

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

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

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示	高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康(1141)
2013年1月北京市PM _{2.5} 区域来源解析	李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松(1148)
2013年1月北京市一次空气重污染成因分析	程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅(1154)
上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征	常燕,冯冲,瞿建国,张经(1164)
厦门春季PM ₁₀ 中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析	张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成(1173)
硫氧同位素示踪南京北郊大气PM _{2.5} 中硫酸盐来源	魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝(1182)
结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程	包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠(1187)
春季华东高山背景区域PM _{2.5} 和PM _{2.5-10} 中水溶性无机离子特征	苏彬彬,张智胜,陶俊,许梹洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇(1195)
落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究	杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹(1202)
四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征	何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪(1208)
深圳市船舶排放清单与时空特征研究	杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏(1217)
超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性	孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗(1227)
空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征	张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹(1234)
基于氢氧稳定同位素的黄土高原下二次蒸发效应	靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽(1241)
黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响	张永领,王明仕,董玉龙(1249)
调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响	王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远(1256)
春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响	于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚(1263)
降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析	任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春(1270)
北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价	钟惠舟,韦朝海(1277)
丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析	李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏(1285)
三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例	操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺(1293)
营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响	王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖雪(1301)
一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究	杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏(1309)
昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析	梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明(1317)
河道曝气提升河流水质的WASP模型研究	朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽(1326)
γ辐射降解水中的盐酸环丙沙星的研究	祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静(1332)
电化学氢化物发生法处理含锑废水及对锑的回收	陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼(1338)
Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水	孙文静,王亚旻,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳(1345)
生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素	孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪(1352)
308 nm光作用下α-Fe ₂ O ₃ 表面HNO ₃ 的光解	陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强(1359)
L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚	何家洪,徐强,丁武泉,李强(1365)
酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究	许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博(1374)
枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性	马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用(1379)
嗜碱降解菌筛选及其对焦化废水强化处理	李静,李文英(1385)
Fe ³⁺ 对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N ₂ O释放的影响	李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建(1392)
内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究	赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉(1399)
利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻	王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东(1406)
进水渗滤液总氮和BOD ₅ /TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响	杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰(1412)
重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析	师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先(1417)
湖南攸县典型煤矿和工矿区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析	张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰(1425)
沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响	苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春(1431)
施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响	王秀丽,梁成华,马子惠,韩月(1437)
不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复	邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提(1445)
陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价	齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞(1453)
有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响	王菲,袁婷,谷守宽,王正银(1461)
玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究	程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云(1468)
硼锑交互作用对水稻吸收积累锑和硼的影响	向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐(1474)
丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响	郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新(1481)
滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究	陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁(1489)
不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系	吴静,陈书涛,胡正华,张旭(1497)
工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析	王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮(1507)
《环境科学》征订启事(1216)	
《环境科学》征稿简则(1248)	
信息(1163,1194,1248,1424)	

滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究

陈友媛^{1,2}, 孙萍¹, 陈广琳¹, 王宁宁¹

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 滨海河口区水体盐碱含量高, 生态景观萧条, 亟需筛选既能耐盐碱又能有效去除氮磷的植物。通过水培实验研究了盐碱胁迫下, 芦苇、香蒲的耐受性及对水体中氮、磷的去除率。结果表明, 芦苇至少能够耐受 10‰ 的盐度和高达 8.5 的 pH, 香蒲能耐受的盐度为 7.5‰、pH 为 8.0, 结合生长、生理指标(叶片相对电导率、脯氨酸、叶绿素和根系活力)的变化, 芦苇耐盐碱性强于香蒲; 盐胁迫下, 芦苇对氨氮去除率相对较高, 由于香蒲生物量较高, 对硝氮、总磷去除效果好, 分别比芦苇高 2.5%、7.3%, 对总氮去除两者相当; 碱胁迫下, 芦苇耐碱性较强, 对氨氮、总磷的去除效果较香蒲稍好, 而香蒲对总氮的去除率比芦苇高 8.2%。综上所述, 芦苇、香蒲可作为修复滨海高盐碱水体生态景观的备选植物。

关键词: 芦苇; 香蒲; 耐盐碱性; 氮; 磷; 滨海河口区

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1489-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.04.049

A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by *Phragmites australis* and *Typha angustifolia* in Coastal Estuary Area

CHEN You-yuan^{1,2}, SUN Ping¹, CHEN Guang-lin¹, WANG Ning-ning¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The salt and alkali contents were so high that the ecological landscape was depressed in water body of a coastal estuary area. Screening some plants which could not only tolerate saline-alkaline but also effectively remove nitrogen and phosphorus was therefore in urgent need. The tolerance range and removal rate of nitrogen and phosphorus by *Phragmites australis* and *Typha angustifolia* under salt and pH stress were investigated by hydroponic experiments. The results showed that *Phragmites australis* could tolerate at least 10‰ salinity and pH 8.5, while *Typha angustifolia* tolerated 7.5‰ salinity and pH 8.0. Combined with the change of the growth and physiological indexes (relative conductivity, proline, chlorophyll and root activity), the salt resistance of *Phragmites australis* was stronger than that of *Typha angustifolia*. Under salt stress, the removal rate of ammonia nitrogen of *Phragmites australis* was higher. The removal rates of nitrate nitrogen and phosphorus of *Typha angustifolia* were 2.5% and 7.3% higher than those of *Phragmites australis* in average, respectively, because of the high biomass of *Typha angustifolia*. The total nitrogen removal rate was equivalent. Under pH stress, the removal rate of ammonia nitrogen and total phosphorus of *Phragmites australis* was a little higher than that of *Typha angustifolia*. However, *Typha angustifolia* had a higher removal rate of total nitrogen, which was 8.2% higher than that of *Phragmites australis*. All the analysis showed that both *Phragmites australis* and *Typha angustifolia* could be used as alternative plants to grow and remove nitrogen and phosphorus in the high salt-alkaline water body in coastal estuary area.

Key words: *Phragmites australis*; *Typha angustifolia*; salt-alkaline resistance; nitrogen; phosphorus; coastal estuary area

青岛滨海地区土壤和水体的盐碱含量高, 植被覆盖率低, 加上经济高速发展带来的水体污染, 致使当地水生植被稀少, 筛选并研究既能耐盐碱又对水体有一定净化功能的植物成为当务之急。

一般植物适宜在 pH 5.5 ~ 7.0, 盐度 0 ~ 3.5‰ 的土壤或者水体中生长^[1], 而当盐度大于 6‰、pH 大于 8.1 时, 盐碱会对植物形成离子毒害^[2]、造成渗透胁迫、破坏物质能量平衡^[3], 植物因不能进行正常的细胞代谢而死亡^[4]。芦苇 (*Phragmites australis*) 是一种广生态幅植物, 抗逆性较强^[5], 可作为湿地植物修复受污染水体^[6]、作为富集重金属的植物修复重金属污染土壤^[7]、作为乡土植物与外来

物种竞争^[8]、作为盐生植物绿化盐碱地^[9]等, 且有研究表明芦苇能改善盐碱地的盐碱环境, 在其生长周期内土壤 pH 平均由 9.22 降低到 8.79, 电导率平均值降低了 55.3%^[10], 但有关芦苇作为水生植物修复滨海地区高盐碱含量水体的研究甚少。香蒲 (*Typha angustifolia*) 是一种能水生的湿地植物, 能有效地净化被污染水体^[11~13], 而且对土壤中重金属有一定的耐受性^[14], 有些研究表明香蒲能耐受一定的

收稿日期: 2014-09-29; 修订日期: 2014-11-28

基金项目: 青岛市科技攻关项目 (12-4-1-58-HY)

作者简介: 陈友媛 (1966 ~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境水资源及海洋沉积环境, E-mail: youyuan@ouc.edu.cn

盐度^[15],但作为水生植物其耐盐碱性及净化含盐碱污水的研究极少。鉴于芦苇对不良环境的高适应性^[16],加之香蒲具有强大的根系和较高的生物量,会对氮、磷有较好的去除效果^[17,18],而且滨海河口地区气候湿润,适合芦苇、香蒲生长,开展芦苇、香蒲对滨海区高盐碱环境的生态修复效果的研究,有助于指导滨海盐碱地区利用芦苇、香蒲进行生态修复。

通过探索芦苇、香蒲能够耐受的盐度和 pH 值,研究芦苇、香蒲的耐盐碱机制,比较芦苇、香蒲分别对氨氮、硝氮、总氮及总磷去除能力的大小,以期筛选既能耐盐碱又能净化水质的植物提供理论依据,同时为青岛市高新区人工水系植被景观恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

芦苇(*Phragmites australis*),禾本科芦苇属,多年水生或湿生的高大禾草,择水而生。地下有发达的匍匐根状茎,且适应性广、抗逆性强^[19]、生长速

度快、成活率高,是改良盐碱土壤的首选。

香蒲(*Typha angustifolia*),香蒲科属,多年生沼生草本,生长于水边、沼泽地及浅水中。有伸长的根状茎,上部出水,地下茎直立粗壮,适应性强,喜光照,耐盐性较好,可用于污水净化^[20]。

本实验所采用的芦苇和香蒲均采自青岛市高新区人工水系周边。

1.2 实验方法

青岛市高新区人工水系的来水为海水、河水、污水处理厂的再生水和偷排的污水,整个水系水体有时盐度高达 20‰、pH 高达 9.5,富营养化严重,水生生态景观萧条,研究区位于主体人工水系西南部。实验所用水样水质根据青岛市高新区人工水系研究区水质范围最大值设置,如表 1。本文将所选植物分别种植在一系列盐度(0‰、2.5‰、5.0‰、7.5‰、10.0‰、12.5‰、15.0‰)和 pH(7.0、7.5、8.0、8.5、9.0)梯度下,通过其生长、生理指标变化研究其对盐碱的耐受性,通过测定实验开始及结束时水中氮、磷剩余质量浓度研究植物对氮磷的去除效果。

表 1 青岛高新区人工水系研究区水质调查结果(2013 年 8 月~2013 年 10 月)

Table 1 Water quality survey result of artificial water body in the study area of Qingdao high-tech zone (August 2013-October 2013)

项目	盐度/‰	pH	硝氮/mg·L ⁻¹	氨氮/mg·L ⁻¹	总氮/mg·L ⁻¹	总磷/mg·L ⁻¹
研究区水质范围	9.70~15.13	7.55~8.97	1.62~1.69	1.30~1.41	3.88~4.00	1.03~1.11

1.2.1 植物耐盐碱性及水质净化的实验方法

将长势一致的芦苇、香蒲用塑料泡沫板固定于 250 mL 的烧杯中,每个烧杯中种植 1 棵植物,种植密度大约为 252.53 株·m⁻²。其中盐和 pH 胁迫下芦苇、香蒲植株的初始鲜重和株高如表 2 所示,按照设定的梯度进行盐和 pH 分别胁迫,其中 pH 用 Na₂CO₃、NaHCO₃ 按照一定的比例调节(因为 pH 用碱性盐调节,故文中将 pH 胁迫简称碱胁迫),为避

免盐激效应,在进行含盐碱污水胁迫实验之前对植物分别以每天增加 2.5‰盐度、0.5 pH 的方法来驯化植物对高盐碱的耐受性,以盐胁迫实验组为例,驯化第 1 d 将除 0‰盐度以外的实验组都用 2.5‰盐度胁迫,第 2 d 用 5.0‰盐度的溶液胁迫≥5.0‰盐度的实验组,第 3 d 则用 7.5‰盐度的溶液胁迫≥7.5‰盐度的实验组,以此类推,6 d 后完成盐胁迫驯化,详见表 3。

表 2 芦苇、香蒲植株鲜重和株高初始值

Table 2 Initial fresh weight and height of *Phragmites australis* and *Typha angustifolia*

胁迫组别	芦苇鲜重/g	香蒲鲜重/g	芦苇株高/cm	香蒲株高/cm
盐胁迫	8.56 ± 0.33	8.84 ± 0.13	23.51 ± 0.45	25.95 ± 0.57
pH 胁迫	8.07 ± 0.36	7.96 ± 0.47	20.39 ± 0.28	21.77 ± 0.42

驯化结束后在含有设定氮、磷质量浓度的溶液中加入相应质量的盐、碱组成含不同梯度盐碱的污水胁迫溶液,将该溶液加入烧杯中对植物进行胁迫,每个实验组设 3~5 个重复,室外自然光照培养,遮雨,蒸馏水补充每日蒸发水量,实验过程中记录植物株高等生长指标。

此外,由于配制完成污水溶液之后需要按照设定的盐碱梯度依次加入相应质量的盐、碱,该过程需要一定的时间,加之溶液转移等误差的影响会引起实际测量值和理论计算值之间的差异,因此,为保证实验的准确性,在对植物加入胁迫溶液前测定所配制溶液中氮、磷的实际质量浓度。结果为芦苇胁

表 3 实验前植物耐盐碱驯化过程

Table 3 Plant saline-alkaline tolerance domestication process before the experiment												
天数	盐度胁迫实验组/‰							pH 胁迫实验组				
	0	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0
第 1 d	0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
第 2 d	0	2.5	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	7.0	7.5	7.5	7.5	7.5
第 3 d	0	2.5	5.0	7.5	7.5	7.5	7.5	7.0	7.5	8.0	8.0	8.0
第 4 d	0	2.5	5.0	7.5	10.0	10.0	10.0	7.0	7.5	8.0	8.5	8.5
第 5 d	0	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	12.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0
第 6 d	0	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0					

迫溶液含硝氮 1.78 mg·L⁻¹、氨氮 1.34 mg·L⁻¹、总氮 3.63 mg·L⁻¹、总磷 1.29 mg·L⁻¹, 香蒲胁迫溶液含硝氮 1.78 mg·L⁻¹、氨氮 2.02 mg·L⁻¹、总氮 4.45 mg·L⁻¹、总磷 1.16 mg·L⁻¹.

实验开始之前进行预实验,使芦苇、香蒲在本实验设置的盐碱梯度下生长 14 d^[3],由于高盐碱胁迫会对植物造成较大影响,加之为确保计算氮、磷去除率的准确性而采用纯蒸馏水配制污水溶液,并未添加植物长期生长需要的其他营养元素,植物生长受阻,且在不同盐碱梯度下各项生理指标差异不大.而胁迫 9 d 后进行破坏性取样时植物生理、生长等指标随盐碱梯度呈有规律的变化.因此选择植物实验周期为 9 d,之后破坏性取样,测定植物的生理指标及水样中氮、磷的质量浓度.

1.2.2 植物生长、生理指标及污水指标测定方法

植物生长指标分析项目为植物株高净增长量、鲜重含水量,生理指标分析项目为叶片相对电导率、脯氨酸、叶绿素、根系活力;水质分析项目为硝氮、氨氮、总氮、总磷.

株高净增长 = 实验结束时株高 - 实验开始时株高;鲜重含水量 = (植株鲜重 - 干重)/鲜重;叶片相对电导率采用浸泡法^[21];脯氨酸含量测定采用酸性茚三酮比色法^[21];叶绿素含量测定采用丙酮提取法^[21];根系活力测定采用氯化三苯基四氮唑

法^[22].硝氮的测定采用紫外分光光度法;氨氮的测定采用纳氏试剂分光光度法;总氮测定采用紫外分光光度法;总磷测定采用钼锑抗分光光度法.

分光光度法采用 TU-1810(北京普析通用仪器有限公司,中国)紫外可见分光光度计.

2 结果与分析

2.1 盐碱胁迫下植物生长、生理指标的变化

含盐碱污水胁迫 9 d 后开始采集芦苇、香蒲基径以上叶片及最末端的须根样品进行实验,叶片及须根用蒸馏水洗净,并用滤纸吸干,采样后立即测定各项指标.

2.1.1 生长指标

植物生长好坏表征其能适应盐碱环境能力的大小,株高的变化直观反映植物长势^[23].盐和碱胁迫下水样中芦苇、香蒲株高的变化见表 4.从中可知,盐胁迫下,随盐度的增大,芦苇株高净增长先升高后降低,轻微盐度刺激有利于芦苇生长,最高增长量比最低增长量高 5 倍;香蒲株高净增长则一直降低,最高与最低相差 11 倍.碱胁迫下,随 pH 的升高,芦苇、香蒲株高净增长均呈先升高后降低趋势,最高与最低相差分别为 4.5 倍、12 倍,由于香蒲的净增长降低较快,且最高增长与最低值相差较大,说明香蒲耐碱能力低.

表 4 盐碱胁迫下芦苇、香蒲的株高净增长量及含水量¹⁾

Table 4 Height net growth and water contents of <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> under salt and alkali stress									
盐度 /‰	芦苇		香蒲		pH	芦苇		香蒲	
	株高净增长 /cm	含水量 /%	株高净增长 /cm	含水量 /%		株高净增长 /cm	含水量 /%	株高净增长 /cm	含水量 /%
0	7.0(1.0)	90(2.0)	11.0(1.5)	90(1.1)	7.0	4.3(0.4)	89(1.2)	6.0(0.6)	82(5.6)
2.5	10.7(0.9)	91(0.5)	7.6(1.3)	89(0.4)	7.5	5.8(1.2)	90(0.4)	6.3(0.5)	86(2.9)
5.0	5.7(0.3)	87(1.1)	5.6(0.5)	86(1.2)	8.0	4.5(0.7)	88(1.1)	2.7(0.8)	81(1.8)
7.5	4.5(1.1)	86(3.7)	4.8(1.1)	85(1.9)	8.5	2.9(1.0)	83(10.7)	1.4(0.7)	76(8.5)
10.0	3.7(0.6)	85(2.4)	3.3(0.5)	83(3.7)	9.0	1.3(0.2)	81(8.3)	0.5(0.9)	71(3.3)
12.5	2.7(0.4)	84(2.5)	2.0(0.6)	78(1.8)					
15.0	2.0(0.8)	77(1.1)	1.0(0.4)	75(1.2)					

1) 括号中数值为 3~5 个平行样的标准偏差

盐碱胁迫下植物体内水分含量与植物生长密切相关,盐和碱胁迫会影响植物细胞对水分的吸收^[24],因此,植株含水量的高低侧面反映植物耐盐碱性的强弱^[25].由表4可知,芦苇在轻微的盐碱刺激下(盐度2.5‰、pH 7.5)含水量会升高;香蒲在盐胁迫下植株含水量降低,pH为7.5时碱会对香蒲有轻微刺激,导致其含水量升高.随盐碱的升高,芦苇、香蒲含水量逐步降低,伴随着叶片逐渐干枯变黄.

2.1.2 生理指标

盐碱胁迫对植物的伤害除了表现在植物生长变得缓慢,还对植物的叶片相对电导率、渗透物质合成、叶绿素合成和根系活力造成影响^[26].

盐碱胁迫对植物造成的伤害首先表现在植物叶片的细胞质膜透性的变化,而细胞质膜透性变化的直观表现是植物叶片相对电导率的变化.由图1(a)和1(b)知,盐碱胁迫下,随盐度和pH的升高,两种植物的叶片相对电导率都升高,芦苇在盐度大于10.0‰、pH高于8.5时叶片相对电导率快速升高,说明芦苇至少能耐受小于10.0‰的盐度和小于8.5的pH,且香蒲的叶片相对电导率都高于芦苇,说明香蒲对盐碱胁迫敏感,即抗盐碱性较差.

盐碱胁迫会引起耐盐碱植物体内渗透物质积累,植物体内渗透物质含量的高低表征植物耐盐碱性的强弱.脯氨酸作为典型的渗透调节物质,其含量从一定程度上说明植物能耐受的盐碱性^[27].由图1(c)、1(d)知,盐碱胁迫下,随盐度和pH的升高,为了抵抗由盐碱造成的渗透胁迫,芦苇、香蒲叶

片中脯氨酸含量升高,芦苇在盐度大于10‰、pH高于8.5,香蒲在盐度大于7.5‰、pH高于8.0时,脯氨酸含量升高较为迅速,因此可初步判定芦苇能耐受的盐碱分别是盐度小于10‰、pH低于8.5,香蒲能耐盐度小于7.5‰、pH低于8.0,而香蒲叶片脯氨酸含量均高于芦苇,说明香蒲对盐碱敏感,需要合成更多的渗透物质调节体内的渗透压,即从渗透调节物质含量方面来看,芦苇耐盐碱性强于香蒲.

植物耐盐碱性的强弱与植物叶片光合作用的强弱有密切联系,叶绿素含量高,植物光合作用强,植物长势好^[28].由图1(e)、1(f)知,随盐度、pH的升高,芦苇、香蒲的叶片叶绿素含量总体上均降低.盐胁迫下芦苇、香蒲分别在盐度大于10.0‰、7.5‰时,由于植物不能较好地适应该盐碱,体内合成较多的渗透调节剂等物质来应对胁迫环境,导致叶绿素合成需要的物质、能量减少,其含量迅速下降,由此可知,芦苇、香蒲能耐受的盐度分别为10.0‰和7.5‰,且芦苇叶片叶绿素含量高于香蒲,说明芦苇在此不良环境中的适应能力强于香蒲.

根系是植物吸收营养的器官,根系活力越高的植物地下部分活动越旺盛,直接影响地上部分生长和营养状况及产量水平^[29].由图1(g)、1(h)知,盐、碱胁迫下芦苇根系活力均先升高后降低,轻微的盐和碱刺激能增强芦苇的根系活力;香蒲根系活力在盐胁迫下呈下降趋势,在碱胁迫下出现升高趋势,说明轻微碱刺激能促使香蒲根系活力升高;盐碱胁迫下芦苇根系活力总体上均大于香蒲,且长势

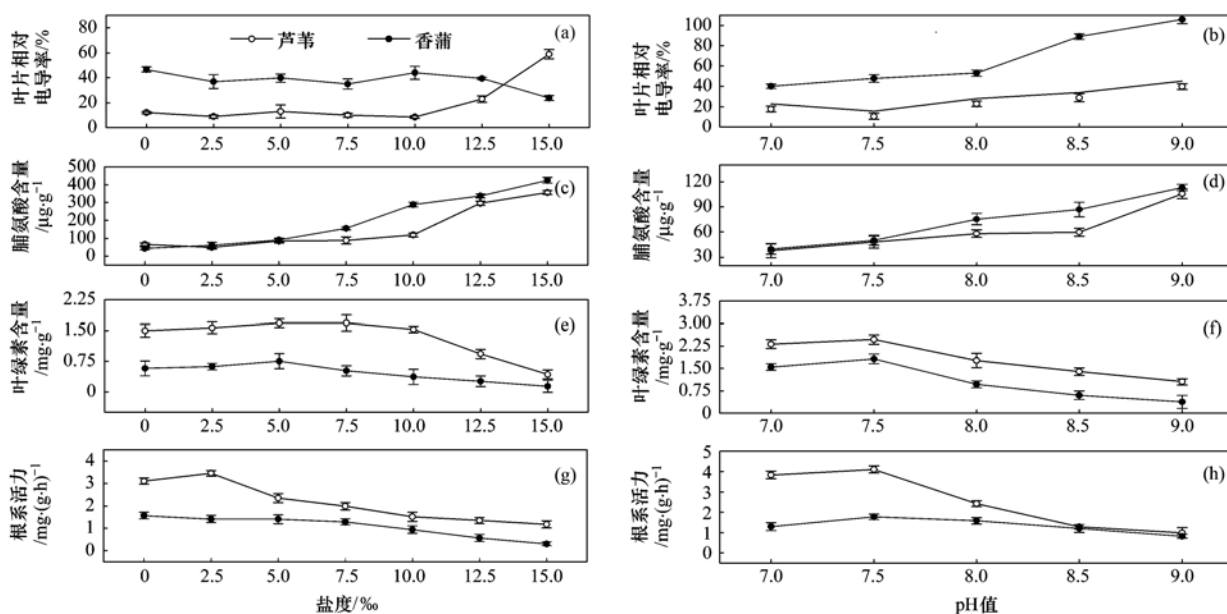


图1 盐碱胁迫下芦苇和香蒲的生理指标变化

Fig. 1 Physiological index changes of *Phragmites australis* and *Typha angustifolia* under salt and alkali stress

较好,即从植物根系活力高低来看,芦苇耐盐碱能力强于香蒲。

2.2 盐碱胁迫下芦苇、香蒲对氮的去除效果

盐胁迫下芦苇、香蒲两种植物对硝氮、氨氮、总氮的净化能力见图 2(a)、2(c)、2(e),在芦苇和香蒲分别处理下,水样中硝氮、氨氮和总氮的质量浓度都随着盐度的增加呈升高趋势,由于香蒲生物量大,根系错综复杂,对硝氮的去除率平均高于芦苇约 2.5%;两种植物对氨氮的去除相近,都在 90% 以上;轻微盐度刺激导致芦苇、香蒲对总氮的去除

率升高,且芦苇略高,但相差不大。

碱胁迫下芦苇、香蒲对氮的净化能力见图 2(b)、2(d)、2(f),香蒲对氮的去除率会在 $\text{pH} < 8.0$ 时随 pH 的升高降低; $\text{pH} = 8.0$ 时,香蒲对硝氮、氨氮的去除率都最低,是香蒲能耐受的最高值; $\text{pH} > 8.0$ 时,香蒲由于不能耐受该 pH ,对氮的去除率波动较大。但 $\text{pH} < 8.5$ 时,芦苇对氮的去除率一直降低, $\text{pH} > 8.5$ 芦苇对氨氮、总氮的去除率会升高。总体而言,香蒲对硝氮、总氮的去除率平均分别高出芦苇 0.1%、8.2%,芦苇对氨氮的去除率平均略高于香蒲 2.7%。

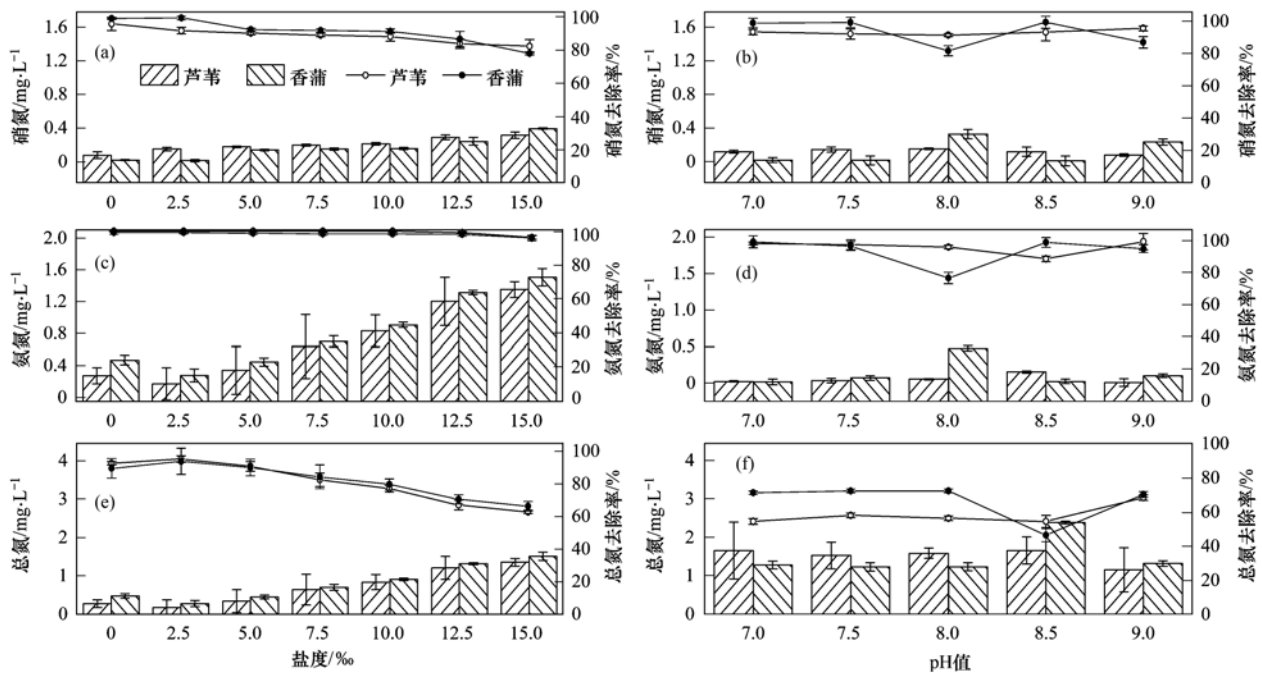


图2 盐碱胁迫下芦苇、香蒲对氮的去除效果

Fig. 2 Removal efficiency of nitrogen by *Phragmites australis* and *Typha angustifolia* under salt and alkali stress

2.3 盐碱胁迫下芦苇、香蒲对磷的去除效果

盐碱胁迫下芦苇、香蒲对总磷的去除及其效果见图 3。由图 3(a)可知,盐度为 0‰ 时,芦苇处理水样中总磷质量浓度低于香蒲,随盐度的增加,均高于香蒲,即香蒲对总磷的去除率高于芦苇,平均高 7.3%,且轻微的盐度刺激(2.5‰)能提高香蒲的去除效率。由图 3(b)可知,随 pH 的升高,芦苇、香蒲处理水样中总磷质量浓度均呈先升高后降低再升高趋势。除 $\text{pH} = 7.0$ 外,芦苇在 $\text{pH} = 8.0$ 时水中总磷质量浓度最低,香蒲则在 $\text{pH} = 8.5$ 时最低,且当 $\text{pH} < 8.0$ 时,芦苇对总磷的去除率平均高于香蒲 1.4%。

3 讨论

3.1 芦苇、香蒲的耐盐碱性与除氮效果

3.1.1 耐盐性与除氮效果

盐胁迫对植物的伤害最直观的表现是植物生长缓慢,芦苇、香蒲株高净增长量的减少说明这两种植物都受到高盐伤害^[30]。在植物生长变得缓慢的同时,芦苇、香蒲在盐度大于 12.5‰ 时叶片都有不同程度的变黄,无新根生长等现象。此时两种植物生长需要的能量减少,植株变得脆弱,不能较好地去除含氮物质。

水生植物除氮机制主要有吸收作用、氨氮挥发、硝化-反硝化^[31]。本实验中分析发现低盐(小于 5.0‰)条件下香蒲对硝氮的去除率高于芦苇,但是当盐度为 15.0‰ 时香蒲对硝氮去除率则比芦苇小,此时由于香蒲不能耐受该盐度,叶绿素含量降低导致叶片枯萎发黄,根系活力降低,根部腐烂,根系微生物活性降低,不能高效率进行硝化-反硝化过程,导致对硝氮去除率降低;芦苇对氨氮的去除率强于

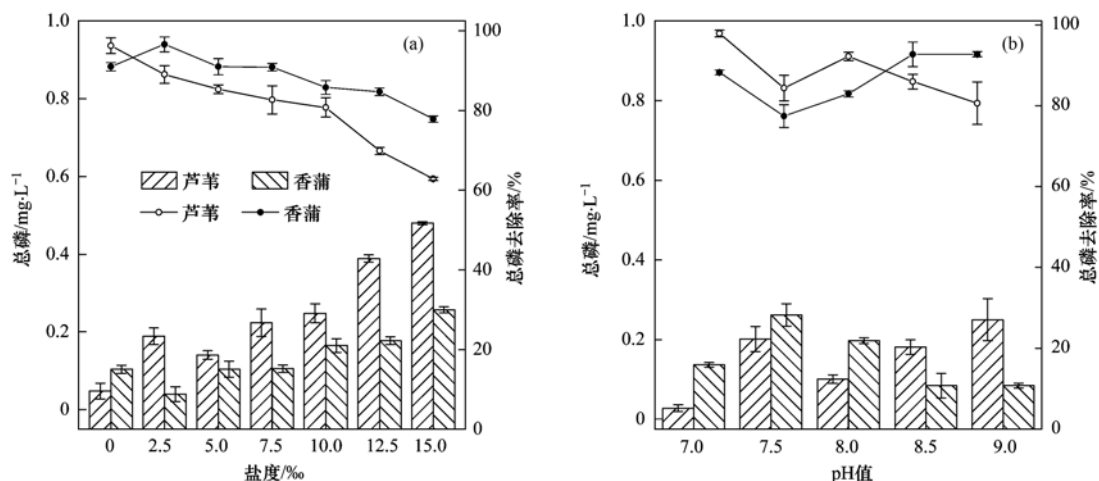


图3 盐碱胁迫下芦苇、香蒲对总磷的去除效果

Fig. 3 Removal efficiency of total phosphorus by *Phragmites australis* and *Typha angustifolia* under salt and alkali stress

香蒲,只有在盐度小于 12.5‰时,两种植物对氨氮的去除率都在 98% 以上,盐度为 15.0‰时才有所降低,可能说明两种植物对氨氮的去除主要靠氨氮的挥发作用,盐度梯度对氨氮的挥发影响不大;对总氮的去除率分析发现当盐度小于 2.5‰时轻微盐度刺激使芦苇根系活力增强,对总氮的去除率高于香蒲,但是当盐度大于 2.5‰时香蒲对总氮的去除率略高于芦苇,可能由于香蒲生物量稍大,对总氮的吸收量大。

盐胁迫下,芦苇植株体内通过调节细胞膜透性,分泌渗透调节物质等生理响应来适应不良环境^[32],从生理指标的变化可以看出,芦苇的耐盐性强于香蒲,而芦苇和香蒲对含氮物质去除率相差不大,盐分胁迫对香蒲的除氮效果的影响不大,而芦苇较好的耐盐性也没有提高除氮效果,可能盐胁迫对芦苇和香蒲去除含氮物质的影响较小。

3.1.2 耐碱性与除氮效果

盐胁迫对植物的影响主要通过离子毒害和渗透胁迫,而碱胁迫对植物的伤害一是通过影响植物根系的吸收功能,对植物造成伤害^[33];二是影响水中营养物质的存在形态和浓度,降低营养元素的有效性,水中 pH > 8.5 时,会使许多微量元素形成难溶性化合物而被固定,从而影响植物根系对营养物质的吸收,抑制植物健康生长^[34]。

从对水中含氮物质的去除实验可知,芦苇、香蒲对氮的净化效果随 pH 的不同有较大差距,pH > 8.5 时,由于正常发育的植物细胞各部分存在精确的 pH 调控,器官不同 pH 不同^[35],pH 的不同会造成各个细胞基质的酶活性需要的酸碱度不同^[36],叶

绿体基质的 pH 在 8.0 左右^[37],且此时,芦苇叶片发黄,不能合成光合作用所需要足够量的叶绿素,且高 pH 抑制根毛的形成,造成根部根系发黑腐烂,可能会滋生一些微生物,而微生物对氮的去除导致含氮物质的减少,从而造成芦苇对氮的去除率会出现回升;pH > 7.5 时,香蒲对氮的去除率会有一个增减波动,且有研究表明,当植物处于高 pH 的条件下时,细胞内酶活性受到影响而抑制植物生长^[38],pH 过高还会导致香蒲根毛部分细胞壁延伸停止,不但生长缓慢^[39],还影响植物对水分和养分的吸收。

3.2 芦苇、香蒲的耐盐碱性与除磷效果

3.2.1 耐盐性与除磷效果

无机磷在植物的吸收及同化作用下可转化为植物的 ATP、DNA 等有机成分,通过植物收割可以去除^[40,41]。由于香蒲植株生物量大,通过直接吸收污水中含磷物质,再加上香蒲根系错综复杂,须根较多,可以吸附含磷物质,或者通过根系微生物降解总磷从而使得盐度为 0‰时芦苇对总磷的处理效率较高,随盐度的升高,香蒲的对总磷的去除率较高。

3.2.2 耐碱性与除磷效果

由于香蒲能耐受的 pH 较低,而 pH > 7.5 时香蒲的去除率增加,加之此时香蒲根系活力不强,可能微生物的去除作用占较大比例,而芦苇对总磷的去除虽随着 pH 的升高出现降低趋势,结合分析芦苇在 pH 较高的条件并没有出现严重的根系发黑腐烂现象,说明芦苇能耐受较高 pH,但是此时芦苇根、叶、茎等细胞受到高 pH 环境的严重影响,已经不能形成新的细胞壁^[39],制造植物细胞分裂生长需要的能量,从而导致植株体生长非常缓慢,对污染物质的

去除率降低。综合来看,香蒲的耐碱性较弱,对总磷的净化效果较低。

4 结论

(1) 盐碱胁迫下,香蒲叶片中相对电导率增加迅速,细胞质膜透性受到的伤害严重,且渗透调节能力差,脯氨酸含量显著上升,光合作用及根系活力都低于芦苇,芦苇比香蒲耐盐碱且芦苇能耐受的盐碱分别为盐度小于 10.0‰,pH 低于 8.5,香蒲能耐受的盐碱分别为盐度小于 7.5‰,pH 低于 8.0。

(2) 氮、磷等物质的去除需要消耗植物生长所需的能量。盐度和 pH 越高,植物用来维持自身生存需要的能量变多,植物对氮、磷的净化效果相应变差。氨氮净化方面,由于芦苇耐盐碱性强于香蒲,净化效果强于香蒲;硝氮净化方面,香蒲生物量大,对硝氮的吸收利用可能较多,去除效果较好;总氮净化方面,盐胁迫下两种植物去除效果相差不大,碱胁迫下香蒲去除率高;总磷净化方面,盐胁迫下香蒲去除率高,碱胁迫下芦苇的去除率较高。

致谢:感谢中国海洋大学环境科学与工程学院水土污染分析实验室成员对采样及实验过程提供的帮助!

参考文献:

- [1] 牛东玲,王启基. 盐碱地治理研究进展[J]. 土壤通报, 2002, **33**(6): 449-455.
- [2] Chen W C, Cui P J, Sun H Y, *et al.* Comparative effects of salt and alkali stresses on organic acid accumulation and ionic balance of seabuckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) [J]. Industrial Crops and Products, 2009, **30**(3): 351-358.
- [3] Li R, Shi F, Fukuda K. Interactive effects of various salt and alkali stresses on growth, organic solutes, and cation accumulation in a halophyte *Spartina alterniflora* (Poaceae) [J]. Environmental and Experimental Botany, 2010, **68**(1): 66-74.
- [4] Munns R. Physiological processes limiting plant growth in saline soils: some dogmas and hypotheses [J]. Plant, Cell & Environment, 1993, **16**(1): 15-24.
- [5] 庄瑶,孙一香,王中生,等. 芦苇生态型研究进展[J]. 生态学报, 2010, **30**(8): 2173-2181.
- [6] 孙景宽. 黄河三角洲退化芦苇湿地生态修复技术研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2013. 7-10.
- [7] 江行玉,王长海,赵可夫. 芦苇抗镉污染机理研究[J]. 生态学报, 2003, **23**(5): 856-861.
- [8] 李愈哲,尹昕,魏维,等. 乡土植物芦苇对外来入侵植物加拿大一枝黄花的抑制作用[J]. 生态学报, 2010, **30**(24): 6881-6891.
- [9] 鲍芳,石福臣. 互花米草与芦苇耐盐生理特征的比较分析[J]. 植物研究, 2007, **27**(4): 421-427.
- [10] 孙博,解建仓,汪妮,等. 芦苇对盐碱地盐分富集及改良效应的影响[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(3): 92-101.
- [11] 钱鸣飞,李勇,黄勇. 芦苇和香蒲人工湿地系统净化微污染河水效果比较[J]. 工业用水与废水, 2008, **39**(6): 55-58.
- [12] 刘霄,唐婷芳子,黄岁樑,等. 4 种湿地植物的生长特性和污水净化效果研究[J]. 云南农业大学学报, 2013, **28**(3): 392-399.
- [13] 孙焕顷,范玉贞. 香蒲对水体的净化效应[J]. 安徽农业科学, 2007, **35**(21): 6576-6582.
- [14] 王凤永,郭朝晖,苗旭峰,等. 东方香蒲 (*Typha orientalis* Presl) 对重度污染土壤中 As、Cd、Pb 的耐性与累积特征[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(10): 1966-1971.
- [15] Nilratnisakorn S, Thiravetyan P, Nakbanpote W. Synthetic reactive dye wastewater treatment by narrow-leaved cattails (*Typha angustifolia* Linn.): effects of dye, salinity and metals [J]. Science of the Total Environment, 2007, **384**(1-3): 67-76.
- [16] 王振庆,王丽娜,吴大千,等. 中国芦苇研究现状与趋势[J]. 山东林业科技, 2006, (6): 85-74.
- [17] 孙瑞莲,张建,王文兴. 8 种挺水植物对污染水体的净化效果比较[J]. 山东大学学报(理学版), 2009, **44**(1): 12-16.
- [18] 黄雪方,李冬林,金雅琴,等. 5 种挺水植物对污水浸淹的生理反应及净水效果[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2012, **36**(5): 66-70.
- [19] 赵可夫,李法曾,樊守金,等. 中国的盐生植物[J]. 植物学通报, 1999, **16**(3): 201-207.
- [20] 汤显强,李金中,李学菊,等. 间歇曝气对人工垂直潜流湿地氮磷去除性能的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(4): 896-901.
- [21] 董树刚,吴以平. 植物生理学实验技术[M]. 青岛:中国海洋大学出版社, 2006. 47-48, 61-62.
- [22] 林莺,范海. 盐胁迫对二色补血草根系活力的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(27): 16598-16600.
- [23] 管博,于君宝,陆兆华,等. 黄河三角洲滨海湿地水盐胁迫对盐地碱蓬幼苗生长和抗氧化酶活性的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(8): 2422-2429.
- [24] Brown C E, Pezeshki S R, DeLaune R D. The effects of salinity and soil drying on nutrient uptake and growth of *Spartina alterniflora* in a simulated tidal system[J]. Environmental and Experimental Botany, 2006, **58**(1-3): 140-148.
- [25] 周婵,杨允菲. 松嫩平原两种趋异类型羊草实验种群对盐碱胁迫的水分响应[J]. 草业学报, 2003, **12**(1): 65-68.
- [26] Wang X P, Geng S J, Ri Y J, *et al.* Physiological responses and adaptive strategies of tomato plants to salt and alkali stresses[J]. Scientia Horticulturae, 2011, **130**: 248-255.
- [27] Tabot P T, Adams J B. Salt secretion, proline accumulation and increased branching confer tolerance to drought and salinity in the endemic halophyte *Limonium linifolium* [J]. South African Journal of Botany, 2014, **94**: 64-73.
- [28] Cha-um S, Supaibulwattana K, Kirdmanee C. Comparative effects of salt stress and extreme pH stress combined on

- glycinebetaine accumulation, photosynthetic abilities and growth characters of two rice genotypes [J]. *Rice Science*, 2009, **16** (4): 274-282.
- [29] 陈永华, 吴晓芙, 陈明利, 等. 人工湿地污水处理系统冬季植物的筛选与评价 [J]. *环境科学*, 2010, **31** (8): 1789-1794.
- [30] Yu Z X, Zhang Q, Yang H S, *et al.* The effects of salt stress and arbuscular mycorrhiza on plant neighbour effects and self-thinning [J]. *Basic and Applied Ecology*, 2012, **13** (8): 673-680.
- [31] 沈根祥, 胡宏, 姚芳, 等. 浮萍放养体系中氮的平衡与浮萍体内氮的亚细胞分布研究 [J]. *浙江大学学报 (农业与生命科学版)*, 2005, **31** (6): 731-735.
- [32] Yang C W, Shi D C, Wang D L. Comparative effects of salt and alkali stresses on growth, osmotic adjustment and ionic balance of an alkali-resistant halophyte *Suaeda glauca* (Bge.) [J]. *Plant Growth Regulation*, 2008, **56** (2): 179-190.
- [33] Li R, Shi F, Fukudab K. Interactive effects of salt and alkali stresses on seed germination, germination recovery, and seedling growth of a halophyte *Spartina alterniflora* (Poaceae) [J]. *South African Journal of Botany*, 2010, **76** (2): 380-387.
- [34] 胡霭堂. 植物营养学 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2000. 91-104.
- [35] Bai J H, Liu J H, Zhang N, *et al.* Effect of alkali stress on soluble sugar, antioxidant enzymes and yield of oat [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, **12** (8): 1441-1449.
- [36] Wang Y, Jiang G Q, Han N Y, *et al.* Effects of salt, alkali and salt-alkali mixed stresses on seed germination of the halophyte *Salsola ferganica* (Chenopodiaceae) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33** (6): 354-360.
- [37] Shi D C, Sheng Y M. Effect of various salt-alkaline mixed stress conditions on sunflower seedlings and analysis of their stress factors [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2005, **54** (1): 8-21.
- [38] Gong B, Wen D, Vandenlangenberg K, *et al.* Comparative effects of NaCl and NaHCO₃ stress on photosynthetic parameters, nutrient metabolism, and the antioxidant system in tomato leaves [J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, **157**: 1-12.
- [39] Jampeetong A, Brix H. Effects of NaCl salinity on growth, morphology, photosynthesis and proline accumulation of *Salvinia natans* [J]. *Aquatic Botany*, 2009, **91** (3): 181-186.
- [40] 蒋廷杰, 齐增湘, 罗军, 等. 人工湿地水质净化机理与生态工程研究进展 [J]. *湖南农业大学学报 (自然科学版)*, 2010, **36** (3): 356-362.
- [41] 李睿华, 管运涛, 何苗, 等. 河岸芦苇、茭白和香蒲植物带处理受污染河水中试研究 [J]. *环境科学*, 2006, **27** (3): 493-497.

CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>	(1141)
Regional Source Apportionment of PM _{2.5} in Beijing in January 2013	LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>	(1148)
Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(1154)
Soluble of Metals within TSP in Shanghai	CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>	(1164)
Analysis of Component Spectral Characteristics of PM ₁₀ -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen	ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>	(1173)
Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes	WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>	(1182)
Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014	BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(1187)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM _{2.5-10} in Mountain Background Region of East China in Spring	SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>	(1195)
Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves	YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>	(1202)
Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province	HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>	(1208)
Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen	YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>	(1217)
Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes	SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>	(1227)
Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards	ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1234)
Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen	JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i>	(1241)
Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport	ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long	(1249)
Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary	WANG Miao-miao, SUN Zhi-guo, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>	(1256)
Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>	(1263)
Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event	REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>	(1270)
Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources	ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai	(1277)
Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period	LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>	(1285)
Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary	CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>	(1293)
Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake	WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>	(1301)
Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond	YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>	(1309)
Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer	LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>	(1317)
Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study	ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>	(1326)
Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using γ Irradiation	ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>	(1332)
Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony	CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>	(1338)
Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation	SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>	(1345)
Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol	KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>	(1352)
Photolysis of Gaseous HNO ₃ on the α -Fe ₂ O ₃ Films Under 308 nm UV Light	LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>	(1359)
Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode	HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>	(1365)
Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis	XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>	(1374)
Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i>	MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>	(1379)
Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water	LI Jing, LI Wen-ying	(1385)
Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process	LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>	(1392)
Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>	(1399)
Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1406)
Effects of Total Nitrogen and BOD ₅ /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor	YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>	(1412)
Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinpo Mountain, Chongqing	SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>	(1417)
Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province	ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1425)
Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain	SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil	WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>	(1437)
Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions	DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1445)
Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County	QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>	(1453)
Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure	WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>	(1461)
Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead	CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>	(1468)
Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling	XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>	(1474)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content	GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>	(1481)
A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area	CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>	(1489)
Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase	WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1497)
Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs	WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>	(1507)

《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)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 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. 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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行