

张毅博,赵剑斐,黄涛,等. 基于地统计分析的老旧工业园农田区域地下水重金属空间分布及风险评价[J]. 江苏农业科学,2020,48(12):258-264.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.12.052

# 基于地统计分析的老旧工业园农田区域地下水 重金属空间分布及风险评价

张毅博, 赵剑斐, 黄涛, 安官平, 彭道平

(西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川成都 611756)

**摘要:**以四川省什邡市某老旧工业园周边农田区域地下水环境为研究对象,结合地统计分析方法,对该区域地下水重金属空间分布进行调查,并评价潜在生态风险。结果表明,研究区域地下水总体表现为以 Zn、Cu 为主的多种重金属富集,Cr 与 Cu 空间分异较大,受外界干扰比较显著,Cr 与 Cu、Cu 与 Pb 的相关系数分别达到 0.693、0.629 ( $P < 0.01$ ),表明其污染源可能相同;地下水中各项重金属单因子指数表现为  $Ni > Pb > Mn > Zn > Cu > Cr$ ,据单项潜在生态污染指数计算结果,Cu 具有中度潜在生态风险,此外,6 种重金属综合潜在生态风险指数(RI)均值为 97.27,属轻度污染,且占比达到总调查区域的 96.2%。总体而言,该老旧工业园对周边农田区域浅层地下水产生了轻度的生态风险。

**关键词:**地统计学;老旧工业园农田;地下水重金属;生态风险;生态污染;风险评价

**中图分类号:** X821      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1002-1302(2020)12-0258-06

地下水作为重要的城乡供水水源,在维护经济社会健康发展等方面发挥着不可替代的作用。据中华人民共和国生态环境部于 2011 年完成的《全国地下水基础环境状况调查评估》,我国地下水资源约占总供水量的 20%,全国 60% 的人口以地下水作为饮用水水源,地下水是支撑经济社会可持续发展的重要战略资源<sup>[1]</sup>。由于开发和利用不当造成的地下水污染,会直接对人类及其活动造成潜在危害,并会对生态环境造成严重影响,还会对工业生产、农业生产产生危害<sup>[2-4]</sup>。老旧工业园区内企业类型纷呈,产业关联度不高,资源在各个企业之间很难做到循环使用,高投入、低产出、高污染等问题突出。在老旧工业园区,污水泄漏会导致地下水水质恶化,地下水含水介质的复杂性、隐蔽性及延时性使地下水污染范围难以确定,以至于扩散至工业园区周边区域<sup>[5-7]</sup>。

针对地下水中重金属污染问题,国内外已有众多学者开展了地下水重金属污染的表征、测量和修复技术等方面的研究<sup>[8-10]</sup>,并对众多地下水污染评

价模型进行了研究,冶雪艳等以第二松花江流域地下水为研究对象,分别采用 DRASTIC 和 GOD 法对地下水环境脆弱性进行评价,并利用实测铬(Cr)含量对评价结果进行验证对比<sup>[11]</sup>。除此之外,地理信息系统(GIS)与专业模型相结合的地下水污染风险评价,也是近年来的研究热点,目前已广泛应用于环境保护、资源保护、灾害预测等领域<sup>[12-13]</sup>。考虑到传统统计学方法忽视了样本的空间位置和方向,难以区别不同空间格局的差异,周晓虹等利用 ArcGIS 的地统计空间分析功能,对内蒙古临河市浅层地下水进行综合评价,得到了研究区地下水水质的空间分布<sup>[14]</sup>。Zamani 等以伊朗博纳布工业区的地下水污染为例,采用差分脉冲极谱(DPP)研究了铁、钴、镍、铜、锌、镉和铅的含量,并应用多元统计技术对数据来源进行描述,分析了所调查的重金属之间的相关性和相似性<sup>[15]</sup>。

四川省什邡市某工业园区拥有众多化工企业,建园时间较长,未进行合理的环境规划,属老旧工业园区。本研究以该园区周边农田地下水环境为研究对象,通过现场踏勘、水质采样分析、地统计分析及潜在风险评价工作,对该区域地下水重金属空间分布调查结果进行直观呈现,同时结合地统计分析对潜在生态风险进行评价,以期对其他类似老旧工业园区周边地下水污染评价提供参考与借鉴。

收稿日期:2019-06-20

基金项目:国家自然科学基金(编号:U1734205);四川省环境工程评估中心研究计划(编号:2017H01013)。

作者简介:张毅博(1989—),男,陕西宝鸡人,博士,讲师,主要从事地下水环境影响特征及评价研究。E-mail:yibo@swjtu.edu.cn。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究研究区域地处双盛镇,位于四川省什邡市北 6 km,地处 104°09'E,31°10'N。海拔高度为 545.598 m,呈西北向东南走势,平均海拔为 507 m。双盛镇东连禾丰镇,南接皂角镇,西南和马祖镇接壤,西北同灵杰镇毗邻,东北与绵竹市玉泉镇、新市镇隔江相望。幅员面积为 28 km<sup>2</sup>,辖 6 个村(白鱼河村、亭江村、青龙村、万缘村、东林村、涌麟村)和 1 个居民委员会。研究区域范围内为平原区域,生态环境以农业耕作为主,主要种植小麦、水稻、豆类等

作物,为典型的农业生境区域。

1.2 地下水样品的采集与分析

本研究所用地下水样品主要取自下部微承压含水层,井深为 20 ~ 40 m。2018 年 4 月、9 月于研究区域内采集 26 个地下水样品,采样点位分布见图 1,采样点位置采用全球定位系统(GPS)定位。浅层地下水主要取自区内正在灌溉的农灌井及工业取水井,水样 24 h 内用 0.45 μm 混合纤维滤膜过滤后于 4 ℃ 冰箱保存待测,重金属离子含量采用 ICP-MS 等离子体质谱仪(美国瓦里安公司)测定,测试精度 >0.5%。

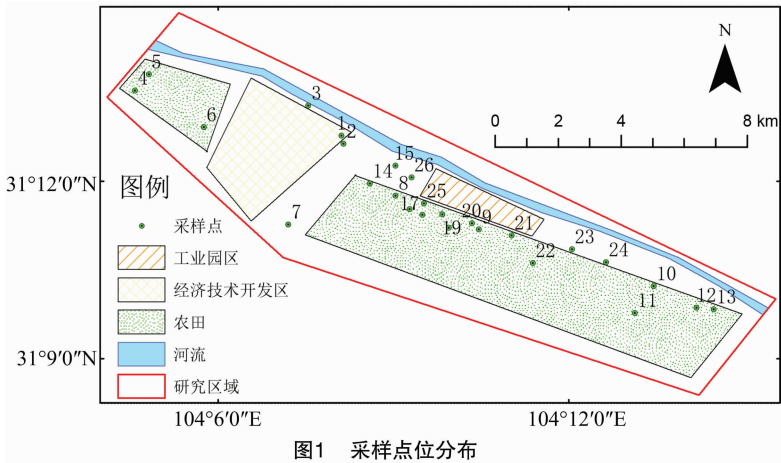


图1 采样点位分布

1.3 试验方法

单因子指数评价方法又称单指标评价法,将各污染因子浓度代表值与评价标准逐项对比,以单项评价最差项目的类别作为水质类别,通过评价结果能直观地反映水质中哪一类或几类因子超标,同时可清晰地判断出主要污染因子和主要污染区域,计算公式<sup>[16]</sup>如下:

$$P_i = C_i / C_{0i} \quad (1)$$

式中: $P_i$  为单因子  $i$  的水质污染指数; $C_i$  为水质中污染物  $i$  的浓度实测值,mg/L; $C_{0i}$  为污染物  $i$  的评价标准浓度。 $P_i \leq 1$  表明该水质因子满足水质标准,为非污染; $1 < P_i \leq 2$  时,表明该水质为轻度污染; $2 < P_i \leq 3$  时,表明该水质为中度污染; $P_i > 3$  时,表明该水质为严重污染。该方法计算简便,由于是对单个污染因子独立进行评价,评价结果不可能全面地反映水环境质量的整体状况,可能导致较大的偏差。为全面反映水体质量状况,还必须计算其综合评价指数。

来评价重金属污染物特征和环境行为的方法<sup>[17]</sup>,计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i; \quad (2)$$

$$E_r^i = T_i \cdot C_f^i; \quad (3)$$

$$C_f^i = \frac{C_s^i}{C_n^i} \quad (4)$$

式中: $RI$  为多种重金属的综合潜在生态风险指数; $E_r^i$  为单项重金属潜在的生态污染指数; $T_i$  为单项重金属  $i$  的毒性响应系数<sup>[18]</sup>,  $Zn = Mn = 1$ ,  $Cu = Pb = Ni = 5$ ,  $Cr = 2$ ;  $C_f^i$  为重金属污染物的污染指数; $C_s^i$  和  $C_n^i$  分别为第  $i$  种重金属元素的检测浓度、评价标准浓度,mg/L。地下水重金属的潜在风险分级标准见表 1。

表 1 地下水重金属的潜在风险分级标准 mg/L

风险等级	$E_r^i$	$RI$
轻度	< 40	< 150
中度	40 ~ 79	150 ~ 299
较强	80 ~ 159	300 ~ 599
很强	160 ~ 320	600 ~ 1 200
极强	> 320	> 1 200

潜在生态风险指数法是一种从沉积物学角度

1.4 数据处理分析

本研究中地下水重金属含量的平均值、变异系数、正态分布检验等描述性统计分析采用 SPSS 25.0 统计软件完成;使用 ArcGIS 10.5 软件对地下水重金属元素含量进行插值计算,以得到每种重金属的空间分布情况。

2 结果与分析

2.1 地下水重金属污染的总体特征

研究区采集的 26 个地下水样品中重金属含量统计见表 2。地下水样品中 Zn、Ni、Cr、Cu、Mn、Pb 这 6 种重金属的平均含量分别为 0.620、0.047、0.024、0.511、0.067、0.007 mg/L。通过与地下水质量 3 类标准相比较,26 个采样点中,仅 Ni 的样本超标,超标率为 46.2%。变异系数可反映采样总体中各样点之间的平均差异程度<sup>[19]</sup>,由表 2 可知,6 种重金属平均变异程度由大到小依次为 Ni、Cr、Cu、Zn、Pb、Mn。重金属 Ni、Cr、Cu 的变异系数较大,均大于 0.4%,其中 Ni 的变异系数达到了 1.124%,为

强变异,表明样品中 Ni 的含量值波动幅度大,连续性差,与自然土壤浅层地下水重金属元素呈连续分布特征的差异大,受外界干扰比较明显;Cr 与 Cu 的变异系数分别为 0.461%、0.445%,属于中等变异,波动幅度较大,连续性变化较差,空间分异较大,这种分异很大程度上归结为工业排污等强烈人为活动的影响。而浅层地下水中 Zn、Pb、Mn 的变异系数较小,说明这 3 种元素受外界影响比较一致,空间分异相对不明显,这 3 种元素在研究区域内的来源可能具有同源性。研究区域地下水总体表现为以 Zn、Cu 为主的多种重金属富集。K-S 检验是检验单一样本是否来自某一特定分布的方法,以样本数据的累积频数分布与特定理论分布比较,若二者间的差距很小,则推论该样本取自某特定分布。若 SPSS 统计结果给出样本符合正态分布的相伴概率值≤0.05 显著性水平,则认为样本总体与正态分布有显著差异,反之则认为符合正态分布。K-S 检验结果表明,Zn、Cr、Cu、Mn 等含量的频数呈正态分布,Ni、Pb 等含量的频数不符合正态性,表现为尖峰、偏性。

表 2 地下水重金属含量描述性统计

元素	最小值 (mg/L)	最大值 (mg/L)	平均值 (mg/L)	标准差 (mg/L)	变异系数 (%)	偏度	峰度	K-S 检验	背景值 (mg/L)	地下水质量标准 (mg/L)
Zn	0.371	0.959	0.620	0.164	0.265	0.371	-0.867	0.200	0.050	1.00
Ni	0.004	0.182	0.047	0.053	1.124	1.376	0.733	0.000	0.020	0.02
Cr	0.007	0.048	0.024	0.011	0.461	0.635	-0.220	0.200	0.004	0.05
Cu	0.143	0.988	0.511	0.227	0.445	0.251	-0.799	0.200	0.050	1.00
Mn	0.042	0.091	0.067	0.014	0.212	0.260	-0.919	0.200	0.010	0.10
Pb	0.004	0.010	0.007	0.002	0.250	-0.366	-1.246	0.045	0.010	0.01

地下水样品中重金属 Zn、Ni、Cr、Cu、Mn、Pb 含量的频率分布见图 2,Zn、Cr、Cu、Mn 的频数分布呈正态分布,Ni、Pb 不符合正态性,与表 2 中的 K-S 检验结果相一致。Zn、Cr、Cu、Mn 的质量浓度集中区间分别为 0.4~0.9、0.01~0.04、0.2~0.8、0.05~0.09 mg/L,分别占总样点的比例为 88.5%、76.9%、88.5%、88.5%;Ni 的质量浓度主要集中在 0.005~0.020 mg/L,样点占比达到 60%,Pb 的质量浓度主要集中在 0.004~0.009 mg/L 之间,分布较为均匀。

6 种重金属的相关性分析结果见表 3,Zn、Cr、Cu、Pb 之间,Pb 与 Ni、Mn 之间,以及 Mn 和 Ni、Cu 之间的相关性显著或极显著,尤其是 Cr 与 Cu、Cu 与 Pb 这 2 组元素之间相关性较为显著,相关系数分别达到 0.693、0.629( $P<0.01$ )。结果表明,这些重

金属元素的污染源可能相同,是通过共沉淀或吸附积累在浅层地下水中,呈现较为相似的化学特征<sup>[20]</sup>,各重金属元素间的相关关系与元素的性质、吸附特征以及沉积环境有关<sup>[21]</sup>。此外,Ni 与 Zn、Cr、Cu 的相关性并不显著(相关系数 $<0.4$ ),表明 Ni 的氧化物或氢氧化物共沉淀或吸附这些金属元素较少,可能由外来污染源所致。重金属 Zn 与 Cr、Mn 与 Pb 之间虽然相关系数不高,但达到了 0.05 显著水平,它们之间有着部分相似的来源。

2.2 地下水重金属的空间分布格局

本研究研究区域内采样点呈带状分布(图 1),工业园区位于研究区域中北部,北邻石亭江,园区南部为农田。克里金插值法是一种无偏、最优的常用插值方法,利用普通克里金插值法得到研究区域内 6 种地下水重金属含量空间变异分布。由图 3 可

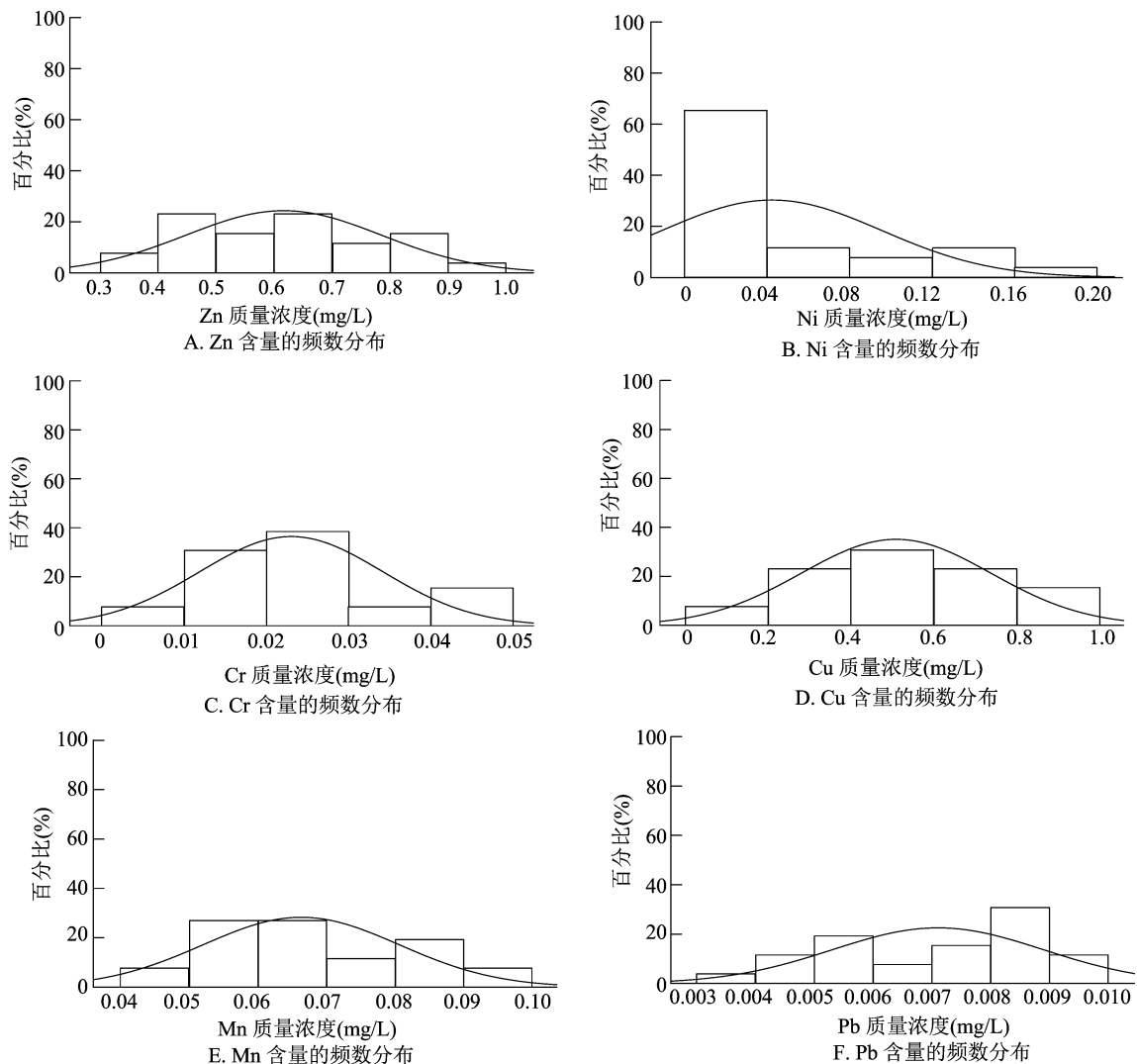


图2 地下水重金属含量频数分布

表3 地下水中 6 种重金属的相关性分析

元素	相关系数				
	Ni	Cr	Cu	Mn	Pb
Zn	0.383	0.426 *	0.577 **	0.319	0.573 **
Ni		0.300	0.292	0.569 **	0.536 **
Cr			0.693 **	0.336	0.531 **
Cu				0.533 **	0.629 **
Mn					0.482 *
Pb					

注：“\*”“\*\*”分别表示在 0.05、0.01 水平上显著相关。

知,6 种重金属浓度较高区域的空间分布相似,均出现在工业园区周边,Zn 和 Cr 的分布较为相似,高浓度主要集中在工业园周边,其他区域检测到较低浓度的分布;Ni 的分布较为均匀,研究区域内均有分布。Cu、Mn、Pb 的高浓度区域主要集中在工业园区南侧农田地区,由于该地区地下水由北部石亭江补给,工业园区重金属下渗后迁移至偏南部区域,而其他区域浓度较低。

2.3 地下水重金属的单因子污染指数与综合潜在生态风险评估

由表 4 可知,6 种重金属中,仅 Ni 的单因子污染指数高于 1,平均值为 2.344,达到中度污染的程度,部分样点的单因子指数最大达到 9.100,属于严重污染程度。其他 5 种重金属的单因子污染指数均小于 1,属于非污染等级。根据单因子污染指数统计数据,地下水中各项重金属的污染程度表现为 Ni > Pb > Mn > Zn > Cu > Cr。

由公式(2)至公式(4)计算得到 26 个样点地下水中 6 种重金属单因子潜在生态风险指数( $E_i^p$ )和多种重金属的综合潜在生态风险指数(RI),统计分析结果见表 5。通过对比 6 种重金属单项潜在生态风险指数的平均值,仅有重金属 Cu 的潜在生态污染指数达到 51.06,具有中度潜在生态风险,其他 5 种重金属均处于轻度潜在生态风险等级,潜在生态

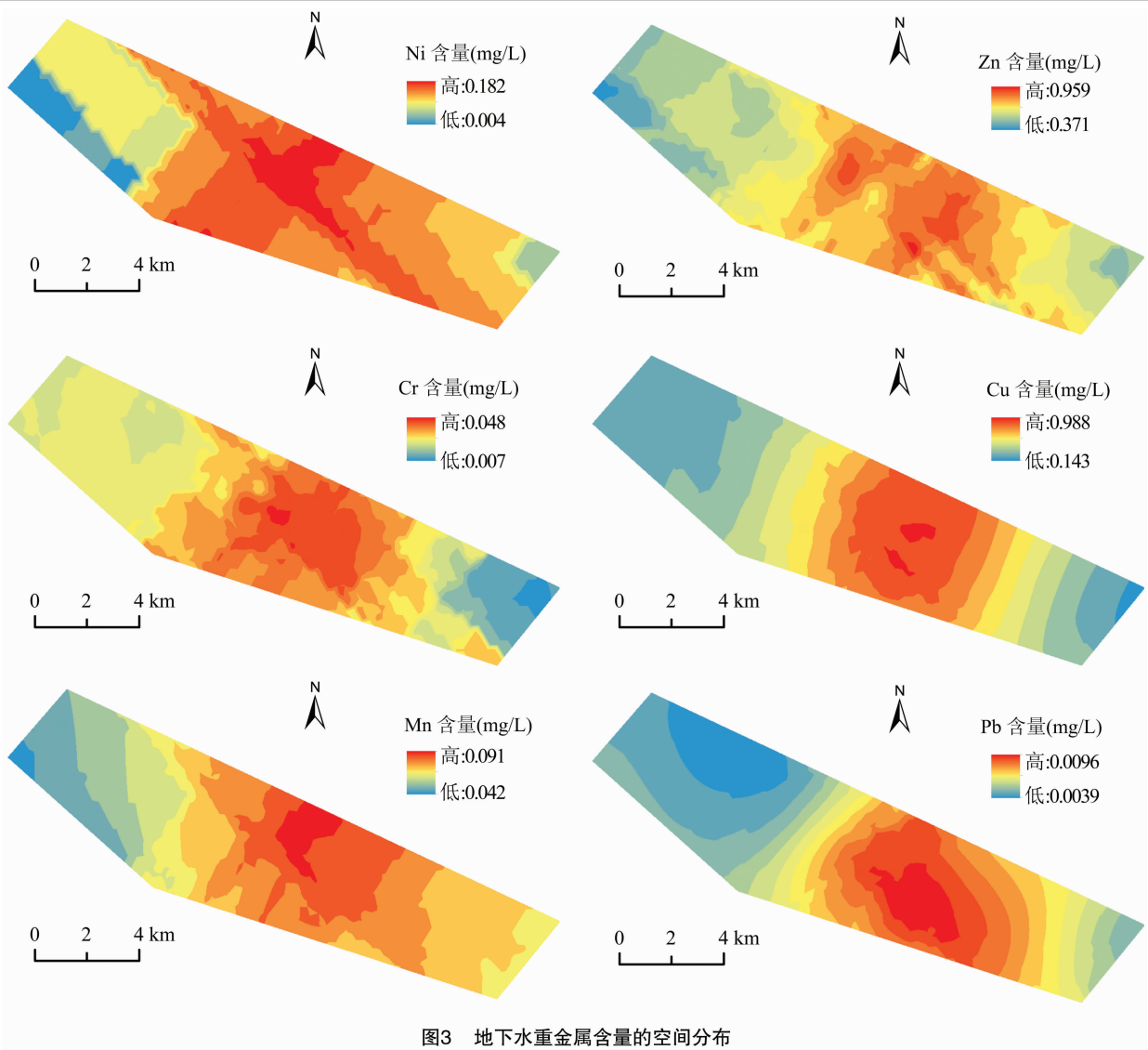


图3 地下水重金属含量的空间分布

表 4 地下水重金属单因子污染指数统计特征

元素	单因子污染指数				变异系数 (%)	污染等级
	最小值	最大值	平均值	标准差		
Zn	0.371	0.959	0.620	0.164	0.265	非污染
Ni	0.200	9.100	2.344	2.634	1.124	中度污染
Cr	0.140	0.960	0.475	0.219	0.461	非污染
Cu	0.143	0.988	0.511	0.227	0.445	非污染
Mn	0.417	0.913	0.666	0.141	0.212	非污染
Pb	0.389	0.960	0.709	0.177	0.249	非污染

风险指数表现为  $Cu > Zn > Cr > Ni > Mn > Pb$ 。对 Cu 的单因子重金属潜在生态风险指数进行统计分析可知,中度生态风险占总样点的 49.8%,较强生态风险占总样点的 15.4%。此外,有占总样点 3.8% 的 Ni 处于中度生态风险。主要是由于 Cu 与 Ni 的生态风险系数较大。

由表 5 可知,6 种重金属综合潜在生态风险指数(RI)的变化范围为 39.44 ~ 151.20,平均值为

97.27,处于中度综合潜在生态风险指数的区域仅占总调查区域的 3.8%,而处于轻度综合潜在生态风险指数的区域占总调查区域的 96.2%,其中风险系数小于 100 的覆盖面积最大,达到总调查面积的 50.0%。由图 4 可知,6 种重金属综合潜在生态风险(RI)评价与浅层地下水重金属含量的空间分布相关性较高,尤其是重金属 Cu 和 Pb 的分布趋势。上述分析结果表明,当地化工行业对农田浅层地下

表 5 地下水重金属单因子潜在生态风险指数及综合潜在生态风险指数统计特征

元素	单因子潜在生态风险指数				变异系数 (%)	风险等级
	最小值	最大值	平均值	标准差		
Zn	7.42	19.17	12.40	3.28	27	轻度
Ni	1.00	45.50	11.72	13.17	112	轻度
Cr	3.50	24.00	11.89	5.48	46	轻度
Cu	14.30	98.80	51.06	22.71	45	中度
Mn	4.17	9.13	6.66	1.41	21	轻度
Pb	1.95	4.80	3.55	0.89	25	轻度
RI	39.44	151.20	97.27	36.50	38	轻度

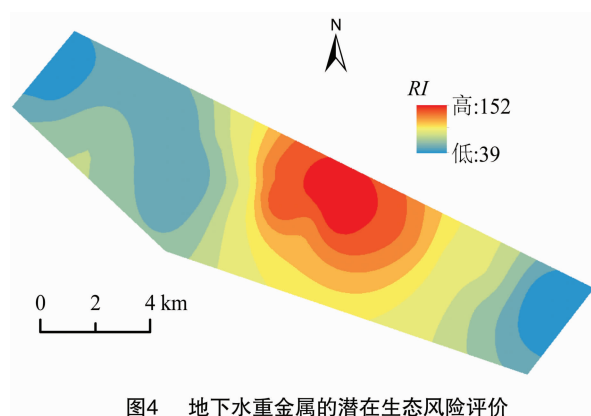


图4 地下水重金属的潜在生态风险评价

水产生了轻度的生态风险。

### 3 结论

浅层地下水调查结果表明,研究区域地下水总体表现为以 Zn、Cu 为主的多种重金属富集,其中 46.2% 的 Ni 超过国家 GB/T 14848—2017《地下水质量标准》的Ⅲ类标准;Ni 的变异系数达到 1.124,为强变异,而 Cr 与 Cu 则属于中等变异,连续性变化较差,空间分异较大,受外界干扰较大;Zn、Pb、Mn 的变异系数较小,分别为 0.265、0.250、0.212,说明这 3 种元素受外界影响比较一致,在研究区域内的来源可能具有同源性;此外,Zn、Cr、Cu、Mn 等含量的频数在研究区域呈正态分布,Ni、Pb 等含量的频数不符合正态性,表现为尖峰、偏性;Cr 与 Cu、Cu 与 Pb 这 2 组元素之间的相关性达极显著,相关系数分别达到 0.693、0.629 ( $P < 0.01$ ),表明其污染源可能相同,且通过共沉淀或吸附积累在浅层地下水中。

由通过普通克里金插值法得到的 6 种地下水重金属含量空间变异分布图可知,Cu、Mn、Pb 的高浓度区域主要集中在工业园区南侧农田地区,由于该地区地下水由北部石亭江补给,工业园区重金属下渗后迁移至偏南部区域,而其他区域浓度较低。

单因子污染指数统计结果表明,地下水中各项重金属的污染程度表现为  $Ni > Pb > Mn > Zn > Cu > Cr$ ,且 Ni 的单因子指数高于 1,平均值为 2.334,达到中度污染的程度;根据潜在生态污染指数计算结果可知,重金属污染程度表现为  $Cu > Zn > Cr > Ni > Mn > Pb$ ,仅有重金属 Cu 具有中度潜在生态风险,主要由于 Cu 的生态风险系数较大所致;6 种重金属综合潜在生态风险指数 (RI) 平均值为 97.27,轻度综合潜在生态风险指数的占比达到总调查区域的 96.2%,其中风险系数小于 100 的覆盖面积达到总调查面积的 50.0%;总体而言,当地化工行业对农田浅层地下水产生了轻度的生态风险。

### 参考文献:

- [1] Zhai Y Z, Lei Y, Wu J, et al. Does the groundwater nitrate pollution in China pose a risk to human health? a critical review of published data[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24 (4): 3640–3653.
- [2] López E, Schuhmacher M, Domingo J L. Human health risks of petroleum – contaminated groundwater[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2008, 15 (3): 278–288.
- [3] Shah T. Groundwater and human development: challenges and opportunities in livelihoods and environment[J]. Water Science and Technology, 2005, 51 (8): 27–37.
- [4] Tuncel S G, Öztas N B, Erduran M S. Air and groundwater pollution in an agricultural region of the Turkish Mediterranean coast[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2008, 58 (9): 1240–1249.
- [5] 刘宏伟. 中宁石空工业园区地下水锰污染评价及其水环境影响预测研究[D]. 西安:长安大学, 2013: 12–13.
- [6] 马群宇, 卞雪, 刘楚烨, 等. 淮安市化工企业地下水污染预测与风险评价[J]. 水土保持通报, 2017, 37 (5): 297–301.
- [7] 贾军元, 姜月华, 周迅, 等. 江苏某化学工业区浅层地下水有机污染特征[J]. 地下水, 2013, 35 (6): 87–89.
- [8] 张妍, 李发东, 欧阳竹, 等. 黄河下游引黄灌区地下水重金属分布及健康风险评估[J]. 环境科学, 2013, 34 (1): 121–128.
- [9] Arslan Ş, Yücel Ç, Çallı S S, et al. Assessment of heavy metal pollution in the groundwater of the northern Develi Closed Basin, Kayseri, Turkey[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2017, 99 (2): 244–252.
- [10] Tiwari A K, Singh P K, Singh A K, et al. Estimation of heavy metal contamination in groundwater and development of a heavy metal pollution index by using GIS technique[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2016, 96 (4): 508–515.
- [11] 冶雪艳, 尤传誉, 杜新强, 等. 傍河区域地下水脆弱性研究——以第二松花江流域为例[J]. 科技导报, 2015, 33 (17): 78–83.
- [12] 于云江, 杨彦. 基于 GIS 的松花江沿岸某区浅层地下水污染特征及人群暴露风险评价[J]. 中国环境科学, 2013, 33 (8): 1487–1494.



付永虎,宗婷,刘俊青,等.基于土地利用变化的连云港海岸带生态系统服务价值评估[J].江苏农业科学,2020,48(12):264-273.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.12.053

# 基于土地利用变化的连云港海岸带生态系统服务价值评估

付永虎<sup>1,2</sup>,宗婷<sup>1,3</sup>,刘俊青<sup>1,4</sup>,魏范青<sup>1</sup>

(1. 江苏海洋大学法律与公共管理学院,江苏连云港 222005; 2. 香港中文大学地理与资源管理学系,香港 999077;

3. 西南大学资源环境学院,重庆 400716; 4. 湘潭大学公共管理学院,湖南湘潭 411105)

**摘要:**基于连云港市 1987 年、1995 年、2002 年、2009 年、2017 年等 5 期 Landsat 影像,采用基于当量因子的生态系统服务价值评价方法和敏感性分析方法,分析连云港海岸带土地利用变化引起的生态系统服务价值变化。结果表明:(1)1987—2017 年,连云港海岸带各地类面积整体上呈现“五减三增”的态势,即耕地、林地、水域、盐田和未利用地面积有所减少;滩涂、其他建设用地和住宅用地面积有所增加;(2)连云港海岸带土地利用生态系统服务总价值呈持续减少趋势,从 1987 年的 87.59 亿元减少到 2017 年的 54.51 亿元,减少 33.08 亿元;(3)在土地利用类型方面,除滩涂外,其他土地利用类型的生态系统服务价值变化趋势与研究区总价值变化趋势基本保持一致,在生态服务功能中,水文调节对海岸带生态系统服务价值贡献率最大,各时间段均超过 70%;(4)敏感性分析结果表明,各土地利用类型的敏感性指数均小于 1,表明生态系统服务总价值对价值系数缺乏弹性,研究结果可信。研究成果对于连云港海岸带土地的可持续利用具有重要的指导意义。

**关键词:**土地利用变化;生态系统服务价值;敏感性分析;海岸带;连云港

**中图分类号:**F301.24 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2020)12-0264-10

生态系统服务是生态系统所形成和维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用<sup>[1-2]</sup>,强调在生

态环境过程、人口增长、社会经济发展等多重约束和限制下,生态系统为人类社会提供服务的能力<sup>[3-4]</sup>。作为自然与经济耦合系统的重要联结点,生态系统服务作用于人类社会经济<sup>[5]</sup>,同时又受到土地利用变化的影响。土地是人类生存最基本的物质载体,人类通过对土地的开发与利用,改变了地表土地利用的结构。土地利用变化能通过改变生态系统结构与生态过程,对生态系统维持及服务功能起到决定性作用,进而制约了人类社会的可持续发展<sup>[6]</sup>。因此,探讨土地利用变化对生态系统服务价值的影响已成为当前生态经济学领域的重要

收稿日期:2019-05-29

基金项目:江苏高校哲学社会科学研究基金(编号:2018SJA1694);江苏海洋大学科研基金资助项目(编号:S2016005);江苏海洋大学海洋经济与文化学科平台研究课题(编号:HHYPT17303);国家自然科学基金青年科学基金项目(编号:71704094)。

作者简介:付永虎(1982—),男,山东济宁人,博士,讲师,主要从事土地资源可持续利用研究。E-mail:huhu\_0902@163.com。

通信作者:刘俊青,硕士研究生,主要从事土地经济与管理研究。E-mail:pinle533@163.com。

[13] 栗石军. 基于 GIS 技术的地下水重金属污染综合风险评价研究[D]. 长沙:湖南大学,2008:11-12.

[14] 周晓虹,李小娟,高存荣. 基于 GIS 的地统计分析在区域水质评价中的应用——以内蒙古临河市为例[J]. 首都师范大学学报(自然科学版),2008,29(4):52-58.

[15] Zamani A A, Yafian M R, Parizanganeh A. Multivariate statistical assessment of heavy metal pollution sources of groundwater around a lead and zinc plant[J]. Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering, 2012, 9(1):29.

[16] 韩君,徐应明,温兆飞,等. 重庆某废弃电镀工业园农田土壤重金属污染调查与生态风险评价[J]. 环境化学,2014,33(3):432-439.

[17] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8):975-1001.

[18] 徐争启,倪师军,虞先国,等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术,2008,31(2):112-115.

[19] 王文森. 变异系数——一个衡量离散程度简单而有用的统计指标[J]. 中国统计,2007(6):41-42.

[20] 郑丙辉,秦延文,张雷,等. 重金属污染沉积物质量评价研究——以太湖为例[J]. 中国环境科学,2012,32(10):1860-1866.

[21] 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.