

白洋淀沉积物—沉水植物—水系统氮、磷分布特征

王亚琼¹, 薛培英¹, 耿丽平¹, 陈苗苗², 孙洪欣¹, 王殿武¹, 冯宇佳¹, 王晓美¹

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院, 河北省农田生态环境重点实验室, 河北 保定 071000;

2. 河北农业大学科学技术研究院, 河北 保定 071000)

摘要: 通过2015年4月份和9月份对白洋淀西部纳污区、中部生活水产养殖区以及淀边缘区优势沉水植物及对应沉积物和水体中总氮(TN)、总磷(TP)含量测定, 分析白洋淀水体氮磷营养分布规律, 明确不同沉水植物对自然水体氮磷富集能力, 为应用沉水植物修复富营养化水体提供理论依据。结果表明: 白洋淀水体TN和TP浓度分别为0.77~13.65 mg/L和0.05~1.21 mg/L。受唐河和府河输入影响, 纳污区水中TN和TP浓度最高, 为IV~劣V类水, 生活水产养殖区和淀边缘区水体TN和TP浓度差异均不显著($p > 0.05$), 水体氮磷主要受入淀河流输入影响; 沉积物TN和TP含量分别为 (3.16 ± 1.86) g/kg和 (0.72 ± 0.20) g/kg。沉积物TN和TP标准指数变化范围为3.42~9.09和0.93~1.44, 综合污染指数为2.19~5.26, 白洋淀沉积物营养盐处于严重污染水平且受氮素影响更为严重。其中生活水产养殖区沉积物TN和TP含量最高, 纳污区和淀边缘区差异不显著($p > 0.05$); 沉水植物对水中TN的富集能力表现为菹草>金鱼藻>篦齿眼子菜, 对水中TP的富集能力表现为金鱼藻>菹草>篦齿眼子菜; 水和沉积物中TN和TP之间均存在显著正相关($p < 0.05$)。沉水植物体内氮磷含量与水体TN和TP浓度存在显著正相关, 而与沉积物TN和TP含量无显著相关($p > 0.05$)。总之, 3种沉水植物均具有很强的修复水体氮磷污染的能力, 建议适时收割地上部以有效去除水体氮磷污染。

关键词: 氮; 磷; 沉水植物; 白洋淀

中图分类号: X824

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)03-0304-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.03.050

Distribution Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediments-Submerged Macrophytes-Water Systems of Baiyangdian Lake

WANG Yaqiong¹, XUE Peiying¹, GENG Liping¹, CHEN Miaomia²,

SUN Hongxin¹, WANG Dianwu¹, FENG Yujia¹, WANG Xiaomei¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Agriculture University of Hebei, Key laboratory for Farml and Eco-environment, Baoding, Hebei 071000; 2. Institute of science and technology of Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071000)

Abstract: Concentrations of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in submerged macrophytes, the corresponding sediments and water of the pollution admitted area, living and aquaculture area, and fringe area of Baiyangdian Lake were determined in April and September, 2015. Along with the nutrient pollution assessment in the sediment, nutrient status and distribution of TN and TP in the waterbody of Baiyangdian Lake were investigated, the accumulation abilities of TN and TP by submerged plants from natural waters were also investigated. These findings contribute to the application of submerged aquatic plants to TN and TP removal from eutrophic water. The results showed that the content range of TN and TP in the surface water was 0.77—13.65 mg/L and 0.05—1.21 mg/L, respectively. The highest concentration of TN and TP were observed in the pollution admitted area, where the water quality ranged from Class IV to inferior Class V because of the influence of the Tanghe and Fuhe River. Concentrations of TN and TP in the living and aquaculture area and the fringe area were relatively insignificant ($p > 0.05$). Nitrogen and phosphorus were mainly discharged by the rivers. Moreover, the content range of TN and TP in the surface sediments was (3.16 ± 1.86) and (0.72 ± 0.20) g/kg, respectively. The variation range of the standard index of TN, TP and comprehensive pollution index (PI) of the sediments in Baiyangdian Lake was 3.42—9.09, 0.93—1.44,

收稿日期: 2016-12-07

资助项目: 国家自然科学基金项目(21407042); 河北省自然科学基金项目(D2015204109)

第一作者: 王亚琼(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤养分资源与利用研究。E-mail: wangyaqiong92@126.com

通信作者: 薛培英(1982—), 女, 博士, 讲师, 主要从事土壤环境质量、城市湿地生态与环境研究。E-mail: pyxue0812@163.com

and 2.19—5.26, respectively, indicating that Baiyangdian Lake was heavily polluted, with the living and aquaculture area being more seriously polluted than other areas. Contents of TN and TP in the sediments of the living and aquaculture area and the fringe area were relatively insignificant ($p > 0.05$). Among the samples of submerged macrophytes, the concentration of TN was in the order of *Potamogeton crispus* > *Ceratophyllum demersum* > *Potamogeton pectinatus*, while for the concentration of TP, the order was *Ceratophyllum demersum* > *Potamogeton crispus* > *Potamogeton pectinatus*. Significant correlations were found between the concentrations of TN and TP in the water and sediments ($p < 0.05$). The concentrations of TN and TP in submerged macrophytes were significantly positively related to the water but had no correlation with the sediments. In conclusion, submerged macrophytes showed strong TN and TP accumulation abilities, which are essential for developing strategies to engineer plants for phytoremediation. Accumulation of TN and TP by different submerged aquatic plants may influence the distribution of TN and TP in the waterbody, and the removal of shoots of submerged macrophytes is suggested for effective removal of TN and TP from the water system to avoid secondary pollution caused by excessive decomposition.

Keywords: nitrogen; phosphorus; submerged macrophytes; Baiyangdian Lake

湖泊富营养化已经成为当前我国乃至世界面临的最为突出的环境问题^[1]。大量氮、磷营养盐的输入在一定程度上会导致生态系统的异常响应,如蓝藻水华爆发、沉水植物消亡、生物多样性下降和营养盐循环与利用效率加快等^[2-4]。白洋淀是华北地区最大的草型淡水湖泊,在调洪蓄水、灌溉生产、航运渔业和调节生态平衡方面起着巨大作用。但是自20世纪70年代以后,入淀河流逐渐减少,除府河(主要接纳保定市生活污水和工业废水)常年有水入淀外,其余河流长期季节性断流,同时由于生产生活污染物排放量增加,加之降水量减少,水位下降湖泊自净能力降低,白洋淀水体整体处于富营养化状态,水域污染严重,生物多样性也遭到一定程度的破坏^[5]。

沉水植物作为湖泊生态系统中重要的大型水生植物类型,由于其整株沉在水底,地上部和根系可以分别从水和沉积物吸收氮、磷营养物质,并可通过抑制藻类生长,保护捕食浮游植物的动物如水蚤以及抑制沉积物再悬浮等途径有效的降低水体富营养化程度^[6-7]。应用沉水植物修复污染水体因其经济、高效和环保逐渐受到人们重视,但是以往研究大多采用室内或人工湿地模拟研究沉水植物对水体氮、磷营养去除效果及去除机制研究^[8],而自然水体中不同沉水植物氮、磷富集能力与周围水和沉积物氮、磷营养状况之间关系研究较欠缺^[9],而这也是应用不同沉水植物去除不同介质(水和沉积物)中氮、磷所要了解的关键。因此,本文基于沉水植物不同生长季,于4月份和9月份在白洋淀西部纳污区、中部生活水产养殖区及淀边缘区分别对优势沉水植物及其对应的水体和表层沉积物中氮、磷含量进行测定,以期明确沉水植物生长条件下白洋淀水体和沉积物中氮、磷营养状况及分布规律,并探讨沉水植物体内氮、磷与周围水体

和沉积物氮、磷营养之间关系,为沉水植物应用于白洋淀水体富营养化的生态治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与制备

于2015年4月26日和9月2日在白洋淀区内布设10个有代表性的采样点(图1),并依据文献和实地考察将10个采样点划分为3个区域:西部纳污区(南刘庄为府河影响带,羊角淀、关城为唐河影响带,沉水植物覆盖度低<30%)、中部生活水产养殖区(端村、圈头、王家寨和光淀张村,沉水植物覆盖度较高约50%)和淀边缘区(采蒲台、赵庄子和烧车淀,沉水植物覆盖度高约80%),采集当季优势沉水植物、沉积物和地表水样品,每个样点采集3个沉积物和地表水样品作为重复。

采集的沉水植物样品主要包括菹草(*Potamogeton crispus*)(4月份采集,冬春生长型沉水植物,夏季衰退)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)和篦齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)(9月份采集,夏秋季生长型沉水植物,冬季衰退。其中圈头、光淀张村、王家寨和南刘庄未采集篦齿眼子菜),将植物地上部用自来水冲洗干净,去离子水,超纯水淋洗2~3次,吸干表面水分后装入牛皮纸袋中,于烘箱中70℃烘干至恒重,粉碎;采用有机玻璃采水器于水面下20cm处采集水样,装入聚乙烯塑料瓶中于冰盒中保存,迅速带回实验室后冷冻保存;采用底泥抓斗器采集0—20cm沉积物,带回实验室后自然风干去杂,磨碎过100目尼龙筛,置于塑封袋中保存。

1.2 测定项目与方法

水样TN采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度计法测定;TP采用过硫酸钾消解—钼酸铵分光光度法测定;沉水植物全氮、全磷测定采用H₂SO₄—

H₂O₂ 消化,半微量凯氏蒸馏定氮法和钼钨黄比色法测定;沉积物 TN 采用 H₂SO₄ + 混合加速剂(K₂SO₄ + CuSO₄ + Se)消煮,半微量凯氏蒸馏定氮法测定,TP 采用 HClO₄—H₂SO₄ 消化—钼锑抗比色法测定。具体分析测定方法参考《环境科学与工程实验教程》^[10]和《土壤农化分析》^[11]。

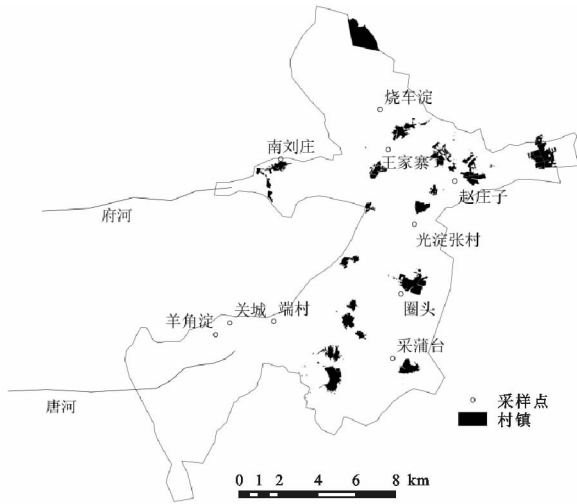


图 1 白洋淀采样点分布

1.3 数据处理及评价

考虑到沉水植物根系退化或消失,整株植物的吸收富集主要发生在水体,通过根系吸收较少,因此富集系数(BCF)=沉水植物 TN(TP)含量(g/kg)/水中 TN(TP)浓度(mg/L)^[12]。

采用 SPSS 17.0 进行方差分析和相关性分析,用 Excel 2003 软件数据处理与制图,采样点分布采用 ArcGIS 10.2 制作。

采用单因子^[13]和综合污染指数法^[14]对沉积物氮、磷污染状况进行评价。

(1)单因子评价。单一污染因子 i 的一般标准指数有如下关系式:

$$S_i = \frac{C_i}{C_s}$$

式中: S_i 为单项评价指数或标准指数, S_i 大于 1 表示含量超过评价标准值; 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。

(2)综合污染指数法。

$$PI = \sum_{i=1}^n (W_i \times PI_i) = \sum_{i=1}^n \left(W_i \times \frac{C_i}{C_{0i}} \right)$$

式中: PI_i 为第 i 种营养盐的污染指数(PI 值 < 0.5 为清洁, $0.5 \sim 1.0$ 为有影响, $1.0 \sim 1.5$ 为轻污染, $1.5 \sim 2.0$ 为重污染, ≥ 2.0 为严重污染); c_i 为第 i 种营养盐实测值; c_{0i} 为第 i 种营养盐评价标准值; PI 为综合污染指数; W_i 为污染因子 i 的权重,研究认为所有污染因子的权重均相同。

沉积物氮、磷营养盐污染标准参照加拿大安大略

省环境和能源部(1992)制定的沉积物质量评价指南,其中 TN 和 TP 能够引起最低级别生态毒性效应的含量分别为 550,600 mg/kg。

2 结果与分析

2.1 白洋淀水体 TN 和 TP 浓度变化及分布特征

白洋淀水体 TN 浓度为 0.77~13.65 mg/L,平均值为 2.23 mg/L,TP 浓度为 0.05~1.21 mg/L,平均值为 0.22 mg/L。不同区域水体 TN 和 TP 浓度变化如表 1 所示。由于受府河和唐河输入的影响,纳污区水体 TN 和 TP 浓度最高,为 IV~劣 V 类水,其中,府河影响带水体 TN 和 TP 浓度分别为地表水环境质量标准(GB 3838—2002)Ⅲ类水标准限值的 8.85 倍和 4.83 倍,为劣 V 类水,这与李源^[15]和张婷等^[16]研究结果一致,这是由于该地地处府河入口处,主要接纳来自保定的生活污水和工业废水,再加上该区域相对封闭,水流动差且缺少自净能力。而唐河同样接纳来自保定市造纸、化工、纺织、印染等行业排出的工业废水,导致水体氮磷污染程度较高。生活水产养殖区和淀边缘区水体 TN 和 TP 浓度差异不显著($p > 0.05$),水体 TN 浓度为 0.77~1.96 mg/L,TP 浓度为 0.05~0.22 mg/L,为Ⅲ类水~V 类水,这主要是由于这些区域远离上游排污口,特别是淀边缘区水域开阔而且沉水植物覆盖率较高,大量研究表明,沉水植物可以通过吸收富集水体中的营养和污染物质,对水体起到较好的净化效果^[17-18],梁淑轩等^[19]研究也发现水生植物生长区水体总氮浓度低于鱼鸭养殖区和生活垃圾区。

不同采样时间相比,除纳污区府河影响带外,9 月份水体 TN 浓度均显著高于 4 月份,其中唐河影响带、生活水产养殖区和淀边缘区水体 TN 浓度分别比 4 月份高 115%,56%,119%。究其原因,一方面可能是由于 9 月份经过了丰水期,降雨量较 4 月份增多,农业面源污染加剧,增加了氮磷营养物质的输入^[20],另一方面可能是由于白洋淀为草型湖泊,4 月份为菹草生长季节,其对水中氮有较强的富集能力,而 9 月份沉水植物(主要是菹草)大量腐烂,其吸收的氮经分解后又重新释放到水中,造成水体氮浓度增加^[21-22]。对于磷而言,9 月份水体 TP 浓度则表现为唐河影响带和淀边缘区水体显著低于 4 月份。这可能是由于 9 月份优势沉水植物金鱼藻和篦齿眼子菜对水体磷具有很强的富集能力(图 3),并且沉水植物类型多样且生物量达到最大^[23],其光合作用产生的氧气提高了水体中的溶解氧,抑制了底泥磷向水体的释放^[24]。可见沉水植物对控制自然水体氮磷营养状况起重要作用,而纳污区府河影响带由于水体富营养化程度最为严重,沉水植物分布较少,因此水体氮、磷浓度主要

取决于外源输入量的变化而受沉水植物影响较小,因此呈现出与其他区域不同的变化特征。

表 1 白洋淀 4 月份、9 月份水体 TN、TP 浓度 单位:mg/L

分区		TN		TP	
		4 月份	9 月份	4 月份	9 月份
纳污区(N=3)	府河影响带	13.65±1.83a	4.04±0.13a	0.72±0.02a	1.21±0.16a
	唐河影响带	1.22±0.24b	2.62±0.81b	0.30±0.04b	0.12±0.01b
生活水产养殖区(N=4)		1.11±0.15b	1.73±0.15c	0.15±0.05c	0.15±0.07b
淀边缘区(N=3)		0.83±0.13b	1.82±0.24c	0.10±0.01c	0.07±0.01b

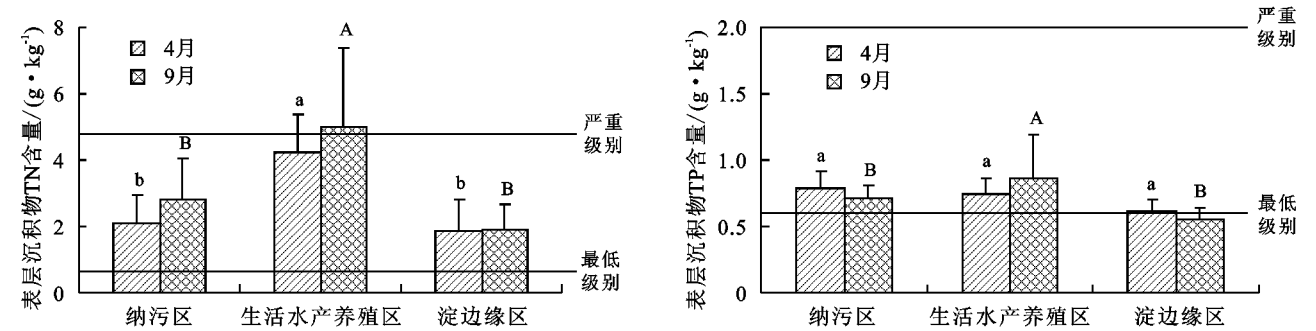
注:数据为平均值±标准偏差;不同小写字母表示相同月份不同区域 TN、TP 浓度间差异显著($p<0.05$);N 表示采样点个数。

2.2 沉积物氮、磷含量变化及分布特征

由图 2 可知,白洋淀沉积物 TN 和 TP 平均含量分别为(3.16±1.86)g/kg 和(0.72±0.20)g/kg。沉积物 TN 含量在生活水产养殖区最高,4 月份和 9 月份分别比纳污区和淀边缘区高 1.00~1.24 倍和 0.79~1.63 倍,但是纳污区和淀边缘区沉积物 TN 含量差异不显著($p>0.05$)。对于 TP 而言,9 月份生活水产养殖区比纳污区和淀边缘区高 0.20~0.54 倍,但是 4 月份不同区域差异不显著。生活水产养殖区为人类活动集中的区域,生活污水排泄物、垃圾和粪便等直接或间接入淀,水中投放的鱼蟹饵料也含有大量的氮磷营养,除少量被鱼蟹食用,大部分剩余物沉积到沉积物表层,同时沉水植物腐烂也会将富集在植物体内的氮磷营养释放,造成沉积物营养物浓度增加^[25-26]。可见沉积物主要受内源营养物质输入的影响。由于沉积物氮磷是长期积累的结果,因此沉

积物 TN 和 TP 含量不同采样时间均未表现出显著差异($p>0.05$)。

以加拿大安大略省环境和能源部(1992)制定的沉积物质量评价指南为标准(TN 和 TP 能够引起最低级别生态毒性效应的含量分别为 550,600 mg/kg,能够引起严重级别生态毒性效应的含量分别为 4 800,2 000 mg/kg。低级别生态毒性效应表明表层沉积物已污染,但多数底栖生物仍可承受;严重级别生态毒性效应表明底栖生物群落已遭到明显的损害),沉积物 TN 含量除 9 月份在生活水产养殖区达到严重级别外,其他区域均会产生低级别生态毒性效应;沉积物 TP 含量除 9 月份淀边缘区处于安全浓度外,其他区域均会产生低级别生态毒性效应。由表 2 可知,3 个区域均达到了严重污染水平($PI>2$),其中沉积物 TN(标准指数 S_{TN} 变化范围为 3.42~9.09)污染程度高于 TP(标准指数 S_{TP} 变化范围为 0.93~1.44)。



注:不同字母表示同一月份不同区域沉积物 TN 和 TP 含量差异显著($p<0.05$)。

图 2 白洋淀表层沉积物 TN 和 TP 含量

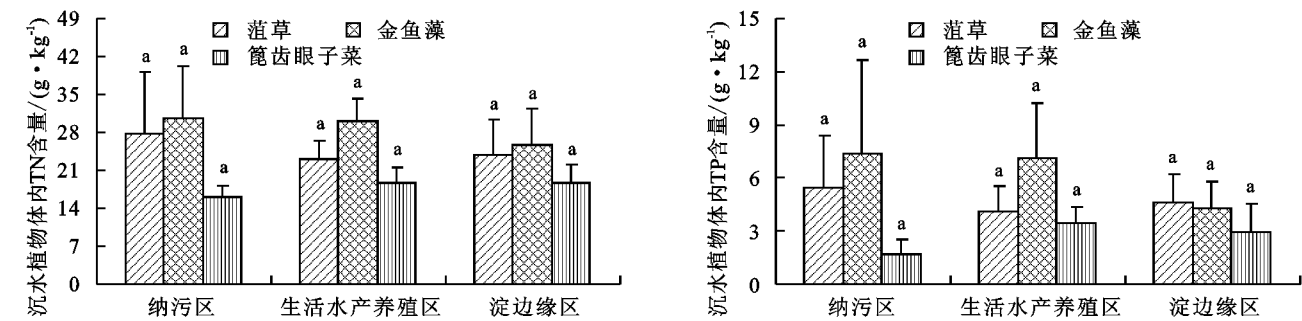
表 2 白洋淀 4 月份、9 月份沉积物氮、磷标准指数

采样时间	采样分区	S_{TN}	S_{TP}	PI
4 月	纳污区	3.84	1.32	2.58(严重污染)
	生活和水产养殖区	7.66	1.24	4.45(严重污染)
	淀边缘区	3.42	1.03	2.22(严重污染)
9 月	纳污区	5.09	1.20	3.15(严重污染)
	生活和水产养殖区	9.09	1.44	5.26(严重污染)
	淀边缘区	3.46	0.93	2.19(严重污染)

2.3 沉水植物体内 TN 和 TP 含量

沉水植物体内氮磷含量是其在一定环境条件下富集氮磷的能力,它在揭示植物种的特性同时也反映了植物与环境之间的相互关系。4 月份优势沉水植物为菹草,9 月份沉水植物优势种为金鱼藻和篦齿眼子菜。3 种沉水植物体内氮磷含量如图 3 所示。每

种沉水植物在不同采样区植物体内氮磷含量差异不显著($p>0.05$)。不同沉水植物相比,沉水植物对水体 TN 的富集能力表现为菹草($BCF=(2.15\pm0.89)\times10^4$)>金鱼藻($BCF=(1.52\pm0.43)\times10^4$)>篦齿眼子菜($BCF=(1.00\pm0.14)\times10^4$),对水体 TP 的富集能力表现为金鱼藻($BCF=(4.22\pm2.56)\times10^4$)>菹草($BCF=(3.18\pm1.72)\times10^4$)>篦齿眼子菜($BCF=(3.15\pm1.92)\times10^4$)。3 种沉水植物对水体 TP 的富集能力均高于 TN。3 种沉水植物对水中氮磷的富集系数远大于 1,说明他们均具有很强的净化氮磷污染水体能力,并且其净化能力往往高于其他大型水生植物^[27],是理想的水体氮磷污染的修复植物。



注:不同字母表示不同区域同种沉水植物体内 TN 和 TP 含量差异显著($p<0.05$)。

图 3 白洋淀沉水植物体内 TN 和 TP 含量

2.4 沉水植物—水—沉积物氮、磷含量相关性分析

白洋淀沉水植物和水体、沉积物 TN、TP 含量相关性如表 3 所示。水体 TN 和 TP 浓度之间,沉水植物 TN 和 TP 含量之间,表层沉积物 TN 和 TP 含量均存在极显著或显著正相关性,说明白洋淀氮磷营养盐具有一定程度相似的生物地球化学过程,来源可能具有同源性^[28]。沉水植物与不同介质中 TN 和 TP 含量相关性表明,沉水植物体内 TN 含量与水体 TN 和 TP 浓度存在极显著正相关性($p<0.01$),沉水植物体内 TP 含量与水体 TP 浓度呈极显著正相关($p<0.01$),同时沉水植物 TN 和 TP 含量之间也存在极显著正相关性,说明沉水植物体内氮磷含量主要受水体氮磷浓度影响,并且植物体内氮磷营养元素的赋存与迁移转化存在相似性,氮磷元素往往以溶解态硝酸根和磷酸根等离子形式被植物体吸收^[29],且吸收会按照一定比例进

行^[30]。而研究表明,沉积物中氮主要以有机氮形式存在(占 95.6%~97.9%),磷主要以稳定的钙磷和有机磷形式存在^[28,31],这些形态氮磷均不利于沉水植物的吸收,因此沉积物中 TN 和 TP 与沉水植物体内 TN 和 TP 含量无显著相关性。这与雷泽湘等^[27]对太湖水生植物氮磷含量与水体和沉积物氮磷含量关系调查研究结果一致。苏倩等^[32]的研究也表明,沉水植物主要依靠叶与茎吸收水体中的氮、磷。尽管根系被认为是元素吸收的主要部位,但是由于沉水植物根系退化,生物量和新陈代谢能力与地上部相比都小得多,而地上部则可以直接吸收水体中营养物质,有效的去除水体中的氮、磷营养盐,因此沉水植物地上部通常被认为是水体污染元素吸收富集的主要部位^[33],也因此可以通过定期收割来增加水体营养盐的输出量,同时可减少由于植物腐败造成营养盐向水体的二次释放。

表 3 白洋淀水体、沉水植物及表层沉积物 TN 和 TP 含量的相关性

	水体 TN	水体 TP	沉水植物 TN	沉水植物 TP	沉积物 TN	沉积物 TP
水体 TN	1					
水体 TP	0.563**	1				
沉水植物 TN	0.568**	0.602**	1			
沉水植物 TP	0.359	0.643**	0.826**	1		
沉积物 TN	-0.206	-0.280	0.079	0.100	1	
沉积物 TP	0.252	0.280	0.320	0.223	0.450*	1

注: * 表示显著相关; ** 表示极显著相关。

3 结论

(1)白洋淀水中 TN 和 TP 浓度分别为 0.77~13.65 mg/L 和 0.05~1.21 mg/L,其中纳污区水中 TN 和 TP 浓度最高,为 IV~劣 V 类水,生活水产养殖区和淀边缘区水中 TN 和 TP 浓度差异不显著,水中氮磷主要受入淀河流氮磷输入影响。沉积物 TN 和 TP 平均含量分别为(3.16±1.86)g/kg 和 (0.72±0.20)g/kg,营养盐综合污染指数法评价结果表明白,洋淀沉积物氮磷含量达到严重污染水平,其中 TN 污染程度(总氮标准指数 S_{TN} 为 3.42~9.09)高于 TP(总磷标准指数 S_{TP} 为 0.93~1.44)。淀中部生活水产养殖区沉积物氮磷污染程度最高,纳污区和淀边缘区沉积物 TN 和

TP 含量差异不显著,沉积物氮磷主要受内源氮磷输入的影响。水中 TN 和 TP 浓度以及沉积物中 TN 和 TP 含量存在显著或极显著正相关关系,表明白洋淀氮磷具有相似的生物地球化学过程。

(2)沉水植物对水体 TN 的富集能力表现为菹草>金鱼藻>篦齿眼子菜,对水体 TP 的富集能力则表现为金鱼藻>菹草>篦齿眼子菜。3 种沉水植物对水体磷的富集能力均高于氮。沉水植物体内 TN 浓度与水体中 TN 和 TP 浓度存在极显著正相关性,体内 TP 浓度与水体中 TP 浓度存在极显著正相关性,但与沉积物中 TN、TP 含量无显著相关性($p>0.05$)。表明沉水植物体内氮磷主要受水体氮磷浓度影响且植物体内氮磷营养元素的富集转化具有相似性。

参考文献:

- [1] 王明华,沈全华,唐晟凯,等.伊乐藻对黄颡鱼池塘养殖水体净化效果的试验[J].水生生态学杂志,2009,30(4):48-51.
- [2] Lu Q, He Z L, Graetz D A, et al. Phytoremediation to remove nutrients and improve eutrophic stormwaters using water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2010, 17(1): 84-96.
- [3] 王岩,姜霞,李永峰,等.洞庭湖氮磷时空分布与水体营养状态特征[J].环境科学研究,2014,27(5):484-491.
- [4] 秦伯强,高光,朱广伟,等.湖泊富营养化及其生态系统响应[J].科学通报,2013,58(10):855-864.
- [5] 田美影,王学东,马雪姣,等.白洋淀气候变化及对生态系统的影响[J].南水北调与水利科技,2013,11(2):76-80.
- [6] Wang S, Jin X, Zhao H, et al. Phosphate biosorption characteristics of a submerged macrophyte *Hydrilla verticillata* [J]. Aquatic Botany, 2008, 89(1): 23-26.
- [7] 田琦,王沛芳,欧阳萍,等.5种沉水植物对富营养化水体的净化能力研究[J].水资源保护,2009,25(1):14-17.
- [8] 徐志嫻,刘维,赵洁,等.沉水植物对再生水景观水体水质变化的影响和净化效果[J].水土保持学报,2012,26(2):214-219.
- [9] 简敏菲,简美锋,李玲玉,等.鄱阳湖典型湿地沉水植物的分布格局及其水环境影响因子[J].长江流域资源与环境,2015,24(5):765-772.
- [10] 钟文辉.环境科学与工程实验教程[M].北京:高等教育出版社,2013:81-89.
- [11] 鲍士旦.土壤农化分析[M].第3版.北京:中国农业出版社出版,2000:42-270.
- [12] 潘义宏,王宏镔,谷兆萍,等.大型水生植物对重金属的富集与转移[J].生态学报,2010,30(23):6430-6441.
- [13] 高泽晋,孟鑫,张洪,等.梁子湖沉积物营养盐的空间分布特征及其污染评价[J].环境科学学报,2016,36(7):2382-2388.
- [14] 熊春晖,张瑞雷,吴晓东,等.漏湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价[J].环境科学,2016,37(3):925-934.
- [15] 李源.白洋淀水环境稳态特征研究[D].济南:山东师范大学,2010.
- [16] 张婷,刘静玲,王雪梅.白洋淀水质时空变化及影响因子评价与分析[J].环境科学学报,2010,30(2):261-267.
- [17] 张饮江,刘晓培,金晶,等.沉水植物对水体净化的研究进展[J].科技导报,2012,30(27):72-79.
- [18] Zhou X, Li Z, Zhao R, et al. Experimental comparisons of three submerged plants for reclaimed water purification through nutrient removal [J]. Desalination & Water Treatment, 2015, 57(26): 1-10.
- [19] 梁淑轩,李璠,郝玉芬,等.白洋淀总氮的时空分布及污染特征分析[J].安全与环境学报,2013,13(3):164-167.
- [20] 孔嘉鑫,姜仁楠,范贝贝,等.农业面源污染特征及治理对策[J].环境科学与管理,2016,41(5):85-88.
- [21] 叶春,王博,李春华,等.沉水植物黑藻腐解过程中营养盐释放过程[J].中国环境科学,2014,34(10):2653-2659.
- [22] 高华梅,谷孝鸿,曾庆飞,等.不同基质下菹草的生长及其对水体营养盐的吸收[J].湖泊科学,2010,22(5):655-659.
- [23] 王婷婷,崔保山,刘佩佩,等.白洋淀漂浮植物对挺水植物和沉水植物分布的影响[J].湿地科学,2013,11(2):265-270.
- [24] 蔡景波,丁学锋,彭红云,等.环境因子及沉水植物对底泥磷释放的影响研究[J].水土保持学报,2007,21(2):151-154.
- [25] 姜义帅,陈灏,马作敏,等.利用沉水植物生长期收割进行富营养化水体生态管理的实地研究[J].环境工程学报,2013,7(4):1351-1358.
- [26] 梁淑轩,秦哲,张振冉,等.从白洋淀内源污染调查探析其环境保护对策[J].中国环境管理,2014,6(1):10-14.
- [27] 雷泽湘,徐德兰,谢贻发,等.太湖水生植物氮磷与湖水和沉积物氮磷含量的关系[J].植物生态学报,2008,32(2):402-407.
- [28] 梁淑轩,张振冉,秦哲,等.白洋淀沉积物理化特性及营养盐分布特征[J].安全与环境学报,2016,16(1):294-298.
- [29] 王敬富,陈敬安,濮培民,等.红枫湖富营养化水体生态修复中水生植物化学成分[J].生态学杂志,2012,31(9):2312-2318.
- [30] 王强,卢少勇,黄国忠,等.14条环太湖河流水质与茭草、水花生氮磷含量[J].农业环境科学学报,2012,31(6):1189-1194.
- [31] 刘峰,高云芳,王立欣,等.水域沉积物氮磷赋存形态和分布的研究进展[J].水生生态学杂志,2011,32(4):137-144.
- [32] 苏倩,刘存歧,杨军,等.小西淀穗花狐尾藻的生长特性与氮磷吸收规律研究[J].水生生态学杂志,2012,33(6):50-55.
- [33] Xue P Y, Li G X, Liu W J, et al. Copper uptake and translocation in a submerged aquatic plant *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle [J]. Chemosphere, 2010, 81(9): 1098-1103.