

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

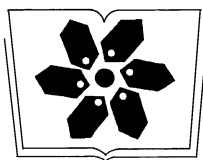
Acta Ecologica Sinica



第31卷 第18期 Vol.31 No.18 **2011**

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



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 18 期 2011 年 9 月 (半月刊)

目 次

高寒矮嵩草草甸冬季 CO ₂ 释放特征	吴 琴, 胡启武, 曹广民, 等 (5107)
开垦对绿洲农田碳氮累积及其与作物产量关系的影响	黄彩变, 曾凡江, 雷加强, 等 (5113)
施氮对几种草地植物生物量及其分配的影响	祁 瑜, 黄永梅, 王 艳, 等 (5121)
浙江天台山甜槠种群遗传结构的时空自相关分析	祁彩虹, 金则新, 李钧敏 (5130)
大兴安岭林区不同植被对冻土地温的影响	常晓丽, 金会军, 于少鹏, 等 (5138)
樟子松树轮不同组分的稳定碳同位素分析	商志远, 王 建, 崔明星, 等 (5148)
内蒙古不同类型草地叶面积指数遥感估算	柳艺博, 居为民, 朱高龙, 等 (5159)
杭州西湖北里湖荷叶枯落物分解及其对水环境的影响	史 绮, 焦 锋, 陈 莹, 等 (5171)
火干扰对小兴安岭落叶松-苔草沼泽温室气体排放的影响	于丽丽, 牟长城, 顾 韩, 等 (5180)
黄河中游连伯滩湿地景观格局变化	郭东罡, 上官铁梁, 白中科, 等 (5192)
黄土区次生植被恢复对土壤有机碳官能团的影响	李 婷, 赵世伟, 张 扬, 等 (5199)
我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性	祖元刚, 李 冉, 王文杰, 等 (5207)
黄土旱塬裸地土壤呼吸特征及其影响因子	高会议, 郭胜利, 刘文兆 (5217)
宁南山区典型植物根际与非根际土壤微生物功能多样性	安韶山, 李国辉, 陈利顶 (5225)
岩溶山区和石漠化区表土孢粉组合的差异性——以重庆市南川区为例	郝秀东, 欧阳绪红, 谢世友 (5235)
夏蜡梅及其主要伴生种叶的灰分含量和热值	金则新, 李钧敏, 马金娥 (5246)
苏柳 172 和垂柳对 Cu ²⁺ 的吸收特性及有机酸影响	陈彩虹, 刘治昆, 陈光才, 等 (5255)
导入 <i>TaNHX2</i> 基因提高了转基因普那菊苣的耐盐性	张丽君, 程林梅, 杜建中, 等 (5264)
空气湿度与土壤水分胁迫对紫花苜蓿叶表皮蜡质特性的影响	郭彦军, 倪 郁, 郭芸江, 等 (5273)
黄土高原旱塬区土壤贮水量对冬小麦产量的影响	邓振镛, 张 强, 王 强, 等 (5281)
咸阳地区近年苹果林地土壤含水量动态变化	赵景波, 周 旗, 陈宝群, 等 (5291)
苗药大果木姜子挥发油成分变化及其地理分布	张小波, 周 涛, 郭兰萍, 等 (5299)
环境因子对小球藻生长的影响及高产油培养条件的优化	丁彦聪, 高 群, 刘家尧, 等 (5307)
不同基质对北草蜥和中国石龙子运动表现的影响	林植华, 樊晓丽, 雷焕宗, 等 (5316)
安徽沿江浅水湖泊越冬水鸟群落的集团结构	陈锦云, 周立志 (5323)
黑胸散白蚁肠道共生锐滴虫目鞭毛虫的多样性分析与原位杂交鉴定	陈 文, 石 玉, 彭建新, 等 (5332)
基于熵权的珠江三角洲自然保护区综合评价	张林英, 徐颂军 (5341)
专论与综述	
中小尺度生态用地规划方法	荣冰凌, 李 栋, 谢映霞 (5351)
土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展	陈 朝, 吕昌河, 范 兰, 等 (5358)
海洋浮游植物与生物碳汇	孙 军 (5372)
多年冻土退化对湿地甲烷排放的影响研究进展	孙晓新, 宋长春, 王宪伟, 等 (5379)
生源要素有效性及生物因子对湿地土壤碳矿化的影响	张林海, 曾从盛, 仝 川 (5387)
生态网络分析方法研究综述	李中才, 徐俊艳, 吴昌友, 等 (5396)
研究简报	
不同群落中米氏冰草和羊草的年龄结构动态	金晓明, 艾 琳, 刘及东, 等 (5406)
主题分辨率对 NDVI 空间格局的影响	黄彩霞, 李小梅, 沙晋明 (5414)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 314 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2011-09



封面图说: 在树上嬉戏的大熊猫——大熊猫是中国的国宝, 自然分布狭窄, 数量极少, 世界上仅分布在中国的四川、陕西、甘肃三省的部分地区, 属第四纪冰川孑遗物种, 异常珍贵。被列为中国国家一级重点保护野生动物名录, 濒危野生动植物种国际贸易公约绝对保护的 CITES 附录一物种名录。瞧, 够得上“功夫熊猫”吧。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

张林海, 曾从盛, 仝川. 生源要素有效性及生物因子对湿地土壤碳矿化的影响. 生态学报, 2011, 31(18): 5387-5395.

Zhang L H, Zeng C S, Tong C. A review on the effects of biogenic elements and biological factors on wetland soil carbon mineralization. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(18): 5387-5395.

生源要素有效性及生物因子对 湿地土壤碳矿化的影响

张林海^{1,3}, 曾从盛^{1,2,3,*}, 仝川^{1,2,3}

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 湿润亚热带生态地理过程省部共建教育部重点实验室, 福州 350007;

3. 福建师范大学亚热带湿地研究中心, 福州 350007)

摘要: 湿地土壤是全球碳存储的重要场所, 湿地生态系统的碳循环过程对全球变化有重要指示作用。土壤碳矿化是湿地生态系统碳循环的重要环节, 对于认知湿地生态系统生物地球化学循环过程具有重要的意义。综述了生源要素及生物因素对湿地土壤碳矿化的内在作用机制。土壤活性有机碳库通过调节土壤能源物质和微生物活性影响土壤碳库的有效性, 是表征土壤碳矿化的敏感指标。湿地其它养分如 N、P、S 等元素的有效性也是影响土壤碳矿化的关键要素。电子受体(NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Fe^{3+} 、 Mn^{4+} 等)对湿地土壤碳矿化和有机碳转变的影响主要通过电子受体的还原过程完成, 在厌氧分解过程中, 湿地土壤利用难溶性电子受体可能是土壤 C 矿化的更重要途径。动物、植物、微生物群落和区系等则是土壤碳矿化的主要驱动因子。土壤动物区系在有机态养分矿化为无机态养分的过程有着独特的功能, 能显著增加土壤碳矿化。土壤微生物的活性, 决定着土壤中有机碎屑的降解速率, 是土壤有机碳分解周转的主要诱导因素。湿地植物则通过影响根系、微生物呼吸底物的供应以及对小气候和土壤因子的调节而影响土壤有机质的分解。湿地生源要素和生物因子还极易与土壤理化性质如温度、水分、pH 值和质地等环境因素形成交互和制约, 共同影响土壤碳矿化。最后, 提出了进一步研究生源要素和生物因素与湿地土壤碳矿化关系需要解决的一些重要问题。

关键词: 生源要素; 生物; 土壤碳矿化; 湿地

A review on the effects of biogenic elements and biological factors on wetland soil carbon mineralization

ZHANG Linhai^{1,3}, ZENG Congsheng^{1,2,3,*}, TONG Chuan^{1,2,3}

1 College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process of Ministry of Education, Fuzhou 350007, China

3 Research Centre of Wetlands in Sub-tropical Regions, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: Wetland soils represent globally significant stocks of carbon, and an understanding of carbon cycling in the ecosystems has important implications for global climate change. Soil carbon mineralization is one of the important parts of the carbon cycle in wetland ecosystem. However our knowledge of the ecological processes that control carbon mineralization in wetland soil is limited. This paper reviews the intrinsic mechanisms of biogenic elements and biological factors which affect soil carbon mineralization in wetlands. The active organic carbon pool in the soil was an important sensitive indicator of carbon mineralization. The biogenic elements (N, S and P) were key elements controlling carbon mineralization. The electron acceptors (NO_3^- , SO_4^{2-} , Fe^{3+} and Mn^{4+}) contribute to anaerobic carbon mineralization, explained by the reducing conditions found in most wetland studies, but the possible use of organic molecules (e. g., humic acids) as alternative

基金项目: 国家自然科学基金项目(31000262); 国家自然科学基金项目(41071148); 福建师范大学地理科学学院“旗山学者”项目

收稿日期: 2011-02-26; **修订日期:** 2011-07-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zjcszeng@pub5.fz.fj.cn

electron acceptors was another potentially important pathway. Animal, plants and microorganism were also important driving factors. The fauna of wetland soil has special function in the decomposition, nutrient mineralization and other ecological processes of soil, which can increase soil carbon mineralization. Microbial biomass and its active control of organic detritus decomposition in soil were strongly correlated with carbon mineralization. Plant material can also alter the soil carbon mineralization rate by influencing microorganism activity by aeration near plant roots. It was noted that invasion by exotic species may influence soil carbon pools and soil carbon mineralization but results are inconsistent. Soil carbon mineralization in wetland ecosystems appear to be controlled by biogenic elements, biological factors, and interacting physical factors, e. g. soil temperature, moisture, pH and texture. Finally, we point out the problems that currently exist in studying the relationship between wetland soil carbon mineralization and controlling variables and present some proposals for further study.

Key Words: biogenic elements; organisms; soil carbon mineralization; wetland

土壤有机碳(SOC)的矿化是通过土壤生物自身活动、利用土壤中主要生源要素(C、N、S、P等)来完成自身代谢,分解有机质同时释放出 CO_2 的过程,直接关系到土壤养分元素的释放与供应及土壤质量的保持,是生态系统物质循环和能量流动的重要环节^[1-2]。湿地是生态系统最重要的碳库之一,据估计,占全球陆地面积6.4%的湿地贮存了大约450 Pg的有机碳^[3]。土壤作为湿地生态系统碳素的主要存储场所,其有机碳的矿化联系着湿地生态系统内部及外部物质循环,是全球碳平衡和碳循环及土壤养分的科学管理等生态环境问题研究的重要组成部分^[4-5]。C、N、S、P等又是湿地生态系统中最主要的生源要素,其有效性对土壤碳矿化和同化效率有重要意义,与全球环境变化存在耦合和反馈机制^[6]。土壤生物自身含有一定数量的C、N、P、S等,可看成是一个有效养分的储备库,同时植物的生长发育状况、微生物分解有机物的能力也影响着沉积物生源要素的迁移和转化等生物地球化学过程,并深刻影响土壤碳循环,这方面的研究日益成为环境地球化学等领域的热点之一^[7]。目前,国内外开展了大量湿地土壤有机碳矿化影响因子的探讨,但是大部分的研究主要集中在温度、水分等土壤理化性质方面^[8-10],对于生源要素和生物因子的综合研究较少,某些方面尚存在空白,特别是动植物与微生物相互作用及其对土壤生源要素转化的影响程度及机理还不够明确^[11-12]。本文在总结近10余年来国内外关于生源要素及生物因子对湿地生态系统土壤有机碳矿化影响的研究和分析当前存在问题的基础上,展望了其研究前景。

1 生源要素有效性对湿地土壤碳矿化的影响

1.1 土壤活性有机碳库

土壤活性有机碳库通过调节土壤能源物质和微生物活性影响着土壤碳库的有效性,与土壤生态系统中有有机碳的迁移、固持和二氧化碳的释放有密切联系,成为土壤有机碳分解矿化的动力和土壤质量演变的敏感指标^[13-14]。土壤有机质的活性组分包括轻组有机碳(LFOC)、水溶性有机碳(DOC)以及微生物生物量碳(MBC)、易氧化碳(EOC)等组分,由糖类、氨基酸和大部分未分解的有机碎屑组成,在土壤中不稳定,周转速率快,易矿化分解^[15]。湿地土壤中,DOC的含量一般为25—50 mg/L,不到土壤有机质的1%,但是为土壤微生物提供了可直接利用的碳源,是环境中重要的天然配位体和吸着载体,在养分流通和有机质的矿化转化中扮演重要角色^[16]。目前,湿地土壤DOC与土壤碳矿化的关系研究也较多。基于水稻田湿地土壤的研究结果表明,土壤碳质量特别是DOC和MBC含量与土壤有机碳矿化之间呈显著正相关^[17],去除DOC显著降低了土壤有机碳的积累衰减量,土壤有机碳矿化下降了11.4%—20.8%^[18]。

土壤碳矿化模型有利于理解土壤碳有效性与碳矿化的关联性。动力学概念模型(图1)就可以较好的描述土壤SOC、DOC浓度和碳矿化的关系^[19]。

该模型认为土壤微生物菌可以分别利用SOC和DOC作为基质矿化产生 CO_2 ,微生物菌也可以利用SOC转化为DOC,DOC浓度和碳矿化的相关关系取决于 k_{DOC} 与 k_{SOC} 的大小,假如由微生物菌形成的不稳定C在

DOC 中比 SOC 高,那么 $k_{\text{DOC}} > k_{\text{SOC}}$,土壤碳矿化速率和 DOC 的浓度正相关,土壤碳矿化主要是由 DOC 来控制的,多数的研究也表明如此^[20];反之,土壤碳矿化速率和 DOC 的浓度负相关。加利福尼亚萨克拉曼多农田泥炭土的研究证实了这一点,表层土壤微生物利用 DOC 比 SOC 快,碳矿化速率和 DOC 的浓度正相关 ($R^2 = 0.87$);次表层土壤在长期水淹厌氧环境下积累形成大量 SOC,一旦处于有氧状态 SOC 大量矿化分解,此时 $k_{\text{SOC}} > k_{\text{DOC}}$,土壤碳矿化速率和 DOC 的浓度负相关 ($R^2 = 0.70$)^[19]。动力学概念模型虽然比较好的描述了有机碳与矿化速率的关系,却难以解释总碳矿化潜能。由于土壤碳矿化还受微生物碳库和 C/N 控制,因此土壤碳库增加与碳矿化速率并非成比例^[21]。湿地活性碳库的有效性对于土壤碳矿化的解释研究仍将是今后研究的重点之一。

1.2 湿地其它养分如 N、P、S 等元素的有效性

土壤 N 素的有效性往往和土壤 C 库联系在一起,这是由于土壤本身可利用 C、N 基质的数量是土壤有机碳矿化的主要限制因素^[25]。但是湿地土壤碳、氮矿化之间的关系较为复杂,并没有一致的结论。在特定温度和水饱和度,土壤 C 和 N 矿化之间的关系可能为正相关^[22],也有负相关的结果^[23],还有些研究认为二者没有相关性^[24]。尽管湿地 N、P、S 等养分在湿地土壤碳矿化过程中的作用非常重要,但是养分有效性在不同湿地生态系统的响应却表现为很大差异。外源 N、P、S 等元素的输入能促进或阻碍土壤有机碳的矿化,引起正的或负的激发效应^[26]。高 C/N 的外源新鲜有机残体输入能加快湿地土壤碳矿化,如三江平原典型草甸小叶章 (*Calamagrostis angustifolia*) 湿地及人工林地土壤在 36 d 的培养实验研究表明, SOC 累积矿化量均随 C/N 的增加而增加,高 C/N 处理下两种土壤的 SOC 累积矿化量分别是低 C/N 时的 2.78 和 2.68 倍,这可能是外源碳输入显著缓解了能源物质对微生物分解速率的限制,而使土壤 C/N 更接近于适宜微生物生长,矿化速率明显提高^[27]。¹⁴C 同位素示踪培养法的研究则认为,添加无机氮使土壤有机碳年矿化率表现出不同程度的下降,降幅可达 3%—9%,无机氮对土壤有机碳转化的贡献在于相对增加了土壤有机碳的固持,表明无机氮对土壤固有碳的矿化起到抑制作用^[28]。其可能的原因是,外源氮输入后促进了硝化-反硝化微生物的生长,而抑制了其他微生物活性,或者与土壤中木质素结合生成更稳定的有机物,降低土壤可利用碳的有效性,导致土壤有机碳矿化速率下降^[29]。对此也有不同的结论,如 Nelson^[30]对比添加 N 和未添加营养物质的土壤溶液矿化实验发现,表层土壤碳矿化释放率提高了 25%,底层没有明显变化,这可能是由于表层土中大量的根系分泌物和可溶性根系组织的输入,提高土层 DOC 的微生物降解率,降解处于 N 限制状态;美国明尼苏达州沼泽湿地的研究结果显示,施用 N、P 肥料和石灰对微生物碳循环没有太多影响,但是增加了土壤碳矿化^[31]。目前关于 P 的有效性对碳矿化影响的研究较少,有培养试验表明,外源 P 输入量的增加,土壤有机碳的矿化速率和累积矿化量均增大;相同 P 输入水平下,淹水处理时土壤有机碳的累积矿化量,DOC 和可溶性无机碳(DIC)含量均高于非淹水处理^[32]。

土壤电子受体 (NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Fe^{3+} 、 Mn^{4+} 等) 对湿地土壤碳矿化和有机碳转变的作用是当前研究的热点^[33]。在厌氧环境下,硫酸盐是很重要的氧化剂,放射性示踪实验证实, SO_4^{2-} 可以利用 H_2 的还原过程,使乙酸的甲基转变为 CO_2 ^[34]。从热力学角度, NO_3^- 在厌氧环境下有很高的氧化还原潜能,是一个比 SO_4^{2-} 更有效的电子受体,如美国路易斯安那 Barataria 湿地研究^[36]认为,淡水湿地遭盐水入侵后,土壤受体离子 (NO_3^- 、 SO_4^{2-}) 增加, NO_3^- (尤其是在 3.2 mmol/L 下) 使乙酸明显受到抑制,显著降低土壤碳矿化,而 SO_4^{2-} 对土壤碳矿化没有影响。但是 Liikanen 等^[35]在芬兰湖泊沼泽研究中发现, NO_3^- 和 SO_4^{2-} 对土壤有机质的矿化影响没有明显差异。 Fe^{3+} 、 Mn^{4+} 等电子受体可以通过控制沉积物 Eh 影响土壤碳矿化。利用稳定同位素 (^{13}C 、 ^{15}N) 示踪法研究九龙江入

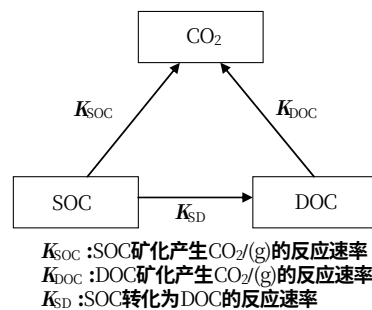


图1 土壤碳矿化动力学概念模型

Fig. 1 A conceptual model describing C mineralization in soils

海口秋茄(*Kandelia candel*)湿地沉积物有机物分解机制,结果表明该区域有机碳矿化非常剧烈(93%为C、92%为N),80%左右的有机碳分解是由Fe、Mn氧化还原循环耦合完成的^[37];比较斯加基拉克湾3个站点硫酸盐、Fe、Mn对有机物总矿化率的贡献,发现硫酸盐所占比率在18%—20%之间,Fe在32%—51%,Mn在有些区域可达80%,表明Mn是比Fe更活泼的电子受体^[38]。

目前大部分湿地土壤碳矿化机制的研究主要通过电子受体的还原过程来解释,而实际情况是,湿地厌氧分解层中,有机质的厌氧发酵或者有机分子(如腐殖酸中的醌类化合物)更有效的利用难溶性电子受体可能是土壤C矿化的更重要途径^[39],这仍需要进一步探讨。

2 湿地土壤碳矿化的生物因子

2.1 动物和植物

土壤有机质的分解和矿化是土壤生物活动及新陈代谢过程中,对有机质产生机械破碎及其它一系列作用而完成的,土壤动物、植物种群种类、数量和区系结构都会对矿化过程产生影响^[40]。多数研究认为,土壤动物区系在有机态养分矿化为无机态养分的过程有着独特的功能,能显著增加土壤碳矿化。这是因为动物生殖、代谢等活动通常会扰动土壤结构和土壤组分,增加土壤有机质的分解和C、N素的矿化,动物可能比微生物更早发挥作用^[41]。研究表明,土壤中植物专性和兼性寄生线虫的解耦合对土壤C、N矿化有显著影响^[42],在稻麦轮作农田土壤实验中,用悉生微缩培养系统引入食微线虫包括原小杆线虫(*Protorhabditis*)后,促进假单胞菌属(*Pseudomonas*)数量的增殖,增强土壤养分矿化作用^[12]。

湿地植物则通过影响根系、微生物呼吸底物的供应以及对小气候和土壤因子的调节而影响土壤有机质的分解。植物生长过程中根系分泌的有机酸和碳水化合物等有机物、根系的裂解物等为土壤微生物提供碳源和养分,这些效应提高了土壤微生物的活性,促进土壤碳矿化。应用脂肪酸甲酯方法(FAMES)分析土壤微生物群落结构变化,发现木榄(*Bruguiera gymnoihiza*)、秋茄和桐花树(*Aegiceras corniculatum*)等红树的种植后,根系具有的丰富通气组织保证了根际的好氧微环境,为真菌和细菌繁殖提供良好条件,提高了根系土壤的呼吸作用,碳矿化速率加快,并且矿化速率木榄高于秋茄和桐花^[43]。凋落物输入则是植物向土壤微生物提供物质和能量的另外一个重要途径,具有不同性质和数量的凋落物及不同C/N、C/P、C/N/P的待分解底物,经过对微生物的同化作用,改变土壤有机碳的分解速率^[44]。苏北泥质海岸湿地的研究发现,水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)人工林土壤矿化速率极显著高于杨树(*Populus tomentosa*)($P<0.01$),林种不同造成土壤理化性质的不同,可能是土壤矿化速率具有显著差异的原因^[45]。

外来入侵植物也可改变湿地生态系统地下碳储量和碳循环,包括土壤碳分配和有机碳矿化。湿地生态系统外来植物入侵对土壤有机碳矿化速率影响存在不同看法,在法国Mont Saint-Michel湾盐沼湿地,披碱草(*Elymus athericus*)入侵10 a后,土壤碳矿化速率低于入侵前的速率^[46];美国新泽西州Mullica河口潮汐湿地遭受芦苇(*Phragmites australis*)入侵后,发现并未显著加快土壤碳矿化和改变土壤有机碳库的规模^[47]。外来植物入侵后对湿地土壤有机碳矿化速率变化的原因是复杂的,入侵植物首先影响湿地群落凋落物的输入数量和质量,其次,入侵后导致的湿地土壤理化性质、土壤微生物群落特性等改变也是重要因素,入侵时间的长短、取样空间的异质性也是造成研究结论不一致的原因。

2.2 微生物

土壤微生物的活性,决定着沉积物中有机碎屑的降解速率、生源物质在沉积物中的滞留时间及释放速率,是土壤有机碳分解周转的主要诱导因素。一般认为,土壤微生物中真菌比细菌的同化效率更高,土壤中真菌数量增加,会使CO₂释放量减少^[48]。不过湿地生态系统土壤碳矿化过程中,细菌扮演更重要角色。如红树底泥的微生物虽然包括细菌、真菌放线菌等,但细菌是最主要的类群,芽孢杆菌(*Bacillus*)又是细菌的优势属。细菌的组成上,革兰氏阳性(GP)菌的百分比含量高于革兰氏阴性(GN)菌,GP/GN比值在10左右^[49]。深圳海上田园的实验表明,土壤经过36 d的矿化培养后,特征脂肪酸C16:1顺、aC15:0百分比减少,特征脂肪酸C12:0、C15:0、C16:1反等比例增大;矿化前土壤真菌/细菌在0.03—0.08;矿化后降低到0.02—0.06,矿化后

细菌占绝对优势,矿化前后 GP/GN 比值较稳定,因此可以推断细菌在红树土壤有机质降解中起主要作用^[43]。微生物还能有效利用土壤中的碳源和电子供体,推动有机物的分解、无机离子的生物同化等过程。如硫酸盐还原菌(SRB)是海岸盐沼湿地土壤微生物优势种群,在厌氧条件下,SRB 能以硫酸盐或其它含硫化合物作为电子受体,经过以磷酸腺苷硫酸盐(APS)为主要中间产物的逐步还原过程,同化有机物而获得能量,同时产生 H₂S 和 CO₂^[50]。微生物群落结构在不同深度土层的分布不同。长白山沟谷湿地乌拉苔草(*Carex meyeriana*)沼泽湿地的研究发现,土壤细菌、放线菌和真菌数量都呈现从上剖面而下急剧减少的趋势,从数量上看,细菌最多,其次是真菌,放线菌最少^[51];Bossio 等^[52]对加利福尼亚 Sacramento-San Joaquin 湿地研究也证实,随着土层深度增加,氧浓度降低,微生物群落发生改变,土壤厌氧菌增加,微生物数量明显减少。微生物群落结构的土层分布使不同土层深度矿化速率形成差异。有研究表明,根际微生物(细菌、放线菌、真菌)数量、MBC 和微生物量 N(MBN)随土层加深和下层土壤容重增加而降低,土壤矿化量降低。这可能是由于下层土壤容重大,其土壤空隙相对较小,透气性差,不适合微生物的繁殖与生长^[53]。

2.3 土壤理化性质对微生物的调控机制

温度和水分往往通过土壤微生物直接或间接影响土壤碳矿化。温度升高时,参与土壤有机碳分解的胞外酶移动加快,微生物细胞同化作用增强,微生物优势种群代谢能力会增加,间接增加底物有效性,碳矿化增强^[54-55]。FACE 处理平台下的研究也表明,CO₂浓度倍增后,温度升高能显著增加水稻成熟期 0—5 cm 土壤真菌数量,微生物活动所需的底物增加,生物活性提高,植物凋落物及土壤有机碳分解加快^[56]。土壤水分是微生物生长的介质,影响土壤养分和气体交换。以往的研究认为,好氧条件下微生物可以直接把有机物转化为 CO₂,而含水量高的厌氧条件下需要一系列微生物接力来完成,因此好氧环境中有机碳的矿化分解速率高于厌氧环境^[57]。在含水量低时,土壤含水量和水分有效性成为土壤微生物活性和土壤碳矿化的重要限制因子^[58]。从生物学的角度,由于湿地经常处于水淹状态,厌氧状态下好氧微生物和酶(如磷酸酶)活性将受到抑制,土壤碳矿化速率降低^[59]。研究表明长期淹水环境下,水稻土氨基糖氮(ASN)的含量和比例均较小,而 ASN 是真菌细胞壁中几丁质的主要组成物质,因此厌氧环境下真菌生长受到抑制,碳矿化降低^[60]。也有不同结论,如 Linn 等^[61]认为土壤碳矿化速率随着含水率的增加而增加,直到土壤微生物活性由于氧气扩散受限而降低。Fierer 等^[62]在室内培养条件下使用同位素示踪方法进行了干土加水湿润后的实验,发现土壤含水率升高,土壤溶液水势增大,微生物释放相关细胞质盐分用以平衡细胞外界水势,释放的胞外细胞物质被其他微生物分解矿化,从而迅速地产生 CO₂。干湿交替(如冻融过程)对微生物有灭杀作用,死亡的微生物在分解过程中释放出一些小分子糖和氨基酸等,从而增加了土壤 DOC 和 DON 含量,但是多次冻融反而降低了土壤碳矿化^[63]。不过,目前对于湿地生态系统中各种微生物在好氧和厌氧环境下碳矿化中的途径及贡献的研究仍考虑较少。

土壤的其他理化性质如 pH 值、*Eh*、质地也影响土壤微生物类群和数量。土壤 pH 值对微生物活性、种类有直接或者间接影响,并与土壤微生物碳密切相关^[64]。通常情况下,酸性土壤中微生物以真菌为主,酸性土壤对有机质和外源有机物质的降解有缓冲作用,从而减缓土壤碳矿化;pH 值升高能增加土壤酶活性,微生物与有机质间的接触增加,有机物质的溶解和分散性也显著提高,促进土壤碳矿化。这在众多研究中得到证实,如 Mladenoff^[65]的研究认为,pH 值升高增加了土壤有机质的可溶性,为微生物生长提供了大量富 C、N 基质,促进 C、N 矿化分解;法国西部天然湿地研究也表明,在一定的厌氧还原条件下,pH 值的升高(5.5—7.4)可以促进土壤氧化-还原反应,增强微生物的新陈代谢能力,这是导致土壤 DOC 的释放和有机质矿化分解加快的主要因素^[66]。不同土壤质地微生物含量不同。采用麦角固醇和胞壁酸标记法测定亚热带紫色水稻土各级团聚体中真菌和细菌的生物量,结果显示真菌生物量与细菌生物量在<0.053 mm 的团聚体粒径中含量最低,可能是此类团聚体中含有较多的木质素二聚物、直链烃和脂质成分;粗砂质地的团聚体中相对高的不稳定性有机碳提高了微生物的生物量,土壤有机碳的分解程度也较高^[67]。

3 研究展望

土壤碳矿化作为湿地生态系统碳循环过程的一个重要内容,无疑对全球生态系统的碳源/汇功能有重要

影响。目前 C、N、S、P 等生源要素和生物因素对湿地土壤碳矿化影响的机制和过程有很多尚不明确的地方,如在细胞和分子水平上微生物对土壤碳矿化的探讨较少,定性多而量化较差,模型研究不足等问题。鉴于以上认识,以下几个方面应给予高度的重视:

(1)深入研究 C、N、S、P 等生源要素对湿地土壤碳矿化影响的动力学机制和模型,明确湿地沉积物中 C、N、S、P 的有效性对土壤碳矿化的作用过程,特别是要明确土壤温度、干湿交替、pH 等与生源要素的交互作用和耦合机理,同时开展土壤碳矿化生源要素的计量化学关系研究。

(2)综合运用生态学、生理学和分子生物学的先进手段,结合化学过程、物理过程和生物学过程,研究在不同环境条件下与碳矿化有关的微生物动力学的关键过程,在测定微生物总量的基础上,开展异养细菌对有机碳(POC 与 DOC)的矿化作用研究。

(3)重视湿地外来入侵植物对土壤碳矿化的研究。从湿地生态系统时空异质性角度考虑外来入侵植物对湿地土壤碳矿化速率和积累量的影响,并引进一些新的方法和手段,如通过可控实验和应用稳定同位素示踪方法研究碳矿化分解过程,重点研究外来植物入侵导致被入侵区域土壤理化性质和土壤微生物群落结构、功能的改变对于土壤有机碳矿化速率的影响及变化机理。

(4)加强受控模拟试验,以明确影响土壤碳矿化的主导因子及碳矿化调控机理和驱动因素,在模拟实验的框架下,探讨各生源要素对土壤碳矿化的响应方式,认识全球环境变化下(CO₂浓度倍增、酸沉降、外来植物入侵等)土壤碳矿化过程中生物的适应机制。

References:

- [1] Wang W J, Dalal R C, Moody P W, Smith C J. Relationships of soil respiration to microbial biomass, substrate availability and clay content. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(2): 273-284.
- [2] Li Z P, Zhang T L, Chen B Y. Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 544-552.
- [3] Roulet N T. Peatlands, carbon storage, greenhouse gases, and the Kyoto protocol: prospects and significance for Canada. *Wetlands*, 2000, 20(4): 605-615.
- [4] Chimner R A, Cooper D J. Carbon dynamics of pristine and hydrologically modified fens in the southern Rocky Mountains. *Canadian Journal of Botany*, 2003, 81(5): 477-491.
- [5] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [6] Chen H. Biogeochemical Effects of Salt-Marshes on Nutrients Cycling at Coastal Tidal Flat, Yangtze Estuary. Shanghai: East China Normal University, 2006.
- [7] Zhang J E, Liu W G. Utilization of microbial resources and sustainable development of agriculture. *Soil and Environmental Sciences*, 2001, 10(2): 154-157.
- [8] Aller R C. Bioturbation and remineralization of sedimentary organic matter: effects of redox oscillation. *Chemical Geology*, 1994, 114 (3/4): 131-345.
- [9] Blodau C. Carbon cycling in peatlands-a review of processes and controls. *Environmental Reviews*, 2002, 10(2): 111-134.
- [10] Mikha M M, Rice C W, Milliken G A. Carbon and nitrogen mineralization as affected by drying and wetting cycles. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(2): 339-347.
- [11] Griffiths B S. Microbial-feeding nematodes and protozoa in soil: Their effects on microbial activity and nitrogen mineralization in decomposition hotspots and the rhizosphere. *Plant and Soil*, 1994, 164(1): 25-33.
- [12] Hu F, Li H X, Xie L Q, Wu S M. Interactions of bacterivorous nematode and bacteria and their effects on mineralization-Immobilization of nitrogen and phosphorus. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(6): 914-920.
- [13] Haynes R J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(2): 211-219.
- [14] Núñez S, Martínez-Yrizar A, Búrquez A, García-Oliva F. Carbon mineralization in the southern Sonoran desert. *Acta Oecologica*, 2001, 22(5/6): 269-276.
- [15] Yan L X, Pan J J. Progress in the study of measurements of soil active organic carbon pool. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(4):

502-506.

- [16] Li S F, Yu Y C, He S. Summary of research on dissolved organic carbon (DOC). *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(4): 422-429.
- [17] Kalbitz K, Schmerwitz J, Schwesig D, Matzner E. Biodegradation of soil-derived dissolved organic matter as related to its properties. *Geoderma*, 2003, 113(3/4): 273-291.
- [18] Han C W, Li Z P, Liu L, Che Y P. Influence on carbon and nitrogen mineralization after dissolved organic matter removal in subtropical Chinese paddy soils. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(1): 107-113.
- [19] Chow A T, Tanji K K, Gao S D, Dahlgren R A. Temperature, water content and wet-dry cycle effects on DOC production and carbon mineralization in agricultural peat soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(3): 477-488.
- [20] Lundquist E J, Jackson L E, Scow K M. Wet-dry cycles affect dissolved organic carbon in two California agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(7): 1031-1038.
- [21] Zhang X H, Li L Q, Pan G X. Top soil organic carbon mineralization and CO₂ evolution of three paddy soils from South China and the temperature dependence. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(3): 319-326.
- [22] Parfit R L, Scott N A, Ross D J, Salt G J, Tate K R. Land-use change effects on soil C and N transformations in soils of high N status: comparisons under indigenous forest, pasture and pine plantation. *Biogeochemistry*, 2003, 66(3): 203-221.
- [23] Scott N A, Saggart S, McIntosh P D. Biogeochemical impact of *Hieracium* invasion in New Zealand's grazed tussock grasslands: sustainability implications. *Ecological Applications*, 2001, 11(5): 1311-1322.
- [24] Kelliher F M, Ross D J, Law B E, Baldocchi D D, Rodda N J. Limitations to carbon mineralization in litter and mineral soil of young and old ponderosa pine forests. *Forest Ecology and Management*, 2004, 191(1/3): 201-213.
- [25] Weintraub M N, Schimel J P. Interactions between carbon and nitrogen mineralization and soil organic matter chemistry in Arctic Tundra soils. *Ecosystems*, 2003, 6(2): 129-143.
- [26] Chen C M, Xie Z B, Zhu J G. Advances in research on priming effect of soil organic carbon. *Soils*, 2006, 38(4): 359-365.
- [27] Dou J X, Liu J S, Wang Y, Zhao G Y. Effects of amendment C/N ratio on soil organic carbon mineralization of meadow marshes in Sanjiang Plain. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29(5): 773-778.
- [28] Zhu P L, Wang Z M, Huang D W, Yu X H, Yan S H. Effect of inorganic nitrogen on mineralization of organic carbon (¹⁴C+¹²C) in soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(4): 457-463.
- [29] Li Y C, Song C C, Hou C C, Song Y Y. Effects of nitrogen input on meadow marsh soil N₂O emission and organic carbon mineralization. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(11): 2091-2096.
- [30] Nelson P N, Dector M C, Soulas G. Availability of organic carbon in soluble and particle-size fractions from a soil profile. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(11): 1549-1555.
- [31] Keller J K, Bridgman S D, Chapin C T, Iversen C M. Limited effects of six years of fertilization on carbon mineralization dynamics in a Minnesota fen. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(6): 1197-1204.
- [32] Liu D Y, Song C C. Effects of phosphorus enrichment on mineralization of organic carbon and contents of dissolved carbon in a freshwater marsh soil. *China Environmental Science*, 2008, 28(9): 769-774.
- [33] Hunt P G, Matheny T A, Ro K S. Nitrous oxide accumulation in soils from riparian buffers of a coastal plain watershed-carbon/nitrogen ratio control. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36(5): 1368-1376.
- [34] Achnich C, Bak F, Conrad R. Competition for electron donors among nitrate reducers, ferric iron reducers, sulfate reducers, and methanogens in anoxic paddy soil. *Biology and Fertility of Soils*, 1995, 19(1): 65-72.
- [35] Liikanen A, Flöjt L, Martikainen P. Gas dynamics in eutrophic lake sediments affected by oxygen, nitrate, and sulfate. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(1): 338-349.
- [36] Dodla S K, Wang J J, Delaune R D, Breitenbeck G. Carbon gas production under different electron acceptors in a freshwater marsh soil. *Chemosphere*, 2009, 76(4): 517-522.
- [37] Alongi D M, Pfitzner J, Trott L A, Tirendi F, Dixon P, Klumpp D W. Rapid sediment accumulation and microbial mineralization in forests of the mangrove *Kandelia candel* in the Jiulongjiang Estuary, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 63(4): 605-618.
- [38] Arnosti C, Holmer M. Carbon cycling in a continental margin sediment: Contrasts between organic matter characteristics and remineralization rates and pathways. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 58(1): 197-208.
- [39] Keller J K, Bridgman S D. Pathways of anaerobic carbon cycling across an ombrotrophic-minerotrophic peatland gradient. *Limnology and Oceanography*, 2007, 52(1): 96-107.
- [40] Alvarez R, Alvarez C R. Soil organic matter pools and their associations with carbon mineralization kinetics. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(1): 184-189.

- [41] Trofymow J A, Morley C R, Coleman D C, Anderson R V. Mineralization of cellulose in the presence of chitin and assemblages of microflora and fauna in soil. *Oecologia*, 1983, 60(1): 103-110.
- [42] Savin M C, Görres J H, Neher D A, Amador J A. Uncoupling of carbon and nitrogen mineralization: role of microbivorous nematodes. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(11): 1463-1472.
- [43] Peng L G. Distribution and Mineralization of Soil-Dissolve Organic Matter in Different Mangrove Planting Systems. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2010.
- [44] Hobbie S E. Temperature and plant species control over litter decomposition in Alaskan tundra. *Ecological Monographs*, 1996, 66(4): 503-522.
- [45] Kong Y G, Zhang J C, Wang Y H, Zhang D H, Chu D S, Tao B X. Soil respiration and its sensitivity to temperature in the typical shelter forests in a silting coastal area of Northern Jiangsu Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8): 4084-4093.
- [46] Valéry L, Bouehard V, Lefeuvre J C. Impact of the invasive native species *Elymus athericus* on carbon pools in a salt marsh. *Wetlands*, 2004, 24(2): 268-276.
- [47] Windham L, Lathrop R G. Effects of *Phragmites australis* (common reed) invasion on aboveground biomass and soil properties in brackish tidal marsh of the Mullica River, New Jersey. *Estuaries*, 1999, 22(4): 927-935.
- [48] Zhang W, Parker K M, Luo Y, Wan S, Wallace L L, Hu S. Soil microbial responses to experimental warming and clipping in a tall grass prairie. *Global Change Biology*, 2005, 11(2): 266-277.
- [49] Lin P, Zhang Y B, Deng A Y, Zhuang T C. Microflora and antimicrobial activities of soil microorganisms in mangrove forests in the Jiulong Estuary, China. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(3): 133-141.
- [50] Xing Y, Liu C H, An S Q. Microbes and their functions in sulfur cycle of coastal salt marsh sediments. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(4): 577-581.
- [51] Xu H F, Liu X T, Bai J H. Dynamic change and environmental effects of soil microorganism in marsh soils from *Carex Meyeriana* wetlands in Changbai Mountain. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3): 115-117.
- [52] Bossio D A, Fleck J A, Scow K M, Fujii R. Alteration of soil microbial communities and water quality in restored wetlands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(6): 1223-1233.
- [53] Wang Q, Yin F, Hao S P, Li C H. Effects of subsoil bulk density on rhizospheric soil microbial population, microbial biomass carbon and nitrogen of corn (*Zea mays* L.) field. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3096-3105.
- [54] Zogg G P, Zak D R, Ringelberg D B, MacDonald N W, Pregitzer K S, White D C. Compositional and functional shifts in microbial communities due to soil warming. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(2): 475-481.
- [55] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 2006, 440(7081): 165-173.
- [56] Li Y, Xu G Q, Huang G H, Shi Y. Effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on soil microbial biomass under rice-wheat rotation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10): 1847-1850.
- [57] Guo L P, Lin E D. Carbon sink in cropland soils and the emission of greenhouse gases from paddy soils: a review of work in China. *Chemosphere: Global Change Science*, 2001, 3(4): 413-418.
- [58] Sponseller R A. Precipitation pulses and soil CO₂ flux in a Sonoran desert ecosystem. *Global Change Biology*, 2007, 13(2): 426-436.
- [59] Liang C, Das K C, McClendon R W. The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. *Bioresource Technology*, 2003, 86(2): 131-137.
- [60] Hao X H. Effect of Long-Term Fertilization on Soil Organic Carbon, Organic Nitrogen and Microbial Properties in Subtropical Paddy Soils. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008.
- [61] Linn D M, Doran J W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(6): 1267-1272.
- [62] Fierer N, Schimel J P. A proposed mechanism for the pulse in carbon dioxide production commonly observed following the rapid rewetting of a dry soil. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(3): 798-805.
- [63] Grogan P, Michelsen A, Ambus P, Jonasson S. Freeze-thaw regime effects on carbon and nitrogen dynamics in sub-arctic heath tundra mesocosms. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(4): 641-654.
- [64] Anderson T H, Joergensen R G. Relationship between SIR and FE estimates of microbial biomass C in deciduous forest soils at different pH. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 29(7): 1033-1042.
- [65] Mladenoff D J. Dynamics of nitrogen mineralization and nitrification in hemlock and hardwood treefall gaps. *Ecology*, 1987, 68(5): 1171-1180.
- [66] Grybos M, Davranche M, Gruau G, Petitjean P, Pédrot M. Increasing pH drives organic matter solubilization from wetland soils under reducing conditions. *Geoderma*, 2009, 154(1/2): 13-19.

- [67] Luo H Y, Jiang X J, Xie D T, Li N, Cao L Y. Distribution patterns of, and the effects of tillage type on, bacterial and fungal biomass within soil water-stable aggregates. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8): 4588-4595.

参考文献:

- [2] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系. *土壤学报*, 2004, 41(4): 544-552.
- [6] 陈华. 长江口滨岸湿地盐生植被对生源要素循环的影响. 上海: 华东师范大学, 2006.
- [7] 章家恩, 刘文高. 微生物资源的开发利用与农业可持续发展. *土壤与环境*, 2001, 10(2): 154-157.
- [12] 胡锋, 李辉信, 谢连琪, 吴珊眉. 土壤食细菌线虫与细菌的相互作用及其对 N、P 矿化生物固定的影响及机理. *生态学报*, 1999, 19(6): 914-920.
- [15] 杨丽霞, 潘剑君. 土壤活性有机碳库测定方法研究进展. *土壤通报*, 2004, 35(4): 502-506.
- [16] 李淑芬, 俞元春, 何晟. 土壤溶解有机碳的研究进展. *土壤与环境*, 2002, 11(4): 422-429.
- [18] 韩成卫, 李忠佩, 刘丽, 车玉萍. 去除溶解性有机质对红壤水稻土碳氮矿化的影响. *中国农业科学*, 2007, 40(1): 107-113.
- [26] 陈春梅, 谢祖彬, 朱建国. 土壤有机碳激发效应研究进展. *土壤*, 2006, 38(4): 359-365.
- [27] 窦晶鑫, 刘景双, 王洋, 赵光影. 三江平原草甸湿地土壤有机碳矿化对 C/N 的响应. *地理科学*, 2009, 29(5): 773-778.
- [28] 朱培立, 王志明, 黄东迈, 余晓鹤, 严少华. 无机氮对土壤有机碳矿化影响的探讨. *土壤学报*, 2001, 38(4): 457-463.
- [29] 李英臣, 宋长春, 侯翠翠, 宋艳宇. 不同氮输入对湿地草甸沼泽土 N_2O 排放和有机碳矿化的影响. *生态学杂志*, 2010, 29(11): 2091-2096.
- [32] 刘德燕, 宋长春. 磷输入对湿地土壤有机碳矿化及可溶性碳组分的影响. *中国环境科学*, 2008, 28(9): 769-774.
- [43] 彭琳婧. 不同红树种植系统中土壤可溶性有机质 (DOM) 的含量分布及矿化特性. 广州: 中山大学, 2010.
- [45] 孔雨光, 张金池, 王因花, 张东海, 储冬生, 陶宝先. 苏北淤泥质海岸典型防护林地土壤呼吸及其温度敏感性. *生态学报*, 2009, 29(8): 4084-4093.
- [49] 林鹏, 张瑜斌, 邓爱英, 庄铁诚. 九龙江口红树林土壤微生物的类群及抗菌活性. *海洋学报*, 2005, 27(3): 133-141.
- [50] 幸颖, 刘常宏, 安树青. 海岸盐沼湿地土壤硫循环中的微生物及其作用. *生态学杂志*, 2007, 26(4): 577-581.
- [51] 徐惠风, 刘兴土, 白军红. 长白山沟谷湿地乌拉苔草沼泽湿地土壤微生物动态及环境效应研究. *水土保持学报*, 2004, 18(3): 115-117.
- [53] 王群, 尹飞, 郝四平, 李潮海. 下层土壤容重对玉米根际土壤微生物数量及微生物量碳、氮的影响. *生态学报*, 2009, 29(6): 3096-3105.
- [56] 李杨, 徐国强, 黄国宏, 史奕. 开放式空气二氧化碳浓度增高 (FACE) 对稻麦轮作土壤微生物数量的影响. *应用生态学报*, 2004, 15(10): 1847-1850.
- [60] 郝晓晖. 长期施肥对亚热带稻田土壤有机碳氮及微生物学特性的影响. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- [67] 罗红燕, 蒋先军, 谢德体, 李楠, 曹良元. 真菌和细菌生物量在土壤团聚体中的分布和耕作响应. *生态学报*, 2009, 29(8): 4588-4595.

CONTENTS

CO ₂ emission from an alpine <i>Kobresia humilis</i> meadow in winters	WU Qin, HU Qiwu, CAO Guangmin, et al (5107)
Effect of cultivation on soil organic carbon and total nitrogen accumulation in Cele oasis croplands and their relation to crop yield	HUANG Caibian, ZENG Fanjiang, LEI Jiaqiang, et al (5113)
Biomass and its allocation of four grassland species under different nitrogen levels	QI Yu, HUANG Yongmei, WANG Yan, et al (5121)
Small-scale spatial patterns of genetic structure in <i>Castanopsis eyrei</i> populations based on autocorrelation analysis in the Tiantai Mountain of Zhejiang Province	QI Caihong, JIN Zexin, LI Junmin (5130)
Influence of vegetation on frozen ground temperatures the forested area in the Da Xing'anling Mountains, Northeastern China	CHANG Xiaoli, JIN Huijun, YU Shaopeng, et al (5138)
Analysis of stable carbon isotopes in different components of tree rings of <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	SHANG Zhiyuan, WANG Jian, CUI Mingxing, et al (5148)
Retrieval of leaf area index for different grasslands in Inner Mongolia prairie using remote sensing data	LIU Yibo, JU Weimin, ZHU Gaolong, et al (5159)
Decomposition of lotus leaf litter and its effect on the aquatic environment of the Beili Lake in the Hangzhou West Lake	SHI Qi, JIAO Feng, CHEN Ying, et al (5171)
Effects of fire disturbance on greenhouse gas emission from <i>Larix gmelinii</i> - <i>Carex schmidtii</i> forested wetlands in XiaoXing'an Mountains, Northeast China	YU Lili, MU Changcheng, GU Han, et al (5180)
Wetland landscape transition pattern of Lianbo Beach along the Middle Yellow River	GUO Donggang, SHANGGUAN Tieliang, BAI Zhongke, et al (5192)
Effect of revegetation on functional groups of soil organic carbon on the Loess Plateau	LI Ting, ZHAO Shiwei, ZHANG Yang, et al (5199)
Soil organic and inorganic carbon contents in relation to soil physicochemical properties in northeastern China	ZU Yuangang, LI Ran, WANG Wenjie, et al (5207)
Characteristics of soil respiration in fallow and its influencing factors at arid-highland of Loess Plateau	GAO Huiyi, GUO Shengli, LIU Wenzhao (5217)
Soil microbial functional diversity between rhizosphere and non- rhizosphere of typical plants in the hilly area of southern Nixia	AN Shaoshan, LI Guohui, CHEN Liding (5225)
Differences in the surface palynomorph assemblages on a karst mountain and rocky desertification areas: a case in Nanchuan District, Chongqing	HAO Xiudong, OUYANG Xuhong, XIE Shiyu (5235)
Ash content and caloric value in the leaves of <i>Sinocalycanthus chinensis</i> and its accompanying species	JIN Zexin, LI Junmin, MA Jine (5246)
Uptake kinetic characteristics of Cu ²⁺ by <i>Salix jiangsuensis</i> CL J-172 and <i>Salix babylonica</i> Linn and the influence of organic acids	CHEN Caihong, LIU Zhikun, CHEN Guangcai, et al (5255)
Introduction of <i>TaNHX2</i> gene enhanced salt tolerance of transgenic puna chicory plants	ZHANG Lijun, CHENG Linmei, DU Jianzhong, et al (5264)
Effects of air humidity and soil water deficit on characteristics of leaf cuticular waxes in alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	GUO Yanjun, NI Yu, GUO Yunjiang, et al (5273)
Influence of water storage capacity on yield of winter wheat in dry farming area in the Loess Plateau	DENG Zhenyong, ZHANG Qiang, WANG Qiang, et al (5281)
Research of dynamic variation of moisture in apple orchard soil in the area of Xianyang in recent years	ZHAO Jingbo, ZHOU Qi, CHEN Baoqun, et al (5291)
Volatile oil contents correlate with geographical distribution patterns of the miao ethnic herb <i>Fructus Cinnamomi</i>	ZHANG Xiaobo, ZHOU Tao, GUO Lanping, et al (5299)
Effect of environmental factors on growth of <i>Chlorella</i> sp. and optimization of culture conditions for high oil production	DING Yancong, GAO Qun, LIU Jiayao, et al (5307)
The effects of substrates on locomotor performance of two sympatric lizards, <i>Takydromus septentrionalis</i> and <i>Plestiodon chinensis</i>	LIN Zhihua, FAN Xiaoli, LEI Huanzong, et al (5316)
Guild structure of wintering waterbird assemblages in shallow lakes along Yangtze River in Anhui Province, China	CHEN Jinyun, ZHOU Lizhi (5323)
Phylogenetic diversity analysis and <i>in situ</i> hybridization of symbiotic Oxymonad flagellates in the hindgut of <i>Reticulitermes chinensis</i> Snyder	CHEN Wen, SHI Yu, PENG Jianxin, et al (5332)
An entropy weight approach on the comprehensive evaluation of the Pearl River Delta Nature Reserve	ZHANG Linying, XU Songjun (5341)
Review and Monograph	
On planning method of mesoscale and microscale ecological land	RONG Bingling, LI Dong, XIE Yingxia (5351)
Effects of land use change on soil organic carbon: a review	CHEN Zhao, LÜ Changhe, FAN Lan, et al (5358)
Marine phytoplankton and biological carbon sink	SUN Jun (5372)
Effect of permafrost degradation on methane emission in wetlands: a review	SUN Xiaoxin, SONG Changchun, WANG Xianwei, et al (5379)
A review on the effects of biogenic elements and biological factors on wetland soil carbon mineralization	ZHANG Linhai, ZENG Congsheng, TONG Chuan (5387)
A review of studies using ecological network analysis	LI Zhongcai, Xu Junyan, WU Changyou, et al (5396)
Scientific Note	
Dynamics of age structures on <i>Agropyron michnoi</i> and <i>Leymus chinensis</i> in different communities	JIN Xiaoming, AI Lin, LIU Jidong, et al (5406)
The impact of thematic resolution on NDVI spatial pattern	HUANG Caixia, LI Xiaomei, SHA Jinming (5414)

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 31 卷 第 18 期 (2011 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 18 2011

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