

马家塔露天煤矿复垦区不同土地利用类型的土壤水分入渗过程研究^{*}

温明霞^{1,2}, 邵明安^{1,2}, 周蓓蓓^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点试验室
西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘 要: 煤矿复垦区土壤结构重组, 严重改变了其某些土壤物理性质, 入渗过程也必然受到影响。因此以马家塔露天煤矿为研究对象, 利用圆盘入渗仪研究分析复垦区 4 种土地利用类型 (荒地、草地、灌木、林地) 下土壤在 3 种负压 (-15 cm, -3 cm, 0 cm) 下水分入渗过程及其影响机理, 探讨了土地利用类型及复垦方式对煤矿复垦区土壤的水分运动过程的影响, 为矿区土壤复垦及植被恢复提供理论基础。

关键词: 入渗速率; 饱和导水率; 土地利用方式

中图分类号: S152; F301.24

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)04-0170-04

Study on Soil Water Infiltration Processes in Different Land Use Types in Majiata Reclaimed Regions

WEN Ming-xia^{1,2}, SHAO Ming-an^{1,2}, ZHOU Bei-bei^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The soil physical characters and soil water infiltration processes were seriously affected because of the soil restruction in coal mine reclaimed region. Under three levels of negative hydraulic head (-15 cm, -3 cm, 0 cm), the disc permeameter was used to measure soil infiltration processes of soil in four different land use types (wasteland, grassland, shrub-land and woodland) in Ma Jiata reclamation regions respectively. The purpose of this study is to determine the effect and the mechanics of land use type on the soil water infiltration process, and to provide the basic theory for the reclamations and revegetation in coal mine areas.

Key words: infiltration rate; saturated hydraulic conductivity; land use types

土壤水分入渗是指水分进入土壤形成土壤水的过程, 它是降水、地面水、土壤水和地下水相互转化的重要环节, 是模拟水文过程的重要参数^[1]。土壤水分入渗一方面决定了产生地表径流的水量, 从而对土壤侵蚀产生影响^[2-4]; 另一方面, 它又影响土壤含水量, 从而对作物可利用的有效水产生影响, 影响作物的生长^[4-5]。而矿区土壤复垦是通过一系列的工程技术措施对塌陷区的土地进行挖、铲、垫、平等处理, 使之达到重新利用的目的, 整个过程就是重构

土壤的过程。在土壤的重构过程中, 通过机械的碾压和扰动, 使土壤结构、层次等物理性质发生了巨大变化, 必然会影响水分运动^[6]。重构复垦区域土壤水分质量高低是复垦区土壤成功与否的关键所在。

自 1991 年起, 国家投入大量人力物力对矿物土壤进行复垦, 同时许多专家也对煤矿复垦区进行大量实验及理论的研究分析, 但主要集中在矿区复垦土壤的综合利用示范、退化生态系统的植被恢复技术与重金属污染等方面^[7], 对矿区复垦土壤水分入

^{*} 收稿日期: 2009-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(50479063, 40025106, 90102012)

作者简介: 温明霞(1985-), 女, 山西长治人, 硕士研究生, 主要从事土壤物理学研究。E-mail: wenmingxia888@126.com

渗过程及其土壤物理性质的论著甚少。因此选择马家塔露天煤矿复垦区为研究对象,通过对复垦土壤水分入渗特性进行研究分析,为揭示该复垦区生产力偏低提供科学依据及理论基础。

1 研究区概况

神东集团马家塔露天煤矿位于鄂尔多斯高原东南部,乌兰木伦河右岸、级阶地上。西北为毛乌素沙地,东南邻近黄土丘陵沟壑水土流失区,露天矿居于沙漠化与水土流失复合侵蚀的中心地带,生态环境脆弱,土地生产力较低。气候上该地区属于典型的大陆性半干旱气候:冬长夏短、冬季寒冷、夏季炎热,气温年较差、日较差都很大,年均降水量 357 mm,其中 70% 的降水集中在 7-9 月,春季 80% 保证率的降水量仅为 12 mm;年均蒸发量 2 554 mm,是降水量的 7.15 倍;年均风速 3.6 m/s,年内最大风速 24 m/s,年均大风日数 42.2 d、沙暴日数 26.7 d,年均气温 6~7℃,日均温 10℃ 的有效积温为 3 000℃,无霜期 140 d;光照充足,全年日照时数 2 740 h~3 000 h。该地区自然侵蚀特征是冬春季在西北风作用下,以剧烈的风沙活动和风沙流产生的风蚀沙埋为主,夏秋季以水土流失形成的水力侵蚀危害为主。该露天矿是神府东胜煤田 1986 年第 1 个建成投产的煤矿,设计露采规模 60 万 t/a,2005 年的实际开采量达到 300 万 t/a。露采区呈不规则梯形状,走向与乌兰木伦河平行,南北长 3 530 m,北端宽南端窄,最宽处 481 m,平均宽度 413.5 m,露采区面积 146 hm²,煤层平均厚度 4 m,覆盖层为乌兰木伦河冲积物,厚度 10~12 m,成分主要是沙砾石,采剥比 2:1~3:1。剥、采、运等全部采用机械化作业^[8-9]。

2 试验地点及方法

试验地点选在马家塔露天煤矿复垦区南部的乔灌造林复垦区,土壤类型为栗钙土,占地 38.6 hm²,分为 4 种土地利用类型:荒地、草地、灌木、林地。

土壤水分入渗过程采用圆盘入渗仪测定。在 4 种不同土地利用类型的土壤上各选 4 个测试点,除去土壤表层植被及碎石,整理出直径大于 10 cm 的平整地面,在距离测量点 25 cm 左右的位置用环刀取样,测量土壤容重及初始含水量^[10]。将细沙平铺在整理完毕的测量点,用钢尺刮平,使之平整。调节圆盘入渗仪恒压管水位,设置 3 种不同负压(ϕ_0): -15 cm, -3 cm, 0 cm。记录盘式入渗仪蓄水管水位,并将仪器小心放在测定点上,使之与沙面紧密接触。打开阀门,待湿润锋通过沙面时开始计时。开

始测定的前 2 min 内,每 15 s 记录一次入渗量,2~5 min 内每 30 s 记录一次入渗量,5 min 后每 60 s 记录一次入渗量,直至出现 5~6 个记录值基本相同,即达到稳定入渗。试验结束后,在试验点附近挖取深 1 m 剖面 2 个,分析回填土壤结构情况。

用烘干法测定各测试点初始含水量,环刀取样对土壤容重进行计算,利用米尺测量回填区土壤分层情况,利用 DPS 软件对实验数据进行计算。

3 圆盘入渗仪基本原理

反映土壤入渗能力的指标主要有初始入渗速率 f_0 (mm/min)、稳定入渗速率 f_c (mm/min)、饱和导水率 K_s (mm/min)。入渗速率取 4 次重复的平均值。

$$f_0 = q_0 / t_0 \quad (1)$$

式中: q_0 ——入渗初始 3 min 内的累积入渗量 (mm); t_0 ——初始入渗时间 (min)。

$$f_c = q_c / t_c \quad (2)$$

式中: q_c ——达到稳定入渗后的累积入渗量 (mm); t_c ——达到稳定后的入渗时间 (min)。

$$K_s = v / (h + l) \quad (3)$$

式中: v ——饱和渗透速度 (mm/min); l ——土层厚度 (cm); h ——土层上水头高 (cm)。

4 结果分析

4.1 不同土地利用类型对入渗速率的影响

试验中土地利用类型对土壤水分入渗速率影响显著(见表 1)。就入渗速率而言,3 种负压下,草地的初始入渗速率(初始 3 min 内的平均入渗速率)最大,其次是林地和灌木,荒地最小。当负压 $\phi_0 = -15$ cm 时,草地的初始入渗速率为荒地的 2.8 倍;当负压 $\phi_0 = -3$ cm 时,草地的初始入渗速率为荒地的 6.8 倍;当负压 $\phi_0 = 0$ cm 时,草地初始入渗速率为荒地的 3.7 倍。结合表 1 可见,初始入渗速率受初始含水量的影响,4 种土地利用类型的初始含水量变化趋势是:荒地>灌木>林地>草地,即初始入渗率与初始含水量呈负相关关系。这是因为初始含水量大时,湿润前锋的吸力梯度小,初始入渗速率则较低;若初始入渗的土壤干燥,含水量较小时,吸力梯度大,则初始入渗速率较高。

根据实测数据将不同土地利用类型下的入渗速率随时间的变化过程绘于图 1。由图 1 可见,在同一负压下,入渗速率变化趋势为:草地最大,荒地最小,灌木和林地居中。这主要因为草地的土壤表层 45 cm 由栗钙土与砂砾混合物构成,颗粒间孔隙较大,因而入渗速率较快;而荒地表层虽然为增加土壤

的肥力,人为施加了有机肥料,但表层 8 cm 下含有约 17 cm 的透水性极差的红黏土层,因此入渗速率较低。另外,草地的根系要比荒地发达,这也会对入渗速率产生影响。

表 1 土壤入渗性能及土壤物理性质

植被 类型	入渗速率(初始入渗速率/ 稳定入渗率)/(mm·min ⁻¹)			初始含水量/ (g·g ⁻¹)	容重 /(g·cm ⁻³)	土壤剖面层次
	- 15 cm	- 3 cm	0 cm			
荒地	2.77/0.12	1.85/0.23	3.24/0.29	0.105	1.156	0 - 8 cm 有机肥料;8 - 25 cm 红黏土;25 - 100 cm 煤粉灰、栗钙土及碎石混合物,碎石含量 68.2 %
草地	7.86/1.39	12.49/4.98	12.02/6.47	0.040	1.652	0 - 45 cm 栗钙土与砂砾混合物;45 - 100 cm 煤粉灰、栗钙土及碎石混合物,碎石含量 68.5 %
灌木	2.77/0.68	4.62/1.62	5.55/2.89	0.073	1.750	0 - 25 cm 栗钙土,25 - 35 cm 砾石与栗钙土混合物,碎石含量 70 %;35 - 100 cm 煤矸土层
林地	5.55/0.46	12.02/1.39	11.10/1.97	0.045	1.712	0 - 3 cm 煤粉灰与砂砾混合物,3 - 100 cm 煤粉灰、栗钙土及砾石混合物,碎石含量 69 %

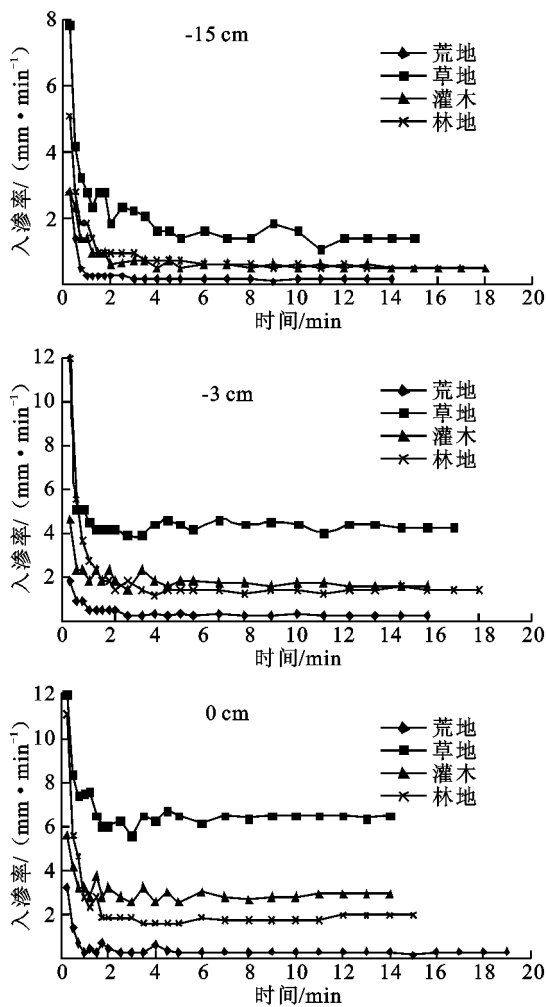


图 1 不同土地利用类型对土壤入渗速率的影响

由图 1 同样可以看出,在入渗初期,负压对入渗速率影响效果不显著;随入渗历时增加,不同负压下 4 种土地利用类型的土壤入渗速率随入渗历时增加呈减小的趋势明显,且随负压增加,入渗速率逐渐减小。即 0 cm 负压下入渗速率最大,3 cm 负压下次之,15 cm 负压下入渗速率最低。这可能主要由于在试验初期,水势梯度较大,土壤基质势为影响入渗

速率的主要因素;而随着入渗历时增加,土壤逐渐湿润,负压对土壤水分入渗速率的影响显著。同时,朱安宁指出圆盘入渗仪在对土壤入渗过程中所预给定负压 h_0 ,是为了排除在入渗时土壤裂缝和某些大孔隙的影响,当 $h_0 = 0$ 时,除被空气闭塞的孔隙和那些结构极不稳定的部分孔隙外,几乎所有孔隙水都可以进入;当 $h_0 < 0$ 时,被排除在外的孔隙的有效当量直径 r_e 与负压成反比^[11]。因此,负压 15 cm 时,有效当量孔径最小,同一土壤结构情况下,有效当量孔径越小,单位时间内过水断面的水量越小,因此入渗速率也越小。

同时,草地在 3 种不同负压下入渗速率随时间的变化趋势显著,荒地的变化趋势最弱。稳定入渗率是土壤水分入渗达到稳定时的入渗速率,是评价土壤物理特性的一个重要指标。本试验中在 0 cm 负压下,草地的稳定入渗速率为 6.47 mm/min,负压 - 15 cm 时,稳定入渗速率为 1.39 mm/min,几乎仅为 0 cm 负压下的 4.7 倍。而对于荒地而言,0 cm 负压下的稳定入渗速率为 0.29 mm/min,负压 - 15 cm 时为 0.12 mm/min,约为负压 0 cm 时的 2.4 倍。(见表 1)。

为进一步研究负压对入渗速率的影响,根据入渗速率随时间变化的趋势,利用幂函数对入渗速率的变化过程进行拟合。

$$f = aT^n \tag{4}$$

式中: f ——入渗速率 (mm/min); T ——入渗历时 (min); a, n ——拟合参数。拟合结果见表 2。

由表 2 可看出,拟合参数 a 大小与入渗速率大小排列顺序基本一致,即草地最大,荒地最小,灌木和林地居中,且入渗速率与时间呈一定的幂函数相关性。

4.2 不同土地利用类型下饱和导水率的研究

土壤饱和导水率是反映土壤的入渗和渗漏性质

的一个重要指标,是研究水分、溶质在土壤中运动规律时的重要水力参数。饱和导水率由于土壤质地、容重以及有机质含量等空间变量的影响空间变异强烈^[11-13]。

表 2 不同土地利用类型及不同负压下入渗速率
随时间变化过程的拟合结果

	负压/cm	<i>a</i>	<i>n</i>	<i>R</i> ²
荒地	- 15	0.4155	- 0.6830	0.8652
	- 3	0.6070	- 0.4428	0.7773
	0	0.6002	- 0.3582	0.7768
草地	- 15	3.1374	- 0.3629	0.8541
	- 3	5.0153	- 0.0658	0.7332
	0	7.5162	- 0.0929	0.7587
灌木	- 15	1.1848	- 0.3824	0.8231
	- 3	2.3206	- 0.1637	0.7779
	0	3.4661	- 0.1119	0.7992
林地	- 15	1.6139	- 0.5065	0.9190
	- 3	2.9867	- 0.3854	0.7775
	0	3.3084	- 0.3201	0.7978

据实测数据分别算出 4 种土地利用类型下的饱和导水率,荒地 为 0.843 mm/min,草地 为 12.951 mm/min,灌木 为 1.829 mm/min,林地 为 3.964 mm/min。可见,草地的土壤饱和导水率最大,其次是林地和灌木,荒地最小。此外,在本研究中,草地的稳定入渗率及饱和导水率均远大于其他 3 种土地利用类型,这是因为所测的草地区域内,表层土 0 - 45 cm 由栗钙土及砂砾构成。相反,入渗速率及饱和导水率偏低的荒地土壤剖面虽 0 - 8 cm 为人为添加的有机肥料,但 8 - 25 cm 均为透水性极差的红黏土层,这也是此区域长期植被恢复失败的主要原因。

结合表 1 的容重指标:灌木 > 林地 > 草地 > 荒地,同时可以看出,除表层为人为有机质层荒地外,饱和导水率与土壤容重呈负相关关系,这与许明祥^[10]研究结果一致。因此,在矿区土壤复垦过程中,本试验提出应尽量避免大型机械对复垦土壤的压实挤压作用是符合赵景逵教授的“堆状地面”覆土法的原则^[14]。

5 结 论

- (1) 不同土地利用类型下的土壤水分入渗速率为:草地最大,荒地最小,灌木和林地居中,且初始入渗速率与土壤初始含水量呈负相关关系。
- (2) 在入渗初期,负压对入渗速率影响效果不显著;随入渗历时增加,不同负压下 4 种土地利用类型的土壤入渗速率随入渗历时增加呈减小的趋势明

显,草地在 3 种不同负压下入渗速率随时间的变化趋势显著,荒地的变化趋势最弱。同时,不同土地利用类型的稳定入渗速率均是在 0 cm 负压下最大,在 15 cm 负压下最小。

(3) 草地的土壤饱和导水率最大,其次是林地和灌木,荒地最小。且饱和导水率与土壤容重成负相关关系。

6 讨 论

马家塔露天煤矿复垦区为了节约复垦成本,采取最原始的混合回填方法,土壤基本上为回填土,回填时不分表土和底土,也不分碎石大小和种类,剖面层次不发育,成土程度较低。复垦后的植被生态恢复工作大部分依靠向土壤投放大量有机及无机肥料,而忽略了复垦工艺过程不合理造成的土壤结构失调,所产生的漏水漏肥或不透水透气的劣质土壤结构是很难熟化,很难提高生产力的。如本试验中马家塔复垦区的荒地。同时,黄土高原农业生产最大的威胁是严重的水土流失。康示勇及白中科等指出,煤矿复垦区土壤较原黄土高原土壤更易水土流失,地貌加重,土壤水蚀模数增加 59%;复垦后土壤水蚀模数减至原地貌的 34 %^[8,15]。因此煤矿复垦区土壤水分运动研究工作还需深入研究,得出系统结论,为我国矿区土壤复垦工作提供科学性决策。

参考文献:

[1] 高鹏,穆兴民.黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分入渗的对比实验[J].中国水土保持科学,2005,3(4):27-31.

[2] Meyer L D,Johnson C B,Foster G R.Stone and wood-chip mulches for erosion control on construction sites[J].Soil Water Conser.,1972,27:264-269.

[3] Grant W J,Struchtemeyer R A. Effect of stones on runoff, erosion and soil moisture [J]. Soil Sci. Soc. Amer. Proc.,1966,30:638-640.

[4] 符素华.土壤中砾石存在对入渗影响研究进展[J].水土保持学报,2005,19(1):171-175.

[5] 周蓓蓓,邵明安.不同碎石含量及直径对土壤水分入渗过程的影响[J].土壤学报,2007,44(5):801-807.

[6] 李新举,胡振琪,李晶,等.采煤塌陷地复垦土壤质量研究进展[J].农业工程学报,2007,23(6):276-280.

[7] 郭逍宇,张金屯,宫辉力,等.安太堡矿区复垦地植被种间关系及土壤因子分析[J].生物多样性,2007,15(1):46-52.

[8] 康世永.马家塔露天矿土地复垦方式的探讨[J].露天采煤技术,1998(2):48-49.

4 结论与讨论

(1) 1977 - 2006 年间,研究区林地、草地、建筑用地和耕地面积增加,水域和未利用土地面积减少。耕地面积上升幅度最大,沙地面积下降最为明显。水电梯级开发带动了当地种植业的发展,区域整体土地利用强度不断加大,由于水土保持政策的推行,水土流失现象有所减缓。

(2) 区域土地利用在 1977 - 1996 年间演变最为剧烈,林地在该时期内变化率最大,且为正增长;1996 - 2000 年间未利用土地和耕地呈负向增长,林地和草地为正向增长,区域生态环境有所好转;2000 - 2006 年间,水域面积下降极为明显,水域面积的减少主要是向耕地和草地的转化。同时,水电站的蓄水运行和毁林造田等人类活动,促进了其他地类向耕地的转化,废弃的荒耕地会进一步转化为建筑用地。

(3) 区域景观斑块数量和破碎度不断增加,破碎化程度逐渐加深,受人为干扰逐年增大,各景观类型也均呈现出破碎化趋势。区域景观形状指数逐年增加,景观形状复杂化。1977 - 1996 年间,景观蔓延度降低,景观多样性和均匀度指数均增加,各景观类型间聚合度减少,景观更加丰富化和均匀化,1996 - 2006 年间,各景观多样性指数变化趋势正好相反。

黄河上游水电开发对整个黄河流域的生态系统稳定都会产生重要影响。目前,大型河流水电梯级对区域生态环境的影响还没有系统的研究。本文选取水电开发区域为研究对象,分析在水电梯级开发的大环境背景下,区域土地利用和景观格局的演变规律,对黄河流域的环境保护和管理具有重要意义。从结果分析来看,水电开发建设对区域土地利用和景观格局有一定影响,但是从大尺度景观看,这种影响并不明显,且多为间接影响。由于研究区人口密度大,除水电开发建设外,其他经济活动较为频繁,特别是当地居民盲目垦荒、围湖造田等人类活动,是

引起当地生态环境变化的主要原因。限于篇幅,本文没有对区域景观变化的驱动力进行深入分析,如何将水电建设与其他人类活动对区域景观格局的影响区分开来,突出水电建设对区域生态环境的累积影响,有待于进一步深入的研究。

参考文献:

[1] 张文静. 黄河黑山峡水电开发建设对区域景观格局的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 162-165.

[2] 刘海龙. 峡谷区域水电开发景观影响评价: 以怒江为例[J]. 地理科学进展, 2006, 25(5): 21-30.

[3] 郑玲芳, 郝芳华, 杨胜天. 天生桥一级水库蓄水前后库周土地覆盖变化研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(2): 80-83.

[4] 郑妍文. 黄河流域甘肃段生态保护与建设的调查[J]. 开发研究, 1999(6): 28-30.

[5] 王世新. 黄河兰州(市区)段河道湿地资源概况及保护建议[J]. 农林科技, 2007, 36(1): 52-53.

[6] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域: 土地利用/土地覆盖变化的国际研究动向[J]. 地理学报, 1996, 51(6): 553-558.

[7] 宋冬梅, 肖笃宁, 张志城, 等. 甘肃民勤绿洲的景观格局变化及驱动力分析[J]. 应用生态学报, 2003, 14(3): 535-539.

[8] 邹秀萍, 齐清文, 徐增让, 等. 怒江流域土地利用/覆被变化及其景观生态效应分析[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 147-151.

[9] Mc Garigal K, Marks B J. spatial analysis program for quantifying landscape structure[Z]. Forest Science Department, Oregon State University, Corvallis Oregon, 1994: 62.

[10] 杨德保, 尚可政, 王式功. 黄河上游水电工程建设与西北经济发展[J]. 科学·经济·社会, 1998, 16(2): 17-20.

[11] 高宁生. 黄河鸟岛为何只剩下美丽的名字[J]. 生态经济, 2004(2): 20-25.

[12] 李哈滨, 伍业刚. 景观生态学的数量研究方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1992: 209-233.

(上接第 173 页)

[9] 李戎凤, 胡春元, 王义. 马家塔露天矿生态复垦区土壤养分状况研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2007, 28(2): 106-110.

[10] 许明祥, 刘国彬, 卜崇峰, 等. 圆盘入渗仪法测定不同利用方式土壤渗透性试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 18(4): 54-58.

[11] 李裕元, 邵明安. 土壤翻耕对坡地水分转化与产流产沙特征的影响[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 46-50.

[12] 查小春, 唐克丽. 黄土丘陵林区开垦地人为加速侵蚀

与土壤物理力学性质的时间变化[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 20-23.

[13] 周蓓蓓, 邵明安. 土石混合介质饱和导水率的研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 52-66.

[14] 李志强, 曹永新, 李伟光, 等. 安家岭露天排土场复垦适宜性评价与效益分析[J]. 露天采矿技术, 2007(2): 58-60.

[15] 白中科, 赵景逵, 李晋川, 等. 大型露天煤矿生态系统受损研究: 以平朔露天煤矿为例[J]. 生态学报, 1999, 19(6): 870-875.