

丛枝菌根真菌(AMF)在土壤固碳中的作用

鲁青原^{1,2}, 郝春博¹

(1 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 10083;

2 中国地质调查局滨海湿地生物地质重点实验室, 青岛 266071)

摘要:传统观点认为,丛枝菌根真菌(AMF)与维管植物共生,且在植物生长的同时有助于将植物光合作用的产物转化为难降解有机物,其释放的球囊霉素还可以促使土壤团聚体的形成,使土壤中的碳能够更好地封存,从而有利于土壤中碳的固定。特别是在未来 CO₂ 浓度升高的环境更加有利于 AMF 的生长,科学家推测它能在土壤固碳方面起到关键作用。但是,目前微生物的研究提出了与传统认识相悖的观点,由于激发效应的存在,在 CO₂ 浓度升高后,AMF 很可能会帮助土壤中的腐食性生物获取到营养物质,并且会帮助植物摄取更多的 NH₄⁺,这使腐食性微生物的代谢活动更加积极。最后,这些腐食性微生物分解的碳超过其固定的碳,形成了碳的净亏损。综述了目前 AMF 与土壤固碳相关的研究进展,总结了 AMF 在土壤固碳过程中的作用,提出了今后需加强的研究内容。

关键词:丛枝菌根真菌;球囊霉素;固碳;CO₂ 浓度

中图分类号: P593

文献标识码: A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2016.08005

全球碳循环研究表明,生态系统中土壤碳库是大气圈的 3.3 倍,是生物圈的 4.5 倍^[1],土壤碳库影响着湿地生态系统的营养状态、河口的生产力以及地区的生态安全与粮食安全^[2,3]。特别是湿地生态系统比任何其他生态系统都更具固碳能力,其碳贮量相当于当今全球矿物燃料释排放 100 余年的总和^[4]。尤其是滨海湿地特殊的地理位置,其土壤通过对碳的埋藏作用而缓解大气 CO₂ 更为直接。要利用好这一碳汇资源,必须进行土壤碳动态相关的科学研究^[5,6],特别是对滨

海湿地土壤的碳的累积机制、影响因素及演变趋势要有很清楚的理解。

在土壤固碳过程中微生物起到重要作用。目前科学家采用同位素或分子生物学技术对这些菌根真菌(mycorrhizal fungi-MF)进行研究^[7],发现 MF 在土壤中可以固定碳。这一发现是极为重要的,因为若碳在土壤中长时间贮存,有助于抵消温室气体向大气排放。研究表明,很多真菌种均在扮演着分解碳的角色而使土壤成为碳源,但 MF 是个例外。特别是丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi-AMF)与维管植物共生,帮助它们生长的同时,也能够将植物光合作用的产物转化为难降解有机物,其释放的球囊霉素还可以促使土壤团聚体的形成,使土壤中的碳能够更好的封存。特别是在未来 CO₂ 浓度升高的环境更加有利于 AMF 的成长,微生物学家推测它能在土壤固碳方面起到关键作用。但是,现代微生物的研

收稿日期:2016-04-25

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(2652015114);国土资源公益性行业科研专项(201111023);国家自然科学基金项目(41240022;40872167);中国地质调查局地质调查项目(DD20160144;1212010611402)

作者简介:鲁青原(1991—),男,在读硕士,主要从事地质微生物的研究工作。E-mail: QDdyr2009@126.com

究提出了与上述认识相悖的观点^[8, 9]。由于激发效应的存在,在 CO₂ 浓度升高后,AMF 很可能会帮助土壤中的腐食性生物更加容易获取到营养物质,并且会帮助植物摄取更多的 NH₄⁺,这使腐食性微生物的代谢活动更加积极。最后,这些腐食性微生物分解的碳超过了额外固定的碳,形成了碳的净亏损,亦即是 AMF 在土壤固碳过程中起到了负面作用。

1 丛枝菌根真菌(AMF)与土壤碳汇

1.1 丛枝菌根真菌(AMF)

丛枝菌根真菌(AMF)是一种伴随维管植物根部生长的真菌,在生物分类上,AMF(纲)属于球囊菌门,其下可再细分为 6 个属:无梗囊霉属、内样囊霉属、巨孢囊霉属、盾孢囊霉属、球囊霉属、囊霉属^[10-12],与外生菌根真菌不同的是,AMF 的菌丝可以穿透植物根部的表皮层,抑或穿透复合基质的土壤颗粒行使其功能。AMF 与约 80% 的陆生植物共生,并附着于植物根部,它们为植物捕获营养物质(主要为有机磷)以换取主要为己糖的养料并通过菌丝扩散到 AMF 内部^[13-15]。当营养物质过量时,AMF 会争夺植物储存的碳,此时 AMF 与植物的关系更加类似于寄生^[16]。AMF 微小的菌丝能够穿透植物根部的表皮细胞,并在其内部延伸,不断伸展成网状,最后进一步分支形成丛状物,通过这些丛状物,AMF 与植物间得以进行物质交换^[13]。已有研究估测植物所固定的碳有 5%~85% 会直接输送至根部与 AMF 交换营养物质^[17]。

1.2 球囊霉素

考虑到植物向 AMF 提供的这些含碳化合物,不难想象 AMF 在土壤固碳和全球碳平衡中扮演着关键角色。与一般的土壤细菌相比,AMF 能够将更高比例的碳转化为难降解的化合物^[18]:在现今 CO₂ 浓度环境下 AMF 利用很大比例(约 20%)的植物净光合作用产物积累形成氨基多糖、角素、糖蛋白和球囊霉素,这些化合物相当难以降解,在土壤固碳中拥有重要地位^[19]。AMF 的菌

丝从产生到死亡时间短暂,并有特有的衰亡周期,Driver 等^[20]研究发现球囊霉素不是 AMF 菌丝的分泌物,而是菌丝死亡后的产物,AMF 利用角素构建菌丝的细胞壁并在菌丝细胞衰亡后释放球囊霉素。Rillig 等^[21]在夏威夷通过 C¹⁴ 标记球囊霉素估测其居住周期是 6~42 a;Treseder 和 Allen^[17]估计在农业土壤中约 30%~60% 的土壤碳归功于球囊霉素的作用。尽管当前文献已经确定球囊霉素是 AMF 的产物,但其准确的分子式还不得而知。

1.3 土壤团聚体和球囊霉素

球囊霉素可以帮助固定土壤微粒形成团聚体,这些团聚体可能会保护土壤中的有机物免受氧气和微生物分解者的影响,从长远来看可以存储更多的碳。球囊霉素也因此被认为是 AMF 提高土壤碳储量的关键环节。这些观测表明球囊霉素有很大的固碳潜能。在汇集土壤碳方面,由于压缩有机物质可以进一步减缓电子受体如氧、硝酸盐等的迁移时间,土壤微粒的团聚可以延长碳的分解周期。AMF 导致土壤微粒团聚的原因有很多,AMF 菌丝以及死亡后产生的球囊霉素的积聚被认为是主要的因素^[22]。球囊霉素就好比疏水性物质,能够将有机物与土壤微粒与水隔离^[19]。如今土壤团聚和球囊霉素已经被联系到一起,还有许多文献表明土地利用的变化,比如农田的增加^[23, 24]、单一作物的培养^[25]、使用杀虫剂等均会对土壤团聚和 AMF 产生重要影响^[26]。

1.4 AMF 与 C₃/C₄ 植物的共生关系

在 C₃ 植物中,大气中的 CO₂ 被磷酸核酮糖酶固定为 3-磷酸甘油酸盐(C₃H₅RO₇P),然后进行卡尔文循环。而 C₄ 植物有 2 个独立的细胞场所进行碳的固定,允许它们先临时将 CO₂ 固定,再输送至磷酸核酮糖酶所在的场所^[27]。由于磷酸核酮糖的厌氧性,C₄ 植物为其提供封闭厌氧的场所可以提高碳固定的效率。有结论表明相对于 C₄ 植物 C₃ 植物的 C 更加有限,也就是说 AMF 要更加努力地获取 C₃ 植物的 C^[28],Johnson 等^[29]的一个实验结论支持了这种假设。另外,可以推断相对于 C₃ 植物 C₄ 植物会向 AMF 输送更多的 C,这使人们认为 C₃ 植物生长的土壤相对有

着更强的固碳能力。关于 AMF 与 C_3/C_4 植物共生的差别仍然在研究之中。目前还没有文献确切的说明 C_3 和 C_4 植物在 C 输送上的对比情况。

2 土壤固碳的悖论

传统的理论认为,AMF 能将一部分植物的光合作用产物转化为难降解有机物,并帮助土壤形成团聚体使其免受微生物的侵袭,而未来 CO_2 浓度的升高会促进植物与 AMF 的生长,使得人们对于 AMF 寄予厚望,推测它能固定更多的 C 从而有效调节土壤—大气之间的碳平衡,能够在未来 CO_2 浓度升高的情况下起到缓冲作用。然而,科学家通过在高 CO_2 浓度(eCO_2)条件下进行的微宇宙实验得出了与上述预期相反的结论^[8],随后有科学家从理论上进行了推测^[9]。

2.1 高 CO_2 浓度(eCO_2)条件下的模拟对照实验

科学家对比了不同条件下的 AMF 对于 C 分解比率的影响^[8]。首先,将有机物加入到装有无氮土壤和野燕麦的菌丝内生生长袋中,通过改变袋子内 CO_2 和 N 的浓度以及是否存在 AMF 设置了 8 组不同条件下的对照,最后,通过同位素标记测量有机物剩余的比率。培养 10 周后,实验结果显示 AMF 提高了内生长菌丝袋中的 C 的分解率:在没有 AMF 的情况下,升高的 CO_2 对于总 C 并无影响,但是在存在 AMF 的情况下 eCO_2 组中有机物的剩余比率减少了 9%,尤其是在加入 N 的情况下,土壤中总碳的减少率更是达到了 19%。

研究者通过实验以及大量的数据分析,探究了 eCO_2 对于土壤中有效 N 组成的影响^[8]。 eCO_2 下植物对于 NO_3^- 的摄取能力降低,土壤中 NO_3^- 的含量会显著升高,相对的, eCO_2 不会影响植物利用 NH_4^+ 的能力,而土壤 NH_4^+ 的含量会相应下降。这说明 eCO_2 条件下植物会更多地利用 NH_4^+ 作为氮源。

为了探究这种植物摄取 N 方式的改变是不是造成碳分解量增加的主要原因之一,研究者在对照组中加入了双氰胺,这是一种硝化抑制剂,不会影响植物与根上的 AMF 正常生长^[30]。在存在 AMF 的内生长菌丝袋内,没加入双氰胺的一

组与之前的结果一致, eCO_2 使得 C 的分解量增加,而加入双氰胺的袋子中 eCO_2 对 C 的分解量基本没有影响,这说明高的 NH_4^+ 含量基本可以抵消 eCO_2 对 C 分解的负面影响。

2.2 实验结论:为什么会出现碳的亏损

通过以上的实验以及综合分析其他过往研究的数据结论。Cheng 认为在 eCO_2 条件下 AMF 对于 C 分解量的影响机制主要可归结于以下 3 点:①AMF 增长时菌丝不断延伸,这给予腐殖微生物更多接触有机物颗粒的机会;②AMF 能慢慢释放出低浓度的易分解 C 供腐殖微生物利用;③AMF 能迅速捕获土壤中新释放的 NH_4^+ ,从而将腐殖微生物从代谢抑制中解脱出来。

根据 Cheng 的实验结论,Kowalchuk 进行了更加详细的阐述^[9]:由于有效氮不足会抑制植物的生长和光合作用产物,植物会通过推动 AMF 对有机质的分解来从其中获取氮,在 AMF 作用下 N 会以氨氮的形式保存,这是有利于植物生长的。但是事实上,这种植物增长导致的固定碳速率的增加不会影响总的固碳能力,额外的固定碳是没有办法持续贮存在土壤中的。这应该是多种专门分解有机质的细菌和真菌(saprotrophs,腐食性生物)复杂的交互作用的结果,AMF 似乎是以刺激这种当地微生物群落的方式来增加有机质的分解,这是土壤激发效应的经典案例。这种激发效应指的是土壤中的微生物被新添加的有机质刺激,导致它们不但分解了这些添加的有机基质,还会额外地分解土壤中原本存在的有机质,这样最终消耗的基质就会超过添加的基质,形成 C 的净亏损。激发效应可以很好地应用于降解有机污染,通过基质对于微生物的生物刺激来降解更多的有机污染物,然而在保留或者说供应土壤的有机碳方面它却起到了消极的作用。

Kowalchuk 最后提出了 4 种概念模型来描述 AMF 对固定碳的影响:①存在有效的 AMF 和可以被有机基质刺激的腐蚀性生物群落,会出现土壤中固定碳的净亏损,这也是 Cheng 等人观测到的情况;②如果不存在 AMF 或者 AMF 适应性不良,则会维持碳平衡状态;③如果土壤中的腐蚀性生物不能很好地适应 AMF 伴生物的刺激或者它们缺乏降解有机物的能力,也不会出现固碳的

亏损;④当几乎不存在 AMF 并且腐蚀性生物难以适应时会出现纯粹的碳固定。

3 AMF 与土壤固碳之间的不确定性

Cheng 的结论发表后也产生了一些质疑。Verbruggen 认为,Cheng 的实验不能完全解释在长周期下植物与微生物生长加快对有机物质增加的潜在贡献,并且短时间内 CO_2 与 N 突然增高与现实其浓度持续上升对土壤碳库的影响可能会存在差异^[31]。

3.1 长周期下 AMF 对于固碳的潜在贡献

土壤的碳汇是来自全部动物、植物、微生物产生的土壤有机物的净积累,而在其中有机物的分解是不断进行着的,通过某一时段的分解比率来评价土壤碳的盈亏状况并不是十分严谨。

某种营养物质的增加确实会导致微生物的分解能力提高,但是评价碳的盈亏必须考虑到生物量增加带来的变化。比如说 AMF 所产生的难降解有机物和球囊霉素,从长远看对有机物的积累是有潜在贡献的。从短期看,AMF 的作用确实会额外分解掉不稳定的植物凋落物,从而导致土壤 C 的减少,但由于 AMF 产生的难降解有机物可以长期存在,从总体碳平衡来看可以抵消这种负面的作用。由于 AMF 可以促进土壤团聚体的形成,有效保护有机物,随着时间的推移其贡献度还会进一步被放大。而且植物生产力的提高也会向土壤输出更多的凋落物。

3.2 实验条件和现实的差异

此外,AMF 对腐食微生物的激发效应确实存在,但激发效应是否会随着时间的推移持续产生作用还值得探究。而且这种激发效应可能只是 CO_2 短时间内突然升高带来的副作用,如果 CO_2 像现实一样持续稳定的升高则不会出现。而且现实中也会有其他的变量,比如说在 eCO_2 条件下产生有机物质质量的提高,而植物凋落物的增加会覆盖其下的植物暴露的面积,从而有效的缓冲调节 eCO_2 带来的影响。因此,这种激发效应的不确定性很多,必须衡量它是否能够抵消 AMF

对于有机物质量提升的贡献。

3.3 实验改进方案

Verbruggen 同样提出了实验的一些改进方案,首先,可以对土壤和有机物进行预处理,调整土壤团聚状况以及有机物的数量、质量使其保持一致。另外,在 NoneAMF 组中,植物根部也要接触有机物从而能够进行更好的对照。

3.4 正确认识 AMF 的作用

AMF 的功能有很多,仅仅以固碳作用为单一标准衡量其价值可能会走入误区。短期的实验也不能否认 AMF 对长期碳收益的贡献(促进植物生长、产生难降解有机物、形成土壤团聚),这些都需要更长周期的实验来验证。

激发效应的存在可能会使一些利用植物—土壤系统的固碳假说成为空谈,学者也在积极寻求应对的方法。值得关注的是在 eCO_2 下 C_3 植物的生长状况显著提高。Curtis 等观测到 C_3 江口莎草(*Scirpusolneyi*)的根系生长在 eCO_2 下显著提高,而 C_4 的江口草(*Spartina patens*)则并未有此现象^[32]。这种区别对于在 eCO_2 下 AMF 的表现有重要的指示意义,可以假设在 CO_2 较高的状况下 AMF 对 C 的净堆积贡献率会降低这一情况在 C_4 植物群落下并不适用。另外,通过控制土壤中氮和有机物的质量以及土地的管理,土壤这种分解模式的平衡会朝向积极的方面倾斜。

4 结论

研究证明,随着大气 CO_2 浓度的升高,有利于加强植物的光合作用,并将大气中 CO_2 转换而固定于地下,从而对不断上升的 CO_2 浓度起到缓解作用。AMF 对这一潜在的额外的固定的碳起到关键作用。AMF 与维管植物共生,帮助它们生长的同时也能够将植物光合作用的产物转化为难降解有机物,其释放的球囊霉素还可以促使土壤团聚的形成,使土壤中的碳能够更好的封存。特别是在未来 CO_2 浓度升高的环境更加有利于 AMF 的成长,这使相当一部分人憧憬它能在土壤固碳方面起到关键作用。但是,目前与上述认识相悖的观点指出:由于激发效应的存在,在 CO_2

浓度升高后,AMF 很可能会帮助土壤中的腐食性更加容易获取到营养物质,并且会帮助植物摄取更多的 NH_4^+ ,这使腐食性微生物的代谢活动更加积极。最后,这些腐食性微生物分解的碳超过了额外固定的碳,形成了碳的净亏损,AMF 在这个过程中起到了负面作用。

然而,有关上述讨论目前还存在许多需要澄清的争议。首先,Cheng 的实验进行了高低 CO_2 浓度的对照,而现实中 CO_2 浓度是缓慢上升的,激发效应在 CO_2 浓度不是急剧升高的情况下能不能产生作用还有待商榷。而且目前科学家的实验结果虽然说明了更多的碳被分解了,但 AMF 对植物生长的好处、其产物的难降解性、球囊霉素形成土壤团聚体对有机物的保护作用还是不能否定的,从长远来看,能否抵消掉激发效应的副作用还需要更长周期的实验来验证。此外,还不清楚外生菌根真菌是否对碳贮有贡献,由 AMF 产生的糖蛋白类球囊霉素被认为可在土壤中保存数十年,但不清楚在某一特定条件下是否会由其他菌根形成类似的物质。许多类似的菌根破坏和吸收土壤有机物质的功能^[33],并以 CO_2 形式释放到大气中。最后,目前对菌根是否有利于固碳还缺乏全面的评估数据,亦即是土壤碳评估中需考虑 3 方面的碳分量值:①菌根残余沉积部分碳分量;②由菌根分解部分的碳分量;③由菌根增加植物生长而额外固定的碳分量。

参考文献:

- [1] Lal R. Carbon sequestration in dryland ecosystems[J]. Environmental management, 2004, 33(4): 528-544.
- [2] Graetz D A, Reddy K R, Nair V D, et al. Evaluation of Constructed Wetlands on Phosphate Mined Lands in Florida [R]. Florida Institute of Phosphate Research: Bartow, FL, USA, 1997.
- [3] Nair V D, Graetz D A, Reddy K R, et al. Soil development in phosphate-mined created wetlands of Florida, USA[J]. Wetlands, 2001, 21(2): 232-239.
- [4] Mitsch W, Gosselink J. Wetlands[M]. 4th ed. New York: John Wiley and Sons, 2007.
- [5] Mehlich A. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. Communications in Soil Science & Plant Analysis, 1984, 15(12): 1409-1416.
- [6] Schlesinger W H. Carbon sequestration in soils[J]. Science, 1999, 284(5423): 2095.
- [7] Clemmensen K E, Finlay R D, Dahlberg A, et al. Carbon sequestration is related to mycorrhizal fungal community shifts during long-term succession in boreal forests[J]. New Phytologist, 2015, 205(4): 1525-1536.
- [8] Cheng L, Booker F L, Tu C, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi increase organic carbon decomposition under elevated CO_2 [J]. Science, 2012, 337(6098): 1084-1087.
- [9] Kowalchuk G A. Bad news for soil carbon sequestration [J]. Science, 2012, 337(6098): 1049-1050.
- [10] Dodd J, Boddington C, Rodriguez A, et al. Mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) from different genera: form, function and detection[J]. Plant and Soil 2000, 226(2): 131-151.
- [11] Schüßler A, Schwarzott D, Walker C. A new fungal phylum, the Glomeromycota: phylogeny and evolution[J]. Mycological Research, 2001, 105(12): 1413-1421.
- [12] Schüßler A, Walker C. The Glomeromycota: a species list with new families and new genera[M]. Create Space Independent Publishing Platform, United States, 2011.
- [13] Smith S E, Read D J. Mycorrhizal Symbiosis[M]. 3rd ed. London: Academic Press, 2008.
- [14] Tarafdar J C, 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.
- [15] Shachar-Hill Y, Pfeffer P E, Douds D, et al. Partitioning of intermediary carbon metabolism in vesicular-arbuscular mycorrhizal leek[J]. Plant Physiology, 1995, 108(1): 7-15.
- [16] Johnson D, Leake J R, Read D J. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in carbon and nutrient cycling in grassland [C]// Gadd G M. Fungi in Biogeochemical Cycles, vol. 24. Cambridge: Cambridge University Press/British Mycological Society, 2006: 129-150.
- [17] Treseder K K, Allen M F. Mycorrhizal fungi have a potential role in soil carbon storage under elevated CO_2 and nitrogen deposition[J]. New Phytologist, 2000, 147(1): 189-200.
- [18] Six J, Frey S, Thiet R, et al. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(2): 555-569.
- [19] Wright S F, Upadhyaya A. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Soil Science, 1996, 161(9): 575-586.
- [20] Driver J D, Holben W E, Rillig M C. Characterization of glomalin as a hyphal wall component of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(1): 101-106.

- [21] Rillig M, Wright S, Nichols K, et al. Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils[J]. *Plant and Soil*, 2001, 233(2): 167-177.
- [22] Rosier C L, Hoyer A T, Rillig M C. Glomalin-related soil protein: Assessment of current detection and quantification tools[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(8): 2205-2211.
- [23] Lumini E, Orgiazzi A, Borriello R, et al. Disclosing arbuscular mycorrhizal fungal biodiversity in soil through a land-use gradient using a pyrosequencing approach[J]. *Environmental Microbiology*, 2010, 12(8): 2165-2179.
- [24] Spohn M, Giani L. Water-stable aggregates, glomalin-related soil protein, and carbohydrates in a chronosequence of sandy hydromorphic soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(9): 1505-1511.
- [25] Fultz L M, Moore-Kucera J, Zobeck T M, et al. Aggregate carbon pools after 13 years of integrated crop-livestock management in semiarid soils[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2013, 77(5): 1659-1666.
- [26] Wilson G W T, Rice C W, Rillig M C, et al. Soil aggregation and carbon sequestration are tightly correlated with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: results from long-term field experiments[J]. *Ecology Letters*, 2009, 12(5): 452-461.
- [27] Ji Y, Zhou G, Lv G, et al. Expansion of *Phragmites australis* in the Liaohe Delta, north - east China[J]. *Weed research*, 2009, 49(6): 613-620.
- [28] Peat H J, Fitter A H. The distribution of arbuscular mycorrhizas in the British flora[J]. *New Phytologist*, 1993, 125(4): 845-854.
- [29] Johnson N C, Wolf J, Koch G W. Interactions among mycorrhizae, atmospheric CO₂ and soil N impact plant community composition[J]. *Ecology Letters*, 2003, 6(6): 532-540.
- [30] Solomon S D, Manning Z, Chen M, et al. Climate Change 2007: The physical science basis contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge Univ Press, 2007.
- [31] Verbruggen E, Veresoglou S D, Anderson I C, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi-short-term liability but long-term benefits for soil carbon storage? [J] *New Phytologist*, 2013, 197(2): 366-368.
- [32] Curtis P S, Balduman L M, Drake B G, et al. Elevated Atmospheric CO₂ Effects on Belowground Processes in C₃ and C₄ Estuarine Marsh Communities[J]. *Ecology*, 1990, 71(5): 2001-2006.
- [33] Friese C F, Allen M F. The Spread of VA Mycorrhizal Fungal Hyphae in the Soil: Inoculum Types and External Hyphal Architecture[J]. *Mycologia*, 1991, 83(4): 409-418.

AMF HELPS IN CARBON SEQUESTRATION IN SOIL

LU Qingyuan^{1,2}, HAO Chunbo¹

(1 School of Water Resources and Environments, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2 Key Laboratory of Coastal Wetland Biogeosciences, China Geologic Survey, Qingdao 266071, China)

Abstract: AMF form symbioses with most Vascular plants, which may enhance plant growth, while converting the products of photosynthesis to refractory organic matter. The glomalin released after its hyphal death also helps bind soil particles to form soil aggregates, Thus soil aggregation may further contribute to long-term carbon storage by protecting soil organic matter from oxygen and microbial decomposers. Particularly in the future, under elevated CO₂ concentration AMF have shown increases in growth. Scientists expect that AMF can play a significant role in soil carbon sequestration. However, The research results recently did not agree with the traditional view, because of the “priming effect”, when CO₂ concentration increased, AMF probably gives more chance for saprotrophs to access the nutrient substance, and rapid removal of newly released NH₄⁺, thus releases saprotrophs from metabolic repression, resulting in degradation of the added substrate and of additional organic matter in the soil. This paper reviews the current research progress of soil carbon-sequestration-related AMF, summarizes the role of AMF in carbon sequestration in soil, and puts forward many issues need to be further clarified.

Key words: arbuscular mycorrhiza fungus; glomalin; carbon sequestration; CO₂ concentration