

张鑫, 余树全, 李清林, 等. 洞头列岛土地利用对土壤及沉积物重金属污染的影响及其生态风险评价[J]. 生态科学, 2016, 35(5): 126–135.

ZHANG Xin, YU Shuquan, LI Qinglin, et al. The effects of land use on soil/sediment heavy metal pollution and ecological risk assessment at Dongtou Islands, Zhejiang, China[J]. Ecological Science, 2016, 35(5): 126–135.

洞头列岛土地利用对土壤及沉积物重金属污染的影响及其生态风险评价

张鑫, 余树全*, 李清林, 张超, 李领寰, 车继鲁

浙江农林大学林业与生物技术学院, 杭州 311300

【摘要】 针对浙江省洞头列岛不同土地利用类型土壤及沉积物中的重金属含量进行调查, 选择了五种土地利用类型, 农田、森林、围涂、码头、养殖。主要评估重金属的污染现状, 区域快速产业化导致的土壤及沉积物中重金属污染及生物的潜在生态风险。采用内梅罗指数法、Hakanson 潜在生态危害系数法对重金属的潜在生态风险进行评价。结果表明, 洞头列岛不同土地类型的土壤重金属含量均超过浙江省土壤背景值, 其中, Cr、Mn、Co 超标率为 100%, Zn 超标率为 84%。多数监测点土壤重金属含量的内梅罗综合指数处于清洁水平, 但养殖类型中的 As、Co, 围涂类型中的 As、Pb, 农田类型中的 Pb、Cr 属于尚清洁等级, 围涂中的 Co 元素属于轻度污染等级; 综合潜在生态风险指数(RI)均显著低于轻微生态危害水平, 五种土地类型土壤质量的 RI 大小顺序为: 养殖>围涂>码头>森林>农田, Pb、As 是主要的重金属生态风险种类。重金属元素之间的相关性分析表明, 围涂与码头土壤中重金属元素之间的相关性明显高于其他三种类型。围涂类型土壤中 As 与 Co、Cu 元素呈极显著正相关, Pb 与 Zn 呈极显著正相关; 码头类型中的 Cu 与 Co 呈极显著正相关, As、Pb 与 Zn 呈极显著正相关。Cu 与 As 在码头、养殖、围涂类型中的含量较高。五种土地类型中除农田和养殖用地的某些重金属来源于成土母质, 其他各重金属来源主要是人为活动影响, 如: 交通运输、城市排污、三废排放以及汽车尾气等。因此, 应该把由人类活动导致的有毒重金属的污染控制作为首要任务, 制定相应的政策和法规。

关键词: 重金属; 内梅罗指数; 潜在生态风险

doi:10.14108/j.cnki.1008-8873.2016.05.018 中图分类号: X825 文献标识码: A 文章编号: 1008-8873(2016)05-126-10

The effects of land use on soil/sediment heavy metal pollution and ecological risk assessment at Dongtou Islands, Zhejiang, China

ZHANG Xin, YU Shuquan*, LI Qinglin, ZHANG Chao, LI Linghuan, CHE Jilu

College of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Zhejiang 311300, China

Abstract: The heavy metals contents in sediments/soils from different land use types were investigated at Dongtou islands, Zhejiang Province, China. The five land use types were port, aquaculture, agriculture, reclamation, and forests. It aims to assess the status of heavy metals pollution due to the regional fast-pace industrialization. The major heavy metals were chromium (Cr), manganese (Mn), cobalt (Co), nickel (Ni), copper(Cu), zinc (Zn), arsenic (As), and lead (Pb). The Nemerow index (*NI*) and Hakanson potential ecological risk index (*RI*) were adopted to assess the heavy metal pollution status and the risks to biota, respectively. The results indicated that the heavy metal contents in each land use types were higher than the provincial base values (*BV*), especially the Cr, Mn, and Co over-passed *BV* 100% and Zn over-passed *BV* 84%. The Nemerow

收稿日期: 2015-09-09; 修订日期: 2015-10-06

基金项目: 浙江省重点科技创新团队项目(2011R50027)

作者简介: 张鑫(1990—)女, 黑龙江牡丹江人, 浙江农林大学在读硕士, 研究方向为生态规划, 重金属污染, E-mail: 1239889484@qq.com

*通信作者: 余树全, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为森林生态, 生态规划, E-mail: yushuq@zafu.edu.cn

index also indicated that most of the heavy metals under investigation were no threats and at safe level, but the As and Co in aquiculture, As and Pb in reclamation, and Pb and Cr in agriculture were in the warning level, while the Co in reclamation was in light pollution status. The *RI* was significantly lower than the light risk level to biota; the *RI* values were aquiculture > reclamation > port > forests > agriculture. Among all the heavy metals, Pb and As were highly toxic to environments, which had great threats to biota. In addition, the correlation analysis indicated that the reclamation soils and port sediments had much higher correlation than others. In reclamation soils, As positively correlated with Co and Cu, while Pb positively correlated with Zn. In port sediments, Cu and Co were positively correlated, while the As, Pb and Zn were positively correlated. The Cu and As contents were much higher in port sediments, aquiculture sediments, and reclamation soils. This research clearly indicated that the heavy metals of agriculture and aquiculture were originated from their parent materials, while other land use types might be introduced by anthropogenic activities, such as transportation, sewage discharge from the cities, waste disposals, and car tail gas. Thus, pollution control of human-induced toxic heavy metals in practice should be put on first priority in formulating local, provincial and/or federal level policies and regulations.

Key words: heavy metals; Nemerow index; potential ecological risk index (*RI*)

1 前言

海岛作为海洋生态系统的重要组成部分, 是国家宝贵的资源财富^[1]。中国是世界上海岛最多的国家之一, 面积大于 500 m² 的海岛有 6500 多个, 岛屿总面积约 8×10⁴ km², 占我国陆地面积的 8%^[2]。与其它生态系统相比, 海岛生态系统具有海陆两相性、结构独立完整性、生态脆弱性、资源独特性、动力两重性等独特的生态特征^[3]。海岛的土地资源有限, 若过度或不当开发, 极易破坏良好的生态系统。近年来, 许多学者从各相关专业角度, 如海岛土壤、植被、潮间带生物等方面对部分海岛进行了相关研究^[4-6], 对于海岛重金属的研究较少。2013 年程芳等人对大金山岛土壤重金属污染进行了评价及相关性分析, 结果表明, 大金山岛陆域土壤重金属基本符合一级土壤标准, 保护尚好, 受人为活动影响较小^[7]。孙元敏对中国南亚热带海岛海域沉积物中的重金属污染进行研究, 用了潜在生态危害系数法评价了海岛沉积物中重金属的潜在生态危害, 判断各海岛的生态危害程度^[8]; 马立杰以 2007 年长岛县海岛调查资料为基础, 分析了长岛县海岛潮间带沉积物重金属含量特征及其与有机质含量等之间的相关关系, 并对其潜在生态危害进行了评价等^[9]。

随着温州洞头半岛工程的完成, 对外交通更加便捷, 使洞头成为一个别具特色的旅游度假地, 洞头列岛各项基础设施建设的加快, 使海岛的自然生态过程受到严重干扰, 生态风险不断加大。在自然情况下, 海岛土壤重金属主要来源于母岩和残落的生物物质, 但随着工农业生产活动的发展, 人为活动对土壤重金属分布的影响不断加强, 土

壤中重金属含量呈现增长趋势^[10]。环境中高浓度的重金属不仅会抑制生物的生长, 破坏群落结构, 造成生态系统不可逆转的危害, 同时, 重金属还能通过各营养级生物的富集和食物链的传递最终危害人类的健康^[11]。因此, 研究洞头列岛土壤重金属的含量及分布特征, 具有十分重要的理论与实践价值。本文以洞头列岛五种不同土地利用类型作为研究对象, 结合洞头列岛的特点, 重点阐明了洞头列岛重金属在五种不同土地利用类型中的含量水平、分布差异, 并归纳总结了洞头列岛重金属的综合污染水平, 污染现状的生态风险评价等, 探究了重金属的潜在污染来源。本研究有助于客观掌握洞头列岛土壤重金属污染水平及生态风险, 为洞头列岛重金属污染防控措施的制定提供科学依据。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

洞头县位于浙江省东南部, 地处浙江省东南海域温州湾口和乐清湾的汇集处, 地理坐标介于东经 120°59'45"—121°15'58", 北纬 27°41'19"—28°01'10" 之间。属中亚热带海洋性季风气候, 温暖湿润, 雨量充沛、四季分明。近年来, 随着温州市经济的快速发展, 输入瓯江的污染物也有所增加, 对洞头列岛的海域环境造成了严重影响。

2.2 样品的采集

本研究样品于 2014 年 12 月在洞头列岛多个岛屿采集, 根据洞头列岛土地利用现状以及渔业、交通分布的特点, 通过现场勘探, 资料分析, 选取 5 个能反应洞头列岛农业、渔业、交通、林业主要活动

特征以及土壤潜在污染可能性差异较大的功能区^[12], 包括农田区、森林区、围涂区、码头区和养殖区。共设置 15 个采样点, 主要位于洞头本岛、大门岛和元觉等地, 每个功能区土壤样品采样点随机布设, 每个样点取 3 个 0—20 cm 土壤样品, 共采集样品 45 份, 样品用聚乙烯塑料袋盛装, 封口、编号、贴好标签运回室内, 以防止污染, 同时记录取样位置的经纬度信息, 采样点位分布如图 1 所示。

2.3 样品的分析测定

2.3.1 样品处理

将土壤样品置于阴凉处荫干, 避免阳光直射, 人工剔除根须、石块等杂物, 粉碎研磨后过筛 60 目, 将土样装进密封袋中, 做好标记, 以备分析。取五个类型土壤, 称 10 g 样品溶解于 25 mL 蒸馏水, 盛于小瓶中, 加盖震荡半小时, 测量 pH 值。

表 1 浙江省土壤中重金属元素背景值^[15] (mg·kg⁻¹)
Tab. 1 Backgrounds of heavy metals in Zhejiang soil (mg·kg⁻¹)

背景值/(mg·kg ⁻¹)	Ti	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Pb	Fe
浙江省土壤	4406	56	620.5	10.4	23.9	22.6	83.1	6.9	35.7	28500

2.3.2 重金属各元素的分析测定

土壤中重金属元素 Ti、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Pb 的测量采用由德国牛津仪器生产的手持 X 射线荧光(EDXRF)光谱仪^[13], 型号为 X-MET7000, 取出待测土壤样品, 装入聚氯乙烯盒内, 用高压机进行压片, 然后用美国进口的聚乙烯膜覆盖与表面, 上机测试, 元素测试误差小于 3%。测试完成于浙江农林大学生态学实验室。

3 研究方法

3.1 土壤重金属超标倍数及超标率

土壤中重金属的超标倍数反应土壤被污染的程度^[14], 如表 1 所示。以浙江省土壤背景值为依据, 计算了洞头列岛不同土地类型的重金属超标倍数及超标率。

超标倍数=(土壤中某污染物实测值-浙江省土壤中某重金属元素背景值)/浙江省土壤中某重金属元素背景值

$$P_i = (C_i - C_0) / C_0$$

式中: P_i ——土壤中 i 重金属污染超标倍数,

C_i ——土壤中 i 重金属实测含量,

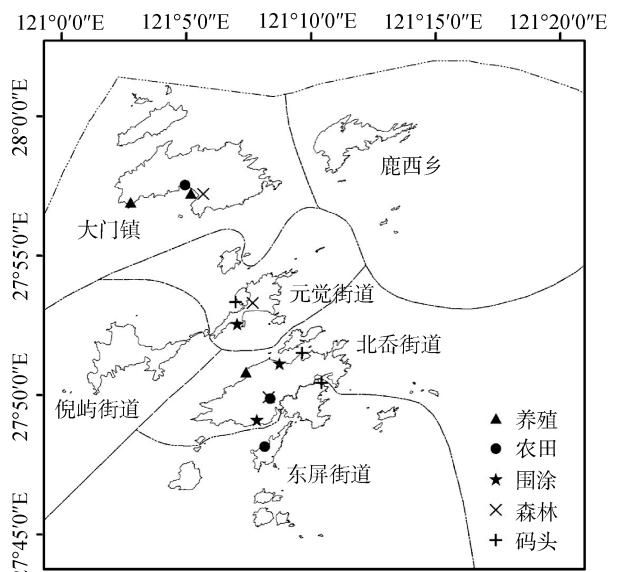


图 1 调查区域及采样站位
Fig. 1 Study area and sampling locations

C_0 ——土壤中 i 重金属质量标准

土壤污染样本超标率(%)=(土壤超标样本总数/监测样本总数)100%

3.2 土壤重金属污染评价

由于土壤重金属污染常常是多种不同元素的复合污染, 仅靠单一指标难以正确评价土壤重金属的污染程度, 因此, 国内外普遍采用内梅罗综合污染指数法来评价土壤的重金属污染情况^[16]。其计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i \tag{1}$$

$$P = \sqrt{\frac{P_{\max}^2 + \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^m P_i\right)^2}{2}} \tag{2}$$

式中, P 为综合污染指数, P_i 为单项污染指数, C_i 为 i 种污染物的实测含量, S_i 为土壤中 i 种污染物的背景值或对照值; P_{\max} 为土壤中重金属元素中污染指数最大值; 一般综合污染指数小于或者等于 1 表示未受污染, 大于 1 表示已受污染^[17]。综合污染指数(P 值)越大表示土壤污染越严重, P 分级标准见表 2。

表 2 土壤综合污染指数分级标准

Tab. 2 Standard of soil pollution classification

等级划分	单项污染指数	综合污染指数	污染等级	污染水平
1	$P_i \leq 1$	$P \leq 0.7$	安全	清洁
2	$P_i \leq 1$	$0.7 < P \leq 1.0$	警戒线	尚清洁
3	$1 < P_i \leq 2.0$	$1.0 < P \leq 2.0$	轻污染	土壤开始受到污染
4	$2.0 < P_i \leq 3.0$	$2.0 < P \leq 3.0$	中污染	土壤受中度污染
5	$P_i > 3.0$	$P > 3.0$	重污染	土壤受污染已相当严重

表 3 洞头列岛不同土地类型土壤 pH 值及背景值

Tab. 3 The pH values of different land use types and their reference pH values

类型	农田	森林	围涂	码头	养殖
pH	6.235	5.949	7.868	8.075	8.122
土壤环境质量标准范围	5.5—6.5	5.5—6.5	>7.5	>7.5	>7.5

表 4 土壤无机污染物在不同土地类型中的环境质量第二级标准值^[18]

Tab. 4 The secondary standards for soils pollution (mg·kg⁻¹)

所属类型	土地类型	pH 平均值	pH 范围	As	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Co
菜地	农田	6.235	>5.5—6.5	30	50	150	50	70	200	40
居住用地	森林	5.949	>5.5—6.5	50	300	400	300	150	500	50
水田	围垦	7.868	>7.5	20	80	350	100	100	300	40
居住用地	码头	8.075	>7.5	50	300	400	300	150	500	50
水田	养殖	8.122	>7.5	20	80	350	100	100	300	40

3.3 土壤重金属潜在生态风险评价

潜在生态危害系数法^[19], 是瑞典科学家 Hakanson 提出的一种土壤重金属的评价方法, 为了使区域质量评价更具有代表性和可比性, Hakanson 从重金属的生物毒性角度出发建议对重金属元素进行评价。本文中重金属元素的选择按相关学者建议选用 Pb、Cu、Zn、Cr 和 As^[20]等 5 种毒性较强的重金属元素, 潜在生态风险指数 RI 的计算公式为:

$$C_f^i = C_{\text{表层}}^i / C_n^i$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i$$
$$RI = \sum E_r^i \tag{3}$$

式中, C_f^i 为某一重金属的污染系数, 表层代表了土壤样品的实测质量分数, C_n^i 代表土壤重金属元素背景值, E_r^i 为某个重金属的潜在生态危害系数, T_r^i 为各重金属的毒性响应系数, RI 为土壤多种重金属的综合潜在生态风险指数。本文采用浙江省土壤重金属元素背景值作为比较基准, 重金属元素的背景参考值及毒性系数如表 5 所示。潜在生态风险指数与污染程度的关系如表 6 所示。

表 5 重金属元素的背景参考值(C_n^i)及毒性系数(T_r^i)

Tab. 5 Heavy metals reference values (C_n^i) and their toxicity coefficient (T_r^i)

重金属	Pb	Cu	Zn	Cr	As
C_n^i	35.7	22.6	83.1	56	6.9
T_r^i	5	5	1	2	10

表 6 潜在生态危害评价指标

Tab. 6 Indices of potential ecological risk assessment

生态危害	轻微	中等	强	很强	极强
E_r^i	<40	40-80	80—160	160-320	≥320
RI	<150	150-300	300—600		>600

4 数据处理

采用 Spss18.0 统计软件对数据进行统计分析。采用单因素方差分析(One-way Anova)对不同土地类型间土壤重金属含量的差异性进行比较,使用皮尔森相关系数(Pearson Correlation Coefficient)探究不同重金属元素之间的相关性。

5 结果与分析

5.1 重金属的含量特征

洞头列岛土壤中的重金属元素在不同土地利用类型中的含量有较大差别,就 Ti 元素来看,码头和农田类型中含量较低,方差分析表明码头类型中 Ti 的含量显低于养殖、森林类型;Cr 元素在围涂类型中的含量最高,由高到低的顺序为围涂>养殖>码头>农田>森林,方差分析表明围涂类型的 Cr 含量显著高于森林和农田类型;Mn 在森林类型中的含量最高,其次为围涂;Co 在围涂类型中含量的平均值为 35.64,分别是农田类型的 2.4 倍,森林类型的 1.8 倍,码头类型的 1.3 倍,养殖类型的 1.4 倍,方差分析表明围涂类型中的 Co 元素含量显著高于农田、森林和养殖类型;Ni 在养殖类型中的含量最高,其次为围涂类型,方差分析表明养殖、围涂、码头中 Ni 元素含量显著高于农田、森林类型;Cu 元素含量在养殖类型、围涂类型中较高,在农田类型中低于背景值,方差分析表明养殖、围涂、码头类型中 Cu 元素含量显著高于农田类型;Zn 在森林类型中含量最高,农田、森林类型中的 Zn 含量有显著性差异;As 在养殖类型中含量最高,是农田类型中 As 平均值含量的 5 倍,围涂、码头、养殖类型中的 As 含量显著高于农田、森林类型;Pb 在森林类型中的含量最高,平均值为 53.86,显著高于养殖类型。变异系数(CV)能够反映不同样点间数据的离散程度,一般认为 $CV \leq 10\%$ 为弱变异性, $10\% < CV < 100\%$ 为中等变异性, $CV \geq 100\%$ 为强变异性^[21]。从表 8 可以看出,研究区内采样点间的重金属元素含量差别较大,养殖类型中的 Ti、Cr、Mn、Cu、Zn 呈弱变异性,其他类型中的重金属元素均呈中等变异性。

以浙江省土壤背景值为依据计算了各重金属元素的超标率及超标倍数,从表 8 可以看出,超标率从高到低的顺序为: $Cr=Mn=Co>Zn>Ni>Pb>Ti>As>Cu$ 。其中, Cr、Mn、Co 元素所有样品均超过浙江省

土壤重金属背景值,超标率为 100%, Zn 元素的超标率为 84%。从图 2 可以看出,与浙江省土壤重金属元素背景值相比, Ti 元素除了码头类型,其余类型均超过背景值; 5 种土地类型中的 Cr、Mn、Co 均超过背景值; Ni 除了农田类型外,其余类型均超过背景值; Cu、As 在农田和森林类型中低于背景值,在围涂、码头、养殖类型中高于背景值; Zn 在所有类型中均超过背景值; Pb 在养殖类型中低于背景值,其余类型中均超过背景值。总体上看, Cr、Co 元素的超标倍数最高,分别达到 1.35、1.34 倍。

5.2 重金属综合污染指数分析

从表 9 可以看出,农田土壤中 Pb、Cr 的综合污染指数分别为 0.90 和 0.94,处于尚清洁(警戒线)等级,其他元素均处于清洁(安全)等级;森林土壤中的各金属元素处于清洁(安全)等级;围涂土壤中的 As、Pb 处于尚清洁(警戒线)等级,Co 的综合污染指数为 1.11,属于轻度污染等级, Cr、Cu、Ni、Zn 均处于清洁(安全)水平;码头类型中的 Co,处于尚清洁(警戒线)等级,其余元素均处于清洁(安全)等级;养殖土壤中的 As、Co 分别为 0.84、0.72,处于尚清洁(警戒线)等级,其余各元素均处于清洁(安全)等级。Pb 在农田、围涂土壤中处于尚清洁等级,Co 在围涂类型中达到轻度污染等级,在养殖土壤中达到警戒线水平,由此可知, Pb 和 Co 是较危险的重金属元素,土壤面临被其污染的风险。

5.3 洞头列岛土壤中重金属的潜在生态风险评价

从表 10 来看, 5 种重金属的潜在生态危害系数 E_i^p 均小于 40,综合潜在生态风险指数 RI 均小于 150,属于轻微生态危害范畴,说明洞头列岛土壤受重金属污染生态危害较轻。农田土壤的各种金属潜在生态危害程度由大到小依次为 $Pb>Cr>As>Cu>Zn$,森林土壤的各重金属元素潜在生态危害程度由大到小依次为 $Pb>As>Cu>Cr>Zn$,围垦与码头土壤中各重金属潜在生态危害程度由大到小依次为 $As>Cu>Pb>Cr>Zn$,养殖土壤中各重金属潜在生态危害程度由大到小为 $As>Cu>Cr>Pb>Zn$ 。As、Cu 在围涂、养殖、码头这三种人为活动相对频繁的土地类型中的潜在生态危害系数较高, Pb 在森林、农田土壤中的潜在生态危害系数较高。总体来看,洞头列岛重金属危害较轻, RI 平均值为 30.16,综合潜在生态风险指数的由大到小顺序依次为养殖>围涂>码头>森林>农田。

表 7 洞头列岛不同土地类型土壤重金属含量水平

Tab. 7 Heavy metal content of soil from different types of land use of Dongtou

(mg·kg⁻¹)(mg·kg⁻¹)

重金属	类型	$\bar{x} \pm s$	极小值	极大值	变异系数
Ti	农田	4532.59±908.96 ab	3366.3	5815.81	0.2
	森林	4805.08±811.77b	3591.88	6028.17	0.17
	围涂	4745.54±471.14 ab	4156.39	5470.25	0.1
	码头	4042.45±880.47 a	3249.47	5286.09	0.22
	养殖	4880.19±203.14 b	4529.99	5155.55	0.04
Cr	农田	123.28±15.91 ab	103.84	156.69	0.13
	森林	115.71±18.39 a	89.56	146	0.16
	围涂	145.63±17.98 c	117.42	171.29	0.12
	码头	135.9±13.33 bc	121.44	155.53	0.1
	养殖	140.22±9.17 c	127.68	155.93	0.07
Mn	农田	892.87±114.76a	781.23	1170.28	0.13
	森林	1113.31±283.55b	648.94	1583.98	0.25
	围涂	1091.38±157.99ab	899.17	1441.96	0.14
	码头	983.59±285.94ab	689.59	1425.23	0.29
	养殖	953.75±62.67ab	877.96	1062.32	0.07
Co	农田	14.82±2.79a	10.86	19.38	0.19
	森林	19.62±6.22ab	11.21	24.68	0.32
	围涂	35.64±12.98c	15.28	51.73	0.36
	码头	27.61±14.62bc	16.51	55.72	0.53
	养殖	24.99±5.97b	14.08	32.17	0.24
Ni	农田	22.99±7.42a	14.68	38.18	0.32
	森林	24.5±6.06a	16.08	35.78	0.25
	围涂	42.27±12.38b	22.32	54.67	0.29
	码头	40.63±19.52b	20.05	67.89	0.48
	养殖	45.89±4.62b	39.75	53.22	0.1
Cu	农田	16.69±5.62a	8.82	25.98	0.34
	森林	20.1±8.1ab	10.27	37.71	0.4
	围涂	28.06±7.31bc	15.73	36.39	0.26
	码头	26.39±14.03bc	11.66	48.11	0.53
	养殖	33.12±2.95c	30.21	38.63	0.09
Zn	农田	95.6±12.18a	78.56	113.72	0.13
	森林	129.67±45.81b	85.6	201.76	0.35
	围涂	112.67±21.49ab	87.25	159.84	0.19
	码头	118.61±46.96ab	59.15	178.76	0.4
	养殖	103.26±4.52ab	94.58	109.43	0.04
As	农田	2.77±2.58a	0	6.06	0.93
	森林	4.31±4.00a	0.65	12.65	0.93
	围涂	11.5±6.37b	0.03	18.71	0.55
	码头	11.49±6.43b	1.14	17.63	0.56
	养殖	14.1±3.14b	10.4	19.11	0.22
Pb	农田	38.77±8.1ab	24.18	50.2	0.21
	森林	53.86±12.99b	36.69	82.71	0.24
	围涂	42.36±24.81ab	21.7	101.09	0.59
	码头	37.73±16.87ab	12.8	59.35	0.45
	养殖	34.06±7.18a	23	41.54	0.21

注: 同一列中相同字母表示方差分析差异不显著, 不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

表 8 洞头列岛土壤中各重金属元素超标率 (%)

Tab. 8 The percentage of heavy metals contents overpass their reference values (%)

元素	Ti	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Pb
总样品数	45	45	45	45	45	45	45	45	45
超标个数	27	45	45	45	31	22	38	23	29
超标率/%	60	100	100	100	69	49	84	51	64

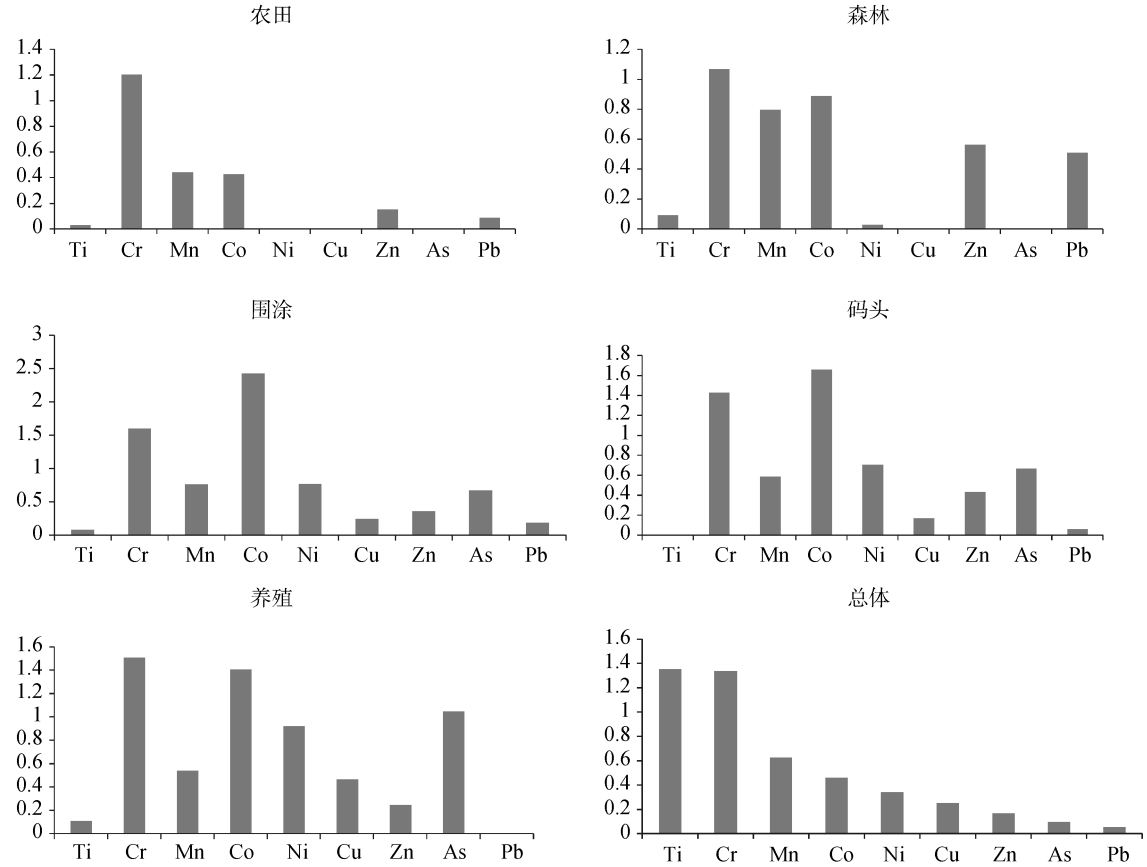


图 2 洞头列岛不同土地类型土壤各重金属超标倍数

Fig. 2 The percentage of the heavy metals overpass the reference values in different land use types

表 9 洞头列岛不同土地类型土壤重金属综合污染指数

Tab. 9 Comprehensive pollution appraisal indexes of soil heavy metal in the studied areas.

类型	As	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Co
农田	0.16±0.06	0.90±0.08	0.94±0.09	0.44±0.09	0.45±0.10	0.53±0.02	0.43±0.04
森林	0.19±0.06	0.23±0.03	0.33±0.04	0.10±0.02	0.20±0.04	0.34±0.08	0.45±0.03
围涂	0.78±0.17	0.97±0.29	0.45±0.02	0.32±0.03	0.49±0.10	0.46±0.06	1.11±0.23
码头	0.30±0.03	0.17±0.03	0.37±0.02	0.13±0.01	0.37±0.11	0.30±0.04	0.88±0.17
养殖	0.84±0.06	0.47±0.03	0.42±0.03	0.36±0.02	0.50±0.01	0.35±0.01	0.72±0.12

5.4 重金属元素质量分数之间的相关性

本研究通过重金属元素质量分数之间的相关性分析可知, 从农田类型上看, Ti 与 Cr 呈显著负相关, Ti 与 Co、Cu 呈显著正相关, 其余重金属元素相关性不显著; 从森林类型上看, Cr 与 Mn、Ni、Zn 呈极显

著正相关; 从围涂类型上看, As 与 Zn、Pb 呈极显著负相关, Zn 与 Pb 呈极显著正相关, As 与 Co 呈极显著正相关; 从码头类型研究区上看, Cu、Co、Zn、As、Pb 有显著的相关性; 从养殖类型上看, Mn 与 Co、Zn 呈显著性正相关, 其他重金属元素相关性不

表 10 洞头列岛不同类型土壤重金属的潜在生态危害系数(E_r^i)和潜在生态风险指数(RI)Tab. 10 Potential ecological risk factor (E_r^i) and potential ecological risk index(RI) of heavy metals in different zones soil from Dongtou

类型	E_r^i					RI
	Zn	Cr	As	Cu	Pb	
农田	1.15±0.04	4.40±0.36	4.01±2.26	3.69±0.86	5.43±0.64	18.68±1.52
森林	1.56±0.49	4.13±0.57	6.25±2.42	4.45±1.21	7.54±1.02	23.93±4.43
围涂	1.36±0.32	5.20±0.13	16.66±1.10	6.21±6.73	5.93±2.10	35.36±5.67
码头	1.43±0.19	4.85±0.30	16.65±0.33	5.84±4.19	5.28±1.58	34.05±6.58
养殖	1.24±0.27	5.01±0.30	20.44±0.03	7.33±1.30	4.77±0.48	38.79±1.90

表 11 土壤重金属元素之间的相关性分析

Tab. 11 Correlation analysis between heavy metals in soil

类型	重金属	Ti	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As
农田	Cr	-0.703*							
	Mn	-0.081	0.102						
	Co	0.709*	-0.523	0.327					
	Ni	-0.038	0.157	0.200	-0.507				
	Cu	0.741*	-0.351	0.151	0.440	0.316			
	Zn	-0.194	0.595	0.479	0.171	-0.079	0.271		
	As	-0.538	0.077	0.364	-0.569	0.594	-0.227	-0.134	
	Pb	0.604	-0.235	0.508	0.796*	-0.225	0.618	0.453	-0.496
森林	Cr	-0.468							
	Mn	-0.247	0.871**						
	Co	0.645	-0.088	0.028					
	Ni	-0.105	0.896**	0.783*	0.107				
	Cu	-0.579	0.591	0.474	-0.566	0.409			
	Zn	-0.594	0.922**	0.745*	-0.298	0.768*	0.767*		
	As	0.454	0.231	0.069	0.583	0.523	-0.334	0.103	
	Pb	-0.277	0.702*	0.906**	-0.131	0.556	0.343	0.531	-0.179
围涂	Cr	-0.563							
	Mn	0.195	-0.723*						
	Co	0.442	0.070	-0.365					
	Ni	0.376	0.380	-0.717*	0.726*				
	Cu	-0.013	0.760*	-0.697*	0.602	0.805**			
	Zn	0.010	-0.484	0.604	-0.725*	-0.608	-0.716*		
	As	0.144	0.393	-0.626	0.798**	0.774*	0.804**	-0.820**	
	Pb	0.031	-0.442	0.716*	-0.723*	-0.672*	-0.690*	0.943**	-0.901**
码头	Cr	-0.210							
	Mn	0.932**	-0.220						
	Co	0.856*	0.066	0.685					
	Ni	0.267	-0.232	0.070	0.363				
	Cu	0.955**	0.024	0.869*	0.922**	0.125			
	Zn	0.752	0.178	0.878*	0.608	-0.284	0.817*		
	As	0.777	0.301	0.855*	0.662	0.016	0.815*	0.923**	
	Pb	0.629	0.179	0.770	0.482	-0.525	0.728	0.960**	0.792
养殖	Cr	0.287							
	Mn	0.178	0.471						
	Co	0.754*	0.658	0.323					
	Ni	0.607	0.051	-0.350	0.209				
	Cu	-0.084	0.637	0.533	0.193	-0.096			
	Zn	0.673*	0.441	0.308	0.580	0.599	0.448		
	As	0.135	0.273	0.003	0.418	0.180	-0.051	0.433	
	Pb	0.104	0.362	0.287	-0.090	0.112	0.428	0.018	-0.705*

注: * $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。

显著。相关性分析显示,围涂与码头类型中重金属元素之间相关性明显强于其他 3 种类型,围涂类型中 As 与 Zn 呈极显著负相关,Pb 与 Zn 呈极显著正相关,As 与 Cu 呈极显著正相关。在码头类型中 As、Pb 与 Zn 呈极显著正相关。

6 讨论

洞头列岛不同土地利用类型中的重金属元素含量均高于浙江省土壤重金属元素背景值,余运勇等人对舟山群岛潮间带表层沉积物重金属进行调查,沉积物质量整体较好,相对于区域背景值,除 Pb 含量相对较低外,其余各元素含量水平显著高于背景值^[22]。乔永民等人对南澳岛表层沉积物重金属的调查研究显示,除了 Cr 外,各重金属元素总平均值含量超过背景值,其中 Cu、Pb 更是高于背景值的 2 倍以上^[23]。海岛重金属含量超标现象已普遍存在我国很多岛屿上,这已经成为需要关注和解决的问题。洞头列岛不同土地利用类型中的重金属含量存在差异,Cr、Co 是主要的超标元素,在土壤中有较高的含量,围涂、码头类型中的 Co 元素含量相对最高,农田、森林的重金属环境质量优于养殖、围涂、码头类型。国内关于海岛土壤重金属污染方面的研究较少,没有关于海岛不同土地利用类型重金属污染情况的研究,与陆域研究区的状况相比,吴新民对南京市不同功能城区土壤中重金属元素的污染状况进行分析,矿冶区 Pb、Cd 含量最高,Cu、Zn 在老居民区、商业区、城市广场含量较高,新开发区、风景区及城市广场的重金属环境质量较好,其他区域污染严重^[24]。人类活动频繁的区域,土壤重金属质量环境较差,与本文的研究结果一致。

洞头列岛五种不同土地利用类型中,Pb、Co 是较危险的重金属元素,森林类型中重金属的综合污染指数处于清洁安全等级,围涂、养殖、码头类型的潜在生态风险指数较高。郭伟、孙文惠等人在 2013 年对呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染情况进行调查,其中 Cu、Zn 的污染程度最高,内梅罗综合污染指数表明商业区最严重,综合污染指数达到 3.03。李晓燕的研究表明,工业区土壤处于轻度污染,城市广场和交通边缘带土壤重金属处于清洁水平,引起污染的重金属元素种类为 Cu、Pb、Zn^[25]。杨红等人的研究表明,上海无居民海岛黄瓜沙和九段沙上沙段处 Cd 元素浓度处于中等生态危害范围,总体

上看上海无居民海岛未收到明显的重金属污染^[26]。康玲芬的研究表明,工业活动对于重金属污染情况的影响最大,交通活动次之,在依次是农业活动和居民生活^[27]。土地利用方式不同导致产生污染的重金属的种类不同,同时也影响了土壤受重金属污染的程度。

在森林类型中,Pb 与 Mn 元素的超标率较高,且 Pb 与 Mn 呈极显著正相关,可以判定 Pb 与 Mn 为同一污染来源,Mn 是土壤中的主要元素,认为主要来源于成土母质,潜在生态风险指数法及内梅罗指数显示 Pb 的生态风险较高但处于清洁安全等级,考虑主要来源为成土母质,其次也可能来源为汽车尾气。洞头列岛位于森林区域的样点多采集于聚居的村庄附近,考虑到有一定的生活污水排放及交通活动,推断 Zn、Pb 主要来源为生活污水排放及交通污染。在围涂类型中,Zn 与 Pb 为同一污染来源,As 与 Co 为同一污染来源,研究表明,Pb、Zn 可能来源于工业污染、燃烧产生“三废”的排放^[28],在实际考察中得知,取样点附近为工业建设用地,近年来一直进行开发建设工程,推断 Pb、Zn 主要来源于工业废物的排放。As 与 Co 则可能来源于城市污水排放。由于人类交通活动频繁,码头周边道路密集,道路两侧的污染物主要是汽车尾气的排放及汽车轮胎磨损产生的大量含重金属的有害气体和粉尘的沉降,污染元素则主要为 Pb、Cu、Zn 等元素^[29]。从洞头列岛的码头类型研究区上看,Cu、Co、Zn、As、Pb 有显著的相关性,考虑为交通污染;码头类型中 As、Pb 与 Zn 呈极显著正相关,说明码头类型中的 As、Pb、Zn 可能来源于船只交通污染,围涂类型中的 As、Cu 元素可能来源于工业三废的排放,Zn、Pb 可能来源于汽车尾气、轮胎摩擦产生的污染。调查重金属的污染来源有助于制定合理的措施预防和控制重金属污染,建议海岛城市适度的发展渔业和旅游业,合理安排交通,使用绿色清洁能源,控制沿海岸的工业建设,合理利用海岛土地资源,减少环境污染。

7 结论

(1) 洞头列岛不同土地利用类型中重金属含量的含量差别较大,大多数重金属元素超过浙江省土壤背景值。围涂、码头、养殖类型土壤重金属超标倍数显著高于农田和森林,Cr、Co 是主要的

超标元素。

(2) 重金属元素的综合污染指数表明, 农田、围涂中的 Pb、Cr, 码头类型中的 Co, 养殖类型中的 As、Co 达到警戒线水平; 围涂类型中的 Co 达到轻度污染水平; 其他类型的重金属元素处于清洁安全水平。

(3) 洞头列岛土壤重金属潜在生态风险指数显著低于轻微生态危害水平, 五种土地类型的潜在生态风险指数由高到低的顺序为: 养殖>围涂>码头>森林>农田, 潜在生态风险指数与人为活动的强烈程度存在一定的正相关关系。

(4) 不同土地类型内部重金属的分布存在一定的相关关系, 围涂与码头类型中重金属元素之间的相关性明显高与其他三种类型。As 元素在不同土地利用类型中的来源不相同, 在码头类型中, As 元素主要来源为交通活动, 在围涂类型中, As 元素则主要来源于城市排污、污水灌溉、三废排放。农田类型中的 Ti 与 Co、Cu 呈显著性正相关, 主要来源为成土母质; 森林类型中的 Zn、Pb 元素主要来源为生活污水排放及交通污染。围涂类型中的 Zn、Pb 推断为工业三废排放, As、Co 为城市排污; 码头类型中的 Zn 与 As、Pb 的来源推断为交通污染; 养殖类型中的 Mn 与 Co、Zn 呈显著性正相关, 推断 Mn、Co、Zn 主要源于成土母质。

参考文献

- [1] 马致远. 城市化压力下的海岛生态系统健康评价研究[D]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2008.
- [2] 杨文鹤. 中国海岛[M]. 北京: 海洋出版社, 2000.
- [3] 肖佳媚. 基于 PSR 模型的南麂岛生态系统评价研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2007.
- [4] 王晓丽. 海岛陆地生态系统固碳估算方法[J]. 生态学报, 2014, 34(1): 88–96.
- [5] 张云, 李雪铭, 景昕蒂, 等. 我国海岛周边海域使用的基本状况[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(1): 147–149.
- [6] 彭茂潇, 钱培力, 张永普, 等. 洞头无居民海岛岩相潮间带夏季大型底栖动物群落格局[J]. 生态学杂志, 2013, 32(9): 2469–2479.
- [7] 程芳, 程金平, 桑恒春, 等. 大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 1062–1066.
- [8] 孙元敏, 陈彬, 黄海萍, 等. 中国南亚热带海岛海域沉积物重金属污染及潜在生态危害[J]. 中国环境科学, 2011, 31(1): 123–130.
- [9] 马立杰, 朱校斌, 毕海波, 等. 长岛县海岛潮间带沉积物重金属及潜在生态风险评价[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(8): 191–195.
- [10] 彭勃, 彭加喜, 孙凯峰. 大亚湾及邻近海域重金属污染的研究进展[J]. 生态科学, 2015, 34(3): 170–180.
- [11] 郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 等. 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1561–1567.
- [12] 陆安祥, 王纪华, 潘立刚, 等. 便携式 X 射线荧光光谱测定土壤中 Cr, Cu, Zn, Pb 和 As 的研究. 光谱学与光谱分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 10(10): 2848–2852.
- [13] 国家环境保护总局. HJ/T166–2004. 土壤环境监测技术规范[S]. 2004.
- [14] 范允慧, 王艳青. 浙江省四大平原区土壤元素背景值特征[J]. 物探与化探, 2009, 33(2): 132–134.
- [15] 刘春早, 黄益宗, 雷鸣, 等. 湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 260–265.
- [16] 陈伯扬. 重金属污染评价及方法对比—以福建浅海沉积物为例[J]. 地质与资源, 2008, 17(3): 213–228.
- [17] 中华人民共和国环境保护部. GB15618–2008. 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国标准化出版社, 2008.
- [18] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975–1001.
- [19] 陈静生, 王忠, 刘玉机, 等. 水体金属污染潜在危害应用沉积学方法评价[J]. 环境科技, 1989, 9(1): 16–25.
- [20] 许明祥, 刘国彬, 赵允格, 等. 黄土丘陵区土地利用及环境因子对土壤质量指标变异性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(2): 409–417.
- [21] 余运勇, 王晓华, 母清林, 等. 舟山群岛潮间带表层沉积物中重金属污染现状及潜在生态风险评价[J]. 海洋科学进展, 2012, 30(4): 567–574.
- [22] 乔永民, 顾继光, 杨扬, 等. 南澳岛海域表层沉积物重金属分布、富集与污染评价[J]. 海洋环境科学, 2010, 29(1): 77–84.
- [23] 吴新民, 李恋卿, 潘根兴, 等. 南京市不同功能城区土壤中重金属 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的污染特征[J]. 环境科学, 2003, 24(3): 105–111.
- [24] 李晓燕, 陈同斌, 雷梅, 等. 不同土地利用方式下北京城区土壤的重金属累积特征[J]. 环境科学学报, 2010, 30(11): 2285–2293.
- [25] 杨红, 王翔, 李奶姜, 等. 上海无居民岛潮间带沉积物重金属污染状况评价[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(1): 24–30.
- [26] 康玲芬, 李峰瑞, 化伟, 等. 不同土地利用方式对城市土壤质量的影响[J]. 生态科学, 2006, 25(1): 59–63.
- [27] 杜锁军, 戴艳, 谢东俊, 等. 土壤 Zn 污染及其治理措施评述[J]. 污染防治技术, 2009, 22(3): 87–90.
- [28] 杨忠平, 卢文喜, 辛欣, 等. 长春市城区表层土壤重金属污染来源解析[J]. 城市环境与城市生态, 2009, 22(5): 29–34.