

# 大兴安岭地区笃斯越橘铅和镉的吸收特性及污染评价

张继舟, 袁磊, 于志民, 王立民, 吕品\*

(黑龙江省科学院自然与生态研究所, 湿地与生态保育国家地方联合工程实验室, 黑龙江省哈尔滨市 150040)

**摘要:**【目的】研究大兴安岭地区自然生境中笃斯越橘叶片、果实及土壤中铅(Pb)和镉(Cd)的含量,为自然生境中笃斯越橘对Pb和Cd的吸收特征及果实品质评价提供基础数据支撑。【方法】以大兴安岭地区笃斯越橘天然种群为研究对象,通过分析其叶片、果实及所生长的土壤中Pb和Cd的含量,应用模型拟合,明确笃斯越橘对土壤中Pb和Cd的吸收特性;通过相关分析,明确影响笃斯越橘叶片及果实中Pb和Cd含量的环境因子;通过标准比较及潜在生态风险评价法,明确笃斯越橘叶片及果实受Pb和Cd的污染程度。【结果】①笃斯越橘叶片、果实及土壤中Pb和Cd含量均为空间中程度变异。②Pb和Cd在笃斯越橘土壤到叶片及果实中的迁移系数(CRs)随土壤中有效态Pb和Cd浓度的增加而减小,该趋势可被Langumir曲线模型较好的拟合。③土壤中较高的碱解氮含量有利于笃斯越橘叶片及果实对Pb的吸收,较高的有效Cd含量有利于叶片及果实对Cd的吸收。④大兴安岭地区笃斯越橘叶片中Pb含量高于国家食品标准GB 2762—2017中Pb含量限值,果实中Pb及叶片和果实中Cd含量远小于国家食品标准GB 2762—2017中Pb和Cd含量限值,果实中Pb和Cd潜在生态风险均较低。【结论】Langumir曲线模型可较好的拟合大兴安岭地区笃斯越橘叶片及果实对土壤中Pb和Cd的吸收特性;笃斯越橘果实中Pb和Cd潜在生态风险均较低。

**关键词:** 大兴安岭; 笃斯越橘; Langumir模型; 铅和镉; 元素迁移系数(CRs)

**中图分类号:** X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2023)03-0703-10

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022062401

张继舟, 袁磊, 于志民, 王立民, 吕品. 大兴安岭地区笃斯越橘铅和镉的吸收特性及污染评价[J]. 土壤通报, 2023, 54(3): 703-712

ZHANG Ji-zhou, YUAN Lei, YU Zhi-min, WANG Li-min, LV Pin. Absorption Characteristics and Pollution Evaluation of Pb and Cd by *Vaccinium uliginosum* L. in the Greater Khingan Mountains[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(3): 703-712

【研究意义】随着人们健康意识的日益提高,重金属污染已经成为世界关注的焦点。土壤-植物系统是矿质元素生物地球化学循环的重要环节,重金属元素可以通过生物地化循环过程从外界进入植物体,并最终通过食物链在人体内富集<sup>[1]</sup>。因此,明确重金属被植物吸收的特性及对植物的污染程度至关重要。【前人研究进展】生物不可利用的毒性重金属元素(Pb和Cd等)可通过诱导氧化应激等致病途径损害植物的生理机能<sup>[2]</sup>。重金属元素从土壤到植物的转移是对植物产生影响的一个关键过程,该过程可用重金属元素从土壤向植物中的迁移系数(CRs),即元素在植物与土壤中的浓度比来表征<sup>[3]</sup>。目前对土壤-植物系统重金属的研究还主要集中于典型污染地区,在自然条件下,植物对重金属摄取的研究仍相对缺乏。植物对土壤中金属元素的吸收效

率与金属元素的含量之间并非呈现线性关系,而是当土壤金属元素浓度较低时,元素可被植物更有效地吸收,当土壤金属元素浓度增高时该吸收过程逐渐趋缓<sup>[4]</sup>,Langumir模型和Freundlich模型可较好的拟合这种吸收特征<sup>[5-6]</sup>。同时,这种非线性的吸收特性因植物及元素种类而异,存在着种间差异性<sup>[7]</sup>。笃斯越橘(*Vaccinium uliginosum* L.)在我国主要分布于大、小兴安岭及长白山地区<sup>[8]</sup>,为该区林下植被中的优势种,基本完全处于野生状态<sup>[9]</sup>,其生境中土壤基质的pH一般小于5.5,较强的酸性使土壤重金属元素的生物有效性相对较高,更容易被植物吸收利用,故研究笃斯越橘对重金属元素的吸收特性对明确其果实的食用安全性意义重大。我国对自然生境中重金属的研究仍然相对缺乏,早期的个别学者对长白山及大兴安岭地区少数几种重金属含量进行了

收稿日期: 2022-06-24; 修订日期: 2022-10-22

基金项目: 黑龙江省科学院院长基金(YZ2022ZR01)和黑龙江省省属科研院所科研业务费(SJKYYWFB2021ST01)资助

作者简介: 张继舟(1980-),男,吉林省吉林人,博士,副研究员,主要从事土壤生态环境的研究工作。E-mail: jizhou1980229@126.com

\*通讯作者: E-mail: lv\_pin2005@163.com

研究。李亚东等<sup>[10]</sup>对长白山地区笃斯越橘叶片 Cu 和 Zn 等几种矿质元素含量变化进行了研究。白永超等<sup>[11]</sup>对大兴安岭地区笃斯越橘叶片与土壤中 Zn 和 Cu 的进行了研究。【本研究切入点】对于毒性的重金属元素 Cd 和 Pb 等的研究极为缺乏, 仅 Bai 等<sup>[12]</sup>对长白山地区笃斯越橘与土壤中的 Pb 含量进行基本分析。随着当前环境条件的急剧变化, 笃斯越橘生长基质的矿质元素含量也会随之发生相应的变化, 故进一步掌握笃斯越橘叶片及果实对重金属的吸收特征具有明显的理论意义。目前, 针对大兴安岭地区自然生境下笃斯越橘对 Pb 和 Cd 吸收及生态风险的研究鲜见报道。【拟解决的问题】本研究以大兴安岭地区笃斯越橘天然种群为研究对象, 通过分析其生长土壤、叶片及果实中 Pb 和 Cd 的含量, 应用模型拟合, 明确笃斯越橘对土壤中 Pb 和 Cd 的吸收特性; 通过相关分析, 明确影响笃斯越橘叶片及果实中 Pb 和 Cd 的土壤因子; 通过标准比较及潜在生态风险评估法, 明确笃斯越橘叶片及果实中 Pb 和 Cd 的污染程度。为自然生境下笃斯越橘对 Pb 和 Cd 的吸收特征及果实品质评价提供理论支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区域概况

本研究以黑龙江大兴安岭阿木尔林业局所辖林区为研究区域 (52°15'03"~53°33'15" N, 122°38'30"~124°05'05" E), 该区域笃斯越橘总蕴藏量在大兴安岭地区居首, 海拔范围 248~1 397 m, 年均气温-5℃, 年均降水量约 455 mm, 年无霜期 90~120 d, 属寒温带大陆性季风气候。笃斯越橘生境主要有水湿地及山地 2 种类型。其中, 水湿地生境中笃斯越橘的根系层主要为腐殖质及草甸土, 主要伴生植物为落叶松 (*Larix gmelini*)、白桦 (*Betula platyphylla*)、柴桦 (*Betula fruticosa*)、杜香 (*Ledum palustre*); 山地林下生境中笃斯越橘的根系层以棕色针叶林土为主, 腐殖质含量较高, 主要伴生植物包括落叶松、白桦、红豆越橘 (*Vaccinium vitis*) 及忍冬 (*Lonicera caerulea*)。

### 1.2 样品的采集与分析

1.2.1 样品采集及处理 2018 年 8 月, 在研究区内东、南、西、北四个方向主要道路边 200 m 外采集叶片、果实及土壤, 各样品间距为 10 km, 总共选择 66 个笃斯越橘集中分布区域, 采样点具体坐标见

表 1。每个区域设置 1 个 10×10 m 的样方, 每个样方中按“Z”形采集植株的叶片, 以笃斯越橘 3~4 a 基生枝条为代表枝条, 采集新梢中部叶片 200 枚作为 1 个叶片样品, 同时采集果实及根系集中分布区 (0~20 cm) 土壤样品, 共采集土壤、叶片及果实样品各 66 份。将采集的叶片及果实带回实验室用去离子水洗净, 晾干, 105℃杀青 30 min, 80℃烘干、粉碎、过 0.15 mm 尼龙筛备用; 土壤自然风干, 过 0.15 mm 尼龙筛备用。

1.2.2 样品测定分析 土壤有机碳应用总有机碳氮分析仪 (Analytik jena2100S, 德国) 测定。土壤 pH (水土比 2.5:1)、土壤电导率、土壤碱解氮、土壤速效磷及土壤速效钾参照《土壤农化分析》中的方法测定<sup>[13]</sup>。土壤 Pb 和 Cd 采用 M3 法浸提<sup>[14]</sup>, 应用原子吸收分光光度计 (Thermo3500, 美国)-石墨炉法测定。笃斯越橘叶片及果实 Pb 和 Cd 应用 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> (3:1) 混合消解<sup>[15]</sup>, 应用原子吸收分光光度计-石墨炉法测定。

### 1.2.3 笃斯越橘叶片对重金属吸收特性的方程拟合

本研究应用扩展的 Langumir 模型 (Equation 1) 及 Freundlich 模型 (Equation 2) 对土壤有效态 Pb 和 Cd 含量与 Pb 和 Cd 从土壤到叶片及果实中的迁移系数 (CRs) 之间的变化关系进行拟合。

$$\text{Langumir模型: } Y = 1/(a + bX^c) \quad (1)$$

$$\text{Freundlich模型: } Y = k \times X^n \quad (2)$$

其中, Y 为重金属 Pb 和 Cd 从土壤向植物中的迁移系数 (CRs), 即 Pb 和 Cd 在植物与土壤中的含量比 (CRs = C<sub>leaf (fruit)}/C<sub>soil</sub>); X 为土壤中有有效态 Pb 和 Cd 的含量; a、b、c 和 k、n 分别为 Langumir 模型及 Freundlich 模型的模型参数。</sub>

1.2.4 污染评价方法 本研究采用标准比较法及潜在生态风险评估法对笃斯越橘叶片及果实中 Pb 和 Cd 的污染程度进行评估, 其中标准比较法的参比标准为食品安全国家标准 GB 2762—2017, 其中 Pb 的含量限值为 0.2 mg kg<sup>-1</sup> (鲜样), Cd 的含量限值为 0.05 mg kg<sup>-1</sup> (鲜样)。潜在生态风险指数的计算公式如下:

$$C_f^i = C_i/C_n^i \quad (3)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \quad (4)$$

式中, E<sub>r</sub><sup>i</sup> 为第 i 种重金属的单因子潜在生态风险指数;

表 1 笃斯越橘采样点的地理坐标  
Table 1 Longitude and latitude coordinates of sampling sites of *Vaccinium uliginosum* L.

样点 Sampling site	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	样点 Sampling site	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	样点 Sampling site	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)
1	123°07'21"	52°52'13"	23	123°11'50"	52°49'01"	45	123°33'00"	52°45'30"
2	123°05'05"	52°53'39"	24	123°14'17"	52°51'02"	46	123°34'10"	52°43'28"
3	123°01'13"	52°54'54"	25	123°18'41"	52°52'09"	47	123°48'26"	52°41'49"
4	122°58'14"	52°56'25"	26	123°21'49"	52°51'16"	48	123°44'17"	52°42'04"
5	122°55'14"	52°57'22"	27	123°26'25"	52°50'33"	49	123°44'18"	52°42'06"
6	122°50'58"	52°56'31"	28	123°26'26"	52°50'34"	50	123°39'11"	52°41'31"
7	123°10'37"	52°50'29"	29	123°29'27"	52°48'50"	51	123°16'04"	52°52'04"
8	123°11'53"	52°48'57"	30	123°30'12"	52°47'12"	52	123°16'05"	52°52'03"
9	123°12'07"	52°47'10"	31	123°33'08"	52°45'32"	53	123°19'08"	52°53'37"
10	123°11'06"	52°44'25"	32	123°33'04"	52°43'31"	54	123°19'18"	52°56'25"
11	123°10'59"	52°42'14"	33	122°42'37"	52°56'52"	55	123°22'31"	53°01'07"
12	123°09'06"	52°39'26"	34	122°46'29"	52°56'00"	56	123°22'36"	53°04'06"
13	123°12'47"	52°36'25"	35	122°38'43"	52°56'46"	57	123°22'27"	53°04'07"
14	123°13'00"	52°34'12"	36	122°45'02"	52°48'13"	58	123°25'14"	53°06'45"
15	123°11'32"	52°32'07"	37	122°46'07"	52°48'52"	59	123°26'22"	53°08'55"
16	123°08'45"	52°29'14"	38	122°50'48"	52°42'11"	60	123°25'22"	53°11'29"
17	123°08'41"	52°29'14"	39	122°39'23"	52°44'55"	61	123°24'37"	53°13'52"
18	123°08'47"	52°29'13"	40	122°36'26"	52°47'59"	62	123°25'23"	53°17'24"
19	123°06'39"	52°28'10"	41	122°42'54"	52°46'03"	63	123°29'12"	53°18'54"
20	123°03'00"	52°25'35"	42	123°13'32"	52°24'37"	64	123°32'41"	53°20'19"
21	123°00'01"	52°25'26"	43	123°17'11"	52°23'03"	65	123°36'38"	53°18'02"
22	122°59'57"	52°25'28"	44	123°49'20"	52°40'43"	66	123°39'17"	53°17'53"

$C_f^i$  为第  $i$  种重金属的污染系数;  $C_i$  为笃斯越橘叶片或果实 Pb 或 Cd 含量的实测值, 单位  $\text{mg kg}^{-1}$ ;  $C_n^i$  为食品安全国家标准 GB2762-2012 中 Pb 或 Cd 含量的限值, 本研究中按干重计算, 即 Pb 为  $2 \text{ mg kg}^{-1}$ , Cd 为  $0.5 \text{ mg kg}^{-1}$ ;  $T_r^i$  为第  $i$  种重金属的毒性参数; 元素 Pb 和 Cd 的毒性系数分别为 5 和 30。潜在生态风险指数分级标准见表 2。

表 2 潜在生态风险指数法分级标准

Table 2 Classification criteria of the potential ecological risk index

潜在生态风险 $E_r^i$ 范围 Range of potential ecological risk $E_r^i$	单因子生态风险污染程度 Degree of single factor ecological risk pollution
$E_r^i < 40$	无风险
$40 \leq E_r^i < 80$	一般风险
$80 \leq E_r^i < 160$	中等风险
$160 \leq E_r^i < 320$	高风险
$320 \leq E_r^i$	极高风险

### 1.3 数据处理

用 SPSS20.0 (SPSS, Inc., 美国) 软件对土壤性质及笃斯越橘叶片和果实 Pb 和 Cd 含量进行 pearson 相关性分析, 应用 Origin2017 (Originlab, 美国) 对 Pb 和 Cd 从土壤向笃斯越橘叶片和果实中的迁移系数进行 Langumir 模型、Freundlich 模型及

直线方程的拟合及绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 笃斯越橘叶片、果实及土壤中 Pb 和 Cd 的含量分布特性

对大兴安岭地区笃斯越橘土壤、叶片及果实中 Pb 和 Cd 含量分析 (图 1) 可知, 土壤有效态 Pb 和 Cd 的含量范围分别在  $0.21 \sim 3.27$  及  $0.02 \sim 0.15 \text{ mg kg}^{-1}$  之间, 平均值分别为  $1.21$  和  $0.07 \text{ mg kg}^{-1}$ , 变异系数分别为  $56.8\%$  及  $45.9\%$ ; 叶片 Pb 和 Cd 的含量范围分别在  $0.21 \sim 3.61$  及  $0.01 \sim 0.11 \text{ mg kg}^{-1}$  之间, 平均值分别为  $2.28$  和  $0.07 \text{ mg kg}^{-1}$ , 变异系数分别为  $45.5\%$  及  $52.1\%$ ; 果实 Pb 和 Cd 的含量范围分别在  $0.11 \sim 0.56$  及  $0.01 \sim 0.04 \text{ mg kg}^{-1}$  之间, 平均值分别为  $0.29$  和  $0.02 \text{ mg kg}^{-1}$ , 变异系数分别为  $37.4\%$  及  $27.7\%$ 。土壤、叶片及果实中 Pb 和 Cd 的含量均为空间中等程度变异。其中 Pb 在叶片中的含量高于其在土壤中的含量, 且远高于其在果实中的含量; Cd 在叶片与土壤中的含量大致相当, 且远高于其在果实中的含量。表明笃斯越橘叶片对 Pb 具有的一定的富集作用。

### 2.2 笃斯越橘叶片及果实对 Pb 和 Cd 的吸收特性

通过土壤有效态 Pb/Cd 含量和笃斯越橘叶片及

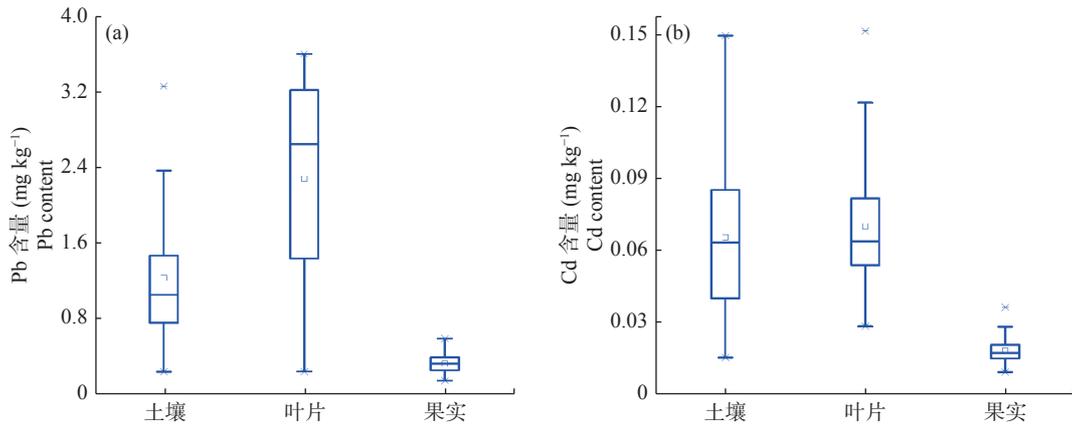


图1 笃斯越橘土壤、叶片及果实中 Pb 和 Cd 的含量  
Fig.1 Contents of Pb and Cd in soil, leaf and fruit of *V. uliginosum*

果实中 Pb/Cd 含量关系的散点图 (图 2) 可知, 笃斯越橘叶片及果实中 Cd 含量与土壤有效态 Cd 含量之

间呈线性相关, 而 Pb 含量与土壤有效态 Pb 含量无相关性。

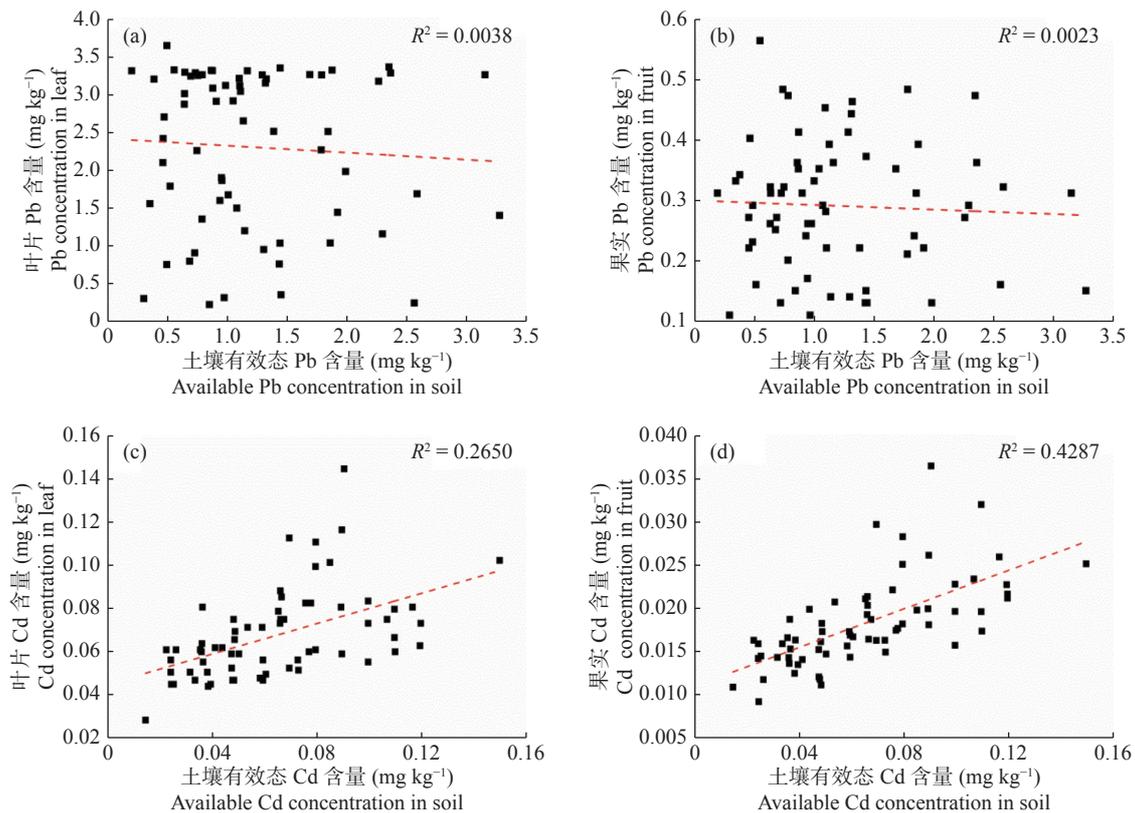


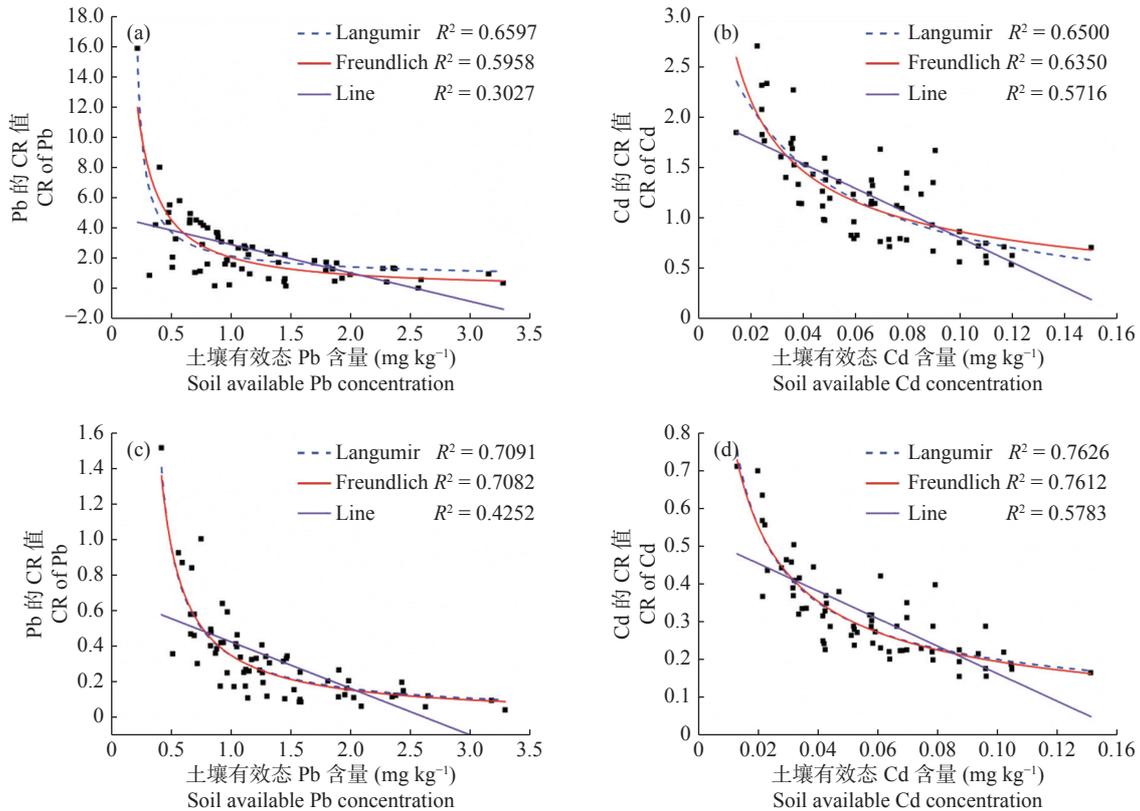
图2 笃斯越橘叶片与果实中 Pb 和 Cd 含量与土壤有效态 Pb 和 Cd 含量的关系图  
Fig.2 Pb and Cd Concentrations in leaf and fruit and available Pb and Cd concentrations in soil

应用 Langumir、Freundlich 和线性方程对 Pb 和 Cd 的迁移系数 (CRs) 与土壤有效态 Pb 和 Cd 含量的数据进行拟合, 可明确笃斯越橘叶片及果实对 Pb 和 Cd 的吸收特征 (图 3)。Langumir 和 Freundlich 模型的拟合度明显优于直线方程模型, 且 Langumir 模型的拟合度最佳。总体表现为笃斯越橘叶片和果

实对 Pb 和 Cd 的 CRs 值在土壤有效态 Pb 和 Cd 含量低时较高, 在土壤有效态 Pb 和 Cd 含量高时较低, 即随土壤有效态 Pb 和 Cd 含量的增加而逐渐降低。

### 2.3 笃斯越橘叶片与果实中重金属 (Cd 和 Pb) 与土壤因子的关系

土壤是植物矿质元素的主要供给库, 研究土壤



注: (a: 叶片 Pb; b: 叶片 Cd; c: 果实 Pb; d: 果实 Cd)

图3 叶片、果实与土壤有效态 Pb 和 Cd 浓度比(CRs)与土壤有效态 Pb 和 Cd 含量关系

Fig.3 Concentration ratios (CRs) of Pb and Cd in leaf and fruit and the relationships as with soil available Pb and Cd concentrations

因子与笃斯越橘叶片与果实中重金属 Pb 和 Cd 的相关性, 可了解土壤因子对笃斯越橘叶片及果实的影响。由笃斯越橘叶片、果实中 Pb/Cd 与土壤因子的相关性 (图 4) 可知, 叶片 Pb 含量与土壤碱解氮呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与土壤有机碳及电导率呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 果实中 Pb 含量与土壤 pH 及碱解氮呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ); 叶片及果实 Cd 含量与土壤有效 Cd 呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。土壤 pH 与土壤有效 Pb 含量呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ); 土壤有机碳、EC 及碱解氮与土壤有效态 Cd 含量呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。由笃斯越橘叶片与果实中 Pb/Cd 的相关性 (图 5) 可知, 叶片 Pb/Cd 与果实中 Pb/Cd 呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。

#### 2.4 笃斯越橘叶片与果实中重金属(Cd 和 Pb) 的污染评价

由笃斯越橘叶片和果实中 Pb 和 Cd 含量的描述性统计 (表 3) 可知, 笃斯越橘叶片 Pb 含量高于国家食品安全标准 GB 2762—2017 的限值, 而果实中 Pb 及叶片和果实中 Cd 含量远低于国家食品安全标准 GB

2762—2017 的限值, 同时果实中 Pb 和 Cd 含量更是远低于叶片中 Pb 和 Cd 含量。

由表 4 可知, 叶片和果实中 Pb 和 Cd 的潜在生态风险指数均小于 40, 处于无风险等级, 其中果实的污染指数远小于叶片的污染指数。果实为笃斯越橘与人类食物链的链接环, 果实中 Pb 和 Cd 的含量极低, 且均处于无风险等级, 表明果实品质十分安全。

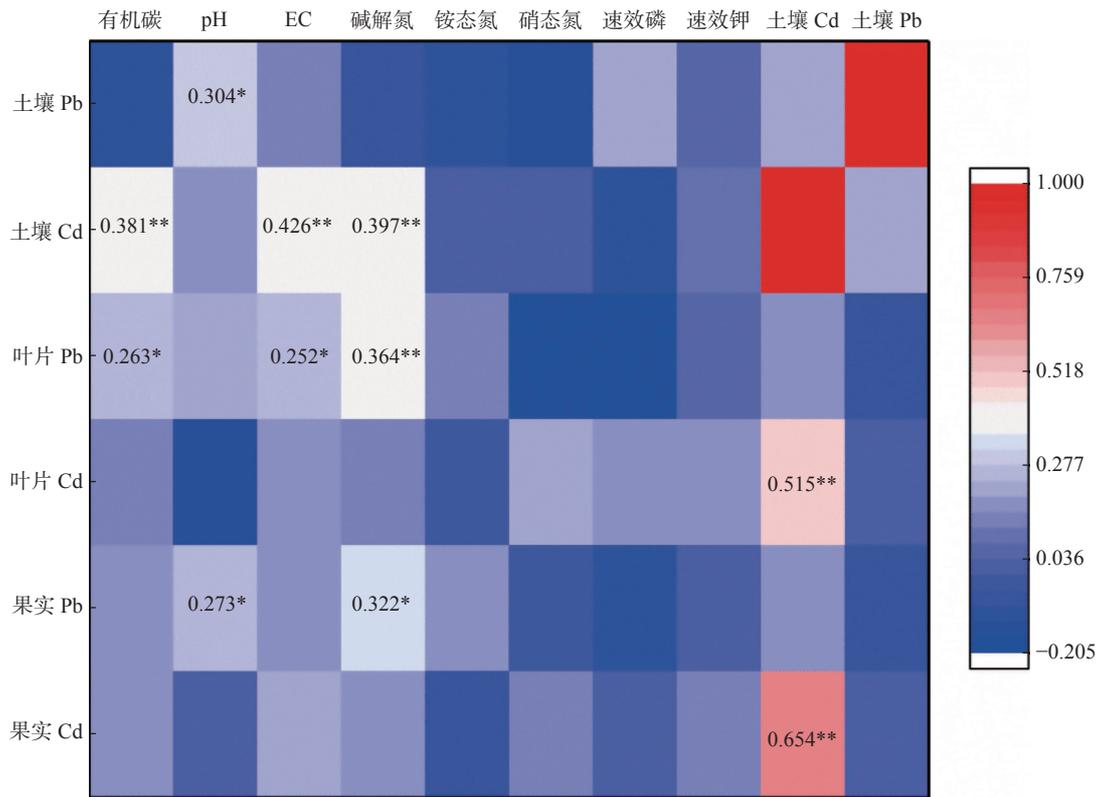
### 3 讨论

#### 3.1 笃斯越橘叶片、果实及其土壤 Pb 和 Cd 含量

本研究表明, 笃斯越橘叶片、果实及其生境土壤中 Pb 和 Cd 的含量均为空间中等程度变异。说明笃斯越橘叶片、果实及其生境土壤受到了一定的干扰, 这可能使土壤中的 Pb 和 Cd 含量发生改变, 这与张继舟等<sup>[18]</sup>的研究结果相符。大兴安岭地区有茂密原始森林, 为中国重要的林业基地之一, 但由于自然多变的环境, 森林火灾时有发生, 消防灭火可能是外源 Pb 和 Cd 加入的重要原因。

#### 3.2 笃斯越橘叶片及果实对 Pb 和 Cd 的吸收特性

本研究表明, 笃斯越橘叶片及果实对 Pb/Cd 的



注:\*表示存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ); \*\*表示存在显著性差异 ( $P < 0.01$ )

图 4 笃斯越橘叶片与果实 Cd 和 Pb 含量与土壤中主要化学性质的 Pearson 相关性

Fig.4 Pearson correlation between Cd and Pb contents of leaf and fruit of *V. uliginosum* and the chemical index of soil

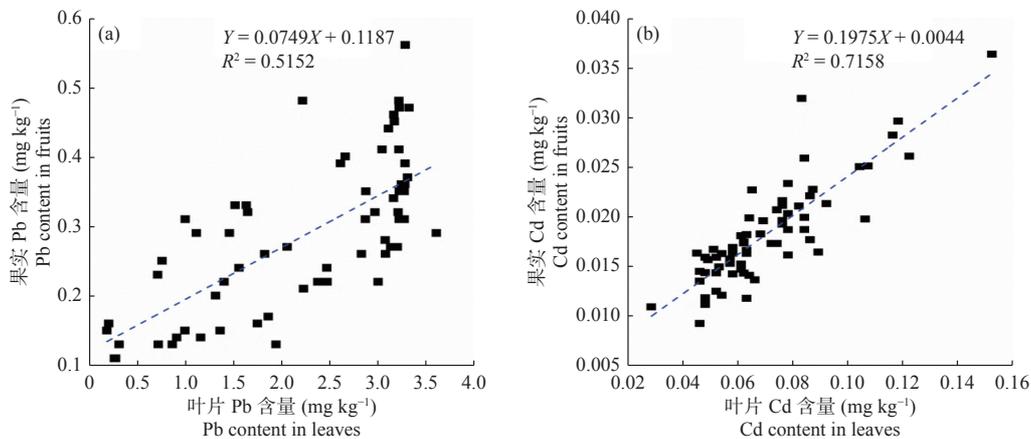


图 5 Pb 和 Cd 在笃斯越橘叶片与果实中相关性

Fig.5 Correlation between Pb and Cd in leaf and fruit of *V. uliginosum*

吸收特性可用 Langumir 模型很好的拟合, 即笃斯越橘叶片及果实对 Pb/Cd 的 CRs 值均在土壤有效态 Pb 和 Cd 含量低时较高, 且随土壤有效态 Pb 和 Cd 含量增加而逐渐降低。Krauss 等<sup>[19]</sup>通过对 Slovakia 农田土壤中的小麦对重金属 Cd、Zn、Pb 和 Cu 的吸收特点的研究得出, 小麦对 Cd 和 Zn 的吸收特性更符合曲线模型, 并可用 Freundlich 模型较好的拟合。Tuovinen 等<sup>[7]</sup>通过对芬兰北方寒冷地区森林土壤中

5 种植物对几种重金属的吸收特性的研究表明, 5 种植物对几种重金属的吸收特性可以用 Langumir 模型很好的拟合。Azeez 等<sup>[20]</sup>研究了作物对农田土壤中放射性元素的吸收特性, 也得出了相同的结论。植物对土壤中元素的吸收表现为低浓度时吸收急剧增加, 而高浓度时吸收逐渐趋缓<sup>[4]</sup>, 本研究及以上相关研究均用不同的数学模型描述了这种吸收行为, 这可解析为植物对外来元素吸收过程中自身的一种保护作

表 3 笃斯越橘叶片和果实 Pb 和 Cd 含量的描述性统计  
Table 3 Descriptive statistics of Pb and Cd contents of leaves and fruits of *V. uliginosum*

重金属元素 Heavy metal element	最小值 Minimum value (mg kg <sup>-1</sup> )	最大值 Maximum value (mg kg <sup>-1</sup> )	平均值 Mean value (mg kg <sup>-1</sup> )	标准差 Standard deviation (mg kg <sup>-1</sup> )	国家食品标准 National Food Standard (mg kg <sup>-1</sup> )
叶片Pb	0.063	1.084	0.645	0.311	0.2
果实Pb	0.011	0.056	0.029	0.011	0.2
叶片Cd	0.009	0.005	0.021	0.007	0.05
果实Cd	0.001	0.004	0.002	0.001	0.05

注: 表中数据为笃斯越橘新鲜叶片和果实中 Pb 和 Cd 含量, 通过测定叶片及果实的含水量换算得出。

表 4 笃斯越橘叶片及果实中 Pb 和 Cd 的潜在生态风险指数  $E_r^i$  的描述性统计  
Table 4 Descriptive statistics of index of potential ecological risk  $E_r^i$  of Pb and Cd in leaves and fruits of *V. uliginosum*

重金属元素 Heavy metal element	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	平均值 Mean value	标准差 Standard deviation
叶片Pb	1.58	27.10	16.13	7.78
果实Pb	0.28	1.40	0.73	0.28
叶片Cd	5.40	3.00	12.60	4.20
果实Cd	0.60	2.18	1.20	0.60

用机制。吸收特性因植物及元素种类而异, 存在着植物种类间及元素间的差异性<sup>[7]</sup>。自然生境中笃斯越橘叶片及果实对 Pb/Cd 的吸收特性恰好符合该种规律, 该研究弥补了国内自然生境下笃斯越橘叶片及果实对 Pb/Cd 吸收特性的研究不足。

本研究中叶片和果实中 Pb 含量与土壤有效态 Pb 含量相关性不佳, 而叶片和果实中 Cd 含量与土壤有效态 Cd 含量呈线性相关。该结果表明, 自然状态下, 笃斯越橘叶片和果实中 Pb 可能并非主要来源于土壤, 而叶片和果实中的 Cd 主要来源于土壤。在自然环境中, Pb 可通过空气中的飘尘通过叶片进入植物体, 大气是植物 Pb 来源的另一个关键原因<sup>[21]</sup>。

转运系数是植物对重金属转运能力的重要指标。某些特定植物转移重金属的能力并不受土壤 pH、有机质及重金属有效性的影响, 而可能受制于其本身遗传特征<sup>[22]</sup>。这可能亦是笃斯越橘对 Pb 和 Cd 吸收差异的原因之一。

重金属离子从根部迁移到地上部主要通过两个途径, 一是通过木质部薄壁细胞释放到导管, 二是凭借根压和蒸腾作用使其在导管中运输。而重金属通常以金属螯合态形式, 通过阳离子-ATPase 通道在木质部运输<sup>[23]</sup>。研究发现 Cd 能通过共质体途径进入根中柱进行快速积累, 再通过扩散梯度进入导管<sup>[24]</sup>。这可能是笃斯越橘叶片与果实中 Cd 与土壤中 Cd 相关性显著的重要因素。而 Pb 进入到植物根部细胞后, 会以难溶态形式聚集在液泡膜表面, 降低了 Pb 在胞内的可迁移性, 阻碍了 Pb 木质部装载过程<sup>[25]</sup>, 故其

迁移性低于 Cd, 这与本研究结论相符, 可能是 Cd 与 Pb 在笃斯越橘中迁移积累差异的原因之一。秦余丽等<sup>[26]</sup>的研究也表明, 与 Pb 相比, 土壤中的 Cd 迁移性较强、生物毒性较高, 容易被作物吸收和富集, 即植物可食用部分的 Cd 含量与土壤中 Cd 的有效性呈正相关。

高含量的 Fe 可促进番茄 *HMA3* (P1B-ATPase 酶) 基因在根部的表达, 增加了根部细胞对 Pb 的区隔能力, 间接地减弱了 Pb 在地上部的转运能力, 从而降低了植物地上部 Pb 的累积<sup>[27]</sup>。笃斯越橘土壤中 Fe 含量较高<sup>[28]</sup>, 可能促使笃斯越橘某些基因产生类似的作用, 而抑制土壤中 Pb 进一步在地上部迁移累积。

### 3.3 土壤因子对笃斯越橘叶片及果实中 Pb 和 Cd 含量的影响

本研究得出土壤碱解氮对笃斯越橘叶片和果实吸收 Pb 起到重要作用。氮素是影响植物生长最重要的矿质元素, 是蛋白及核酸的重要组分, 在分子组成、代谢和及遗传方面意义重大<sup>[29]</sup>。适当的氮素吸收可改善植物的生长状况, 调节体内渗透压, 刺激酶活, 提高光合效率, 减缓重金属对植株的胁迫, 保持植物的营养平衡<sup>[30-31]</sup>。氮素可减缓或消除 Pb 对植物的毒害, 并促进植物生长<sup>[32]</sup>, 这与本研究碱解氮与笃斯越橘中 Pb 呈现显著相关性的研究结果相符。植物可通过氮代谢合成脯氨酸等的含氮代谢产物, 进而增加其对 Pb 的耐受性<sup>[33]</sup>。

本研究表明, 土壤有效态 Pb 与叶片及果实中

Pb 含量未见相关性, 土壤有效态 Cd 含量显著影响叶片及果实对 Cd 的吸收。这表明了笃斯越橘叶片及果实对重金属 Pb 和 Cd 吸收的异质性, 即笃斯越橘对 Pb 的吸收一方面来自与土壤中有有效态 Pb, 另一方面可能源于其他途径, 如大气中的气溶胶 Pb 通过叶片进入笃斯越橘体内; 而笃斯越橘对 Cd 的吸收大部分来自于土壤中的有效态 Cd。前人研究表明, 植物叶片中多数矿质元素与土壤中矿质元素间无显著相关性<sup>[34-36]</sup>, 这与本研究土壤中 Pb 与叶片果实中的 Pb 含量无相关性的结论相符。笃斯越橘叶片 Pb/Cd 含量与果实 Pb/Cd 元素的相关性强, 可能是因为植株叶片 Pb/Cd 为果实中 Pb/Cd 的直接来源, 叶片的良好生长直接影响果实品质。马海洋等的研究也表明, 果树叶片对矿质元素反应敏感, 它既是土壤矿质元素的贮库, 又是果实发育所需养分的供源, 果实中矿质元素含量与叶片呈显著正相关<sup>[37]</sup>。

土壤有机碳及电导率的增加有利于笃斯越橘叶片中 Pb 元素的积累, 可能由于有机碳中的活性物质可提高笃斯越橘叶片对 Pb 的利用率<sup>[38]</sup>, 并且土壤有机碳的增加可增加土壤的阳离子代换量, 进而增加其对 Pb 元素的吸收<sup>[39]</sup>, 同时也说明笃斯越橘叶片是吸收 Pb 元素的主要器官。

### 3.4 笃斯越橘叶片与果实中 Pb 和 Cd 的污染评价

本研究应用标准比较法及潜在生态风险评价法评估了笃斯越橘果实中 Pb 和 Cd 的污染状况, 表明大兴安岭地区笃斯越橘果实中 Pb 和 Cd 含量远小于国家食品标准 GB 2762—2017 中 Pb 和 Cd 含量限值, 不存在潜在生态风险。

潜在生态风险评价法一般用于土壤中重金属元素的污染评价, 本研究将该方法运用到笃斯越橘叶片及果实的污染评价中, 同样得出了较好的结果, 表明该方法亦可用于食品中重金属的污染评价。前人研究表明, 大兴安岭地区土壤重金属含量较低, 其中 Pb 处于无风险等级, 20% 地区的 Cd 处于低风险等级, 80% 地区的 Cd 处于无风险等级<sup>[18]</sup>。该研究中叶片和果实中 Pb 和 Cd 的单因子潜在风险指数  $E_i^p$  均小于 40, 处于无风险等级, 表明果实中 Pb 和 Cd 不存在潜在生态风险。

## 4 结论

(1) 土壤、笃斯越橘叶片及果实中 Pb 和 Cd 含量均为空间中等程度变异。

(2) 自土壤至笃斯越橘叶片、果实的 Pb 和 Cd 的迁移系数 (CRs) 随土壤中有有效态 Pb 和 Cd 浓度的增加而减小, 笃斯越橘对 Pb 和 Cd 的吸收可被 Langumir 曲线模型较好的拟合。

(3) 土壤中较高的碱解氮、有机碳含量及电导率有利于笃斯越橘叶片对土壤 Pb 的吸收, 较高的 pH 值及碱解氮含量有利于笃斯越橘果实对土壤 Pb 的吸收, 较高的有效 Cd 含量有利于笃斯越橘叶片及果实对 Cd 的吸收。

(4) 大兴安岭地区笃斯越橘叶片中 Pb 含量高于国家食品标准 GB 2762—2017 中 Pb 含量限值, 果实中 Pb 及叶片和果实中 Cd 含量远小于国家食品标准 GB 2762—2017 中 Pb 和 Cd 含量限值, 即笃斯越橘果实中 Pb 和 Cd 潜在生态风险均较低。

### 参考文献:

- [1] 朱亮亮, 吴 勇, 周 浪, 等. 铜仁土壤-水稻重金属积累效应与安全种植区划[J]. *环境科学*, 2021, 42(12): 5988 - 5996.
- [2] JOMOVA K, VALKO M. Advances in metal-induced oxidative stress and human disease[J]. *Toxicology*, 2011, 283: 65 - 87.
- [3] IAEA, International Atomic Energy Agency. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments. Technical reports series no. 72. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010.
- [4] SIMON SL, IBRAHIM SA. The plant/soil concentration ratio for calcium, radium, lead and polonium: Evidence for non-linearity with references to substrate concentration[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 1987, 5: 123 - 42.
- [5] YAYLAH-ABANUZ G, TUYSUZ N. Heavy metal contamination of soils and tea plants in the eastern Black Sea region, NE Turkey[J]. *Environmental Earth Science*, 2009, 59: 131 - 44.
- [6] REDJALA T, STERCKEMAN T, SKIKER S, et al. Contribution of apoplast and symplast to short term nickel uptake by maize and *Leptoplax emarginata* roots[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2010, 68: 99 - 106.
- [7] TUOVINEN T S, ROIVAINEN P, MAKKONEN S, et al. Soil-to-plant transfer of elements is not linear: Results for five elements relevant to radioactive waste in five boreal forest species[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 410-411: 191 - 197.
- [8] 郝 瑞. 长白山笃斯越橘的调查[J]. *园艺学报*, 1979, 6(2): 87 - 93.
- [9] SONG Y Y, SONG C C, RENG J S, et al. Influence of nitrogen additions on litter decomposition, nutrient dynamics, and enzymatic activity of two plant species in a peatland in Northeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 640 - 646.
- [10] 李亚东, 郝 瑞, 曲路平, 等. 笃斯越橘矿质营养特性研究[J]. *吉林农业大学学报*, 1990, 12(1): 24 - 28, 116.

- [ 11 ] 白永超, 侯智霞, 王 冲, 等. 大兴安岭笃斯越橘叶片、根系及根系层土壤养分特性研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(7): 115 – 124.
- [ 12 ] BAI J H, CUI B S, DENG W, et al. Plant Pb Contents in Elevation Zones of the Changbai Mountain National Nature Reserve, China[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(2): 229 – 234.
- [ 13 ] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [ 14 ] 刘 肃, 李西开. Mehlich3通用浸提剂的研究[J]. *土壤学报*, 1995, 32(2): 132 – 141.
- [ 15 ] 唐玉琴, 彭良志, 淳长品, 等. 红壤甜橙园土壤和叶片营养元素相关性分析[J]. *园艺学报*, 2013, 40(4): 623 – 632.
- [ 16 ] LANGMUIR I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1918, 40: 1361 – 1403.
- [ 17 ] FREUNDLICH H M F. Over the Adsorption in Solution[J]. *Journal of Physical Chemistry*, 1906, 57: 385 – 470.
- [ 18 ] 张继舟, 吕 品, 王立民, 等. 大兴安岭森林土壤重金属含量空间变异与污染评价[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(3): 810 – 819.
- [ 19 ] KRAUSS M, WILCKE W, KOBZA J, et al. Predicting heavy metal transfer from soil to plant: potential use of Freundlich-type function[J]. *J Plant Nutr Soil Sci*, 2002, 165: 3 – 8.
- [ 20 ] AZEEZ H H, MANSOUR H H, AHMAD S T. Transfer of natural radioactive nuclides from soil to plant crops[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2019, 03(10): 152 – 158.
- [ 21 ] MICHPOULOS P, BALOUTSOS G, ECONMOU A, et al. Biogeochemistry of lead in an urban forest in Athens, Greece. *Biogeochemistry*, 2005, 73: 345-357.
- [ 22 ] 王效瑾, 高 巍, 赵 鹏, 等. 小麦幼苗根系形态对镉胁迫的响应[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(6): 1218 – 1225.
- [ 23 ] SOLIS D F, GONZALEZ C M, CARRILLO G R, et al. Accumulation and localization of cadmium in *Echinochloa polystachya* grown within a hydroponic system[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, (141): 630 – 636.
- [ 24 ] 杨惟薇, 刘 敏, 曹美珠, 等. 不同玉米品种对重金属铅镉的富集和转运能力[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(06): 774 – 779.
- [ 25 ] 侯晓龙, 陈加松, 刘爱琴, 等. Pb胁迫对金丝草体内Pb化学形态及细胞分布的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2012, 28(3): 271 – 276.
- [ 26 ] 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 等. 纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响[J]. *环境科学*, 2017, 38(3): 1189 – 1200.
- [ 27 ] 叶汉杰, 王立立, 余丹萍, 等. 缺Ca/Fe及盐胁迫下番茄Pb吸收转运与关键基因的表达关系[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(1): 37 – 43.
- [ 28 ] 张继舟, 李云影, 袁 磊, 等. 大兴安岭地区笃斯越橘果实成熟期叶片矿质元素营养诊断研究[J]. *果树学报*, 2019, 36(9): 1161 – 1170.
- [ 29 ] KRAPP A. Plant nitrogen assimilation and its regulation: a complex puzzle with missing pieces[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2015, 25: 115 – 122.
- [ 30 ] ZHANG F, LI J, HUANG J, LIN L H, et al. Transcriptome profiling reveals the important role of exogenous nitrogen in alleviating cadmium toxicity in poplar plants[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2017, 36(4): 942 – 956.
- [ 31 ] ALPHA J M, CHEN J, ZHANG G. Effect of nitrogen fertilizer forms on growth, photosynthesis, and yield of rice under cadmium stress[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2009, 32(2): 306 – 317.
- [ 32 ] 周正贵. 白三叶草苗期土壤干旱胁迫生理生化特性研究[D]. 西南大学, 2008.
- [ 33 ] SHARMA S S, DIETZ K. The significance of amino acids and amino acid-derived molecules in plant responses and adaptation to heavy metal stress[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2006, 57(4): 711 – 726.
- [ 34 ] KHOKHAR Y. Soil fertility and nutritional status of Kinnow orchards grown in arid soil of Punjab, India[J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2012, 7(33): 4692 – 4697.
- [ 35 ] SHAN Z, SHAH M Z, TARIQ M, et al. Survey of citrus orchards for micronutrients deficiency in Swat valley of North Western Pakistan[J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2012, 42(2): 705 – 710.
- [ 36 ] 白永超, 卫旭芳, 陈 露, 等. 笃斯越橘果实、叶片矿质元素和土壤肥力因子与果实品质的多元分析[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(1): 170 – 181.
- [ 37 ] 马海洋, 同延安, 路永莉, 等. 诊断施肥综合法(DRIS)在渭北旱塬红富士苹果营养诊断中的应用[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(2): 84 – 88, 99.
- [ 38 ] GALE E S, SULLIVAN D M, COGGER C G, et al. Estimating plant-available nitrogen release from manures, composts, and specialty products[J]. *Journal of Environment Quality*, 2006, 35(6): 2321 – 2332.
- [ 39 ] SIDDIQUE M, ALI S, JAVED A S. Macronutrient assessment in apple growing region of Punjab[J]. *Soil & Environment*, 2009, 28(2): 184 – 192.

## Absorption Characteristics and Pollution Evaluation of Pb and Cd by *Vaccinium uliginosum* L. in the Greater Khingan Mountains

ZHANG Ji-zhou, YUAN Lei, YU Zhi-min, WANG Li-min, LV Pin\*

(Institute of Natural Resources and Ecology Heilongjiang Academy of Sciences, National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Wetlands and Ecological Conservation, Harbin 150040, China)

**Abstract:** [Objective] The aims were to study the contents of Pb and Cd in leaves and fruits of *Vaccinium uliginosum* L. under natural habitats in the Greater Khingan Mountains, which provided basic data support for the absorption characteristics of Pb and Cd in plant and soil. [Methods] Taking the natural population of *Vaccinium uliginosum* L. in the Greater Khingan Mountains as the research object, the absorption characteristics of *Vaccinium uliginosum* L. to Pb and Cd in soil were determined by analyzing and applying models fitting the contents of Pb and Cd in leaves, fruits and soils. The environmental factors affecting Pb and Cd contents in *Vaccinium uliginosum* L. leaves and fruits were identified by correlation analysis. Finally, the pollution degree of Pb and Cd in *Vaccinium uliginosum* L. leaves and fruits were determined by standard comparison method and potential ecological risk assessment method. [Results] ① The contents of Pb and Cd in soil, leaf and fruit showed moderate spatial variations. ② The migration coefficients (CRs) of Pb and Cd from soil to leaf and fruit of *Vaccinium uliginosum* L. decreased with the increase of Pb and Cd contents in soil, which could be well fitted by Langumir curve model. ③ The higher alkali-hydrolyzed nitrogen was beneficial to the absorption of Pb by leaf and fruit, and the higher available Cd was beneficial to the absorption of Cd by leaf and fruit. ④ The Pb contents in leaf of *Vaccinium uliginosum* L. in the Greater Khingan Mountains were higher than the limit value of the National Food Standard (GB2762-2017), the Pb contents in fruit and Cd contents in leaf and fruit of *Vaccinium uliginosum* L. were far lower than the limit value of National Food Standards (GB 2762—2017). The potential ecological risks of Pb and Cd in fruits were very low. [Conclusion] The Langumir curve model could well fit the absorption characteristics of Pb and Cd by *Vaccinium uliginosum* L. leaf and fruit in the Greater Khingan Mountains. The potential ecological risks of Pb and Cd were low.

**Key words:** Greater Khingan Mountains; *Vaccinium uliginosum* L.; Langumir model; Pb and Cd; Element migration coefficient (CRs)

[责任编辑: 裴久渤 高晓丹]