混合浮床对南海湖湿地富营养化水体修复的作用

王志超[1]，王智超[1]，缪晨霄[1]，杨文焕[1]，于玲红[1]，张明钰[2]，宋嘉乐[2]，李卫平[1]
(1.内蒙古科技大学 能源与环境学院，内蒙古 包头 014010；2.包头南海子湿地保护区管理处，内蒙古 包头 014010)

摘　要：[目的] 探究植物的交互作用对生态浮床去除 N,P 效率的影响，为后期南海湖湿地规模化建设提供理论依据。[方法] 在自然开放水域条件下，选取适合于北方生长的 3 种挺水植物水葱、千屈菜、风车草为浮床植物，以高密聚乙烯空心塑料基盘为植物载体，建立单一种植与交叉混合种植两种浮床体系，在南海湖湿地保护区进行为期 90 d 的水质处理，研究植物生长特性及浮床净化效果。[结果] 10 月份收割时，混合浮床中水葱和风车草的分蘖数分别达 26 和 30 株，生物量(鲜重)分别为 1.43 和 1.98 kg/株。风车草浮床 N 累积量最好，达 110.6 g/m^2，水体 TN 去除率 34.9%。混合浮床 P 累积量最好，达 26.02 g/m^2，水体 TP 去除率 43.3%。[结论] 植物的交互作用对植株的分蘖繁殖有一定促进作用，但不改变植物自身 N，P 吸收能力，植物体对 N,P 的累积量受生物量影响较大，3 种植物在混合浮床中的整株 N,P 累积量要高于单植物浮床，混合浮床可作为针对南海湖富营养化水体修复的浮床形式推广使用。

关键词：南海湿地；混合浮床；交互作用；富营养

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2019)04-0120-07　　**中图分类号**：X524

文献参数：王志超，王智超，缪晨霄，等.混合浮床对南海湖湿地富营养化水体修复的作用[J].水土保持通报，2019，39(4)：120-126. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.04.019；Wang Zhichao，Wang Zhichao，Miao Chenxiao，et al. Restoration effects of eutrophic water in Nanhai Lake wetland by mixed plant ecological floating island[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(4)：120-126.

Restoration Effects of Eutrophic Water in Nanhai Lake Wetland by Mixed Plant Ecological Floating Island

Wang Zhichao[1]，Wang Zhichao[1]，Miao Chenxiao[1]，
Yang Wenhuan[1]，Yu Linghong[1]，Zhang Mingyu[2]，Song Jiale[2]，Li Weiping[1]
(1. *School of Energy and Environment，Inner Mongolia University of Science and Technology，Baotou，Inner Mongolia* 014010，*China*；2. *Baotou Yellow River National Wetland Park Management Office，Baotou，Inner Mongolia* 014010，*China*)

Abstract：[Objective] The interaction of plants on the removals of N and P efficiency by ecological floating bed was studied to provide a theoretical basis for the large-scale construction of Nanhai Lake wetland in the later period. [Methods] Under the condition of natural open water，three kinds of water-stained plants，*Scirpus validus*，*Lythrum salicaria*，and *Cyperus alternifolius*，which are suitable for growth in the north，were selected as floating bed plants，and high-density polyethylene hollow plastic substrates were used as plant carriers，to establish two kinds of floating bed systems of single planting and mixed planting in the Nanhai Lake Wetland Reserve for 90 days of water treatment to study plant growth characteristics and floating bed purification effects. [Results] At the time of harvest in October，the number of tillers of *Scirpus validus* and *Cyperus alternifolius* in the mixed floating bed reached 26 and 30，respectively，and the biomasses (fresh weight) were 1.43 kg/plant and 1.98 kg/plant，respectively. The cumulative amount of *Scirpus validus*

收稿日期：2018-12-13　　**修回日期**：2019-01-31
资助项目：内蒙古自然科学基金项目“混合浮床对南海湖湿地富营养化水体修复的研究”(2018LH04002)；内蒙古科技创新引导项目(KCBJ2018033)；包头科技计划重点领域技术攻关项目(2017Z1009-1)；包头市南海湿地管理处科研项目(NH2018003)；内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY19132)
第一作者：王志超(1988—)，男(汉族)，山东省德州市人，博士，讲师，主要从事水土环境污染控制与生态修复方面的研究。E-mail：wzc5658@126.com。
通讯作者：李卫平(1973—)，男(汉族)，内蒙古自治区包头市人，博士，教授，硕士生导师，主要从事水资源优化与水环境治理方面的研究。E-mail：sjlwp@163.com。

grass floating bed N was the best, reaching 110.6 g/m^2, and the water body TN removal rate was 34.9%. The cumulative amount of mixed floating bed P was the best, reaching 26.02 g/m^2, and the water body TP removal rate was 43.3%. [Conclusion] The interaction of plants can promote the tillering of plants, but it does not change the N and P absorption capacity of plants. The accumulations of N and P in plants were greatly affected by biomass, and the individual accumulations for the three plants in mixed floating bed were greater than those in single floating bed. The mixed floating bed can be used as a floating bed for the restoration of eutrophic water in Nanhai Lake.

Keywords: Nanhai Lake; mixed floating beds; interaction; eutrophication

N,P 营养盐作为植物所需的基本元素,对植株的长势起着决定性作用。但随着其在地表水中浓度的不断增加,由此带来的水体富营养化问题也越发严重,这不仅会破水环境中生物的多样性,还可能导致生态完整性的丧失,引起如藻类水华频发、沉水植物消失、潜在毒素滋生等现象的发生[1]。因此对于富营养化水体的改善,根本途径在于对水体 N,P 营养盐的去除[2]。传统的理化方法往往治标不治本,不仅成本高且易出现反复,而生态浮床不仅具有原位修复的特点,且造价低廉结构灵活,不产生二次污染。同时还具有污染扩散防治、修剪护岸、栖息地保护、水质净化及景观绿化等多种功能[3]。浮床对水质的净化主要由浮床植物实现,而浮床植物则通过吸收水体中营养物质实现自身增长,其中一些植物在过量吸收氮养的同时,甚至可以降解水体中的有毒化学物质[4]。且随植株生长,水下繁密的根系所分泌的生物粘附介质对水中污染物也可起到一定吸附作用,实现污染物与植物的结合并有效利用。同时这种粘附介质还可起到除水中悬浮颗粒(SS)的作用,提升水质并改善透明度[5]。对于依赖光合作用的藻类而言,漂浮于水面的生态浮床可形成一定的遮光效应,间接减少了藻类对于光源的获取,且由于植物与藻类间对营养盐存在竞争关系及化感作用,也进一步使藻类的生长得到抑制。目前,利用生态浮床技术防治水体富营养化在我国已取得了一定的成果。Chang Yuanhsiou 等[6]研究了一种以太阳能板为曝气能源的生态浮床对校园废水的净化效果;郭一鸣等[7]建立了一种新型生态浮床用于恢复沉水植物的生长并对水中营养盐进行吸收;Wang Wenhuai 等[8]以高密聚乙烯浮板为载体,研究了强化生态浮床对城市景观水体的净化效果。然而,但在目前众多研究中,侧重点更多偏向于新型组合浮床对小型封闭静态水体污染物的去除效果,有关植株在自然开放水域的生长特性、植物交互作用对植株分蘖繁殖的影响及植株 N,P 累积量与生物量关系方面的研究仍少为报道。为此,本试验从以上 3 个方面入手,在南海湖生态修复试验工程中,通过单植物与混合植物两种浮床体系的搭建,研究其对富营养化水体的净化效能及水域环境改善能力,分析植物交互作用与水质净化的关系,为后期南海湖规模化建设提供理论依据和经验基础。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

南海湖(40°30′8″—40°33′32″N,109°59′2″—110°2′26″E)位于内蒙古包头市东河区南侧,属半干旱中温带大陆性季风气候。年平均降雨量不足 400 mm,年蒸发量约 2 300 mm,最冷 1 月平均气温 −11.8 ℃,最热 7 月平均气温 22.9 ℃。整个湖体的形成源自于黄河改道,以黄河水、地下水及大气降水作为主要补水来源,全年光照充足,光能与渔业资源丰富。同时由于保护区地处全球候鸟迁徙的重要途径路线,也使其成为鸟类栖息的重要场所之一[9]。研究水域主要指标详见表 1。

表 1　试验水域水体指标

总氮(TN)/(mg·L^{-1})	总磷(TP)/(mg·L^{-1})	透明度/cm	pH 值
2.291～2.808	0.129～0.215	19～52	8.17～8.78

1.2　供试植物

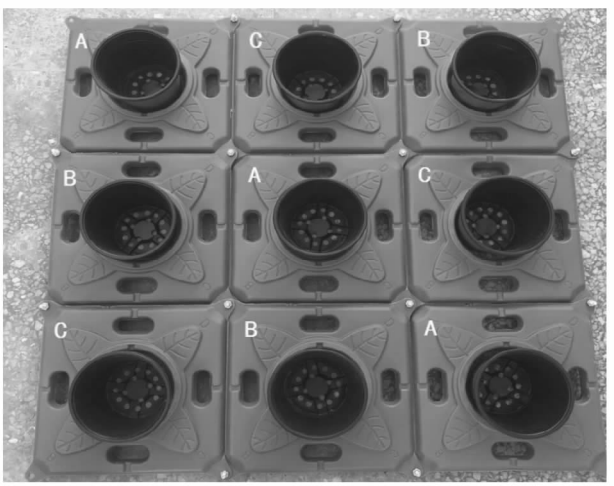
浮床植物作为生态浮床中最为重要的组成部分,其选择的合理性直接影响着浮床整体的净化效果。目前可用于生态浮床的植物可大致分花卉类、蔬菜类、饲料类及水生植物类。而为作为浮床核心技术,植株本身也应具有无害化、易驯服、可水生、易维护等特点。考虑到试验场地处于高原寒旱区,从每年 11 月份起进入为期长达 5 个月的冰封期,植物在自然环境下最佳生长日期多集中于 6—9 月间,且整体土壤环境及水质 pH 值均呈弱碱性。因此植物的易驯服性和本土性应作为植株选择的首要因素[10]。通过文献查阅[1-2]以及与当地多年从事植物种植和研究的相关人士进行沟通调研后,最终选取水葱(*Scirpus validus*)、千屈菜(*Lythrum salicaria*)、风车草(*Cyperus alternifolius*)作为本试验浮床植物供以研究。

1.3 生态浮床构建

试验场地位于南海湖鸟类博物馆西侧，该区域游客稀少，人为干扰因素较低，同时为减少水体交换作用对净化效果的干扰，提前采用防水布沿岸边进行水体隔离，形成约 600 m^2 的独立水域。试验采用 0.3 m×0.3 m的正方形高密度聚乙烯空心塑料基盘作为浮床材料，各基盘用螺丝链接，每个基盘 1 个植物种植孔，种植密度为 9 株/m^2，浮床总面积设计为 64 m^2，共分 4 组，每组 16 m^2，长、宽皆为 4 m，平均覆盖率 11%。为研究植物交互作用对水质净化效果的影响，试验采用单植物种植与交叉混合种植两种方式进行浮床搭建。前 3 组为单植物浮床，分别种植水葱、千屈菜、风车草，第 4 组为混合植物浮床，按照3 种植物 1∶1∶1 的方式进行种植，具体如图 1 所示。

1.4 试验方法

1.4.1 试验植物 于 7 月初栽种，并于 9 月末进行收割，植物生长期间，每隔 15 d 对其生长状况及浮床周边水域 TN，TP 浓度变化进行采样监测。在浮床四周距水面 30 cm 深处分别设置 4 各采样点，各浮床整体数据以 4 组数据平均值为准。采样时间设置为 10:00—12:00。具体时间安排详见表 2。



注：A 为水葱；B 为千屈菜；C 为风车草。

图 1 混合浮床每 1 hm^2 面积的种植方式

表 2 2019 年 7—9 月植物及水质样本采集时间

项目	采样时间						
	0701	0715	0730	0814	0829	0913	0928
试验天数/d	1	15	30	45	60	75	90
采集次数	1	2	3	4	5	6	7

1.4.2 统计植物成活率，定期采集植物样本进行分析测量 现场随机抽取 3 株植物（包括茎叶与根部）洗净后带回实验室，主要测试指标包括株高、分蘖数、鲜重、干重、植物体内氮磷含量等。首先用吸水纸将植物表面水分吸干测量鲜重，后将植物置于烘箱内在 105 ℃下杀菌 3 h，并于 80 ℃烘至恒重，记录植株干重。最后将烘干的植物粉碎过 60 目筛，经浓 H_2SO_4-H_2O_2 法消煮，定容检测。具体方法详见表 3。

表 3 浮床水域水质指标及植物体氮磷含量检测方法

水质指标	测定方法
总氮	碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法
总磷	过硫酸钾消解—钼酸铵分光光度法
透明度	塞氏盘法测定
植物氮含量	H_2SO_4—H_2O_2 消煮扩散皿法
植物磷含量	钒铂黄吸光光度法

2 结果与分析

2.1 两种浮床体系植物的生长特性

两种体系浮床中 3 种植物单株分蘖数的变化如图 2 所示。随时间变化，植株的分蘖繁殖呈不同变化趋势，由于植物对试验区水体存在适应过程，3 种植物分蘖情况整体呈前期缓慢中后期增快的现象。其中风车草、水葱的分蘖过程比千屈菜更明显，单株分蘖数相比千屈菜每整株多 2～4 株。从移栽前到 8 月初，各浮床体系植物长势基本接近，但由于植物交互作用对内源激素分泌的影响，使得后期同种植物在不同浮床中的分蘖发育有所差异[11]。其中水葱在 8 月间的分蘖最为迅速，至 8 月末单植物浮床整株分蘖数达 18 株，混合浮床分蘖数达 20 株。而至此之后到试验结束前风车草则体现出了较强的繁殖能力，单植物浮床平均分蘖数 26 株，混合浮床达 30 株。

图 3 显示了各植物移栽前与收割后的生物量变化。从图 3 可以看出，两浮床体系植株生物量（鲜重）变化明显，单植物浮床中水葱、千屈菜、风车草整株生物量分别为移栽前的 113，195 和 205 倍，而混合浮床可分别达到 127，221 和 233 倍，直至收割后，混合浮床中水葱和风车草整株生物量（鲜重）达 1.43 和 1.98 kg/株，相比单植物浮床增量 12.32%～15.16%。结

果表明,混合浮床中同种植物的长势要优于单植物浮床。因为 4 组浮床处于同一水域,影响植株分蘖繁殖的诸多因素中,如光照、温度、种植密度及养分,其来源皆具有同源性,这种情况下植物内部激素的变化对分蘖的调控就占据了主导地位[12]。在植物生长过程中,细胞分裂素作为内部激素的主要成分,其分泌情况直接影响植株的生长态势。又因为混合浮床中植物交互作用只能通过植株根细在水下进行,而细胞分裂素的主要合成场所又集中于植株根部,说明植物交互作用对细胞分裂素等植物激素的合成起到了一定的促进作用。同时细胞分裂素又可以增强植物对氮素的利用率[13-14],间接增强了混合浮床植株的分蘖繁殖,因此相比之下混合浮床的植株生物量要高于单植物浮床。

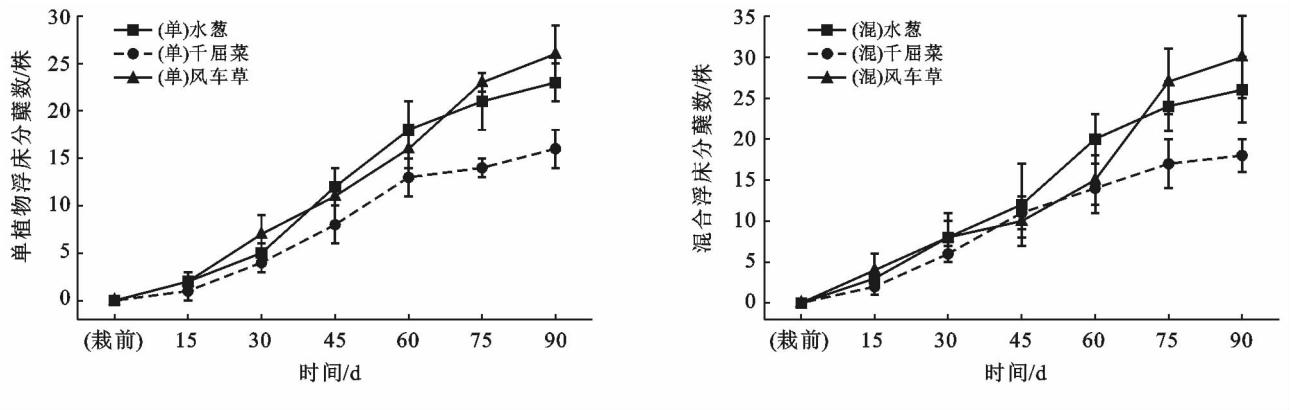


图 2　单植物浮床与混合浮床中各植物分蘖数变化

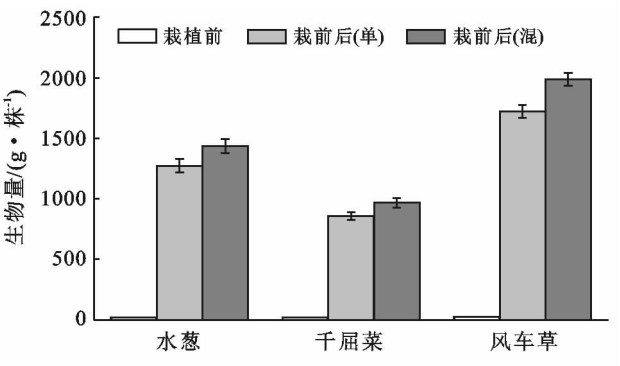


图 3　栽植前后单植物与混合植物浮床各植物生物量对比

2.2　两种浮床体系中植物体对 N,P 的吸收

两种浮床系统中,植物 N,P 的吸收能力如图 4 所示。通过显著性检验分析,3 种植物对于 N,P 的吸收能力均存在差异性,就 N 吸收能力而言,千屈菜与水葱、风车草存在显著关系($p<0.05$),而对 P 吸收能力而言,3 种植物差异则更为明显($p<0.05$),千屈菜的平均 N,P 吸收能力可达 10.08 和 3.40 g/kg,分别为水葱和风车草的 1.54 和 2.26 倍。而相比之下同种植物在两种浮床系统中的单株 N,P 吸收能力则表现出相同水平($p>0.05$)。结果表明,由混合栽种方式产生的交互作用无法干扰植物自身对 N,P 的吸收。原因是植物的生长状况主要由遗传因素、环境(外源)因素以及内源因素决定[15],植物的形态及木质素合成皆由遗传物质主导,并直接决定植物体营养盐吸收饱和度,而植物间交互作用仅仅作为一种外源刺激因素,虽然可以间接影响植物内部激素分泌,但从根本上讲却无法改变 3 种植物自身的遗传特性[16],改变 N,P 吸收能力。结合图 5 可知,尽管 3 种植物各自 N,P 吸收能力存在差异,但整株累积量却呈现相反趋势。不难看出,千屈菜由于物种优势,对 N,P 营养盐具有较高的吸收能力,但整株 N,P 累积量却稍显乏力,受分蘖数及自身条件限制,收割后千屈菜整株生物量仅为水葱和风车草的 67% 和 49%,表明各植物体 N,P 累积量差异仍主要来自于生物量的差异[17]。同时,混合浮床中各植株 N,P 累积量均高于单植物浮床,更加说明生物量对于植物体 N,P 累积的重要性。

表 4 数据显示了各浮床体系 N,P 累积的具体情况。各浮床单位面积 N,P 吸收能力,可由植物收割后与栽植前体内 N,P 含量的差值,再结合种植密度及植物成活率求得。根据计算结果,单位面积 N 吸收均风车草浮床最高,达 12.169 g/m^2,混合植物浮床次之,为 11.257 g/m^2。单位面积 P 吸收量混合浮床最高达 2.602 g/m^2,千屈菜其次为 2.473 g/m^2。尽管风车草 N 吸收能力较强,但 P 吸收量仅 2.063 g/m^2,为各浮床最低。综合考虑,混合浮床更适合作为南海湖富营养化水体修复的浮床形式推广使用。

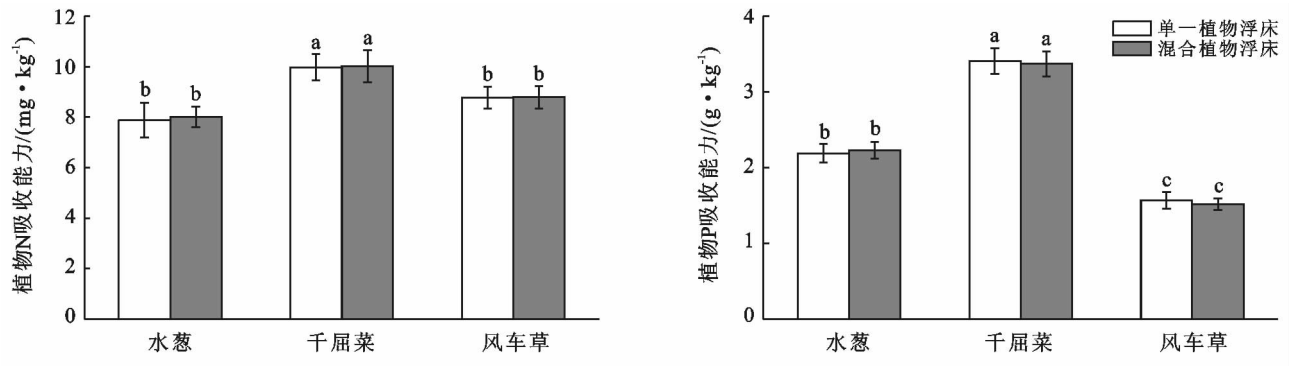


图 4 单植物浮床与混合植物浮床各植物 N,P 吸收能力对比

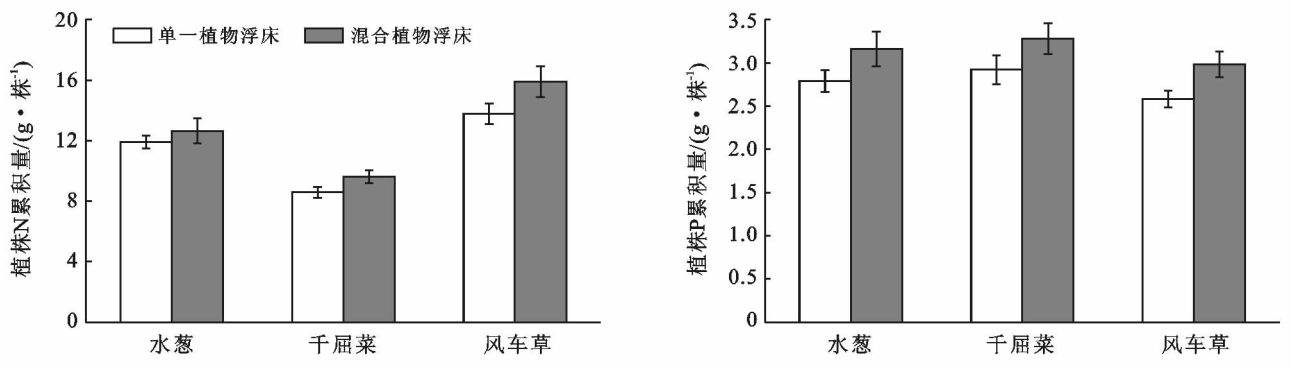


图 5 单植物浮床与混合植物浮床各植株 N,P 累积量对比

表 4 浮床植物收割后 N,P 累积量

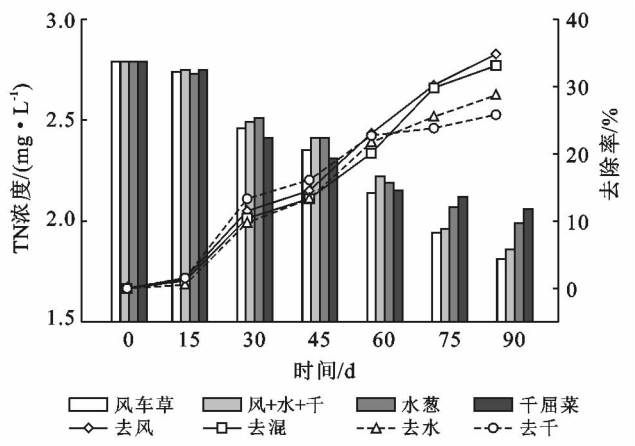
植物名称	干重/(g/株)			N 含量/(g/株)			N 吸收量/(g/株)		成活率/%	N 吸收量/(g·m⁻²)	
	栽前	栽后(单)	栽后(混)	栽前	栽后(单)	栽后(混)	单一	混合		单一	混合
水葱	0.77	150.72	170.37	0.027	1.216	1.292	1.189	1.265	92.7	9.919	
千屈菜	1.21	137.90	155.13	0.031	0.890	0.992	0.859	0.961	94.1	7.274	11.257
风车草	1.15	236.15	272.48	0.017	1.404	1.610	1.377	1.593	89.2	12.169	

植物名称	干重/(g/株)			P 含量/(g/株)			P 吸收/(g/株)		成活率/%	P 吸收量/(g·m⁻²)	
	栽前	栽后(单)	栽后(混)	栽前	栽后(单)	栽后(混)	单一	混合		单一	混合
水葱	0.77	150.72	170.37	0.002	0.281	0.317	0.279	0.315	92.7	2.327	
千屈菜	1.21	137.90	155.13	0.003	0.295	0.330	0.292	0.327	94.1	2.473	2.602
风车草	1.15	236.15	272.48	0.002	0.259	0.230	0.257	0.298	89.2	2.063	

2.3 两种浮床体系对水体 TN,TP 的净化效果

2.3.1 两浮床体系对水体 TN 的净化效果分析 试验各浮床水体 TN 含量随试验天数的变化曲线如图 6 所示。

由图 6 可知,初始阶段,由于植株处于对试验水域的适应期,故分蘖较为缓慢,各组浮床水体 TN 浓度变化不明显。试验 15 d 后,正直七月中旬,植物进入迅猛生长期,生物量变化显著,水质净化效率随之提升,试验 15～60 d 千屈菜分蘖繁殖表现出相对优势,TN 去除效率较高,但由此之后呈减缓态势。相比而言,其他 3 组浮床 TN 浓度变化趋势相近,其中风车草处理效果最好,而一开始除 N 较强的千屈菜则表现较差。试验 30～45 d,各个浮床水体 TN 去效率有所减缓,在这之后整体又呈升高趋势,原因是浮床在水面上所形成的阴影区,长时间削减了藻类对于光源的获取,不但使其生长得到限制,也使得部分藻类因体循环失效而死亡分解,原本被藻类吸收的氮素又被释放回水体中[18],此时又正值植株营养盐最佳摄取阶段。因此,虽然 TN 去除效率相对降低,但整体去除效果仍呈升高趋势。到九月中旬即试验持续 75 d 后进入秋季,各植株对氮素的吸收相继进入饱和阶段,植物根系对营养物质的黏附作用有所削减,此时水体中 TN 的去除已由植物吸收逐渐向微生物吸附降解转化[19],加之受温度影响,植物生长速率、微生物数量及活跃程度均有所下降,因此各浮床水体 TN 浓度变化速率逐渐变缓[20]。



注:风+水+千表示水葱、千屈菜、风车草这 3 种植物的混合植物浮床;去风表示风车草植物浮床的 TN 去除率,去混表示混合植物浮床的 TN 去除率,去水表示水葱植物浮床的 TN 去除率,去千表示千屈菜植物浮床的 TN 去除率。下同。

图 6　两种浮床体系水体 TN 含量变化

由于表 5 数据可知,至试验第 90 d,4 组浮床对水体中的氮素均具有较好的消减作用。去除效果最好的风车草浮床,水体 TN 浓度从 2.78 mg/L 下降到 1.81 mg/L,去除率达到 34.9%。其次是混合浮床和水葱,质量度分别下降至 1.94 和 1.98 mg/L,去除率分别为 33.1%和 28.0%。

表 5　各浮床对水体 TN 的去除效果

植物名称	平均初始浓度/(mg·L⁻¹)	末质量浓度/(mg·L⁻¹)	TN 去除率/%	浮床平均每单元 N 去除量/g
水葱	2.78	1.98	28.0	158.70
千屈菜	2.78	2.06	25.6	116.38
风车草	2.78	1.81	34.9	194.70
水+千+风	2.78	1.94	33.1	180.12

2.3.2　*两种浮床对水体 TP 的净化效果*　两种浮床体系对水体中 TP 去除效果如图 7 所示。各浮床对水体 TP 去除速率随时间变化均呈现慢→快→慢的变化趋势,试验 35～75 d,由于物种自身优势,千屈菜在 TP 去除效率上明显优于其他植物。受其影响,混合浮床 TP 去除速率也随之加快。在此期间,伴随各植株的迅猛生长,植物根细越发繁密,依附于根系的微生物得以大量繁殖,这也为聚磷菌的生长创造了良好环境[21-22],同时植株光合作用产生的部分氧气也借助植物根系释放到水中,形成了一定的氧化太微环境,促进了聚磷菌对水体中 P 的超量吸收[23]。加之温度和光照强度等因素的协同作用,使得此阶段各浮床 TP 浓度明显降低。而此后虽然生物量仍在增长,但随温度的降低,微生物活性的减弱,且各植株对 N,P 的吸收近乎处于饱和状态,因此 TP 去除率变化趋势也相对平缓。到试验结束时,由于各植株生长规律不同,对营养盐需求量、自身饱和程度,根部聚磷菌数量及活性均存在差异,使得浮床整体 TP 去除总量各有不同。

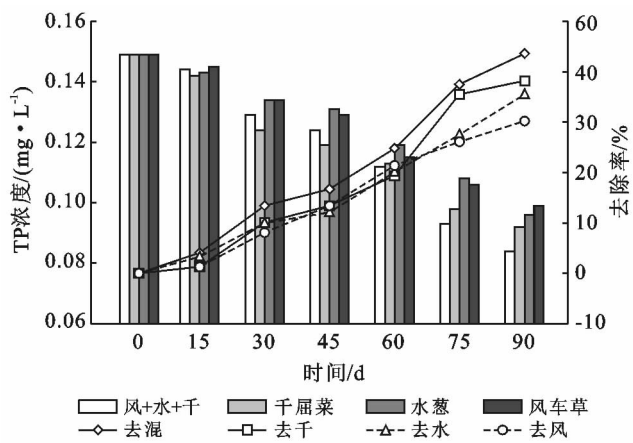


图 7　两种浮床体系水体 TP 含量变化

由表 6 可知,4 组浮床中混合浮床对水体 TP 的去除能力最强,质量浓度由 0.149 ml/L 下降到0.084 ml/L,去除率达 43.3%。水葱、千屈菜、风车草浮床水体 TP 质量浓度分别下降到 0.096,0.092 和 0.102 mg/L,去除率按顺序依次为:千屈菜(38.2%)>水葱(35.5%)>风车草(33.4%)。

表 6　各浮床对水体 TP 的去除效果

植物名称	平均初始浓度/(mg·L⁻¹)	末质量浓度/(mg·L⁻¹)	去除率/%	浮床平均每单元 P 去除量/g
水葱	0.149	0.096	35.5	37.24
千屈菜	0.149	0.092	38.2	39.56
风车草	0.149	0.102	33.4	33.01
水+千+风	0.149	0.084	43.3	41.63

2.4　不同植物分蘖数与 TN,TP 去除率相关性

本研究对不同植物不同时期的分蘖数和 TN,TP 去除率进行相关性分析。结果表明,对于 N 的去除而言,同一时期植物分蘖数与浮床对水体 TN 的去除率在 0.99 置信度下的相关系数可达到 0.950,说明两者相关性显著,其曲线拟合结果如图 8 所示;对于 P 的去除而言,分蘖数与浮床对水体 TP 去除率在 0.99 置信度下的相关性为 0.918,表明植物分蘖数与 TP 的去除率同样呈现显著相关关系,两者曲线拟合结果如图 8 所示。由相关性分析结果可知,植物分蘖数与其所对应的浮床对水体 TN,TP 去除效果存在必然联系,即在交互作用影响下,植物分蘖繁殖得以间接增强,同等条件下整株植物生物量随之增高,尽管各植物对 N,P 的吸收能力存在差异,但植物体本身对 N,P 营养盐的累积量仍由其自身生物量决定[24],在同一水域环境前提下,由于植物对 N,P 吸收的增加,使得

水体 TN,TP 浓度随之下降。相关性分析结果与植物体内氮磷累积量差异主要来自于生物量差异的结论是相吻合的。其相互关系可简单表示为：

交互作用→分蘖繁殖增加→生物量升高→植物体 N,P 累积增加→水体 TN,TP 浓度降低→富营养化程度减轻。

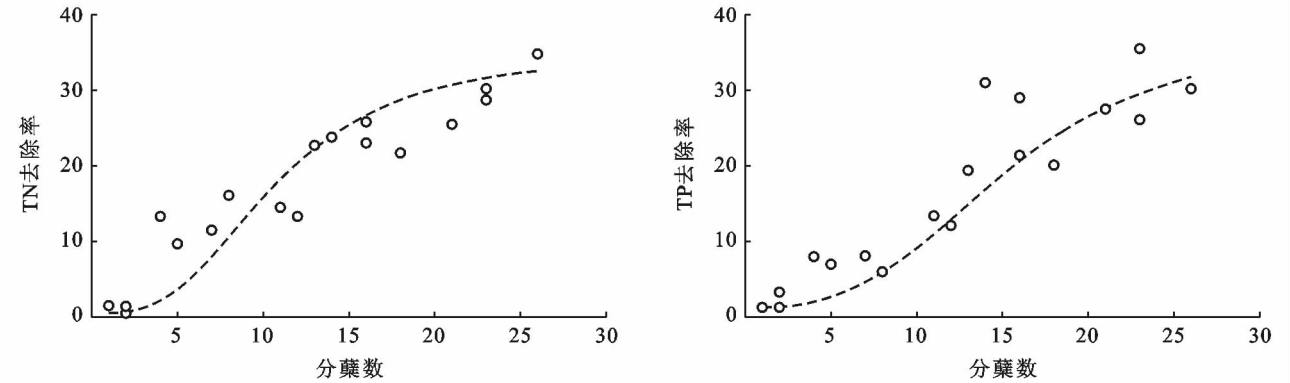


图 8 植物分蘖数与水体 TN,TP 去除率曲线拟合关系

3 结 论

(1)试验所选 3 种植物对南海湖水体均具有一定耐受性,皆可作为南海湖生态工程备选植物。

(2) 试验结束时,混合浮床中水葱、千屈菜及风车草的分蘖数分别为 26,18 和 30 株,相比单植物浮床每整株多 2～4 株;3 种植物生物量(鲜重)分别达 1.43,0.96 和 1.98 kg/株,相比单植物浮床增量 12.32%～15.16%。

(3) N 吸收方面风车草浮床最佳,达 12.169 g/m^2,P 吸收方面则混合浮床最好,为 2.602 g/m^2,从整体上看混合浮床对 N,P 的吸收仍相对全面,分别为 11.257和 2.602 g/m^2。

(4) 各植物浮床对水体 N,P 去除率依次为 TN:风车草(34.9%)>混合浮床(33.1%)>水葱(28.0%)>千屈菜(25.6%);TP:混合浮床(43.3%)>千屈菜(38.2%)>水葱(35.5%)>风车草(33.4%)。

[参 考 文 献]

[1] Lua Hsiaoling, Kub Chenruei, Chang Yuanhsiou. Water quality improvement with artificial floating islands[J]. Ecological Engineering, 2015,74(1):371-375.

[2] 吴伟,胡庚东,金兰仙,等.浮床植物系统对池塘水体微生物的动态影响[J].中国环境科学,2008,28(9):791-795.

[3] 吴建强,王敏,吴健,蒋跃,等.4 种浮床植物吸收水体氮磷能力试验研究[J].环境科学,2011,32(4):995-999.

[4] 屠清瑛,章永,杨贤智,等.北京什刹海生态修复试验工程[J].湖泊科学,2004,16(1):61-66.

[5] Li Xianning, Song Hailiang, Li Wei, et al. An integrated ecological floating-bed employing plant, freshwater clam and biofilm carrier for purification of eutrophic water[J]. Ecological Engineering, 2010,36(4):382-390.

[6] Chang Yuanhsiou, Ku Chenruei, Naichia Y. Solar powered artificial floating island for landscape ecology and water quality improvement[J]. Ecological Engineering, 2014,69(8):8-16.

[7] Guo Yiming, Liu Yunguo, Zeng Guangming, et al. A restoration-promoting integrated floating bed and its experimental performance in eutrophication remediation [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014,26(5):1090-1098.

[8] Wang Wenhuai, Wang Yi, Li Zhi, et al. Effect of a strengthened ecological floating bed on the purification of urban landscape water supplied with reclaimed water[J]. Science of the Total Environment, 2018,622/623(5):1630-1639.

[9] 杨文焕,齐璐,李卫平,等.包头南海湖冰封期不同形态氮的空间分布[J].东北农业大学学报,2018,49(3):42-49.

[10] 高月香,陈桐,张毅敏,等.不同生物联合净化富营养化水体的效果[J].环境工程学报,2017,11(6):3555-3563.

[11] 周宇飞,闫彤,张姣,等.外源 IAA 对高粱幼苗内源激素含量及分蘖发生的影响[J].生态学杂志,2017,36(8):2191-2197.

[12] 高雨,李颖,谢寅峰,等.独脚金内酯调控植物侧枝发育的分子机制及其与生长素交互作用的研究进展[J].植物资源与环境学报 2013,22(4):98-104.

[13] 罗宝杰,许俊旭,丁艳锋,等.内源 CTK 和 IAA 平衡对水稻分蘖芽休眠与萌发的影响[J].作物学报,2014,40(9):1619-1628.

(下转第 133 页)

及其对林下土壤的改良作用[J]. 中国水土保持科学,2012,10(4):45-50.

[7] 殷丽强,梁月. 沙棘人工林对砒砂岩地区土壤物理性质变化的影响[J]. 国际沙棘研究与开发,2009,4(5):1-5.

[8] 温仲明,焦峰,李静. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被自然演替阶段的识别与量化分析[J]. 水土保持研究,2009,16(5):40-44.

[9] 张瑞,白凤林. 晋陕蒙砒砂岩区十大孔兑沙棘种植抗旱措施[J]. 中国水土保持,2015(4):31-33.

[10] 柴华,何念鹏. 中国土壤容重特征及其对区域碳贮量估算的意义[J]. 生态学报,2016,36(13):3903-3910.

[11] 张淑娟,王道杰,梅永丽,等. 泥石流多发区小流域土地利用方式对土壤性质的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(1):257-262.

[12] 李宗超,胡霞. 小叶锦鸡儿灌丛化对退化沙质草地土壤孔隙特征的影响[J]. 土壤学报,2015,52(1):242-248.

[13] 张磊,王嘉学,刘保强,等. 喀斯特山原红壤退化过程中土壤表层团聚体变化规律[J]. 山地学报,2015,33(1):8-15.

[14] 袁勤,崔向新,乔荣. 砒砂岩区不同人工林对土壤理化性质的影响[J]. 北方园艺,2013(18):52-55.

[15] 魏晓婷,雷泽勇,韩辉. 章古台沙地不同林龄樟子松人工林土壤水分研究[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(6):115-121.

[16] 阿拉木萨,蒋德明,骆永明. 半干旱区人工固沙灌丛发育过程土壤水分及水量平衡研究[J]. 水土保持学报,2005,19(4):107-110.

[17] 卢立娜,赵雨兴,胡莉芳,等. 沙棘(*Hippophae rhamnoides*)种植对鄂尔多斯砒砂岩地区土壤容重、孔隙度与贮水能力的影响[J]中国沙漠,2015,35(5):1171-1176.

[18] 景贯阳,邸利,王安民,等. 甘肃泾川不同林龄人工刺槐林的土壤水分—物理特性及渗透性研究[J]. 四川农业大学学报,2017,35(2):193-198.

[19] 周米京,高城雄,郝文功,等. 灌木固沙林改良土壤效益分析[J]. 水土保持通报,2009,29(1):138-141.

[20] 李红,范素芳,张光灿,等. 黄土丘陵区退耕还林后不同林地土壤孔隙与贮水特性[J]. 水土保持通报,2010,30(1):27-30.

[21] 邱新彩,彭道黎,李伟丽,等. 北京延庆区不同林龄油松人工林土壤理化性质[J]. 应用与环境生物学报,2018,24(2):221-229.

[22] 孙培峰. 不同林龄刺槐人工林林分结构和土壤特性研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2015.

(上接第 126 页)

[14] 刘杨,顾丹丹,许俊旭,等. 细胞分裂素对水稻分蘖芽生长及分蘖相关基因表达的调控[J]. 中国农业科学,2012,45(1):44-51.

[15] 孙从军,高阳俊,曹勇,等. 淀山湖河口生态浮床试验工程设计与效果研究[J]. 中国给水排水,2010,26(18):64-68.

[16] 邢春玉,吴运刚,乔镜澄,等. 水生植物群落对水华藻类的化感抑制研究[J]. 环境科学与技术,2018,41(3):35-41.

[17] Mark T B, Treavor B, Sindelar R J, et al. A floating island treatment system for the removal of phosphorus from surface waters[M]. Engineering, 2018,4(5):597-609.

[18] 范洁群,邹国燕,宋祥甫,等. 不同类型生态浮床对富营养河水脱氮效果及微生物菌群的影响[J]. 环境科学研究,2011,24(8):850-856.

[19] Naichia Y, Pulin Y, Chang Yuanhsiou. Artificial floating islands for environmental improvement[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015,47(7):616-622.

[20] Wu Qing, Hu Yue, Li Shuqun, et al. Microbial mechanisms of using enhanced ecological floating beds for eutrophic water improvement[J]. Bioresource Technology, 2016,211(7):451-456.

[21] 张择瑞,张学,郭婧,等. 3 种新型浮床植物净化富营养化水体的试验研究[J]. 中国科学技术大学学报,2018,48(3):221-228.

[22] Di Luca G A, Mufarrege M M, Hadad H R, et al. Nitrogen and phosphorus removal and Typha domingensis tolerance in a floating treatment wetland[M]. Science of the Total Environment, 2009,90(1):74-77.

[23] Zhao Fengliang, Xi Shu, Yang Xiao, et al. Purifying eutrophic river waters with integrated floating island systems[M]. Ecological Engineering, 2012,40(3):53-60.

[24] 罗固源,郑剑锋,许晓毅,等. 4 种浮床栽培植物生长特性及吸收氮磷能力的比较[J]. 环境科学学报,2009,29(2):285-290.