

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 排放测量	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子轲, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)
黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合	陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)
沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)
南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析	秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)
太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征	曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)
2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)
机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成	袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)
DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响	楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)
紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附	李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)
三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征	江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)
三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)
高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例	孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093)
不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应	季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)
丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估	赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)
滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价	王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)
粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险	阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)
鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应	刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)
周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响	贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)
溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响	王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)
微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响	李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)
城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响	唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)
两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究	孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)
巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II)	谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)
改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征	唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)
UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性	任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)
对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究	王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)
高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性	牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)
硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响	周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)
单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响	马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)
钛盐混凝剂调对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制	王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)
城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律	孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)
低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析	信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆峰 (2259)
微丝菌 (<i>Microthrix parvicella</i>) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化	王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)
基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响	吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)
1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性	黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)
长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征	韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)
有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响	张名豪, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)
生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响	张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘恩新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)
多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源	孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)
苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征	陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)
河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)
杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价	龚丹丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)
土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力	田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)
添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响	陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)
应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响	尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽蛟, 孙国新, 崔岩山 (2353)
不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系	辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)
苾芻对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响	潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚阗, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)
维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化	徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)
苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素	许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)
g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ 复合物的制备及可见光催化降解 MO	张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)
海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价	耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)
《环境科学》征订启事 (2130) 《环境科学》征稿简则 (2251) 信息 (2178, 2344)	

苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征

陈昕¹, 潘剑君^{2*}, 王文勇², 李炳亚¹

(1. 南京农业大学公共管理学院, 南京 210095; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 评价土壤重金属污染等级并掌握其空间格局特征, 对区域土壤环境保护和治理具有重要意义。以苏南某镇 8 种土壤重金属 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 为研究对象, 综合运用单因子评价法、内梅罗综合评价法、地统计分析法、景观格局的粒度效应及景观指数分析方法, 在污染评价的基础上, 分析了研究区土壤重金属的景观格局特征。结果表明: ①研究区各土壤重金属单因子污染指数及内梅罗综合评价指数的均值取值范围为 0.145~0.893, 整体污染程度低, 且南部地区污染程度低于北部; ② As、Pb、Hg 和 Zn 面源污染特征明显, 其中 As 和 Pb 空间分布特征相似, Hg 和 Zn 空间分布特征相似; Cd、Cr、Cu、Ni 点源污染特征显著, 其中 Cd 和 Cr 空间分布特征相似, Cu 和 Ni 空间分布特征相似; ③土壤重金属景观的适宜粒度为 30~40 m; ④研究区土壤重金属低含量区域面积比例最大, 较低含量区域边界最复杂, 各污染程度区域分布相对集中且综合污染破碎化程度低。表明研究区重金属污染源数量尚少且分布集中, 但有进一步发展的趋势, 整体处于土壤重金属污染的早期阶段。

关键词: 土壤重金属; 污染评价; 粒度效应; 景观格局指数; 空间格局特征

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2313-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.06.040

Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu

CHEN Xin¹, PAN Jian-jun^{2*}, WANG Wen-yong², LI Bing-ya¹

(1. College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: It is of great significance to evaluate the soil heavy metal pollution level and to know their spatial distribution characteristics. Taking soil heavy metals As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn in a town of southern Jiangsu as research objects, using the single factor evaluation method, Nemerow comprehensive evaluation method, geostatistical analysis method together with the landscape pattern grain effect and the landscape index analysis method, we studied their characteristics of landscape patterns in the study area based on pollution evaluation. The results showed that: ① The average value range of single factor pollution index and Nemerow comprehensive evaluation index for soil heavy metals in study area was 0.145-0.893. The overall pollution level was low. The pollution level of south area was lower than that of north area; ② As, Pb, Hg, and Zn elements showed obvious non-point pollution characteristics. As and Pb showed a similar spatial distribution. So were Hg and Zn elements. In contrast, Cd, Cr, Cu and Ni elements showed obvious point pollution characteristics. Cd and Cr showed similar spatial distribution. So were Cu and Ni elements; ③ The suitable grain effect landscape index of nine soil heavy metals pollution landscape was 30-40 m; ④ The low concentration area of soil heavy metals in the study area accounted for the largest proportion. The border of lower concentration area was the most complex part. The distribution of all pollution level areas was relatively concentrated and the comprehensive pollution fragmentation degree was low. The source pollution of soil heavy metals was in concentrated distribution, and its number still counted low, but there was a tendency for further development. As a whole, it was still in the early pollution stage of soil heavy metals.

Key words: soil heavy metals; pollution evaluation; grain effect; landscape pattern index; spatial patterns characteristics

土壤重金属污染作为一个整体, 具有其相应的景观格局特征^[1]。以土壤重金属污染评价为基础, 利用景观格局指数可以从斑块类型水平和景观水平入手, 直接反映土壤重金属各污染级别的面积比例, 边界复杂程度、聚合程度以及整体的多样性和破碎度等问题^[2, 3], 分析土壤重金属的污染程度和空间格局特征, 为土壤重金属污染评价和分布特征的研究提供新的手段和方法, 对区域土壤重金属污染监测和管理具有重要意义。

作为难以降解的污染物质, 土壤重金属始终是

科学界关注的热点问题^[4]。目前, 国内外研究者已从数理统计和地统计等方面进行了大量研究, 获得了土壤重金属污染来源^[5]、分布^[6]、行为^[7, 8]和归趋^[9]等方面的知识。由于污染评价可反映土壤重金属的污染程度^[10], 而景观格局分析可从细节上解释

收稿日期: 2015-12-21; 修订日期: 2016-01-24

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAJ22B02-03); 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)

作者简介: 陈昕(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为“3S”技术与土壤资源管理, E-mail: chenxin_091@163.com

* 通讯联系人, E-mail: jpan@njau.edu.cn

不同污染程度区域的空间格局特征,朱文转^[11]指出应用景观生态学理论探讨土壤重金属的空间格局及环境效应具有重要意义.但是由于景观格局具有明显的尺度依赖性,且不同景观分析的适宜空间粒度不同^[12],目前研究多集中在基于 GIS 制图的土壤重金属污染评价^[13, 14],较少有土壤重金属污染景观空间格局特征的研究.由此可见对土壤重金属景观格局特征进行相关研究很有必要.

本研究考虑到用污染评价等级构建景观分类系统,结合污染评价指数和景观格局指数对苏南某镇 8 种土壤重金属进行污染评价和景观格局分析,目的是为了能够从数值特征和空间格局特征两方面深入了解苏南某镇土壤重金属污染状况,以期为区域土壤环境质量的规划管理提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江苏省南京市南部某镇,地处东经 118°53′~119°13′,北纬 31°24′~31°48′间,总面积为 71.2 km²,人口 4.5 万,下辖有 14 个村.该区域属于北亚热带季风气候,年均气温 21℃,全年雨水充足,四季分明.地势平坦,土壤类型主要是水稻土和黄棕壤,其主要由河流冲积母质、石质低山丘陵残积母质、下蜀黄土母质发育而来.该镇交通便利,是南京通往皖南和苏杭地区的交通要道.经济发达,拥有 40 多家工业企业,主要包括化工、轻工、建材、机械、医疗设备和电子等,是典型的城乡结合带地区.

1.2 样品采集与分析

样品采集于 2012 年 12 月,根据重金属的潜在分布(前期调查获得数据),兼顾样点布设的均匀性原则,共设置了 109 个采样点,覆盖了研究区内所有土壤类型和成土母质.在每个采样点位 50 m 范围内采用梅花形采样法采集 5 个以上子样组成一个混合样品,采样深度为 0~20 cm,并使用差分 GPS 记录采样中心位置.采样工具为竹勺,用聚乙烯塑料袋盛放样品并注明编号.采集的土样于木质抽屉中自然风干,剔除样品中植物根系、残渣以及可见侵入体,用木质工具碾碎,并用玛瑙研钵研磨至可通过 0.149 mm 孔径尼龙筛.分析测定时,设置 2 次重复,并用标准土样 GSS-3 黄棕壤监控样品分析质量水平. Cr、Cu、Pb、Cd、Ni、Zn 采用盐酸、硝酸、氢氟酸、高氯酸消解,电感耦合等离子体光谱(ICP-OES)法测定; As、Hg 采用王水-水浴消解,原子荧

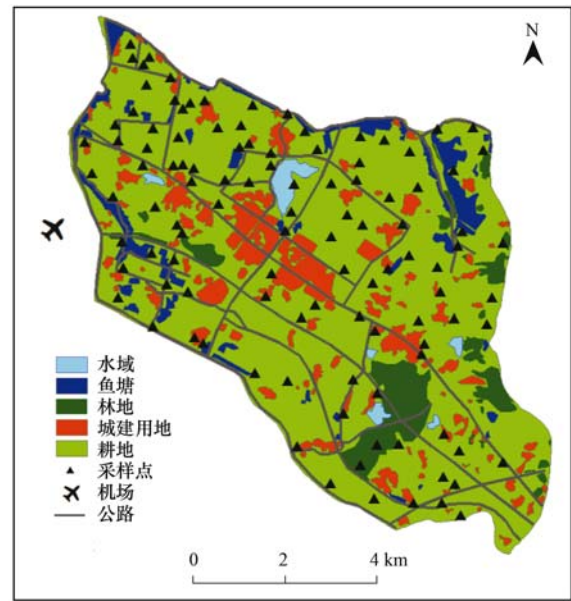


图 1 研究区土地利用类型和采样点分布示意

Fig. 1 Land use and the distribution of sampling sites in a town of southern Jiangsu

光光谱(AFS)法测定^[15].

1.3 研究方法

1.3.1 土壤重金属污染评价

本研究采用单因子污染指数法[式(1)]和内梅罗综合污染指数法[式(2)]进行土壤重金属污染评价,污染评价标准采用我国在 1995 年发布的环境质量标准(GB 15618-1995)中二级标准^[16].

$$P_i = \frac{C_i}{B_i} \quad (1)$$

式中, P_i 代表土壤中重金属*i*的污染指数; C_i 代表土壤重金属*i*的实测值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); B_i 代表评价标准值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{P_{\text{ave}}^2 + P_{\text{max}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中, $P_{\text{综}}$ 代表内梅罗综合评价指数, P_{ave} 代表各单项污染指数的均值, P_{max} 代表各单项污染指数的最大值.

1.3.2 污染评价指数的标准化及等级分类

为了对土壤重金属污染景观进行景观格局分析,利用 Max-Min 标准化公式[式(3)]将污染指数统一规范到 0~1 之间,然后将污染评价指数划分为低含量区域、较低含量区域、中含量区域、较高含量区域和高含量区域 5 种景观类型^[11],如表 1 所示.景观空间分布图的生成与重分类由 ArcGIS 10.0 软件的地统计模块和空间分析模块共同完成.

$$N_i = (N - N_{\min}) / (N_{\max} - N_{\min}) \quad (3)$$

式中, N_i 代表标准化的污染评价指数值, N 代表污染评价指数原始值, $N_{\max}$ 和 $N_{\min}$ 分别代表各单项污染指数的最大值和最小值.

表 1 土壤重金属污染景观分类标准

Table 1 Classification standard of soil heavy metals landscape		
景观类别	值域	等级特性
class1	0.0 ~ 0.2	低含量区域
class2	0.2 ~ 0.4	较低含量区域
class3	0.4 ~ 0.6	中等含量区域
class4	0.6 ~ 0.8	较高含量区域
class5	0.8 ~ 1.0	高含量区域

1.3.3 景观格局指数的选取与计算

景观格局指数是定量分析景观格局特征的重要手段,本研究在类型水平上选取景观类型百分比指数 PLAND、景观形状指数 LSI 和聚集度指数 AI,在景观水平上选取香农多样性指数 SHDI 和破碎度指数 DIVISION 表征不同土壤重金属污染的景观格局

特征^[17]. 利用美国俄勒冈州立大学开发的 FRAGSTATS(Version 3.3) 软件和 Excel 2013 软件进行景观指数的计算及粒度效应分析.

2 结果与分析

2.1 土壤重金属污染评价指数计算及其空间分布制图

2.1.1 土壤重金属污染评价指数统计特征

对苏南某镇的土壤重金属污染进行单因子评价和内梅罗综合评价,结果见表 2. 8 种土壤重金属元素的单因子污染指数和综合污染指数平均值都小于 1,其中 Cd、Cu 和 Ni 单因子污染指数最大值与均值差距较大,而其它元素单因子污染指数取值范围较小. 除 Cd 外,所有评价指数的变异系数都小于 0.5,综合污染变异系数为 0.357. As、Hg 和 pb 单因子污染指数服从正态分布,而 Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 单因子污染指数以及综合污染指数经对数变换后服从正态分布.

表 2 苏南某镇土壤重金属污染评价指数描述性统计及正态分析¹⁾

Table 2 Statistical parameters of soil heavy metals pollution index and normal distribution analysis in a town of southern Jiangsu								
项目	极小值	极大值	均值	标准差	变异系数	偏度	峰度	正态分析
As	0.25	1.017	0.462	0.149	0.323	1.125	2.937	正态分布
Cd	0.047	3.083	0.670	0.381	0.569	2.581	14.057	对数正态分布
Cr	0.231	0.643	0.311	0.051	0.164	2.676	16.009	对数正态分布
Cu	0.588	3.86	0.893	0.333	0.373	7.004	15.589	对数正态分布
Hg	0.107	1.45	0.555	0.242	0.436	0.704	1.014	正态分布
Ni	0.613	3.433	0.848	0.274	0.323	7.909	14.87	对数正态分布
Pb	0.087	0.21	0.145	0.021	0.145	0.101	1.112	正态分布
Zn	0.186	1.136	0.519	0.116	0.224	1.561	7.108	对数正态分布
综合污染指数	0.530	2.873	0.804	0.287	0.357	4.919	10.474	对数正态分布

1) 样点数: 109 个

2.1.2 土壤重金属污染的空间分布特征

将 8 种土壤重金属的单因子污染指数与综合污染指数进行标准化和重分类后,根据表 2 的正态分布检测结果进行相应模型的克里格插值,空间分布结果见图 2. 8 种土壤重金属元素的空间分布各有差异,但按照空间格局主要特征可将其分为两大类. 一类为 Cd、Cr、Cu 和 Ni,即低含量与高含量区域分布两级化明显,且高含量区域集中分布于研究区的中东部,其中 Cu 和 Ni 绝大部分区域以 class1 为主,而 Cd 和 Cr 从南至北由 class1 和 class2 交叉分布;另一类为 As、Pb、Hg 和 Zn,即以某一污染类别分布为主,其余类别零星穿插分布,其中 Hg 元素以 class1 分布为主,As 和 Zn 元素以 class2 分布为主,Pb 元素以 class3 分布为主. 由综合污染指数空间分

布格局可以看出,整个研究区的综合污染类别以低污染级别的 class1 为主,中东部一小面积区域从内到外污染程度由高到低向外扩散分布,这与 Cd、Cr、Cu 和 Ni 元素的小面积重污染区域区位分布相似.

2.2 土壤重金属景观格局指数对空间粒度变化的响应

2.2.1 景观指数随粒度增大的变化趋势

生成与污染评价指数对应的 9 类土壤重金属污染景观后,可利用景观指数进行景观特征分析,而尺度效应是景观格局分析中的首要问题. 通过对土壤重金属污染景观设立一系列的粒度值,并计算各粒度值相对应的景观指数,分析各景观指数对粒度变化的响应及适宜的粒度区域,可为后续 9 类土壤

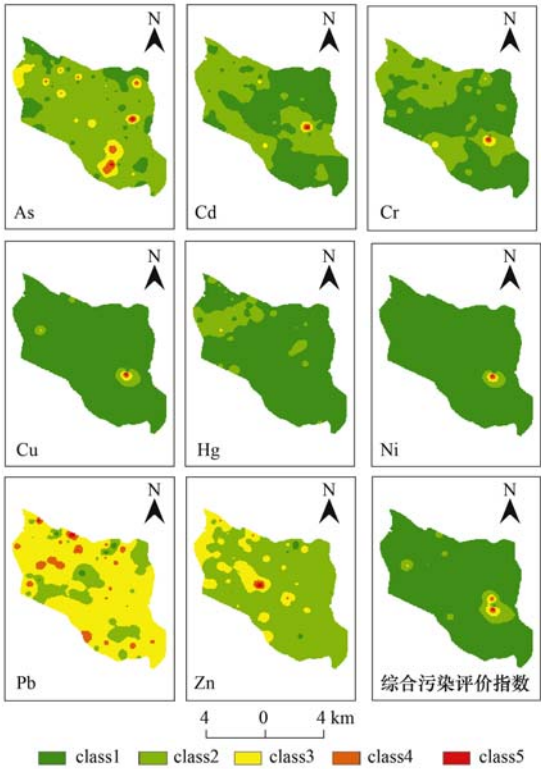


图2 苏南某镇土壤重金属污染含量类别空间分布格局
Fig. 2 Spatial patterns of soil heavy metals concentration indices in a town of southern Jiangsu

重金属污染景观的空间特征对比分析提供一致性保障. 图3反映了5种景观指数随粒度变化的趋势,其中PLAND、LSI和AI为类型水平上的景观指数,SHDI和DIVISION为景观水平上的景观指数,根据粒度效应的变化趋势,可将5种景观指数分为3类.

随着粒度的增大,9类景观的PLAND指数基本保持平稳.各景观类型对应的PLAND指数都在一个稳定值的邻域内小幅变化,没有明显拐点.

随着粒度的增大,9类景观的LSI和AI指数整体呈下降趋势.其中,As、Cd、Cr、Hg和Zn景观中各类别的LSI指数下降趋势平缓,而Cu、Ni、Pb和综合污染景观的LSI指数变化幅度较大,其中Cu的class4, Ni的class3、class4和class5, Pb的class1和class5以及综合污染景观的class2、class3、class4和class5的变化幅度大于同景观中的其他景观类型的变化幅度;相对于LSI指数, AI指数的下降变化幅度更大一些,且随着粒度值的增大, AI指数的变化过程也更剧烈一些,其中As的class5, Cd的class3和class4, Cr的class3和class4, Cu的class3和class4, Ni的class3和class4, Pb的class5, Zn的class3和class5以及综合污染景观的class3、class4和class5的变化剧烈程度尤为明显.

随着粒度的增大,9类景观的SHDI和DIVISION指数中,除Cr和Zn有较为明显的下降趋势外,其他景观中的两种景观指数没有明显的上升或下降趋势,但都有明显的拐点,第一个拐点多分布在30、50、60 m处,个别也分布在40 m和70 m处.

2.2.2 景观指数随粒度增大的第一尺度域和适宜粒度

表3统计了9类土壤重金属污染景观的第一尺度域和适宜粒度.对于类型水平上的景观指数,同景观各类型的同一指数第一尺度域是相同或相近的,为了保证一致性和准确性,从中选取粒度值较小的尺度域为该景观指数的第一尺度域,适宜粒度范围则在第一尺度域中选取,综合45个景观指数的适宜粒度范围及计算工作量,最终选取30~40 m为适宜粒度.

2.3 土壤重金属污染景观的景观格局指数分析

2.3.1 类型水平上的景观格局指数分析

表4中PLAND指数计算结果表明,Cd、Cr、Cu、Hg和Ni这5类景观的斑块类型面积百分比均随污染级别的增大而减小,其中Cu、Hg和Ni景观中class1所占比例具有绝对优势,均超过研究区面积的85%,而Cd和Cr景观的class1面积比例略大于class2,且class1和class2所占比例之和均超过了研究区面积的98%;As和Zn景观以class2分布为主,其所占面积比例超过整个研究区面积的75%;Pb景观以class3分布为主,约占75%,其次为class2和class4.研究区土壤重金属综合污染面积分布以class1为主,高达92.93%,且PLAND值排序依次为class1 > class2 > class3 > class4 > class5.

LSI指数计算结果显示,As景观中的类型边界复杂程度随污染级别的增加呈递减趋势,最大值为class1的5.28;Cd、Cr和Hg景观中各类型的LSI指数大小排序一致,即class2 > class1 > class3 > class4 > class5,最大值分别为4.4、4.74和3.8;Cu、Ni、Pb和Zn景观各斑块类型的LSI指数值大小排序不一,但都呈现class2和class3的LSI指数值大于其他斑块类型LSI指数值的规律,且最大值分别为class2的2.69、class3的2.15、class2的5.35和class3的5.63.

AI指数计算结果可看出,9类土壤重金属景观的5种景观类型中,class4的AI值最低,class3次之;其中,Cd、Cu和Ni景观中各类型的AI指数值排序一致,均为class1 > class5 > class2 > class3 > class4;As和Zn景观class2的AI值最高;Cr景观

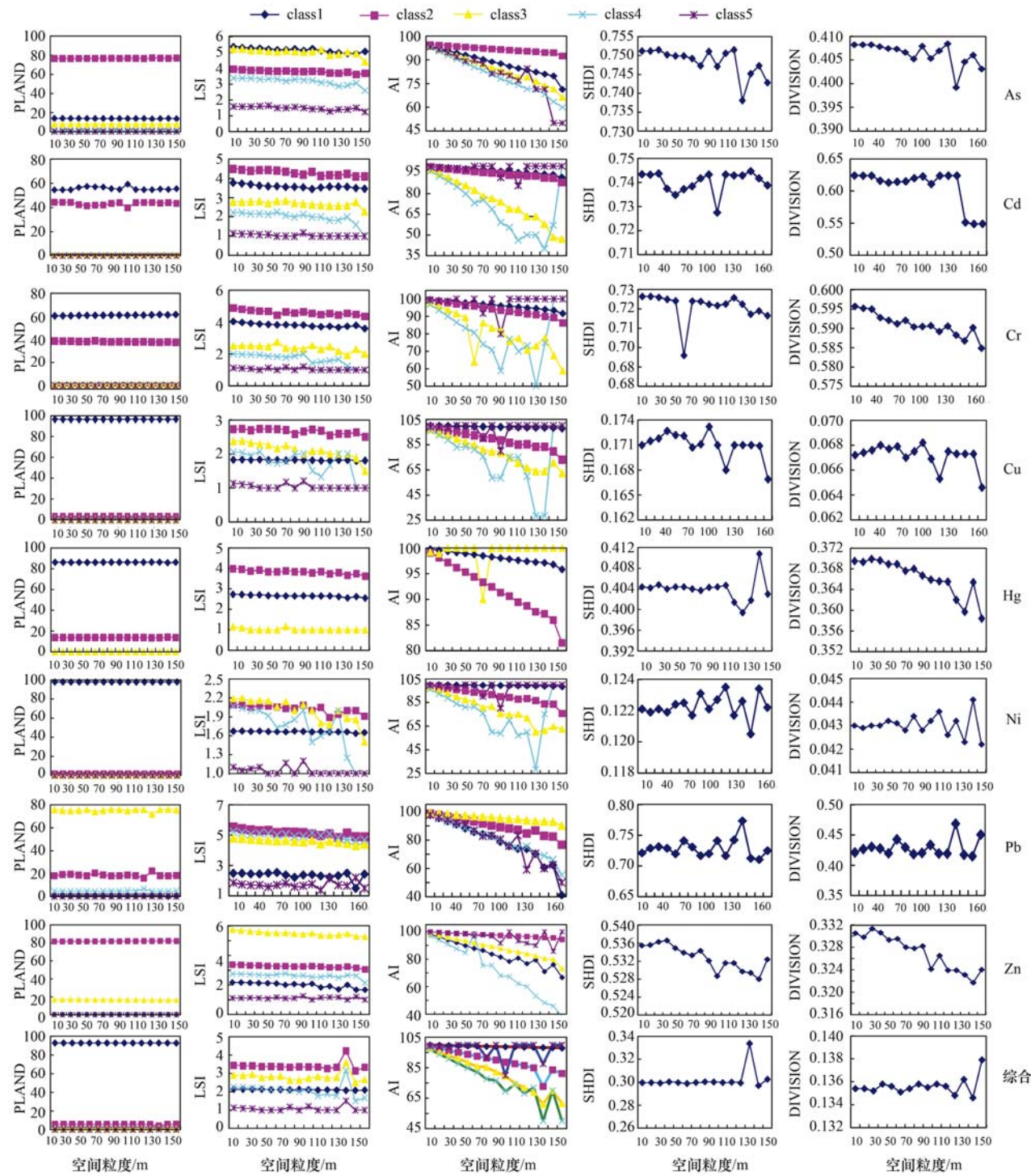


图3 PLAND、LSI、AI、SHDI、DIVISION 这5种景观指数随粒度的变化特征

Fig. 3 Changes in PLAND,LSI,AI,SHDI,DIVISION landscape metrics with increasing spatial grain size

class5 的 AI 值最高；综合污染景观的 class1 与 class5 的 AI 值均高于其他斑块类型。

2.3.2 景观水平上的景观格局指数分析

9 类土壤重金属景观多样性指数 SHDI 取值范围 0.12~0.75,整体偏低,排序为 As>Cd>Cr=Pb>Zn>Hg>综合污染>Cu>Ni,其中 As、Cd、Cr 和 Pb 的 SHDI 值均大于 0.7,而 Cu 和 Ni 的 SHDI 值小

于 0.2,综合污染景观 SHDI 值为 0.3。

9 类土壤重金属景观 DIVISION 指数大小排序依次为 Cd>Cr>Pb>As>Hg>Zn>综合污染>Cu>Ni,DIVISION 指数值域范围为 0.04~0.62,整体偏低。结合空间分布特征可将 8 种土壤重金属景观分为 4 类,其中 Cd 和 Cr 景观破碎化程度相似,低含量区域和较低含量区域从南至北交叉分布,致使整个景

观破碎度较高; As 和 Pb 景观破碎化程度相似, 分别以较低含量和中等含量区域为主, 其它各污染含量区域分散于整个研究区; Hg 和 Zn 景观破碎化程度相似, 景观北部破碎化程度高于南部, 且南部基本无破碎; Cu 和 Ni 景观破碎化程度相似, 均以低含量区域分布为主, 高含量区域聚集于景观中东部.

表 3 土壤重金属景观指数的第一尺度域及适宜粒度区间/m

Table 3 The 1st scale domain and appropriate grain range of the soil heavy metals landscape metrics/m

景观	景观指数	第一尺度域	适宜粒度	景观	景观指数	第一尺度域	适宜粒度	景观	景观指数	第一尺度域	适宜粒度
As	PLAND	40 ~ 70	45 ~ 65	Cu	PLAND	30 ~ 60	35 ~ 55	Pb	PLAND	30 ~ 60	35 ~ 55
	LSI	20 ~ 50	25 ~ 45		LSI	20 ~ 50	25 ~ 45		LSI	30 ~ 60	35 ~ 55
	AI	40 ~ 70	45 ~ 65		AI	40 ~ 70	45 ~ 65		AI	40 ~ 70	45 ~ 65
	SHDI	20 ~ 50	25 ~ 45		SHDI	30 ~ 60	35 ~ 55		SHDI	40 ~ 70	45 ~ 65
	DIVISION	30 ~ 60	35 ~ 55		DIVISION	30 ~ 60	35 ~ 55		DIVISION	30 ~ 60	35 ~ 55
Cd	PLAND	30 ~ 60	35 ~ 55	Hg	PLAND	30 ~ 60	35 ~ 55	Zn	PLAND	20 ~ 60	25 ~ 55
	LSI	30 ~ 60	35 ~ 55		LSI	30 ~ 60	35 ~ 55		LSI	40 ~ 70	45 ~ 65
	AI	50 ~ 80	55 ~ 75		AI	20 ~ 50	25 ~ 45		AI	40 ~ 70	45 ~ 65
	SHDI	30 ~ 60	35 ~ 55		SHDI	20 ~ 50	25 ~ 45		SHDI	30 ~ 60	35 ~ 55
	DIVISION	30 ~ 60	35 ~ 55		DIVISION	20 ~ 50	25 ~ 45		DIVISION	20 ~ 50	25 ~ 45
Cr	PLAND	30 ~ 60	35 ~ 55	Ni	PLAND	30 ~ 60	35 ~ 55	综合污染	PLAND	30 ~ 60	35 ~ 55
	LSI	40 ~ 70	45 ~ 65		LSI	30 ~ 60	35 ~ 55		LSI	20 ~ 50	25 ~ 45
	AI	40 ~ 70	45 ~ 65		AI	40 ~ 70	45 ~ 65		AI	50 ~ 80	55 ~ 75
	SHDI	40 ~ 70	45 ~ 65		SHDI	20 ~ 50	25 ~ 45		SHDI	30 ~ 60	35 ~ 55
	DIVISION	30 ~ 60	35 ~ 55		DIVISION	20 ~ 50	25 ~ 45		DIVISION	30 ~ 60	35 ~ 55

表 4 土壤重金属景观 PLAND、LSI、AI、SHDI 和 DIVISION 指数特征¹⁾

Table 4 Characteristics of PLAD, LSI, AI, SHDI and DIVISION in soil heavy metals landscape

景观指数	景观类别	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	综合污染
PLAND	class1	13. 94	54. 69	60. 46	96. 54	86. 22	97. 81	0. 71	0. 54	92. 93
	class2	76. 63	44. 33	38. 50	2. 84	13. 73	1. 64	19. 58	81. 57	5. 71
	class3	7. 73	0. 69	0. 82	0. 44	0. 06	0. 37	74. 71	17. 18	1. 02
	class4	1. 51	0. 19	0. 16	0. 13		0. 13	4. 76	0. 53	0. 28
	class5	0. 18	0. 10	0. 06	0. 05		0. 05	0. 24	0. 18	0. 06
LSI	class1	5. 28	3. 70	3. 92	1. 83	2. 70	1. 67	2. 45	2. 15	2. 13
	class2	3. 88	4. 40	4. 74	2. 69	3. 86	2. 06	5. 35	3. 33	3. 41
	class3	5. 13	2. 80	2. 51	2. 32	1. 00	2. 15	4. 72	5. 63	2. 95
	class4	3. 36	2. 16	1. 96	1. 95		2. 00	5. 07	2. 71	2. 20
	class5	1. 58	1. 11	1. 07	1. 08		1. 08	1. 70	1. 13	1. 07
AI	class1	95. 83	98. 68	98. 64	99. 70	99. 34	99. 75	93. 46	94. 07	99. 58
	class2	98. 81	98. 14	97. 81	96. 27	97. 18	96. 90	96. 42	99. 07	96. 29
	class3	94. 54	91. 77	93. 64	92. 38	100. 00	92. 64	98. 44	95. 93	92. 79
	class4	92. 77	89. 06	90. 13	88. 95		88. 64	93. 11	90. 87	90. 86
	class5	94. 53	98. 55	98. 72	98. 55		98. 51	94. 36	98. 85	98. 75
SHDI	all	0. 75	0. 74	0. 73	0. 17	0. 40	0. 12	0. 73	0. 54	0. 30
DIVISION	all	0. 41	0. 62	0. 60	0. 07	0. 37	0. 04	0. 43	0. 33	0. 14

1) Hg 只有 class1、class2 和 class3 这 3 个景观类别

3 讨论

3.1 土壤重金属污染评价及其空间分布特征

赵秀峰等^[10]指出, 污染指数的大小代表了污染程度的高低, 污染指数小于 1 表示土壤环境尚清洁, 污染指数大于 1 表示土壤已受污染, 且指数值越大污染程度越严重. 本研究各污染指数的取值范围和均值统计结果表明研究区整体尚处于清洁级别, 而

Cd、Cu 和 Ni 这 3 种元素存在污染情况严重的小部分污染区域. 变异系数的大小揭示了随机变量的离散程度, 反映了重金属元素在土壤中的均匀性和变异性^[18]. 一般地, 变异系数小于 0. 1 为弱变异, 变异系数大于 1 为强变异, 介于 0. 1 与 1 之间为中等变异. 土壤重金属的来源及空间分布主要受成土母质和人类活动的影响^[19], 柳云龙等^[20]指出不同土地利用情况、距污染源远近、人类干扰都会使同一

区域土壤重金属含量和分布产生差异. 本研究结果表明 8 种土壤重金属元素的空间分布呈中等变异, 受到了一定强度的人为活动影响, 综合污染变异指数表明研究区土壤重金属污染尚处于较早的发展阶段. Facchinelli 等^[21]研究表明 Cr 和 Ni 来源与成土母岩密切相关, 而 Cu、Hg、Zn 和 Pb 主要来源于人类活动. 本研究中土壤重金属 As 较低含量污染区域几乎遍布整个研究区, 而研究区大部分面积以农用地为主, 说明 As 主要来源于农药和化肥等人类活动^[22, 23]; Hg 元素的污染区域以低含量和较低含量为主, 且较低污染含量区域呈带状分布, 与研究区西北部机场航道区域相重合, 说明 Hg 主要来源于交通尾气^[24]; 本研究区大部分区域受到了中等含量的 Pb 污染, 且在航道及西北部城镇区域有较高含量污染分布, 说明 Pb 主要来源于交通尾气、农药化肥以及工业“三废”^[25]; 土壤重金属 Zn 呈现以较低含量污染为主, 中等含量污染和高含量污染在西北区域蔓延的分布格局, 其中高含量污染区域集中于 S123 和 S234 省道交汇处的城镇处, 说明 Zn 主要来源于工业污染、交通尾气和生活垃圾^[26], 这与王军等^[27]指出的 Hg、Pb 和 Zn 是交通污染的标识元素的结论相一致. 付传城等^[28]对苏南某镇土壤重金属污染源的分析指出, 研究区的城镇用地主要沿 S123 省道呈带状分布, 其中包括 40 余家工厂, 这些化工、建材、机械等企业生产过程中会产生大量含 Cd、Cr、Cu 和 Ni 的“三废”污染物并不断富集, 本研究土壤重金属空间分布图中 Cd、Cr、Cu 和 Ni 元素的小面积重污染区域区位分布与当地主要重金属复合污染源的空间分布情况相一致.

3.2 土壤重金属景观格局指数的粒度效应

生态学中的尺度指的是空间和时间上的粒度和幅度^[29], 本研究在时间和幅度确定的情况下, 空间粒度效应就成了尺度效应研究的重点. 空间粒度与景观的结构与功能都密切相关, 许多景观特征会随空间粒度的不同而改变^[30], 邱扬等^[31]研究表明当粒度增大到一定程度时, 景观指数值会出现一定的变化趋势, 这是由于粒度的变化能够通过分割或融合斑块而改变斑块边界, 从而改变景观格局的相关特征, 进而使景观指数值发生一系列变化. 图 3 显示了随着粒度的增大, 研究区各土壤重金属景观的景观指数值表现出不同的变化趋势, 说明空间粒度的变化对景观指数取值有明显的影响. 其中, PLAND 指数随空间粒度值的渐变, 9 类土壤重金属景观的各景观类型面积因斑块的分割或融合而逐渐

改变, 没有特别明显的拐点; LSI 和 AI 指数整体呈下降趋势, 且随粒度的变化表明 8 种土壤重金属中污染程度较高的景观类别的 AI 指数对粒度变化更敏感; 9 类土壤重金属景观的 SHDI 和 DIVISION 指数的粒度效应明显, 第一个拐点多分布在 30 ~ 70 m 处且最终将 9 类土壤重金属景观的适宜粒度确定为 30 ~ 40 m, 本研究景观指数的粒度效应结果与徐丽等^[32]的研究结果是基本一致的.

3.3 土壤重金属污染景观格局特征

PLAND 是类型水平上表征土壤重金属斑块类型结构组成特征的景观指数^[33], 本研究中虽然各土壤重金属污染分布特征各有差异, 但均以低含量分布为主, 综合污染程度偏低, 整个研究区的土壤重金属污染尚处于初级阶段. LSI 是类型水平上表征土壤重金属斑块类型形状特征的景观指数, 其值越大, 斑块类型的边界越复杂^[33], 结果显示研究区低 ~ 中含量污染区域的边界复杂程度最高, 说明目前人类活动对该部分区域产生的影响更大一些, 研究区土壤重金属污染有进一步发展的趋势. AI 是类型水平上表征土壤重金属斑块类型聚合度特征的景观指数, 其值越大, 斑块类型分布越聚集^[33], 分析结果表明研究区低含量区域和高含量区域分布相对集中, 可能是由于研究区土壤重金属以低含量分布为主, 低含量区域聚集程度较高; 而复合污染源的分布少且集中, 距污染源近的高含量区域分布也相对聚集. SHDI 是景观水平上表征土壤重金属景观多样性特征的景观指数^[33], 罗光杰等^[3]研究表明各景观要素之间的面积分布越均匀, 其值越大, 景观类型越丰富, 多样性越显著, As、Cd、Cr 和 Pb 的 SHDI 指数值最大, 说明这 4 种土壤重金属各污染类别的空间分布相对比较均衡; 而 Cu 和 Ni 的 SHDI 指数值最小, 说明这 2 种土壤重金属分布存在占绝对优势的斑块类型, 综合污染景观 SHDI 指数值略大于 Cu 和 Ni, 表明研究区多种金属综合污染景观中存在具有相对优势的景观类型, 结合土壤重金属污染评价空间分布图可看出低含量污染区域在综合污染景观中具有显著优势, 这与 PLAND 指数的分析结果相一致. DIVISION 是景观水平上表征土壤重金属景观聚散度特征的景观指数, 其值越大, 景观破碎化程度越高, 分散性越明显^[33]. 仇江啸等^[34]研究表明景观破碎化程度随发展水平的提高呈现出先上升后下降的倒“U”型变化趋势. 本研究污染评价和 PLAND 分析结果表明, 研究区以低含量分布为主, 处于发展早期阶段, 所以土壤重金属景观的 DIVISION 指数

越大,表明其相应污染源发展水平越高. 空间分布特征的分析结果得出 Cd、Cr、Cu 和 Ni 景观都存在较明显的点源污染特征,其中 Cd 和 Cr 的 DIVISION 指数最大且兼具点源污染和面源污染的空间分布特征,而 Cu 和 Ni 景观 DIVISION 指数最小且只有点源污染的空间分布特征,表明 Cd 和 Cr 的面污染源发展水平较高,而 4 种重金属景观的点污染源发展水平较低,这符合城乡结合带还处于发展起步阶段的特点.

4 结论

(1) 苏南某镇土壤重金属污染程度整体偏低,且南部地区污染程度普遍低于北部地区. 8 种土壤重金属可分为两大类,一类为 Cd、Cr、Cu 和 Ni,点源污染特征显著,其中 Cd 和 Cr 空间格局相似,而 Cu 和 Ni 空间格局相似;另一类为 As、Pb、Hg 和 Zn,面源污染特征显著,其中 As 和 Pb 空间格局相似,Hg 和 Zn 空间格局相似.

(2) 苏南某镇土壤重金属景观的 5 种景观指数的粒度效应特征可分为三类:第一类为 PLAND 指数,基本保持平稳,无明显拐点;第二类为 LSI 和 AI 指数,呈下降趋势,且污染程度高的斑块类型粒度效应显著;第三类为 SHDI 和 DIVISION 指数,无明显升降趋势,但对粒度变化比较敏感,第一拐点多出现在 30~70 m 处. 本研究的适宜粒度为 30~40 m,这与研究区耕地田块大小格局相一致,可将之作为参考依据,设置研究区评价单元大小为 $35 \times 35 \text{ m}^2$.

(3) 苏南某镇 9 类土壤重金属景观的格局特征分析表明:研究区土壤重金属以低含量分布为主;且目前人类活动对较低含量区域的影响最大,土壤重金属污染有进一步发展的趋势;土壤重金属综合污染呈以低含量区域为主,低含量与高含量区域相对聚集的分布特征,进一步说明了研究区土壤重金属复合污染源数量尚少,且分布集中,处于土壤重金属污染的形成发展阶段.

参考文献:

- [1] 傅伯杰,陈利顶,马克明,等. 景观生态学原理及应用[M]. (第二版). 北京:科学出版社,2011. 15-20.
- [2] 何念鹏,周道玮,吴冷,等. 人为干扰强度对村级景观破碎度的影响[J]. 应用生态学报,2001,12(6): 897-899.
- [3] 罗光杰,李阳兵,王世杰,等. 岩溶山区景观多样性变化的生态学意义对比——以贵州四个典型地区为例[J]. 生态学报,2011,31(14): 3882-3889.
- [4] 李如忠,潘成荣,徐晶晶,等. 典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估[J]. 环境科学,2013,34(3): 1076-1085.
- [5] Lv J S, Zhang Z L, Li S, *et al.* Assessing spatial distribution, sources, and potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of the Nansi Lake, Eastern China [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2014, 299(3): 1671-1681.
- [6] 张雷,秦延文,郑丙辉,等. 丹江口水库迁建区土壤重金属分布及污染评价[J]. 环境科学,2013,34(1): 108-115.
- [7] Liu Y, Su C, Zhang H, *et al.* Interaction of soil heavy metal pollution with industrialisation and the landscape pattern in Taiyuan city, China[J]. PLoS One, 2014, 9(9): e105798.
- [8] 宋成军,张玉华,刘东生,等. 土地利用/覆被变化(LUCC)与土壤重金属积累的关系研究进展[J]. 生态毒理学报,2009,4(5): 617-624.
- [9] 易秀,郭婷婷,谷晓静. 陕西省泾惠渠灌区土壤重金属污染累积趋势预测[J]. 生态环境学报,2010,19(9): 2209-2213.
- [10] 赵秀峰,王强盛,石宁宁,等. 石化园区周边农田土壤重金属污染分析与评价[J]. 环境科学学报,2010,30(1): 133-141.
- [11] 朱文转,夏北成,江学顶. 惠州市土壤重金属污染景观空间格局特征研究[J]. 中国环境科学,2009,29(8): 885-891.
- [12] 欧维新,甘玉婷婷. 耦合种群动态的生境格局变化分析粒度与景观因子选择——以盐城越冬丹顶鹤及其生境的变化为例[J]. 生态学报,2016,36(10): 1-9.
- [13] 余辉,张文斌,余建平. 洪泽湖表层沉积物重金属分布特征及其风险评价[J]. 环境科学,2011,32(2): 437-444.
- [14] 李冰茹,王纪华,马智宏,等. GIS 在土壤重金属污染评价中的应用[J]. 测绘科学,2015,40(2): 119-122, 164.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京:中国农业出版社,2008. 370-400.
- [16] 陈涛,常庆瑞,刘京,等. 长期污灌农田土壤重金属污染及潜在环境风险评价[J]. 农业环境科学学报,2012,31(11): 2152-2159.
- [17] Lin Y P, Teng T P, Chang T K. Multivariate analysis of soil heavy metal pollution and landscape pattern in Changhua county in Taiwan[J]. Landscape and Urban Planning, 2002, 62(1): 19-35.
- [18] Yang P G, Mao R Z, Shao H B, *et al.* The spatial variability of heavy metal distribution in the suburban farmland of Taihang Piedmont Plain, China[J]. Comptes Rendus Biologies, 2009, 332(6): 558-566.
- [19] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Multivariate geostatistical analyses of heavy metals in soils: Spatial multi-scale variations in Wulian, Eastern China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 107: 140-147.
- [20] 柳云龙,章立佳,韩晓非,等. 上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价[J]. 环境科学,2012,33(2): 599-605.
- [21] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils[J]. Environmental Pollution, 2001, 114(3): 313-324.

- [22] 方明, 吴友军, 刘红, 等. 长江口沉积物重金属的分布、来源及潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(2): 563-569.
- [23] Cai L M, Xu Z C, Ren M Z, *et al.* Source identification of eight hazardous heavy metals in agricultural soils of Huizhou, Guangdong Province, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, **78**: 2-8.
- [24] Cai L M, Xu Z C, Bao P, *et al.* Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and source of arsenic and heavy metals in the agricultural soils in Shunde, Southeast China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, **148**: 189-195.
- [25] 戴彬, 吕建树, 战金成, 等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 507-515.
- [26] Chen X D, Lu X W, Yang G. Sources identification of heavy metals in urban topsoil from inside the Xi'an Second Ringroad, NW China using multivariate statistical methods [J]. *Catena*, 2012, **98**: 73-78.
- [27] 王军, 陈振楼, 王初, 等. 上海崇明岛蔬菜地土壤重金属含量与生态风险预警评估[J]. 环境科学, 2007, **28**(3): 647-653.
- [28] 付传城, 王文勇, 潘剑君, 等. 城乡结合带土壤重金属时空变异特征与源解析——以南京市柘塘镇为例[J]. 土壤学报, 2014, **51**(5): 1066-1077.
- [29] Qi Y, Wu J G. Effects of changing spatial resolution on the results of landscape pattern analysis using spatial autocorrelation indices[J]. *Landscape Ecology*, 1996, **11**(1): 39-49.
- [30] Lustig A, Stouffer D B, Roigé M, *et al.* Towards more predictable and consistent landscape metrics across spatial scales [J]. *Ecological Indicators*, 2015, **57**: 11-21.
- [31] 邱扬, 杨磊, 王军, 等. 黄土丘陵小流域景观格局指数的粒度效应[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(5): 1159-1166.
- [32] 徐丽, 卞晓庆, 秦小林, 等. 空间粒度变化对合肥市景观格局指数的影响[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(5): 1167-1173.
- [33] 郭建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2007. 30-70.
- [34] 仇江啸, 王效科, 逯非, 等. 城市景观破碎化格局与城市化及社会经济发展水平的关系——以北京城区为例[J]. 生态学报, 2012, **32**(9): 2659-2669.

CONTENTS

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM ₁₀ and PM _{2.5} Emissions from Stationary Sources	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)
Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer	CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing	QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)
Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan	CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)
Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)
Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust	YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)
Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus	LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)
Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation	LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)
Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters	JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)
High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan	SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)
Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities	JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)
Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir	ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System	WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi	YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)
Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake	LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)
Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure	GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)
Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria	LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)
Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River	TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)
Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling	MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)
Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite	XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)
Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar	TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195)
Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater	REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag	WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite	NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)
Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)
Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)
Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Flocs	WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)
Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System	SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)
Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition	XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)
Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH)	WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)
Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology	WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)
Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency	HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)
Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)
Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils	ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)
Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation	ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)
Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope	SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)
Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu	CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang	LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)
Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou	GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)
Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu ²⁺ -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter	TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)
Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism	CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)
Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model	YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)
Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar	XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)
Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i>	PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)
N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition	XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)
Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu	XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)
Preparation of Visible-light-induced g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange	ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)
Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province	GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行