

文章编号: 1674-7054(2023)02-0145-08



成都平原农田蔬菜重金属含量及污染评价

黑儿平^{1,2}, 上官宇先¹, 喻华¹, 秦鱼生¹, 曾祥忠¹, 郭晶晶³, 伍燕翔⁴

(1. 四川省农业科学院农业资源与环境研究所, 成都 610066; 2. 四川农业大学农学院, 成都 611130;

3. 叙永县农业农村局, 四川 泸州 646499; 4. 翠屏区农业农村局, 四川 宜宾 644002)

摘要: 为降低重金属污染风险, 保证蔬菜生产安全, 调查了成都平原部分污染地区蔬菜种植地土壤和 5 类 18 种蔬菜可食部位重金属含量, 并对蔬菜中重金属污染状况进行了评价, 同时运用富集系数分析和比较了不同蔬菜对 Cd、Cr、Pb、Zn、Cu、Ni、Hg、As 的富集能力。结果表明: 试验区域土壤 Cd 含量超标率达 31.91%, Cd 是主要污染物, 其余元素均符合国家标准。所有蔬菜可食部位主要受重金属 Cr、Hg、Cd 污染, 轻微污染的有蒜苗和油菜, 轻度污染的有菠菜和香菜; 通过富集系数发现, 18 种蔬菜对 8 种重金属元素的富集系数平均值均从高到低依次为 Cd>Zn>Hg>Cu>Ni>As>Cr>Pb, 且不同蔬菜对同一种元素的富集系数也表现显著性差异。总体上, 叶菜类蔬菜如香菜对 Cd、Hg、Pb、Cr、Ni、Zn、Cu 和菠菜对 Cd、Hg、Zn、Pb、Cu 以及红油菜对 As、Pb 富集能力相对较强, 表明研究区域香菜和菠菜不宜在 Cd、Hg、Pb、Cr、Ni、Zn、Cu 污染土壤上栽培, 及红油菜不宜在 As、Pb 污染土壤上栽培, 而甘蓝类和根茎类如包心菜对 Cd、Hg、Cr、Pb、As、Ni、Cu 和白萝卜对 Cd、Cr、Zn、Cu、Ni、Hg 及红萝卜对 Zn、Cr、Cu 富集能力则相对较弱, 可作为研究区域 Cd、Hg、Cr、Pb、As、Ni、Cu、Zn 污染土壤优先选种的蔬菜品种。

关键词: 成都平原; 重金属含量; 污染状况; 蔬菜; 富集能力

中图分类号: X 53; X 825 **文献标志码:** A

引用格式: 黑儿平, 上官宇先, 喻华, 等. 成都平原农田蔬菜重金属含量及污染评价 [J]. 热带生物学报, 2023, 14(2): 145-152. DOI: 10.15886/j.cnki.rdsxb.2023.02.002

据报道, 近年来, 工业“三废”的随意排放和生活污水灌溉于农田, 以及大量工业肥料农药的施用, 造成农田土壤中重金属富集和积累显著增加^[1-2]。蔬菜可以通过根系等吸收转运土壤重金属到食用部分, 重金属进而通过食物链危害人体身心健康^[3]。赵小蓉等^[4]在成都平原区研究表明叶菜类蔬菜对土壤重金属富集能力较强, 而根茎类蔬菜则表现相对较弱。林君锋等^[5]在福建部分污染严重地区研究蔬菜对镉、锌、铜的富集能力, 结果显示蔬菜对镉的富集能力相对较强。何江华等^[6]研究广州蔬菜生产基地的蔬菜, 表明不同蔬菜对不同重金属的富集存在很大差异, 其吸收富集能力从大到小为 Cd>Hg>As>Pb>Cr。有学者进一步研究证实了不仅不同蔬菜对重金属的富集

能力存在明显差异^[7-8], 同种蔬菜之间也存在差异。结果表明, 不同蔬菜具有对重金属不同的富集能力, 可选择性地栽培在相适宜的农田土壤中, 以减轻对重金属的过度富集风险以及保证蔬菜生产安全^[9-11]。成都平原是我国西部地区重要的蔬菜生产基地, 近期有研究报道, 成都平原个别地区农田土壤已受到不同程度的重金属污染^[12-13]。笔者在成都平原农田土壤重金属污染区域, 选择面积较大、连续种植多年的蔬菜种植地和当地常见的具有代表性的 18 种蔬菜品种(蔬菜类型主要涉及叶菜类、果菜类、葱蒜类、根茎类、甘蓝类 5 大类作物)进行田间试验, 测定了土壤和蔬菜中 Cd、Cr、Pb、Zn、Cu、Ni、Hg、As 8 种重金属含量状况, 分析了不同蔬菜对重金属的富集规律, 并筛选了

收稿日期: 2021-11-19

修回日期: 2022-05-07

第一作者: 黑儿平(1995-), 男, 四川农业大学农学院 2021 级硕士研究生. E-mail: 1569289929@qq.com

通信作者: 上官宇先(1987-), 男, 博士, 副研究员. 研究方向: 土壤环境治理. E-mail: 396478825@qq.com

不同富集能力的蔬菜种类,为该地区种植蔬菜种类的选择及种植结构的调整提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区域概况 试验区位于四川成都平原东北部,其中心地理位置坐标为 107°50'E, 31°21'N, 年均气温 17.3℃, 无霜期长达 300 d, 年均降雨量 1 185.2 mm, 试验区土壤 pH 均值 6.48, 偏酸性, 土壤有机质均值为 32.30 g·kg⁻¹。

1.2 样品的采集与处理 于 2017 年 10 月至 2019 年 5 月在研究区域具有代表性的蔬菜生产基地选择有一定规模的田块进行田间试验。为全面比较不同蔬菜对重金属吸收累积的差异性,供试作物类型包括叶菜类、果菜类、葱蒜类、根茎类、甘蓝类 5 大类作物,即白菜(*Brassica rapa* var. *glabra* Regel)、白萝卜(*Raphanus sativus*)、白菜型油菜(*Brassica campestris* L.)简称白油菜、菠菜(*Spinacia oleracea* L.)、莲白与包心菜(*Brassica oleracea* var. *capitata* Linnaeus)、小白菜(*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* Makino var. *communis* Tsen et Lee)、胡萝卜(*Daucus carota* var. *sativa* Hoffm.)、小葱(*Allium fistulosum* L.)、红萝卜(*Salvia bowleyana* Dunn)、红油菜(*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *utilis*)、青菜 [*Brassica rapa* var. *chinensis* (Linnaeus) Kitamura]、蒜苗(*Allium sativum*)、豌豆尖(*Pisum sativum* L.)、莴笋叶(*Lactuca sativa* L.)、香菜(*Coriandrum sativum* L.)、小青菜(*Brassica chinensis* L.)、油菜(*Brassica rapa* var. *oleifera* DC.)等 18 种当地常见的主要蔬菜品种。将每个品种蔬菜分别种植在不同的试验小区内,小区面积为 20 m²(5 m×4 m),周围设置保护行(30 cm),农田管理均采取当地平时农作习惯。在成熟期笔者课题组安排专人到试验基地负责采集蔬菜测定部位。白菜、白油菜、菠菜、莲白、包心菜、小白菜、红油菜、青菜、豌豆尖、莴笋叶、香菜、小青菜、油菜采集测定部位为叶片;白萝卜、胡萝卜、红萝卜采集测定部位为根;小葱、蒜苗采集测定部位为茎。

每个采样点小区取 3~5 个样品,然后混合均匀,现场去除腐烂叶或根部土壤,其混合样 1 kg 左右。土样保持与蔬菜样在同一样点同步采取,采样深度为 0~20 cm,每份混合样不少于 1 kg,共

54 个土样。土样按 NY/T395—2012《农田土壤环境质量监测技术规范》要求进行,剔除石块、植物根茎等杂质,风干后、将其置于 60℃ 恒温干燥箱内,烘干至恒重,取出后用玛瑙研磨机研磨、过 1 mm 尼龙筛,样品保存于玻璃瓶中备用。蔬菜样品经离子水冲洗干净后,65℃ 烘干,磨碎后过 0.84 mm 孔径尼龙网筛。

1.3 测定方法 蔬菜每个品种混合样品以及其混合土样经 HNO₃-HClO₄ 消化处理后, Hg、As 原子荧光分光光度法测定, Pb、Cd、Cu、Cr、Zn、Ni 利用电感耦合等离子体质谱法测定, 土壤 pH 值的测定使用电位法, 土壤有机质采用高温外热重 Cr 酸钾氧化-容量法测定^[14]。

1.4 评价方法

1.4.1 单项污染指数法 根据公式计算单项污染指数,依据 GB2762—2017《食品安全国家标准食品中污染物限量》^[15] 制定限量标准, $P_i \leq 1$ 为安全, $1.0 < P_i \leq 2.0$ 为轻微污染, $2.0 < P_i \leq 3.0$ 为轻度污染, $3.0 < P_i \leq 5.0$ 为中度污染, $P_i > 5.0$ 为重度污染。

$$P_i = C_i/S_i,$$

式中, P_i 为污染物的单项污染指数; C_i 为农产品中重金属质量分数, mg·kg⁻¹; S_i 为污染物 i 的评价标准限值, mg·kg⁻¹。

1.4.2 内梅罗综合污染指数法 根据公式计算内梅罗综合污染指数, P_N 值越大,说明重金属污染越严重, $P_N < 0.7$ 为安全, $0.7 < P_N \leq 1.0$ 为轻微污染, $1.0 < P_N \leq 2.0$ 为轻度污染, $2.0 < P_N \leq 3.0$ 为中度污染, $P_N > 3.0$ 为重度污染。

$$P_N = \sqrt{\frac{P_{max}^2 + P_{ave}^2}{2}},$$

式中, P_N 表示某区域综合污染指数; P_{max} 表示单因子污染指数最大值; p_{ave} 为单因子污染指数平均值。

1.5 生物富集系数 为了比较不同蔬菜品种对土壤重金属的吸收和累积特性的差异,利用富集系数来衡量蔬菜可食用部分对土壤中重金属元素的吸收能力。富集系数愈大,表明愈易从土壤中吸收该元素,即对该元素的富集能力愈强。

$$BCF = C_G/C_T,$$

式中, BCF 为蔬菜可食部分中重金属生物富集系数, C_G 为蔬菜可食部分中重金属含量, C_T 为对应

的土壤中重金属含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.6 数据处理 对土样和蔬菜样中的 8 种重金属含量采用 Excel 2010 进行数据分析, 相关性分析用 SPSS 软件, 富集能力分析图用 OriginPro 8.5 统计软件完成。

2 结果与分析

2.1 蔬菜地土壤重金属含量特征 供试土壤样本的重金属含量平均值和标准差详见表 1。参照 GB15618—2018《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》^[6], 土样中 Cd 含量有 15 个超标, 超标率达 31.91%, 最大超标值是限值的 2.18 倍, 其余元素均符合国家标准。土壤 Cd、Cr、Pb、Zn、Cu、Ni、Hg、As 的平均值分别为四川省土壤背景值的 4.05 倍、0.91 倍、1.19 倍、1.18 倍、0.90 倍、1.00 倍、1.80 倍、0.82 倍。

表 1 菜地土壤重金属含量的情况

重金属	试验田地/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	超标 个数	超标 率/%	四川省土壤 背景值/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Cd	0.32±0.12	15	31.91	0.079
Cr	71.93±12.00	0	0.00	79.000
Pb	36.88±14.29	0	0.00	30.900
Zn	102.14±24.31	0	0.00	86.500
Cu	27.97±6.18	0	0.00	31.100
Ni	32.49±5.65	0	0.00	32.600
Hg	0.11±0.06	0	0.00	0.061
As	8.56±3.43	0	0.00	10.400

注: 数据为平均值±标准差($n=54$)。

2.2 蔬菜可食部分重金属含量 参照上述蔬菜重金属评价标准, 蔬菜样品中除了 Zn、Cu 未超标外, 其余 6 种重金属 Cd、Cr、Pb、Ni、Hg、As 含量超标率分别为 4.39%、26.37%、6.59%、12.09%、5.49%、1.10%。其中, 香菜中的 Cd、Cr、Pb、Zn、Cu、Ni、Hg 的平均含量, 菠菜中的 Cd、Cr 的平均含量, 胡萝卜中的 Cd 的平均含量, 红油菜中的 Cr 的平均含量, 蒜苗中的 Cr 的平均含量, 豌豆尖中的 Cr 的平均含量, 莴笋叶中的 Cr 的平均含量, 油菜中的 Cr 的平均含量均超过食品安全国家标准食品中污染物限量, 但其他均符合国家标准。不同蔬菜中重金属含量具体详见图 1。

2.3 蔬菜可食部位重金属污染评价 由上述重金属污染评价计算结果(表 2)可知, 各种蔬菜主要

受重金属 Cr 污染, 受污染蔬菜达到 55.56%, 其次是 Hg、Cd 和 Pb 分别为 16.67%、22.22% 和 11.11%, 而 As 无污染。综合污染程度处于安全范围内的蔬菜有白菜、白萝卜、白油菜、莲白、包心菜、小白菜、胡萝卜、小葱、红萝卜、红油菜、青菜、豌豆尖、莴笋叶、小青菜, 其中白油菜、小葱、红油菜、青菜、莴笋叶和小青菜均受到不同程度的 Cr 污染, 胡萝卜受到 Cd 和 Hg 污染; 轻微污染的蔬菜有蒜苗和油菜, 均受到 Cr 污染, 综合污染指数分别为 0.789 和 0.874; 而轻度污染的蔬菜有菠菜和香菜, 均受到 Hg、Pb、Cd 和 Pb 污染, 综合污染指数分别为 1.185 和 1.373。

2.4 蔬菜可食部位对重金属的富集能力 根据相关性分析表明, 蔬菜中重金属含量与土壤中重金属含量具有一定的显著性相关, 因此, 为了比较不同蔬菜品种对土壤重金属的吸收和累积特性的差异, 利用富集系数来衡量蔬菜可食用部分对土壤中重金属元素的吸收能力, 富集系数愈大, 表明愈易从土壤中吸收该元素, 即对该元素的富集能力愈强。由生物富集系数结果(图 2)可见, 总体而言, 18 种蔬菜对 Cd、Zn、Hg 3 种元素的富集系数平均值均超过 0.04, 表现出富集能力相对较强, 而对其余元素则表现出富集能力相对较弱的趋势(图 3)。

蔬菜可食部分对重金属 Cd、Cr、Pb、Zn、Cu、Ni、Hg、As 元素的富集系数(图 2)具体规律表现如下: (1)不同蔬菜对 Cd 的富集规律: 不同蔬菜对 Cd 的富集系数平均值为 0.2011, 由高到低依次是菠菜>香菜>胡萝卜>青菜>红油菜>莴笋叶>白油菜>油菜>蒜苗>白菜>小葱>小青菜>小白菜>莲白>红萝卜>豌豆尖>白萝卜>包心菜; 其中, 菠菜对 Cd 的富集能力相对较强, 富集系数为 1.1216, 而包心菜则相对较弱, 富集系数仅为 0.0258。(2)不同蔬菜对 Cr 的富集规律: 不同蔬菜对 Cr 的富集系数平均值为 0.0063, 由高到低依次是香菜>油菜>蒜苗>菠菜>红油菜>豌豆尖>莴笋叶>青菜>小葱>白油菜>小青菜>白菜>莲白>小白菜>胡萝卜>白萝卜>红萝卜>包心菜; 其中, 香菜对 Cr 的富集能力相对较强, 富集系数为 0.0148, 而包心菜则相对较弱, 富集系数仅为 0.0017。(3)不同蔬菜对 Pb 的富集规律: 不同蔬菜对 Pb 的富集系数平均值为 0.0031, 由高到低依次是香菜>菠菜>莴笋叶>红

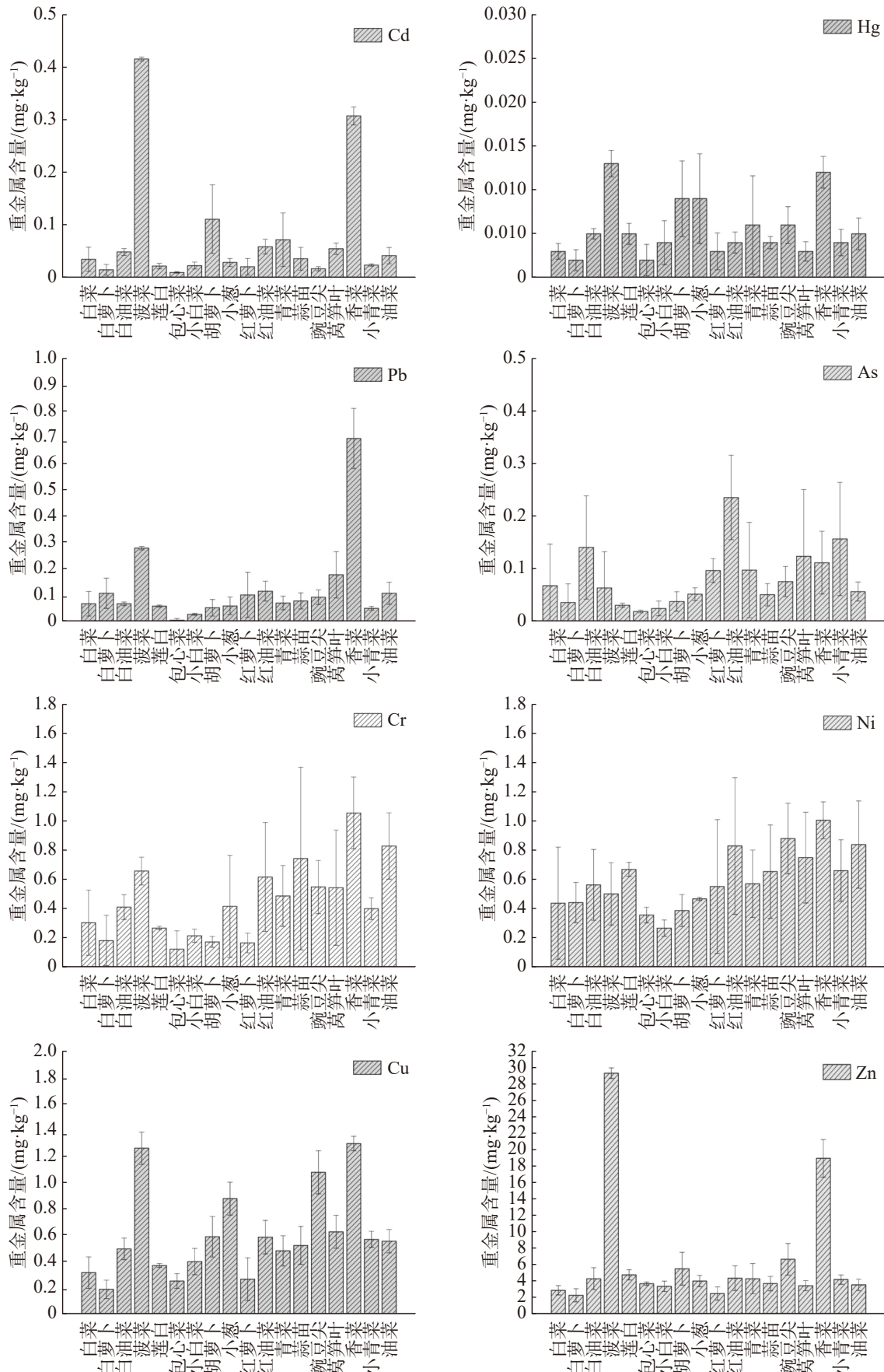


图1 不同蔬菜中重金属的含量

表 2 蔬菜重金属污染评价

蔬菜类型	蔬菜种类	单项污染指数					综合污染指数	污染程度
		Cd	Hg	Pb	As	Cr		
叶菜类	白菜	0.173	0.312	0.222	0.136	0.604	0.335	安全
	白油菜	0.243	0.527	0.223	0.281	0.818	0.459	安全
	菠菜	2.075	1.28	0.927	0.129	1.31	1.185	轻度污染
	小白菜	0.117	0.436	0.091	0.05	0.424	0.245	安全
	红油菜	0.293	0.434	0.384	0.472	1.229	0.676	安全
	青菜	0.359	0.57	0.232	0.195	0.97	0.538	安全
	莴笋叶	0.273	0.264	0.591	0.248	1.084	0.595	安全
	香菜	1.535	1.215	2.313	0.225	2.107	1.373	轻度污染
	小青菜	0.118	0.409	0.167	0.315	0.795	0.436	安全
	油菜	0.212	0.497	0.356	0.114	1.654	0.874	轻微污染
葱蒜类	小葱	0.291	0.853	0.297	0.105	0.828	0.488	安全
	蒜苗	0.358	0.363	0.391	0.103	1.482	0.789	轻微污染
根茎类	白萝卜	0.145	0.238	0.533	0.071	0.36	0.298	安全
	胡萝卜	1.109	0.874	0.262	0.076	0.339	0.615	安全
	红萝卜	0.212	0.308	0.507	0.194	0.325	0.297	安全
果菜类	豌豆尖	0.167	0.618	0.46	0.152	0.546	0.365	安全
甘蓝类	莲白	0.11	0.499	0.193	0.062	0.53	0.299	安全
	包心菜	0.048	0.152	0.018	0.039	0.242	0.131	安全

注: 数据为每种蔬菜3个小区的平均值; 因Zn、Cu、Ni无蔬菜食品安全标准限量指标, 故未作出评价。

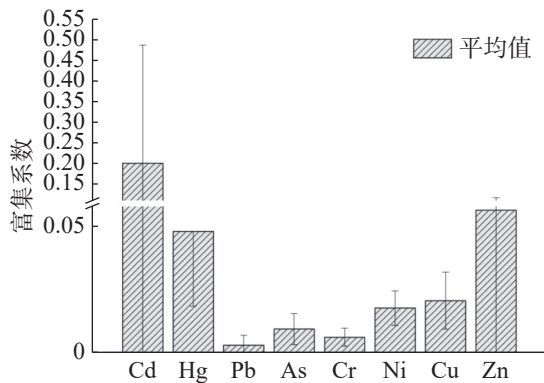


图 2 蔬菜对重金属的富集系数平均值

油菜>油菜>豌豆尖>蒜苗>青菜>白油菜>白菜>白萝卜>红萝卜>小葱>莲白>胡萝卜>小青菜>小白菜>包心菜; 其中, 香菜对 Pb 的富集能力相对较强, 富集系数为 0.0180, 而包心菜则相对较弱, 富集系数仅为 0.0001。(4)不同蔬菜对 Zn 的富集规律: 不同蔬菜对 Zn 的富集系数平均值为 0.0565, 由高到低依次是菠菜>香菜>豌豆尖>胡萝卜>莲白>红油菜>青菜>白油菜>小青菜>小葱>蒜苗>包心菜>油菜>莴笋叶>小白菜>白菜>白萝卜>红萝卜; 其中, 菠菜对 Zn 的富集能力相对较强, 富集系数为 0.2687, 而红萝卜则相对较弱, 富集系数仅为 0.0202。(5)不同蔬菜对 Cu 的富集规律: 不同蔬

菜对 Cu 的富集系数平均值为 0.0207, 由高到低依次是香菜>菠菜>豌豆尖>小葱>莴笋叶>胡萝卜>红油菜>小青菜>油菜>蒜苗>白油菜>青菜>小白菜>莲白>白菜>包心菜>红萝卜>白萝卜; 其中, 香菜对 Cu 的富集能力相对较强, 富集系数为 0.0453, 而白萝卜则相对较弱, 富集系数仅为 0.0057。(6)不同蔬菜对 Ni 的富集规律: 不同蔬菜对 Ni 的富集系数平均值为 0.0178, 由高到低依次是香菜>豌豆尖>油菜>红油菜>莴笋叶>莲白>小青菜>蒜苗>青菜>白油菜>菠菜>小葱>白菜>胡萝卜>红萝卜>包心菜>小白菜>白萝卜; 其中, 香菜对 Ni 的富集能力相对较强, 富集系数为 0.0311, 而白萝卜则相对较弱, 富集系数仅为 0.0060。(7)不同蔬菜对 Hg 的富集规律: 不同蔬菜对 Hg 的富集系数平均值为 0.0481, 由高到低依次是菠菜>香菜>胡萝卜>小葱>豌豆尖>青菜>白油菜>莲白>油菜>小白菜>红油菜>小青菜>蒜苗>莴笋叶>红萝卜>白菜>包心菜>白萝卜; 其中, 菠菜对 Hg 的富集能力相对较强, 富集系数为 0.1164, 而白萝卜则相对较弱, 富集系数仅为 0.0108。(8)不同蔬菜对 As 的富集规律: 不同蔬菜对 As 的富集系数平均值为 0.0095, 由高到低依次是红油菜>小

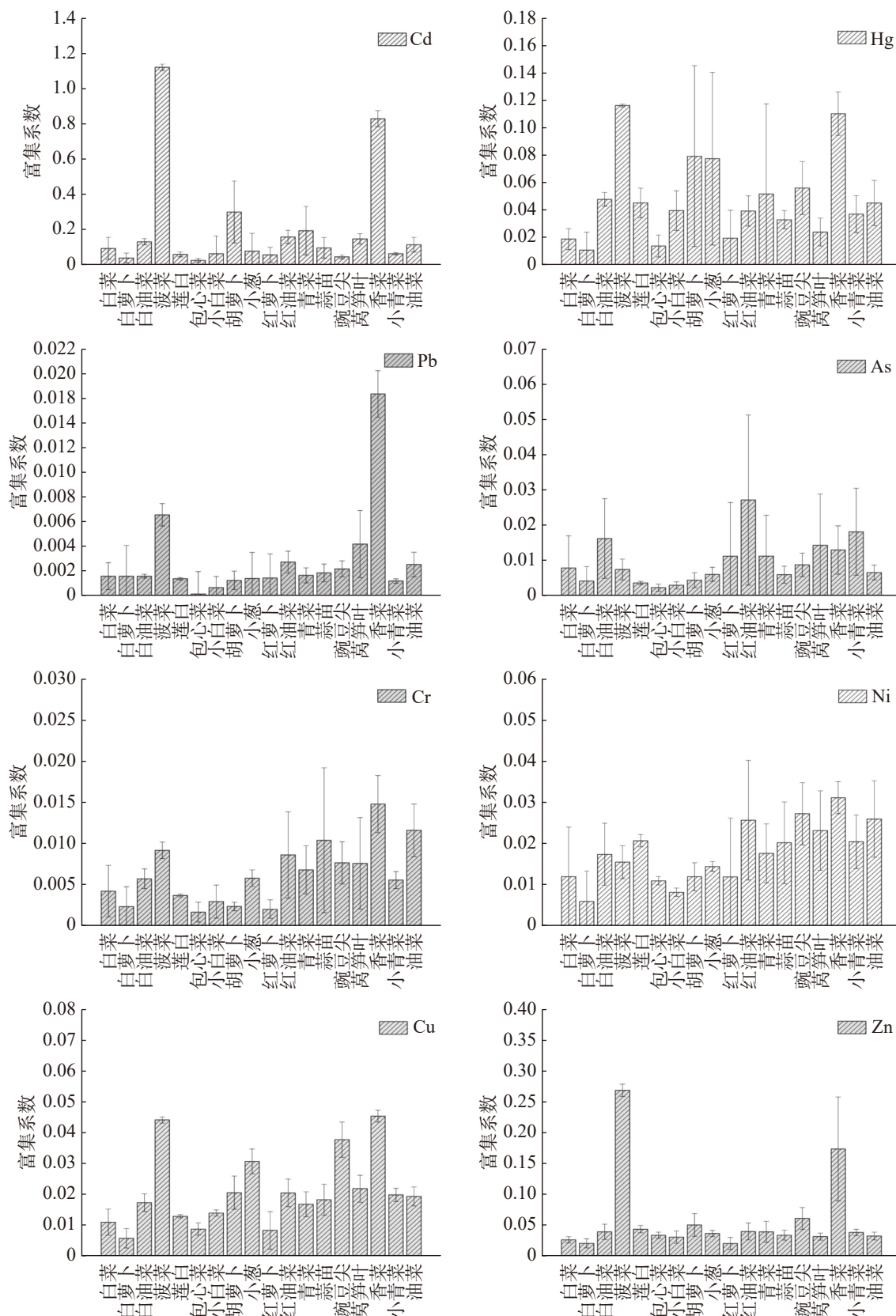


图3 不同蔬菜对重金属的富集系数

青菜>白油菜>莴笋叶>香菜>青菜>红萝卜>豌豆尖>白菜>菠菜>油菜>小葱>蒜苗>胡萝卜>白萝卜>莲白>小白菜>包心菜;其中,红油菜对As的富

集能力相对较强,富集系数为0.0271,而包心菜则相对较弱,富集系数仅为0.0022。

总体而言,蔬菜可食部分对Cd、Hg和Cr的

富集能力规律表现为叶菜类>葱蒜类>果菜类>根菜类>甘蓝类;对 Pb、As 和 Ni 的富集能力规律表现为叶菜类>果菜类>葱蒜类>根茎类>甘蓝类;对 Cu、Zn 的富集能力规律表现为叶菜类>果菜类>葱蒜类>甘蓝类>根茎类,显然,叶菜类蔬菜对重金属元素的富集能力相对较强,而甘蓝类和根茎类则相对较弱。这表明不同蔬菜对同一种重金属元素的富集能力存在差异,或同一种蔬菜对不同重金属元素的富集能力存在差异,特别是还存在种内差异,即同种蔬菜的不同品种对重金属的富集能力也有所差异,该种内差异主要内容有待进一步深入研究。

3 讨论

本调查发现试验区域土壤 Cd 元素超标较严重,且蔬菜对 Cd 元素的富集能力相对较强。土壤有机质可参与土壤重金属的氧化还原反应、络合与螯合作用,影响重金属的存在形态,进而干扰迁移、转化过程。通常土壤 Cd 的有效态含量随 pH 值的下降而增加,这是因为土壤 pH 值降低可促进 Cd 的络合态与残渣态向有效态转化^[17-20]。而本试验区域土壤呈偏酸性,土壤有机质含量较丰富,平均值为 32.30 g.kg⁻¹(二级),属偏上等水平,有利于增加 Cd 的活性,因而作物较容易吸收积累 Cd^[11]。

本试验区域蔬菜主要受重金属 Cr、Hg、Cd 污染,但除了 Cd 外,Cr、Hg 在农田土壤采样中并未发现含量超标的现象,因而可以认定为蔬菜生长发育过程中受到污染,污染物主要来源是外源,如农田施肥、灌溉以及农药等农业活动和工业废气等工业活动,因而建议密切监督当地工业活动和严格制定农药化肥的使用规格。叶菜类蔬菜对重金属的富集能力相对较强,而根茎类和甘蓝类蔬菜则相对较弱,以及同种蔬菜种内存在差异,利用这个特性,可以选择性地去完善种植制度和规划种植区域,减少甚至避免蔬菜受重金属的污染,保证蔬菜生产安全和降低重金属污染风险^[21-23],这一项研究具有重大的意义。

4 结论

(1)本试验区域土壤 Cd、Cr、Pb、Zn、Cu、Ni、Hg、As 含量平均值分别为四川省土壤背景值的 4.05 倍、0.91 倍、1.19 倍、1.18 倍、0.90 倍、

1.00 倍、1.80 倍、0.82 倍,其中土壤 Cd 含量超标率达 31.91%,最大超标值是限值的 2.18 倍,Cd 是主要污染物,其余元素均符合国家标准。

(2)本研究区域蔬菜主要受重金属 Cr、Hg、Cd 污染;综合污染程度为轻微污染的有蒜苗和油菜,轻度污染的有菠菜和香菜;通过富集系数发现,18 种蔬菜对 8 种重金属元素的富集系数平均值从高到低依次为 Cd>Zn>Hg>Cu>Ni>As>Cr>Pb,且 18 种蔬菜对同一种元素的富集系数也表现显著性差异。总体上,叶菜类蔬菜如香菜对 Cd、Hg、Pb、Cr、Ni、Zn、Cu 和菠菜对 Cd、Hg、Zn、Pb、Cu 以及红油菜对 As、Pb 富集能力相对较强,而甘蓝类和根茎类如包心菜对 Cd、Hg、Cr、Pb、As、Ni、Cu 和白萝卜对 Cd、Cr、Zn、Cu、Ni、Hg 及红萝卜对 Zn、Cr、Cu 的富集能力则相对较弱。这表明研究区域香菜和菠菜不宜在被 Cd、Hg、Pb、Cr、Ni、Zn、Cu 污染的土壤上栽培;红油菜不宜在被 As、Pb 污染的土壤上栽培;包心菜、白萝卜和红萝卜可作为被 Cd、Hg、Cr、Pb、As、Ni、Cu、Zn 污染的土壤优先选种的蔬菜品种。

参考文献:

- [1] 安婧,宫晓双,陈宏伟,等. 沈抚灌区农田土壤重金属污染时空变化特征及生态健康风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(1): 37-44.
- [2] 许根焰,宋静,高慧,等. 贵州省白菜种植土壤镉风险管控标准研究[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(7): 1490-1497.
- [3] 周旭,周安琪,曹红斌,等. 基于健康风险评价的白菜种植土壤中重金属的安全限量研究[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(6): 1213-1220.
- [4] 赵小蓉,杨谢,陈光辉,等. 成都平原区不同蔬菜品种对重金属富集能力研究[J]. *西南农业学报*, 2010, 23(4): 1142-1146.
- [5] 林君锋,高树芳,陈伟平,等. 蔬菜对土壤镉铜锌富集能力的研究[J]. *土壤与环境*, 2002(3): 248-251.
- [6] 何江华,柳勇,王少毅,等. 蔬菜对重金属富集能力的研究——以广州蔬菜生产基地为例[J]. *重庆环境科学*, 2003(12): 4-6.
- [7] 窦磊,马瑾,周永章,等. 广东东莞地区土壤-蔬菜系统重金属分布与富集特性分析[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2008(1): 98-102.
- [8] 施泽明,倪师军,张成江. 成都城郊典型蔬菜中重金属元素的富集特征[J]. *地球与环境*, 2006(2): 52-56.
- [9] 杜俊杰,李娜,吴永宁,等. 蔬菜对重金属的积累差异及低积累蔬菜的研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(6): 1193-1201.
- [10] 伍文宪,张蕾,黄小琴,等. 成都平原主栽大白菜品种

- 根肿病抗性的鉴定[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(10): 127–132.
- [11] 涂春艳, 陈婷婷, 廖长君, 等. 矿区农田蔬菜重金属污染评价和富集特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(8): 1713–1722.
- [12] 朱礼学. 成都平原西部土壤中镉的分布与镉污染[J]. *成都理工学院学报*, 2000(S1): 94–97.
- [13] 佟洪金, 涂仕华, 赵秀兰, 等. 彭州市蔬菜基地土壤中重金属污染评价[J]. *西南农业学报*, 2003(S1): 122–125.
- [14] 贾亚琪, 刘文政, 秦俊虎, 等. 汞矿区土壤和农产品重金属污染状况及风险评估[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2021(3): 43–50.
- [15] GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》[J] *中国食品卫生杂志*, 2018, 30(3): 329–340.
- [16] 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(节选)[J]. *腐植酸*, 2018(4): 58–61.
- [17] 滑小赞, 程滨, 赵瑞芬, 等. 太原市城郊菜地土壤和蔬菜重金属含量特征及健康风险评价[J]. *山西农业科学*, 2019, 47(1): 82–87.
- [18] 邹鲤岭, 杨加庆, 程先锋, 等. 张香群. 云南东川小江沿岸农田土壤和白菜重金属污染研究[J]. *西南农业学报*, 2018, 31(4): 754–758.
- [19] 张兰, 黑儿平, 武娟, 等. 镉污染稻田土壤调理剂效果研究[J]. *农业研究与应用*, 2021, 34(1): 47–52.
- [20] 旭音, 陶于祥, 王润华, 等. 湖州市不同土壤重金属的污染现状[J]. *上海国土资源* (3): 6–11.
- [21] 宋恒飞, 吴克宁, 刘霈珈. 土壤重金属污染评价方法研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(15): 11–14.
- [22] 张成丽, 张伟平, 程红丹, 等. 禹州市煤矿区周边土壤和农作物重金属污染状况及健康风险评价[J]. *环境化学*, 2019, 38(4): 805–812.
- [23] 赵瑞芬, 程滨, 滑小赞, 等. 忻州市灌区土壤重金属污染评价及分布特征分析[J]. *北方园艺*, 2021(6): 81–88.

Heavy metal contents and pollution evaluation of farmland vegetables in Chengdu Plain

HEI Erping^{1,2}, SHANGGUAN Yuxian¹, YU Hua¹, QIN Yusheng¹,
ZENG Xiangzhong¹, GUO Jingjing³, WU Yanxiang⁴

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu, Sichuan 610066; 2. College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan 611130; 3. Xuyong County Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Luzhou Sichuan 646499; 4. Cuiqing District Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Yibin Sichuan 644002, China)

Abstract: In order to reduce the risk of heavy metal pollution and ensure the safety of vegetable production, the heavy metal contents in the soil and the edible parts of 18 varieties under 5 types of vegetables were determined, and the status of heavy metal pollution in the vegetables were evaluated. Meanwhile an enrichment coefficient was used to analyze and compare the capacity of the vegetables to accumulate the heavy metals Cd, Cr, Pb, Zn, Cu, Ni, Hg and As. The results showed that the soil Cd content in the area under experiment was 31.91%, which was the main pollutant, while the contents of other heavy metals fell within the national standards. The edible parts of all vegetables were mainly contaminated, and garlic and rape, spinach and coriander were slightly contaminated by heavy metals Cr, Hg, and Cd. The enrichment coefficients of the 8 heavy metals in the vegetables showed that the average enrichment coefficient of the heavy metals in 18 varieties of vegetables was in the descending order of Cd > Zn > Hg > Cu > Ni > As > Cr > Pb. The average enrichment coefficient of Cd was 0.201 1 and Pb was 0.003 1, a difference of 64.66 times between Cd and Pb. The enrichment coefficient of the same element in different vegetables showed significant difference which was up to 120 folds. Generally, leaf vegetables such as coriander had a relatively higher enrichment capacity for Cd, Hg, Pb, Cr, Ni, Zn, Cu, and spinach for As and Pb, which indicates that coriander and spinach in the experimental area should not be cultivated on the soil contaminated with Cd, Hg, Pb, Cr, Ni, Zn and Cu. Red rape should not be cultivated on the As and Pb contaminated soil, However, cabbage and root vegetables, such as cabbage, white radish and carrot, had a weak capacity to accumulate Cd, Hg, Cr, Pb, As, Ni and Cu; Cd, Cr, Cu, Ni and Hg; and Zn, Cr, and Cu, respectively, and can hence be used as the priority varieties of vegetables cultivated in the soils contaminated with Cd, Hg, Cr, Pb, As, Ni, Cu, and Zn in the experimental area.

Keywords: Chengdu Plain; heavy metal content; pollution status; vegetables; enrichment capacity