

岩石边坡生态工程中土层变化规律及防护措施探讨

叶建军¹, 许文年²

(1. 襄樊学院 建筑工程学院, 湖北 襄樊 441053; 2. 三峡大学 防灾减灾研究院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 出于景观改善的需要和生态恢复的要求, 一些工程形成的岩石边坡需要进行生态恢复。在总结岩石边(斜)坡生态防护方法的基础上, 对喷射护坡绿化技术中喷射土层的土壤变化规律进行了探讨。运用物质平衡等原理, 建立了边(斜)坡土壤物质平衡不等式, 分析了边(斜)坡土壤平衡的所有因素并绘制了生态恢复成功和不成功时边(斜)坡土壤变化规律图, 得出了水力侵蚀、地质灾害损失和初始喷层厚度是岩石边坡土层保持的关键因素。最后, 提出了保证岩石边(斜)坡生态防护(恢复)工程成功的一些措施。

关键词: 岩石边(斜)坡; 生态恢复; 土层; 变化规律; 保持

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)06-0136-04

中图分类号: S157, P642.22

Change of Soil Layers and Soil Conservation in Rocky Slope Ecological Protection Engineering

YE Jian-jun¹, XU Wen-nian²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xiangfan University, Xiangfan, Hubei 441053, China;

2. Institute of Disaster Prevention and Reduction, Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: To meet the environmental and scenic demands, some rocky slopes in civil engineering need some works on ecosystem restoration. Firstly, the present methods in rocky slope ecological protection engineering are summarized. Then, the changes of gunning (or gunniting) soil layer in rocky slope ecological protection engineering projects are investigated. By using the principle of mass balance and the multi-subject knowledge, an inequality for the mass balance of the gunning soil layer on rocky slope is set up, all the factors in the inequality are analyzed, and the figures on the changes of gunning soil layer on rocky slope under different situations are presented. It is found that water erosion, landslip loss, and initial thickness of gunning soil layer are the key factors of soil conservation. Based on the above fact, some measures on how to guarantee the success in rocky slope ecological protection engineering projects are discussed. This paper may help the practice of rocky slope ecological protection engineering projects in the future.

Keywords: rocky slope; ecological restoration; soil layer; principle of change; conservation

出于景观改善的需要和生态恢复的要求, 一些工程形成的岩石边(斜)坡在防护的同时, 需要恢复植被。陡峭的岩石边(斜)坡若依靠自然恢复, 需要很长的时间。除岩石边坡石壁上的凹槽和裂隙里截留了由水流从上部带来的土壤或杨尘沉降而很容易生长植物外, 平整陡峭的石壁是很难在短期内恢复植被的^[1]。这主要是由于石壁表面形成土壤的速度很慢。Bennett 在 1939 年估计, 在不扰动的条件下, 新鲜花岗岩每 300 年可形成 25 mm 的表土^[2]。而且, 石壁上还会发生严重的水土流失。通常, 石壁由于风化作用, 形成少量可以

供苔藓植物生长的“土壤”, 然后在苔藓等地被植被和风化作用下, 形成更厚的土层, 植被也由地被植物为主过渡带草本植物为主, 最后才向灌木和乔木为主过渡。这个过程在没有人干涉的情况下, 需要上百年^[3]。为加快岩石边坡的植被恢复进程, 当前工程界普遍采取人工客土的手段来恢复岩石边(斜)坡植被。方法以喷射方法为主^[4]。岩石边(斜)坡往往坡度大, 恢复植被面临很大的难度。主要的难题有土壤植被层的稳定附着、表层土壤的侵蚀控制。本研究主要探讨这些技术中喷层土壤的变化和保持规律。

收稿日期: 2008-11-12

修回日期: 2009-04-28

资助项目: 国家自然科学基金项目(50879043); 国家科技攻关项目(2006BAC10B04)

作者简介: 叶建军(1974—), 男(汉族), 湖北省英山县人, 讲师, 硕士, 博士研究生, 研究方向为边(斜)坡生态防护及屋顶绿化。E-mail: yjjyc@126.com。

1 岩石边(斜)坡生态防护工程概述

边(斜)坡生态防护(也称护坡绿化)有三重目的或任务,即保持边(斜)坡稳定、恢复边(斜)坡生态(植被)、保持坡面土壤^{5]}。就岩石边(斜)坡而言,恢复边(斜)坡生态(植被)和保持坡面土壤两个任务其实是一个任务,因为,保持土壤和恢复植被两者之间互为充分必要条件。

工程中,常见的岩石边(斜)坡生态防护方法有:植被混凝土护坡绿化技术^{6]}、客土喷播技术^{7]}、钻孔客土技术^{8]}、厚层基材护坡绿化技术^{9-10]}、插槽(水平台阶)技术^{11-12]}、植生袋技术^{13]}、挂网+爬藤方法等^{14]}。其中,植被混凝土护坡绿化技术、客土喷播技术、厚层基材护坡绿化技术 3 种技术是机械化程度高的全坡面客土技术,具备劳动强度低、生产效率高的优点,已经是工程界应用广泛的施工技术。本研究主要探讨喷射护坡绿化技术中的土层(或喷层)的土壤保持和变化规律。

2 岩石边(斜)坡生态防护工程中的土壤层物质平衡

无论是采取哪种边(斜)坡绿化方法,岩石边(斜)坡能否顺利快速的生态恢复,关键在于能否保持好坡面的土壤。边坡独特的环境使边坡土壤具备土层薄(填方边坡除外)、贫瘠、生物量少这 3 大特点^{15]}。

2.1 岩石边(斜)坡成功进行生态防护时的物质平衡

本研究运用物质平衡等原理,尝试探讨岩石坡面土壤变化规律,并在掌握这些规律的基础上,形成指导岩石边坡生态防护工程的一些有效对策。

坡面土层实际上是一个动态平衡过程,即不断有物质离开坡面土壤,又不断有物质添加到坡面土壤中。岩石边(斜)坡生态防护要成功,就要使边(斜)坡土壤层处于稳定平衡状态,最终必须满足新增加的土壤 ≥ 失去土壤,即最终边(斜)坡土壤物质质量 Q 应保持不变或增长。把边(斜)坡坡面土层看做一个系统,则系统的最终的物质输入(input)速度需要大于或等于系统物质输出(output)速度。用 I_s 和 O_s 分别代表物质输入速度和输出速度,则系统平衡要稳定,最终需要满足:

$$I_s \geq O_s \quad (1)$$

公式(1)为边(斜)坡物质平衡条件不等式。

把单位面积的岩石边(斜)坡理想化成没有任何土壤的倾斜的平面,坡面人工客土数量 K 作为系统初始值。随着时间的推移,系统物质输入 I_s 包括:风化成土量 W , 风力灰尘沉降量 S_f , 水力搬运泥沙沉降

及雨水携带的灰尘和氮素养分量 S_w , 周边进入坡面的凋落物数量 F_m , 光合作用和生物固氮等作用固定的有机物数量 M 。

而系统物质输出 O_s 包括:土壤风力侵蚀量 E_f 、土壤水力侵蚀量 E_w 、滑坡等地质灾害引起的土壤损失 D 、坡面掉落物凋落离开坡面量 F_{out} 、坡面凋落腐烂后分解气化部分 A 。

以年或更小时间单位 t 作为计算上述各参数的平均速度,则(1)式可变为:

$$(W + S_f + S_w + F_{in} + M) / t \geq (E_f + E_w + D + F_{out} + A) / t \quad (2)$$

显然,公式(2)没有考虑进入和离开系统而没有被生物固定的水分。它是边(斜)坡物质平衡条件不等式,边(斜)坡的土层要实现最终的稳定,必须满足这个公式。

2.2 岩石边(斜)坡生态恢复成功时的边(斜)坡土层变化规律

图 1 为当边(斜)坡成功进行生态恢复时,边(斜)坡土层的变化规律。

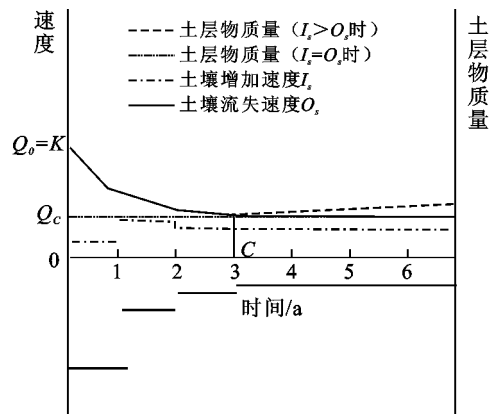


图 1 岩石边坡生态恢复成功时土层变化规律

从图 1 可以看出,在起始点,边(斜)坡土壤物质质量为 $Q_0 = K$,即为人工客土数量。一般地,在第一年,边(斜)坡植被还未对边(斜)坡进行有效覆盖,边(斜)坡土壤侵蚀 E_w 和 E_f 很大,表现为土壤失去速度 O_s 很大;此时,植物固定的有机物 M 还不小,边(斜)坡的且边(斜)坡土壤物质质量 Q 下降迅速。接着的两年时间里,随着植物的生长和覆盖率提高,边(斜)坡的边(斜)坡土壤侵蚀 E_w 和 E_f 量下降,而植物的生产能力 M 增加,此时,边(斜)坡 O_s 依然大于 I_s ,使现有土层物质质量 Q 依然下降,但是下降速度明显降低。

一般在 3 a 以后, I_s 开始大于或等于 O_s , 曲线 Q 变成水平直线或上升曲线。当 $I_s = O_s$ 时,边(斜)坡

土层物质质量不随时间变化, 对应的土层物质质量为 Q_c ; 在硬质岩石边(斜)坡上进行生态修复时, 由于边(斜)坡成土速度很慢, 如果生态恢复成功, 边(斜)坡土壤基本上是这个变化规律。

根据恢复生态学理论, 在某一特定区域, 土层厚度与植被的类型和高低是呈正比的, 即土层由薄到厚时, 植被由地被植物为主 \rightarrow 草本植物为主 \rightarrow 灌木为主 \rightarrow 乔木为主过渡^[3]。根据这个理论, 边(斜)坡要想恢复草本或灌木植物覆盖, Q_c 不能太小。

而当边(斜)坡是软质易风化的岩石时, 如泥岩、粘土岩, 边(斜)坡坡面的成土速度会较快, 此时, 表现为 $I_s > O_s$ 时, 曲线 Q 变成向上倾斜曲线, 此时边(斜)坡物质质量逐年增加, 植被也会逐步向更高的植物类型演化, 这是边(斜)坡生态恢复最佳结果。

2.3 岩石边(斜)坡生态防护失败时的边(斜)坡土层变化

岩石边(斜)坡生态恢复失败有两个原因, 要么是坡面水土流失失控, 要么是土层与岩质坡面之间发生滑坡(滑塌)。无论是什么原因, 最终的结果是边(斜)坡土层丧失。

图 2 显示的是一种岩石坡面生态恢复失败时的边(斜)坡土层变化规律。此时, 坡面 I_s 始终小于 O_s , 最后, 坡面土层在 t_0 时刻丧失殆尽, 这在坡面植被覆盖率不高的陡峭岩石边(斜)坡有可能发生, 是逐渐累计侵蚀的导致的。

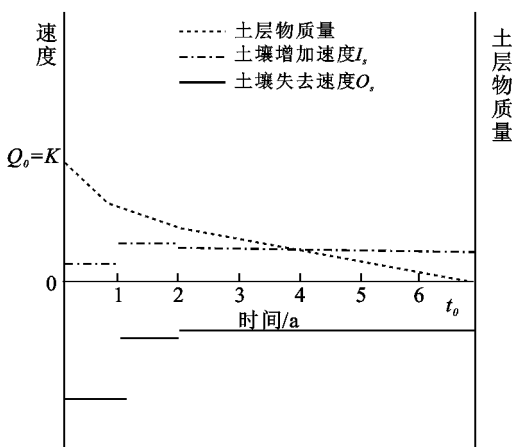


图 2 岩石边坡生态恢复失败时的土层变化

图 3 显示的是岩石边(斜)坡由于滑坡引起的岩石边(斜)坡生态恢复失败时的边(斜)坡土层变化规律。此时, 在 t_1 时刻, 边(斜)坡土层突然发生滑坡, 坡面土壤丧失殆尽。在有些降雨强度大的地区, 也可能大发生如图 3 类似的变化规律。如刚客土不久, 就遭遇一场大暴雨, 坡面土壤侵蚀殆尽。

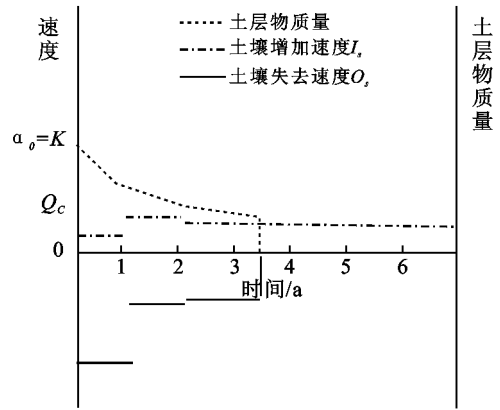


图 3 岩石边坡由于滑坡引起的岩石边(斜)坡生态恢复失败时的土层变化

3 物质平衡条件不等式中各参数的讨论

讨论式(1)中各参数, 特别是探讨这些参数数量级和变化幅度, 可以帮助理解上面图 1—3 的变化规律, 获得一些指导边(斜)坡生态防护工程的结论。

公式(1)中除时间外的 11 个参数, 对边(斜)坡生态防护能否成功影响最大的参数是 K , E_w , D ; 只要这 3 个参数得到有效控制, 总体来说, 岩石边(斜)坡生态恢复就会成功。参数 K 是人工输入到岩石边(斜)坡的物质数量, 是人工配置的养分充足的改良土壤或其它混合材料, 称之为“种植基材”或“种植基质”, 它们应该利于植被生长, 更重要的是, 应该有良好的抗侵蚀性和足够的数量。在工程实践中可以发现, 一些客土喷播技术非常有利于植物的生长, 但是, 早期抗侵蚀性能很差。例如在江苏江阴某采石场看到一处正在施工的采石场边(斜)坡生态防护工程, 工人在浇水时就引起了很严重的水土流失。因此, 参数 K 必须数量足够大, 以保证在经历早期的土壤侵蚀后, 边(斜)坡土层厚度足够, 即图 1 中的 Q_c 足够大, 有利于植物生长和抗旱。

在工程实践中, 人工客土早期抗侵蚀性能最好的技术是植被混凝土护坡绿化技术, 主要是因为加入水泥这种水硬性的粘结材料, 很大程度上加强了喷层的抗侵蚀性。实践表明(超过 $2.00 \times 10^6 \text{ m}^2$), 在南方, 年降雨量大于 1 000 mm 的地区, 只要能保证 10 cm 的喷层厚度, 就能保证工程成功。

E_w 的控制是岩石边(斜)坡生态防护的关键。由土壤侵蚀理论知, 影响边(斜)坡土壤侵蚀的所有因素(气候、坡长、坡度、土壤可侵蚀性、覆盖率等)中^[2], 能被人工控制的且最为关键的因素是坡面覆盖率^[6]。本研究通过 2002 年宜昌高坝洲高陡岩石边坡绿化工

程现场观测发现, 利用植被混凝土护坡绿化技术时, E_w 很小, 即使是降雨强度达 30 mm/h 的 5 h 强降雨, 喷层也未出现明显冲沟, 侵蚀量小于 200 g/m²。

在植被没有覆盖坡面前, 采取人工覆盖是必然的选择, 各种侵蚀控制卷材(草毯、无纺布、刨花毯等)将是最好的选择^[17]。

D 的控制也是岩石边(斜)坡生态防护的关键, 为防治高边坡坡面滑坡, 截水沟的修建必不可少, 锚杆和挂网在陡峭的边(斜)坡上成为必须。这里介绍一个由于锚杆和挂网设计不合理而导致的边(斜)坡生态防护失败坡面案例(此处不探讨如何设计锚杆和挂网)。图 4 所示的某坡度为 80° 岩石边(斜)坡在生态防护 6 a 后, 在一次强降雨后发生了局部土层剥离。经分析, 主要原因在于所挂铁丝网锈蚀严重, 加之设计锚杆间距过大, 两锚杆之间的土层下滑力超过了已经严重锈蚀的铁丝网承载能力, 而岩石坡面风化缓慢, 没有形成风化层(以供植物根系扎入而提高抗滑力)。最终, 在降雨时, 土层重量增加, 下滑力大于土层与坡面摩擦力引起滑坡。 D 的数量与 K 一样, 瞬时变化很大。



图 4 某高陡岩石边(斜)坡绿化 6 a 后发生滑坡

在硬质岩石坡面上, 早期风化成土量 W 可以忽略, 这是因为硬质岩石坡面的风化成土速度非常缓慢, 上图 4 剥离裸露的岩石坡面看, 在喷射防护 6 a 后, 几乎没有形成任何风化层。如前所述, Bennett 在 1939 年估计, 在不扰动的条件下, 新鲜花岗岩每 300 a 可形成 25 mm 的表土^[21]。但是, 在一些容易风化的岩石边(斜)坡, 如黏土岩、泥岩等边(斜)坡, 风化成土的因素必须考虑。

S_f 和 S_w 在不同的地区变化很大, 在西北, 空气中含灰量高, S_f 不可忽略; S_w 与边(斜)坡所处位置和

上部有无水流流过坡面有关。无人工干预的边(斜)坡, 早期边(斜)坡少量的土壤存在坡面凹槽和裂隙里, 就是来自 S_f 和 S_w ^[11]。总体上, 该因素为次要的因素, 数量一般 S_f 在 10~100 g/(m²·d), 而对岩石边坡而言, 一次降雨在坡面凹槽和裂隙里形成 S_w 一般在 1~3 kg/m² (具体数量与凹槽和裂隙形态有关)。

F_{in} , F_{out} , M 和 A 都是生物新陈代谢形成的, 是边(斜)坡土壤养分形成的关键。

F_{in} , F_{out} 一般在边(斜)坡上处于得失平衡状态。但是, 在陡峭的岩石边(斜)坡生长高大的落叶植物时, 由于坡外凋落无很难附着坡面, 而边(斜)坡上的植物凋落物(落叶)又飘落到边(斜)坡外面, 导致 $F_{in} < F_{out}$, 即凋落物是进出不能平衡。所以, 在岩石边(斜)坡上, 植物应使用低矮的草本、灌木和藤本植物为主; 只有在有凹槽的地方, 使用乔木。

M 实际上是边坡植物的初级生产力, 考虑到微生物的光合作用很小, 这里只考虑植物的初级生产力。借用亚热带地区草原的初级生产力, 并考虑到岩石边坡的坡度很大, 光照照度小、土层薄等因素, 大致估计边坡的初级生产力在 500~1500 g/(m²·a)^[18]。

M 与 A 之差是边坡净凋落物存量, 按照生态学研究结果, 在亚热带地区, A 在 300~900 g/(m²·a)^[18]。

4 岩石边(斜)坡生态防护工程中水土保持的对策

(1) 精心设计, 特别是锚杆、挂网和喷射基材的配比设计, 既要避免早期滑坡破坏, 也要考虑更长期(10 a 以上)的边(斜)坡土层稳定问题。目前这方面的理论和实践还不完善。

(2) 加强新喷射坡面的覆盖。在植被覆盖坡面前, 控制侵蚀的最有效手段就是使用人工侵蚀控制卷材控制坡面水土流失。这在国内工程中还不常见, 特别是厚层侵蚀控制卷材的使用。

(3) 不同情况, 使用不同的技术。在陡峭的边(斜)坡上, 应使用更抗侵蚀的技术, 目前, 国内最抗侵蚀的技术是植被混凝土护坡绿化技术, 植被混凝土的板结可以随着植物根系的深入生长逐步得到活化, 而早期的强度是抵抗侵蚀的保证。

(4) 在陡峭的岩石边(斜)坡, 喷层厚度必须得到保证。

(5) 岩石边(斜)坡应该使用草类、灌木和藤本植物等低矮植物为主, 以减少边(斜)坡土壤掉落物的丧失。

(下转第 143 页)

表2 蔚汾河流域各级土壤侵蚀强度面积及侵蚀量

级别	面积/ km ²	侵蚀模数/ (t · km ⁻² · a ⁻¹)	侵蚀量/ 10 ⁴ t
一级	282.25	500	14.11
二级	4 057.00	1 500	608.55
三级	3 638.75	3 500	1 273.56
四级	1 926.25	6 000	1 155.75
五级	258.00	9 000	232.20
总计			3 284.18

3 结论

(1) 由于土壤侵蚀过程的复杂性,影响因子众多,要完全定量地估算土壤侵蚀量有一定困难。本研究提出指标模型法,利用 Arc/Info 栅格数据的处理功能,实现各指标的定量描述和综合,在这方面作了有益探索。

(2) 本研究在进行蔚汾河流域土壤侵蚀量估算时,采用的是遥感技术为主、常规手段为辅的信息获取方法。由于受遥感信息源分辨率的限制,在进行土壤侵蚀量估算时,未考虑侵蚀防护措施中坡改梯引起的微地形坡度因子,但这不表明对土壤侵蚀没有影响。

(3) 遥感技术与常规方法相结合,收集不同时相土壤侵蚀影响因子数据,应用指标模型方法完全可以做到土壤侵蚀的动态监测。

参 考 文 献]

- 1] 景可. 中国土壤侵蚀与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 35-60.
- 2] Wischmeier W H. Smith D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains [M]. USDA Agricultural Handbook, 1965.
- 3] 张照录, 崔继红. 通用土壤流失方程最新研究改进分析 [J]. 地球信息科学, 2004(4): 51-55.
- 4] 陈宁强, 戴锦芳. 人机交互土地资源遥感解译方法研究 [J]. 遥感技术与应用, 1998, 13(2): 15-19.
- 5] 卜兆宏, 李士鸿. 水土流失调查的遥感数据处理 [M]. 南京: 东南大学出版社, 1989: 157-186.
- 6] 薛利红, 杨林章. 遥感技术在我国土壤侵蚀中的研究进展 [J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 186-189.
- 7] 于芳, 甘大勇, 朱启疆. 黄土高原小流域土壤侵蚀信息系统初步研究 [C]//黄土高原遥感专题研究论文集. 北京: 北京大学出版社, 1990: 285-301.
- 8] 景可, 郑粉莉. 全国水土流失治理典型 [J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 34-38.
- 9] Yuan JianGang, Fang Wei, Fan Ling, et al. Soil formation and vegetation establishment on the cliff face of abandoned quarries in the early stages of natural colonization [J]. Restoration Ecology, 2006, 14(3): 349-356, 358.
- 10] 张俊云, 周德培. 厚层基材喷射植被护坡的抗侵蚀试验研究 [J]. 西南交通大学学报, 2002, 37(6): 628-631.
- 11] 夏长华, 方雪松. 北京建材化工厂采石场边坡生态修复施工实践 [J]. 地质灾害与环境保护, 2008, 19(3): 90-94.
- 12] 高丽霞, 刘水, 陈阳春, 等. 广州南沙采石场植被生态修复工程土建技术应用及评价 [J]. 广东林业科技, 2008, 24(1): 60-62.
- 13] 骆会欣. 植生袋技术助研石山治理 [OL]. 2009-04-06]. http://news.china-flower.com/paper/paper-newsinfo.asp?n_id=205865.
- 14] 宁丰收, 游霞, 杨海林. 重庆市主城区废弃采石场生态与景观恢复对策 [J]. 水土保持通报, 2005, 25(3): 77-80.
- 15] 都市绿化开发机构, 地面植被共同研究会(日). 地面绿化手册 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2003: 25-26.
- 16] Donald H G, Robbin B. Sotir biotechnical and soil bio-engineering slope stablization [M]. New York: John Willy & Sons, INC, 1996: 30-36.
- 17] 聂维中, 梁世庆, 叶建军. 浅谈坡面覆盖材料 [J]. 水土保持研究, 2007, 13(5): 16-18.
- 18] 李博, 杨持, 林鹏. 生态学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 49-56.

(上接第139页)

参 考 文 献]

- 1] Hudson N W. Soil conservation [M]. 窦葆璋译. 北京: 科学出版社, 1976: 71, 27, 28.
- 2] 任海, 刘庆李, 凌浩. 恢复生态学导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 56-65.
- 3] 叶建军, 周明涛, 许文年. 谈喷射护坡绿化技术 [J]. 水土保持研究, 2004, 11(2): 194-197.
- 4] 叶建军. 边坡生态防护工程中的若干问题探讨 [J]. 水土保持研究, 2007, 14(5): 333-335.
- 5] 许文年, 王铁桥, 李建林, 等. 岩石边坡护坡绿化技术应用研究 [J]. 水利水电技术, 2002, 33(7): 35-37.
- 6] 周颖, 曹映泓, 廖晓瑾, 等. 喷混植生技术在高速公路岩石边坡防护和绿化中的应用 [J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 353-356.
- 7] 周德培, 张俊云. 植被护坡工程技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 102-108.
- 8] 张俊云, 周德培. 厚层基材喷射护坡试验研究 [J]. 水土保持通报, 2001, 21(4): 23-25.