

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,齐珩,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)

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

(内蒙古大学环境与资源学院, 呼和浩特 010021)

摘要: 采用温室盆栽实验的方法, 研究接种 *Claroideoglomus etunicatum* (CE)、*Rhizophagus intraradices* (RI)、*Funneliformis mosseae* (FM) 和 *Glomus versiforme* (GV) 对非盐渍化和盐渍化湿地土壤上芦苇 (*Phragmites australis*) 菌根侵染率、生物量、矿质营养吸收、C:N:P 生态化学计量比和 Na^+ 、 Cl^- 含量的影响, 旨在为我国湿地生态系统的生态恢复和盐碱化修复提供理论依据和技术支持。结果表明, 在 2 种湿地土壤上 4 种 AM 真菌的平均菌根侵染率为 2.5% ~ 38%, 接种 CE 的侵染率显著高于其它接种处理; 盐渍化湿地土壤上芦苇菌根侵染率与非盐渍化湿地土壤间无显著性差异, 非盐渍化湿地土壤芦苇生物量、矿质营养元素的吸收显著高于盐渍化湿地土壤, 而 Na^+ 和 Cl^- 的含量显著低于盐渍化湿地土壤。对于非盐渍化湿地土壤, 接种 GV 处理显著增加了芦苇地上部的干重, 促进了芦苇地上部对 N、P、K、Ca 和 Mg 等 5 种营养元素的吸收, 接种 GV 和 RI 则显著促进了芦苇根部对 P 和 K 的吸收; 4 种接种处理显著降低了芦苇地上部 N:P, 接种 FM 和 GV 显著降低了根部 C:N 和 C:P; 4 种接种处理也显著降低了芦苇地上部 Cl^- 的含量, 接种 RI 处理显著降低了芦苇地上部 Na^+ 的含量。对于盐渍化湿地土壤, 4 种接种处理对芦苇生物量、矿质营养吸收和 Na^+ 、 Cl^- 的含量均没有显著性影响。结果也表明, AM 真菌对于不同含盐量湿地土壤芦苇生长的影响表现出不同的菌根效应, 在非盐渍化湿地土壤上对芦苇生长的有益作用明显好于盐渍化湿地土壤。应结合相应的技术措施进一步通过野外实地实验筛选接种效果好的 AM 真菌菌种, 探讨菌根技术对不同含盐量湿地土壤上芦苇生长的实际作用。

关键词: 丛枝菌根真菌; 盐渍化; 湿地土壤; 芦苇

中图分类号: X171; X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1481-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.04.048

Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content

GUO Jiang-yuan, GUO Wei*, BI Na, FU Rui-ying, ZHAO Wen-jing, ZHAO Ren-xin, WANG Li-xin

(College of Environment and Resources, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

Abstract: A greenhouse pot experiment was conducted to investigate the effects of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi *Claroideoglomus etunicatum* (CE), *Rhizophagus intraradices* (RI), *Funneliformis mosseae* (FM) and *Glomus versiforme* (GV) on AM colonization rate, biomass, mineral nutrient uptake, C:N:P ratios and Na^+ and Cl^- concentrations of reeds (*Phragmites australis*) grown in saline and non-saline wetland soils. The aim was to provide a technical basis for the ecological revegetation and salinity restoration of wetland ecosystem. The results indicated that symbiotic associations were successfully established between the four isolates and reeds grown in the two types of wetland soils. The average AM colonization rates ranged from 2.5% to 38%. The mean root colonization rate of CE was significantly higher than those of the other three isolates. There were no significant differences in root colonization rates between saline and non-saline wetland soils. The biomass and nutrient contents of reeds grown in non-saline wetland soils were significantly higher than those grown in saline wetland soils. However, Na^+ and Cl^- concentrations of reeds grown in non-saline wetland soils were significantly lower than those grown in saline wetland soils. In non-saline wetland soils, inoculation with GV significantly increased the shoot dry weight and the shoot N, P, K, Ca and Mg contents of reeds. Inoculation with GV and RI significantly improved the root P and K contents of reeds. Inoculation with the four AM fungi significantly reduced the shoot N:P ratios. Inoculation with FM and GV significantly reduced the root C:N and C:P ratios. Inoculation with the four AM fungi significantly reduced the shoot Cl^- concentrations. Inoculation with RI significantly reduced the shoot Na^+ concentrations. In saline wetland soils, inoculation with AM fungi had no significant effect on the biomass, mineral nutrient uptake and Na^+ and Cl^- concentrations of reeds. The results demonstrated that the four AM fungi isolates had different effects on the growth of reeds in wetland soils with different salt contents. Inoculation with AM fungi played a more positive role in improving the growth of reeds in non-saline wetland soil than those in saline wetland soil. Further experiments should be conducted to screen optimal AM fungi isolates under field conditions and to evaluate the practical effects of AM fungi on the growth of reeds in wetland soils with different salt contents.

Key words: arbuscular mycorrhizal fungi; salinization; wetland soil; reed

收稿日期: 2014-09-14; 修订日期: 2014-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(31200421, 41461071); 内蒙古自然科学基金项目(2012MS0603); 国家科技支撑计划项目(2011BAC02B03)

作者简介: 郭江源(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为湿地生态恢复、土壤污染控制与治理技术, E-mail: 1024820863@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: guowei-1976-z@hotmail.com

湿地生态系统是指天然或人工、长久或暂时的沼泽地、泥炭地、静止或流动的淡水、半咸水、咸水水域,包括低潮时水深不超过 6 m 的海水区^[1]. 湿地被称为地球之肾,具有多种独特的生态功能^[2,3],是全球最有价值和生产力最高的生态系统^[4]. 2013 年第二次全国湿地资源调查结果显示,我国自然湿地面积减少了 337.62 万 hm^2 ,减少率为 9.33%^[5]. 造成湿地面积不断减少的一个主要原因是湿地土壤的盐碱化. 以松嫩平原为例,三分之二以上的沼泽湿地发生次生盐渍化,盐碱湿地面积约 57.8 万 hm^2 ,并且以每年 1%~3% 的惊人速度在增加^[6]. 湿地土壤的盐渍化会造成植物细胞膜系统的不可逆损伤,导致细胞新陈代谢过程的中断,致使湿地植物细胞生命活动趋于停止^[7],加速了湿地的退化过程. 因此,采取适当的措施进行湿地的保护和修复已迫在眉睫.

在湿地保护与综合治理的过程中,工程措施以及生态技术措施是目前国内外采取的解决湿地生态破坏与环境污染的主要途径. 但是,由于这些措施本身的一些局限性,如容易造成二次污染、费用过高以及需要不断地进行维护等,限制了这些措施的实际应用^[8~10]. 因此,探寻一种新的既经济又环保的湿地保护与治理措施非常必要. 丛枝菌根 (arbuscular mycorrhizal, AM) 是陆地生态系统一种分布广泛、功能多样的古老共生结构,AM 真菌在陆地植被生态系统中的分布、特点及功能等已有很多研究,并对其在陆生植物生长、养分吸收及抗盐碱等逆境胁迫方面的作用及机理有了充分的认识^[11]. 然而,目前国内外有关 AM 真菌对湿地植物生长、营养元素吸收、抗逆境胁迫和抗污染能力方面的研究还较少^[12~14],其在湿地生态系统中所具有的重要作用及功能尚不十分清楚. 因此,开展 AM 真菌对湿地植物生长及抗逆性方面尤其是在抗盐碱方面的研究具有重要的理论与现实意义.

本研究主要针对目前我国湿地生态系统所面临的生态破坏和盐碱化问题,利用 AM 真菌本身的生理生态特性,采用温室盆栽实验的方法,探讨接种 4 种 AM 真菌对非盐渍化和盐渍化湿地土壤上芦苇 (*Phragmites australis*) 菌根侵染率、生物量、矿质营养吸收、C:N:P 生态化学计量比和 Na^+ 、 Cl^- 吸收的影响,分析接种 AM 真菌对两种不同含盐量湿地土壤环境下芦苇生长的作用,评价将 AM 真菌应用于湿地植被恢复和盐渍化治理中所能发挥的潜在作用,旨在为我国湿地生态系统的保护和恢复提供理

论依据和技术支持.

1 材料与方法

1.1 培养基质

供试的 2 种类型湿地土壤均采自内蒙古巴彦浩特市的乌梁素海湿地. 乌梁素海南北长 35 km~40 km,东西宽 5 km~10 km,面积约 293 km^2 . 在乌梁素海湿地的周边选取含盐量较低的非盐渍化湿地土采样点 ($\text{N}40^\circ 41' 36.66''$, $\text{E}109^\circ 56' 34.86''$,海拔 1 021 m) 和含盐量较高的盐渍化湿地土采样点 ($\text{N}40^\circ 56' 46.38''$, $\text{E}108^\circ 56' 49.74''$,海拔 1 037 m),采集 0 cm~20 cm 的表层湿地土壤作为研究对象. 采集的湿地土壤首先经过自然风干,然后过 2 mm 土壤筛,在 121℃ 条件下高压蒸汽灭菌 2 h,以杀灭土著的 AM 真菌. 2 种湿地土壤的基本理化性质见表 1.

表 1 2 种湿地土壤的基本理化性质

基质	非盐渍化湿地土	盐渍化湿地土
pH	7.11	7.17
有机质/%	0.42	0.39
全 N/%	0.031	0.038
全 P/%	0.045	0.036
全 K/%	0.29	1.87
速效 N/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	53.3	82.4
速效 P/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	13.74	10.24
速效 K/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	71.53	85.0
电导率/ $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$	0.29	4.05
盐分含量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	<1.0	3.0~5.0

1.2 供试植物和菌种

供试植物为禾本科芦苇 (*Phragmites australis*), 芦苇幼苗 (10 cm 左右) 采于 4 月份乌梁素海湿地. 种植前先将芦苇幼苗根部的土壤清洗干净,选取大小一致的苗进行移植. 实验用 AM 真菌为扩繁后的幼套球囊霉 (*Claroideoglomus etunicatum*, CE, BBC XJ03C, 1511C0001BGCAM0018, 265 个孢子/10 g)、根内球囊霉 (*Rhizophagus intraradices*, RI, BGC HK02D, 1511C0001BGCAM0042, 369 个孢子/10 g)、摩西球囊霉 (*Funneliformis mosseae*, FM, BGC NM01A, 1511C0001BGCAM0023, 282 个孢子/10 g)、地表球囊霉 (*Glomus versiforme*, GV, BGC GD01C, 1511C0001BGCAM0031, 310 个孢子/10 g), 菌种由北京市农林科学院营养与资源所微生物室提供,接种菌剂是以玉米 (*Zea mays* L.) 和白三叶草 (*Trifolium repens* L.) 为宿主植物进行扩大繁殖而获得的内含真菌孢子、菌丝以及宿主植物根段等繁殖

体的根际沙土混合物。

1.3 实验设计

实验采用生物学盆栽法在温室内进行,设置不接种对照 CK、接种 CE、RI、FM 和 GV 共 5 种处理,每个处理设 6 个重复,2 种湿地土壤基质共计 60 盆。以塑料小桶(上口径 18 cm,下口径 14 cm,高 18 cm)作为培养容器。每盆装湿地土壤 3 000 g,采用层接法将 75 g 菌剂接种于土壤表面下 2 cm 左右。不接种处理采用相同方法加入等量的灭菌菌剂。为保证植物能获得充足的养分,在种植前以溶液形式向土壤中加入基础肥料: N 为 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, P 为 $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, K 为 $71.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Mg 为 $4.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Ca 为 $20.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Zn 为 $1.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Mn 为 $3.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cu 为 $0.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Mo 为 $0.00935 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

选择长势一致的芦苇每盆移栽 6 株,待其成活后,每盆保留 3 棵长势相近的植物。实验在内蒙古大学温室内进行,白天温度为 $20 \sim 35^{\circ}\text{C}$,夜间温度为 $10 \sim 20^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 20% ~ 70%。实验期间自然采光,采用称重法每天定期为植物补水,前 30 d 土壤基质的含水量维持在田间最大持水量的 100%,接下来的 60 d 土壤基质保持淹水 3 cm,植物移栽后生长 90 d 收获。

1.4 样品制备及分析测定

收获时,将芦苇地上部自茎基部剪下,蒸馏水洗净, 70°C 烘干,称重。先用自来水洗净芦苇根系土壤,然后用蒸馏水冲洗 3 次, 70°C 烘干,称重。在收获时随机选取 1.0 g 新鲜根段保存于 50% 的乙醇中,用于测定菌根侵染率。测定时,将根系样品用 0.05% 台盼蓝于乳酸甘油溶液中染色,保存、制片,利用根段频率法计算菌根侵染率。植物样品烘干称重后进行粉碎处理,每个样品称取 2 ~ 3 mg 利用元素分析仪 (Vario ELIII, CHNOS Elemental Analyzer, Elementar Co Germany) 测定 C 和 N 元素含量。称取 0.5 g 左右的植物样品加入 5 mL 优级纯 HNO_3 于 120°C 条件下开放式消解,制备待测溶液。利用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES, Optima 7000DV, PerkinElmer USA) 测定消解液中 P、K、Ca、Mg 和 Na 等离子的含量,用 PTSJ-216 型离子分析仪 (上海雷磁) 氯离子选择电极测定 Cl 离子的含量。

1.5 数据分析

所有实验数据利用 Excel 2003 进行平均值和标准误差的计算,SPSS 17.0 软件进行统计分析,邓肯氏新复极差检验法 (Duncan's multiple range test,

DMRT) 检验各处理平均值之间的差异显著性,差异显著水平为 $P < 0.05$,而呈现非正态分布的数据(菌根侵染率)经过反正弦转换后再以同样方法进行分析。

2 结果与分析

2.1 接种 AM 真菌对芦苇菌根侵染率和生物量的影响

实验结果表明(表 2),2 种含盐量湿地土壤基质上未接种处理根系中均未发现 AM 真菌的侵染。对于接种处理,接种 CE 的侵染率显著高于接种 RI、FM 和 GV 的处理,平均为 35% 左右,而其它 3 种接种处理均低于 10% ($P < 0.05$)。在非盐渍化与盐渍化湿地土壤间,4 种 AM 真菌对芦苇根部的侵染率没有显著性差异 ($P < 0.01$ 和 $P < 0.05$)。非盐渍化湿地土壤芦苇地上部生物量和总生物量显著高于盐渍化湿地土壤,根部生物量及根冠比无显著性差异。在非盐渍化湿地土壤上,与对照处理相比仅接种 GV 处理显著的增加了芦苇地上部干重 ($P < 0.05$),其它 3 种接种处理对芦苇地上部、根部、根冠比和总干重均没有显著性影响;与 CE 比较,接种 GV 显著的增加了芦苇地上部干重并显著降低了根冠比,其它各接种处理间芦苇地上部、根部和总干重差异不显著。对于盐渍化湿地土壤,4 种接种处理对芦苇地上部、根部、根冠比和总干重均没有显著性影响,各接种处理之间也没有显著性差异。在非盐渍化湿地土壤上,AM 真菌接种处理对芦苇生长的促进作用要显著高于盐渍化湿地土壤。

2.2 接种 AM 真菌对芦苇植株 N、P、K、Ca 和 Mg 吸收量的影响

AM 真菌对芦苇地上部和根部 N、P、K、Ca 和 Mg 吸收量的影响如表 3、4 所示。非盐渍化湿地土壤芦苇地上部 N、P、K 和 Ca 的吸收量要显著高于盐渍化湿地土壤(表 3, $P < 0.05$),芦苇根部 N、P 和 K 的吸收量也显著高于盐渍化湿地土壤(表 4, $P < 0.05$)。对于非盐渍化湿地土壤,与对照和接种 CE 处理相比,接种 GV 处理显著地增加了芦苇地上部 N、P、K、Ca 和 Mg 等 5 种元素的吸收量(表 3, $P < 0.05$);与接种 FM 处理相比,接种 GV 处理显著地增加了芦苇地上部 N、P 和 K 的吸收量(表 3, $P < 0.05$)。与对照处理相比,接种 RI 和 GV 处理对芦苇根部 P 和 K 的吸收量有显著的促进作用(表 4, $P < 0.05$),接种 RI 处理也显著增加了芦苇根部 Mg 的吸收量(表 4, $P < 0.05$);与接种 CE 和 FM 处理相比,接种 GV 显著的增加了根部 P 和 K 的吸收量。

对于盐渍化湿地土壤,4 种接种处理对芦苇地上部和芦苇根部 N、P、K、Ca 和 Mg 等 5 种元素的吸收量均没有显著性影响,接种处理之间也没有显著性差异. 除了 CE 接种处理外,非盐渍化湿地土壤上其它 3 种接种处理对于芦苇地上部 N、P、K、Ca 和 Mg 等 5 种元素吸收量的促进作用均明显高于盐渍

化湿地土壤(表 3, $P < 0.05$),分别为 48.8% ~ 249.2% 和 0.9% ~ 113.2%;而非盐渍化湿地土壤上 4 种接种处理对于芦苇根部 P 和 K 元素吸收量的促进作用也明显高于盐渍化湿地土壤(表 4, $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$),分别为 4.9% ~ 403.7% 和 -32.1% ~ 59.3%.

表 2 接种 AM 真菌对 2 种湿地土壤芦苇菌根侵染率和生物量的影响¹⁾

Table 2 Effect of inoculation with AM fungi on mycorrhizal colonization and biomass of reed grown in two types of wetland soils

基质	接种	菌根侵染率 /%	地上部干重 /g·pot ⁻¹	根部干重 /g·pot ⁻¹	根冠比	总干重 /g·pot ⁻¹
非盐渍化湿地土	CK	0.00 ± 0.00 c	1.20 ± 0.66 b	1.63 ± 0.65 a	1.84 ± 0.44 ab	2.699 ± 1.159 a
	CE	32.75 ± 5.58 a	0.84 ± 0.12 b	2.26 ± 0.80 a	2.53 ± 0.63 a	3.100 ± 0.917 a
	RI	6.08 ± 1.34 b	2.56 ± 0.87 ab	3.30 ± 0.62 a	1.41 ± 0.20 ab	5.857 ± 1.470 a
	FM	9.34 ± 1.72 b	1.72 ± 0.47 ab	1.51 ± 0.20 a	0.95 ± 0.18 b	3.226 ± 0.643 a
	GV	7.83 ± 0.67 b	3.21 ± 0.52 a	2.51 ± 0.34 a	0.80 ± 0.12 b	5.719 ± 0.793 a
盐渍化湿地土	CK	0.00 ± 0.00 c	0.81 ± 0.04 a	1.65 ± 0.57 a	1.99 ± 0.62 ab	2.464 ± 0.597 a
	CE	37.83 ± 7.91 a	0.88 ± 0.15 a	2.23 ± 0.55 a	2.60 ± 0.55 a	3.105 ± 0.617 a
	RI	6.67 ± 1.46 b	1.21 ± 0.26 a	1.96 ± 0.20 a	1.76 ± 0.34 ab	3.177 ± 0.438 a
	FM	8.17 ± 3.92 b	1.03 ± 0.31 a	1.13 ± 0.01 a	1.33 ± 0.41 ab	2.162 ± 0.308 a
	GV	2.50 ± 0.76 bc	1.23 ± 0.32 a	1.08 ± 0.43 a	0.88 ± 0.28 b	2.312 ± 0.656 a
显著性分析	基质 (S)	NS	* *	NS	NS	*
	接种 (I)	* * *	*	NS	* *	NS
	S × I	NS	NS	NS	NS	NS

1) 表中数据为 6 次重复的平均值 ± 标准误差,同一列中对于同一基质不同字母表示在 $P < 0.05$ 显著水平差异显著; * 为 $P < 0.05$,表示差异显著; ** 为 $P < 0.01$,表示差异非常显著; *** 为 $P < 0.001$,表示差异极显著; NS 表示无显著性差异,下同

表 3 接种 AM 真菌对 2 种湿地土壤芦苇地上部 N、P、K、Ca 和 Mg 吸收量的影响/mg·pot⁻¹

Table 3 Effect of inoculation with AM fungi on shoot N, P, K, Ca and Mg contents of reed/mg·pot⁻¹

基质	接种	N	P	K	Ca	Mg
非盐渍化湿地土	CK	19.90 ± 7.73 c	1.52 ± 0.62 c	20.03 ± 6.29 bc	7.57 ± 3.86 b	2.15 ± 0.92 b
	CE	17.88 ± 2.98 c	1.68 ± 0.28 c	15.53 ± 1.27 c	5.39 ± 1.19 b	1.55 ± 0.31 b
	RI	52.06 ± 10.53 ab	4.63 ± 0.95 ab	49.57 ± 16.86 ab	16.28 ± 4.21 ab	4.32 ± 1.31 ab
	FM	33.57 ± 8.25 bc	3.37 ± 0.79 bc	34.44 ± 11.88 bc	11.96 ± 3.59 ab	3.20 ± 0.88 ab
	GV	65.89 ± 6.80 a	6.07 ± 0.33 a	69.95 ± 6.08 a	19.73 ± 4.11 a	5.52 ± 0.91 a
盐渍化湿地土	CK	17.33 ± 0.35 a	1.36 ± 0.08 a	13.53 ± 1.98 a	6.69 ± 1.47 a	2.30 ± 0.52 a
	CE	18.65 ± 3.64 a	1.76 ± 0.22 a	15.30 ± 3.27 a	5.63 ± 0.856 a	2.07 ± 0.45 a
	RI	27.68 ± 7.05 a	2.41 ± 0.59 a	21.29 ± 3.15 a	9.33 ± 2.59 a	3.57 ± 0.87 a
	FM	24.13 ± 9.58 a	2.14 ± 0.72 a	20.79 ± 6.27 a	6.75 ± 2.89 a	2.34 ± 0.87 a
	GV	28.72 ± 7.77 a	2.90 ± 0.93 a	24.83 ± 7.11 a	7.63 ± 2.13 a	2.87 ± 0.74 a
显著性分析	基质 (S)	* *	* *	* *	*	NS
	接种 (I)	* *	* * *	* *	*	*
	S × I	NS	NS	NS	NS	NS

2.3 接种 AM 真菌对芦苇植株 C:N:P 生态化学计量比的影响

对于非盐渍化和盐渍化湿地土壤,芦苇地上部和根部 C:N、C:P 和 N:P 均没有显著性差异(数据未在文章中给出). 对于非盐渍化湿地土壤,4 种接种处理与对照相比显著降低了植株地上部 N:P ($P < 0.05$),对 C:N 和 C:P 比无显著性影响;接种 FM 和 GV 处理显著地降低了芦苇根

部 C:N 和 C:P ($P < 0.05$),接种 CE 和 RI 处理对 C:N、C:P 和 N:P 均无显著性影响. 对于盐渍化湿地土壤,除接种 GV 处理与对照相比显著降低了植株地上部 C:P ($P < 0.05$),4 种接种处理对芦苇地上部和根部 C:N、C:P 和 N:P 均无显著影响. 在非盐渍化湿地土壤上,4 种接种处理对于芦苇 C:N:P 的调节作用要好于盐渍化湿地土壤.

表 4 接种 AM 真菌对芦苇根部 N、P、K、Ca 和 Mg 吸收量的影响/mg·pot⁻¹

Table 4 Effect of inoculation with AM fungi on root N, P, K, Ca and Mg contents of reed/mg·pot⁻¹

基质	接种	N	P	K	Ca	Mg
非盐渍化湿地土	CK	9.37 ±4.64 a	0.29 ±0.04 c	2.95 ±1.31 c	5.09 ±2.54 a	1.59 ±0.98 b
	CE	12.91 ±4.69 a	0.59 ±0.21 bc	5.64 ±1.07 bc	9.45 ±3.25 a	3.04 ±0.98 ab
	RI	18.73 ±4.00 a	1.00 ±0.22 ab	11.88 ±3.52 ab	13.12 ±2.60 a	4.83 ±1.08 a
	FM	9.83 ±1.84 a	0.61 ±0.021 bc	7.28 ±1.12 bc	5.36 ±0.92 a	2.14 ±0.46 ab
	GV	16.53 ±2.26 a	1.30 ±0.17 a	14.86 ±2.22 a	9.28 ±1.88 a	3.14 ±0.51 ab
盐渍化湿地土	CK	9.06 ±2.96 a	0.29 ±0.07 a	2.63 ±0.65 a	6.27 ±2.278 a	2.46 ±0.87 a
	CE	10.08 ±2.73 a	0.44 ±0.16 a	4.19 ±1.36 a	8.25 ±2.25 a	3.41 ±0.80 a
	RI	12.05 ±2.73 a	0.39 ±0.08 a	4.05 ±0.71 a	7.43 ±0.96 a	3.11 ±0.34 a
	FM	6.46 ±0.28 a	0.39 ±0.12 a	2.99 ±0.57 a	5.13 ±0.60 a	2.11 ±0.23 a
	GV	6.66 ±3.30 a	0.43 ±0.23 a	3.42 ±1.38 a	3.56 ±1.57 a	1.67 ±0.69 a
显著性分析	基质 (S)	*	* *	* * *	NS	NS
	接种 (I)	NS	*	* *	NS	NS
	S × I	NS	NS	*	NS	NS

2.4 接种 AM 真菌对芦苇植株 Na⁺ 和 Cl⁻ 含量的影响

AM 真菌对芦苇地上部和根部 Na⁺ 和 Cl⁻ 含量的影响如表 5 所示。非盐渍化湿地土壤上芦苇地上部和根部 Na⁺ 和 Cl⁻ 的含量显著低于盐渍化湿地土壤 ($P < 0.05$)。在非盐渍化湿地土壤上 4 种接种处

理均显著降低了芦苇地上部 Cl⁻ 的含量,接种 RI 处理显著降低了地上部 Na⁺ 的含量; 4 种接种处理对于芦苇根部 Na⁺ 和 Cl⁻ 的含量没有产生显著性的影响。在盐渍化湿地土壤上, 4 种接种处理对于芦苇地上部和根部 Na⁺ 和 Cl⁻ 的含量均没有产生显著性的影响。

表 5 接种 AM 真菌对芦苇植株 Na⁺ 和 Cl⁻ 浓度的影响/mg·g⁻¹

Table 5 Effect of inoculation with AM fungi on Na⁺ and Cl⁻ concentrations of reed/mg·g⁻¹

基质	接种	地上部		根部	
		Cl ⁻	Na ⁺	Cl ⁻	Na ⁺
非盐渍化湿地土	CK	0.07 ±0.00 a	1.37 ±0.06 a	0.06 ±0.00 a	0.81 ±0.16 a
	CE	0.06 ±0.00 bc	1.16 ±0.12 ab	0.05 ±0.00 a	1.15 ±0.32 a
	RI	0.06 ±0.00 b	0.98 ±0.08 b	0.05 ±0.00 a	1.13 ±0.13 a
	FM	0.06 ±0.00 bc	1.12 ±0.13 ab	0.05 ±0.00 a	1.28 ±0.21 a
	GV	0.05 ±0.00 c	1.08 ±0.10 ab	0.05 ±0.00 a	1.30 ±0.17 a
盐渍化湿地土	CK	0.08 ±0.02 a	11.60 ±3.42 a	0.11 ±0.04 a	4.71 ±0.23 a
	CE	0.06 ±0.00 a	10.46 ±1.58 a	0.08 ±0.01 a	4.70 ±0.77 a
	RI	0.07 ±0.00 a	9.79 ±1.57a	0.14 ±0.05 a	4.47 ±0.48 a
	FM	0.07 ±0.00 a	6.98 ±0.04 a	0.09 ±0.00 a	5.71 ±0.47 a
	GV	0.07 ±0.01 a	6.02 ±0.86 a	0.10 ±0.02 a	4.89 ±0.18 a
显著性分析	基质 (S)	*	* * *	* *	* * *
	接种 (I)	NS	NS	NS	NS
	S × I	NS	NS	NS	NS

3 讨论

侵染率是表示 AM 真菌与宿主植物之间亲和力的重要指标,能衡量其生态适应性^[15]。实验结果表明 4 种 AM 真菌与 2 种湿地土壤的芦苇根部均建立了共生关系,菌根侵染率在 2.5% ~ 38% 之间,但除了接种 CE 之外其它 3 种 AM 真菌的菌根侵染率均较低。这与 Jayachandran 等^[16]对湿地植物锯齿草 (*Pennell gratiolaciliata* Colsm.) 的研究结果相似,其根部侵染率为 0% ~ 41%。Wang 等^[17]对红树林

(*Rhizophoraceae*) 的研究也显示其菌根侵染率较低,平均只有 11.5%。湿地植物菌根侵染率较低的原因可能是 AMF 生长发育过程对氧气的要求比较严格,而湿地生态系统中土壤氧气含量较低^[18],另外淹水导致的氧分压降低,也会使得湿地植物根部真菌丰度下降^[19]; 而且多数单子叶植物不形成典型的 AMF 结构,且整体侵染率水平较低,也可能是原因之一^[20]。本研究中,选取了 2 种盐分含量 (<1‰ 和 3‰ ~ 5‰) 的湿地土壤,相同接种处理下的芦苇菌根侵染率没有显著差异,表明湿地土壤盐分含量对

AM 真菌的侵染并没有产生显著性影响,这与鄱金灼的研究结果相似^[21]。然而, Saint-Etienne 等^[22]的研究表明紫椴属植物 (*Pterocarpus officinalis*) 在湿地环境中,当盐分浓度 < 10‰ 时对菌根侵染率没有显著影响,当盐分浓度 > 10‰ 时菌根侵染率会随着盐分浓度的升高而显著降低。这些研究结果表明,湿地土壤盐分含量对植物菌根侵染率的影响具有一定的阈值范围。与其它 3 种菌种相比,接种 CE 处理对芦苇有较高的侵染率,表明 CE 对 2 种湿地土壤具有较好的生态适应性。Lekberg 等^[23]认为不同菌种对湿地植物的侵染方式、增长速度、寄主专一性和耐受性不同,这使得它们对不同环境表现出不同的生态适应性。

非盐渍化湿地土壤上芦苇的生物量和植物矿质营养元素的吸收均显著高于盐渍化湿地土壤,表明湿地土壤的盐分含量对植物的生长和营养元素的吸收产生了一定的抑制作用。胡志宏等^[24]对水稻 (*Oryza sativa* L.) 的研究表明盐分胁迫会抑制植物的生长以及矿质营养元素 P 和 K 的吸收。土壤盐分浓度的增加对植物生长的抑制作用,可能是由于在盐胁迫下大量的 Na^+ 和 Cl^- 被植物吸收,造成植物细胞内 Na^+ 和 Cl^- 的快速积累,引起水分胁迫,导致许多酶类的变性和失活,从而使植物受害^[25]。本研究结果显示,接种 GV 处理显著增加了非盐渍化湿地土壤芦苇地上部生物量,并显著促进了芦苇地上部 N、P、K、Ca、Mg 和根部 P、K 的吸收。Miller 等^[26]在湿地植物 *Panicum hemitomon* 上接种 AM 真菌与不接种相比,P、Ca 和 Mg 等营养元素的吸收增加了 20% 左右。Solaiman 等^[27,28]田间试验的研究结果显示,接种球囊霉属菌根真菌 (*Glomus* spp.) 的水稻 (*Oryza sativa* L.) 谷物产量比没有接种的高 14% ~ 21%,对 N 和 P 等营养元素的吸收也增加了 20% 左右。4 种 AM 真菌接种处理在非盐渍化湿地土壤对芦苇生长和营养元素吸收的促进作用高于盐渍化湿地土壤,这与 Yamato 等^[29]的研究结果是一致的,即 AM 真菌对湿地植物生长的有益作用会受到盐分含量的影响。对于 2 种湿地土壤,具有较高侵染率的 CE 接种处理并没有显著促进芦苇的生长,而侵染率较低的 GV 却显著增加了非盐渍化湿地土壤芦苇地上部干重。Evelin 等^[30]对葫芦巴 (common fenugreek seed) 的研究表明 AM 真菌促进植物生长的作用并不依赖于菌根侵染率。Olsson 等^[31]认为 AM 真菌对植物生长的促进作用与菌根侵染率不一致的状况,可能与菌根共生关系中的成本效益不平

衡有关。这是由于 AM 真菌与植物形成共生结构后,作为共生结构的植物为 AM 真菌提供有机营养,表现为植物的 C 消耗,AM 真菌为植物提供无机营养元素供其生长发育,表现为植物的 C 积累,当 AM 真菌对植物有益的 C 积累作用小于其造成的 C 消耗时,不利于植物的生长,表现为成本效益不平衡。因此,AM 真菌对于湿地土壤上芦苇生长效应的影响可能是由菌种、盐分含量和生长条件等共同决定的。

生态化学计量学是指生态过程和生态相互作用中多种化学元素和能量平衡的科学,它主要研究 3 种元素 C、N 和 P 之间的关系^[32]。生长速率假设是生态化学计量学的核心思想,认为随着植物生长速率的不断加快,生物体需要向富含 P 的核糖体和 rRNA 投资更多的 P 元素以促进蛋白质的合成,这样植物体内 N 和 P 浓度逐渐增加,而 P 增加的更快,C:P 与 N:P 比会随之降低^[33]。本研究结果表明,接种 AM 真菌能够调节芦苇地上部和根部的 C:N:P 生态化学计量比。对于非盐渍化的湿地土壤,4 种接种处理均显著降低了芦苇地上部 N:P,接种 FM 和 GV 显著降低了根部 C:P,这主要是由于芦苇植株中 P 浓度显著增加所致的,符合生长速率假设。

王树凤等^[34]对沿海滩涂植物弗吉尼亚栎 (*Quercu virginia*) 的研究表明其对 Na^+ 和 Cl^- 的吸收随盐分含量的增加显著增加。闫道良等^[35]的研究也发现随着盐浓度的增加,海滨锦葵 (*Kosteletzkya virginica*) 中 Na^+ 的含量明显增加。本研究结果同样表明,盐渍化湿地土壤上芦苇地上部和根部 Na^+ 和 Cl^- 的含量也显著高于非盐渍化土壤湿地土壤,增加率分别为 276% ~ 899% 和 0 ~ 180%。在非盐渍化湿地土壤上,4 种接种处理显著降低了芦苇地上部 Cl^- 的含量,接种 RI 显著降低了地上部 Na^+ 的含量;而 4 种处理对盐渍化湿地土壤芦苇地上部和根部 Na^+ 和 Cl^- 的含量均没有产生显著性的影响。目前,接种 AM 真菌对于湿地植物 Na^+ 和 Cl^- 吸收的影响并没有得出一致的结论。张义飞等^[36]研究表明接种地球囊霉 *Glomus geosporum* 显著地降低羊草 (*Leymus chinensis*) 对 Na^+ 和 Cl^- 的吸收,这可能与 AM 真菌促进植物生长,稀释了植株体内的 Na^+ 和 Cl^- 的浓度有关。而当土壤盐分浓度为 2 ~ 3 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的情况下,接种摩西球囊霉 *Glomus mosseae* 则显著地促进了棉花 (*Gossypium* spp.) 对 Na^+ 和 Cl^- 的吸收,这可能是由于虽然 AM 真菌促进了两种盐离子的吸收,但其对于营养元素吸收的促进作用更加明

显,从而降低了菌根化植株体内盐离子的相对含量,有利于减轻盐离子毒害作用^[37]。另外,李涛^[38]对湿地植物碱蓬(*Suaeda salsa* L.)的研究显示接种 *Glomus mosseae* 显著降低了其地上部 Na^+ 和 Cl^- 的含量,而对根部 Na^+ 和 Cl^- 的含量有显著的促进作用。Mohammad 等^[39]的实验表明在高盐分浓度下 AM 真菌能够显著降低大麦(*Hordeum vulgare* L.)对 Na^+ 和 Cl^- 的吸收,而在低盐分浓度情况下却没有产生显著性的影响。这些研究结果表明,接种 AM 真菌对植物体 Na^+ 和 Cl^- 吸收的影响可能与菌种、植物品种、基质盐分浓度等多种因素有关。

本研究表明,AM 真菌对湿地植物芦苇的接种效应会受到包括菌种、水分和土壤含盐量等多种因素的影响。AM 真菌在非盐渍化湿地土壤上表现出了对芦苇生长的促进作用,体现出了一定的菌根效应,但是湿地土壤盐分含量的增加在一定程度上抑制了 AM 真菌对芦苇生长的有益作用。因此,在进一步研究中一方面要扩大 AM 真菌菌种的筛选范围,获得对于盐渍化湿地土壤接种效果明显的菌种类型,另一方面也应该开展野外实地实验研究菌根技术在不同含盐量湿地土壤中对芦苇生长的实际作用,从而为湿地生态破坏和盐碱化问题的修复提供理论依据和技术支持。

4 结论

(1) 在 2 种湿地土壤上,4 种 AM 真菌和芦苇均建立了共生关系,菌根侵染率在 2.5% ~ 38% 之间,其中 CE 表现出较好的生态适应性,盐渍化湿地土壤芦苇菌根侵染率与非盐渍化湿地土壤间无显著性差异。

(2) 对于非盐渍化湿地土壤,接种 GV 显著地促进了芦苇的生长和矿质营养元素的吸收,接种 4 种 AM 真菌显著降低了芦苇植株 C:N:P 生态化学计量比和地上部 Cl^- 的含量,接种 RI 显著降低了芦苇地上部 Na^+ 的含量;4 种 AM 真菌对盐渍化湿地土壤上芦苇的生长、矿质营养元素吸收以及 Na^+ 和 Cl^- 含量的影响均没有达到显著性水平。

(3) 湿地土壤盐分含量的增加显著抑制了芦苇的生长和 AM 真菌的接种效应,AM 真菌对非盐渍化湿地土壤上芦苇生长的促进作用要优于盐渍化湿地土壤。

参考文献:

[1] 张建龙. 湿地公约履约指南[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001. 1-228.

- [2] 刘婧. 中国湿地资源研究综述[J]. 资源与产业, 2007, 9(4): 21-23.
- [3] 张苹, 马涛. 湿地生态系统服务价值评估的国内研究评述[J]. 湿地科学, 2011, 9(2): 203-208.
- [4] Moreno-Mateos D, Power M E, Comin F A, et al. Structural and functional loss in restored wetland ecosystems [J]. PLoS Biology, 2012, 10(1): e1001247.
- [5] 耿国彪. 我国湿地保护形势不容乐观——第二次全国湿地资源调查结果公布[J]. 绿色中国, 2014, (3): 8-11.
- [6] 邓春暖, 章光新, 潘响亮. 莫莫格湿地不同盐分梯度对芦苇生理生态的影响[J]. 河南农业科学, 2012, 41(5): 61-64, 73.
- [7] 苏芳莉, 李海福, 陈曦, 等. 盐胁迫对芦苇细胞超微结构的影响[J]. 西北植物学报, 2011, 31(11): 2216-2221.
- [8] 王小雨, 冯江, 胡明忠. 湖泊富营养化治理的底泥疏浚工程[J]. 环境保护, 2003, (2): 22-23.
- [9] 张淑霞, 周虹霞, 陈静. 湖滨湿地恢复方案研究综述[J]. 环境科学导刊, 2012, 31(2): 46-51.
- [10] 彭军, 边艳勇, 朱少杰. 湿地的生态恢复研究综述[J]. 广东化工, 2012, 39(9): 133-135.
- [11] 鄢金灼, 武发思, 冯虎元. 湿地植物与丛枝菌根真菌(AMF)相互关系的研究进展[J]. 西北植物学报, 2008, 28(4): 836-842.
- [12] Ahmed F R S, Alexander I J, Mwinyihija M, et al. Effect of superphosphate and arbuscular mycorrhizal fungus *glomus mosseae* on phosphorus and arsenic uptake in lentil (*Lens culinaris* L.) [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2011, 221(1-4): 169-182.
- [13] Kawahara A, Ezawa T. Characterization of arbuscular mycorrhizal fungal communities with respect to zonal vegetation in a coastal dune ecosystem [J]. Oecologia, 2013, 173(2): 533-543.
- [14] 李敏, 陈琳, 肖燕, 等. 丛枝真菌对互花米草和芦苇氮磷吸收的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3960-3969.
- [15] 王晓英, 王冬梅, 陈保冬, 等. 丛枝菌根真菌群落对白三叶草生长的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(6): 1456-1462.
- [16] Jayachandran K, Shetty K G. Growth response and phosphorus uptake by arbuscular mycorrhizae of wet prairie sawgrass [J]. Aquatic Botany, 2003, 76(4): 281-290.
- [17] Wang Y T, Qiu Q, Yang Z Y, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi in two mangroves in south China [J]. Plant and Soil, 2010, 331(1-2): 181-191.
- [18] Carvalho L M, Correia P M, Caçador I, et al. Effects of salinity and flooding on the infectivity of salt marsh arbuscular mycorrhizal fungi in *Aster tripolium* L. [J]. Biology and Fertility of Soils, 2003, 38(3): 137-143.
- [19] Wolfe B E, Mummey D L, Rillig M C, et al. Small-scale spatial heterogeneity of arbuscular mycorrhizal fungal abundance and community composition in a wetland plant community [J]. Mycorrhiza, 2007, 17(3): 175-183.
- [20] Weishampel P A, Bedford B L. Wetland dicots and monocots differ in colonization by arbuscular mycorrhizal fungi and dark septate endophytes [J]. Mycorrhiza, 2006, 16(7): 495-502.
- [21] 鄢金灼. 苏干湖湿地芦苇丛枝菌根真菌生态学研究[D]. 兰

- 州: 兰州大学, 2008. 1-57.
- [22] Saint-Etienne L, Paula S, Imberta D, *et al.* Arbuscular mycorrhizal soil infectivity in a stand of the wetland tree *Pterocarpus officinalis* along a salinity gradient [J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, **232**(1-3): 86-89.
- [23] Lekberg Y, Koide R T, Rohr J R, *et al.* Role of niche restrictions and dispersal in the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities [J]. *Journal of Ecology*, 2007, **95**(1): 95-105.
- [24] 胡志宏, 黄晶心, 杜书佳, 等. 盐胁迫下丛枝菌根对植物幼苗生长和营养元素吸收的影响[J]. *上海师范大学学报(自然科学版)*, 2010, **39**(3): 309-314.
- [25] 柴民伟. 外来种互花米草和黄顶菊对重金属和盐碱胁迫的生态响应[D]. 天津: 南开大学, 2013. 1-127.
- [26] Miller S P, Sharitz R R. Manipulation of flooding and arbuscular mycorrhiza formation influences growth and nutrition of two semiaquatic grass species [J]. *Functional Ecology*, 2000, **14**(6): 738-748.
- [27] Solaiman M Z, Hirata H. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation of rice seedlings at the nursery stage upon performance in the paddy field and greenhouse [J]. *Plant and Soil*, 1997, **191**(1): 1-12.
- [28] Solaiman M Z, Hirata H. *Glomus* - wetland rice mycorrhizas influenced by nursery inoculation techniques under high fertility soil conditions [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, **27**(1): 92-96.
- [29] Yamato M, Ikeda S, Iwase K. Community of arbuscular mycorrhizal fungi in a coastal vegetation on Okinawa island and effect of the isolated fungi on growth of sorghum under salt-treated conditions [J]. *Mycorrhiza*, 2008, **18**(5): 241-249.
- [30] Evelin H, Giri B, Kapoor R. Contribution of *Glomus intraradices* inoculation to nutrient acquisition and mitigation of ionic imbalance in NaCl-stressed *Trigonella foenumgraecum* [J]. *Mycorrhiza*, 2012, **22**(3): 203-217.
- [31] Olsson P A, Rahm J, Aliasgharzad N. Carbon dynamics in mycorrhizal symbioses is linked to carbon costs and phosphorus benefits [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2010, **72**(1): 123-131.
- [32] 陈梅梅, 陈保冬, 王新军, 等. 不同磷水平土壤接种丛枝菌根真菌对植物生长和养分吸收的影响[J]. *生态学报*, 2009, **29**(4): 1980-1986.
- [33] Matzek V, Vitousek P M. N:P stoichiometry and protein: RNA ratios in vascular plants: an evaluation of the growth-rate hypothesis [J]. *Ecology Letters*, 2009, **12**(8): 765-771.
- [34] 王树凤, 胡韵雪, 孙海菁, 等. 盐胁迫对2种栎树苗期生长和根系生长发育的影响[J]. *生态学报*, 2014, **34**(4): 1021-1029.
- [35] 闫道良, 余婷, 徐菊芳, 等. 盐胁迫对海滨锦葵生长及 Na⁺、K⁺ 离子积累的影响[J]. *生态环境学报*, 2013, **22**(1): 105-109.
- [36] 张义飞. 松嫩平原盐碱化草地丛枝菌根真菌资源及其生态作用的研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2011. 1-83.
- [37] 冯固, 张福锁. 丛枝菌根真菌对棉花耐盐性的影响研究[J]. *中国生态农业学报*, 2003, **11**(2): 21-24.
- [38] 李涛. AM 真菌对不同盐生植物抗盐性的影响[D]. 济南: 山东师范大学, 2009. 1-61.
- [39] Mohammad M J, Malkawi H I, Shibli R. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus fertilization on growth and nutrient uptake of barley grown on soils with different levels of salts [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2003, **26**(1): 125-127.

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