

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2013.06.027

黄土地区道路陡边坡植被多样性生态防护措施

张莎莎¹, 杨晓华¹, 李凌姜²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 四川路桥建设股份有限公司, 四川 成都 610000)

摘要: 针对黄土地区路堑陡边坡的坡体形式, 以锚杆护坡和植被根系保水固土机理为基础, 结合植被多样性原理, 统计分析黄土地区道路生态防护的植物种类及其植被群落组合, 研究设计了适用于黄土地区陡边坡的新型土工柔性格框生态防护措施。以定西至平凉高速公路为试验依托项目, 模拟分析黄土地区降雨对无防护边坡、普通植物纤维防护边坡和新型土工柔性格框植被防护边坡的冲刷, 结果表明: 在降雨量分别为 $2.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $3.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 的 60 min 冲刷条件下, 随着试验历时的增加, 新型生态防护技术的边坡水流含沙率与累计边坡冲蚀量较其他 2 种边坡形式小 30% 以上; 降雨冲刷试验结束后, 前 2 种边坡的坡面均有不同程度的破坏, 而新型生态防护技术防护的坡面比较稳定。

关键词: 环境工程; 边坡防护; 植物护坡; 现场试验; 植物多样性

中图分类号: X734.03.23; U418.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2013) 06-0153-06

Ecological Protection Measures of Vegetation Diversity for Road Steep Slope in Loess Region

ZHANG Sha-sha¹, YANG Xiao-hua¹, LI Ling-jiang²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China;

2. Sichuan Road & Bridge Construction Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610000, China)

Abstract: For the steep cutting slope in loess region, based on the principles of anchor slope protection and water retention and soil-fixation by vegetation roots, combining with ecological diversity principle, the plant species and vegetation communities package for road ecological protection in the loess region are statistical analysed. A new flexible geotechnical box ecological protective measures (FGB) is designed for the steep cutting slope in the loess region. Relying on the project of Dingxi-Pingliang expressway, the rainfall erosion processes of the unprotected slope, plant fiber protective slope and FGB slope in the loess region are simulated. It is shown that (1) under the conditions of the rainfall of $2.4 \text{ m}^3/\text{h}$ and $3.2 \text{ m}^3/\text{h}$ and each experiment last 60 min, the change of water sediment rate and accumulative erosion of FGB with the rainfalls time is above 30% smaller than that of the former two. After the end of the trial, the surfaces of the former two slopes have different degrees of damage, but the surface of FGB slope is more stable.

Key words: environmental engineering; slope protection; biotechnical slope protection; field test; vegetation diversity

0 引言

针对道路工程建设中的生态环保问题, 欧、美

等发达国家很早就将生态理念应用其中, 而我国则起步较晚。20 世纪 90 年代, 李和平等针对边坡客土喷播植草护坡技术进行了试验研究^[1]; 章梦涛等以

收稿日期: 2012-12-18

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目 (200631881291); 交通部科技项目 (200731878582)

作者简介: 张莎莎 (1982-), 女, 山西运城人, 博士, 讲师. (zss_lx@126.com)

土体为主要材料,利用硅酸盐水泥为粘结材料开展了喷混植生的室内外试验^[2];许文年研究设计了植被混凝土边坡绿化技术^[3];肖衡林等研究了网垫强度和类型及植被对护坡的抗冲刷性能^[4];李天斌采用生态基材护坡技术对高寒高海拔地区岩质陡边坡进行了防护研究^[5]。边坡常用的生态绿化方法样式较多,现有研究成果对道路边坡的生态护坡技术发展具有很大的推动作用,但目前依然缺乏适用于工程性能较差、土质陡边坡的生态防护措施。

近年来,高等级公路建设在黄土地区得到了迅速发展,但其却导致沿线大量原生植被破坏、水土流失及土地分割等生态环境问题的出现^[6],使黄土地区的生态环境进一步恶化。尤其对于黄土路堑陡边坡,由于大部分植物无法快速适应陡边坡的坡体环境,造成了黄土地区道路陡边坡生态防护及其恢复措施难以实施,严重制约着高等级公路经济、社会和环境效益的协调发挥。为了确保公路建成后,在正常运营的同时,使道路陡边坡生态系统达到动态平衡,营造环境友好型的路域体系,结合植被多样性搭配理论,研究了适用于黄土地区道路陡边坡的土工柔性格框生态恢复技术,并针对无防护边坡、普通植物纤维防护边坡和土工柔性格框植被防护边坡开展现场降雨冲刷试验效果的对比分析,以研究土工柔性格框植被防护边坡的稳定性与工程性能,及其与普通植物纤维护坡的区别。

1 土工柔性格框边坡生态恢复技术

1.1 土工柔性格框植被防护机理

1.1.1 锚杆固坡作用

土工柔性格框与陡坡通过锚杆连接,通过锚杆杆体的纵向拉力作用,克服土体抗拉能力远低于抗压能力的缺点,限制了土体脱离原体,提高土体的粘聚力和内摩擦角,其实质上锚杆位于土体内与土体形成一个新复合体。这个复合体中的锚杆是解决土体抗拉能力低的缺点。从而使得土体自身的承载能力大大加强。

1.1.2 植物根系的加筋作用

植物根系生态护坡的作用表现为2个方面:抗滑移作用和抗侵蚀作用。生长在边坡上的植被,其根系互相缠绕,形成纵横交错且具有一定抗拉强度的根系网,其可分为垂直根和侧根,垂直根(深粗根系)类似锚杆,主要起到锚固作用;而侧根(浅细根系)主要起到三维加筋作用。浅层根延伸范围内的土与草根构成有机整体,其中草根可视为带预

应力的加筋材料,使土体的粘聚力增加,草根的抗拉性能限制了土体的侧向变形。深层根穿过较稳定的土层,将土壤固结成一个整体,起到预应力锚杆的作用,从而增加了土体的稳定性。同时,植物通过吸收和蒸腾土体内的水分,降低边坡土体内孔隙水压力,提高土体的抗剪强度,有利于边坡稳定。并且,在生长发育的过程中,根系会分泌大量高分子粘胶物质与多糖类物质,此类物质存在巨大的粘结力,增加土壤有机胶结物质及团粒结构等,提高土壤抗冲击分散能力和结构、孔隙的稳定性^[7-8]。

1.1.3 植物的水土保持效用

植物的水土保持功能体现在对坡面径流侵蚀力和土壤抗侵蚀力的影响。对坡面径流侵蚀力的影响,主要体现在削弱雨滴动能,防治溅蚀,减少地表径流量,阻延流速等方面;对土壤抗侵蚀的影响,主要是改善土壤渗透性、抗冲性等。

1.2 土工柔性格框植被防护措施设计

针对黄土地区路堑陡边坡的坡体形式,根据锚杆护坡和植被根系的保水固土机理,研究设计了土工柔性格框植被防护技术,其不仅可以使植物生长区域达到90%以上,而且能应用于高陡边坡及土质贫乏植被恢复困难的边坡。该技术由相互连接的柔性格框构成,柔性格框由土工面板(高密度聚乙烯)、钎杆、连接耳、锚杆(或钎钉)连接构成。将土工面板固定在陡坡坡面上时,采用锚杆(或钎钉)穿入联接孔将面板的底部固定在斜坡上,土工面板上部通过连接耳与钎杆连接,再由锚杆将钎杆固定于边坡。土工柔性格框各部件及其关系如图1所示,土工面板整体为绿色,展开固定于陡边坡上,土工面板的背部充填有种植土,种植土下部(与土工面板接触处)铺设滤水土工布,种植土中种植花草,起到绿化和防护坡面的作用。土工柔性格框分层布设于边坡坡面上,上下2层土工柔性格框的距离为20~40 cm,分层布设的柔性格框构成梯状平台结构,土工柔性格框整体结构如图2所示。

1.3 植被多样性搭配

植物多样性是生态系统稳定的基础,在路域植物选择上应遵守“适地适树、适地适草”的原则。首先应增加植物群落中的种类,提高多样性指数,即使是同个物种,在对其进行改造时,应尽量选取不同的基因型。因地制宜,充分利用乡土品种是植被防护中植物选择的基础^[9-10]。

通过对山西、陕西及甘肃等多条高速公路生态护坡所用植被种类的调研,统计了可用于黄土地区

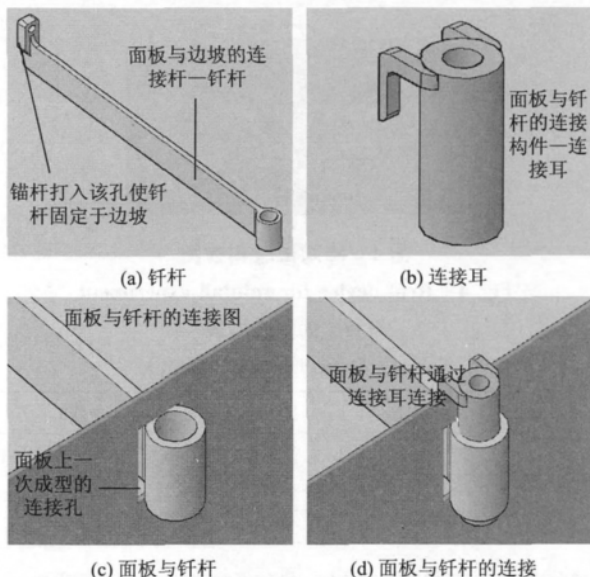


图1 土工柔性格框各部件分解图

Fig.1 Parts of flexible geotechnical box

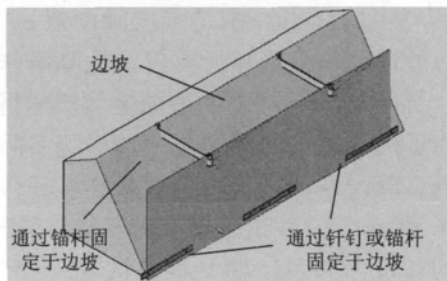


图2 土工柔性格框整体图

Fig.2 Overall diagram of flexible geotechnical box

公路边坡草灌乔的种类,见表1。草灌乔植物种类搭配示意图3,其中,草灌乔植物为错落搭配种植,以区域乡土种为优势种,兼顾物种总数和密度,并且草类植物错落种植于土工柔性格框所建的平台上,种植方式主要采用粗放式搭配有机化肥种植,种植密度参考表1,乔灌木类植物种植在边坡的平台上,其种植间距在1.5~3 m左右。

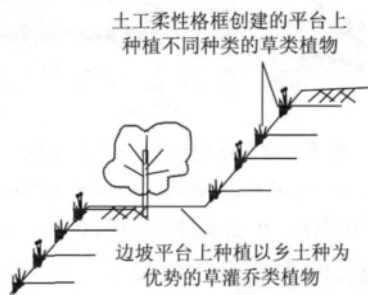


图3 植物多样性搭配示意图

Fig.3 Schematic diagram of plant diversity

表1 适宜于黄土地区公路边坡防护的植物种类选择

Tab.1 Selected plant species for road slope protection in loess region

植物种类	生长习性	种植方法
无芒雀麦	多年生长,适用于西北、东北、华北地区,黄土高原地区适用于秋播	种子数量为1.5~3.0 g/m ²
高羊茅	适应性强,喜温耐热,抗热,抗旱,耐践踏,再生力强	种子数量为1.5~2.0 g/m ²
扁穗冰草	喜干燥寒冷,在夏季,可成为优势种,抗逆性强,耐贫瘠,耐碱,耐旱	种子数量为1.0~2.5 g/m ²
小冠花	该草喜温暖湿润气候,抗寒性、抗旱性强	种子数量为1.0 g/m ²
紫花苜蓿	喜温暖半干旱气候,耐寒力强,抗旱性强,对土壤要求不严格	种子数量为9.0~11.0 g/m ²
迎春	喜光,稍耐荫,抗旱御寒力强,不择土壤	水插待须根长至3~5 cm栽植
紫穗槐	喜光喜湿,耐干旱,耐瘠薄,耐寒,是抗性较强的植物	250 棵/m ² 左右
枸杞	耐寒,耐瘠薄,耐干旱,耐盐碱。喜光,不耐荫,不耐水湿	株距12~15 cm
连翘	耐寒又耐旱,略耐荫,怕积水,萌发力强,怕积水	行株距2 m×1.5 m
火炬树	喜光。耐寒,对土壤适应性强,耐干旱瘠薄,耐水湿,耐盐碱	株距40×30 cm
乔 刺槐	喜光,刺槐对土壤要求不严,适应性很强	每亩栽植110~200 株
栾树	喜光,耐半荫;耐寒;耐干旱和瘠薄,适应性强,耐盐渍及短期水涝	每亩200~300 株

3 现场冲刷试验

3.1 试验设计

为检验土工柔性格框边坡生态防护技术的工程稳定性,并与普通植物纤维维护坡的区别。采用现场降雨冲刷试验对无防护边坡、普通植被纤维防护边坡和土工柔性格框植被防护边坡进行对比分析。依托平凉至定西高速公路某路堑边坡进行现场试验,选择适宜于当地的草本植物种植于格框内,苜蓿和冰草混合适当的有机肥搭配种植。依据试验目的,确定试验中的各主要因素及其参数,其测量参数包括:流量、流速、水温、坡长、坡宽,水流含沙率、时间及坡面土体含水率等。降雨流量用小型流量计计量,用体积法校正;流速用回水阀门控制;水流含沙率用置换法测量,见式(1);累积侵蚀量通过含沙率、流量及时间换算,见式(2)。

$$e_i = \frac{r_s}{(r_s - r_w)} v (w_2 - w_1), \quad (1)$$

$$S_m = \sum_{i=1}^n \overline{e_i} \times q / 1\,000 \times t_i, \tag{2}$$

式中, e_i 为水流含沙率; v 为量瓶的体积, 试验采用 250 mL; r_s 为土体颗粒密度, 取 2.71 g/cm^3 ; r_w 为水的密度; w_2 为瓶、水和土的质量; w_1 为瓶与土的质量; S_m 为第 n 分钟的坡面累计冲蚀量; $\overline{e_i}$ 为第 i 时段的平均含沙率, 其中 $\overline{e_1} = e_1$, $\overline{e_i} = \frac{e_i + e_{i-1}}{2}$; q 为流量的大小, 此处取 5 m 宽度流量; t_i 为第 i 时段。

冲刷过程通过现象描述、照相、录像等方法记录, 试验参数及其测量参数见表 2。

表 2 试验模型基本参数及试验测量参数表

Tab. 2 Basic parameters of test model and measurement parameters

试验模型	坡高	净宽	路堑边坡坡度
基本尺寸	8 m	5 m	1:0.75
时间 t	精度: 1 s 秒表		
含沙率 e	比重瓶、温度计、天平		
量测参数及	边坡坡宽、坡长	钢尺	
其工具	土壤含水率	铝盒、天平、烘箱、干燥器	
	流速	回水阀门	
	不同深度含水量、温度量测	温湿探头	

根据试验段公路沿线地区近 50 a 的降雨气象资料, 采用数理统计方法, 计算出该地区的降雨强度 (表 3):

$$q = \frac{1\,140 \times (1 + 0.961gp)}{(t + 8)^{0.8}}, \tag{3}$$

式中, q 为暴雨强度; p 为重现期; t 为降雨历时。

表 3 降雨强度表 [单位: $L/(s \cdot km^2)$]

Tab. 3 Rainfall intensities [unit: $L/(s \cdot km^2)$]

历时/min	10 a 一遇	50 a 一遇	100 a 一遇
	1:0.75	1:0.75	1:0.75
30	0.456	0.613	0.680
60	0.287	0.385	0.427
240	0.102	0.137	0.152

为了使试验结果更具有代表性, 以试验段公路沿线地区近 50 a 的降雨气象资料为基础, 并结合黄土地区的降雨资料确定 2 种降雨流量: $2.4\text{ m}^3/\text{h}$ 和 $3.2\text{ m}^3/\text{h}$ 。降雨系统由水泵、管道、回水阀、降雨喷头、流量计等组成, 降雨流量用流量计控制, 精度等级 $2.5\text{ m}^3/\text{h}$ 。为了避免降雨后坡面水流对坡脚的冲蚀, 在坡尾处铺设铁板, 同时也便于连续取水样进行含沙率测量。降雨试验实物见图 4, 试验安排见表 4。



图 4 降雨试验实物图

Fig. 4 Real device for rainfall experiment

表 4 试验安排表

Tab. 4 Experimental schedule

试验组	①		②		③	
	①-a	①-b	②-a	②-b	③-a	③-b
流量 $A/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	2.4	3.2	2.4	3.2	2.4	3.2
防护形式 B	土工柔性格框防护		植被纤维防护		无防护	

试验若采用 10 a 一遇最大 30 min 暴雨对应的降雨流量, 其现场边坡冲刷试验时间本应取 30 min。但是自然界中的降雨冲刷是多次降雨累积的结果, 每年的边坡冲蚀量为当年所有侵蚀性降雨作用效果的叠加, 所以 30 min 降雨的冲蚀量与实际情况相差较大。为了确定边坡的冲蚀规律, 试验实际采用暴雨 60 min, 降雨冲蚀过程中连续采样。具体试验步骤: (1) 刷坡; (2) 试验模型的安装与调试; (3) 测试土的初始含水率; (4) 准备试验; (5) 放水, 开始试验, 同时开始测量和记录; (6) 第 2 个试验条件的准备, 重复步骤 (2) ~ (5)。

3.2 试验结果及其分析

降雨冲刷试验过程中, 水流含沙率和坡面累计冲蚀量分别如图 5 和图 6 所示, 图中各曲线的标注意义同表 4。

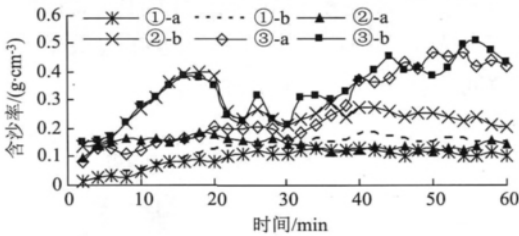


图 5 坡面水流含沙率变化曲线

Fig. 5 Curves of slope surface water sediment rate

从图 5 可知, 在降雨冲刷试验中, 由土工柔性格框防护的坡面水流含沙率最小; 在降雨初期, 无防护的坡面水流含沙率增大得很快, 随着试验时间的增长, 其水流含沙率逐渐增大; 植物纤维防护边坡的水流含沙率随时间变化的趋势基本介于土工柔

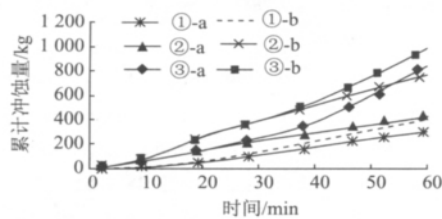


图6 坡面累计冲蚀量变化曲线

Fig. 6 Curves of slope surface accumulative erosion

性格框和无防护水流含沙率之间。降雨量为 $3.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 时比 $2.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 时导致的坡面水流含沙率大。

由图6可知,随着试验时间的增长,坡面累计冲蚀量有明显的增大趋势。在相同降雨强度和相同降雨历时条件下,土工柔性格框坡面累计冲蚀量小于无防护裸露坡面和普通植被护坡坡面的累计冲蚀量,说明土工柔性格框生态防护措施减小了降雨在坡面的渗流路径,减少降雨导致的坡面累计冲蚀量。

降雨冲刷试验结束后,不同条件下的边坡形态如图7~图9所示。

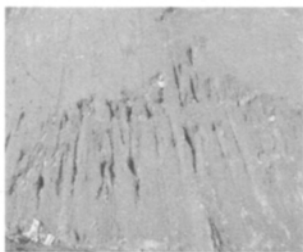


图7 降雨后无防护坡面

Fig. 7 Unprotected slope surface after rainfall



图8 降雨后植被纤维防护的坡面

Fig. 8 Plant fiber protective slope surface after rainfall

由图7可知,黄土路堑陡边坡在无防护的条件下,降雨结束后,坡面会形成细小的纹沟或不连续的斑点状小跌坎,距坡底3m处为冲沟密集处,坡底有局部破坏。对于普通植物纤维护坡的坡面,降雨试验结束后,坡体表面土壤被水流带走,植物纤维部分裸露出来,整个冲刷过程中无大规模冲沟形成,试验中坡体底部有小面积冲沟1处,见图8。由于土工柔性格框防护本身特殊的台阶式设计及其植

被和锚杆的加筋作用,对降雨能起到很好的跌水作用,消减了冲刷试验中水流的动量,试验结束后土工柔性格框防护的边坡坡面基本没有破坏,见图9。

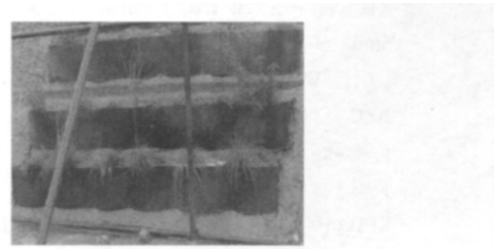


图9 降雨后土工柔性格框防护的坡面

Fig. 9 FGB protective slope surface after rainfall

4 结论

(1) 基于锚杆、植被根系的固土护坡机理,及植被的水土保持作用,提出了适用于黄土地区陡边坡的土工柔性格框植被防护技术。

(2) 以植物多样性理论为基础,通过对黄土地区多条高速公路生态护坡所用植被种类的调研,统计了可用于公路边坡草灌乔的种类,并提出了以区域乡土种为优势种,兼顾物种总数和密度的公路边坡草灌乔的搭配形式,其中草类植物错落种植于土工柔性格框所建的平台,乔灌木类植物种植在边坡的平台上,其种植间距在1.5~3m左右。

(3) 现场降雨冲刷试验表明,土工柔性格框植被防护边坡的水流含沙率与累计边坡冲蚀量较其他2种边坡形式小30%以上;新型生态防护技术防护的坡面比较稳定,而其他2种边坡的坡面均有不同程度的破坏。明确了土工柔性格框植被防护边坡技术不仅可以为植物生长提供土壤平台,而且对黄土陡边坡的坡体起到固土防护的作用。

参考文献:

References:

- [1] 李和平,张瑞强,张文秀,等.水力喷播技术引进及试验研究[J].水土保持通报,1999,19(2):27-30.
LI He-ping, ZHANG Rui-qiang, ZHANG Wen-xiu, et al. Introduction and Research of Hydroseeding Technology[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1999, 19(2): 27-30.
- [2] 章梦涛,付奇峰,吴长文.岩质坡面喷混快速绿化新技术浅析[J].水土保持研究,2000,7(3):65-66.
ZHANG Meng-tao, FU Qi-feng, WU Chang-wen. Analysis of the "ON" Spray Vegetation Method in Fastly Greening the Rock Slopes [J]. Research of Soil and Water

Conservation, 2000, 7 (3): 65-66.

- [6] 许文年, 王铁桥, 叶建军. 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.

XU Wen-nian, WANG Tie-qiao, YE Jian-jun. Application Study of Greening Technology on Rock Slope Protection [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2002, 33 (7): 35-37.

- [7] 肖衡林, 王钊, 张晋锋. 三维土工网垫设计指标的研究 [J]. 岩土力学, 2004, 25 (11): 1800-1804.

XIAO Heng-lin, WANG Zhao, ZHANG Jin-feng. Study on the Design Indexes of Three Dimensional Geomat [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25 (11): 1800-1804.

- [8] 李天斌, 徐华, 周雄华, 等. 高寒高海拔地区岩质陡边坡 JYC 生态基材护坡技术 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (11): 2332-2339.

LI Tian-bin, XU Hua, ZHOU Xiong-hua, et al. Protection Techniques of Steep Rock Slope with JYC Ecological Base Materials in High-cold and High-altitude Area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (11): 2332-2339.

- [9] 廖红建, 李涛, 彭建兵. 高陡边坡滑坡体黄土的强度特性研究 [J]. 岩土力学, 2007, 32 (7): 1939-1944.

LIAO Hong-jian, LI Tao, PENG Jian-bing. Study of Strength Characteristics of High and Steep Slope Landslide Mass Loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 32 (7): 3641-3647.

- [10] 伍谦. 高速公路边坡植草护坡的根固效应研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31 (11): 106-109.

WU Qian. Research on Reinforcement Mechanisms of Expressway Side Slope Protection with Greensward [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2011, 31 (11): 106-109.

- [11] 肖本林, 罗寿龙, 邓友生, 等. 根系生态护坡的机理

及试验研究 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2011, 38 (5): 19-23.

XIAO Ben-lin, LUO Shou-long, DENG You-sheng, et al. Research on Mechanism and Test of Roots for Ecological Protection Slope [J]. Journal of Hunan University: Natural Science Edition, 2011, 38 (5): 19-23.

- [12] 江源, 陶岩, 顾卫, 等. 高速公路边坡植被恢复效果研究 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (7): 147-152.

JIANG Yuan, TAO Yan, GU Wei, et al. Assessment on Vegetation Restoration by Soil Spray Seeding Technique on Road Verge Slopes of Expressway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (7): 147-152.

- [13] 牛丽丽, 张学培, 曹奇光. 我国西北干旱区生物多样性研究 [J]. 水土保持研究, 2007, 14 (1): 223-225.

NIU Li-li, ZHANG Xue-pei, CAO Qi-guang. Biodiversity in Arid Regions of Northwest China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14 (1): 223-225.

- [14] 于国强, 李占斌, 裴亮, 等. 不同植被类型下坡面径流侵蚀产沙差异性 [J]. 水土保持学报, 2012, 21 (1): 1-11.

YU Guo-qiang, LI Zhan-bin, PEI Liang, et al. Difference of Runoff-erosion-sediment Yield under Different Vegetation Type [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 21 (1): 1-11.

- [15] 杨晓华, 晏长根, 谢永利. 黄土路堤土工格室护坡冲刷模型试验研究 [J]. 公路交通科技, 2004, 21 (9): 21-24.

YANG Xiao-hua, YAN Chang-gen, XIE Yong-li. Research of Erosion Contrast Model Tests for Slope Protecting by Geocell of Loess Embankment [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21 (9): 21-24.

(上接第152页)

ZHU Feng-kai, ZHANG Feng-rong, ZHAO Hua-fu, et al. The Impact of Farmers' Opportunity Cost on Land Consolidation Project in Suburban Areas [J]. Resources Science, 2012, 34 (7): 1340-1346.

- [9] 祖平. 上海市高血压疾病经济负担及死亡损失研究 [J]. 上海: 复旦大学, 2010.

ZU Ping. Study on Economic Burden and Life Lost of Hypertension in Shanghai [D]. Shanghai: Fudan University, 2010.

- [10] 任艳军, 李秀央, 金明娟, 等. 大气颗粒物污染与心血管病死亡的病例交叉研究 [J]. 中国环境科学,

2007, 27 (5): 657-660.

REN Yan-jun, LI Xiu-yang, JIN Ming-juan, et al. The Case-crossover Studies of Air Particulate Matter Pollution and Cardiovascular Disease Death [J]. China Environmental Science, 2007, 27 (5): 657-660.

- [11] 巨天珍, 温飞, 孙宏发. 兰州市道路交通噪声污染与人体健康的分析 [J]. 中国安全科学学报, 2005, 15 (3): 69-73.

JU Tian-zhen, WEN Fei, SUN Hong-fa. Health Survey of Traffic Noise in Lanzhou City [J]. China Safety Science Journal, 2005, 15 (3): 69-73.