

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

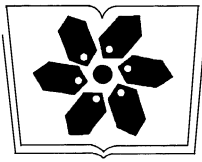
Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 17 期 Vol.33 No.17 **2013**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 17 期 2013 年 9 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 植物角质层蜡质的化学组成研究综述 曾 琼, 刘德春, 刘 勇 (5133)
- 中国滨海盐沼湿地碳收支与碳循环过程研究进展 曹 磊, 宋金明, 李学刚, 等 (5141)

个体与基础生态

- 秸秆隔层对盐碱土水盐运移及食葵光合特性的影响 赵永敢, 逢焕成, 李玉义, 等 (5153)
- 盐地碱蓬二型性种子及其幼苗对盐渍环境的适应性 刘 艳, 周家超, 张晓东, 等 (5162)
- 不同抗旱性花生品种的根系形态发育及其对干旱胁迫的响应 丁 红, 张智猛, 戴良香, 等 (5169)
- 夏季苹果新梢生理指标与抗苹果绵蚜的关系 王西存, 周洪旭, 于 毅, 等 (5177)
- 花期海蓬子对盐胁迫的生理响应 刘伟成, 郑春芳, 陈 琛, 等 (5184)
- 白蜡多年卧孔菌生物学特性及驯化栽培 鲁 铁, 图力古尔 (5194)
- 重度火烧迹地微地形对土壤微生物特性的影响——以坡度和坡向为例
..... 白爱芹, 傅伯杰, 曲来叶, 等 (5201)
- 秸秆还田与施肥对稻田土壤微生物生物量及固氮菌群落结构的影响 刘骁蓓, 涂仕华, 孙锡发, 等 (5210)
- 大穗型小麦叶片性状、养分含量及氮素分配特征 王丽芳, 王德轩, 上官周平 (5219)
- 复合不育剂 EP-1 对小鼠空间记忆与焦虑行为的影响 王晓佳, 秦婷婷, 胡 霞, 等 (5228)

种群、群落和生态系统

- 小兴安岭阔叶红松混交林林隙特征 刘少冲, 王敬华, 段文标, 等 (5234)
- 高寒矮嵩草群落退化演替系列氮、磷生态化学计量学特征 林 丽, 李以康, 张法伟, 等 (5245)
- 中亚热带人工针叶林生态系统碳通量拆分差异分析 黄 昆, 王绍强, 王辉民, 等 (5252)
- 高寒山区一年生混播牧草生态位对密度的响应 赵成章, 张 静, 盛亚萍 (5266)
- 乳山近海大型底栖动物功能摄食类群 彭松耀, 李新正 (5274)

景观、区域和全球生态

- 采伐干扰对大兴安岭落叶松-苔草沼泽植被碳储量的影响 牟长城, 卢慧翠, 包 旭, 等 (5286)
- 西南喀斯特地区轮作旱地土壤 CO_2 通量 房 彬, 李心清, 程建中, 等 (5299)
- 干湿季节下基于遥感和电磁感应技术的塔里木盆地北缘绿洲土壤盐分的空间变异性
..... 姚 远, 丁建丽, 雷 磊, 等 (5308)
- 东北温带次生林和落叶松人工林土壤 CH_4 吸收和 N_2O 排放通量 孙海龙, 张彦东, 吴世义 (5320)
- 新疆东部天山蝶类多样性及其垂直分布 张 鑫, 胡红英, 吕昭智 (5329)
- 玉米农田空气动力学参数动态及其与影响因子的关系 蔡 福, 周广胜, 明惠青, 等 (5339)

天山北坡家庭牧场复合系统对极端气候的响应过程..... 李西良,侯向阳,丁 勇,等 (5353)

大城市边缘区景观破碎化空间异质性——以北京市顺义区为例..... 李 灿,张凤荣,朱泰峰,等 (5363)

资源与产业生态

基于 GLBM 模型的中国大陆阿根廷滑柔鱼鱿钓渔业 CPUE 标准化 陆化杰,陈新军,曹 杰 (5375)

三峡库区古夫河水质时空分异特征..... 冉桂花,葛继稳,苗文杰,等 (5385)

城乡与社会生态

汉、藏、回族地区农户的环境影响——以甘肃省张掖市、甘南藏族自治州、临夏回族自治州为例.....

..... 赵雪雁,毛笑文 (5397)

研究简报

中国近海浮游动物群落结构及季节变化..... 杜明敏,刘镇盛,王春生,等 (5407)

海洋污染物对菲律宾蛤仔的免疫毒性..... 丁鉴锋,闫喜武,赵力强,等 (5419)

衰亡期沉水植物对水和沉积物磷迁移的影响..... 王立志,王国祥 (5426)

伊洛河流域外来草本植物分布格局..... 郭屹立,丁圣彦,苏 思,等 (5438)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-09



封面图说: 帽儿山次生林林相——帽儿山属于长白山山脉的张广才岭西坡,松花江南岸支流阿什河的上游,最高海拔 805m,由侏罗纪中酸性火山岩构成,是哈尔滨市附近的最高峰,因其貌似冠状而得名。东北林业大学于 1958 年在此建立了实验林场。山上生长着松树、榆树、杨树及各种灌木等,栖息着山鸡、野兔等野生动物,在茂密的草地上还生长有各种蘑菇。其地带性植被为温带针阔混交林,目前状况为天然次生林。部分地方次生林转变为落叶松人工林后,落叶松林地的凋落物层影响了林地土壤水分的格局。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201206070821

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. 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. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(17): 5426-5437.

衰亡期沉水植物对水和沉积物磷迁移的影响

王立志^{1,*}, 王国祥²

(1. 山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂大学, 临沂 276000;

2. 南京师范大学地理科学学院, 江苏省环境演变及生态建设重点实验室, 南京 210046)

摘要:通过室内模拟的方式, 分别研究了秋季黑藻、苦草和春季菹草的衰亡过程, 分析了沉水植物在衰亡期间水、沉积物中磷与环境因子[pH、氧化还原电位(Eh)和溶解氧(DO)]的相互作用。结果表明:沉水植物黑藻和菹草在衰亡期间能显著提高水中总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)、颗粒磷(PP)、溶解性活性磷(SRP)和溶解性有机磷(DOP)的含量;苦草在衰亡期对水体各形态磷含量影响不显著,且各形态磷含量的变化相对较小(TP, 0.04—0.06 mg/L);环境因子的变化对水中磷含量影响显著,黑藻和菹草水体中TP的含量和环境因子pH、DO和Eh均呈负相关,而苦草组水中各形态磷的含量受环境因子影响不显著。实验期间不同植物组沉积物中总磷(TP)、NaOH提取磷(NaOH-P)、HCl提取磷(HCl-P)、无机磷(IP)和有机磷(OP)的含量均呈上升趋势。沉积物IP的含量主要受NaOH-P的影响,OP对TP的影响要大于IP,沉积物OP与OM(有机质)的含量存在显著正相关。

关键词:沉水植物;水;沉积物;衰亡

Influence of submerged macrophytes on phosphorus transference between sediment and overlying water in decomposition period

WANG Lizhi^{1,*}, WANG Guoxiang²

1 Shandong Provincial Key Laboratory of Soil Conservation and Environmental Protection, Linyi University, Linyi 276000, China

2 College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Nanjing 210046, China

Abstract: Eutrophication is an important indication of serious water pollution. Phosphorus (P) is a key factor causing eutrophication, because it enhances production in an amplified positive feedback. Submerged macrophytes play an important role in P cycling, especially in shallow lakes. However, most of the submerged macrophyte died in winter. In the decomposition period of submerged macrophytes, the decaying macrophytes may be an internal P source for the lake and considerable quantities of P to the water. So to study the interaction of P among aquatic plants, sediments and water is important. However, the effects of submerged macrophytes on P cycling in lakes during the decomposition period are much less understood. In this study, submerged macrophyte *H. Verticillata*, *V. natans* and *P. crispus* were used as material. Through laboratory simulation experiments to study the relationship between P concentration in water and sediment and environmental factors [pH, redox potential (Eh) and dissolved oxygen (DO)] during the decomposition. The results indicated that submerged macrophyte *H. Verticillata* and *P. crispus* increased the concentrations of total P (TP), dissolved total P (DTP), particulate P (PP), dissolved organic P (DOP) and soluble reactive P (SRP) during the decomposition

基金项目:国家自然科学基金项目(21207058);山东省科技攻关项目(2011GGH21704);临沂市重大科技创新项目(201211027);山东省水土保持与环境保育重点实验室开发基金(stkf 201206)资助

收稿日期:2012-06-07; **修订日期:**2012-10-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wanglizhi@lyu.edu.cn

period. *V. natans* has no significant effect on P concentration, P concentrations maintained in a relative low level (TP, 0.04—0.06 mg/L). The changes of environmental factors have significant effect on P concentration in water. The concentrations of TP in water was significant negative correlated with pH、DO and Eh in the groups of *H. Verticillata* and *P. crispus*. However, environmental factors have no significant effect on P concentration in the group *V. natans*. Sediment P concentrations of total P (TP), HCl extracted P (HCl-P), NaOH extracted P (NaOH-P), inorganic P (IP), organic P (OP) were increased during the experiment course. The concentration of IP mainly caused by NaOH-P. Compared with IP, OP has larger effect on TP, OP has significant positive correlation with OM.

Key Words: submerged macrophyte; water; sediment; decomposition

在湖泊生态修复的方法中,恢复和重建水生植被的生态修复方法已成为湖泊修复的重要途径,其重点和难点在于沉水植物的恢复和重建^[1]。沉水植物作为水生生态系统的初级生产者,对整个水体生态系统的结构与功能及系统稳定性有决定性的影响^[2]。大量研究表明环境因子 pH、DO 和 Eh 等能够影响水-沉积物界面的磷循环过程^[3-5]。然而在较大的湖泊中却较难通过人工的方法改变湖泊整体的环境因子,而沉水植物在生长过程中可以通过光合作用等对周围环境因子产生影响,改变水体的 pH、DO 和 Eh 等。因此,在大型浅水湖泊中可以采用种植沉水植物的方式来对环境因子产生影响,从而达到影响水—沉积物界面磷迁移转化的目的^[6-7]。但是沉水植物的生长具有一定的周期性,多数沉水植物在 7—8 月,随着气温的升高进入旺盛生长期,生物量达到最大,而在秋、冬季逐渐凋谢死亡,只有少数种类(如眼子菜、伊乐藻、菹草等)可以过冬^[8-10]。

沉水植物在衰亡期,植株死亡并逐渐腐败分解,衰亡的沉水植物向水体和沉积物释放的营养盐将在春季气温回暖后对水体环境产生较大的影响^[11]。目前对沉水植物的环境效应的研究多集中在植物的生长期,而对沉水植物衰亡期的环境效应研究较少。因此,本实验在模拟的条件下利用不同季节衰亡的沉水植物进行研究,探讨沉水植物在衰亡期对水体和沉积物各形态磷的影响,分析环境因子(pH、DO 和 Eh)的变化和磷迁移之间的关系。

1 实验材料与设计

1.1 材料与设计

底质采自南京富营养化水华爆发水体(32°06′10.36″N, 118°54′13.75″E),采集后样品低温风干后过 100 目筛,去除粗粒及动植物残体,然后充分混匀。将混匀后的底质加入高密度聚乙烯桶(顶直径×底直径×高=55cm×45 cm×75 cm,预先经过 5% 的 HCl 处理后冲洗干净),底质平均厚度为 10cm,底质干重为 4821.00g。然后缓慢注入水 100L。

按照植物的顶冠特征、根系状况和衰亡季节的不同,分别选取沉水植物黑藻、苦草和菹草作为实验植物,以最大限度说明不同沉水植物不同季节衰亡期对水和沉积物磷迁移的影响。黑藻顶冠蓬散,根系退化严重,每年秋季进入衰亡期;苦草顶冠带状,根系较发达,每年秋季进入衰亡期;菹草顶冠蓬散,根系退化,每年春末夏初进入衰亡期。

秋季实验设置实验桶装置总计 9 桶,其中沉水植物苦草((835±25)g 鲜重)和黑藻((660±16)g 鲜重)分别种植 3 桶,另外 3 桶不进行沉水植物种植作为对照组。

春季实验设置实验桶装置总计 6 桶,其中沉水植物菹草((476±12)g 鲜重)种植 3 桶,另外 3 桶不进行沉水植物种植作为对照组。

沉水植物黑藻、苦草和菹草经驯化培养 2 个月后,选择性状均一的植株体,均匀种植于实验桶。

实验在温室玻璃房内进行,春季实验时间为 4—7 月。秋季实验为 10 月—翌年 1 月。实验开始时水、底泥、植物和藻类初始值如表 1 所示。

1.2 取样与分析

水样采集采用虹吸管抽取的方式,每次采集水面以下 5、20cm 和 45cm 处的等体积水(50mL)混匀。每次

取水后添加等体积的无磷水,以弥补取样带来的水损耗,并每月按照蒸发量添加无磷水,弥补蒸发带来的水损耗。上覆水 TP 和 DTP,浓度测定采用过硫酸钾氧化法;DTP 浓度的测定:将水样预先过 0.45 μm 孔径的醋酸纤维滤膜,而后用过硫酸钾氧化法;SRP 浓度的测定:将水样预先过 0.45 μm 孔径的醋酸纤维滤膜,而后用钼-锑-钒比色法。磷浓度用 Skalar(荷兰)流动分析仪测定。PP 浓度为 TP 浓度与 DTP 浓度之差,DOP 浓度为 DTP 浓度与 SRP 浓度之差。每个样品均重复测定 3 次。

表 1 实验系统水、底泥、植物和藻类初始值
Table 1 Initial value of water sediment plant and algae in the experimental system

	项目 Items	单位 Unit	黑藻 <i>H. Verticillata</i>	苦草 <i>V. natans</i>	菹草 <i>P. crispus</i>	对照 Control
水 Water	TP	mg/L	0.07	0.04	0.09	0.08
	DTP	mg/L	0.05	0.03	0.04	0.06
	SRP	mg/L	0.24	0.00	0.02	0.01
	PP	mg/L	0.01	0.01	0.05	0.02
	DOP	mg/L	0.03	0.01	0.02	0.05
底泥 Sediment	TP	mg/kg	736.25	704.58	740.66	744.17
	NaOH-P	mg/kg	253.37	232.77	243.30	261.47
	HCl-P	mg/kg	288.42	292.42	255.33	286.25
	IP	mg/kg	459.17	453.25	436.18	454.17
	OP	mg/kg	231.45	209.94	254.34	242.24
植物 Plant	均长 Average length	cm	70.42	46.91	71.24	0
	株数 Number of plants	n	150	85	100	0
	生物量 Biomass	g	650.32	850.36	480.36	0
藻 Algae	密度 Density	$\times 10^3$ 株/L	8.10	9.40	7.80	8.50

沉积物采用微型柱状采泥器采集,沉积物样品每次均匀采集 5 个微型柱状样(横切面直径 2cm),采集后的样品室温(25 $^{\circ}\text{C}$)风干,然后对风干前后的样品称重以计算由采样带来的总体磷和水量的损耗。将风干后沉积物样品与植物根系分离,过 100 目筛后充分混匀,然后进行沉积物中各形态磷分析。采集沉积物样品的同时采集植物样品,测定生物量,并分析植物中磷含量。沉积物样品磷形态分析采用国际通用的 SMT (Standard Measurements and Testing) 法^[12]。pH 和 Eh 测定采用上海雷磁 (PHSJ-4A) 测定仪测定。DO 采用 YSI 5750(美国)测定。

在沉水植物衰亡期,统计沉水植物黑藻、苦草和菹草不同衰亡阶段的长度(X_1 , cm),其中黑藻和菹草株高为植株主干长度和各级繁殖芽长度之和,地下部分根系的平均长度折算入植株主干长度。苦草根系相对较发达,对地下根系总数进行统计,用地下根系总数除地上叶片总数的方法,将根系均匀分配到叶片之中,然后统计其平均长度,折算成苦草的总长度。并统计苦草的叶片宽度(X_2 , cm),通过统计建立不同植物生物量(W , g)和长度之间的函数关系,以推算沉水植物在生长过程中的生物量,生物量为植物湿重。不同沉水植物生长期的生物量函数推算关系为:

$$W_{\text{黑藻}} = 0.0196X_1 + 0.5207 \quad R = 0.74 \quad R^2 = 0.55 \quad P < 0.05$$

$$W_{\text{菹草}} = 0.0501X_1 - 1.3515 \quad R = 0.85 \quad R^2 = 0.73 \quad P < 0.05$$

$$W_{\text{苦草}} = 0.0202X_1 + 0.1862 X_2 - 0.2235 \quad R = 0.91 \quad R^2 = 0.83 \quad P < 0.05$$

对沉水植物采样后称量沉水植物的湿重和干重,以计算由于植物采样对实验系统整体带来了磷损耗。

2 实验结果

2.1 上覆水各形态磷含量的变化

在秋季实验中,黑藻组各形态磷含量均显著高于对照组[图 1]。黑藻组各形态磷的变化呈明显的单峰曲线,各形态磷含量在实验开始后迅速升高,并在实验第 40 天达到最大值(TP, 0.63 mg/L)。然后在实验第

50—110 天期间, 水体中各形态磷含量缓慢降低, 到实验结束水体中 TP 含量为 0.23 mg/L, 仍然处于一个相对较高的水平。而对照组各形态磷的含量均保存在一个相对较为平稳的水平, 无明显的波动 (0.05—0.09 mg/L)。 t 检验表明, 黑藻组在衰亡过程中能够使得水体中各形态磷的含量显著升高 ($P < 0.05$)。

在秋季实验中, t 检验表明, 苦草组各形态磷的含量与对照组均无显著性差异 ($P > 0.05$)。而且, 苦草组各形态磷含量的变化相对较平稳 (TP, 0.04—0.06 mg/L), 在实验第 40 天略有上升, 然后保持在相对较稳定的水平 (图 1)。苦草组在实验期间 TP 的含量低于对照组, 苦草在衰亡分解期间并未引起水体中各形态磷含量的显著升高。

在春季实验过程中, 菹草组各形态磷的含量均显著升高 ($P < 0.05$, t 检验)。菹草组在衰亡期间水体各形态磷含量的变化趋势和黑藻组类似, 呈明显的单峰曲线变化, 在实验第 70 天时水体各形态磷的含量达到最大值 (TP, 0.63 mg/L), 然后在实验后期缓慢降低, 到实验结束水体中 TP 的含量为 0.18 mg/L (图 1)。其他各形态磷的变化趋势均和 TP 类似, 只是 PP 的峰值相对较为平缓, 变化相对缓和。因此, 菹草在衰亡期间能使得水体中各形态磷的含量显著升高。

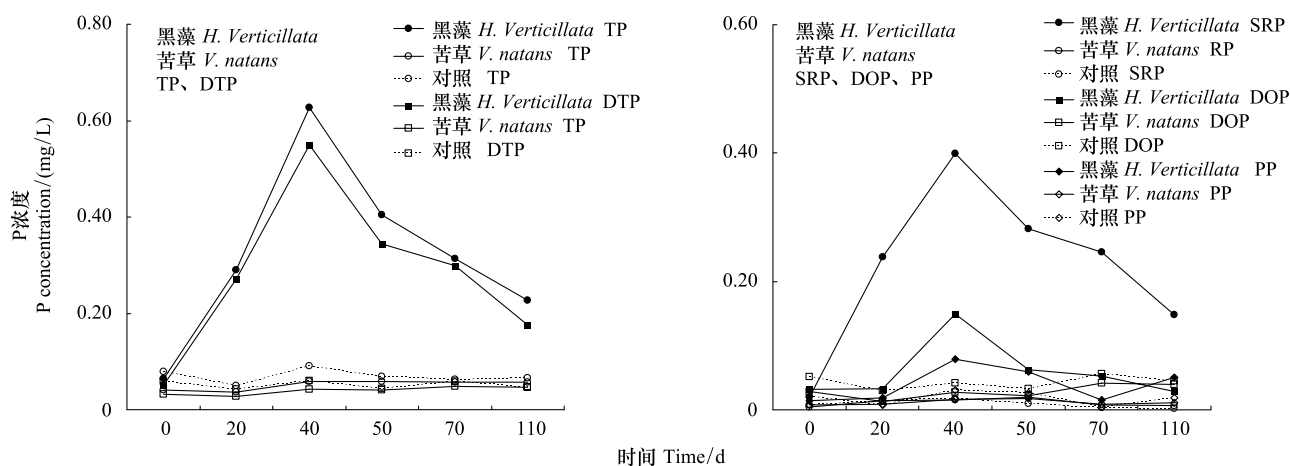


图 1 实验期间黑藻组、苦草组、菹草组和对照组上覆水各形态磷含量变化

Fig.1 Changes in different phosphorus concentrations of Group *H. Verticillata*, *V. natans* and *P. crispus* in overlying water during the experiment course

2.2 沉积物各形态磷含量的变化

在秋季实验中, 黑藻组各形态磷的含量均表现出不同程度的上升趋势, 但是, t 检验表明, 黑藻组和对照组各形态磷的含量差异性均不显著 ($P > 0.05$)。和实验开始时相比较, 在实验结束时黑藻组沉积物中 TP、NaOH-P、HCl-P、IP 和 OP 分别上升了 4.61%、5.33%、4.89%、6.17% 和 2.02%。 t 检验表明, 实验结束时黑藻组沉积物中 TP、NaOH-P、HCl-P、IP 和 OP 升高均未达到显著性水平 ($P > 0.05$)。在实验过程中 TP 有较大的升高, TP 含量在实验结束时为 770.17 mg/kg, 和初始值比上升了 33.92 mg/kg。在实验结束时 IP 和 OP 分别上升了 28.33 和 4.66 mg/kg, IP 和 OP 升高磷含量分别占 TP 升高量的 83.54% 和 13.75%。NaOH-P 和 HCl-P 在实验结束分别升高了 13.50 和 14.08 mg/kg, 分别占 TP 升高量的 39.80% 和 41.52% (图 2)。

在秋季实验中, 苦草组各形态磷含量均呈小幅度上升趋势。和实验开始时相比较, 在实验结束时苦草组沉积物中 TP、NaOH-P、HCl-P、IP 和 OP 分别上升了 2.08%、3.03%、1.47%、2.67% 和 1.05%。 t 检验表明, 实验结束时黑藻组沉积物中 TP、NaOH-P、HCl-P、IP 和 OP 升高均未达到显著性水平 ($P > 0.05$)。TP 含量在实验结束时有小幅度升高 (升高了 14.68 mg/kg)。实验结束时 IP 和 OP 分别上升了 12.06 和 2.19 mg/kg, 分别占 TP 升高量的 82.11% 和 14.94% (图 2)。NaOH-P 和 HCl-P 在实验结束分别升高了 7.05 和 mg/kg, 分别占 TP 升高量的 48.04% 和 21.19%。

在春季实验中, 菹草组各形态磷含量均呈较大幅度上升趋势。和实验开始时相比较, 在实验结束时苦草

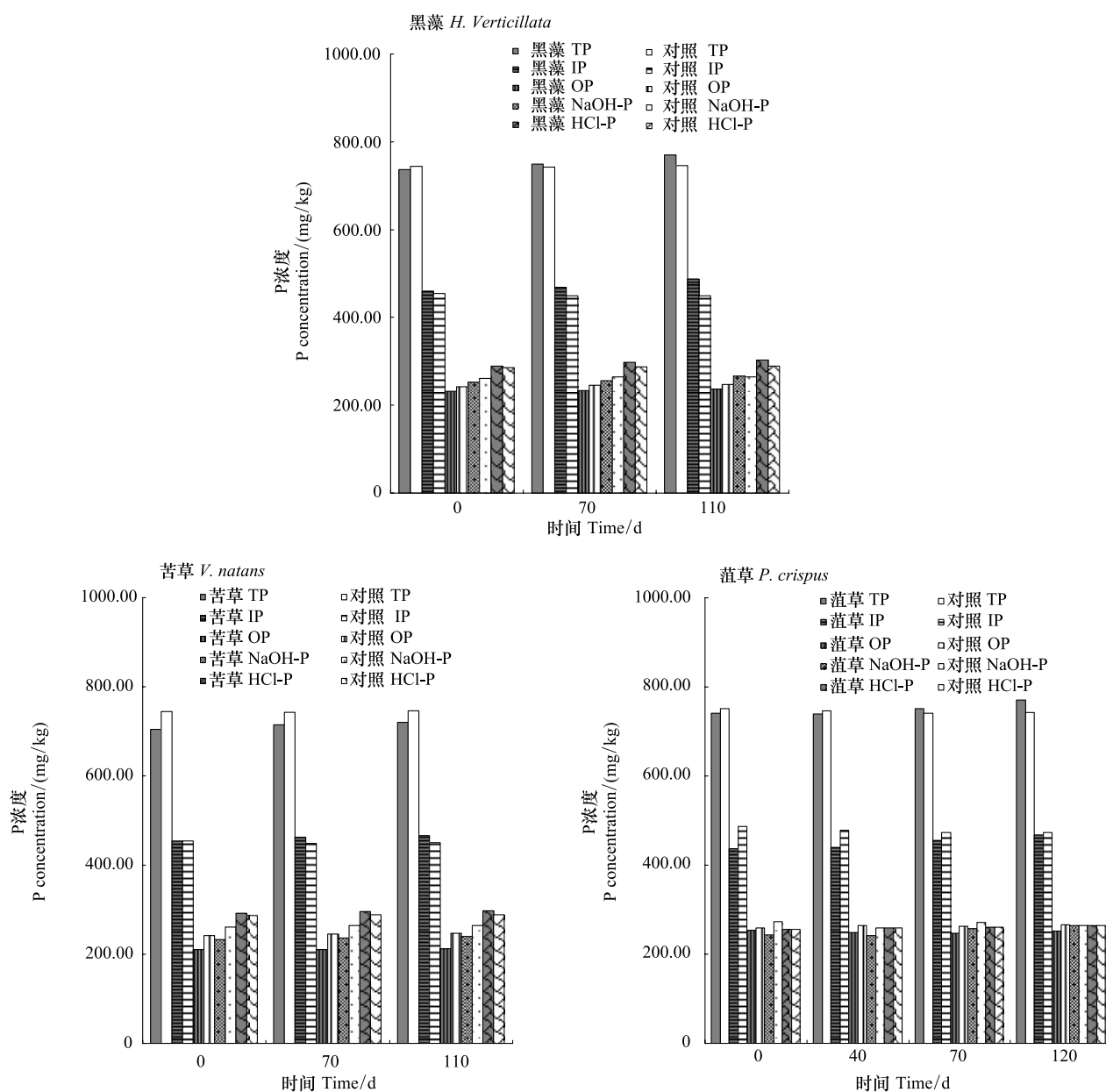


图2 实验期间黑藻组、苦草组、菹草组和对照组沉积物各形态磷含量变化

Fig.2 Changes in different phosphorus concentrations of Group *H. Verticillata*, *V. natans* and *P. crispus* in sediment during the experiment course

组沉积物中 TP、NaOH-P、HCl-P、IP 和 OP 分别上升了 6.13%、10.67%、3.62%、7.36% 和 3.94%。 t 检验表明,实验结束时黑藻组沉积物中 TP、NaOH-P、HCl-P、IP 和 OP 升高均未达到显著性水平 ($P>0.05$)。TP 含量在实验结束时较大幅度升高 (升高了 42.17 mg/kg)。实验结束时 IP 和 OP 均呈升高趋势,IP 和 OP 分别上升了 32.41 和 8.16 mg/kg,分别占 TP 升高量的 76.84% 和 19.34% (图 2)。因此 IP 占了 TP 升高量的主要部分。NaOH-P 和 HCl-P 在实验结束分别升高了 21.58 和 9.34 mg/kg,分别占 TP 升高量的 51.17% 和 22.15%,因此 NaOH-P 是 TP 升高量的重要组成部分。

3 讨论

3.1 沉水植物衰亡期对上覆水磷含量的影响

3.1.1 沉水植物生物量变化对上覆水各形态磷的影响

由于植物自身的结构特点,不同的沉水植物在衰亡期分解速率存在较大的差异。顶冠蓬伞状黑藻和菹草

在衰亡期分解速率相对较高,而苦草在衰亡期分解速率相对较低。在本实验条件下秋季实验中黑藻分解速率在前 40d 最大(平均 8.39 g/d),在 40—80d 黑藻分解速率平均为 4.12 g/d,80—110d 为 2.10 g/d(图 3)。因此,黑藻在前 40 天较快的分解速率是实验期间上覆水中各形态磷含量在第 40 天达到最大值的主要原因。黑藻的快速分解向水体释放大量的磷,这是导致水体中磷含量迅速升高的主要原因。

在春季实验中,0—30,30—70,70—120,120—140d 中沉水植物菹草的分解速率分别为:3.73,5.93,0.77,1.32 g d⁻¹桶⁻¹(图 3)。在实验第 0—70 天菹草分级为速率较高,这是导致水体中磷含量迅速升高的主要原因。

在秋季实验中,苦草组水体中各形态磷含量均无明显的波动,这和苦草较低分解速率有关,在实验过程中苦草平均分解速率为 1.60 g/d。较低的分解速率给沉积物以充足的缓冲时间,这是导致实验期间苦草组上覆水中各形态磷含量变化相对较平稳且较低的主要原因。

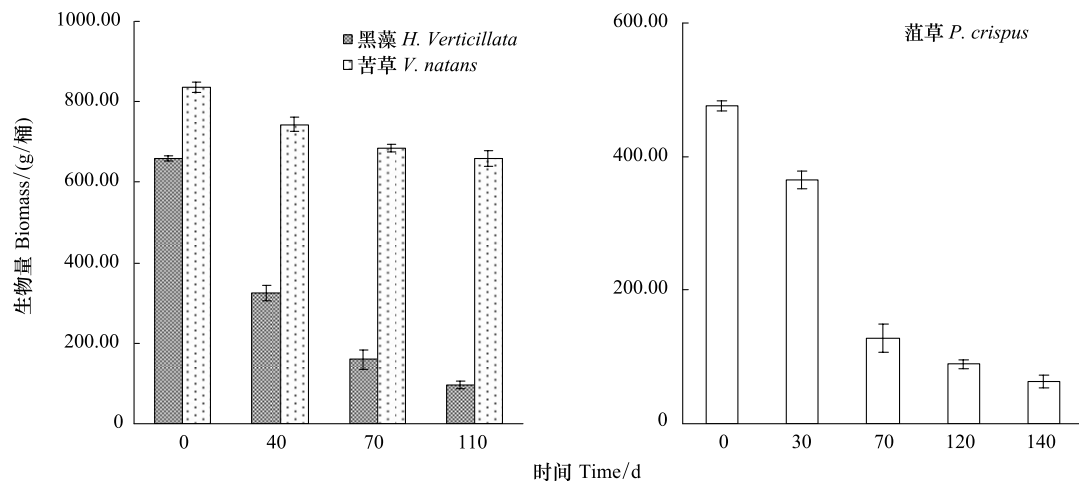


图 3 实验期间各生物的生物量变化

Fig.3 Changes of biomass during the experiment course

3.1.2 水体环境因子的改变对上覆水各形态磷的影响

水体环境因子的改变影响着沉积物对水体中磷的吸收与释放过程,研究表明较高的 DO 和 Eh 有利于沉积物对磷的吸收^[13-15]。当水体控制在好氧状态时,底泥的磷释放量小于厌氧状态下的释放量。溶解氧充足情况下,表层底泥氧化还原电位较高,利于 Fe²⁺ 转化为 Fe³⁺,Fe³⁺ 与磷酸盐结合成难溶的磷酸铁,使好氧状态下底泥对磷的释放作用减弱。厌氧时,Fe³⁺ 还原成 Fe²⁺,一方面使 PO₄³⁻ 脱离原来沉淀状态进入上覆水,另一方面[Fe(OH)₃]_x 胶体转化成可溶的 Fe(OH)₂,同时释放吸附于其上的游离态磷,导致上覆水体中溶解态磷浓度增加^[16-17]。

在秋季实验中黑藻组在实验第 40 天植物分解速率较大,因此水体中 DO 的含量及 Eh 较低,但在后期的实验中由于黑藻分解速率的降低水体中 DO 和 Eh 也缓慢上升。另外冬季是水体溶解氧周年变化中的最大值,所以 DO 的含量在实验期间整体变化呈上升趋势(图 4)。

黑藻组水体 DO 和 Eh 在实验前 40d 的降低抑制了沉积物对水体磷的吸收速率,而在后期的升高则促进了沉积物对水体磷的吸收。因此水体环境因子 DO 和 Eh 的变化是水体中磷含量先升高后下降的一个重要原因。由于黑藻的分解释放大量的磷到水中,外加 DO 和 Eh 的降低,从而降低了沉积物对水体中磷的吸收速率,所以在两者共同作用下,使得水体中各形态磷的含量在实验第 40 天左右呈现最大值。

黑藻组 pH 的变化相对较平稳,呈弱碱性(图 4),和对照组无明显差异($P>0.05$),因此可认为黑藻衰亡对水体 pH 的影响不显著。但是水体还是处于碱性环境中,由于碱性环境下有利于沉积物磷的释放,所以在黑藻衰亡期 pH 的改变一直促进沉积物磷的释放。但实验后期水体中各形态磷含量的降低表明,沉积物对水体

各形态磷的吸收速率大于释放速率。

黑藻组水体各形态磷含量和环境因子相关分析(表2)表明,水体中各形态磷的含量和环境因子均呈不同程度的负相关,其中 DO 与 TP、SRP 相关性显著,pH 与 TP、DTP、PP、SRP 相关性显著,Eh 与 TP、DTP、SRP 相关性显著,部分环境因子与水体中磷含量相关性达到极显著水平。因此,在沉水植物黑藻衰亡分解期间,水体中 TP 和 SRP 的含量受环境因子 DO、pH 和 Eh 影响显著;DTP 的含量受 pH 和 Eh 的影响显著;PP 的含量受 pH 的影响显著;环境因子对 DOP 无显著影响。

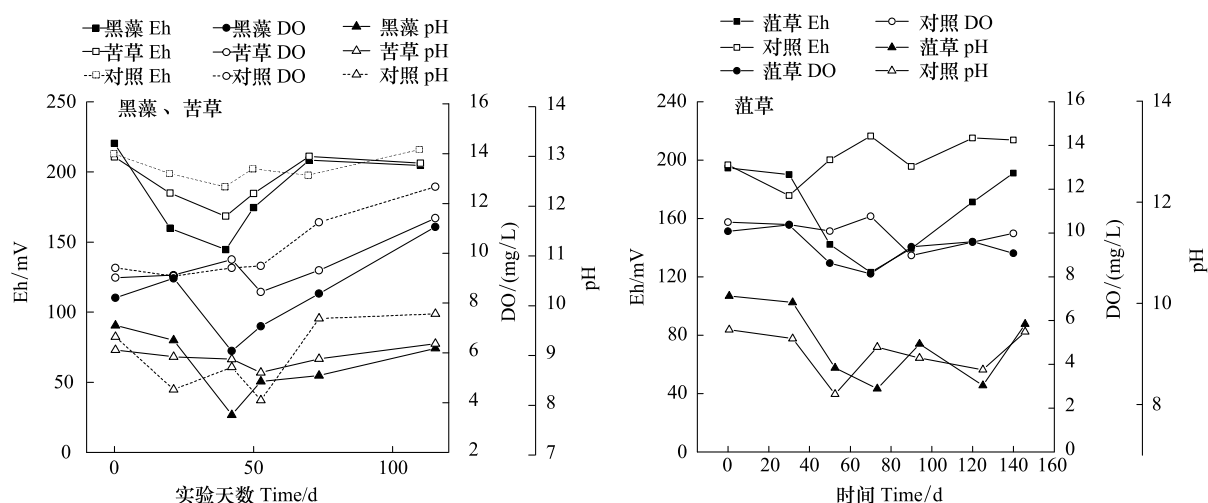


图4 实验期间上覆水各环境因子变化

Fig.4 Changes in different environmental factors during the experiment course

在秋季实验中,苦草组环境因子的变化趋势和黑藻组略有不同。苦草组 DO 和 Eh 的变化在实验期间一直处于平稳上升趋势,无明显的下降(图4),且苦草组 DO 和 Eh 含量和对照组无显著差异($P>0.05$),因此可认为,苦草在衰亡期对水体 DO 和 Eh 的影响不显著。苦草组 pH 在实验期间几乎无明显的波动,变化平稳,因此苦草在衰亡期对 pH 也无显著影响。

苦草组水体各形态磷含量和环境因子相关分析(表2)表明,水体中各形态磷的含量和环境因子均无显著相关,可推论在苦草衰亡分解期间,水体中环境因子的改变对水体各形态磷含量无显著影响。因此,本实验结果表明在苦草衰亡期间水体中环境因子的改变并未显著影响水体中各形态磷的含量。

在春季实验中,DO 和 Eh 的变化趋势类似,均在实验第70天达到最低值后缓慢上升(图4)。而 DO 和 Eh 的降低则抑制沉积物对水体磷的吸收,同时,此时期菹草的分解速率达到最大,所以水体中磷的含量在实验第70天达到最大值。然后随着 DO 和 Eh 的升高,沉积物对水体中磷的吸收能力增加,而此时菹草衰亡分解速率降低,所以在实验后期水体中磷的含量逐渐降低。实验期间菹草组水体中 pH 和对照组无显著性差异($P>0.05$),且水体处于碱性环境中,因此,菹草分解期间可认为对水体中 pH 的影响不显著。但是较高的 pH 仍促进沉积物向水体释放磷。实验后期水体中各形态磷含量的降低表明,沉积物对水体各形态磷的吸收速率大于释放速率。

菹草组水体各形态磷含量和环境因子相关分析(表2)表明,水体中 TP、DTP、PP 和 SRP 的含量和环境因子均呈不同程度的负相关,DOP 与环境因子无显著相关性。其中 DO 与 TP、DTP、SRP 相关性显著,pH 与 TP 相关性显著,Eh 与 TP、DTP、SRP 相关性显著,部分环境因子与水体中磷含量相关性达到极显著水平。因此在菹草衰亡期间,水体中 TP 的含量受 DO、pH 和 Eh 的影响显著;DTP 和 SRP 受 DO 和 Eh 的影响显著,环境因子对水体 PP 和 DOP 的含量无显著影响。

潘慧云等^[18]实验室模拟条件下通过对沉水植物衰亡期实验表明,沉水植物的腐败分解速度十分缓慢,在整个低温季节对水体环境影响很小,营养盐大部分保留在植物残体中。在温度回升后,会有所分解,向水体中

释放氮、磷。潘慧云等实验系统采用的实验材料为苦草和金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum*), 这两种植物分解速率均较为缓慢, 这和本实验系统中所得到的结论一致。但是在本实验条件下, 顶冠蓬散状沉水植物黑藻和菹草分解速率较快, 在实验 40d 左右均使得水体中磷含量迅速升高, 因此不同顶冠形态的沉水植物由于其分解速率的不同, 导致了其对水体中磷含量的影响亦有较大差异。

表 2 水体各形态磷含量与环境因子之间皮尔逊相关系数矩阵

Table 2 Pearson correlation coefficient matrix between phosphorus in overlaying water and environmental factors

		TP	DTP	PP	DOP	SRP
黑藻 <i>H. Verticillata</i>	DO	-0.64 **	-0.40	-0.42	-0.03	-0.40
	pH	-0.86 **	-0.54 *	-0.61 **	-0.02	-0.58 *
	Eh	-0.68 **	-0.52 *	-0.27	-0.37	-0.53 *
苦草 <i>V. natans</i>	DO	0.23	-0.23	-0.12	-0.31	-0.18
	pH	0.20	-0.45	-0.44	-0.40	-0.33
	Eh	-0.09	0.16	-0.26	0.17	0.22
菹草 <i>P. crispus</i>	DO	-0.45 *	0.03	-0.04	0.14	0.06
	pH	-0.50 *	-0.27	-0.14	0.14	-0.26
	Eh	-0.77 **	-0.40	-0.02	0.04	-0.38

* 相关性在 0.05 水平显著 (双侧检验); ** 相关性在 0.01 水平显著 (双侧检验)

3.2 沉水植物衰亡期对沉积物磷含量的影响

3.2.1 沉积物环境因子的变化对各形态磷含量的影响

沉积物中环境因子的改变将直接影响到沉积物对磷的释放与吸收过程, 方差分析结果表明在不同季节实验条件下沉水植物黑藻、苦草和菹草组沉积物中 pH 和 Eh 均与对照组无显著性差异 ($P>0.05$)。因此, 可认为沉水植物在衰亡期间对沉积物中环境因子 pH 和 Eh 无显著影响。在本实验条件下, 不同季节沉水植物衰亡期中沉积物 pH 在 7.0—7.5 之间波动 (图 5), 属于中性范围。在中性范围内, 沉积物颗粒和水及间隙水界面中正磷酸盐主要以 HPO_4^{2-} 和 H_2PO_4^- 的形态存在, 易与沉积物中的金属元素结合而被沉积物吸附^[3, 19]; 所以 pH 虽然没有明显的波动但是中性的沉积物环境使得沉积物利于对磷的吸收, 这是导致水体中磷在实验后期一直呈降低趋势而沉积物各形态磷却呈上升趋势的原因之一。

黑藻组和菹草组沉积物 Eh 在实验后期均呈上升趋势, 而苦草组 Eh 一直保持在相对较高的水平 (图 5), 较高的 Eh 可以增强沉积物对上覆水磷的吸附能力^[3]。这是沉积物各形态磷含量在实验后期呈上升趋势的另一个主要的原因。在沉水植物黑藻和菹草快速衰亡期, 实验组沉积物中 Eh 呈降低趋势, 较低的 Eh 抑制沉积物对水体磷的吸收, 这是导致水体各形态磷含量在该时期呈较高趋势的另一个原因。

3.2.2 沉水植物分解对沉积物各形态磷的影响

实验过程中沉积物不同形态的磷均存在不同程度的升高, 可见, 沉水植物的分解, 使得沉积物中各形态磷的含量升高, 但是由于各形态磷的不同组成及结合特点, 导致各形态磷升高的原因也存在较大差异。在 NaOH-P 中磷主要以化学吸附的方式吸附于沉积物表面, 因此在沉水植物衰亡期沉积物中 NaOH-P 的升高主要是由于沉积物 Fe、Al 吸附水体中活性磷所导致的升高。在实验过程中不同实验组水体中 DTP 和 SRP 的含量在实验后期均呈现明显的降低, 和沉积物 Fe、Al 等元素的吸附有直接关系^[13, 20]。

沉积物 HCl-P 主要为沉积物钙结合磷, 沉积物钙结合磷由自生钙磷 (磷灰石、沉积碳酸钙、早期成岩作用形成的氟磷灰石) 和碎屑钙磷 (动植物残体、骨骼等) 组成。实验期间不同沉水植物组沉积物中 HCl-P 的含量均呈不同程度的上升, 这是由于在沉水植物衰亡分解期间飘落植物残体所导致, 因为植物残体是沉积物中钙结合磷的重要组成部分^[14, 21]。

OP 包括由陆源性排放物质组成的难降解性有机磷部分和由死亡的水生生物残体组成的可降解性有机磷部分。其中可降解有机磷部分, 可以在早期成岩过程中随有机质的降解而释放, 甚至向其它结合态磷转化, 沉

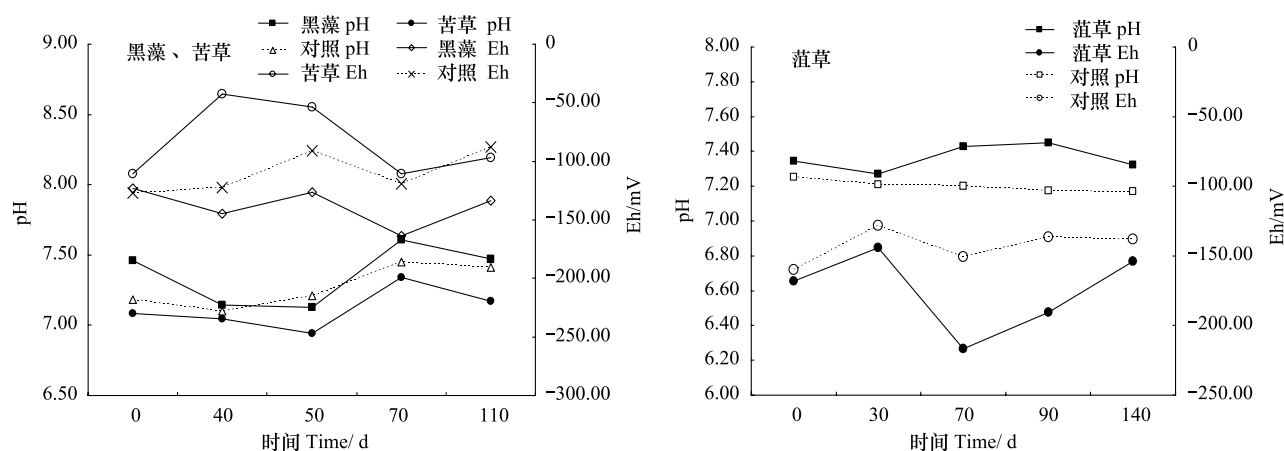


图5 实验期间沉积物中各环境因子变化

Fig.5 Changes in of environmental factors in Sediment during the experiment course

积物 OP 多数以磷酸酯(包括肌醇六磷酸)、磷脂、核酸、磷蛋白和磷酸糖类以及一些未知的化合物等形态出现^[22-23]。研究表明,沉积物 OP 的含量和有机质的含量存在密切的关系。在本实验条件下沉积物 OP 与有机质(OM)的含量存在显著正相关(图 6, 黑藻, $P < 0.05$, $R^2 = 0.70$; 苦草, $P < 0.05$, $R^2 = 0.73$; 菹草, $P < 0.05$, $R^2 = 0.60$)。因此,沉积物 OP 含量变化是由于 OM 的变化引起的。而沉水植物在衰亡过程中由于植物残体的分解和飘落,从而使得沉积物中有机质的含量呈增高趋势。

不同实验组沉积物各形态磷之间相关分析结果表明(表 3),沉积物 TP 和 IP, OP 的含量显著相关, IP 与 NaOH-P 显著相关,与 HCl-P 相关系数较高,但未达到显著性水平。沉积物 TP 由 OP 和 IP 构成,因此 TP 在实验期间的变化是由 OP 和 IP 共同作用的结果,但是相关分析表明,在不同的实验组中 TP 和 OP 的相关系数均大于 TP 和 IP 的系数,所以,实验期间 OP 对 TP 的影响要大于 IP。

NaOH-P 和 HCl-P 是沉积物的重要组成部分, IP 和 NaOH-P, HCl-P 的相关分析表明,沉积物 IP 的含量主要受 NaOH-P 的影响, HCl-P 对沉积物 IP 的影响不显著。NaOH-P 和 HCl-P 之间无显著性相关。

3.3 沉水植物分解释放磷对沉积物和上覆水中磷总量的影响

不同季节的实验表明,在沉水植物衰亡期,沉水植物体内磷最终迁移方向为沉积物。在春季和秋季实验中沉水植物菹草、黑藻和苦草磷含量百分比逐渐降低,而沉积物中逐渐增加;实验开始时黑藻、菹草和苦草组“沉积物-植物-水”三相中磷含量百分比分别为:0.14%、8.17%、91.69%;0.15%、5.49%、94.36%;0.34%、4.30%、93.36%。而且,实验结束时黑藻、菹草和苦草组“沉积物-植物-水”三相中磷含量百分比分别为:0.29%、1.23%、98.48%;0.15%、4.30%、95.55%;0.90%、1.19%、97.91%。

植物的腐败分解包括其组织衰老和死亡后所有的物理和化学变化,复杂的有机分子最后会转变为无机元素。该过程包括机械破碎、可溶性有机物的浸出或自溶以及细菌或真菌作用下植物组织的分解。因此,沉水植物的衰亡对水环境效应的影响是十分复杂的问题。一般认为,大部分沉水植物经历了生长期后,进入秋、冬寒冷季节,植物体会死亡并释放出氮、磷等营养物质^[24-25]。

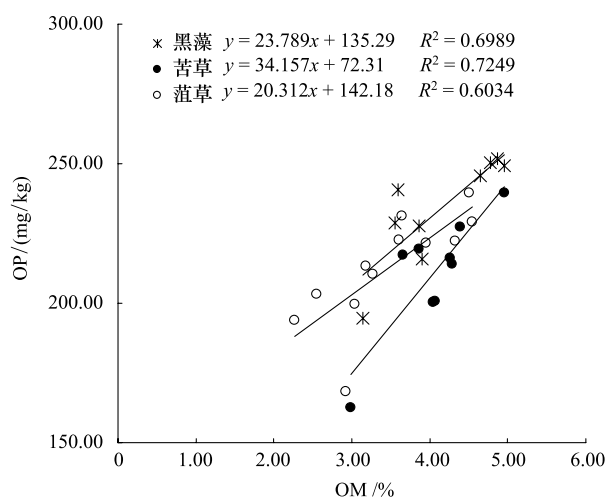


图6 各实验组 OM 与 OP 线性关系

Fig.6 The relationship between organic matter(OM) and OP

表 3 沉积物各形态磷之间相皮尔逊关系数矩阵

Table 3 Pearson correlation coefficient matrix between different phosphorus in sediment

实验组 Experiment		TP	NaOH-P	HCl-P	IP	OP
黑藻 <i>H. Verticillata</i>	TP	1.00				
	NaOH-P	0.45	1.00			
	HCl-P	0.55	-0.33	1.00		
	IP	0.63 *	0.74 *	0.58	1.00	
	OP	0.74 *	-0.60	0.45	-0.29	1.00
苦草 <i>V. natans</i>	TP	1.00				
	NaOH-P	0.47	1.00			
	HCl-P	0.53	-0.29	1.00		
	IP	0.68 *	0.62 *	0.51	1.00	
	OP	0.76 *	0.40	-0.37	-0.50	1.00
菹草 <i>P. crispus</i>	TP	1.00				
	NaOH-P	0.61	1.00			
	HCl-P	0.59	-0.44	1.00		
	IP	0.58 *	0.70 *	0.55	1.00	
	OP	0.61 *	-0.07	0.02	-0.29	1.00

* 相关性在 0.05 水平显著(双侧检验); ** 相关性在 0.01 水平显著(双侧检验)

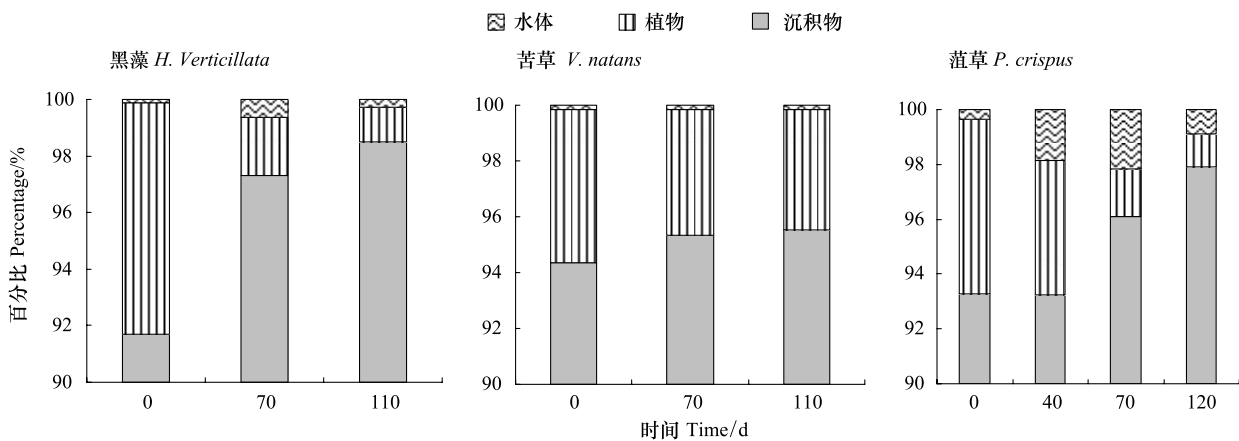


图 7 “沉积物-植物-水”三相中磷占总体组成百分比

Fig.7 Percentage of phosphorus in ‘sediment-submerged macrophyte- water’

在本实验条件下,实验结束时沉水植物衰亡分解所释放的磷基本与沉积物和上覆水所汇集的磷相当,说明在沉水植物衰亡期沉水植物是“沉积物-植物-水”系统中重要的磷源,而上覆水和沉积物则是重要的磷汇。

在浅水湖泊中,通过恢复沉水植物的方式来修复水体环境是水生态修复的一个重要手段,而植物的生命周期决定了植物在衰亡期对系统中氮磷的影响可能由生长旺盛期时系统中氮磷的“汇”而转变成氮磷的“源”。因此,恢复重建沉水植物系统过程中,必须控制沉水植物的残留生物量,充分加以利用并在适当的时间加以收割以避免过多植物残体分解对水体的影响。

4 结论

本实验通过在春季和秋季分别进行沉水植物衰亡期实验,实验结果表明:

(1) 在沉水植物衰亡期,黑藻能显著提高水体中 TP、DTP、PP 和 SRP 的含量,对水体中 DOP 的影响不显著,而苦草在衰亡期对水体中各形态磷的含量影响均不显著,水中各形态磷含量并无显著升高。菹草在衰亡期显著提高水体中 TP、DTP 和 SRP 的含量,对水体中 PP 和 DOP 含量的影响不显著。水中各形态磷的含量受沉水植物分解速率的影响。水体较高的 DO 和 Eh,促进沉积物对上覆水各形态磷的吸收,是沉水植物衰亡

后期水体各形态磷含量降低的重要原因。沉水植物衰亡对沉积物各形态磷含量的影响均不显著。

(3) 沉水植物在衰亡期降低上覆水中 DO、Eh 和 pH 从而降低沉积物对上覆水磷的吸附能力,在衰亡后期随着上覆水中 DO、Eh 和 pH 的提高,沉积物对上覆水磷吸附的能力也相应的提高。沉积物对磷的吸收及磷的沉降导致了在沉水植物衰亡休眠期“沉积物-植物-水”系统中磷的迁移方向为沉积物。

References:

- [1] Hilt S, Gross E M, Hupfer M, Morscheid H, Mählmann J, Melzer A, Poltz J, Sandrock S, Scharf E M, Schneider S, Van de Weyer K. Restoration of submerged vegetation in shallow eutrophic lakes-A guideline and state of the art in Germany. *Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters*. 2006, 36(3): 155-171.
- [2] Wang F, Liang L L, Zhang Y S, Gao R H. Eco-hydrological model and critical conditions of hydrology of the wetland of Erdos Larus Relictus Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*. 2009, 29(5): 307-313.
- [3] Wang S R, Jin X C, Bu Q Y, Jiao L X, Wu F C. Effects of dissolved oxygen supply level on phosphorus release from lake sediments. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2008, 316(1/3): 245-252.
- [4] Almroth E, Tengberg A, Andersson J H, Pakhomova S, Hall P O J. Effects of resuspension on benthic fluxes of oxygen, nutrients, dissolved inorganic carbon, iron and manganese in the Gulf of Finland, Baltic Sea. *Continental Shelf Research*. 2009, 29(5/6): 807-818.
- [5] Jensen H S, Anderson F O. Importance of temperature, nitrate, and pH for phosphate release from aerobic sediments of four shallow, eutrophic lakes. *Limnol Oceanogr*. 1992, 37(3): 577-589.
- [6] Bakker E S, Van Donk E, Declerck S A J, Helmsing N R, Hidding B, Nolet B A. Effect of macrophyte community composition and nutrient enrichment on plant biomass and algal blooms. *Basic and Applied Ecology*. 2010, 11(5): 432-439.
- [7] Carpenter S R, Lodge D M. Effects of submersed macrophytes on ecosystem processes. *Aquatic Botany*. 1986, 26: 341-370.
- [8] Schorer A, Schneider S, Melzer A. The importance of submerged macrophytes as indicators for the nutrient concentration in a small stream (Rothbach, Bavaria). *Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters*. 2000, 30(4): 351-358.
- [9] Ellen V D, Wouter J V D. Impact of submerged macrophytes including charophytes on phyto- and zooplankton communities; allelopathy versus other mechanisms. *Aquatic Botany*. 2002, 72(3/4): 261-274.
- [10] Gao J, Xiong Z, Zhang J, Zhang W, Obono Mba F. Phosphorus removal from water of eutrophic Lake Donghu by five submerged macrophytes. *Desalination*. 2009, 242(1/3): 193-204.
- [11] Asaeda T, Trung V K, Manatunge J. Modeling the effects of macrophyte growth and decomposition on the nutrient budget in Shallow Lakes. *Aquatic Botany*. 2000, 68(3): 217-237.
- [12] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, Rauret G, Muntau H, Quevauviller P. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments — A synthesis of recent works. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry* 2001, 370: 224-228.
- [13] Wang S R, Jin X C, Zhao H C, Wu F C. Phosphorus fractions and its release in the sediments from the shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River area in China. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2006, 273(1/3): 109-116.
- [14] Sun S J, Huang S L, Sun X M, Wen W. Phosphorus fractions and its release in the sediments of Haihe River, China. *Journal of Environmental Sciences*. 2009, 21(3): 291-295.
- [15] Kleeberg A, Kozerski H. Phosphorus release in Lake Groger Muggelsee and its implications for lake restoration. *Hydrobiologia*. 1997, 342(1): 9-26.
- [16] Rooney N, Kalff J. Inter-annual variation in submerged macrophyte community biomass and distribution; the influence of temperature and lake morphometry. *Aquatic Botany*. 2000, 68(4): 321-335.
- [17] Sorrell B K, Dromgoole F I. Oxygen transport in the submerged freshwater macrophyte *Egeria densa* planch. I. Oxygen production, storage and release. *Aquatic Botany*. 1987, 28(1): 63-80.
- [18] Pan H Y, Xu X H, Gao S X. Study on Process of Nutrition Release during the Decay of Submerged Macrophytes. *Research of Environmental Sciences*. 2008, 21(1): 64-68.
- [19] Jiang X, Jin X C, Yao Y, Li L H, Wu F C. Effects of biological activity, light, temperature and oxygen on phosphorus release processes at the sediment and water interface of Taihu Lake, China. *Water Research*. 2008, 42: 2251-2259.

- [20] Wang S G, Jin X C, Pang Y, Zhao H C, Zhou X N, Wu F C. 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. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2005, 289(2): 339-346.
- [21] Jin X C, Wang S R, Pang Y, Wu F C. Phosphorus fractions and the effect of pH on the phosphorus release of the sediments from different trophic areas in Taihu Lake, China. *Environmental Pollution*. 2006, 139(2): 288-295.
- [22] Turner B L. Organic phosphorus in Madagascan rice soils. *Geoderma*. 2006, 136(1/2): 279-288.
- [23] Jin X C, Wang S R, Chu J Z, Wu F C. Organic Phosphorus in Shallow Lake Sediments in Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Area in China. *Pedosphere*. 2008, 18(3): 394-400.
- [24] Wang Y Y, Chen F Z. Decomposition and phosphorus release from four different size fractions of *Microcystis spp.* taken from Lake Taihu, China. *Journal of Environmental Sciences*. 2008, 20(7): 891-896.
- [25] Godshalk G L, Wetzel R G. Decomposition of aquatic Angiosperms. *Zostera marina* L. and a conceptual model of decomposition.. *Aquatic Botany*. 1978, 5: 329-354.

参考文献:

- [13] 潘慧云, 徐小花, 高士祥. 沉水植物衰亡过程中营养盐的释放过程及规律. *环境科学研究*. 2008, 21(1): 64-68.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 17 Sep. ,2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The overview and prospect of chemical composition of plant cuticular wax ZENG Qiong, LIU Dechun, LIU Yong (5133)
- Research progresses in carbon budget and carbon cycle of the coastal salt marshes in China
..... CAO Lei, SONG Jinming, LI Xuegang, et al (5141)

Autecology & Fundamentals

- Effects of straw interlayer on soil water and salt movement and sunflower photosynthetic characteristics in saline-alkali soils
..... ZHAO Yonggan, PANG Huancheng, LI Yuyi, et al (5153)
- Adaptations of dimorphic seeds and seedlings of *Suaeda salsa* to saline environments
..... LIU Yan, ZHOU Jiachao, ZHANG Xiaodong, et al (5162)
- Responses of root morphology of peanut varieties differing in drought tolerance to water-deficient stress
..... DING Hong, ZHANG Zhimeng, DAI Liangxiang, et al (5169)
- The relationship between physiological indexes of apple cultivars and resistance to *Eriosoma lanigerum* in summer
..... WANG Xicun, ZHOU Hongxu, YU Yi, et al (5177)
- Physiological responses of *Salicornia bigelovii* to salt stress during the flowering stage
..... LIU Weicheng, ZHENG Chunfang, CHEN Chen, et al (5184)
- Biological characteristics and cultivation of fruit body of wild medicinal mushroom *Perenniporia fraxinea*
..... LU Tie, BAU Tolgor (5194)
- The study of characteristics of soil microbial communities at high severity burned forest sites for the Great Xingan Mountains: an
example of slope and aspect BAI Aiqin, FU Bojie, QU Laiye, et al (5201)
- Effect of different fertilizer combinations and straw return on microbial biomass and nitrogen-fixing bacteria community in a paddy
soil LIU Xiaoqian, TU Shihua, SUN Xifa, et al (5210)
- Structural characters and nutrient contents of leaves as well as nitrogen distribution among different organs of big-headed wheat
..... WANG Lifang, WANG Dexuan, SHANGGUAN Zhouping (5219)
- Effects of EP-1 on spatial memory and anxiety in *Mus musculus* WANG Xiaojia, QIN Tingting, HU Xia, et al (5228)

Population, Community and Ecosystem

- Gap characteristics in the mixed broad-leaved Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains
..... LIU Shaochong, WANG Jinghua, DUAN Wenbiao, et al (5234)
- Soil nitrogen and phosphorus stoichiometry in a degradation series of *Kobresia humilis* meadows in the Tibetan Plateau
..... LIN Li, LI Yikang, ZHANG Fawei, DU Yangong, et al (5245)
- An analysis of carbon flux partition differences of a mid-subtropical planted coniferous forest in southeastern China
..... HUANG Kun, WANG Shaoqiang, WANG Huimin, et al (5252)
- The niche of annual mixed-seeding meadow in response to density in alpine region of the Qilian Mountain, China
..... ZHAO Chengzhang, ZHANG Jing, SHENG Yaping (5266)
- Functional feeding groups of macrozoobenthos from coastal water off Rushan PENG Songyao, LI Xinzhen (5274)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Effects of selective cutting on vegetation carbon storage of boreal *Larix gmelinii*-*Carex schmidtii* forested wetlands in Daxing'anling,
China MU Changcheng, LU Huicui, BAO Xu, et al (5286)
- CO₂ flux in the upland field with corn-rape seed rotation in the karst area of southwest China
..... FANG Bin, LI Xinqing, CHENG Jianzhong, et al (5299)
- Monitoring spatial variability of soil salinity in dry and wet seasons in the North Tarim Basin using remote sensing and electromagn-
etic induction instruments YAO Yuan, DING Jianli, LEI Lei, et al (5308)
- Methane and nitrous oxide fluxes in temperate secondary forest and larch plantation in Northeastern China
..... SUN Hailong, ZHANG Yandong, WU Shiyi (5320)
- Butterfly diversity and vertical distribution in eastern Tianshan Mountain in Xinjiang
..... ZHANG Xin, HU Hongying, LÜ Zhaozhi (5329)

- Dynamics of aerodynamic parameters over a rainfed maize agroecosystem and their relationships with controlling factors CAI Fu, ZHOU Guangsheng, MING Huiqing, et al (5339)
- The response process to extreme climate events of the household compound system in the northern slope of Tianshan Mountain LI Xiliang, HOU Xiangyang, DING Yong, et al (5353)
- Analysis on spatial-temporal heterogeneities of landscape fragmentation in urban fringe area; a case study in Shunyi district of Beijing LI Can, ZHANG Fengrong, ZHU Taifeng, et al (5363)
- Resource and Industrial Ecology**
- CPUE Standardization of *Illex argentinus* for Chinese Mainland squid-jigging fishery based on generalized linear Bayesian models LU Huajie, CHEN Xinjun, CAO Jie (5375)
- Spatial-temporal differentiation of water quality in Gufu River of Three Gorges Reservoir RAN Guihua, GE Jiwen, MIAO Wenjie, et al (5385)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Comparison environmental impact of the peasant household in han, zang and hui nationality region; case of zhangye, Gannan and Linxia in Gansu Province ZHAO Xueyan, MAO Xiaowen (5397)
- Research Notes**
- The seasonal variation and community structure of zooplankton in China sea DU Mingmin, LIU Zhensheng, WANG Chunsheng, et al (5407)
- Immunotoxicity of marine pollutants on the clam *Ruditapes philippinarum* DING Jianfeng, YAN Xiwu, ZHAO Liqiang, et al (5419)
- Influence of submerged macrophytes on phosphorus transference between sediment and overlying water in decomposition period WANG Lizhi, WANG Guoxiang (5426)
- Distribution patterns of alien herbs in the Yiluo River basin GUO Yili, DING Shengyan, SU Si, et al (5438)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 张利权

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

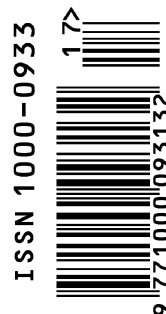
第 33 卷 第 17 期 (2013 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 17 (September, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元