

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第7期

Vol.36 No.7

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析	李莉, 蔡蓓琳, 周敏 (2327)
长三角冬季一次霾过程气溶胶及其水溶性离子的区域分布特征	王曼婷, 朱彬, 王红磊, 薛国强, 何俊, 徐宏辉, 曹锦飞 (2337)
北京城区大气 PM _{2.5} 主要化学组分构成研究	刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 陈添, 赵红帅, 陈圆圆, 陆皓昀 (2346)
2014年春季山东省 PM _{2.5} 跨界输送研究	贾海鹰, 程念亮, 何友江, 陈云波, 杜晓惠, 单晓丽 (2353)
燃煤电厂产生和排放的 PM _{2.5} 中水溶性离子特征	马子珍, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥, 邓建国, 段雷 (2361)
南京夏季城市冠层大气 CO ₂ 浓度时空分布规律的观测	高韵秋, 刘寿东, 胡凝, 王淑敏, 邓力琛, 于洲, 张圳, 李旭辉 (2367)
北京市机动车尾气排放因子研究	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2374)
北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力	张维康, 王兵, 牛香 (2381)
长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算	丁青青, 魏伟, 沈群, 孙予罕 (2389)
基于区域循环模型 IAP-N 的安徽省农用地 N ₂ O 排放量估算	韩云芳, 韩圣慧, 严平 (2395)
不同源汇信息提取方法对区域 CO ₂ 源汇估算及其季节变化的影响评估	张芳, 周凌晔, 王玉诏 (2405)
实测/预测辽河铬(VI)水生生物基准与风险评估	王晓南, 闫振广, 刘征涛, 张聪, 王伟莉 (2414)
博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价	张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清 (2422)
岩溶泉水化学性质及 δ ¹³ C _{DIC} 影响因素	赵瑞一, 吕现福, 刘子琦, 吕春艳 (2430)
柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析	原雅琼, 何师意, 于爽, 孙平安, 王艳雪, 武招云, 李新桂, 谢明鲜, 刘文, 李瑞, 张华生 (2437)
重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价	庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 王效科, 庞容, 邓睿, 孟龄, 马慧雅 (2446)
三峡库区消落带土壤邻苯二甲酸二丁酯静态释放特征	王法, 王强, 木志坚, 杨志丹, 宋娇艳 (2453)
干湿循环对三峡支流消落带沉积物中可转化态氮及其形态分布的影响	林俊杰, 张帅, 杨振宇, 何立平, 周依, 张倩茹 (2459)
天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究	王斌, 马健, 王银亚, 尹湘江 (2465)
西大海湖沉积物营养盐垂直分布特征变化分析	段木春, 肖海丰, 臧淑英 (2472)
草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价	杨敏, 张晟, 刘朔孺 (2480)
宁波三江口水域原核生物群落结构分析	胡安谊, 李姜维, 杨晓永, 王弘杰, 于昌平 (2487)
全氟化合物对表层沉积物中细菌群落结构的影响	孙雅君, 王铁宇, 彭霞薇, 王佩 (2496)
菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质及植物生长的影响	马月, 王国祥, 曹勤, 王小云, 马杰 (2504)
生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究	李立青, 龚燕芳, 颜子钦, 单保庆 (2511)
复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究	王晓璐, 左剑恶, 千里里, 邢薇, 缪恒峰, 阮文权 (2518)
3种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响	吕露, 张梦露, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (2525)
基于透射光法探讨水流流速对 DNAPL 运移分布的影响	高燕维, 郑菲, 施小清, 孙媛媛, 徐红霞, 吴吉春 (2532)
BDD 和 PbO ₂ 电极电化学氧化苯并三氮唑的对比研究	伍娟丽, 张佳维, 王婷, 倪晋仁 (2540)
开放系统下方解石对邻苯二甲酸的吸附	李振炫, 黄利东, 陈艳芳, 缪晔, 刘大刚, 许正文 (2547)
碳纳米管-羟磷灰石对铅的吸附特性研究	张金利, 李宇 (2554)
刚果红分子印迹聚合物纳米微球的合成及吸附性能	常自强, 陈复彬, 张玉, 时作龙, 杨春艳, 章竹君 (2564)
碱热-酸热法合成二氧化钛-钛酸纳米管复合纳米材料对 Cd(II) 和苯酚的同步去除	雷立, 晋银佳, 王婷, 赵泉, 晏友, 刘文 (2573)
固定化菌剂对污水和牛粪中雌二醇和己烯雌酚的去除作用	李欣, 凌婉婷, 刘静娴, 孙敏霞, 高彦征, 刘娟 (2581)
PN-ANAMMOX 一体化反应器处理电子行业 PCB 废水	袁琬, 李祥, 周呈, 陈宗姮 (2591)
Fenton 氧化深度处理石化废水厂二级出水研究	王翼, 吴昌永, 周岳溪, 张雪, 董波, 陈学民 (2597)
制革废水和印染废水的综合毒性评估及鉴别	黄利, 陈文艳, 万玉山, 郑国娟, 赵远, 蔡强 (2604)
不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化	陈燕, 刘国华, 范强, 汪俊妍, 齐鲁, 王洪臣 (2610)
利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数	王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 李静文, 李紫棋, 余勇 (2617)
连续流态下以实际低基质生活污水培养好氧颗粒污泥及其脱氮性能	姚力, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建 (2626)
广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价	张金莲, 丁疆峰, 卢桂宇, 党志, 易筱筠 (2633)
山东省临沂市土壤有机氯农药滴滴涕残留量与空间分布特征	喻超, 王增辉, 王红晋, 代杰瑞, 庞绪贵, 赵西强, 刘华峰 (2641)
金华市萤石矿区土壤氟污染评价	叶群峰, 周小玲 (2648)
土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制	侯亚红, 王磊, 付小花, 乐毅全 (2655)
黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素	李如剑, 王蕊, 李娜娜, 姜继韶, 张彦军, 王志齐, 刘庆芳, 吴得峰, 郭胜利 (2662)
缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响	雷利国, 江长胜, 郝庆菊 (2669)
塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析	朱美玲, 贡璐, 张龙龙 (2678)
不同部位玉米秸秆对两种质地黑土 CO ₂ 排放和微生物量的影响	刘四义, 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 贾淑霞, 陈学文, 张士秀, 孙冰洁, 陈升龙 (2686)
1株对叔丁基邻苯二酚降解菌的筛选鉴定及响应面法优化其降解	贺强礼, 刘文斌, 杨海君, 彭晓霞, 关向杰, 黄水娥 (2695)
耐高浓度沼液产油小球藻的分离鉴定与特征分析	杨周, 王文国, 马丹炜, 汤晓玉, 胡启春 (2707)
水介质中 C ₆₀ 纳米晶体颗粒与 Cu ²⁺ 对小鼠腹腔巨噬细胞的复合毒性研究	于叶, 卞为林, 张慧敏, 张波, 何义亮 (2713)
地表水体中同时分析 18 种糖皮质激素方法的建立	郭文景, 常红, 孙德智, 吴丰昌, 杨浩 (2719)
《环境科学》征订启事 (2553) 《环境科学》征稿简则 (2640) 信息 (2546, 2609, 2616, 2647)	

菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质及植物生长的影响

马月, 王国祥*, 曹勋, 王小云, 马杰

(南京师范大学地理科学学院, 南京 210023)

摘要: 通过室内实验模拟沉水植物季相交替过程, 分析菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质变化影响, 探讨菹草不同残体量腐解对金鱼藻生长的影响. 结果表明, 不同残体量条件下, 金鱼藻均能将水体营养盐及有机质保持在相对较低水平, 且实验第29 d后基本保持稳定, 其中 $DTN < 0.514 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $TN < 0.559 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $TP < 0.080 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $DTP < 0.014 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $TOC < 13.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $Chl-a < 26.546 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质的改善效果明显, 其中在20 g残体条件下处理效果较好, 对水体TN、DTN、TP、TOC和Chl-a的去除率分别达到89.67%、52.51%、94.99%、55.59%和98.55%; 不同残体量条件下金鱼藻的叶绿素、可溶性蛋白、丙二醛含量均比初始值增加, 残体释放的营养盐促进了金鱼藻生长, 在20 g残体条件下其对金鱼藻生长的促进作用最好. 结果表明在水体含有20 g残体条件下, 菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质的改善及植物生长的促进效果最显著.

关键词: 金鱼藻; 菹草; 季相交替; 水质; 植物生理

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)07-2504-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.07.024

Coupling Effects of Decomposed *Potamogeton crispus* and Growing *Ceratophyllum demersum* on Water Quality and Plant Growth

MA Yue, WANG Guo-xiang*, CAO Xun, WANG Xiao-yun, MA Jie

(School of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to study the coupling effects of decomposed *Potamogeton crispus* (*P. crispus*) and growing *Ceratophyllum demersum* (*C. demersum*) on water quality and the effects of different decomposed biomass on plant growth, the simulating experiments for seasonal changes of submerged macrophytes were conducted. The results indicated that the nutrient concentrations in water remained at a relatively low level with different decomposed biomass and they remained stable after 29 days of the experiment. The concentrations of total dissolved nitrogen (DTN), total nitrogen (TN), total phosphorous (TP), total dissolved phosphorous (DTP), organic carbon (TOC) and chlorophyll-a (Chl-a) were lower than 0.514, 0.559, 0.080, 0.014, 13.94 and 26.546 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The obvious improving effects on water quality were observed under coupling condition of decomposition and growth, especially when the treatment of decomposed *P. crispus* was 20 g, and the removal efficiency of TN, DTN, TP, DTP, TOC and Chl-a reached 89.67%, 52.51%, 94.99%, 55.59% and 98.55%, respectively. Compared with the physiology of *C. demersum* in the early stage, the contents of total chlorophyll, soluble protein and malondialdehyde all increased under different decomposed biomass conditions, which suggested that the nutrient released from decomposed *P. crispus* promoted the growth of *C. demersum*. The coupling effects between *P. crispus* decomposition and *C. demersum* growth showed better improving effect on water quality and growth of *C. demersum* with treatment of 20 g decomposed *P. crispus*.

Key words: *Ceratophyllum demersum*; *Potamogeton crispus*; seasonal changes; water quality; plant physiology

沉水植物在水生态系统中承担着重要作用, 不仅是系统的初级生产者, 还通过自身的生态功能对生态系统的物质循环和能量转换起着重要调控作用, 维持水生态系统的平衡及稳定^[1~4]. 研究沉水植物修复富营养化水体的报道很多, 结果表明沉水植物能够降低水体营养盐含量^[5]、抑制藻类滋长^[6]、提高水体透明度等^[7]; 然而沉水植物死亡后也会引起水体恶化现象, 沉水植物腐烂分解释放体内大量的有机质和营养物质, 导致水体营养盐含量增加^[8]、藻类暴发等^[9], 对水体产生“二次污

染”^[10,11]. 利用单一季节沉水植物修复水体, 待沉水植物死亡后, 为防止引起“二次污染”, 近年来有研究提出打捞、收割等应对措施和治理方法^[12,13], 形成“修复-污染-再修复”过程. 目前多集中于研究单一季节沉水植物对水质的改善效果或污染影响, 针对季相交替过程中沉水植物与水质的相互影响研究较

收稿日期: 2014-12-02; 修订日期: 2015-01-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41173078); 江苏省太湖水环境综合治理科研项目(TH2014402)

作者简介: 马月(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境生态修复, E-mail: my2j2l@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: wangguoxiang@njnu.edu.cn

少^[14,15],而在自然湖泊中死亡腐解的植物残体作为营养供体提供碳氮磷等营养物质,促进新生植物生长,从而推动物质转化及能量循环,实现水生生态系统的“自我修复”过程,因而沉水植物季相交替过程对维持水生生态系统的长期稳定性有着重要作用.

金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum*) 是一种较耐受营养盐胁迫,春末夏初开始生长的沉水植物;菹草 (*Potamogeton crispus*) 是冬春生长,夏季衰亡的沉水植物,两者是季相交替过程中典型的沉水植物,具有一定延续性. 因此选用金鱼藻和菹草残体模拟沉水植物夏秋季相交替过程,分析在金鱼藻生长期,不同菹草残体量腐解水质的变化及不同残体量腐解对金鱼藻生长的影响,以探讨季相交替过程中菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用的对水质及植物生长的影响,以期为沉水植物修复水环境提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验方法

2014 年 6 月在实验室采集长势一致的成熟期

菹草并洗净,在 105℃ 杀青 10 min,于 60℃ 烘干至恒重,将茎叶剪碎 (长度 <1 cm),每袋尼龙袋 5 g,干燥保存备用. 采集金鱼藻,去除异物洗净后培养驯化 3 周. 同时采集底泥,去除腐叶、碎石和大颗粒物后过 2 mm 筛,搅拌均匀,静置备用.

选用 ϕ 52 × 75 cm 圆形塑料桶,均匀铺置 10 cm 厚的底泥,加入各 50 L 的自来水和经浮游生物网 (ϕ 0.064 mm) 过滤的池塘水,以引入微生物. 实验用水的可溶性总氮 (DTN)、总氮 (TN)、可溶性总磷 (DTP)、总磷 (TP)、有机碳 (TOC) 和水体叶绿素 a (Chl-a) 分别为 0.272、0.308、0.009、0.011、13.140 和 1.164 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,实验系统稳定 7 d. 设置菹草残体量梯度为 10、20、40 g,实验设计如表 1 所示,金鱼藻选取长势良好的植株,残体尼龙袋捆绑碎石沉入桶底. 实验开始前测定水样作为第 0 d,24 h 后采样作为第 1 d,实验周期为 2 个月,隔时采集水样和植株,测定水质、金鱼藻生理指标以及实验前后金鱼藻和菹草残体的生物量.

表 1 实验设计
Table 1 Experimental design

项目	处理组 I	处理组 II	处理组 III	对照组 IV	对照组 V	空白组
金鱼藻/g	300	300	300	—	—	—
菹草残体/g	10	20	40	20	40	—

1.2 取样与分析

将水样分为上、中、下 3 层,用 50 mL 注射器进行分层采样,混合于 300 mL 的塑料采样瓶,设置 3 个平行. 现场用便携式测定仪测定系统水体的 pH、溶解氧 (DO); 水样总氮 (TN)、总磷 (TP)、可溶性总氮 (DTN)、可溶性总磷 (DTP)、水体叶绿素 a (Chl-a) 和有机碳 (TOC) 的分析方法见文献[16]. 选取金鱼藻顶株,设置 3 个平行,植株的叶绿素 (Chl)、可溶性蛋白和丙二醛 (MDA) 的分析方法采用丙酮-乙醇提取法、硫代巴比妥酸法和紫外吸收法.

1.3 数据处理

采用 SPSS 18.0 统计分析软件对数据进行分析,用 Bivariate 检验相关性的显著水平 (P),用 one-way ANOVA 检验差异的显著水平 (P), $P < 0.05$ 为显著相关, $P < 0.01$ 为极显著相关;用 Matlab 拟合方程.

2 结果与分析

2.1 不同处理条件下水质指标的变化

2.1.1 水体 DTN 和 TN 的变化

不同处理组的水体 DTN 和 TN 在实验期间均不

同程度降低且保持在相对较低水平 (图 1),其中处理组 III 的 DTN 下降速率最快,与相应对照组相比,处理组 II 和 III 对 DTN 的去除率分别为 52.51% 和 45.82%,对 TN 的去除率分别为 89.67% 和 81.45%. 最终处理组 I、II 和 III 的 DTN 分别为 0.464、0.514 和 0.509 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TN 分别为 0.513、0.554 和 0.559 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 对 DTN 和 TN 的去除效果为处理组 II > 处理组 III.

2.1.2 水体 DTP 和 TP 的变化

不同实验组 DTP 的变化趋势大致相似均先增后降 (图 2),11 d 后又不同程度回升再下降. 与相应对照组相比,处理组 II 和 III 对 DTP 的去除率分别为 27.08% 和 51.95%,最终处理组 I、II 和 III 的 DTP 分别为 0.010、0.010 和 0.014 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 其中处理组 II 的藻密度较大,对 DTP 有明显吸收作用,因此 DTP 的去除效果处理组 II < 处理组 III. 处理组的 TP 整体呈波动性下降趋势,实验结束时处理组 I、III 有藻类出现,TP 均有回升. 处理组 II 和 III 对 TP 去除率分别为 94.99% 和 74.35%,最终处理组 I、II 和 III 的 TP 分别为 0.045、0.022 和 0.080 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TP 的去除效果为

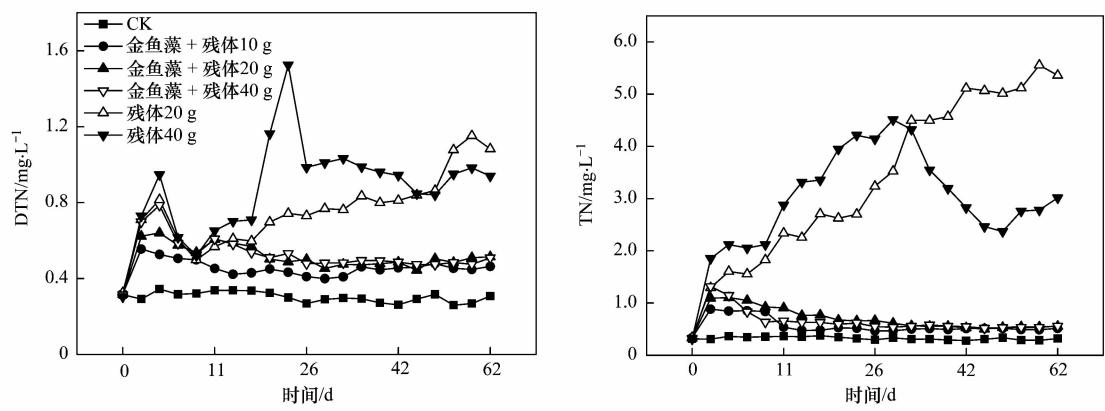


图 1 实验组 DTN 和 TN 的变化

Fig. 1 Changes of total dissolved nitrogen and total nitrogen in different experimental groups

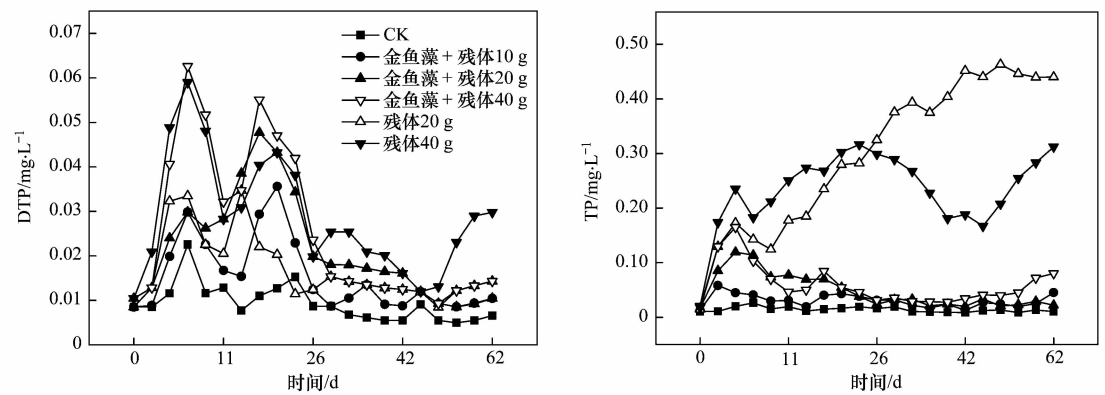


图 2 实验组 DTP 和 TP 的变化

Fig. 2 Changes of total dissolved phosphorous and total phosphorous in different experimental groups

处理组Ⅱ>处理组Ⅲ。

2.1.3 水体 TOC 的变化

处理组的 TOC 在实验前期均快速下降 (图 3), 14 d 后处理组 I、II 和 III 的 TOC 均有小幅度回升且变化波动较大,可能由于水体中有机物的相互转化,及金鱼藻脱叶、老叶分解产生了新的有机物,其

中处理组 I 的部分金鱼藻衰退分解,26 d 后 TOC 接近处理组 II,最终处理组 I、II 和 III 的 TOC 分别为 11.98、13.94 和 13.72 mg·L⁻¹。处理组 II 和 III 的 TOC 去除率分别为 55.59% 和 44.94%,去除效果为处理组 II > 处理组 III。

2.1.4 水体 Chl-a 的变化

菹草残体腐解释放营养盐,促进沉水植物及藻类的生长,处理组水体 Chl-a 均呈先增加后降低趋势 (图 4),实验后期由于处理组 I 和 III 的金鱼藻脱叶分解引起藻类滋长,导致 Chl-a 增加。与相应对照相比,处理组 II 和 III 对 Chl-a 去除率分别为 98.55% 和 96.88%,最终处理组 I、II 和 III 的水体 Chl-a 分别为 26.546、9.983 和 13.683 mg·L⁻¹,去除效果处理组 II > 处理组 II,其中处理组 II 的抑藻作用最明显。

2.2 不同处理条件下金鱼藻生理指标变化

2.2.1 金鱼藻生物量的变化

初始生物量均为 300 g [图 5 (a)],8 d 后处理

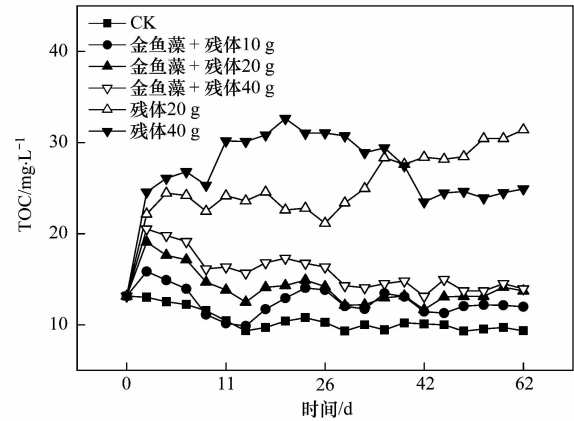


图 3 实验组 TOC 的变化

Fig. 3 Changes of organic carbon in different experimental groups

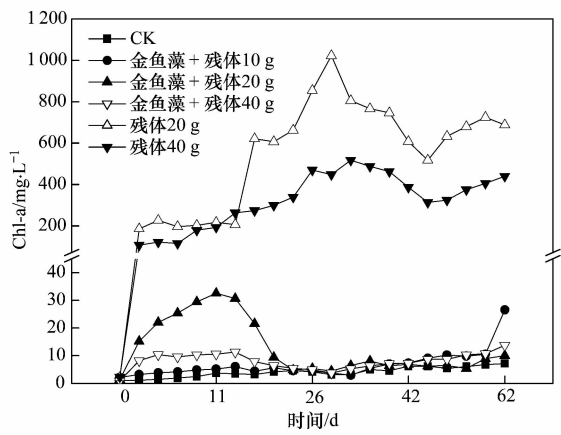


图4 实验组水体 Chl-a 的变化

Fig. 4 Changes of Chl-a in water in different experimental groups

组Ⅰ的金鱼藻衰退,生物量快速降低,29 d 后新株生长,生物量增加;处理组Ⅱ的金鱼藻植株健康并逐渐增大;处理组Ⅲ在实验第1~23 d 生长旺盛,后期生长缓慢. 最终生物量处理组Ⅰ降低50.07%,处理组Ⅱ和Ⅲ分别增加7.92%和18.75%.

2.2.2 金鱼藻 Chl 含量的变化

实验初期金鱼藻长势良好[图5(b)],11 d 后处理组Ⅰ的金鱼藻 Chl 含量降至最低,29 d 后新株

生长,Chl 含量增加;处理组Ⅱ的 Chl 含量持续增加;处理组Ⅲ的 Chl 含量第23 d 达到最高,分别是处理组Ⅰ和Ⅱ的1.88和1.27倍,后期植株 Chl 含量逐渐降低. 3个处理 Chl 含量均比初始值增加,三者差异显著($P<0.01$),且处理组Ⅱ的 Chl 最终含量分别是处理组Ⅰ和Ⅲ的1.23和1.39倍.

2.2.3 金鱼藻可溶性蛋白含量的变化

处理组Ⅰ的金鱼藻可溶性蛋白含量11 d 后明显增加[图5(c)],第23 d 的含量分别是处理组Ⅱ和Ⅲ的1.68和1.52倍,后期含量下降;其他两个处理组的可溶性蛋白含量逐渐增加. 可溶性蛋白最终含量为处理组Ⅱ>处理组Ⅲ>处理组Ⅰ,三者差异显著($P<0.01$).

2.2.4 金鱼藻 MDA 含量的变化

实验第1~29 d [图5(d)],处理组Ⅰ的金鱼藻 MDA 含量第11 d 明显增高,分别是处理组Ⅱ和Ⅲ的1.35和1.58倍,随后含量有所降低;处理组Ⅱ的 MDA 含量缓慢增加;处理组Ⅲ的 MDA 含量第17 d 降至最低其后缓慢增加. 29 d 后3个处理组的 MDA 含量均缓慢增加并逐渐保持稳定. MDA 最终含量为处理组Ⅲ>处理组Ⅰ>处理组Ⅱ,三者差异显著($P<0.01$).

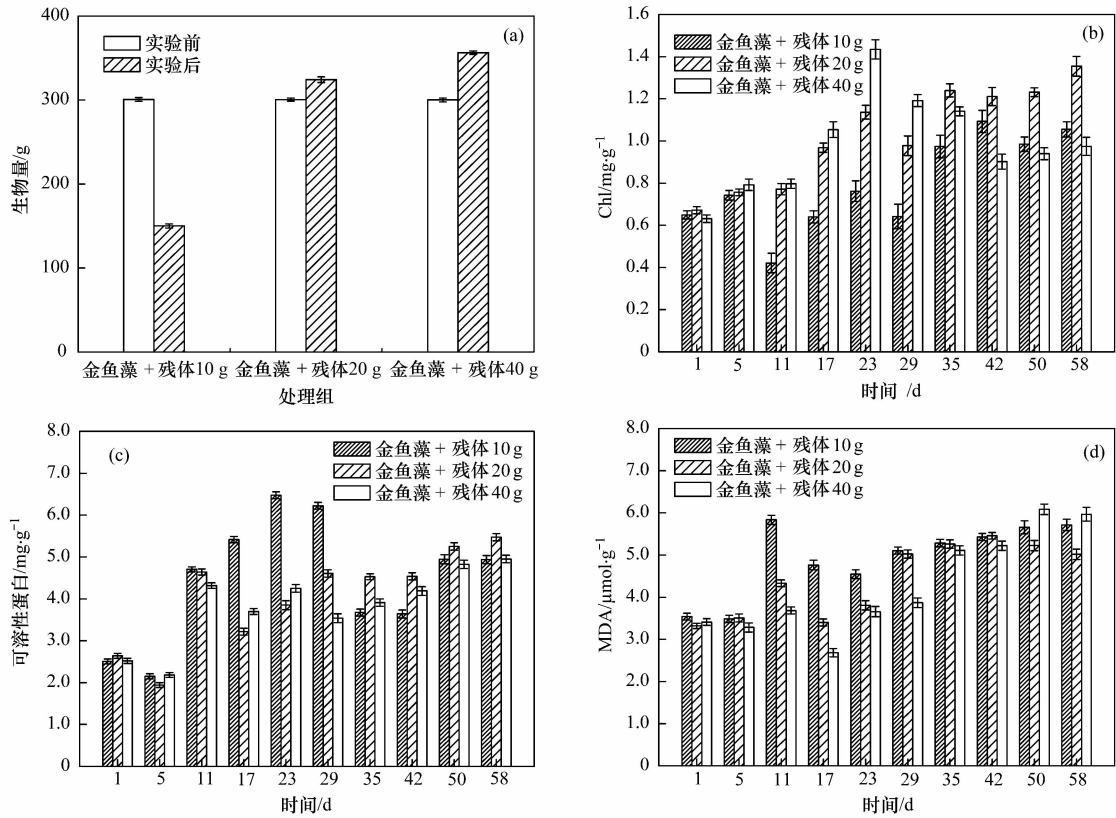


图5 金鱼藻各生理指标的变化

Fig. 5 Changes of physiological indices of *Ceratophyllum demersum*

3 讨论

3.1 菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质的影响

菹草残体内不稳定的有机物分解释放到水体中,各实验组的残体生物量均比初始值减少了 50% 以上(表 2). 有研究表明,沉水植物的腐解分解率不高,且分解过程短暂,其中植残体内的 C、N 分解过程较滞后^[10],而植物残体内的 P 主要存在生物活性物质中易于分解释放^[17],同时底泥内源磷释放也引起水体 P 含量增加^[18],因而在实验期间 C、N 含量释放强度不大,而 P 含量均有不同程度的回升. 不同残体量条件下,菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用均对水体营养盐有着显著去除效果,实验第 29 d 后,各处理组的营养盐浓度基本保持稳定,实验结束时均处于较低水平. 原因可能是,其一,沉水植物的吸收同化作用^[6],其二,植物附着生物吸收作用^[19],其三,周生环境条件的改善并促进微生物的活动^[20]. 其四,沉水植物的化感作用^[9]. 在整个培养阶段残体腐释放营养盐,金鱼藻通过吸收同化营养盐,一部分促进植株生长,一部分贮存在植物体内;金鱼藻植株上有少量的丝状藻等附着藻类生长,可直接吸收利用水体营养盐^[6];金鱼藻的生长改善残体腐解的水环境条件,溶解氧高,pH 保持弱碱性,水体透明度高,微生物活动增强,促进系统中 N、P 营养元素的迁移、转化,通过硝化-反硝

化作用去除氮,转化含磷化合物去除磷. 同时残体释放的有机质能够为微生物提供碳源,提高微生物活性,进而有效去除水体有机物^[11, 21],使 TOC 以 CH₄、CO₂ 的形式逸出系统^[22],另外通过吸附作用和悬浮物质的沉降^[13],也使水体 TOC 逐渐降低. 处理组水体 Chl-a 与菹草残体投加量成反比,这与成小英等^[23]的实验结果一致. 水体 Chl-a 与 TN、TP 显著相关 ($P < 0.01$),与 TOC 也呈相关性 ($P < 0.05$),表明藻类生长或死亡后被微生物分解转化均增加了水体有机质和营养盐. 因此金鱼藻的他感作用抑制藻类生长,间接降低了水体有机质及营养盐.

菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对不同残体量条件下的水质改善效果存在差异. 10 g 残体处理组金鱼藻受到胁迫衰退,叶片脱落,残叶分解释放出 C、N、P 元素,导致实验中期水体营养盐及有机质浓度小幅度回升,随着新株快速生长及藻类滋长,营养盐及有机质浓度与其他处理组相近;20 g 残体处理组水体营养盐及有机质浓度持续下降,水体 Chl-a 达到最低,去除率高于其他处理组;40 g 残体处理组水体营养盐及有机质浓度的下降速率最快,实验后期金鱼藻受到环境胁迫及藻类滋长,水体营养盐及有机质浓度有所回升. 结果表明在 20 g 残体条件下,菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对去除水体营养盐及有机质浓度的效果显著.

表 2 实验前后菹草残体生物量变化

Table 2 Decomposed biomass changes of *Potamogeton crispus* before and after the experiment

项目	金鱼藻 + 10 g 残体	金鱼藻 + 20 g 残体	金鱼藻 + 40 g 残体	20 g 残体	40 g 残体
实验初/g	10.00 ± 0.00	20.00 ± 0.00	40.00 ± 0.00	20.00 ± 0.00	40.00 ± 0.00
实验末/g	4.65 ± 0.41	8.37 ± 0.21	15.64 ± 0.16	8.00 ± 0.29	18.28 ± 0.18
损失量/%	53.54	58.14	60.91	60.00	61.80

3.2 不同残体量对金鱼藻生长的影响

菹草残体腐解过程对水环境产生影响,在实验初期不同残体量腐解均不同程度降低了水体溶解氧、pH、透明度等,后随着金鱼藻的生长环境条件改善水体溶解氧、pH、透明度均升高,这与易文利等^[15]实验结果相似,且残体释放的营养盐及有机物含量也会对植物的生理特性造成胁迫,抑制植物生长,引起金鱼藻的生理响应. 生物量是反映植物生长状态的重要指标. 10 g 残体处理组金鱼藻受营养胁迫,生物量下降;20 g 残体处理组营养盐浓度适量,环境条件适宜,金鱼藻生长健壮,植株油绿;40 g 残体处理组营养盐释放大,耗氧较多,较高浓度促进金鱼藻生长,生物量快速增大竞争激烈,生长受到

抑制,植株颜色逐渐发暗.

光合作用是植物体内极为重要的代谢过程,其强弱对植物生长及抗逆性具有十分重要的影响. 光合色素是光合作用的物质基础,叶绿素含量高低反映了植株的营养及生长状况和光合作用能力^[24],含量越高,光合作用越强^[15],缺乏营养元素,叶绿素形成受阻. 10 g 残体处理组营养盐低,金鱼藻叶绿素合成受阻,植株衰退残叶分解释放营养盐,促进新株生长含量逐渐增加;20 g 残体处理组的金鱼藻长势良好,叶绿素含量持续增高,光合作用最强. 40 g 残体处理组金鱼藻在高营养盐浓度中快速生长,叶绿素含量激增,随着竞争及营养盐胁迫,叶绿素含量降低.

植物叶片中的可溶性蛋白多是参与各种代谢、光合作用的关键酶,可溶性蛋白含量是了解植物体总代谢的一个重要指标^[25]。逆境胁迫导致植物蛋白质分解,合成降低,引起可溶性蛋白含量增加,同时缺乏或过多摄取氮素营养,可溶性蛋白质含量减少。10 g 残体处理组缺乏营养盐,植物受到胁迫,可溶性蛋白含量激增,随着生物量减少及残叶腐解释放营养促进新株生长,恢复正常蛋白合成功能;20 g 残体处理组的营养盐促进蛋白质合成,提高可溶性蛋白含量,利于植株生长。40 g 残体处理组由于竞争作用及营养胁迫导致生长减缓,蛋白合成减少,可溶性蛋白含量相应减少。

丙二醛是膜脂过氧化作用的产物,可以作为细胞膜受损的标志^[26]。当水体营养盐浓度较低或较高时,植物受到胁迫活性氧自由基积累,体内活性氧产生与清除系统的动态平衡被打破,促使膜脂过氧化,MDA 含量增加,细胞膜系统受损^[27]。10 g 残体处理组营养盐释放量低,金鱼藻逆境下产生自由基,

引起 MDA 含量增加,植株受到迫害叶片脱落,金鱼藻产生胁迫响应,促使保护酶增加清除自由基,随着环境条件适宜,金鱼藻生出新枝,MDA 含量相应下降,后随植株生长含量渐增;20 g 残体处理组金鱼藻生长受到胁迫较小,MDA 含量随植株生长逐渐增加且显著低于其他处理组,植物生长旺盛。40 g 残体处理组金鱼藻初期快速生长 MDA 含量降低,后期竞争及营养盐胁迫生长受到抑制含量缓慢增加。结果表明本实验中 300 g 金鱼藻在 20 g 菹草残体条件下生长最好。

3.3 水质与生理指标的相关分析

3.3.1 主成分分析

将不同处理组随时间变化的 DTN、TN、DTP、TP 和 TOC 这 5 个水质指标进行主成分分析,结果如图 6,不同处理组对于时间的散点分布具有一定差异,通过对主成分进行分析,第一成分指标为 TOC,第二成分指标为 TN,第三成分指标为其他水质指标,其中 DTP、TP 具有相关性。

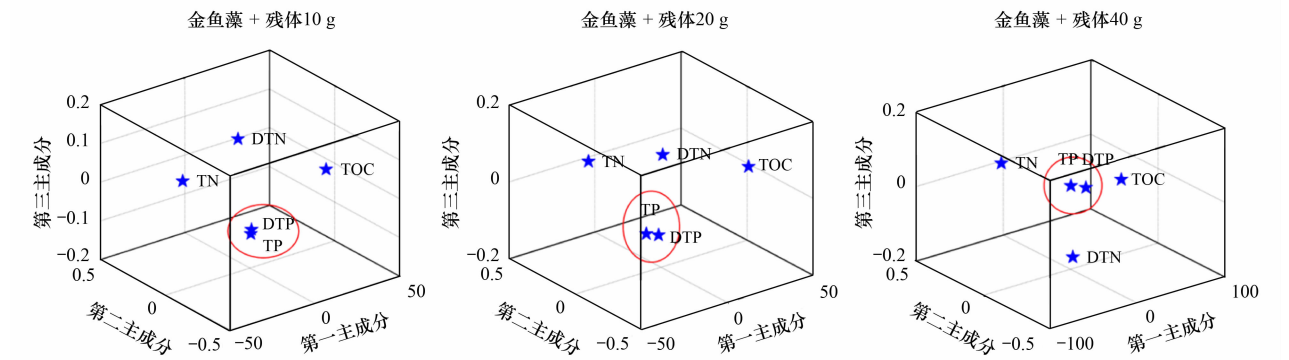


图 6 金鱼藻组水质指标主成分分布

Fig. 6 Scatter plot of the scores of the first three principal components in the *Ceratophyllum demersum* groups

表 3 金鱼藻组的多元线性回归拟合方程¹⁾

Table 3 Multiple linear fitting regression equation of <i>Ceratophyllum demersum</i> groups						
项目	处理组	拟合方程	R^2	P	显著性水平	
水体 Chl-a	金鱼藻 + 10 g 残体	$y = -17.24 + 87.03x_1 - 21.08x_2 - 83.99x_3 + 41.39x_4 - 0.35x_5$	0.692 4	< 0.01	极显著	
	金鱼藻 + 20 g 残体	$y = -4.08 + 87.27x_1 + 25.37x_2 + 27.34x_3 + 114.76x_4 - 3.71x_5$	0.858 7	< 0.001	极显著	
	金鱼藻 + 40 g 残体	$y = 0.32 + 53.17x_1 - 21.76x_2 - 51.73x_3 + 110.61x_4 - 0.68x_5$	0.761 3	< 0.01	极显著	
植物 Chl	金鱼藻 + 10 g 残体	$y = -0.90 + 4.91x_1 - 1.56x_2 - 3.81x_3 - 7.56x_4 + 0.05x_5$	0.630 1	< 0.01	极显著	
	金鱼藻 + 20 g 残体	$y = 1.22 + 0.72x_1 - 1.90x_2 - 1.51x_3 + 2.21x_4 + 0.05x_5$	0.962 4	< 0.001	极显著	
	金鱼藻 + 40 g 残体	$y = 0.47 - 0.38x_1 - 1.10x_2 - 3.51x_3 - 1.07x_4 + 0.10x_5$	0.529 7	< 0.05	显著	
植物可溶性蛋白	金鱼藻 + 10 g 残体	$y = 14.73 - 119.54x_1 - 4.35x_2 + 6.51x_4 + 7.17x_4 - 0.03x_5$	0.822 5	< 0.001	极显著	
	金鱼藻 + 20 g 残体	$y = 5.09 + 8.98x_1 - 4.24x_2 - 31.10x_3 - 7.02x_4 - 0.12x_5$	0.895 3	< 0.001	极显著	
	金鱼藻 + 40 g 残体	$y = 2.79 + 4.81x_1 - 7.43x_2 - 38.64x_3 + 8.97x_4 + 0.25x_5$	0.812 4	< 0.001	极显著	
植物 MDA	金鱼藻 + 10 g 残体	$y = 7.09 + 7.72x_1 - 4.20x_2 - 23.40x_3 - 3.37x_4 - 0.22x_5$	0.902 5	< 0.001	极显著	
	金鱼藻 + 20 g 残体	$y = 9.37 - 1.14x_1 - 1.56x_2 - 42.07x_3 + 6.83x_4 - 0.19x_5$	0.931 3	< 0.001	极显著	
	金鱼藻 + 40 g 残体	$y = 11.26 - 4.13x_1 - 1.23x_2 - 42.11x_3 + 22.10x_4 - 0.26x_5$	0.830 9	< 0.001	极显著	

1) $x_1 \sim x_5$ 分别为水质指标 DTN、TN、DTP、TP 和 TOC ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); * 为剔除两个异常点后所得拟合方程

3.3.2 多元线性回归模型的建立

处理组的水质指标 DTN、TN、DTP、TP、TOC 和水体 Chl-a 及金鱼藻生理指标 Chl、可溶性蛋白、MDA 通过 Matlab 拟合方程,结果如表 3 所示,可以看出不同处理组均可以建立多元线性回归拟合方程,且相关性均显著,说明藻类及金鱼藻的生长与腐解水质状况有较大关系,其中 20 g 残体处理组相关性最好. 选取实验不同天数的水质指标数据代入多元线性回归拟合方程进行计算,得出的数值与实际数值误差均不超过 20%,可满足模型计算要求. 因此通过测定水质指标 DTN、TN、DTP、TP 和 TOC,即可对水体 Chl-a 及金鱼藻各生理指标进行快速估算,提高现场预测能力.

4 结论

(1) 不同残体量条件下水体 DTN、TN、DTP、TP、TOC 和 Chl-a 均处于较低水平,且实验第 29 d 后基本保持稳定,其中 $DTN < 0.514\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $TN < 0.559\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $TP < 0.080\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $DTP < 0.014\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $TOC < 13.94\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $Chl-a < 26.546\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表明菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质的改善作用明显. 其中在 20 g 残体条件下改善效果好,对水体 TN、DTN、TP、TOC 和 Chl-a 的去除率分别达到 89.67%、52.51%、94.99%、55.59% 和 98.55%.

(2) 整个培养阶段,不同残体量条件下金鱼藻的叶绿素、可溶性蛋白、丙二醛含量均比初始值增加,残体释放的营养盐促进了金鱼藻生长. 其中在 10 g 和 40 g 残体条件下,菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用的对金鱼藻生长的促进作用较小,而在 20 g 残体条件下其对金鱼藻生长的促进作用最好. 表明在菹草残体 20 g 条件下菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质改善及促进植物生长的效果最显著.

参考文献:

[1] Havens K E, Sharfstein B, Brady M A, *et al.* Recovery of submerged plants from high water stress in a large subtropical lake in Florida, USA[J]. Aquatic Botany, 2004, **78**(1): 67-82.

[2] 宋玉芝, 杨美玖, 秦伯强. 苦草对富营养化水体中氮磷营养盐的生理响应[J]. 环境科学, 2011, **32**(9): 2569-2575.

[3] 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.

[4] 杨文斌, 李阳, 孙共献. 两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2156-2163.

[5] 张来甲, 叶春, 李春华, 等. 沉水植物腐解对水体水质的影响[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(2): 145-151.

[6] 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

[7] 高华梅, 谷孝鸿, 曾庆飞, 等. 不同基质下菹草的生长及其对水体营养盐的吸收[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(5): 655-659.

[8] 卢少勇, 陈建军, 覃进, 等. 扰动强度对菹草浸泡过程中氮磷碳释放的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 1940-1944.

[9] 张娟, 李春华, 叶春, 等. 沉水植物黑藻腐解对微囊藻休眠体复苏的影响[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(1): 43-50.

[10] 李文朝, 陈开宁, 吴庆龙, 等. 东太湖水生植物生物质腐烂分解实验[J]. 湖泊科学, 2001, **13**(4): 331-336.

[11] 叶春, 王博, 李春华, 等. 沉水植物黑藻腐解过程中营养盐释放过程[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(10): 2653-2659.

[12] 王锦旗, 郑有飞, 王国祥. 玄武湖菹草种群的发生原因及人工收割对水环境的影响[J]. 水生生物学报, 2013, **27**(2): 300-305.

[13] 王博, 李法云, 范志平. 不同温度下黑藻分解过程及对水体-底泥碳、氮、磷的影响研究[J]. 环境污染与防治, 2013, **35**(10): 46-51.

[14] 王文林, 马婷, 李强, 等. 水生高等植物季相交替群落对富营养化水体净化效果调查[J]. 环境监测管理与技术, 2006, **18**(1): 16-19.

[15] 易文利, 王圣瑞, 杨苏文, 等. 有机质腐解对穗花狐尾藻生长及生理的影响[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(10): 1718-1724.

[16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002, 243-257.

[17] 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.

[18] Gibbs M, Özkundakci D. Effects of a modified zeolite on P and N processes and fluxes across the lake sediment-water interface using core incubations[J]. Hydrobiologia, 2011, **661**(1): 21-35.

[19] Hilt S, Gross E M. Can allelopathically active submerged macrophytes stabilize clear-water states in shallow lakes? [J]. Basic and Applied Ecology, 2008, **9**(4): 422-432.

[20] 刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 等. 伊乐藻和氮循环细菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(10): 3764-3768.

[21] Newton R J, Jones S E, Eiler A, *et al.* A guide to the natural history of freshwater lake bacteria [J]. Microbiology and Molecular Biology Reviews. 2011, **75**(1): 14-49.

[22] 张来甲, 叶春, 李春华, 等. 不同生物量苦草在生命周期的不同阶段对水体水质的影响[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(11): 2053-2061.

[23] 成小英, 王国祥, 濮培民, 等. 凤眼莲腐烂分解对湖泊水质的影响[J]. 中国环境科学, 2004, **24**(3): 303-306.

[24] 潘慧云, 李小路, 徐小花, 等. 甲磺隆对沉水植物伊乐藻的生理生态效应研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(7): 1844-1848.

[25] 葛芳杰, 刘碧云, 鲁志营, 等. 不同氮、磷浓度对穗花狐尾藻生长及酚类物质含量的影响[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(2): 472-479.

[26] 吴婷婷, 刘国锋, 韩士群, 等. 蓝藻水华聚集对水葫芦生理生态的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 114-120.

[27] 周庆, 韩士群, 严少华, 等. 凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 597-604.

CONTENTS

Potential Source Contribution Analysis of the Particulate Matters in Shanghai During the Heavy Haze Episode in Eastern and Middle China in December, 2013	Li Li, CAI Jun-lin, ZHOU Min (2327)
Composition and Regional Characteristics of Atmosphere Aerosol and Its Water Soluble Ions over the Yangtze River Delta Region in a Winter Haze Period	WANG Man-ting, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (2337)
Chemical Species of PM _{2.5} in the Urban Area of Beijing	LIU Bao-xian, YANG Dong-yan, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2346)
Numerical Study on the Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Shandong Province During Spring in 2014	JIA Hai-ying, CHENG Nian-liang, HE You-jiang, <i>et al.</i> (2353)
Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} Emitted from Coal-Fired Power Plants	MA Zi-zhen, LI Zhen, JIANG Jing-kun, <i>et al.</i> (2361)
Direct Observation on the Temporal and Spatial Patterns of the CO ₂ Concentration in the Atmospheric of Nanjing Urban Canyon in Summer	GAO Yun-qiu, LIU Shou-dong, HU Ning, <i>et al.</i> (2367)
Emission Factors of Vehicle Exhaust in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2374)
Adsorption Capacity of the Air Particulate Matter in Urban Landscape Plants in Different Polluted Regions of Beijing	ZHANG Wei-kang, WANG Bing, NIU Xiang (2381)
Major Air Pollutant Emissions of Coal-Fired Power Plant in Yangtze River Delta	DING Qing-qing, WEI Wei, SHEN Qun, <i>et al.</i> (2389)
Estimation of N ₂ O Emission from Anhui Croplands by Using a Regional Nitrogen Cycling Model IAP-N	HAN Yun-fang, HAN Sheng-hui, YAN Ping (2395)
Evaluation on the Impacts of Different Background Determination Methods on CO ₂ Sources and Sinks Estimation and Seasonal Variations	ZHANG Fang, ZHOU Ling-xi, WANG Yu-zhao (2405)
Measured and Predicted Aquatic Life Criteria and Risk Assessment of Chromium (VI) in Liaohe River	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, <i>et al.</i> (2414)
Pollution and Potential Ecology Risk Evaluation of Heavy Metals in River Water, Top Sediments on Bed and Soils Along Banks of Bortala River, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwalili, JIANG Feng-qing (2422)
Influencing Factors for Hydrochemistry and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of Karst Springs	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, LIU Zi-qi, <i>et al.</i> (2430)
Hydrochemical Characteristics and the Dissolved Inorganic Carbon Flux in Liuzhou Section of Liujiang Basin	YUAN Ya-qiong, HE Shi-yi, YU Shi, <i>et al.</i> (2437)
Characteristics of Total Nitrogen and Total Phosphorus Pollution and Eutrophication Assessment of Secondary River in Urban Chongqing	QING Xu-yao, REN Yu-fen, LÜ Zhi-qiang, <i>et al.</i> (2446)
Static Migration and Release of Dibutyl-Phthalate in the Fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir	WANG Fa, WANG Qiang, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (2453)
Effect of Drought and Subsequent Re-wetting Cycles on Transferable Nitrogen and Its Form Distribution in the Sediment of Water Level Fluctuating Zone in the Tributary of Three Gorge Reservoir Areas	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, YANG Zhen-yu, <i>et al.</i> (2459)
Distribution of Chlorophyll-a and Eutrophication State in Tianchi Lake of Tianshan Mountains in Summer	WANG Bin, MA Jian, WANG Yin-ya, <i>et al.</i> (2465)
Vertical Distribution Characteristics and Analysis in Sediments of Xidaihai Lake	DUAN Mu-chun, XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying (2472)
Phytoplankton Community Structure and Water Quality Assessment in Jialing River After the Impoundment of Caojie Reservoir	YANG Min, ZHANG Sheng, LIU Shuo-ru (2480)
Analysis of Prokaryotic Community Structure in River Waters of the Ningbo Sanjiang Mouth	HU An-yi, LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, <i>et al.</i> (2487)
Effects of Perfluoroalkyl Substances on the Microbial Community Structure in Surface Sediments of Typical River, China	SUN Ya-jun, WANG Tie-yu, PENG Xia-wei, <i>et al.</i> (2496)
Coupling Effects of Decomposed <i>Potamogeton crispus</i> and Growing <i>Ceratophyllum demersum</i> on Water Quality and Plant Growth	MA Yue, WANG Guo-xiang, CAO Xun, <i>et al.</i> (2504)
Bioretention Media Screening for the Removal of Phosphorus in Urban Stormwater	LI Li-qing, GONG Yan-fang, YAN Zi-qin, <i>et al.</i> (2511)
Treatment of Urban Runoff Pollutants by a Multilayer Biofiltration System	WANG Xiao-lu, ZUO Jian-e, GAN Li-li, <i>et al.</i> (2518)
Effect of Three Typical Disinfection Byproducts on Bacterial Antibiotic Resistance	LÜ Lu, ZHANG Meng-lu, WANG Chun-ming, <i>et al.</i> (2525)
Laboratory Investigation of DNAPL Migration Behavior and Distribution at Varying Flow Velocities Based on Light Transmission Method	GAO Yan-wei, ZHENG Fei, SHI Xiao-qing, <i>et al.</i> (2532)
Comparative Study of Benzotriazole Electrochemical Oxidation at Boron-doped Diamond and PbO ₂ Anodes	WU Juan-li, ZHANG Jia-wei, WANG Ting, <i>et al.</i> (2540)
Sorption of <i>o</i> -Phthalate onto Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, HUANG Li-dong, CHEN Yan-fang, <i>et al.</i> (2547)
Adsorption Behaviors of Lead on Multi-Walled Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Composites	ZHANG Jin-li, LI Yu (2554)
Synthesis and Study on Adsorption Property of Congo Red Molecularly Imprinted Polymer Nanospheres	CHANG Zi-qiang, CHEN Fu-bin, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2564)
Simultaneous Removal of Cd(II) and Phenol by Titanium Dioxide-Titanate Nanotubes Composite Nanomaterial Synthesized Through Alkaline-Acid Hydrothermal Method	LEI Li, JIN Yin-jia, WANG Ting, <i>et al.</i> (2573)
Immobilization of Estrogen-degrading Bacteria to Remove the 17 β -estradiol and Diethylstilbestrol from Polluted Water and Cow Dung	LI Xin, LING Wan-ting, LIU Jing-xian, <i>et al.</i> (2581)
Optoelectronic PCB Wastewater Treatment by Partial Nitrification-ANAMMOX Integrative Reactor	YUAN Yan, LI Xiang, ZHOU Cheng, <i>et al.</i> (2591)
Treatment of Petrochemical Treatment Plant Secondary Effluent by Fenton Oxidation	WANG Yi, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (2597)
Comprehensive Toxicity Evaluation and Toxicity Identification Used in Tannery and Textile Wastewaters	HUANG Li, CHEN Wen-yan, WAN Yu-shan, <i>et al.</i> (2604)
Carbon/nitrogen Removal and Bacterial Community Structure Change in an A/O Activated Sludge System Under Different Dissolved Oxygen Conditions	CHEN Yan, LIU Guo-hua, FAN Qiang, <i>et al.</i> (2610)
ORP in the Main Anoxic Stage as the Control Parameter for Nitrogen and Phosphorus Removal in the Single Sludge System with a Continuous Flow	WANG Xiao-ling, SONG Tie-hong, YIN Bao-yong, <i>et al.</i> (2617)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Real Low Concentration Domestic Wastewater and Its Denitrification Performances Under the Continuous Flow	YAO Li, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2626)
Heavy Metal Contamination in Farmland Soils at an E-waste Disassembling Site in Qingyuan, Guangdong, South China	ZHANG Jin-lian, DING Jiang-feng, LU Gui-ning, <i>et al.</i> (2633)
Residues and Spatial Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides DDTs in Soil of Linyi City, Shandong Province	YU Chao, WANG Zeng-hui, WANG Hong-jin, <i>et al.</i> (2641)
Assessment of Soil Fluorine Pollution in Jinhua Fluorite Ore Areas	YE Qun-feng, ZHOU Xiao-ling (2648)
Response of Straw and Straw Biochar Returning to Soil Carbon Budget and Its Mechanism	HOU Ya-hong, WANG Lei, FU Xiao-hua, <i>et al.</i> (2655)
Changes of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors of Apple Orchards and Black Locusts in the Small Watershed of Loess Plateau, China	LI Ru-jian, WANG Rui, LI Na-na, <i>et al.</i> (2662)
Impacts of Land Use Changes on Soil Light Fraction and Particulate Organic Carbon and Nitrogen in Jinyun Mountain	LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2669)
Soil Enzyme Activities and Their Relationships to Environmental Factors in a Typical Oasis in the Upper Reaches of the Tarim River	ZHU Mei-ling, GONG Lu, ZHANG Long-long (2678)
Effects of Different Residue Part Inputs of Corn Straws on CO ₂ Efflux and Microbial Biomass in Clay Loam and Sandy Loam Black Soils	LIU Si-yi, LIANG Ai-zhen, YANG Xue-ming, <i>et al.</i> (2686)
Isolation, Identification of a <i>p</i> - <i>tert</i> -Butylcatechol-Degrading Strains and Optimization for Its Degradation by Response Surface Methodology	HE Qiang-li, LIU Wen-bin, YANG Hai-jun, <i>et al.</i> (2695)
Isolation, Identification and Characteristic Analysis of an Oil-producing <i>Chlorella</i> sp. Tolerant to High-strength Anaerobic Digestion Effluent	YANG Chuang, WANG Wen-guo, MA Dan-wei, <i>et al.</i> (2707)
Coupled Cytotoxicity of C ₆₀ Nano-Crystal Particle with Cu ²⁺ to the Mouse Peritoneal Microphage RAW 264. 7	YU Ye, BIAN Wei-lin, ZHANG Hui-min, <i>et al.</i> (2713)
Simultaneous Analysis of 18 Glucocorticoids in Surface Water	GUO Wen-jing, CHANG Hong, SUN De-zhi, <i>et al.</i> (2719)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编：欧阳自远
副主编：赵景柱 郝吉明 田 刚
编 委：（按姓氏笔画排序）

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976 年 8 月创刊)

2015 年 7 月 15 日 第 36 卷 第 7 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 7 Jul. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧 阳 自 远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《 环 境 科 学 》 编 辑 委 员 会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871 , Beijing 100085 , China Tel: 010-62941102 , 010-62849343 ; Fax : 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street , Beijing 100717 , China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian) , P. O. Box 399 , Beijing 100044 , China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301 国内邮发代号: 2-821
CN 11-1895/X

国 内 定 价: 120.00 元 国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行