

人工降雨条件下植被覆盖对黄土坡面养分随 径流泥沙迁移影响的试验研究

李家明^{1,3}, 汪建芳², 杨艳芬^{1,2,3}, 王兵^{1,2,3}

(1.中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100;3.中国科学院大学,北京 100049)

摘要: 植被覆盖可有效保护地表,抑制产流产沙过程,进而影响坡面养分迁移过程。选取黄土高原典型白羊草和铁杆蒿草地,通过人工模拟降雨试验(雨强 60 mm/h,历时 60 min,坡度 15°),研究植被不同盖度下(10%,20%,30%,45%,60%,80%)坡面径流、泥沙养分特征。结果表明:(1)土壤有机质、全氮和全磷含量均随植被盖度增加呈线性增加($R^2 \geq 0.63$),相对于铁杆蒿样地,白羊草样地土壤有机质和全磷含量分别增加 28.8%~107.1%和 10.6%~25.0%,全氮含量减少 2.6%~42.5%。(2)径流中有机质、全氮和全磷浓度随植被盖度的增加而减少 0.6%~63.7%,但种间差异不显著($P > 0.05$)。径流中有机质、全氮和全磷量随植被盖度的增加显著降低 1.9%~83.9%,且当植被盖度 $\geq 20\%$ 时,白羊草样地径流中有机质、全氮和全磷的量较铁杆蒿分别显著减少 28.4%~66.4%,10.7%~55.8%和 3.3%~64.7%。(3)泥沙中有机质、全氮和全磷的量随植被盖度的增加减幅为-59.5%~65.1%,平均减少 5.8%,其泥沙中养分的含量白羊草总体低于铁杆蒿。白羊草和铁杆蒿泥沙有机质、全氮和全磷的量随盖度增加分别呈指数函数($R^2 \geq 0.78$)和先增后减的下降趋势,其泥沙中养分的量显著减少 69.9%~99.3%。(4)白羊草和铁杆蒿样地径流泥沙中有机质、全氮和全磷总量随植被盖度增加分别呈指数函数($R^2 \geq 0.53$)和先增后减的下降趋势,且当植被盖度 $\geq 45\%$ 时,白羊草有机质、全氮和全磷总量较铁杆蒿样地分别减少 33.7%~71.8%,50.1%~53.6%和 48.1%~64.3%。(5)白羊草和铁杆蒿样地泥沙中有机质、全氮和全磷富集比随盖度的增加呈线性降低($R^2 \geq 0.56$)。2种植被土壤有机质和全磷主要随泥沙迁移为主,土壤全氮主要以径流迁移为主。研究成果为植被覆盖影响坡面养分迁移机制提供理论参考。

关键词: 黄土坡面; 人工降雨; 植被盖度; 径流泥沙养分; 养分迁移

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)04-0007-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.04.002

Experimental Study on the Influence of Vegetation Cover on Loess Slope Surface Nutrient Transport Along with Runoff and Sediment Under Artificial Rainfall

LI Jiaming^{1,3}, WANG Jianfang², YANG Yanfen^{1,2,3}, WANG Bing^{1,2,3}

(1. Research Center for Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Ministry of Education, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Agriculture on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Vegetation cover can effectively protect the ground surface, inhibit the process of runoff and sediment production, and then affect the process of nutrient migration on slopes. Typical *Bothriochloa ischaemum* and *Artemisia gmelini* grasslands in the Loess Plateau were selected and simulated rainfall experiments (rain intensity 60 mm/h, duration 60 min, slope 15°) were used to study the slope runoff and sediment nutrient characteristics under different coverage conditions (10%, 20%, 30%, 45%, 60%, 80%). The results showed that: (1) The contents of soil organic matter, total nitrogen and total phosphorus increased linearly with the increase of coverage ($R^2 \geq 0.63$). Compared with *Artemisia gmelini* plot, the contents of soil organic matter and total phosphorus in *Bothriochloa ischaemum* plot increased by 28.8%~107.1% and 10.6%~25.0% respectively, while the contents of total nitrogen decreased by 2.6%~42.5%. (2) With the increase of vegetation coverage, the concentrations of organic matter, total nitrogen and total

收稿日期:2021-01-24

资助项目:国家重点研发计划项目“黄土高原区域生态系统演变规律和维持机制研究”(2016YFC0501603),“黄土丘陵沟壑区植被功能提升与山地果园管理关键技术及示范”(2016YFC0501703),中国科学院西部青年学者项目“黄土高原退耕草地近地表特征变化及其对土壤侵蚀过程的影响”(XAB2019A04)

第一作者:李家明(1994—),男,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: lijiaming19@mailsucas.ac.cn

通信作者:王兵(1982—),男,博士,研究员,主要从事植被恢复与土壤侵蚀研究。E-mail: bwang@ms.iswc.ac.cn

phosphorus in runoff decreased by 0.6%~63.7%, but there was no significant difference between the two species ($P>0.05$). The amount of organic matter, total nitrogen and total phosphorus in runoff decreased by 1.9%~83.9%, and when vegetation coverage was $\geq 20\%$, the amount of organic matter, total nitrogen and total phosphorus in runoff in *Bothriochloa ischaemum* sample decreased by 28.4%~66.4%, 10.7%~55.8% and 3.3%~64.7%, respectively, compared with *Artemisia gmelini* sample. (3) The contents of organic matter, total nitrogen and total phosphorus in the sediment decreased by -59.5%~65.1% with the increase of vegetation coverage, with an average decrease of 5.8%. The nutrients amount of the sediment *Bothriochloa ischaemum* were generally lower than those of *Artemisia gmelini*. The amount of *Bothriochloa ischaemum* and *Artemisia gmelini* sediment organic matter, total nitrogen and total phosphorus showed an exponential function ($R^2 \geq 0.78$) and a downward trend with the increase in coverage, respectively. The nutrients amount in the sediment were significantly reduced by 69.9%~99.3%. (4) The total organic matter, total nitrogen and total phosphorus of runoff sediment in *Bothriochloa ischaemum* and *Artemisia gmelini* showed an exponential function ($R^2 \geq 0.53$) and a decreasing trend with the increase of vegetation coverage, respectively. When the vegetation coverage was $\geq 45\%$, the total organic matter, total nitrogen and total phosphorus in *Bothriochloa ischaemum* decreased by 33.7%~71.8%, 50.1%~53.6% and 48.1%~64.3%, respectively, compared with *Artemisia gmelini* plots. (5) The enrichment ratios of soil organic matter, total nitrogen and total phosphorus of two typical vegetation decreased linearly with the increase of coverage ($R^2 \geq 0.56$). The migration of soil organic matter and total phosphorus of two typical vegetations occurred mainly in sediment, and the migration of soil total nitrogen occurred mainly in runoff. The research results provide a theoretical reference for the effect of vegetation coverage on the nutrients migration mechanism of slopes.

Keywords: Loess slope; artificial rainfall; vegetation coverage; runoff and sediment nutrients; nutrients migration

土壤侵蚀过程中地表径流对土壤可溶性养分的浸提、对土壤颗粒表面吸附的养分离子的冲洗以及土壤颗粒被径流携带流出坡面是养分迁移的主要途径^[1],从而造成土地退化、肥力衰减、作物减产以及非点源污染,在一定程度上加速区域生态环境恶化^[2]。径流和泥沙作为土壤养分流失的载体^[3],研究其养分特征对阐明坡面养分迁移具有重要意义。植被覆盖是控制土壤侵蚀的积极因素^[4],植被茎干可拦截降雨、消减降雨动能,枯落物可减缓流速、增加土壤入渗,根系可固结土壤、改良土壤性状和增加侵蚀阻力^[5],减少径流、泥沙,提高土壤抗侵蚀能力,从而对土壤养分迁移产生影响。黄土高原是我国乃至全世界土壤侵蚀最为严重的地区之一,自从 1999 年实施“退耕还林(草)工程”以来,植被盖度由 1999 年前的 31.6%增加到 2017 年的 65.0%,土壤侵蚀得到有效控制。同时,土壤理化性状得到改良,土壤有机质、全氮和全磷等养分含量增加;植被冠层及其近地表特征因子对坡面产流、产沙过程也产生显著影响,从而导致径流、泥沙中养分差异。然而,有关植被对坡面养分迁移影响过程机理仍不清楚。植被盖度作为表征植被特征的常用指标,在较大尺度上评估植被恢复及其对土壤养分的影响具有重要意义。相关研究表明,径流、泥沙中有机质^[6]、全氮^[6-8]、全磷^[7-9]以及溴离子^[10]随植被盖度增加而减少。但上述研究一定程度存在植被盖度变幅较小、盖度设置数量较少等问题,仍需对植被覆盖影响

土壤养分流失进行系统研究。基于此,本文以黄土高原典型植被白羊草(禾本科)和铁杆蒿(菊科)为研究对象,探究不同植被盖度下土壤、径流和泥沙中有机质、全氮和全磷等养分特征,量化植被盖度与土壤养分特征间的相互关系,阐明养分流失对植被类型的响应机制。本研究旨在揭示黄土坡面养分迁移规律,为黄土高原综合治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2018 年 8 月在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室降雨大厅进行。人工模拟降雨采用 QYJY-503 固定式人工降雨设备,该设备采用组合喷头降雨,喷头安置高度均为 18 m,雨滴大小控制在 0.4~6.0 mm,可调节雨强范围为 30~300 mm/h,降雨均匀度 $>80\%$,雨滴终点速度近似天然降雨。

1.2 试验处理

选取黄土高原典型植被白羊草(*Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng)和铁杆蒿(*Artemisia sacrorum* Ledeb),分别设计 6 个盖度处理(表 1)和 2 个裸地对照,每个处理 2 次重复。

1.3 试验过程

试验土槽长 \times 宽 \times 高分别为 2.0 m \times 0.5 m \times 0.5 m,坡度为 15°。供试土壤为黄绵土,取自延安市安塞区坡耕地表层(0—40 cm),土壤有机质、全氮和全磷含量分别为 2.78,0.21,0.17 g/kg,土壤黏粒、粉粒和砂

粒质量分数分别为 15.74%, 63.45% 和 20.81%, 土壤质地为粉质黏壤土。填土前将供试土壤过 2 mm 孔筛, 去除草根和砾石, 并在土槽底部铺 10 cm 细沙, 以保证土壤水分均匀下渗, 同时盖 1 层纱布隔开土和沙。填土时将土壤容重控制在 1.2 g/cm³ 左右, 每层填土 5 cm, 铺平、压实, 每次填土之前将下层土壤打毛, 以消除土壤分层现象, 填土总厚度为 30 cm。填土结束后, 于 2018 年 4 月初种植白羊草和铁杆蒿, 种植密度分别为 5, 10, 15, 20, 25, 30 株/m²。种植后定期洒水, 待长势稳定后采用间苗法控制植被密度。

表 1 白羊草和铁杆蒿实测盖度 单位: %

设计盖度	实测盖度	
	白羊草	铁杆蒿
10.0	12.3	13.5
20.0	20.8	21.6
30.0	34.0	31.1
45.0	45.7	45.8
60.0	61.0	60.9
80.0	80.4	81.8

降雨试验开始前率定雨强至与设定雨强误差 < 5%, 用拍照法测量各处理的实际盖度, 并对每个处理进行含水量标定, 以消除前期含水量的影响。根据黄土高原雨季侵蚀性降雨情况, 60 mm/h 降雨强度为该区域较为常见的侵蚀性降雨强度, 因此, 本研究降雨强度设置为 60 mm/h, 降雨历时为 1 h。降雨前测量土槽表层(0—5 cm)土壤有机质、全氮和全磷含量。降雨过程中前 10 min 每隔 2 min 收集 1 次径流泥沙全样, 后 50 min 每隔 5 min 收集 1 次径流泥沙全样。降雨后测定径流养分(有机质、全氮和全磷)平均浓度; 测定泥沙养分的平均含量, 计算泥沙养分富集比; 径流泥沙全样经过称质量、沉淀、烘干泥沙后计算得到径流质量, 再分别计算径流和泥沙养分的量, 最后计算径流泥沙养分的总量。

1.4 养分测定与数据处理

有机质含量采用高温外加热—重铬酸钾法氧化法测定; 全氮含量采用半微量开氏法测定; 全磷含量采用浓硫酸—高氯酸消化—钼锑抗比色法测定。径流养分的量 = 径流养分平均浓度 × 径流总量, 泥沙养分的量 = 泥沙养分平均含量 × 泥沙总量; 养分富集比 = 泥沙养分含量 / 土壤养分含量; 径流泥沙养分的总量 = 径流养分的量 + 泥沙养分的量; 养分量占比 = 径流养分的量或泥沙养分的量 / 径流泥沙养分的总量。每个处理 2 次重复的平均值作为试验数值的标值。

2 结果与分析

2.1 典型植被土壤养分特征

2 种植被地上生物量均随盖度的增加呈指数函数增加的趋势($R^2 \geq 0.96$, 图 1a), 地上生物量总体差别不大,

当植被盖度 $\leq 60\%$ 时, 铁杆蒿地上生物量略高, 而当植被盖度 $> 60\%$ 时, 白羊草地上生物量略高。随着植被盖度的增加, 白羊草和铁杆蒿土壤有机质、全氮和全磷含量呈显著线性函数增加($R^2 \geq 0.63$, 图 1b、1c 和 1d)。相较于裸地, 白羊草和铁杆蒿土壤有机质含量分别增加 75.1%~344.3% 和 6.1%~115.0%, 全氮含量分别增加 5.4%~103.1% 和 18.5%~195.4%, 全磷含量分别增加 197.6%~281.0% 和 169.0%~238.1%。总体而言, 白羊草土壤有机质和全磷含量高于铁杆蒿, 相较于铁杆蒿, 白羊草有机质和全磷含量分别增加 28.8%~107.1% 和 10.6%~25.0%, 平均分别增加 69.4% 和 17.6%; 全氮含量减少 2.6%~42.5%, 平均减少 17.0%。

2.2 径流养分特征

植被覆盖总体减少 2 种植被径流中有机质、全氮和全磷的浓度(图 2)。相较于裸地, 白羊草和铁杆蒿径流有机质浓度分别减少 35.0%~64.3% 和 32.6%~63.7%, 全氮浓度分别减少 10.3%~29.1% 和 0.6%~34.6%, 全磷浓度分别减少 3.6%~26.0% 和 1.3%~50.3%。对于白羊草和铁杆蒿径流有机质、全氮和全磷浓度而言, 其种间差异不显著($P > 0.05$)。

植被径流有机质、全氮和全磷的量均随盖度增加而减少(图 3), 且白羊草盖度 $\geq 45\%$ 时有机质、全氮和全磷的量趋于稳定。相较于裸地, 白羊草和铁杆蒿径流有机质的量分别减少 29.0%~83.9% 和 52.1%~59.6%, 全氮分别减少 1.9%~72.0% 和 2.5%~36.8%, 全磷分别减少 36.5%~67.7% 和 41.6%~51.2%。总体而言, 白羊草径流有机质、全氮和全磷的量均高于铁杆蒿。相对于铁杆蒿样地, 当植被盖度为 $< 20\%$ 时, 白羊草径流有机质和全氮的量分别增加 48.3% 和 12.2%; 当植被盖度 $\geq 20\%$ 时, 白羊草径流有机质、全氮和全磷的量分别减少 28.4%~66.4%, 10.7%~55.8% 和 3.3%~64.7%, 平均分别减少 48.40%, 41.80% 和 24.5%。

2.3 泥沙养分特征

植被覆盖对泥沙养分含量有一定的影响, 随植被盖度的增加, 白羊草泥沙有机质、全氮和全磷含量减少, 铁杆蒿泥沙有机质、全氮和全磷含量随盖度增加总体呈先增后减的下降趋势(图 4)。相较于裸地, 白羊草和铁杆蒿泥沙有机质含量分别减少 -20.0%~34.3% (平均减少 3.3%) 和 -59.5%~65.1% (平均减少 -10.0%), 全氮分别减少 -16.8%~34.1% (平均减少 14.5%) 和 -10.8%~55.5% (平均减少 12.8%), 全磷分别减少 5.5%~10.5% (平均减少 8.2%) 和 2.3%~8.8% (平均减少 5.7%)。总体而言, 白羊草泥沙有机质、全氮和全磷含量低于铁杆蒿, 当 $20\% \leq$ 植被盖度 $\leq 60\%$ 时, 相对于铁杆蒿样地, 白羊草泥沙中有机质、全氮和全磷含量分别减少

12.7%~40.7%，-8.0%~33.0%和 2.5%~6.9%，平均分别减少 28.7%，17.4%和 4.3%；当植被盖度

<20%时，白羊草泥沙有机质、全氮和全磷含量分别增加 54.5%，57.6%和 3.6%。

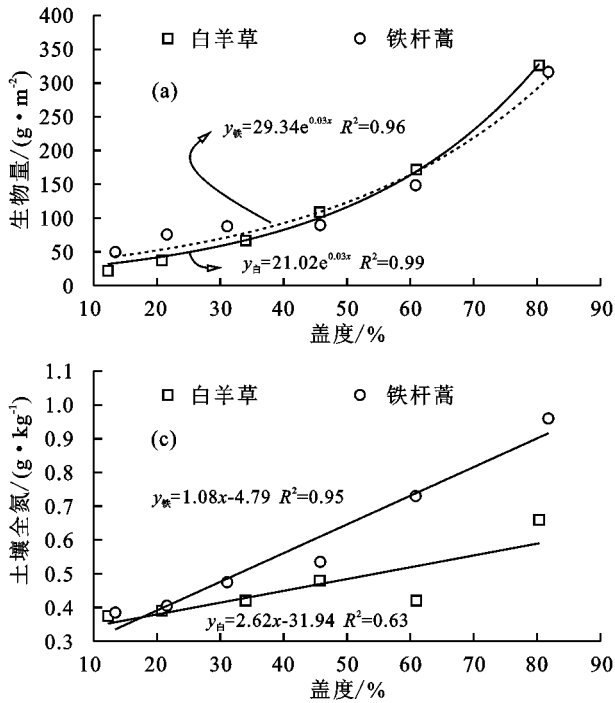


图 1 典型植被地上生物量、土壤有机质、全氮和全磷含量随盖度的变化特征

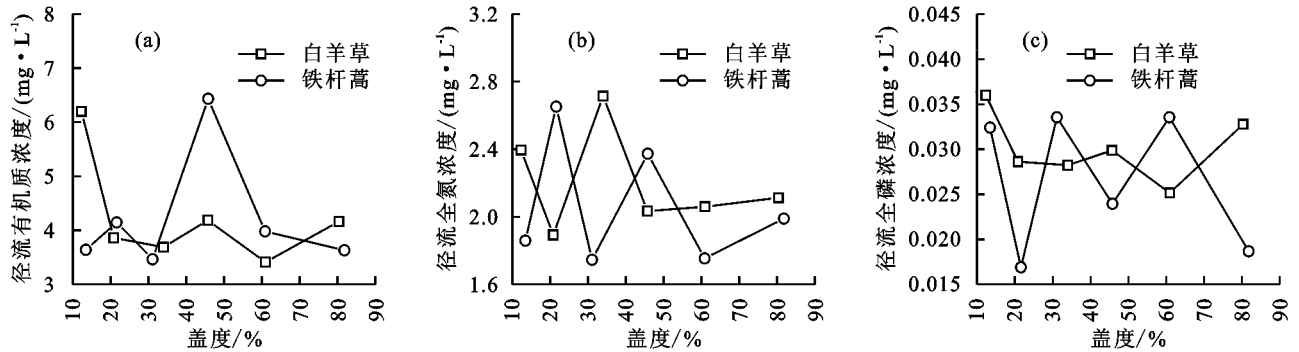


图 2 典型植被径流有机质、全氮和全磷浓度随植被盖度的变化特征

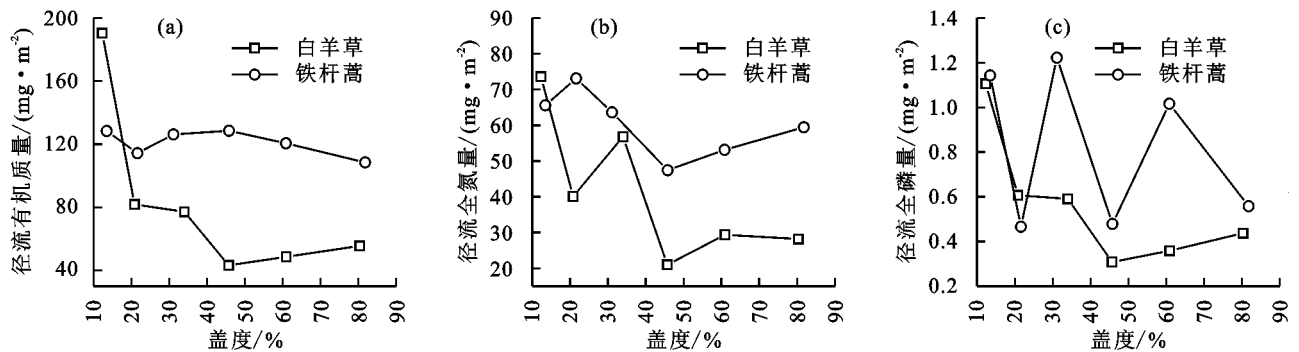


图 3 典型植被径流有机质、全氮和全磷的量随植被盖度的变化特征

植被泥沙有机质、全氮和全磷的量随盖度增加分别呈指数函数($R^2 \geq 0.78$)和先增后减的下降趋势(图 5)。相较于裸地,白羊草和铁杆蒿泥沙有机质的量分别减少 69.9%~99.3%和 88.9%~99.2%,全氮分别减少 73.4%~99.3%和 91.0%~99.0%,全磷分别减少 76.3%~99.0%和 92.0%~97.9%。相较于铁杆蒿,当植被盖度<45%时,白羊草泥沙有机质、全氮和全磷的量分别增加 60.0%~

1 117.8%,81.0%~1 142.1%和 23.9%~716.3%；当植被盖度 $\geq 45\%$ 时,白羊草泥沙有机质、全氮和全磷的量分别减少 9.9%~53.8%,29.3%~68.4%和 52.9%~64.2%。

植被泥沙有机质、全氮、全磷的富集比均随盖度增加呈线性降低($R^2 \geq 0.56$,图 6)。相较于裸地,白羊草和铁杆蒿有机质的富集比分别减少 31.5%~85.2%和 14.7%~83.8%,全氮分别减少 8.1%~67.6%和 18.0%~

84.9%，全磷分别减少 5.5%~10.5%和 2.3%~8.8%。总体而言，白羊草有机质和全磷的富集比较铁杆蒿低，全氮的富集比较铁杆蒿高。相对于铁杆蒿样地，白羊

草有机质和全磷的富集比分别减少 6.3%~67.2%和 6.4%~21.5%，平均分别减少 38.9%和 16.9%；全氮的富集比增加 61.8%~115.3%，平均增加 32.2%。

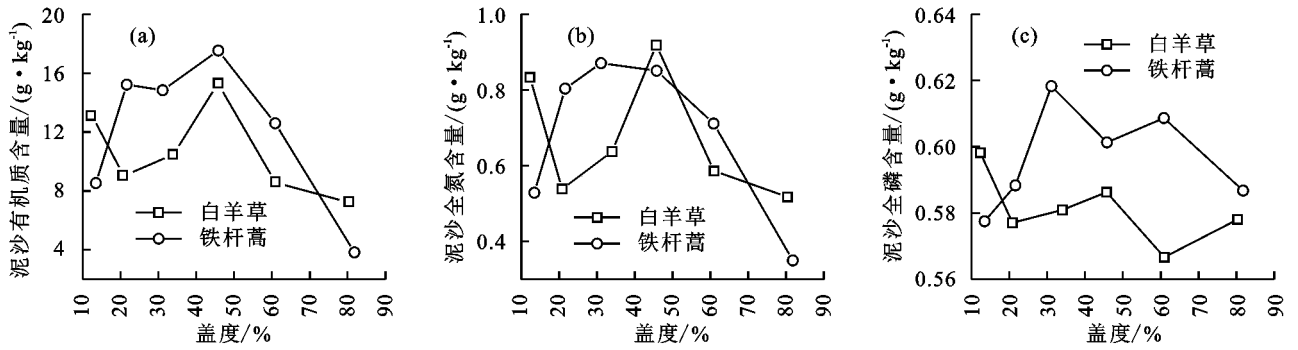


图 4 典型植被泥沙有机质、全氮和全磷含量随植被盖度的变化特征

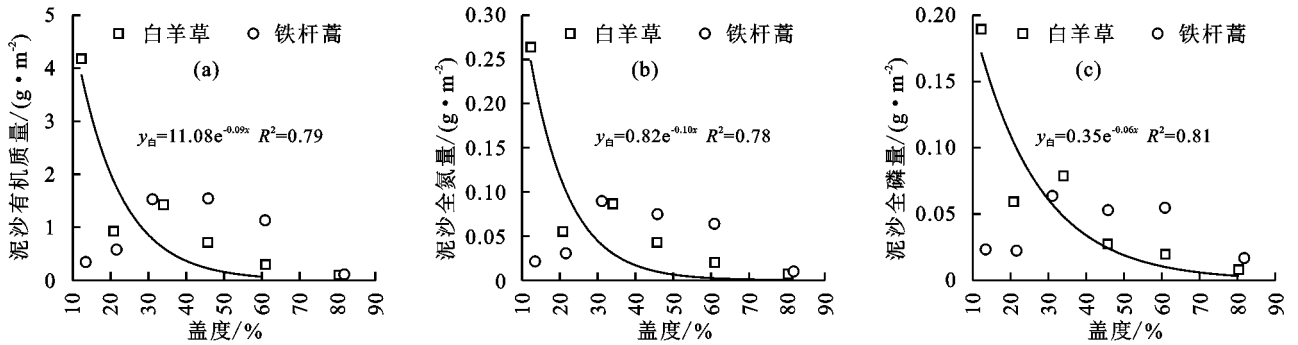


图 5 典型植被泥沙有机质、全氮和全磷量随植被盖度的变化特征

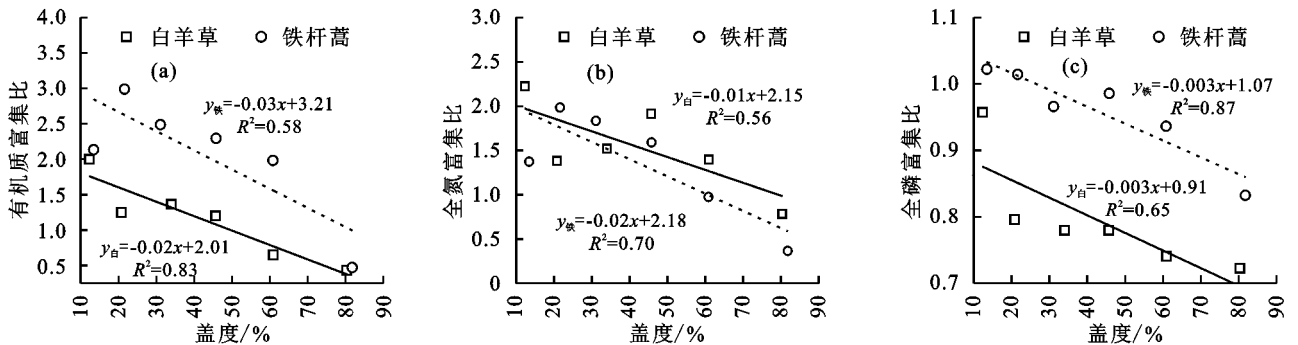


图 6 典型植被泥沙有机质、全氮和全磷富集比随植被盖度的变化特征

2.4 径流泥沙养分总量

白羊草和铁杆蒿样地土壤有机质和全磷主要随泥沙迁移为主，全氮主要随径流迁移为主(表 2)。白羊草和铁杆蒿泥沙有机质的量平均占比分别为 82.8%和 73.4%，全氮分别为 39.2%和 27.0%，全磷分别为 96.6%和 95.3%；白羊草和铁杆蒿径流中有机质的量平均占比分别为 17.2%和 26.6%，全氮分别为 60.8%和 73.0%，全磷分别为 3.4%和 4.7%。相较于裸地，白羊草和铁杆蒿泥沙养分的量占比降低，径流养分的量占比增加。总体而言，白羊草泥沙养分的量占比高于铁杆蒿，径流养分的量占比低于铁杆蒿。

植被径流泥沙有机质、全氮和全磷的总量均随盖度增加而减少，白羊草养分的总量可表征为植被盖度的指数函数($R^2 \geq 0.53$)，铁杆蒿养分的总量随盖度增加表现为先增后减的降低趋势(图 7)。相较于裸地，白羊

草和铁杆蒿径流泥沙有机质的总量分别减少 68.7%~98.7%和 87.8%~98.0%，全氮分别减少 64.0%~94.4%和 81.0%~88.7%，全磷分别减少 76.1%~98.9%和 91.8%~97.8%。总体而言，白羊草径流泥沙养分的总量低于铁杆蒿，当植被盖度 $\geq 45\%$ 时，相较于铁杆蒿草地，白羊草有机质、全氮和全磷的总量分别减少 33.7%~71.8%，50.1%~53.6%和 48.1%~64.3%，平均分别减少 53.6%，51.5%和 54.4%。

表 2 径流和泥沙有机质、全氮和全磷量占比

单位: %

典型植被	泥沙			径流		
	有机质	全氮	全磷	有机质	全氮	全磷
白羊草	82.8	39.2	96.6	17.2	60.8	3.4
铁杆蒿	73.4	27.0	95.3	26.6	73.0	4.7
CK	97.0	86.9	99.8	3.0	13.1	0.2

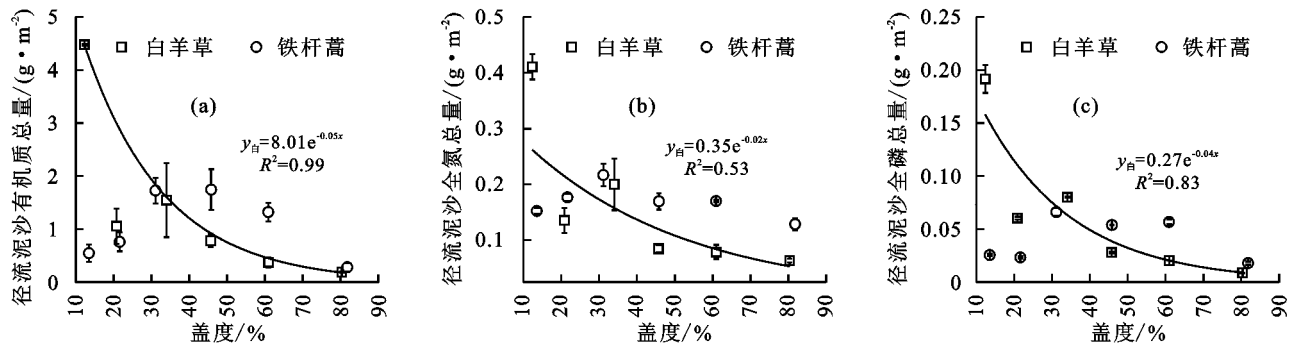


图 7 典型植被径流泥沙有机质、全氮和全磷的总量随植被盖度的变化特征

3 讨论

土壤有机质、全氮和全磷含量随植被盖度增加呈线性增加($R^2 \geq 0.63$)。这是由于植被盖度增加,根系分泌物和枯落物混入表土量逐渐增加,促进土壤微生物的活动,加快土壤中有机残体和枯落物的分解,从而提高土壤有机质、全氮和全磷回流土壤的速率^[11-12]。不同植被类型土壤养分含量存在明显差异,白羊草样地对有机质和全磷回流土壤的速率具有较强的促进作用,而铁杆蒿则在增加土壤全氮含量方面的作用相对明显。这反映出 2 种典型植被在有机质、全氮和全磷的吸收、固定和消耗进程等方面存在明显的差异^[13],这是由于 2 种典型植被根系构型(白羊草为须根系,铁杆蒿为直根系)不同,以致于白羊草在土壤表层具有更大的根长密度和根表面积密度^[14],而根长密度、根表面积密度和土壤表层有机质、全磷含量呈极显著正相关^[14],因此,白羊草对有机质和全磷回流土壤的速率具有更强的促进作用。铁杆蒿样地土壤全氮含量高于白羊草样地,其机理尚不明确,仍需进一步深入的研究。

植被盖度具有对降雨的消能、截留以及增加土壤入渗的作用^[5],有效抑制坡面产流产沙过程,进而影响土壤有机质、全氮和全磷的迁移过程。随植被盖度增加,2 种植被径流有机质、全氮和全磷的浓度均不同程度地减少。这是由于植被覆盖有效抑制产流过程,从而减少径流对土壤有机质、全氮和全磷的浸提和冲洗,植被覆盖也削弱了径流携带养分的能力^[15],且随盖度的增加,这种抑制和削弱的作用逐渐增加。受土壤养分含量、植被盖度和类型的影响,泥沙养分特征也有所不同。随盖度的增加,白羊草泥沙有机质、全氮和全磷含量不同程度地减少,铁杆蒿泥沙全氮和全磷含量也同样减少,但有机质含量反而增加,这说明植被覆盖对减少泥沙有机质、全氮和全磷含量的作用有限。相反,2 种植被泥沙有机质、全氮和全磷的量随植被盖度增加而显著减少,这是由于植被覆盖有效抑制产沙过程^[16],减少土壤有机质、全氮和全磷迁移的载体^[3],从而导致泥沙中有机质、全氮和全

磷的量减少,且随植被盖度的增加,这种抑制作用增加。2 种植被径流泥沙有机质、全氮和全磷的总量随盖度增加也显著减少,这主要是由于植被盖度增加有效抑制产流产沙过程^[10,16],减少地表径流对土壤可溶性养分的浸提,对土壤颗粒表面吸附的养分离子的冲洗以及对土壤颗粒的携带^[1]。

植被盖度显著影响泥沙有机质、全氮和全磷的富集和土壤养分迁移方式。随植被盖度的增加,2 种植被泥沙有机质、全氮和全磷的富集比均呈线性函数递减($R^2 \geq 0.56$)。这是由于径流在土壤表面传输特性决定土壤侵蚀过程中首先搬运土壤表层的细颗粒,其原因在于土壤细颗粒易在径流中传输,使泥沙通常趋于黏粒富集和所吸附化学元素富集^[17-18],其富集比随植被盖度增加而降低的原因是植被覆盖增加抑制产沙过程^[16]。2 种植被土壤有机质和全磷主要以泥沙迁移为主,全氮主要以径流迁移为主,而裸地土壤有机质、全氮和全磷主要以泥沙迁移为主。Wang 等^[19]在人工模拟降雨条件下发现,耕地土壤全氮、全磷主要以泥沙迁移为主,而林地土壤全氮主要以径流迁移为主,全磷主要以泥沙迁移为主,这说明植被覆盖后改变土壤全氮的迁移方式,而未改变土壤有机质、全磷的迁移方式。其原因主要有 2 个方面:其一,有机质和全磷的迁移主要与 2~20 μm 微团聚体及其比表面积有关^[20],因此土壤有机质和全磷主要以泥沙迁移为主,尤其是全磷;其二,植被盖度增加,抑制产流产沙过程,从而导致泥沙中全氮的量占比减少^[19],但在增加雨水入渗和减少产流的同时,加剧径流与表层土壤的相互作用,加速土壤全氮向径流中释放,因此径流中全氮的量占比呈增加的趋势。

白羊草和铁杆蒿样地种间径流、泥沙养分特征存在较大差异。这可能与植被形态特征和生长特征有关,白羊草为须根系草被植物,根系发达,分蘖力强,茎叶多为基生叶丛^[21],且随着盖度的增加逐渐形成致密的贴地丛状结构,对产流产沙的抑制作用逐渐凸显。野外调查发现,铁杆蒿为直根系的半灌木状草本,茎多丛生,自下部分枝,叶具 2~3 回栉齿状羽状

分裂,降雨过程中雨滴能穿过枝叶的孔隙打击地表。相较于铁杆蒿,当植被覆盖较低时,白羊草未形成贴地的叶丛结构,抑制产流产沙过程的作用较铁杆蒿低,而铁杆蒿茎的丛生特性和分支结构能有效削弱雨滴的动能,对产流产沙的抑制作用较白羊草高;当植被覆盖较高时,白羊草逐渐形成致密的贴地丛状结构,抑制产流产沙的作用逐渐凸显。因此,2种典型植被径流、泥沙中养分特征存在明显的差异。

4 结论

(1)植被覆盖提高土壤有机质、全氮和全磷含量,加快养分回流土壤的速率,且土壤有机质、全氮和全磷含量随植被盖度增加呈线性增加($R^2 \geq 0.63$)。白羊草对提高土壤有机质和全磷含量具有较强的促进作用,而铁杆蒿则在增加土壤全氮含量方面的作用相对明显。

(2)植被覆盖降低白羊草和铁杆蒿径流有机质、全氮和全磷的浓度,但种间差异不显著($P > 0.05$)。白羊草和铁杆蒿径流有机质、全氮和全磷的量随植被盖度增加而显著降低,当植被盖度 $\geq 20\%$ 时,白羊草抑制土壤养分随径流迁移的作用明显高于铁杆蒿;植被盖度 $< 20\%$ 时,白羊草抑制土壤养分随径流迁移的作用明显低于铁杆蒿。

(3)植被覆盖对泥沙有机质、全氮和全磷含量的影响较小。相反,白羊草和铁杆蒿泥沙有机质、全氮和全磷的量随盖度增加分别呈指数函数($R^2 \geq 0.78$)和先增后减的下降趋势,且当植被盖度 $\geq 45\%$ 时,白羊草泥沙有机质、全氮和全磷的量低于铁杆蒿;当植被盖度 $< 45\%$ 时,白羊草泥沙有机质、全氮和全磷的量高于铁杆蒿。

(4)白羊草径流泥沙有机质、全氮和全磷的总量随植被盖度增加呈指数函数下降($R^2 \geq 0.53$),而铁杆蒿呈先增后减的下降趋势,且当植被盖度 $\geq 45\%$ 时,白羊草抑制土壤有机质、全氮和全磷迁移的作用较铁杆蒿强;当植被盖度 $< 45\%$ 时,白羊草抑制土壤有机质、全氮和全磷迁移的作用较铁杆蒿弱。

(5)白羊草和铁杆蒿泥沙有机质、全氮和全磷的富集比随植被盖度增加呈线性降低($R^2 \geq 0.56$)。白羊草与铁杆蒿样地土壤有机质和全磷主要随泥沙迁移为主,全氮主要随径流迁移为主,植被覆盖改变土壤全氮的迁移方式,未改变土壤有机质和全磷的迁移方式。

参考文献:

[1] 邵明安,张兴昌.坡面土壤养分与降雨、径流的相互作用机理及模型[J].世界科技研究与发展,2001,23(2):7-12.
[2] 王全九,张江辉,丁新利,等.黄土区土壤溶质径流迁移过程影响因素浅析[J].西北水资源与水工程,1999,10(1):3-5.

[3] Owino J O, Owido S F O, Chemelil M C. Nutrients in runoff from a clay loam soil protected by narrow grass strips [J]. Soil and Tillage Research, 2006, 88(1/2): 116-122.
[4] 朱显谟.黄土地区植被因素对于水土流失的影响[J].土壤学报,1960(2):110-121.
[5] 张光辉,梁一民.植被盖度对水土保持功效影响的研究综述[J].水土保持研究,1996,3(2):104-110.
[6] 张兴昌,邵明安.植被盖度对流域有机质和氮素径流流失的影响[J].草地学报,2000,8(3):198-203.
[7] Gao C N, Cheng J H, Li F. Experimental study of herbaceous structure effects on reducing nutrient loss [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2018, 28(3): 1675-1685.
[8] 戴矜君,程金花,张洪江,等.草被覆盖对养分迁移机制的影响[J].水土保持学报,2016,30(3):147-153.
[9] 李婧,李占斌,李鹏,等.模拟降雨条件下植被格局对径流总磷流失特征的影响分析[J].水土保持学报,2010,24(4):27-30.
[10] 王升,王全九,董文财,等.黄土坡面不同植被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.
[11] 王忠禹,王兵,刘国彬,等.黄土丘陵区典型植被枯落物坡面分布及混入土壤对土壤性状的影响[J].自然资源学报,2018,33(11):2020-2031.
[12] 朱丽,郭继勋,鲁萍,等.松嫩羊草草甸羊草、碱茅群落土壤酶活性比较研究[J].草业学报,2002,11(4):28-34.
[13] 张婷,陈云明,武春华.黄土丘陵区铁杆蒿群落和长芒草群落地上生物量及土壤养分效应[J].中国水土保持科学,2011,9(5):91-97.
[14] 赵富王,王宁,苏雪萌,等.黄土丘陵区主要植物根系对土壤有机质和团聚体的影响[J].水土保持学报,2019,33(5):105-113.
[15] 王辉,王全九,邵明安.人工降雨条件下黄土坡面养分随径流迁移试验[J].农业工程学报,2006,22(6):39-44.
[16] 朱冰冰,李占斌,李鹏,等.草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J].土壤学报,2010,47(3):401-407.
[17] Mcisaac G F, Hirschi M C, Mitchell J K. Nitrogen and phosphorus in eroded sediment from corn and soybean tillage systems [J]. Journal of Environmental Quality, 1991, 20(3): 663-670.
[18] 张兴昌,邵明安.侵蚀泥沙、有机质和全氮富集规律研究[J].应用生态学报,2001,12(4):541-544.
[19] Wang G, Li Z, Zhang J, et al. Loss rules of total nitrogen and total phosphorus in the soils of southwest mountains in Henan Province, China under artificial rainfall [J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2019, 17(1): 451-461.
[20] 李裕元,邵明安,郑纪勇,等.黄绵土坡耕地磷素迁移与土壤退化研究[J].水土保持学报,2003,17(4):1-7.
[21] 米佳,董宽虎.白羊草种群生殖分蘖株数量特征分析[J].草地学报,2007,15(1):55-59.