

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.6
第41卷 第6期

目次

基于SPAMS的天津市夏季环境受体中颗粒物的混合状态及来源..... 林秋菊,徐娇,李梅,王玮,史国良,冯银厂 (2505)

南京北郊降水无机离子和有机酸的化学特征及来源分析..... 杨笑影,曹芳,林煜棋,章炎麟 (2519)

西安市PM_{2.5}中水溶性离子的季节变化特征..... 黄舍舍,王羽琴,李升苹,陈庆彩 (2528)

新疆石化工业区颗粒物含水量和酸度对二次无机组分形成的影响..... 刘会斌,迪丽努尔·塔力甫,王新明,张潇潇,王威,阿布力克木·阿不力孜,买里克扎提·买合木提,刘伟 (2536)

长秋季生物质燃烧对PM_{2.5}中WSOC吸光性的影响..... 孟德友,曹芳,翟晓瑶,张世春,章炎麟 (2547)

2019年5月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源..... 王倩 (2555)

南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析..... 曹梦瑶,林煜棋,章炎麟 (2565)

郑州市春季大气污染过程VOCs特征、臭氧生成潜势及源解析..... 任义君,马双良,王思维,于世杰,李一丹,张瑞芹,尹沙沙 (2577)

上甸子区域背景站VOCs污染特征及其对臭氧生成贡献..... 韩婷婷,李颖若,邱雨露,何迪,王焱,马志强 (2586)

北京市餐饮业大气污染物排放特征..... 孙成一,白画画,陈雪,翟翼飞,高启天,何万清,聂磊,石爱军,李国傲 (2596)

北京市农业机械排放因子与排放清单..... 王凯,樊守彬,亓浩云 (2602)

北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化..... 李贝贝,黄玉虎,毕晓辉,刘李阳,秦建平 (2609)

基于MODIS_C061的长三角地区AOD与Angström指数时空变化分析..... 张颖蕾,崔希民 (2617)

环渤海地区2,4,4'-三氯联苯的多介质归趋模拟..... 张毅,马艳飞,宋帅,吕永龙,张盛,吴强 (2625)

岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析..... 周石磊,孙悦,苑世超,彭瑞哲,刘世崇,岳奇丞,张航,王周强,李再兴,罗晓 (2635)

“河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析..... 李悦昭,陈海洋,孙文超 (2646)

伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价..... 姜时欣,翟付杰,张超,王蒙蒙,单保庆 (2653)

典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析..... 赵然,韩志伟,申春华,张水,涂汉,郭永丽 (2664)

沉积物参与下氮磷脉冲式输入对太湖水体营养盐浓度和藻类生长的影响..... 陈洁,许海,詹旭,许笛,朱广伟,朱梦圆,季鹏飞,康丽娟 (2671)

丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因素..... 李胜男,陈豪宇,彭华,李芸君,朱坚,简燕,纪雄辉 (2679)

胶网藻对水体中恩诺沙星的毒性响应及去除作用..... 王振方,韩子玉,王梦雪,马逸驰,王婷,王丽卿,张玮 (2688)

不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较..... 桑雨璇,杨珈乐,熊怡,尹文博,汪华,王和云 (2698)

过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用..... 张帅,李大鹏,丁玉琴,徐楚天,许鑫澎,孙培荣,赵哲豪,黄勇 (2706)

基于区域DNDC的稻田轮作氮素空间分异与驱动分析:以晋江流域为例..... 王亚楠,祝伟,祁新华,范水生 (2714)

不同铁锰浓度的低温铁锰氨地下水净化中氨氮去除途径..... 张杰,梅宁,刘孟浩,叶雪松,李冬 (2727)

高晶度Mn-Fe LDH催化剂活化过一硫酸盐降解偶氮染料RBK5..... 李立,吴丽颖,董正玉,王霖,张倩,洪俊明 (2736)

Fe-cyclam/H₂O₂体系催化降解罗丹明B机制..... 余雨清,陈翔宇,蔡权华,黄歆珏,陈曼 (2746)

微生物光电化学池去除硝酸盐氮:以PANl/TiO₂-NTs为光阳极..... 卢忆,周海珊,彭瑞建,叶杰旭,陈建孟,宋爽,张士汉 (2754)

缺氧MBR-MMR处理海水养殖废水性能及膜污染特性..... 陈凡雨,徐仲,尤宏,柳锋,李之鹏,陈其伟,韩红卫 (2762)

HRT对改良式A²/O-BAF反硝化除磷脱氮的影响..... 赵凯亮,刘安迪,南彦斌,梁利民,王云霞,陈永志 (2771)

重金属Ni(II)对厌氧氨氧化脱氮性能的影响及其动力学特征变化..... 孙琪,赵白航,范飒,周邦磊,李玉琪 (2779)

异养硝化-好氧反硝化混合菌对尿素去除及重金属和盐度的影响..... 王萌萌,曹刚,张迪,冯乃亮,潘涌璋 (2787)

火山岩填料曝气生物滤池的SNAD工艺启动特性及功能菌丰度演替..... 薛嘉俊,张绍青,张立秋,李淑更,姚海楠,耿忠轩,李鸿,刘晓玲 (2796)

游离羟胺对两种典型亚硝态氮氧化菌活性的影响..... 沈琛,张树军,彭永臻 (2805)

死菌DNA对厌氧消化污泥中抗生素抗性基因及微生物群落分析的干扰..... 苏宇傲,刘宏波,毛秋燕,张慧旻,张衍,刘和 (2812)

中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价..... 陈文轩,李茜,王珍,孙兆军 (2822)

土壤环境质量预警体系构建与应用..... 李笑诺,丁寿康,陈卫平,王夏晖,吕斯丹,刘睿 (2834)

不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系..... 毛霞丽,邱志腾,张爽,沈倩,章明奎 (2842)

长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征..... 宁玉菲,魏亮,魏晓梦,祝贞科,袁红朝,葛亿达,吴金水 (2852)

生物质炭对磷富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响..... 黄洋,郭晓,胡学玉 (2861)

基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评价..... 肖冰,薛培英,韦亮,刘成程,高培培,樊利敏,杜佳燕,刘文菊 (2869)

重构土壤垂直剖面重金属Cd赋存形态及影响因素..... 胡青青,沈强,陈飞,尹炳,邹宏光,庄红娟,张世文 (2878)

新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果..... 陈兆进,李英军,邵洋,林立安,徐鸽,陈彦,田伟,姚伦广,韩辉 (2889)

三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征..... 李丽娟,李昌晓,陈春桦,杨治华,陈雪梅 (2898)

滇池水中细菌和古菌氮代谢功能基因的空间分布..... 张宇,左剑恶,王丝可,Alisa Salimova,李爱军,李玲玲 (2908)

模拟升温对冰川前缘地微生物种群的影响..... 王愉琬,马安周,种国双,谢飞,周汉昌,刘国华,庄国强 (2918)

水肥气耦合对温室番茄土壤N₂O排放及番茄产量的影响..... 商子惠,蔡焕杰,陈慧,孙亚楠,李亮,朱艳,王晓云 (2924)

矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦的毒性作用..... 尚誉,杨丰隆,宁夏,董轶茹,桑楠 (2936)

海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价..... 汪慧娟,旷泽行,周贤,覃晓青,黄洪辉 (2942)

春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因素分析..... 贺玉晓,李珂,任玉芬,王思琪,方文颖 (2951)

热解温度和时间对香蒲生物炭性质的影响及生态风险评估..... 蔡朝卉,楚沉静,郑浩,罗先香,李锋民 (2963)

长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年)..... 蒋自然,金环环,王成金,叶士琳,黄艳豪 (2972)

《环境科学》征订启事(2595) 《环境科学》征稿简则(2687) 信息(2697, 2713, 2811)

不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较

桑雨璇¹, 杨珈乐², 熊怡¹, 尹文博¹, 汪华^{3*}, 王和云^{1*}

(1. 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 河湖生态修复及藻类利用湖北省重点实验室, 武汉 430068; 2. 武外英中学校, 武汉 430022; 3. 湖北省农业科学院植保土肥研究所, 武汉 430064)

摘要: 沉水植物光合作用形成的微环境有利于水体中钙和磷形成 $\text{CaCO}_3\text{-P}$ 共沉淀, 将水体磷迁移到基质, 避免植物腐烂后的二次污染. 但沉水植物形成 $\text{CaCO}_3\text{-P}$ 共沉淀的能力依赖植物种类和环境条件. 本研究以菹草和粉绿狐尾藻为研究对象, 设置无机添加磷质量浓度(0、0.2和2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和光照强度[66 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 和110 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$]两个变量, 测定其培养一周后植物相对生长速率、植株总磷、植株灰分磷和钙磷的含量, 以比较不同植物富集水体磷的实际能力和植物腐败后对水体磷增加的影响. 结果表明:①菹草在各种培养条件下的相对生长速率显著高于粉绿狐尾藻, 在外源性磷质量浓度为2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和光照强度为66 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 时, 相对生长速率达到最大;②无机磷添加显著影响了两种植物的灰分总磷(菹草95.681%和粉绿狐尾藻85.432%), 2种沉水植物灰分磷中Ca-P含量最高值均出现在高磷水平;③菹草的干重磷在各种处理下都低于粉绿狐尾藻, 但是灰分总磷和Ca-P在高磷水平大于粉绿狐尾藻. 结果表明, 菹草、粉绿狐尾藻在生长期均能有效吸收磷, 但2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 质量浓度下菹草对水体磷的实际去除能力大于粉绿狐尾藻.

关键词: 沉水植物; 钙磷; 灰分磷; 磷浓度; 光照

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)06-2698-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201909258

Comparative Phosphorus Accumulation and Ca-P Content of Two Submerged Plants in Response to Light Intensity and Phosphorus Levels

SANG Yu-xuan¹, YANG Jia-le², XIONG Yi¹, YIN Wen-bo¹, WANG Hua^{3*}, WANG He-yun^{1*}

(1. Key Laboratory of Ecological of Lakes and Rivers and Algal Utilization of Hubei Province, School of Civil and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. Wuhan Britain-China School, Wuhan 430022, China; 3. Institute for Plant Protection and Soil Science, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China)

Abstract: The micro-environment formed by the photosynthesis of submerged plants is conducive to the formation of $\text{CaCO}_3\text{-P}$ from co-precipitation of calcium and phosphorus in water, thereby permanently removing phosphorus from water to the bottom mud and avoiding secondary pollution after plants decay. However, $\text{CaCO}_3\text{-P}$ co-precipitation shows obvious specific-differences and environmental dependencies. In the present study, two different submerged plants, *Myriophyllum aquaticum* and *Potamogeton crispus*, were used as the research objects. Two variables, inorganic phosphorus level (0, 0.2, and 2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) and light intensity [66 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ and 110 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$], were set. After cultivating for a week, the plant relative growth rate, plant total phosphorus, plant ash phosphorus, and Ca-P were measured to analyze the actual ability of phosphorus accumulation and clarify the effect of plant corruption on phosphorus increase in the water body. Results revealed that under various culture conditions, the relative growth rates (RGR) of *P. crispus* were significantly higher than those of *M. aquaticum*, and RGR reached the maximum at a P level of 2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and a light intensity of 66 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$. The addition of inorganic phosphorus significantly affected plant ash phosphorus of the two plants (*P. crispus* 95.681%, *M. aquaticum* 85.432%), and the highest value of Ca-P content in the ash phosphorus of the two submerged plants appeared at a high phosphorus level. The total phosphorus in *P. crispus* was lower than that in *M. aquaticum* under various treatments, but the total ash phosphorus and Ca-P levels were higher than those in *M. aquaticum*. Consequently, *M. aquaticum* and *P. crispus* can effectively accumulate phosphorus during growth. However, the actual ability of *P. crispus* of removing phosphorus from water by the formation of $\text{CaCO}_3\text{-P}$ was higher than that of *M. aquaticum* at a P level of 2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

Key words: submerged plant; Ca-P; ash phosphorus; phosphorus concentration; light intensity

人类活动的干扰和磷肥的大量施用加快了自然界中的P元素进入水体的速度,破坏了磷循环的正常速率,导致了世界范围内的水体富营养化^[1],并进一步导致了全球范围内夏季藻华的恶化趋势^[2]. 沉水植物是浅水湖泊重要的功能群,不同沉水植物种类对磷变化的响应体现出明显的种间差异^[3~5],对水体磷富集适应性强的沉水植物种类会逐渐演化为优势种^[6].

沉水植物可以通过茎叶拦截和吸附水体中的可溶性磷,通过根部的吸收作用促进底质中的有机磷的迁移^[7,8]. 多数研究均以水体中磷的去除率或植物干

收稿日期: 2019-09-27; 修订日期: 2019-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(31670367)

作者简介: 桑雨璇(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为水体生态修复, E-mail: 929092705@qq.com

* 通信作者, E-mail: wanghua4@163.com; heyunwang2006@163.com

重全磷表征植物对水体的净化效果,一般去除率较高,干重磷含量较高的植物被认定为除磷效果好^[4,9]. 然而随着沉水植物的衰亡和腐败,植株生长旺盛时期所积累的磷将重新被释放到水体中. 王立志等^[10]发现黑藻和菹草在衰亡期会使沉积物和上覆水中各种磷含量显著增加. 另外的研究表明水体中被植物吸收或者吸附的磷,只有少量通过沉淀反应^[11]或者植物的生物钙化作用^[12,13]形成 $\text{CaCO}_3\text{-P}$ 共沉淀,富集在植株体表面. 与 CaCO_3 结合在一起的磷在植株经微生物原位分解后很难被生物重新利用,因此对水体磷水平不再有影响^[14]. 因此,钙磷可以表征植物从水体相向基底迁移磷的能力,比较不同植物的钙磷含量有利于更好地评估植物对水体磷的去除能力^[15].

在湖泊生态系统中,沉水植物的光合作用形成的微环境,或局部水体 Ca^{2+} 高度过饱和是控制湖泊 CaCO_3 沉淀的直接原因和形成细胞外 CaCO_3 自生沉淀的主要原因^[16]. 低于 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的低 Ca^{2+} 浓度发生的钙化主要为生物钙化,高于 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的高 Ca^{2+} 浓度则主要为以生物引发的物理化学钙化^[17]. 此时,水体 SRP 的去除可以通过 CaCO_3 晶体生长或 CaCO_3 沉淀时产生 $\text{CaCO}_3\text{-P}$ 共沉淀而去除^[11]. 在低 Ca^{2+} 浓度条件下,光合作用可直接诱导 14% CaCO_3 沉淀^[18], $\text{CaCO}_3\text{-P}$ 共沉淀除磷作用会因沉水植物光合作用加强而更加明显^[19,20].

粉绿狐尾藻 [*Myriophyllum aquaticum* (Vell.) Verdc.] 属于小二仙草科狐尾藻属,原产地为南美亚马孙河流域^[21],为多年生草本植物,可挺水或沉水生长,适应水环境能力强^[22],因此广泛应用于人工湿地的建设和富营养化河道水体的修复. 因其茎呈半蔓状,上部挺出水面,并伴有叶片匍匐于水面,能利用空气中的二氧化碳作为碳源,故不受水下光照和水体无机碳的限制. 菹草 (*Potamogeton crispus* L.) 为眼子菜属冠层型多年生沉水植物,分布我国南北各省,为世界广布种,也是长江中下游中富营养湖泊的优势种^[23]. 菹草能利用水中的 CO_2 和 HCO_3^- ,属于 HCO_3^- 利用型^[24]. 本实验选择粉绿狐尾藻和菹草两种不同生活型的植物为研究对象,控制光照和磷含量两个因素,以植物灰分磷和灰分磷组成为切入点,通过将灰分磷分为水溶性磷、有机磷和钙磷这 3 个组分,探究两种植物富集磷的实际能力和植物腐败后对水体磷增加的影响,以期选取水体富营养化修复的优势物种提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验材料与预培养

2017 年春,将取自梁子湖的菹草 (*P. crispus*) 和

取自内沙湖的粉绿狐尾藻 (*M. aquaticum*) 栽培在湖北工业大学资源与环境学院后面水池无遮荫的水泥池,自来水培养. 在 2018 年 3 月 10 日截取若干长势良好和叶片完整,长约 5~8 cm 的植物顶端,并用去离子水洗净植株表面,再用软毛刷清洗植株叶片,去除植株表面杂质和能与植株竞争营养的其他附着生物. 将清洗后的植株分开放置于 1 L 的玻璃烧杯中,取水池内的原水用玻璃纤维膜 (上海新亚, $0.45 \mu\text{m}$) 过滤除去藻类与大颗粒物质后添加到放置植株的烧杯中 [TP: $(0.0036 \pm 0.0012) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SRP: $(0.0021 \pm 0.0010) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$]. 烧杯置于恒温培养箱中,光照强度为 60% 光照,对应光量子强度为 $66 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,光暗比 = 12:12,温度控制为 20°C ,预培养一周,培养期间不更换培养液.

1.2 实验设计

预培养一周后,选取长势状况良好,已基本适应环境的植物顶端,将其转入 1 L 烧杯中,每个杯中约 4~5 株,并记录其重量,菹草鲜重约 3 g,粉绿狐尾藻鲜重约 5 g,每个烧杯中有不同磷浓度的培养液 1 L,并将其分成两组,每组置于不同光照的培养箱中. 外加磷源的浓度设置 3 个水平,分别是无添加磷 ($0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、中浓度磷 ($0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和高浓度磷 ($2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); 光照强度设置了两个水平,分别是 100% 光照和 60% 光照. 无机磷处理通过添加 K_2HPO_4 获得,光照处理通过调节光照培养箱获得. 本研究有 6 种处理 (表 1),平行处理为 4 个.

表 1 实验分组设计

实验编号	$\text{PO}_4^{3-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	光照 ¹⁾ /%	磷-光照
A	0	100	0~100
B	0.2	100	0.2~100
C	2	100	2~100
D	0	60	0~60
E	0.2	60	0.2~60
F	2	60	2~60

1) 100% 光照对应光量子强度为 $110 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 60% 光照对应光量子强度为 $66 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$

正式培养过程中的培养温度、光照周期设置与预实验保持一致,实验每隔 12 h,即在每个光周期开始的时候更换培养液,配置培养液的原水获取与预实验中一致. 本实验周期为 7 d. 实验结束后将植株冲洗,用纸擦拭,分析天平称取其鲜重. 并检测植物干重全磷和植株灰分磷及灰分磷组成.

1.3 数据获得

植物鲜重通过分析天平 (分度值 0.001 g) 测得,相对生长速率使用公式:

$$\text{RGR} = (\ln W_1 - \ln W_0) / t$$

式中, RGR 为植物相对生长速率 [$\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$]; W_0 为实验开始时植物鲜重 (mg); W_1 为实验结束时植物鲜重 (mg); t 为实验时间 (d). 植株干重全磷通过钼锑抗比色法 (GB 7887-87) 测定^[25], 然后将部分草样用马弗炉 (SX-4-10 型箱式电阻炉) 进行烧灰处理 (450°C , 24 h), 再分别用不同的试剂萃取以获得水溶性磷 ($\text{H}_2\text{O-P}$)、有机磷 (NaOH-P) 和钙磷 (Ca-P). 该方法包括: ①用 50 mL 蒸馏水提取样品 30 min 以获得水溶性 P ($\text{H}_2\text{O-P}$); ②用 50 mL 1.0 mol·L 的 NaOH 提取 20 h 以获得有机 P (NaOH-P); ③用 50 mL 1.0 mol·L 的 HCl 萃取 30 min 以释放 Ca 结合的钙 P (Ca-P)^[26], 水溶性磷 ($\text{H}_2\text{O-P}$) 有机磷 (NaOH-P) 和钙磷 (Ca-P) 这 3 个组分相加得到灰分总磷. 萃取后的溶液用过硫酸钾氧化法 (GB 11893-89) 测得对应磷含量.

1.4 数据分析

光照和磷水平对两种植物相对生长速率、干重全磷、灰分磷和各组分的影响通过二元方差分析获得, 处理间的差异通过 t -test 获得, 所有的分析通过 SPSS 23.0 进行, 采用 Origin 2016 绘制图.

2 结果与分析

2.1 相对生长速率

两种光照条件下, $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的磷添加显著提高了菹草的相对生长速率. 在外加磷质量浓度较低 (0 和 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时, 菹草的生长速率不受光照强度的影响. 在外源性磷质量浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、光照强度为 60% 时, 菹草的生长速率达到最大 [图 1(a)]. 二元方差分析表明磷质量浓度对菹草的生长速率影响更为显著 (69.657%), 见表 2.

在光照强度相同时, 粉绿狐尾藻的生长速率随磷浓度的增加呈现上升的趋势. 在外加磷浓度相同时, 粉绿狐尾藻的生长速率与光照无关 [图 1(b)]. 二元方差分析表明 (表 2) 磷浓度对粉绿的生长速率影响更为显著 (75%).

2.2 植株灰分磷组成

2.2.1 植物 Ca-P

在光照强度相同时, 菹草的 Ca-P 随磷质量浓度的增加呈现上升的趋势. 在外加磷质量浓度较低 (0 和 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时, 光照强度对菹草的 Ca-P 含量无显著性的影响. 在磷 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 60% 光照强度时菹草的 Ca-P 含量高于 100% 光照强度, 也是最大 Ca-P 含量 [图 2(a)]. 二元方差分析表明 (表 2) 磷质量浓度对菹草的 Ca-P 影响更为显著 (94.772%).

在外加磷质量浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和无外源性磷

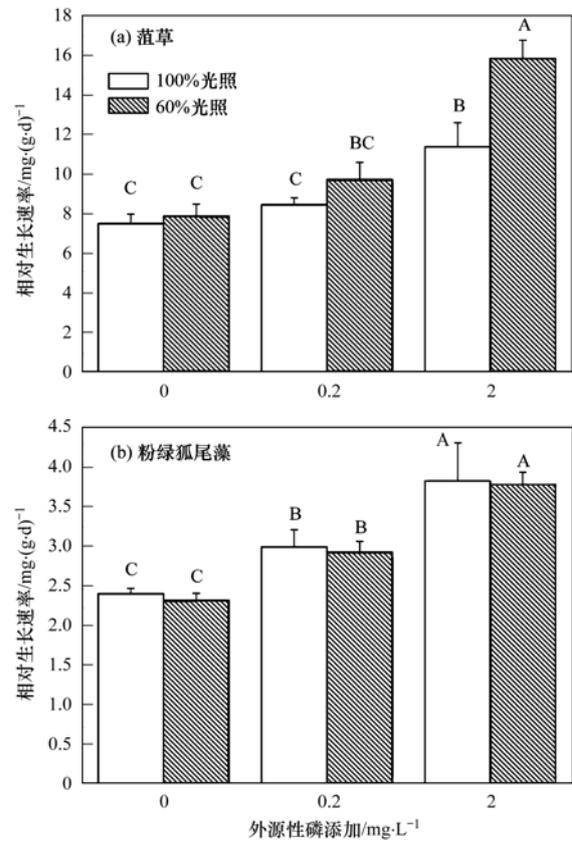


图 1 不同 P 添加-光照水平处理条件下的两种植物相对生长速率
Fig. 1 Relative growth rates of two plants under different P-addition-light treatment conditions

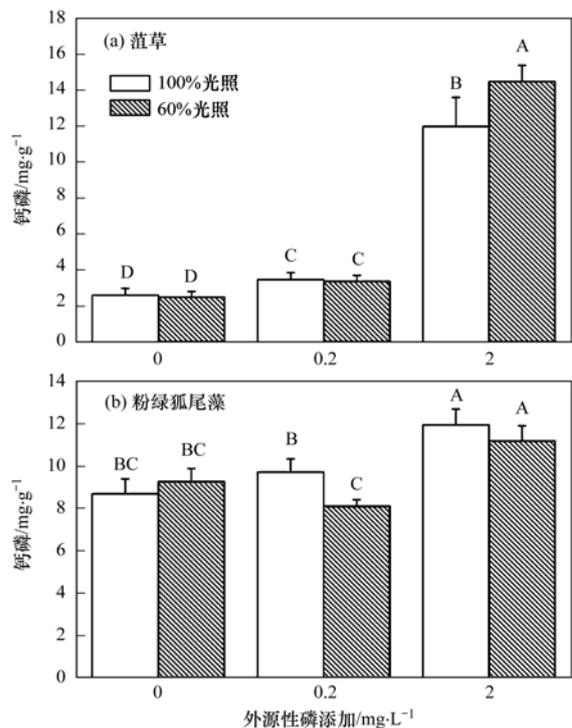


图 2 不同 P 添加-光照水平处理条件下的两种植物灰分中的钙磷
Fig. 2 Ca-P of two plants under different P-addition-light treatment conditions

添加时, 粉绿狐尾藻的 Ca-P 含量不受光照强度的影响. 在外加磷质量浓度为 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 高光条件下有更高的 Ca-P 含量. 两种光照条件下, 最大的 Ca-P 值均出现在高磷浓度添加 ($2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 二元方差分析表明磷质量浓度对粉绿狐尾藻 Ca-P 的影响更为

显著 (65.019%), 见表 2. 在 0 和 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 两种质量浓度磷添加时, 菹草的 Ca-P 均比粉绿狐尾藻小 ($P < 0.001$), 但在外加磷质量浓度为 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 菹草的 Ca-P 含量迅速升高, 大于粉绿狐尾藻 ($P < 0.05$).

表 2 外加磷和光照对植物生长速率、磷含量和组成差异的贡献百分比¹⁾

Table 2 Percentage of contribution of phosphorus and light to plant growth rate, phosphorus content, and compositional differences

植物	指标	贡献值(平方和的百分比)/%			误差
		磷	光照强度	磷×光照强度	
菹草	植物生长速率	69.657***	11.346***	8.443**	0.037
	干重全磷	95.551***	0.854**	2.142***	25.976
	灰分总磷	95.681***	1.080***	2.697***	35.885
	灰分水磷	94.014***	1.259***	3.674***	9.024
	灰分有机磷	94.689***	1.370***	2.845***	8.741
	灰分钙磷	94.772***	0.585 ^{ns}	1.522**	18.480
粉绿狐尾藻	植物生长速率	75.000***	4.167 ^{ns}	4.167 ^{ns}	0.004
	干重全磷	70.842***	14.472***	3.286 ^{ns}	85.111
	灰分总磷	85.432***	7.482***	1.422 ^{ns}	17.756
	灰分水磷	47.875***	7.806 ^{ns}	1.098 ^{ns}	8.146
	灰分有机磷	45.737***	44.868***	4.494**	6.164
	灰分钙磷	65.019***	3.935 ^{ns}	8.553 ^{ns}	12.736

1) 磷和光照强度分别表示外加磷质量浓度和光照对指标差异的贡献比; 磷×光照强度表示两个因素交互作用的贡献比; 贡献值(平方和的百分比)基于方差分析得出; * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$; *** 表示 $P < 0.001$; ^{ns} 表示影响不显著 ($P > 0.05$)

2.2.2 植物 $\text{H}_2\text{O-P}$

在光照强度相同时, 菹草的 $\text{H}_2\text{O-P}$ 含量随磷质量浓度的增加呈上升趋势. 在外加磷质量浓度较低 (0 和 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 时, 菹草的 $\text{H}_2\text{O-P}$ 含量不受光照强度的影响. 在 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 60% 光照强度时菹草的 $\text{H}_2\text{O-P}$ 含量高于 100% 光照强度, 也是最大 $\text{H}_2\text{O-P}$ 含量 [图 3(a)]. 二元方差分析表明 (表 2) 磷质量浓度对菹草 $\text{H}_2\text{O-P}$ 含量影响更为显著 (94.014%).

在外加磷质量浓度为 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 光照对粉绿狐尾藻的 $\text{H}_2\text{O-P}$ 含量无影响. 两种光照情况下, 最大的 $\text{H}_2\text{O-P}$ 值均出现在高磷浓度添加 ($2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 二元方差分析表明 (表 2) 磷质量浓度对粉绿狐尾藻的 $\text{H}_2\text{O-P}$ 影响更为显著 (47.875%). 在 0 和 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 两种质量浓度添加时, 菹草的 $\text{H}_2\text{O-P}$ 含量比粉绿狐尾藻小 ($P < 0.001$). 但在外加磷质量浓度为 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 菹草的 $\text{H}_2\text{O-P}$ 含量迅速升高, 大于粉绿狐尾藻 ($P < 0.05$).

2.2.3 植物 NaOH-P

在光照强度相同时, 菹草的 NaOH-P 含量随磷质量浓度的增加呈上升趋势. 在外加磷质量浓度较低 (0 和 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 时, 菹草的 NaOH-P 含量不受光照强度的影响. 在 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 60% 光照强度时菹草的 NaOH-P 含量高于 100% 光照强度, 也是最大 NaOH-P 含量 [图 4(a)]. 二元方差分析表明 (表 2)

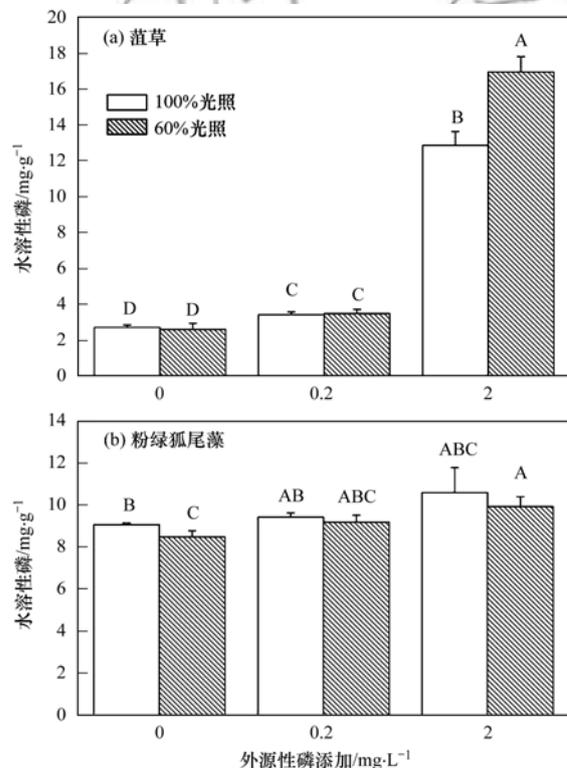


图 3 不同 P 添加-光照水平处理条件下的两种植物灰分中的水溶性磷

Fig. 3 $\text{H}_2\text{O-P}$ of two plants under different P-addition-light treatment conditions

磷质量浓度对菹草 NaOH-P 含量影响更为显著 (94.689%).

在外加磷质量浓度相同时, 粉绿狐尾藻的 NaOH-P 含量存在着显著差异, 60% 光照强度时粉绿狐尾藻的 NaOH-P 含量高于 100% 光照强度. 两种光照条件下, 粉绿狐尾藻的 NaOH-P 含量最大值均出现在 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 二元方差分析表明磷质量浓度和光照均对粉绿的 NaOH-P 含量有显著性影响(磷质量浓度影响占比 45.737%; 光照强度影响占比 44.868%, 表 2). 在 0 和 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 两种质量浓度添加时, 菹草的 NaOH-P 含量比粉绿狐尾藻小 ($P < 0.001$). 但在外加磷质量浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 菹草的 NaOH-P 含量迅速升高, 大于粉绿狐尾藻 ($P < 0.05$).

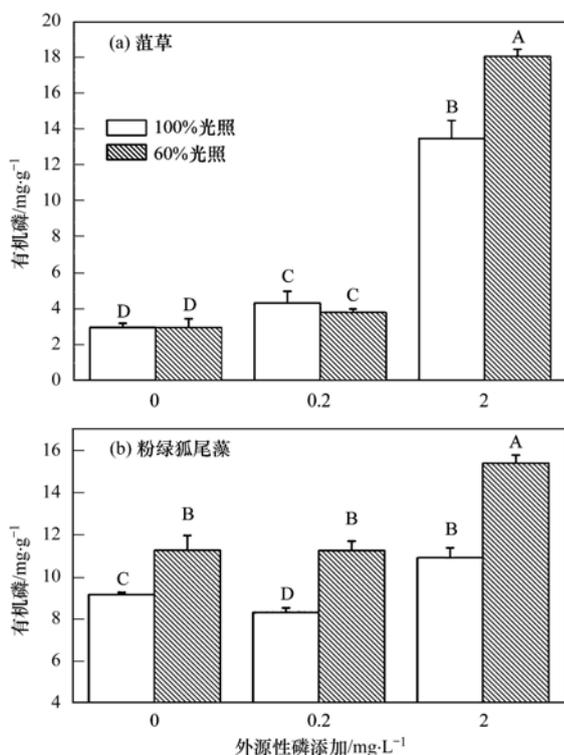


图 4 不同 P 添加-光照水平处理条件下的两种植物灰分中的 NaOH-P

Fig. 4 NaOH-P levels of two plants under different P-addition-light treatment conditions

2.3 植物灰分总磷和植物全磷

2.3.1 植物灰分总磷

植物灰分磷由可溶性磷 ($\text{H}_2\text{O-P}$)、有机磷 (NaOH-P) 和钙磷 (Ca-P) 组成.

在光照强度相同时, 菹草的灰分总磷含量随磷质量浓度的增加呈上升趋势. 在外加磷质量浓度较低 (0 和 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时, 菹草的总磷含量不受光照强度的影响. 在 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 60% 光照强度时菹草的总磷含量高于 100% 光照强度, 也是最大总磷含量 [图 5(a)]. 二元方差分析表明磷质量浓度对菹草总磷含量影响更为显著 (95.681%, 表 2).

在外加磷质量浓度为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和无外源性

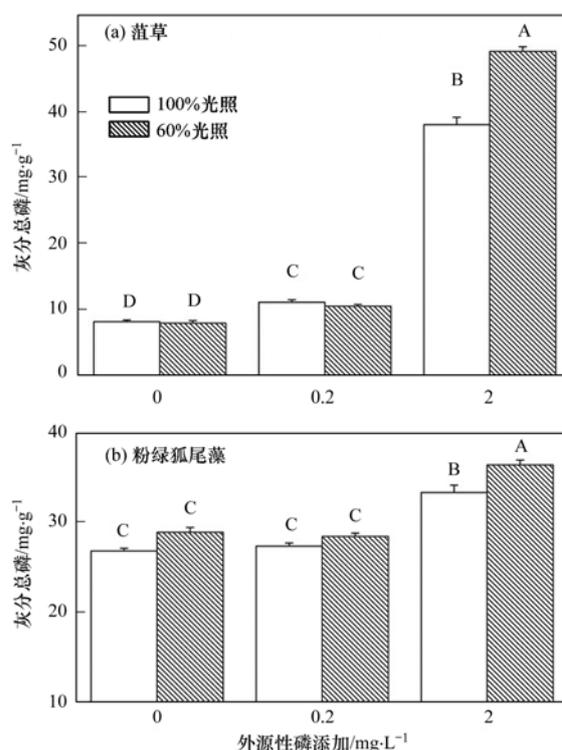


图 5 不同 P 添加-光照水平处理条件下的两种植物灰分总磷
Fig. 5 Ash phosphorus content of the two plants under different P-addition-light treatment conditions

磷添加时, 粉绿狐尾藻的总磷含量不受光照强度的影响. 两种光照情况下, 最大的总磷值均出现在高磷浓度添加 ($2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 二元方差分析表明磷质量浓度对粉绿狐尾藻灰分总磷的影响更为显著 (85.432%, 表 2). 在 0 和 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 两种质量浓度添加时, 菹草的灰分总磷含量比粉绿狐尾藻小 ($P < 0.05$). 但在外加磷质量浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 菹草的灰分总磷含量迅速升高, 大于粉绿狐尾藻 ($P < 0.05$).

2.3.2 植株全磷

在光照强度相同时, 菹草的干重全磷随磷质量浓度的增加呈现上升的趋势. 在无外加磷源时, 菹草的全磷在两种光照强度无显著性差异. 在较高磷质量浓度 ($0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时, 光照强度不同, 菹草的全磷含量存在着显著差异, 在外源性添加磷质量浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、光照强度为 60% 时, 菹草的全磷含量最高 [图 6(a)]. 二元方差分析表明光照和磷质量浓度对菹草的干重全磷有显著的交互影响, 其中光照强度的影响更为显著 (95.551%, 表 2).

$2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的磷添加显著提高了粉绿狐尾藻的干重全磷含量. 在相同磷质量浓度时, 粉绿狐尾藻的全磷含量不受光照强度的影响. 在磷质量浓度较低 (0 和 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时, 100% 光照强度粉绿狐尾藻的全磷含量高于 60% 光照强度; 在高磷质量浓度时,

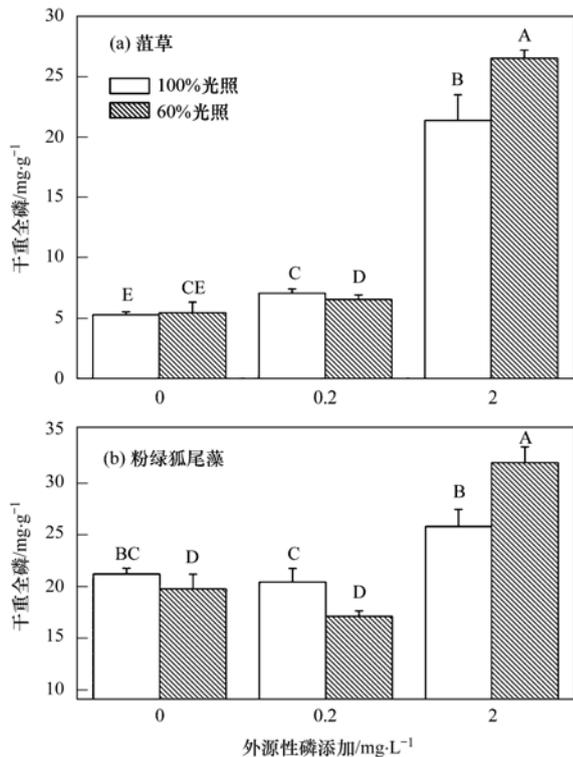


图6 不同P添加-光照水平处理条件下的两种植物干重全磷
Fig. 6 Total phosphorus contents of the two plants under different P-addition-light treatment conditions

100%光照强度粉绿狐尾藻的全磷含量低于60%光照强度。在光照强度相同时,粉绿狐尾藻的全磷随磷质量浓度的增加呈现上升的趋势。二元方差分析表明磷质量浓度对粉绿狐尾藻的干重全磷影响更为显著(70.842%,表2)。在外源性添加磷质量浓度为 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,光照强度为60%时,粉绿狐尾藻的全磷含量最高。

3 讨论

3.1 光照水平对植物生长的影响

在实验设置的3组生长条件下,菹草的相对生长速率都高于粉绿狐尾藻。在本实验设置的两组光照条件中, $66\ \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 光照条件下菹草生长状况显著好于 $110\ \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 光照条件;而粉绿狐尾藻在两种光照水平下的相对生长速率无显著差异。分析其主要原因是两种植物在水中的生长状态不同,故其对光照的需求也不同。菹草为多年生沉水草,对光照需求较低,因此较低光照有利于植物生长。而粉绿狐尾藻的多数叶片匍匐在水面,喜强光照。Tan等^[27]的研究表明,光照强度的降低和过度遮阴将抑制水体中粉绿狐尾藻的生长。

3.2 灰分磷各组分意义

本实验通过不同的处理方法将植物灰分磷分成水溶性磷($\text{H}_2\text{O-P}$)、有机磷(NaOH-P)和钙磷(Ca-P)

P)这3个部分。其中,水溶性磷($\text{H}_2\text{O-P}$)用来表征植物对水体磷的吸附作用,而这种吸附作用是可逆的^[12,13]。因此,沉水植物死亡后,作为可逆性吸附反应的结果,水溶性磷($\text{H}_2\text{O-P}$)以可溶性磷的形式重新进入水体,直接被其它水生生物利用,而有机磷(NaOH-P)则通过微生物的分解作用成为可溶性无机磷^[28,29],这能解释白洋淀菹草大量死亡后水体磷的急剧上升^[30]。

与水溶性磷($\text{H}_2\text{O-P}$)和有机磷(NaOH-P)相比,一般情况下钙磷(Ca-P)不易被溶解和吸附,是生物难以利用的磷,在植物死亡分解后这部分磷经过一系列的迁移转化最终以稳定的形态埋藏在沉积物中^[12-14]。朱端卫等^[11]的研究发现,由沉水植物光合作用驱动的钙泵会促进水体磷、 CO_3^{2-} 和钙离子共沉淀形成 $\text{CaCO}_3\text{-P}$ 共沉淀,从而维持上覆水较低的磷水平。这也是在植株上形成稳定 Ca-P 复合物的钙化的大型植物轮藻群落内水体可溶性磷含量低,并且基质中含有大量碳酸盐的主要原因之一^[31]。因此,钙磷实际上可以表征植物对水体磷的真正去除能力。陈琦^[15]的研究表明无机碳添加通过影响菹草和粉绿狐尾藻灰分中的钙磷来影响水体磷向基质的迁移。在本实验中两种植物菹草和粉绿狐尾藻的钙磷(Ca-P)含量均受到外源性添加磷浓度的影响,这与陈琦^[15]的实验结果一致。在磷浓度为 $2\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时两种植物的钙磷(Ca-P)含量达到最高,印证了较高的磷浓度可以促进钙磷共沉淀的产生^[32]。

3.3 干重磷和灰分磷的差异

作为主要的初级生产者,水生植物在改善水体环境和维持良好水质中具有不可替代的作用^[33]。水生植物能直接从水体中吸收N、P等营养物质,也可通过影响微生物代谢等方式减少水体营养盐的循环,从而降低水体富营养化水平^[8]。杨文斌等的研究表明,狐尾藻和金鱼藻均可有效吸收上覆水和间隙水中的磷,使水体磷浓度保持较低水平^[35]。其中植物自身的代谢吸收是最为主要的方式^[32]。因此,植株干重磷含量和磷吸收量通常作为筛选净化水质优势植物的重要指标^[35-37]。

本实验中,磷的添加和浓度的变化显著影响了菹草和粉绿狐尾藻的干重磷(表2)。两种植物干重磷更高值均出现在高磷浓度水平(图6),说明两种植物能适应不同磷浓度的水体,且在腐败衰亡前对磷浓度较高水体处理效果好。菹草的干重磷在各种处理下都低于粉绿狐尾藻,若以干重磷含量作为植物富集水体磷的能力指标,菹草的富集能力低于粉绿狐尾藻。然而水生植物的腐解是导致水体污染源的重要环节,在植物腐败衰亡时,磷会优于其他元

素被大量释放,加重湖泊污染^[30,38]. 本研究中,菹草灰分总磷和钙磷在高磷水平大于粉绿狐尾藻,如前所述,钙磷才是植物从水体最终去除的磷,因此,更高的钙磷含量表明高磷浓度($2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)下菹草比粉绿狐尾藻的磷去除能力更强. 这与陈琦等^[15,32]的研究一致,即比较不同植物的钙磷含量有利于更好地评估植物对水体磷的去除能力.

4 结论

(1) 菹草相对生长速率显著高于粉绿狐尾藻;两种植物的最大生长速率均出现在高磷水平,但由于生长型的差异,菹草在高磷质量浓度和低光照水平条件下生长速率最大,而光照对粉绿狐尾藻的生长无影响.

(2) 菹草和粉绿狐尾草在生长过程中均能有效富集水体中的磷,二元方差分析表明无机磷的添加对两种水生植物的水溶性磷($\text{H}_2\text{O-P}$)、有机磷(NaOH-P)和钙磷(Ca-P)均有显著影响. 且菹草和粉绿狐尾藻的钙磷(Ca-P)含量更多地受到外源性添加磷的影响,在磷质量浓度为 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时钙磷(Ca-P)含量均达到最高,证明磷浓度增加能促进 Ca-P 共沉淀的生成.

(3) 菹草的干重磷在各种处理下都低于粉绿狐尾藻,但灰分总磷和钙磷在高磷水平大于粉绿狐尾藻. 因此,仅以植物干重磷比较植物对磷的去除能力容易引起争议,以植物灰分磷组成和钙磷含量比较植物去除水体磷的能力更为准确.

参考文献:

- [1] Yuan Z W, Jiang S Y, Sheng H, *et al.* Human perturbation of the global phosphorus cycle: changes and consequences [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52** (5): 2438-2450.
- [2] Ho J C, Michalak A M, Pahlevan N. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s [J]. *Nature*, 2019, 574(7780): 667-670.
- [3] 高敏, 刘鑫, 邓建才, 等. 不同水质对沉水植物马来眼子菜主要生理指标的影响研究 [J]. *生态环境学报*, 2015, **24** (11): 1886-1892.
Gao M, Liu X, Deng J C, *et al.* Studies on effects of water quality in different lake zones on main physiological indices of *Potamogeton wrightii* morong [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24** (11): 1886-1892.
- [4] 熊剑, 黄建团, 聂雷, 等. 不同营养条件对金鱼藻净化作用及其生理生态的影响 [J]. *水生生物学报*, 2013, **37** (6): 1066-1072.
Xiong J, Huang J T, Nie L, *et al.* The effects of nutrient concentration on purification ability and eco-physiology of *Ceratophyllum demersum* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, **37** (6): 1066-1072.
- [5] 蒋鑫焱, 翟建平, 黄蕾, 等. 不同水生植物富集氮磷能力的试验研究 [J]. *环境保护科学*, 2006, **32** (6): 13-16.
Jiang X Y, Zhai J P, Huang L, *et al.* Experimental study on enrichment of nitrogen and phosphorus in several hydrophytes [J]. *Environmental Protection Science*, 2006, **32** (6): 13-16.
- [6] 吴爱平, 吴世凯, 倪乐意. 长江中游浅水湖泊水生植物氮磷含量与水柱营养的关系 [J]. *水生生物学报*, 2005, **29** (4): 406-412.
Wu A P, Wu S K, Ni L Y. Study of macrophytes nitrogen and phosphorus contents of the shallow lakes in the middle reaches of Changjiang river [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2005, **29** (4): 406-412.
- [7] Gabrielson J O, Perkins M A, Welch E B. The uptake, translocation and release of phosphorus by *Elodea densa* [J]. *Hydrobiologia*, 1984, **111** (1): 43-48.
- [8] 吴振斌, 邱东茹, 贺锋, 等. 沉水植物重建对富营养水体氮磷营养水平的影响 [J]. *应用生态学报*, 2003, **14** (8): 1351-1353.
Wu Z B, Qiu D R, He F, *et al.* Effects of rehabilitation of submerged macrophytes on nutrient level of a eutrophic lake [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14** (8): 1351-1353.
- [9] 任文君, 田在锋, 宁国辉, 等. 4种沉水植物对白洋淀富营养化水体净化效果的研究 [J]. *生态环境学报*, 2011, **20** (2): 345-352.
Ren W J, Tian Z F, Ning G H, *et al.* Purification efficiency of four species submerged macrophytes for the eutrophic water in Baiyangdian Lake [J]. *Ecology and Environmental Science*, 2011, **20** (2): 345-352.
- [10] 王立志, 王国祥. 衰亡期沉水植物对水和沉积物磷迁移的影响 [J]. *生态学报*, 2013, **33** (17): 5426-5437.
Wang L Z, Wang G X. Influence of submerged macrophytes on phosphorus transference between sediment and overlying water in decomposition period [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33** (17): 5426-5437.
- [11] 朱端卫, 朱红, 倪玲珊, 等. 沉水植物驱动的水环境钙泵与水体磷循环的关系 [J]. *湖泊科学*, 2012, **24** (3): 355-361.
Zhu D W, Zhu H, Ni L S, *et al.* Relationship between calcium pump driven by submerged macrophytes and phosphorus cycle in water [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, **24** (3): 355-361.
- [12] Kufel L, Biardzka E, Strzałek M. Calcium carbonate incrustation and phosphorus fractions in five charophyte species [J]. *Aquatic Botany*, 2013, **109**: 54-57.
- [13] Kufel L, Strzalek M, Biardzka E. Site- and species-specific contribution of charophytes to calcium and phosphorus cycling in lakes [J]. *Hydrobiologia*, 2016, **767** (1): 185-195.
- [14] James W F, Barko J W, Field S J. Phosphorus mobilization from littoral sediments of an inlet region in Lake Delavan, Wisconsin [J]. *Archiv fur Hydrobiologie*, 1996, **138** (2): 245-257.
- [15] 陈琦, 黄飞, 刘瑛, 等. 无机碳和磷添加对两种沉水植物磷富集和灰分磷组成的影响 [J]. *水生态学杂志*, 2019, **40** (3): 58-64.
Chen Q, Huang F, Liu Y, *et al.* Effect of adding bicarbonate and phosphorus on phosphorus accumulation in two submerged plants and on the content and fractioning of phosphorus in plant residues [J]. *Journal of Hydroecology*, 2019, **40** (3): 58-64.
- [16] 吴丰昌, 万国江. 淡水湖泊碳酸钙自生沉淀生物成因新证据和成因解释 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 1994, (2): 71-72.
- [17] 张道勇, 潘响亮, 张京梅. 环境因子对 *Synechocystis* sp. 钙化动力学的影响 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2008, **27** (2): 105-111.
Zhang D Y, Pan X L, Zhang J M. Effects of environmental factors on calcification kinetics of *Synechocystis* sp. [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2008, **27** (2): 105-

- 111.
- [18] Pentecost A, Franke U. Photosynthesis and calcification of the stromatolitic freshwater cyanobacterium *Rivularia* [J]. *European Journal of Phycology*, 2010, **45**(4): 345-353.
- [19] Dittrich M, Koschel R. Interactions between calcite precipitation (natural and artificial) and phosphorus cycle in the hardwater lake [J]. *Hydrobiologia*, 2002, **469**(1-3): 49-57.
- [20] House W A. Geochemical cycling of phosphorus in rivers [J]. *Applied Geochemistry*, 2003, **18**(5): 739-748.
- [21] Li Z Y, Hsieh C F. New materials of the genus *Myriophyllum* L. (Haloragaceae) in Taiwan [J]. *Taiwania*, 1996, **41**(4): 322-328.
- [22] Hussner A, Meyer C, Busch J. The influence of water level and nutrient availability on growth and root system development of *Myriophyllum aquaticum* [J]. *Weed Research*, 2009, **49**(1): 73-80.
- [23] 高镜清, 熊治廷, 张维昊, 等. 常见沉水植物对东湖重度富营养化水体磷的去除效果 [J]. *长江流域资源与环境*, 2007, **16**(6): 796-800.
Gao J Q, Xiong Z T, Zhang W H, *et al.* Removal efficiency of phosphorus in hypertrophic lake donghu water by common submerged macrophytes [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, **16**(6): 796-800.
- [24] Kahara S N, Vermaat J E. The effect of alkalinity on photosynthesis-light curves and inorganic carbon extraction capacity of freshwater macrophytes [J]. *Aquatic Botany*, 2003, **75**(3): 217-227.
- [25] 董鸣. 陆地生物群落调查观测与分析 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [26] Dou Z, Toth J D, Galligan D T, *et al.* Laboratory procedures for characterizing manure phosphorus [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, **29**(2): 508-514.
- [27] Tan B C, He H, Gu J, *et al.* Effects of nutrient levels and light intensity on aquatic macrophyte (*Myriophyllum aquaticum*) grown in floating-bed platform [J]. *Ecological Engineering*, 2019, **128**: 27-32.
- [28] Maurer M, Abramovich D, Siegrist H, *et al.* Kinetics of biologically induced phosphorus precipitation in waste-water treatment [J]. *Water Research*, 1999, **33**(2): 484-493.
- [29] Drizo A, Comeau Y, Forget C, *et al.* Phosphorus saturation potential; a parameter for estimating the longevity of constructed wetland systems [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(21): 4642-4648.
- [30] 张菊, 邓焕广, 吴爱琴, 等. 东平湖菹草腐烂分解及其对水环境的影响 [J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(9): 2590-2596.
Zhang J, Deng H G, Wu A Q, *et al.* Decomposition of *Potamogeton crispus* and its effect on the aquatic environment of Dongping Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(9): 2590-2596.
- [31] Pelechaty M, Pukacz A, Apolinarska K, *et al.* The significance of *Chara* vegetation in the precipitation of lacustrine calcium carbonate [J]. *Sedimentology*, 2013, **60**(4): 1017-1035.
- [32] 陈琦, 王和云. 钙离子添加对沉水植物菹草 (*Potamogeton crispus* L.) 和金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum* L.) 富集水体磷的影响 [J]. *湖泊科学*, 2020, **32**(2): 406-416.
Chen Q, Wang H Y. Effect of calcium addition on phosphorus enrichment capacity of *Potamogeton crispus* L. and *Ceratophyllum demersum* L. in water bodies [J]. *Journal of Lake Science*, 2020, **32**(2): 406-416.
- [33] 吴振斌, 邱东茹, 贺锋, 等. 水生植物对富营养水体水质净化作用研究 [J]. *武汉植物学研究*, 2001, **19**(4): 299-303.
Wu Z B, Qiu D R, He F, *et al.* Studies on eutrophicated water quality improvement by means of aquatic macrophytes [J]. *Journal of WuHan Botanical Research*, 2001, **19**(4): 299-303.
- [34] 王立志, 王国祥, 俞振飞, 等. 沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(2): 385-392.
Wang L Z, Wang G X, Yu Z F, *et al.* Influence of submerged macrophytes on phosphorus transference between sediment and overlying water in the growth period [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(2): 385-392.
- [35] 杨文斌, 高顺峰, 万锐, 等. 两种沉水植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2145-2153.
Yang W B, Gao S F, Wan R, *et al.* Effects of submerged macrophytes on different phosphorus fractions in overlying water and interstitial water [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2145-2153.
- [36] 黄子贤, 张饮江, 马海峰, 等. 4 种沉水植物对富营养化水体氮磷的去除能力 [J]. *生态科学*, 2011, **30**(2): 102-106.
Huang Z X, Zhang Y J, Ma H F, *et al.* A comparative study on removal efficiency of four submerged plants on phosphorus and nitrogen in eutrophic water under different planting density [J]. *Ecological Science*, 2011, **30**(2): 102-106.
- [37] 金树权, 周金波, 包薇红, 等. 5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 156-161.
Jin S Q, Zhou J B, Bao W H, *et al.* Comparison of nitrogen and phosphorus uptake and water purification ability of five submerged macrophytes [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 156-161.
- [38] 韩红娟, 翟水晶, 胡维平. 马来眼子菜腐烂分解氮磷转化模型研究 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(6): 1483-1488.
Han H J, Zhai S J, Hu W P. Modelling nitrogen and phosphorus transfer in *Potamogeton malaiianus* Miq. decomposition [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(6): 1483-1488.

CONTENTS

Mixed State and Sources of Fine Particulate Matter in the Summer in Tianjin City Based on Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	LIN Qiu-ju, XU Jiao, LI Mei, <i>et al.</i>	(2505)
Characteristics and Sources of Inorganic Ions and Organic Acids in Precipitation in the Northern Suburb of Nanjing, China	YANG Xiao-ying, CAO Fang, LIN Yu-qi, <i>et al.</i>	(2519)
Seasonal Variation of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xi'an	HUANG Han-han, WANG Yu-qin, LI Sheng-ping, <i>et al.</i>	(2528)
Effect of Liquid Water Content of Particles and Acidity of Particulate Matter on the Formation of Secondary Inorganic Components in Xinjiang Petrochemical Industrial Area	LIU Hui-bin, Dilinuer-Talifu, WANG Xin-ming, <i>et al.</i>	(2536)
Effect of Biomass Burning on the Light Absorption Properties of Water Soluble Organic Carbon in Atmospheric Particulate Matter in Changchun	MENG De-you, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i>	(2547)
Chemical Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Shanghai During an Ozone and Particulate Pollution Episode in May 2019	WANG Qian	(2555)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in the Nanjing Industrial Area in Autumn	CAO Meng-yao, LIN Yu-chi, ZHANG Yan-lin	(2565)
Ambient VOCs Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of Air Pollution in Spring in Zhengzhou	REN Yi-jun, MA Shuang-liang, WANG Si-wei, <i>et al.</i>	(2577)
Characteristics of VOCs and Their Roles in Ozone Formation at a Regional Background Site in Beijing, China	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, QIU Yu-lu, <i>et al.</i>	(2586)
Emission Characteristics of the Catering Industry in Beijing	SUN Cheng-yi, BAI Hua-hua, CHEN Xue, <i>et al.</i>	(2596)
Emission Factors and Emission Inventory of Agricultural Machinery in Beijing Under Real-world Operation	WANG Kai, FAN Shou-bin, QI Hao-yun	(2602)
Localization of Soil Wind Erosion Dust Emission Factor in Beijing	LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, BI Xiao-hui, <i>et al.</i>	(2609)
Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Angström Exponent in the Yangtze River Delta Based on MODIS_C061	ZHANG Ying-lei, CUI Xi-min	(2617)
Fate Simulation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl in the Bohai Rim Using the Multimedia Model	ZHANG Yi, MA Yan-fei, SONG Shuai, <i>et al.</i>	(2625)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Sediment Interstitial Water from Gangnan Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUAN Shi-chao, <i>et al.</i>	(2635)
Environmental Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in the Sediments of a River-Lake System	LI Yue-zhao, CHEN Hai-yang, SUN Wen-chao	(2646)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Yitong River City Area	JIANG Shi-xin, ZHAI Fu-jie, ZHANG Gang, <i>et al.</i>	(2653)
Identifying Nitrate Sources in a Typical Karst Underground River Basin	ZHAO Ran, HAN Zhi-wei, SHEN Chun-hua, <i>et al.</i>	(2664)
Influence of Nutrient Pulse Input on Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Algal Growth in the Sediment-Water System of Lake Taihu	CHEN Jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i>	(2671)
Temporal and Spatial Variation Patterns of Picophytoplankton and Their Correlations with Environmental Factors During the Wet Season in East Lake Dongting	LI Sheng-nan, CHEN Hao-yu, PENG Hua, <i>et al.</i>	(2679)
Toxicological Effects of Enrofloxacin and Its Removal by Freshwater Micro-Green Algae <i>Dictyosphaerium</i> sp.	WANG Zhen-fang, HAN Zi-yu, WANG Meng-xue, <i>et al.</i>	(2688)
Comparative Phosphorus Accumulation and Ca-P Content of Two Submerged Plants in Response to Light Intensity and Phosphorus Levels	SANG Yu-xuan, YANG Jia-le, XIONG Yi, <i>et al.</i>	(2698)
Effect of Calcium Peroxide Composite Tablets on Water Remediation and Phosphorus Control in Sediment	ZHANG Shuai, LI Da-peng, DING Yu-qin, <i>et al.</i>	(2706)
Spatial Differentiation and Driving Analysis of Nitrogen in Rice Rotation Based on Regional DNDC: Case Study of Jinjiang River Watershed	WANG Ya-nan, SHUI Wei, QI Xin-hua, <i>et al.</i>	(2714)
Low Temperature Ammonia Nitrogen Removal from an Iron, Manganese, and Ammonia Groundwater Purification Process with Different Concentrations of Iron and Manganese	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(2727)
Degradation of RBKS by High Crystallinity Mn-Fe LDH Catalyst Activating Peroxymonosulfate	LI Li, WU Li-ying, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i>	(2736)
Mechanisms of Fe-cyclam/H ₂ O ₂ System Catalyzing the Degradation of Rhodamine B	YU Yu-qing, CHEN Xiang-yu, CAI Quan-hua, <i>et al.</i>	(2746)
Removal of Nitrate Nitrogen by Microbial Photoelectrochemical Cell; PANI/TiO ₂ -NTs as a Photoanode	LU Yi, ZHOU Hai-shan, PENG Rui-jian, <i>et al.</i>	(2754)
Performance and Membrane Fouling Characteristics of Mariculture Wastewater Treated by Anoxic MBR-MMR	CHEN Fan-yu, XU Zhong, YOU Hong, <i>et al.</i>	(2762)
Effect of HRT on Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal in Modified A ² /O-BAF	ZHAO Kai-liang, LIU An-di, NAN Yan-bin, <i>et al.</i>	(2771)
Effect of Ni(II) on Anaerobic Ammonium Oxidation and Changes in Kinetics	SUN Qi, ZHAO Bai-hang, FAN Sa, <i>et al.</i>	(2779)
Removal of Urea by Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Mixed Strains and Effects of Heavy Metals and Salinity	WANG Meng-qing, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i>	(2787)
Start-up Characteristics of SNAD Process and Functional Abundance Succession of Volcanic Rock Biological Aerated Filter	XUE Jia-jun, ZHANG Shao-qing, ZHANG Li-qiu, <i>et al.</i>	(2796)
Effect of Free Hydroxylamine on the Activity of Two Typical Nitrite-oxidizing Bacteria	SHEN Chen, ZHANG Shu-jun, PENG Yong-zhen	(2805)
Interference of Dead Cell DNA on the Analysis of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in Anaerobic Digestion Sludge	SU Yu-ao, LIU Hong-bo, MAO Qiu-yan, <i>et al.</i>	(2812)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Arable Land Soil of China	CHEN Wen-xuan, LI Qian, WANG Zhen, <i>et al.</i>	(2822)
Construction and Application of Early Warning System for Soil Environmental Quality	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(2834)
Response of Aggregate Distribution to Input Straw and Their Linkages to Organic Carbon Mineralization in Soils Developed from Five Different Parent Materials	MAO Xia-li, QIU Zhi-teng, ZHANG Shuang, <i>et al.</i>	(2842)
Response of Extracellular Enzyme Activities to Substrate Availability in Paddy Soil with Long-term Fertilizer Management	NING Yu-fei, WEI Liang, WEI Xiao-meng, <i>et al.</i>	(2852)
Effects of Biochar on Bioavailability of Two Elements in Phosphorus and Cadmium-Enriched Soil and Accumulation of Cadmium in Crops	HUANG Yang, GUO Xiao, HU Xue-yu	(2861)
Characteristics of Cd, As, and Pb in Soil and Wheat Grains and Health Risk Assessment of Grain-Cd/As/Pb on the Field Scale	XIAO Bing, XUE Pei-ying, WEI Liang, <i>et al.</i>	(2869)
Reconstructed Soil Vertical Profile Heavy Metal Cd Occurrence and Its Influencing Factors	HU Qing-qing, SHEN Qiang, CHEN Fei, <i>et al.</i>	(2878)
Bacterial Community Composition in Cadmium-Contaminated Soils in Xixiang City and Its Ability to Reduce Cadmium Bioaccumulation in Pak Choi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	CHEN Zhao-jin, LI Ying-jun, SHAO Yang, <i>et al.</i>	(2889)
Root Activities of Re-Vegetated Plant Species Regulate Soil Nutrients and Bacterial Diversity in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Li-juan, LI Chang-xiao, CHEN Chun-hua, <i>et al.</i>	(2898)
Spatial Distribution of Nitrogen Metabolism Functional Genes of Eubacteria and Archaeobacteria in Dianchi Lake	ZHANG Yu, ZUO Jian-e, WANG Si-ke, <i>et al.</i>	(2908)
Effect of Simulated Warming on Microbial Community in Glacier Forefield	WANG Yu-wan, MA An-zhou, CHONG Guo-shuang, <i>et al.</i>	(2918)
Effect of Water-Fertilizer-Gas Coupling on Soil N ₂ O Emission and Yield in Greenhouse Tomato	SHANG Zi-hui, CAI Huan-jie, CHEN Hui, <i>et al.</i>	(2924)
Toxicity of Soil Leachate from Coal Gangue and Its Surrounding Village of Barley (<i>Hordeum vulgare</i>)	SHANG Yu, YANG Feng-long, NING Xia, <i>et al.</i>	(2936)
Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution in Marine Organisms from Estuaries of Changhua River in Hainan Province	WANG Hui-juan, KUANG Ze-xing, ZHOU Xian, <i>et al.</i>	(2942)
Characteristics of Macrobenthos Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Rivers of Beijing in Spring	HE Yu-xiao, LI Ke, REN Yu-fen, <i>et al.</i>	(2951)
Effect of Pyrolytic Temperature and Time on Characteristics of <i>Typha angustifolia</i> Derived Biochar and Preliminary Assessment of the Ecological Risk	CAI Zhao-hui, CHU Chen-jing, ZHENG Hao, <i>et al.</i>	(2963)
Measurement of Traffic Carbon Emissions and Pattern of Efficiency in the Yangtze River Economic Belt (1985-2016)	JIANG Zi-ran, JIN Huan-huan, WANG Cheng-jin, <i>et al.</i>	(2972)