

分光光度法对白洋淀各形态氮磷分布特征及源解析的研究

姚 珊¹, 张璇凌¹, 蔡雨欣¹, 何连琼¹, 李佳潼¹, 王小龙¹, 刘 颖^{1,2*}

1. 中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081

2. 中央民族大学北京市食品环境与健康工程技术研究中心, 北京 100081

摘 要 氮磷是引起湖泊富营养化的关键限制因子, 对于水体和底泥中各形态氮磷的分布特征和源解析的研究能有效地揭示水体富营养化的过程与机制并分析其污染来源。白洋淀作为雄安新区最重要的水源之一, 其水体富营养化状况严重, 氮磷污染不容乐观。对于各形态氮磷含量分布特征及源解析的研究有助于全面分析该地区氮磷污染状况及污染来源, 而目前同时研究底泥和水体两种介质各形态氮磷的分布规律, 并利用模型定量分析各污染源对于各形态氮磷贡献的研究较少。利用分光光度法研究白洋淀水体和底泥两种介质各形态氮磷分布特征, 利用主成分分析法综合评估白洋淀各区域氮磷综合污染状况, 基于绝对主成分得分-多元线性回归(APCS-MLR)模型分析不同污染源对于各形态氮磷的贡献量。研究结果表明, 白洋淀水体中总氮(TN)含量(1.41~4.64 mg·L⁻¹)严重超标, 均为重富营养化; 水体中总磷(TP)含量(0.043~0.273 mg·L⁻¹)污染也相对严重, 95.8%的采样点为Ⅳ类及以上水质。水体中可被藻类和植物直接吸收利用的氨氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)总占比达到54.9%; 另外, 对水体富营养化贡献大的溶解性无机磷(DIP)和溶解性有机磷(DOP)两种磷形态总占比达到52.8%。水体氮磷总量和形态的分布规律表明: 白洋淀的水体富营养化状况不容乐观, 对水体富营养化影响大的各形态氮磷占比大, 其中白洋淀景区和淀边缘区污染相对严重。底泥生物可利用性氮(EN和HCl-N之和)占TN的比例为17.9%~66.4%, 生物可利用性磷(BAP)的含量占TP的比例为8.50%~28.0%。以上结果表明, 白洋淀底泥存在较大氮磷释放风险。主成分分析结果表明, 白洋淀景区相较于其他区域氮磷污染严重。APCS-MLR模型分析结果表明生活源污染对于各形态氮磷(尤其底泥中)的贡献量大, 农业污染、动植物残体分解、养殖业对各形态氮磷含量也有较大贡献。

关键词 分光光度法; 水体; 底泥; 形态氮磷; 主成分分析; APCS-MLR模型

中图分类号: X524

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)04-1306-07

引 言

湖泊富营养化是当今面临的最为严重的水环境问题之一, 氮磷是引起富营养化的关键限制因子。随着湖泊富营养化状态持续恶化, 水体中积累的氮磷营养盐通过沉降、扩散等形式汇入底泥中, 当底泥中的氮磷累积到一定程度时, 在一定环境条件下又会通过扩散、对流、再悬浮等形式释放到水体中, 加剧湖泊富营养化状况^[1]。目前, 国内外众多研究表明, 水体和底泥中不同形态氮磷的生物活性及其对环境的影响和反馈作用不同, 各形态氮磷的分布特征能有效地揭示

水体富营养化的过程与机制^[2]。同时研究水体和底泥两种介质氮磷各形态的分布特征有助于更全面地了解湖泊富营养化状态, 并为湖泊富营养化的治理提供依据。分光光度法作为检测氮磷的重要手段, 在获取基础数据方面发挥着重要作用。针对各形态氮磷的测定, 分别依据国家标准分析方法和国内外文献中报道较为成熟的方法。

绝对主成分得分-多元线性回归(absolute principal components score combined with multivariate linear regression, APCS-MLR)主要用于重金属、有机污染物和大气颗粒物源解析, 在湖泊氮磷污染源解析中应用很少。本研究利用该模型对湖泊水体和底泥中氮磷污染源进行解析, 探究该模型在

收稿日期: 2021-04-19, 修订日期: 2021-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(21177163), 中央民族大学校级交叉学科研究专项(2021GDZC08), 中央民族大学校级青年教师科研能力提升计划项目(2021QNPY82), 中央民族大学大学生创新训练计划项目(BEIJ2020110061)资助

作者简介: 姚 珊, 女, 1996年生, 中央民族大学生命与环境科学学院硕士研究生 e-mail: ys2293693123@163.com

* 通讯作者 e-mail: liuying4300@163.com

氮磷污染源解析方面的适用性，为所研究区域的污染治理提供建议。

白洋淀位于河北省保定市，作为华北平原最大的富营养化湖泊，在过去很长一段时间接收大量来自保定和附近村庄的生活污水和工业废水^[3]。随着河北雄安新区的建设，其水质状况受到广泛关注。因此，研究现阶段白洋淀水体富营养化状况具有重要意义。

本研究将以白洋淀为研究对象，探究白洋淀水体和底泥各形态氮磷的分布特征，根据主成分分析结果综合评估各区域的污染状况，并利用 APCS-MLR 模型进行源解析，研究结果为相关部门提供更为科学的意见和建议。

1 实验部分

1.1 仪器与试剂

Spectrumlab 22pc 可见光光度计(上海棱光技术有限公司)，JASCOV-750 紫外-可见分光光度计(日本 JASCO 公司)，SX712 便携式多参数测量仪(上海三信仪表厂)，SS-325 灭菌锅(日本 TOMY 公司)，THZ-82 型恒温振荡器(常州市

国华电器有限公司)。磷标准溶液[GSB04-1741-2004(a)]，氨氮溶液标准物质[GBW(E)083304—50]，硝酸盐氮标准溶液[GBW(E)083215—50]，水系沉积物成分分析标准物质(GBW07307a)，亚硝酸钠，磷酸，4-氨基苯磺酰胺，抗坏血酸，钼酸铵，酒石酸锑钾，过硫酸钾，酒石酸钾钠，纳氏试剂，氨基磺酸，氯化铵、连二亚硫酸钠等。所用试剂均为分析纯，实验用水为超纯水。

1.2 样品采集、预处理及统计分析

2019 年 7 月在白洋淀采集样品，共布 24 个采样点(图 1 所示)，可划分为四个区域。河口区域中的白沟引河、府河、唐河、孝义河是白洋淀的进水口，赵王新河为白洋淀的出水口。周边城镇的工农业废水、生活污水由进水口排入白洋淀。白洋淀景区旅游业发达，常年接受大量的游客加重生活源污染，此外，该区域生长的大量的动植物，其残体分解也对氮磷含量有很大贡献。淀边缘区靠近附近城镇，大量生活污水、工业废水排入，养殖产生的粪便以及饲料残渣对氮磷污染也有一定影响。水上居民区则主要受到附近居民产生的生活源污染的影响。

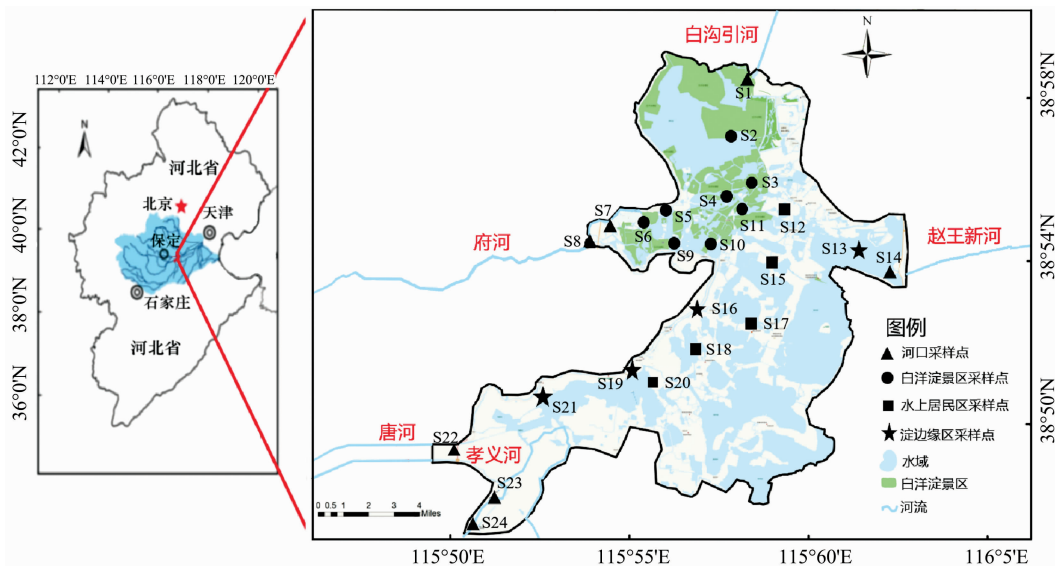


图 1 采样点分布图

Fig. 1 Distribution map of sampling points

利用分光光度法测定各形态氮磷含量，测定方法如下：水体总磷(TP)依据国标(GB 11893—89)测定。水体中溶解态磷(TDP)、溶解态无机磷(DIP)和颗粒态无机磷(PIP)等各形态磷的测定均采用钼锑抗分光光度法^[4]。颗粒态磷(TPP)的含量为 TP 和 TDP 的差值，溶解态有机磷(DOP)为 TDP 和 DIP 的差值，颗粒态有机磷(POP)由 TPP 减去 PIP 得到。水样总氮(TN)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)和亚硝态氮(NO₂⁻-N)分别依据国家标准(GB 11894—89)、(HJ535—2009)、(HJ/T 346—2007)和(GB 7493—87)测定。有机氮(ON)为 TN 含量依次减去 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N 含量得到。底泥总磷(TP)和无机磷(IP)依据标准测定程序法

(standard measurements and testing, SMT)测定，底泥有机磷由 TP 和 IP 做差得到。利用改进的 Psenner 法得到弱吸附态磷(Ex-P)、可还原态磷(BD-P)、金属氧化物结合态磷(NaOH-P)、钙结合磷(HCl-P)，采用钼锑抗分光光度法测定^[5]。底泥总氮采用碱性过硫酸钾消解测定^[6]。底泥各形态氮利用连续提取法提取，得到可交换态氮(EN)和酸解态氮(HCl-N)，分别利用前文所述的国标方法测定 EN 中 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N 的含量以及 HCl-N 中 TN 的含量^[7]。通过加标回收实验，回收率均在 90.0%~110% 范围内；通过平行实验得到的变异系数均小于 10.0%。采用 Arc-Gis10.2, SPSS25, Origin2018 对数据分析处理。

2 结果与讨论

2.1 水体中氮磷总量及形态的分布特征及污染评价

2.1.1 水体氮磷总量的分布特征及污染评价

白洋淀水体中各采样点的总氮(TN)、总磷(TP)含量及相应湖泊环境质量和湖泊富营养化标准如图 2(a,b)所示。本研究四个采样区域水体中 TN 含量($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)的平均值依次为 2.64(河口) $>$ 2.04(淀边缘区) $>$ 1.94(白洋淀景区) $>$ 1.65(水上居民区); TP 平均含量相差不多,其中白洋

淀景区污染相对严重。水体中 TN 含量最高的点位于 S8(府河口); TP 含量最高的点位于 S3(郭口里村)(见图 1)。府河沿线农田广泛使用复合肥,除被作物利用外,磷素主要在土壤中累积,而氮素不易在土壤中积累,会在汛期随径流汇入府河,造成府河口 TN 含量远远高于其他区域。郭口里村与白洋淀景区距离近,人类活动频繁,有大量的生活污水排入河中,且大面积的养殖行为导致含有大量氮磷元素的饵料排入湖中,加之采样点处水深较浅,且底泥中的氮磷含量高易释放到水体中,这可能是该区域水体 TN、TP 含量高的原因。

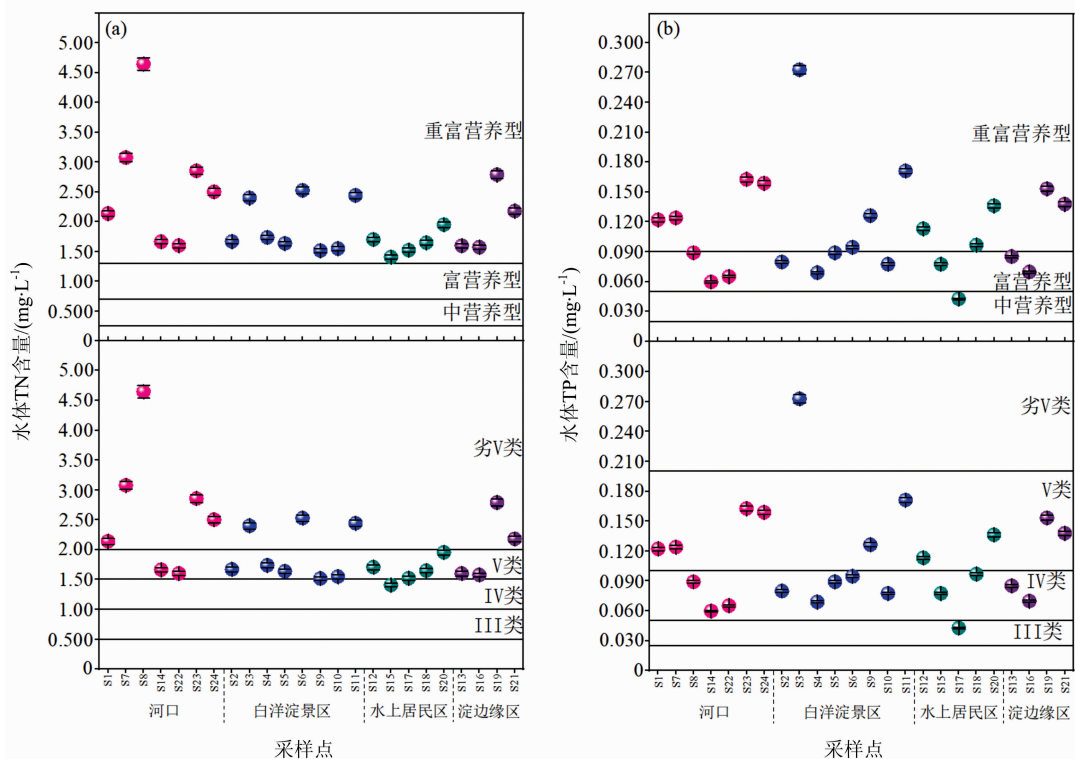


图 2 本研究水体的水质评价和富营养化类型评价

Fig. 2 Water quality evaluation and eutrophication type evaluation in water

对比我国《地表水环境质量标准》,基于 TN 含量,该湖泊 V 类及劣 V 类水质的采样点占 95.8%;基于 TP 含量,该湖泊 IV 类及以上水质占 95.8%。对比我国《湖泊富营养化调查规范》,基于 TN 含量,该湖泊所有采样点均为重富营养型;基于 TP 含量水平,该湖泊 41.7%的采样点为富营养型,54.2%为重富营养型。由此可见,白洋淀水体的氮磷污染严重。

2.1.2 水体中各形态氮磷的分布特征

水体中氮包括氨氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N)、亚硝态氮(NO_2^--N)和有机氮(ON)。 NO_2^--N 、 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 可直接被植物和藻类吸收利用,ON 是潜在氮源^[8]。白洋淀各采样点水体中形态氮含量分布如图 3(a)所示, NO_2^--N 含量很低, NO_3^--N 和 NH_4^+-N 总占比达到 54.9%,且白洋淀水体 TN 含量高,因此白洋淀水体氮形态分布特征不利于缓解白洋淀富营养状况。采样点 S8, S19 和 S3 的 NO_3^--N 和

NH_4^+-N 含量之和,应考虑作为重点控制区域。

水体中不同形态的磷对于富营养化的贡献不同,溶解性无机磷(DIP)反应活性最大,最容易被藻类等水生植物吸收利用;溶解性有机磷(DOP)可参与颗粒与植物表面的吸附解吸,可被进一步转化和利用;颗粒态磷难以被生物直接利用^[9]。因此, DIP 和 DOP 含量对于白洋淀富营养化影响更大。由图 3(b)可知,白洋淀 DOP 和 DIP 之和(相当于 TDP 的含量)占 TP 的比例达到 52.8%,说明白洋淀水体磷含量引起富营养化的风险较大。所有采样点中采样点 S3(郭口里村)的 TDP 含量远远高于其他区域,应作为重点控制区域。

2.2 底泥总氮总磷及各形态氮磷的分布特征及污染评价

2.2.1 底泥氮磷总量的分布特征及污染评价

白洋淀底泥中各采样点的 TN 和 TP 含量及相应的污染评价标准如图 4 所示。本研究的四个采样区域中底泥 TN 含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的平均值依次为 1 946(白洋淀景区) $>$ 1 586

(淀边缘区) > 1 197(水上居民区) > 1 159(河口), TP 含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 平均值依次为 694.8(淀边缘区) > 614.1(河口) > 594.5(白洋淀景区) > 476.2(水上居民区)。S4(荷花大观园)和 S3(郭口里村)底泥中的 TN 含量最高; S16(西淀头)和 S19(端村)底泥 TP 含量最高。S3 和 S4 均位于白洋淀景区水域, S16 和 S19 均位于淀边缘区附近。总体来看, 白洋淀景区和淀边缘区底泥 TN、TP 含量相对较高, 水上居民区底泥 TN、TP 含量相对较低。白洋淀景区旅游业发达, 常年接受大量的游客会加重生活源污染负担, 导致大量氮磷元素沉降

到底泥中, 造成底泥氮磷污染相对严重, 此外, 白洋淀景区生长着大量的动植物, 动植物残体分解也对于底泥氮磷有很大贡献。淀边缘区采样点靠近附近城镇, 大量生活污水、工业废水排入, 养殖产生的粪便和饲料残渣对底泥氮磷都有很大的贡献。水上居民区虽有居民造成的生活源污染, 但人口较少, 导致生活源污染小, 且远离附近城镇, 受城镇排入的生活生产污水影响小, 这可能造成该区域底泥氮磷污染较小。

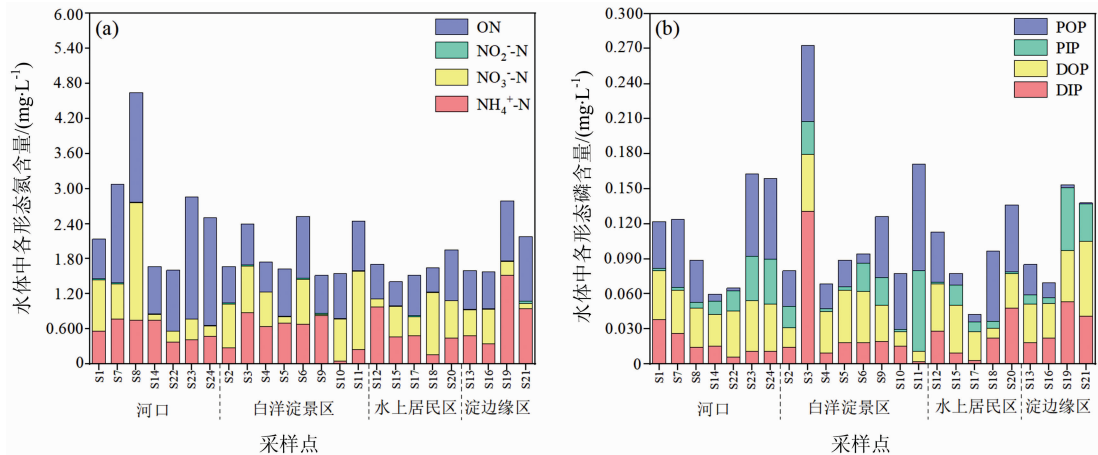


图 3 水体各采样点中形态(a)氮、(b)磷的含量

Fig. 3 N (a) and P (b) fractions concentrations in each sampling sites in water

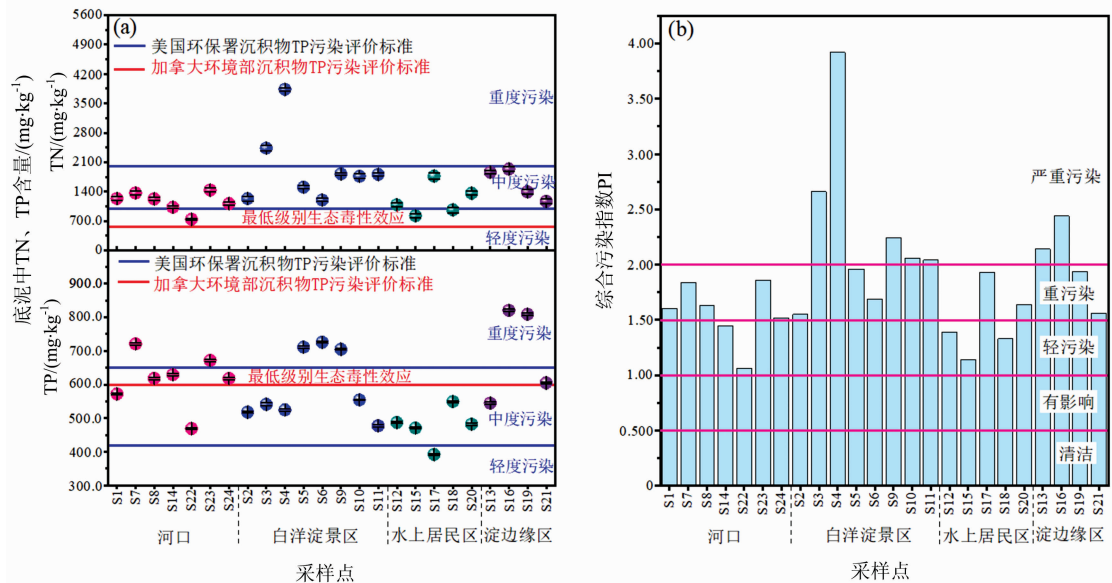


图 4 参照评价标准和综合污染指数的底泥氮磷污染评价

(a): 参照评价标准; (b): 参照综合污染指数

Fig. 4 N and P pollution evaluation of sediment with reference to evaluation standard and composite pollution index

(a): N and P pollution evaluation of sediment with reference to evaluation;

(b): N and P pollution evolution of composite pollution index

参照美国环保署制定的标准, 基于底泥 TN 含量, 79.2%的采样点处于中度污染, 8.33%的采样点 TN 含量处于重度污染; 基于 TP 含量, 66.7%的采样点处于中度污染,

29.2%的采样点处于重度污染[见图 4(a)]。参照加拿大环境部制定的标准, 基于底泥 TN 含量, 所有采样点均能引起最低级别生态毒性效应; 基于 TP 含量, 45.8%的采样点能引

起最低级别生态毒性效应[见图 4(a)]。依据综合污染指数, 20.8%的采样点为轻污染, 50.0%的采样点为重污染, 29.2%的采样点为严重污染[见图 4(b)]。因此, 白洋淀底泥氮磷有较为严重的污染, 氮磷二次释放会加剧水体富营养化。

2.2.2 底泥各形态氮磷分布特征

底泥中的氮形态主要包括可交换态氮(EN)、酸解态氮(HCl-N)、残渣态氮(Res-N), EN 主要包括 NH_4^+-N , $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- -\text{N}$ 。生物可利用性氮主要包括 EN 和 HCl-N^[7]。白洋淀各采样点底泥中各形态氮的含量如图 5(a)所示。各形态

氮平均含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)由大到小依次为: $481.6(\text{HCl-N}) > 78.85[\text{EN}(\text{NH}_4^+-\text{N})] > 18.24[\text{EN}(\text{NO}_3^- -\text{N})] > 0.190[\text{EN}(\text{NO}_2^- -\text{N})]$ 。这四种生物可利用性氮占 TN 的比例范围为 17.9%~66.4%。由图 5 可见, 四个采样区域生物可利用性氮的平均含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)依次为: $938.1(\text{白洋淀景区}) > 464.0(\text{淀边缘区}) > 392.0(\text{河口}) > 357.5(\text{水上居民区})$, 这和 TN 含量的分布规律相同, 白洋淀景区底泥 TN 含量高且对水体富营养化贡献大的生物可利用性氮含量高, 尤其 S3(郭口里村)、S4(荷花大观园)两个采样点, 应作为重点控制目标。

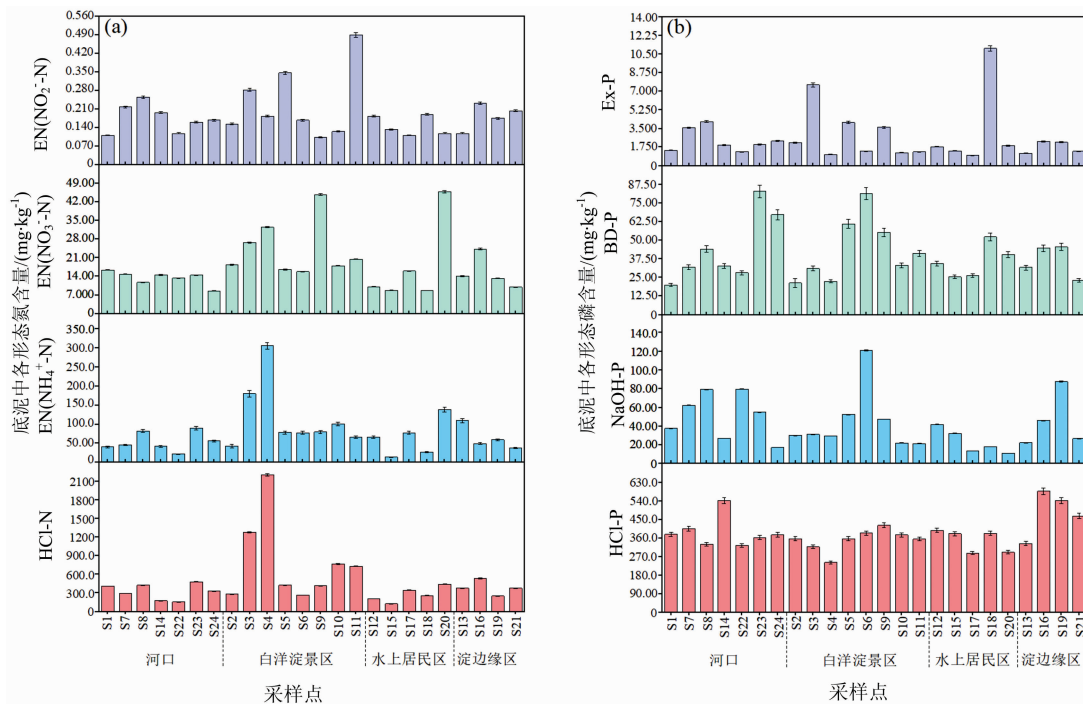


图 5 底泥各采样点形态(a)氮、(b)磷含量

Fig. 5 N (a) and P (b) fractions concentrations in each sampling sites in sediment

底泥中不同形态磷对于水体富营养化的贡献不同, 可分为: 弱吸附态磷(Ex-P)、可还原态磷(BD-P)、金属氧化物结合态磷(NaOH-P)、钙结合态磷(HCl-P)和残渣态磷(Res-P)。Ex-P, BD-P 和 NaOH-P 三种磷形态总和构成了生物有效态磷(BAP)^[10]。BAP 占 TP 的比例范围为 8.50%~28.0%。由图 5(b)可知, 四个采样区域 BAP 的平均含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)依次为: $97.48(\text{河口}) > 90.65(\text{白洋淀景区}) > 83.81(\text{淀边缘区}) > 62.73(\text{水上居民区})$, 其中所有采样点的 BAP 含量中, 采样点 S6(203.6), S23(139.8)和 S19(135.4)三个点高, 且这三个点底泥 TP 含量也相对较高, 可考虑作为重点控制目标。

2.3 基于主成分分析法的白洋淀氮磷污染综合评价

通过水和底泥氮磷总量及形态的分析, 筛选出对水体富营养化影响大的指标, 包括: 上覆水中的 TN, TP, $\text{NO}_3^- -\text{N}$, NH_4^+-N , ON, DIP 和 DOP; 底泥中的生物可利用性氮(EN, HCl-N)、生物可利用性磷(Ex-P, BD-P, NaOH-P)。利用主成分分析(PCA)法对以上指标进行分析, 得到各采样点 PCA

综合得分, 进而综合评估各采样点氮磷污染状况。结果如图 6 所示, 白洋淀北部污染尤其白洋淀景区污染严重, 应作为重点修复区域。

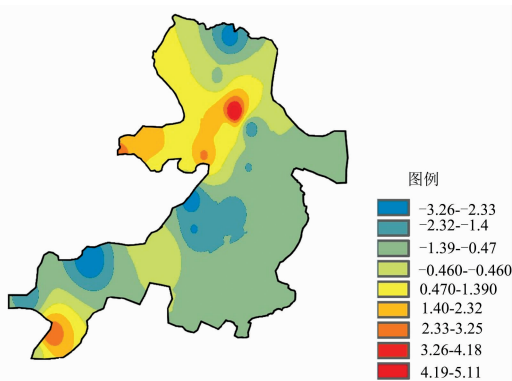


图 6 基于 PCA 得分的氮、磷污染空间分布图
Fig. 6 N, P pollution of Spatial distribution map based on PCA scores

2.4 基于 APCS-MLR 模型的源解析

采用 APCS-MLR 模型对各形态氮磷进行源解析。通过对水体和底泥中各形态氮磷的来源进行初步分析，最终选择了 16 个变量作为源解析的基础数据：水体中的 TP, POP, IP, OP, TN, NO₃⁻-N, NH₄⁺-N 和 ON；底泥中的 TP, BD-P, NaOH-P, OP, TN, EN(NO₃⁻-N), EN(NH₄⁺-N) 和 HCl-N。文献报道了这些指标的来源，因此通过所得到的各因子的污染源解析结果可初步确定各因子分别代表的污染来源，进而得到各污染源对各形态氮磷的贡献量。该模型在白洋淀氮磷污染源识别方面获得了较合理的研究结果，拟合系数为 0.40 ≤ R² ≤ 0.95，11 个指标的拟合系数大于 0.60，且各变量检测值与预测值的误差小。

图 7 是根据 APCS-MLR 受体模型得到的各污染源对于各形态氮磷的贡献。由图可知，APCS-MLR 模型提取了 5 个源因子，通过文献检索并结合白洋淀当地的污染情况，确定了这五个污染源分别为：工业、养殖业、动植物残体分解、生活源污染及农业。因子 1 相较于其他四种污染源，该因子对于各形态氮磷的贡献小。由于雄安新区的建设推动了白洋淀的修复工作，很多企业关停，大大降低了工业污水对白洋

淀的污染。另外大多数工厂主要分布在白洋淀附近的城镇，经府河等入水口排入淀内，受到水生植物净化等的影响，工业废水对于淀内各采样点氮磷的贡献相对较小。因此，本研究将因子 1 确定为工业污染。因子 2 对水体和底泥中多种形态氮磷有一定贡献，白洋淀养殖业的发展对于水体和底泥多种形态氮磷含量有较大贡献^[11]。因此，本研究将因子 2 确定为养殖业污染。因子 3 和因子 4 对于底泥各形态氮磷的贡献大，动植物残体分解和生活源污染是底泥各形态氮磷的重要来源，而生活源污染对水体和底泥中 NH₄⁺-N 的贡献大^[1, 12]。因此，将因子 3 确定为动植物残体分解，因子 4 确定为生活源污染。流域内很大比例的氮磷来源于农业污染，因子 5 对于水体各形态氮磷都有很大的贡献^[13]。因此，将因子 5 确定为农业污染。

综上，利用 APCS-MLR 模型进行源解析在一定程度上可以得到相对可靠的结果。从源解析结果来看，生活源污染对于白洋淀水体和底泥氮磷各形态的贡献最大，养殖业、农业及动植物残体分解的贡献也相对较大。因此，对于这几种污染来源尤其生活源污染的控制非常必要。

3 结 论

(1) 白洋淀水体氮磷污染状况较为严重，尤其总氮含量严重超标。通过对水体中各形态氮磷含量分析，对水体富营养化贡献大的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 占 TN 比例为 54.9%，DIP 和 DOP 占 TP 的比例为 52.8%，不利于白洋淀富营养化的缓解。

(2) 白洋淀各采样点的底泥受到不同程度的氮磷污染，区域差异大。底泥生物可利用性氮占 TN 的比例为 17.9%~66.4%，生物可利用性磷(BAP)占 TP 的比例范围为 8.50%~28.0%，说明底泥氮磷释放可能加剧白洋淀水体富营养化状况。

(3) 根据主成分分析结果，白洋淀景区污染严重，应作为重点治理区域。APCS-MLR 源解析结果表明生活源污染对于各形态氮磷含量贡献最大，其他污染源也对各形态氮磷含量有不同程度的贡献。

(4) 根据研究结果，相关部门应对白洋淀景区等区域进行重点治理，可通过减少五大污染源尤其生活源污染缓解白洋淀水体富营养化问题。未来可结合其他富营养化指标以及重金属、有机污染物等污染状况，对白洋淀进行综合治理。

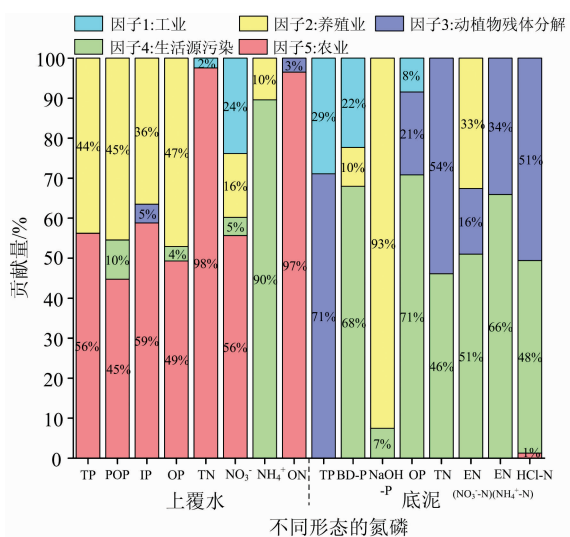


图 7 根据 APCS-MLR 受体模型得到的不同来源对于各形态氮磷的贡献

Fig. 7 The contribution of different sources to various nitrogen and phosphorus fractions according to the APCS-MLR receptor model

References

[1] DU Yi-heng, LIU Cheng, CHEN Kai-ning, et al(杜奕衡, 刘 成, 陈开宁, 等). Journal of Lake Sciences(湖泊科学), 2018, 30 (6): 1537.

[2] Ji N, Wang S, Zhang L. Science of the Total Environment, 2017, 601-602: 1544.

[3] Ji Z, Zhang Y, Zhang H, et al. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 174: 417.

[4] Fang T. Continental Shelf Research, 2004, 24(12): 1285.

[5] Hupfer M, Gächter R, Giovanoli R. Aquatic Sciences, 1995, 57(4): 305.

[6] Smart M, Rada R, Donnermeyer G. Water Research, 1983, 17(9): 1207.

[7] WANG Shu-hang, JIANG Xia, ZHONG Li-xiang, et al(王书航, 姜 霞, 钟立香, 等). Environmental Science(环境科学), 2010, 31

(4): 946.

- [8] Herbert R. FEMS Microbiology Reviews, 1999, 23: 563.
- [9] Lin P, Klump J, Guo L. Science of the Total Environment, 2016, 541: 1070.
- [10] Jing L, Liu X, Bai S, et al. Ecological Engineering, 2015, 82: 267.
- [11] Zhu Y, Jin X, Tang W, et al. Journal of Environmental Sciences, 2019, 76: 319.
- [12] ZHU Yao-yao, JIN Xin, MENG Xin, et al(朱曜曜, 金鑫, 孟鑫, 等). Acta Scientiae Circumstantiae(环境科学学报), 2018, 38(6): 2435.
- [13] Yang J, Strokal M, Kroeze C, et al. Agricultural Water Management, 2019, 213: 62.

Study on Distribution Characteristics of Different Nitrogen and Phosphorus Fractions by Spectrophotometry in Baiyangdian Lake and Source Analysis

YAO Shan¹, ZHANG Xuan-ling¹, CAI Yu-xin¹, HE Lian-qiong¹, LI Jia-tong¹, WANG Xiao-long¹, LIU Ying^{1, 2*}

1. College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China

2. Beijing Engineering Research Center of Food Environment and Public Health, Minzu University of China, Beijing 100081, China

Abstract Nitrogen and phosphorus are the key limiting factors of lake eutrophication. The study on the distribution characteristics and source analysis of nitrogen and phosphorus fractions in water and sediment can effectively reveal the process and mechanism of water eutrophication and analyze the pollution sources. As one of the most important water sources in the Xiongan New Area, the eutrophication of Baiyangdian Lake is serious, and the pollution of nitrogen and phosphorus is not optimistic. The study on the distribution characteristics and source analysis of nitrogen and phosphorus fractions is helpful to the analysis of nitrogen and phosphorus pollution in this area. However, there are few studies on the distribution of nitrogen and phosphorus fractions in sediment and water simultaneously, and the quantitative analysis of the contribution of nitrogen and phosphorus fractions by various pollution sources using models. In this study, the distribution characteristics of nitrogen and phosphorus in water and sediments of Baiyangdian Lake were studied by spectrophotometry. The contribution of different sources to nitrogen and phosphorus fractions was analyzed based on absolute principle components score combined with multivariate linear regression (APCS-MLR) model. The results showed that the content of total nitrogen (TN) ($1.41 \sim 4.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) in the water of Baiyangdian Lake exceeded the environmental quality standards and were all heavy eutrophication; the total phosphorus (TP) content ($0.043 \sim 0.273 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) in the water was also relatively seriously polluted, 95.8% of the sampling point were water quality of Class IV and above. The total proportion of ammonia nitrogen (NH_4^+-N) and nitrate nitrogen (NO_3^--N) that could be directly absorbed and utilized by algae and plants reached 54.9%. In addition, the dissolved inorganic phosphorus (DIP) and dissolved organic phosphorus (DOP), which contributed a great deal to the eutrophication of water accounted for 52.8%. The distribution regularity of nitrogen and phosphorus total amount and fractions showed that the eutrophication of Baiyangdian Lake was not optimistic, the pollution of Baiyangdian scenic area and margin area was relatively serious, and the proportion of nitrogen and phosphorus fractions which had great influence on water eutrophication was large. The ratio of bioavailable nitrogen (the sum of EN and HCl-N) to TN was 17.9%~66.4%, and the proportion of bioavailable phosphorus (BAP) in TP was 8.50%~28.0%. These results indicated a great risk of nitrogen and phosphorus release in the sediments of Baiyangdian Lake. The results of the principal component analysis showed that nitrogen and phosphorus pollution in Baiyangdian scenic area was more serious than that in other areas. The results of the APCS-MLR model showed that the contribution of domestic source pollution to nitrogen and phosphorus fractions were large, especially in sediments, agricultural pollution, animal and plant residues decomposition and aquaculture also contributed significantly to the content of different nitrogen and phosphorus fractions.

Keywords Spectrophotometry; Water; Sediments; Nitrogen and phosphorus fractions; Principal component analysis; APCS-MLR model

* Corresponding author

(Received Apr. 19, 2021; accepted Jun. 21, 2021)