

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2017.06.20

# 南方丘陵山区湿地氮磷时空变化及影响因素分析

赵尚<sup>1</sup>, 朱亮<sup>1,2</sup>, 谈悦<sup>1</sup>, 汪跃<sup>1</sup>, 方长风<sup>3</sup>

(1. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 南京市溧水区水务局, 江苏 南京 211200)

**摘要:** 对陈墩库区湿地从2015年9月到2016年8月进行水质监测, 通过方差分析和相关性分析归纳总结湿地氮磷浓度变化规律, 探究不同植物与湿地氮磷的相互作用。结果表明: 陈墩库区 TN、TP 浓度在不同湿地季节变化有所差异, 各湿地 TN 浓度在春、夏、冬差异显著; TP 在冬季有显著差异, 其余季节均无明显差异, 陈墩库区 TN、TP 浓度季节变化与进水氮磷浓度和湿地面积、植物类型及生长状况密切相关; 不同植物与湿地 TN、TP 呈现不同的相关性, 这与水生植物对氮磷的吸收能力不同有关; 轮叶黑藻、再力花、芦苇对氮磷的去除效果较好。

**关键词:** 季节性变化; 氮磷时空变化; 水生植物; 相关性分析; 湿地; 南方丘陵山区

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2017)06-0115-08

## Spatial and temporal variation of nitrogen and phosphorus in wetland of hilly areas in southern China and analysis of influencing factors

ZHAO Shang<sup>1</sup>, ZHU Liang<sup>1,2</sup>, TAN Yue<sup>1</sup>, WANG Yue<sup>1</sup>, FANG Changfeng<sup>3</sup>

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development of Shallow Lakes, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Lishui District Water Affairs Bureau of Nanjing City, Nanjing 211200, China)

**Abstract:** The water quality of Chendun reservoir area from September 2015 to August 2016 was monitored. The variation of nitrogen and phosphorus concentration in wetland was summarized by analysis of variance. The interaction between nitrogen and phosphorus in different plants was discussed by correlation analysis. The results showed that the seasonal variation of TN and TP concentrations in the Chendun reservoir area was different. The TN concentrations in the functional areas were different in spring, summer and winter. There were significant differences of TP in the sampling points in the winter and no significant differences in other seasons. The variations of TN and TP concentrations were closely related to the influent nitrogen and phosphorus concentrations, wetland area, water depth, plant type and growth status. Different plants showed different correlation with wetlands TN, TP, which is related to the absorption capacity of aquatic plants on nitrogen and phosphorus. Among them, the leaves of *Hydrilla verticillata*, *Thalia dealbata* Fraser and *Phragmites australis* Trin, Reed have better removal effect on nitrogen and phosphorus.

**Key words:** seasonal variation; nitrogen and phosphorus spatial change; aquatic plants; correlation analysis; wetland; hilly areas in southern China

## 1 研究背景

近年来, 湿地生态系统在维持氮、磷等元素的生物地球化学循环、净化水质等方面的作用越来越受到关注<sup>[1-2]</sup>。湿地是自然的或者人工建造的生态系

统, 主要由土壤或者基质和生长在水生植物组成, 利用微生物、植物、水生动物等协同作用, 通过一系列物理、化学、生物作用实现对水体中绝大部分有机物、营养盐等物质的降解和吸收<sup>[3-4]</sup>。

目前国内外已经针对湿地净化水质季节变化规

收稿日期: 2017-04-21; 修回日期: 2017-05-26

作者简介: 赵尚(1992-), 女, 河南安阳人, 在读硕士研究生, 研究方向为水污染控制及水生态保护。

通讯作者: 朱亮(1963-), 男, 江苏泰州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水污染控制理论及应用的研究。

律以及影响因素方面展开了较多的研究:胡俊纳等<sup>[5]</sup>对南京景观区典型湿地进行水质监测,发现湿地水质季节波动明显,春夏季节水质较差,秋冬季节较好;张增胜等<sup>[6]</sup>研究表明潜流人工湿地系统对富营养化水体中总氮和氨氮的净化效果呈现出季节性变化,夏季净化效果最好;过锋等<sup>[7]</sup>对胶州湾生态湿地连续6个月的水质监测,分析了水体中总氮和总磷的变化特征,发现胶州湾氮磷含量月际变化明显,TN在2-8月份呈降低趋势,8-12月份呈增高趋势,TP以2月份最高,其他月份含量较低且变化不明显;Huett等<sup>[8]</sup>研究了潜流人工湿地中植物对TN和TP的去除效果,结果表明有植物的人工湿地对TN和TP的去除效果显著高于不种植物的人工湿地;金树权等<sup>[9]</sup>在室内净水的条件下对10种水生植物吸收氮磷和净化水质能力进行了比较研究,结果表明植物氮磷去除率与水生植物的生物量有显著的相关性;梁奇奇等<sup>[10]</sup>考察了不同植物种类在不同水力负荷下的去污效果,发现植物种类对氮磷的去除率有显著影响。研究湿地水质的变化规律并且探究其影响因素,对认识湿地净化水质的机制具有重要意义。

本文研究分析了陈墩库区湿地TN、TP季节变化特征,通过单因素方差分析比较不同湿地氮磷浓度的差异性,探究了TN、TP季节变化的影响因素,通过氮磷与植物生物量间的相关性分析,讨论湿地植物与氮磷含量变化的相互影响,从而为陈墩库区湿地管理提供依据。

## 2 研究区域与方法

### 2.1 研究区域概况

陈墩库区湿地(N31°40′40.91″~31°41′0.29″, E119°8′20.17″~119°8′35.34″)位于南京市溧水区,属典型的丘陵山区,湿地北面和西面临方便水库,东面临村庄。水面面积约15 hm<sup>2</sup>,旱地面积2 hm<sup>2</sup>,多年平均气温15.1℃,多年平均降雨量为1 084.7 mm,多年平均入库水量约为34.76×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。陈墩库区属于方便水库的前置湿地,是方便水库小流域的一部分。方便水库位于秦淮河支流二干河上游,设计洪水位28.04 m(吴淞基面,下同),校核洪水位29.15 m,年平均水位25.5 m,库区面积6.68 km<sup>2</sup>,总库容4 900×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,兴利库容2 084×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。省政府于2003年将方便水库列为饮用水源地水功能区,2007年列为全省第一批重点集中式饮用水源地。

### 2.2 监测点布设与采样分析

陈墩库区包括6个湿地(图1),每个湿地设置一个监测点,6个湿地的主要植物类型以及水域面积见表1。水质监测和水生植物调查从2015年9月到2016年8月进行。TN、TP的监测为每周监测1次,每月4次,总氮的测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636-2012),总磷的测定采用钼酸铵分光光度法(GB 11893-89)。植物每个季度测定一次,测定指标包括植物盖度、生物量等,测定时间分别在2015年10月、2016年1月、2016年4月、2016年7月。

表1 陈墩库区各湿地面积及植被特征

湿地区域	监测点	水域面积/hm <sup>2</sup>	水深/m	水生植物类型及分布情况
1号湿地	1 <sup>#</sup>	4.0	2.0	密集挺水植物、沉水植物和少量浮叶植物
2号湿地	2 <sup>#</sup>	1.0	1.8	密集的沉水植物
3号湿地	3 <sup>#</sup>	1.5	2.2	密集的挺水植物
4号湿地	4 <sup>#</sup>	1.5	1.8	少量浮叶植物
5号湿地	5 <sup>#</sup>	1.0	2.1	少量浮叶植物
6号湿地	6 <sup>#</sup>	7.0	2.5	密集浮叶植物、少量挺水植物



图1 陈墩库区位置与监测点分布图

### 2.3 数据处理方法

所有实测指标均做3次平行测定与分析,试验

结果以3次样品分析的平均值表示(3次分析结果的误差范围 $<5\%$ ),不同季节氮、磷时空差异显著性检验采用单因素方差分析(one-way ANOVA),两组数据显著性差异采用独立样本T检验;氮、磷与植物间的相关性采用RDA分析。试验数据采用Excel2013、Matlab2014、Canoco4.5以及SPSS17.0软件进行统计检验、绘图和分析。

### 3 结果与分析

#### 3.1 陈墩库区 TN、TP 季节变化特征

3.1.1 TN 季节变化特征 陈墩库区不同湿地 TN 浓度变化有所差异(图2、图3)。1号湿地(1<sup>#</sup>)为挺水植物优势区,秋季9、10月份浓度较低,11月份浓度上升达到第一个峰值0.760 mg/L;冬季浓度逐渐降低,春季4月份浓度上升,可能由于春季天气回暖,春耕化肥使用等使得面源污染浓度增加,造成了入河营养盐升高;5月份挺水植物快速生长,TN浓度在5月份逐步呈现下降趋势;夏季6、7月份 TN 浓度较稳定,8月份略有上升;全年平均值为 $0.529 \pm 0.201$  mg/L,各季节平均浓度为秋季( $0.653 \pm 0.327$  mg/L) > 冬季( $0.509 \pm 0.186$  mg/L) > 春季( $0.503 \pm 0.221$  mg/L) > 夏季( $0.484 \pm 0.293$  mg/L)。3号湿地(3<sup>#</sup>)也是以挺水植物为主,其季节变化趋势与1号湿地(1<sup>#</sup>)比较相似,但是夏季浓度高于冬季,这是因为1号湿地比3号湿地面积大,夏季降雨量增大携带大量营养盐进入湿地,1号湿地起到了较好的稀释作用,夏季6、7月份 TN 浓度变化平稳,没有出现明显上升;3号湿地 TN 浓度变化均值为秋季( $0.800 \pm 0.067$  mg/L) > 夏季( $0.781 \pm 0.146$  mg/L) > 冬季( $0.643 \pm 0.062$  mg/L) > 春季( $0.615 \pm 0.092$  mg/L),全年平均浓度为 $0.710 \pm 0.217$  mg/L。

2号湿地(2<sup>#</sup>) TN 浓度秋季10月份略有下降,11月份 TN 浓度逐渐上升,在冬季(12月) TN 浓度达到峰值1.112 mg/L;春季3月份下降到最低点后上升,夏季 TN 浓度持续上升,8月份达到峰值1.062 mg/L。沉水植物区 TN 浓度季节变化特征为夏季( $1.008 \pm 0.053$  mg/L) > 冬季( $0.868 \pm 0.244$  mg/L) > 秋季( $0.824 \pm 0.226$  mg/L) > 春季( $0.692 \pm 0.136$  mg/L),浓度全年平均值为 $0.848 \pm 0.264$  mg/L。

4号湿地(4<sup>#</sup>)、5号湿地(5<sup>#</sup>)和6号湿地(6<sup>#</sup>)均为浮叶植物优势区。4号湿地(4<sup>#</sup>)秋季9、11月总氮浓度较高,10月份浓度较低,进入冬季以后 TN

浓度逐渐降低,冬季2月份降到最低点,春季 TN 浓度没有较大的波动;进入夏季 TN 浓度逐渐上升;TN 浓度季节变化表现为秋季( $0.741 \pm 0.262$  mg/L) > 夏季( $0.740 \pm 0.201$  mg/L) > 冬季( $0.703 \pm 0.258$  mg/L) > 春季( $0.680 \pm 0.041$  mg/L),全年平均值为 $0.716 \pm 0.287$  mg/L。5号湿地(5<sup>#</sup>)季节变化趋势与4号湿地(4<sup>#</sup>)基本一致,整体表现为秋季( $0.815 \pm 0.126$  mg/L) > 夏季( $0.775 \pm 0.087$  mg/L) > 冬季( $0.768 \pm 0.182$  mg/L) > 春季( $0.749 \pm 0.121$  mg/L),全年平均浓度为 $0.777 \pm 0.164$  mg/L。6号湿地(6<sup>#</sup>)季节变化与4号、5号湿地(5<sup>#</sup>)略有差别,夏季浓度 TN 没有明显上升,这是因为6号湿地水域面积大且夏季浮叶植物生物量更高,具有较好的净化吸收作用。TN 浓度整体表现为秋季( $0.971 \pm 0.099$  mg/L) > 冬季( $0.872 \pm 0.050$  mg/L) > 夏季( $0.764 \pm 0.046$  mg/L) > 春季( $0.647 \pm 0.039$  mg/L),全年平均值为 $0.814 \pm 0.257$  mg/L。

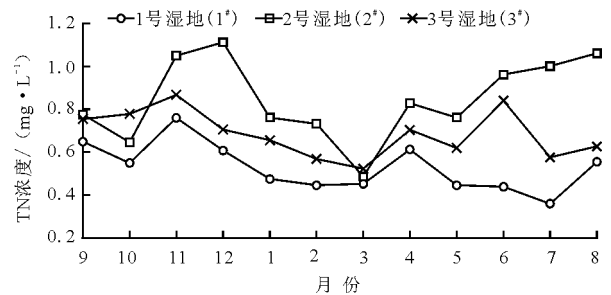


图2 1号、2号和3号湿地 TN 季节变化曲线

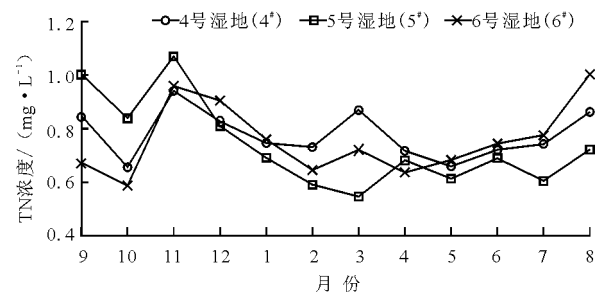


图3 4号、5号和6号湿地 TN 季节变化曲线

不同湿地 TN 浓度季节变化曲线既有相似之处又有区别。除了1号湿地(1<sup>#</sup>)以外的湿地夏季浓度均相对较高,这可能与湿地进水营养盐浓度有着密切关系。根据调查陈墩库区小流域以面源污染为主,其中农田径流污染最为严重,夏季(6-8月份)雨量充沛,大量化肥、农药等随着雨水冲刷进入河道,引起河道营养盐浓度急剧上升,造成湿地进水 TN 浓度增加<sup>[11]</sup>。1号湿地(1<sup>#</sup>) TN 浓度夏季没有升高是因为水域面积较大而且水生植物种类丰富起

到了较好的稀释净化作用。各湿地的 TN 浓度在秋季的 11 月份均呈现上升趋势,而进入冬季以后均呈现下降趋势,研究表明大多数挺水植物和浮叶植物在 11 月份开始进入衰败期,水生植物衰败分解过程分泌的代谢产物及残枝败叶的腐烂物质会增加水体中的 TN 浓度<sup>[12]</sup>;冬季浓度逐渐降低一方面是因为冬季进水中的 TN 浓度降低,另一方面是由于水生植物腐败后期营养盐释放强度逐渐减小,一些研究还表明<sup>[13-14]</sup>水体中保留适量的水生植物残体,可以有效地增加水体的溶解氧,促进系统的硝化作用,有利于降低水体中 TN 浓度。

**3.1.2 TP 季节变化特征** 陈墩库区 TP 季节变化特征与 TN 有所不同(图 4、图 5)。1 号湿地(1<sup>#</sup>)秋季 11 月份浓度上升达到峰值 0.035 mg/L;进入冬季(12 月份)TP 浓度明显下降,冬季变化较为平稳;春季(4 月)浓度呈现大幅度上升趋势,夏季继续上升 6 月份达到峰值 0.048 mg/L 后又呈现下降趋势,平均浓度夏季(0.0392 ± 0.0133 mg/L) > 秋季(0.0247 ± 0.0088 mg/L) > 春季(0.0240 ± 0.0070 mg/L) > 冬季(0.0160 ± 0.0040 mg/L),全年平均浓度 0.0251 ± 0.0031 mg/L;3 号湿地(3<sup>#</sup>)TP 变化趋势与 1 号(1<sup>#</sup>)湿地基本一致,峰值也是在秋季的 11 月份(0.0460 mg/L)和夏季的 6 月份(0.0430 mg/L)出现,平均浓度秋季(0.0411 ± 0.0031 mg/L) > 夏季(0.0370 ± 0.0110 mg/L) > 春季(0.0308 ± 0.0168 mg/L) > 冬季(0.0177 ± 0.0033 mg/L),全年平均浓度 0.0312 ± 0.0148 mg/L;2 号湿地(2<sup>#</sup>)与 3 号湿地(3<sup>#</sup>)在夏季略有不同,6 月份出现浓度稍下降的趋势,因此其峰值出现在 4 月(0.034 mg/L)和 8 月份(0.037 mg/L),平均浓度秋季(0.0334 ± 0.0106 mg/L) > 夏季(0.0308 ± 0.0062 mg/L) > 春季(0.0281 ± 0.0121 mg/L) > 冬季(0.0155 ± 0.0015 mg/L),全年平均浓度 0.0265 ± 0.0175 mg/L。

4 号湿地(4<sup>#</sup>)秋季 9、10 月份浓度较低,11 月份浓度升高达到峰值 0.052 mg/L,进入冬季浓度又迅速降低,春季 3、4 月浓度明显上升,夏季 6、7 月浓度变化平稳,8 月份略有下降,平均浓度秋季(0.0376 ± 0.0144 mg/L) > 春季(0.0337 ± 0.0097 mg/L) > 夏季(0.0314 ± 0.0104 mg/L) > 冬季(0.0203 ± 0.0023 mg/L),全年平均浓度 0.0294 ± 0.0225 mg/L。6 号湿地(6<sup>#</sup>)秋季、冬季、春季变化趋势与生态精养区基本一致,秋季 11 月份达到第一个峰值 0.042 mg/L 之后大幅下降,冬季 TP 浓度变化平稳,

春季浓度逐渐上升;进入夏季 6 月浓度稍有下降,7 月大幅回升达到峰值 0.061 mg/L,8 月份呈现下降趋势,平均浓度夏季(0.0362 ± 0.0248 mg/L) > 秋季(0.0297 ± 0.0123 mg/L) > 春季(0.0247 ± 0.0121 mg/L) > 冬季(0.0203 ± 0.0063 mg/L),全年平均浓度 0.0271 ± 0.0339 mg/L。6 号湿地(6<sup>#</sup>)秋季(9、10、11 月)TP 浓度变化稳定,冬季呈现持续下降的趋势,进入春季 3 月份后,浓度逐渐回升,4 月份达到第 1 个峰值 0.046 mg/L,后 5 月份又逐渐下降,进入夏季略有回升,7 月份达到第 2 个峰值 0.047 mg/L,8 月份浓度下降,平均浓度夏季(0.0372 ± 0.0152 mg/L) > 春季(0.0371 ± 0.0121 mg/L) > 秋季(0.0297 ± 0.0023 mg/L) > 冬季(0.0213 ± 0.0043 mg/L),全年平均浓度 0.0303 ± 0.0157 mg/L。

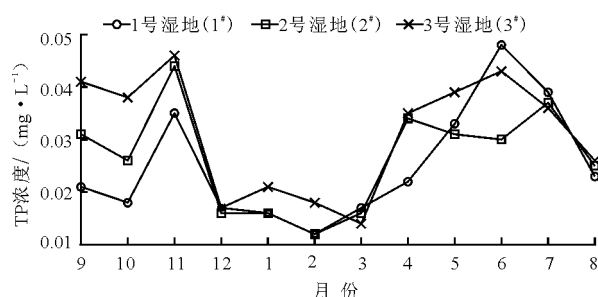


图 4 1 号、2 号和 3 号湿地 TP 季节变化曲线

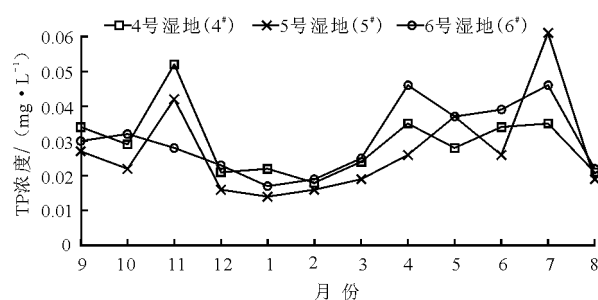


图 5 4 号、5 号和 6 号湿地 TP 季节变化曲线

各湿地 TP 浓度的季节变化趋势比较相似,除了浮叶植物区(6<sup>#</sup>)基本都呈现夏季和秋季浓度较高,而冬季和春季浓度较低的趋势,这主要和进水 TP 浓度密切相关,夏季 TP 浓度是降雨携带大量营养盐进入水体导致,秋季 TP 浓度较高和植物衰败营养盐释放有关。6 号湿地秋季 11 月份 TP 浓度没有明显上升,可能是由于进入秋季后,随着温度降低,6 号湿地优势浮叶植物由喜温植物凤眼莲变为空心莲子草,俗称水花生,其耐寒性较强,11 月份还未大面积腐烂,冬季植物枯萎死亡后,残败的枝叶在春季初期(4 月)温度刚上升时腐烂速度加快,释放

了更多的磷元素<sup>[15-16]</sup>,TP 浓度呈现了夏、春季节较高而秋、冬季节较低的特点。

### 3.2 陈墩库区 TN、TP 空间变化特征

3.2.1 TN 空间变化特征 陈墩库区生态湿地全年 TN 浓度均值表现为秋季(0.782 ± 0.951 mg/L) > 冬季(0.772 ± 0.715 mg/L) > 夏季(0.751 ± 0.479 mg/L) > 春季(0.659 ± 0.534 mg/L)。单因素方差分析结果(表 2)显示陈墩库区 TN 浓度在春季、夏季、冬季均有显著差异(P < 0.05),秋季差异不显著。

表 2 陈墩库区各湿地 TN 浓度单因素方差分析

季节	ANOVA		TN/(mg · L <sup>-1</sup> )		水质类别
	F	P	均值	变化范围	
春季	4.813	0.001	0.659	0.266 ~ 1.193	Ⅲ类水
夏季	7.318	0.000	0.751	0.261 ~ 1.23	Ⅲ类水
秋季	1.954	0.096	0.782	0.287 ~ 1.733	Ⅲ类水
冬季	4.105	0.006	0.772	0.445 ~ 1.487	Ⅲ类水

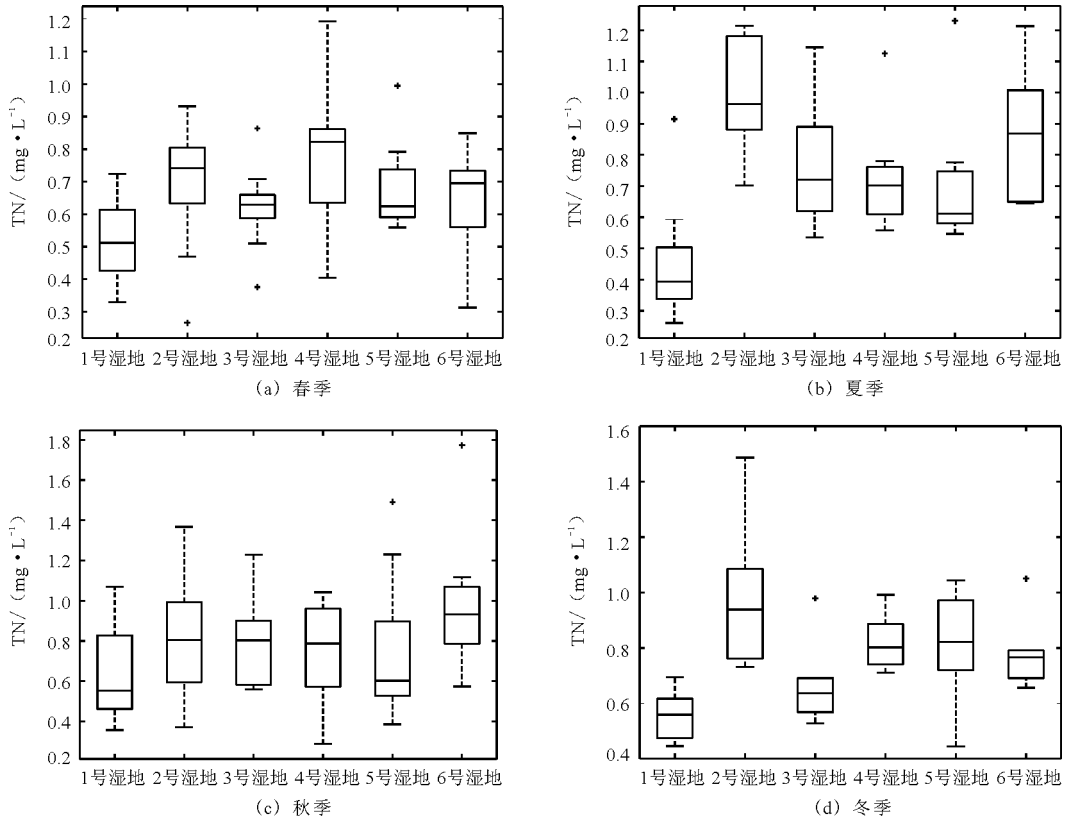


图 6 陈墩库区各湿地 TN 浓度季节变化箱线图

从陈墩库区各功能区 TN 浓度季节变化箱线图(图 6)可以看出,春季各功能区水体 TN 浓度变化有显著差异(图 6(a)),1 号湿地(1<sup>#</sup>)和 3 号湿地(3<sup>#</sup>)TN 浓度较低,1 号湿地(1<sup>#</sup>)和 3 号湿地(3<sup>#</sup>)植物以芦苇、荷花、菖蒲等景观植物为主,研究表明挺水植物芦苇、菖蒲根系孔隙率高有较好的输氧能力<sup>[17]</sup>,可以促进水体中微生物的硝化作用<sup>[18-19]</sup>,进而提高了氮的去除效率。夏季 1 号湿地 TN 浓度较低,图 6(b)表明其在夏季对 TN 也有较好的去除作用,2 号湿地(2<sup>#</sup>)和 6 号湿地(6<sup>#</sup>)夏季浓度较高,可能是由于这两个功能区植物物种比较单一,研究表明植物合理搭配比单一植物物种能起到更加有效的净化作用<sup>[20-21]</sup>,另外, Ibekwe 等<sup>[22]</sup>的研究表明

50% 的植物覆盖面积比 100% 植物覆盖的湿地中硝化细菌和反硝化细菌的丰富度更好,沉水植物区(2<sup>#</sup>)和浮叶植物区(6<sup>#</sup>)植物覆盖面积都达到 90% 以上,过大的覆盖面积反而降低了其对氮的去除作用。秋季各湿地区浓度没有明显差异(图 6(c))。冬季 1 号湿地和 3 号湿地浓度仍然较低,而 2 号湿地浓度最高(6(d)),这是因为不同水生植物分解过程对水体水质的影响不同,相比挺水植物和浮叶植物,沉水植物腐烂氮的释放量更多,这与周林飞等<sup>[23]</sup>的研究结果一致。

3.2.2 TP 空间变化特征 陈墩库区生态湿地全年 TP 浓度均值表现为夏季(0.0353 ± 0.0757 mg/L) > 秋季(0.0330 ± 0.052 mg/L) > 春季(0.0299 ± 0.0297 mg/L)

>冬季( $0.0180 \pm 0.009 \text{ mg/L}$ ), 总体呈现夏秋季节较高、春冬季节较低的特征, 与 TN 浓度变化特征不同。单因素方差分析结果(表 3)显示陈墩库区 TN 浓度在冬季有显著差异( $P < 0.05$ ), 春季、夏季、秋季差异均不显著。

由陈墩库区各功能区 TP 浓度季节变化箱线图(图 7)可以看到, 春季、夏季和秋季各功能区 TP 浓度没有显著差别, 这是因为陈墩库区不同生活型水生植物对 TP 的去除效果差异不大。

冬季 6 号和 4 号湿地 TP 浓度较高, 其余各功能

区没有明显差别, 可能是由于陈墩库区的浮叶植物冬季腐烂时释放了较多的磷元素。

表 3 陈墩库区各湿地 TP 浓度单因素方差分析

季节	ANOVA		TP/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )		水质类别
	F	P	均值	变化范围	
春季	2.021	0.088	0.0299	0.010 - 0.065	Ⅲ类水
夏季	0.326	0.895	0.0353	0.004 - 0.111	Ⅲ类水
秋季	2.266	0.057	0.0330	0.011 - 0.085	Ⅲ类水
冬季	2.755	0.037	0.0180	0.011 - 0.027	Ⅲ类水

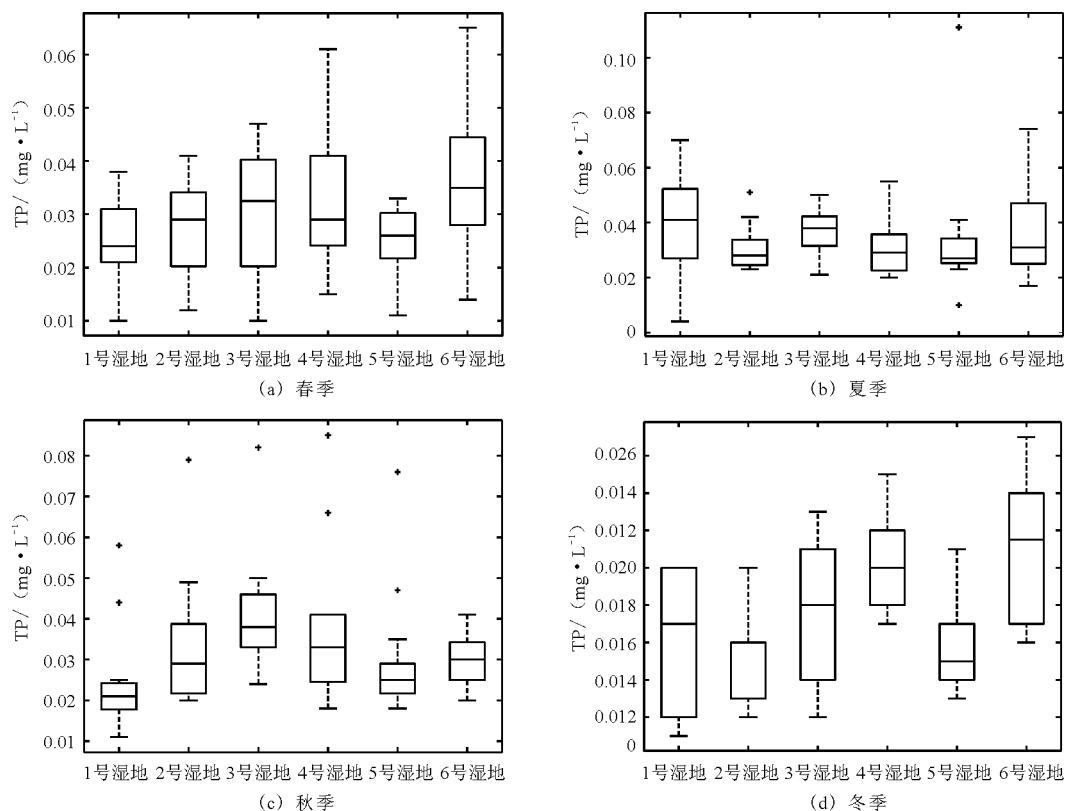


图 7 陈墩库区各湿地 TP 浓度季节变化箱线图

### 3.3 陈墩库区 TN、TP 浓度与植物生物量的相关性分析

湿地植物物种是氮磷浓度变化的重要影响因素。针对全年不同季节对库区植物调查结果, 挑选优势度较高的物种分析其分布与氮磷浓度的相关性, 主要包括挺水植物再力花、芦苇、黄菖蒲, 浮叶植物睡莲、浮萍, 沉水植物轮叶黑藻。运用 Canoco4.5 将 6 种植物在各采样点的生物量与氮磷浓度进行冗余分析, 分析结果见图 8。图 8 中, 植物物种标线与环境因子标线之间夹角的余弦值为两者间的相关性大小, 投影方向与环境因子标线方向一致表示呈正相关, 方向相反则为负相关。

黄菖蒲和睡莲与 TN、TP 都成正相关, 可能是由于黄菖蒲和睡莲生物量相对较低没有起到较好的吸收作用, 随着 TN、TP 浓度的增加其生物量有所增加; 芦苇与 TN 浓度呈现明显的负相关, 而与 TP 没有明显的相关性, 这表明芦苇对 TN 的去除作用更好, 这可能是因为芦苇一方面可以吸收水体中的氮磷等营养物质, 也可以增加水体中的溶解氧从而促进硝化作用<sup>[18-19, 24]</sup>, 研究表明水生植物对氮磷的直接吸收作用有限, 植物的根系给微生物提供氧气和碳源, 对湿地水质净化有更重要的意义<sup>[25-27]</sup>。再力花与 TP、TN 都呈负相关, 这表明再力花对 TN、TP 都有一定的去除作用, 但是对 TP 的去除作用更好;

王骥等<sup>[28]</sup>发现再力花湿地对 TN、TP 的去除效果好于菖蒲湿地,并且再力花湿地对 TP 的去除率显著高于 TN,这与本文的研究结果一致。浮萍与 TN 呈显著正相关,薛慧玲等<sup>[29]</sup>在不同浓度梯度条件下测定了浮萍生物量的变化,结果表明在一定的氮浓度范围内浮萍生物量呈现增加趋势;陈墩库区湿地中再力花与 TP 的相关性不明显,马晓霞<sup>[30]</sup>研究了不同磷浓度梯度条件下浮萍生物量呈现先升高后降低的趋势,与本文研究结果不同,这可能是由于 TP 浓度在陈墩库区各湿地没有显著差异,而 TN 浓度空间变化差异显著,因此在陈墩库区湿地中 TN 是浮萍生长的主要限制因子,与 TP 没有呈现明显的相关性。轮叶黑藻与 TN 和 TP 都呈显著负相关,孔祥虹等<sup>[31]</sup>研究发现长江中下游湖泊中轮叶黑藻与 TN 呈负相关,吕晓燕等<sup>[32]</sup>发现淮河流域中轮叶黑藻与 TN、TP 均呈负相关,可见轮叶黑藻的生长能够有效降低水体中 TN、TP 的浓度。

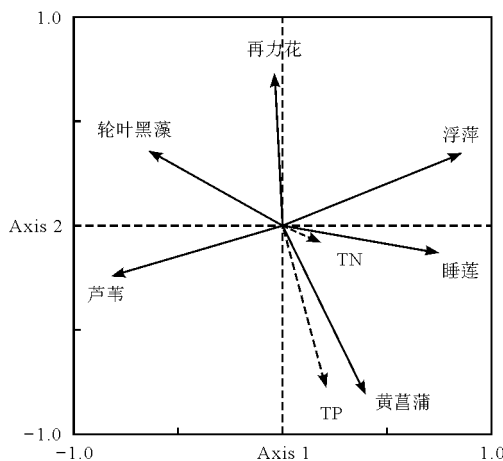


图8 湿地水生植物与氮磷浓度相关性分析

## 4 结论与讨论

陈墩库区 TN、TP 浓度不同功能区域有所差异: TN 季节变化在挺水植物优势区(1<sup>#</sup>)和浮叶植物优势区(6<sup>#</sup>)呈现冬秋季节较高,而春夏季节较低的特征;沉水植物优势区(2<sup>#</sup>)呈现夏冬季节较高,春秋季节较低;浮叶植物优势区(4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>)和挺水植物优势区(3<sup>#</sup>)呈现夏秋季节较高、春冬季节较低的特点。TP 季节变化趋势在浮叶植物优势区(4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>)和挺水植物优势区(1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>)以及沉水植物优势区(2<sup>#</sup>)都呈现夏秋季节较高,而春冬季节较低的特点,在浮叶植物优势区(6<sup>#</sup>)呈现夏春季节较高、秋冬季节较低的特点。对不同季节各采样点氮磷浓度差异性分析显示:采样点 TN 浓度在春季、夏季、冬季有显著

差异;采样点 TP 在冬季有显著差异,其余季节均无明显差异。

(1)从时间维度上来看,水体季节变化曲线主要受进水氮磷浓度和植物生长状况的影响,陈墩库区入湿地河道的主要污染来源是面源污染,受降雨量的影响其水质季节变化明显,基本呈现夏秋季节较高、冬春季节较低的特点,在各湿地夏秋季节的 TN、TP 往往呈现升高趋势,可见进水 TN、TP 浓度对其产生了显著影响;湿地植物也会影响水体氮磷浓度的季节变化,研究表明水生植物在夏季对水质的净化作用最好,秋冬季节植物逐步衰落腐败释放一定量的营养盐,造成秋冬季节营养盐升高的现象<sup>[33-34]</sup>,植物在不同季节的生长状况也是影响湿地水质的重要因素<sup>[35]</sup>。

(2)从空间维度上来看,湿地 TN、TP 浓度与水生植物类型密切相关,水生植物类型不同的湿地其氮磷浓度季节变化也不相同,水生植物类型分布相似的湿地由于其大小不同季节变化也不完全相同,水域面积较大的湿地 TN、TP 浓度较低,这是因为陈墩库区湿地水深没有显著差别,水域面积较大的湿地起到了更好的稀释作用,也可以增加水体在湿地内的停留时间,从而强化湿地的去除作用。可见陈墩库区 TN、TP 浓度季节变化与进水氮磷浓度和湿地面积、植物类型及生长状况密切相关。

通过将湿地优势水生植物与 TN、TP 的相关性分析可知,不同植物与氮磷呈现不同的相关性,这与水生植物对氮磷的吸收能力不同有关;湿地中的轮叶黑藻、再力花、芦苇具有较好的去除氮磷营养盐的作用。

## 参考文献:

- [1] 白军红,邓伟,朱颜明. 湿地生物地球化学过程研究进展[J]. 生态学杂志,2002,21(1):53-57.
- [2] 吴春笃,石驰,沈明霞,等. 北固山湿地植物对氮磷元素吸收能力的研究[J]. 生态环境,2007,16(2):369-372.
- [3] 陈功杰,温小军,朱建新. 人工湿地生态系统建造技术研究[J]. 工程建设与设计,2007(7):54-57.
- [4] 汪银梅. 人工湿地水质净化应用现状及发展前景分析[J]. 山东化工,2015,44(20):157-159.
- [5] 胡俊纳,刘红玉,郝敬锋. 城市景观多功能区湿地水质分异及其人类影响[J]. 生态学杂志,2010,29(7):1409-1413.
- [6] 张增胜,徐功娣,李方,等. 水平潜流人工湿地复合系统净化农村高浊度富营养化水体的研究[J]. 水处理技



- 术,2009,35(2):46-49.
- [7] 过 锋,赵 俊,陈聚法. 胶州湾湿地水体中总氮和总磷的分布及变化特征[J]. 渔业科学进展,2012,33(3):108-114.
- [8] Huett D O, Morris S G, Smith G, et al. Nitrogen and phosphorus removal from plant nursery runoff in vegetated and unvegetated subsurface flow wetlands[J]. Water Research,2005,39(14):3259-3272.
- [9] 金树权,周金波,朱晓丽,等. 10种水生植物的氮磷吸收和水质净化能力比较研究[J]. 农业环境科学学报,2010,29(8):1571-1575.
- [10] 梁奇奇,沈耀良,吴 鹏,等. 植物种类与水力负荷对人工湿地去除污染物的交互作用[J]. 环境工程学报,2016,10(6):2975-2980.
- [11] 杨超杰,贺 斌,段伟利,等. 太湖典型丘陵水源地水质时空变化及影响因素分析——以平桥河流域为例[J]. 长江流域资源与环境,2017,26(2):273-281.
- [12] 王新刚,吕锡武,张圣菊. 水生植物分解过程中生物物质及氮磷释放规律研究[J]. 安全与环境学报,2011,11(5):82-85.
- [13] 唐金艳,曹培培,徐 驰,等. 水生植物腐烂分解对水质的影响[J]. 应用生态学报,2013,24(1):83-89.
- [14] 强蓉蓉,王国祥,张利民,等. 凤眼莲死亡对湖泊水质的持续性影响分析[J]. 中国环境监测,2005,21(1):24-27.
- [15] 戚美侠,王红萍,陈 杰. 冬、春季芦苇(*Phragmites australis*)和狭叶香蒲(*Typha angustifolia*)的腐解过程及其对水质的影响[J]. 湖泊科学. 2017,29(2):420-429.
- [16] 潘慧云,徐小花,高士祥. 沉水植物衰亡过程中营养盐的释放过程及规律[J]. 环境科学研究,2008,21(1):64-68.
- [17] Lai Wenling, Wang Shuqiang, Peng Changlian, et al. Root features related to plant growth and nutrient removal of 35 wetland plants[J]. Water Research,2011,45(13):3941-3950.
- [18] 丁 浩,凌 云,徐亚同,等. 梦清园芦苇湿地根际微生物特性研究[J]. 四川环境,2007,26(2):6-10.
- [19] 李顺鹏,沈 标,高庆军,等. 芦苇塘处理城市污水中的产甲烷细菌研究[J]. 中国沼气,1994,12(1):6-10.
- [20] 田如男,朱 敏,孙欣欣,等. 不同水生植物组合对水体氮磷去除效果的模拟研究[J]. 北京林业大学学报,2011,33(6):191-195.
- [21] Han Wenquan, Chang Jie, Fan Xing, et al. Plant species diversity impacts nitrogen removal and nitrous oxide emissions as much as carbon addition in constructed wetland microcosms[J]. Ecological Engineering,2016,93:144-151.
- [22] Ibekwe A M, Lyon S R, Leddy M, et al. Impact of plant density and microbial composition on water quality from a free water surface constructed wetland[J]. Journal of Applied Microbiology,2007,102(4):921-936.
- [23] 周林飞,赵言稳,关秀婷. 6种水生植物腐烂过程中水质理化指标的变化室内模拟研究[J]. 湿地科学,2016,14(6):832-839.
- [24] 刘超翔,胡洪营,黄 霞,等. 滇池流域农村污水生态处理系统设计[J]. 中国给水排水,2003,19(2):93-94.
- [25] 张 巍,许 静,李晓东,等. 稳定塘处理污水的机理研究及应用研究进展[J]. 生态环境学报,2014,23(8):1396-1401.
- [26] 王 博,祁佩时,刘云芝,等. 潜流人工湿地氮素去除机理与影响因素[J]. 应用化工,2017,46(2):350-355.
- [27] Chen Yi, Wen Yue, Zhou Qi, et al. Effects of plant biomass on nitrogen transformation in subsurface batch constructed wetlands: A stable isotope and mass balance assessment[J]. Water Research,2014, 63:158-167.
- [28] 王 骥,张兰英,卢少勇,等. 再力花/菖蒲生物湿地床去除河水中氮磷的试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2012,42(S1):408-414.
- [29] 薛慧玲,张云峰,陈祈磊,等. 水体中氮含量对紫背浮萍生长的影响[J]. 环境科学与技术,2013,36(12M):37-41.
- [30] 马晓霞. 浮萍对不同氮素形态和水平的代谢响应[D]. 重庆:重庆大学,2012.
- [31] 孔祥虹,肖兰兰,苏豪杰,等. 长江下游湖泊水生植物现状及与水环境因子的关系[J]. 湖泊科学,2015,27(3):385-391.
- [32] 吕晓燕,于鲁冀,王 莉,等. 淮河流域河南段水生植物多样性评价及其影响因素分析[J]. 中国环境监测,2015,31(6):83-90.
- [33] 刘守江,张 斌,胡翠华. 人工湿地植物净化生活污水研究现状与展望[J]. 四川环境,2011,30(1):53-55.
- [34] 陈永华,吴晓芙,郝 君,等. 人工湿地植物应用现状与问题分析[J]. 中国农学通报,2011,27(31):88-92.
- [35] Greenway M, Woolley A. Changes in plant biomass and nutrient removal over 3 years in a constructed wetland in Cairns, Australia[J]. Water Science and Technology, 2001,44(11-12):303-310.