、除草等农业生产活动,水土流失强度远高于其他类型土壤^[4]。

茶叶是我国重要的坡地经济林作物,也是主要的出口农产品,安吉白茶为我国稀有品种,驰名中外。茶是一种叶用经济作物,农民为追求更高经济效益,盲目施肥,茶园的肥料投入量远远超出白茶生长所需和生态环境容量。据调查统计,安吉县茶园平均施用氮肥 450 kg/hm²,磷肥 150 kg/hm²,50% 以上的养分未被植株吸收利用就流失掉了。王京文等^[5]研究表明,习惯施肥的茶园自然降雨条件下地表径流总氮浓度为 5.5 mg/L,总磷平均浓度为 0.5 mg/L,地表径流流入水体后存在水体富营养化的风险。陈裴裴等^[6]研究表明,减氮 40% 处理可以减少渗漏水总氮流失量 19.4%。另有研究^[7]表明,减施 30% 磷肥与常规施肥的土壤有效磷含量差异不显著。

安吉县茶园位于坡度较大的丘陵地区,已有研究^[8]表明,坡地上养分、水和土壤的流失具有很大的潜力,导致水体富营养化和土地退化。董敦义等^[9]研究表明,安吉县 90% 的土壤侵蚀及养分流失来自丘陵和低山林地,76% 的土壤侵蚀及养分流失来自斜坡和陡坡上的林地。南方降雨量极其丰沛且集中,影响丘陵坡地径流输沙^[10],且降雨强度、降雨频率与水土流失具有相关性^[11],坡面径流是土壤营养元素流失的载体,土壤中的氮素、磷素易在强降雨和径流作用

下流失^[12]。茶园通常采用人工和化学方法进行清园处理,导致茶园地表裸露,地表植被管理可以增大坡面糙度,减少土壤侵蚀量和养分流失量^[13-14]。植被措施包括林下套种、设置植物篱和保留地被植物等,可以有效拦蓄泥沙,减少径流^[15]。植物篱可以增加土地有机碳含量,抑制杂草生长,控制坡耕地水土流失^[16],根系的固氮作用还可以增加土壤含氮量,提高作物产量^[17]。配植乔木可以增加地表上空的郁闭度,减少降雨对地表的冲击力,从而降低径流量,减少养分的流失。合欢宜植于山坡环境,生长迅速,树干笔直,姿态优美,既可以配植于茶园保持水土,也可以作为茶园的景观树木;且合欢属于豆科植物,具有生物固氮作用,种植合欢可以减少氮肥的投入,增加土壤的有机质含量,改善土壤生态环境^[18]。

本研究以白茶园为研究对象,通过野外径流小区试验,在自然降水条件下,探讨平衡减量施肥和配施乔木对茶园土壤侵蚀和养分流失的影响,以期茶园土壤侵蚀、氮磷养分流失的阻控提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

试验于 2016 年 11 月至 2019 年 2 月在浙江省安吉县溪龙乡黄杜村(北纬 30°44'18",东经 119°45'59")进行。安吉县属于北亚热带南缘季风区,光照充足,雨量充沛,四季分明,适宜作物生长发育。年平均气温 15.5℃,7 月平均气温 28.1℃,1 月平均气温 2.7℃,无霜期 200~226 天。年相对湿度为 81%,年日照时间 2 005.5 h,年辐射总量 107.6 kcal/m²,多年年均降水量为 1 380 mm。黄杜村是“中国白茶第一村”,是白茶产业的始发地和核心区。试供土壤为山地红壤,pH 为 4.20,土壤全氮含量为 1.24 g/kg,全磷含量为 0.77 g/kg,全钾含量为 7.20 g/kg,有机碳含量为 12.02 g/kg,碱解氮含量为 145.00 mg/kg,有效磷含量为 263.59 mg/kg,速效钾含量为 134.25 mg/kg。

供试肥料为尿素(含 N 46%)、钙镁磷肥(含 P₂O₅ 12%)、硫酸钾(含 K₂O 50%)和菜籽饼(含 N 5.53%,含 P₂O₅ 2.59%,含 K₂O 0.76%)。

试验共设 4 个处理,分别为 CK(习惯施肥处理)、T1(平衡减量施肥处理,在习惯施肥基础上减 N 40%,减 P 40%)、T2(在习惯施肥基础上减 P 40%,配植合欢,种植密度为 200 株/hm²)、T3(在 T1 处理基础上配植合欢,种植密度为 200 株/hm²),每个处理设置 2 次重复,共设置 8 个径流小区。合欢的种植方式为:每个小区种植 2 株合欢,间距 10 m。

试验共 2 个观测周期,第 1 个观测周期为 2016 年 11 月至 2017 年 10 月,第 2 个观测周期为 2018 年 3 月至 2019 年 2 月。8%的化学氮肥作基肥,30%化学氮肥用作催芽肥,30%化学氮肥用作保枝肥,32%的氮肥用菜籽饼代替,菜籽饼、磷肥和钾肥做基肥一次性施入,施肥方为开浅沟施用,各处理每周期总养分投入量及植物配植密度见表 1。

小区随机排列,且建立在坡度平缓且一致的茶园内,小区外围用厚度为 4 cm 的花岗岩隔开,杜绝施肥

后因降雨与相邻小区发生串流串肥。小区面积 100 m²(长 20 m,宽 5 m)。每个径流小区底部安装水表和径流池和沉沙池。小区下方径流池有 3 个集水桶:第 1 个桶与小区坡面下方的集水槽通过软管相连通,第 1 个和第 2 个桶中间连接 1 个水表,用于记录从第 1 个桶流出的径流量;第 2 个集水桶上沿设有 4 个 20 mm 宽的三角形分流口,在暴雨径流量较大的情况下,可以通过分流,分级收集并记录径流水量;第 2 个和第 3 个集水桶用软管相连。径流收集装置见图 1。

处理	施肥量/(kg·hm ²)			合欢配植密度/(株·hm ²)
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
CK	450	150	180	
T1	270	90	180	
T2	450	90	180	200
T3	270	90	180	200

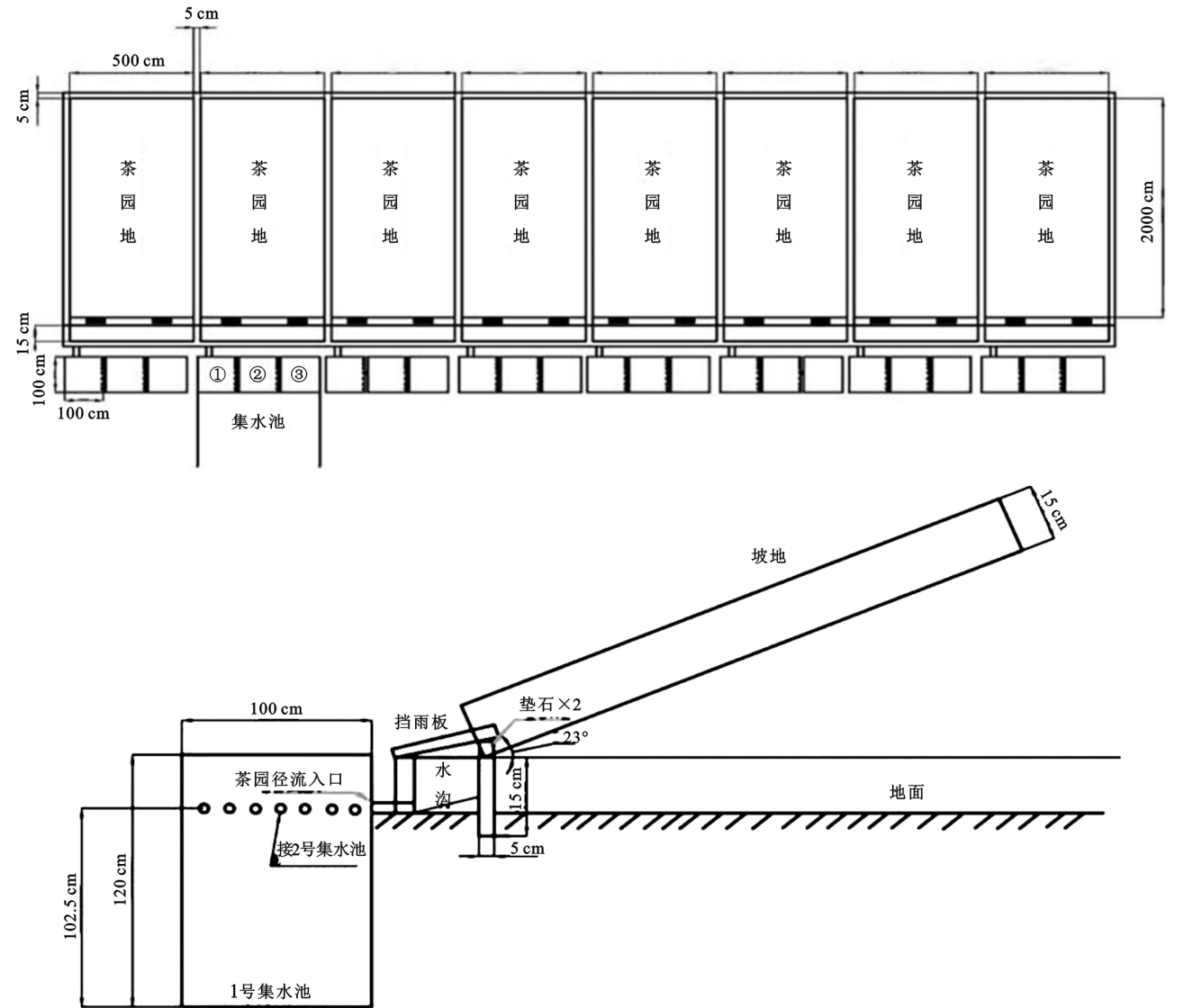


图 1 径流小区径流收集装置示意

1.2 测定项目及计算方法

试验前采集试验田土样,测定土壤基本理化性

质,同时记录水表初始读数。试验过程中,每次降雨产流后采集小区径流装置中水样和土壤样品,测定土

壤水溶性总氮、铵态氮、硝态氮、总磷、无机磷含量,同时读取水表读数,计算径流量和泥沙量以及径流水氮磷流失量和泥沙氮磷携出量。

径流总氮采用过硫酸钾—紫外分光光度法测定,硝态氮采用紫外分光光度法测定,铵态氮采用靛酚蓝比色法测定,有机氮为总氮与铵态氮、硝态氮之差;径流总磷采用过硫酸钾—钼锑抗比色法测定,无机态磷采用钼锑抗比色法测定,有机磷为总磷与无机磷之差^[19]。土壤基本理化性质参照鲁如坤^[20]方法进行测定。为保证测试结果的准确度,水样采集后冷藏(4℃以下)保存,从样品采集到测定完成不超过 2 天。

径流水累积氮/磷流失量计算公式为:

$$Q=\sum_1^n C_w \cdot V$$

式中: Q 为径流水氮/磷累积流失量(g/hm^2); C_w 为每次采样所测得径流水样氮/磷浓度(g/m^3); V 为每次计算所得径流水体积(m^3/hm^2); n 为每周期采得径流水样次数。

径流泥沙累积氮磷携出量计算公式为:

$$S=\sum_1^n C_s \cdot M$$

式中: S 为径流泥沙氮/磷累积携出量(g/hm^2); C_s 为每次采样所测得径流泥沙样氮/磷浓度(g/kg); M 为每次计算所得径流泥沙质量(kg/hm^2); n 为每周期采得径流泥沙样次数。

1.3 数据分析

采用 Excel 2016 和 SPSS 23.0 软件对试验数据进行处理,Duncan 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 白茶园不同处理径流量和泥沙流失量

第 1 个观测周期共采集径流水样 12 次(2016 年 11 月 4 日至 2017 年 10 月 18 日),径流泥沙样 11 次(2016 年 11 月 4 日至 2017 年 10 月 18 日);第 2 个观测周期共采集径流水样 11 次(2018 年 3 月 12 日至 2019 年 2 月 11 日),径流泥沙样 7 次(2018 年 3 月 26 日至 2018 年 10 月 20 日)。由表 2 可知,第 1 个观测周期累积径流量 CK 最高,为 $203.2\text{ m}^3/\text{hm}^2$,第 2 个观测周期累积径流量 CK 最高,为 $259.2\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。T2、T3 处理 2 个观测周期的累积径流量均显著低于 CK($P<0.05$),其中 T2 与 T3 处理间无显著差异,说明配植合欢可以有效降低径流量。第 1 个观测周期,与 CK 相比,T2、T3 处理径流量降低 $12.7\sim 14.3\text{ m}^3/\text{hm}^2$,减少 $6.24\%\sim 7.05\%$;第 2 个观测周期,与 CK 相比,T2、T3 处理径流量降低 $29.2\sim 31.8\text{ m}^3/\text{hm}^2$,减少 $11.27\%\sim 12.27\%$ 。T1 处理在第 1 个观测周期与 CK 的累积径流量无显著差异,在第 2 个

观测周期显著低于 CK($P<0.05$),说明减氮减磷处理后期可以有效降低径流量。CK、T1、T2、T3 处理第 2 个周期的径流量均高于第 1 个周期。

表 2 不同处理累积径流量

单位: m^3/hm^2		
处理	第 1 个观测周期	第 2 个观测周期
CK	$203.2\pm 0.9\text{a}$	$259.2\pm 1.0\text{a}$
T1	$200.1\pm 2.0\text{a}$	$253.2\pm 1.3\text{b}$
T2	$190.5\pm 3.0\text{b}$	$229.9\pm 2.0\text{c}$
T3	$188.8\pm 0.5\text{b}$	$227.4\pm 1.6\text{c}$

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异达显著水平($P<0.05$)。下同。

由表 3 可知,第 1 个观测周期累积径流泥沙量 CK 最高,为 $474.8\text{ kg}/\text{hm}^2$,第 2 个观测周期累积径流泥沙量 CK 最高,为 $260.0\text{ kg}/\text{hm}^2$ 。T2、T3 处理 2 个周期的累积径流泥沙量均显著低于 CK($P<0.05$),说明配植合欢可以有效降低径流泥沙量。第 1 个观测周期,与 CK 相比,T2、T3 处理泥沙量降低 $59.4\sim 82.8\text{ kg}/\text{hm}^2$,减少 $12.50\%\sim 17.42\%$;第 2 个观测周期,与 CK 相比,T2、T3 处理泥沙量降低 $41.7\sim 50.8\text{ kg}/\text{hm}^2$,减少 $16.04\%\sim 19.55\%$ 。T1 处理在第 1 个观测周期与 CK 的累积径流泥沙量无显著差异,在第 2 个观测周期显著低于 CK($P<0.05$)。CK、T1、T2、T3 处理第 2 个周期的累积径流泥沙量均低于第 1 个周期。

表 3 不同处理累积径流泥沙量

单位: m^3/hm^2		
处理	第 1 个观测周期	第 2 个观测周期
CK	$474.8\pm 12.1\text{a}$	$260.0\pm 5.2\text{a}$
T1	$461.1\pm 11.5\text{a}$	$246.7\pm 0.4\text{b}$
T2	$415.4\pm 27.0\text{b}$	$218.3\pm 3.4\text{c}$
T3	$392.0\pm 3.8\text{b}$	$209.2\pm 1.4\text{d}$

配植合欢处理(T2、T3)相比无配植合欢处理(CK、T1)在 2 个观测周期内的径流量和泥沙量均有显著降低。第 1 个观测周期,与无合欢配植处理(CK、T1)相比,配植合欢处理(T2、T3)径流量降低 $9.7\sim 14.3\text{ m}^3/\text{hm}^2$,减少 $4.83\%\sim 7.05\%$;泥沙流失量降低 $45.7\sim 82.8\text{ kg}/\text{hm}^2$,减少 $9.89\%\sim 17.42\%$ 。第 2 个观测周期,与无合欢配植处理(CK、T1)相比,配植合欢处理(T2、T3)径流量降低 $23.3\sim 31.8\text{ m}^3/\text{hm}^2$,减少 $9.18\%\sim 12.27\%$;泥沙流失量降低 $28.4\sim 50.8\text{ kg}/\text{hm}^2$,减少 $11.51\%\sim 19.55\%$ 。减氮减磷处理(T1)第 1 个观测周期的累积径流量以及累积径流泥沙量与 CK 相比无显著差异,在第 2 个观测周期显著降低。

2.2 白茶园不同处理径流水及泥沙氮素流失量

由表 4 可知,第 1 个观测周期径流水总氮、铵态氮、硝态氮、有机氮流失量 CK 最高,依次为 $1\ 038.6$,

153.8,669.3,215.5 g/hm²;第 2 个观测周期径流水总氮、铵态氮、硝态氮、有机氮流失量 CK 最高,依次为 2 050.4,510.6,1 143.7,396.1 g/hm²。CK 处理 2 个观测周期的径流总氮及各形态氮的累积流失量均显著大于其他 3 个处理($P<0.05$)。T1 处理 2 个观测周期的径流总氮及各形态氮的累积流失量均显著低于 CK($P<0.05$),说明减氮处理可以有效降低径流氮素流失。T2 处理 2 个观测周期的径流总氮及各形态氮的累积流失量均显著低于 CK($P<0.05$),说明配植合欢可以有效降低径流氮素流失。T3 处理 2 个观测周期的径流总氮及各形态氮的累积流失量均显著低于 T1 处理($P<0.05$),说明减氮条件下配植合欢可以更好的降低径流氮素流失。

第 1 个观测周期,T1、T2、T3 处理的径流水总氮流失量、铵态氮流失量、有机氮流失量均显著低于 CK($P<0.05$),其中 T3 处理显著低于 T1、T2 处理($P<0.05$),T1 处理显著低于 T2 处理($P<0.05$),与 CK 相比,T1、T2、T3 处理径流水总氮、铵态氮、有机氮流失量分别降低 195.9~337.8,34.9~60.2,21.5~39.5 g/hm²,分别减少 23.02%~32.48%,22.66%~

39.14%,9.96%~18.31%;T1、T2、T3 处理的径流水硝态氮流失量均显著低于 CK($P<0.05$),其中 T3 处理显著低于 T1、T2 处理($P<0.05$),T1、T2 处理间无显著差异,与 CK 相比,T1、T2、T3 处理径流水硝态氮流失量降低 139.6~237.7 g/hm²,减少 20.85%~35.50%。第 2 个观测周期,T1、T2、T3 处理的径流水总氮流失量、铵态氮流失量、有机氮流失量均显著低于 CK($P<0.05$),其中 T3 处理显著低于 T1、T2 处理($P<0.05$),T1、T2 处理间无显著差异,与 CK 相比,T1、T2、T3 处理径流水总氮、铵态氮、有机氮流失量分别降低 297.5~523.4,86.9~140.3,59.2~98.0 g/hm²,分别减少 14.51%~25.53%,17.01%~27.47%,14.93%~24.74%;T1、T2、T3 处理的径流水硝态氮流失量均显著低于 CK($P<0.05$),其中 T3 处理显著低于 T1、T2 处理($P<0.05$),T2 处理显著低于 T1 处理($P<0.05$),与 CK 相比,T1、T2、T3 处理径流水硝态氮流失量降低 151.4~285.1 g/hm²,减少 13.24%~24.93%。CK、T1、T2、T3 处理第 2 个周期的径流水总氮流及各形态氮的累积流失量均高于第 1 个周期。

表 4 不同处理径流水氮素累积流失量 单位:g/hm²

处理	第 1 个观测周期				第 2 个观测周期			
	总氮流失量	铵态氮流失量	硝态氮流失量	有机氮流失量	总氮流失量	铵态氮流失量	硝态氮流失量	有机氮流失量
CK	1038.6±1.4a	153.8±10.6a	669.3±4.8a	215.5±7.3a	2050.4±13.5a	510.6±6.1a	1143.7±9.5a	396.1±2.2a
T1	799.5±22.9c	111.4±2.2c	503.0±15.7b	185.2±5.0c	1753.0±15.3b	423.8±0.9b	992.3±3.5b	337.0±19.7b
T2	842.7±12.9b	118.9±3.4b	529.7±12.3b	194.1±3.9b	1708.1±24.9b	416.9±6.1b	956.2±12.2c	335.1±6.7b
T3	701.3±3.7d	93.6±0.9d	431.6±4.9c	176.1±2.1d	1527.1±8.7c	370.4±1.6c	858.6±1.9d	298.1±8.9c

由表 5 可知,第 1 个观测周期泥沙氮素流失量 CK 最高,为 836.6 g/hm²,第 2 个观测周期泥沙氮素流失量 CK 最高,为 447.7 g/hm²。CK 处理 2 个观测周期的泥沙氮素累积携出量显著大于 T3 处理($P<0.05$)。T2 处理第 2 个个观测周期的泥沙氮素累积携出量显著低于 CK($P<0.05$),说明配植合欢后期可以有效降低泥沙氮素流失。T3 处理 2 个观测周期的泥沙氮素累积携出均显著低于 T1 处理($P<0.05$),说明减氮条件下配植合欢可以有效降低泥沙氮素流失。

T3 处理 2 个观测周期的泥沙氮素累积携出量均显著低于 CK 处理($P<0.05$),第 1 个观测周期。与 CK 相比,T3 处理的泥沙氮素携出量降低 126.7 g/hm²,减少 15.15%;第 2 个观测周期,与 CK 相比,T3 处理的泥沙氮素携出量降低 94.4 g/hm²,减少 21.08%。第 2 个观测周期,T2 处理的泥沙氮素携出量显著低于 CK($P<0.05$),与 CK 相比,T2 处理的泥沙氮素携出量降低 76.4 g/hm²,减少 17.06%。CK、T1、T2、T3 处理第 2 个周期的泥沙氮素携出量均低于第 1 个周期。

表 5 不同处理泥沙氮素累积携出量 单位:g/hm²

处理	第 1 个观测周期	第 2 个观测周期
CK	836.6±21.7a	447.7±1.9a
T1	833.3±43.6a	428.5±12.7a
T2	755.2±70.6ab	371.3±9.3b
T3	709.8±7.2b	353.3±4.6b

2.3 白茶园不同处理径流水及泥沙磷素流失量

由表 6 可知,第 1 个观测周期径流水总磷、有机磷、无机磷流失量 CK 最高,依次为 44.5,17.5,26.9 g/hm²。第 2 个观测周期径流水总磷、有机磷、无机磷流失量 CK 最高,依次为 82.2,31.1,51.1 g/hm²。CK 处理 2 个观测周期径流总磷及无机磷的累积流失量均显著大于其他 3 个处理($P<0.05$)。T1 处理 2 个周期的径流总磷及无机磷的累计流失量均显著低于 CK($P<0.05$),说明减磷处理可以有效降低径流磷素流失。T2、T3 处理 2 个周期的径流总磷及各形态磷的累积流失量均显著低于 CK($P<0.05$),说明减磷并配植合欢可以有效的降低径流磷素流失;T2、T3 处理第 2 个周期的径流总磷及无机磷的累积

流失量均显著低于 T1($P<0.05$),说明减磷的条件下配植合欢可以更好地降低径流磷素流失。

第 1 个观测周期,T1、T2、T3 处理的径流水总磷流失量、无机磷流失量均显著低于 CK($P<0.05$),与 CK 相比,T1、T2、T3 处理径流水总磷、无机磷流失量分别降低 12.1~17.1,9.9~13.0 g/hm²,分别减少 27.10%~38.44%,36.65%~48.38%;T3 处理的有机磷流失量显著低于 CK($P<0.05$),与 CK 相比,T3 处理径流水有机磷流失量降低 4.7 g/hm²,减少 26.81%。

第 2 个观测周期,T1、T2、T3 处理的径流水总磷

流失量、无机磷流失量均显著低于 CK($P<0.05$),其中 T2、T3 处理显著低于 T1 处理($P<0.05$),T2 与 T3 处理间无显著差异,与 CK 相比,T1、T2、T3 处理径流水总磷、无机磷流失量分别降低 10.6~21.6,6.2~12.2 g/hm²,分别减少 12.86%~26.24%,12.19%~23.87%;T2、T3 处理的有机磷流失量显著低于 CK($P<0.05$),与 CK 相比,T3 处理径流水有机磷流失量降低 9.3 g/hm²,减少 30.01%。CK、T1、T2、T3 处理第 2 个周期的径流水总磷、有机磷流失量、无机磷流失量均高于第 1 个周期。

表 6 不同处理径流磷素累积流失量

单位:g/hm²

处理	第 1 个观测周期			第 2 个观测周期		
	总磷流失量	有机磷流失量	无机磷流失量	总磷流失量	有机磷流失量	无机磷流失量
CK	44.5±3.1a	17.5±0.5a	26.9±3.6a	82.2±1.6a	31.1±1.2a	51.1±0.3a
T1	32.4±2.7b	15.3±1.1ab	17.1±1.5b	71.6±2.0b	26.8±1.9ab	44.9±0.1b
T2	29.0±0.5b	15.1±1.3ab	13.9±1.4b	62.6±2.6c	23.1±2.9b	39.5±0.3c
T3	27.4±1.2b	12.8±0.3b	14.6±1.0b	60.6±0.5c	21.7±1.1b	38.9±0.6c

由表 7 可知,第 1 个观测周期泥沙磷素流失量 CK 最高,为 209.8 g/hm²,第 2 个观测周期泥沙磷素流失量 CK 最高,为 125.1 g/hm²。CK 处理 2 个观测周期泥沙磷素累积携出量显著大于 T2 和 T3 处理($P<0.05$)。T2、T3 处理 2 个周期的泥沙磷素累计携出量显著低于 CK($P<0.05$),说明减磷并配植合欢可以有效降低泥沙磷素携出量。T3 处理 2 个周期的泥沙磷素累计携出量显著低于 T1 处理($P<0.05$),说明减磷条件下配植合欢可以取得更好的控制泥沙磷素流失的效果。T1 处理第 2 个观测周期泥沙磷素累计携出量显著低于 CK($P<0.05$),说明减磷处理后期可以有效降低泥沙磷素流失。

T2、T3 处理 2 个周期的泥沙磷素累计携出量显著低于 CK($P<0.05$),其中 T2 与 T3 处理间无显著差异,第 1 个观测周期,与 CK 相比,T2、T3 处理的泥沙磷素携出量降低 28.2~36.5 g/hm²,减少 13.50%~17.40%。第 2 个观测周期,与 CK 相比,T2、T3 处理的泥沙磷素携出量降低 26.7~28.9 g/hm²,减少 21.37%~23.06%。CK、T1、T2、T3 处理第 2 个周期的泥沙磷素流失量均低于第 1 个周期。

表 7 不同处理泥沙磷素累积携出量

单位:g/hm²

处理	第 1 个观测周期	第 2 个观测周期
CK	209.8±5.2a	125.1±2.3a
T1	203.3±0a	112.0±1.2b
T2	181.5±6.0b	98.4±6.4c
T3	173.3±3.5b	96.3±2.3c

3 讨论

3.1 平衡减量施肥和配植乔木对茶园径流量和泥沙量的影响

配置乔木可以显著降低茶园径流量和泥沙流失量。朱远达等^[21]研究表明,增加植被覆盖能显著减少土壤大颗粒的流失。蒲玉琳等^[22]研究指出,紫穗槐等植物篱模式均能显著减少坡耕地径流,达 56%以上,20°和 13°坡地紫穗槐等植物篱也均能显著减少坡耕地土壤流失,达 80%以上。

配植合欢处理(T2、T3)相比无配植合欢处理(CK、T1)在 2 个观测周期内的径流量和泥沙量均有显著降低,减氮减磷并配植合欢处理(T3)效果最佳。第 1 个观测周期,与无合欢配植处理(CK)相比,减氮减磷并配植合欢处理(T3)径流量降低 14.3 m³/hm²,减少 7.05%,泥沙流失量降低 82.8 kg/hm²,减少 17.42%;第 2 个观测周期,径流量降低 31.8 m³/hm²,减少 12.27%,泥沙流失量降低 50.8 kg/hm²,减少 19.55%,表明地表植被管理可以增大坡面的粗糙度,减少径流量,减少土壤侵蚀量,这与王升等^[13]、吴全等^[14]的研究结果一致。单纯的减氮减磷施肥处理(T1)在第 1 个观测周期降低径流量和泥沙量的效果不佳,但在第 2 个观测周期能够有效控制水土流失,与习惯施肥处理(CK)相比径流量降低 6.0 m³/hm²,减少 2.3%;泥沙流失量降低 13.3 kg/hm²,减少 5.11%,结果表明,单纯的减量施肥在后期才能表现出明显的控制水土流失的效果。

第 1 个观测周期由于合欢刚移栽不久,配植合欢处理对土壤的固持和降雨的截留效果不佳,到第 2 个

观测周期合欢根系发达且树冠大、郁闭度高,同时减量施肥避免了土壤酸化,有利于土壤的保水保肥能力,所以配植合欢处理表现出了良好的水土保持能力;单纯的减量施肥处理在后期可以有效改良土壤团粒结构,避免土壤酸化,有利于土壤保水保肥,显著降低径流量和泥沙流失量。总的来说,减氮减磷并配植合欢处理能够有效降低水土流失,后期径流量可减少12.27%,泥沙流失量可减少19.55%。

3.2 平衡减量施肥和配植乔木对茶园径流水和泥沙氮素流失量的影响

茶园氮素流失量与植被覆盖、施肥量有显著的相关性。朱远达等^[21]研究了植物篱对土壤养分流失的影响表明,增加植被覆盖能够显著减少土壤携带的氮素养分流失。本研究中减氮处理(T1)、减磷并配植合欢处理(T2)、减氮减磷并配植合欢处理(T3)与习惯施肥处理(CK)相比均能显著降低径流水氮素流失量,不论初期还是后期减氮减磷并配植合欢处理(T3)均表现出了最优的效果。

减氮减磷处理(T1)2个观测周期的径流氮素累积流失量低于CK,说明减氮处理可以有效降低径流氮素流失。配植合欢处理(T2、T3)处理2个观测周期的径流氮素累积流失量低于CK,说明配植合欢可以有效降低径流氮素流失。减氮减磷并配植合欢处理(T3)2个观测周期的径流氮素累积流失量低于减氮减磷处理(T1),说明减氮条件下配植合欢可以更好地降低径流氮素流失。陈裴裴等^[6]研究表明,减量无机施肥(减氮40%)处理可以减少渗漏水总氮流失量19.4%^[7],相比之下,本试验减氮减磷并配植合欢处理(T3)控制氮素流失的效果更优。田昌等^[23]研究表明,氮磷优化减量施肥可以降低水稻田面水氮磷流失风险。前期减氮处理(T1)降低径流水氮素流失量的效果优于减磷并配植合欢处理(T2),但后期两者效果无显著差异,说明减磷并配置合欢与减氮处理均可以降低径流水氮素流失量,配植合欢可以通过生物固氮作用降低径流水氮素流失。平衡减量施肥和配植乔木措施相结合对茶园径流水氮素流失有更好的控制效果。

减氮减磷并配植合欢处理(T3)与习惯施肥处理(CK)相比能够显著降低泥沙氮素流失量,第1个观测周期泥沙氮素流失量降低126.7 g/hm²,减少15.15%;第2个观测周期泥沙氮素流失量降低94.4 g/hm²,减少21.08%。减氮减磷处理(T1)与习惯施肥处理(CK)相比无明显的控制泥沙氮素流失效果。说明配植合欢处理可以有效控制泥沙的氮素流失,减

氮处理对泥沙氮素流失量无明显影响,配植合欢处理在后期通过生物固氮作用以及根系固持作用能够起到控制泥沙氮素流失的作用。

本研究表明,白茶园氮素流失以径流水为主,席运官等^[24]也有类似的报道。本研究还得出,第1个观测周期径流水铵态氮、硝态氮、有机氮流失量分别占径流水氮素流失量的13.35%~14.81%,61.55%~64.44%,20.75%~25.10%,第2个观测周期径流水铵态氮、硝态氮、有机氮流失量分别占径流水氮素流失量的24.17%~24.90%,55.78%~56.60%,19.22%~19.62%,说明白茶园径流水氮素流失以硝态氮为主,这与刘宗岸等^[25]的研究结果相似。

3.3 平衡减量施肥和配植乔木对茶园径流水和泥沙磷素流失量的影响

茶园磷素流失量与植被覆盖、施肥量有显著的相关性。减氮减磷处理(T1)、减磷并配植合欢处理(T2)、减氮减磷并配植合欢处理(T3)均能有效降低径流水磷素流失量,第1个观测周期三者效果相差不大,第2个观测周期减磷并配植合欢处理(T2)、减氮减磷并配植合欢处理(T3)降低径流水磷素流失量的效果优于减氮减磷处理(T1),T2、T3与习惯施肥处理(CK)相比径流水总磷、有机磷、无机磷流失量分别降低19.6~21.6,8.0~9.3,11.6~12.2 g/hm²,分别减少23.84%~26.24%,25.72%~30.03%,22.70%~23.87%,说明减量施肥并配置合欢处理在后期可以取得更好的控制径流磷素流失的效果。

此外,第1个观测周期径流水有机磷、无机磷流失量分别占径流水磷素流失量的39.43%~52.07%,47.97%~60.57%,第2个观测周期径流水有机磷、无机磷流失量分别占径流水磷素流失量的35.86%~37.80%,62.20%~64.16%,可见白茶园径流水磷素流失以无机磷为主。

本试验茶园磷素流失以泥沙为主。减磷并配植合欢处理(T2)、减氮减磷并配植合欢处理(T3)可以有效控制泥沙磷素流失量,减氮减磷并配植合欢处理(T3)与习惯施肥处理(CK)相比,泥沙磷素流失量第1个观测周期降低36.5 g/hm²,减少17.40%第2个观测周期降低28.3 g/hm²,减少23.06%,朱远达等^[21]研究也表明,增加植被覆盖能显著减少土壤大颗粒的流失,从而有效控制土壤携带的磷素流失,说明行间配植合欢、增加植被覆盖可有效控制泥沙的磷素流失。已有研究^[7]表明,减施30%磷肥与常规施肥的土壤有效磷含量差异不显著,所以减磷处理能够有效保持茶园土壤肥力水平。

4 结 论

行间配植合欢可显著降低茶园径流量和泥沙流失量,能有效控制水土流失。白茶园氮素流失以径流水为主,且主要为硝态氮,减氮施肥可以有效控制径流水氮素流失,减量施肥基础上行间配植合欢控制径流和泥沙氮素流失的效果优于单纯的减氮施肥处理。白茶园磷素流失以泥沙为主,径流水磷素流失以无机磷为主,减磷施肥可以有效控制径流磷素流失及泥沙磷素流失,减量施肥结合行间配植合欢控制径流水和泥沙磷素流失的效果优于单纯的减磷施肥处理。氮磷减施 40% 并配植合欢能够在保持茶园土壤肥力水平的基础上有效控制茶园水土及养分流失。鉴上,推荐的控制安吉白茶园土壤侵蚀和养分流失的适宜技术措施为:施 N 270 kg/hm², P₂O₅ 90 kg/hm², K₂O 180 kg/hm² 和配植合欢密度 200 株/hm²。

参考文献:

- [1] 杨滨键,尚杰,于法稳.农业面源污染防治的难点、问题及对策[J].中国生态农业学报,2019,27(2):236-245.
- [2] 张媛,许有鹏,于志慧,等.太湖西苕溪流域环境流量评价分析[J].水利学报,2014,45(10):1193-1198.
- [3] 陈诗文,袁旭音,金晶,等.西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析[J].环境科学,2016,37(11):4179-4186.
- [4] 郭峰,李钢,王惠丽,等.浙江省两种典型落叶经济林生态恢复技术[J].浙江水利科技,2018,46(1):8-11.
- [5] 王京文,孙吉林,张奇春,等.西湖名胜区茶园地表径流的氮磷流失研究[J].浙江农业学报,2012,24(4):676-679.
- [6] 陈裴裴,吴家森,郑小龙,等.不同施肥对雷竹林径流及渗漏养分流失规律的影响[J].水土保持学报,2013,27(3):39-43.
- [7] 黄楠,赵跃,刘继培,等.减施磷肥对京郊设施番茄产量、品质及土壤有效磷的影响[J].中国农学通报,2018,34(16):65-69.
- [8] Guo S F, Zhai L M, Liu J, et al. Cross-ridge tillage decreases nitrogen and phosphorus losses from sloping farmlands in southern hilly regions of China [J]. Soil and Tillage Research, 2019, 191: 48-56.
- [9] 董敦义,张彪,张灿强,等.太湖流域安吉县林地养分流失评估[J].资源科学,2011,33(8):1608-1612.
- [10] 王冉,童菊秀,李佳韵,等.模拟降雨条件下农田裸地氮素随地表径流流失特征[J].中国农村水利水电,2018

(5):37-42.

- [11] Morteza A, Farzin N, Hossain A. Effects of rainfall patterns on runoff and rainfall-induced erosion[J]. International Journal of Sediment Research, 2019, 34(3): 270-278.
- [12] Wen Q Z, Xin J, Xin M, et al. Contribution of particulate matter in storm runoff to organic phosphorus loads in urban rivers [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25: 23342-23348.
- [13] 王升,王全九,董文财,等.黄土坡面不同植被覆盖度下产流产沙与养分流失规律[J].水土保持学报,2012,26(4):23-27.
- [14] 吴全,姚永宏,李中林.山地茶园中不同种植模式对水土保持效果研究[J].水土保持研究,2004,11(3):252-254.
- [15] Han E J, Park Y S, Kim Y D, et al. A study on soil loss rate assessment of vegetation mat measures [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2016, 10: 21-31.
- [16] 刘富庭,张林森,李雪薇,等.生草对渭北旱地苹果园土壤有机碳组分对微生物的影响 [J].植物营养与肥料学报,2014,20(2):355-363.
- [17] 陈蝶,卫伟.植物篱的生态效益研究进展[J].应用生态学报,2016,27(2):652-662.
- [18] 赵叶舟,王浩铭,汪自强.豆科植物和根瘤菌在生态环境中的地位和作用[J].农业环境与发展,2013,30(4):7-12.
- [19] 谢贤群,王立军.中国生态系统研究网络观测与分析标准方法:水环境要素观测与分析[M].北京:中国标准出版社,1998.
- [20] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [21] 朱远达,蔡强国,张光远,等.植物篱对土壤养分流失的控制机理研究[J].长江流域资源与环境,2003,12(4):345-351.
- [22] 蒲玉琳,谢德体,林超文,等.紫色土区不同植物篱模式控制坡耕地氮素流失效应[J].农业工程学报,2014,30(23):138-147.
- [23] 田昌,周旋,杨俊彦,等.化肥氮磷优化减施对水稻产量和田面水氮磷流失的影响[J].土壤,2020,52(2):311-319.
- [24] 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.
- [25] 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.