

不同植物边坡的糙率系数和水力学特征参数

刘慧博¹, 高二鹏¹, 王冰洁¹, 杨海龙¹, 张 婧¹, 王志刚¹, 张成梁²

(1. 北京林业大学 水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 轻工业环境保护研究所, 北京 100089)

摘 要: [目的] 研究北方土石山区植物边坡糙度, 为坡面生态防护的最佳植物配置选择提供依据。[方法] 在北京市昌平区试验基地设置多组不同地表类型的径流小区, 设计了控制流速、流量的野外放水冲刷试验。[结果] (1) 与乔灌植被相比较, 草本植被对地表径流流速具有良好的阻滞作用, 毛白杨对地表流速有加速作用。(2) 草地的平均糙率系数最大, 裸地最小。对裸地进行处理后发现, 铺设枯枝物, 可以有效提高地表糙率系数值, 通过砾石压盖处理的地表糙率系数并未有明显改变。(3) 各类地表下垫面的雷诺系数 R_e 均介于 21.34~23.49 之间, 枯落物小区 R_e 最大, 毛白杨小区 R_e 最小, 水流均为层流, 紊动性弱; 弗劳德数 F_r 介于 0.35~2.55 之间; 阻力系数 f 介于 1.03~54.43 之间。[结论] 枯落物和草地可以有效减缓地表径流流速; 毛白杨下垫面防蚀功能最弱。

关键词: 糙率系数; 生态护坡; 植被; 土壤侵蚀

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)04-0064-05

中图分类号: S157.43

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.04.014

Roughness Coefficient and Hydraulics Characteristics Parameters of Slopes with Different Plants

LIU Huibo¹, GAO Erpeng¹, WANG Bingjie¹, YANG Hailong¹,
ZHANG Qiang¹, WANG Zhigang¹, ZHANG Chengliang²

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combat, Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Environmental Protection Research Institute of Light Industry, Beijing 100089, China)

Abstract: [Objective] In order to determine the optimal plant configuration of slope ecological protection, we designed a washout test by control the velocity and flow of water in runoff plots of different surface type. [Methods] Based on experimental data, we studied the effect of different surface types on both surface roughness coefficient and hydraulics characteristic parameters. [Results] (1) The effect of herbaceous vegetation on the velocity of the block is better than shrub tree species. *Populus tomentosa* promote the surface velocity. (2) The largest average roughness coefficient is in the lawn plot, the smallest is bare plot. Laying litter in bare ground can effectively increase the surface roughness coefficient value and there is no significantly change by laying gravel. (3) Reynolds coefficient (R_e) is 21.34~23.49 and the largest is the litter surface, the smallest is *Populus tomentosa* surface. Water flow is laminar flow, the turbulence is weak, Froude coefficient (F_r) is 0.35~2.55, Darcy—Weisbach resistance coefficient (f) is 1.03~54.43. [Conclusion] The bare land with litters and grassland surface can effectively resist runoff scour and the *Populus tomentosa* underlying surface has the potential to cause the most amount of soil erosion.

Keywords: roughness coefficient; ecological slope protection; vegetation; soil erosion

随着社会经济发展和人们对生态环境的日益重视,生态护坡已经是河道、湿地、公路边坡等处防治水土流失、改善生态环境的常见措施之一。灌木和草本

植物通常为边坡常见的植被类型,研究土质边坡不同坡面植被配置类型对坡面流阻力的影响过程及特征,对于研究乔、灌、草植被对坡面流的阻滞作用均具有

收稿日期:2014-05-06

修回日期:2014-06-09

资助项目:国家林业公益性行业科研专项“建设工程损毁林地植被修复关键技术与示范”(200904030)

第一作者:刘慧博(1989—),女(汉族),辽宁省本溪市人,硕士研究生,主要研究方向为水土保持。E-mail:liu_huibo@126.com。

通信作者:杨海龙(1966—),男(汉族),内蒙古自治区赤峰市人,博士,副教授,主要从事流域管理及森林水文方面的研究。E-mail:yang_hlong@163.com。

重要意义。国内外在相关方面开展了广泛的研究^[1-6],但多集中于草本植被坡面,针对乔、灌、草植被配置对坡面流阻滞效果及边坡糙率系数和水力学参数的影响研究较少。为此,本研究通过野外设置径流小区和放水试验,探究不同流量、不同植被配置条件下乔、灌、草植被坡面糙率系数和流速的变化特征,揭示乔、灌、草植被对坡面流阻滞的效果,为北京市土质边坡防治土壤侵蚀提供理论依据。

1 试验区概况

试验区位于北京市西北部的昌平区,区域地理坐标为东经 115°50′17″—116°29′49″,北纬 40°2′18″—40°23′13″。昌平区属暖温带,半湿润大陆性季风气候。全年四季分明,春季干旱多风,夏季炎热多雨,秋季凉爽少雨,冬季寒冷干燥。全区多年平均气温 11.8℃,月平均气温-4.2℃;极端最高气温 40.3℃,极端最低气温-9.6℃。多年平均积温 4 591.3℃,

无霜期约为 200~203 d。多年平均降水量为 550.3 mm,最大年降雨量为 1 002.5 mm,最小年降雨量为 318 mm。雨量多集中在夏季,占全年总降水量的 76%;春、秋两季雨量较少,占全年降水量的 22%;冬季降水量不足全年的 2%。全年平均日照总时数为 2 684 h,春季最多,冬季最少。

本试验在北京市昌平区马池口镇亭自庄轻工业环境保护研究所生态修复试验基地人工修筑边坡上,以不同植被类型作为试验对象,以裸地作对照,模拟野外边坡在坡面流冲刷下地表糙率系数和水力学特征参数的变化过程。边坡顶宽 2 m,底宽 8 m,高 3 m 等腰梯形,坡度 45°。在人工修筑边坡上设置径流小区,分别选择裸地、碎石压盖面、枯落物覆盖、金丝柳 (*Salix aureo-pendula*)、草地 (狗尾草 *Setaria viridis*)、毛白杨 (*Populus tomentosa*)、小叶黄杨 (*Buxus sinica* var. *parvifolia*) 共 7 种试验样地。各试验样地的特征详见表 1。

表 1 试验样地基本特征

下垫面类型	树龄/a	胸径/cm	株高/m	冠幅/m ²	盖度/%	下垫面特征参数
裸地						
草地					96	
金丝柳	2	1.5	2.2	1.2×1.5	45	
毛白杨	3	2.2	2.5	1.5×1.7	64	
小叶黄杨	1		0.3	0.2×0.3	83	
碎石压盖					28	砾石直径 1~3 cm
枯落物					95	枯落物厚度 2.5 cm

2 试验方法

由于室内模拟植草坡面对地表径流阻力系数的影响,在装填土体和栽植植被上都会不同程度的对土体造成破坏,室内植被与野外近自然的植被生长状况并不相同,不能最大限度地反映野外植生边坡的下垫面的实际情况,为此本试验采用野外实地冲刷水槽法。

试验装置由供水桶、稳压桶、薄层水流堰,试验区、集流槽组成。具体步骤如下:在试验区坡面,先将两块长 30 cm,宽 20 cm 的钢板砸入土体内(防止流水侧漏,并保证插入面平行)。用容积各为 100 和 30 L 的水桶分别作为供水桶和稳压桶(调节出流量,保持桶内液面高度不变),稳压桶下部顺接薄层水流堰后,依次流入试验区坡面。坡面下端连接集流槽,最后用烧杯承接径流水样。试验前,先在试验区坡面洒水,直至坡面土壤水分饱和。试验过程中,利用稳压桶阀门调节出流量,待流速均匀后利用染色剂滴定法测定

径流流速,实测流速乘以修正系数为断面平均流速。利用量筒计测出入流量。在试验区下方采集水样,用烘干过滤法测定地表径流的泥沙含量。以上步骤重复测定 5 次,取各结果的平均值作为最终试验结果。放水过程,采取每隔 3 min 采集一次试样,量测试验区土壤侵蚀量,通过绘制土壤侵蚀量(A)—时间(t)过程曲线表征实际土壤侵蚀过程。采用水体染色法进行流速测定,使用精度为 0.01 s 的秒表计时。然后,采用相关公式计算出平均流速 V_s ,曼宁糙率系数 n ,雷诺数 R_e ,运动黏滞性系数 ν ,弗劳德数 F_r ,Darcy—Weisbach 阻力系数 f 等水动力学参数。

3 结果分析

3.1 不同流量下坡面平均流速的变化特征

试验结果采用流体表面平均流速 V_s 表示。根据 Abraham 等^[7]的相关研究确定当流态为层流、过渡流、紊流时,相应的各修正系数 k 分别为 0.67, 0.70 和 0.80,根据坡面径流特征,判断实际的径流流态,

选择不同的流速修正系数。根据所测得的流速乘以相应的修正系数,确定坡面径流平均流速 V_s (图 1)。由图 1 可知,随着流量的增加,坡面薄层水流的平均流速呈增加趋势,不同下垫面边坡径流平均流速和单宽流量的关系并不一致。当流量从 5 ml/s 增大到 30 ml/s 时,5 种地表流速变化依次为:裸地(0.031~0.069 m/s),草地(0.017~0.051 m/s),金丝柳(0.020~0.055 m/s),毛白杨(0.023~0.061 m/s),小叶黄杨(0.015~0.062 m/s)。其中小叶黄杨的地表径流流速变化最大,其他几种类型在流量为 5 ml/s 时,流速相差不大,相应流速从大到小依次为:裸地(0.031 m/s)>毛白杨(0.023 m/s)>金丝柳(0.020 m/s)>草地(0.017 m/s)>小叶黄杨(0.015 m/s)。当流量从 5 ml/s 增加到 30 ml/s 时,相应流速从大到小依次为:裸地(0.069 m/s)>小叶黄杨(0.062 m/s)、毛白杨(0.061 m/s)>金丝柳(0.055 m/s)>草地(0.051 m/s)。在相同流量下,草地的流速相对于其他植被覆盖类型坡面流速除流量为 5 ml/s 时始终为最小值,裸地坡面流速则始终为最大值;但当流量逐渐增加到 20 ml/s 时,小叶黄杨地表流速增长趋势最明显,超过毛白杨和金丝柳,表明随着入流量的增加,小叶黄杨对地表流速有促进作用;草地坡面与乔、灌植被覆盖坡面相比,草地坡面对地表径流有更好的阻滞效果。

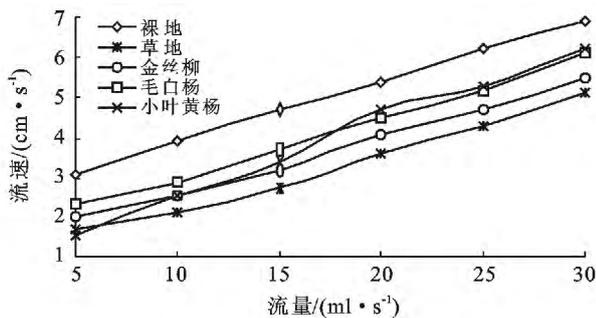


图 1 不同下垫面坡面流速随流量的变化

3.2 不同流量下地表糙率系数的变化特征

曼宁糙率系数^[8]是描述坡面流的重要参数之一,反映地表对径流阻滞效果。一般曼宁系数越大,表示地表对水流的阻力越大,对土壤侵蚀的防护越有利。曼宁糙率系数是众多土壤侵蚀预测模型的基本参数之一。各类植被覆盖坡面曼宁糙率系数变化如图 2 所示。从图 2 可知,不同植被覆盖坡面糙率系数值随着入流量的增加呈现总体下降趋势。当入流量为 5 ml/s 时,各地表曼宁糙率系数大小顺序依次为:小叶黄杨(0.867 1)>草地(0.704 8)>金丝柳(0.538 3)>毛白杨(0.426 9)>裸地(0.260 1)。当入流量为

30 ml/s 时,各地表糙率系数大小顺序依次为:草地(0.369 4)>金丝柳(0.326 1)>毛白杨(0.274 9)>小叶黄杨(0.267 6)>裸地(0.224 3)。与坡面流速的分布特征一致,小叶黄杨变化趋势最显著,由流量较小时的糙率系数最大值随着流量的增加迅速降低至最小值。另外,除小叶黄杨之外,其他 4 种植被覆盖坡面的糙率系数随着流量的增大呈现出先上升后逐步降低的变化,其原因主要是由于植物种类不同,根系分布亦不相同,从而导致各地表土壤的疏松程度不同,当流量较小时,随着水流的冲刷,一部分水分下渗到土壤中,使得 V_s 变小,从而糙率系数变大。当流量逐步增大时,土壤中水分逐渐达到饱和,此时随着径流量的增加, V_s 越来越大,从而糙率系数呈现一个减小的趋势。从图 2 可知,小叶黄杨始终呈现下降趋势,这可能是由于小叶黄杨地表土壤状况与其他 4 类不同,所以变化趋势不尽相同。此外,当流量较小时,各地表糙率系数的差异显著;但随着入流量的逐渐增大,糙率系数之间差异明显缩小。坡面径流深理论上也相应增大,但由于研究对象为地表薄层水流,故认为径流深未发生明显改变。依据糙率系数公式知,糙率系数在数值上与坡面流速呈反势,且从上一个结论得到坡面流速随流量增加而显著增大,故地表糙率系数会显著减少。

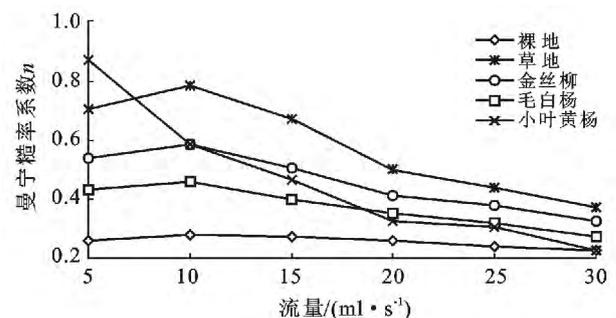


图 2 变流量下地表糙率系数的变化

3.3 相同流量下糙率系数的变化特征

根据北京地区多年实测平均降雨量数据,采取单宽定流量为 $0.25 \text{ cm}^3/(\text{s} \cdot \text{cm})$,径流系数按照 0.5 计算,相当于北京地区 10 年一遇 1 h 降雨量。由图 3 可知,在单宽定流量为 $0.25 \text{ cm}^3/(\text{s} \cdot \text{cm})$ 的条件下,草地的平均糙率系数最大,其值为 0.248 8。其次为枯落物地表(0.093 6)和小叶黄杨地表(0.063 5);其中地表糙率系数较小的几种地类分别为毛白杨(0.027 3)、裸地(0.041 4)、砾石覆盖(0.045 9)、金丝柳(0.060 3)。

腐烂的枯落物可增加土体有机质及生物和微生物的种类和数量,有利于促进土壤团粒结构的形

成^[9],进而增大土壤透水性能,减少地表径流量^[10],而半分解和未分解的枯落物可直接增大地表粗糙度,使地表径流流速降低,减少地表径流冲刷表层土壤的能力。

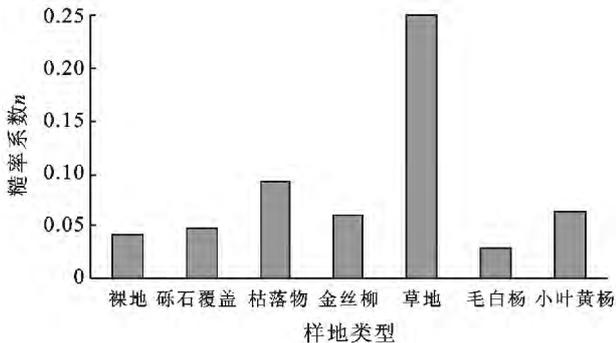


图 3 不同下垫面边坡地表糙率系数分布

单就裸地而言,分别对其进行砾石压盖和铺设枯枝落叶物处理,分析其曼宁糙率系数前后的变化程度。结果发现(表 2),对其进行砾石压盖处理后,理

论上能在一定程度上增加地表粗糙度,进而影响地表径流的下流速度。但事实证明,曼宁糙率系数值并未有较大变化,砾石压盖地表糙率系数值为 0.045 9,较裸地的曼宁糙率系数(0.041 4)相比仅增加 0.004 5。这一现象表明,通过砾石压盖理论上增加了地表粗糙度,但对曼宁糙率系数并没有起到明显的增大的作用。此外裸地人为覆盖枯落物质,对曼宁糙率系数的影响较大,枯落物覆盖的地表曼宁糙率系数为 0.093 6,约相当于裸地地表曼宁糙率系数值的 2 倍以上。分析结果表明,对裸露地表铺设枯枝落叶物,可以有效增加地表粗糙度,提高地表曼宁糙率系数值,通过砾石压盖处理的地表糙率系数并未有较明显变化。

乔木和灌木树种相比,其中糙率系数最大的是小叶黄杨(0.063 5),其次从大到小的顺序分别为金丝柳(0.060 3)和毛白杨(0.027 3)。由此可知,若边坡坡度一致,乔木和灌木之间、不同乔木之间地表糙率系数存在差异,灌木树种地表糙率系数大于乔木树种。这可能与不同乔灌木树种地表根系分布不同有关。

表 2 不同地表下垫面边坡地表糙率系数值

下垫面	坡度/ (°)	试验区 长/m	试验区 宽/m	平均流量/ (ml · s ⁻¹)	单宽流量/ (cm ³ · s ⁻¹ · cm ⁻¹)	时间/ s	流速/ (m · s ⁻¹)	断面面 积/cm ²	水深/ cm	水力半 径/cm	糙率
裸地	45	0.3	0.2	4.96	0.25	3.3	0.091	5.46	0.27	0.27	0.041 4
砾石覆盖	45°	0.3	0.2	5.10	0.26	3.2	0.095	5.36	0.27	0.27	0.045 9
枯落物	45°	0.3	0.2	5.17	0.26	5.3	0.057	9.14	0.46	0.45	0.093 6
金丝柳	45°	0.3	0.2	5.01	0.25	4.1	0.073	6.89	0.34	0.34	0.060 3
草地	45°	0.3	0.2	5.14	0.26	9.6	0.031	16.40	0.82	0.81	0.248 8
毛白杨	45°	0.3	0.2	4.90	0.25	2.6	0.116	4.22	0.21	0.21	0.027 3
小叶黄杨	45°	0.3	0.2	5.03	0.25	4.2	0.071	7.12	0.36	0.35	0.063 5

3.4 相同流量下坡面流水力学特征参数变化特征

糙率系数是反映下垫面状况阻延地表径流的指标,地表粗糙度直接影响着坡面的水力学特征^[11]。雷诺数^[12]是判定水流流态的重要依据,是水流的惯性力与黏滞力之比。根据明渠均匀流流态的判定标准,若 $R_e < 500$,表示水流为层流;若 $R_e \geq 500$,则表示水流为紊流。为了研究不同下垫面地表水流水力学特征,减小流速对试验结果的影响,本试验各组的单宽流量变化较小,均在 $0.25 \text{ cm}^3 / (\text{s} \cdot \text{cm})$ 左右;平均流速变化范围为 $0.03 \sim 0.12 \text{ m/s}$,不同地表下垫面边坡径流水力学特征详见表 3。由表 3 可以看出,各地表下垫面的雷诺系数均介于 $21.34 \sim 23.49$ 之间,故可认定各地表下垫面的水流均为层流,紊动性较弱。其中枯落物地表径流的雷诺系数最大,表明枯落物地表径流流态紊动性相对较强;而毛白杨地表径流的雷诺系数值最小,表示毛白杨地表的水流紊动性

最弱,水流的流态平缓。弗劳德数 F_r ^[13]是表征水流流型的重要参数,它是水流的惯性力和重力的比值。一般地,判断 F_r 是否大于 1.0,是判断该水流急缓的标准。如果 $F_r < 1$,水流为缓流;如果 $F_r \geq 1$,水流为急流。由表 1 可知,各下垫面流态各异,主要分布在 $0.35 \sim 2.55$ 之间,其中枯落物、草地小区地表径流为缓流;裸地、砾石压盖、金丝柳、毛白杨、小叶黄杨等小区地表径流为急流,说明枯落物和草地可以有效减缓地表径流流速。Darcy—Weisbach 阻力系数 f ^[14-15]反映了坡面含沙水流在运动中所受的综合阻力大小,阻力系数越大,说明径流克服地表阻力所消耗的能量就越大,而用于侵蚀和泥沙输移的能量就越小,路面侵蚀产沙就减少;反之地表土壤侵蚀越强烈。流速的平方与阻力系数成反比,而流速的大小主要取决于地表糙率系数值,在等流量条件下,地表糙率越大,流速越小,因而 Darcy—Weisbach 阻力系数 f 值越大。从表

3 可以看出,不同坡面的阻力系数变化在 1.03~54.43 之间,差异较大。7 种地表阻力系数大小依次为:草地(54.43)>枯落物(9.34)>小叶黄杨(4.67)>金丝柳(4.27)>裸地(2.17)>砾石压盖(1.94)>毛白杨(1.03),其中阻力系数最大的是草地,是裸地的 25 倍。阻力系数最小的是毛白杨地表,仅为 1.03,为裸地地表阻力系数的 47.5%。这与前面分析的定流量下不同地表类型糙率系数的变化特征一致。由此说明,植被对边坡径流具有明显的拦截作用,而毛白杨对边坡径流的拦截作用较弱,较裸地反而有加快径流流速作用。

表 3 不同地表下垫面边坡径流水力学特征

地类	单宽流量/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)	平均流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	阻力 系数	雷诺 系数	弗劳 德数
裸地	0.25	0.09	2.17	21.60	1.76
砾石压盖	0.26	0.10	1.94	22.21	1.86
枯落物	0.26	0.06	9.34	22.53	0.85
金丝柳	0.25	0.07	4.27	21.82	1.25
草地	0.26	0.03	54.43	22.39	0.35
毛白杨	0.25	0.12	1.03	21.34	2.55
小叶黄杨	0.25	0.07	4.67	21.91	1.20

4 结论

(1) 在相同流量下,草地的流速始终较小,裸地流速相对较大;随着流量的增加,草本植被与乔、灌木种相比较,草本植被对地表径流流速具有良好的阻滞作用,毛白杨对地表流速有加速作用。

(2) 随着流量的增加,不同植被覆盖坡面糙率系数值呈现总体下降趋势。小叶黄杨变化最为明显,草地平均糙率最大。流量为 5 ml/s 时,裸地、乔木、灌木、草地 4 种不同植被覆盖地表,灌木的平均糙率系数最大,其中地表糙率系数较小的几种地类分别为裸地(0.2601)、砾石覆盖(0.2749)、毛白杨(0.4269)。对裸地进行处理后发现,铺设枯枝物,可以有效提高地表糙率系数值,通过砾石压盖处理的地表糙率系数并没有明显改变;不同的灌木树种下垫面地表糙率系数,若边坡坡度一致,地表糙率系数的变化较明显。

(3) 各种下垫面的雷诺系数均介于 21.34~23.49 之间,各种下垫面的水流均为层流,紊动性弱,其中枯落物地表径流的雷诺系数最大,毛白杨地表径流的雷诺系数值最小;各下垫面流态各异,弗劳德数主要介于 0.35~2.55 之间;不同坡面的 Darcy—Weisbach 阻力系数变化在 1.03~54.43 之间,其中

草地阻力系数最大,毛白杨地表阻力系数最小。由此可以看出,草地下垫面可以有效抵御径流的冲刷,毛白杨下垫面的潜在侵蚀力最强,具有产生较大土壤侵蚀量的潜力。

[参 考 文 献]

- [1] Nearing M, Simanton R, Norton D, et al. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hill slope [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24(2):677-686.
- [2] Foster G R, Hugins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics (I): Velocity relationships [J]. *Transactions of ASAE*, 1984, 27(3):790-796.
- [3] 蔡强国,刘纪根,郑明国.黄土丘陵沟壑区中大流域侵蚀产沙模型与尺度转换研究[J]. *水土保持通报*, 2007, 27(4):132-135.
- [4] 杨海龙,朱金兆,齐实,等.三峡库区森林流域林地的地表糙率系数[J]. *北京林业大学学报*, 2005, 27(01):38-41.
- [5] Morgan R P C. *Soil erosion* [M]. New York: Longman Inc, 1997.
- [6] 吴持恭. *水力学* [M]. 2 版. 北京:高等教育出版社, 1982: 94-97.
- [7] Li Gang, Abrahams A D, Atkinson J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21(6):509-515.
- [8] 刘青泉,李家春,陈力,等.坡面流及土壤侵蚀动力学(I):坡面流[J]. *力学进展*, 2004(3):360-365.
- [9] 张洪江,北原曜,远藤泰造.几种林木枯落物对糙率系数 n 值的影响[J]. *水土保持学报*, 1994, 8(4): 4-10.
- [10] 吴淑芳,吴普特,冯浩,等.标准坡面人工草地减流减沙效应及其坡面流水力学机理研究[J]. *北京林业大学学报*, 2007, 29(3):99-104.
- [11] 郑子成,吴发启,何淑勤.降雨条件下土壤物理性质对地表糙度变化的影响[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2006, 34(11):185-189.
- [12] 翟艳宾,吴发启,王健,等.不同人工糙率床面水力学特性的试验研究[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(6):39-43.
- [13] Govers G. Relationships between discharge, velocity, and flow area for rills eroding loose, non-layered materials [J]. *Earth Surface Processes Land forms*, 1992, 17(5):515-528.
- [14] 张光辉.坡面薄层流水动力学特性的实验研究[J]. *水科学进展*, 2002, 3(3):159-165.
- [15] 王宏,蔡强国,朱远达.应用 EUROSEM 模型对三峡库区陡坡地水力侵蚀的模拟研究[J]. *地理研究*, 2003, 22(5):580-585.