

# 有色金属尾矿库土地复垦与环境治理效益估算研究进展

靳文娟, 魏忠义\*

沈阳农业大学土地与环境学院, 辽宁 沈阳 110866

**摘要:** 有色金属矿山选矿形成的尾矿库是潜在的高风险重金属污染源, 闭库后应及时进行土地复垦与环境治理。有色金属尾矿库的综合整治效果如何, 可以通过合理的效益估算来分析, 有效的效益估算往往涉及多学科领域的专业知识。在归纳总结国内外有色金属尾矿库复垦治理效益相关研究的基础上, 系统地阐述了复垦治理经济效益、社会效益和生态环境效益的概念、内容及其估算方法。对已有有色金属尾矿库复垦治理效益估算的研究表明: 尾矿库复垦的直接经济效益较小, 主要是估算复垦区内植物的经济收益以及采用收益还原法估算复垦土地的增值收益; 社会效益主要是采用价值法和替代法针对增加就业和社会保障进行估算, 较少关注复垦治理对社会其他方面的贡献; 生态环境效益估算方法主要包括污染损失率法、生态服务价值法及环境价值法等, 但与复垦治理技术措施结合较少, 效益估算对复垦治理措施优化的作用较弱。总体来看, 有色金属尾矿库复垦治理效益估算的内容涵盖不够全面, 尚未形成适合重度重金属污染尾矿库特点的效益估算体系, 效益估算准确性较低。因此, 合理确定尾矿库复垦治理效益估算的内容、完善效益估算方法及其数学模型、合理确定模型参数, 是有色金属闭库尾矿库土地复垦与环境治理效益估算进一步研究的重点内容。有效的效益估算可为优化有色金属尾矿库复垦治理措施、寻求最佳复垦治理模式及确定复垦治理的资金投入提供依据。

**关键词:** 有色金属; 尾矿库; 土地复垦; 环境治理; 效益估算

中图分类号: X53; TD8

文章编号: 1001-6929(2019)08-1304-10

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2019.03.17

## Research Progress on the Benefit Estimation of Land Reclamation and Environment Remediation for Non-Ferrous Metal Tailings Pond

JIN Wenjuan, WEI Zhongyi\*

College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

**Abstract:** Non-ferrous metal tailings pond formed by mineral processing is a potential and high-risk heavy metal pollution source. Land reclamation and environment remediation should be carried out in time after closing the pond. The effects of reclamation and remediation can be analyzed by benefit estimation, which involves multidisciplinary expertise. On the basis of summarizing the relevant researches at home and abroad on the effects of reclamation and remediation, the concepts, contents and estimation methods of economic, social and eco-environment benefits were systematically discussed. The results showed that the economic benefit of non-ferrous metal tailings pond reclamation was less, which mainly estimates the benefits of plants in the reclamation area and the value-added income of reclaimed land by income reduction method. The social benefit mainly estimated the value of increasing employment and social security by value method and substitution method, which pays less attention to the contribution of reclamation to other aspects. The eco-environment benefit was mainly estimated by pollution loss rate method, ecological service value method and environmental value method, which were less combined with reclamation and remediation measures, thus the benefit estimation had limited effect for the reclamation measures optimization. In general, the content of the benefit estimation was not comprehensive enough, and the benefit estimation system suitable for the tailings pond of severe heavy metal contamination was not formed, thus the accuracy of benefit estimation was low. Therefore, determining the contents of benefit estimation, improving the estimation methods and their mathematical models, and defining the parameters reasonably are the key contents for further study on the benefits estimation of land reclamation and environment remediation to non-ferrous metal closed tailings pond. The effective benefit estimation can provide references for optimizing the reclamation measures,

收稿日期: 2018-12-05 修订日期: 2019-03-07

作者简介: 靳文娟(1995-), 女, 山西忻州人, wjjinsyau@163.com.

\* 责任作者, 魏忠义(1967-), 男, 河北沧州人, 教授, 博士, 博导, 主要从事工矿区土地复垦与生态环境恢复研究, drweizy@163.com

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项经费项目(No.201111016-03)

**Supported by** Special Fund of the Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China for Scientific Research in the Public Interest (No.201111016-03)

seeking the best remediation model and determining the investment for non-ferrous metal tailings pond reclamation.

**Keywords:** non-ferrous metal; tailings pond; land reclamation; environment remediation; benefit estimation

有色金属矿山选矿产生的废渣由水力排放形成的尾矿库是有色矿山选矿厂必要的生产设施,该文主要是指用来贮存研磨选矿后水力排放的细颗粒尾矿和废水形成的尾矿库,闭库后形成重度重金属污染场地,需要及时采取有效的复垦治理措施.我国有色金属矿石品位相对较低,尾矿产率较高,造成大量尾矿堆积.中国选矿技术网发布的信息显示,据2017年不完全统计,我国有色矿山先后建成500余座(较大的)尾矿库,已堆存尾矿量 $15 \times 10^8$  t.有色金属选矿产生的尾矿属于危险性废弃物,颗粒往往较细,重金属等污染物可以径流、淋滤、风蚀等方式扩散,污染周边水土环境,产生潜在的环境污染风险<sup>[1-2]</sup>.如果发生溃坝事故,还会摧毁下游的村庄、农田,阻塞河道,导致尾矿颗粒及污染物扩散,污染土壤、河流,毒害水生生物,威胁居民生命安全,造成不可估量的损失<sup>[3-6]</sup>.

土地复垦与环境治理效益估算是复垦治理项目的经济效益、社会效益和生态环境效益进行系统分析,效益估算是复垦治理的重要依据<sup>[7]</sup>.近年来,专家学者多从经济、社会和生态环境这3个方面选取效益估算指标,运用层次分析法<sup>[8]</sup>、模糊分析法<sup>[9]</sup>和Topsis法<sup>[10]</sup>等对尾矿库的复垦效益进行评估,也有学者从环境和生态经济学角度构建效益估算模型对有色金属尾矿库复垦治理效果展开有益探索<sup>[11-12]</sup>,但限于涉及土地、生态环境以及技术、经济等相关多学科领域的专业认知,复垦治理效益估算一直是有色金属闭库尾矿库综合治理体系中的薄弱环节,因此,有必要在论述国内外尾矿库复垦治理技术措施的基础上,系统综述复垦治理的经济、社会和生态环境效益及各效益的估算方法,分析现有研究中的不足,提出有色金属闭库尾矿库复垦治理效益估算进一步研究的重点内容,以期完善尾矿库复垦治理效益估算体系、优化尾矿库复垦治理技术措施、合理确定尾矿库复垦治理资金投入等提供参考和借鉴.

## 1 有色金属尾矿库土地复垦与环境治理技术措施

有色金属选矿尾矿库是重污染场地,闭库后应及时进行复垦治理,高危、重污染的特性使其复垦治理措施不同于通常的土地复垦.20世纪初,美国、德国和澳大利亚等工业发达国家最早开展了尾矿库复垦治理实践活动,并取得显著成效.美国对有色矿山选矿尾矿库的安全性要求很高,尾矿库的洪水设计最低标准为百年一遇的洪水,尾矿坝稳定性安全系数为1.5,并在库外或上游设截洪设施,最大限度减少入库洪水量<sup>[13]</sup>.闭库后,通常采用固化/稳定化技术将污染源封装,通过工程、水力控制来保证边坡稳定,并不断完善测压管、位移桩等观测设施和库区交通、通讯设施,便于安全管理<sup>[14-15]</sup>,最后采取植被恢复措施通过植物稳定化来减少有色金属尾矿中重金属元素的迁移扩散,改善生态环境<sup>[16]</sup>.

德国萨克森州的铀尾矿库闭库后,首先按照最小稳定安全系数为1.5的标准加固尾矿坝;其次用浮船泵房将库内废水送到附近的废水处理车间用离子交换法去除铀、镭,用沉淀法去除其他毒物,使尾矿库中的废水得到严格处理;然后采用两布一栅的方法用黏土和废石覆盖滩面,厚度各约1 m,使表面氡析出率降至 $1.0 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以下<sup>[17]</sup>;最后利用一些重金属蓄积能力较高的植物进行植物修复<sup>[18]</sup>.

澳大利亚大坝委员会提出从尾矿库选址、可行性研究、工程设计、尾矿库运行到闭库、复垦与治理的尾矿库生命周期管理流程(见图1)<sup>[19]</sup>,确保其在生命周期内对环境的污染破坏处于可接受水平.在实际中,尾矿库闭库、复垦与治理是在设计阶段进行分析,并随其整个生命周期予以更新和调整<sup>[20]</sup>.尾矿库闭库设计主要考虑土方工程、坝体结构与岩土完整性等问题,保证尾矿库的坝体稳定安全.复垦治理技术包括尾矿覆盖、排水系统建立和植被恢复<sup>[21-22]</sup>,同时,

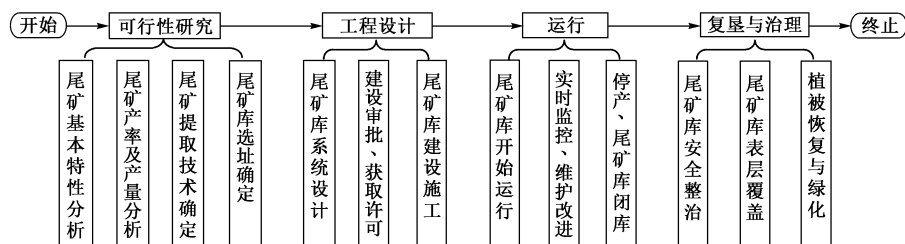


图1 澳大利亚的尾矿库生命周期管理流程<sup>[19]</sup>

Fig.1 Life cycle management procedure for tailings pond in Australia<sup>[19]</sup>

尾矿库生命周期管理使得尾砂联合处置、尾矿回填及尾矿回收再利用等先进高效的复垦治理技术得以应用<sup>[23]</sup>,实现了生态环境修复的高效益和经济性(见表1)。

表1 澳大利亚的尾矿库土地复垦与环境治理技术措施<sup>[23]</sup>

Table 1 Technical measures for land reclamation and environment remediation of tailings pond in Australia<sup>[23]</sup>

| 复垦治理技术措施 | 复垦治理方法   | 特点   |                       |
|----------|--|--|-----------------------|
| 一般治理技术   | 尾矿的覆盖<br>植被法:简单施肥后直接种植植被.<br>物理法:尾矿表层铺碎石.<br>化学法:利用化学剂与尾矿胶结成稳定覆盖层.<br>综合法:物理、化学与植被法相结合 | 技术简单、成本低.<br>可减轻粉尘、扬沙.<br>尾矿排渗前处理.<br>用于处理毒性、危险性强的尾矿 |                       |
|          | 排水系统建立   | 在尾矿下建立排水管道   | 减少暴雨侵蚀土地和渗流影响,改变地表水流向 |
|          | 植被恢复   | 分析气候、土壤等条件,选择合适植物建立植被群落                              | 控制水蚀、风蚀,抑制粉尘,增大土地利用效率 |
| 先进治理技术   | 尾砂联合处置   | 将粗颗粒和细颗粒尾砂混合后排放,使沉积物更稳定                              | 增加坝体稳定性,减少粉尘          |
|          | 尾矿回填   | 使用尾矿回填露天矿坑   | 简单、经济                 |
|          | 尾矿回收再利用  | 提高选矿工艺,以低成本回收利用尾矿                                    | 减少尾矿排放量,获得有用资源        |

我国对尾矿库土地复垦与环境治理的研究起步较晚,1988年国务院颁布《土地复垦规定》后,采矿塌陷地、排土场及尾矿库等损毁土地的复垦治理逐渐受到高度关注<sup>[7]</sup>.通过多年实践、探索及借鉴国外先进技术,我国尾矿库复垦治理取得了较大成果.目前对有色金属尾矿库的综合治理主要包括尾矿坝整治、排洪系统、土地复垦与植被恢复及安全监测设施布设等方面<sup>[24]</sup>.坝体安全是基础,研究<sup>[25]</sup>表明,尾矿库主

要的破坏模式为洪水漫坝、渗透侵蚀及坝体失稳.因此,闭库后应先分析坝体稳定性、排洪设施等库区具体状况,研究有色金属尾矿库复垦治理的关键问题,寻求最佳解决方案,据此确定适宜的复垦技术措施.

依据卢春燕等<sup>[26-28]</sup>对闭库尾矿库复垦治理技术的相关论述,归纳总结了我国目前的有色金属尾矿库土地复垦与环境治理技术措施(见表2).

表2 我国有色金属尾矿库土地复垦与环境治理技术措施

Table 2 Technical measures for land reclamation and environment remediation of non-ferrous metal tailings pond in China

| 复垦治理项目    | 技术措施     | 复垦治理方法  | 特点                               |                                |
|-----------|----------|---|----------------------------------|--------------------------------|
| 尾矿坝整治     | 提高尾矿库稳定性 | 削坡减载与削坡压脚   | 削减坡面角或在坝体坡脚堆石,增加坝体稳定性,提高边坡安全系数   | 有效阻止尾砂流动,但抗滑性能较弱               |
|           | 增强坝体强度   | 灌注粘结剂   | 将黏土浆、水泥等灌注到尾矿坝的裂缝和渗流通道中          | 简单、价低,治理效果较好                   |
|           |          | 设置抗滑桩   | 计算确定桩长、锚固深度等参数,在坝坡中下部设置抗滑桩       | 简单、成本低,效益高,不影响坝体               |
| 排洪系统整治    | 降低浸润线高度  | 传统方法  | 管井法、井点法                          | 简单、工期短,初期效果较好,但尾矿粒细小导致透水性差、易淤堵 |
|           |          | 新方法   | 水平井排渗法、虹吸管法、垂直-水平联合法和辐射井排渗法等     | 工艺简单、工期短,排渗效果好                 |
| 安全监测设施布设  | 安全监测体系   | 利用电子传感、影像、3S、4D、仪表、网络通信等技术对浸润线、干滩长度、库水位、坝体位移等指标进行实时监测 | 所有数据实时采集、传输、处理、存储与显示,形成一个完整的监测体系 |                                |
| 土地复垦与植被恢复 | 库区覆盖     | 覆土:在尾矿表层覆盖一定厚度的土、有机废物或其他材料,防止粉尘、降雨侵蚀入渗及尾矿氧化导致污染物扩散.   | 覆盖方式、材料及厚度直接影响防止污染扩散的效果.         |                                |
|           |          | 无土覆盖:使用化学稳定剂固化尾砂,或施加EDTA络合重金属离子,或使用石灰等碱性材料中和酸性尾砂      | 可以解决土源短缺的问题                      |                                |
|           | 道路铺设     | 在库区内铺设进场道路、上坝道路、生产道路、库外排洪设施联络道路以及库内道路等                | 作为尾矿库必要的辅助设施,便于对尾矿库进行管理,提高库区景观   |                                |
|           | 植被恢复     | 库区覆土后,选择适宜当地条件的植物进行植被恢复,一般选取本土植被和耐性植物                 | 成本低、效果好,植被选择会对表层侵蚀、污染扩散和生态景观产生影响 |                                |

复垦治理措施各具特点,选取不同措施会产生不同的效益,同一措施在不同技术模式下的效益也不尽相同. 技术措施与模式对复垦治理效益至关重要,各项措施的简单加和往往达不到很好的效果,针对恢复目标的有效技术集成或技术模式才能更好地发挥作用. 因此,分析复垦治理效果时,应根据闭库后有色金属尾矿库的具体情况,明确复垦治理的目标和关键问题,适当分析与估算每项复垦治理措施产生的效益.

## 2 有色金属尾矿库土地复垦与环境治理的效益

有色金属尾矿库土地复垦与环境治理措施的实施使库区生态环境得到改善,对周边农作物生产、水土保持、气体调节和生物多样性保护等产生直接影响;同时,库区周边居民在复垦治理中获得工作生活保障、健康保障和精神享受等福祉,这些都是尾矿库复垦治理的效益,因此要从经济、社会和生态环境三方面对有色金属尾矿库复垦治理的效益展开研究. 缪海花等<sup>[9]</sup>在评估尾矿库土地复垦效益时通过专家评分得出,尾矿库复垦的经济效益和生态效益各占总效益的40%,社会效益占20%. 刘振肖等<sup>[29]</sup>则通过主观和客观相结合取平均值的方法得出,尾矿库土地复垦效益中经济效益占40%,生态效益和社会效益各占30%. 各部分效益所占比例会因具体尾矿库而不同,同时与效益分析估算方法有关.

### 2.1 经济效益

经济效益是指资金占用、劳动耗费与成本支出所获得的有用经济成果<sup>[30]</sup>. 有色金属尾矿库复垦治理的经济效益是通过对尾矿库投入一定的资金、劳动、技术和管理等复垦治理后产生的经济收益. 刘文英等<sup>[31]</sup>指出,土地复垦与生态重建的根本目的是对受损生态系统进行重建,改善生态环境,经济效益仅是其全部效益的一小部分,主要为生态重建过程中栽植的乔、灌、草等树种的直接产出和土地的增值收益. 周亚军<sup>[32]</sup>在讨论矿山土地复垦经济效益时也指出,土地复垦主要通过种植业或林业实现生态恢复,产出的农林产品出售后所得收入即是经济效益. 李敏等<sup>[33]</sup>认为,除新增土地的经济收益外,复垦治理还会改善现有耕地质量、降低生产成本、提高产量,故其经济效益还包括现有耕地增产产值. 此外,有色金属尾矿库内堆存的大量尾砂既是重金属污染源,也是潜在的矿产资源,未来选矿技术的进步可能使过去不易回收的有用金属元素得到重新开发利用. 尾矿库复垦治理将大量尾矿资源保存在库内,若干年后可能被再次利用,也应将其作为经济效益估算内容的

一部分.

### 2.2 社会效益

社会效益是指复垦治理实施后,对当地社会生活、社会环境系统的贡献与影响及其产生的宏观社会效应<sup>[7]</sup>,主要体现在改善生产和生活条件、解决就业问题、缓解人地矛盾及促进社会稳定等方面. 穆连萍等<sup>[34]</sup>对本溪南芬尾矿库生态恢复的分析表明,复垦治理能有效解决矿山企业与农民间的“用地之争”,并在治理过程中吸收大量农村剩余劳动力,缓解就业压力,促进社会稳定. 周游<sup>[35]</sup>在测算复垦治理效益时认为,社会效益主要体现在养老、失业和医疗保障方面. 李德志等<sup>[36]</sup>指出,复垦治理的实施能使矿区下岗职工与无地农民的就业和生活得到保障,减少很多不安定因素,有利于社会发展和进步. 可见,多数研究较为重视复垦治理在促进就业和提高生活保障方面的效益,而较少关注其对社会其他方面的贡献. 有色金属尾矿库复垦治理能减轻和抑制重金属等污染物扩散,改善区域生活环境,减少居民疾病发生率<sup>[37]</sup>,产生疾病控制效益. 库区经复垦治理可作为科研示范区或实习试验基地,具有一定科研教育价值,亦应作为社会效益的一方面.

### 2.3 生态环境效益

生态环境效益主要指复垦治理活动对生态环境及自然生态系统的结构与功能产生的直接或间接、有利或有害的影响<sup>[7]</sup>. 有色金属尾矿库复垦治理的生态环境效益主要体现在减少重金属污染、改善土壤性质、提高植被覆盖度、保持水土、改善气候及恢复生物资源等方面. 叶新才等<sup>[38]</sup>指出,可通过土壤、气候和生物资源的恢复程度及减少污染等内容估算生态环境效益. 彭元<sup>[39]</sup>通过研究铅锌尾矿库土地复垦得出,复垦治理的生态环境效益包括防止水土流失、抑制重金属扩散、提高植被覆盖率、保护生物多样性及改善生态景观. 此外,国内外学者围绕尾矿坝安全、重金属污染、土壤侵蚀及植被恢复等内容对有色金属尾矿库复垦治理展开大量研究,分析其生态效果(见表3),研究表明,复垦治理能有效防止尾矿坝溃坝,控制水蚀和风蚀,减少地表径流,抑制重金属迁移扩散污染土壤、水体和空气,改善景观环境及增加物种多样性. 虽然对生态环境效益的内容涵盖较全面,但由于各效益在复垦治理中重要程度的专业认知差异和资料获取等方面的原因,估算内容选择的随意性较大,甚至会遗漏一些重要估算内容,效益估算完整性和系统性不足.

表 3 国内外有色金属尾矿库土地复垦与环境治理研究汇总

Table 3 Research summary on land reclamation and environment remediation of non-ferrous metal tailings pond at home and abroad

| 研究区                  | 研究内容              | 研究结论   | 数据来源   |
|----------------------|-------------------|--|--------|
| 荷兰 Obuasi 金矿尾矿库      | 尾矿库复垦对土壤质量和环境的影响  | 植被覆盖防止土壤侵蚀,保护临近水源和大气环境不受尾砂污染                                   | 文献[40] |
| 印度 Kolar Gold Fields | 适宜尾矿库复垦与环境治理的物种   | 用本土植物复垦,不仅有提供木材和燃料、增加库区有机质等生态效益,而且可以控制风蚀和水蚀,保存尾矿库中的有价值金属       | 文献[41] |
| 瑞典 Boliden Aitik 尾矿库 | 尾矿库风蚀损失           | 对尾矿坝治理能有效控制粉尘的产生   | 文献[42] |
| 罗马尼亚 Jolotca 尾矿库     | 尾矿库生态重建的影响        | 加固尾矿坝、修建排渗设施、填充土壤及栽种植被等能降低区域水源、土壤中污染物浓度,恢复森林生态系统,改善人居环境,提升人文景观 | 文献[43] |
| 巴西 Samarco 铁矿尾矿库     | 尾矿坝溃坝对土地、生态和社会的影响 | 尾矿坝溃坝导致植被面积大幅减少,区域环境严重破坏,周边居民损失惨重,表明尾矿库治理的生态和社会经济效益巨大          | 文献[44] |
| 江西某尾矿库               | 尾矿库生态环境综合评判       | 尾矿库生态环境综合治理能防治土壤、水体及空气污染,防止尾矿溃坝灾害,保存尾矿资源,取得显著的效益               | 文献[45] |
| 河北涞源县城子沟铁矿尾矿库        | 复垦尾矿库土壤生态系统服务价值   | 尾矿库复垦和生态重建的生态效益主要体现在水土保持作用增强、土壤肥力提高和物种多样性增加 3 个方面              | 文献[46] |
| 广东梅子窝钨尾矿库            | 尾矿库环境治理效果         | 通过加固坝体、增设排渗沟和绿化复垦,使尾矿库抵御百年一遇的洪水,避免溃坝损失,说明综合治理具有抵御灾害的效益         | 文献[47] |
| 湘潭锰矿小浒尾矿库            | 尾矿库生态恢复的环境效益      | 锰尾矿库生态恢复后能降低库区扬尘,减少地表径流、控制重金属迁移,但表层覆土不能降低尾矿库扬尘量,也无重金属污染控制作用    | 文献[48] |

### 3 有色金属尾矿库土地复垦治理效益估算方法

估算方法的选择对尾矿库复垦治理效益估算的结果产生重要影响。为复垦治理各效益选取合适的估算方法并进行货币化处理是获得客观准确估算结果的关键。已有研究主要运用收益还原法、社会贡献估算法、环境污染损失法和生态系统服务价值估算等方法对有色金属尾矿库土地复垦与环境治理效益进行估算。

#### 3.1 经济效益估算方法

对于复垦治理中植物直接产出物的经济收益,通常根据用地面积与单位面积收入估算。考虑到有色金属尾矿库区土地属损毁地,复垦前几年质量较差,收益偏低,数年后收益增加并趋于稳定这一特殊性,学者们多选用收益还原法对其估算(见表 4)。李敏等<sup>[33]</sup>指出,对经济效益的研究不应仅停留在静态分析上,复垦治理是一个持续多年的活动,应以净现值、内部收益率和动态投资回收期为参数分析其动态经济效益,最后研究收入、成本和投资 3 个因素变化对投资收益率和净现值的影响。罗畅等<sup>[49]</sup>选取投资收益率和静态投资回收期分析灾毁土地复垦的静态经济效益,结果表明静态经济效益良好;但根据复利现值系数计算复利现值后,将项目期内的现金流量折现得到项目的动态投资回收期为 9 a(标准为 10 a),内部收益率为 9%,动态经济效益一般。由此说明,静态

和动态估算对经济效益的反映存在差异。HE 等<sup>[50-51]</sup>也一致认为,将不同时期的现金流量统一到同一时间估算土地复垦治理的动态经济效益更具有综合性。目前对复垦治理经济效益的估算方法和数学模型较为完备,但较少对尾矿库复垦治理的资源保存效益进行估算,故可根据尾矿资源的利用特点对该效益进行科学估算,更全面地分析有色金属尾矿库复垦治理的经济效果。

#### 3.2 社会效益估算方法

我国对复垦治理社会效益的估算起步较晚,以定性描述为主,近年来定量估算的研究逐渐增多,但仍处于估算方法和模型的探索阶段。钱一武<sup>[52]</sup>依据增加就业人数和地区平均工资,运用劳动力价值法估算出北京市门头沟区 2008 年因生态修复增加就业的效益为  $0.496 \times 10^8$  元,说明生态修复带来的促进就业效益是积极的。周游<sup>[35]</sup>从土地的养老保障、医疗和失业保障 3 个方面选取人口安置数、养老保险费率和最低生活保障费等参数构建估算模型对四川省南部县石河镇复垦治理项目的社会效益进行估算,得出社会效益为  $1.374 \times 10^8$  元,超过总投资的 7 倍,效益显著。近年来,研究者<sup>[30]</sup>开始尝试采用环境经济学提出的疾病成本法和人力资本法估算环境变化对人类健康和劳动力数量及质量的影响。翟林等<sup>[11]</sup>选取复垦后疾病减少率、疾病治疗费和就业增加率等参数,估算祁东煤矿区复垦项目实施的社会效益约为  $0.194 \times 10^8$  元,

表明复垦治理有助于当地环境条件和居民健康状况的改善. HE 等<sup>[50]</sup>构建了成本-效益分析体系,通过意愿调查法、旅行费用法等,从货币角度将“是”或“否”的问题转化为“多”或“少”的问题,判断复垦项目的社会效益.

现有社会效益估算的研究多以促进就业和提高社会保障为主,采用价值法和替代法进行估算(见表 4). 多数研究对最低生活保障、医疗和失业保险进行粗略的系数修正后估算社会效益,估算结果的准确性较低. 对于环境价值法中的疾病成本和人力资本法,

由于包含的环境和市场信息参数较多,信息的可得性影响模型参数的准确性,从而影响估算结果. 实际研究中,受模型建立、数据获取等影响,对疾病控制、科研教育等效益研究较少,对复垦治理社会效果的分析不够全面. 今后应加强对各项社会效益的估算方法及其数学模型的探索,根据估算过程提供的研究对象、时间、资金及其他特征,结合环境政策、统计制度和技术体系,科学构建估算方法和模型,合理确定模型参数,提高估算结果的准确性.

### 3.3 生态环境效益估算方法

表 4 尾矿库土地复垦与环境治理效益的现有估算方法及数学模型

Table 4 Existing methods and mathematical models of benefits estimation for tailings pond reclamation and remediation

| 效益类型   | 估算内容            | 估算方法        | 数学模型  | 模型参数   | 数据来源      |
|--------|-----------------|-------------|---|--|-----------|
| 经济效益   | 新增土地收益和现有土地增值收益 | 收益还原法       | $M = \frac{a_1 + a_2}{r} \times \left[ 1 - \frac{1}{(1+r)^m} \right]$   | $M$ 为经济效益,元; $a_1$ 为原有地增值收益,元; $a_2$ 为新增地净收益,元; $r$ 为贴现率; $m$ 为使用年限, $a$   | 文献[35]    |
|        |                 | 静态分析法       | $E = (N/C) \times 100\%$ ,<br>$TP = (C/N) \times 100\%$   | $E$ 为静态投资收益率; $N$ 为项目年新增产值,元; $C$ 为项目总投资,元; $TP$ 为静态投资回收期, $a$   | 文献[7]     |
|        |                 | 动态分析法       | $NPV = \sum_{k=1}^n (CI - CO)_k (1+x)^{-k}$   | $NPV$ 为净现值,元; $CI$ 为现金流入量,元; $CO$ 为现金流出量,元; $(CI-CO)_k$ 为第 $k$ 年的现金流量,元; $n$ 为计算年数; $x$ 为设定的折现率  | 文献[7,33]  |
|        |                 | 动态分析法       | $IRR = x_1 + (x_2 - x_1) \frac{NPV_1}{NPV_1 +  NPV_2 }$   | $IRR$ 为内部收益率; $x_1$ 为偏低折现率; $x_2$ 为偏高折现率; $NPV_1$ 为正净现值,元; $NPV_2$ 为负净现值,元   | 文献[7,33]  |
|        |                 |             | $P_T = A - 1 + \frac{ CL }{CT}$   | $P_T$ 为动态投资回收期, $a$ ; $A$ 为累计净现金流量开始出现正值的年份数; $CL$ 为上年累计净现金流量值,元; $CT$ 为当年净现金流量值,元   | 文献[7,33]  |
| 社会效益   | 增加就业            | 劳动力价值法      | $V_J = JN \times W \times \theta$   | $V_J$ 为增加就业效益,元; $JN$ 为就业人数增加量,人; $W$ 为研究区平均工资,元/人; $\theta$ 为修正系数   | 文献[52]    |
|        | 社会保障            | 替代法         | $V_E = E_0 + E_M + E_J$   | $V_E$ 为社会保障效益,元; $E_0$ 为养老保障值,元; $E_M$ 为医疗保障值,元; $E_J$ 为失业保障值,元  | 文献[35]    |
|        | 疾病控制            | 疾病成本法和人力资本法 | $V_1 = V_C + V_T$ ,<br>$V_C = \sum_{i=1}^z (L_i + M_i)$ ,<br>$V_T = \sum_{t=T}^{\infty} Y_t P_T^t (1+r)^{t-T}$                  | $V_1$ 为疾病控制效益,元; $V_C$ 为环境污染导致的疾病损失成本,元; $V_T$ 为 $T$ 年年龄过早死亡的损失,元; $L_i$ 为个人工资损失,元; $M_i$ 为个人医疗费用,元; $z$ 为受影响人数,人; $Y_t$ 为第 $t$ 年获得的人力资本收入,元; $P_T^t$ 为个人活到 $t$ 年的概率; $r$ 为贴现率 | 文献[30]    |
|        | 减少污染损失          | 污染损失率法      | $R_j = \frac{1}{1 + \alpha_j \times \exp(-\beta_j \times c_j)}$ ,<br>$R = 1 - \prod_{j=1}^s (1 - R_j \times \omega_j \times s)$ | $R_j$ 为重金属 $j$ 对土壤造成的污染损失率; $c_j$ 为土壤中重金属 $j$ 的质量分数,mg/kg; $\alpha_j$ 和 $\beta_j$ 为价值损失参数,待求常数; $R$ 为重金属综合污染损失率; $\omega_j$ 为重金属 $j$ 所占权重; $s$ 为土壤重金属种类数                       | 文献[53-55] |
| 生态环境效益 | 改善生态环境质量        | 生态服务价值系数法   | $ESV = \sum (A_K \times V_K \times \rho)$   | $ESV$ 为生态系统服务总价值,元; $A_K$ 为 $K$ 种土地利用类型面积, $m^2$ ; $V_K$ 为 $K$ 种土地类型的生态价值,元; $\rho$ 为价值修正系数  | 文献[56]    |
|        |                 | 环境价值法       | 包括市场价值、重置成本、防护支出、影子价格及意愿调查等方法,但尚未形成统一的数学模型  |  | 文献[57-58] |
|        |                 | 生态系统服务评估模型  | RS、GIS、InVEST 模型和 CITYgreen 等空间技术模型   |  | 文献[59-63] |

对生态环境效益的估算,主要从复垦减少环境污染损失和改善生态环境质量两方面展开.对于减少土壤和水污染的效益,多运用污染损失率法建立污染损失 Logistic 模型,结合研究区实际情况估算经济损失作为复垦治理减少污染的效益(见表4).污染损失 Logistic 模型中,学者们关注的焦点是确定价值损失参数.如余立斌等<sup>[53]</sup>指出,土壤中各污染物因子的本底浓度为 GB 15618—1995《土壤环境质量标准》中一级标准(自然背景值)限值的 1/2;高奇等<sup>[64]</sup>认为,不同研究区土壤质量状况和自然条件差异显著,GB 15618—1995 中一级标准限值的 1/2 难以反映研究区实际状况,应以现有优质耕地采样点土壤重金属的平均含量作为无污染背景值,借鉴《农业环境监测实用手册》确定参数;李嘉竹等<sup>[54]</sup>在估算水污染经济损失时依据现有水质标准和毒性资料粗略估算参数;陈金发<sup>[55]</sup>在估算污染经济损失时对传统 Logistic 模型中的价值损失参数进行修正,使模型能更好地反映水污染经济损失的真实情况.可见,模型参数对于效益估算结果的准确性至关重要,应结合有色金属尾矿库区实际情况和复垦治理技术措施合理界定参数,提高估算结果的准确性.

对于改善生态环境质量,学者们多通过生态服务价值估算有色金属尾矿库复垦治理的生态环境效益. Costanza 等<sup>[56]</sup>于 1997 年提出生态系统服务价值系数法(见表4).在此基础上,谢高地等<sup>[57-58,65]</sup>提出基于市场理论的间接评估法,包括替代法(RCM)、旅行费用法(TCM)和享乐价格法(HPM)等. WANG 等<sup>[66-68]</sup>利用降雨量与蒸散量差值、降雨截留和地表径流估算水源涵养价值. Potter 等<sup>[69-70]</sup>选取植被净初级生产力和生物量等参数,基于卫星反射率估算气候调节价值. WANG 等<sup>[71]</sup>从物质质量与价值量角度选取土壤保持、水源涵养、气体调节等指标,运用替代法、市场价值法和影子价格法等估算矿区土地复垦后的生态效益.随着空间技术的发展,RS 和 GIS 等被引入生态服务价值计算中<sup>[60]</sup>,XIE 等<sup>[59]</sup>运用 ArcGIS 空间分析模块估算生态旅游价值.近年来,国外的 InVEST 模型和 CITYgreen 等生态服务评估模型得到广泛应用<sup>[61-62]</sup>.何君<sup>[63]</sup>利用 RS 和 InVEST 模型评估了复垦土地的生物栖息地、土壤保持、水源涵养、气候调节和环境净化等生态效益.

目前的生态环境效益估算方法和模型较多,但一些模型适用性较差,有色金属尾矿库高危、重污染的特性使其与一般生态恢复不同,对方法的盲目借鉴会使估算结果存在一定偏差.有色金属尾矿库治理最

重要的一个目标是保障尾矿坝稳定,防治溃坝灾害发生,诸多研究<sup>[34,45,47]</sup>也表明,复垦治理有防止尾矿库溃坝的效益,而鉴于尾矿库溃坝的复杂性,目前尚未针对该效益提出科学的估算方法.建议从溃坝灾害损失和溃坝后治理投入角度探索效益估算.作为一项以生态恢复为主的综合治理工程,有色金属尾矿库的复垦治理模式和技术措施会直接影响治理的生态环境效果.因此,效益估算应与技术措施相结合,在参考生态服务价值评估方法的基础上,探索适合有色金属尾矿库自身特点的估算方法,合理构建数学模型,使估算结果更加准确可靠.

#### 4 结论与展望

a) 当前,复垦治理效益估算尚未形成适合重度重金属污染尾矿库复垦治理效益的估算体系.效益估算内容的确定、估算方法选择及其数学模型构建方面尚需进一步完善,主要包括:①尾矿库复垦治理效益估算的内容涵盖不全面,效益分析缺乏完整性和系统性.②效益估算过程与复垦治理技术措施结合较少,尚未形成适合重度重金属污染尾矿库自身特点的效益估算体系,导致估算结果对于优化复垦治理措施等的参考价值较低.③目前的一些效益估算方法及其数学模型对有色金属尾矿库复垦治理效益估算的适用性较差,且相关模型参数的确定不够明晰,效益估算的准确性较低.

b) 针对尾矿库复垦治理效益估算中存在的问题,提出有色金属闭库尾矿库土地复垦与环境治理效益估算进一步研究的重点内容:①充分考虑复垦治理对经济、社会和生态环境的复杂影响,合理确定效益估算的内容,形成系统、全面的效益构成体系,使效益估算更有目的性和针对性.②根据有色金属尾矿库复垦治理目的及闭库后尾矿库区的具体状况,有针对性地系统构建尾矿库复垦治理技术模式,为效益估算内容和估算方法的确定提供依据.③根据效益估算内容的特点、方法适用条件和资料获取等情况,完善现有估算方法及其数学模型,结合复垦治理技术措施合理确定相关模型参数,使估算结果更加可靠和准确,提升效益估算对于进一步优化复垦治理措施的参考价值.

c) 有色金属尾矿库的土地复垦与环境治理是一项复杂的系统工程,在研究方面需要多学科、多专业的学术视角,统筹全局,合理构建效益估算模型,准确确定模型参数.此外,管理方面需要生态环境部、自然资源部、国家安全生产监督管理局等相关部门的有效协调运作,技术方面需要进一步提升与完善有色金属尾矿库相关技术标准和技术规范.

## 参考文献(References):

- [ 1 ] MIAN M H, YANFUL E K. Tailings erosion and resuspension in two mine tailings ponds due to wind waves [ J ]. *Advances in Environmental Research*, 2003, 7: 745-765.
- [ 2 ] 黄飞, 王泽煌, 蔡昆争, 等. 大宝山尾矿库区水体重金属污染特征及生态风险评估 [ J ]. *环境科学研究*, 2016, 29 ( 11 ): 1701-1708.  
HUANG Fei, WANG Zehuang, CAI Kunzheng, *et al.* Pollution characteristics and potential ecological risks of heavy metals in water of tailing zone in Dabaoshan Mine, Guangdong Province, China [ J ]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29 ( 11 ): 1701-1708.
- [ 3 ] WANG Kun, YANG Peng, KAREN H E, *et al.* Status and development for the prevention and management of tailings dam failure accidents [ J ]. *Chinese Journal of Engineering*, 2018, 40 ( 5 ): 526-539.
- [ 4 ] AGURTO-DETZEL H, BIANCHI M, ASSUMPÇÃO M, *et al.* The tailings dam failure of 5 November 2015 in SE Brazil and its preceding seismic sequence [ J ]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43: 4929-4936.
- [ 5 ] 伏凤艳, 宋波, 钟雪梅, 等. 尾砂库溃坝对大环江沉积物中重金属的影响 [ J ]. *环境科学研究*, 2015, 28 ( 1 ): 31-39.  
FU Fengyan, SONG Bo, ZHONG Xuemei, *et al.* Effects and risk assessment of heavy metals in sediments of Dahuanjiang River since tailing dam break [ J ]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28 ( 1 ): 31-39.
- [ 6 ] BIAN Zhengfu, LEI Shaogang, JIN Dan, *et al.* Several basic scientific issues related to mined land remediation [ J ]. *Journal of the China Coal Society*, 2018, 43 ( 1 ): 190-197.
- [ 7 ] 胡振琪, 卞正富, 成枢, 等. 土地复垦与生态重建 [ M ]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008: 304-310.
- [ 8 ] 刘立忠. 基于 Yaahp 的土地复垦效益量化及应用 [ J ]. *煤矿开采*, 2016, 21 ( 4 ): 90-94.  
LIU Lizhong. Benefit qualification and application of land reclamation based on Yaahp [ J ]. *Coal Mining Technology*, 2016, 21 ( 4 ): 90-94.
- [ 9 ] 缪海花, 何建军. 基于模糊综合评判的尾矿库土地复垦效益评价 [ J ]. *中国金属通报*, 2017 ( 10 ): 70-71.
- [ 10 ] 潘叶, 张燕. 矿山废弃地生态修复效益评价研究: 以南京幕府山为例 [ J ]. *中国水土保持*, 2016 ( 5 ): 61-65.
- [ 11 ] 翟林, 乔磊, 李建民. 高潜水位矿区塌陷土地复垦效益估算研究 [ J ]. *中国矿业*, 2014, 23 ( 12 ): 42-46.  
ZHAI Lin, QIAO Lei, LI Jianmin. Benefit evaluation of land reclamation in mining subsidence area with higher level of underground water [ J ]. *China Mining Magazine*, 2014, 23 ( 12 ): 42-46.
- [ 12 ] 李芬, 李妍菁, 赖玉珮. 城市矿山修复生态效益评估研究 [ J ]. *环境保护*, 2018, 46 ( 2 ): 55-58.  
LI Fen, LI Yanjing, LAI Yupei. Ecological benefit evaluation of urban mines remediation [ J ]. *Environmental Protection*, 2018, 46 ( 2 ): 55-58.
- [ 13 ] 汪贻水. 美国矿山企业的尾矿管理 [ J ]. *世界有色金属*, 2008 ( 2 ): 55-58.  
WANG Yishui. Tailing management of mining enterprise in USA [ J ]. *World Nonferrous Metals*, 2008 ( 2 ): 55-58.
- [ 14 ] ALAKANGAS L, LU J, JIA Yu, *et al.* Evaluation of the application of dry covers over carbonate-rich sulphide tailings [ J ]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 244/245: 180-194.
- [ 15 ] ZHANG Wei, ALAKANGAS L, WEI Zhongyi, *et al.* Geochemical evaluation of heavy metal migration in Pb-Zn tailings covered by different top soils [ J ]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, 165: 134-142.
- [ 16 ] HOSNEY M S, ROWE R K. Performance of three GCLs used for covering gold mine tailings for 4 years under field and laboratory exposure conditions [ J ]. *Geosynthetics International*, 2014, 21 ( 3 ): 197-212.
- [ 17 ] 高尚雄, 叶开发, 李承, 等. 德国轴尾矿库退役治理技术考察报告 [ J ]. *轴矿冶*, 2003 ( 4 ): 208-211.  
GAO Shangxiong, YE Kaifa, LI Cheng, *et al.* The investigation reports on the improvement technology of decommission uranium tailings impoundments in Germany [ J ]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2003 ( 4 ): 208-211.
- [ 18 ] MKANDAWIRE M, DUDEL E G. Accumulation of arsenic in *Lemna gibba* L. ( duckweed ) in tailing waters of two abandoned uranium mining sites in Saxony, Germany [ J ]. *Science of the Total Environment*, 2005, 336: 81-89.
- [ 19 ] 徐曙光. 澳大利亚的最优尾矿管理 [ J ]. *中国金属通报*, 2009 ( 22 ): 38-41.
- [ 20 ] JORDAN G. Sustainable mineral resources management: from regional mineral resources exploration to spatial contamination risk assessment of mining [ J ]. *Environmental Geology*, 2009, 58 ( 1 ): 153-169.
- [ 21 ] 李全明, 张红, 李钢. 中澳尾矿库全生命周期安全管理对比分析 [ J ]. *现代矿业*, 2016, 32 ( 12 ): 1-5.  
LI Quanming, ZHANG Hong, LI Gang. Comparison analysis of safety management of tailings ponds life cycle in China and Australia [ J ]. *Modern Mining*, 2016, 32 ( 12 ): 1-5.
- [ 22 ] MUDD G M, DIESENDORF M. Sustainability of uranium mining and milling: toward quantifying resources and eco-efficiency [ J ]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42 ( 7 ): 2624-2630.
- [ 23 ] 谢李娜, 周建伟, 徐文. 澳大利亚尾矿治理现状及先进技术综述 [ J ]. *环境工程*, 2015, 33 ( 10 ): 72-76.  
XIE Lina, ZHOU Jianwei, XU Wen. Current situation and advanced technologies of tailings management in Australia [ J ]. *Environmental Engineering*, 2015, 33 ( 10 ): 72-76.
- [ 24 ] 张卫. 有色金属尾矿库重金属污染扩散特征及生态封闭治理模式研究 [ D ]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016: 6-15.
- [ 25 ] KOSSOFF D, DUBBIN W E, ALFREDSSON M, *et al.* Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation [ J ]. *Applied Geochemistry*, 2014, 51: 229-245.
- [ 26 ] 卢春燕, 石文芳, 罗涛, 等. 尾矿库治理技术研究现状与展望 [ J ]. *江西理工大学学报*, 2016, 37 ( 1 ): 48-56.  
LU Chunyan, SHI Wenfang, LUO Tao, *et al.* Research status and prospect of reinforcement technology of tailings dam [ J ]. *Journal of*



- Jiangxi University of Science and Technology, 2016, 37(1):48-56.
- [27] 周连碧. 铜尾矿废弃地重金属污染特征与生态修复研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2012:91-93.
- [28] 马国超, 王立娟, 马松, 等. 矿山尾矿库多技术融合安全监测运用研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(7):35-40.  
MA Guochao, WANG Lijuan, MA Song, *et al.* Research on mine tailing pond safety monitoring based on multiple technology fusion [J]. *China Safety Science Journal*, 2016, 26(7):35-40.
- [29] 刘振肖, 陈建宏. 基于模糊综合评判的尾矿库土地复垦效益评价[J]. 矿业研究与开发, 2010, 30(4):97-100.  
LIU Zhenxiao, CHEN Jianhong. Benefit evaluation of tailings reservoir reclamation based on the fuzzy comprehensive evaluation [J]. *Mining Research and Development*, 2010, 30(4):97-100.
- [30] 沈满洪, 马永喜, 谢慧明, 等. 资源与环境经济学[M]. 2版. 北京: 中国环境出版社, 2015:191-247.
- [31] 刘文英, 王永旺, 池君洲. 浅析黑岱沟露天煤矿土地复垦与生态重建效益[J]. 露天采矿技术, 2008(6):72-73.
- [32] 周亚军. 矿山土地复垦经济效益计算方法的探讨[J]. 冶金矿山设计与建设, 1998, 29(3):61-64.
- [33] 李敏, 赵小敏, 龚绍琦, 等. 土地整理中土地经济效益分析: 以山东省阳信县为例[J]. 江西农业大学学报(社会科学版), 2003, 2(4):141-143.  
LI Min, ZHAO Xiaomin, GONG Shaoqi, *et al.* Analysis of land economic benefit in land consolidation: a case study of Yangxin County, Shandong Province [J]. *Journal of Jiangxi Agricultural University (Social Science Edition)*, 2003, 2(4):141-143.
- [34] 穆连萍, 王誉闻, 孟繁斌, 等. 本溪市南芬选矿厂尾矿库生态恢复治理实践[J]. 中国水土保持, 2013(7):22-23.
- [35] 周游. 四川丘陵区土地整治效益测算研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2012:34-45.
- [36] 李德志, 李生荣. 浅谈靖远矿区尾矿库治理实践[J]. 煤, 2016, 25(11):41-42.
- [37] SONG Xingqiang, PETERSEN J B, PEDERSEN K B, *et al.* Comparative life cycle assessment of tailings management and energy scenarios for a copper ore mine: a case study in northern Norway[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 164:892-904.
- [38] 叶新才, 王占岐. 尾矿库土地复垦的效益分析[J]. 采矿技术, 2004, 4(1):26-28.  
YE Xincan, WANG Zhanqi. Benefit analysis of land reclamation in tailings reservoir[J]. *Mining Technique*, 2004, 4(1):26-28.
- [39] 彭元. 柴河铅锌矿尾矿库土地复垦方案编制研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016:42-43.
- [40] BOATENG E, DOWUONA G N, NUDE P M, *et al.* Geochemical assessment of the impact of mine tailings reclamation on the quality of soils at AngloGold Concession, Obuasi, Ghana [J]. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, 2012, 4(4):466-474.
- [41] ROY S, GUPTA P, RENALDY T A. Impacts of gold mill tailings dumps on agriculture lands and its ecological restoration at Kolar Gold Fields, India [J]. *Resources and Environment*, 2012, 2(1):67-79.
- [42] JIA Qi, AL-ANSARI N, KNUTSSON S. Modeling of wind erosion of the Aitik Tailings Dam using SWEEP model [J]. *Engineering*, 2014, 6:355-364.
- [43] PARASCHIV V, GHIURCO A M. The ecological reconstruction of JOLOTCA Mining (Giurgeu Basin) [J]. *Present Environment and Sustainable Development*, 2010, 4:391-398.
- [44] AIRES U R V, SANTOS B S M, COELHO C D, *et al.* Changes in land use and land cover as a result of the failure of a mining tailings dam in Mariana, MG, Brazil [J]. *Land Use Policy*, 2018, 70:63-70.
- [45] 唐宇, 李瑞军, 王海军. 尾矿库生态环境模糊综合评判应急响应体系及治理初探[J]. 中国矿业, 2014, 23(S2):77-80.  
TANG Yu, LI Ruijun, WANG Haijun. Preliminary study on fuzzy comprehensive evaluation of ecological environment and emergency response system for tailings reservoir [J]. *China Mining Magazine*, 2014, 23(S2):77-80.
- [46] 李大伟, 许焱, 尹海魁, 等. 复垦尾矿库土壤生态系统服务价值评估[J]. 环境工程, 2016, 34(11):113-117.  
LI Dawei, XU Hao, YIN Haikui, *et al.* Soil ecosystem service valuation on tailings reclamation [J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34(11):113-117.
- [47] 王潇, 孔凡乾, 翁海蛟, 等. 广东梅子窝钨矿尾矿库的防治措施及治理效果[J]. 矿物学报, 2015, 35(S1):829-830.
- [48] 黄艳红. 锰尾矿库植物适生性研究及生态恢复的环境效益[D]. 长沙: 中南大学, 2013:49-52.
- [49] 罗畅, 夏春光, 杨庆媛, 等. 灾毁土地复垦的经济效益研究: 以重庆市北碚区为例[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2005, 30(6):1138-1141.  
LUO Chang, XIA Chunguang, YANG Qingyuan, *et al.* Study on the economic reclamation benefit of damaged land: case study in Beibei District, Chongqing City [J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science)*, 2005, 30(6):1138-1141.
- [50] HE Yueyun, XUE Xiongzhi, KONG Hao. The application of costs and benefits analysis in coastal land reclamation [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 518/523:5232-5237.
- [51] VITIKAINEN A. An overview of land consolidation in Europe [J]. *Nordic Journal of Surveying and Real Estate Research*, 2004(1):25-44.
- [52] 钱一武. 北京门头沟区生态修复综合效益价值评估研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011:60-93.
- [53] 余立斌, 张江山, 王菲凤. 污染损失率法在土壤环境质量评价中的应用[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(4):180-183.  
YU Libin, ZHANG Jiangshan, WANG Feifeng. Application of pollution loss rate method in soil environmental quality assessment [J]. *Environmental Science and Management*, 2008, 33(4):180-183.
- [54] 李嘉竹, 刘贤赵, 李宝江, 等. 基于 Logistic 模型估算水资源污染经济损失研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(9):1667-1675.  
LI Jiazhu, LIU Xianzhao, LI Baojiang, *et al.* Estimating of economic loss caused by water resources pollution based on the Logistic model [J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(9):1667-1675.
- [55] 陈金发. 修正 Logistics 模型在水污染经济损失计算中的应用[J]. 节水灌溉, 2015(5):57-59.  
CHEN Jinfa. Modification of Logistic model parameter and its

- application in water pollution economic loss calculation[J]. *Water Saving Irrigation*, 2015(5):57-59.
- [56] COSTANZA R, ARGE R, DE GROOT R, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387:253-260.
- [57] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(8):1243-1254.
- XIE Gaodi, ZHANG Caixia, ZHANG Leiming, *et al.* Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8):1243-1254.
- [58] 高艳妮, 李岱青, 蒋冲, 等. 基于能值理论的三江源区生态系统服务物质当量研究[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(1):101-109.
- GAO Yanni, LI Daiqing, JIANG Chong, *et al.* Estimation of substance-equivalent of ecosystem services in the Three-River Headwaters Region based on emergy [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(1):101-109.
- [59] XIE Gaodi, ZHEN Lin, LU Chunxia, *et al.* Applying value transfer method for eco-service valuation in China[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 1(1):51-59.
- [60] ARAUJO BARBOSA C, ATKINSON P M, DEARING J A, *et al.* Remote sensing of ecosystem services: a systematic review [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 52:430-443.
- [61] NELSON E, MENDOZA G, REGETZ J, *et al.* Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1):4-11.
- [62] TERRADO M, SABATER S, CHAPLIN-KRAMER B, *et al.* Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 540:63-70.
- [63] 何君. 基于 GIS 与 InVEST 模型的重庆市城镇化过程中生态经济效益损益研究[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2017:10-31.
- [64] 高奇, 师学义, 李牧, 等. 复垦村庄土壤重金属污染损失评价[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(2):204-209.
- GAO Qi, SHI Xueyi, LI Mu, *et al.* Evaluation of soil heavy metal pollution loss in reclamation village[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(2):204-209.
- [65] 朱康文, 雷波, 李月臣, 等. 生态红线保护下的两江新区土地利用/覆盖情景模拟及生态价值评估[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(11):1801-1812.
- ZHU Kangwen, LEI Bo, LI Yuechen, *et al.* Land use cover scenario simulation and ecological value assessment based on the ecological protection red line: Liangjiang New Area case study[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(11):1801-1812.
- [66] WANG Zongming, MAO Dehua, LI Lin, *et al.* Quantifying changes in multiple ecosystem services during 1992-2012 in the Sanjiang Plain of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 514:119-130.
- [67] ZHANG Biao, LI Wenhua, XIE Gaodi, *et al.* Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value[J]. *Ecological Economics*, 2010, 69:1416-1426.
- [68] LI Jing, REN Zhiyuan, ZHOU Zixiang. Ecosystem services and their values: a case study in the Qinba mountain of China[J]. *Ecological Research*, 2006, 21:597-604.
- [69] POTTER C, PEGGY G, STEVEN K, *et al.* Storage of carbon in U.S. forests predicted from satellite data, ecosystem modeling, and inventory summaries[J]. *Climatic Change*, 2008, 90(3):269-282.
- [70] KROSS A, SEASQUIST J W, ROULET N T, *et al.* Estimating carbon dioxide exchange rates at contrasting northern peatlands using MODIS satellite data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 137:234-243.
- [71] WANG Jing, WEI Zhongyi, WANG Qiubing. Evaluating the eco-environment benefit of land reclamation in the dump of an opencast coal mine[J]. *Chemistry and Ecology*, 2017, 33(7):607-624.

(责任编辑:周巧富)