DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2017.06.020

基于 PPC 模型与 RI 指数法的茶产地土壤重金属污染评价①

王 历[1,3]，周忠发[2,3*]，李丹丹[1,3]，黄登红[1,3]

(1 贵州师范大学喀斯特研究院，贵阳 550001；2 贵州师范大学地理与环境科学学院/喀斯特研究院，贵阳 550001；
3 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地，贵阳 550001)

摘 要：以某喀斯特山区茶产地表层土壤为研究对象，依托 GIS 空间分析技术，采用投影寻踪聚类(PPC)模型和潜在生态风险指数(RI)法两种较新的评价方法对土壤重金属污染进行综合评价。投影寻踪聚类模型将 236 个土壤样本中的 Hg、As、Cd、Pb、Cr 含量指标作为多维投影参数寻求其最优投影方向，由投影指标函数得出土壤重金属污染投影值来反映重金属含量的特征，建立投影寻踪聚类模型，从而得出研究区土壤重金属污染实际现况，结合潜在生态风险指数法，进一步对研究区土壤重金属污染风险程度和演变趋势进行预测。结果表明：①在指标投影方向上 Hg 和 As 对研究区土壤污染影响最大，Cd 对土壤污染影响最小；②根据 PPC 评价标准，研究区土壤环境质量状况良好，无污染的样点区域达到 96.61%，清洁占总样点数的 30.08%，尚清洁占总样点数的 66.53%；③在潜在生态风险上存在低度、中度，分别占采样点的 89.41% 和 10.59%，风险程度较低，但有向中度演变的趋势；④在污染情况上，清洁和尚清洁的空间分布广阔，轻度污染进行内插后空间分布不明显。本文研究结果有利于综合评价该地的土壤环境质量状况，在实践中将为喀斯特山区的土壤资源的管理和茶叶种植区的合理布局起到参考作用。

关键词：茶产地；GIS；投影寻踪聚类模型；潜在生态风险指数法；综合评价

中图分类号：X53 文献标识码：A

近年来，随着中小型城市工农业和城市化的快速发展，交通运输、工业排放、化肥农药施用和大气沉降等造成的土壤重金属污染越来越严重[1-4]。随着偏远喀斯特山区的茶产地产业化和企业化不断增强，企业和工业的发展使茶产地土壤受污染进程不断加快。茶产地土壤重金属不仅影响和改变土壤生态环境功能，而且茶叶的重金属富集间接地危害人体健康。

土壤的重金属污染一直是社会关注热点和多因素的综合问题，其研究和评价方法众多。例如，运用内梅罗综合污染指数[5]、污染负荷指数法[6]、环境风险指数法[7]均对土壤重金属污染有所研究和评价，但以上方法在评价时均存在缺陷和不足。内梅罗综合污染指数法过分突出了污染指数最大的污染物对环境质量的影响和作用[8]；污染负荷指数法没有考虑不同污染物源所引起的背景差别[9]；环境风险指数法不能反映出重金属污染在这个时间和空间的变化特征[7]。因此，为了综合、全面地对研究区土壤环境质量进行评价，本文引入投影寻踪聚类模型 (projection pursuit cluster，PPC) 和潜在生态风险指数法 (potential ecological risk index，RI) 两种较新的研究方法。Stanford 大学的 Friedman 和 Tukey[10]在 1974 年提出了投影寻踪，一个将高维数据投影到低维的一类新兴工具，现在已经被应用于多个领域。例如在追求稳健主成分分析心电图增强方面的应用[11]，在水文和气象方面的应用[12-13]，以及刘慧卿等[14]运用加速遗传算法优化投影寻踪模型对土壤重金属污染的评价中进行了应用。Hakanson[15]的潜在生态风险评价法是国内外重金属风险评价应用中较新的方法，近年来一些研究学者使用潜在生态风险评价法评价了矿区土壤重金属的生态风险[16-17]；陈江等[18]运用潜在生态风险评价法研究了湖州市土壤重金属元素分布及潜在生态风险；蒋红群等[19]对北京市土壤重金属潜在生态风险进行了预警研究。本文通过投影寻踪聚类模型和潜在生态风险指数法两种方法综合研究，既能将多指标

①基金项目：国家自然科学基金项目(41661088)、贵州省重大科技专项计划(黔科合重大专项字[2013]6024 号)、贵州省科技计划项目(黔科合 GY 字[2015]3001)、贵州省高层次创新型人才培养计划—“百”层次人才项目(黔科合平台人才[2016]5674)、贵州省国内一流学科建设项目 (黔教科研发[2017]85 号)和国家遥感中心贵州分部平台建设项目(黔科合计 Z 字[2012]4003)资助。

* 通讯作者(fa6897@163.com)

作者简介：王历(1991—)，男，四川绵阳人，硕士研究生，主要研究方向为地理信息系统与遥感。E-mail: 827544609@qq.com

因素问题转化为单一指标因素问题，达到综合分析土壤重金属污染现状的目的，又能进一步对土壤重金属污染风险程度和演变趋势进行预测，能够更加准确、科学地评价土壤环境质量状况。

研究区是贵州省著名的产茶县，也是该区主要的产业支柱，其茶产地土壤质量状况对全省茶叶产量与品质有直接影响。文章利用投影寻踪聚类模型和潜在生态风险指数法两种较新的方法，对研究区土壤重金属污染展开研究和评价，旨在弄清研究区土壤重金属污染现状、风险程度和演变趋势以及空间分布规律。希望其研究结果能够对喀斯特山区的土壤资源的管理和茶叶种植区的合理布局起到参考作用。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云贵高原东部，乌江中游，扬子陆块南部被动边缘褶冲带滑脱褶皱带内，平均海拔 720 m，多低山、丘陵、河谷等地形，属于典型的喀斯特地貌。境内属中亚热带湿润季风气候，年均温 15.2 ℃，年平均降水量 1 257.1 mm，土壤以酸性为主，黄壤、紫色土、水稻土广泛分布，是典型的产茶县。

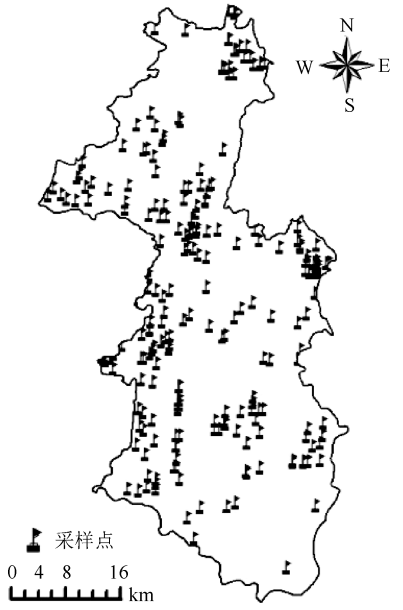


图 1 研究区采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling sites in study area

1.2 供试样本

研究中所用的试验样本采自研究区 13 个乡镇表层土壤(采样深度为 0 ~ 20 cm)。每个中心样点四周间设置 4 个辅助点，利用手持 BDS 对中心样点定位。将 4 个辅助样点表层土壤和中心样点土壤混合，去掉杂草、草根、砾石、砖块、肥料团块等杂物，用“四分法”取约 2 kg 混合土样带回室内作为该点的土壤样品，自然风干，磨细后过 100 目尼龙筛、试用，共计 236 个样品土壤。

1.3 测定方法

土壤样品处理采用 HNO_3、$HClO_4$、HF 进行三酸消解，分别取 0.5 g 土样、5 ml HNO_3、4 ml HF 和 0.5 ml $HClO_4$ 混合放入聚四氟乙烯坩埚内，放置 100 ℃ 的消化炉内进行消解，待完成后，用 1∶100 的稀 HNO_3 溶液定容样品。检测方法采用石墨炉–原子吸收分光光度法(ASC-990 原子吸收分光光度计、ASC-990 自动进样器和 GF-990 石墨炉)(GB/T 17141-1997)测试出 Cd、Pb、Cr 的浓度值；用原子荧光光谱法(AFS)测试出 Hg 和 As 的浓度值，运用 SPSS 软件分析得出回归直线方程，进一步计算出 Hg、As、Cd、Pb、Cr 含量。

1.4 研究方法

1.4.1 投影寻踪聚类模型　投影寻踪是基于计算机技术，把高维数据投影到低维子空间上，通过优化投影指标函数，寻找能反映原高维数据结构或特征的最佳投影向量，在低维空间上对数据结构进行分析，以达到研究高维数据的目的方法[20]。评价模型建立如下：

步骤 1：数据归一化处理。为消除各指标量纲和统一各指标的变化范围，进行极值归一化处理，设指标值的样本集为 $\{x(i,j)|i=1,2,\cdots,n,j=1,2,\cdots,p\}$，在处理中有两种类型，其公式如下：

对于越大越优的指标：

$$x^*(i,j)=\frac{x(i,j)-x_{\min}(j)}{x_{\max}(j)-x_{\min}(j)} \tag{1}$$

对于越小越优的指标：

$$x^*(i,j)=\frac{x_{\max}(j)-x(i,j)}{x_{\max}(j)-x_{\min}(j)} \tag{2}$$

式中：$x_{\min}(j)$，$x_{\max}(j)$分别为第 j 个指标的最小值和最大值，$x^*(i\,j)$为归一化后样本值。

步骤 2：构造投影指标函数。投影寻踪法是将 p 维数据整合成以 a (a_1, a_2, a_3, a_4, …, a_p)为投影方向上的一维投影值 z_i。在优化综合投影值时，要求样本集 z_i 的局部投影点尽可能密集，最好凝聚成若干个点团，而在整体上投影点之间尽可能散开[21]。因此，试验样本 i 在该方向上的投影值和投影指标函数的公式如下：

$$z_i=\sum_{j=1}^{p}a(j)x(i,j)\quad i=1,2,\cdots,n \tag{3}$$

$$Q(a)=S(a)D(a) \tag{4}$$

式中：a 为单位向量，z_i 为投影值；$Q(a)$为投影指标函数，$S(a)$为投影值的标准差，$D(a)$为投影值的局部

密度，即公式如下：

$$S(a)=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Z_i-\overline{Z_i}\right)^2}{n-1}} \tag{5}$$

$$D(a)=\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}(R-r_{ik})f(R-r_{ik}) \tag{6}$$

式中：$\overline{Z_i}$ 为 Z_i 投影值的平均值，r_{ik} 为试验样本间的距离，R 为局部密度的窗口半径，f 为一单位阶跃函数，当 $R-r_{ik}\geq 0$ 时，值为 1；$R-r_{ik}\leq 0$ 时，值为 0。

步骤 3：模型优化。模型优化是通过求解投影指标函数的最大化问题来估计最佳投影方向，即求解：

目标函数：$\max Q(a)$ (7)

约束条件：$\sum_{j=1}^{p}a^2(j)=1$ (8)

步骤 4：聚类评价。通过模型优化后，得到最佳投影方向，计算各试验样本的投影值，建立等级评价法，并对样本投影值进行极值归一化处理，建立评价标准，确定评价样本所属等级。

1.4.2　综合潜在生态风险指数法　　综合潜在生态风险指数法是土壤重金属污染主流评价法之一，以定量的方法划分出重金属潜在风险程度，反映出环境中多种污染物的综合效应，具有相对快速、简便和标准的特点，被广泛地用于此类研究中[22]。其公式如下：

$$RI=\sum_{i}^{n}E_r^i=\sum_{i}^{n}\left(T_r^i\times C_r^i\right) \tag{9}$$

式中，$C_r^i=C_i\times C_n^i$ 为单项重金属污染指数，C_i 为实测参数，C_n^i 为参比值；$C_d=\sum_i^n C_r^i$ 为多项污染指数之和；E_r^i 为单项潜在生态风险指数；T_r^i 为单项重金属的毒性响应参数。参照 Hakanson 和徐争启[23]的研究结果将 Hg，Cd，As，Pb，Cr 毒性响应参数设为 40，30，10，5，2。综合污染物潜在生态风险程度分级标准见表 1。

表 1　综合潜在生态风险指数分级标准

Table 1　Grading standard of integrated potential ecological risk index

RI 范围	RI<150	150≤RI<300	300≤RI<600	RI≥600
程度	低度	中度	重度	严重

1.4.3　GIS 空间评价法　　GIS 空间评价法是地统计重要评价方法之一，以试验样本投影值和 RI 指数值(表 2)为对象，通过 Kriging 空间插值法[24]得到空间预测图。Kriging 空间插值法是利用原始数据和半方差函数的结构性，对未采样点区域化进行无偏估计的一种方法，更加直观地对综合投影预测图和综合潜在生态风险预测图进行空间分析，其计算公式如下：

$$Z(x_o)=\sum_{i=1}^{N}\lambda_i Z(x_i) \tag{10}$$

式中：$Z(x_o)$ 表示未知样点值，$Z(x_i)$ 表示未知样点周围的已知点值，λ_i 为第 i 个样点的权重，N 表示样本数。

表 2　投影值和综合潜在生态风险指数统计

Table 2　Statistics of projection values and integrated potential ecological risk index

类型	样点数	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数(%)
投影值	236	0.08	1.69	0.63	0.28	44.44
RI 指数值	236	19.26	252.27	89.90	48.40	53.84

2　结果与讨论

2.1　土壤重金属探索性统计分析

从表 3 可知，与国家土壤环境质量标准(GB 15618-2008)二级标准相比，Hg 无超标样点，而 As、Cd、Pb、Cr 在研究区内均有超标样点，超标率分别达到了 14.83%、2.97%、8.47%、1.69%；从由大到小的顺序看，5 种重金属的变异系数是 Cd>Hg>As>Pb>Cr，其中 Cd 变异系数最大，为 166.33%。总体上除了 Cd 元素外，其余 4 种重金属变异系数相差不大，表明研究区土壤中重金属含量空间分布较为均匀。

表 3　土壤中重金属含量分布特征

Table 3　Statistics of heavy metal contents in vegetable-field soil

元素	最小值(mg/kg)	最大值(mg/kg)	平均值(mg/kg)	标准差(mg/kg)	变异系数(%)	国标(mg/kg)
Hg	0.02	0.56	0.18	0.11	60.99	0.70
As	1.29	70.60	19.72	11.64	59.03	30.00
Cd	0.01	1.35	0.10	0.16	166.33	0.45
Pb	7.30	170.65	49.51	23.26	46.98	80.00
Cr	33.70	230.65	119.67	31.46	26.29	200.00

通过研究重金属元素之间的相关性可以推测重金属的来源是否相同[25]。若它们之间存在相关性，则它们的来源可能相同，否则来源可能不同[26]。利用 SPSS22.0 软件对 5 种重金属元素含量进行 Pearson 相关分析，并计算其相关系数(表 4)。分析结果表明：研究区的土壤中 Hg 与 As 呈极显著正相关，相关系数达到 0.758；Hg 与 Cd、Pb、Cr 呈显著正相关，相关系数达到 0.119、0.526、0.290；其中 As 与 Cd、Cd 与 Pb 没有相关关系。因此除了 As 与 Cd、Pb 与 Cd 没有相关关系外，各元素指标之间都存在不同程度的相关关系，分析表明，研究区土壤存在不同程度的土壤重金属混合污染或污染具有同源性。

表 4 土重金属元素间的相关性分析

Table 4 Correlation coefficients between five heavy metals in vegetable-field soil

	Hg	As	Cd	Pb	Cr
Hg	1.000				
As	0.758**	1.000			
Cd	0.119*	–0.057	1.000		
Pb	0.526**	0.377**	–0.090	1.000	
Cr	0.290**	0.207**	0.349**	0.174**	1.000

注：**表示相关性在 $P<0.01$ 水平上显著；*表示相关性在 $P<0.05$ 水平上显著。

2.2 投影寻踪与综合潜在生态风险空间分析

以土壤各评价指标的投影值和综合潜在生态风险指数为对象，利用地统计空间插值功能进行插值分析。地统计插值方法众多，本文采用 Kriging 空间插值法，从而得出研究区综合污染程度图和综合潜在生态风险预测图。Kriging 空间插值法又称空间自协方差最佳插值法，是从变量的相关性和变异性出发，在有限区域内对区域变量的取值进行无偏、最优估计的一种方法[24]。通过 Kriging 空间插值法，得到了综合污染程度图和综合潜在生态风险预测图(图 3 和图 4)。

根据图 2 看出，土壤污染投影值主要集中在 0.077 2 ~ 1.332 4 之间，通过与 PPC 分级标准对比，投影值小于 0.482 8 的样点为清洁，投影值在 0.482 8 ~ 1.332 4 的样点为尚清洁。从投影值插值的图 3 看出，研究区的土壤污染主要呈清洁和尚清洁状态，但轻度污染在进行内插后空间分布不明显。根据图 4 显示，研究区存在潜在的生态风险性，从空间分布图明显看出，研究区绝大部分面积为低度潜在生态风险，但土壤存在中度潜在生态风险，主要在研究区东部和中部的局部成圆形面状分布，造成这些地区土壤潜在生态风险较高的主要原因是这些地区处在城镇，交通道路、城镇住宅用地、废水和金属废弃物较多。因此，为确保土壤环境不会进一步恶化，应加强环境监管，对产生的重金属废弃物合理处理，治理已经污染的土地[27]。

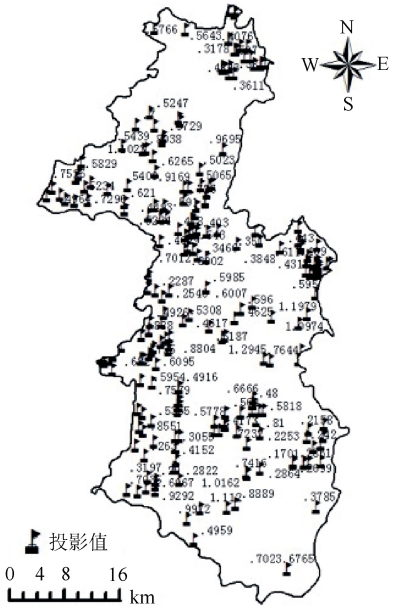


图 2 投影值图

Fig. 2 Projection value



图 3 综合污染程度图

Fig. 3 Integrated pollution degree



图 4　潜在生态风险预测图
Fig .4　Predicated potential ecological risk

2.3　投影寻踪与综合潜在生态风险综合评价

2.3.1　投影寻踪聚类评价　　通过投影寻踪聚类模型，将研究区内 236 个样区的 Hg、As、Cd、Pb、Cr 5 种重金属元素作为多维评价指标。因为研究区土壤存在不同程度的土壤重金属复合污染，所以，5 种评价指标含量简单累积不能科学地评价该区域的土壤重金属污染情况。因此，采用投影寻踪模型将多维评价指标数据转化为一维数据，客观科学地评价分析土壤的重金属污染问题[28]。将 5 个评价指标作为投影参数，利用 MATLAB7.0 软件对投影参数进行编程计算，得出最佳投影方向和投影值，运用 Origin 软件制图得到图 5、图 6，运用 SPSS22.0 软件对投影值进行聚类分析，得出分类等级评价表(表 5)。

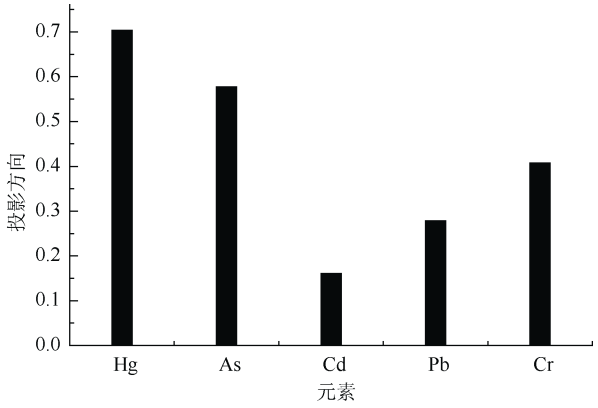


图 5　土壤样本各评价指标柱状图
Fig. 5　Histogram of heavy metal elements of soil samples

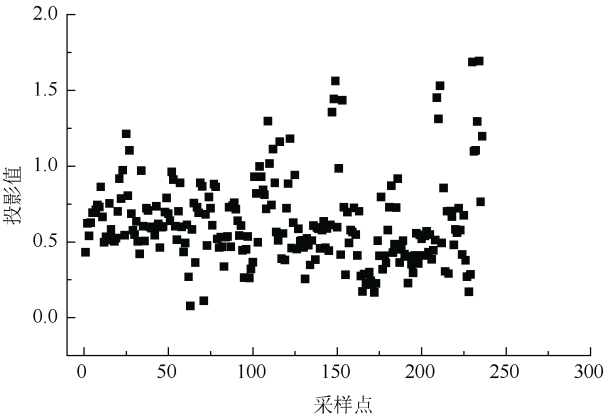


图 6　研究区土壤采样点投影值散点图
Fig. 6　Scatter plot of project value of soil sampling sites in the study area

表 5　土壤环境质量评价分级标准及 **PPC** 评价标准
Table 5　Standards of classification standard of soil environmental quality assessment and of PPC evaluation

等级	Hg	As	Cd	Pb	Cr	样点数	百分比(%)	PPC 评价标准
清洁	0.15	15	0.2	35	90	71	30.08	<0.482 8
尚清洁	0.5	25	0.3	300	300	157	66.53	0.482 8 ~ 1.332 4
轻度污染	1.5	30	1	500	400	8	3.39	1.332 4 ~ 2.399 9
重度污染						0	0.00	＞2.399 9

土壤样本各评价指标柱状图分析得出，Hg 和 As 对研究区土壤的污染影响最大，对土壤影响最小的污染物是 Cd。研究区土壤采样点投影值散点图显示，在局部投影点较为密集，凝聚成若干个点团，而在整体上投影点之间较为散开，投影效果很好。但是通过散点图可看出，在样点 149、153、209 ~ 211、230、234 的投影值偏高，表明这些样点土壤环境质量状况较差。

依据表 5 土壤环境质量评价分级标准，建立投影寻踪聚类模型，计算得到土壤环境质量分级标准的综合投影特征值分别为清洁 Z_{I} = 0.482 8，尚清洁 Z_{II} = 1.332 4，轻度污染 Z_{III} = 2.399 9。因此，土壤环境质量 PPC 评价标准为清洁＜0.482 8，尚清洁 0.482 8 ~ 1.332 4，轻度污染 1.332 4 ~ 2.399 9，严重污染>2.399 9。通过与土壤环境质量 PPC 评价标准比对，研究区样点投影值呈现一定规律，从表 5 看出，土壤重金属污染处于清洁的样点达到了 71 个，占总样点数的 30.08%；土壤重金属污染处于尚清洁的样点达到了 157 个，占总样点数的 66.53%；土壤重金属污染处于轻度污染的样点达到了 8 个，占总样点数的

3.39%，呈先增大后减小的趋势，总体上土壤环境质量状况良好。

2.3.2 综合潜在生态风险评价 为更科学、标准、快速地判断研究区土壤环境质量优劣情况，采用综合潜在生态风险指数法，以定量的形式划分出重金属潜在风险程度，从而精确反映出环境中多种污染物的综合效应。从表 6 得知，研究区综合潜在生态风险等级只有低度、中度两个级别，分别占总采样点的 89.41% 和 10.59%。研究区重金属污染的潜在生态危害风险程度较低，处在一个较为良好的程度。

表 **6** 综合潜在生态风险指数统计
Table 6 Statistics of integrated potential ecological risk index

RI 范围	RI＜150	150≤RI<300	300≤RI<600	RI≥600
程度	低度	中度	重度	严重
样点数	211	25	0	0
百分比(%)	89.41	10.59	0.00	0.00

根据不同分级的评价标准，投影寻踪聚类评价与综合潜在生态风险评价的结果都从不同角度评价了研究区土壤重金属污染的情况。投影寻踪聚类评价得出了该区土壤重金属污染的现状，污染等级达到清洁、尚清洁和轻度污染 3 个级别。综合潜在生态风险评价得出了该区污染风险程度为低度和中度 2 级别，并且有向中度演变的趋势，需要提前做好防治。从二者的评价结果上看有一定联系，投影寻踪聚类评价中土壤重金属污染的清洁和尚清洁程度在综合潜在生态风险评价中等同于低度或无污染危害；投影寻踪聚类评价中的轻度污染是根据国家土壤环境质量评价级别为依据，高于第二级、低于或等于第三级限定值确定为轻度污染，轻度污染对农业生产、人体健康都存在危害，会导致中度潜在生态风险。

3 结论

1)研究区内 Hg 均未超标，而 As、Cd、Pb、Cr 在研究区内均有超标样点，超标率均在 15% 以下，表明研究区的土壤环境质量较好；变异系数上 Cd 的值最大，其余 4 种重金属变异系数相差较小，表明研究区土壤中重金属含量没有集中富集，空间分布较为均匀。

2)综合重金属污染图和综合潜在生态风险预测图结果显示：前者中研究区处在清洁和尚清洁两个等级，中部清洁性较高，只有东南部和西南部小部分属于尚清洁，进一步治理跟预防可以到达清洁的等级；后者中研究区处在低度和中度两个等级，风险程度较低，土壤环境质量较良好。但研究区存在一定的潜在生态风险性，有向中度演变的趋势，土壤的环境质量需要改良，治理和预防措施需要加强。

3)投影寻踪聚类评价与综合潜在生态风险评价的结果具有一定联系性，投影寻踪聚类评价中的清洁和尚清洁程度在综合潜在生态风险评价中等同于低度或无污染危害，而投影寻踪聚类评价中的轻度污染对农业生产、人体健康都存在危害，会导致中度潜在生态风险。

参考文献：

[1] Garcia R, Mil Ian E. Assessment of Cd, Pb, and Zn contamination in roadside soils and grasses from Gipuzkoa(Spain) [J]. Chemo-sphere, 1998, 37(8): 1615–1625

[2] Aleem A, Isar J, Malik A. Impact of long-term application of industrial wastewater on the emergence of resistance traits in Azotobacter chroococcum isolated from rhizos-pheric soil[J]. Bioresource Technology, 2003, 86(1): 7–13

[3] 曹伟, 周生路, 王国梁, 等. 长江三角洲典型区工业发展影响下土壤重金属空间变异特征[J]. 地理科学, 2010, 30(2): 283–289

[4] 吴绍华, 周生路, 张红富, 等. 经济发展梯度影响下的江苏农用地土壤重金属含量分布局[J]. 地理科学, 2008, 28(3): 412–418

[5] 李祚泳, 丁晶, 彭荔红. 环境质量评价原理与方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004

[6] Raj S P, Ram P A. Determination and contamination assessment of Pb, Cd, and Hg in roadside dust along Kathmandu-Bhaktapur Road Section of Arniko Highway, Nepal[J]. Research Journal of Chemical Sciences, 2013, 3(9): 18–25

[7] Rapant S, Kordik J. An environmental risk assessment map of the Slovak Republic: Application of data from geochemical atlases[J]. Environmental Geology, 2003, 44: 400–407

[8] 孙雷, 孙世群, 杨晨. 几种综合指数方法在土壤重金属污染评价中的应用——以淮南矿区为例[J]. 赤峰学院学报, 2013, 29(11): 34–36

[9] 丁喜桂, 叶思源, 高宗军, 等. 近海沉积物重金属污染评价方法[J]. 海洋地质动态, 2005, 21(8): 31–36

[10] Friedman J H, Tukey J W. A projection pursuit algorithm for exploratory data analysis[J]. IEEE Transactions on Computers, 1974, C 23(9): 881–890

[11] Kotas M. Application of projection pursuit based robust principal component analysis to ECG enhancement[J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2006, 1(4): 289–298

[12] Van Hulle M M. Nonparametric regression modeling with equiprobable topographic maps and projection pursuit learning with application to PET image processing[J]. Journal of VLSI Signal Processing, 1998, 18 (3): 275–285

[13] Wang S J, Ni C J. Application of projection pursuit dynamic cluster model in regional partition of water resources in China[J]. Water Resources Management, 2008, 22(10): 1421–1429

[14] 刘慧卿, 张先起, 杨会娟. 基于 RAGA 的投影寻踪模型在土壤重金属污染评价中的应用[J]. 河南农业科学, 2005(10): 60–62
[15] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975–1001
[16] 孙叶芳, 谢正苗, 徐建明, 等. TCLP 法评价矿区土壤重金属的生态环境风险[J]. 环境科学, 2005, 26(3): 152–156
[17] 许超, 夏北成. TCLP 法评价酸性矿山废水污染稻田土壤重金属的生态风险[J]. 生态环境, 2008, 17(6): 2264–2266
[18] 陈江, 张海燕, 何小峰, 等. 湖州市土壤重金属元素分布及潜在生态风险评价[J]. 土壤, 2010, 42(4): 595–599
[19] 蒋红群, 王彬武, 刘晓娜, 等. 北京市土壤重金属潜在风险预警管理研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 732–746
[20] 付强, 赵小勇. 投影寻踪模型原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 46–51
[21] 高杨, 黄华梅, 吴志峰. 基于投影寻踪的珠江三角洲景观生态安全评价[J]. 生态学报, 2010, 30(21): 5894–5903
[22] 徐清运, 张立新, 刘素红, 等. 表层土壤重金属污染及潜在生态风险评价——包头市不同功能区案例研究[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(6): 6–12
[23] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. 环境科学, 2004, 25(1): 117–122
[24] 侯景儒, 尹镇南, 李维明, 等. 实用地质统计学(空间信息统计学)[M]. 北京: 地质出版社, 1998
[25] 胡春华, 蒋建华, 周文斌. 环鄱阳湖区农家菜地土壤重金属风险评价及来源分析[J]. 地理科学, 2012, 32(6): 771–776
[26] 辛蕊, 张思冲, 周晓聪, 等. 大庆城区土壤重金属污染及相关性分析[J]. 中国农学通报, 2008, 24(9): 416–420
[27] 刘平, 邹峥嵘, 杜锦华. 基于 GIS 与 PPC 的土壤重金属污染综合评价[J]. 测绘与空间地理信息, 2012, 35(5): 115–119
[28] 侯秀玲, 周益民, 王绍俊, 等. 基于投影寻踪模型的农田土壤重金属污染分析[J]. 三峡环境与生态, 2012, 34(1): 60–62

Assessment of Heavy Metal Pollution in Tea-planting Soils Based on PPC Model and RI Index Method

WANG Li[1,3], ZHOU Zhongfa[2,3*], LI Dandan[1, 3], HUANG Denghong[1, 3]

(1 *School of Karst Science*, *Guizhou Normal University*, *Guiyang* 550001, *China*; 2 *School of Geography & Environmental Science/ School of Karst Science*, *Guizhou Normal University*, *Guiyang* 550001, *China*; 3 *State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province*, *Guiyang* 550001, *China*)

Abstract: Taking the topsoils of the tea-planting area in Karst mountainous regions of Guizhou Province as the study object, based on GIS spatial analysis technology, projection pursuit cluster (PPC) model and potential ecological risk index (RI), as two new evaluation methods, were used to comprehensively evaluate the heavy mental pollution in soil. PPC model takes the contents of Hg, As, Cd, Pb and Cr in 236 soil samples as the multi-dimensional projection parameter to seek its optimal projection direction, obtains the projection value of soil heavy mental pollution by the function of projection index to reflect the characteristic of heavy metal content, establishes the poly class model of projection pursuit, knows the actual situation of soil heavy mental pollution, and further to predict the pollution degree of soil heavy metals and its evolution trend in the study area combined with the method of potential ecological risk index. The results showed that: 1) Hg and As had the greatest influences on soil pollution in the projection direction of index, while Cd had minimal impact on soil pollution. 2) according to the criteria of PPC evaluation, soil environmental quality in the study area was in good condition, the areas of no-pollution level accounted for 96.61% of the study area, the numbers of clean level and still clean level accounted for 30.08% and 66.53% of the total samples, respectively. 3) There were low level and moderate level in the potential ecological risk, accounted for 89.41% and 10.59% of the total samples, respectively, their risk degree were low, but trended to worsen into moderate level. 4) On pollution level, the clean level and still clean level distributed widely in the study area, the spatial distribution of light pollution level was not obviously after interpolation. The above results are favorable for the comprehensive evaluation of soil environmental quality and can play a reference role in the management of soil resources and the rational distribution of tea-planting in Karst areas.

Key words: Tea-planting region; GIS; Projection pursuit cluster (PPC); Potential ecological risk index; Comprehensive evaluation