

# 不同修复类型铀富集植物筛选评价及铀富集特性研究

朱杰 郑慧赢 陈晓明 朱博 黄娅慧 黄朝辉 刘子豪

<sup>1</sup>(西南科技大学生命科学与农林学院 绵阳 621010)

**摘要** 为探究不同浓度铀胁迫下富集植物的筛选评价模型构建及其富集规律,本研究以一年生黑麦草、龙葵、高丹草、拉巴豆以及模式植物红苋菜和向日葵为材料,开展盆栽试验,设置 50 mg/kg、100 mg/kg 和 200 mg/kg 的铀胁迫浓度,测定植株地上与地下部干重及铀含量,计算铀积累量、富集系数 (BCF)、转运系数 (TF) 和单位积累量 (BCQ),并基于主成分分析法分别构建提取修复与根部富集修复筛选模型,以综合评价各植物铀富集能力并筛选出优势植物。结果表明:在 200 mg/kg 铀胁迫下,高丹草地下部铀含量最高 (1215.91 mg/kg DW),铀积累量最大 (1.94 mg),转运系数最低 (0.1),地下部富集系数最高 (6.08),表现出极强的铀根部富集能力,黑麦草和龙葵次之;红苋菜和向日葵适用于中低浓度铀污染土壤的提取修复,高丹草则适用于高浓度铀污染区域;提取修复综合评价表明,红苋菜和向日葵在中低浓度下得分最高,高丹草在高浓度下得分最高;根部富集修复评价中高丹草综合得分最优,黑麦草和龙葵次之。综上,红苋菜和向日葵可作为中低浓度铀污染土壤的提取修复材料,高丹草可用于高浓度铀污染的提取修复;高丹草、黑麦草和龙葵具备作为铀污染土壤根部富集修复材料的潜力。本研究为铀污染土壤的植物筛选与评价提供了理论依据。

**关键词** 铀污染土壤,植物提取修复,铀超富集植物,修复综合评价,根部富集修复

**中图分类号** X173, X53

**DOI:** 10.11889/j.1000-3436.2025-0122

**CSTR:** 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2025-0122

**引用该文:**

朱杰,郑慧赢,陈晓明,等.不同修复类型铀富集植物筛选评价及铀富集特性研究[J].辐射研究与辐射工艺学报,XXXX,XX(X):XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0122.

ZHU Jie, ZHENG Huiying, CHEN Xiaoming, *et al.* Screening, evaluation and uranium enrichment characteristics of uranium-accumulating plants for different remediation types[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, XXXX, XX(X): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0122.



基金资助: 国家自然科学基金 (12275227)

第一作者: 朱杰, 男, 1999年8月出生, 西南科技大学生物与医药专业2023级硕士在读, E-mail: zzzhujie@163.com

通信作者: 陈晓明, 博士, 教授, E-mail: cmxkd@163.com; 朱博, 博士, 讲师, E-mail: zzhubo@126.com

收稿日期: 初稿 2025-12-17; 修回 2026-03-09

Supported by National Natural Science Foundation of China (12275227)

First author: ZHU Jie (male) was born in August 1999, master's candidate of 2023 in biology and medicine, Southwest University of Science and Technology, E-mail: zzzhujie@163.com

Corresponding author: CHEN Xiaoming, doctoral degree, professor, E-mail: cmxkd@163.com; ZHU Bo, doctoral degree, lecturer, E-mail: zzhubo@126.com

Received 17 December 2025; accepted 09 March 2026

## Screening, evaluation and uranium enrichment characteristics of uranium-accumulating plants for different remediation types

ZHU Jie ZHENG Huiying CHEN Xiaoming ZHU Bo HUANG Yahui HUANG Zhaohui LIU Zihao

<sup>1</sup>(School of Life Science and Agriculture & Forestry, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

**ABSTRACT** To investigate the establishment of a screening and evaluation model for enriched plants and their accumulation patterns under different uranium stress concentrations, this study conducted a pot experiment using annual ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.), black nightshade (*Solanum nigrum* L.), sorghum-sudan grass hybrid (*Sorghum bicolor* × *sudanense*), lablab bean (*Lablab purpureus*), as well as model plants red amaranth (*Amaranthus cruentus* L.) and sunflower (*Helianthus annuus*). The experiment included uranium stress concentrations of 50 mg/kg, 100 mg/kg, and 200 mg/kg. Shoot and root dry weights along with U concentrations were measured to calculate U accumulation, bioconcentration factor (BCF), translocation factor (TF), and bioconcentration quantity (BCQ). Based on principal component analysis, screening models for extraction remediation and root enrichment remediation were constructed to comprehensively evaluate the uranium enrichment capacity of each plant and identify dominant species. The results showed that under 200 mg/kg DW uranium stress, sorghum-sudan grass hybrid exhibited the highest uranium content in the underground parts (1215.91 mg/kg DW), the highest uranium accumulation amount (1.94 mg), the lowest translocation factor (0.1), and the highest underground bioconcentration factor (6.08), indicating extremely strong uranium root enrichment capacity, followed by ryegrass and black nightshade. Red amaranth and sunflower were suitable for extraction remediation in low to medium uranium-contaminated soils, while sorghum-sudan grass hybrid was applicable for high-concentration uranium-contaminated areas. The comprehensive evaluation for extraction remediation indicated that red amaranth and sunflower scored the highest under low to medium concentrations, while sorghum-sudan grass hybrid scored the highest under high concentrations. In the root enrichment remediation evaluation, sorghum-sudan grass hybrid achieved the highest comprehensive score, followed by ryegrass and black nightshade. In conclusion, red amaranth and sunflower can serve as materials for extraction remediation in low to medium uranium-contaminated soils, while sorghum-sudan grass hybrid is suitable for extraction remediation in high-concentration uranium contamination. sorghum-sudan grass hybrid, ryegrass, and black nightshade have the potential to be used as root enrichment remediation materials for uranium-contaminated soils. This study provides a theoretical basis for the screening and evaluation of plants for uranium-contaminated soil remediation.

**KEYWORDS** Uranium-contaminated soil, Phytoextraction remediation, Uranium hyperaccumulators, Comprehensive remediation assessment, Root-based enrichment remediation

**CLC** X173, X53

铀矿开采<sup>[1]</sup>、污水灌溉<sup>[2]</sup>及核工业发展<sup>[3]</sup>等活动导致土壤铀(U)污染日益严重<sup>[4-5]</sup>。在土壤重金属污染的各种修复技术中,植物提取<sup>[6]</sup>修复因其成本低、环境友好等优点而被广泛应用<sup>[7-9]</sup>。然而,该技术依赖重金属向植物地上部的转运,其收获物处置不当易造成二次污染,成为制约其推广的关键瓶颈<sup>[10]</sup>。

为克服上述局限,本课题组基于前期工作,提出植物根部富集技术,该技术利用根系对重金属的吸附、固定与转化作用,将污染物富集于根组织内,从而抑制其向地上部迁移,在保障地上

部生物量经济价值的同时,降低了二次污染风险<sup>[11]</sup>。在植物修复实践中,筛选高效修复植物是核心环节。目前,已发现黑麦草<sup>[12]</sup>、油麦菜<sup>[13]</sup>、向日葵<sup>[14]</sup>和特选榨菜<sup>[15]</sup>等多种植物对铀具有富集潜力,此外,超富集植物的筛选标准也多基于生物富集系数(BCF)与转运系数(TF)等单一或少数指标<sup>[16-18]</sup>。然而,随着修复场景的多元化,传统的筛选指标难以满足不同修复模式(如提取修复与根部富集修复)的差异化需求。同时,尽管建模分析在植物修复筛选中的应用日益增多<sup>[19]</sup>,但针对不同修复类型构建专属综合评价模型的研究

究尚显薄弱。因此，本研究基于前期文献调研及本课题组基础，选用一年生黑麦草、龙葵、高丹草、拉巴豆以及模式对照植物红苋菜和向日葵为试验材料，通过盆栽试验系统分析不同铀胁迫浓度下植物的生长与富集特性。通过主成分分析法分别构建针对提取修复和根部富集修复的专属筛选模型，旨在建立一种多指标协同的量化评价体系，为铀污染土壤植物修复提供新材料、新方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试植物

供试6种植物材料来自江苏新天地种业有限公司的一年生黑麦草 (*Lolium multiflorum* Lam.)、北京金土地农业研究所的高丹草 (*Sorghum bicolor* × *sudanense*)、宿迁市日出种业有限公司的观赏向日葵 (*Helianthus annuus*) 和红苋菜 (*Amaranthus cruentus* L.)、河北满畴农业科技有限公司的龙葵 (*Solanum nigrum* L.)、西南科技大学白史且教授课题组培育的拉巴豆 (*Lablab purpureus*)。

### 1.2 供试土壤

土壤pH=7.58，有机质含量为22.58 mg/kg，碱解氮含量为72.44 mg/kg，有效磷含量为11.10 mg/kg，有效钾含量50.17 mg/kg，铀背景浓度2.68 mg/kg。我国某铀矿区周边土壤铀含量最高达233.08 mg/kg，远超背景值<sup>[20]</sup>，因此选用UO<sub>2</sub>(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O配制铀污染土壤，设置浓度为50 mg/kg、100 mg/kg、200 mg/kg左右，以不添加铀为对照组。根据所需土壤浓度，用UO<sub>2</sub>(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O配置铀溶液，利用喷壶少量多次均匀地喷洒在土壤上，最后进行搅拌，然后置于暗处，静置30 d，完成铀污染土壤的制备。

### 1.3 植物种植与收获后处理

将选定植物置于50 mg/kg，100 mg/kg，200 mg/kg铀污染土壤中进行筛选，以未添加外源铀的土壤作为空白对照处理。将配制好的污染土壤装入塑料花盆（高度为14 cm，底部直径为10 cm，外部口径为16.5 cm），每盆装土1 kg，每种处理设置3次重复实验。每种植物在抽穗前进行收获，测定相关指标。

对于收获后的植物材料将会采用微生物降解减容技术进行处理，采用外加一定量的尿素

(1.6 g/kg)和接种一定量的强启动真菌QD-1（接种量5%）与白腐菌（接种量5%）能有效的促进植物基质的降解，实验后的污染土壤会分类收集于专用的防泄漏、防辐射标识的密封容器中，这些容器暂时存放于实验室指定的污染品存储区，然后会重复用于实验室其他重金属污染修复实验，以减少污染土壤的产生，极少数污染土壤由学校统一收集处理。

### 1.4 数据测定与指标计算

样品收获后用蒸馏水反复冲洗，按照地上部和地下部分别收获，然后烘干并测定其干重。植物样品研磨后经HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>法消解，采用电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS Agilent 7700x, USA）测定不同部位的铀含量，将植物地上部和地下部干重分别记为SDW（Shoot dry weight）和RDW（Root dry weight），植物地上部和地下部铀含量分别记为SUC（Shoot uranium content）和RUC（Root uranium content），植物地上部铀积累量和植物地下部铀积累量分别记为SUA（Shoot uranium accumulation）和RUA（Root uranium accumulation），植株铀含量记为TUC（Total uranium content）。指标计算参考江文静等<sup>[21]</sup>方法，见式（1）~（6）。

$$RUA(\text{mg}) = RDW \times RUC \quad (1)$$

$$TUC((\text{mg/kg})\text{DW}) = \text{植物铀积累量}/(\text{SDW} + \text{RDW}) \quad (2)$$

$$BCF = \text{植株铀含量}/\text{土壤铀含量} \quad (3)$$

$$BCF_r = RUC/\text{土壤铀含量} \quad (4)$$

$$TF = SUC/RUC \quad (5)$$

$$BCQ(\text{mg/kg土}) = \text{整株干重} \times \text{植株铀含量}/\text{单盆土重}(1\text{kg}) \quad (6)$$

### 1.5 筛选评价模型建立

试验测定所得指标数据由office 2021整理，使用IBM SPSS Statistics 26软件对不同处理之间进行显著性差异比较（ $p < 0.05$ ）和主成分分析，所有因子均采用极差化进行标准化处理，提取修复指标不做处理，而根部富集指标将地上部铀含量和转运系数设为负向指标进行标准化处理；采用Origin 2021软件对相关数据制图。综合评价模型建立参考董海燕等<sup>[22]</sup>方法，见式（7）~（10）。

### 1.5.1 原始数据标准化

对原始数据进行极差标准化，根部富集指标中地上部铀含量和转运系数越小越好，因此这两个指标设为负向指标，其他指标设为正向指标进行处理。

$$Z_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (\text{正向}) \quad (7)$$

$$Z_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (\text{负向}) \quad (8)$$

式中： $x_{ij}$ ，第  $i$  个样本的第  $j$  项原始指标值； $\max(x_j)$  与  $\min(x_j)$ ，第  $j$  项指标所有样本值的最大值和最小值； $Z_{ij}$ ，标准化后的指标值。

### 1.5.2 主成分得分系数计算

$$F_m = Zv_m \quad (9)$$

式中： $Z$ ，标准化数据矩阵 ( $z_{ij}$ ) <sub>$n \times p$</sub> ； $v_m$ ，相关系数矩阵第  $m$  大特征值对应的单位特征向量 ( $v_{m1}, v_{m2}, \dots, v_{mp}$ )<sup>T</sup>，其分量  $v_{mj}$  即为第  $j$  个指标在第  $m$  个主成分中的系数； $F_m$ ，第  $m$  个主成分的得分向量。

### 1.5.3 综合得分模型中各指标系数

$$\omega_j' = \sum_{m=1}^k \eta_m v_{mj} \quad (10)$$

式中： $K$  选取的主成分个数； $\eta_m$ ，第  $m$  个主成分的

方差贡献率； $\omega_j'$  为第  $j$  个标准化指标在综合得分模型中的线性组合系数。

### 1.5.4 权重计算

$$\omega_j = \frac{|\omega_j'|}{\sum_{j=1}^p |\omega_j'|} \quad (11)$$

式中： $\omega_j$  为第  $j$  个指标的最终权重。

### 1.5.5 综合评价得分计算

$$D = \sum_{j=1}^p \omega_j Z_{ij} \quad (12)$$

式中： $D$  为各植物铀富集能力综合评价总分。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同浓度铀胁迫对植物生物量的影响

铀胁迫对供试植物生物量的影响如图 1 所示。在无铀胁迫（对照组）条件下，龙葵的 SDW 最大（14.54 g），高丹草次之。随着铀胁迫浓度增加，高丹草的 SDW 与 RDW 呈下降趋势，但与对照组无显著差异 ( $p > 0.05$ )。黑麦草、红苋菜、向日葵和拉巴豆的 SDW 在低、中浓度铀胁迫下较对照组有所增加，但在 200 mg/kg 浓度下，其 RDW 均出现下降。

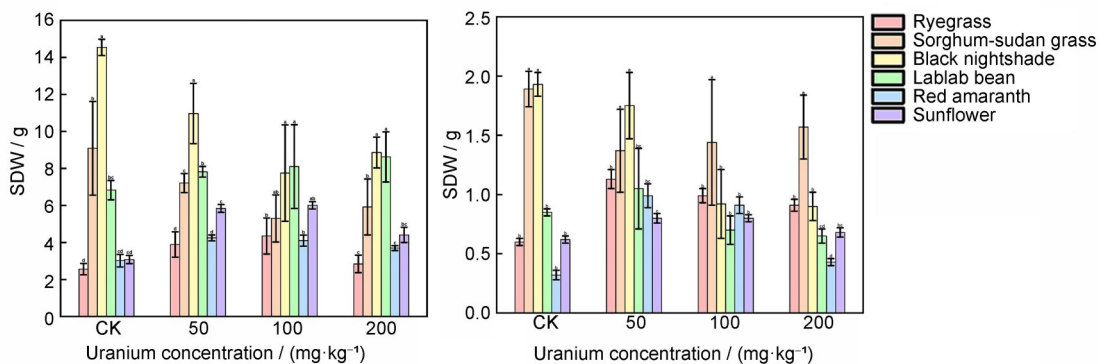


图 1 不同浓度铀胁迫下植物地上部和地下部干重(不同小写字母表示不同处理间差异显著( $p < 0.05$ ),下同)(彩色见网络版)

Fig.1 Shoot and root dry weights of selected plant species under uranium concentration gradients (Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ( $p < 0.05$ ), as below) (color online)

## 2.2 植物对铀的吸收和转运

### 2.2.1 植物的铀含量和积累量

不同植物在不同浓度铀污染胁迫下其富集指标存在显著差异。如图 2 所示，对照组（CK）植株铀含量均低于检测限。在不同铀胁迫浓度下，植物各部位铀含量与积累量差异显著 ( $p < 0.05$ )。在 50 mg/kg 胁迫下，红苋菜的 SUC 最高，达 243.90 mg/kg DW；在 100 mg/kg 胁迫下，向日葵

的 SUC 最高，达 224.72 mg/kg DW。在 200 mg/kg 胁迫下，高丹草表现出极强的地下部富集能力，其 RUC 高达 1 215.91 mg/kg DW，显著高于其他植物。相应地，高丹草在 200 mg/kg 时的 RUA 最大（1.94 mg），而红苋菜和向日葵在中低浓度下的 SUA 最高，分别为 1.04 mg 和 1.35 mg。

### 2.2.2 铀胁迫对植物富集指标的影响

由图 3 可知，BCF、TF 等指标随铀浓度升高呈现规律性变化。在 50 mg/kg 时，红苋菜的 BCF 最

高 (4.62); 在 100 mg/kg 时, 向日葵的 BCF 最高且 TF 大于 1 (1.99); 在 200 mg/kg 时, 高丹草的地下部富集系数 (BCF<sub>R</sub>) 高达 6.08, 而其 TF 值最低 (0.08), 表明铀主要被富集于根部。单位积累量

(BCQ) 进一步显示, 红苋菜、向日葵和高丹草分别在低、中、高浓度铀胁迫下具有最高值, 表明其在不同污染程度下的修复潜力。

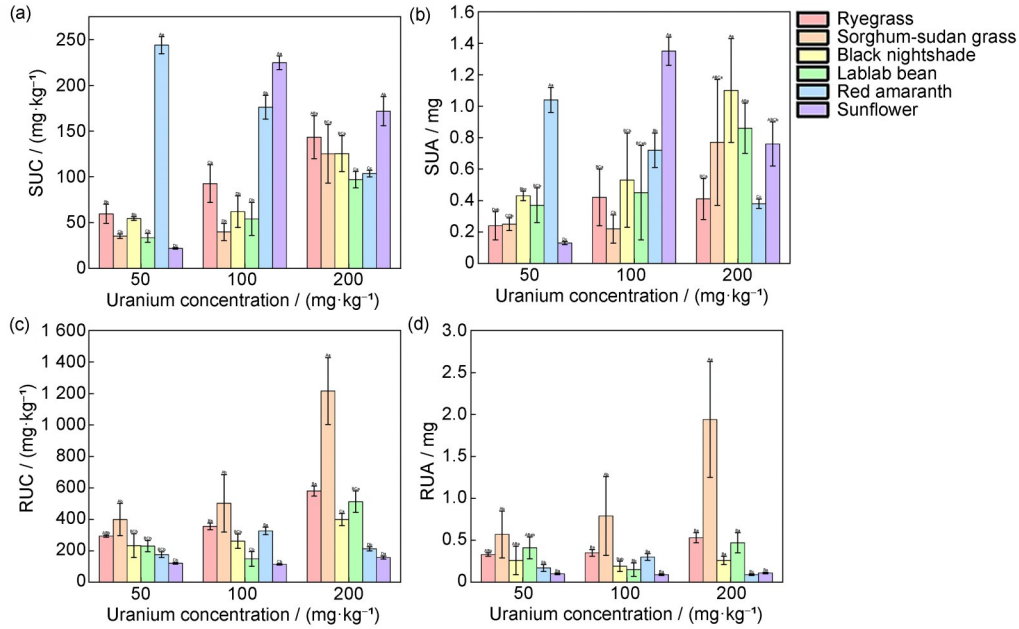


图2 不同浓度铀胁迫下植物铀含量和积累量(不同小写字母表示同植物不同浓度间差异显著( $p < 0.05$ ), 不同大写字母表示同浓度不同植物间差异显著( $p < 0.05$ ), 下同; a~d 分别代表地上部铀含量、地上部铀积累量、地下部铀含量、地下部铀积累量(彩色见网络版)

Fig.2 Uranium content and accumulation of plants under different uranium concentration stresses (Different lowercase letters indicate significant differences among different concentrations of the same plant ( $p < 0.05$ ), while different uppercase letters indicate significant differences among different plant species at the same concentration ( $p < 0.05$ ). The same applies below. a~d represent uranium content in shoots, uranium accumulation in shoots, uranium content in roots, and uranium accumulation in roots, respectively) (color online)

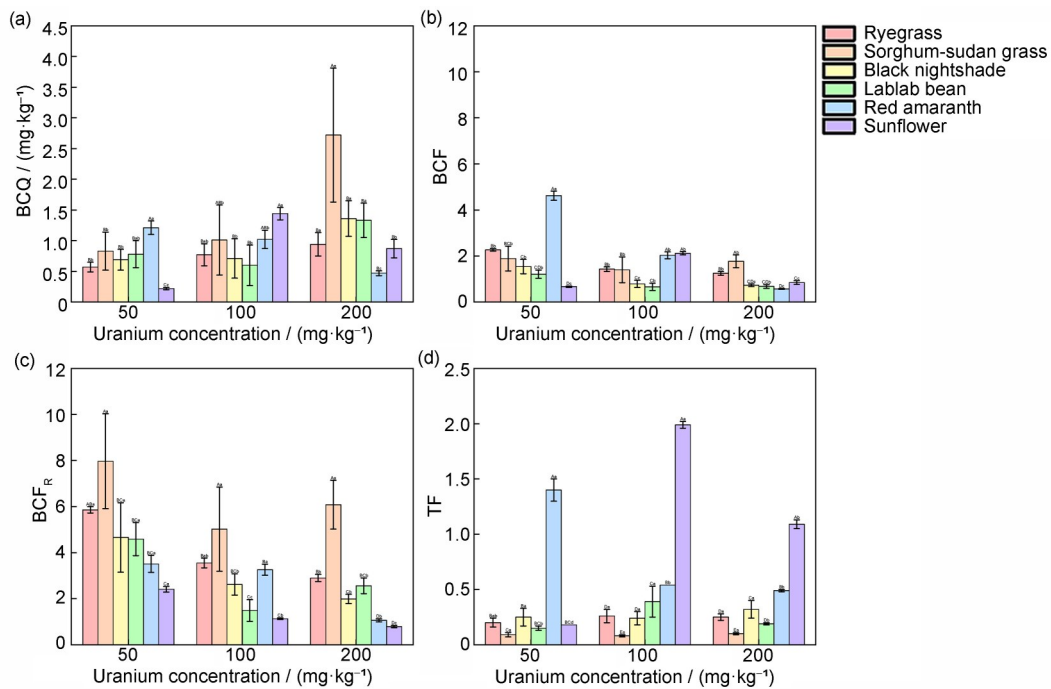


图3 不同浓度铀胁迫下植物的富集指标(a~d 分别代表单位积累量、富集系数、地下部富集系数、转运系数)(彩色见网络版)  
Fig.3 Enrichment indicators of plants under different uranium concentration stresses (a~d represent unit accumulation, enrichment coefficient, underground enrichment coefficient, and transfer coefficient, respectively) (color online)

### 2.3 提取修复植物综合评价

对6种植物的富集指标进行主成分分析，建立提取修复综合评价模型。如表1和表2所示，根据主成分分析结果，得到提取修复能力综合评价模型（式13）。

$$D=0.093 \quad 7x_1+0.125 \quad 6x_2+0.116 \quad 6x_3+0.136 \quad 1x_4+0.116 \quad 6x_5+0.110 \quad 9x_6+0.158 \quad 9x_7+0.141 \quad 6x_8 \quad (13)$$

式中： $x_1 \sim x_8$ 分别为生物量、SUC、RUC、SUA、RUA、BCF、BCQ、TF。

各植物的综合评价得分如表3所示，U50综合评分排序为红苋菜>龙葵>高丹草>拉巴豆>黑麦草>向日葵；U100综合评分排序为向日葵>红

苋菜>黑麦草>高丹草>拉巴豆>龙葵；U200综合评分排序为高丹草>拉巴豆>龙葵>向日葵>黑麦草>红苋菜。在低浓度铀胁迫下，红苋菜得分最高且排名靠前，而在高浓度铀胁迫下，红苋菜的得分和排名靠后，表明红苋菜适用于低浓度铀污染土壤提取修复，且具有较强的铀污染土壤提取修复能力；在中浓度铀胁迫下，向日葵得分最高，表明其适用于中浓度铀污染提取修复；高丹草在高浓度铀胁迫下，其得分最高，表现出较强的高浓度铀胁迫耐受能力和富集能力，与前文铀富集指标分析结果一致，红苋菜、向日葵和高丹草是潜在的铀污染土壤提取修复植物。

表1 主成分分析结果  
Table 1 Results of principal component analysis

主成分编号 Principal component number	初始特征值 Initial eigenvalue			旋转载荷平方和 Sum of squares of rotating load		
	特征值 Eigenvalues	方差解释率/% Proportion of variance explained	累积方差解释率/% Cumulative proportion of variance explained	总计 Total	方差百分比/% Percent variance	累积贡献率/% Cumulative percentage of variance
1	3.184	39.803	39.803	3.038	37.981	37.981
2	2.789	34.858	74.661	2.810	35.130	73.111
3	1.157	14.458	89.119	1.281	16.008	89.119

表2 成分矩阵和权重  
Table 2 Rotated component matrix and weights

指标 Index	主成分1 Principal component 1	主成分2 Principal component 2	主成分3 Principal component 3	权重/% Weights
生物量 Plant biomass	-0.07	0.13	0.93	9.37
SUC	0.93	0.06	-0.27	12.56
RUC	-0.09	0.98	-0.02	11.66
SUA	0.91	0.14	0.31	13.61
RUA	-0.08	0.98	0.03	11.66
BCF	0.56	0.18	-0.42	11.09
BCQ	0.50	0.84	0.21	15.89
TF	0.88	-0.34	-0.15	14.16

表3 各植物综合评价得分  
Table 3 Comprehensive evaluation scores for each plant

植物种类 Plant species	综合评价得分 Comprehensive evaluation score		
	U50	U100	U200
黑麦草 Ryegrass	0.154	0.184	0.227
高丹草 Sorghum-Sudan grass hybrid	0.178	0.174	0.479
拉巴豆 Lablab bean	0.177	0.171	0.314
龙葵 Black nightshade	0.185	0.149	0.285
红苋菜 Red amaranth	0.489	0.300	0.135
向日葵 Sunflower	0.047	0.503	0.282

## 2.4 根部富集修复植物综合评价

植物根部富集技术是利用植物根系通过吸附、吸收、稳定和转化，使重金属富集于植物根系组织内，限制重金属向地上部转运，使其地上部收获后可产生一定经济效益，因此将SUC和TF设为负向指标。对6种植物的富集指标进行主成分分析，建立根部富集修复综合评价模型。如4和表5所示，根据主成分分析结果，得到根部富集修复能力综合评价模型（式14）。

$$D=0.108 \ 1x_1+0.164 \ 0x_2+0.137 \ 8x_3+0.145 \ 1x_4+0.133 \ 6x_5+0.151 \ 4x_6+0.160 \ 0x_7 \quad (14)$$

式中： $x_1 \sim x_7$ 分别为SDW、RDW、SUC、RUC、RUA、TF、 $BCF_R$ 。

各植物的综合评价得分如表6所示，U50综合评分排序为高丹草>龙葵>拉巴豆>黑麦草>向日葵>红苋菜；U100综合评分排序为高丹草>黑麦草>拉巴豆>龙葵>红苋菜>向日葵；U200综合评分排序为高丹草>龙葵>黑麦草>拉巴豆>红苋菜>向日葵。高丹草、黑麦草和龙葵排名皆较为靠前，表明具有较强的铀根部富集能力和铀耐性，与前文铀富集指标分析结果一致。高丹草在不同浓度铀胁迫下排名皆是第一，表明高丹草是潜在的铀根部高富集植物。

表4 主成分分析结果  
Table 4 Results of principal component analysis

主成分编号 Principal component number	初始特征值 Initial eigenvalue			旋转载荷平方和 Sum of squares of rotating load		
	特征值 Eigenvalues	方差解释率 / % Proportion of variance explained	累积方差解释率 / % Cumulative proportion of variance explained	总计 Total	方差百分比 / % Percent variance	累积贡献率 / % Cumulative percentage of variance
1	3.511	50.152	50.152	2.997	42.818	42.818
2	1.637	23.385	73.537	1.881	26.875	69.694
3	0.932	13.317	86.854	1.201	17.161	86.854

表5 成分矩阵和权重  
Table 5 Rotated component matrix and weights

指标 Index	主成分1 Principal component 1	主成分2 Principal component 2	主成分3 Principal component 3	权重 / % Weights
SDW	0.020	0.150	0.913	10.81
RDW	0.766	0.149	0.472	16.40
SUC	-0.019	0.944	0.239	13.78
RUC	0.908	0.069	-0.180	14.51
RUA	0.964	0.045	-0.013	13.36
TF	0.323	0.909	0.007	15.14
$BCF_R$	0.742	0.334	0.234	16.00

表6 各植物综合评价得分  
Table 6 Comprehensive evaluation scores for each plant

植物种类 Plant species	综合评价得分 Comprehensive evaluation score		
	U50	U100	U200
黑麦草 Ryegrass	0.471	0.404	0.373
高丹草 Sorghum-Sudan grass hybrid	0.613	0.568	0.688
拉巴豆 Lablab bean	0.471	0.398	0.362
龙葵 Black nightshade	0.601	0.377	0.450
红苋菜 Red amaranth	0.195	0.311	0.244
向日葵 Sunflower	0.390	0.107	0.179

### 3 讨论

植物对于重金属的吸收和积累是由植物的生物量和富集量共同决定的，而不是由土壤中的总重金属所决定，植物对重金属的吸收效率除了受土壤中根-土壤共同界面重金属的生物有效性影响，还受植物根部的生物量影响<sup>[23]</sup>。基于前期文献调研及本课题组研究基础，筛选出的6种植物对铀都具有一定的铀富集能力和铀耐性，其中高丹草的铀富集能力最强，且随着铀胁迫浓度的增加，其生物量较CK无明显差异，表现出极强的铀耐性，与苏赛赛等<sup>[24]</sup>发现的规律相似。植物对铀胁迫的响应表现为低浓度促进生长而高浓度会产生抑制作用<sup>[25]</sup>，可能是因为在中低浓度铀胁迫下，铀胁迫对植物产生了一种逆境刺激，这种刺激可能会激活植物的抗氧化系统，使植物的代谢活动更为旺盛，从而间接导致植物生物量的增加，而在高浓度铀胁迫下，抑制效应占据主导地位，导致植物生长受到抑制<sup>[26]</sup>。本研究结果也表明，中低浓度铀胁迫下，黑麦草的生物量较CK有所增加，而高浓度铀胁迫下，其生长受到抑制，生物量增加不明显。有研究表明，向日葵地下部对铀具有较强的富集作用<sup>[21]</sup>。本试验条件下，在200 mg/kg铀浓度胁迫下，高丹草地下部铀含量远高于向日葵的地下部铀含量，并且高丹草的地下部铀积累量是向日葵的17.64倍，可能是由于重金属通过植物细胞壁结合以及液泡隔离，将重金属富集于根部所导致<sup>[27]</sup>。

植物茎叶中重金属含量的变化与植物不同部位重金属的转运以及迁移能力有关<sup>[28]</sup>。不同植物在不同铀浓度污染胁迫下其根部将铀往地上部转移的能力差异显著。有研究表明，植物根部对于重金属的灵敏性远高于地上部<sup>[29]</sup>。一般情况下，植物会将重金属限制在根部以减轻其毒害作用<sup>[30]</sup>。本研究中，在不同浓度铀胁迫下，黑麦草、高丹草、龙葵和拉巴豆的转运系数皆 $<1$ ，其中高丹草的转运系数最低，表明高丹草对铀的根部阻控能力最强。由于各植物生物量及地上地下部铀含量存在差异，所以植物对铀的富集量也存在明显差异。不同浓度铀胁迫下高丹草的地下部富集系数和地下部铀积累量最高，表现出最强的铀根部富集能力，在中低浓度铀胁迫下，红苋菜和向日葵的富集系数和地上部铀积累量较高，随着铀胁迫的增强其富集指标有所降低，说明它们对中高

浓度铀污染的提取修复能力较强，而高浓度铀胁迫对其生长会产生抑制作用，与姚凯等<sup>[31]</sup>和王艳芳等<sup>[32]</sup>的研究结果相似。

目前主成分分析<sup>[33]</sup>被广泛应用于筛选评价，基于主成分分析法构建富集植物筛选模型方面有报道。在富集植物修复过程中，提取修复往往未考虑植物收获后处理问题，对于植物收获后处理方式目前集中于热解、气化、堆肥等方面<sup>[34]</sup>，成本高且技术不成熟。根部富集修复则不同，通过根部高富集植物将重金属限制在植物根部，使其地上部仍能产生经济效益，避免了植物后处理问题。本研究中为避免二次污染，对于收获后的富集高浓度铀的地下部分将会采用微生物降解减容技术进行处理<sup>[35]</sup>，采用外加一定量的尿素(1.6 g/kg)和接种一定量的强启动真菌QD-1(接种量5%)与白腐菌(接种量5%)能有效的促进牧草基质的降解，与提取修复不同，根部富集修复其收获后所需处理生物量小，且植物地上部收获后仍能发挥经济价值。郭松明等<sup>[36]</sup>提出，应通过多层次深化研究优化超积累植物的界定标准与方法，进而筛选出实用性及应用价值更为突出的超积累植物种类。因此在进行富集植物筛选模型构建时，应根据修复类型进行富集指标的选定。基于主成分分析进行综合评价，发现根部富集修复评价和提取修复评价因筛选指标不同，导致对于同种植物其筛选结果也不同<sup>[37]</sup>。本研究中通过分别构建提取修复和根部富集修复筛选评价模型量化植物生物量、富集系数、转运系数和铀积累量等指标权重，快速计算不同铀浓度下植物的综合修复得分，从而辅助筛选适配的提取修复和根部富集修复植物。根部富集修复筛选评价模型结果显示在不同浓度铀胁迫下高丹草、黑麦草和龙葵排名皆较为靠前，可作为潜在根部富集修复植物，而提取修复评价结果显示红苋菜和向日葵适用于中低浓度铀污染提取修复，高丹草适用于高浓度铀污染区域，相同植物在不同修复评价模型中得分和排名却不同，在提取修复筛选评价模型中，指标的选择主要关注植物整体修复效率，没有区分地上部及地下部的修复效率，而在根部富集修复筛选评价模型中，主要关注植物地下部对铀的富集能力，导致不同指标在这两个筛选评价模型中所占权重不同，生物量指标在提取修复评价模型中所占权重仅有9.37%，而在根部富集修复筛选评价模型中其所占权重高达27.21%，此外BCF指

标在提取修复评价模型中权重占比为11.09%，而在根部富集修复筛选评价模型中其所占权重高达16.00%，同类指标在不同修复评价模型中的权重不同，导致同种植物在不同修复评价模型中的得分和排名也不尽相同。因此，进行富集植物筛选时，应根据具体需求进行指标的设置，囊括对多个富集指标的考察，为重金属污染土壤实地修复的工程化应用，提供可靠性强、适配性优的植物修复资源。

#### 4 结论

本研究在不同浓度铀胁迫下对6种植物进行种植筛选，测定富集指标，探究其富集特性，基于主成分分析法构建提取修复筛选模型和根部富集修复筛选模型进行综合评价，根部富集筛选评价结果显示高丹草是6种植物中得分最高的植物，其铀根部富集能力在6种植物中最强，其次是黑麦草和龙葵，可选择高丹草、黑麦草和龙葵作为根部富集修复植物；提取修复筛选评价结果显示向日葵和红苋菜在中低浓度铀胁迫下得分较高，可作为中低浓度铀污染提取修复植物材料，高丹草在200 mg/kg铀胁迫下得分最高，可用于高浓度铀污染区域。本研究对6种植物分别进行提取修复和根部富集修复综合评价，筛选不同修复类型铀富集植物的同时，也为后续铀污染土壤修复植物材料及筛选指标的选取具有一定的指导意义，后续可结合微生物或者其他提高植物修复效率的手段形成一个可运用于实地修复的方案。

**作者贡献声明** 朱杰主要负责实验操作、实验数据分析和论文撰写，郑慧赢和黄娅慧负责图表修改和优化，黄朝辉和刘子豪协助种植实验材料，陈晓明和朱博负责整体指导和论文审阅及定稿。全体作者均已阅读并同意最终的文稿。

#### 参考文献

- 1 Kathren R L, Tolmachev S Y. The US transuranium and uranium registries (USTUR): a five-decade follow-up of plutonium and uranium workers: erratum[J]. *Health Physics*, 2019, **117**(3): 337. DOI: 10.1097/HP.0000000000001152.
- 2 陈露瑶, 严习, 程聪慧, 等. 耐辐射奇球菌对铀的富集性能及其对pH动态调节研究[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2022, **40**(2): 020701. DOI: 10.11889/j.1000-

3436.2021-0211.

CHEN Luyao, YAN Xi, CHENG Conghui, *et al.* Dynamic uranium enrichment and pH regulation in uranium solution by *Deinococcus radiodurans*[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2022, **40**(2): 020701. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021-0211.

- 3 黄森, 陈晓明, 张谷禹, 等. 高浓度铀污染对农田土壤酶活性及微生物代谢的短期影响[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2022, **40**(5): 050301. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0022.

HUANG Sen, CHEN Xiaoming, ZHANG Guyu, *et al.* Short-term effects of high-concentration uranium pollution on soil enzyme activity and microbial metabolism in farmland soil[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2022, **40**(5): 050301. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0022.

- 4 肖奕铭, 黄德娟, 任强, 等. 铀的几种常见促排剂的研究进展[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2017, **35**(4): 040102. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2017.rj.35.040102.

XIAO Yiming, HUANG Dejuan, REN Qiang, *et al.* Research progress on some uranium mobilization agents [J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2017, **35**(4): 040102. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2017.rj.35.040102.

- 5 胡丹飞, 毕梦, 袁海浪, 等. 新型促排剂WSC-DTPA纳米粒对内污染铀的促排和防护作用[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2013, **31**(4): 040202.

HU Danfei, BI Meng, YUAN Hailang, *et al.* Decorporation and radiation protection effects of WSC-DTPA nanoparticles on internal uranium exposure[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2013, **31**(4): 040202.

- 6 Azhar U, Ahmad H, Shafqat H, *et al.* Remediation techniques for elimination of heavy metal pollutants from soil: a review[J]. *Environmental Research*, 2022, **214**: 113918. DOI: 10.1016/j.envres.2022.113918.

- 7 Deng S X, Zhang X, Zhu Y H, *et al.* Recent advances in phyto-combined remediation of heavy metal pollution in soil[J]. *Biotechnology Advances*, 2024, **72**: 108337. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2024.108337.

- 8 Adnan M, Xiao B H, Ali M U, *et al.* Heavy metals pollution from smelting activities: a threat to soil and groundwater[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2024, **274**: 116189. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2024.116189.

- 9 李龙祥, 周仲魁, 张益硕, 等. 微生物法修复铀污染环境

- 研究进展[J]. 有色金属(冶炼部分), **2023**(8): 129-138. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7545.2023.08.017.
- LI Longxiang, ZHOU Zhongkui, ZHANG Yishuo, *et al.* Research progress on microbial remediation of uranium-contaminated environment[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, **2023**(8): 129-138. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7545.2023.08.017.
- 11 沈川, 李夏. 根系分泌物对不同环境胁迫响应的研究进展[J]. 核农学报, 2024, **38**(11): 2247-2257. DOI: 10.11869/j.issn.1000-8551.2024.11.2247.
- SHEN Chuan, LI Xia. Research progress on responses of root exudates to different environmental stresses[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2024, **38**(11): 2247-2257. DOI: 10.11869/j.issn.1000-8551.2024.11.2247.
- 12 张文龙, 陈井影, 卢玢宇, 等. 黑麦草-AMF联合修复铀污染土壤的根际效应[J]. 有色金属(冶炼部分), 2024(8): 175-181. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7545.2024.08.021.
- ZHANG Wenlong, CHEN Jingying, Lu Binyu, *et al.* Rhizosphere effect of ryegrass-AMF combined remediation of uranium contaminated soil[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2024(8): 175-181. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7545.2024.08.021.
- 13 万芹方, 陈雅宏, 胡彬, 等. 植物对土壤中铀的吸收与富集[J]. 植物学报, 2011, **46**(4): 425-436. DOI: 10.3724/SP.J.1259.2011.00425.
- WAN Qinfang, CHEN Yahong, HU Bin, *et al.* Uranium uptake and accumulation in plants on soils[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2011, **46**(4): 425-436. DOI: 10.3724/SP.J.1259.2011.00425.
- 14 Dushenkov S, Vasudev D, Kapulnik Y, *et al.* Removal of uranium from water using terrestrial plants[J]. *Environmental Science & Technology*, 1997, **31**(12): 3468-3474. DOI: 10.1021/es970220l.
- 15 唐丽, 柏云, 邓大超, 等. 修复铀污染土壤超积累植物的筛选及积累特征研究[J]. 核技术, 2009, **32**(2): 136-141. DOI: 10.3321/j.issn: 0253-3219.2009.02.015.
- TANG Li, BO Yun, DENG Dachao, *et al.* The selection of hyperaccumulators for phytoremediation of uranium-contaminated soils and their uranium-accumulating characters[J]. *Nuclear Techniques*, 2009, **32**(2): 136-141. DOI: 10.3321/j.issn: 0253-3219.2009.02.015.
- 16 Brooks R R, Lee J, Reeves R D, *et al.* Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1977, **7**: 49-57. DOI: 10.1016/0375-6742(77)90074-7.
- 17 Baker A J M , Brooks R R . Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements. A review of their distribution, ecology and phytochemistry[J]. *Environmental Science, Biology*, 1989.
- 18 Siyar R, Ardejani F D, Norouzi P, *et al.* Phytoremediation potential of native hyperaccumulator plants growing on heavy metal-contaminated soil of khatunabad copper smelter and refinery, Iran[J]. *Water*, 2022, **14**(22): 3597. DOI: 10.3390/w14223597.
- 19 Alvarez-Vázquez L J, Martínez A, Rodríguez C, *et al.* Mathematical analysis and optimal control of heavy metals phytoremediation techniques[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2019, **73**: 387-400. DOI: 10.1016/j.apm.2019.04.011.
- 20 姜方荣, 潘进礼, 蒋文波, 等. 电动-化学淋溶联合修复铀污染土壤[J]. 有色金属(冶炼部分), **2024**(12): 99-108, 176. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7545.2024.12.013.
- JIANG Fangrong, PAN Jinli, JIANG Wenbo, *et al.* Electrokinetic and chemical eluviation combined remediation of uranium contaminated soil[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, **2024**(12): 99-108, 176. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7545.2024.12.013.
- 21 江文静, 王丹, 姚天月. 铀及其伴生重金属镉的根茎类富集植物的筛选[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(1): 39-47. DOI: 10.11654/jaes.2016-0828.
- JIANG Wenjing, WANG Dan, YAO Tianyue. Screening of rhizomatic accumulators to uranium and cadmium[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(1): 39-47. DOI: 10.11654/jaes.2016-0828.
- 22 董海燕, 潘耀忠, 朱秀芳, 等. 多因子贡献率权重的城市精细人口空间化方法: 以北京市为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2022, **58**(1): 135-142. DOI: 10.12202/j.0476-0301.2021063.
- DONG Haiyan, PAN Yaozhong, ZHU Xiufang, *et al.* Spatial method of urban fine population with multifactor contribution rate weight: case of Beijing[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2022, **58**(1): 135-142. DOI: 10.12202/j.0476-0301.2021063.
- 23 刘高品, 刘炳霄, 王琨, 等. 土壤-水稻体系镉转运机制及环境安全修复方法研究进展[J]. 环境科学与管理, 2022, **47**(8): 46-50. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1212.2022.08.011.
- LIU Gaopin, LIU Bingxiao, WANG Kun, *et al.* Research progress on transferal mechanism of cadmium and environment-safe remediation schemes in soil-rice system

- [J]. *Environmental Science and Management*, 2022, **47**(8): 46-50. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1212.2022.08.011.
- 24 苏赛赛, 段燕青, 杨小晗, 等. 高丹草在低浓度铜-镉-菲复合胁迫下的生长及响应特性[J]. *农业环境科学学报*, 2024, **43**(8): 1753-1759. DOI: 10.11654/jaes.2023-1020.
- SU Saisai, DUAN Yanqing, YANG Xiaohan, *et al.* Growth and response characteristics of *Sorghum-Sudan grass* under combined low stress of coppercadmium-phenanthrene[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, **43**(8): 1753-1759. DOI: 10.11654/jaes.2023-1020.
- 25 石慧芳, 席溢, 张茂, 等. 铅、锌、镉单一及复合胁迫对多年生黑麦草生长及生理特性的影响[J]. *南方农业学报*, 2021, **52**(4): 1030-1039. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1191.2021.04.021.
- SHI Huifang, XI Yi, ZHANG Mao, *et al.* Effects of single and combined stresses of lead, zinc and cadmium on growth and physiological characteristics of perennial ryegrass[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2021, **52**(4): 1030-1039. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1191.2021.04.021.
- 26 何玉君, 孙梦荷, 沈亚婷, 等. 超富集植物与重金属相互作用机制及应用研究进展[J]. *岩矿测试*, 2020, **39**(5): 639-657. DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.202004140048.
- HE Yujun, SUN Menghe, SHEN Yating, *et al.* Research progress on the interaction mechanism between hyperaccumulator and heavy metals and its application [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2020, **39**(5): 639-657. DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.202004140048.
- 27 卢诗雨, 令建伟, 吴琳, 等. 湿地植物对重金属污染的去 除机制研究进展[J]. *湿地科学*, 2025, **23**(4): 846-857. DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.20240183.
- LU Shiyu, LING Jianwei, WU Lin, *et al.* Research progress on removal mechanism of heavy metal pollution by wetland plants[J]. *Wetland Science*, 2025, **23**(4): 846-857. DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.20240183.
- 28 杜俊, 鲁先科, 蔡奎, 等. 土壤、植物中镉污染与治理技术 研究现状与展望[J]. *中国地质*, 2025, **52**(1): 131-158. DOI: 10.12029/gc20240320002.
- DU Jun, LU Xianke, CAI Kui, *et al.* Cadmium pollution in soil and plant system and its remediation technology: Status and prospects[J]. *Geology in China*, 2025, **52**(1): 131-158. DOI: 10.12029/gc20240320002.
- 29 关永鑫, 胡喜生, 闫淑君, 等. 闽江福州段河岸带土壤重 金属空间分布特征与危险评价及其来源分析[J/OL]. *水生态学杂志*. [2024-04-02](2025-12-17). <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202401200025>.
- GUAN Yongxin, HU Xisheng, YAN Shujun, *et al.* Spatial distribution characteristics, risk assessment, and source analysis of heavy metals in riparian soil of Fuzhou section of Minjiang River[J/OL]. *Journal of Hydroecology*. [2024-04-02](2025-12-17). <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202401200025>.
- 30 曾欢, 张华, 丁明军, 等. 鄱阳湖典型湿地土壤-植物系 统重金属沿湖向富集及迁移转换特征分析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(2): 781-795. DOI: 10.13227/j.hjcx.202203301.
- ZENG Huan, ZHANG Hua, DING Mingjun, *et al.* Enrichments, migrations, and conversions of heavy metal in the soil/sediment-plant system towards the lake in typical Poyang Lake wetland[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(2): 781-795. DOI: 10.13227/j.hjcx.202203301.
- 31 姚凯, 牛晓娟, 徐德, 等. 镉对菠菜幼苗生长、光合和抗 氧化酶活性的影响[J]. *核农学报*, 2019, **33**(6): 1225-1231. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2019.06.1225.
- YAO Kai, NIU Xiaojuan, XU Hui, *et al.* Effects of strontium on growth, photosynthesis and antioxidant enzyme activities in *Spinacia oleracea* L. seedlings[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, **33**(6): 1225-1231. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2019.06.1225.
- 32 王艳芳, 悦飞雪, 李冬, 等. 镉胁迫对不同基因型玉米生 长和镉吸收分配的影响[J]. *核农学报*, 2019, **33**(7): 1440-1447. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2019.07.1440.
- WANG Yanfang, YUE Feixue, LI Dong, *et al.* Effects of cadmium stress on plant growth, cadmium absorption and distribution of different genotypes of maize[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, **33**(7): 1440-1447. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2019.07.1440.
- 33 刘俊涛, 王瑞辉, 沈燕, 等. 千年桐盛果期优良单株综合 评价选择[J]. *中南林业科技大学学报*, 2020, **40**(6): 53-62. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2020.06.007.
- LIU Juntao, WANG Ruihui, SHEN Yan, *et al.* Comprehensive evaluation and selection of excellent individual plants in flourishing fruit period of *Vernicia montana*[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2020, **40**(6): 53-62. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2020.06.007.
- 34 Cui X Q, Zhang J W, Wang X T, *et al.* A review on the thermal treatment of heavy metal hyperaccumulator: Fates of heavy metals and generation of products[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **405**: 123832. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123832.
- 35 张祥辉, 肖伟, 唐俊杰, 等. 强启动真菌在牧草降解减容

- 过程中的应用[J]. 中国农学通报, 2016, **32**(23): 16-21.  
ZHANG Xianghui, XIAO Wei, TANG Junjie, *et al.*  
Application of external fungi in herbage degradation  
process[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016,  
**32**(23): 16-21.
- 36 郭松明, 余海波, 袁龙义. 近20年我国重金属超积累植  
物种质资源筛选研究进展[J]. 生态毒理学报, 2022, **17**  
(2): 96-108. DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20210318002.  
GUO Songming, YU Haibo, YUAN Longyi. Research  
progress of screening of germplasm resources of heavy  
metal hyperaccumulator in recent 20 years in China[J].  
Asian Journal of Ecotoxicology, 2022, **17**(2): 96-108.  
DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20210318002.
- 37 徐宇轩, 陈晓明, 周君, 等. 不同品种(系)牧草镉修复能  
力综合评价[J]. 西北植物学报, 2023, **43**(7): 1158-1169.  
XU Yuxuan, CHEN Xiaoming, ZHOU Jun, *et al.*  
Comprehensive evaluation of the cadmium remediation  
capacity of different species (strains) of forage grasses[J].  
Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2023, **43**(7):  
1158-1169.