

普者黑岩溶湖滨湿地沉积物与茭草全磷相关性研究

詹乃才¹, 刘云根^{1,2}, 王妍^{1,2}, 梁启斌^{1,2}, 侯磊^{1,2}, 王书锦¹, 张慧娟¹

(1. 西南林业大学 环境科学与工程学院, 昆明 650224; 2. 西南林业大学 农村污水处理研究所, 昆明 650224)

摘要:以滇东南岩溶湿地为研究对象,在普者黑湖滨湿地设置典型样地,采用典型样带法布点方式,探讨岩溶湖滨湿地在湖岸—湖心过程中沉积物全磷的空间变化规律以及与湿地挺水植物茭草全磷的关系。结果表明:(1)普者黑湖滨湿地沉积物 $w(\text{TP})$ 空间变化规律明显,水平方向总体按照湖岸—湖心方向依次递减,且变化范围分别为 $0.68\sim 0.42\text{ g/kg}$ ($0\sim 5\text{ cm}$), $0.65\sim 0.35\text{ g/kg}$ ($5\sim 10\text{ cm}$)和 $0.59\sim 0.27\text{ g/kg}$ ($10\sim 15\text{ cm}$);垂直方向沉积物 $w(\text{TP})$ 均以表层最高,并依次向下层递减;(2)湿地植物茭草茎中TP含量沿湖岸—湖心方向总体呈现递减的变化规律,茭草叶对TP的吸收量明显高于茎的吸收量,且叶中 $w(\text{TP})$ 约为茎含量的1.35倍;(3)湿地植物茭草茎 $w(\text{TP})$ 与沉积物 $w(\text{TP})$ 均呈现出显著性相关性,茭草叶 $w(\text{TP})$ 与沉积物 $w(\text{TP})$ 均呈正相关,但相关性不显著。

关键词:普者黑; 岩溶湖滨湿地; 沉积物; 挺水植物; 全磷

中图分类号:X53

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)02-0167-06

Relationship Between Total Phosphorus Contents in Sediment and Aquatic Plant *Zizania latifolia* in Puzhehei Karst Lakeside Wetland

ZHAN Naicai¹, LIU Yungen^{1,2}, WANG Yan^{1,2}, LIANG Qibin^{1,2},

HOU Lei^{1,2}, WANG Shujin¹, ZHANG Huijuan¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224,

China; 2. Research Institute of Rural Sewage Treatment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: The research site was the karst wetland in southeastern Yunnan, the typical sample sites were set in Puzhehei lakeside wetland by using the layout mode of typical sample method. The spatial variation of total phosphorus sediments in the process of lakeside—the middle of lake in karst wetland and the relationship of total phosphorus in wetland aquatic plant *Zizania latifolia* are discussed. The results show that: (1) the spatial variation of sediments $w(\text{TP})$ in Puzhehei lakeside wetland is obvious, from the horizontal direction, as a whole, it decreased regularly in accordance with lakeside—the middle of lake, from the vertical direction, and the ranges of $w(\text{TP})$ are $0.68\sim 0.42\text{ g/kg}$ ($0\sim 5\text{ cm}$), $0.65\sim 0.35\text{ g/kg}$ ($5\sim 10\text{ cm}$) and $0.59\sim 0.27\text{ g/kg}$ ($10\sim 15\text{ cm}$), respective; the sediment of $w(\text{TP})$ is the highest on the surface, and decreases regularly to the lower level; (2) as a whole, the TP content in the wetland plant *Zizania caduciflora* shows the changing rule of decline, and absorption of TP about *Zizania caduciflora* is obviously higher than in stems, and the leaves of $w(\text{TP})$ are about 1.35 times of the stem; (3) the wetland plant *Zizania caduciflora* stem $w(\text{TP})$ and sediment $w(\text{TP})$ show a significant correlation, *Zizania* leaf $w(\text{TP})$ and sediment $w(\text{TP})$ are positively correlated, but the correlation is insignificant.

Keywords: Puzhehei; karst lakeside wetland; wetland; aquatic plant; total phosphorus(TP)

湖滨湿地是湖泊的水陆交错区域,它在涵养水源、蓄洪防旱、削减湖泊污染负荷等方面均有十分重要的作用^[1],可有效拦截和吸收来自地表径流的N、P等污染物^[2-3],同时又具有美化环境、维持生物多样

性的重要功能,湖滨湿地的结构变化将直接引发湖泊生态系统的一系列变化。目前,关于湖滨湿地大型水生植物N、P质量分数的分布以及与水生植被P的关系在国内外已有报道^[4-5],且结果表明湖滨湿地沉积

物沿陆向辐射区一湖心地区呈现依次递减趋势;水生植被地上部分磷吸收量远大于地下部分吸收量,地下部分磷浓度与沉积物呈显著性正相关。但是,关于岩溶湖滨湿地沉积物磷与水生植物磷之间的关系尚缺乏研究。

由于岩溶湖滨湿地不同于一般的湖滨湿地,地形地貌十分独特,主要表现在:(1)我国溶岩地层分布面积约占国土陆地面积的1/3^[6],主要有6种类型的岩溶地貌,西南地区岩溶地貌具有孤峰多、土层薄、洼地广等特征^[7],使得岩溶湖泊及湖滨湿地数量众多;(2)岩溶湖滨湿地分布广、人为干扰程度大、生态系统脆弱等特点为本项目开展系统研究提供独特条件;(3)滇东南地貌湿地是云南省六大湿地分布区之一,开展岩溶湖滨湿地研究符合国家重大生态战略需求。普者黑湖是滇东南岩溶区最大的湖泊,已列入全国优质水源地保护范围,为当地重要饮水源地,同时普者黑岩溶湿地已作为重点保护纳入云南省湿地保护规划,近年来,由于当地旅游业的发展,导致湿地面积在不断退化,据2013年普者黑流域湖滨湿地生态系统调查结果,普者黑流域退化湖滨湿地面积为243 hm²,占湖滨湿地总面积的26%,消失湖滨湿地面积为423 hm²,占湖滨湿地总面积的45%。因此,本文通过探究岩溶湖滨湿地沉积物全磷的空间分布特征以及与湿地植物茭草全磷的关系,对普者黑湖水体净化与环境改善具有重要意义,也为岩溶湖滨湿地生态系统的修复重建提供理论参考和技术指导。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省文山壮族苗族自治州丘北县境内的普者黑国家级旅游风景区—普者黑村附近(24°08′N,104°06′E),该区域属于南亚热带高原季风气候,多年平均气温16.4℃,雨季多集中在5—10月,平均降雨量1206.8 mm,海拔1436~1499 m,区域内植被盖度约70%,主要植被为挺水植物:茭草,一般生长状况良好。

1.2 样点布设与样品采集

样点布设采用典型样带法,选取受农业面源污染影响下的湿地区域为研究区域,在普者黑村普新桥南100 m处的湖泊主体水域一侧湖滨湿地设置三条典型样带(编号Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ),相邻两条样带间隔30 m,且每条样带沿湖岸—湖心方向等距离布置6个采样点,同时在每条样带对应的湖泊主体水域布置1个对照采样点,共21个采样点。首先对样点生境进行全面调查,测定水深、植物种类、高度、单位面积株数、株高

等。植物采集采用单位面积样方法,在对应每个采样点(湖心点除外)周围量取0.5×0.5 m²的样方,称取每个样方内的植物总鲜重后选取2~3株典型植株,分别称其茎、叶鲜重后带回实验室进行预处理。利用底泥采样器于2014年10月15~17日采集柱状沉积物,每个样点自上而下分3层采样(0—5,5—10,10—15 cm),装入袋中,放入便携式冷箱带到实验室分析。

1.3 样品分析及数据处理

沉积物样品经自然风干后,磨细过20目和100目筛,全磷采用钼锑抗分光光度法测定^[8];植物样品经105℃杀青10 min,再80℃烘干24 h,直至恒重,磨碎后采用钼锑抗分光光度法测定其全磷含量。

1.4 数据分析

试验数据采用Excel进行初步分析并建立数据库,利用软件SPSS 19.0对数据进行相关性分析,采用Origin 7.5制图。

表 1 普者黑湖滨湿地不同样带水质情况

| 样带 | mg/L | | |
|----|-------------------|--------------------|-----------------------------------|
| | $\rho(\text{TP})$ | $\rho(\text{DTP})$ | $\rho(\text{PO}_4^{3-}-\text{P})$ |
| Ⅰ | 0.022±0.009 | 0.010±0.006 | 0.011±0.005 |
| Ⅱ | 0.026±0.018 | 0.019±0.020 | 0.021±0.028 |
| Ⅲ | 0.032±0.019 | 0.032±0.017 | 0.021±0.019 |

2 结果与分析

2.1 普者黑湖滨湿地挺水植物茭草群落的变化

从调查结果来看,普者黑湖滨湿地植物种类虽然单调,但个体生长良好,分枝多,冠形大。样带Ⅰ的茭草(*Zizania latifolia* Turcz.)的单位面积株数约为24株,鲜质量为11.60 kg/m²(表2);样带Ⅱ的茭草的单位面积株数约为26株,鲜质量为12.40 kg/m²;但样带Ⅲ的茭草单位面积株数约为18株,且鲜质量为6.40 kg/m²。可以看出,样带Ⅲ茭草的单位面积株数与样带Ⅰ,Ⅱ的差异较大,相应地鲜质量差异也较大,可能由于样带Ⅲ受人为干扰较大,故其生物量相应较小。

表 2 普者黑湖滨湿地3条样带茭草群落比较

| 样带 | 平均水深/m | 植物种类 | 单位面积株数/(株·m ⁻²) | 植株平均高/m | 植株鲜质量/(kg·m ⁻²) |
|----|--------|------|-----------------------------|---------|-----------------------------|
| Ⅰ | 0.85 | 茭草 | 24 | 1.25 | 11.60 |
| Ⅱ | 0.90 | 茭草 | 26 | 1.30 | 12.40 |
| Ⅲ | 0.70 | 茭草 | 18 | 1.20 | 6.40 |

2.2 普者黑湖滨湿地沉积物全磷质量分数的空间变化

2.2.1 沉积物TP质量分数的水平变化 普者黑湖滨湿地湖岸—湖心(A₁—A₇)方向上的三条样带沉积物中全磷含量水平变化规律见图1。总体来看,三条样带(样带Ⅰ,Ⅱ和Ⅲ)水平变化规律明显,总体按湖

岸—湖心依次递减变化。如样带 I 中, A_{11} 点(湖岸)表层沉积物(0—5 cm)中 TP 含量为 0.62 g/kg, 是 A_{17} 点(湖心 0.45 g/kg)的 1.37 倍; A_{11} 中层沉积物(5—10 cm)中 TP 含量为 0.65 g/kg, 是 A_{17} 点(0.34 g/kg)的 1.91 倍; A_{11} 底层沉积物(10—15 cm)中 TP 含量为 0.55 g/kg, 是 A_{17} 点(0.27 g/kg)的 2.03 倍; 样带 II 中, 湖岸—湖心过程 0—5 cm 沉积物各点 TP 含量变化在 0.71~0.36 g/kg, 5—10 cm 沉积物为 0.69~0.30 g/kg, 10—15 cm 沉积物为 0.65~0.27 g/kg; 样带 III 中, 沿湖岸—湖心方向, 0—5 cm, 5—10 cm, 10—15 cm 沉积物中 TP 含量变化范围分别在 0.69~0.45, 0.67~0.43, 0.60~0.27 g/kg, A_{11} (湖岸)点分别为 A_{17} 点的 1.53, 1.59, 2.22 倍。总的趋势来看, 沉积物以湖岸区域 TP 质量分数最高, 并依次向湖心地区递减。

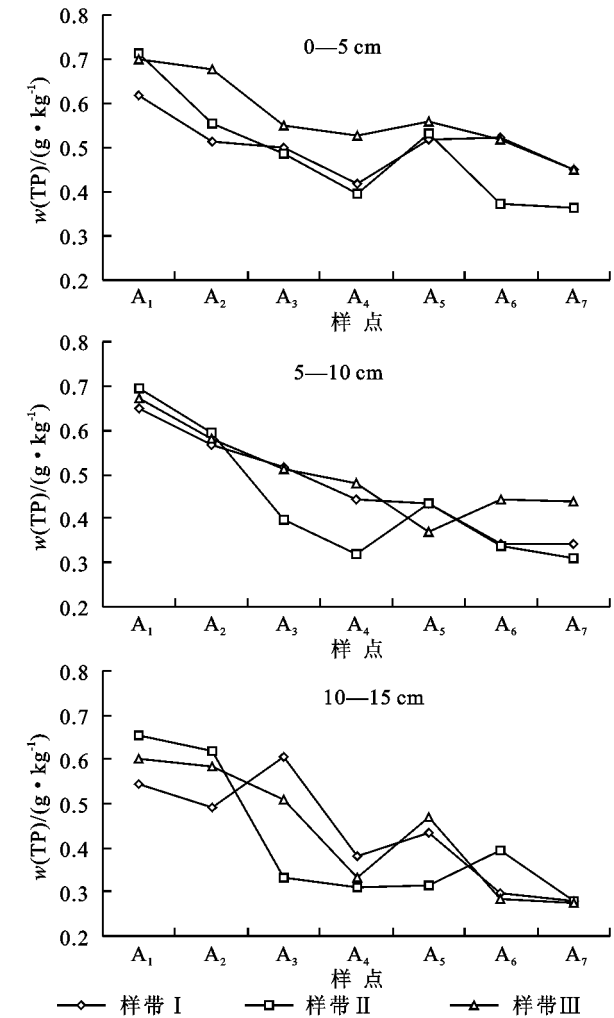


图 1 普者黑湖滨湿地沉积物 $w(\text{TP})$ 的水平变化

2.2.2 沉积物 TP 质量分数的垂直变化 普者黑湖滨湿地沉积物 TP 质量分数的纵向垂直变化见图 2。总体来看, 样带 I, II 和 III 中沉积物 TP 含量均以表层(0—5 cm)最高, 并依次向下层递减。样带 II, III 样点中, 除 A_{12} 点 TP 质量分数呈现出表层最低, 底

层最高的变化规律外, 其余各点均呈现出表层(0—5 cm) > 中层(5—10 cm) > 底层(10—15 cm); 样带 I 中沉积物各点 TP 质量分数垂直变化略微不同, A_{11} — A_{14} 号点呈现出中层 > 表层 > 底层, 但 A_{15} — A_{17} 点呈现出一般变化规律, 以表层最高, 并依次向下层递减。

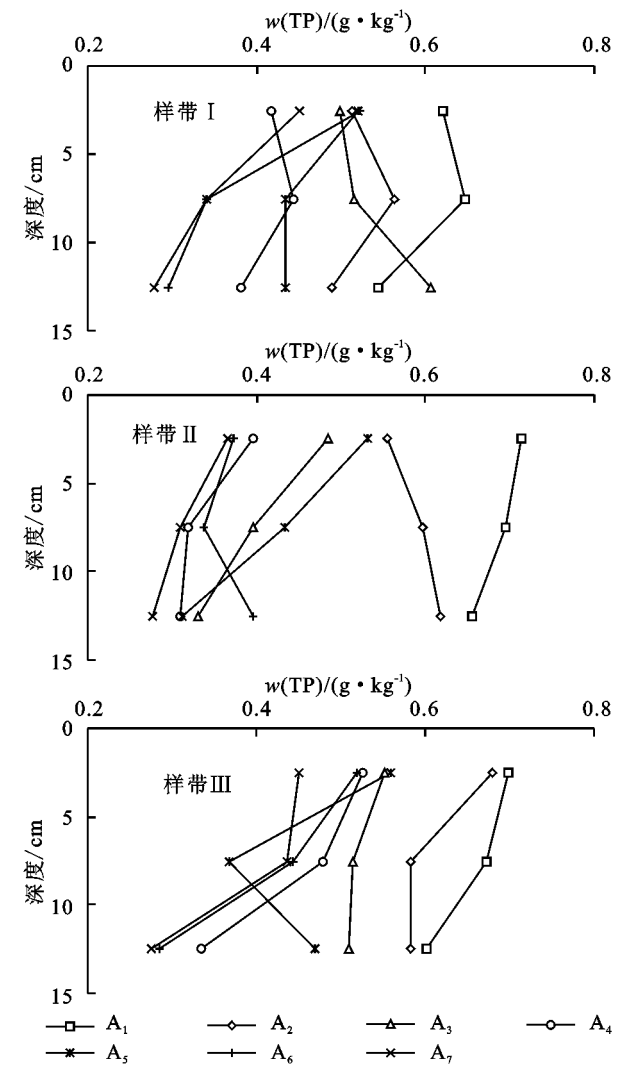


图 2 普者黑湖滨湿地沉积物 $w(\text{TP})$ 的垂向变化

2.3 湿地挺水植物茭草 TP 质量分数的变化

普者黑湖滨湿地挺水植物 TP 质量分数的变化如下图所示, 结果表明, 样带 I, II 和 III 中, 茭草叶对 TP 的吸收量明显高于茎, 且茎中 TP 含量沿湖岸—湖心方向总体呈现递减少的变化规律, 但叶中 TP 质量分数无明显变化规律。样带 I 中茭草茎、叶对 TP 的吸收量变化分别在 1.26~0.77 g/kg, 1.49~1.55 g/kg; 样带 II 中茭草茎、叶 $w(\text{TP})$ 变化分别在 1.06~0.62 g/kg, 1.47~0.86 g/kg; 样带 III 中茭草茎、叶 $w(\text{TP})$ 变化分别在 1.25~0.53 g/kg, 1.36~0.78 g/kg。三条样带茭草茎 $w(\text{TP})$ 在 A_1 — A_4 点呈现递减趋势, 即从陆向辐射区向湿地辐射区递减趋势, 但在 A_5 点

表现出异常增高的态势,后沿 A_5 — A_6 方向又表现出递减的变化规律,且植物叶 $w(\text{TP})$ 的富集量明显高于茎 $w(\text{TP})$ 的富集量,可见湿地植物茭草凭借其水上部分茂密的枝叶对水体中的 P 具有显著的吸附与固定作用。

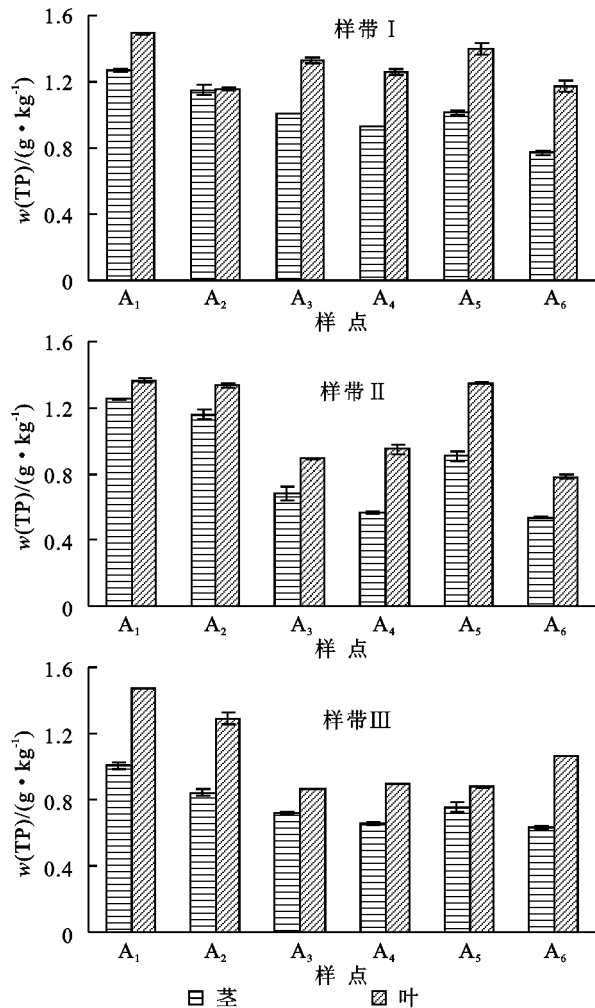


图 3 普者黑湖滨湿地植物茭草中 TP 质量分数

2.4 湿地植物与沉积物 $w(\text{TP})$ 的相关性分析

三条样带(样带 I, II 和 III)沉积物 $w(\text{TP})$ 分别与植物茎、叶 $w(\text{TP})$ 相关性见表 3。总体表明,茭草茎 $w(\text{TP})$ 与沉积物 $w(\text{TP})$ 均呈现出显著性相关性,茭草叶 $w(\text{TP})$ 与沉积物 $w(\text{TP})$ 均呈正相关,但相关性不显著。样带 I 中只有 5—10 cm 沉积物 $w(\text{TP})$ 与茭草茎 $w(\text{TP})$ 呈现出极强的相关性($r=0.964$),但与茭草叶 $w(\text{TP})$ 相关性不显著;样带 II 中 0—5 cm, 5—10 cm, 10—15 cm 沉积物 $w(\text{TP})$ 与茭草茎 $w(\text{TP})$ 分别表现出极强的相关性($r=0.985$, $r=0.978$, $r=0.839$);样带 III 中茭草茎 $w(\text{TP})$ 与 0—5 cm, 10—15 cm 沉积物 $w(\text{TP})$ 表现出极强的相关性($r=0.959$, $r=0.897$),茭草叶 $w(\text{TP})$ 与沉积物 $w(\text{TP})$ 呈正相关,但相关性不显著。

表 3 普者黑湖滨湿地挺水植物 TP 与沉积物 TP 质量分数的相关性

| 样带 | 沉积物 | 茭草 | |
|-----|----------|---------|---------|
| | | 茎 | 叶 |
| I | 0—5 cm | 0.591 | 0.547 |
| | 5—10 cm | 0.964** | 0.498 |
| | 10—15 cm | 0.730 | 0.510 |
| II | 0—5 cm | 0.985** | 0.722 |
| | 5—10 cm | 0.978** | 0.879** |
| | 10—15 cm | 0.839** | 0.979** |
| III | 0—5 cm | 0.959** | 0.778 |
| | 5—10 cm | 0.664 | 0.347 |
| | 10—15 cm | 0.897** | 0.766 |

注: * 在 0.05 水平(双侧)显著相关; ** 在 0.01 水平(双侧)显著相关。

3 讨论

(1) 普者黑湖滨湿地位于滇东南岩溶地区,属于典型的岩溶湿地。近年来,由于生态旅游业的发展和人类活动干扰的影响,导致普者黑湖泊水体富营养化加重、湖滨湿地退化严重、岩溶湖滨湿地磷元素沉积通量不断增大且与外源污染的输入有密切关系,这与沈德福、李世杰等^[9-10]对桂林岩溶湖滨湿地以及田昆等^[11]对云南纳帕海岩溶湿地的研究结果基本一致,因此,普者黑湖滨湿地对于外源污染物的拦截和有效控制起有重要作用。

(2) 湖滨湿地底泥中的 P 是湿地水生植物和食物链中基础元素的重要来源,同时对湿地营养盐的收支及其生物地球化学循环有着极其重要的作用。普者黑湖滨湿地沉积物 $w(\text{TP})$ 的总体水平变化很明显,均按湖岸—湖心依次递减变化,与此前吴春笃等^[12]、王磊等^[13]、王佩等人^[14]关于对湖滨湿地带底泥 P 分布特征的研究基本类似,例如甘树等^[15]对太湖西岸湖滨带沉积物氮磷分布研究表明,湖滨湿地表层沉积物磷含量基本上呈由近岸向远岸递增的变化趋势;从垂直变化来看,总体上沉积物 $w(\text{TP})$ 以表层最高,并依次向下层递减,与此前等人关于对太湖、剑湖、滇池等湖泊的研究结果基本一致^[16-20],例如,陈如海等^[21]对于西溪湖滨湿地底泥氮、磷及有机质含量竖向分布规律研究表明,底泥中 TP 含量随着埋深增加呈降低的规律明显,此外,邵亚等^[22]对岩溶湿地沉积物磷形态及分布特征进行研究表明,沉积物中磷的含量及其形态是影响水体营养化进程的重要因素,岩溶湿地沉积物中磷以 Ca-P 为主,且 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 所占比例较高,导致内源磷不易释放,有利于减缓岩溶湿地水体富营养化过程,且在空间分布上,各种形态磷分布趋势相似,从沉积物表层至底层逐渐降低并趋于

稳定。但张台凡等^[23]对于渭河西段沉积物中总磷、总氮时空分布特征研究表明,大多数研究点沉积物中总磷含量在垂向上呈现先减小后增大再减小的趋势。表明普者黑岩溶湖滨湿地与一般湖滨湿地类似,都具有对农业面源污染中P的削减效果。Stottmeister^[24],李莎莎^[25]等研究表明外源污染物进入到湖滨湿地后,流速被减缓,污水中的有机物污染物通过一系列的迁移转化过程被沉积物拦截和被植物富集,同时,湿地中微生物也对污水中有机物产生分解作用,使得有机污染物浓度降低;另外湖滨湿地由于其干湿季节交替变化,可以增加沉积物对磷的滞留作用,湖滨湿地沉积物不仅为微生物的生长提供稳定依附的表面,而且为水生植物提供载体和营养物质,与此同时,湖滨湿地沉积物能够通过过滤和吸附等作用直接去除污水中的磷素,其污水过程来自离子交换、专性与非专性吸附、螯合作用。

(3) 普者黑岩溶湖滨湿地植物种类虽然单调,但整体生长良好,生物量较大。从湿地植物茭草水平分布状况来看,茭草营养器官内全磷质量分数沿湖岸—湖心方向总体呈现递减的变化规律,这也是挺水植物适应湖泊环境的结果。测定结果表明,茭草对P具有较强的吸收和同化作用。因此,茭草作为一种乡土水生植物、凭借其繁殖容易、种植简单、吸收污染物能力强的特点,这与崔丽娟^[26]、许国云^[27]、雷泽湘^[28]对湿地植物去除污水氮、磷效应研究一致。徐治国,何岩等^[29]研究表明,挺水植物(如芦苇、香蒲、茭草等)能够从污水中汲取营养物质,从而降解和净化污染物和过量的营养物质,当外界营养物和污染物进入湖滨湿地,经过沉积物以及密集的植物茎叶和根系时,可以过滤、截留营养物和污染物,湿地植物能够从废水中吸取营养物质而去除污染物。因此,茭草对湖滨湿地水质净化具有举足轻重的作用,应加以重视。试验结果还表明,茭草叶对TP的吸收量明显大于茎吸收量,这与鲁静等^[30]研究结果一致。因此可根据茭草的生长周期特点,对相应地叶进行及时收割移除,避免生物体内的营养物质通过活体释放或死亡体腐烂释放到水体,造成P对湖水的二次污染。

(4) 相关性分析表明,茭草茎 $w(TP)$ 与沉积物 $w(TP)$ 均呈现出显著性相关性,茭草叶 $w(TP)$ 与沉积物 $w(TP)$ 均呈正相关,但相关性不显著。说明植物部位不同对沉积物及水体中P的吸收富集能力不同,茭草根对沉积物中P具有强烈吸附作用,姜凯^[31]通过研究水塘湿地截留和净化农业面源污染物特性研究表明,茭草进入枯死期后,茎叶部分首先开始枯萎分解,释放出氮、磷营养物质,一部分营养元素

从茎部向根部转移,在根部贮藏起来,然后在生长旺季时,根部贮藏的营养物质向茎和叶运输,提供植物生长。王震宇等^[32]通过对湖滨湿地六种水生植物的磷素根际效应研究表明,湿地植物(茭草)根际土壤磷素浓度高于非根际,且茭草通过强大的根系获取了较多的磷素。这表明茭草通过发达的根系对沉积物和水体中的磷素具有强烈的吸收和富集作用。

4 结论

本文通过研究岩溶湖滨湿地沉积物与茭草 $w(TP)$ 的相关性研究,结果表明:普者黑湖滨湿地沉积物 $w(TP)$ 空间变化规律明显,水平方向总体按照湖岸—湖心方向依次递减;从垂直变化来看,沉积物 $w(TP)$ 均以表层最高,并依次向下层递减。湿地植物茭草茎中TP含量沿湖岸—湖心方向总体呈现递减的变化规律,茭草叶对TP的吸收量明显高于茎的吸收量,且茭草茎 $w(TP)$ 与沉积物 $w(TP)$ 均呈现出显著性相关性,茭草叶 $w(TP)$ 与沉积物 $w(TP)$ 均呈正相关,但相关性不显著。挺水植物茭草的存在可以起到减轻水体和沉积物中的营养富集,从而有效缓解水体富营养化。

参考文献:

- [1] 王玲玲,曾光明,黄国和,等. 湖滨湿地生态系统稳定性评价[J]. 生态学报,2005,25(12):3406-3410.
- [2] 钱进,王超,王沛,等. 河湖滨岸缓冲带净污机理及适宜宽度研究进展[J]. 水利科学进展,2009,20(1):139-144.
- [3] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径探究[J]. 湖泊科学,2002,14(3):194-202.
- [4] 杨荣敏,李宽意,王传海,等. 大型水生植物对太湖沉积物磷释放的影响研究[J]. 农业环境科学学报,2007,26(2):274-278.
- [5] 刘文静,张平究,董国政,等. 不同退耕年限下菜子湖湿地土壤磷素组分特征变化[J]. 生态学报,2014,34(10):2654-2662.
- [6] 陈强. 云南岩溶地区石漠化生态治理模式及技术[M]. 昆明:云南科技出版社,2011.
- [7] 喻甦. 中国石漠化分布现状与特点[J]. 中南林业调查规划,2003,22(2):53-55.
- [8] 国家环境保护总局编. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [9] 沈德福,李世杰. 桂林岩溶湿地沉积物地球化学元素变化的环境影响因子分析[J]. 高校地质学报,2010,16(4):517-526.
- [10] 尚文,杨永兴. 滇西北高原纳帕海湖滨湿地退化特征、规律与过程[J]. 应用生态学报,2012,23(12):3257-3265.
- [11] 田昆,陆梅. 云南纳帕海岩溶湿地生态环境变化及驱动机制[J]. 湖泊科学,2004,16(1):25-30.
- [12] 吴春笃,王悦. 北固湿地底泥氮磷释放特征初步研究

- [J]. 环境科学与技术, 2008, 31(4): 10-14.
- [13] 王磊, 李林. 太湖湖滨湿地沉积物氮磷与 2 种挺水植物氮磷的关系[J]. 生态环境学报, 2011, 20(10): 1523-1529.
- [14] 王佩, 卢少勇, 王殿武. 太湖湖滨带底泥氮、磷、有机质分布与污染评价[J]. 中国环境科学, 2012, 32(4): 703-709.
- [15] 甘树, 卢少勇, 秦普丰, 等. 太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价[J]. 环境科学, 2012, 9(33): 3065-3070.
- [16] 田自强, 郑丙辉, 张雷. 西太湖湖滨已恢复与受损芦苇湿地环境功能比较[J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2625-2633.
- [17] 刘绍雄, 王明月, 杨宇明, 等. 剑湖湿地湖滨带 5 种植物群落类型氮和磷的根际效应[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(10): 73-77.
- [18] 吴永红, 胡俊, 金向东, 等. 滇池典型湖湾沉积物氮磷化学特征及疏浚层推算[J]. 环境科学, 2005, 26(4): 77-82.
- [19] 赵兴青, 杨柳燕, 于振洋, 等. 太湖沉积物理化性质及营养盐的时空变化[J]. 湖泊科学, 2007, 19(6): 698-672.
- [20] 孙宁波, 王宇庭, 孙春光, 等. 黄河三角洲水库底泥中氮、磷特征及其与水体磷富营养化关系[J]. 青岛农业大学学报: 自然科学版, 2007, 24(4): 274-278.
- [21] 陈如海, 詹良通, 陈云敏, 等. 西溪湿地底泥氮、磷和有机质含量竖向分布规律[J]. 中国环境科学, 2010, 30(4): 493-498.
- [22] 邵亚, 蔡崇法, 赵悦. 桂林会仙湿地沉积物中磷形态及分布特征[J]. 环境工程学报, 2014, 12(2): 340-346.
- [23] 张台凡, 宋进喜, 杨小刚, 等. 渭陕西段沉积物中总磷、总氮时空分布特征及其影响因素研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(5): 1393-1399.
- [24] Stottmeister U, Wiebner A, Kusch P, et al. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment[J]. Biotechnology Advances, 2003, 22(2): 93-117.
- [25] 李莎莎. 滇西北高原典型湿地湖滨带水—基质—植物系统的净化功能研究[D]. 昆明: 西南林业大学, 2011.
- [26] 崔丽娟, 李伟, 张曼胤, 等. 不同湿地植物对污水中氮磷去除的贡献[J]. 湖泊科学, 2011, 23(2): 203-208.
- [27] 许国云, 段宗亮, 田昆, 等. 滇西北高原主要湿地挺水植物净化氮磷效应研究[J]. 山东林业科技, 2014, 12(2): 1-6.
- [28] 雷泽湘, 徐德兰, 顾继光, 等. 太湖大型水生植物分布特征及其对湖泊营养盐的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 698-704.
- [29] 徐治国, 何岩, 闫百兴, 等. 营养物及水位变化对湿地植物的影响[J]. 生态学杂志, 2006, 25(1): 87-92.
- [30] 鲁静, 周虹, 霞田广宇, 等. 洱海流域 44 种湿地植物的氮磷含量特征[J]. 生态学报, 2011, 31(3): 0709-0715.
- [31] 姜凯. 水塘湿地截留和净化农业面源污染物特征研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [32] 王震宇, 温胜芳, 李锋民, 等. 南四湖湿地六种水生植物的磷素根际效应[J]. 中国环境科学, 2010, 30(S): 64-68.

~~~~~

(上接第 166 页)

- [15] Cornelis J, Hermy M. Biodiversity relationships in urban and suburban parks in Flanders[J]. Landscape and Urban Planning, 2004, 69(4): 385-401.
- [16] Alvey A A. Promoting and preserving biodiversity in the urban forest [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2006, 5(4): 195-201.
- [17] Nagendra H, Gopal D. Tree diversity, distribution, history and change in urban parks; studies in Bangalore, India[J]. Urban Ecosystems, 2011, 14(2): 211-223.
- [18] 张娜娜. 郑州市公园绿地植物多样性与景观研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [19] 易军. 城市园林植物群落生态结构研究与景观优化构建[D]. 南京: 南京林业大学, 2005.
- [20] 洪志猛. 厦门城市公园植物群落的物种丰富度调查分析[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2009, 33(2): 51-54.
- [21] 马栋栋, 吴海霞, 王晓茜, 等. 青岛城市公园绿地多样性研究[J]. 山东林业科技, 2012, 42(2): 52-54.
- [22] 李智琦. 武汉市城市绿地植物多样性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2005.
- [23] 石孟春, 和太平, 招礼军. 南宁市城市园林绿地系统植物多样性调查分析[J]. 广西科学院学报, 2008, 24(2): 130-133.
- [24] 曹立颜, 张宇, 盖力岩, 等. 保定市城市绿地植物多样性研究[J]. 河北林果研究, 2009, 24(1): 95-99.
- [25] Bolund P, Hunhammar S. Ecosystem services in urban areas[J]. Ecological economics, 1999, 29(2): 293-301.
- [26] Hope D, Gries C, Zhu W, et al. Socioeconomics drive urban plant diversity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2003, 100(15): 8788-8792.
- [27] Stagoll K, Lindenmayer D B, Knight E, et al. Large trees are keystone structures in urban parks[J]. Conservation Letters, 2012, 5(2): 115-122.
- [28] 石辉. 城市环境学[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2010.
- [29] Knapp S, Kühn I, Schweiger O, et al. Challenging urban species diversity: contrasting phylogenetic patterns across plant functional groups in Germany[J]. Ecology Letters, 2008, 11(10): 1054-1064.