

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析	刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝 (3239)
1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析	刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕 (3247)
瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征	刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章 (3256)
上海城区PM _{2.5} 中有机碳和元素碳变化特征及来源分析	张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳 (3263)
亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布	王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟 (3271)
无锡市冬季典型天气PM _{2.5} 中碳组分的污染特征	云龙龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国 (3280)
高炉炼铁工艺细颗粒物PM _{2.5} 排放特性分析	范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军 (3287)
重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究	祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜 (3293)
双组分VOCs的催化氧化及动力学分析	卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙 (3302)
汽车排放超细微粒子浓度及粒径谱特征的实验研究	陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊 (3309)
疏勒河上游地表水化学离子特征及其控制因素	周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲 (3315)
河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量	陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴 (3325)
大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价	张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶 (3336)
雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价	柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力 (3346)
北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析	李海燕,石安邦,瞿杨晨,岳靖冰 (3352)
黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布	李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园 (3358)
合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征	李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤 (3365)
基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究	刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥 (3373)
杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态	邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅 (3381)
基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演	李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅 (3389)
天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例	高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐 (3397)
利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度	李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮 (3408)
Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究	王冉,周雪峰,胡学香,胡春 (3417)
不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究	李欢旋,万金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅 (3422)
还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸	周红艺,曾思思,梁思,韩鉴 (3430)
多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较	宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程 (3436)
不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究	金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌 (3443)
气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响	李祥,张大林,黄勇,陈宗烜,袁怡 (3449)
微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究	刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚伟 (3455)
“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究	吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶 (3461)
温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析	吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (3466)
污水处理厂尾水细菌群落结构分析	徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩 (3473)
沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究	国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑 (3480)
内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析	李志华,张芹,白旭丽,刘毅 (3487)
基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析	李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博 (3492)
S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响	陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君 (3498)
影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析	李艳利,李艳粉,徐宗学 (3504)
河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系	马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿 (3513)
Fontibacter sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究	马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂 (3522)
基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析	艾建超,王宁,杨净 (3530)
石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究	杨涵,熊黑钢,陈学刚 (3537)
不同施磷量(KH ₂ PO ₄)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化	郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳 (3546)
硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中形态影响	杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集 (3553)
硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响	刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青 (3564)
再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响	龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈 (3572)
西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征	秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平 (3580)
黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ ¹³ C值的影响	杜雪莲,王世杰,罗绪强 (3587)
碳底物含量对厌氧条件下水稻土N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和CH ₄ 排放的影响	陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂,Klaus Butterbach-Bahl (3595)
北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM _{2.5} 能力研究	梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂 (3605)
污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响	刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹 (3612)
京津冀区域生产和消费CO ₂ 排放的时空特点分析	汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉 (3619)
水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究	任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁 (3632)
《环境科学》征稿简则 (3279) 《环境科学》征订启事 (3545) 信息 (3364,3486,3552,3563)	

杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态

邵学新^{1,2}, 梁新强¹, 吴明^{2*}, 叶小齐², 蒋科毅²

(1. 浙江大学环境保护研究所, 杭州 310058; 2. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 富阳 311400)

摘要: 湿地植物枯死物分解影响湿地营养物质循环。为分析杭州湾潮滩植物枯死物分解过程和磷素动态, 开展了3种优势植物芦苇(*Phragmites australis*)、互花米草(*Spartina alterniflora*)和海三棱藨草(*Scirpus mariqueter*)立枯阶段的观测和分解袋法模拟实验。结果表明, 观测期间立枯干物质量逐渐降低, 180 d后逐步凋落至地面; 立枯磷含量则波动下降。植物分解具有明显的阶段性, 初期(0~15 d)损失最快, 然后降低。地下根系分解速率表现为: 海三棱藨草 > 芦苇 > 互花米草, 地上部分则相反。分解95%所需时间在1.2~8.3 a之间。植物磷含量先下降后上升, 绝对含量则表现为净释放。分析表明, 植物分解速率与C/N比没有显著的相关关系, 而受C/P比的影响较大。环境因子中的大气温度对分解也有影响。立枯阶段和分解袋法模拟下植物所处的环境不同是影响两者分解过程差异的主要原因。

关键词: 杭州湾; 枯死物; 分解; 磷; 影响因素

中图分类号: X173; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3381-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.09.019

Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland

SHAO Xue-xin^{1,2}, LIANG Xin-qiang¹, WU Ming², YE Xiao-qi², JIANG Ke-yi²

(1. Institute of Environmental Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, China)

Abstract: Wetlands litter decomposition affects wetlands nutrient cycling. The decomposition progress of standing litter was monitored and the litterbag simulation experiment was carried out in order to analyze dynamics of litter decomposition and phosphorus release in *Phragmites australis* (PA), *Spartina alterniflora* (SA) and *Scirpus mariqueter* (SM) marshes of Hangzhou Bay coastal wetland. Results show that the dry mass of standing litter and P concentration decrease gradually and the litter drops to the sediment surface after 180 d. There are distinctive stages of the plant litter decomposition in litterbag simulation experiments. The loss rate is faster during 0-15 d than that of later days. The loss rate in root decomposition of three plants are SM > PA > SA, while the trend is opposite for that of aboveground tissues. The time needed for 95% of dry mass decomposition in the plant tissues is between 1.2-8.3 a. The P concentration in litters decreases rapidly in the initial stage and then increases slowly while the net P pools decreases all the time. Pearson's correlation coefficient shows that there is no significant correlation between the litter decomposition rate and C/N ratio. However, the litter C/P ratio affects greatly on plant decomposition rate. Environmental factors in the atmospheric temperature also have an impact on the decomposition rate of leaves. The different decomposition progresses between standing litter and litterbag are caused by environmental factors.

Key words: Hangzhou Bay; litter; decomposition; phosphorus; influencing factors

磷(P)是水体浮游植物生长的限制性因子,P的过量输入是导致水体富营养化的主要因素之一^[1,2]。滨海湿地生态系统具有较强的过滤和沉降外来污染物的能力,尤其是植物由于具有很高的生产力而在整个生态系统生源物质循环和对营养物质的截留功能中起着十分重要的作用^[3,4]。但植物吸收的P随着植物枯死物(包括立枯体和凋落物^[5])分解大部分又重新归还至环境。因此,湿地枯死物分解速率的高低在很大程度上影响着枯死物的地表积累速度以及氮(N)、P等营养元素和其它物质向土壤库的归还,是湿地营养物质循环和能量流动的关键环节^[6,7]。湿地枯死物分解受物理、化学和生物过程等多因素制约。不同区域的植物由于种类、

枯死物C、N、P等初始化学组成、气候条件、湿地沉积物理化性质等外部环境差异^[6,7],导致枯死物的分解特性也有较大区别。

湿地植物枯萎和死亡后,并不是立刻倒伏进入湿地水中或湿地沉积物表面,而是处于站立状态,这一阶段也是湿地植物养分迁移转化的重要组成部分,即分解过程并不是完全始于枯死物到达地面^[8]。立枯体的分解是植物枯死物分解的一个阶

收稿日期: 2014-01-13; 修订日期: 2014-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(31000296, 41271314); 林业公益性行业科研专项(201404210)

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

* 通讯联系人, E-mail: hangzhoubay@126.com

段,对其开展研究有助于了解分解的全过程^[9]. 而目前采用分解袋法模拟枯死物倒伏后(即凋落物)的分解研究较多^[10~13],这并不能完全反映枯死物自然的分解状况^[14]. 此外,现有研究也更多地关注植物地上部分的分解动态,对于植物地下部分研究较薄弱^[15]. 而潮滩植物拥有发达的地下根系和生物量,地下部分残体分解后大部分归还至沉积物中^[16],对养分循环具有很大影响. 因此,植物不同阶段及不同部位分解过程及养分的释放值得人们深入的研究.

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,是我国南北滨海湿地的分界线. 目前,有关杭州湾湿地典型植物枯死物分解特性的研究鲜见报道. 本文以杭州湾南岸典型潮滩湿地为研究区,开展了3种优势植物立枯阶段地上和地下部干物质和P含量动态监测,同时对植物立枯体采用分解袋法进行原位分解模拟,从而对比枯死物不同分解过程差异及其影响因子,以期为进一步了解滨海湿地生态系统生物地球化学循环的过程与机制提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区设在杭州湾南岸慈溪庵东沼泽湿地北面的潮滩湿地,处于杭州湾跨海大桥西侧(图1). 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]. 项目区处北亚热带南缘,属季风型气候,四季分明,年平均气温16℃,年平均降水量1273 mm. 研究区沉积物颗粒组成主要为粉沙,粒径在(3.9~62.5) μm,有机碳、全氮和全磷含量分别为(1.07~0.25)%、(0.51~0.13) g·kg⁻¹和(0.60~0.03) g·kg⁻¹.

1.2 实验方法

在垂直杭州湾南岸海岸线方向的自然滩涂,由北向南选取植被面积较大、植物长势较为一致的区域布设样地,分别代表潮滩湿地海三棱藨草、互花米草和芦苇生长区. 3种植物群落的平均盖度分别为55%、75%和80%,平均高度分别为0.3、2.2和2.0 m,夏季地上生物量分别为487、3731和2903 g·m⁻². 本研究对植物枯死物进行2个分解过程的

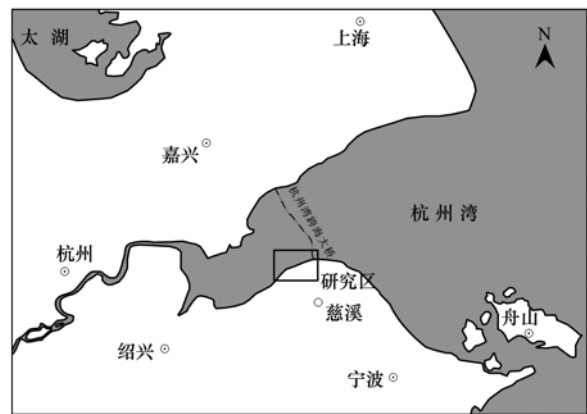


图1 研究区域地理位置示意

Fig. 1 Location of the research area

实验,一是野外调查植物枯死物在立枯阶段的干物质质量及P含量动态,二是收获枯死物进行分解袋法原位模拟分解过程及P含量动态.

研究区湿地植物一般在9月开始形成立枯,至11月底和12月初基本全部枯死. 因此,植物立枯调查的起点时间(第0 d)为2008年11月底,随后在第60、120和180 d分别开展监测,至180 d(来年5月)之后由于大部分植物立枯都倒伏至地面而结束调查. 调查时在每处样地设置3~5个0.5 m×0.5 m样方. 采用收割法获取样方内植物地上部样品,采用挖掘法挖出样方内的沉积物,然后用网筛筛洗后获取地下根系(根状茎和细根)样品. 根据根的颜色和结构,通过肉眼判断尽可能地检出活根^[3, 18],剩余的则为死根. 每种植物类型获取至少3个重复样品.

同期对枯死物开展分解袋法模拟实验. 将相同方法在同一样地获取的植物枯死物分成叶、茎和根3部分. 样品洗净烘干后,剪成约5 cm长片段,并充分混匀. 称取约10 g放入15 cm×15 cm的0.45 mm孔径尼龙网袋. 将叶片和茎放回原地表面,根系样品则埋入原地约10 cm深处. 放置后,分别于第15、60、120、160和210 d回收样品. 每种植物每个部位取回3个重复. 回收当天同时采集土壤样品分析pH、电导率(EC)和含水量(WC)等指标. 研究区域大气温度(T)、相对空气湿度(RH)和降雨(Rain)等实时数据来自于国家林业局杭州湾湿地生态系统定位观测站的自动气象观测站(表1),该站距研究区约1.5 km.

1.3 样品分析和数据处理

植物样品经清洗后于烘箱中60℃烘干至恒重. 植物干样经磨碎过筛后测定有机碳(C)、全氮(N)

表 1 分解袋法实验区环境因子时间动态¹⁾

Table 1 Seasonal variation of environmental factors in study area of litterbag field experiment						
阶段/d	T/℃	RH/%	Rain/mm	pH	EC/mS·cm ⁻¹	WC/%
0~15	3.85	65.00	0.28	8.61	1.29	36.76
15~60	4.50	76.60	1.60	8.83	1.28	36.58
60~120	13.22	64.83	1.26	8.74	1.28	34.56
120~160	22.00	66.67	1.43	8.71	1.12	31.21
160~210	27.92	74.33	9.37	8.64	1.26	41.31

1) T、RH 和 Rain 为阶段均值; pH、EC 和 WC 为 3 种植物类型下土壤平均值

和全磷(P)含量. 采用重铬酸钾容量法测定植物组织有机碳含量,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 N 和 P 含量^[19]. 土壤含水量采用烘干法测定, pH 采用 PHS-3C 型 pH 计测定(土水比为 1:2.5),电导率采用 DDSJ-308A 电导仪测定(土水比为 1:5)^[19].

植物地上和地下部立枯量采用单位面积干物质重量表示($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$). 植物 P 储量(P_i)为植物立枯量乘以 P 的含量($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$). 立枯中 P 储量的累积指数 (NAI)用现存储量(P_i)与初始储量(P_0)的百分率表示($\text{NAI} = P_i/P_0$),百分率大于 100%,说明立枯中的元素发生了净积累,百分率小于 100%,说明立枯中的元素发生了净释放.

根据 Olson 指数衰减模型 $W_t = W_0 e^{-kt}$ 拟合分解模型,得到分解速率常数 $k(\text{d}^{-1})$,并由此计算立枯物分解 95% 的时间. 式中, W_0 为立枯物的初始质量; W_t 为经分解时间 $t(\text{d})$ 后立枯物的分解残留量^[12].

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分解速率与植物性质、土壤和气

象因子的 Pearson 相关性分析,用重复测量的方差分析方法 (Repeated Measures ANOVA) 分析不同植物间立枯物 P 含量差异是否显著 (LSD 法进行多重比较).

2 结果与分析

2.1 植物立枯和分解袋法干物质残留动态

3 种植物立枯阶段,地上茎叶干物质质量随时间增加而降低. 地下根系干物质质量初期略有增加,而后降低. 这主要由于地下根系不易分解,且初期(早春)由于植物生长,从地下转移大量营养物质至地上,加速部分根系的枯萎^[20],故初期表现为死根残留率有所增加(图 2). 至 180 d 时,3 种植物地上茎叶和地下根系干物质质量残留率分别为,海三棱藨草: 0% 和 55.4%, 芦苇: 31.6% 和 65.6%, 互花米草: 18.7% 和 63.7%. 3 种植物立枯阶段损失率都表现为:地上茎叶 > 地下根系 ($P < 0.05$). 不同植物间地上茎叶损失率表现为:海三棱藨草 > 互花米草 > 芦苇 ($P < 0.05$),地下根系损失率则为:海三棱藨草 > 芦苇 > 互花米草,但差异不显著.

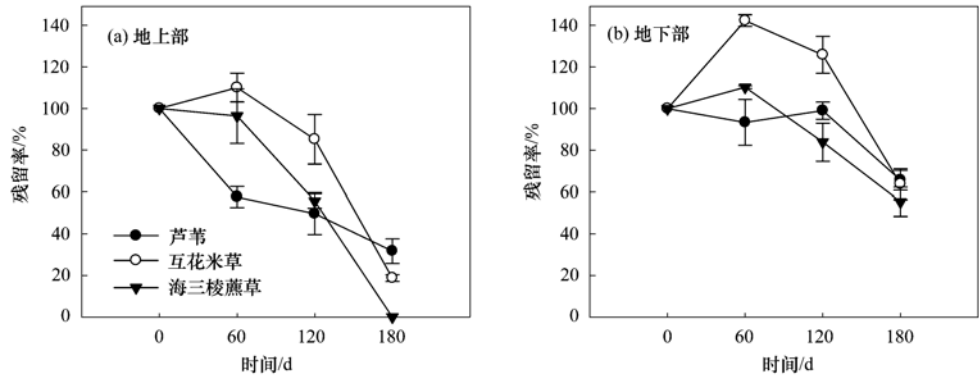


图 2 植物立枯分解过程中干物质残留率

Fig. 2 Dry mass remaining of standing litter during decomposition

分解袋法模拟实验表明,3 种植物干物质残留量随时间增加而持续降低(图 3),尤以分解初期 0~15 d 降低最快. 至 210 d 时,海三棱藨草叶和根的干物质残留率分别为:35.6% 和 30.9%, 芦苇叶、茎和根的干物质残留率分别为 30.2%、84.8% 和

35.1%, 互花米草叶、茎和根的干物质残留率分别为 19.7%、43.7% 和 45.8%. 为更好地描述枯死物分解动态,根据 Olson 指数衰减模型,对分解袋法枯死物干物质残留率(W_t/W_0)和分解时间(t)进行分析. 结果表明,模型可以较好地描述 3 种植物不同

部位的枯死物分解残留率, P 值都小于 0.01, 达极显著水平(表 2). 分析表明, 芦苇和互花米草不同构件的分解速率都表现为叶 > 根 > 茎, 海三棱藨草不同构件的分解速率表现为根 > 叶. 不同植物叶片分解速率则表现为互花米草 > 芦苇 > 海三棱藨草; 茎部表现互花米草 > 芦苇; 根部表现为, 海三棱藨草 > 芦苇 > 互花米草. 植物不同部位分解 95% 所需时间在 1.2 ~ 8.3 a 之间.

2.2 植物立枯和分解袋法磷的变化动态

植物立枯阶段分解过程中(图 4), 地上部 P 含量始终表现为海三棱藨草 > 互花米草 > 芦苇($P < 0.05$), 地下部 P 含量则表现为海三棱藨草 > 芦苇 > 互花米草($P < 0.05$). 从植物不同部位来看, 地下根系 P 含量都显著高于地上部分. 芦苇和互花米草地上部分总体表现下降趋势, 至 180 d 时含量分别为初始的 68.6% 和 79.5%. 而地下根系则表现为先升高后降低, 至 180 d 时芦苇和互花米草根系 P 含量分别为初始的 82.5% 和 108%. 海三棱藨草不同部位 P 含量表现为先降低后升高的趋势, 至分解末期, 地上部分和地下根系 P 含量分别为初始的 98.9% 和 145.0%.

分解袋法模拟实验表明(图 5), 植物叶片 P 含量在分解的前 60 d 内迅速下降, 至 60 d 时芦苇、互花米草和海三棱藨草 P 含量分别为初始量的 41.7%、47.7% 和 70.4%. 植物茎在前 15 d 降低最快, 芦苇和互花米草分别为初始量的 39.9% 和 49.8%. 植物根部 P 含量变化趋势有所不同, 芦苇和互花米草在前 15 d 降低最快, 而海三棱藨草初始降低较慢, 在第 60 ~ 120 d 阶段降低最快. 随后, 3 种植物不同部位 P 含量波动变化, 总体浓度表现缓慢上升趋势. 至 210 d 时, 芦苇、互花米草和海三棱藨草叶片 P 含量分别为初始量的 81.3%、83.1% 和 99.7%, 芦苇和互花米草茎的 P 含量分别为初始量

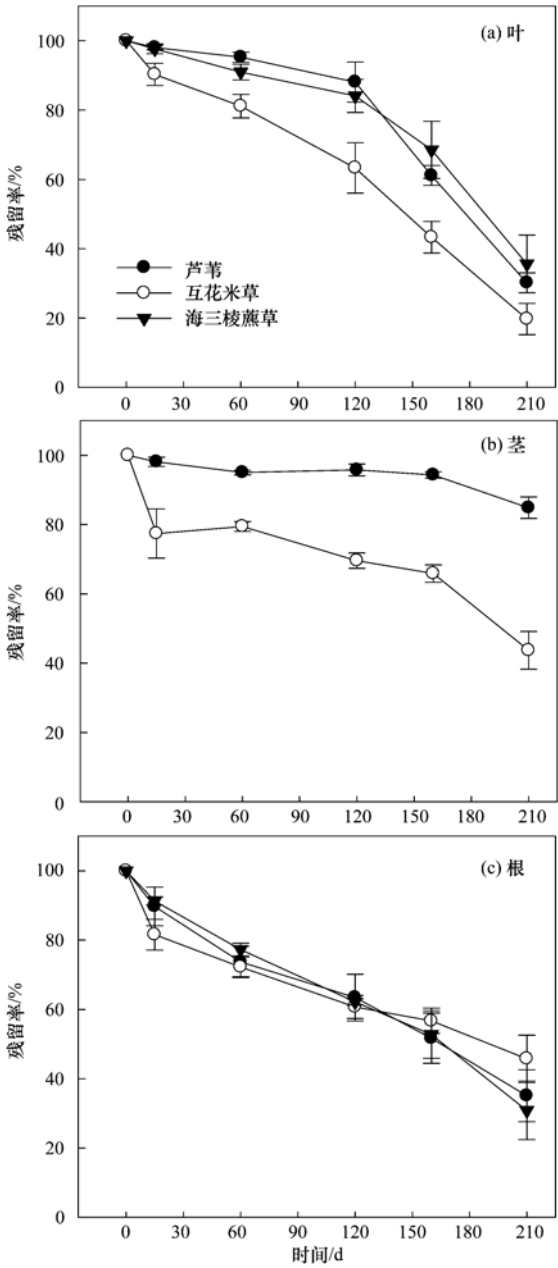


图 3 植物分解袋法干物质残留率动态
Fig. 3 Dry mass remaining of litter during decomposition by litterbag

表 2 分解袋法干物质残留率(y)与分解天数(t)的指数方程及其相应参数($n = 18$)¹⁾

Table 2 Equations and parameters of natural logarithm (y) of mass remaining regressed on decomposition days (t)						
部位	类型	方程	K	R^2	P	$t_{0.95}/a$
叶	芦苇	$y = 115.7e^{-0.0048t}$	0.0048	0.78	<0.001	1.8
	互花米草	$y = 112.3e^{-0.0070t}$	0.0070	0.87	<0.001	1.2
	海三棱藨草	$y = 111.7e^{-0.0040t}$	0.0040	0.75	<0.001	2.1
茎	芦苇	$y = 103.3e^{-0.0010t}$	0.0010	0.75	<0.001	8.3
	互花米草	$y = 92.84e^{-0.0029t}$	0.0029	0.79	<0.001	2.8
根	芦苇	$y = 100.7e^{-0.0044t}$	0.0044	0.89	<0.001	1.9
	互花米草	$y = 91.46e^{-0.0033t}$	0.0033	0.92	<0.001	2.4
	海三棱藨草	$y = 103.6e^{-0.0049t}$	0.0049	0.88	<0.001	1.7

1) K : 分解速率常数; $t_{0.95}$: 95% 干物质分解需要的时间(a)

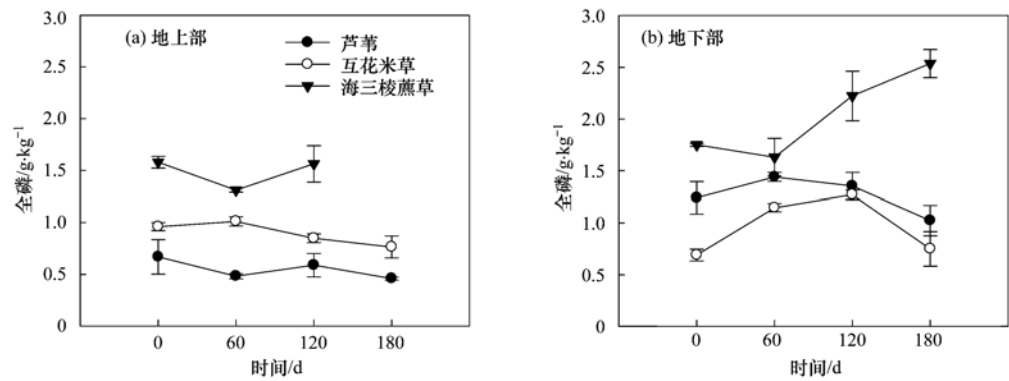


图4 植物立枯分解过程中P含量变化

Fig. 4 Phosphorus concentration of standing litter during decomposition

的62.7%和57.4%,3种植物根部P含量分别为初始量的49.1%、41.4%和60.1%。方差分析表明,整个分解过程,芦苇叶和茎P含量显著低于互花米草,但芦苇根部P含量则高于互花米草,海三棱藨草根的P含量最高($P<0.05$)。从植物的构件上看,芦苇P含量表现为叶>根>茎,互花米草表现为叶>根≈茎,海三棱藨草为根>叶。

分解期间,不同植物P的NAI指数有所不同(表3),海三棱藨草的叶以及3种植物的根NAI呈单调释放态势,但芦苇叶、互花米草的叶和茎表现

为释放-积累-释放态势,而芦苇茎由于干物质分解速率慢(表2),故在观测期间表现为先释放后积累趋势。总体而言,3种植物P的NAI指数变化范围在12.4%~90.5%,始终小于100%,说明分解过程中P发生了净释放。

2.3 主要环境因子与枯死物分解的相关关系
对不同阶段下,不同植物及其不同部位分解速率与植物性质、土壤因子和气象因子进行相关关系分析(表4)。结果表明,3种植物叶片分解速率与大气平均温度呈正相关,与植物体内C含量,C/P比

表3 植物分解袋法P累积指数(NAI)变化/%

Table 3 Variation of plant NAI during decomposition by litterbag/%

部位	类型	分解时间/d					
		0	15	60	120	160	210
叶	芦苇	100±0.0	56.3±19.2	39.7±9.1	52.8±10.3	38.6±4.7	24.3±1.6
	互花米草	100±0.0	65.9±10.4	38.6±11.0	39.6±7.3	33.2±2.5	16.4±4.2
	海三棱藨草	100±0.0	69.8±6.7	64.0±9.9	64.1±6.5	55.2±6.3	35.6±8.8
茎	芦苇	100±0.0	39.2±5.6	35.6±5.2	35.6±3.0	42.0±6.0	53.0±4.5
	互花米草	100±0.0	38.6±5.9	37.3±5.7	33.6±2.2	36.5±9.5	25.3±7.7
	芦苇	100±0.0	41.1±3.8	29.1±2.4	27.7±1.9	24.5±3.4	16.9±2.1
根	互花米草	100±0.0	29.9±5.5	25.1±4.3	18.9±1.9	20.9±2.6	18.7±0.6
	海三棱藨草	100±0.0	88.5±1.7	73.4±2.5	36.8±5.1	29.3±4.2	18.7±5.1

表4 植物不同部位分解速率与植物性质、土壤和气象因子的相关性¹⁾

Table 4 Correlations between decomposing velocity of different plants and main influencing factors

项目	指标	叶			茎			根	
		芦苇	互花米草	海三棱藨草	芦苇	互花米草	芦苇	互花米草	海三棱藨草
枯死物性质	C	-0.673	-0.197	-0.916 *	-0.491	0.196	-0.707	-0.687	0.766
	N	-0.413	0.250	0.576	0.052	-0.432	0.704	-0.696	-0.604
	P	-0.088	0.520	-0.001	0.456	0.983 **	0.955 *	0.991 **	0.220
	C/N	0.130	-0.390	-0.778	-0.296	0.721	-0.724	0.474	0.683
	C/P	-0.264	-0.534	-0.409	-0.593	-0.970 **	-0.972 **	-0.980 **	-0.152
	N/P	-0.340	-0.423	0.174	-0.615	-0.962 **	-0.979 **	-0.963 **	-0.262
	pH	-0.238	-0.447	-0.843	0.099	-0.839	-0.351	-0.723	-0.204
土壤因子	EC	-0.275	-0.411	0.370	-0.427	0.324	0.193	0.292	0.416
	WC	0.524	-0.393	0.449	0.534	0.338	-0.408	0.312	0.655
	Rain	0.485	-0.171	0.835	0.661	-0.149	-0.274	-0.342	0.071
气象因子	T	0.869	0.115	0.898 *	0.227	-0.342	-0.506	-0.570	-0.311
	RH	0.011	-0.576	0.336	0.434	-0.436	-0.160	-0.398	-0.068

1) 枯死物性质和土壤因子为阶段初始值,气象因子为阶段日均值; * 为 $P<0.05$, ** 为 $P<0.01$

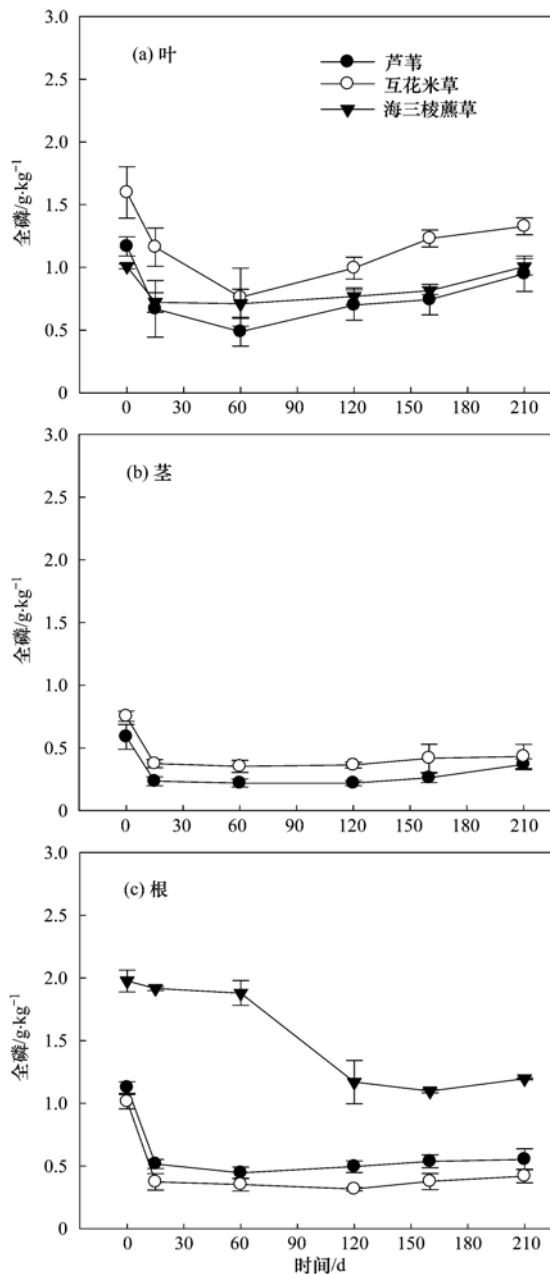


图5 植物分解袋法 P 含量变化

Fig. 5 Phosphorus concentration of litter during decomposition by litterbag

以及土壤 pH 呈负相关. 芦苇和互花米草茎的分解速率与植物体内 P 和土壤含水量呈正相关, 与植物体内 C/P 比和 N/P 比呈负相关. 3 种植物根部分解速率与植物体内 P 和土壤 EC 呈正相关, 与植物体内 C/P 比和 N/P 比、土壤 pH 以及大气平均温度和湿度呈负相关.

3 讨论

3.1 枯死物不同分解过程的比较

植物的分解过程并不是完全始于枯死物到达地

面,在凋落前就受到渗滤、裂解和真菌的作用^[21]. 本研究结果也显示,植物地上立枯部分至 180 d 时干物质量显著降低,而 P 含量则波动下降. 分解袋法研究结果有所不同,在 0~60 d 的初期植物体内 P 含量明显降低,此后植物体内 P 含量又有所升高(图 5). 这可能与两种研究方法下,植物所处的环境不同有关^[18, 22]. 立枯所处的环境不与土壤直接接触,其养分含量在分解初期变化幅度相对较小,远小于分解袋法枯死物养分浓度的变化(图 4 和 5). 而分解袋法所进行的枯死物分解研究中,地上部分枯死物放置于土壤表面,地下根系则掩埋在土壤中,受潮水等强烈影响,因而分解初期在淋洗等作用下 P 含量快速降低. 而后受附着在枯死物上的微生物影响,往往会固定土壤中的养分,引起枯死物养分总量的增加^[18, 23].

本研究也表明,湿地植物分解过程从立枯阶段就已开始. 因此,采用分解袋法研究枯死物分解速率,需要选择恰当的枯死物采集时间,才能尽量维持枯死物原有的自然分解次序和所处的环境条件^[12]. 相关研究也指出,分解袋法模拟实验由于歪曲了枯死物分解的早期环境,都高估了大型植物枯死物的早期分解速率,同时还造成了对于湿地生态系统碳排放及养分循环过程的曲解^[24]. 需要指出的是,立枯阶段植物地上干物质的减少并不完全是分解,很多是脱落至地面. 因此,笔者分析了立枯干物质动态后并没有进一步分析其 NAI 变化和环境因子对其分解的影响. 今后有必要进一步开展植物枯死物立枯阶段分解的研究.

3.2 枯死物分解影响因素分析

枯死物分解是复杂的生物物理化学过程,是由基质质量和环境因子综合作用的结果^[12, 25]. 一般认为,枯死物的基质质量在分解过程中起关键性作用,是影响枯死物分解的内在因素. 如 Liao 等^[18]在长江口九段沙湿地的研究发现,海三棱藨草叶片凋落物初始 C/N 比(23.07)显著低于互花米草(27.80)和芦苇(26.52),其平均立枯分解速率亦显著高于后两种植物. 本研究区,3 种植物叶片分解速率受 C 含量影响较大,与 C/P 比呈负相关关系,但与 C/N 比没有显著的正相关关系. 植物茎和根则受 P 含量的影响较大,与 C/P 和 N/P 比呈负相关关系. 通常认为,枯死物 C/N 比是表征枯死物分解速率的理想指标^[26],而本研究未发现这一关系. 这可能与本研究选择的 3 种植物碳氮比的差异相对较小有关. 此外,研究区复杂的潮汐作用,也可能影响

了枯死物的分解过程. 如杨继松等^[10]认为, 沼泽水中可利用性 N 可能抵消了高 C/N 比对枯死物分解速率的抑制作用. 孙志高等^[7]认为只有在降水较少时, 分解速率才与 C/N 比密切相关. 总体来看, 本研究中枯死物 C/P 比对植物分解速率的影响较大. 这与相关学者对三江平原小叶章 (*Calamagrostis angustifolia*) 和乌拉苔草 (*Carex meyeriana*) 枯死物以及闽江河口湿地的芦苇、短叶荳芰 (*Cyperus malaccensis*) 和互花米草分解的研究结果较为一致^[12, 27]. 说明枯死物分解过程中的元素生态化学计量学特征及其对分解过程指示作用的变化是十分复杂的^[28].

植物枯死物分解也与所处的环境条件如土壤(水分、pH、含盐量)和气象(温度、湿度和降雨)等因子有关^[10, 25]. 但本研究区域, 尽管土壤因子在不同植被类型间有显著差异, 但变幅不大, 因而对枯死物分解速率的影响较小. 对闽江河口湿地不同潮汐环境芦苇等植物的研究也表明^[27], 尽管潮汐可改变沉积物的含水量、pH、Eh、盐度以及土壤养分可利用性, 促进枯死物的分解, 但对分解速度差异的影响均不显著. 本研究区大气温度在不同季节有较大变化, 而温度的变化可以影响分解枯死物的土壤生物活性, 因而影响着植物叶片的分解. 相关研究也表明温度和湿度是对枯死物影响较大的环境因素^[29, 30].

3.3 不同植物枯死物分解差异

研究表明, 处于不同演替阶段的植物分解速率有所不同. 生长在贫瘠土壤上的先锋种枯死物的基质质量较差, 含有耐分解的化学物质较多, 导致分解缓慢; 生长在肥沃土壤上的演替后期种的枯死物基质质量较好, 含量偏高, 因而分解较快^[31, 32]. 对杭州湾不同植物的比较表明, 先锋种海三棱藨草叶片分解 95% 所需时间高于芦苇, 但研究区入侵植物互花米草叶和茎分解 95% 所需时间(表 1)和 P 的 NAI 值(表 2)却低于芦苇, 使得互花米草 P 的释放量更大. 枯死物分解速率的加快, 将促进生态系统 P 素循环, 改善土壤状况, 为进一步侵入和生长提供条件, 因而这可能是互花米草在该区域成功入侵的原因之一. 廖成章等^[33]在长江口的研究也表明, 互花米草取代芦苇后, 改变了枯死物的 N 动态, 增加了生态系统中 N 的输入, 可能有利于互花米草的快速扩张. Ehrenfeld^[34]分析了植物入侵对土壤养分影响的研究案例, 提出了植物入侵与植物养分循环之间存在潜在的正反馈理论. 需要指出的是, 研究区互

花米草根的分解速率要低于芦苇和海三棱藨草, 这主要同互花米草根系具有较高的初始 C/P 比有关. Liao 等^[18]研究也表明, 互花米草地下部分分解速率要低于芦苇和海三棱藨草.

总体而言, 3 种植物分解初期(0 ~ 15 d)分解速率最快, 然后分解速率降低, 即湿地植物枯死物分解速率具有明显的阶段性(图 3). 这与相关学者在三江平原、长江口和闽江河口等开展的研究结果较为一致^[10, 12, 35, 36]. 主要因为在分解初期枯死物中易溶性有机颗粒和无机盐类含量多, 分解以物理淋溶为主, 分解速率快; 随着分解的进行木质素、纤维素等难溶性物质分解由微生物与土壤动物起主导作用, 以缓慢的生物化学过程为主, 分解速率下降^[12, 35, 37]. 但研究区 3 种植物末期(160 ~ 210 d)的分解速率又有所加快, 可能同后期处于夏季气温升高、降雨量较大(表 3)有关. 整个分解过程中, 植物不同部位的分解速率整体表现为茎 > 根 > 叶, 这可能与植物茎的木质素含量较高, 而叶片木质素含量较低有关^[38]. Gessner^[39]对芦苇的茎和叶的分解速率进行研究后指出, 由于茎中营养物质含量小, 木质素含量高, 并且茎外表有一层厚壁组织, 导致其分解速率明显小于叶.

4 结论

(1) 杭州湾湿地立枯分解过程中干物质量逐渐降低, 至 180 d 后逐步凋落至地面. 分解袋法模拟下, 枯死物分解具有明显的阶段性. 植物立枯分解期间, P 含量波动下降. 分解袋法模拟下, 初期 P 含量明显降低, 随后又有所升高. 植物所处的环境不同可能导致了两种研究方法下分解过程的差异.

(2) 分解袋法模拟实验表明, 3 种植物分解速率与 C/N 比没有显著的正相关关系, 而枯死物 C/P 比对植物分解速率的影响较大. 植物叶片分解速率还受 C 含量影响, 植物茎和根则受 P 含量的影响. 说明枯死物分解过程中的元素生态化学计量学特征及其对分解过程指示作用的变化十分复杂.

参考文献:

- [1] Correll D L. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review [J]. Journal of Environmental Quality, 1998, 27(2): 261-266.
- [2] Smith V H, Tilman G D, Nekola J C. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems [J]. Environmental Pollution, 1999, 100(1-3): 179-196.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 黄体冉, 刘海丰, 王运静, 等. 枯死物对红松洼山地草甸植物群落特征影响[J]. *草地学报*, 2010, **18**(1): 50-55.
- [6] 武海涛, 吕宪国, 杨青. 湿地草本植物枯落物分解的影响因素[J]. *生态学杂志*, 2006, **25**(11): 1405-1411.
- [7] 孙志高, 刘景双. 湿地枯落物分解及其对全球变化的响应[J]. *生态学报*, 2007, **27**(4): 1606-1618.
- [8] Kuehn K A, Gessner M O, Wetzel R G, *et al.* Decomposition and CO₂ evolution from standing litter of the emergent macrophyte *Eriophorum giganteus* [J]. *Microbial Ecology*, 1999, **38**(1): 50-57.
- [9] 郭继勋, 姜世成, 任炳忠. 松嫩草原优势植物羊草立枯体分解的研究[J]. *生态学报*, 2000, **20**(5): 784-787.
- [10] 杨继松, 刘景双, 于君宝, 等. 三江平原沼泽湿地枯落物分解及其营养动态[J]. *生态学报*, 2006, **26**(5): 1297-1302.
- [11] 孙志高, 刘景双, 于君宝, 等. 模拟湿地水分变化对小叶章枯落物分解及氮动态的影响[J]. *环境科学*, 2008, **29**(8): 2081-2093.
- [12] 武海涛, 吕宪国, 杨青, 等. 三江平原典型湿地枯落物早期分解过程及影响因素[J]. *生态学报*, 2007, **27**(10): 4027-4035.
- [13] Tong C, Zhang L, Wang W, *et al.* Contrasting nutrient stocks and litter decomposition in stands of native and invasive species in a sub-tropical estuarine marsh [J]. *Environmental Research*, 2011, **111**(7): 909-916.
- [14] Bärlocher F. Pitfalls of traditional techniques when studying decomposition of vascular plant remains in aquatic habitats [J]. *Limnologia*, 1997, **13**(2): 1-11.
- [15] 宇万太, 于永强. 植物地下生物量研究进展[J]. *应用生态学报*, 2001, **12**(6): 927-932.
- [16] Palomo L, Niell F X. Primary production and nutrient budgets of *Sarcocornia perennis* ssp. *alpini* (Lag.) Castroviejo in the salt marsh of the Palmones River estuary (Southern Spain) [J]. *Aquatic Botany*, 2009, **91**(3): 130-136.
- [17] 邵学新, 李文华, 吴明, 等. 杭州湾潮滩湿地 3 种优势植物碳氮磷储量特征研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3451-3457.
- [18] Liao C Z, Luo Y Q, Fang C M, *et al.* Litter pool sizes, decomposition, and nitrogen dynamics in *Spartina alterniflora* invaded and native coastal marshlands of the Yangtze Estuary [J]. *Oecologia*, 2008, **156**(3): 589-600.
- [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, 2000.
- [20] 何池全. 毛茛苔草湿地枯落物及其地下生物量动态[J]. *应用生态学报*, 2003, **14**(3): 363-366.
- [21] 何池全, 赵魁义, 余国营, 等. 湿地生态过程研究进展[J]. *地球科学进展*, 2000, **15**(2): 165-171.
- [22] 张新厚, 宫超. 湿地挺水植物凋落物立枯分解研究进展[J]. *生态环境学报*, 2013, **22**(4): 712-717.
- [23] Findlay S, Howe K, Austin H K. Comparison of detritus dynamics in two tidal freshwater wetlands [J]. *Ecology*, 1990, **71**(1): 288-295.
- [24] Welsch M, Yavitt J B. Early stages of decay of *Lythrum salicaria* L. and *Typha latifolia* L. in a standing-dead position [J]. *Aquatic Botany*, 2003, **75**(1): 45-57.
- [25] 刘增文, 高文俊, 潘开文, 等. 枯落物分解研究方法和模型讨论[J]. *生态学报*, 2006, **26**(6): 1993-2000.
- [26] Lee A A, Bukaveckas P A. Surface water nutrient concentrations and litter decomposition rates in wetlands impacted by agriculture and mining activities [J]. *Aquatic Botany*, 2002, **74**(4): 273-285.
- [27] 仝川, 刘白贵. 不同水淹环境下河口感潮湿地枯落物分解及营养动态[J]. *地理研究*, 2009, **28**(1): 118-128.
- [28] 欧阳林梅, 王纯, 王维奇, 等. 互花米草与短叶荇菜枯落物分解过程中碳氮磷化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2013, **33**(2): 389-394.
- [29] Wang L X, Wang J, Huang J H. Comparison of major nutrient release patterns of *Quercus liaotungensis* leaf litter decomposition in different climatic zones [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003, **45**(4): 399-407.
- [30] 王相娥, 薛立, 谢腾芳. 凋落物分解研究综述[J]. *土壤通报*, 2009, **40**(6): 1473-1478.
- [31] 宋新章, 江洪, 余树全, 等. 中亚热带森林群落不同演替阶段优势种凋落物分解试验[J]. *应用生态学报*, 2009, **20**(3): 537-542.
- [32] Sariyildiz T, Anderson J M. Interactions between litter quality, decomposition and soil fertility: a laboratory study [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**(3): 391-399.
- [33] 廖成章, 唐小平, 程小玲, 等. 外来种互花米草和土著种芦苇空中凋落物氮动态的比较研究[J]. *生物多样性*, 2010, **18**(6): 631-637.
- [34] Ehrenfeld J G. Effects of exotic plant invasions on soil nutrient cycling processes [J]. *Ecosystems*, 2003, **6**(6): 503-523.
- [35] 刘白贵, 仝川, 罗榕婷. 闽江河口湿地 3 种主要植物冬季枯落物分解特征[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2008, **24**(2): 80-85.
- [36] 周俊丽, 吴莹, 张经, 等. 长江口潮滩先锋植物藎草腐烂分解过程研究[J]. *海洋科学进展*, 2006, **24**(1): 44-50.
- [37] 王世岩, 杨永兴. 三江平原小叶章枯落物分解动态及其分解残留物中磷素季节动态[J]. *中国草地*, 2000, (6): 7-11.
- [38] 柳新伟. 温度对芦苇不同部位分解动态的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(3): 1042-1044.
- [39] Gessner M O. Breakdown and nutrient dynamics of submerged *Phragmites* shoots in the littoral zone of a temperate hardwater lake [J]. *Aquatic Botany*, 2000, **66**(1): 9-20.

CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i> (3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO ₂ and CH ₄ at Mount Waliguan, China	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i> (3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shanghai Urban Area	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i> (3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i> (3280)
Emission Characteristics of PM _{2.5} from Blast Furnace Iron Making	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i> (3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i> (3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i> (3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i> (3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i> (3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i> (3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i> (3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i> (3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i> (3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i> (3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (3408)
Synthesis of Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i> (3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i> (3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i> (3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i> (3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i> (3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i> (3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i> (3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i> (3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd ²⁺ on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i>	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i> (3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i> (3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(Ⅲ) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i> (3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing (3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang (3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH ₂ PO ₄	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i> (3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i> (3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i> (3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i> (3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ ¹³ C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang (3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i> (3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM _{2.5}	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i> (3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO ₂ Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region: an Economic Input-Output Analysis	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i> (3632)

《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)

2014年9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 15, 2014

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