

基于 Pb 稳定同位素分析的海岸带生态保护关键区域识别

钱庆腾 历成伟 赵 萌 方淑波*

(上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306)

摘 要 Pb 稳定同位素分析可以精确确定 Pb 的来源, 揭示 Pb 在空间上的潜在迁移过程, 从而对目标区域实行精确的污染管理. 研究采集了盐城海岸带 12 个样方点的表层 (0~10 cm) 土壤样品, 每个样方点 3~5 个重复, 采用等离子光谱质谱仪测定各土壤样品 Pb 的含量及 Pb 同位素组成 (^{206}Pb 、 ^{207}Pb 、 ^{208}Pb). 结果表明: 研究区域土壤 Pb 含量平均值是背景值的 1.7 倍, 参考国家土壤环境质量标准 GB 15618—2008, 研究区域受到较严重的 Pb 污染. 分析表明, 盐城海岸带土壤 Pb 污染源主要为局地污染源, 包括江苏省射阳电厂、双灯纸业芦苇基地污水处理和王港闸华丰工业园. 采用归一化植被指数 (NDVI) 和距离分析, 通过计算筛选出了盐城海岸带应对主要压力源的关键格局.

关键词 Pb 稳定同位素; 距离分析; NDVI; 优先管理区域; 滨海湿地

Identification of the critical coastal conservation areas with ecological significance based on Pb stable isotope signatures analysis. QIAN Qing-teng, LI Cheng-wei, ZHAO Meng, FANG Shu-bo* (*College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*).

Abstract: Pb stable isotope signatures analysis can be used to identify its sources precisely and the spatial transportation process to achieve precise management of target areas. In this study, 12 surface (0–10 cm) soil samples (3–5 replications for each site) were collected on the Yancheng coast. Pb isotopes (^{206}Pb , ^{207}Pb and ^{208}Pb) and Pb contents were analyzed by inductively coupled plasma mass spectrometry. Results showed that the soil Pb contents were as high as 1.7 times of the background Pb content value. Referencing the national criteria of GB 15618–2008, the study area was polluted by Pb to a relatively serious extent. The analysis indicated that main Pb sources of the area were local, including Sheyang Power Plant, Shuangdeng Paper Mill Sewage Plant, and Hua-feng industrial area near Wanggang. Based on the normalized difference vegetation index (NDVI) and distance analysis, we figured out the key patterns of Yancheng coast to cope with the press sources.

Key words: Pb isotope; distance analysis; NDVI; priority areas; coastal wetlands.

利用 Pb 同位素技术研究 Pb 稳定同位素的组成特征/指纹图谱, 可以推断重金属污染物的可能来源或迁移途径, 因而在环境科学研究领域受到广泛关注. 铅有 4 种稳定同位素: ^{204}Pb 、 ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 和

^{208}Pb , 由于质量大、同位素间的相对质量差较小, 外界条件 (温度、压力、pH、氧化还原电位和生物作用等) 的变化对其组成的影响小, 几乎不存在同位素分馏效应. 铅同位素组成的变化主要取决于放射性元素铀 (U) 和钍 (Th) 的含量、衰变时间、母体同位素的含量及外来源区的混合, 即环境物质形成的时间及其 U/Pb 和 Th/Pb 值. 因此, 铅同位素组成具有明显的“指纹特征”, 其中 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 值作为 Pb 同位素组成的特征被广泛应用^[1]. 目前, 同位素分析研究已有关于城市河道沉积物^[1]、城市

本文由国家重点基础研究发展计划重大基础专项 (2013CB430400) 和国家科技支撑计划项目 (2012BAC07B03) 资助 This work was supported by the National Key Basic Research Program of China (2013CB430400) and the National Science and Technology Support Program (2012BAC07B03).

2017-02-27 Received, 2017-05-22 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bsfang@shou.edu.cn

土壤表层 Pb 污染来源^[2]、城市不同功能区污染源^[3]、河湖沉积物 Pb 污染来源^[4]、城市灰尘的污染来源^[5]、城市气溶胶及土壤污染源^[6]、Pb 在海洋中的多年浓度变化^[7]以及人类活动污染源对北太平洋 Pb 污染的影响^[8]等方面.在未来多种重金属污染源解析的研究中,同位素分析技术都是一种不可或缺的技术手段^[9].

如何识别海岸带区域生态保护的优先格局是海岸带生态保护的关键问题之一.^[10-11]孙贤斌等^[12]研究了盐城海岸带的湿地景观格局优化方法,在景观生态系统服务功能评价的基础上采用阻力面模型分析构建了盐城海岸带源地、生态廊道和生态节点等景观组分,并确立废黄河口附近和大丰港附近是景观生态节点优化的首要对象,认为核心斑块保护以及提高景观连通度是实现景观格局优化的关键.方淑波等^[11]基于 NDVI 分析、重金属生态风险评价以及土地利用的空间分异,提出了一个盐城海岸带重金属生态风险管理的格局鉴别方法.宋晓龙等^[13]以湿地生物多样性保护为目标,运用系统保护规划的理论和方法,以 Marxan 为空间优化模型,进行多目标湿地系统保护预案设计,构建区域湿地保护的关键格局,对现有的湿地保护体系提出了完善方案.刘吉平等^[14]用 GAP 分析方法预测了三江平原鸟类丰富度,评价和计算了湿地鸟类干扰度,在此基础上构建物种运动阻力模型,并通过阻力面分析,识别了战略点、辐射道和源间联接等景观组分,提出了扩大保护区面积、建立保护区与热点之间廊道和设立微型保护地块的规划措施.这些研究对区域生态保护提出了很好的建议,但缺少在过程认知基础上的压力源的精确确定,因而使得基于阻力面分析的景观组分判定只是基于主要生态源的分析,而缺少压力源的分析,而对压力源的判定在现实中具有生态风险管理的重要意义.本研究拟以 Pb 同位素为手段,研究盐城海岸带主要区域的 Pb 同位素组成分布,在与区域主要污染源的 Pb 同位素比值对比的基础上,确定盐城海岸带的主要污染压力源,进而分析确定盐城海岸带应对主要人类活动压力的生态保护区优先格局.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

盐城海岸带介于 32° 34'—34° 28' N 和 119° 27'—121° 16' E 之间,位于中国海岸中部,是全球最大的海岸带滩涂湿地,属典型的粉砂淤泥质平

原海岸,受海洋性、大陆性气候双重影响,以季风气候为主.盐城海岸带总面积 $45.33 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占江苏省滩涂面积的 70%,沿海射阳、大丰两地分布着盐城丹顶鹤国家级自然保护区和麋鹿自然保护区,保护区核心区面积 $1.74 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[15].因其生物多样性保护的重要性和湿地资源的多样性,2002 年盐城滨海湿地被纳入国家重要湿地名录.

目前研究区内潜在的 Pb 排放源主要是工业及发电企业.江苏省射阳电厂(以下简称射阳电厂)为燃煤发电的电力企业,过去十几年先后有 4 台 13.75 万千瓦机组和两台 66 万千瓦超临界燃煤发电机组建成并投入商业运营.双灯纸业污水处理厂主要处理双灯纸业的生产废水,但就我们实地观察,污水处理厂多数时候并未开机运转,相当数量的生产废水直接排到芦苇湿地进行净化,其处理效果如何目前未见相关报道.王港华丰工业园区有包括农药生产在内的多家大型化工企业.这些都可能是本区域主要的 Pb 排放企业.

1.2 土壤样品采集

2014 年 3—4 月,由射阳电厂到东台麋鹿保护区核心三区南缘,自北向南沿着 20 世纪 50 年代的老海堤线,每隔 5 km 设置一个采样点.每个采样点采用 S 形布点采 3~5 个重复样,采样深度为土壤表层(0~10 cm),总共采集 12 个采样点的土壤样品(图 1).所有样品均保存于聚乙烯塑料袋中,并尽快带回实验室低温贮存.潜在可能的污染区域包括射阳电厂(S_1)、双灯纸业污水处理厂(S_2)、王港华丰工业园附近的土壤样品(S_8).潜在污染源土壤样品采集和其他一般土壤样品采集方法一致.

其他对照点的土壤样品如图 1 所示.

1.3 样品处理与测定

将土壤样品在实验室风干、研磨,混合后通过四分法分成两份,一份通过 20 目孔径尼龙筛后再用四分法分成两份,一份备用,一份用玛瑙研钵研磨到全部过孔径 0.15 mm(100 目)筛,然后采用 ISO 11466 方法用王水浸提沉积物中的重金属元素^[1].在南京大学分析测试中心采用 Elan9000 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,美国,Perkin-Elmer 公司)测试 Pb 稳定同位素(^{206}Pb 、 ^{207}Pb 、 ^{208}Pb),波长范围 170~800 nm,检测下限 $0.001 \sim 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,精密度 $\text{RSD} \leq 2\%$ (浓度为 $10 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$).仪器工作参数和 Pb 同位素测定参数设置见表 1^[1],Pb 同位素标准物质 SRM 981(美国国家标准局).重金属含量用电感耦合等离子体发射光谱仪 ICP-OES(Optima 5300DV,

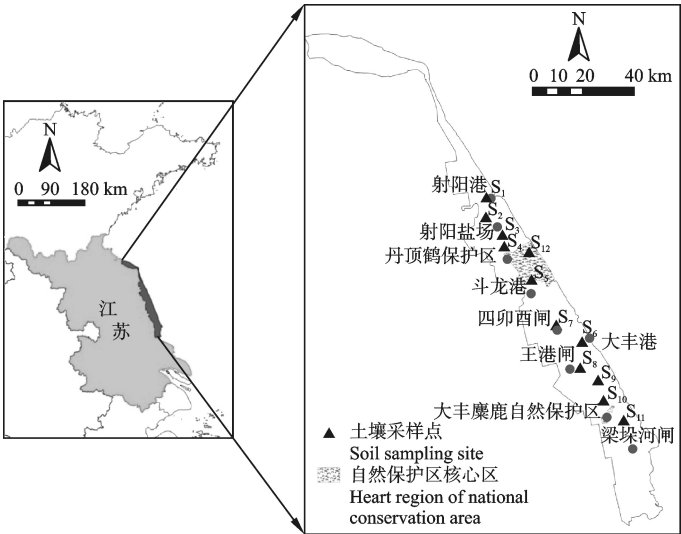


图 1 盐城海岸带土壤样点位置

Fig.1 Soil sampling sites on Yancheng coast.

S₁: 射阳电厂采样点 Sampling site in Sheyang electric power plant; S₂: 双灯纸业污水处理厂 Sampling site in Shuangdeng paper mill sewage plant; S₃: 射阳盐场鱼塘 Sampling site in fishponds of Sheyang solar salt field; S₄: 东沙港芦苇基地 Sampling site in Dongsha reed plantation base; S₅: 三里闸核心区南缘 Sampling site in the south edge of the National Conservation Area at Sanli Gate; S₆: 大丰港一期 Sampling site in Dafeng Habor of the first-stage; S₇: 四卯酉闸旁 Sampling site in area near the Simaoyou Gate; S₈: 王港闸华丰工业园 Sampling site in the Huafeng industrial area near Wanggang; S₉: 竹川闸旁 Sampling site in the Zhuchuang Gate; S₁₀: 麋鹿保护区核心区三区 Sampling site in the heart area of Milu National Conservation Area III; S₁₁: 麋鹿保护区核心区三区南缘 Sampling site at the edge of Milu National Conservation Area III; S₁₂: 丹顶鹤保护区核心区 Sampling site in the National Conservation Area.

表 1 ICP-MS 仪器工作参数和 Pb 同位素测定参数设置

Table 1 Instrumental parameters for ICP-MS and operation parameters for lead isotopes

项目 Item	数值 Value	项目 Item	数值 Value
RF 功率 RF power (W)	1100	扫描模式 Scanning mode	跳峰 Skip
透镜电压 Lens voltage (V)	5.7	等离子气流速 Plasma gas velocity (L · min ⁻¹)	15
模拟信号电压 Analog signal voltage (V)	-1680	辅助气流速 Gas velocity (L · min ⁻¹)	0.95
脉冲信号电压 Pulse voltage (V)	1000	进样流速 Injection velocity (mL · min ⁻¹)	1
透镜扫描 Lens scanning	能 On	重复次数 Repeating times	6
监测器模式 Monitor mode	脉冲 Pulse	²⁰⁸ Pb 驻留时间 Residence time (ms)	10
扫描/阅读次数 Scan/read times	300	²⁰⁷ Pb 和 ²⁰⁶ Pb 驻留时间 Residence time (ms)	25

美国 Perkin-Elmer 公司)测试。

1.4 研究区污染源的确定及海岸带生态保护的优先区域关键格局

根据文献[1, 6, 16],研究采用²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb 对²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb比值作图.通过对比已知的汽车尾气的 Pb 同位素组成,以及研究区港口、电厂、工厂等潜在污染源的 Pb 同位素组成,确定研究区可能的污染源,²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb 与²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 散点图采用 Excel 完成.以同位素分析所确定的主要污染源为压力源,采用 Distance 方法分析距离主要压力源的压力距离. Distance 方法采用 ArcGIS 9.3 的 spatial analysis 模块,计算各个像元到主要压力源的距离,然后采用 reclassify 命令,把所有的压力距离重分类为 20 个类别,并赋值 1~20,距离越大,类别越大,输出栅格图

像的大小为 100 m².然后,采用 2013 年的 2 景 [(120,36),(119,37)] TM 遥感影像,经几何纠正、拼接后用研究区范围矢量图裁切^[17],采用 ENVI 4.3 软件分析研究区生长旺季(7—10 月)的归一化植被指数(NDVI)值,同样采用 reclassify 命令,把 NDVI 值分为 10 个类别,并赋值 1~10,类别越大,NDVI 值越高,同样把栅格重采样为 100 m²像元大小.最后,通过 Raster Calculator 工具,采用 NDVI 和压力距离,以中值作为阈值(分别为 5 和 10),筛选出盐城海岸带应对主要压力源的湿地保护关键格局,即 NDVI 大于 5 和距离大于 10 的区域.农田和互花米草(*Spartina alterniflora*)的区域作掩膜处理,不作为生态保护的关键区域,相关方法参考方淑波等^[11].

为了反映研究区域自 1991 年到 2006 年的景观

格局演变,将 1991 年和 2006 年的土地利用图栅格化,栅格像元大小为 100 m².然后,采用 ArcGIS 9.3 的 Raster Calculator 命令,计算每个像元下列表达式的值:

$$R_v = R_{91} \times 1000 + R_{06}$$

式中: R_v 是新像元的值; R_{91} 和 R_{06} 分别是 1991 年和 2006 年的像元值,反映 1991 年和 2006 年的像元景观类型.根据 R_v 值的特征判断景观格局的转化方式.例如,像元 1991 年的值为 2,表示鱼塘,2006 年为 8,表示农田,那么 R_v 值为 2008,表示像元从 1991 年的鱼塘转化为 2006 年的农田.

2 结果与分析

2.1 盐城海岸带表层土壤 Pb 质量分数

由表 2 可知,盐城海岸带表层土壤 Pb 含量变化范围为 82.73~113.57 mg·kg⁻¹,平均值为 102.31 mg·kg⁻¹,中值 103.85 mg·kg⁻¹.根据王计平^[18]、乔磊^[19]的盐城海岸带重金属背景数据显示,该地区 Pb 的背景值为 58.87 mg·kg⁻¹.本研究所测的 Pb 含量平均值是这个背景值的 1.7 倍,参考国家土壤环境质量标准 GB 15618—2008 农用地土壤 Pb 含量二级标准(50 mg·kg⁻¹),研究区域明显受到了 Pb 污染.从 Pb 含量的变化幅度看,从电厂到三里闸呈现由小变大再变小的趋势,在双灯纸业污水处理厂处为最大值,说明土壤 Pb 污染受发电厂和污水处理厂影响较大.从四卯西闸到丹顶鹤核心区也呈现由小变大再变小的变化趋势.在麋鹿保护区核心三区呈最大值,此处王港附近有化纤厂、造纸厂、制药厂等工厂组成的华丰工业园区,工业污染严重.

表 2 盐城海岸带表层土壤 Pb 同位素组成和 Pb 含量
Table 2 Soil Pb contents and Pb isotopic composition of topsoil on Yancheng coast

编号 Code	采样点 Sampling site	Pb (mg·kg ⁻¹)	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb
1	S ₁	103.87	0.837	2.100
2	S ₂	108.12	0.838	2.090
3	S ₃	83.63	0.850	2.121
4	S ₄	103.83	0.836	2.078
5	S ₅	82.73	0.828	2.078
6	S ₆	108.52	0.836	2.089
7	S ₇	101.12	0.840	2.096
8	S ₈	112.08	0.844	2.107
9	S ₉	103.64	0.831	2.100
10	S ₁₀	113.57	0.831	2.095
11	S ₁₁	107.79	0.840	2.106
12	S ₁₂	98.85	0.835	2.098

2.2 研究区域 Pb 同位素特征及汽车尾气 Pb 同位素特征比较

从表 2 可知,作为重要的参考区域,两个国家自然保护区即麋鹿国家自然保护区和丹顶鹤自然保护区的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 和²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb 介于 0.831~0.840 和 2.095~2.106 之间.其他地点土壤²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 和²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb分别介于 0.828~0.850 和 2.078~2.121 之间,平均值分别为 0.837 和 2.097.污染源的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb和²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb 分别介于 0.837~0.844 和 2.09~2.107之间,平均值分别为 0.840 和 2.099.污染源土壤的 Pb 含量高于其他地方的土壤样品(表 2).

土壤中 Pb 除了附近的化工厂、射阳电厂、污水处理厂等污染企业排放 Pb 造成污染外,机动车辆排放尾气也会对土壤造成 Pb 污染.虽然自 20 世纪 70 年代以来含 Pb 汽油在全世界范围内控制使用(中国于 2000 年开始实行),但历史上含 Pb 汽油的使用依然是各地土壤 Pb 的重要污染来源^[5-6,20].本研究通过查找文献对比了全国各大城市汽油的 Pb 同位素组成,发现长春市的汽车尾气 Pb 同位素比值与杭州、成都、泉州、珠江三角洲地区的结果差异较大,这可能是由于长春与杭州、成都、珠江三角洲等地区所使用的汽油来源不同,且受汽车的燃油性能和所采集的汽油样品类型等因素影响^[2].杭州、成都、泉州、珠江三角洲等地区的 Pb 同位素比值范围都比较接近,可见,我国南部、西南部地区汽油的来源相近.因此,本文选取了 4 个地区(杭州、成都、泉州、珠江三角洲)的汽车尾气²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 和²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb值来分析和鉴别盐城海岸带土壤 Pb 的来源.由表 3 可知,4 个地区汽车尾气²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 和²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb值主要集中于 0.85~0.89 和 2.03~2.12 范围内.

2.3 土壤 Pb 污染源确定

为分析海岸带土壤 Pb 的潜在来源,以²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb值为横坐标、以²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb 值为纵坐标作图,将所有土壤组分及其他已知汽油的 Pb 同位素比值标示在图上(图 2).盐城海岸带土壤 Pb 同位素比值除了原射阳盐场内鱼塘样品外,其他的土壤样品点都比较集中,与临近地区汽车尾气的 Pb 同位素组成差异较大.这表明除射阳盐场内鱼塘样品外,其他土壤样品受汽车尾气 Pb 的影响较小.射阳盐场内鱼塘样品的 Pb 同位素比值主要在汽车尾气和工业区 Pb 同位素比值之间,表明主要受工业区和汽车尾气排放的 Pb 的影响.原射阳盐场更靠近双灯纸业芦苇基地污水处理厂,但受工业区的影响更大.7 号(四卯西闸旁)和 11 号(麋鹿保护区核心三区南缘)土壤

表 3 汽车尾气 Pb 同位素组成
Table 3 Pb isotopic composition of automobile exhaust

编号 Code	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	来源 Source
Klw6-1 ^[21]	0.880	2.122	汽油(杭州)
Klw6-2 ^[21]	0.851	2.109	Gasoline (Hangzhou)
Klw6-3 ^[21]	0.892	2.153	
Klw6-4 ^[21]	0.851	2.101	
Klw6-5 ^[21]	0.855	2.114	
Klw6-6 ^[21]	0.855	2.105	
成都柴油 Chengdu diesel ^[22]	0.854	2.107	尾气(成都)
成都汽油 Chengdu gasoline ^[22]	0.861	2.112	Auto exhausts (Chengdu)
汽车尾气 1 Auto exhausts1 ^[3]	0.900	2.125	汽油(泉州)
汽车尾气 2 Auto exhausts2 ^[3]	0.877	2.081	Gasoline (Quanzhou)
汽车尾气 3 Auto exhausts3 ^[3]	0.891	2.099	
汽车尾气 4 Auto exhausts4 ^[3]	0.891	2.059	
汽车尾气 5 Auto exhausts5 ^[3]	0.864	2.143	
汽车尾气 6 Auto exhausts6 ^[3]	0.872	2.031	
汽车尾气 7 Auto exhausts7 ^[3]	0.870	2.031	
汽油 1 Gasoline1 ^[6]	0.861	2.188	汽油(珠三角)
汽油 2 Gasoline2 ^[6]	0.865	2.055	Gasoline (Pearl
汽油 3 Gasoline3 ^[6]	0.859	2.026	River Delta)

样品在射阳电厂、双灯纸业污水处理厂和工业园区中间,说明 7 号和 11 号土壤 Pb 来源于电厂、污水处理厂和大型工业区的共同污染.四卯酉闸和东台麋鹿保护区核心三区南缘土壤 Pb 主要受射阳电厂、双灯纸业污水处理厂和工业区的影响.4 号(东沙港芦苇基地)、6 号(大丰港一期)和 12 号(丹顶鹤保护区核心区碱蓬滩)土壤样品 Pb 同位素比值在射阳电厂和污水处理厂 Pb 同位素比值附近,说明东

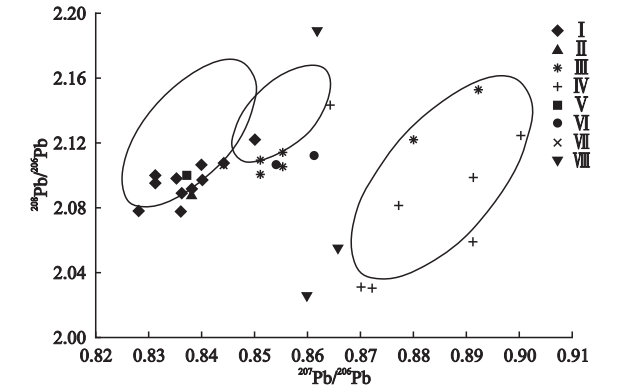


图 2 盐城海岸带表层土壤与汽车尾气 Pb 同位素 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 值
Fig.2 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ values of top soils on Yancheng coast and auto exhausts.

I：土壤样方 Soil sampling；II：污水处理厂附近 Sewage plant；III：汽车尾气(杭州) Auto exhaust (Hangzhou)；IV：汽车尾气(泉州) Auto exhaust (Quanzhou)；V：射阳电厂附近 Sheyang power plant；VI：汽车尾气(成都) Auto exhaust (Chengdu)；VII：工业园区 Industrial area；VIII：汽车尾气(珠江三角洲) Auto exhaust (Pear River Delta)。

沙港芦苇开发基地、大丰港一期和丹顶鹤核心区碱蓬滩的土壤主要受射阳电厂和双灯纸业污水处理厂排放的 Pb 的影响.5 号(三里闸核心区南缘)、9 号(竹川闸旁)和 10 号(麋鹿保护区核心三区)土壤样品的 Pb 同位素比值主要靠近射阳电厂和污水处理厂的 Pb 同位素比值,说明 5 号、9 号和 10 号土壤主要受射阳电厂和双灯纸业污水处理厂的影响.

2.4 基于同位素分析的海岸带生态保护关键区域格局

在明确射阳电厂、污水和王港工业园为主要污染源的情况下,采用 Distance 和 NDVI 分布的图层运算,得到盐城海岸带受污染源影响较小的、具有重要价值的生态区域.由于影像资料主要来源于生长季,互花米草和农田也会有很高的 NDVI 值,因此在运算最后,把互花米草和农田区域通过逻辑运算去除,从而得到海岸带生态保护关键区域格局(图 3).

盐城市海岸带保护关键区域主要由两部分组成:北部以盐城丹顶鹤自然保护区为核心,包括附近的芦苇基地、射阳电厂附近的芦苇湿地,以及斗龙港和四卯酉闸之间的芦苇湿地,芦苇基地除了部分被双灯纸业公司用于湿地净化之外,还有一大部分湿地主要用于芦苇生产.南部以盐城市大丰麋鹿自然保护区为核心,包括王港闸以南部分的芦苇湿地、梁垛河闸附近的芦苇和碱蓬湿地.近 30 年来,农业、水产养殖和晒盐工业的发展,使得大量的原生湿地被开发利用.从研究区域 1991—2006 年的景观格局转化情况可以看出,人类活动开发是盐城海岸带原生湿地面临的主要威胁(图 4).

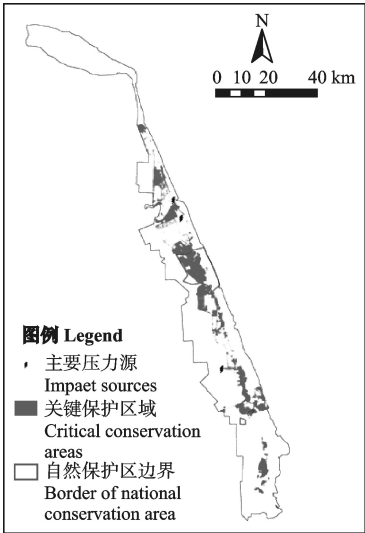


图 3 海岸带生态保护关键区域
Fig.3 Coastal critical areas of ecological conservation.

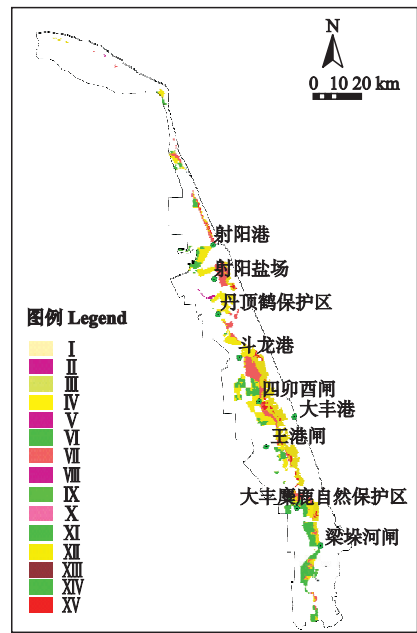


图 4 盐城海岸带 1991—2006 年间景观转换格局
Fig.4 Transferred patterns of the coastal landscape during 1991 to 2006 on Yancheng coast.

I：河流到鱼塘 Rivers to fishpond；II：河流到盐田 Rivers to saltfield；III：河流到农田 Rivers to famlans；IV：芦苇到鱼塘 Reeds to fishpond；V：芦苇到盐田 Reeds to saltfield；VI：芦苇到农田 Reeds to farmlands；VII：盐蒿到鱼塘 *Suaeda glauca* to fishpond；VIII：盐蒿到盐田 *Suaeda glauca* to saltfield；IX：盐蒿到农田 *Suaeda glauca* to farmlands；X：茅草到鱼塘 *Imperata cylindric* to fishpoood；XI：茅草到农田 *Imperata cylindrica* to farmlands；XII：光滩到鱼塘 Bareflats to fishpond；XIII：光滩到盐田 Bareflats to saltfield；XIV：光滩到农田 Bareflats to farmlands；XV：互花米草到鱼塘 *Spartina altemiflora* to fishpoond.

3 讨 论

刘吉平等^[23]研究了三江平原湿地鸟类多样性保护区,采用湿地鸟类丰富度、国家级保护湿地鸟类生境类型和结构、距最近保护区距离、破碎度、干扰度等指标确立了 13 个鸟类保护热点地区,总面积为 1018.7 km².他们又采用系统聚类分析,将 13 个热点地区划分成 3 个水平保护的优先顺序^[23].同样在三江平原,刘吉平等^[14]在鸟类丰富度分析评价的基础上采用物种运动阻力模型和阻力面分析,确定了战略点、辐射道和源间联接等关键景观组分,提出了景观组分的优化措施.孙贤斌等^[12]在湿地景观生态系统服务评价的基础上,通过累积耗费距离面、生态源地、耗费路径分析,构建了源地、廊道和生态节点等景观组分及其优化的景观格局,研究具有重要意义.与这些研究相比,本研究采用生长季 NDVI 分析方法来确定生物多样性保护的热点地区,并通过掩膜方法去除农田、互花米草滩等区域,研究基础主要是通过盐城海岸带现场的长期调研,同时也有一些

研究成果支撑^[24-27].NDVI 分析确立湿地保护的热点区域,与基于个别物种分析的热点保护区域相比,更多的物种和生态过程能得到保护,因而更具有生态系统保护的内涵特征^[28-31].此外,最新的研究表明,景观多样性而非连通度决定复合群落的多尺度结构^[32],因而基于景观多样性的生态系统保护研究相较于基于景观连通度的研究更具有优先性.

研究采用的 Pb 稳定同位素分析手段所指示的压力源,不仅仅是重金属的污染压力,实际上,Pb 同位素在该研究中更多具有海岸带主要人类活动压力指示的指纹效应^[33].仅就重金属污染而言,Pb 同位素分析不仅可以判定 Pb 的来源,还可以通过相关性比较,指示其他重金属的污染来源、范围、污染程度以及迁移途径^[33].

基于压力源分析的生态保护关键区域识别使湿地的风险管理具有空间针对性,容易采取空间明晰的、具体的风险管理策略^[34-35].在盐城海岸带,对人类活动压力源的生态风险管控应集中于生态价值高、同时风险值较高的地区,如与射阳电厂、双灯纸业污水处理厂区域和王港闸华丰工业园区比邻的芦苇湿地区,以及大丰麋鹿国家级自然保护区核心三区的重要湿地.具体的湿地管理策略如压力源周边缓冲带的设置、湿地边缘缓冲带宽度和物种构成的确定,以及压力源本身的三废管理等,这些具体的管理措施需进一步研究.在管理层面,应该将盐城海岸带的湿地管理统一纳入一致的政策通道,而非仅局限于对保护区核心区的严格管理.根据研究者对 2005 年以来盐城海岸带的持续观察,2010 年之后大量的原生湿地围垦开发为鱼塘或农田,主要原因在于这些区域不属于自然保护区的核心区域.应通过对盐城海岸带进行合理的功能区划分,根据划分区域的不同对人类活动尤其是围垦活动实行不同的管理方案.对于本研究提出的重要自然价值区域,应该与自然保护区的核心区实行一致的严格管理措施,这对于海岸带湿地的可持续利用具有重要意义.

参考文献

[1] Hu X (胡 忻), Cao M (曹 密). Speciation of heavy metals and Pb stable isotope signatures in urban channel sediments in Nanjing. *Research of Environmental Sciences* (环境科学研究), 2009, 22(4): 398-403 (in Chinese)
[2] Yang Z-P (杨忠平), Lu W-X (卢文喜), Xin X (辛欣), et al. Lead isotope signatures and source identification in urban soil of Changchun City. *Journal of Jilin University* (Earth Science) (吉林大学学报:地球科学)

- 版), 2008, **38**(4): 663–669 (in Chinese)
- [3] Yu R-L (于瑞莲), Hu G-R (胡恭任), Lin Y-P (林燕萍), *et al.* Lead isotope signatures and source identification in urban soils from different functional areas of Quanzhou City. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2013, **33**(7): 1996–2003 (in Chinese)
 - [4] Peng B (彭 渤), Tang X-Y (唐晓燕), Yu C-X (余昌训), *et al.* Heavy metal contamination of inlet sediments of the Xiangjiang River: With Pb isotopic geochemical implications on metal sources. *Acta Geologica Sinica* (地质学报), 2011, **85**(2): 282–299 (in Chinese)
 - [5] Rio-Salas RD, Ruiz J, De la O-Villanueva M, *et al.* Tracing geogenic and anthropogenic sources in urban dusts: Insights from lead isotopes. *Atmospheric Environment*, 2012, **60**: 202–210
 - [6] Zhu BQ, Chen YW, Peng JH. Lead isotope geochemistry of the urban environment in the Pearl River Delta. *Applied Geochemistry*, 2001, **16**: 409–417
 - [7] Boyle E, Lee J, Echegoyen Y, *et al.* Anthropogenic lead emissions in the ocean: The evolving global experiment. *Oceanography*, 2014, **27**: 69–75
 - [8] Zurbrick CM. Asian Anthropogenic Lead Contamination in the North Pacific Ocean as Evidenced by Stable Lead Isotopic Compositions. PhD Thesis. San Francisco: University of California, Santa Cruz, 2014
 - [9] Zhang H (章 骅), Yao Q-S (姚其生), Zhu Y-M (朱钰敏), *et al.* Review of source identification methodologies for heavy metals in solid waste. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2012, **57**(33): 3132–3138 (in Chinese)
 - [10] Fang SB, Jia XB, Yang XY, *et al.* A method of identifying priority spatial patterns for the management of potential ecological risks posed by heavy metals. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **237–238**: 290–298
 - [11] Fang S-B (方淑波), Jia X-B (贾晓波), An S-Q (安树青), *et al.* The priority pattern for managing the potential ecological risks associated with heavy metals of the top soil on Yancheng coast. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2012, **67**(1): 27–35 (in Chinese)
 - [12] Sun X-B (孙贤斌), Liu H-Y (刘红玉). Optimization of wetland landscape patterns based on ecological function evaluation: A case study on the coastal wetlands of Yancheng, Jiangsu Province. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(5): 1157–1166 (in Chinese)
 - [13] Song X-L (宋晓龙), Li X-W (李晓文), Zhang M-X (张明祥), *et al.* Systematic conservation pattern for the wetland biodiversity in HuangHuaiHai Region, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(15): 3953–3965 (in Chinese)
 - [14] Liu J-P (刘吉平), Lyu X-G (吕宪国), Yang Q (杨青), *et al.* Wetland landscape ecological security patterns analysis and plan in northeast of Sanjiang Plain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(3): 1083–1090 (in Chinese)
 - [15] Ou W-X (欧维新), Yang G-S (杨桂山), Yu X-X (于兴修), *et al.* Effect of coastal land use changes on eco-environment in the coastal zone of Yancheng. *Resources Science* (资源科学), 2004, **26**(3): 76–83 (in Chinese)
 - [16] Bermea OM, Salazar MTR, Alvarez EH, *et al.* Lead isotopes as tracers of anthropogenic pollution in urban topsoils of Mexico City. *Chemie Der Erde-Geochemistry*, 2011, **71**: 189–195
 - [17] Xu C, Sheng S, Zhou W, *et al.* Characterizing wetland change at landscape scale in Jiangsu Province, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **179**: 279–292
 - [18] Wang J-P (王计平). Study on Coastal Environmental Evaluation and Early Warning System, Yancheng, Jiangsu Province. PhD Thesis. Nanjing: Nanjing University, 2006 (in Chinese)
 - [19] Qiao L (乔 磊). Research on the Eco-environmental Quality and Ecological Risk Evaluation of Estuaries in Jiangsu Coast. Master Thesis. Nanjing: Hohai University, 2006 (in Chinese)
 - [20] Duzgoren-Aydin NS. Sources and characteristics of lead pollution in the urban environment of Guangzhou. *Science of the Total Environment*, 2007, **385**: 182–195
 - [21] Chen H-S (陈好寿), Pei H-D (裴辉东), Zhang X-Y (张霄宇), *et al.* Isotope tracing of major sources of lead pollution in the atmosphere of Hangzhou City. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry* (矿物岩石地球化学通报), 1998, **17**(3): 8–11 (in Chinese)
 - [22] Shang Y-N (尚英男), Yin G (尹 观), Yan Q-S (闫秋实), *et al.* Lead pollution character of urban river sediments in Chengdu City. *Urban Environment & Urban Ecology* (城市环境与城市生态), 2005, **18**(6): 40–42 (in Chinese)
 - [23] Liu J-P (刘吉平), Lyu X-G (吕宪国). Study on the spatial pattern of wetland bird richness and hotspots in Sanjiang Plain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(20): 5894–5902 (in Chinese)
 - [24] Wang Y-J (王云静), Liu M-S (刘茂松), Xu H-Q (徐惠强), *et al.* Biodiversity of the natural wetlands in Jiangsu Province. *Journal of Nanjing University* (Natural Sciences) (南京大学学报: 自然科学版), 2002, **38**(2): 171–181 (in Chinese)
 - [25] Wang H (王 会), Du J-J (杜进进), Hou Y-Q (侯韵秋), *et al.* A study of the population and distribution of several waterbird species around the coast of Yancheng, Jiangsu Province in breeding season (II). *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2000, **36**(4): 112–114 (in Chinese)
 - [26] Zuo P (左 平). Landscape Spatial Pattern Analysis and Landscape Heterogeneity Study in Yancheng Coastal Wetland Ecosystem, Jiangsu, China. PhD Thesis. Nanjing: Nanjing University, 2005 (in Chinese)
 - [27] Bureau of Jiangsu Agricultural Resources Development (江苏农业资源开发局). The Reclamation Area in Jiangsu. Beijing: Ocean Press, 1999 (in Chinese)
 - [28] Shi H, Singh A. An assessment of biodiversity hotspots using remote sensing and GIS. *Journal of the Indian So-*

ciety of Remote Sensing, 2002, **30**: 105–114

[29] Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, *et al.* Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 2000, **403**: 853–858

[30] Kumar TS, Mahendra RS, Nayak S, *et al.* Identification of hot spots and well managed areas of Pichavaram mangrove using Landsat TM and Resourcesat—1 LISS IV: An example of coastal resource conservation along Tamil Nadu Coast, India. *Journal of Coastal Conservation*, 2012, **16**: 1–12

[31] Nagendra H, Lucas R, Honrado JP, *et al.* Remote sensing for conservation monitoring: Assessing protected areas, habitat extent, habitat condition, species diversity, and threats. *Ecological Indicators*, 2013, **33**: 45–59

[32] Ryberg W, Fitzgerald L. Landscape composition, not connectivity, determines metacommunity structure across multiple scales. *Ecography*, 2015, DOI: 10.1111/ecog.01321

[33] Yu R-L (于瑞莲), Hu G-R (胡恭任). Research pro-

gress in sources identification of soil heavy metal pollution. *Nonferrous Metals* (有色金属), 2008, **60**(4): 158–166 (in Chinese)

[34] Zhao Y (赵 羿), Wu Y-M (吴彦明), Sun Z-W (孙中伟). Landscape-ecological characteristics of coast zone and its management. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1990, **1**(4): 373–377 (in Chinese)

[35] Zhu Y-L (朱燕玲), Guo Z-Y (过仲阳), Ye S-F (叶属峰), *et al.* Construction of degradation diagnosis system for the ecosystems in Dongtan coastal zone of Chongming, Shanghai. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(2): 513–518 (in Chinese)

作者简介 钱庆腾, 男, 1988 年生, 硕士研究生. 主要从事湿地生态学研究. E-mail: bsfang@ sina.com

责任编辑 张凤丽
