

DOI:10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0108

田青怀,廖绫,张洋宁,肖振华,李威.厚层基材(TBS)工艺在功果桥电站边坡生物防护中的应用.草业科学,2016,33(10):2144-2152.
Tian Q H, Liao L, Zhang Y N, Xiao Z H, Li W. Application of TBS in biological protection of side slop at Gongguoqiao hydropower station. Pratacultural Science, 2016, 33(10): 2144-2152.

厚层基材(TBS)工艺在功果桥电站边坡生物防护中的应用

田青怀¹, 廖 绫¹, 张洋宁¹, 肖振华¹, 李 威²

(1. 浙江华东建设工程有限公司, 浙江 杭州 310030;

2. 华能澜沧江水电股份有限公司苗尾·功果桥水电工程建设管理局, 云南 大理 672708)

摘要:为了探索西部边坡生物防护模式,将厚层基材(TBS)工艺引入到云南功果桥水电站边坡生物防护治理工程中,以此实例介绍了 TBS 工艺流程及边坡防护植物的选择,对绿化后的植被生长情况进行了数年的跟踪调查。结果表明,只要合理选择防护物种,TBS 工艺在西部边坡生物防护中完全可以达到预期效果并具有推广价值。

关键词:厚层基材;水电站边坡;生物防护;应用

中图分类号:S688.9;Q731.9

文献标志码:A

文章编号:1001-0629(2016)10-2144-09*

Application of TBS in biological protection of side slop at Gongguoqiao hydropower station

Tian Qing-huai¹, Liao Ling¹, Zhang Yang-ning¹, Xiao Zhen-hua¹, Li Wei²

(1. Zhejiang Eastern China Construction Project Ltd., Hangzhou 310030, China;

2. Miaowei · Gongguo Bridge Hydroelectric Engineering Construction Administration of

Huaneng Lancang River Hydropower Co., Ltd., Dali 672708, China)

Abstract: To explore biological protection pattern of western slop, the TBS technology was introduced to manage slop biological protection at Gongguoqiao hydropower station in Yunnan, which presented TBS process and the choice of slop protection plant. Meanwhile, vegetation growth survey was followed after greening for several years, which proved that TBS technology can achieve the desired effect and has promotional value if reasonable species were selected.

Key words: TBS; side slop of hydropower station; biological protection; application

Corresponding author: Tian Qing-huai E-mail: 15216998@qq.com

地球的环境日益恶化,人类在不断地采取不同的措施进行改善,我国也已经将生态环境治理纳入每年的政府财政预算中。目前,全国国土、公路、建设以及房地产等系统均在对历史遗留的和建设生产中不可避免破坏的矿山以及新开挖边坡等,采用不同工艺进行着生态治理修复^[1-2]。传统的绿化方式如开挖种植、贴草皮、格构梁覆土绿化及客土吹附等

曾解决过缓坡和土质边坡的绿化问题,但对岩质边坡和坡度较大的边坡特别是混凝土封闭坡面则无计可施或实施后效果不持久,不理想。20 世纪 90 年代,我国工程研究人员引进了国外先进技术,结合国内边坡设计水平、自然气候和经济条件等,不断地试验、研究和改进,形成了一套独立的适合我国国情的生物防护技术^[3]即厚层基材(TBS)工艺。其主要原

* 收稿日期:2016-03-03 接受日期:2016-06-14

第一作者:田青怀(1977-),男,浙江杭州人,高级工程师,本科,主要从事高边坡生态修复工程。E-mail:15216998@qq.com

理为在裸露坡面上喷附一层结构类似于自然土壤且能够贮存水分和养分的植物生长所需的基质材料,使其中植物与土木工程措施有机结合,以减轻工程坡面的不稳定性 and 侵蚀,通过植被根系的力学加固^[4]和地上生物量的水文效应^[5-6]达到护坡和改善生态环境的目的,进而解决裸露边坡无法生长植物的难题。由于其具备施工灵活便捷,生态效益和经济效益高等特点,到目前为止已成为边坡生态防护的主流方式,特别是在我国东部地区,已被大力发展和推广,并受到了社会的检验和青睐。

新建电站为国家的发展做出了卓越的贡献,但是建设过程中对周边原始生态的破坏问题也愈显突出,为此,被破坏区域的生态修复率已成为新建电站是否具备发电条件的一项硬性指标。对云南功果桥水电站缓坡或土质边坡采用格构梁结合覆土种植,对水泥封闭边坡与高陡边坡则采用爬藤进行绿化,但见效慢、生态修复率低。TBS 工艺可以提高边坡生态修复率,加快绿化进程,但是工程区蒸发量大于降水量的干热河谷气候对该工艺提出了严峻的考验。在云南地区采用 TBS 工艺的真实案例较少,相关文献报道鲜见,可参考依据不足,本研究首次将 TBS 工艺应用到云南功果桥水电站开挖边坡的生物防护中,以期以工程实例为契机和基础,研究出一套适合云南地区的 TBS 技术体系,为相关工程建设提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 工程地概况

功果桥水电站位于云南省大理州云龙县旧州镇媳

姑坝社,地理位置为 $98^{\circ}52' - 99^{\circ}46' E$, $25^{\circ}28' - 26^{\circ}23' N$,气候呈现旱雨季分明、雨热同季、干凉同季、冬春干旱的特点。治理区及其周边最低气温 $-8.5^{\circ}C$,最高气温 $35.6^{\circ}C$,多年平均气温 $17.8^{\circ}C$,每年最冷月为 1 月,平均气温 $7.6^{\circ}C$,最热月为 8 月,平均气温 $21.6^{\circ}C$,多年平均最小、最大蒸发量分别为 1 600 和 1 900 mm,相对湿度 75% 左右;气温年变化大于日变化,年较差平均 $15.1^{\circ}C$,日较差平均 $14.7^{\circ}C$ 。年平均降水量 729.5 mm,但降水量在时间和地区的分配上极不平衡,全年降水多集中在 6 月—10 月,约占全年降水量的 80%。东部、西部降水量偏少,属少雨区;东北部、西南部降水量偏多,属多雨区,特别是地处西南部的漕涧坝,年平均降水量高达 1 659.7 mm。周边有丰富的植物种群,有暖性针叶林、常绿阔叶林、硬叶常绿阔叶林和杜鹃灌丛(*Rhododendron dumicola* Tagg et Forrest)等多种植被类型,有高等植物 170 多种^[7]。

1.2 施工区组成及概况

由坝后右岸边坡、观礼台上边坡及坝后左岸边坡 3 部分组成的工程施工区均由混凝土封闭,坡面上无任何绿化(图 1、2)。

1) 坝后右岸边坡:混凝土边坡,呈梯形状,坡脚长约 200 m,坡长约 70 m,坡度 $55^{\circ} \sim 60^{\circ}$,开挖形式基本为一坡到底型,无马道,面积约 10 000 m^2 ;

2) 左岸观礼台上边坡:混凝土边坡,三角形,坡脚长约 100 m,坡长约 10 m,坡度 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$,面积约 10 000 m^2 ;

3) 坝后左岸边坡:混凝土边坡,长方形状,坡脚长约 60 m,坡长约 50 m,中间设马道,面积约 3 000 m^2 。



图 1 坝后右岸边坡

Fig.1 The right bank slope behind the dam



图 2 观礼台上边坡及坝后左岸边坡

Fig.2 The reviewing stand behind the dam slope and the slope on the left bank

1.3 材料

1.3.1 植物种类 植物种类及用量如表 1 所示。为丰富坡面植物种类,改善坡面景观,治理工程中选用了高羊茅、狗牙根、山合欢、木豆、猪屎豆、坡柳、翅荚决明、胡枝子、紫穗槐、刺槐、马棘、多花木蓝、紫花苜蓿和野花组合。

1.3.2 基材 混合基材由当地表层种植土、泥炭土、有机肥、三元复合肥、草纤维、保水剂和固化剂等材料组成。TBS 工艺材料基本情况如表 2 所示、基材配比如表 3 所示。

1.4 方法

1.4.1 TBS 生物防护技术 采用特制 PE 网材,网材左右搭接间距 10~20 cm,视坡面平整度调整,锚钉采用“J”型,规格 Φ6 mm,L12~20 cm,4~6 枚·m⁻²,梅花形布置;网材与坡面间距保持 5~6 cm,贴面不足区域采取垫层解决。将基材以及按既定比例配合的混合种子放入搅拌机内充分拌合,形成类团粒结构的混合基材,由高压风喷射于铺设好 PE 铁丝网的坡面上,形成植物生长的基质层。技术实施时间为 2012 年 5 月—9 月,前期养护持续 45 d 左右。

1.4.2 植被调查 于 2012—2015 年对施工区域采用样线法进行植被调查^[8],利用 GPS 定位并记录样方所在的海拔和经纬度。选择具有代表性的混凝土边坡植被地段确定样方范围,每个坡面选择 10 个样方。样方确定后采用目测方法根据生物防护的作用和目的着重调查植物生长状况,包括植物种类、盖度、高度等指标。

表 1 植物种类及种子用量

Table 1 The plant species and seed dosage

植物种名 Plant species	用量 Seed dosage/ g · m ⁻²	占种子总用 量百分比 Percentage of total amount/%
高羊茅 <i>Festuca arundinacea</i>	15	34.09
狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	5	11.36
山合欢 <i>Albizzia macrophylla</i>	2	4.55
木豆 <i>Cajanus cajan</i>	2	4.55
猪屎豆 <i>Crotalaria pallida</i>	3	6.82
坡柳 <i>Salix myrtillacea</i>	2	4.55
翅荚决明 <i>Cassia alata</i>	3	6.82
胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	2	4.55
紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>	1	2.27
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	1	2.27
马棘 <i>Indigofera pseudotinctoria</i>	2	4.55
多花木蓝 <i>Indigofera amblyantha</i>	2	4.55
紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	2	4.55
野花组合 Wildflower portfolios	2	4.55
合计 Total	44	100

表 2 材料基本情况表
Table 2 Basic information of material

材料名称 Material name	来源 Origin	基本情况 Basic information
园土或肥土 Garden soil or fertile soil	云南大理 Dali, Yunnan	浅表层,富含有机质 Superficial zone, rich in organic matter
泥炭土 Peat soil	吉林长春 Changchun, Jilin	有机质含量 60.2%,pH 5.6 Content of organic matter: 60.2%, pH: 5.6
草纤维 Grass fiber	浙江长兴 Changxin, Zhejiang	长 Length 3~5 cm,宽 Width 2 mm
畜禽粪便 Livestock and poultry manure	云南大理 Dali, Yunnan	充分发酵 Full fermentation
酵母种剂 Yeast strain agent	浙江杭州 Hangzhou, Zhejiang	分解菌为主 Decomposing bacteria dominates
肥料 Fertilizer	浙江杭州 Hangzhou, Zhejiang	复合肥 Compound fertilizer(N:P:K=15:15:15)
保水剂 Water-retaining agent	浙江杭州 Hangzhou, Zhejiang	吸水率 500~600 倍 Water absorption rate:500~600 times
固化剂 Curing agent	法国 France	特性粘度 1 250 mL·g ⁻¹ ,成膜性良好 Viscous property is 1 250 mL·g ⁻¹ , Good film forming property
种子 Seed	混合 Mixture	

表 3 基材配比
Table 3 Process matrix

材料名称 Material name	材料要求 The material requirement	使用量 Amount
土壤 Soil	园土或肥土 Garden soil or fertile soil	0.66 m ³ ·m ⁻²
基质 Base material	泥炭土 Peat soil	6 kg·m ⁻²
	草纤维 Grass fiber	8 kg·m ⁻²
	畜禽粪便 Livestock and poultry manure	6 kg·m ⁻²
	酵母种剂 Yeast strain agent	50 g·m ⁻²
	肥料 Fertilizer	100 g·m ⁻²
保水剂 Water-retaining agent	进口 Imported	50 g·m ⁻²
固化剂 Curing agent	进口 Imported	50 g·m ⁻²
种子 Seed	混合 Mixture	44 g·m ⁻²

2 结果

2.1 植物群落变化

在第 1 年,高羊茅、紫花苜蓿、木豆、猪屎豆、刺槐、马棘和多花木蓝生长健壮,表现良好;狗牙根、山合欢、坡柳、翅荚决明、野花组合、爬山虎和常春藤表现一般,胡枝子和紫穗槐未见生长(表 4)。植被恢复第 2、3 年,山合欢、坡柳、翅荚决明生长量变化较大,表现良好;前期生长良好的猪屎豆和刺槐则消失不见;地被植物和藤本植物经过 3 年的生长,表现更加良好。综合植被生长的盖度及高度情况,该工程 TBS 绿化取得了很好的效果,边坡植被盖度在 90%以上,没有发生大面积的水土流失,景观效果显著。该边坡植被种群已

形成了稳定的多样性群落,大量的植物已经适应了当地气候,表现出了良好的适应性和稳定性,但是依然有不少物种在雨季集中、干旱期长的立地条件下出现了退化、快速消亡等不适应现象。

2.2 施工效果

对该边坡施工工艺、生态修复效果进行了近 3 年的持续观测,施工 20 d 后先锋物种开始发芽,3 个月后绿色覆盖坡面,6 个月后坡面植被盖度超过 90%,植被中生长着不同品种的小灌木,密度 8~10 株·m⁻²,人工引入的观赏性花卉争艳怒放,同时已有大量的当地野生植物入侵,形成了多物种植被群落的雏形。3 年后,坡面植被物种在不断竞争中趋于稳定,先锋植物在夏季过分潮湿、冬春季极端干旱的气候下条件逐渐

表 4 植被种群组成及表现

Table 4 Species composition and vegetation

植物种名 The species name	生长状况(1 年后) Growth status (later a year)	生长状况(2 年后) Growth status (after two years)	生长状况(3 年后) Growth status (after three years)	生活型 Biotype
高羊茅 <i>Festuca arundinacea</i>	良好 Very good	一般 The general	不良 Bad	多年生草本 Herbaceous perennid
狗牙根 <i>Cynodondactylon</i>	一般 The general	良好 Very good	良好 Very good	多年生草本 Herbaceous perennid
紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	良好 Very good	一般 The general	一般 The general	多年生草本 Herbaceous perennid
木豆 <i>Cajanus cajan</i>	良好 Very good	一般 The general	一般 The general	灌木 Shrub
猪屎豆 <i>Grotalaria pallida</i>	良好 Very good	淘汰 Be sifted out	淘汰 Be sifted out	灌木 Shrub
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	良好 Very good	淘汰 Be sifted out	淘汰 Be sifted out	灌木或半灌木 Shrub or subshrub
马棘 <i>Indigofera pseudotinctoria</i>	良好 Very good	良好 Very good	良好 Very good	灌木 Shrub
多花木蓝 <i>Indigofera amblyatha</i>	良好 Very good	良好 Very good	良好 Very good	灌木 Shrub
山合欢 <i>Albizia kalkora</i>	一般 The general	良好 Very good	良好 Very good	灌木或半灌木 Shrub or subshrub
坡柳 <i>Dodonaea</i>	一般 The general	良好 Very good	良好 Very good	灌木 Shrub
翅荚决明 <i>Cassia alata</i>	一般 The general	良好 Very good	良好 Very good	灌木或半灌木 Shrub or subshrub
胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	未见 Not found	未见 Not found	未见 Not found	灌木或半灌木 Shrub or subshrub
紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>	未见 Not found	未见 Not found	未见 Not found	灌木或半灌木 Shrub or subshrub
野花组合 Portfolios of wildflower	一般 The general	良好 Very good	不良 Bad	地被植物 Ground cover plants
爬山虎 <i>Parthenocissus tricuspidata</i>	一般 The general	良好 Very good	良好 Very good	藤本植物 Vine
常春藤 <i>Hedera nepalensia</i> ver. <i>sinensis</i>	一般 The general	良好 Very good	良好 Very good	藤本植物 Vine

注:灌木品种数量 ≥ 5 株 $\cdot m^{-2}$,植株平均高度 ≥ 10 cm,枝叶繁茂为良好;品种数量1~2株 $\cdot m^{-2}$ 为一般;植株明显生长不良、未见或消亡为淘汰;草本植物平均盖度 $\geq 90\%$ 为良好,75%~90%为一般, $\leq 75\%$ 为不良。

Note:The good shrub species with lush vegetation, density is more than 5 plants per square meters, the mean height is more than 5 cm; the ordinary species density is about 2 plants per square meters; plants failed to grow or disappeared is elimination; mean grass coverage is 90% is good and 75% is ordinary.

退化,原配方中个别物种已消亡,适应当地气候的物种与当地物种生长茂盛,种间竞争趋于正常,相互平衡后逐渐形成了优势种群。栽植的灌木成活率100%,爬山虎、常春藤两种爬藤类植物成活率98%,在前期人工牵引下已朝既定方向攀爬并向四周扩展,形成了覆盖裸露坡面的绝对趋势。最终构成了以灌木为主,草、花、藤共存的多样性植物群落结构。

期间经历了2013年近两个月的持续阴雨、大坝底孔换水和泄洪等高强度雨水冲刷未出现基质滑落的现象,2014年1月—3月右岸分别经历24与20 d的养护断水,对植物造成较大的伤害,但恢复供水后均得到返青,进一步证明了TBS工艺在此电站边坡上应用的可行性。植被建成后的整体效果如图3、4、5所示。



图 3 生物防护边坡的整体效果

Fig.3 The overall effect of biological protection of slope



图 4 植被群落的组成

Fig.4 The composition of vegetation communities



图 5 观赏植物在坡面的效果

Fig.5 Ornamental plants in the slope effect

3 讨论

3.1 植物种类的选择

在 TBS 植被护坡技术中,植物种类选择采用优势群落+伴生群落+试验群落+观赏群落的搭配原则^[9],保证发挥先锋种群的绝对优势,使其最大限度地生根发芽,发挥固土护坡、涵养水源、遮阳挡风等保护功能,促进后续植物的顺利成长。草本植物播种后数月生长茂密,固土护坡、防止冲刷效果明显,但禾本科草易退化衰老,必须采用寿命长、耐干旱、耐瘠薄,固土

护坡及景观功能胜于草本的灌木,如马棘、多花木蓝、山合欢等的优势才是生物防护成功之根本。在植被建植初期,并不追求高的草本盖度,使灌木能够充分生长通过自然演替达到边坡建植森林的目的^[10]。本技术推广研究中将草、灌混播护坡,加上藤本植物的攀岩效果,不仅提高了整个坡面的植被修复盖度,缩短了绿化见效时间,同时加入野花组合,极大地提升了施工坡面的观赏性。

TBS 植被护坡技术中的植物种类选择,经历了从简单到多样、从传统技术到现代技术的发展过程。最

初的植物种类局限于园林草坪物种,不仅养护成本高,且生态效益不理想。美国自 1995 年以来就强调乡土物种的利用和野花植物的生态景观功能^[11]。而日本也强调乡土植物的利用,且主张利用灌木进行公路边坡防护,要求边坡绿化结合坡面综合防护进行^[12]。有研究也曾提出,开发利用本土优良的水土保持植物资源是紫色土丘陵区断面植被恢复、生态治理的必经之路^[13]。

结合岩石与混凝土边坡干旱、无种植土壤层的生态环境,本技术提出了草、灌、花立体构建和谐共融的植被系统;与根据生物气候的地带性,边坡环境的适应性,植物形态共生的互补性,以及生态景观的统一性,以灌木为主,多科属、多品种结合,构建乔、灌、草、藤、花立体群落^[14-16]的观点基本一致;与我国南方地区进行生态恢复、岩质边坡绿化植物应用搭配的基本原则相一致^[17]。

相比草本植物,灌木对水、肥的需求少,适应性强。灌木的深根伸入坡体内部,一定程度上可起到锚固坡体的作用^[18]。经过 3 年的自然生长与发展演变,坡面形成了以固土护坡能力强、景观效果好的灌木为优势种群,大面积覆盖基质的草和其它地被植物为伴生种群,小乔木与花卉局部点缀的共生群落。该群落可自然协调生长与演替且与周围自然生态环境基本融合。从跟踪调查结果来看,灌木中的多花木兰、马棘、山合欢、坡柳、翅荚决明能更好地适应功果桥水电站坝后边坡困难立地条件,木豆、高羊茅、狗牙根、苜蓿、野花组合也较适应该环境。

3.2 生物防护模式

功果桥水电站边坡生物防护工程中所采用 TBS 工艺在连续雨季、大坝泄洪以及底孔换水等综合因素作用下基质流失量小。在长期干旱条件下未出现严重龟裂而掉块的现象,基质中前期先锋类植物虽然出苗缓慢,但后期还是覆盖了坡面,不仅阻隔了部分降水渗透,也有效防止了水土流失,给后续植物营造了有利的生存环境,保证了灌木类的顺利成长。木本植物长势良好,种类繁多,与草本及当地入侵的野生植物形成了一个共生的多样性植被系统。综合来看,采取 TBS 工艺对该边坡进行生物防护的生态效果较为理想,基本达到了边坡生物防护的预期目的。

发达国家如美国、法国、加拿大和澳大利亚等对边坡绿化很重视^[18-19]。如日本,在工程建设中的主导思想是建设与绿化同步进行。国外边坡绿化常用的方法有钢筋水泥框格法、植生卷铺盖法、客土植生带法、纤维绿化法、生态多孔混凝土绿化法以及客土喷射绿化

法等。其中客土植生带法、纤维绿化法以及生态多孔混凝土绿化法可用于岩石边坡绿化^[20]。但是客土植生带法、纤维绿化法和客土喷射绿化法的共同弱点是强度很低,不能承担边坡防护作用,并且客土植生带法只能用于缓坡,纤维绿化法和客土喷射绿化法有着保水性能差、不耐旱等缺点。生态多孔混凝土绿化法强度比较高,防护作用好,但也存在基材为植物提供养分能力差且成本过高的问题。目前,国内在边坡防护与绿化方面的研究多限于模仿和引进国外的边坡防护绿化方法。有的生物防护模式由于地理位置、气候条件的差异,很难适应植物的生长。

TBS 生物防护模式中,PVC 铁丝网的作用至关重要,既可以对边坡进行前期的包容而保持一定的稳定性,又可以起到喷播后基质与坡面联系的加筋作用,网材质量的选择和施工决定了整个边坡植物防护系统的持久性。植被形成后,PVC 铁丝网和植物的根系纠缠在一起,共同发挥防冲刷的作用。基材需要含有满足植物生长 3~5 年的养分。

另外一个重要因子是基质。为了使基层紧实,基材中添加了碱性的土壤固化剂,将 SY、GT 土壤固化剂和水泥掺入砂壤土,固化剂能显著提高砂壤土的力学性能和抗冻性能;在同一个固化剂掺量下,其力学性能和抗冻性能随着水泥含量的增加而提高;固化剂掺量、水泥含量与土壤含量三者之间存在协调性^[21-23]。水泥含量的增加,导致基材 pH 上升,土壤呈现碱化状态,严重影响了豆科植物、灌木的生长,土壤中有效磷含量很低,成为阻碍豆科植物生长的因素^[24-25]。

木屑和泥炭土等基质的添加,显著改善了土壤的理化特性,也提高了土壤持水能力^[26],并从一定程度上缓解了固化剂引起的土壤硬化。由于 2 mm 直径的稻草会造成土壤过度松散,可能降低基质的抗侵蚀能力,所以不宜过量应用^[27]。

经历了 3 年时间的自然雨水冲刷,本研究中不同植被条件下土壤径流量随冲刷时间的变化较明显,总体上表现为先增大后减小。对照裸地径流量随时间变化低于灌木林地,但高于其它植被条件,这与何淑勤等^[28]的研究结果相一致。

西部困难立地条件实施 TBS 边坡绿化施工后,在干旱高温环境时需要特别注意前期养护。种子发芽期湿润深度控制在 3~5 cm,幼苗期依据植物根系的发展逐渐加大到 5~15 cm,但要控制不至在基材混合物内形成“壤中流”,侵蚀基材混合物中小颗粒及淋失养分,破坏养分平衡。

4 结论

TBS 工艺适用于西部边坡生物防护工程,但必须因地制宜地选择并科学搭配物种形成共生有效的植被

群落,其中更多的考虑种间竞争^[29],合理规避雨季施工,保持基质强度和防治病虫害是本工艺成功的另一关键要素,干旱季节根据植物不同的生长周期采取科学合理的养护方法格外重要。

参考文献 References:

- [1] 王琼,韩烈宝,叶激华,辜再元.PMS 植生基质喷射技术在废弃采石场生态防护工程中的应用.中国水土保持科学,2008,6(增刊 2):187-192.
Wang Q, Han L B, Ye J H, Gu Z Y. Application of planting material spraying technique in ecological protection engineering a-bandoned quarry. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(S 2): 187-192. (in Chinese)
- [2] 周德培,张俊云.植被护坡工程技术.北京:人民交通出版社,2003:1-7.
Zhou D P, Zhang J Y. The Slope Vegetation Engineering Technique. Beijing: People Traffic Press, 2003: 1-7. (in Chinese)
- [3] 李绍才,孙海龙,张华德.岩石边坡 TBS 植被护坡工程养护原则与方法.路基工程,2003(1):56-58.
Li S L, Sun H L, Zhang H D. Maintenance principle and method of TBS vegetation slope protection engineering of rock slope. Subgrade Engineering, 2003(1): 56-58. (in Chinese)
- [4] 方华,林建平.植被护坡现状与展望.水土保持研究,2004,11(3):283-285.
Fang H, Lin J P. Slope vegetation: Present situation and its prospect. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(3): 283-285. (in Chinese)
- [5] 邓辅唐,彭赛恒,姚勇,晏雨鸿,邓辅商,王德军.高速公路强分化花岗岩边坡生态恢复技术.中国水土保持科学,2008,6(增刊 2):175-179.
Deng F T, Peng S H, Yao Y, Yan Y H, Deng F S, Wang D J. Ecological restoration technique of strongly differentiated granite slope in Expressway. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(S 2): 175-179. (in Chinese)
- [6] 张成梁, Li B L. 美国煤矿废弃地的生态修复.生态学报,2011,31(1):276-285.
Zhang C L, Li B L. Ecological reclamation and restoration of abandoned coal mine in the United States. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(1): 276-285. (in Chinese)
- [7] 周成贵.云南云龙天池自然保护区珍稀濒危动植物种类及综合评价.陕西林业科技,2008(1):32-37.
Zhou C G. Rare and endangered wildlife species in nature reserve of Yunleng lake and their assessment. Shanaxi Forest Science and Technology, 2008(1): 32-37. (in Chinese)
- [8] 罗双,孙海龙,刘冲,李绍才,庞亮,李成俊.四川道路边坡自然恢复的植被多样性研究.水土保持研究,2011,18(6):52-56.
Luo S, Sun H L, Liu C, Li S C, Pang L, Li C J. Study on vegetation diversity of road verge after natural restoration in Sichuan Province, China. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(6): 52-56. (in Chinese)
- [9] 田青怀,李树一,王春东,徐礼根.客土吹附技术在公路边坡生物防护中的应用研究.公路环境保护,2004(4):100-101.
Tian Q H, Li S Y, Wang C D, Xu L G. Study on application of soil spraying technology in slope protection of highway in biology. Highway Environmental Protection, 2004(4): 100-101. (in Chinese)
- [10] 王云,江玉林,崔鹏,陈学平.安楚高速公路禄丰段边坡生态防护技术.水土保持研究,2006,13(1):139-141.
Wang Y, Jiang Y L, Cui P, Chen X P. Bioengineering technique for slope protection of Anning—Chuxiong expressway in Yunnan Province. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(1): 139-141. (in Chinese)
- [11] Richard T T. Road Ecology, Science and Solution. Washington: Island Press, 2002: 13-15.
- [12] 山寺喜成,安保昭,吉田宽.恢复自然环境绿化工程概论.罗晶,译.北京:中国科学技术出版社,1997:22-23.
- [13] 刘金平.坡度对野牛荩草分株特征及生殖分配的影响.草业科学,2013,30(10):1602-1607.
Liu J P. Effects of sectional slope on reproductive ramets quantitative characteristics and reproductive investment of wild Arthraxon hispidus. Pratacultural Science, 2013, 30(10): 1602-1607. (in Chinese)
- [14] 陈晓蓉,徐国钢,朱兆华,曹华英,孙吉雄,赖庆旺.深圳地区道路边坡植物配置及群落建植技术.草业科学,2013,30(9):1359-1364.
Chen X R, Xu G G, Zhu Z H, Cao H Y, Sun J X, Lai Q W. Research on road slope plant configuration and ecological patter in Shenzhen. Pratacultural Science, 2013, 30(9): 1359-1364. (in Chinese)
- [15] 田青怀,徐礼根,李树一.杭州将军山高陡边坡生态环境治理工程技术研究.中国水土保持科学,2008,6(增刊 2):192-194.

- Tian Q H, Xu L G, Li S Y. Technical study on ecological environment restoration projects on high-steep slopes in general mountain in Hangzhou. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(S2): 192-194. (in Chinese)
- [16] 肖笃宁, 高峻, 石铁矛. 景观生态学在城市规划和管理中的应用. *地球科学进展*, 2001, 16(6): 813-820.
- Xiao D N, Gao J, Shi T M. Application of landscape ecology in planning and management. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(6): 813-820. (in Chinese)
- [17] 唐欣, 向佐湘, 倪海满. 植被混凝土在采石场生态恢复中的应用. *草业科学*, 2011, 28(1): 74-76.
- Tang X, Xiang Z X, Ni H M. The application of vegetation concrete to ecological restoration in the stone pit. *Pratacultural Science*, 2011, 28(1): 74-76. (in Chinese)
- [18] 廖晶晶, 罗绪强, 罗光杰, 魏华伟. 三种护坡植物根—土复合体抗剪强度比较. *水土保持通报*, 2013, 33(5): 118-122.
- Liao J J, Luo X Q, Luo G J, Wei H W. Comparison of shear strength of root—soil composite for three types of slope protection vegetation. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(5): 118-122. (in Chinese)
- [19] 加拿大矿物和能源技术中心编. 边坡工程手册. 祝玉学, 刑修祥译. 北京: 冶金工业出版社, 1984: 25.
- Canadian Mineral and Energy Technology Center. *Slope Engineering Handbook*. Zhu Y X, Xin X X, translation. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1984: 25. (in Chinese)
- [20] 陈志明, 仲童强. 高速公路岩石边坡客土喷播施工技术——以宁常高速公路南京段客土喷播为例. *草业科学*, 2009, 26(12): 157-160.
- Chen Z M, Zhong T Q. Technology of spray seeding for rocky slope protection by express highway——A case study of Nan-chang express highway. *Pratacultural Science*, 2009, 26(12): 157-160. (in Chinese)
- [21] 张慧莉, 廖柯, 石一彤. SY 固化土构件在护坡工程中的性能及其机理研究. *水土保持通报*, 2010, 30(1): 151-155.
- Zhang H L, Liao K, Shi Y T. Properties and mechanisms of SY soil stabilizer components in slope protection engineering. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(1): 151-155. (in Chinese)
- [22] 樊恒辉, 高建恩, 吴普特, 鞠伟, 孙胜利. 土壤固化剂集流面不同施工工艺比较. *农业工程学报*, 2006, 22(10): 73-77.
- Fan H H, Gao J E, Wu P T, Ju W, Sun S L. Comparison of different construction techniques for the catchment area with soil stabilizer. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(10): 73-77. (in Chinese)
- [23] 方祥位, 孙树国, 陈正汉, 申春妮, 徐尔昌. GT 型土壤固化剂改良土的工程特性研究. *岩土力学*, 2006, 27(9): 1545-1548.
- Fang X W, Sun S G, Chen Z H, Shen C N, Xu E C. Study on engineering properties of improved soil by GT soil firming agent. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(9): 1545-1548. (in Chinese)
- [24] 唐伟, 王永雄. 豆科植物低磷胁迫的适应机制. *草业科学*, 2014, 31(8): 1538-1548.
- Tang W, Yu Y X. Adaptation mechanisms of legume to phosphorus deficiency. *Pratacultural Science*, 2014, 31(8): 1538-1548. (in Chinese)
- [25] 张东梅, 宋鑫, 张丽静, 胡晓炜, 陈晓龙, 张燕慧. 不同供磷水平对紫穗槐生长及根系形态的影响. *草业科学*, 2014, 31(9): 1767-1773.
- Zhang D M, Song X, Zhang L J, Hu X W, Chen X L, Zhang Y H. Effects of phosphorus fertilizing on growth and root morphology of *Amorpha fruticosa*. *Pratacultural Science*, 2014, 31(9): 1767-1773. (in Chinese)
- [26] 刘铁军, 卢健男, 张哲乾, 马莉, 张琼, 刘金荣. 干旱半干旱区裸露边坡适宜喷播的绿化基质筛选. *草业科学*, 2016, 33(7): 1291-1296.
- Liu T J, Lu J N, Zhang Z Q, Ma L, Zhang Q, Liu J R. Screening of green substrate suitable for spraying and sowing in uncoversing slope of arid and semi-arid zone. *Pratacultural Science*, 2016, 33(7): 1291-1296. (in Chinese)
- [27] 高桂娟, 曾小龙. 添加剂对高陡岩石边坡人工基质性状的影响. *草业科学*, 2009, 26(4): 154-158.
- Gao G J, Zeng X L. Effect of water absorbent polymer on properties of soil substrate used on high and steep rocky slope. *Pratacultural Science*, 2009, 26(4): 154-158. (in Chinese)
- [28] 何淑勤, 宫渊波, 郑子成, 孔祥东. 不同植被条件下土壤抗冲性及其影响因素. *水土保持通报*, 2013, 33(6): 75-79.
- He S Q, Gong Y B, Zheng Z C, Kong X D. Dynamic change of soil anti-scourability and its influencing factors under different vegetation types. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(6): 75-79. (in Chinese)
- [29] 李莉, 王元素, 王堃. 喀斯特地区永久性禾草+白三叶混播草地群落种间竞争与共存. *草业科学*, 2014, 31(10): 1943-1950.
- Li L, Wang Y S, Wang K. Interspecific competition and co-existence in permanent grasses+ *Trifolium repens* mixed pasture in Karst region. *Pratacultural Science*, 2014, 31(10): 1943-1950. (in Chinese)

(责任编辑 苟燕妮)