

在黄土丘陵区土质路面种草

曹世雄¹, 陈 莉², 高旺盛^{1*}

(1. 中国农业大学农学与生物技术学院区域农业发展研究中心, 北京 100094; 2. 延安市水土保持研究所, 延安 716000)

摘要:土质道路水土流失是所有人工生态系统中最严重的土地利用类型, 土壤侵蚀模数是相同条件下林地的 250 倍, 农村道路修筑破坏了区域生态景观的完整性, 为景观生态修复理论与技术研究提供了重要的实验场地。广大山区农村田间地块道路在种植和收获季节以外长期处于闲置状态, 这为植物的种植和生长提供了可能。1997~2001 年, 以中国黄土丘陵区陕西省延安市小砭沟小流域农田道路为背景, 以防止和减轻路面汇流引发的水土流失对道路的破坏和修复农村道路景观生态系统为目的, 采用小区径流监测、施工统计和定点观测的方法, 在路面进行了为期 5a 的种草实验。研究结果显示, 农田作业道路路面不仅可以种草, 而且具有一定生态经济价值, 在条播下, 胡枝子、小冠花、无芒雀麦每 km 年产值可达 1068.88~3150.27 元; 同时, 路面牧草可承受适度的通行压力, 禾本科牧草一般可承受 300t·次/a 以下车辆碾压; 道路种植禾本科牧草后, 除有机质外, 土壤中其它营养成分均有不同程度的亏损, 因此有必要补充各种肥料延长路面牧草使用年限和提高牧草防蚀能力; 路面种草后径流量减少 46.15%~69.30%, 土壤侵蚀量减少 54.53%~77.80%, 建设成本仅为石子路的 27.69%~35.99%, 维护费用仅为土质道路的 30.52%, 是一种经济可行的技术途径。道路种草后, 路面雨季泥泞、旱季尘土飞扬的劣质景观被蜿蜒的绿色道路景观所取代, 形似镶嵌在绵延山谷中的绿飘带, 这无论在理论还是技术方面都是生态修复学和景观生态学研究的重要方向之一。

关键词:道路侵蚀; 路面种草; 通行能力; 生长发育; 黄土丘陵区

文章编号:1000-0933(2005)07-1754-10 **中图分类号:**Q149 **文献标识码:**A

Planting grass on rural roads in loess hilly-gully

CAO Shi-Xiong¹, CHEN Li², GAO Wang-Sheng^{1*} (1. *Regional Agriculture R&D Centre, College of Agronomy and Biotechnology, China Agriculture University, Beijing 100094, China*; 2. *Institute of Soil and Water Conservation in Yan'an City, Yan'an Shaanxi 716000, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1754~1763.

Abstract: In China and other countries of the world, terrene roads (unpaved or unsurfaced roads) are common in rural areas. Low design standards, however, may contribute to problems of soil and water erosion. As a result, erosion from terrene roads is often severe. Maintenance and construction of traffic roads are significant costs for modern societies. In many developing countries, especially in hilly rural areas, it is difficult to afford the high costs of surfaced roads such as stone or tar roads. And stone or tar roads often are not compatible with the demands of a "near-natural" landscape. Terrene (unpaved or unsurfaced) roads prevail in rural regions. In China there are more than three million kilometers which is about 80% of rural roads. So, is there an economic and ecological type of road construction and maintenance technology? To answer this question, we put a 7-year test (1997~2003) in Xiabiangou of Yan'an city, Shaanxi, P. R. China. Grasses were planted on terrene roads ('botanic roads') using criteria of soil and water conservation. The results showed that planting grass on terrene roads has economic and ecological benefits for the Loess Plateau. Construction costs of 'botanic roads' are 11.17% of stone road, and the costs of maintenance are 30.52% of non-grass terrene road.

The test results showed that: the germination ratio of all kind of grasses was more than 82%. All kind of grasses except

基金项目:中国重点基础研究发展规划资助项目(G2000018606); 延河流域世行贷款资助项目(3222CHA)

收稿日期:2004-09-08; **修订日期:**2004-12-04

作者简介:曹世雄(1965~), 男, 博士, 副教授, 主要从事水土保持研究. E-mail: shixiongcao@126.com

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: wshgao@cau.edu.cn

Foundation item: National Key Basic Research Support Foundation of China NKBRSF Project (No. G2000018606) and world bank loan project in Yanhe valley (No. 3222CHA)

Received date: 2004-09-08; **Accepted date:** 2004-12-04

Biography: CAO Shi-Xiong, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in soil and water conservation. E-mail: shixiongcao@126.com

Lolium perenne L. had good adaptability to the environment and survived in winter. Grasses had better performance than legumes. On the road with less traffic there was also good production of seed or raw grass. The economic value of planting *Bromus inermis* Leyss. can be 2584.24 to 3150.27 RMB/km per year, and *Lespedeza bicolor* Turcz. is 1068.88~1194.04 RMB/km per year. In the sinking land, planting *Coronilla varia* L. can yield 2866.15 RMB/km per year. Botanic roads improve the aesthetics of the landscape. Instead of the mud and dust, they appear as a "green belt" dancing in the hilly area. Runoff of test road surfaces are decreased by 46.15%~69.30% and the soil erosion modulus decreased by 54.53%~77.80%. Our results showed that strip sowing was the best grass sowing method, and the first-choice varieties of grasses are *Agropyron cristatum* L. Gaertn, *Bromus inermis* Leyss., *Lespedeza bicolor* Turcz., and *Coronilla varia* L.

Grasses can bear traffic under 300 tone.time/year. *Agropyron cristatum* L. Gaertn. had the best resistance to trampling; the second best was *Bromus inermis* Leyss. Legumes grass's resistance to trampling was not as good as grasses. With traffic more than 300 tone.time/year, the place directly trampled by vehicles all died. There is 54.2 cm width bare wheel-print on the roads.

The normal nutrient content, except soil organic matter, decreased in different degree on the road planted to grasses. After 5 years, the content of total nitrogen, phosphorus, potassium and active nitrogen, phosphorus, potassium had decreased 21.53%, 25.09%, 5.65%, 12.17% and 17.42% respectively. The 'botanic road' therefore needs man-made fertilizer to compensate for the decline of soil nutrients.

Key words: road erosion; planting grass on terrene road; capacity of traffic; loess hilly-gully region

现代社会随着人们交往的扩大和商品交换的普及与增加,对交通道路的通行能力提出了愈来愈高的要求,土路被改造为石子路、柏油路、水泥路,建设成本依次盘升。但是,由于发展中国家经济实力的限制和山区农业生产功能的要求,把广大山区农业作业道路都改造成柏油路面或石子路面费用很高,不仅经济上难以承受,也不符合“接近自然”的现代生态观念和景观生态学的基本要求^[1]。因此,世界上有大量的农田作业道路路面处于裸露状态,仅在中国 20 个世纪的后 50a 里,围绕农村经济建设,特别是山区水土保持和农田基本建设,修筑了各种用途的农田作业道路 300 多万 km,占地约 130 万 hm²,占农村道路的 80%以上^[2]。由于农田作业道路设计标准低,传统的道路修筑技术无法解决土质道路路面集水和排水所造成的严重水土流失问题,因此极易形成破坏性的道路冲刷,是水土流失最严重、生态环境最脆弱的农业用地功能单位之一,在坡面汇流的共同作用下,导致强烈沟蚀作用,每 km² 土质山坡道路路面土壤侵蚀模数高达 3.49~9.02 万 t。土质道路水土流失破坏了区域生态景观的完整性,是景观生态修复最重要的实验场地。

土质路面侵蚀防治与维护在世界各地都是一个比较崭新的研究课题,其中等级道路边坡的土壤侵蚀及其防治方面的研究非常活跃,在中国、日本、美国、西欧等地,科学家们对高速公路、铁路边坡的土壤侵蚀与防治进行了一系列研究^[3~6],并取得了重大突破。非等级道路的土壤侵蚀研究也取得了积极进展,日本、德国以及美国的一些学者对林区和矿区道路土壤侵蚀进行了探讨,林区道路修筑当年,河溪中泥沙含量提高 250 倍^[3,6~10]。P. C. Batra 和 G. S. Gill 就灌木与草本对道路边坡的防护进行了研究,得出了纯粹的边坡灌木防护在防止侵蚀功效上小于草本植物,原因是雨水在叶片上形成了较大的水滴,成为灌木下土壤侵蚀之因,而草本覆盖着地面,其强大的根系将土壤颗粒紧紧固结在一起,有效地防止了土壤侵蚀的发生^[11]。

道路维护和管理措施的研究也引起科学家们的高度重视^[12,13],有学者对乡村道路对陆地景观系统的影响^[14~16]和林区路面沉降的防治^[17]进行了研究。近年来,台湾的林亲义先生对山坡土质道路侵蚀的机理、类型、影响因素进行了深入研究,并采取了一系列工程措施加以治理,如路旁修渗水窖、排水渠等挡土排水措施^[18]。在中国内地,中国科学院水土保持研究所的郑世清研究员率先开展了山坡土质道路侵蚀与防治方向研究,通过对道路边坡造林种草和道路汇、排水系统的工程设计和改造,有效分散了路面径流,从而达到减小侵蚀、维护道路的目的^[19~21],并通过对牧草根系水保功能评价提出了山坡道路边坡防蚀的技术指标体系和防蚀措施^[22~24]。与此同时,关于牧草方面的研究主要集中在草地生态系统^[25]、草场土壤性状^[26]、草场退化^[27]、牧草水保原理和意义^[23,25,28~33]等等。但田间地块裸露的土质道路,雨季泥泞、旱季尘土飞扬,形成农业生态系统劣质生态景观并未引起人们的高度重视,开展路面种草在道路维护、农业生态系统景观修复等方面都具有现实的生态经济意义和广阔的应用前景,是景观生态学和“接近自然”水土保持生态学理论与技术研究的重要方向。为此依据牧草减沙保土原理、“接近自然”生态学理论及景观生态修复的原理,设计在土质路面采取不同方式种植牧草,形成以植物保护为主要特征的新型道路景观系统,达到保护路面、增加产出、修复景观与美化环境的目的。1997 年起采用小区径流监测、施工统计、定点观测的方法,选用当地牧草和引进牧草共 8 种,在黄土丘陵区的陕西省延安市下砭沟小流域对农田地块土质道路路面种植牧草的生长发育、通行能力、防蚀护路效果进行了 5a 的试验观测与 2a 示范推广。

1 试验设计与方法

1.1 试验区自然概况

试验区位于中国黄土高原陕西省延安市下砭沟小流域,东经 $109^{\circ}26'15''$,北纬 $36^{\circ}32'30''$,流域内植被破坏严重,地形破碎,属黄土丘陵区,海拔高度 993.7~1191.2m。试验区面积 1.21km^2 ,土壤侵蚀强烈,年土壤侵蚀模数 $15000\text{t}/\text{km}^2$,年平均气温 9.4°C ,年平均降水 547.4mm,多年汛期平均降水 413.6mm,1997~2001 年汛期降水 364.0mm,其中 71.2%集中于 6~9 月份,年无霜期 147d,干旱霜冻危害较为频繁。

1.2 试验材料与方法

1.2.1 道路类型

(1)山地道路 指崩缘线以上地块道路,土壤为黄绵土,海拔 1050~1170m,道路坡度为 $0\sim 13.1^{\circ}$,平均为 6.21° 。

(2)沟道道路 指崩缘线以下地块道路,以红胶泥土壤为主,少量夹杂黄绵土,海拔 1000~1050m,道路坡度为 $0\sim 13.5^{\circ}$,平均为 7.00° 。

1.2.2 试验设计 地面种草,有效地增加了地表粗糙度,地上部分植物能有效缓减降雨对地面的打击力,同时地下网络状根系发育和地表粗糙性的共同作用,缓减了地表径流的形成,延长了降雨入渗时间,固定了土壤,从而达到防蚀减沙的目的。在山区广大农村,由于地形条件限制,农业用地破碎分散,通往田间地块的道路利用率较低,在种植和收获季节以外长期处于闲置状态,这为植物的种植和生长提供了可能。

(1)对照道路 是指传统技术修筑的土质道路,用推土机推出后在路边栽植与试验道路相同树木,在路面不做其它处理(图 1)。

(2)试验道路 依据牧草减沙保土原理,按照“上拦、下护,合理引灌的原则”,设计在路面采取不同方式种植牧草,路边种植不同经济树种和牧草,形成以植物保护为主要特征的新型道路景观系统,并把路面来水通过沉沙池沉淀后汇集在贮水窖中贮存起来,然后在干旱季节用于节水灌溉或作为其它生产生活用水(图 2)。试验路段的工程措施与对照完全一样,不同之处只是在路面以不同方式种植了各种牧草进行监测。

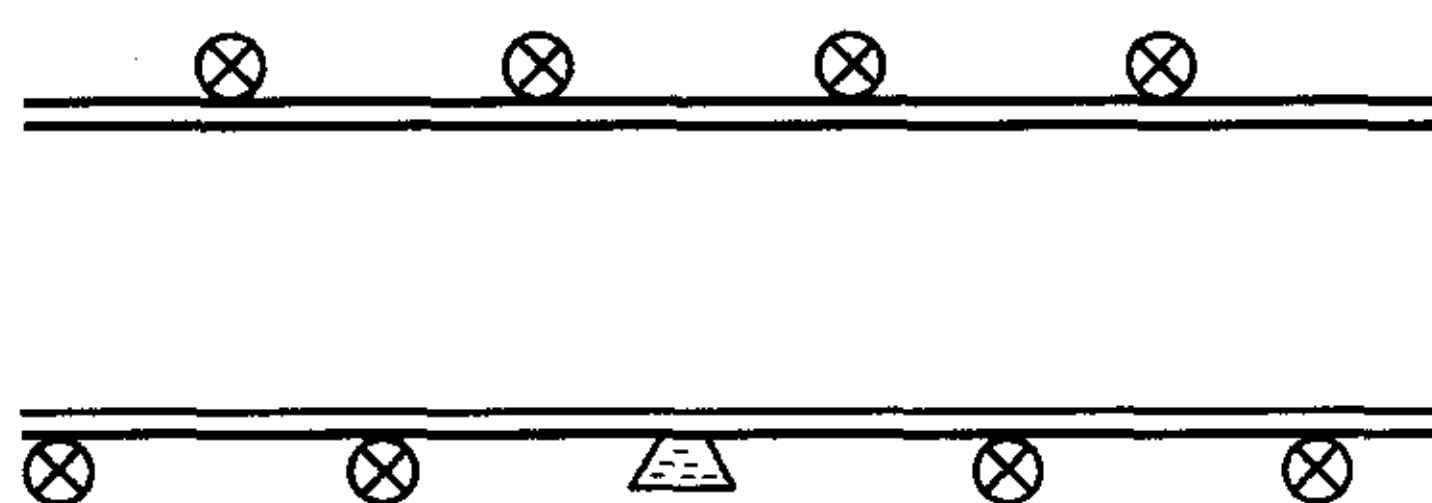


图 1 对照道路设计示意图

Fig. 1 Design pattern of CK road

— 牧草 Grass; ⊗ 乔木 Arbor tree; 水 Wwater pond; — 排水渠 Water offtake;下同 the same below

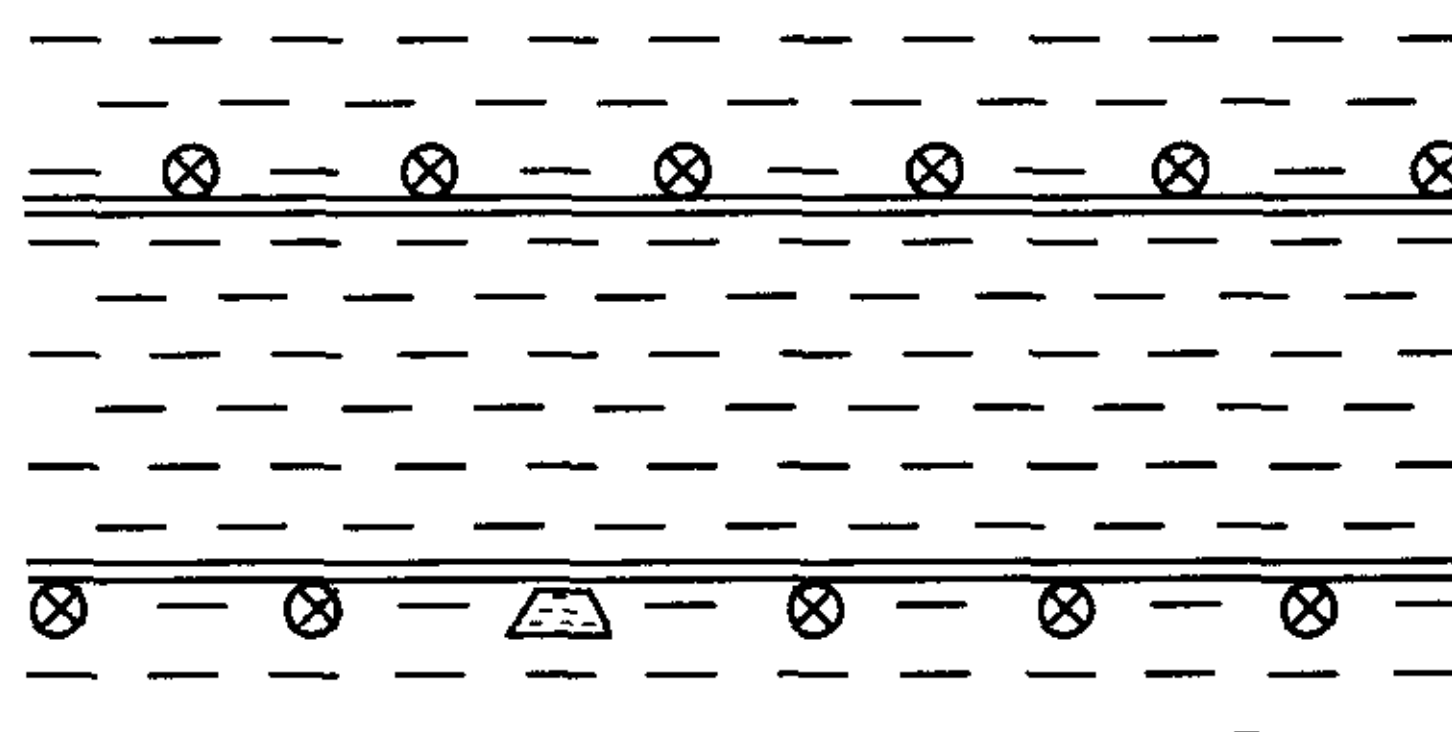


图 2 试验道路设计示意图

Fig. 2 Design pattern of testing road

1.2.3 草种选择 试验是把普通农田地块道路宽 4~6m 的行车路面翻耕,然后按 $300\text{kg}/\text{hm}^2$ 标准施尿素,以 20m 长度为一个试验小区,以散播和条播两种方式种植无芒雀麦(*Bromus inermis* Leyss.)、黑麦草(*Lolium perenne* L.)、小冠花(*Coronilla varia* L.)、冰草(*Agropyron cristatum* L. Gaertn.)、胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)、老芒麦(*Elymus sibiricus* L.)、披碱草(*Elymus nutans* Griseb.)、早熟禾(*Poa pratensis* L.)。

1.2.4 观测指标与方法

(1)郁闭度 牧草郁闭度按种植行的垂直方向测量一定长度(一般为 10m),有草长度之和除以测量长度获得,每个试验路段根据牧草均匀程度,等密度布设 3~5 个测量段。

(2)出苗率、越冬率、产草量 所有牧草在 97a 春季播种,种植 20d 后测定出苗率;第 2 年春季返青后测算越冬率;每年 6 月下旬对地上部分产量进行实地测量,每试验段选有代表性地段测 1m^2 样方 3~5 个,刈割后立即称取鲜样重量;草种产量按实际收获量统计。

(3)径流量、侵蚀量 试验区每 20m 坡长为一个观测路段,下部设径流沉沙池,并通过塑胶管同水窖相连,径流池和水窖用浆砌块石水泥抹面,容积分别为 3.375m^3 ($1.5\text{m}\times 1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$)和 48m^3 ($4\text{m}\times 6\text{m}\times 2\text{m}$),每次雨后测量径流量,24h 后取样烘干测定侵蚀量。

(4)通行能力 山下路口处设有办公基地,对过往车辆进行登记。试验区设有路卡,对试验路段车辆进行监控和分流,使通

行量符合试验设计要求。每年 10 月中旬对试验区车轮压死牧草的面积进行测量分析。

(5) 维护费用 每年根据道路损毁情况进行不定期维修,每次维修前要对冲毁路段的需土量进行实地测算登记,每次维修时对每一路段的用工量进行登记,年底进行统计分析。

(6) 土壤水分 每年汛期(5~10 月份)的每月 10、20、30 日对各试验路段和对照含水量进行定期定点取土测定,深度为 20、40、60、80cm 各取一个土样,每个小区每次选 3 个取土点取平均值。

(7) 土壤容量 每年 4 月 10 日和 10 月 10 日两次对各路段和坡耕地空隙度进行定期测定,用环刀取 20cm 深土壤,每个小区每次选 3 个取土点取平均值。

(8) 土壤养分 每年 10 月中旬在各试验区和对照路段取土样测定土壤养分,每个试区随机选 3 个取土点,用土钻取可耕层(0~30cm)土样,3 个土样混合均匀后送延安市水土保持研究所化验室测定。

2 结果分析

2.1 修筑费用统计分析

试验结果表明,道路种草后每公里种草投资为 3188.23 元,仅为石子路面铺石子费的 11.17%;从总的投资来看,试验路段每 km 的投资为 10031.02 元,比对照路高 46.98%,但是仅为石子路的 28.35%,比石子路面有显著经济优势(表 1)。

2.2 路面种草生长发育的观测分析

研究结果表明,所选牧草出苗率在 82%以上,除黑麦草以外均能安全越冬,具有良好生态适应性;土质路面可以种草,禾本科牧草的适应性优于豆科,除黑麦草不能安全越冬被淘汰外,其它平均覆盖率为 60.32%,是豆科牧草的 1.50 倍。条播牧草生长优于散播,当地牧草陕北冰草表现最好,覆盖率高 达 81.07%(表 2,图 3);在车辆通行量较小的田间路段,路面牧草可以收获少量种子和牧草,在条播下无芒雀麦每年产值高达 2584.28~3150.27 元/km,胡枝子为 1068.88~1194.04 元/km。在沟道,小冠花每年可获得 2866.15 元/km 产值(表 3)。

表 1 道路修筑费用统计表

Table 1 The cost of road construction			
费用 Costs	试验路 Testing road	对照路 CK road	石子路 Stone road
工程 Engineering (RMB/km)	4176.12	4176.12	4176.12
植树 Planting tree (RMB/km)	2666.67	2666.67	2666.67
种草 Planting grass (RMB/km)	3188.23		
铺石子 Pave stone (RMB/km)			28541.67
小计 Sum (RMB /km)	10031.02	6824.79	35384.46

注:以上数据为统计数据;石子路是指试验点附近厚度为 10cm 石子路面测算数据。The data were statistic. Stone roads have 10 cm thickness stone on the road near the test plot.

表 2 道路牧草生长发育观测分析表

Table 2 Growth and development of different kinds of grasses after planted on the road

牧草 Grass	播种 Sowing methods	出苗率 Germination ratio (%)	越冬率 Survival ratio in winter (%)	覆盖率 Cover ratio (%)		高度 Height(cm)	
				山地道路 Road 1	沟道道路 Road 2	山地道路 Road 1	沟道道路 Road 2
无芒雀麦 <i>Bromus inermis</i>	撒播 BS	95	95	28.58	51.01	9.10	9.94
	条播 SS	95	95	61.10	65.98	53.50	51.66
早熟禾 <i>Poa pratensis</i>	撒播 BS	95	95	44.28	52.84	7.44	7.22
	条播 SS	95	95	57.51	62.92	7.52	7.88
冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	移栽 TP	100	100	78.95	81.07	15.24	12.62
老芒麦 <i>Bromus inermis</i>	撒播 BS	90	95	47.38	49.56	9.31	11.07
	条播 SS	91	95	61.60	65.56	15.93	21.62
披碱草 <i>Elymus nutans</i>	撒播 BS	85	95	43.59	50.94	9.63	11.75
	条播 SS	90	95	55.67	65.03	15.11	21.89
黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	撒播 BS	90	5	12.13	12.18		
	条播 SS	95	5	17.15	17.58		
胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	撒播 BS	85	95	40.05	40.31	12.28	11.81
小冠花 <i>Coronilla varia</i>	撒播 BS	82	70	6.87	36.32	9.02	14.76

注:山地道路为黄绵土,海拔 1050~1170m,坡度为 0~13.1°。沟道道路以红胶泥土壤为主,少量夹杂黄绵土和风化岩沫土,海拔 1000~1050m,坡度为 0~13.5°。BS-broadcast sowing, SS-strip sowing, TP- transplant. Road 1: hilly land, loess, 1050~1170 m above sea level, slope gradient is 0~13.1°. Road 2: sinking land, most soil is red-clay, less loess, 1000~1050 m above sea level, slope gradient is 0~13.5°

2.3 路面种草通行能力观测

路面牧草具有一定的抗碾压能力,研究结果表明,沟道道路与山地道路虽然牧草长势差异较大,但抗压性相近,多年平均车轮压死率分别为 18.9%和 19.0%;路面牧草耐践踏能力受道路坡度、道路通行车次、牧草品种等因素的影响。当道路坡度大于 10°时,农机车轮的掘土作用可使受压部位牧草连根拔出而死亡。禾本科牧草一般可承受 300t·次/a 以下车辆碾压,其中陕北冰草表现最好,其次为无芒雀麦。豆科牧草抗碾压能力较弱,200t·次/a 的通行量即可造成受压部位牧草全部死亡。观测结果

证实,种草道路通行后,随车辆行走增加,最终可使所有受压部位牧草全部死亡,路面出现两行 54.25cm 宽的裸露车痕,严重时可使中央 2~3m 路面全部裸露(表 4)。同时,随着车辆碾压下沉和侵蚀作用,道路受压部位年均下沉速度约为 1~2cm/a,并逐渐形成汇、排水壕沟,这是造成种草道路水土流失的重要原因之一。因此,应在车痕处铺上石子,抬高基准面,有效分流路面集水,提高道路通行能力。

表 3 每 km 道路路面种草产出表
Table 3 The economic output of planting grass per kilometer road

牧草 Grass	播种 Sowing methods	鲜草产量 Fresh grass (kg)		产种量 Seeds(kg)		年产值 Value (RMB/year)	
		山地道路 Road 1	沟道道路 Road 2	山地道路 Road 1	沟道道路 Road 2	山地道路 Road 1	沟道道路 Road 2
无芒雀麦 <i>Bromus inermis</i>	撒播 BS	47.0	54.2			81.03	93.45
	条播 SS	364.8	374.0	5.85	4.50	3150.27	2584.28
老芒麦 <i>Elymus sibiricus</i>	撒播 BS	50.6	62.4			87.23	107.58
	条播 SS	61.6	132.8			106.20	228.95
披碱草 <i>Elymus nutans</i>	撒播 BS	41.8	57.8			72.06	99.65
	条播 SS	68.4	131.0			117.92	225.84
胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	撒播 BS	223.2	189.4	4.73	3.55	1196.80	938.55
小冠花 <i>Coronilla varia</i>	撒播 BS	91.6	660.2		6.15		2650.65

注:①牧草产值按 0.2 元/kg 估价,小冠花茎叶因品质有争议不计产值;草种价格:胡枝子 20 元/kg、其它 50 元/kg;②为了便于比较,道路路面宽按 5m 计算。This is the average data of 5years. For convenient to calculate, take the average width of the road is 5 m. BS-broadcast sowing, SS-strip sowing. Value of seed calculated in term of 20 yuan. kg⁻¹ of *Lespedeza bicolor*, 50 yuan. kg⁻¹ of others as local price. Fresh vegetation calculated in term of 0.2 yuan. kg⁻¹, except *Coronilla varia* L., because it can not be ate by domestic animal.

2.4 道路径流量与侵蚀量观测分析

研究结果表明,路面种草是积极有效的水土流失防治措施。路面种草后径流量减少 46.15%~69.30%,土壤侵蚀量减少 54.53%~77.80%,陕北冰草和无芒麦雀表现最好;其它牧草如老芒麦、披碱草、早熟禾、胡枝子、小冠花也有推广价值。从播种方式来看,条播优于散播,减流效益条播比散播高 11.25%~19.26%、减沙效益高 8.55%~14.45%,因此建议在推广该技术时应以条播方式为好。陕北冰草、无芒雀麦、胡枝子、小冠花寿命可达 50a 以上,应成为首选品种(表 5)。

2.5 道路维修费用

试验结果表明,道路种草后每年每 km 维修需土方量和维修费用分别为 22.79m³ 和 48.57 元,比对照减少 69.04%和 69.48%,其中沟道道路效益比山地道路更突出,维修费用比对照减少 74.84%,比山地道路高 13.11%,这是因为沟道土壤较高的含水量有利于牧草的生长发育(表 8),提高了护路效果。实践证明,路面种草后 5a 内不去维修仍可通行,这和对照路年年维修形成明显对比。禾本科牧草优于豆科牧草,平均每 km 每年维修用土 17.43m³,费用 37.36 元,分别比对照减少 82.57%和 82.64%,比豆科牧草效益高 20.84%和 20.05%。在试验牧草中,陕北冰草效益最为突出,平均每年可减少维修费用 90.85%(表 6,图 4)。

2.6 道路种草后土壤理化性状

2.6.1 路面种草土壤营养成分 研究结果表明,道路种植禾本科牧草后,除有机质外,土壤中其它营养成分均有不同程度亏损。种植 5a 后,全氮、全磷、全钾、碱性氮、速效磷、速效钾含量分别减少 21.53%、25.09%、5.65%、12.17%、12.50%、17.42%(表 7),因此在推广过程中,有必要补充各种肥料,这是延长路面牧草使用年限和提高牧草防蚀能力必不可少的条件,有条件地区可试验推广禾本科与豆科牧草混播,但陕北冰草、无芒雀麦、小冠花等长寿命牧草均有极强的竞争能力,和其它牧草难以混合配置。

2.6.2 道路种草土壤物理性状 研究结果表明,道路种草后水分蒸发加快,土壤水分含量减少,山地道路和沟道道路分别为对照的 93.97%和 94.77%;种草后道路土壤板结程度有所缓解,四年平均土壤孔隙度山地道路和沟道道路分别为比对照高 3.15%和 4.66%(表 8,图 5)。道路种草后路面粗糙程度和孔隙度增加,有利于降水入渗,减少了径流和土壤侵蚀发生的可能,这符合道路种草的设计要求。

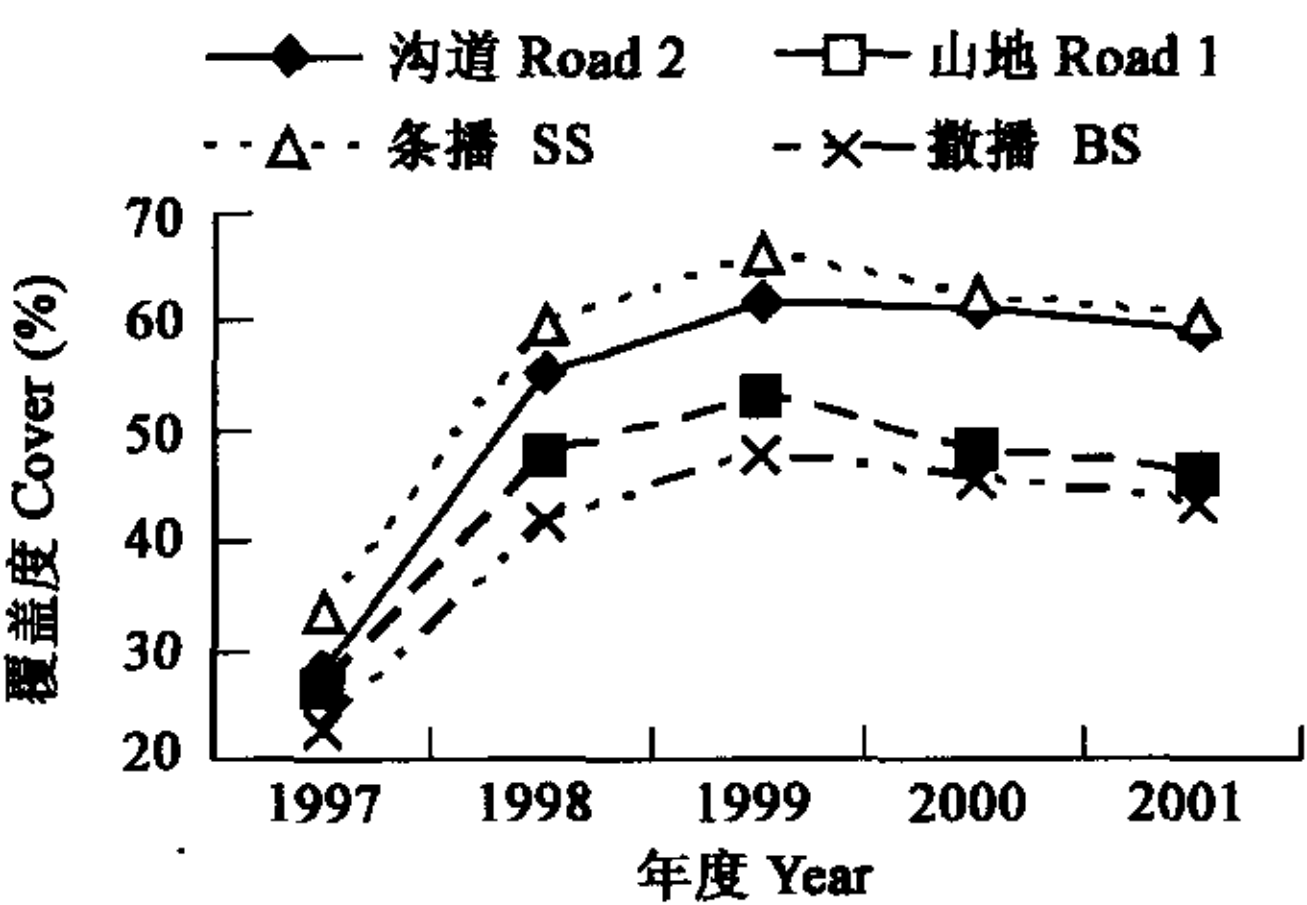


图 3 不同道路与播种方式牧草覆盖度比较图

Fig. 3 Cover ratio of grass on road 1, road2, and different sowing methods per year
BS broadcast sowing, SS strip sowing

表 4 路面种草通行能力观测分析表

Table 4 The capacity of anti-trample observation after planting grasses on the road

牧草 Grass 通车量 Traffic (t · times/a)	禾本科 Grasses					豆科 Legumes				
	坡度 Slope (°)	无芒雀麦 Bi	早熟禾 Cv	陕北冰草 Ac	老芒麦 Lb	坡碱草 Es	平均 Aver.	胡枝子 Pp	小冠花 Lp	平均 Aver.
<100	0~5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	78.3	89.2
	5~10	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	94.2	78.3	86.3
	10~12.5	91.0	89.9	100.0	97.3	95.6	94.8	85.7	78.3	82.0
	>12.5	85.8	81.7	100.0	87.5	89.4	88.9	82.4	78.3	80.4
	Average	94.2	92.9	100.0	96.2	96.3	95.9	90.6	78.3	84.5
100~200	0~5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	94.3	78.3	86.3
	5~10	94.2	93.0	100.0	100.0	100.0	97.4	83.5	78.3	80.9
	10~12.5	85.7	82.0	100.0	86.2	88.7	88.5	78.3	78.3	78.3
	>12.5	83.4	79.8	100.0	83.6	83.3	86.0	78.3	78.3	78.3
	Average	90.8	88.7	100.00	92.5	93.0	93.0	83.6	78.3	81.0
200~300	0~5	100.0	93.2	100.0	100.0	100.0	98.6	93.1	78.3	85.7
	5~10	94.2	88.7	100.0	90.8	91.8	93.1	78.3	78.3	78.3
	10~12.5	83.6	78.3	100.0	78.3	93.3	86.7	78.3	78.3	78.3
	>12.5	78.3	78.3	95.9	78.3	78.3	81.8	78.3	78.3	78.3
	Average	89.0	84.6	98.9	86.9	90.9	90.1	82.0	78.3	80.2
>300	0~5	98.3	90.1	100.0	97.8	92.6	95.8	78.3	78.3	78.3
	5~10	94.2	85.4	100.0	85.8	93.9	91.9	78.3	78.3	78.3
	10~12.5	79.6	78.3	100.0	78.3	78.3	82.9	78.3	78.3	78.3
	>12.5	78.3	78.3	83.7	78.3	78.3	79.4	78.3	78.3	78.3
	Average	87.6	83.0	95.9	85.1	85.8	87.5	78.3	78.3	78.3
平均	Average	90.4	87.3	98.7	90.2	91.5	91.6	83.6	78.3	81.0

注:①牧草保存率是指每年 6 月中旬存活牧草面积与道路通行前牧草面积的比率;②路面种草统一按 5m 宽计算;③以上数据为 2001 年 10 月的观测值。The data of survive rate in relation to the amount of the traffic on the road observed in October, 2001. The survive rate means the ratio of pasture in June per year compared with untraffic period in 1997. For convenient to calculate, take the average width of the road is 5 m. Bi: *Bromus inermis*, Lp: *Lolium perenne*, Cv: *Coronilla varia*, Ac: *Agropyron cristatum*, Lb: *Lespedeza bicolor*, Es: *Elymus sibiricus*, Pp: *Poa pratensis*; BS-broadcast sowing, SS-strip sowing.

3 讨论与建议

景观生态恢复与重建是区域生态安全格局构建的关键途径,景观中某些关键性点、位置或关系的破坏对整个生态安全具有毁灭性的后果,研究景观层次上的生态恢复模式及恢复技术、选择恢复的关键位置、构筑生态安全格局已成为景观生态学家关注的焦点^[34]。第 15 届国际恢复生态学大会强调生态恢复应该归类于设计的领域,她类似于景观建筑和工程建筑,已有漫长历史。她与其它建筑设计要求一样,是人类有意识改变景观的决定,必须考虑人类的需求、美学原则^[36]。农村道路的修筑一方面破坏了自然景观系统的完整性,同时其退化生态系统的恢复可以为景观生态学的研究提供非常恰当的实验场地。寓景观生态学思想于退化生态系统恢复过程,是一种新的有效途径^[35]。因此,土质道路的侵蚀防治成为水土保持、道路维护工作、景观生态恢复与重建不可忽视的重要领域。研究结果显示,路面牧草具有良好的通行能力和较强的防蚀护路作用。路面种草后,路面土壤侵蚀量减少 54.53%~77.80%,最高可减少 92.07%;在条播下,无芒雀麦每年产值高达 2584.28~3150.27 元/km,胡枝子为 1068.88~1194.04 元/km。在沟道,小冠花每年可获得 2866.15 元/km 收入;同时,道路种草使路表集水中的泥沙含量减少,灌溉利用的可行性增加,每公里可获得有效水资源 259.98~410.80m³,具有良好经济、生态效益;道路种草成本仅为石子路的 27.69%~35.99%,维修费用仅为对照路面的 30.52%,如选用当地乡土草种,费用会更低,是一种经济可行的技术途径;道路种草后,路面雨季泥泞、旱季尘土飞扬的劣质景观被蜿蜒的绿色景观所取代,形似镶嵌在绵延山谷中的绿飘带,这是景观生态学发展的重要方向之一。

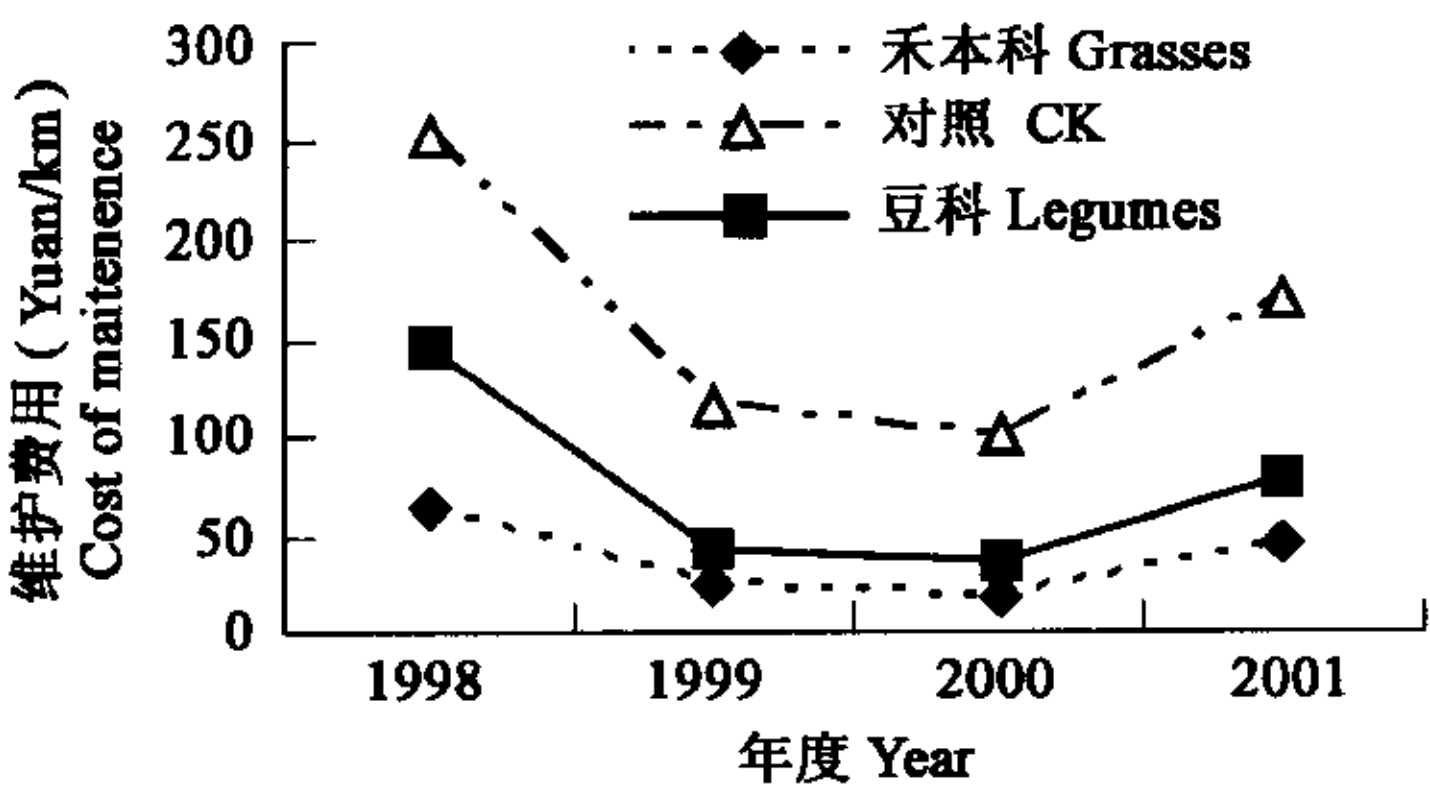


图 4 维护费用年度比较图

Fig. 4 Cost of maintenance of different grasses per year

因此,土质道路的侵蚀防治成为水土保持、道路维护工作、景观生态恢复与重建不可忽视的重要领域。研究结果显示,路面牧草具有良好的通行能力和较强的防蚀护路作用。路面种草后,路面土壤侵蚀量减少 54.53%~77.80%,最高可减少 92.07%;在条播下,无芒雀麦每年产值高达 2584.28~3150.27 元/km,胡枝子为 1068.88~1194.04 元/km。在沟道,小冠花每年可获得 2866.15 元/km 收入;同时,道路种草使路表集水中的泥沙含量减少,灌溉利用的可行性增加,每公里可获得有效水资源 259.98~410.80m³,具有良好经济、生态效益;道路种草成本仅为石子路的 27.69%~35.99%,维修费用仅为对照路面的 30.52%,如选用当地乡土草种,费用会更低,是一种经济可行的技术途径;道路种草后,路面雨季泥泞、旱季尘土飞扬的劣质景观被蜿蜒的绿色景观所取代,形似镶嵌在绵延山谷中的绿飘带,这是景观生态学发展的重要方向之一。

表 5 道路种草每 km 路面径流量和侵蚀量监测分析表

Table 5 The runoff volume and erosion modules of different roads

牧草名称 Grass	种植方式 Sowing methods	山地道路 Road 1			沟道道路 Road 2		
		径流量 Runoff	侵蚀量 Soil erosion	侵蚀模数 SEM	径流量 Runoff	侵蚀量 Soil erosion	侵蚀模数 SEM
		(m ³)	amount (t)	(t/km ²)	(m ³)	amount (t)	(t/km ²)
对照 CK		751.65	273.98	5.48	979.33	311.67	6.23
冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	移栽 TP	155.12	28.04	0.56	171.58	24.72	0.49
无芒雀麦 <i>Bromus inermis</i>	散播 BS	471.46	122.48	2.45	372.69	84.29	1.68
	条播 SS	221.56	60.61	1.21	275.54	60.63	1.21
老芒麦 <i>Elymus sibiricus</i>	散播 BS	304.35	82.78	1.66	385.60	89.04	1.78
	条播 SS	219.94	57.96	1.16	296.84	65.76	1.31
披碱草 <i>Elymus nutans</i>	散播 BS	329.64	81.62	1.63	376.33	82.85	1.66
	条播 SS	276.11	70.11	1.40	263.04	63.55	1.27
早熟禾 <i>Poa pratensis</i>	散播 BS	355.40	92.66	1.85	336.88	79.77	1.59
	条播 SS	249.95	69.77	1.40	265.52	70.51	1.41
禾本科平均 <i>Grasses average</i>	散播 BS	数量 Amount	365.21	94.89	1.90	367.88	84.00
		%	48.59	34.63	34.63	37.56	26.95
	条播 SS	数量 Amount	224.54	57.29	1.15	241.01	55.11
		(%)	29.87	20.91	20.91	24.61	17.68
胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	散播 BS		367.20	103.43	2.07	485.57	120.88
	条播 SS		351.45	99.54	1.99	465.10	108.85
小冠花 <i>Coronilla varia</i>	散播 BS		727.21	263.66	5.27	507.72	118.23
	条播 SS		684.09	213.83	4.28	434.46	99.86
豆科平均 <i>Legumes average</i>	散播 BS	数量 Amount	547.21	183.55	3.67	496.64	119.56
		(%)	72.80	66.99	66.99	50.71	38.36
	条播 SS	数量 Amount	517.77	156.69	3.13	449.78	104.36
		(%)	68.88	57.19	57.19	45.93	33.45
平均 Average	散播 BS	数量 Amount	404.76	124.44	2.49	410.80	95.84
		(%)	53.85	45.47	45.47	41.95	30.75
	条播 SS	数量 Amount	259.98	84.98	1.70	300.66	69.18
		%	34.59	31.02	31.02	30.70	22.20

注:①以上数据按路面宽度 5m,每年实测数据换算而得;②测试小区坡长为 20m,黑麦草因无法越冬没有列入本表;③陕北冰草数据统计在条播内;以上数据为 1998~2001 年监测的平均值,年均汛期降雨量为 405.9mm,4a 年平均 10min 最大降雨 6.9mm。For convenient to calculate, take the average width of the road is 5 m. All the data are the average of a year from 1998 to 2001, except *Lolium perenne* because it cannot survived in winter. BS-broadcast sowing; SS-strip sowing, TP- transplant. Every test plot is 20m long. The data of *Agropyron cristatum* was caculated in strip sowing. Between 1998 and 2001, an average of 405.9 mm yr⁻¹ of rainfall occurred during the flood season, with as much as 6.9mm falling in 10 minutes.

表 6 每公里道路维修费用测算分析表

Table 6 The cost of road maintenance of road per kilometer

道路 Road		对照 CK	禾本科 Grasses			豆科 Legumes			
			陕北冰草 <i>Ac</i>	无芒雀麦 <i>Bi</i>	老芒麦 <i>Lb</i>	披碱草 <i>Es</i>	早熟禾 <i>Cv</i>	胡枝子 <i>Pp</i>	小冠花 <i>Lp</i>
山地道路	土方 Earth (m ³)	65.19	6.90	21.99	16.82	22.80	19.66	24.68	57.20
Road 1	费用 Cost (RMB)	130.38	13.79	43.99	33.63	45.60	39.33	49.36	114.39
沟道道路	土方 Earth (m ³)	82.02	6.70	19.62	20.47	19.39	19.99	31.03	29.21
Road 2	费用 Cost (RMB)	187.84	15.34	44.92	46.87	44.39	45.77	71.06	66.89

注:本表数据通过对道路沟蚀情况的测定而得,回填黄绵土每 m³ 定价为 2.00 元,红胶泥为 2.29 元。以上为 1998~2001 平均值。All the data are the average of a year from 1998 to 2001, observed by practice of soil erosion. Value of the used soil calculated in term of 2.00 yuan. m³ of loess, 2.29 yuan. m³ of clay, as local price. *Bi*:*Bromus inermis*, *Lp*:*Lolium perenne*, *Cv*:*Coronilla varia*, *Ac*:*Agropyron cristatum*, *Lb*:*Lespedeza bicolor*, *Es*:*Elymus sibiricus*, *Pp*:*Poa pratensis*.

土质道路的侵蚀防治应站在景观生态修复的角度进行设计与施工,引用“接近自然”的水土保持生态修复理论进行路面景观修复,不仅要积极采取工程措施,更要采取生物措施,积极开展路面种草、路畔植树造林和路面集水灌溉,变害为利,最大限度地减少人工材料的使用量,这是生态修复理论与技术研究的重要方向。同时,把景观生态学和“接近自然”的水土保持与生态修复理论在实践中检验,是生态理论研究的重要方法。从生态和经济综合角度考虑,陕北冰草和无芒雀麦是黄土丘陵区道路种草的最佳草种,陕北冰草、无芒雀麦、胡枝子、小冠花寿命可达 50a 以上,应成为首选品种。从不同地形条件路面种草效果比较来

看,土壤水分条件较好的沟道道路路面种草效果优于干旱的山地道路,因此,该技术在降雨量丰富地区应该更有推广价值。考虑到车辆通行对路面牧草的破坏作用,在通行压力较大的其他道路可进一步推广以下两种种草护路模式:

表 7 路面种草土壤营养成分对比分析表

Table 7 The soil nutrition content after planting grasses on the road

道路类型 Road			全氮	全磷	全钾	有机质	碱性氮	速效磷	速效钾	pH
			Total N (%)	Total P (%)	Total K (%)	SOM (%)	Active N (mg/L)	Active P(mg/L)	Active K(mg/L)	
山地道路 I	对照 CK		0.039	0.118	2.495	0.390	44	6	46	8.12
	禾本科 Grasses	含量 Content	0.029	0.105	2.225	0.415	34	7	46	7.99
		与对照相比 Compare with CK(%)	-24.62	-10.85	-10.83	6.46	-22.27	16.67	0.43	-1.58
	豆科 Legumes	含量 Content	0.044	0.105	2.143	0.393	59	9	48	8.30
		与对照相比 Compare with CK(%)	11.54	-11.44	-14.11	0.64	32.95	41.67	4.35	2.16
沟道道路 II	对照 CK		0.039	0.114	2.657	0.370	46	8	63	8.12
	禾本科 Grasses	含量 Content	0.031	0.085	2.507	0.433	40	7	53	8.28
		与对照相比 Compare with CK(%)	-21.53	-25.09	-5.65	17.14	-12.17	-12.50	-15.87	2.00
	豆科 Legumes	含量 Content	0.060	0.095	3.128	0.876	61	11	66	8.12
		与对照相比 Compare with CK(%)	53.85	-17.11	17.71	136.62	31.52	31.25	3.97	0.00

注:土样为不同重复的混合样,对照为没有种草道路土样,土样化验由延安市水土保持研究所 2001 年 10 月 16 日取样化验完成;道路种草后每年补施尿素和磷肥各 150kg/hm2。①- Grasses; ②- Legumes; I-Road 1; II-Road 2. The soil samples are the mixture with various treatments. Replicate soil samples were pooled by treatment and tested at the Yan'an Water and Soil Conservation Research Institute on 16 October 2001. Grass road received 150 kg ha-1 of both carbamide and phosphate fertilizers.

表 8 道路土壤布设前后物理性状观测分析表

Table 8 The soil physical character after planting grasses on the road

草种 Grass	项目	1997		2001	
		山地道路 Road 1	沟道道路 Road 2	山地道路 Road 1	沟道道路 Road 2
禾本科 Grasses	含水量 Soil water content(%)	12.40	13.33	9.55	10.59
	孔隙度 Soil porosity(%)	50.19	43.40	48.30	40.38
豆科 Legumes	含水量 Soil water content(%)	12.40	13.33	9.92	11.50
	孔隙度 Soil porosity(%)	50.19	43.40	46.42	39.62
平均 Average	含水量 Soil water content(%)	12.40	13.33	9.66	10.85
	孔隙度 Soil porosity(%)	50.19	43.40	47.55	40.00
对照 CK	含水量 Soil water content(%)	12.40	13.33	10.10	12.03
	孔隙度 Soil porosity(%)	50.19	43.40	46.04	38.87

3.1 生产干道模式

生产干道是指连接各田间道路的农田作业道路,车辆通行增加,道路种草后,路面因车轮碾压和车轮掘土造成部分路面牧草损坏,形成两行土壤裸露的车轮痕迹,这时可在痕迹处散播石子,提高痕迹基准面,控制水土流失,提高道路的通行能力(图 6)。

3.2 交通干道模式

交通干道指同时用于农业生产和其他活动的农业道路,车辆通行多,道路种草后,路面因车轮碾压和车轮掘土造成中间行走路面牧草全部损坏,道路中间形成宽 2~3m 裸露路面,因此应在路边种植牧草,路中铺设石子,提高路面基准面,控制水土流失,提高道路通行能力(图 7)。

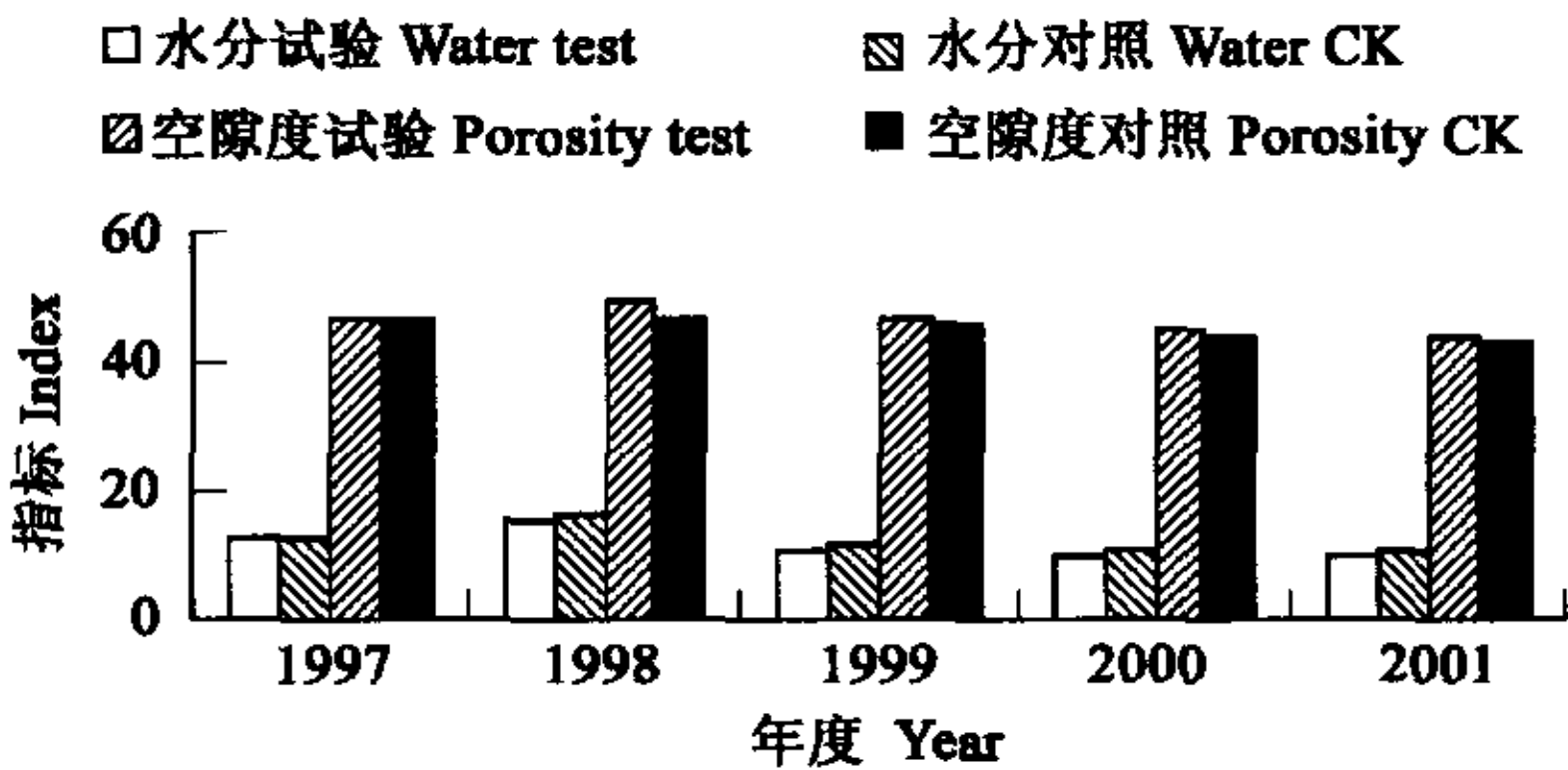


图 5 试验与对照道路土壤水分与孔隙度

Fig. 5 Soil water content and porosity of testing road and CK road

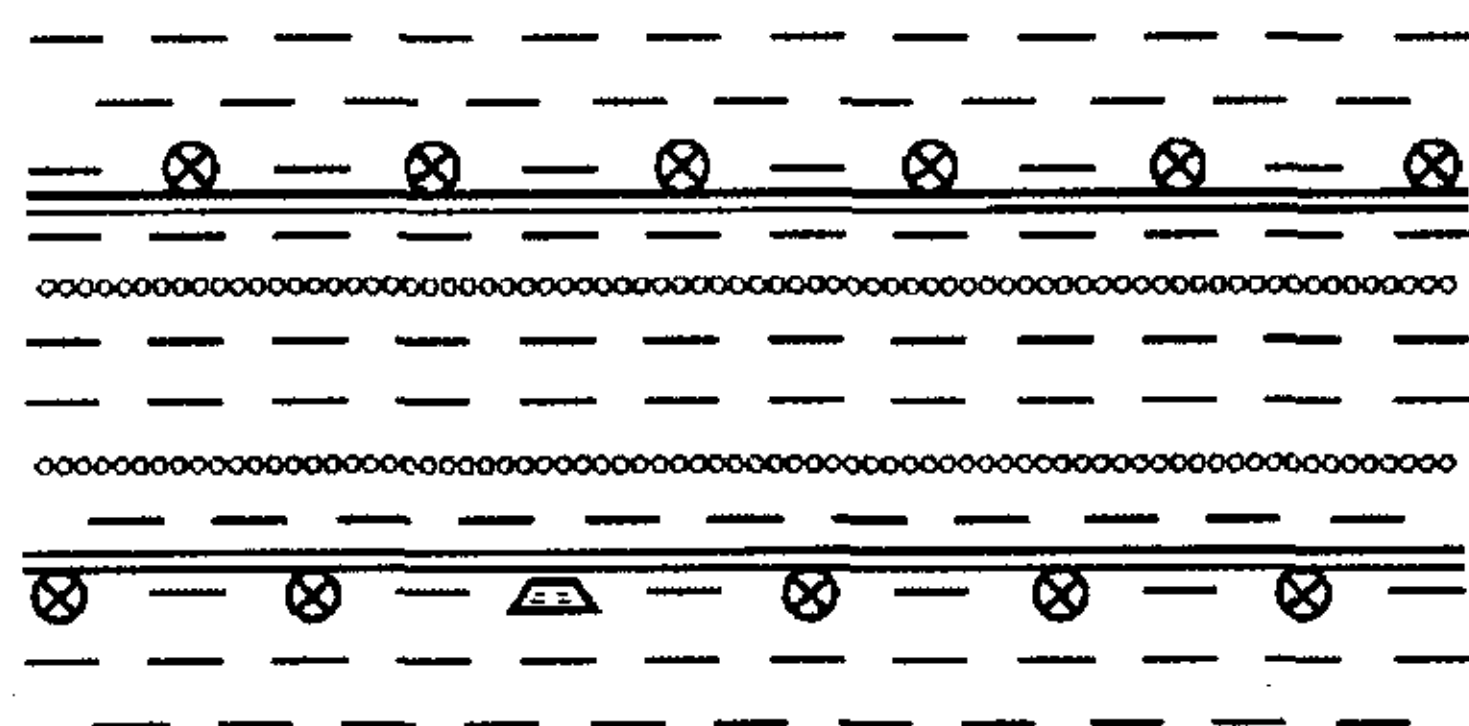


图6 生产干道种草模式

Fig. 6 Production road model

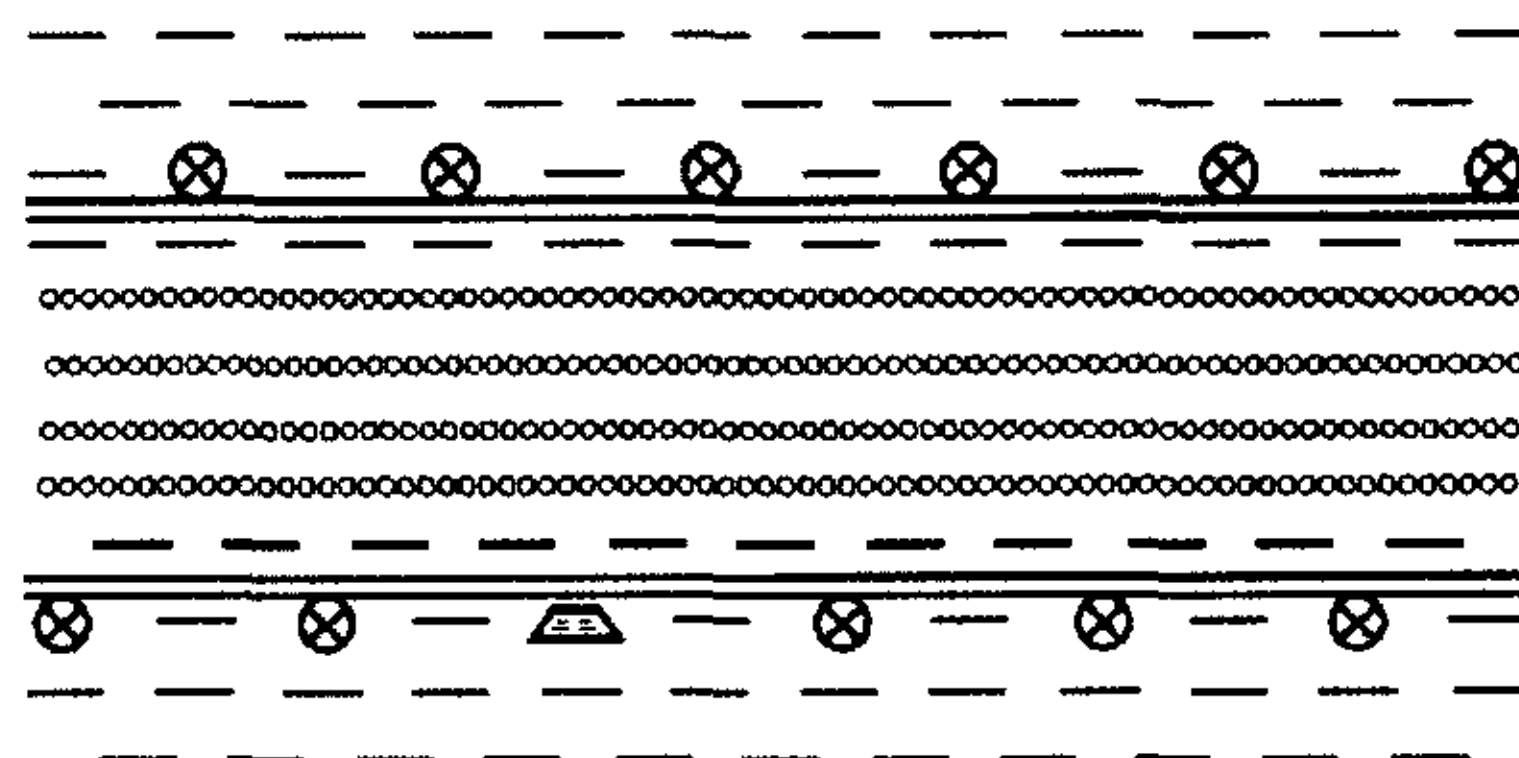


图7 交通干道种草模式

Fig. 7 Trunk road model

References:

- [1] Zhang S X, Lei R D, Chen C G, *et al.* Near-natural Forest — A Promising Man-made Nature Forest. *Journal of Northwest Forestry College*, 1996, **11**(5):157~162.
- [2] Cao S X. *Mountainous Agriculture*. Beijing: China Agriculture Science & Technology Press, 2001. **11**(5): 96~132.
- [3] Fredricksen R L. *Sediment after the Idaho Batholith*. U. S. For. Ser. Res. Paper INI-161. Intermountain For. and Range Exp. Sta. Ogden, Utah. 1974r logging road construction in a small western Oregon watershed. Misc. Pub. 970 U. S. Dept. agr. Washington, d. c. 1965.
- [4] Xi J B, Yang Z G, Chen B S, *et al.* Grasses and Legumes Suitable for Stable Ining Side Slopes of Highways in Xin'an Are. *Pratacul Tural Science*, 1998, **15**(5):53~58.
- [5] Gratz K E. Sericea for erosion protection and Beauty along high ways. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1966, **21**(3): 92~94.
- [6] Rodgers D B. Highway Erosion Control. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1965, **20**(3):189~190.
- [7] Batra P C. Comparison of Ipomoea and Grass for Checking Erosion on Road Embankments. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1968, **16**(3):152~55.
- [8] Devet D D, Davis J E. Grass and pines-Winning combination. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1965, **20**(1):30~31.
- [9] Dyrness C T. *Stablization of newly constructed road back slopes by mulch and grass-legume treatments*. U. S. For. Ser. Res. Note PNW-123. Pca. N. W. For. and Range Exp. Sta. , Portland, ore.
- [10] Carr W W and Ballard T M. Hydroseeding forest roadsides in British Columbia for erosion contro1. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1980, 33~35.
- [11] Batra P C & Gill G S. Comparison of Ipomoea and Grass for Checking Erosion on Road Embankments. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1968, **16**(3):52~55.
- [12] Jaarsma C F, Dijk T V. Financing local rural road maintenance. Who should pay what share and why? *Ransportation Research Part A*, 2002, **36**:507~524.
- [13] Ariel E Gucinski L H. Function, effects, and management of forest roads. *Forest Ecology and Management*, 2000, **133**:249~262.
- [14] Sari C S, Mislivets M R, Jiquan C, *et al.* Effects of roads on landscape structure within nested ecological units of the Northern Great Lakes Region. USA. *Biological Conservation*, 2002, **103**:209~225
- [15] Jaarsma C F, Geert P A Willems. Reducing habitat fragmentation by minor rural roads through traffic calming. *Landscape and Urban Planning*, 2002, **58**:125~135.
- [16] Jaarsma C F. Approaches for the planning of rural road networks according to sustainable land use planning. *Landscape and Urban Planning*, 1997, **39**: 47~54.
- [17] Rummer B, Stokes B, Lockaby G. Sedimentation associated with forest road surfacing in a bottomland ecosystem. *Forest Ecology and Management*, 1997, **90**:195~200.
- [18] Chin I L. Soil and Water conservation Engineering and Research in Taiwan. *Research of Soil and Water Conservation*, 1995, **2**(3):31~39.
- [19] Zheng S Q. Gully-slope Road Building Technology and Erosion Controlling System. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1997, **17**(7):33~39.
- [20] Zheng S Q, Gao K X. A Design of Hillside Production Type Plant Road in Loess Hilly Region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2000, **20** (1):36~38.
- [21] Zheng S Q, Zhao B L, Zhao K Q. Valley-Slope Road Erosion and Its Control Measures in Wangdong Gully Experimental Area Located in

- Changwu County. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1994, **8**(3): 29~35.
- [22] Zheng S Q, Zheng K. Appraisalment of Botanic Roots and Anti-erosion Functionon Botanic Road in Yan'an Loees Area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, **17**(2):174~176.
- [23] Zheng K, Zheng S Q, Yang G M, *et al.* The system of building technology and quota of anti-erosion road in hill-gully areas of Loess Plateau in Yan'an. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2001, **19**(3): 134~150.
- [24] Zheng S Q, Yang G M, Zhou H. Study on Erosion Control Measures of Slopped Roads in Gullied Rolling Loess Area of the Loess Plateau. *Soil and Water Conservation in China*, 2000, (11):16~17.
- [25] Klemens Ekschmitt, Gabor Bakonyi, Marina Bongers, *et al.* Nematode community structure as indicator of soil functioning in European grassland soils. *Eur. J. Soil Biol.*, 2001, **37**:263~268.
- [26] Wei Y C, Kang L L, Wang Y Z, *et al.* Effect of Soil and Water Conservation Measures on Soil Physical Behaviors-Taking World Bank, s Loan Project Area of Soil and Water Conservation on Loess Plateau as Example. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, **17**(5): 114~116.
- [27] Wang Y S, Masae Shiyomi, Mikinori Tsuiki, *et al.* Spatial heterogeneity of vegetation under different grazing intensities in the Northwest Heilongjiang Steppe of China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, **90**:217~229.
- [28] Victor L Hauser. Improving grass seeding establishment. *Water Conservation*, 1988, **43**, (1):153~156.
- [29] Elliott L F, Saxton K E, and Papendick R I. The effect of residue management and para tillage on soil water conservation and spring barley ylelds. *Journa of Soil and Water Conservation*, 1995, **50** (6):134~139.
- [30] Cooper H W. Some Plant Material and Improved Techniques Used in Soil and Water Conservation in the Great Plains. *Journal of Soil and Water Conservation*, **12**(4):52~55.
- [31] Michael A Zobisch. Erosion susceptibility and soil loss on grazing lands in some semiarid and suumid locations of Eastern Kenya. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1993, **48** (5)126~140.
- [32] Zhang M T, Na Y F. Discussion of the Way for Grassland and Utilization in Inner Mongolia. *Grassland of China*, 2003, **25**(6):59~62.
- [33] Mi Z Y, Li C F. Artificial Grass Planting is the Requirement of Ecological Security Amomg the Three-Gorges Dam Territory. *Pratacul Tural Science*, **19**(4), 74~76.
- [34] Guan W B, Xie C H, Ma K M, *et al.* A vital method for constructing regional ecological security pat-tern: landscape ecological restoration and rehabilitation. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(1): 64~74.
- [35] Li M H, Peng S L, Shen W J, *et al.* Landscape ecology and restoration of degraded ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(8): 1621~1626.
- [36] Peng S L, Lu H F. Restoration, design and landscape——The overview of 15th restoration ecology global meeting. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(12):2747.

参考文献:

- [1] 张硕新,雷瑞德,陈存根,等.“近自然林”——一种有发展前景的“人工天然林”.西北林学院报,1996, **11**(增):157~162.
- [2] 曹世雄.山地农业.北京:农业科技出版社,2002. 5.
- [4] 席嘉宾,杨中艺,陈宝书,等.西安地区高等级公路边坡护坡绿化草种的引种栽培试验.中国草业科学,1998, **15**(5):53~58.
- [18] 林亲义.台湾水土保持工程及研究.水土保持研究,1995, **2**(3):31~39.
- [19] 郑世清.黄土高原沟壑区沟坡道路修筑技术及其防蚀体系.水土保持通报,1997, **17**(7):33~39.
- [20] 郑世清,高可兴.黄土丘陵区山坡生产型植物路综合防护技术体系规划设计.水土保持通报,2000, **20**(1):36~38.
- [21] 郑世清,周保林,赵克信.长武王东沟试验区沟坡道路侵蚀及其防蚀措施,水土保持学报,1994, **8**(3): 29~35
- [22] 郑世清,郑科.延安黄土区植物路植物根系与水保功能评价研究.水土保持学报,2003, **17**(2):174~176.
- [23] 郑科,郑世清,杨岗民,等.延安黄土丘陵沟壑区山坡防蚀道路技术体系及指标.干旱地区农业研究,2001, **19**(3):134~150.
- [24] 郑世清,杨岗民,周红.黄土丘陵沟壑区山坡道路防蚀措施初步研究.中国水土保持,2000, (11):16~17.
- [26] 魏义长,康玲玲,王云璋,等.水土保持措施对土壤物理性状的影响——以黄土高原水土保持世界银行贷款项目区为例.水土保持学报, 2003, **17**(5):114~116.
- [32] 张明铁,那艳芬.内蒙古草原建设与利用途径的探讨.中国草地,2003, **25**(6):59~62.
- [33] 米自由,李传富.人工种草是三峡库区生态安全的需要.草业科学,2002, **19**(4):74~76.
- [34] 关文彬,谢春华,马克明,等.景观生态恢复与重建是区域生态安全格局构建的关键途径.生态学报,2003, **23**(1):64~74.
- [35] 李明辉,彭少麟,申卫军,等.景观生态学与退化生态系统恢复.生态学报,2003, **23**(8): 1621~1626.
- [36] 彭少麟,陆宏芳.生态恢复、设计与景观生态学——第十五届国际恢复生态学大会综述.生态学报,2003, **23**(12):2747.