

文章编号: 1000-5641(2018)06-0050-09

## 洱海调蓄多塘湿地磷截留效果及影响因子研究

李 丹<sup>1,2,3</sup>, 黄民生<sup>1,2</sup>, 郑丙辉<sup>3</sup>, 储昭升<sup>3</sup>

- (1. 华东师范大学 生态与环境科学学院, 上海 200241;
2. 华东师范大学 崇明生态研究中心, 上海 200241;
3. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

**摘要:** 为考察洱海调蓄多塘湿地对磷的截留特征及效果, 选取流域内 12 个调蓄多塘湿地进行定期跟踪调查, 评估湿地中磷的截留性能, 识别调蓄多塘湿地中磷的截留特征, 解析调蓄多塘湿地中磷去除的主要影响因子. 结果表明: 调蓄多塘湿地的建立能够有效拦截面源污染携带的磷污染物, 提升出水水质. 湿地中  $\eta(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 、 $\eta(\text{TP})$  和  $\eta(\text{SS})$  平均截留效率分别为 43.44%~93.88%、27.71%~89.67% 和 21.84%~62.12%. 枯水期进水磷浓度高于丰水期, 且枯水期磷的截留效率优于丰水期, 枯水期间歇性断流提供足够的停留时间, 有助于污染物的去除.  $\rho_o(\text{TP})$  与  $\rho_i(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$  ( $R = 0.297$ ) 和  $\rho_i(\text{TP})$  ( $R = 0.304$ ) 显著正相关,  $\eta(\text{TP})$  分别与调蓄多塘湿地进水  $\rho_i(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$  ( $R = 0.665$ ) 和  $\rho_i(\text{TP})$  ( $R = 0.740$ ) 呈显著正相关. 调蓄多塘湿地对磷的持留效率主要取决于进水中磷酸根所占比例及总磷的浓度. 该研究以期为调蓄多塘湿地在磷入湖负荷削减、流域污染治理和水体修复等领域的应用提供可靠的案例支持.

**关键词:** 调蓄多塘湿地; 磷; 截留; 流域

**中图分类号:** X524 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2018.06.006

## Performance and factors of phosphorus interception in storing multi-pond wetlands in the Erhai Lake Basin

LI Dan<sup>1,2,3</sup>, HUANG Min-sheng<sup>1,2</sup>, ZHENG Bing-hui<sup>3</sup>, CHU Zhao-sheng<sup>3</sup>

- (1. School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China;
2. Institute of Eco-Chongming, East China Normal University, Shanghai 200241, China;
3. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** To investigate the characteristics and factors of phosphorus interception, phosphorus concentration from 12 storing multi-pond wetlands were analyzed. Evaluation of the removal efficiency and identification of the key factors of phosphorus removal were executed in the Erhai Lake Basin. The results showed that the water quality was effectively improved because phosphorus pollutants from the surface source pollution were

收稿日期: 2018-03-14

基金项目: 国家科技重大专项(2014ZX07101012)

第一作者: 李 丹, 女, 博士研究生, 研究方向为水环境治理与修复. E-mail: lidan01@craes.org.cn.

通信作者: 黄民生, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为水环境治理与修复.

E-mail: mshuang@des.ecnu.edu.cn.

intercepted in the storing multi-pond wetlands. The average interception efficiency value of  $\eta(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ ,  $\eta(\text{TP})$  and  $\eta(\text{SS})$  were 43.44%~93.88%、27.71%~89.67% and 21.84%~62.12%, respectively. Both the phosphorus concentration of the influent and the efficiency of phosphorus interception in the dry season were higher, respectively, than those in the wet season. Intermittent outflow of effluent provided a residence time which was long enough for the removal of pollutants in the dry season. While  $\rho_o(\text{TP})$  had a significantly positive correlation with  $\rho_i(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$  ( $R=0.297$ ) and  $\rho_i(\text{TP})$  ( $R=0.304$ ).  $\eta(\text{TP})$  showed a significant positive correlation with  $\rho_i(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$  ( $R=0.665$ ) and  $\rho_i(\text{TP})$  ( $R=0.740$ ). The efficiency of phosphorus removal primarily depended on the proportion of phosphate and the TP concentration of the influent. This study may provide support as an engineering case of multi-pond wetlands for the reduction of phosphorus into lakes, water pollution control in basins, and water restoration.

**Keywords:** storing multi-pond wetlands; phosphorus; interception; basin

## 0 引言

随着点源污染得到有效控制,面源污染由于广域性、分散性、随机性、长期性成为湖泊、河流水体富营养化及流域水生态恶化的主要诱因<sup>[1-2]</sup>. 据统计,洱海流域长期受到面源污染,氮磷输入负荷过载,约占入湖总负荷的70%<sup>[3]</sup>. 洱海是磷主控型富营养化湖泊,2016年年均磷含量为0.029 mg/L,超过GB 3838—2002《地表水环境质量》Ⅱ类标准0.16倍,总磷浓度均值较2015年上升了31.80%. 目前,洱海水质正由富营养化初期阶段向中期阶段转变<sup>[4-6]</sup>.

2017年1月,云南省大理州集中精力实施洱海流域“七大工程”方案,全面开启保护洱海模式<sup>[7]</sup>. 流域生态多塘的建设是“七大工程”中的重要工程措施之一,用以应对洱海流域面源污染<sup>[8]</sup>. 调蓄多塘湿地作为面源污染控制的有效手段,用以实现污染物的截留,能够有效实现流域磷的汇,提高出水水质,实现流域面源污染的控制与治理及洱海流域入湖磷污染负荷的削减<sup>[9-10]</sup>.

作为人工湿地的重要形式之一,调蓄多塘湿地的特点在于造价更为低廉、管理便捷、蓄水量大. 国外对于雨水滞留塘、人工湿地用于面源污染处理已有大量的研究报道,但我国对人工湿地的研究依然处于起步阶段<sup>[11-12]</sup>. 我国巢湖面源污染严重,多塘系统得到了良好的运用,并取得了一定的成效<sup>[13-14]</sup>. 然而洱海流域地处高原,与巢湖流域地理气候存在显著差异. 因此,因地制宜开发高原地区调蓄多塘湿地技术亟待研究,为高原地区面源污染控制提供可靠的案例分析和基础研究.

本文基于洱海流域内规模化调蓄多塘湿地体系的建立,选取海东(H)、上关(S)、湾桥(W)这3个镇的12个调蓄多塘湿地,跟踪调研进出水中的磷含量,分析湿地进出水中磷浓度的分布特征,评价调蓄多塘湿地对磷的净化效果,初步解析调蓄多塘湿地磷去除影响因子,以期调蓄多塘湿地的稳定运行和规模化应用提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

洱海流域地处云贵高原,属于中亚热带西南季风气候,干湿季节明显,日照充足,年均气温15.1℃,常年主导风向为西南风. 流域内多年平均降水量1 048 mm,降雨集中在5—10月

份, 占全年降雨的 85%~96%<sup>[15]</sup>.

## 1.2 生态调蓄多塘湿地

生态调蓄多塘湿地主要由土质边坡和土质塘埂构成, 底部铺设防渗布, 防止污水下渗和地下水渗入, 坡埂铺设尼龙网, 边坡设有护坡木桩, 防止边坡坍塌. 塘中设有导流埂以疏导水流, 边坡与内部塘埂比为 1:2. 进出水口设有铸铁闸门、溢流堰等, 以调控进出水水量和运行水位. 调蓄多塘湿地由前置稳定塘、串联表流湿地组成, 前置塘均种有 50% 塘水域面积的风眼莲, 串联表流湿地混合种有梭鱼草、风车草、再力花和睡莲等, 植物覆盖度约为 10%~20% 的表流湿地水域面积. 其地理位置坐标及基本工艺参数见表 1.

表 1 调蓄多塘湿地经纬度及基本工艺参数

名称	经度	纬度	面积/m <sup>2</sup>	平均水深/m
H1	100°15'56.52"E	25°42'56.60"N	2 844.54	0.81
H2	100°15'53.63"E	25°41'41.59"N	1 612.08	0.46
H3	100°15'53.47"E	25°42'39.55"N	4 108.21	1.25
H4	100°17'14.21"E	25°41'38.38"N	4 721.84	1.08
H5	100°15'40.11"E	25°42'56.81"N	3 229.36	0.76
H6	100°19'11.98"E	25°41'30.93"N	5 880.20	1.36
H7	100°16'57.51"E	25°41'26.22"N	5 169.06	1.35
S1	100°07'35.94"E	25°56'15.14"N	5 176.00	1.28
S2	100°07'37.08"E	25°56'14.76"N	5 038.00	1.32
S3	100°06'16.60"E	25°56'04.42"N	8 400.42	1.50
S4	100°06'42.88"E	25°56'22.58"N	5 115.00	1.31
W1	100°08'09.21"E	25°47'14.72"N	7 699.05	2.00

## 1.3 样品采集与测试方法

调蓄多塘湿地建成于 2017 年 5 月, 并成功进水投入运行. 调蓄多塘湿地稳定运行 2—3 个月, 于 2017 年 7 月—2018 年 1 月(其中 7—10 月为雨季, 11—1 月旱季), 逐月对 12 个调蓄多塘湿地进行水样采集. 采样点分别位于湿地的进出口. 水样装入 PVC 塑料瓶中低温保存后, 立即运回实验室, 在 24 h 内完成  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、总磷 (TP) 和悬浮固体污染物 (SS) 浓度 ( $\rho$ ) 的测定. 根据《水和废水监测分析方法》(第四版)中的测定方法分别采用钼锑抗分光光度法、钼锑抗分光光度法和重量法进行  $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 、 $\rho(\text{TP})$  和  $\rho(\text{SS})$  的测定. 无特别说明外, 所有试剂均为分析纯, 实验用水为新鲜去离子水.

## 1.4 数据分析

磷在湿地中的截留效率 ( $\eta$ ) 按照下式计算,

$$\eta = (\rho_i - \rho_o) / \rho_i \times 100\%,$$

式中,  $\eta$  为  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、TP 和 SS 的截留效率, 单位为 %;  $\rho_i$  为进水  $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 、 $\rho(\text{TP})$  和  $\rho(\text{SS})$ , 单位为 mg/L;  $\rho_o$  为出水  $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{SS})$ , 单位为 mg/L.

采用 Excel 2016、Origin 8.0 和 SPSS 20.0 等数学统计软件进行实验数据的分析和绘图.

# 2 结果与分析

## 2.1 调蓄多塘湿地进水磷和 SS 分布特征

调蓄多塘湿地进水磷的分布如图 1, 2017 年 7 月—2018 年 1 月, 12 个调蓄多塘湿地进水中磷含量差异性显著. 调蓄多塘湿地  $\rho_i(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 、 $\rho_i(\text{TP})$  和  $\rho_i(\text{SS})$  分别为  $6.60 \times 10^{-3} \sim$

2.24 mg/L、 $3.40 \times 10^{-2} \sim 2.58$  mg/L 和  $4.00 \sim 281.25$  mg/L. 其中  $\rho_i(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$  对  $\rho_i(\text{TP})$  贡献率为 9.77%~95.17%. 进水中  $\rho_i(\text{TP})$  优于地表水 III 级标准的比例仅占 3.57%, 劣于地表水 V 级标准的比例为 51.19%.  $\rho_i(\text{SS})$  劣于 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》三级标准的比例为 32.14%, 优于一级 A 标准的比例为 3.57%. 其中 H2、H3、H4、H7 和 S2 进水中磷含量普遍较高, 污染严重; H5、H6 和 S3 进水水质相对较好, 磷含量相对较低. 调蓄多塘湿地进水  $\rho_i(\text{SS})$  变化波动较大, H1 和 S4 进水  $\rho_i(\text{SS})$  含量普遍偏高.

洱海不仅是大理州重要的饮用水水源地, 还是重要的旅游胜地, 为满足水质和景观需求, 防止藻华爆发, 急切需要对来自面源污染的入湖磷负荷进行有效控制. 这些源于面源污染的进水中  $\rho_i(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 、 $\rho_i(\text{TP})$  和  $\rho_i(\text{SS})$  含量较高, 波动性和差异性十分显著, 固态磷和溶解态磷分配比例差异大. 其中活性磷酸盐含量较高的多塘中  $\rho_i(\text{TP})$  也相对较高, 说明这些多塘中  $\rho_i(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$  对  $\rho_i(\text{TP})$  的贡献相对较大. 这些较高污染负荷的来水, 需经过进一步净化后, 才能排放入洱海<sup>[16]</sup>.

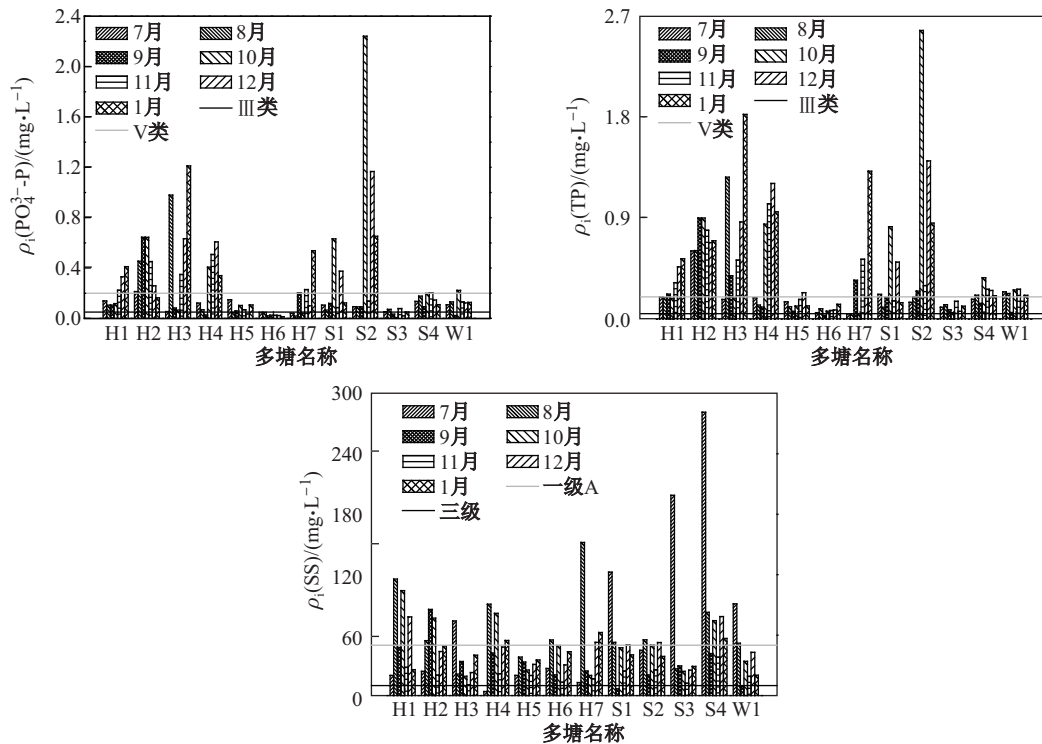


图1 调蓄多塘湿地进水磷和SS含量的分布特征

Fig. 1 The characteristics of P and SS concentration of influent in storing multi-pond wetlands

## 2.2 调蓄多塘湿地出水中磷和SS分布特征

调蓄多塘湿地出水磷的分布见图2, 污水经过调蓄多塘湿地截留净化后, 出水水质有了明显的改善. 调蓄多塘湿地中出水  $\rho_o(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 、 $\rho_o(\text{TP})$  和  $\rho_o(\text{SS})$  分别为  $2.90 \times 10^{-4} \sim 0.13$  mg/L、0.01~0.30 mg/L 和 0.56~191.25 mg/L. 出水中  $\rho_o(\text{TP})$  劣于地表水V类标准的比例仅为 3.57%, 下降了 47.62%, 而出水  $\rho_o(\text{TP})$  优于地表水 III 类标准的比例上升至 34.52%. 出水  $\rho_o(\text{SS})$  劣于三级城镇污水排放标准的仅为 8.33%, 下降了约 25.00%,  $\rho_o(\text{SS})$  达到一级 A 标准的比例为 14.29%, 总体水平提高了 10.72%. 其中 H4 和 W1 调蓄多塘湿地, 2017 年 7 月—2018 年 1 月期间出水中

$\rho_o(\text{TP})$  几乎均优于地表水 III 类标准. 调蓄多塘湿地 H1 总体出水水质相对较差. 此外, 2017 年 7 月, S3 和 S4 多塘中出水  $\rho_o(\text{SS})$  依然过高.

上述调蓄多塘湿地进水中, 部分  $\rho_i(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 、 $\rho_i(\text{TP})$  和  $\rho_i(\text{SS})$  相对较低, 但其中个别出水  $\rho_o(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 、 $\rho_o(\text{TP})$  和  $\rho_o(\text{SS})$  却出现轻微的增加现象, 这是由于进水中  $\rho_i(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 、 $\rho_i(\text{TP})$  和  $\rho_i(\text{SS})$  含量过低, 而塘体内留有大量余水, 污染物浓度偏高, 污水经过调蓄多塘湿地后, 导致出水水质较差. 因此, 在治理面源污染时, 需要及时跟踪调查进出水水质, 通过进水阀的开启闭合, 将水质良好的来水直接排放入湖, 以降低干净来水被多塘中残余污水污染的风险. 此外, 在多塘选址设计时, 根据实地调查在污染负荷较为严重的区域进行多塘建设, 最大化实现调蓄多塘湿地的截污功能.

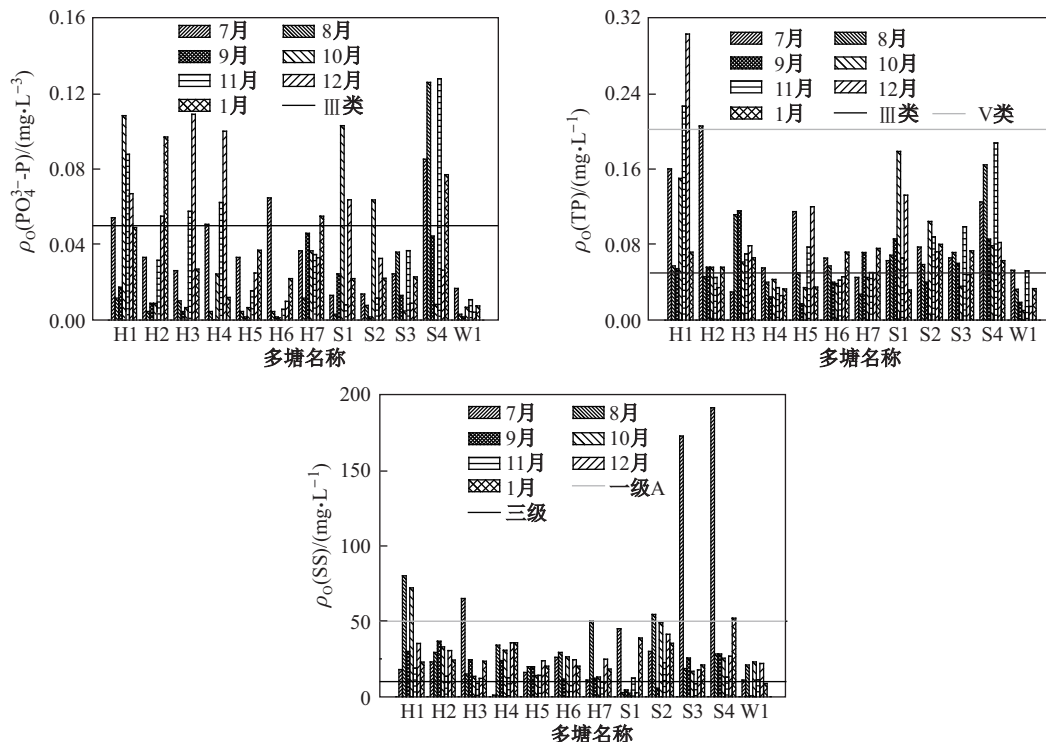


图2 调蓄多塘湿地出水磷和 SS 含量的分布特征

Fig. 2 The characteristics of P and SS concentration of effluent in storing multi-pond wetlands

### 2.3 调蓄多塘湿地磷和 SS 截留效率

调蓄多塘湿地对  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、TP 和 SS 的截留效率见图 3,  $\eta(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 、 $\eta(\text{TP})$  和  $\eta(\text{SS})$  平均为 43.44%~93.88%、27.71%~89.67% 和 21.84%~62.12%. 约 50% 的调蓄多塘湿地对磷的截留效果相对优越 (>60%), 其余调蓄多塘湿地磷去除效果差异性较大, 但大多数对磷的去除效率在 50% 左右. SS 在多塘中的去除效率差异性显著, S1 和 W1 调蓄多塘湿地  $\eta(\text{SS})$  相对良好, 其他多塘湿地  $\eta(\text{SS})$  约为 30%.

调蓄多塘湿地中磷的去除过程受到多种因素的影响, 如植物的生长、微生物的分布、基质的差异性和工艺参数等<sup>[17-18]</sup>, 任一因素的改变都会导致磷截留效率的差异. SS 的去除效率与多塘进水中 SS 浓度、粒径大小、湿地流程、水深、植物密度和水流流速等多种因素都有关<sup>[19-20]</sup>,

从而造成湿地中 SS 的去除效率差异显著。

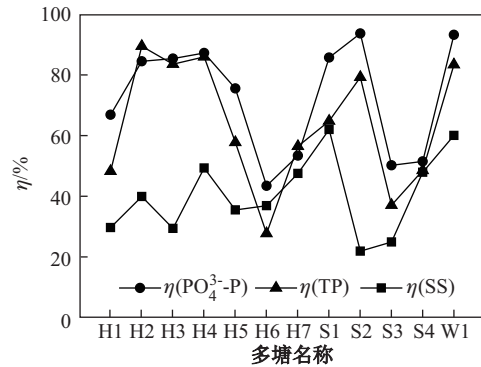


图3 调蓄多塘湿地净化效率

Fig.3 Purification efficiency in storing multi-pond wetlands

#### 2.4 不同水期下进水磷和 SS 分布特征

不同水期下进水磷分布见图4, 总体而言调蓄多塘湿地枯水期进水  $\rho_i(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$  和  $\rho_i(\text{TP})$  高于丰水期, 而  $\rho_i(\text{SS})$  在丰水期高于枯水期。枯水期表现出较高的磷输入现象, 这是由于多塘的进水均源于农村村落污水、农田灌溉后的退水径流, 这些未经处理的污水, 磷含量通常较高; 而丰水期时, 降雨量较大, 初期雨水形成的径流虽然会携带大量的污染物, 但是较大的水量对高浓度的面源污水有一定的稀释作用, 因此, 枯水期表现出相对较高的污染物浓度。然而  $\rho_i(\text{SS})$  在丰水期和枯水期表现出相反的现象, 这是由于雨季时, 降雨较多, 雨水冲刷作用强, 携带了大量的泥沙土粒, 导致进水固体悬浮物浓度偏高<sup>[21]</sup>。不同水期,  $\rho_i(\text{SS})$  和  $\rho_i(\text{TP})$  表现出相反的现象, 说明固体悬浮物中磷的含量相对较低, 其对  $\rho_i(\text{TP})$  的贡献不大。

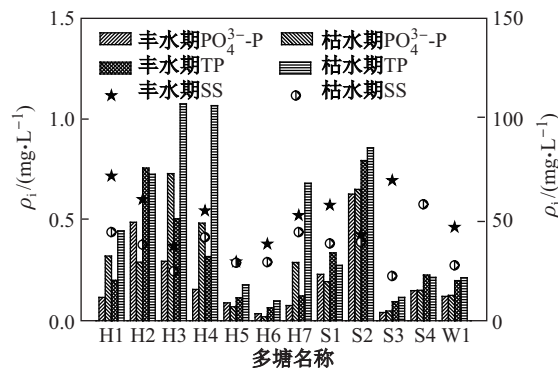


图4 不同水期下进水磷和 SS 特征分布

Fig.4 Characteristics of P and SS distribution of influent in the dry and wet seasons

#### 2.5 不同水期下出水磷和 SS 分布特征

不同水期下出水磷的分布特征见图5, 大部分调蓄多塘湿地出水  $\rho_o(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 、 $\rho_o(\text{TP})$  在不同水期浓度变化不明显。  $\rho_o(\text{SS})$  丰水期普遍高于枯水期, 这与进水  $\rho_i(\text{SS})$  现象一致。调蓄多塘湿地出水  $\rho_o(\text{TP})$  总体水平在  $0.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右, 说明调蓄多塘湿地对面源污水有良好的净化作用, 且有助于出水磷浓度的稳定。其中 H1 多塘在枯水期出水  $\rho_o(\text{TP})$  均值约为  $0.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 在 2017 年 11 月—2018 年 1 月份由于洱海地区“七大工程”排污管道铺设、新建污水措施等工程施工原因, 将上游沟渠沟水改道, 汇进该调蓄多塘湿地的进水沟渠, 造成进水水质变差, 水量变大, 进而导致出水磷浓度的异变。而丰水期  $\rho_o(\text{SS})$  依然较枯水期高, 这一现象说明, 出水  $\rho_o(\text{SS})$  与

进水中的  $\rho_i(\text{SS})$  具体一定的相关性.

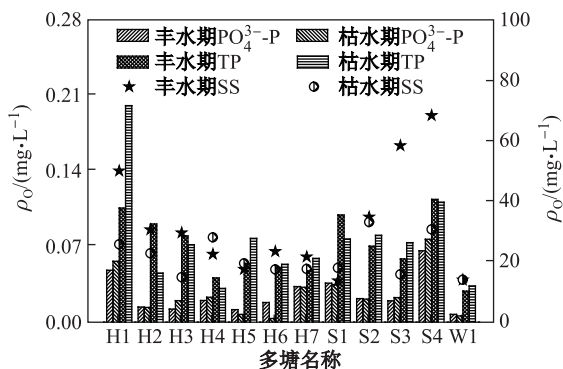


图5 不同水期下出水磷和SS特征分布

Fig.5 Characteristics of phosphorus and SS distribution of effluent in the dry and wet seasons

### 3 讨 论

#### 3.1 不同水期对调蓄多塘湿地磷和SS截留效果差异性分析

洱海流域由于旱季雨季交替分明,造成了调蓄多塘湿地不同的水期.降雨的差异也导致进水水质水量差异明显,进而造成不同水期调蓄多塘湿地进出口水文水质特征差异显著,影响湿地中磷的截留效果.因此,水期是调蓄多塘湿地磷截留的重要影响因素.

不同水期下磷截留效果见图6,调蓄多塘湿地的  $\eta(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$  和  $\eta(\text{TP})$  在丰水期和枯水期效果均良好,且彼此间差异不显著.  $\eta(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$  和  $\eta(\text{TP})$  在枯水期略优于丰水期.不同水期,调蓄多塘湿地中SS的去除效率区别明显,部分多塘在丰水期对SS的去除效果较好,如H4和W1;其余大多数多塘湿地,枯水期  $\eta(\text{SS})$  要高于丰水期.

磷在湿地中的去除,主要依赖于物理沉降沉淀、植物的吸收和基质的吸附等过程<sup>[22]</sup>.丰水期时,植物正处于生长的旺季,污水中的活性  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  首先易被植物、微生物吸收<sup>[23]</sup>,进而转化为有机磷,截留在植物、微生物体内;固态磷通过沉降、底质吸附解吸再吸附等过程,最终沉积到底泥中<sup>[24]</sup>.即使水量较大,湿地依然表现出良好的磷截留效果.枯水期时,虽然植物对磷的截留贡献削弱,但是枯水期时,进水量较小,且部分调蓄多塘湿地出口出现间歇性断流,即使进水中磷含量较高,但较小的水量确保了污水在调蓄多塘湿地中足够的停留时间,提供磷与湿地介质充分的反应时间,不但使得污染物的沉淀效果大大提升,还有利于污染物在湿地中的生化去除过程,从而导致枯水期污染物去除率相对较高.

#### 3.2 调蓄多塘湿地出水 $\rho_o(\text{TP})$ 和 $\eta(\text{TP})$ 与进水磷含量和SS的相关性分析

调蓄多塘湿地进水  $\rho_i(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 、 $\rho_i(\text{TP})$ 、 $\rho_i(\text{SS})$ 、出水  $\rho_o(\text{TP})$  和  $\eta(\text{TP})$  的 Spearman 相关性分析见表2.  $\rho_i(\text{TP})$  分别与  $\rho_i(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$  显著正相关 ( $R = 0.916$ ),表明进水  $\rho_i(\text{TP})$  随着  $\rho_i(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$  的增加而增加,且进水中溶解态正磷酸盐对进水总磷贡献相对较大.  $\rho_o(\text{TP})$  与  $\rho_i(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$  ( $R = 0.297$ ) 和  $\rho_i(\text{TP})$  ( $R = 0.304$ ) 显著正相关,当进水中的磷含量过高,会导致湿地出水  $\rho_o(\text{TP})$  的增加<sup>[26]</sup>,过高的进水磷浓度不利于出水水质的改善.  $\eta(\text{TP})$  分别与进水  $\rho_i(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$  ( $R = 0.665$ ) 和  $\rho_i(\text{TP})$  ( $R = 0.740$ ) 呈显著正相关,与出水  $\rho_o(\text{TP})$  ( $R = -0.335$ ) 显著负相关.总磷的去除效果与进水磷浓度有关,较高进水浓度有助于湿地净化效率的提高<sup>[27]</sup>.当调蓄多塘湿地的净化效率变差时不利于出水磷浓度的改善<sup>[28]</sup>.进水  $\rho_i(\text{SS})$  与  $\rho_i(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$



$P)(R = 0.147)$  和  $\rho_i(\text{TP})(R = 0.163)$  正相关性较差, 说明进水中固体悬浮物中磷含量对湿地进水磷浓度的贡献率不大.

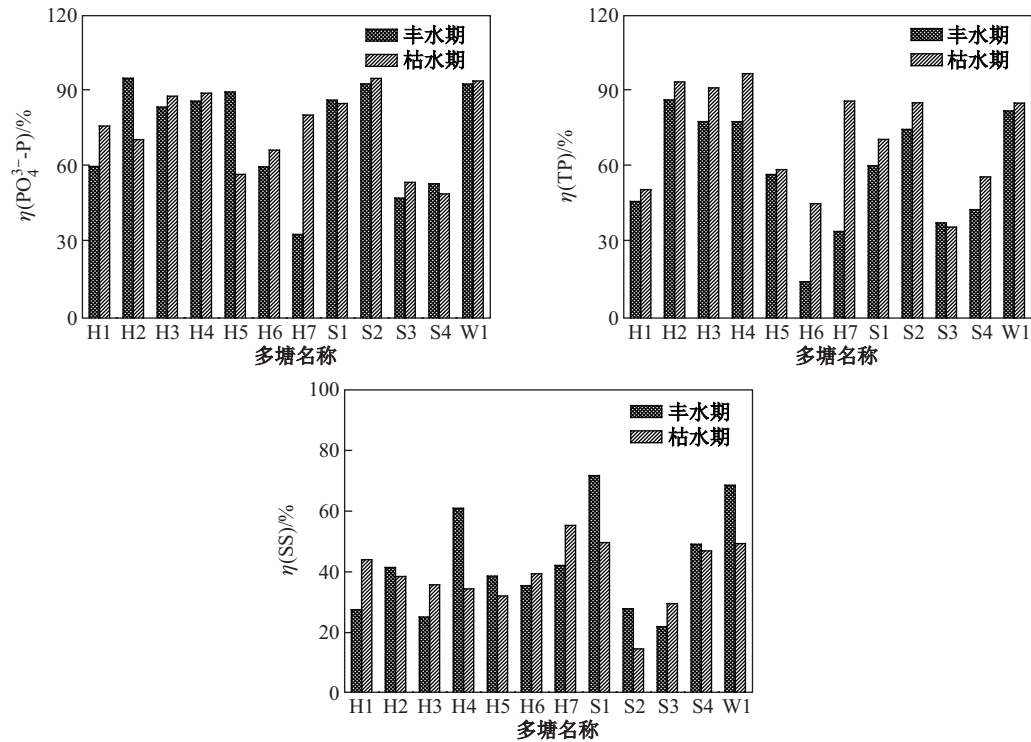


图 6 不同水期下磷和 SS 截留效果

Fig.6 Efficiency of phosphorus and SS retention in the dry and wet seasons

在合适的进水磷浓度范围, 随着湿地进水中  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  和 TP 含量的增加, 可以提供更多的营养物质给湿地植物和微生物吸收生长, 促进微生物和植物的新陈代谢, 进而有助于促进其对磷的吸收去除<sup>[29]</sup>. 一般而言, 当湿地中 SS 过多, TP 去除效果优越, 这是由于湿地中磷的存在形态多以固态形式存在<sup>[30]</sup>. 而在洱海调蓄多塘湿地中,  $\rho_i(\text{SS})$  与  $\eta(\text{TP})(R = 0.124)$  和  $\rho_o(\text{TP})(R = 0.035)$  正相关性不显著, 说明洱海多塘进水中固体悬浮物中磷含量不高, 也说明了洱海多塘进水磷多以溶解态为主, 这与上文所得结论一致. 此外, 洱海 12 个多塘中  $\rho_i(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 、 $\rho_i(\text{TP})$  与出水磷浓度和磷去除效率显著相关, 证实了这些多塘中进水  $\rho_i(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 、 $\rho_i(\text{TP})$  是  $\rho_o(\text{TP})$  和  $\eta(\text{TP})$  的重要制约因子之一,  $\rho_i(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$  和  $\rho_i(\text{TP})$  是湿地磷截留过程中重要影响参数, 影响磷在湿地中的转化过程. 因此, 在设计调蓄多塘湿地时, 为满足湿地对磷的截留效果, 控制良好的出水水质, 选择合适的进水磷浓度, 识别不同形态磷组成对湿地净化性能的提升有深刻的意义<sup>[31-32]</sup>.

表 2 调蓄多塘湿地进口磷、SS与磷去除率相关性分析

Tab. 2 Correlation analysis between phosphorus, SS of influent, and phosphorus removal

efficiency in storing multi-pond wetlands					
项目	$\rho_i(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$	$\rho_i(\text{TP})$	$\rho_i(\text{SS})$	$\rho_o(\text{TP})$	$\eta(\text{TP})$
$\rho_i(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$	1.000				
$\rho_i(\text{TP})$	0.916**	1.000			
$\rho_i(\text{SS})$	0.147	0.163	1.000		
$\rho_o(\text{TP})$	0.297**	0.304**	0.035	1.000	
$\eta(\text{TP})$	0.665**	0.740**	0.124	-0.335**	1.000

注: \*\*代表在 0.01 水平(双侧)上显著相关,  $n=84$



## 4 结 论

(1) 调蓄多塘湿地的建立能够有效拦截面源污染携带的磷污染物, 提升出水水质. 经湿地净化处理后, 出水  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、TP 和 SS 的含量从原先的  $6.60 \times 10^{-3} \sim 2.24 \text{ mg/L}$ 、 $3.40 \times 10^{-2} \sim 2.58 \text{ mg/L}$  和  $4.00 \sim 281.25 \text{ mg/L}$  下降到  $2.90 \times 10^{-4} \sim 0.13 \text{ mg/L}$ 、 $0.01 \sim 0.30 \text{ mg/L}$  和  $0.56 \sim 191.25 \text{ mg/L}$ . 出水  $\rho(\text{TP})$  优于地表水 III 标准的比例上升至 34.52%, 出水  $\rho(\text{TP})$  劣于地表水 V 类标准的比例仅为 3.57%, 下降了 47.62%. 调蓄多塘湿地对  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、TP 和 SS 的平均截留效率分别为 43.44%~93.88%、27.71%~89.67% 和 21.84%~62.12%.

(2) 在不同水期, 调蓄多塘湿地进水中磷分布特征及其截留效果有所差异. 枯水期进水中磷浓度较丰水期较大, 且枯水期的磷去除效率较丰水期高. 枯水期间歇性断流有助于湿地污染物的去除.

(3) 根据 Spearman 相关性分析,  $\rho_o(\text{TP})$  与  $\rho_i(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$  ( $R = 0.297$ ) 和  $\rho_i(\text{TP})$  ( $R = 0.304$ ) 显著正相关,  $\eta(\text{TP})$  分别与进水  $\rho_i(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$  ( $R = 0.665$ ) 和  $\rho_i(\text{TP})$  ( $R = 0.740$ ) 呈显著正相关. 进水  $\rho_i(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$  和  $\rho_i(\text{TP})$  的增加有助于湿地  $\eta(\text{TP})$  和  $\rho_o(\text{TP})$  的改善, 是调蓄多塘湿地磷截留过程中重要的影响因子. 识别优化进水磷形态组成及浓度对提升湿地净化性能, 降低出水水质有深远的意义.

## [参 考 文 献]

- [1] WU M, TANG X Q, LI Q Y, et al. Review of ecological engineering solutions for rural non-point source water pollution control in Hubei Province, China [J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2013, 224(5): 1-18.
- [2] 翟玥, 尚晓, 沈剑, 等. SWAT模型在洱海流域面源污染评价中的应用[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(6): 666-671.
- [3] 李强. 洱海北部区域农村污水排放规律及控制技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2015
- [4] 羊华, 李红燕, 李丽怀. 2015 年洱海入湖河流磷负荷时空变化与洱海富营养化浅析 [J]. *人民珠江*, 2017, 38(7): 77-79.
- [5] 赵海超, 王圣瑞, 焦立新, 等. 2010 年洱海全湖氮负荷时空分布特征 [J]. *环境科学研究*, 2013, 26(5): 534-539.
- [6] WANG S R, ZHENG B H, CHEN C, et al. Thematic issue: water of the Erhai and Dianchi Lakes [J]. *Environmental Earth Science*, 2015, 74(5): 3685-3688.
- [7] 佚名. 云南省开展调研洱海保护治理 [J]. *给水排水*, 2017(6): 96-96.
- [8] 金相灿, 胡小贞, 储昭升, 等. “绿色流域建设”的湖泊富营养化防治思路及其在洱海的应用 [J]. *环境科学研究*, 2011, 24(11): 1203-1209.
- [9] 张毅敏, 张永春, 左玉辉. 前置库技术在太湖流域面源污染控制中的应用探讨 [J]. *环境污染与防治*, 2003, 25(6): 342-344.
- [10] CHEN Q F, SHAN B Q, YI C Q, et al. An off-line filtering ditch-pond system for diffuse pollution control at Wuhan City Zoo [J]. *Ecological Engineering*, 2007, 30(4): 373-380.
- [11] TANG W Z, ZHANG W Q, ZHAO Y, et al. Nitrogen removal from polluted river water in a novel ditch-wetland-pond system [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 60(11): 135-139.
- [12] HU S J, NIU Z G, CHEN Y F. Global wetland datasets: A review [J]. *Wetlands*, 2017(1): 1-11.
- [13] 毛战坡, 彭文启, 尹澄清, 等. 非点源污染物在多水塘系统中的流失特征研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2004, 1(3): 530-535.
- [14] 吴若静, 谢三桃. 多塘系统在巢湖山丘区面源污染控制中的应用 [J]. *水利规划与设计*, 2016(3): 18-21
- [15] 黄慧君, 王永平, 李庆红. 洱海流域近50年气候变化特征及其对洱海水资源的影响 [J]. *气象*, 2013, 39(4): 436-442.
- [16] 陈伟栋. 洱海流域农业面源污染负荷模型计算研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [17] DAVIS T W, BULLERJAHN G S, TUTTLE T, et al. Effects of increasing nitrogen and phosphorus concentrations on phytoplankton community growth and toxicity during planktothrix blooms in Sandusky Bay, Lake Erie [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(12), 7197-7207.
- [18] TU Y T, CHIANG P C, YANG J, et al. Application of a constructed wetland system for polluted stream remediation [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 510(3): 70-78.
- [19] ZHANG D, GERBERG R M, KEAT T S, et al. Constructed wetlands in China [J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(10): 1367-1378.
- [20] KADLEC R H, WALALLACE S D. *Treatment Wetlands* [M]. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.
- [21] SCHOLLS L, REVITT M, ELLIS J B, et al. A systematic approach for the comparative assessment of stormwater pollutant removal potentials [J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, 88: 467-478.

(下转第 121 页)

- [12] MEADOWS A J, OWEN J P, SNYDER W E. Keystone nonconsumptive effects within a diverse predator community [J]. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(23): 10315-10325.
- [13] 宁长修, 姚超群, 毛明. 紫外线照射致倦库蚊绝育研究初报 [J]. *中国寄生虫病防治杂志*, 1992, 5(3): 208-209.
- [14] 刘丽娟, 李亚平. 淡色库蚊越冬机制的研究进展 [J]. *中国媒介生物学及控制杂志*, 2012, 23(6): 589-591.
- [15] 陈奇. 上海某组合式污水处理试验系统中蚊虫孳生规律及影响因素研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [16] 张博. 城市化过程蚊虫孳生与景观特征及水质关系研究 (以上海市为例) [D]. 上海: 华东师范大学, 2017.

(责任编辑: 李 艺)

(上接第 58 页)

- [22] LUO P, LIU F, LIU X, et al. Phosphorus removal from lagoon-pretreated swine wastewater by pilot-scale surface flow constructed wetlands planted with *Myriophyllum aquaticum* [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 576: 490-497.
- [23] ZHANG Y, CUI L J, LI W, et al. Performance evaluation of an integrated constructed wetland used to treat a contaminated aquatic environment [J]. *Wetlands Ecology & Management*, 2014, 22(5): 493-507.
- [24] 彭剑峰, 王宝贞, 王琳. 塘-湿地组合处理系统中磷的主导去除机制分析 [J]. *南京理工大学学报(自然科学版)*, 2005, 29(5): 609-612.
- [25] BODIN H, PERSSON J, ENGLUND J E, et al. Influence of residence time analyses on estimates of wetland hydraulics and pollutant removal [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 501(10): 1-12.
- [26] DZAKPASU M, WANG X C, ZHENG Y C, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus removal by a surface-flow constructed wetland for polluted river water treatment [J]. *Water Science & Technology*, 2015, 71(6): 904-12.
- [27] 李伟, 崔丽娟, 张岩, 等. 水平潜流湿地磷去除效果及影响因子分析 [J]. *湿地科学*, 2014(4): 464-470.
- [28] SPIELES D J, MITSCH W J. The effects of season and hydrologic and chemical loading on nitrate retention in con-structed wetlands: a comparison of low- and high-nutrient riverine systems [J]. *Ecological Engineering*, 1999, 14(1-2): 77-91.
- [29] MA L, HE F, HUANG T, et al. Nitrogen and phosphorus transformations and balance in a pond-ditch circulation system for rural polluted water treatment [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 94: 117-126.
- [30] MA L, HE F, SUN J, et al. Remediation effect of pond-ditch circulation on rural wastewater in southern China [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 77: 363-372.
- [31] AL-RUBAEI, ENGSTROM M, VIKLANDER M, et al. Effectiveness of a 19-year old combined pond-wetland system in removing particulate and dissolved pollutants [J]. *Wetlands*, 2017, 37(3): 485-496.
- [32] WANG Z, WU J, MADDEN M, et al. China's wetlands: conservation plans and policy impacts [J]. *Ambio*, 2012, 41(7): 782-786.

(责任编辑: 张 晶)