

闽江上游富屯溪表层沉积物营养盐分布特征及生态风险评价

苏丽鹄, 李青玉, 叶宏萌*, 胡家朋, 李云峰, 左邦瑞, 杜仁凤

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

摘要 为了解闽江上游流域表层沉积物营养盐空间分布特征及其污染状况,以闽北富屯溪为研究对象,测定表层沉积物中 pH 和营养元素的含量,通过有机指数与单因子污染指数评价其污染水平,并探究沉积物碳-氮-磷两两之间的相互耦合关系,揭示其污染来源。结果表明,沉积物呈弱酸性,速效氮符合土壤养分 IV 级标准,速效磷符合土壤养分 II 级标准。总有机碳(TOC)、总氮(TN)、总磷(TP)的平均含量分别为 2.19%、2 472.28 mg/kg 和 653.10 mg/kg,对多数底栖生物处于可承受范围。有机指数为 0.17~1.27,其中 33%样点为有机污染;有机氮指数为 0.087~0.384,其中 83%样点为有机氮污染,具有较大的潜在生态风险;TP 的单因子污染指数为 0.64~1.64,其中 6%样点为重度污染,TP 潜在生态风险较低。全流域 TOC/TN 平均值为 10.12,有机质的内源和外源输入基本达到一个平衡状态,但北支以外源为主,西支则以内源为主。同时 TOC 与 TN、TOC 与 TP 均呈弱相关,而 TN 与 TP 呈显著相关,氮磷在沉积物积累行为上较为相似,主要受到农业面源及周边城镇生活污水废水排放的影响。

关键词 营养盐;表层沉积物;生态风险;闽江上游;富屯溪

中图分类号 X 826 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)19-0076-05

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2022.19.019



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of Futunxi in the Upper Reaches of Minjiang River

SU Li-man, LI Qing-yu, YE Hong-meng et al (School of Ecology and Resource Engineering, Wuyi University, Key Laboratory of Green Technology for Ecological Industry of Fujian, Wuyishan, Fujian 354300)

Abstract In order to understand the spatial distribution characteristics and pollution status of nutrients in the surface sediments of the upper reaches of the Minjiang River, taking the Futunxi in northern Fujian as the research object, the contents of pH and nutrient elements in the surface sediments were measured. The pollution level was evaluated through the organic index and single-factor pollution index, and the mutual coupling relationship between the sediment carbon-nitrogen-phosphorus was further explored to reveal the source of pollution. The results showed that the sediment was weakly acidic, available nitrogen met grade IV standards of soil nutrient, and available phosphorus met grade II standard of soil nutrient. The average contents of TOC, TN and TP were 2.19%, 2 472.28 mg/kg and 653.10 mg/kg, respectively, and in a tolerable range for most benthic organisms. The organic index was 0.17-1.27, and 33% of the samples were organic pollution. The organic nitrogen index was 0.087-0.384, and 83% of the samples were organic nitrogen pollution, TN had a greater potential ecological risk. The single factor pollution index of TP was 0.64-1.64, and 6% of the samples were severe pollution, TP had the lowest potential ecological risk. The average value of TOC/TN in the whole watershed was 10.21. The internal and external input of organic matter in the sediments of the whole Watershed basically reached a balanced state, but the northern branch was dominated by external sources, and the west branch was dominated by internal sources. At the same time, TOC and TN, TOC and TP were weakly correlated, while TN and TP were significantly correlated. Nitrogen and phosphorus were similar in sediment accumulation behavior, which was mainly affected by agricultural non-point sources and the discharge of domestic sewage and wastewater in surrounding cities and towns.

Key words Nutrients; Surface sediments; Ecological risk; Upstream of Minjiang River; Futunxi watershed

河流沉积物不仅能反映流域内环境的变迁^[1],同时也是水体碳、氮、磷等营养元素的重要储存库。各种来源的营养盐进入水体后,除部分被水生生物吸收利用和以各种形式存在于水中外,仍有大量营养盐经过化学、物理及生物化学作用逐渐沉降到水体底部^[2],成为营养盐最大的汇。另一方面当输入水体的营养盐负荷量减少或外界环境因素发生变化时,沉积物中的氮磷可经过矿化和早期成岩作用进入水体再循环^[3],延续水体富营养化,发挥着营养源的作用。氮、磷是水生生物生长的必需元素,但同时也是水体富营养化的限制元素^[3-4],有机质作为重要的胶体,是反映沉积物有机营养程度的重要标志^[5]。因此,研究沉积物营养盐分布特征及污染情况对掌握水体生态系统状况有重要指导意义。

近年来,我国学者对水体沉积物进行了大量的研究,如戴纪翠等^[6]分析了胶州湾沉积物中氮的地球化学特征和控制因素;朱广伟等^[7]对长江中下游大型湖泊进行研究,发现该区域绝大多数湖泊处于富营养水平;孙文等^[8]研究了北运河沙河水库沉积物氮、磷及有机质的分布特征,并指出点源污染是沙河水库污染物积累的重要来源;郑国侠等^[9]研究发现南海深海盆沉积物向海水提供氮与磷等营养元素,一定程度上增加了该海域的初级生产力水平。因此,当外源污染物得到有效控制时,内源污染物的释放成为水体环境潜在生态污染风险。目前,沉积物营养元素分布特征的研究主要集中在水库、湖泊、海湾、河口等相对宽广的水域,对邻近山区上游小流域对比研究较少。河流上游作为源头,其输送的营养元素对下游的水质有重要的影响。闽江是福建省最大河流,随着经济的快速发展,各种污染源大量输入水体后,改变了水体营养盐的结构,对水体生态环境造成很大的影响^[10]。富屯溪作为闽江上游三大溪之一,是当地水资源重要的调蓄区和“净化池”,但因受到流域周边环境变化的影响,水质由贫营养状态向中营养化发展^[11]。而研究河流表层沉积物污

基金项目 福建省自然科学基金项目(2020J05218);福建省大学生创新创业训练计划(202110397016);福建省教育厅中青年教育科研基金项目(JAT200666);南平市科技项目(2022-ZX-HZ-002)。

作者简介 苏丽鹄(1985—),女,广西南宁人,实验师,硕士,从事环境地球化学研究。*通信作者,副教授,博士,从事水资源保护和环境地球化学研究。

收稿日期 2022-04-20

染物污染状况,能够较有效地识别和管控河流水环境生态风险。因此,笔者展开对富屯溪流域表层沉积碳、氮、磷的分布特征及相关性进行研究,并评价其污染现状,探究沉积物中有机质的来源,以期为该流域水污染控制及富营养化治理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 富屯溪位于福建省北部,分布于武夷山脉南坡,为闽江上游三大溪之一。流域面积为 12 080 km²,约占闽江流域面积的 22.5%,有西支和北支 2 条水源,贯穿光泽、建宁、泰宁、将乐、顺昌、邵武、南平 8 个县市,全长 285 km。该流域地处亚热带,是典型的红壤、黄壤分布区,年均降雨量 1 600~2 000 mm,年均径流量为 137 亿 m³,年均输沙量为 103 万 t,河道平均坡降 1.20‰。流域内土地利用以林地和农业用地为主,四周山体以花岗岩组成为主。

1.2 样品采集与测试 2018 年 8 月用 DXCN-3821 加重型彼得森抓斗式采样器对富屯溪流域采集 18 个 0~10 cm 深度的表层沉积物样品,其中北支 6 个(1~6 号样点)、西支 10 个(7~16 号样点)、主干 2 个(17~18 号样点),采样点分布见图 1。每个采样点沿着样线随机取泥 5 次,并混匀作为此点样品,放入聚乙烯塑料袋中密封,运回实验室。将样品放在干净、阴凉通风的实验台上自然风干,风干样品粉碎研磨并过 100 目尼龙筛,筛下样保存备用。在采样调查的过程中,记录样点地形地貌条件、土地利用类型、人类活动强度等。

对沉积物样品的 pH、总有机碳(TOC)、总氮(TN)、速效氮(AN)、总磷(TP)和速效磷(AP)含量进行测试。其中 pH 采用电位计法(土:水=1:2.5),TOC 采用重铬酸钾容量法-外加加热法,TN 采用过硫酸钾氧化法,AN 采用扩散吸收法,TP 采用硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法,AP 采用饱和碳酸氢钠浸提法。每个沉积物样品均进行 3 组平行试验,所得结果的相对偏差小于 5%,以保证试验结果的精度。

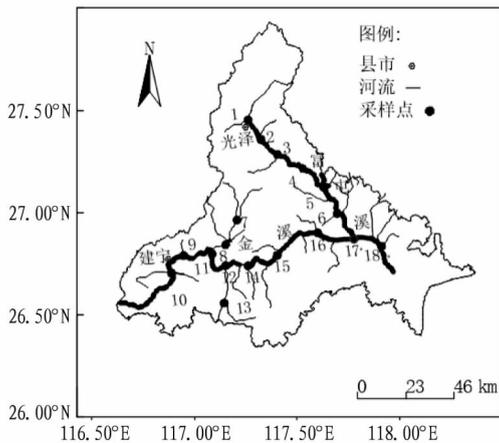


图 1 采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites

1.3 生态风险评价方法 目前,国内外对沉积物中营养盐的生态风险评价尚缺乏统一的评价方法和标准^[12-13],有机指数法和有机氮运用比较广泛,但它只考虑沉积物碳氮的污染,没有考虑磷的污染,因此为了更全面地反映富屯溪沉积

物的污染状况,该研究采用有机指数法和有机氮评价富屯溪沉积物碳氮的生态风险,采用单因子污染指数法评价富屯溪沉积物磷的生态风险。

有机指数通常作为评价沉积物环境状况的指标,有机氮指数则是衡量沉积物受氮污染程度的重要指标,评价标准见表 1,计算方法如下:

$$\text{有机指数} = \text{有机碳}(\%) \times \text{有机氮}(\%) \quad (1)$$

$$\text{有机氮指数} = \text{总氮}(\%) \times 0.95 \quad (2)$$

采用单因子污染指数法对磷污染因子的污染状况进行评价,评价标准见表 2,计算方法如下:

$$P_i = C_i / C_s \quad (3)$$

式中, P_i 为单因子污染指数, C_i 为污染因子 i 的实测值; C_s 为污染因子 i 的评价标准值。该研究参照加拿大安大略省环境和能源部制定的环境质量评价指南^[13],按照该指南,沉积物中能引起最低级别生态毒性效应的 TP 浓度为 600 mg/kg。

表 1 沉积物有机指数与有机氮指数评价标准

Table 1 Evaluation criteria of sediment organic index and organic nitrogen

项目 Item	数值 Value	描述 Describe	等级 Grade
有机指数 Organic index	<0.05	清洁	I
	0.05~<0.20	较清洁	II
	0.20~<0.50	尚清洁	III
	≥0.50	有机污染	IV
有机氮指数 Organic nitrogen index	<0.033	清洁	I
	0.033~<0.066	较清洁	II
	0.066~<0.133	尚清洁	III
	≥0.133	有机氮污染	IV

表 2 沉积物单因子污染指数评价标准

Table 2 Evaluation standard for single factor pollution index of sediment

P_i	描述 Describe	等级 Grade
<0.5	清洁	I
0.5~1.0	轻度污染	II
>1.0~1.5	中度污染	III
>1.5	重度污染	IV

1.4 数据处理与分析 研究区采样图采用 ArcGIS 10.2 绘制,用 SPSS 26.0 软件进行相关系数分析,采用 Origin 2019b 绘图。

2 结果与分析

2.1 富屯溪表层沉积物 pH 和营养元素空间分布特征 从图 2 可以看出,富屯溪表层沉积物 pH 为 5.12~6.62,均值为 5.86,呈弱酸性,空间分布较均匀。TOC 浓度为 1.43%~5.06%,平均值为 2.19%,最高值出现在北支 1 号点位,最低值出现在西支 15 号点位,1 号采样点位于光泽县城区,人口密度大,点源污染多,生活、工业污水的大量输入导致河流水质较差,初级生产力增大,经长期沉积导致沉积物中营养元素含量较高^[4]。空间分布上,北支 TOC 平均值略高于西支,两支流均表现为上游高下游低的趋势。受人类生活、工农业

发展、土地利用及植被分布等影响^[14], TOC 含量较高的点位均出现在人类活动频繁的城村和林地附近的河段。沉积物有机质一般可分为藻类、草本类、木质类、木炭 4 种类型, 通常最稳定的是木质类和木炭, 其次是草本类, 藻类因易氧化分解而不易保存^[15]。富屯溪流域森林覆盖率高, 林地分布广, 植物的碎屑等草本类和木质类来源丰富, 通过地表径流进入水体沉积下来, 导致林地附近河段沉积物 TOC 的含量较高。

富屯溪表层沉积物 TN 平均浓度为 2 472. 28 mg/kg, 流域内 TN 分布不均, 最高值达 4 047. 34 mg/kg, 最低值则为 918. 97 mg/kg, 分别出现在北支 2 号点位和 6 号点位, 说明北支受人类活动干扰的程度较大。空间分布上, 西支 TN 的平均值高于北支。速效氮浓度为 18. 17~121. 29 mg/kg, 均值为 65. 12 mg/kg, 符合全国第二次土壤普查推荐的土壤速效养

分 IV 级标准(60~90 mg/kg), 属于较缺乏水平。

富屯溪表层沉积物 TP 浓度为 386. 35~988. 24 mg/kg, 平均浓度为 653. 10 mg/kg, 空间差异较小, 北支和西支 TP 的平均值分别为 678. 57、639. 14 mg/kg, 基本持平; 与 TN 相似, TP 的最高值和最低值均出现在北支。速效磷浓度为 17. 37~44. 49 mg/kg, 均值为 33. 99 mg/kg, 符合全国第二次土壤普查推荐的土壤速效养分 II 级标准(20~40 mg/kg), 属于丰富水平。TN 和 TP 含量较高的点位均出现在城村和农田密集附近的河段, 可能与人类活动(生活、工业污水的排放, 农业生产)、降雨量等相关。闽江上游是福建著名的暴雨中心, 雨水形成的地表径流冲刷强度大^[16], 富含营养的土壤和岩石碎屑随着地表径流进入河流并沉积^[17], 造成 TN、TP 含量增高, 这可能是富屯溪沉积物中氮、磷营养盐的重要来源。

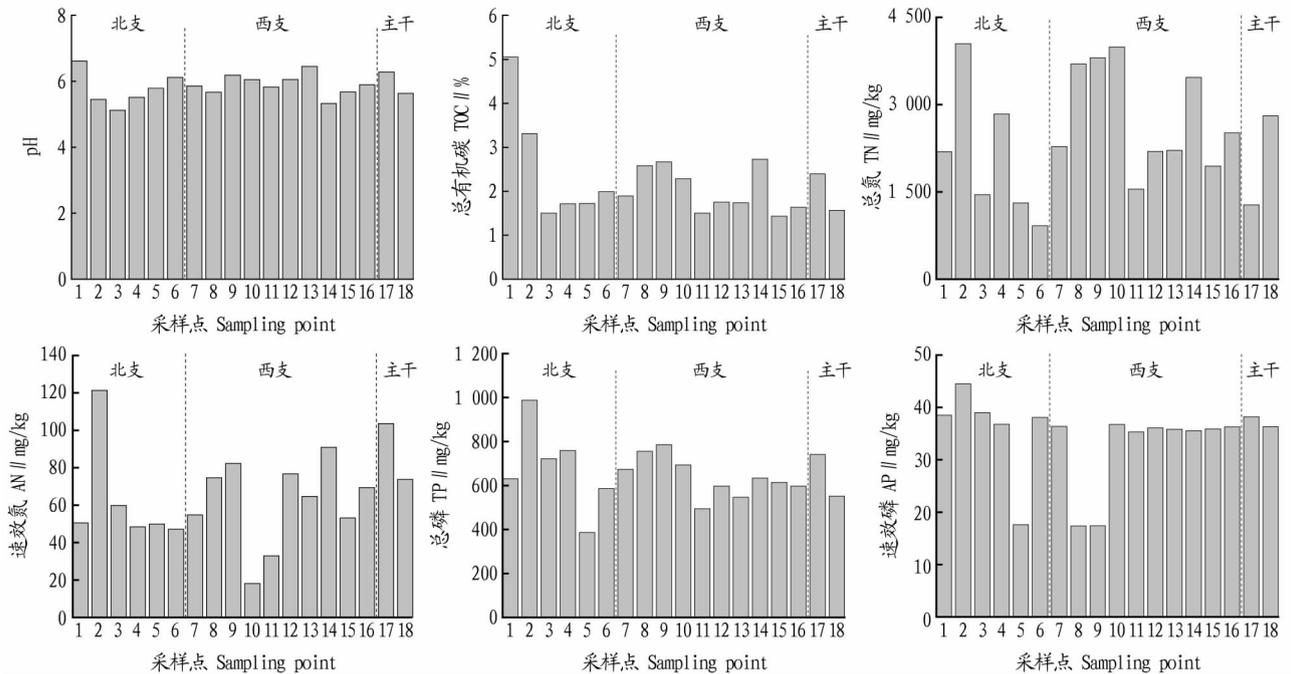


图2 富屯溪表层沉积物 pH 和营养元素分布情况

Fig. 2 Distribution of pH and nutrient elements in surface sediments in Futunxi

加拿大安大略省环境和资源部制定的环境质量评价指南规定, 沉积物中能引起最低级别生态毒性效应的 TOC、TN 和 TP 浓度分别为 1%、550 mg/kg 和 600 mg/kg。富屯溪所有样点的 TOC 和 TN 值均超出了安全级别, 处在最低级别范围内。而有 39% 样点的 TP 值处在安全级别, 61% 样点的 TP 值处在最低级别, 说明富屯河流域已受到了碳、氮、磷的污染, 只是多数底栖生物尚可承受。

2.2 富屯溪表层沉积物营养盐污染评价 从研究区沉积物营养盐污染评价(图 3)可以看出, 全流域有机指数为 0.17~1.27, 平均值为 0.54, 其中, 有 6% 样点属于较清洁水平, 61% 样点属于尚清洁水平, 33% 样点属于有机污染水平; 有机指数最高的样点位于北支 2 号点位, 高达 1.27; 整体上, 富屯溪表层沉积物有机污染处于尚清洁的状态。全流域有机氮指数为 0.087~0.384, 平均值为 0.235, 达到有机氮污染水平,

存在较大的潜在生态风险; 其中西支有机氮污染程度最高, 100% 样点达到有机氮污染水平, 说明沉积物受 TN 污染较严重, 对底栖生物群落造成一定的威胁。单因子污染指数评价结果表明, 全流域 TP 单因子污染指数为 0.64~1.65, 平均值为 1.09, 总体上属于中度污染水平, 潜在生态风险较小。由此可见, 富屯溪表层沉积物受到碳氮磷不同程度的污染, 富屯溪作为当地重要水源, 应当控制外来污染, 尤其是氮的输入, 防止富屯溪沉积物污染程度逐渐加剧, 对上覆水造成威胁。有机指数与单因子污染指数最高值均出现北支 2 号点位, 可能是因为 2 号点位处于光泽县下游郊区, 周边林地农田较多, 并且光泽县城区排放的污染物在水动力作用下在此沉积, 故而营养元素水平较高。

2.3 沉积物有机质、总氮、总磷来源分析 水体沉积物的 C/N 值在某种程度上反映了有机质来源的差异性^[15,18]。研

究表明,湖泊、河流水生植物富含蛋白质而缺乏纤维素,其 C/N 值通常在 4~10;陆地高等植物体内纤维素含量高,蛋白质含量低,其 C/N 值通常大于 20 或更高;藻类的 C/N 值为 4~10,浮游动物的 C/N 值一般小于 7^[13,19]。因此可利用 C/N 值判识沉积物中有机质的输入源。整体上,富屯溪表层沉积物 TOC/TN 值在 5.59~23.09,平均值为 10.12,外源有机质与内源有机质的输入基本上达到一个平衡的状态。北支

TOC/TN 值在 5.59~23.09,平均值为 13.74,空间差异较大,且外源输入略占主导;西支 TOC/TN 值在 5.73~9.71,平均值为 7.53,空间差异较小,且内源输入略占主导(图 3)。两溪流有机质来源存在差异,这一方面可能是因为西支陆源有机质输入相对较少;另一方面可能是西支流域农田、菜地等耕地面积大,导致含氮污染物在沉积物表层积累,形成表层富集现象,进一步使 TOC/TN 值降低。

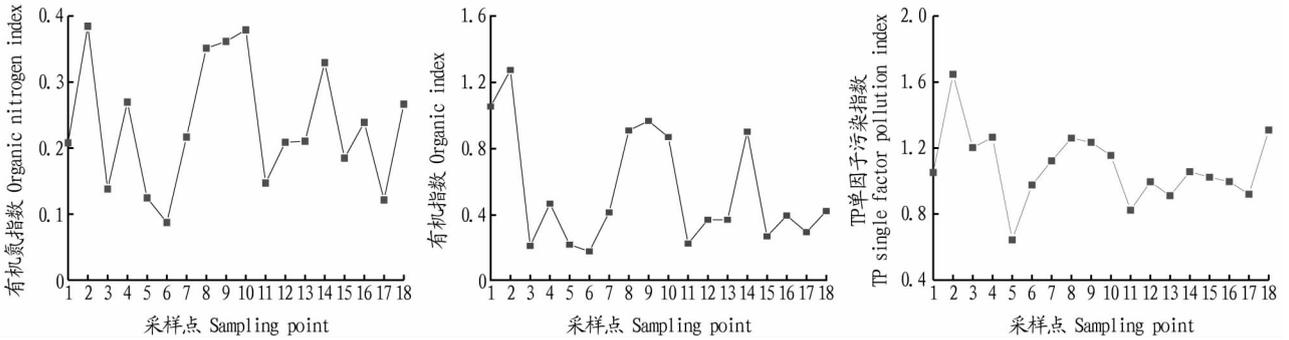


图 3 富屯溪沉积物营养元素生态风险评价

Fig. 3 Ecological risk assessment of nutrient elements in sediments in Futunxi

C/P 值在一定都程度上能够反映沉积物中有机碳和磷化合物的分解速率^[12,20]。全流域 TOC/TP 值在 20.84~80.14,平均值为 33.94(图 4),均小于 Redfield 比(C:N:P=106:16:1)^[21],说明有机碳的分解速率较快,磷化合物分解较慢。空间分布上,北支的 TOC/TP 值高于西支,北支陆源有机质来源相对较多,且主要来源于陆源纤维束植物碎屑,其

不易氧化分解而沉积下来,导致北支 TOC/TP 值较高。

氮、磷在沉积物溶出、释放及水中聚集、沉积这 2 种动态过程可以由表层沉积物中 N、P 含量及比值反映出来^[22]。全流域 TN/TP 值在 1.57~5.75,平均值为 3.76(图 4),小于 Redfield 比^[21],说明富屯溪流域中磷不是限制水体富营养化的主导因子,且可能主要受陆源输入的影响。

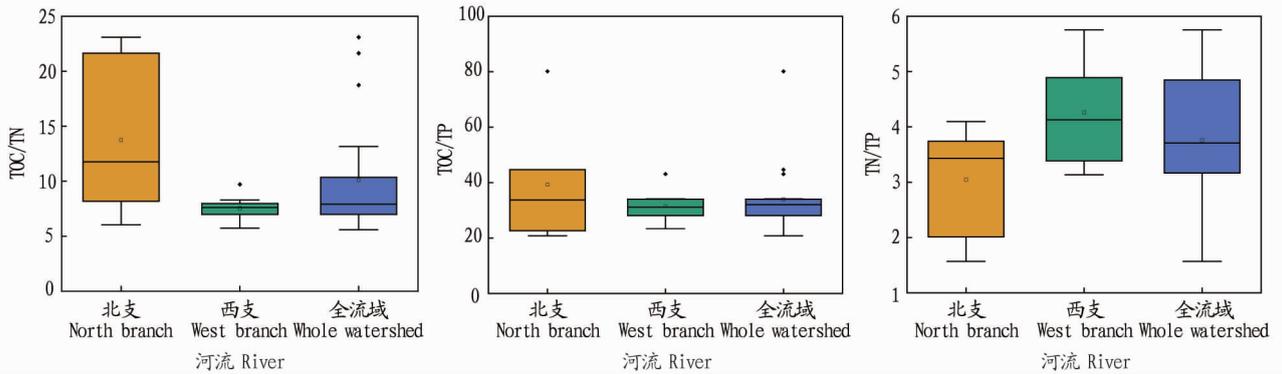


图 4 富屯溪表层沉积物 TOC/TN、TOC/TP、TN/TP 值

Fig. 4 The value of TOC/TN, TOC/TP, TN/TP of surface sediments in Futun River

2.4 沉积物营养盐相关性分析 有研究表明,沉积物中氮的存在形态以有机氮为主,而沉积物磷以无机磷为主,故有机碳与总氮显著正相关,与总磷不相关,如太湖^[23]、江苏西部湖泊^[24]。由表 3 可知,pH 与 TOC、TN、TP 等相关性并不明显。TOC、TN 和 TP 之间均存在一定的相关性,其中,TOC 与 TP、TN 均呈正相关,但均达不到显著相关,说明沉积物中氮、磷的赋存形态比较复杂,氮主要以无机氮为主,磷以无机磷为主。TP 与 TN、TP 与 AP 分别呈极显著、显著正相关,相关系数分别为 0.592 和 0.526,表明氮磷在沉积物积累行为上较为相似,具有一定的同源性,且 TP 浓度可以较好地指示沉积物速效磷水平。

表 3 富屯溪表层沉积物中沉积物营养盐相关性分析

Table 3 Correlation analysis of sediment nutrients in the surface sediments of Futun River

因子 Factor	pH	TOC	TN	TP	AN	AP
pH	1					
TOC	0.371	1				
TN	-0.115	0.332	1			
TP	-0.277	0.385	0.592**	1		
AN	-0.164	-0.105	0.113	0.179	1	
AP	-0.065	0.323	0.183	0.526*	0.067	1

注: * 表示显著相关($P < 0.05$), ** 表示极显著相关($P < 0.01$)

Note: * means significant correlation ($P < 0.05$), ** means extremely significant correlation ($P < 0.01$)

2.5 富屯溪沉积物 TOC、TN、TP 平均含量与其他河流对比

富屯溪沉积物 TOC、TN、TP 平均含量与其他河流对比见表 4。漳河、潮白河是海河水系重要支流;渭河为黄河一级支流;赤水河为长江上游一级支流;珠江口是珠江的河口湾;建溪、闽江河口为闽江流域;抚河是鄱阳湖水系。在所有对比河流中,富屯溪沉积物 TOC 和 TP 含量处于较低水平,其中富屯溪 TOC 含量高于抚河和赤水河中游,低于潮白河中游、建溪、渭河陕西段、漳河上游,与小清河、闽江河口基本持平;TP 含量远远低于潮白河中游、小清河,也低于抚河、赤水河中游、闽江河口、渭河陕西段,与建溪、漳河上游基本持平,高于珠江口;富屯溪 TN 含量在所有对比河流中处于最高水平。因此,与其他河流相比,富屯溪 TOC 和 TP 含量较低,TN 含量较高。

表 4 富屯溪沉积物 TOC、TN、TP 平均含量与其他河流对比

Table 4 The average content of TOC, TN and TP in Futunxi sediments compared with other rivers

河流名称 River name	TOC %	TN mg/kg	TP mg/kg	数据来源 Data sources
富屯溪 Futunxi	2.19	2 472	653	该研究
潮白河中游 Middle Reaches of Chaobai River	3.08	192	1 662	[25]
珠江口 Pearl River Estuary	—	1 649	456	[26]
建溪 Jianxi	3.05	1 858	624	[27]
赤水河中游 Middle Reaches of Chishui River	1.12	1 600	798	[28]
渭河陕西段 Shaanxi Section of Weihe River	5.61	640	710	[29]
小清河 Xiaoqinghe	2.36	2 272	3 218	[30]
漳河上游 Upper Zhanghe	3.14	920	693	[31]
闽江河口 Minjiang Estuary	2.43	1 686	726	[32]
抚河 Fuhe	1.63	1 850	840	[33]

3 结论

(1) 富屯河流域表层沉积物 pH 为 5.86;速效氮符合全国第二次土壤普查推荐的土壤速效养分 IV 级标准,属于较缺乏水平;速效磷符合全国第二次土壤普查推荐的土壤速效养分 II 级标准,属于丰富水平。TOC、TN 和 TP 的含量分别为 1.43%~5.06%、918.97~4 047.34 mg/kg、386.35~988.24 mg/kg,对多数底栖生物处于可承受范围,不同溪流水平分布有所差异。

(2) 整体上,富屯溪表层沉积物有机污染处于尚清洁的状态,但 33%样点属于有机污染水平。有机氮达到了有机氮污染水平,存在较大的潜在生态风险。TP 属于中度污染水平,但最高点位达到了重度污染水平,具有潜在生态风险。

(3) 富屯溪外源有机质与内源有机质的输入基本上达到一个平衡的状态,但北支以外源输入占优势,西支以内源输入为主。TOC 与 TN、TP 均呈弱相关,而 TN 与 TP 呈极显著相关,故氮磷在沉积物积累行为上较为相似,具有一定的同源性,与有机质来源有一定差异。

参考文献

[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.
- [2] 杨丽原,沈吉,刘恩峰,等. 南四湖现代沉积物中营养元素分布特征[J]. 湖泊科学,2007,19(4):390-396.
- [3] 宋金明,李学刚,邵君波,等. 南黄海沉积物中氮、磷的生物地球化学行为[J]. 海洋与湖沼,2006,37(4):370-376.
- [4] 刘伟,周斌,王丕波,等. 沉积物再悬浮氮磷释放的机制与影响因素[J]. 科学技术与工程,2020,20(4):1311-1318.
- [5] 张天然,张平究,杨艳芳,等. 巢湖十五里河河流沉积物地球化学元素分布特征[J]. 安徽农业科学,2021,49(13):55-59.
- [6] 戴纪翠,宋金明,李学刚,等. 胶州湾沉积物中氮的地球化学特征及其环境意义[J]. 第四纪研究,2007,27(3):347-356.
- [7] 朱广伟,许海,朱梦圆,等. 三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素[J]. 湖泊科学,2019,31(6):1510-1524.
- [8] 孙文,王理明,刘吉宝,等. 北运河沙河水库沉积物营养盐分布特征及其溯源分析[J]. 环境科学学报,2019,39(5):1581-1589.
- [9] 郑国侠,宋金明,孙云明,等. 南海深海盆表层沉积物氮的地球化学特征与生态学功能[J]. 海洋学报,2006,28(6):44-52.
- [10] LIU E F, SHEN J, ZHANG E L, et al. A geochemical record of recent anthropogenic nutrient loading and enhanced productivity in Lake Nansihu, China[J]. Journal of paleolimnology, 2010,44(1):15-24.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 陈敬安,万国江,汪福顺,等. 湖泊现代沉积物碳环境记录研究[J]. 中国科学(D 辑:地球科学),2002,32(1):73-80.
- [16] 张国防,陈瑞炎,曾建荣,等. 闽江流域洪灾与生态环境脆弱性研究[J]. 水土保持通报,2000,20(4):51-55.
- [17] 赵婷,王义祥,徐国忠,等. 农田表土有机碳含量变化特征及其研究进展[J]. 福建农业学报,2011,26(3):498-503.
- [18] 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.
- [19] ECKERROT Å, PETTERSON K. Pore water phosphorus and iron concentrations in a shallow, eutrophic lake-indications of bacterial regulation[J]. Hydrobiologia, 1993,253(1/2/3):165-177.
- [20] 邱祖凯,胡小贞,姚程,等. 山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价[J]. 环境科学,2016,37(4):1389-1396.
- [21] 王保栋,陈爱萍,刘峰. 海洋中 Redfield 比值的研究[J]. 海洋科学进展,2003,21(2):232-235.
- [22] 卓海华,邱光胜,翟婉盈,等. 三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价[J]. 环境科学,2017,38(12):5020-5031.
- [23] 袁旭音,陈骏,季峻峰,等. 太湖沉积物和湖岸土壤的污染元素特征及环境变化效应[J]. 沉积学报,2002,20(3):427-434.
- [24] 刘涛,胡志新,杨柳燕,等. 江苏西部湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力差异性分析[J]. 环境科学,2012,33(9):3057-3063.
- [25] 迟明慧,秦延文,杨晨晨,等. 潮白河中游沉积物氮磷和有机质分布特征及评价[J]. 地学前缘,2022,29(4):448-454.
- [26] 岳维忠,黄小平,孙翠慈. 珠江口表层沉积物中氮、磷的形态分布特征及污染评价[J]. 海洋与湖沼,2007,38(2):111-117.
- [27] 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.
- [28] 刘斌,盛恩国,蔡深文,等. 赤水河流域中游沉积物营养元素分布特征及污染评价[J]. 地球环境学报,2021,12(2):214-223.
- [29] 何琪琳,张凤宝,吴普侠,等. 渭河陕西段河道沉积物中碳氮磷时空变化分析及评价[J]. 水土保持研究,2021,28(3):88-93,100.
- [30] 苏鑫. 小清河表层沉积物营养元素和重金属分布特征及风险评价研究[D]. 济南:济南大学,2021.
- [31] 李煜. 漳河上游流域沉积物磷形态分布特征及其生态风险评价[D]. 邯郸:河北工程大学,2021.
- [32] 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.
- [33] 向爱农,苏甜,刘方平,等. 抚河故支河道沉积物污染物分布特征及污染评价[J]. 中国农村水利水电,2020(10):117-120.