DOI:10.15928/j.1674-3075.2019.04.008

沉水植物苦草对沉积物各形态磷时空分布的影响

王立志,董 彬,宋红丽,郁万妮

(山东省水土保持与环境保育重点试验室,临沂大学资源环境学院,临沂 276000)

摘要:监测苦草生长过程中根系及沉积物中磷含量和形态的时空变化,探讨苦草根系在生长过程中对沉积物磷时空分布的影响。聚乙烯塑料桶中铺设沉积物为暴发水华水体的底泥,厚度 10 cm,干重 4 821.00 g,底泥铺设完毕后缓慢注入 100 L 水(TP 0.02 mg/L)。试验桶种植 2 g 苦草休眠芽。沉积物样品磷形态分析采用国际通用的 SMT 法,在采集沉积物同时采集苦草样品,测定根系生长情况及根系在沉积物中的分布。结果表明:苦草在生长过程中能降低沉积物各层总磷(TP)、NaOH 提取磷(NaOH-P)、HCl 提取磷(HCl-P)、无机磷(IP)和有机磷(OP)的含量,沉积物各形态磷含量的下降速率为:NaOH-P>HCl-P>IP=OP;随着苦草根系的生长,在苦草根系分布区沉积物中各形态磷的含量明显低于非根系分布区。苦草根系通过对环境因子氧化还原电位和 pH 的改变从而影响根系周围沉积物磷的含量,沉积物中各形态磷含量随着苦草根系面积的增加而减小。

关键词:沉水植物;苦草;沉积物;磷分布;各形态磷

中图分类号:S932 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2019)04-0058-07

在有效控制外源磷进入水体后,湖泊富营养化现象仍有发生(Barlow et al, 2003),因此,内源磷的释放成为人们关注的焦点(Liu et al, 2004)。磷在沉积物和上覆水界面之间可以相互迁移转化,研究表明即使切断了外源磷的输入,沉积物中的磷仍然可以向水体中释放,从而使得水体中的磷保持在相对较高的水平(Kabengi et al, 2003)。沉水植物在湖泊生态系统中具有重要的作用,它生长在水和底泥的界面,植株整体沉没在水体之中,对水和底泥之间物质的交换、能量的传输等具有重要的作用(Zhou et al, 2006, Zhao et al, 2010)。目前关于沉水植物对水体沉积物磷影响的研究多探讨了沉水植物生长过程对沉积物整体磷形态及含量的影响,而关于生长过程中根系对沉积物磷空间尤其是垂直空间磷的影响研究相对较少。

沉水植物苦草(*Vallisneria natans*)的茎叶能吸附和沉降水体中的悬浮物,并将光合作用产生的氧气输送至根部的好氧微生物,有利于有氧呼吸的进行。此外,苦草具有较强的环境适应能力,常作为重建水生植被的重点先锋物种(张嵘梅 等, 2016)。本研究采用人工模拟的试验方式,选择根系相对较发达的苦草作为试验植物,监测苦草生长过程中根系及沉积物中磷含量和形态的时空变化,探讨苦草根系在生长过程中对沉积物磷时空分布的影响。

1 材料与方法

1.1 沉积物

沉积物为用彼得生采泥器从某暴发水华水体采集的底泥。底泥采集后室温风干,过 200 目筛,去除较粗的石子及动植物的残体等。过筛后的底泥采用机械搅拌的方式充分混合后铺设在聚乙烯塑料桶中。塑料桶 6 个,顶直径 55 cm、底直径 45 cm、高 75 cm,桶内壁预先经过灭菌处理,并用去离子水冲洗干净。底泥铺设厚度为 10 cm,干重为 4 821.00 g,底泥铺设完毕后缓慢注入 100 L 水(TP 0.02 mg/L)。

1.2 试验设计

设试验组和对照组各 3 组(平行),对照组不种植苦草。待注入水的试验桶稳定后,试验组每桶种植 2 g 苦草休眠芽。试验在可控的智能温室内进行,试验时间为 1~7 月。水温模拟室外温度,控制在 5~25℃,各桶间水温差异小于 2℃。试验组和对照组沉积物的总磷(TP)、NaOH 提取磷(NaOH-P)、HCl 提取磷(HCl-P)、无机磷(IP)、有机磷(OP)、氧化还原电位(ORP)和 pH 见表 1。

收稿日期:2017-06-20

基金项目:山东省自然科学基金(ZR2018LD004);国家自然科学基金青年项目(41303061,41603071);国家自然科学基金面上项目(41571261);临沂大学博士启动基金(LYDX2013BS063);山东省水土保持与环境保育重点试验室开放基金(stkf201206)。

作者简介:王立志,1980 年生,男,山东临沂人,博士,教授,主要从事水环境生态修复研究。E-mail:wanglizhi@lyu.edu.cn

表 1　沉积物基本理化特征

Tab.1　Physical and chemical characteristics of test sediment

组别	苦草/g	TP/mg·kg^{-1}	NaOH-P/mg·kg^{-1}	HCl-P/mg·kg^{-1}	IP/mg·kg^{-1}	OP/mg·kg^{-1}	ORP/mV	pH
试验组	2	770.49	202.82	271.38	446.26	275.98	-130	7.24
对照组	0	779.34	208.40	271.90	447.61	277.06	-125	7.33

1.3　取样与分析

因苦草根系生长相对较为缓慢，所以沉积物采样间隔为 2 个月。为保证水样具有代表性，取水面 20 cm 以下水，每次采集 50 mL。沉积物采用自制的微型柱状采泥器采集，超低温（-80℃）冷冻后切割，切割间距为 2 cm。切割后的样品冷冻干燥。在采集沉积物同时采集苦草样品，测定根系生长情况及根系在沉积物中的分布。沉积物样品磷形态分析采用国际通用的 SMT 法（Ruban et al，2001）。沉积物分析前将苦草根系从沉积物中去除。苦草和水体中磷含量按照相关规范（刘鸿亮，1990）分析。

2　结果与分析

2.1　苦草生长情况

试验期间苦草的生长情况见图 1 。

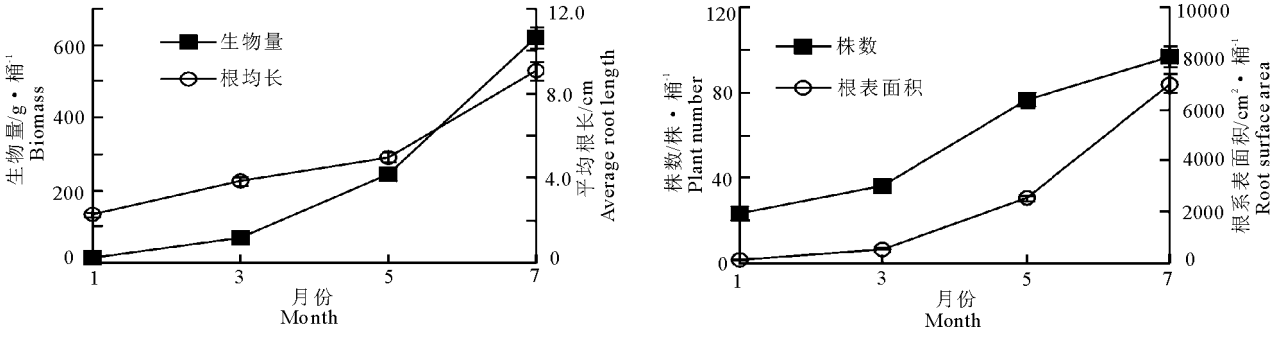


图 1　苦草生长情况

Fig.1　Growth characteristics of *V. natans*

1-5 月苦草的根系和生物量变化均较为缓慢，到 5 月份苦草生物量（湿重）为 21 g，根系平均长度为 5 cm。5-7 月由于气温的升高，苦草进入快速生长期，根系和总体生物量迅速增加，至 7 月份生物量达 80 g 左右，根系平均长度达到 9.8 cm。

苦草由于自身的无性繁殖株数不断增加，到试验结束平均为 81 株/桶。苦草根系表面积也随着苦草的繁殖而迅速增加，到试验结束时平均为 0.59 m^2/桶。

2.2　苦草对沉积物各形态磷时空分布的影响

试验组沉积物各形态磷含量均显著（$P<0.05$）低于对照组（图 2）。试验组沉积物中 TP 的含量随着苦草根系的深入而逐渐降低。1-5 月，苦草根系平均长度以内分布区沉积物中 TP 的含量（765～730 mg/kg）明显低于平均长度以外分布区（770～755 mg/kg），其差值在 10～30 mg/kg。6-7 月，苦草根系平均长度以内分布区沉积物中 TP 的含量与平均长度以外分布区差异较小，其差值在 0～10 mg/kg。在苦草根系深度所覆盖的区域，沉积物中 TP 的含量随着植物的生长而呈下降趋势，TP 变化范围为 765～710 mg/kg。在苦草根系平均长度以外分布区沉积物 1-5 月下降趋势不明显，而 6-7 月则快速下降，并最终与上层沉积物磷含量基本持平。

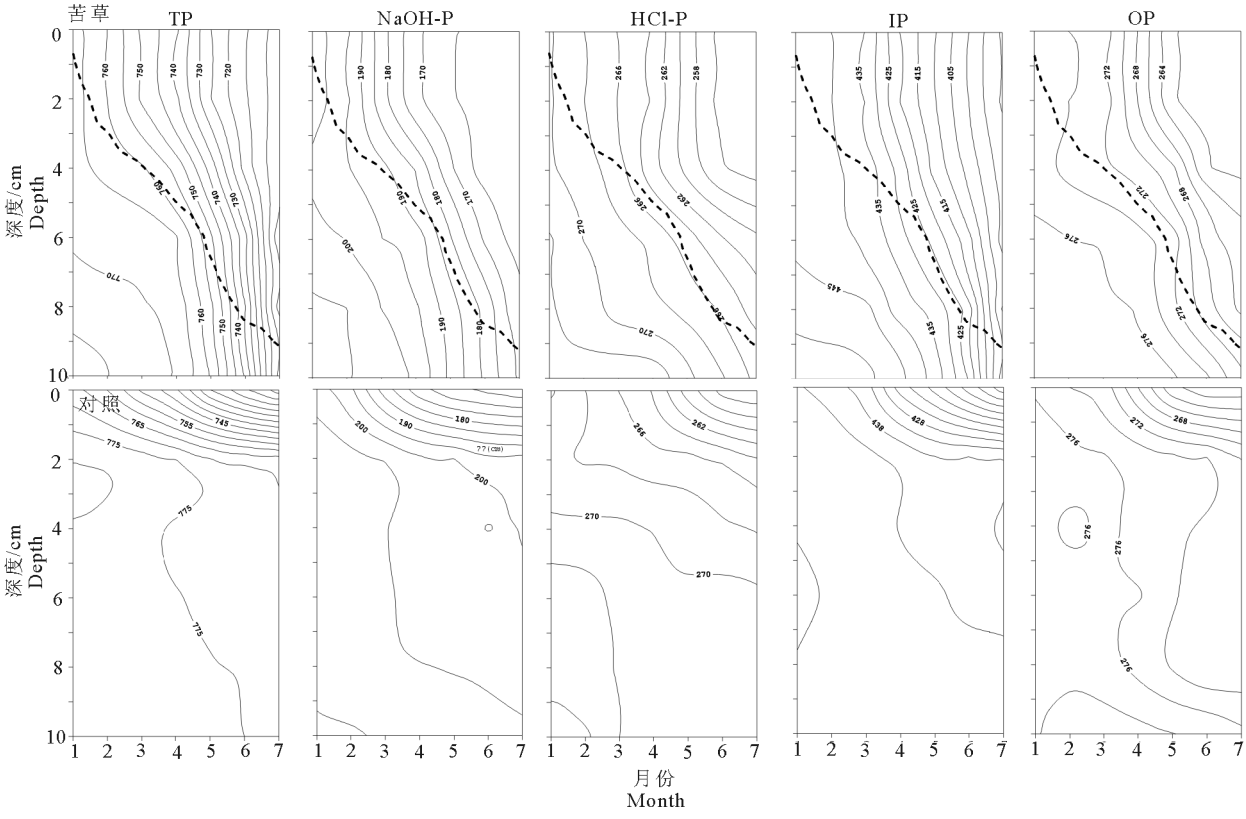
对照组沉积物中 TP 的含量在 2～10 cm 深度内在试验期间基本没有变化，在 0～2 cm 深度变化较明显。随着培养时间的推移，表层沉积物中 TP 的含量呈略下降趋势。

试验组和对照组 NaOH-P、HCl-P 的变化趋势和 TP 类似，但是试验组 NaOH-P 的变化范围（165～200 mg/kg）明显大于 HCl-P（256～270 mg/kg）。沉积物上层 0～4 cm 范围内 HCl-P 的含量明显低于下层。对照组 NaOH-P 在沉积物 0～2 cm 内变化较大（170～200 mg/kg），随着试验时间的推移呈明显降低趋势。而 HCl-P 的含量在沉积物 0～3 cm 内随着培养时间的推移呈缓慢变化趋势，且变化较小（260～270 mg/kg）。

试验组和对照组 IP、OP 的变化趋势和 TP 类似，但是试验组 IP 的变化明显大于 OP，试验期间 IP 的含量随着培养时间的推移呈下降趋势，变化范

围在395～445 mg/kg。6－7月份沉积物上下层之间IP的含量基本无差异。而OP的含量随培养时间的推移也呈下降趋势，但是变化较缓慢，变化范围在263～276 mg/kg。而且沉积物上层0～4 cm内OP的含量明显要低于下层含量。

试验组和对照组上覆水各形态磷含量呈相反趋势(图3)。试验组上覆水各形态磷含量随着苦草的生长而呈下降趋势，TP从试验开始的0.10 mg/L降至试验结束时的0.04 mg/L。对照组由于底泥中磷的释放，随着培养时间的增加水体中磷的含量呈上升趋势，TP由试验开始的0.04 mg/L上升至试验结束时的0.30 mg/L。



虚线为苦草根系平均深度，等值线为各形态磷的含量(mg/kg)

图2　苦草对沉积物各形态磷时空分布的影响

The broken line is the average depth of *V. natans* roots, and the isoclines is the content of phosphorus in each form(mg/kg)

Fig.2　Effect of *V. natans* on temporal and spatial distribution of each sediment phosphorus fraction

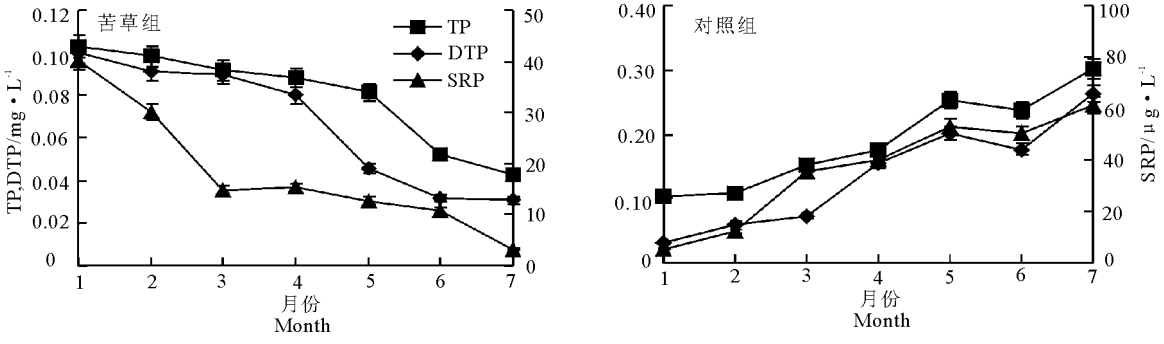


图3　试验期间上覆水各形态磷含量随时间的变化

Fig.3　Variation of phosphorus content in overlying water over time for each treatment

3　讨论

沉水植物苦草在生长过程中可以吸收上覆水和沉积物中各形态磷(顾燕飞 等，2017)，沉水植物在生长过程中根系可以直接吸收沉积物中生物有效磷(尚媛媛 等，2016)，将沉积物和水体中的磷富集于植物体内(葛绪广 等，2009)。

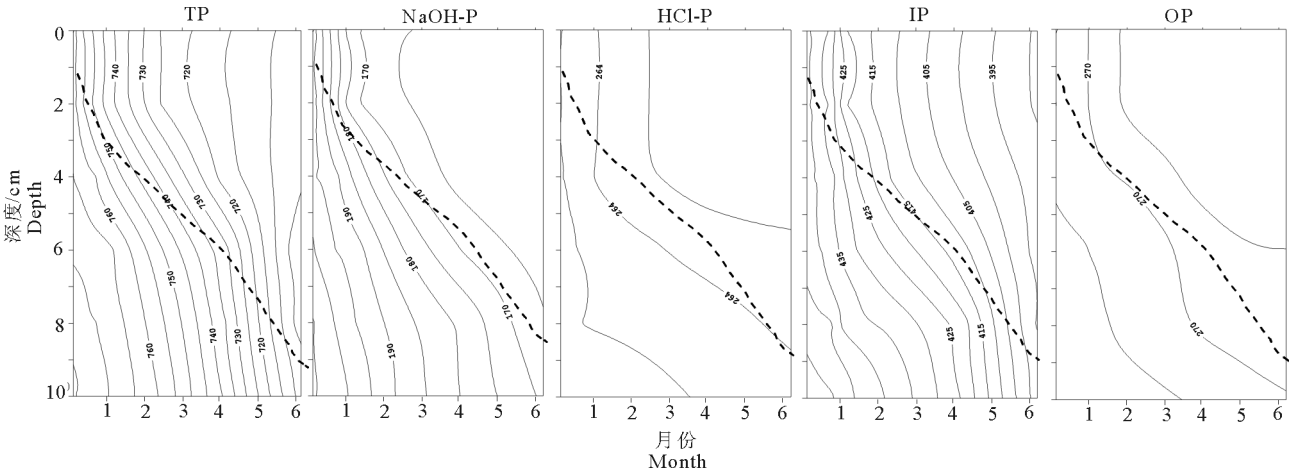
3.1　生物量和根系长度对沉积物磷含量的影响

沉积物各形态磷的含量随苦草生物量和根系长度的变化如图 4。随着生物量的增加沉积物中 TP 的含量逐渐降低，在生物量达到 500～600 g/m^2 时（6－7 月），沉积物各层磷的含量基本趋于一致。在生物量 0～500 g/m^2 时，苦草根系大量分布区沉积物 TP 的含量明显偏低。因此苦草可以通过根系的吸收作用明显降低沉积物 TP 的含量，并且随着根系的生长，苦草对沉积物 TP 含量的影响逐渐深入，到 6－7 月份苦草根系平均长度在 8～9 cm，部分根系长度大于 10 cm，根系在沉积物表层和底部均具有较大的表面积（图 5）。这可能是沉积物中 TP 在 6－7 月份基本趋于一致的主要原因。

1－5 月份，随着苦草的生长，根系不断发育，沉积物中各层 TP 的含量均呈现降低趋势。以苦草根系平均深度为分界线，平均深度以上 TP 的含量显著低于平均深度以下（$P<0.05$）。苦草巨大的根系表面积（图 5）有助于苦草对沉积物磷的吸收，由于苦草根系对沉积物中磷的吸收，导致了上层沉积物中磷含量的降低。在苦草根系平均深度以下，沉积物中 TP 的含量也随着生物量的增加呈降低趋势，这主要是由于在该区域仍分布少量大于根系平均深度的苦草根系（图 5），这些根系仍可以吸收少量的磷。由于该区根系表面积远小于根系平均深度以内的苦草根系，因此，根系在此区域吸收的磷总量也要小于上部根系区域，从而导致了以苦草根系平均深度为分界线的沉积物 TP 的一个明显变化梯度。

3.2　苦草根系表面积和各形态磷相关性

沉积物 0～10 cm 各层苦草根系表面积和各形态磷线性相关分析结果见图 6。随着苦草根系表面积的增加沉积物中各形态磷的含量相应降低。TP 随着苦草根系表面积的增加而降低的斜率为－5.95，NaOH-P、HCl-P、IP 和 OP 随着苦草根系表面积的增加而降低的斜率分别为－3.78、－1.43、－5.03 和－1.43。斜率绝对值的大小为 IP＞NaOH-P＞HCl-P＝OP，即随着苦草根系表面积增加含量降低最快的是 IP，其次是 NaOH-P。苦草根系表面积的变化对 IP 和 NaOH-P 的含量影响较大，对 HCl-P 和 OP 含量的影响较小且基本相同。



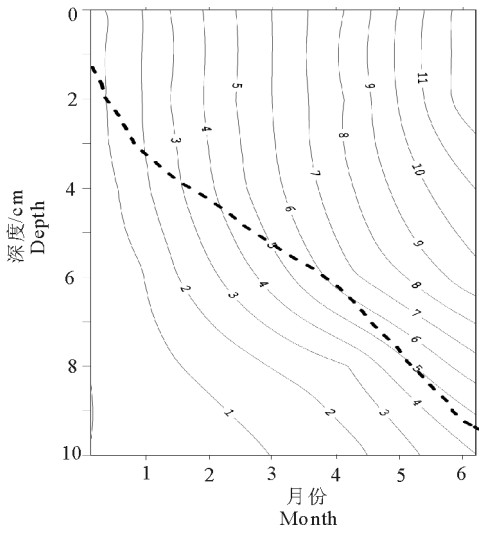
虚线为苦草根系平均深度位置，等值线为各形态磷含量

图 4　苦草生物量和根系对沉积物磷的影响

The broken line is the average depth of *V. natans* roots, and the isoclines is the content of phosphorus in each form

Fig.4　Content variation of different form phosphorus in sediments with *V. natans* biomass and root length

NaOH-P、HCl-P、IP 和 OP 的波动范围虽各有不同，但是在空间上随着苦草生物量的变化趋势和 TP 基本是一致的。NaOH-P 和 HCl-P 是沉积物 IP 的重要组成部分，试验组 NaOH-P 的下降速率要大于 HCl-P，这应该和沉积物不同形态磷的结合性质有关。苦草根系绝大部分扎入底泥之中，在生长过程中根系的呼吸作用增加了根际的溶解氧，并改变了根际周围的微环境如溶解氧、氧化还原电位（ORP）、pH 等（Sorrell & Dromgoole，1987），苦草根系的作用会引起根际周围微环境氧化还原电位的升高，氧化还原电位的升高导致了根际 pH 值也相应的发生变化（Sorrell & Dromgoole，1987；Gahoonia et al，2000；Rooney & Kalff，2000），由于根系分泌弱酸性物质，导致苦草根际 pH 值降低，而 pH 值的降低则可导致 NaOH-P 的释放（Jin et al，2006）。研究表明，NaOH-P 能在较高的氧化还原电位和较低 pH 条件下释放（Barlow et al，2003；Wang et al，2005）。试验组苦草根系周围较高的氧



虚线为苦草根系平均深度位置，等值线为根系表面积(m^2/m^3)

图5 沉积各层苦草根系表面积随苦草生物量变化

The broken line is the average depth of *V. natans* roots, and the isoclines is the root surface area(m^2/m^3)

Fig.5 Variation of *V. natans* root surface area with biomass in different sediment layers

化还原电位和较低的pH(图7)可能是导致试验组沉积物中NaOH-P含量降低的一个重要因素。

HCl-P是钙结合态磷，主要指与沉积碳酸钙、自生磷灰石等的含磷矿物有关的磷形态，主要来源于早期成岩作用形成的氟磷灰石和生物颗粒的沉积(葛绪广 等，2014)。HCl-P由于其结合形态的原因，自身相对较为稳定，一般不易释放，但是当环境中pH值较低的时候也会释放(Jin et al,2006)。试验组苦草根际pH值的下降可能是导致HCl-P略降低(图7)的一个重要原因，由于HCl-P的难析出性，当苦草生物量达到500～600 g/m^2时沉积物中HCl-P的含量仅在0～4 cm范围内呈现较低值，这可能和该区域较大的根系表面积有关。OP包括死亡的水生动植物残体中可降解性有机磷和陆源性排放物质中难降解性有机磷。可降解性有机磷可以在早期成岩过程中随降解释放出来，并有可能向其他形态磷迁移转化(Turner et al, 2005)。OP的矿化速率与氧化还原条件密切相关(王立志 等，2011)，

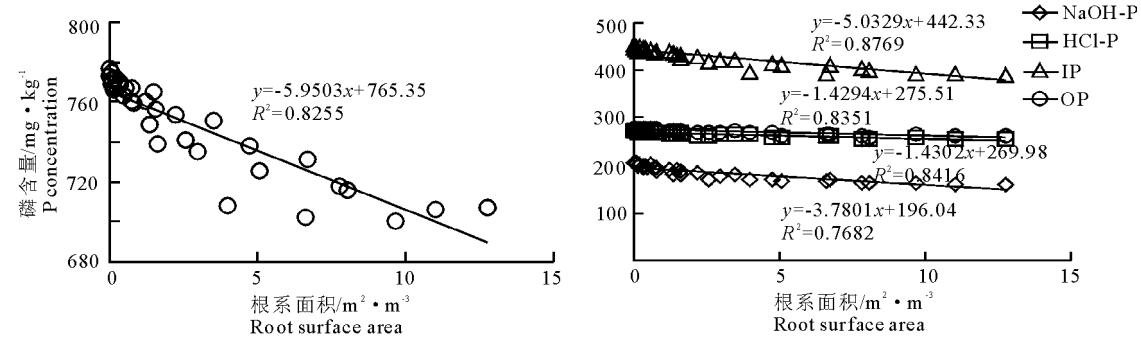


图6 沉积物苦草根系表面积和各形态磷线性关系

Fig.6 Linear relationship between *V. natans* root surface area and different form phosphorus

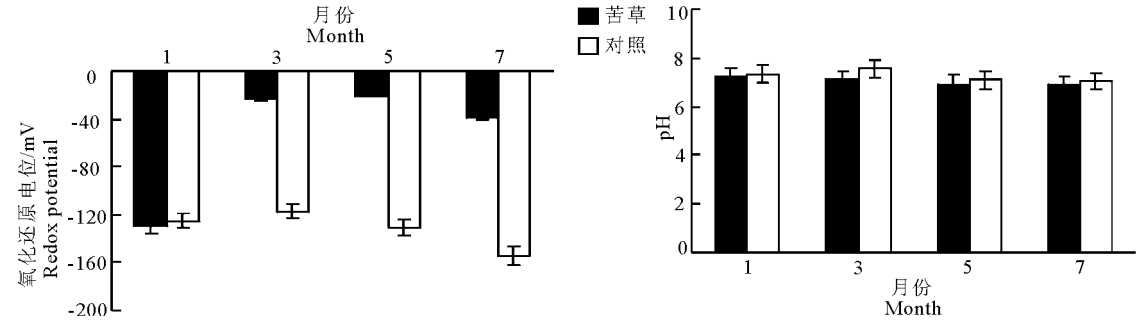


图7 试验期间底泥中氧化还原电位和pH的变化

Fig.7 Changes in the redox potential and pH in the sediments during the experiment

在试验组底泥中氧化还原电位要显著($P<0.05$)高于对照组(图6)，这可能导致底泥中肌醇六磷酸被转化成无机磷，从而使得OP的含量降低、IP的含量升高，也就是磷形态从OP向IP转化。底泥中OP结构相对较稳定，植物在正常条件下相对较难利用，因此OP在沉积物中的释放速率一般相对较小。这应该是本试验中OP变化较小的主要原因。苦草生物量达到400～600 g/m^2时沉积物中OP的含量仅在0～4 cm范围内呈现较低值，这可能和该区域较大的苦草根系表面积有关。

4 结论

苦草根系在生长过程中能降低沉积物各形态磷含量，以苦草根系平均深度为分界线，沉积物 TP 在根系平均深度以上的含量显著低于根系平均深度以下的含量。苦草根系表面积与沉积物各形态磷含量呈负相关，苦草对沉积物各形态磷含量下降速率的影响各不相同，IP＞NaOH-P＞ HCl-P＝OP，苦草根系通过提高沉积物的氧化还原电位和降低 pH 的方式来影响沉积物中各形态磷的含量。

参考文献

葛绪广，王国祥，陈成忠，等，2014. 苦草生长对沉积物中磷迁移转化的影响[J]. 生态学报，34(20)：5802－5811.

葛绪广，王国祥，陆贻超，2009. 4 种沉水植物断枝再生能力研究[J]. 水生态学杂志，30(4)：23－28.

顾燕飞，王俊，王洁，等，2017. 不同水深条件下沉水植物苦草(*Vallisneria natans*)的形态响应和生长策略[J]. 湖泊科学，29(3)：654－661.

刘鸿亮，1990. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京：中国环境科学出版社.

尚媛媛，关保华，郑建伟，等，2016. 沉水植物苦草和轮叶黑藻对水环境的影响[J]. 中国农学通报，32(28)：155－159.

王立志，王国祥，俞振飞，等，2011. 苦草(*Vallisneria natans*)生长期对沉积物磷形态及迁移的影响[J]. 湖泊科学，23(5)：753－760.

张嵘梅，马博馨，杨志杰，等，2016. 沉水植物苦草属在水体环境修复中的研究进展和应用现状[J]. 中国农学通报，32(28)：144－154.

Barlow K，Nash D，Turral H，et al，2003. Phosphorus uptake and release in surface drains[J]. Agricultural Water Management，63(2)：109－123.

Gahoonia T S，Asmar F，Giese H，et al，2000. Root-released organic acids and phosphorus uptake of two barley cultivars in laboratory and field experiments[J]. European Journal of Agronomy，12(3/4)：281－289.

Jin X C，Wang S R，Pang Y，et al，2006. Phosphorus fractions and the effect of pH on the phosphorus release of the sediments from different trophic areas in Taihu Lake，China[J]. Environmental Pollution，139(2)：288－295.

Kabengi N J，Zurayk R A，Baalbak I R Z，et al，2003. Phosphorus dynamics and characterization under long-term rotation trial[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis，34(3/4)：375－392.

Liu S M，Zhang J，Li D J，2004. Phosphorus cycling in sediments of the Bohai and Yellow Seas[J]. Estuarine，Coastal and Shelf Science，59(2)：209－218.

Rooney N，Kalff J，2000. Inter-annual variation in submerged macrophyte community biomass and distribution：the influence of temperature and lake morphometry[J]. Aquatic Botany，68(4)：321－335.

Ruban V，López-Sánchez J F，Pardo P，et al，2001. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments-A synthesis of recent works[J]. Fresenius Journal of Analytical Chemistry，370(2/3)：224.

Sorrell B K，Dromgoole F I，1987. Oxygen transport in the submerged freshwater macrophyte *Egeria densa planch*. I. Oxygen production，storage and release[J]. Aquatic Botany，28(1)：63－80.

Turner B L，Cade-Menun B J，Condron L M，et al，2005. Extraction of soil organic phosphorus[J]. Talanta，66(2)：294－306.

Wang S G，Jin X C，Pang Y，et al，2005. Phosphorus fractions and phosphate sorption characteristics in relation to the sediment compositions of shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River region，China[J]. Journal of Colloid and Interface Science，289(2)：339－346.

Zhao Y J，Liu B，Zhang W G，et al，2010. Effects of plant and influent C：N：P ratio on microbial diversity in pilot-scale constructed wetlands[J]. Ecological Engineering，36(4)：441－449.

Zhou W J，Wang K R，Zhang Y Z，et al，2006. Phosphorus Transfer and Distribution in a Soybean-Citrus Intercropping System[J]. Pedosphere，16(4)：435－443.

（责任编辑　张俊友）

Influence of *Vallisneria natans* Growth on Spatial-temporal Distribution of Different Forms of Phosphorus in Sediment

WANG Li-zhi, DONG Bin, SONG Hong-li, YU Wan-ni

(Shandong Provincial Key Laboratory of Water and Soil Conservation and Environmental Protection, College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi 276000, P.R.China)

Abstract: Aquatic plants can take up nutrients from the water column through submerged shoots, or from interstitial sediment water through roots. The rooted submerged macrophyte *Vallisneria natans* absorbs nutrients from both sediment and water. In this study, we monitored plant and root growth, the phosphorus content of roots, sediment and water, and changes in different forms of sediment phosphorus. The experiment was carried out in a controlled laboratory setting and the objective was to explore the effect of the root system on the spatial-temporal distribution of sediment phosphorus. The test group and control (no *V. natans*) were both run in triplicate. Sediment collected from severely eutrophic water body was placed in polyethylene containers (10 cm thick, 4 821.00 g dry weight), and 100 L water was slowly injected. A dormant bud (2 g) was planted in each of the test group containers. *V. natans* and sediment samples were collected at two month intervals to determine root growth and sediment phosphorus content and distribution. Phosphorus forms in the sediment were determined by standard methods. Results show that the roots and biomass of *V. natans* grew slowly from January to May. By May, the biomass (wet weight) of *V. natans* was 21 g in each container, and the average root length was 5 cm. From May to July, *V. natans* entered the rapid, warm season growth period and biomass and root length increased rapidly. By July, the biomass reached 80 g per container and the average root length was 9.8 cm. Nutrient uptake by *V. natans* decreased sediment total phosphorus (TP), NaOH extractable phosphorus (NaOH-P), HCl extractable phosphorus (HCl-P), inorganic phosphorus (IP) and organic phosphorus (OP); the removal rates of the different phosphorus fractions were ordered as IP>NaOH-P>HCl-P=OP. When the biomass of *V. natans* was low (0 - 500 g/m^2), the content of TP in the root zone was significantly lower than that in the area without root distribution. At higher biomasses (500 - 600 g/m^2), the vertical phosphorus distribution was more uniform because the roots were more evenly distributed through the sediment. The phosphorus content in water also decreased as *V. natans* grew, with TP decreasing from an initial concentration of 0.10 mg/L to a final concentration of 0.04 mg/L. In summary, phosphorus content in the root zone was markedly lower than outside the zone and the content of the various forms of phosphorus decreased with increased root distribution. The form of phosphorus in the root zone of *V. natans* was affected by changes in redox potential and pH.

Key words: submerged macrophyte; *Vallisneria natans*; sediment; phosphorus distribution; phosphorus speciation