

程禹敏, 蒯琳萍. 荠菜对土壤中锶(Sr)的吸收和富集[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(18): 275-279.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.18.067

# 荠菜对土壤中锶(Sr)的吸收和富集

程禹敏, 蒯琳萍

(上海交通大学机械与动力工程学院核科学与工程学院, 上海 200240)

**摘要:**为了研究荠菜对锶(Sr)污染土壤的修复效果,通过温室盆栽土培的方式,研究不同土壤有效Sr浓度下荠菜的生长特性、Sr吸收和分布特性、Sr富集特性。结果表明:过高的土壤有效Sr浓度会抑制荠菜的生长,但并不抑制荠菜对土壤中Sr的富集,最适宜荠菜生长的土壤有效Sr浓度在80 mg/kg左右;在筛选超富集植物最常用的2个评价指标上,荠菜Sr转运系数都大于1, Sr富集系数都大于0.86,达到了Sr超富集植物的标准,因此荠菜可能是Sr的超富集植物;单株荠菜的生物量较小,因而Sr富集总量较小,进一步的研究应尝试通过农艺学强化等手段提高单株荠菜生物量,或者通过合理密植提高单位面积土壤上荠菜的Sr富集总量。

**关键词:**放射性污染;Sr;土壤修复;植物修复;荠菜;吸收;富集;生长特性;转运系数;富集系数

**中图分类号:** X171.4; X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)18-0275-05

铀矿的开采、核武器制造、核试验、放射性同位素的生产应用、核废料、核事故等所产生的人工放射性核素对环境造成了难以治理的放射性污染。这些人工放射性核素通过扩散、迁移、转化等途径进入土壤生态环境,在土壤中积累,并最终对人类健康产生各种影响<sup>[1-2]</sup>。人类的生存和发展离不开土壤,受放射性核素污染的土壤不仅浪费了人类的土壤资源,而且也给人类健康带来了威胁。因此,采用合理的修复技术对受放射性核素污染的土壤进行修复具有重大意义。其中,被认为是绿色修复技术的植物修复技术在土壤放射性污染修复领域引起了人们极大的兴趣和关注。土壤放射性污染的植物修复就是通过在污染土壤中种植植物,利用植物根系吸收水分和养分的过程来吸收土壤中的污染核素,最后将收获的植物进行统一处理以达到清除核素、修复土壤目的的修复技术<sup>[3]</sup>。

由于涉及到植物生长,受气候条件、土壤性质等影响,植物修复研究中使用较多的表征植物对核素富集能力的富集系

数和转运系数等并不固定,即使是同种植物对同一核素的富集能力,国内外不同研究的结果差异较大<sup>[4]</sup>。例如,苋菜的Sr富集系数,裘同才等的研究结果较高<sup>[5-6]</sup>,而唐永金等的则较低<sup>[7]</sup>。目前,对我国华东地区大面积低放射性污染土壤的植物修复研究较少。华东地区一带有不少核电站在运行,无论从事事故后还是退役后土壤修复的角度出发,在华东地区开展大面积低放射性污染土壤的植物修复研究都具有重要意义。

土壤放射性的主要来源是核试验的沉积物以及核电站事故释放的进入土壤中的放射性核素,而<sup>90</sup>Sr在裂变产物中产额较高。另外<sup>90</sup>Sr属于高毒性核素,半衰期长达28.1年<sup>[8]</sup>,与营养元素钙(Ca)同族而具有相似的化学生物性质,是植物最容易吸收的放射性核素<sup>[9]</sup>,进入人体后危害较大。因此本研究以Sr为例进行研究。

虽然国内外学者们认为“能富集放射性铯(Cs)的植物往往能富集钾(K),对Ca吸收的植物可能吸收土壤中的放射性Sr”<sup>[10]</sup>。但是,鲜有研究者据此选择Ca吸收能力强的植物进行Sr植物修复研究,但有Fuhrmann等选择菜豆这种钙吸收能力强的豆科植物<sup>[11]</sup>。荠菜是我国较受欢迎的野菜品种,其上海经人工栽培已成为当地有名的特优蔬菜之一。荠菜Ca含量较高<sup>[12-13]</sup>,是有名的“补钙小能手”,而且其生长周期

收稿日期:2017-05-15

基金项目:国家自然科学基金(编号:11575114)。

作者简介:程禹敏(1990—),男,广东阳江人,硕士研究生,主要从事放射性污染土壤的植物修复技术研究。E-mail:chengyumin@outlook.com。

[7]石占飞,王力. 神木矿区土壤重金属含量特征及潜在风险评价[J]. 农业环境科学学报,2013,32(6):1150-1158.

[8]邢宁,吴平霄,李媛媛,等. 大宝山尾矿重金属形态及其潜在迁移能力分析[J]. 环境工程,2011,5(6):1370-1374.

[9]周建民,党志,蔡美芳,等. 大宝山矿区污染水体中重金属的形态分布及迁移转化[J]. 环境科学研究,2005,18(5):5-10.

[10]李雅贞,罗琳,晏洪铃,等. 含磷材料对矿区铅镉污染土壤重金属形态转化的影响[J]. 环境工程,2015,9(5):2469-2472.

[11]中国环境监测总站. 土壤元素的近代分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社,1992:214-221.

[12]鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000:30-58.

[13]中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国科

学出版社,1990:389-405.

[14]刘勇,岳玲玲,李晋昌. 太原市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报,2011,31(6):1285-1293.

[15]吴传生. 经济数学——概率论与数理统计[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2011:241-251.

[16]王亚平,鲍征宇,侯书恩. 尾矿库周围土壤中重金属存在形态特征研究[J]. 岩矿测试,2000,19(1):7-13.

[17]宋凤敏,张兴昌,王彦民,等. 汉江上游铁矿尾矿库区土壤重金属污染分析[J]. 农业环境科学学报,2015,34(9):1707-1714.

[18]王志楼,谢学辉,王慧萍,等. 典型铜尾矿库周边土壤重金属复合污染特征[J]. 生态环境学报,2010,19(1):113-117.

[19]薛薇. 统计分析与SPSS的应用[M]. 4版. 北京:高等教育出版社,2014:154-160.

短,可以一次播种,多次采收<sup>[14]</sup>。因此 Ca 含量高的芥菜可能较为适合修复土壤中的 Sr,且有望通过 1 年内多次采收来提高修复效率。

本研究拟用温室盆栽土培的方法,研究不同土壤有效 Sr 浓度下芥菜对 Sr 的富集能力,探讨芥菜修复土壤 Sr 污染的可行性,为我国华东地区大面积低放射性污染土壤的植物修复研究提供一定的研究基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

研究表明,植物对放射性核素及其稳定性同位素的吸收并没有选择性<sup>[15-16]</sup>。因此,本试验用非放射性锶(<sup>88</sup>Sr)代替放射性 Sr,具体施加形式为分析纯 Sr(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>。

鉴于植物修复实际应用可能会进行土壤改良,且本试验为先期基础研究,故暂不考虑可能有差异的实际可能污染地点的土壤性质,进而选取上海交通大学闵行校区的土壤[有机质(N+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+K<sub>2</sub>O≥2%,有机质≥40%)]和黄沙于通风避光处自然风干,剔除杂物并捣碎过筛,按 6:3:1 的质量比混匀,表 1 为其主要性质参数。

表 1 试验土壤主要性质参数

参数	数值
水溶液 pH 值	7.42 ± 0.05
盐溶液 pH 值(KCl)	7.17 ± 0.05
电导率(mS/cm)	2.26 ± 0.12
有效 Sr 含量(mg/kg)	81.7 ± 0.20

注:按国标 NY/T 1377—2007《土壤 pH 的测定》,用实验室 pH 计测量土壤水溶液和盐溶液 pH 值。

芥菜品种为大叶芥菜,生长期 40 d 左右,购买自上海农乐种植有限公司。试验所用塑料花盆底部开孔带托盘,规格为盆口直径 22 cm、盆高 19 cm。

### 1.2 试验设计

试验采用盆栽土培的方式,自 2016 年 10 月 1 日开展于玻璃智能温室内。

根据华东地区中的土壤 Sr 含量——A 层土壤最大值为 329 mg/kg(山东)<sup>[17]</sup>以及试验土壤有效 Sr 含量为 81.7 mg/kg,试验将 Sr 施加的浓度设置为 5 组:0(人为不添加)、40、80、160、320 mg/kg,每组设 3 个重复(1 个重复为 1 盆)。之所以设置如此高的浓度,是因为如前所述,植物对放射性核素及其稳定性同位素的吸收并没有选择性。因此,用植物修复土壤中的放射性 Sr 还需要考虑土壤中稳定性 Sr 含量的影响。

种植的田地一般在种植前翻耕 15~20 cm<sup>[11,15,18-19]</sup>,这样会使得核素在这 15~20 cm 的表层土上得以较为均匀地分布。考虑到应用植物修复大面积放射性污染土壤时,种植植物前也可能会进行上述翻耕,所以试验时每个花盆装干土 3 kg,使土深 17 cm 左右,按前述 Sr 施加浓度分组,将相应量的 Sr(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 溶于水中,与土壤充分混匀,再播种。每盆播种 10 粒种子,出苗后留下长势好、个体大小一致的 3 株芥菜继续试验,其余拔掉放在土壤上让其自行分解。

土培过程中视土壤含水量情况浇水。出苗后 20、30、60 d 每盆分别收获 1 株植物,每株植物分成根、茎、叶 3 个部分。

### 1.3 分析测试

收获的植物先后用清水、去离子水清洗,并用吸湿纸吸去植物表面水分。再放置于烘箱内,在 105 °C 下杀青 30 min,然后在 80 °C 下烘干至恒质量,继而分别测量植物根、茎、叶干质量。

烘干至恒质量的植物样品先用马弗炉在 650 °C 下灰化 1 h,然后用浓硝酸-高氯酸混合酸(体积比 4:1)消解,最后用 ICP-AES 测量其 Sr 含量,每个样品重复测量 3 次,结果表示为“平均值 ± 标准差”。

### 1.4 数据处理

核素含量<sup>[4,20]</sup>,指单位质量的植物干物质中核素的含量。转运系数(translocation factor,简称 TF)<sup>[21-23]</sup>,指植物地上部核素含量与根部核素含量的比值,其反映了核素在植物内的转移及分配情况。TF 越大,说明植物将核素从根部转运到地上部的能力越强。富集系数(enrichment coefficient,简称 EC)<sup>[23-24]</sup>,指单位质量的植物干物质中某核素的含量与土壤中该核素原含量的比值。另外,本研究特地引进“核素富集总量”的评价指标,即植物吸收的核素总量,是植物从土壤中去掉的核素的绝对量,理应是评价植物修复效果的重要指标。

数据分析采用 Microsoft Excel 2013,并采用 IBM SPSS Statistics 22 进行单因素方差分析和 Duncan's 多重比较。作图由 Microsoft Word 2013 完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 芥菜生长特性

由图 1、图 2 和图 3 可知,在相同种植时间下,随着 Sr 处理浓度增大,芥菜根、茎、叶 3 个部位的生物量大体呈现先增大后减小的趋势。其中,在 80 mg/kg Sr 处理下,芥菜达到最大生物量。由此可见,适宜的土壤 Sr 浓度能促进芥菜的生长,而土壤 Sr 浓度过高则会抑制芥菜的生长,但在试验条件下未出现明显病变。在相同的 Sr 处理浓度下,随着种植时间的延长,芥菜的生物量也增加,其中叶部生物量增加速率最高。

另外根据试验过程中的观察,芥菜在发芽出苗时期生长较慢,而在生长后期生长速率较快。不同浓度的 Sr 处理对芥菜的这一生长规律并没有明显影响。

### 2.2 芥菜 Sr 吸收和分布特性

由表 2、表 3 和表 4 可知,在相同的种植时间下,随着 Sr 处理浓度的增大,芥菜根、茎、叶 3 个部位的 Sr 含量均增加。且根、茎、叶 3 个部位的 Sr 含量基本表现为茎 > 叶 > 根。在相同的 Sr 处理浓度下,随着种植时间的延长,芥菜根、茎、叶 3 个部位的 Sr 含量增加。

在相同的种植时间下,随着 Sr 处理浓度的增大,芥菜茎、叶的 TF 大体上呈现先增加后降低的趋势,这说明土壤 Sr 浓度对芥菜的 Sr 转运能力有一定影响,大体上来说是中等土壤 Sr 浓度情况下,芥菜的 Sr 转运能力更高。在相同的 Sr 处理浓度下,随着种植时间的延长,芥菜茎、叶的 TF 没有明显的变化规律,这表明长时间的 Sr 处理对芥菜的 Sr 转运能力影响并不大,芥菜可能具有较好的 Sr 耐受性。

### 2.3 芥菜 Sr 富集特性

由表 5、表 6 和表 7 可知,在相同的种植时间下,随着 Sr 处理浓度的增大,芥菜根、茎、叶 3 个部位的 Sr 富集总量大体

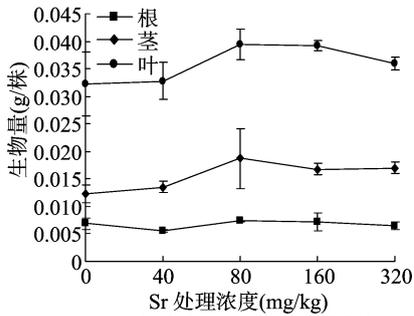


图1 20 d后各浓度 Sr 处理下芥菜各部位生物量(干质量)

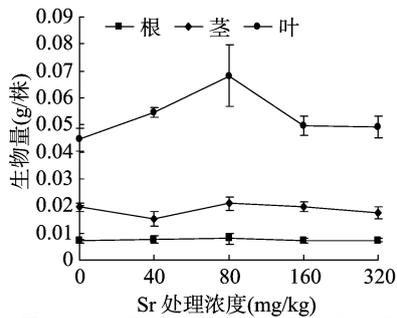


图2 30 d后各浓度 Sr 处理下芥菜各部位生物量(干质量)

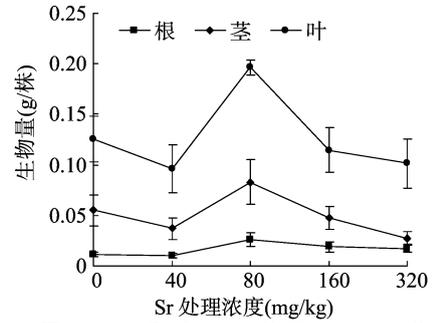


图3 60 d后各浓度 Sr 处理下芥菜各部位生物量(干质量)

表2 20 d后芥菜 Sr 吸收和分布情况

Sr 处理浓度 (mg/kg)	Sr 含量(mg/kg)			TF	
	根	茎	叶	茎	叶
0	112.83 ± 0.35d	143.26 ± 0.69e	142.88 ± 0.43d	1.27	1.27
40	146.42 ± 0.72d	391.96 ± 1.99d	370.71 ± 1.12c	2.68	2.53
80	294.60 ± 0.55c	480.92 ± 2.32c	402.41 ± 1.00c	1.63	1.37
160	538.40 ± 3.15b	1 020.87 ± 2.96b	1 104.32 ± 7.86b	1.89	2.05
320	966.89 ± 1.37a	1 908.06 ± 23.18a	1 860.62 ± 7.96a	1.97	1.92

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

表3 30 d后芥菜 Sr 吸收和分布情况

Sr 处理浓度 (mg/kg)	Sr 含量(mg/kg)			TF	
	根	茎	叶	茎	叶
0	121.13 ± 0.20d	159.35 ± 0.59d	166.24 ± 0.46e	1.32	1.37
40	161.60 ± 0.39d	403.08 ± 0.86d	373.39 ± 1.28d	2.49	2.31
80	368.26 ± 0.33c	886.64 ± 2.41c	604.13 ± 0.81c	2.41	1.64
160	592.69 ± 0.35b	1 476.12 ± 0.86b	1 181.68 ± 5.21b	2.49	1.99
320	1 135.10 ± 6.72a	2 315.75 ± 4.82a	2 015.55 ± 10.00a	2.04	1.78

表4 60 d后芥菜 Sr 吸收和分布情况

Sr 处理浓度 (mg/kg)	Sr 含量(mg/kg)			TF	
	根	茎	叶	茎	叶
0	127.83 ± 0.23e	163.56 ± 0.22e	196.12 ± 0.89d	1.28	1.53
40	174.66 ± 0.44d	418.63 ± 1.01d	402.21 ± 0.50d	2.40	2.3
80	382.30 ± 0.69c	1 353.00 ± 1.57c	900.79 ± 3.27c	3.54	2.36
160	842.58 ± 0.70b	2 648.80 ± 1.34b	2 066.26 ± 3.39b	3.14	2.45
320	1 807.82 ± 0.86a	3 764.77 ± 3.53a	3 986.26 ± 9.03a	2.08	2.21

表5 20 d后芥菜 Sr 富集情况

Sr 处理浓度 (mg/kg)	Sr 富集总量(μg)			EC		
	根	茎	叶	根	茎	叶
0	0.79 ± 0.01d	1.77 ± 0.01d	4.62 ± 0.01e	1.38	1.75	1.75
40	0.82 ± 0.01d	5.26 ± 0.03d	12.10 ± 0.04d	1.20	3.22	3.05
80	2.17 ± 0.01c	9.12 ± 0.04c	15.83 ± 0.04c	1.82	2.97	2.49
160	3.84 ± 0.02b	17.13 ± 0.05b	43.25 ± 0.31b	2.23	4.22	4.57
320	6.36 ± 0.01a	32.51 ± 0.40a	66.76 ± 0.29a	2.41	4.75	4.63

上增大。且根、茎、叶3个部位的Sr富集总量表现为叶>茎>根。在相同的Sr处理浓度下,随着种植时间的延长,芥菜根、茎、叶3个部位的Sr富集总量增大。

在相同的种植时间下,随着Sr处理浓度的增大,芥菜根、茎、叶3个部位的EC增大。且根、茎、叶3个部位的Sr富集系数基本表现为茎>叶>根,而且均大于唐秀斌等导出的<sup>90</sup>Sr超富集植物的最低EC值0.86<sup>[25]</sup>。相同Sr处理浓度下,随着种植时间的增长,芥菜根、茎、叶3个部位的Sr富集系数

也增大。

由于芥菜叶部生物量大,因此其Sr富集总量也大,但是其EC大部分情况下低于芥菜茎部的EC。

### 3 讨论

本研究表明,适宜的土壤Sr浓度能促进芥菜的生长,而土壤Sr浓度过高则会抑制芥菜的生长。这与现有研究的Sr对其他一些植物的生长影响相似<sup>[26]</sup>。根据与芥菜同属的油

表6 30 d后芥菜 Sr 富集情况

Sr 处理浓度 (mg/kg)	Sr 富集总量 (μg)			EC		
	根	茎	叶	根	茎	叶
0	0.88 ± 0.01c	3.11 ± 0.01d	7.36 ± 0.02e	1.48	1.95	2.03
40	1.21 ± 0.01c	6.02 ± 0.01d	20.40 ± 0.07d	1.33	3.31	3.07
80	3.00 ± 0.01b	18.80 ± 0.05c	41.16 ± 0.06c	2.28	5.48	3.74
160	4.24 ± 0.01b	28.93 ± 0.02b	58.73 ± 0.26b	2.45	6.11	4.89
320	8.31 ± 0.05a	40.43 ± 0.08a	99.33 ± 0.49a	2.82	5.76	5.02

表7 60 d后芥菜 Sr 富集情况

Sr 处理浓度 (mg/kg)	Sr 富集总量 (μg)			EC		
	根	茎	叶	根	茎	叶
0	1.40 ± 0.01d	9.20 ± 0.01b	25.11 ± 0.12c	1.56	2.00	2.40
40	1.77 ± 0.01d	15.45 ± 0.03b	39.67 ± 0.04c	1.44	3.44	3.30
80	10.00 ± 0.02c	111.88 ± 0.11a	177.81 ± 0.64b	2.36	8.37	5.57
160	15.80 ± 0.01b	125.29 ± 0.06a	236.17 ± 0.39b	3.49	10.96	8.55
320	31.28 ± 0.01a	102.03 ± 0.10a	404.60 ± 0.92a	4.50	9.37	9.92

菜、白菜的研究结果, Sr 对芥菜生长的影响可能是 Sr 对芥菜光合作用、氧化酶系统和脂质过氧化作用产生了影响, 即低浓度的 Sr 处理可能提高了芥菜的叶绿素含量, 从而促进了光合效率, 提高了抗氧化酶系统的活性并降低了脂质过氧化作用<sup>[26-29]</sup>。

植物修复的关键是找到合适的超富集植物。超富集植物的定义源于重金属的植物修复研究, 是指植物地上部分累积核素的量较一般植物高 10 ~ 500 倍的植物<sup>[30-32]</sup>。但是在放射性核素的植物修复领域由于研究较少, 对此还没有定论。目前, 对放射性核素的超富集植物在富集能力上的要求是: 对放射性核素吸收能力强, 而且最好是地上部分积累, 即 EC 较高且 TF > 1<sup>[33-34]</sup>。本研究中, 芥菜的 Sr 转运系数都大于 1, 而且随着种植时间的延长, 芥菜茎、叶的 Sr 转运系数没有明显的变化规律, 芥菜具有较好的 Sr 耐受性。芥菜的 Sr 富集系数也均大于唐秀欢等导出的<sup>90</sup>Sr 超富集植物的最低富集系数 0.86<sup>[25]</sup>。因此, 芥菜有可能是 Sr 的超富集植物。由于在放射性核素 Sr 的植物修复研究中未见芥菜的研究, 且与其同属的油菜、白菜的研究结果<sup>[4,27,35-38]</sup>本来就存在差异, 所以在此不作与其他研究结果比较。

植物修复研究中发现的超富集植物往往具有生物量小、生长速度慢的缺点<sup>[33]</sup>。本研究中, 芥菜生长速度仅在发芽出苗的几天时间中较慢。另外可能由于种植期间肥水管理工作不够到位, 单株芥菜生物量较小, 没达到该芥菜品种应有的 18 cm 开展度, 导致结果中单株芥菜 Sr 富集总量较小。进一步的研究应探索如何提高单株芥菜生物量, 从而提高单株芥菜的 Sr 富集总量的途径, 或者通过合理密植来提高单位面积土壤上芥菜的 Sr 富集总量。

Ca 是植物的不可利用元素, 在植物体内以稳定的化合物形式存在, 来源于土壤。因此, Ca 含量高的植物如果在被 Sr 污染的土壤上种植, 则有可能由于 Sr 与 Ca 的性质相似而吸收较多的 Sr。本研究对“补钙小能手”芥菜的研究结果也证实了这一点。因此, 筛选 Sr 的超富集植物可以优先从人们熟知的 Ca 含量高的植物入手, 尤其是蔬菜类作物。因为蔬菜作物有人工大面积种植和病虫害防治的经验, 一般生长速率较快、生命周期较短, 土壤和气候等条件对其的影响亦为人类熟

知。另外, 蔬菜作物的生物量一般都不会很大, 其应用在植物修复中产生的放射性废物量也就不会太大。

#### 4 结论

本研究根据华东地区的土壤 Sr 含量水平设置了试验土壤 Sr 施加浓度, 初步得出芥菜生长、Sr 吸收和分布、Sr 富集随土壤 Sr 浓度的变化规律, 以及其随种植时间的变化规律, 并大致确定了最适宜芥菜生长的土壤有效 Sr 浓度在 80 mg/kg 左右, 且值得指出的是, 更高的土壤有效 Sr 浓度对芥菜富集土壤中 Sr 的效果并没有抑制作用。

本研究条件下, 芥菜对 Sr 的 TF 和 EC 较高, 有可能是 Sr 的超富集植物, 有实际应用于 Sr 污染土壤修复的潜力。但是单株芥菜生物量较小, 从而其 Sr 富集总量较小, 进一步的研究应尝试通过加强肥水管理等农艺学手段提高单株芥菜生物量, 或者通过合理密植提高单位面积土壤上芥菜的 Sr 富集总量。

Ca 含量高的植物的确具有较强的 Sr 富集能力。植物修复超富集植物的筛选工作应从这方面入手, 如筛选 Sr 的超富集植物考虑 Ca 含量高的植物、筛选 Cs 的超富集植物考虑 K 含量高的植物等。

#### 参考文献:

- [1] Vandenhove H, Sweeck L, Vives I B J, et al. Predicting the environmental risks of radioactive discharges from Belgian nuclear power plants[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2013, 126(4): 61-76.
- [2] Larsson C M. An overview of the ERICA integrated approach to the assessment and management of environmental risks from ionising contaminants[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2008, 99(9): 1364-1370.
- [3] 孙兴滨, 闫立龙, 张宝杰. 环境物理性污染与控制[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2010: 149.
- [4] 唐永金, 罗学刚. 植物吸收和富集核素的研究方法[J]. 核农学报, 2011, 25(6): 1292-1299.
- [5] 裘同才. 探索利用植物净化<sup>90</sup>Sr、<sup>137</sup>Cs污染的土壤[J]. 农业环境保护, 1988, 7(5): 14-17.

- [6] 张晓雪. 绿肥和花卉对  $^{133}\text{Cs}$  和  $^{88}\text{Sr}$  污染土壤的修复能力研究 [D]. 绵阳:西南科技大学,2010.
- [7] 唐永金,罗学刚,曾峰,等. 不同植物对高浓度 Sr、Cs 胁迫的响应与修复植物筛选[J]. 农业环境科学学报,2013,32(5):960-965.
- [8] 施仲齐,方栋,云桂春. 核电站的环境影响[M]. 北京:水利电力出版社,1984:172.
- [9] 胡凯光. 核工业微生物学[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2009:306.
- [10] 汤泽平,陈迪云,宋刚. 土壤放射性核素污染的植物修复与利用[J]. 安徽农业科学,2009,37(13):6101-6103.
- [11] Fuhrmann M, Lasat M M, Ebbs S D, et al. Uptake of cesium - 137 and strontium - 90 from contaminated soil by three plant species; application to phytoremediation [J]. Journal of Environmental Quality, 2002, 31(3):904-909.
- [12] 李泽鸿,姚玉霞. 荠菜的营养成分分析[J]. 中国野生植物资源,2000(4):41.
- [13] 程爱芳. 荠菜的营养价值及药用价值[J]. 蔬菜,2004(6):36.
- [14] 余先亮. 荠菜高产栽培技术[J]. 福建农业,2012(5):38.
- [15] Tsukada H, Takeda A, Takahashi T, et al. Uptake and distribution of  $^{90}\text{Sr}$  and stable Sr in rice plants [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2005, 81(2):221-231.
- [16] Soudek P, Valenová S, Vavříková Z, et al.  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  uptake by sunflower cultivated under hydroponic conditions [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2006, 88(3):236-250.
- [17] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990:87-90.
- [18] 熊毅,李庆逵. 中国土壤[M]. 2版. 北京:科学出版社,1978:318.
- [19] 张彤,刘桂琴,韩向荣. 土壤与肥料[M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1984:45-46.
- [20] 王丹,陈晓明,唐运来,等. 放射性核素污染土壤的植物修复技术研究关键问题探讨[J]. 辐射防护,2016,36(2):94-103.
- [21] 姜晓燕,刘淑娟,闫冬,等. 植物对核素铯的吸附与富集作用研究现状[J]. 癌变·畸变·突变,2014,26(6):463-466.
- [22] 闻方平. 西南地区四种植物对土壤  $^{133}\text{Cs}$ 、 $^{88}\text{Sr}$  胁迫响应及吸收积累特征研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2009.
- [23] 曾超,王丹,付菊梅,等. 不同螯合剂对花生富集污染土壤中 Co 的影响[J]. 安全与环境学报,2015,15(1):252-257.
- [24] Qi L, Qin X, Li F M, et al. Uptake and distribution of stable strontium in 26 cultivars of three crop species; oats, wheat, and barley for their potential use in phytoremediation [J]. International Journal of Phytoremediation, 2014, 17(3):264-271.
- [25] 唐秀欢,潘孝兵,杨永青,等. 放射性污染植物修复中超富集植物的数值评价[J]. 环境科学与技术,2008,31(5):125-129.
- [26] 周璐璐,唐运来,陈霞,等. 铯对油菜幼苗叶片光合作用的影响[J]. 植物学报,2013,48(3):313-319.
- [27] 敖嘉,唐运来,陈梅,等. Sr 胁迫对油菜幼苗抗氧化指标影响的研究[J]. 核农学报,2010,24(1):166-170.
- [28] 李奕泰. 植物对铯富集能力及根际促生菌协同作用的研究 [D]. 北京:中国疾病预防控制中心,2016
- [29] 刘淑娟. 4 种常见蔬菜对 Sr 的吸收积累特征及其生理指标的影响研究 [D]. 北京:中国疾病预防控制中心,2015.
- [30] 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.
- [31] 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, 1:81-126.
- [32] Chaney R L, Malik M, Li Y M, et al. Phytoremediation of soil metals [J]. Current Opinion in Biotechnology, 1997, 8(3):279-84.
- [33] 唐秀欢,潘孝兵. 植物修复——大面积低剂量放射性污染的新治理技术[J]. 环境污染与防治,2006,28(4):275-278.
- [34] 田军华,曾敏,杨勇,等. 放射性核素污染土壤的植物修复[J]. 四川环境,2007,26(5):93-96.
- [35] 唐秀欢,潘孝兵,王俊生. 放射性污染植物修复技术田间试验及前景分析[J]. 环境科学与技术,2008,31(4):63-67.
- [36] 张晓雪,王丹,张志伟,等. 水培条件下十种植物对  $^{88}\text{Sr}$  和  $^{133}\text{Cs}$  的吸收和富集[J]. 北方园艺,2009(10):65-67.
- [37] 侯兰欣,徐世明,赵文虎,等.  $^{90}\text{Sr}$  在棉花等作物体内分布及高浓集植物的筛选[J]. 中国核科技报告,1996(增刊1):869-877.
- [38] 赵文虎,徐世明,侯兰欣,等. 农作物食用部分中  $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  含量的早期预报——对  $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  具有高浓集力植物的筛选[J]. 中国核科技报告,1996(增刊):272-291.

(上接第 265 页)

- [13] 包妮沙,叶宝莹,祝艳. 矢量数据栅格化过程中尺度与方法选择研究[C]//ESRI 中国有限公司. 2009 第八届 ESRI 中国用户大会论文集. 北京:测绘出版社.
- [14] 徐磊. 龙海市耕地景观格局变化及其影响因素研究[D]. 福州:福建农林大学,2015.
- [15] 谢花林,李秀彬. 基于分形理论的土地利用空间行为特征——以江西东江源流域为例[J]. 资源科学,2008,30(12):1866-1872.
- [16] 刘淑苹. 周宁县耕地景观格局及其影响因素分析[D]. 福州:福建师范大学,2009.
- [17] 李谢辉,塔西甫拉提·特依拜,任福文. 基于分形理论的干旱区绿洲耕地动态变化及驱动力研究[J]. 农业工程学报,2007,23(2):65-70.
- [18] Deng X, Huang J, Rozelle S, et al. Cultivated land conversion and potential agricultural productivity in China [J]. Land Use Policy, 2006, 23(4):372-384.
- [19] 吴楠楠,任星,张鹏岩. 河南省巩义市不同坡度下的耕地景观格局分析[J]. 河南大学学报(自然科学版),2014,44(3):317-323.
- [20] 常胜. 基于景观空间格局的土地可持续利用评价——以湖北恩施为例[D]. 武汉:中国地质大学,2010.
- [21] 关兴良,方创琳,鲁莎莎. 中国耕地变化的空间格局与重心曲线动态分析[J]. 自然资源学报,2010,25(12):1997-2006.
- [22] 陈朝. 湖北耕地利用变化与驱动力分析[D]. 武汉:华中师范大学,2007.
- [23] 王秋香. 佛山市耕地变化驱动机理及空间布局优化研究[D]. 南京:南京大学,2011.
- [24] 王爱苓,严永路,尹崧,等. 经济、社会、资源、环境复合系统协调发展研究——以保定市为例[J]. 中国农学通报,2012,28(23):171-176.