

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

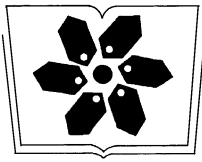
Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 10 期 Vol.33 No.10 **2013**

中国生态学会
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 33 卷 第 10 期 2013 年 5 月 (半月刊)

目次

福建长汀水土保持专题

- 福建省长汀县水土流失区的时空变化研究——“福建长汀水土保持”专题序言 徐涵秋 (2945)
- 福建省长汀县河田盆地近 35 年来地表裸土变化的遥感时空分析 徐涵秋 (2946)
- 福建省长汀县河田水土流失区植被覆盖度变化及其热环境效应 徐涵秋, 何 慧, 黄绍霖 (2954)
- 红壤侵蚀地马尾松林恢复后土壤有机碳库动态 何圣嘉, 谢锦升, 曾宏达, 等 (2964)
- 基于 RUSLE 的福建省长汀县河田盆地土壤侵蚀定量研究 杨冉冉, 徐涵秋, 林 娜, 等 (2974)
- 南方红壤水土流失区土地利用动态变化——以长汀河田盆地为例 林 娜, 徐涵秋, 何 慧 (2983)
- 亚热带地区马尾松林碳储量的遥感估算——以长汀河田盆地为例 黄绍霖, 徐涵秋, 林 娜, 等 (2992)
- 南方红壤侵蚀区土壤肥力质量的突变——以福建省长汀县为例 陈志强, 陈志彪 (3002)

前沿理论与学科综述

- 土壤有机质转化及 CO₂ 释放的温度效应研究进展 沈征涛, 施 斌, 王宝军, 等 (3011)
- 湖泊蓝藻水华发生机理研究进展 马健荣, 邓建明, 秦伯强, 等 (3020)

个体与基础生态

- 岩溶区不同植被下土壤水溶解无机碳含量及其稳定碳同位素组成特征 梁 轩, 汪智军, 袁道先, 等 (3031)
- 黄脊雷鳉越冬卵的滞育发育特性 朱道弘, 陈艳艳, 赵 琴 (3039)
- 香港巨牡蛎与长牡蛎种间配子兼容性 张跃环, 王昭萍, 闫喜武, 等 (3047)

种群、群落和生态系统

- 西藏珠穆朗玛峰国家级自然保护区鸟类群落结构与多样性 王 斌, 彭波涌, 李晶晶, 等 (3056)
- 采伐对长白山阔叶红松林生态系统碳密度的影响 齐 麟, 于大炮, 周旺明, 等 (3065)
- 胶州湾近岸浅水区鱼类群落结构及多样性 徐宾铎, 曾慧慧, 薛 莹, 等 (3074)
- 黄河口盐地碱蓬湿地土壤-植物系统重金属污染评价 王耀平, 白军红, 肖 蓉, 等 (3083)
- 不同起始状态对草原群落恢复演替的影响 杨 晨, 王 炜, 汪诗平, 等 (3092)
- 施肥梯度对高寒草甸群落结构、功能和土壤质量的影响 王长庭, 王根绪, 刘 伟, 等 (3103)
- 高寒退化草地狼毒种群株丛间格局控制机理 高福元, 赵成章 (3114)
- 藏东南色季拉山西坡土壤有机碳库研究 马和平, 郭其强, 刘合满, 等 (3122)
- 灵石山不同海拔米槠林优势种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与叶属性因子的相关性 王英姿 (3129)
- 西门岛人工秋茄林恢复对大型底栖生物的影响 黄 丽, 陈少波, 仇建标, 等 (3138)
- 喀斯特峰丛洼地土壤剖面微生物特性对植被和坡位的响应 冯书珍, 苏以荣, 秦新民, 等 (3148)
- 青藏高原高寒草甸植被特征与温度、水分因子关系 徐满厚, 薛 娴 (3158)

景观、区域和全球生态

近 60 年挠力河流域生态系统服务价值时空变化..... 赵 亮,刘吉平,田学智 (3169)

基于系统动力学的雏菊世界模型气候控制敏感性分析..... 陈海滨,唐海萍 (3177)

资源与产业生态

主要气候因子对麦棉两熟棉花产量的影响..... 韩迎春,王国平,范正义,等 (3185)

低覆盖度行带式固沙林对土壤及植被的修复效应..... 姜丽娜,杨文斌,卢 琦,等 (3192)

不同土地利用方式土下岩溶溶蚀速率及影响因素..... 蓝家程,傅瓦利,彭景涛,等 (3205)

农地保护的外部效益测算——选择实验法在武汉市的应用 陈 竹,鞠登平,张安录 (3213)

研究简报

温度、投饵频次对白色霞水母无性繁殖与螅状体生长的影响 孙 明,董 婧,柴 雨,等 (3222)

内蒙古达赉湖西岸地区大鸕巢穴特征和巢址选择..... 张洪海,王 明,陈 磊,等 (3233)

红外相机技术在鼠类密度估算中的应用..... 章书声,鲍毅新,王艳妮,等 (3241)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 304 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 33 * 2013-05



封面图说: 色季拉山的长苞冷杉和高山杜鹃林——色季拉山高海拔处的植被主要有长苞冷杉、林芝云杉和高山杜鹃等,再高海拔地区则分布有高山灌丛、草甸等。长苞冷杉为我国特有种,属松科常绿乔木,分布于西藏东南部高山地带。树高可达 40m,树皮暗褐色,针叶较短;其球果圆柱形,直立。长苞冷杉的形态独特,与分布区内多种冷杉有密切的亲缘关系,和云杉、杜鹃的分布也彼此交叠。随着色季拉山体海拔的升高,区域气候对于山地土壤从黄壤至棕色森林土、直至高山草甸土的完整发育,以及对森林生态系统类型的形成都产生直接而深刻的影响。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201202170211

沈征涛, 施斌, 王宝军, 姜洪涛. 土壤有机质转化及 CO₂ 释放的温度效应研究进展. 生态学报, 2013, 33(10): 3011-3019.

Shen Z T, Shi B, Wang B J, Jiang H T. The temperature dependence of soil organic matter decomposition and CO₂ efflux: a review. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(10): 3011-3019.

土壤有机质转化及 CO₂ 释放的温度效应研究进展

沈征涛¹, 施斌^{1,*}, 王宝军¹, 姜洪涛²

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210093; 2. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093)

摘要: 土壤有机质转化对温度变化的响应, 是气候变暖与全球碳循环关系中的核心问题。掌握土壤有机质对温度变化的响应规律, 对准确评价气候变暖背景下, 全球土壤有机质的转化至关重要。综述了国内外大量研究成果, 对基质成分、基质损耗、测试方法、微生物、水分含量等因素, 对土壤有机质转化与温度关系的影响机理与影响规律以及 Q_{10} 的变化规律进行了探讨。提出稳定有机质与不稳定有机质温度敏感性异同问题, 应作为土壤有机质转化与温度关系中的核心问题进行深入研究。同时通过分析, 提出室内短期培养是首选测试方法。分析认为微生物生长温度曲线与微生物呼吸之间不存在必然联系, 而在过低和过高之间, 水分含量是否会影响土壤呼吸, 有待进一步试验验证。提出随着城市热岛效应这一环境问题的加剧, 研究及评价更大温度区间内的城市土壤有机质对温度变化的响应规律十分重要。

关键词: 土壤有机质; 温度; 土壤呼吸; 基质; 微生物; 水分含量; 城市热岛效应

The temperature dependence of soil organic matter decomposition and CO₂ efflux: a review

SHEN Zhengtao¹, SHI Bin^{1,*}, WANG Baojun¹, JIANG Hongtao²

1 School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2 School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: The temperature dependence of soil organic matter (SOM) is a key question in the relationship between climate warming and global carbon cycles. Understanding the response of SOM to temperature is critical in evaluating global SOM transformation under climate warming. In this review, quantities of studies are summarized and the mechanism and laws of influence of substrate components, substrate loss, test methods, microbes, water content on the temperature dependence of SOM transformation are also discussed, in addition, the variation law of Q_{10} is discussed. The response of labile and resistant SOM to changes in temperature is proposed as the key question in further studying in relation between SOM transformation and temperature while short-term test in laboratory is recommended as the best test method. Moreover, according to the analysis in this review, there is no positive relation between microbial growth curve and temperature dependence of microbial respiration, and further study need put forward to judge whether soil respiration would be influenced by water content between too low and too high. At last, it is firstly put forward that it is significant to study and evaluate the temperature dependence of urban SOM decomposition in a big temperature range as the aggravation of the environment problem-urban heat island effect.

Key Words: soil organic matter; temperature; soil respiration; substrate; microbe; water content; urban heat island effect

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(40730739); 国家自然科学基金项目资助(41072210)

收稿日期: 2012-02-17; 修订日期: 2013-02-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shibin@nju.edu.cn

土壤作为全球第二大有机碳库,其碳储量约是大气碳库的 2 倍,约 81% 参与全球碳循环的有机碳储存在土壤中;同时土壤有机碳对温度的变化非常敏感,微小的温度变化都能对土壤有机碳的转化产生巨大影响^[1-2]。在气候变暖背景下,研究土壤有机碳转化对温度变化的响应规律,对了解和掌握是否会有大量有机碳以 CO_2 的形式释放到大气中具有重要意义,如果有,将进一步加剧气候变暖^[3]。国内外的学者开展了大量的研究,试图掌握土壤有机质转化随温度的变化规律。虽然对这一规律的研究在过去 30a 取得了长足的进步,但基质(也称底物,下同)成分、基质损耗、测试方法、微生物、水分含量等主要影响因素对这一规律的影响,依然存在争议甚至矛盾的结论^[2-5]。

土壤有机质转化与温度的关系,一般用土壤基础呼吸(微生物呼吸)即土壤 CO_2 释放与温度的关系来表征。土壤基础呼吸的温度敏感性一般用 Q_{10} 来表征,即温度每增加 10°C ,土壤基础呼吸速率所增加的倍数^[6-8]。早期的研究认为 $Q_{10}=2$ 为一常量,但随着研究的深入,已发现 Q_{10} 随着时空分布的变化存在很大差异:从 1—20 不等甚至小于 1^[9-15]。已有的对自然生态系统,土壤有机质转化对温度变化的响应模型的建立,都是基于 Q_{10} 的原理,如一阶指数方程,阿伦尼乌斯方程,loyd 和 Taylor 方程等^[6,9]。因此,对 Q_{10} 的准确认识直接决定了模型评价的客观性。

本文综述了国内外大量的研究成果,对土壤有机质转化与温度关系的影响因素,以及 Q_{10} 的变化规律进行了详细的探讨,同时指出了已有研究的不足,提出了值得深入研究的课题,为解释土壤有机质对温度变化的响应规律和今后的研究方向提供了参考。

1 主要影响因素

1.1 基质的影响

1.1.1 基质成分的影响

早期的研究在建模时认为不同的土壤有机质成分拥有相同的温度敏感性^[16],但 Liski 等^[16]通过比较一定温度梯度下土壤碳库的总量和年龄的变化规律发现,稳定有机质(又称老有机质)比新鲜凋落物对温度敏感性低很多;Giardina 等^[17]通过统计全球 5 个大陆 82 个观测点森林矿物质土中有机质的分解速率发现,全球尺度下,不同森林矿物质土中有机质的分解速率相似,从而推论温度升高不会刺激森林矿物质土中的稳定有机质的分解,得出了与 Liski 等^[16]相似的结论。Fang 等^[18]通过在不同温度下进行的室内 108d 的培养试验发现,培养前期和后期土壤呼吸的 Q_{10} 相近,从而推论不稳定有机质(又称新鲜有机质)和稳定有机质具有相似的温度敏感性,Fang 等^[18]的结论与 Liski 等^[16]和 Giardina 等^[17]的结论相反。Leifeld 等^[5]通过物理分离碳库后长期的室内培养试验,以及对水解残留下的稳定有机碳库的研究发现,稳定有机质与新鲜有机质有相似的温度敏感性,Leifeld 等^[5]的研究结论与 Fang 等^[18]相似,但 Leifeld 等^[5]认为 Fang 等^[18]的研究中把不同的碳库看作一个碳库,只是定义了稳定有机碳库和不稳定有机碳库,并没有对碳库进行物理的分离,可能导致高估了稳定有机质对总 CO_2 释放量的贡献率,从而对结论产生影响。

不稳定有机质和稳定有机质是否具有相似的温度敏感性,是研究土壤有机质转化随温度变化规律的一个核心问题。如果稳定有机质对温度敏感性很低,那么即使在气候变暖背景下,占土壤有机碳库 90% 以上的稳定有机碳库也不会发生很大的转化^[16,19-20],同时随着植物净初级生产力(NPP)的增加,净生态系统生产力 NEP(NEP,等于 NPP 减去总土壤呼吸量)很可能大于 0,即土壤为碳汇^[16,21],起到缓解气候变暖的作用;而如果稳定有机质和非稳定有机质拥有相似的温度敏感性,那么气候变暖显然将刺激更多的稳定有机质转化,释放更多的 CO_2 到大气中,土壤可能成为碳源,进一步加剧气候变暖。

Ben 等^[22]用元分析的方法统计了从 1989 年到 2008 年期间主要发表的土壤呼吸资料,发现在气候变暖背景下,土壤的年呼吸量呈逐渐变高的趋势。出现这一现象的原因可以用图 1^[23]解释:一种可能如图 1a,如果稳定有机质的分解也会受气候变暖的刺激,则气候变暖下,凋落物并未增多,即注入土壤的新鲜有机质质量没有变化,由新鲜有机质转化释放到大气中的 CO_2 也没有变化,是更多稳定有机质的转化导致年土壤呼吸量的增加;另一种可能如图 1b,如果稳定有机质的分解并不受气候变暖的刺激,则土壤年呼吸量的增加是由于更多

凋落物的注入,使更多新鲜有机质分解。如果是前者,那么土壤的总碳量会逐渐减少,土壤中更多有机质转化产生 CO₂ 释放到大气中,进一步加剧气候变暖;如果是后者,那么土壤碳库是稳定的^[23]。

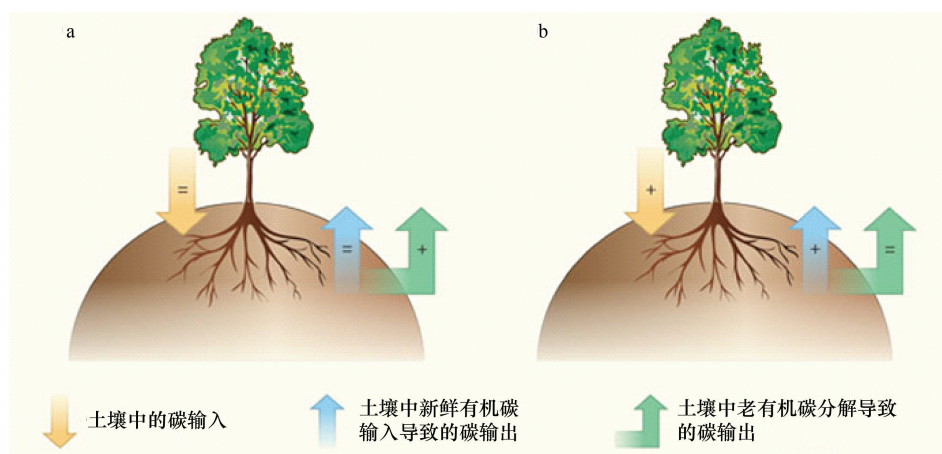


图1 气候变暖背景下全球土壤年呼吸量增加的驱动因素^[23]

Fig.1 Possible mechanisms driving increased soil respiration in a warming climate

因此,只有掌握稳定有机质和不稳定有机质的温度敏感性异同问题,才能对气候变暖下,全球土壤有机碳库的转化做出科学评价。国内对此的研究比较少见,今后的研究应重视这一关键问题。

1.1.2 基质消耗的影响及测试方法产生的偏差

基质消耗即基质数量的减少会明显降低土壤的 CO₂ 释放速率,而基质消耗的程度与试验方法密切相关。

(1) 基质消耗对野外原位测试的影响

在多数生态系统,落叶集中在秋季凋落,这会导致秋、冬季的基质注入大于春、夏季,而基质的多少显然会影响土壤呼吸率。即使在全年落叶掉落较平均的地区,由于夏季温度较高,夏季时基质的消耗速度肯定大于冬季(因为有机质的分解者微生物,在冬季活性较低),全年可利用基质显然也会随季节发生变化^[3,24]。因此野外的原位测试方法测得的土壤呼吸率与温度的关系受环境因素影响较大,存在偏差,用野外测得的土壤呼吸数据来评价有机质转化与温度的关系不够客观。

(2) 基质消耗对室内培养试验的影响

室内培养试验被认为是对土壤有机质转化与温度关系产生偏差最小的测试方法^[3,24],但即使在室内试验中,基质消耗问题依然存在。Nicolardot 等^[25]在把标记了¹⁴C 元素的葡萄糖加入土壤样品后,通过较高温度下的短期室内试验发现,试验初期葡萄糖快速的分解导致了初期 CO₂ 释放速率显著大于后期。此外,在正常的土壤样品中,也存在基质损耗问题。Koepf 等^[26]将3组平行土壤样品分别在10、20、30℃环境下短期培养后,测定其在相同温度下的 CO₂ 释放速率,发现在同一测定温度下,较高温度培养过的样品 CO₂ 释放速率显著低于较低温度。说明部分基质已在较高温度培养下消耗掉了。长期室内培养引起的基质消耗问题更严重^[3]。很多长期培养试验中,都观测到基质大量损耗后,试验后期土壤呼吸率的降低^[27-28]。

就目前而言,室内的短期培养试验,是测定土壤有机质转化与温度关系时,由基质消耗产生的偏差最小的测试方法。

1.2 微生物

1.2.1 微生物呼吸作用

除了极少量的化学氧化^[29-31],土壤有机质的分解与转化主要由微生物驱动,因此有机质转化随温度的变化规律往往用微生物呼吸(土壤基础呼吸)与温度的关系来表征^[4,6,32]。微生物通过分泌酶,将复杂结构的有机质分解为简单结构的有机质如葡萄糖,同时,微生物以简单结构的有机质为养料生长。在氧气充足的情况下,微生物会吸收养料进行呼吸作用释放 CO₂;同时复杂结构有机质在微生物分泌的酶作用下,与氧气反应分

解为简单结构有机质,并释放出 CO_2 ,而现有的研究把这两个产生 CO_2 的过程都归为微生物呼吸(土壤基础呼吸)^[4,33]。

1.2.2 微生物呼吸最优温度问题

在培养液中微生物的生长与温度的关系已经被广泛研究,不同的微生物种类有不同的生长曲线,并且都存在最优温度,地表土壤中微生物生长的最优温度一般在 25—35℃ 之间^[32,34]。但微生物呼吸作用还受其他因素控制,如基质成分、可利用基质数量、可溶性有机碳含量、微生物量碳、水分、氧气、pH 等^[35]。因此微生物呼吸率与温度的关系往往与微生物生长的温度曲线之间没有明显的相关性^[6]。理论上微生物呼吸在正常区间内会存在最优温度,但大多数的研究在 0—40℃ 内都没有发现最优温度^[6,36-45]。只有极少量的研究发现了最优温度,如 Parker 等^[46]对一种沙地土壤全年的原位测试发现,土壤呼吸的最优温度为 41℃,但 Parker 等^[46]采用的碱液吸附法,本身会使 40℃ 以上测得的土壤呼吸率值偏低,因此 Parker 等^[46]的结论缺乏可信度。Connel 等^[47]在室内观察到微生物分解落叶的最优温度为 30℃,Grundmann 等^[48]等发现微生物驱动下的土壤硝化的最优温度在 20—25℃ 之间。但 Connel 等^[47]和 Grundmann 等^[48]的研究只能证明微生物的活动确实存在最优温度,对微生物分解土壤有机质是否存在最优温度缺乏参考价值。Eszter 等^[15]在文章中称在 0—50℃ 内观测到了最优温度为 35℃,但 Eszter 等^[15]并没有给出最优温度之后的土壤呼吸温度曲线形状。国内少数野外的研究也出现过土壤呼吸率随温度升高而降低的情况^[27,31],但 Eszter 等^[15]和国内的研究都是野外的原位数据,野外变化因素太多,尤其是基质的差异会对结果造成很大的偏差。

虽然土壤微生物呼吸存在最优温度被广泛预期^[6,15,47,49-50],但已有的研究忽略了这样一个问题,就是大量的在正常温度区间 0—40℃ 内的对于土壤呼吸的研究都没有发现最优温度^[6,36-45]。出现这一现象的可能原因有三:(1)微生物有很强的温度适应性,这种适应性极可能是单一种群对较大温度区间的适应;也可能是种群通过结构的调整来适应温度的变化,即随着温度的变化,优势种群发生改变^[33]。正是由于这种适应性的存在,野外的原位测试很难观测到土壤基础呼吸的最优温度。因为自然生态系统中温度变化循序渐进,有利于微生物发挥其适应性。通过对高纬度、低纬度土壤在夏季、冬季分别进行系统的室内培养实验,可以检验出长期处于低温环境(高纬度)和高温环境(低纬度)的微生物呼吸作用对温度适应性的异同,同时进行较大温度区间内的试验可以客观检验土壤基础呼吸最优温度是否真实存在。(2)酶的温度适应性,驱动有机质与氧气反应产生 CO_2 的酶(由微生物分泌)具有较强的温度适应性,随着温度的升高,酶的最优温度变大^[51],继续驱动较复杂有机质的转化。(3)物理化学作用,有机质化学氧化在较高温度下变得剧烈^[52],或者土壤对 CO_2 物理化学吸附能力的降低,尤其是 40℃ 后(因为 40℃ 以后土颗粒对 CO_2 的吸附作用急剧下降^[53]),原本依靠物理化学吸附作用固定在土颗粒表面的 CO_2 ,脱离土颗粒的束缚释放到空气中,也可能导致随着温度的升高,观测到的土壤基础呼吸速度变大^[53]。只有排除这 3 种可能,并且在较大温度区间内的试验中,同时排除水分,基质等因素的影响,普遍发现最优温度,才能证明大量学者广泛预期的土壤微生物呼吸的最优温度确实存在。

因此,准确理解微生物在土壤有机质转化中的角色,掌握微生物生长温度曲线与微生物呼吸作用温度效应的关系,对准确评价土壤有机质对温度的响应至关重要。

1.3 水分含量的影响

1.3.1 水分影响与温度敏感性的关系

水分是影响土壤有机质转化的一个重要因素,但关于水分对土壤有机质转化温度敏感性的影响,到底是间接的还是直接的,存在两种不同的观点。一些研究认为水分在影响土壤呼吸率的同时,能影响土壤呼吸的温度敏感性,即水分含量能改变 Q_{10} ^[54-56]。Howard 等^[36]发现不同水分含量试样的土壤呼吸拥有不同的 Q_{10} 。Parker 等^[46]发现土壤呼吸活化能随着含水率的增加而减小,Balogh 等^[37]还发现活化能与含水率之间有很好的负线性关系,这些发现都支持水分能影响土壤呼吸温度敏感性这一观点。一些研究则认为温度和水分分别独立对土壤呼吸产生影响,两者互不干扰^[54,57-58]。Eszter 等^[15]分别用基于水分和温度独立影响和相互影响土壤呼吸的方程,拟合了某半干旱地区的土壤呼吸与温度和水分含量的关系的数据,发现基于水分含量也能影

响土壤呼吸温度敏感性的模型能更好地反映真实情况。

1.3.2 最优水分含量问题

水分主要通过影响酶和基质的扩散、氧气在土壤中的传输来影响土壤基础呼吸。当水分含量过低时,抑制了酶的含量和基质的扩散,土壤基础呼吸受到限制;当水分含量过高时,虽然酶和可利用基质的含量充足,但土壤孔隙被水填充,限制了土壤呼吸所需氧气的传输,土壤呼吸也受到限制^[33]。因此,在过低和过高水分含量时,土壤呼吸会受到限制是被公认的^[37,59-62]。但是,在过低和过高水分含量之间,水分的变化是否会影响土壤呼吸率,目前的观点主要有两种:一种观点结合试验数据,认为在过低和过高水分含量之间,水分的变化对土壤呼吸率没有明显的影响^[6,63-66];另一种观点结合试验数据发现在过低和过高含水率区间内存在最优含水率^[36-37,61];Balogh 等^[37]还发现不同土壤的最优水分含量与土壤粘粒含量存在显著的线性关系。支持第一种观点的大部分研究是在野外进行的,而野外的研究中可变因素太多,因此在野外的研究中没发现水分含量与土壤呼吸之间存在明显关系是可以理解的,但 Fang 等^[6]在室内精确控制下的试验也没发现最优水分含量。可见最优水分含量是否真的存在,依然是一个值得继续深入研究的问题。

在生态系统中,土壤含水率是动态变化的,因此掌握含水率对土壤有机质温度敏感性的影响,有利于更准确的建立模型,进行年土壤呼吸量的评价。

此外,土壤深度和 pH 等因素对土壤有机质对温度变化的响应规律也会产生影响。一般认为,随着土壤深度的增加,氧气和可利用基质(可溶性有机质)减少,土壤呼吸率迅速减弱^[35]。Fang 认为对于一个剖面,土壤呼吸的主要来源在表层 0—8cm^[35]。土壤 pH 对土壤呼吸过程中化学反应和微生物酶都有影响,一般认为,当土壤为酸性时,pH 增加促进土壤呼吸,当土壤为碱性时,pH 增加抑制土壤呼吸。

2 Q_{10} 的规律

2.1 基质对 Q_{10} 的影响

一些研究发现基质的改变会影响 Q_{10} 。如在野外原位的研究中 Graf 等^[67],Jin 等^[68],Pavelka 等^[11]都发现随着深度的增加,土壤呼吸的 Q_{10} 增大,而深度的改变意味着基质的改变。Fang 等^[35]发现总有机碳,微生物量碳,可溶性有机碳含量都随着深度的增加而降低,而新鲜有机质主要集中在土壤表层 0—8cm,这些基质变化都可能引起 Q_{10} 的变化。Kirschbaum 等^[3]基于 52 个年均数据提出了基质耗竭对土壤呼吸的影响,指出如果不同基质组分对温度敏感性即 Q_{10} 不同,基质的损耗将显著影响年土壤呼吸量。

Leifeld 认为^[5]基质对 Q_{10} 的影响,是由基质质量即基质物理,化学成分决定的。新鲜有机质质量高,成分简单,转化周期短, Q_{10} 较低;稳定有机质质量低,成分复杂,转化周期长, Q_{10} 较高。

2.2 Q_{10} 的变化规律

国内外已有的研究中,土壤呼吸与温度的关系模型可以主要概括为三类^[15]:(1)大量的研究认为同一土壤呼吸的温度敏感性即 Q_{10} 恒定(图 2b, Exponoenel),用指数模型 $R = \exp(a+bT)$ (R 为土壤呼吸率, T 为温度, a, b 为参数),来拟合其数据(图 2a, Expononenel);(2) Lloyd-Taylor 方程 $R = \exp(a+bT+cT^2)$ (R, T 同上, a, b, c 为参数),则反映出土壤呼吸的温度敏感性在高温时较低,在低温时较高,且随着温度的升高而减小(图 2b, Lloyd-Taylor),并得到图 2a Lloyd-Taylor 曲线;(3) Gaissoam 方程 $R = \exp(a-b/(T-c))$ (R, T, a, b, c 同上),则反映出在野外基质充足的情况下,在一个较大温度区间内会出现最优温度,土壤呼吸率在最优温度之前随温度增加,在最优温度之后随温度减小(图 2a, Gaissoam)。Gaissoam 方程的 Q_{10} 变化规律与 Lloyd-Taylor 方程相似,但 Gaissoam 方程在最优温度之后, Q_{10} 会小于 1。

虽然国内外大量的研究都用基于恒定 Q_{10} 的指数方程来拟合数据^[6,38-45,57,69-72],但越来越多的研究发现 Q_{10} 并不恒定^[12,73-74]。其他条件一定时, Q_{10} 随着温度的升高而减小已被广泛认可^[3,5,69,74],因此 Lloyd-Taylor 方程和 Gaissoam 方程比较客观地评价土壤呼吸率与温度间的关系。这两个方程的主要区别是在一个较大温度区间内如 0—50℃ 是否存在最优温度。Eszter 等^[15]发现 Gaissoam 方程比 Lloyd-Taylor 方程能更好地拟合其在半干旱地区观测得到的数据,但 Eszter 等^[15]并没有给出最优温度之后的土壤呼吸温度曲线形状。

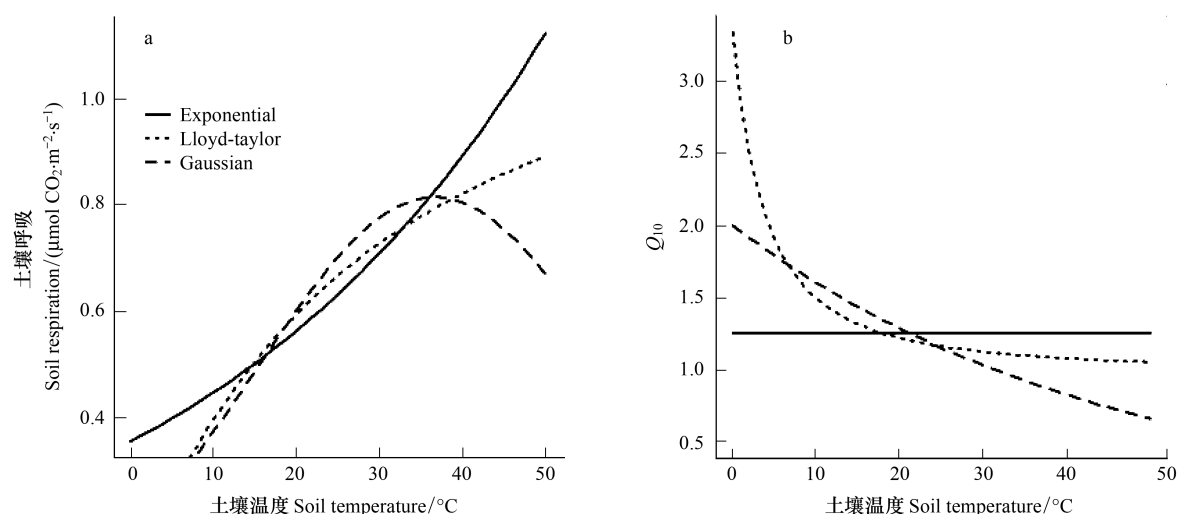


图2 3种方程及其 Q_{10} 与温度的关系^[15]

Fig. 2 Shape of the temperature dependence of soil respiration (a) and Q_{10} (b) in the three fitted functions

2.3 温度区间与城市热岛效应

目前,国内外大量的野外和室内培养试验的温度区间主要集中在 $0-40^{\circ}\text{C}$ 以内^[6,38-45,57,69-72],在这温度区间以外的研究较少。Michaelson 等^[75]对一种有机质土 0°C 以下的呼吸率进行了研究,发现零度以下有机质依然在转化,且呼吸率是同条件下矿物质土的 1.7 倍。Parker 等^[46]用碱液吸附法原位观测了 40°C 以上一种沙漠土的呼吸率,但碱液吸附法已被证明在 40°C 以上会产生较大误差^[6]。之所以 40°C 之后的土壤呼吸与温度关系的研究较少,主要是因为自然生态系统中,土体温度很少超过 40°C ,同时,对于一些比较精密,造价较高的 CO_2 测试仪器,合适的使用温度在 40°C 以下,例如在采用水浴控温的测试方法中, 35°C 之后就会有大量的水蒸气对仪器造成破坏,维护费用较高。

然而,在气候变暖的背景下,尤其是城市热岛效应日趋显著的背景下,极限温度越来越普遍的出现。沙漠地区的土壤地表温度可达 60°C ^[37],城市沥青路面地表温度可达 50°C 以上^[76]。本课题组对南京城区浅层土体温度 2011 年长达 1a 的监测发现,城区水泥覆盖层表面,日最高温度大于等于 40°C 的天数,全年达 100d 以上,最高温度达 56.3°C 。在同一剖面,城市草地温度比水泥覆盖层平均低 2°C 左右,可见草地在浅表层出现大于 40°C 的情况是比较普遍的,而表层 ($0-8\text{cm}$) 土体是整个剖面土壤年呼吸量的主要贡献来源^[35]。同时随着世界经济的发展,城市化进程的加快,在过去几十年中,越来越多的自然生态系统正在被城市所取代^[77]。而用自然生态系统观测的数据来评价城市土体的有机质转化即 CO_2 的释放,显然是不客观的,因此在城市热岛效应背景下,在更广的温度区间内研究城市环境中土体有机质对温度变化的响应是当务之急。

同时,现有的评价模型很多基于这样的假设,即在试验中的温度区间以外,土壤呼吸的温度敏感性变化规律与试验的温度区间内一致。这样的假设在较小温度区间是合理的,但当温度区间扩大,尤其是 40°C 以上,土壤有机质温度敏感性即 Q_{10} 的变化是否还如指数模型那样不变,或者如 Lloyd-Taylor 和 Gaissoam 方程那样减小,都需要进一步的试验验证。同时,在较高温度下,有机质的化学氧化作用^[52],微生物和酶的温度适应性^[33],土壤物理化学吸附 CO_2 作用的减弱^[53],会对 Q_{10} 产生怎样的影响,也都需要一一验证。

3 结论

本文对基质成分、基质损耗、测试方法、微生物、水分含量等主要影响因素,对土壤有机质对温度变化响应的的影响机理和影响规律,以及 Q_{10} 的变化规律进行了系统的总结归纳。同时指出了已有研究的不足,并且提出了未来研究的展望。主要结论与展望总结如下:

(1) 稳定有机质与不稳定有机质温度敏感性异同问题,是研究土壤有机质对温度变化响应中的核心问

题,应继续深入研究;

(2)室内短期培养的试验方法能将基质损耗引起的偏差降至最低,是研究土壤有机质温度响应问题的首选测试方法;

(3)微生物生长温度曲线,与微生物呼吸和温度的关系之间不存在必然联系,微生物呼吸最优温度是否会在正常温度区间内出现,需要在不受基质,水分等因素限制的试验中验证;

(4)过低和过高水分含量会显著限制土壤呼吸,但水分含量是否会改变 Q_{10} ,依然没有定论,而在过低和过高水分含量之间,水分含量是否会影响土壤呼吸,也需要进一步试验验证;

(5)对 Q_{10} 的认识,已逐渐从恒定 Q_{10} 转变为 Q_{10} 随温度升高而减小。同时,如果最优温度的存在能被广泛验证,则基于存在最优温度的 Gaissoam 方程将是比较合理土壤呼吸与温度关系的评价模型;

(6)随着气候变暖,尤其是城市热岛效应这一环境问题的加剧,研究及评价更大温度区间内的,城市土壤有机质对温度变化的响应规律已十分重要。

致谢:感谢复旦大学方长明教授给予的指导。

References:

- [1] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [2] Lutzow M V, Kogel I. Temperature sensitivity of soil organic matter decomposition—what do we know? *Biology and Fertility of Soils*, 2009, 46(1): 1-15.
- [3] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of organic-matter decomposition—still a topic of debate. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(9): 2510-2518.
- [4] Fang C, Smith P, Smith J U, Moncrieff J B. Incorporating microorganisms as decomposers into models to simulate soil organic matter decomposition. *Geoderma*, 2005, 129(3/4): 139-146.
- [5] Leifeld J, Fuhrer J. The temperature response of CO₂ production from bulk soils and soil fractions is related to soil organic matter quality. *Biogeochemistry*, 2005, 75(3): 433-453.
- [6] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(2): 155-165.
- [7] Chatterjee A, Jenerette G D. Changes in soil respiration $Q(10)$ during drying-rewetting along a semi-arid elevation gradient. *Geoderma*, 2011, 163(3/4): 171-177.
- [8] Yang Q P, Xu M, Liu H S, Wang J S, Liu L X, Chi Y G, Zheng Y P. Impact factors and uncertainties of the temperature sensitivity of soil respiration. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(8): 2301-2311.
- [9] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 1994, 8(3): 315-323.
- [10] Atkin O K, Tjoelker M G. Thermal acclimation and the dynamic response of plant respiration to temperature. *Trends in Plant Science*, 2003, 8(7): 343-351.
- [11] Pavelka M, Acosta M, Marek M V, Kutsch W, Janous D. Dependence of the Q_{10} values on the depth of the soil temperature measuring point. *Plant and Soil*, 2007, 292(1/2): 171-179.
- [12] Xu M, Qi Y. Spatial and seasonal variations of Q_{10} determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevada forest. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(3): 687-696.
- [13] Janssens I A, Pilegaard K. Large seasonal changes in Q_{10} of soil respiration in a beech forest. *Global Change Biology*, 2003, 9(6): 911-918.
- [14] Zhou T, Shi P J, Hui D F, Luo Y Q. Global pattern of temperature sensitivity of soil heterotrophic respiration (Q_{10}) and its implications for carbon-climate feedback. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2009, 114: G02016, doi: 10. 1029 /2008JG000850.
- [15] Lellei E, Kovacs E, Botta Z, Kalapos T, Emmett B, Beier C. Thresholds and interactive effects of soil moisture on the temperature response of soil respiration. *European Journal of Soil Biology*, 2011, 47(4): 247-255.
- [16] Liski J, Ilvesniemi H, Makela A, Westman C J. CO₂ Emissions from Soil in Response to Climate Warming are Overestimated—The Decomposition of Old Soil Organic Matter is Tolerant of Temperature. *Ambio*, 1999, 28(2): 171-174.
- [17] Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. *Nature*, 2000, 404: 858-861.
- [18] Fang C, Smith P, Moncrieff J B, Smith J U. Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature. *Nature*, 2005, 433: 57-59.
- [19] Jenkinson D S, Rayner J H. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science*, 1977, 122(6): 298-305.
- [20] Liski J, Ilvesniemi H, Makela A, Starr M. Model analysis of the effects of soil age, fires and harvesting on the carbon storage of boreal forest soils. *European Journal of Soil Science*, 1998, 49(3): 407-416.
- [21] Hibbard K A, Law B E, Reichstein M, Sulzman J. An analysis of soil respiration across northern hemisphere temperate ecosystems. *Biogeochemistry*, 2005, 73(1): 29-70.
- [22] Bond B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature*, 2010, 464: 579-582.
- [23] Smith P, Fang C. A warm response by soils. *Nature*, 2010, 464: 499-500.
- [24] Gu L, Post W M, King, A W. Fast labile carbon turnover obscures sensitivity of heterotrophic respiration from soil to temperature: a model analysis. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18: 1022-1032.

- [25] Nicolardot B, Fauvet G, Chenby D. Carbon and nitrogen cycling through soil microbial biomass at various temperatures. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(2): 253-261.
- [26] Koepf H. Die Temperature/Zeit—Abhängigkeit der Bodenatmung. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 1953, 61: 29-48.
- [27] Zhang W L, Liu J, Wang J Z, Chen F Q. Soil heterotrophic respiration and its temperature sensitivity in different-aged orange plantations in Three Gorges Reservoir area of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(11): 1265-1273.
- [28] Liu Y P, Tang Y P, Lu Q, Gao R. Effects of Temperature and Land Use Change on Soil Organic Carbon Mineralization. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(7): 3896, 3927.
- [29] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, Andrews J A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 115-146.
- [30] Ma X M, Zhu B, Han G X, Chen Y S, Gao M R, Zhang Z J. The advance in research of soil respiration. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19: 491-495.
- [31] Hu C J, Liu G H, Fu B J, Jin T T, Guo L, Su C H. Soil CO₂ emission and the driving factors of typical artificial woodlands in the hilly area of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9): 4700-4709.
- [32] Dou S. *Soil Organic Matter [M]*. Beijing: Science Press, 2009.
- [33] Yang Y, Huang M, Liu H S, Liu H J. The Interrelation between Temperature Sensitivity and Adaptability of Soil Respiration. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(10): 1811-1820.
- [34] Li F H. *Physical Chemistry of Soil [M]*. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [35] Fang C, Moncrieff J B. The variation of soil microbial respiration with depth in relation to soil carbon composition. *Plant and Soil*, 2005, 268(1): 243-253.
- [36] Howard D M, Howard P J A. Relationships between CO₂ evolution, moisture content and temperature for a range of soil types. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(11): 1537-1546.
- [37] Balogh J, Pinter K, Foti S, Cserhalmi D, Papp M, Nagy Z. Dependence of soil respiration on soil moisture, clay content, soil organic matter, and CO₂ uptake in dry grasslands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(5): 1006-1013.
- [38] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(11/22): 1625-1635.
- [39] Liu Q J, Zhang G C, Xu Q Q, Wang Y D, Wang H M. Simulation of soil respiration in response to temperature under snowpacks in the Changbai Mountain, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(5): 477-487.
- [40] Zhang L H, Chen Y N, Zhao R F, Li W H, Xie Z K. Analysis of soil CO₂ efflux in *Populus* and *Ulmus pumila* planting shelterbelts in arid region, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(5): 526-534.
- [41] Li T, Zhang M L, Cao J H, Huang Y M, Chen J R, Yan Y P. The Distribution and Variation of Soil CO₂ Emission Rate in the Panlong Cave, Guilin. *Earth and Environment*, 2011, 39(3): 343-348.
- [42] Luo L, Shen G Z, Xie Z Q, Zhou L G. Components of soil respiration and its temperature sensitivity in four types of forests along an elevational gradient in Shennongjia, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(7): 722-730.
- [43] 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.
- [44] Li X B, Yang Y S, Zeng H D, Xie J S, Chen G S, Zhu N, Ma S G. Soil respiration of *Zoysia matrella* turfgrass in subtropics. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(8): 2096-2105.
- [45] Zhang R J, Bu N S, Cui J, Fang C M. Effects of land use on soil organic carbon and soil respiration in soils reclaimed from wetland in the Chongming Island. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(24): 6698-6706.
- [46] Parker L W, Miller J, Steinberger Y, Whitford W G. Soil respiration in a Chihuahuan desert rangeland. *Soil Biology and Biochemistry*, 1983, 15(3): 303-309.
- [47] Connel A M. Microbial decomposition (respiration) of litter in eucalypt forests of south-western Australia: an empirical model based on laboratory incubations. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22(2): 153-160.
- [48] Grundmann G L, Renault P, Rosso L, Bardin R. Differential effects of soil water content and temperature on nitrification and aeration. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59(5): 1342-1349.
- [49] Tuomi M, Vanhala P, Karhu K, Fritze H, Liski J. Heterotrophic soil respiration-Comparison of different models describing its temperature dependence. *Ecological Modelling*, 2008, 211(1/2): 182-190.
- [50] Agren G I, Mcmurtrie R E, Parton W J, Pastor J, Shugart H H. State-of-the-art of models of production decomposition linkages in conifer and grassland ecosystems. *Ecological Applications*, 1991, 1(2): 118-138.
- [51] Fenner N, Freeman C, Reynolds B. Observations of a seasonally shifting thermal optimum in peat land carbon-cycling processes: Implications for the global carbon cycle and soil enzyme methodologies. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(10): 1814-1821.
- [52] Thornley J H M, Cannell M G R. Soil carbon storage response to temperature: an hypothesis. *Annals of Botany*, 2001, 87(5): 591-598.
- [53] Luo G Y, Li S L. *Foundation of Engineering Geology*. Nanjing: Nanjing University Press, 1990.
- [54] Reichstein M, Tenhunen J D, Rouspard O, Ourcival J M, Rambal S, Miglietta F, Peressotti A, Pecchiaru M, Tirone G, Valentini R. Severe drought effects on ecosystem CO₂ and H₂O fluxes at three Mediterranean evergreen sites: revision of current hypotheses? *Global Change Biology*, 2002, 8(10): 999-1017.
- [55] Qi Y, Xu M, Wu J. Temperature sensitivity of soil respiration and its effects on ecosystem carbon budget: nonlinearity begets surprises. *Ecological Modelling*, 2002, 153(1/2): 131-142.
- [56] Xu L, Baldocchi D D, Tang J. How soil moisture, rain pulses, and growth alter the response of ecosystem respiration to temperature. *Global Biochemical Cycles*, 2004, 18, GB4002.
- [57] Mielnick P C, Dugas W A. Soil CO₂ flux in a tallgrass prairie. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(2): 221-228.
- [58] Zhou X, Sherry R A, An Y, Wallace L L, Luo Y. Main and interactive effects of warming, clipping, and doubled precipitation on soil CO₂ efflux in a

- grassland ecosystem. *Global Biochemical Cycles*, 2006, 20, GB1003.
- [59] Wan S, Norby R J, Ledford J, Weltzin J F. Responses of soil respiration to elevated CO₂, air warming, and changing soil water availability in a model old-field grassland. *Global Change Biology*, 2007, 13(11): 2411-2424.
- [60] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 217-227.
- [61] Byrne A K, Kiely G, Leahy P. CO₂ fluxes in adjacent new and permanent temperate grasslands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 135(1/4): 82-92.
- [62] Saiz G, Black K, Reidy B, Lopez S, Farrell E P. Assessment of soil CO₂ efflux and its components using a process-based model in a young temperate forest site. *Geoderma*, 2007, 139(1/2): 79-89.
- [63] Tesarova M, Gloser J. Total CO₂ output from alluvial soils with 2-types of grassland communities. *Pedobiologia*, 1976, 16(5): 364-372.
- [64] Schlentner R E, Vancleve K. Relationships between CO₂ evolution from soil, substrate temperature, and substrate moisture in four mature forest types in interior Alaska. *Canadian Journal of Soil Science*, 1985, 15(1): 97-107.
- [65] Simunek J, Suarez D L. Modelling of carbon dioxide transport and production in soil 1, model development. *Water Resources Research*, 1993, 29(2): 487-497.
- [66] Goto N, Sakoda A, Suzuki M. Modelling of soil carbon dynamics as a part of carbon cycle in terrestrial ecosystems. *Ecological Modelling*, 1994, 74(3/4): 183-204.
- [67] Graf A, Weihermuller L, Huisman J A, Herbst M, Bauer J, Vereecken H. Measurement depth effects on the apparent temperature sensitivity of soil respiration in field studies. *Biogeosciences Discuss*, 2008, 5: 1867-1898.
- [68] Jin X B, Wang S M, Zhou Y K. Microbial CO₂ production from surface and subsurface soil as affected by temperature, moisture, and nitrogen fertilization. *Australian Journal of Soil Research*, 2008, 46: 273-280.
- [69] Zhang L H, Chen Y N, Zhao R F, Li W H. Significance of temperature and soil water content on soil respiration in three desert ecosystems in Northwest China. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(10): 1200-1211.
- [70] Emmett B, Beier C, Estiarte M, Tietema A, Kristensen H L, Williams D, Penuelas J, Schmidt I, Sowerby A. The response of soil processes to climate change: results from manipulation studies of shrublands across an environmental gradient. *Ecosystems*, 2004, 7(6): 625-637.
- [71] Flanagan L B, Johnson B. Interacting effects of temperature, soil moisture and plant biomass production on ecosystem respiration in a northern temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 130(3/4): 237-253.
- [72] Beier C, Emmett B, Tietema A, Schmidt I, Penuelas J, Kovacs E, Duce P, Angelis P, Gorissen A, Estiarte M, Dato G D, Sowerby A, Kroel G, Lellei E, Kull O, Mand P, Petersen H, Gjelstrup P, Spano D. Carbon and nitrogen balances for six shrublands across Europe. *Global Biochemical Cycles*, 2009, 23, GB4008.
- [73] Murthy R, Griffin K L, Zarnoch S J, Dougherty P M, Watson B, Van Haren J, Patterson R L, Mahato T. Carbon dioxide efflux from a 550 m³ soil across a range of soil temperatures. *Forest Ecology and Management*, 2003, 178(3): 311-327.
- [74] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 27(6): 753-760.
- [75] Michaelson G J, Ping C L. Soil organic carbon and CO₂ respiration at subzero temperature in soils of Arctic Alaska. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2003, 108, 8164.
- [76] Eusuf M A, Asaeda T. Heating effects of pavement on urban thermal environment. *Journal of Civil Engineering*, 1996, 28(2): 173-190.
- [77] Tang C S, Shi B, Gao L, Daniels J L, Jiang H T, Liu C. Urbanization effect on soil temperature in Nanjing, China. *Energy and Buildings*, 2011, 43(11): 3090-3098.

参考文献:

- [8] 杨庆朋,徐明,刘洪升,王劲松,刘丽香,迟永刚,郑云普. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性. *生态学报*, 2011, 31(8): 2301-2311.
- [27] 张文丽,刘菊,王建柱,陈芳清. 三峡库区不同林龄人工橘林土壤异养呼吸及其温度敏感性. *植物生态学报*, 2010, 34(11): 1265-1273.
- [28] 刘燕萍,唐英平,卢茜,高人. 温度和土地利用变化对土壤有机碳矿化的影响. *安徽农业科学*, 2011, 39(7): 3896, 3927.
- [30] 马秀梅,朱波,韩广轩,陈玉成,高美荣,张中杰. 土壤呼吸研究进展. *地球科学进展*, 2004, 19: 491-495.
- [31] 胡婵娟,刘国华,傅伯杰,靳甜甜,郭雷,苏常红. 黄土丘陵沟壑区典型人工林土壤 CO₂ 释放规律及其影响因素. *生态学报*, 2009, 29(9): 4700-4709.
- [32] 窦森. 土壤有机质. 北京: 科学出版社, 2009.
- [33] 杨毅,黄玫,刘洪升,刘华杰. 土壤呼吸的温度敏感性和适应性研究进展. *自然资源学报*, 2011, 26(10): 1811-1820.
- [34] 李法虎. 土壤物理化学. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [39] 刘琪璟,张国春,徐倩倩,王义东,王辉民. 长白山高山苔原季节性雪斑土壤呼吸对温度响应的模拟研究. *植物生态学报*, 2010, 34(5): 477-487.
- [40] 张丽华,陈亚宁,赵锐锋,李卫红,谢忠奎. 干旱区杨树、榆树人工防护林地土壤 CO₂ 释放通量研究. *植物生态学报*, 2010, 34(5): 526-534.
- [41] 李涛,张美良,曹建华,黄艳梅,陈家瑞,严毅萍. 桂林盘龙洞土壤 CO₂ 释放速率的分布状况和变化规律. *地球与环境*, 2011, 39(3): 343-348.
- [42] 罗璐,申国珍,谢宗强,周利光. 神农架海拔梯度上 4 种典型森林的土壤呼吸组分及其对温度的敏感性. *植物生态学报*, 2011, 35(7): 722-730.
- [43] 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.
- [44] 李熙波,杨玉盛,曾宏达,谢锦升,陈光水,朱宁,马书国. 亚热带沟叶结缕草草坪土壤呼吸. *生态学报*, 2011, 31(8): 2096-2105.
- [45] 张容娟,布乃顺,崔军,方长明. 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. *生态学报*, 2010, 30(24): 6698-6706.
- [53] 罗国煜,李生林. 工程地质学基础. 南京: 南京大学出版社, 1990.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 10 May, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Special Topics in Soil and Water Conservation of County Changting, Fujian Province

- Spatiotemporal dynamics of the bare soil cover in the Hetian basinal area of County Changting, China, during the past 35 years XU Hanqiu (2946)
- Analysis of fractional vegetation cover change and its impact on thermal environment in the Hetian basinal area of County Changting, Fujian Province, China XU Hanqiu, HE Hui, HUANG Shaolin (2954)
- Dynamic of soil organic carbon pool after restoration of *Pinus massoniana* in eroded red soil area HE Shengjia, XIE Jinsheng, ZENG Hongda, et al (2964)
- RUSLE-based quantitative study on the soil erosion of the Hetian basin area in County Changting, Fujian Province, China YANG Ranran, XU Hanqiu, LIN Na, et al (2974)
- Land use changes in a reddish soil erosion region of Southern China: Hetian Basin, County Changting LIN Na, XU Hanqiu, HE Hui (2983)
- Remote-sensing estimate of the carbon storage of subtropical *Pinus massoniana* forest in the Hetian Basin of County Changting, China HUANG Shaolin, XU Hanqiu, LIN Na, et al (2992)
- Mutation of soil fertility quality in the red eroded area of southern China: A case study in Changting County, Fujian Province CHEN Zhiqiang, CHEN Zhibiao (3002)

Frontiers and Comprehensive Review

- The temperature dependence of soil organic matter decomposition and CO₂ efflux: a review SHEN Zhengtao, SHI Bin, WANG Baojun, et al (3011)
- Progress and prospects on cyanobacteria bloom-forming mechanism in lakes MA Jianrong, DENG Jianming, QIN Boqiang, et al (3020)

Autecology & Fundamentals

- Characteristics of concentrations and carbon isotope compositions of dissolved inorganic carbon in soil water under varying vegetations in karst watershed LIANG Xuan, WANG Zhijun, YUAN Daoxian, et al (3031)
- The traits of diapause development of overwinter eggs in *Rameacris kiangsu* Tsai (Orthoptera: Arcypteridae) ZHU Daohong, CHEN Yanyan, ZHAO Qin (3039)
- Analysis of gamete compatibility between *Crassostrea hongkongensis* and *C. gigas* ZHANG Yuehuan, WANG Zhaoping, YAN Xiwu, et al (3047)

Population, Community and Ecosystem

- Avifaunal community structure and species diversity in the Mt. Qomolangma National Nature Reserve, Tibet, China WANG Bin, PENG Boyong, LI Jingjing, et al (3056)
- Impact of logging on carbon density of broadleaved-Korean pine mixed forests on Changbai Mountains QI Lin, YU Dapao, ZHOU Wangming, et al (3065)
- Community structure and species diversity of fish assemblage in the coastal waters of Jiaozhou Bay XU Binduo, ZENG Huihui, XUE Ying, et al (3074)
- Assessment of heavy metal contamination in the soil-plant system of the *Suaeda salsa* wetland in the Yellow River Estuary WANG Yaoping, BAI Junhong, XIAO Rong, et al (3083)
- The effects of different original state on grassland community restoration succession YANG Chen, WANG Wei, WANG Shiping, et al (3092)
- Effects of fertilization gradients on plant community structure and soil characteristics in alpine meadow WANG Changting, WANG Genxu, LIU Wei, et al (3103)
- Pattern-controlling mechanics of different age classes of *Stellera chamaejasme* population in degraded alpine grassland GAO Fuyuan, ZHAO Chengzhang (3114)

- Soil organic carbon pool at the western side of the sygera mountains, southeast Tibet, China MA Heping, GUO Qiqiang, LIU Heman, et al (3122)
- Correlation between foliar $\delta^{13}\text{C}$ and foliar trait factors of dominant species in *Castanopsis carlessii* forests in Lingshishan National Forest Park WANG Yingzi (3129)
- Influences of artificial *Kandelia obovata* mangrove forest rehabilitation on the macrobenthos in Ximen Island HUANG Li, CHEN Shaobo, CHOU Jianbiao, et al (3138)
- Responses of soil microbial properties in soil profile to typical vegetation pattern and slope in karst-cluster depression area FENG Shuzhen, SU Yirong, QIN Xinmin, et al (3148)
- Correlation among vegetation characteristics, temperature and moisture of alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau XU Manhou, XUE Xian (3158)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- The temporal and spatial variation of the value of ecosystem services of the Naoli River Basin ecosystem during the last 60 years ZHAO Liang, LIU Jiping, TIAN Xuezhi (3169)
- Sensitivity analysis of climate control in the Daisyworld model based on system dynamics CHEN Haibin, TANG Haiping (3177)
- Resource and Industrial Ecology**
- Analysis of key climatic factors influencing on seed cotton yield in cotton-wheat double cropping HAN Yingchun, WAN Guoping, FAN Zhengyi, et al (3185)
- The effect of low-covered sand-fixing forest belts on restoration of the soil and vegetation JIANG Lina, YANG Wenbin, LU Qi, et al (3192)
- Dissolution rate under soil in karst areas and the influencing factors of different land use patterns LAN Jiacheng, FU Wali, PENG Jingtao, et al (3205)
- Measuring external benefits of agricultural land preservation: an application of choice experiment in Wuhan, China CHEN Zhu, JU Dengping, ZHANG Anlu (3213)
- Research Notes**
- Effect of temperature and feeding frequency on asexual reproduction and polyp growth of the scyphozoan *Cyanea nozakii* Kishinouye SUN Ming, DONG Jing, CHAI Yu, LI Yulong (3222)
- The research on *Buteo hemilasius* nest-site selection on the west bank of Dalai Lake in Dalai Lake Natural Reserve ZHANG Honghai, WANG Ming, CHEN Lei, et al (3233)
- Estimating rodent density using infrared-triggered camera technology ZHANG Shusheng, BAO Yixin, WANG Yanni, et al (3241)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 高玉葆

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 33 卷 第 10 期 (2013 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 10 (May, 2013)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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 90.00 元