

草原工程侵蚀区植被恢复模式的水土保持效应

荣浩, 珊丹, 刘艳萍, 梁占岐

(水利部 牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020)

摘要:以内蒙古草原大型露天煤矿开采形成的人工再塑地貌为研究对象, 针对水土流失特点, 结合自然气候、立地条件等因素, 以快速恢复工程侵蚀区受损植被、减少水土流失为目的, 通过水土保持措施组合配置试验, 研究草原工程侵蚀区人工再塑地貌不同植被恢复模式的水土保持效应。结果表明: 人工再塑地貌平台植被恢复采用“栽植灌木+种草”的措施配置灌木保存率为85.4%, 草本植物盖度76%, 土壤风蚀量比其他样区减少30%~85%; 边坡植被恢复采用“栽植灌木+种草”模式和“生物袋+灌木”模式植物盖度达60%以上, 抗蚀保土能力较强; 通过秩和比法进行综合效益评价, “生态袋+种草”和“栽植灌木+种草”两种模式在治理投资成本与水土保持效益方面结合较好, 水土流失防控效果明显, 可在草原工程侵蚀区人工再塑地貌边坡水土流失治理中优先应用。

关键词:草原; 水土保持; 措施配置; 工程侵蚀区

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)03-0024-05

Effects of Vegetation Restoration Models on Soil and Water Conservation in Engineering Erosion Area of Grassland

RONG Hao, SHAN Dan, LIU Yanping, LIANG Zhanqi

(Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Hohhot 010020, China)

Abstract: Effects of the artificial reshaping landscape for vegetation restoration on soil and water conservation was investigated in engineer erosion areas of open coal mine dump in Inner Mongolia typical steppe. The aims of this study was to restore the damaged vegetation, and to reduce water loss and soil erosion by the combined configuration of soil and water conservation measures based on characteristics of the soil and water loss, natural climate, site conditions, and other factors. The results showed that the vegetation coverage reached to 76% and the bush survival rate was 85.4% by the vegetative restoration model of planting shrubs and grass on the dumping platform, this pattern made soil wind erosion decrease by 30%~85% compared with the others. The coverage of slope vegetation increased by 60% by restoration models of planting shrubs and grass, and of setting ecological bag and planting grass, which were better for preventing and controlling soil and water losses, and low investment, evaluated comprehensive benefits by the Rank-sum ratio. Two models could be preferred for controlling soil and water losses in the artificial reshaping landscape.

Keywords: steppe; soil and water conservation; measure configuration; engineer erosion area

广袤的内蒙古草原不仅是我国最大的天然牧场和畜牧业生产基地, 也是我国重要的天然生态屏障。近些年, 随着草原区煤炭、电力为主体的能源产业迅猛发展, 基础设施建设不断加大, 草原生态环境和农牧民的生产生活受到巨大影响。大规模矿山开采、城镇建设以及交通等生产建设项目占用和破坏大面积草原, 改变了草原原有面貌, 损坏土壤结构, 大面积地表裸露的人工再塑地貌使草原景观不再完整^[1], 形成

草原工程侵蚀区。草原工程侵蚀区(即发生严重水土流失的草原工程项目建设区)生产建设项目造成的水土流失是以人类生产建设活动为主要外营力形成的水土流失类型^[2], 是人类生产建设活动过程中扰动地表和地下岩土层、堆置废弃物、构筑人工边坡而造成水土资源和土地生产力的破坏和损失, 是一种典型的人为加速侵蚀^[3-5], 草原大型露天煤矿是草原工程侵蚀区典型代表之一^[6]。

收稿日期: 2016-05-18

修回日期: 2016-06-07

资助项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目“退化草地恢复重建水土保持关键技术研究”(201301049); 内蒙古自治区科技计划项目“草原矿区生态修复重建关键技术与示范”(20140713)

第一作者: 荣浩(1969—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 硕士, 高级工程师, 主要从事草地水土保持与生态用水研究。E-mail: mksrh@126.com

目前国内外学者在矿区水土保持生态修复技术方面开展了一些研究,国外的研究成果主要包括矿山开采对立地条件的影响机制、废弃地的生态和综合治理研究、以及物理性修复、生物复垦、植物修复技术、抗侵蚀复垦工艺等^[7],美国、加拿大、澳大利亚、法国等发达国家基本实现了土地、环境和生态的综合修复^[8],其中,美国主要注重水体和林地修复,澳大利亚注重于草原管理与修复,法国等欧洲国家则侧重于废弃地修复^[9-11]。目前,我国针对半干旱草原大型煤矿开发区,尤其是草原区露天煤矿水土流失综合治理方面还缺乏科学、有效的技术手段与治理模式,科技基础十分薄弱^[12-13]。本研究以草原区露天煤矿人工再塑地貌水土保持植被修复模式试验研究为基础,以生态优先、科学性、可操作性、近自然修复为主的原则,针对不同立地类型,研究不同植被恢复模式的水土保持效应,为草原工程侵蚀区水土流失防治及生态修复提供技术支撑和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

内蒙古大唐国际锡林浩特矿业有限公司胜利东二号露天煤矿位于内蒙古锡林郭勒盟锡林浩特市境内,露天矿呈北东—南西走向不规则的四边形,面积49.88 km²,开采规模6 000~7 000万t/a。本试验区位于胜利东二号露天煤矿矿区东南部排土场,排土场占地面积13.66 km²,为平台、边坡相间分布的阶梯式地貌,相对高度100 m,每级台阶坡面高度约25 m,排土场为煤矸石与土混排后覆土,覆土深度50~80 cm,排土场覆土沉降时间为3 a^[14]。排土场平台措施配置样区分别为:样区1为宽株行距灌木林(2.5×2.5 m),样区2为窄株行距灌木林(0.8 m×0.6 m),样区3为灌木+种草,样区4为人工种草。每个试验小区面积为10 m×10 m。排土场边坡措施配置样区:样区1为灌木林,样区2为灌木+种草,样区3为灌+草+滴灌,样区4为生物篱+沙障+草,每个试验小区面积为20 m×5 m。

平台水土保持措施组合配置试验中,样区1和样区2的灌木林造林方式为人工栽植柠条(*Caragana intermedia*),每穴2~3株;样区3的灌木+种草方式中,灌木株行距为1.5 m×1.5 m,人工栽植柠条,每穴2~3株,空地牧草混合撒播,草种为紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、披碱草(*Elymus dahuricus*);样区3的人工种草采用牧草混合撒播,草种为紫花苜蓿、披碱草。边坡水土保持措施组合配置试验中,样区1的灌木林造林方式为人工栽植柠条,株行距为

1.5 m×1.5 m,每穴2~3株;样区2的灌木+种草方式同平台试验区;样区3的灌+草+滴灌方式中,灌木和草的配置同样区2,同时配套滴灌灌溉系统,滴灌带沿边坡等高线每1.5 m布置1条;样区4的生物篱+沙障+草方式中,坡面铺设生物篱,用黄柳条人工插成1 m×1 m规格的网格沙障,生物篱网格内撒播披碱草、紫花苜蓿。

1.2 试验方法

从植物生长状况、土壤理化性质变化、抗风蚀能力及蓄水保土能力方面,分析各试验样区不同措施配置作用下的水土保持效应,为草原工程侵蚀区人工再塑地貌水土保持治理模式的选择提供科学依据,试验测试时间为2013年5月—2015年8月。

1.2.1 植被调查 于水土保持措施布设第3年植物生长旺盛期(8月初),采用样方法对植被进行调查,在各个样区随机选取3个样方,测定每个样方内的各种植物个体高度、盖度,灌木冠幅直径(垂直交叉);地上生物量采用刈割法,随机选取3个1 m×1 m样方,齐地刈割,除去枯枝叶,自然风干后称重。

1.2.2 土壤风蚀量测定 采用测钎法,每个样区布设9根测钎,垂直主风向布设3行,每行3支,行间距为1 m×1 m。同时用环刀测定土壤干容重(W , W =烘干土重/环刀容积),计算土壤风蚀模数。

1.2.3 坡面径流量、土壤侵蚀量测定 试验样区内布设径流小区,面积20 m×5 m,由PVC防水材料围砌,以保证各小区土壤中水分不会侧渗,在小区最低处设置一个出水口,出口端接有体积为0.13 m³的集流桶,用于收集1次降雨产生的径流和泥沙。每次降雨产流后,测定桶内集水深度(h),计算坡面径流总体积,再用全深剖面采样器取小样,作为代表本次径流的总代表水样,称其重量和体积,过滤后105℃烘干至质量恒重,电子天平称其质量(M),用以计算此次降雨的径流量和侵蚀量。

2 结果与分析

2.1 平台不同措施配置模式水土保持效应

2.1.1 不同模式植物生长情况 分析草原矿区排土场平台不同措施配置方式植物生长变化,由表1可知,排土场平台不同措施配置样区中,采取灌木宽行栽植模式的样区1,灌木成活率和保存率均较低,林间虽出现一些草原植物,但植被覆盖度仅为32%,样地出现大面积地表裸露;样区2灌木采用了密植方式,灌木成活率和保存率均较样区1有一定提高,林间植被覆盖度达到49%;3号样区采取了灌木+人工种草模式,植物生长状况良好,灌木保存率达

85.4%，草本植物盖度为 76%，地表裸露面积不足 10%；4 号样区人工种草后，植物盖度（60%）与地上生物量均低于 3 号样区。

表 1 平台不同措施配置模式植物生长情况

试验 样区	草 本			灌木		冠幅/ m
	盖度/ %	草群 高度/m	生物量/ (g·m ⁻²)	保存率/ %	成活 率/%	
1	32	10	62	71	82.5	0.52
2	49	14	87	77.5	84.4	0.67
3	76	18	154	85.4	95.6	0.93
4	60	17	109			

注：用平均值表示测定结果。

2.1.2 不同模式土壤理化性质变化 对不同水土保持措施实施后各样区土壤主要理化性质进行分析，

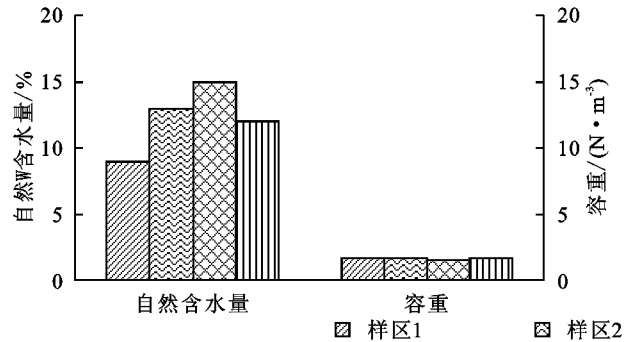


图 1 平台不同措施配置模式土壤理化性质变化

2.1.3 不同模式的抗风蚀效果 土壤风蚀监测结果（图 2）表明，水土保持措施实施后各试验区的土壤风蚀厚度有较大差别；各样区按抗风蚀能力实测结果排序为：样区 3>样区 4>样区 2>样区 1，测定样区 3 土壤风蚀厚度与土壤风蚀量较其他样区减少幅度达 30%~85%，样区 3 土壤风蚀量与样区 1，样区 2 之间的变化差异显著（ $p<0.05$ ），说明样区 3 的措施配置模式防风固土能力强于其他样区，同时，样区 3 植物生长状况及土壤环境均较好，因此，根据植被以及土壤主要性状的变化情况，“灌+草”结合可作为草原生产建设项目废弃地平台水土保持植被恢复重建的主要模式。

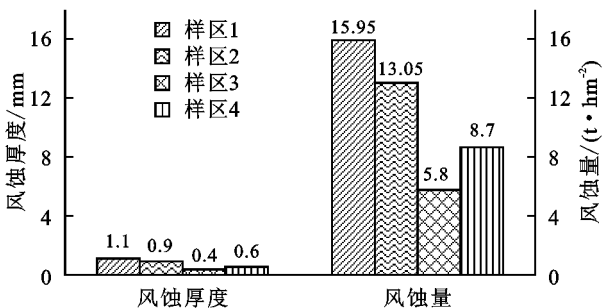
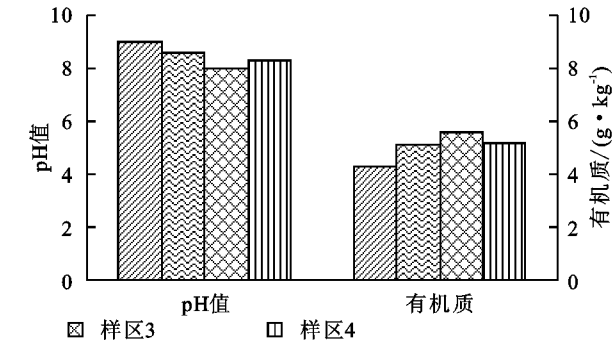


图 2 排土场平台措施配置方式试验区土壤风蚀量变化

2.2 边坡不同措施配置模式水土保持效应

2.2.1 不同措施配置方式植物生长情况 分析不同

结果表明（图 1），不同措施组合实施后，各样区土壤容重虽有一定差异，但变化未达到显著水平（ $p>0.05$ ）；不同水土保持措施实施后，3 号样区土壤自然含水量最高，比土壤含水量最低的 1 号样区增加 14.9%，两个样区之间土壤自然含水量变化差异显著（ $p<0.05$ ）；各措施组合对土壤 pH 值影响比较明显，并且各样区的 pH 值均在 8.0 以上，土壤 pH 值高于 8.0 时，土壤中即使有丰富的营养物质，植物根系也难以吸收利用；样区 4 土壤有机质含量最高，为 6.1 g/kg，其次为样区 3，样区 1 最低（4.2 g/kg），从土壤 pH 值和有机质含量上看出，草原工程侵蚀区土壤条件较差，极不利于植物生长，植被恢复与重建难度较大。



水土保持措施配置排土场边坡植被变化情况（图 3），1, 2 号样区灌木保存率均较低，样区 1 林间虽出现一些草本植物，但植被覆盖度为 31%；样区 2 由于采取了人工种草措施，林间植被覆盖度比样区 1 有所提高，植被覆盖度为 40%，但仍处于较低水平，两个样区均出现较大面积的地表裸露；样区 3 的“灌木+人工种草”模式和样区 4 的“生物篱+灌木”模式，植物生长情况均较好，灌木保存率都达到 80% 以上，植物盖度达 60%，地表裸露面积少于 20%。

2.2.2 不同模式下边坡径流及土壤侵蚀分析 图 4 可知，在排土场边坡水土保持措施配置方式中，措施实施第一年，样区 4 的年径流量最小，是样区 1 的 74%，其次为样区 2，年径流量是样区 1 的 80%，样区 4 的年径流量明显小于其他样区，具有显著的拦水蓄水、减小地表径流的作用，主要原因是生物篱直接覆盖于坡面，避免降雨与坡面表层土直接接触，从而减小了地表径流^[15]；在治理的第二年，各样区年径流量较上一年均有不同程度减少，且不同样区的年径流量之间的差异逐渐增大，样区 3 和样区 4 较上一年径流量减少达 30% 以上，且比样区 1 和样区 2 的年径流量减少达 50%。对各试验样区的产沙量进行对比分析发现（图 4），治理当年，样区 4 的年土壤侵蚀量最小，为 8 878 t/(km²·a)，治理次年，年土壤侵蚀量由

大到小的顺序为:样区 1>样区 2>样区 4>样区 3,各治理模式的产沙量差距也明显增大,样区 3 和样区 4 的抗蚀保土能力明显优于样区 1 与样区 2。上述试验数据的对比分析说明,样区 3 和样区 4 的措施配置

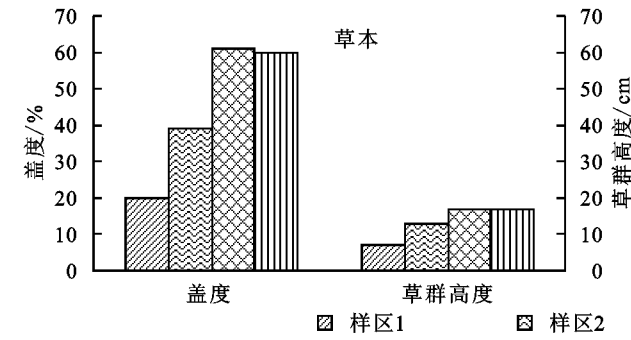


图 3 排土场边坡不同措施配置方式试验区植被生长情况

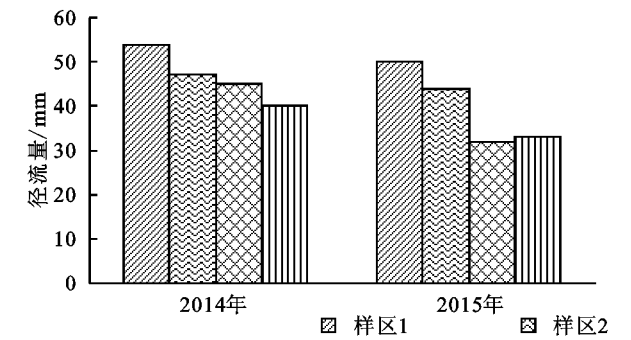


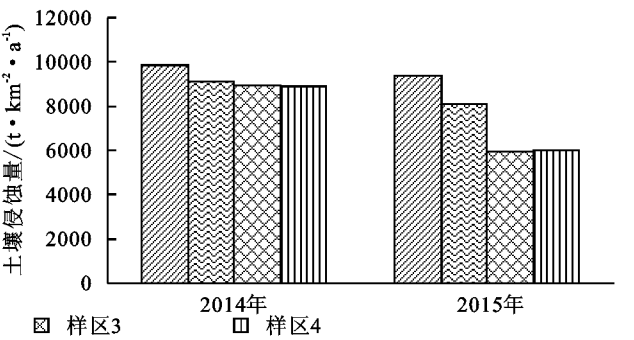
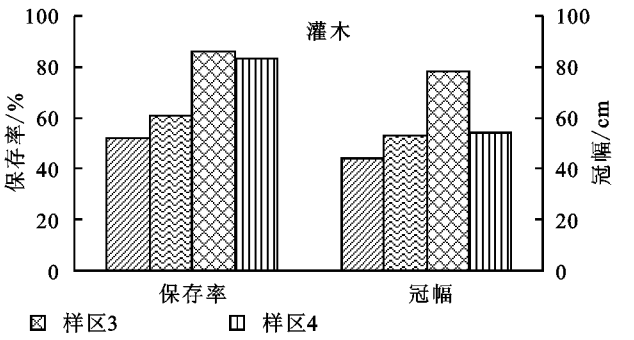
图 4 排土场边坡不同措施配置方式试验区径流量及土壤侵蚀量比较

2.3 边坡不同水土保持措施配置的综合效益分析

适用于草原工程侵蚀区人工再塑地貌的较成熟护坡工程技术如生物篱覆盖、框格骨架护坡等,水土流失防治效果接近^[16],但不同水土保持措施的经济成本存在较大差异。通过草原工程侵蚀区人工再塑地貌边坡各技术模式综合效益评价,可反映技术模式是否适宜边坡水土流失的治理。本文采用秩和比法对各模式的综合效益评价分析。

2.3.1 主要水土保持措施及配置方式 目前,草原工程侵蚀区人工再塑地貌护坡工程技术措施配置方式有“生态袋+草”、“浆砌石框格+草”等 6 种。“生态袋+草”是利用铁钎将生态袋固定在人工再塑地貌边坡,生态袋垂直间距 1 m,生态袋间撒播种草,生态袋由聚丙烯为原材料制成,袋长 80 cm,宽 30 cm,袋子内可添加植物生长土、植物种子、肥料、保水剂等;“浆砌石框格+草”是砌石、混凝土等形成框格骨架稳定边坡,骨架内撒播(或条播)种草;植生带是以可自然降解的无纺布等为材料,草种、肥料、保水剂等按一定的比例定植在材料上,施工时植生带顺坡面自然平铺在坡面上,并用柳枝将植生带固定于边坡上;“生物沙障+草”是以沙柳、杨柴、黄柳等为材料设置网格沙障,尺寸一般为 0.8 m×0.8 m,1.0 m×1.0 m 的菱形方块,沙障内撒播种草;“生物篱+灌

方式对排土场边坡水土流失控制效果较好,可作为草原工程侵蚀区人工再塑地貌边坡主要的水土保持防治模式,特别是生物篱+草护坡方式对于覆土初期极易发生强度风、水蚀的废弃地边坡尤其适用。



木”是以灌木枝条等为材料,人工编织成不同规格篱笆,整体直接覆盖固定于坡面的栽植穴上,穴内栽植沙柳、柠条等;“灌木+草”是沿等高线栽植小型灌木,植物种选择过渡性先锋植物、性状优良的乡土植物,空地种草,豆科、禾本科等科牧草混播,构成灌草结构。

2.3.2 边坡不同治理模式水土保持效益及成本 通过试验和调查,砌石框格骨架这类工程措施经济投入相对较高,一般工程成本为 100~130 元/m²。生态袋措施的成本为 15~20 元/m²,经济投入属中等水平。生物篱和植生带铺设对坡面平整度要求严格,措施实施中的人工费用投入较高,造价为 20~30 元/m²。生物沙障原料一般可就近购买,且成本较低,中间的运输费用差别不大,经济投入为 1.5~3 元/m²。

2.3.3 边坡不同治理模式水土保持综合效益评价 评价指标选择反映边坡生态效益的指标——植被盖度,反映蓄水保土能力的指标——土壤侵蚀量,反映经济效益的指标——投资成本(表 2)。

RSR 计算公式如下:

$$RSR_i = \frac{\sum_{j=1}^m R_{ij}}{m \times n}$$
 (1)

式中: m 为考核指标数; n 为分组数。最后按 RSR 由小到大做出排序(表 2)。

根据秩和比法的评价原理,RSR 值越大,说明被评价模式的综合效益越高;RSR 值越小,说明被评价模式的综合效益越低^[17]。RSR 值计算结果显示:边坡植被恢复模式中,综合效益排序为:生态袋+种草>灌木+种草>生物沙障+草>生物筐+灌木>浆

砌石框格+草>植生带。“生态袋+种草”和“灌木+种草”这两种模式在治理投资成本与水土保持效益方面结合较好,水土流失防控效果明显,因此,在退化草地工程侵蚀区人工再塑地貌边坡水土流失治理中应优先选择使用。

表 2 边坡不同治理模式植被盖度、土壤侵蚀量、投资成本指标秩次

边坡治理模式	综合效益指标						RSR
	植被盖度 %	排序	土壤侵蚀量/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	排序	投资成本/ (元·m ⁻²)	排序	
生态袋+种草	66	6	3307	6	18	4	0.889
浆砌石框格+种草	55	3.5	3289	5	125	1	0.528
植生带	42	1	5249	1	25	2	0.222
生物沙障+种草	55	3.5	4145	3	2.5	5.5	0.667
生物筐+灌木	59	4	3840	4.5	22	3	0.639
灌木+种草	60	5	3614	4.5	2.0	5.5	0.833

注:成本为调查值,成本=材料成本+人工成本。植被盖度、土壤侵蚀量为技术模式实施次年的实测值。

3 结论

退化草地工程侵蚀区的植被恢复与重建需针对草原各类型生产建设项目工程建设特点,结合自然气候条件,科学合理设置水土保持措施。人工再塑地貌平台治理采用“灌木+种草”的植被重建措施配置方式,边坡治理采用“灌木+种草”和“生态袋+种草”两种植被重建措施配置方式,均能达到较好的水土流失防控效果,治理投资成本相对较低;结合废弃地径流调控和抗蚀固土造林等措施,可有效控制草原工程侵蚀区水土流失,达到综合效益最大。文中所提出的水土保持措施配置方式是对研究区现有治理技术和研究成果的有机结合,但由于不同研究区地质、地貌、水文等地理因素在空间分布上较为复杂,治理过程不可避免地呈现出一定的差异性,因而水土保持措施配置仍需要根据客观实际予以修正,做到因地制宜、达到最大综合效益。

参考文献:

[1] 陈来红,马万里.霍林河露天煤矿排土场植被恢复与重建技术探讨[J].中国水土保持科学,2011,9(4):117-120.

[2] 王克勤,赵辉,高天天,等.生产建设项目水土流失影响等级划分[J].水土保持通报,2015,35(3):143-148.

[3] 史东梅.高速公路建设中侵蚀环境及水土流失特征的研究[J].水土保持学报,2006,20(2):5-9.

[4] 王克勤,姜德文,高天天,等.基于层次分析法的生产建设项目水土流失影响综合指数研究[J].水土保持通报,2015,35(3):136-142.

[5] 吕钊,王冬梅,徐志友,等.生产建设项目弃渣(土)场水

土流失特征与防治措施[J].中国水土保持科学,2013,11(3):118-126.

[6] 白中科,左寻,郭青霞,等.大型露天煤矿土地复垦规划案例研究[J].水土保持学报,2001,15(4):118-121.

[7] 刘思莹.黑岱沟露天煤矿水土保持生态修复技术体系研究[D].辽宁阜新:辽宁工程技术大学,2013.

[8] 余莉琳.干旱矿区生态修复土壤改良及植物选择实验[D].北京:中国矿业大学,2014.

[9] Zhang J, Fu M, Hassani F P, et al. Land use-based landscape planning and restoration in mine closure areas[J]. Environmental Management,2011,47(5):739-750.

[10] 孟伟庆,李洪远,鞠美庭,等.欧洲受损生态系统恢复与重建研究进展[J].水土保持通报,2008,28(5):201-208.

[11] Gorokhovich Y, Voros A, Reid M, et al. Prioritizing abandoned coal mine reclamation projects within the contiguous United States using geographic information system extrapolation[J]. Environmental Management, 2003,32(4):527-534.

[12] 程小琴,赵方莹.门头沟区煤矿废弃地自然恢复植被数量分类与排序[J].东北林业大学学报,2010,38(11):75-79.

[13] 吕刚,黄龙,王洪禄.排土场边坡土壤抗冲性空间变异性特征[J].西南大学学报:自然科学版,2013(1):35-42.

[14] 刘伟民,邢万昱.胜利东二露天矿排土工艺研究[J].露天采矿技术,2009(4):14-15.

[15] 李胜军,赵有富,贺广礼.“生物筐”技术恢复草原矿区植被的方法与效果[J].内蒙古草业,2012(4):19-21.

[16] 艾应伟,刘浩,范志金,等.我国道路边坡治理现状及其对策[J].水土保持研究,2006,13(5):222-224.

[17] 潘峰,付强.模糊综合评价在水环境质量综合评价中的应用研究[J].环境工程,2002,20(2):58-60.