

# Selection of Phytoremediation Species for Heavy Metal Polluted Soil in Mining Area

Lei Lv, Jinyan Geng, Yunxin Huang, Kun Jia, Wenting Dai

School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining & Technology, Xuzhou Jiangsu, 221116, China

Email: 1024523865@qq.com

## Abstract

With the increase of mineral resources exploitation, the heavy metal pollution of the soil in mining area is gradually increasing. Phytoremediation of polluted soil is an important and emerging method to deal with the heavy metal pollution in soil. Based on the traditional methods of phytoremediation in heavy metal polluted soils, this paper analyzed all the methods of the selection of phytoremediation species, and summarized the common selection indexes and process; combining with the characteristics of heavy metal pollution of soils in mining area, proposed appropriate selection requirements to phytoremediation; determined the selection process of phytoremediation species in mining area. It provides theoretical support and promotion to the phytoremediation of heavy metal polluted soils in mining area.

**Keywords:** Mining Areas; Soil Remediation; Heavy Metal Pollution; Phytoremediation; Selectionmethod

## 矿区土壤重金属污染修复植物的筛选\*

吕蕾, 耿金燕, 黄云鑫, 贾坤, 戴文婷

中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏省徐州市221000

**摘要:** 随着矿产资源开采力度的加大, 矿区土壤的重金属污染问题逐渐加重。土壤重金属污染的植物修复是目前应对土壤重金属污染问题的重要和新兴手段。本文在以往常用的传统土壤重金属污染修复植物筛选方法的基础上, 分析出各种方法对修复植物的筛选要求, 指出常用的筛选指标并总结筛选流程; 结合矿区土壤重金属污染的特点, 对修复植物的筛选提出适宜的筛选要求; 确定矿区土壤重金属污染修复植物筛选的流程, 提供利用层次分析法建立筛选指标体系的思路。从而为植物修复在矿区土壤重金属污染中的进一步应用与推广提供理论支持。

**关键字:** 矿区; 土壤修复; 重金属污染; 修复植物; 筛选方法

## 引言

近年来, 随着我国经济飞速发展, 城市化与工业化进程加快, 煤炭等资源的开采力度也大大加强, 工矿企业废水废气等危险废弃物的肆意排放对土壤、水体等环境都造成了严重的破坏。据统计, 目前我国的耕地重金属污染非常严重, 受重金属污染的耕地有1000万公顷, 占18亿亩耕地的8%以上。而其中, 受采矿污染的土地面积200余万公顷, 并且每年以3.3万到4.7万公顷的速度递增<sup>[1]</sup>。土壤的洁净与安全密切影响着人类的温饱以及身体健康。由此可见, 矿区土壤重金属污染已成为我国现阶段待解决的重要问题。

土壤重金属的修复有物理修复、化学修复、微生物修复及植物修复等方法, 其中植物修复从修复效果、景观改善、经济适宜等方面都显现出了巨大的优势, 具有广阔的研究前景。植物修复方法是指利用一些特定植物将土壤中的重金属通过富集、转运等作用由土壤转移到植物的地上部分, 从而通过收获植物以

\*基金资助: 中国矿业大学大学生创新创业基金立项大学生创新项目 (201522); 国家自然科学基金面上项目 (51374208)。

达到净化土壤的作用<sup>[2]</sup>。而其中对于修复植物筛选及应用等方面的研究是重点也是难点。当前国内外发现的超富集植物达700多种，且广泛分布于约50个科<sup>[3]</sup>，但绝大多数为Ni的超富集植物，且一般一种植物只单一对一种重金属的吸收效果显著，有的虽然已经用于实践修复，但大多数植物的生物量小，生长缓慢，对环境的要求较为严苛，难以真正投入实践使用。其中矿区作为土壤重金属污染的高发敏感区域，是一个较为特殊的人为扰动生态系统，拥有特殊的土壤环境及污染特点，因此对修复植物也有其不同于其他土壤的特殊要求。

因此，本文借助以往土壤重金属修复植物筛选与应用的研究成果，结合矿区的实际要求，总结矿区重金属污染土壤对修复植物的筛选要求，为以后在具体矿区因地制宜筛选修复植物并投入应用提供思路，为植物修复矿区重金属污染土壤方法的进一步完善和推广提供理论支持。

## 1 一般重金属污染土壤修复植物的筛选方法

从20世纪80年代问世以来，植物修复技术迅速发展，修复植物的筛选方法的研究也有了许多成果<sup>[4-5]</sup>。目前，土壤重金属修复植物的筛选主要有两个阶段。一是通过实地调查、经验总结等方法，选取自然界中天然存在的植物种类最为可能具有修复效果的备选植物；二是通过实验室培育的方法，对从自然界中选取的备选植物进行进一步的培养，并进行相应的重金属胁迫的实验，最终找到达到实验要求的修复植物。现对目前较为成熟的几种方法进行评述。

### 1.1 方法简述

#### 1.1.1 野外调查法

野外调查法是目前国内外常用的一种超富集植物的筛选方法。它是指在已受重金属污染的区域及其附近进行野外调查，通过目测及科学的统计方法，观察植物群落的特点，根据群落中物种优势度大小，选出可能具有修复效果的植物种群<sup>[6]</sup>。通过这种方法，已经成功筛选出了一些超富集植物。Wenzel等<sup>[7]</sup>人利用野外调查法在奥地利的阿尔卑斯矿山上筛选出了重金属Pb的超富集植物，十字花科植物*Biscutella leavigata*和石竹科植物*Minuartia verna*。束文生等<sup>[8]</sup>在铜矿山附近调查发现，鸭跖草是Cu的超富集植物。韦朝阳等<sup>[9]</sup>在湖南省高砷区进行一系列的野外调查发现，与一种凤尾蕨属植物大叶井口边草(*Pteris cretica*)对砷也具有明显的富集功能。这种方法的优点已在多次的实践中得到检验，生长在已受重金属污染地区的优势种能够很好地适应本地区受污染的土壤环境，具有较强的适应能力。此外，在污染地区筛选，更具有针对性，缩小了筛选范围，增加了找到修复植物的可能性，减小了筛选的工作量。

#### 1.1.2 植物特性法

植物特性法是一种带有经验总结性的筛选方法，它是根据植物所表现出的一些特性，通过以往筛选修复植物的经验或者与已经发现的各种修复植物的特性对比，从而确定出一些特殊的植物作为筛选的对象，或是根据特殊地域等因素对植物某些特性的特殊要求确定的筛选对象<sup>[2]</sup>。李翠兰等<sup>[10]</sup>通过研究8种花卉植物对Pb的富集发现了，当Pb的浓度为1000mg/L时，紫茉莉(*Mirabilis jalapa*)和紫花玉簪(*Hosta ventricosa*)的地上部最大Pb含量分别达1321mg/kg和1033mg/kg，具备对Pb的超富集特性。魏树和等<sup>[11]</sup>以杂草为研究对象，通过盆栽模拟试验和小区试验，从20科54种杂草植物中筛选出Cd的超富集植物龙葵(*Solanum nigrum*)。郭晓方等<sup>[12]</sup>以农作物为研究对象，选取了8个品种的玉米分别研究其重金属Cd、Pb、Zn和Cu积累与转运发现，粤糯1号对Cd、Pb、Zn和Cu具有超富集特性。总之，这种方法结合了地域或生产需要的特定要求，最近几年逐渐被广泛应用。

#### 1.1.3 土壤种子培养法

土壤种子培养法是在野外调查法基础上，提出的一种新的筛选修复植物的方法<sup>[13]</sup>。土壤种子库是指存

在于土壤表层掉落物和土壤中全部活性种子的总和。土壤种子培养法就是将含有丰富种子数量和种类的土壤作为研究对象，再通过重金属浓度梯度实验等方法对土壤种子库中筛选出的高活性种子进行培育筛选得到修复植物。目前此种方法的应用还不是十分广泛，成功的具体实例也较少。Zhang等<sup>[2]</sup>通过对土壤种子初步筛选培育，从9种植物中发现少花龙葵(*Solanum photeinocarpum*)对镉具有极强的耐受性和富集效果,然后通过实验室培养，并进行浓度梯度试验验证了少花龙葵为Cd的超富集植物，在土壤Cd浓度为60mg/kg时，生物量与未污染时没有显著差异，其根、茎和叶分别富集473mg/kg、215mg/kg 和251mg/kg。土壤种子培养法较野外调查法而言，在植物的丰富度上有了很大的改进，能够提高筛选效率，也便于发现更多野外调查法可能遗漏的物种，因此有很好的研究利用前景。

#### 1.1.4 重金属浓度梯度法

重金属浓度梯度法是筛选土壤重金属污染修复植物的重要实验室方法。即对每种备选植物，设置不同重金属浓度梯度，运用水培和沙培的培育方法进行重金属胁迫实验，观察植物种子的萌发情况或是植株的生长情况，从而得到植物对重金属的耐受程度及对重金属的富集效果。这种方法能够较为准确地确定出植物对于不同浓度重金属的耐受与吸收效果，定量测出不同植物对不同浓度重金属的耐受与富集情况，是目前确定植物修复能力的主要实验方法，野外调查法、特殊植物法还有土壤种子库法都需结合重金属浓度梯度法的实验才能最终筛选出有效的修复植物。

### 1.2 筛选指标及方法流程

#### 1.2.1 常用筛选指标

已有的一般土壤重金属污染修复植物的筛选，都是以发现某种特定污染重金属新的超富集植物，以及实验验证修复植物富集特性和耐受性为目的的，因此，流程与方法也都是基于此展开的。目前常用富集指数和转运指数表示植物的富集效果。而植物的耐受性一般通过植物的生物量、生长状况等间接指标衡量，Wilkins<sup>[14]</sup>早在1978年始也提出可以用耐性系数来表示植物对重金属的耐受情况。

$$\text{吸收系数} = \frac{\text{地上部重金属含量}}{\text{基质中重金属含量}}$$

$$\text{转运系数} = \frac{\text{地上部重金属含量}}{\text{根部重金属含量}}$$

$$\text{耐性指数}(\%) = \frac{\text{重金属含量处理中植物干重生物量}}{\text{对照中的植物干重生物量}} \times 100$$

#### 1.2.2 一般筛选流程

一般土壤重金属污染修复植物的筛选流程较简单，分为前期工作、实验筛选及结果分析三部分，如图1所示：

明确研究目标，即确定研究的重金属种类及植物种类是实验筛选的基础。植物种类的确定需要利用野外调查、土壤种子培养或植物特性等方法。实验筛选利用重金属浓度梯度法培养植物，再利用原子吸收光谱仪等方法测定并计算植物的吸收系数、转运系数等，从而筛选出对目标重金属具有超富集特性的植物。

一般土壤重金属污染修复植物的筛选重点在于筛选出对某种重金属的超富集植物。针对合适的备选植物运用一般性方法得到筛选指标值是修复植物筛选的核心步骤,因此筛选流程中前期工作及结果分析都是服务于这一核心步骤的。

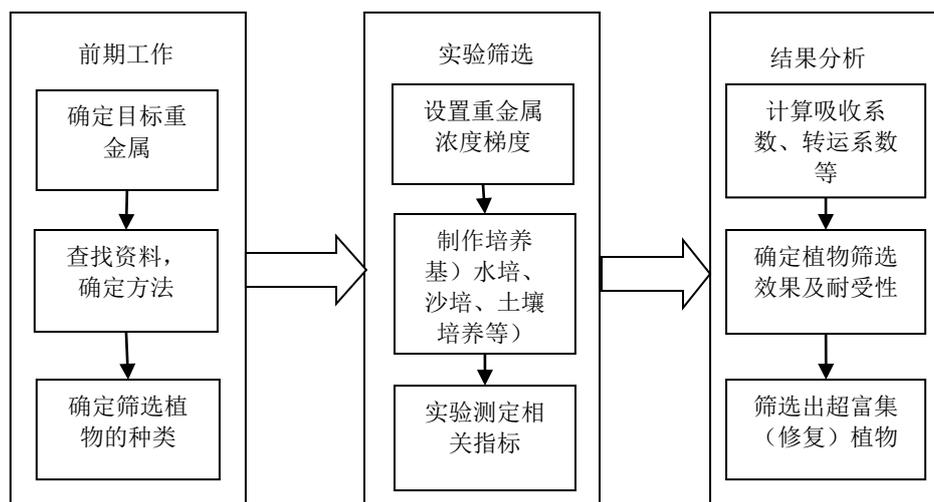


图1 一般重金属污染土壤修复植物筛选概念模型

## 2 矿区土壤重金属污染特点

矿区土壤重金属污染具有复杂性。矿区的主要重金属污染种类往往不是单一的一类，而是多种重金属污染复合作用的结果。这是由金属资源往往都是伴生的客观现实所决定。如徐州矿区的土壤重金属污染评价的结果当中，镉、铅、锌三种重金属污染比较严重。并且由于地域差异及矿产种类的不同，不同矿区土壤中重金属的种类不尽相同，目前未发现可寻的规律和共性。由此可见，矿区的重金属污染状况具有复杂性。

矿区土壤重金属污染程度严重。一般土壤的重金属污染都是一个积累的过程。其来源一般为工业废水废气的排放，汽车尾气的排放及农业灌溉与施肥三方面<sup>[9]</sup>。这三种来源对于土壤重金属的污染都是一个缓慢积累的过程，因此污染的程度在一定时期内不易积累过重。而矿区土壤的重金属污染是一个突变的过程，矿区土壤污染主要是由于矿产资源开采、加工、利用过程中，采矿活动及其相关的电力、冶金等产业的发展，导致输入矿区土壤污染重金属的速度和量超过了土壤环境对该物质的承载和容纳能力，使土壤原有的性质发生变化<sup>[15]</sup>。研究表明，矿山酸性废水和固体废物污染是土壤中重金属的主要来源。这种污染是突变的、大量的，因此对矿区土壤环境在内的矿区生态环境的破坏也是难以逆转的。此外，在矿物开采、运输、排水等过程中，矿尘的污染也是矿区土壤中重金属污染物的一个来源<sup>[16]</sup>。

矿区土壤环境条件恶劣。由于人类活动的影响，长期的矿产资源开采导致矿区土壤的挖损、压占、占用、沉陷等，使得矿区土壤环境受到极大地破坏。而这种破坏主要体现在两个方面：其一，矿区地表形态破坏严重。矿区原地貌是一个十分脆弱的生态系统，剧烈采矿活动的扰动使得矿区地表植被破坏，地面沉降、地表裂缝等。原生景观不复存在，地表形态变化显著，不再具备适宜作物生长的物理条件。其二，矿区土壤的肥力必然产生大幅度的下降。人为扰动破坏矿区原本的土壤结构，土壤耕作层损坏，土壤中的水资源被污染，氮、磷、钾等营养元素流失，导致土壤肥力大大降低。

矿区土壤污染具有区域蔓延性。矿区土壤中重金属污染不仅仅集中在进行采矿活动的区域，而是在一定区域范围内呈扩散趋势分布。在土壤中土壤动物、微生物以及土壤中水分流动等因素的影响下，土壤中的重金属会发生一定程度的迁移，造成更大区域内的污染，导致危害进一步扩大。

## 3 矿区土壤重金属污染修复植物筛选方法

### 3.1 筛选要求

根据矿区土壤重金属污染的特点可以发现，一般土壤重金属污染修复植物的筛选方法对于矿区土壤重金属污染植物修复的应用有很大的通用性，但仍存在着一些不适宜。因此，针对矿区特殊土壤条件，并结

合一般土壤重金属污染的筛选方法，筛选植物的新要求。

矿区土壤重金属污染土壤修复植物的筛选遵循一般土壤重金属修复植物筛选的基本规律，也就是首先要对植物的富集效果与耐受程度进行筛选，这是修复植物在污染土壤中正常存活并吸收土壤重金属的基础保证。此外，矿区不同特点又对修复植物的筛选有不同的要求。

矿区重金属污染的复杂性要求在对修复植物的筛选过程中应当考虑植物对于多种重金属的综合富集程度以及综合耐受程度。而富集指数、转运指数以及耐受指数的定义都是基于一种植物对单一重金属吸收及耐受的实验指标定义的，因此，不能很好地反映出矿区污染土壤对修复植物筛选的要求。所以，在矿区修复植物的筛选过程中，应当结合矿区情况适当修改实验设计，在培养基中添加与矿区土壤重金属浓度与种类等相同的重金属试剂，使实验更能模拟真实的矿区土壤修复状况，进而测定备选植物对多种重金属的吸收指数或转运指数，得到一个植物对矿区污染重金属的综合性富集指标，再通过观察和测定植物对各种重金属综合的耐受性，由此确定矿区重金属污染土壤修复植物的富集效果及耐受性。

矿区恶劣的土壤环境，尤其是土壤肥力低下会影响修复植物的正常生长，从而使修复重金属污染的目的无法达到。因此，在筛选修复植物时除了考虑植物对重金属的耐受能力还要考虑植物对土壤的肥力要求。通过确定植物的各项肥力指标范围，对比具体矿区的土壤肥力状况，筛选出适合用于矿区土壤重金属修复的植物。

矿区土壤重金属污染的区域蔓延性要求在治理土壤重金属污染时控制污染重金属向周边区域的迁移。因此，我们可以在修复植物的筛选指标中加入修复植物对重金属迁移的控制指标，筛选出对重金属迁移具有一定抑制效果的植物，以限制矿区重金属污染土壤面积的进一步扩大，控制治理范围。

另外，为恢复矿区生态环境的稳定，矿区土壤重金属污染的植物修复常常作为矿区土地复垦项目的一个环节来进行，有其特定的修复目标。因此，为保证整个项目的进展，往往对植物修复的年限有一定的要求。此外，有时也会对修复植物对景观的改善有一定的要求。所以，根据实际需要，也应考虑将修复植物的修复周期、景观生态价值、社会经济效益等作为筛选的要求。

综上所述，矿区土壤重金属污染的植物修复工作对于修复植物的筛选指标的要求往往是综合的、复杂的，且会因矿区的具体情况而有所变化，很难确定出十分具体而又一成不变的筛选要求体系，但筛选矿区土壤重金属污染修复植物的流程基本一致，且植物自身的性质具有一定的固定性。因此，可以通过了解不同矿区的实际情况，补充对修复植物的要求，将植物对多种重金属的富集、耐受情况、对肥力的要求、修复周期、景观生态价值、社会经济效益等客观指标根据矿区具体修复目标建立筛选评价体系，结合一般土壤重金属污染修复植物的筛选方法，确定一般性的矿区污染土壤修复植物筛选流程，从而完善矿区土壤重金属污染修复植物的筛选方法。

## 3.2 筛选流程及筛选指标体系

### 3.2.1 筛选流程

一般的土壤重金属污染植物的筛选重点侧重于对植物吸收重金属和耐受重金属情况的筛选，特定性不强。现结合一般土壤重金属污染修复植物的筛选方法及矿区重金属污染土壤对修复植物筛选的特殊要求，提出矿区土壤重金属污染修复植物的筛选流程。

根据矿区土壤的特殊性，类比一般土壤重金属污染修复植物筛选流程，将整个筛选流程仍分为筛选前期工作、实验筛选过程、筛选评价及结果验证三个阶段。

筛选前期工作阶段，通过对矿区土壤污染及受破坏情况的分析评价，掌握矿区污染重金属的种类和污染程度，以及大致土壤肥力的情况，并根据评价结果制定修复目标。修复目标应包括对矿区土壤修复后的重金属污染的修复要求、达到修复目标的年限要求、还有地表覆盖绿量等其他方面的要求。根据修复目标的具体要求确定筛选因子，并且赋予权重，建立起适合矿区的筛选体系。

实验筛选阶段，运用传统的一般土壤重金属修复植物筛选方法进行初步筛选，然后通过模拟矿区污染土壤环境制作实验筛选所需的培养基（考虑重金属污染情况及土壤肥力状况等），将矿区具体土壤情况加入实验筛选过程中，并测定相关筛选指标的值。

在最后分析验证阶段，根据实验得到数据与已建立的筛选评价体系对植物的修复效果数据进行分析，筛选出最符合要求的修复植物。此外，通过进一步验证实验，检验筛选结果。

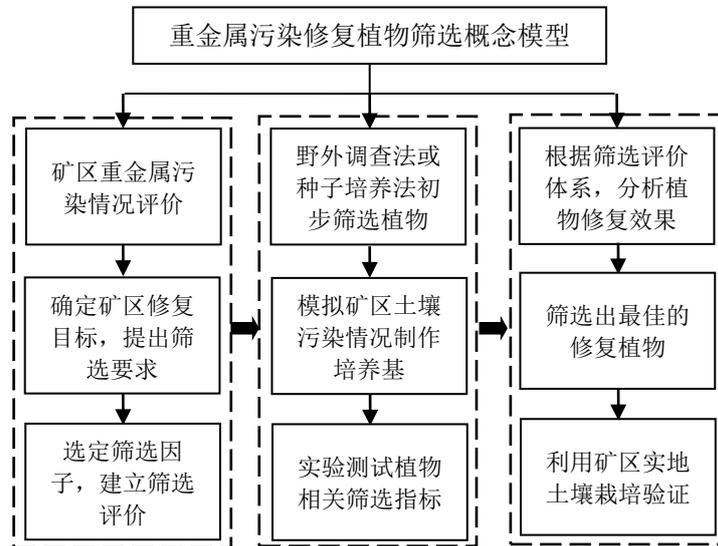


图2 矿区重金属污染土壤修复植物筛选概念模型

### 3.2.2 筛选指标体系建立

由于矿区植物修复工程的目标是涉及多方面的，且不同的矿区不同的修复目标其筛选指标及权重都无法一概而论，因此，在筛选矿区修复植物的时候，根据实际情况建立具体的指标分析体系对于整个筛选过程有着举足轻重的过程。确定指标及其权重的方法有很多种，其中层次分析法是较常用的方法。<sup>[18]</sup>因此利用层次分析法，通过构造指标分析评价体系，再根据目标的要求对各层次指标赋予权重，构造判断矩阵，通过一致性检验最终确定合适的修复植物。

首先，根据矿区对筛选修复植物的要求，构造出采用以下指标层次结构。

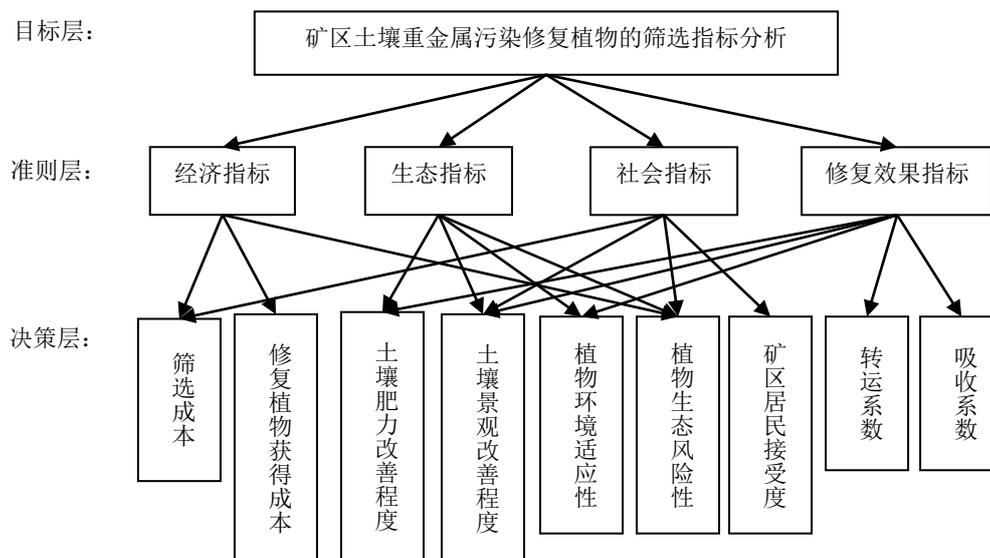


图3 矿区重金属污染土壤修复植物筛选指标层次结构

表1 分级定量法表

重要程度	赋值	说明
两个因素一样好	1	两个因素具有相同贡献
一个对另一个稍好	3	从经验判断, 某个因素稍重要于另一个因素
一个对另一个较好	5	从经验判断, 某个因素较重要于另一个因素
一个对另一个很好	7	从经验判断, 某个因素较另一个因素占主导地位
一个对另一个极好	9	从经验判断, 某个因素较另一个因素占绝对地位

注: 2、4、6、8作为内插值。

其次, 构造判断矩阵的标度并解释其含义, 如采用九级定量法。确定判断矩阵标度后, 对各个层次的指标进行排序及一致性检验。第一步, 根据表1对准则层及各个对应的决策层建立判断矩阵T:

$$T = \begin{vmatrix} U_{11} & U_{12} & \cdots & U_{1n} \\ U_{21} & U_{22} & \cdots & U_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ U_{m1} & U_{m2} & \cdots & U_{mn} \end{vmatrix}$$

具体的判断矩阵需由专家根据具体的修复目标及经验进行打分确认, 得到完整的判断矩阵。

第二步, 根据公式(1)对判断矩阵按列进行归一化, 得到一个归一化矩阵, 记为Q:

$$\bar{u}_{ij} = \frac{u_{ij}}{\sum_{k=1}^m u_{ik}} \quad (i, j = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

第三步对Q求其特征向量。根据公式(2)将Q的每一列元素按行相加得到向量Q, 在根据公式(3)进行规范化处理, 得到特征向量a。该特征向量即为单层次各评价因素的排序。

$$\bar{w}_i = \sum_{j=1}^m \bar{u}_{ij} \quad (i, j = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

$$\alpha_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{j=1}^m w_j} \quad (i, j = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

第四步, 根据公式(4)得到最大特征根。公式中TA 为判断矩阵T与特征向量a相成得到的向量。

$$\lambda_{max} = \frac{m}{1} \sum_{i=1}^m \frac{(TA)_i}{\alpha_i} \quad (4)$$

最终根据公式(5)进行一致性检验。CR为判断矩阵的随机一致性比率, CI为判断矩阵一致性指标, RI为判断矩阵的平均随机一致性指标, 其中CI用公式(6)计算而来, RI的取值见表2。

$$CR = CI/RI \quad (5)$$

$$CI = (\lambda_{max} - m)/(m - 1) \quad (6)$$

表2层次分析法的平均随机一致性指标值

M	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

同样对各个准则层指标对应的决策层进行同样的判断矩阵建立、归一化、求取特征向量及最大特征根, 并进行一致性检验。

最终根据总层次分析结果排序, 确认决策层各指标的权重, 从而得到完整的筛选指标体系。总层次排序就是指利用同一层次中所有层次单排序的结果, 就可以计算针对上一层次而言的本层次所有元素的重要性权重。通过该指标体系分析评价得到的结果, 将会作为矿区土壤重金属修复植物筛选的根本依据<sup>[19]</sup>。这

点与一般土壤重金属污染修复植物的筛选简单的以吸收系数和转运系数作为筛选指标有着根本的区别，也进一步体现了矿区土壤重金属污染有其自身的特点及特殊的修复要求。

## 4 结语

矿区土壤重金属污染的研究工作的重要性是目前严峻的土壤污染形势所决定的，矿区土壤重金属污染修复植物的筛选遵循一般土壤重金属污染修复植物筛选的规律，其基本思路都是从高富集能力、高耐受能力这两个因素来考量植物的修复能力。但同时，矿区土壤特殊的土地利用方式决定了其特有的土壤环境条件，对重金属污染修复植物的筛选也有其特殊的要求。因此，要结合矿区的实际情况，完善修复植物筛选的具体流程，合理选取衡量修复植物的指标，进而建立恰当的筛选指标体系，因地制宜地筛选出最适宜的矿区重金属污染土壤的修复植物，达到最终的修复目标。

## 致谢

本文承蒙中国矿业大学董霁红教授指导完成，谨此致谢！感谢创新项目团队内所有成员的努力及参考文献所有作者对研究的帮助。

## REFERENCES

- [1] Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Countermeasure of the problems and Countermeasures of heavy metal pollution in soil of our country by Zhao Qiguo [N].2015-10-29.
- [2] Zhang X F. Advances in Screening Methods of Remediation Plants of Heavy Metal Pollution [J].Guizhou Agricultural Sciences, 2013, 02: 173-177.
- [3] Xing Y S, Qiao D M, Zhu G F, Qi X B. Research Progress of Heavy Pollution in Soil and Phytoremediation Technology [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 17: 208-214.
- [4] Luo Y M. Phytoremediation of metal contaminated soils [J].Soils, 1999, 31(5):261-265.
- [5] Kramer U. Free histamines as a metal chelate in plants that accumulate nickel [J].Nature, 1996, 379: 635-638.
- [6] Long J, Zhang J F, Ran H Y. Compare of select tolerant and hyper accumulator plants on soil remediation in China and Korea [J]. Environmental Protection and Technology, 2013, 06: 26-29.
- [7] Wenzel W W, JockwerF. Accumulation of heavy metals in plants grown on mine raised soils of the Austrian Alps [J]. Environmental Pollution, 1999, 104: 145-155.
- [8] Shu W S, Yang K Y, Zhang Z Q. Flora and Heavy Metals in Dominant plants Growing on an Ancient Copper Spoil Heap on Tonglushan in HuBei Province, China [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2001, 7(1): 7-12.
- [9] Wei Z Y, Chen T B, Huang Z C. Cretan Brake (*Pteris cretica* L.): an Arsenic-accumulating Plant [J] Acta Ecologica Sinica, 2002, 23(5): 777-778.
- [10] Li C L, Shao Z Q, Wang Y J. Enrichment Characteristics of Pb by Several Kinds of Ornamental Plants [J] Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(4): 127-134.
- [11] Wei S H, Zhou Q X, Wang X. A Newly Discovered Cadmium Hyperaccumulator: *Solanumnigrum*[J]. Science Bulletin, 2004, 49(24): 2568-2573.
- [12] Guo X F, Wei Z B, Qiu J R. Differences Between Corn Cultivars in Accumulation and Translocation of Heavy Metals[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26(4): 367-371.
- [13] Zhang X F, Xia H P, Li Z A, et al. Identification of a new potential Cd-hyper accumulator *Solanum photei-nocarpum* by soil seed bank-metal concentration gradient method [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 189: 414-419.
- [14] Wilkins D A. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth [J].New Photon, 1978, 80: 623-633.
- [15] Jia X P. Sources and Improvement Measures of Heavy Metal Pollution in Soil [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2007, 09: 197-199.

- [16] Bai Z K, Fu M C, Zhao Z Q. On soil environmental problems in mining area [J]. Ecology and Environment, 2006, 05: 1122-1125.
- [17] Liu J Y. The Research Progress on Heavy Metal Soil Pollution and Ecological Rehabilitation in Mine Area [J]. China Mining Magazine, 2006, 12: 66-69.
- [18] Zhang X, Dong J H. A study on mine site land subsidence rehabilitation project post assessment [J]. China Coal, 2010, 36(3): 78-83.
- [19] Lu Y. The Application of GIS Based Analytical Hierarchy Process for City Land Evaluation[J]. Journal of Guangxi Teachers College, 2003(2):74- 77.

### 【作者简介】



<sup>1</sup>吕蕾（1995-），女，汉，本科在读，无，土地资源管理，本科学习三年。

Email: 1024523865 qq.com



<sup>3</sup>黄云鑫（1993-），男，汉，本科在读，无，土地资源管理，本科学习三年。

Email: 1207079279qq.com



<sup>2</sup>耿金燕（1995-），女，汉，本科在读，无，土地资源管理，本科学习三年。

Email: 1224236271 qq.com