

黄土区采煤排土场生态复垦工程实施成效分析

吕春娟¹, 白中科², 陈卫国³

(1. 山西农业大学 资源环境学院, 山西 太谷 030801; 2. 中国地质大学 土地科学技术学院
国土资源部土地整治重点实验室, 北京 100083; 3. 山西农业大学 生命科学学院, 山西 太谷 030801)

摘要: 以复垦 20 a 的平朔露天煤矿排土场生态系统为研究对象, 从土壤重构到先锋树种筛选及生态系统恢复不同阶段植被演变、动物定居、微生物、土壤养分变化等方面, 系统分析了其生态重建技术的实施效果。结果表明, 平朔矿区已形成“黄土母质直接覆盖表层培肥熟化”特色复垦技术; 筛选出刺槐×油松×柠条, 刺槐×油松, 刺槐×沙棘, 刺槐纯林等多种植被配置模式; 随着复垦年限的延长, 野生物种大量入侵, 土壤种子库逐渐形成, 物种多样性增加, 植被群落组成趋于稳定, 动物、微生物和土壤养分呈现增加趋势, 表明矿区生态系统已进入正常的演替过程。但受矿区特殊生境和自然客观条件的限制, 演替过程中某些植被出现病虫害、种内或种间的水分竞争等问题已导致部分植被退化, 因此植被恢复成功后其生态管理还需进一步研究。

关键词: 露天煤矿; 土壤重构; 植被演替; 动物; 微生物; 土壤养分

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)06-0232-05

中图分类号: X171, TD88

Ecological Reclamation Effect of Mining Dump in Loess Area

LÜ Chun-juan¹, BAI Zhong-ke², CHEN Wei-guo³

(1. College of Resources & Environmental Science, Shanxi Agriculture University, Taigu, Shanxi 030801, China; 2. Key Laboratory of Land Reclamation and Rehabilitation of Ministry of Land and Resources, School of Land Science & Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. College of Life Science, Shanxi Agriculture University, Taigu, Shanxi 030801, China)

Abstract: Taking a reclaimed ecosystem in dump of Pingshuo opencast coal mine for 20 years as the research object, the implementation effects of ecological rehabilitation technologies were analyzed including soil reconstruction, screening pioneer species, vegetation succession and changes of animal, microorganism and soil nutrient. Results showed that the particular reclamation technologies-dump surface were covered directly by loess parental material, then ripened by fertilizing, were developed in Pingshuo mine. Many vegetation configuration modes were screened with *Caragana korshinsk*×*Robinia pseudoacacia*×*Pinustabulaeformis*, *Robinia pseudoacacia*×*Pinus tabulaeformis* and *Robinia pseudoacacia*×*Hippophae rhamnoides* etc. With the increasing of reclamation years, wild species invaded, soil seed bank gradually formed and species diversity has increased. Moreover, vegetation communities tended to stability and animal, microbial and soil nutrient presented the increasing trend. All these changes indicated that the ecological system have entered a normal succession process. But duo to the influence of special habitat and natural objective conditions, some problems such as diseases and pests, intraspecific and interspecific moisture competition etc, have resulted in vegetation degeneration. So ecological management of plants succession needed to be study in detail.

Keywords: opencast coal mine; soil reconstruction; vegetation succession; animal; microorganism; soil nutrient

煤矿区退化生态系统的重建,在美国、德国、澳大利亚等国已有很长的研究历史与经验^[1-2],如利用菌类对土壤理化属性的改善、先锋物种的筛选^[3-5],其土

地利用方式多样,可以恢复为娱乐场所、耕地、林地和牧场等。但我国大型露天煤矿均分布在西北和东北地区,这些地区自身水土流失严重,生态环境脆弱。

露天采矿对土地大规模的扰动,更加速了生态系统的退化,而且黄土高原露天采煤后形成的极度退化生态系统,其采煤剥离物形成的排土场和采煤沉陷往往具有独特的损伤特点^[6],其客观条件与国外也有很大的差别。国内对于采矿废弃地的复垦也进行了很多的研究,积累了很多成功的经验,但大都集中于复垦过程中的植被群落和土壤养分特征研究^[7-9,13],系统研究相对还比较缺乏。因此本研究针对山西平朔露天煤矿排土场这种极度退化的生态系统,系统分析了其从排土场土壤剖面的构建到生态系统基本稳定近20 a历史中的一些成功复垦技术与效果,以期重建一个“黑色+绿色”和谐共处的矿区复合生态系统,为其它类似退化系统的重建提供借鉴。

1 研究区概况

平朔矿区处黄土高原东部、山西省北部朔州境内,地理坐标:东经 $112^{\circ}10'$ — $112^{\circ}30'$,北纬 $39^{\circ}23'$ — $39^{\circ}37'$ 。矿区地质储量 1.27×10^{10} t,现有国家特大型露天矿3个,即安太堡露天矿、安家岭露天矿、东露天矿,开采面积约 160 km^2 ,每个煤田的年产规模均为 1.50×10^7 t。矿区原地貌为黄土低山丘陵,年均降雨量450 mm,且65%集中在6—9月,年均蒸发量2 160 mm,年均温 $6.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年均风速 $2.3 \sim 4.7 \text{ m/s}$,最大风速 20.0 m/s ;地带性植被属干草原类型,植被稀少;地带性土壤为栗钙土,有机质含量低、结构差,水蚀风蚀严重。其生态系统抗逆能力很差,属黄土高原典型生态脆弱区,是一个对外界反应敏感,维持自身可塑性较低的生态系统。

2 极度退化的生态系统特征

原地貌在大规模的露天开采后,严重受损,引发的生态系统属极度退化型。采矿剥离物被重新塑造为一个岩土混合、平台一边坡相间的排土场,没有植被覆盖,平台一般为 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$,边坡为 $35^{\circ} \sim 40^{\circ}$,为松散介质体,在数年内就堆垫形成,很不稳定。加之排弃物空间分布很不均匀,产生排土场特有的“非均匀沉降”,而且会持续数年,甚至几十年。土壤基质组成多样,有黄土母质、岩土混排、黄红土混合,甚至出现矸石地面,异质性程度比较高。由于大型机械的碾压,土壤基质表层严重压实,容重 $>1.6 \text{ g/cm}^3$,根系穿透阻力 $30 \sim 60 \text{ kg/cm}^3$,有机质含量 $<4.0 \text{ g/kg}$,岩土侵蚀严重,侵蚀模数 $>15 000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,比原地貌高出33%^[10]。

目前,岩土排弃已形成了5座高45~190 m的外排土场(二铺,南排,西排,西排扩大区,南寺沟排土

场);同时,部分剥离岩土回填矿坑,形成内排土场,总占地近 $1 000 \text{ hm}^2$ ^[2]。此种极度退化的生态系统,只有借助人工支持和诱导,方可重建一个健康的人工—自然复合生态系统。

3 排土场的生态复垦效果

3.1 土壤重构

为了保证复垦后植被的快速恢复,国外和我国南方露天矿排土场都遵循“表土剥离单独存放”的惯例。但平朔煤矿的实践经验表明,根据当地的具体情况和黄土母质的特性,可以把黄土母质直接铺在复垦地表层,结合复垦种植培肥土壤,这样可节省二次倒土和表土保存的管理费用^[2]。对于特殊排弃的煤矸石平台和边坡,采用客土栽植复垦方式,效果也非常显著,到目前为止,矸石地上复垦将近20 a的植被长势良好,而且植物的恢复,也加速了矸石地表的风化。

3.2 先锋物种的筛选与植被演替

平朔矿区自1985年以来,先后试种植物98种,目前有60余种植物能够适应矿区的生境,正常演替^[11]。现已把沙打旺、红豆草、草木樨以及紫花苜蓿、无芒雀麦作为草本先锋植物;柠条、沙棘、沙枣、沙柳作为灌木先锋植物;油松、刺槐、小叶杨作为乔木先锋植物^[10]。

重建技术方案经历了纯草、纯灌、纯乔模式,随机配比的草、灌、乔组合和优化配置的草、灌、乔组合模式3个阶段。经过时间的检验,单一品种种植模式易出现病虫害和种群退化问题;随机组合的草、灌、乔结构,大多数由于相互竞争养分与水分或拮抗作用,也出现整体退化现象^[12]。目前筛选出长势较好的植被模式主要包括:刺槐×油松×柠条,刺槐×油松,刺槐×沙棘,刺槐纯林,刺槐×沙棘×草木樨,沙打旺×沙棘×柠条等^[11-12](表1)。这些模式经过近20 a的验证,已形成较为稳定的植被群落,结构趋于合理,促进了土壤的熟化和养分的循环,植被的水土保持效益也逐渐凸显,一般复垦13 a草灌乔覆盖度可达80%~90%,径流量可减少66%,土壤侵蚀量可减少77%。

实践证明,矿区特殊生境的植被配置方式在植被恢复的前3 a,与自然植被表现出一定的差异,3 a之后群落的演替与自然植被的演替表现出趋同性;多样的植被配置利于自然的选择,更能促进群落的正向演替;乔灌草的时空差异结合更适合平朔矿区特殊生境的植被复垦^[11,13],随着植被的恢复,生境的改变,大量的野生植物入侵,植物种越来越丰富,多样性增加。土壤种子库也逐渐形成,6个样地的土壤种子库调查表明,种子库中的植物分属5科,以禾本科植物最多,

其次为菊科植物,藜科 4 种,豆科和禾本科,主要以 1 年生草本植物为主^[14]。但已有的研究表明,水分是植被群落演替的重要限制因子^[11,13]。

表 1 不同复垦群落的物种多样性,生态优势度和群落均匀度状况^[11]

复垦植被	复垦时间/a	物种多样性指数	生态优势度指数	群落均匀度指数
刺槐	6	1.63	0.52	0.45
沙棘	5	0.60	0.81	0.67
刺槐×油松	8	2.26	0.31	0.85
刺槐×沙棘	8	2.31	0.69	0.52

3.3 动物的定居

采矿造成的退化生态系统,随着生态系统恢复时间的延长,土壤动物群落趋于丰富,且土壤动物群落与土壤某些理化性质密切相关。此外,某些土壤动物还可以加速生态系统的恢复过程^[15-16]。

据多年对平朔矿区动物的踪迹分析和观察,迁入的大型动物种主要有昆虫、两栖纲的蛙类、爬行纲的蛇类和各种鸟类以及一些小型兽类。如蛙类、蛇类、野兔、野鸡、石鸡、刺猬、鼠类、狗獾、孢子、狐狸^[2,17]。对于土壤里较小的动物,利用自制的土壤动物采集器收集样品,进行室内鉴定。结果表明,表土层(0—5 cm)土壤动物 316 头,隶属 4 纲包括:昆虫纲、蛛形纲、腹足纲和多足纲;8 目:鞘翅目、半翅目、膜翅目、鳞翅目、同翅目、蜘蛛目、革翅目和双尾目;30 科。其优势类群为膜翅目蚁科、同翅目蚧壳虫,以及鞘翅目步甲科,它们分别占到总捕获量的 19.9%,16.5%和 12.0%^[18];而且土壤动物群落随复垦时间的延长,其群落结构趋于复杂,表征土壤动物的多样性指数 DIC 和 DG 指数也呈现增加的趋势(表 2),并且复垦时间越长,不同群落间的相似性也越大;相同复垦年限的土壤动物多样性指数因复垦植被模式不同,由多到少依次为:针阔叶混交林>乔灌混交林>针叶混交林。

表 2 不同复垦阶段土壤动物的重要指数值^[19]

复垦植被	复垦阶段和年限/a	动物类群数/个	动物密度/(头·m ⁻²)	DIC 多样性指数	DG 多样性指数	优势度指数
沙棘×刺槐×柠条	I 3	7	135	0.54	0.45	0.23
沙棘	II 5	8	85	0.57	0.46	0.21
沙棘		10	305	1.92	1.92	0.47
油松×云杉×落叶松	13	8	385	2.00	2.41	0.37
刺槐×油松×榆树	III 13	15	255	4.78	4.83	0.11
刺槐×柠条	13	12	405	3.11	2.93	0.43

注:为了便于比较,依据植被不同复垦年限将排土场人为划分为 3 个阶段。1~4 a 复垦初期为第一阶段 I,5~10 a 复垦中期为第二阶段 II,10 a 以后基本稳定期为第三阶段 III。文中 3.4 和 3.5 的划分方法相同。

3.4 微生物的数量分布

露天开采剥离了发育良好的表层土壤,特别是破坏了地表的植被层,造成土壤有机物严重缺乏,很大程度上限制了土壤微生物数量,因而在排土场复垦初期土壤微生物含量极少。但随着植被的恢复,微生物数量逐渐增加,在植被复垦 1~13 a 土壤中,干土细菌变幅为 126~1 398×10⁵ 个/g,放线菌为 1~34×10⁵ 个/g,真菌为 0~16×10⁵ 个/g,微生物总数为 127~1 437×10⁵ 个/g。第 III 阶段复垦 13 a 的刺槐×油松×榆树、刺槐×柠条、云杉×油松×落叶松这 3 种复垦模式下的土壤微生物总量平均为 1 380×10⁵ 个/g,是第 I 阶段平均值的 6.33 倍。但在复垦 13 a 的砾石自燃退化的刺槐×柠条平台土壤中,受高达 30℃ 表土层温度影响,其微生物数量极少,总数仅为 10×10⁵

个/g 干土,是相同复垦年限正常演替植被的 0.72%,放线菌和真菌基本没有。

复垦植被土壤中细菌、放线菌和真菌随着复垦年限的延长均呈现明显的增加趋势,而且微生物总数的变化与细菌几乎一致(图 1)。这是因为 3 大类微生物中细菌数量处于绝对优势地位,占 95% 以上,有的地方甚至达到了 99% 以上。在黄土层较薄,土壤剖面结构复杂的样地土壤中,放线菌和真菌的数量相对较多,说明放线菌、真菌在土地复垦过程中主要参与难分解物质转化的活动,与阳承胜等^[20]的研究结果一致,即难分解物质越多,覆土层越薄,环境越复杂,放线菌、真菌数量就越多。土壤微生物三大类群差异性,说明土壤微生物活性受各种因素的影响,主要与温度、基质组成和土地利用方式等关系密切。

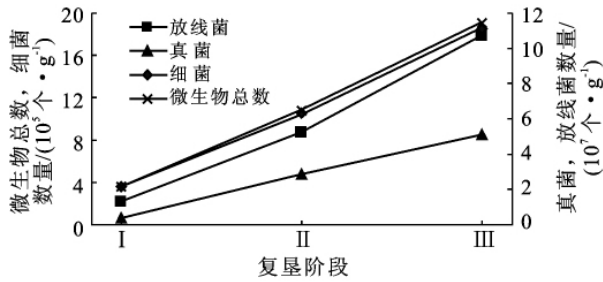


图 1 不同复垦阶段土壤微生物量变化

3.5 土壤养分变化

我国人多地少,必须执行国际上最为严格的耕地保护政策,确保“耕地总量动态平衡”。复垦初期为林地,最终除斜坡林地水土保持作用保留外,平台基本上都要恢复为耕地。因此土壤养分的提高对于复垦地快速转化为耕地,减少矿区征地的费用,特别重要。为了便于在同一坐标比较,将各个复垦阶段土壤的养分均值再通过均值标准化处理(图 2),来比较不同阶段的土壤养分,分析植物的复垦效果和土壤的肥力状况。

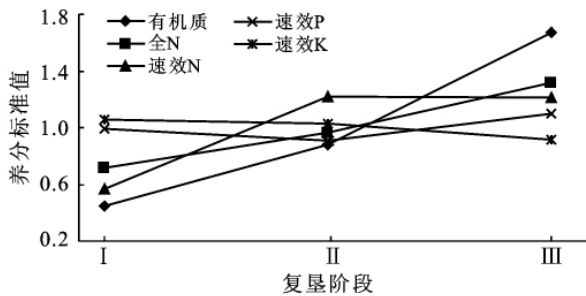


图 2 不同复垦阶段土壤养分变化

在复垦的 3 个阶段中有机质变幅为 3.13~32.26 g/kg,全氮为 0.27~0.98 g/kg,速效 P 为 4.94~28.97 mg/kg,速效 N 为 4.28~17.74 mg/kg,速效 K 为 82.45~144.50 mg/kg。由于矿区复垦基质的复杂性,受立地条件、复垦基质和复垦模式多因素的影响,土壤养分会出现波动,但通过趋势线分析,随着复垦年限的延长,除速效钾含量呈减少趋势外,其余指标均呈增加趋势(图 2)。特别是有机质含量的增加趋势比较明显,第 III 阶段是第 I 阶段的 3.75 倍,这与采样过程中的观测一致,在复垦 13 a 的刺槐林下有很厚的枯枝落叶层,并生长有苔藓、蘑菇等,而且偶尔裸露地表的煤矸石,也已风化为粒状或片状碎屑。说明复垦第 III 阶段植被群落已形成较稳定的人工—自然复合生态系统。

目前矿区已复垦的 1 000 hm² 土地,矿区复垦率达 40%,排土场可复垦率达 90%以上,高于国内 12%

的平均水平^[17]。随着土壤质量的提高,采用“易地”的方式,已解决了采矿的部分征地问题。但根据耕地占补平衡的需求,部分复垦的农牧用地要及时转变为耕地,但转变为耕地后,如果经营管理、或者产权问题不能很好的解决,有可能造成土地的再度退化,也是一个值得重视的问题。

4 结论

山西省是全国工矿区土地和生态破坏最严重的省份之一,破坏土地中的 40%是耕地,然而该省的土地复垦率只有 2%左右^[21]。目前平朔矿区土地的复垦,已逐渐形成了特色生态复垦技术,复垦土地的利用方面,在市场需求和政策的导向和土地适宜性评价的基础上,已进行功能分区,如农业综合利用区、工业生态园区、恢复生态保护区、旅游观光区、生态重建区和待开采区 6 大功能区^[22]。平朔矿区的复垦技术和管理经验对山西省其它工矿区的土地复垦可以提供宝贵的经验,为“山西省国家资源型经济转型综合配套改革试验区”的实施提供示范样板。但生态系统的演替需要很长时间的验证,在生态系统的演替过程中,受自然因素和人为因素的双重影响,可能还会出现许多新的问题,如在 2006 年我国第一座露井联采大型煤矿—平朔安家岭煤矿投产后,部分已基本稳定的复垦地又出现新的地质灾害,出现大量地裂缝^[23]。重建的人工—自然复合生态系统的稳定演替与调控技术、自然演替的过程与机制;人工植被群落结构与功能的关系;重建生态系统养分的积累、转化与循环规律;人工生态系统重建技术与效益评价体系等研究工作,是今后应研究的重点^[12]。因此寻求一条煤炭开采与环境保护协调发展的道路,还有很大的困难和挑战,需要不断的探索。

[参 考 文 献]

- [1] 梁留科,常江,吴次芳,等. 德国煤矿区景观生态重建/土地复垦及对中国的启示[J]. 经济地理, 2002, 22(6): 711-715.
- [2] 李晋川,白中科. 露天煤矿土地复垦与生态重建:平朔露天矿的研究与实践[M]. 北京:科学出版社, 2000: 128-129.
- [3] Singh A N, Singh J S. Experiments on ecological restoration of coal mine spoil using native trees in a dry tropical environment, India: A synthesis[J]. New Forests, 2006, 31: 25-39, 46.
- [4] Lisiewska M. Floristic-ecological investigations of macro-mycetes on a coal mine dump in the Silesia region (south-

- ern Poland)[J]. Feddes Repertorium, 1987, 98(3/4): 265-272.
- [5] Whitford W G, Elkins N Z. The importance of soil ecology and the ecosystem perspective in surface-mine reclamation[C]// Reith C R, Potter LD(eds.). Principles and Methods of Reclamation Science; With Case Studies from the Arid Southwest. Albuquerque (USA): University of New Mexico, 1986:151-187.
- [6] 胡振琪. 山西省煤矿区土地复垦与生态重建的机遇和挑战[J]. 山西农业科学, 2010, 38(1):42-45, 64.
- [7] 卞正富. 我国煤矿区土地复垦与生态重建研究[J]. 资源·产业, 2005, 7(2):18-24.
- [8] 胡振琪, 赵淑芹. 中国东部丘陵矿区复垦土地利用结构优化研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5):78-81.
- [9] 李江锋. 北京矿山废弃地生态恢复质量评价研究[D]. 北京:北京林业大学, 2010:80-99.
- [10] 白中科, 王文英, 李晋川. 中国山西平朔安太堡露天煤矿退化土地生态重建研究[J]. 中国土地科学, 2000, 14(4):1-4.
- [11] 郝蓉, 白中科, 赵景逵, 等. 黄土区大型露天煤矿废弃地植被恢复过程中的植被动态[J]. 生态学报, 2003, 23(8):1470-1476.
- [12] 李晋川, 白中科, 柴书杰, 等. 平朔露天煤矿土地复垦与生态重建技术研究[J]. 科技导报, 2009, 27(17):30-34.
- [13] 郭道宇, 张金屯, 宫辉力, 等. 安太堡矿区复垦地植被恢复过程多样性变化[J]. 生态学报, 2005, 25(4):763-770.
- [14] 韩丽君, 白中科, 李晋川, 等. 安太堡露天煤矿排土场土壤种子库[J]. 生态学杂志, 2007, 26(6):817-821.
- [15] 查书平, 丁裕国, 王宗英, 等. 铜陵市铜尾矿土壤动物群落生态研究[J]. 生态环境, 2004, 13(2):167-169.
- [16] 戈峰, 刘向辉, 潘东卫, 等. 蚯蚓在德兴铜矿废弃地生态恢复中的作用[J]. 生态学报, 2001, 21(11):1790-1795.
- [17] 白中科, 郗文聚. 矿区土地复垦与复垦土地的再利用:以平朔矿区为例[J]. 资源与产业, 2008, 10(5):32-37.
- [18] 崔艳, 张继栋, 白中科, 等. 露天煤矿不同恢复植被大型土壤动物群落比较[J]. 生态环境, 2008, 17(3):1024-1027.
- [19] 崔艳. 露天煤矿恢复生态系统大型土壤动物及其与土壤理化性质关系研究[D]. 山西 太谷:山西农业大学, 2006:14-23.
- [20] 阳承胜, 蓝崇钰, 束文圣. 矿业废弃地生态恢复的土壤生物肥力[J]. 生态科学, 2000, 9(3):73-78.
- [21] 国内专家会诊:我省矿区土地复垦与生态重建[OL]. (2008-03-17)[2010-02-23]. 山西日报/2008年/3月/17日/第 B01 版, <http://www.daynews.com.cn/498778.html>.
- [22] 崔艳. 生态脆弱矿区土地利用调控机制与对策[D]. 北京:中国地质大学, 2008:80-82.
- [23] 韩静. 露井联采煤矿区主要地质灾害形态分析与复垦对策研究[D]. 山西 太谷:山西农业大学, 2008:32-36.

(上接第 231 页)

(2) 提高水资源费标准, 工业用水和生活用水应采取不同的征收标准。根据水资源费确定的原则和方法, 结合重庆市经济发展水平和水资源供求情况, 适时提高水资源费标准。建议居民生活用水应提高到 0.18~0.26 元/m³, 工业用水应提高到 0.23~0.34 元/m³。

(3) 应对地热水和矿泉水开征水资源费。地热水和矿泉水都有很高的使用价值, 且二者都属稀有资源, 根据《重庆市人民政府关于加强地热资源管理的意见》, 为了保护地热资源, 实现地热资源的可持续利用, 应对地热水和矿泉水征收水资源费。参考其它省市, 建议征收标准为 0.6~1.2 元/m³。

[参 考 文 献]

- [1] 陈明忠. 水资源费是国家水资源所有权的经济体现[J]. 水利经济, 1992(2):46-49.
- [2] 陈梦玉, 张晓萍. 水资源价格与可持续发展[J]. 水利科技与经济, 2001, 7(3):116-118.
- [3] 叶勋. 关于水资源费问题的探讨[J]. 水利经济, 1991(1):28-29.
- [4] 罗慧, 王梅华, 杜继稳, 等. 水资源可持续发展中政府管制的作用分析[J]. 水土保持通报, 2005, 25(5):94-99.
- [5] 刘雪英, 冯兴平, 高照良, 等. 延安市水资源开发与可持续利用对策[J]. 水土保持通报, 2008, 28(4):182-184.
- [6] 重庆市水利局. 重庆市水资源公报(2009年)[R]. 重庆:重庆市水利局, 2010.
- [7] 李放, 罗晓容. 三峡库区重庆段水资源承载力研究[J]. 人民长江, 2010, 41(21):35-38.
- [8] 重庆市人民政府. 重庆市取水许可和水资源费征收管理办法[Z]. 重庆:重庆市人民政府, 2004.
- [9] 重庆市人民代表大会常务委员会. 重庆市水资源管理条例[Z]. 重庆:重庆市人民代表大会常务委员会, 2003.
- [10] 姚鹏程, 孙长学. 对我国水资源费征收标准的研究[J]. 价格理论与实践, 2009(8):18-19.
- [11] 岳向东, 王英虎. 河北省水资源费征收标准探讨[J]. 水利经济, 2000(2):51-54.
- [12] 陈庆秋, 陈晓宏. 广东省水资源费征收体制改革初探[J]. 人民长江, 2006, 37(4):23-25.