

菹草生长对西安护城河底泥营养及重金属的影响

王冠柏¹, 王 怡¹, 张 颖¹, 陈 炜², 史璐璐¹

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安城墙管理委员会, 陕西 西安 710005)

摘 要: 以西安市护城河某一水域为研究对象,通过现场采样测定了菹草生长区和无菹草生长区底泥中碳、氮、磷及重金属含量的季节性变化。结果表明,同一水域,菹草生长区底泥中的TN和TOC含量明显高于无菹草生长区的,四季均值分别为10.7、104.41 mg/g,分别为无菹草生长区的1.66和1.23倍,且两者均在春季最大、秋季最小。而菹草生长区底泥中的TP含量明显低于无菹草生长区的,四季均值为2.01 mg/g,为无菹草生长区的85.9%,且季节性变化不大。TP的主要赋存形态为无机磷(IP),菹草生长区底泥的IP中铁铝磷含量均值仅为无菹草生长区的65.7%;菹草生长区底泥的有机磷(OP)中稳性有机磷含量占OP的49.4%。此外,菹草生长区底泥中主要重金属Cr、Mn、Cu、Zn的含量均值分别为68.03、100.63、66.12和295.19 $\mu\text{g/g}$,分别为无菹草生长区的88.8%、65.7%、56.2%和110.9%。总之,菹草在实际水体中的生长,增加了底泥中碳、氮的含量,降低了磷含量并促使IP向OP转化,且会引起底泥中重金属含量的变化。

关键词: 菹草; 底泥; 营养物; 重金属; 季节性影响

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)09-0116-05

Effect of *Potamogeton crispus* Growth on Nutrient and Heavy Metal Contents of Sediment in Xi'an Moat

WANG Guan-bai¹, WANG Yi¹, ZHANG Ying¹, CHEN Wei², SHI Lu-lu¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Xi'an City Wall Management Committee, Xi'an 710005, China)

Abstract: Taking a certain water area of the moat in Xi'an City as the research object, seasonal variation of carbon, nitrogen, phosphorus and heavy metal contents in sediment of *Potamogeton crispus* (*P. crispus*) growth area and no *P. crispus* growth area were determined by spot-sampling. The results showed that the contents of both TN and TOC in sediment with *P. crispus* growth were significantly higher than those in sediment without *P. crispus* growth, and the average contents of TN and TOC were 10.7 and 104.41 mg/g in sediment with *P. crispus* growth, which were 1.66 times and 1.23 times of those in sediment without *P. crispus* growth, respectively. Moreover, both TN and TOC contents in sediment reached the highest and lowest values in spring and autumn respectively. However, the TP content in sediment with *P. crispus* growth was significantly lower than that without *P. crispus* growth, and its average value of

four seasons was 2.01 mg/g in sediment with *P. crispus* growth, which was 85.9% of that without *P. crispus* growth and was without obvious seasonal change. The main occurrence of TP was inorganic phosphorus (IP), and the average value of Fe/Al-bound phosphorus of IP in sediment with *P. crispus* growth was only 65.7% of that without *P. crispus* growth. The content of stable organic phosphorus accounted for 49.4% of the organic phosphorus (OP) in sediment with *P. crispus* growth. In addition, the mean values of the main heavy metals Cr, Mn, Cu and Zn were 68.03, 100.63, 66.12 and 295.19 $\mu\text{g/g}$ in sediment with *P. crispus* growth, which were 88.8%, 65.7%, 56.2% and 110.9% in sediment without *P. crispus* growth, respectively. In short, *P. crispus* growth increased the carbon and nitrogen contents in the sediment, which reduced the phosphorus content and promoted the transformation of IP to OP. Furthermore, *P. crispus* growth led to the change of heavy metal content in the sediment.

Key words: *Potamogeton crispus*; sediment; nutrient; heavy metal; seasonal effect

沉水植物充当着底泥和上覆水体之间营养交换的纽带,因而在水生生态系统中发挥着重要作用^[1],比如,沉水植物可减缓水体流速从而提高细颗粒的沉降速率,也可改善底泥的氧化还原条件从而影响底泥的地球生化性质。菹草作为一种典型的沉水植物,对净化水体、改善水环境及维持生态系统平衡具有重要作用^[2],从而成为近年来沉水植物研究的热点,但这些研究大多集中在其对水质的改善方面^[3,4]。另一方面,随着景观水体特别是城市景观水体面积的增大,大量资料报道了菹草在封闭水域的过度生长现象,如南京玄武湖、山东东平湖等景观水体皆大面积暴发菹草^[5],菹草在旺盛生长期可改善水质,但过度生长的菹草倒伏腐败后却导致湖水黑臭,反而给景观水体带来一定危害,这种危害往往通过底泥营养环境的改变间接影响到水质。然而,菹草生长对实际水体底泥的营养环境影响目前报道较少。

鉴于此,笔者测定了西安市护城河同一水域菹草生长区和无菹草生长区底泥中碳、氮、磷及重金属含量的季节性变化,探讨菹草生长对实际水体底泥营养物质含量、形态及重金属含量的季节性影响,以期景观水体生态治理提供有益参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

西安市护城河总长为 14.8 km,河底宽为 15 ~ 20 m,水深为 5 ~ 8 m,环绕西安市中心一周,紧邻西安市城墙外围,是以城市防洪和雨水调蓄功能为主、兼具休闲娱乐的城市景观水体。玉祥门(HY)和安定门(HA)是护城河西线同一水域紧密相连的两个区段, HY 水域近两年暴发菹草,而 HA 水域则一直

无菹草生长,试验采集底泥位置相距不足百米。

1.2 样品采集与处理

采用抓斗采泥器于 2015 年春、夏、秋、冬四季分别采集 HY 和 HA 区段的表层底泥。所取底泥呈黑色,有微臭气味。粗筛滤除石块、树叶等杂物后,将底泥离心并冷冻干燥,再研磨过 100 目筛备用。

1.3 测定方法

底泥的 TN 含量采用凯氏定氮法测定; TOC 含量采用重铬酸钾氧化-分光光度法测定; TP 含量采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定,其他各形态磷的测定方法参照欧盟 SMT 协议,采用连续浸提方法按图 1 所示流程测定底泥中的无机磷(IP)、有机磷(OP)、铁铝磷(Fe/Al-P)和钙磷(Ca-P)。采用 Bowman-Cole 有机磷分级方法,分别测定 OP 中的活性有机磷(A-OP)、中活性有机磷(MA-OP)和稳性有机磷(S-OP)。

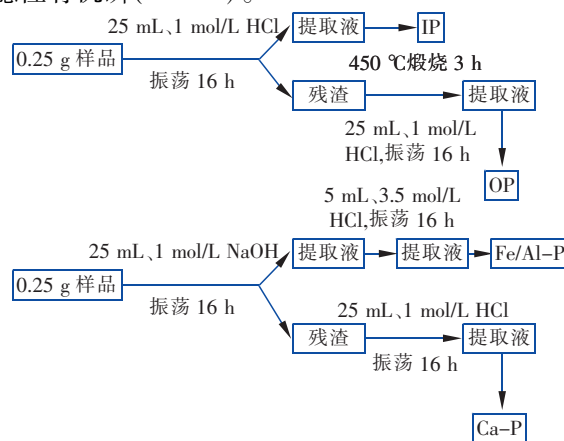


图1 底泥中磷形态浸提流程

Fig. 1 Sequential extraction procedure of phosphorus from sediment

底泥中重金属含量的测定:首先采用X射线荧光光谱仪确定底泥中主要重金属的类别和相对含量,然后采用 $\text{HCl}-\text{HNO}_3-\text{HClO}_4$ 混酸消解样品,再利用SOLAAR原子吸收光谱仪测定底泥中含量相对较高的4种重金属(Cr、Mn、Cu和Zn)含量。

2 结果与讨论

2.1 菹草生长对底泥中TN和TOC含量的影响

图2为菹草生长对底泥中TN和TOC含量的季节性影响。可以看出,菹草生长区域的底泥中TN和TOC含量在4个季节中均明显高于无菹草生长区域的,前者四季的TN和TOC含量均值分别为10.7、104.41 mg/g,后者分别为6.45、84.89 mg/g。此外,菹草生长区域底泥中的TN和TOC含量季节性变化趋势相似,即春季最高,分别为12.14、110.85 mg/g,然后逐渐递减,秋、冬季稳定,最低值分别为9.53、100.25 mg/g。

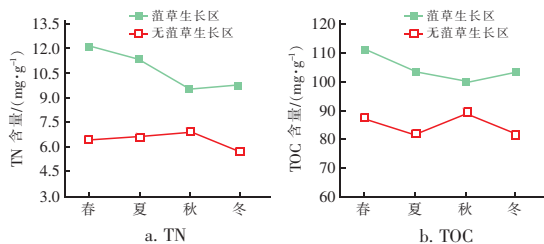


图2 菹草生长对底泥中TN和TOC含量的季节性影响

Fig. 2 Seasonal effect of *P. crispus* growth on TN and TOC content in sediment

菹草一般秋季发芽,越冬生长,春季大量繁殖,夏季衰败死亡^[2]。因此,菹草在春季大量繁殖时需要从水体中摄取大量碳和氮,这些碳、氮最终被输送转移进入底泥,表现为底泥中碳、氮在春季含量最高;这些贮存于底泥中的碳、氮,被用于菹草在秋季的孕育和冬季的缓慢生长。因此,菹草生长区底泥中TOC和TN含量的变化可能与菹草生长周期相关。然而,无菹草生长区底泥中的TOC和TN含量较少且相对稳定,受季节影响不大。

2.2 菹草生长对底泥磷含量和形态的影响

底泥中的TP可分为IP和OP,IP的赋存形态主要有Fe/Al-P和Ca-P,OP的形态主要有A-OP、MA-OP和S-OP。不同形态磷的可生物利用程度不同,从而对上覆水中磷浓度的影响也不同。

2.2.1 菹草生长对底泥TP、IP和OP含量的影响

图3为菹草生长对底泥中TP及IP和OP含量

的季节性影响。从图3(a)可以看出,菹草生长区底泥中的TP含量在4个季节中明显低于无菹草生长区的,前者含量均值为2.01 mg/g,仅为后者的85.9%,且二者TP含量均相对平稳,受季节影响较小。从图3(b)可以看出,无论是否生长菹草,IP是TP的主要存在形态,OP含量则相对较低。此外,菹草生长区底泥中的IP含量在4个季节中均低于无菹草生长区的,而OP含量却相反,菹草生长区底泥中IP和OP含量均值分别为1.34、0.51 mg/g,无菹草生长区的对应值则分别为1.72、0.40 mg/g。这表明,菹草的生长可能引起底泥中IP向OP的转化,从而导致IP含量降低、OP含量升高。

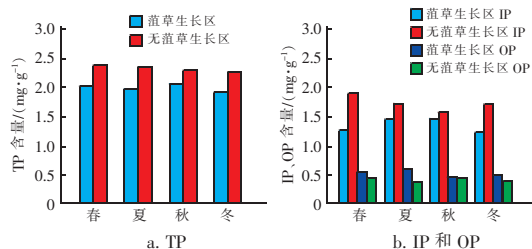


图3 菹草生长对底泥中磷含量的季节性影响

Fig. 3 Seasonal effect of *P. crispus* growth on P content in sediment

2.2.2 菹草生长对底泥中无机磷含量的影响

Fe/Al-P和Ca-P作为IP中最主要的赋存形态,其含量在有、无菹草生长时随季节的变化如图4所示。

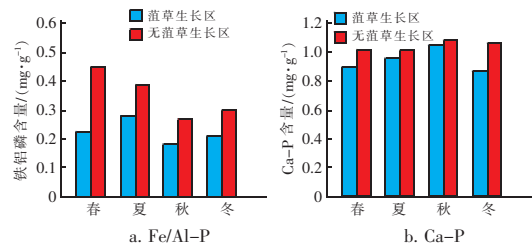


图4 菹草生长对底泥中无机磷含量的季节性影响

Fig. 4 Seasonal effect of *P. crispus* growth on IP content in sediment

从图4可以看出,无论是否生长菹草,底泥中IP的主要成分均为Ca-P。由图4(a)可知,菹草生长区底泥中的Fe/Al-P含量在4个季节均明显低于无菹草生长区的,其四季均值为0.23 mg/g,为无菹草生长区的65.7%,二者含量差异在春季最大、秋季最小。倪玲珊^[6]、Wang等^[7]研究发现,菹草生长能有效吸收底泥中可生物利用的Fe/Al-P,这也

是菹草生长区底泥中 Fe/Al - P 含量较低的重要原因。由图 4(b)可知,菹草生长区底泥中的 Ca - P 含量较为稳定,受季节变化影响不大,其四季均值为 0.95 mg/g,为无菹草生长区的 90.5%,原因可能是 Ca - P 为难生物利用态磷,可在底泥中稳定存在。总之,菹草生长可以引起底泥中 Fe/Al - P 含量的降低,而对 Ca - P 含量影响不大。

2.2.3 菹草生长对底泥中有机磷含量的影响

表 1 为有、无菹草生长时底泥中的 OP 含量。可以看出,菹草生长区底泥中的 A - OP、MA - OP 和 S - OP 含量均值总和为 0.389 mg/g,为无菹草生长区的 1.31 倍;生物有效性最低、最难被生物利用的 S - OP^[8]在菹草生长区底泥 OP 中占 49.4%,远高于无菹草生长区(28.6%),而菹草生长区底泥中有较高生物可利用性的 A - OP 和 MA - OP 仅占 OP 的一半,远低于无菹草生长区(71.4%)。这表明菹草生长虽然增加了底泥中的 OP 含量,但是对已转化的 OP 有一定的钝化作用,使其约一半进一步转化为稳定状态的 S - OP。

表 1 菹草生长对底泥中不同形态有机磷含量的季节性影响

Tab. 1 Seasonal effect of *P. crispus* growth on contents of different OP forms in sediment mg · g⁻¹

项 目	菹草生长区底泥			无菹草生长区底泥		
	A - OP	MA - OP	S - OP	A - OP	MA - OP	S - OP
春	0.061	0.086	0.250	0.038	0.234	0.068
夏	0.046	0.230	0.183	0.033	0.197	0.075
秋	0.042	0.152	0.137	0.039	0.171	0.082
冬	0.048	0.124	0.199	0.031	0.104	0.114
均值	0.049	0.148	0.192	0.035	0.177	0.085

2.3 菹草生长对底泥中重金属含量的影响

图 5 为菹草生长对底泥中重金属 Cr、Mn、Cu 和 Zn 含量的季节性影响。可以看出,菹草生长区底泥中的 Cr、Mn 和 Cu 含量在 4 个季节均低于无菹草生长区的,其四季均值分别为 68.03、100.63 和 66.12 μg/g,分别为无菹草生长区底泥的 88.8%、65.7% 和 56.2%;而菹草生长区底泥中的 Zn 含量却略高于无菹草生长区的,其四季均值为 295.19 μg/g,为无菹草生长区的 1.11 倍。因此,菹草生长引起底泥中 Cr、Mn 和 Cu 含量不同程度的降低,却使 Zn 含量略有升高。从季节性变化来看,菹草生长区底泥中 Cr、Cu 和 Zn 含量受季节变化影响较小;而 Mn 含量全年波动较大,夏秋季节较高、春冬季节较低。Mi 等^[9]研究发现,菹草在汤逊湖沉积物中生长时能明

显降低沉积物水浸提 Mn 和 Cu 的含量,对 Zn 含量则没有显著影响,这与本研究结果有一定的相似性。此外,Mn 对菹草生长促进作用较明显^[10],菹草根际的氧化作用可使沉积物中大量存在的 Fe、Mn 离子在根表面被氧化成铁锰氧化物胶膜^[11],这可能是菹草生长区底泥中 Mn 含量较低的原因。

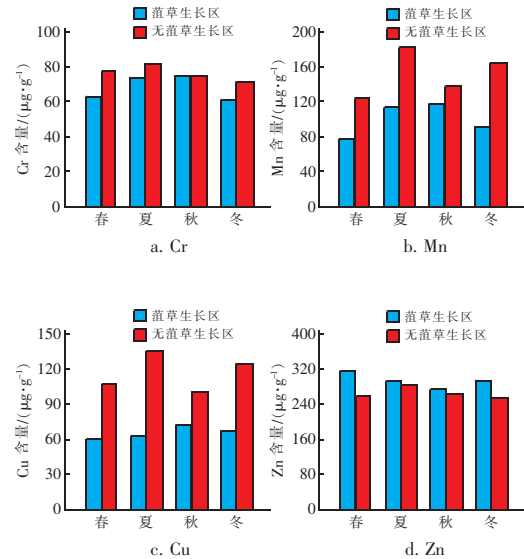


图 5 菹草生长对底泥重金属含量的季节性影响

Fig. 5 Seasonal effect of *P. crispus* growth on heavy metal content in sediment

3 结论

① 菹草生长区底泥中的 TN 和 TOC 含量均明显高于无菹草生长区的,四季均值为 10.7、104.41 mg/g,分别为无菹草生长区的 1.66 和 1.23 倍,且两者均在春季最大、秋季最小。而菹草生长区底泥中的 TP 含量明显低于无菹草生长区的,四季均值为 2.01 mg/g,仅为无菹草生长区的 85.9%,且季节性变化不大。

② 底泥中 TP 的主要赋存形态为 IP,菹草生长区底泥 IP 中的铁铝磷含量均值仅为无菹草生长区的 65.7%;另外,菹草生长区底泥 OP 中的稳性有机磷含量占 OP 的 49.4%。

③ 菹草生长区底泥中主要重金属 Cr、Mn、Cu、Zn 的含量均值分别为 68.03、100.63、66.12 和 295.19 μg/g,分别为无菹草生长区的 88.8%、65.7%、56.2% 和 110.9%。

参考文献:

[1] Schneider S, Melzer A. Sediment and water nutrient

- characteristics in patches of submerged macrophytes in running waters[J]. *Hydrobiologia*, 2004, 527(1): 195 – 207.
- [2] 张敏, 尹传宝, 张翠英, 等. 沉水植物菹草的生态功能及其应用现状[J]. *中国水土保持*, 2015, (3): 50 – 53.
Zhang Min, Yin Chuanbao, Zhang Cuiying, *et al.* Ecology function and application status of *Potamogeton crispus* [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2015, (3): 50 – 53 (in Chinese).
- [3] 任文君, 胡晓波, 刘霞, 等. 白洋淀菹草对富营养化水体总磷的净化[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(4): 1053 – 1058.
Ren Wenjun, Hu Xiaobo, Liu Xia, *et al.* Total phosphorus removal from eutrophic water in Baiyangdian Lake by *Potamogeton crispus* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(4): 1053 – 1058 (in Chinese).
- [4] 王文林, 王国祥, 李强, 等. 菹草 – 伊乐藻群落对富营养化水体水质的净化效果[J]. *南京师大学报: 自然科学版*, 2006, 29(4): 111 – 116.
Wang Wenlin, Wang Guoxiang, Li Qiang, *et al.* Purification effect of *Potamogeton crispus* – *Elodea nuttallii* community on eutrophic water body quality [J]. *Journal of Nanjing Normal University: Natural Science Edition*, 2006, 29(4): 111 – 116 (in Chinese).
- [5] 王锦旗, 郑有飞, 王国祥. 玄武湖菹草种群的发生原因及人工收割对水环境的影响[J]. *水生生物学报*, 2013, 37(2): 300 – 305.
Wang Jinqi, Zheng Youfei, Wang Guoxiang. Reasons for the occurrence of *Potamogeton crispus* population and harvesting impact on the water environment in Xuanwu Lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, 37(2): 300 – 305 (in Chinese).
- [6] 倪玲珊. 菹草对长江中游湖泊沉积物及上覆水间钙、磷循环的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
Ni Lingshan. Effect of *Potamogeton crispus* on Calcium and Phosphorus Cycle in Lake Sediments and Overlying Water of Middle Yangtze River [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010 (in Chinese).
- [7] Wang S, Jin X, Zhao H, *et al.* Phosphorus release characteristics of different trophic lake sediments under simulative disturbing conditions [J]. *J Hazard Mater*, 2009, 161(2/3): 1551 – 1559.
- [8] 李孝良, 于群英, 陈如梅. 土壤有机磷形态的生物有效性研究[J]. *土壤通报*, 2003, 34(2): 98 – 101.
Li Xiaoliang, Yu Qunying, Chen Rumei. Bio-availability of different forms of soil organic phosphorus [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(2): 98 – 101 (in Chinese).
- [9] Mi W J, Zhu D W, Zhou Y Y, *et al.* Influence of *Potamogeton crispus* growth on nutrients in the sediment and water of Lake Tangxunhu [J]. *Hydrobiologia*, 2008, 603(1): 139 – 146.
- [10] 何成杰, 朱端卫, 郭怀成, 等. 外源 Mn(II) 对菹草 (*Potamogeton crispus* L.) 生长及其铁锰含量的影响[J]. *环境科学研究*, 2010, 23(6): 690 – 695.
He Chengjie, Zhu Duanwei, Guo Huaicheng, *et al.* Effects of manganese application on *Potamogeton crispus* L. growth and response of iron and manganese in plants [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(6): 690 – 695 (in Chinese).
- [11] Hupfer M, Dollan A. Immobilisation of phosphorus by iron-coated roots of submerged macrophytes [J]. *Hydrobiologia*, 2003, 506/509(1/3): 635 – 640.



作者简介: 王冠柏(1993 –), 男, 甘肃会宁人, 硕士研究生, 研究方向为城市景观水体的修复。

E-mail: 1531824212@qq.com

收稿日期: 2017 – 10 – 13