

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017121801

叶宏萌, 袁旭音, 李国平, 等. 闽北建溪流域表层沉积物营养元素分布特征及生态风险评价[J]. 环境化学, 2018, 37(11): 2481-2488.

YE Hongmeng, YUAN Xuyin, LI Guoping, et al. Distribution and ecological risk assessment of nutrient elements in surface sediments of Jianxi Watershed in northern Fujian[J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(11): 2481-2488.

闽北建溪流域表层沉积物营养元素分布特征及生态风险评价*

叶宏萌^{1,2} 袁旭音^{1,2**} 李国平¹ 万杰² 徐健²

(1. 福建省生态产业绿色技术重点实验室, 武夷学院生态与资源工程学院, 武夷山, 354300;

2. 河海大学环境学院, 南京, 210098)

摘 要 为了解闽江上游流域沉积物环境的现状, 本文研究闽北建溪流域表层沉积物中营养元素的分布特征及生态风险, 描述了表层沉积物中有机碳(TOC)、总氮(TN)和总磷(TP)的含量分布, 运用单因子指数法进行生态风险评价, 并分析碳、氮、磷的比例, 阐述其相关关系及其环境意义. 结果表明, 沉积物中 TOC、TN 和 TP 的含量均值分别为 3.05%、1858.05 mg·kg⁻¹ 和 624.68 mg·kg⁻¹, 对多数底栖生物处于安全范围; TOC 的单因子污染指数范围为 2.0—5.8, TN 污染指数范围为 2.3—4.4, TP 指数范围则为 0.4—1.7, 具有潜在的生态风险; 沉积物营养元素比值中 TOC/TN 均值为 16.9, TOC/TP 均值为 53.7, TN/TP 均值为 3.2, 表明建溪流域沉积物营养元素受内、外源共同输入影响, 且以外源作用为主导, 其中林地营养物质输出是沉积物营养累积的主要原因之一. 总体而言, 建溪流域沉积物 TN 的生态风险较高且主要受流域面源排放影响, TOC 与 TP 的生态风险较低. 因此, 应着重加强流域氮素面源污染调查并对重点污染源加以严控, 减轻流域总氮的生态风险.

关键词 营养元素, 表层沉积物, 生态风险, 建溪流域, 闽江上游.

Distribution and ecological risk assessment of nutrient elements in surface sediments of Jianxi Watershed in northern Fujian

YE Hongmeng^{1,2} YUAN Xuyin^{1,2**} LI Guoping¹ WAN Jie² XU Jian²

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Eco-Industrial Green Technology, College of Ecology and Resource Engineering of Wuyi University, Wuyishan, 354300, China; 2. College of Environmental, Hohai University, Nanjing, 210098, China)

Abstract: This study investigated the distribution and ecological risk of nutrient elements in the surface sediments of Jianxi watershed in northern Fujian in order to clarify the sediment environmental status of the upperstream of Minjiang River. The contents of organic carbon (TOC), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in the surface sediments were considered, and the single factor pollution index was employed in the risk assessment of sediment environment. The interrelations of carbon, nitrogen, and phosphorus in sediments and their environmental significance were also discussed. The results showed that the average concentrations of TOC, TN and TP in the sediments were 3.05 %, 1858.05 mg·kg⁻¹ and 624.68 mg·kg⁻¹, respectively, which are considered as harmless for most of aquatic organism. There were some potential ecological risks for benthonic

2017 年 12 月 18 日收稿 (Received: December 18, 2017).

* 国家自然科学基金(41372354), 福建省教育厅 A 类科技项目(JAT170591) 和南平市重点科技计划项目(N2017T02)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (41372354), A Project of Fujian Provincial Department of Education ((JAT170591) and Key Science and Technology Program of Nanping City(N2017T02).

** 通讯联系人, Tel: 13951708506, E-mail: xxy_hjy@hhu.edu.cn

Corresponding author, Tel: 13951708506, E-mail: xxy_hjy@hhu.edu.cn

organism with 2.0—5.8 of TOC, 2.3—4.4 of TN and 0.4—1.7 of TP using the ranges of single factor pollution index. In addition, the average values of elemental ratios (TOC/TN was 16.9, TOC/TP was 53.7 and TN/TP was 3.2) indicated that nutrient elements in the sediments of Jianxi watershed were affected by the exogenous and endogenous inputs. The output of nutrients from forestland was a main reason for the accumulation of nutrients in the river sediments. Overall, TN in the sediments of Jianxi watershed showed the highest ecological risk for aquatic organism and was mainly affected by non-point sources in the watershed, but TOC and TP in the sediments only exhibited slight risks. Therefore, it is urgent to implement the investigation of the nitrogen pollution sources and strictly control these pollution sources so as to reduce the ecological risk of nitrogen in Jianxi watershed.

Keywords: nutrient element, surface sediments, ecological risk, Jianxi watershed, upstream of Minjiang River.

水体颗粒物的两大来源为内源性和外源性输入,悬浮态的水体颗粒物沉降到水底后,其反映的环境信息也保存在沉积记录中,故利用沉积物中生源要素(碳、氮、磷等)指标可指示水体环境中初级生产力、营养水平、物质来源等方面的变化^[1-3].研究表明,在外源输入逐渐得到控制的情况下,积累在沉积物中的营养元素能通过界面特性改变、形态变化而释放,在一定程度上发挥着营养源(内源)的作用,进而形成水体的富营养化^[3-4],沉积物既是污染物的“汇”,也是污染物的“源”.因此,沉积物作为持久污染物的存贮器,研究其营养元素含量及生态风险评价对控制水体营养化和生态系统修复有重要的指导意义^[2,5].

近年来,随着水体富营养化成为水环境最重要的问题之一,水体沉积物的研究也越来越受学术界的重视^[5-6].目前,对沉积物营养元素时空分布特征的研究主要集中于海湾、湖泊、水库、河口等相对宽广的水域,针对小流域的对比研究不多,尤其是流域上游地区的报道较少^[2,7].河流上游作为源区,对流域营养元素的运输起着重要作用,因此,加强流域上游的河流沉积物营养元素含量分布研究与生态风险评价,这对流域水体生态环境的保护是极为关键的.

闽江是福建省最大河流,目前水系水质已有恶化趋势^[8-9],而有关该流域水体沉积物营养元素状况研究主要集中于下游的河口区域^[9-10],上游流域较少^[2,11].建溪流域是闽江上游等三大溪中最大的溪流,近年来水质由贫营养状态向中营养化发展,但有关沉积物营养状况分布与生态风险评价的报道却鲜见^[2].鉴此,文中展开建溪流域表层沉积物营养元素分布特征研究,评价营养元素生态风险,并分析碳、氮、磷之间的比例、相关关系及其环境意义,以期为全面评价该流域沉积环境营养状况,促进流域水体生态环境保护与恢复提供参考依据.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 研究区域概况

建溪流域位于福建省南平地区,总面积为 16396 km²,约占闽江流域总面积的 27%,包括武夷山、建阳、浦城、松溪、政和、建瓯、南平等 7 个县市.该流域为亚热带季风气候区,年均降雨量 1600—2000 mm.建溪是一个树枝状水系,由崇阳溪、南浦溪和松溪三大水源组成,全长 294 km,年均径流量为 155.9 亿 m³,年均输沙量为 158 万吨,河道平均坡降 0.8‰.根据南平各县市区 2015 年统计年鉴,该流域人口总计约 157.3 万人,人口密度约 95 人·km⁻².近 10 年来,流域国内总产值处于持续稳步增长中,从种植业为主的传统农业向农业、林业、牧业和渔业全面发展.流域内土地利用类型较为齐全,主要以林地和农业用地为主,其次为城镇用地和其他类型.土壤类型以花岗岩和砂质岩形成的红壤、黄壤和水稻土为主.

1.2 样品采集

2016 年 10 月(旱季),对建溪流域村庄内供水和排水系统进行调查,并综合考虑河流排污口、沿岸

村庄、企业等分布状况,避开重要闸坝、排污口,在河流两岸沿线基本等距离设置沉积物取样点.为防止样品采集的随机性和偶然性,沉积物样品采集时,在每个固定取样点近岸沿河流方向 30 m 长度范围内,用 DXCN-3821 加重型彼得森抓斗式采样器随机采集 5 处 0—10 cm 深度的表层沉积物混合为一个样品,共采集 23 个样品,分布见图 1.其中,采样点编号 1 至 6 为崇阳溪样品;7 至 12 为南浦溪样品;13 至 18 为松溪样品;19 至 23 为建溪干流的样品.

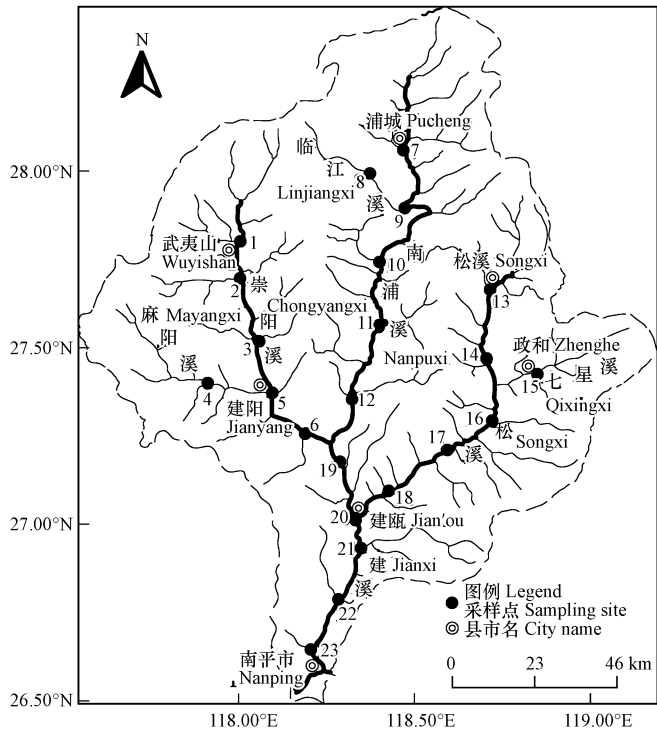


图 1 建溪流域采样点位置示意图
Fig.1 Sampling sites in Jianxi watershed

1.3 样品处理与测试

将采集的沉积物样品去除大块的植物残体和石块后,分别装入清洁的聚乙烯可密封塑料袋中并标记编号,运回实验室.样品置于干净、阴凉通风的试验台上自然风干后,用木棍压碎碾磨,进一步剔除砾石、贝壳、杂草等杂质,再以四分法选取一定量的沉积物样品于玛瑙研钵中轻轻研磨并过 100 目尼龙筛,筛下样保存备用.

沉积物样品基本性质测定包括 pH、粒度、有机碳(TOC)、总氮(TN)、总磷(TP),其中 pH 采用电极法(土:水=1:2.5),粒度使用英国马尔文仪器公司的 Mastersizer2000 型激光粒度仪,营养成分中有机碳(TOC)采用重铬酸钾容量法,总氮(TN)采用过硫酸钾氧化法,总磷(TP)的测定采用硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法^[2,7].为了保证实验结果的精度,上述实验过程均取 3 组平行样品进行重复实验,所得结果的相对偏差小于 5%,取 3 组实验的均值为实测统计值.

1.4 生态风险评价方法

目前国内外对河流沉积物中有机质、总氮、总磷等营养元素的生态风险评价暂无统一的标准和方法,国内外应用较为广泛的是基于加拿大安大略省环境和能源部(1992 年)制定的环境质量评价指南标准进行的单因子污染指数评价法,这个方法简明直观,已为国内多个研究所采用^[9,12-13].

关系式表达为:

$$P_i = C_i / C_s$$

式中, P_i 为单项评价指数或标准指数, C_i 为评价因子*i*的实测值; C_s 为评价因子*i*的评价标准值(采用加拿大安大略省制定的环境质量评价标准中的安全级的营养水平:TOC、TN、TP 浓度限值分别为 1%, 550 mg·kg⁻¹和 600 mg·kg⁻¹).一般按照指数值 P_i 的大小将评价风险等级结果分为四级:Ⅰ级表示清洁($P_{TOC} < 1, P_{TN} < 1, P_{TP} < 0.5$);Ⅱ级表示轻度污染($1 \leq P_{TOC} < 5, 1 \leq P_{TN} < 2, 0.5 \leq P_{TP} < 1$);Ⅲ级表示中度污

染 ($5 \leq P_{\text{TOC}} < 10, 2 \leq P_{\text{TN}} < 3, 1 \leq P_{\text{TP}} < 1.5$); IV 级表示重度污染 ($10 \leq P_{\text{TOC}}, 3 \leq P_{\text{TN}}, 1.5 \leq P_{\text{TP}}$)^[9].

1.5 数据处理

沉积物营养元素含量的描述性统计分析和相关关系采用统计软件 IBM SPSS Statistics 20.0 进行, 采样图绘制采用 CorelDRAW 软件完成.

2 结果与讨论 (Result and discussion)

2.1 沉积物营养元素含量分布特征

沉积物基本理化测试结果表明, 建溪流域沉积物整体 pH 值范围为 4.50—6.30, 为酸性. 这与我国南方土壤整体呈酸性趋势一致. 粒径分布的均值情况为: 黏粒 ($< 0.002 \text{ mm}$) 占 4.36%, 粉粒 ($0.02—0.002 \text{ mm}$) 为 64.50%, 砂粒 ($2—0.02 \text{ mm}$) 为 31.18%, 整体粉砂级颗粒含量较高, 与当地林地覆盖率高及土壤类型以砂质岩和花岗岩为主有关^[2].

表 1 汇总了建溪干流、三大支流及整体河流的沉积物营养元素含量数据. 从各河流沉积物营养元素含量分布来看, TOC 平均值大小分布顺序为: 崇阳溪 > 南浦溪 > 松溪 > 建溪干流; TN 分布为: 松溪 > 南浦溪 > 建溪干流 > 崇阳溪; TP 分布为: 建溪干流 > 松溪 > 南浦溪 > 崇阳溪. 其中, 崇阳溪的 TOC 含量相对最高, 但 TN 与 TP 却相对最低, 可见沉积物不同营养元素的分布在各河流不尽一致. 这与不同流域差异的土壤分布类型、土地利用类型、生态景观布局、人口数量和密度、城镇建设规模、工农业发达程度、河岸带植被分布及水体自身理化特性等综合因素有关^[2, 13–16], 值得今后进一步加深研究.

整体而言, 建溪流域沉积物 TOC、TN 和 TP 的含量范围依次为: 1.96%—5.75%, 1268.70—2421.17 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 264.01—1045.40 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 对应均值为 3.05%、1858.05 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 624.68 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 各元素均值皆超出了加拿大安大略省制定的环境质量评价标准对应的安全级浓度限值, 但最大值仍在其规定的最低级别范围 (TOC、TN、TP 浓度分别为 1%—10%, 550—4800 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 600—2000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 内, 表示该流域沉积物已受营养元素 (碳、氮、磷) 污染, 但多数底栖生物仍可承受^[9, 13].

表 1 建溪流域沉积物营养元素含量分布
Table 1 Distribution of the nutrient elements in sediments from Jianxi watershed

河流名称 River name	项目 Item	最大值 Max.	最小值 Min.	平均值 Mean	标准差 SD	CV/%
崇阳溪 Chongyangxi	TOC/%	5.66	2.41	3.63	1.21	33.2
	TN/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	2310.57	1268.70	1768.68	386.82	21.9
	TP/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	891.59	382.85	510.32	173.76	34.1
南浦溪 Nanpuxi	TOC/%	5.75	2.10	3.43	1.18	34.5
	TN/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	2421.17	1307.06	1913.90	446.17	23.4
	TP/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	823.65	264.01	653.51	197.10	30.2
松溪 Songxi	TOC/%	3.45	1.96	2.63	0.50	19.1
	TN/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	2407.95	1381.32	1924.08	327.52	17.0
	TP/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1045.40	500.56	670.37	192.67	28.7
建溪 Jianxi	TOC/%	2.70	2.04	2.41	0.24	10.0
	TN/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	2173.58	1609.10	1819.05	219.36	12.1
	TP/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	935.54	405.27	672.49	195.20	29.0
整体 Total	TOC/%	5.75	1.96	3.05	1.04	34.1
	TN/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	2421.17	1268.70	1858.05	365.75	19.7
	TP/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1045.40	264.01	624.68	201.61	32.3

已有研究报道, 闽江河口湿地沉积物 TOC、TN 和 TP 的含量范围依次为: 2.09%—2.73%, 1564.24—1808.15 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 607.91—807.60 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 对应均值为 2.43%、1686.00 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 726.29 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[9]. 相比而言, 建溪流域沉积物中营养元素含量范围变动幅度更大, 这一定程度上与采样点分布范围更广有关; TOC、TN 含量均值高于闽江河口沉积物 TOC、TN 均值, 但 TP 均值低于后者 TP 均值, 这很可能与两个研究区差异的土地利用方式及人类活动力度有关. 其中, 建溪流域的森林覆盖率达 77.4%, 比福建

省平均水平高 11.4%;而闽江河口是中国东南沿海最具代表性的开放性河口^[9],城镇人口密度更高,人类活动力度更为强烈.研究表明,TOC 和 TN 在不同土地利用类型的土壤中含量大小排序为:林地>草地>耕地>城镇^[15],TP 则在林地含量最少,城镇用地最高^[16];且土壤粒径分布差异显著,粒径大小排序为:林地、草地>岸边土(例如耕地、菜地等混合用地)>城镇用地^[17].因此,建溪整体流域以林地为主,土壤 TOC 和 TN 含量普遍较高,TP 较低;同时,建溪流域林地土壤输出的颗粒物较粗,吸附磷能力较弱,故流失进入河流的总磷含量也要相对其他土地利用类型少,而闽江河口流域则情况相反.

2.2 沉积物营养元素生态风险评价

为进一步定量分析和评价建溪流域沉积物营养元素生态风险,对研究区沉积物采样点进行了单因子污染指数计算,结果见表 2.由表 2 可知,TOC 的单因子污染指数范围为 2.0—5.8,其中,除了崇阳溪和南浦溪各有 1 个沉积物样品 TOC 的单因子污染风险等级为Ⅲ级,其他样点为Ⅱ级(Ⅱ级为轻度污染,其样品数占总样品数约 91%),基本为轻度污染.据研究表明,闽江河口沉积物中 TOC 的污染指数介于 2.2—2.7,样品全在Ⅱ级范围内^[9].相比而言,闽江上游建溪流域沉积物 TOC 相对下游河口累积程度更高,可能与该地区掉落的植物碎片腐烂有关.

表 2 建溪流域沉积物营养元素生态风险评价
Table 2 Ecological risk assessment of the nutrient elements in sediments from Jianxi watershed

河流名称 River Name	样点编号 Sampling No.	TOC		TN		TP	
		P_i	风险等级 Risk level	P_i	风险等级 Risk level	P_i	风险等级 Risk level
崇阳溪 Chongyangxi	1	5.7	Ⅲ	3.9	Ⅳ	0.6	Ⅱ
	2	3.0	Ⅱ	3.5	Ⅳ	0.8	Ⅱ
	3	2.4	Ⅱ	2.3	Ⅲ	0.7	Ⅱ
	4	4.9	Ⅱ	2.9	Ⅲ	0.8	Ⅱ
	5	3.3	Ⅱ	4.2	Ⅳ	1.5	Ⅲ
	6	2.6	Ⅱ	2.5	Ⅲ	0.7	Ⅱ
南浦溪 Nanpuxi	7	3.6	Ⅱ	4.4	Ⅳ	1.2	Ⅲ
	8	2.1	Ⅱ	2.4	Ⅲ	0.4	Ⅱ
	9	5.8	Ⅲ	3.5	Ⅳ	1.4	Ⅲ
	10	3.3	Ⅱ	2.5	Ⅲ	1.3	Ⅲ
	11	2.3	Ⅱ	3.8	Ⅳ	0.9	Ⅱ
	12	3.5	Ⅱ	4.4	Ⅳ	1.3	Ⅲ
松溪 Songxi	13	2.3	Ⅱ	4.4	Ⅳ	0.8	Ⅱ
	14	3.1	Ⅱ	2.5	Ⅲ	1.0	Ⅲ
	15	2.4	Ⅱ	4.0	Ⅳ	1.0	Ⅲ
	16	2.0	Ⅱ	3.4	Ⅳ	0.9	Ⅱ
	17	2.5	Ⅱ	3.6	Ⅳ	1.3	Ⅲ
	18	3.5	Ⅱ	3.1	Ⅳ	1.7	Ⅲ
建溪 Jianxi	19	2.4	Ⅱ	3.0	Ⅳ	1.4	Ⅲ
	20	2.7	Ⅱ	3.6	Ⅳ	0.8	Ⅱ
	21	2.3	Ⅱ	3.0	Ⅳ	1.2	Ⅲ
	22	2.7	Ⅱ	4.0	Ⅳ	1.6	Ⅲ
	23	2.0	Ⅱ	2.9	Ⅲ	0.7	Ⅱ

TN 污染指数介于 2.3—4.4,在各河流都达到Ⅲ或Ⅳ的风险等级,其中Ⅲ级样品数约占总样品数的 30%,Ⅳ级近占 70%,说明该流域生态系统受氮的污染严重.这与闽江河口沉积物 TN 的风险评价结果(污染指数介于 2.8—3.3,为Ⅲ或Ⅳ级)较相符^[11],也反映出闽江流域 TN 污染风险普遍较高.其中,中上游以农田水土(养分)流失、水产养殖和畜禽粪尿为农业面源污染的主要污染源(占全流域污染率的 87.7%),最为首要污染的是农田养分流失占 45.8%^[8].故应严控该流域化肥施加和流失量,加强农化物质投入优化技术研究,提高肥料利用率.此外,闽江流域大多数集约化养殖场集中分布于中上游,还应兼顾畜禽污染综合整治.

TP 指数范围则为 0.4—1.7,为Ⅱ或Ⅲ级的生态风险等级,其中 11 个样点为Ⅱ级风险,意味着约一半的沉积物样品的总磷浓度低于加拿大环境质量评价标准中安全级的浓度,即对水生生物不会发生中

毒效应.研究区沉积物 TP 污染指数要低于闽江河口(指数介于 1.0—1.4,皆为Ⅲ级)^[9],这与上文分析相一致.

整体而言,沉积物各营养元素生态风险评价等级分布在建溪各子流域中没有显著差异,但营养元素分布中 TN 的生态风险较高,TP、TOC 的风险较低.

2.3 沉积物营养元素比值分析

研究表明,营养元素比值的不同可以反映其差异性来源^[13,18],其中 TOC/TN 比值常被用来表征有机质的潜在输入源及生物种类的差别.细菌等微生物的 TOC/TN 值为 2—4,藻类为 4—10,浮游动物的 TOC/TN 值一般小于 7,浮游植物为 6—14,非纤维束植物为 4—12,含纤维束的植物碎屑的 TOC/TN 大于 20,高等陆生植物则一般为 20—160,大多数高等植物具有较高比值,通常可高达 50 以上^[12,18-21].综合而言,一般认为沉积物 TOC/TN >10 时,有机质以外源(陆源)为主;TOC/TN <10 时,以内源(水体自身)为主;TOC/TN ≈10 时,内、外源的有机质基本达到平衡状态^[18,22].

从表 3 可知,建溪流域不同河流沉积物 TOC/TN 平均值大小排序为:崇阳溪>南浦溪>松溪>建溪干流,这与上文各河流沉积物有机质均值大小排序一致,反映了 TOC / TN 比值的变化以有机质为主导作用.整体而言,TOC/TN 整体范围为 9.6—30.5,均值为 16.9,大于 10.由此可以推断,该流域沉积物有机质受内、外源共同输入影响,且以外源(陆源)作用为主导.该流域沉积物 TOC /TN 均值相对闽江河口湿地土壤(范围为 8.0—15.5,均值为 11.7)和沉积物(范围为 10.3—13.2,均值为 11.9)要高^[9-10],也高于全国土壤平均值 11.9^[23].由于 TOC /TN 比值越大,陆源输入的有机质成分越大^[13],因此外源为该流域水体沉积物有机质的主要来源.此外,该流域森林覆盖率高,但降雨量大且地形坡度大容易导致水土流失过程中林地高等植物的凋零物和植物残体等随雨水冲刷进入河流^[2,8],这是该流域沉积物营养元素累积和 TOC/TN 比值较高的重要原因之一.

表 3 沉积物中 TOC/TN、TOC/TP、TN/TP 比值
Table 3 Rate of of TOC/TN, TOC/TP, TN/TP in sediments

河流名称 River Name	项目 Item	最大值 Max.	最小值 Min.	平均值 Mean	标准差 SD	CV/%
崇阳溪 Chongyangxi	TOC/TN	30.5	14.3	20.8	5.9	28.3
	TOC/TP	147.7	37.2	78.0	36.3	46.5
	TN/TP	5.6	2.6	3.7	1.0	27.6
南浦溪 Nanpuxi	TOC/TN	30.0	11.3	18.5	6.5	35.0
	TOC/TP	79.5	42.6	54.9	14.6	26.6
	TN/TP	5.0	1.8	3.2	1.0	32.1
松溪 Songxi	TOC/TN	22.5	9.6	14.4	5.0	34.8
	TOC/TP	54.1	31.7	40.7	7.8	19.3
	TN/TP	4.8	1.6	3.1	1.1	33.8
建溪 Jianxi	TOC/TN	14.1	12.2	13.3	0.7	5.5
	TOC/TP	53.6	28.4	38.9	10.9	28.1
	TN/TP	4.0	2.1	2.9	0.8	28.8
整体 Total	TOC/TN	30.5	9.6	16.9	6.0	35.3
	TOC/TP	147.7	28.4	53.7	26.2	48.8
	TN/TP	5.6	1.6	3.2	1.0	31.7

TOC/TP 值在一定程度上能反映沉积物中有机碳和磷化合物的分解速率^[13].建溪流域不同河流沉积物 TOC/TP 均值大小排序同 TOC 含量排序,亦反映了该流域沉积物有机质主导着 TOC/TP 比值变化.整体而言,该流域沉积物 TOC / TP 比值范围为 28.4—147.7,均值为 53.7,远高于闽江河口湿地土壤(范围为 16.0—56.1,均值为 27.4)^[10];进一步反映了研究区以林地为主且城镇化低,流域土壤 TOC 含量较高,而 TP 含量较低.

TN/TP 通常为水中氮磷聚积、沉积以及沉积物溶出、释放两种动态过程的综合反映^[24].建溪流域不同河流沉积物 TN/TP 均值大小排序同 TOC/TN、TOC/TP 排序,反映了该流域沉积物营养元素比值受 TOC、TN 含量影响较大.该流域沉积物 TN/TP 范围为 1.6—5.6,均值为 3.2,高于闽江河口湿地土壤(范围为 1.5—4.2,均值为 2.3)^[10],这与上文分析的农田氮肥过剩、水产、畜禽养殖业较发达而城镇密度较低,导致 TN 含量较高,TP 较低的现象相符.

2.4 沉积物基本理化指标与营养元素的相关性分析

建溪流域沉积物基本理化指标与营养元素的相关性如表 4 所示.由表 4 可见,研究区域沉积物 TOC、TN 和 TP 的含量与沉积物 pH 值相关性极弱,说明研究区沉积物酸度波动不会引起营养元素含量的明显变化.但 TOC 与沉积物黏粒、粉粒呈显著负相关,与砂粒显著正相关.这与上文分析中,研究区林地分布较广,区域内土壤粒径较粗且有机碳含量高相一致^[15,17],再次说明了研究区土地利用方式对流域沉积物有机碳分布起主要决定作用.

建溪流域沉积物 TOC、TN 和 TP 之间的相关性较弱,很可能说明三者的主要来源仍存在差异.结合上文已有分析,可以推断流域土地利用方式主导着 TOC 含量,TN 含量则与研究区较为广泛存在的面源污染更为相关^[8,25];而 TP 含量更大程度受点源排放影响,与城镇人口密度和活动强度密切相关^[2,16,26].

表 4 沉积物基本理化指标与营养元素相关性分析 (n=23)

Table 4 Correlations analysis of basic physicochemical indicators and nutrients of sediments							
	pH	黏粒	粉砂	砂粒	TOC	TN	TP
pH	1.000						
黏粒	0.153	1.000					
粉砂	0.178	0.841 *	1.000				
砂粒	-0.178	-0.888 **	-0.996 *	1.000			
TOC	-0.064	-0.792 **	-0.460 *	0.528 **	1.000		
TN	0.255	-0.290	-0.279	0.288	0.169	1.000	
TP	-0.168	-0.395	-0.399	0.407	0.162	0.316	1.000

注: * P < 0.05; * * P < 0.01.

3 结论 (Conclusion)

(1) 建溪流域沉积物 TOC、TN 和 TP 的含量范围依次为 1.96%—5.75%,1268.70—2421.17 mg·kg⁻¹,264.01—1045.40 mg·kg⁻¹,对应元素平均值高于加拿大环境质量评价标准的安全级浓度值,但最大值仍在其规定的含量范围内,表示该流域沉积物虽存在碳、氮、磷富集现象,尚未影响底栖生物的生长.

(2) 沉积物 TOC 的单因子污染指数范围为 2.0—5.8,基本为轻度污染;TN 污染指数介于 2.3—4.4,污染较严重;TP 指数范围则为 0.4—1.7,部分具有潜在生态风险.各营养元素生态风险评价等级分布在建溪各子流域中没有显著差异,但营养元素分布中 TN 的生态风险较高,TP、TOC 的风险总体较低.因此,应注重控制该流域氮源的输入,减轻流域 TN 的生态风险.

(3) 营养元素比值分析表明,建溪流域沉积物有机质受内、外源共同输入影响,且以外源(陆源)作用为主导,其中林地营养物质输出是沉积物营养累积变化的主要原因.该流域沉积物营养元素的 TOC/TN、TOC/TP、TN/TP 比值和其 TOC 含量排序一致,反映了有机质与氮磷含量的变化关系密切.但三者的主要来源仍存在一定差异,其中林地覆盖率主导着 TOC 含量变化,TN 分布更大取决于较为严重的面源排放;而 TP 受城镇点源排放影响更为显著.

(4) 建溪流域位于闽江上游,其流域沉积环境营养状况影响和制约着中、下游乃至整个闽江水体水质.因此,今后有待加强该流域农田养分流失治理,推广农化物质投入的优化技术,兼顾畜禽污染综合整治,走生态农业之路,进一步研究流域沉积环境氮素的来源及对水环境的影响.

参考文献 (References)

[1] 于宇,宋金明,李学刚,等.沉积物生源要素对水体生态环境变化的指示意义[J].生态学报,2012,32(5):1623-1632.
YU Y,SONG J M,LI X G,et al. Indicative significance of biogenic elements to eco-environmental changes in waters[J]. Acta Ecologica Sinica,2012, 32(5): 1623-1632 (in Chinese).

[2] YE H M, YUAN X Y, ZHOU R, et al. Distribution and environmental significance of phosphorus forms in riparian soils and river sediments of Jianxi Basin, Fujian province[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2017, 26(5): 2331-2341.

[3] 杨洋,刘其根,胡忠军,等.太湖流域沉积物碳氮磷分布与污染评价[J].环境科学学报,2014,34(12):3057-3064.
YANG Y, LIU Q G,HU Z J,et al. Spatial distribution of sediment carbon, nitrogen and phosphorus and pollution evaluation of sediment in Taihu Lake Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(12): 3057-3064(in Chinese).

- [4] ZHANG W Q, JIN X, LIU D, et al. Temporal and spatial variation of nitrogen and phosphorus and eutrophication assessment for a typical arid river - Fuyang River in northern China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 55(5): 41-48.
- [5] NI Z, WANG S. Economic development influences on sediment-bound nitrogen and phosphorus accumulation of lakes in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(23): 18561-18573.
- [6] XIA X H, DONG J W, WANG M H, et al. Effect of water-sediment regulation of the Xiaolangdi reservoir on the concentrations, characteristics, and fluxes of suspended sediment and organic carbon in the Yellow River[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 571(7): 487-497.
- [7] 陈海龙, 袁旭音, 王欢, 等. 荇溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析[J]. *环境科学*, 2015, 32(6): 464-470.
CHEN H L, YUAN X Y, WANG H, et al. Distributions of phosphorus fractions in suspended sediments and surface sediments of Tiaoxi mainstreams and cause analysis[J]. *Environmental Science*, 2015, 32(6): 464-470 (in Chinese).
- [8] 陈超, 黄东风, 邱孝煊, 等. 闽江中上游流域农业面源污染调查评估及其防治技术探讨[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(增刊): 368-374.
CHEN C, HUANG D F, QIU X X, et al. Survey and evaluation of agricultural non-point source pollution and prevention-and-cure countermeasures in middle and upriver of Minjiang drainage area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Supplement): 368-374 (in Chinese).
- [9] 胡敏杰, 邹芳芳, 全川, 等. 闽江河口湿地沉积物生源要素含量及生态风险评价[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 119-124.
HU M J, ZOU F F, TONG C, et al. Contents and ecological risk assessment of biogenic elements in estuary wetland sediments of Min River[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3): 119-124 (in Chinese).
- [10] 胡敏杰, 任洪昌, 邹芳芳, 等. 闽江河口淡水、半咸水沼泽土壤碳氮磷分布及计量学特征[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(3): 917-926.
HU M J, REN H C, ZOU F F, et al. Spatiotemporal distribution and stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in surface soils of freshwater and brackish marshes in the Min River estuary[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(3): 917-926 (in Chinese).
- [11] 叶宏萌, 李国平, 袁旭音, 等. 山区性小流域水化学特征及物源贡献研究-以武夷山九曲溪流域为例[J]. *环境化学*, 2016, 35(3): 581-589.
YE H M, LI G P, YUAN X Y, et al. Hydro-chemical characteristics and source contribution for small mountainous basin: A case study in the Jiuxi basin, Wuyishan[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(3): 581-589 (in Chinese).
- [12] 黄廷林, 刘飞, 史建超. 水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价[J]. *环境科学*, 2016, 37(1): 166-172.
HUANG T L, LIU F, SHI J C. Distribution characteristics and pollution status evaluation of sediments nutrients in a drinking water reservoir[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(1): 166-172 (in Chinese).
- [13] 王亚平, 黄廷林, 周子振, 等. 金盆水库表层沉积物中营养盐分布特征与污染评价[J]. *环境化学*, 2017, 36(3): 659-665.
WANG Y P, HUANG T L, ZHOU Z Z, et al. Distribution and pollution evaluation of nutrients in surface sediments of Jinpen Reservoir[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(3): 659-665 (in Chinese).
- [14] 王朝旭, 祝贵兵, 王雨, 等. 岸边带湿地对富营养化河流的净化作用研究[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(1): 51-56.
WANG C X, ZHU G B, WANG Y, et al. The purification function of riparian wetlands on the eutrophicated river[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(1): 51-56 (in Chinese).
- [15] KHALEDIAN Y, KIANI F, EBRAHIMI S. The effect of land use change on soil and water quality in Northern Iran[J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, 9(6): 798-816.
- [16] WANG Z W, YANG S T, ZHAO C S, et al. Assessment of non-point source total phosphorus pollution from different land use and soil types in a mid-high latitude region of China[J]. *Water*, 2016, 8(11): 1-17.
- [17] MUKUNDAN R, RADCLIFFE D E, RITCHIE J C, et al. Sediment fingerprinting to determine the source of suspended sediment in a southern Piedmont stream[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1328-1337.
- [18] 张晓晶, 李畅游, 张生, 等. 乌梁素海表层沉积物营养盐的分布特征及环境意义[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(9): 1770-1776.
ZHANG X J, LI C Y, ZHANG S, et al. Distribution analysis of nutrient salt in the sediment of Lake Wulangsuhai with respect to its effects on the environment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(9): 1770-1776 (in Chinese).
- [19] MEYERS P. A preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter[J]. *Chemical Geology*, 1994, 114(3-4): 289-302.
- [20] 万国江, 白占国, 王浩然, 等. 洱海近代沉积物中碳-氮-硫-磷的地球化学记录[J]. *地球化学*, 2000, 29(2): 189-197.
WAN G J, BAI Z G, WANG H R, et al. The geochemical records of C-N-S-P in recent sediments of Lake Erhai, China[J]. *Geochimica*, 2000, 29(2): 189-197 (in Chinese).
- [21] D'ANGELO E M, REDDY K R. Diagenesis of organic matter in a wetland receiving hypereutrophic lake water: I. Distribution of dissolved nutrients in the soil and water column[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23(5): 928-936.
- [22] 冯峰, 王辉, 方涛, 等. 东湖沉积物中微生物量与碳、氮、磷的相关性[J]. *中国环境科学*, 2006, 26(3): 342-345.
FENG F, WANG H, FANG T, et al. The correlation between microbial biomass and carbon, nitrogen, phosphorus in the sediments of Donghu Lake[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(3): 342-345 (in Chinese).
- [23] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, et al. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1-3): 139-151.
- [24] 杨丽原, 沈吉, 刘恩峰, 等. 南四湖表层沉积物中营养元素分布特征[J]. *湖泊科学*, 2007, 19(4): 390-396.
YANG L Y, SHEN J, LIU E F, et al. Characteristics of nutrient distribution from recent sediment in Lake Nansihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(4): 390-396 (in Chinese).
- [25] YE H M, YUAN X Y, HAN L, et al. Risk assessment of nitrogen and phosphorus loss in a hilly-plain watershed based on the different hydrological period: a case study in Tiaoxi Watershed[J]. *Sustainability*, 2017, 9(8): 1493-1505.
- [26] YE H M, YUAN X Y, HAN L, et al. Comparison of phosphorus fraction distribution and influencing factors of suspended and surface sediments in the Tiaoxi watershed, China[J]. *Water Science and Technology*, 2017, 75(9-10): 2108-2118.