有机肥替代和稻草覆盖对中南丘陵茶园氮磷径流损失的影响

何石福[1,2,3,4], 荣湘民[1,2,3,4],李 艳[1],
刘 强[1,2,3,4], 彭建伟[1,2,3,4], 谢 勇[1,2,3,4], 张广宇[1]

(1.湖南农业大学资源环境学院,长沙 410128;2.农田污染控制与农业资源利用湖南省重点实验室,长沙 410128;
3.植物营养湖南省普通高等学校重点实验室,长沙 410128;4.土壤肥料资源高效利用国家工程实验室,长沙 410128)

摘要:在自然降雨条件下的中南丘陵茶园小区进行定点观测,比较了农民习惯施肥处理(T1)、分别以有机肥代替 10%化学氮肥或磷肥(T2、T4)及有机肥代替 10%化学氮肥或磷肥+覆盖稻草(T3、T5)对不同形态氮、磷养分径流流失的影响,以期为防控茶园氮磷流失从施肥和茶园管理的角度提供借鉴。结果表明:与 T1 相比,T2 和 T4 径流量减少 15.4%~31.5%(P<0.05),T3、T5 减少 46.8%~52.9%(P<0.01)。相同降雨条件下,相比 T1,T2 和 T4 径流损失 TN 分别减少 42.4%(P<0.05)和 57.2%(P<0.05),T3 和 T5 分别降低 74.7%(P<0.01)和 74.6%(P<0.01);相比 T1,T2 和 T4 径流损失 TDN 分别降低 18.2%(P>0.05)和 39.2%(P>0.05),T3 和 T5 分别降低 75.6%(P<0.01)和 74.1%(P<0.01),与 T2、T4 差异极显著(P<0.01);NH_4^+-N 和 NO_3^--N 流失总量表现为,T2、T4 与 T1 差异均不显著(P>0.05),T3、T5 分别降低 61.5%~71.9%(P<0.05)和 78.2%~92.7%(P<0.05)。与 T1 相比,T2 和 T4 处理 TP 流失均降低,但只有 T4 差异达到显著水平(P<0.05),而 T3、T5 TP 损失减少达 66.5%~70.6%(P<0.01)。另外,氮素流失以溶解态为主(83.8%~95.1%),而磷素流失以颗粒态为主(72.7%~84.3%)。研究证明配施有机肥和覆盖稻草均能够有效减少茶园氮磷径流损失,两者结合效果更好,对降低面源污染风险意义重大,适合大面积推广。

关键词:有机肥替代;稻草覆盖;丘陵茶园;氮磷流失

中图分类号:S157.1 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-2242(2017)05-0120-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.05.019

Effects of Organic Mmanure Substitution and Straw Mulching on Nitrogen and Phosphorus Runoff Loss in Zhongnan Hilly Tea Plantation

HE Shifu[1,2,3,4], RONG Xiangmin[1,2,3,4], LI Yan[1], LIU Qiang[1,2,3,4],
PENG Jianwei[1,2,3,4], XIE Yong[1,2,3,4], ZHANG Guangyu[1]

(1. *College of Resources and Environment*, *Hunan Agricultural University*, *Changsha* 410128;
2. *Hunan Provincial Key Laboratory of Farmland Pollution Control and Agricultural Resources Use*,
Changsha 410128;3. *Hunan Provincial Key Laboratory of Plant Nutrition in Common University*, *Changsha* 410128;
4. *National Engineering Laboratory on Soil and Fertilizer Resources Efficient Utilization*, *Changsha* 410128)

Abstract: Field experiment was conducted in Zhongnan hilly tea garden, and the effects of the farmers used to fertilize treatment (T1), replace the 10% chemical nitrogen or phosphorus fertilizer with organic manure (T2, T4) and organic fertilizer instead of chemical nitrogen or phosphorus fertilizer + straw covering 10% (T3 and T5) on nitrogen and phosphorus nutrient runoff erosion were explored. The results showed that compared with T1, runoff of T2 and T4 decreased by 15.4%~31.5% (P <0.05), T3 and T5 reduced by 46.8%~52.9% (P<0.01). Compared with T1, TN runoff loss of T2 and T4 decreased by 42.4% and 57.2% (P <0.05), T3 and T5 decreased by 74.7% and 74.6% (P<0.01); Compared with T1, TDN runoff loss of T2 and T4 reduced by 18.2% and 39.2% respectively (P > 0.05), and T3 and T5 decreased by 75.6% and 74.1% (P<0.01), and compared with T2, T4 showed extremely significant difference (P<0.01). As for NH_4^+-N and NO_3^--N loss, there were no significance between T1 and T4 and T1 (P > 0.05), while T3 and T5 reduced by 61.5%~71.9% and 78.2%~71.9%, respectively (P<0.05). Compared with T1,

收稿日期:2017-04-03
资助项目:国家科技支撑计划项目(2014BAC09B01);湖南省教育平台项目(15K056)
第一作者:何石福(1991—),男,在读博士研究生,主要从事植物营养生理与生态研究。E-mail:646290886@qq.com
通信作者:荣湘民(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事养分资源高效安全利用研究。E-mail:rongxm2005@126.com

T2 and T4 reduced the loss of TP, but only T4 was significant ($P<0.05$), and TP loss of T3 and T5 reduced by 66.5%～70.6% ($P<0.01$). In addition, TN ran off mainly through dissolved nitrogen loss (83.8%～95.1%), and phosphorus ran off mainly through particle state (72.7%～84.3%). Studies indicate that organic fertilizer and covering straw can effectively reduce nitrogen and phosphorus runoff loss of the tea garden, and the combination effect is better, and it is of great significance to reduce the risk of non-point source pollution, and it is suitable for large area promotion.

Keywords: organic fertilizer alternative; straw cover; hilly tea garden; nitrogen and phosphorus loss

茶叶饮品被誉为“世界三大饮料之一”，广受人们欢迎，我国的茶树种植大部分分布在我国南方地区。我国南方地区气候湿润，降雨集中，而茶园种植地带多为丘陵区，水土流失严重，茶园土壤氮、磷养分随径流流失的风险较高，是加剧农业面源污染的重要因素。

相关研究表明，地表水的富营养化是我国水污染的主要表现形式，而农业面源污染是导致水体富营养化的主要原因，农业生产中氮、磷肥的损失是导致农业面源污染的主要原因[1-2]。我国化肥用量逐年上升，但化肥的利用效率普遍较低，氮肥利用率低于30%，磷肥则低于15%[3]。大部分未被利用的养分可能通过地表径流或渗漏流失到地表水和地下水中，最终输入到河流和湖泊中[4]。目前，由氮磷富集所引起的江河湖海的富营养化已成为一个世界性的问题，在美国、欧洲、南美洲，都发生过由于富营养化所导致的海洋水体污染，对环境和生态造成巨大破坏[5]。据统计数据表明，我国113个环保重点城市395个集中式饮用水源地不达标水占23.5%；26个国控重点湖库水质劣于Ⅳ类占77%，富营养状态占57.7%；82个城市57.2%的地下水监测点水质呈较差—极差级别[6]。在新农村建设、“十二五”规划、农业部相关文件中，特别强调控制农业面源污染，要求大力发展资源节约型、环境友好型农业；《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》明确指出，发展农业环境综合整治技术，提高农林生态环境质量是我国农业科学技术研究的优先主题。

我国茶园种植所处的南方丘陵地区，降雨量极其丰沛，且相对集中，因而产生地表径流极大，随之带走的土壤氮素、磷素也较多。已有研究表明[7]，通过对茶园覆盖稻草和不同施肥处理，可以有效降低氮、磷的流失风险。目前，针对茶园施肥方式和秸秆覆盖对茶叶产量和品质的研究较多，而对有机无机肥配施和秸秆覆盖对茶园养分流失的影响的研究较少。因而在全面调查中南丘陵茶园土壤肥力水平、当地施肥水平及茶叶产量水平的基础上，根据平衡施肥原理[8]，采用有机无机肥配施和稻草覆盖处理，通过田间小区试验，研究不同管理方式对中南丘陵茶园氮磷径流流失的差异及其影响因素，以期为中南丘陵茶园氮磷径流流失防控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试茶树品种为“福云早毫”，由湖南省金湘园茶叶公司提供，培育年限约为10 a。供试肥料为普通尿素(含N 46.0%)；过磷酸钙(含 P_2O_5 12.0%)；氯化钾(含 K_2O 44.8%)；强湘有机肥(含有机质47.0%、N 1.827%、P_2O_5 1.237%、K_2O 0.802%)。供试稻草为当地晚稻稻草，2015年3月份覆盖，覆盖量为15 000 kg/hm^2，均匀铺于茶行间及茶树间隙。

1.2 试验区概况

试验于2015年3月1日—10月15日在湖南省长沙县开慧镇金湘园茶叶基地进行。该试验地属中亚热带北缘季风气候，土壤为花岗岩母质发育的红壤，年平均气温16.5～20.5 ℃。1月平均气温11.9 ℃，极端最低气温−5.2 ℃，7月平均气温27.9 ℃，极端最高气温39.1 ℃，≥10 ℃年有效积温6 539 ℃，年均降水量1 389 mm，4—6月降水占全年降水总量的76%。试验观察期间(2015年3—10月)，发生径流事件12次。

供试土壤为花岗岩母质发育的红壤，基本理化性状：pH 4.38；有机质24.00 g/kg；全N 1.86 g/kg；全P 0.19 g/kg；全K 19.73 mg/kg；碱解N 124.02 mg/kg；速效P 26.40 mg/kg；速效K 145.21 mg/kg。

1.3 试验设计

采用长期定位小区试验(2015年为第4年)，每个小区2个平行茶行，小区面积30 m^2(7.5 m×4 m)，每个小区用不锈钢防水挡板围住，挡板地上部和地下部均为50 cm，在小区顺着地势高差建设体积为1 m^3(长1 m×宽1 m×高1 m)的可收集径流的塑胶水箱(水箱用不锈钢支架固定)，降雨产生的径流由于地势的高差顺着PVC管流入水箱，水箱底部自带出水阀门，水箱顶部留可打开圆形封盖(方便将蓄积的水样搅拌均匀)，水箱一侧为排水沟，直通试验区下游的总排水口。降雨产生径流后，用刻度尺测量水深，根据水箱规格数据计算径流体积，并采集径流水样。

试验共设5个处理：处理1(T1，对照)，农民习惯施肥；处理2(T2)，有机肥代替10%化学N肥；处理3(T3)，有机肥代替10%化学N肥＋稻草覆盖；处理4(T4)，有机肥代替10%化学P肥；处理5(T5)，有机

肥代替10%化学P肥+稻草覆盖。经调查南方茶园肥料用量,发现施肥水平不高,为防止茶叶减产,将有机肥代替10%的化学N肥、P肥分别作为一种处理方式。各处理纯养分投入量均为:纯N 41.37 kg/hm^2、P_2O_5 2.75 kg/hm^2、K_2O 255.23 kg/hm^2,施用有机肥部分根据其中氮、磷、钾含量相应地减少化肥用量,保证每个处理施用的氮、磷、钾用量一致。各处理具体肥料用量和稻草覆盖量见表1。每个处理设置3个重复,共15个小区,随机区组排列。

表1 施肥方案 单位:kg/hm^2

处理	稻草覆盖	有机肥	尿素	过磷酸钙	氯化钾
T1	0	0	960	690	570
T2	0	6855	864	293	561
T3	15000	838	864	293	561
T4	0	1485	793	621	555
T5	15000	1485	793	621	555

氮肥分3次施用,总量的40%作基肥、30%作第1次追肥、30%作第2次追肥,有机肥、磷肥和钾肥全部作为基肥施入。基肥于2015年3月17日(采春茶前)施入,第1次氮肥追肥于7月10日施入,第2次追肥于9月8日(秋茶采摘前)施入。为保证茶树能够均匀吸收养分,肥料均采用开沟条施的方式施入,基肥于茶行中间开沟20 cm施入(有机肥替代处理在施肥前将化肥与有机肥充分混匀),追肥也要施10~15 cm深,施肥后立即均匀盖土。试验除施肥量和稻草覆盖不同外,其他管理条件均同大田生产的常规化管理。

1.4 取样方法

每次降雨结束并产生径流后,用刻度尺测量各个水箱内水深度,并根据长宽数据计算径流体积;通过水箱上端开口对径流充分搅拌均匀后,用干净塑料瓶在底端出水口接取水样500 mL,立即带回实验室进行指标分析(如不立即分析,则加1 mL氯仿溶液于−20 ℃冰箱保存,但不超过1个月)。取样结束后,打开水箱阀门,将水箱内的水排干并将箱内泥沙清洗干净,关好阀门,以储存下次降雨产生径流。茶叶样品在清明前后采摘(春茶),分2次采样,中间间隔15 d,用已知面积的自制方形金属框随机选定多个采样点,采样时摘取2片新叶带一个嫩芽(即两叶一心)。

1.5 测定与数据分析方法

氮、磷、钾是茶树所需的主要养分,茶园径流包含多种形态的氮、磷、钾元素,为探明不同形态养分径流流失的总量和比例以及水土流失情况,选取的分析指标包括径流总氮(TN)、溶解态总氮(TDN)、颗粒态氮(PN)、硝态氮(NO_3^-—N)、铵态氮(NH_4^+—N)和溶解态有机氮(DON),总磷(TP)、溶解态总磷(TDP)和颗粒态磷(PP)及水样全钾(TK)。

总氮(TN):取部分混匀的径流液采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度计法测定;溶解态总氮(TDN):取部分径流液过0.45 μm滤膜(真空抽滤机抽滤),收集滤液采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度计法测定;颗粒态氮(PN):PN=TN−TDN;铵态氮(NH_4^+—N)和硝态氮(NO_3^-—N):取部分径流液过0.45 μm滤膜,收集滤液使用连续流动分析仪(AA3,德国生产)测定;溶解态有机氮(DON):DON=TDN−(NH_4^+—N+NO_3^-—N);总磷(TP):取部分径流液采用过硫酸钾消解—钼锑抗比色法测定;溶解态总磷(TDP):取部分径流液过0.45 μm滤膜,收集滤液采用过硫酸钾消解—钼锑抗比色法测定;颗粒态磷(PP):PP=TP−TDP;水样全钾(K):取部分径流液过0.45 μm滤膜,收集滤液采用火焰光度法测定。

氮(磷、钾)径流流失总量=径流液体积×径流液中氮(磷、钾)浓度/面积

茶叶样品:取样后立即称其鲜重,然后置于烘箱105 ℃杀青30 min,接着在60~65 ℃烘干至恒重,产量以单位面积茶叶干重表示(kg/hm^2),同时取部分茶叶样品用烘干法测定水分含量,以百分数形式表示。

所有试验数据采用Microsoft Excel 2007进行整理和作图,不同处理间差异采取DPS v7.05版软件进行单因素方差分析,LSD法进行显著性检验($P<0.05$),所有数据结果均以平均值的形式来表达。

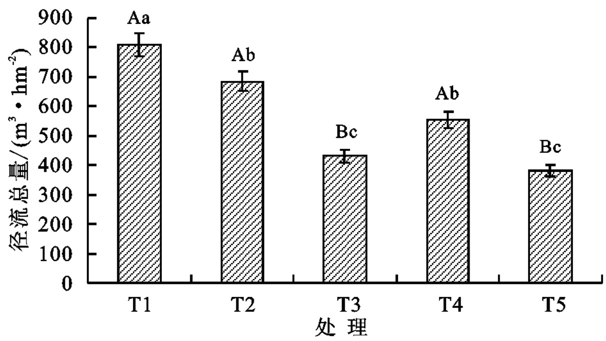
2 结果与分析

2.1 不同管理方式对茶园地表径流总量的影响

2015年3—10月共有12次比较大的降雨事件,收集到了地表径流。由图1可知,整个试验周期内,不同处理地表径流总量T1~T5依次为809.5,684.8,381.3,554.2,430.9 m^3/hm^2,T2和T4,分别比T1低15.4%和31.5%,差异显著($P<0.05$);有机肥替代+稻草覆盖的2个处理T3和T5最低,分别比T1低46.8%和52.9%,且与其他3个非覆盖处理(T1、T2和T4)的差异均达到极显著水平($P<0.01$)。

通过参考当地气象局降雨监测数据,获得各次降雨事件的降雨量数据。结果表明,径流量的多少与降雨量和地面情况直接相关,在降雨量条件相同的情况下,地面覆盖物及土壤性状是主要影响因素。有机肥替代10%的化学氮肥或磷肥处理(T2、T4)能够显著降低径流损失,原因可能是通过数年连续施用有机肥(从2012年开始定位试验),提高了土壤中有机碳含量,对茶园土壤理化性状具有一定的改善作用,土壤孔隙度提高,加强渗透性和抗冲性,延长了地表土壤产生水饱和层的时间,从而能够吸纳更多降雨,减少径流损失。稻草覆盖处理则可以降低雨水对地表的击溅作用,削减了径流的动能,从而减弱对地表土壤的冲刷,此外覆盖物可

以延长雨水在地表停留时间,增加雨水下渗量。因此,在配施有机肥的基础上,添加稻草覆盖可以有效降低茶园径流损失,为茶树生长提供充足的水分,同时极大地降低了中南丘陵茶园水土流失风险。



注:不同小写字母表示差异达显著(P<0.05);大写字母表示差异极显著(P<0.01)。下同。

图 1　不同处理 3—10 月地表径流总量

2.2　不同管理方式对茶园氮素养分径流损失的影响

2.2.1　不同管理方式对不同形态氮素损失的影响

监测茶园整个试验周期内通过径流损失的不同形态的氮素总量,结果如表 2 所示,茶园径流损失的总氮量(TN)与径流总量有类似的变化趋势。T1 处理径流损失 TN 最高,为 7.31 kg/hm²,其次是 T4 和 T2 的 3.13,4.21 kg/hm²,T3 和 T5 最低,分别为 1.85,1.86 kg/hm²。相比 T1 处理,T2 和 T4 处理径流损失 TN 分别减少 42.4%和 57.2%,差异显著(P<0.05),T3 和 T5 则分别降低 74.7%和 74.6%,差异极显著(P<0.01)。表明有机肥代替部分化肥能够显著降低 TN 流失风险,同时覆盖稻草处理效果更佳。溶性氮(TDN)和颗粒态氮(PN)的处理间差异则与总氮的变化差别较大。T2 和 T4 径流损失 TDN 分别比 T1 低 18.2%和 39.2%,差异不显著(P>0.05),且 T2 和 T4 间差异同样不显著(P>0.05);T3 和 T5 分别比 T1 低 75.6%和 74.1%,差异均达到极显著水平(P<0.01),且与 T2、T4 差异亦极显著(P<0.01)。从径流损失 PN 来看,与 T1 相比,T2、T3、T4 和 T5 径流损失 PN 分别降低44.9%,72.4%,58.3%,75.8%,差异均达显著水平(P<0.05),且 T2、T4 分别与 T3、T5 差异显著(P<0.05)。这一结果说明有机肥替代处理对降低 TDN 和 PN 径流损失的作用不显著,主要是稻草覆盖处理产生影响。另外,从 TDN 的占比来看,T1～T5 处理径流损失 TDN 占 TN 的比例依次为 70.4%,71.6%,67.8%,71.2%,71.6%,均超过 50%,表明中南丘陵茶园径流损失的总氮以溶解态氮为主要流失形态,颗粒态氮比例较小,这可能与茶园土壤质地和降雨强度有关。

由表 2 可知,溶解态氮中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 流失总量大小依次为 T1>T2>T4>T5(T3),T2、T4 与 T1 差异均不显著(P>0.05),T3、T5 均与 T1 差异显著(P<0.05),损失 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 分别降低 61.5%～71.9%和 78.2%～92.7%。表明有机肥代替对减少NH_4^+-N 和 NO_3^--N 流失的作用不显著,而覆盖稻草则作用显著,这一结果与各处理对 TDN 流失的影响一致。各处理径流损失的溶解态有机氮(DON)总量也均低于 T1 处理,除 T2 外差异均达到显著水平(P<0.05)。各处理 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的加和占 TDN 的比例为 83.8%～95.1%,说明 NH_4^+-N、NO_3^--N 是氮素径流流失的主要形式。

综合来看,相比 T1 处理,有机肥代替化学氮肥和稻草覆盖能够不同程度地减少各种形态氮素的流失量,氮素流失总量降幅达 42.4%～74.7%。有机肥代替化学氮肥能够减少肥料中速效氮的含量,本试验中有机肥代替 10%化学 N 肥(T2)处理的 TDN、NH_4^+-N、NO_3^--N、DON 流失量均低于 T1 处理,再加上稻草覆盖处理(T3)可以极大地降低径流量,降低效果更显著。因此,通过有机肥代替化学氮肥和覆盖稻草能够有效减少茶园氮素养分径流流失,使土壤和肥料中的速效氮更多地为茶树生长所利用。

表 2　不同处理各形态氮素径流流失差异比较

单位:kg/hm²

处理	TN	TDN	PN	NH_4^+-N	NO_3^--N	DON
T1	7.31Aa	5.144Aa	2.170Aa	2.645Aa	1.868Aa	0.631Aa
T2	4.21ABb	3.013ABab	1.195ABb	1.698Aa	1.168Aab	0.147Aab
T3	1.85Bc	1.254Cc	0.600Bc	0.743ABb	0.407ABbc	0.104Ab
T4	3.13Bbc	2.228ABab	0.905Bb	1.080Aab	0.787Aab	0.361Ab
T5	1.86Bc	1.332Cc	0.525Bc	1.019Ab	0.137Bc	0.176Ab

2.2.2　不同时期总氮流失量的动态分布特征

由图 2 可知,在试验开展的时段内,不同时期地表径流损失总氮呈波动变化趋势,各处理的变化趋势基本一致。各处理径流损失总氮(TN)均在 6 月出现明显的峰值,且 T1 处理流失总氮均明显高于其他处理,这主要与不同时期降雨量有关,2015 年试验区降水主要集中在 4—6 月,尤其是 6 月降雨较集中,产生径流量较大,随径流损失的氮素增加;从曲线的走势来看,农民习惯施肥处理(T1)不同时期流失总氮波动幅度最大,有机肥替代化肥的 2 个处理 T2 和 T4 走势稍缓和且较接近,而稻草覆盖的 2 个处理 T3 和 T5 走势更加缓和,整个监测周期变幅均较小,说明有机肥部分代替化肥和稻草覆盖 2 个处理均能有效缓和降雨对氮素流失的影响,同时采用这 2 种处理可起叠加作用,并且这种作用在较强降雨的情况下作用更加明显,其原因可能是一方面有机肥部分代替化学氮肥减少了速效态氮肥的比例,使占主要流失形式的 TDN(主要为 NH_4^+-N 和 NO_3^--N)量减少,另一方面有机肥中的有机碳可以有效改善土壤结构,增强了土壤透水和下渗能力,当产生强降雨时可以短时间内吸纳较多降雨产生的径流,从而减少了径流总量并减弱了径流动能,使径流带走氮素养分减少,而稻草覆盖可保护地表免受雨滴的直接打击,延长雨水下渗时间,同

样能够减少径流总量并减弱其动能，达到有效控制氮素的径流损失流失，使得氮肥的肥效更持久。

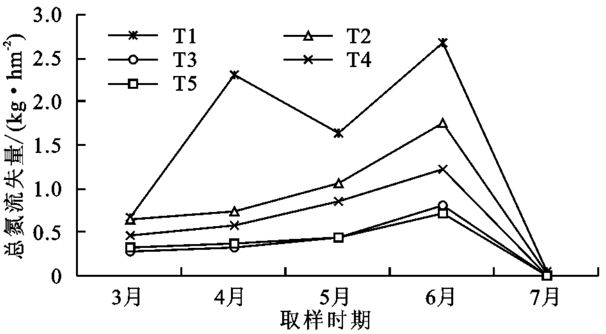


图2 不同时期(3—10月)各处理总氮流失趋势

2.3 不同管理方式对茶园磷素养分径流损失的影响

2.3.1 不同管理方式对不同形态磷素损失的影响 由表3可知，各处理径流损失的总磷(TP)大小依次为T1>T2>T4>T3>T5，T2～T5相对T1的降幅依次为31.4%，66.5%，47.9%，70.6%，T2略高于T1但差异不显著($P>0.05$)，T3、T4、T5与对照处理(T1)间差异均达极显著水平($P<0.01$)，T2、T4均与T3、T5差异显著($P<0.05$)。表明有机肥代替10%化学磷肥和稻草覆盖均能极显著降低TP的径流损失。

可溶性磷(TDP)流失量与TP表现类似，按流失量大小依次为T1>T2>T4>T5>T3，T2～T5相对T1的降幅依次为35.8%，79.2%，69.8%，83.0%，T3和T5均与T1差异显著($P<0.05$)，T2和T4与T1差异不显著($P>0.05$)，T4与T5差异显著($P<0.05$)，但与T3差异不显著($P>0.05$)。说明有机肥替代+稻草覆盖可以显著降低TDP的径流损失量，但单独有机肥替代或者稻草覆盖处理效果不显著。颗粒态磷(PP)流失量同样表现为T1最高，其次为T4和T2，T3和T5最低，T2～T5相对T1的降幅依次为29.8%，61.7%，39.7%，66.0%，各处理除T2外均与T1差异显著($P<0.05$)，说明有机肥替代10%化学磷肥和稻草覆盖均能显著降低PP损失量。此外，T1～T5处理流失TDP占TP比例依次为27.3%，25.6%，16.9%，15.8%，15.7%，均低于50%，说明径流损失磷素主要通过颗粒态形式流失，这一点与氮素相反，因为土壤中的磷绝大部分被土壤颗粒吸附，能够自由移动的磷含量较少。

综合来看，相比T1，有机肥代替10%化学氮(磷)肥和稻草覆盖均能减少磷素养分的流失，其中以结合了有机肥代替化学磷肥和稻草覆盖的处理(T3、T4、T5)对减少TP流失效果最明显，对于T4而言，其原因可能是有机肥代替部分化学磷肥使施入的肥料中速效磷含量降低，降低了磷素养分随径流流失的风险；对于T3和T5，其原因主要是稻草覆盖处理避免了雨滴的直接溅蚀，延长了产流时间并增大了入渗量，大量减少径流冲刷产生泥沙流失，从而减少了以颗粒态磷为主的总磷流失。

表3 不同处理各形态磷素径流流失差异比较

单位：kg/hm²

处理	TP	TDP	PP
T1	0.194Aa	0.053Aa	0.141Aa
T2	0.133Aab	0.034Aab	0.099Aa
T3	0.065Bc	0.011ABbc	0.054Ab
T4	0.101Bbc	0.016Aab	0.085Abc
T5	0.057Bc	0.009Bc	0.048Ab

2.3.2 不同时期总磷流失量的动态分布特征 由图3可知，监测时期内5个处理的地表径流损失总磷总体呈现为从3—5月缓慢升高，至6月急剧升高至峰点，再至7月陡降至最低值，整体表现出较大的波动性，主要差别在于峰值不同，其大小顺序为T1>T2>T4>T3>T5。这主要与监测点降雨存在较大时空差异有关，2015年试验区降水主要集中在4—6月，其中尤以6月降雨频率高且持续时间长，而7月以后天气较干燥且降雨稀少，因而不同时期径流量差异较大，随径流流失的TP随之发生变动。T2和T4的地表径流总磷流失量均低于T1，即T2和T4均有减缓总磷流失的效果，说明配施有机肥对减少磷素营养流失具有良好的作用，原因可能是有机肥中磷素以缓效态为主，较难以溶解流失。有机肥替代+稻草覆盖处理的T3和T5两个处理在4—5月对TP流失的减弱作用表现不明显，而到6月则表现十分明显，表明有机肥替代和稻草覆盖对茶园磷素径流流失的阻控作用在降雨量较大的情况下更加明显。

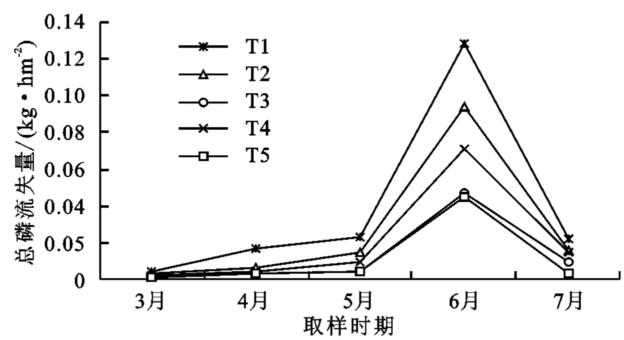


图3 不同时期(3—10月)各处理总磷流失趋势

2.4 不同管理方式对茶园钾素养分径流损失的影响

由图4可知，试验周期内T1～T5流失总钾(TK)量依次为20.3，13.7，3.4，5.2，2.9 kg/hm²，T2比T1降低32.5%，差异显著($P<0.05$)；T4比T1降低74.4%，差异极显著($P<0.01$)；T3和T5分别比T1降低83.3%和85.7%，差异均达极显著水平($P<0.01$)。表明有机肥代替10%化学氮(磷)肥能够显著减少钾素的径流损失，同时覆盖稻草则作用更显著。施肥时为保证投入N、P、K的量一致，施用有机肥的处理根据有机肥中的K含量相应减少化学钾肥的用量，除T1外均通过有机肥投入钾素，因此T2～T5投入的K素中缓效态K比例较高，故可以有效降低钾素径流流失量；另外，对比径流数据可知，

各处理径流流失 TK 与径流总量流失特征(图 1)相似,说明钾素的流失与径流量的多少直接相关,覆盖处理可以通过影响径流量间接影响 K 的流失。因此,可以通过有机肥替代化肥+稻草覆盖处理降低钾素的流失风险。

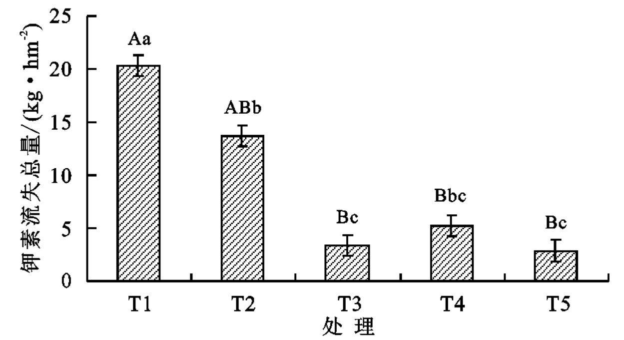


图 4　不同处理钾素径流损失总量比较

2.5　不同管理方式对茶园茶叶产量和水分含量的影响

由表 4 可知,农民习惯施肥处理(T1)茶叶产量最低,为 849 kg/hm^2,其次是 T2 和 T4,分别为 937,992 kg/hm^2,T5 和 T3 处理的产量最高,分别为 1 098,1 038 kg/hm^2。T2 和 T4 分别比 T1 高 9.5%和 14.5%,T5 和 T3 分别比 T1 产量高 22.7%和 18.3%,但差异均未达到显著水平($P>0.05$)。这可能是因为本试验各处理的总养分投入水平一致,且茶树是多年生作物,只进行 4 年的试验处理(本试验从 2012 年开始进行,本年度为长期定位试验的第 4 年),有机肥和稻草改良土壤并提高茶树产量的成效需要一定的年限才能发挥显著作用,因此目前对于茶叶增产的效果并不显著。各处理的茶叶水分含量由低到高依次为 T1<T2<T4<T5<T3,T2 和 T4 均高于 T1 处理,但差异不显著($P>0.05$),T3 和 T5 处理最高,分别为 78.4%和 77.9%,均显著高于 T1 的 74.4%($P<0.05$)。T2 与 T4、T3 与 T5 差异均不显著($P>0.05$),但 T2、T4 均与 T3 和 T5 差异显著($P<0.05$)。说明配施有机肥对茶叶水分含量的影响不明显,而稻草覆盖处理可以显著提高茶叶水分含量,这是因为稻草覆盖可以有效地减少地表径流损失,为茶树生长提供足够的水分,且由于稻草的保温保墒作用,稻草覆盖处理的土壤温度相对升高,有利于增强土壤微生物和酶的活性,加速土壤中营养物质的转化,促进了茶树对养分的吸收和转运,增强茶树对水分的吸收和转运,进而提高了茶叶的水分含量。

表 4　不同处理茶叶产量及其水分含量比较

处理	产量/(kg·hm^{-2})	水分含量/%
T1	849a	74.37b
T2	937a	75.03b
T3	1038a	78.43a
T4	992a	75.17b
T5	1098a	77.90a

3　讨 论

本试验研究了有机肥代替 10%化学氮(磷)肥和稻草覆盖处理在相同培养管理条件下对中南丘陵茶园径流量、肥料养分径流损失及茶叶产量和水分含量的影响。径流量的多少主要受降雨量、降雨强度、降雨时长、地形条件和植被因素等的影响[9]。试验期间降水主要集中于上半年,在 3—7 月就监测到 12 次比较大的降雨,产生径流总量达到 381.3～809.5 m^3/hm^2。配施有机肥处理(T2、T4)径流总量分别比农民习惯施肥处理(T1)低 15.4%和 31.5%,差异显著($P<0.05$),与庹海波等[10]的研究结果基本一致。而有机肥替代+稻草覆盖处理对径流量的影响更为显著,相比 T1,T3 和 T5 产生的径流量降幅达到 46.8%～52.9%($P<0.01$),且极显著低于 T2 和 T4,说明覆盖稻草在其中起主要作用。蒋翔[11]的研究也表明,秸秆覆盖与无覆盖处理产生径流量存在显著差异,与本研究结果相符。

在相同降雨和养分投入量的情况下,相比 T1 处理,T2 和 T4 处理径流损失 TN 分别减少 42.4%和 57.2%,差异显著($P<0.05$),T3 和 T5 则分别降低 74.7%和 74.6%,差异极显著($P<0.01$)。从径流损失 TDN 来看,T2 和 T4 分别比 T1 低 18.2%和 39.2%,差异不显著($P>0.05$),且 T2 和 T4 间差异同样不显著($P>0.05$);T3 和 T5 分别比 T1 低 75.6%和 74.1%,差异均达到极显著水平($P<0.01$),且与 T2、T4 差异亦极显著($P<0.01$)。而从径流损失 PN 来看,与 T1 相比,T2、T3、T4 和 T5 径流损失 PN 分别降低 44.9%,72.4%,58.3%,75.8%,差异均达显著水平($P<0.05$),且 T2、T4 分别与 T3、T5 差异显著($P<0.05$)。说明有机肥替代处理对降低 TDN 和 PN 径流损失的作用不显著,主要是稻草覆盖处理产生影响。溶解态氮中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 流失总量则表现为,T2、T4 与 T1 差异均不显著($P>0.05$),T3、T5 均与 T1 差异显著($P<0.05$),损失 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 分别降低 61.5%～71.9%和 78.2%～92.7%。表明有机肥代替部分化肥对减少 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 流失的作用不显著,而覆盖稻草可以显著降低 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 流失总量。有关研究通过秸秆覆盖对桃—大豆套种地表径流及 N、P 流失的影响研究发现,覆盖处理相比对照,TN、NH_4^+-N 和 NO_3^--N 流失量减少 52.6%～91.1%,同时覆盖的效果与径流量密切相关[11],这与本研究结果一致。说明稻草覆盖处理对茶园氮素径流流失具有很好的削减作用,其作用原理主要是通过缓冲雨滴动能和控制径流量而间接影响氮素的损失。说明有机肥分别代替 10%化学氮肥和磷肥对减少氮素流失的作用是一致的,且对不同形态氮素的流失均有一定削减作用。王京文等[12]通过对西湖区茶园施有机肥(菜饼)对茶园养分径流损失研究发现,有机肥处理的茶区能够减少总氮总磷的径流损失,氮素的流失与降雨量呈显著正相关,同时总氮流失中可溶性氮占

66%，是茶园土壤氮素流失的主要形态，这点与本试验结果基本一致(67.8%～71.6%)。

磷素主要以吸附态形式存在茶园土壤中，移动性和溶解性低于氮素，因而流失量较少，但根据短板效应，磷是水体富营养化的关键因素，产生面源污染的风险更大。本试验处理过程中磷素的径流损失与氮素相同之处在于均与径流量密切相关，配施氮肥和磷肥的2个处理(T2和T4)对削减TP、TDP和PP均有一定作用，但只有T4(代替10%化学磷肥)的差异达到显著水平($P<0.05$)，说明有机肥代替化学磷肥能够有效降低磷素径流流失，因为降低了速效磷的含量，从而减小了磷素的流失风险。而有机肥替代+稻草覆盖处理对磷素损失具有更加显著的削减作用，T3和T5能够降低TP 66.5%～70.6%(相比T1)，差异极显著($P<0.01$)，TDP和PP则分别降低79.2%～83.0%和61.7%～66.0%，差异均达到显著水平($P<0.05$)。而有关研究报道，覆盖处理可以降低TP 91.1%[10]，明显比本研究的结果要高(66.5%～70.6%)，可能是由于覆盖量、地形、土壤质地及降雨条件不同所导致。另外，各处理径流损失TDP占TP 15.7%～27.3%，表明茶园径流损失的磷素以颗粒态为主，这与龚蓉等[13]的旱地试验研究所得出的颗粒态磷占总磷68%～78%(即PP是磷素流失主要形态)相符。

除了N、P养分外，K同样是茶树栽培过程中重要的营养元素，被称为“品质元素”。不同试验处理措施对TK流失的影响存在较大差异，相比T1，T2降低TK流失量32.5%，差异达到显著水平($P<0.05$)，T3、T4和T5降低TK幅度达74.4%～85.7%，差异均极显著($P<0.01$)。钾素的流失与径流量关系紧密，当径流量较大时，土壤中的K容易随径流溶解而流失，同时有机肥里钾素主要为缓效态，可以有效减少K的浸出流失。

有机肥部分替代化肥和稻草覆盖对茶叶产量有一定影响，相比T1，各处理茶叶产量增加9.5%～22.7%，但差异不显著($P>0.05$)，可能是由于有机肥和覆盖措施虽然能够改善土壤性状和减少养分流失起到一定的增产效果，但因茶树为多年生作物，且有机肥肥效较慢，短期难以被茶树充分吸收利用，故增产效果有限。茶叶水分含量是衡量茶叶品质的一个重要指标，试验表明两个覆盖处理(T3和T5)均能显著提高茶叶水分含量($P<0.05$)，而3个非覆盖处理(T1、T2和T4)间差异不显著($P>0.05$)。彭晚霞等[14]在覆盖与间作对亚热带丘陵茶园生态的综合调控效果研究中得出了相似的结果。

4 结论

(1)丘陵茶园径流量多少与降雨量、降雨强度、覆盖物和施肥处理密切相关。本研究发现，配施有机肥可以使径流量减少15.4%～31.5%，差异显著($P<0.05$)，而配施有机肥+稻草覆盖则减少46.8%～52.9%，差异达到极显著水平($P<0.01$)。表明配施有机肥和覆盖处理相结合，能够高效拦截和吸收降雨形成的径流，使降水更多为茶园所吸收利用。

(2)相同降雨条件下，相比T1，T2和T4处理径流损失TN分别减少42.4%和57.2%，差异显著($P<0.05$)，T3和T5则分别降低74.7%和74.6%，差异极显著($P<0.01$)；TDN流失量表现为，相比T1，T2和T4分别降低18.2%和39.2%，差异不显著($P>0.05$)，T3和T5则分别降低75.6%和74.1%，差异极显著($P<0.01$)，且与T2、T4差异亦极显著($P<0.01$)；与T1相比，T2～T5径流损失PN分别降低44.9%～75.8%，差异均达显著水平($P<0.05$)，且T2、T4分别与T3、T5差异显著($P<0.05$)。说明有机肥替代处理对降低TDN和PN径流损失的作用不显著，主要是稻草覆盖处理产生影响。NH_4^+-N和NO_3^--N流失总量则表现为，T2、T4与T1差异均不显著($P>0.05$)，T3、T5均与T1差异显著($P<0.05$)，损失NH_4^+-N和NO_3^--N分别降低61.5%～71.9%和78.2%～92.7%。表明有机肥代替部分化肥对减少NH_4^+-N和NO_3^--N流失的作用不显著，而覆盖稻草可以显著降低NH_4^+-N和NO_3^--N流失总量。TN在不同时期的流失特征与降雨情况基本一致，即TN流失主要集中在连续较强降雨的4—6月，且径流损失氮素以TDN为主，尤其以NO_3^--N、NH_4^+-N为主，不同形态的氮素流失总量基本与径流量差异一致。说明径流量直接影响氮素养分的流失，因而可以通过覆盖稻草减少径流量间接阻控养分流失。

(3)与T1相比，T2和T4均降低了磷素流失，但只有T4差异达到显著水平($P<0.05$)，而T3、T5对降低茶园磷素的径流损失有极显著作用($P<0.01$)，对TP削减达66.5%～70.6%，TDP和PP则分别降低79.2%～83.0%和61.7%～66.0%。另外试验结果表明磷素流失以颗粒态为主(72.7%～84.3%)。

(4)不同试验处理措施对TK流失的影响存在较大差异，与T1相比，T2能够降低TK 32.5%，差异显著($P<0.05$)，T3、T4和T5降低TK幅度达74.4%～85.7%，差异均极显著($P<0.01$)。

(5)配施有机肥和稻草覆盖处理对茶叶产量增幅为9.5%～22.7%，但差异不显著($P>0.05$)。有机肥替代处理对茶叶水分含量有一定的影响，但差异不显著($P>0.05$)，而2个覆盖处理T3和T5显著高于3个非覆盖处理，说明覆盖稻草能够有效增加茶叶水分含量，提升茶叶品质。

(下转第132页)