

稀土矿山“菌根-油松-耐性蚯蚓”修复土壤效应评价

魏光普¹, 于晓燕^{2*}, 康 瑜¹, 宋宇辰²

(1. 内蒙古科技大学 风景园林系, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古科技大学 信息管理与信息系统系, 内蒙古 包头 014010)

摘 要:以内蒙古自治区白云鄂博稀土露天矿为研究区,采用菌根-油松-耐性蚯蚓协同修复受稀土污染的土壤,通过评价修复效应筛选出不同修复组合的最优方案。将该矿区按开采特征进行植被调查,分别对油松、菌根、耐性蚯蚓和根际土壤进行采样分析,通过层次分析法对不同组合下的菌根-油松-耐性蚯蚓修复土壤复合污染效应做出定性评价,再通过模糊综合评判法将评价中出现繁多的变量和一些试验不确定因素作一个总的定量评价。四种不同菌根接种油松并联合耐性蚯蚓协同修复土壤复合污染的效应由高到低依次为:淡紫丝盖伞 *Inocybe lilacina*>臭黄菇 *Russula foetens*=血红乳菇 *Lactarius sanguifluus*>红网牛肝菌 *Boletus luridus*,评价分数依次为 3.2601, 2.8001, 2.8001, 2.4834,表明淡紫丝盖伞+油松+耐性蚯蚓的土壤修复方案效果最佳,菌根-植物-耐性蚯蚓的新技术通过试验表明可以有效提升植物修复土壤的效应。

关键词:层次分析法;模糊综合评判;修复评价;菌根;稀土矿山

中图分类号:S731.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-0277(2023)02-0120-10

内蒙古自治区包头市白云鄂博矿的稀土总储量占中国稀土总存储量的85%左右^[1],研究表明,稀土产品的开采和生产过程中约有75%进入到土壤中,目前中国所有的稀土矿区表层土壤中稀土元素含量值均偏高^[2];在稀土露天开采过程中还伴随着重金属元素和放射性核素,土壤中以稀土为主的多种污染物随着时间和重力在土壤中不断累积、迁移,导致矿区土壤污染程度日趋严重^[3,4]。

国内研究集中在土壤污染物含量的空间分布

方面,有研究发现内蒙古自治区白云鄂博矿区的空气、人发、尿液中稀土La和Ce元素含量都远高于内蒙古土壤中稀土背景值^[5];而矿区土壤中稀土含量超过内蒙古土壤中稀土背景值481倍,这与白云鄂博矿区的土壤荒漠化、农田绝产等多种环境问题存在联系^[6]。国外研究发现稀土元素无法被植物分解、吸收,但其可通过植物、微生物或者动物将土壤中的污染元素提取、转移和钝化,从而改善土壤生态环境^[7]。

收稿日期:2021-12-17

基金项目:内蒙古自治区关键技术攻关计划项目(2020GG0227);内蒙古自治区自然科学基金项目(2021MS03035);中国博士后面上基金项目(2021M690570)

作者简介:魏光普(1986-),男,山东昌乐人,副教授,主要从事矿山园林植物生态修复研究,E-mail: weigp2007@163.com

*通讯作者:于晓燕,副教授,E-mail: yuxiaoyan2005@163.com

DOI: 10.16533/J.CNKI.15-1099/TF.20220069

白云鄂博矿(E 109°47'~110°04', N 41°39'~41°53')是目前世界上最大的露天稀土矿,土壤中污染物主要包括:稀土开采中裸露地表的La和Ce元素,以及稀土开采伴随的Pb、Cu、Mn、Zn和放射性核素²³⁸Th和²³²U,污染物的空间分布导致当地人居环境不容乐观^[8]。研究表明该矿区现存植物科主要包括:松科 *Pinaceae*、菊科 *Asteraceae*、禾本科 *Gramineae* 和豆科 *Leguminosae*,其中油松作为先锋植物数量较多^[9]。研究评价“油松+外生菌根+耐性蚯蚓”联合修复土壤污染物的效应,可以为稀土矿区土壤生态环境修复提供科学性基础数据,有助于缩短该区域土壤污染物修复的时间。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

本研究采用油松+外生菌根联合修复土壤中复合污染物的方法,于2020年7月对内蒙古自治区白云鄂博矿区进行了植物多样性调查,结果发现该区域的先锋植物油松对土壤中污染物具有较高的耐受性。现场采集到四种油松的外生菌根:红网牛肝菌 *Boletus luridus* (简称BLS),淡紫丝盖伞 *Inocybe lilacina* (简称ILK),臭黄菇 *Russula foetens* (简称RFP),血红乳菇 *Lactarius sanguifluus* (简称LSF)。本研究在内蒙古科技大学寒旱型园林植物生态修复实验室进行,选用呼和浩特市农牧局提供的油松种子,播种前对种子表面消毒,再置于恒温光照培养箱(宁波乐电GL0-45DD-4型)中进行催芽处理(25℃,20000Lx),露白后播种试验^[10]。接种菌剂在内蒙古自治区森林培育林业菌根生物技术重点实验室扩繁采集到的菌根而获得,菌剂包括:被侵染的油松根段、油松的根际沙土混合物以及菌丝和孢子。耐性蚯蚓在白云鄂博矿山公园采集(鲜活保存)。土壤样品采集油松根际土壤,无菌密封袋保存。

1.2 样品含量测定

采集的土样样品在实验室自然风干,再用电热恒温干燥箱(上海尚光202型)75℃烘干3h,除去

石头等杂质后过3次100目筛网,称取土壤的试验样品和空白试验样品各0.20g备用^[11]。采用HYP-320智能消解炉消解,将样品倒入聚四氟乙烯坩埚中,加水润湿,再加3mL硝酸和2mL氢氟酸,坩埚130℃加热2h;再加入2mLHF和3mL硝基盐酸($\text{HNO}_3 \cdot 3\text{HCl}$),加热2h后加入0.5mL高氯酸,150℃蒸干至坩埚不再冒白烟^[12]。再两次加入 $\text{HNO}_3 \cdot 3\text{HCl}$ 3mL和0.5mL HClO_4 ,200℃蒸干,残渣呈黑色后加入3mL $\text{HNO}_3 \cdot 3\text{HCl}$ 至完全溶解,温度降低后聚乙烯瓶定容至25mL。

植物样品处理方法:植物地上器官和根系分别用超纯水冲洗干净,再反复用超纯水冲洗3次,放入烘箱中55℃杀青30min,放入鼓风箱中55℃烘干至恒重。植物样品粉碎后再过100目筛2次,装入无菌密封袋编号备用,每个植物样品留有备用样品,每份样品重量需保留10g以上。电子天平称1.0g植物样品,并采用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 消解体系进行微波消解(设备参数:功率1500W,温度240℃),液体透明澄清后装入无菌塑料瓶中备用,同时做空白对照试验^[13]。

采用电感耦合等离子体发射光谱(Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer, Optima 7000 DV,简称ICP法)测定消解液中La,Ce,Pb,Cu,Mn,Zn元素的含量(包头稀土研究院测试)^[14]。土壤样品中的核素测量采用伽马(γ)能谱仪法(相对效率66%),采集时间为72h,放射性核素²³²Th和²³⁸U的含量由中国安徽辐射管理处测定。

1.3 评价方法

采用层次分析(Analytical Hierarchy Process,简称AHP)和模糊综合评判的耦合分析方法研究油松-菌根-耐性蚯蚓联合修复土壤复合污染的效应^[15]。AHP是定性分析方法,可以把三种方法联合修复土壤效应中的复杂问题按逐个因素分解为关联有序的层次,进而为7种污染物质和6个修复标准制定出条理化决策方案。模糊综合评判是将定性分析转为定量分析的方法,基于“模糊数学”隶属度理论对土壤中7种污染物变量繁多、修复效应

评价层次结构复杂和评价中出现不确定因素的复杂系统做出总体科学地评判。AHP 和模糊综合评判法系统性强、结果科学可靠,可以对四种不同的外生菌根+油松+耐性蚯蚓协同修复土壤复合污染效应的质量评价^[16]。

1.4 数据分析

利用 SPSS 25.0 进行数据分析,采用 DPS 7.0 对层次分析法和模糊综合评判进行分析。

2 结果与分析

2.1 土壤修复评价指标选取

外生菌根+油松+耐性蚯蚓协同修复土壤复合污染的评价指标选取 3 种方法联合修复后的

各自实验值,即菌根侵染率、接种后植被生物量、土壤中耐性蚯蚓量以及协同后植物中的 Pb、Cu、Mn、Zn、La、Ce、²³⁸U 和 ²³²Th 含量。因稀土和放射性核素中存在不溶于水的形态,为保证实验结果的准确性,所有实验土壤采用现场采集油松根际土壤,并将采集土壤测定污染物含量后分为高浓度、中浓度和低浓度进行后期胁迫实验(见表 1)。油松菌根侵染率和接种后植被生物量见表 2,油松接种四种不同菌根并添加等量的耐性蚯蚓(白云鄂博矿山公园采集),接种后结果显示土壤污染越严重菌根侵染成功率越低,油松植物体干重也越低,这与稀土对植物体“Home”现象一致,即低促高抑。

表 1 土壤污染物含量

Table 1 Soil pollutant content

Element content	Pb/ (mg/kg)	Cu/ (mg/kg)	Mn/ (mg/kg)	Zn/ (mg/kg)	La/ (mg/kg)	Ce/ (mg/kg)	²³⁸ U/ (Bq/kg)	²³² Th/ (Bq/kg)
High	328.1	85.2	10496.7	576.6	2031.71	4162.03	28.9	43.7
Middle	225.3	54.3	4770.1	345.2	329.41	741.81	25.3	41.2
Low	41.6	23.1	1364.8	101	107.15	362.11	21.5	36.3

表 2 油松生物量和菌根侵染率的统计表

Table 2 Statistics of mycorrhizal infection rate and *Pinus tabulaeformis* biomass

Plants	Mycorrhizal name	Earthworm dung	Inoculation/ (mg/kg)	Mycorrhizal infection rate/%	Shoot dry weight/g	Root dry weight/g
Pinus	BLS	0.4 kg/m ²	High	4.36±0.39	3.98±0.49b	2.26±0.16b
			Middle	35.75±2.79	8.12±0.22b	4.87±0.65a
			Low	64.81±6.33	12.57±0.46a	6.93±0.77b
	ILK		High	2.57±0.02	3.59±0.58b	1.37±0.64b
			Middle	28.83±1.83	5.56±0.89b	3.34±0.25a
			Low	42.23±3.93	9.11±0.55a	3.42±0.37a
	RFP		High	0.51±0.01	3.12±0.12a	1.32±0.41b
			Middle	25.24±1.09	5.51±0.35b	3.27±0.28a
			Low	39.03±3.37	7.88±0.97a	3.86±0.32b
			High	1.18±0.02	1.16±0.27b	0.26±0.01b
			Middle	13.53±1.63	2.43±0.61a	0.73±0.03a
			Low	34.16±3.18	3.20±0.24b	1.22±0.05a
LSF	High	0.00±0.00	0.73±0.33a	0.14±0.01a		
	Middle	0.00±0.00	2.04±0.17b	0.56±0.01a		
	Low	0.00±0.00	3.11±0.74a	0.94±0.02a		

Note: the data is the mean ± standard error of three repetitions. Different letters in the same column indicate significant differences, a and b indicate significant correlation coefficient ($a \leq 0.05$; $b \leq 0.01$)

油松接种 4 个不同菌根后(红网牛肝菌 BLS、淡紫丝盖伞 ILK、臭黄菇 RFP、血红乳菇 LSF)在 7 种不同污染物(Pb、Cu、Mn、Zn、La、Ce、²³⁸U 和 ²³²Th)胁迫下的植物地上器官和根系中的含量,见图 1。其中油松接种 4 种不同菌根后体内重金属含量基本相同且明显高于对照组(CK)值,地上器官<根系器官中的含量,说明重金属富集在根系且菌根对重金

属的吸收差异影响较小。油松接种 4 种不同菌根后体内稀土 La 和 Ce 含量差异较大,且地上器官含量>根系含量,说明接种菌根后,油松转运稀土元素的能力提高。油松接种 4 种不同菌根后体内放射性核素含量基本相同且高于对照组(CK)值,地上器官<根系器官中的含量,说明放射性核素富集在根系。

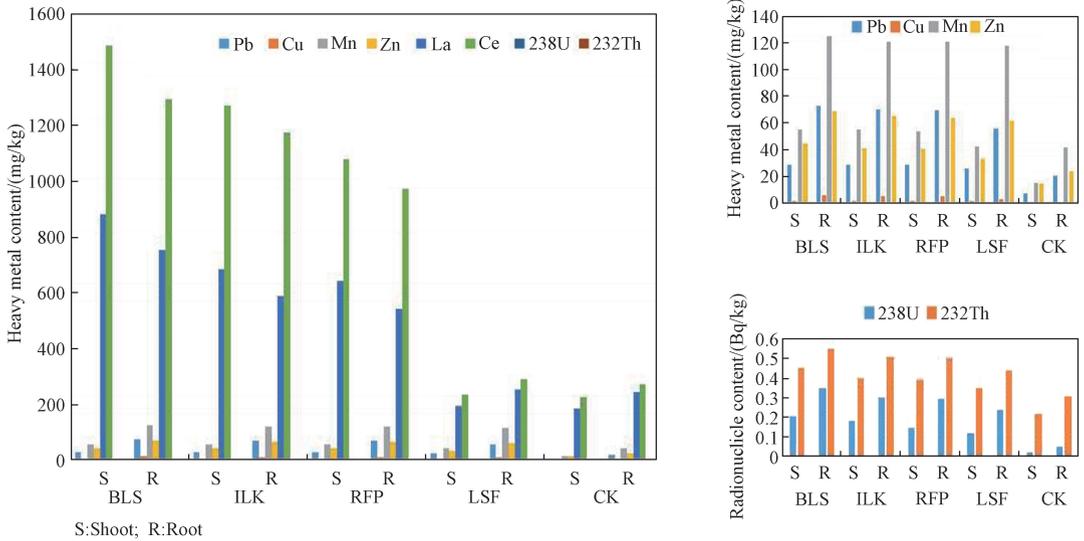


图 1 油松体内污染物含量

Fig. 1 Pollutant content of *Pinus tabulaeformis*

2.2 层次分析法(AHP)评价结果

首先将内蒙古自治区白云鄂博矿山外生菌根+油松+耐性蚯蚓协同修复土壤复合污染的效应问题置于一个大系统中,在系统中存在外生菌根多样性、土壤复合污染和试验误差等多因素影响,需要将问题按逐个因素进行层次化处理,构建一个关联有序的多层次分析结构模型;之后再行层次排序,根据不同的修复组合方案计算出其所占权重,用于辅助决策^[17,18]。

2.2.1 权重确定的步骤

①构建层次分析矩阵。A 代表目标, U_i 、 U_j ($i, j = 1, 2, \dots, n$) 代表影响修复的因素。 U_i 对 U_j 的相对重要值用 u_{ij} 表示。并由 U_{ij} 组成 A - U 判断矩阵 P。

$$P = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \cdots & u_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

②重要性的排序计算。根据构建的判断矩阵,求出其最大特征 λ_{\max} 对应的特征向量 w 。

$$P_w = \lambda_{\max} \times w \quad (2)$$

特征向量 w 的归一化计算即为菌根+油松+耐性蚯蚓协同修复土壤复合污染效应评价的权重分配,也是重要性评价。

权重分配和判断矩阵需要一致性的科学检验。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

式中:判断矩阵 CR 代表随机一致性比率;判断矩阵 CI 代表一致性指标。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

判断矩阵 RI 代表平均随机一致性指标。判断矩阵的 RI 值为 1~9 阶(见表 3)。

表 3 判断矩阵一致性指标

Table 3 Consistency index of judgment matrix

Order	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46

When judgment matrix P $CR < 0.1$ or $\lambda_{\max} = n, CI = 0$ 。

2.2.2 粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, 简称 PSO)

PSO 是构建一种在限定的群体中个体对群体信息共享算法,将无序到有序的群体的活动问题进行计算而得到最佳答案的过程。由于 AHP 法行业专家打分的主观性较强,或经常有漏项的评分矩阵数据,因此在 AHP 法计算过程中增加 PSO 算法对矩阵数据进行修正^[19,20]。

①计算抽象问题:将内蒙古白云鄂博稀土矿区土壤中不同的污染因素抽象为没有质量、没有体积的点,再延伸到一个多维空间中,多维空间中的位置点 1 代表矢量 $X_i = (x_1, x_2, \dots, x_N)$,协同修复效应代表矢量 $V_i = (v_1, v_2, \dots, v_N)$ 。每个抽象点都有一个目标函数计算出的适应值,并能算出目前最好点位 $pbest$ 和现在的点位 X_i 。这可以看作是点“菌根-油松-耐性蚯蚓”协同修复土壤复合污染的效应值。此外,每个抽象点还需计算出系统中目前整个群体所有抽象点发现的最好点位 $gbest$ (注: $pbest$ 中的最优值是 $gbest$)。

②PSO 算法:初始化为一群随机抽象点^[21],再通过迭代计算得出最佳答案。在整个计算中,抽象点通过跟踪($pbest, gbest$)两个点位的“极值”来更新,再找到这两个最优抽象点位值后,抽象点采用式 5 更新位置和速度。

$$V_{i+1} = V_i + C_1 \times \text{rand}(0 \sim 1) \times (pbest_i - x_i) +$$

$$C_2 \times \text{rand}(0 \sim 1) \times (gbest_i - x_i)$$

$$V_{i+1} = x_i + V_i \quad (5)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, M, M$ 为该群体中抽象点的总数;抽象点的速度表示为 V_i ;个体最优抽象点值用 $pbest$ 表示;全系统最优抽象点值用 $gbest$ 表示; $\text{rand}(0 \sim 1)$ 为介于(0、1)之间的随机数;抽象点的当前点位用 X_i 表示。学习因子是 C_1 和 C_2 ,通常取 $C_1 = C_2 = 2$,在每一维度和抽象点都有一个最大限速 V_{\max} ,假如某一维度速度超过限速的 V_{\max} ,那这一维度的速度就会增加至 V_{\max} 。

2.2.3 层次分析法(AHP 法)总排序检验

AHP 法总排序检验是多层次结构中的某一层系统对总目标组合权重以及与上层系统之间的相互影响,需要这一层所有单排序的结果,然后再计算该层系统的组合权重。

AHP 法总排序检验需从上到下逐层排序计算,依次得到最底层的计算结果;总排序检验是要给决策解决方案的优先次序赋予相对应的权重。总排序与单排序的检验计算过程大致相同^[22]。

$$CR = \frac{wi_1cl_1 + wi_2cl_2 + \dots + wi_mcl_m}{wi_1RI_1 + wi_2RI_2 + \dots + wi_mRI_m} \quad (6)$$

总排序一致性用 CR 表示,当 $CR < 0.1$ 时代表总排序通过了一致性检验,否则需重新构建一致性比率的判断矩阵或重新计算模型。

2.2.4 层次分析法(AHP 法)最终群决策结论

通过对行业专家打分评价修正后的数据进行计算矩阵对应位置几何平均值,得到 AHP 法的群决策矩阵,再计算群矩阵的最终结果。

2.2.5 群决策数据

AHP 层次分析法中先将第一层植物生理(菌根侵染率、生物量)、植物体内污染物含量($Pb, Cu, Mn, Zn; La, Ce; ^{238}U$ 和 ^{232}Th)、土壤污染影响动物量(耐性蚯蚓含量)的权重分别设置为 1,再分别对各自进行权重赋值(见图 2);再根据粒子群优化算法对图 2 权重赋值进行数据修正,得到修正后的权重赋值(见表 4)。

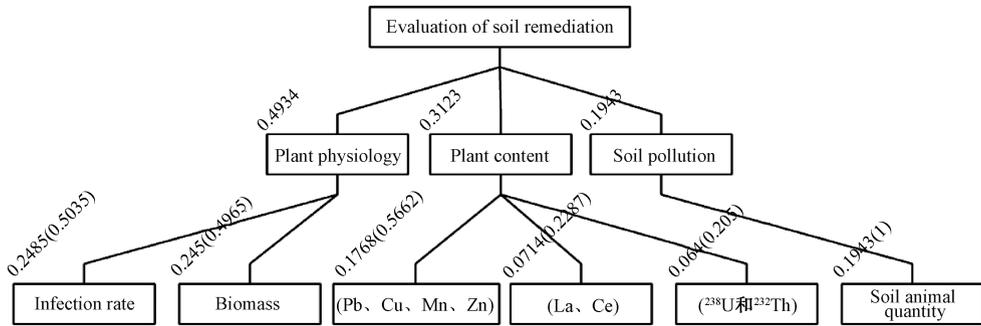


图 2 群决策矩阵

Fig. 2 Group decision matrix

表 4 群决策底层结论(权重)表

Table 4 Bottom conclusion (weight) table of group decision

Underlying elements	Conclusion value	Peer weight	Superior
Impregnation rate	0.2485	0.5035	Plant physiology
Biomass	0.245	0.4965	
Pb、Cu、Mn、Zn	0.1768	0.5662	Plant content
La、Ce	0.0714	0.2287	
²³⁸ U 和 ²³² Th	0.064	0.205	Soil pollution
Soil fauna	0.1943	1	

2.3 模糊综合评判法研究结果

模糊综合评判法依据隶属度理论对多种制约因素的菌根+油松+耐性蚯蚓协同修复内蒙古白云鄂博稀土矿区土壤复合污染效应的总体评价^[23,24]。

(1) 构建模糊综合评判模型的原理: 按单个因素评判和按所有因素综合评判。

① 构建综合评价指标: 评判对象的各种影响因素设定为“因素集” U

$$(u_i)U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\} \quad (7)$$

② 构建综合评价指标的权重: 影响因素的重要值都不一样, 为了体现出各系统因素的重要值差异, 对各系统因素 U_i 设置相对应的权重 W_i , 则“权重集” W_i 表示为: $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$

$$Ri = \frac{r_{i1}}{v_1} + \frac{r_{i2}}{v_2} + \dots + \frac{r_{im}}{v_m} \quad (8)$$

③ 构建评价“备择集” V : 以菌根+油松+耐性蚯蚓协同修复土壤复合污染效应作出总的评判结果, 组成的集合表示为 V_i 。

$$V_i = \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \quad (9)$$

④ 构建单因素模糊评判: 单个“因素集” U 的评判是确定对象“备择集” V 中各元素的隶属度关系。假设评判对象按“因素集” U 中第 i 个因素 U_i 评判时, 对“备择集” V 中第 j 个元素 V_j 的隶属度为 r_{ij} , 则按第 i 个因素 U_j 评判的结果可用模糊集合表示, 单因素评判集表示为 R_i :

$$R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}) \quad (10)$$

⑤ 构建模糊综合评判: 单个因素对评判对象的影响需要进行准确评判, 还要根据“权重集”综合考虑各因素的影响做出准确的评判。因此, 当“权重集” W 和单因素评判集 R_i 已知时, 可通过模糊变换来进行综合评判^[25]。

$$B = W \times R = (w_1, w_2, \dots, w_n) \times$$

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} = b_1, b_2, \dots, b_m \quad (11)$$

式中: B 为“评判集”指标; $b_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 为评判指标。

$$b_j = \sum_{i=1}^n (w_i \times r_{ij}) \quad (12)$$

式中: 评判指标 b_j 为权数, 对各备选元素 v_j 进行加

权平均计算,模糊综合评判的结果表示为 V 。

$$v = \sum_{j=1}^m b_j v_j \div \sum_{j=1}^m b_j \quad (13)$$

当前模糊算子:

$$M(\cdot, +) \text{ 算子: [1 相乘, 2 相加]} \quad (14)$$

根据模糊综合评判法确定评测指标权重为 1 (见表 5)。菌根侵染率最高为 0.2485, La、Ce 最低为 0.0714。评测结果按优良中差取分值(见表 6)。AHP+模糊综合评判法是一种科学计算定量评价体系,通过在局部限定研究区域内将不同菌根接种油松并联合耐性蚯蚓协同修复土壤以稀土为主的复合污染物的效应进行定量分析评价,高效可靠的评价结果可以精准指导土壤修复。耐性蚯蚓联合油松接种的菌根 BLS、菌根 LSF、菌根 RFP 低于菌根 ILK 的协同修复效应(见表 7)。因此,菌根 ILK+油松+耐性蚯蚓是协同修复土壤中稀土、重金属、放射性核素复合污染的最佳组合。

表 5 评测指标权重集 W

Table 5 Evaluation index weight set W

No.	Index	Weight
1	Impregnation rate	0.2485
2	Biomass	0.245
3	Pb、Cu、Mn、Zn	0.1768
4	La、Ce	0.0714
5	^{238}U 和 ^{232}Th	0.064
6	Soil fauna	0.1943

表 6 评测结论

Table 6 Evaluation conclusion

No.	Conclusion	Score
1	Excellent	4
2	Good	3
3	Medium	2
4	Poor	1

表 7 群决策中间层权重表

Table 7 Weight table of middle layer in group decision

Target	Excellent	Good	Medium	Poor	Score
BLS	0	0.7417	0	0.2583	2.4834
ILK	0.5649	0.1943	0.1768	0.064	3.2601
RFP	0.4935	0.0714	0.1768	0.2583	2.8001
LSF	0.4935	0.0714	0.1768	0.2583	2.8001

3 结论

1. 白云鄂博矿山公园采集的 4 种油松的外生菌根均在实验室与油松建立了共生关系,可以有效提升油松的抗逆性。
2. 通过 AHP+模糊综合评判法定性+定量的科学评价可知,油松+淡紫丝盖伞+耐性蚯蚓协同修复土壤中污染物的组合得分最高,为 3.2601,比其他三种组合更能有效修复土壤污染。
3. 白云鄂博稀土矿山土壤污染修复效应研究中三种生物技术协同的技术优于单一修复方法,合理化的修复模式有助于缩短恢复时间。

参考文献:

- [1] 于晓燕,宋宇辰,魏光普,肖凤洁,高耀辉. 基于层次分析和模糊综合评判的尾矿库植物群落评价[J]. 稀土,2020,41(5):70-79.
Yu X Y, Song Y C, Wei G P, Xiao F J, Gao Y H. Assessment of plant community around Baotou LREE tailings reservoir based on AHP and fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Chinese Rare Earths, 2020, 41(5):70-79.
- [2] 高娟琴,于扬,李以科,李瑞萍,柯昌辉,王登红,于泓,张塞,王雪磊. 内蒙白云鄂博稀土矿土壤-植物稀土元素及重金属分布特征[J]. 岩矿测试,2021,40(6):871-882.
Gao J Q, Yu Y, Li Y K, Li R P, Ke C H, Wang D H, Yu F, Zhang S, Wang X L. Distribution characteristics of rare earth elements and heavy metals in a soil-plant system at Bayan Obo rare earth mine, Inner Mongolia

- [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2021, 40(6): 871-882.
- [3] Phan Q V, Dao T T, Nguyen P. An assessment of natural radioactivity in the Namxe rare earth deposit, Laichau province, Vietnam [J]. *Minerals*, 2019, 9(10): 602-614.
- [4] 张塞, 于扬, 王登红, 王伟, 张洪果, 岑况. 赣南离子吸附型稀土矿区土壤重金属形态分布特征及生态风险评价[J]. *岩矿测试*, 2020, 39(5): 726-738.
Zhang S, Yu Y, Wang D H, Wang W, Zhang H G, Cen K. Forms distribution of heavy metals and their ecological risk evaluation in soils of ion adsorption the rare earth mining area of Southern Jiangxi, China [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2020, 39(5): 726-738.
- [5] 王哲, 赵莹晨, 骆逸飞, 郑春丽, 卞园, 张光宇. 内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2021, 42(3): 1503-1513.
Wang Z, Zhao Y C, Luo Y F, Zheng C L, Bian Y, Zhang G Y. Characteristics and evaluation of soil rare earth element pollution in the Bayan Obo mining region of Inner Mongolia [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(3): 1503-1513.
- [6] 关海波, 李金霞, 牟艳军, 高文邦, 张春妮. 白云鄂博矿区外围土壤稀土元素累积空间分异[J]. *稀土*, 2021, 42(5): 27-35.
Guan H B, Li J X, Mu Y J, Gao W B, Zhang C N. Spatial heterogeneity of rare earth elements accumulation in the soil surrounding Bayan Obo mining area [J]. *Chinese Rare Earths*, 2021, 42(5): 27-35.
- [7] 赵丹, 崔毓萱, 刘筱玮, 王涵, 计红岩, 周晟, 岳桦. 寒地校园植物景观评价—以东北林业大学校园为例[J]. *东北林业大学学报*, 2018, 46(9): 80-83, 88.
Zhao D, Cui Y X, Liu X W, Wang H, Ji H Y, Zhou S, Yue H. Evaluation of plant landscape in campus of cold region—Taking Northeast Forestry University campus as an example [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2018, 46(9): 80-83, 88.
- [8] 雷金睿, 辛欣, 宋希强, 何荣晓. 基于 AHP 的海口市公园绿地植物群落景观评价与结构分析[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(3): 262-268.
Lei J R, Xin X, Song X Q, He R X. Landscape evaluation and structure analysis of plant community in Haikou city parks, based on analytic hierarchy process [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(3): 262-268.
- [9] 王涛, 刘以珍, 孔召玉, 蔡奇英, 葛刚. 稀土矿山生态修复研究现状与热点——基于 CiteSpace 的可视化分析[J]. *稀土*, 2021, 42(6): 134-145.
Wang T, Liu Y Z, Kong Z Y, Cai Q Y, Ge G. Research status and hotspots of ecological restoration of rare earth mines—Visualization analysis based on CiteSpace [J]. *Chinese Rare Earths*, 2021, 42(6): 134-145.
- [10] 于晓燕, 宋宇辰, 魏光普, 高耀辉, 肖凤洁. 轻稀土开采、冶炼对环境影响及修复治理研究[J]. *应用化工*, 2020, 49(10): 2630-2635.
Yu X Y, Song Y C, Wei G P, Gao Y H, Xiao F J. Study on the effects of light rare earth mining and smelting on environmental pollution and remediation [J]. *Applied Chemical Industry*, 2020, 49(10): 2630-2635.
- [11] 于晓燕, 宋宇辰, 魏光普, 高耀辉, 纪奕赫. 镧、铈污染土壤中植物-菌根协同修复效应[J]. *稀土*, 2021, 42(4): 91-100.
Yu X Y, Song Y C, Wei G P, Gao Y H, Ji Y H. Phytomycorrhizal synergistic remediation of soil polluted by lanthanum and cerium [J]. *Chinese Rare Earths*, 2021, 42(4): 91-100.
- [12] 朱云辰, 毛一平. 基于层次分析法的浙江大学紫金港东区植物景观评价[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2013, 39(4): 452-459.
Zhu Y C, Mao Y P. Evaluation of plant landscape at east Zijingang area of Zhejiang University based on analytic hierarchy process [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2013, 39(4): 452-459.
- [13] 高洁琼, 李锋, 杨芳绒. 基于 AHP 的郑州绿博园滨水植物群落的景观评价与分析[J]. *西部林业科学*, 2017, 46(3): 109-115.
Gao J Q, Li F, Yang F R. Landscape evaluation and analysis on waterfront plant communities in Zhengzhou green expo garden based on AHP [J]. *Journal of West*

- China Forestry Science, 2017, 46(3): 109-115.
- [14] 赵琳, 毛洪玉. 基于层次分析法的沈阳高校植物景观调查与评价[J]. 北方园艺, 2013, (7): 85-89.
- Zhao L, Mao H Y. Study on the resources and ornamental characteristics of ranunculus japonicus in Wulian mountain area[J]. Northern Horticulture, 2013, (7): 85-89.
- [15] 曾凤, 李许文, 胡晓敏, 陈红锋. 广州白云山典型景区园林植物群落景观评价[J]. 中国园林, 2014, 30(8): 97-101.
- Zeng F, Li X W, Hu X M, Chen H F. Landscape evaluation of typical garden plant communities in Baiyun mountain scenic site of Guangzhou[J]. Chinese Landscape Architecture, 2014, 30(8): 97-101.
- [16] 黄广远, 徐程扬, 朱解放, 毛斌. 基于层次分析法和逼近理想解排序法的高校校园绿地景观评价[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(9): 113-115, 123.
- Huang G Y, Xu C Y, Zhu J F, Mao B. Evaluation of green landscape in college campuses based on a combined AHP-TOPSIS method[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2012, 40(9): 113-115, 123.
- [17] 沈雯, 李凯, 王秀荣. 层次分析法与美景度评价法在植物景观评价中的综合运用[J]. 北方园艺, 2018, (11): 110-117.
- Shen W, Li K, Wang X R. Comprehensive application of AHP method and SBE method in plant landscape evaluation[J]. Northern Horticulture, 2018, (11): 110-117.
- [18] 金彪, 孙明艳, 李海防. 基于 AHP-模糊综合评价法的桂林“两江四湖”旅游景区植物景观评价[J]. 北方园艺, 2017, (1): 203-207.
- Jin B, Sun M Y, Li H F. Plant landscape evaluation of tourist attraction based on AHP-fuzzy comprehensive evaluation in two rivers and four lakes in Guilin[J]. Northern Horticulture, 2017, (1): 203-207.
- [19] 康秀琴, 李海防. 基于层次分析法的桂林市“两江四湖”景区植物景观评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(3): 129-133, 140.
- Kang X Q, Li H F. Plant landscape evaluation of two river and four lakes based on analytic hierarchy process[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2016, 36(3): 129-133, 140.
- [20] 陈芳洲, 董丽. 基于 AHP 法的西安市 9 个公园绿地冬季植物景观评价[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(5): 258-261.
- Ceng F Z, Dong L. Evaluation of plantscape in winter by AHP method in Xi'an[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(5): 258-261.
- [21] 康秀琴. 基于 AHP 法的桂林市 8 个公园绿地植物景观评价[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(6): 273-278.
- Kang X Q. Evaluation on plantscape of eight parks in Guilin by AHP method[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(6): 273-278.
- [22] 孟亚南, 王佩佩, 谢珊珊, 张琳, 孔德政, 刘艺平. 基于 AHP 法的郑州市人民公园植物群落景观评价[J]. 天津农业科学, 2017, 23(9): 95-100.
- Meng Y N, Wang P P, Xie S S, Zhang L, Kong D Z, Liu Y P. Evaluation of plant community landscape in Zhengzhou People's park based on AHP method[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2017, 23(9): 95-100.
- [23] 刘洋, 高宇, 张睿. 基于 AHP 模型的冬季校园植物景观评价—以东北林业大学为例[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(4): 171-173.
- Liu Y, Gao Y, Zhang R. Evaluation of the winter campus plant landscape based on AHP model—A case study of Northeast Forestry University [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(4): 171-173.
- [24] 李金霞, 红梅, 殷秀琴. 包钢尾矿坝下风位土壤外源稀土累积及地球化学特征[J]. 稀土, 2008, 29(6): 57-62.
- Li J X, Hong M, Yin X Q. Accumulation and geochemical characteristics of exogenous rare earths in soil of leeward area of tailings dam of Baotou Iron & Steel (Group) Company [J]. Chinese Rare Earths, 2008, 29(6): 57-62.
- [25] 郑春丽, 张志彬, 刘启容, 陈敏洁, 程昊辰. 稀土尾矿库区土壤中稀土形态分布规律研究[J]. 稀土, 2016, 37(2): 73-80.
- Zheng C L, Zhang Z B, Liu Q R, Chen M J, Cheng H C. Rare earth distribution in the soil around rare earth tailings[J]. Chinese Rare Earths, 2016, 37(2): 73-80.

Evaluation of Rare Earth Mine Vegetation Restoration Based on AHP and Fuzzy Comprehensive Evaluation

WEI Guang-pu¹, YU Xiao-yan^{2*}, KANG Yu¹, SONG Yu-chen²

(1. School of Architecture, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

2. School of Economy and Management, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: Taking Bayan Obo rare earth open pit mine in Inner Mongolia Autonomous Region as the study area, mycorrhizal-Pinus tabulaeformis-tolerant earthworm was used to repair the soil polluted by rare earth. The optimal schemes of different repair combinations were selected by evaluating the repair effect. The vegetation in the mining area was investigated according to the mining characteristics. The samples of Pinus tabulaeformis, mycorrhizal, tolerant earthworm and rhizosphere soil were analyzed respectively. The compound remediation effect of mycorrhizal-Pinus tabulaeformis-tolerant earthworm pollution for soil pollute under different combinations was evaluated by analytic hierarchy process, then the fuzzy comprehensive evaluation method was used to make a general evaluation of many variables and some uncertain factors in the evaluation. The results showed that the composite effects of four different mycorrhizas combined with Pinus tabulaeformis and tolerant earthworm were as follows: *Inocybe lilacina*>*Russula foetens*=*Lactarius sanguifluus*>*Boletus luridus*, the comprehensive scores were 3.2601, 2.8001, 2.8001 and 2.4834, respectively, indicating that remediation scheme of the light purple silk umbrella *inocybe lilacina*+ Pinus tabulaeformis+tolerant earthworm has the best effect. The experimental results show that the new technology of mycorrhizal plant tolerant earthworm can effectively improve the effect of phytoremediation.

Key words: AHP; fuzzy comprehensive evaluation; repair evaluation; mycorrhizal; rare earth mine