

doi:11.12097/j.issn.1671-2552.2023.11.014

白洋淀表层沉积物氮磷分布、储量及污染评价

尹德超¹, 王雨山^{1*}, 祁晓凡^{1,2}, 王旭清¹, 安永会¹, 杨进平¹

YIN Dechao¹, WANG Yushan^{1*}, QI Xiaofan^{1,2}, WANG Xuqing¹, AN Yonghui¹, YANG Jinping¹

1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051;

2. 中国地质调查局地质环境监测院, 北京 100081

1. Center For Hydrogeology and Environmental Geology, CGS, Baoding 071051, Hebei, China;

2. China Institute of Geo-Environmental Monitoring, CGS, Beijing 100081, China

摘要:白洋淀是雄安新区核心生态功能区,为查明白洋淀表层沉积物氮磷分布特征、储量及污染程度,系统开展了氮磷营养盐调查及污染评价。结果表明:白洋淀底泥层总氮含量为 528.5~10566.5 mg/kg,均值为 2859.91 mg/kg,总磷含量为 425.7~2446.0 mg/kg,均值为 789.22 mg/kg;过渡层总氮含量为 318.5~4662.0 mg/kg,均值为 1706.7 mg/kg,总磷含量为 315.05~976.30 mg/kg,均值为 598.97 mg/kg;表层沉积物总氮总储量为 15.86×10^4 t,其中底泥层总氮储量为 3.76×10^4 t,过渡层总氮储量为 12.10×10^4 t;总磷总储量为 5.54×10^4 t,其中底泥层总磷储量为 1.02×10^4 t,过渡层总磷储量为 4.52×10^4 t。根据综合污染指数法评价结果,白洋淀湿地底泥层氮磷污染程度均为重度,过渡层除烧车淀为重度外,其余各淀泊均为中度或轻度。

关键词:白洋淀;表层沉积物;氮磷;储量;污染评价

中图分类号:P941.78;X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)11-1983-10

Yin D C, Wang Y S, Qi X F, Wang X Q, An Y H, Yang J P. Distribution, reserves and pollution evaluation of nitrogen and phosphorus in surface sediments of Baiyangdian Lake. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(11): 1983-1992

Abstract: Baiyangdian Lake is the main ecological function area of Xiong'an New Area. In order to find out the distribution characteristics of nitrogen and phosphorus in the surface sediments of Baiyangdian Lake and evaluate the pollution degree of nitrogen and phosphorus, we carried out the investigation and pollution assessment of nitrogen and phosphorus in Baiyangdian Lake. The results indicate that the total nitrogen(TN) content of sludge layer of surface sediments are 528.5~10566.5 mg/kg, and the average is 2859.91 mg/kg. The total phosphorus(TP) content of sludge layer is 425.7~2446.0 mg/kg, and the average is 789.22 mg/kg. The TN content of transition layer is 318.5~4662.0 mg/kg, and the average is 1706.7 mg/kg. The TP content of transition layer is 315.05~976.30 mg/kg, and the average is 598.97 mg/kg. The total TN reserves of surface sediments are 15.86×10^4 t, among which the TN reserves of sludge layer are 3.76×10^4 t and the TN reserves of transition layer are 12.10×10^4 t. The total TP reserves of surface sediments are 5.54×10^4 t, among which the TP reserves of sludge layer are 1.02×10^4 t and that of transition layer are 4.52×10^4 t. According to the evaluation result of comprehensive pollution index method, the sludge layer of surface sediments in Baiyangdian Lake have been heavily polluted. As for the transition layer, except Shaoche Lake, which is severely polluted, the other lakes are all moderately polluted or slightly polluted.

Key words: Baiyangdian Lake; surface sediments; nitrogen and phosphorus; reserves; pollution evaluation

白洋淀(东经 115°45'~116°07', 北纬 38°43'~40°00') 地,发挥着调节气候、蓄水兴利、旅游景观、维持生物多样性等多种重要生态功能(易雨君等, 2020)。位于河北省中部,是中国北方最具代表性的湖泊湿

收稿日期:2021-08-20;修订日期:2021-10-20

资助项目:中国地质调查局项目《白洋淀地区生态地质调查》(编号:DD20190300)和国家重点研发计划课题(编号:2021YFC3200504)

作者简介:尹德超(1990-),男,硕士,工程师,从事水文地质生态地质调查研究。E-mail:yindechao@mail.cgs.gov.cn

* 通信作者:王雨山(1984-),男,硕士,正高级工程师,从事水文地质生态地质调查研究。E-mail:wangyushan@mail.cgs.gov.cn

在气候变化和人类活动影响下,20 世纪 80 年代以来,白洋淀生态环境受到严重破坏,生态系统退化、水体富营养化等生态环境问题屡见报道。2017 年,中共中央、国务院决定成立河北雄安新区,白洋淀湿地作为其核心生态功能区,湿地生态环境的保护与修复显得更加重要。表层沉积物作为白洋淀湿地的重要组成部分,是氮、磷营养盐的重要载体,沉积物中的氮磷可在湖泊流动、生物扰动、氧化还原环境改变的情况下,扩散到水体中,成为湖泊的内源污染物,造成湖泊水体富营养化 (Ellen et al., 2001; Sndergaard et al., 2003; Vicente et al., 2003; Li et al., 2012)。

近年来,关于白洋淀湿地表层沉积物氮磷分布特征、环境质量及污染评价方面的研究已取得一定的成果。王亚琼等 (2017) 开展了白洋淀沉积物-沉水植物-水系统氮磷分布特征研究,杜奕衡等 (2018)、李成瑶等 (2021) 分别开展了白洋淀沉积物氮磷释放通量研究,李再兴等 (2019) 开展了白洋淀冰封期沉积物氮的赋存形态及分布特征研究,汪敬忠等 (2020) 对白洋淀表层沉积物氮磷及重金属元素的空间分布、风险评价及来源开展了分析。众多学者一致认为,白洋淀浅表层沉积物氮磷污染严重,存在向地表水扩散的风险。

前人对白洋淀湿地沉积物氮磷分布规律的研究主要集中于浅表层 5~10 cm,一般不超过 20 cm,仅有少量的垂向剖面可评价淀区浅表层以下沉积物的氮磷含量及污染程度,对浅表层以下沉积物氮磷分布及污染程度尚未进行过全面系统研究。基于此,本次研究针对白洋淀不同深度表层沉积物采集了大量样品,基于高密度采样刻画白洋淀湿地表层沉积物氮磷分布特征,计算沉积物氮磷储量,并采用综合污染指数法对表层沉积物氮磷污染进行评价,以期对白洋淀湿地生态保护与修复提供借鉴。

1 研究区概况

白洋淀湿地位于京津冀腹地、雄安新区东南部,是华北平原最大的淡水湿地系统,素有“华北明珠”之称,对维护华北地区生态环境具有不可替代的作用。白洋淀湿地入淀河流有 8 条,自南向北分别为潞龙河、孝义河、唐河、府河、漕河、瀑河、萍河、白沟引河,其中孝义河、府河以城市中水为主,为常年入淀河流,其他河流仅在汛期或生态补水期有少

量径流入淀,大部分时间处于干涸状态 (李刚等, 2021; 毛欣等, 2021)。白洋淀东侧枣林庄水利枢纽为出水口,经赵王新河汇入大清河,东流入海。在自然和人为因素影响下,白洋淀湿地形成四周堤埝环绕、淀内沟壕相连、淀中有淀和水-田相间分布的生态格局 (王雨山等, 2021)。依据白洋淀湿地地貌格局及淀泊分布,将白洋淀划分为藻荇淀、烧车淀等 8 个亚区,各亚区多以近连续分布的台田为边界。其中烧车淀、池鱼淀亚区水域开阔,围埝及台田分布较少,水体连通性好;南刘庄、王家寨亚区台田及居民地分布集中,水体连通性一般;藻荇淀、捞王淀、泛鱼淀、小白洋淀围埝纵横,水体连通性差。

白洋淀湖泊沉积物垂向上从浅到深可分为底泥层、过渡层和沉积层。其中底泥层沉积物与湿地水体接触,为含水率较高 (多大于 40%)、呈流塑状的黑灰色淤泥质粉质粘土,富含植物碎屑;过渡层沉积物位于底泥层以下,为含水率稍低 (多小于 40%)、呈软塑—硬塑状的深灰色粉土或粉质粘土。底泥层和过渡层共同构成淀泊表层的沉积物。表层沉积物分布与水域分布范围一致,面积 149.5 km²。

2 研究方法

2.1 样品采集及测试

2020 年,笔者在白洋淀及入淀河流采集沉积物样品 431 组,其中底泥层沉积物样品 267 组,过渡层沉积物样品 90 组;沉积物垂向分层采样点 6 个,样品 60 组;在孝义河、府河、白沟引河 3 条入淀河流采集河床表层沉积物样品 14 组。

淀区底泥层沉积物调查采样设备为 Corer 柱状采泥器,采样管直径 60 mm,在调查采样时将采样器下压,穿过流塑—软塑状底泥层,至过渡层后将取样器提出,记录底泥层厚度,并采集上部 0~10 cm 底泥层样品,若底泥层厚度不足 10 cm,采集全部。过渡层沉积物采样设备为便携式汽油冲击钻,岩心管长度 1 m,直径 50 mm,取样时钻进 1.0 m,取心描述岩性记录过渡层厚度,若未揭露沉积层则继续钻进,采集过渡层顶部 0~10 cm 样品,若过渡层厚度不足 10 cm,采集全部。入淀河流表层沉积物采集采用 Corer 柱状采泥器,取样深度为表层 0~10 cm。垂向分层样品分段采集,上段底泥层沉积物采用 Corer 柱状采泥器,下段过渡层及沉积层采用便携

式汽油钻,取样深度 1.0 m,取样间隔为 10 cm,每个取样点共采集样品 10 组。白洋淀湿地各亚区划分及表层沉积物调查取样点分布如图 1 所示。

表层沉积物样品采集后装入塑料自封袋中,将分层样品混匀后置于低温保温箱内保存,在 24 h 内带回实验室 4℃ 下冷藏。样品测试工作由河北省地质实验测试中心实验室完成,测试项目包括重量含水率、总氮(TN)含量、总磷(TP)含量等,其中含水率测定采用烘干法,总氮测试采用凯氏自动定氮仪 K1100,总磷测试采用 X 射线荧光光谱仪。

2.2 沉积物氮磷储量计算方法

白洋淀表层沉积物 TN、TP 含量和含水率随深度增大而减小,并逐渐趋于稳定,TN、TP 含量和含水率随深度变化基本衰减符合指数型函数:

$$X(z) = X_0 \cdot \alpha^{(z-0.05) \cdot 10} \quad (1)$$

式中: z 为表层沉积物任一点深度(m); $X(z)$ 为 z 深度氮磷含量或含水率; X_0 为底泥层或过渡层上部 0~10 cm 样品中点(即 0.05 m)位置氮磷含量或含水率; α 为 TN、TP 及含水率衰减系数,分别取相邻垂向分层样品 TN、TP 及含水率比值均值。

一定厚度底泥层或过渡层沉积物氮磷含量或含水率平均值可由以下公式计算:

$$\bar{X} = \frac{\int_0^h X_0 \cdot \alpha^{(z-0.05) \cdot 10} dz}{h} = \frac{X_0(\alpha^{10h} - 1)}{10 \cdot h \cdot \sqrt{\alpha} \cdot \ln(\alpha)} \quad (2)$$

式中: $\bar{X}$ 为沉积物 TN、TP 或含水率平均值; h 为底泥层或过渡层沉积物厚度(m)。

白洋淀表层沉积物处于饱水状态,可根据含水率平均值计算沉积物自然干密度,计算公式为:

$$\rho = \frac{\rho_w \rho_s (1 - \omega)}{\rho_s \omega + \rho_w (1 - \omega)} \quad (3)$$

式中: ρ 为沉积物自然干密度(10^3 kg/m^3); ρ_w 为沉积物孔隙水密度,取 $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; ρ_s 为沉积物颗粒密度,取 $2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; ω 为沉积物重量含水率平均值(%)。

通过以上计算得出沉积物 TN 和 TP 平均含量及沉积物平均自然干密度,表层沉积物氮磷储量计算公式为:

$$M = h \times A \times \rho \times C \quad (4)$$

式中: M 为沉积物氮(磷)总储量(t); h 为沉积物厚度(m); A 为白洋淀沉积物分布面积(km^2); ρ

为沉积物自然干密度(10^3 kg/m^3); C 为沉积物氮(磷)平均含量(mg/kg)。

2.3 沉积物氮磷污染评价方法

白洋淀表层沉积物氮磷评价采用综合污染指数法(岳维忠等,2007;杨洋等,2014;王艳平等,2021),计算公式:

$$S_i = C_i / C_s \quad (5)$$

$$FF = \sqrt{\frac{F^2 + F_{\max}^2}{2}} \quad (6)$$

式中: S_i 为单项评价指数(i 代表 TN 或 TP), $S_i > 1$ 表示该指标含量超过评价标准值; C_i 为评价因子 i 的实测含量; C_s 为评价因子 i 的标准含量。 FF 为综合污染指数; F 为 n 项评价因子污染指数的平均值(S_{TN} 和 S_{TP} 的平均值); $F_{\max}$ 为最大单项评价指数(S_{TN} 和 S_{TP} 的最大值)。参照沉积物综合污染程度分级标准(表 1),得到白洋淀表层沉积物总氮和总磷的污染等级。

2.4 数据处理及图件编制

数据处理与分析采用 Excel 2016 和 SPSS 19.0 软件,数据空间分析及图件绘制采用 ArcGIS 10.5 软件。

3 结果与讨论

3.1 表层沉积物氮、磷分布

3.1.1 底泥层 TN 和 TP 分布特征

白洋淀湿地底泥层 TN 含量为 528.5~10566.5 mg/kg,平均值为 2859.91 mg/kg,变异系数为 50.2%(表 2),总体分布特征为东北高、西南低(图 2)。TN 富集区主要为烧车淀、南刘庄、捞王淀北部、池鱼淀中部、泛鱼淀北部及小白洋淀西南部,TN 含量多大于 3500 mg/kg,局部大于 6000 mg/kg。藻荇淀西部、捞王淀南部、泛鱼淀南部 TN 含量较低,

表 1 沉积物综合污染程度分级标准

Table 1 Classification standard for comprehensive pollution degree of sediments

等级	S_{TN}	S_{TP}	FF	污染程度
1	<1.0	<0.5	<1.0	清洁
2	1.0~1.5	0.5~1.0	1.0~1.5	轻度污染
3	1.5~2.0	1.0~1.5	1.5~2.0	中度污染
4	>2.0	>1.5	>2.0	重度污染

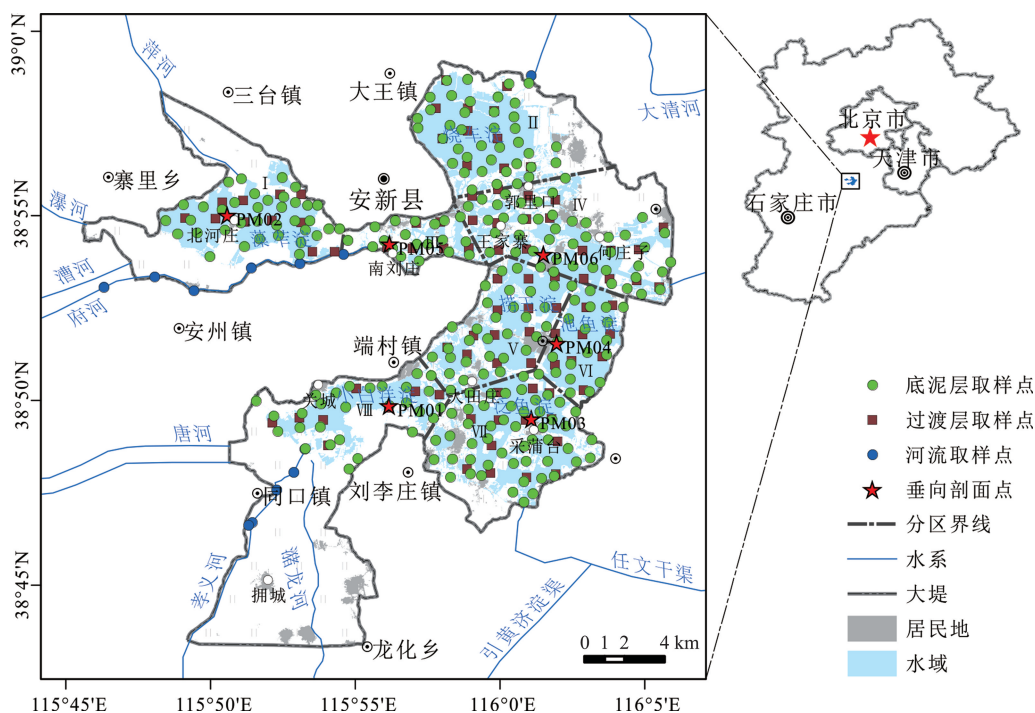


图1 白洋淀表层沉积物取样点分布图

Fig. 1 Distribution map of surface sediments samples in Baiyangdian Lake

I—藻荇淀; II—烧车淀; III—南刘庄; IV—王家寨; V—捞王淀; VI—池鱼淀; VII—泛鱼淀; VIII—小白洋淀

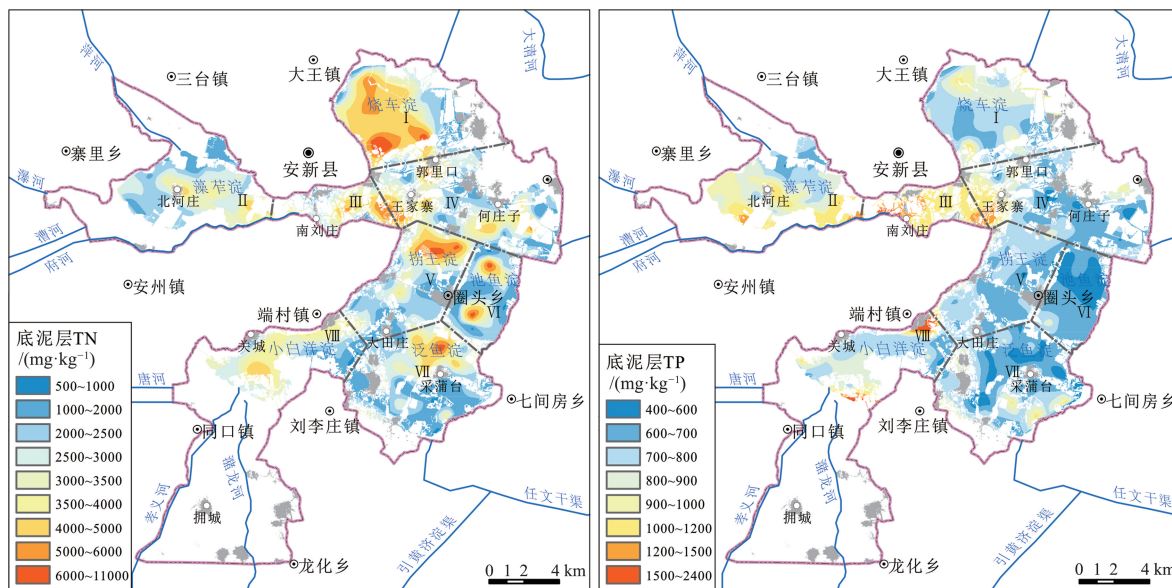


图2 白洋淀湿地底泥层 TN、TP 含量分布

Fig. 2 Distribution of TN and TP in the sludge layer of surface sediments of Baiyangdian Lake

多小于 3000 mg/kg。各亚区 TN 含量由高到低排序依次为:烧车淀>南刘庄>小白洋淀>捞王淀>王家寨>藻荇淀>泛鱼淀>池鱼淀。各亚区底泥层 TN 含量均大于入淀河流沉积物的 TN 含量(2009.14 mg/kg)。

本次研究期间,白洋淀底泥层总氮含量平均值略高于张国锋等(1995)的研究成果(2480 mg/kg),但低于汪敬忠等(2020)的测试结果(4020 mg/kg),总体分布规律基本一致,TN 含量最大值采样点均位于

表 2 白洋淀各亚区底泥层 TN、TP 含量
Table 2 Statistics of TN and TP content in the sludge layer of surface sediments of Baiyangdian Lake

组分	含量 /(mg·kg ⁻¹)	全淀区 n=267	藻荇淀 n=36	烧车淀 n=39	南刘庄 n=19	王家寨 n=44	捞王淀 n=31	泛鱼淀 n=51	池鱼淀 n=19	小白洋淀 n=28	入淀河流 n=14
TN	均值	2859.91	2677.53	3731.32	3267.89	2694.24	2716.23	2509.94	2472.42	2923.57	2009.14
	最小值	528.50	1029.00	919.00	891.00	618.50	1057.00	723.50	528.50	628.00	896.00
	最大值	10566.50	4682.50	10566.50	6248.50	5820.00	6724.50	7099.50	7059.00	4656.00	3633.00
	Cv	50.2%	29.7%	50.6%	42.3%	48.2%	52.4%	53.0%	74.6%	36.9%	46.68%
TP	均值	789.22	870.67	775.27	1135.49	748.13	709.85	703.69	620.56	891.66	1008.17
	最小值	425.70	587.70	581.35	743.20	511.30	572.60	435.10	425.70	502.00	719.50
	最大值	2446.00	1337.40	1138.70	1808.65	1375.70	887.10	1072.00	860.30	2446.00	1386.30
	Cv	29.5%	20.4%	17.8%	20.7%	22.6%	9.4%	20.3%	15.4%	49.0%	16.84%

烧车淀。

白洋淀底泥层 TP 含量为 425.7~2446.0 mg/kg,平均值为 789.22 mg/kg,变异系数 29.5%。总体分布规律为河流入淀口及人类农业活动集中区含量高,其他区域含量较低(图 2)。府河入淀口南刘庄片区 TP 含量最高,平均值为 1163.1 mg/kg。其次为小白洋淀东北部、藻荇淀南部、烧车淀北部局部地区,TP 含量多大于 900 mg/kg。烧车淀南部、王家寨东部、泛鱼淀北部及池鱼淀 TP 含量较低,多小于 700 mg/kg。池鱼淀底泥层 TP 含量最低,平均含量为 632.73 mg/kg。各亚区 TP 含量由高到低排序依次为:南刘庄>小白洋淀>藻荇淀>烧车淀>王家寨>捞王淀>泛鱼淀>池鱼淀。除南刘庄片区外,其他各亚区底泥层 TP 含量均低于入淀河流表层沉积物 TP 含量(1008.17 mg/kg)。白洋淀底泥层 TP 平均含量高于张国锋等(1995)的研究成果(640 mg/kg),略高于汪敬忠等(2020)的测试结果(730 mg/kg)。

通过中国东部主要湖泊表层沉积物 TN、TP 含量对比分析发现,白洋淀表层沉积物 TN、TP 含量处于较高水平(表 3),表层沉积物 TN 含量最高,TP 含量仅低于衡水湖。从平均含量看,白洋淀、衡水湖、南四湖等北方水动力较差的浅水湖泊表层沉积物 TN、TP 含量显著高于南方湖泊。

3.1.2 过渡层 TN 和 TP 分布特征

白洋淀过渡层 TN 含量为 318.5~4662.0 mg/kg,平均值为 1706.7 mg/kg,平均值为底泥层 TN 含量的 59.7%,总体呈现北高南低的分布特征(图 3)。

北部烧车淀 TN 含量最高,平均值为 2633.62 mg/kg,南刘庄片区其次,平均值为 2134.00 mg/kg。南部淀区除小白洋淀西南部含量较高外,其他淀区过渡层 TN 含量多小于 1500 mg/kg,以东南部泛鱼淀过渡层 TN 含量最低,平均值为 1120.54 mg/kg。过渡层 TN 分布与底泥层相似,均为烧车淀含量最大,东南部淀区含量最小。

白洋淀过渡层 TP 含量为 315.05~976.30 mg/kg,平均值为 598.97 mg/kg,平均值为底泥层 TP 含量的 75.9%,总体呈现西高东低的分布特征(图 3)。南刘庄、藻荇淀、小白洋淀过渡层 TP 含量较高,多大于 600 mg/kg,以南刘庄片区最高,平均含量为 778.38 mg/kg。东部区域除王家寨西部、烧车淀中北部、泛鱼淀南部、池鱼淀东北部局部地区含量较高外,其他淀区

表 3 中国东部主要湖泊表层沉积物 TN、TP 含量对比
Table 3 Comparison of TN and TP content in surface sediments of major lakes in Eastern China

湖泊	TN/(mg·kg ⁻¹)	TP/(mg·kg ⁻¹)	来源
白洋淀	2859.9	789.2	本文
衡水湖	1850	1020	张嘉文等,2020
南四湖	2500	720	李爽等,2013
巢湖	1088	585	王艳平等,2021
洪泽湖	1020	580	余辉等,2010
太湖	1349	486	杨洋等,2014
洞庭湖	1046	242	刘俊,2019
洱海	514	267	李延鹏等,2013
鄱阳湖	1216	506	王圣瑞等,2012

表 4 白洋淀各亚区过渡层 TN、TP 含量统计

Table 4 Statistics of TN and TP content in the transition layer of surface sediments of Baiyangdian Lake

组分	含量 /(mg·kg ⁻¹)	全淀区 n=90	藻荇淀 n=11	烧车淀 n=13	南刘庄 n=6	王家寨 n=16	捞王淀 n=13	池鱼淀 n=9	泛鱼淀 n=14	小白洋淀 n=8
TN	均值	1706.81	1763.00	2633.69	2134.17	1613.25	1297.54	1513.11	1120.64	1898.75
	最小值	319.00	559.00	1080.00	658.00	319.00	567.00	544.00	400.00	1015.00
	最大值	4662.00	2883.00	4662.00	4218.00	2998.00	3704.00	2822.00	2345.00	3795.00
	Cv	58.96%	37.06%	49.00%	58.45%	54.25%	71.02%	52.26%	60.57%	46.15%
TP	均值	598.97	677.73	588.38	778.50	588.63	481.33	550.61	582.45	668.38
	最小值	315.00	508.00	315.00	541.00	442.60	335.80	384.20	348.30	560.00
	最大值	976.00	874.00	779.00	976.00	841.00	608.80	958.40	841.00	747.00
	Cv	22.01%	15.80%	19.38%	18.21%	16.67%	16.30%	33.30%	18.58%	9.49%

过渡层 TP 含量多小于 600 mg/kg,以捞王淀过渡层 TP 含量最低,平均值为 481.33 mg/kg。与 TN 类似,过渡层 TP 整体分布规律与底泥层相近,富集区主要分布于河流入淀口周边。

3.1.3 TN、TP 和含水率垂向分布特征

白洋淀 6 个垂向剖面采样点底泥层及过渡层沉积物厚度如表 5 所示,底泥层沉积物厚度为 0.06~0.57 m,平均值为 0.23 m,过渡层厚度为 0.30~0.42 m,平均值为 0.36 m。

垂向分层样品测试结果显示(图 4),6 个剖面的沉积物 TN、TP 和含水率数值存在差异,但各剖面垂向变化规律基本一致:TN、TP 和含水率最初均表现为随深度增加而减小,并出现明显拐点,且拐点出现深度与底泥层底界深度相近;拐点之后,TN 和含水率下降趋势减缓,TP 含量则趋于稳定,个别剖面(如 PM04)拐点之后,TP 含量甚至随深度增大而增大,但仍低于拐点之前的含量水平。由此表明,底泥层 TN、TP 和含水率普遍高于过渡层及沉积层,且底泥层 TN、TP 和含水率随深度减小的速率大于过渡层及沉积层;从氮磷含量随深度变化曲线看,沉积物 TP 含量变化规律比 TN 含量变化规律复杂。

表 5 各垂向剖面底泥层和过渡层厚度

Table 5 Thickness of sludge layer and transition layer of each vertical section

层位	PM01	PM02	PM03	PM04	PM05	PM06
底泥层	0.20	0.06	0.20	0.23	0.57	0.12
过渡层	0.42	0.34	0.30	0.42	0.33	0.35

统计发现,6 个采样点底泥层沉积物的 TN、TP 和含水率衰减系数 α 分别为 0.87 ± 0.09 、 0.86 ± 0.22 和 0.90 ± 0.09 ,过渡层沉积物的 TN、TP 和含水率衰减系数 α 分别为 0.96 ± 0.09 、 0.93 ± 0.19 和 0.97 ± 0.08 。底泥层沉积物的 TN、TP 和含水率衰减系数 α 均小于过渡层,表明底泥层沉积物沉积物的 TN、TP 和含水率衰减速率大于过渡层沉积物。底泥层和过渡层 TN 和含水率衰减系数 α 的标准差均小于 0.1,表明 TN 和含水率随深度衰减趋势较稳定,且不同垂向剖面 TN 和含水率随深度衰减规律基本一致,符合指数衰减规律。底泥层和过渡层 TP 衰减系数 α 的标准差分别为 0.22 和 0.19,表明 TP 含量随深度变化规律更复杂,与此前认识基本一致。

3.2 表层沉积物氮、磷储量

白洋淀表层沉积物调查结果显示,白洋淀不同淀区底泥层及过渡层厚度有差异,全淀区底泥层沉积物厚度 0.03~0.60 m,平均厚度 0.15 m,表层 0~10 cm 含水率 31.05%~83.36%;过渡层沉积物厚度 0~1.06 m,平均厚度 0.46 m,上部 0~10 cm 含水率 18.03%~56.23%。根据各亚区底泥层和过渡层沉积物厚度、表层 0~10 cm 段含水率,依据公式(1)~(3)计算各亚区平均含水率和平均自然干密度(表 6)。根据白洋淀各亚区底泥层和过渡层沉积物厚度及表层 0~10 cm 段 TN 和 TP 含量,依据公式(1)和(2)计算白洋淀各亚区底泥层及过渡层 TN 和 TP 平均含量,依据公式(4)计算各亚区氮磷储量(表 7)。

计算结果显示,白洋淀表层沉积物 TN 总储量为 15.86×10^4 t,其中底泥层 TN 储量为 3.76×10^4 t,

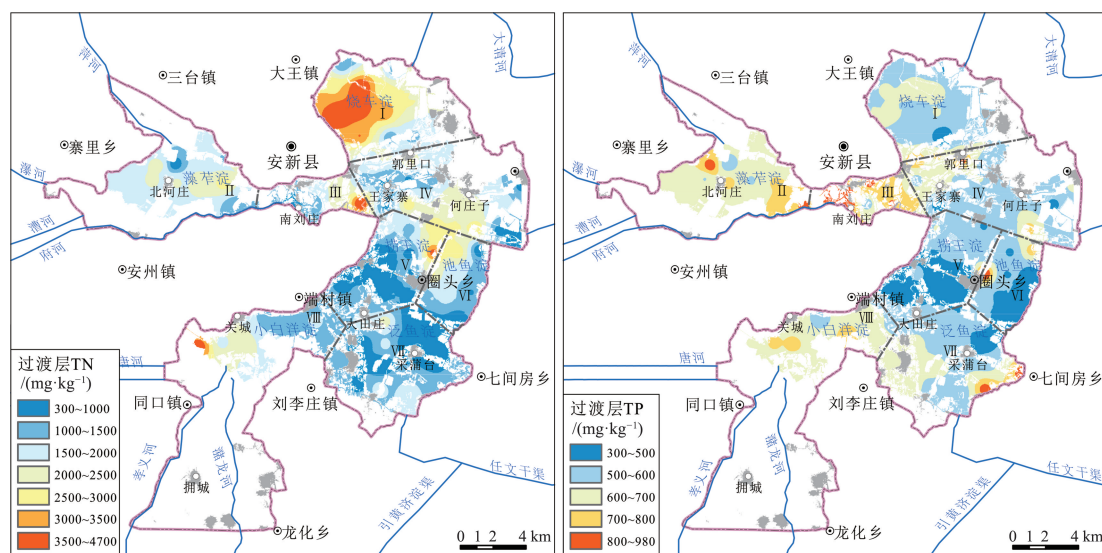


图 3 白洋淀湿地过渡层 TN、TP 分布

Fig. 3 Distribution of TN and TP in the transition layer of surface sediments of Baiyangdian Lake

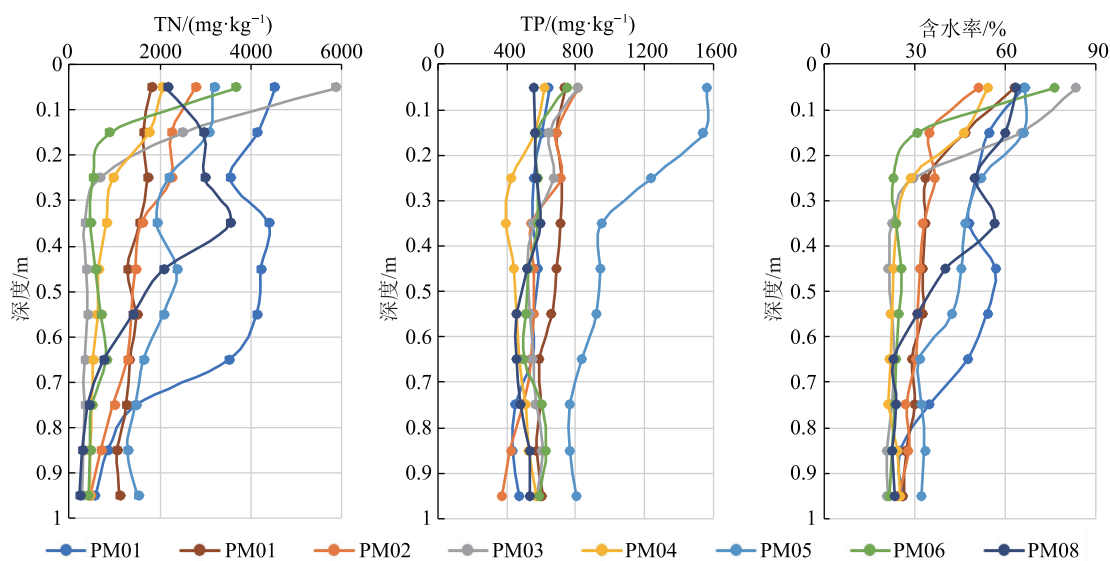


图 4 白洋淀沉积物 TN、TP 含量及含水率垂向分布

Fig. 4 The vertical distribution of TN, TP and water content in the sediments of Baiyangdian Lake

占总储量的 23.7%, 过渡层 TN 储量为 12.10×10^4 t, 占比 76.3%。白洋淀表层沉积物 TP 总储量为 5.54×10^4 t, 其中底泥层 TP 储量为 1.02×10^4 t, 占总储量的 18.4%, 过渡层 TP 储量为 4.52×10^4 t, 占比 81.6%。

通过各亚区氮磷储量对比, 烧车淀表层沉积物 TN 和 TP 储量最大, 分别为 4.47×10^4 t 和 0.96×10^4 t, 占淀区氮磷总储量的 25.67% 和 17.36%; 南刘庄片

区 TN 和 TP 储量最小, 分别占淀区氮磷总储量的 3.55% 和 3.81%。

与中国中东部浅水湖泊相比, 白洋淀表层沉积物 TN 储量与巢湖 TN 储量 (15.8×10^4 t) 相近, TP 储量约为巢湖沉积物 TP 储量 (9.8×10^4 t) 的 1/2 (王艳平等, 2021)。然而, 巢湖水域面积为 770 km², 白洋淀表层沉积物分布面积仅为 149.5 km²。单位面积表层沉积物氮磷储量对比发现, 白洋淀湿地单位

表 6 白洋淀各亚区表层沉积物平均含水率和自然干密度计算结果

Table 6 Calculation results of surface sediment mean moisture content and natural dry density in each sub-area of Baiyangdian Lake

亚区	面积	厚度/m		表层含水率		平均含水率		平均自然干密度/(10 ³ kg·m ⁻³)	
		底泥层	过渡层	底泥层	过渡层	底泥层	过渡层	底泥层	过渡层
藻荇淀	22.09	0.11	0.42	0.49	0.31	0.49	0.29	0.74	1.23
烧车淀	24.89	0.15	0.55	0.53	0.40	0.51	0.36	0.69	1.03
南刘庄	5.24	0.21	0.35	0.64	0.35	0.60	0.34	0.53	1.10
王家寨	21.57	0.15	0.42	0.58	0.32	0.56	0.30	0.59	1.21
捞王淀	20.31	0.13	0.47	0.59	0.30	0.57	0.28	0.57	1.26
池鱼淀	14.82	0.14	0.60	0.57	0.31	0.56	0.28	0.60	1.28
泛鱼淀	25.38	0.13	0.43	0.56	0.31	0.55	0.29	0.61	1.23
小白洋淀	15.20	0.22	0.37	0.65	0.37	0.60	0.35	0.53	1.06
全淀区	149.50	0.15	0.46	0.58	0.33	0.56	0.31	0.60	1.18

表 7 白洋淀各亚区表层沉积物 TN、TP 储量计算结果

Table 7 Calculation results of TN and TP reserves in surface sediments of Baiyangdian Lake

亚区	TN 含量均值		TP 含量均值		TN 储量			TP 储量		
	底泥层	过渡层	底泥层	过渡层	底泥层	过渡层	总计	底泥层	过渡层	总计
藻荇淀	2662.09	1575.32	866.95	645.84	0.48	1.80	2.27	0.15	0.74	0.89
烧车淀	3602.26	2255.33	756.10	550.43	0.93	3.14	4.07	0.19	0.77	0.96
南刘庄	3026.03	1957.73	1075.18	750.33	0.17	0.39	0.56	0.06	0.15	0.21
王家寨	2605.66	1441.65	730.55	560.96	0.49	1.58	2.07	0.14	0.62	0.75
捞王淀	2651.60	1138.23	697.76	455.03	0.41	1.38	1.80	0.11	0.55	0.66
池鱼淀	2439.89	1270.15	689.64	510.61	0.30	1.45	1.76	0.09	0.58	0.67
泛鱼淀	2414.77	999.94	610.20	554.71	0.50	1.32	1.83	0.13	0.74	0.86
小白洋淀	2677.44	1729.72	837.70	642.27	0.48	1.02	1.50	0.15	0.38	0.53
全淀区	2759.96	1507.04	769.51	567.85	3.76	12.10	15.86	1.02	4.52	5.54

注:TN 和 TP 含量平均值单位为 mg/kg;TN 和 TP 储量单位为 10⁴ t

面积 TN 和 TP 储量分别为巢湖的 5.2 倍和 2.9 倍。由此反映,白洋淀表层沉积物氮磷负荷严重。

3.3 氮磷污染评价

沉积物单项和综合污染指数受氮磷评价基准值影响,不同基准值下单项污染指数(*S*_{TN} 和 *S*_{TP})存在差异。目前通常使用的沉积物氮磷评价基准值有 3 套,分别为加拿大基准值(张敏,2005)、美国沉积物基准值(Leland et al.,1995)和中国东部典型湖泊沉积物氮磷基准值(王健等,2014)。其中,中国东部典型湖泊沉积物氮磷基准值数据统计自中国

东部安徽、江苏、浙江、江西、湖北、湖南和山东 100 个面积大于 10 km² 的湖泊的 896 个表层沉积物样品,TN 和 TP 基准阈值分别为 1111 mg/kg 和 457 mg/kg,与美国沉积物基准值(1000 mg/kg 和 420 mg/kg)相当。基于白洋淀的地理位置,采用中国东部典型湖泊沉积物氮磷基准值作为氮磷污染评价基准值。取各亚区底泥层及过渡层 TN 和 TP 平均含量为实测值,依据公式(5)和(6)计算沉积物氮磷污染指数,根据表 1 污染程度分级标准对各亚区表层沉积物氮磷污染进行评价。

评价结果显示(表 8),白洋淀各亚区底泥层 TN 单项污染指数为 2.23~3.36,全淀底泥层 TN 污染指数为 2.57,污染程度均为重度污染;各亚区 TP 单项污染指数为 1.36~2.48,全淀 TP 污染指数为 1.73,除泛鱼淀为中度污染外,其他淀区均为重度污染;各亚区底泥层综合污染指数为 2.02~2.97,全淀综合污染指数为 2.37,均为重度污染。底泥层氮磷污染评价结果与前人评价结果基本一致,白洋淀底泥层氮磷污染严重。湖泊表层沉积物氮磷含量与氮磷释放速率呈正相关(Li et al., 2012;王亚琼等, 2017;杜奕衡等, 2018),白洋淀底泥层氮磷污染严重会促进氮磷由底泥向水体释放,加剧白洋淀水体的富营养化程度,威胁白洋淀湿地生态系统健康发展。

白洋淀各亚区过渡层 TN 单项污染指数为 1.01~2.37,除烧车淀为 TN 重度污染外,其他淀区为中度或轻度污染;全淀区过渡层 TN 单项污染指数为 1.54,全淀区过渡层 TN 污染程度为中度。各亚区过渡层 TP 单项污染指数为 1.05~1.70,全淀过渡层 TP 污染指数为 1.31,除南刘庄为重度污染外,其他淀区均为 TP 中度污染。各亚区过渡层氮磷综合污染指数为 1.14~2.12,全淀区综合污染指数为 1.48。烧车淀氮磷综合污染指数最大,为重度污染区,藻苻淀、南刘庄、小白洋淀为氮磷中度污染,其余淀区为轻度污染。白洋淀过

渡层氮磷整体污染程度显著优于底泥层,但仍存在重度污染区。烧车淀和南刘庄片区过渡层分别面临 TN 和 TP 重度污染,在实施白洋淀生态清淤时,应加深以上两淀区的清淤深度,避免过渡层氮磷内源释放。

4 结 论

(1)白洋淀表层沉积物底泥层 TN 含量平均值为 2859.91 mg/kg,TP 含量平均值为 789.22 mg/kg,过渡层氮磷含量显著低于底泥层,TN 含量平均值为 1706.7 mg/kg,TP 含量平均值为 598.97 mg/kg。与中国东部主要湖泊表层沉积物氮磷含量相比,白洋淀表层沉积物 TN、TP 含量处于较高水平。

(2)白洋淀表层沉积物 TN 总储量为 15.86×10^4 t,其中底泥层 TN 储量为 3.76×10^4 t,过渡层 TN 储量为 12.10×10^4 t;TP 总储量为 5.54×10^4 t,其中底泥层 TP 储量为 1.02×10^4 t,过渡层 TP 储量为 4.52×10^4 t;与各亚区氮磷储量相比,烧车淀表层沉积物 TN 和 TP 储量最大,分别占氮磷总储量的 25.67% 和 17.36%

(3)根据综合污染指数法评价结果,白洋淀各亚区底泥层氮磷污染程度严重,均为重度污染;过渡层氮磷污染程度小于底泥层,按氮磷综合污染指数评价,除烧车淀过渡层为重度污染外,其余各淀泊均为中度或轻度污染。

表 8 白洋淀各亚区表层沉积物氮磷污染评价结果

Table 8 Assessment results of nitrogen and phosphorus pollution in surface sediments of Baiyangdian Lake

亚区	底泥层						过渡层					
	S_{TN}	污染程度	S_{TP}	污染程度	FF	污染程度	S_{TN}	污染程度	S_{TP}	污染程度	FF	污染程度
烧车淀	3.36	重度	1.70	重度	2.97	重度	2.37	重度	1.29	中度	2.12	重度
藻苻淀	2.41	重度	1.91	重度	2.29	重度	1.59	中度	1.48	中度	1.56	中度
南刘庄	2.94	重度	2.48	重度	2.83	重度	1.92	中度	1.70	重度	1.87	中度
王家寨	2.43	重度	1.64	重度	2.24	重度	1.45	轻度	1.29	中度	1.41	轻度
捞王淀	2.44	重度	1.55	重度	2.23	重度	1.17	轻度	1.05	中度	1.14	轻度
池鱼淀	2.26	重度	1.54	重度	2.09	重度	1.36	轻度	1.20	中度	1.32	轻度
泛鱼淀	2.23	重度	1.36	中度	2.02	重度	1.01	轻度	1.27	中度	1.21	轻度
小白洋淀	2.63	重度	1.95	重度	2.47	重度	1.71	中度	1.46	中度	1.65	中度
全淀区	2.57	重度	1.73	重度	2.37	重度	1.54	中度	1.31	中度	1.48	轻度

参考文献

- Ellen L P, Joselito M A. Evaluation of iron-phosphate as a source of internal lake phosphorus loadings[J]. Science of The Total Environment, 2001, 266 (1/3): 87-93.
- Leland H V, Dean W E, Mudroch A, et al. Manual of Aquatic Sediment Sampling[J]. Journal of the North American Benthological Society, 1995, 16(1): 296.
- Li Z J, Yue Q Y, Gao B Y, et al. Phosphorus release potential and pollution characteristics of sediment in downstream Nansi Lake, China [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2012, 6(2): 162-170.
- Sndergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes [J]. Hydrobiologia, 2003, 506/509(1/3): 135-145.
- Vicente I D, Serrano L, Amores V, et al. Sediment phosphate fractionation and interstitial water phosphate concentration in two coastal lagoons (Albuferas de Adra, SE Spain) [J]. Hydrobiologia, 2003, 492 (1/3): 95-105.
- 杜奕衡, 刘成, 陈开宁, 等. 白洋淀沉积物氮磷赋存特征及其内源负荷[J]. 湖泊科学, 2018, 30(6): 1537-1551.
- 李成瑶, 程立, 王同飞, 等. 白洋淀典型区域清淤前后沉积物的氮磷扩散通量研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(4): 1401-1409.
- 李刚, 马佰衡, 周仰效, 等. 白洋淀湖岸带地表水与地下水垂向交换研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(4): 48-54.
- 李爽, 张祖陆, 孙媛媛. 南四湖沉积物对上覆水氮磷负荷的时空响应[J]. 环境科学学报, 2013, 33(1): 133-138.
- 李延鹏, 杨婕, 肖文, 等. 洱海及上游主要湖泊底泥营养盐的研究[J]. 大理学院学报, 2013, 12(4): 58-61.
- 李再兴, 孙悦, 张艺冉, 等. 白洋淀冰封期沉积物中氮赋存形态及分布特征[J]. 环境工程, 2019, 37(12): 29-33.
- 刘俊. 洞庭湖沉积物营养盐和重金属污染特征及评价研究[D]. 湘潭大学硕士学位论文, 2019.
- 毛欣, 刘林敬, 宋磊, 等. 白洋淀近 70 年生态环境演化过程及影响因素[J]. 地球科学, 2021, 46(7): 2609-2620.
- 汪敬忠, 刘卓, 魏浩, 等. 白洋淀表层沉积物元素的空间特征、风险评价及来源分析[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 224-231.
- 王健, 张靖天, 咎逢宇, 等. 中国东部浅水湖泊沉积物总氮总磷基准阈值研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(6): 992-999.
- 王圣瑞, 倪栋, 焦立新, 等. 鄱阳湖表层沉积物有机质和营养盐分布特征[J]. 环境工程技术学报, 2012, 2(1): 23-28.
- 王亚琼, 薛培英, 耿丽平, 等. 白洋淀沉积物-沉水植物-水系统氮、磷分布特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 304-309.
- 王艳平, 徐伟伟, 韩超, 等. 巢湖沉积物氮磷分布及污染评价[J]. 环境科学, 2021, 42(2): 699-711.
- 王雨山, 尹德超, 王旭清, 等. 雄安新区白洋淀湿地地表水和地下水转化关系及其对芦苇分布的影响[J]. 中国地质, 2021, 48(5): 1368-1381.
- 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.
- 易雨君, 林楚翘, 唐彩红. 1960s 以来白洋淀水文、环境、生态演变趋势[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1333-1347, 1226.
- 余辉, 张文斌, 卢少勇, 等. 洪泽湖表层底质营养盐的形态分布特征与评价[J]. 环境科学, 2010, 31(4): 961-968.
- 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, (2): 111-117.
- 张国峰, 于世繁, 董志民, 等. 白洋淀底质现状及对水体富营养化的影响[J]. 环境科学, 1995, (S1): 24-27.
- 张嘉雯, 魏健, 刘利, 等. 衡水湖沉积物营养盐形态分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2020, 41(12): 5389-5399.
- 张敏. 长江中下游浅水湖泊富营养化机制与重金属污染研究[D]. 中国科学院研究生院(水生生物研究所)博士学位论文, 2005.