

# 煤矸石等组成的无土栽培基质重金属污染及蔬菜安全评价

童贯和, 王顺昌, 刘天骄, 罗 勋

(淮南师范学院生命科学系, 安徽 淮南 232001)

**摘 要:**利用煤矸石、油菜秸秆等废弃资源为原料,按(煤矸石:腐熟秸秆)体积比为 2:8、3:7、4:6、5:5 和 6:4 的比例配制成 5 种混合基质,在人工光照室内以盆栽的方法栽培白菜、生菜、苋菜、菠菜、茄子、番茄、辣椒和萝卜 8 种蔬菜,采用尼梅罗综合污染指数和 Hakanson 潜在生态风险指数法对 5 种混合基质以及其上生长的 8 种蔬菜的重金属污染和潜在生态风险进行了综合评价。结果表明,5 种混合基质中,煤矸石含量较少的 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 基质的重金属污染程度较小,潜在生态风险程度较低,在这 3 种基质上栽种的蔬菜重金属综合污染评价等级为优良或安全,符合蔬菜绿色食品标准。重金属对混合基质产生的污染中,Cd 和 Hg 是主要的重金属污染及潜在生态风险因子,其他重金属的污染能力较小。另外,在评价由煤矸石为无机原料组成的有机生态型无土栽培基质的重金属污染及潜在生态风险时,应选择国家土壤环境质量一级标准作为参比值,且煤矸石在混合基质中所占的体积比一般不应超过 1/2。

**关键词:**煤矸石;油菜秸秆;无土栽培基质;重金属污染;潜在生态风险

中图分类号:X825 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2010)11-2064-07

## Evaluation on Heavy Metal Contamination and Vegetable Security in Soilless Culture Medium Containing Coal Gangue

TONG Guan-he, WANG Shun-chang, LIU Tian-jiao, LUO Xun

(Life Science Department, Huainan Teachers College, Huainan 232001, China)

**Abstract:** Five types of soilless culture mediums, containing coal gangue and rape stalk with the volume ratios of 2:8, 3:7, 4:6, 5:5 and 6:4, respectively, were prepared for vegetable cultivation. On such mediums, 8 species of vegetable crops, *Brassica chinensis* L., *Lactuca sativa*, *Amarantus mangostanus* L., *Spinacia oleracea* L., *Solanum melongena*, *Lycopersicon esculentum*, *Capsicum frutescens* L., *Raphanus sativus* L., were cultivated in the pot in the biotron. The state of heavy metals contamination and the potential ecological risks in the cultivation systems were assessed using single factor contaminant indexes, nemerow pollution indexes and hakanson indexes, respectively. The results showed that 3 of the 5 types of mediums, containing less coal gangue, named T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, exhibited low levels of heavy metal contamination and less potential ecological risks. All of the 8 species of vegetable crops cultivated on these 3 types of mediums were evaluated as quality or safe for heavy metals contamination assessments, and meet the standards for green food vegetables. However, the mediums of T<sub>4</sub> and T<sub>5</sub>, with slightly elevated levels of heavy metals contamination, exhibited relatively high potential of ecological risks. The 8 species of vegetable crops cultivated on these mediums were evaluated as safe or lightly heavy metals contamination. The main heavy metals contaminants in the compound mediums were Cd and Hg, which contribute to 35.64%~36.50% and 51.78%~42.94% to the *RI* according to the national soil environment first-level quality standards. So, Cd and Hg were the major pollutants and potential ecological risk factors in the mediums, while other heavy metals had relatively low levels of pollution capabilities. Additionally, the national soil environment first-level quality standards should be adopted as the control in evaluation the overall heavy metals contamination and potential ecological risks of soilless culture with coal gangue as inorganic constituents, and the volume ratios of coal gangue in the compound mediums should be less than half of the total volumes.

**Keywords:** coal gangue; rape stalk; soilless culture medium; heavy metals contamination; potential ecological risk

煤矸石是我国排放量最大的工业固体废弃物,据不完全统计,我国每年排放煤矸石约 1.5~2.0 亿 t,历年堆积量达 35~40 亿 t,占地面积约 22~30 万  $\text{hm}^2$ 。煤矸石的堆积不但占用了大量土地,破坏了矿区的自然景观,而且由于不合理的排放工艺,矸石山自燃释放出大量粉尘及  $\text{CO}$ 、 $\text{SO}_2$ 、氮氧化物等有毒有害气体,严重污染着矿区的大气环境<sup>[1]</sup>。目前我国煤矸石的综合利用率不到 30%。因此,如何对煤矸石进行充分合理的利用,使其变废为宝,对于减小矿地矛盾,改善矿区生态环境,具有十分重要的意义。

在绿色食品成为消费需求的今天,蔬菜有机生态型无土栽培技术在国内已经广为应用<sup>[2-4]</sup>,有机生态型无土栽培基质多采用泥炭、商品有机基质或自配有机基质,目前应用较广的为自配有机基质<sup>[3]</sup>。自配有机基质是由有机、无机原料两部分构成的混合基质,有机原料一般为农作物秸秆、农产品加工后的废弃物等,无机原料种类较多,如珍珠岩、蛭石、炉渣、河沙等。无机原料的加入,不仅为栽培植物提供了矿质营养,也可调整栽培基质的物理性能,起到进一步固定植物的作用。煤矸石是煤炭开采和洗选过程的产物,矸石中除了含有丰富的钾外,还含有一定量的氮和磷,同时煤矸石还具有吸热、贮热和较耐风化的特点<sup>[5]</sup>。若用煤矸石为无机原料配制混合基质,将能更好地促进栽培植物的生长发育,促进作物高产、稳产。

然而,煤矸石中含有一些微量有害重金属元素(如  $\text{Cr}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{Cd}$ 、 $\text{As}$ 、 $\text{Hg}$  等),这些元素一旦污染环境,可被植物吸收,并通过食物链的放大作用,危害到人类健康。有学者对我国不同地区煤矸石重金属元素进行的研究表明<sup>[6]</sup>,煤矸石中这些有害重金属元素含量具有地域差别,不同矿区矸石中同种元素含量差别较大,但大多数矸石中重金属元素含量超标并不严重,一般只有 1 种或 2 种元素达到污染标准(土壤环境质量 2 级或 3 级标准),而其他元素含量则低于标准,如辽宁抚顺产出的矸石  $\text{Cd}$ 、 $\text{Ni}$  超标<sup>[7]</sup>,河南焦作矸石  $\text{Zn}$ 、 $\text{Mn}$  超标<sup>[8]</sup>,安徽淮南矸石  $\text{Cd}$ 、 $\text{Cu}$  超标<sup>[9]</sup>等。从我国煤矸石微量重金属的总体超标率和超标百分率来看, $\text{Hg}$ 、 $\text{As}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{Cd}$  超标较严重, $\text{Cu}$  微量超标, $\text{Cr}$ 、 $\text{Pb}$  达标。但总的来说,大多数矿区煤矸石不属于有毒、有害固体废弃物,许多矿区煤矸石甚至达到无公害蔬菜的土壤质量标准<sup>[6]</sup>。所以,煤矸石能否用作无机原料配制混合基质,关键在于矸石中所含的有害重金属元素是否会造成基质的重金属污染。本研究以煤矸石、油菜秸秆和猪粪等废弃资源为原料,配制有机生态型无

土栽培基质,并在该基质上种植白菜 (*Brassica chinensis* L.)、生菜 (*Lactuca sativa*)、苋菜 (*Amarantus mangostanus* L.)、菠菜 (*Spinacia oleracea* L.)、茄子 (*Solanum melongena*)、番茄 (*Lycopersicon esculentum*)、辣椒 (*Capsicum frutescens* L.) 和萝卜 (*Raphanus sativus* L.) 8 种蔬菜,采用尼梅罗 (N.L.Neiow) 综合污染指数法和 Hakanson 潜在生态风险指数法,对由煤矸石为原料组成的混合基质的重金属污染和潜在生态风险以及在其上栽培的蔬菜安全进行综合评价,判断该有机生态型无土栽培基质的应用可能性及安全性,以期为煤矸石的综合利用寻找一条新的途径。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

煤矸石采自淮南市大通矿区,经人工破碎成 1~10 mm 的不同粒径。油菜秸秆取自淮南市三河乡曹庵镇第二村民组当年秸秆,风干后分别粉碎至 1~5 cm,添加 15% (质量分数) 消毒猪粪(取自淮南市曹庵农业综合开发公司养猪场)与 1% (质量分数) 尿素,含水量为 60% 左右,进行高温静态堆制,以塑料薄膜密闭。通过翻堆补充水分与氧气,第 1 次翻堆于堆制后第 4 d 进行,然后每 7 d 进行 1 次(共 5 次)翻堆,再每 15 d 进行 1 次(共 2 次)翻堆,后期保持自然状态,堆制腐熟结束后风干。主要原料重金属含量见表 1。

表 1 主要原料重金属含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Table 1 The heavy metal content of major constituents( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

| 项目   | Cr    | Cu     | Pb    | Zn     | Cd    | As    | Hg    |
|------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 煤矸石  | 78.54 | 51.35  | 56.67 | 115.13 | 0.234 | 3.87  | 0.129 |
| 油菜秸秆 | 12.04 | 11.76  | 9.54  | 21.38  | 0.057 | 2.51  | 0.106 |
| 猪粪   | 31.41 | 331.62 | 15.85 | 355.19 | 1.025 | 12.64 | 0.727 |

供试作物:白菜、生菜、苋菜、菠菜、茄子、番茄、辣椒和萝卜 8 种蔬菜种子由淮南市种子公司提供。

### 1.2 试验设计

本试验共设 5 个处理,以煤矸石和腐熟的油菜秸秆为原料,按下列腐熟秸秆:矸石(体积比)配制混合基质:( $T_1$ )8:2, ( $T_2$ )7:3, ( $T_3$ )6:4, ( $T_4$ )5:5, ( $T_5$ )4:6。盆栽试验于 2009 年 5 月初开始至 2010 年 2 月底结束,试验在淮南师范学院生命科学系实验中心栽培室中进行,将 8 种蔬菜分别种植在 5 种混合基质上,采用完全随机区组设计,每种处理 4 次重复。

### 1.3 测定方法

分别取煤矸石、5 种混合基质样品,用玛瑙球磨

机研磨后过 100 目尼龙筛,于烘箱内 80 ℃烘干,采用 HCl-HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub> 全分解法消煮,同时做平行全空白样。蔬菜长至可食用时取其可食用部分,将新鲜蔬菜用自来水冲洗 3 遍,再用去离子水冲洗 2 遍,晾干后于烘箱内 75 ℃烘干,用玛瑙研钵磨碎,过 100 目尼龙筛。蔬菜、油菜秸秆和猪粪采用 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> 法消煮,每 10 个样品做 1 个平行全空白样。

用原子吸收分光光度计(美国 PE 公司生产,PE—5000)测定 Cd 和 Pb(石墨炉原子吸收分光光度法,GB/T 17171—1997)、Cr(火焰原子吸收分光光度法,GB/T 17137—1997)、Cu 和 Zn(火焰原子吸收分光光度法,GB/T 17138—1997)含量,用原子荧光光谱仪(北京海光仪器公司生产,AFS—1201)测定 Hg(NY/T 1121.10—2006)和 As(NY/T 1121.11—2006)含量。分析过程中加入植物标准样品(GBW08513)进行蔬菜质量分析控制。分析过程所用试剂均为优级纯,所用水均为超纯水(亚沸水)。

由于混合基质既不同于土壤,也不同于岩石,更不同于植物,无法找到国际或国家标准参考样进行分析质量控制,本试验对 T<sub>3</sub> 处理的混合基质进行加标连续 10 次测定试验,通过计算试验加标回收率评价分析的精密度和准确度。结果见表 2。

表 2 精密度和准确度结果

Table 2 Precision and recovery experiment

| 项目 | 样品中含量/<br>mg·kg <sup>-1</sup> | 加入量/<br>mg·kg <sup>-1</sup> | 测得值/<br>mg·kg <sup>-1</sup> | 相对标准<br>偏差/% | 回收率/<br>% |
|----|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------|-----------|
| Cr | 53.57                         | 50                          | 104.18                      | 1.26         | 100.59    |
| Cu | 31.02                         | 20                          | 46.84                       | 2.74         | 91.81     |
| Pb | 30.95                         | 20                          | 50.20                       | 2.08         | 98.53     |
| Zn | 77.99                         | 50                          | 115.75                      | 2.81         | 90.44     |
| Cd | 0.168                         | 0.1                         | 0.292                       | 3.46         | 108.96    |
| As | 2.87                          | 2                           | 4.93                        | 1.75         | 101.23    |
| Hg | 0.111                         | 0.1                         | 0.207                       | 2.09         | 98.10     |

表 2 中样品加标回收率均在 90.44%~108.96%,相对标准偏差小于 3.46%,表明样品的测定结果具有较高的准确度和精密度,数据可靠。

1.4 评价标准

(1)综合污染指数

计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i \quad P = [(P_{imax}^2 + P_{iave}^2)/2]^{1/2}$$

式中: $P_i$  为  $i$  污染物的污染指数; $C_i$  为  $i$  污染物的实测值; $S_i$  为  $i$  污染物的参比值; $P$  为综合污染指数; $P_{imax}$  为最大单项污染指数; $P_{iave}$  为平均单项污染指数。根

据  $P_i$  和  $P$  值变幅,划分 5 个污染等级:Ⅰ优良级, $P$ (或  $P_i$ ) $\leq 0.7$ ;Ⅱ安全(警戒)级, $0.7 < P$ (或  $P_i$ ) $\leq 1.0$ ;Ⅲ轻度污染级, $1.0 < P$ (或  $P_i$ ) $\leq 2.0$ ;Ⅳ中度污染级, $2.0 < P$ (或  $P_i$ ) $\leq 3.0$ ;Ⅴ重度污染级, $P$ (或  $P_i$ ) $> 3.0$ 。

(2)潜在生态风险指数

计算公式为:

$$E_i^j = T_i^j \cdot C_j^i = T_i^j \cdot C_j^i / S_i \quad RI = \sum E_i^j$$

式中: $E_i^j$  为潜在生态风险单项系数( $E_i^j < 40$  为轻微潜在生态风险, $40 \leq E_i^j < 80$  为中等潜在生态风险, $80 \leq E_i^j < 160$  为强潜在生态风险, $160 \leq E_i^j < 320$  为很强潜在生态风险, $E_i^j \geq 320$  为极强潜在生态风险); $T_i^j$  为某一重金属的毒性响应系数,Hakanson<sup>[10]</sup>给出的 7 种重金属的毒性响应系数为  $Zn = 1 < Cr = 2 < Cu = Pb = 5 < As = 10 < Cd = 30 < Hg = 40$ ;  $C_j^i$  (即  $P_i$ ) 为单项污染系数; $RI$  为潜在生态风险指数( $RI < 150$  为轻微潜在生态风险, $150 \leq RI < 300$  为中等潜在生态风险, $300 \leq RI < 600$  为强潜在生态风险, $RI \geq 600$  为很强潜在生态风险)。

1.5 数据处理

采用 SPSS 和 Microsoft Excel(Office XP)统计软件分析。

2 结果与分析

2.1 混合基质的重金属含量

5 种混合基质的重金属含量见表 3。从 T<sub>1</sub> 至 T<sub>5</sub>,随着煤矸石含量的增加,7 种重金属元素含量逐渐增加。但各元素增幅不同,7 种重金属元素增幅依次为  $Cr(194.78\%) > Cu(191.55\%) > Pb(179.12\%) > Zn(110.79\%) > Cd(53.38\%) > Hg(23.85\%) > As(23.23\%)$ 。与淮南土壤背景值相比,5 种混合基质的 Cd 和 Hg 均超标,Cu 和 Pb 在 T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub> 和 T<sub>5</sub> 中超标,Zn 在 T<sub>4</sub> 和 T<sub>5</sub> 中、Cr 在 T<sub>5</sub> 中

表 3 5 种混合基质的重金属含量

Table 3 The heavy metal content in the 5 types of mixed substrates

| 项目                       | 重金属含量/mg·kg <sup>-1</sup> |       |       |        |       |       |       |
|--------------------------|---------------------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
|                          | Cr                        | Cu    | Pb    | Zn     | Cd    | As    | Hg    |
| T <sub>1</sub>           | 23.56                     | 14.09 | 16.91 | 46.88  | 0.133 | 2.54  | 0.109 |
| T <sub>2</sub>           | 39.78                     | 23.67 | 22.58 | 62.27  | 0.150 | 2.65  | 0.111 |
| T <sub>3</sub>           | 53.57                     | 31.02 | 30.95 | 77.99  | 0.168 | 2.87  | 0.111 |
| T <sub>4</sub>           | 62.13                     | 35.75 | 38.22 | 90.46  | 0.191 | 3.01  | 0.126 |
| T <sub>5</sub>           | 69.45                     | 41.08 | 47.20 | 98.82  | 0.204 | 3.13  | 0.135 |
| 淮南土壤背景值 <sup>(1)</sup>   | 64.93                     | 24.16 | 30.47 | 80.81  | 0.061 | 16.87 | 0.041 |
| 土壤环境标准 <sup>(2)</sup> —级 | 90.00                     | 35.00 | 35.00 | 100.00 | 0.200 | 15.00 | 0.150 |

注:(1)数据为安徽省环境监测中心站(1992)发布,引自刘慧力等<sup>[17]</sup>;(2)数据参照土壤环境质量标准(GB 15618—1995)。

超标。与土壤环境质量一级标准相比,Cu 和 Pb 在  $T_4$  和  $T_5$  中超标,Cd 在  $T_5$  中超标。

## 2.2 混合基质重金属污染评价

本研究选择以淮南土壤背景值和土壤环境质量一级标准值(GB 15618—1995)为参比,对混合基质的重金属污染指数及潜在生态风险指数进行了计算。

5 种混合基质的重金属单因子污染指数和综合污染指数见表 4。除 As 外,以淮南土壤背景值为参比的  $P_{i1}$  和  $P_1$  均高于以土壤环境质量一级标准值为参比的  $P_{i2}$  和  $P_2$ 。5 种混合基质若以淮南土壤背景值为参比, $P_1$ (2.01~2.67)评价为中度污染,其中 Cd 和 Hg 贡献最大,其他重金属污染贡献较小;5 种混合基质若以土壤环境质量一级标准值为参比, $P_2$ (0.61~1.15)评价为优良、安全或轻度污染,其中 Pb、Cu 和 Cd 对污染贡献较大,其他元素贡献较小。但无论是以淮南土壤背景值还是以土壤环境质量一级标准值为参比, $T_5$  处理的混合基质均达到了轻度以上的污染程度,已不符合绿色蔬菜栽培要求。

## 2.3 混合基质潜在生态风险评价

5 种混合基质重金属污染潜在生态单项系数( $E_i^i$ )和潜在生态风险指数(RI)见表 5。以淮南土壤背景值为参比的  $RI_1$  值(180.30~253.31)较大,生态风险等级评价为中等程度,均不符合绿色蔬菜栽种条件,其中

Cd 和 Hg 贡献最大,Cd 和 Hg 的  $E_{i1}^i$  值分别为 65.4~100.2 和 106.4~131.6,风险等级达到中等或强的程度,但其他重金属元素对生态风险贡献较小。而以土壤环境质量一级标准值为参比的  $RI_2$  值(<83.83)较小,生态风险等级评价为轻微程度,7 种金属元素的  $E_{i2}^i$  值也都较低(<40),风险等级轻微,表明即使煤矸石含量较高的  $T_5$  处理,其生态风险也很低,完全满足绿色蔬菜的栽培要求。

## 2.4 8 种蔬菜的重金属含量及其污染评价

测定 8 种蔬菜(4 种叶菜类、3 种茄果类、1 种根茎类)可食用部分重金属含量,并采用单因子污染指数和尼梅罗综合污染指数法对蔬菜重金属污染程度进行了评价(见表 6)。

由表 6 可看出,生长在  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  混合基质上的蔬菜重金属含量较小,综合污染评价为优良或安全,满足绿色食品的无污染、安全、优质、营养型标准;但生长在  $T_4$ 、 $T_5$  上的蔬菜重金属含量稍高,综合污染评价大多数为轻度污染。表明随着煤矸石含量的增加,蔬菜中重金属污染的风险也在加大。由表 6 还可看出,3 种茄果类蔬菜的重金属污染程度比 4 种叶菜类和 1 种根茎类蔬菜的重金属污染程度小,5 种混合基质上生长的茄子和辣椒综合污染评价均为优良或安全,番茄仅有  $T_5$  基质上生长的表现为轻度污染。这一试验

表 4 混合基质重金属的单因子污染指数( $P_i$ )和综合污染指数( $P$ )

Table 4 The  $P_i$  and  $P$  of heavy metals in mixed substrates

| 项目    | Cr       |          | Cu       |          | Pb       |          | Zn       |          | Cd       |          | As       |          | Hg       |          | 综合指标  |       |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|-------|
|       | $P_{i1}$ | $P_{i2}$ | $P_{i1}$ | $P_{i2}$ | $P_{i1}$ | $P_{i2}$ | $P_{i1}$ | $P_{i2}$ | $P_{i1}$ | $P_{i2}$ | $P_{i1}$ | $P_{i2}$ | $P_{i1}$ | $P_{i2}$ | $P_1$ | $P_2$ |
| $T_1$ | 0.36     | 0.26     | 0.58     | 0.40     | 0.56     | 0.48     | 0.58     | 0.47     | 2.18     | 0.67     | 0.15     | 0.17     | 2.66     | 0.73     | 2.01  | 0.61  |
| $T_2$ | 0.61     | 0.44     | 0.98     | 0.68     | 0.74     | 0.65     | 0.77     | 0.62     | 2.46     | 0.75     | 0.16     | 0.18     | 2.71     | 0.74     | 2.10  | 0.67  |
| $T_3$ | 0.83     | 0.60     | 1.28     | 0.89     | 1.02     | 0.88     | 0.97     | 0.78     | 2.75     | 0.84     | 0.17     | 0.19     | 2.71     | 0.74     | 2.15  | 0.80  |
| $T_4$ | 0.96     | 0.69     | 1.48     | 1.02     | 1.25     | 1.09     | 1.12     | 0.91     | 3.13     | 0.96     | 0.18     | 0.20     | 3.07     | 0.84     | 2.49  | 0.96  |
| $T_5$ | 1.07     | 0.77     | 1.70     | 1.17     | 1.55     | 1.35     | 1.22     | 0.99     | 3.34     | 1.02     | 0.19     | 0.21     | 3.29     | 0.90     | 2.67  | 1.15  |

注: $P_{i1}$  为以淮南土壤背景值为参比值, $P_{i2}$  为以国家土壤环境标准一级为参比值。

表 5 混合基质重金属污染潜在生态单项系数( $E_i^i$ )和潜在生态风险指数(RI)

Table 5 The  $E_i^i$  and RI of heavy metal pollution in mixed substrates

| 项目    | Cr         |            | Cu         |            | Pb         |            | Zn         |            | Cd         |            | As         |            | Hg         |            | 综合指标   |        |
|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------|--------|
|       | $E_{i1}^i$ | $E_{i2}^i$ | $E_{i1}^i$ | $E_{i2}^i$ | $E_{i1}^i$ | $E_{i2}^i$ | $E_{i1}^i$ | $E_{i2}^i$ | $E_{i1}^i$ | $E_{i2}^i$ | $E_{i1}^i$ | $E_{i2}^i$ | $E_{i1}^i$ | $E_{i2}^i$ | $RI_1$ | $RI_2$ |
| $T_1$ | 0.72       | 0.52       | 2.90       | 2.00       | 2.80       | 2.40       | 0.58       | 0.47       | 65.4       | 20.1       | 1.50       | 1.70       | 106.4      | 29.2       | 180.30 | 56.39  |
| $T_2$ | 1.22       | 0.88       | 4.90       | 3.40       | 3.70       | 3.25       | 0.77       | 0.62       | 73.8       | 22.5       | 1.60       | 1.80       | 108.4      | 29.6       | 194.39 | 62.05  |
| $T_3$ | 1.66       | 1.20       | 6.40       | 4.45       | 5.10       | 4.40       | 0.97       | 0.78       | 82.5       | 25.2       | 1.70       | 1.90       | 108.4      | 29.6       | 206.73 | 67.53  |
| $T_4$ | 1.92       | 1.38       | 7.40       | 5.10       | 6.25       | 5.45       | 1.12       | 0.91       | 93.9       | 28.8       | 1.80       | 2.00       | 122.8      | 33.6       | 235.19 | 77.24  |
| $T_5$ | 2.14       | 1.54       | 8.50       | 5.85       | 7.75       | 6.75       | 1.22       | 0.99       | 100.2      | 30.6       | 1.90       | 2.10       | 131.6      | 36.0       | 253.31 | 83.83  |

注: $E_{i1}^i$  为以淮南土壤背景值为参比值, $E_{i2}^i$  为以国家土壤环境标准一级为参比值。

表 6 蔬菜重金属含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )及重金属污染指数( $P_V$ )  
Table 6 The heavy metal content( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )and its  $P_V$  in vegetables

| 项目        | Cr             |             | Cu    |             | Pb    |             | Zn    |            | Cd    |             | As    |             | Hg    |             | 综合污染指数 | 污染程度     |
|-----------|----------------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|--------|----------|
|           | 含量             | $P_V$       | 含量    | $P_V$       | 含量    | $P_V$       | 含量    | $P_V$      | 含量    | $P_V$       | 含量    | $P_V$       | 含量    | $P_V$       |        |          |
| 白菜        | T <sub>1</sub> | 0.209±0.013 | 0.418 | 0.366±0.011 | 0.037 | 0.114±0.008 | 0.570 | 5.88±0.27  | 0.294 | 0.022±0.004 | 0.440 | 0.098±0.010 | 0.196 | 0.002±0.001 | 0.200  | 0.458 优良 |
|           | T <sub>2</sub> | 0.270±0.012 | 0.540 | 0.405±0.023 | 0.041 | 0.186±0.007 | 0.930 | 9.53±0.54  | 0.477 | 0.025±0.008 | 0.500 | 0.114±0.012 | 0.228 | 0.003±0.001 | 0.300  | 0.725 安全 |
|           | T <sub>3</sub> | 0.387±0.015 | 0.774 | 0.498±0.021 | 0.050 | 0.211±0.005 | 1.055 | 13.21±0.86 | 0.661 | 0.030±0.008 | 0.600 | 0.127±0.014 | 0.254 | 0.003±0.002 | 0.300  | 0.834 安全 |
|           | T <sub>4</sub> | 0.461±0.029 | 0.922 | 0.574±0.036 | 0.057 | 0.254±0.017 | 1.270 | 20.01±1.25 | 1.001 | 0.039±0.010 | 0.780 | 0.149±0.034 | 0.298 | 0.004±0.000 | 0.400  | 1.017 轻度 |
|           | T <sub>5</sub> | 0.514±0.043 | 1.028 | 0.632±0.066 | 0.063 | 0.301±0.024 | 1.505 | 23.34±1.27 | 1.167 | 0.045±0.019 | 0.900 | 0.152±0.029 | 0.304 | 0.005±0.003 | 0.500  | 1.199 轻度 |
| 生菜        | T <sub>1</sub> | 0.201±0.010 | 0.402 | 0.508±0.058 | 0.051 | 0.187±0.006 | 0.935 | 3.99±0.25  | 0.200 | 0.024±0.006 | 0.480 | 0.094±0.011 | 0.188 | 0.001±0.000 | 0.100  | 0.703 安全 |
|           | T <sub>2</sub> | 0.289±0.014 | 0.578 | 0.598±0.049 | 0.060 | 0.204±0.004 | 1.020 | 7.69±0.38  | 0.385 | 0.029±0.007 | 0.580 | 0.116±0.012 | 0.232 | 0.001±0.001 | 0.100  | 0.780 安全 |
|           | T <sub>3</sub> | 0.382±0.017 | 0.764 | 0.690±0.081 | 0.069 | 0.239±0.002 | 1.195 | 12.71±0.44 | 0.636 | 0.036±0.003 | 0.720 | 0.128±0.018 | 0.256 | 0.001±0.001 | 0.100  | 0.926 安全 |
|           | T <sub>4</sub> | 0.434±0.036 | 0.868 | 0.767±0.032 | 0.077 | 0.287±0.030 | 1.435 | 18.44±1.02 | 0.922 | 0.041±0.015 | 0.820 | 0.144±0.022 | 0.288 | 0.002±0.001 | 0.200  | 1.116 轻度 |
|           | T <sub>5</sub> | 0.485±0.028 | 0.970 | 0.841±0.091 | 0.084 | 0.334±0.027 | 1.670 | 21.15±1.72 | 1.058 | 0.048±0.025 | 0.960 | 0.150±0.026 | 0.300 | 0.003±0.001 | 0.300  | 1.298 轻度 |
| 苋菜        | T <sub>1</sub> | 0.192±0.011 | 0.384 | 0.447±0.042 | 0.045 | 0.157±0.003 | 0.785 | 4.76±0.31  | 0.238 | 0.028±0.007 | 0.560 | 0.105±0.009 | 0.210 | 0.002±0.000 | 0.200  | 0.607 优良 |
|           | T <sub>2</sub> | 0.278±0.018 | 0.556 | 0.531±0.045 | 0.053 | 0.195±0.001 | 0.975 | 7.43±0.48  | 0.372 | 0.035±0.006 | 0.700 | 0.121±0.008 | 0.242 | 0.003±0.001 | 0.300  | 0.761 安全 |
|           | T <sub>3</sub> | 0.362±0.020 | 0.724 | 0.600±0.054 | 0.060 | 0.241±0.008 | 1.205 | 11.27±0.74 | 0.564 | 0.044±0.002 | 0.880 | 0.139±0.013 | 0.278 | 0.004±0.001 | 0.400  | 0.948 安全 |
|           | T <sub>4</sub> | 0.460±0.037 | 0.920 | 0.669±0.053 | 0.067 | 0.298±0.007 | 1.490 | 18.95±0.89 | 0.948 | 0.050±0.004 | 1.000 | 0.153±0.015 | 0.306 | 0.005±0.002 | 0.500  | 1.179 轻度 |
|           | T <sub>5</sub> | 0.487±0.033 | 0.974 | 0.724±0.073 | 0.072 | 0.343±0.009 | 1.715 | 20.58±1.54 | 1.029 | 0.058±0.011 | 1.160 | 0.166±0.027 | 0.332 | 0.006±0.003 | 0.600  | 1.351 轻度 |
| 菠菜        | T <sub>1</sub> | 0.199±0.016 | 0.398 | 0.612±0.080 | 0.061 | 0.147±0.002 | 0.735 | 11.25±0.55 | 0.563 | 0.024±0.005 | 0.480 | 0.085±0.014 | 0.170 | 0.002±0.000 | 0.200  | 0.582 优良 |
|           | T <sub>2</sub> | 0.281±0.023 | 0.562 | 0.773±0.076 | 0.077 | 0.194±0.004 | 0.970 | 15.18±0.23 | 0.759 | 0.033±0.008 | 0.660 | 0.090±0.007 | 0.180 | 0.003±0.001 | 0.300  | 0.772 安全 |
|           | T <sub>3</sub> | 0.375±0.025 | 0.750 | 0.927±0.095 | 0.093 | 0.227±0.005 | 1.135 | 18.05±0.94 | 0.903 | 0.041±0.012 | 0.820 | 0.091±0.010 | 0.182 | 0.003±0.000 | 0.300  | 0.907 安全 |
|           | T <sub>4</sub> | 0.447±0.022 | 0.894 | 1.146±0.051 | 0.115 | 0.283±0.021 | 1.415 | 21.74±1.06 | 1.087 | 0.047±0.012 | 0.940 | 0.107±0.009 | 0.214 | 0.004±0.003 | 0.400  | 1.124 轻度 |
|           | T <sub>5</sub> | 0.492±0.034 | 0.984 | 1.373±0.064 | 0.137 | 0.299±0.019 | 1.495 | 25.61±1.33 | 1.281 | 0.052±0.021 | 1.040 | 0.113±0.018 | 0.226 | 0.004±0.001 | 0.400  | 1.197 轻度 |
| 茄子        | T <sub>1</sub> | 0.042±0.008 | 0.084 | 0.307±0.017 | 0.031 | 0.069±0.004 | 0.345 | 5.88±0.28  | 0.294 | 0.015±0.001 | 0.300 | 0.076±0.005 | 0.152 | 0.003±0.001 | 0.300  | 0.288 优良 |
|           | T <sub>2</sub> | 0.051±0.006 | 0.102 | 0.394±0.022 | 0.039 | 0.103±0.003 | 0.515 | 9.87±0.46  | 0.494 | 0.018±0.001 | 0.360 | 0.089±0.008 | 0.178 | 0.004±0.002 | 0.400  | 0.421 优良 |
|           | T <sub>3</sub> | 0.074±0.003 | 0.148 | 0.465±0.037 | 0.047 | 0.138±0.009 | 0.690 | 14.27±0.96 | 0.714 | 0.024±0.002 | 0.480 | 0.102±0.003 | 0.204 | 0.004±0.001 | 0.400  | 0.573 优良 |
|           | T <sub>4</sub> | 0.097±0.007 | 0.194 | 0.541±0.041 | 0.054 | 0.184±0.006 | 0.920 | 18.99±0.75 | 0.950 | 0.033±0.004 | 0.660 | 0.110±0.007 | 0.220 | 0.006±0.002 | 0.600  | 0.764 安全 |
|           | T <sub>5</sub> | 0.135±0.013 | 0.270 | 0.592±0.034 | 0.059 | 0.215±0.007 | 1.075 | 22.73±1.14 | 1.137 | 0.040±0.004 | 0.800 | 0.125±0.012 | 0.250 | 0.007±0.002 | 0.700  | 0.913 安全 |
| 番茄        | T <sub>1</sub> | 0.088±0.004 | 0.176 | 0.254±0.018 | 0.025 | 0.115±0.002 | 0.575 | 12.07±0.88 | 0.604 | 0.010±0.002 | 0.200 | 0.051±0.004 | 0.102 | 0.004±0.001 | 0.400  | 0.477 优良 |
|           | T <sub>2</sub> | 0.134±0.014 | 0.268 | 0.339±0.024 | 0.034 | 0.170±0.005 | 0.850 | 14.68±0.78 | 0.734 | 0.013±0.005 | 0.260 | 0.061±0.002 | 0.122 | 0.004±0.002 | 0.400  | 0.659 优良 |
|           | T <sub>3</sub> | 0.179±0.015 | 0.358 | 0.436±0.051 | 0.044 | 0.204±0.005 | 1.020 | 19.34±1.07 | 0.967 | 0.017±0.004 | 0.340 | 0.072±0.006 | 0.144 | 0.005±0.001 | 0.500  | 0.798 安全 |
|           | T <sub>4</sub> | 0.227±0.012 | 0.454 | 0.507±0.034 | 0.051 | 0.249±0.006 | 1.245 | 21.85±1.25 | 1.093 | 0.019±0.007 | 0.380 | 0.086±0.007 | 0.172 | 0.007±0.003 | 0.700  | 0.973 安全 |
|           | T <sub>5</sub> | 0.281±0.009 | 0.562 | 0.554±0.045 | 0.055 | 0.277±0.008 | 1.385 | 27.41±1.86 | 1.371 | 0.024±0.006 | 0.480 | 0.088±0.009 | 0.176 | 0.009±0.002 | 0.900  | 1.099 轻度 |
| 辣椒        | T <sub>1</sub> | 0.043±0.002 | 0.086 | 0.489±0.032 | 0.049 | 0.061±0.003 | 0.305 | 4.26±0.31  | 0.213 | 0.011±0.002 | 0.220 | 0.050±0.003 | 0.100 | 0.003±0.001 | 0.300  | 0.251 优良 |
|           | T <sub>2</sub> | 0.062±0.005 | 0.124 | 0.618±0.046 | 0.062 | 0.098±0.005 | 0.490 | 7.64±0.49  | 0.382 | 0.016±0.001 | 0.320 | 0.052±0.002 | 0.104 | 0.004±0.001 | 0.400  | 0.395 优良 |
|           | T <sub>3</sub> | 0.089±0.004 | 0.178 | 0.827±0.069 | 0.083 | 0.124±0.011 | 0.620 | 12.57±0.74 | 0.629 | 0.024±0.006 | 0.480 | 0.061±0.003 | 0.122 | 0.004±0.001 | 0.400  | 0.512 优良 |
|           | T <sub>4</sub> | 0.109±0.008 | 0.218 | 1.365±0.078 | 0.137 | 0.176±0.013 | 0.880 | 17.98±0.98 | 0.899 | 0.031±0.007 | 0.620 | 0.069±0.005 | 0.138 | 0.005±0.002 | 0.500  | 0.722 安全 |
|           | T <sub>5</sub> | 0.156±0.007 | 0.312 | 1.741±0.142 | 0.174 | 0.213±0.016 | 1.065 | 20.72±0.99 | 1.036 | 0.037±0.005 | 0.740 | 0.073±0.007 | 0.146 | 0.006±0.002 | 0.600  | 0.858 安全 |
| 萝卜        | T <sub>1</sub> | 0.195±0.010 | 0.390 | 0.436±0.039 | 0.044 | 0.126±0.018 | 0.360 | 11.67±0.66 | 0.584 | 0.013±0.002 | 0.260 | 0.035±0.004 | 0.070 | 0.005±0.002 | 0.500  | 0.511 优良 |
|           | T <sub>2</sub> | 0.290±0.019 | 0.580 | 0.580±0.045 | 0.058 | 0.174±0.014 | 0.870 | 16.59±0.72 | 0.830 | 0.017±0.002 | 0.340 | 0.044±0.003 | 0.088 | 0.006±0.001 | 0.600  | 0.703 安全 |
|           | T <sub>3</sub> | 0.384±0.027 | 0.768 | 0.866±0.078 | 0.087 | 0.209±0.019 | 1.045 | 20.07±0.81 | 1.004 | 0.022±0.003 | 0.440 | 0.052±0.004 | 0.104 | 0.006±0.002 | 0.600  | 0.844 安全 |
|           | T <sub>4</sub> | 0.461±0.033 | 0.922 | 1.152±0.082 | 0.115 | 0.260±0.022 | 1.300 | 26.18±1.64 | 1.309 | 0.029±0.002 | 0.580 | 0.059±0.004 | 0.118 | 0.007±0.003 | 0.700  | 1.057 轻度 |
|           | T <sub>5</sub> | 0.527±0.047 | 1.054 | 1.443±0.096 | 0.144 | 0.321±0.030 | 1.605 | 34.11±1.70 | 1.706 | 0.036±0.004 | 0.720 | 0.064±0.005 | 0.128 | 0.008±0.004 | 0.800  | 1.357 轻度 |
| 蔬菜重金属限量标准 |                | 0.5         |       | 10          |       | 0.2         |       | 20         |       | 0.05        |       | 0.5         |       | 0.01        |        |          |

注:蔬菜重金属限量标准参照 GB 18406.1—2001、GB 15199—1994(Cu)及 GB 13106—1991(Zn)。

结果与前人的实验结论相一致<sup>[1]</sup>。

### 3 讨论

煤炭开采和加工中产生的煤矸石约占煤炭生产量的 10%。不断拓展煤矸石的利用途径,提高煤矸石的有效利用率,对于节约土地,改善当地环境意义重大。本研究以煤矸石为无机原料,配制有机生态型无土栽培基质栽种蔬菜,并对栽培基质和种植蔬菜的重金属污染及潜在生态风险进行了评价。在评价时,由于选择了淮南土壤背景值和土壤环境质量一级标准 2 种不同的参比值,至使评价结果差异较大(表 4、表 5)。前人在评价环境体系重金属污染及潜在生态风险时,选择的参比值各不相同,没有统一标准。Hakanson<sup>[10]</sup>提出以现代工业化前正常颗粒沉积物中重金属的最高背景值作参比值;国内学者更多的是采用土壤环境质量二级标准作参比<sup>[12-14]</sup>,为了反映特定区域的分异性,也有学者采用区域土壤背景值或部门(专业)土壤质量标准作为比较基准<sup>[5]</sup>。本研究认为,以土壤环境质量一级标准为参比值的评价结果较科学,也更准确。因为土壤环境质量一级标准(GB 15618—1995)主要适用于国家规定的自然保护区(原有背景重金属含量高的除外)、集中生活饮用水源地、蔬菜地、茶园、牧场和其他保护地区的土壤,更能反映绿色蔬菜食品生产基地应选择在无污染和生态条件良好的地区这一较高的环境质量要求(GB/T 1840.1—2001)。此外,本试验种植的 8 种蔬菜的尼梅罗综合污染评价结果(表 6)也表明以土壤环境质量一级标准作参比值的合理性和正确性。

本研究应用尼梅罗综合污染指数和 Hakanson 潜在生态风险指数法评价结果表明,以土壤环境质量一级标准作为参比值的  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$  3 种混合基质的重金属污染程度较低(表 4),潜在生态风险较小(表 5),基本符合《绿色食品产地环境质量标准》(GB/T 1840.1—2001)所规定的环境条件要求。在这 3 种基质上生长的 8 种蔬菜的可食部分重金属综合污染评价(表 6)也证明了这一点。而  $T_4$ 、 $T_5$  混合基质的重金属污染程度有所增加,潜在生态风险程度有所加大,尤其是  $T_5$  混合基质,重金属污染已达轻度以上污染程度(表 4),在这 2 种基质上生长的蔬菜的可食部分重金属综合污染评价(表 6)也达轻度污染或接近轻度污染水平,表明在混合基质中,随着煤矸石所占比重的增加,7 种重金属元素含量也逐渐增加(表 3),混合基质及其种植的蔬菜重金属污染程度加大,潜在生

态风险增强。

本研究还表明,在 5 种混合基质中,Cd 和 Hg 的含量不仅都超过了淮南土壤背景值,而且  $T_5$  混合基质中的 Cd 还超过了土壤环境质量一级标准(表 3)。由于 Cd 和 Hg 的生态毒性很强,Hakanson 给出的毒性响应系数较大,所以它们的潜在生态风险指数( $E^i$ )也比较大(表 5)。由表 5 中的有关数据可计算出各种重金属元素的潜在生态风险分担率<sup>[16]</sup>(基质中某项生态风险指数占各项生态风险指数之和的比例),Cd 和 Hg 的  $E^i_{-1}$  在  $RI_1$  中的分担率分别达到 36.27%~39.56%和 51.95%~59.01%,Cd 和 Hg 的  $E^i_{-2}$  在  $RI_2$  中的分担率也分别达到了 35.64%~36.50%和 42.94%~51.78%。Cd 和 Hg 的分担率之和最高可达 95.28%,最低也有 79.44%。此结论与刘慧力等<sup>[17]</sup>的评价结果相一致。

综上所述,本研究以煤矸石为无机原料,配制有机生态型无土栽培基质栽种蔬菜是可行的,也是安全的。然而,这一结论是以淮南矿区煤矸石为研究对象得出的,在我国不同地区产出的煤矸石中,矿石种类的组成,矸石中重金属的种类及含量均有差别,由于这些差别必然造成由不同产地的煤矸石所组成的混合基质重金属污染和潜在生态风险有所不同。因此,该结论是否也适用于我国其他矿区产出的煤矸石,尚须作进一步的研究。

### 4 结论

(1)在评价混合基质的重金属污染及潜在生态风险时,采用不同背景值作参比评价结果差异较大。因此建议应以土壤环境质量一级标准作为唯一参比值,以便将煤矸石这一新的利用途径向全国其他地方推广应用。

(2)以煤矸石为无机原料配制混合基质时,煤矸石所占的体积比不宜过大。本研究认为,煤矸石所占的体积比一般以不超过 1/2 为宜。

(3)混合基质中的主要重金属污染及潜在生态风险因子是 Cd 和 Hg,其他重金属的污染能力较小。所以在利用煤矸石时,首先应当考虑矸石中的 Cd 和 Hg 是否会对环境带来重金属污染。

### 参考文献:

- [1] 董雪玲, 刘大猛. 煤炭开发中的环境污染及防治措施[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(5): 67-71.
- [2] DONG Xue-ling, LIU Da-meng. Environment pollution during coal de-

- velopment and control measures[J]. *Coal Science and Technology*, 2005, 33(5):67-71.
- [2] 柴伟国, 潘晓利, 杜东方. 利用西湖淤泥进行低成本有机型基质栽培试验[J]. 环境污染与防治, 2003, 25(2):1-3.  
CHAI Wei-guo, PAN Xiao-li, DU Dong-fang. An experiment of the sediment from West Lake as organic substrate for greenhouse culture[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2003, 25(2):1-3.
- [3] 王建湘, 周杰良. 农作物秸秆在有机生态型无土栽培中的应用研究[J]. 北方园艺, 2007(4):7-9.  
WANG Jian-xiang, ZHOU Jie-lian. Applied study of the straws in eco-organic type soilless culture[J]. *Northern Horticulture*, 2007(4):7-9.
- [4] 李胜利, 孙治强. 以农业废弃物为主的复合基质番茄无土栽培研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2008, 43(1):114-118.  
LI Sheng-li, SUN Zhi-qiang. Study on substrates mixed mainly with agricultural wasted staff in soilless culture of tomato [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2008, 43(1):114-118.
- [5] 何俊瑜, 任艳芳, 李亚灵, 等. 利用煤矸石基质进行小白菜无土栽培研究[J]. 北方园艺, 2008(12):35-37.  
HE Jun-yu, REN Yan-fang, LI Ya-ling, et al. Study of the gangue as the substrate of soilless culture in Chinese cabbage[J]. *Northern Horticulture*, 2008(12):35-37.
- [6] 孙长安, 尹忠东, 周心澄. 煤矸石山重金属元素研究进展 [J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(增刊):91-94.  
SUN Chang-an, YIN Zhong-dong, ZHOU Xin-cheng. Reviews of studies on heavy metals in coal gangues[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2006, 4(Suppl):91-94.
- [7] 魏忠义, 陆 亮, 王秋兵. 抚顺西露天矿大型煤矸石山及其周边土壤重金属污染研究[J]. 土壤通报, 2008, 39(4):946-949.  
WEI Zhong-yi, LU Liang, WANG Qiu-bing. Research on the heavy metal contamination of Funshun west coal wastes pile and its adjacent soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(4):946-949.
- [8] 郭慧霞, 杨 建, 王心义, 等. 焦作矿区土壤对煤矸石中污染组分的吸附解吸试验[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1):194-199.  
GUO Hui-xia, YANG Jian, WANG Xin-yi, et al. Adsorption-desorption behaviors of pollutants from coal waste rock on soil in Jiaozuo mine field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1):194-199.
- [9] 白建峰, 崔龙鹏, 黄文辉, 等. 煤矸石释放重金属环境效应研究:淮南煤矿塌陷区水体试验场实例调查[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(4):7-10.  
BAI Jian-feng, CUI Long-peng, HUANG Wen-hui, et al. Environmental impact of heavy metal in coal mining spoils: An investigation on water near waste piles in Huainan gob area, Anhui Province, China[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2004, 32(4):7-10.
- [10] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Res*, 1980, 14(8):975-1001.
- [11] 黄雅琴, 杨在中. 蔬菜对重金属的吸收累积特点[J]. 内蒙古大学学报, 1995, 26(5):608-615.  
HUANG Ya-qin, YANG Zai-zhong. Differences in uptake and cumulation of heavy metal in various vegetables[J]. *Journal of Inner Mongolia University*, 1995, 26(5):608-615.
- [12] 刘洪莲, 李艳慧, 李恋卿, 等. 太湖地区某地农田土壤及农产品中重金属污染及风险评价[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(5):60-63.  
LIU Hong-lian, LI Yan-hui, LI Lian-qing, et al. Pollution and risk evaluation of heavy metals in soil and agro-products from an area in the Taihu Lake region[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006, 6(5):60-63.
- [13] 赵 勇, 李红娟, 孙治强. 郑州农区土壤重金属污染与蔬菜质量相关性探析[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(4):126-130.  
ZHAO Yong, LI Hong-juan, SUN Zhi-qian. Correlation between the heavy metal pollution in soil and quality of vegetable in farming district of Zhengzhou[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(4):126-130.
- [14] 郭朝晖, 肖细元, 陈同斌, 等. 湘江中下游农田土壤和蔬菜的重金属污染[J]. 地理学报, 2008, 63(1):3-11.  
GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, CHEN Tong-bin, et al. Heavy metal pollution of soils and vegetables from midstream and downstream of Xiangjiang River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(1):3-11.
- [15] 赵沁娜, 徐启新, 杨 凯. 潜在生态危害指数法在典型污染行业土壤污染评价中的应用[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2005(1):111-116.  
ZHAO Qin-na, XU Qi-xin, YANG Kai. Application of potential ecological risk index in soil pollution of typical polluting industries[J]. *Journal of East China Normal University(Natural Science)*, 2005(1):111-116.
- [16] 许学宏, 纪从亮. 江苏蔬菜产地土壤重金属污染现状调查与评价[J]. 农村生态环境, 2005, 21(1):35-37.  
XU Xue-hong, JI Cong-liang. Heavy metal pollution survey of vegetable soil in Jiangsu Province and the countermeasures[J]. *Rural Eco-Environment*, 2005, 21(1):35-37.
- [17] 刘慧力, 崔龙鹏. 淮南矿区水体沉积物中金属污染及环境现状评价[J]. 环境科学研究, 2009, 22(5):601-606.  
LIU Hui-li, CUI Long-peng. Assessment of pollution and environmental status of metals in sediments of subsidence-land-water-ponds in Huainan Mining Area[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(5):601-606.