

# 珠江三角洲污灌区土壤中重金属含量特征

梁国玲, 黄冠星, 孙继朝, 刘景涛, 荆继红, 张玉玺, 陈 玺, 王金翠, 向小平

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061)

**摘 要:**通过现场采样及室内测试方法,分析了珠江三角洲污灌区土壤中9种重金属 Cd、Cu、Zn、Pb、Mn、Ni、As、Cr、Se 的含量分布特征。结果表明,污灌区土壤9种重金属的全量平均含量均已超出广东省土壤背景值,其中 Cd 的污染程度最重,Se 的污染程度最轻;污灌区土壤以 Cd 元素的有效系数最高,Ni 元素的有效系数最低。Zn、Pb、Cu 以及 Cd 元素随采样深度的增加其全量逐渐减少, Cr、Ni、As 以及 Se 元素随采样深度的增加其全量呈上下波动状态或几乎不变,而 Mn 元素则是随采样深度的增加其全量先略有减少而后骤升。Cu、Cd、Zn 等3种元素全量与有效态含量以及这3种元素全量间均呈显著或极显著的正相关关系。

**关键词:**珠江三角洲;污灌区;土壤;重金属;全量

**中图分类号:**X833 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)11-2307-06

## Heavy Metal Content Characteristics of Soil in Sewage Irrigation Area of Pearl River Delta

LIANG Guo-ling, HUANG Guan-xing, SUN Ji-chao, LIU Jing-tao, JING Ji-hong, ZHANG Yu-xi, CHEN Xi, WANG Jin-cui, XIANG Xiao-ping  
(Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China)

**Abstract:** With the rapid industrialization development in recent years, there are many sewage irrigation phenomenons in the Pearl River Delta. It is important to understand the distribution of heavy metals in soil in sewage irrigation area for soil pollution prevention and control planning in Pearl River Delta. The total content and available content of heavy metals (Cd, Cu, Zn, Pb, Mn, Ni, As, Cr and Se) in soil from sewage irrigation area in the Pearl River Delta were analyzed with 32 soil samples. The average content of total content of the nine heavy metals in soil from sewage irrigation area exceeded soil background value of Guangdong Province. Among of the nine heavy metals, Cd had the highest pollution degree, Se had the lowest pollution degree, Cd had the highest valid coefficient, and Ni had the lowest valid coefficient. The total contents of Cd, Cu, Zn and Pb decreased with the sampling depth increasing. The total contents of Ni, As, Cr and Se fluctuated or kept stable with the sampling depth increasing. The total content of Mn decreased firstly, and then rose remarkably with the sampling depth increasing. There was a remarkable or most remarkable positive correlation between total content and available content of Cd, Cu and Zn, and there was a remarkable positive correlation among of the total content of Cd, Cu and Zn, which indicated that the distribution of Cd, Cu, Zn and Pb in soil mainly affected by sewage irrigation.

**Keywords:** Pearl River Delta; sewage irrigation area; soil; heavy metals; total content

随着工业化发展以及城市化进程的加剧,地表水环境污染已成为一个世界性环境污染问题。目前,不少地方存在地表污水,这些污水被用于农业灌溉,导致越来越严重的土壤污染问题,其中重金属污染问题较为突出<sup>[1-3]</sup>。珠江三角洲地区作为我国改革开放的前

沿阵地,其工业化发展及城市化进程更为迅速,已有研究表明珠江三角洲地区部分土壤和蔬菜均已受到重金属污染<sup>[4-5]</sup>。本文选择珠江三角洲典型污灌区作为研究区,在实地取样分析基础上,探讨污灌条件下重金属在土壤中的含量分布特征,为该区水土资源的防治规划提供基础的科学依据。

## 1 研究区概况

研究区位于广东省中南部工业发达区,地形为河网发育的平原区,面积约 4 hm<sup>2</sup>,年平均气温 22.1 ℃,

收稿日期:2009-05-04

基金项目:中国地质科学院水文地质环境地质研究所项目(SK200801)

作者简介:梁国玲(1958—),女,副研究员,数学、水文地质专业,主要从事信息技术研究。

通讯作者:黄冠星 E-mail:huanguanxing2004@126.com



景值,这些地表污水长期灌溉是导致污灌区表层土壤重金属污染的主要原因。

### 3.1.2 底层土壤(30~40 cm)重金属全量特征

污灌区底层土壤样(30~40 cm)与表层(0~10 cm)一一对应。从表 3 可以看出,污灌区底层土壤 Cu 等 9 种重金属的全量平均含量均已超出广东省土壤背景值<sup>[7]</sup>,其中也以 Cd 的污染指数最大,表明污灌区底层土壤受污水灌溉作用明显。底层土壤重金属的污染程度依次为 Cd>Zn>Cu>Pb>Mn>Ni>As>Cr>Se。对比表层土壤重金属全量的平均含量可以看出,底层土壤各重金属元素全量的平均含量均低于表层土壤,

表明污水中的重金属滞留在表层土壤的量要明显多于底层土壤。从各元素的变异系数来看,污灌区底层土壤重金属全量的波动程度以 As 最为强烈,然后依次为 Se>Zn>Mn>Cd>Pb>Cu>Ni>Cr,表层土壤各重金属全量的波动程度显示,表、底层土壤重金属分布差异显著。

### 3.2 土壤重金属有效态含量

土壤中重金属元素的总量称为全量,根据能否被植物所吸收可以把重金属全量分为可给态和不可给态,可给态指能被植物所吸收的部分,又名“有效态”,不可给态是指不能被植物所吸收的部分,又名“固定

表 1 污灌区表层土壤重金属全量

Table 1 Heavy metal total content of topsoil in sewage irrigation area

| 参数                      | Cu    | Zn    | Ni   | Se   | Cr    | Mn      | Cd    | As   | Pb    |
|-------------------------|-------|-------|------|------|-------|---------|-------|------|-------|
| 平均值/mg·kg <sup>-1</sup> | 123.4 | 293.0 | 36.8 | 0.43 | 91.3  | 666.0   | 0.76  | 23.7 | 128.6 |
| 中位值/mg·kg <sup>-1</sup> | 92.3  | 262.1 | 37.4 | 0.44 | 84.1  | 621.5   | 0.67  | 24.1 | 113.9 |
| 最大值/mg·kg <sup>-1</sup> | 374.9 | 585.1 | 39.0 | 0.52 | 177.3 | 1 367.8 | 1.23  | 27.4 | 241.4 |
| 最小值/mg·kg <sup>-1</sup> | 70.8  | 202.1 | 31.4 | 0.37 | 76.1  | 512.2   | 0.55  | 19.8 | 95.6  |
| 标准差/mg·kg <sup>-1</sup> | 82.8  | 96.5  | 2.4  | 0.04 | 25.1  | 212.3   | 0.20  | 2.3  | 39.9  |
| 变异系数/%                  | 67.1  | 32.9  | 6.5  | 9.3  | 27.5  | 31.9    | 26.3  | 9.7  | 31.0  |
| 背景值/mg·kg <sup>-1</sup> | 17.7  | 49.7  | 17.8 | 0.29 | 56.5  | 279     | 0.094 | 13.5 | 35.9  |
| 污染指数                    | 7.0   | 5.9   | 2.1  | 1.5  | 1.6   | 2.4     | 8.1   | 1.8  | 3.6   |

注:变异系数=(标准差/平均值)×100%;背景值为广东省土壤背景值<sup>[7]</sup>;污染指数=平均值/背景值。

表 2 污灌区地表水重金属含量(μg·L<sup>-1</sup>)

Table 2 Heavy metal content of surface water in sewage irrigation area(μg·L<sup>-1</sup>)

| 样品编号       | Cu    | Zn   | Ni   | Se   | Cr   | Mn   | Cd   | As   | Pb    |
|------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| SW01       | 10.7  | 98   | 5.5  | 4.1  | 12.9 | 359  | 0.2  | 8.6  | 4.5   |
| SW02       | 16.1  | 377  | 12.9 | 0.4  | 20.4 | 179  | 1.2  | 3.9  | 91.2  |
| SW03       | 108   | 180  | 8.2  | 6.1  | 24.9 | 548  | 0.7  | 7.6  | 34.5  |
| SW04       | 5.5   | 38   | 10.1 | 0.7  | 13.4 | 116  | 0.1  | 3.5  | 2.9   |
| SW05(工业废水) | 1 040 | 612  | 79.3 | 10.6 | 36.2 | 612  | 12.1 | 18   | 2 250 |
| 背景值        | 5.82  | 7.73 | 7.62 | 0.02 | 11.5 | 44.7 | 0.05 | 0.16 | 0.4   |

注:背景值为珠江三角洲经济区河水中各元素的背景值<sup>[8]</sup>。

表 3 污灌区底层土壤重金属全量

Table 3 Heavy metal total content of subsoil in sewage irrigation area

| 参数                      | Cu   | Zn    | Ni   | Se   | Cr   | Mn   | Cd    | As   | Pb    |
|-------------------------|------|-------|------|------|------|------|-------|------|-------|
| 平均值/mg·kg <sup>-1</sup> | 60.6 | 185.0 | 36.0 | 0.41 | 82.5 | 607  | 0.56  | 21.2 | 96.9  |
| 中位值/mg·kg <sup>-1</sup> | 61.4 | 192.2 | 36.8 | 0.40 | 82.8 | 603  | 0.55  | 22.3 | 100.4 |
| 最大值/mg·kg <sup>-1</sup> | 77.4 | 228.0 | 38.6 | 0.66 | 92.2 | 881  | 0.75  | 28.1 | 119.8 |
| 最小值/mg·kg <sup>-1</sup> | 46.0 | 137.9 | 31.0 | 0.28 | 72.2 | 410  | 0.42  | 11.5 | 77.0  |
| 标准差/mg·kg <sup>-1</sup> | 8.3  | 31.3  | 2.3  | 0.08 | 5.1  | 102  | 0.09  | 4.6  | 13.7  |
| 变异系数/%                  | 13.7 | 16.9  | 6.4  | 19.5 | 6.2  | 16.8 | 16.1  | 21.7 | 14.1  |
| 背景值/mg·kg <sup>-1</sup> | 17.7 | 49.7  | 17.8 | 0.29 | 56.5 | 279  | 0.094 | 13.5 | 35.9  |
| 污染指数                    | 3.4  | 3.7   | 2.0  | 1.4  | 1.5  | 2.2  | 6.0   | 1.6  | 2.7   |

注:变异系数=(标准差/平均值)×100%;背景值为广东省土壤背景值<sup>[7]</sup>;污染指数=平均值/背景值。

态”或“残留态”。土壤中重金属元素的有效态易于迁移、转化,易被植物所吸收进入食物链,易对人体健康造成潜在危害。因此,了解土壤重金属元素的有效态含量及其占全量的比率对于深入了解土壤重金属污染意义重大。

### 3.2.1 表层土壤(0~10 cm)重金属有效态含量特征

从表 4 可以看出,本次所调查的 9 种重金属元素中,污灌区表层土壤以 Cd 元素的有效态所占全量的比率最高,Mn 元素次之,然后依次为 Cu>Pb>Zn>Se>As>Cr>Ni。表明表层土壤 Cd 元素活性较强,易于被植物所吸收,而 Ni 元素活性相对较弱,不易于被植物所吸收。另外,对比表 4 和表 1 的变异系数可以看出,污灌区表层土壤重金属全量的波动程度明显小于有效态含量的波动程度(Mn 除外)。

### 3.2.2 底层土壤(30~40 cm)重金属有效态含量特征

本次所调查的 9 种重金属元素中,污灌区底层土壤也以 Cd 元素的有效态所占全量的比率最高,Pb 元素次之,然后依次为 Cu>Mn>Se>Zn>As>Cr>Ni(表 4),排列顺序与表层略有不同,结果也显示底层土壤 Cd 元素活性相对最强,而 Ni 元素活性相对最弱。对比表、底层各重金属元素的有效系数可以看出,表层土壤重金属元素的有效系数基本上都大于底层土壤各重金属元素的有效系数,仅 Se 和 Pb 元素呈相反规律(Cr 元素持平)。另外,从变异系数来看,污灌区底层土壤重金属全量的波动程度明显小于有效态含量的波动程度(Se 除外),与表层土壤基本一致(Se、Mn

除外)。

### 3.3 重金属的包气带垂向分布

本次仅选择一个代表性点采集包气带垂向系列样(6 组,每 10 cm 一个土样)。结果显示 Zn、Pb、Cu 以及 Cd 元素的分布规律为随包气带深度的增加其全量逐渐减少,Cr、Ni、As 以及 Se 元素的分布规律为随包气带深度的增加其全量呈上下波动状态或几乎不变,而 Mn 元素的分布规律则是随包气带深度的增加其全量先略有减少而后骤升(图 2)。Zn、Pb、Cu 以及 Cd 元素的全量分布规律表明,这 4 种元素受污灌作用明显,污灌通常导致重金属大多滞留表层且随深度增加逐渐减少<sup>[9]</sup>。Cr、Ni、As 以及 Se 等 4 种元素可能受污灌和成土母岩自然成分共同作用所致。而 Mn 元素全量的分布规律可能揭示出 Mn 元素的分布主要受制于成土母岩,即成土母岩含 Mn 量大于污水的 Mn 含量,而 0~40 cm 为耕作层土常受扰动并淋滤,最终导致 0~40 cm 土壤中 Mn 的流失量大于 40 cm 以下土壤中 Mn 的流失量。

对比图 2 和图 3 可以看出,Zn 和 Cu 元素的有效态含量分布与其全量分布规律相似,均为随包气带深度的增加而减少。Cr 元素和 Se 元素的有效态含量分布也与其全量分布规律相似,随包气带深度的增加呈上下波动或几乎不变。而 Mn、As、Pb、Ni、Cd 等 5 种元素的有效态含量分布却与其全量分布规律差异较大,尤其是 As 元素的有效态含量随包气带的分布基本与其全量呈相反分布。

表 4 污灌区表、底层土壤重金属有效态含量

Table 4 Available content of heavy metal of topsoil and subsoil in sewage irrigation area

| 参数                         | Cu   | Zn   | Ni    | Se    | Cr   | Mn    | Cd   | As   | Pb    |
|----------------------------|------|------|-------|-------|------|-------|------|------|-------|
| 表层 平均值/mg·kg <sup>-1</sup> | 13.5 | 11.6 | 0.175 | 0.011 | 0.60 | 109.4 | 0.19 | 0.39 | 7.94  |
| 中位值/mg·kg <sup>-1</sup>    | 8.7  | 9.6  | 0.120 | 0.010 | 0.61 | 104.4 | 0.18 | 0.39 | 5.67  |
| 最大值/mg·kg <sup>-1</sup>    | 47.0 | 41.8 | 0.480 | 0.017 | 1.10 | 176.4 | 0.30 | 0.59 | 20.73 |
| 最小值/mg·kg <sup>-1</sup>    | 7.0  | 4.6  | 0.096 | 0.005 | 0.20 | 59.5  | 0.07 | 0.13 | 3.84  |
| 标准差/mg·kg <sup>-1</sup>    | 10.7 | 9.5  | 0.112 | 0.004 | 0.28 | 29.3  | 0.06 | 0.14 | 5.48  |
| 变异系数/%                     | 79.3 | 81.9 | 64.0  | 36.4  | 46.7 | 26.8  | 31.6 | 35.9 | 69.0  |
| 有效系数/%                     | 10.9 | 4.0  | 0.5   | 2.6   | 0.7  | 16.4  | 25.0 | 1.6  | 6.2   |
| 底层 平均值/mg·kg <sup>-1</sup> | 6.20 | 3.63 | 0.116 | 0.013 | 0.59 | 57.8  | 0.13 | 0.16 | 11.64 |
| 中位值/mg·kg <sup>-1</sup>    | 6.22 | 3.60 | 0.100 | 0.013 | 0.61 | 53.5  | 0.14 | 0.12 | 11.90 |
| 最大值/mg·kg <sup>-1</sup>    | 11.1 | 7.20 | 0.250 | 0.015 | 1.22 | 136   | 0.18 | 0.44 | 18.17 |
| 最小值/mg·kg <sup>-1</sup>    | 2.64 | 1.08 | 0.060 | 0.010 | 0.20 | 18.5  | 0.08 | 0.08 | 3.75  |
| 标准差/mg·kg <sup>-1</sup>    | 1.99 | 1.63 | 0.056 | 0.001 | 0.34 | 30.5  | 0.03 | 0.10 | 4.79  |
| 变异系数/%                     | 32.1 | 44.9 | 48.3  | 7.7   | 57.6 | 52.8  | 23.1 | 62.5 | 41.2  |
| 有效系数/%                     | 10.2 | 2.0  | 0.3   | 3.2   | 0.7  | 9.5   | 23.2 | 0.8  | 12.0  |

注:变异系数=(标准差/平均值)×100%;有效系数=(有效态平均含量/全量平均含量)×100%。

### 3.4 重金属各元素间的关系

#### 3.4.1 重金属元素全量与有效态含量的关系

从表 5 可以看出,污灌区土壤中各重金属元素的全量与有效态含量的关系差异显著。其中,Cu 和 Cd 这 2 种重金属元素全量与有效态含量均呈极显著的正相关关系,其次为 Zn 元素,它在土壤中的全量与其有效态含量呈显著的正相关关系,这可能与上述 3 种重金属元素在土壤中的分布主要受制于污灌作用有关(3.3 节)。其余 5 种重金属元素的全量与其有效态含量的相关关系均不明显,即这 5 种重金属元素全量的增加不一定伴随着有效态含量的增加。

#### 3.4.2 重金属各元素间的相关关系

重金属元素间存在显著的相关性或极显著的相关性,表明这些元素可能是复合污染关系或同源关

系。从表 6 可以看出,Cu、Zn、Cd、Pb 4 种元素的全量之间存在显著或极显著的正相关关系,表明这 4 种元素为复合污染且可能来源相同,结合 3.3 节和 3.4.1 节的推测结果——Cu、Zn、Cd、Pb 这 4 种重金属元素在土壤中的分布主要受制于污灌作用,进一步表明污灌区土壤中 Cu、Zn、Cd、Pb 这 4 种重金属元素主要来自污水灌溉,具有明显的同源关系。此外,Mn 元素与 Cr 元素的全量呈极显著的正相关关系,可能是由于 Mn 元素和 Cr 元素受成土母岩作用的体现。其余重金属元素全量间的相关性均不明显。

## 4 结论

(1)污灌区表层土壤重金属的全量平均含量均已超出广东省土壤背景值 50%以上,其污染程度依次为

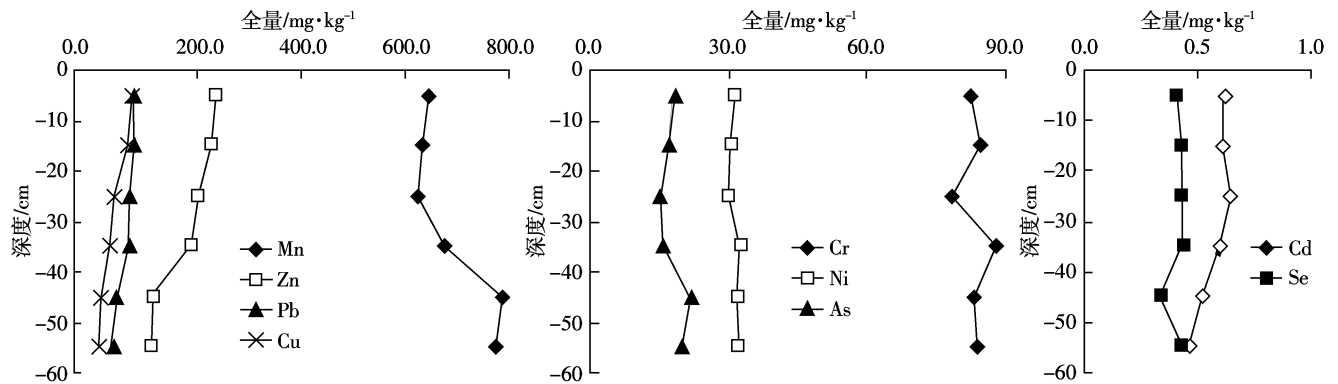


图 2 重金属在污灌区包气带垂向上的全量分布

Figure 2 Total content distribution of heavy metals in unsaturated zone of sewage irrigation area

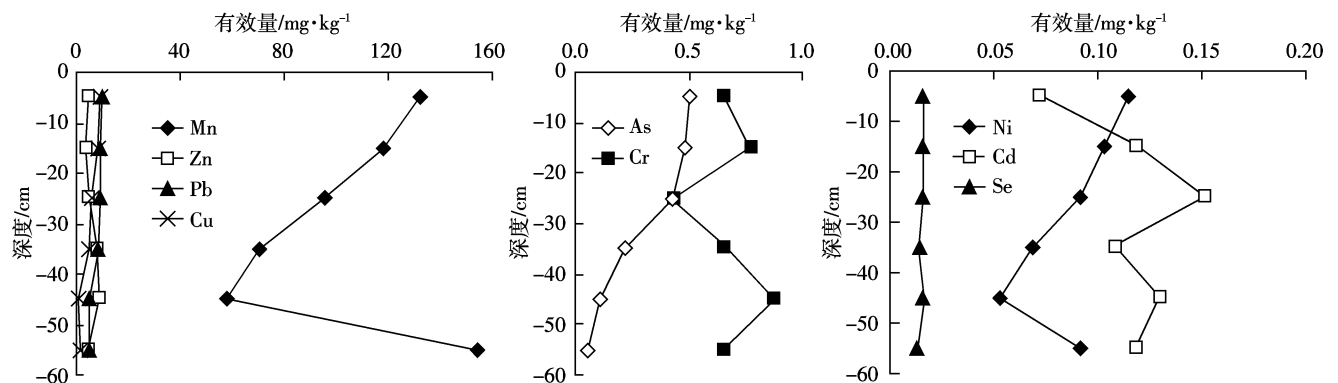


图 3 重金属在污灌区包气带垂向上的有效态含量分布

Figure 3 Available content distribution of heavy metals in unsaturated zone of sewage irrigation area

表 5 重金属各元素的全量及其有效态含量的关系

Table 5 Relationship between total content and available content of heavy metals

| 参数 | Cu                  | Zn                 | Ni    | Se     | Cr     | Mn    | Cd                  | As    | Pb    |
|----|---------------------|--------------------|-------|--------|--------|-------|---------------------|-------|-------|
| R  | 0.984 <sup>▲▲</sup> | 0.648 <sup>▲</sup> | 0.233 | -0.181 | -0.147 | 0.253 | 0.813 <sup>▲▲</sup> | 0.419 | 0.332 |

注:R 为全量与有效态含量的相关系数;▲▲表示显著性水平为 0.01(极显著),▲表示显著性水平为 0.05(显著)。

表 6 重金属各元素全量间的相关系数

Table 6 Correlation coefficients among the total content of heavy metals

| 元素 | Cu                 | Zn                  | Ni     | Se    | Cr                  | Mn     | Cd                  | As    | Pb |
|----|--------------------|---------------------|--------|-------|---------------------|--------|---------------------|-------|----|
| Cu | 1                  |                     |        |       |                     |        |                     |       |    |
| Zn | 0.648 <sup>▲</sup> | 1                   |        |       |                     |        |                     |       |    |
| Ni | 0.007              | -0.186              | 1      |       |                     |        |                     |       |    |
| Se | 0.019              | 0.300               | 0.306  | 1     |                     |        |                     |       |    |
| Cr | 0.059              | 0.183               | 0.193  | 0.172 | 1                   |        |                     |       |    |
| Mn | -0.029             | -0.027              | 0.281  | 0.063 | 0.897 <sup>▲▲</sup> | 1      |                     |       |    |
| Cd | 0.551 <sup>▲</sup> | 0.661 <sup>▲▲</sup> | 0.191  | 0.377 | 0.118               | 0.061  | 1                   |       |    |
| As | 0.044              | 0.305               | 0.206  | 0.306 | 0.172               | 0.313  | 0.481               | 1     |    |
| Pb | 0.609 <sup>▲</sup> | 0.877 <sup>▲▲</sup> | -0.152 | 0.239 | 0.146               | -0.027 | 0.719 <sup>▲▲</sup> | 0.365 | 1  |

注:▲▲表示显著性水平为 0.01(极显著),▲表示显著性水平为 0.05(显著)。

Cd>Cu>Zn>Pb>Mn>Ni>As>Cr>Se。底层土壤重金属的全量平均含量也均已超出广东省土壤背景值,污染程度依次为 Cd>Zn>Cu>Pb>Mn>Ni>As>Cr>Se。

(2)污灌区表层土壤以 Cd 元素的有效态所占全量的比率最高,Mn 元素次之,然后依次为 Cu>Pb>Zn>Se>As>Cr>Ni。底层土壤与表层土壤相似,也以 Cd 元素的有效系数最高,Pb 元素次之,然后依次为 Cu>Mn>Se>Zn>As>Cr>Ni。

(3)Zn、Pb、Cu 以及 Cd 元素的全量随包气带深度的增加而减少,Cr、Ni、As 以及 Se 元素的全量随包气带深度的增加而呈上下波动状态或几乎不变,Mn 元素的全量随包气带深度的增加先略有减少而后骤升。Zn、Cr、Se 以及 Cu 元素的有效态含量分布与其全量分布相似,而 Mn、As、Pb、Ni 以及 Cd 元素的有效态含量分布却与其全量分布差异较大。

(4)Cu、Cd、Zn 元素全量与有效态含量以及这 3 种元素全量间均呈显著或极显著的正相关关系,表明污灌区土壤中 Cu、Cd、Zn 的分布均主要受制于污灌作用。

参考文献:

[1] Abbas S T, Sarfraz M, Mehdi S M, et al. Trace elements accumulation in soil and rice plants irrigated with the contaminated water[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 94(2):503-509.

[2] Kizilonglu F M, Turan M, Sahin U, et al. Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower and red cabbage grown on calcareous soil in Turkey [J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(6):716-724.

[3] ZHANG YL, DAI JL, WANG RQ, et al. Effects of long-term sewage irrigation on agricultural soil microbial structural and functional characteri-

zations in Shandong, China[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2008, 44 (1):84-91.

[4] 柴世伟,温琰茂,韦献革,等.珠江三角洲主要城市郊区农业土壤的重金属含量特征[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2004, 43(4):90-94.

CHAI Shi-wei, WEN Yan-mao, WEI Xian-ge, et al. Heavy metal Content characteristics of agricultural soils in the Pearl River Delta[J]. *Acta Scientia Rum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2004, 43 (4):90-94.

[5] 黄 勇,郭庆荣,任 海,等.珠江三角洲典型地区蔬菜重金属污染现状研究——以中山市和东莞市为例[J]. *生态环境*, 2005, 14(4):559-561.

HUANG Yong, GUO Qing-rong, REN Hai, et al. Investigation of heavy metal pollution in vegetables in the Pearl River Delta:A case study of Zhongshan and Dongguan[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(4):559-561.

[6] 张万儒.森林土壤分析方法(国家标准)[M].北京:中国标准出版社,1999.

[7] 中国环境监测总站.中国土壤元素背景值[M].北京:中国环境科学出版社,1990.

Terminal of Environmental Monitoring of China. Background value of soil element in China[M]. Beijing:China Environmental Science Press, 1990.

[8] 欧阳婷萍,匡耀求,谭建军,等.珠江三角洲经济区河水中微量元素的空间分布[J]. *水文地质工程地质*, 2004 (4):66-69.

OUYANG Ting-ping, KUANG Yao-qiu, TAN Jian-ju, et al. Spatial distribution of trace element in rivers in the Pearl River Delta Economic Zone[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2004 (4):66-69.

[9] 杨 军,郑袁明,陈同斌,等.中水灌溉下重金属在土壤中的垂直迁移及其对地下水的污染风险[J]. *地理研究*, 2006, 25(3):449-456.

YANG Jun, ZHENG Yuan-ming, CHEN Tong-bin, et al. Leaching of heavy metals in soil column under irrigation reclaimed water:a simulation experiment[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(3):449-456.