

# Overview of Rhizosphere Carbon Cycle and Microbial Function under Plant Competition

Lirong He<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group, Xi'an Shaanxi

<sup>3</sup>Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, The Ministry of Natural Resources of China, Xi'an Shaanxi

<sup>4</sup>Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an Shaanxi

Email: 156144982@qq.com

Received: Apr. 2<sup>nd</sup>, 2019; accepted: Apr. 17<sup>th</sup>, 2019; published: Apr. 24<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

In recent years, in order to truly reveal the mechanism of plant competition affecting the rhizosphere carbon cycle process from the perspective of material metabolism and promote the understanding of the geochemical process, more studies have been conducted on the effect of vegetation competition on soil carbon cycle and microbial diversity. The changes of carbon cycle and microbial functional groups in rhizosphere soil during vegetation succession were reviewed in this paper. The wide application of stable isotope detection technology makes it possible to connect rhizosphere microflora with its functions and establish some microflora actively participating in special metabolic processes in a deep understanding of the carbon cycling process in plant-soil-microorganism. The paper also puts forward the issues worthy of further study: the application of stability isotope detection technology to rhizosphere microorganism ecology and corresponding carbon cycle research, analyzes the carbon cycle response of different succession stages of plant competition laws, clearly confirms one of the key microbial functional groups, from the metabolism point of view to reveal the mechanism of the rhizosphere carbon cycle process, and promote the understanding of the biochemistry process on the planet.

## Keywords

Plant Competition, Carbon Cycle, Microbial Function

---

# 植物竞争条件下根际碳循环及微生物功能研究概述

何俐蓉<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安

<sup>2</sup>陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安

<sup>3</sup>自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安

<sup>4</sup>陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安

Email: 156144982@qq.com

收稿日期: 2019年4月2日; 录用日期: 2019年4月17日; 发布日期: 2019年4月24日

## 摘要

近年来, 为从物质代谢角度真实提示植物竞争影响根际碳循环过程的机理, 促进对地球生物化学过程的认识, 针对植被竞争对土壤碳循环和微生物多样性开展了较多的研究。本文综述了植被演替过程中根际土壤碳素循环及微生物功能群的变化情况, 得出: 植物竞争通过影响植物生理生态、土壤养分状况及微生物多样性等推动植被演替, 并影响碳素的循环过程; 稳定性同位素探测技术的广泛应用, 使得对植物-土壤-微生物中碳的循环过程有深刻认识, 能很好地将根际微生物类群与其功能联系起来, 并确立一些积极参与特殊代谢过程的微生物类群。同时还提出了值得进一步研究的问题: 将稳定性同位素探测技术应用于根际微生物生态及相应碳循环的研究中, 分析碳素循环对不同演替阶段植物竞争的响应规律, 明确其中关键的微生物功能群, 旨在从物质代谢角度揭示根际碳循环过程的机理, 促进对地球生物化学过程的认识。

## 关键词

植物竞争, 碳循环, 微生物功能

Copyright © 2019 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

植物竞争是植物与土壤相互影响和作用的过程, 它不仅推动植被的发展与演替, 更会导致以物质、能量和信息流动为代表的结构和功能的演变。碳素循环是物质流动的主要元素之一, 分析它在植被竞争过程中的响应规律, 对认识植被竞争的生物地球化学循环机理有重要的科学价值。微生物是碳素代谢的主要驱动力, 其物种、代谢等的多样性导致其在碳素循环过程中的功能作用存在较大差距。目前针对植被竞争, 对土壤碳循环和微生物多样性开展了部分研究, 从代谢功能上建立植被竞争与碳素过程和微生物功能群的真实关系, 揭示植物竞争条件下碳素循环与固定的生物地球化学循环机理, 但由于根际系统的复杂性和实验分析手段的限制, 从而制约了对植被竞争和物质代谢等关键生态学“瓶颈”问题的认识。

## 2. 根际土壤碳素循环研究

### 2.1. 研究陆地生态系统碳素循环的重要科学价值和现实意义

陆地生态系统是人类赖以生存与持续发展的生命支持系统, 碳储量巨大, 是大气中 CO<sub>2</sub> 重要的源和汇, 其碳循环成为全球碳循环和全球气候变化中极其重要的一个环节, 对气候变化具有明显的反馈作用 [1] [2]。Metz 认为当前全球碳循环研究中最大的不确定性主要来自陆地的生态系统碳循环 [3], 有关研究

表明全球植被和土壤共储存 2200 Gt (1 Gt = 10<sup>9</sup> 吨)有机碳[4] [5], 是大气中碳储量的 3 倍, 而陆地生态系统与大气之间净 CO<sub>2</sub> 交换速率决定于光合作用、呼吸作用和土壤微生物分解之间的平衡。生态系统碳储量及其与大气 CO<sub>2</sub> 交换速率的微小变化就能导致大气 CO<sub>2</sub> 浓度明显波动, 并会影响陆地生态系统的诸多过程[6] [7]。在国际地圈—生物圈研究计划(IGBP)中, 碳循环已经成为全球变化与陆地生态系统(GCTE)等多个核心计划中的重要研究内容。

## 2.2. 根际系统碳素循环与分配是陆地碳循环的最活跃的区域

土壤是陆地生态系统最大的碳库, 其贮存的有机碳占整个陆地生态系统碳库的 2/3, 约为植物碳库的 3 倍、大气碳库的 2 倍[8], 而根际微生态系统是联结植物、土壤和微生物的纽带, 是有机地联系大气圈、生物圈、土壤圈物质循环的核心区域, 是全球碳素生物化学循环中最活跃的部分[9] [10], 也是全球碳素循环系统性机理研究的重点。植物通过物质流的压力差将光合产物从叶片运到根系等各个组织库中贮存起来[11], 剩余的光合产物则通过植物根系以各种形式将输入到根部的有机、无机化合物释放到周围土壤, 形成根际沉积(rhizodeposition); 另一方面, 进入到土壤中的碳素经过一系列的生物化学过程, 在根系、土壤和微生物中周转与再分配, 从维持根际碳吸收和释放平衡[12] [13]。

目前, 国内外有关植物—土壤碳循环中的研究主要集中在植物体内碳素的分配与循环, 由于研究方法和技术的局限性, 虽然根际微生态系统碳素循环研究取得了一定进展, 但是仍处于起步阶段, 且主要集中于某一单元及其相互关系的探讨[14] [15] [16]。对碳素结构、数量及其在植物-土壤界面的分配与周转动态关系方面的研究依然十分有限, 特别是根际系统中碳素周转的微生物作用机理还很不清楚, 因此有必要针对各类生态系统和环境胁迫下根际系统碳素分配及调节机制、根际与外环境的碳素交换与机理、微生物在根际微生态系统物质、能量与信息传递中的作用机理等方面进行深入研究。

## 2.3. 微生物在根际碳素循环的效应研究是一个重要的前沿领域

根际土壤微生物是陆地生态系统中各种生命元素生物地球化学循环的重要驱动力和主要参与者, 其将有机养分转化成无机养分促进植物吸收和利用, 而根际土壤则为微生物代谢提供场所和介质, 根际土壤、植物、微生物的相互作用维持着土壤生态系统的生态功能。根际微生物种类、数量可以直接影响土壤的生物化学活性及土壤养分的组成与转化, 反过来根际效应又影响根际微生物的营养选择和富集[17]。

研究证实根际微生物在碳素固定中具有极其重要的作用, 约 40%的光合产物通过根系分泌到根际土壤, 并被微生物呼吸代谢分解或者贮存在微生物体内[18], 根系分泌物作为微生物利用的碳源[19], 可以增加根际微生物的呼吸[20] [21]。在根际微生物中, 菌根真菌与植物—土壤碳素相互关系中的作用最为明显[13], 其可以利用 30%的近期光合产物[2], 菌丝是碳素代谢周转最快的部分, 周转周期为 5~9 天[22], 远超一般微生物的周转周期(7~95 天) [23], 微生物对碳素周转周期的差异主要取决于对碳源利用的微生物功能群的差异[13]。

# 3. 植物竞争与根际碳循环

## 3.1. 植物竞争的生态学意义

植物个体间的竞争是自然界普遍存在的一种作用过程, 植物通过竞争获取各自所需资源, 求得生存和发展竞争可以发生在同种植物的不同个体之间(种内竞争)或异种植物之间(种间竞争), 植物的生态位需求越接近, 竞争也就越强烈。同一个种在形态和生理上的可塑性小, 因此, 种内竞争往往比种间竞争激烈[24]。植物竞争引起的资源水平的变化, 因而受到资源的限制, 植物个体获得资源的能力依赖于其形态

和生理特性。植物竞争过程中的可塑性,大小不同个体的非对称竞争、地下竞争和地上竞争的差异,植物的空间分布和资源的异质性等影响竞争结果[25]。植物间的竞争作用对植物的生长、形态和存活产生重要影响,是塑造群落结构和动态的关键因子之一,因此有关竞争的研究成为生态学的一个重要内容[26]。

在自然界中,植物群落主要由混生种群所组成,真正的单物种群落几乎是不存在的,即使有也只是瞬时的[27]。在长期没有干扰的条件下,植物群落组成、结构主要是由植物的适应性和种间作用(包括资源竞争,化感作用和根际微营养环境作用)两者共同决定的[28]。适应性决定了植物种的分布范围和在一定群落中出现的可能性及其数量多度,而种间竞争的不对称性和环境相关性决定了特定群落环境中植物种的演替地位。由于竞争的不对称性,在群落水平上就存在共存物种的竞争等级(competitive hierarchy),其中的两个极端表现为有些种对共存的多数植物具有竞争优势,或有些种总是处于竞争劣势[29]。在较大群落尺度上,前者总是优势种而后者总是次要种。如果在特定条件下一些种与共存的多数植物竞争力相近,在较小尺度上可使得种对共存[30],但这时环境的小幅波动也会影响到群落结构并导致群落演替。植被动态的长期研究结果表明竞争对群落演替的作用主要有两个机制:演替早期物种繁殖力高,繁殖体传播距离远,先定居生境,但竞争力弱,后期物种相反,这种演替机制生态学家称之为定居-竞争法则(Colonization-competition tradeoff)。即使演替前期与后期物种同时出现,因演替前期物种在资源相对丰富的条件下生长迅速,短期内要比演替后期物种表现好,以后随着资源的消耗,生长变慢且存活率降低,演替后期物种竞争力强,在资源较低时能生长、存活和竞争,在无干扰的条件仍能代替演替前期物种成为群落中的优势种,这种机制叫做演替生态位(Succession niche) [31]。

### 3.2. 根际碳素过程、关键微生物功能群与植物竞争的协同效应

植物的地上部分对光资源的竞争及地下部分对土壤养分和水分的竞争会极大地影响碳素的循环[32][33][34]。植物可通过根系-微生物相互作用(即根际效应)影响土壤有机质的分解[35]。例如,植物根系通过向土壤微生物提供易分解的活性有机质,如植物残茬、根类物质、真菌菌丝、微生物量及其渗出物如多糖等,会促进原有土壤有机质的分解,也就是激发效应,植物种类不同激发效应会有差异[21]。植物竞争主要通过混播实验进行研究,因此,植物竞争与物种多样性紧密联系。植物多样性对根际效应有显著影响。有研究表明,物种多样性越高,会提高产生的活性有机化合物多样性,进而增加微生物群落的多样性[36]。此外,这些有机化合物也会刺激胞外酶的产生,进而增加产生正激发效应的可能性[37]。然而,也有研究表明,这些有机化合物多样性的提高会产生负效应,不利于土壤有机碳的分解和转化,因为会增加一种可能性,即某些种类的有机化合物不能被土壤微生物分解。此外,物种多样性的提高可能会通过交换和选择吸收效应,降低土壤养分的有效性,进而降低根际效应[38]。目前为止,植物竞争的相关研究主要集中于生理生态及群落发展方面,由于技术手段的限制,植物竞争与碳素循环无法真正联系起来,相关研究几乎没有。值得庆幸的是,近几年发展起来的稳定性同位素探测技术(Stable Isotope Probing, SIP)在地球生物化学循环研究方面取得了重大进展,在根际生物生态学等领域得到广泛应用,成为研究植物-土壤-微生物之间关系的桥梁。

### 3.3. 植物竞争条件下的碳素循环过程及微生物的功能机理仍需深入研究

竞争就是两个或两个以上的个体为争夺资源而发生的相互关系,是生态学中最重要的概念之一,也是植被动态的中心问题[29]。植物间的竞争作用对植物的生长、形态和存活产生重要影响,是塑造植物形态、生活史以及植物群落结构和动态的主要动力之一[27]。演替后期种对前期种较强的竞争是植被演替的动力之一[39]。在共享资源有限的情况下,植物竞争影响植物生理生态、土壤养分状况及微生物多样性等,不同演替阶段因竞争物种不同其影响机制存在差异。

针对植物竞争的大多数的研究集中于植物生理生态、物种多样性和土壤环境效应等方面, 结果表明植物的竞争过程是植被和土壤相互影响和作用的过程, 植被通过光合作用向土壤输送有机物质并从土壤吸收养分, 从而对有机碳的积累和周转产生深刻的影响; 而土壤有机质积累和转化与植被竞争及群落生物多样性之间也存在反馈关系, 是不同物种竞争替代和植物群落演替的重要推动力[40][41]。碳素是目前地球生物化学循环中研究较多的元素之一, 植被演替通过对碳循环的库(源、汇)的影响, 决定着演替过程中的碳素积累与流动方向, 而碳循环的流(通量)则决定着系统的稳定性。针对碳素代谢的主要驱动力--微生物一直是广大学者研究的主要内容之一, 其可以通过微生物的生物量和群落结构等影响着碳素过程。目前, 虽然针对植物竞争过程中碳素循环过程及微生物多样性已经开展了相关研究, 但是研究很少涉及植物竞争过程中碳素过程与微生物类群的功能关系, 以及它们与植被演替的协同机理方面, 而这些研究是认识植物竞争碳循环机理的基础, 特别是对生态脆弱区植被演替过程中根际系统碳素过程及其“源-汇-流”效应与微生物功能作用的研究, 对研究生态脆弱区植被演替恢复机理有着极其重要的科学价值。

#### 4. 先进的分析技术为研究地球生物化学循环与微生物功能开通了新的途径

在根际微生态系统的研究中, 如何将微生物类群及其功能与物质循环代谢联系起来, 一直是一个倍受关注的科学问题。然而由于微生物的复杂性, 一些传统的分析方法使我们不能全面认识如此众多的微生物功能的信息, 严重的制约了人类对根际系统的认识。随着分子生物学技术在微生物生态学中的应用, 如基于微生物群体 DNA 的聚合酶链反应(PCR)、梯度凝胶电泳(DGGE、TGGE)、荧光原位杂交(FISH)及高通量测序技术等方法, 使人们对微生物遗传多样性的认识大大提高, 但这样取得的结果仍难以提供有关微生物间相互作用及其代谢功能的直接信息。近几年发展起来的稳定性同位素探测技术(SIP), 在确定特殊代谢过程的微生物类群具有很大优势。该技术已经在认识土壤微生物过程在调节陆地生态系统 C、N 循环方面取得重大进展[42], 在根际微生物生态学等领域得到应用, 提供了许多关于微生物多样性和功能的有用信息, 架起了认识微生物功能种群和地球化学循环关系的桥梁。

#### 5. 展望

本文综述了植物竞争通过影响植物生理生态、土壤养分状况及微生物多样性等推动植被演替, 并影响碳素的循环过程; 稳定性同位素探测技术的广泛应用, 使得对植物-土壤-微生物中碳的循环过程有了深刻认识, 能很好地将根际微生物类群与其功能联系起来, 并确立一些积极参与特殊代谢过程的微生物类群, 同时还提出了值得进一步研究的问题: 利用稳定性同位素探测技术研究植物竞争对根际微生物生态及相应碳循环的影响, 分析碳素循环对不同演替阶段植物竞争的响应规律, 明确其中关键的微生物功能群。旨在从物质代谢角度真实揭示植物竞争影响根际碳循环过程的机理, 促进对地球生物化学过程的认识。

#### 参考文献

- [1] Heinemeyer, A., Hartley, I.P., Evans, S.P., De la Fuente, J.A.C. and Ineson, P. (2007) Forest Soil CO<sub>2</sub> Flux: Uncovering the Contribution and Environmental Responses of Ectomycorrhizas. *Global Change Biology*, **13**, 1786-1797. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01383.x>
- [2] Chapin, F.S., McFarland, J., McGuire, A.D., Euskirchen, E.S., Ruess, R.W. and Kielland, K. (2009) The Changing Global Carbon Cycle: Linking Plant-Soil Carbon Dynamics to Global Consequences. *Journal of Ecology*, **97**, 840-850. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01529.x>
- [3] Metz, B. (2001) Climate Change 2001: Mitigation: Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, England.
- [4] 曹明奎, 李克让. 陆地生态系统与气候相互作用的研究进展[J]. 地球科学进展, 2000, 15(4): 446-452.

- [5] 李克让. 土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环[M]. 北京: 气象出版社, 2002.
- [6] Gatti, L.V., Gloor, M., Miller, J.B., Doughty, C.E., Malhi, Y., Domingues, L.G., Basso, L.S., Martinewski, A., Correia, C.S.C., Borges, V.F., Freitas, S., Braz, R., Anderson, L.O., Rocha, H., Grace, J., Phillips, O.L. and Lloyd, J. (2014) Drought Sensitivity of Amazonian Carbon Balance Revealed by Atmospheric Measurements. *Nature*, **506**, 76-80. <https://doi.org/10.1038/nature12957>
- [7] Goodrick, I., Nelson, P.N., Banabas, M., Wurster, C.M. and Bird, M.I. (2015) Soil Carbon Balance Following Conversion of Grassland to Oil Palm. *Global Change Biology Bioenergy*, **7**, 263-272. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12138>
- [8] Schlesinger, W.H. (1990) Evidence from Chronosequence Studies for a Low Carbon-Storage Potential of Soils. *Nature*, **348**, 232-234. <https://doi.org/10.1038/348232a0>
- [9] Schweinsberg-Mickan, M.S.Z., Jörgensen, R.G. and Müller, T. (2012) Rhizodeposition: Its Contribution to Microbial Growth and Carbon and Nitrogen Turnover within the Rhizosphere. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **175**, 750-760. <https://doi.org/10.1002/jpln.201100300>
- [10] Carrillo, Y., Dijkstra, F.A., Pendall, E., LeCain, D. and Tucker, C. (2014) Plant Rhizosphere Influence on Microbial C Metabolism: The Role of Elevated CO<sub>2</sub>, N Availability and Root Stoichiometry. *Biogeochemistry*, **117**, 229-240. <https://doi.org/10.1007/s10533-014-9954-5>
- [11] Van Bel, A.J.E. (2003) The Phloem, A Miracle of Ingenuity. *Plant, Cell & Environment*, **26**, 125-149. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.00963.x>
- [12] Jones, D. and Darrah, P. (1994) Role of Root Derived Organic Acids in the Mobilization of Nutrients from the Rhizosphere. *Plant and Soil*, **166**, 247-257. <https://doi.org/10.1007/BF00008338>
- [13] Jones, D.L., Nguyen, C. and Finlay, R.D. (2009) Carbon Flow in the Rhizosphere: Carbon Trading at the Soil-Root interface. *Plant and Soil*, **321**, 5-33. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9925-0>
- [14] Watanabe, A., Machida, N., Takahashi, K., Kitamura, S. and Kimura, M. (2004) Flow of Photosynthesized Carbon from Rice Plants into the Paddy Soil Ecosystem at Different Stages of Rice Growth. *Plant and Soil*, **258**, 151-160. <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000016545.36421.bc>
- [15] Jiang, L.L., Han, X.G., Dong, N., Wang, Y.F. and Kardol, P. (2011) Plant Species Effects on Soil Carbon and Nitrogen Dynamics in a Temperate Steppe of Northern China. *Plant and Soil*, **346**, 331-347. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0822-y>
- [16] Cong, W.F., van Ruijven, J., Mommer, L., De Deyn, G.B., Berendse, F. and Hoffland, E. (2014) Plant Species Richness Promotes Soil Carbon and Nitrogen Stocks in Grasslands without Legumes. *Journal of Ecology*, **102**, 1163-1170. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12280>
- [17] Wiehe, W. and Höflich, G. (1995) Survival of Plant Growth Promoting Rhizosphere Bacteria in the Rhizosphere of Different Crops and Migration to Non-Inoculated Plants under Field Conditions in North-East Germany. *Microbiological Research*, **150**, 201-206. [https://doi.org/10.1016/S0944-5013\(11\)80057-1](https://doi.org/10.1016/S0944-5013(11)80057-1)
- [18] Kuzyakov, Y. (2006) Sources of CO<sub>2</sub> Efflux from Soil and Review of Partitioning Methods. *Soil Biology and Biochemistry*, **38**, 425-448. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.08.020>
- [19] Cheng, W.X., Zhang, Q.L., Coleman, D.C., Carroll, C.R. and Hoffman, C.A. (1996) Is Available Carbon Limiting Microbial Respiration in the Rhizosphere? *Soil Biology & Biochemistry*, **28**, 1283-1288. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(96\)00138-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(96)00138-1)
- [20] Kuzyakov, Y. and Cheng, W. (2001) Photosynthesis Controls of Rhizosphere Respiration and Organic Matter Decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, **33**, 1915-1925. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00117-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00117-1)
- [21] Kuzyakov, Y. (2002) Review: Factors Affecting Rhizosphere Priming Effects. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **165**, 382-396.
- [22] Staddon, P.L., Ramsey, C.B., Ostle, N., Ineson, P. and Fitter, A.H. (2003) Rapid Turnover of Hyphae of Mycorrhizal Fungi Determined by AMS Microanalysis of <sup>14</sup>C. *Science*, **300**, 1138-1140. <https://doi.org/10.1126/science.1084269>
- [23] Ostle, N., Whiteley, A.S., Bailey, M.J., Sleep, D., Ineson, P. and Manfield, M. (2003) Active Microbial RNA Turnover in a Grassland Soil Estimated Using a <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> Spike. *Soil Biology and Biochemistry*, **35**, 877-885. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00117-2](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00117-2)
- [24] Hunt, M.A., Battaglia, M., Davidson, N.J. and Unwin, G.L. (2006) Competition between Plantation *Eucalyptus nitens* and *Acacia dealbata* Weeds in Northeastern Tasmania. *Forest Ecology and Management*, **233**, 260-274. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.05.017>
- [25] Berger, U., Piou, C., Schiffers, K. and Grimm, V. (2008) Competition among Plants: Concepts, Individual-Based Modelling Approaches, and a Proposal for a Future Research Strategy. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, **9**, 121-135. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2007.11.002>
- [26] Ewanchuk, P.J. and Bertness, M.D. (2004) Structure and Organization of a Northern New England Salt Marsh Plant Community. *Journal of Ecology*, **92**, 72-85. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2004.00838.x>

- [27] 李博, 陈家宽, A.R. 沃金森. 植物竞争研究进展[J]. 植物学通报, 1998, 15(4): 18-29.
- [28] 杜峰, 梁宗锁, 胡莉娟. 植物竞争研究综述[J]. 生态学杂志, 2004, 23(4): 157-163.
- [29] Keddy, P., Gaudet, C. and Fraser, L.H. (2000) Effects of Low and High Nutrients on the Competitive Hierarchy of 26 Shoreline Plants. *Journal of Ecology*, **88**, 413-423. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2000.00456.x>
- [30] Aarssen, L.W. (1983) Ecological Combining Ability and Competitive Combining Ability in Plants: Toward a General Evolutionary Theory of Coexistence in Systems of Competition. *The American Naturalist*, **122**, 707-731. <https://doi.org/10.1086/284167>
- [31] Rees, M., Condit, R., Crawley, M., Pacala, S. and Tilman, D. (2001) Long-Term Studies of Vegetation Dynamics. *Science*, **293**, 650-655. <https://doi.org/10.1126/science.1062586>
- [32] Hooper, D.U. and Vitousek, P.M. (1997) The Effects of Plant Composition and Diversity on Ecosystem Processes. *Science*, **277**, 1302-1305. <https://doi.org/10.1126/science.277.5330.1302>
- [33] Hooper, D.U. and Vitousek, P.M. (1998) Effects of Plant Composition and Diversity on Nutrient Cycling. *Ecological Monographs*, **68**, 121-149. [https://doi.org/10.1890/0012-9615\(1998\)068\[0121:EOPCAD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9615(1998)068[0121:EOPCAD]2.0.CO;2)
- [34] Dijkstra, F.A., Morgan, J.A., Blumenthal, D. and Follett, R.F. (2010) Water Limitation and Plant Inter-Specific Competition Reduce Rhizosphere-Induced C Decomposition and Plant N Uptake. *Soil Biology & Biochemistry*, **42**, 1073-1082. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.02.026>
- [35] Cheng, W. and Kuzyakov, Y. (2005) Root Effects on Soil Organic Matter Decomposition. In: Zobel, R.W. and Wright, S.F., Eds., *Roots and Soil Management: Interactions between Roots and the Soil*, ASA-SSSA, Madison, WI, 119-143.
- [36] Stephan, A., Meyer, A.H. and Schmid, B. (2000) Plant Diversity Affects Culturable Soil Bacteria in experimental grassland communities. *Journal of Ecology*, **88**, 988-998. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2000.00510.x>
- [37] Fontaine, S., Mariotti, A. and Abbadie, L. (2003) The Priming Effect of Organic Matter: A Question of Microbial Competition? *Soil Biology & Biochemistry*, **35**, 837-843. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00123-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00123-8)
- [38] Tilman, D., Knops, J., Wedin, D., Reich, P., Ritchie, M. and Siemann, E. (1997) The Influence of Functional Diversity and Composition on Ecosystem Processes. *Science*, **277**, 1300-1302. <https://doi.org/10.1126/science.277.5330.1300>
- [39] Fowler, N. (1986) The Role of Competition in Plant Communities in Arid and Semiarid Regions. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **17**, 89-110. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.17.1.89>
- [40] Prach, K., Bartha, S., Pyšek, P., Joyce, C.B., van Diggelen, R. and Wiegand, G. (2001) The Role of Spontaneous Vegetation Succession in Ecosystem Restoration: A Perspective. *Applied Vegetation Science*, **4**, 111-114. <https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2001.tb00241.x>
- [41] Alday, J., Marrs, R. and Martínez-Ruiz, C. (2012) Soil and Vegetation Development during Early Succession on Restored Coal Wastes: A Six-Year Permanent Plot Study. *Plant and Soil*, **353**, 305-320. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1033-2>
- [42] Maxfield, P.J., Dildar, N., Hornibrook, E.R.C., Stott, A.W. and Evershed, R.P. (2012) Stable Isotope Switching (SIS): A New Stable Isotope Probing (SIP) Approach to Determine Carbon Flow in the Soil Food Web and Dynamics in Organic Matter Pools. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, **26**, 997-1004. <https://doi.org/10.1002/rcm.6172>

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2329-7255, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [hjss@hanspub.org](mailto:hjss@hanspub.org)