

## 覆膜对土壤-青菜体系 Cu 和 Zn 迁移特性的影响

李非里<sup>1,2</sup>, 刘丛强<sup>2</sup>, 杨元根<sup>2</sup>, 陈小英<sup>1</sup>, 蒋琦杰<sup>1</sup> (1. 浙江工业大学生物与环境工程学院, 浙江 杭州 310032; 2. 中国科学院地球化学研究所/环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002)

**摘要:** 地膜覆盖(覆膜)是一种国际上广泛采用的农作物栽培方式,极大地改变了土壤的水热生态效应,从而影响土壤中重金属元素的生物有效性。通过田间对比试验,研究覆膜对土壤-青菜体系中 Cu 和 Zn 迁移及分布特征的影响。结果表明:覆膜栽培方式在促进青菜生长的同时,显著地改变了土壤的理化性质。覆膜地块中土壤 pH 值和  $\text{SO}_4^{2-}$  含量比不覆膜地块分别降低 12.77% 和 33.90%, 差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。覆膜对 Cu 形态分布和迁移影响很小,对 Zn 影响则大得多。土壤中 Zn 的 BCR (community bureau of reference) 3 步提取态含量分别降低 25.87%、35.80% 和 28.17%。覆膜地块青菜根和叶中 Zn 含量分别较不覆膜地块增加 130.9% 和 13.6%, 但茎中减少了 23.7%。覆膜栽培对土壤中 Zn 有一定活化作用,释放出来的 Zn 大部分被青菜根吸收,因此覆膜地块中青菜根对 Zn 的吸收量远远大于不覆膜地块。

**关键词:** 覆膜; 生物有效性; 菜园土; 青菜; 铜; 锌

**中图分类号:** X131.3; S154.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4831(2009)02-0054-05

**Effect of Plastic Mulching on Translocation Characteristics of Copper and Zinc in Soil and Chinese Cabbage (*Brassica chinensis*) System.** LI Fei-li<sup>1,2</sup>, LIU Cong-qiang<sup>2</sup>, YANG Yuan-gen<sup>2</sup>, CHEN Xiao-ying<sup>1</sup>, JIANG Qi-jie<sup>1</sup> (1. College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry/Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** Plastic mulching is widely used in commercial vegetable production in the world. The technique changes soil hydrothermal properties significantly and eventually bioavailability of heavy metals in the soil. Field experiments were conducted to study effect of plastic mulching on translocation characteristics of copper and zinc in the soil-Chinese cabbage (*Brassica chinensis* L.) system. Results show that plastic mulching promoted growth of cabbage, while changing physico-chemical properties of the soil. Compared with un-mulched field, the mulched field was 12.77% and 33.90% lower in soil pH and  $\text{SO}_4^{2-}$  contents, respectively, showing a significant level of difference ( $P < 0.05$ ). Plastic mulching didn't have significant effect on the distribution and translocation characteristic of Cu, while it affected those of Zn. The concentration of each fraction of zinc extracted by BCR (community bureau of reference) three-stage sequential extraction procedure, in mulched field decreased by 25.87%, 35.80% and 28.17%, respectively. The concentrations of Zn in Chinese cabbage in mulched field increased by 130.9% and 13.6% in root and leaf, respectively, but decreased by 23.7% in shoot. Plastic mulching activated Zn somewhat in the soil, releasing Zn, of which most was absorbed by Chinese cabbage root. So Zn absorption by Chinese cabbage root in mulched field was far larger than that in un-mulched field.

**Key words:** plastic mulching; bioavailability; vegetable soil; Chinese cabbage; copper; zinc

地膜覆盖(覆膜)是一种国际上广泛采用的农作物栽培方式<sup>[1]</sup>。由于光、温、水、土等田间小气候的各种栽培环境变得较为优越<sup>[2]</sup>,采用覆膜栽培促进了农作物增收和早熟<sup>[3-4]</sup>。最近的研究表明,覆膜种植方式能改变元素的生物有效性,采用覆膜种植的蔬菜中一些重金属元素含量也会相应增加<sup>[5-6]</sup>。Cu 和 Zn 是植物生长和人类维持生命活动所需的微量元素,但人体吸收过量也会产生不利的

影响。蔬菜是人类摄取重金属的主要途径之一<sup>[7]</sup>。目前,关于覆膜对 Cu 和 Zn 迁移特征影响的研究还比较少。本文以不覆膜为对照,以青菜(*Brassica chinensis*)为供试植物样品,通过田间试验,研究覆

**基金项目:** 国家自然科学基金(40703020); 国家重点基础研究发展计划(2006CB403200); 中国科学院海外合作伙伴计划

**收稿日期:** 2008-07-26

膜对青菜及其根系周围土壤中 Cu、Zn 含量变化及形态分布的影响,探讨覆膜种植方式下青菜对 Cu、Zn 的吸收特征。

## 1 研究方法

### 1.1 供试材料和试验设计

田间试验在杭州市北郊进行。供试土壤为河流冲积物与海相沉积物母质发育的灰潮土,表面土壤呈灰暗色,其基本理化性质为有机质  $21.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,含水量  $330 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,烧失量质量分数  $3.6\%$ ,Cu  $35.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,Zn  $159 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,pH 4.9。播撒青菜种子,等青菜发芽长出三四片叶子时,移栽至试验田里,1组采用覆膜种植,另1组不覆膜作为对照,每组种植约15棵青菜,控制其他种植条件完全相同。40 d后采集2地块上长势优良的整株青菜以及根系周围土壤各10份。

### 1.2 样品采集和预处理

剔除新鲜土壤中的细小根系物及石块,过孔径  $2 \text{ mm}$  不锈钢筛。部分样品放到冰箱中保存,部分样品自然风干后用四分法缩分至  $100 \text{ g}$  左右,然后用玛瑙研钵磨细,过孔径  $0.14 \text{ mm}$  不锈钢筛,封存、备用。

青菜样采回实验室后立即用自来水反复冲洗,再用去离子水冲洗  $3 \sim 5$  遍,吸去水分晾干,尽快测量青菜鲜重和根重。将青菜的根、茎、叶分开,沿根轴处将根和茎剪开,于鼓风干燥箱中  $90 \sim 95 \text{ }^\circ\text{C}$  杀青  $30 \text{ min}$ ,在  $65 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$  下烘干,研磨、过孔径  $0.14 \text{ mm}$  不锈钢筛,封存、备用。

### 1.3 测试方法及数据处理

土壤水分和土壤烧失量采用土壤重量差减法测定。称取  $10 \text{ g}$  新鲜土壤放置于瓷坩埚中,在  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  烘箱中烘至恒重,称重后继续于  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  的马弗炉灼烧  $8 \text{ h}$ ,再称重,分别计算2次土壤质量之差。土壤有机质采用重铬酸钾氧化-稀释热法测定<sup>[8]</sup>。土壤 pH 采用 pH 计测定, $m(\text{土}) : V(\text{水}) = 1 : 2.5$ 。

土壤中重金属形态分析采用 BCR(欧共体参比司)推荐的3步连续提取程序:以  $0.11 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  醋酸、 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  盐酸羟胺(pH 2)和  $8.8 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  双氧水酸(pH 2~3)分别提取酸可提取态(BCR<sub>1</sub>)、铁锰氧化物结合态(BCR<sub>2</sub>)和有机结合态(BCR<sub>3</sub>)<sup>[9]</sup> 重金属。选取10%样品作平行试验,结果表明,该方法稳定性及重现性好,提取精度较高。土壤和植物样品用  $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{HF-HCl}$  和  $\text{H}_3\text{BO}_3$  混合酸3步

微波消解<sup>[10]</sup>。用火焰原子吸收光谱仪(Solaar M)测定提取液和消解溶液中重金属 Cu、Zn 含量。

样品分析分别采用中国标准物质 GBW07602、GBW07603(灌木枝叶),GBW07429(长江平原区土壤)进行质量控制。经 S-Wilk 检验,各数据组的  $W$  计算值为  $0.720 \sim 0.963$  ( $n=10$ ),符合或近似正态分布<sup>[11]</sup>,数据用 Excel、SPSS 软件处理。

## 2 结果与讨论

### 2.1 覆膜对青菜生长状况的影响

覆膜地块和对照地块中青菜生长状况见表1。由表1可见,覆膜地块中青菜生长情况略好于不覆膜地块,青菜地上部分和根部平均质量较对照分别增加  $21.85\%$  和  $6.02\%$ ,青菜株高较对照增长  $12.97\%$ 。单因素方差分析结果表明,2种地块中青菜生长指标差异均未达到显著性水平。

表1 试验地块中青菜生长状况

Table 1 Growth of Chinese cabbage in mulched and un-mulched fields

栽培方式	统计量	地上部分/ g	根部/ g	株高/ cm
覆膜	最大值	489.0	21.2	68.0
	最小值	66.0	9.6	49.0
	平均值	290.0	14.1	56.6
	标准差	132.0	4.2	6.4
不覆膜	最大值	425.0	22.6	65.0
	最小值	92.0	6.7	34.0
	平均值	238.0	13.3	50.1
	标准差	106.0	4.4	10.7

$n=10$ 。

### 2.2 土壤理化性质

覆膜地块和对照地块土壤的理化性质见表2。由表2可见,覆膜地块的土壤烧失量、pH 值、含水量、 $\text{SO}_4^{2-}$  和有机质分别比不覆膜地块降低  $27.13\%$ 、 $12.77\%$ 、 $2.31\%$ 、 $33.90\%$  和  $0.47\%$ 。单因素方差分析表明,2种地块中土壤 pH 值和  $\text{SO}_4^{2-}$  含量差异均达到显著水平( $P<0.05$ )。

覆膜土壤 pH 值较对照土壤低,但  $\text{SO}_4^{2-}$  含量却减少,说明土壤中硫酸盐并不是控制土壤 pH 的主要因素。供试土壤初始 pH 值为  $4.9$ ,呈强酸性反应,可能是因为土壤长期施用铵态氮肥,由于硝化作用或植物吸收导致了土壤中  $\text{H}^+$  和  $\text{NO}_3^-$  增加<sup>[12]</sup>。土壤 pH 还受土壤微生物活动的影响。覆膜土壤中氧

气含量减少,导致有机物分解不完全,产生了较多有机酸,从而使土壤 pH 值低于不覆膜土壤。土壤中有有机硫只有通过生物氧化转化成 $SO_4^{2-}$ 才能被作物利

用。而硫氧化细菌大多是好氧菌,覆膜阻止了大气中氧气向土壤传输,使土壤中氧气含量减少,导致覆膜地块中 $SO_4^{2-}$ 含量低于不覆膜地块。

表 2 试验地块土壤理化性质

Table 2 Descriptive statistics of soil physicochemical properties

栽培方式	统计量	pH	烧失量/%	含水量/(g · kg <sup>-1</sup> )	有机质/(g · kg <sup>-1</sup> )	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /(mg · kg <sup>-1</sup> )
覆膜	最大值	5.0	6.36	365	23.2	0.018
	最小值	3.4	0.98	266	17.8	0.065
	平均值	4.1	3.25	339	21.1	0.039
	标准差	0.6	2.04	29.5	1.4	0.006
不覆膜	最大值	5.5	7.07	403	24.2	0.021
	最小值	4.1	0.98	305	18.2	0.096
	平均值	4.7	4.46	347	21.2	0.059
	标准差	0.5	2.50	30.3	2.1	0.036

n=10。

### 2.3 土壤中 Cu、Zn 含量及形态分布

基于操作定义的逐级提取技术获得的重金属形态可以很好地反映元素的生物有效性<sup>[13]</sup>,并且残余态重金属在短期内几乎不被植物吸收<sup>[14]</sup>。因此,本研究仅对具有生物有效性或潜在生物有效性的重金属形态进行分析,土壤中 Cu、Zn 各形态含量见图 1。

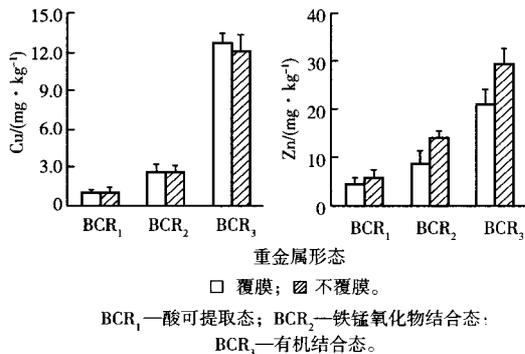


图 1 土壤中 Cu 和 Zn 各形态含量

Fig. 1 Concentrations of various fractions of Cu and Zn in the soil under Chinese cabbage

由图 1 可见,覆膜地块中 Cu 的 3 步提取形态含量与不覆膜地块相比变化较小,覆膜地块中酸可提取态、铁锰氧化物结合态和有机结合态 Cu 分别为 1.01、2.70、12.73 mg · kg<sup>-1</sup>,对照地块为 1.02、2.69、12.06 mg · kg<sup>-1</sup>,分别增减了-0.98%、0.37%和 5.56%。Zn 的形态含量与不覆膜地块相比变化较大,覆膜地块中酸可提取态、铁锰氧化物结合态和

有机结合态 Zn 分别为 4.27、8.77、21.14 mg · kg<sup>-1</sup>,不覆膜地块为 5.76、13.66、29.43 mg · kg<sup>-1</sup>,分别降低了 25.87%、35.80%和 28.17%。单因素方差分析表明,2 种地块土壤中 Cu 各形态含量差异不显著,Zn 各形态含量差异达到显著水平(P<0.05)。

Cu、Zn 各形态含量分配比例见图 2。Cu、Zn 各形态含量分配比例均表现为酸可提取态<铁锰氧化物结合态<有机结合态,Cu 有机结合态所占比例大于 Zn,其余 2 种形态比例则小于 Zn。然而,覆膜种植与不覆膜种植对土壤中 Cu、Zn 各形态间分配比例的影响却极小。结合图 1 中 Cu、Zn 各形态含量看,Cu 具有较高的稳定性;而 Zn 在覆膜栽培下虽然各生物有效态的相对含量没有明显变化,但其绝对含量却同比例减少。由此推测,覆膜栽培使土壤中生物有效态 Zn 含量减少,极可能是 Zn 被活化并由土壤向蔬菜体内转移。

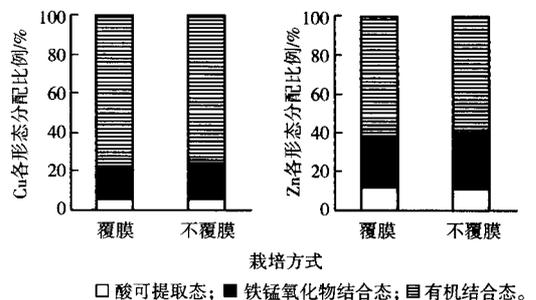


图 2 土壤中 Cu 和 Zn 各形态含量分配比例

Fig. 2 Ratio of various fractions of Cu and Zn in the soils

### 2.4 青菜中 Cu、Zn 含量及其分布

青菜各部分 Cu、Zn 含量见图 3。覆膜地块青菜根、茎、叶中 Cu 平均含量分别为 4.63、6.57、7.84 mg · kg<sup>-1</sup>, 不覆膜地块为 4.32、6.22、8.27 mg · kg<sup>-1</sup>, 覆膜地块青菜根和茎中 Cu 含量比对照略有增加, 叶中略有减少。覆膜地块青菜根、茎、叶中 Zn 平均含量分别为 335.80、51.32、75.31 mg · kg<sup>-1</sup>, 不覆膜地块为 145.40、67.28、66.28 mg · kg<sup>-1</sup>, 覆膜地块青菜根和叶中 Zn 含量高于不覆膜地块, 茎中则低于不覆膜地块, 且根中 Zn 含量差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。本研究中青菜根中 Zn 含量远高于文献 [15] 报道值 50.74 mg · kg<sup>-1</sup>, 叶中含量略高于文献 [15] 报道值 62.21 mg · kg<sup>-1</sup>。Zn 在覆膜栽培青菜中的表现与笔者前面的推测相吻合。

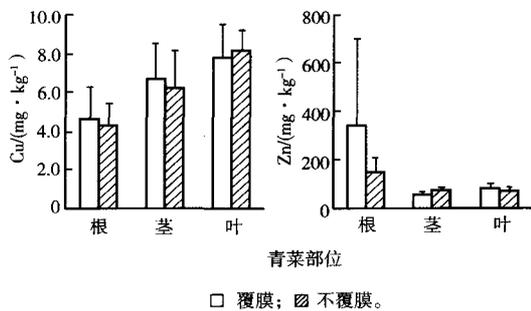


图 3 青菜各部位 Cu 和 Zn 含量  
Fig. 3 Concentrations of Cu and Zn in different parts of Chinese cabbage

覆膜地块和不覆膜地块中, 青菜各部位 Cu 的分配比例非常接近 (图 4), 均表现为叶 > 茎 > 根, 这主要与 Cu 参与了植物光合作用有关。Zn 在青菜各

部位分布特征总体上是根 >> 茎、叶, 但覆膜地块中 Zn 在青菜各部位的分配比例与不覆膜地块差异较大, 根中所占比例显著增加, 茎和叶中所占比例减少。覆膜后青菜根和叶中 Zn 含量分别较不覆膜地块增加 130.9% 和 13.6%, 茎中 Zn 含量减少 23.7%。Zn 在覆膜地块青菜中分布表现为根 > 叶 > 茎。

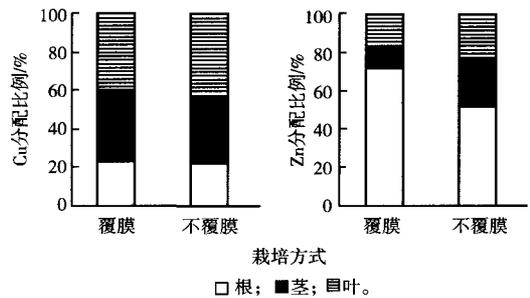


图 4 青菜不同部位 Cu、Zn 含量分配比例  
Fig. 4 Ratios of Cu and Zn in different parts of Chinese cabbage

### 2.5 土壤 pH 值和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量对 Zn 迁移的影响

在覆膜土壤-青菜体系中, 土壤和青菜中 Cu 含量及形态分布与不覆膜体系相比变化不大, 这与 Cu 本身性质较稳定有关。Zn 在覆膜地块土壤中各形态总体分布比例没有改变, 但是含量却显著减少。Zn 对土壤 pH 值相当敏感<sup>[16]</sup>, 其活性随土壤 pH 值下降而增加。由表 2 可知, 覆膜与不覆膜栽培方式中, 土壤 pH 值和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量差异显著。为此, 对土壤 pH 值、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量和 Zn 在土壤-青菜体系中的分布进行相关性分析, 结果见表 3。

表 3 覆膜地块中土壤 pH 值、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 Zn 形态及青菜各部位中含量分布的相关性分析

Table 3 Correlation coefficients between soil pH, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Zn fractions and their concentrations in different parts of Chinese cabbage in mulched field

项目	pH 值	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Zn <sub>根</sub>	Zn <sub>茎</sub>	Zn <sub>叶</sub>	BCR <sub>1</sub>	BCR <sub>2</sub>	BCR <sub>3</sub>
pH 值	1.000							
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.202	1.000						
Zn <sub>根</sub>	-0.636 *	-0.111	1.000					
Zn <sub>茎</sub>	-0.236	0.233	0.092	1.000				
Zn <sub>叶</sub>	0.277	0.008	-0.160	-0.009	1.000			
BCR <sub>1</sub>	0.031	0.147	-0.133	0.472	-0.292	1.000		
BCR <sub>2</sub>	-0.053	0.470 *	-0.141	0.190	-0.267	0.323	1.000	
BCR <sub>3</sub>	0.431	0.323	-0.595 *	0.096	0.306	0.373	0.058	1.000

\* 显著性水平  $\alpha = 0.05$ 。BCR<sub>1</sub>—土壤中酸可提取态 Zn; BCR<sub>2</sub>—土壤中铁锰氧化态 Zn; BCR<sub>3</sub>—土壤有机结合态 Zn。n = 10。

由表 3 可见,覆膜地块中土壤 pH 值与青菜根中 Zn 含量在  $\alpha=0.05$  水平上呈显著负相关,这可能是随着土壤 pH 值降低,酸性增强,土壤中  $H^+$  使处于较松散结合态 Zn 释放,从而被青菜根吸收所致。土壤中  $SO_4^{2-}$  含量与铁锰氧化物结合态 Zn 呈显著正相关,推断二者可能都受土壤中氧气含量的控制。青菜根中 Zn 含量与土壤中有机结合态 Zn 呈显著负相关,可能是有机结合态 Zn 被分解而减少,释放出来的 Zn 大部分被青菜根吸收,致使青菜根中 Zn 含量反而增加。因此覆膜地块中青菜根对 Zn 的吸收量远大于不覆膜地块,这与图 3 得出的结论相一致。

### 3 结论

(1) 覆膜地块中土壤烧失量、pH 值、含水量和  $SO_4^{2-}$  含量分别比不覆膜地块降低 27.13%、12.77%、2.31% 和 33.90%,其中土壤 pH 值和  $SO_4^{2-}$  含量差异显著 ( $P<0.05$ )。

(2) 覆膜地块土壤中 3 种生物有效态 Cu 含量及分布比例与不覆膜地块相比变化较小,酸可提取态、铁锰氧化物结合态、有机结合态 Cu 分别增减 -0.98%、0.37% 和 5.56%。覆膜地块青菜根和茎中 Cu 含量略有增加,叶中略有减少;2 种地块青菜各部位 Cu 含量均为叶>茎>根。

(3) 覆膜地块土壤中 3 种生物有效态 Zn 相对比例与不覆膜地块相比无明显变化,但各形态 Zn 含量都低于不覆膜地块,且呈同比例减少,酸可提取态、铁锰氧化物结合态、有机结合态 Zn 分别降低 25.87%、35.80% 和 28.17%。覆膜地块青菜根和叶中 Zn 含量增加,茎中 Zn 含量减少,且根中 Zn 含量较不覆膜地块增加 130.9%,差异达显著水平 ( $\alpha=0.05$ )。2 种地块青菜各部位 Zn 含量均为根>>叶、茎。由此可见,覆膜产生的水热生态效应,促进了生物有效态 Zn 的活化,释放出来的 Zn 则大部分被青菜吸收于根部,对青菜的食用安全性影响不大。

#### 参考文献:

- [1] LOVELLI S, PIZZA S, CAPONIO T, *et al.* Lysimetric Determination of Muskmelon Crop Coefficients Cultivated Under Plastic Mulches [J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 72 (2): 147-159.
- [2] XIE Z K, WANG Y J, LI F M. Effect of Plastic Mulching on Soil Water Use and Spring Wheat Yield in Arid Region of Northwest China [J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 75 (1): 71-83.
- [3] KWABIAH A B. Growth and Yield of Sweet Corn (*Zea mays* L.) Cultivars in Response to Planting Date and Plastic Mulch in a Short-Season Environment [J]. *Scientia Horticulturae*, 2004, 102 (2): 147-166.
- [4] RUMPEL J, GRUDZIEN K. Suitability of Nonwoven Polypropylene for a Flat Covering in Sweet Pepper Cultivation [J]. *Acta Horticulturae*, 1999 (267): 53-58.
- [5] MORENO D A, VÍLLORA G, RUIZ J M, *et al.* Growth Conditions, Elemental Accumulation and Induced Physiological Changes in Chinese Cabbage [J]. *Chemosphere*, 2003, 52 (6): 1031-1040.
- [6] BAGHOUR M, MORENO D A, HERNÁNDEZ J, *et al.* Influence of Root Temperature on Uptake and Accumulation of Ni and Co in Potato [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2002, 159 (10): 1113-1122.
- [7] EBBS S, TALBOTT J, SANKARAN R. Cultivation of Garden Vegetables in Peoria Pool Sediments From the Lllinois River: A Case Study in Trace Element Accumulation and Dietary Exposures [J]. *Environment International*, 2006, 32 (6): 766-774.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30.
- [9] RAURET G, LÓPEZ-SÁNCHEZ J F, SAHUQUILLO A, *et al.* Improvement of the BCR Three Step Sequential Extraction Procedure Prior to the Certification of New Sediment and Soil Reference Materials [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999 (1): 57-61.
- [10] NIEMELÄ M, PERÄMÄKI, PIISPANEN J, *et al.* Determination of Platinum and Rhodium in Dust and Plant Samples Using Microwave-Assisted Sample Digestion and ICP-MS [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2004, 521 (2): 137-142.
- [11] 韩志永. 统计学在理化检验中的应用 第六讲 正态分布及其检验(续) [J]. *理化检验: 化学分册*, 2000, 36 (3): 138-141.
- [12] 古巧珍, 杨学云, 孙本华, 等. 日光温室蔬菜地土壤主要养分含量及其累积特征分析 [J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2008, 36 (3): 129-135.
- [13] MAIZ I, ARAMBARRI I, GARCIA R, *et al.* Evaluation of Heavy Metal Availability in Polluted Soils by Two Sequential Extraction Procedures Using Factor Analysis [J]. *Environmental Pollution*, 2000, 110 (1): 3-9.
- [14] 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.
- [15] 丁爱芳. 南京市城郊零散菜地土壤及青菜中重金属含量特征 [J]. *南京晓庄学院学报*, 2003, 19 (4): 28-31.
- [16] 谢正苗. 土壤中锌的化学平衡 [J]. *环境科学进展*, 1996, 4 (5): 13-30.

作者简介: 李非里 (1973—), 女, 重庆人, 副教授, 博士, 从事环境地球化学方面的研究。E-mail: lifeili@zjut.edu.cn