

黑麦草修复铀污染土壤的根际效应分析

牛天洋, 史泽涵, 陈井影*, 廉欢, 王奕凯, 张天然

(东华理工大学水资源与环境工程学院, 核资源与环境国家重点实验室, 江西南昌 330013)

摘要 选取黑麦草作为供试植物, 通过模拟根箱栽培试验, 探究在不同外源铀下黑麦草修复铀污染土壤的根际效应。研究表明: 黑麦草植株地上部和根部铀含量直接受外源铀浓度影响, 黑麦草地上部分和根部富集系数均大于 1, 但转运系数均小于 1, 黑麦草主要将铀富集在根部, 同时, 土壤铀含量达到一定水平会抑制黑麦草的生长导致其生物量降低。根际土壤与非根际土壤中铀主要以惰性铀的形式存在。随着土壤铀浓度的增加, 根际处惰性铀的含量明显低于非根际处, 这表明根际土壤对惰性铀具有活化作用, 植物根系分泌物促进惰性铀的转化, 将惰性铀转化为可被植物吸收的活性铀或潜在活性铀。

关键词 植物修复; 黑麦草; 铀污染土壤; 根际效应

中图分类号 X53 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)03-0069-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.03.019



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Rhizosphere Effect of Ryegrass on Remediation of Uranium-contaminated Soil

NIU Tian-yang, SHI Ze-han, CHEN Jing-ying et al (State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, College of Water Resources and Environmental Engineering, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013)

Abstract In this thesis, ryegrass was selected as the test plant, and through the simulation of root box cultivation experiment, the rhizosphere effect of ryegrass under different exogenous uranium to repair uranium-contaminated soil was explored. The results showed that the uranium content in the aerial parts and roots of ryegrass plants was directly affected by the concentration of exogenous uranium. The enrichment coefficients of the upper parts and roots of the ryegrass grassland were both greater than 1, but the transport coefficients were both less than 1. The ryegrass mainly enriched uranium in the roots. At the same time, when the soil uranium content reached a certain level, it would inhibit the growth of ryegrass and caused its biomass to decrease. Uranium in rhizosphere soil and non-rhizosphere soil mainly existed in the form of inert uranium. With the increase of soil uranium concentration, the content of inert uranium in the rhizosphere was significantly lower than that in the non-rhizosphere, which indicated that the rhizosphere soil had an activation effect on inert uranium, and the plant root exudates promoted the conversion of inert uranium, converting inert uranium into active uranium or potentially active uranium that can be absorbed by plants.

Key words Phytoremediation; Ryegrass; Uranium contaminated soil; Rhizosphere effect

核工业的快速发展, 导致铀矿资源被过度开采, 进而产生了大量含有²³⁸U、⁴⁰K、²³²Th、²²⁶Ra等放射性核素的废水、废石、废渣等放射性废物, 这些放射性废物中含有生命周期较长的放射性核素, 而目前的技术水平及经济条件无法将放射性核素完全从放射性废物中分离出来^[1-2]。

物理法、化学法和生物法是修复含有放射性铀污染土壤的主要方法。早期, 我国研究者主要利用物理法和化学法来修复含有放射性铀污染的土壤, 比如客土法、离子交换法和氧化还原法等, 但由于技术不成熟且成本过高, 导致修复土壤的结构及理化性质遭到破坏, 造成二次污染。为了更加经济有效地去除土壤中的放射性铀, 我国研究者采用生物法来修复含铀土壤。其中植物修复技术是生物修复技术中的一种, 具有成本低, 维护费用小, 易操作, 不容易造成二次污染, 且能够实现资源回收利用的优点, 深受国内外学者重视^[3]。

多年生黑麦草是禾本科早熟禾亚科黑麦草属多年生疏丛型草本植物, 是我国南北方普遍种植的优质牧草和常用的优质草坪草, 其再生能力强, 易于种植^[4]。有报道表明黑麦草对铀有较强的富集能力^[5]。目前对铀污染下黑麦草对铀的富集机理分析还不够深入, 特别是外源铀作用下根际环境

如何影响修复作用的机理研究还不多, 这对铀污染土壤植物修复技术的应用至关重要。该研究采用模拟根箱栽培技术探究在不同铀浓度胁迫下黑麦草修复铀污染土壤的根际效应。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂 试验所用仪器见表 1^[6]。试验所用试剂及去离子水均是符合国家标准和分析纯试剂。试验中所用的主要化学试剂有硝酸、氢氟酸、高氯酸、氢氧化钠、抗干扰铀荧光试剂、草酸、草酸铵、柠檬酸三钠、碳酸氢钠、连二亚硫酸钠、醋酸、30%双氧水溶液。

1.2 供试材料 供试植物为黑麦草, 多年生优良牧草植物。从农贸市场中选择颗粒饱满、大小均匀且无毒无蛀完整的种子。

供试土壤均为无铀污染的土壤, 取 0~20 cm 的表层土壤。土壤为红壤土, 颜色为黄色, pH 为中性(6.32), 基本理化性质如下: 有机质 35.543 g/kg, 碱解氮 115.423 mg/kg, 速效磷 32.246 mg/kg, 速效钾 106.753 mg/kg。

1.3 栽培试验 将供试土壤放在空旷通风处进行风干, 土壤风干后磨细再过 2 mm 筛, 将过筛后的土壤依次放入根箱中并加入底肥(尿素 0.5 g/kg, 磷酸二氢钾 0.44 g/kg)混匀待用。将土壤样品分成 4 个处理组, 每处理组 3 个重复, 同时设置一批对照组。铀(U)以 UO₂(NO₃)₂·6H₂O 溶液的形式加入土壤中, 然后均匀搅拌。土壤中铀溶液的浓度分别为 5、10、15、20 mg/kg, 土壤静置 7 d 后进行播种。

将上述供试土壤放入根箱中, 根箱中间被 300 目尼龙网

基金项目 国家自然科学基金项目(21407023, 41362011); 江西省自然科学基金项目(20171BAB203027)。

作者简介 牛天洋(1995—), 男, 吉林白城人, 硕士研究生, 研究方向: 生物法修复放射性污染土壤。*通信作者, 副教授, 博士, 硕士生导师, 从事放射性污染土壤修复研究。

收稿日期 2020-05-24

分隔开,将黑麦草种植在根箱一侧,作为根际侧,土壤为根际土壤;另一侧为非根际侧,土壤为非根际土壤。保持田间持

水量,黑麦草的生长周期为45 d。

表1 试验仪器

Table 1 Laboratory instruments

序号 No.	仪器 Instrument	型号规格 Model and specification	生产厂商 Manufacturer
1	微型铀分析仪	WGJ-III	杭州大吉光电仪器有限公司
2	可控硅温度控制器-马弗炉	KSY	中国沈阳市节能电炉厂
3	不锈钢恒温电热板	DB-3A/B	江苏省金坛市荣华仪器制造有限公司
4	加热恒温鼓风干燥箱	DHG-9030	上海精宏实验设备有限公司
5	分析天平(精确到0.0001)	AR224CN	奥豪斯仪器有限公司
6	消解炉	KDNX-20	上海精科有限公司
7	气浴恒温振荡器	SHZ-82A	金坛市荣华仪器制造有限公司
8	高速冷冻离心机	TGL-16C	上海安亭科学仪器厂

1.4 测试方法 植物样品和土壤样品中铀的测定采用激光液体荧光法,土壤样品中铀的各形态采用在 Tessier^[7] 五步提取法基础上修改的逐级化学提取法来确定。

富集量等相关计算见公式(1)和(2)。

$$\text{富集系数 BCF} = \frac{C_{\text{root}}/C_{\text{ground}}}{C_{\text{soil}}} \quad (1)$$

$$\text{转运系数 TF} = \frac{C_{\text{ground}}}{C_{\text{root}}} \quad (2)$$

式中, C_{ground} 为黑麦草地上部铀含量(mg/kg); C_{root} 为黑麦草根部分铀含量(mg/kg); C_{soil} 为土壤铀浓度(mg/kg)。

1.5 数据处理与统计分析 数据处理使用 WPS2019 软件,使用 SPSS17.0 对数据进行 Duncan's 法单因素方差分析和多重比较, $P < 0.05$ 为显著, $P < 0.01$ 为极显著,最后使用 Origin2017 作图。

2 结果与分析

2.1 铀胁迫对黑麦草生物量的影响 由表2可知,黑麦草地上部和根部干重在不同浓度铀处理之间存在显著差异($P < 0.05$)。随着土壤铀浓度的升高,黑麦草地上部干重和根部干重均呈先增加后降低趋势。在土壤铀浓度为5 mg/kg时,黑麦草地上部和根部干重均达到最大值:地上部干重为270.685 mg/盆,根部干重为146.415 mg/盆,分别较对照增加了8.7%和9.4%。随着土壤铀浓度的升高,黑麦草地上部干重和根部干重逐渐降低,在10~20 mg/kg 铀胁迫下,黑麦草地上部和根部干重分别较对照降低了7.4%、22.2%、32.8%和19.4%、27.2%、45.7%,这表明土壤铀浓度达到一

表2 不同铀胁迫对黑麦草生物量的影响

Table 2 Effects of different uranium levels on ryegrass biomass

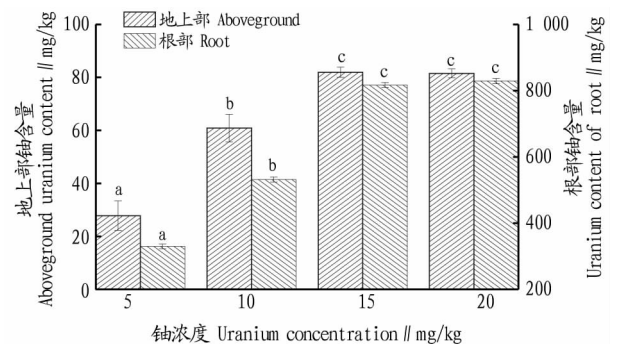
铀浓度 Uranium concentration/mg/kg	植株干重 Plant dry weight/mg/盆	
	地上部 Aboveground	根部 Root
CK	249.110±7.778 c	133.835±3.917 c
5	270.685±6.497 c	146.415±1.798 c
10	230.585±8.892 bc	107.915±4.035 bc
15	193.890±8.339 ab	97.370±7.748 ab
20	167.445±4.217 a	72.694±6.652 a

注:同列数据后小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

Note: Different small letters within the same column mean significant differences ($P < 0.05$)

定高度会抑制黑麦草的生长,导致其生物量降低。这与王帅等^[8]低浓度铀会促进植物生长,高浓度铀会抑制植物生长的研究结果保持一致。

2.2 铀胁迫对黑麦草富集量的影响 由图1可知,随着土壤铀水平的升高,黑麦草植物地上部和根部铀含量均呈增加趋势($P < 0.05$),说明黑麦草植物体内铀含量直接受外源铀浓度影响,这与徐国聪等^[9]的研究结果基本一致。黑麦草根部分铀含量明显高于地上部分,说明黑麦草根部分吸收铀贡献显著大于地上部,即黑麦草富集铀的主要器官为根部。在土壤铀水平为20 mg/kg时,黑麦草根部分铀含量达到最大值为829.25 mg/kg,比陈威^[10]报道间作竹柳地下部铀含量305.635 mg/kg 要高很多,分别较其他3个处理组增加了151.3%、55.9%、1.5%;而黑麦草地上部铀含量在15 mg/kg 铀胁迫时达到最大值为81.967 mg/kg,分别较其他3个处理组增加了194.5%、34.6%、0.5%。当土壤铀浓度分别为15、20 mg/kg时,黑麦草根部分铀含量相差无几,说明土壤铀浓度达到一定水平时,黑麦草根部分对铀的富集量会呈现饱和状态。



注:小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

Note: Different small letters mean significant differences ($P < 0.05$)

图1 不同铀胁迫下黑麦草地上部分和根部对铀的富集量

Fig. 1 Uranium enrichment in upper parts and roots of ryegrass-land under different concentrations of uranium stress

2.3 铀胁迫对黑麦草富集系数和转移系数的影响 植物体内铀含量与土壤中铀含量之比为富集系数^[11](BCF),其值越大,则表明植物富集能力越强。植物地上部分铀含量与根部铀含量之比为转运系数^[11](TF),其值越大,则表明植物将铀

从根部转运到地上部的能力越强。由公式(1)和(2)可得计算结果如表3所示。黑麦草地上部铀富集系数(BCF)随铀浓度增加呈先增加后降低趋势,在10 mg/kg 铀浓度下黑麦草地上部 BCF 达到最大值为 6.088,较其他3个处理组增加了9.4%、11.4%、49.3%。黑麦草 BCF 根部显著大于地上部,在5 mg/kg 铀浓度下黑麦草根 BCF 达到最大值为 66.007,较其他3个处理组增加了24.1%、21.3%、59.4%。黑麦草转运系数在10 mg/kg 铀浓度下达到最大值为 0.114,且所有处理下转运系数均小于1。与文献[12-14]中的研究结果“超富集植物应满足富集系数大于1”保持一致。但转运系数小于1,表明黑麦草将铀从根部转运到地上部的能力较差,不符合超富集植物特点。

表3 不同铀胁迫下植物体中的 BCF、TF

Table 3 BCF and TF in plants under different concentrations of uranium stress

铀浓度 Concentration mg/kg	地上部富集系数 BCF Aboveground bioaccumulation factor	根部富集系数 BCF Roots bioaccumulation factor	转运系数 TF Transfer factor
5	5.567	66.007	0.084
10	6.088	53.202	0.114
15	5.464	54.474	0.100
20	4.078	41.463	0.098

2.4 根际效应分析 含铀土壤中铀的形态可分为可交换态、碳酸盐结合态、有机质结合态、无定型铁锰氧化物/氢氧化物结合态、晶质型铁锰氧化物/氢氧化物结合态和残渣态6种。其中可交换态铀和碳酸盐结合态铀称为活性铀,有机质结合态铀和无定型铁锰氧化物/氢氧化物结合态铀称为潜在活性铀,植物容易吸收活性铀或潜在活性铀;而晶质型铁锰氧化物/氢氧化物结合态铀和残渣态铀称为惰性铀,不易被植物吸收^[15-17]。由图2可知,根际土壤中各相态铀占总相态铀含量的平均百分比为惰性铀(46.6%)>潜在活性铀(29.47%)>活性铀(23.93%);非根际土壤中各相态铀占总相态铀含量的平均百分比为惰性铀(60.22%)>活性铀(21.21%)>潜在活性铀(18.57%)。在不同浓度铀胁迫下,根际土壤和非根际土壤中惰性铀含量明显高于其他2种相态铀含量,这表明根际土壤与非根际土壤中铀主要以惰性铀的形式存在。随着土壤铀浓度的增加,根际处惰性铀含量逐渐低于非根际处,这表明黑麦草根系具有很强的活化能力,黑麦草根系分泌出某种有机酸能够对根际土壤中惰性铀进行转化,将惰性铀转化为可被植物吸收的活性铀或潜在活性铀。有研究表明:土壤的pH是影响铀活性的重要因素^[18]。有机酸在被施入土壤后可与重金属形成可溶的络合物,不仅促进了稳定态的重金属向土壤溶液中迁移,而且也使重金属很容易随着植物的蒸腾作用从根部向地上部迁移,显著提高了植物体内重金属的含量^[19-20]。研究证实,超富集植物印度芥菜能够从根系中分泌出柠檬酸作为螯合剂,与土壤中的重金属离子相结合,提高重金属在土壤溶液中的移动性,使得通过质流、扩散等作用到达植物根际土壤的重金属离子的量的增加,从而增加植物根系对重金属的富集量,促进植物将

重金属从根系转运到地上部^[21]。

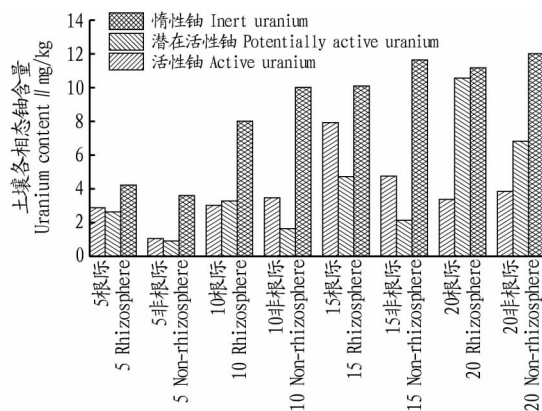


图2 不同浓度铀胁迫下各相态铀含量

Fig. 2 The uranium content of each phase under different concentrations of uranium stress

3 结论

采用模拟根箱栽培试验,通过对黑麦草进行不同浓度铀(5、10、15、20 mg/kg)处理,对黑麦草生物量、植物体内铀含量及根际与非根际土壤中铀的赋存形态进行测定与分析,研究结果如下。

(1)黑麦草地上部和根部干重在不同浓度铀处理之间存在显著性差异($P < 0.05$)。随着土壤铀浓度的升高,黑麦草的地上部干重和根部干重均呈先增加后降低趋势。

(2)黑麦草根 BCF 浓度明显高于地上部分,随着土壤铀浓度的升高,黑麦草地上部和根部铀浓度呈显著增加趋势($P < 0.05$)。黑麦草地上部和根部富集系数大于1,但转运系数均小于1,说明黑麦草主要将铀富集在根部。

(3)在不同浓度铀胁迫下,根际土壤与非根际土壤中铀均以惰性铀形式存在。随着土壤铀浓度的增加,根际处惰性铀含量逐渐低于非根际处,说明黑麦草根系可能分泌出某种有机酸作为螯合剂促进了铀向根际土壤处迁移,导致根际土壤中惰性铀较非根际处易于转化为活性铀。

参考文献

- [1] BACA T E, FLORKOWSKI T. The environmental challenges of nuclear disarmament[M]. Dordrecht; Springer Netherlands, 2000; 1-12.
- [2] TAYLOR S R. Abundance of chemical elements in the continental crust: A new table[J]. Geochimica et cosmochimica acta, 1964, 28(8): 1273-1285.
- [3] 刘娜, 杨云龙. 生物修复技术在污染环境修复中的应用研究[J]. 科技情报开发与经济, 2005, 15(3): 173-175.
- [4] 王宏信. 重金属富集植物黑麦草对镉、镉的响应及其根际效应[D]. 重庆: 西南大学, 2006; 9.
- [5] 赵继武, 罗学刚, 王焯, 等. 黑麦草对铀胁迫的光合响应及铀吸收特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(11): 2456-2464.
- [6] 周秀丽. 某铀矿区土壤放射性核素铀形态分布特征及其生物有效性研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2016; 13.
- [7] TESSIER A, CAMPBELL P G C, BISSON M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical chemistry, 1979, 51(7): 844-851.
- [8] 王帅, 黄德娟, 黄德超, 等. 蔬菜对铀的富集特征及其形态分析[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(8): 266-268.
- [9] 徐国聪, 唐运来, 陈梅, 等. 铀对菠菜叶片光合作用影响的研究[J]. 西北植物学报, 2016, 36(2): 370-376.
- [10] 陈斌. 博落回和竹柳间作修复铀污染土壤的研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2018; 27.

壤水分研究,主要从坡位、坡向、坡度等地形因子进行探讨^[2,20,23]。坡向通过受太阳辐射程度的强弱来反映对土壤水分的变化^[24],一般情况下,同一流域中阳坡的含水量低于阴坡,主要是阴坡的太阳辐射热量低于阳坡,阴坡的蒸发蒸腾强度也低于阳坡,因此阴坡的土壤水分含量高于阳坡^[25]。

根系与土壤直接接触,对土壤中水分和养分的吸收起着至关重要的作用^[26]。有研究表明,毛竹细根比根长和根长密度随着土层深度的增加呈下降趋势^[27],其中根长密度可以在一定程度上反映单位体积内根系的吸收表面积,植物的根长密度越大,养分及水分吸收的表面积就越大;比根长越大的根,直径越细,根系的活力越强,吸收水分的能力就越强^[28],两者对土壤水分的变化有绝对性影响。也有研究证明土壤表层的比根长和根长密度较大,底层较小^[29]。该研究气象因子对4个点中不同厚度土壤的典型相关系数均值结果表明,随土壤厚度增加,气象因子对土壤水分的作用越明显,间接说明气象因子与根系对土壤水分影响有着密不可分的效果。

4 结论

该研究运用典型相关分析方法处理气象因子对土壤水分影响中有一定的优越性,得出以下结论:

(1)在气象要素对土壤水分的影响中,水汽压差是影响土壤水分最主要的气象因子,这表明该研究区域中植被是对土壤水分影响的主要因素。

(2)在累积时间的综合气象因子对土壤水分的影响中,土壤水分观测日前4d的综合气象因子对土壤水分影响较大。

参考文献

- [1] 韩新生,王彦辉,于澎涛,等.六盘山半干旱区华北落叶松林土壤水分时空变化与影响因素[J].水土保持学报,2019,33(1):111-117.
- [2] 李谦,郑锦森,朱青,等.太湖流域典型土地利用类型土壤水分对降雨的响应[J].水土保持学报,2014,28(1):6-11.
- [3] 田迅,高凯,张丽娟,等.坡位对土壤水分及植被空间分布的影响[J].水土保持通报,2015,35(5):12-16.
- [4] 濮阳雪华,王春春,苟清平,等.陕北黄土区植被群落特征与土壤水分关系研究[J].草业学报,2019,28(11):184-191.
- [5] 王素萍,张存杰,宋连春,等.多尺度气象干旱与土壤相对湿度的关系研究[J].冰川冻土,2013,35(4):865-873.
- [6] 黄志宏,周国逸,MORRIS J,等.桉树人工林冠层气象因子对雨季土壤水分的影响[J].热带亚热带植物学报,2003,11(3):197-204.
- [7] 张聪聪,陈效民,张勇,等.气象因子对太湖地区旱作农田土壤水分

态的影响[J].中国农业科学,2013,46(21):4454-4463.

- [8] 张桂珍,高凯,张丽娟.扎鲁特旗山地草地土壤含水量动态与气候因子的关系[J].草业科学,2015,32(9):1399-1404.
- [9] 徐勇峰,郭伊辉,李淮,等.洪泽湖湿地杨树林土壤水分变化及其与气象因子的关系[J].浙江农林大学学报,2018,35(1):20-28.
- [10] 吴东丽,李琪,薛红喜,等.山东省土壤水分时空分布规律及分区[J].江苏农业学报,2019,35(3):639-645.
- [11] 魏宝成,玉山,贾旭,等.基于 AMSR-2 蒙古高原土壤水分反演及对气象因子响应分析[J].中国生态农业学报,2016,24(6):837-845.
- [12] 韩相云,景元书,李根.低丘红壤坡面土壤水分变化的气象因素冗余分析[J].生态学杂志,2013,32(9):2368-2374.
- [13] 刘士玲,杨保国,卢立华,等.广西大青山土壤水热特征及其对气象要素的响应[J].中南林业科技大学学报,2018,38(11):46-52.
- [14] 何兴潼,袁淑杰,谷晓平,等.贵州省喀斯特区域土壤水分持续上升时期气象要素对土壤水分的影响[J].水土保持通报,2018,38(2):87-94.
- [15] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56[R]. Rome:FAO,1998.
- [16] 高惠璇.两个多重相关变量组的统计分析(1)(典型相关与典型冗余分析)[J].数理统计与管理,2002,21(1):57-64.
- [17] FU B J, WANG J, CHEN L D, et al. The effects of land use on soil moisture variation in the Danangou catchment of the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2003, 54(1/2): 197-213.
- [18] SENEVIRATNE S I, CORTI T, DAVIN E L, et al. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review[J]. Earth-science reviews, 2010, 99(3/4): 125-161.
- [19] CHO E, CHOI M. Regional scale spatio-temporal variability of soil moisture and its relationship with meteorological factors over the Korean peninsula[J]. Journal of hydrology, 2014, 516: 317-329.
- [20] 赫晓慧,温仲明.小流域地形因子影响下的土壤水分空间变异性研究[J].水土保持研究,2008,15(2):80-83,87.
- [21] 余雷,张一平,沙丽清,等.哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤含水量变化规律及其影响因素[J].生态学杂志,2013,32(2):332-336.
- [22] 刘鑫,毕华兴,李笑吟,等.晋西黄土区基于地形因子的土壤水分分异规律研究[J].土壤学报,2007,44(3):411-417.
- [23] 葛翠萍,赵军,王秀峰,等.东北黑土区坡耕地地形因子对土壤水分和容重的影响[J].水土保持通报,2008,28(6):16-19.
- [24] 朱德兰,吴发启.不同地形部位土壤水分的年变化分析[J].中国水土保持科学,2003,1(4):28-31.
- [25] 何福红,黄明斌,党廷辉.黄土高原沟壑区小流域土壤水分空间分布特征[J].水土保持通报,2002,22(4):6-9.
- [26] CRAINE J M, LEE W G, BOND W J, et al. Environmental constraints on a global relationship among leaf and root traits of grasses[J]. Ecology, 2005, 86(1):12-19.
- [27] 刘广路,范少辉,蔡春菊,等.毛竹细根分布特征研究[J].热带亚热带植物学报,2017,25(5):472-479.
- [28] PREGITZER K S, LASKOWSKI M J, BURTON A J, et al. Variation in sugar maple root respiration with root diameter and soil depth[J]. Tree physiology, 1998, 18(10):665-670.
- [29] 程云环,韩有志,王庆成,等.落叶松人工林细根动态与土壤资源有效性关系研究[J].植物生态学报,2005,29(3):303-310.

(上接第71页)

- [11] 王帅.某铀矿区农田土壤重金属形态分析及其风险评估[D].南昌:东华理工大学,2017:47.
- [12] 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.
- [13] 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): 81-126.
- [14] 沈振国,刘友良.重金属超量积累植物研究进展[J].植物生理学通讯,1998,34(2):133-139.
- [15] 宋照亮,朱兆洲,杨成.乌江流域石灰土中铀等元素形态与活性[J].长江流域资源与环境,2009,18(5):471-476.
- [16] GUO P R, DUAN T C, SONG X J, et al. Evaluation of a sequential extraction for the speciation of thorium in soils from Baotou area, Inner Mongolia[J]. Talanta, 2007, 71(2): 778-783.

- [17] MARTÍNEZ-AGUIRRE A, GARCIA-LEÓN M, IVANOVICH M. U and Th speciation in river sediments[J]. Science of the total environment, 1995, 173/174:203-209.
- [18] 廉欢.黑麦草对铀污染土壤植物提取修复的根际效应研究[D].南昌:东华理工大学,2018:25.
- [19] ZHAO S L, LIAN F, DUO L. EDTA-assisted phytoextraction of heavy metals by turfgrass from municipal solid waste compost using permeable barriers and associated potential leaching risk[J]. Bioresource technology, 2011, 102(2): 621-626.
- [20] DE LA ROSA G, PERALTA-VIDEA J R, CRUZ-JIMENEZ G, et al. Role of ethylenediaminetetraacetic acid on lead uptake and translocation by tumbleweed (*Salsola kali* L.) [J]. Environmental toxicology and chemistry, 2007, 26(5): 1033-1039.
- [21] 霍文敏,赵中秋,王丽,等.不同超富集、富集植物-玉米间作模式对玉米中镉吸收、转运的影响研究[J].地学前缘,2019,26(6):118-127.