

李小曼,徐梦洁,刘 勤,等. 基于内梅罗指数法及其改进方法的小尺度区域土壤重金属污染评价——以苏南地区为例[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(3): 241–245.

doi:10. 15889/j. issn. 1002–1302. 2017. 03. 065

基于内梅罗指数法及其改进方法的小尺度 区域土壤重金属污染评价 ——以苏南地区为例

李小曼^{1,2}, 徐梦洁², 刘 勤¹, 孟令仪²

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏南京 210008; 2. 南京农业大学公共管理学院, 江苏南京 210095)

摘要:采用 110 个采样点数据,利用内梅罗指数法及其改进方法,结合评价标准对小尺度区域 Y 镇土壤重金属污染进行评价,比较各自方法的优缺点、适用性,并选择最优方法使得评价结果更为全面地反映小尺度区域土壤重金属污染程度,从而为该地土壤重金属污染治理提供依据。结果表明:内梅罗指数法的改进方法更适用于小尺度地区的土壤重金属污染评价,该方法改进了内梅罗指数是因为最大值而夸大了污染情况的缺点,更加重视外界因素对土壤重金属污染的影响,分级更加科学。

关键词:重金属污染评价;内尔梅罗指数法;改进方法;小尺度;苏南

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1002–1302(2017)03–0241–05

重金属污染的主要来源包括工业污染、金属矿山开采、污水灌溉、固体废弃物处置等方面^[1],近年受到了研究人员的广泛关注。我国在第 1 个国家“十二五”规划上通过了《重金属污染综合防治规划》,这充分表明对重金属污染问题的重视已经上升到国家层面。污染物在土壤中的聚集往往因人为活动的增强呈现出高度的空间变异性,使得土壤重金属污染问题更为复杂,往往在空间上形成一种或多种趋势^[2]。由于重金属不易移动溶解,进入生物体会后积累下来,并对生物体产生不利影响。如低浓度的 Hg 在小麦萌发初期能起到促进作用,但随着影响时间的延长,呼吸作用会降低,最终表现为抑制作用^[3]。土壤重金属污染潜伏时间长,多数重金属不易降解,对农作物的品质、产量造成不良影响,甚至可以通过食物链影响人类健康^[4]。因此,了解土壤中重金属的含量与空间分布并进行污染评价,对于土壤重金属污染防治乃至维护人体健康都具有十分重要的意义。

在城镇化发展飞速的苏南地区,因乡镇企业大力发展和监管力度缺乏而导致的村镇地区土壤重金属污染问题十分严重^[5]。乡镇是一个特定的区域,处于城市的外围,是连接农村和城市的桥梁与纽带,在接受大中型城市辐射的同时,带动周围广大农村经济和社会的发展,并促进农民生活水平的提高^[6]。现阶段,乡镇企业快速发展,先进的农业技术得到广

泛应用,但是环境问题也随之而来。由于乡镇监管力度薄弱,乡镇企业的厂房设施一般较为简陋,重金属物质排放不合理,使得土壤重金属污染成为乡镇环境中较为严峻的问题。苏南的乡镇企业非常多,乡镇企业的蓬勃发展,为乡镇经济的腾飞、社会发展和环境建设提供了较为雄厚的物质基础,有力地促进了苏南农村现代化建设的步伐。由于大力发展经济,苏南在乡镇环境污染方面存在许多问题,尤其是那些“看不见”的污染。由于重金属在土壤中迁移缓慢,较小的尺度更能反映污染的真实性,所以展开以村镇为单位的小尺度土壤重金属污染研究显得更为重要。

土壤重金属污染研究中,评价方法也是十分重要的研究内容。目前,国内外应用较多的土壤重金属评价方法有内梅罗指数法、环境风险指数法^[7]、灰色聚类法^[8]等,其中内梅罗指数法应用最为广泛,并对该方法做了种种改进。在土壤重金属污染评价时,研究人员往往只使用一种评价方法,往往导致结果唯一,没有可比性,无法进行择优判断;评价时所采用的基准值通常为国家基准值或江苏省基准值,范围较广,不能因地制宜体现研究区域的实际情况。同时,重金属污染评价的范围一般趋向大中尺度,小尺度的研究较为少见。因此,本研究以小尺度区域为依托,使用采样数据,采用内梅罗指数及其改进方法对研究区域的重金属污染进行评价,通过对比评价结果,得出更为符合研究区域实际情况的评价结果,进而确定小尺度区域重金属污染评价的适宜方法。研究结论也可以为政府部门以及环保部门的工作提供参考。

1 研究区域、材料与方法

1.1 研究区概况

Y 镇位于江苏省 C 市,地处中国经济最活跃的区域——上海经济圈中心,总面积约为 12.67 km²。境内四季分明,属

收稿日期:2015–12–11

基金项目:国家科技支撑计划(编号:2012BAJ24B06)

作者简介:李小曼(1990—),女,江苏南京人,硕士研究生,从事环境地理信息系统、地图学与地理信息系统的研究。E-mail: xiaoman421@qq.com。

通信作者:徐梦洁,硕士生导师,从事区域经济与可持续发展、地理信息系统研究。Tel: (025)84395700; E-mail: xmj@njau.edu.cn。

亚热带季风气候,年平均气温为 16℃;雨量充沛,水网稠密,年平均降水量为 1 200 mm,土壤类型主要为水稻土^[9]。Y 镇高速发展工业、苗木种植、水产养殖、农业观光旅游,其中工业产值占该镇总产值的 90% 以上。工厂主要集中在东部,尤其是东南部地区,主要有纺织厂、印染厂、机械制造厂、五金厂、温室制造厂等(图 1)。笔者在污染源调查中了解到,Y 镇有大型铜管厂,并且金属材料厂、电镀厂较多,很多工厂的废水、废渣中都含有重金属。

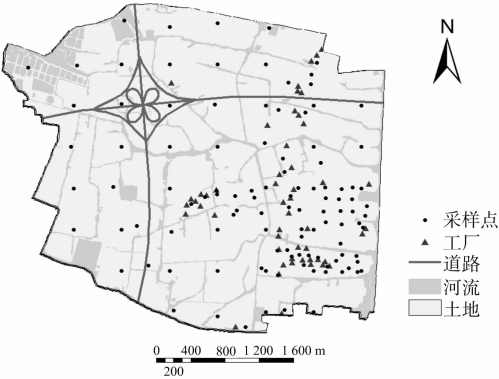


图1 土壤重金属取样点分布

1.2 材料与方法

1.2.1 样品采集与前期处理 本研究采用的是格网布点法与半随机布点法相结合的采样方式。在乡镇工业区范围以外的研究区内以 500 m 格网布点;乡镇工业区内由于厂房众多,并且排列不规则,同时要避开道路等设施,不便于采用格网的形式,所以采取加密布点的方式,加密时一部分考虑了主要污染源,一部分随机布点,尽量覆盖景观草坪、居民地、工厂、水稻田、养殖水面等不同的土地利用现状。采样时间为 2014 年 10 月 21—22 日,重金属采样器型号为 WN0306。采样时,用手持式 GPS 精确定位,采集表层 0~20 cm 土壤。其中,每一样点分别向 4 个方向辐射约 2 m(在 5 m×5 m 方格内),共采集 5 次。将 5 份样品均匀混合制成该样点的样品,并标号,采样点分布如图 1 所示,共采集 110 个样。工厂附近 200 m 以内的点占 43.64%,农作物及附近 50 m 以内的点(包含居民区内零碎菜地、农业科技园等)占 22.72%。

采集的土壤样品带回实验室,置于阴凉处,室温下使其自然风干。将风干的土壤样品用木棒压揉捻碎过 20 目的尼龙筛,并分成 2 份,一份进行 pH 值的测定,另一份研磨过 100 目的尼龙筛并充分混合均匀,装瓶并贮存于干燥器内备用。

1.2.2 样品分析 土样 pH 值的测定采用便携式 pH 计(SG8-FK)用玻璃电极法进行测定,水土比为 2.5:1。土壤重金属分析项目为全量 Cr、Cu、Zn、Ni、Pb、Cd、As、Hg,其中 Cr、Cu、Zn、Ni、Pb、Cd 含量前处理采用 HF-HClO₄-HNO₃ 等 3 酸高温消解,Cr、Cu、Zn、Ni 含量采用电感耦合等离子光谱法(ICP-AES)测定^[10],Pb、Cd 含量采用液相色谱电感耦合等离子体质谱仪(HPLC-ICP-MS)测定,As、Hg 含量采用 GB/T 22105.1—2008《土壤质量总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法第 1 部分:土壤总汞的测定》、GB/T 22105.2—2008《土壤质量总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法第 2 部分:土壤总砷的测定》测定。重金属分析测试过程中均用 GSS-4

和 GSS-5 标准参考土样进行全程质量控制。

2 评价指标体系与方法

2.1 土壤重金属污染评价标准

为切实反映 Y 镇的实际情况,本研究采用当地土壤背景值作为评价基准。土壤背景值是土壤环境评价的基准值,同时也是土壤污染态势预报、土壤环境容量计算、土壤环境质量标准确立以及制定国民经济发展规划的重要基础数据^[11]。本研究以苏南土壤背景值作为各种污染评价方法的基准(表 1)。

表 1 土壤质量标准及背景值

元素	苏南土壤自然背景值(mg/kg) ^[12]	水田土壤环境质量标准值(mg/kg)		
		一级 ^[13]	二级(pH 值 6.5~7.5) ^[13]	三级(pH 值 >6.5) ^[13]
Cu	22.780	35.00	100.00	400.000
Pb	20.390	35.00	300.00	500.000
Zn	73.020	100.00	250.00	500.000
Cd	0.116	0.20	0.30	1.000
Ni	29.120	40.00	50.00	200.000
Cr	65.720	90.00	300.00	400.000
As	8.800	15.00	25.00	30.000
Hg	0.163	0.15	0.50	1.500

2.2 内梅罗指数法及其改进方法

2.2.1 内梅罗指数法 内梅罗指数法(综合污染指数法)是一种兼顾极值或突出最大值的计权型多因子环境质量指数法,该方法包括单项污染指数法和综合指数法。其中,单项污染指数法是以重金属含量实测值和评价标准相比除去量纲来计算污染指数的方法,能够准确反映某种重金属元素的污染程度,目标明确,公式及分级标准参见文献[14]。在单项污染指数法的基础上发展内梅罗综合污染指数法,可以较全面地反映多种污染物的共同作用。内梅罗指数可以突出显示指数最大值的重金属污染物的危害性,但可能会夸大或缩小一些污染物的影响,导致对土壤污染程度分级的不精确,环境质量评价有偏差。

2.2.2 内梅罗指数法的几种改进方法

2.2.2.1 单项污染指数结合土壤背景值修正 原单项污染指数法中,S_i为土壤环境质量的标准值,未扣除自然背景值,使得外在因素的影响不突出。因此,如果要突出表示人为等外在因素对环境的影响,可以对单项污染指数用土壤背景值进行修正^[15]。

2.2.2.2 多因子综合污染指数结合环境影响程度修正 由于不同重金属元素对环境的影响大小不同,为了能将不同元素的影响程度考虑进来,而不是都视为一致,更合理地反映出污染程度,可以采用加权计算法改进 i 采样点所有污染物的算数平均值公式,后面计算综合污染指数的公式仍然不变^[16]。

权重和类别依据 Swaine 的环境影响程度划分,把 Hg、Pb、Cd、As 几种毒性较高的元素归为 I 类,权重设为 3;Zn、Cu、Cr、Ni 几种毒性较低的元素归为 II 类,权重设为 2^[16]。

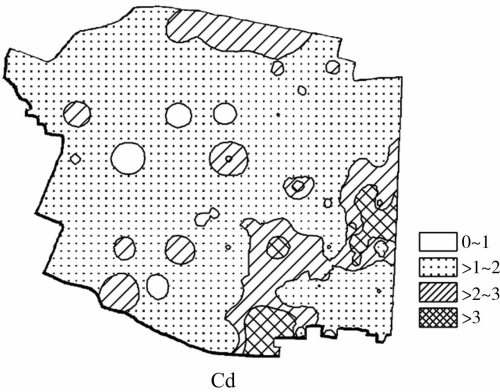
2.2.2.3 内梅罗指数结合地累积指数改进 地累积指数具有与单项污染指数一致的作用,只是考虑的因素更多、更全面。因此,可以把单项污染指数替换为地累积指数,从而获得

新的综合指数^[17]。

2.2.2.4 内梅罗指数结合土壤环境质量的改进 直接采用内梅罗指数法评价,仅在公式中依据当地土壤背景值或土壤环境质量评价标准来计算,安全系数较小,且规范性和可比性欠佳。采用土壤环境质量标准对内梅罗指数法进行改进,可使得评价结果更加合理,可比性增强,更符合评价的实际需要。该方法依据 GB 15618—1995《土壤环境质量标准》的三级标准分别作为评价的各级污染的初始值,把土壤重金属污染分为 4 级,并在划分级别上也进行相应调整^[18]。

全部采样点单因子污染指数的平均值以及全部采样点单因子污染指数的最大值,共分为清洁、轻度污染、中度污染和重度污染 4 级,单项污染指数分级不变,综合污染指数的划分界点将 2 种常见的分级方法进行改进,取 2 种方法的算术平均数。

3 评价结果与分析



采用上述方法分别对研究区土壤中的 8 种重金属元素进行污染评价,对采样点进行分级统计。为了更直观地展示出研究区的整体污染状况,选用插值效果较好的径向基函数法的高次曲面函数对样点土壤环境质量分类评价结果进行空间插值,并运用 ArcGIS 进行等值线图的绘制。

3.1 内梅罗指数法

3.1.1 单项污染指数评价 单项污染指数法实际上是利用实测数据和标准对比分类,根据单项污染指数计算公式对 110 个采样点重金属数据分别进行单项评价,得到研究区内的重金属污染情况。由统计结果得知,Hg 和 Cd 的污染程度较大,分别有 19、20 个样点严重污染,中度污染的比例分别为 14.55% 和 20.91%,而 Ni、Zn 重度污染的样点各有 1 个。其余元素大多无污染,少部分为轻度污染。Hg、Cd 无污染的比例非常低,只有 35.45% 和 20.91%,说明该地区 Hg、Cd 污染非常严重。以元素 Cd、Hg 为例,分别生成插值图并分级,结果如图 2 所示。

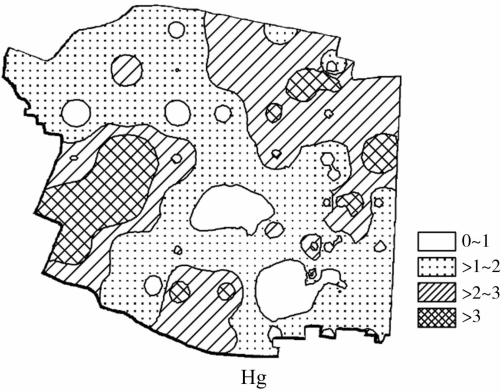


图2 单因子内梅罗指数评价结果

3.1.2 多因子综合污染指数评价 计算每一个采样点多因子综合污染指数($P_{综1}$)均值得到采样点多因子综合污染指数($P_{综}$),详见表 2, $P_{综}$ 为 1.98,表明该地区总体为轻度污染。但接近于中度污染级别,污染极有可能往中、重度级别发展,需要在局部地区开展防治工作。

表 2 多因子综合污染指数评价

污染程度	$P_{综1}$	样本数 (个)	占总样点数 (%)
安全	≤ 0.7	7	6.36
警戒限	$> 0.7 \sim 1$	8	7.27
轻度污染	$> 1 \sim 2$	50	45.45
中度污染	$> 2 \sim 3$	31	28.18
重度污染	> 3	14	12.73

Hg 的比例有所下降,分别从 0.91%、20.91% 下降为 0、16.36%;在重度污染部分,Ni、Zn、Cd、Hg 所占的比例都有所上升,分别从 0.91%、0.91%、18.18%、17.27% 分别上升至 4.55%、1.82%、28.18%、27.27%。总体来看,修正后的单项污染指数更加强调外因对污染的影响,无污染部分污染程度没有变化,而中度和重度污染的比例大大增加,但是在污染元素的分配上基本没有变化。

修正后的单因子综合指数排序不变,但是在单项指数的均值、最大值调整后的综合指数上,Ni、Cd、Hg 的值明显增加。尤其是 Ni,污染程度从中度上升为重度,而 As 的指数却有所下降,其他指数基本不变,说明这种修正方法更加夸大了极值的作用,突出了外因的影响程度。

3.2.2 内梅罗多因子综合污染指数结合环境影响程度修正 在单项污染指数修正的基础上进行单个采样点所有污染物的

3.2 改进方法

3.2.1 内梅罗单项污染指数结合背景值修正 修正后的内梅罗指数削弱了内因的影响,重点考虑外在因素,实质上是计算各样点的超标率,修正后无污染样点占总样点数的比例没有变化(表 3),在轻度污染部分,Ni、Cd、Hg 所占比例有所下降,从原来的 40.00%、46.36%、26.36% 下降为 32.73%、30.00%、20.91%;而在中度污染部分 Ni、Cd 的比例有所上升,分别从 3.64%、14.55% 上升为 7.27%、20.91%,而 Zn、

的算数平均值公式的修正,即把原来的 $\bar{P}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$ (n 为样点数, P_i 为内梅罗单项污染指数),加入了权重值,来衡量不同重金属元素对环境影响程度的大小。对环境危害大的元素污染值就高,使得评价值更加合理,具体修正前后对比结果参见表 4。从图 3 可以看出,按照综合指数将污染程度划分为 5 级,重度污染的面积大大增加,说明外界因素对整体污染影响程度较高,不容忽视。

表 3 单项污染指数修正前后对比的评价结果统计

%

重金属元素	无污染指数		轻度污染指数		中度污染指数		重度污染指数	
	修正前	修正后	修正前	修正后	修正前	修正后	修正前	修正后
Cu	96.36	96.36	3.64	3.64	0.00	0.00	0.00	0.00
Ni	55.45	55.45	40.00	32.73	3.64	7.27	0.91	4.55
Zn	91.82	91.82	6.36	6.36	0.91	0.00	0.91	1.82
Cr	99.09	99.09	0.91	0.91	0.00	0.00	0.00	0.00
Cd	20.91	20.91	46.36	30.00	14.55	20.91	18.18	28.18
Pb	99.09	99.09	0.91	0.91	0.00	0.00	0.00	0.00
As	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hg	35.45	35.45	26.36	20.91	20.91	16.36	17.27	27.27

表 4 修正前后多因子综合污染指数评价对比

污染程度	$P_{\text{综}1}$	占总样点数的比例(%)	
		修正前样点	修正后样点
安全	≤ 0.7	6.36	8.18
警戒限	$>0.7 \sim 1.0$	7.27	5.45
轻度污染	$>1.0 \sim 2.0$	45.45	29.09
中度污染	$>2.0 \sim 3.0$	28.18	23.64
重度污染	>3.0	12.73	33.64

注:修正前 $P_{\text{综}}=1.98$;修正后 $P_{\text{综}}=2.65$ 。

价结果见表 5、表 6。

3.2.4 内梅罗指数结合土壤环境质量的改进 采用土壤环境质量的三级标准制定新的评价体系,统计改进前后不同污染级别的样点占总样点数的比例,改进前后的单项污染指数和改进后的多因子综合指数评价结果对比情况如表 7、表 8 所示。

表 5 改进后的单因子综合污染指数评价

重金属元素	I_{ave}	I_{max}	P	污染等级	污染程度	污染程度排序
Cu	0.45	2.14	1.55	2	中	5
Ni	0.21	1.94	1.38	2	中	6
Zn	0.02	3.58	2.53	3	中至强	4
Cr	-0.38	1.76	1.27	2	中	7
Cd	1.49	4.65	3.45	4	强	1
Pb	1.69	3.46	2.72	2	中	3
As	-0.70	0.25	0.53	1	无至中	8
Hg	1.35	3.70	2.79	2	中	2

表 6 改进后的多因子综合污染指数评价

污染程度	$P_{\text{综}1}$	占总样点数的百分比(%)	
		修正前样点	修正后样点
安全	≤ 0.7	6.36	5.45
警戒限	$>0.7 \sim 1.0$	7.27	11.82
轻度污染	$>1.0 \sim 2.0$	45.45	59.09
中度污染	$>2.0 \sim 3.0$	28.18	22.73
重度污染	>3.0	12.73	0.91

注:改进前 $P_{\text{综}}=1.98$;改进后 $P_{\text{综}}=1.59$ 。

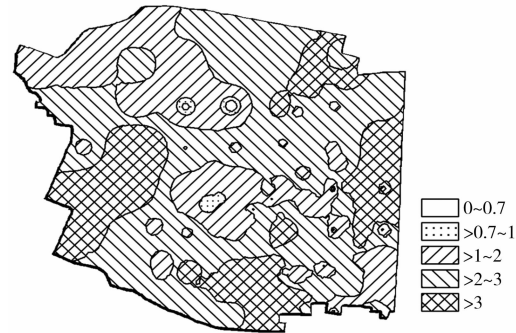


图 3 内梅罗指数结合背景值修正评价结果

3.2.3 内梅罗指数结合地累积指数法改进 将内梅罗指数法与地累积指数法结合有利于 2 种方法缺陷的互补。其中, I_{ave} 是地累积指数的算数平均值, I_{max} 是地累积指数的最大值, P 为改进后的单因子综合污染指数。改进后, 单项污染指数相当于地累积指数, 而单因子综合指数和多因子综合指数评

表 7 改进前后的单项污染指数评价结果对比

%

重金属元素	无污染指数		轻度污染指数		中度污染指数		重度污染指数	
	改正前	改正后	改正前	改正后	改正前	改正后	改正前	改正后
Cu	96.36	15.45	3.64	80.91	0.00	3.64	0.00	0.00
Ni	55.45	17.27	40.00	38.18	3.64	44.55	0.91	0.00
Zn	91.82	51.82	6.36	40.00	0.91	6.36	0.91	1.82
Cr	99.09	85.45	0.91	13.64	0.00	0.91	0.00	0.00
Cd	20.91	4.55	46.36	16.36	14.55	68.18	18.18	10.91
Pb	99.09	0.00	0.91	99.09	0.00	0.91	0.00	0.00
As	100.00	99.09	0.00	0.91	0.00	0.00	0.00	0.00
Hg	35.45	10.00	26.36	25.45	20.91	47.27	17.27	17.27

由表 7 可知, Hg 和 Cd 的污染程度较大。总体来看, 改进后的单项污染指数在污染程度较低的部分污染程度普遍上升 1 个级别, 并且增强了区分度, 污染评价结果更为准确。对于

Pb、Cu 污染指数修正后轻度污染比例明显增加而不是大部分归为无污染的级别, 说明该方法对于污染的识别敏感性较强。如图 4 所示, 污染最为严重的地区集中在东部、南部和西

表 8 改进后多因子综合污染指数评价

污染程度	$P_{\text{综}}$	样本数 (个)	占总样点数的 比例(%)
清洁	≤ 0.85	0	0
轻度污染	0.86 ~ 1.70	16	14.55
中度污染	1.71 ~ 2.56	71	64.55
重度污染	> 2.56	23	20.91

注: $P_{\text{综}} = 2.20$ 。

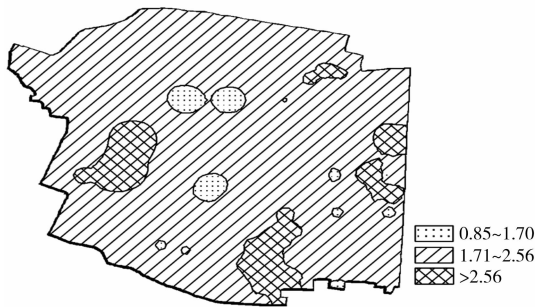


图 4 改进后的多因子综合污染评价结果

部地区。

4 讨论与结论

从内梅罗单项污染指数结合背景值修正后与未经修正的评价结果对比来看,Ni、Cd、Hg 轻度污染所占比例有所下降,从原来的 40.00%、46.36%、26.36% 下降为现在的 32.73%、30.00%、20.91%,变化较为明显,由修正公式可知,Ni、Cd、Hg 受人为因素影响较大。

多因子综合污染指数结合环境影响程度评价法修正后的多因子综合污染评价结果与修正前相比,样本点数在轻度污染、中度污染中的比例有所下降,但在重度污染中的比例却有所上升,轻度污染、中度污染分别从 45.45%、28.18% 下降为 29.09%、23.64%,而重度污染的比例则从 12.73% 上升为 33.64%,说明样点普遍污染程度等级提高了,强调了人为活动影响土壤重金属污染的作用。

内梅罗指数结合地累积指数法改进后的单因子综合污染指数较修正前内梅罗指数比,污染程度下降。污染级别最高为 4 级,说明整体污染程度较重。改进后的多因子综合污染评价结果与改进前相比,样本点数在警戒限、轻度污染中的比例有所上升,但在中度污染、重度污染中的比例却有所下降,说明样点普遍污染程度等级提高,但极端值污染程度降低,重视内在因素和外在因素共同影响土壤重金属污染的过程,更加符合土壤实际情况,改进了内梅罗指数因为最大值而夸大污染情况的缺点,比其他几种修正方法整体污染程度低。

结合土壤环境质量标准的内梅罗指数从评价结果来看,比其他单因子内梅罗指数评价结果更能适度地反映人为因素和自然因素的综合作用情况,分析结果更为客观。而对于多因子综合评价来看,内梅罗指数结合土壤环境质量标准改进评价比其他内梅罗方法更能反映客观实际,且污染分布的区

分度较高,更加形象清晰,有助于决策者进行决策。

综合上述分析,在 Y 镇这样的小尺度区域,重金属污染评价适合采用内梅罗指数的改进方法,改进后的多因子综合污染评价与修正前相比虽然污染级数减少,但仍可以看出,样本点数在清洁、轻度污染中的比例有所下降,但在中度污染、重度污染中的比例却有所上升,说明更加重视了外界因素影响土壤重金属污染的作用,且分级更加科学。

参考文献:

[1] 范松喜,甘卓亭,李美娟,等. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. 中国农学通报,2010,26(17):310-315.

[2] Lin Y P. Multivariate geostatistical methods to identify and map spatial variations of soil heavy metals[J]. Environmental Geology,2002,42(1):1-10.

[3] 顾继光,林秋奇,胡 韧,等. 土壤-植物系统中重金属污染的治理途径及其研究展望[J]. 土壤通报,2005,36(1):128-133.

[4] 陈怀满. 土壤-植物系统中的重金属污染[M]. 北京:科学出版社,1996.

[5] 肖 智,刘志伟,毕 华. 土壤重金属污染研究述评[J]. 安徽农业科学,2010(33):18812-18815.

[6] 方如康. 环境学词典[M]. 北京:科学出版社,2003:530.

[7] 沈体忠,肖 杰. 绿色食品产地土壤重金属生态风险预警评估——以湖北省天门市为例[J]. 农产品质量与安全,2013(6):65-68.

[8] 何厅厅,赵艳玲,李建华,等. 基于 GCM_CB 模型的土壤重金属污染评价[J]. 环境工程学报,2012,6(10):3781-3786.

[9] Ran J, Wang D, Wang C, et al. Using portable X-ray fluorescence spectrometry and GIS to assess environmental risk and identify sources of trace metals in soils of per urban areas in the Yangtze Delta region, China[J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 2014, 16(8):1870-1877.

[10] Leivuori M. Heavy metal contamination in surface sediments in the gulf of Finland and comparison with the gulf of Bothnia[J]. Chemosphere,1998,36:43-59

[11] 夏立江,王宏康. 土壤污染及其防治[M]. 武汉:华中理工大学出版社,2001.

[12] 钱新锋,沈国清. 苏南河网地区河岸带土壤重金属污染生态风险评估[J]. 南京师大学报(自然科学版),2012,35(4):78-83.

[13] 土壤环境质量标准:GB 15618—1995[S].

[14] 林 艳. 基于地统计学与 GIS 的土壤重金属污染评价与预测[D]. 长沙:中南大学,2009.

[15] 吴春发. 复合污染土壤环境安全预测预警研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.

[16] Swaine D J. Why trace elements are important? [J]. Fuel Processing Technology,2000,65/66:21-33

[17] 刘衍君,汤庆新,张保华,等. 基于 ArcGIS 的聊城市耕地土壤重金属污染现状与评价[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2009,40(4):567-571.

[18] 黄国锋,吴启堂. 绿色食品产地土壤环境质量现状评价标准的修正[J]. 农业环境保护,2000,19(2):123-125.