

有居民海岛土壤重金属空间异质性及其入海风险分析: 以田横岛为例

许 昊^{1,2}, 郭 振^{1,2}, 张志卫^{1,2}, 王 珏^{1,2}, 刘寅楚^{2,3}

(1.山东科技大学测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590; 2.自然资源部第一海洋研究所海岸带科学与海洋发展战略研究中心, 山东 青岛 266061; 3.青岛科技大学环境与安全工程学院, 山东 青岛 266042)

摘 要:查清海岛土壤环境本底特征,尤其是土壤重金属的空间异质性及其对周边海域的潜在影响,对于海岛生态承载力及脆弱性评估具有重要意义。以有居民海岛山东田横岛为研究对象,对岛内 Cu、Ni、Cr、Pb、Zn 5 种重金属含量开展取样与分析,利用反距离权重法研究重金属含量空间异质性特征;选取坡度、坡向两个地形要素,利用地理探测器研究其对重金属含量空间分布的影响;通过汇水区分析预测降水径流对周边海域污染的潜在风险源。研究表明:田横岛上重金属含量均未超过山东省背景值,且符合中国耕地标准,仅 Zn 存在轻度超标;基于相关性分析,土地利用与重金属含量无显著相关性,不同植被分布与重金属含量有显著相关性 ($p<0.01$);地理探测器分析结果显示,坡度、坡向对重金属含量空间分布影响较小,两者的共同作用对重金属空间分布具有非线性增强贡献;基于汇水区分析,岛内部分汇水区重金属含量较高,岛陆上重金属通过暴雨径流将会产生海洋污染风险,有潜在影响周边海产养殖产业的风险,后续可将出水口与水动力分析相结合,开展陆源污染物入海的动态评估治理。以上研究结果对于进一步摸清有居民海岛土壤本底重金属含量空间分布特征,以及面向陆海统筹的田横岛新一轮开发建设具有重要研究意义。

关键词:土壤重金属; 空间异质性; 地理探测器; 数字表面模型; 海岛发展

中图分类号:X53; X820.4

文献标识码:A

文章编号:1007-6336(2023)05-0704-09

Spatial heterogeneity and risk assessment of heavy metals in the soils of inhabited islands: A case study of Tianheng Island

XU Hao^{1,2}, GUO Zhen^{1,2}, ZHANG Zhiwei^{1,2}, WANG Jue^{1,2}, LIU Yinchu^{2,3}

(1.College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2.Coastal Science and Marine Policy Center, First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China; 3.College of Environment and Safety Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: It is of great significance to identify the background characteristics of soil environment in the island, especially the spatial heterogeneity of heavy metals in the soils and its potential impact on the adjacent sea areas, which is a prerequisite for the assessment of the island's ecological carrying capacity and vulnerability. In this study, Tianheng Island, an inhabited island of Shandong province, was chosen as a research object. Concentrations of five heavy metals, Cu, Ni, Cr, Pb, and Zn in the soils sampled from the island were analyzed,

收稿日期:2022-09-07, 修订日期:2023-01-13

基金项目:国家自然科学基金项目(42171292); 外交部亚洲专项资金项目(WJ0922011); 中国海洋发展基金会国际合作项目(B19029)

作者简介:许 昊(1998—),男,山东莱芜人,硕士,研究方向为 3S 技术在海岛空间规划中的应用, E-mail: 1360375614@qq.com

通信作者:郭 振(1983—),男,副研究员,博士,研究方向为海岸带生态过程与空间规划, E-mail: guozhen@fio.org.cn

and the spatial heterogeneity characteristics of the five heavy metal contents were studied by using the inverse distance weighting method. Two topographical elements, slope gradient and aspect, were used to study their influence on the spatial distribution of the heavy metal contents by using geographic detectors. The potential risk sources of precipitation runoff pollution to adjacent sea areas were predicted through catchment area analysis. The result shows that the heavy metal contents on Tianheng Island did not exceed the background value of Shandong Province, in line with the Chinese cultivated land standard, except Zn slightly polluted. Based on the correlation analysis, there is no significant correlation between land use and heavy metal content, but there is a significant correlation between different vegetation distribution and heavy metal content ($p < 0.01$). The results of geographical detector analysis showed that slope and aspect had little effect on the spatial distribution of heavy metals, and their combined effect had a nonlinear enhancement contribution to the spatial distribution of the heavy metals. Based on the analysis of the catchment area, there are many water outlets flowing into the ocean, and some catchment areas contain more heavy metals. Heavy metals on the island might cause marine pollution risks through stormy runoff, which might affect the marine aquaculture industry. It is suggested that, to the point precisely, the outlet can be combined with the hydrodynamic force for the precise governance. The research results are of important theoretical significance for improving our understanding the spatial distribution characteristics of background contents of heavy metals in the soils of inhabited islands, and for a new round of development and construction of Tianheng Island based on land and sea oriented overall planning.

Key words: heavy metal; spatial heterogeneity; ecological carrying capacity; DSM; island development

我国的众多海岛在国民经济、国家权益、资源生态等方面均具有十分重要的意义^[1]。近年来,我国坚持陆海统筹,在“新东部”经济带发展战略的布局下,我国近岸海岛,尤其是有居民海岛成为开发建设的重点区域,各类开发利用活动日趋频繁和强烈。海岛在发展建设的同时也带来了诸多的环境问题,如涉海基础设施建设、农业、海水养殖、船舶制造等活动造成海岸带地区土壤环境重金属的污染日益严重。2014年国务院发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,中国土壤的污染率达16.1%,约有20%的土壤已被重金属污染^[2]。

重金属一般指比重大于 0.5 g/cm^3 的金属,该类金属通常难以被生物降解,却能在食物链的富集作用下对环境和人类造成极大的危害^[3]。目前,土壤重金属作为一个全球性的环境污染问题,被人们广泛关注。国内外对重金属污染的研究较多,在内容方面,有侧重于污染的生化机理、土壤修复(物理、微生物手段)以及评估、预测污染时空分布与强度等^[4-6];在研究对象方面,有针对农田、工矿区、城市环境(街道扬尘)、湿地等;近年的研究有突出污染溯源的特点,如通过重金属同位素比值测定、多元统计和空间分

析等方法调查土壤的重金属污染源及路径示踪^[7-9],以探究人类工业活动以及径流、道路扬尘、固体废弃物堆积、肥料施用等过程对土壤重金属含量的影响程度、范围与途径^[10-11]。上述研究表明,不同土地利用方式下土壤重金属的污染程度、各重金属所占比重以及空间分布特征也各不相同^[12-13]。开展不同生境、不同人类活动干扰强度下土壤重金属的空间异质性与多要素相关性分析,是揭示城镇化、工业化过程对土壤圈层污染的基础性研究工作。重金属对环境的影响甚大,尤其是海岛地区,在发展建设时会产生大量的重金属污染物,基于海岛四面临海的特点,污染物入海的渠道更多,从而造成一定的海洋生态风险。目前,对海岛土壤重金属的空间异质性与地形相关性的研究较少,随着国家对海洋开发力度的加大,保护海岛生态系统,特别是提升海岛土壤质量,对促进海岛的可持续发展尤为重要。

依据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018),包括Cu、Ni、Cr、Pb、Zn等,是农用地土壤污染风险筛选值的必测项目,因此,本研究选取Cu、Ni、Cr、Pb、Zn 5种重金属作为研究指标。在系统梳理现有海岸带

地区土壤重金属分布特征的基础上,以山东田横岛为研究区,进行土壤重金属的空间异质性分析。将地统计学与 GIS 相结合进行海陆统筹分析^[14],通过开展多样点土壤重金属含量分析、基于高分辨率正射影像的土地利用分类、无人机倾斜摄影点云调查和海岛数字表面模型(DSM)构建,计算地累积指数和汇水区,研究海岛土壤重金属的空间异质性及其与土地利用、地形因子的相关性。本研究旨在揭示在海岛相对封闭的系统下,人类活动与土壤重金属空间分布的驱动机制,摸清我国北方典型有居民海岛的土壤环境本底现状,以规范海岛开发利用活动,提出有

针对性的整治修复建议。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

田横岛位于山东青岛东部海域的横门湾中,中心位置为 $36^{\circ}25'08''\text{N}$, $120^{\circ}57'32''\text{E}$, 总面积为 1.5 km^2 , 海岸线长约 8 km , 属于温暖湿润的海洋性气候(图 1)。田横岛有人口约 200 户,主要从事农渔业及旅游业。岛上已建成旅游度假区,食宿方便,可进行垂钓、帆船、摩托艇等海上运动。海岛周围海域为海上牧场,盛产鲍鱼、扇贝、海带等海产品。

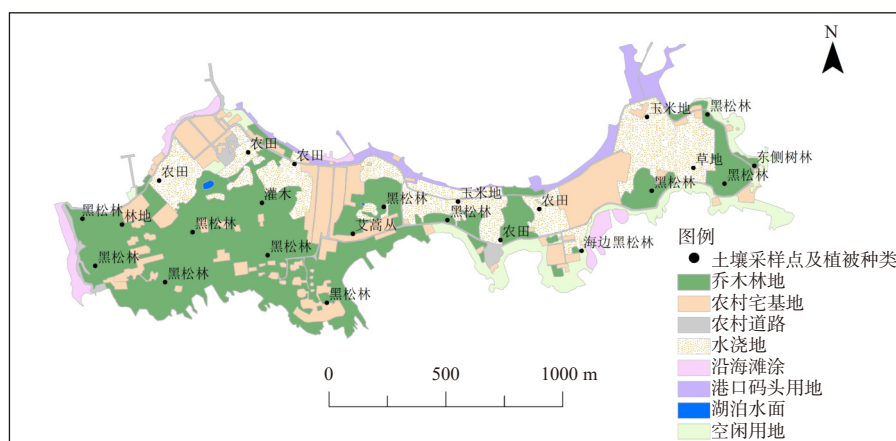


图 1 田横岛位置、土地利用及采样点植被类型

Fig. 1 Location, land use and vegetation types at sampling points of Tianheng Island

1.2 数据获取

土壤样点布设采取随机分布方式,并根据海岛土地利用现状及可达性进行筛选,于 2021 年 1 月在研究区内共采集 24 个位点的样本(图 2),包括农田 5 个、玉米地 2 个、黑松林 14 个(包括林地)、艾蒿丛 1 个、草地 1 个、灌木 1 个。利用 GPS 定位各采样点的位置,采样密度约为 6 ha/点 ,采样深度为 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 。

将土壤样品置于通风干燥处自然风干,剔除砂石、动植物遗体等杂质,采用四分法取样,经研磨后过 100 目筛,取 0.2 g 样品置于聚四氟乙烯坩埚中,加入少量水进行湿润后,依次加入硝酸、盐酸、高氯酸、氢氟酸进行热消解,使用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(Plasma2000, 中国钢研纳克)测定样品中 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni 的含量。每个样品做 3 组平行实验取平均

值,以确保实验的准确性,通过分析空白样品和国家标准样品(GSS-8)进行质量控制^[15],实验中所用试剂均为优级纯,水为超纯水,平行实验的相对偏差在 5% 以内,各种重金属回收率控制在 90% 以上。

无人机倾斜摄影影像数据、激光点云数据由无人机搭载倾斜摄影相机获得,调查时间为 2021 年 1 月,飞行高度为 100 m ,飞行姿态以单相机倾角 45° 绕飞,获得点云数据密度为 27 点/m^2 。在 Pix4d 软件中,对航测相片、POS 数据、相机参数、像控点数据进行定义与数据处理,将点云数据生成数字表面模型 DSM 数据,用以开展海岛微地形及汇水区分析。

通过正射高分影像进行土地利用和地物解译,并开展现场调查验证,得到田横岛土地利用及采样点处植被类型图(图 1)。

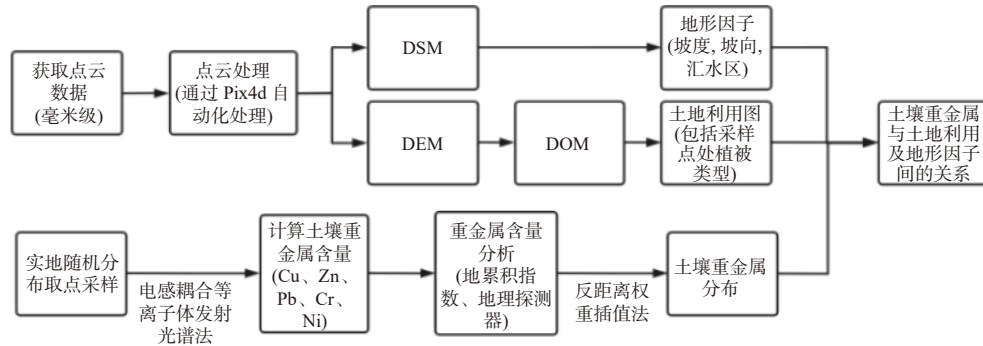


图2 研究路线

Fig. 2 The roadmap of this study

1.3 研究方法

1.3.1 研究路线

基于航摄点云数据处理生成分辨率为 $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 的 DSM 与 DOM 数据。通过 DOM 绘制田横岛土地利用图。基于 DSM 开展地形因子分析及汇水区分析, 形成 6 类坡度、4 类坡向及汇水区 3 类地形要素分布。根据采样点分布的非均匀性及采样点的数量特征及地形特征, 采用反距离权重插值法进行空间插值^[16-17], 得到各类重金属含量在田横岛的空间分布。鉴于部分重金属含量并不符合正态分布, 故采用 Spearman 相关分析研究任意两种金属以及金属与地形因子、土地利用类型之间的相关性^[18], 研究路线如图 2 所示。

1.3.2 地累积指数

地累积指数 (I_{geo}) 可以定性评估单个重金属的污染水平, 不仅考虑了自然地质过程造成的背景值的影响, 而且充分体现了人为活动对重金属污染的影响^[19-20], 该指数计算如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2(C_i/1.5C_{b,i}) \quad (1)$$

式中: C_i 是测得的重金属含量; $C_{b,i}$ 是土壤中重金属的背景值(《中国土壤元素背景值》, 1990), 1.5 为岩石形成导致的变异系数。该指数可分为 7 个等级: 无污染 ($I_{\text{geo}} < 0$)、轻度污染 ($0 < I_{\text{geo}} < 1$)、部分中度污染 ($1 < I_{\text{geo}} < 2$)、中度污染 ($2 < I_{\text{geo}} < 3$)、部分重度污染 ($3 < I_{\text{geo}} < 4$)、重度污染 ($4 < I_{\text{geo}} < 5$) 和极强污染 ($I_{\text{geo}} > 5$)。

1.3.3 地理探测器

地理探测器可以利用验证变量间的空间分布耦合性来确定变量之间的因果关系。以田横

岛土壤重金属含量为因变量, 以坡度、坡向为自变量, 利用因子探测器和交互作用探测器来探究坡度、坡向对重金属含量的影响^[21-22]。

因子探测器用于衡量坡度、坡向对土壤重金属含量空间分异性的影响程度, 用 q 值度量, 其计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (2)$$

式中: N_i 、 N 为层 i 和研究区的单元数; σ_i^2 为层 i 和研究区的方差; $i = 0, 1, 2, \dots$ 为影响因子的分层; SSW 为层内方差之和; SST 为研究区总方差。 q 的取值为 $[0, 1]$, 取值越大, 说明自变量对因变量的影响力越强。

交互作用探测器用于评估两个不同的自变量对因变量空间分异性的影响能力, 其判断依据及类型见表 1。

表 1 交互作用判断类型及依据
Tab.1 Types and Basis of Interaction Judgment

判断依据	交互作用类型
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量及其与污染程度相关性分析

对 5 种土壤重金属含量开展描述性统计(表 2),

田横岛土壤中重金属的平均含量均符合中国耕地标准^[23],为海岛农产品的安全以及岛民的健康提供了保障。与《中国土壤元素背景值》(1990)中山东省的土壤背景值相比,Cu、Ni、Zn 3 种重金属的平均含量超过了背景值,其中,Zn 超过背景值 2.04 倍。Cu 的变异系数最高(33%),表明 Cu 的含量在研究区变化最大,其高峰度和高偏度也表明,Cu 的分布相较于正态分布更陡峭,意味着田横岛土壤中 Cu 含量具有在高值区域集中分布的特点^[24]。

表 2 土壤重金属含量 (mg/kg)					
Tab.2 Concentrations of the heavy metals in the soils (mg/kg)					
指标	Cu	Ni	Cr	Pb	Zn
最大值	66.00	54.90	105.30	40.10	147.20
最小值	19.10	28.20	53.70	16.70	108.80
平均值	28.37	34.98	65.90	24.74	129.51
标准差	9.26	5.70	11.97	5.10	10.31
变异系数/(%)	33.00	16.00	18.00	21.00	8.00
偏度	3.10	2.00	1.85	1.05	-0.17
峰度	12.20	5.63	4.04	2.35	-0.77
土壤背景值	24.00	25.80	66.00	25.80	63.50
中国耕地标准	100.00	100.00	200.00	120.00	250.00

由表 3 可知,田横岛土壤 pH 与 5 种重金属之间没有显著相关性;Cu、Cr、Ni 之间呈显著正相关,表明这 3 种重金属可能有相同的来源或输入途径;Zn 与 Pb、Ni 有显著正相关性。

表 3 5 种重金属及其 pH 相关系数						
Tab.3 The correlation coefficients of five heavy metals and pH						
因子	pH	Cu	Ni	Cr	Pb	Zn
pH	1.000	—	—	—	—	—
Cu	0.266	1.000	—	—	—	—
Ni	0.121	0.692**	1.000	—	—	—
Cr	0.256	0.748**	0.933**	1.000	—	—
Pb	-0.026	0.353	0.191	0.162	1.000	—
Zn	-0.115	0.264	0.459*	0.392	0.475*	1.000

注: * 为 $p < 0.05$ 显著; ** 为 $p < 0.01$ 显著

各种重金属的地累积指数计算结果如表 4 所示,其中,Zn 的平均 I_{geo} 最高(0.44),为轻度污染;其次为 Ni、Cu、Cr、Pb,为无污染等级。Ni、Cu、Cr 和 Pb 的 I_{geo} 指数表现出相似的模式,其

无污染的采样点基本相似,表明人类活动是影响土壤 Zn 含量的主要因素。

表 4 重金属 I_{geo} 指数					
Tab.4 I_{geo} index of the heavy metals					
指标	Cu	Ni	Cr	Pb	Zn
平均值	-0.39	-0.16	-0.61	-0.67	0.44
无污染	22	20	23	23	—
轻度污染	2	4	1	1	24
部分中度污染	—	—	—	—	—
极强污染	—	—	—	—	—

2.2 土壤重金属与土地利用、植被空间相关分析

田横岛土壤中 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni 5 种重金属空间分布如图 3 所示。其中,Ni 和 Cr 空间分布特征总体相似,其变化趋势为东西方向各有一个最高点,重金属含量从最高点向四周逐渐递减,自西向东呈现低-高-低-高-低的分布趋势。Cu、Zn、Pb 的空间分布存在较大的差异性,其中 Cu 含量较多的区域有两处,分别是西侧中部以及东部小区域,海岛东部的 Cu 含量差别不大。Zn 的含量总体上呈现北低南高的分布特征,与 Ni 和 Cr 类似,在海岛的中东部地区含量最多。Pb 的空间分布情况多为带状分布,且东部地区 Pb 含量高于西部地区。整体来看,除 Cu 含量的空间分布表现为西多东少外,其他重金属也呈现东多西少的分布特征。

基于土地利用解译和现场验证调查,田横岛土地利用主要分为三大类,分别为乔木林地、农村宅基地以及水浇地。其中,农村宅基地分布相对均匀,乔木林地主要分布于岛的西部,水浇地大部分分布于海岛的北部、东部区域。基于重金属与土地利用类型的空间相关性,对每种土地利用类型与重金属之间进行 Spearman 相关性分析,由表 5 可以看出,田横岛的重金属含量与土地利用类型并不相关,这与 Salem 等^[25]的研究结论一致。

田横岛植被资源丰富,以黑松为主要的植被群落;灌木有刺槐、柘树、山槐、扁担木等,以刺槐为优势种;草本以艾蒿为优势种;农田以玉米地为主。根据采样点处的植被类型特征,选取黑

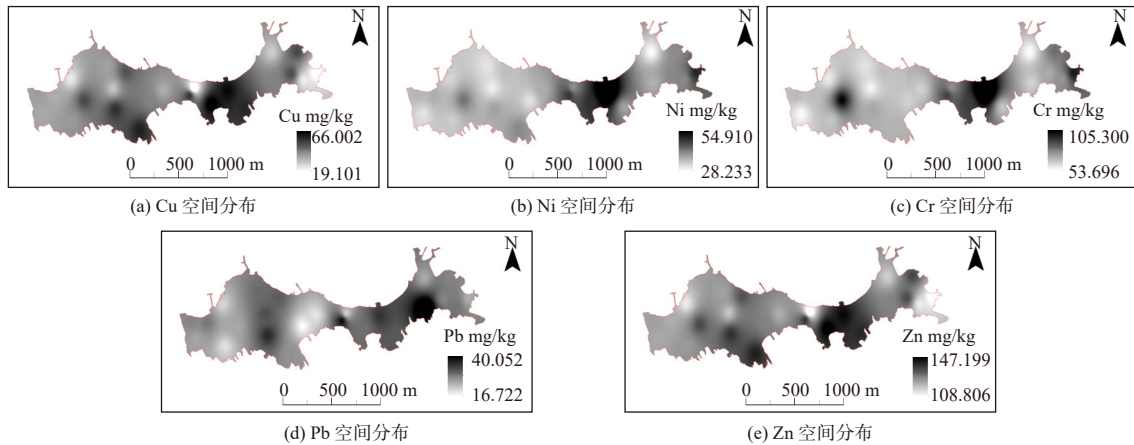


图3 田横岛土壤重金属分布情况

Fig. 3 Distribution of the heavy metals in soils of Tianheng Island

表5 地形要素与土壤重金属的相关系数

Tab.5 The correlation coefficients of land use and soil heavy metals

地形	Cu	Ni	Cr	Pb	Zn
乔木林地	0.030	0.030	0.030	-0.079	0.067
农村宅基地	0.018	0.067	0.115	-0.079	0.067
水浇地	-0.382	-0.297	-0.042	0.006	-0.297

松林、灌木、艾蒿三处采样点,以10 m为单位向外100 m建立多重缓冲区,并计算缓冲区内各重金属含量,同时进行Pearson相关性分析。由表6可以看出,任何重金属的含量均与植被的分布范围相关,艾蒿与所有重金属含量均呈正相关;灌木与Cu、Pb呈负相关,与Ni、Cr、Zn呈正相关;黑松与Pb呈正相关,与其他重金属呈负相关。由此可见,不同的植被对重金属的要求不同,这也间接表明,三者对环境的要求为黑松>灌木>艾蒿。

表6 不同植被与土壤重金属的相关系数

Tab.6 The correlation coefficients of different vegetation types and soil heavy metals

植被	Cu	Ni	Cr	Pb	Zn
黑松	-0.990**	-0.990**	-0.990**	0.991**	-0.990**
灌木	-0.993**	0.992**	0.992**	-0.994**	0.992**
艾蒿	0.991**	0.991**	0.992**	0.991**	0.998**

注:**为 $p < 0.01$ 显著

2.3 土壤重金属与地形要素空间相关性分析

基于激光点云生成的毫米级海岛DSM模

型,可精细地反映微地形的变化。首先,剔除房屋等人工构筑物以去除其对坡度、坡向造成的影响,经处理得到田横岛坡度、坡向,如图4所示。在不同坡度和坡向上选取500个点位(含24个实测点),导出其坡度、坡向以及各重金属含量,利用SPSS及地理探测器进行土壤重金属与海岛地形因子间的相关性分析。

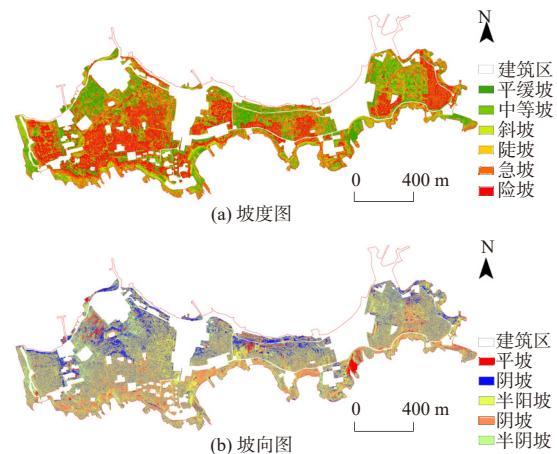


图4 田横岛坡度与坡向信息

Fig. 4 Slope gradient and slope aspect of Tianheng Island

结果表明,在坡向方面,Zn与Pb平均含量最高处均为平坡,分别为131.55 mg/kg和26.31 mg/kg,最低处均为阴坡,分别为129.12 mg/kg和24.52 mg/kg;Cu平均含量最高处为阴坡(30.15 mg/kg),最低处为平坡(28.16 mg/kg);Cr平均含量最高处为阴坡(66.29 mg/kg),最低处为半阴坡(64.26 mg/kg);Ni平均含量最高处

为半阳坡 (34.90 mg/kg), 最低处为半阴坡 (33.99 mg/kg)。由此可见, 坡向对不同重金属含量的影响不尽相同, 在接受太阳辐射较少的阴坡, Cu、Cr 含量最多, 而 Zn、Pb 含量最少。在坡度方面, 险坡处 Cu(30.26 mg/kg)、Zn(131.00 mg/kg) 的平均含量最高, 中等坡度处 Cr(66.41 mg/kg)、Pb(25.51 mg/kg)、Ni(35.00 mg/kg) 含量最高, 平缓坡度处 Cu(27.85 mg/kg)、Zn(129.26 mg/kg)、Pb(24.49 mg/kg) 的平均含量最低, 急坡处 Cr(63.96 mg/kg)、Ni(33.99 mg/kg) 的平均含量最低。将不同重金属分别与坡度、坡向进行 Spearman 相关性分析(表 7), 结果表明, Cu 与坡度呈正相关, 而与坡向呈负相关; Ni 与坡度、坡向均呈负相关, 且受坡向的影响更大; Cr 与坡向呈负相关, 与坡度不相关; Pb、Zn 均与坡度、坡向不相关。由表 8 可知, 坡度和坡向对重金属的空间分布影响较弱, 主要原因是田横岛地势较为平坦, 面积较小, 整体差异不大, 两者的共同作用对所有重金属的空间分布均是非线性增强, 两者的交互作用影响力强于单个因子。

表 7 地形要素与土壤重金属的相关系数

Tab.7 The correlation coefficient of topographic elements and soil heavy metals

因子	Cu	Ni	Cr	Pb	Zn
坡度	0.105 [*]	-0.097 [*]	-0.024	-0.012	0.077
坡向	-0.100 [*]	-0.119 ^{**}	-0.139 ^{**}	0.006	-0.077

注: * 为 $p < 0.05$ 显著; ** 为 $p < 0.01$ 显著

表 8 地形要素与土壤重金属的因子分析

Tab.8 Factor analysis of topographic elements and soil heavy metals

因子	Cu	Ni	Cr	Pb	Zn
坡度	0.023	0.006	0.005	0.009	0.013
坡向	0.005	0.002	0.004	0.002	0.008
坡度∩坡向	0.041 [*]	0.026 [*]	0.027 [*]	0.044 [*]	0.053 [*]

注: * 为非线性增强

2.4 面向土壤重金属的汇水区分析

受海岛地形的影响, 陆源重金属极有可能通过降水和径流等过程输入周边海域, 影响海岛的海水水质及沉积环境, 尤其是田横岛部分区域正

处于二次开发阶段。通过对田横岛的汇水区分析, 可快速确定对近海造成潜在影响的区域及入海口位置, 以对田横岛土壤重金属治理提出合理化建议。DEM 栅格单元的大小影响汇水区的面积大小及数量^[26], 本研究 DEM 栅格大小为 0.1 m × 0.1 m, 得到的汇水区数量为 143 个。为方便观察, 根据岛内主要汇水区及汇水方向调整适宜的分析栅格单元, 最终合并得到 11 个汇水区(图 5)。其中, 面积最大的汇水区为 23.4 ha, 最小的为 0.4 ha, 海岛与海洋相接的出水口共 85 个。

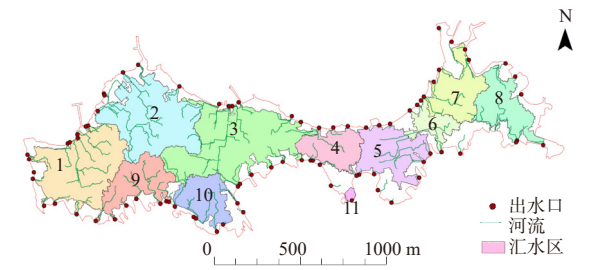


图 5 田横岛陆域汇水区分布

Fig. 5 Distribution of land catchment area in Tianheng Island

根据各汇水区重金属平均含量结果(表 9), 5 号汇水区 Ni、Cr、Zn 的平均含量最高, Cu 平均含量最多的地区位于 9 号汇水区, Pb 平均含量最多的地区位于 6 号汇水区。经实地调查, 9 号汇水区处正进行旅游资源的二次开发, 5 号汇水区内存在较多农业用地, 农业生产活动的肥料使

表 9 各汇水区重金属平均含量 (mg/kg)

Tab.9 Average contents of heavy metals in each catchment area (mg/kg)

汇水区	Cu	Ni	Cr	Pb	Zn
1	29.5	32.5	62.3	22.4	126.3
2	30.5	31.6	61.2	24.8	127.2
3	26.9	33.1	62.0	22.9	130.0
4	32.1	40.3	75.3	25.8	133.4
5	30.9	43.7	81.5	28.1	140.6
6	26.2	36.0	65.9	31.4	131.7
7	23.1	32.6	60.7	26.8	126.9
8	26.2	36.4	68.2	24.9	127.1
9	37.0	33.4	67.1	23.4	131.5
10	27.9	34.3	63.0	24.9	137.1
11	31.5	40.9	76.0	26.0	140.0

用会造成田横岛土壤中重金属的积累,当遇到暴雨冲刷时,会将土壤中的重金属通过汇水区的出水口流向岛外。需重点关注5号汇水区入海口处重金属含量的检测,以防止重金属大量流入海洋造成海水污染,影响周边海域的生态环境及海水养殖。

2.5 讨论

通过土壤重金属的含量分析可知,田横岛在建设发展中造成的重金属污染并不严重。由表2和表4可以看出,田横岛存在Zn污染的风险,而Cu分布具有变化大、高值多的特点,这在一定程度上加大了Cu的治理难度。每种重金属的分布各有特点,Cu含量的空间分布表现为西多东少的特点,而其他重金属呈现东多西少的特征。

综合来看,田横岛水浇地的重金属含量较高,推断为肥料施用所致,这与其他文献的结论一致^[27]。海岛西部乔木林地的中间区域重金属含量较高,经实地调查,该处正在进行旅游产业的二次开发活动。田横岛西部地区的Zn、Pb、Ni、Cr含量比东部地区少,推断人类生产活动对海岛土壤重金属含量有一定的影响,与其他文献的结论一致^[28]。从图1中可以看出,黑松林的分布范围较广,且与其他树林分布不同的是,其主要分布在Ni含量较少的区域,推测Ni作为限制性因子对黑松的生长有较大的影响,可见黑松林对环境的适应能力更强^[29]。灌木种类植被分布在Cu、Pb、Zn含量中等且Cr、Ni含量较少的地区。以艾蒿为优势种的草本种类植被大多分布在Cu、Pb、Cr、Ni含量较少且Zn含量中等的地区。玉米地基本分布在重金属含量较少的地区,部分农田的Zn、Pb、Cr、Ni含量较高。

田横岛内重金属污染物流入大海的主要途径便是汇水区出水口,当岛内含重金属沉积物位于岛内汇水区时,一旦岛内出现大雨,这些沉积物可顺着出水口进入潮间带地区,在潮间带地区这些附着在沉积物上的重金属被重新释放^[29],经由涨潮退潮、雨水冲刷等,最终流入大海。重金属在水体中很难降解,对海洋生态系统有很大的威胁,也会对人类产生一定的威胁^[30-31],当重金属含量超过一定阈值时会对生物产生显著的影响,不同重金属对生物造成的影响亦不同^[32],也

会间接影响人体健康,因此,通过汇水区将海洋与岛屿相联系,研究土壤重金属对海洋的影响,是非常有必要的。田横岛上有汇水区11个,与海洋相接的出水口85个,若要追究产生污染的出水口,将会非常麻烦,若将其与海洋水动力相结合,从大海向岛内进行追踪,便可精确到点,精准治理。

3 结论

(1)田横岛各重金属含量的最大值均未超过《中国土壤元素背景值》(1990),对食物安全和人类健康没有影响;基于地累积指数,田横岛土壤中的Zn存在轻度污染,岛上正在进行二次旅游开发地区的重金属含量远远高于其他地区。

(2)从重金属分布研究情况来看,Cr与Ni的分布情况大致相同,呈中间高、四周低的分布趋势,其他3种重金属的分布各具特点。重金属的含量与土地的利用方式无显著相关性,植被种类的分布与重金属含量有显著相关性。基于田横岛的植被种类,黑松林对环境的适应能力比艾蒿和灌木更强,可通过多种植黑松改善环境。

(3)坡度与坡向对重金属含量的影响不显著,但两者的交互作用对5种重金属来说均大于单个因子的影响力。田横岛上汇水区有11个,涉及85个出水口,在对海岛进行大规模开发建设时,应重点关注工程所在区域入海口的重金属含量检测,以减少对周边海域的污染。

参考文献:

- [1] 张坤理,郭新昌,郭佩芳,等. 资源环境视角下的海岛发展潜力评价——以七个海岛县(区)为例[J]. 海洋环境科学, 2022, 41(2): 230-235.
- [2] 宋玉婷,彭世逞. 我国土壤重金属污染状况及其防治对策[J]. 吉首大学学报(自然科学版), 2018, 39(5): 71-76.
- [3] 李家兵,赖月婷,吴如林,等. 河口潮间带沉积物重金属累积及生态风险评价[J]. 生态学报, 2020, 40(5): 1650-1662.
- [4] 魏忠平,朱永乐,赵楚峒,等. 生物炭吸附重金属机理及其应用技术研究进展[J]. 土壤通报, 2020, 51(3): 741-747.
- [5] 骆永明,滕 应. 中国土壤污染与修复科技研究进展和展望[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1137-1142.
- [6] 王韬轶,潘保柱,韩 谓,等. 黄河沉积物重金属时空分布与污染评价[J]. 环境科学, 2022, 43(5): 2467-2475.
- [7] 于旦洋,王颜红,丁 茯,等. 近十年来我国土壤重金属污染

- 源解析方法比较[J]. 土壤通报, 2021, 52(4): 1000-1008.
- [8] WANG S Y, ZHANG Y B, CHENG J L, et al. Pollution assessment and source apportionment of soil heavy metals in a coastal industrial City, Zhejiang, Southeastern China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(6): 3335.
- [9] ZHOU J, FENG K, PEI Z P, et al. Multivariate analysis combined with GIS to source identification of heavy metals in soils around an abandoned industrial area, Eastern China[J]. *Ecotoxicology*, 2016, 25(2): 380-388.
- [10] 张 蕾, 李 洋, 张 阳. 常用肥料对作物重金属积累的影响及其机理研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(2): 123-131.
- [11] FEI X F, XIAO R, CHRISTAKOS G, et al. Comprehensive assessment and source apportionment of heavy metals in Shanghai agricultural soils with different fertility levels[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 106: 105508.
- [12] CUI S, HAN Q, ZHANG T Y, et al. Overview of leaching remediation of heavy metal contamination in soil[J]. *E3S Web of Conferences*, 2021, 245: 02005.
- [13] WASEEM A, ARSHAD J, IQBAL F, et al. Pollution status of Pakistan: a retrospective review on heavy metal contamination of water, soil, and vegetables[J]. *Biomed Research International*, 2014, 2014: 813206.
- [14] 张 博, 郑青松, 赵耕毛, 等. 基于GIS和地统计学的滩涂增养殖区沉积物重金属污染评价[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(3): 376-379.
- [15] 汪 丹, 何恬叶, 胡子文. 电感耦合等离子体发射光谱法测定土壤中10种重金属[J]. 化学分析计量, 2018, 27(3): 28-31, 43.
- [16] 阳文锐, 王如松, 黄锦楼, 等. 反距离加权插值法在污染场地评价中的应用[J]. 应用生态学报, 2007, 18(9): 2013-2018.
- [17] 韩富江, 刘学军, 潘胜玲. DEM内插方法与可视性分析结果的相似性研究[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(1): 31-35.
- [18] 刘 辉, 邵福波, 宫 响. 经典相关系数及统计功效对比研究[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2022, 43(1): 111-119.
- [19] 李 磊, 王云龙, 蒋 玫, 等. 江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性[J]. 环境科学, 2012, 33(8): 2607-2613.
- [20] ARIENZO M, FERRARA L, TOSCANESI M, et al. Sediment contamination by heavy metals and ecological risk assessment: the case of Gulf of Pozzuoli, Naples, Italy[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 155: 111149.
- [21] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [22] 张若婧, 陈跃红, 张晓祥, 等. 基于参数最优地理探测器的江西省山洪灾害时空格局与驱动力研究[J]. 地理与地理信息科学, 2021, 37(4): 72-80.
- [23] GB 15618—2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [24] ZHANG B C, JIA T Z, PENG S Z, et al. Spatial distribution, source identification, and risk assessment of heavy metals in the cultivated soil of the Qinghai-Tibet Plateau region: case study on Huzhu County[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2022, 35: e02073.
- [25] SALEM M A, BEDADE D K, AL-ETHAWI L, et al. Assessment of physiochemical properties and concentration of heavy metals in agricultural soils fertilized with chemical fertilizers[J]. *Heliyon*, 2020, 6(10): e05224.
- [26] 彭 博, 王继龙, 同 萌, 等. 人类活动影响下福建三都澳近百年来重金属沉积记录及其对生态环境的影响[J]. 中国地质, 2021, 48(6): 1759-1769.
- [27] 石娇星, 许洛山, 方晓晨, 等. 中国东部海岛黑松群落功能多样性的纬度变异及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2021, 45(2): 163-173.
- [28] MIRANDA L S, DEILAMI K, AYOKO G A, et al. Influence of land use class and configuration on water-sediment partitioning of heavy metals[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 804: 150116.
- [29] 薛丰昌, 唐步兴, 黄敏敏. DEM栅格单元大小对汇水区提取的影响研究[J]. 科技通报, 2019, 35(3): 18-25.
- [30] 马立杰, 李新正, 毕海波, 等. 山东黑泥湾潮间带沉积物重金属分布及其环境效应[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(1): 44-47.
- [31] 陈 毅, 夏 鹏, 陈志华, 等. 海南沿海岸海岛潮间带表层沉积物中重金属的污染状况及其潜在生态危害[J]. 环境化学, 2012, 31(9): 1450-1451.
- [32] SHAHJAHAN M, TASLIMA K, RAHMAN M S, et al. Effects of heavy metals on fish physiology - A review[J]. *Chemosphere*, 2022, 300: 134519.