

# 植被护坡机制及应用研究

戚国庆<sup>1,2</sup>, 胡利文<sup>2</sup>

(1. 四川大学 水利水电工程学院, 四川 成都 610065; 2. 广州四航工程技术研究院, 广东 广州 510230)

**摘要:** 植被护坡就是利用植被涵水固土的原理来进行边坡加固及坡面防护。研究结果显示, 植被护坡的机制为: (1) 木本植物深根对边坡岩土体有锚固作用; (2) 草本植物浅根对边坡岩土体有加筋作用; (3) 植被覆盖层可以防止坡面冲刷。植被护坡的特点主要有: (1) 植被护坡在初始时, 作用力较弱, 但随着植物的生长, 作用力逐渐加强; (2) 植被根系作用力及作用范围有限; (3) 植被护坡要求边坡处于相对稳定状态。在此基础上, 对植被护坡技术的环境适应性以及植被护坡技术的流程模式进行探讨, 并提出将传统的边坡加固技术与植被护坡技术有机地结合起来, 发挥二者各自的优点, 既保证边坡的安全稳定, 以及加固措施的长期有效, 又实现坡面植被的快速恢复及生态环境保护。

**关键词:** 边坡工程; 植被护坡; 边坡加固; 环境适应性

**中图分类号:** P 642

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2006)11 - 2220 - 06

## STUDY ON MECHANISM AND APPLICATION OF SLOPE PROTECTION WITH VEGETATION

QI Guoqing<sup>1,2</sup>, HU Liwen<sup>2</sup>

(1. College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;

2. Guangzhou Sihang Institute of Engineering Technology, Guangzhou, Guangdong 510230, China)

**Abstract:** The slope protection with vegetation is to stabilize slope and protect slope surfaces according to the mechanisms of conservation of both moisture and soil with vegetation. Research shows that the mechanisms of the slope protection with vegetation include that (1) root system of woody plant can anchor rock and soil slope bodies; (2) root system of herbaceous plant has reinforcement action for rock and soil slope bodies; and (3) vegetation can prevent the erosion caused by slope surfaces. The chief characters of the slope protection with vegetation can be described as follows: (1) the effort of the slope protection with vegetation is very weak in initial stage, but will increase as vegetation growing; (2) the action range and effort of root system is limited; and (3) relatively stable slope is demanded for the slope protection with vegetation. Based on these, environmental compatibility and routine of the slope protection with vegetation are discussed. Combining the technologies of traditional slope protection and slope protection with vegetation, the respective merit of each method can be displayed, with this method slope stability can be guaranteed, reinforcement measure is durably effective, and immediate revegetation on the slope surfaces and the ecological environment protection are realized.

**Key words:** slope engineering; slope protection with vegetation; slope protection; environment compatibility

**收稿日期:** 2006 - 05 - 26; **修回日期:** 2006 - 09 - 25

**作者简介:** 戚国庆(1967 - ), 男, 博士, 2004年于成都理工大学环境与土木工程学院地质工程专业获博士学位, 现任广州四航工程技术研究院环境生态岩土工程研究所所长, 主要从事地质工程方面的研究工作。E-mail: dr.guoqingqi@163.com

# 1 引言

植被护坡是利用植被涵水固土的原理稳定边坡，控制坡面侵蚀，防治水土流失，保护生态环境<sup>[1~4]</sup>。人类进行植被护坡实践的历史较为久远，早在中世纪就开始利用植被护坡进行河堤护岸及荒山治理。但是，直到 20 世纪，美国、日本及欧洲一些发达国家和地区才开始广泛应用植被护坡技术进行边坡防护。1936 年美国在南加利福尼亚州的 Angeles Crest 公路边坡治理中就应用了植被护坡技术<sup>[5]</sup>。在日本，植被护坡技术的发展已有半个多世纪的应用历史，获得了多项植被护坡技术方面的专利，如液压喷播技术、植被型混凝土、三维网植草护坡、纤维土绿化工法等。从总体上看，目前日本在植被护坡工程技术研究方面处于世界领先地位<sup>[6]</sup>。

我国在植被护坡技术应用方面的研究起步较晚，20 世纪 90 年代以前一般多采用撒草种、穴播或沟播、铺草皮、片石骨架植草等护坡方法。1989 年广东省水利水电科学研究所开始在华南地区进行液压喷播试验。此后，经过 10 a 左右的发展与完善，该项技术已在我国广泛应用。我国 1993 年引进了土工材料植草技术。近年来，我国也开始了类似于客土喷播技术的研究和应用，并取得了一定的进展。在 2000 年，已有岩石坡面喷混快速生态恢复新技术的报道<sup>[7~8]</sup>，但采用的名称有所不同，如喷混植生技术、有机基材喷植、水泥生态种植基、植被混凝土护坡绿化技术等。

尽管植被护坡技术在边坡加固、生态环境保护等方面具有很多优越性，然而，由于植被根系的作用范围及作用力有限，以及植被生长对周围环境的需求等因素，植被护坡技术在应用范围、条件方面尚存在局限性，尤其是植被护坡要求边坡初始处于基本稳定状态。而植被护坡的特点是：最初时的加固作用较弱，随着植物的生长以及繁殖，其边坡加固作用及减轻坡面侵蚀方面的作用会越来越大。因此，单纯的植被护坡对于那些开挖后处于不稳定状态的边坡将无能为力，而必须借助传统的边坡加固技术(锚杆、抗滑桩、挡墙等)先使边坡处于稳定状态。

因此，本文在对植被护坡机制进行研究的基础上，对植被护坡技术的应用范围、适用条件及其环境适应性等进行探讨，并提出将传统的边坡加固技术与植被护坡技术有机地结合起来，发挥二者各自

的优点，既保证边坡的安全稳定，以及加固措施的长期有效，又实现坡面植被的快速恢复及生态环境保护，达到人类活动与自然环境的和谐共处。

## 2 植被护坡机制

### 2.1 深根的锚固作用

木本植物扎根较深，其根系对边坡岩土体具有锚固作用。木本植物根系的最大锚固力为

$$T = 2\pi\mu\gamma \int_0^{\infty} P(z)Q(z)zdz \quad (1)$$

式中： $T$  为木本植物根系的最大锚固力， $\mu$  为根-土间的最大静摩擦因数， $\gamma$  为土体的天然容重， $P(z)$  为根系的平均半径沿深度  $z$  方向的分布函数， $Q(z)$  为根系数目沿深度  $z$  方向的分布函数。

树木根系的锚固力很大，例如，15 a 生油松在 1 000 cm<sup>2</sup> 面积上分布的根系锚固力可达 470 kN<sup>[4]</sup>。同时根的直径越细，则抗拉强度越高。试验结果表明，对于直径为 2~5 mm 的各种类型的树根，其抗拉强度为 8~80 MPa<sup>[5]</sup>。

### 2.2 浅根系的加筋作用

浅层的植草根系对边坡土体具有加筋作用<sup>[5, 9]</sup>，使得边坡土体在植草根系延伸范围内成为土与草根的复合材料，可视为带预应力的三维加筋材料。根据莫尔-库仑准则，草根的加筋作用增加了土体的黏聚力  $c$  值，使其破坏线向上平移  $\Delta c$ ；另外，草根的张拉限制了土体的侧向变形，使  $\sigma_3$  增大到  $\sigma_3 + \Delta\sigma_3$ ，从而使莫尔圆向右平移  $\Delta\sigma_3$ 。  $\Delta c$ 、 $\Delta\sigma_3$  的大小与草根密度、强度及土体性质有关，如图 1 所示。

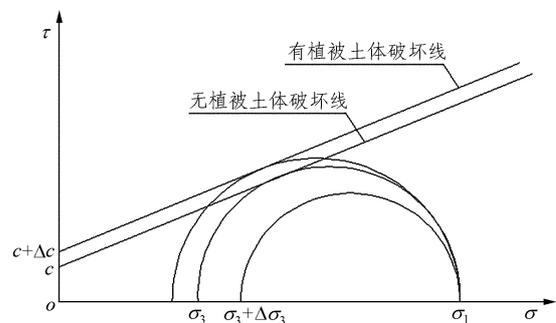


图 1 有、无植被土体的应力圆<sup>[5]</sup>

Fig.1 Stress circles with and without vegetation<sup>[5]</sup>

在草本植物的加筋作用下，土体的抗剪强度可写为

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi + \tau_R \quad (2)$$

式中： $\tau$ 为植物根系加筋作用下的总抗剪强度， $c$ 为土体的黏聚力， $\varphi$ 为土体的内摩擦角， $\tau_R$ 为由于根的加筋作用所增加的土体抗剪强度。 $\tau_R$ 的确定方法为：若在面积为 $A$ 的土体内共有 $n$ 个根，其中有 $m$ 个正交根， $n-m$ 个斜交根，根的抗拉力分别为 $T_1, T_2, \dots, T_n$ ，正交根的剪切变形角分别为 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$ ，斜交根的延伸方向与剪切面的初始夹角分别为 $i_{m+1}, i_{m+2}, \dots, i_n$ ，剪切变形比分别为 $k_{m+1}, k_{m+2}, \dots, k_n$ ，则由于根系加筋所增加的土体抗剪强度 $\tau_R$ 为

$$\tau_R = \frac{\sum_{j=1}^m (T_j \sin \theta_j)}{A} + \frac{\sum_{j=m+1}^n [T_j \sin (90^\circ - \psi_j)]}{A} + \left\{ \frac{\sum_{j=1}^m (T_j \cos \theta_j)}{A} + \frac{\sum_{j=m+1}^n [T_j \cos (90^\circ - \psi_j)]}{A} \right\} \tan \varphi \quad (3)$$

其中，

$$\psi_j = \arctan \left( \frac{1}{k + \tan^{-1} i_j} \right) \quad (j = m + 1, m + 2, \dots, n)$$

一般情况下，禾本科、豆科植物和小灌木对地下 0.75~1.50 m 深处的土壤具有加强作用。无芒雀麦的根可以使其根系范围内的土体抗剪强度增加 13.05 kPa<sup>[5]</sup>。

### 2.3 防止坡面冲刷

下落的雨滴在打击坡面时，把动量传递给土体，产生的分裂力使土体颗粒分离飞溅。在滴溅过程中，雨滴动量越大，撞击分裂力越大，被溅出的土粒数量也越多。地表径流将已被滴溅分离的土粒带走，产生坡面侵蚀。这对采用传统方法加固的边坡造成危害，如使坡面框架梁架空、虚脱、断裂等，往往造成加固结构失效，导致边坡失稳。

植被能拦截高速下落的雨滴，减少雨滴数量、滴溅能量及飞溅的土粒。更为重要的是，植被能够抑制地表径流并削弱雨滴溅蚀，从而能控制土粒流失，通常情况下，土体的流失量随植被覆盖率的增加呈指数关系降低<sup>[5, 10]</sup>。

模拟降雨冲刷试验的结果(见图 2)<sup>[10]</sup>显示：面积为 40 m<sup>2</sup> 无植被覆盖的裸露边坡水土流失比较严

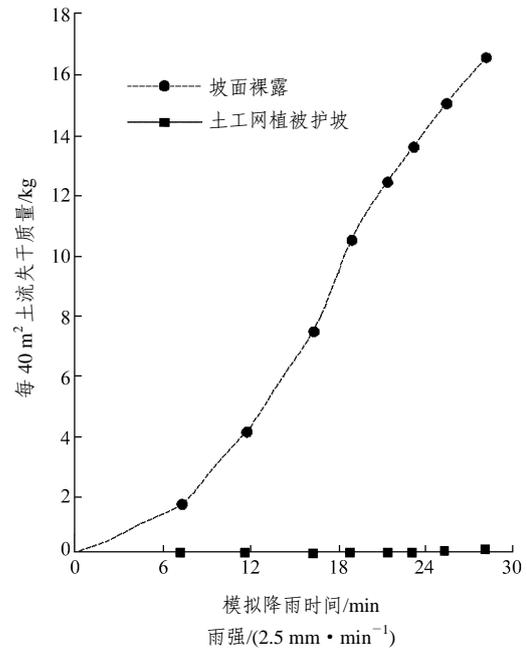


图 2 模拟降雨冲刷试验结果<sup>[10]</sup>  
Fig.2 Results of test for simulating rainfall erosion<sup>[10]</sup>

重，模拟降雨历时 19 min 之前土流失速率逐渐增加，19 min 之后土流失速率略有降低，30 min 时土流失干质量以干重度计算达 17 kg，而 40 m<sup>2</sup> 经植被防护的边坡基本上无水土流失情况发生。

### 3 植被护坡技术的环境适应性

虽然植被护坡技术具有很多优点，但是，植被护坡技术对周围环境有较强的依赖性，任何一种植被护坡方法都有其适用条件以及适用环境。如日本于 1976 年开发出的厚层基料喷射护坡技术，主要用于软弱岩石边坡的生态防护。日本客土喷播厚度为 2~3 cm，只适合日本国土气候带，不适合我国热带、亚热带地区植物的水热需求，草坪往往因伏秋干热而枯死。此外，香根草护坡方法要求温暖湿润气候环境，藤蔓植物护坡要求湿润气候环境、土壤肥沃。

依据相关研究<sup>[4, 10]</sup>，本文总结出各类植被护坡方法的环境要求见表 1。

植被护坡方法在适宜的条件下，可以综合考虑草、花、灌、乔等多种类植物，将深根植物与浅根植物有机结合，充分发挥深根的锚固作用与浅根的结合作用，以促进多样性、稳定性的坡面植物群落的迅速建立，起到植物护坡的功能。

表 1 各类植被护坡方法的环境要求

Table 1 Environmental requests of different slope protection methods with vegetation

植被护坡方法	适用边坡坡率		边坡类型
	常用坡率	上限值	
铺草皮护坡	1 : 1.0	1 : 0.75	土质、强风化岩质边坡
三维植被网护坡	1 : 1.5	1 : 1.25	土质、强风化岩质边坡
植生带护坡	1 : 1.5~ 1 : 2.0	1 : 1.25	土质、土石混合边坡
香根草篱护坡	≤1 : 1.0	1 : 1.00	土质边坡
液压喷播植草	1 : 1.5~ 1 : 2.0	1 : 1.25	经处理后的土质、土石混合边坡
挖沟植草护坡	1 : 1.0~ 1 : 1.25	1 : 0.75	土质、泥岩、页岩等软岩边坡
土工格室植草	1 : 1.0	1 : 1.00	泥岩、灰岩、砂岩等岩质边坡
浆砌片石骨架植草	1 : 1.0~ 1 : 1.5	1 : 1.00	土质、强风化岩质边坡
客土喷播护坡	≤1 : 0.3	1 : 0.30	地质环境恶劣的石质、质地密实坚硬的土质边坡
钢筋混凝土框架植生护坡	≥1 : 0.5	1 : 0.30	超高、浅层稳定性差且难以绿化的贫瘠边坡
藤蔓植物护坡	≥1 : 0.3	-	已修建挡土墙等构造物的边坡

### 4 植被护坡与传统护坡方法相结合

不论是哪种植被护坡方法，均要求目前的边坡处于稳定状态。边坡的稳定性评价主要应考虑两类问题：一类是受开挖卸荷过程控制的变形稳定性问题；另一类是受结构面及其组合控制的强度稳定性问题<sup>[11]</sup>。此外，作者认为，进行植被护坡的边坡除了稳定性满足要求以外，还应满足变形要求，也就是在植被生长过程中，边坡不应产生较大的变形

位移，这就需要与传统的边坡加固技术相结合。因此，在进行植被护坡时，一方面要对边坡的稳定性进行分析评价，在此基础上，应用传统的边坡加固技术使边坡处于稳定状态，同时达到变形要求；另一方面要依据现场边坡的环境选择合适的植被护坡方式。

周德培和张俊云<sup>[4]</sup>给出了植被护坡模式总体流程(见图 3)。该模式具有如下特点：(1) 突出边坡工程调查，要求所选植被种类与当地植被环境及其已有植物种类一致，使之在工后较短时间内融入当地自然环境；(2) 突出边坡稳定性分析和判别，根据边坡稳定性特征，选择合理有效的工程措施；(3) 强调传统的边坡加固工程措施与植被护坡的有机结合，即边坡加固工程措施不同，植被护坡的方法也不同，应与之适应。

### 5 工程实例

对于岩石边坡上的植被，可用无限坡模型进行计算，而对于土坡上的植被，其对土坡的加固作用可通过提高土坡表面强度参数获得。植被无限坡安全系数为

$$F_s = \frac{c + A \cos^2 \alpha \tan \varphi}{B \sin \alpha \cos \alpha} \quad (4a)$$

其中，

$$\left. \begin{aligned} A &= q_0 + \gamma(L - L_w) + (\gamma_{sat} - \gamma_w)L_w \\ B &= q_0 + \gamma(L - L_w) + \gamma_{sat}L_w \\ c &= c_r + c_s \end{aligned} \right\} \quad (4b)$$

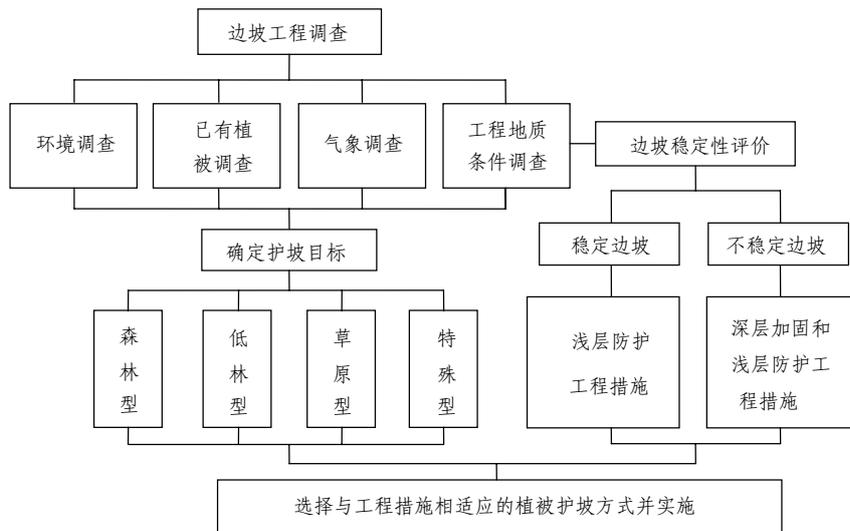


图 3 植被护坡模式总体流程<sup>[4]</sup>

Fig.3 Flowchart of slope protection with vegetation<sup>[4]</sup>

式中： $F_s$ 为边坡安全系数； $\alpha$ 为边坡坡角； $L$ 为土层总厚度； $L_w$ 为饱和土厚度； $c_r$ 为根系黏聚力，对于深根植物，为植被根系锚固强度，对于浅根植物，为植被根系的加筋强度； $q_0$ 为植被荷载； $c_s$ 为土壤黏聚力； $\varphi$ 为有效内摩擦角； $\gamma_{sat}$ 为土的饱和重度； $\gamma_w$ 为水的重度。

依据上述理论及方法，本文对永湖渡槽段弃渣土石混合碱性边坡进行了生态防护设计施工。该边坡最大坡角为 $40^\circ$ ，局部有小滑坡，采用简化 Bishop 法计算，安全系数为 1.1。考虑植被根系的加固作用，设根系深度为 0.5 m 左右，则其表层滑动安全系数为 1.95。

植被采用宿根黑麦草、百慕大、百喜草、白车轴草和勾叶画眉草按比例配植，采用竹筋和钢筋加固坡面并用三维生态网固土。活性营养土覆土厚度 15~20 cm。坡顶设截水沟，坡面布排水盲沟进行排水。利用耐特龙高强土工网，采用 U 型钉固定于坡面上并覆土，然后覆盖地膜保水。具体实施步骤如下：

(1) 施工准备：包括土壤测定、不良土壤改造(或活性土壤塑造)、边坡整形、种子处理及植物材料选取。

(2) 安装锚筋：根据锚筋时效性，安装短效锚固的竹筋和长效锚固的钢筋，当竹筋腐蚀后，植被根系及钢筋可以弥补所需浅层锚固力。

(3) 安装植生袋：将植生袋储存于保水保肥等生长基材，并与钢丝网或土工格栅等捆扎。

(4) 安装格栅：采用土工格栅和三维生态网，网间搭接宽度不小于 10 cm，每隔 30 cm 用铁丝扎结。直接用 U 型钉固定格栅。采用垫块使网与坡面保持 2/3 覆土厚度的距离。

(5) 植被种植：创造出草灌混合生态。

(6) 前期养护：采用地膜保温防雨，避免基材混合物在没有一定黏聚力的情况下流失。用高压喷雾器将养护水成雾状湿润坡面基材，发芽期湿润深度控制在 3~5 cm，出芽期早晚各养护 1 次，每隔 15 d 采用消毒剂防植物病虫害。

通过养护观测，播种 40 d 后坡面植被覆盖率达 80% 以上，2 个月后达 95%，茎高平均达 21 cm，最大根深 30 cm，施工 3 个月后，覆盖率达 100%。坡面植被叶色随季节和坡面土壤含水量的变化而不断变化。该边坡经过多次台风和暴雨仍完好无损，达

到了表面防护的目的(见图 4)。



(a) 原貌



(b) 植被护坡后

图 4 植被护坡工程实例

Fig.4 Engineering case of slope protection with vegetation

## 6 结 语

20 世纪末是环境岩土工程初步形成和发展的世纪，21 世纪则是环境岩土工程系统的相互促进和协调发展的世纪，在从事岩土工程建设时，应全面考虑社会经济、人口与军事等发展的需要，充分利用原有的地理、地质和生态环境条件和最新科技，尽量延长建筑物的寿命，减少对国土资源、已有建筑物与地质和生态环境的破坏；采用环保建筑材料、再生的和可再回收利用的材料，选择合适的设计方案与施工方法，追求建筑与自然生态环境的相互协调。

植被护坡首先要求边坡处于稳定状态，同时，变形也要满足要求。这就需要将植被护坡与传统的边坡加固技术有机结合，建立既稳固又有生态效应的防护结构体系，并且应考虑植被护坡方式的环境适应性。与此同时，综合考虑草、灌、花、乔等多种植物，形成优美、协调、稳定的景观，在边坡植被防护设计时所选植物除考虑景观效果外兼顾经

济效益。

岩质边坡的生态护坡治理是一门新兴边缘学科,它涉及到岩石工程力学、地质学、生物学、土壤学、肥料学、园艺学、草业学、林学、环境生态学等。岩石边坡的生态治理研究刚起步,尚处于理论研究与应用技术的摸索阶段,以后应加强此方面的研究。

### 参考文献(References):

- [1] 冯俊德. 路基边坡植被护坡技术综述[J]. 路基工程, 2001, (5): 20 - 23.(Feng Junde. Summarization of subgrade slope protection with vegetative cover technique[J]. Subgrade Engineering, 2001, (5): 20 - 23.(in Chinese))
- [2] 张俊云, 周德培, 李绍才. 岩石边坡生态护坡研究简介[J]. 水土保持通报, 2000, 20(4): 36 - 38.(Zhang Junyun, Zhou Depei, Li Shaocai. Brief introduction to study on slope eco-engineering for rock slope protection[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2000, 20(4): 36 - 38.(in Chinese))
- [3] 谭少华, 汪益敏. 高速公路边坡生态防护技术研究进展与思考[J]. 水土保持研究, 2004, 11(3): 81 - 84.(Tan Shaohua, Wang Yimin. Research progress and thinking of bioengineering techniques for slope protection in expressway[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(3): 81 - 84.(in Chinese))
- [4] 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. (Zhou Depei, Zhang Junyun. Bio-geotechnical Technology of Vegetation[M]. Beijing: China Communications Press, 2003.(in Chinese))
- [5] 张俊云, 周德培, 李绍才. 高速公路岩石边坡绿化方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1 400 - 1 403.(Zhang Junyun, Zhou Depei, Li Shaocai. Study on greening method for rock slope in highway project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1 400 - 1 403.(in Chinese))
- [6] 李旭光, 毛文碧, 徐福有. 日本的公路边坡绿化与防护——1994 年赴日本考察报告[J]. 公路交通科技, 1995, 12(2): 59 - 64.(Li Xuguang, Mao Wenbi, Xu Fuyou. Japanese highways slope landscape planning and protection—investigation report in Japan in 1994[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 1995, 12(2): 59 - 64.(in Chinese))
- [7] 马万权, 沈康健, 邓辅唐. 客土喷播技术对石质边坡防护的运用[J]. 云南交通科技, 2003, 19(3): 7 - 11.(Ma Wanquan, Shen Kangjian, Deng Futang. Applying the technology of spray irrigation for stone protective coating on the border slope[J]. Yunnan Communication Science and Technology, 2003, 19(3): 7 - 11.(in Chinese))
- [8] 章梦涛, 邱金淡, 颜冬. 客土喷播在边坡生态修复与防护中的应用[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(3): 10 - 12.(Zhang Mengtao, Qiu Jindan, Yan Dong. Application of external-soil spray seeding technique to slopes natural eco-restoration and protection[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2004, 2(3): 10 - 12.(in Chinese))
- [9] 王可钧, 李焯芬. 植物固坡的力学简析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 687 - 691.(Wang Kejun, Lee C F. Brief mechanical analysis of bioengineering techniques for slope protection[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 687 - 691.(in Chinese))
- [10] 娄仲连, 董志良. 岩质边坡的生态恢复工程新技术研究[J]. 地下空间, 2001, 21(4): 318 - 322.(Lou Zhonglian, Dong Zhiliang. Study on new technology of ecological restoration of rock slope[J]. Underground Space, 2001, 21(4): 318 - 322.(in Chinese))
- [11] 赵华, 黄润秋. 岩石边坡生态护坡特点及其关键技术问题探讨[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(1): 87 - 90.(Zhao Hua, Huang Runqiu. Characters of biological protection of rock slopes and analysis of its key problems[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, 31(1): 87 - 90.(in Chinese))