

基于 GIS 技术的荔城平原区耕地土壤重金属污染程度及其风险评价

丛艳静¹, 邢世和², 罗文光²

(1. 包头师范学院资源与环境学院, 内蒙古 包头 014030;
2. 福建农林大学资源与环境学院, 福建 福州 350002)

摘要: 在空间插值基础上, 利用 Hakanson 潜在生态风险指数法, 研究了荔城平原耕地土壤重金属的污染程度及其潜在生态风险。结果表明, 研究区 8 种重金属中汞污染指数最高, 综合污染指数均值为 0.897, 处于警戒线水平, 但总体上较清洁; 在重金属潜在生态危害指数中, 汞危害系数较高, 达到 47.496, 处于中度危害水平, 其余重金属元素的潜在危害系数为 0.362~12.058, 均处于轻度危害水平; 综合潜在风险指数介于 27.742~127.344, 均值为 68.129, 处于轻度危害; 并利用 GIS 软件绘制出污染风险评价分区图。

关键词: 耕地; 重金属污染; 生态风险评价; GIS 技术

中图分类号: X 820.4

文献标识码: A

Heavy metal contamination in farm soils at Licheng Plainarea and its risk assessment based on GIS

CONG Yan-jing¹, XING Shi-he², LUO Wen-guang²

(1. Resource and Environment Department of BaoTou Teachers College, Baotou, Inner Mongolia 014030, China; 2. Resource and Environment Department of Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: The pollution on the farm land in Licheng plain area and its potential ecological risk caused by heavy metal contamination were studied based on the spatial interpolation. The result showed that the single highest pollution index of 8 heavy metals was Hg. The average combined pollution index of heavy metals on the farm land was 0.897, at the warning level. However, the overall soil condition was acceptable. Among the 8 heavy metals, Hg had the greatest index of potential ecological hazard, i.e., 47.496, which was at the medium hazard level. The indices for the other 7 elements ranged from 0.362 to 12.058, at the light hazard level. The combined index of potential pollution risk of heavy metals on the farmland was 27.742 to 127.344, averaging 68.129, which is considered a low hazard. A soil quality classification for the area based on the pollution risk index by the GIS technology was presented.

Key words: crop land; heavy metal pollution; ecological risk assessment; GIS

20世纪60年代以来, 随着世界经济的迅速发展, 环境问题也日益突出, 最初人们只注意环境危害出现后的治理研究, 然而很多有毒有害物质一旦进入环境, 将对人类健康和生态环境造成长期严重危害, 且要彻底治理将要花费大量的人力、物力和财力, 有些甚至根本无法治理恢复, 一些工业发达国家为此付出了沉重的代价^[1]。而目前, 有关风险评价的研究还停留在理论框架和技术路线的探讨阶段^[2~3], 少数有关生态风险评价的应用研究案例也多集中在对生态环境中污染物浓度的测定或简单的风险指数的计算, 而不能真正回答污染的生态风险^[4~5]。国内在重金属污染环境风险评价的研究方

面虽有一些进展, 但多数研究只是在调查样点重金属含量数据资料的基础上, 采用 Hakanson 生态指数法或其他方法进行潜在环境风险分析。而把 GIS 和地统计学相结合, 基于土壤重金属污染空间栅格数据库基础上探讨土壤重金属污染环境风险评价的研究尚少见报道^[6~7]。

在引起土壤污染的众多污染物中, 重金属污染是破坏土壤环境的重要因素之一。含重金属的污染物通过各种途径进入土壤, 造成土壤不同程度的污染。重金属在土壤中具有移动性差、滞留时间长、不易被微生物降解、毒性强和积累效应等特征, 对农作物的生长、产量及品质都有较大影响, 并通过

食物链直接或者间接影响人类健康, 同时也会引起水和大气环境质量的二次污染^[8-9]。因此, 关注并研究耕地土壤中重金属的污染程度及其风险状况, 对生产优质、安全的食品显得非常重要。同时也可为区域无公害及绿色农产品生产基地选择与规划, 以及重金属的污染防治与治理等提供科学依据。本项目以福建省莆田荔城平原区耕地土壤为研究对象, 通过对该平原区耕地土壤中8种重金属元素(Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、As和Hg)的调查采样和分析测试, 借助全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)与地统计学模型(Geo-statistic)集成技术, 研究区域耕地土壤重金属污染状况, 并进行潜在环境风险评价, 建立区域耕地土壤重金属污染状况及潜在环境风险数据库, 为荔城平原区耕地土壤重金属污染防治、耕地环境保护和可持续利用提供参考与决策依据。

1 研究区概况

研究区位于福建省东南沿海的莆田市荔城区的中部, 东经 $118^{\circ}58' \sim 119^{\circ}14'$ 、北纬 $25^{\circ}17' \sim 25^{\circ}43'$, 属南亚热带海洋性季风气候, 地势平坦。研究区包括平原中部的黄石镇和拱辰、镇海两个街道办事处的全部以及北高、新度和西天尾3个镇的部分区域^[10]。

2 方法与步骤

2.1 评价底图数据库建立

利用数字化的1:50 000荔城区地貌分区图、土壤类型分布图、土地利用现状图和耕地保护区图等图件, 借助GIS8.3软件的Arcmap模块, 提取荔城平原区空间分布图矢量数据, 利用荔城平原区分布图与耕地保护区图、土壤类型图等图件进行空间叠加分析生成荔城平原区耕地分布图及其数据库。

2.2 样品采集

利用荔城平原区耕地分布图, 遵循样点布设的基本原则, 在野外选择合适的采样地块, 采用GPS进行采样点定位, 记录采样点的经纬度和海拔高程。在选定的耕地地块采用网格法采集5~10个0~20 cm的耕层土样, 经充分混匀后采用四分法留取2 kg样品。研究区耕地总面积5 779.87 hm², 共布设76个耕地地块样点, 平均每个地块样点代表面积为76.05 hm²。样点分布见图1。

2.3 重金属测定方法

土壤总铅和总镉量采用石墨炉原子吸收光谱法; 总汞量采用冷原子吸收光谱法; 总砷量采用二

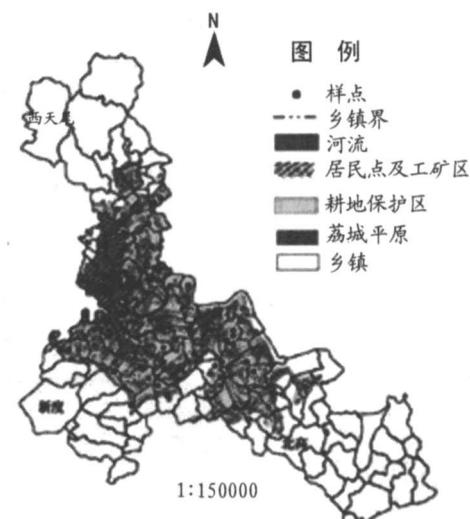


图1 土壤样点分布图

Fig 1 Distribution of soil sampling locations

乙基二硫代氨基甲酸银分光光度计法; 总铬、镍、铜和锌采用火焰原子吸收光谱法测定。

2.4 耕地土壤重金属含量空间插值及其数据库建立

利用最优空间插值模型进行研究区耕地土壤各种重金属的空间插值, 借助GIS软件将插值结果以Grid(栅格)格式存储, 利用研究区耕地保护区图屏蔽所生成的重金属栅格图, 生成研究区域耕地保护区的各重金属含量空间插值栅格图, 建立研究区耕地土壤重金属含量空间栅格数据库。

2.5 污染程度评价

采用目前使用较广泛的单项污染指数和综合污染指数(尼梅罗指数)法评价重金属的污染程度。根据土壤中各重金属的含量计算污染指数, 确定污染等级(表1), 污染指数的计算及等级的划分参照文献[11-13]。

表1 土壤环境质量综合污染指数分级标准

Table 1 Criteria of combined pollution index for soil quality classification

| 等级 | 综合污染指数 | 污染程度 | 污染水平 |
|----|-------------------------------|------|---------------------------|
| 1 | $P_{\text{综}} \leq 0.7$ | 安全 | 清洁 |
| 2 | $0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$ | 警戒线 | 尚清洁 |
| 3 | $1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$ | 轻污染 | 土壤污染超过背景值, 视为轻度污染, 作物开始污染 |
| 4 | $2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$ | 中污染 | 土壤、作物均受到中度污染 |
| 5 | $P_{\text{综}} > 3.0$ | 重污染 | 土壤、作物污染已相当严重 |

2.6 污染风险评价

采用目前国际上应用较广泛的Hakanson提出

的“多指标生态评价方法”(又称潜在生态危害指数法, the potential ecological risk index, 简称 RI), 对区域耕地土壤中重金属污染进行潜在生态风险分析与评价。计算方法如下:

$$E_r^i = T_r^i \times P_i$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i$$

式中 P_i 为单因子污染指数, E_r^i 为单因子危害系数,

RI 为多因子综合潜在生态危害指数, T_r^i 为毒性响应系数, 本研究中参考 Hakanson 提出的毒性系数的设定标准以及一些文献资料^[14~20], 并结合国家土壤重金属环境质量标准及福建省农田土壤污染物单项指标评价标准, 设定 8 种重金属的毒性响应系数分别为: As=10, Hg=40, Pb=5, Cd=30, Cr=2, Ni=5, Cu=5, Zn=1。

表 2 潜在生态危害风险评价指数及其分级

Table 2 Soil classification by potential ecological risk index

| 单因子潜在生态危害系数 (E_r^i) | 单因子污染物 风险危害程度 | 多种重金属潜在 生态危害指数(RI) | 多种因子潜在 生态危害程度 |
|-----------------------------|------------------|--------------------------|------------------|
| $E_r^i < 40$ | 轻度危害 | $RI < 150$ | A/低度危害 |
| $40 \leqslant E_r^i < 80$ | 中度危害 | $150 \leqslant RI < 300$ | B/中度危害 |
| $80 \leqslant E_r^i < 160$ | 较强危害 | $300 \leqslant RI < 600$ | C/高度危害 |
| $160 \leqslant E_r^i < 320$ | 强度危害 | $RI \geqslant 600$ | D/极高危害 |
| $E_r^i \geqslant 320$ | 极强危害 | | |

2.7 重金属污染程度及风险分区与面积统计

利用研究区耕地土壤重金属空间插值栅格数据库, 借助内梅罗法计算各栅格耕地土壤重金属的单项污染指数和综合污染指数, 以土壤质量综合污染指数分级标准为依据划分污染程度, 形成研究区耕地土壤重金属污染程度栅格分区图及其数据库。在此基础上借助 Hakanson 生态指数法计算单因子生态危害系数和多因子潜在生态风险危害指数; 以潜在生态危害风险评价指标(表 4)及其分级标准(表 2)为依据, 进行研究区耕地土壤重金属污染的风险等级分区, 形成风险分区栅格图及其数据库。

2.8 图件编辑与输出

借助 Arcmap 软件对评价成果图进编辑修饰, 输出重金属含量空间插值、污染程度分区及环境风

险分区等评价成果图。

3 结果与分析

3.1 耕地土壤重金属污染状况分析

从表 3 可以看出, 研究区耕地土壤 8 种重金属的单项污染指数, 除重金属汞污染指数较高以外(P_i 达到 1.187), 其余 7 种重金属污染指数均值均小于 1, 8 种重金属单项污染指数均值大小的排列顺序为 $Hg > Cu > Ni > Cd > Zn > Pb > As > Cr$, 表明研究区部分耕地土壤存在汞轻度污染。研究区耕地土壤重金属综合污染指数介于 0.285~1.888, 均值为 0.897, 处于警戒线水平。整体而言, 耕地土壤处于尚清洁状态, 但局部区域存在汞的轻度污染。

表 3 莆田平原区耕地土壤重金属单项及综合污染指数

Table 3 Single and combined pollution index of heavy metals in the soil on Licheng farmland

| | 单项污染指数(P_i) | | | | | | | | 综合污染指数 ($P_{综}$) |
|-----|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------------|
| | As | Hg | Pb | Cd | Cr | Ni | Cu | Zn | |
| 最小值 | 0.057 | 0.327 | 0.053 | 0.306 | 0.072 | 0.003 | 0.115 | 0.141 | 0.285 |
| 最大值 | 0.302 | 2.589 | 0.301 | 0.477 | 0.310 | 0.806 | 0.608 | 0.535 | 1.888 |
| 平均值 | 0.193 | 1.187 | 0.195 | 0.404 | 0.181 | 0.464 | 0.511 | 0.402 | 0.897 |

3.2 耕地土壤重金属污染风险及分区分析

由表 4 的单因子潜在生态危害系数比较来看, 研究区 8 种重金属的单因子潜在生态危害系数以汞最高, E_r^i 达到 47.496, 处于中度危害水平, 其余

重金属元素的潜在危害系数介于 0.362~12.058, 均处于轻度危害水平, 单因子潜在环境风险危害系数由大到小的排列顺序为 $Hg > Cd > Cu > Ni > As > Pb > Zn > Cr$ 。

表 4 荔城平原区耕地土壤重金属单因子及多因子潜在环境风险评价

Table 4 Single and combined index of potential ecological risk of heavy metals in the soil on Licheng farmland

| | 单因子潜在危害系数(E_f^i) | | | | | | | | 多因子潜在风险指数(RI) |
|------|----------------------|---------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|---------------|
| | As | Hg | Pb | Cd | Cr | Ni | Cu | Zn | |
| 最小值 | 0.568 | 13.095 | 0.263 | 9.173 | 0.144 | 0.003 | 0.575 | 0.141 | 27.742 |
| 最大值 | 3.016 | 103.575 | 1.507 | 14.314 | 0.620 | 4.040 | 3.038 | 0.535 | 127.344 |
| 平均值 | 1.950 | 47.496 | 0.975 | 12.058 | 0.362 | 2.329 | 2.557 | 0.402 | 68.129 |
| 危害程度 | 轻度 | 中度 | 轻度 | 轻度 | 轻度 | 轻度 | 轻度 | 轻度 | A 级/低度 |

表 5 荔城平原区各乡镇耕地土壤重金属汞不同程度危害面积

Table 5 Statistics of the environmental hazard from Hg on the farmland in villages at Licheng (单位: hm²)

| 乡镇名称 | 轻度危害 $E_f^i < 40$ | 中度危害 $40 \leq E_f^i < 80$ | 较强危害 $80 \leq E_f^i < 160$ | 强度危害 $160 \leq E_f^i < 320$ | 极强危害 $E_f^i \geq 320$ |
|------|----------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| 北高 | 172.37 | 60.64 | 0 | 0 | 0 |
| 黄石 | 73.42 | 2851.52 | 44.69 | 0 | 0 |
| 新度 | 732.03 | 582.01 | 0 | 0 | 0 |
| 西天尾 | 173.43 | 429.86 | 0 | 0 | 0 |
| 拱辰 | 0 | 659.68 | 0 | 0 | 0 |
| 总计 | 1151.24 | 4583.72 | 44.69 | 0 | 0 |

通过对各乡镇不同等级汞潜在生态危害系数的统计及空间分布图(图2)可以看出: 汞潜在生态危害系数处于轻度危害($E_f^i < 40$)的区域主要分布于新度, 其次是西天尾以及北高的部分区域, 最少的是黄石镇, 合计面积达1151.24 hm², 占研究区耕地土壤总面积的19.92%; 汞潜在生态危害系数处于中度危害($40 \leq E_f^i < 80$)的区域除北高较少以外, 在黄石、新度、西天尾以及拱辰(办事处)均有不同面积分布, 合计面积达4583.92

hm², 占研究区耕地土壤总面积的79.30%, 其中黄石镇中度危害面积最大, 高达2851.52 hm², 占研究区耕地土壤总面积的49.34%, 其次是新度和拱辰(办事处), 合计面积达1241.69 hm², 占研究区耕地土壤总面积的21.48%; 汞潜在生态危害系数处于较强危害($80 \leq E_f^i < 160$)的区域仅分布于黄石镇, 但面积较小, 仅占研究区耕地土壤总面积的0.77% (表5)。

表 6 荔城平原区各乡镇耕地土壤重金属多因子潜在环境风险危害状况面积统计

Table 6 Statistics on the areas with environmental hazard from heavy metals in the farmland in villages at Licheng(单位: hm²)

| 乡镇名称 | 轻度危害 $RI < 150$ | 中度危害 $150 \leq RI < 300$ | 强度危害 $300 \leq RI < 600$ | 极强危害 $RI \geq 600$ |
|------|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| 北高 | 233.02 | 0 | 0 | 0 |
| 黄石 | 2968.43 | 0 | 0 | 0 |
| 新度 | 1314.04 | 0 | 0 | 0 |
| 西天尾 | 603.29 | 0 | 0 | 0 |
| 拱辰 | 660.74 | 0 | 0 | 0 |
| 总计 | 5579.52 | 0 | 0 | 0 |

从表6和图3的多因子综合潜在风险指数可以看出, 荔城平原耕地土壤重金属污染多因子综合潜在风险指数介于27.742~127.344, 平均值为68.129, 处于低度危害水平。重金属污染综合潜在

风险处于低度危害水平的耕地主要分布于黄石和新度镇, 合计面积达4282.47 hm², 占研究区耕地土壤总面积的74.10%。黄石、新度和拱辰镇(办事处)局部区域的环境风险值相对较高。

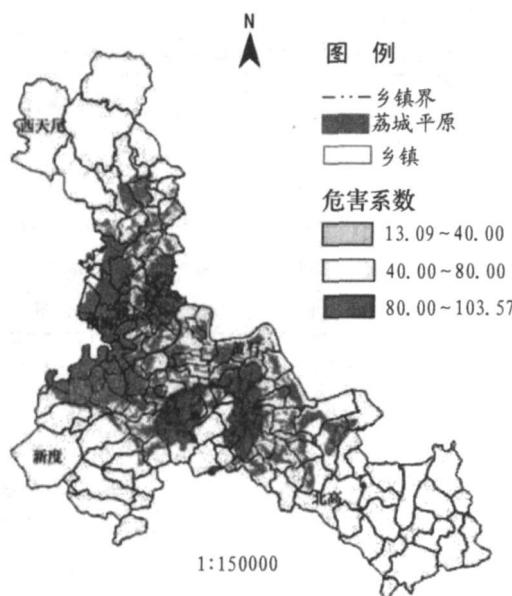


图 2 重金属汞单因子危害系数分区图

Fig 2 Hg hazard coefficient map

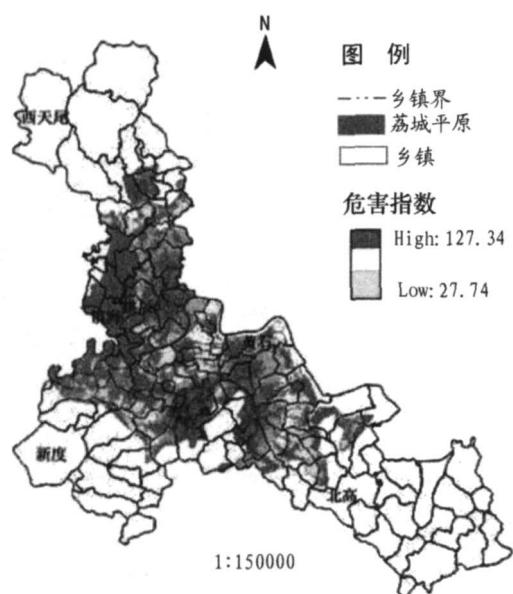


图 3 重金属多因子危害系数分区图

Fig 3 Heavy metals hazard coefficient map

4 结 论

根据以上分析, 研究区耕地土壤重金属污染多因子综合潜在风险指数较低, 处于低度危害水平。汞危害系数较高的地区主要分布于黄石和新度镇, 局部汞危害系数较高的地区主要分布在黄石, 中度危害区域主要分布在研究区的中部。其原因可能是由于研究区中部的拱辰、黄石和新度人口密度相对较大, 交通便利, 制鞋业等工业较发达, 耕地分布集中, 利用强度较大, 耕地灌溉水汞含量超标较为

严重^[10]。此外, 黄石镇还有一家已倒闭的电镀厂, 由于几年前电镀厂排放的含汞废水直接流入农田导致周边耕地土壤的汞污染较严重。因此, 应根据兴化平原具体实际, 提出耕地土壤重金属污染防治对策。

5 预防对策

5.1 加强乡镇企业管理, 严格控制工业“三废”排放, 推广清洁生产技术

污染源调查表明, 荔城平原区各类污染源企业达 15 家, 分布较为零散, 不同企业产生的污染物数量、类型和产生的危害也不同^[10, 21]。从研究区重金属汞污染状况评价结果可见, 土壤汞污染指数较高的区域(如黄石和新度镇), 综合污染指数以及单因子生态危害系数也相对较高, 主要是周边企业(如电镀、印染企业等)排放的废物、废水等未经处理直接排入河流或流入农田所致。因此, 应该有针对性地加强平原区人口密集区域的乡镇企业管理, 严格控制污染排放, 通过技术改造, 推广适合各类型企业的清洁生产工艺技术, 最大限度的减少污水、废气和固废物的产生, 严禁将有毒污水或固废物未经处理直接排入河道或农田; 合理规划乡镇企业布局, 建立和完善土壤污染防治、控制和治理的有关法规和政策措施, 本着“防重于治”的方针, 从源头上防治污染物的排放, 是解决土壤重金属污染的关键。

5.2 合理的施用化肥和农药, 科学灌溉, 防止面源污染

某些农药、除草剂中含有 Pb、Cu、Hg 和 As 等重金属元素, 如果使用不当, 随着耕作时间的增加, 散落在土壤表面的高毒高残农药渗入土壤中, 并在土壤中滞留、累积。因此应该指导农民科学合理的使用农药, 推广生物农药和生物防治技术, 防止盲目使用农药, 特别是毒性较强的农药而导致农产品的污染。灌溉和施肥是农田土壤污染物最主要的来源, 由于采用污水灌溉或施用有毒固废物而导致农田土壤污染的事例已不胜枚举。从本研究调查发现, 荔城平原区出现中度污染的耕地土壤是由于电镀厂排放的污水流入农田所致。因此, 必须加强对农田灌溉水源的管理, 严禁使用受污染的灌溉水源或直接使用工业污水灌溉农田。根据荔城区农田灌溉水质调查, 发现荔城区多数乡镇的耕地灌溉水中汞含量呈不同程度的超标^[10], 必须引起各级地方政府的高度重视, 应组织有关部门和技术力量, 及时查清灌溉水中汞污染的来源, 从源头上控制和

消除灌溉水的汞超标问题，从而防止因长期使用汞超标的灌溉水而导致农田的汞污染。

5.3 开展环境保护的宣传与科普工作，进一步提高全民生态环保意识

从研究结果来看，研究区耕地土壤重金属污染的环境风险处于低度危害，但局部地区汞污染较严重，且由于重金属在土壤中具有潜伏性、累积性和隐蔽性，短期内不容易引起人们的重视，而一旦出现污染，治理难度很大。因此在加强兴化平原污染企业源头的监督、管理和治理的同时，政府和相关部门应加强对当地群众环保知识的宣传和普及，妥善处理居民的生活垃圾，防止二次污染进入农田。同时，可以通过开展环保讲座、环保宣传等公益活动提高公众及企业的环保意识，保护生态环境，预防土壤污染。

参考文献：

- [1] 林玉锁. 对我国开展环境风险评价的一些看法 [J]. 环境导报, 1993, 1: 14- 15.
- [2] CLAASSEN M. Ecological risk assessment as a framework for environmental impact assessment [J]. Water Science and Technology, 1999, 39 (10): 151- 154.
- [3] SERGEANT A. Management objectives for ecological risk assessment development at US EPA [J]. Environmental Science & Policy, 2000, 20 (3): 295- 298.
- [4] 王子健, 吕怡兵, 王毅, 等. 淮河水体取代苯类污染及其生态风险 [J]. 环境科学学报, 2002, 22 (3): 300- 304.
- [5] 刘成, 王兆印, 何耘, 等. 环渤海湾诸河口潜在生态风险评价 [J]. 环境科学研究, 2002, 15 (5): 33- 37.
- [6] 叶玉瑶, 张虹鸥, 谈树成. 个别城区土壤中重金属潜在生态危害评价 [J]. 热带地理, 2004, 24 (1): 15- 18.
- [7] 王铁宇, 汪景宽, 周敏, 等. 黑土重金属元素局地分异及环境风险 [J]. 农业环境科学学报, 2004, 23 (2): 272- 276.
- [8] 郑鲁坤, 鲁安怀, 高翔, 等. 土壤中重金属污染现状与防治对策 [J]. 土壤与环境, 2002, 11 (1): 79- 84.
- [9] 周泽义. 中国蔬菜重金属污染及控制 [J]. 资源生态环境网络研究动态, 1999, 10 (3): 21- 27.
- [10] 邢世和. 福建省莆田市荔城区耕地地力调查评价技术报告 [R]. 2003: 6- 20.
- [11] 魏秀国, 何江华, 王少毅, 等. 广州市菜园土和蔬菜中镉含量水平及污染评价 [J]. 土壤与环境, 2002, 11 (2): 129- 132.
- [12] 林玉锁, 张孝飞, 窦文倩, 等. 徐州地区主要农产品生产基地土壤环境质量评价 [J]. 农村生态环境, 2003, 19 (1): 60- 63.
- [13] 李其林, 黄昀. 重庆市近郊区蔬菜地土壤重金属含量变化及污染情况 [J]. 土壤通报, 2002, 33 (2): 158- 160.
- [14] 何孟常, 王子健, 汤鸿霄. 乐安江沉积物重金属污染及生态风险性评价 [J]. 环境科学, 1999, 20 (1): 7- 10.
- [15] 殷晋铎, 么俊东, 薛恩树, 等. 大沽排污河沉积物重金属和砷污染及生态风险性研究 [J]. 环境工程, 2002, 22 (1): 70- 74.
- [16] 胡宁静, 李泽琴, 黄朋, 等. 江西贵溪冶炼厂重金属环境污染特征及生态风险评价 [J]. 地球科学进展, 2004, 19 (增刊): 468- 472.
- [17] 叶玉瑶, 张虹鸥, 谈树成. 个别城区土壤中重金属潜在生态危害评价 [J]. 热带地理, 2004, 24 (1): 15- 18.
- [18] 王铁宇, 汪景宽, 周敏, 等. 黑土重金属元素局地分异及环境风险 [J]. 农业环境科学学报, 2004, 23 (2): 272- 276.
- [19] HAKANSON L. An ecological risk index for quality pollution control: a sediment geological approach [J]. Water Res, 1980, 35 (14): 975- 1001.
- [20] 韦玉春, 陈锁忠. 地理建模原理与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 286- 302.
- [21] 邢世和. 福建耕地资源利用 [M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2003: 148- 155.

(责任编辑: 刘新永)