

绿肥覆盖对紫色土坡耕地柑橘园氮磷流失的阻控效应研究

刘 瑞¹, 张宇亭¹, 王志超¹, 张学良¹, 谢 军¹, 张建伟¹, 徐文静¹, 石孝均^{1,2}

(1.西南大学资源环境学院,重庆 400715;2.西南大学农业科学研究院,重庆 400716)

摘要:为探明紫色土坡耕地不同绿肥覆盖对柑橘园径流和养分流失的阻控效应,在田间径流小区设置黑麦草(*Lolium perenne* L.)、光叶苕子(*Vicia villosa* Roth var.)、二月兰(*Orychophragmus violaceus*)和清耕对照 4 个处理,定量监测了在自然降雨条件下不同处理的径流及氮磷养分流失量。结果表明,与清耕对照相比,周年内绿肥覆盖可显著降低 8.7%~27.0%的地表径流量、30.1%~50.6%总氮流失量和 32.4%~62.9%总磷流失量。绿肥覆盖对径流和养分的阻控效应在不同品种间存在差异,整体表现为黑麦草>光叶苕子>二月兰。与清耕对照相比,黑麦草覆盖使径流中总氮、可溶性氮、硝态氮和铵态氮的流失总量分别减少 50.6%,47.0%,49.5%和 48.1%;总磷、可溶性磷和磷酸盐流失总量分别减少 62.9%,62.6%和 62.6%。此外,绿肥覆盖对不同形态养分的阻控效应也有所不同,其径流液中以可溶性氮和颗粒态磷的流失占比最大,分别占总氮和总磷的 59.6%~67.0%和 68.6%~71.8%。综上,绿肥覆盖栽培能有效降低紫色土坡耕地柑橘园径流及氮磷的流失,其中以覆盖栽培黑麦草和光叶苕子较好。研究结果为紫色土坡耕地柑橘园水土保育和面源污染防治提供了依据。

关键词:绿肥;紫色土坡耕地;柑橘园;地表径流;氮磷流失

中图分类号:S157.2

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)02-0068-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbxb.2021.02.010

Control Effect of Green Manure Cover on Nitrogen and Phosphorus Loss of Citrus Orchard on Purple Soil Slope Farmland

LIU Rui¹, ZHANG Yuting¹, WANG Zhichao¹, ZHANG Xueliang¹,

XIE Jun¹, ZHANG Jianwei¹, XU Wenjing¹, SHI Xiaojun^{1,2}

(1.College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715;

2.Academy of Agricultural Science, Southwest University, Chongqing 400716)

Abstract: In order to explore the effects of different green manure cover on the runoff and nutrient loss of the citrus orchard on the purple soil slope farmland, four treatments (*Lolium perenne* L., *Vicia villosa* Roth var., *Orychophragmus violaceus*, and clean tillage control) were set up to quantitatively monitor the runoff and nitrogen and phosphorus loss of different treatments under natural rainfall conditions. The results showed that compared with the clean tillage control, green manure cover significantly reduced the surface runoff by 8.7%~27.0%, total nitrogen loss by 30.1%~50.6%, and total phosphorus loss by 32.4%~62.9%. However, the effects of green manure cover on runoff and nutrient control were different among different varieties, and the trend of overall performance was *Lolium perenne* L. > *Vicia villosa* Roth var. > *Orychophragmus violaceus*. Compared with clean tillage control, *Lolium perenne* L. treatment reduced the total loss of total nitrogen, soluble nitrogen, nitrate nitrogen, and ammonium nitrogen in runoff by 50.6%, 47.0%, 49.5%, and 48.1% respectively; total phosphorus, soluble phosphorus, and total loss of phosphate was reduced by 62.9%, 62.6%, and 62.6% respectively. In addition, the effect of green manure cover on different nutrient forms were also different, and the loss of soluble nitrogen and particulate phosphorus in the runoff were the largest, accounting for 59.6%~67.0% and 68.6%~71.8% of total nitrogen and total phosphorus, respectively. In summary, green manure cover cultivation can effectively reduce the runoff and nitrogen and phosphorus loss of citrus orchards on purple soil sloping farmland. Among them, *Lolium perenne* L.

收稿日期:2020-10-22

资助项目:国家绿肥产业体系项目(CARS-22-G-13)

第一作者:刘瑞(1993—),女,在读硕士研究生,主要从事果园绿肥水土保持研究。E-mail:liurglor@163.com

通信作者:石孝均(1964—),女,教授,博士生导师,主要从事养分循环与土壤肥力与肥料及果园绿肥养分循环等研究。E-mail:shixj@swu.edu.cn

and *Vicia villosa* Roth var. cover were the best. Taken together, our results provide reference for water and soil conservation and non-point source pollution prevention and control in citrus orchards on purple soil slope farmland.

Keywords: green manure; purple soil slope farmland; citrus orchard; surface runoff; nitrogen and phosphorus loss

坡耕地水土流失是我国乃至全世界重要的生态环境问题之一,也是土壤退化进程中的一个主导因子^[1-2]。紫色土坡耕地广泛分布于重庆、四川地区,面积达 767 万 hm²,占全国坡耕地面积的 32.0%^[3]。紫色土土层浅薄,水稳性差,土壤孔隙度大,侵蚀强度可高达 3 464~9 452 t/(km²·a)^[4]。由于地形条件和气候优势,近年来紫色土坡耕地柑橘产业不断扩大,仅重庆地区柑橘种植面积已达 22 万 hm²。该地区柑橘园施肥量高,氮(N)肥年平均施用量高达 340 kg/hm²,磷(P)肥年平均施用量高达 196 kg/hm²。柑橘行间多采用清耕管理制度,地表常年处于裸露状态,加之降雨量丰沛(1 100~1 200 mm),存在极为严重的水土肥流失风险。因此,开展紫色土坡耕地柑橘园 N、P 流失阻控研究不仅有利于保持水土和防控面源污染的发生,还有利于柑橘产业的可持续发展。

近年来,柑橘园行间进行绿肥覆盖栽培得到快速发展,广受果农和科研工作者认可。与传统的清耕管理相比,绿肥覆盖能明显改善果园土壤环境条件并提高土地生产力,具体表现为改善土壤物理结构^[5],提高耕层土壤 N、P 含量^[6-7],提高土壤有机碳^[8-9]及提高果树产量和质量^[10]等。此外,在坡耕地柑橘园种植绿肥,能有效地减少径流和养分损失。栾好安等^[11]在三峡库区粗黄砂土坡耕地上的研究表明,柑橘园行间进行绿肥覆盖后,减少地表径流 11.0%~24.0%,减少地表径流中 N 素损失 8.3%~40.8%和 P 素损失 7.5%~58.0%。在丹江口库区的黄棕壤坡耕地柑橘园,绿肥覆盖栽培使得地表径流损失减少 13.9%~31.6%,径流中 N 损失减少 20.6%~30.5%,P 损失减少 33.3%~52.8%^[12]。在江西红壤坡耕地柑橘园,通过绿肥栽培可以减少径流损失达 71.4%,同时减少 N 和 P 损失约 7.2%^[13]。可见,绿肥覆盖栽培对径流和养分损失的阻控效应在不同土壤类型下存在较大差异,很难利用已有数据来指导紫色土坡耕地柑橘园的生产活动。因此,需要进一步探究不同绿肥覆盖对紫色土坡耕地上径流和 N、P 养分损失的阻控效应,以期获得本地化的参数。

课题组前期的研究表明,在紫色土坡耕地上种植黑麦草(*Lolium perenne* L.)、光叶苕子(*Vicia villosa* Roth var.)和二月兰(*Orychophragmus violaceus*)均表现出良好的生长状况,其中黑麦草和光叶苕子地上部鲜草

产量均达到 55 t/hm²,柑橘园空地覆盖度可达 75.0%~98.0%,表现出对径流和养分截获巨大的潜力。本研究在前期工作的基础上,通过在紫色土坡耕地柑橘园上建立的野外径流监测小区,定量化研究以黑麦草、光叶苕子和二月兰为代表的禾本科、一年生豆科和十字花科绿肥对柑橘园径流和 N、P 养分的阻控效应,以期为紫色土坡耕地柑橘园水土保育和面源污染防治工作提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在重庆市西南大学国家紫色土肥力与肥料效益监测站径流监测场(106°26′33″E,29°48′36″N)进行,试验地海拔 266.3 m,属亚热带季风气候,年平均气温为 18.3℃,年均降水量为 1 115.3 mm,年日照时间达 1 276.7 h。

径流监测场共建有 12 个小区,每个小区宽 4 m、长 12 m,面积 48 m²。为保障各小区水系独立,防止附近水流侧渗影响,小区四周采用混凝土板围埂,防止水土串流。径流小区坡度为 15°,坡脚均设有汇流沟,通过 PVC 管道将小区产生的径流全部汇入径流收集桶。

径流监测场内供试土壤为西南地区典型的紫色土,pH 5.6,有机质含量 19.7 g/kg,全 N 含量 1.2 g/kg,全 P 含量 0.7 g/kg,全 K 含量 22.3 g/kg,碱解 N 含量 104.5 mg/kg,有效 P 含量 55.8 mg/kg,速效 K 含量 90.7 mg/kg。

柑橘种植于每个小区的中轴线上,株距为 3 m,于 2018 年 5 月移栽,品种为“爱媛 38”。各试验小区施肥水平相同,每株柑橘树全年施用 N273 g,P₂O₅ 151 g,K₂O 299 g。所用肥料分别在 3,6,10 月分 3 次施用;肥料均为柑橘树滴水线处开沟施肥。柑橘病虫害防治等按常规进行,各小区管理保持一致。

1.2 试验设计

试验设 1 个清耕对照和 3 个绿肥覆盖栽培处理,分别为:(1)清耕对照(代表果农习惯,杂草旺盛时刈割或喷洒除草剂);(2)黑麦草覆盖管理(代表禾本科绿肥);(3)光叶苕子覆盖管理(代表豆科绿肥);(4)二月兰覆盖管理(代表十字花科绿肥)。每个处理设置 3 次重复。黑麦草、光叶苕子和二月兰于 2018 年 9 月中旬播种,播种量分别为 22.5,45.0,22.5 kg/hm²;各绿肥种子均匀播撒在小区内、柑橘树冠外,让其自然生长。

1.3 测定项目与方法

试验时间为 2018 年 9 月至 2019 年 9 月。每次降雨产流后,分别测量每个径流小区地表径流收集桶的水量,平均值即为小区径流量值。

径流收集桶中水样充分搅拌混匀后,立即于桶中部取水样 500 mL 入聚乙烯瓶,并贴上标签,送至实验室保存于 4 ℃ 冰箱并于 48 h 内分析完毕。主要测定指标为各形态氮:总氮(TN)、可溶性总氮(DN)、硝态氮(NO_3^--N)、铵态氮(NH_4^+-N);各形态磷:总磷(TP)、可溶性总磷(DP)、磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)。取一部分样品分别采用紫外分光光度计比色法(碱性过硫酸钾消解)和钼蓝比色法(过硫酸钾氧化)测定原液中的 TN 和 TP;另取一部分水样经 0.45 μm 滤膜过滤后,以 Auto Analyzer-3 流动分析仪测定 DN、 NO_3^--N 、 NH_4^+-N 、DP 和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 含量。颗粒态氮(PN)由 TN 和 DN 的差值计算得出,颗粒态磷(PP)由 TP 和 DP 的差值计算得出。2018—2019 年气象数据来源于监测场的气象观测站。

1.4 数据处理与计算

单次降雨产流事件中某种形态 N 或 P 流失通量采用计算公式为:

$$Q_i = C_i \frac{q_i}{S} \cdot 10 \quad (1)$$

式中: Q_i 为第 i 次降雨地表径流中某种形态 N 或者 P 流失通量(g/hm^2); C_i 为地表径流中某形态 N 或者 P 浓度(mg/L); q_i 为本次小区地表径流量(L); S 为径流小区面积(m^2);10 表示单位换算系数。

周年某种形态 N 或 P 流失量 $Q(\text{g}/\text{hm}^2)$ 为 1 年中每次某形态 N 或者 P 流失通量之和,计算公式为:

$$Q = \sum_i Q_i \quad (2)$$

采用 SPSS 18.0 和 Origin 8.0 等软件处理试验数据和绘制图表,显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 绿肥覆盖对地表径流的阻控

从图 1 可以看出,在 2018 年 9 月到 2019 年 9 月试验观测期内,本试验地点降雨总量为 981.0 mm,共有 19 次降雨收集到径流。降雨主要集中在 5—7 月,这 3 个月的降雨量分别为 276.9,245.1,214.0 mm,共占总降雨量的 75.1%。

各处理地表径流量随着降雨量的增加而增加。试验前期(2018 年 9—10 月),各处理间径流量并无明显差异,但自 2018 年 11 月开始,黑麦草和光叶苕子覆盖处理显著降低地表径流量。相对于清耕处理,各绿肥覆盖处理在 2019 年 6 月对地表径流的截获效果最好,黑麦草处理可减少 29.8%~35.1%的地表径流,光叶苕子处理可减少 20.2%~28.9%的地表径流,二月兰处理对径流的阻控效应并不明显,仅为 8.4%~14.9%(图 1)。

从图 2 可以看出,全年径流流失总量中,相比于清耕对照处理,覆盖黑麦草、光叶苕子和二月兰分别降低 27.0%,20.9%和 8.7%的地表径流。其中,黑麦草和光叶苕子处理之间没有显著性差异,二月兰对径流的阻控效应较差。

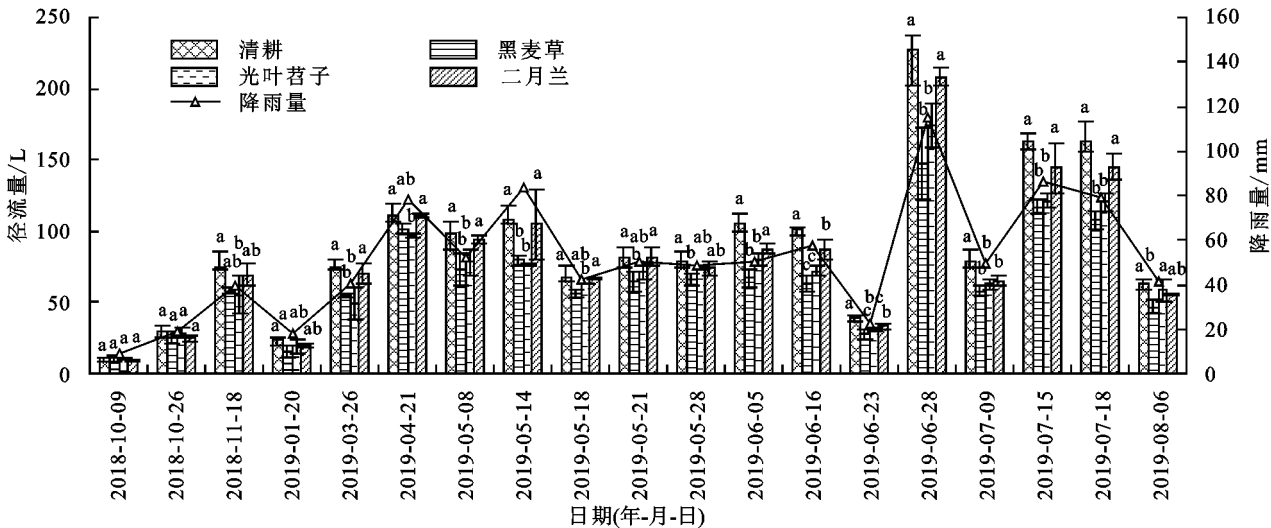


图 1 不同绿肥处理对地表径流的影响

2.2 绿肥覆盖对径流中 N 损失的阻控

由图 3 可知,不同绿肥处理对径流中各形态 N 流失量的阻控作用大多表现为黑麦草>光叶苕子>二月兰>清耕对照。从周年 N 流失动态看,以 3—5 月流失量较高,这主要与该时间段柑橘春肥施用及降

雨有关。

从全年 N 流失总量(表 1)来看,相比清耕对照,不同绿肥覆盖处理均显著降低径流中各形态 N 的流失量。其中,黑麦草处理对径流中 TN、DN、 NO_3^--N 、 NH_4^+-N 、PN 的阻控效应差异显著,分别减少

50.6%,47.0%,49.5%,48.1%和 56.2%,光叶苕子和二月兰处理之间没有显著差异。

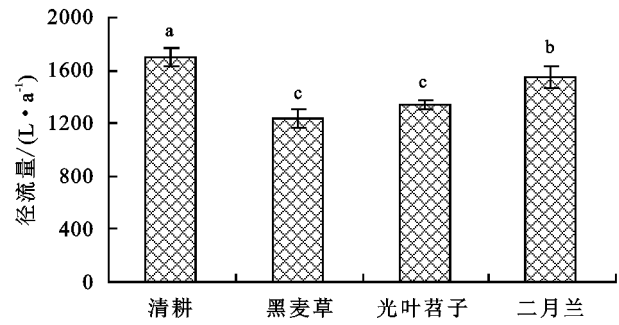
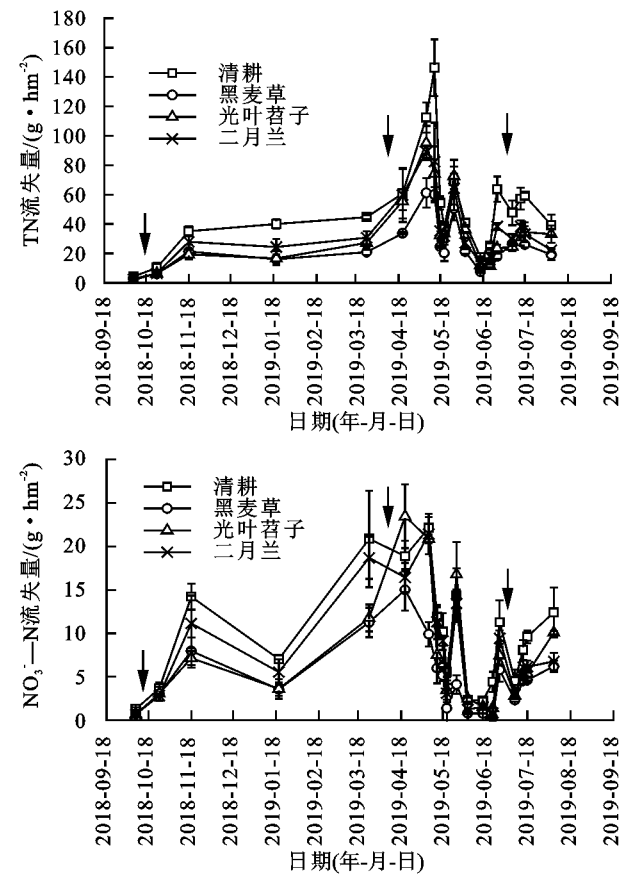
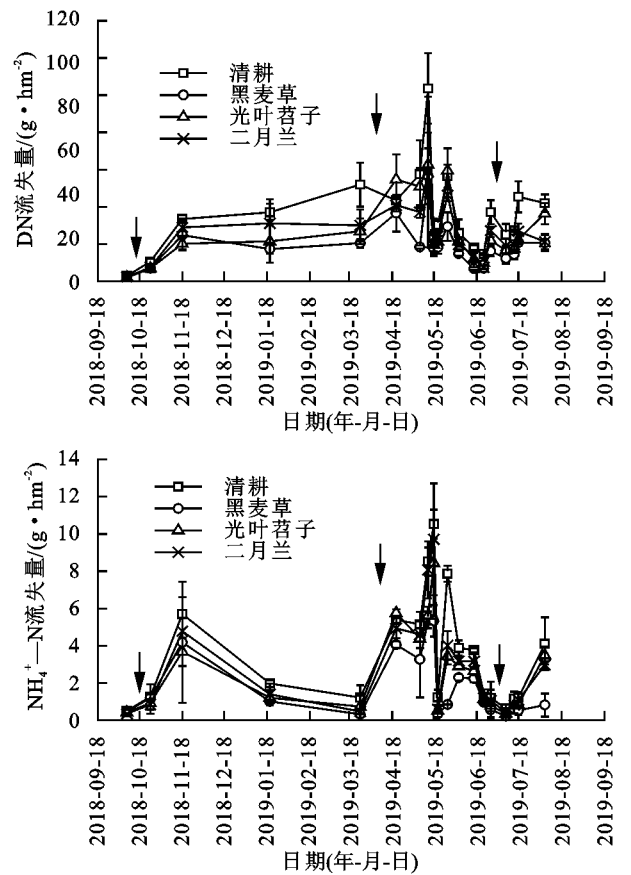


图 2 不同绿肥处理全年径流量



2.3 绿肥覆盖对径流中 P 损失的阻控

由图 4 可知,不同绿肥处理对径流中各形态 P 流失量的阻控作用大多表现为黑麦草>光叶苕子>二月兰>清耕对照。试验前期(2018 年 10 月),各处理间 P 流失量无明显差异,在 2019 年 7 月,P 流失量较其他月份较大,其黑麦草处理下径流中 TP、DP 和 PO₄⁺-P 流失量分别达到 13.9~47.2,3.1~18.3,2.4~6.5 g/hm²,与清耕对照处理相比减幅为 58.0%~68.3%,37.3%~81.6%和 42.2%~59.6%。从 P 周年流失动态看,6—8 月流失量出现峰值,这可能与该季节高温高湿以及绿肥腐解后有利于 P 迁移有关。



注:竖线箭头表示施肥时间。下同。

图 3 不同绿肥覆盖处理径流水中 N 流失量的动态变化

表 1 不同处理径流水中 N 周年累积流失量

单位:g/hm²

处理	TN	DN	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	PN
清耕	966.4±44.0a	584.3±36.1a	184.9±10.8a	66.7±2.1a	382.1±8.2a
黑麦草	477.1±17.4c	309.7±25.7c	93.4±9.2c	34.6±4.6c	167.4±17.9c
光叶苕子	645.6±53.9b	432.0±26.3b	141.3±8.6b	48.1±1.8b	213.7±27.7b
二月兰	675.2±44.7b	403.1±32.8b	148.8±4.3b	53.6±5.6ab	272.2±23.3b

注:同列数据后不同小写字母表示差异性达到显著水平(P<0.05)。下同。

从全年 P 流失总量(表 2)来看,相比清耕对照,不同绿肥覆盖显著降低径流中各形态 P 的流失量,其中,黑麦草处理对径流中 TP、DP、PO₄⁻-P 和 PP 的阻控效应最显著,减幅分别为 62.9%,62.6%,62.6%和 63.0%,黑麦草与光叶苕子处理在减少 TP 和 PP 流失方面没有显著差异。

2.4 径流中不同形态 N、P 流失比例

在紫色土坡耕地柑橘园中,N 素流失以 DN 为主, DN 占 TN 的 59.6%~67.0%,PN 占 TN 的 33.0%~40.4%;在 DN 中,以 NO₃⁻-N 为主,占 TN 的 19.1%~22.1%,以 NH₄⁺-N 形式的损失较少,仅占 TN 的 6.9%~7.9%。黑麦草和光叶苕子覆盖处理并没有改变

径流中 N 素的损失形式,二月兰处理降低 DN 的损失形式,同时增加 PN 的损失形式。P 素流失以 PP 为主,占 TP 的 68.6%~71.8%,DP 占 TP 的不足 33.0%, $\text{PO}_4^{+}-\text{P}$ 仅占 TP 的 14.3%~16.9%。光叶苕子处理明显改变径流中 P 素的损失形式,其显著增加 DP 和 $\text{PO}_4^{+}-\text{P}$ 的流失,降低 PP 的流失(表 3)。

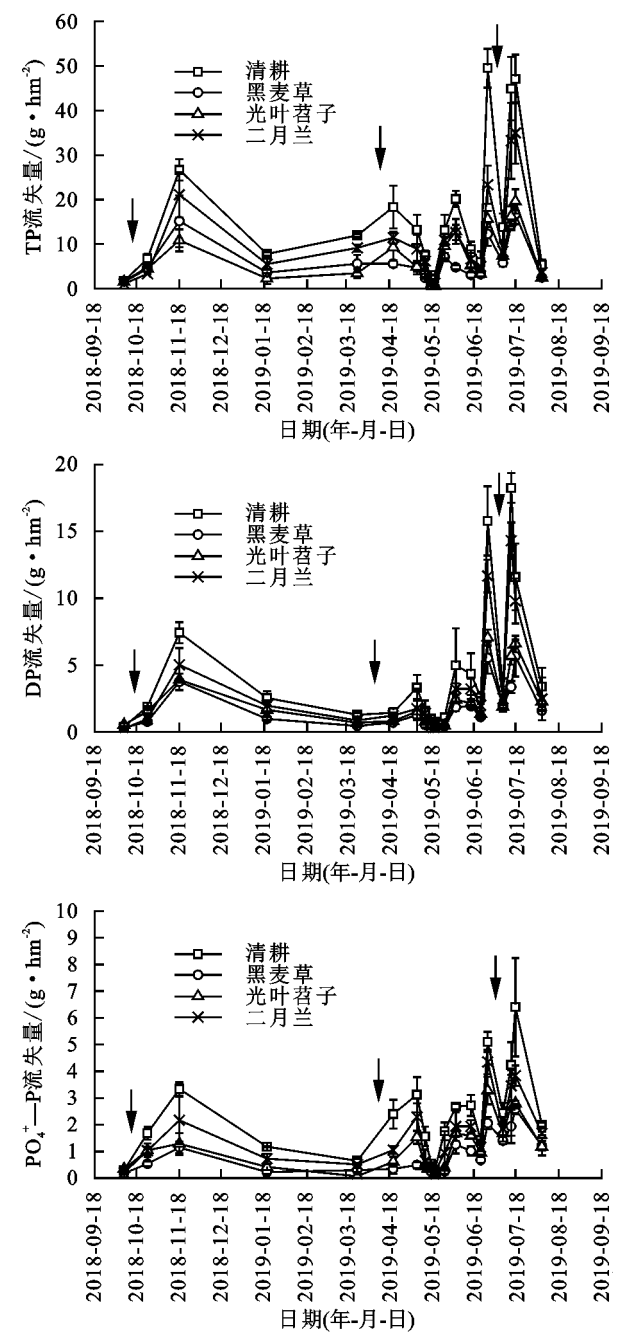


图 4 不同绿肥覆盖处理径流水中 P 流失量的动态变化

表 2 不同处理径流中 P 周年累积流失量

单位: g/hm²

处理	TP	DP	$\text{PO}_4^{+}-\text{P}$	PP
清耕	306.9±10.0a	86.6±4.1a	43.9±1.1a	220.3±10.5a
黑麦草	114.0±8.3c	32.4±2.0d	16.4±1.8d	81.6±6.5c
光叶苕子	134.2±8.3c	42.1±1.8c	22.6±1.1c	92.1±7.3c
二月兰	207.5±7.7b	64.4±3.1b	30.5±1.3b	143.1±7.2b

不同绿肥处理显著降低 N 肥和 P 肥流失率,与清耕对照相比,黑麦草、光叶苕子和二月兰处理显著降低 N 肥流失率,减幅分别为 50.6%,33.2%和 30.1%,P 肥流失率减幅分别为 62.9%,56.3%和 32.4%。

3 讨论

3.1 绿肥覆盖对地表径流的阻控效应

绿肥覆盖可以保护坡地土壤表面,增加对降雨的拦截能力,促进入渗。此外,绿肥作物根部也会改变土壤的物理特性,增加土壤的孔隙度,降低土壤容重,从而增强土壤团聚体稳定性和土壤凝聚力,最终起到保护水土的作用^[14-16]。本研究结果表明,在紫色土坡耕地上绿肥覆盖可以减少 8.7%~27.0%的径流,这与栾好安等^[11]研究结果(11.0%~24.0%)一致;但是李太魁等^[12]在丹江口库区的黄棕壤坡耕地柑橘园上的研究表明,绿肥覆盖栽培使得地表径流损失减少13.9%~31.6%;张杰等^[13]在江西红壤坡耕地上柑橘园上的研究表明,绿肥覆盖栽培减少径流损失达 71.4%。出现这样的差异可能与当地的气候条件、土壤性质和绿肥在该地区的生长情况有关。如在本研究中,不同品种绿肥间的差异与该品种的生长发育情况息息相关,与黑麦草和光叶苕子处理相比,二月兰处理对地表径流截获效果较差(图 1 和图 2)。一方面是因为黑麦草和光叶苕子生育期较长,从 2018 年 11 月到 2019 年 5 月均有良好的长势,且黑麦草维持时间更久,而二月兰生育周期短^[17],长势较弱,从 3 月下旬进入盛花期,4 月开始逐渐凋亡,4 月中旬到 9 月地表裸土面积接近清耕对照处理,导致在截流方面能力较弱;另一方面,3 种绿肥品种在紫色土坡耕地上的覆盖度也有所差异^[18]。在试验观测期,黑麦草地表覆盖度基本达到最大值,从 3 月中旬开始覆盖度达到 100%并维持至 7 月;光叶苕子地表覆盖度持续增加,3 月下旬覆盖度接近 100%,从 4 月开始腐解,地表覆盖度逐渐下降,到 7 月地表覆盖度下降约至 60%;而二月兰对土壤肥力要求较高^[19],其 3 月下旬进入盛花期,地表覆盖度约 40%~50%,4 月下旬之后覆盖度<10%,其在长势和地表覆盖度方面均低于黑麦草和光叶苕子。较高的植被覆盖度可以增加对降雨的拦截能力,促进入渗,更有效地降低降雨对裸露土壤表面的影响,最终降低径流损失的风险^[20-21]。所以,二月兰表现出相对较差的径流控制效果,在 2018 年 9 月至 2019 年 4 月期间减少径流损失 10.1%,在 4—9 月仅减少径流损失 8.5%(图 1)。因此,坡耕地果园种植黑麦草能有效控制径流损失。

表 3 不同绿肥处理径流中不同形态 N、P 流失比例

单位: %

处理	不同形态 N 流失比例				N 肥流失率	不同形态 P 流失比例			P 肥流失率
	DN/TN	NO ₃ ⁻ —N/TN	NH ₄ ⁺ —N/TN	PN/TN		DP/TP	PO ₄ ⁺ —P/TP	PP/TP	
清耕	60.4±1.0ab	19.1±0.6a	6.9±0.3a	39.6±1.0ab	0.43±0.02a	28.2±1.6b	14.3±0.3b	71.8±1.6a	0.24±0.01a
黑麦草	64.9±4.0ab	19.6±2.1a	7.3±1.3a	35.1±4.0ab	0.21±0.01c	28.4±0.8b	14.4±0.8b	71.6±0.8a	0.09±0.01c
光叶苕子	67.0±1.5a	21.9±0.9a	7.5±0.9a	33.0±1.5b	0.28±0.02b	31.4±1.5a	16.9±0.9a	68.6±1.5b	0.11±0.01c
二月兰	59.6±2.5b	22.1±1.9a	7.9±0.5a	40.4±2.5a	0.30±0.02b	31.1±1.5a	14.7±0.8b	69.0±1.5b	0.16±0.01b

3.2 绿肥覆盖对径流中氮磷损失的阻控效应

随着径流的发生,土壤氮磷的流失也在同步发生,并且径流中养分流失与地表土壤中养分的含量、形态以及覆盖作物有直接关系^[11]。本研究结果表明,坡耕地柑橘园覆盖绿肥可以显著降低径流中氮磷流失负荷,其黑麦草处理效果最优,其次为光叶苕子处理,二月兰处理效果较差(表 1 和表 2)。但是在 4—8 月观测期,光叶苕子处理下径流中氮素流失量多次高于二月兰处理,并且在 5 月 28 日,氮素流失量高于清耕对照处理,磷素流失仅次于二月兰处理(图 3 和图 4),这与绿肥的生长特性密切相关。如前文所述,对于黑麦草而言,其接近全园覆盖,能有效减少雨水对土壤的直接冲刷,增加入渗,且黑麦草 C/N 较高,不易腐解,氮磷养分释放速率也较慢^[19],在生长期内反而会吸收土壤氮磷养分^[22],故黑麦草显著降低柑橘园中地表径流量和径流中氮磷流失浓度,从而降低径流中养分流失量。相比而言,由于光叶苕子自身的固氮作用^[18,23],其在生长期内可减少对土壤氮的吸收;并且由于其含氮量较高,C/N 较小,腐解速率更快,更容易向土壤中释放氮磷养分^[24-25]。因此,在 4—8 月光叶苕子枯萎腐解覆盖时期,径流中氮素流失量会高于二月兰处理,甚至高于清耕处理(图 3)。虽然光叶苕子处理在腐解期增加氮素流失浓度,但由于其枯枝残体仍能有效阻控径流,因此在周年径流中氮素流失总量显著低于二月兰处理,与黑麦草处理相当。

3.3 绿肥覆盖对径流中不同形态养分损失的阻控效应

研究表明,不同绿肥覆盖栽培没有明显改变氮磷流失形态。总体而言,氮素主要以可溶性氮流失为主,其中硝态氮与铵态氮的流失占比差异较大,硝态氮损失占总氮流失量的 19.1%~22.1%,铵态氮损失占比仅有 6.9%~7.9%。其原因一方面可能是因为硝态氮是土壤氮素存在的主要形态,并且大多存在于土壤溶液中,遇到强降水很容易随径流流失^[26];另一方面可能是因为土壤颗粒会吸附铵态氮,使得其移动性较差,不容易随径流而发生流失^[27-28]。相反,在磷素流失形态上,颗粒态磷的损失却占主导(平均 67.0%)。刘毅等^[29]对丹江口坡地果园氮磷流失研

究表明,坡耕地土壤氮素流失载体是径流水体,而磷素流失的载体主要是泥沙。因此,在紫色土坡耕地中,控制径流是削减氮素流失负荷的重要举措,而控制磷素流失的关键是控制坡面的侵蚀产沙和土壤流失。此外,在本研究中,氮磷的流失量占总施肥量的比例较小,不足 1.0%。由于没有考虑壤中流,肥料氮磷的流失量被低估,是因为本研究仅监测地表径流量,并没有对壤中流进行监测,而紫色土具有岩—土二元结构性,孔隙度较大,养分随壤中流的损失占绝大部分^[30-31]。因此,在本研究的基础上,未来应重点对壤中流进行监测,以全面掌握绿肥覆盖栽培对紫色土坡耕地养分的阻控效应。

4 结论

- (1)绿肥覆盖栽培显著降低地表径流量。相对于清耕处理,黑麦草、光叶苕子和二月兰处理中周年总径流量比清耕处理分别减少 27.0%,20.9%和 8.7%。
- (2)绿肥覆盖栽培可有效降低地表径流中氮磷流失。相对于清耕处理,黑麦草、光叶苕子和二月兰处理中周年氮素流失分别减少 50.6%,33.2%和 30.1%,周年磷素流失分别减少 62.9%,56.3%和 32.4%。其中,氮素流失形态主要以可溶性氮素为主,占比为 59.6%~67.0%;磷素流失以颗粒态磷为主,占 68.6%~71.8%。

参考文献:

[1] 史志华,杨洁,李忠武,等.南方红壤低山丘陵区水土流失综合治理[J].水土保持学报,2018,32(1):6-9.

[2] Bonetti S, Richter D D, Porporato A. The effect of accelerated soil erosion on hillslope morphology[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2019,44(15):3007-3019.

[3] 张怡,何丙辉,王仁新,等.横坡和顺坡耕作对紫色土土壤团聚体稳定性的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(2):192-198.

[4] 文安邦,齐永青,汪阳春,等.三峡地区侵蚀泥沙的¹³⁷Cs 法研究[J].水土保持学报,2005,19(2):33-36.

[5] Garcia L, Celette F, Gary C, et al. Management of service crops for the provision of ecosystem services in vineyards: A review[J]. Agriculture Ecosystems and Environment,2018,251:158-170.

[6] 付学琴,刘琚珥,黄文新.南丰蜜橘园自然生草对土壤微

- 生物和养分及果实品质的影响[J].园艺学报,2015,42(8):1551-1558.
- [7] Wei H, Xiang Y Z, Liu Y, et al. Effects of sod cultivation on soil nutrients in orchards across China: A meta-analysis[J].Soil Tillage Research,2017,169:16-24.
- [8] Alvarez R, Steinbach H S, De Paepe J L. Cover crop effects on soils and subsequent crops in the pampas: A meta-analysis[J].Soil Tillage Research,2017,170:53-65.
- [9] Novara A, Minacapilli M, Santoro A, et al. Real cover crops contribution to soil organic carbon sequestration in sloping vineyard[J].Science of the Total Environment, 2019,652:300-306.
- [10] Li Y H, Li N, Zhang P, et al. Effects of mouse thatched on soil temperature, yield and quality in apple orchard[J].Agricultural Biotechnology,2019,8(3):153-155.
- [11] 栾好安,王晓雨,韩上,等.三峡库区橘园种植绿肥对土壤养分流失的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):68-72.
- [12] 李太魁,张香凝,寇长林,等.丹江口库区坡耕地柑橘园套种绿肥对氮磷径流流失的影响[J].水土保持研究, 2018,25(2):94-98.
- [13] 张杰,陈晓安,汤崇军,等.典型水土保持措施对红壤坡地柑橘园水土保持效益的影响[J].农业工程学报, 2017,33(24):165-173.
- [14] 俞巧钢,叶静,马军伟,等.山地果园套种绿肥对氮磷径流流失的影响[J].水土保持学报,2012,26(2):6-9.
- [15] Zhang Y, Xie D T, Ni J P, et al. Conservation tillage practices reduce nitrogen losses in the sloping upland of the Three Gorges Reservoir area: No-till is better than mulch-till[J/OL]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2020, 300. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107003>.
- [16] Duan J, Liu Y J, Yang J, et al. Role of groundcover management in controlling soil erosion under extreme rainfall in citrus orchards of southern China[J/OL]. Journal of Hydrology, 2020, 582. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124290>.
- [17] 张钦,姚单君,吴兴洪,等.传统绿肥贵州山地景观化利用潜力评价[J].热带作物学报,2020,41(7):1477-1483.
- [18] 吴兴洪,冉斌,王文华,等.贵州山区猕猴桃园适宜绿肥品种的筛选[J].种子,2019,38(12):132-137.
- [19] 杨叶华,张松,王帅,等.中国不同区域常见绿肥产量和养分含量特征及替代氮肥潜力评估[J].草业学报, 2020,29(6):39-55.
- [20] Chen J, Xiao H B, Li Z W, et al. Threshold effects of vegetation coverage on soil erosion control in small watersheds of the red soil hilly region in China[J].Ecological Engineering,2019,132:109-114.
- [21] Deng L, Kim D G, Li M Y, et al. Land-use changes driven by ‘Grain for Green’ program reduced carbon loss induced by soil erosion on the Loess Plateau of China[J]. Global and Planetary Change,2019,177:101-115.
- [22] Rasmussen J, Seegaard K, Pirhofer-Walzl K, et al. N₂-fixation and residual N effect of four legume species and four companion grass species[J].European Journal of Agronomy,2012,36:66-74.
- [23] Ma X, Li Y, Li B L, et al. Nitrogen and phosphorus losses by runoff erosion: Field data monitored under natural rainfall in Three Gorges Reservoir Area, China [J].Catena,2016,147:797-808.
- [24] 梁军.不同绿肥还田腐解动态及其对土壤养分的影响[D].长沙:湖南农业大学,2018.
- [25] Blanco-Canqui H, Shaver T M, Lindquist J L, et al. Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils[J].Agronomy Journal,2015, 107(6):2449-2474.
- [26] 范宏翔,徐力刚,赵旭,等.太湖流域典型稻—麦轮作农田区氮素流失过程研究[J].生态环境学报,2015,24(2):255-262.
- [27] 井光花,于兴修,刘前进,等.沂蒙山区不同强降雨下土壤的氮素流失特征分析[J].农业工程学报,2012,28(6):120-125.
- [28] 熊子怡,王子芳,龙翼,等.紫色土旱坡地氮失通量对减肥配施秸秆的响应[J].环境科学,2020,41(4):1930-1940.
- [29] 刘毅,陶勇,万开元,等.丹江口库区坡耕地柑桔园不同覆盖方式下地表径流氮磷流失特征[J].长江流域资源与环境,2010,19(11):1340-1344.
- [30] 姜世伟,何太蓉,汪涛,等.三峡库区消落带农用坡地氮素流失特征及其环境效应[J].长江流域资源与环境, 2017,26(8):1159-1168.
- [31] 刘莲,刘红兵,汪涛,等.三峡库区消落带农用坡地磷素径流流失特征[J].长江流域资源与环境,2018,27(11): 217-226.