

苏州市各功能区水环境中碳氮磷分布特征与污染评价*

陈 恺¹ 杨 俊¹ 何义亮^{1,2} 张小凡^{1#}

(1.上海交通大学环境科学与工程学院,上海 200240;2.上海交通大学中英国际低碳学院,上海 200240)

摘要 为了解苏州市水环境中营养元素的时空分布特征及潜在生态风险,于苏州市城区、城郊和郊区共设置 16 个采样点,并对全年水样和沉积物样进行各形态碳、氮、磷含量的测定。结果表明:(1)时间尺度上,水体中春季溶解性有机质(DOC)极显著低于秋、冬季,TN 季节性差异不显著,春、夏季 TP 极显著高于秋、冬季。沉积物中总有机碳(TOC)、TN 和 TP 均在冬季最高、春季最低。(2)空间尺度上,水体中城区 TP 高于城郊和郊区。沉积物中 TOC、TP 均呈现城区>郊区>城郊的分布特征。(3)水体富营养化评价综合指数表明,1 个采样点为极富营养级,11 个为重富营养级,4 个为富营养级,春、夏两季富营养化风险高。(4)苏州市整体有机氮污染较严重,城区沉积物中生物有效性磷最高,对上覆水的磷释放风险最高。(5)相关性分析表明,沉积物中 TP、无机磷和铁铝磷来源可能相同。

关键词 苏州市 沉积物 水环境 磷形态 营养盐 生态风险

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2020.03.011

Distribution characteristics and pollution assessment of carbon, nitrogen and phosphorus in the aquatic environment of different regions of Suzhou CHEN Kai¹, YANG Jun¹, HE Yiliang^{1,2}, ZHANG Xiaofan¹. (1. School of Environment Science & Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240; 2. China-UK Low Carbon College, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: In order to reveal space-time distribution characteristics and potential ecological risk of nutrients in aquatic environment in Suzhou city, 16 sampling sites were set up in urban, suburb and rural area in Suzhou. Contents of C, N, P in different forms were determined during the year. The results showed that: (1) on the time scale, the contents of dissolved organic carbon (DOC) in spring were obviously lower than that of autumn and winter. There was no significant seasonal variation of TN. The contents of TP in spring and summer were significantly higher than that of autumn and winter. Total organic carbon (TOC), TN and TP in sediments were found to be the highest in winter and the lowest in spring. (2) On the spatial scale, TP in water samples presented the occurrence characteristics that urban area higher than rural area and suburb area. TOC and TP in sediment samples presented the occurrence characteristics that urban area>rural area>suburb area. (3) Comprehensive eutrophication index (EI) demonstrated that 1 sampling sites, 11 sites and 4 sites were at the level of extreme eutrophication, severe eutrophication and eutrophication respectively. (4) The organic nitrogen pollution in Suzhou was severe generally. The content of bioavailable phosphorus in urban area was the highest, indicating that its ecological risk of phosphorus release was the highest in all regions. (5) Correlation analysis showed that TP, inorganic phosphorus and ferric/aluminous phosphorus in sediment samples might have the same source.

Keywords: Suzhou; sediment; aquatic environment; phosphorus forms; nutrients; ecological risk

苏州市位于长江三角洲中部,西邻太湖,北依长江,城市内水网密布。近年来,随着人口增加和城市发展,苏州市地表水受上游来水水质、工业废水及生活污水排放等影响,水质状况不断恶化^[1],富营养化问题日益突出。据报道,苏州市工业园区附近水域有水华暴发和河体黑臭现象^[2];苏州市 2 个主要污水处理厂每日排入大运河的 TP 分别达 21.6、29.7

kg^[3];吴淞江苏州段营养物质不断输入,导致氮磷含量极高。在自然水体中,氮磷是构成水生生态系统最主要的营养元素^[4],但过量的氮磷输入易导致水体富营养化。水中各形态氮含量的测定有助于评价水体被污染程度和自净效果;水体中可利用磷的含量水平直接反映水体营养状况^[5]。

沉积物是碳氮磷等营养元素的主要蓄积库^[6],

第一作者:陈 恺,男,1994 年生,硕士研究生,研究方向为污水处理技术。* 通讯作者。

* 水体污染控制与治理科技重大专项(No.2017ZX07205)。

http://www.zjzpc.com

可间接反映水体污染状况。当环境条件发生改变时,这些元素可重新释放进入水体并影响水质^[7]。氮磷的生物有效性受其赋存形态影响^[8]。沉积物中的氮形态可分为 TN、有机氮、氨氮及硝酸盐氮。硝酸盐氮及氨氮是沉积物中较活跃的部分,易释放至上覆水中^[9]。有机氮则是沉积物中最主要的氮素存在形式^[10]。欧洲标准委员会推荐的 SMT 法^[11]将沉积物中的磷分为铁/铝磷(Fe/Al-P)、钙磷(Ca-P)、无机磷(IP)、有机磷(OP)和 TP。各形态磷的关系符合:IP=Fe/Al-P+Ca-P,TP=IP+OP。Fe/Al-P 易释放,从而被水生植物和藻类利用^[12],进而导致水体富营养化^[13]。ZHANG 等^[14]和 RYDIN^[15]研究表明,约 50%(质量分数,下同)~60%的 OP 可被藻类和水生植物直接利用。Ca-P 活性较低,但在酸性条件下可成为内源磷的潜在来源^[16]。

针对苏州市水域氮磷含量高、沉积物具有潜在释放风险现状,现有研究多关注太湖^[17-18]、苏州园林^[19]等水体或底泥的研究,而对苏州市整体水域生态风险的研究较少。本研究对不同功能区水体及沉积物中碳氮磷的含量、形态和时空分布特征进行分析,评价苏州市水体富营养化状况和营养盐生态风险,对河流污染防治具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域与样品采集

参照国(省)控断面和水务局自动监测断面,共设置 16 个采样点,具体见图 1,其中根据人口居住密度和区域发展模式,将采样区域划分为郊区(S1~S5)、城区(S6~S10)和城郊(S11~S16)。采样工作于 2017 年 10 月(秋季)、2018 年 1 月(冬季)、2018 年 4 月(春季)和 2018 年 7 月(夏季)开展,其中由于多地河道清淤。水样在距水面 0.5 m 处采集,于 4℃冷库避光保存并于 48 h 内完成检测;沉积物在距底泥表层 0~15 cm 处采集,冻干碾磨并过 100 目筛后待用。

1.2 分析方法

水样先经 0.45 μm 玻璃纤维膜过滤后再测定,TN 和溶解性有机质(DOC)采用总有机碳/氮分析仪(德国耶拿 Multi N/C3000)测定;硝酸盐氮根据《水质 硝酸盐氮的测定 酚二磺酸分光光度法》(GB 7480—87)测定;亚硝酸盐氮根据《水质 亚硝酸盐氮的测定 分光光度法》(GB 7493—87)测定;氨氮根据《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》(HJ 535—2009)测定。

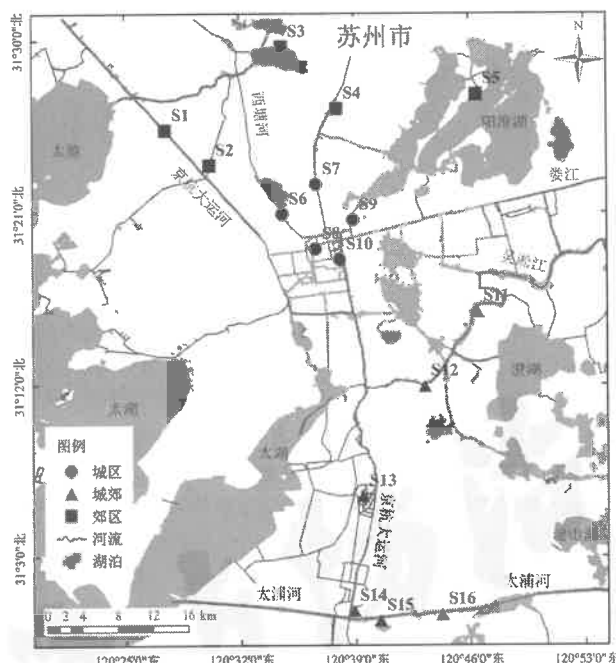


图 1 苏州市采样点分布图

Fig.1 The map of sampling sites in Suzhou

使用未过滤的原水进行测定,COD 采用哈希 COD 试剂盒(哈希 DR6000 分光光度计)测定,TP 根据《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB 11893—89)测定。

沉积物首先于瓷坩埚中滴加 1 mol/L 盐酸去除碳酸盐,然后置于 60℃烘箱中烘干,碾磨成粉末后约称取 20 mg,采用元素分析仪(德国元素分析公司,Vario Macro Cube)测定总有机碳(TOC)和 TN;采用 SMT 法测定 Fe/Al-P、Ca-P、IP、OP 和 TP。

1.3 碳氮磷污染评价方法

水体常规指标评价依据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)进行,采用对数型幂函数普适指数公式(见式(1))^[20]计算水体富营养化评价综合指数(EI),评价水体潜在富营养化水平。

$$EI = \sum_{j=1}^n W_j \times EI_j = 10.77 \times \sum_{j=1}^n W_j \times (\ln X_j)^{1.1825} \quad (1)$$

式中: j 为指标编号; n 为指标总数; W_j 为指标 j 的归一化权重值,本研究选取 TN、TP、氨氮和 COD 进行评价,权重均为 0.25; EI_j 为指标 j 的富营养化评价普适指数; X_j 为指标 j 监测结果规范值,转化方法参考文献[20]。

根据文献[20],淡水水体富营养化共分为 5 个等级; $EI \leq 20.00$ 为贫营养级; $20.00 < EI \leq 39.42$ 为中营养级; $39.42 < EI \leq 61.29$ 为富营养级; $61.29 < EI \leq 76.28$ 为重富营养级; $76.28 < EI \leq 99.77$ 为极富营养级。

沉积物污染状况采用有机指数和有机氮评价。有机指数为有机碳、有机氮质量分数的乘积,常用于评价水域沉积物环境状况;而有机氮为 TN 质量分数乘以 0.95,常用于衡量沉积物氮污染情况^[21]。评价标准如表 1^[22]所示。

1.4 数据处理与分析

基础数据分析处理与绘图采用 Excel 2016 和 Origin Pro 2017 软件进行,采样地图使用 ArcGIS 10.2 绘制。相关性和差异性分析采用 SPSS 24.0 软件,其中相关性分析采用 Pearson 相关性分析,差异性分析采用单因素方差分析。单因素方差分析首先进行 Levene 方差齐性检验,若 $p > 0.05$,则认为方差齐性,成对比较检验可采用最小显著性差异法 (LSD);若 $p \leq 0.05$,则认为方差不齐,成对比较检验采用 Games-Howell 法。显著性水平划分依据: $p \leq 0.01$ 为极显著; $0.01 < p \leq 0.05$ 为显著; $p > 0.05$ 为

不显著。

2 结果与讨论

2.1 水体中碳氮磷时空分布特征

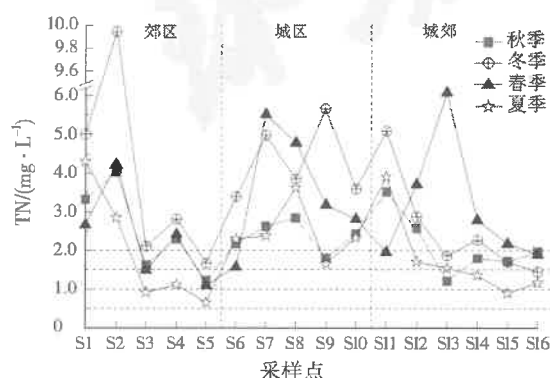
苏州市水体中碳含量由 COD 和 DOC 表示。秋、冬、春、夏季 COD 平均值分别为 20.44、18.13、16.19、23.38 mg/L,季节差异不显著;DOC 平均值分别为 9.67、14.08、4.33、8.68 mg/L,呈现冬季>秋季>夏季>春季的变化趋势,其中春季 DOC 极显著低于秋、冬季。COD 和 DOC 表现出不同的季节变化特征,可能与不同季节水质及水体中悬浮颗粒物附着污染物的理化性质差异有关。冬季温度较低,DOC 自然降解速率慢,导致 DOC 较高。春季 COD 和 DOC 平均值均最低,说明水体有机质含量相对较低。

水体中不同形态氮时空分布特征如图 2 所示。

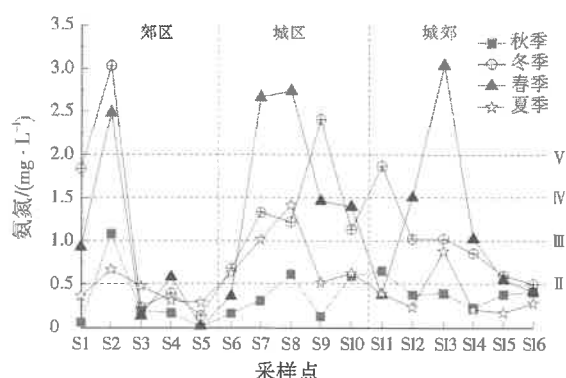
表 1 沉积物有机氮及有机指数评价标准

Table 1 Standard for evaluation of organic nitrogen and organic indices in sediments

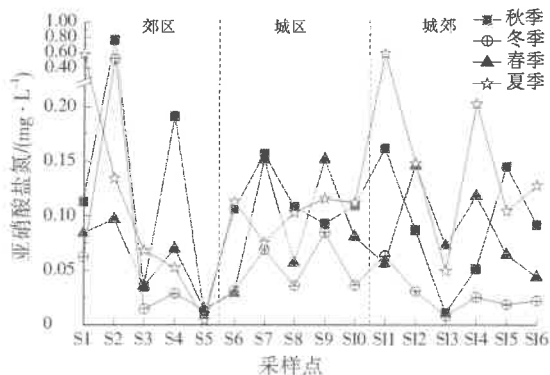
项目	I	II	III	IV
有机指数	<0.050	$0.050 \sim <0.200$	$0.200 \sim <0.500$	≥ 0.500
有机氮/%	<0.033	$0.033 \sim <0.066$	$0.066 \sim <0.133$	≥ 0.133
类型	清洁	较清洁	尚清洁	污染



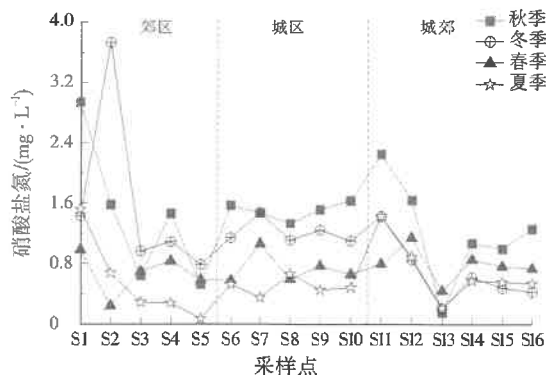
(a) 水体中 TN



(b) 水体中氨氮



(c) 水体中亚硝酸盐氮



(d) 水体中硝酸盐氮

注: II~V 为 GB 3838—2002 中 II~V 类标准限值。

图 2 水体中不同形态氮时空分布特征

Fig.2 The spatiotemporal distribution characteristics of different nitrogen fractions in water

TN 季节性差异不显著。秋、冬、春、夏季氨氮平均值分别为 0.36、1.14、1.24、0.53 mg/L, 秋季显著低于冬、春季, 夏季城区显著高于郊区和城郊, 可能与夏季城区生活污水排放量较大有关。秋、冬、春、夏季亚硝酸盐氮平均值分别为 0.14、0.07、0.08、0.16 mg/L。秋、冬、春、夏季硝酸盐氮平均值分别为 1.38、1.13、0.73、0.59 mg/L, 秋、冬季极显著高于春、夏季。氨氮总体遵循枯水期(冬季)高、丰水期(夏季)低的规律。丰水期水温较高, 较低的含氧量阻碍硝化反应进行, 产生低硝酸盐氮、高氨氮的特征^[23]。秋季氨氮最低而硝酸盐氮最高, 表明水体在秋季主要处于氧化态, 水体自净能力较强^[24], 春季则相反。

秋、冬、春、夏季水体中 TP 平均值分别为 0.17、0.10、0.35、0.33 mg/L, 春、夏季极显著高于秋、冬季, 可能与春、夏季的农业活动有关, 郊区、城郊农田中化肥的使用及畜禽废物的直接排放, 导致径流中营养盐较多^[25]。空间尺度上, 郊区、城区和城郊 TP 平均值分别为 0.20、0.30、0.22 mg/L, 城区高于城郊和郊区。在秋、冬季, 城区 TP 均显著高于城郊, 但春、夏季区域差异不显著。

2.2 沉积物中碳氮磷时空分布特征

沉积物中 TOC 和 TN 的时空分布特征见图 3。沉积物中 TOC 和 TN 平均值呈现冬季>夏季>秋季>春季的变化趋势, 但两者季节差异均不显著。全年 TOC 表现出城区>郊区>城郊的区域赋存特征, 而 TN 仅在夏季城区显著高于城郊。TOC 和 TN 最大值均出现在 S8, 表明此处沉积物中污染物赋存水平极高。该地处于苏州市老城区, 周边住宅区密集, 生活污水排放量较大。值得注意的是, S2 冬季 TOC 和 TN 很高, 但春、夏季明显降低, 这与冬季前该处有养殖厂有关, 而在春季时期已关停, 因此含量明显降低。S13 沉积物中秋、冬季 TOC 和 TN 较低, 但春、夏季明显上升, 这是因为该河流在采样前几个月前曾开展过清淤工作, 之后污染程度不断加重可能与附近工业污染在沉积物中富集有关。

由于沉积物中秋季 TP 误差较大, 不具代表性, 暂不予分析。沉积物中冬、春、夏季 TP 平均值分别为 (506.6 ± 228.2) 、 (428.5 ± 146.1) 、 (450.7 ± 177.7) mg/kg, 呈现出冬季>夏季>春季的变化趋势, 但季节差异不显著。与国内其他发展程度类似的城市相比, 如成都市 $(535.5 \sim 2\,390.2 \text{ mg/kg})$ ^[26] 和杭州市 $(880.0 \sim 2\,850.0 \text{ mg/kg})$ ^[27], 苏州市河流沉积物中的 TP 相对较低。空间尺度上, 除春季城区 TP 显著

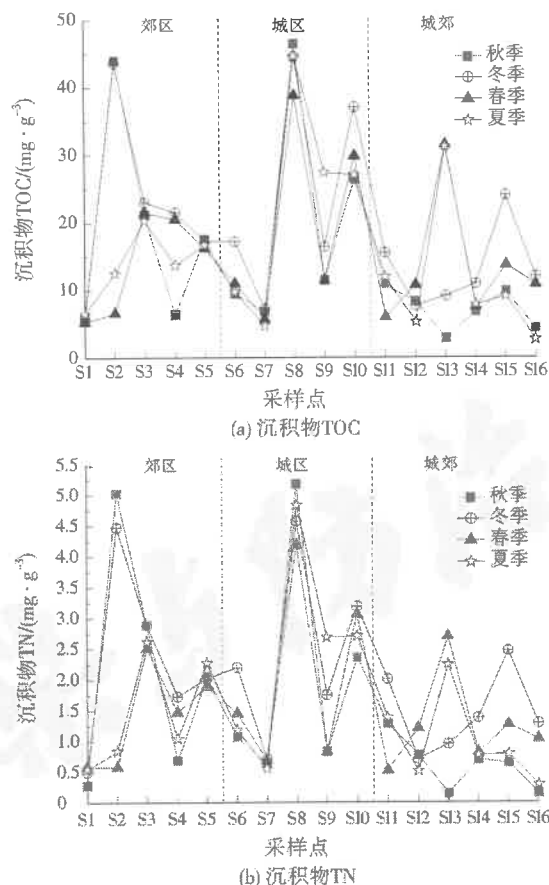


图3 沉积物中 TOC 和 TN 的时空分布特征

Fig.3 The spatiotemporal distribution characteristics of TOC and TN in sediments

高于城郊外, 其他时期不同区域差异均不显著; TP 呈现城区>郊区>城郊的赋存特征, 与表层水中城区 TP 最高一致, 进一步说明城区水环境磷污染较严重。城区水网分布密集, 宽度较窄, 流速较慢, 河道曲折, 这些因素都为污染物在城区发生沉降提供有利条件, 加上城区自身含磷污染物排放量较多, 造成沉积物中 TP 偏高。

2.3 沉积物中不同形态磷时空分布特征

根据 1992 年加拿大安大略省环境和能源部指定的沉积物质量评价指南, TP 小于 600 mg/kg^[28-29] 时为安全级别。苏州市城区 S8 和 S10 3 个季度的 TP 均高于 600 mg/kg, 表明存在一定的生态毒性风险。鉴于沉积物中不同形态磷具有活性差异, 还需对各形态磷含量进行进一步研究。沉积物中不同形态磷的时空分布特征如图 4 所示。

OP 主要包括核酸、磷脂和植素, 多为有效态磷, 部分 OP 经磷酸酶水解可转化成 IP 而被水生植物吸收利用, 对湖泊河流富营养化的产生发挥着重要作用^[30]。OP 为 37.31~259.31 mg/kg, 占 TP 的 11.7%~35.8%。冬、春、夏季 OP 平均值分别为

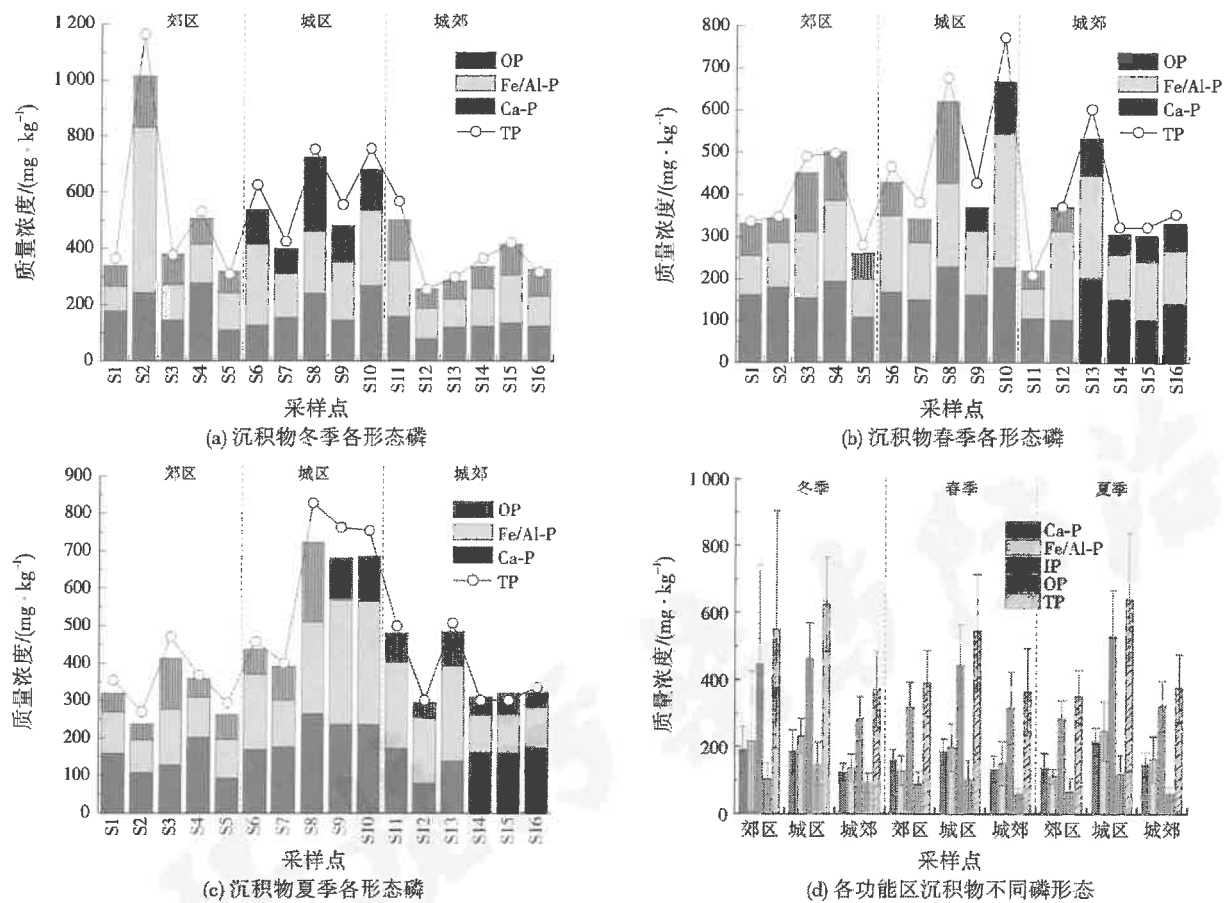


图4 沉积物中不同形态磷的时空分布特征

Fig.4 The spatiotemporal distribution characteristics of different phosphorus fractions in sediments

114.0、81.9、80.9 mg/kg,且均呈现出城区>郊区>城郊的分布规律,其中夏季城区 OP 显著高于城郊,这与城区磷污染输入较多及上游污染汇入有关。郊区农田及养殖业发达,地表径流与农村畜禽养殖废水带来外源性 OP 的输入,成为其流域内的主要污染源^[31],因此郊区 OP 也相对较高。

IP 占 TP 的 64.2%~88.3%,是沉积物磷的主要部分,其中 Ca-P 占 TP 的 23.6%~56.4%,Fe/Al-P 占 TP 的 26.3%~59.7%。Ca-P 主要包括磷酸钙矿物和自生磷灰石磷,是沉积物中的惰性成分,不易释放进入上覆水体,也难以被生物利用。冬、春、夏季 Ca-P 平均值极其接近,分别为 164.6、158.1、165.4 mg/kg,夏季城区极显著高于郊区、显著高于城郊。Fe/Al-P 主要为铁铝氧化物及其氢氧化物包裹态的磷,是主要活性磷形态,易于迁移转化并释放到上覆水中,可为水生植物和藻类提供直接利用的 IP^[32]。冬、春、夏季 Fe/Al-P 平均值分别为 191.1、158.4、173.5 mg/kg,城区均高于郊区和城郊,其中冬季城区显著高于城郊。

2.4 水体中碳氮磷污染评价

参照 GB 3838—2002,冬、春季 COD 大多处于 15~30 mg/L,多介于 II~III 类标准(II、III 类标准限值分别为 15、20 mg/L),夏、秋季多大于 30 mg/L,处于 III~V 类标准(IV、V 类标准限值分别为 30、40 mg/L)。城区水体 TN 污染较重,几乎均高于 V 类标准限值。秋冬季 TP 多为 0.1~0.3 mg/L,为 II~III 类标准(II、III 类标准限值分别为 0.1、0.2 mg/L),春、夏季多高于 0.4 mg/L,为劣 V 类标准(V 类标准限值分别为 0.4 mg/L)。

如图 5 所示,1 个采样点为极富营养级,11 个为重富营养级,4 个为富营养级。EI 最高值出现在 S2,可能与附近畜禽养殖及农田分布较多带来的氮磷污染物相对较多有关。时间尺度上,苏州市秋、冬、春、夏季 EI 平均值分别为 63.79、65.11、71.76、69.24,春、夏季富营养化风险略高于秋、冬季,其中春季富营养化水平显著高于秋季,但季节差异较小说明常年的人类活动造成氮磷营养盐和有机污染物持久性稳定输入,使水体潜在富营养化水平保持相对一致。

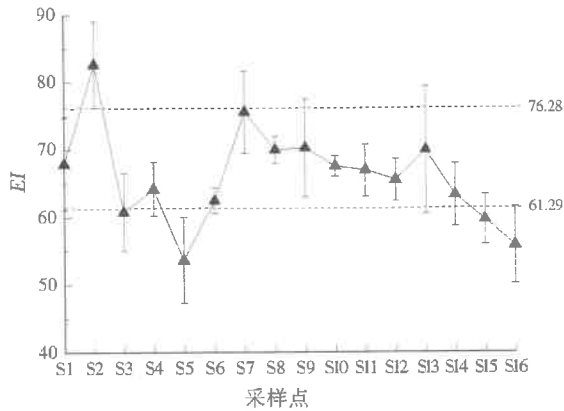


图5 EI的时空分布特征

Fig.5 The spatiotemporal distribution characteristics of EI

2.5 沉积物有机污染评价及生物有效性磷分析

如表2所示,有机指数为0.008~2.050,S8有机污染最严重,S3、S10也存在有机污染。城郊6个采样点均为尚清洁和较清洁,有机污染状况比城区和郊区好。苏州市整体有机氮污染较严重,有机氮为0.028%~0.460%,达到污染类型的有S2~S6、S8~S10、S13、S15共10个采样点。城郊有机氮污染程度相对轻于城区和郊区。综合来看,S3、S8、S10同时存在有机和有机氮污染,生态风险最高。

为进一步指明磷释放并引起富营养化的生态风险,选取沉积物中100%(质量分数,下同)Fe/Al-P

和50%~60%的OP之和估算生物有效性磷,结果如表3所示。苏州市各区域内沉积物的生物有效性磷占TP的比例很接近,生物有效性磷呈现城区>郊区>城郊的分布特征,城区沉积物中磷的潜在可利用性最大,对上覆水的磷释放风险最高,城郊沉积物的磷生态风险最低。

2.6 沉积物各元素及环境因子相关性分析

沉积物中各营养元素间的相关关系是描述其分布特征和在沉积物-水界面迁移转化的重要依据。由表4可见,TP和IP、TP和Fe/Al-P、IP和Fe/Al-P均呈现显著正相关性,相关系数分别为0.970、0.914、0.942,说明沉积物中Fe/Al-P的变化对IP和TP变化具有较大影响,3者的来源可能相同。TOC与OP、IP间均有显著正相关性,可能是由于有机质中的腐殖质与铁、铝氧化物等无机物外表形成无机-有机复合体^[33],与磷酸盐离子的络合作用使磷元素聚集。

3 结论

(1) 时间尺度上,水体中春季DOC极显著低于秋、冬季;TN季节性差异不显著,秋季氨氮显著低于冬、春季,春、夏季TP极显著高于秋、冬季。沉积

表2 沉积物有机氮及有机指数评价

Table 2 Contents of organic nitrogen and evaluation of organic indices

采样点	有机指数					有机氮				
	最大值	最小值	平均值	等级	类型	最大值/%	最小值/%	平均值/%	等级	类型
S1	0.034	0.027	0.030	I	清洁	0.055	0.048	0.052	II	较清洁
S2	1.855	0.036	0.391	III	尚清洁	0.425	0.055	0.187	IV	污染
S3	0.633	0.505	0.549	IV	污染	0.275	0.238	0.254	IV	污染
S4	0.353	0.134	0.249	III	尚清洁	0.164	0.098	0.134	IV	污染
S5	0.360	0.289	0.327	III	尚清洁	0.216	0.179	0.196	IV	污染
S6	0.359	0.109	0.193	II	较清洁	0.209	0.112	0.153	IV	污染
S7	0.049	0.024	0.036	I	清洁	0.068	0.052	0.061	II	较清洁
S8	2.050	1.539	1.835	IV	污染	0.460	0.397	0.431	IV	污染
S9	0.699	0.091	0.307	III	尚清洁	0.255	0.079	0.167	IV	污染
S10	1.123	0.694	0.887	IV	污染	0.303	0.257	0.283	IV	污染
S11	0.296	0.029	0.137	II	较清洁	0.191	0.049	0.124	III	尚清洁
S12	0.124	0.026	0.061	II	较清洁	0.115	0.049	0.077	III	尚清洁
S13	0.807	0.083	0.447	III	尚清洁	0.256	0.091	0.187	IV	污染
S14	0.143	0.057	0.082	II	较清洁	0.131	0.073	0.094	III	尚清洁
S15	0.563	0.069	0.224	III	尚清洁	0.234	0.075	0.143	IV	污染
S16	0.147	0.008	0.070	II	较清洁	0.122	0.028	0.083	III	尚清洁

表3 沉积物中生物有效性磷

Table 3 Bioavailable phosphorus in sediments

区域	生物有效性磷/(mg·kg ⁻¹)	占TP的比例/%
郊区	195.9~204.7	45.5~47.5
城区	287.1~299.4	47.6~49.6
城郊	185.4~192.5	50.1~52.0

表4 沉积物中各营养元素相关性分析¹⁾
Table 4 Correlation analysis of phosphorus and environmental factors in sediments

指标	Ca-P	Fe/Al-P	IP	OP	TP	TN	TOC
Ca-P	1.000						
Fe/Al-P	0.528**	1.000					
IP	0.769**	0.942**	1.000				
OP	0.588**	0.585**	0.642**	1.000			
TP	0.765**	0.914**	0.970**	0.796**	1.000		
TN	0.556**	0.669**	0.699**	0.889**	0.813**	1.000	
TOC	0.632**	0.693**	0.744**	0.848**	0.831**	0.964**	1.000

注:1) **表示在0.01级别(双尾)相关性显著。

物中 TOC、TN 和 TP 均在冬季最高、春季最低。

(2) 空间尺度上,水体中城区 TP 高于城郊和郊区。沉积物中 TOC、TP 均呈现城区>郊区>城郊的分布特征。

(3) 水体富营养化评价综合指数表明,1 个采样点为极富营养级,11 个为重富营养级,4 个为富营养级,春、夏两季富营养化风险高。

(4) 苏州市整体有机氮污染较严重,城区沉积物中生物有效性磷最高,对上覆水的磷释放风险最高。

(5) 相关性分析表明,沉积物中 TP、IP 和 Fe/Al-P 来源可能相同。

参考文献:

- [1] 何丽君.苏州市区饮用水源地环境现状及对策研究[D].苏州:苏州科技学院,2015.
- [2] 李振国,余光辉,张勇,等.水体沉积物磷形态及释放风险分析——以苏州工业园水体为例[J].中国环境管理干部学院学报,2017,27(6):46-49.
- [3] 刘焱见,李大鹏,李鑫,等.京杭大运河(苏州段)内源磷形态分布及其对扰动的响应[J].环境科学学报,2018,38(1):125-132.
- [4] SMITH V H, TILMAN G D, NEKOLA J C. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems[J]. Environmental Pollution, 1999, 100: 179-196.
- [5] 何德进,邢友华,姜瑞雪,等.东平湖水体中氮磷的分布特征及其富营养化评价[J].环境科学与技术,2010,33(8):45-48.
- [6] 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.
- [7] ZHOU Q, GIBSON C E, ZHU Y. Evaluation of phosphorus bioavailability in sediments of three contrasting lakes in China and the UK[J]. Chemosphere, 2001, 42(2): 221-225.
- [8] GILLOR O, HADAS O, POST A F, et al. Phosphorus and nitrogen in a monomictic freshwater lake, employing cyanobacterial bioreporters to gain new insights into nutrient bioavailability[J]. Freshwater Biology, 2010, 55(6): 1182-1190.
- [9] 吴亚林,李帅东,江俊武,等.百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征[J].环境科学,2017,38(2):517-526.
- [10] 倪兆奎,李跃进,王圣瑞,等.太湖沉积物有机碳与氮的来源[J].生态学报,2011,31(16):4661-4670.
- [11] RUBAN V, LOPEZ SANCHEZ J F, PARDO P, et al. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments - a synthesis of recent works[J]. Fresenius Journal of Analytical Chemistry, 2001, 370(2/3): 224-228.
- [12] BOSTRÖM B, PERSSON G, BROBERG B. Bioavailability of different phosphorus forms in freshwater systems[J]. Hydrobiologia, 1988, 170(1): 229-244.
- [13] CAVALCANTE H, ARAÚJO F, NOYMA N. Part al. Phosphorus fractionation in sediments of tropical semiarid reservoirs[J]. Science of the Total Environment, 2018, 619/620: 1022-1029.
- [14] ZHANG R, WU F, LIU C, et al. Characteristics of organic phosphorus fractions in different trophic sediments of lakes from the middle and lower reaches of Yangtze River region and Southwestern Plateau, China[J]. Environmental Pollution, 2008, 152(2): 366-372.
- [15] RYDIN E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment[J]. Water Research, 2000, 34(7): 2037-2042.
- [16] KAISERLI A, VOUTSA D, SAMARA C. Phosphorus fractionation in lake sediments - Lakes Volvi and Koronia, N. Greece[J]. Chemosphere, 2002, 46(8): 1147-1155.
- [17] 杨文晶,谈剑宏,姜宇.苏州太湖水体氮、磷含量及形态组成分析[J].江苏水利,2018(5):40-43.
- [18] 吕文,孙瑞瑞,王诚,等.太湖东部湖区水源地下水环境时空变化特征[J].环境科学导刊,2018,37(3):20-24.
- [19] 袁海浪.苏州市古典园林水质状况调查[D].苏州:苏州大学,2016.
- [20] 李祚泳,汪嘉杨,郭淳.富营养化评价的对数型幂函数普适指数公式[J].环境科学学报,2010,30(3):664-672.
- [21] 唐陈杰,左倬,成必新,等.生态净化湿地预处理区底泥有机质与营养盐分布特征及评价[J].环境工程,2017,35(增刊):111-114,140.
- [22] 马睿,李璇,卞婷婷,等.水源生态净化系统沉积物中营养盐空间分布特征及污染评价[J].环境化学,2019,38(2):412-421.
- [23] 崔莹,吴莹,邵亮,等.苏州河、黄浦江水体中有机物、营养盐季节变化及其环境效应[J].环境化学,2011,30(3):645-651.
- [24] 杨兵,何丙辉,王德宝.三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估[J].环境科学,2016,37(12):4586-4595.
- [25] 余丽燕,杨浩,黄昌春,等.夏季滇池和入滇河流氮、磷污染特征[J].湖泊科学,2016,28(5):961-971.
- [26] 丁璐,欧阳莉莉,石清,等.特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例[J].环境科学,2019,40(1):219-227.
- [27] 涂焯楠,仲玉芳,范华,等.杭州典型城市河道污染特征及差异性分析评价[J].环境科学与技术,2016,39(增刊1):360-365.
- [28] 杨小雨,张鉴达,张博,等.昌黎近岸表层沉积物中磷的赋存形态及其分布特征研究[J].海洋环境科学,2018,37(6):813-818.
- [29] LEIVUORI M, NIEMISTÖ L. Sedimentation of trace metals in the Gulf of Bothnia[J]. Chemosphere, 1995, 31(8): 3839-3857.
- [30] 熊强,焦立新,王圣瑞,等.滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性[J].环境科学,2014,35(11):4118-4126.
- [31] 武升,张俊森,张东红,等.小流域农业面源污染评价与综合治理研究进展[J].环境污染与防治,2018,40(6):710-716.
- [32] HUANG X L, HU J J, HU H E, SHI FENG Y, et al. The contribution of opal-associated phosphorus to bioavailable phosphorus in surface and core sediments in the East China Sea[J]. Journal of Ocean University of China, 2018, 17(3): 571-580.
- [33] 袁旭音.太湖现代沉积物的物质组成和形成条件分析[J].南京大学学报(自然科学版),2002,38(6):756-765.

编辑:黄 芳 (收稿日期:2019-07-01)

