

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.005.

敖利满, 蒋超华, 徐勤学, 等. 岩面形态对西南喀斯特坡地产生沙的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 52-60.

AO Liman, JIANG Chaohua, XU Qinxue, et al. Influence of Rock Surface Morphology on Runoff and Sediment in Karst Slope of Southwest China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 52-60.

岩面形态对西南喀斯特坡地产生沙的影响

敖利满^{1,2}, 蒋超华³, 徐勤学^{1,2}, 方荣杰^{1,2}, 付智勇⁴, 陈洪松⁴

(1. 桂林理工大学 广西环境污染控制理论与技术重点实验室科教结合科技创新基地,

广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学 岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林 541004;

3. 广西珠委南宁勘测设计院, 南宁 530007; 4. 中国科学院 环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100)

摘要: [目的] 探明出露岩石的岩面形态对喀斯特坡地产生沙特征的影响, 为进一步认识喀斯特坡地降雨侵蚀规律提供科学依据。 [方法] 采用人工模拟降雨的方法, 以无裸岩为对照, 研究了在 3 个坡度 (5°, 15°, 25°) 条件下, 岩面无发育 (光滑)、岩面溶穴发育 (溶穴) 和岩面溶沟发育 (溶沟) 3 种岩面形态对岩石出露坡面产生沙特征的影响。 [结果] (1) 与无裸岩相比, 3 种岩面形态均能显著增加地表径流, 减少地下径流, 其中溶穴平均地表径流系数最高 (26.2%), 溶沟平均地下径流系数最低 (18.4%)。 (2) 地表初始产流时间与地下初始产流时间均受到岩面形态影响而有所提前, 溶穴地表初始产流时间与地下初始产流时间均早于其他岩面形态。 (3) 裸露岩石拦截降雨形成的岩面流冲刷地表, 加剧了地表产沙, 地表产沙量大小呈现为光滑 > 溶穴 > 溶沟 > 无裸岩。 (4) 坡度为 5° 时, 3 种岩面形态均提升了地表径流携沙能力, 坡度为 15° 时, 光滑与溶穴提升了地表径流携沙能力, 溶沟减弱了地表径流携沙能力, 但坡度为 25° 时 3 种岩面形态均减弱了地表径流携沙能力。 [结论] 岩面形态对喀斯特坡地产生沙影响显著, 未来应加强对野外自然条件下不同岩面形态产生沙的观测研究。

关键词: 岩面形态; 产生沙; 喀斯特; 坡度; 模拟降雨

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0052-09

Influence of Rock Surface Morphology on Runoff and Sediment in Karst Slope of Southwest China

AO Liman^{1,2}, JIANG Chaohua³, XU Qinxue^{1,2}, FANG Rongjie^{1,2}, FU Zhiyong⁴, CHEN Hongsong⁴

(1. Key Laboratory for Theory and Technology of Environmental Pollution Control in Guangxi,

Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Guangxi Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

3. Guangxi Nanning Survey and Design Institute of Pearl River Commission, Nanning 530007, China; 4. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100, China)

Abstract: [Objective] The aim of the study is to explore the influence of exposed rock surface morphology on the runoff and sediment yield of karst slope, and then to enhance the understanding of rainfall erosion pattern on karst slopes. [Methods] The artificially simulated rainfall experiment was used to study the effects of three types of rock surface morphology on the characteristics of runoff and sediment yields of karst slope with rock outcrops. With no bare rock as the control, three kinds of rock surface morphology (smoothness, karst cave, karst gully) and three slope gradients (5°, 15°, 25°) were set up. [Results] (1) Compared with no bare rock, the three kinds of rock surface morphology all can significantly increase surface runoff and reduce underground runoff. The average surface runoff coefficient of karst cave is the highest (26.2%), and the

收稿日期: 2022-06-14

修回日期: 2022-07-17

资助项目: 国家自然科学基金项目“岩—土覆被格局对岩溶峰丛洼地坡面水土流失的影响机制研究”(51769005), “多径流作用下喀斯特露天铝土矿区开挖边坡土壤侵蚀机理研究”(42067014)

第一作者: 敖利满 (1999—), 男, 湖北松滋人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与农业生态研究。E-mail: alm0221@qq.com

通信作者: 徐勤学 (1982—), 男, 湖南新宁人, 博士, 研究员, 主要从事水土保持与农业生态研究。E-mail: xqx@glut.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

average underground runoff coefficient of karst gully is the lowest (18.4%). (2) The initial surface runoff time and the initial underground runoff time are both advanced because of the effect of the rock surface morphology, and the initial surface runoff time and the initial underground runoff time of karst cave are both earlier than those of other rock surface morphology. (3) The rock surface flow formed by the process that bare rock intercepts rainfall scoures the surface, which intensifies the surface sediment yield. The surface sediment yield shows the following order: smoothness > karst cave > karst gully > no bare rock. (4) When the slope is 5° , the three types of rock surface morphology all improve the sediment carrying capacity of surface runoff. When the slope is 15° , the smoothness and karst cave improves the sediment carrying capacity of surface runoff, and the karst gully weakens the sediment carrying capacity of surface runoff. However, the three types of rock surface morphology all weaken the sediment carrying capacity of surface runoff when the slope is 25° . [Conclusion] The rock surface morphology has a significant effect on runoff and sediment yield in karst slope. In the future, the observation and research on runoff and sediment yield of different rock surface morphology under natural conditions should be strengthened.

Keywords: rock surface morphology; runoff and sediment yield; karst; slope; simulated rainfall

我国西南喀斯特地区生态环境脆弱,土层浅薄且分布不连续,水土流失严重^[1-2],加上长期且剧烈的岩溶作用,喀斯特地区石漠化问题较为突出^[3-4]。岩石出露是喀斯特地区的显著特征^[5-6],也是喀斯特石漠化的直观表达,喀斯特坡地基岩裸露率较高,基岩直接出露地表,岩面形态差异较大且种类较多,降雨在不同形态的岩面上汇集形成的径流对下方坡地土壤侵蚀的影响也明显不同。

目前,已有大量研究证明岩石出露对坡面土壤侵蚀的影响较大^[7]。有研究表明岩石出露可以通过抑制产流与土壤可蚀性,增加地表径流的入渗率从而减少土壤侵蚀^[8-9]。Lv 等^[10]关于不同裸岩率对土壤侵蚀影响的研究发现,随着裸岩率增加土壤流失呈下降趋势;王济等^[11]关于不同裸岩率的坡面土壤侵蚀研究发现,随着裸岩率的增加,坡面径流强度与产沙量均有所减小。但也有研究表示,岩石出露会增加坡面径流量,对土壤流失的影响较为复杂。Rodrigo^[12]与 Dai^[13]等分别通过模拟降雨试验研究发现,大面积碎石可有效降低水土流失速度,但径流量会随裸岩率的增加而增加,土壤流失量呈下降趋势;宋兰等^[14]通过室内模拟冲刷试验研究了喀斯特槽谷区集中流条件下的坡面土壤侵蚀过程,发现岩石与坡面呈一定夹角时,坡面土壤流失量增加。不同岩石的分布特征也会影响降雨入渗从而改变坡面径流量,Smets 等^[15]研究发现岩石覆盖在土壤表面的情况下能加速地表径流入渗,地表径流量线性减小,而岩石嵌入表土层对入渗的影响较小,地表径流量仍持续增加。总体而言,西南喀斯特地区石漠化问题突出,大量的裸露岩石对坡面土壤侵蚀的影响较为复杂。野外试验时,侵蚀过程受岩石出露与坡度、土壤类型、降雨阶段等因

素交织影响^[16],使得土壤侵蚀结果存在较大差异,因此大量学者主要通过室内人工降雨这一重要手段研究喀斯特坡地降雨侵蚀过程^[17-18]。

现有喀斯特地区出露岩石对坡面土壤侵蚀影响的研究主要集中在裸岩率方面^[19-20],但复杂的岩石形态特征可能会影响降雨入渗和地表径流过程,从而影响土壤侵蚀。已有研究表明,喀斯特坡地石牙形态的岩石出露会产生石牙表面径流冲刷土壤,加快了产流速度,增加了地表径流量,同时大量石牙汇集了坡面径流,加强了径流冲刷能力从而加剧了地表侵蚀^[21],但不同岩面形态的岩石出露对坡面侵蚀过程的影响是否存在差异尚不清楚。基于此,为明确不同岩面形态对喀斯特坡地土壤侵蚀的影响,本研究以 3 种典型岩面形态的岩石出露坡面为研究对象,通过室内模拟降雨试验,研究不同岩面形态和坡度对喀斯特坡地产生沙规律的影响,揭示岩面形态对喀斯特坡面土壤侵蚀的影响机制,以期为进一步认识喀斯特坡地水土流失过程与机理提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

模拟降雨试验所用土壤为黄色石灰土,取自于广西壮族自治区环江毛南族自治县大才乡新坡村山脚(北纬 $24^\circ 44' 11''$,东经 $108^\circ 20' 41''$),试验所用土壤中砂粒含量为 22.6%,粉粒含量为 47.3%,黏粒含量为 30.1%。供试土壤经自然风干过 10 mm 的细筛去除根系以后,按土壤自然容重 1.1 g/cm^3 分三层压实填筑,每层土壤厚度为 10 cm,考虑到喀斯特地区土层较薄,试验设计土层厚度为 30 cm。填土之前,在土槽底板的圆孔上铺设一张长宽均为 8 cm,厚度与纸

张相近的水溶棉(遇水溶解),用土壤将其覆盖后再进行填土。在保证土槽中其他部分土壤均匀的条件下,使用自制平整铁板进行压实,同时对土槽四周边界进行压实以减少边界效应对试验的影响。

1.2 试验装置

降雨器采用组合的顶喷式降雨器,由4个喷头组成,喷头为美国 SPRACO 锥形喷头,高度调节为4.5 m,降雨器压力表控制在0.08 MPa 压强时,降雨得到的雨滴下降终点速度符合自然降雨特性,降雨前对降雨强度进行校准,降雨均匀度可达到80%以上,有效半径为2 m,雨强范围为25~150 mm/h^[22]。试验土槽为自制可调节坡度的钢板土槽,土槽长2 m,宽、高均为1 m,可调节坡度范围为0°~25°。土槽底板均匀分布6个直径为5 cm的圆孔,作为地下孔隙。土槽的下端为V型地表集流槽,集流槽通过软管与集流桶连接,以收集地表产生的径流以及泥沙。在土槽的底板打孔处焊接了可以安装阀门的钢管,阀门连接水带以便将地下径流引入到集流桶里。

1.3 试验方法

模拟降雨试验于2019年7月—10月在中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站内完成。试验土槽以无裸岩出露为对照,土槽中放置了3种不同岩面形态的岩石:(1)光滑,即岩面无发育,岩石表面较为光滑;(2)溶穴,即岩面溶穴发育,在岩石下部打

一个半径为8 cm的圆孔,从岩面贯穿到岩石底部;(3)溶沟,即坡面溶沟发育,溶沟从岩面中部延伸至岩面下部边缘,沟深逐渐增大,至最底部处溶沟总长度25 cm,宽5 cm,深5 cm(图1)。试验所用岩石使用混凝土浇筑,根据需要塑造成不同的形状,岩石投影面积为50 cm×80 cm,在前期野外调查中,3种典型岩面形态的近似岩面与坡面的夹角以15°左右居多,因此本试验中3种岩石与坡面夹角均设置为15°,填土前将岩石放置在土槽中部,距前后各60 cm,左右各25 cm,再进行填土压实。收集每场降雨后的地表径流与地下径流样品,地表径流通过土槽下端V型集流槽连接的软管收集,地下径流通过土槽底板打孔处焊接的钢管收集,泥沙样品静置后倒掉上清液,置于烘箱(105℃)烘干24 h至恒重后,用天平称量得出泥沙重量。为保证初始含水量相同,本研究在试验前一天用喷雾器均匀地对土壤进行润湿直至地下孔隙产流,此时水溶棉遇水迅速溶解并随地下径流流出,然后用防水布遮盖土槽12 h使其充分扩散分配,12 h后搭配多参数水分探测仪测土壤含水量,以保证每场降雨试验前期土壤含水量一致。试验设计以降雨历时和降雨强度作为喀斯特地区的降雨特性指标,每场模拟降雨历时90 min,为模拟该地区实际中强度降雨强度情况,本次试验降雨强度选用56 mm/h,每种岩面形态进行2次重复降雨试验。



图1 无裸岩、光滑、溶穴、溶沟岩石图

本次试验设计监测内容包括不同岩面形态的坡面地表与地下初始产流时间、地表与地下每5 min内产流产沙量,用以分析岩面形状对地表及地下产流产沙的影响,通过调整坡度,来分析坡度对岩石出露坡面产流产沙的影响。

1.4 数据分析

利用Excel 2016与Spss 19.0软件进行数据处理与统计分析,其中显著性分析采用LSD(Least significance difference test)进行样本检验,使用Origin 2021软件进行作图与数据拟合。

2 结果与分析

2.1 岩面形态对地表产流产沙的影响

2.1.1 地表径流系数 3种岩面形态的地表径流系数均显著提升,溶穴的平均地表径流系数最高(表1)。不同坡度之间,光滑、溶穴、溶沟的平均地表径流系数均高于无裸岩,分别为无裸岩的4.3倍、5.7倍和2.3倍;无裸岩地表径流系数随坡度的增高而增高,而3种岩面形态的地表径流系数则均呈现先增加后减小的趋势。相同坡度下,无裸岩地表径流系数显著

低于其他 3 种岩面形态,溶穴在 5°和 15°时地表径流系数最高,光滑在 25°时地表径流系数最高。

表 1 不同岩面形态坡面地表径流系数

形态	地表径流系数/%			
	5°	15°	25°	平均值
对照	0.0c	5.4±0.4b	8.4±1.2c	4.6
光滑	10.4±1.5b	28.5±7.0a	20.8±0.2a	19.9
溶穴	25.1±1.6a	35.2±3.8a	18.4±0.2ab	26.2
溶沟	1.6±0.2c	15.8±0.3b	15.1±0.2b	10.8

注:同列不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。

2.1.2 地表径流过程 与无裸岩相比,3 种岩面形态的地表初始产流时间均明显提前(图 2)。相同坡度下,3 种岩面形态的初始产流时间均比无裸岩早。不同坡度之间,坡度为 5°时无裸岩未产流,15°时无裸岩开始产流,25°时无裸岩初始产流时间最迟;光滑与溶穴地表初始产流时间随着坡度的升高逐渐提前;溶沟地表初始产流时间随坡度升高先提前后延迟。溶穴平均初始产流时间最早(15.1 min),明显加快了地表产流。

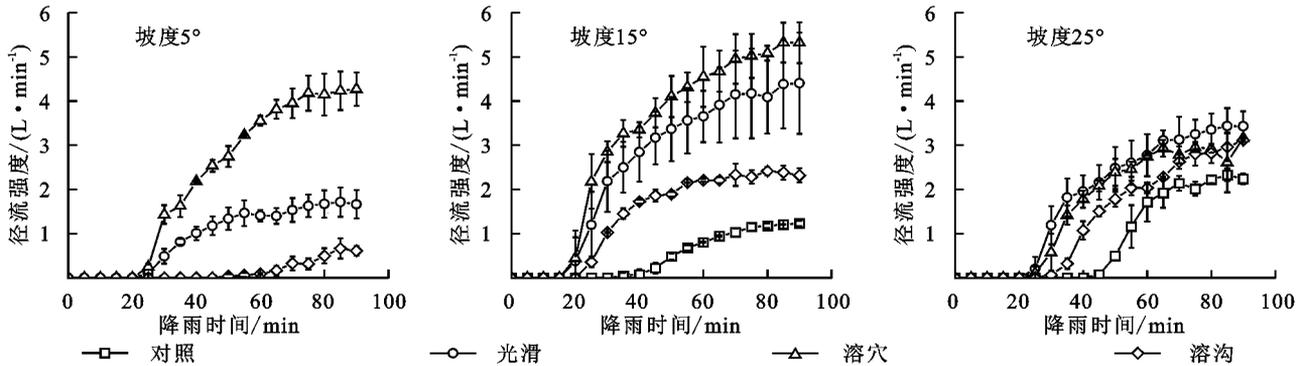


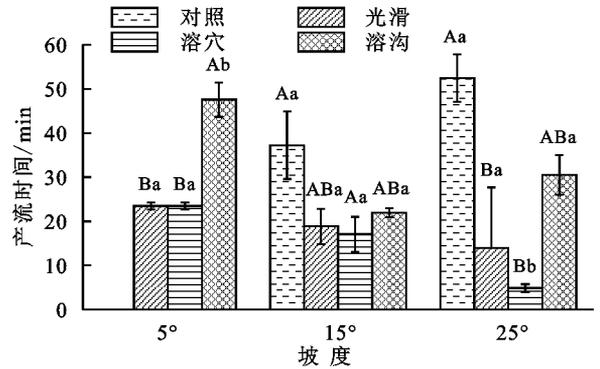
图 3 不同岩面形态坡面地表产流过程

2.1.3 地表产沙量 3 种岩面形态均促进了地表侵蚀(表 2)。3 种岩面形态的地表产沙量较无裸岩均有明显增加,光滑、溶穴、溶沟较无裸岩平均地表产沙量分别增加了 21.7 g,11.4 g,3.8 g。不同坡度之间,随着坡度的增高,无裸岩、光滑与溶穴地表产沙量均呈现先增后减的趋势,在 15°坡度时达到峰值,溶沟地表产沙量主要呈上升趋势。光滑平均地表产沙量为 23.6 g,高于其他岩面形态。

表 2 不同岩面形态坡面地表产沙量

形态	地表产沙量/g			
	5°	15°	25°	平均值
对照	0.0a	3.2±1.1a	2.6±2.2a	1.9
光滑	25.3±23.7a	39.5±43.8a	5.9±6.3a	23.6
溶穴	11.0±3.1a	21.4±10.0a	7.4±7.1a	13.3
溶沟	0.6±0.5a	3.1±1.2a	13.5±14.7a	5.7

注:同列不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。



注:图中不同大写字母表示相同坡度不同岩面类型之间差异显著($p < 0.05$),不同小写字母表示相同岩面类型不同坡度之间差异显著($p < 0.05$)。

图 2 不同岩面形态地表初始产流时间

3 种岩面形态明显提升了地表径流强度(图 3),总体上产流过程主要分为快速增加—缓慢增加—趋于稳定 3 个阶段。相同坡度下,溶穴平均地表径流强度最高,为无裸岩的 2.4 倍;坡度为 5°与 15°时,溶穴地表径流强度最高,坡度为 25°时,光滑地表径流强度最高。不同坡度之间,光滑与溶穴的稳定地表径流强度随坡度的增高呈现先增后减的趋势,而无裸岩和溶沟的稳定径流强度则随坡度增高而逐渐增高。

2.2 岩面形态对地下产流产沙的影响

2.2.1 地下径流系数 3 种岩面形态的地下径流系数均显著降低(表 3)。随着坡度的升高,无裸岩、光滑与溶沟的地下径流系数呈现逐渐减小的趋势,溶穴的地下径流系数呈现先减后增的趋势;坡度从 5°升高到 25°,无裸岩、光滑、溶穴、溶沟地下径流系数分别从 47.6%,40.3%,29.8%,29.5%下降到 10.3%,13.0%,20.6%,6.9%。相同坡度之间,3 种岩面形态的地下径流系数在坡度为 5°和 15°时均小于无裸岩,但在坡度为 25°时,光滑和溶穴则增加了地下径流系数,溶沟地下径流系数在每个坡度下均最低。

2.2.2 地下径流过程 3 种岩面形态均使坡面地下初始产流时间提前,随着坡度升高所有坡面的地下初始产流时间均逐渐延迟(图 4)。相同坡度下,3 种岩面形态地下初始产流时间较无裸岩均有所提前,溶穴的

平均地下初始产流时间最早(9.9 min),较无裸岩平均地下产流时间提前了 15.5 min。随着坡度从 5°升高到 25°,各坡面初始产流时间均呈现延长趋势,无裸岩、光滑、溶穴、溶沟分别从 15.6 min, 8.6 min, 5.8 min, 11.0 min 延长到 39.6 min, 15.8 min, 15.4 min, 25.3 min。

表 3 不同岩面形态地下径流系数

形态	地下径流系数/%			
	5°	15°	25°	平均值
对照	47.6±6.5a	38.8±1.6a	10.3±0.5b	32.2
光滑	40.3±5.2ab	21.2±0.7b	13.0±0.9b	24.8
溶穴	29.8±5.1b	19.6±2.2b	20.6±1.8a	23.3
溶沟	29.5±7.6b	18.9±2.2b	6.9±0.1c	18.4

注:同列不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。

溶沟在任意坡度下均明显抑制了地下产流,地下径流强度随坡度增高呈现逐渐减小的趋势,产流过程主要为快速增加—缓慢增加—趋于稳定 3 个阶段(图 5)。不同坡度之间,各坡面的地下径流强度均随坡度的升高而减小,无裸岩的稳定径流强度减少最多,从

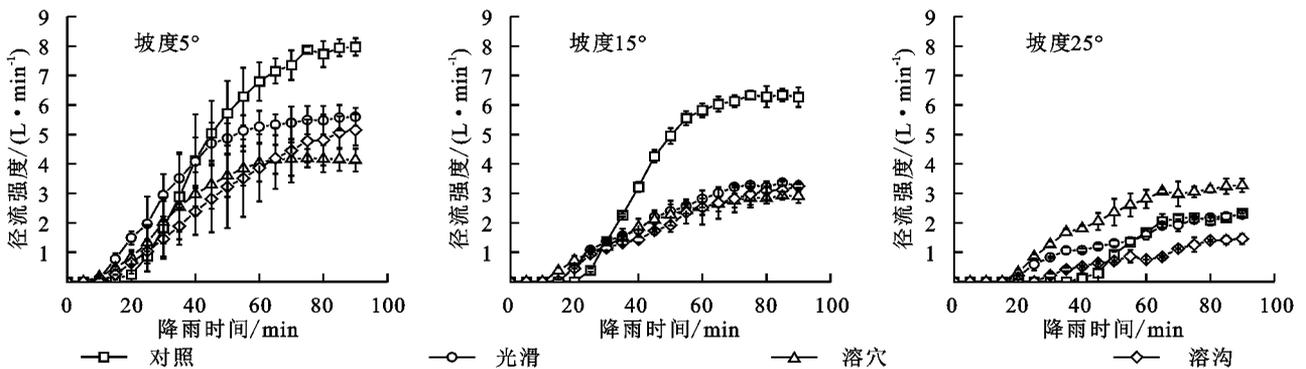


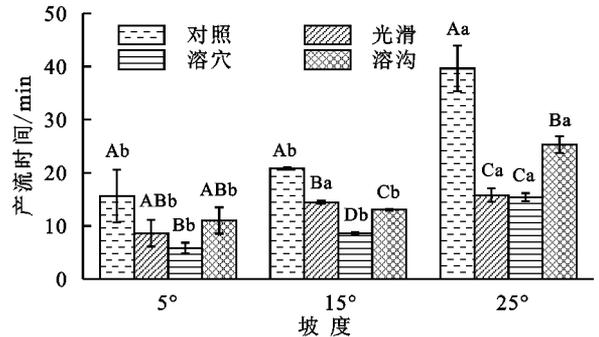
图 5 不同岩面形态坡面地下产流过程

2.2.3 地下产沙量 3 种岩面形态均使坡面地下产沙量明显减少,随着坡度升高地下产沙量逐渐减少(表 4)。3 种岩面形态的平均地下产沙量较无裸岩均有明显降低,光滑、溶穴、溶沟地下产沙量较无裸岩分别降低了 53.7%, 27.1%, 12.0%。不同坡度之间,3 种岩面形态的地下产沙量均随坡度升高而减小,坡度为 5°时光滑地下产沙量较低,其余坡度情况下地下产沙量均比无裸岩大;无裸岩与溶沟在坡度为 15°与 25°时产沙量的下降幅度有明显不同,15°时无裸岩与溶沟相对 5°时分别下降了 0.6%, 11.2%, 25°时相对 15°坡面分别下降了 56.5%, 79.0%, 说明坡度对地下产沙量的影响较大。

2.3 岩面形态对径流—泥沙关系的影响

岩面形态明显改变了径流泥沙关系,3 种岩面形态坡面的径流携沙能力随坡度升高呈下降趋势(图 6)。对于 5°坡面,无裸岩未产流,比较 3 种岩面形态,光滑的拟合方程斜率为 1.47,大于溶穴与溶沟的

8.0 L/min 下降到 2.3 L/min,在 25°坡度时稳定径流强度甚至低于光滑与溶穴,说明坡度为 25°时,光滑与溶穴促进了地下产流。相同坡度下,溶穴地下稳定径流强度在 5°和 15°时最低,溶沟在 25°时地下稳定径流强度最低且对地下产流的抑制作用最为明显,其在任意坡度下的地下径流强度均低于无裸岩。



注:图中不同大写字母表示相同坡度不同岩面类型之间差异显著($p<0.05$),不同小写字母表示相同岩面类型不同坡度之间差异显著($p<0.05$)。

图 4 不同岩面形态坡面地下初始产流时间

0.21。对于 15°坡面,无裸岩开始产流,4 个坡面径流泥沙关系拟合方程的斜率表现为光滑>溶穴>无裸岩>溶沟。对于 25°坡面,坡面径流泥沙关系拟合方程斜率表现为无裸岩>溶穴>溶沟>光滑。这表明坡度为 5°和 15°时,除了溶沟,其他两种岩面形态径流携沙能力均高于无裸岩;而坡度在 25°时,不同岩面形态坡面的径流携沙能力则均比无裸岩弱。不同坡度比较,各坡面的径流泥沙关系拟合方程的斜率均呈下降趋势,表明产流率与产沙率的线性关系随坡度的增大而减小,径流携沙能力逐渐减弱。

表 4 不同岩面形态坡面地下产沙量

形态	地下产沙量/g			
	5°	15°	25°	平均值
对照	48.4±41.3a	48.1±47.7a	20.9±24.4a	39.1
光滑	31.2±34.5a	21.0±25.5a	2.1±1.4a	18.1
溶穴	51.3±49.6a	24.1±13.5a	10.0±13.7a	28.5
溶沟	49.8±53.3a	44.2±51.2a	9.3±2.4a	34.4

注:同列不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。

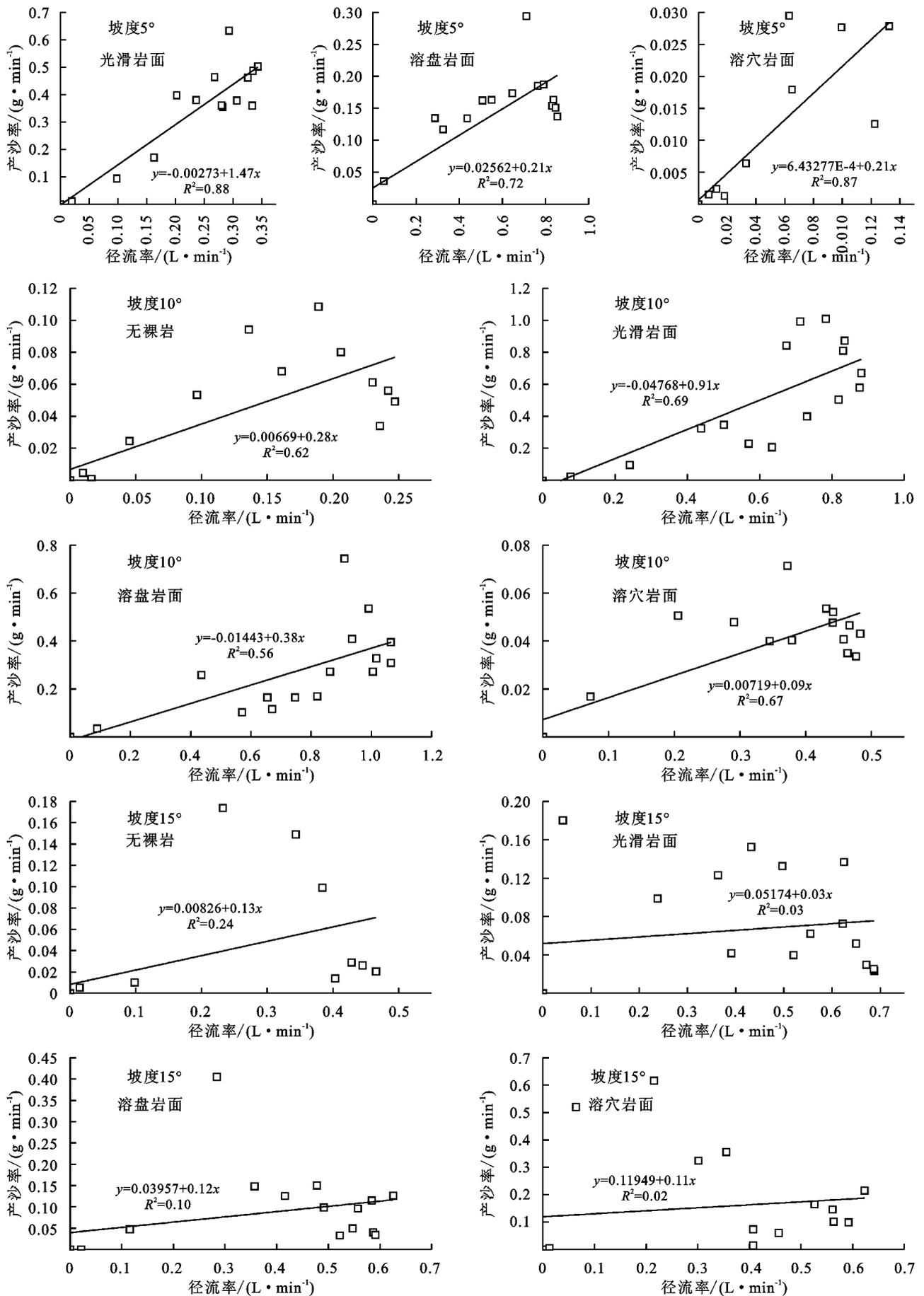


图 6 不同岩面形态与坡度下的地表径流泥沙关系

3 讨论

3种岩面形态均显著提升了坡面地表径流系数,同时降低了坡面地下径流系数。主要原因是与无裸岩相比,部分降雨被裸岩面拦截,汇聚在岩面形成岩面流,部分岩面流汇入地表径流对裸岩下方的坡面进行冲刷,与降雨共同作用于该坡面。地表裸露岩石与土壤形成了岩—土界面优先通道,部分岩面流沿着岩—土界面优先通道入渗到地下^[22-23],随着降雨时间的增加,土壤水分下渗,土槽中土壤含水量逐渐增加至饱和状态,降水入渗速率随之减小^[24],继而加快了地表径流的形成。这与Sohrt等^[25]的研究中降雨在裸岩面形成的径流沿岩土界面优先流动的迹象明显的现象一致,吴庆华等^[26]研究也表明,有优先通道发育的情况下地下初始产流更快。溶穴平均地表径流系数最高,可能是因为当降雨发生时,溶穴岩面汇集的大部分岩面流进入“溶穴”(直径约为8 cm)中,此时“溶穴”起到岩土界面优先通道的作用,大量岩面流通过“溶穴”快速入渗到土壤中。由于岩土界面突变接触,岩面流易进入岩土界面^[22],向附近土壤输送水分^[27],相比其他岩面,因“溶穴”这一优先通道的增加,大部分岩面流可直接入渗到较深层的土壤中,加之坡度的设置,入渗的水分因重力作用向下坡位运移,使得溶穴岩面下坡位的土壤含水量比其他坡面更快达到饱和状态,也更早产生地表径流,更多的降雨在下坡位转化为地表径流,地表径流系数也更高。地下产流过程中,随着坡度增加地下径流强度明显减少,不同岩面形态地下径流强度差异较小,但相对无裸岩有明显降低,这可能与地下孔隙的设置有关。随着坡度升高,地下孔隙位置也随之增高,地下孔隙产流时所需的蓄水量越大,因坡度增高重力作用更强使得土槽下方土壤水分更快饱和,更快产生地下径流,但土槽中上部土壤含水量相对较低,产生的地下径流减少,因此除溶穴外各坡面地下径流强度均有明显降低。此外岩面流的动能随坡度增加而增加^[28],对地表径流的影响加大而减少了对地下入渗的影响,因此各岩面形态坡面之间的地下产流的差异也较小。

3种岩面形态均明显提升了地表产沙量,降低了地下产沙量,与殷亮^[21]的研究中石牙汇集降雨形成径流加大了径流的冲刷能力,从而加剧土壤侵蚀量的结果相似。降水在岩面被截留并汇聚成岩面流向坡面,地表产流增多地下产流相应减少,且岩面较坡面具有更高的坡度,岩面流的动能较坡面地表径流的动

能更大,径流携带泥沙的能力更强^[29],因此不同岩面形态坡面地表产沙量更大。光滑的地表径流系数低于溶穴,但地表产沙量高于溶穴,原因可能是光滑产生的所有岩面流对坡面进行冲刷,但溶穴上部分岩面流进入溶穴向地下入渗,仅有一部分岩面流直接冲刷地表,加剧土壤侵蚀的作用相对较小。光滑、溶穴坡面地表产沙量均随坡度的增加呈现先增大后减少的趋势,这与张兴奇等^[30]的研究结果相似。坡度从5°增长到15°时,使雨滴沿着坡面的分力增大,坡面易产生径流,坡面地表径流的速度逐渐加快,径流动能与侵蚀力增加,产沙量也随之增大^[31]。坡度增长到25°时,坡面有效集雨面积相应减少,雨滴落到坡面的垂直分力也减小^[32],降雨侵蚀力降低,同时岩面所汇集的岩面流也相对减少,汇入地表径流的岩面流量随之减少,地表径流量减少,故产沙量也逐渐减少。这与张会茹等^[33]得出的在50 mm/h雨强下,随着坡度的增加,红壤坡面地表侵蚀量呈现先增加后减小的趋势,坡度20°附近存在临界坡度的结论相似。

岩面形态改变了地表径流与泥沙关系,光滑径流携沙能力在5°和15°时最高,无裸岩的径流携沙能力在15°时最高,但与其他坡面相差不大,这与黄晓虎等^[34]研究发现径流携沙能力随着坡度的增加逐渐增加的结果不同。光滑在5°和15°时,随着径流率的增长其径流携沙能力要高于其他岩面形态,在25°时又明显降低。这可能是因为光滑相比其他岩面形态,更多的岩面流直接与地表径流汇聚,加大了地表径流的动能,对地表的冲刷作用更大,携沙能力更强;溶穴由于部分岩面流通过溶穴直接向下入渗,相对较少的岩面流直接冲刷地表,冲刷地表的作用较弱。而溶沟虽然具有汇水作用,但岩面汇集的部分径流仅通过溶沟直接冲刷土壤,该部分径流动能较强;另外一部分径流需经过垂直断面流向土壤,该部分径流动能则有所减小,且由于雨强较小,溶沟汇集的径流量较少,其侵蚀力有限,因此溶沟的携沙能力较弱。坡度升高到25°后,岩面流对裸岩下方冲刷作用加强,在岩石下方形成浅坑,径流携带的泥沙有所堆积,同时由于有效集雨面积相对减少,产流量也随之减小,导致产沙量有所减小^[30],此时无裸岩虽然地表产流较少,但由于没有岩石覆盖,地表可侵蚀面积更大,径流携沙能力更强。

本试验采用混凝土浇筑而成的岩石,模拟西南喀斯特地区典型岩面形态的出露岩石,由于石灰岩与混凝土的透水性有一定差异,浇筑岩石粗糙程度与自然

出露岩石也有所区别,故仍存在一定局限性。因此,在今后的研究中,需加强野外降雨条件下出露岩石的岩面形态对喀斯特坡地产生沙特征的影响研究。

4 结论

(1) 3种岩面形态均显著提升了坡面地表径流系数,同时降低了地下径流系数,平均地表径流系数溶穴>光滑>溶沟>无裸岩,平均地下径流系数无裸岩>光滑>溶穴>溶沟。3种岩面形态的地表径流系数随着坡度升高均呈现先增后减的趋势,地下径流系数均随坡度的升高逐渐降低。

(2) 受岩面形态的影响,坡面地表与地下初始产流时间均有所提前,溶穴的地表初始产流时间与地下初始产流时间均最早,分别为15.1 min和9.9 min。光滑与溶穴的地表初始产流时间随坡度升高逐渐提前,溶沟的地表初始产流时间则随坡度升高呈现先提前后延迟的趋势,所有坡面地下初始产流时间均随坡度升高而延迟。

(3) 不同坡度下,光滑与溶穴均加剧了坡面地表产沙,溶沟则在坡度为15°时略微减少了地表产沙量,平均地表产沙量光滑>溶沟>溶穴>无裸岩。随着坡度升高,光滑与溶穴地表产沙量先增加后减少,56 mm/h雨强下在坡度15°~25°地表产沙量可能存在临界坡度;溶穴地表产沙量主要呈上升趋势。地下漏失并没有呈现明显规律,平均地下产沙量无裸岩>溶穴>溶沟>光滑。

(4) 在5°和15°坡面,3种岩面形态均提高了地表径流携沙能力,光滑地表径流携沙能力高于其他岩面形态,但在25°坡面,3种岩面形态均减弱了地表径流携沙能力,光滑的地表径流携沙能力最低。

参考文献:

- [1] 陈洪松,冯腾,李成志,等.西南喀斯特地区土壤侵蚀特征研究现状与展望[J].水土保持学报,2018,32(1):10-16.
- [2] 苏维词.中国西南岩溶山区石漠化的现状成因及治理的优化模式[J].水土保持学报,2002,16(2):29-32,79.
- [3] Dai Q, Peng X, Zhao L, et al. Effects of underground pore fissures on soil erosion and sediment yield on karst slopes [J]. *Land Degradation & Development*, 2017,28(7):1922-1932.
- [4] 张信宝,王世杰,曹建华,等.西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题[J].中国岩溶,2010,29(3):274-279.
- [5] 李阳兵,邵景安,王世杰,等.岩溶生态系统脆弱性研究[J].地理科学进展,2006,25(5):1-9.
- [6] 苏维词.喀斯特土地石漠化类型划分及其生态治理模式探讨[J].中国土地科学,2008,22(4):32-37.
- [7] 李瑞,陈康,刘瑞禄,等.基于小流域尺度的黔北喀斯特地区产生沙特征[J].农业工程学报,2019,35(11):139-147.
- [8] Gong T X, Zhu Y J, Shao M A. Effect of embedded-rock fragments on slope soil erosion during rainfall events under simulated laboratory conditions [J]. *Journal of Hydrology*, 2018,563:811-817.
- [9] Cerda A. Effects of rock fragment cover on soil infiltration, interrill runoff and erosion [J]. *European Journal of Soil Science*, 2001,52(1):59-68.
- [10] Lv J, Luo H, Xie Y. Effects of rock fragment content, size and cover on soil erosion dynamics of spoil heaps through multiple rainfall events [J]. *Catena*, 2019,172:179-189.
- [11] 王济,蔡雄飞,雷丽,等.不同裸岩率下我国西南喀斯特山区土壤侵蚀的室内模拟[J].中国岩溶,2010,29(1):1-5.
- [12] Rodrigo-Comino J, García-Díaz A, Brevik E C, et al. Role of rock fragment cover on runoff generation and sediment yield in tilled vineyards[J]. *European Journal of Soil Science*, 2017,68(6):864-872.
- [13] Dai Q, Peng X, Yang Z, et al. Runoff and erosion processes on bare slopes in the Karst Rocky Desertification Area [J]. *Catena*, 2017,152:218-226.
- [14] 宋兰,张玉启,何丙辉,等.喀斯特槽谷区岩石与坡面夹角对产流产沙过程的影响[J].水土保持学报,2022,36(3):9-15.
- [15] Smets T, Poesen J, Bochet E. Impact of plot length on the effectiveness of different soil-surface covers in reducing runoff and soil loss by water [J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2008,32(6):654-677.
- [16] 李瑞,盘礼东.岩石裸露与水土流失关系研究现状及石漠化因子研究存在的问题[J].水土保持学报,2021,35(5):10-15,23.
- [17] Fang Q, Zhao L, Hou R, et al. Rainwater transformation to runoff and soil loss at the surface and below-ground on soil-mantled karst slopes under rainfall simulation experiments [J]. *Catena*, 2022,215:106316.
- [18] Peng X, Dai Q, Li C, et al. Role of underground fissure flow in near-surface rainfall-runoff process on a rock mantled slope in the karst rocky desertification area [J]. *Engineering Geology*, 2018,243:10-17.
- [19] Martínez-Zavala L, Jordán A. Effect of rock fragment cover on interrill soil erosion from bare soils in Western Andalusia, Spain [J]. *Soil Use and Management*,

- 2008,24(1):108-117.
- [20] Han Z, Wang X Y, Song D D, et al. Response of soil erosion and sediment sorting to the transport mechanism on a steep rocky slope [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019,44(12):2467-2478.
- [21] 殷亮.喀斯特石牙出露坡地产生沙特征及影响因素研究[D].昆明:云南大学,2017.
- [22] Fu Z Y, Chen H S, Zhang W, et al. Subsurface flow in a soil-mantled subtropical dolomite karst slope: A field rainfall simulation study [J]. *Geomorphology*, 2015,250:1-14.
- [23] 罗为群,蒋忠诚,韩清延,等.岩溶峰丛洼地不同地貌部位土壤分布及其侵蚀特点[J].*中国水土保持*,2008,321(12):46-49.
- [24] 甘卓亭,叶佳,周旗,等.模拟降雨下草地植被调控坡面土壤侵蚀过程[J].*生态学报*,2010,30(9):2387-2396.
- [25] Sohrt J, Ries F, Sauter M, et al. Significance of preferential flow at the rock soil interface in a semi-arid karst environment [J]. *Catena*, 2014,123:1-10.
- [26] 吴庆华,朱国胜,崔皓东,等.降雨强度对优先流特征的影响及其数值模拟[J].*农业工程学报*,2014,30(20):118-127.
- [27] Wang D, Shen Y, Huang J, et al. Rock outcrops re-distribute water to nearby soil patches in karst landscapes [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016,23:8610-8616.
- [28] 车明轩,宫渊波, Khan M N, 等.不同雨强、坡度对秸秆覆盖保持水土效果的影响[J].*水土保持学报*,2016,30(2):131-135,42.
- [29] 李彦海,陈晓燕,韩珍,等.紫色土细沟水流输沙能力对近地表水流作用的响应[J].*土壤学报*,2021,58(3):657-664.
- [30] 张兴奇,顾礼彬,张科利,等.坡度对黔西北地区坡面产流产沙的影响[J].*水土保持学报*,2015,29(4):18-22,72.
- [31] 闫帅旗,朱冰冰,边焯.不同覆盖位置下草地坡面水流路径长度变化特征[J].*农业工程学报*,2021,37(3):116-123.
- [32] 蔡雄飞,赵士杰,王济,等.基于侵蚀过程的喀斯特坡耕地土壤重金属迁移机制[J].*科学技术与工程*,2021,21(23):9767-9774.
- [33] 张会茹,郑粉莉.不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J].*水土保持学报*,2011,25(3):40-43.
- [34] 黄晓虎,王常明,宋朋燃,等.黄土边坡降雨侵蚀特征的物理模拟试验研究[J].*工程地质学报*,2015,23(4):725-730.

(上接第51页)

- [51] 刘文超,刘纪远,匡文慧.陕北地区退耕还林还草工程土壤保护效应的时空特征[J].*地理学报*,2019,74(9):1835-1852.
- [52] 李亚丽,杨粉莉,杨联安,等.近40年榆林市土地利用空间格局变化及影响因素分析[J].*干旱区地理*,2021,44(4):1011-1021.
- [53] 封建民,文琦,郭玲霞.风沙过渡区土地利用变化对生态系统服务价值的影响:以榆林市为例[J].*水土保持研究*,2018,25(4):304-308.
- [54] Nunes A N, De Almeida A C, Coelho C O A. Impacts of land use and cover type on runoff and soil erosion in a marginal area of Portugal [J]. *Applied Geography*, 2011,31(2):687-699.
- [55] 吴蕾,穆兴民,高鹏,等.黄土高原地区植被盖度对产流产沙的影响[J].*水土保持研究*,2019,26(6):133-138,144.
- [56] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].*中国科学院院刊*,2017,32(1):11-19.
- [57] 赵安周,张安兵,刘海新,等.退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析[J].*自然资源学报*,2017,32(3):449-460.
- [58] 张宝庆,田磊,赵西宁,等.植被恢复对黄土高原局地降水的反馈效应研究[J].*中国科学:地球科学*,2021,51(7):1080-1091.
- [59] 孙善良,张小平,张志斌.陕西省2000—2018年土地利用时空演变及驱动因素[J].*水土保持通报*,2021,41(4):339-349,369.