

# 杭州市菜地蔬菜对土壤重金属的富集特性研究

顾燕青, 顾优丽, 白倩, 龚梦丹, 朱维琴\*

(杭州师范大学生命与环境科学学院, 浙江 杭州 310036)

**摘要:** 研究调查了杭州市 30 个蔬菜基地土壤和蔬菜重金属含量, 通过分析各蔬菜的富集系数和转运系数, 研究了叶菜类、根茎类、茄果类共 27 种蔬菜对土壤 Cu、Zn、Cd、Cr、Pb 的富集特性, 旨在了解不同蔬菜对重金属富集特性的差异, 并就中轻度重金属污染菜地上的蔬菜种植提出合理建议。结果表明: 在中轻度重金属污染土壤中, 叶菜类中的筒蒿、甘蓝、菜心、芹菜和长白菜, 根茎类中的白萝卜、胡萝卜, 茄果类的西红柿等对重金属的富集能力相对较低, 可以优先考虑种植; 而叶菜中的白苋菜、红苋菜、塌棵菜、西兰花、紫背天葵、雪菜和生菜, 根茎类中的茼蒿、芋艿、大红萝卜和樱桃萝卜及茄果中的甜椒等对重金属富集能力相对较高, 应尽量避免选择种植于中轻度重金属污染菜地。

**关键词:** 蔬菜; 重金属; 富集系数

中图分类号: X835

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2015)04-0401-10

doi: 10.13254/j.jare.2014.0342

## Heavy Metals Accumulation Characteristics of Vegetables in Hangzhou City, China

GU Yan-qing, GU You-li, BAI Qian, GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin\*

(College of Life and Environmental Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310036, China)

**Abstract:** A field survey of heavy metal concentrations in soils and vegetables grown in 30 vegetable farmlands of Hangzhou City were carried out. Through calculating the bioconcentration factor (BCF) and transfer factor (TF) for different heavy metals (Cu, Zn, Cd, Cr and Pb) in 27 kinds of different vegetables which belong to leafy vegetables, root vegetables or eggplant fruit vegetables, assessing their accumulation characteristics of heavy metals according to the differences of the bio-concentration factor, the reasonable proposals were put forward to optimize the planting structure of vegetables in mild and middle-level heavy metal contamination soils. The experimental results were as follows: In soils with mild and middle-level heavy metal contamination, leafy vegetables, such as crown daisy, cabbage, celery and Chinese long cabbage, had relatively low enrichment ability of heavy metals, so as the root and fruit vegetables like white radish, carrot, tomatoes, hence these vegetables could be planted preferentially. In contrast, some kinds of vegetables, including white amaranth, red amaranth, tatsoi, broccoli, gynura, brassica juncea and lettuce of leafy vegetables, lactuca sativa, taro, red radish and cherry radish of rhizome vegetables and sweet pepper of fruit vegetables, had relatively high accumulation ability of heavy metal, which should be avoided to be planted in soils with mild and middle-level heavy metal contamination.

**Keywords:** vegetables; heavy metal; bioconcentration factor

近年来,随着工业“三废”、城市生活垃圾、污泥、化肥等不断进入土壤环境,导致土壤中重金属含量呈日益增高及复合污染的趋势<sup>[1-3]</sup>。调查显示,重金属复合污染在城郊菜地土壤中普遍存在,Cd 污染最严重,Pb 次之<sup>[4]</sup>。陈涛等<sup>[5]</sup>研究发现长期污灌已导致西安农

田土壤中 Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 等的累积。土壤中重金属不仅会影响农作物产量,还能在植物中富集,进而威胁人类和动物的健康<sup>[6-8]</sup>。崔晓峰等<sup>[9]</sup>调查发现,珠江三角洲地区土壤和蔬菜主要受 Pb、Cd、Hg 污染,少数蔬菜受 Cr 污染。王晓波等<sup>[10]</sup>亦发现,Hg、Cd 和 Pb 为广州市本土蔬菜的主要污染元素,超标率分别为 50%、50%和 30%。刘尧兰等<sup>[11]</sup>通过对环鄱阳湖区部分叶菜中重金属污染调查表明,有 2/3 蔬菜样品的 Pb、Cd、Cr、Cu 和 Zn 重金属含量超标,超标率在 50%以上。同时,有关蔬菜对重金属富集能力的差异研究亦已相继开展,例如,Liu 等<sup>[12]</sup>对山东省蔬菜基地

收稿日期:2014-12-02

基金项目:杭州市农业科研攻关项目(20120232B10);浙江省新苗人才计划项目(2014R421036);杭州师范大学大学生挑战杯项目(1284XXM32)

作者简介:顾燕青(1991—),江苏溧阳人,硕士研究生,研究方向为土壤重金属污染控制。E-mail: yanqing\_gu@163.com

\* 通信作者:朱维琴 E-mail: zhqw@hznu.edu.cn

的土壤和蔬菜中重金属含量调查发现,蔬菜吸收重金属由难到易表现为: $Cd>As>Cu>Pb>Hg>Cr$ 。Wang等<sup>[13]</sup>亦发现,叶菜比非叶菜对Cd、Pb富集能力更强。利用不同品种蔬菜富集重金属的差异特性,选择性种植不同蔬菜于中轻度重金属污染菜地,指导人们进行无公害蔬菜的栽培和安全生产,可以达到控制土壤重金属进入蔬菜的目的<sup>[14-15]</sup>,因此,就蔬菜对重金属的富集特性研究具有重要的理论及实际意义。根据本研究污染评价结果(结果待发表),杭州市菜地中葱蒜、瓜豆类蔬菜及大部分叶菜基本安全,但部分根茎类和茄果类蔬菜存在重金属污染,且分别源自Pb、Cd、Cr共同污染和Pb污染所致,亦有少数叶菜受Cu、Zn、Cr或Pb、Cr共同污染影响达警戒或轻度污染水平。基于此,本文就杭州市菜地中叶菜、根茎及茄果类蔬菜对Cu、Zn、Cd、Cr及Pb的富集特性进行研究,以期对杭州市无公害蔬菜安全生产及重金属耐污蔬菜品种选育等提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

在杭州市选择30个具有代表性的蔬菜基地进行采样。采样基地分布如图1所示,采样地覆盖江干区、西湖区、滨江区、萧山区、余杭区等10个区县。所采蔬菜样品涉及叶菜、根茎、茄果等,其中,叶菜类蔬菜采集品种达17种,94个样本;茄果类6种,17个样本;根茎类4种,28个样本。每种蔬菜样品均采用多点采

样法采集,共采蔬菜27种,139个样本。在采集蔬菜的同时采用多点混合采样法采集土壤样本1份,所采土壤共139个。

### 1.2 样品分析

所采蔬菜样品用自来水洗净后,用去离子水洗3遍,置于篮子中沥干水分后,取可食部分及根系并称鲜重后经105℃杀青2h,然后在65℃下烘干48h后称取干重并粉碎。然后称取蔬菜烘干样品0.5000g于瓷坩锅中,置于通风炉中排烟,当样品呈现黑色颗粒后取出,在马弗炉中550℃灰化12~16h后加5mL 50%稀硝酸酸化溶解,定容过滤后采用原子吸收分光光度计(SHIMADZU, AA-6300C)测定Cu、Zn、Pb、Cd、Cr的干物重含量。土壤样品经自然风干后,磨碎过100目尼龙筛,采用 $HNO_3-HClO_4$ 消解后亦采用原子吸收分光光度计法测定各重金属含量。土壤及蔬菜中重金属含量测定过程中,均抽取20%的样品进行平行双样测定以保证分析质量。

### 1.3 数据处理

#### 1.3.1 富集系数(Bioconcentration factor, BCF)计算

富集系数(BCF)是指植物体内某种重金属含量与土壤中该元素含量的比值<sup>[16]</sup>,它反映了植物对土壤中重金属元素的积累能力,BCF值越小,则植物对该种重金属的积累能力越弱,抗土壤重金属污染的能力则较强<sup>[17]</sup>。其计算公式为:

$$BCF = C_{\text{vegetable}} / C_{\text{soil}}$$

式中: $C_{\text{vegetable}}$ 表示蔬菜中的重金属含量; $C_{\text{soil}}$ 表示土壤

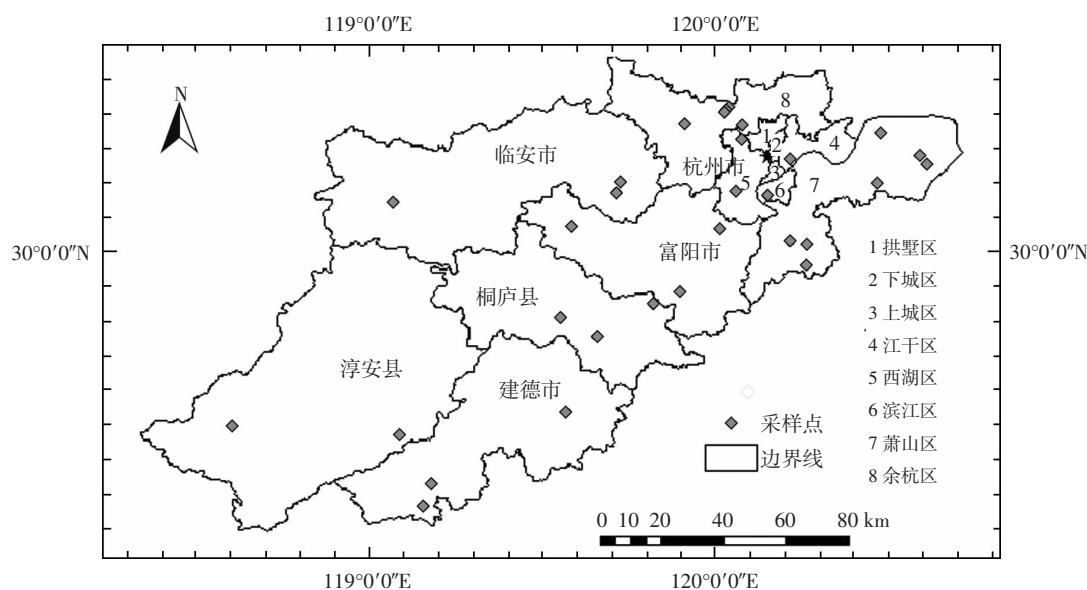


图1 杭州市蔬菜基地采样分布图

Figure 1 Location of the study area and distribution of sampling sites in Hangzhou City

中相应重金属的总含量。

### 1.3.2 转运系数(Transfer factor, $TF$ )计算

转运系数( $TF$ )即指植物地上部分(茎、叶、果实)中某重金属元素含量与根部该重金属含量的比值,它反映了该重金属由根部向地上部分迁移的能力, $TF$ 值越大,则植物将重金属从根部向地上部分转运的能力越强。其计算公式如下:

$$TF=C_{ag}/C_{root}$$

式中: $C_{ag}$ 为蔬菜地上部分重金属含量; $C_{root}$ 为根部重金属含量。

### 1.3.3 数据统计分析与作图

采用 DPS V14.10 统计软件对各富集系数( $BCF$ )及转运系数( $TF$ )进行差异显著性检验,以比较不同

蔬菜品种间富集能力和转运能力的差异显著性。研究区及样点分布图用 ArcGIS 9.3 软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同品种蔬菜对 Cu 的富集特性

从表 1 可见,叶菜生长土壤、可食部位及根系中 Cu 含量范围均存在较大变异性,分别为 4.74~66.26、0.15~77.13  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.92~60.25  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。从富集系数( $BCF$ )看,香菜和白苋菜可食部位对土壤中 Cu 的积累能力最强,其对土壤 Cu 的  $BCF$  值分别为 1.560 和 1.333,且两者间无显著差异性;其次为菜心、长白菜、菠菜和生菜,其对土壤 Cu 的  $BCF$  均为 0.600 以上;而雪菜、甘蓝、西兰花、茼蒿对土壤 Cu 的积累能

表 1 土壤-蔬菜系统中 Cu 的富集系数( $BCF$ )及转运系数( $TF$ )

Table 1 Bioconcentration factor ( $BCF$ ) and transfer factor ( $TF$ ) of Cu in soil-vegetable system

蔬菜种类	品种	土壤 Cu 含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}, \text{dw}$	地上部分 Cu 含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}, \text{dw}$	根系 Cu 含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}, \text{dw}$	可食部位 $BCF$	$TF$
叶菜类	长白菜	9.33~50.32	7.80~77.09	5.92~14.05	0.831±0.008b	2.285±0.924a
	青菜	10.10~66.26	2.17~77.13	2.17~22.19	0.443±0.035cde	1.567±0.52abcd
	菠菜	17.35~33.97	6.55~59.62	5.30~17.17	0.626±0.109bc	1.085±0.196cde
	芹菜	12.94~42.21	1.55~19.05	4.05~30.27	0.501±0.060cd	0.836±0.030ef
	花菜	10.29~58.20	0.15~36.55	2.17~30.28	0.510±0.103bcd	0.897±0.046def
	大白菜	6.24~28.95	1.55~14.04	3.43~20.93	0.387±0.020cdef	0.628±0.075ef
	甘蓝	4.74~40.67	0.92~9.67	0.92~34.06	0.188±0.016ef	0.353±0.116f
	生菜	8.45~46.66	7.80~42.78	4.27~29.68	0.608±0.257bc	0.837±0.127ef
	红苋菜	20.37~26.34	10.29~12.17	13.43~60.25	0.484±0.030cde	0.461±0.34ef
	茼蒿	23.78~50.42	10.29~45.88	4.05~27.15	0.261±0.080def	0.676±0.038ef
	香菜	11.23~11.63	18.01~17.57	17.69~19.17	1.560±0.026a	0.970±0.017cdef
	塌棵菜	26.55~27.79	9.43~9.91	16.32~16.78	0.356±0.013cdef	0.585±0.032ef
	白苋菜	15.07~15.29	20.19~20.41	11.96~12.40	1.333±0.005a	1.669±0.084abc
	雪菜	51.49~54.11	5.72~6.12	9.55~9.79	0.111±0.008f	0.619±0.054ef
	菜心	12.21~28.48	10.29~39.64	6.54~41.65	0.844±0.002b	1.182±0.359bcde
根茎类	紫背天葵	42.15~44.03	17.15~19.05	9.56~9.78	0.426±0.012cde	1.952±0.214ab
	西兰花	20.07~20.95	4.55~4.79	7.83~9.01	0.230±0.017def	0.564±0.072ef
	胡萝卜	13.73~52.80	4.67~37.13	4.68~32.15	0.688±0.014c	0.689±0.004bcd
	茼蒿	11.46~52.00	7.80~64.65	0.12~24.68	0.970±0.151a	1.722±0.615b
	樱桃萝卜	26.95~27.37	2.09~2.25	26.77~26.95	0.706±0.063c	0.112±0.011d
	大红萝卜	12.35~17.72	1.55~7.80	3.42~27.60	0.916±0.057b	0.367±0.120cd
茄果类	白萝卜	22.01~23.03	3.91~4.51	3.33~3.51	0.152±0.006e	1.227±0.015bc
	芋艿	27.03~28.49	73.44~74.02	12.55~13.03	0.460±0.026d	5.776±0.004a
	辣椒	10.73~138.30	5.30~25.30	5.92~29.66	0.545±0.093b	1.593±0.153b
	甜椒	15.81~16.39	10.25~11.59	5.85~5.99	0.680±0.017ab	1.844±0.005a
	茄子	12.07~12.55	8.90~9.20	15.14~15.46	0.733±0.021a	0.591±0.006c
	西红柿	10.06~46.12	3.42~7.79	5.29~23.42	0.185±0.020c	0.311±0.071d

注:叶菜及葱蒜类可食部位为茎叶,根茎类可食部位为根系,茄果的可食部位均为果实;dw 表示干重。同列中不同小写字母表示同一蔬菜种类不同品种间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

力相对最弱,且相互间无显著差异。从转运系数(*TF*)看,长白菜、紫背天葵、白苋菜和青菜中 Cu 的 *TF* 值相对最高,其 *TF* 值分别为 2.285、1.952、1.669 和 1.567,且相互间无显著差异性;而甘蓝、红苋菜、西兰花、塌棵菜、雪菜、大白菜、筒蒿中 Cu 的 *TF* 值相对较低,且相互间亦无显著差异。可见,白苋菜对土壤 Cu 同时具有较强的富集能力和转运能力,而雪菜、甘蓝、西兰花、筒蒿等对土壤 Cu 的富集能力和转运能力均相对最弱。

各根茎类蔬菜可食部位对土壤 Cu 的 *BCF* 值大小顺序为:莴苣>大红萝卜>樱桃萝卜>胡萝卜>芋艿>白萝卜,各根菜中 Cu 的 *TF* 值大小顺序为:芋艿>莴苣>白萝卜>胡萝卜>大红萝卜>樱桃萝卜,其中白萝卜、莴苣及胡萝卜之间,大红萝卜与樱桃萝卜之间均无显著差异。因此,莴苣对土壤 Cu 的富集能力和迁

移能力均较强;而大红萝卜和樱桃萝卜对土壤中 Cu 具有较强的富集能力,但不易向茎叶中迁移;芋艿和白萝卜则对土壤中 Cu 的富集能力相对较弱,且所吸收 Cu 相对易于迁移至茎叶部位。

茄果类可食部位对土壤 Cu 的 *BCF* 大小依次是茄子>甜椒>辣椒>西红柿,且茄子中 Cu 的 *BCF* 约为西红柿的 4.0 倍;各茄果蔬菜的可食部位中 Cu 的 *TF* 值大小顺序为:甜椒>辣椒>茄子>西红柿,且相互间均达显著差异水平。因此,茄果中的甜椒对土壤中 Cu 的积累及地上迁移能力相对较强,而西红柿对土壤 Cu 的积累及地上迁移能力均相对较弱。

## 2.2 不同品种蔬菜对 Zn 的富集特性

从表 2 可见,叶菜、根茎、茄果类蔬菜生长土壤中 Zn 含量范围均存在较大变异,分别为 53.45~208.80、69.55~179.94、64.97~193.34 mg·kg<sup>-1</sup>。从富集系数

表 2 土壤-蔬菜系统中 Zn 的富集系数(*BCF*)及转运系数(*TF*)  
Table 2 Bioconcentration factor (*BCF*) and transfer factor (*TF*) of Zn in soil-vegetable system

蔬菜种类	品种	土壤 Zn 含量/ mg·kg <sup>-1</sup> ,dw	地上部分 Zn 含量/ mg·kg <sup>-1</sup> ,dw	根系 Zn 含量/ mg·kg <sup>-1</sup> ,dw	可食部位 <i>BCF</i>	<i>TF</i>
叶菜类	长白菜	72.54~87.84	41.33~71.49	29.18~84.98	0.541±0.041efg	1.140±0.118d
	青菜	61.43~208.80	31.51~123.43	19.81~125.05	0.652±0.007bcd	1.159±0.200d
	菠菜	84.85~191.17	64.92~155.48	43.86~135.68	0.735±0.091bc	1.247±0.083cd
	芹菜	71.52~197.87	30.76~84.64	26.17~108.15	0.504±0.003fgh	0.889±0.032d
	花菜	70.97~149.02	27.67~96.24	28.94~96.00	0.652±0.020bcd	1.069±0.079d
	大白菜	53.45~129.30	24.68~202.98	33.66~183.44	0.654±0.013bc	0.965±0.057d
	甘蓝	62.45~180.04	15.57~96.44	5.32~91.17	0.445±0.011gh	1.293±0.038cd
	生菜	72.03~195.42	53.64~142.27	58.78~131.01	0.735±0.054bc	1.054±0.042d
	红苋菜	89.99~181.61	66.24~140.48	24.90~127.20	0.755±0.027b	1.882±1.100abc
	筒蒿	111.40~183.46	40.66~124.68	39.36~68.76	0.412±0.055h	1.210±0.090cd
	香菜	135.11~137.45	73.46~75.26	111.43~113.78	0.555±0.003def	0.664±0.005d
	塌棵菜	133.15~135.85	127.98~129.43	54.86~56.78	0.956±0.004a	2.317±0.001ab
	白苋菜	162.85~163.46	113.95~115.42	91.45~93.78	0.705±0.004bc	1.242±0.021cd
	雪菜	132.78~134.87	97.65~99.67	93.36~95.51	0.734±0.005bc	1.037±0.118d
	菜心	95.20~131.74	47.97~52.86	1.25~34.25	0.462±0.005fgh	1.323±0.211cd
	紫背天葵	127.41~129.58	81.56~83.45	45.12~46.87	0.643±0.003cde	1.778±0.010bc
	西兰花	86.45~88.59	82.45~83.98	31.26~33.56	0.946±0.003a	2.550±0.006a
根茎类	胡萝卜	81.72~158.37	40.84~91.01	18.12~73.42	0.358±0.058c	2.533±0.394a
	莴苣	69.55~179.94	9.15~100.85	2.62~57.12	0.640±0.038bc	1.329±0.127b
	樱桃萝卜	110.46~113.45	48.65~49.78	61.56~63.45	0.745±0.044b	0.880±0.049cd
	大红萝卜	82.71~97.69	44.05~47.72	32.16~54.08	0.472±0.116c	1.126±0.345bcd
	白萝卜	64.95~67.42	39.56~41.56	30.12~31.64	0.467±0.036c	1.321±0.102bc
茄果类	芋艿	87.46~89.76	65.23~67.78	90.12~93.85	1.034±0.004a	0.724±0.002d
	辣椒	64.97~193.34	16.38~35.57	20.22~68.78	0.265±0.038c	0.706±0.089b
	甜椒	79.46~81.46	33.46~35.76	20.46~22.85	0.423±0.002b	1.601±0.003a
	茄子	64.92~67.13	32.45~34.12	87.12~89.45	0.513±0.001a	0.383±0.003c
	西红柿	89.44~185.38	15.12~45.98	45.53~208.30	0.248±0.027c	0.348±0.041c

(*BCF*)看,塌棵菜和西兰花可食部位对土壤中 Zn 的积累能力最强,其 *BCF* 值分别为 0.956 和 0.946,且两者间无显著差异性;茼蒿、甘蓝、菜心、芹菜和长白菜对土壤 Zn 的积累能力相对较弱,且相互间亦无显著差异。从转运系数(*TF*)看,西兰花、塌棵菜和红苋菜中 Zn 的 *TF* 值相对较高,且相互间无显著差异性,其 *TF* 值分别为 2.550、2.317 和 1.882;而香菜、芹菜、雪菜、大白菜、生菜、长白菜、菠菜、花菜、青菜、甘蓝、菜心、白苋菜、筒蒿中 Zn 的 *TF* 值均相对较低,且相互间无显著差异。因此,塌棵菜、西兰花及红苋菜对土壤 Zn 同时具有较强的富集能力和转运能力;而茼蒿、甘蓝、菜心、芹菜和长白菜等对土壤 Zn 的富集能力和转运能力均相对较弱。

各根茎类蔬菜可食部分对土壤 Zn 的 *BCF* 值大小顺序为:芋艿>樱桃萝卜>茼蒿>大红萝卜>白萝卜>胡萝卜,其中樱桃萝卜与茼蒿之间,大红萝卜、白萝卜和胡萝卜之间均无显著差异;各根菜中 Zn 的 *TF* 值大小顺序为:胡萝卜>茼蒿>白萝卜>大红萝卜>樱桃萝卜>芋艿,其中芋艿、大红萝卜与樱桃萝卜之间均无显著差异。茄果类蔬菜可食部位对土壤 Zn 的 *BCF* 大小顺序为:茄子>甜椒>辣椒>西红柿,且茄子中 Zn 的 *BCF* 约为西红柿的 2.1 倍,但辣椒和西红柿之间无显著差异;各茄果蔬菜中 Zn 的 *TF* 值大小顺序为:甜椒>辣椒>茄子>西红柿,且仅在茄子和西红柿间无显著差异。因此,根茎类中的芋艿和樱桃萝卜及茄果中的甜椒对土壤中 Zn 具有较强的富集能力,且易于向可食部位迁移;而根茎类中的白萝卜和胡萝卜及茄果中的西红柿则对土壤中 Zn 的富集能力相对较弱,且所吸收 Zn 相对易于迁移至非可食部位。

### 2.3 不同品种蔬菜对 Cd 的富集特性

有研究表明,蔬菜对 Cd 的积累能力较强,且可能与 Cd 在土壤中的较强迁移能力和植物对 Cd 的较强吸收能力有关<sup>[8]</sup>。从表 3 可见,叶菜类蔬菜生长土壤、茎叶及根系中 Cd 的含量范围为 0.10~3.11、0.000~0.855  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.000~2.684  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,其中,白苋菜的茎叶、根系和茼蒿的茎叶中均未检出 Cd。从 *BCF* 和 *TF* 看,紫背天葵可食部位中 Cd 的 *BCF* 和 *TF* 分别为 1.902 和 16.212,均显著高于其他叶菜;其次为雪菜和生菜;而塌棵菜、菜心、甘蓝中 Cd 的 *BCF* 和 *TF* 值均显著低于其他叶菜。因此,叶菜中的紫背天葵、雪菜和生菜对土壤 Cd 同时具有较强的富集及转运能力,而白苋菜、茼蒿、塌棵菜、菜心、甘蓝等对土壤 Cd 吸收积累及转运能力相对较差。

根茎类蔬菜可食部位中 Cd 的 *BCF* 大小顺序为:茼蒿>樱桃萝卜>胡萝卜>大红萝卜>白萝卜>芋艿,其中,茼蒿中 Cd 的 *BCF* 约为芋艿的 4.0 倍,与其他蔬菜间差异均达显著水平;同时,茼蒿和胡萝卜之间及樱桃萝卜、白萝卜、大红萝卜之间的 *TF* 亦无显著差异,而芋艿中 Cd 的 *TF* 值为 0.175,显著低于其他根茎类蔬菜。茄果类蔬菜可食部位中 Cd 的 *BCF* 大小顺序为:甜椒>西红柿>茄子>辣椒,其中,甜椒与西红柿之间以及茄子与辣椒之间的差异均未达显著水平,其中甜椒果实中 Cd 的 *BCF* 约为辣椒的 2.3 倍;其 *TF* 大小顺序为:西红柿>甜椒>辣椒>茄子,且甜椒和西红柿之间差异亦未达显著水平。因此,根茎类中的茼蒿、樱桃萝卜及茄果中的甜椒对土壤中 Cd 的积累能力和地上部转运能力较强;而根茎中的芋艿及茄果类中的茄子对土壤 Cd 具有较低的富集能力和运输能力。

### 2.4 不同品种蔬菜对 Cr 的富集特性

从表 4 可以看出,在叶菜类蔬菜生长的土壤中 Cr 含量范围为 21.42~111.13  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,长白菜、花菜、塌棵菜、白苋菜、雪菜及西兰花可食部位中均未检出 Cr,其余叶菜 Cr 含量范围为 0.00~10.82  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,各叶菜根系中 Cr 含量范围为 0.00~28.63  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,其中,塌棵菜根系中亦未检出 Cr。从 *BCF* 看,红苋菜可食部位对土壤 Cr 的 *BCF* 值为 0.156,而其他叶菜对土壤 Cr 的 *BCF* 值范围为 0.011~0.079,可见,红苋菜对土壤 Cr 的积累能力显著高于其他叶菜。从 *TF* 看,青菜、芹菜、大白菜、甘蓝、红苋菜、香菜、菜心、紫背天葵中 Cr 的 *TF* 相对较高,且相互无显著差异。可见,各叶菜对土壤 Cr 的富集能力均相对偏低,红苋菜对土壤 Cr 的富集及迁移能力相对较强,而未检出 Cr 的长白菜、花菜、塌棵菜、白苋菜、雪菜及西兰花等富集能力相对较低。

根茎类蔬菜生长土壤中 Cr 含量范围为 22.12~110.02  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,樱桃萝卜、大红萝卜和芋艿的茎叶及白萝卜和芋艿的根系中均未检测出 Cr,且根茎类蔬菜对土壤 Cr 的 *BCF* 值均相对偏低,*BCF* 大小范围为 0.052~0.077,而茄果类蔬菜可食部位无 Cr 检出,说明根茎类和茄果蔬菜对土壤 Cr 的积累能力亦相对较弱。分析各类蔬菜对土壤 Cr 的富集能力均相对较低的原因,可能与正常情况下植物对 Cr 的吸收和运转至地上部的能力都比较低有关<sup>[9]</sup>。

### 2.5 不同品种蔬菜对 Pb 的富集特性

从表 5 可见,土壤 Pb 的含量范围为 0.00~92.05  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,大多数蔬菜可食部位中未检出 Pb,根系中 Pb

表 3 土壤-蔬菜系统中 Cd 的富集系数(*BCF*)及转运系数(*TF*)Table 3 Bioconcentration factor (*BCF*) and transfer factor (*TF*) of Cd in soil-vegetable system

蔬菜种类	品种	土壤 Cd 含量/ mg·kg <sup>-1</sup> , dw	地上部分 Cd 含量/ mg·kg <sup>-1</sup> , dw	根系 Cd 含量/ mg·kg <sup>-1</sup> , dw	可食部位 <i>BCF</i>	<i>TF</i>
叶菜类	长白菜	0.18~1.46	0.000~0.252	0.041~0.651	0.428±0.057de	0.746±0.087cde
	青菜	0.17~1.46	0.000~0.653	0.043~1.063	0.736±0.015c	0.993±0.044b
	菠菜	0.37~0.75	0.000~0.855	0.000~2.011	0.683±0.093c	0.721±0.208de
	芹菜	0.19~2.78	0.000~0.851	0.043~2.275	0.583±0.031cd	0.620±0.021e
	花菜	0.18~1.33	0.000~0.252	0.000~0.452	0.380±0.075ef	0.824±0.163bcd
	大白菜	0.18~3.11	0.000~0.453	0.000~0.651	0.326±0.021efg	0.936±0.021bc
	甘蓝	0.18~0.73	0.000~0.453	0.000~0.654	0.181±0.014gh	0.198±0.020fg
	生菜	0.19~0.73	0.000~1.061	0.252~1.091	1.293±0.066b	0.637±0.012de
	红苋菜	0.31~0.55	0.041~0.246	0.042~0.253	0.297±0.217efg	1.017±0.025b
	茼蒿	0.55~1.07	0.000~0.001	0.251~2.684	0.000~0.000h	0.000~0.000g
	香菜	0.34~0.38	0.201~0.241	0.832~0.873	0.618±0.005cd	0.262±0.002f
	塌棵菜	0.89~0.93	0.032~0.054	0.413~0.491	0.047±0.001h	0.095±0.001fg
	白苋菜	0.10~1.28	ND	ND	NC	NC
	雪菜	0.17~0.21	0.232~0.272	0.242~0.263	1.316±0.018b	1.003±0.014b
	菜心	0.36~0.73	0.000~0.145	0.042~0.451	0.131±0.001gh	0.201±0.005fg
	紫背天葵	0.34~0.38	0.651~0.732	0.035~0.054	1.902±0.042a	16.212±0.015a
	根茎类	西兰花	0.17~0.19	0.029~0.061	0.032~0.065	0.231±0.002fg
胡萝卜		0.18~1.29	0.124~1.373	0.251~1.872	1.206±0.228b	1.240±0.078a
茼蒿		0.12~3.06	0.000~1.062	0.043~1.993	1.808±0.148a	1.572±0.100a
樱桃萝卜		0.18~0.91	0.041~0.473	0.042~0.653	1.211±0.019b	0.589±0.025b
大红萝卜		0.37~1.11	0.231~0.272	0.252~1.060	0.809±0.201c	0.616±0.542b
白萝卜		0.53~0.55	0.114~0.155	0.212~0.291	0.452±0.004d	0.505±0.004b
芋艿		0.52~0.56	0.033~0.054	0.243~0.261	0.451±0.001d	0.175±0.001c
茄果类	辣椒	0.49~1.46	0.045~0.453	0.252~0.451	0.285±0.209b	0.548±0.047b
	甜椒	0.36~0.39	0.042~0.453	0.064~0.457	0.650±0.022a	0.967±0.109a
	茄子	0.37~4.76	0.042~0.252	0.042~2.075	0.288±0.049b	0.330±0.047c
	西红柿	0.91~0.94	0.431~0.474	0.446~0.462	0.483±0.006ab	0.975±0.022a

注:ND 表示未检出;NC 为不能计算;\ 表示无数据。下同。

多数可检出,但 Pb 含量亦普遍偏低,这可能和 Pb 在土壤中的移动性较差有关<sup>[20]</sup>。其中,紫背天葵生长土壤中未检出 Pb,但其根系及可食部位均有 Pb 检出,其原因可能在于,生长在 Pb 污染空气中的蔬菜,可以由其植株叶片吸收大气中的 Pb<sup>[21]</sup>。叶菜蔬菜可食部位中检出 Pb 的主要有白苋菜、红苋菜、西兰花、花菜和紫背天葵,其 *BCF* 大小顺序为:白苋菜>红苋菜>西兰花>花菜,而其 *TF* 大小顺序为:花菜>红苋菜>白苋菜>紫背天葵,这亦说明空气中 Pb 可能是杭州市叶菜 Pb 的重要污染源之一。

根茎类蔬菜土壤中均检出 Pb,但根茎类蔬菜茎叶中检出 Pb 的仅有茼蒿和芋艿,各根茎蔬菜可食部位(根系)中 Pb 的 *BCF* 大小顺序为芋艿>樱桃萝卜>胡萝卜>大红萝卜>茼蒿,且胡萝卜和大红萝卜之间

及大红萝卜和茼蒿之间均无显著差异。茄果类蔬菜可食部位对土壤 Pb 的 *BCF* 大小顺序为:茄子>辣椒>西红柿,且相互间差异均达显著水平,其 *TF* 大小顺序为:甜椒>茄子>西红柿>辣椒,其中西红柿和辣椒中 Pb 的 *TF* 值分别为:0.444 和 0.443,无显著差异。可见,根茎类中的芋艿和樱桃萝卜及茄果类中的茄子对土壤 Pb 积累能力相对较高;而根茎类中的大红萝卜、茼蒿和胡萝卜及茄果类中的西红柿则对土壤 Pb 富集能力相对较低。

### 3 讨论

研究表明,不同蔬菜对重金属元素的富集特征大不相同<sup>[22]</sup>。郭海涛<sup>[23]</sup>试验发现,甜椒属于高富集蔬菜,在受 Cd 污染农田不建议种植。方华为<sup>[24]</sup>研究发现,莴

表4 土壤-蔬菜系统中Cr的富集系数(*BCF*)及转运系数(*TF*)Table 4 Bioconcentration factor(*BCF*) and transfer factor(*TF*) of Cr in soil-vegetable system

蔬菜种类	品种	土壤 Cr 含量/ mg·kg <sup>-1</sup> ,dw	地上部分 Cr 含量/ mg·kg <sup>-1</sup> ,dw	根系 Cr 含量/ mg·kg <sup>-1</sup> ,dw	可食部位 <i>BCF</i>	<i>TF</i>
叶菜类	长白菜	22.49~51.98	ND	0.00~6.85	NC	NC
	青菜	22.38~110.15	0.00~9.56	0.00~15.70	0.056±0.002bc	0.672±0.057a
	菠菜	22.91~109.84	0.75~3.42	0.00~22.41	0.027±0.001cd	0.232±0.003bcd
	芹菜	22.40~109.48	0.00~10.82	0.00~28.63	0.071±0.013b	0.740±0.041a
	花菜	50.71~107.80	ND	0.00~18.22	NC	NC
	大白菜	22.34~107.86	0.00~9.57	0.00~13.26	0.036±0.006cd	0.620±0.042a
	甘蓝	22.35~107.42	0.00~5.71	0.00~10.84	0.027±0.005cd	0.626±0.167a
	生菜	22.47~111.13	0.00~3.43	0.00~22.44	0.016±0.002d	0.154±0.021d
	红苋菜	22.39~51.85	2.85~9.57	5.71~20.22	0.156±0.04a	0.486±0.019abc
	茼蒿	51.30~108.04	0.00~3.43	5.00~13.26	0.011±0.001d	0.159±0.021cd
	香菜	50.19~51.06	0.65~0.87	1.35~1.56	0.015±0.001d	0.519±0.010ab
	塌棵菜	50.51~50.62	ND	ND	NC	NC
	白苋菜	21.42~23.58	ND	1.32~1.56	NC	NC
	雪菜	50.36~52.98	ND	9.08~9.36	NC	NC
	菜心	22.43~78.88	1.38~1.56	2.63~2.86	0.064±0.090bc	0.520±0.736ab
	紫背天葵	58.34~62.54	4.56~4.88	9.12~9.35	0.079±0.002b	0.519±0.001ab
	西兰花	49.23~52.56	ND	2.65~2.89	NC	NC
	根茎类	胡萝卜	50.37~80.92	0.00~3.42	0.00~14.26	0.052±0.001b
茼蒿		22.37~110.02	0.00~10.83	0.00~15.70	0.028±0.006c	0.506±0.006b
樱桃萝卜		68.34~73.02	ND	5.14~6.26	0.077±0.002a	NC
大红萝卜		51.05~51.32	ND	2.74~5.00	0.076±0.031a	NC
白萝卜		22.12~22.56	4.62~4.87	ND	NC	NC
芋艿		50.12~50.35	ND	ND	NC	NC
茄果类	辣椒	22.49~146.70	ND	2.74~15.70	NC	NC
	甜椒	48.76~53.06	ND	9.01~9.45	NC	NC
	茄子	48.89~52.96	ND	2.55~2.98	NC	NC
	西红柿	50.77~92.79	ND	0.00~5.71	NC	NC

茼蒿对土壤镉吸收能力最强,芹菜为中等吸收级别,而筒篙对镉吸收能力最低且为低吸收级别。本研究亦得到类似结果(表1~表5)。鉴于大面积重金属污染菜地土壤的污染治理难以推广,避免种植对重金属富集能力较强的蔬菜品种、选择对重金属具有较低富集能力的蔬菜进行种植,对减少蔬菜吸收富集土壤重金属,保证蔬菜安全具有重要意义。根据本研究结果,在中轻度Cu污染菜地中,可以避免选择可食部位对Cu积累高的蔬菜品种,如叶菜中的白苋菜,根菜中的茼蒿、大红萝卜和樱桃萝卜,茄果类蔬菜中的甜椒;叶菜类中的雪菜、甘蓝、西兰花、筒篙,根茎类中的芋艿和白萝卜,茄果类的西红柿可以优先考虑种植。在中轻度Zn污染菜地中,应尽量减少种植叶菜中的塌棵菜、西兰花及红苋菜,根菜中的芋艿和樱桃萝卜,茄果类蔬菜中的甜椒;尽量选种叶菜中的茼蒿、甘蓝、菜心、

芹菜和长白菜,根茎类中的白萝卜和胡萝卜及茄果类中的西红柿等。对于中轻度Cd污染菜地,叶菜中的紫背天葵、雪菜和生菜,根茎类中的茼蒿、樱桃萝卜及茄果中的甜椒均应避免种植;尽量选择种植叶菜中的白苋菜、茼蒿、塌棵菜、菜心、甘蓝,根茎类中的芋艿及茄果类中的茄子等。在中轻度Cr污染菜地土壤中应该尽量避免选种Cr富集能力较强的红苋菜;可以优先选种未检出Cr或富集能力较弱的根茎类蔬菜以及多数叶菜如长白菜、花菜、塌棵菜、白苋菜、雪菜及西兰花等。对于中轻度Pb污染菜地,叶菜中的白苋菜、红苋菜、西兰花、花菜,根茎类蔬菜中的芋艿和樱桃萝卜,茄果类中的茄子均可以避免种植;而多数未检出Pb的叶菜,根茎类中的大红萝卜、茼蒿和胡萝卜,茄果类中的西红柿对土壤中Pb富集能力相对较低,可以优先选择种植。

表 5 土壤-蔬菜系统中 Pb 的富集系数(*BCF*)及转运系数(*TF*)Table 5 Bioconcentration factor(*BCF*) and translocation factor(*TF*) of Pb in soil-vegetable system

菜种类	品种	土壤 Pb 含量/ mg·kg <sup>-1</sup> , dw	地上部分 Pb 含量/ mg·kg <sup>-1</sup> , dw	根系 Pb 含量/ mg·kg <sup>-1</sup> , dw	可食部位 <i>BCF</i>	<i>TF</i>
叶菜类	长白菜	5.41~17.13	ND	0.00~1.13	NC	NC
	青菜	2.22~62.03	ND	0.00~12.72	NC	NC
	菠菜	1.16~35.63	ND	0.00~5.00	NC	NC
	芹菜	1.17~48.05	ND	0.00~6.93	NC	NC
	花菜	10.85~33.84	0.00~3.07	0.00~6.93	0.035±0.004c	0.420±0.122a
	大白菜	4.33~46.57	ND	0.00~6.93	NC	NC
	甘蓝	3.27~30.24	ND	1.13~5.00	NC	NC
	生菜	2.21~48.69	ND	1.13~8.85	NC	NC
	红苋菜	1.16~22.93	0.00~2.44	1.13~3.07	0.101±0.143b	0.397±0.562a
	茼蒿	30.22~47.00	ND	0.00~6.93	NC	NC
	香菜	2.87~3.67	ND	5.67~7.35	NC	NC
	塌棵菜	29.69~31.24	ND	4.76~5.37	NC	NC
	白苋菜	1.88~2.86	0.00~2.45	5.87~7.25	0.513±0.001a	0.163±0.003b
	雪菜	20.87~22.11	ND	2.95~3.25	NC	NC
	菜心	2.23~17.15	ND	0.00~4.99	NC	NC
	根茎类	紫背天葵	ND	0.55~0.57	6.82~7.04	NC
西兰花		18.28~20.34	1.01~1.26	ND	0.060±0.003c	NC
胡萝卜		4.35~32.18	ND	1.13~14.26	0.227±0.048c	NC
茼蒿		3.92~47.73	1.13~2.50	1.13~6.93	0.030±0.002d	0.388±0.034a
樱桃萝卜		2.85~3.07	ND	5.17~6.68	1.897±0.034b	NC
大红萝卜		6.53~19.47	ND	0.00~5.00	0.128±0.181cd	NC
白萝卜		ND	ND	6.82~7.03	NC	NC
茄果类	芋艿	2.01~2.44	0.54~0.59	6.89~6.96	3.130±0.001a	0.082±0.002b
	辣椒	4.34~31.69	0.00~3.06	1.13~6.93	0.057±0.002b	0.443±0.137c
	甜椒	\	2.97~3.14	1.03~1.25	NC	2.696±0.001a
	茄子	29.66~31.02	4.85~5.14	4.56~5.76	0.163±0.004a	1.004±0.007b
	西红柿	17.45~92.05	0.94~2.24	3.06~6.93	0.035±0.004c	0.444±0.065c

此外,研究发现,同一作物对不同重金属元素的富集特征也不同<sup>[25]</sup>。对同一类蔬菜而言,Cu、Cd、Zn 为高富集元素,Cr 为中等富集元素,Pb 为低富集元素<sup>[26]</sup>。本研究则发现,叶菜类蔬菜对土壤中 Zn 积累能力较强,根茎类蔬菜对土壤中 Cd、Pb 积累能力较强,这与徐明飞等<sup>[27]</sup>的研究结果相类似,而各蔬菜对土壤中 Cr 的积累能力较低,且以茄果类积累能力最低。因此,在中轻度重金属复合污染土壤中,首先需考虑 Cu、Cd、Zn 的污染程度,避免选择 Cu、Cd、Zn 富集能力较强的蔬菜种植,如叶菜中的白苋菜、红苋菜、塌棵菜、西兰花、紫背天葵、雪菜和生菜,根茎类中的茼蒿、芋艿、大红萝卜和樱桃萝卜及茄果中的甜椒等。岳振华等<sup>[28]</sup>亦发现茼蒿、苋菜对 Cu、Zn、Cd、Pb 的富集作用最强。同时,在中轻度重金属复合污染土壤中,应该优先选择对 Cu、Cd、Zn 富集能力较弱的蔬菜进行种植,如:

叶菜类中的茼蒿、甘蓝、菜心、芹菜和长白菜,根茎类中的白萝卜、胡萝卜及茄果类的西红柿等,这与梁称福等<sup>[25]</sup>筛选或选育耐、抗重金属污染的类型品种相类似。

#### 4 结论

(1)在中轻度重金属污染土壤中,叶菜类中的茼蒿、甘蓝、菜心、芹菜和长白菜,根茎类中的白萝卜、胡萝卜及茄果类的西红柿等对重金属的富集能力相对较低,可以优先考虑种植。

(2)叶菜中的白苋菜、红苋菜、塌棵菜、西兰花、紫背天葵、雪菜和生菜,根茎类中的茼蒿、芋艿、大红萝卜和樱桃萝卜及茄果中的甜椒等等对重金属富集能力相对较高,应尽量避免选择种植于中轻度重金属污染菜地。



## 参考文献:

- [1] 黄永东, 黄永川, 于官平, 等. 蔬菜对重金属元素的吸收和积累研究进展[J]. 长江蔬菜, 2010(10): 1-6.  
HUANG Yong-dong, HUANG Yong-chuan, YU Guan-ping, et al. Progress of absorption and accumulation of heavy metals for vegetables[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2010(10): 1-6. (in Chinese)
- [2] 王 辉, 王宜娟, 黎星辉, 等. 洛阳市蔬菜基地土壤重金属含量对蔬菜安全性的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(21): 369-372.  
WANG Hui, WANG Yi-juan, LI Xing-hui, et al. Effect of heavy metal content in soil from Luoyang vegetable base on vegetable safety[J]. *Food Science*, 2010, 31(21): 369-372. (in Chinese)
- [3] 樊 霆, 叶文玲, 陈海燕, 等. 农田土壤重金属污染状况及修复研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(10): 1727-1736.  
FAN Ting, YE Wen-ling, CHEN Hai-yan, et al. Review on contamination and remediation technology of heavy metal in agricultural soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(10): 1727-1736. (in Chinese)
- [4] ETCS (European Topic Centre Soil). Topic report-contaminated site[R]. Denmark: European Environment Agency, 1998.
- [5] 陈 涛, 常庆瑞, 刘 京, 等. 长期污灌农田土壤重金属污染及潜在环境风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2152-2159.  
CHEN Tao, CHANG Qing-rui, LIU Jing, et al. Pollution and potential environment risk assessment of soil heavy metals in sewage irrigation area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11): 2152-2159. (in Chinese)
- [6] 防治重金属污染列为环保部 2010 年头等大事[N]. 光明日报, 2010-01-13.  
Ministry of Environmental Protection regard prevention and control of heavy metal pollution as the focal point in 2010[N]. *Guangming Daily*, 2010-01-13. (in Chinese)
- [7] 刘玉燕, 刘 敏, 刘浩峰. 乌鲁木齐城市土壤中重金属含量与影响机制探讨[J]. 干旱区地理, 2007, 30(4): 552-555.  
LIU Yu-yan, LIU Min, LIU Hao-feng. Heavy metal content and its influence mechanic to urban soil at Urumqi City[J]. *Arid Land Geography*, 2007, 30(4): 552-555. (in Chinese)
- [8] 刘玉燕, 刘 敏, 刘浩峰. 乌鲁木齐城市土壤中重金属分布[J]. 干旱区地理, 2006, 29(1): 184-188.  
LIU Yu-yan, LIU Min, LIU Hao-feng. Distribution of heavy metal in urban soil of Urumqi City[J]. *Arid Land Geography*, 2006, 29(1): 184-188. (in Chinese)
- [9] 崔晓峰, 李淑仪, 丁效东, 等. 珠江三角洲地区典型菜地土壤与蔬菜重金属分布特征研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(1): 130-135.  
CUI Xiao-feng, LI Shu-yi, DING Xiao-dong, et al. Contents of heavy metals in soil and vegetables at typical vegetable plot in the Pearl River Delta[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(1): 130-135. (in Chinese)
- [10] 王晓波, 陈海珍, 刘冬英, 等. 广州市蔬菜重金属污染状况及健康风险评估[J]. 中国公共卫生, 2011, 27(5): 549-551.  
WANG Xiao-bo, CHEN Hai-zhen, LIU Dong-ying, et al. Contents of heavy metal in vegetables and their potential risks to human health in Guangzhou City[J]. *Chinese Journal of Public Health*, 2011, 27(5): 549-551. (in Chinese)
- [11] 刘尧兰, 陈焕晟, 蒋建华, 等. 环鄱阳湖区部分叶菜类蔬菜重金属污染评价与来源分析[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(20): 12310-12312, 12314.  
LIU Xiao-lan, CHEN Huan-sheng, JIANG Jian-hua, et al. Pollution situation assessment of heavy metal in part of leaf vegetables in the area around Poyang Lake[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(20): 12310-12312, 12314. (in Chinese)
- [12] Liu P, Zhou H J, Wang L L, et al. Analysis of heavy metal sources for vegetable soils from Shandong Province, China[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(1): 109-119.
- [13] Wang G, Su M Y, Chen Y H, et al. Transfer characteristics of cadmium and lead from soil to the edible parts of six vegetable species in south-eastern China[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144: 127-135.
- [14] 孙铁珩, 李培军, 周启星. 土壤污染形成机理与修复技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 574.  
SUN Tie-heng, LI Pei-jun, ZHOU Qi-xing, et al. The formation mechanism and restoration techniques of soil pollution[M]. Beijing: Science Press, 2005: 574. (in Chinese)
- [15] 杨海菊. 农作物富集土壤重金属的规律及其运用[J]. 绿色科技, 2011(4): 162-164.  
YANG Hai-ju. Accumulation law and application of heavy metals for crops in soil[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2011(4): 162-164. (in Chinese)
- [16] Mattina M J I, Lannucci-Berger W, Musante C, et al. Concurrent plant uptake of heavy metals and persistent organic pollutants from soil[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 124(3): 375-378.
- [17] 宋 波, 陈同斌, 郑袁明, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜镉含量及其健康风险分析[J]. 环境科学学报, 2006, 26(8): 1343-1353.  
SONG Bo, CHEN Tong-bin, ZHENG Yuan-ming, et al. A survey of cadmium concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risk to human risk[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 26(8): 1343-1353. (in Chinese)
- [18] 许嘉琳, 杨居荣. 陆地生态系统中的重金属[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995: 6.  
XU Jia-lin, YANG Ju-rong. Heavy metals in terrestrial ecosystems[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1995: 6. (in Chinese)
- [19] Bini C, Maleci L, Romanin A. The chromium issue in soil of the leather tannery district in Italy[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2008, 96: 194-202.
- [20] 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, 25(12): 4-6.  
HE Jiang-hua, LIU Yong, WANG Shao-yi, et al. A study on the enrichment ability of some popular vegetables for heavy metals in Guangzhou vegetable production base[J]. *Chongqing Environmental Science*, 2003, 25(12): 4-6. (in Chinese)
- [21] 郑 路, 常 江. 合肥市菜园蔬菜和土壤的铅污染与调查[J]. 环境污染与防治, 1989, 11(5): 33-37.  
ZHENG Lu, CHANG Jiang. A survey on Pb pollution of vegetables and

- soil in Hefei[J]. *Environmental Pollution and Control*, 1989, 11(5): 33-37. (in Chinese)
- [22] 李秀兰, 胡雪峰. 上海郊区蔬菜重金属污染现状及累积规律研究[J]. 化学工程, 2005(5): 36-39.  
LI Xiu-lan, HU Xue-feng. Study on pollution situation and enrichment regulations of some popular vegetables for heavy metals in Shanghai[J]. *Chemical Engineering*, 2005(5): 36-39. (in Chinese)
- [23] 郭海涛. 不同蔬菜吸收积累镉的差异研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2009.  
GUO Hai-tao. Differences of absorption and accumulation of cadmium by vegetables[D]. Beijing: Capital Normal University, 2009. (in Chinese)
- [24] 方华为. 不同品种蔬菜对镉的吸收及根系形态特征研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.  
FANG Hua-wei. Cadmium uptake by different vegetable cultivars and their root morphological traits[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [25] 梁称福, 陈正法, 刘明月, 等. 蔬菜重金属污染研究进展[J]. 湖南农业科学, 2002(4): 45-48.  
LIANG Chen-fu, CEHN Zheng-fa, LIU Ming-yue, et al. Study process-  
es on heavy metal pollution on vegetables[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2002(4): 45-48. (in Chinese)
- [26] 施泽明, 倪师军, 张成江, 等. 成都市郊典型蔬菜中重金属元素的富集特征[J]. 地球与环境, 2006, 34(2): 52-55.  
SHI Ze-ming, NI Shi-jun, ZHANG Cheng-jiang, et al. The characteristics heavy metal enrichment in representative vegetables in Chendu [J]. *Earth and Environment*, 2006, 34(2): 52-55. (in Chinese)
- [27] 徐明飞, 郑纪慈, 阮美颖, 等. 不同类型蔬菜重金属(Pb, As, Cd, Hg)积累量的比较[J]. 浙江农业学报, 2008, 20(1): 29-34.  
XU Ming-fei, ZHENG Ji-ci, RUAN Mei-ying, et al. Comparison of the amounts of heavy metals accumulated by different groups of vegetables [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2008, 20(1): 29-34. (in Chinese)
- [28] 岳振华, 张富强, 胡瑞芝, 等. 菜园土中重金属和氟的迁移累积及蔬菜对重金属的富集作用[J]. 湖南农学院学报, 1992, 18(4): 929-937.  
YUE Zhen-hua, ZHANG Fu-qiang, HU Rui-zhi, et al. Migration and accumulation of heavy metals and F in garden soils and vegetables[J]. *Journal of Hunan Agricultural College*, 1992, 18(4): 929-937. (in Chinese)