

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第 30 卷 第 24 期
Vol.30 No.24
2010



中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

中国科学院科学出版基金资助出版

第 30 卷 第 24 期 2010 年 12 月 (半月刊)

目 次

三江平原残存湿地斑块特征及其对物种多样性的影响	施建敏, 马克明, 赵景柱, 等 (6683)
叶片碳同位素对城市大气污染的指示作用	赵德华, 安树青 (6691)
土地利用对崇明岛围垦区土壤有机碳库和土壤呼吸的影响	张容娟, 布乃顺, 崔 军, 等 (6698)
缓/控释复合肥料对土壤氮素库的调控作用	董 燕, 王正银 (6707)
北京海淀公园绿地二氧化碳通量	李 霞, 孙 睿, 李 远, 等 (6715)
三峡库区消落带生态环境脆弱性评价	周永娟, 仇江啸, 王 姣, 等 (6726)
应用碳、氮稳定同位素研究稻田多个物种共存的食物网结构和营养级关系	张 丹, 闵庆文, 成升魁, 等 (6734)
基于弹性系数的江苏省能源生态足迹影响因素分析	杨足膺, 赵 媛, 付伍明 (6741)
中国土地利用多功能性动态的区域分析	甄 霖, 魏云洁, 谢高地, 等 (6749)
遮荫处理对东北铁线莲生长发育和光合特性的影响	王云贺, 韩忠明, 韩 梅, 等 (6762)
臭氧胁迫对冬小麦光响应能力及 PS II 光能吸收与利用的影响	郑有飞, 赵 泽, 吴荣军, 等 (6771)
地表覆草和覆膜对西北旱地土壤有机碳氮和生物活性的影响	谢驾阳, 王朝辉, 李生秀 (6781)
喀斯特峰丛洼地旱季土壤水分的空间变化及主要影响因子	彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 等 (6787)
极干旱区深埋潜水蒸发量的测定	李红寿, 汪万福, 张国彬, 等 (6798)
灌木林土壤古菌群落结构对地表野火的快速响应	徐赢华, 张 涛, 李 智, 等 (6804)
稻田免耕和稻草还田对土壤腐殖质和微生物活性的影响	区惠平, 何明菊, 黄 景, 等 (6812)
造纸废水灌溉对黄河三角洲盐碱地土壤酶活性的影响	董丽洁, 陆兆华, 贾 琼, 等 (6821)
神农宫扁角菌蚊幼虫种群分布及其与环境因子的相关性	顾永征, 李学珍, 牛长缨 (6828)
三亚珊瑚礁水域纤毛虫种类组成和数量分布及与环境因子的关系	谭烨辉, 黄良民, 黄小平, 等 (6835)
淞江鲈在中国地理分布的历史变迁及其原因	王金秋, 成 功 (6845)
黄海中南部小黄鱼生物学特征的变化	张国政, 李显森, 金显仕, 等 (6854)
甲基溴消毒对番茄温室土壤食物网的抑制	陈云峰, 曹志平 (6862)
离子树脂法测定森林穿透雨氮素湿沉降通量——以千烟洲人工针叶林为例	盛文萍, 于贵瑞, 方华军, 等 (6872)
乡土植物芦苇对外来入侵植物加拿大一枝黄花的抑制作用	李愈哲, 尹 昕, 魏 维, 等 (6881)
遂渝铁路边坡草本植物多样性季节动态和空间分布特征	王 倩, 艾应伟, 裴 娟, 等 (6892)
古尔班通古特沙漠原生梭梭树干液流及耗水量	孙鹏飞, 周宏飞, 李 彦, 等 (6901)
碟果虫实种子萌发对策及生态适应性	刘有军, 刘世增, 纪永福, 等 (6910)
原始兴安落叶松林生长季净生态系统 CO ₂ 交换及其光响应特征	周丽艳, 贾丙瑞, 曾 伟, 等 (6919)
五种红树植物通气组织对人工非潮汐生境的响应	伍卡兰, 彭逸生, 郑康振, 等 (6927)
亚高寒草甸不同生境植物群落物种多度分布格局的拟合	刘梦雪, 刘佳佳, 杜晓光, 等 (6935)
内蒙古荒漠草原地表反照率变化特征	张 果, 周广胜, 阳伏林 (6943)
中国沙棘克隆生长对灌水强度的响应	李甜江, 李根前, 徐德兵, 等 (6952)
增温与放牧对矮蒿草甸 4 种植物气孔密度和气孔长度的影响	张立荣, 牛海山, 汪诗平, 等 (6961)
基于 ORYZA2000 模型的北京地区早稻适宜播种期分析	薛昌颖, 杨晓光, 陈怀亮, 等 (6970)
专论与综述	
区域生态安全格局研究进展	刘 洋, 蒙古军, 朱利凯 (6980)
植物功能性状与湿地生态系统土壤碳汇功能	王 平, 盛连喜, 燕 红, 等 (6990)
农田水氮关系及其协同管理	王小彬, 代 快, 赵全胜, 等 (7001)
虫害诱导挥发物的生态调控功能	王国昌, 孙晓玲, 董文霞, 等 (7016)
土壤微生物资源管理、应用技术与学科展望	林先贵, 陈瑞蕊, 胡君利 (7029)
问题讨论	
从演化的角度评价北京市经济系统可持续发展趋势	黄茹莉, 徐中民 (7038)
基于植物多样性特征的武汉市城市湖泊湿地植被分类保护和恢复	郑忠明, 宋广莹, 周志翔, 等 (7045)
濒危兰科植物再引入技术及其应用	陈宝玲, 宋希强, 余文刚, 等 (7055)
研究简报	
实验条件下华北落叶松和白杆苗期生长策略的差异比较	张芸香, 李海波, 郭晋平 (7064)
基于源-库互反馈的温室青椒坐果时空动态模拟	马韞韬, 朱晋宇, 胡包钢, 等 (7072)
西双版纳小磨公路及其周边道路对蛇类活动的影响	孙 戈, 张 立 (7079)
温度变化对藻类光合电子传递与光合放氧关系的影响	张 曼, 曾 波, 张 怡, 等 (7087)
黄土区六种植物凋落物与不同形态氮素对土壤微生物量碳氮含量的影响	王春阳, 周建斌, 董燕婕, 等 (7092)
食细菌线虫 <i>Caenorhabditis elegans</i> 的取食偏好性	肖海峰, 焦加国, 胡 锋, 等 (7101)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 424 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 48 * 2010-12

植物功能性状与湿地生态系统土壤碳汇功能

王 平¹, 盛连喜^{1,*}, 燕 红¹, 周道玮², 宋彦涛²

(1. 东北师范大学城市与环境科学学院国家环境保护湿地生态与植被恢复重点实验室, 长春 130024;

2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012)

摘要: 湿地生态系统碳平衡对气候变化极为敏感, 是陆地生态系统碳循环响应全球变化的重要环节。然而, 湿地生态系统碳汇调节机制仍不清楚, 并且对影响因子的研究多集中在非生物因子上。综述了植物功能性状和功能性状多样性对湿地生态系统土壤碳汇功能的影响, 阐明了生物因子对生态系统碳循环响应全球变化的重要性, 介绍了植物功能性状对生态系统碳输入和输出过程的影响, 简述了植物功能性状多样性的研究现状及其在指示生态系统碳汇功能现状和预测未来趋势等方面的应用。从优势植物、植物种间关系和植物-微生物种间关系 3 方面总结了植物功能性状多样性直接和间接影响生态系统碳循环的途径。展望了植物功能性状和功能性状多样性与湿地生态系统土壤碳汇功能的研究前景。

关键词: 功能性状; 功能性状多样性; 碳汇; 土壤碳

Plant functional traits influence soil carbon sequestration in wetland ecosystem

WANG Ping¹, SHENG Lianxi^{1,*}, YAN Hong¹, ZHOU Daowei², SONG Yantao²

1 State Environmental Protection Key Laboratory of Wetland Ecology and Vegetation Restoration, College of Urban and Environmental Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

2 Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China

Abstract: The carbon cycle of wetland ecosystems has important influences on a more general terrestrial ecosystem carbon balance, and it is sensitive to changes in global climate and local land use. However, our mechanistic understanding of soil carbon sequestration in wetland ecosystem is incomplete. There have been many studies on soil carbon sequestration in wetland ecosystems, but most of them focused on the abiotic drivers. In an effort to elucidate the importance of biotic factors in influencing the response of ecosystem carbon cycles to global changes, we reviewed the influences of plant functional traits and functional trait diversity on the soil carbon sequestration of wetland ecosystems. We first briefly discuss the concepts of plant functional traits and functional trait diversity. Then we review published literature and reach a broad conclusion that plant functional traits can affect soil carbon cycling through altering carbon inputs and loss to and from soils. More specifically, plant growth rate can be related to the amount of carbon forms that plants return to soil, and their subsequent fate in soil. The allocation of carbon and nutrients between plant organs also affects soil carbon sequestration. Higher root/shoot ratios may indicate increased soil carbon sequestration potential, as root litter generally appears to be of more recalcitrant carbon pool than that of shoots. Soil carbon mostly originates from decaying aboveground and belowground plant tissue, but root exudates are also an important source of carbon input to soil. Plant traits related to forming mutualistic symbioses are important for soil carbon input, as they typically increase carbon assimilation through enhanced acquisition of limiting resources. Plant functional traits strongly influence litter decomposability, soil respiration, carbon immobilization and leaching. High lignin content and other recalcitrant carbon forms enhance soil carbon sequestration because of their long residence time in soil. In waterlogged conditions, the lost rates of methane and carbon dioxide to the atmosphere from soil depend on the type of aerenchyma of roots. Plant traits that alter the soil's abiotic conditions can have strong effects on soil

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30970542)

收稿日期: 2009-11-04; **修订日期:** 2010-09-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shenglx@nenu.edu.cn

carbon sequestration, such as plant canopy characteristics, which control microenvironment conditions related to carbon mineralization and leaching. We explored possible approaches by which the functional diversity directly and indirectly influences ecosystem carbon cycle through dominant species role, plant specific interactions and plant-microorganism interactions. The relative abundances and productivities of the predominant plant functional types and their traits appear to be the principal factor determining soil carbon dynamics. Specific plant trait compositions also influence soil carbon dynamics through complementarity or facilitation of plant traits at community level. However, there remains much uncertainty over the extent that trait interactions among plant species might influence carbon inputs and losses, because such interaction effects appear to be context dependent. Plant trait composition may influence soil decomposer diversity through the diversity of substrates and habitats, and decomposer diversity in turn can affect soil carbon cycling through functional complementarity. Finally, we proposed several future avenues for research on the effects of plant functional traits and functional diversity on soil carbon sequestration of wetland ecosystems.

Key Words: functional trait; functional diversity; carbon sequestration; soil carbon

陆地生态系统是全球碳循环的重要组成部分,在全球碳收支中占主导地位。据估计,陆地生态系统碳储量达 2100Gt^[1],其中三分之二贮藏在土壤中^[2-3]。湿地生态系统土壤碳储量约 450Pg (Pg = 10¹⁵g),占全球土壤总储量的三分之一^[4]。湿地生态系统因其营养贫乏、气温低以及水淹等条件而致植物分解率低,大量碳以泥炭有机质的形式不断堆积,从而成为陆地生态系统主要的土壤碳库^[5]。然而,湿地生态系统的碳平衡对气候变化极为敏感,当气温升高或降水减少时,湿地有可能由碳吸收者转变为碳释放者。并且,当土地利用方式发生变化,湿地遭到破坏时,不仅其固碳功能减弱,甚至原有土壤碳也会被迅速氧化分解而成为碳释放源^[6]。目前,湿地生态系统碳库/源关系的转换成为陆地生态系统碳循环响应全球变化至关重要的环节。

随着全球气候变化对人类社会影响的加剧,人们越来越意识到湿地生态系统土壤碳汇对大气 CO₂ 浓度和人类生存的重要性。但目前土壤碳汇的调节机制仍不清楚,从而限制了理解和预测全球碳储量响应气候和土地利用方式变化^[7]。虽然人们已对湿地碳释放的影响因子作了大量研究,但主要集中在非生物因子上,如温度^[8-9],土壤水分等^[10-11]。对生物因子(如植被组成和生产力变化)如何影响湿地生态系统碳交换,以及非生物因子和生物因子的相互反馈作用的影响了解较少。

然而,随着功能生态学的创立和发展,以及相应研究方法的不断创新和改进,越来越多的研究表明,作为重要的生物因子,植物功能性状及功能性状多样性强烈影响着生态系统的碳输入和输出过程^[12]。近年来,植物功能性状影响生态系统过程和功能的研究逐渐增多^[13-15],其中不乏植物功能性状对湿地生态系统碳循环的影响^[16-18]。碳氮循环与植物形态性状有关^[19];也可能与物种的化学性状有关^[20]。生态系统功能不仅受优势物种或优势功能群的性状的强烈影响^[15, 21-25],功能性状多样性的作用也不容忽视^[26-28]。与物种多样性相比,功能性状多样性不仅包含了物种数量对群落特征的影响^[29-30],同时考虑了物种组成与系统功能之间的关系^[31-32]。随着数据处理和计算方法的不断推进,功能多样性已由功能群的定性划分发展为对功能性状的数值大小、分布范围及分布格局的定量计算。目前已发表的为数不多的功能性状多样性研究,大多以草地生态系统为对象,揭示出功能性状多样性与生态系统功能之间存在着强烈的相关关系^[27-28]。

本文综述了植物功能性状对湿地生态系统土壤碳汇功能的影响,详细阐明了植物功能性状如何影响湿地系统碳输入和输出过程。介绍了植物功能性状多样性的研究现状及其在指示生态系统碳汇功能现状和预测未来趋势等方面的应用。总结了植物功能性状多样性直接和间接影响生态系统碳循环的已知途径。最后,展望了应用植物功能性状和功能性状多样性指标预测湿地生态系统碳汇功能的前景及未来研究方向。

1 功能性状

性状是指在个体水平上(从细胞到整个生物体)可测量的任何形态、生理或物候特征,而功能性状是指能够通过直接影响生长、繁殖和存活而间接影响物种适合度的任何性状^[33-34]。

功能生态学自 1987 年《Functional Ecology》创刊以来一直倡议在规范的性状测量方法下^[35-36],研究植物功能性状在全球范围内的分布以及对各种影响因子的响应^[37-38],并进一步阐释性状在群落和环境梯度上的分布、聚集、分离等特征所代表的生态或进化意义^[39]。收集各个物种的各类性状数据是功能生态学的研究基础,而探索性状间、性状与功能(个体功能、生态系统过程和功能)间的关系则是功能生态学最终要解决的问题。性状-功能关系研究涵盖了生态学的各个生物层次,例如,木材密度与生长率的关系^[40];个体大小与竞争能力的关系^[41];植物性状与生态系统土壤碳含量的关系等^[15]。

2 功能性状多样性

虽然植物性状强烈影响着碳汇等生态系统功能^[42],但某物种或某类功能群的性状并不能代表整个群落对土壤碳汇的影响。群落物种组成,即功能性状组合对揭示土壤碳汇的影响机制不容忽视。功能性状多样性,亦称功能多样性,是指群落内植物功能性状值的大小、分布范围及分布模式^[26, 43]。功能性状多样性被认为能够超越物种局限和环境对个体的影响,从而成为在群落水平上指示生态系统功能的适宜变量^[26-27, 44]。功能性状多样性主要有两个组成成份,一是普遍应用的性状群落权重均值(community weighted mean, CWM),二是逐渐兴起的功能分离度(functional divergence, FD_{vg})。

2.1 性状群落权重均值(CWM)

性状群落权重均值,即就某一性状而言,群落内所有该性状的值与其相对丰度积的总和^[45]。性状群落权重均值表示群落内某功能性状的均值,常用来评估群落动态和生态系统特征^[45]。无论是理论推导还是实验数据,均证明植物性状的群落权重均值与各项生态特征之间存在强烈关系,并且这种关系广泛存在于不同的生态环境和地理条件下^[30, 46]。

$$CWM = \sum_{i=1}^n p_i \times trait_i$$

式中, p_i 是物种 i 在群落内的相对丰度, $trait_i$ 是物种 i 的性状值。

2.2 功能分离度(FD_{vg})

功能分离度将群落内性状值的分离程度定量化,表示随机选出的两个物种具有相同性状值的可能性,即性状的重叠程度^[47]。功能分离度被认为能够反映物种间的生态位补偿^[44, 48]。

$$FD_{vg} = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s d_{ij} p_i p_j$$

式中, s 是群落内物种数量, $d_{ij} = 1 - O_{ij}$, O_{ij} 是物种 i 和 j 性状值概率密度函数的重叠,由每个函数的正态近似值估计得到^[47]。

关于功能性状多样性与生态系统功能关系的研究,主要讨论群落内某性状值的大小及分布范围如何控制陆地生态系统的各项生态过程^[12, 27-28]。功能性状多样性通过影响生态系统特征而影响生态系统服务,特别是影响与碳、营养和水循环相关的生物地球化学过程。当前关于多样性影响生态系统特征和功能的解释机制(质量比、取样、生态位补偿和保险假说)均围绕着植物功能性状^[26],其研究日益引起人们的关注。

生态学家对生物多样性-生态系统功能关系存在争论,多数人认为功能性状多样性比物种数量更决定着系统的各项生态过程^[39]。整个功能型的丧失(性状的丧失)对生态系统的影响远远大于从不同功能型中减去相同数量物种对生态系统的影响。物种数量增加的效果也同样如此,例如物种入侵(物种数量仅少量增加)极大地改变了原生态系统的结构和功能。功能性状多样性与生态系统功能关系研究整合了植物性状、群落生态学和生物进化理论,开辟了功能生态学研究的新领域。从植物功能性状多样性角度探讨湿地植被与湿地生态系统碳汇功能关系的研究鲜有报道。

3 植物功能性状与土壤碳汇功能

湿地生态系统碳循环过程:湿地植物通过光合作用将大气 CO_2 转化为有机碳并储存在植物体中,死亡的植物残体(地上部分和根系)经淋溶、降解、破碎化后形成有机质,有机质经微生物分解释放 CO_2 、 CH_4 等气

体。影响湿地生态系统碳储量的生物因子众多^[6, 12, 49],根据文献资料,从两条途径归纳总结了植物性状对土壤碳汇功能的影响:一是植物性状影响碳输入过程;二是植物性状影响碳输出过程(图 1)^[15]。

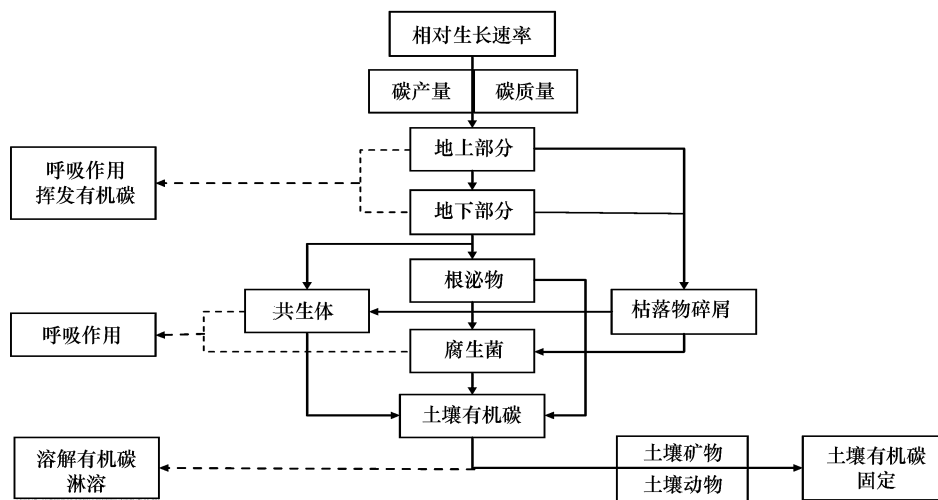


图 1 土壤碳输入输出框架图^[15]

Fig. 1 Soil carbon (C) in- and output^[15]

注:土壤碳汇能力依赖于植物和异养生物碳库的数量和质量,这些碳库决定了碳利用效率和土壤碳存留时间。高生长率通常代表碳流量多、快,但土壤碳库少;低生长率代表碳流量慢,但土壤碳库多且存留时间长。根际沉积和大型土壤动物(如蚯蚓)通常增强了土壤碳的固定,延长了碳存留时间;实线表明碳输入,虚线表明碳输出

3.1 植物功能性状与碳输入

植物性状决定碳输入的数量、形式及存留时间。植物光合能力、生长速率、寿命均影响湿地生态系统碳的输入量^[50-51]。植物碳返回土壤的数量和组成及在土壤中的命运均与植物生长速率相关^[52]。速生植物往往光合能力强,但寿命短,干物质和碳含量低^[51]。速生植物通过输入大量碳以增加土壤碳库,而慢生植物的碳输入量虽低、但碳含量往往较高。在生长季短、营养贫乏的群落中,土壤碳主要来源于质量低、碳含量高的枯枝落叶,而在高产群落中,初级生产力是土壤碳汇的主要驱动因子。

植物结构和各器官的碳氮分配影响土壤碳储量,如木本植物支撑器官的碳含量高且难于分解,形成循环速度慢、长期存留的碳库,是森林生态系统碳的重要贮存形式^[53]。由于植物地上和地下碳的分解速率和难易程度不同,高根茎比植物可能会延长固定碳的存留时间^[54]。目前发表的几个同时关注地上地下枯落物的研究表明,两者之间可能并不直接相关^[55]。因为植物的叶性状可能是速生的竞争者,而根性状却是慢生的忍耐者,或者相反。这些互惠的性状组合稳定了种间共存^[56]。相对于地上部分而言,地下根系通常质量低,分解慢,碳库保存时间长^[57-58]。因此高根茎比往往代表较高的土壤碳汇能力。

此外,植物的结构性状(如高度和冠层密度)改变了微环境中的光照条件,影响了碳输入过程中最为关键的植物光合作用。在水淹和缺氧条件下,植物地上和地下部形成粗大的通气组织及浅生的外生根,这些适应限制了根系在土壤中的纵深分布,减少了植株的机械强度,从而减少了土壤碳的输入^[59]。根系分泌物也是土壤碳输入的重要来源(占日间光合同化产物的 5%—33%)^[60],因此,根系分泌物的数量和种类也是土壤碳输入的影响因子。

植物-微生物共生体能够增强对受限资源的吸收,促进产量形成,因此,影响共生体的植物性状对土壤碳输入非常重要。从全球范围来看,最常见的共生菌是固氮菌和菌根真菌。固氮菌增强了豆科和山麻黄属(*Parasponia*)等植物^[61],以及苔藓和地衣植物^[35]的生长,菌根真菌增强了植物对土壤养分的吸收,尤其是对 N 和 P 的吸收,两者均促进了植物对 CO₂ 的固定。此外,菌根真菌菌丝中固定了大量的碳,菌丝的存在延长了植物根的生命,改善土壤团聚体,从而减少了土壤碳输出^[62-63]。

3.2 植物功能性状与碳输出

植物性状同样决定着碳输出的数量、形式和速度。植物性状影响枯落物的物理特征和化学成份,从而影响其分解速率、碳浸出、碳存留时间等^[64]。速生植物 C/N 低,其枯落物易于分解,相反,慢生和长寿植物枯落物营养低、难分解^[51]。这种生长速率与枯落物质量间的关系并不仅仅存在于种子植物,大部分的维管和非维管的慢生隐花植物,如蕨类、苔藓和一些地衣,同样产生碳含量高、分解慢的枯落物,增强了土壤碳贮存^[35]。

木质素、多酚和丹宁等含量高的植物形成难分解、存留久的枯落物,增强了系统的碳汇功能。这些难分解的碳成分,尤其是木质素,对土壤碳汇意义重大。分解木质素需要特殊的木质素分解酶,而能够产生此类分解酶的土壤真菌的出现率往往很低,尤其是白腐菌,因此碳得以长期贮存在土壤中^[65]。此外,当木质素的分解产物(腐殖质)与氨基酸、酶等其它有机分子结合形成联合体后,更增强了土壤碳的贮存^[66]。有研究表明,白腐菌产生的木质素分解酶活性受抑于土壤的高氮浓度,因此高木质素含量的枯落物在高肥力环境中更加难于分解^[67]。虽然氮沉积促进了生态系统初级生产力,但增加的氮浓度却因影响土壤微生物而增强了土壤碳汇能力^[68]。木质素、酚类和单宁类物质保护植物免遭采食和病害,在另一方面减少了碳素流经食物链的氧化释放。

在水淹条件下,土壤碳以 CH_4 和 CO_2 的形式释放到大气中,其释放速率似乎依赖于根的通气组织和碳供应类型^[59];深而广的根系因能够减少土壤侵蚀而加强了土壤碳素的稳定性^[69]。此外,植物冠层因影响地面反射、蒸散、风速和雪覆盖等气象因子而改变了群落微环境内的温度和湿度,从而通过影响土壤有机碳的矿化和淋溶过程而控制碳的输出^[52]。植物的可燃和易燃特征同样影响碳素释放速率的快慢程度^[52]。

4 植物功能性状多样性与碳汇关系

植物的产量、枯落物分解特性和共生真菌各异,当各物种的相对丰度和空间分布不同时,性状组合就会在局部和系统尺度上以不同途径影响湿地生态系统的碳平衡(图2)。无论是物种组成还是物种数量发生变化,均可通过改变整个群落的碳含量而调节碳的输入输出,从而影响整个系统的碳汇功能^[27, 70]。

4.1 优势植物

植物群落特征影响土壤碳氮循环^[19, 71]、控制着生态系统的分解过程^[20, 72]。群落内物种和/或功能群的丰度及组成影响土壤碳的输入和输出过程。依据质量比假说,即生态系统功能主要决定于在群落生物量中占优势的物种的性状值^[27, 73],那么优势植物的相对丰度和产量及它们的性状特征本身,可能是决定土壤碳素动态的主要因子。

总体来讲,优势植物不仅影响整个群落的光合和呼吸速率,同样影响 DOC 等活性碳的数量。对阿拉斯加泥炭湿地的研究表明,植被类型比气候因子对 DOC(dissolved organic carbon)通量的影响更加强烈^[74]。对英国泥炭湿地的调查结果显示,湿地生态系统的 DOC 通量因优势物种的不同而不同:以帚石楠(*Calluna* spp.)为优势种的湿地,因通气管道发达,增加了碳传输途径^[75],该系统的 DOC 浓度显著高于羊胡子草湿地(*Eriophorum* spp)以及羊胡子草-泥炭藓湿地(*sphagnum-erriophorum*)。

4.2 群落物种组成

除了优势植物对群落碳循环的影响外,群落物种组成(性状组合)也发挥着重要作用。若植物性状存在种间互补和互利作用,使得群落的碳输入大于碳输出,则可加强生态系统碳汇功能^[70]。例如,当群落内的植物对空间或光、水等资源的需求和吸收机制不同时,这些性状组合能够直接或间接促进该群落的碳输入量(图2)。植物性状组合同样影响碳输出:如植物的物理和化学性状使适口性好的相邻植物免于被采食^[76];适口性差物种的存在降低了群落内枯落物的分解程度;易燃性差的物种的存在降低了该系统的火灾风险;深根系和浅根系植物利用不同土层的资源,加强了根系分层和异养微生物的活动,使碳固化得到加强,并减轻了可溶性有机碳的淋溶(图2)。

全球环境变化对群落物种组成影响极大,并通过种间的相互作用增强或减弱湿地生态系统的碳汇。植物性状的种间差异是土壤碳动态的主要决定因子,但影响碳输入输出的性状的种间相互作用却不十分清楚,因

为该种间作用和控制因子往往因群落而异^[70, 77]。并且,群落物种组成在全球环境变化或其它干扰因子的影响下产生波动。明晰不同湿地植物对环境因子的响应将有助于揭示或预测全球环境变化条件下生态系统的碳循环和碳汇功能。

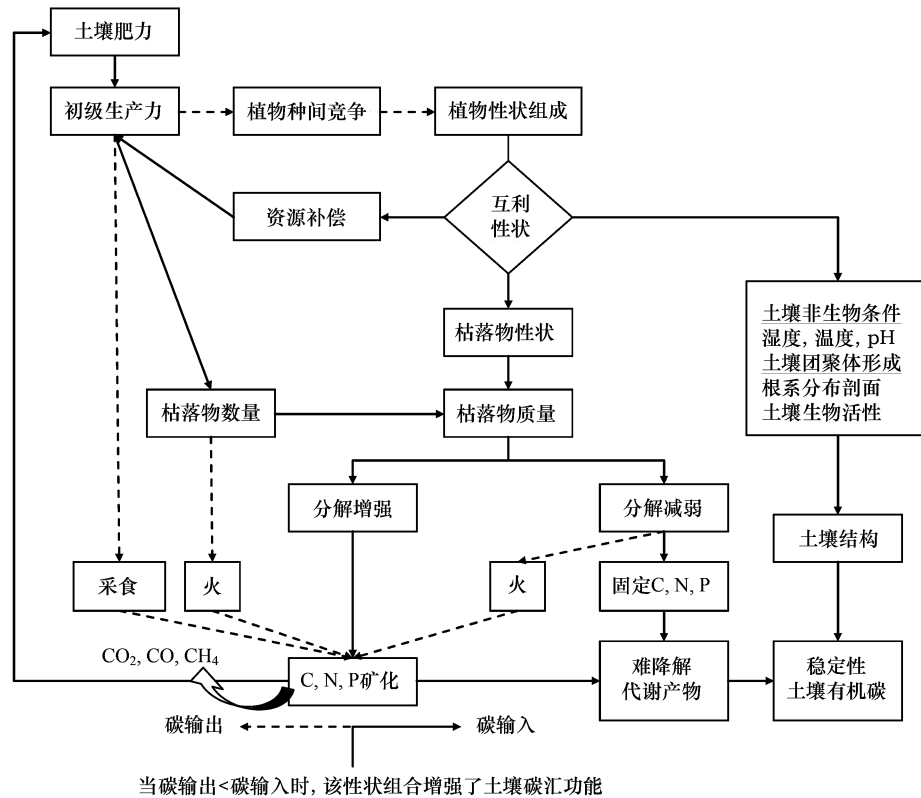


图2 植物性状组合影响碳输入输出比例, 最终影响土壤碳汇功能

Fig. 2 Potential plant trait composition effects on soil carbon sequestration, through influencing the ratio between carbon gains (C-in) and losses (C-out)

实线表明碳输入, 虚线表明碳输出; 引自 De Deyn 等^[15]

大气 CO₂ 浓度升高, 使弱矿质营养泥炭湿地植被中的维管植物逐步取代泥炭藓^[78], 但也有研究认为 CO₂ 浓度增加并没有显著改变泥炭湿地的物种组成^[79-80]。来自瑞士的一项野外实验展示了氮和 CO₂ 对不同苔藓物种的影响^[81]: 氮添加促进了金发藓 (*Polytrichum strictum*) 的高生长, 而 CO₂ 增加促进了泥炭藓 (*Sphagnum fallax*) 的高生长。因为苔藓种间竞争结果很大程度上取决于覆盖和遮荫作用, 因此, 对营养需求较低的泥炭藓来说, 氮沉降带来的遮荫负效应可能比 CO₂ 的促生正效应更加重要。当氮沉降速率超过 1—1.5 g m⁻² a⁻¹ 时, 湿地群落中维管植物的盖度通常增加, 而泥炭藓盖度减少。一些长期监测数据也表明, 近 10a 来, 瑞典西南部的藓丘群落中, 需氮物种数量已然增加^[82]。温度对不同泥炭藓物种的生长影响不同^[83], 但是这种影响对种间平衡的调节是否达到了足以影响碳循环的程度还未可知。

4.3 植物-微生物种间关系

植物性状组合通过所能创造的多样性生境条件影响着土壤分解者的多样性^[84], 而分解者的多样性又显著影响着土壤碳素循环^[85]。枯落物分解过程中出现的主场优势现象即证明了上述关系的存在。主场优势是指处于相同物种冠层下的枯落物的分解速率要高于处于不同物种下的枯落物分解^[72, 86], 展示了土壤生物群落对物种枯落物的专性分解现象。

植物与土壤腐生生物、共生菌和病菌之间的反馈改变了植物群落组成, 由此改变了群落的优势性状, 并最终影响碳输入的数量、质量, 以及碳氮循环速率^[87]。在低产土壤中, 植物与土壤微生物共同竞争土壤矿物营

养^[88],在这种竞争条件下,植物可能会增加营养竞争能力强的性状^[89],而这些性状往往表现为生长率低且分解缓慢,延长了碳在土壤中的存留时间。

5 展望

综上所述,植物功能性状决定着湿地生态系统土壤碳的输入输出。在不同的生物群落中,环境因子选择利于植物在特定温、光、水等条件下生存的功能性状,这些性状往往直接或间接控制着土壤碳汇。当土壤因子(营养、水、氧或 pH)限制植物生长时,控制碳汇的植物性状通常包括:生长率低、C/N 高、根/茎比高、新陈代谢次级产物多、寿命(个体或器官)长、枯落物残留时间长。而当光资源限制植物生长时,与碳汇相关的植物性状与上述相反。目前,虽然讨论植物功能性状与生态系统碳循环关系的研究较多,但仍有许多领域需要进一步的探索。

植物性状-碳循环研究大多分别探讨了植物的地上和地下性状,同时讨论植物地上和地下性状与碳循环关系的研究很少。植物的不同性状对土壤碳的影响可能相反,即一些植物性状增强了土壤碳的输入,但另一些性状却加速了土壤碳的输出。例如禾草似乎因其强大的根系和根茎增加了土壤碳汇,但另一方面,大量的根浸出物、易分解的枯落物以及遍布根、茎的通气管道等也加速了碳的损失^[90]。又如灌木因改善冬春季土壤温度或湿度而增强了碳的分解和输出,但其枯落物难以分解又减缓了碳循环^[90]。因此,在探明各植物功能性状对碳循环影响的基础上,综合考虑影响土壤碳汇的所有植物功能性状的最终作用结果是准确预测全球碳循环变化的前提^[91]。而探索性状间的相互关系,可以允许人们在现有技术条件下,在不同时空尺度上,仅调查有效的易测性状来推测难以准确测量的其它功能性状的作用。

未来需要探索更多的未知的植物性状影响碳流通的途径,尤其是土壤生物途径。植物促进了土壤微生物活动,释放含有活性有机碳的根际分泌物,这些有机碳经矿化后增强了土壤碳的输出^[92]。这种启动效应通常发生在低营养土壤中,真菌利用活性有机碳产生酶,进而分解木质素等难分解的物质^[67]。近来,关于土壤有机碳的启动效应也见于肥沃土壤中,并与植物产量正相关,与根的氮含量负相关,这表明植物-微生物的氮竞争可能调节着启动效应^[93]。另一方面,某些植物性状,如毒素,能够抑制启动效应,阻止微生物活动,减少碳释放^[93]。因此根系分泌物(数量和质量)对土壤有机碳的释放至关重要。然而,根系分泌的代谢物在质量上存在很大差异,它们对根系启动效应的影响还是未知。

土壤自养或异养生物呼吸是土壤碳输出的主要途径。但由于很难将根系、共生体和异养生物绝然分离,因此不同生物对土壤呼吸的贡献量还无法准确定量。然而,能够大体将影响土壤碳输出的植物性状分为两类:一类是直接影响根呼吸和 VOC(volatile organic carbon)释放的性状。除了呼吸,植物还通过释放 VOC 损失碳。到目前为止,大多数工作集中在叶片和冠层挥发 VOC 的研究,根系释放 VOC 对土壤碳汇的影响还需要深入研究^[94]。第二类是间接影响土壤异养生物分解、吸收和呼吸速率的植物性状。菌根真菌和固氮菌的呼吸作用从另一方面直接反应了光合产物的地下分配^[95-97]。因此速生植物共生体的呼吸速率要高于慢生植物,但它们对土壤碳的净效应还取决于寄主共生体的物种组合^[98-99]。

研究植物性状多样性与湿地生态系统碳汇的关系,能够帮助人们理解和预测植物如何通过其性状组合直接和间接地驱动生态系统碳汇响应全球气候变化。这种新颖的研究方法结合了以物种为基础和以功能为基础的研究方法,有助于理解植物多样性与生态系统过程相关联的内在机制,对多样性保护和生态系统服务管理具有理论指导意义。这种方法同样适于构建普适模型,以便在生态系统水平上,研究全球气候变化导致的湿地生物群落的变化如何影响碳汇/源的转变。

在以往的研究中,常用物种数量来代表功能多样性,致使物种数量、功能数量和功能组成的差别似乎难以捉摸。然而,明晰它们之间的差异可以探明生态系统过程的运行机制。为达到这一目标,应探明功能数量的作用和制定功能数量及组成的标准测量方法。目前已有几种鉴别功能类型、量化种间性状差异距离的方法。Lavorel 等人评价了群落水平上草本植被功能多样性的测量方法,认为所选方法影响了功能多样性数值,从而影响研究结论^[28]。并且在选择性状参数时,未充分考虑性状参数与所研究功能之间的对应关系,而是普遍采

用易于测量的指标去计算功能多样性(如使用植被盖度代表功能性状承载比例)。建立标准的功能多样性计算方法是一个正在进展也是需要投入更多努力的课题^[47],其发展将加速功能多样性领域的研究。

References:

- [1] Schulze E D. Biological control of the terrestrial carbon sink. *Biogeosciences*, 2006, 3: 147-166.
- [2] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, 10: 423-436.
- [3] Amundson R. The carbon budget in soils. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2001, 29: 535-562.
- [4] Lal R. Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2007, 363: 815-830.
- [5] Roehm C L, Roulet N T. Seasonal contribution of CO₂ fluxes in the annual C budget of a northern bog. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17: 291-299.
- [6] Sun Z G, Liu J S. Development in study of wetland litter decomposition and its responses to global change. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27: 1606-1618.
- [7] Rustad L. From transient to steady-state response of ecosystems to atmospheric CO₂-enrichment and global climate change: conceptual challenges and need for an integrated approach. *Plant Ecology*, 2006, 182: 43-62.
- [8] Bubier J L, Frolking S, Crill P M, Linder E. Net ecosystem productivity and its uncertainty in a diverse boreal peatland. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1999, 104: 27683-27692.
- [9] Updegraff K, Bridgman S D, Pastor J, Weishampel P, Harth C. Response of CO₂ and CH₄ emissions from peatlands to warming and water table manipulation. *Ecological Applications*, 2001, 11: 311-326.
- [10] Waddington J M, Roulet N T. Carbon balance of a boreal patterned peatland. *Global Change Biology*, 2000, 6: 87-97.
- [11] Bubier J, Crill P, Mosedale A, Frolking S, Linder E. Peatland responses to varying interannual moisture conditions as measured by automatic CO₂ chambers. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17: 1-15.
- [12] Fornara D A, Tilman D. Plant functional composition influences rates of soil carbon and nitrogen accumulation. *Journal of Ecology*, 2008, 96: 314-322.
- [13] Chapin F S, Bret-Harte M S, Hobbie S E, Zhong H. Plant functional types as predictors of transient responses of arctic vegetation to global change. *Journal of Vegetation Science*, 1996, 7: 347-358.
- [14] Diaz S, Hodgson J G, Thompson K, Cabido M, Cornelissen J H C, Jalili A, Montserrat-Marti G, Grime J P, Zarrinkamar F, Asri Y, Band S R, Basconcelo S, Castro-Diez P, Funes G, Hamzehe B, Khoshnevi M, Perez-Harguindeguy N, Perez-Rontome M C, Shirvany F A, Vendramini F, Yazdani S, Abbas-Azimi R, Bogaard A, Boustani S, Charles M, Dehghan M, de Torres-Espuny L, Falcuk V, Guerrero-Campo J, Hynd A, Jones G, Kowsary E, Kazemi-Saeed F, Maestro-Martinez M, Romo-Diez A, Shaw S, Siavash B, Villar-Salvador P, Zak M R. The plant traits that drive ecosystems: Evidence from three continents. *Journal of Vegetation Science*, 2004, 15: 295-304.
- [15] De Deyn G B, Cornelissen J H C, Bardgett R D. Plant functional traits and soil carbon sequestration in contrasting biomes. *Ecology Letters*, 2008, 11: 516-531.
- [16] Thomas K L, Benstead J, Davies K L, Lloyd D. Role of wetland plants in the diurnal control of CH₄ and CO₂ fluxes in peat. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28: 17-23.
- [17] Dorrepaal E, Cornelissen J H C, Aerts R, Wallen B, Van Logtestijn R S P. Are growth forms consistent predictors of leaf litter quality and decomposability across peatlands 20 along a latitudinal gradient?. *Journal of Ecology*, 2005, 93: 817-828.
- [18] Ward S E, Bardgett R D, McNamara N P, Ostle N J. Plant functional group identity influences short-term peatland ecosystem carbon flux: evidence from a plant removal experiment. *Functional Ecology*, 2009, 23: 454-462.
- [19] De Deyn G B, Quirk H, Yi Z, Oakley S, Ostle N J, Bardgett R D. Vegetation composition promotes carbon and nitrogen storage in model grassland communities of contrasting soil fertility. *Journal of Ecology*, 2009, 97: 864-875.
- [20] Lang S I, Cornelissen J H C, Klahn T, van Logtestijn R S P, Broekman R, Schweikert W, Aerts R. An experimental comparison of chemical traits and litter decomposition rates in a diverse range of subarctic bryophyte, lichen and vascular plant species. *Journal of Ecology*, 2009, 97: 886-900.
- [21] Chapin F S I, Walker B H, Hobbs R J, Hooper D U, Lawton J H, Sala O E, Tilman D. Biotic control over the functioning of ecosystems. *Science*, 1997, 277: 500-504.
- [22] Hooper D U, Vitousek P M. The effects of plant composition and diversity on ecosystem processes. *Science*, 1997, 277: 1302-1305.
- [23] Tilman D, Knops J, Wedin D, Reich P, Ritchie M, Siemann E. The influence of functional diversity and composition on ecosystem processes. *Science*, 1997, 277: 1300-1302.
- [24] Wardle D A, Bonner K I, Barker G M, Yeates G W, Nicholson K S, Bardgett R D, Watson R N, Ghani A. Plant removals in perennial grassland:

- Vegetation dynamics, decomposers, soil biodiversity, and ecosystem properties. *Ecological Monographs*, 1999, 69: 535-568.
- [25] Wardle D A, Zackrisson O. Effects of species and functional group loss on island ecosystem properties. *Nature*, 2005, 435: 806-810.
- [26] Diaz S, Cabido M. Vive la difference: plant functional diversity matters to ecosystem processes. *Trends in Ecology and Evolution*, 2001, 16: 646-655.
- [27] Diaz S, Lavorel S, de Bello F, Quetier F, Grigulis K, Robson T M. Incorporating plant functional diversity effects in ecosystem service assessments. *PNAS*, 2007, 104: 20684-20689.
- [28] Lavorel S, Grigulis K, McIntyre S, Williams N S G, Garden D, Dorrough J, Berman S, Quetier F, Thebault A, Bonis A. Assessing functional diversity in the field-methodology matters! *Functional Ecology*, 2008, 22: 134-147.
- [29] Tilman D, Lehman C L, Bristow C E. Plant diversity and ecosystem productivity: theoretical considerations. *PNAS*, 1997, 94: 1857-1861.
- [30] Naeem S, Li S. Biodiversity enhances ecosystem reliability. *Nature*, 1997, 390: 507-509.
- [31] Huston M A, Aarssen L W, Austin M P, Cade B S, Friday J D, Garnier E, Grime J P, Hodgson J, Lauenroth W K, Thompson K, Vandemeer J H, Wardle D A. No consistent effect of plant diversity on productivity. *Science*, 2000, 289: 1255.
- [32] Grime J P. Biodiversity and ecosystem function: the debate deepens. *Science*, 1997, 277: 1260-1261.
- [33] Violle C, Navas M L, Vile D, Kazakou E, Fortunel C, Hummel I, Garnier E. Let the concept of trait be functional!. *Oikos*, 2007, 116: 882-892.
- [34] Zhou D W. A phylogenetic approach to comparative functional plant ecology. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29: 5644-5655.
- [35] Cornelissen J H C, Lang S I, Soudzilovskaia N A, During H J. Comparative cryptogam ecology: a review of bryophyte and lichen traits that drive biogeography. *Annals of Botany*, 2007, 99: 987-1001.
- [36] Cornelissen J H C, Lavorel S, Garnier E, Diaz S, Buchmann N, Gurvich D E, Reich P B, ter Steege H, Morgan H D, van der Heijden M G A, Pausas J G, Poorter H. A handbook of protocols for standardized and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 2003, 51: 335-380.
- [37] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. *PNAS*, 2004, 30: 11001-11006.
- [38] Reich P B, Wright I J, Lusk C H. Predicting leaf physiology from simple plant and climate attributes: A global GLOPNET analysis. *Ecological Applications*, 2007, 17: 1982-1988.
- [39] Ackerly D D, Cornwell W K. A trait-based approach to community assembly: partitioning of species trait values into within- and among-community components. *Ecology Letters*, 2007, 10: 135-145.
- [40] Poorter L, Wright S J, Paz H, Ackerly D D, Condit R, Ibarra-Manriques G, Harms K E, Licona J C, Martinez-Ramos M, Mazer S J, Muller-Landau H C, Pena-Claros M, Webb C O, Wright I J. Are functional traits good predictors of demographic rates? Evidence from five Neotropical forests. *Ecology*, 2008, 89: 1908-1920.
- [41] Keddy P, Nielsen K, Weiher E, Lawson R. Relative competitive performance of 63 species of terrestrial herbaceous plants. *Journal of Vegetation Science*, 2002, 13: 5-16.
- [42] Diaz S, Lavorel S, Chapin F S, Tecco P A, Gurvich D E, Grigulis K. Functional diversity at the crossroads between ecosystem functioning and environmental filters//Canadell J, Pataki D E, Pitelka L F, eds. *Terrestrial Ecosystem in a Changing World*. Berlin: Springer, 2007: 79-91.
- [43] Tilman D. Functional diversity//Levin S ed. *Encyclopedia of Biodiversity*. San Diego: Academic Press, 2001: 109-120.
- [44] Petchey O L, Gaston K J. Functional diversity: back to basics and looking forward. *Ecology Letters*, 2006, 9: 741-748.
- [45] Garnier E, Cortez J, Bill s G, Navas M L, Roumet C, Debussche M, Laurent G, Blanchard A, Aubry D, Bellmann A, Neill C, Toussaint J P. Plant functional markers capture ecosystem properties during secondary succession. *Ecology*, 2004, 85: 2630-2637.
- [46] Meng T T, Ni J, Wang G H. Plant functional traits, environments and ecosystem functioning. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31: 150-165.
- [47] Leps J, de Bello F, Lavorel S, Berman S. Quantifying and interpreting functional diversity of natural communities: practical considerations matter. *Preslia*, 2006, 78: 481-501.
- [48] Mason N W H, Mouillot D, Lee W G, Wilson J B. Functional richness, functional evenness and functional divergence: the primary components of functional diversity. *Oikos*, 2005, 111: 112-118.
- [49] Yang J S, Liu J S, Sun L N. CO₂-release rate of soil respiration and litter decomposition of meadow marshes in Sanjiang Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28: 805-810.
- [50] Lavorel S, Diaz S, Cornelissen J H C, Garnier E, Harrison S P, McIntyre S. Plant functional types: are we getting any closer to the Holy Grail?//Canadell J, Pitelka L F, Pataki D eds. *Terrestrial Ecosystems in a Changing World*. Berlin: Springer, 2007: 171-186.
- [51] Aerts R, Chapin F I. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns. *Advances in Ecological Research*, 2000, 30: 1-67.
- [52] Chapin F S. Effects of plant traits on ecosystem and regional processes: a conceptual framework for predicting the consequences of global change. *Annals of Botany* 2003, 91: 455-463.

- [53] Sitch S, Smith B, Prentice I C, Arneth A, Bondeau A, Cramer W, Kaplan J O, Levis S, Lucht W, Sykes M T, Thonicke K, Venevsky S. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 2003, 9: 161-185.
- [54] Silver W L, Miya R K. Global patterns in root decomposition: comparisons of climate and litter quality effects. *Oecologia*, 2001, 129: 407-419.
- [55] Wardle D A, Barker G M, Bonner K I, Nicholson K S. Can comparative approaches based on plant ecophysiological traits predict the nature of biotic interactions and individual plant species effects in ecosystems? *Journal of Ecology*, 1998, 86: 405-420.
- [56] Personeni E, Loiseau P. How does the nature of living and dead roots affect the residence time of carbon in the root litter continuum? *Plant and Soil*, 2004, 267: 129-141.
- [57] Craine J M, Lee W G, Bond W J, Williams R J, Johnson L C. Environmental constraints on a global relationship among leaf and root traits of grasses. *Ecology*, 2005, 86: 12-19.
- [58] Tjoelker M G, Craine J M, Wedin D, Reich P B, Tilman D. Linking leaf and root trait syndromes among 39 grassland and savannah species. *New Phytologist*, 2005, 167: 493-508.
- [59] Striker G G, Insausti P, Grimoldi A A, Vega A S. Trade-off between root porosity and mechanical strength in species with different types of aerenchyma. *Plant Cell and Environment*, 2007, 30: 580-589.
- [60] Bardgett R D, Bowman W D, Kaufmann R, Schmidt S K. A temporal approach to linking aboveground and belowground ecology. *Trends in Ecology and Evolution*, 2005, 20: 634-641.
- [61] Vessey J K, Pawlowski K, Bergman B. Root-based N-2-fixing symbioses: legumes, actinorhizal plants, *Parasponia* sp. and cycads. *Plant and Soil*, 2005, 274: 51-78.
- [62] Langley J A, Chapman S K, Hungate B A. Ectomycorrhizal colonization slows root decomposition: the postmortem fungal legacy. *Ecology Letters*, 2006, 9: 955-959.
- [63] Rillig M C, Mummey D L. Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist*, 2006, 171: 41-53.
- [64] Cornelissen J H C, Thompson K. Functional leaf attributes predict litter decomposition rate in herbaceous plants. *New Phytologist*, 1997, 135: 109-114.
- [65] Zak D R, Blackwood C B, Waldrop M P. A molecular dawn for biogeochemistry. *Trends in Ecology & Evolution*, 2006, 21: 288-295.
- [66] Htenschwiler S, Vitousek P M. The role of polyphenols in terrestrial ecosystem nutrient cycling. *Trends in Ecology and Evolution*, 2000, 15: 238-243.
- [67] Waldrop M P, Zak D R. Response of oxidative enzyme activities to nitrogen deposition affects soil concentrations of dissolved organic carbon. *Ecosystems*, 2006, 9: 921-933.
- [68] Pregitzer K S, Burton A J, Zak D R, Talhelm A F. Simulated chronic nitrogen deposition increases carbon storage in northern temperate forests. *Global Change Biology*, 2008, 14: 142-153.
- [69] Lorenz K, Lal R. The depth distribution of soil organic carbon in relation to land use and management and the potential of carbon sequestration in subsoil horizons. *Advances in Agronomy* 2005 88: 35-66.
- [70] Hooper D U, Chapin F S, Ewel J J, Hector A, Inchausti P, Lavorel S, Lawton J H, Lodge D M, Loreau M, Naeem S, Schmid B, Setälä H, Symstad A J, Vandermeer J, Wardle D A. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*, 2005, 75: 3-35.
- [71] Klumpp K, Fontaine S, Attard E, Le Roux X, Gleixner G, Soussana J F. Grazing triggers soil carbon loss by altering plant community roots and their control on soil microbial community. *Journal of Ecology*, 2009, 97: 876-885.
- [72] Ayres E, Steltzer H, Berg S, Wall D H. Soil biota accelerate decomposition in high-elevation forests by specializing in the breakdown of litter produced by the plant species above them. *Journal of Ecology*, 2009, 97: 901-912.
- [73] Grime J P. Benefits of plant diversity to ecosystems: immediate, filter and founder effects. *Journal of Ecology*, 1998, 86: 902-910.
- [74] Neff J C, Hooper D U. Vegetation and climate controls on potential CO₂, DOC and DON production in northern latitude soils. *Global Change Biology*, 2002, 8: 872-884.
- [75] Holden J. Peatland hydrology and carbon release: Why small-scale process matters. *Philosophical Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2005, 363: 2891-2913.
- [76] Olff H, Vera F W M, Bokdam J, Bakker E S, Gleichman J M, Maeyer K, Smit R. Shifting mosaics in grazed woodlands driven by the alternation of plant facilitation and competition. *Plant Biology*, 1999, 1: 127-137.
- [77] Gartner T B, Cardon Z G. Decomposition dynamics in mixed-species leaf litter. *Oikos*, 2004, 104: 230-246.
- [78] Fenner N, Ostle N J, McNamara N, Sparks T, Harmens H, Reynolds B, Freeman C. Elevated CO₂ effects on peatland plant community carbon dynamics and DOC production. *Ecosystems*, 2007, 10: 635-647.
- [79] Berendse F, van Breemen N, Rydin H, Buttler A, Heijmans M, Hoosbeek M R, Lee J A, Mitchell E, Saarinen T, Vasander H, Wallen B.

- Raised atmospheric CO₂ levels and increased N deposition cause shifts in plant species composition and production in *Sphagnum* bogs. *Global Change Biology*, 2001, 7: 591-598.
- [80] Heijmans M M P D, Klees H, de Visser W, Berendse F. Response of a *Sphagnum* bog plant community to elevated CO₂ and N supply. *Plant Ecology*, 2002, 162: 123-134.
- [81] Mitchell E A D, Buttler A, Grosvernier P, Rydin H, Siegenthaler A, Gobat J M. Contrasted effects of increased N and CO₂ supply on two keystone species in peatland 25 restoration and implications for global change. *Journal of Ecology*, 2002, 90: 529-533.
- [82] Gunnarsson U, Flodin L A. Vegetation shifts towards wetter site conditions on oceanic ombrotrophic bogs in southwestern Sweden. *Journal of Vegetation Science*, 2007, 18: 595-604.
- [83] Robroek B J M, Limpens J, Breeuwer A, Schouten M G C. Effects of water level and temperature on performance of four *Sphagnum* mosses. *Plant Ecology*, 2007, 190: 97-107.
- [84] Porazinska D L, Bardgett R D, Blaauw M B, Hunt W H, Parsons A, Seastedt T R, Wall D H. Relationships at the aboveground-belowground interface: plants, soil microflora and microfauna, and soil processes. *Ecological Monographs*, 2003, 73: 377-395.
- [85] Wardle D A. The influence of biotic interactions on soil biodiversity. *Ecology Letters*, 2006, 9: 870-886.
- [86] Vivanco L, Austin A T. Tree species identity alters forest litter decomposition through long-term plant and soil interactions in Patagonia, Argentina. *Journal of Ecology*, 2008, 96: 727-736.
- [87] van der Heijden M G A, Bardgett R D, van Straalen N M. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 2008, 11: 296-310.
- [88] Bardgett R D, Streeter T, Bol R. Soil microbes compete effectively with plants for organic nitrogen inputs to temperate grasslands. *Ecology*, 2003, 84: 1277-1287.
- [89] Schimel J P, Bennett J. Nitrogen mineralization: challenges of a changing paradigm. *Ecology*, 2004, 85: 591-602.
- [90] Cornelissen J H C, van Bodegom P M, Aerts R, Callaghan T V, van Logtestijn R S P, Alatalo J, Stuart Chapin F, Gerdol R, Gudmundsson J, Gwynn Jones D, Hartley A E, Hik D S, Hofgaard A, Jonsdottir I S, Karlsson S, Klein J A, Laundre J, Magnusson B, Michelsen A, Molau U, Onipchenko V G, Quested H M, Sandvik S M, Schmidt I K, Shaver G R, Solheim B, Soudzilovskaia N A, Stenstrom A, Tolvanen A, Totland O, Wada N, Welker J M, Zhao X. Global negative vegetation feedback to climate warming responses of leaf litter decomposition rates in cold biomes. *Ecology Letters*, 2007, 10: 619-627.
- [91] Owen K E, Tenhunen J, Reichstein M, Wang Q, Falge E, Geyer R, Xiao X, Stoy P, Ammann C, Arain A, Aubinet M, Aurela M, Bernhofer C, Chojnicki B H, Granier A, Gruenwald T, Hadley J, Heinesch B, Hollinger D, Knohl A, Kutsch W, Lohila A, Meyers T, Moors E, Moureaux C, Pilegaard K, Saigusa N, Verma S, Vesala T, Vogel C. Linking flux network measurements to continental scale simulations: ecosystem carbon dioxide exchange capacity under non-water-stressed conditions. *Global Change Biology*, 2007, 13: 734-760.
- [92] Kuzyakov Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 425-448.
- [93] Dijkstra F A, Hobbie S E, Reich P B. Soil processes affected by sixteen grassland species grown under different environmental conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70: 770-777.
- [94] Lin C, Owen S M, Penuelas J. Volatile organic compounds in the roots and rhizosphere of *Pinus* spp. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 951-960.
- [95] Hobbie E A. Carbon allocation to ectomycorrhizal fungi correlates with belowground allocation in culture studies. *Ecology*, 2006, 87: 563-569.
- [96] McDowell N G, Balster N J, Marshall J D. Belowground carbon allocation of Rocky Mountain Douglas-fir Canadian. *Journal of Forest Research*, 2001, 31: 1425-1436.
- [97] Schulze J, Pöschel G. Bacterial inoculation of maize affects carbon allocation to roots and carbon turnover in the rhizosphere. *Plant and Soil*, 2004, 267: 235-241.
- [98] Allen M F, Swenson W, Querejeta J I, Egerton-Warburton L M, Treseder K K. Ecology of mycorrhizae: a conceptual framework for complex interactions among plants and fungi. *Annual Review of Phytopathology*, 2003, 41: 271-303.
- [99] Kiers E T, van der Heijden M G. Mutualistic stability in the arbuscular mycorrhizal symbiosis: exploring hypotheses of evolutionary cooperation. *Ecology*, 2006, 87: 1627-1636.

参考文献:

- [6] 孙志高, 刘景双. 湿地枯落物分解及其对全球变化的响应. *生态学报*, 2007, 27: 1606-1618.
- [34] 周道玮. 植物功能生态学研究进展. *生态学报*, 2009, 29: 5644-5655.
- [46] 孟婷婷, 倪健, 王国宏. 植物功能性状与环境 and 生态系统功能. *植物生态学报*, 2007, 31: 150-165.
- [49] 杨继松, 刘景双, 孙丽娜. 三江平原草甸湿地土壤呼吸和枯落物分解的 CO₂ 释放. *生态学报*, 2008, 28: 805-810.

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1~9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 30 卷 第 24 期 (2010 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 30 No. 24 2010

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元