喀斯特槽谷区坡面集中水流曼宁系数变化特征

曾荣昌，李天阳，何丙辉

（西南大学 资源环境学院 三峡库区生态环境教育部重点实验室，重庆 400715）

摘　要：[目的] 探究喀斯特槽谷区不同岩石与坡面夹角影响下地表集中水流阻力变化特征，为该区土壤侵蚀模型构建提供科学依据。[方法] 在 3 个坡度(10°，15°，20°)，3 个冲刷流量(5，7.5，10 L/min)和 6 个岩石与坡面夹角角度(30°，60°，90°，120°，150°，180°)组合条件下开展室内放水冲刷试验，研究喀斯特槽谷区不同岩石与坡面夹角下地表集中水流曼宁系数的变化规律及其影响因素。[结果] ①地表集中水流曼宁系数 n 随冲刷历时呈迅速增大再缓慢增长或趋于稳定的变化趋势。不同夹角的 n 值大小顺序为：$n_{180°}>n_{150°}>n_{90°}>n_{30°}>n_{120°}>n_{60°}$。②当岩石与坡面夹角大于 30°时，$n$ 与水深 h 显著相关，夹角为 30°时，二者关系不显著；试验条件下，n 与雷诺数 Re 关系不显著，与弗汝德数 Fr 呈显著幂函数负相关。③相对水深曼宁系数 n/h 随夹角增大呈先增后减的变化趋势。④岩石与坡面夹角大于 30°时，n/h 与 Re 均呈幂函数负相关，夹角为 30°时，二者关系不显著；不同岩石与坡面夹角的 n/h 与 Fr 关系均不显著。[结论] 喀斯特槽谷区坡面集中水流曼宁系数 n 受岩石与坡面夹角的显著影响，随夹角增大总体呈先减后增的趋势。

关键词：喀斯特；岩石与坡面夹角；集中流；曼宁系数

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2020)04-0266-08　　**中图分类号**：S157.1

文献参数：曾荣昌，李天阳，何丙辉. 喀斯特槽谷区坡面集中水流曼宁系数变化特征[J]. 水土保持通报，2020，40(4)：266-273. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2020.04.036；Zeng Rongchang，Li Tianyang，He Binghui. Manning roughness coefficient characteristics of concentrated flow on slope in karst trough valley hillslope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(4)：266-273.

Manning Roughness Coefficient Characteristics of Concentrated Flow on Slope in Karst Trough Valley Hillslope

Zeng Rongchang，Li Tianyang，He Binghui

(*College of Resources and Environment*，*Southwest University*，*Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region*，*Ministry of Education*，*Chongqing* 400715，*China*)

Abstract：[Objective] The variation characteristics of concentrated water flow resistance influenced by different angles between bedrocks and ground surface on the hillslope were explored to provide scientific basis for the construction of soil erosion model in the karst trough valley area. [Methods] To investigate the changes of Manning roughness coefficient (n) of concentrated flow and its influencing factors on the karst trough valley hillslope with different angles between bedrocks and ground surface，the laboratory scouring simulation experiments were conducted under the conditions of three slope gradients (10°，15° and 20°)，three inflow rates (5，7.5，10 L/min) and six angles between bedrocks and ground surface (30°，60°，90°，120°，150° and 180°). [Results] ① The Manning coefficient n of concentrated flow increased rapidly and then increased slowly or tended to be stable with the scouring time. The average value of n was ranked as：180°>150°>90°>30°>120°>60°. ② When the angle between rock and slope surface was greater than 30°，the relationship between n and water depth (h) was significant，and when the angle was 30°，the relationship

收稿日期：2020-04-01　　**修回日期**：2020-05-14

资助项目：国家重点研发计划课题“喀斯特槽谷区土壤地上/下流/漏失过程与保护技术研发及示范”(2016YFC0502303)；国家自然科学基金项目“喀斯特槽谷区土壤地上/下流/漏失过程与模拟研究”(41771312)

第一作者：曾荣昌(1995—)，男(汉族)，河南省商城县人，硕士研究生，研究方向为城市水土保持。Email：zrc1995@email.swu.edu.cn。

通讯作者：何丙辉(1966—)，男(汉族)，湖南省汨罗市人，博士，教授，博士生导师，主要从事土壤侵蚀与小流域综合治理研究。Email：hebinghui@swu.edu.cn。

between n and Reynolds number (Re) was not significant, and there was a significant negative power function correlation between n and Froude number (Fr). ③ The ratio of Manning roughness coefficient to flow depth (n/h) increased at first and then decreased with the increase of angles between bedrocks and ground surface. ④ The n/h presented negative power correlation with Re when the angle between bedrocks and ground surface was greater than 30 °, and n/h showed no significant relationship with Re when the angle between bedrocks and ground surface was 30°. The relationship between n/h and Fr was always not significant. [Conclusion] Manning coefficient n was strongly affected by the angles between bedrocks and ground surface, and decreased first and then increased with the increase of angles between bedrocks and ground surface on the karst trough valley hillslope.

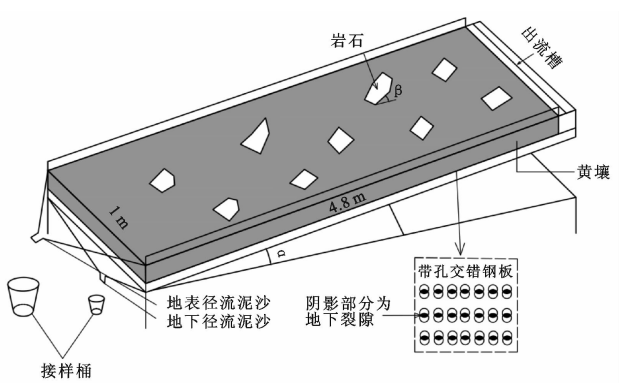
Keywords: karst; angles between bedrocks and ground surface; concentrated flow; Manning roughness coefficient

坡面水流水动力学变化对坡面产流产沙特性有决定作用,常用的水流阻力参数包括 Darcy-Weisbach阻力系数 f 和曼宁系数 n,其中曼宁系数 n 常用于沟渠流的阻力分析[1]。了解水流阻力影响因素及其变化规律是认识坡面土壤侵蚀过程和动力学机制的基础,有助于构建坡面土壤侵蚀预报模型[2-3]。关于水流阻力的研究中,张科利等[4]研究表明受沟道冲刷形态的影响,n 的变化与细沟中的径流量及坡度的陡缓有关。汤珊珊等[5]研究发现相比较于其他水动力学参数,相对水深(h)曼宁系数 n/h 可以更好预测水力侵蚀过程中输沙量和产流。Xia 等[6]研究发现随着岩石覆盖率的增加 n 和 f 均随之增大。同时,前人研究发现水流阻力与其他水力学参数之间存在一定的数学关系[7-10]。如拜亚茹等[7]研究发现糙率系数 n 与水深 h 的关系受流态的影响。李朝栋等[10]研究表明 n 与雷诺数 Re 和弗汝德数 Fr 之间存在着幂函数关系。以上研究多关注于土壤结构单一、空间结构为单层的非喀斯特区域,而对于具有特殊二元地质结构的喀斯特地区的相关研究还不多见。西南喀斯特槽谷区紧密式箱型背斜/向斜构造、岩层倾角大、典型顺/逆向边坡地质构造发育充分等特征造成不同倾角岩层出露地面,使地表裸露岩石沿坡向与斜坡坡面形成不同夹角[11],导致其存在着不同的产流产沙方式和地表径流水力学特性[12],且在降雨过程中易汇聚局部径流成集中流[13],造成剧烈的土壤侵蚀。目前,已有较多针对喀斯特槽谷区土壤侵蚀的研究,但这些研究多集中于水土流失方式[14-15],产流产沙变化[16-17]等方面,从水动力学角度阐述喀斯特槽谷区土壤侵蚀特征的研究还不多,特别是关于水流曼宁系数变化特征的研究更是少见。为此,本文通过模拟喀斯特槽谷区不同岩石与斜坡夹角条件坡面和地下裂隙双层空间结构,采用室内土槽放水冲刷试验,研究在限定裂隙下,不同坡度、流量和岩石与斜坡坡面夹角条件下的坡面集中流曼宁系数变化特征,揭示了喀斯特槽谷区坡面集中流曼宁系数随时间变化规律及其与其他水力学参数之间的关系,以期为建立喀斯特槽谷区土壤侵蚀预报模型提供科学依据。

1　试验方法

1.1　供试仪器

试验土槽为自制的可调孔(裂)隙度的变坡钢槽(见图 1),土槽长 5.0 m,宽 1.0 m,深 0.2 m。通过错位调节土槽底部 0.2 m 处两块可调节的带圆孔钢槽地板来模拟地下裂隙,地下裂隙度为地下裂隙水平投影面积占钢槽底板总面积的百分比[12],可在 0%～5%范围内调节。土槽上、下端分别设置地表径流、地下裂隙流集流槽,冲刷水流从置于土槽顶端的稳流水箱(长 1.0 m,宽 0.2 m,深 0.2 m)出流,试验冲刷长度为 4.8 m。前期预试验表明,土槽宽度为 1.0 m 的条件下,集中流在坡面形成的细沟能够自由发育不受边界限制,土槽尺寸满足试验要求。



注:图中坡度 $\alpha=10°,15°,20°$;岩石与坡面夹角 $\beta=30°,60°,90°,120°,150°,180°(0°)$。

图 1　坡面放水冲刷试验装置

1.2　供试材料处理

试验土壤于 2018 年 6 月采自重庆市北碚区鸡公山(106°27′19″E,29°47′41″N)喀斯特槽谷区碳酸盐发育的石灰性土坡耕地土壤,土壤粒径组成及容重详见表 1。试验前将土壤风干并过 10 mm 筛,计算填土

量后按上层 15 cm(容重 1.2 g/cm³),下层 5 cm(容重 1.3 g /cm³)分层填装土壤于试验土槽内。土槽边界处涂抹凡士林,填土时压实耙平土壤,两边填高以减小边缘效应。填土完成后,为模拟喀斯特槽谷区野外实际条件,采用坡度倾斜仪将 9 块直径大于 25 cm 的不规则碳酸盐石块按一定岩石裸露率及设计夹角角度随机排列装于土槽内,压实岩石与土壤接触面。

表 1 试验用土壤机械组成及容重

不同粒径土壤比例			容重/(g·cm⁻³)
2~0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm	
20.68%	51.09%	28.23%	1.21

1.3 试验方案

室内模拟试验于 2019 年 4 月在西南大学后山人工降雨大厅内进行。根据野外调查重庆市酉阳喀斯特槽谷区典型基岩裸露坡面,本试验设置岩石裸露率为 15%,地下裂隙度为 2%(轻度发育),岩石与坡面夹角设置为 30°,60°,90°,120°,150°和 180°。夹角为 30°和 60°的岩石倾向与坡向一致;夹角 120°和 150°的岩石倾向与坡向相反;夹角为 90°和 180°时,岩石分别与坡面垂直和平行。根据研究区典型坡度和雨强,试验坡度设计为 10°,15°和 20°,流量设计为 5,7.5,10 L/min。所有试验均重复 2 次,共计 108 场试验。

试验开始前,调整地下裂隙度达到设计水平 2%。使用侧喷式降雨器降小雨至地下产生均匀不间断漏渗且地表有蓄流时,停止降雨,使土槽中土壤达到饱和,放置 48 h。试验开始时,将坡度及流量均调整至设计水平。待出流稳定后,调整水箱与土槽过渡段左右高度使水流集中在一侧出流。试验冲刷历时为 18 min,在前 6 min 每隔 1 min 分别于距底端 1,2.5,3.5 m 处设置的测定断面测定流速、水深及水宽,后 12 min 每隔 1.5 min 在相同位置测定流速、水深及水宽。采用染色法测定水流流速,测距为 0.5 m;用薄钢尺量测水深及水宽,用温度计测量水流温度用于计算水运动黏滞系数。试验结束后,根据冲刷沟道深度更换表层土壤,将表面抹平打毛后为下一场试验作准备。

1.4 数据处理及分析

曼宁系数 n 计算公式为:

$$n=V^{-1}\cdot S^{1/2}\cdot R^{2/3} \tag{1}$$

式中:V 为水流平均流速(m/s);R 为水力半径(m),$R=A/P$,A 为过水断面面积(m²);P 为湿周(m),$P=2h+b$,h 为流深(m);b 为径流宽(m);S 为水力坡降,$S=\sin\theta$,θ 为试验坡度(°)。

径流雷诺数 Re 是判断水流流态的重要指标,当 Re<900 时,水流为层流;900<Re<2 000 时,水流为过渡流;Re>2 000 时水流处于紊流状态[18]。其计算公式为:

$$\mathrm{Re}=VR/v \tag{2}$$

($v=0.017\ 75\times10^{-4}/(1+0.033\ 7\ t+0.000\ 221\ t^2)$

式中:t 为水温(℃)。

弗汝德数 Fr 计算公式为:

$$\mathrm{Fr}=V/\sqrt{gh} \tag{3}$$

式中:g 为重力加速度(m/s²)。

1.5 数据分析方法

采用 Excel 2016 进行试验数据的整理。利用 SPSS 24.0 进行数据分析:采用单因素方差(one-way ANOVA)对不同岩石与坡面夹角条件的水流曼宁系数和相对水深曼宁系数进行分析,用 Duncan 法进行多重比较;对 n 与 h,Re,Fr 以及 n/h 与 Re,Fr 进行回归分析并检验方程的显著性。本文显著水平设置为:$p<0.05$ 为关系显著,$p<0.01$ 为关系极显著。使用 Origin 2018 及 AutoCAD 2018 作图。

2 结果与分析

2.1 岩石与坡面夹角对曼宁系数 n 的影响

试验条件下曼宁系数 n 随冲刷历时的变化如图 2 所示。由图 2 可知,n 在试验前 6 min 内迅速增大,之后随着冲刷历时的延长呈缓慢增长或趋于稳定的趋势。这是因为喀斯特槽谷区地表裸露岩石与坡面形成不同夹角,在试验条件下,前 6 min 内集中流迅速冲刷出沟道,水流经过岩石时由于阻挡和岩土界面发生改变,水深和流速随之变化,混乱度增大,易发生剧烈侵蚀,岩石下部产生较深跌水,沟道糙度增加,这与在野外所观察到的现象一致[13]。同时沟道中径流实际水力坡降随着沟道深度增大而不断增大,岩石对水流阻挡作用增强,流速减小,使得 n 明显增大[19-20]。随着冲刷继续进行,沟道加深,在地下裂隙影响下地下漏渗增加[21],地表集中流动能减小,水流阻力较大,冲刷能力减小,沟道形态变化程度较小,n 呈缓慢增长或趋于稳定[22]。试验条件下,n 随流量的增大而减小。这可能是由于流量变化使得相对糙率和沟道形态发生变化,其中糙率减小的程度大于形态变化引起的增大程度,二者综合作用使得 n 随流量的增大而减小[4]。试验条件下,水流曼宁系数变化于 0.036~0.116,这与傅斌等[23]研究结果相比较小,而相对于田风霞等[24]研究结果较大。原因与喀斯特槽谷区下垫面条件及坡面集中水流特性有关。喀斯特槽谷区坡面岩石改变了地表微地形,增大了地表糙度,同时地下孔隙也减少了地表径流能量,使得该区域水流曼

宁系数相对于非喀斯特区域较大;而坡面集中水流具有流速和水深较大,水流能量较集中等特征,这与在降雨条件下形成的坡面流不同。以上因素使得本试验研究结果相较于前人有所不同。

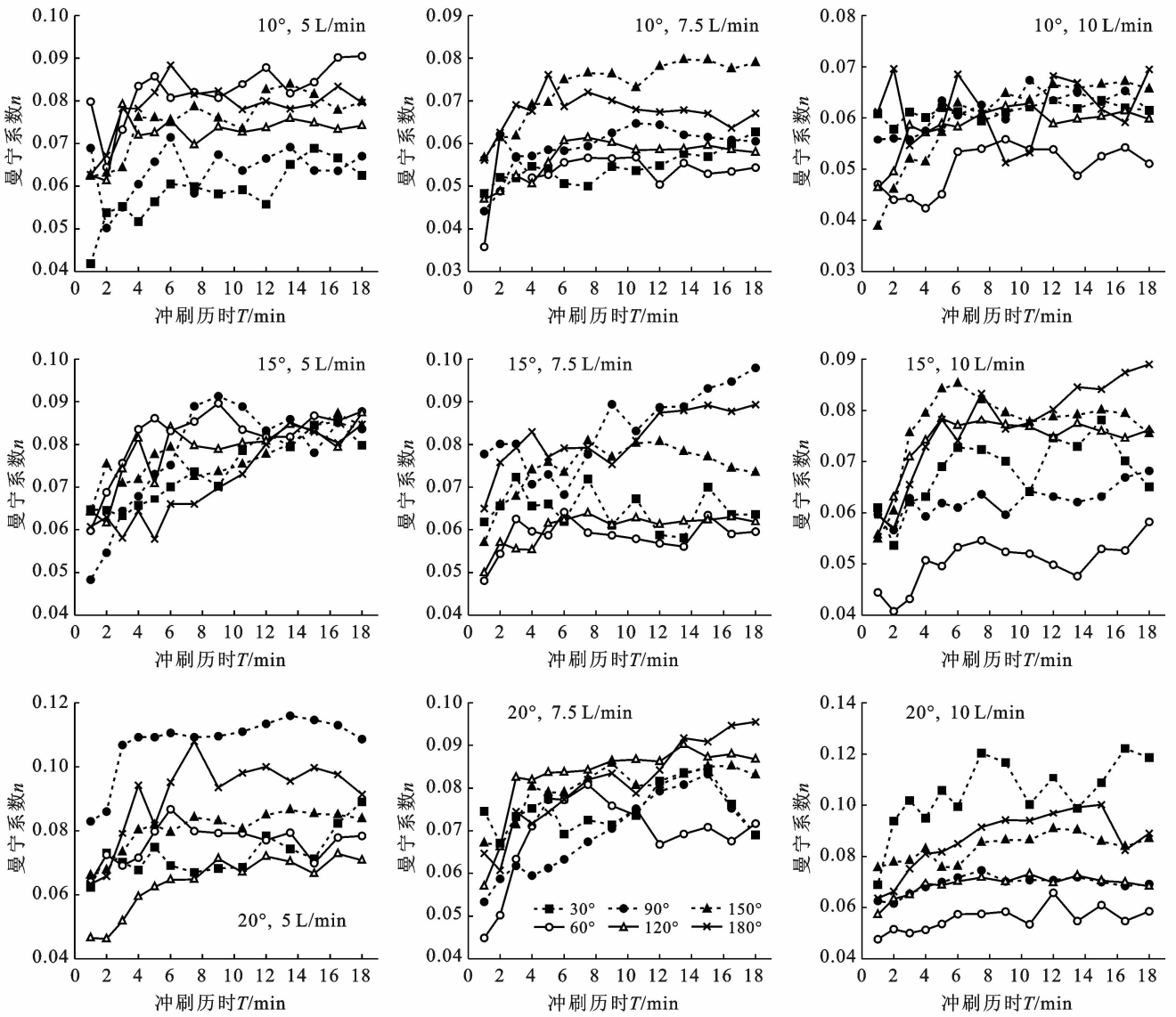
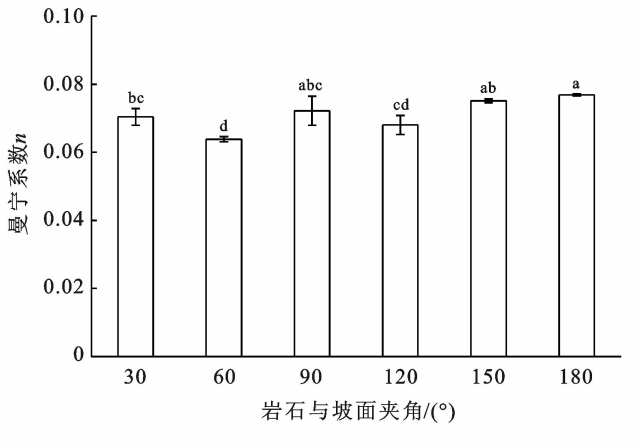


图 2　坡面集中水流曼宁系数 n 随冲刷历时的变化

不同岩石与坡面夹角对 n 的影响如图 3 所示。夹角角度分别为 30°,60°,90°,120°,150°和 180°时,n 平均值分别为 0.070,0.064,0.072,0.068,0.075,0.077。由图 3 可知,岩石与坡面夹角小于等于 90°时 n 随夹角角度增大而先减小后增大;岩石与坡面夹角大于 90°时,n 随夹角角度增大而增大。这种现象可能和与坡面形成不同夹角的岩石影响坡面水流运动及其能量变化进而影响到沟道形态发育有关。岩石与坡面夹角小于等于 90°时,岩石倾向与坡向相同,此时岩石对坡面水流有促进作用[25],水流流速相对较大,在夹角 30°表现较为明显。试验观察到此时岩石更易影响水流集中状态,细沟形态复杂,水流湿周增大。由于岩石阻力较小,水流能量较大,水流岩石周围易产生跌水和壅水,沟道糙度增大,n 反而较大。而随着夹角增大,岩石分散水流能力减弱,但阻挡作用也增大,流速减小,水流阻力增大,n 随之增大。岩石与坡面夹角大于 90°时,随着夹角角度增大,岩石维持水流处于集中状态,阻挡作用增强。水深有所增大的同时,流速减小较多,使得水流总体能量随之减小。水流路径在岩石影响下更易弯曲,产生侧切,流程增加,水流阻力和过水断面粗糙度随之增大[18],水流克服岩石阻挡做功增加,水流流速减小,n 增大。岩石与坡面夹角为 180°时径流路径最长,在湿周和岩石阻挡能力较大的综合作用下,水流阻力和过水断面糙度较大,此时 n 为最大[10]。对试验条件下岩石与坡面夹角(x)与 n 进行拟合得到:

$$n=7.3\times10^{-7}x^2-9.3\times10^{-5}x+0.071 \quad (R^2=0.626,\ p=0.228) \quad (4)$$

根据公式(4)可以看出,二者关系不显著。



注:不同小写字母表示不同岩石与坡面夹角间差异显著性($p<0.05$)。下同。

图 3 不同岩石与坡面夹角下曼宁系数 n 的变化

2.2 曼宁系数 n 与水深 h 的关系

试验条件下 n 与水深 h 的关系如表 2 所示。通过对不同坡度、流量和岩石与坡面夹角条件下的 n 与 h 进行函数拟合发现,坡度为 10°,流量为 10 L/min,夹角为 150°时的决定系数最大。由表 2 可知,坡度为 15°,流量为 7.5 L/min,夹角为 30°和坡度为 20°,流量为 5 L/min、夹角为 90°条件下,n 随 h 的增大而减小,但二者关系均不显著。在其他条件下,n 随 h 的增大而增大,且存在着显著的幂函数正相关关系,这与 Fraga 等[26]研究结果不一致。这可能是因为本试验为集中出流,水流在试验前期快速冲刷出沟道,随着细沟不断加深,侵蚀沟内产生了一定间距的跌水,在岩石影响下集中水流沿沟道能量分布不具有连续性,存在水深和侵蚀突变点[27],水流所塑造的沟道形态也更复杂。岩石本身增强了水流本身的扰动,使得水深增大的同时增强水流阻力作用[28]。岩石与坡面夹角 30°条件下 n 与 h 拟合效果较差,决定系数 R^2 变化于 0.025~0.801;夹角为 60°,90°,120°,150°和 180°时,二者拟合效果较好,相关性显著。这与岩石与坡面夹角 30°条件下岩石更易分散和改变径流路径,在地下裂隙和岩石影响下冲刷过程和沟道发育更为复杂有关。

表 2 坡面集中水流曼宁系数 n 与水深 h 的关系

坡度/(°)	流量/(L·min^{-1})	岩石与坡面夹角																	
		30°			60°			90°			120°			150°			180°		
		a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2
10	5	0.39	0.45	0.505*	2.36	0.75	0.832*	0.14	0.16	0.145	0.21	0.24	0.489*	0.42	0.39	0.886*	1.14	0.62	0.617*
	7.5	0.70	0.61	0.693*	1.50	0.69	0.582*	2.58	0.88	0.562*	0.53	0.53	0.278	3.44	0.91	0.935*	0.16	0.20	0.111
	10	0.07	0.04	0.025	0.50	0.51	0.631*	0.53	0.51	0.343	0.82	0.63	0.609*	1.24	0.71	0.960*	0.15	0.20	0.168
15	5	1.09	0.66	0.801*	2.59	0.78	0.852*	36.03	1.35	0.704*	0.71	0.49	0.563*	1.48	0.69	0.830*	1.41	0.71	0.539*
	7.5	0.05	−0.07	0.019	1.12	0.70	0.802*	1.21	0.58	0.743	2.98	0.86	0.835*	3.46	0.90	0.509*	2.10	0.78	0.656*
	10	0.21	0.28	0.273	0.46	0.48	0.740*	0.19	0.25	0.342	105.66	1.74	0.626*	8.30	1.15	0.698*	0.76	0.54	0.813*
20	5	0.46	0.41	0.492*	0.60	0.45	0.415	0.06	−0.15	0.037	6.15	0.95	0.624*	1.66	0.68	0.865*	5.18	0.94	0.488*
	7.5	0.19	0.41	0.179	3.38	0.92	0.237	1.72	0.75	0.915*	22.45	1.30	0.797*	6.80	1.06	0.577*	0.49	0.41	0.837*
	10	1.52	0.67	0.215	0.24	0.33	0.369	0.45	0.43	0.116	1.11	0.65	0.790*	0.47	0.42	0.641*	2.48	0.88	0.761*

注:①n 与 h 的关系式为 $n=ah^b$。②R^2 值 * 表示在 $p<0.01$ 水平极显著相关,下划线表示在 $p<0.05$ 水平显著相关。下同。

2.3 曼宁系数 n 与雷诺数 Re、弗汝德数 Fr 的关系

在试验条件下,对 n 与 Re 分别进行直线、对数、幂函数拟合,结果如表 3 所示。由表 3 可知,总体上,直线方程的决定系数 R^2 比对数方程和幂函数方程要大,直线方程更适合用来描述 n 与 Re 的关系,这与 Emmett 等[29]研究结果一致。n 与 Re 之间关系受坡度、流量和岩石与坡面夹角改变的影响,不呈现特定的正负相关函数关系。这可能是随着冲刷进行在地下裂隙、沟道糙度以及岩石阻挡的作用下流速和水深综合作用的结果。直线方程的 R^2 普遍不高,其中最大值出现在坡度 15°,流量 7.5 L/min,夹角为 180°情况下,为 0.882,最小值出现在坡度 10°,流量 5 L/min,夹角为 90°情况下,为 0.001。说明在本试验条件下,二者关系不显著($p>0.05$),雷诺数 Re 不适合用来描述曼宁系数 n,这可能是受岩石与坡面夹角和喀斯特槽谷区特殊二元地质结构影响,使得试验过程中水深和流速变化复杂,Re 变化规律不明显,从而影响上述关系。王仁新等[28]的研究也获得类似结果。

表 3　曼宁系数 n 与雷诺数 Re 之间的关系

坡度/(°)	流量/(L·min^{-1})	关系式	岩石与坡面夹角 30° a	30° b	30° R^2	60° a	60° b	60° R^2	90° a	90° b	90° R^2	120° a	120° b	120° R^2	150° a	150° b	150° R^2	180° a	180° b	180° R^2
		直线	-7.63×10^{-6}	0.07	0.067	3.07×10^{-5}	0.05	0.306	5.22×10^{-7}	0.06	0.001	8.59×10^{-6}	0.06	0.029	3.86×10^{-5}	0.03	0.635*	3.20×10^{-5}	0.05	0.128
	5	对数	−0.01	0.16	0.067	0.03	−0.12	0.277	−0.001	0.07	0.002	0.01	0.02	0.022	0.04	−0.21	0.603*	0.03	−0.11	0.124
		幂函数	0.28	−0.21	0.050	0.006	0.37	0.266	0.07	−0.007	0.001	0.03	0.13	0.030	0.001	0.57	0.622*	0.01	0.36	0.115
		直线	-1.03×10^{-5}	0.08	0.405	-3.46×10^{-6}	0.06	0.008	-1.61×10^{-5}	0.09	0.139	-2.37×10^{-5}	0.11	0.513*	-4.76×10^{-5}	0.16	0.556	-1.22×10^{-5}	0.09	0.223
10	7.5	对数	−0.03	0.25	0.408	−0.005	0.09	0.009	−0.04	0.33	0.139	−0.06	0.52	0.517*	−0.09	0.76	0.550*	−0.03	0.27	0.238
		幂函数	2.03	−0.47	0.413	0.06	−0.02	0.001	9.02	−0.66	0.142	265.37	−1.81	0.512*	2.37×10^{3}	−1.38	0.583*	1.15	−0.37	0.211
		直线	-3.97×10^{-6}	0.07	0.142	-1.59×10^{-5}	0.08	0.203	-1.87×10^{-5}	0.10	0.493*	-1.23×10^{-5}	0.09	0.260	4.21×10^{-5}	−0.05	0.581*	-3.52×10^{-6}	0.07	0.026
	10	对数	−0.01	0.12	0.135	−0.03	0.25	0.197	−0.04	0.37	0.492*	−0.03	0.28	0.239	0.11	−0.77	0.583*	−0.005	0.10	0.025
		幂函数	0.15	−0.12	0.139	3.48	−0.57	0.206	10.66	−0.68	0.500*	3.41	−0.53	0.245	1.91×10^{-8}	1.91	0.541*	0.12	−0.09	0.024
		直线	-3.34×10^{-5}	0.14	0.783*	2.42×10^{-5}	0.05	0.206	-8.54×10^{-5}	0.20	0.689*	-3.93×10^{-6}	0.09	0.004	9.26×10^{-6}	0.06	0.006	-1.79×10^{-5}	0.10	0.557*
	5	对数	−0.07	0.59	0.777*	−0.17	0.04	0.24	−0.12	0.98	0.676*	−0.005	0.12	0.004	0.02	−0.05	0.007	−0.03	0.28	0.566*
		幂函数	71.18	−0.90	0.761*	0.003	0.47	0.232	2.13×10^{3}	−1.72	0.623*	0.14	−0.08	0.006	0.02	0.19	0.005	1.46	−0.42	0.595*
		直线	-5.53×10^{-6}	0.08	0.068	-6.47×10^{-6}	0.07	0.041	3.42×10^{-5}	0.04	0.191	-1.42×10^{-5}	0.09	0.156	-1.46×10^{-5}	0.11	0.090	-2.68×10^{-5}	0.12	0.882*
15	7.5	对数	−0.01	0.14	0.058	−0.02	0.18	0.038	0.04	−0.21	0.197	−0.03	0.30	0.151	−0.04	0.35	0.085	−0.05	0.43	0.902*
		幂函数	0.21	−0.16	0.062	0.61	−0.30	0.049	0.02	0.50	0.201	3.86	−0.54	0.155	4.86	−0.54	0.096	6.69	−0.60	0.911*
		直线	-4.04×10^{-3}	0.08	0.049	9.93×10^{-6}	0.03	0.129	-1.43×10^{-6}	0.07	0.006	-3.13×10^{-5}	0.14	0.740*	-2.94×10^{-5}	0.15	0.716*	-4.48×10^{-5}	0.15	0.249
	10	对数	−0.01	0.13	0.030	0.02	−0.09	0.129	−0.003	0.09	0.008	−0.07	0.65	0.724*	−0.08	0.73	0.723*	−0.07	0.59	0.233
		幂函数	0.17	−0.12	0.031	0.003	0.39	0.136	0.09	−0.05	0.007	419.83	−1.12	0.740*	1.10×10^{3}	−1.22	0.735*	82.31	−0.94	0.227
		直线	-1.14×10^{-5}	0.09	0.042	-2.04×10^{-5}	0.11	0.327	-4.35×10^{-5}	0.16	0.522	-3.07×10^{-5}	0.10	0.239	-2.43×10^{-5}	0.13	0.079	-1.62×10^{-5}	0.12	0.410
	5	对数	−0.02	0.21	0.040	−0.04	0.37	0.333	−0.06	0.51	0.521	−0.04	0.35	0.218	−0.05	0.43	0.083	−0.03	0.28	0.349
		幂函数	0.44	−0.24	0.038	3.54	−0.51	0.325	6.17	−0.58	0.516	12.51	−0.74	0.247	7.39	−0.60	0.078	0.87	−0.31	0.361
		直线	-2.98×10^{-6}	0.08	0.033	-2.23×10^{-5}	0.12	0.863*	-4.24×10^{-5}	−0.03	0.416	-4.72×10^{-5}	0.18	0.614*	1.24×10^{-5}	0.05	0.036	-5.39×10^{-5}	0.15	0.255
20	7.5	对数	−0.01	0.12	0.023	−0.06	0.48	0.851*	0.09	−0.65	0.412	−0.09	0.80	0.591*	−0.03	−0.16	0.035	−0.07	0.56	0.263
		幂函数	0.14	−0.08	0.024	72.32	−0.91	0.871*	1.59	1.38	0.420	1.20×10^{3}	−1.26	0.560*	0.004	0.37	0.030	27.16	−0.82	0.240
		直线	-4.82×10^{-5}	0.21	0.495*	2.41×10^{-6}	0.05	0.021	-1.98×10^{-5}	0.11	0.392	-1.65×10^{-6}	0.07	0.002	-1.13×10^{-5}	0.11	0.281	-2.83×10^{-5}	0.16	0.785*
	10	对数	−0.11	0.93	0.476*	0.007	−0.002	0.027	−0.04	0.39	0.375	−0.003	0.09	0.001	−0.03	0.33	0.274	−0.07	0.63	0.765*
		幂函数	520.44	−1.10	0.465*	0.02	0.14	0.032	9.43	−0.64	0.391	0.12	−0.08	0.003	1.81	−0.04	0.279	73.55	−0.87	0.768*

注:表中 n 与 Re 的关系式分别为:$n=a\mathrm{Re}+b$(直线);$n=a\ln(\mathrm{Re})+b$(对数);$n=a\mathrm{Re}^{b}$(幂函数);a,b 分别为关系式系数及常量。

对各岩石与坡面夹角条件下 n 与 Fr 关系进行回归分析,得到关系式如表 4 所示。

表 4　各岩石与坡面夹角条件下曼宁系数 n 与弗汝德数 Fr 的关系

岩石与坡面夹角/(°)	n−Fr 关系	R^2	P
30	$n=0.059\mathrm{Fr}^{-0.621}$	0.153	0.298
60	$n=0.056\mathrm{Fr}^{-0.758}$	0.668	0.007
90	$n=0.058\mathrm{Fr}^{-0.770}$	0.488	0.036
120	$n=0.060\mathrm{Fr}^{-0.421}$	0.230	0.191
150	$n=0.074\mathrm{Fr}^{-0.024}$	0.001	0.939
180	$n=0.072\mathrm{Fr}^{-0.167}$	0.013	0.768

由表 4 可知夹角为 60°时二者关系为极显著($p<0.01$),夹角为 90°时二者关系显著($p<0.05$),其他条件下不显著($p>0.05$)。说明岩石与坡面夹角影响着二者关系。n 与 F_r 总关系式为

$$n=0.058\mathrm{F_r}^{-0.747}\quad(R^2=0.854,\ p=0.008)\qquad(5)$$

由公式(5)可知,在总体试验条件下,n 与 Fr 呈极显著的幂函数负相关关系。这可能是由于坡面径流受到的岩石阻挡作用和沟道形态阻力增大,水流受到的阻滞作用越强,水流将越缓[30],这与郝好鑫等[31]研究结果一致。

2.4　岩石与坡面夹角对相对水深曼宁系数 n/h 的影响

由不同岩石与坡面夹角对 n/h 的影响(见图 4)可知,6 个夹角角度条件下的平均 n/h 呈先增大后减小的变化趋势。岩石与坡面夹角小于等于 90°时,各夹角之间表现出显著性差异,n/h 随着夹角角度增大而增大。这可能是由于随着岩石与坡面夹角角度增加,岩石对水流产生的阻挡作用及相应沟道形态阻力的增大大于岩石对水流影响而造成的水深变化。Yang 等[32]研究结果表明,n/h 能够较好地预测径流能量,且与滚波速度呈反比。本试验在岩石与坡面夹角小

于等于 90°的条件下，随着夹角减小，岩石阻挡作用减小，岩石处由于水流被抬高以及水流流经的沟道界面糙度突变，可能更易产生滚波。当岩石与坡面夹角大于 90°时，各夹角之间没有显著差异，而夹角 90°与 120°之间则表现出了显著差异，说明试验条件下，当岩石与坡面夹角大于等于 90°时存在临界夹角，角度在 90°～120°之间。对试验条件下岩石与坡面夹角(x)与 n/h 进行拟合得到：

$$n/h=-2\times10^{-4}x^2+0.033x+4.013 \quad (R^2=0.675,\ p=0.185) \tag{6}$$

根据公式(6)可以看出，二者关系不显著。

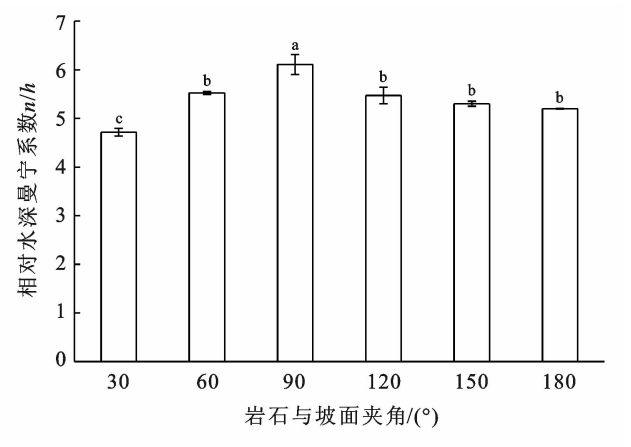


图 4 不同岩石与坡面夹角下 n/h 的变化

2.5 相对水深曼宁系数 n/h 与 Re，Fr 的关系

不同岩石与坡面夹角条件下，n/h 与 Re 关系如图 5 所示。

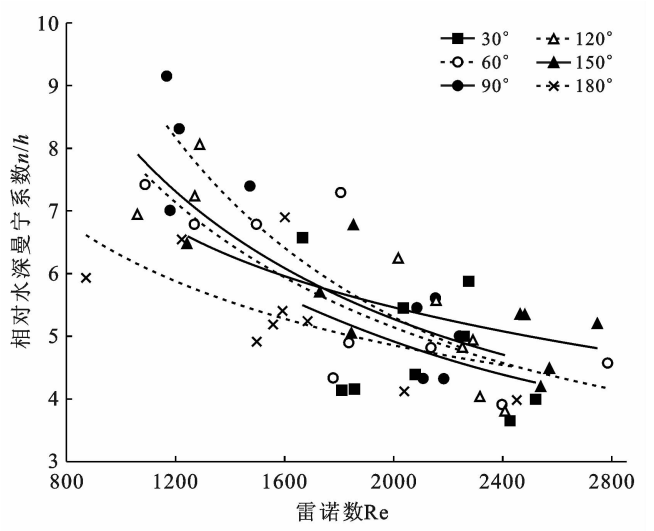


图 5 不同岩石与坡面夹角的 n/h 与 Re 关系

由图 5 可知，n/h 与 Re 均呈幂函数负相关关系。岩石与坡面夹角为 90°和 120°时二者关系为极显著($p<0.01$)，R^2 分别为 0.830，0.729；岩石与坡面夹角为 60°，150°和 180°时二者关系显著($p<0.05$)，R^2 分别为 0.608，0.483，0.486；岩石与坡面夹角 30°时二者关系则不显著($p>0.05$)。这可能是因为夹角 30°时岩石促进了水流的流动，在水流能量较大的条件下更易加重侵蚀，促进崩塌和细沟流路的发育，使径流路径更为复杂，冲刷过程中沟道侵蚀形态变化的不确定性增加，减弱了二者关系[33]。

不同岩石与坡面夹角的 n/h 与 Fr 的关系如图 6 所示。由图 6 可知，n/h 与 Fr 关系不显著($p>0.05$)。Guo 等[34]研究结果表明，n/h 和雷诺数 Re 均可较好预测径流波动，同时其能够更好预测泥沙输移，且 n/h 与 Fr 关系不显著，这与本试验结果一致。

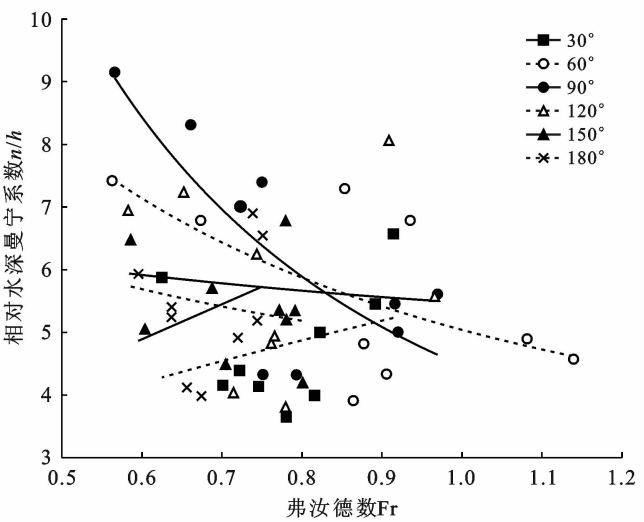


图 6 不同岩石与坡面夹角的 n/h 与 Fr 关系

3 结 论

(1) 岩石与坡面夹角对喀斯特槽谷区坡面集中流曼宁系数 n 影响显著。冲刷过程中，n 在试验前 6 min内迅速增大，后随着冲刷历时的延长呈缓慢增长或趋于稳定的趋势。n 随流量的增大而减小，不同岩石与坡面夹角的 n 值大小顺序为：$n_{180°}>n_{150°}>n_{90°}>n_{30°}>n_{120°}>n_{60°}$。试验条件下，$n$ 变化范围为 0.036～0.116。

(2) n 与水深 h 关系受岩石与坡面夹角影响，当岩石与坡面夹角大于 30°时，n 与水深 h 显著相关，夹角为 30°时，二者关系不显著；试验条件下，n 与 Re 相关性不显著，与 Fr 则呈显著幂函数负相关。

(3) 相对水深曼宁系数 n/h 随岩石与坡面夹角增大呈先增后减的趋势，当岩石与坡面夹角大于等于 90°时存在临界角度，临界角度在 90°～120°之间。岩石与坡面夹角大于 30°时，n/h 与 Re 均呈幂函数负相

关,夹角为 30°时,二者关系不显著;不同岩石与坡面夹角的 n/h 与 Fr 关系均不显著。喀斯特槽谷区岩石与坡面夹角及地下裂隙结构复杂多变,室内模拟试验条件与野外实际情况可能有所偏差,同时野外条件下的土壤异质性及地表植被等因素均会对集中水流曼宁系数产生影响,因此还需结合野外喀斯特槽谷区径流小区试验对本试验结果进行进一步验证。

[参 考 文 献]

[1] Hessel R, Jetten V, Zhang Guanghui. Estimating Manning's n for steep slopes [J]. Catena, 2003,54(1/2):77-91.

[2] Al-Hamdan O Z, Pierson Jr F B, Nearing M A, et al. Characteristics of concentrated flow hydraulics for rangeland ecosystems: Implications for hydrologic modeling [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2012,37(2):157-168.

[3] Li Tianyang, He Binghui, Wang Renxin, et al. Comparison of hydrodynamic parameters for predicting soil and water loss on simulation landslide deposit slope in Wenchuan earthquake area, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2017,76(4):1-10.

[4] 张科利. 黄土坡面细沟侵蚀中的水流阻力规律研究[J]. 人民黄河,1998,20(8):13-15.

[5] 汤珊珊,李占斌,鲁克新,等. 覆沙坡面水动力学参数与径流产沙的关系[J]. 农业工程学报,2017,33(20):136-143.

[6] Xia Lu, Song Xiaoyu, Fu Na, et al. Effects of rock fragment cover on hydrological processes under rainfall simulation in a semi-arid region of China [J]. Hydrological Processes, 2018,32(6):792-804.

[7] 拜亚茹,赵锦程,邱秀云,等. 人工渠道糙率系数影响因素的试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(4):229-232.

[8] 李永红,牛耀彬,王正中,等. 工程堆积体坡面径流水动力学参数及其相互关系[J]. 农业工程学报,2015,31(22):83-88.

[9] Abrahams A D, Parsons A J. Resistance to overland flow on desert pavement and its implications for sediment transport modeling [J]. Water Resource Research, 1991,27(8):1827-1836.

[10] 李朝栋,李占斌,马建业,等. 不同长度小麦秸秆覆盖下黄土耕地坡面流水动力学特性[J]. 农业工程学报,2017,33(4):153-160.

[11] 蒋勇军,刘秀明,何师意,等. 喀斯特槽谷区土地石漠化与综合治理技术研发[J]. 生态学报,2016,36(22):7092-7097.

[12] Gan Fengling, He Binghui, Qin Ziyang. Hydrological response and soil detachment rate from Dip/Anti-dip slopes as a function of rock strata dip in Karst Valley revealed by rainfall simulations [J]. Journal of Hydrology, 2019,581:124416.

[13] 王恒松,熊康宁,张芳美. 地形因子对喀斯特坡面水土流失影响的机理研究[J]. 水土保持通报,2015,35(4):1-7.

[14] 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.

[15] Akdim B. Karst landscape and hydrology in Morocco: Research trends and perspectives [J]. Environmental Earth Sciences, 2015,74(1):251-265.

[16] 彭旭东,戴全厚,李昌兰,等. 模拟雨强和地下裂隙对喀斯特地区坡耕地养分流失的影响[J]. 农业工程学报,2017,33(2):131-140.

[17] Dai Quanhou, Peng Xudong, Zhao Longshan, 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.

[18] 姚文艺. 坡面流阻力规律试验研究[J]. 泥沙研究,1996(1):74-82.

[19] 梁心蓝,赵龙山,吴佳,等. 地表糙度与径流水力学参数响应规律模拟[J]. 农业工程学报,2014,30(19):123-131.

[20] 李勉,姚文艺,陈江南,等. 草被覆盖下坡面—沟坡系统坡面流阻力变化特征试验研究[J]. 水利学报,2007,38(1):112-119.

[21] 严友进,戴全厚,伏文兵,等. 喀斯特裸坡产流产沙过程试验研究[J]. 生态学报,2017,37(6):2067-2079.

[22] 张光辉,卫海燕,刘宝元. 坡面流水动力学特性研究[J]. 水土保持学报,2001,15(1):58-61.

[23] 傅斌,王玉宽,徐佩. 紫色土坡地径流退水过程与地表糙率试验研究[J]. 水土保持通报,2009,29(1):36-39.

[24] 田风霞,刘刚,郑世清,等. 草本植物对土质路面径流水动力学特征及水沙过程的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(10):25-29.

[25] 甘凤玲,何丙辉,覃自阳. 喀斯特槽谷区的顺/逆层坡面对水动力学参数的影响[J]. 土壤学报,2019,56(4):825-837.

[26] Fraga I, Cea L, Puertas J. Experimental study of the water depth and rainfall intensity effects on the bed roughness coefficient used in distributed urban drainage models [J]. Journal of Hydrology, 2013,505:266-275.

[27] 丁文峰,李占斌,鲁克新,等. 坡面细沟发生临界水动力条件初探[J]. 土壤学报,2003,40(6):822-828.

[28] 王仁新,何丙辉,李天阳,等. 汶川震区滑坡堆积体土石混合坡面细沟水流曼宁系数特征研究[J]. 水电能源科学,2016,34(4):115-119..

(下转第 279 页)

(3) 政府加大石漠化相关政策和知识的宣传力度,建立政府与公众互通互信互助,依托学校教育及社会团体组织等方式普及石漠化防治和生态环境教育,让社会大众所熟知才能更好地积极配合,防治政策和工作才能更好地执行到位。

(4) 石漠化防治应建立和完善相应的生态补偿制度,合理制定补偿标准,调节上下游、防治者与社会受益者等相关利益关系,促进工程治理。

(5) 可先行出台相关石漠化防治行政法规或开展地方立法,解决当前突出问题。

[参 考 文 献]

[1] 尹辉,蒋忠诚,罗为群,等. 西南岩溶区水土流失与石漠化动态评价研究[J]. 水土保持研究,2011,18(1):66-70.

[2] 张平仓,丁文峰. 中国石漠化问题研究进展[J]. 长江科学院院报,2008,25(3):1-5.

[3] 国家林业和草原局. 岩溶地区石漠化状况公报[R]. 北京:国家林业和草原局,2018.

[4] 宋维风. 中国石漠化现状及其防治综述[J]. 中国水土保持科学,2007,5(5):102-106.

[5] 贺庆棠,陆佩玲. 中国岩溶山地石漠化问题与对策研究[J]. 北京林业大学学报,2006,28(1):117-120.

[6] 国家林业局. 岩溶地区石漠化综合治理工程"十三五"建设规划[R]. 北京:国家林业和草原局,2016.

[7] 王爱娟,穆洪. 石漠化的生态治理技术与治理模式发展[J]. 水土保持通报,2019,39(5):285-289.

[8] 曹明德. 关于修改中国《环境保护法》的若干思考[J]. 中国人民大学学报,2005(1):125-132.

[9] 刘静. 中国西南地区石漠化防治法律问题探讨[D]. 云南昆明:昆明理工大学. 2010.

[10] 黄朵俏蓉. 西南地区石漠化防治法律制度探析[J]. 法制与经济,2017(9):18-19.

[11] 王民. 环境意识及测评方法研究[M]. 北京:中国环境科学出版社,1999.

[12] 王来华,黄明健. 中国环境法基本制度探析[J]. 水土保持研究,2004,11(4):194-197.

[13] 邓广山,曾璐. 岩溶石漠化地区农户可持续生计发展存在的问题及对策分析[J]. 科学咨询,2019(42):12-15.

[14] 云南省林业和草原局. 云南省(岩溶地区)石漠化状况公报[R]. 云南 昆明:云南省林业和草原局,2019.

[15] 云南省发展和改革委. 云南省岩溶地区石漠化综合治理工程"十三五"建设规划[R]. 云南 昆明:云南省发展和改革委,2017.

[16] 路冠军. 生态、权力与治理[D]. 北京:中国农业大学. 2014.

[17] 李娇. 新一轮退耕还林工程建设困境及策略思考[J]. 绿色科技,2019(17):237-238.

(上接第 273 页)

[29] Emmett, William W M. The Hydraulics of Overland Flow on Hillslopes [M]. Geological Survey Professional. A. U. S. Government Printing Office, Washington, 1970.

[30] 郑良勇,李占斌,李鹏. 黄土区陡坡径流水动力学特性试验研究[J]. 水利学报,2004,35(5):46-51

[31] 郝好鑫,杜一凡,曹丹妮,等. 红壤缓坡水流动力学特性及其对侵蚀影响的试验研究[J]. 中国水土保持科学,2018,16(2):1-8.

[32] Yang Ting, Su Lijun, Wu Laosheng, et al. Overland flow along stone covered slope land simulated with semi-analytical and numerical models [J]. Water Resources Management, 2020,34(1):51-69.

[33] 吴淑芳,刘政鸿,霍云云,等. 黄土坡面细沟侵蚀发育过程与模拟[J]. 土壤学报,2015,52(1):48-56.

[34] Guo Tailong, Wang Quanjiu, Li Dingqiang, et al. Flow hydraulic characteristic effect on sediment and solute transport on slope erosion [J]. Catena, 2013, 107: 145-153.