日照市茶树种植区表层土壤重金属环境质量评价

王 学[1], 张祖陆[1], 王茂香[1], 张 伦[1], 代杰瑞[2]
(1. 山东师范大学 人口·资源与环境学院, 山东 济南 250014; 2. 山东省地质调查院, 山东 济南 250013)

摘 要: 以日照市茶树种植区为研究对象, 对其表层土壤重金属元素的空间分布特征进行分析, 利用内梅罗综合指数法评价其环境质量状况, 并将评价结果利用 ARC/ MAP 地统计模块中的克里金插值法插值处理。结果表明, 日照市茶树种植区重金属元素分布较为均匀, 仅 Cd, Hg 的空间变异性相对较大; 根据单因子污染指数评价结果, 大部分地区环境质量较好, 仅在局部地区存在 Cd, Ni 污染; 根据内梅罗综合污染指数空间分布, 大部分地区土壤属于Ⅰ级, 少部分属于Ⅱ级和Ⅲ级, 整个区域未出现Ⅳ级和Ⅴ级土壤。

关键词: 重金属; 地统计; 环境质量; 日照
文献标识码: A 文章编号: 1000-288X(2011)03-0219-06 中图分类号: X53, X820.1

Environmental Assessment of Heavy Metals in Surface Soil of Tea Plantations in Rizhao City

WANG Xue[1], ZHANG Zu-lu[1], WANG Mao-xiang[1], ZHANG Lun[1], DAI Jie-rui[2]
(1. *School of Population, Resources and Environment, Shandong Normal University, Ji'nan, Shanodng* 250014, *China*; 2. *Shandong Institute of Geological Survey, Ji'nan, Shandong* 250013, *China*)

Abstract: Geostatistics method was used to analyze the spatial distribution patterns of heavy metal elements, and Nemerow integrated index method was used to assess environmental qualities regarding heavy metals in tea-planting areas of Rizhao City. The results of assessment were then displayed with Kriging interpolation in ArcMap. The results show that the distributions of all the heavy metals except Cd and Pb were comparatively uniform. The single factor pollution index indicate that the majority of the research areas was clean except that Cd and Ni pollution existed in some parts of the area. The spatial distribution of Nemerow integrated pollution index show that 88.41% of the research areas soil was classified as level Ⅰ, and 6.44% as level Ⅱ, and 5.14% as level Ⅲ, while no area as Ⅳ and level Ⅴ.

Keywords: heavy metal; geostatistics; environmental quality; Rizhao City

土壤中的重金属元素是造成土壤污染的重要原因之一, 不但影响茶树质量, 还可以通过食物链等方式危害人类的健康。利用重金属含量分布进行土壤质量评价和分区, 对改善茶树布局, 提高茶叶产量和品质, 充分利用土地资源等均具有重要意义。国内外在利用实验数据进行种植地土壤重金属环境质量评价方面已经取得了不少成果, 但对整个区域进行的评价工作还比较少见[1-9]。本文主要采用地统计分析与 GIS 技术相结合的研究手段, 对研究区表层土壤的重金属环境质量进行综合分析与评定, 系统地研究日照市茶树种植区土壤重金属含量的空间分布特征及变异规律, 并对其环境质量进行讨论, 以期为日照市茶树种植工作提供借鉴。

1 研究区概况

日照市种植茶树历史悠久, 自明代起即有茶树分布。自 1966 年"南茶北引"项目成功以来, 茶树种植已成为该市最主要的农业活动之一。日照市茶树种植区主要集中在东港区和岚山区, 具体包括巨峰、后村、高兴、日照、南湖、陈疃、三庄、两城、河山、秦楼、奎山、黄墩、涛雒、石臼 14 个镇和街道, 总面积约 1 799 km^2。研究区属鲁南丘陵区, 地势由西北向东南倾斜, 西北多山, 东南低洼多沿海平原, 海拔 1.3~656.9 m; 茶树种植区属湿润暖温带季风气候区, 年均温 13 ℃, 无霜期 220 d 以上, 年降水 870 mm, ≥10 ℃活动积温 4 260 ℃, 年平均相对湿度 72%, 总体气候条件适

收稿日期: 2010-11-09 修回日期: 2010-12-02
资助项目: 山东省国土资源大调查项目"山东省东部地区农业生态地球化学调查"(鲁国土资字[2006]709)
作者简介: 王学(1989—), 女(汉族), 山东省临朐县人, 硕士研究生, 研究方向为土壤修复与环境评价。E-mail: wangxue19881220@126.com。
通信作者: 张祖陆(1949—), 男(汉族), 上海市嘉定区人, 教授, 博导, 研究方向为全球变化与区域可持续发展。E-mail: zulzhang@126.com。

合茶树生长; 区内土壤以棕壤为主, 占总面积的 79.01%, 具有较好的保水保肥性能, 但也存在一定程度的 As, Cr, Hg 污染, 可能会对当地茶树种植造成影响, 迫切需要引起人们的高度重视。

2 土样采集与分析

2.1 采样方法

采集的土样主要为表层样(0—20 cm), 是按照中国地质调查局《多目标地球化学调查规范(1∶25 万)》(DD2004-XX)、《区域生态地球化学评价指南》(DD2005-XX)的要求在整个日照市采集完成的。具体的采样采用网格布样法, 采样密度为 1 件/km^2, 在采样点周围 50 m 范围内, 等量采集 3~5 点土壤样品组成一个土样, 采样时除去表面杂物, 垂直采集地表至 20 cm 深的土壤, 保证上下均匀采集, 并弃去动植物残留体、砾石、肥料团块等, 装入干净布袋, 土样原始重量大于 1 000 g。土样风干、敲碎、过 20 目尼龙筛, 并按 4 个相邻网格(4 km^2)的样品组合为一个土样进行测试。

2.2 分析方法

表层土样测试 Al_2O_3, CaO, K_2O, MgO, Fe_2O_3, Na_2O, Ag, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Br, Cd, Ce, Cl, Co, Cr, Cu, F, Ga, Ge, Hg, I, La, Li, Mn, Mo, N, Nb, Ni, P, Pb, Rb, S, Sb, Sc, Se, SiO_2, Sn, Sr, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn, Zr, C, 有机碳和 pH 值, 共 54 项指标, 由武汉岩矿测试中心采用 X 射线荧光光谱、等离子光谱、氢化物原子荧光光谱、发射光谱等一整套大型精密仪器进行测试。测试质量由中国地质调查局专家组进行监控, 采用了标准样、密码样、监控样等多种监控手段, 保证了分析质量的可靠性。共分析全日照市样品 1 349 个, 其中, 研究区样品 450 个。

根据《土壤环境质量标准(GB15618-1995)》中规定的重金属类型, 选择 Cd, Hg, As, Cu, Pb, Cr, Zn, Ni 作为日照市茶树种植区表层土壤重金属环境质量评价的评价因子[1-3], 各重金属元素的具体测定方法见表 1。

表 1 土壤重金属污染指标及测定方法

重金属	测定方法
Cd	石墨炉原子吸收分光光度法(GB/T 17141-1997)
Hg	原子荧光光谱方法(NY/T 1121.10-2006)
As	原子荧光光谱方法(NY/T 1121.11-2006)
Cu	火焰原子吸收分光光度法(GB/T 17138-1997)
Pb	石墨炉原子吸收分光光度法(GB/T 17141-1997)
Cr	火焰原子吸收分光光度法(GB/T 17137-1997)
Zn	火焰原子吸收分光光度法(GB/T 17138-1997)
Ni	火焰原子吸收分光光度法(GB/T 17139-1997)

3 表层土壤重金属元素地球化学特征

选择最大值、最小值、平均值、变异系数等统计指标进行重金属元素地球化学特征分析。其中, 变异系数又称“标准差率”, 是衡量资料中各观测值变异程度的一个统计量, 可以消除单位或平均数不同对 2 个或多个资料变异程度比较的影响, 一般而言, 变异系数小于 0.3, 数据分布空间差异性较小; 大于 0.3, 数据分布则较为分散, 空间变异性较大。日照市背景值采用唐文春等[4]的正态分布法进行计算, 结果见表 2。

表 2 研究区表层土壤重金属含量

重金属元素	国家二级基准值	最大值	最小值	平均值	变异系数	日照市背景值	全国土壤丰度[14]	K_1	K_2
Cd	0.30	4.81	0.026	0.115	1.969	0.114	0.09	0.912	1.156
Hg	0.30	3.28	0.008	0.043	3.850	0.027	40.00	1.172	0.001
As	30.00	11.80	1.900	5.043	0.265	5.466	10.00	0.899	0.491
Cu	50.00	99.80	4.900	17.568	0.506	19.359	24.00	0.836	0.675
Pb	250.00	72.30	18.200	27.784	0.218	27.143	23.00	0.993	1.171
Cr	250.00	277.60	12.200	54.088	0.506	56.704	65.00	0.286	0.249
Zn	200.00	170.60	18.300	63.098	0.318	64.730	68.00	0.939	0.894
Ni	40.00	166.30	7.100	23.515	0.546	24.082	26.00	0.917	0.850

注: 除变异系数, K_1, K_2 这 3 项无量纲, 其余各项单位均为 mg/kg; K_1 为平均值/日照市土壤背景值; K_2 为平均值/全国土壤丰度。

根据表 2, Cd, Hg 的变异系数较大, 说明这 2 种重金属元素在研究区内分布不均匀, 而其它几种重金属元素的分布相对较为均匀。K_1 和 K_2 分别表示研究区相对于日照市和全国表层土壤中的重金属元素富集情况。由于 K_1 大部分小于 1, 说明大部分重金属元素(Hg 除外)在研究区表层土壤中的含量要低于

日照市的含量, 这说明了与日照市相比, Hg 在研究区内相对较为富集, 而其它各重金属元素在研究区内相对较为贫乏; 同理, 由 K_2 值可以看出, 除 Cd, Pb 外, 其余重金属元素均表现为研究区背景值不同程度地低于全国土壤丰度, 说明与全国相比, 研究区表层土壤中的大部分重金属元素总体上是贫缺的, 但也不排除存在局部超标的可能。根据研究区表层土壤 pH 值背景值(5.865)以及《土壤环境质量标准(GB15618-1995)》中的国家 2 级标准确定了 8 种重金属元素的基准值(见表 2), 超过某一基准值的地区为该重金属的含量超标区。根据表 2, 除 As, Pb, Zn 元素在研究区内未超标外, 其它重金属元素均含量超标。

4　表层土壤重金属结构分析

4.1　半方差函数

半方差函数是用来描述区域化变量结构性和随机性并存这一空间特征而提出的, 是地统计学解释土壤空间变异结构的基础。它一般有 3 个重要的参数: 块金常数(C_0)、基台值($C+C_0$)、有效变程, 用来表示区域化变量在一定尺度上的空间变异和相关程度。其中, 函数在原点处的数值称为块金常数(C_0), 代表了无法解释的或随机的变异, 通常由测定误差或土壤性质的微变异所造成; 基台值(C_0+C_1)通常表示系统内的总变异, 它是结构性变异和随机性变异之和; 有效变程表示空间自相关范围, 它与观测以及取样尺度上影响土壤性状的各种过程的相互作用有关: 在有效变程范围内, 变量有空间自相关性, 反之则不存在[2, 10-13]。

土壤性质的半方差图通常可以被某些曲线方程所拟合, 用于拟和的曲线方程就称为半方差函数的理论模型。决定系数(R^2)表示拟合精度, R^2 越大, 则拟合效果越好。

块金值 C_0 与基台值(C_0+C_1)之比是反映区域化变量空间异质性程度的重要指标, 又称为块金效应。该比值用以反映空间变异影响因素中自然因素和人为因素的作用。若 $C_0/(C_0+C_1)<25\%$, 表明变量的空间变异以结构性变异为主, 变量具有强烈的空间相关性; 当上述比值 $25\% \leqslant C_0/(C_0+C_1)<75\%$ 时, 变量为中等程度空间相关; 而 $C_0/(C_0+C_1) \geqslant 75\%$ 时, 以随机变量为主, 变量的空间相关性则很弱[2]。

4.2　半方差函数理论模型及有关参数统计特征分析

采用半方差函数对研究区表层土壤重金属元素的空间结构特征进行分析, 并利用 GS+ Version 9.0 软件对土壤中重金属元素 Cd, Hg, As, Cu, Pb, Cr, Zn, Ni 的半方差函数理论模型及其相关参数进行拟合, 结果见表 3。

表 3　研究区表层土壤重金属含量的半方差函数理论模型及其相关参数

重金属	理论模型	块金常数 C_0	基台值 C_0+C_1	有效变程/m	块金常数/基台值 $C_0/(C_0+C_1)\times 100\%$	决定系数 R^2
Cd	球型	0.02	0.03	20 200	49.84	0.726
Cr	指数型	71.00	738.20	11 400	9.62	0.891
Cu	指数型	10.80	80.75	10 500	13.37	0.461
Hg	指数型	0.01	0.07	10 800	14.27	0.632
Ni	指数型	11.80	157.80	10 200	7.48	0.781
Pb	球型	17.79	38.60	36 900	46.09	0.945
Zn	球型	136.00	486.40	62 400	21.96	0.998
As	指数型	0.22	1.81	15 300	12.24	0.922

注: Cd 和 Hg 是经对数变换后的数值。

根据表 3, 除 Cd, Pb, Zn 的变异函数理论模型符合球状模型外, 其余的均符合指数模型。除 Cu 外, 其余的半方差函数模型拟合度均在 0.5 以上, 说明半方差函数模型的选取基本符合要求。

Cd, Pb 的块金常数/基台值介于 25%～75%, 说明这 3 种重金属元素的空间相关性中等, 在研究区内由污染、施肥等随机因素引起的空间变异占较大比重; 其余各金属元素的块金常数/基台值均小于 25%, 说明其它们表现出较强的空间相关性, 空间变异则主要是土壤母质、地形、土壤类型等结构性因素引起的。从有效变程来看, 土壤中以 Zn 变程较大, 说明 Zn 在较大的范围内有相关关系, 反映土壤母质对其影响较大; 而 Cu, Hg 的变程较小, 说明它们受到人为活动污染等随机因素的影响较大, 导致在较小的空间范围内存在相关关系。

4.3　克里金插值分析

本文在对研究区表层土壤各重金属元素进行半方差函数模型拟合的基础上, 应用 ARC/MAP 软件地统计分析模块(Geostatistical Analyst)对各重金属元素进行了克里金插值, 主要内插结果见图 1—4。

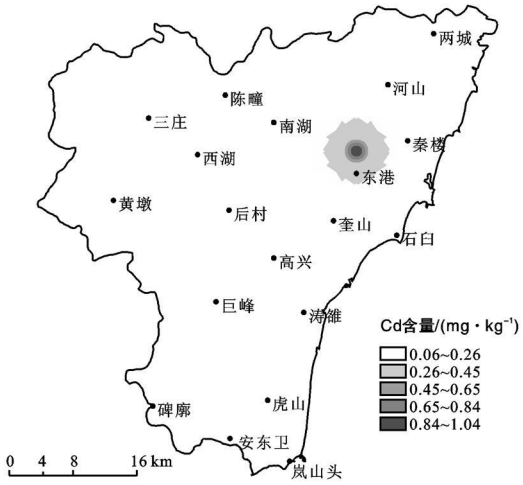


图 1 Cd 的地球化学分布图

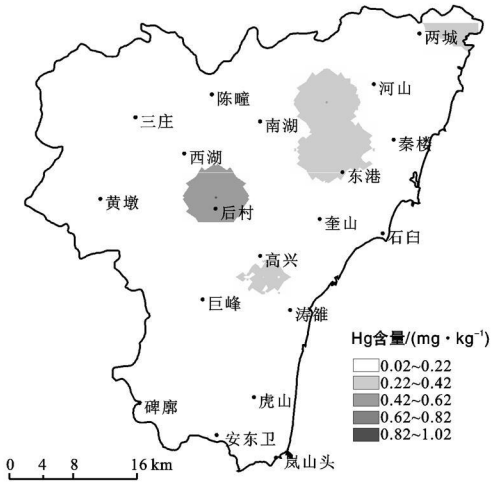


图 2 Hg 的地球化学分布图

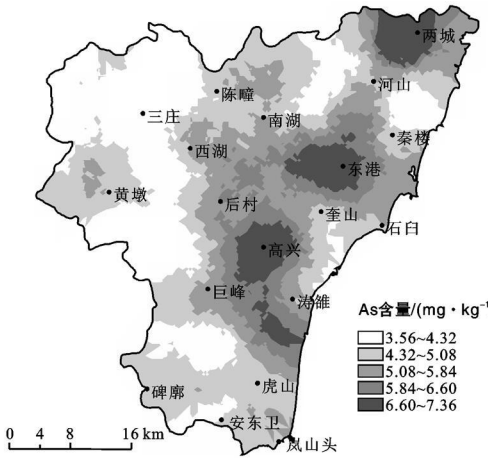


图 3 As 的地球化学分布图

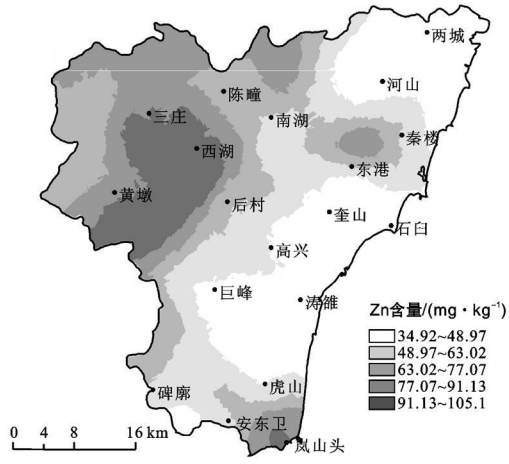


图 4 Zn 的地球化学分布图

分析图 1—4, 并结合其它重金属元素内插结果可以得出如下结论: Cd, Hg 含量高的地区均呈点状分布, Cd 主要集中在东港, 而 Hg 主要集中在后村, 因这 2 个地区工业发展较为成熟、人口密度较大, 造成了大量的工业三废和生活污水的排放, 加之农业活动中化肥和农药的过量施用, 最终造成了 Cd, Hg 在土壤中的富集; Zn 含量高的地区主要呈片状分布在研究区的西北部, 这是因该地区的主要土壤类型——酸性石质土和酸性粗骨土土壤背景值中 Zn 含量较高所致; As, Cu, Pb, Cr 和 Ni 在研究区内的分布相对较为均匀, 但也存在含量偏高的地区(Cu 除外), 大体呈带状分布: 其中 Pb, Cr 和 Ni 主要集中在陈疃—南湖—西湖—大坡—巨峰—碑廓一带, 而 As 主要集中在两城—东港—高兴一带, 这也是与这一地带的主要土壤类型——白浆化棕壤土壤背景值中 As 的含量较高有关。

5 表层土壤重金属环境质量评价

5.1 评价方法

本文采用内梅罗综合指数法计算单项污染指数 P_i 和多因子综合污染指数 P, 并根据污染指数的大小统计环境质量面积, 对研究区表层土壤重金属环境质量进行分析和评价, 并借助空间变异理论和点状克里格内插法, 运用 ARC/MAP 对离散的采样点进行连续插值, 最终获得研究区表层土壤重金属多因子综合污染指数分布图[6-8]。

其中, 单因子污染指数 P_i 的计算公式如下:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中: P_i ——土壤中污染物的单项污染指数; C_i ——土壤中污染物的实测浓度(mg/kg) ; S_i ——污染物的评价标准(mg/kg) 。

若 $P_i < 1$, 表示土壤未受污染物 i 污染; $P_i > 1$, 表示土壤受污染, P_i 越大, 受污染程度越重。

多因子综合污染指数 P_I 的计算公式如下:

$$P_I = \sqrt{\frac{1}{2}\left(P_{i\max}^2 + P_{i\text{ave}}^2\right)} \quad (2)$$

式中: P_I ——内梅罗综合污染指数; $P_{i\max}$ ——单因子污染指数最高值(mg/kg) ; $P_{i\text{ave}}$ ——单因子污染指数的算术平均值(mg/kg) 。

5.2　结果与分析

5.2.1　单因子环境质量评价　利用内梅罗单因子污染指数法计算得到的日照市茶树种植区表层土壤重金属元素的单因子污染指数值 P_i(见表 4)。

表 **4**　研究区表层土壤各重金属污染指数 P_i

评价指标	P_i 平均值	P_i 范围
Cd	0.384	0.062~ 1.046
Hg	0.142	0.016~ 0.312
As	0.168	0.116~ 0.266
Cu	0.351	0.020~ 0.575
Pb	0.111	0.086~ 0.164
Cr	0.216	0.115~ 0.423
Zn	0.315	0.151~ 0.687
Ni	0.588	0.298~ 1.172

根据表 4 并结合图 1—4 可以看出, 研究区单因子环境质量均属于清洁或基本清洁的范围, 除 Cd, Ni 存在面积较小的土壤污染现象外, 其余重金属元素均未出现土壤污染区。说明单因子土壤环境质量较好, 区内未出现严重的土壤污染现象。

5.2.2　内梅罗综合污染评价

(1) 分级标准。土壤环境质量综合评价结果的等级划分采用王春光等[7]的研究结果, 按照综合污染指数 PI 的大小, 将研究区土壤质量分为 V级, 并对各级污染区的面积进行统计(见表 5)。

利用 ARC/MAP 软件对离散的采样点进行连续插值, 得到整个研究区的内梅罗综合污染指数分布图(见图 5)。

表 **5**　研究区表层土壤重金属污染等级划分

综合污染指数	分级	污染等级	面积/ m^2	比重/ %	污染水平
$P_I \leqslant 0.7$	Ⅰ	安 全	1 649 767 500	88.41	清 洁
$0.7 < P_I \leqslant 1$	Ⅱ	警戒线	120 150 900	6.44	尚清洁
$1 < P_I \leqslant 2$	Ⅲ	轻污染	95 962 500	5.14	土壤污染物超过背景值, 轻污染, 植物开始受污染
$2 < P_I \leqslant 3$	Ⅳ	中污染	62 100	0.003 33	土壤、植物受到中度污染
$P_I > 3$	Ⅴ	重污染	7 200	0.000 39	土壤、植物受污染已相当严重

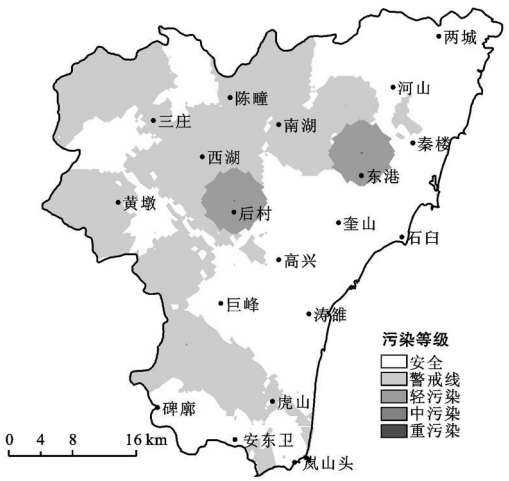


图 **5**　研究区表层土壤内梅罗综合污染指数分级图

(2) 综合评价结果。从表 5, 图 5 中可以看出, 研究区大部分土壤属于 Ⅱ级以内, 基本不存在Ⅳ级和Ⅴ级的土壤: 其中, Ⅰ 级土壤面积占总面积的 88.41%, 说明研究区内大部分土壤是清洁的; Ⅱ级土壤面积占研究区总面积的 6.44%, 散布在西湖镇附近, 属尚清洁土壤的范畴, 不影响茶树种植; Ⅲ级土壤占研究区总面积的 5.14%, 集中分布在东港、后村镇附近, 该类土壤受到了轻度重金属污染, 主要是 Cd 污染和 Hg 污染。结合前文分析可知, Cd 和 Hg 在研究区内均呈点状分布, 面积虽小但相对集中, 空间变异性较大, 工农业活动等随机因素可能是造成这类重金属土壤污染的主要原因[14-15]。受到轻度重金属污染的土壤不仅不利于茶树种植, 甚至会对人体健康产生危害, 应采取必要手段防止污染的继续扩大。

6　结 论

本文对表层土壤重金属地球化学特征及空间结构进行了分析, 并利用内梅罗综合指数法对日照市茶树种植区表层土壤环境质量进行了评价, 结果表明:

(1) 根据重金属元素的地球化学特征分析可知, 研究区内大部分重金属元素含量相对较小, 但与国家重金属环境质量二级标准相比, 除 As, Pb, Zn 外的其它重金属元素均存在一定范围的含量超标区。

(2) 根据重金属元素的半方差分析结果, Cd, Pb, Zn 符合球状模型, Hg, As, Cu, Cr, Ni 符合指数模型, 各模型的拟合度均较高; Zn 的空间变异性较大, 主要受土壤类型这一因素的影响, 而 Cd, Pb, Cu, Hg 空间变异性较大, 说明它们受人为因素影响较为明显; 克里金插值结果表明, 研究区表层土壤重金属的空间分布主要呈现点状(Cd, Hg)、片状(Zn)和带状(Pb, As, Cr, Ni)3 种方式, 但 Cu 基本是均匀分布的。

(3) 内梅罗评价结果显示, 研究区大部分土壤是安全的, 只有 5.14% 的土壤受到 Hg 和 Cd 的轻度污

染,推测可能与工农业活动等随机因素有关。

因茶叶生产已成为日照市产茶地区农村经济的支柱产业和农民增收的主要来源,而土壤是茶叶赖以生长的物质基础,考虑到东港、后村镇出现的轻度土壤污染现象会对当地茶叶生产产生不利影响,为提高茶叶品质,保证茶叶的增产增收,建议当地茶农在严格按照产品质量标准施用有机肥的同时,大力推广无公害茶叶栽培技术,必要时还可以采取相应的措施对土壤进行改良。

[参 考 文 献]

[1] 颜雄,张杨珠,周卫军,等.长沙县“百里茶廊”6 个茶叶基地的土壤肥力质量评价[J].农业现代化研究,2007,28(3):354-357.

[2] 谢正苗,李静,王碧玲,等.基于地统计学和 GIS 的土壤和蔬菜重金属的环境质量评价[J].环境科学,2006,27(10):2110-2116.

[3] 易桂花,彭培好,倪师军.蒙顶山茶区土壤重金属环境质量及土壤 pH 值现状评价[J].地球与环境,2009,37(4):430-435.

[4] 唐文春,金立新,周雪梅.成都市土壤中元素地球化学基准值研究及其意义[J].物探与化探,2005,29(1):71-83.

[5] 胡永华,王恒旭,王志坤,等.杞县大蒜产区土壤重金属元素地球化学特征及环境质量评价[J].安徽农业科学,2006,34(2):1411-1412.

[6] 刘苹,赵海军,刘兆辉,等.山东省露地蔬菜产地土壤重金属含量的环境质量分析与评价[J].农业环境科学学报,2010,29(6):1130-1136.

[7] 王春光,张思冲,辛蕊,等.哈尔滨市东郊菜地土壤重金属环境质量评价[J].中国农学通报,2010,26(2):262-266.

[8] 史同广,郑昭佩,王智勇,等.GIS 支持下的鲁东南丘陵区茶树土地适宜性评价[J].山地学报,2008,6(5):560-564.

[9] 庞绪贵,陈长峰,李秀章,等.鲁北小清河流域土壤中元素分布特征及环境质量评价[J].地质通报,2005,24(2):160-164.

[10] 马黎春,盛建东,蒋平安,等.克拉玛依地区土壤速效微量养分空间变异特征[J].干旱区地理,2004,27(2):202-206.

[11] 倪俊,杨良华,雷能忠.基于 GIS 的舒城县土壤养分综合评价[J].皖西学院学报,2008,24(5):153-156.

[12] 贾宇平,段建南.黄土高原沟壑区小流域土壤碳酸盐碳的空间分布特征[J].干旱区地理,2004,27(2):166-171.

[13] 马黎春,盛建东,蒋平安,等.克拉玛依干旱生态农业区土壤质地的空间异质性研究[J].干旱区地理,2006,29(1):109-114.

[14] 迟清明,鄢明才.应用地球化学元素丰度数据手册[M].北京:地质出版社,2007:82.

[15] 夏立江,王宏康.土壤污染及其防治[M].上海:华东理工大学出版社,2001:59-87.

(上接第 207 页)

[7] 祝小迁,程久苗,费罗成.安徽省耕地集约利用及其驱动力分析[J].中国土地科学,2009,23(2):11-17.

[8] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].2 版.北京:高等教育出版社,2004:84-93.

[9] 费罗成,程久苗,沈非,等.区域土地集约利用水平时空比较研究:以中部地区为例[J].地域研究与开发,2008,27(5):90-94.

[10] 王玲,孙洁,吕新.基于主成分分析的耕地集约利用评价[J].湖北农业科学,2009,48(3):607-611.

[11] 李静,宋尧,郭蒙,等.基于 GIS 的黑龙江省耕地集约利用水平的空间格局分析[J].水土保持通报,2009,29(1):123-127.

[12] 何蒲明,王雅鹏,黎东升.湖北省耕地减少对国家粮食安全影响的实证研究[J].中国土地科学,2008,22(10):52-63.

[13] 朱红波.论粮食安全与耕地资源安全[J].农业现代化研究,2006,27(3):161-164.

[14] 傅泽强,蔡运龙,杨友孝,等.中国粮食安全与耕地资源变化的相关分析[J].自然资源学报,2001,16(4):313-319.

[15] 李宗尧,杨桂山.安徽沿江地区耕地数量变化特征及其对粮食安全的影响[J].资源科学,2006,28(6):91-96.

[16] 赵连武,谢永生,王继军,等.陕西省米脂县耕地动态变化与粮食安全研究[J].水土保持通报,2009,29(4):143-148.

[17] 费罗成.中国中部地区耕地集约利用评价及安全水平预测[D].安徽芜湖:安徽师范大学,2009.