

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源	张利飞, 杨文龙, 董亮, 史双昕, 周丽, 张秀蓝, 李玲玲, 钮珊, 黄业茹 (3339)
FTIR对大气颗粒物PM _{2.5} 中硝酸盐的定量分析	刘娜, 魏秀丽, 高闯光, 徐亮, 焦洋, 李胜, 童晶晶, 程已阳 (3347)
福建茫荡山地区春季大气O ₃ 、HONO、HCHO、H ₂ O ₂ 对·OH的贡献率研究	刘昊, 王会祥 (3352)
水体类固醇雌激素污染现状研究进展	都韶婷, 金崇伟, 刘越 (3358)
嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查	闫幸, 余卫娟, 兰亚琼, 李立, 吕升, 叶朝霞, 张永明, 刘锐, 陈吕军 (3368)
上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征	姜国, 陈来国, 何秋生, 孟祥周, 封永斌, 黄玉妹, 唐才明 (3374)
水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 孙雯, 钱令嘉, 战锐 (3381)
四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用	徐冬梅, 王艳花, 饶桂维 (3386)
光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响	李鸿妹, 石晓勇, 丁雁雁, 唐洪杰 (3391)
围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较	庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 王江涛 (3398)
长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征	赖俊翔, 俞志明, 宋秀贤, 韩笑天, 曹西华, 袁涌铨 (3405)
长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究	李胜男, 史小丽, 谢微微, 龚伊, 孔繁翔 (3416)
峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析	黄廷林, 秦昌海, 李璇 (3423)
九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义	鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 王龙剑, 吴杰忠 (3430)
氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律	陈友媛, 申宇, 杨世迎 (3437)
石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究	张菁, 李睿华, 李杰, 胡俊松, 孙茜茜 (3445)
杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究	邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐 (3451)
滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究	谢理, 杨浩, 渠晓霞, 朱元荣, 鄢元波, 张明礼, 吴丰昌 (3458)
自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响	张鸿, 陈清武, 王鑫璇, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 刘国卿 (3467)
J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价	李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 余素林, 文晓刚, 陈吕军, 张永明 (3474)
水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响	吴永丽, 石宝友, 孙慧芳, 张枝焕, 顾军农, 王东升 (3480)
重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究	胡运俊, 盛田田, 薛晓芹, 谭丽莎, 徐新华 (3486)
聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究	刘新新, 杨忠莲, 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 李倩 (3493)
镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制	桑义敏, 常雪红, 车越, 谷庆宝 (3502)
钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究	欧阳磊, 丁耀彬, 朱丽华, 唐和清, 廖海星 (3507)
以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征	宿程远, 李伟光, 刘兴哲, 王恺尧, 王勇 (3513)
氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究	赵丽君, 马志远, 郭延凯, 席振华, 杜海峰, 刘晓宇, 郭建博 (3520)
缓释碳源滤料滤池用于二级出水的深度脱氮	唐蕾, 李彭, 左剑恶, 袁琳, 李再兴 (3526)
微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N ₂ O产生量的研究	陈丽丽, 高大文 (3532)
Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究	马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 岳东北, 王洪涛 (3538)
高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性	唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 郑平 (3544)
内蒙古温带草原氮沉降的观测研究	张菊, 康荣华, 赵斌, 黄永梅, 叶芝祥, 段雷 (3552)
湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究	刘孝利, 曾昭霞, 陈喆, 铁柏清, 陈求稳, 叶长城 (3557)
蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究	王书航, 王雯雯, 姜霞, 宋倩文 (3562)
密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价	于洋, 高宏超, 马俊花, 李迎霞, 莫雁, 孔彦鸿 (3572)
西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义	许淑婧, 张英, 余晔, 王博, 夏敦胜 (3578)
复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究	王浩, 潘利祥, 张翔宇, 李萌, 宋宝华 (3587)
湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征	何东, 邱波, 彭尽晖, 彭亮, 胡凌雪, 胡瑶 (3595)
安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较	王翔, 李晋川, 岳建英, 周小梅, 郭春燕, 卢宁, 王宇宏, 杨生权 (3601)
三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响	叶锦韶, 田云, 尹华, 彭辉, 黄捷, 麻榆佳 (3607)
二氯甲烷降解菌Methylobacterium rhodesianum H13的分离鉴定及降解特性研究	刘洪霞, 朱润晔, 欧阳杜娟, 庄庆丰, 陈东之, 陈建孟 (3613)
引物选择对污泥微生物多样性分析的影响	徐爱玲, 吴等等, 宋志文, 任杰, 夏岩, 董珊珊, 刘梦 (3620)
钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO ₂ 储存性能研究	曹琳, 王海林, 解强 (3627)
基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究	袁京, 李国学, 张红玉, 罗一鸣 (3633)
重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文	
多证据分析技术在地表重金属污染评价中的应用研究	姜林, 钟茂生, 朱笑盈, 姚珏君, 夏天翔, 刘辉 (3641)
我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源	李晓燕, 刘艳青 (3648)
黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价	张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 胡长慧, 赵亚平 (3654)
青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究	朱磊, 贾永刚, 潘玉英 (3663)
某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险	郑立保, 陈卫平, 焦文涛, 黄锦楼, 魏福祥 (3669)
某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响	周小勇, 雷梅, 杨军, 周广东, 郭广慧, 陈同斌, 万小铭, 梁琪, 乔鹏伟 (3675)
某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究	岳希, 孙体昌, 黄锦楼 (3679)
原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究	张建荣, 李娟, 许伟 (3684)
淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究	朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 张晗芝, 魏荣菲, 王春雨, Marc Peters (3690)
铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析	任贝, 黄锦楼, 苗明升 (3697)
超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究	王鑫杰, 黄锦楼, 刘志强, 岳希 (3704)
摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价	杨雯, 黄锦楼, 彭会清, 李思拓 (3709)
土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究	郭文娟, 梁学峰, 林大松, 徐应明, 王林, 孙约兵, 秦旭 (3716)
无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究	曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 王琳玲, 陈静 (3722)
《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)	

杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究

邵学新, 李文华, 吴明*, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐

(中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 国家林业局杭州湾湿地生态系统定位观测研究站, 富阳 311400)

摘要: 潮滩植物在碳氮磷生物地球化学循环中发挥着重要的作用。为探明杭州湾潮滩湿地植物碳氮磷储量特征, 对植物生物量、碳氮磷含量及储量的季节动态进行了分析。结果表明, 3种优势植物芦苇(*Phragmites australis*)、互花米草(*Spartina alterniflora*)和海三棱藨草(*Scirpus mariqueter*)地上生物量呈典型的单峰值曲线。地上部有机碳含量全年变化幅度相对较小, 氮磷含量随植物生长而明显下降。植物碳氮磷储量与植物生物量显著正相关。海三棱藨草碳氮磷储量显著低于芦苇和互花米草, 芦苇地上部总氮储量显著高于互花米草, 但总磷储量则相反, 有机碳储量两种植物差异不显著。芦苇、互花米草和海三棱藨草年固碳能力分别是中国陆地植被平均固碳能力的380%、376%和55.5%, 以及全球植被平均固碳能力的463%、458%和67.7%。从净化氮磷功能上考虑, 7月可认为是本研究区域3种植物的最佳收割时间, 且以收获互花米草对水体富营养化的限制性因子磷的去处效果最佳。因此, 潮滩植物具有较好的储碳固碳能力和氮磷净化效应。

关键词: 杭州湾; 湿地植物; 生物量; 生源要素; 季节动态

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3451-07

Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland

SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, YANG Wen-ying, JIANG Ke-yi, YE Xiao-qi

(Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Wetland Ecosystem Research Station of Hangzhou Bay, State Forestry Administration, Fuyang 311400, China)

Abstract: Salt marshes perform important ecosystem functions in carbon, nitrogen and phosphorus recycling. The plant biomass, content and pools of C, N and P were measured seasonally in three marsh species *Phragmites australis*, *Spartina alterniflora* and *Scirpus mariqueter* in Hangzhou Bay coastal wetland for the dynamics of C, N and P storage. The results showed that seasonal variation of aboveground biomass displayed a unimodal curve. The seasonal variability of plant OC content in the aboveground part of the plants was not significant, while the TN and TP content decreased significantly from spring to winter. The seasonal variability of plant C, N and P pools was significant. And there was a significant relationship between plant C/N/P pools and biomass. The pools among plant species were significantly different. *S. mariqueter* had the lowest C/N/P pools. TN pool in the aboveground part of *P. australis* was higher than that of *S. alterniflora*, but its TP pool was lower than that of *S. alterniflora*, and there was no significant difference for OC pools between *P. australis* and *S. alterniflora*. C fixation of the three marsh species was 380%, 376% and 55.5% of the average C fixation of terrestrial vegetations in China, and 463%, 458% and 67.7% of the average C fixation of terrestrial vegetations of the world. Considering the purification capacity of N and P, July would be the best harvest time of the study area for three plants. And the harvest of *S. alterniflora* could remove the biggest amount of P, since P was a limiting nutrient for phytoplankton growth. In conclusion, the marsh plants had strong C fixation and N/P purification ability.

Key words: Hangzhou Bay; marsh plants; biomass; biogenic elements; dynamics

温室效应引起的全球性气候变化受到各国的普遍关注, CO₂ 是所有大气温室气体中浓度最大, 气候效应最显著的一种气体。湿地生态系统是全球性碳汇, 湿地面积虽然只占全球陆地总面积 4% ~ 5%, 碳储量却达到 450 Pg (1 Pg = 10¹⁵ g), 超过农业生态系统、温带森林及热带雨林的碳储量, 相当于陆地生态圈总碳储量的 20%^[1]。同时, 湿地具有持续的固碳能力, 研究表明, 全球湿地植物的平均固碳能力为 (0.05 ~ 1.35) kg·(m²·a)⁻¹^[2]。中国三江平原湿地植物的固碳能力为 (0.80 ~ 1.20) kg·(m²·a)⁻¹^[3]。长江口湿地芦苇的固碳能力为

(1.63 ± 0.39) kg·(m²·a)⁻¹^[4]。因此, 湿地生态系统在全球碳循环中占有重要地位, 成为继森林、草原和农业生态系统外, 引起关注的又一重要生态系统。湿地也具有“地球之肾”的美誉, Mitsch 等^[5]指出, 只要建立或恢复占密西西比河流域面积 0.7% ~ 1.8% 的湿地, 就会显著削减进入墨西哥湾的氮负

收稿日期: 2013-01-11; 修订日期: 2013-02-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(31000296); “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAC13B02-2); 中国林业科学院亚热带林业研究所基本科研业务费(RISF61256)

作者简介: 邵学新(1980~), 男, 助理研究员, 主要研究方向为湿地生态学, E-mail: shaouxuexin@126.com

* 通讯联系人, E-mail: hangzhoubay@126.com

荷. 研究表明,盐城黄沙港芦苇湿地对 TN 和 TP 的年净化能力分别为 $0.095 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.026 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[6]; 扎龙河滨湿地对 TP 的净化系数为 $(0.00186 \sim 0.01175) \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{km})^{-1}$, 且表现为季节性规律^[7]. 随着经济的快速发展和人口的不断增加,环境污染加剧,特别是水体富营养化愈来愈严重. 据 2010 年中国近岸海域环境质量公报,我国 9 个重要海湾中辽东湾、渤海湾、胶州湾、长江口、杭州湾和珠江口等水质都为重度污染,主要污染因子是无机氮和活性磷酸盐^[8]. 因而湿地过滤径流中的氮磷和作为氮磷汇的作用成为研究热点^[6, 9~11].

滨海湿地是我国湿地的重要类型之一. 由于受海陆作用的交互影响,滨海湿地各种物理、化学、生物因素变化强烈,是一个典型的环境脆弱带和敏感区^[12],易受各种自然和人为活动的干扰和破坏. 滨海湿地生态服务功能的退化与近岸海域水环境质量恶化密切相关. 当前,滨海湿地碳、氮、磷、硫的生物地球化学循环是全球变化研究焦点之一,也是海岸带陆海相互作用研究 (LOICZ) 项目的核心^[13]. 我国对滨海湿地系统元素分布及其储碳固碳效应开展了相关研究,主要集中在黄河、辽河、长江和闽江等河口湿地^[4, 14~16],但对主要海湾滨海湿地研究较为薄弱. 杭州湾是我国南北滨海湿地的分界线,杭州湾南岸湿地属于淤涨型滩涂,每年新增大量湿地面积,同时由于经济发展需要,又被不断地围垦利用,具有重要的研究意义^[17]. 因此,本实验以杭州湾南岸典型潮滩湿地为研究区,开展了 3 种优势植物碳氮磷储量及季节动态研究,并探讨其储碳固碳和氮磷净化等生态环境效应,以期为滨海湿地的合理开发与保护、退化湿地的恢复与重建提供理论依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地概况

杭州湾位于浙江省东部,西接钱塘江,东至东海,呈喇叭口形状,属河口海湾. 研究区设在杭州湾南岸慈溪三北滩涂湿地国家林业局杭州湾湿地生态系统定位观测研究站北面 (图 1). 项目区属北亚热带海洋性季风气候,四季分明,年平均气温 16°C , 年平均降水量 1273 mm ,日照 2038 h ,无霜期 244 d . 研究区沉积物颗粒主要为粉粒 ($3.9 \sim 62.5 \mu\text{m}$), pH、盐度和有机碳含量分别为 8.42 ± 0.15 、 $(5.17 \pm 1.45)\%$ 和 $(1.07 \pm 0.25)\%$. 沿高程增加和滩涂形成时间的逐渐加长,潮滩湿地伴有典型的自然生

物群落演替序列,依次为光滩、海三棱藨草 (*Scirpus mariqueter*) 和芦苇 (*Phragmites australis*) 生长区. 此外,由于外来种互花米草 (*Spartina alterniflora*) 的入侵,在海三棱藨草和芦苇生长区之间出现了互花米草镶嵌群落^[17].

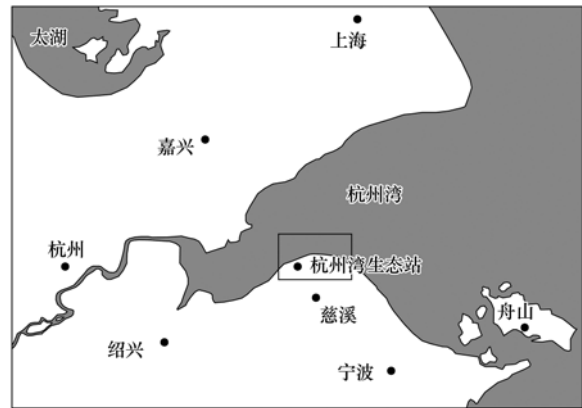


图 1 研究区域地理位置示意

Fig. 1 Location of the research area

1.2 样品采集与分析

根据资料收集及现场勘察,在垂直杭州湾南岸海岸线方向的自然滩涂,由北向南布设 3 处样地,分别代表潮滩湿地海三棱藨草、互花米草和芦苇生长区,每处样地随机设置 3 个 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 样方. 分别于 2009 年的 3、5、7、9 和 11 月,采用收割法获取植物地上部 (茎叶) 样品. 由于该地区滩涂围垦频繁,湿地植物生长年限较短,根系主要分布在 $0 \sim 50 \text{ cm}$ 深度以内,所以直接剖面法主要获取 50 cm 深度以内地下根系. 每种植物类型获取 3 个重复样品.

植物样品经清洗后于烘箱中 105°C 杀青 0.5 h , 然后 60°C 烘干至恒重. 植物干样经磨碎过筛后测定有机碳、总氮和总磷含量. 采用重铬酸钾容量法测定植物组织有机碳含量^[18],植物样品经凯氏法消解后,分别用蒸馏法和钼锑抗比色法测定氮和磷含量^[19].

植物地上/地下部生物量采用单位面积干物质质量表示 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$). 植物养分储量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) 为植物生物量乘以相应元素的含量.

1.3 数据处理

采用 SPSS 16.0 软件进行数据的统计分析. 包括对植物不同部位碳氮磷含量和储量及主要影响因子的 Pearson 相关性分析,采用 *t*-test 比较植物不同部位生物量、碳氮磷含量及储量的差异,应用 Two-way ANOVA 分析 2 个因素 (植物类型和采样时间) 对植物生物量、碳氮磷含量及储量的影响 (LSD 法进行多重比较).

2 结果与分析

2.1 植物生物量及其季节动态

图 2 显示了 3 种植物生长期地上和地下部生物量的时间动态. 对地上部而言, 芦苇和互花米草从 3 月开始迅速生长, 海三棱藨草的生长期相对较晚, 3 月采样时基本无地上活体. 3 种植物地上生物量呈现典型的单峰值曲线, 但最大值出现的时间不一. 芦苇和海三棱藨草在夏季 (7 月) 生物量达到峰值 ($3\,731.7\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $487.4\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$), 互花米草在秋季 (9 月) 达到峰值 ($3\,105.9\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$). 对地下部分而言, 随时间动态, 其变化趋势没有地上部分明显. 在

植物地上部快速生长阶段, 植物地下部生物量有所降低, 而在春季植物生长初期和秋季植物生长末期, 地下部生物量相对较高.

植物不同部位的比较表明, 除 3 月植物生长初期和 11 月植物开始枯萎外, 3 种植物地上部生物量占总生物量的 60% 左右, 显著高于地下部生物量 ($P<0.05$). 对不同植物生物量的方差分析表明, 芦苇和互花米草地上部生物量显著高于海三棱藨草 (图 2, $P<0.05$), 而本地种芦苇和入侵种互花米草间生物量差异不显著. 对于地下部生物量, 则始终表现为互花米草 > 芦苇 > 海三棱藨草 ($P<0.01$). 3 种植物总生物量的变化趋势与地上部分相似.

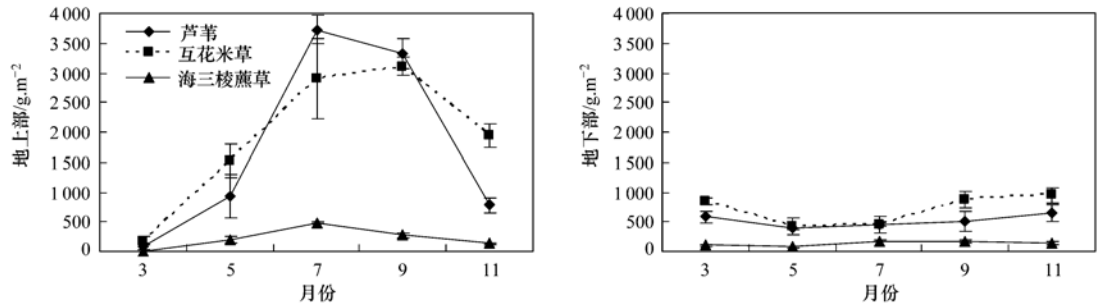


图 2 湿地植物生物量的时间动态
Fig. 2 Dynamics of plant biomass in salt marsh

2.2 植物碳氮磷含量及其相关性

3 种植物地上部碳、氮、磷的变化范围分别为 39.6% ~ 47.4%、0.49% ~ 2.59%、0.04% ~ 0.34%, 地下部分别为 34.9% ~ 43.5%, 0.20% ~ 1.18% 和 0.03% ~ 0.27% (图 3), 年均含量表现为碳 > 氮 > 磷 ($P<0.01$). 植物有机碳的全年变化幅度相对较小, 而氮磷含量受季节变化的影响极大 ($P<0.01$). 从图 3 可以看出, 3 种植物生长初期氮磷养分含量最高, 然后随植物生长而表现为明显的下降趋势. 植物地下根系氮磷含量季节动态不如地上部明显, 总体表现为在植物生长初期 3 月和枯萎期 11 月含量较高, 而植物旺盛生长期期间含量较低 (图 1), 其中芦苇和海三棱藨草在 7 月氮磷含量最低,

互花米草在 9 月含量最低.

植物不同部位 t -test 分析表明, 地上部有机碳和总氮含量显著高于地下部 ($P<0.01$), 不同部位间总磷含量的差异不显著 ($P>0.05$). 但不同植物间碳氮磷含量有显著差异 ($P<0.01$), 有机碳含量芦苇体内最高, 海三棱藨草最低. 总氮和总磷含量海三棱藨草体内最高, 而芦苇和互花米草最低. 双因素方差分析表明, 植物体内碳氮磷含量植物间的差异小于季节间的变化差异.

植物 C、N、P 相关性分析表明 (表 1), 不论地上部或地下部, 植物体内 C 和 N 相关性不明显 ($P>0.05$), 而 C 和 P 显著负相关, N 和 P 显著正相关. 植物地上组织 C、N、P 与地下组织相应元素则显著正相关.

表 1 植物不同部位碳氮磷含量的相关关系¹⁾

Table 1 Relationship among OC, TN and TP in different parts of marsh plants							
部位	项目	地上部			地下部		
		OC	TN	TP	OC	TN	TP
地上部	OC	1					
	TN	-0.261	1				
	TP	-0.382 *	0.908 **	1			
地下部	OC	0.621 **			1		
	TN	-0.058	0.406 **		-0.222	1	
	TP	-0.405 *	0.349 *	0.352 *	-0.526 **	0.724 **	1

1) * 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$

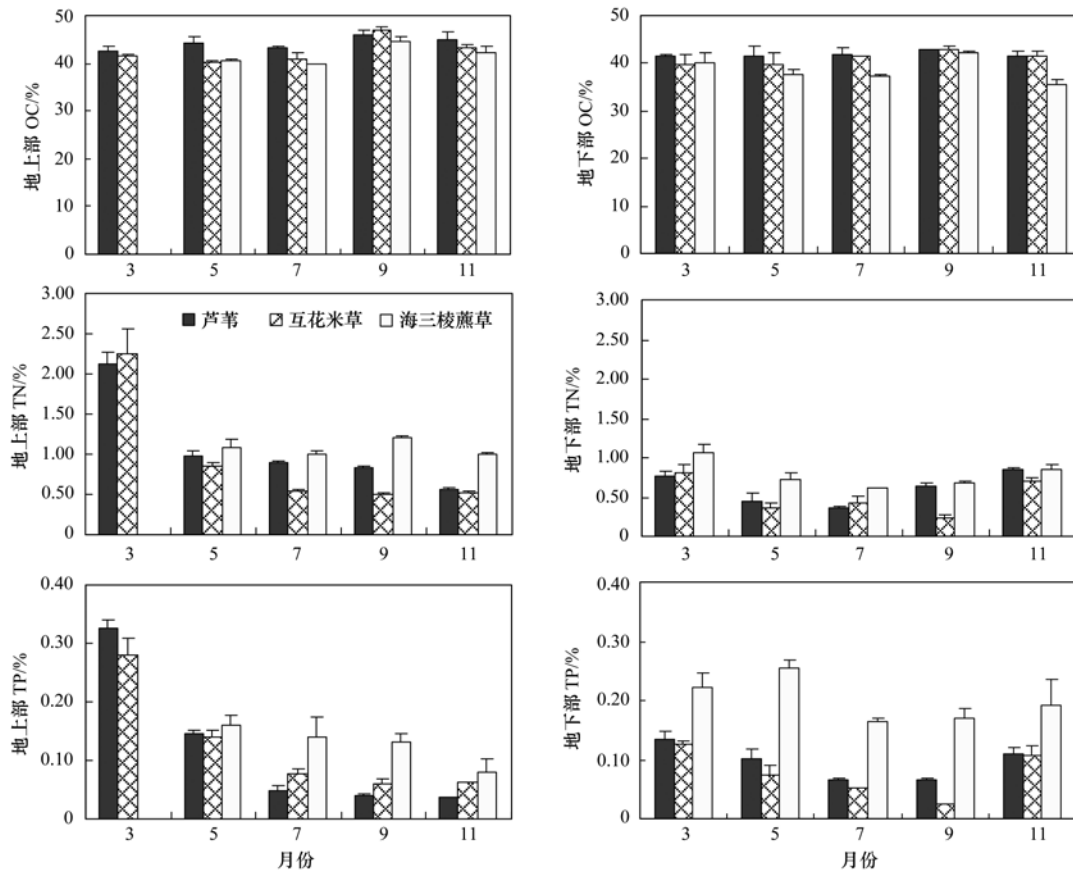


图3 湿地植物碳氮磷含量动态

Fig. 3 Dynamics of plant OC/TN/TP content in marsh plants

2.3 植物碳氮磷储量及其影响因子

芦苇、互花米草和海三棱藨草这3种植物不同部位碳氮磷储量结果见表2。总体来看,植物年均储量表现为碳>氮>磷。方差分析表明,3种植物体内3种元素储量表现明显的季节变化($P<0.01$),地上部储量最小值出现在3月,芦苇、互花米草和海三棱藨草碳储量最小值分别为21.4、61.3和0 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,氮储量分别为1.08、3.24和0 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,磷储量分别为0.17、0.40和0 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。地上部储量最大值出现在7月,芦苇、互花米草和海三棱藨草碳储量最大值分别为1 609、1 462和198 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,氮储量分别为33.7、15.9和4.83 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,磷储量分别为1.83、2.19和0.69 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。3种植物地下部碳氮磷储量则明显不同,最大值通常出现在11月,而最小值主要为5~7月。

植物不同部位 t -test 分析表明,地上部有机碳、总氮和总磷储量显著高于地下部($P<0.01$)。方差分析表明,不同植物间碳氮磷储量也有显著差异($P<0.01$),不论地上部还是地下部,海三棱藨草碳氮磷储量都要显著低于芦苇和互花米草($P<0.01$)。

芦苇地上部总氮储量显著高于互花米草,但总磷储量则低于互花米草,有机碳储量两种植物差异不显著($P>0.05$)。

相关系分析表明(表3),植物碳储量与植物生物量和碳含量显著正相关($P<0.01$),植物氮磷储量与植物生物量显著正相关($P<0.01$),但与相应部位氮磷含量呈负相关关系(地上部)或无显著相关性(地下部)。

3 讨论

3.1 植物生物量在不同地区的差异

植物生物量是研究生态系统物质循环、能量流动的物质基础,也是评价生态系统结构与功能的重要参数。本研究也发现,生物量与植物碳氮磷储量密切相关。与其他地区相比^[9, 14],本研究区芦苇地上部生物量峰值(3 731 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)要显著高于长江口(1 246 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)和闽江口(1 525 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)的相关研究结果,互花米草和海三棱藨草地上生物量(3 105和487 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)与长江口(2 759和548 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)和闽江口(互花米草:3 037 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)相当。此外,对长江口和

闽江口的相关研究表明,入侵植物互花米草地上部生物量显著高于本地种芦苇,而本研究区两者没有明显差别. 因此,不同植物及同一植物在不同地区的生产力有明显的差别,这可能与植物不同的生理学和群落组成及所处的纬度和湿地土壤环境不同有关^[20, 21].

表 2 3 种植物不同部位碳氮磷储量的季节动态¹⁾/g·m⁻²
Table 2 Dynamics of OC/TN/TP pools in different parts of marsh plants/g·m⁻²

项目	植物	部位	3 月	5 月	7 月	9 月	11 月
OC	芦苇	地上部	21.4 (8.65) ¹⁾	331 (67.4)	1 609 (89.3)	1 490 (87.3)	349 (56.6)
		地下部	226 (91.4)	160 (32.6)	192 (10.7)	216 (12.7)	268 (43.4)
	互花米草	地上部	61.3 (15.6)	596 (78.0)	977 (83.7)	1462 (79.4)	839 (68.1)
		地下部	331 (84.4)	168 (22.0)	191 (16.3)	379 (20.6)	393 (31.9)
	海三棱藨草	地上部	0 (0)	79.5 (74.8)	198 (75.3)	127 (62.5)	54.5 (48.1)
		地下部	44.2 (100)	26.8 (25.2)	64.8 (24.7)	76.1 (37.5)	58.7 (51.9)
TN	芦苇	地上部	1.08 (21.5)	7.30 (80.8)	33.7 (95.4)	27.2 (90.2)	4.30 (44.1)
		地下部	3.94 (78.5)	1.74 (19.2)	1.61 (4.6)	2.97 (9.8)	5.47 (56.0)
	互花米草	地上部	3.24 (32.7)	12.9 (89.0)	15.9 (89.6)	15.9 (89.6)	10.3 (60.6)
		地下部	6.65 (67.3)	1.58 (11.0)	1.84 (10.4)	1.87 (10.4)	6.70 (39.4)
	海三棱藨草	地上部	0 (0)	2.05 (80.4)	4.83 (81.9)	3.34 (74.9)	1.29 (50.4)
		地下部	1.17 (100)	0.50 (19.6)	1.07 (18.1)	1.12 (25.1)	1.27 (49.6)
TP	芦苇	地上部	0.17 (18.1)	1.08 (73.3)	1.83 (86.1)	1.26 (80.4)	0.29 (28.7)
		地下部	0.75 (81.9)	0.39 (26.7)	0.30 (13.9)	0.31 (19.6)	0.71 (71.3)
	互花米草	地上部	0.40 (27.5)	2.06 (86.2)	2.19 (91.0)	1.87 (89.9)	1.23 (54.9)
		地下部	1.06 (72.5)	0.33 (13.8)	0.22 (9.0)	0.21 (10.1)	1.01 (45.1)
	海三棱藨草	地上部	0 (0)	0.32 (63.6)	0.69 (70.7)	0.36 (56.6)	0.11 (27.0)
		地下部	0.24 (100)	0.18 (36.4)	0.29 (29.3)	0.28 (43.4)	0.29 (73.0)

1) 括号内数字表示占植物总储量的百分比(%)

表 3 植物不同部位碳氮磷储量与主要影响因子的相关关系¹⁾
Table 3 Relationship among biomass, OC, TN and TP contents and pools in different parts of marsh plants

部位	项目	生物量	OC 含量	TN 含量	TP 含量
地上部	OC	0.998 **	0.439 **		
	TN	0.940 **		-0.406 **	
	TP	0.845 **			-0.422 **
地下部	OC	0.997 **	0.452 **		
	TN	0.810 **		0.270	
	TP	0.722 **			-0.055

1) * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$

湿地植被一般具有较高的地下/地上生物量比率. 如长江口东滩湿地芦苇的地下/地上生物量比率为 2.33 ~ 3.64 (平均 2.96)^[4], 闽江河口湿地芦苇地下/地上生物量比率为 2.02 ~ 5.59, 互花米草为 0.51 ~ 1.69^[14]. 但本研究区芦苇和互花米草地下生物量小于地上生物量. 这可能由两个因素引起, 一是本研究取样时主要收获 50 cm 深度内根系, 地下部调查数据略有偏低; 二是研究区围垦等人为干扰强烈, 植物生长年限较短, 地下根茎生长与其他地区多年生植物相比尚不发达. 张林海等^[14]研究也表明, 互花米草入侵的初级阶段, 有机质分配主要

用于地上部分特别是同化器官的构建, 地下生物量较低. Brix 等^[20]对欧洲 8 处不同地区湿地芦苇生物量的调查也表明, 不同地区芦苇生物量及地下/地上生物量比率变化很大.

3.2 植物储碳固碳功能

碳平衡问题已成为全球环境变化的关键问题. 湿地植物具有很高的净初级生产力和固定大气中 CO₂ 的能力, 成为抑制大气 CO₂ 升高的碳汇^[20], 湿地植被碳储量正是其碳汇功能大小的保障, 在全球碳循环中占有重要地位. 笔者用“最大现存法”来估算群落的年净初级生产力, 乘以相应的有机碳含量, 得到研究区芦苇、互花米草和海三棱藨草 3 种植物年固碳能力分别为 1 877、1 855 和 274.1 g·(m²·a)⁻¹, 分别是中国陆地植被平均固碳能力 [494 g·(m²·a)⁻¹]^[22] 的 380%、376% 和 55.5%, 以及全球植被平均固碳能力 [405 g·(m²·a)⁻¹]^[23] 的 463%、458% 和 67.7%. 研究区芦苇和海三棱藨草与崇明东滩、辽河三角洲等河口湿地相同植被的固碳能力相当^[4, 15]. 与中国其他生态系统固碳能力^[22] 的比较也表明, 研究区芦苇和互花米草固碳能力高于湖泊 [147 g·(m²·a)⁻¹]、河流 [219

$\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]、沼泽 $[606 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$ 等生态系统类型,而与相同植被覆盖度(约 70%)条件下的森林生态系统 $[1\,627 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$ 的固碳能力相当;研究区海三棱藨草固碳能力与湖泊、河流等生态系统类型相当,但要低于森林生态系统的固碳能力。可见,杭州湾滨海湿地生态系统植物具有较高的储碳固碳能力。由于研究区除受潮汐等水动力影响外,围垦养殖等人为干扰强烈,3 种植物生长较稀疏,植被盖度较低,因此现存生物量和碳储量仍有很大的提高潜力。

研究还表明,随着海三棱藨草群落向芦苇群落的演替,其储碳固碳能力也不断增强。这与梅雪英等^[4]对崇明东滩湿地自然植被演替过程中储碳及固碳功能变化的研究结果相似。管东生等^[24]对华南亚热带不同演替阶段植被研究表明,让草地、芒萁、灌木群落演替成为常绿阔叶林,将有利于植物碳储量的提高。赵勇等^[25]对太行山丘陵区群落演替进程中碳储量变化特征研究也表明,从草本群落到灌木群落到栓皮栎群落的演替过程中,植被碳储量逐渐增加。因此,本研究与前人对河口湿地植被演替和陆地植被演替过程的研究结论较为一致。说明作为生态演替过程中的重要生物因子,植被在演替过程中,其储碳固碳能力逐步增强。

3.3 植物氮磷净化功能

在大多数潮滩湿地,盐沼植物由于具有很高的生产力而在整个生态系统生源要素循环和营养物质持留中起着十分重要的作用^[9, 10]。杭州湾潮滩湿地 3 种植物地上部氮磷含量春季最高,随植物生长含量出现“稀释”效应,但植物地上生物量和养分储量则逐渐增加,地下部氮磷储量则略有降低。这与国内外相关研究的结果较为一致^[26~28]。说明在生长期,氮磷养分由地下根系转移到了植物地上部,从而维持植物地上部的快速生长需要,使得地上部分快速生长时其地下部分根系生长特别慢或略有降低。而进入秋季植物开始逐渐枯萎,部分养分又从地上部转移到地下部^[9],使得地下生物量逐渐增加,以备来年植物的生长。因此,植物体内有随季节而向上输送蓄积或向下进行“营养汇流”的特点^[28]。由于植物枯萎后经分解大部分养分释放进入水体,只有小部分以有机质的形式储存在沉积物中。因而,植物地下部在湿地系统养分循环和能量转化方面起着重要的作用。尤其是潮滩植物芦苇和互花米草,拥有发达的地下根系和生物量,在氮磷持留方面具有很大潜力。

氮磷营养物质在植物体内的吸收转化规律,对湿地植物的管理具有重要的指导意义。在植物枯萎期到来之前,合理选择收割时间能更好地发挥湿地植物对湿地水体的净化功能。通常,最佳收割时间根据湿地植物生物量、养分含量及储量特征来确定^[26]。在本研究区域,3 种植物地上部氮磷储量最大时植物地上部养分含量却最低,而地上部氮磷储量的季节动态与其对应生物量变化规律较为一致,但 3 种植物地上部氮磷储量达到峰值的时间与生物量的峰值略有不同。因此,通过地上部养分储量确定最佳的收获季节则较为科学,7 月可认为是本研究区域 3 种植物的最佳收割时间。本研究还表明,植物通过吸收持留氮磷的能力取决于植物类型和生长特性。尽管海三棱藨草体内 TN、TP 含量显著高于芦苇和互花米草,但由于其生物量小,氮磷储量要显著低于后两者。此外,互花米草地上部总氮储量低于芦苇,但地上部总磷储量显著大于芦苇,表明其对水环境中磷的吸收和滞留效率更高。由于磷是水体浮游植物的限制性因子,过量的磷是水体富营养化的重要诱因,因而从净化功能上考虑,收获互花米草对营养盐的去处效果最佳。对于入侵种互花米草,收割也是抑制其在潮滩湿地进一步扩张的物理控制措施之一^[29]。需要指出的是,本研究只从营养元素去除的最大化角度考虑收割时间,如果考虑将芦苇和互花米草等植物用作造纸等资源化原料,则尚需综合考虑植株纤维品质的优良和环境净化功能的最大化。

4 结论

(1) 杭州湾潮滩湿地 3 种优势植物地上部碳氮磷储量与植物生物量显著正相关。芦苇和互花米草储碳固碳能力显著高于海三棱藨草,也要高于中国和全球植被的平均固碳能力。

(2) 芦苇和海三棱藨草在 7 月生物量达到峰值,互花米草在 9 月达到峰值,植物氮磷储量最大值则都出现在 7 月。从净化功能考虑,可认为是本研究区域 3 种植物的最佳收割时间。

(3) 由于杭州湾南岸围垦剧烈,自然植被生长年限较短,随着植物生长年限的增加,其生物量和碳氮磷储量将得到进一步提升。因此,控制围垦规模,将有助于杭州湾潮滩湿地植被演替,从而更好地发挥滨海湿地储碳固碳和氮磷净化等生态环境功能。

参考文献:

- [1] Maltby E, Immirzi P. Carbon dynamics in peatlands and other

- wetland soils: regional and global perspectives [J]. *Chemosphere*, 1993, **27**(6): 999-1023.
- [2] Aselmann I, Crutzen P J. Global distribution of natural freshwater wetlands and rice paddies, their net primary productivity, seasonality and possible methane emissions [J]. *Journal of Atmosphere Chemistry*, 1989, **8**(4): 307-358.
- [3] 马学慧, 吕宪国, 杨青, 等. 三江平原沼泽地碳循环初探 [J]. *地理科学*, 1996, **16**(4): 323-330.
- [4] 梅雪英, 张修峰. 崇明东滩湿地自然植被演替过程中储碳及固碳功能变化 [J]. *应用生态学报*, 2007, **18**(4): 933-936.
- [5] Mitsch W J, Day J W, Gilliam J W, *et al.* Reducing nitrogen loading to the Gulf of Mexico from the Mississippi River basin: Strategies to counter a persistent ecological problem [J]. *BioScience*, 2001, **51**(5): 373-388.
- [6] 欧维新, 杨桂山, 高建华. 盐城潮滩湿地对 N、P 营养物质的截留效应研究 [J]. *湿地科学*, 2006, **4**(3): 179-186.
- [7] 郭跃东, 何岩, 邓伟, 等. 扎龙河滨湿地对地表径流氮磷污染物的净化作用 [J]. *环境科学*, 2005, **26**(3): 49-55.
- [8] 中华人民共和国环境保护部. 2010 年中国近岸海域环境质量公报 [EB/OL]. <http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/jagb/2010jagb/201206/P020120613554548391256.pdf>, 2011-08-23.
- [9] Quan W M, Han J D, Shen A L, *et al.* Uptake and distribution of N, P and heavy metals in three dominant salt marsh macrophytes from Yangtze River estuary, China [J]. *Marine Environmental Research*, 2007, **64**(1): 21-37.
- [10] Sousa A I, Lillebø A I, Caçador I, *et al.* Contribution of *Spartina maritima* to the reduction of eutrophication in estuarine systems [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **156**(3): 628-635.
- [11] González-Alcaraz M N, Egea C, Jiménez-Cárceles F J, *et al.* Storage of organic carbon, nitrogen and phosphorus in the soil-plant system of *Phragmites australis* stands from a eutrophicated Mediterranean salt marsh [J]. *Geoderma*, 2012, **185-186**: 61-72.
- [12] 余小青, 杨军, 刘乐冕, 等. 九龙江口滨海湿地生源要素空间分布特征 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(11): 3739-3747.
- [13] Smith S V. Carbon-nitrogen-phosphorus fluxes in the coastal zone: the global approach [J]. *LOICZ Newsletter*, 2002, **49**: 7-11.
- [14] 张林海, 曾从盛, 全川, 等. 闽江河口湿地芦苇和互花米草生物量季节动态研究 [J]. *亚热带资源与环境学报*, 2008, **3**(2): 25-33.
- [15] 索安宁, 赵冬至, 张丰收. 我国北方河口湿地植被储碳、固碳功能研究: 以辽河三角洲盘锦地区为例 [J]. *海洋学研究*, 2010, **28**(3): 67-71.
- [16] 董洪芳, 于君宝, 孙志高, 等. 黄河口滨岸潮滩湿地植物-土壤系统有机碳空间分布特征 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(6): 1594-1598.
- [17] 邵学新, 杨文英, 吴明, 等. 杭州湾滨海湿地土壤有机碳含量及其分布格局 [J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(3): 658-664.
- [18] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [20] Brix H, Sorrell B K, Lorenzen B. Are *Phragmites*-dominated wetlands a net source or net sink of greenhouse gases? [J]. *Aquatic Botany*, 2001, **69**(2): 313-324.
- [21] Kirwan M, Guntenspergen G R, Morris J T. Latitudinal trends in *Spartina alterniflora* productivity and the response of coastal marshes to global change [J]. *Global Change Biology*, 2009, **15**(8): 1982-1989.
- [22] 何浩, 潘耀忠, 朱文泉, 等. 中国陆地生态系统服务价值测量 [J]. *应用生态学报*, 2005, **16**(6): 1122-1127.
- [23] 李银鹏, 季劲钧. 全球陆地生态系统与大气之间碳交换的模拟研究 [J]. *地理学报*, 2001, **56**(4): 379-389.
- [24] 管东生, Peart M R. 华南亚热带不同演替阶段植被的环境效应 [J]. *环境科学*, 2000, **21**(5): 1-5.
- [25] 赵勇, 吴明作, 樊巍, 等. 太行山丘陵区群落演替进程中碳贮量变化特征 [J]. *水土保持学报*, 2009, **23**(4): 208-212.
- [26] 吴淑杭, 徐亚同, 姜震方, 等. 梦清园人工湿地芦苇的氮磷和生物量动态及其适宜收割期的研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(6): 1594-1597.
- [27] Neves J P, Ferreira L F, Simões M P, *et al.* Primary production and nutrient content in two salt marsh species, *Atriplex portulacoides* L. and *Limoniastrum monopetalum* L., in Southern Portugal [J]. *Estuaries and Coasts*, 2007, **30**(3): 459-468.
- [28] 郭长城, 胡洪营, 李锋民, 等. 湿地植物香蒲体内氮、磷含量的季节变化及适宜收割期 [J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(3): 1020-1025.
- [29] 李贺鹏, 张利权. 外来植物互花米草的物理控制实验研究 [J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2007, (6): 44-55.

CONTENTS

PUF Passive Air Sampling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere of the Yangtze River Delta, China: Spatio-Temporal Distribution and Potential Sources	ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, <i>et al.</i> (3339)
Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM _{2.5} with Fourier Transform Infrared Spectroscopy	LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, <i>et al.</i> (3347)
Study on Contribution Factor to Atmospheric ·OH by O ₃ , HONO, HCHO and H ₂ O ₂ in Spring at Mangdang Mountain, Fujian Province	LIU Hao, WANG Hui-xiang (3352)
A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System	DU Shao-ting, JIN Chong-wei, LIU Yue (3358)
A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaxing	LÜ Xing, YU Wei-juan, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3368)
Contamination Characteristics of Short-Chain Chlorinated Paraffins in Edible Fish of Shanghai	JIANG Guo, CHEN Lai-guo, HE Qiu-sheng, <i>et al.</i> (3374)
Detection of Endotoxin Activity in Water Environment and Analysis of Influence Factors for TAL Assay	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (3381)
Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei (3386)
Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, DING Yan-yan, <i>et al.</i> (3391)
Compare the Growth of <i>Enteromorpha prolifera</i> Under Different Nutrient Conditions	PANG Qiu-ting, LI Feng, LIU Xiang-qing, <i>et al.</i> (3398)
Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	LAI Jun-xiang, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, <i>et al.</i> (3405)
Genetic Diversity of Picoeukaryotic Phytoplankton in the Lakes Along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River	LI Sheng-nan, SHI Xiao-li, XIE Wei-wei, <i>et al.</i> (3416)
Studies on Seasonal Variation and Sources of Nitrogen and Phosphorus in a Canyon Reservoir Used as Water Source	HUANG Ting-lin, QIN Chang-hai, LI Xuan (3423)
Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance	LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, <i>et al.</i> (3430)
Variation of Nitrogen During the High Suspended Sediments Concentration Water Supply in an Artificial Shallow Lake	CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying (3437)
Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water	ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, <i>et al.</i> (3445)
Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, <i>et al.</i> (3451)
Dissolved Organic Matter Release of <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> from Lake Dianchi	XIE Li, YANG Hao, QU Xiao-xia, <i>et al.</i> (3458)
Influence of Tap Water Treatment on Perfluorinated Compounds Residue in the Dissolved Phase	ZHANG Hong, CHEN Qing-wu, WANG Xin-xuan, <i>et al.</i> (3467)
Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City	LI Xiao-ling, LIU Rui, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3474)
Effect of the Change in Sulphate and Dissolved Oxygen Mass Concentration on Metal Release in Old Cast Iron Distribution Pipes	WU Yong-li, SHI Bao-you, SUN Hui-fang, <i>et al.</i> (3480)
Research on Low-level Hg(II) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent	HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, <i>et al.</i> (3486)
Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epichlorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment	LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, <i>et al.</i> (3493)
Microstructure Morphology and Flocculation Mechanism of the Decolorizing Flocculant Poly-aluminum(III)-magnesium(II)-sulfate	SANG Yi-min, CHANG Xue-hong, CHE Yue, <i>et al.</i> (3502)
Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO ₃	OUYANG Lei, DING Yao-bin, ZHU Li-hua, <i>et al.</i> (3507)
Preparation Bimetallic Heterogeneous Fenton-Like Catalyst as Sepiolite Supported and Its Surface Chemical Characterization	SU Cheng-yuan, LI Wei-guang, LIU Xing-zhe, <i>et al.</i> (3513)
Nitrite Denitrification Characteristics with Redox Mediator	ZHAO Li-jun, MA Zhi-yuan, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (3520)
Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material	TANG Lei, LI Peng, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (3526)
N ₂ O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge	CHEN Li-li, GAO Da-wen (3532)
Sludge Dewaterability with Combined Conditioning Using Fenton's Reagent and CPAM	MA Jun-wei, LIU Jie-wei, CAO Rui, <i>et al.</i> (3538)
Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules	TANG Chong-jian, XIONG Lei, WANG Yun-yan, <i>et al.</i> (3544)
Monitoring Nitrogen Deposition on Temperate Grassland in Inner Mongolia	ZHANG Ju, KANG Rong-hua, HUANG Bin, <i>et al.</i> (3552)
Non-Point Loads of Soluble Cadmium by <i>in situ</i> Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3557)
Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake	WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3562)
Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County	YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, <i>et al.</i> (3572)
Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance	XU Shu-jing, ZHANG Ying, YU Ye, <i>et al.</i> (3578)
Study on Composite Stabilization of Arsenic (As) Contaminated Soil	WANG Hao, PAN Li-xiang, ZHANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (3587)
Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province	HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, <i>et al.</i> (3595)
Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types	WANG Xiang, LI Jin-chuan, YUE Xiang-yi, <i>et al.</i> (3601)
Biodegradation of Triphenyltin and Its Effect on <i>Klebsiella pneumoniae</i>	YE Jin-shao, TIAN Yun, YIN Hua, <i>et al.</i> (3607)
Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13	LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3613)
Effect of Different Primers on Microbial Community of Activated Sludge	XU Ai-ling, WU Deng-deng, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3620)
Reaction of SO ₂ over CaAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites Samples	CAO Lin, WANG Hai-lin, XIE Qiang (3627)
Optimization for MSW Logistics of New Xicheng and New Dongcheng Districts in Beijing Based on the Maximum Capacity of Transfer Stations	YUAN Jing, Li Guo-xue, ZHANG Hong-yu, LUO Yi-ming, <i>et al.</i> (3633)
Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, ZHU Xiao-ying, <i>et al.</i> (3641)
Heavy Metals and Their Sources in Outdoor Settled Dusts in Different Function Areas of Cities	LI Xiao-yan, LIU Yan-qing (3648)
Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City	ZHANG Peng-yang, QIN Ming-zhou, YAN Jiang-hong, <i>et al.</i> (3654)
Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station	ZHU Lei, JIA Yong-gang, PAN Yu-ying (3663)
Distribution Characteristics and Ecological Risk of Pb in Soils at a Lead Battery Plant	ZHENG Li-bao, CHEN Wei-ping, JIAO Wei-tao, <i>et al.</i> (3669)
Effect of Lead on Soil Quality and Human Health Around a Lead Smeltery	ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, <i>et al.</i> (3675)
Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site	YUE Xi, SUN Ti-chang, HUANG Jin-lou (3679)
Research on the Application of <i>In-situ</i> Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management	ZHANG Jian-rong, LI Juan, XU Wei (3684)
Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils	ZHU Guang-xu, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (3690)
Analysis of Washing Efficiency and Change in Lead Speciation in Lead-contaminated Soil of a Battery Factory	REN Bei, HUANG Jin-lou, MIAO Ming-sheng (3697)
Remediation Efficiency of Lead-Contaminated Soil at an Industrial Site by Ultrasonic-assisted Chemical Extraction	WANG Xin-jie, HUANG Jin-lou, LIU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3704)
Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil	YANG Wen, HUANG Jin-lou, PENG Hui-qing, <i>et al.</i> (3709)
Adsorption of Cd ²⁺ on Biochar from Aqueous Solution	GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils	CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, <i>et al.</i> (3722)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2013年9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 15, 2013

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. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. 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
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人