

丛枝菌根真菌(AMF)提高人工湿地去污能力及运行稳定性的潜力分析

彭 麟¹, 刘子芳², 肖文雄¹, 阳路芳¹, 邓仕槐^{1*}

(1.四川农业大学资源环境学院, 成都 611130; 2.雅安市环境监测站, 四川 雅安 625014)

摘 要:目前人工湿地在污水处理中的应用日益广泛,围绕丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhiza fungi, AMF)对提高人工湿地除磷、除氮、降解有机物以及运行稳定性等方面的潜力进行了评述,同时结合当前 AMF 研究现状,针对如何使 AMF 在人工湿地中发挥最优作用,从人工湿地的类型、运行方式、植物种类、菌种组成及污水水质与湿地基质等 5 个方面进行了系统分析。

关键词:人工湿地;丛枝菌根真菌;去污能力;稳定运行;潜力分析

中图分类号:X172 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)10-1869-10

The Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) to Improve Decontamination Capability and Operational Stability of Constructed Wetland

PENG Lin¹, LIU Zi-fang², XIAO Wen-xiong¹, YANG Lu-fang¹, DENG Shi-huai^{1*}

(1. College of Resource and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2. Environmental Monitor Station of Yaan City, Yaan 625014, China)

Abstract: Constructed wetland is widely used in sewage treatment. However, blockage and decrease in ability of decontamination in winter have restricted the development of constructed wetland. Arbuscular mycorrhizal and its host plant can form a symbiotic relationship. There is a great potential of arbuscular mycorrhizal to improve operational stability of constructed wetland and capability of removal of phosphorus, nitrogen and organic matter. Nevertheless, few factors can affect the application of AMF. In order to promote AMF to play an optimal role in the constructed wetland, an analysis based on the type of wetland, operation mode, plant species, strain of AMF, composition of sewage and wetland was carried out. To sum up, there is a bright future for the application of AMF in constructed wetland.

Keywords: constructed wetland; arbuscular mycorrhizal fungi; decontamination capability; operational stability; potential analysis

由于运行费用低、管理方便,人工湿地已广泛应用于工业及生活废水的处理。但目前人工湿地普遍存在对氮、磷等污染物的去除效果相对较低,长期运行易发生堵塞^[1],冬季去污能力下降^[2]等问题。丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhiza fungi)简称 AMF,是一类比较古老的土生真菌,能够与地球上绝大多数植物形

成菌根,菌根真菌从植物体内获取光合产物,同时从土壤中吸收营养物质和水分传递给宿主植物,二者之间形成互惠共生的关系^[3],AMF 存在于农田、森林土壤、高山、低地、湿地、海滩、沙漠、盐碱滩和盐碱地、重金属污染土壤、煤矿土及一些工业污染区和废矿区等各种生态环境中^[4-5]。

人工湿地对污水的净化是依靠湿地中基质、微生物及植物的相互作用完成的。尽管对湿地中 AMF 研究起步较晚^[6],但是 AMF 在自然生态系统中发挥着重要的作用,在改变土壤酶及植物根际微生物活性^[7-8],提高植物群落的稳定性和生产力方面起着重要的生态作用^[9],同时能促进植物抗病^[10]、抗盐^[11]、抗重金属^[12]、

收稿日期:2012-03-14

基金项目:四川省科技支撑项目:畜禽养殖废弃物处理及资源化技术研究(2011NZ0061);国家科技支撑项目:《城郊低碳型循环经济技术研究及示范》课题(2012BAC03B06)

作者简介:彭 麟(1986—),男,四川资中人,硕士研究生,从事环境生态方向研究。E-mail:177858275@qq.com

* 通信作者:邓仕槐 E-mail:shdeng8888@163.com

抗寒^[13],促进植物生长发育^[14],增强植物对氮磷的吸收^[15]。因此将丛枝菌根应用于人工湿地值得进一步的探索和研究^[16],这对增强湿地去污效果及其稳定运行具有巨大的潜力。

1 AMF 促进人工湿地去污能力和运行稳定性

1.1 AMF 提高人工湿地除磷能力

磷的去除主要是通过植物的吸收作用和基质的吸附作用^[17],其中植物吸收占小部分,基质吸附占大部分。

对比无植物系统,植物对总磷的去除效果普遍能达到 20% 以上^[18],最多时可以达到 73%^[19]。当植物生长迅速时,生物量增加,对磷的吸收加快,出水中磷含量明显减少^[20],同时植物呼吸过程释放的 CO_2 与土壤及介质中钙离子结合形成碳酸钙,并能与磷形成共沉淀而使磷被去除^[21]。AMF 存在于土壤中的庞大的菌丝网络能在植物根系到达不了的区域吸收磷^[22],同时还能引起土壤有机磷矿化,而土壤有机磷必须分解为无机磷才能被植物吸收利用。已有大量试验表明:AMF 能够促进植物对磷的吸收,增加植物体内的磷含量,进而促进植物生长发育^[15]。此外,AMF 对植物吸收磷的促进作用不仅局限于陆生植物,对湿地植物也同样有效。常见的人工湿地植物芦苇、香蒲,在接种 AMF 后芦苇磷含量显著增加^[23-24]。对于水稻这种常年生长在淹水条件下的植物,AMF 亦能提高植物组织中的磷含量^[14]。

化学吸附、沉淀以及微生物同化作用所引起的总磷去除的贡献率在 50%~65% 之间^[25]。在化学法除磷中,磷酸根离子主要通过配位体交换被吸附到 Fe^{3+} 和 Al^{3+} 的表面,但是这种吸附沉淀并不是永久地沉积在基质中,其中部分是可逆的。如果系统中填料的吸附容量达到饱和、污水中磷的浓度较低或者在还原条件下 Fe^{3+} 被还原成 Fe^{2+} 时,基质对磷酸根的吸附能力下降,就会有部分磷被重新释放到水中,使得出水中 P 浓度升高^[26-27]。另外,微生物产生的某些酶对磷的去除也有影响。复合垂直流人工湿地中基质磷酸酶的活性与污水中 TP 以及 COD_Cr 的去除率呈显著性相关,说明了基质磷酸酶在含磷化合物降解过程中起到重要作用^[28]。肖敏等^[29]对菲芘复合污染土壤中的 3 种酶的活性进行了研究,发现 AMF 能提高植物根际土壤中磷酸酶的活性。而冀永生^[30],山宝琴^[31]和 Tarafdar 等^[32]的研究则发现,根际土壤磷酸酶活性与 AMF 侵染率、丛枝菌根真菌的孢子密度以及 AMF 根外菌丝长度显著

相关。此外,在环境条件相对恶劣的多种重金属的复合污染下,AMF 也能提高土壤中磷酸酶的活性^[33]。可见,AMF 能有效提高根际土壤中磷酸酶活性,以增强对磷的去除。

人工湿地中多数除磷基质在湿地运行初期磷去除率达 90% 以上,但运行 4 至 5 年后,由于磷在系统内的积累使磷去除率急剧下降,甚至会发生磷的解吸^[21]。由于基质吸附的磷容量有限,从人工湿地长期运行角度来看,只有加强植物以及微生物对磷的去除作用才能保证人工湿地的除磷效果以及人工湿地的使用年限。AMF 能促进植物对磷的吸收,同时提高土壤基质中磷酸酶的活性,加强对磷的分解,这对提高人工湿地除磷效果以及保持其稳定运行有重要意义。

1.2 AMF 提高湿地除氮能力

由于湿地系统中植物根系周围形成了许多好氧、缺氧、厌氧微区,这相当于许多串联和并联的 A^2/O 单元,使得硝化与反硝化作用同时进行,能够有效除氮。另外,植物还可以从两个方面促进氮的去除:一是植物本身直接吸收同化含氮化合物,其中绝大部分是硝酸根离子的形式^[34];二是其根系分泌物可促进某些嗜氮细菌的生长,提高整个湿地生态系统微生物数量,促进氮的释放、转化,从而间接提高净化率^[21]。

与植物的根系相比,丛枝菌根真菌可以利用其庞大的菌丝网络延伸到根系无法到达的区域吸收氮素,扩大了对氮素的吸收面积,增强了氮素的吸收利用^[35]。丛枝菌根真菌根外菌丝将无机态的铵根离子、硝酸根离子吸收后,通过一定途径转化为精氨酸,向根内菌丝运输,最终分解为氨氮向宿主植物运输^[36]。相对于硝酸盐,菌丝对铵盐的吸收能力更强^[37],这对于提高人工湿地中氨氮的去除率有很大的潜力。硝酸还原酶是植物氮代谢的关键酶,它催化 NO_3^- 到 NO_2^- 的还原反应,其活性大小可反映植物对环境中 NO_3^- 的利用吸收及氮代谢情况。AMF 能增加寄主植物地上部和根系中硝态氮还原酶的数量并能提高其活性^[38],因此增强了植物同化利用硝酸盐的能力。AMF 促进湿地植物氮素吸收已被相关研究证实,挺水植物香蒲接种 AMF 后,无论是叶片还是根中的氮浓度均有所提高^[24],接种摩西球囊的水稻组织中氮含量亦显著提高^[39]。虽然也有些研究发现,AMF 减少了植物体内 N 含量^[40],但这可能与湿地植物种类、湿地水体各种环境因素有关,需要更进一步的研究。

在湿地系统中,尽管植物吸收的氮素所占比例不高,但是最终通过植物的收割而去除的总氮并不多,

因而不是脱氮的主要过程^[41]。微生物引起的硝化和反硝化作用是将氮素从湿地系统中去除的主要途径^[42]。与人工湿地除氮有关的微生物主要是氨化、硝化和反硝化细菌^[43],其中氨氮的去除率与硝化细菌和反硝化细菌的数量密切相关^[44]。硝化菌数量与硝化作用强度,反硝化菌数量与反硝化作用强度均呈显著的正相关^[45]。梁威等^[46]对复合垂直流构建湿地基质微生物数量与污水净化效果的相关性进行了研究,基质中细菌、真菌和放线菌数量与凯氏氮去除率密切相关。近年来,研究发现基质中一些酶也能够影响人工湿地氮素的去除效果,其中脲酶的活性能显著影响总氮与凯氏氮(KN)的去除率^[28,47]。

AMF 可以提高土壤中微生物数量以及尿酶活性,接种 AMF 的大青杨苗木根际土壤微生物总数可升高 1 倍以上,并可同时增加根际土壤脲酶、蛋白酶的活性,而且各种酶活性增加量显著影响菌根侵染率^[48]。Caravaca 等^[49]发现接种 AMF 提高了 *Dorycnium pentaphyllum* L. 根际土壤中的脱氢酶及尿酶的活性;而 Wang 等^[33]将 AMF 接种于海州香薷和玉米,发现二者根围土壤中尿酶的活性均显著提高。另外,有报道称丛枝菌根真菌孢子密度与脲酶的活性也有显著正相关关系^[31]。因此,将 AMF 接种于人工湿地植物,提高对氮的去除效果具有极大的应用潜力和研究价值。

1.3 AMF 提高湿地对有机物的去除

人工湿地中有机物的去除主要依植物和微生物。植物通过直接同化吸收有机污染物,植物根系释放的酶以及根际微生物对有机物的联合作用来去除有机污染物。相对于植物,微生物在有机物的降解中发挥着主要作用^[50]。

细菌在污水净化过程中起到巨大作用,它能使复杂的含氮有机物转化成可供植物和微生物利用的无机氮化合物。真菌是参与基质中有机质分解过程的主要成员之一,具有强大的酶系统,能促进纤维素、木质素、果胶等的分解,并能将蛋白质最终分解释放出氨。放线菌是分解基质中不含氮和含氮有机化合物的积极参与者,能比真菌更强烈地分解氨基酸等蛋白质,还能形成抗生物质维持湿地生物群落的动态平衡^[51]。人工湿地中的优势菌种有假单胞杆菌属、产碱杆菌属和黄杆菌属,均为生长快速的微生物,其体内含有降解质粒,是分解有机物的主体微生物种群^[52]。关于复合垂直流人工湿地系统的研究发现,基质中细菌和真菌的数量与 COD_Cr 去除率之间极显著相关^[46];同时,污水中 BOD_5 的去除率与湿地细菌总数也显著相关^[44]。

AMF 可以提高植物根际土壤中微生物的数量^[7]及代谢活性^[8],间接地提高人工湿地对有机物的去除率。研究表明,接种 AMF 能显著增加三叶草^[53]以及翅果油树幼苗^[54]根际和菌丝际土壤中细菌、真菌和放线菌的数量,大青杨苗木根际土壤微生物总数在接种 AMF 后也提高了一倍^[48]。因而,针对人工湿地对有机物去除率低的问题,可引入 AMF 以提高净化效果。

1.4 AMF 提高人工湿地稳定性

1.4.1 促进植物生长

湿地植物通过向根部输送氧气,为好氧微生物群落提供适宜的生长环境,而根区以外则适于兼氧、厌氧微生物群落的生存,使不同的微生物各得其所;同时植物还将净光合产物的 10%~40% 从根系向外分泌,为根际微生物提供碳源和营养物质^[55]。因此,植物长势好,则人工湿地去污能力强。

大量试验表明:接种 AMF 可以增加宿主植物叶绿素含量、改善叶片气孔导度、蒸腾速率和羧化速率^[56],进而提高植物净光合速率,增加植物的碳素营养^[57]。Dunham 等^[24]将 AMF 接种于湿地植物香蒲后使其光合速率得到了提高,Miller^[40]对 *Panicum hemitomon* 以及 *Leersia hexandra* 两种湿地植物在四种水力条件下分别接种 AMF 后,其叶面积、分蘖数、根长和生物量相较于未接种植株均有显著提高。对于 *Dorycnium pentaphyllum* L., 其叶片生物量甚至能增加两倍之多^[49]。Selilia 和 Bagyaraj^[14]对水稻接种了多种 AMF 后发现从不同地方分离的摩西球囊霉、聚生球囊霉都能增加水稻生物量,且能提高 AMF 侵染率。此外,有研究发现人工湿地中单位面积氮吸收量的大小和“地上氮吸收量/地下氮吸收量”以及植物体内氮浓度并不相关,而是受到生物量的影响,生物量大,植物氮吸收量较大^[44]。因此接种 AMF 后,还可能会通过增加植物生物量而提高对氮的吸收。

1.4.2 增强植物的抗性

1.4.2.1 抗病性

人工湿地植物病害能降低植物品质,影响植物生态功能,减少植物生物量,严重时甚至导致植物大量死亡,对人工湿地的正常运行极为不利。AMF 能增强植物抗病性,使病原菌的生长与致病能力降低,对寄主植物的危害减小。有研究报道,番茄接种地表球囊霉后根际的青枯菌种群数量比未接种地表球囊霉的植株降低 60 倍,而其他根际微生物并未受到抑制^[7]。AMF 提高植物对病原体抗性的机理有以下方面:当病原菌侵染菌根植物时,丛枝周围的羟脯氨酸糖蛋白

使细胞壁的强度增加,且将细胞壁中的纤维素、半纤维素包裹起来,避免病原菌的分解,从而提高对病原菌的防卫作用^[10];AMF在侵染植物根部时能诱导寄主植物产生植保素,植保素能抵抗病原菌,提高植物抗病性^[58];AMF化的植物在受病原菌侵染时能分泌一些保护酶,提高宿主植物对病原菌的抗性^[59];受AMF侵染的植物还能通过菌丝体的机械隔离作用或与病原菌竞争侵染位点,提高宿主植物的抗病性^[60]。

1.4.2.2 抗盐性

盐胁迫会使植物缺水,导致细胞内离子浓度增高,而造成植物细胞内的酶丧失活力,干扰植物生理过程;同时胞膜系统包括与光合作用相关的膜结构会被破坏,直接或间接地造成植物光合强度降低,抑制植物生长。AMF能在一定的盐度范围内提高植物抗盐胁迫的能力^[61]。申连英等^[11]在3个不同盐浓度胁迫下,对酸枣实生苗进行摩西球囊霉的接种试验发现,生物量和叶片叶绿素含量均显著提高,表明接种AMF能增加植物对于盐胁迫的耐受能力。AMF除了通过前文所述的增加植物N、P等营养元素的吸收,改善植物营养,使植物在逆境条件下生长得更好外,还能通过一些其他方式来提高植物对盐胁迫的抗性。对于禾本科植物玉米,在盐胁迫条件下,接种AMF使得玉米生物量、叶绿素以及可溶性糖含量均得到提高,而糖类物质可以参与渗透调节,减轻细胞所受伤害^[62];AMF可以通过改变水分代谢增加植物含水量或植物体细胞水势,进而增强宿主植物耐盐性^[63];Al-Karaki的研究还发现,在盐胁迫条件下,AMF可以增加植物对微量元素的吸收,降低体内钠的浓度从而减弱盐的胁迫影响^[64]。

1.4.2.3 抗寒性

温度是限制人工湿地应用范围的一个重要因素,冬季气温较低,植物生长缓慢,特别是严寒地区或者遇上降雪等低温天气时,质膜的结构和功能受到伤害,导致细胞膜透性增大,电解质外渗,电导率增大,使湿地植物枯萎,甚至凋亡,严重影响人工湿地的去污能力。研究发现,AMF提高植物抗寒性的途径较多:首先AMF侵染根系后引起宿主植物某些形态结构发生变化,有利于增加植物抗寒性^[65];其次,AMF可通过提高植物叶绿素含量、提高叶肉细胞的光合活性最终提高植物的光合能力来减轻低温胁迫对植株造成的伤害,提高植物耐受低温的能力,促进植物生长^[13];另外,在低温范围内,接种AMF能显著提高植株叶片中可溶性糖含量,提高了细胞液浓度、降低冰点,可以

缓和细胞质过度脱水,保持细胞不致遇冷凝固,从而提了植物的耐寒性^[66]。

1.4.2.4 抗重金属毒性

近年来,人工湿地在处理采矿废水中得到了一些应用,其对重金属的去除主要依靠的是基质、微生物、植物的共同作用,而不是单一的植物富集吸收^[67]。因此,相对于抗重金属毒性弱的植物,抗性强的植物适用性更大。AMF能提高植物的抗重金属能力,减少植物对重金属的吸收^[68]。Turnau等^[69]发现,AMF的菌丝重金属含量高于宿主细胞,从而推测AMF可以固定大部分重金属,减少其向植物传输,或可能是通过整合等作用抑制了重金属向地上部分转运^[12]。虽然土壤中重金属含量过高会大幅降低AMF对宿主植物的侵染率,但是经过接种处理植株重金属含量还是显著低于未接种处理的植株^[70]。可见,重金属浓度会影响AMF对宿主植物的侵染能力,进而影响其对宿主植物抗重金属能力的提升。因此,不同AMF菌种对特定重金属的耐受限度范围值得进行进一步的研究。

2 AMF在人工湿地中应用效果的影响因素分析

虽然AMF能从多方面促进人工湿地的运行,但是从侵染率指标上可以发现,湿地中很多因素能影响“AMF-植物共生体”,包括AMF种类、植物种类,pH、水分、氧气、盐度、基质理化性质等环境条件及其相互间的复杂作用。

2.1 人工湿地类型

表面湿地中的氧气来源于水面扩散与植物根系传输;潜流湿地中污水以较慢速度从湿地表面以下流过,湿地中的氧气来源于水面扩散与植物根系传输,但传输能力十分有限^[9]。表面流湿地与垂直流湿地的水面暴露于大气中,便于大气充氧,其氧含量高于潜流人工湿地系统。所以,含氧量更高的表面流人工湿地或垂直流人工湿地更适宜AMF的生存。虽然丛枝菌根真菌为好氧微生物,但对氧的需求并不十分高,因此河流、湖泊及沼泽中才能发现被浸染的丛枝菌根,当然为了最大限度地确保AMF的生长,应选择含氧量相对较高的人工湿地类型。

2.2 植物种类

目前人工湿地主要选择的植物类型为挺水植物,挺水植物根系发达,可通过根系向基质送氧,使基质中形成多个好氧、兼性厌氧、厌氧小区,利于多种微生物繁殖,便于污染物的多途径降解^[7]。广泛用于人工湿地中的植物有芦苇、灯芯草、香蒲、鸢尾、蕹草、菖

蒲、水甜茅、苔属植物等^[50],其中香蒲的分布范围很广,而且对根系的输氧能力强^[71],而芦苇因其种植简单、繁殖能力强、管理要求粗放、处理效果好被国内外广泛采用。

AMF 对寄主植物虽然没有表现出严格的专一性,但它们对寄主植物具有一定的选择性。不同寄主植物其根系形态、生理代谢等不同,会影响 AMF 的生长与发育、繁殖、定殖与扩展^[72]。一般认为被子植物的莎草科、十字花科、苋科、藜科、石竹科和蓼科等 10 余科植物不能或不易形成丛枝菌根^[73],而禾本科的植物普遍具有较高的侵染率^[9],选择人工湿地中普遍存在的禾本科植物作为 AMF 宿主,效果较好。

2.3 菌种选择

到目前为止,世界范围内已报道的 AMF 种类有 100 多种,其中球囊霉属最多,其次为无梗囊霉属。Radhika 等^[74]在研究印度 20 种水生植物时,发现 70% 以上的植物都能被 AMF 侵染,且以明球囊霉为优势种。渤海湾的海岛林地、黄河三角洲盐碱地、鲁西南煤矿和内蒙古退化草原等几种生态环境中,球囊霉属出现的频度和相对多度最高,其次是无梗囊霉属^[5]。贺学礼等^[75]从河北省安新县芦苇群落中分离出了摩西球囊霉、透光球囊霉、地球囊霉、缩球囊霉、膨果球囊霉、皱壁无梗囊霉、浅窝无梗囊霉和红色盾巨孢囊霉等 3 属 8 种 AMF。Wangkai 等^[76]调查了西南地区 8 个湖沼中的水生植物,发现部分植物被丛枝菌根真菌侵染,其中摩西球囊霉是优势种。在污灌 5 年到 95 年的两种不同类型土壤中摩西球囊霉都存在^[77],因此可以推测,摩西球囊霉能适应富含大量有机物的人工湿地环境。

不同种类,甚至相同种类,不同来源的 AMF 对宿主植物的菌根效应是不相同的,Secilia^[14]对水稻接种了 13 种不同种类 AMF,发现虽然接种 AMF 均能促进植物生长以及营养吸收,但不同种类或分离自不同地区的同种 AMF 对植物促进作用有较大差别,其中摩西球囊霉和无梗囊霉属的 AMF 对增加植物生物量以及提高植物磷素营养都有很大的作用。另外,由多种 AMF 构成的群落(混合菌株)之间往往协同发挥作用,具有较高的侵染优势,功能上常表现出比单一菌种更好的效果^[78]。有研究发现混合接种处理能提高植物侵染率,且对土壤中微生物总数的促进作用也要显著高于单接种^[79]。同时,混合接种的植物不仅侵染率更高,而且生物量更大,抗寒性更高^[66,80]。董昌金等^[81]将适量的类黄酮(hesperitin)施于玉米和棉花根部,能明显促进 AMF 对宿主植物根段的侵染。因此,

以包含摩西球囊霉以及其他球囊霉属或无梗囊霉属 AMF 的混合菌剂作为接种剂,辅以施加类黄酮,是 AMF 应用于人工湿地的一个很好的研究方向。最后,丛枝菌根真菌的种类繁多,针对人工湿地的缺氧条件,还可以通过筛选或驯化找出能适应环境的优势菌株。

2.4 湿地运行方式

AMF 为好氧生物,可通过增加植物密度来增强氧气输送能力;曝气和污水回流措施也可有效改善湿地的溶解氧状况,明显提高湿地基质氧含量。干湿交替、间歇运行可为湿地提供大气复氧,提高基质表面氧的输送,同时更有利于湿地植物的生长,提高植物的输氧量,改善介质中氧化还原状态^[17,34]。

人工湿地的水力停留时间与出水水质存在一定关系,即随着水力停留时间的延长,COD 的去除率逐渐下降^[82],N、P 的去除效果提高^[1,18]。综合各方面的考虑,可以认为,表面流湿地的总水力停留时间以 4~8 d 为佳^[83]。由于 AMF 为好氧微生物,淹水导致的低电位条件也可能会抑制 AMF 的侵染率。有研究表明侵染率与淹没水深呈显著负相关,并且相比连续淹没,间歇淹没状态的湿地具有更高的侵染率^[84]。Ray 等^[71]研究了人工湿地在不同水位变化下的侵染率,发现侵染率与非淹没时间(水位低于湿地基质表面的时间)成正比。但也有研究指出,水位与 AMF 侵染率之间并无联系^[9]。Miller 等^[40]指出,AMF 侵染植物以后,淹水对侵染率的影响就较小,且一旦侵染,淹水不会抑制 AMF 的活性,侵染率的下降是由于根长增加所造成的生物稀释。Ipsilantis 等^[85]通过室内盆栽试验发现,虽然自由排水使丛枝侵染率显著高于淹水,淹水极大抑制了根外菌丝的延伸,但是却观察到在野外生长的该植物 AMF 侵染率较高,推测盆栽试验中植物不能像野外那样形成相互联系的根,因此抑制了 AMF 的侵染,而人工湿地中植物根系间没有阻隔,可以相互联系。因此,只要选择适当的水深、水力停留时间,并使人工湿地以干湿交替的方式运行,便可减小甚至消除淹水对 AMF 的不利影响。

2.5 污水水质与湿地基质

用于人工湿地处理的污水,其典型的水质指标有 N、P 和 pH 等。虽然关于 AMF 促湿地进植物吸收 N、P 的研究已较多,但关于高 P 条件是否抑制 AMF 侵染率存在不同的结论。Cornwell 等^[86]对 *Solidago patula* 进行田间试验时发现,有机磷、钙磷、铁磷、无机磷等 4 种不同形态的磷素对侵染率都有抑制作用。Ipsilantis 的研究也发现,在自由排水条件下,当基质磷含

量从0上升到 $20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时丛枝菌根侵染率下降了40%,当磷浓度达到 $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,侵染率又下降了10%,而在淹水条件下,基质磷浓度达到 $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时几乎不会发生侵染^[85]。但是也有研究表明,磷浓度的升高并不会抑制AMF侵染率以及土壤中AMF孢子数^[77],甚至某些植物在 $6000\sim 12\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的磷浓度下也有很高的AMF侵染率。但是,当前研究普遍认为低磷水平下的AMF侵染率要高于高磷水平。在供磷浓度小于 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的时候,有较好的侵染率,能够增加AMF土壤中根外菌丝的密度,并轻微促进植物的生长^[87-88]。Blanke从AMF与植物的共生关系上推断,认为磷并不是抑制AMF的唯一因素,AMF的侵染率由植物营养状况决定,由于AMF能促进植物N、P的吸收,在N营养限制条件下,AMF帮助植物吸收N,植物分配碳水化合物给AMF,达到双赢,而当土壤中氮素营养丰富的时候,植物靠自身根系也能吸收足够的N,这时的AMF从植物根系索取的碳水化合物对植物的负面影响大于其吸收的营养元素对植物的贡献,植物便减少向AMF分配碳水化合物,因此AMF生长受抑制,侵染率下降^[9]。传统的人工湿地比较适合处理污染物浓度较低的生活污水,对于污染物浓度较高的污水需要经过预处理,对于重度污染的污水,人工湿地只能作为二级乃至三级污水处理设施^[89]。所以,当AMF应用于人工湿地以后,进水中N、P中任意一项的浓度可以大幅度提高,只要另一项足够低,便不会抑制侵染,亦不会降低AMF在污水处理中发挥的作用。

pH值可以影响AMF的生长繁殖,相关研究表明,土壤pH值升高,球囊霉属所占的比例会增大。而球囊霉属是AMF侵染植物的主要优势种,可见pH值能够影响AMF对植物的侵染能力。徐辉等的研究则印证了这一点,他发现AMF侵染率与pH值呈显著正相关;但是,pH值对AMF生长的影响其实并不显著。AMF在基质pH为5~9的范围内都能正常生长^[90-91]。

目前已有的研究表明,AMF在土壤、沙子、沸石以及他们的混合物构成的基质中均可正常生长繁殖。不同培养基质可影响AMF的侵染率(如黑石粉、灰石粉、河砂、铁矿尾渣、细红砂),但其原因归根结底还是由基质的理化性质来决定的^[92]。

3 研究展望

目前,要使AMF菌剂在人工湿地上进行合理有效的应用,还有许多工作要做。今后针对AMF在人工

湿地上应用的研究可以从以下几个方面开展:

(1)调查湿地中AMF的多样性、种属构成与分布特点;分离筛选出适合人工湿地的AMF菌种,为进一步研究做好准备。

(2)将适合人工湿地环境的AMF菌种进一步驯化,使其能适用于高浓度污染废水的处理,增加人工湿地的适用性。

(3)深入研究AMF的生理生态特性,针对AMF的生理生态特性,优化人工湿地条件,充分发挥AMF在人工湿地中的作用。

(4)针对主要的人工湿地植物,研究AMF的最佳接种方法、接种量、接种时间等,为以后实际应用奠定基础。

(5)继续深入研究AMF与污水中污染物的相互作用机理,确定AMF最适宜处理的废水类型,为AMF在人工湿地中的应用找准方向。

(6)加快菌种培养的研究,提高菌剂产量和生产速度,降低成本,为AMF菌剂大量应用于人工湿地铺平道路。

综上所述,利用微生物提高人工湿地系统去污能力及稳定性的研究还不多,而AMF有着从多个方面提高人工湿地对污染物的去除能力以及运行稳定性的潜力,具有较大的研究价值。随着研究的深入以及技术的不断发展、完善,人工湿地这种污水处理方式将会得到全新的发展以及广阔的应用。

参考文献:

- [1] 李先宁,金 秋,姜 伟,等.蚯蚓人工湿地对农村生活污水净化效果试验研究[J].环境科学与技术,2010,33(1):146-149.
LI Xian-ning, JIN Qiu, JIANG Wei, et al. Purification of countryside wastewater in *Eisenia foetida* constructed wetland[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(1):146-149.
- [2] Werker A, Dougherty J, McHenry J, et al. Treatment variability for wetland wastewater treatment design in cold climates[J]. *Ecological Engineering*, 2002, 19(1):1-11.
- [3] Blanke V, Renker C, Wagner M, et al. Nitrogen supply affects arbuscular mycorrhizal colonization of *Artemisia vulgaris* in a phosphate-polluted field site[J]. *New Phytologist*, 2005, 166(3):981-992.
- [4] 张 英,郭良栋,刘润进.都江堰地区丛枝菌根真菌多样性与生态研究[J].植物生态学报,2003,27(4):537-544.
ZHANG Ying, GUO Liang-dong, LIU Run-jin. Diversity and ecology of arbuscular mycorrhizal fungi in Dujiangyan[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(4):537-544.
- [5] 王发园,刘润进,林先贵,等.几种生态环境中AM真菌多样性比较研究[J].生态学报,2003,23(12):2666-2671.
WANG Fa-yuan, LIU Run-jin, LIN Xian-gui, et al. Comparison of di-

- iversity of arbuscular mycorrhizal fungi in different ecological environments[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(12):2666–2671.
- [6] Jayachandran K, Shetty K. Growth response and phosphorus uptake by arbuscular mycorrhizae of wet prairie sawgrass[J]. *Aquatic Botany*, 2003, 76(4):281–290.
- [7] 朱红惠, 龙良坤, 羊宋贞, 等. AM 真菌对青枯菌和根际细菌群落结构的影响[J]. 菌物学报, 2005, 24(1):137–142.
- ZHU Hong-hui, LONG Liang-kun, YANG Song-zhen, et al. Influence of AM fungus on *Ralstonia solanacearum* population and bacterial community structure in rhizosphere[J]. *Mycosystema*, 2005, 24(1):137–142.
- [8] Artursson V, Finlay R, Jansson J. Combined bromodeoxyuridine immunocapture and terminal-restriction fragment length polymorphism analysis highlights differences in the active soil bacterial metagenome due to *Glomus mosseae* inoculation or plant species[J]. *Environmental Microbiology*, 2005, 7(12):1952–1966.
- [9] Bauer C, Kellogg C, Bridgman S, et al. Mycorrhizal colonization across hydrologic gradients in restored and reference freshwater wetlands[J]. *Wetlands*, 2003, 23(4):961–968.
- [10] Balestrini R, Romera C, Puigdomenech P, et al. Location of a cell-wall hydroxyproline-rich glycoprotein, cellulose and β -1, 3-glucans in apical and differentiated regions of maize mycorrhizal roots[J]. *Planta*, 1994, 195(2):201–209.
- [11] 申连英, 毛永民, 鹿金颖, 等. 丛枝菌根对酸枣实生苗耐盐性的影响[J]. 土壤学报, 2004, 41(3):426–433.
- SHEN Lian-ying, MAO Yong-ming, LU Jin-ying, et al. Effects of arbuscular mycorrhizae on salt tolerance of wild jujube (*Zizyphus spinosus* hu) seedlings[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(3):426–433.
- [12] 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[J]. 生态学报, 2007, 27(2):793–801.
- WANG Fa-yuan, LIN Xian-gui. Role of a buscular mycorrhizae in phytoremediation of heavy metal-contaminated soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2):793–801.
- [13] 朱先灿, 凤斌, 徐洪文. 低温胁迫下丛枝菌根真菌对玉米光合特性的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(2):470–475.
- ZHU Xian-can, FENG Bin, XU Hong-wen. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on photosynthetic characteristics of maize under low temperature stress [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(2):470–475.
- [14] Secilia J, Bagyaraj D. Selection of efficient vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for wetland rice: A preliminary screen [J]. *Mycorrhiza*, 1994, 4(6):265–268.
- [15] 邹碧莹, 张云翼. 丛枝菌根(AM)真菌对植物营养代谢的影响研究进展[J]. 现代农业科技, 2008, 15:10–13.
- ZOU Bi-ying, ZHANG Yun-yi. Advances in the researches on the effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AM) on plant nutrition metabolism[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2008, 15:10–13.
- [16] 王曙光, 刁晓君, 冯兆忠. 湿地植物的丛枝菌根(AM)[J]. 生态学报, 2008, 28(10):5075–5083.
- WANG Shu-guang, DIAO Xiao-jun, FENG Zhao-zhong. Arbuscular mycorrhizal status of setland plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10):5075–5083.
- [17] 冯琳. 潜流人工湿地中有机污染物降解机理研究综述[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5):2006–2010.
- FENG Lin. Progress of study on the degradation mechanism of organic pollutants in subsurface flow constructed wetland[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(5):2006–2010.
- [18] 吴振斌, 陈辉蓉, 贺锋, 等. 人工湿地系统对污水磷的净化效果[J]. 水生生物学报, 2001, 15(1):28–35.
- WU Zhen-bin, CHEN Hui-rong, HE Feng, et al. Primary studies on the purification efficiency of phosphorus by means of constructed wetland system[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2001, 15(1):28–35.
- [19] 李涛, 周律. 湿地植物对污水中氮、磷去除效果的试验研究[J]. 环境工程, 2009, 27(4):25–28.
- LI Tao, ZHOU Lü. Characteristics of several plants for removing nitrogen and phosphorus from wastewater in constructed wetland[J]. *Environmental Engineering*, 2009, 27(4):25–28.
- [20] 李晓东, 孙铁珩, 李海波, 等. 人工湿地除磷研究进展[J]. 生态学报, 2007, 27(3):1226–1232.
- LI Xiao-dong, SUN Tie-heng, LI Hai-bo, et al. Current researches and prospects of phosphorus removal in constructed wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3):1226–1232.
- [21] 李杰, 钟成华, 邓春光. 人工湿地研究进展[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(6):1178–1780.
- LI Jie, ZHONG Cheng-hua, DENG Chun-guang. Research advance in the construction of artificial wetland [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(6):1178–1780.
- [22] Zandavalli R, Dillenburg L, Souza P V. Growth responses of *Araucaria angustifolia* (Araucariaceae) to inoculation with the mycorrhizal fungus *Glomus clarum*[J]. *Applied Soil Ecology*, 2004, 25(3):245–255.
- [23] 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.
- LI Min, CHEN Lin, XIAO Yan, et al. Effects of arbuscular mycorrhiza on absorption of nitrogen and phosphorus of *Spartina alterniflora* and *Phragmites australis* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7):3960–3969.
- [24] Dunham R, Ray A, Inouye R. Growth, physiology, and chemistry of mycorrhizal and nonmycorrhizal *Typha latifolia* seedlings[J]. *Wetlands*, 2003, 23(4):890–896.
- [25] 崔理华, 朱夕珍, 骆世明, 等. 垂直流人工湿地系统对污水磷的净化效果[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(7):13–17.
- CUI Li-hua, ZHU Xi-zhen, LUO Shi-ming, et al. The purification efficiency of phosphorus by means of vertical-flow constructed wetlands treatment system[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2002, 3(7):13–17.
- [26] 陈长太, 王雪和, 祁继英. 国外人工湿地技术的应用及研究进展[J]. 中国给水排水, 2003, 19(12):105–106.
- CHEN Chang-tai, WANG Xue-he, QI Ji-ying. Research progress and application of constructed wetland technology abroad[J]. *China Water & Wastewater*, 2003, 19(12):105–106.
- [27] 梁继东, 周启星, 孙铁珩. 人工湿地污水处理系统研究及性能改进分析[J]. 生态学杂志, 2003, 22(2):49–55.
- LIANG Ji-dong, ZHOU Qi-xing, SUN Tie-heng. A research review

- and technical improvement analysis of constructed wetland systems for wastewater treatment[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(2):49-55.
- [28] 吴振斌, 梁 威, 邱东茹, 等. 复合垂直流构建湿地基质酶活性与污水净化效果[J]. *生态学报*, 2002, 22(7):1012-1017.
- WU Zhen-bin, LIANG wei, QIU Dong-ru, et al. The correlation between the substrate enzymatic activities and purification of wastewater in the integrated vertical constructed wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(7):1012-1017.
- [29] 肖 敏, 凌婉婷, 高彦征, 等. 丛枝菌根对菲芘污染土壤中几种酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(5):919-924.
- XIAO Min, LING Wan-ting, GAO Yan-zheng, et al. Effects of arbuscular mycorrhizae on enzymes in contaminated soils by phenanthrene and pyrene[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(5):919-924.
- [30] 冀永生, 高 辉, 顾泳洁, 等. 不同生境条件下苦楮丛枝菌根对根际土壤磷酸酶活性的影响[J]. *生态环境*, 2008, 17(4):1586-1589.
- JI Yong-sheng, GAO Hui, GU Yong-jie, et al. The impact of the arbuscular mycorrhizae of castanopsis sclerophylla on the phosphatase activity of rhizosphere in different habitats[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(4):1586-1589.
- [31] 山宝琴, 贺学礼, 白春明, 等. 荒漠油蒿(*Artemisia ordosica*)根围 AM 真菌分布与土壤酶活性[J]. *生态学报*, 2009, 29(6):3044-3051.
- SHAN Bao-qin, HE Xue-li, BAI Chun-ming, et al. Distribution of arbuscular mycorrhizal fungi and soil enzyme activities in the rhizosphere of *Artemisia ordosica* in desert[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6):3044-3051.
- [32] Tarafdar J, Marschner H. Phosphatase activity in the rhizosphere and hyphosphere of VA mycorrhizal wheat supplied with inorganic and organic phosphorus [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(3):387-395.
- [33] Wang F, Lin X, Yin R, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on the growth of *Elsholtzia splendens* and *Zea mays* and the activities of phosphatase and urease in a multi-metal-contaminated soil under unsterilized conditions[J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, 31(1-2):110-119.
- [34] 尹 炜, 李培军, 裴巧俊, 等. 植物吸收在人工湿地去除氮、磷中的贡献[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(2):218-221.
- YIN Wei, LI Pei-jun, QIU Qiao-jun, et al. Contribution of macrophyte assimilation in constructed wetland to nitrogen and phosphorous removal[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(2):218-221.
- [35] 李 侠, 张俊伶. 丛枝菌根真菌对氮素的吸收作用和机制[J]. *山西大同大学学报(自然科学版)*, 2008, 24(6):75-78.
- LI Xia, ZHANG Jun-ling. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to N uptake by plants[J]. *Journal of Shanxi Datong University(Natural Science Edition)*, 2008, 24(6):75-78.
- [36] Govindarajulu M, Pfeffer P, Jin H, et al. Nitrogen transfer in the arbuscular mycorrhizal symbiosis[J]. *Nature*, 2005, 435(7043):819-823.
- [37] Toussaint J, St-Arnaud M, Charest C. Nitrogen transfer and assimilation between the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* Schenck & Smith and Ri T-DNA roots of *Daucus carota* L. in an in vitro compartmented system[J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 2004, 50(4):251-260.
- [38] 陈丹明, 郭 娜, 郭绍霞. 丛枝菌根真菌对牡丹生长及相关生理指标的影响[J]. *西北植物学报*, 2010, 30(1):131-135.
- CHEN Dan-ming, GUO Na, GUO Shao-xia. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and some physiological indices of paeonia suffruticosa[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2010, 30(1):131-135.
- [39] Chinnusamy M, Kaushik B, Prasanna R. Growth, nutritional, and yield parameters of wetland rice as influenced by microbial consortia under controlled conditions[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2006, 29(5):857-871.
- [40] Miller S, Sharitz R. Manipulation of flooding and arbuscular mycorrhiza formation influences growth and nutrition of two semiaquatic grass species[J]. *Functional Ecology*, 2000, 14:738-748.
- [41] Lin Y, Jing S, Wang T, et al. Effects of macrophytes and external carbon sources on nitrate removal from groundwater in constructed wetlands[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 119(3):413-420.
- [42] Gilliam J. Riparian wetlands and water quality[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23(5):896.
- [43] 张虎成, 俞穆清, 田 卫, 等. 人工湿地生态系统中氮的净化机理及其影响因素研究进展[J]. *干旱区资源与环境*, 2004, 18(4):163-168.
- ZHANG Hu-cheng, YU Mu-qing, TIAN Wei, et al. Study progress on mechanisms and effect factors of nitrogen removal in constructed wetlands ecosystem[J]. *Journal of Arid Land Resources & Environment*, 2004, 18(4):163-168.
- [44] 陈明利, 吴晓芙, 胡曰利. 人工湿地去污机理研究进展[J]. *中南林业学院院报*, 2006, 26(3):123-127.
- CHEN Ming-li, WU Xiao-fu, HU Yue-li. The research review of constructed wetland systems for wastewater treatment[J]. *Journal of Central South Forestry University*, 2006, 26(3):123-127.
- [45] 贺 锋, 吴振斌, 陶 菁, 等. 复合垂直流人工湿地污水处理系统硝化与反硝化作用[J]. *环境科学*, 2005, 26(1):47-50.
- HE Feng, WU Zhen-bin, TAO Jing, et al. Nitrification and denitrification in the integrated vertical flow constructed wetlands[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(1):47-50.
- [46] 梁 威, 吴振斌, 周巧红, 等. 构建湿地基质微生物与净化效果及相关分析[J]. *中国环境科学*, 2002, 22(3):282-285.
- LIANG Wei, WU Zhen-bin, ZHOU Qiao-hong, et al. Analysis of substrate microorganisms in the constructed wetland and their correlation with wastewater purification effects[J]. *China Environmental Science*, 2002, 22(3):282-285.
- [47] 吴振斌, 梁 威, 成水平, 等. 人工湿地植物根区土壤酶活性与污水净化效果及其相关分析[J]. *环境科学学报*, 2001, 21(5):622-624.
- WU Zhen-bin, LIANG Wei, CHENG Shui-ping, et al. Studies on correlation between the enzymatic activities in the rhizosphere and purification of wastewater in the constructed wetland[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(5):622-624.
- [48] 宋福强, 杨国亨, 孟繁荣, 等. 丛枝菌根化大青杨苗木根际微域环境的研究[J]. *生态环境*, 2004, 13(2):211-216.

- SONG Fu-qiang, YANG Guo-ting, MENG Fan-rong, et al. The rhizospheric niche of seedlings of *Populus ussuriensis* colonized by arbuscular mycorrhizal (AM) fungi[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(2):211-216.
- [49] Caravaca F, Alguacil M, Azcon R, et al. Comparing the effectiveness of mycorrhizal inoculation and amendment with sugar beet, rock phosphate and *Aspergillus niger* to enhance field performance of the leguminous shrub *Dorycnium pentaphyllum* L.[J]. *Applied Soil Ecology*, 2004, 25(2):169-180.
- [50] Stottmeister U, Wießner A, Kusch P, et al. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment[J]. *Biotechnology Advances*, 2003, 22(1-2):93-117.
- [51] 梁威, 胡洪营. 人工湿地净化污水过程中的生物作用[J]. 中国给水排水, 2003, 19(10):28-31.
- LIANG Wei, HU Hong-ying. Biological effect of constructed wetland in wastewater treatment[J]. *China Water & Wastewater*, 2003, 19(10):28-31.
- [52] 张虎成, 田卫, 俞穆清, 等. 人工湿地生态系统污水净化研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, 5(2):11-15.
- ZHANG Hu-cheng, TIAN Wei, YU Mu-qing, et al. Study progress in constructed wetland ecosystems for sewage purification[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2004, 5(2):11-15.
- [53] 肖敏, 高彦征, 凌婉婷, 等. 菲、芘污染土壤中丛枝菌根真菌对土壤酶活性的影响[J]. 中国环境科学, 2009, 29(6):668-672.
- XIAO Min, GAO Yan-zheng, LING Wan-ting, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on enzymes activity in soils contaminated by phenanthrene and pyrene[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(6):668-672.
- [54] 袁丽环, 闫桂琴. 丛枝菌根化翅果油树幼苗根际土壤微环境[J]. 植物生态学报, 2010, 34(6):678-686.
- YUAN Li-huan, YAN Gui-qin. Rhizospheric soil of seedlings of *E-laeagnus mollis* colonized by arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(6):678-686.
- [55] Helal H, Sauerbeck D. Carbon turnover in the rhizosphere[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 1989, 152(2):211-216.
- [56] 宋会兴, 彭远英, 钟章成. 干旱生境中接种丛枝菌根真菌对三叶鬼针草(*Bidens pilosa* L.)光合特征的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(8):3744-3751.
- SONG Hui-xing, PENG Yuan-ying, ZHONG Zhang-cheng. Photosynthetic responses of AMF-infected and AMF-free *Bidens pilosa* L. to drought stress conditions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8):3744-3751.
- [57] Zhao X, Yu T, Wang Y. Effect of arbuscular mycorrhiza on the growth of *Camptotheca acuminata* seedlings[J]. *Journal of Forestry Research*, 2006, 17(2):121-123.
- [58] Volpin H, Phillips D, Okon Y, et al. Suppression of an isoflavonoid phytoalexin defense response in mycorrhizal alfalfa roots[J]. *Plant physiology*, 1995, 108(4):1449.
- [59] Guillon C, St-Arnaud M, Hamel C, et al. Differential and systemic alteration of defence-related gene transcript levels in mycorrhizal bean plants infected with *Rhizoctonia solani*[J]. *Botany*, 2002, 80(3):305-315.
- [60] 王树和, 王晓娟, 王茜, 等. 丛枝菌根及其宿主植物对根际微生物作用的响应[J]. 草业学报, 2007, 16(3):108-113.
- WANG Shu-he, WANG Xiao-juan, WANG Qian, et al. Responses of rhizosphere microorganisms to arbuscular mycorrhizal fungi and their effects on host plants[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2007, 16(3):108-113.
- [61] Gupta R, Krishnamurthy K. Response of mycorrhizal and nonmycorrhizal arachis hypogaea to NaCl and acid stress[J]. *Mycorrhiza*, 1996, 6(2):145-149.
- [62] Feng G, Zhang F, Li X, et al. Improved tolerance of maize plants to salt stress by arbuscular mycorrhiza is related to higher accumulation of soluble sugars in roots[J]. *Mycorrhiza*, 2002, 12(4):185-190.
- [63] 金樑, 陈国良, 赵银, 等. 丛枝菌根对盐胁迫的响应及其与宿主植物的互作[J]. 生态环境, 2007, 16(1):228-233.
- JIN Liang, CHEN Guo-liang, ZHAO Yin, et al. Response of arbuscular mycorrhizal fungi to salt stressed condition and the interrelation between AMF and host plant[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(1):228-233.
- [64] Al-Karaki G. Growth of mycorrhizal tomato and mineral acquisition under salt stress[J]. *Mycorrhiza*, 2000, 10(2):51-54.
- [65] 杨振翼, 廖声熙. 丛枝菌根对植物抗性的影响研究进展[J]. 世界林业研究, 2005, 18(2):26-29.
- YANG Zhen-yin, LIAO Sheng-xi. Advances in the research on the effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plant stress resistance [J]. *World Forestry Research*, 2005, 18(2):26-29.
- [66] 郭绍霞, 马颖, 李敏. 丛枝菌根真菌对彩叶草耐寒性的影响[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2009, 26(3):174-176.
- GUO Shao-xia, MA Ying, LI Min. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on cold tolerance of *coleus blumei* seedlings [J]. *Journal of Qingdao Agricultural University(Natural Science)*, 2009, 26(3):174-176.
- [67] Sheoran A, Sheoran V. Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review[J]. *Minerals Engineering*, 2006, 19(2):105-116.
- [68] Gonzalez-Chavez C, Harris P, Dodd J, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi confer enhanced arsenate resistance on *Holcus lanatus*[J]. *New Phytologist*, 2002, 155(1):163-171.
- [69] Turnau K, Kottke I, Oberwinkler F. Element localization in mycorrhizal roots of *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn collected from experimental plots treated with cadmium dust[J]. *New Phytologist*, 1993, 123(2):313-324.
- [70] 孔凡美, 史衍玺, 冯固, 等. AM菌对三叶草吸收、累积重金属的影响[J]. 中国农业生态学报, 2007, 15(3):92-96.
- KONG Fan-mei, SHI Yan-xi, FENG Gu, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on heavy metal tolerance of clover in contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(3):92-96.
- [71] Ray A, Inouye R. Effects of water-level fluctuations on the arbuscular mycorrhizal colonization of *Typha latifolia* L.[J]. *Aquatic Botany*, 2006, 84(3):210-216.
- [72] 钟凯, 袁玉清, 赵洪海, 等. 泰山丛枝菌根真菌群落结构特征[J].

- 菌物学报, 2010, 29(1):44-50.
- ZHONG Kai, YUAN Yu-qing, ZHAO Hong-hai, et al. Arbuscular mycorrhizal fungal community structure in rhizospheric soil of Taishan vegetation[J]. *Mycosystema*, 2010, 29(1):44-50.
- [73] 包玉英, 孙 芬, 闫 伟. 内蒙古荒漠地区丛枝菌根植物的初步研究[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(3):180-184.
- BAO Yu-ying, SUN Fen, YAN Wei. Preliminary study on arbuscular mycorrhizae and their morphological types of common plants in inner mongolia desert region[J]. *Journal of Arid Land Resources & Environment*, 2005, 19(3):180-184.
- [74] Radhika K, Rodrigues B. Arbuscular mycorrhizae in association with aquatic and marshy plant species in Goa, India[J]. *Aquatic Botany*, 2007, 86(3):291-294.
- [75] 贺学礼, 杨 磊, 唐宏亮, 等. 克隆植物芦苇(*Phragmites communis*)生长对 AM 真菌时空分布的影响[J]. 自然科学进展, 2007, 17(7):978-983.
- HE Xue-li, YANG Lei, TANG Hong-liang, et al. Effect of the growth of colonial reed (*Phragmites communis*) on spatial and temporal distribution of AM fungi[J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(7):978-983.
- [76] Kai W, Zhiwei Z. Occurrence of arbuscular mycorrhizas and dark septate endophytes in hydrophytes from lakes and streams in Southwest China[J]. *International Review of Hydrobiology*, 2006, 91(1):29-37.
- [77] Ortega-Larrocea M, Siebe C, Estrada A, et al. Mycorrhizal inoculum potential of arbuscular mycorrhizal fungi in soils irrigated with wastewater for various lengths of time, as affected by heavy metals and available P[J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 37(1-2):129-138.
- [78] Bever J, Schultz P, Pringle A, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi: More diverse than meets the eye, and the ecological tale of why[J]. *Bioscience*, 2001, 51(11):923-932.
- [79] 毕银丽, 任 婧. 接种菌根对根际微生物群落和磷营养的影响[J]. 能源环境保护, 2007, 21(3):25-28.
- BI Yin-li, REN Jing. Effect of inoculated AM fungi on microorganism and phosphorus concentration in rhizosphere soil[J]. *Energy Environmental Protection*, 2007, 21(3):25-28.
- [80] 何跃军, 钟章成, 刘锦春, 等. 石灰岩土壤基质上构树幼苗接种丛枝菌根(AM)真菌的光合特征[J]. 植物研究, 2008, 28(4):452-457.
- HE Yue-jun, ZHONG Zhang-cheng, LIU Jin-chun, et al. Photosynthetic characteristics of broussonetia papyrifera seedlings inoculated AM fungus in limestone soil substratum[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2008, 28(4):452-457.
- [81] 董昌金, 姚发兴, 赵 斌. 类黄酮对 AM 真菌侵染菌丝生长及酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(3):473-477.
- DONG Chang-jin, YAO Fa-xing, ZHAO Bin. Impact of hesperitin on infection hyphal growth and enzyme activity of AM fungus[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3):473-477.
- [82] Kivaisi A. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: A review[J]. *Ecological Engineering*, 2001, 16(4):545-560.
- [83] 华 涛, 周启星, 贾宏宇. 人工湿地污水处理工艺设计关键及生态学问题[J]. 应用生态学报, 2004, 15(7):1289-1293.
- HUA Tao, ZHOU Qi-xing, JIA Hong-yu. Designing cruxes and ecological issues of constructed wetland systems for wastewater treatment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(7):1289-1293.
- [84] Miller S. Arbuscular mycorrhizal colonization of semi-aquatic grasses along a wide hydrologic gradient[J]. *New Phytologist*, 2000, 145(1):145-155.
- [85] Ipsilantis I, Sylvia D. Interactions of assemblages of mycorrhizal fungi with two Florida wetland plants[J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35(2):261-271.
- [86] Cornwell W, Bedford B, Chapin C. Occurrence of arbuscular mycorrhizal fungi in a phosphorus-poor wetland and mycorrhizal response to phosphorus fertilization[J]. *American Journal of Botany*, 2001, 88(10):18-24.
- [87] 冯海艳, 冯 固, 王敬国, 等. 植物磷营养状况对丛枝菌根真菌生长及代谢活性的调控[J]. 菌物系统, 2003, 22(3):589-598.
- FENG Hai-yan, FENG Gu, WANG Jing-guo, et al. Regulation of P status in host plant on alkaline phosphatase (ALP) activity in intraradical hyphae and development of extraradical hyphae of AM fungi[J]. *Mycosystema*, 2003, 22(3):589-598.
- [88] 黄京华, 骆世明, 曾任森, 等. 磷胁迫下 AMF 对玉米生长的影响[J]. 广西农业生物科学, 2006, 25(4):321-324.
- HUANG Jing-hua, LUO Shi-ming, ZENG Ren-sen, et al. Effects of AMF on maize plant growth under phosphorus stress[J]. *Journal of Guangxi Agricultural and Biological Science*, 2006, 25(4):321-324.
- [89] 袁东海, 高士祥, 任全进, 等. 几种挺水植物净化生活污水总氮和总磷效果的研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4):77-80.
- YUAN Dong-hai, GAO Shi-xiang, REN Quan-jin, et al. Study on purified efficiency of phosphorus and nitrogen from domestic sewage by several macrophytes in vertical flow constructed wetlands[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2004, 18(4):77-80.
- [90] ZHANG Mei-qing, WANG You-shan, ZHANG Chi. The ecological distribution characteristics of some genera and species of fungi in northern China[J]. *Acta Mycologica Sinica*, 1994, 13(3):166-172.
- [91] 徐 辉, 唐 明, 高瑞霞, 等. 土壤因子对府谷清水川流域砒砂岩区刺槐和沙棘 AMF 的影响[J]. 西北植物学报, 2008, 28(12):2500-2505.
- XU Hui, TANG Ming, GAO Rui-xia, et al. Influences of soil factors on *Robi nia pseudoacacia* and *Hippophae hamnoides* AMF in soft rock zone of Fugu qingshuichuan valley[J]. *Acta Botanica Boreale-Occidentalia Sinica*, 2008, 28(12):2500-2505.
- [92] 张云贵, 刘 珍, 范巧兰, 等. 盆栽基质对 AM 真菌及宿主植物生长发育的影响[J]. 山西农业科学, 2011, 39(8):809-811.
- ZHANG Yun-gui, LIU Zhen, FAN Qiao-lan, et al. The influences of various growth mediums to the growth of AMF and its host plants[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2011, 39(8):809-811.