

基于推理条件和规则的废弃露天矿坑再利用方式选择

高文文^{1,2}, 白中科^{2,3*}

(1. 中国人民大学公共管理学院, 北京 100872; 2. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083;
3. 国土资源部土地整治重点实验室, 北京 100035)

摘要:为了更好地实现废弃露天矿坑的再利用, 并对再利用方式进行科学的选择, 该文以废弃露天矿坑为研究对象, 从限制性角度着手提取了矿坑条件、自然条件、其他条件3类17个条件项, 形成58个推理条件和13条推理规则, 构建了基于“推理条件-推理规则”的废弃露天矿坑再利用方式选择方法, 并运用此方法对平朔煤矿露天矿坑再利用方式进行选择。研究表明: 经过初步推理, 研究区可用于生态保护基地、垃圾填埋场、旅游文娱、光伏发电基地, 且这4种再利用方式可进行组合与协调; 决策结果需通过更加详细的分析及多方案比选后确定, 一般情况下为推理结果的子集, 也可能为空集。该研究可为闭矿或即将闭矿的露天矿坑再利用提供参考。

关键词: 土地利用; 复垦; 煤矿; 露天矿坑; 再利用; 废弃地; 推理; 选择

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.11.032

中图分类号: F301.24; TD88

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-11-0253-08

高文文, 白中科. 基于推理条件和规则的废弃露天矿坑再利用方式选择[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 253-260.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.11.032 <http://www.tcsae.org>

Gao Wenwen, Bai Zhongke. Reuse ways selection of abandoned open pits based on inference conditions and rules[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(11): 253-260. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.11.032 <http://www.tcsae.org>

0 引言

废弃露天矿坑是露天开采活动结束后产生的遗留废弃地, 其数量和规模持续增长。它以挖损的方式破坏了大量土地资源, 对生态安全和地貌景观造成不同程度的负面影响^[1-2]。有的废弃矿坑还伴随高陡边坡和积水, 若不及时对其进行维护和管理, 还可能引发崩塌、滑坡等地质灾害^[3]。因此, 废弃露天矿坑再利用代表着新型的资源利用观和绿色的开发理念, 是生态文明建设所提倡的, 已成为当今土地复垦领域中关注的热点, 亦是难点。

束文圣等^[4]2000年提出, 深入研究不同类型矿业废弃地的复垦技术和模式, 是中国矿业废弃地复垦工作的当务之急^[1]。十多年来, 矿业废弃地的生态恢复与重建技术逐步完善, 景观更新与再利用水平大幅提高^[4]。在此过程中, 排土场、尾矿库等研究较多, 废弃露天矿坑研究较少。对于废弃矿坑的再利用方式, 王永生等^[5-6]最早将其归纳为博物资源利用、旅游开发、复垦造田、矿坑水利用、垃圾处理等。而后有学者对废弃矿坑水的治理利用^[7-8]、矿坑边坡稳定性^[9-10]、闭矿规划政策^[11-13]等个别要素进行了研究。如今, 中国逐渐摆脱了传统土地整治的束缚, 在废弃矿坑再利用中注入了景观设计元素和美学元

素, 甚至实现了功能更新^[14-18]。欧美国家工业发展早于中国, 因此较早地开始研究矿业废弃地的治理理念和方案。1867年, 巴黎比特·绍蒙公园(Buttes Chaumont)从衰败的矿坑变身东方园林, 开启了废弃矿坑再利用的先河^[19]。随着人们对环境要求的提高、环保意识的加强以及科学技术的发展, 废弃露天矿坑再利用受到了建筑师、景观设计师、生态学者、规划师等的共同关注, 缔造了一系列公园类优秀案例, 如加拿大维多利亚附近的布查特花园(Butchart Gardens)^[20]、美国芝加哥南区的斯特恩矿坑公园(Stearns Quarry Park)^[21]等。此外, 国外废弃露天矿坑的景观改造与再利用呈现出个性化、多元化的特点, 如用于民居^[22]、野生生物栖息地^[23]、水产养殖^[24]等。

在再利用方式的选择方面, Soltanmohammadi等^[25-26]运用消去与选择转换法、偏好顺序结构评估法和层次分析法对闭矿后的土地利用方式进行了排序, Bascetin^[27]运用层次分析法对露天矿的最优复垦方式进行了选择, 刘慧芳等^[28]通过建立用地竞争模型对矿业废弃地再利用的用地类型进行了判定, 高怀军^[29]运用和谐理论并借鉴协调调度提出了矿业废弃地的再利用方案。但废弃露天矿坑自身具有特殊性, 不同再利用方式的同一条件可能具有互斥性, 某种再利用方式可能只与部分条件相关, 而上述研究选取的影响因子相对笼统, 可操作性较差。Bangian等^[30]运用模糊层次分析法构建了露天矿坑再利用方式选择模型, 但其未考虑起决定性作用的因子对结果造成的影响。

综上, 废弃露天矿坑再利用方式的选择目前还处于探索阶段。无论是直接针对废弃露天矿坑进行再利用研究, 还是将其作为矿业废弃地的一部分进行规划设计,

收稿日期: 2018-03-28 修订日期: 2018-05-07

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0206802)

作者简介: 高文文, 博士, 主要从事土地整治与生态恢复、土地政策研究。

Email: gaowenwen@ruc.edu.cn.

*通信作者: 白中科, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事土地整治与生态恢复研究。Email: baizk@cugb.edu.cn。中国农业工程学会会员(E041200374S)。

多缺乏条件剖析和论证,从而使研究的实际指导意义大打折扣。本文通过“推理条件-推理规则”以及限制性思路对废弃露天矿坑再利用方式进行初步选择,以期为闭矿或即将闭矿的露天矿坑再利用提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

研究区选择山西省朔州市境内的平朔露天煤矿,具体研究对象是矿区的3大露天矿坑,即安太堡矿坑(1985—2077年)、安家岭矿坑(1998—2095年)、东露天矿坑(2006—2080年)(下文顺序同)。这3个露天矿的生产能力分别为15.0、24.0、20.0 Mt/a,是典型的特大型露天矿。据2014年气象监测数据,该区年平均气温7℃,年内气温极不均匀,昼夜温差大。年降雨量365.7 mm,年蒸发量2 217.2 mm,均集中在夏季。年主导风向为西北风,年平均风速2.5 m/s,城镇用地和农村居民点集中区位于平朔矿区的西部。光能资源丰富,平均日照期2 662.8 h/a,平均太阳辐射照量5 752 MJ/(m²·a)。土源丰富,但土壤贫瘠,有机质含量小于1%。

在露天煤矿开采前,通常会根据矿体埋藏条件、开采工艺和有关技术经济因素等进行开采设计。根据平朔露天煤矿的开采工艺与时序以及矿坑的土地利用变化情况,3个矿坑废弃后的面积分别约380、460、300 hm²,位置如图1所示。

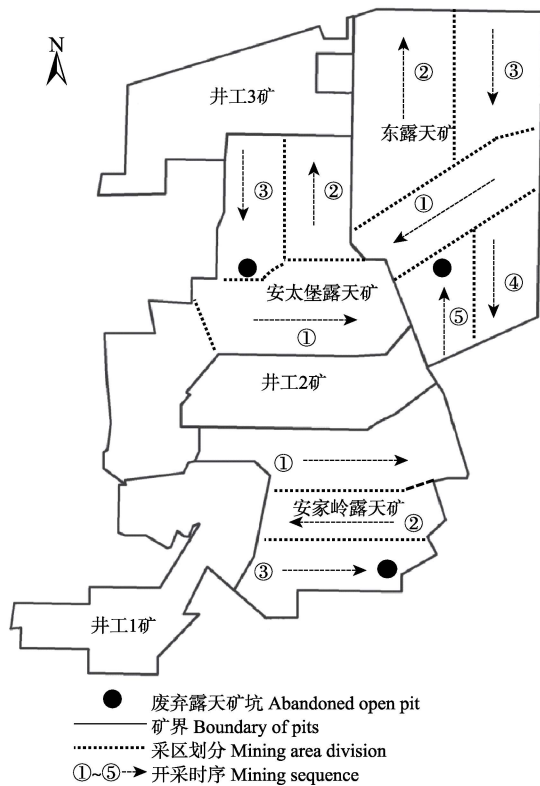


图1 废弃露天矿坑位置示意图

Fig.1 Position schematic diagram of abandoned open pits

1.2 数据来源

本文研究区的自然条件和矿坑条件数据主要来源于平鲁区2014年统计年鉴和矿区的土地复垦方案。其中,

矿坑的重金属污染数据来源于《露天煤矿土地复垦与生态重建——平朔露天矿的研究与实践》^[31],评价方法为内梅罗指数法,评价标准为土壤环境质量标准(征求意见稿)中商业用地和工业用地的二级标准。其他条件数据主要来源于2015年8月实地调研。其中,交通条件数据来源于规划文件。

1.3 再利用方式

废弃露天矿坑再利用是指通过岩土工程措施、生物工程措施等将废弃露天矿坑的土地、资源、文化等要素进行整合,使其达到可利用状态的过程。本文按照废弃露天矿坑可利用状态的主导功能性质,将其分为农业生产型、生态保护型、旅游文娱型、社会服务型、新兴产业型5大类,每类模式下又有多种不同的再利用方式(图2)。其中,将旅游文娱型归纳为科普教育类、建筑改造类和公园类。

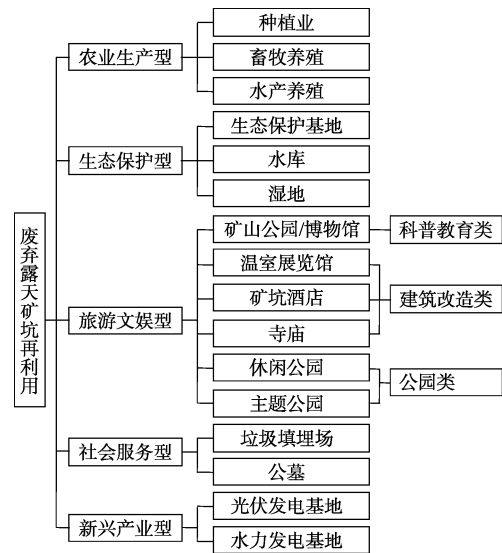


图2 废弃露天矿坑再利用方式分类

Fig.2 Reuse ways classification of abandoned open pits

2 研究方法

2.1 推理条件

废弃露天矿坑的再利用受到多种条件因子的影响。本文基于再利用方式,通过专家咨询、文献提取、规程规范查询等,共提取矿坑条件、自然条件和其他条件3类17个条件项。

2.1.1 矿坑条件

矿坑条件主要指矿坑自身的属性特征,包括矿坑规模、矿坑污染状况、矿坑积水状况、矿坑深度、坡度、边坡稳定性6个条件项。

1) 矿坑规模

由于矿坑规模没有统一的分类标准,且矿山规模大,矿坑规模也相对较大,故本文通过矿山规模间接地对矿坑规模进行分类。矿山生产建设规模通常用年产量表示,按原煤或矿石的年产量可分为大型矿山、中型矿山、小型矿山(表1)。其中,露天煤矿、露天铁矿及常见的金属矿(铜、铅、钨、镍等)均有统一的分类标准,采石

矿因矿石类型不同规模标准不同，但与煤矿、金属矿相比多为小型矿山。因此，矿坑规模可分为大型、中型和小型。

表 1 露天矿山规模分类
Table 1 Scale classification of opencast mines

| 矿种 Mineral species | 矿山规模 Mine scale | | |
|---------------------------------------|-----------------|-----------|----------|
| | 大型 Large | 中型 Medium | 小型 Small |
| 露天煤矿 Opencast coal mine | ≥400 | 100~>400 | <100 |
| 露天铁矿 Opencast iron mine | ≥200 | 60~>200 | <60 |
| 其他常见金属矿 Other common metallic mine | ≥100 | 30~>100 | <30 |

万 t·a⁻¹

注：露天煤矿原煤产量≥1 000 万 t·a⁻¹ 为特大型露天矿。

Note: it is super large opencast mine that the raw coal output of opencast coal mine is greater than or equal to 10 million t·a⁻¹.

矿坑规模对再利用方式有直接影响，如矿坑规模较大时一般不考虑用于农业种植，因为回填难度大，直接利用又存在通勤距离过大、农具到位困难的弊端；矿坑规模较小时一般不考虑新兴产业型再利用模式，因为光伏发电、水力发电属于工业利用，对场地的要求之一就是面积要大。

2) 矿坑污染状况

污染的治理和次生污染的防控是废弃露天矿坑再利用过程中的关键环节，尤其是在农业生产、旅游文娱等以人的参与为主的再利用过程中，必须保证环境质量达到相关标准。矿坑污染状况根据各污染指数（如单因子指数法、内梅罗指数法、潜在生态危害指数等）等级划分标准分为 5 级，I 级表示清洁无污染^[32]。若有矿坑积水，还需对水质进行调查研究，确保水质安全。根据《地表水环境质量标准》（2002），矿坑积水的环境质量根据相应的地表水水域功能可分为达标和不达标 2 类。

3) 矿坑积水状况

废弃矿坑的水水平衡主要取决于蒸发量与补给量的大小。补给途径主要有大气降水、地表水、地下水等。当蒸发量大于补给量时，废弃矿坑不会积水，反之则会产生积水。矿坑积水在再利用中的作用主要体现在：具有生态系统服务功能，能湿润净化空气，调解局部小气候，为水生动植物提供适宜的生活环境；可提供生产、工业用水；可作为水上娱乐项目的活动场所；是重要的景观要素之一。根据刘抚英的研究成果，当常年积水或季节性积水>3 m 时，可用于养殖；<0.5 m 时，用作观赏景观；介于二者之间时，可用作环保型湿地^[33]。

4) 矿坑深度

矿坑深度对水力发电、垃圾填埋场的选择影响较大。中国按水头的大小将水电站分为高水头水电站、中水头水电站和低水头水电站，对应的水头大小分别为>200、40~200、<40 m。废弃矿坑用于水力发电属于蓄水式发电，矿坑适宜深度为 40~200 m。对于垃圾填埋场而言，当填埋面积一定时，填埋高度越大，填埋容量越大，经济性就越好。

5) 坡度

坡度指矿坑平台及坑底的坡度，对再利用的影响主要体现在耕地种植上。根据《土地利用现状调查技术规程》（1984）将其划分为 5 级。其中，≤2°一般无水土流失现象；>2°~6°可发生轻度土壤侵蚀；>6°~15°可发生中度水土流失；>15°~25°水土流失严重；>25°为限制坡度，不准种植农作物。

6) 边坡稳定性

影响露天矿坑边坡稳定性的因素有自然因素和人为因素 2 类。自然因素包括水文地质条件、降雨条件等。人为因素主要是人工爆破等采矿活动的影响。本文定性地将边坡稳定性分为强、中等、弱 3 级。因事关安全，其在每种再利用中均需予以重视，否则一旦失稳将会对周边产生重大威胁。

2.1.2 自然条件

自然条件包括太阳辐照量、主导风向、灌溉条件、土源条件 4 个条件项。

1) 太阳辐照量

国家气象局根据各地的年辐射总量和年日照时数将全国太阳能资源大致分为 5 类地区（表 2）。一、二、三类地区太阳能资源的利用条件较好，四、五类地区受地理位置的影响利用条件较差。根据目前光伏电站建设单位投资水平，三类以上地区较适宜太阳能资源的开发，四类地区为较难开发地区，五类地区几乎为不可能开发地区^[34]。

表 2 中国太阳能资源分类
Table 2 Solar energy resources classification of China

| 类别 Category | 年辐射总量 Annual total radiation (MJ·m ⁻² ·a ⁻¹) | 年日照时数 Annual sunshine hours/(h·a ⁻¹) | 备注 Remark |
|----------------|---|--|--------------|
| 一类 | 6 680~8 400 | 3 200~3 300 | 最丰富 |
| 二类 | 5 852~6 680 | 3 000~3 200 | 较丰富 |
| 三类 | 5 016~5 852 | 2 200~3 000 | 中等 |
| 四类 | 4 180~5 016 | 1 400~2 200 | 较差 |
| 五类 | 3 344~4 180 | 1 000~1 400 | 最差 |

2) 主导风向

废弃露天矿坑用作垃圾填埋场时，主导风向是一个至关重要且不可改变的条件。生活垃圾填埋场、一般工业固体废物贮存、处置场都应设在工业区和居民集中区主导风向下风向。若废弃露天矿坑位于上风向，则可直接排除用作垃圾填埋场。

3) 灌溉条件

在农业生产型、生态保护型再利用模式中，幼苗的前期培育和花卉、苗木的生长期均需要良好的灌溉条件。干旱时，灌溉农业需通过灌溉以保证农业的正常生产。本文将灌溉条件定性地分为：水源有保证，设施完备；水源有保证，设施不完备；水源无保证，设施无保证。

4) 土源条件

由于露天开采将上覆土层全部剥离，故与耕地、林地、草地相关的再利用需考虑土源条件。本文将土源条

件定性地分为场内存土、周边客土、外购土 3 个推理条件。值得一提的是, 回填再利用难度较大, 经济性较低, 通常需要大量土源, 但其是一种永久性的造地行为, 且可消除一些潜在的地质灾害风险。

2.1.3 其他条件

其他条件是除矿坑条件、自然条件外的对废弃露天矿坑再利用影响较为显著的条件, 包括交通状况、距居民点距离、劳动力资源、技术条件、思想文化、公众参与、与城市的关系 7 个条件项。

1) 交通状况

交通状况对旅游文娱型、社会服务型、新兴产业型再利用模式影响较大。交通状况与交通线路的类型以及交通网的密度、结构相关。交通线路主要有公路、铁路、空中航线等; 交通网的密度即区域内单位面积交通线路的长度, 结构指通达性和连接性等。本文将交通网的密度、结构合为可达性, 分为区内可达和区外可达。区内可达指满足区域内活动所需的交通设施, 区外可达指满足到达区外目的地或目的地周边交通枢纽所需的交通设施。由此, 交通状况分为: 交通线路类型多样, 区外可达性高; 交通线路类型较为单一, 区内可达性高; 交通工具类型单一, 区内可达性低。

2) 距居民点距离

考虑到选址、通勤等因素, 距居民点的距离需在可接受范围内, 如农业种植的耕作半径要尽量小。根据调研情况, 大多数农民认为可接受的最大耕作半径为 2 000 m。垃圾填埋场选址时需考虑周边人畜栖居地的卫生环境状况及有毒物质的扩散距离。随着垃圾处理技术和设备的进步, 我国对生活垃圾填埋场距居民点集中区距离从 1989 年的 800 m 变为 1997 年的 500 m, 再到现行的无统一的限制距离, 依据环境影响评价结论确定, 经当地环境保护行政主管部门批准即可^[35]。但在实际生活中, 存在着因周边居民认为填埋场距离“过近”而引发的冲突。综上, 本文将垃圾填埋场距居民点集中区的最小距离设为 1 000 m。

3) 劳动力资源

在废弃露天矿坑的再利用中, 不同模式对劳动力质量和数量的需求不同。劳动密集型产业需要的劳动力数量较多, 技术密集型产业对劳动力自身能力要求较高。本文将定性地分为供大于需、供需平衡、供小于需 3 个推理条件。

4) 技术条件

废弃露天矿坑再利用所依赖的技术手段大体分为 2 个方面: 一是与废弃露天矿坑再利用相关的工程技术, 二是提高资源利用率的技术。在选择再利用方式时, 要充分考虑所需技术的成本和可获得性, 实现相关技术及技术手段的供求平衡, 才能为再利用提供强大的技术支撑。本文将之定性地分为可达、部分可达和不可达 3 个推理条件。其中, 不可达主要指一些世界性难题, 部分可达指整体中有个别技术需要攻坚, 可达指技术已相对成熟。

5) 思想文化

对于公墓、寺庙等风俗、信仰指向较强的再利用方

式, 思想文化是必须考虑的条件。近年来, 随着国家的提倡和呼吁, 绿色生态节地葬在大城市逐渐推广, 为少数人所接受。但受传统文化的影响, 中国大多数地区尤其是经济较落后的地区依然实行土葬, 思想文化的包容性较弱。其次是宗教信仰, 一个地区如果有相关的宗教文化和一定的信仰人群, 方可考虑此类再利用, 否则优先排除。

6) 公众参与

为了维护利益相关者的权益, 在废弃矿坑再利用决策阶段需加强公众参与, 尤其是在社会冲突易发的领域, 如垃圾填埋场、发电站的选址等, 规避不必要的风险。本文将其分为多数同意、少数同意、都不同意 3 个推理条件。少数同意的情况下可以先争取再作决策, 都不同意的情况下, 则应改变计划。

7) 与城市的关系

从废弃矿坑与城市的关系看, 废弃矿坑可分为 3 种: 城区型、城郊型、远离城市型^[36]。一般情况下, 离城市越近, 可利用资源、劳动力、社会经济、科学技术等条件就越优越。但从实际角度出发, 位于城市内部的废弃露天矿坑并不多见, 如若存在, 也是城市扩张的结果, 具有较高的土地价值和开发潜力。城郊型废弃矿坑次之, 远离城市型区位优势明显。从某种意义上看, 废弃露天矿坑的位置从很大程度上决定了其再利用模式, 如旅游文娱型对区位的要求较高, 社会服务型不能离城市过远等。

综上所述, 废弃露天矿坑再利用方式推理条件如表 3 所示。

2.2 推理规则

推理规则是以目标为导向的推理条件的有机组合。本文以废弃露天矿坑再利用方式选择为目标, 对推理条件进行组合, 形成了推理规则表 (表 4)。在推理规则表中, 条件间的“,”表示“且”, 即所列条件均需考虑并满足; 条件中的“/”表示“或”, 即满足其一即可; 条件前的“not”表示“非”, 即需满足与此相反的条件。此外, 只标注条件序号表示该推理条件存在不确定因素, 需视情况而定, 如灌溉条件只标注了条件序号 9, 表示用作雨养农业时不考虑此条件, 用作灌溉农业时才需考虑水源和灌溉设施; 在光伏发电基地中, 矿坑深度只标注了条件序号 4, 是因为随深度的增加是否会影响光照条件, 要视废弃矿坑规模、所在地区太阳高度角等实际情况而定。

2.3 推理思路

推理规则运用的总体思路是: 从限制性出发, 优先排除限制性强的再利用模式, 初步筛选出可纳入考虑范围的。本文将限制条件分为永久性限制条件和暂时性限制条件。前者指基本不可改变的, 或是改变需要付出巨大代价的条件, 包括矿坑深度、矿坑规模、矿坑积水、太阳辐照量、主导风向、与城市的关系; 具有“一票否决权”, 即如果某一关键条件的限制导致废弃露天矿坑不能用于某种模式, 则无论其它条件多么适宜, 最终还是不能用于此模式。后者指采取相关措施可加以改良的条件, 改良难度越大, 改良的相对费用越高, 则限制性越强。因此, 再利用方式选择遵循“先永久后暂时”、“先强后弱”的原则, 按照图 3 的推理顺序进行。

表 3 推理条件
Table 3 Inference conditions

| 条件类型 Conditions' type | 条件号 Conditions' number | 条件项 Conditions' item | 推理条件 Inference conditions |
|--------------------------------|---------------------------|-------------------------|---|
| 矿坑条件 Open pit conditions | 1 | 矿坑规模 | (1) 大型 (2) 中型 (3) 小型 |
| | 2 | 矿坑污染状况 | (4) I 级 (5) II 级 (6) III 级 (7) IV 级 (8) V 级 (若有积水: (9) 水质达标 (10) 水质不达标) |
| | 3 | 矿坑积水状况 | (11) >3 m (12) >0.5~3 m (13) >0~0.5 m (14) 无积水 |
| | 4 | 矿坑深度 | (15) >200 m (16) 40~200 m (17) <40 m |
| | 5 | 坡度 | (18) ≤2° (19) >2°~6° (20) >6°~15° (21) >15°~25° (22) >25° |
| | 6 | 边坡稳定性 | (23) 强 (24) 中等 (25) 弱 |
| 自然条件 Natural conditions | 7 | 太阳辐射量 | (26) 一类 (27) 二类 (28) 三类 (29) 四类 (30) 五类 |
| | 8 | 主导风向 | (31) 位于下风向 (32) 位于上风向 |
| | 9 | 灌溉条件 | (33) 水源有保证, 设施完备 (34) 水源有保证, 设施不完备 (35) 水源无保证, 设施不完备 |
| | 10 | 土源条件 | (36) 场内存土 (37) 周边客土 (38) 外购土 |
| 其他条件 Other conditions | 11 | 交通状况 | (39) 交通线路类型多样, 区内外可达性高 (40) 交通线路类型较为单一, 区内可达性高 (41) 交通工具类型单一, 区内可达性低 |
| | 12 | 距居民点距离 | (42) <1 000 m (43) 1 000~2 000 m (44) >2 000 m |
| | 13 | 劳动力资源 | (45) 供大于需 (46) 供需平衡 (47) 供小于需 |
| | 14 | 技术条件 | (48) 可达 (49) 部分可达 (50) 不可达 |
| | 15 | 思想文化 | (51) 包容性强 (52) 包容性弱 |
| | 16 | 公众参与 | (53) 多数同意 (54) 少数同意 (55) 都不同意 |
| | 17 | 与城市的关系 | (56) 城区型 (57) 城郊型 (58) 远离城市型 |

表 4 推理规则
Table 4 Inference rules

| 再利用模式 Reuse patterns | 已有/在研案例 Cases existing or in research | 推理规则 Inference rules |
|----------------------------------|--|--|
| 农业生产型 Agricultural production | 种植业 | (2) / (3), (4), (14), (17), not (22), (23), 9, (36) / (37), not (44) |
| | 畜牧养殖 | (4), (14), (17), (23), not (41) |
| | 水产养殖 | (4), (9), (11), (23), not (41), (48) |
| 生态保护型 Ecologic conservation | 生态保护基地 | (36) / (37) |
| | 水库 | (4), (9), (11), (23) |
| | 湿地 | (4), (12), (23) |
| 旅游文娱型 Tourism entertainment | 科普教育类 | (4), (14), (23), (39), not (47), (48), not (58) |
| | 建筑改造类 | (4), (14), (23), (39), not (47), (48), not (58), 寺庙附加条件 (51) |
| | 公园类 | (4), (23), (39), not (47), (48), not (58) |
| 社会服务型 Social service | 垃圾填埋 | (1) / (2), (14), (23), (31), not (41), not (42), (48), (53), not (58) |
| | 公墓 | (4), (14), (23), not (41), (53), not (58) |
| 新兴产业型 Emerging industry | 光伏发电 | (1), (14), 4, (23), (26) / (27) / (28), not (41), not (42), (48), (53) |
| | 水力发电 | (1), (9), (11), (16), (23), not (41), not (42), (48), (53) |

注：推理规则是推理条件的组合。“，”表示“且”；“/”表示“或”；“4”和“9”为存在不确定性的条件项的条件序号。其中，“4”表示矿坑深度能否影响废弃露天矿坑用于光伏发电，要考虑矿坑规模、所在地区太阳高度角等实际情况；“9”表示用作灌溉农业时考虑灌溉条件，用作雨养农业时不考虑。

Note: in the table, inference rules are combinations of inference conditions, where “，” means “and”; “/” means “or”. “4” and “9” are the conditions' numbers of conditions' items with uncertainty. “4” indicates whether the pit depth can affect the use of abandoned open pits for photovoltaic power generation base, conditions such as the pit scale and the solar elevation angle should be taken into consideration. “9” indicates that irrigation condition should be considered when the abandoned open pit is used for irrigation agriculture, and is not considered when used for rain fed agriculture.

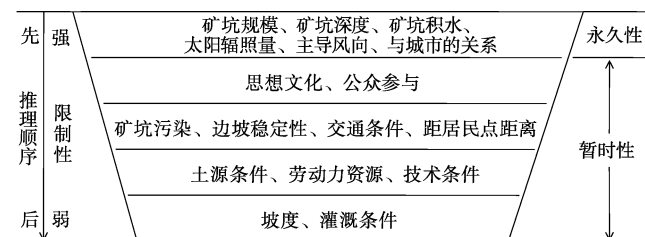


图 3 推理顺序
Fig.3 Inference order

3 结果与分析

3.1 推理结果

按照推理顺序，首先对永久性限制条件进行分析。其中，太阳能辐照量、主导风向、与城市的关系未能行使“一票否决权”，但矿坑规模、矿坑深度、矿坑积水状况对再利用方式进行了限制。该区平均日照期 2 662.8 h/a，平均太阳能辐射量 5 752 MJ/(m²·a)，根据表 2 可知属于三类地区，原则上可以进行太阳能资源的开发

2) 以平朔矿区露天矿坑为例进行实证研究, 研究证明了方法的可行性。经过初步选择, 该区可用于生态保护基地、旅游) 文娱、垃圾填埋场、光伏发电基地。决策时, 可结合现有的复垦景观、产业规划、土地利用规划、经济条件等, 将 3 个矿坑的再利用方式进行组合与协调, 避免单一化。

废弃露天矿坑的再利用是一个复杂的巨系统, 且涉及采矿、地质、农林、环境、生态、景观、建筑、工程等诸多学科与领域。因此, 本文提取的条件还有待补充和完善, 使得初步选择结果的范围进一步缩小。在此基础上, 以期建立起一个用于回答“为什么”的专家知识库以及可以简单化操作的计算机系统页面, 夯实本研究的实用性。此外, 本研究主要基于国内外已有和在研的废弃露天矿坑再利用方式进行选择, 在实际再利用中, 可以此为参考, 也可超越本文研究范畴。

[参 考 文 献]

- [1] 束文圣, 张志权, 蓝崇钰. 中国矿业废弃地的复垦对策研究(I)[J]. 生态科学, 2000, 19(2): 24—29.
Shu Wensheng, Zhang Zhiquan, Lan Chongyu. Strategies for restoration of mining wastelands in China(I)[J]. Ecologic Science, 2000, 19(2): 24—29. (in Chinese with English abstract)
- [2] 孙琦, 白中科, 曹银贵, 等. 特大型露天煤矿土地损毁生态风险评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 278—288.
Sun Qi, Bai Zhongke, Cao Yingui, et al. Ecological risk assessment of land destruction in large open-pit mine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(17): 278—288. (in Chinese with English abstract)
- [3] 王瑞锋, 钟煜豪. 贵州福泉滑坡: 矿坑积水形成“灾害链”[J]. 农村. 农业. 农民(A 版), 2014, 9: 41—43.
- [4] 陈百明, 谷晓坤, 张正峰, 等. 土地生态化整治与景观设计[J]. 中国土地科学, 2011, 25(6): 10—14.
Chen Baiming, Gu Xiaokun, Zhang Zhengfeng, et al. Land ecological consolidation and landscape design[J]. China Land Science, 2011, 25(6): 10—14. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王永生, 郑敏. 废弃矿坑综合利用[J]. 中国矿业, 2002, 11(6): 65—67.
Wang Yongsheng, Zheng Min. Reutilization of abandoned pits from mining activities[J]. China Mining Magazine, 2002, 11(6): 65—67. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王永生. 利用废弃矿坑进行旅游开发[J]. 西部资源, 2007(1): 21—22.
- [7] 李韧杰. 湖南某铀矿退役矿坑水的治理[J]. 铀矿冶, 2002, 21(3): 146—150.
Li Renjie. Decommissioning management of pit water at an uranium mine in Hunan Province[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2002, 21(3): 146—150. (in Chinese with English abstract)
- [8] 杜玉龙, 韩英, 王同荣, 等. 利用矿坑水发电在云南东川因民矿区的意义[J]. 金属矿山, 2012, 41(1): 139—143.
Du Yulong, Han Ying, Wang Tongrong, et al. Meaning of development and utilization of mine water for generating electricity in Yinmin mining area, Dongchuan, Yunnan[J]. Metal Mine, 2012, 41(1): 139—143. (in Chinese with English abstract)
- [9] 周京, 张华. 大连石灰石矿坑边坡绿化植物种类选择[J]. 环境科学导刊, 2012, 31(2): 31—34.
Zhou Jing, Zhang Hua. Plant species selection for greening the mine slope in Dalian limestone quarries[J]. Environmental Science Survey, 2012, 31(2): 31—34. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张启文, 黄克斌, 揣新. 凹山采场高陡边坡生态再造实践[J]. 现代矿业, 2015(10): 155—157, 165.
Zhang Qiwen, Huang Kebin, Chuai Xin. Practice of the ecological reconstruction of high and steep slope in Aoshan stope[J]. Modern Mining, 2015(10): 155—157, 165. (in Chinese with English abstract)
- [11] 刘昌华, 胡振琪. 闭矿规划及其意义[J]. 中国矿业, 2003, 12(12): 72—75.
Liu Changhua, Hu Zhenqi. Mine closure planning and its significance in China[J]. China Mining Magazine, 2003, 12(12): 72—75. (in Chinese with English abstract)
- [12] 韩博, 桂琳, 杨俊国. 澳大利亚基于风险评估的一体化闭矿规划的编制[J]. 煤炭技术, 2011, 30(9): 3—4.
Han Bo, Gui Lin, Yang Junguo. Compilation of Australia's integrated mine closure planning based on risk assessment [J]. Coal Technology, 2011, 30(9): 3—4. (in Chinese with English abstract)
- [13] 蓝楠, 刘中兰. 国外废弃矿区闭矿立法对我国的启示[J]. 中国国土资源经济, 2014, (12): 56—59, 40.
Lan Nan, Liu Zhonglan. Some enlightenment drawn from foreign countries' legislation regarding closing abandoned mines [J]. Natural Resource Economics of China, 2014, (12): 56—59, 40. (in Chinese with English abstract)
- [14] 翁奕城, 王世福, 周可斌. 城市废弃采石场改造利用与生态设计: 以广州番禺区六大连湖主题公园为例[J]. 华中建筑, 2012, 30(7): 113—116.
Weng Yicheng, Wang Shifu, Zhou Kebin. Renovation and ecological design of urban abandoned quarry: A case study of Six-Lake ecological park in Panyu, Guangzhou[J]. Huazhong Architecture, 2012, 30(7): 113—116. (in Chinese with English abstract)
- [15] 钟华, 林春模, 姜俊红. 废弃矿坑型水库规模确定的探讨[J]. 广东水利水电, 2013(8): 40—42.
- [16] 刘江黎, 吴兵. 矿坑中的佛教世界: 蚌埠白石山栖霞寺景观设计[J]. 南方建筑, 2014(4): 84—87.
Liu Jiangli, Wu Bing. The world of buddhism in mine: Landscape design of Qiyan Temple in Bengbu Baishi Mountain[J]. South Architecture, 2014(4): 84—87. (in Chinese with English abstract)
- [17] 三澍. 废弃矿坑复垦创新深度思考[J]. 科技与企业, 2016(1): 109—110, 114.
- [18] 朱育帆, 姚玉君, 孟凡玉. 辰山植物园矿坑花园, 上海, 中国[J]. 世界建筑, 2015(3): 52—55.
Zhu Yufan, Yao Yujun, Meng Fanyu. Quarry Garden in Chenshan Botanical Garden, Shanghai, China[J]. World Architecture, 2015(3): 52—55. (in Chinese with English abstract)
- [19] Meyer E K. The public park as avante-garde (Landscape) architecture: A comparative interpretation of two Parisian Parks, Parc de la Villette (1983-1990) and Parc des Buttes-Chaumont (1864-1867) [J]. Landscape Journal, 1991, 10(1): 16—26.
- [20] Preston D. The Story of Butchart Gardens[M]. Victoria: Highline Publishing, 1996.
- [21] 崔庆伟. 美国斯特恩矿坑公园的景观改造再利用研究[J]. 中国园林, 2014(3): 74—79.
Cui Qingwei. Research on landscape architectural reclamation and reuse of stearns quarry park in US [J]. Chinese Landscape Architecture, 2014(3): 74—79. (in Chinese with English abstract)
- [22] Stevens J. Cole's Pits [J]. Nature, 1884, 30(782): 607.
- [23] Davis B N K. Chalk and limestone quarries as wildlife habitats[J]. Environmental Geochemistry and Health, 1979, 1(2): 48—56.
- [24] Otchere F A, Veiga M M, Hinton J, et al. Transforming open mining pits into fish farms: Moving towards sustainability [J]. Natural Resources Forum, 2004, 28(3): 216—223.
- [25] Soltanmohammadi H, Osanloo M, Rezaei B, et al. Achieving to some outranking relationships between post mining land

- uses through mined land suitability analysis[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2008, 5(4): 535–546.
- [26] Soltanmohammadi H, Osanloo M, Bazzazi A A. Deriving preference order of post-mining land-uses through MLSA framework: application of an outranking technique[J]. *Environmental Geology*, 2009, 58(4): 877–888.
- [27] Bascetin A. A decision support system using analytical hierarchy process (AHP) for the optimal environmental reclamation of an open-pit mine[J]. *Environmental Geology*, 2007, 52(4): 663–672.
- [28] 刘慧芳, 刘友兆, 毕如田, 等. 基于用地竞争的矿业废弃地再利用用地类型判定[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(10): 258–266.
Liu Huifang, Liu Youzhao, Bi Rutian, et al. Reuse type judgment of mining wasteland based on land use competitiveness[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(10): 258–266. (in Chinese with English abstract)
- [29] 高怀军. 矿业城市采矿废弃地和谐生态修复及再利用研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
Gao Huaijun. Research on Harmonious Ecological Restoration and Reuse of Mining Wasteland in Mining Cities[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [30] Bangian A H, Ataei M, Sayadi A, et al. Optimizing post-mining land use for pit area in open-pit mining using fuzzy decision making method[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2012, 9(4): 613–628.
- [31] 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.
- [32] 高文文, 白中科, 余勤飞. 煤矿工业场地土壤重金属污染评价[J]. *中国矿业*, 2015, 24(8): 59–64.
Gao Wenwen, Bai Zhongke, Yu Qinfei. Evaluation of soil heavy metal pollution in coal mine industrial site[J]. *China Mining Magazine*, 2015, 24(8): 59–64. (in Chinese with English abstract)
- [33] 刘抚英. 中国矿业城市工业废弃地协同再生对策研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.
Liu Fuying. Research on the Co-regeneration Strategies of Industrial Wasteland in Chinese Mining Cities[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [34] 徐振兴, 石景晨, 周平. 大型并网光伏电站选址分析[J]. *中国市场*, 2016(41): 67–68.
- [35] 华冰群. 生活垃圾填埋场卫生防护距离标准的冲突与选择[J]. *环境保护*, 2009, 424(14): 43–45.
- [36] 常江, 杨波. 偏远型资源枯竭矿区土地再利用研究[C]//中国城市规划学会. 生态文明视角下的城乡规划: 2008中国城市规划年会论文集. 大连: 大连出版社, 2008: 1–9.

Reuse ways selection of abandoned open pits based on inference conditions and rules

Gao Wenwen^{1,2}, Bai Zhongke^{2,3*}

(1. School of Public Administration and Policy, Renmin University of China, Beijing 100872, China;

2. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

3. Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China)

Abstract: Abandoned open pits are leftover waste lands after the closure of open-pit mining, and their number and size continue to increase. They have destroyed large quantities of land in the form of excavation and have different degrees of negative impact on ecological security and landscape. Therefore, under the serious population-land-economy contradiction background in China, the reuse of abandoned open pits is necessary and is an important aspect of green development and circular development. In order to better reuse abandoned open pits, the existing case studies of abandoned open pits reuse were summarized and were divided into agricultural production pattern, ecological conservation pattern, tourism entertainment pattern, science education pattern and social service pattern, and each reuse pattern included different reuse ways. Then a method of selecting reuse ways from the perspective of constraints was constructed, which was based on inference conditions and inference rules. The method selected 3 categories of restrictive conditions, which were open pit conditions, natural conditions and other conditions. To be specific, open pit conditions included size, pollution, slope stability, water accumulation in pit, depth and slope; natural conditions included solar radiation, dominant wind direction, irrigation and soil source; other conditions included traffic, distance from settlements, labor resources, technology, ideology and culture, public participation, and regional position relative to urban. Through expert consultation, literature extraction and specification inquiry, 58 inference conditions and 13 inference rules of reuse ways were formed. At last, the restrictive conditions were divided into permanent restrictions and temporary restrictive conditions. The former had strong restrictions while the latter had weak restrictions. The inference order was proposed according to principles of “permanently restrictive conditions first”, “strongly restrictive conditions first”, by which some strongly restrictive reuse ways could be ruled out quickly. Applying the method, reuse ways of 3 open pits in Pingshuo coal mine were selected. The results indicate that: (1) The method based on inference conditions and inference rules can select reuse ways of abandoned open pits. (2) By a preliminary inference, the study area can be used as ecological conservation area, refuse landfill, tourism entertainment area and photovoltaic power generation base, and in the decision-making process, these 4 types of reuse ways for 3 pits can be combined and coordinated to realize comprehensive reuse, considering the existing reclamation landscape, industrial planning, land use planning and economic conditions. (3) The decision result needs more detailed analysis and appraisal of multiple schemes, which is usually a subset of the inference results, may also be empty. The research can provide a reference for the reuse of open pits which have been closed or will be closed. However, the reuse of abandoned open pits is a complex and huge system, involving a variety of subjects and fields such as mining, geology, agriculture, forestry, environment, ecology, landscape, architecture and engineering. Therefore, conditions in this paper may need to be supplemented. In addition, this research is mainly based on reuse ways that are existing or in research worldwide. In practice, we can refer to it, and can go beyond the scope of this study as well.

Keywords: land use; reclamation; coal mine; open pit; reuse; wasteland; inference; selection