

# 基于 AHP-TOPSIS 的土壤重金属污染修复植物适宜性评价

潘俊,王兴作

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 筛选出适应性强、处理效果好的植物,用于解决困扰重金属污染土壤植物修复的选种难题。**方法** 应用层次分析法构建以生态适应性、技术可行性、经济可行性为准则、下含8个影响因素的指标体系,建立判断矩阵,并对其构造进行改进,通过逼近理想解的排序法筛选出最适合的修复植物;将该模型用于沈阳市某化工厂被重金属严重污染的土壤修复,对15种植物进行评价、筛选。**结果** 构造的改进判断矩阵评价误差更小;通过计算发现,在污染土壤植物修复工程中,耐旱性是影响修复效果的主要因素;筛选结果表明,狼尾草等适合用于该场地的植物修复,接近度为0.838,去除率可达82%。**结论** 该植物筛选模型能综合考虑各评价指标的影响,可以客观、准确地筛选出修复植物。

**关键词** 植物筛选数学模型;层次分析法;指标评价体系;逼近理想解的排序法

中图分类号 TU992.3;X53

文献标志码 A

**引用格式:**潘俊,王兴作.基于 AHP-TOPSIS 的土壤重金属污染修复植物适宜性评价[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(3):563-569. (PAN Jun, WANG Xingzuo. Suitability evaluation of restoration plants on soil polluted by heavy metal based on AHP-TOPSIS[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(3):563-569.)

## Suitability Evaluation of Restoration Plants on Soil Polluted by Heavy Metal Based on AHP-TOPSIS

PAN Jun, WANG Xingzuo

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** Restoration plants were studied on the remediation of heavy metals contaminated soil. An indexed system of restoration plant was built by analytic hierarchy process (AHP). Ecological adaptability, technical feasibility and economic feasibility as construction criteria, this system included eight influencing factors. Based on AHP, a judgment matrix was established and its construction was improved. And the most suitable remediation plants were selected through the

收稿日期:2023-09-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1801203)

作者简介:潘俊(1962—),男,教授,博士研究生导师,主要从事环境污染治理技术等方面研究。

weighted sorting method of approximating the ideal solution. This system was used to select restoration plants for the remediation of heavy metals contaminated soil in a chemical plant in Shenyang City. 15 species of plants taken as screening objects, an improved judgment matrix with minor evaluation error was constructed. In the system drought tolerance is the main factor affecting the remediation effect in phytoremediation of contaminated soil by calculation. The results showed that, wolfsbane was the most suitable for phytoremediation at this site, with a proximity of 0.838 and the removal rate is 82%. It is concluded that the system could analyze the impact of each evaluation index and screen restoration plants objectively and accurately.

**Key words:** mathematical modeling of plant screening; analytic hierarchy process; indicator evaluation system; ranking method for approximating ideal solutions

1983年,R. L. Chaney等<sup>[1]</sup>首次提出“植物修复”概念,因其能有效修复污染,已得到广泛应用,该技术的载体是富集较高含量污染物的植物,正确选择植物对高效修复污染场地、最大程度地降低环境风险具有重要意义<sup>[2]</sup>。传统的方法是通过盆栽试验计算富集系数和转运系数来直观地评判确定,不能准确反映真实情况。在实际工程中,多种因素会影响修复进程,修复效果好的植物,可能修复周期长,也可能对土壤环境敏感。植物的选择涉及多层次、多因素、多指标,必须对多种因素、指标进行综合分析,这也是土壤修复植物选择的一个难题。近年来,学者们开展了利用数学方法进行修复植物的筛选研究,唐玉情<sup>[3]</sup>等通过构建层次分析模型(AHP)筛选出修复黑龙江多宝山铜业矿区的植被。逼近理想解的排序法(TOPSIS)也是常用的多因素决策方法,罗云<sup>[4]</sup>将TOPSIS用于污染场地修复植物的筛选。应用TOPSIS建立的层次模型较复杂时,评价会产生误差,与AHP结合,会进一步提高决策的准确性。韦一鸣等<sup>[5]</sup>通过构建AHP-TOPSIS模型筛选出用于搭建嫩江柔性防浪林的最适宜植物,张倩等<sup>[6]</sup>构建了AHP-TOPSIS模型,用于修复某焦化厂污染场地。

基于此,笔者从生态适应性、技术可行性及经济可行性三方面,将AHP与TOPSIS结合,构建土壤重金属污染植物修复筛选模型,并改进AHP中判断矩阵的构建方法,最后结

合工程案例,对查找文献及现场调查搜集到的15种植物进行适宜性评价,筛选出适合的修复植物,该模型解决了土壤修复植物选择中的主观性和片面性问题,为科学有效筛选修复植物提供了新方法。

## 1 植物筛选数学模型的构建

### 1.1 评价指标体系的构建

植物修复过程中,诸多因素会影响植物修复效率<sup>[7]</sup>,包括生态适应性、技术可行性及经济可行性。生态适应性是选择修复植物首先考虑的问题,涉及土壤肥力、耐旱性、pH值、病虫害等,需了解植物的生长习性,而在没有确定植物环境条件的情况下,盲目选择,会带来一定的影响<sup>[8]</sup>。技术可行性是评价修复效果好坏的关键指标之一,包括重金属去除率、修复周期,不同植物对重金属污染土壤耐受性是不同的,会影响植物富集率、生长状况<sup>[9]</sup>。经济可行性是衡量生态修复工程项目实施成败的关键因素<sup>[10-11]</sup>,包括运行成本、资源获取成本,部分富集植物的修复成本中人力成本所占比重达81.7%<sup>[12]</sup>,在选择时要考虑植物间人力成本的差异,同时某些植物还具有一定的商业价值,属收益性植物<sup>[13]</sup>,在选择时,也是考虑的关键因素。

综上,依据可行性、科学性、客观性的原则,建立基于生态适应性、技术可行性、经济可行性的、含8个影响因素的评价指标体系(见图1)。

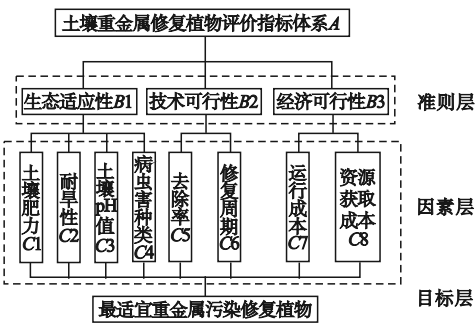


图1 土壤重金属修复植物评价指标体系

Fig.1 Evaluation index system of remediation plants for heavy metal contaminated soil

1.2 AHP-TOPSIS 数学模型的建立

1.2.1 AHP 法评价指标权重的确定

(1) 比较矩阵

为避免评审专家的主观性影响评价结果,采用三级标度法,而不是通常采用的九级标度法,即将同一层次中的指标进行两两比较,构造比较矩阵,可大大减少因主观性造成的误差。层次分析法标度及相对重要性判断见表1。

表1 层次分析法标度及相对重要性判断

Table 1 Analytic hierarchy process scale and relative importance judgment

标度级别	相对重要性( $i, j = 1, 2, \dots, n$ )
2	第 <i>i</i> 元素比第 <i>j</i> 元素重要
1	第 <i>i</i> 元素与第 <i>j</i> 元素同样重要
0	第 <i>i</i> 元素不如第 <i>j</i> 元素重要

采用三级标度法建立比较矩阵  $A = \{a_{ij}\}$ ,再计算重要性排序指数:

$$r_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}, i = 1, 2, \dots, n. \tag{1}$$

$$r_j = \sum_{i=1}^n a_{ij}, j = 1, 2, \dots, n. \tag{2}$$

式中: $r_i$  为矩阵  $A$  中第  $i$  行各因素之和; $r_j$  为矩阵  $A$  中第  $j$  行各因素之和。

(2) 判断矩阵

用极差法将比较矩阵  $A$  转化为判断矩阵  $D = \{d_{ij}\}$ 。

$$d_{ij} = d_b^{(r_i - r_j) / (r_{\max} - r_{\min})}. \tag{3}$$

式中: $d_b$  为常量,实际应用中, $d_b = 9$ ;  $r_{\max} = \max \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ ;  $r_{\min} = \min \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ 。

$R = r_{\max} - r_{\min}$ ,表示极差,在实际应用当中,会存在  $r_{\max} = r_{\min}$  的情形,即一切重要性排序指数均相等,即  $r_i = r_j$ 。此刻  $R = 0$ ,该转换无意义,笔者对此进行了改进,改进后的判断矩阵中元素为

$$d_{ij} = \begin{cases} d_b^{(r_i - r_j) / (r_{\max} - r_{\min})}, & r_{\max} \neq r_{\min}; \\ 1, & r_{\max} = r_{\min}. \end{cases} \tag{4}$$

(3) 计算特征值及特征向量

将判断矩阵每一行元素进行乘积得到  $w_i$ :

$$w_i = \prod_{j=1}^n d_{ij}. \tag{5}$$

计算  $w_i$  的  $n$  次方根,得到几何算数平均值  $\overline{w}_i$ :

$$\overline{w}_i = \sqrt[n]{w_i} = (\prod_{j=1}^n d_{ij})^{1/n}. \tag{6}$$

对  $\overline{w}_i$  作归一化处理  $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ :

$$W = \overline{w}_i / \sum_{i=1}^n \overline{w}_i. \tag{7}$$

计算判断矩阵的最大特征值  $\lambda_{\max}$ :

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{nw_i} \sum_{j=1}^n d_{ij} w_j. \tag{8}$$

(4) 一致性检验

在计算过程中会出现误判,影响最终评价结果,因此需要对判断矩阵进行一致性检验,用一致性比率  $C.R.$  来衡量,计算公式为

$$K_{C.R.} = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n - 1)\beta_{RI}}. \tag{9}$$

式中: $\beta_{RI}$  为平均随机一致性指标。

一般认为当  $K_{C.R.} < 0.1$  时,判断矩阵具有满意的一致性。

1.2.2 加权优劣排序

(1) 加权矩阵

采用向量规范化的方法求出规范化矩阵,并将权重与归一化矩阵相乘,得到加权矩阵  $z_{ij}$ :

$$z_{ij} = w_j \cdot r_{ij}. \tag{10}$$

$r_{ij}$ 为多参数问题的决策矩阵,经归一化后所得,归一化方法为

$$r_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m d_{ij}^2}} \tag{11}$$

(2) 正理想解和负理想解的确定

设正理想解  $z^+$  的第  $j$  个参数值为正理想解  $z_j^+$ , 负理想解  $z^-$  的第  $j$  个参数值为负理想解  $z_j^-$ , 则有:

$$z_j^+ = \{(\max z_{ij}, i \in I^+), (\min z_{ij}, i \in I^-)\} = (z_1^+, z_2^+, \dots, z_n^+), j=1, 2, \dots, n. \tag{12}$$

$$z_j^- = \{(\min z_{ij}, i \in I^+), (\max z_{ij}, i \in I^-)\} = (z_1^-, z_2^-, \dots, z_n^-), j=1, 2, \dots, n. \tag{13}$$

(3) 目标层与正理想解及负理想解间的距离  $d_i^+$ 、 $d_i^-$  的计算

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_{ij} - z_j^+)^2}, i = 1, 2, \dots, m. \tag{14}$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_{ij} - z_j^-)^2}, i = 1, 2, \dots, m. \tag{15}$$

(4) 各方案综合评价指数

接近度  $C_i$  反映了评价对象与正理想解、负理想解的疏远程度,  $C_i$  越大, 越靠近正理想解, 越远离负理想解, 最后按照计算结果从小到大顺序排列, 从而判断与评价对象的接近度。计算公式:

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}. \tag{16}$$

2 工程应用

2.1 研究概况

沈阳市某化工厂以生产铬盐为主, 生产过程中排放大量的铬渣等废弃物, 堆放在化工园区内, 造成严重的土壤重金属污染, 需对场地进行治理修复。该厂位于沈阳市北部, 地处辽河冲击平原, 地势平坦, 属北温带, 为半干旱、半湿润大陆性季风气候, 会出现干旱现象, 修复植物的抗旱性相对重要。

2.2 植物的选择

目前研究结果显示, 修复植物应该满足以下条件<sup>[14]</sup>: 一是植物能够超量吸收重金属; 二是转运系数大于 1, 即地上部分植物吸收的重金属含量大于根系部分; 三是植物生长几乎不受污染影响。根据以上原则, 进行实地调查和资料查找, 经过比对, 拟定富集铬能力较强的 15 种植物作为待选对象(见表 2)<sup>[15-17]</sup>。

2.3 植物适应性试验

2.3.1 试验方法

植物适应性是治理修复的基础, 因场地不同, 有些植物的特性可能发生变化, 所以需要对所选植物进行盆栽生态适应性试验。

盆栽试验土取自被铬金属污染的研究区, 土壤在通风阴凉处风干, 过筛处理。将 15 种待选植物种子于 2021 年 6 月 24 日进行盆栽种植, 每个品种栽种 5 盆, 每盆播种 20 粒, 采取常规栽培管理措施, 每天观察植物长势, 记录植物成活率, 使用直尺测量植株株高, 精度为 0.1 mm; 植株重金属含量的测定采用硝酸消解火焰原子吸收分光光度法。

根据全国第二次土壤普查养分分级标准和文献[18-19], 设置不同梯度的参数值来观察植物的生长状况。将土壤肥力按全氮、全磷、全钾的含量分为丰富、较丰富、中等、较缺、缺、极缺 6 个等级。将土壤 pH 值分为 6 个等级: 小于 4.5 为强酸性, 4.5~5.5 为酸性, 5.5~6.5 为弱酸性, 6.5~7.5 为中性, 7.5~8.5 为弱碱性, 8.5~9.5 为碱性。每种植物分别设置 10%、20%、30%、40%、50% 等五种不同含水量来测试植物的耐旱性, 植物的耐旱性分为 5 个级别, 包括弱、较弱、一般、强、较强。

2.3.2 试验结果

盆栽试验总时间为期 3 个月, 通过观察植物的生长状况及检测土壤金属铬的去除率, 得到 15 种待选植物试验结果(见表 2)。

表 2 15 种待选植物部分指标试验结果

Table 2 The experimental values of 15 species of plants to be selected

植物名称	土壤肥力	耐旱性	土壤 pH 值	周期/d	去除率/%
小蓬草	4	一般	6.3~7.1	82	56
芦苇	3	弱	6.2~6.9	79	63
高羊茅	2	一般	6.6~7.2	63	77
蓖麻	2	一般	6.3~7.9	75	69
马齿苋	5	较强	7.3~8.6	57	17
狼尾草	5	强	7.6~8.2	63	82
狗尾草	3	强	8.2~9.0	78	79
黑麦草	4	一般	7.4~8.9	71	73
李氏禾	2	弱	6.4~7.2	73	69
牛筋草	5	较强	7.1~8.9	62	76
芦竹	3	一般	6.3~7.3	73	74
黄花稔	2	一般	6.8~7.8	75	69
小蓬草	3	强	6.1~7.1	69	60
尼科菊	2	弱	6.7~6.8	71	56
灰绿藜	5	弱	7.2~7.9	72	54

通过盆栽试验可以看出,15 种植物所需的营养成分级别在 2~5,其中高羊茅、蓖麻、李氏禾、黄花稔、尼科菊对营养成分要求较低。部分植物能较好地富集土壤中的铬,且在试验过程中发现它们能够生长多日,适应污染环境。通过试验发现马齿苋、牛筋草受土壤含水

量的影响较小,具有较高的抗旱性。植物在酸性土壤中生长会受到影响,调查发现,研究区的土壤呈弱碱性,马齿苋、狼尾草、灰绿藜等植物长势较好。去除率高、修复周期短的植物有利于工程应用,狼尾草在这方面表现出很好的优越性,其重金属去除率达 82%。

2.4 植物筛选数学模型的计算

2.4.1 指标权重的确定

由表 1 和式(1)、(2)并结合盆栽试验结果可构建比较矩阵,并计算重要性排序指数, $r_i$ 、 $r_j$  分别为

$$r_i = \{12, 12, 14, 12, 6, 7, 4, 4\};$$
$$r_j = \{13, 3, 3, 7, 10, 10, 13, 14\}。$$

由比较矩阵及式(4)可构建判断矩阵  $D$ 。

根据式(5)计算得到  $\bar{w}_i$ ,对  $\bar{w}_i$  归一化处理得到特征向量及权重值  $W = (0.103\ 4, 0.111\ 5, 0.012, 0.102\ 1, 0.286, 0.142, 0.102\ 9, 0.040\ 1)$ ,各指标详细权重结果见表 3,把平均随机一致性指标代入式(9)、(10)进行一致性检验,计算得到  $K_{C.R.} < 0.1$ ,表明判断矩阵的构造合理。

表 3 最适宜植物评价指标权重结果

Table 3 Evaluation index weight results of optimal plant

目标层	准则层		因素层		综合权重
	因素	权重	因素	权重	
土壤修复植物评价体系 A	生态适应性(B1)	0.329	土壤肥力(C1)	0.413 2	0.103 4
			耐旱性(C2)	0.269 9	0.231 5
			土壤 pH 值(C3)	0.214 5	0.142 0
			病虫害种类(C4)	0.102 4	0.041 2
	技术可行性(B2)	0.528	去除率(C5)	0.763 2	0.106 0
			修复周期(C6)	0.236 8	0.122 0
	经济性(B3)	0.143	运行成本(C7)	0.640 2	0.112 9
			资源获取成本(C8)	0.359 8	0.141 0

由表 3 可知,在最适宜修复植物评价指标体系一级指标中,技术可行性 B2 所占权重为 0.528,高于生态适应性指标 B1 和经济性指标 B3,表明在植物修复过程中,技术可行性对植物修复效果起主导作用,这也是实

际修复工程中最关键的因素。在二级指标中,在生态适应性 B1 里,土壤肥力 C1 所占权重最高,为 0.413 2;在技术可行性 B2 里,去除率 C5 所占权重最高,为 0.763 2;在经济性 B3 里,运行成本 C7 所占权重最高,为



0.640 2。从综合权重值来看,整个评价体系中,耐旱性所占权重最大,为0.231 5,表明在在污染土壤植物修复工程中,耐旱性是影响修复效果的主要因素,也就是说,研究区的水文条件会影响其修复效果,这也与徐秀源<sup>[20]</sup>研究结果是一致的。除耐旱性以外,土壤 pH 值、运行成本对整个修复工程也起主导作用。

2.4.2 最优方案的确定

通过土壤重金属修复植物评价指标体系得到判断矩阵及权重,再根据式(11)、(12)构建加权矩阵 $z_{ij}$ 后,可得该问题的“正理想解 $z^+$ ”和“负理想解 $z^-$ ”:

$$z^+ = (0.057, 0.016, 0.032, 0.035, 0.042, 0.010, 0.032, 0.039);$$
$$z^- = (0.012, 0.004, 0.016, 0.024, 0.039, 0.017, 0.013, 0.016).$$

将 $z^+$ 、 $z^-$ 代入式(13)可分别求得15种植物与正理想解 $z^+$ 、负理想解 $z^-$ 的距离,最后利用式(16)计算相对接近度,并对其进行排序,计算结果见表4。

表4 TOPSIS 最终评价结果及排序  
Table 4 TOPSIS final evaluation results and ranking

植物名称	$d^+$	$d^-$	相对接近度	排序
小蓬草	0.015	0.042	0.737	6
芦苇	0.019	0.031	0.620	7
高羊茅	0.078	0.068	0.466	11
蓖麻	0.036	0.123	0.774	4
马齿苋	0.016	0.078	0.830	3
狼尾草	0.021	0.109	0.838	1
狗尾草	0.012	0.039	0.765	5
黑麦草	0.014	0.017	0.548	9
李氏禾	0.039	0.029	0.426	12
牛筋草	0.014	0.069	0.831	2
芦竹	0.089	0.126	0.586	8
黄花稔	0.123	0.089	0.420	13
小蓬草	0.024	0.029	0.547	10
尼科菊	0.025	0.0132	0.346	14
灰绿藜	0.039	0.0158	0.288	15

由表4可以看出,15种待选方案的相对

接近度在0.288~0.838,其中狼尾草、牛筋草、马齿苋的相对接近度在0.8以上,适宜用于该铬金属污染场地植物的修复。

3 结 论

(1)对层次分析法中极差法构造判断矩阵进行改进,引入新的构造矩阵方法,能够正确地构造矩阵,减少评价误差。

(2)将构建的土壤重金属污染修复植物筛选评价模型应用于实际工程中,通过AHP计算各指标权重值发现,在污染土壤植物修复工程中,耐旱性是影响修复效果的主要因素。

(3)根据计算结果,狼尾草、牛筋草、马齿苋适宜用于大陆性季风气候区铬金属污染场地的修复。

参考文献

[1] CHANEY R L, MALIK M, LI Y M, et al. Phytoremediation of soil metals [J]. Current opinion in biotechnology,1997,8(3):279-284.

[2] 石杨,李家豪,于月,等. 重金属污染土壤的植物修复技术与其他技术联用的进展与前景[J]. 环境污染与防治,2022,44(2):244-250. (SHI Yang, LI Jiahao, YU Yue, et al. Progress and prospect of plant remediation technology joint with other technologies for heavy metal contaminated soil [J]. Environmental pollution and control,2022,44(2):244-250.)

[3] 唐玉情,孙飞,刘海龙,等. 基于AHP法黑龙江多宝山铜业矿山排土场植物筛选[J]. 植物研究,2021,41(5):700-711. (TANG Yuqing, SUN Fei, LIU Hailong, et al. Plant screening in dumping site of Duobaoshan copper mine in Heilongjiang based on AHP method [J]. Bulletin of botanical research, 2021,41(5):700-711.)

[4] 罗云. 基于Topsis的污染场地土壤修复技术筛选方法及应用研究[D]. 上海:上海师范大学,2013. (LUO Yun. Screening method and application of remediation technology in contaminated site based on Topsis [D]. Shanghai: Shanghai Normal University,2013.)

[5] 韦一鸣,董增川,徐伟,等. 基于TOPSIS-AHP模型的嫩江柔性防浪林植物优选[J]. 水生态学杂志,2019,40(5):20-25. (WEI Yiming, DONG Zengchuan, XU Wei, et al. Optimization of vegetation in a flexible wave break forest for Nenjiang river using a multi-attribute TOPSIS-AHP model [J]. Journal of hydroecology,2019,40(5):20-25.)

- [6] 张倩,蒋栋,谷庆宝,等.基于 AHP 和 TOPSIS 的污染场地修复技术筛选方法研究[J].土壤学报,2012,49(6):1088-1094.  
(ZHANG Qian, JIANG Dong, GU Qingbao, et al. Selection of remediation techniques for contaminated sites using AHP and TOPSIS [J]. Acta pedologica sinica, 2012, 49(6):1088-1094.)
- [7] HAYES D M, MAZZUCHIT T A. A decision model for remedy selection under the comprehensive environmental response, compensation, and liability act [J]. Federal facilities environmental journal, 2005, 16(2):79-94.
- [8] 李娜.土壤重金属污染的植物修复技术研究现状[J].中国资源综合利用,2021,39(12):106-108.  
(LI Na. Current status of research phytoremediation technology of soil contaminated by heavy metals [J]. China resources comprehensive utilization, 2021, 39(12):106-108.)
- [9] 杨维,沈爱莲,李璇,等.大孤山矿区土壤重金属形态分布特征及影响因素[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2011,27(1):130-134.  
(YANG Wei, SHEN Ailian, LI Xuan, et al. Morphological distribution characteristic of heavy metal chemical form and its influencing factors around the Dagushan mine district [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2011, 27(1):130-134.)
- [10] 江澜,王小兰.铬的生物作用及污染治理[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2004,21(4):325-328.  
(JIANG Lan, WANG Xiaolan. Bioactivity function of chromium and measures to prevent its chromic [J]. Journal of Chongqing technology and business university (natural science edition), 2004, 21(4):325-328.)
- [11] 张纪利,魏苙越,王景,等.高碳基有机肥对烤烟生长发育、病害、化学成分及经济性状的影响[J].江苏农业科学,2022,50(20):117-124.  
(ZHANG Jili, WEI Jiangyue, WANG Jing, et al. Effects of carbon-based organic fertilizer on growth, disease, chemical composition and economic properties of flue-cured tobacco [J]. Jiangsu agricultural sciences, 2022, 50(20):117-124.)
- [12] 谢运河,纪雄辉,吴家梅,等.镉砷污染土壤“三高”富集植物筛选与修复成本分析[J].环境科学与技术,2020,43(增刊1):116-121.  
(XIE Yunhe, JI Xionghui, WU Jiamei, et al. The “three highs” hyperaccumulators screening and repair cost analysis of Cadmium and Arsenic contaminate soil [J]. Environmental science and technology, 2020, 43(S1):116-121.)
- [13] 黄勇,盛浩,张亮,等.收益型植物修复镉污染耕地土壤的研究进展[J].中国麻业科学,2018,40(6):290-295.  
(HUANG Yong, SHENG Hao, ZHANG Liang, et al. Research development on profitable phytoremediation toward Cadmium contaminated cultivated soil [J]. Plant fiber sciences in China, 2018, 40(6):290-295.)
- [14] 施雪黎.水湿生植物中 Cd 和 Pb 的积累研究[D].杭州:浙江大学,2016.  
(SHI Xueli. Study on Cd and Pb accumulation in aquatic and wetland plants [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.)
- [15] 陈志明,王玉军,于森,等.某电镀厂附近土壤铬污染及植物富集特征研究[J].中国农学通报,2010,26(19):363-368.  
(CHEN Zhiming, WANG Yujun, YU Miao, et al. Investigation for Chromium-polluted soil and characteristics of accumulation nearby electroplating factory [J]. Chinese agricultural science bulletin, 2010, 26(19):363-368.)
- [16] GALAL T M, AL-SODANY Y M, AL-YASI H M. Phytostabilization as a phytoremediation strategy for mitigating water pollutants by the floating macrophyte Ludwigia stolonifera (Guill. Perr.) pH Raven. [J]. International journal of phytoremediation, 2020, 22(4):373-382.
- [17] BAKER A J M, BROOKS R R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements: a review of their distribution, ecology and phytochemistry [J]. Biorecovery. 1989, 1(2):81-12.
- [18] 李洋,王坤春,许苗苗,等.山东省淄博市临淄区设施蔬菜土壤地力及其重金属积累变化分析[J].农业工程技术,2022,42(25):82-88.  
(LI Yang, WANG Kunchun, XU Miaomiao, et al. Analysis of soil fertility and heavy metal accumulation of facility vegetables in Linzi District, Zibo city, Shandong Province [J]. Agricultural engineering technology, 2022, 42(25):82-88.)
- [19] 代静,司万童,赵雪波,等.稀土尾矿库复合污染对周边土壤肥力的影响[J].江苏农业科学,2017,45(20):299-303.  
(DAI Jing, SI Wantong, ZHAO Xuebo, et al. Effect of compound pollution of rare earth tailings pond on surrounding soil fertility [J]. Jiangsu agricultural sciences, 2017, 45(20):299-303.)
- [20] 徐秀源.工业废弃地生态修复植物适应性评价:以唐山植物园为例[J].山东林业科技,2015,45(1):83-87.  
(XU Xiuyuan. Evaluation of plant adaptability in ecological restoration of industrial wasteland: a case study of Tangshan botanical garden [J]. Journal of Shandong forestry science and technology, 2015, 45(1):83-87.)
- (责任编辑:王国业 英文审校:唐玉兰)