

范晨子, 刘永兵, 赵文博, 等. 云南安宁水系沉积污染物分布特征与风险评价[J]. 岩矿测试, 2021, 40(4): 570 – 582.
FAN Chen – zi, LIU Yong – bing, ZHAO Wen – bo, et al. Pollution Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the River Sediments in Anning, Yunnan Province[J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, 40(4): 570 – 582.
【DOI: 10. 15898/j. cnki. 11 – 2131/td. 202103080035】

云南安宁水系沉积污染物分布特征与风险评价

范晨子¹, 刘永兵¹, 赵文博¹, 刘成海¹, 袁继海¹, 郭威¹, 郝乃轩²

(1. 国家地质实验测试中心, 中国地质调查局微区与元素形态重点实验室, 北京 100037;
2. 中国地质大学(北京)材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要: 云南安宁是长江经济带上游重要的工业、矿业城市, 是滇中新区经济发展和生态文明建设的支点。对安宁地区地球化学水系沉积物、水文地质等方面的调查尚停留在二十世纪七八十年代, 而近年来人类生产生活对生态环境造成的影响也不明确。为揭示安宁地区水系沉积物污染状况、空间分布特征与潜在生态风险, 本文以 2019 年采集的云南安宁地区水系表层沉积物为研究对象, 利用 X 射线荧光光谱、电感耦合等离子体质谱、气相色谱 – 质谱等方法系统分析其中常量元素、微量元素和 16 种优先控制的多环芳烃(PAHs)含量和空间分布特征, 采用地累积指数法、Hankanson 潜在生态风险指数法对 8 种典型重金属(As、Cd、Cr、Cu、Ni、Zn、Pb、Hg)以及采用质量基准法对 PAHs 进行了生态风险评价。结果表明: ①水系沉积物中的重金属含量不同程度地高于中国全国和南方水系沉积物背景值, 且变异程度较高、空间分布不均, Cd、Hg 和 As 的潜在生态风险处于中等到严重等级; ② Σ PAHs 平均含量为 20856. 0ng/g, 较长江流域均值显著偏高, 16 种单体检出率接近 100%, 但 PAHs 总体生态风险较低, 石化工业和石油燃料的燃烧是 PAHs 主要来源; ③污染物重点潜在生态风险主要集中于普渡河流域螳螂川沿岸钢铁、化工等厂矿周边。本研究结果为加强流域工业污染源污染监管、减少和控制工业污水排放提供了科学依据。

关键词: 安宁地区; 水系沉积物; 重金属; 多环芳烃; X 射线荧光光谱法; 电感耦合等离子体质谱法; 气相色谱 – 质谱法; 生态风险

要点:

- (1) 安宁地区沉积物中的重金属含量偏高, 分布不均, Cd、Hg、As 生态风险大。
- (2) 沉积物中的多环芳烃平均含量高, 石油燃料的燃烧是其主要来源。
- (3) 污染物潜在风险集中于普渡河流域螳螂川沿岸钢铁、化工等厂矿周边。

中图分类号: X821 **文献标识码:** A

水系沉积物是水环境的基本组成部分, 是水环境中污染物的源或汇^[1-2]。在自然条件下, 水系沉积物中的元素主要来源于水与岩石、水与土壤之间的相互作用^[3]。伴随着近年来工业、农业以及城市化的发展与推进, 大量的工农业、生活污水以及大气沉降物不断排入水中, 导致水体中悬浮物与沉积物中的污染物含量急剧升高。当水环境条件(如 pH、

温度、溶解氧等)发生改变时, 累积于沉积物中的污染物会重新释放进入上覆水体, 造成水环境的“二次污染”^[4-7]。因此, 研究污染物在地区水系沉积物中的含量水平和分布特征的基础上, 对其潜在生态风险进行评价和预测具有十分重要的意义。

近年来, 国内外学者对水系沉积物中的污染物特别是重金属、有机污染物的污染分布特征、生态风险

收稿日期: 2021 – 03 – 08; 修回日期: 2021 – 05 – 11; 接受日期: 2021 – 07 – 02
基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190589); 国家重点研发计划项目(2019YFC1805005); 中国地质科学院基本科研业务费项目(CSJ201903, CSJ202014)
作者简介: 范晨子, 博士, 副研究员, 主要从事环境矿物学研究工作。E – mail: czfan2013@ 163. com。

评价、变化趋势、污染来源等开展了较多的研究,研究的水系范围包括海洋、湖泊、河口、湖口、内陆河流等,尤其是流经城市、矿区和工业区的河流和湖泊^[8-13]。例如,Ayari 等^[14]评估了突尼斯西北部 Oued Rarai 盆地水系沉积物中锑、砷、铅、汞和银显示出污染,其中砷的潜在生态风险指数值最大,通过来源相关性分析揭示了与岩性、构造和人为来源有关的三个主要地球化学联系。Yuan 等^[15]对江苏苏州工业园区城市河流沉积物样本中的多环芳烃类物质(PAHs)进行了分析,并通过正矩阵分解模型诊断煤/生物质燃烧是 PAHs 的主要来源,其次是非燃烧源和车辆排放。采用多种数学模型对当前污染现状及潜在生态风险进行预测评价并解析污染物的来源,对于提出有效的防范、应急与减缓措施可提供重要的科学依据^[9,16-17]。目前,国际上常用的评价水系沉积物环境重金属污染程度的方法包括地累积指数法(I_{geo})^[18]、污染负荷指数法(PLI)^[19]、潜在生态危害指数法(RI)^[20]、生物毒性不利影响评价法(mPEC-Q)^[21]、对数衰减模型^[22-23]等。前三种方法均将样品重金属含量的实测值与区域背景值对比,通过计算得到相应的评价指数,再对区域重金属的污染程度进行评估。在追踪环境污染源时,通常采用最接近于现代河流水系沉积物形成环境的“全球页岩标准”^[24-25]作为最快速和有效的方法,而使用中国全国水系沉积物平均值^[26-27]或者中国南方水系沉积物平均值^[28]作为标准背景进行评价,该结果可以与中国水系的环境地球化学质量进行对比。地累积指数法侧重单一金属,潜在生态风险指数综合考虑重金属的毒性、在沉积物中普遍的迁移转化规律和评价区域对重金属污染的敏感性,以及重金属区域背景值的差异,适用于大区域范围不同源沉积物之间进行评价比较^[16,29]。沉积物中 PAHs 生态风险评价常用的方法为 Long 等提出的质量基准法(SQGs)和加拿大发布的质量标准法(SQSs)等^[30]。两种方法均是通过设定浓度值的界限来判定污染物潜在风险几率的高低。其中质量基准法用于表征 PAHs 潜在生物毒性风险的量化指标,是评价淡水和海洋沉积物环境质量的有力工具。

长江作为中国的第一大河流,国家高度重视长江经济带的生态环境安全,明确提出长江经济带“要坚持生态优先、绿色发展的战略定位”,将建设“安全长江”确立为区域生态环境保护的主要目标^[31]。云南安宁地区位于长江经济带上游金沙江流域,具有“中国磷都”之称,是云南滇中新区发展的重要支点。已有学者在 20 世纪 70~80 年代对昆

明及周边安宁地区开展了 1:20 万地球化学水系沉积物测量^[32]、1:20 万水文地质调查^[33]等工作,但随着矿业、工业和城镇化进程,近年来安宁地区生态环境受人类活动的影响发生了较大变化。本文利用 X 射线荧光光谱、电感耦合等离子体发射光谱/质谱、气相色谱-质谱等方法系统分析了安宁地区水系沉积物中的常量元素、微量元素和 16 种优先控制的 PAHs 含量和空间分布特征,并采用地累积指数法、Hankanson 潜在生态风险指数法对 8 种典型重金属元素(As、Cd、Cr、Cu、Ni、Zn、Pb、Hg)和采用质量基准法对 PAHs 进行了生态风险评价,研究这些污染物对周边生态环境的影响,为今后实施重点污染源、生态状况监测,实现流域内总磷总量控制奠定基础,保障长江流域的生态安全。

1 研究区概况

云南省安宁市位于滇中高原的东部边缘和滇池断陷盆地西部,地处于康滇地轴二级构造带的中南段。安宁市隶属于昆明市管辖,是云南滇中新区西片区核心,属亚热带低纬度高海拔气候,四季温差不大,年平均气温 14.9℃,年均降水量约为 1000mm,降雨主要集中在 5~9 月。安宁市矿产资源十分丰富,境内探明磷矿储量约 10.15 亿吨,占全国资源储量的 14%,区内除磷矿外,还有盐、铁、钛、锡、铜、锌、铝、硅、铝土矿、石英砂、石灰石、白云石及花岗岩等诸多矿藏。安宁市工业产业以石化化工、钢铁、磷化工、装备制造、新材料等为主;农业以烤烟、鲜花、红梨、大棚蔬菜等经济作物种植为主。

安宁市地处红河水系和金沙江水系分界处,径流面积 1301km²,其中金沙江流域 1186km²,红河流域 115km²。安宁市集水面积大于 50km²(包括市境外面积)的河流共有 14 条,其中长江流域有 11 条,均属金沙江右岸一级支流普渡河水系,分别为螳螂川、马料河、鸣矣河、招坝河、一六街河、螃蟹河、县街河、沙河、九龙河、禄脬河与甸尾管河;红河流域有 3 条,均属红河左岸一级支流绿汁江水系,分别为中屯河、川街河与王家滩河。其中,螳螂川作为滇池的唯一出口,除红河水系的九渡河外,其余河流最后都汇入螳螂川。螳螂川沿岸分布着众多的磷化工、钢铁冶金、石油化工以及制酸等企业。特别是在安宁草铺、禄脬、青龙片区集中了大量化工企业,例如三环化工集团、三聚磷酸五钠厂等,致使河道水体水质恶化,总磷、氟化物、汞、化学需氧量浓度经常检出超标现象,是近年来螳螂川水体整治和监管的重点^[34]。

2 实验部分

2.1 样品采集及处理

2019 年 4 月项目组在安宁地区采集了水系沉积物。使用铁铲或抓斗式取样器采集水底 0~20cm 的沉积物共 29 件,样品编号为 1~29(采样点位见后文的图 1)。将样品中的水草、石块、生物碎屑等杂质剔除之后,置于白布袋中室温下自然风干。用于无机分析的样品经破碎后过 200 目筛,装入纸袋送至实验室分析。用于有机污染物分析的样品置于棕色瓶中送至实验室分析。

2.2 样品分析方法

无机样品和有机样品分析均由国家地质实验测试中心完成。

无机分析测试方法如下:使用 X 射线荧光光谱仪(型号 PW4400)测定 Al_2O_3 、 CaO 、 K_2O 、 MgO 、 MnO 、 Na_2O 、 P_2O_5 、 SiO_2 、 TFe_2O_3 、 TiO_2 含量,检测方法依据《硅酸盐岩石化学分析方法 第 28 部分:16 个主次成分量》(GB/T 14506.28—2010);使用 X 射线荧光光谱仪(型号 2100)测定 Cl 含量,检测方法依据《波长色散型 X 射线荧光光谱方法通则》(JY/T 016—1996);使用电感耦合等离子体质谱仪(型号 PE300D)测定 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Zn、Pb、Th、U 含量,检测方法依据《硅酸盐岩石化学分析方法 第 30 部分:44 个元素量测定》(GB/T 14506.30—2010);使用原子荧光光谱仪测定 Hg、Se 含量,检测方法依据《1:5 万区域地质调查及地球化学普查样品分析及质量管理指导性规程》(DZG 20.10—1990);使用红外碳硫仪测定 C、S 含量,检测方法依据《锰铁及高炉锰铁化学分析方法 红外线吸收法测定硫含量》(GB/T 7730.5—2000);使用离子选择性电极法测定水溶性氟含量,检测方法依据《1:5 万区域地质调查及地球化学普查样品分析及质量管理指导性规程》(DZG 20.10—1990)。

有机分析测试方法如下:使用气相色谱-质谱仪(型号 QP-2010)测定萘、苊、芴、菲、蒽、荧蒽、芘、苯并[a]蒽、屈、苯并[b]荧蒽、苯并[k]荧蒽、苯并[a]芘、二苯并[a,h]蒽、苯并[g,h,i]芘、茚并[1,2,3-cd]芘、茚并[1,2,3-cd]芘、茚并[1,2,3-cd]芘等多环芳烃类有机污染物,检测方法依据《气相色谱-质谱法分析半挥发性有机物》(US. EPA 8270D)。

数据整理和分析采用 Microsoft Excel 完成,采用 Arcgis 软件绘制流域沉积物采样点分布图和生态风险评价图。

2.3 重金属生态风险评价方法

2.3.1 地累积指数法

地累积指数法(I_{geo})是由德国沉积学家 Müller 提出的一种研究水环境沉积物中重金属污染的定量指标^[18]。该方法综合考虑了人为污染因素、环境地球化学背景值和自然成岩作用引起的背景值变动的影 响,其计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left[\frac{C_n}{1.5B_n} \right]$$

式中: C_n 为元素 n 在沉积物中的实测含量; B_n 为该元素的地球化学背景值,本文采用中国南方水系沉积物、全国水系沉积物元素背景值为参考值^[26-28]。根据 I_{geo} 数值的大小,可将其按污染程度分为 6 级^[5],重金属地累积指数(I_{geo})与污染程度的关系为:当 $I_{\text{geo}} < 0$ 时,无污染; $0 \leq I_{\text{geo}} < 1$ 时,轻度污染; $1 \leq I_{\text{geo}} < 2$ 时,偏中度污染; $2 \leq I_{\text{geo}} < 3$ 时,中度污染; $3 \leq I_{\text{geo}} < 4$ 时,偏重度污染; $4 \leq I_{\text{geo}} < 5$ 时,重度污染; $I_{\text{geo}} \geq 5$ 时,严重污染。

2.3.2 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法(RI)是由瑞典科学家 Hankanson 提出的一种应用沉积学方法评价沉积物中重金属污染程度的方法^[20]。该方法对应主要指标包括:某一种重金属的单因子潜在生态风险系数(E_r^i)和多种重金属的多因子综合潜在生态风险指数(RI)。其中:单因子重金属潜在生态风险系数(E_r^i)计算公式如下:

$$E_r^i = T_r^i \times C_r^i = T_r^i \times \frac{C_{\text{实测}}^i}{C_n^i}$$

式中: C_r^i 为某一重金属的污染指数, $C_{\text{实测}}^i$ 为水系沉积物重金属元素的实测含量, C_n^i 为重金属参比值,本文采用中国南方水系沉积物元素背景值作为参考值^[28]。 T_r^i 为毒性响应系数,反映重金属的毒性水平及生物对重金属污染的敏感程度。Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg 和 Pb 的 T_r^i 值分别为 2、5、5、1、30、30、40 和 5。多因子综合潜在生态风险指数(RI)为多个某一种重金属潜在生态风险系数的加和:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i$$

沉积物中重金属潜在生态风险指数分级标准关系为: $E_r^i < 40$, $RI < 150$, 表示轻微潜在生态风险; $40 \leq E_r^i < 80$, $150 \leq RI < 300$, 表示中等潜在生态风险; $80 \leq E_r^i < 160$, $300 \leq RI < 600$, 表示强潜在生态风险; $160 \leq E_r^i < 320$, $RI \geq 600$, 表示很强潜在生态风险; $E_r^i \geq 320$, 表示极强潜在生态风险。

2.4 多环芳烃类生态风险评价方法

本文采用质量基准法对安宁地区水系沉积物中 PAHs 类污染物的生态风险进行评价^[30]。质量基准法中提出了效应区间低值(ERL)和效应区间中值(ERM),用于确定河流、海洋、湖泊沉积物中有机污染物的潜在生态风险,进而反映沉积物生态风险水平。PAHs < ERL,表示生物毒副作用不显著(风险概率 < 10%);ERL ≤ PAHs ≤ ERM,表示偶尔会产生负面生态效应(风险概率在 10% ~ 50% 之间);PAHs > ERM,表示可能会产生一定的负面生态效应(风险概率 > 50%)。

3 结果与讨论

3.1 安宁地区水系沉积物主要无机元素含量特征

3.1.1 主量元素和硫碳钍等元素含量特征

安宁地区流域水系沉积物中主量元素、S、C、Th、U、Se、Cl 和水溶性氟的统计结果如表 1 所示。根据 Wilding^[35]对变异系数的分类,除 SiO₂的变异系数小于 0.35,变异程度不高外,其余元素变异程度较高,尤其是 CaO、P₂O₅、S 和水溶性氟变异系数均超过了 1,说明它们在水系沉积物中的含量变化大,受地层岩性、人类活动等空间差异影响大。SiO₂含量存在显著亏损的样品(点位 29 和 25)主要分布在铁矿等矿山周边,伴随着 CaO 或 Fe₂O₃含量的明显上升。相对于中国全国水系沉积物^[27]和中国南方水系沉积物^[28]而言(表 1),安宁地区水系沉积物明显亏损 SiO₂、Al₂O₃、K₂O、MgO、Na₂O,富集 CaO、Fe₂O₃、P₂O₅和 TiO₂。安宁地区水系沉积物中水溶性氟含量较高,超过 65% 的点位数值高于《土壤环境质量标准》(GB 15618—2008)农业用地对氟的标准

(5μg/g),尤其集中分布在以磷化工企业分布较多的北部禄脬河和普渡河流域。安宁地区所有采样点水系沉积物中 U 和 Se 元素的平均含量分别为4.78 μg/g 和 1.10μg/g,显著高于中国全国水系沉积物中 U 的均值 2.40μg/g^[27],以及中国南方水系沉积物中 U 和 Se 的均值 3.50μg/g 和 0.33μg/g^[28]。

3.1.2 重金属元素含量特征

重金属元素含量统计结果见表 2。Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg、Pb 和 Cr 含量均值分别为 48.81、69.97、495.83、27.46、1.14、0.47、126.36 和 94.72μg/g,分别为中国南方水系沉积物背景值^[28]的 1.68、2.80、6.12、2.10、4.97、6.22、3.91 和 1.41 倍,呈现出显著富集的特征。安宁地区水系沉积物中重金属含量变异系数的大小顺序为:Zn > Hg > Cd > Cu > Pb > As > Ni > Cr,除 Ni 和 Cr 外其他重金属均变异程度高,特别是 Zn、Cd 和 Hg 的变异系数分别高达 1.88、1.51 和 1.60,说明重金属元素的空间分布极度不均匀。安宁地区水系沉积物中重金属元素的高值主要集中在螳螂川安宁城区和工业园区段,其中 Zn、Hg、Pb 的最高值(点位 14)出现在螳螂川流域昆钢段;Cr 的最高值(点位 24)出现在鸣矣河小流域窑坡磷矿水库;Ni 的最高值(点位 12)出现在螳螂川流域松林水库;Cu、As、Cd 的最高值(点位 6)出现在禄裱河花箐段。可见,重金属的分布与安宁地区工业生产集中在螳螂川沿岸特别是禄脬、草铺等工业园区密切相关。安宁地区水系沉积物重金属含量与滇池外海^[36]、滇池宝象河^[37]基本相当,Zn、Pb 含量略高;相比珠江流域南盘江^[38]As 和 Cd 含量偏低;相比长江上游宜宾至泸州段^[39]、岷江^[40]、沱江流域^[2],除 Cr 之外其他几种重金属含量都偏高。

表 1 安宁地区水系沉积物主量元素、碳、硫等含量统计

检测项目	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	TFe ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	MnO (%)	Na ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	TiO ₂ (%)	S (%)	Cl (μg/g)	C (%)	水溶性氟 (μg/g)	Th (μg/g)	U (μg/g)	Se (μg/g)
平均值	57.08	11.14	5.56	8.94	1.70	1.47	0.23	0.12	1.38	0.98	0.24	91.13	3.51	10.38	11.75	4.78	1.10
中位数	60.28	10.87	3.58	7.25	1.61	1.23	0.15	0.07	0.71	0.80	0.09	60.00	2.83	6.55	10.85	4.26	0.46
最大值	79.81	28.67	28.28	53.69	3.34	4.00	0.86	0.43	11.02	3.97	1.73	326.00	11.20	62.60	29.50	11.80	6.02
最小值	21.66	3.50	0.14	3.94	0.63	0.22	0.02	0.01	0.13	0.30	0.02	33.00	0.27	3.10	5.70	1.36	0.12
变异系数	0.23	0.46	1.15	0.99	0.45	0.51	0.91	0.92	1.49	0.71	1.79	0.82	0.83	1.13	0.48	0.53	1.28
页岩 ^[25]	50.93	19.75	2.21	4.76	2.75	2.22	0.086	0.89	0.176	0.751	0.3	160	-	500	11	3.2	0.6
中国全国水系沉积物元素丰度值 ^[27]	65.40	12.60	2.00	4.30	2.40	1.30	0.08	1.40	0.13	0.64	-	-	-	475.00 (总氟)	11.40	2.40	-
中国南方水系沉积物元素丰度值 ^[28]	64.90	13.80	1.10	4.80	2.30	1.10	0.10	0.60	0.14	0.77	0.03	71.00	1.69	527 (总氟)	13.30	3.50	0.33

注:“-”表示相关文献没有提供数据。

表2 安宁地区水系沉积物重金属含量统计

Table 2 Statistics of heavy metal contents in the surface sediments from Anning area

检测项目	Ni (μg/g)	Cu (μg/g)	Zn (μg/g)	As (μg/g)	Cd (μg/g)	Hg (μg/g)	Pb (μg/g)	Cr (μg/g)
平均值	48.81	69.97	495.83	27.46	1.14	0.47	126.36	94.72
中位数	46.60	47.30	225.50	20.70	0.54	0.17	107.00	87.85
最大值	97.00	298.00	5068.00	113.00	7.31	3.61	566.00	186.00
最小值	17.80	22.00	69.70	6.28	0.07	0.02	24.30	55.70
变异系数	0.37	0.92	1.88	0.78	1.51	1.60	0.83	0.32
页岩 ^[25]	95.00	57.00	80.00	6.60	0.30	0.04	20.00	100.00
中国全国水系沉积物元素丰度 ^[27]	23.00	20.00	67.00	9.00	0.13	0.03	23.00	54.00
中国南方水系沉积物元素丰度 ^[28]	29.00	25.00	81.00	13.10	0.23	0.075	32.30	67.00
滇池外海丰水期0~5m ^[36]	39.90	72.76	176.88	31.30	1.00	0.18	66.79	77.78
滇池外海枯水期0~5m ^[36]	48.76	127.87	553.57	44.79	12.32	0.83	115.50	89.51
滇池宝象河流域丰水期 ^[37]	56.75	129.90	164.80	—	—	—	51.88	108.28
滇池宝象河流域枯水期 ^[37]	52.68	147.93	272.08	—	—	—	65.25	94.05
南盘江流域云南段 ^[38]	—	80.00	239.00	146.20	4.52	—	101.00	150.00
长江上游宜宾至泸州段 ^[39]	34.52	42.92	98.93	6.71	0.76	—	35.41	78.77
三峡库区 ^[41]	42.80	58.80	148.50	12.30	0.90	0.12	53.10	103.20
沱江流域石亭江 ^[2]	27.00	27.34	121.00	6.72	0.99	0.19	32.03	76.53
沱江流域绵远河 ^[2]	23.00	24.98	97.00	10.14	0.79	0.09	29.37	55.36
沱江流域沱江 ^[2]	43.00	48.95	261.00	11.84	1.48	0.19	47.16	100.07
岷江流域金马河 ^[40]	—	35.23	108.78	8.87	0.33	0.04	37.64	84.69
岷江流域文锦江/西江 ^[40]	—	18.69	127.64	5.79	0.71	0.04	98.69	67.89
岷江流域斜江河 ^[40]	—	27.58	137.15	6.74	0.51	0.07	37.03	76.06
岷江流域南河 ^[40]	—	47.43	141.00	6.78	0.59	0.14	34.93	250.30
岷江流域青衣江 ^[40]	—	29.05	199.00	7.05	0.83	0.09	64.88	86.73
岷江流域大渡河 ^[40]	—	34.68	710.71	18.12	4.58	0.24	—	136.66

注:“—”表示相关文献没有提供数据。

3.2 安宁地区水系沉积物中多环芳烃含量与空间分布特征

本研究对安宁地区水系沉积物中16种优先控制的多环芳烃PAHs进行了测定,包括2环和3环PAHs(Nap、Acy、Ace、Flu、Phe、Ant);4环PAHs(Fla、Pyr、BaA、Chr);5环和6环PAHs(BbF、BkF、BaP、InP、DahA、BghiP)。表3显示区内沉积物中ΣPAHs含量的均值为20856.0ng/g,其中最小值为84.9ng/g,最大值为560181.7ng/g,16种PAHs检出率几近100%(图1)。从PAHs组成来看,4环PAHs含量最高,为10497.8ng/g,其中Pyr含量最高;5~6环PAHs含量次之,平均值为7482.3ng/g,其中BbF含量最高,DahA含量较低;2~3环PAHs含量最小,平均值为2875.9ng/g,其中Phe含量最大。总体来说,16种单体的变异系数均较大,说明这些物质在空间上的含量差异程度大,其中Fla的变异系数最大,Ace的变异程度相对较小;在不同环数中,中环(4环)和高环(5环、6环)的变异程度明显大于低环(2环、3环)。

安宁地区水系沉积物PAHs的总体含量较大

(ΣPAHs均值为20856.0ng/g),显著高于文献报道的其他区域表层水系沉积物。据报道16种PAHs总量均值在长江、淮河、海河、松花江、太湖、滇池分别为1147、1723、2595、793、12472、3714ng/g^[42],在三亚河为2624.98ng/g^[43],在南宁清水泉地下河为430.86ng/g^[44]。通过对比说明安宁地区PAHs污染较为严重。

本研究采用特征分子分析法来确定环境中的PAHs来源,采用Ant/(Ant+Phe)、Flu/(Flu+Pyr)比值法对PAHs来源进行解析^[44]。当Ant/(Ant+Phe)<0.1为石油源,Ant/(Ant+Phe)>0.1为燃烧源;当Flu/(Flu+Pyr)<0.4为石油燃烧,Flu/(Flu+Pyr)>0.5主要是木材和煤炭燃烧,该值在0.4~0.5之间为石油及其精炼产品的燃烧来源^[45]。安宁地区水系沉积物Ant/(Ant+Phe)比值范围为0~0.22,约有2/3采样点该比值小于0.1,表明沉积物PAHs以石油源为主。Flu/(Flu+Phy)比值范围为0.03~0.64,在70%的采样点该比值小于0.4,表明安宁水系沉积物PAHs以石油燃烧为主(图2)。PAHs类污染物高值主要分布在螳螂川沿

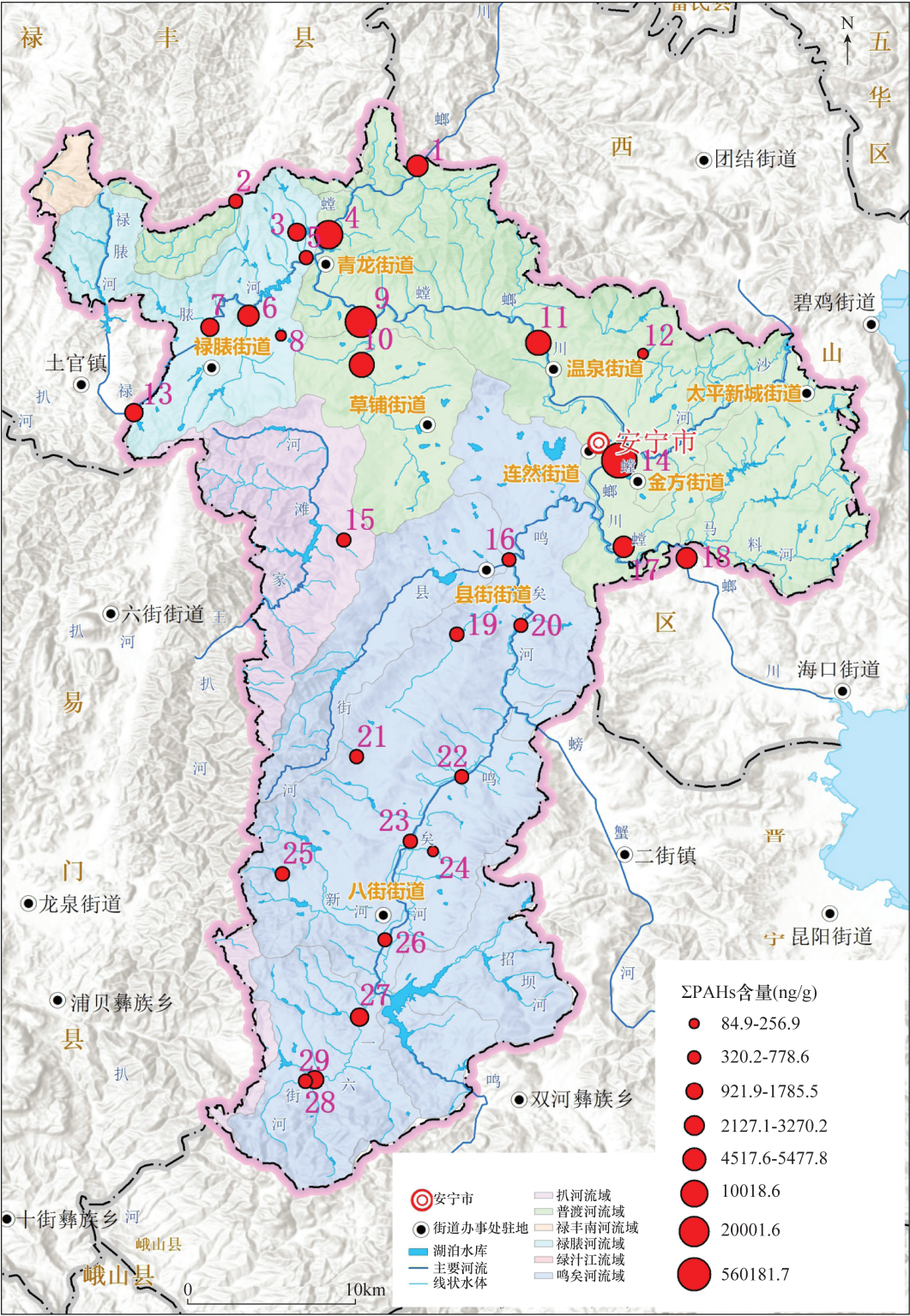


图1 安宁地区水系沉积物采样点位(数字“1~29”)及多环芳烃总量分布图

Fig.1 Sampling sites (No.1-29) and distribution of Σ PAHs contents in the surface sediments from Anning area

岸(图1),特别是在点位14(钢铁厂周边),点位9(石油化工、钢铁厂周边),点位4(发电厂、化工厂周边)。上述结果表明石化工业以及石油燃料的燃烧是安宁地区沉积物 PAHs 的主要来源。

3.3 安宁地区水系沉积物中重金属生态风险评价

以中国南方水系沉积物为标准,对安宁地区水系沉积物中重金属元素采用地累积指数进行评价结果的统计。29个样品中,Cr的 $I_{geo} = -138.98 \sim$

表3 安宁地区水系沉积物多环芳烃含量统计

Table 3 Statistics of Σ PAHs concentrations in the surface sediments from Anning area

多环芳烃化合物	简称	多环芳烃含量(ng/g)				变异系数	检出限 (ng/g)	控制加标样回收率 (%)
		平均值	中位数	最大值	最小值			
萘	Nap	164.4	37.5	2555.2	0.0	2.9	5.00	71.3
苊烯	Acy	278.0	4.5	7595.2	0.0	5.0	2.00	75.1
苊	Ace	106.4	9.2	2406.7	0.0	4.1	2.00	80.0
芴	Flu	213.4	31.3	4508.4	3.7	3.8	2.00	79.3
菲	Phe	1693.3	166.3	40645.8	40.3	4.4	5.00	70.8
蒽	Ant	420.5	7.6	11444.1	0.0	5.0	2.00	75.5
荧蒽	Fla	4081.3	134.2	112033.4	16.6	5.0	5.00	89.8
芘	Pyr	3124.8	77.3	86287.4	6.1	5.0	2.00	94.8
苯并[a]蒽	BaA	1961.2	34.5	54526.6	1.9	5.1	2.00	95.5
屈	Chr	1330.5	24.7	36478.7	2.7	5.0	2.00	89.7
苯并[b]荧蒽	BbF	2731.5	76.0	73829.7	3.2	4.9	2.00	108
苯并[k]荧蒽	BkF	1068.5	38.3	28572.2	0.0	4.9	2.00	114
苯并[a]芘	BaP	1273.8	30.3	34963.0	0.0	5.0	2.00	96.4
茚并[1,2,3-cd]芘	InP	1125.1	43.2	30325.9	0.0	4.9	2.00	99.7
二苯并[a,h]蒽	DahA	265.7	11.8	6921.3	0.0	4.7	2.00	104
苯并[g,h,i]芘	BghiP	1017.7	39.8	27088.1	0.0	4.8	2.00	98.7
2~3环	/	2875.9	256.5	69155.4	43.9	4.4	-	-
4环	/	10497.8	270.7	289326.1	27.4	5.0	-	-
5~6环	/	7482.3	239.3	201700.2	3.2	4.9	-	-
16种多环芳烃合计	Σ PAHs	20856.0	850.2	560181.7	84.9	4.9	-	-

注：“-”表示方法未涉及相关数据。

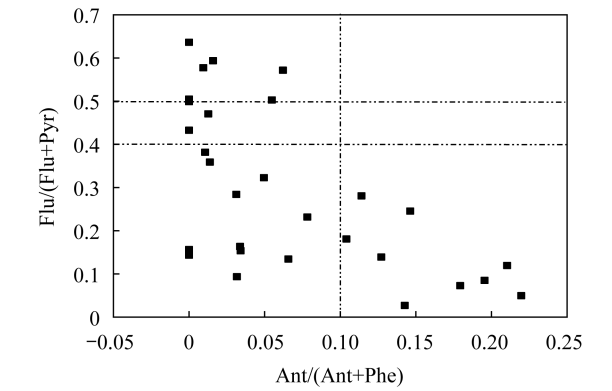


图2 安宁地区水系沉积物 PAHs 来源分析

Fig. 2 Identification of the sources of PAHs in the surface sediments from Anning area

15.82, 平均值为 -9.07; Ni 的 $I_{geo} = -49.90 \sim 11.51$, 平均值为 -1.80; Cu 的 $I_{geo} = -36.79 \sim 9.01$, 平均值为 -0.79; Zn 的 $I_{geo} = -5.45 \sim 11.57$, 平均值为 0.77; As 的 $I_{geo} = -38.57 \sim 25.11$, 平均值为 -0.88; Cd 的 $I_{geo} = -47.48 \sim 16.29$, 平均值为 -0.89; Hg 的 $I_{geo} = -30.84 \sim 10.74$, 平均值为 -2.07; Pb 的 $I_{geo} = -5.29 \sim 16.73$, 平均值为 0.94。从地累积指数统计结果(表4)来看,安宁地区水系沉积物中重金属污染程度总体较为严重,特别是部分地区的 As、Ni、Cr、Cu 等元素达到了严重污染的程

度,占比分别为 20.69%、13.79%、10.34% 和 10.34%。

同时采用了潜在生态风险指数对安宁地区水系沉积物重金属的潜在生态风险进行评价。29 个样品中,Cr 的 $E_{Cr}^i = 1.66 \sim 5.55$, 平均为 2.83, 属于轻微潜在生态风险; Ni 的 $E_{Ni}^i = 3.07 \sim 16.72$, 平均为 8.41, 属于轻微潜在生态风险; Cu 的 $E_{Cu}^i = 4.40 \sim 59.60$, 平均为 13.99, 90% 以上属于轻微潜在生态风险; Zn 的 $E_{Zn}^i = 0.86 \sim 62.57$, 平均为 6.12, 90% 以上属于轻微潜在生态风险; As 的 $E_{As}^i = 14.38 \sim 258.78$, 平均为 62.88, 属于中等潜在生态风险; Cd 的 $E_{Cd}^i = 0 \sim 953.48$, 平均为 144.22, 大部分属于强潜在生态风险; Hg 的 $E_{Hg}^i = 12.27 \sim 1925.33$, 平均为 248.80, 属于很强潜在生态风险; Pb 的 $E_{Pb}^i = 3.76 \sim 87.62$, 平均为 19.56, 大部分属于轻微潜在生态风险。8 种重金属 $RI = 99.27 \sim 3031.73$, 平均为 506.82, 属于强潜在生态风险。整体上来看(图3),安宁地区水系沉积物 20% 采样点重金属潜在生态风险变化处于轻微潜在生态风险, 23% 点位处于中等潜在生态风险, 30% 点位处于强生态风险, 27% 点位处于很强生态风险, 重金属生态风险主要集中于螳螂川(普渡河流域)的钢铁厂及化工厂周边。

表 4 安宁地区水系沉积物地累积指数生态风险评价结果

Table 4 Heavy metal ecological risk assessment results based on geoaccumulation index in the surface sediments from Anning area

重金属元素	参数	无污染	轻度污染	偏中度污染	中度污染	偏重度污染	重度污染	严重污染
Cr	样品个数	21	0	4	1	0	0	3
	总样品数占比(%)	72.41	0	13.79	3.45	0	0	10.34
Ni	样品个数	14	1	5	2	2	1	4
	总样品数占比(%)	48.28	3.45	17.24	6.90	6.90	3.45	13.79
Cu	样品个数	7	7	4	4	3	1	3
	总样品数占比(%)	24.14	24.14	13.79	13.79	10.34	3.45	10.34
Zn	样品个数	5	14	6	3	0	0	1
	总样品数占比(%)	17.24	48.28	20.69	10.34	0	0	3.45
As	样品个数	12	7	0	0	3	1	6
	总样品数占比(%)	41.38	24.14	0	0	10.34	3.45	20.69
Cd	样品个数	10	12	5	0	0	0	2
	总样品数占比(%)	34.48	41.38	17.24	0	0	0	6.90
Hg	样品个数	13	12	2	0	1	0	1
	总样品数占比(%)	44.83	41.38	6.90	0	3.45	0	3.45
Pb	样品个数	5	17	4	1	0	0	2
	总样品数占比(%)	17.24	58.62	13.79	3.45	0	0	6.90

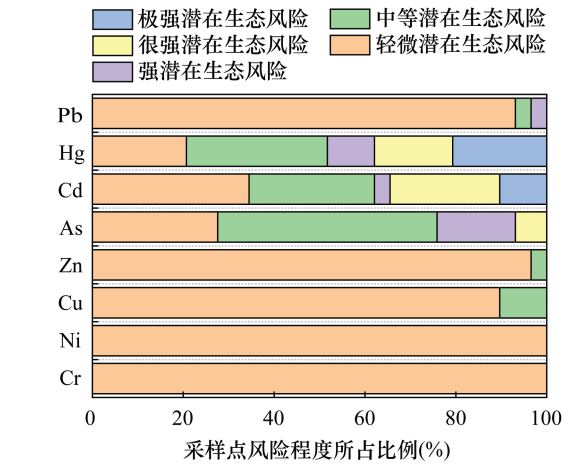


图 3 安宁地区水系沉积物重金属潜在生态风险评价结果

Fig. 3 Hankanson ecological risk of heavy metals in the surface sediments from Anning area

3.4 安宁地区水系沉积物多环芳烃生态风险评价

采用质量基准法对安宁地区水系沉积物中 PAHs 潜在的生态风险进行了评价。结果(表 5)表明,在 29 处采样点中,有 24 处 Σ PAHs 含量小于 ERL 值,生物毒副作用不明显;4 处 Σ PAHs 含量在 ERL 和 ERM 之间,偶尔会产生负面生态效应,一处采样点 Σ PAHs 含量超出 ERM 值。总体而言,安宁地区水系沉积物多环芳烃生物毒副作用不明显,生态风险较低。对于单体 PAHs,有 4 处采样点(点 14、11、9、6)的 BghiP 的含量,2 处(点 14 和 11)Phe 和 BaA 值的含量,其他单体有一处含量值超过了

表 5 安宁地区水系沉积物多环芳烃生态风险评价结果

Table 5 Evaluation results of the ecological risk of Σ PAHs based on SQGs in the surface sediments from Anning area

多环芳烃化合物	简称	质量基准法阈值		点位数		
		ERL	ERM	< ERL	$\begin{matrix} \text{ERL} \leq \text{PAHs} \\ \leq \text{ERM} \end{matrix}$	> ERM
萘	Nap	160	2100	23	5	1
苊烯	Acy	44	640	24	4	1
苊	Ace	16	500	16	12	1
芴	Flu	19	540	8	20	1
菲	Phe	240	1500	17	10	2
蒽	Ant	85.3	1100	24	4	1
荧蒽	Fla	600	5100	25	3	1
芘	Pyr	665	2600	25	3	1
苯并[a]蒽	BaA	261	1600	25	2	2
屈	Chr	384	2800	26	2	1
苯并[b]荧蒽	BbF	320	1880	22	6	1
苯并[k]荧蒽	BkF	280	1620	25	3	1
苯并[a]芘	BaP	430	1600	26	2	1
茚并[1,2,3-cd]芘	InP	-	-	-	-	-
二苯并[a,h]蒽	DahA	430	1600	28	0	1
苯并[g,h,i]芘	BghiP	63.4	260	18	7	4
2~3 环	/	564.3	6380	21	7	1
4 环	/	1910	12100	29	0	0
5~6 环	/	1523.4	6960	24	3	2
16 种多环芳烃合计	Σ PAHs	3997.7	25440	24	4	1

注:“-”表示相关方法中未提供数据。

ERM 值,生物毒性大于 50%。与重金属潜在生态风险类似,多环芳烃生态风险也是主要集中在螳螂川(普渡河流域)的钢铁厂和化工厂周边区域。螳螂

川尤其是草铺、禄脬街道段工业化程度高,污染源集中,人类活动强烈,排放了大量的污染物,致使该区域生态风险强烈增加,因此相关部门应加强污染物定期监测,减少现有污染物的排放,防止新增污染物的输入。

4 结论

根据 2019 年云南安宁地区水系沉积物的调查数据,通过分析其水系沉积物中的无机元素、多环芳烃含量和分布特征,结合地累积指数、潜在生态风险评价指数和质量基准评价方法,识别了安宁市水系沉积物中重金属和多环芳烃的潜在生态风险。研究结果表明:①研究区水系沉积物 8 种重金属 Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg、Pb 和 Cr 均不同程度地高于中国全国和南方水系沉积物背景值,且变异程度较高;② Σ PAHs 总量的均值为 20856.0ng/g,16 种优先控制的 PAHs 单体检出率接近 100%,4 环 PAHs 含量最高;PAHs 空间含量的差异程度大,石化工业以及石油燃料的燃烧是安宁地区水系沉积物 PAHs 的主要来源;③地累积指数和潜在生态风险指数评价结果表明研究区重金属污染程度较为严重,尤其是 Cd、Hg 和 As 存在中等到严重的潜在生态风险,重点风险集中于螳螂川(普渡河流域)钢铁厂及化工厂周边;④质量基准法评价结果表明研究区多环芳烃的生物毒副作用总体不明显,生态风险较低,但在螳螂川昆钢段存在潜在生态风险。

本次研究工作通过系统采样、含量及分布特征分析结合多种评价方法,针对云南安宁地区水系沉积物的重金属和多环芳烃生态风险状况进行了全面、客观的评价。安宁地区水系沉积物生态风险较严重的区域均集中在普渡河流域螳螂川沿线的钢铁、化工、冶炼等工业厂矿周边,因此需要重点治理工业点源污染,减少和控制工业污水排放,加强定期监测。本研究成果为安宁地区水环境中污染防治和环境治理提供了科学依据与技术支持,为当地加强水环境监测和资源保护的监管提供了详细的数据。

5 参考文献

- [1] Forstner U. Metal pollution in the aquatic environment [M]. Berlin:Spring Verlag,1978.
- [2] 李佳宣,施泽明,郑林,等. 沱江流域水系沉积物重金属的潜在生态风险评价[J]. 地球与环境,2010,38

(4):481-487.

Li J X, Shi Z M, Zheng L, et al. Evaluation on potential ecological risk of heavy metals pollution in sediments from Tuojiang Drainage [J]. Earth and Environment, 2010,38(4):481-487.

- [3] 肖冬冬,史正涛,苏斌,等. 滇池宝象河表层沉积物重金属含量空间分布特征及污染评价[J]. 环境化学,2017,36(12):2719-2728.

Xiao D D, Shi Z T, Su B, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in surface sediment of Baoxiang River, Dianchi Lake [J]. Environmental Chemistry, 2017,36(12):2719-2728.

- [4] Zoumis T, Schmidt A, Grigorova L, et al. Contaminants in sediments: Remobilization and demobilization [J]. Science of The Total Environment, 2001,266:195-202.

- [5] Liu Y, Huang H, Sun T, et al. Comprehensive risk assessment and source apportionment of heavy metal contamination in the surface sediment of the Yangtze River Anqing Section, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2018,77:493.

- [6] Enuneku A, Omoruyi O, Tongo I, et al. Evaluating the potential health risks of heavy metal pollution in sediment and selected benthic fauna of Benin River, southern Nigeria [J]. Applied Water Science, 2018,8(8):1-13.

- [7] 张杰,郭西亚,曾野,等. 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估[J]. 环境科学,2019,40(5):2202-2210.

Zhang J, Guo X Y, Zeng Y, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments from Lake Taihu Basin [J]. Environmental Science, 2019,40(5):2202-2210.

- [8] Abuduwaiji J, Zhang Z Y, Jiang F Q. Assessment of the distribution, sources and potential ecological risk of heavy metals in the dry surface sediment of Aibi Lake in northwest China [J]. PLOS One, 2015,10(3):1-16.

- [9] 田建民,徐争启,张富贵,等. 四川雷波磷矿区沉积物重金属污染特征研究[J]. 环境科学与技术,2020,43(11):59-68.

Tian J M, Xu Z Q, Zhang F G, et al. Pollution characteristics of heavy metals in sediments of Leibo phosphate mine area, Sichuan Province [J]. Environmental Science & Technology, 2020,43(11):59-68.

- [10] Hong W J, Jia H L, Li Y F, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and alkylated PAHs in the

coastal seawater, surface sediment and oyster from Dalian, northeast China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*,2016,128:11 – 20.

[11] Ke X,Gui S F,Huang H,et al. Ecological risk assess – ment and source identification for heavy metals in surface sediment from the Liaohe River protected area, China[J]. *Chemosphere*,2017,175:473 – 481.

[12] 马晗宇,申月芳,应耀明,等. 独流减河湿地沉积物中多环芳烃生态风险评价[J]. *环境化学*,2020,39(8): 2253 – 2262.

Ma H Y, Shen Y F, Ying Y M, et al. Ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of Duliujian River Wetland [J]. *Environmental Chemistry*,2020,39(8):2253 – 2262.

[13] 尚文郁,谢曼曼,王淑贤,等. 应用近红外光谱法研究泻湖湿地沉积物重金属活动态特征及生态风险评价 [J]. *岩矿测试*,2020,39(4):597 – 608.

Shang W Y, Xie M M, Wang S X, et al. Detection of heavy metals mobile fraction in Lagoonal wetland sediment using near – infrared spectroscopy and ecological risk assessment [J]. *Rock and Mineral Analysis*,2020,39(4):597 – 608.

[14] Ayari J, Barbieri M, Agan Y, et al. Trace element contam – ination in the mine – affected stream sediments of Oued Rarai in north – western Tunisia: A river basin scale assessment [J]. *Environmental Geochemistry and Health*,2021,doi:10. 1007/S10653 – 021 – 00887 – 1.

[15] Yuan Z, He N, Wu X, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban stream sediments of Suzhou Industrial Park, an emerging eco – industrial park in China: Occurrence, sources and potential risk [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 214:112095.

[16] 张塞,于扬,王登红,等. 赣南离子吸附型稀土矿区土壤重金属形态分布特征及生态风险评价[J]. *岩矿测试*,2020,39(5):726 – 738.

Zhang S, Yu Y, Wang D H, et al. Forms distribution of heavy metals and their ecological risk evalution in soils of ion adsorption type in the rare earth mining area of southern Jiangxi, China [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2020,39(5):726 – 738.

[17] 沈小明,吕爱娟,沈加林,等. 长江口启东—崇明岛航道沉积物中多环芳烃分布来源及生态风险评价[J]. *岩矿测试*,2014,33(3):379 – 385.

Shen X M, Lv A J, Shen J L, et al. Distribution characteristics, sources and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in waterway sediments from Qidong and Chongming Island of Yangtze River Estuary [J]. *Rock and Mineral Analysis*,2014,33(3): 379 – 385.

[18] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. *GeoJournal*,1969,2:108 – 118.

[19] Zhao H, Zhao J, Yin C, et al. Index models to evaluate the potential metal pollution contribution from washoff of road – deposited sediment [J]. *Water Research*, 2014, 50:71 – 79.

[20] Hankanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control—A sediment ecological approach [J]. *Water Research*,1980,14(8):975 – 1001.

[21] Ingersoll C G, Macdonald D, Wang N, et al. Predictions of sediment toxicity using consensus – based freshwater sediment quality guidelines [J]. *Achieves of Environmental Contamination and Toxicology*,2001,41: 8 – 21.

[22] Field L J, MacDonald D D, Norton S B, et al. Evaluating sediment chemistry and toxicity data using logistic regression modeling [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*,1999,18(6):1311 – 1322.

[23] Field L J, MacDonald D D, Norton S B, et al. Predicting amphipod toxicity from sediment chemistry using logistic regression models [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*,2002,21(9):1993 – 2005.

[24] Forstner U, Wittmann G T W 著. 王忠玉,姚重华译. 水环境的重金属污染 [M]. 北京:海洋出版社,1987.

Forstner U, Wittmann G T W (Editors). Wang Z Y, Yao Z H (Translators). *Metal pollution in the aquatic environment* [M]. Beijing:China Ocean Press,1987.

[25] 迟清华,鄢明才. 应用地球化学元素丰度数据手册 [M]. 北京:地质出版社,1987.

Chi Q H, Yan M C. *Handbook of applied geochemical element abundance data* [M]. Beijing: Geological Publishing House,1987.

[26] 黎彤. 中国陆壳及其沉积层和上陆壳的化学元素丰度 [J]. *地球化学*,1994,23(2):140 – 145.

Li T. Element abundances of China’s continental crust and its sedimentary layer and upper continental crust [J]. *Geochimica*,1994,23(2):140 – 145.

[27] 史长义,梁萌,冯斌. 中国水系沉积物 39 种元素系列背景值 [J]. *地球科学*,2016,41(2):235 – 251.

Shi C Y, Liang M, Feng B. Average background values of 39 chemical elements in stream sediments of China [J]. *Earth Science*,2016,41(2):235 – 251.

- [28] 程志中,谢学锦,潘含江,等. 中国南方地区水系沉积物中元素丰度[J]. 地学前缘, 2011, 18(5): 289–295.
Cheng Z Z, Xie X J, Pan H J, et al. Abundance of elements in stream sediment in South China[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(5): 289–295.
- [29] 宁增平,蓝小龙,黄正玉,等. 贺江水系沉积物重金属空间分布特征、来源及潜在生态风险[J]. 中国环境科学, 2017, 37(8): 3036–3047.
Ning Z P, Lan X L, Huang Z Y, et al. Spatial distribution characteristics, sources and potential ecological risk of heavy metals in sediments of Hejiang River[J]. China Environmental Science, 2017, 37(8): 3036–3047.
- [30] Long E R, Macdonald D D, Smith S L, et al. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments[J]. Environmental Management, 1995, 19(1): 81–97.
- [31] 杜耘. 保护长江生态环境, 统筹流域绿色发展[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(2): 171–179.
Du Y. Protecting the eco-environment, and striving for the green development in the Yangtze River Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(2): 171–179.
- [32] 李亚东. 昆明幅 G-48-25 1/20 万地球化学图说明书: 水系沉积物测量[D]. 昆明: 云南省地质矿产勘查开发局, 1989.
Li Y D. Kunming sheet G-48-25 1: 200000 geochemical map manual: Water system sediment survey [D]. Kunming: Yunnan Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 1989.
- [33] 曹其林. 昆明幅 G-48-25 1/20 万区域水文地质普查报告[D]. 昆明: 云南省地质局水文工程地质公司, 1977.
Cao Q L. Kunming sheet G-48-25 1: 200000 regional hydrogeological survey report [D]. Kunming: Hydrological Engineering Geology Company of Yunnan Geology Bureau, 1977.
- [34] 张丽,段云龙,字润祥,等. 螳螂川河流磷、氟污染与防治对策分析研究[J]. 环境科学导刊, 2015, 34(6): 31–35.
Zhang L, Duan Y L, Zi R X, et al. Study on phosphorus and fluorine pollution and control in Tanglangchuan River[J]. Environmental Science Survey, 2015, 34(6): 31–35.
- [35] Wilding L P. Spatial variability: Its documentation, accommodation and implication to soil surveys[M]// Wageningen. Soil spatial variability. 1985.
- [36] 邵晓华. 云南滇池底泥重金属元素分布规律研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2003.
Shao X H. Study on the distribution of heavy metal elements in sediment of Dianchi Lake, Yunnan [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2003.
- [37] 肖冬冬. 滇池宝象河表层沉积物重金属特征及潜在生态风险评价[D]. 昆明: 云南师范大学, 2018.
Xiao D D. Characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Baoxiang River, Dianchi [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2018.
- [38] 熊燕,宁增平,刘意章,等. 南盘江流域(云南段)水系沉积物中重金属含量分布特征及其污染状况评价[J]. 地球与环境, 2017, 45(2): 171–178.
Xiong Y, Ning Z P, Liu Y Z, et al. Distribution and pollution evaluation of heavy metals in sediments in the Nanpan River Basin (Yunnan Section) [J]. Earth and Environment, 2017, 45(2): 171–178.
- [39] 王丹. 长江上游(宜宾至泸州段)毒害污染物分布特征及风险评价——以重金属和多环芳烃为例[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2016.
Wang D. Pollution characteristics and risk of persistent toxic substances from Yangtze River (Yibin to Luzhou)—A case study for heavy metal and polycyclic aromatic hydrocarbons [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2016.
- [40] 孙洁. 岷江中游水系沉积物中重金属的环境地球化学评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2010.
Sun J. Environmental geochemistry evolution of heavy metal elements in sediments from middle reaches of Minjiang River [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.
- [41] 郭威. 三峡库区低水运行期表层沉积物重金属污染特征研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2016.
Guo W. Study on heavy metals pollution of sediments in the Three Gorges Reservoir during its operating period with low water level [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2016.
- [42] 李利荣,王艳丽,高璟赞,等. 中国表层水体沉积物中多环芳烃源解析及评价[J]. 中国环境监测, 2013, 29(6): 92–98.
Li L R, Wang Y L, Gao J Y, et al. Source and risk assessment of PAHs in surface sediments from rivers and lakes of China [J]. Environmental Monitoring in China,

2013,29(6):92–98.

[43] 詹咏,韦婷婷,叶汇彬,等. 三亚河沉积物 PAHS 和 PCBs 的分布、来源及风险评价[J]. 环境科学,2020, dio:10.13227/j.hjxx.202008267.

Zhan Y,Wei T T,Ye H B,et al. Distribution,sources, and ecological risk evolution of the PAHs and PCBs in the sediments from Sanya River[J]. Environmental Science,2020,dio:10.13227/j.hjxx.202008267.

[44] 王喆,卢丽,裴建国. 城郊型地下河表层沉积物多环芳烃来源分析与生态风险评价[J]. 环境化学,2020, 39(10):2733–2741.

Wang Z,Lu L,Pei J G. Source analysis and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments from suburban type underground river[J]. Environmental Chemistry,2020,39(10):2733–2741.

[45] 高秋生,焦立新,杨柳,等. 白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估[J]. 环境科学,2018,39 (4):1616–1627.

Gao Q S,Jiao L X,Yang L,et al. Occurrence and ecological risk assessment of typical persistent organic pollutants in Baiyangdian Lake[J]. Environmental Science,2018,39(4):1616–1627.

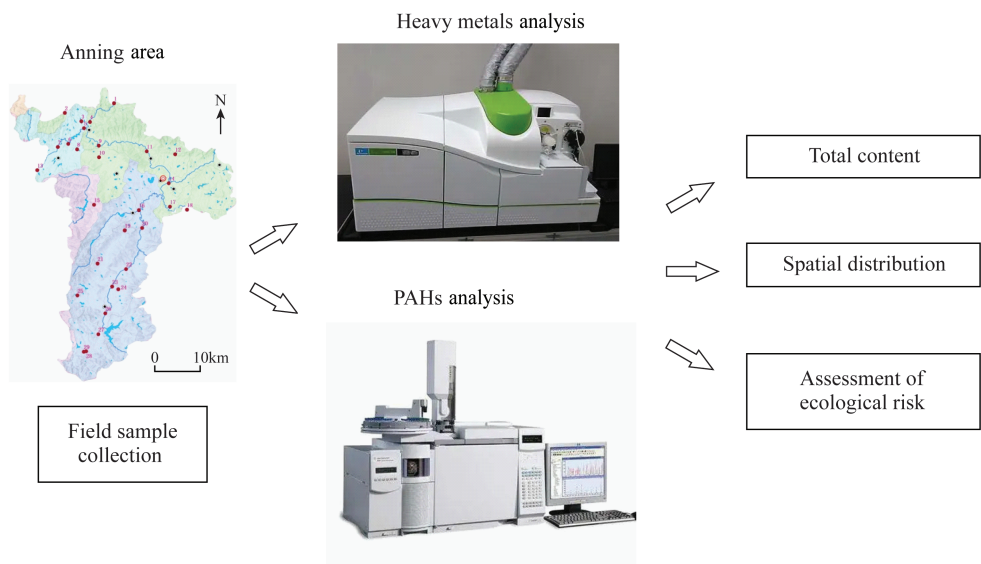
Pollution Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the River Sediments in Anning, Yunnan Province

FAN Chen – zi¹, LIU Yong – bing¹, ZHAO Wen – bo¹, LIU Cheng – hai¹, YUAN Ji – hai¹, GUO Wei¹, HAO Nai – xuan²

- (1. National Research Center for Geoanalysis; Key Laboratory of Micro – and Element Forms Analysis, China Geological Survey, Beijing 100037, China;
2. School of Materials Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

HIGHLIGHTS

- (1) The heavy metals in Anning sediments exhibit high concentrations and are unevenly distributed, and Cd, Hg, and As have high ecological risks.
- (2) The average content of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the sediments is high, and the combustion of petroleum fuels is the main source.
- (3) The potential risks of pollutants are concentrated in the vicinity of iron and steel, chemicals industries, and other factories that mine along the Tanglangchuang River.



ABSTRACT

BACKGROUND: Anning is an important industrial and mining city in the upper reaches of the Yangtze River Economic Belt. It is a fulcrum for economic development and ecological civilization construction in the Central Yunnan New Area. The investigation of geochemical water system sediments and hydrogeology in the Anning area was last performed in the 1970s and the 1980s. In recent years, the impact of human production and life on the ecological environment remains unclear.

OBJECTIVES: Surface sediment samples from the Anning area were investigated to reveal their pollution status, spatial distribution characteristics, and potential ecological risks of river sediments.

METHODS: X – ray fluorescence spectroscopy, inductively coupled plasma optical mass spectrometry, gas chromatography – mass spectrometry, and other methods were used to systematically analyze the contents and distribution characteristics of major elements, trace elements, and 16 priority – controlled PAHs. Geoaccumulation index, Hankanson ecological risk index, and sediment quality criteria were used to assess the ecological risk of eight typical heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn, Pb, and Hg) and PAHs.

RESULTS: Results showed that the heavy metal content in the river sediments from the Anning area was higher than the background values of the national and southern rivers. The spatial distributions of the heavy metals were highly variable and uneven. Additionally, Cd, Hg, and Ad showed medium to severe potential ecological risks. The average content of $\sum$ PAHs was 20856ng/g, and the detection rate of the 16 monomers was ~100%. The overall ecological risk of PAHs was low, and their main sources were petrochemical industry and combustion of petroleum fuels. The major risks of pollutants in the river sediments of the Anning area were mainly concentrated in the vicinity of steel plants and chemical factories in the Tanglangchuan River.

CONCLUSIONS: This research provides a scientific basis for local governments to strengthen key industrial point source pollution control, and reduce and control industrial sewage discharge.

KEY WORDS: Anning area; surface sediments; heavy metals; PAHs; X – ray fluorescence spectrometry; inductively coupled plasma – mass spectrometry; gas chromatography – mass spectrometry; ecological risk