Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng

Research
Watershed Ecology—Article

一种去除地表水中的磷的浮岛处理系统

Mark T. Brown [a,*], Treavor Boyer [a], R.J. Sindelar [a], Sam Arden [a], Amar Persaud [a], Sherry Brandt-Williams [b]

[a] Department of Environmental Engineering Sciences, University of Florida, Gainesville, FL 32611, USA
[b] St. Johns River Water Management District, Palatka, FL 32177, USA

ARTICLE INFO

Article history:
Received 2 February 2018
Revised 10 April 2018
Accepted 26 April 2018
Available online 14 August 2018

关键词
除磷
湖泊生态系统
浮岛处理

摘要

本研究旨在设计、建造和测试一个中试规模的浮动模块化处理系统，并用以对美国佛罗里达州中部富营养化湖泊中的总磷（TP）进行去除。该处理系统由生物和物理 - 化学处理模块组成。用多种底物和水生大型植物组合构建了 13 种不同的中宇宙实验（mesocosm），分别测试了总磷（TP）和正磷（PO_4^{3-}）的去除率及潜在的区域去除率。此外本研究对 7 种吸附介质进行了小型杯罐实验和柱实验，并对 3 种商业树脂进行了吸附能力的测试。完成这些独立的测试过程后，在佛罗里达中部的一个湖泊中，设计了一个浮岛处理系统（FITS）并运行了 8 个月。中宇宙实验对磷的平均去除率为 40%~50%，平均去除量为 5.0 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$。其中沉水植物（SAV）系统和藻类洗涤器（AGS）效果最好，分别去除了 20 $mg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 和 50 $mg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 的磷，它们对磷的平均去除量分别为 5.5 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ 和 12.0 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$。在吸附介质中，明矾渣（AR）的性能最佳，接触 5 min 后，PO_4^{3-} 浓度降低了 75% 左右。在所测试的商品树脂中，PhosX 树脂的去除效果最好，在 30 min 后去除了约 40% 的磷，60 min 后去除了约 60% 的磷。在基线运行条件下展开实验，FITS 对 PO_4^{3-} 的平均去除率为 53%；使用 PO_4^{3-} 去除率的第 50 百分位和第 90 百分位以及 FITS 的环境足迹进行评价，结果表明系统的去除率分别为 56% 和 86%；区域磷去除率在 8.9~16.5 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ 之间。

© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

1. 引言

随着人类对水质退化流域的不断改造，美国佛罗里达州乃至世界各地的湖泊生态系统正发生显著变化。越来越多的研究表明，相比其他类型的生态系统，湖泊生态系统更可能具有生态阈值[1]，如果超过生态阈值，湖泊的恢复将会异常困难，而由于替代稳定状态和不对称恢复轨迹（滞后）的存在，湖泊可能不会完全复原至原状态[2]。因此湖泊生态恢复工程必须认识到这些关键问题，并采取积极主动的办法将湖泊控制在生态系统阈值以下。

目前，佛罗里达州已经有157个湖泊受到损害（总面积约为1.42×10^5 hm^2），而116个目前未受损的湖泊（总面积约为1.59×10^5 hm^2）也正在退化，并且它们未来的状态也很难确定[3]。最大日负荷总量（TMDL）是常用的污染物评估方法，本研究采用这一方法来识别受损水域。如果某一湖泊加入了地表水改善管理计划（SWIM），那么负责该湖泊的水管理区就需要确立污染负荷减少目标（PLRG），并且为提供科学基础[4]。而为满足所需的污染物减排要求，TMDL方法中的流域管理行动计划（BMAP）列出了每个利益相关者的恢复战略。

有些湖泊从干流和所有支流流域获得地表径流，但

* Corresponding author.
E-mail address: mtb@ufl.edu (M.T. Brown)

2095-8099/© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).
英文原文: Engineering 2018, 4(5): 597–609
引用本文: Mark T. Brown, Treavor Boyer, R.J. Sindelar, Sam Arden, Amar Persaud, Sherry Brandt-Williams. A Floating Island Treatment System for the Removal of Phosphorus from Surface Waters. *Engineering*, https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.08.002

由于其区域流量低，停留时间长，养分更容易集中，恢复就更为困难。虽然可以通过彻底疏浚湖底的营养物质来恢复，但成本很高[5–7]。此外，在这些区域中几乎不存在《清洁水法》中TMDL进程所定义的外部人为导致的营养物质减少。在湖泊修复中，普遍需要将营养物质和沉积物维持在低水平，如建造大型湿地处理池需把湖泊水泵入系统，从而隔离营养物质并缓慢降低湖泊的营养水平[8,9]；明矾处理系统在湖泊修复中也很常用，磷经化学反应沉淀，从而隔离水体底部或絮凝池的营养物质。上述恢复工作都需要使用湖泊周围大量的土地，来建造人工湿地或处置沉积物。但由于湖泊周围的土地大多已经完全开发，无法直接利用土地进行湖泊恢复工作，因此浮岛技术成为一种潜在的解决办法。然而，单纯依靠植物吸收作用的简单生物处理系统需要表面积很大的湖（或其支流）。将植物组分与吸附技术结合的创新替代技术，可以克服许多城市富营养化湖泊恢复过程中的障碍，同时产生较少的副产物和环境足迹。

本研究设计了一种集生物成分（湿地斑块流）和物理-化学成分（吸附介质流化床）于一体的浮岛水处理技术，可用来去除湖水中的TP和PO_4^{3-}。我们首先对各种生长介质与水生植物的组合进行测定，从而确定了在高流量与不同的吸收介质条件下的合理组合。此外，为了最大限度地减少浮岛系统的环境足迹并提高去除率，本研究利用太阳能光伏电池（PV）板为水泵提供电力，从而保证了系统是便携式和自给式的。

总的说来，本研究有3个目标：第一个目标是证明几种养分去除工艺在中试规模上能够持续有效地减少湖水中的TP；第二个目标是评估实验室规模下的优化过程和浮岛处理系统（FITS），在最终运行过程中年度TP减少的情况；第三个目标是基于初步实验性研究，评估为满足佛罗里达州污水排放标准所需的资本和费用（用于提高工艺规模、运营和维修）。总而言之，FITS应是一个固定或可移动的浮动平台，并且不需要高地和栓系电源，也不能严重阻碍航行。此外，除了减少进水和出水之间的养分浓度外，它不应引起水化学生态的显著变化（出水中不存在进水中没有的化学物质），并且也不应造成湖泊美观性的损失。

2. 方法

本研究通过收集生物中宇宙和吸收介质的小型实验的数据（6个月），设计和运行了FITS。具体方法如下。

2.1. 生物中宇宙实验

2.1.1. 中宇宙设计

本研究将生物处理系统的中宇宙实验设置在美国盖恩斯维尔的佛罗里达大学（UF）校园内。图1为生物中宇宙实验的设计布局，其中储罐用来控制磷的输入浓度。本研究实验用水为盖恩斯维尔的公共供水，并用活性炭过滤器分离了其中的氯。

图2和图3为大型植物、生物膜、藻类洗涤器（AGS）和垂直生物滤池（VTF）4种类型中宇宙实验的结构图。

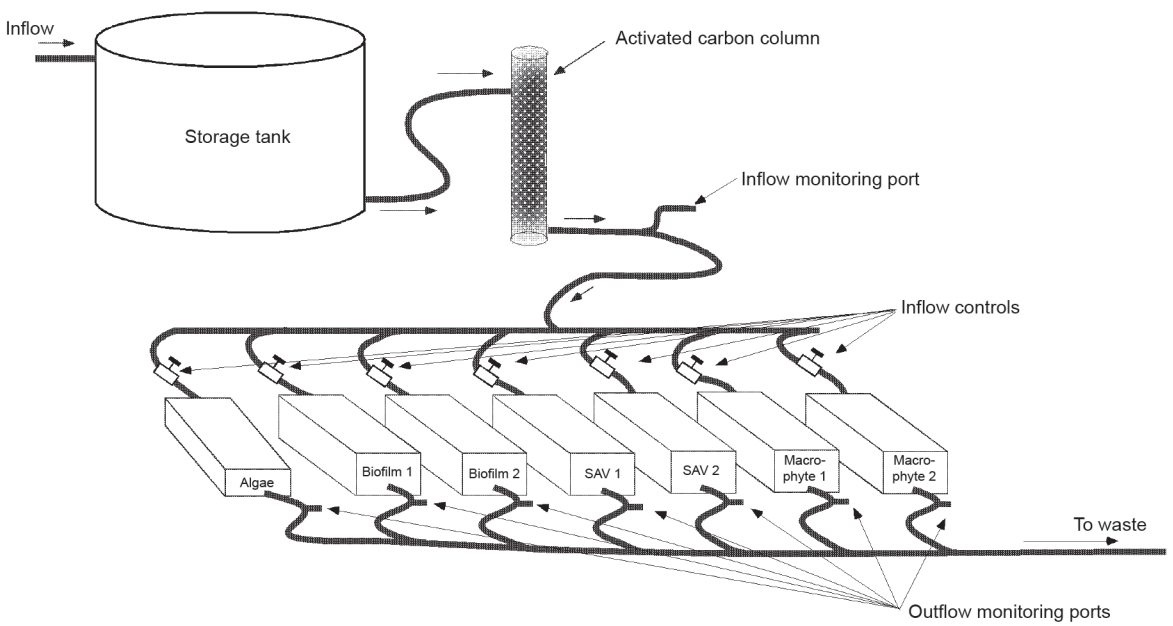

图1. 生物处理中宇宙实验设计布局（活性炭柱用于去除进水中的氯）。

中宇宙实验系统由胶合板制成，内衬为40 mil（1 mil= 0.0254 mm）聚氯乙烯（PVC）薄膜，整体占地0.75 m^3（宽0.5 m、长3.0 m、深0.5 m）。建成后，每个中宇宙实验都接种了来自UF污水处理厂和UF校园内的爱丽斯湖的湖水，从而确保多有机体接种。

进行中宇宙实验的目的是快速提供有关选择合适的大型植物和生长培养基的基本信息。由于空间和设备的限制，本研究的12个中宇宙实验分两个阶段进行，具体如下。

（1）第一阶段

EMC：以再生混凝土（RC）为基质的新兴大型水生植物中宇宙实验；

EML：以火山岩为基质的新兴大型水生植物中宇宙实验；

VET：包含水培香根草（*Chrysopogon zizanioides*）的中宇宙实验；

SAV：包含水生沉水植物金鱼藻（*Ceratophyllum demersum*）的中宇宙实验；

BFJ：含有3个PVC支架（0.5 m×0.5 m）的生物膜中宇宙实验，可容纳0.25 kg垂直于流动方向的黄麻纤维网；

BFB：含有3包椰子纤维（0.5 m×0.5 m×0.5 m）的生物膜中宇宙实验，每个重约0.5 kg，安装垂直于流动方向；

AGS：藻类洗涤器，由局部藻类饱和的浅通道构成的中宇宙实验。

（2）第二阶段

PLM：在塑料重磨基质中种植新兴大型水生植物（上述6种）的中宇宙实验；

PLV：在塑料重磨基质中种植香根草的中宇宙实验；

BIB：仅含有生物球的中宇宙实验，生物球是一种商业上可用的高表面积塑料基板，可以促进生物膜生长，从而有效处理高营养水平污染；

PLO：在塑料重磨基质中无植物存在的中宇宙实验；

VTF：包含垂直滴滤器，由一个塑料基板和一个用来为悬挂的黄麻帘（0.5 m × 0.5 m）提供水的太阳能泵组成，该中宇宙实验中含有大约0.25 kg的黄麻。

2.1.2. 中宇宙实验操作

中宇宙实验在白天和夜间间歇循环运行。每天晚上，供应池（图1）进水达到饱和状态，通过加入磷酸二氢钾（KH_2PO_4）提高了进水中的PO_4^{3-}浓度，从而使其达到佛罗里达中部湖泊的预期水平（磷浓度为220 μg·L^{-1}）。此外，为保证体系不受氮的限制，本研究加入硝酸钠（$NaNO_3$），将硝酸盐（NO_3^-）浓度增加到800 μg· L^{-1}。由于进水中的磷浓度保持恒定，所以磷的质量负荷主要由水力负荷速率（HLR）控制，本研究通过控制HRL的范围（2.5~60 cm·d^{-1}），改变了中宇宙实

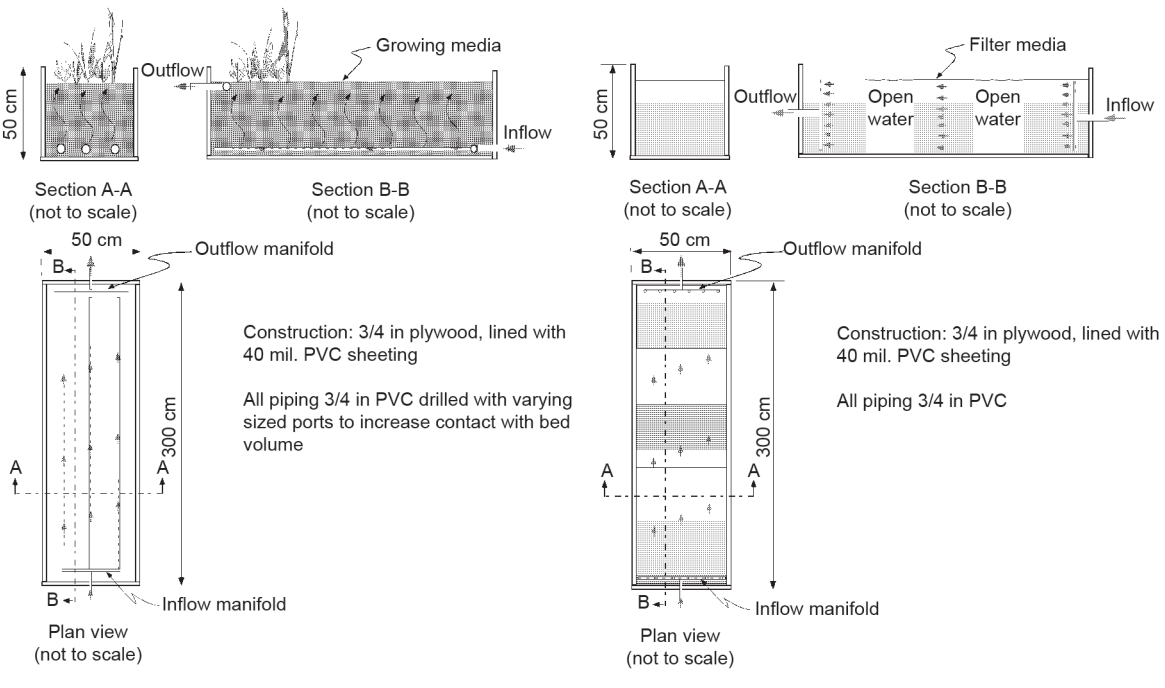

图2. 中宇宙实验结构图。（a）大型植物中宇宙实验（EMC、EML、VEG、PLM、PLV、BIB、PLO）；（b）生物膜中宇宙实验（BFJ和BFB）。1 in=2.54 cm。

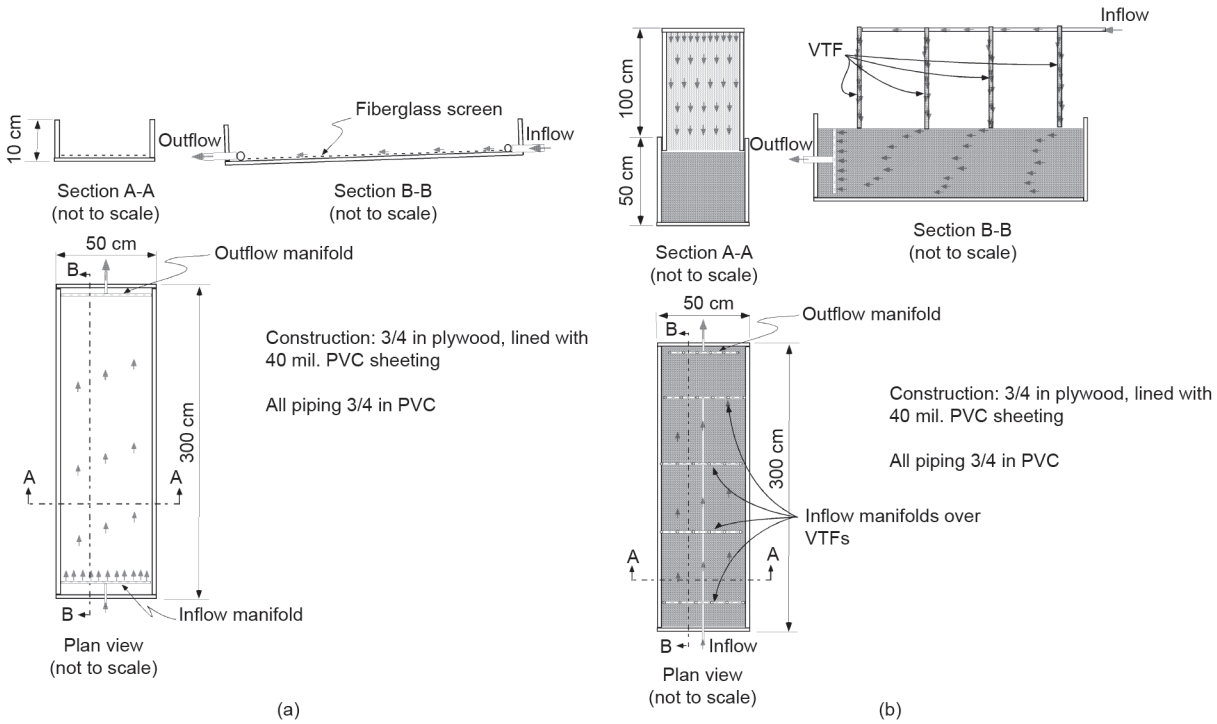

图3. 中宇宙实验结构图。（a）AGS；（b）VTF。

验中磷的质量负荷，同时分别测试了植被和生长介质的磷去除效果。

中宇宙实验的目的是快速提供有关选择合适的植物和生长培养基的基本信息。考虑到浮岛的美学问题，本研究中含有新生大型植物的中宇宙实验由能够去除磷的大型开花植物[柔瓣美人蕉（*Canna flaccida*）、泽泻慈姑（*Saggitaria lancifolia*）、梭鱼草（*Pontederia cordata*）、紫茎泽兰（*Peltandra virginica*）、金棒花（*Orontium aquaticum*）、水鬼蕉属（*Hymenocallis* spp.）共10种植物]均匀分布构成。此外，本研究也致力于寻找一种具有足以容纳60 cm·d^{-1}（较高HLR）的孔隙空间的生长介质。

本研究在2009年4月24日至7月15日期间进行第一组中宇宙实验，2009年7月20日至12月15日期间运行第二组。不过，在两组实验的运行期间内，依据其性能，我们可能会停止个别实验或使其运行时间增加。如第一组中宇宙实验中各组的操作时间不尽相同：混凝土粉尘使得pH值较高，因此含再生混凝土基质的中宇宙实验4周后就停止运行；BFJ的磷去除率最高，但是由于黄麻降解耗氧，使得出水中溶解氧（DO）低于湖泊实际应用中可接受的水平；由于BFB的DO值较低，8周后停止运行；初夏时期，SAV中的植被因高温而死亡，因此6周后停止运行。

本研究基于第一组测试结果构建了第二组中宇宙实验，并从一家塑料制造商那里获得了一种因回用质量差而即将进行填埋的塑料重磨材料[†]。其重磨切屑尺寸约为0.5 cm，且水力特性良好，介质通过横截面的流动可以满足最高60 cm·d^{-1}的要求。此外，我们还测试了具有高比表面积、可以促进生物膜生长（Bioballs，BIB）和具有过滤作用（VTF）的商业塑料基质，其中VTF是一个垂直挂着黄麻条的滴滤式生物滤池，水在上面流出，从而解决了第一组中宇宙实验中BFJ的缺氧问题。

在为期148 d的第二组中宇宙实验中，本研究大约每30 d改变一次HLR（由30 cm·d^{-1}增加到45 cm·d^{-1}，然后增加到70 cm·d^{-1}，接着下降到45 cm·d^{-1}，最后降至20 cm·d^{-1}）。其中，VTF中宇宙实验利用太阳能泵将水泵送到黄麻上，从而使之维持在55 cm·d^{-1}条件下运行。

2.1.3. 中宇宙实验取样步骤

本研究在每个系统的出流处设置了一个滴灌取样孔。在前两个月的实验中，每隔一天收集一次水样，此后每4 d收集一次水样（将棕色不透明纳金样品瓶用水样清洗3次，然后将其放在滴管上，每12 h采集500 mL的样品），收集后制成日常样品并在4 ℃冷藏（以

[†] 重磨材料是经过研磨或切碎的闪光灯、流道、喷漆和塑料制造中未受污染的零件，这些零件是由模型机在最初的成型过程中生产的。这些材料被粉碎成更小的尺寸，再用原始材料回收。重磨适用于后工业（消费前）废料。

便根据EPA的365.1方法[10]在样品采集3 d内进行PO_4^{3-}分析）。

此外，每天早晨用秒表和1000 mL刻度塑料圆筒测量流速，并通过调节保持流速恒定，同时需每天测量各组实验中DO、温度和pH值。

2.2. 小型杯罐实验和柱实验

2.2.1. 材料

本研究对吸附剂和离子交换树脂两类材料进行了评价。如表1所述，所评估的吸附剂包括废料副产品和天然材料。将吸附剂、处理饮用水的明矾渣（AR）、铁渣（IS）和钢渣（SS）研磨粉碎后，用美国标准筛30和40进行筛分，得到的粒度范围为420~595 μm。而处理饮用水的铁渣（FR）、再生混凝土（RC）和石灰石（LS）在实验室条件下干燥后粉碎。此外，F级粉煤灰（FA）的接收形式为粉状，此状态下即可使用。本研究采用的离子交换树脂如表2所示。

2.2.2. 实验水

由于杯罐和柱实验的用水量相对较小，本研究直接使用了从佛罗里达中部的桑福德大道运河（杰瑟普湖的支流，靠近佛罗里达州的桑福德）和爱丽丝湖（位于盖恩斯维尔佛罗里达大学校园内）两地收集的水，其2009年1月至8月的水质情况如表3所示。

2.2.3. 杯罐实验

本研究通过杯罐实验检测了吸附剂和离子交换树脂对水中TP和PO_4^{3-}的去除效果。吸附剂按重量法定量（0.5~8 $g \cdot L^{-1}$），而离子交换树脂按体积计量（0.5~4 $mL \cdot L^{-1}$）。本研究所用的实验仪器有：一台装有

表1 杯罐实验和柱实验所用的吸附剂

Adsorbent	Source	Description
Drinking water treatment AR	Peace River Manasota Regional Water Supply Authority, Arcadia, FL	Surface water treatment plant that uses aluminum sulfate to treat water from the Peace River
Drinking water treatment FR	David L. Tippin Water Treatment Facility, Tampa, FL	Surface water treatment plant that uses ferric sulfate to treat water from the Hillsborough River
Granulated blast furnace IS	Civil & Marine Inc., Cape Canaveral, FL	Non-metallic byproduct from iron production
Basic oxygen furnace SS	Levy Enterprises, Valparaiso, IN	Byproduct of manufacturing steel from pig iron
FA	Boral Materials Technologies, Tampa, FL	Combustion byproduct of coal
RC	Florida Concrete Recycling Inc, Gainesville, FL	Concrete aggregate collected from demolition sites
LS	Florida Rock Industries Inc., Gainesville, FL	Natural rock mined from various locations

表2 杯罐实验和柱实验所用的离子交换树脂

Ion-exchange resin	Manufacturer	Structure
PhosX	SolmeteX	Macroporous polymer resin impregnated with iron oxide particles
MIEX	Orica Watercare	Macroporous, polyacrylic anion-exchange resin with strong-base, type II functional groups
Dowex22	Dow Chemical	Macroporous, polystyrene anion-exchange resin with strong-base, type II functional groups

表3 杯罐实验和柱实验中所用的实验水的水质

Location	Sample	Month of 2009	pH	Turbidity (NTU)	PO_4^{3-} ($g \cdot L^{-1}$ of P)	TP ($g \cdot L^{-1}$)	Chloride ($mg \cdot L^{-1}$)	Sulfate ($mg \cdot L^{-1}$)	TOC ($mg \cdot L^{-1}$)	UV_{254} (cm^{-1})
Sanford Avenue Canal	Raw	April	7.6	4	222	329	185	33	14	0.641
	Filtered[a]	April	7.7	—	215	250	185	33	15	0.593
	Raw	June	6.9	—	107	195	55	6	34	1.63
	Filtered[a]	June	7.6	—	107	143	55	6	31	1.64
Lake Alice	Raw	July	7.7	—	421	482	14	19	7.2	0.228
	Filtered[a]	July	7.7	—	387	423	14	18	7.1	0.219
	Raw	August	7.6	—	507	529	16	21	8.3	0.225
	Filtered[a]	August	7.5	—	272	327	—	—	8.1	0.228

NTU: nephelometric turbidity unit; TOC: total organic carbon; UV_{254}: ultraviolet absorbance at 254 nm.

[a] Whatman GF/A filter.

2 L或500 mL瓶的Phipps、Bird PB-750杯罐测试仪。基础实验方案为：实验水加入吸附剂或离子交换树脂，在100 r·min^{-1}条件下快速混合60 min，然后沉淀30 min。

因为相比AR、FA和离子交换树脂，FR、IS、SS、RC和LS更为致密，所以它们在200 r·min^{-1}条件下能快速混合。本研究分别在混合后5 min、30 min、60 min和沉淀30 min时取样，并对其进行TP、PO_4^{3-}、pH值、浊度、254 nm处（UV_{254}）的紫外吸收度（UV）、总有机碳（TOC）和总氮（TN）的分析，其中UV_{254}和TOC是常用来测定有机物的指标。

2.2.4. 柱实验

本研究的柱实验使用的聚乙烯纤维柱内径为0.7854 cm，高度为2 cm，两端孔径为25 μm，并在柱内填充了1 mL的湿吸附树脂或离子交换树脂，那么，根据定义，1柱床体积（BV）等于1 mL。此外，柱子是连接的，允许向上流动。流速被设计为2 mL·min^{-1}或2 BV·min^{-1}。在柱实验开始前，将120 BV的去离子（DI）水泵入到塔内，从而对系统进行冲洗。此后，将待处理的水通过沃特曼GF/A过滤器（1.6 μm孔径）进行过滤，从而防止柱堵塞。本研究在连续流动和间歇流动（12 h开/12 h关闭）两种情况下进行了测试，前者每3 h抽取1 h的样品，后者在白天流动12 h或夜间关闭12 h后取样。本研究将PO_4^{3-}的预突破浓度设为去除50%时的浓度，此后再多取一个样品以确定实验结束。水样参数分析同杯罐实验。

2.3. 浮岛处理系统

2.3.1. 材料

图4是FITS的平面图：主体为Hobie Cat®拖带和骨架。此外，在两个拖带之间放置的由聚苯乙烯泡沫塑料组成的浮动结构可以提供额外的浮力，从而可以支撑处理系统的重量[在装满水时为1100~1200 lb（1 lb=0.4536 kg）]。

生物处理组分在系统处理过程中占主导，其次才是物理-化学组分（P-C处理柱）。其中，生物处理分为两个阶段：首先是水在6个VTF顶部流入，从其底部收集，接下来被引入到4个平行的湿地线性处理单元（WLTC）。WLTC由直径为12 in的PVC管纵向切割而成，两端密封，并在其中种植了80株草本湿地植物和80株香根草植物，其总体积为450 L，面积为3.7 m^2。本研究通过中宇宙实验，筛选出了生存能力最好的物种：柔瓣美人蕉、泽泻慈姑和梭鱼草。此外，P-C处理柱由两个体积为12 L的上流式流化床组成，处理柱中含有AR树脂或PhosX树脂（前期实验结果表明这两种材料去除TP效果最好），在0.5~5 min的接触时间后流化床开始运行。

本研究中水从船艏（面向南方的前端）流入，在Hobie Cat®的末端（后面）流出。4台12 V的太阳能舱底泵组成了抽水系统，其中，两台泵入入流，两台泵出经过P-C处理柱处理的水。泵的尺寸和功率要求如下：Attwood-Tsunami T800舱底泵在2.5 A时的额定值为800 gal·min^{-1}（1 gal·min^{-1}=3.785 L·min^{-1}）。虽然在实验中这些泵没有始终按额定值使用，但制造商认为它们在FITS条件下可以运行几个月，因此最终的成本（每台不到20 USD）可以接受。

入流首先经过VTF，之后通过重力作用到达水平湿地，然后通过P-C处理柱后被泵送到储水池。经过3个月的运行，在2009年12月本研究对最初的FITS配置进行

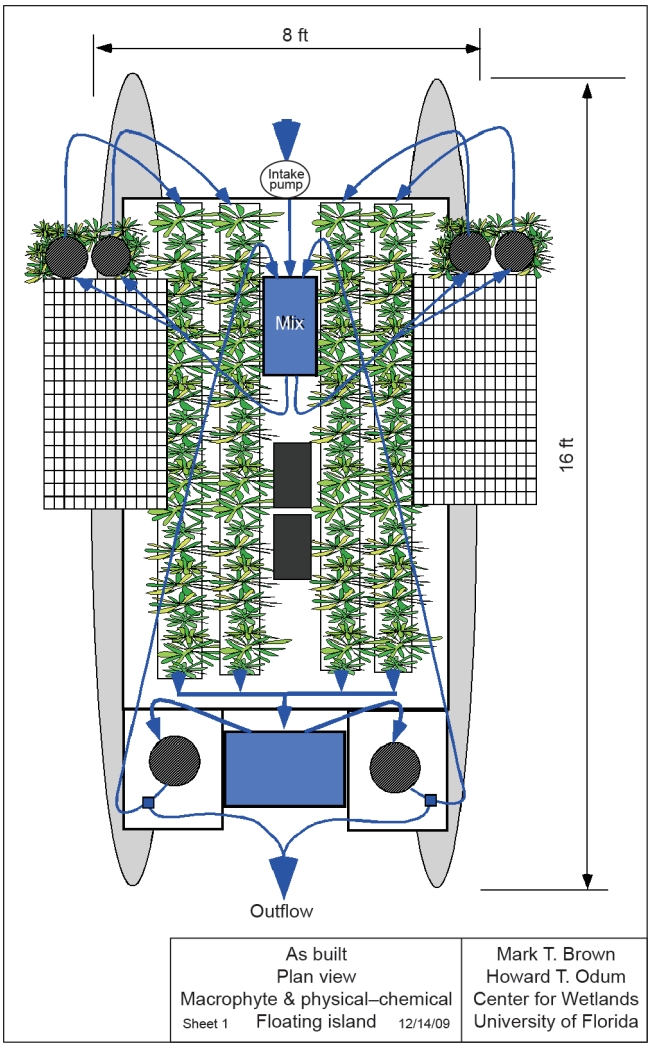

图4. FITS的平面图。其中蓝色箭头表示水流动的方向。1 ft=0.3048 m。

了重新设计——增加了第二个储水池，以便将处理过的水与流入的湖水混合，从而可以测试更大范围的入流浓度。所以经过重新设计，本研究的实验装置由以下工艺单元组成：混合室、VTFS、水平湿地和P-C处理柱。其中混合室用于将爱丽斯湖湖水与经过P-C处理塔处理的水混合，并将这种含磷浓度低的混合水作为生物处理的进水。

本研究的电力系统由两个100 W（18 V）太阳能电池板和两个深循环模式的12 V船用蓄电池组成，其中蓄电池具有开关，可根据时间和水位，利用继电器开启和关闭水泵。计算表明，即使多云天气持续两天，电力配置也足以维持系统的运行。

2.3.2. FITS 的运行

2009年9月18日，星期五，FITS开始在佛罗里达大学校园的爱丽丝湖中运行。在第一次运行期间，将其流量设置为1 gal·min^{-1}，因此含有PhosX树脂或AR回收残渣的P-C处理柱的流量为0.5 gal·min^{-1}。

2009年12月，本研究对FITS的配置进行了优化设计，并在2010年3月24日启动了第二次运行。第一次运行的目标是检验设想，而第二次运行的目标则是降低磷输入浓度（使之更接近佛罗里达中部湖泊），并且更加详细地评估操作条件。表4列出了两次运行期间FITS的操作条件。

在运行过程中，除运行2~4 h流量增加到1.5 gal·min^{-1}外，VTF和WLTC均保持在恒定的流量条件下运行（1 gal·min^{-1}），此外，P-C处理柱1在运行过程中也保持在恒定的流动条件下运行，而P-C处理柱2则在不同的条件下运行，如表4所示。

在这两次运行过程中，完成了几个子目标：运行1-2、1-3和1-6的目的是比较PhosX树脂和AR。运行1-4、1-5、1-7和1-8的目的是评价再生PhosX树脂的性能。第一次实验结果表明，相较于AR，PhosX树脂性能较好。而在第二组实验中，运行2-1的目的是验证两个处理柱的运行情况是否相同，这对判断处理单元是否容易复制至关重要；运行2-2的目的是评价PhosX树脂用量加倍（相当于基线流量下接触时间的加倍）的效果；运行2-3的目的是对再生4次的PhosX树脂（在第一次实验期间进行了3次测试和再生）进行评价；运行2-4的目的是评价PhosX树脂的体积加倍和流量加倍的效果；运行2-5的目的是评价将PhosX树脂的体积增加3倍（相当于基线流速下接触时间的3倍）的效果。此外，在运行期间，每周更改一次实验柱，并以此来优化实验。

必须指出，整个运行过程的操作条件与P-C处理柱1的操作条件相同，因此，将这些操作条件作为基线操作，从而优化流程。

2.3.3. 样品收集

从FITS中收集了下列样品：作为FITS进水的未经处理的爱丽丝湖水（LA Infl.）；作为大多数研究的进水

表4 FITS运行期间的操作条件

Test	Dates	Infl.	VTFs		Horizontal wetlands		Column 1			Column 2		
			Operational	Q (gal·min^{-1})	Operational	Q (gal·min^{-1})	Material	V (mL)	Q (gal·min^{-1})	Material	V (mL)	Q (gal·min^{-1})
1-1	22 Sep 2009–1 Oct 2009	LA	No	—	Yes	1	PhosX	950	0.5	—	—	—
1-2	2 Oct 2009–8 Oct 2009	LA	No	—	Yes	1	PhosX	950	0.5	AR	950	0.5
1-3	10 Oct 2009–19 Oct 2009	LA	No	—	Yes	1	PhosX	950	0.5	AR	950	0.5
1-4	3 Nov 2009–13 Nov 2009	M	No	—	Yes	1	PhosX	950	0.5	R1PX	950	0.5
1-5	18 Nov 2009–30 Nov 2009	M	No	—	Yes	1	PhosX	950	0.5	R1PX	950	0.5
1-6	1 Dec 2009–12 Dec 2009	M	No	—	Yes	1	PhosX	950	0.5	AR	950	0.5
1-7	15 Dec 2009–21 Dec 2009	M	No	—	Yes	1	PhosX	950	0.5	R2PX	950	0.5
1-8	13 Jan 2010–20 Jan 2010	M	Yes	1	Yes	1	PhosX	950	0.5	R3PX	950	0.5
2-1	24 Mar 2010–10 Apr 2010	M	Yes	1	Yes	1	PhosX	950	0.5	PX	950	0.5
2-2	14 Apr 2010–6 May 2010	M	Yes	1	Yes	1	PhosX	950	0.5	2VPX	1900	0.5
2-3	11 May 2010–28 May 2010	M	Yes	1	Yes	1	PhosX	950	0.5	R4PX	950	0.5
2-4	2 Jun 2010–23 Jun 2010	M	Yes	1.5	Yes	1.5	PhosX	950	0.5	2V2QPX	1900	1
2-5	25 Jun 2010–30 Jul 2010	M	Yes	1	Yes	1	PhosX	950	0.5	3VPX	2850	0.5

Infl.: Influent to FITS; LA: Lake Alice; M: mixture of Lake Alice and treated effluent from FITS; *Q*: flow rate; *V*: volume of material in treatment column; R1PX: 1st regenerated PhosX; R2PX: 2nd regenerated PhosX; R3PX: 3rd regenerated PhosX; 2VPX: doubled volume of PhosX; R4PX: 4th regenerated PhosX; 2V2QPX: twice the volume and twice the flow rate using PhosX; 3VPX: three times the volume of PhosX.

的混合水（M. infl.）；VTF的出水（Vert. effl.）；水平湿地的出水（Bio. effl.）；处理柱1的出水（PX effl.）；处理柱2的出水（RPX effl. 或OPX effl.）。最初（约2周）以抓取样品的形式收集样品，之后在中宇宙实验中采用“滴水”法收集样品。

水样大约每隔一天收集一次，收集好的样品在4 ℃冷藏，以便根据EPA方法365.1，在采集样品后3 d内进行PO_4^{3-}分析[10]。

通过对样品进行PO_4^{3-}和TP的分析，本研究得到FITS中不同入流和出流取样位置的TP和PO_4^{3-}的日数据点，此外，也对水样进行pH值、TN和TOC分析。

为了监测P-C处理系统可能造成的水质变化，本研究在UF湿地中心实验室监测分析了每日在FITS出水处收集的样品中的pH值、UV_{254}、TOC、氯化物和硫酸盐。此外，为对室内分析方法进行复核，本研究将随机样品（约占总样品的10%）送到经认证的实验室（UF/IFAS分析服务实验室）进行分析。

2.4. 分析方法

表5总结了本研究中所使用的化学测量和分析方法[9–14]。校准标准由制造商提供或将美国化学会（ACS）级化学品溶解在DI水中，其中需要过滤的样品用0.45 μm膜过滤器进行真空过滤。

3. 结果和讨论

3.1. 生物中宇宙实验

表6总结了中宇宙实验中磷的HLR、质量负荷和去除率。总体而言，第一次中宇宙实验运行了10周，其平均去除率在18%~45%之间，年（生长期240 d）质量去

表5 化学测量和分析方法

Chemical measured	Analytical method	Filtered
TP and PO_4^{3-}	Samples for TP and PO_4^{3-} were sent to the UF/IFAS Analytical Services Laboratory in 20 mL scintillation vials, and were analyzed following US EPA Method 365.1 [10]. Samples for TP analysis were acidified in the laboratory to pH < 2 with sulfuric acid for preservation, after which autoclave digestion using ammonium persulfate and sulfuric acid was performed at the UF/IFAS Analytical Services Laboratory	TP (No) PO_4^{3-} (Yes)
PO_4^{3-}	PO_4^{3-} was measured using a Hach DR-850 colorimeter using an ascorbic acid method equivalent to US EPA Method 365.2 [11], and was checked periodically for its accuracy by measuring 50, 100, and 200 $g \cdot L^{-1}$ standard solutions of P	No
PO_4^{3-}	Mesocosm PO_4^{3-} was measured using a Lamontt SMART 2 colorimeter. The colorimeter was calibrated four times from April 2009 to December 2009. No appreciable drift (>10%) was noted in any calibration. Phosphorus analysis was done using the SMART 2, phosphorus, low-range, ascorbic acid reduction method (Lamontt Code #:3653-SC)	No
pH	pH was measured using an Accumet AP71 pH meter with an Ag/AgCl reference probe. The pH meter was calibrated before each use with pH 4, 7, and 10 buffer solutions. Mesocosm pH was measured using a HANNA pH meter, calibrated weekly with pH solutions obtained for Fischer Scientific	No
Turbidity	Turbidity was measured using a LaMotte 2020e portable turbidity meter. The instrument was calibrated before each use using the 1.0 NTU turbidity standard	No
TOC and TN	TOC and TN were measured using a Shimadzu TOC-V_{CPH} total organic carbon analyzer, as described in Ref. [9]. The instrument uses a high-temperature combustion method to measure non-purgeable organic carbon (i.e., TOC) and chemiluminescence to measure TN, similar to that described in Standard Method 5310B High-Temperature Combustion [12]. Calibration points were prepared the day of analysis from standard TOC and TN solutions. All samples were measured in duplicate with average values reported. The acceptance criterion for duplicate samples was a relative difference of < 20%	No
UV_{254}	UV_{254} was measured on a Hitachi U-2900 spectrophotometer using a 1 cm quartz cell	Yes
Chloride, nitrate, and sulfate	Chloride, nitrate, and sulfate were measured on a Dionex ICS-3000 ion chromatograph equipped with an AG22 guard column and an AS22 analytical column, as described in Ref. [13] and following US EPA Method 300.0 [14]. All samples were measured in duplicate with average values reported. The acceptance criterion for duplicate samples was a relative difference of < 20%	Yes
DO	Mesocosm DO and temperature were measured using an Oakton 110 DO meter, calibrated weekly using a zero-dissolved-oxygen solution obtained from Oakton. The temperature sensor was also calibrated weekly using a mercury glass thermometer from Fischer Scientific	

除量在2.2~12.0 g·m^{-2}之间。其中，BFJ对磷的平均去除率为71.6%，年去除量为12.6 g·m^{-2}。但随着黄麻的降解，出水中的DO逐渐降至零，所以大约6周后就停止了运行。椰子纤维生物滤池的去除率为44%（7.4 g·m^{-2}·a^{-1}），同样也出现DO下降的情况，所以8周后停止运行。

第二次中宇宙实验的HLR高于第一次，但由于实验后期（11月和12月）植被老化以及低温的影响，其去除效率（平均在5.5%~19.2%之间）和年化磷质量去除量（平均在1.4~6.9 g·m^{-2}之间）较低。

3.2. 小型杯罐实验和柱实验

3.2.1. 杯罐实验

图5（a）为原水经过60 min标准化之后的PO_4^{3-}、TP、UV_{254}和TOC浓度。由于FA在经过处理的水中添加了PO_4^{3-}，所以不包括在图3至图6中。如图所示，所有材料都能在一定程度上去除PO_4^{3-}；但可能由于吸附剂在杯罐实验中磨损，导致经FR和AR处理后的水中TP浓度相较于原水有了明显的提高；同时，所有处理过的水的浊度都大于原水；此外，经FR处理后的水中UV_{254}和TOC的浓度有所提高；经IS、LS、SS和RC处理过的水中UV_{254} 和TOC略有变化，但只有经AR处理的水中UV_{254}和 TOC去除的结果可测量。

图5（b）为离子交换树脂的实验结果。如图所示，所有离子交换树脂对PO_4^{3-}、TP、UV_{254}和TOC均有不同程度的去除效果。其中PhosX和Dowex 22的去除顺序为PO_4 > TP > UV_{254}和TOC，而且相较Dowex 22，PhosX的去除效果更好；而MIEX的去除顺序为UV_{254}>TOC > PO_4^{3-}> TP。

表6 中宇宙实验中的HLR、磷质量负荷和磷去除率

Mesocosm	Dates of operation	Mean HLR (σ) (cm·d^{-1})	Mean P loading (mg·m^{-2}·d^{-1})	Mean P removed (mg·m^{-2}·d^{-1})	Efficiency (P_{remove}/P_{load})
First Set (24 Apr 2009–15 July 2009 Jul)					
EMC	Apr 24–May 15	54.5 (± 38.8)	34.42 (± 37.1)	24.43 (± 34.1)	—
VEG	Jun 13–Aug 1	18.3 (± 5.3)	41.7 (± 12.3)	9.05 (± 6.7)	18.2% (± 8.5%)
EML	Apr 24–Aug 1	35.3 (± 28.0)	51.07 (± 24.6)	16.2 (± 19.4)	37.1% (± 25.0%)
VET	May 3–Aug 1	17.2 (± 3.4)	39.0 (± 8.7)	15.2 (± 8.1)	38.3% (± 20.5%)
SAV	May 13–Jun 28	22.0 (± 4.9)	49.6 (± 13.2)	23.1 (± 11.9)	44.4% (± 19.1%)
BFJ	Apr 24–Jun 2	45.1 (± 12.7)	67.3 (± 51.1)	52.4 (± 42.5)	71.6% (± 29.1%)
BFB	Apr 24–Jun 28	47.2 (± 27.0)	69.3 (± 35.1)	30.1 (± 25.38)	44.0% (± 26.9%)
AGS	Apr 24–Dec 15	60.9 (± 29.3)	116.06 (± 44.0)	49.8 (± 25.0)	45.4% (± 20.0%)
Second Set (20 Jul 2009–15 Dec 2009)					
PLM	July 20–Dec 15	40.8 (± 18.5)	92.9 (± 49.47)	13.5 (± 15.7)	16.9% (± 17.0%)
PLV	July 20–Dec 15	41.1 (± 17.8)	92.7 (± 43.0)	11.7 (± 9.3)	13.5% (± 9.1%)
BIB	July 20–Dec 15	40.8 (± 21.2)	91.5 (± 53.5)	7.1 (± 8.2)	9.5% (± 8.9%)
PLO	July 20–Dec 15	42.89 (± 21.1)	96.4 (± 53.3)	5.7 (± 13.2)	5.5% (± 10.1%)
VTF	July 20–Dec 15	55.8 (± 19.4)	127.7 (± 55.1)	28.6 (± 34.0)	19.2% (±17.1%)

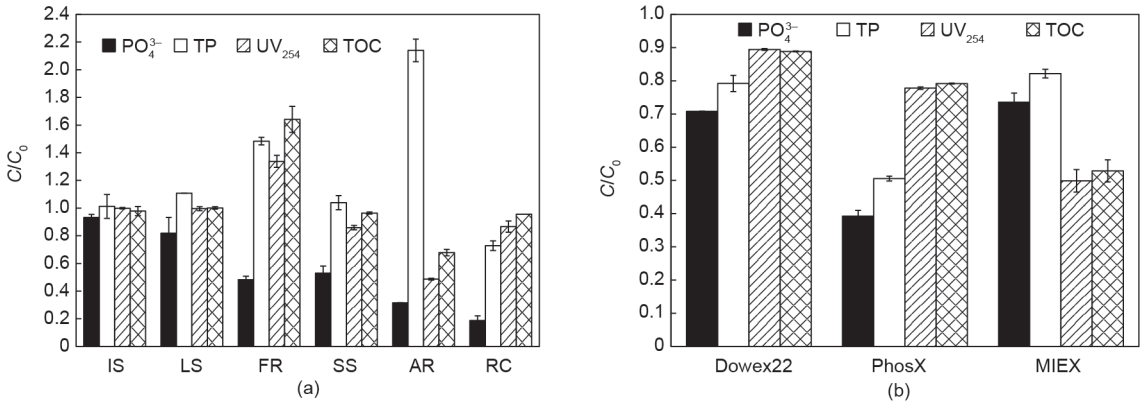

图 5. 桑福德大道运河水经60 min杯罐实验后的标准化浓度（C）。（a）吸附剂；（b）离子交换树脂。初始浓度（即C_0）见表3。

3.2.2. 柱实验

图6为使用桑福德大道运河水进行柱实验（材料：AR和PhosX）的结果。在大多数柱实验中，经AR处理的水的PO_4^{3-}浓度从107 μg·L^{-1}降至35~50 μg·L^{-1}，TP浓度从153 μg·L^{-1}降至80~90 μg·L^{-1}。而PhosX的处理结果与AR相似。但随着时间的推移，这两种材料的去除率都呈下降趋势。图7为使用爱丽斯湖水进行柱实验（材料：AR和PhosX）的结果。爱丽斯湖水中TP和PO_4^{3-}的浓度约为桑福德大道运河水的3倍。AR和PhosX对PO_4^{3-}和TP的处理效果相似，即随着时间的推移和进水浓度的增加，去除效果明显提高。

如图8所示，脉动进水可以增大系统的潜在去除能力。不同操作条件下（分别为连续流动和间歇流动——12 h开启/12 h关闭）用PhosX进行对爱丽斯湖水柱实验的TP的结果表明，PhosX材料在间歇流动模式下（即12 h开启/12 h关闭）的去除能力高于连续流动模式。此外，由于实验用水是两批水，所以该图采用了标准化出水浓度（即处理后的水除以原水）。

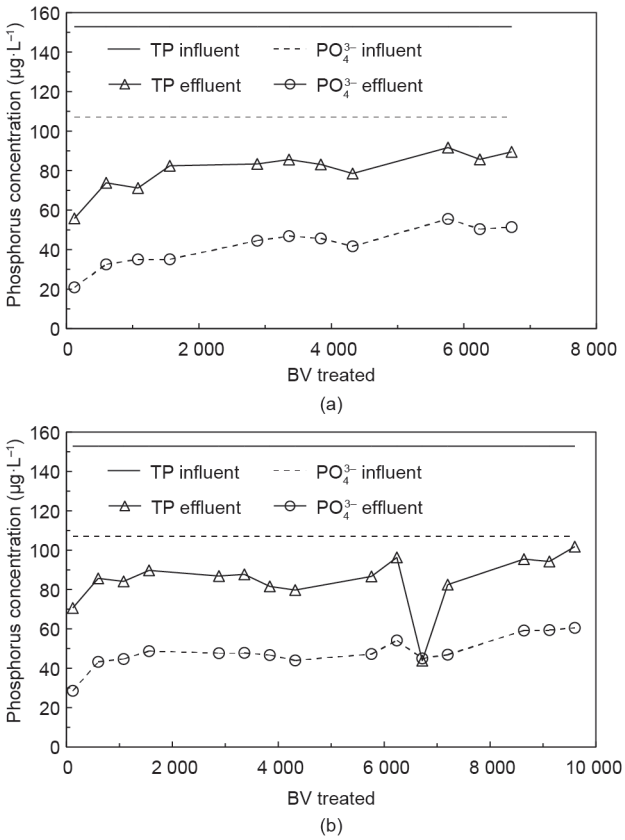

图6. 使用桑福道运河水（2009年6月收集）进行柱实验的结果，材料：（a）AR；（b）PhosX。实验条件：1 BV=1 mL湿沉降材料；连续流动；流速=2 BV·min^{-1}；进水通过Whatman GF/A过滤器过滤；进水TP（实线）= 153 μg·L^{-1}；进水PO_4^{3-}（虚线）= 107 μg·L^{-1}。

3.3. FITS 的运行

在佛罗里达大学校园的爱丽丝湖，FITS分两次运行了8个月，其中，第一次运行（2009年9月22日至2010年1月22日）目的为检验设想；而第二次运行（2010年3月24日至2010年7月30日）旨在评估FITS的操作条件（主要涉及P-C处理柱）。在2010年1月22日至2010年3月

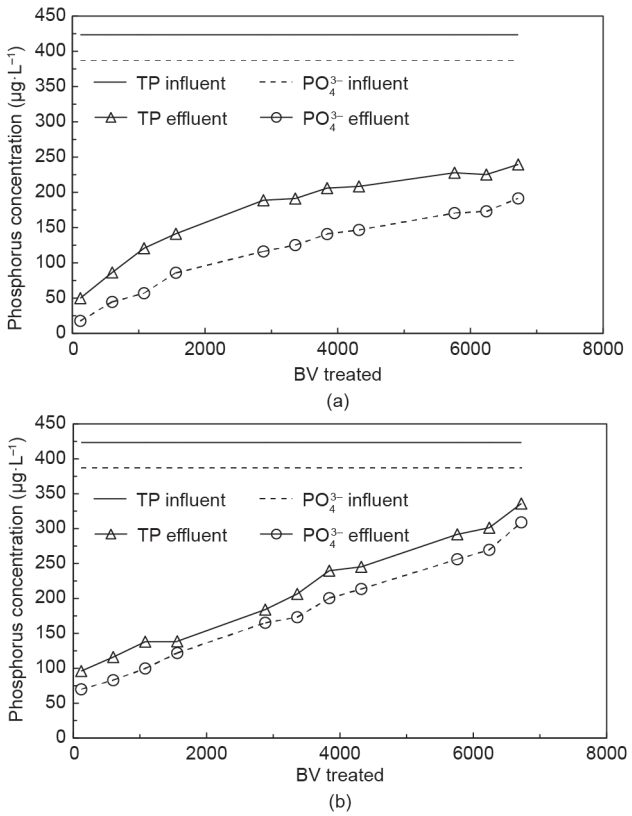

图7. 使用爱丽斯湖水（2009年7月收集）进行柱实验的结果。材料：（a）AR；（b）PhosX。实验条件：1 BV=1 mL湿沉降材料；连续流动；流速2 BV·min^{-1}；进水经Whatman GF/A滤池过滤；进水TP（固体线）=423 μg·L^{-1}；进水PO_4^{3-}（虚线）=387 μg·L^{-1}。

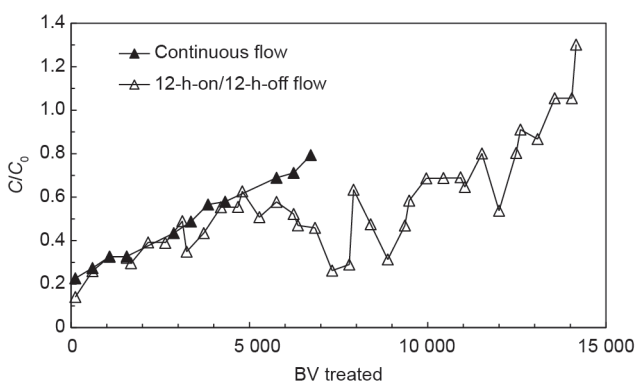

图 8. 使用爱丽斯湖水进行柱实验（材料为PhosX树脂）的TP标准化（C/C_0）结果，（其中2009年7月为连续流动收集，2009年8月为12 h开启/12 h关闭）。实验条件：连续流动，12 h开启/12 h关闭；1 BV=1 mL湿沉降材料；流速2 BV·min^{-1}；进水经Whatman GF/A过滤器过滤。

24日期间运行中断。图9总结了FITS的性能，结果表明，持续去除率约为60%。由于本操作的目的是测试PhosX树脂和AR的使用寿命，所以当吸附剂接近耗尽时，FITS去除率呈现循环模式。本研究认为树脂在其处理能力几乎完全耗尽后才会被改变，这在运行的后半部分尤为明显（图9）。

3.3.1. FITS 的处理效率

图10和图11分别为FITS中生物处理和P-C处理工艺的TP去除率。去除效果如图，其中*y*轴为出水浓度，*x*轴为进水浓度。例如，“Bio. effl. vs LA infl”[图10（a）]为经生物处理的出水中TP的浓度与爱丽斯湖水中TP浓度的关系，后者是第一次实验的进水。图10（b）显示了生物处理对混合进水的处理效率。很明显，当进水浓度较低时，处理效率较低。此外，线性回归曲线表明，在进水中TP浓度较高[图10（a）]情况下处理效率为42%；而在浓度较低时，处理效率约为15%。

图11为Posi-PoSox树脂柱对TP的去除率（表4中的Column 1）。顶部图形[图11（a）] 将树脂柱的流出物与爱丽斯湖水进行比较，反映的是FITS整体的处理效率，因此它包括生物和树脂柱处理两部分。图11（b）中是FITS的处理混合进水的效率（同样包括生物和P-C组分），图11（c）为树脂柱对生物处理出水的处理效率。显然，特别是与单独的生物组分相比，树脂柱提高了FITS的处理能力。

图12和图13分别为FITS中生物和P-C处理工艺对PO_4^{3-}的去除率。其中生物组分对PO_4^{3-}的处理效率略低于TP，而在树脂柱对PO_4^{3-}的处理效率较高。此外，通过对比对爱丽斯湖原水的处理结果，本研究发现当混合进水中的PO_4^{3-}浓度较低时处理效率略低。

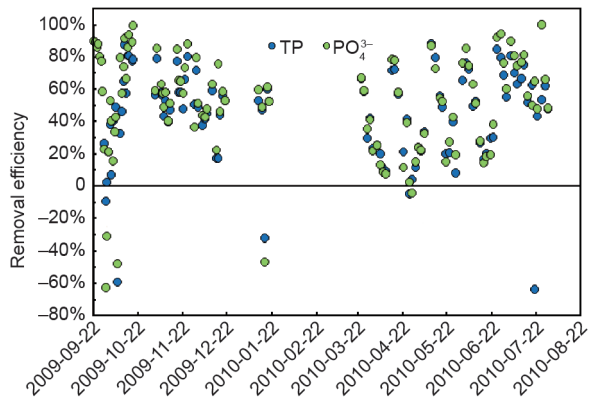

图 9. 使用PhosX树脂的且在基线条件下运行的FITS的TP和PO_4^{3-}去除率（见表2和表3）。

表7总结了FITS运行8个月的处理情况，给出了生物组分和树脂柱作为独立单元去除TP和PO_4^{3-}平均值。生

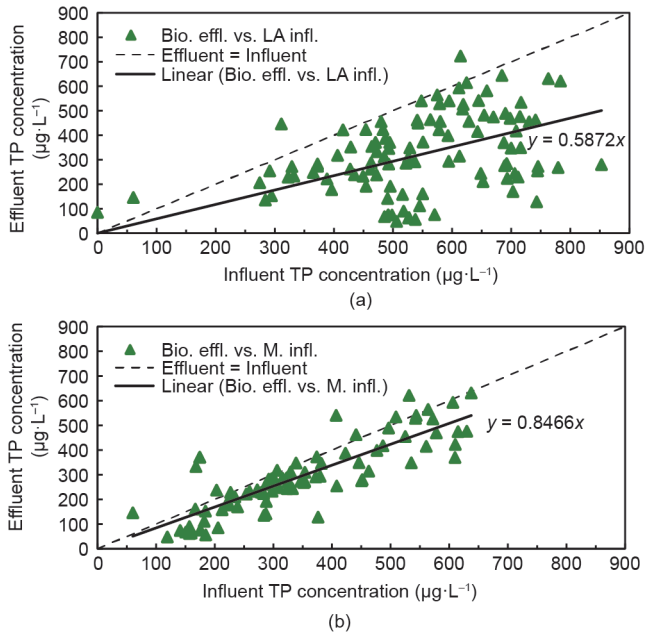

图 10. FITS的TP去除率。（a）Bio. effl.与LA infl.；（b）Bio. effl与M. infl.。实心黑线表示出水浓度等于进水浓度，即不去除的情况。

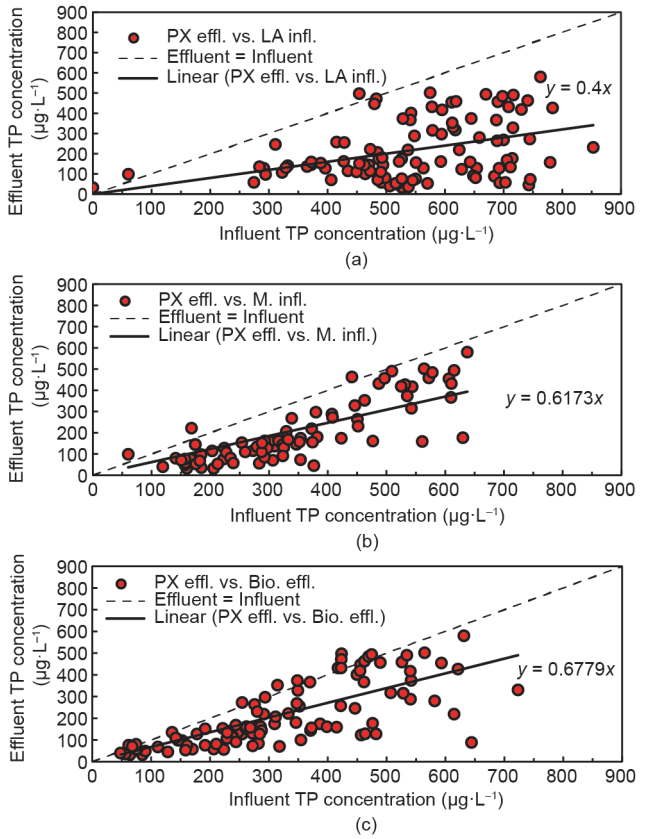

图 11. TP去除率。（a）在基线条件下运行PhosX树脂柱（PX effl.）与LA infl.；（b）PX effl.与M. infl.；（c）PX effl.与Bio. effl.。实心黑线表示出水浓度等于进水浓度，即不去除的情况。

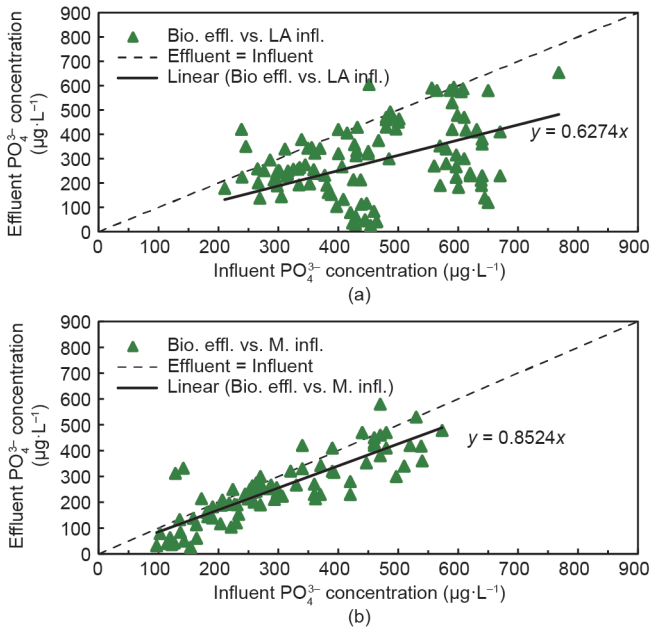

图 12. PO_4^{3-}去除率。（a）Bio. effl.与LA infl.；（b）Bio. effl.与M. infl.。实心黑线表示出水浓度等于进水浓度，即不去除的情况。数据低于“Effluent = Influent”说明被删除。

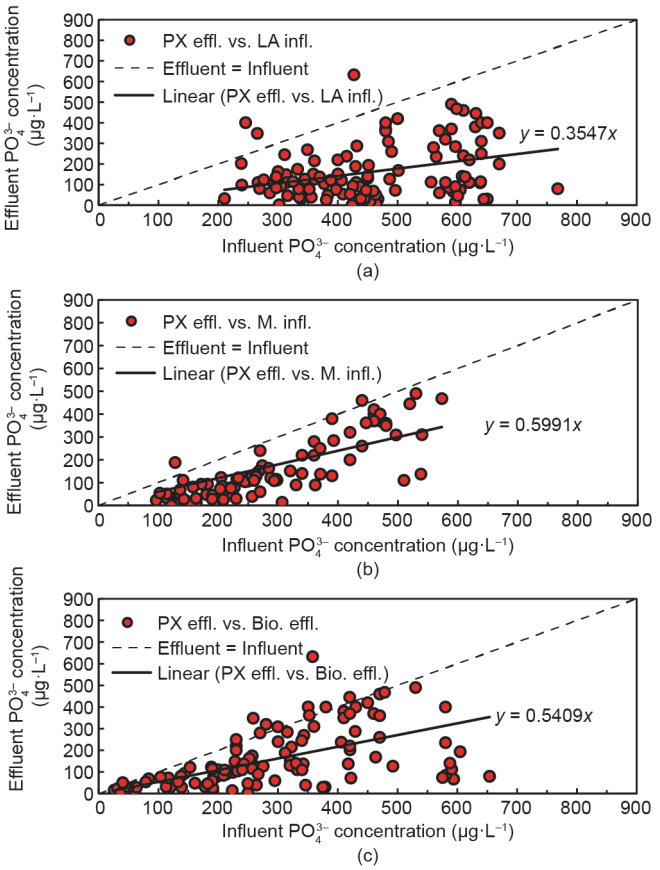

图 13. PO_4^{3-}去除率。（a）在基线条件下运行PhosX树脂柱（PX effl.）与爱丽斯湖水；（b）PX effl.与M. infl.；（c）PX effl.与Bio. effl.。实心黑线表示出水浓度等于进水浓度，即不去除的情况。

物组分的入流为爱丽斯湖水（4周）和混合进水（28周），而Phosx树脂柱的入流为生物组分的出流。本研究用爱丽斯湖水、混合进水与PhosX进水对系统进行了计算，显然，输入源的变化以及每个部分的去除作用使得整体去除效率较高。其中，生物组分在实验期间对TP和PO_4^{3-}的平均去除率分别为20.2%和17.6%，PhosX对TP和PO_4^{3-}的平均去除率分别为35.3%和42.5%，FITS对TP和PO_4^{3-}的去除率分别为45.5%和53.3%。如表7所示，生物处理组分对TP的吸收量为12.1 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$，对$PO_4^{3-}$吸收量为8.3 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$。

3.3.2. FITS 的生物量

本研究在实验期间两次收获了生物量产量：第一次是在严寒导致地上湿地植物死亡后（2009年12月）从水平湿地收获植物材料，第二次是2010年6月。表8为收获的生物量的分析结果：经过3个月的生长，湿地植物地上和地下总生物量中TP的浓度约为3.99 $g \cdot kg^{-1}$ OM。而香根草地上生物量和地下生物量的组织浓度分别为1.75 $g \cdot kg^{-1}$ OM和1.4 $g \cdot kg^{-1}$ OM。在第一次实验冻结前的3个月内，大型湿地植物在地上和地下生物量中共储存了2.3 $g \cdot m^{-2}$的磷。而香根草不受冻结的影响，大部分磷储存在其地下生物量中，在8个月内共储存了2.8 $g \cdot m^{-2}$。

3.4. 生物中宇宙实验、小型杯罐实验、柱实验和 FITS 的综合

生物中宇宙实验结果表明，大量实验的PO_4^{3-}的去除率平均为40%。为了更好地模拟FITS，本研究在第二次中宇宙实验中缩小了规模，增大了水力保留时间

表7 FITS运行8个月期间的TP 和PO_4^{3-}去除情况

Component	TP			PO_4^{3-}		
	P loading ($mg \cdot d^{-1}$)	P removed ($mg \cdot d^{-1}$)	Efficiency (P_{remove}/P_{load})	P loading ($mg \cdot d^{-1}$)	P removed ($mg \cdot d^{-1}$)	Efficiency (P_{remove}/P_{load})
Biological	1042.4 (± 433.9)	187.2 (± 163.7)	20.2% (± 18.3%)	844.9 (± 340.0)	127.7 (± 146.4)	17.6% (±32%)
PhosX	873.9 (± 419.1)	290.5 (± 290.1)	35.3% (± 25.9%)	722.3 (± 352.0)	282.6 (± 254.6)	42.5% (± 29.6%)
Combined	1042.4 (± 433.9)	455.4 (± 318.0)	45.5% (± 26.3%)	844.9 (± 340.0)	409.6 (± 247.3)	53.3% (±30.0%)

表8 收获的植被中的生物量和磷含量

Vegetation	December harvest		June harvest		Phosphorus storage ($g \cdot m^{-2}$)
	Biomass (g)	Phosphorus ($g \cdot kg^{-1}$)	Biomass (g)	Phosphorus ($g \cdot kg^{-1}$)	
Wetland macrophytes[a]	1082.2	3.994	—	—	2.32
Vetiver (above ground)[b]	—	—	872.2	1.757	0.82
Vetiver (below ground)	—	—	2656.8	1.401	2.00

[a] Total of above- and below-ground biomass after three months (September 22–December 22) harvested from 1.86 m^2 horizontal wetlands.

[b] Vetiver harvested after approximately eight months from 1.86 m^2 horizontal wetlands.

（HRT），此时PO_4^{3-}去除率下降到20%。此外，本研究通过生物中宇宙实验，确定在塑料再生培养基中种植的新的大型植物和香根草这一处理工艺单元的去除效果最佳。然而，实验水的组成成分（自来水中加入磷酸盐和硝酸盐）可能是生物中宇宙实验存在的局限问题，因为实验水中很可能不含有维持生物系统最佳性能所必需的微量营养素，同时实验水中也不含天然有机物，这会影响TP的形态。但生物中宇宙实验可提供FITS针对PO_4^{3-}的实际预期去除处理效率范围。

小型杯罐实验和柱实验结果表明，AR和PhosX树脂是针对TP去除效果最好的材料。虽然在杯罐实验中，FR、SS和RC都能去除PO_4^{3-}和TP，但FR会引入有机物，而SS和RC均提高了水的pH值。因此，这些材料需要增加处理系统的单元（进行后处理）才能纠正水质变化。所以柱实验的重点是在连续流动条件下（更接近FITS）对AR和PhosX树脂进行评价。结果表明，AR和PhosX树脂对桑福德大道运河和爱丽斯湖水体中PO_4^{3-}和TP的去除效果非常相似。由于AR是以质量为基础的，而PhosX是以体积为基础的，所以在杯罐实验中二者无法进行定量比较，但柱实验中AR和PhosX树脂的体积相同，因此可定量比较。

FITS将生物处理（生长在塑料再生培养基中的大型植物和香根草）与P-C处理（含AR或PhosX树脂的上流式柱）相结合，可以最大限度地去除磷。由于PhosX比AR的除磷量更大，所以大部分实验材料都为PhosX，小型实验与此形成了鲜明的对比，分析可能的原因为：AR是大的、不规则的碎片，将AR研磨成大小一致的颗粒比研磨成末困难得多，而PhosX树脂不需要任何粒径调整。

应该强调的是，平均去除效率（表7）代表了PhosX树脂几乎耗尽的时间以及使用新鲜PhosX的时间，因此必须谨慎使用总体平均值。FITS在湖区运行过程中，生物工艺单元使TP降低了20%，PhosX树脂约使TP降低了35%，而FITS的总有效去除率在45%~50%之间（表7）。此外，在最佳操作条件下，效率会更高。假设操作效率在所有测量结果的第90百分位以内，则可以去除约863 $mg \cdot d^{-1}$和259 $mg \cdot d^{-1}$的PO_4^{3-}，那么系统总体对TP和PO_4^{3-}的去除率分别能达到78%和85%。

如表7所示，生物处理组分对TP和PO_4^{3-}去除率的差异（TP和PO_4^{3-}的平均去除率分别为20.2%和17.6%）证实了我们最初的假设：生物组分既能够降低PO_4^{3-}，也能够降低TP。此外，当湖水通过WLTC的生长介质时，浮游植物的过滤作用能够减少物理-化学成分的堵塞，因此我们将生物组分放在处理链第一位。

生物组分的环境足迹（3.7 m^2）与FITS的总面积环境足迹（包括太阳能电池和树脂柱）约10 m^2，所以可以采用单位面积的磷去除量与其他技术进行比较。假设生长季节为240 d，磷的平均质量去除量如表7所示，FITS中生物组分对TP和PO_4^{3-}中磷的去除量分别约为12.1 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$和8.3 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$。而从总体上看，FITS的生物化学组分对TP和$PO_4^{3-}$的去除率分别为10.9 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$和9.8 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$。

与其他生物工程处理系统相比，本研究的去除率更高，经推算，设计用来过滤颗粒磷的湿地系统的年平均去除率为2.2 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ [15]。而瑞典有4种入流浓度的不同表面流人工湿地，可去除1~4 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$[16]；大沼泽地（美国佛罗里达州）的大规模湿地处理系统5年内的平均总磷去除量为1.2 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ [17]；佛罗里达的13个由SAV管控的天然湖泊和河流系统的长期磷平均去除率为1.2 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ [18]。

在FITS运行期间，本研究同时对其他水质参数进行了监测，爱丽斯湖与FITS出水（即“PX effl.”）中pH值、氯化物和硫酸盐的差异一般不超过20%。而由于出水中颗粒状态磷较少，其浊度在原基础（平均4 NTU）上降低了50%左右。对比爱丽斯湖湖水和混合进水，FITS出水的总有机碳（TOC）、波长在254 nm处的UV吸收（UV_{254}）和总氮（TN）含量更低，平均去除率为30%。此外，由于硝酸盐浓度接近仪器的最低校准标准，因此没有明确的硝酸盐去除趋势。总的来说，监测结果表明，与其他水化学过程相比，FITS对PO_4^{3-}和TP具有很高的

选择性，而且不会引入任何处理副产物。

PhosX树脂可多次再生、重复使用[19]。本研究对树脂进行了3次再生，其吸附容量未发生明显降低。此外，可以通过钙沉淀法分离回收废液再生溶液中的磷酸盐，这既可以获取有价值的产品（如鸟粪石），又可以使废液再生液在树脂再生周期再利用。

4. 结论

从FITS的设计和操作过程中可以得出以下结论：

- 在中等HLR条件下，各中宇宙实验对PO_4^{3-}的去除率均在40%~50%之间，平均吸收量为5.0 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$。而在较高HLR以及FITS等效流量运行条件下，中宇宙实验平均去除率约为15%。
- 小型杯罐实验和柱实验表明，AR和PhosX树脂是去除TP效果最好的材料。
- 大部分实验材料为PhosX，因为它比AR的TP去除量更大，分析其原因可能为PhosX不需要任何粒度调整。
- 再生后的PhosX与原始的PhosX一样有效。
- 与其他水化学过程相比，FITS对PO_4^{3-}和TP的处理具有很高的选择性，并且不会引入任何处理副产物。
- WLTC中悬浮藻类的过滤作用去除TP的重要机制，具体体现在FITS的运行过程中生物组分对PO_4^{3-}和TP去除效果的差异。
- 在2009年末生长季的后3个月，大型湿地植物在地上生物量和地下生物量中的磷平均贮藏总量为2.3 $g \cdot m^{-2}$。
- 使用PO_4^{3-}去除率的第50和第90百分位以及FITS的环境足迹进行评价，结果表明系统的去除率分别为56%和86%，实验记录期间区域磷的去除率在8.9~16.5 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$之间。

Acknowledgements

Funding for this research was from the Lake Jesup Total Phosphorus Removal Treatment Technologies Floating Island Pilot Project (25104) of St. Johns River Water Management District, Palatka, FL, USA.

Compliance with ethics guidelines

Mark T. Brown, Treavor Boyer, R.J. Sindelar, Sam Arden, Amar Persaud, and Sherry Brandt-Williams declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

[1] Groffman PM, Baron JS, Blett T, Gold AJ, Goodman I, Gunderson LH, et al. Ecological thresholds: the key to successful environmental management or an important concept with no practical application? Ecosystems 2006;9(1):1–13.
[2] Beisner BE, Haydon DT, Cuddington K. Alternative stable states in ecology. Front Ecol Environ 2003;1(7):376–82.
[3] Florida Department of Environmental Protection. Integrated water quality assessment for Florida. Report. Tallahassee: Florida Department of Environmental Protection; 2016 Jun.
[4] Water Resource Implementation Rule. Rules. Florida Administrative Code. Florida Department of State. 2014 May. Rule No.: 62-40.210.
[5] Moss B, Balls H, Irvine K, Stansfield J. Restoration of two lowland lakes by isolation from nutrient-rich water sources with and without removal of sediment. J Appl Ecol 1986;23(2):391–414.
[6] Moss B. Engineering and biological approaches to the restoration from eutrophication of shallow lakes in which aquatic plant communities are important components. Hydrobiologia 1990;200(1):367–77.
[7] Moss B, Stansfield J, Irvine K, Perrow M, Phillips G, Stansfieldt J. Progressive restoration of a shallow lake: a 12-year in isolation, experiment sediment removal and biomanipulation. J Appl Ecol 1996;33(1):71–86.
[8] Lowe EF, Battoe LE, Stites DL, Coveney MF. Particulate phosphorus removal via wetland filtration: an examination of potential for hypertrophic lake restoration. Environ Manage 1992;16(1):67–74.
[9] Comstock SE, Boyer TH, Graf KC, Townsend TG. Effect of landfill characteristics on leachate organic matter properties and coagulation treatability. Chemosphere 2010;81(7):976–83.
[10] O'Dell JW, editor. Method 365.1: determination of phosphorus by semiautomated colorimetry. Report. Cincinnati: United States Environmental Protection Agency (US), Environmental Monitoring Systems Laboratory, Office of Research and Development, 1993 August. Report No.: EPA/600/R- 93/100.
[11] Method 365.2: phosphorous, all forms (colorimetric, ascorbic acid, single reagent). Report. Cincinnati: United States Environmental Protection Agency (US), NPDES, 1971.
[12] American Public Health Association, American Water Works Association, The Water Environment Federation. Standard methods for examination of water and wastewater. 22nd ed. Washington: American Public Health Association; 2012, 1360 pp.
[13] Rokicki CA, Boyer TH. Bicarbonate-form anion exchange: affinity, regeneration, and stoichiometry. Water Res 2011;45(3):1329–37.
[14] Pfaff JD. Method 300: determination of inorganic anions by ion chromatography. Report. Cincinnati: United States Environmental Protection Agency (US), Environmental Monitoring Systems Laboratory, Office of Research and Development, 1993 Aug.
[15] Coveney MF, Lowe EF, Battoe LE, Marzolf ER, Conrow R. Response of a eutrophic, shallow subtropical lake to reduced nutrient loading. Freshw Biol 2005;50(10):1718–30.
[16] Andersson JL, Kallner Bastviken S, Tonderski KS. Free water surface wetlands for wastewater treatment in Sweden: nitrogen and phosphorus removal. Water Sci Technol 2005;51(9):39–46.
[17] Gu B, DeBusk TA, Dierberg FE, Chimney MJ, Pietro KC, Aziz T. Phosphorus removal from everglades agricultural area runoff by submerged aquatic vegetation/limerock treatment technology: an overview of research. Water Sci Technol 2001;44(11–12):101–8.
[18] Knight RL, Gu B, Clarke RA, Newman JM. Long-term phosphorus removal in Florida aquatic systems dominated by submerged aquatic vegetation. Ecol Eng 2003;20(1):45–63.
[19] O'Neal JA, Boyer TH. Phosphorus recovery from urine and anaerobic digester filtrate: comparison of adsorption–precipitation with