

永利露天煤矿排土场不同植被类型下 土壤理化性质和酶活性研究

肖礼¹, 赵俊峰¹, 黄懿梅¹, 马任甜¹, 方瑛¹, 安韶山^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:以鄂尔多斯市准格尔旗永利露天煤矿排土场不同植被类型(苜蓿、沙打旺、沙打旺+油松)土壤为研究对象,以复垦1a土壤为对照(CK),探讨了永利煤矿排土场不同植被类型条件下土壤理化性质和酶活性变化特征,以及两者之间的相关关系,为该矿区露天煤矿排土场的植被恢复工作提供理论依据。结果表明:矿区复垦对土壤质量有一定的改善,表现为沙打旺>苜蓿>沙打旺+油松>CK,土壤酶活也得到了一定改善。0—10 cm土层,沙打旺的有机碳为5.18 g/kg,显著高于其他植被恢复措施,沙打旺对于改良土壤有一定的优势;土壤有机碳、全氮、酶活性随着土层深度的加深而降低,土壤酶活性与土壤养分之间存在不同程度的相关性,土壤磷酸酶、蔗糖酶与土壤容重呈显著正相关关系;不同植被类型间土壤酶活性亦存在显著差异,土壤蔗糖酶表现为沙打旺>苜蓿>沙打旺+油松>CK,沙打旺脲酶显著高于其他植被类型及CK。

关键词:永利煤矿; 植被类型; 理化性质; 土壤酶活

中图分类号:S154.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)04-0089-05

Study on Soil Enzyme Activities and Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Types in Yongli Opencast Coal Mine

XIAO Li¹, ZHAO Junfeng¹, HUANG Yimei¹, MA Rentian¹, FANG Ying¹, AN Shaoshan^{1,2}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land

Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to understand the effects on soil physical and chemical properties and enzyme activity variation in different vegetation types, three kinds of vegetation types (*Medicago sativa*, *Astragalus adsurgens* Pall, *Astragalus adsurgens* Pall + *Pinus tabulaeformis* Carr) were selected as research samples in Jungar Banner, Erdos. The studies were help understand the relationships between vegetation restoration and soil quality. The results showed that soil physical and chemical properties of different vegetation types had been improved, were characterized by *Astragalus adsurgens* Pall > *Medicago sativa* > *Astragalus adsurgens* Pall + *Pinus tabulaeformis* Car > CK; the soil organic carbon in 0—10 cm layer in *Astragalus adsurgens* Pall community was 5.18 g/kg, which was significant higher than other vegetation types; soil organic matter, total nitrogen and enzyme activities under different vegetation types declined with increase of soil depths. There were significant correlations between soil enzyme activities and soil nutrients. Phosphatase and invertase were significantly positively correlated with soil bulk density, suggesting that soil bulk density had significant effects on soil enzyme activities. Soil enzyme activities also significantly differed from different vegetation types, with respect to invertase, *Astragalus adsurgens* Pall > *Medicago sativa* > *Astragalus adsurgens* Pall + *Pinus tabulaeformis* Car > CK. The invertase of *Astragalus adsurgens* Pall was twice higher

收稿日期:2015-07-08

修回日期:2015-07-30

资助项目:中国科学院西部行动计划项目“晋陕蒙能源基地水土保持与受损生态系统重建关键技术与示范”(KZCX2-XB3-13);国家自然科学基金面上项目(41171226);教育部新世纪优秀人才(NCET-2-0479)

第一作者:肖礼(1990—),男,重庆人,硕士研究生,主要研究方向为生态环境工程效益评估。E-mail: xiaoli047@nwsuaf.edu.cn

通信作者:黄懿梅(1971—),女,四川大竹人,副教授,主要研究方向为环境化学、固体废弃物处理。E-mail: ymhuang1971@nwsuaf.edu.cn

than *Astragalus adsurgens* Pall + *Pinus tabulaeformis* Car, and urease in *Astragalus adsurgens* Pall soil was significantly higher than other vegetation types.

Keywords: Yongli coal mine; vegetation types; physical and chemical properties; soil enzyme activity

随着我国国民经济的发展,煤炭资源的开发利用在我国的经济建设和环境可持续发展战略中都发挥着重要作用。露天煤矿有实现集中开采,劳动生产率高,成本低等优点,世界各采煤国家都优先发展露天采煤作为增加煤产量的主要途径。随着露天煤矿的建设和发展,露天开采对矿区土地资源和生态环境的破坏日趋严重。据统计,1991—2000 年的十年间,我国开采原煤约 0.1 Gt 左右,直接破坏土地估计 22 000 hm²,到 2020 年,年均破坏土地面积约为 6 600 hm²,其破坏速度是十分惊人的^[1]。我国土地复垦时间较晚,主要采用填埋、剥离、覆土等简单措施,土地复垦基本上处于一种自然修复的状态^[2]。植被恢复是矿山废弃地生态恢复的关键,因为几乎所有的自然生态系统的恢复总是以植被恢复为前提的,故根据具体环境条件与需要选择适宜的树种是生态恢复的关键技术之一,是土地复垦的核心^[3]。植被恢复矿区的过程中,不仅能有效的改善矿区生态景观环境,还能通过凋落物加速土壤肥力的恢复。土壤酶活性主要来自植物根系分泌物、动植物残体的腐烂分解,以及土壤中微生物活动等,它是土壤质量的生物活性指标^[4]。它在土壤生态系统的物质循环和能量转化中起着非常重要的作用,其活性常被作为土壤肥力指标^[5-7]。目前,对露天煤矿复垦的研究多关注于土壤理化性质和生物多样性的研究,研究土壤酶活性以及理化性质与土壤酶活之间关系的相对较少。本文对永利露天煤矿排土场不同植被类型下的土壤理化性质和土壤酶活进行分析探讨,以期了解矿区植被恢复对土壤的影响,为矿区植被恢复提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

永利煤矿座落于内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗乌兰哈达乡哈拉庆沟与贾明沟的范围内,现井田面积为 3.567 km²,系露天开采 A 类煤矿。地理坐标为东经 110°12',北纬 39°43',海拔高度在 1 324~1 423 m。属于典型的中温带半干旱大陆性气候,常年平均温度 7℃,年积温 3 000℃,年日照在 3 000 h 以上。矿区属干旱少雨的丘陵山区,全年降水量约为 380 mm。

矿区属于中部丘陵沟壑砂岩区,位于准格尔旗西部,是由三世纪上统砂质泥岩,中统的含砾砂岩,泥质粉砂岩和棕红色砂质泥岩、砂砾砂岩构成。植被均

以其抗旱,抗贫瘠、生长缓慢、种类单纯为其特点。主要树种以油松、侧柏、杜松为主群系,多与阔叶杨、柳、榆、酸刺、柠条等组成乔灌混交林。

1.2 样品采集

2013 年 9 月在内蒙古准格尔旗永利煤矿复垦区采集土壤样品,依次取恢复 10 a 的苜蓿(*Medicago sativa*)、沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall)、沙打旺+油松混交林(*Astragalus adsurgens* Pall + *Pinus tabulaeformis* Carr)的典型样地,选取 3 个采样点作为野外重复,采用“S”形布点采样法,同时选取复垦一年的苜蓿地作为 CK 对照,每个样地设置 3 个样方,样方面积分别为:乔木样方 20 m×20 m,草地样方 1 m×1 m。采用多点混合取样法,按 0—10 cm,10—20 cm 两层分别取混合样,密封后带回实验室,仔细除去其中可见的植物残体及土壤动物。土样风干过 2 mm 筛后供土壤的酶活性与理化性质分析用。

1.3 样品分析

1.3.1 土壤理化性质 土壤有机质采用重铬酸钾—外加热法,土壤全氮采用凯氏定氮法(KYD-9830),土壤速效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法,土壤容重采用环刀法^[8]。

1.3.2 土壤酶活性 脲酶活性测定采用苯酚钠—次氯酸钠比色法[mg/(g·24 h)],蔗糖酶活性测定用 3,5—二硝基水杨酸比色法[mg/(g·24 h)],碱性磷酸酶活性测定用磷酸苯二钠比色法[mg/(g·24 h)]^[9]。

1.4 数据处理

采用 SPSS 18.0 统计分析软件对数据进行相关性分析、单因素方差分析(One-Way ANOVA)以及多重比较,运用 Excel 2013 数据处理和 Origin 9.0 图型制作。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型对土壤理化性质的影响

不同植被恢复类型土壤的理化性质见表 1。植被恢复方式不同,凋落物成分有所不同,从而对土壤有机质的形成产生影响也不同。土壤有机碳是反映土壤质量的重要指标,不同植被类型间的差异显著($p<0.05$),但各样地有机碳含量均表现为 0—10 cm>10—20 cm 土层。0—10 cm 土层和 10—20 cm 土层有机碳含量沙打旺显著大于其他植被,沙打旺与油松混交、苜蓿大于 CK。0—10 cm 土层,沙打旺的有机碳为 5.18 g/kg,显著高于 CK 2.55 g/

kg,高于苜蓿 1.73 g/kg。全氮含量 0—10 cm 土层沙打旺、沙打旺+油松混交林显著大于苜蓿和 CK,且沙打旺的含量是苜蓿的 2 倍,也说明了沙打旺改良土壤的优势。速效磷含量在 0—10 cm 土层表现为 CK>混交林>沙打旺>苜蓿地,前三者差异不显著,而且没有明显规律,这是因为土壤速效磷的分布趋势主要与根系分布和不同植被对

土壤剖面速效磷的吸收利用有关。土壤容重 0—10 cm 四者差异不显著,10—20 cm 土 CK 与沙打旺和混交林差异显著。不同植被土壤基本理化性质随土层深度变化中土壤全氮、有机碳含量 0—10 cm 土层均大于 10—20 cm 土层,容重则相反,速效磷无此规律性。不同土层之间有机碳和全氮差异达到显著水平。

表 1 不同植被土壤基本理化性质

植被	土层深度/cm	有机碳/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	容重/(g·cm ⁻³)
CK	0—10	2.63±0.31c	0.17±0.04b	2.38±0.58a	1.29±0.02a
	10—20	1.66±0.20a	0.15±0.04b	1.06±0.14b	1.74±0.03a
苜蓿	0—10	3.43±0.31b	0.12±0.01b	0.89±0.14b	1.55±0.00a
	10—20	1.91±0.40a	0.07±0.03c	1.64±0.35ab	1.68±0.01ab
沙打旺	0—10	5.18±0.01a	0.26±0.00a	0.97±0.02ab	1.33±0.21a
	10—20	2.39±0.04a	0.11±0.00bc	2.64±0.68a	1.51±0.05b
沙打旺+油松	0—10	3.38±0.22b	0.3±0.06a	1.83±0.82ab	1.34±0.00a
	10—20	1.88±0.53a	0.24±0.05a	1.99±0.08ab	1.48±0.08b

2.2 不同植被类型对土壤酶活的影响

土壤磷酸酶(图 1A)是一类能够催化土壤有机磷化合物矿化的水解酶,水解后释放出无机磷和各种醇类作为植物磷素营养,因此磷酸酶活性高低直接影响着土壤中有有机磷的分解转化及其生物有效性。0—10 cm 土层,苜蓿地磷酸酶的含量为 0.326 mg/(g·24 h)显著高于沙打旺、混交林,显著高于 CK,且苜蓿是 CK 的 1.8 倍。10—20 cm 土层各植被之间没有显著差异。除 CK 外,其他植被 0—10 cm 土层磷酸酶均大于 10—20 cm 土层。

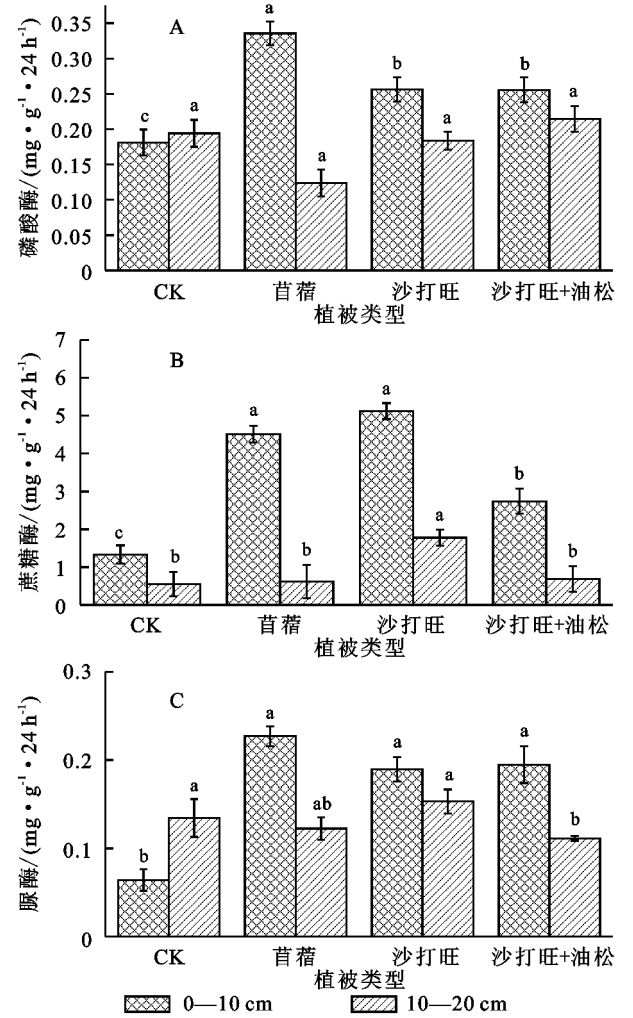
土壤蔗糖酶(图 1B)可以增加土壤中易溶物质,其活性与土壤有机质的转化和呼吸强度具有密切关系。不同植被之间均表现为 0—10 cm 土层大于 10—20 cm 土层。0—10 cm 土层,沙打旺、混交林和苜蓿显著大于 CK。10—20 cm 土层沙打旺显著高于混交林、苜蓿和 CK。这也与沙打旺有机碳显著高于 CK 一致。

尿素水解后的某些酶统称为脲酶(图 1C),它是催化土壤中尿素唯一的酶类,其酶促水解产物为氨气和二氧化碳,由此可见脲酶与土壤的供氮能力之间具有极其密切的联系。因此土壤脲酶活性的高低常被用来表征土壤氮素的供应程度大小。在 0—10 cm 土层中,沙打旺、混交林、苜蓿均显著大于 CK,10—20 cm 土层混交林显著大于苜蓿,与 CK 差异不显著。不同植被之间均是 0—10 cm 土层大于 10—20 cm。脲酶活性大致表现为混交林>沙打旺>苜蓿>CK。

2.3 土壤酶活与理化性质的相关分析

对土壤酶活性与土壤各理化性质进行简单相关分析。由表 2 可知,土壤磷酸酶活性与土壤有机碳、

土壤容重显著正相关,脲酶活性与土壤容重显著正相关。蔗糖酶活性与容重相关性不显著;三种酶活性与全氮、含水率、速磷相关性不显著。



注:图中不同小写字母代表同一土层不同植被类型间的差异显著。

图 1 不同植被类型对土壤磷酸酶、蔗糖酶、脲酶的影响

表 2 土壤酶活性与土壤理化性质之间的相关性分析

	有机碳	全氮	容重	速磷	脲酶	蔗糖酶	磷酸酶
有机碳	1	−0.004	0.590*	0.732**	0.119	0.009	0.417**
全氮		1	−0.087	−0.025	0.003	0.230	−0.067
容重			1	0.470	0.608*	−0.126	0.706*
速磷				1	0.073	−0.051	0.032
脲酶					1	−0.015	0.266
蔗糖酶						1	0.152
磷酸酶							1

注：* . 在 0.05 水平(双侧)上显著相关，* * . 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

3 讨论

3.1 不同植被类型对土壤理化性质的影响

植被在改善土壤肥力方面具有重要作用,不同植被类型土壤养分含量具有明显差异^[10,11]。有机碳、氮及磷含量是矿区排土场土壤形成的关键因素^[12-13]。从总体上来看,随着土层深度的增加,各土壤养分含量呈现逐渐降低的趋势。相同土层中沙打旺、沙打旺+油松混交土壤养分含量最高,其次是苜蓿地,CK 最低。这与薛立等^[14]研究结果相似,与马尾松纯林相比,混交林的土壤有机质等土壤养分含量更高。这可能与次生阔叶林的植被种类多样、凋落物量大等原因有关。土壤有机碳和全氮是反映土壤质量的重要指标,在本研究中可以发现,土壤有机碳和全氮含量表现为沙打旺>苜蓿>沙打旺+油松>CK,其中苜蓿和沙打旺+油松差异不显著。这也说明了人工植被和混交林的凋落物和根系分泌物为土壤提供有机质,使土壤的 C,N 肥力尤其是表层 C,N 肥力得到一定恢复。但是沙打旺的有机碳显著大于沙打旺+油松混交林,这说明油松的介入在一定程度上影响了土壤有机碳。土壤速效磷以 CK 最大,但各土层之间没有规律性,土壤中的磷元素主要来源于母质,初始土壤的含量影响较大^[15]。但土壤速效磷除 CK 外,均是亚表层大于表层土壤,这可能是磷的淋溶结果。土壤容重是表征土壤物理属性的一个综合指标,一般来说,土壤有机质含量低,致密紧实,土壤容重大^[16]。这与本研究相似,可以看出 10—20 cm 土层沙打旺容重小于 CK。陈建宇等^[17]指出适合植被生长的土壤容重为 1.20~1.40 g/cm³,本研究中 0—10 cm 土层,除苜蓿地外都达到了要求。结合方差分析可以看出植被与土层深度对土壤基本理化性质的影响程度不同,土壤容重和速效磷在不同土层中的变化受植被恢复的影响显著,不同植被恢复方式对土壤有机碳和全氮的影响主要表现在土层深度上。

3.2 不同植被类型对土壤酶活的影响

土壤酶是一种生物的催化剂,它主要的来源是土壤中的动物、植物以及微生物^[18],参与土壤中各种有

机质的分解、合成与转化,以及无机物质的氧化与还原等过程。土壤酶活性可以反映土壤中生物代谢的强弱和物质转化过程的速度,是土壤生态质量的良好标记^[19]。土壤酶活性的高低还可以直接或间接反映土壤肥力和土壤健康程度^[20],可以作为土壤质量评价的生物指标^[21]。不同植被下三种土壤酶活性土层差异显著,且除 CK 酶活性外各酶活性都是随土层加深而降低。三种酶活性总体表现为沙打旺>苜蓿>沙打旺+油松>CK,这与理化性质类似,同时也表明了油松的加入在一定程度上降低了土壤酶活,进一步说明油松不利于矿区土壤恢复。土壤磷酸酶能催化磷酸脂的水解及无机磷酸的释放,在土壤磷素循环中起重要作用。研究结果表明磷酸酶活性与有机质含量相关性极显著,这与何钢^[22]等研究相似。脲酶能分解有机物质,其水解成 NH₃ 和 CO₂,其中 NH₃ 是植物氮素营养的直接来源,脲酶活性可以表示土壤氮素情况,但研究结果是脲酶酶活与全氮含量相关性不显著,其可能的原因也是与研究的时间和土壤中氮素存在的含量有关,9 月,各种植被刚经历根系生长高峰,吸收的氮素营养较多,土壤中氮素营养相对较少,再就是土壤中氮素营养不是以氨态氮形式存在,而是以硝态氮营养形式存在^[22]。

4 结论

植被恢复过程中土壤,植被及地下土壤生物均发生了显著的变化,大部分的研究表明植被恢复过程中土壤的物理化学性质得到了改善^[23-24]。不同植被类型与土层深度对土壤理化性质有不同程度的影响。土壤养分和土壤酶是影响和评价土壤的重要组成部分。从总体上来看,随着土层深度的增加,各土壤养分含量呈现逐渐降低的趋势。不同植被恢复方式对土壤有机碳和全氮的影响主要表现在不同土层深度,有机碳和容重对土壤磷酸酶的影响呈显著相关关系。沙打旺+油松混交林的土壤理化性质和酶活总体上低于沙打旺,表明油松不利于矿区植被和土壤的恢复。同时也说明沙打旺作为该排土场复垦土壤的改良作物具有一定的优势。

参考文献:

- [1] 孙世国. 露天煤矿开采对生态环境的影响及其亟待解决的问题[J]. 煤矿环境保护, 2000, 14(2): 53-54.
- [2] 王莉, 张和生. 国内外矿区土地复垦研究进展[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 294-300.
- [3] 薛玲, 李青丰. 乔灌草生态模式在准格尔煤田植被恢复中研究[J]. 内蒙古大学学报: 自然科学版, 1995, 26(2): 202-208.
- [4] 李文革, 刘志坚, 谭周进, 等. 土壤酶功能的研究进展[J]. 湖南农业科学, 2007(6): 34-36.
- [5] Jimenez M D L P, Horra A D L, Pruzzo L, et al. Soil quality: a new index based on microbiological and biochemical parameters[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 35(4): 302-306.
- [6] Yao X, Min H, Lü Z, et al. Influence of acetamiprid on soil enzymatic activities and respiration[J]. European Journal of Soil Biology, 2006, 42(2): 120-126.
- [7] 陈红跃, 徐英宝. 马尾松、黎蒴栲混交林土壤肥力水平的研究[J]. 华南农业大学学报, 1992, 13(4): 162-169.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 2000.
- [9] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [10] 巩杰, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵区小流域植被恢复的土壤养分效应研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 93-96.
- [11] 马玉红, 郭胜利, 杨雨林, 等. 植被类型对黄土丘陵区流域土壤有机碳氮的影响[J]. 自然资源学报, 2007, 22(1): 97-105.
- [12] Bradshaw A. Restoration of mined lands-using natural processes[J]. Ecological Engineering, 1997, 8(4): 255-269.
- [13] Iost S, Landgraf D, Makeschin F. Chemical soil properties of reclaimed marsh soil from Zhejiang Province PR China[J]. Geoderma, 2007, 142(3): 245-250.
- [14] 薛立, 陈红跃, 邱立刚. 湿地松混交林地土壤养分、微生物和酶活性的研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(1): 157-159.
- [15] 陈刚才, 甘露. 土壤中元素磷的地球化学[J]. 地质地球化学, 2001, 29(2): 78-81.
- [16] 邹慧, 毕银丽, 金晶晶, 等. 采煤沉陷对植被土壤容重和水分入渗规律的影响[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(03): 125-128.
- [17] 陈建宇. 杉木林下植被生物量与土壤容重关系的研究[J]. 福建林业科技, 2000, 27(4): 56-60.
- [18] 余娜, 刘济明, 张超, 等. 不同沙生植被土壤酶活性分异特征研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(1): 77-81.
- [19] 张刘东, 李传荣, 孙明高, 等. 沿海破坏山体周边不同植被恢复模式的土壤酶活性[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 112-116.
- [20] 赫晓慧, 常庆瑞, 温仲明, 等. 农牧交错带不同人工植被下荒漠化土壤肥力的变化[J]. 中国沙漠, 2006, 26(6): 915-919.
- [21] Badiane N N Y, Chotte J L, Pate E, et al. Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions[J]. Applied Soil Ecology, 2001, 18(3): 229-238.
- [22] 何钢, 袁德义, 刘贤桂. 油茶低产林土壤改良对土壤养分及土壤酶活的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(3): 76-80.
- [23] 胡婵娟, 郭雷. 植被恢复的生态效应研究进展[J]. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1640-1646.
- [24] 马佳慧, 张兴昌, 邱莉萍. 黑岱沟矿区排土场不同复垦方式下土壤性质的研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 93-96.
- [5] 巩同梁, 刘昌明, 刘景时. 拉萨河冬季径流对气候变暖和冻土退化的响应[J]. 地理学报, 2006, 61(5): 519-526.
- [6] 刘士余, 章俊霞, 罗志军, 等. 近 50 a 赣西北大坑小流域径流对降雨的响应[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 19-22.
- [7] 卓嘎, 建军, 边巴次仁. 1960—2004 年金沙江径流量特征及其对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2011, 33(2): 405-415.
- [8] 刘明春, 李玲萍, 史志娟, 等. 石羊河流域径流量分布特征及对气候变化的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(1): 193-198.
- [9] 张一驰, 李宝林, 程维明, 等. 开都河流域径流对气候变化的响应研究[J]. 资源科学, 2004, 26(6): 69-76.
- [10] 李卓仑, 王乃昂, 李育, 等. 近 50 a 来黑河出山径流对气候变化的响应[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2): 7-16.
- [11] 陈玲飞, 王红亚. 中国小流域径流对气候变化的敏感性分析[J]. 资源科学, 2004, 26(6): 62-67.
- [12] 何进花, 丁文荣. 龙川江流域近 50 a 气温、降水及径流的变化趋势分析[J]. 大理学院学报, 2011, 10(4): 54-58.
- [13] 马平森, 顾世祥, 卯昌书, 等. 龙川江流域径流量变化趋势及水资源合理配置研究[J]. 中国农村水利水电, 2011(5): 6-10.
- [14] 许志敏, 臧庆春. 龙川江流域年径流特性的地区综合分析[J]. 人民长江, 2011, 42(10): 73-76.
- [15] 丁文荣. 龙川江水资源对气候变化的敏感性和适应性分析[J]. 人民长江, 2011, 42(9): 15-18.
- [16] 文安邦, 张信宝, 王玉宽, 等. 云贵高原区龙川江上游泥沙输移比研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 139-141.
- [17] 李运刚, 何大明, 叶长青. 云南红河流域径流的时空分布变化规律[J]. 地理学报, 2008, 63(1): 41-49.

(上接第 88 页)