

徐温新, 李 艳, 代允超, 等. 影响小白菜铅吸收的土壤因素和预测模型研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(8): 1584–1591.

XU Wen-xin, LI Yan, DAI Yun-chao, et al. Determination and prediction of lead uptake by *Brassica chinensis*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(8): 1584–1591.

影响小白菜铅吸收的土壤因素和预测模型研究

徐温新¹, 李 艳², 代允超¹, 吕家珑^{1*}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 农业部植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 陕西省农业环境保护监测站, 西安 710003)

摘要: 铅(Pb)的生物有效性、移动性和转移特征对环境和食品安全至关重要。本研究采集我国15个省份理化性质差异很大的土壤, 利用温室试验, 以小白菜为研究对象, 通过外源添加Pb, 研究Pb从土壤向植物的运移, 探索影响Pb生物有效性的主要土壤因素, 并建立预测模型。结果表明, 土壤总Pb含量、有机碳(OC)含量、pH对植物吸收Pb有显著影响。植物Pb含量和土壤Pb含量呈正相关, 而土壤pH和OC含量则与植物Pb含量呈负相关。相比于单因素回归分析, 逐步多元线性回归在评价Pb生物有效性时, 相关性更高, 决定系数 R^2 由0.83提高到0.94。Pb在酸性土壤中生物富集系数(BCF)较碱性土壤中更大。利用合并CK、Pb1和Pb2处理($n=45$)得到的Freundlich预测方程($\lg C_{\text{plant Pb}}=1.14 \lg C_{\text{soil Pb}}-0.19\text{pH}-0.63\lg C_{\text{OC}}+1.92$, $R^2=0.94$, $\text{RMSE}=0.11$)能更准确地评估Pb在土壤中的生物有效性, 试验结果可用于预测Pb从土壤到植物的转移。

关键词: 铅; 转移特性; 小白菜; 控制因素; 预测模型

中图分类号: S132 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)08-1584-08 doi:10.11654/jaes.2017-1626

Determination and prediction of lead uptake by *Brassica chinensis*

XU Wen-xin¹, LI Yan², DAI Yun-chao¹, LÜ Jia-long^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China; 2. Shaanxi Monitoring Station of Agro-Environmental Protection, Xi'an 710003, China)

Abstract: The estimation of heavy metal bioavailability, mobility, and movement is important for ensuring environment and food safety. We conducted a greenhouse study, using *Brassica chinensis* and 15 soils, to investigate the uptake of lead (Pb) by plants and to construct a model for predicting the main factors that influence Pb bioavailability. The results showed that soil organic carbon (OC) content, pH, and total Pb content significantly affected Pb uptake, and the Pb contents of the plants and soil were positively correlated, whereas the soil pH and OC were negatively correlated with plant Pb. Multivariable (pH, OC, and total soil Pb) regression models ($R^2=0.94$) were more accurate for estimating Pb bioavailability than single-factor (total soil Pb) models ($R^2=0.83$). The greatest bioconcentration factor (BCF) was measured for acidic soils. The most accurate Freundlich equation for estimating Pb bioavailability ($\lg [\text{plant Pb}] = 1.14 \lg [\text{soil Pb}] - 0.19\text{pH} - 0.63\lg [\text{OC}] + 1.92$) was developed using data from combined CK and Pb treatments ($R^2=0.94$, $\text{RMSE} = 0.11$, $n=45$) and could be used to predict Pb uptake.

Keywords: lead; transfer characteristic; *Brassica chinensis*; controlling factor; prediction model

收稿日期: 2017-11-28 录用日期: 2018-01-23

作者简介: 徐温新(1980—), 男, 河南兰考人, 博士研究生, 主要从事土壤化学和土壤环境化学研究。E-mail: xuwenxin008@yahoo.com.cn

*通信作者: 吕家珑 E-mail: ljll@nwsuaf.edu.cn

基金项目: “十三五”科技部重点专项(2017YFD0200200/2017YFD0200205); “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD22B02); 陕西省科技创新项目(2016KTZDNY03-01)

Project supported: The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (2017YFD0200200/2017YFD0200205); The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2015BAD22B02); The Key Science and Technology Program of Shaanxi Province, China (2016KTZDNY03-01)

铅(Pb)由于其其在土壤中的溶解性和迁移性较大,是一种危害性很大的微量重金属元素^[1-2],土壤和蔬菜已受到一定程度的Pb污染,大多数重金属可以通过食用蔬菜很容易地进入食物链^[3-4],因此农业土壤的重金属污染是一个严重的问题。有研究表明,单独使用金属总量不足以准确评估重金属的风险,在评价生物有效性时应侧重于重金属生物活性而不是总量^[5]。但是目前土壤中的金属总含量仍被中国和欧盟等国家用作制定土壤环境质量标准的基本指标,近年来,很多相关研究也是采用重金属总量来构建重金属风险评估的预测模型^[6]。土壤性质如土壤质地、pH、有机碳(OC)、碳酸钙(CaCO₃)、阳离子交换量(CEC)、氧化铝(Al_{ox})和氧化铁(Fe_{ox})都会影响Pb在土壤中的迁移率和生物有效性^[7-8]。然而,这些土壤性质之间的相互关系使得影响土壤中Pb生物有效性的主要变量难以确定。因此,可以通过逐步多元线性分析来确定土壤性质和Pb生物有效性之间的关系。故本研究利用土壤中总Pb含量结合土壤基本理化性质,对Pb在土壤中的生物有效性及其向植物中的运移特性展开研究。

除了土壤因素,Pb的生物有效性与作物的种类也有一定关系,研究表明,小白菜对Pb具有较高的吸收能力^[9]。虽然许多研究调查了各种植物摄取Pb的机制,但大多数集中在具有单一土壤或性质相似的土壤中,这限制了结果的普遍应用性^[10]。中国地域广

阔,土壤性质差异很大,因此,在进行土壤Pb生态风险评价时需要考虑土壤性质对Pb生物有效性的影响,但仍然缺乏在不同种类土壤上普遍适用的评价Pb生物有效性的方法,构建适用于各种土壤类型的预测模型至关重要。因此,本研究选取我国15种理化性质差异很大的土壤,以小白菜为研究对象,旨在测定其在不同性状土壤上对Pb的吸收特征,评估影响小白菜对Pb生物有效性的主要因素,构建小白菜在不同的土壤类型吸收Pb的预测模型。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

采集我国15个省份理化性质差异较大的土壤,采样深度为0~20 cm,土壤样品风干后过20目尼龙筛,供土壤基本理化性质测定。分析方法参照《土壤农化分析》^[11]。使用湿酸消解法(HNO₃-HF-HClO₄)对供试土壤样品进行消解处理,浸提液使用原子吸收分光光度计(Hitachiz-2000,日本)测量其中的总Pb含量。供试土壤基本理化性质见表1,可以看出,其pH变化范围为4.90~8.80;OC含量范围为6.78~20.70 g·kg⁻¹;CaCO₃含量范围为0~53.57 g·kg⁻¹;CEC含量范围为8.70~31.11 cmol·kg⁻¹;黏粒含量范围为6.66%~42.91%;Fe_{ox}和Al_{ox}含量范围分别为0.72~2.34 g·kg⁻¹和0.05~0.26 g·kg⁻¹,15种供试土壤包含了酸性土、中性土和碱性土,其理化性质变化很大。

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Selected soil properties

编号 ^a	采样点	pH	OC/g·kg ⁻¹	CaCO ₃ /g·kg ⁻¹	CEC/cmole·kg ⁻¹	黏粒/%	Fe _{ox} /g·kg ⁻¹	Al _{ox} /g·kg ⁻¹	Pb背景值/mg·kg ⁻¹
1	湖南	4.90	9.00	0.00	10.85	42.91	1.71	0.11	28.74
2	重庆	5.74	10.14	0.00	21.34	24.96	2.14	0.08	38.46
3	云南	5.92	19.87	0.00	11.10	27.52	1.97	0.26	42.51
4	江西	6.01	6.78	0.00	8.70	36.51	1.76	0.18	34.75
5	安徽	6.25	11.62	0.00	19.08	16.84	2.34	0.05	30.17
6	黑龙江	6.27	20.70	0.00	28.59	19.33	1.96	0.09	44.79
7	吉林	6.82	19.05	0.00	31.11	30.18	1.84	0.19	44.73
8	陕西	7.90	9.56	35.60	22.37	26.01	1.20	0.17	37.40
9	河南	8.07	10.32	27.50	16.01	18.18	0.94	0.15	36.12
10	新疆	8.12	11.27	15.06	25.25	9.57	1.19	0.19	40.87
11	山西	8.24	13.44	25.15	16.80	17.74	1.10	0.15	38.58
12	天津	8.29	12.77	53.57	24.67	7.59	1.60	0.16	39.75
13	甘肃	8.37	11.18	38.51	11.23	6.66	1.67	0.13	36.86
14	山东	8.65	6.87	31.69	13.09	17.11	0.92	0.16	36.02
15	内蒙古	8.80	9.45	11.51	11.61	10.51	0.72	0.19	40.80

注:a.土壤编号以pH值升高为序。

Note:a. Soil numbers are listed in order of increasing pH.

1.2 实验布置和样品分析

在陕西省杨凌区进行盆栽实验。按照《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)二级标准中Pb的限量, pH<6.5时, 250 mg·kg⁻¹; pH为6.5~7.5时, 300 mg·kg⁻¹; pH>7.5时, 350 mg·kg⁻¹。将外源Pb(PbNO₃)以0、150 mg·kg⁻¹和300 mg·kg⁻¹的标准分别施用于含有1 kg土壤的盆中, 分别记为对照(CK), Pb1和Pb2。将Pb溶解在水中以确保混合均匀, 每个处理重复三次, 自然条件下放置三个月使其老化。期间土壤水分保持在最大持水量的80%, 并且每周称重并补水。在土壤老化后, 向每盆土壤中加入含有0.30 g氮(尿素), 0.10 g磷[Ca(H₂PO₄)₂]和0.20 g钾(K₂SO₄)的基肥。然后将小白菜种子(金早生, 陕西秦兴种苗有限公司)直接播种在盆栽土壤中, 并且在发芽后, 根据长势每盆定苗两株。在整个生长期土壤水分都保持在最大持水量的80%, 白天和晚上的温度分别控制在20℃和15℃, 空气湿度为60%~70%。

生长60 d后将小白菜收获, 将收获小白菜后的土壤样品风干并过0.15 mm尼龙筛, 经HNO₃-HF消煮。新鲜植物样品用蒸馏水冲洗, 100℃烘箱干燥, 并在密封的高压系统下用HNO₃-H₂O₂消化。用石墨炉原子吸收光谱仪(日立Z-2000, 日本)测量消煮液中土壤样品和植物样品中的总Pb含量。每个样品重复三次, 用GBW10015作标准参考材料, 以确保测试的准确性。

1.3 数据分析

生物富集系数(BCF)是植物样品中金属含量与土壤中金属含量的比值。目前有两种常见的计算生物富集系数的方法。第一种方法称为全量法, 计算方程式如下:

$$BCF_{\text{total}} = C_{\text{plant}} / C_{\text{soil}} \quad (1)$$

式中: C_{plant} 和 C_{soil} 分别代表植物中和土壤中的Pb含量。

第二种方法为外源法, 它是由第一种方法全量法引申而来, 具体计算方程式如下^[12]:

$$BCF_{\text{added}} = (C_{\text{plant}} - C_{\text{plant-CK}}) / (C_{\text{soil}} - C_{\text{soil-CK}}) \quad (2)$$

式中: C_{plant} 和 $C_{\text{plant-CK}}$ 分别代表添加Pb处理和对照处理的植物中Pb含量; C_{soil} 和 $C_{\text{soil-CK}}$ 分别代表添加Pb处理和对照处理的土壤中Pb含量。

Freundlich方程可用于预测重金属从土壤到植物系统转移^[13], 其方程式如下:

$$C_{\text{plant}} = 10^a C_{\text{soil}}^b \text{ 或 } \lg C_{\text{plant}} = a + b \lg C_{\text{soil}} \quad (3)$$

式中: C_{plant} 和 C_{soil} 分别是植物和土壤中的Pb含量; a和b是常数。

基于土壤的基本理化性质, 采用逐步多元线性回归(SMLR)预测小白菜对Pb的吸收量。除了pH之外的所有数据在分析之前进行对数转化以获得正态分布。数据分析和作图分别采用SPSS和Excel软件。

2 结果与分析

2.1 不同处理条件下植物中Pb含量之间的关系

如图1所示, 对照(CK)处理中植物Pb含量范围为0.008~0.019 mg·kg⁻¹。Pb1处理植物Pb含量范围为0.15~0.42 mg·kg⁻¹, 平均值为0.25 mg·kg⁻¹。Pb2处理植物Pb含量范围为0.29~0.57 mg·kg⁻¹, 平均值为0.40 mg·kg⁻¹。Pb1和Pb2处理中植物Pb含量均极显著高于CK处理中植物Pb含量($P<0.01$)。在酸性土壤上生长的植物中的Pb含量(0.27 mg·kg⁻¹)高于在碱性土壤上生长的Pb含量(0.18 mg·kg⁻¹), 这表明低pH可以提高Pb在植物中的富集量。如图2A所示, 土壤中的Pb含量(19.45~389.46 mg·kg⁻¹)和植物Pb含量(0.01~0.57 mg·kg⁻¹)表现出很大的变化, 植物Pb含量与土壤Pb含量呈极显著相关($R^2=0.72, P<0.01$)。如图

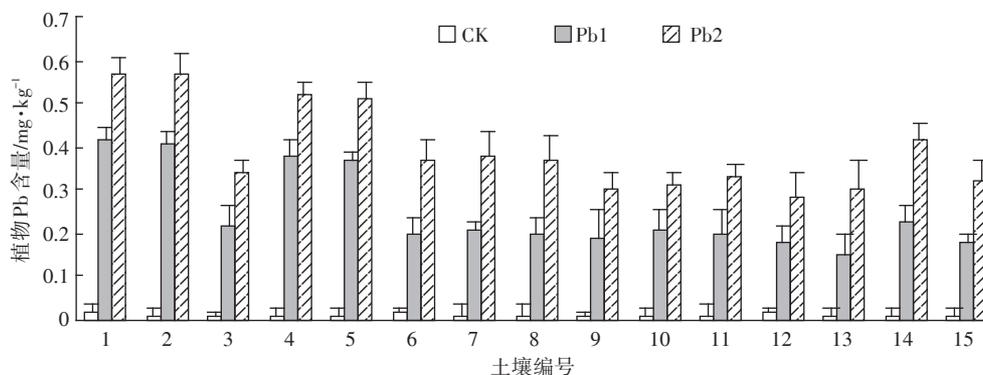


图1 不同Pb处理下小白菜的Pb含量

Figure 1 Pb concentration in the *Brassica chinensis* under different Pb treatments

2B所示,把植物Pb含量与土壤Pb含量经对数化处理,两者之间相关性更高($R^2=0.83, P<0.01$)。

2.2 土壤理化性质对植物吸收Pb的影响

图3A为用全量法计算的生物富集系数(BCF_{total})。可见,相比于对照CK,添加Pb的处理Pb1和Pb2显著增加了不同土壤中的生物富集系数(BCF),但Pb1和Pb2处理之间的差异并不显著。在酸性土壤中的 BCF_{total} 值较高,表明Pb在酸性条件下更容易被植物富集。然而,相对于其他酸性土壤,土壤编号3、6、7的

BCF_{total} 显著降低,这可能是由于这三种土壤中有机碳(OC)含量(分别为 $19.87、20.70\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $19.05\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)较高。土壤编号12相对于其他土壤的 BCF_{total} 值显著降低,这可能是由于该土壤中 CaCO_3 含量($53.57\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)较高。与其他碱性土壤相比,土壤编号14的 BCF_{total} 明显较高,这可能是由于土壤中有机碳含量($6.87\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)较低。如图3B所示,用外源法计算的生物富集系数(BCF_{added})在酸性土壤中最高,但在Pb1和Pb2处理之间没有表现出显著差异。与 BCF_{total} 相比,

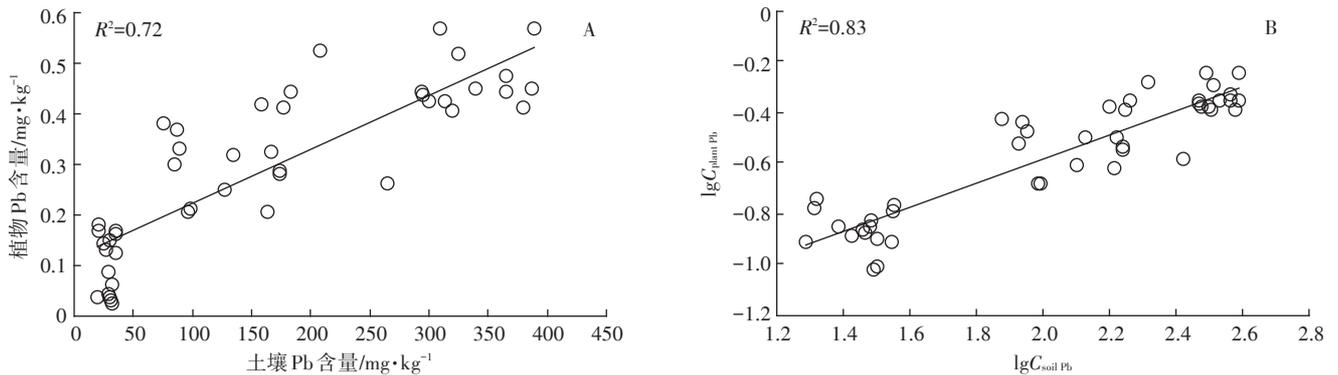


图2 土壤Pb和植物Pb含量之间的关系(A和B分别表示正常和对数转换)

Figure 2 Relationships between Pb concentration in *Brassica chinensis* and soil in normal(A) and log-transformed(B)

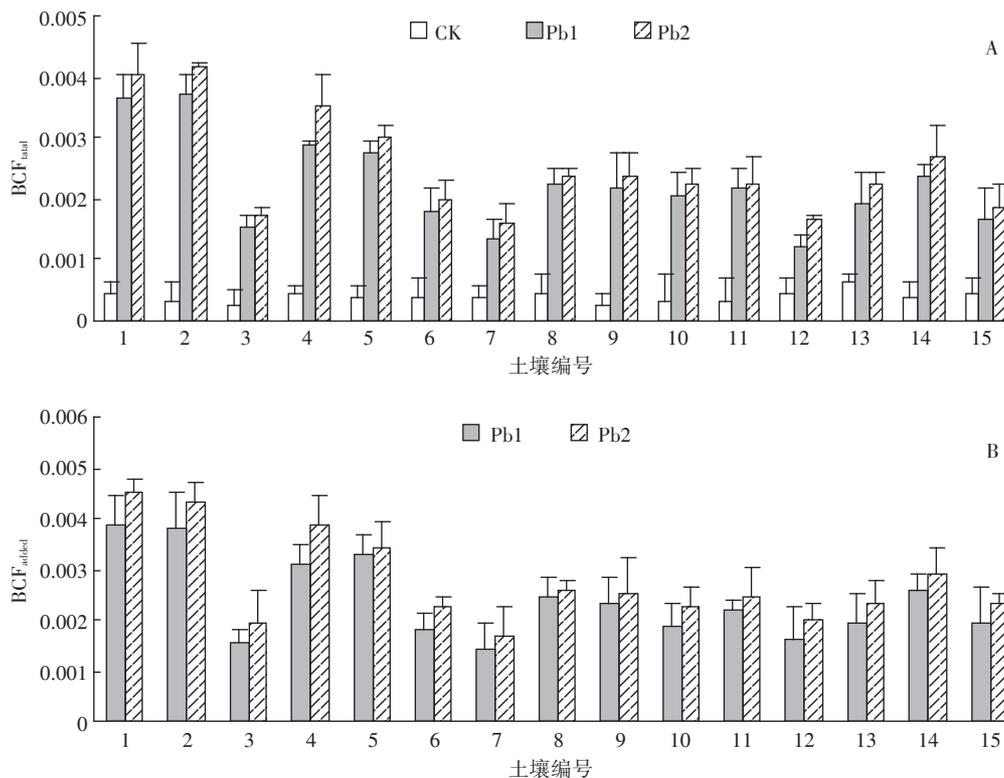


图3 不同Pb处理下15种土壤中小白菜的富集系数(BCF)

Figure 3 BCF_{total} (A) and BCF_{added} (B) of *Brassica chinensis* in the 15 soils under different Pb treatments

相应土壤的 BCF_{added} 略增大,其原因可能是在计算 BCF_{added} 时消除了土壤本底 Pb 的影响。

2.3 影响植物 Pb 吸收的土壤因素

以植物中 Pb 含量为因变量,土壤中 Pb 含量、土壤 pH、OC、CEC 和黏粒含量等作为自变量进行逐步多元线性回归,可以得出土壤中 Pb 含量、土壤 pH 和 OC 与植物中 Pb 含量极显著相关 ($P < 0.01$)、其他土壤性质如黏粒含量、CEC、 $CaCO_3$ 含量和 Fe^- 或 Al^- 氧化物含量也会对植物中 Pb 含量产生影响,但均未达到显著相关 ($P > 0.05$),因此没有被回归到预测方程中。从表 2 可以看出,基于土壤 Pb 含量的单因素预测方程估计精度最低 ($R^2 = 0.83, P < 0.01$),而基于土壤 Pb 含量、土壤 pH 和土壤 OC 含量的多变量预测方程估计精度最高 ($R^2 = 0.94, P < 0.01$),将土壤性质纳入逐步多元线性回归分析改进了 Pb 生物有效性的估计,因此在评价 Pb 的生物有效性时,需要考虑土壤 pH 和 OC 等因素。植物 Pb 含量与土壤 pH 和 OC 之间的简单关系如图 4 所示。

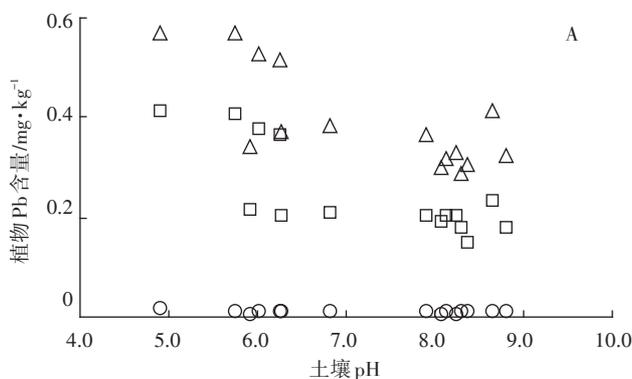
2.4 植物从土壤中吸收 Pb 的模型预测

添加 pH、OC、CEC 和黏粒含量等土壤性质可以提高 Freundlich 方程的预测精度。对数转换的 Freundlich 模型经常被应用于研究各种土壤-植物系统中的重金属吸收^[14-15]。为判定预测模型的预测效果,可

表 2 基于土壤性质的植物 Pb 吸收预测模型

Table 2 Prediction equations between plant Pb and soil properties

方程	回归方程	R^2	P	n
4	$\lg C_{plant Pb} = 0.47 \lg C_{soil Pb} - 1.52$	0.83	<0.01	45
5	$\lg C_{plant Pb} = 1.02 \lg C_{soil Pb} - 0.16pH - 1.21$	0.90	<0.01	45
6	$\lg C_{plant Pb} = 1.14 \lg C_{soil Pb} - 0.19pH - 0.63 \lg C_{oc} + 1.92$	0.94	<0.01	45

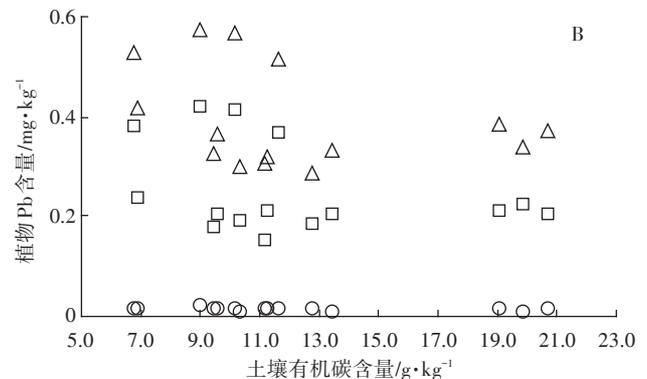


以通过预测值和实测值之间的均方根误差 (RMSE) 和决定系数 (R^2) 来获得最佳预测方程, RMSE 越小, R^2 越大, 其方程预测效果越好。

在本研究中,基于方程(3),根据不同来源的 Pb 数据,分别是对照处理、全量法、外源法和将对照处理和添加 Pb 的处理相结合,对数据分别进行拟合计算,共得到 4 个不同的预测方程,如表 3 所示。通过这些方程可以看出,植物中 Pb 含量与土壤中 Pb 含量、土壤 pH 值和有机碳含量呈显著相关关系,且植物 Pb 含量与土壤 Pb 含量呈正相关,但与土壤 pH 和有机碳含量呈负相关。为进一步探索各回归方程的预测效果,通过绘制不同 Pb 来源的预测值和实测值之间的关系图(图 5),可以看出,通过合并对照处理和添加 Pb 处理计算的回归方程 ($R^2 = 0.94, RMSE = 0.11, n = 45$) 较其他方程预测效果更好。

3 讨论

有研究表明,随着土壤中 Pb 含量的增加,植物中的 Pb 含量也随之增加,即植物中 Pb 含量与土壤中 Pb 含量呈正相关,并且将数据进行对数处理后,植物 Pb 含量和土壤 Pb 含量之间相关性更高^[16-17],这与本研究的结果相似,且本研究供试土壤中的 Pb 含量和植物 Pb 含量变化范围较大(图 2),充分说明了本研究结果的普遍性。但也有研究表明,植物 Pb 含量和土壤 Pb 含量之间的简单线性回归分析不能完全反映出土壤性质对 Pb 生物有效性的影响^[18],因此许多学者通过建立包含土壤性质的多元回归预测模型,如王卫等^[19]通过建立土壤理化性质与烟叶中 Cd 含量的相关方程, Ding 等^[20]利用 21 个土壤样品建立土壤理化性质与根菜类植物中 Pb 含量的回归方程, Dai 等^[21]采集我



○ CK □ Pb1 △ Pb2

图 4 植物 Pb 含量与土壤 pH、土壤 OC 含量之间的简单关系

Figure 4 The simple relationships between the Pb concentration in plants and pH, OC in soils

表3 基于不同数据源的植物Pb吸收的预测方程

Table 3 Prediction equations for the different Pb sources

方程	Pb处理	回归方程	R^2	P	RMSE	n
7	对照法(CK)	$\lg C_{\text{plant Pb}}=2.01 \lg C_{\text{soil Pb}}-0.08\text{pH}-0.13 \lg C_{\text{OC}}+0.25$	0.80	<0.01	0.21	15
8	全量法(Pb1、Pb2)	$\lg C_{\text{plant Pb}}=1.24 \lg C_{\text{soil Pb}}-0.15\text{pH}-0.26 \lg C_{\text{OC}}+3.23$	0.74	<0.01	0.16	30
9	外源法(Pb1-CK、Pb2-CK)	$\lg C_{\text{plant Pb}}=0.83 \lg C_{\text{soil Pb}}-0.32\text{pH}-0.13 \lg C_{\text{OC}}+0.83$	0.34	<0.05	0.21	30
10	合并法(CK、Pb1、Pb2)	$\lg C_{\text{plant Pb}}=1.14 \lg C_{\text{soil Pb}}-0.19\text{pH}-0.63 \lg C_{\text{OC}}+1.92$	0.94	<0.01	0.11	45

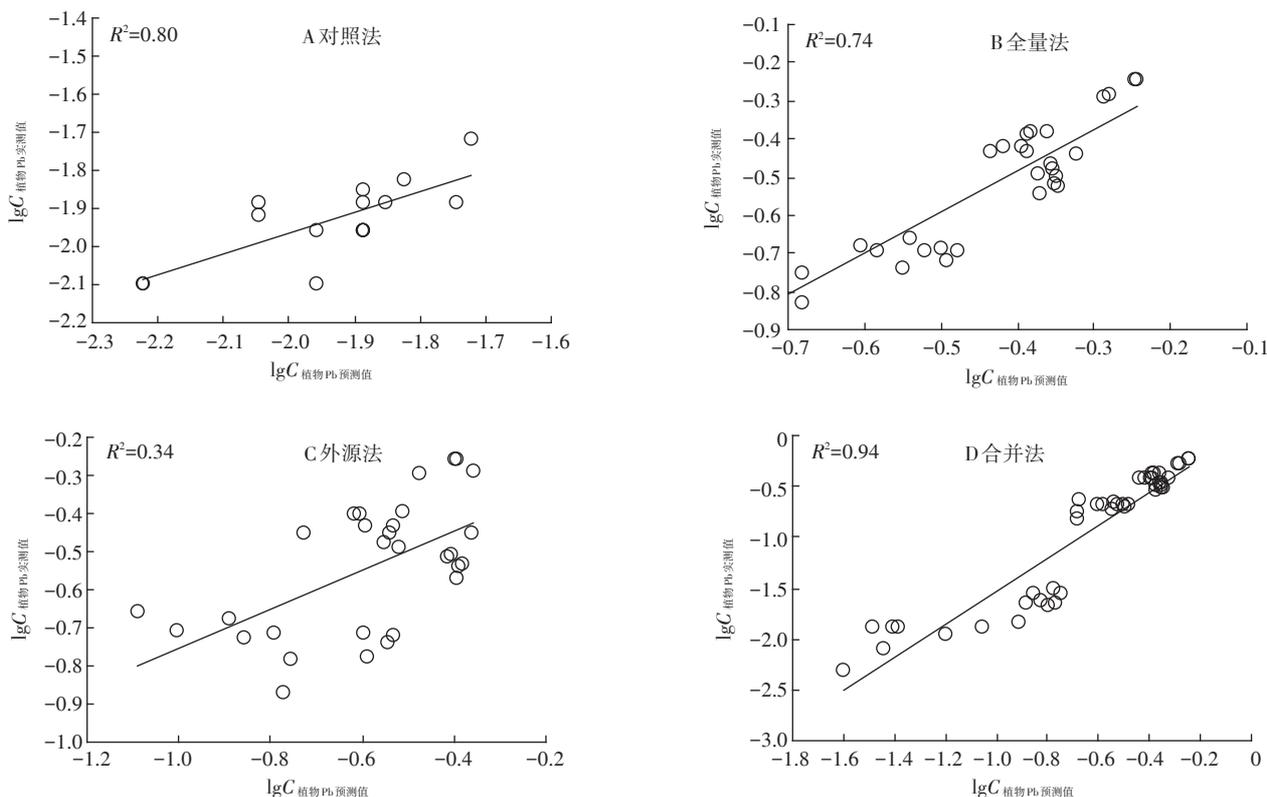


图5 根据数据来源的植物Pb测定和预测值之间的关系

Figure 5 Relationships between measured \lg [plant Pb] and predicted \lg [plant Pb] of different Pb sources

国18个省份的土壤,建立土壤理化性质与小麦中As含量之间的预测方程,都取得了不错的效果。本研究中,将土壤性质融合进回归方程的模型相关性比不包含土壤性质的方程相关性更好,说明土壤性质对小白菜从土壤中吸收Pb有显著影响。

通过逐步多元线性回归分析(SMLR)构建的植物Pb含量与土壤Pb含量和土壤理化性质之间的Freundlich型关系($\lg C_{\text{plant Pb}}$ 对 $\lg C_{\text{soil Pb}}$),可以看出,土壤OC含量和土壤pH与小白菜对Pb的吸收量呈负相关。土壤pH控制重金属在土壤固相中的沉淀和溶解以及金属吸附,络合和酸碱反应,因此,土壤pH对土壤中Pb的形态及其吸附解吸有着直接的影响^[22-23]。本研究证实,在酸性土壤中的植物Pb含量和生物富集系数都较大,表明Pb在pH低的酸性土壤上更容易被作

物吸收。土壤有机碳含量也与Pb的生物有效性呈负相关,原因可能是有机物料施用能改变土壤中重金属的形态,土壤有机质通过发生络合反应固定阳离子,导致土壤中Pb的浓度降低,从而降低植物的吸收^[24]。另外,有机物料腐解后产生的某些基团能有效吸附、络合土壤重金属,从而减少重金属的生物有效性^[25]。有研究表明,土壤CEC、CaCO₃和黏粒含量对土壤中外源Pb的有效性也有影响。CEC反映了土壤胶体的负电荷量,为土壤吸附和交换的阳离子容量。黏粒含量高,CEC相应增加,土壤对Pb²⁺的吸附作用也较大,而CaCO₃解离出来的少量Ca²⁺会与Pb²⁺产生拮抗作用^[26-27]。但是本研究的结果表明,土壤CEC、CaCO₃、黏粒含量和Fe、Al氧化物等在供试土壤上均未对小白菜吸收Pb产生显著的影响,这可能与供试土壤理

化性质和植物种类有关。

目前用于评价重金属生物有效性的模型主要有经验模型和机理模型,机理模型通常基于土壤参数(例如,土壤溶液中离子的扩散系数)和植物特征(例如,根大小和几何形状,根的离子吸收的动力学参数),其导致估计精度较好^[28]。由于经验模型更简单和准确,近年来很多研究人员使用经验模型预测重金属的生物有效性^[29-30]。例如,François等^[31]研究指出,经验模型比机理模型预测小麦中的重金属浓度更准确,这是由于经验模型考虑了土壤pH、CEC和土壤重金属的活性等因素,故本研究中的预测模型考虑了土壤pH、OC对Pb生物有效性的影响,宋文恩等^[32]研究水稻中Cd的生物有效性时利用经验模型获得的预测方程,可以解释模型变异的81.90%以上。广泛用于评估重金属从土壤到植物转移的Freundlich型方程通常就基于容易测量的土壤性质参数而得出,比如pH、OC、CEC和重金属总量等^[33]。

在本研究中,15个不同土壤性质的变化范围比较大,特别是pH和有机碳含量,以确保这些变量在回归模型中的意义。结合土壤理化性质后,通过不同来源Pb数据拟合的预测模型都有较好的预测效果,尤其是合并对照处理和添加Pb处理得到回归方程($n=45$)预测效果最好,实测值和预测值相关性最高,因此,本研究得到的预测模型可以为中国土壤Pb污染对叶菜类蔬菜的生态风险评价和土壤环境质量的修订提供参考。

4 结论

(1)植物中的Pb含量受土壤中的Pb含量、土壤pH值和有机碳含量影响显著,且与土壤中的Pb含量呈正相关,与土壤pH和有机碳含量呈负相关。

(2)Pb在酸性土壤中富集系数比碱性土壤大,且外源法测得的BCF都高于全量法测得的BCF。植物Pb含量和土壤Pb含量的简单线性相关关系,在经过对数处理后相关性更好。

(3)相对于单变量(土壤Pb含量)模型,通过逐步多元线性回归将土壤理化性质纳入回归方程得到的多变量(土壤Pb含量、土壤pH、OC含量)预测模型的相关性更好,可以用于估计Pb从土壤到植物的转移。

参考文献:

[1] 臧飞,王胜利,南忠仁,等.工矿型绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价[J].环境科学,2015,36(2):497-506.

- ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, et al. Speciation distribution and risk assessment of heavy metals in sediments in suburban outfall of industrial oasis region[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(2):497-506.
- [2] Pourrut B, Shahid M, Dumat C, et al. Lead uptake, toxicity, and detoxification in plants[J]. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2011, 213:113-136.
- [3] McBride M B, Simon T, Tam G, et al. Lead and arsenic uptake by leafy vegetables grown on contaminated soils: Effects of mineral and organic amendments[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2013, 224(1):1-10.
- [4] Liu W T, Zhou Q X, Zhang Y L, et al. Lead accumulation in different Chinese cabbage cultivars and screening for pollution-safe cultivars[J]. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(3):781-788.
- [5] Dong J, Yang Q W, Sun L N, et al. Assessing the concentration and potential dietary risk of heavy metals in vegetables at a Pb/Zn mine site, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(5):1317-1321.
- [6] 寇士伟,吴锦标,谢素,等.红薯对Pb、Cd的吸收累积特征及根际土壤Pb、Cd形态分布研究[J].农业环境科学学报,2011,30(4):677-683.
- KOU Shi-wei, WU Jin-biao, XIE Su, et al. Absorption and accumulation of Pb and Cd in sweet potato and species distribution of Pb and Cd in rhizosphere soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(4):677-683.
- [7] Nan Z, Zhao C, Li J, et al. Relations between soil properties and selected heavy metal concentrations in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in contaminated soils[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2002, 133(1/2/3/4):205-213.
- [8] Zapřanova P, Dospatliev L, Angelova V, et al. Correlation between soil characteristics and lead and cadmium content in the aboveground biomass of Virginia tobacco[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 163(1/2/3/4):253-261.
- [9] Li F L, Liu C Q, Yang Y G, et al. Natural and anthropogenic lead in soils and vegetables around Guiyang City, Southwest China: A Pb isotopic approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 431(5):339-347.
- [10] 刘维涛,周启星,孙约兵,等.大白菜对铅积累与转运的品种差异研究[J].中国环境科学,2009,29(1):63-67.
- LIU Wei-tao, ZHOU Qi-xing, SUN Yue-bing, et al. Variety difference of lead accumulation and translocation in Chinese cabbage (*Brassica pekinensis* L.) [J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(1):63-67.
- [11] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- LU Ru-kun. The analysis method of soil agricultural chemistry[M]. Beijing:China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [12] Liang Z F, Ding Q, Wei D P, et al. Major controlling factors and predictions for cadmium transfer from the soil into spinach plants[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, 93:180-185.
- [13] Sauvé S, Hendershot W, Allen H E. Solid-solution partitioning of metals in contaminated soils: Dependence on pH, total metal burden, and organic matter[J]. *Environmental Science and Technology*, 2000, 34

- (7):1125-1131.
- [14] Ding C F, Zhang T, Wang X X, et al. Prediction model for cadmium transfer from soil to carrot (*Daucus carota* L.) and its application to derive soil thresholds for food safety[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(43):10273-10282.
- [15] Liu K, Lv J L, He W X, et al. Major factors influencing cadmium uptake from the soil into wheat plants[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 113: 207-213.
- [16] Ding C F, Li X G, Zhang T L, et al. Phytotoxicity and accumulation of chromium in carrot plants and the derivation of soil thresholds for Chinese soils[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 108(2): 179-186.
- [17] 胡鑫, 罗真华, 谢会雅, 等. 土壤性质对烟叶中铅、镉含量的影响及预测模型研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3):449-454.
HU Xin, LUO Zhen-hua, XIE Hui-ya, et al. Soil property effects on and prediction models of lead and cadmium concentrations in tobacco leaves[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3): 449-454.
- [18] Antoniadis V, Robinson J S, Alloway B J. Effects of short-term pH fluctuations on cadmium, nickel, lead, and zinc availability to ryegrass in a sewage sludge-amended field[J]. *Chemosphere*, 2008, 71(4): 759-764.
- [19] 王卫, 梁振飞, 李菊梅, 等. 土壤性质对烟草中镉富集的影响及预测模型研究[J]. 土壤, 2014, 46(1):178-183.
WANG Wei, LIANG Zhen-fei, LI Ju-mei, et al. Studies on effects of soil properties on Cd accumulation in tobacco and prediction model[J]. *Soils*, 2014, 46(1):178-183.
- [20] Ding C F, Li X G, Zhang T L, et al. Transfer model of lead in soil-carrot (*Daucus carota* L.) system and food safety thresholds in soil[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2015, 34(9):2078-2086.
- [21] Dai Y C, Lv J L, Liu K, et al. Major controlling factors and prediction models for arsenic uptake from soil to wheat plants[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 130:256-262.
- [22] 代允超, 吕家珑, 曹莹菲, 等. 石灰和有机质对不同性质镉污染土壤中镉有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3):514-519.
DAI Yun-chao, LÜ Jia-long, CAO Ying-fei, et al. Effects of lime and organic amendments on Cd availability in Cd-contaminated soils with different properties[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3):514-519.
- [23] Appel C, Ma L N. Concentration, pH, and surface charge effects on cadmium and lead sorption in three tropical soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(2):581-589.
- [24] 吴曼, 徐明岗, 徐绍辉, 等. 有机质对红壤和黑土中外源铅镉稳定化过程的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3):461-467.
WU Man, XU Ming-gang, XU Shao-hui, et al. Effects of organic matter on the stabilization process of added cadmium and lead in red soil and black soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3): 461-467.
- [25] 代允超, 吕家珑, 刁展, 等. 改良剂对不同性质镉污染土壤中有有效镉和小白菜镉吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(1): 80-86.
DAI Yun-chao, LÜ Jia-long, DIAO Zhan, et al. Effects of soil amendments on Cd bioavailability to and uptake by *Brassica chinensis* in different Cd-contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(1):80-86.
- [26] 谢丹, 徐仁扣, 卞永荣, 等. 不同体系中不同土壤对 Cu(II)、Pb(II)和 Cd(II)吸附能力的比较[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(5):899-904.
XIE Dan, XU Ren-kou, BIAN Yong-rong, et al. Adsorption ability for Cu(II), Pb(II) and Cd(II) among different soils under different systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(5): 899-904.
- [27] 徐明岗, 吴曼, 武海雯, 等. 土壤外源铅的稳定化特征及其对土壤性质的响应[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(9):1702-1709.
XU Ming-gang, WU Man, WU Hai-wen, et al. External lead stabilization characteristics in soils and responses to soil properties[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(9):1702-1709.
- [28] Rengel Z. Mechanistic simulation models of nutrient uptake: A review [J]. *Plant and Soil*, 1993, 152(2):161-173.
- [29] Liu K, Lü J L, Dai Y C, et al. Cross-species extrapolation of models for predicting lead transfer from soil to wheat grain[J]. *PloS One*, 2016, 11(8):1-16.
- [30] Zhao F J, Zhao F J, Adams M L, et al. Factors affecting the concentrations of lead in British wheat and barley grain[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 131(3):461-468.
- [31] François M, Grant C, Lambert R, et al. Prediction of cadmium and zinc concentration in wheat grain from soils affected by the application of phosphate fertilizers varying in Cd concentration[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 83(2):125-133.
- [32] 宋文恩, 陈世宝. 基于水稻根伸长的不同土壤中镉(Cd)毒性阈值(EC_x)及预测模型[J]. 中国农业科学, 2014, 47(17):3434-3443.
SONG Wen-en, CHEN Shi-bao. The toxicity thresholds(EC_x) of cadmium(Cd) to rice cultivars as determined by root-elongation tests in soils and its predicted models[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(17):3434-3443.
- [33] Mench M, Baize D, Mocquot B. Cadmium availability to wheat in five soil series from the Yonne district, Burgundy, France[J]. *Environmental Pollution*, 1997, 95(1):93-103.