

植被生长初期机场生态边坡抗冲刷性能

岑国平, 洪传平, 李 林, 陈 悦

(空军工程大学机场建筑工程系, 西安, 710038)

摘要 为研究机场生态护坡的植被在生长初期抗冲刷能力的影响因素,对植被生长初期不同防护方式及不同植株密度的草皮进行直剪试验和抗冲刷试验,得到了不同生态防护方式下植株数量和土体粘聚力增量的关系式,不同防护方式不同植株密度植被的抗冲流速和冲刷破坏方式,分析了草株密度和防护方式对生态边坡抗冲刷能力的影响规律,得到了土壤粘聚力与草皮土抗冲流速的关系,并给出了工程应用的条件与方法。

关键词 生态边坡;抗冲刷试验;生长初期;抗剪强度;抗冲流速

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.05.017

中图分类号 TU-023 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)05-0099-06

A Study of Anti-erosion Properties on Airport Ecological Slope Vegetation at the Initial Stage of Growth

CEN Guoping, HONG Chuanping, LI Lin, CHEN Yue

(Airport Construction Engineering Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Aimed at the problems that the factors of the anti-erosion capacity influences on the airport ecological slope protection vegetation at the initial stage of growth, this paper performs a direct shear test and anti-erosion test on the turf of different planting density and protection modes, and obtains an equation on the numbers of plant and the soil cohesion increment in different ecological protection modes. On the basis of laboratory experiments, the anti-erosion velocity and erosion damage modes are investigated. The influence laws of different planting density and protection modes on slope erosion are analyzed. In addition, the relationship between soil cohesion and turf soil impact velocity is explored, and the conditions and methods of the engineering application are given.

Key words: ecological slope; anti-erosion test; initial stage of growth; shear strength; impact velocity

生态护坡技术在国内外的应用已有很长的历史^[1],对其应用和研究也是在不断的发展。谢力峰对边坡防护的工程措施进行抗冲刷研究并进行新老对比^[2];郭梅、姜红安等通过冲刷试验^[3],对边坡入渗破坏的机理进行了分析;王云^[4]等对不同防护类型护坡的防护效果进行了对比;生物防护措施中,植

被类型和茎叶条件等对边坡防护效果也有很大影响^[5-8],单永体等在高海拔地区进行现场试验^[9],得出高海拔地区高等级公路的边坡侵蚀规律。赵云等对植被生长成熟期的生态护坡进行了抗冲刷性能研究^[10],而生态护坡的植被在其生长初期时更易遭到冲刷破坏^[11-14]。本文对公路、机场等生态护坡植被

收稿日期: 2017-11-20

作者简介: 岑国平(1962—),男,浙江慈溪人,教授,博士生导师,主要从事机场规划设计及机场防洪排水研究。E-mail: cenguoping@163.com

引用格式: 岑国平,洪传平,李林,等. 植被生长初期机场生态边坡抗冲刷性能 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(5): 99-104. CEN Guoping, HONG Chuanping, LI Lin, et al. A Study of Anti-erosion Properties on Airport Ecological Slope Vegetation at the Initial Stage of Growth [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(5): 99-104.

生长初期不同防护方式不同植株密度的草皮,进行直剪试验和室内冲刷试验,对其抗冲刷性能进行定量分析,以及对生态边坡的抗冲刷性能进行机理分析,为生态边坡建设提供理论及设计依据。

1 草皮准备

1.1 草皮养护时间

草皮在不同的生长期对边坡抗冲刷能力有较大影响。草籽从播种到出苗需 2 周时间,幼苗期茎叶较少,根系不发达,抗冲刷能力较弱。为了防止施工初期边坡冲刷破坏,一般在草籽播种后用草坪无纺布覆盖,并定期洒水,一直到草苗高度达到 5 cm 左右揭开无纺布,让草自然生长。从播种到揭开无纺布大约在 40 d 左右,揭开无纺布后的半个月之内是边坡最容易受到冲刷的。以后随着草的生长,草苗高度达到 10 cm 以上时,根系也逐渐发达,固土作用越来越强,抗冲刷能力会显著提高。因此,本文将草株高度在 5~10 cm 之间定义为边坡草皮的生长初期,时间大约为播种后 40~55 d。本次试验中,草种选择高羊茅和早熟禾,1:1 混播,从播种后共养护 45 d 左右开始试验,草株平均高度 7.5 cm。

1.2 草皮种植

为了便于草皮生长,首先在室外进行草皮种植,试验时移植到室内。试验土壤为西安黄土,土的液限为 31%,塑性指数为 16,根据《公路土工试验规程》^[15],该土为低液限粘土。表土过 5 mm 筛后与草籽、肥料混合后播种。植株密度按每平方米 3 000、4 000、5 000、6 000 株考虑,按出苗率 80% 计算,分别按每平方米 3 750、5 000、6 250、7 500 颗草

种均匀撒播。草皮分为纯草皮和三维土工网草皮两种。三维网铺设在表面以下 1 cm 位置。为保证移植时草皮的整体性,种植前在草皮下 5 cm 处先铺钢丝网,每块约 1 m²。草皮经过 45 d 左右的洒水养护后,将钢丝网拉起整块搬移到室内试验。

2 草皮土抗剪试验

边坡抗冲刷能力与边坡土体的抗剪强度有直接关系。在种植草皮后,草根对土体有加筋作用,根土复合体的抗剪强度比单纯的土体有一定的提高。因此可以根据根土复合体抗剪强度增大的幅度,来反映草皮土抗冲刷能力的提高。为此,本文先通过直剪试验,分析不同草株密度及加筋材料对抗剪强度的影响。

2.1 试验设备和方法

试验采用应变控制式直剪仪:内径 61.8 mm,高 20 mm 的环刀;位移测量设备(百分表,量程为 10 mm,分度值为 0.01 mm)。

试验前剪掉草的茎叶,用环刀取 20 mm 厚的上层带根土体。对三维网草皮,先剪出厚 2 cm,面积大约 40 cm² 的正方形土块,三维网在土样中间位置,然后用 2 个环刀分别从草皮上下两边同时对准草皮进行切取,当 2 个环刀合拢后,再用剪刀修剪夹在环刀间多余的三维网和根系。为了与无草皮的土进行比较,还选取了裸土试样进行试验。试验时垂直应力分别为 50、100、200、300 kPa。

2.2 直剪试验结果分析

试验得到裸土及不同密度纯草皮、三维网草皮在 4 种荷载下的抗剪强度,见表 1。

表 1 不同土样抗剪强度

Tab. 1 Shear strength of different soil samples

垂直荷载/kPa	裸土		纯草皮/(株·m ⁻²)				三维网草皮/(株·m ⁻²)			
	0	3 000	4 000	5 000	6 000	3 000	4 000	5 000	6 000	
50	29.5	39.1	41.9	48.8	52.8	37.5	44.1	55.2	58.6	
100	50.2	57.5	64.1	68.7	76.2	58.1	66.8	70.7	81.2	
200	94.7	103.2	110.2	116.4	124.7	107.3	113.5	115.7	125.6	
300	132.3	144.5	153.3	162.1	164.3	148.6	157.1	161.2	164.2	

将不同垂直荷载下的抗剪强度数据进行线性拟合分别得到裸土和 4 条不同植株密度 2 种草皮的剪切试验拟合线。

图 1、图 2 直观分析可知,各土样的抗剪强度随着垂直荷载的增大,近似呈线性增大;这说明试验基本符合库伦定律。土的抗剪强度用下式

表示:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中: τ_f 为土的抗剪强度; c 为土的粘聚力; σ 为法向应力; φ 为土的内摩擦角。

通过直剪试验,得到裸土、各种草株密度的纯草皮和三维网草的 c 值、 φ 值见表 2。

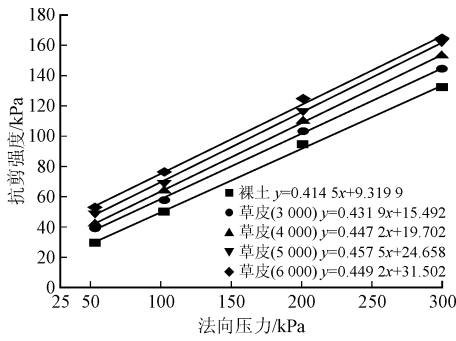


图 1 纯草皮抗剪强度拟合图

Fig. 1 Fitting test of the strength of pure turf

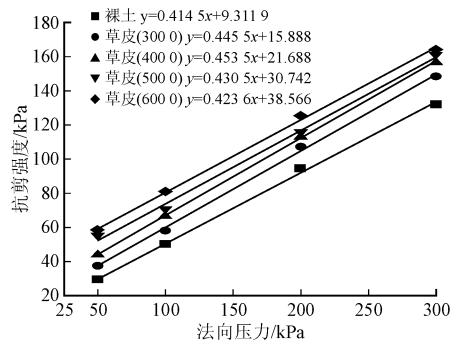


图 2 三维网草皮抗剪强度拟合图

Fig. 2 Three dimensional net saw shear strength fitting

表 2 不同密度草皮的粘聚力及内摩擦角

Tab. 2 Cohesive force and internal friction angle of different density turf

草株密度/(株·m ⁻²)	c/kPa		φ/(°)	
	纯草皮	三维网草皮	纯草皮	三维网草皮
3 000	15.49	15.89	23.38	24.00
4 000	19.70	21.69	24.10	24.41
5 000	24.66	30.74	24.62	23.30
6 000	31.50	38.57	24.19	22.97

注:裸土的 $c=9.31$ kPa, $\varphi=22.55^\circ$

从表 2 看出,纯草皮土和三维网草皮土的 φ 值与裸土相差不大,而 c 值相差较大。因此,可以认为草根及土工加筋材料只影响土的粘聚力,可以将抗剪强度改为:

$$\tau_f = c' + \Delta c + \sigma \tan \varphi \quad (2)$$

式中: c' 为裸土的粘聚力; Δc 为草根及土工加筋材料产生的粘聚力增量;其它符号同前。

将纯草皮土和三维网草皮土的粘聚力减去裸土的粘聚力,得各种植株密度草皮土的粘聚力增量 Δc 。将 Δc 与植株密度建立关系,见图 3,得到如下公式:

$$\Delta c = kn + b \quad (3)$$

式中: n 为植株密度(株/m²); k, b 为参数。

由图 3 看出纯草皮土和三维网草皮土的数据拟合较好,即粘聚力增量与根系密度呈明显的线性关系。在根系含量为 3 000 株/m² 时,三维网草皮和纯草皮的粘聚力增量几乎在同一水平,随着根系密度的提高,三维网草皮的粘聚力增量也在不断提高,增幅较大,说明植被根系密度对三维网草皮土抗剪能力的影响较大。经分析,可以得到纯草皮及三维网草皮植株量 n 和含根系土粘聚力增量 Δc 的线性关系式分别为:

纯草皮:

$$\Delta c = 0.005 3n - 10.318 \quad (4)$$

三维网草皮:

$$\Delta c = 0.007 7n - 17.278 \quad (5)$$

式(4)和式(5)只在特定试验条件下得到的,随着土的差别以及草皮生长情况而变。

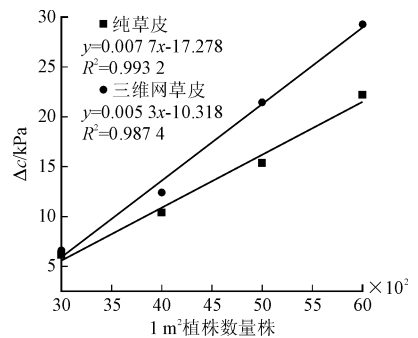


图 3 植株数量与粘聚力增量关系图

Fig. 3 The relationship between the number of plants and the increment of cohesion

3 室内抗冲刷试验

草皮土的抗剪强度虽然与抗冲刷性能有一定关系,但不能直接反映抗冲刷能力。因此本文通过室内抗冲刷试验,进一步研究草皮类型及草株密度对抗冲刷能力的影响。

3.1 试验设备

室内冲刷试验装置见图 4。主要有进水部分、水流稳定与流量测试部分、试验坡面和回水部分组成。试验坡面水平长 3.5 m,宽 0.9 m,坡度从 1:10 ~ 1:1.5 可调,本次试验采用 1:3。坡面分为两部分,第 1 部分为混凝土土坡面,主要是使水流加速,并

达到均匀流速。第2部分为草皮坡面,长度1 m,进行各种草皮的冲刷试验。流量测试用三角堰,堰顶角为 71° 。

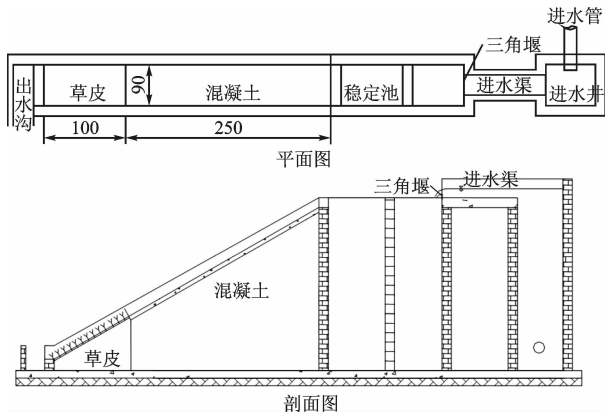


图4 室内冲刷试验装置(尺寸单位:cm)

Fig. 4 Indoor flushing test device (dimensions units:cm)

利用该装置对裸土和4种植株密度条件下不同生态防护方式的生态草皮进行抗冲刷试验。

3.2 室内冲刷试验结果与分析

坡面流速通过测试坡面水流的深度推求:

$$v = \frac{Q}{bh} \quad (6)$$

式中: Q 为流量; b 为坡面宽度; h 为坡面水深。为保证试验精度,需对水渠出水口的三角堰进行率定^[16]。用体积法测出多组不同堰头水深条件下的流量,并对三角堰理论公式进行修正。三角堰流量 Q 的理论计算公式如下:

$$Q = MH^{5/2} \quad (7)$$

$$M = \frac{8}{15}u \sqrt{2g} \tan \frac{\theta}{2} = 1.01 \quad (8)$$

式中: H 为堰头水深; M 为堰流系数; u 为流量系数,一般为0.6; θ 为堰顶角, g 为重力加速度。

通过率定,得 $M=1.00$ 。

在混凝土坡面末端测试坡面水深 h 。为保证精度,测试三点深度进行平均。由式(6)计算混凝土末端的坡面流速,作为试验段的冲刷流速。

3.2.1 裸土抗冲刷试验

对西安黄土进行裸土冲刷试验时,从最小的冲刷流速开始,逐渐加大流量。水流最开始先浸润土壤,然后冲走裸土表层的疏松土质,此时为面状侵蚀阶段,随后逐渐发展成细沟侵蚀;冲刷坑最先在水泥坡面和试验段的裸土接触部分形成,随着水流的持续冲刷,侵蚀现象顺着冲刷坑不断向下发展,形成侵蚀沟,然后大部分水汇集到侵蚀沟持续冲刷,不断将细沟拓宽加深,最后形成面积较宽的冲沟。见图5。根据周培德等人的研究^[17],本次试验以人工观察裸土表层受到冲刷破坏,颗粒大量剥离,冲沟深度达到

2 cm为裸土冲刷破坏标准。通过测定得到西安裸土的抗冲流速为0.43 m/s。



图5 裸土冲刷图

Fig. 5 Bare soil erosion map

3.2.2 草皮抗冲刷试验

目前针对草皮冲刷破坏没有统一的标准,本次试验通过人工直接观察草皮根须是否被冲刷裸露或翻起为破坏标准。

进行草皮抗冲刷试验时,4种植草密度条件下的2种草皮经过3个级别流速的冲刷后,最终遭到冲刷破坏。见图6、图7。试验结果见表3。



图6 纯草皮冲刷图

Fig. 6 Pure turf erosion map

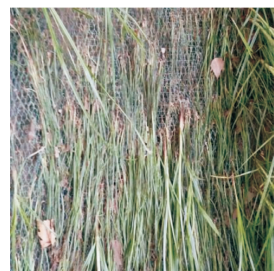


图7 三维网草皮冲刷图

Fig. 7 Three dimensional mesh turf erosion map

由冲刷试验得出如下结果:

1)纯草皮相对于裸土的抗冲刷效果有明显提高,表明植被对边坡的固土效果显著;在冲刷过程中冲刷破坏不是同时产生的,而是首先从草株稀疏处开始,再逐渐扩大。所以边坡表面草长得稀疏的部分是整个纯草皮护坡的薄弱环节。

2)纯草皮的抗冲刷流速随着草株密度的增大而逐渐提高,抗冲刷流速在0.96~1.34 m/s之间,从冲刷后的结果观测,低密度草皮的冲刷坑比高密度草皮的大且多。

表 3 不同密度下草皮的抗冲流速与流量
Tab. 3 The impact velocity and flow rate of turf under different density

植株密度 /(株·m ⁻²)	水头深度/cm		径流深度/cm		流量/(L·s ⁻¹)		流速/(m·s ⁻¹)	
	纯草皮	三维网草皮	纯草皮	三维网草皮	纯草皮	三维网草皮	纯草皮	三维网草皮
3 000	9.538	16.100	0.329	0.771	2.84	10.512	0.959	1.515
4 000	10.096	17.370	0.364	0.886	3.273	12.71	0.999	1.594
5 000	11.787	18.473	0.472	0.959	4.821	14.825	1.135	1.718
6 000	13.405	18.879	0.552	0.976	6.65	15.651	1.339	1.782

3)三维网草皮的抗冲刷效果较好,4种密度条件下的三维网草皮抗冲流速都达到了1.5 m/s以上,6 000株/m²的三维网草皮其抗冲流速达到1.78 m/s,防护效果优于纯草皮,见图8。由于草根与三维网相互缠绕,提高了抗冲刷能力。

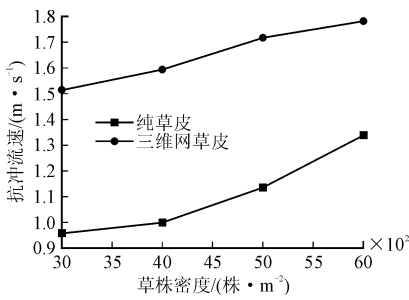


图 8 草株密度与抗冲流速关系图

Fig. 8 The relationship between the density of grass and the anti-erosion velocity

4)草皮抗冲刷流速与草皮土的抗剪强度呈正比例关系,见图9。由于冲刷试验需要大型设备,难度较大。而直剪试验相对容易。因此当冲刷试验有困难时,可通过直剪试验,获得草皮土的粘聚力,可间接反映草皮的抗冲刷能力。

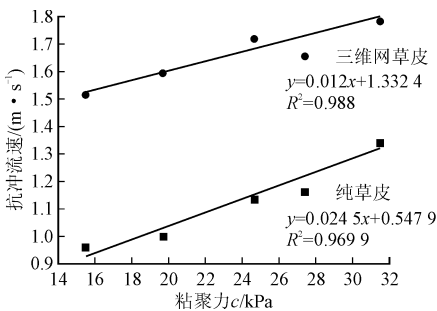


图 9 粘聚力与抗冲流速关系图

Fig. 9 The relationship between the cohesion and the anti-erosion velocity

4 结论

1)通过室内剪切试验得出:①草皮土的抗剪能力随着根系数量的增多而增大植株密度为4 000~

5 000株/m²时,增长效果最明显;②三维网能有效提高草皮土的抗剪能力;③纯草皮及三维网草皮土含根量 n 和土体粘聚力增量 Δc 呈线性关系。

2)通过室内冲刷试验得出:①裸土的抗冲流速较小,不及草皮土抗流速的1/2,极易遭到径流的冲刷破坏,在实际工程中必须采取相应的边坡防护措施;②草皮的抗冲流速随草株密度的增大而增大。因此为了提高草皮生长初期的抗冲刷流速,宜适当增大草籽播种密度,以5 000~6 000株/m²为宜。③三维网草皮的抗冲刷流速明显大于纯草皮,在流速较大的边坡,宜用三维网草皮防护。

参考文献(References):

[1] FORMAN R T T, SPERLING D, BISSONETTE J A, et al. Road Ecology [M]. Science and Solutions, 2003.

[2] 谢力峰. 边坡抗冲刷型护坡砌块防护室内冲刷模型试验研究 [J]. 湖南水利水电, 2015(2): 34-37.
XIE L F. Experimental Study on Scour Protection Model of Anti-erosion Slope Protection Block [J]. Water Resources & Hydropower Engineering, 2015 (2): 34-37. (in Chinese)

[3] 郭梅, 姜仁安. 边坡防护室内水力冲刷模拟试验及降雨入渗分析 [J]. 辽宁省交通高等专科学校学报, 2008(2): 16-18.
GUO M, JIANG R A. Simulation Experiment of Water Scour in Slope Protection Room and Analysis of Rainfall Infiltration [J]. Journal of Liaoning Provincial College of Communications, 2008(2): 16-18. (in Chinese)

[4] 王云, 龙春林, 刘怡涛, 等. 植物在高速公路边坡防护中的应用 [J]. 水土保持研究, 2005(12): 199-202.
WANG Y, LONG C L, LIU Y T, et al. Application of Plants in Slope Protection of Expressway [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005(12): 199-202. (in Chinese)

[5] 王萌, 田伟平. 公路边坡防护的植物选择 [J]. 公路科技交通建设, 2011(2): 47-48.

- WANG M, TIAN W P. Plant Selection for Highway Slope Protection [J]. Highway Technology Traffic Construction, 2011(2): 47-48. (in Chinese)
- [6] 蒋少钦, 王亮. 草本植物护坡机理及工程应用分析 [J]. 四川建筑, 2009(2): 132-133.
- JIANG S Q, WANG L. Mechanism and Application of Herbaceous Plant Slope Protection [J]. Sichuan Architecture, 2009(2): 132-133. (in Chinese)
- [7] 肖培青, 史学建, 陈江南, 等. 高速公路边坡防护的降雨和径流冲刷试验研究 [J]. 水土保持通报, 2004(1): 16-18.
- XIAO P Q, SHI X J, CHEN J N, et al. Experimental Study on Rainfall and Runoff Scouring of Expressway Slope Protection. [J] Bulletin of Soil and Water Conservation, 2004(1): 16-18. (in Chinese)
- [8] 伍从明. 山区公路绿色边坡防护的应用研究 [J]. 科技视界, 2013(4): 164-165.
- WU C M. Study on Application of Green Slope Protection in Mountain Highway [J]. Science & Technology Vision, 2013(4): 164-165. (in Chinese)
- [9] 单永体, 胡林, 王琦, 等. 径流冲刷对高寒高海拔地区高等级公路边坡侵蚀的影响 [J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(8): 88-95.
- SHAN Y T, HU L, WANG Q, et al. Effects of Runoff on Erosion of High-grade Highways Slopes in Alpine High Altitude Area [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(8): 88-95. (in Chinese)
- [10] 赵云, 岑国平, 李会恩, 等. 不同边坡防护形式防冲刷试验研究 [J]. 科学技术与工程, 2013, 13(20): 6015-6019.
- ZHAO Y, CEN G P, LI H E, et al. Experimental Study on Anti-erosion of Different Slope Protection Forms [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(20): 6015-6019. (in Chinese)
- [11] VELASCO D, BATEMAN A, REDONDO J M, et al. An Open Channel Flow Experimental and Theoretical Study of Resistance and Turbulent Characterization Over Flexible Vegetated Linings [J]. Flow, Turbulence and Combustion 2003, 70(1): 69-88.
- [12] KOUWEN N, UNNY T E. Flexible Roughness in Open Channels [J]. ASCE Journal of the Hydraulics Division, 1973, 99: 713-728.
- [13] 肖成志, 孙建诚, 李雨润, 等. 三维土工网垫植草护坡防坡面径流冲刷的机制分析 [J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 453-458.
- XIAO C Z, SUN J C, LI Y R, et al. Mechanism Analysis of Three Dimensional Net Geogrids on Grass Slope Protection Against Slope Runoff Scouring [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 453-458. (in Chinese)
- [14] 李勇. 黄土高原植物根系与土壤抗冲刷性 [M]. 北京: 科学出版社, 1995: 121-134.
- LI Y. Anti-Scour of Plant Roots and Soil in the Loess Plateau [M]. Beijing: Science Press, 1995: 121-134. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国交通部. JTG E40-2007. 公路土工试验规程 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- Ministry of Communications of the People's Republic of China. JTG E40-2007. Code for highway geotechnical testing [S]. Beijing: China Communication Press, 2007. (in Chinese)
- [16] 孙健. 三角堰测流率定方法浅析 [J]. 吉林水利, 2003(11): 20-22.
- SUN J. Simple Analysis on the Method of Determining Flow Rate of Triangular Weir [J]. Water Resources & Hydropower Engineering, 2003(11): 20-22. (in Chinese)
- [17] 周培德, 张俊云. 植被护坡工程技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- ZHOU P D, ZHANG J Y. Vegetation Slope Protection Technology [M]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰)