

DOI: 10.5846/stxb201408211660

刘家艳,曹敏,唐许,杨晓红,黄先智,秦俭.桑及菌根桑在库区消落带的生态重建功能及应用潜力.生态学报,2016,36(1): - .

Liu J Y, Cao M, Tang X, Yang X H, Huang X Z, Qin J. Ecological reconstruction function and potential application of mulberry and mycorrhizal mulberry in the Three Gorges Reservoir area. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(1): - .

桑及菌根桑在库区消落带的生态重建功能及应用潜力

刘家艳^{1,3}, 曹 敏¹, 唐 许¹, 杨晓红^{1,*}, 黄先智², 秦 俭²

1 南方山地园艺学教育部重点实验室, 西南大学农学部园艺园林学院, 重庆 400716

2 西南大学蚕学与系统生物学研究所, 重庆 400716

3 重庆市南山植物园管理处, 重庆 400065

摘要:三峡工程在提供丰富水电资源造福人类的同时,也引发了一些生态环境问题,对库区环境、生物、气候以及人们的生活都产生了不同程度的影响。桑树休眠和生长发育节律与库区水体涨落规律的反向偶联,桑的菌根结构在改善根际土质量,促进桑树水分和养分吸收,增强桑树对盐碱、干旱、重金属的耐受性,提高幼苗的存活率,促进桑苗生长,促进植物群落正向演替等生态过程中发挥着重要的作用。本文分析了三峡库区消落带周期性水淹的生态特征和岸生植物生态恢复障碍,综述了桑及菌根桑在消落带的生态特性和应用潜力,最后提出了菌根桑生物技术的应用所面临的新课题和挑战。

关键词:AM 真菌;生态重建;消落带;桑;三峡库区

Ecological reconstruction function and potential application of mulberry and mycorrhizal mulberry in the Three Gorges Reservoir area

LIU Jiayan^{1,3}, CAO Min¹, TANG Xu¹, YANG Xiaohong^{1,*}, HUANG Xianzhi², QIN Jian²

1 Key Laboratory of Horticulture Science for Southern Mountainous Regions, Ministry of Education, College of Horticulture and Landscape Architecture, Department of Agriculture, Southwest University, Chongqing 400716, China

2 Institute of Sericulture and Systems Biology, Southwest University, Chongqing 400716, China

3 Nanshan Botanical Garden, Chongqing 400065, China

Abstract: The construction of the Three Gorges Dams in the Yangtze River in the 1990s has induced profound impacts on the environment and biodiversity in the reservoir region, although these hydroelectric dams have supplied an enormous amount of hydropower resources and electricity to all of China. One main example of such environmental effects is the gradual degeneration or death of plants under waterlogging or flooding along the reservoir areas after implementation of the dams. The river banks, which serve as hydro-fluctuation belts, have been annually fluctuated for three to six months at a time, leading to low soil fertility and high erodibility. Meanwhile, some adaptive vegetation with low water-holding capacity has persisted in the drought soil. However, these distinctive characteristics are major restoration obstacles in the hydro-fluctuation belt area, even for plants with strong vitality. Mulberry (*Morus alba* L.), a plant native to China, has not only economic importance to the Chinese silk industry but also ecological benefits to its plantation regions in China. Studies have shown that mulberry trees have strong ecological adaptation ability and ecological restoration potential, as they are able to hold water and prevent soil erosion with their extensive root systems. These traits facilitate mulberry survival in harsh environments, particularly when they have established symbiotic associations with beneficial soil microorganisms such as arbuscular mycorrhizal (AM) fungi. On the other hand, the application of AM fungi to ecological restoration has been

基金项目:现代农业产业技术体系专项(CARS-22-ZJ0503);重庆市研究生教育教学改革研究项目(yjg143028)

收稿日期:2014-08-21; **修订日期:**2015-07-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangxh2@swu.edu.cn

recently proposed. In general, AM fungi and their massive underground hyphal networks could enhance the uptake of plant nutrients and water, formation of soil aggregates, and resistance to biotic and abiotic stresses. Studies have further shown that AM fungi have significant impacts on the soil microflora community and on plant community compositions. As a result, mulberry trees colonized by AM fungi could have the capacity to improve the soil rhizosphere quality, promote the uptake and transportation of minerals and water, and enhance the tolerance to drought and waterlogging. Therefore, mycorrhizal mulberry could promote leaf development and tree performance for the food resource of silk worms as well as function in ecological restoration on the river bank areas of the Three Gorges Reservoir. As the growth rate of mulberry is inversely related to fluctuations of water level in the reservoir, the planting of AM fungi-colonized mulberry trees is considered to be a potential ecological restoration strategy to deal with both the waterlogging in winter or early spring and the drought in summer at the fluctuation belts or in other fragile ecosystems of the Three Gorges Reservoir. In this paper, we review the ecological characteristics and plant growth obstacles faced during the water fluctuation period on the river banks along the Three Gorges Reservoir areas of the Yangtze River, and then propose the potential application of the mycorrhizal mulberry for ecological reconstruction of the hydro-fluctuation belts of these areas.

Key Words: Arbuscular mycorrhizal fungi; ecological reconstruction; hydro-fluctuation belt; mulberry; Three Gorges Reservoir

三峡库区消落带是指由于水位周期性涨落而使库区周边被淹土地周期性出露于水面而形成的 30m 落差的水陆系统交互地带。三峡水库在蓄水发电、防洪航运等方面发挥出的效益已经明了,在退水成陆期间所具有的大农业开发利用价值也很清楚^[1]。然而,消落带存在严重的生态环境问题不容忽视,尤其是固土护岸的木本植物稀少、生物多样性受损、水土流失严重等已成为库区消落带亟待解决的重大科学问题^[2]。因此,探索适应三峡库区消落带生态环境、兼具生态效应和经济效应的生态修复机制、模式和途径显得非常重要。

丛枝菌根真菌(Arbuscular Mycorrhizal Fungi, AM Fungi 或 AMF)是自然界水陆交替系统中广泛存在的一种有益土壤微生物,能够与 90% 以上的有花植物形成菌根共生体^[3]——丛枝菌根(Arbuscular Mycorrhiza, AM),能促进植物对矿质营养尤其是磷等的吸收^[4-6],将宿主植物接种 AMF 的菌根技术应用到矿区^[7]、石漠化^[8]等地区,植株成活率高、植被生长良好,生态修复作用显著。桑树(*Morus alba* L.)是三峡水库建成以前该地区广泛种植的特种经济林木之一,广泛应用于桑蚕业、饲料、食品、医疗保健等领域,具有较大的经济价值;据报道桑在防风固沙、治理水土流失、绿化环境等生态治理方面效果显著^[9-10],具有较强的生态适应性。调查发现,桑树是三峡库区消落带能存活的极少数木本植物之一,可望作为三峡水库生态屏障区的建设树种。然而,消落带成陆后植桑时,恶劣的环境使得桑幼苗存活率低,难于成林^[11]。

库区自然生长桑树的菌根侵染率在 16% 左右^[12],证明桑树是典型的丛枝菌根植物。借助菌根技术在库区 171.5m 高程区植桑,菌根桑苗成活率可达到 75.0%,高出对照一倍多^[11]。由此推测,菌根桑生物共生机制可能是库区消落带生态修复的有效机制,在消落带种植菌根桑可能具备生态环境治理和促进库区经济发展的综合优势。因此,本文在概述三峡库区消落带生态特征基础上,对桑及菌根桑在库区消落带的生态恢复能力作了较为系统的综述,进一步明确桑和菌根桑在修复脆弱生态环境方面的作用,最后提出了菌根桑生物修复技术的应用研究所面临的新课题与挑战,望能为库区消落带植被恢复、防治水土流失和生态重建提供有价值的参考。

1 消落带生态重建状况

1.1 消落带生态重建的研究进展

国内外关于消落带土地资源利用以及生态重建的研究十分活跃。国外花了很多时间研究消落带水流动力学和景观变化,并跨学科研究太平洋沿岸热带雨林生态系统和人类社会经济系统的长期健康发展^[13]。在

湿地河岸进行植被修复时需考虑洪水干扰、植被带、植被演替、土壤基质、种植密度、种植技术和合适的生态管理系统^[14]以及河岸具体位置^[15]等多种因素,综合分析,选择合适的植被。近年来,三峡库区消落带水土流失严重,非点源污染逐年呈上升趋势,因此减少耕地,控制农业非点源污染,发展生态农业,重建绿色生态屏障成为研究的热点和难点^[16-17],同时探索了多种不同的生态修复模式,例如将香根草(*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash)与工程综合技术相结合^[18],一致认为:三峡库区植被修复的关键问题是需要优先选育出既具有生态效益也具有经济效益的耐水淹树种,提高植物的存活率。

1.2 消落带生态恢复存在的主要障碍

1.2.1 秋冬淹水长久,夏季高温干旱

三峡库区消落带植物要经受长达半年的水淹,植物长期处于水淹状态导致根部缺氧^[19],由缺氧所产生的乙醇、乙酸、乳酸积累会影响植物根部生理代谢^[20],抑制植物生长,长期的酒精积累会导致岸生植物大批死亡。在7—8月,库岸植被必须忍耐高温缺水的极端环境。极端水淹和极端高温干旱条件的交替胁迫,使得植被覆盖率大幅降低,给当地生态恢复治理工作带来了巨大困难。

1.2.2 水土流失严重,土壤营养贫瘠

三峡库区是我国水土流失最为严重的地区之一,其水土流失面积约5.1万km²,每年流失的泥沙总量达1.4亿t,占长江上游泥沙的26%,平均土壤侵蚀模数3000t km⁻² a⁻¹,中度和极强度侵蚀达43.5%^[21]。以水土流失比较严重的重庆段为例^[22],重庆市三峡库区年土壤侵蚀总量达8923.9万t,平均土壤侵蚀模数高达3739 t km⁻² a⁻¹,其中开县^[2]每年从小江流失泥沙1585万t,大部分为强度和中度侵蚀。库区土壤以紫色土为主,土壤有机质含量少,结构差,水稳定性不好,N、P流失率较高,其中N肥、P肥的土壤残留率平均分别为31.17%、13.24%^[2,23]。三峡库区水土流失严重导致土壤贫瘠,养分大量亏损,土地生产力下降,对当地居民赖以生存的土地资源产生了较强的破坏力。

1.2.3 适生植被少,生态稳定性低

三峡水库运行后,消落带植被发生重大变化,原有高大乔木或灌木大量退化和消亡,剩下一些草本植物和小灌木组成的低矮稀疏植被,这些植被大多数因难以适应水淹及水淹以后的干旱等恶劣生境而死亡^[24]。三峡库区耐水淹树种陆续有人报道,例如秋华柳(*Salix variegata* Franch)^[25]、桑树^[11]、池杉(*Taxodium ascendens*)、落羽杉(*Taxodium distichum*)^[26]、中华蚊母(*Distylium racemosum*)、疏花水柏枝(*Myricaria laxiflora*)^[27]、墨西哥落羽杉(*Taxodium macronatum*)和花叶杞柳(*S. integra* 'Hakuro Nishiki')^[28]等。但是,到目前为止,树冠经受3—6个月的水淹后仍能存活的植物报道罕见。笔者团队前期调查结果^[11]显示在消落带140—169m高程区种植的桑苗全部死亡,170—171m高程桑苗存活率为7.8%,而在172—175m高程桑苗的整株存活率达到87.0%。适应库区消落带环境的耐淹植物较少,减缓了消落带植被恢复的速度。

2 桑在库区消落带的生态适应性与生态修复潜力

2.1 消落带桑树资源及经济价值

我国幅员辽阔,桑树种质资源丰富,分布广泛,且具有较高的经济价值,可供不同生态条件下的地区选栽。其中在消落带170m高程存活桑品种有白皮荆桑、粤桑10号、桂桑优12号、桂桑优62号,但是种植桑苗在170—171m高程区的成活率并不高,相较而言,白皮荆桑和粤桑10号在消落带种植的成活率较高;留存的桑树大多用于采摘桑叶养蚕或养羊,在172—175m高程区新建的饲料桑桑园的桑叶年产量达45t/hm²,产值近3万元/hm²^[11]。

2.2 桑树在消落带地区生态适应性强

桑树属多年生阔叶木本植物,根系发达,枝叶繁茂,萌芽能力强,生长快,具有顽强的生命力和适应性,生命期长,容易成林^[29]。桑树的耐反季节水淹特性与消落带水位季节性涨落的特殊生境反相耦合,是消落带出露地表后最早生长的灌木,具有耐涝、耐渍、耐旱的生理优势^[30]。同时,桑树对于氯污染、以及铅、镉等大气金

属污染物具有较强的吸滞能力,为一级抗性树种^[31-32],近年来在环境治理方面逐渐展示出其巨大的生态修复潜力。因此,在消落带选择生态适应强、具有一定经济价值、能为当地农民创收的桑树作为造林树种具有重要意义。

2.3 桑的水土保持功能

2.3.1 涵养水源,减轻干旱胁迫

桑树能够有效截持降水、吸收和调节地表径流、提高土壤渗透速度、减小地表径流、增加蓄水保水性能。山地桑园土壤的土壤贮存水量和毛管最大持水量分别是空旷地的 1.03 倍和 1.15 倍,而渗透速度和渗透系数分别为 1.91 倍和 3.07 倍,且这种差距随着桑树年龄的增长而增加;即使根系死亡,腐烂的根系仍能增加土壤孔隙度,提高土壤蓄水保水能力^[33-34]。建立生态桑园,可显著降低土壤侵蚀程度,提高土壤保水能力,在同样坡度的陡坡耕地上,栽桑比种植粮食作物可减少水土流失 50%以上^[35]。

2.3.2 固土保土,减少土壤流失

桑树根系庞大,侧根多,水平根和垂直根的综合配置构成一个立体交互式固土网络,有效固持土壤^[34]。史东梅^[36]等在坡地上相隔一定距离密集种植桑树,将农作物种植在桑树之间的种植带上,在这种桑基植物篱模式下,土壤抗蚀性提高,表层土团聚度和团聚状况分别较传统种植模式提高 25.2%和 50.6%,径流量和径流系数降低 10.34%—20.00%,侵蚀量减少 55.23%—67.84%,径流含沙量减少了 48.6%—59.8%,这说明栽桑能有效减少土壤流失,尤以侵蚀量和径流含沙量的减少和降低更为明显。

3 菌根桑在库区消落带地区生态修复潜力

3.1 AMF 适应湿地生态系统

AMF 是生态系统中生物多样性的的重要组成部分,具有十分丰富的物种多样性、遗传多样性和功能多样性,在独特的植物种类与特殊生态条件的长期影响下,AMF 会演化成各自不同的优势种群^[37]。AMF 广泛存在湿地生态系统,例如生长在海岸边浅水区的印度红树林植物^[38]、广西钦州湾大风江河口的海漆、桐花树和秋茄^[39]等水生湿地植物均有菌根报道,其中在钦州湾红树林^[39]、福建红树林植物^[40]根系中观察到了大量的 AM 真菌结构,如丛枝、根内菌丝(胞间菌丝、膨大扭曲的胞内菌丝)、泡囊等。AMF 能促进红树林植物对 N、P、K 的吸收,增加植物的株高、直径和生物量,从而显著改善植物生长^[41]。研究^[42-43]表明,AMF 是红树林生境重要的组成部分,具有丰富的多样性,其中在红树林生境中三种(半)红树植物根内共获得 23 个 AMF 的种系型,这种湿地生境中 AMF 的多样性水平甚至高于大部分已报道的陆地生态系统中 AMF 的多样性,而淹水强度可能是决定 AMF 在红树林生态系统中多样性以及分布特征最重要的影响因子^[43]。在三峡库区消落带,调查研究发现库区自然生长桑树不同程度地被 AMF 侵染^[12],这说明库区消落带的确存在着一定种类和数量的 AMF,它们能够适应消落带的湿生环境。

3.2 桑对 AM 真菌依赖性强

桑树根尖上的根毛及其短小,须借助体积微小、数量巨大、可长达数米的菌根根外菌丝吸收营养和水分,因此,许多生境中的桑都对 AMF 有高度的依赖性,例如喀斯特石漠化地区桑树对 AMF 依赖性最高可达到 203.03%^[44]。研究表明接种 AMF 能显著扩大桑叶面积,提高桑树叶片的质量、含水量以及 P 吸收量,其中桑树所需磷总量的 80%可通过 AMF 获得^[45]。舒玉芳^[12]等在调查三峡库区海拔 170—175m 区域自然生长桑树的根系与 AMF 共生形成菌根情况时发现,库区桑树根系 82%左右的根尖不同程度被 AMF 侵染形成菌根,菌根内有菌丝、丛枝、泡囊、孢子等结构;并通过盆栽桑苗接种 AMF 研究菌根对桑苗生长的促进作用验证了桑菌根的共生关系,表明丛枝经过形成-消解-再形成的变化,与桑根皮层细胞良性互作,形成可持续性的相互依存的共生关系,提高桑根系吸收能力,显著促进桑苗的生长。

3.3 菌根桑适应库区消落带生态环境

接种 AMF 后,桑树的耐淹、抗旱能力都得到显著提高。研究表明 AMF 可以增加植物根系的酶及非酶抗

氧化产物^[46]、增强桑苗根系活力、提高叶片保护酶活性和光和效率、增加叶片渗透物质含量、增强桑树抵御干旱胁迫的能力^[47],使其能够忍耐高达 -0.49Mpa (20%PEG6000 处理)的水分胁迫^[48];对于消落带春冬季潮湿、夏季干旱的特殊生境,菌根桑的生长发育节律与库区水体的涨落规律反向偶联,具有超强的生存适应性。笔者所在团队将接种与不接种桑苗移栽到三峡库区 171.5m 处,水淹 3 个月,在生长季节调查移栽一年后的桑苗,接种苗与对照苗存活率分别为 75.0%和 34.0%^[11],栽植两年后调查,第一年存活的菌根苗全部存活,没有死亡,存活率达到 100%,生长旺盛,表明桑树的耐淹能力会随着树龄的增长而增强,对照桑苗多数死亡,即使存活,长势也显著低于菌根苗。因此,认为菌根桑是适应消落带春冬季潮湿、夏季干旱特殊生境的生态重建植物。

3.4 菌根桑在三峡库区的生态修复潜力

尽管桑树本身已经具有较强的生态适应性和生态修复能力,但是接种 AMF 后,菌根感染率提高,桑的生态修复能力得到进一步加强,在对土壤生态修复和对植被生态修复方面尤其显著。

3.4.1 菌根桑促进消落带土壤修复

(1) 增加土壤团聚体结构,改良土壤理化性质

消落带土壤受到水库水位涨落的重力侵蚀和波浪冲击,土壤密度增加,土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度减少,这种影响作用随着消落带水位涨落次数的累加正逐年加强^[24]。研究表明丛枝菌根菌丝网络能够促进土壤团聚体的形成与稳定^[49],接种 AMF 能显著增加土壤中 1—2mm 水稳性团聚体比例、土壤中蛋白质和有机碳含量以及菌丝密度,从而显著改善土壤团聚体稳定性,在植物根际形成更好的土壤结构^[50]。菌丝形成的网络系统能将小团聚体连成稳定的大团聚体,菌丝片段和真菌孢子通过为土壤微生物群落提供基质而充当核生境,从而维持土壤的大团聚体的结构稳定性^[51-52]。因此,在自然生态系统中,丛枝菌根将土壤小粒子变成微聚体、微聚体变成团聚体,利用小孔从土壤基质中吸收水分、通过空气流通改善土壤的理化性质^[52]。

(2) 吸附土壤金属离子,提高植物抗重金属毒害

受人们生活以及周边工厂的影响,三峡库区重金属的迁移与累积影响着消落带土壤质量。研究表明,库区土壤重金属 As($>19.0\text{mg/kg}$)、Cd($>0.38\text{mg/kg}$)含量超标,远高于当地土壤背景值,库区蔬菜、茶叶、鱼等农畜产品中 Pb、Cd 超标较严重,Hg 污染程度相对轻微^[23,53]。针对重金属污染的环境修复,可以利用土著的或外源的 AMF,调节菌根化植物的生长和对重金属的吸收与转运,从而达到强化修复重金属污染土壤的目的^[54]。丛枝菌根可以通过回避重金属^[55]、螯合重金属、菌丝和孢子固持作用等途径抑制重金属的移动性^[54]。AMF 能抑制 Cd、Cs 从根转移到地上枝叶而积累在根内组织中从而提高宿主耐性,减轻地上枝叶中的重金属含量^[56-57]和在生物链中的快速迁移。AMF 对 Zn、Cd、Mn 三种元素中 Cd 的吸附能力最强,吸附量要高于其它土壤微生物以及在生物吸附中常用的真菌少根根霉(*Rhizopus arrhizus*)^[58]。菌根可能通过调节根际中的金属形态来阻止过量金属进入植物,提高植物对过量金属污染的抗性^[59],或通过螯合过量的 Zn 和 Cd^[60]、分泌球囊霉素(glomalin)等固持一定量的重金属^[61],抵抗重金属对植物的毒害作用。

3.4.2 菌根桑促进湿地植物群落正向演替

菌根真菌影响植物种群的竞争能力,其多样性决定着植物的生物多样性、生态系统的变化以及植物的生产力^[3]。大规模种植桑树有助于减少温室气体排放、保护森林、维持生物多样性^[62];且 AMF 能够促进营养元素的可持续循环^[63]、改变土壤微生物群落组成,同时能够直接影响宿主生理机能以及能源摄取等,从而影响整个生态系统^[64]。在受到湿地环境多种不良因素胁迫条件下,AMF 仍能广泛存在于湿地红树林根系中,根外菌丝形成密集的菌丝网或菌丝桥,将许多原本独立、甚至没有亲缘关系的植物菌根化并联系起来,在抵制恶劣环境中扩大生存空间^[65],且经常被洪水淹没的地方 AMF 具有更丰富的多样性^[66]。现有的研究证据强有力地证明:AMF 能在湿地或水陆交替出现的恶劣环境中生存,其菌株能自主、快速而广泛地在湿生环境中建立生物修复机制^[67],通过直接影响幼苗的生长发育进而显著改变植物种群结构^[68],对当地植物群落组成以

及生态系统的演替产生积极影响。菌丝能给植物之间提供直接的联系,促进植物之间化学营养元素的转移,且通过扩大生物活性区域,增加化感物质在自然系统中的有效性,增强土壤中的化学传递过程^[69-70],从而对植物竞争关系模式和强度产生影响,间接影响植物群落,使得群落中物种多样性和均匀度发生变化^[71],促进生态系统良性循环。消落带生态治理中的主要障碍因子是植被退化、物种稀少以及水分、营养分配不均,桑的超强生态适应性、AMF 的物种多样性、菌丝的广泛联系和物质、能量的传输功能将为消落带生态恢复带来新的突破口,这对于库区消落带生物多样性的恢复、植物群落的稳定和正向演替将发挥重要作用。

综上所述,AMF、桑树各自对于干旱或湿地等极端生态系统的较好适应特性,以及桑树对 AMF 的高度依赖性,决定了菌根桑共生复合体在库区消落带的强大生命力,决定了它们在涵养水源、防止水土流失、改善土壤理化性质、降低重金属危害、促进植物群落的正向演替等方面将会产生积极贡献,生态桑与菌根生物技术的结合使得库区消落带的生态修复与重建有了新的思路与途径,对三峡库区消落带的脆弱生态系统具有巨大的生态修复潜力。因此,桑和菌根桑对库区脆弱生态系统的恢复与平衡将产生重要的积极作用,以菌根桑为防护植被在消落带生态修复与重建中的应用前景广阔。

4 展望

菌根桑在国内外各领域的研究还不多,研究也不够深入,尤其是在 AMF 菌剂的大规模生产上有待更大的突破,因此在三峡库区消落带大面积应用尚有一定的距离。目前,也还有一些理论问题尚未解决:(1)桑和 AMF 均是品种繁多,不同品种的桑对不同的 AMF 的亲合力,如何组合最适应消落带生境?(2)菌根桑的耐淹和生态修复机理研究不详,尤其是缺乏分子水平的研究。在长期水淹过程中,AMF 的存活形式及供氧来源是什么?退水后的桑树根系复活过程中,AMF 与桑树是如何互作及如何促进菌根桑恢复生长的?(3)在水淹和退水条件下,AMF 与桑根际其它有益微生物之间有相互作用吗?是共同促进桑及周边植物的生长,间接增加植被覆盖面积,还是对桑及其它植物生长产生消极作用?(4)三峡库区消落带由于其地理位置和水库运作的特殊性,当地土壤也存在不同程度的复合污染,因此,在筛选高效 AMF 时,除了需考虑与桑树的亲和性强弱外,还得研究 AMF 对水淹胁迫程度和对重金属等污染物的耐性,大量的工作尚待开展。

尽管面临很多挑战,但对恶劣环境具有超强的适应性使得菌根桑在消落带生态修复与重建中有着其他植物不可替代的优势,能够较好地克服消落带由于水位周期性涨落所带来的一些环境问题。桑树在固土护岸方面作用显著,借助菌根技术,一方面能够提高桑苗在三峡库区的早期存活率,增加植被覆盖率;另一方面能够改善植物根际土壤,提高土壤质量,促进宿主植物的生长,促进植物群落正向演替,进而形成稳定的生态系统。因此,桑及菌根桑的运用不失为库区消落带生境生态修复与重建的一种新途径,在消落带植被修复中具有广阔的应用前景。

参考文献(References):

- [1] 刁承泰,黄京鸿.三峡水库水位涨落带土地资源的初步研究.长江流域资源与环境,1999,8(1):75-80.
- [2] 徐亮.基于GIS的消落带土地利用变化及管理对策研究——以重庆市开县为例[D].重庆:重庆大学,2007.
- [3] Van der Heijden M G A, Klironomos J N, Ursic M, Moutoglou P, Streitwolf-Engel R, Boller T, Wiemken A, Sanders I R. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature*, 1998, 396(6706): 69-72.
- [4] Li X L, George E, Marschner H. Extension of the phosphorus depletion zone in VA-mycorrhizal white clover in a calcareous soil. *Plant and Soil*, 1991, 136(1): 41-48.
- [5] Johansen A, Jakobsen I, Jensen E S. Hyphal transport of ¹⁵N-labelled nitrogen by a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus and its effect on depletion of inorganic soil N. *New Phytologist*, 1992, 122(2): 281-288.
- [6] Mosse B. Growth and chemical composition of mycorrhizal and non-mycorrhizal apples. *Nature*, 1957, 179(4566): 922-924.
- [7] 毕银丽,吴福勇,武玉坤.丛枝菌根在煤矿区生态重建中的应用.生态学报,2005,25(8):2068-2073.
- [8] 王建峰,谢世友,许建平.丛枝菌根在石漠化生态恢复中的应用及前景分析.信阳师范学院学报:自然科学版,2009,22(1):157-160.
- [9] 杜周和,刘俊凤,左艳春,张剑飞,刘彬斌,陈义安,朱永群,周晓康.桑叶的营养特性及其饲料开发利用价值.草业学报,2011,20

- (5): 192-200.
- [10] 秦俭, 何宁佳, 黄先智, 向仲怀. 桑树生态产业与蚕丝业的发展. 蚕业科学, 2010, 36(6): 984-989.
- [11] 黄先智, 沈以红, 蒋贵兵, 刘文波, 余茂德, 秦俭. 三峡库区消落带桑树种植及资源利用调查. 蚕业科学, 2013, 39(6): 1193-1197.
- [12] 舒玉芳, 叶娇, 潘程远, 杨晓红, 黄先智, 秦俭. 三峡库区桑树菌根发育特征及菌根对桑苗生长的促进作用. 蚕业科学, 2011, 37(6): 978-984.
- [13] Naiman R J, Bilby R E, Bisson P A. Riparian ecology and management in the Pacific coastal rain forest. Bioscience, 2000, 50(11): 996-1011.
- [14] Webb A A, Erskine W D. A practical scientific approach to riparian vegetation rehabilitation in Australia. Journal of Environmental Management, 2003, 68(4): 329-341.
- [15] Pezeshki S R, Li S, Shields Jr F D, Martin L T. Factors governing survival of black willow (*Salix nigra*) cuttings in a streambank restoration project. Ecological Engineering, 2007, 29(1): 56-65.
- [16] Shi R. Ecological environment problems of the Three Gorges Reservoir Area and countermeasures. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10: 1431-1434.
- [17] Shen Z Y, Qiu J L, Hong Q, Chen L. Simulation of spatial and temporal distributions of non-point source pollution load in the Three Gorges Reservoir Region. Science of the Total Environment, 2014, 493: 138-146.
- [18] 刘信安, 柳志祥. 三峡库区消落带流域的生态重建技术分析. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2004, 21(2): 60-63.
- [19] Drew M C. Oxygen deficiency and root metabolism: injury and acclimation under hypoxia and anoxia. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1997, 48(1): 223-250.
- [20] Crawford R M M, Braendle R. Oxygen deprivation stress in a changing environment. Journal of Experimental Botany, 1996, 47(2): 145-159.
- [21] 王晖, 廖伟, 陈峰云, 吴宜进. 长江三峡库区水土流失现状及治理对策探讨. 人民长江, 2007, 38(8): 34-36.
- [22] 李月臣, 刘春霞, 赵纯勇, 汪洋, 陈国建. 重庆市三峡库区水土流失特征及类型区划分. 水土保持研究, 2009, 16(1): 13-17.
- [23] 刘光德, 李其林, 黄昀. 三峡库区面源污染现状与对策研究. 长江流域资源与环境, 2003, 12(5): 462-466.
- [24] 康义, 郭泉水, 程瑞梅, 洪明, 金江群, 王祥福. 三峡库区消落带土壤物理性质变化. 林业科学, 2010, 46(6): 1-5.
- [25] 李娅, 曾波, 叶小齐, 乔普, 王海峰, 罗芳丽. 水淹对三峡库区岸生植物秋华柳 (*Salix variegata* Franch.) 存活和恢复生长的影响. 生态学报, 2008, 28(5): 1923-1930.
- [26] 李昌晓, 钟章成, 刘芸. 模拟三峡库区消落带土壤水分变化对落羽杉幼苗光合特性的影响. 生态学报, 2005, 25(8): 1953-1959.
- [27] 戴方喜, 许文年, 刘德富, 陈方清. 对构建三峡库区消落带梯度生态修复模式的思考. 中国水土保持, 2006, (1): 34-36.
- [28] 罗祺, 张纪林, 郝日明, 许万根, 潘伟明, 教忠意. 水淹胁迫下 10 个树种某些生理指标的变化及其耐水淹能力的比较. 植物资源与环境学报, 2007, 16(1): 69-73.
- [29] 熊晓军, 吴强, 封利军, 刘明鲁, 廖兴茂. 试论桑树的生态功能及对汉江水源地的保护作用. 北方蚕业, 2013, 34(3): 55-58.
- [30] 贺秀斌, 谢宗强, 南宏伟, 鲍玉海. 三峡库区消落带植被修复与蚕桑生态经济发展模式. 科技导报, 2008, 25(23): 59-63.
- [31] 鲁敏, 李英杰. 绿化树种对大气金属污染物吸附能力. 城市环境与城市生态, 2003, 16(1): 51-52.
- [32] 鲁敏, 王仁卿, 齐鑫山. 绿化树种对大气氯污染的反应. 山东大学学报: 理学版, 2004, 39(2): 98-101.
- [33] 高福军, 杨志荣, 董洪, 王炳文, 郭荣民. 山地桑园水土保持效益的研究. 水土保持研究, 2002, 9(1): 158-160.
- [34] 杜周和, 刘俊凤, 刘刚, 胡作忠, 张剑飞. 桑树作水土防护经济林的研究. 广西蚕业, 2001, 38(3): 10-11.
- [35] 张正新, 宋广林, 钟勇玉, 李玉平, 肖乃康. 陕南地区陡坡生态桑园建设模式及水土保持效果. 蚕业科学, 2005, 30(4): 413-416.
- [36] 史东梅, 卢喜平, 刘立志. 三峡库区紫色土坡地桑基植物篱水土保持作用研究. 水土保持学报, 2005, 19(3): 75-79.
- [37] 刘润进, 焦惠, 李岩, 李敏, 朱新产. 丛枝菌根真菌物种多样性研究进展. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2301-2307.
- [38] Kumar T, Ghose M. Status of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in the Sundarbans of India in relation to tidal inundation and chemical properties of soil. Wetlands Ecology and Management, 2008, 16(6): 471-483.
- [39] 王桂文, 李海鹰, 孙文波. 钦州湾红树林丛枝菌根初步研究. 广西植物, 2004, 23(5): 445-449.
- [40] 蔡邦平, 董怡然, 侯全, 黄耀坚. 福建红树林植物丛枝菌根侵染研究. 亚热带植物科学, 2012, 41(1): 1-6.
- [41] Wang Y T, Qiu Q, Yang Z Y, Hu Z J, Tam N F Y, Xin G R. Arbuscular mycorrhizal fungi in two mangroves in South China. Plant and Soil, 2010, 331(1/2): 181-191.
- [42] Wang Y T, Li T, Li Y W, Qiu Q, Li S S, Xin G R. Distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in four semi-mangrove plant communities. Annals of Microbiology, 2014, doi: 10.1007/s13213-014-0896-x.
- [43] Wang Y T, Huang Y L, Qiu Q, Xin G R, Yang Z Y, Shi S H. Flooding greatly affects the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi communities in the roots of wetland plants. PLoS One, 2011, 6(9): e24512.
- [44] 施松梅, 陈珂, 涂波, 杨晓红, 黄先智. 石漠化地区桑根际 AM 真菌多样性及桑壮苗培育研究. 西南大学学报: 自然科学版, 2013, 35(10): 24-30.

- [45] Setua G C, Kar R, Ghosh J K, Das K K, Sen S K. Influence of arbuscular mycorrhizae on growth, leaf yield and phosphorus uptake in mulberry (*Morus alba* L.) under rainfed, lateritic soil conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 29(1): 98-103.
- [46] Wu Q S, Zou Y N, Xia R X. Effects of water stress and arbuscular mycorrhizal fungi on reactive oxygen metabolism and antioxidant production by citrus (*Citrus tangerine*) roots. *European Journal of Soil Biology*, 2006, 42(3): 166-172.
- [47] 唐许, 刘代军, 涂波, 杨晓红, 黄先智. 菌根桑的促生效应及耐旱生理生化机制分析. *西南大学学报: 自然科学版*, 2013, 35(8): 19-26.
- [48] 叶娇, 涂波, 施松梅, 杨晓红, 黄先智, 秦俭. 桑菌根初生结构对梯度水分胁迫的细胞学生态响应. *西南大学学报: 自然科学版*, 2012, 34(8): 67-72.
- [49] Peng S L, Guo T, Liu G C. The effects of arbuscular mycorrhizal hyphal networks on soil aggregations of purple soil in southwest China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 411-417.
- [50] Wang S, Srivastava A K, Wu Q S, Fokom R. The effect of mycorrhizal inoculation on the rhizosphere properties of trifoliate orange (*Poncirus trifoliata* L. Raf.). *Scientia Horticulturae*, 2014, 170: 137-142.
- [51] Hallett P D, Feeney D S, Bengough A G, Rillig M C, Scrimgeour C M, Young I M. Disentangling the impact of AM fungi versus roots on soil structure and water transport. *Plant and Soil*, 2009, 314(1/2): 183-196.
- [52] Miller R M, Jastrow J D. The role of mycorrhizal fungi in soil conservation // Bethlenfalvay G J, Linderman R G, eds. *Proceedings on Mycorrhizae in Sustainable Agriculture*. California: ASA Special Publication, 1992: 29-44.
- [53] 刘丽琼, 魏世强, 江韬. 三峡库区消落带土壤重金属分布特征及潜在风险评价. *中国环境科学*, 2011, 31(7): 1204-1211.
- [54] 王发园, 林先贵. 丛枝菌根在植物修复重金属污染土壤中的作用. *生态学报*, 2007, 27(2): 793-801.
- [55] Pawlowska T E, Charvat I. Heavy-metal stress and developmental patterns of arbuscular mycorrhizal fungi. *Applied and Environmental Microbiology*, 2004, 70(11): 6643-6649.
- [56] Tullio M, Pierandrei F, Salerno A, Rea E. Tolerance to cadmium of vesicular arbuscular mycorrhizae spores isolated from a cadmium-polluted and unpolluted soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 37(4): 211-214.
- [57] de Boulois H D, Delvaux B, Declerck S. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the root uptake and translocation of radiocaesium. *Environmental Pollution*, 2005, 134(3): 515-524.
- [58] 陈保冬, 李晓林, 朱永官. 丛枝菌根真菌菌丝体吸附重金属的潜力及特征. *菌物学报*, 2005, 24(2): 283-291.
- [59] 黄艺, 陈有鑑, 陶澍. 污染条件下 VAM 玉米元素积累和分布与根际重金属形态变化的关系. *应用生态学报*, 2002, 13(7): 859-862.
- [60] Dehn B, Schuepp H. Influence of VAM on the uptake and distribution of heavy metal in plants. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1989, 29: 79-83.
- [61] Gonzalez-Chavez M C, Carrillo-Gonzalez R, Wright S F, Nichols K A. The role of glomalin, a protein produced by arbuscular mycorrhizal fungi, in sequestering potentially toxic elements. *Environmental Pollution*, 2004, 130(3): 317-323.
- [62] Lu L, Tang Y, Xie J S, Yuan Y L. The role of marginal agricultural land-based mulberry planting in biomass energy production. *Renewable Energy*, 2009, 34(7): 1789-1794.
- [63] Bender S F, Conen F, Van der Heijden M G A. Mycorrhizal effects on nutrient cycling, nutrient leaching and N₂O production in experimental grassland. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 80: 283-292.
- [64] Rillig M C. Arbuscular mycorrhizae and terrestrial ecosystem processes. *Ecology Letters*, 2004, 7(8): 740-754.
- [65] Sengupta A, Chaudhuri S. Arbuscular mycorrhizal relations of mangrove plant community at the Ganges river estuary in India. *Mycorrhiza*, 2002, 12(4): 169-174.
- [66] Kumar T, Ghose M. Status of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in the Sundarbans of India in relation to tidal inundation and chemical properties of soil. *Wetlands Ecology and Management*, 2008, 16(6): 471-483.
- [67] Fester T. Arbuscular mycorrhizal fungi in a wetland constructed for benzene-, methyl *tert*-butyl ether-and ammonia-contaminated groundwater bioremediation. *Microbial Biotechnology*, 2013, 6(1): 80-84.
- [68] Stevens K J, Wall C B, Janssen J A. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on seedling growth and development of two wetland plants, *Bidens frondosa* L., and *Eclipta prostrata* (L.) L., grown under three levels of water availability. *Mycorrhiza*, 2011, 21(4): 279-288.
- [69] Meding S M, Zasoski R J. Hyphal-mediated transfer of nitrate, arsenic, cesium, rubidium, and strontium between arbuscular mycorrhizal forbs and grasses from a California oak woodland. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(1): 126-134.
- [70] Achatz M, Rillig M C. Arbuscular mycorrhizal fungal hyphae enhance transport of the allelochemical juglone in the field. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 78: 76-82.
- [71] O'Connor P J, Smith S E, Smith F A. Arbuscular mycorrhizas influence plant diversity and community structure in a semiarid herbland. *New Phytologist*, 2002, 154(1): 209-218.