

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 22 期 Vol.33 No.22 **2013**

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 33 卷 第 22 期 2013 年 11 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 利用分布有/无数据预测物种空间分布的研究方法综述 刘芳,李晟,李迪强 (7047)
- 景观服务研究进展 刘文平,宇振荣 (7058)
- 土壤呼吸组分分离技术研究进展 陈敏鹏,夏旭,李银坤,等 (7067)

个体与基础生态

- 平茬高度对四合木生长及生理特性的影响 王震,张利文,虞毅,等 (7078)
- 不同水分梯度下珍稀植物四数木的光合特性及对变化光强的响应 邓云,陈辉,杨小飞,等 (7088)
- 水稻主茎节位分蘖及生产力补偿能力 隗溟,李冬霞 (7098)
- 基于辐热积法模拟烤烟叶面积与烟叶干物质产量 张明达,李蒙,胡雪琼,等 (7108)
- 耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响 田慎重,王瑜,李娜,等 (7116)
- 不同光照强度下兴安落叶松对舞毒蛾幼虫生长发育及防御酶的影响 鲁艺芳,严俊鑫,李霜雯,等 (7125)
- 南方小花蝽在不同空间及笼罩条件下对西花蓟马的控制作用 莫利锋,鄧军锐,田甜 (7132)
- 浮游植物对溶解态 AI 的清除作用实验研究 王召伟,任景玲,闫丽,等 (7140)
- 卧龙巴郎山川滇高山栎群落植物叶特性海拔梯度特征 刘兴良,何飞,樊华,等 (7148)
- 春夏季闽江口和兴化湾虾类数量特征 徐兆礼,孙岳 (7157)
- 啃食性端足类强壮藻钩虾对贫营养湖三种大型海藻的摄食选择性 郑新庆,黄凌风,李元超,等 (7166)

种群、群落和生态系统

- 4 种农业措施对三化螟种群动态的控制作用 张振飞,黄炳超,肖汉祥,等 (7173)
- 黄土高原沟壑区森林带不同植物群落土壤氮素含量及其转化 邢肖毅,黄懿梅,安韶山,等 (7181)
- 基于诊断学的生态系统健康评价 蔡霞,徐颂军,陈善浩,等 (7190)
- 稻田生态系统中植硅体的产生与积累——以嘉兴稻田为例 李自民,宋照亮,姜培坤 (7197)
- 自由搜索算法的投影寻踪模型在湿地芦苇调查中的应用 李新虎,赵成义 (7204)
- 贺兰山不同海拔典型植被带土壤微生物多样性 刘秉儒,张秀珍,胡天华,等 (7211)
- 内蒙古典型草原灌丛化对生物量和生物多样性的影响 彭海英,李小雁,童绍玉 (7221)
- 黄土丘陵沟壑区 80 种植物繁殖体形态特征及其物种分布 王东丽,张小彦,焦菊英,等 (7230)
- 基于 MAXENT 模型的贺兰山岩羊生境适宜性评价 刘振生,高惠,滕丽微,等 (7243)
- 太湖湖岸带浮游植物初级生产力特征及影响因素 蔡琳琳,朱广伟,李向阳 (7250)

景观、区域和全球生态

- 艾比湖地区土壤呼吸对季节性冻土厚度变化的响应…………… 秦 璐,吕光辉,何学敏,等 (7259)
- 田间条件下黑垆土基础呼吸的季节和年际变化特征…………… 张彦军,郭胜利,刘庆芳,等 (7270)

资源与产业生态

- 光核桃遗传资源的经济价值评估与保护 …………… 张丽荣,孟 锐,路国彬 (7277)
- 棉花节水灌溉气象等级指标…………… 肖晶晶,霍治国,姚益平,等 (7288)

研究简报

- 云南红豆杉人工林萌枝特性…………… 苏 磊,苏建荣,刘万德,等 (7300)
- 赣中亚热带森林转换对土壤氮素矿化及有效性的影响…………… 宋庆妮,杨清培,余定坤,等 (7309)

学术信息与动态

- 2013 年 European Geosciences Union 国际会议述评 …………… 钟莉娜,赵文武 (7319)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 276 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 30 * 2013-11



封面图说: 山坡岩羊图——岩羊属国家二级保护动物,因喜攀登岩峰而得名,又名石羊。贺兰山岩羊主要分布于海拔 1500—2300m 的山势陡峭地带,羊群多以 2—10 只小群为主。生境适宜区主要为贺兰山东坡(宁夏贺兰山国家级自然保护区)的西南部,而贺兰山西坡(内蒙古贺兰山国家级自然保护区)也有少量分布。贺兰山建立国家级自然保护区以来,随着保护区环境的不断改善,这里岩羊的数量也开始急剧增长,每平方公里的分布数量现居世界之首,岩羊的活动范围也相应扩大到低山 900 米处的河谷。贺兰山岩羊生境选择的主要影响因子为海拔、坡度及植被。

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/stxb201207191027

陈敏鹏, 夏旭, 李银坤, 梅旭荣. 土壤呼吸组分分离技术研究进展. 生态学报, 2013, 33(22): 7067-7077.

Chen M P, Xia X, Li Y K, Mei X R. Progress on techniques for partitioning soil respiration components and their application in cropland ecosystem. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(22): 7067-7077.

土壤呼吸组分分离技术研究进展

陈敏鹏^{1,2}, 夏旭^{1,2,*}, 李银坤^{1,2}, 梅旭荣^{1,2}

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 2. 农业部农业环境重点实验室, 北京 100081)

摘要: 分离土壤呼吸组分是理解陆地生态系统碳循环的重要步骤, 研究农田生态系统土壤呼吸组分的呼吸过程和机理对促进农业温室气体减排和碳汇增加、气候变化适应、保障粮食安全以及推动农业可持续发展都具有积极意义。综述了近年来土壤呼吸组分分离的理论依据、主要技术及分类, 系统比较了现有技术的优势、劣势和应用领域, 并总结了土壤呼吸组分分离技术在国内外农田生态系统中的应用情况。由于多数分离技术在森林生态系统的相关研究中发展而来, 它们在农田生态系统的应用十分有限, 目前应用以同位素法、根分离法和回归法为主。由于土壤呼吸理论划分和分离方法的差异, 不同研究结果之间往往难以比较。分离技术的发展有赖于土壤呼吸源分离理论的进一步发展, 未来土壤呼吸组分分离研究的主要方向在于: (1) 利用现有观测技术促进组分集成分析法和根分离法在农田生态系统中的应用, 强化土壤呼吸组分和环境因子的同步观测, 准确评估农田碳收支; (2) 利用定位观测数据开展大尺度模型研究, 改进和重构现有全球碳模型的碳氮过程, 并在其中考虑重要的土壤呼吸过程; (3) 利用 FACE 试验评估气候变化对土壤呼吸组分的影响和土壤-植物碳循环的适应机制; (4) 分析呼吸组分与植物-土壤-养分的交互作用, 评估农田管理措施的综合影响。

关键词: 土壤呼吸组分; 分离技术; 根呼吸; 微生物呼吸; 农田生态系统

Progress on techniques for partitioning soil respiration components and their application in cropland ecosystem

CHEN Minpeng^{1,2}, XIA Xu^{1,2,*}, LI Yinkun^{1,2}, MEI Xurong^{1,2}

1 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081, China

2 Key Laboratory of Agricultural Environment, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China

Abstract: Partitioning soil respiration components is a very important step before we understand the carbon cycling in terrestrial ecosystem. Studies on processes and mechanisms between different soil respiration components in cropland ecosystem will help to promote greenhouse gases mitigation, carbon sequestration and storage, climate change adaptation, food security and sustainable development of agriculture. In this context, this paper reviews theoretical and technical development of soil respiration component partitioning in recent decades, including the theoretical premises, the development and classification of partitioning techniques. This paper also compares the advantages and disadvantages of most partitioning techniques, analyzes their applicability for different systems, and summarizes the application of current soil respiration partitioning techniques in cropland ecosystem in China as well as in world. Generally speaking, since most soil respiration partitioning techniques are developed in the studies of forest ecosystem, they are not suitable for cropland ecosystem. Presently, isotope methods, root excised method and regression method are major applied techniques of soil respiration partitioning in cropland ecosystem. Due to the differences in theoretical premises and techniques choices for soil

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 项目)资助项目(2012CB955904); 国家科技支撑计划资助项目(2013BAD11B03); 国家自然科学基金资助项目(71103186); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资助项目(BSRF201003)

收稿日期: 2012-07-19; 修订日期: 2013-07-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuxubuwei@126.com

respiration partitioning, results from different researches are difficult to compare. Further development of partitioning techniques relies on the breakthrough of soil respiration partitioning theories and future breakthroughs in the researches related to soil respiration partitioning will lie in the following aspects: (1) Component integration methods and root excised method will be improved to better apply in cropland ecosystem by making best of present soil respiration monitoring technologies and systems. The simultaneously monitoring of soil respiration components and environmental factors will be strengthened and cropland carbon budget will be more physically-based and reliable. (2) Large-scale modeling on carbon cycling will take advantages of existing long-term on-site monitoring data to upscale soil respiration processes and mechanisms. With this, existing global carbon cycling models could improve or change current carbon-nitrogen processes and adopt important soil respiration processes. (3) With FACE (free-air carbon dioxide enrichment) experiments, researchers could evaluate the impacts of climate change on different soil respiration components and identify the adaptive mechanisms of soil-plant carbon cycling to climate change. (4) The interaction between soil respiration components and plant-soil-nutrient will be examined to evaluate the integrated impacts of cropland management practices.

Key Words: soil respiration component; partitioning technique; root respiration; microbial respiration; cropland ecosystem

土壤呼吸(R_s)是陆地生态系统中的第二大碳通量过程,是影响大气二氧化碳(CO_2)浓度变化和全球碳循环的关键环节^[1-2]。据估计,每年因土壤呼吸向大气释放的 CO_2 为 50—75PgC, 约占大气碳库的 10%, 是化石燃料燃烧排放量的 10 倍以上^[3-4], 因此土壤呼吸速率的微小变化将直接导致大气 CO_2 浓度和土壤碳累积速率的重大改变, 从而加剧或减缓全球气候变化^[5-6]。虽然对土壤呼吸的重要作用已达成广泛共识, 科学界对土壤呼吸关键机制和过程的理解仍十分有限。土壤呼吸组分分离的相关研究可以帮助明确土壤呼吸和碳素周转过程及其对环境因子的响应和适应, 这不仅可以推动全球碳循环模型的改进(例如, 白化土壤呼吸和碳固定过程、精确估算生态系统净初级生产力^[7], 区分不同土壤呼吸组分对环境变量的敏感性等等^[8-9]), 而且有助于理解全球变化背景下土壤有机质的变化格局、识别和筛选减缓土壤有机碳分解的对策和措施, 因此成为陆地生态系统碳循环、气候变化影响和适应、土壤与植物营养等领域的热点问题之一^[10-12]。

农田生态系统是陆地生态系统最重要的组成部分。全球耕地面积约 1381×10^2 万 hm^2 , 占陆地总面积的 10.6%^[13], 全球农田碳储量达 170PgC, 占陆地碳储量的 10% 以上^[14]。由于农业生态系统跟人类活动最密切, 受人为干扰最大, 它是唯一能在较短时间尺度实现调节功能的陆地生态系统碳库^[15]。因此, 研究农田生态系统土壤呼吸的过程和机理对促进温室气体减排增汇、气候变化适应、粮食安全保障和农业可持续发展都具有积极意义。

1 土壤呼吸的组分界定

土壤呼吸, 也称土壤总呼吸, 严格意义上包括未扰动土壤中产生 CO_2 的所有代谢活动, 它包括 3 个生物学过程和一个化学氧化过程, 即微生物的呼吸和土壤有机质分解过程(即微生物呼吸)、植物根和根际有机体呼吸过程(即纯根和根际呼吸)、土壤动物呼吸过程(R_f)和含碳物质的化学氧化过程^[16-17]。由于后两个过程对土壤呼吸的贡献较小, 机制尚不清楚, 目前的相关研究主要集中于前两个生物学过程。由于各过程呼吸性质、呼吸主体、利用碳源、周转速率、时空变异性以及对环境因子的响应机制和适应性的显著差异, 学者们对不同土壤呼吸进行区分, 以深入理解土壤呼吸的生态过程和微观机制^[18-20]。

在具体的研究中, 由于区分标准和研究目的不同, 研究者对土壤呼吸组分划分方式也不相同(图 1)。最简单的两室模型根据呼吸主体不同将土壤呼吸区分为根呼吸(R_r)和微生物呼吸(R_b)^[21]。多室模型则对上述两个过程进行了细化, 一般的三室模型假设存在植物残留且激发效应(PE)对土壤呼吸的贡献较低, 将土壤呼吸划分为根呼吸(R_r)、微生物呼吸或者土壤有机质(SOM)分解(R_b /SOM)以及根际共生体(菌根)呼吸/根际微生物呼吸(R_z), 其中 R_r 又称为自养呼吸(R_a)、 R_b 和 R_z 合称为异养呼吸(R_h)^[22-24]。Kuz'yahov^[25] 根据利用

碳源和碳周转速率的差异将土壤 CO₂ 通量分为 5 种主要来源:纯根系呼吸(R_r)、根际微生物呼吸、死亡植物残留物的微生物呼吸、源于有机质添加的土壤呼吸(激发效应)和源于有机质的基础土壤呼吸。

图 1 根据土壤组分界定的经典文献绘制而成^[21,23,25,28],可看出,目前学术界尚未形成对土壤呼吸组分界定的一致意见,许多概念的边界仍十分模糊(例如土壤微生物呼吸的外延在文献中就有最广义、广义和狭义 3 种区分),争论焦点则集中在各呼吸过程的划分,尤其是根际周围各种呼吸过程的区分和界定方面^[17,19]。例如,Hogberg 等^[26]认为没必要区分根际微生物呼吸和纯根呼吸,但 Kuzyakov^[27]坚持二者是不同过程。在实际研究中,区分纯根呼吸和根际微生物呼吸十分困难,多数文献测量的根呼吸都包括了纯根呼吸和部分根际微生物呼吸。

自养呼吸	异养呼吸				动物呼吸	化学氧化过程
纯根呼吸	最广义土壤微生物呼吸					
	根际微生物呼吸 根际共生体呼吸	死亡植物残留物的微生物呼吸	源于有机质添加的土壤呼吸 激发效应	源于有机质的基础土壤呼吸		
		广义土壤微生物呼吸 土壤有机质分解 非根参与的土壤呼吸				
	根源呼吸					
植物呼吸			有机质呼吸			
根际呼吸			狭义土壤微生物呼吸			

图 1 土壤呼吸不同过程的区分^[21,23,25,28]

Fig.1 Definition of different soil respiration processes^[21,23,25,28]

2 土壤呼吸的组分分离技术:分类和比较

近十年来,各国研究者在实验室和田间条件下发展了多种土壤呼吸组分分离技术^[11,25],它们可以分为三类,即物理分离法、同位素示踪法和间接法^[29-30]。目前应用较多是根分离法、挖沟分离法、各种同位素法和根系生物量外推法^[17,31](表 1)^[17,19-20,25,29-37]。

表 1 土壤呼吸组分分离技术原理及特征^[17,19-20,25,29-37]

Table 1 Theories and features of different partitioning techniques				
方法 Method		原理 Principle	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
物理分离方法 Physical separation method	实地测量法 In situ measurement	将活根挖掘不加处理放入试管,测量试管中活根的碳通量;随后将装有活根的试管置回土壤中恢复一段时间后测量其碳通量,二者差值为土壤基础呼吸	可在田间状况下测量活根的呼吸通量	不能考虑根系在土壤中的垂直和水平分布对土壤呼吸的实际影响
	组分集成分析 Component integration	人工分离土壤呼吸的各基质(根系、枯叶、土壤)并测定各自土壤呼吸速率	成本低,适宜各种生态系统	扰动大,结果不准确、费人工。根系受扰动和损伤时会有较大的 CO ₂ 排放脉冲,排放脉冲之后 CO ₂ 排放降低,因此圈闭时间对结果影响很大
	根分离法 Root excised method	组分集成分析的简单版本,主要应用于根系生态生理的相关研究;有两种形式,一种是对比有根地块和无根地块的土壤呼吸通量,另一种是人工去除植物根系测量土壤呼吸	不计算死根分解的碳排放,可估计根部生物量,适用各类生态系统	费人工,移除过程破坏土壤自然形状,改变土壤原剖面,可能影响土壤有机质分解和土壤湿度条件
	林隙法 Gap formation	选用较大区域,移除地上部分植被,根呼吸速率是有植被土壤和无植被土壤呼吸速率之间的差值	较不费人工,成本较低,适用于森林生态系统	残留根分解需要较长时间,移除植被改变样地土壤的物理性质和有机质分解过程

续表

方法 Method	原理 Principle	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
阴影法 Shading	阴影中断叶片光合作用,阻碍光合产物向根部的传输,因此阴影遮盖和非阴影遮盖的土壤呼吸差值为根呼吸	简单、成本低、主要适用于草地和农田生态系统	无法考虑根部沉积物的贡献,无法完全避免根呼吸和根际呼吸,阴影遮盖会改变土壤的微生物活动和水分状况
切割法 Clipping	切割地上植物,部分中断叶片光合作用,阻碍光合产物向根部的传输,因此切割过样地和未切割样地的土壤呼吸差值为根呼吸	简单、成本低、适用于各类生态系统	无法考虑根部沉积物的贡献,无法完全避免根呼吸和根际呼吸,切割会改变土壤的微生物活动和水分状况
环割法 Tree girdling	环形切割树干切断向根部运送光合产物通道,测量得到的土壤 CO ₂ 释放量为土壤异养呼吸通量	自然的水情和氮吸收状况下分离土壤呼吸组分,适用于森林生态系统	不能排除林下草本植物的根呼吸,根和根际微生物的死体会激发异养呼吸速率短时期内迅速增加
挖沟分离法 Trenching method	在小区四周挖沟切断根系和真菌菌丝,并埋设物理隔板阻隔根系生长,隔离小区内土壤呼吸差值即根系-根圈呼吸	方法简单,适合以年为单位的测定	费人工,难以消除残留根分解的影响,隔离小区内外的水分、养分和微生物量水平的差异影响土壤有机质分解。可能会降低土壤呼吸通量
同位素示踪法 Isotopic tracer method	连续标记法 Continuous labeling of shoots	植物生育期都暴露在 ¹⁴ CO ₂ 或者 ¹³ CO ₂ 环境中,根部产生的 CO ₂ 被土壤有机质产生的未标记 CO ₂ 稀释	结果准确,保持稳定状态简化了计算,不适合研究植物碳的动态变化,较不适合大田生态系统
	脉冲标记法 Pulse labeling of shoots	单次或多次加入微量元素,以计算标记碳在植物内的分配和在一定时间内地上地下植物部分标记碳的呼吸量	设备昂贵、笨重,标记箱内的温度和大气湿度较难控制;长时间辐射同化土壤有机物,不利于区分根系呼吸
	¹³ C 自然丰度法 ¹³ C natural abundance method	在 C ₃ 土壤中种植 C ₄ 作物(或相反),示踪土壤中 CO ₂ 排放的 ¹³ C 丰度	对植物碳库的标记不均匀、不稳定,计算假设多
	自由大气 CO ₂ 富集法 (Free air carbon dioxide enrichment, FACE)	开顶箱和开放式空气 CO ₂ 浓度升高开展 ¹³ C 亏损的连续同位素标记,根据处理前后糖类的不同同位素值,分离自养呼吸和异养呼吸	不精确, ¹³ C 丰度的变率大,必须考虑大气 CO ₂ 的扰动,只适合一些特定的土壤-作物组合
	核弹爆炸标记法 Bomb ¹⁴ C	20 世纪 50 年代和 60 年代早期的核武器试验相当于全球性的长期标记试验。测定大气 CO ₂ 、土壤有机物和呼吸速率的 ¹⁴ C 丰度可以量化根系呼吸对总呼吸的贡献	非常昂贵,FACE 试验开始第一年的估计比较准确,CO ₂ 中的 ¹³ C 丰度变率大
间接法 Indirect method	模拟法 Modeling	利用土壤各组分实测值与生物、非生物因子间的函数关系进行模拟估算,或推算 NPP* 及其相关变化进而模拟推算不同组分比例	必须计算土壤有机质导致的 CO ₂ 排放的原子量,分析非常昂贵
	质量平衡法 Mass balance	假定观测期内出入土壤的碳通量平衡,利用凋落物 C 量、输入量与土壤呼吸量的差值得求根呼吸	方法易行,成本低,适合各种生态系统
		方法易行,适合各种生态系统	缺少直接观测数据的验证

续表			
方法 Method	原理 Principle	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
回归法 Regression method	通过建立土壤呼吸与不同指标之间的回归模型外推根呼吸的贡献	方法简单易行、成本低,适用各种生态系统	重复较多时更为准确
根系生物量外推法 Root biomass extrapolation	回归法的特例,利用土壤呼吸与根系生物量之间的回归模型外推根系生物量为零时的土壤净呼吸	方法简单易行,成本低,适合各种生态系统,在草原生态系统中应用较多	要求试验重复多,大根系或者老根导致根呼吸量高估,土壤有机质驱动的 CO ₂ 排放估计偏差大

* NPP 为 net primary productivity,即净初级生产力

一般认为,同位素法测量的人为影响最小,是最准确的方法^[29-30]。但是由于方法本身特性、土壤微生物的特性以及土壤有机基质特征的不同,不同同位素方法在实际应用中也体现出不同程度的不确定性,例如 Werth& Kuzyakov^[34]对利用¹³C 自然丰度法的相关结果进行统计误差分析后认为,不同研究之间的结果差异很大,不确定性很高。各种物理分离方法,例如根分离法、成分综合法等,是在田间区分土壤呼吸最直接的方法,但是这些方法易产生微气象偏差,根分离区域和普通样地土壤温度和土壤湿度的较大差异会影响土壤的 SOM 分解,从而带来估计偏差^[25]。Suleau 等^[35]认为物理分离无法分离根移除区域的土壤,临近区域的根系会渗入根移除区域,从而导致根移除区域土壤呼吸和根呼吸的高估,他们声称冬小麦根呼吸测量和分离的不确定性至少达 20%,其他作物甚至达 25%以上。Hanson 等^[29]则认为根分离法受到农田作物的严重妨碍且无法考虑根系分泌物对土壤 SOM 分解可能存在的激发效应,只适合高秆作物(如玉米、向日葵)。

从分离目标出发,Kuzyakov^[25]提出了理想分离方法的 5 个重要特征,即(1)对研究的生态系统或者土壤呼吸没有显著扰动;(2)适合分离所有不同组分;(3)可以适用于包括草地、作物、灌木和森林在内的一系列生态系统;(4)不依赖特定实验操作人员并可产生可重复、可靠的结果;以及(5)设备安装、维护和分析都便宜简单。他还认为,虽然与其他方法相比,同位素标记法对系统的扰动小、测量精度高,优势不可替代,但是由于设备昂贵、分析困难,其实际应用(尤其是大田应用)受到很大限制^[25,38-39]。因此,Kuzyakov^[25]认为同位素标记法实用性低于根分离法;根系生物量法简单易行,几乎具有理想分离方法的所有特征,如在调查中加大样本数,将是一种非常理想的方法;组分集成分析法虽然通用性高,可分离 3 种(根呼吸、土壤中有有机物的微生物分解和凋落物分解)甚至 4 种(根呼吸、根际微生物呼吸、土壤中有有机物的微生物分解和凋落物分解)的呼吸组分,但对系统的扰动较大,需进一步改进。虽然不同方法的准确性和应用性存在较大差异,对不同文献的元数据分析却表明不同分离方法对土壤呼吸组分分离没有可量化的显著影响^[30-31]。

现有方法对土壤根系呼吸和微生物呼吸的测量还较为精准,但尚没有土壤动物呼吸的有效测定方法^[17],对不同植物不同生长阶段根呼吸通量的比较和对环境因素的响应也还没有经典结论。对分离方法的争议本质上源于对土壤过程的不同理解,因此分离技术的发展有赖于土壤呼吸机制理论深化^[39]。研究者认为应对土壤呼吸进行更细致的理论源分离,以更精确地估计不同来源的土壤呼吸通量^[25,40]。技术上,土壤呼吸分离技术则有如下发展方向^[11]:

(1)发展科学易行的自动连续监测技术,目前最有发展前景的两种技术是自动通量箱以及利用气井或固态传感器的土壤 CO₂浓度自动监测技术;

(2)同位素方法是直接获取与植物和微生物机理相关的土壤呼吸定量数据最有前景的技术,今后需进一步强化碳在植物体内的转化机制、碳从根系向微生物的迁移机制以及自养呼吸和异氧呼吸的定量监测^[41-43];

(3)促进多种方法的结合,尤其是过程模型或者回归方法^[44-46]与物理分离方法或者同位素方法的同步观测和模拟^[31,47],以改良现有基于根部生物量的回归方法。例如 Xu 等^[48]认为根部非结构性碳(non-structural carbon)含量能比根部生物量更好地估计根呼吸强度。

3 土壤呼吸组分分离技术在农业生态系统的应用

全球农业生态系统土壤碳储量虽然只占陆地碳储量的 10%,但是它是最活跃、最可控和最易调节的土壤

碳汇系统^[49-51],农田生态系统土壤呼吸组分对环境因子和农业管理措施的响应和模拟也成为国内外农业碳循环领域的研究热点之一。

国内外现有土壤呼吸组分分离技术主要从森林和草地生态系统的相关研究中发展而来,它们在农田生态系统的应用兴起于 20 世纪末,但农田生态系统土壤呼吸组分分离研究的深度和广度都远逊于森林生态系统。目前,农田生态系统中常用的组分分离技术包括组分集成分析法、根分离法、同位素法和回归法,其中又以同位素法和回归法的应用最为广泛,研究作物主要集中于玉米和小麦(表 2)。

农田生态系统具有人工参与程度高、生长季节短等特点,农田地上地下生物量的碳分配、不同来源的呼吸机制与草地和森林生态系统有较大差异。例如,农田作物活根的生长期较短,根呼吸对农田生态系统土壤呼吸的贡献低于森林和草地生态系统。一般而言不同生态系统根呼吸对土壤呼吸的贡献约为 30—80%^[29-31],一些温带和热带地区的森林甚至可高达 84%^[52],但是农田生态系统根呼吸(纯根呼吸)对土壤呼吸的平均贡献率一般不到 50%^[6](表 2)^[48,56]。

表 2 组分分离方法在农田生态系统中的应用及比较

Table 2 Application and comparison of partitioning techniques in cropland ecosystem

国家或地区 Area	作物类型 Crop type	土壤类型 Soil type	分离方法 Partitioning technique	根呼吸贡献估计 Contribution of root respiration	文献 References
德国 Germany	玉米	薄层淋溶壤土	¹³ C 自然丰度法和微生物生物量法	23% (R_t)	[23]
	冬大麦	粘壤土	微孔网分离法	20.9% (R_t)	[40]
	水稻	粉质壤土	同位素 ¹⁴ C 脉冲标记法和回归法	85%—92% (R_t+R_z)	[48]
	玉米	薄层淋溶壤土	同位素 ¹⁴ C 脉冲标记法和回归法	69%—94% (R_t+R_z)	[53]
比利时 Belgium	土豆、冬小麦、甘蔗	砂质淋溶土	根分离法	土豆 67%; 冬小麦 89%; 甘蔗: 62% (R_t+R_z)	[35]
	甜菜-冬小麦-土豆轮作	淋溶土	根分离法和回归法	各季平均大于>65% (R_t+R_z)	[56]
美国 United States	春小麦	黑钙土	同位素 ¹⁴ C 脉冲标记法	75% (R_t+R_z)	[54]
俄罗斯 Russia	玉米、春大麦、荞麦	生草轻度灰化土	组分集成分析法和根分离法	玉米 52%—68%; 春大麦 58%—64%; 荞麦 13%—33% (R_t+R_z)	[55]
荷兰 Netherlands	玉米	普通潜育土	模型模拟法	60.6% (R_t+R_z)	[57]
寒带 Frigid zone	针叶林			2%—64% (28%) (R_t)	[22, 30]
	草地			19%—42% (40%) (R_t)	
温带 Temperate zone	针叶林			23%—84% (51%) (R_t)	
	落叶林			4%—74% (50%) (R_t)	
	草地			10%—42% (35%) (R_t)	
热带 Tropical zone	森林			24%—73% (52%) (R_t)	
	草地			53%—62% (56%) (R_t)	

* 括号内为平均值

农田生态系统根呼吸的贡献因作物类型、生长阶段、土壤性质、环境状况、试验条件、测量方法和分离技术的差异,变化巨大(表 2)。由于不同研究对土壤呼吸的划分和不同分离方法理论的巨大差异,不同研究结果之间往往难以比较。例如,虽然理论上纯根呼吸(R_t)属于自养呼吸而根际微生物呼吸属于异养呼吸,但是很难进一步区分纯根呼吸(R_t)和根际微生物呼吸(R_z),不同试验对根呼吸的外延也不相同^[23],现有田间测量的“根呼吸”多为根源呼吸(R_t+R_z)^[29,34]。

国内农田生态系统土壤呼吸组分分离研究起步于 20 世纪末,但近几年才得以较快发展。目前在国内农

田生态系统中应用较多的分离技术包括根分离法和根系生物量外推法,国际上流行的同位素方法由于设备昂贵应用较少(表3)^[58-78]。国内农田生态系统的土壤呼吸组分分离研究主要关注生长季根呼吸对土壤呼吸的贡献和对环境因子的响应,研究作物以冬小麦居多,但各研究者对根呼吸的内涵和外延却不十分明确,多数研究的分离对象为根源呼吸(R_r+R_z),少有研究进一步区分纯根呼吸和根际共生体呼吸,因此观测到的根呼吸贡献偏大(10%—90%)^[29]。

表3 各组分分离方法在中国农田生态系统中的应用与比较

Table 3 Application and comparison of partitioning techniques in Chinese cropland ecosystem					
区域 Area	作物类型 Crop type	土壤类型 Soil type	分离方法 Partitioning technique	根呼吸贡献估计* Contribution of root respiration	文献 References
河北吴桥	小麦-玉米	潮土	根分离法	小麦 15%; 玉米 13%	[58]
河北邯郸	小麦、玉米、棉花	—	DNDC 模型模拟	玉米 91%—95%; 棉花 70%; 冬小麦 80%	[59]
四川盐亭	小麦	水稻土	根分离法	—50% **	[60]
江苏南京	大豆、玉米	黄棕壤	根分离法和生物量外推法	大豆 79%; 玉米 76%	[61]
	玉米	壤质黏土	根分离法	48%—76%	[62]
江苏江都	小麦	砂姜土和黑土	¹³ C 自然丰度法和 FACE 试验	20%—48%	[63]
辽宁锦州	玉米	棕壤	生物量外推法	43.1%—63.6% (54.5%)	[64-65]
河北栾城	小麦-玉米	潮褐土、质地为壤土	根分离法	各生育期 26%—37%	[66]
山东禹城	小麦	潮土和盐化潮土	根分离法和生物量外推法	18%—55% (32%)	[67]
河南封丘	夏玉米	潮土,质地为砂壤	根分离法	20%—70% (46%)	[68]
	玉米	潮土	根分离法	纯根呼吸 45.9%, 根际微生物呼吸 17.9%	[69]
甘肃兰州	小麦和玉米	潮土	生物量外推法	玉米 9%—29% (19.4%), 小麦 6%—36% (23.8%),	[70]
	小麦	黏土	根分离法	11%—23%	[71]
	茄子、甘蓝和亚麻	石灰质土	挖沟分离法	67.3%	[72]
黑龙江尚志	森林	暗棕色森林土	挖沟分离法	28%—47%	[73]
河南内乡	森林	褐土和黄棕壤	挖沟分离法	39%—53%	[74]
江苏大丰	森林	粉砂质壤土	挖沟分离法	杨树:20.2%; 水杉:25.0%	[75]
广东鼎湖山	森林	赤红壤	挖沟分离法	针叶林:23%—55% (40%); 混交林 16%—51% (33%); 阔叶林 33%—56% (45%)	[76]
内蒙古锡林湖	草地	—	生物量外推法	20%—30%	[77]
	草地	栗钙土	根分离法	25%—45% (35.7%)	[78]

* 括号内为平均值; ** 根据文章数据折算

4 结论和展望

随着全球变化研究的不断升温,土壤呼吸组分分离技术及相关机理研究也日益成为研究热点。虽然随着技术的不断发展,土壤呼吸组分分离技术和相关机制的研究也取得了较大进展,但是在今后和未来仍然面对着许多挑战,未来相关研究主要的突破在于:(1)突破现有分离方法在农田生态系统应用的局限性,根据农田生态系统的特点,深入分析农田生态系统土壤呼吸的碳源、呼吸主体和呼吸过程,利用现有土壤呼吸观测技术,改进现有组分分离法和根分离法,强化土壤呼吸组分和环境因子的同步观测,以准确地评估农田碳收支;(2)土壤呼吸过程在现有全球碳循环模型仍是一个“黑箱”,利用土壤呼吸各组分的定位观测数据开展大尺度的模拟研究,研究不同呼吸组分对不同环境因子(温度、湿度、养分、气候因子及生物因子)的交互响应机制,白化、改进或者重构现有全球碳模型的碳氮过程,并在机理模型中考虑重要的土壤呼吸过程(例如激发效

应);(3)利用 FACE 试验,研究 CO₂浓度和温度升高对不同土壤呼吸组分的影响并利用碳循环模型对响应机制和过程进行模拟,以评估不同气候变化情景和全球碳循环之间的响应和适应机制;以及(4)分析土壤各呼吸组分与植物生长、土壤水分、土壤氮循环和养分状况之间的交互作用,以识别和评估农田管理措施对土壤 SOM、温室气体排放、环境影响和作物产量的综合影响。

References:

- [1] Box E. Geographical dimension of terrestrial net and gross primary productivity. *Radiation and Environmental Biophysics*, 1978, 15:305-322.
- [2] Houghton R A. Balancing the global carbon budget. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2007, 35:313-347.
- [3] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: Correlation and controls. *Biogeochemistry*, 2000, 48:71-90.
- [4] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48:7-20.
- [5] Boden T A, Marland G, Andres R J. Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. 2010. doi 10.3334/CDIAC/00001_V2010.
- [6] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: correlation and controls. *Biogeochemistry*, 2000, 48:71-90.
- [7] Gower S T, Krankina O, Olson R J, Apps M, Linder S, Wang C. Net primary production and carbon allocation patterns of boreal forest ecosystems. *Ecological Applications*, 2001, 11:1395-1411.
- [8] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, Kaye J P. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, 1998, 396:570-572.
- [9] Widen B, Majdi H. Soil CO₂ efflux and root respiration at three sites in a mixed pine and spruce forest: seasonal and diurnal variation. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, 31:786-796.
- [10] Balser T C, Wixon D L. Investigating biological control over soil carbon temperature sensitivity. *Global Change Biology*, 2009, 15:2935-2949.
- [11] Vargas R, Carbone M S, Reichstein M, Baldocchi D D. Frontiers and challenges in soil respiration research: from measurements to model-data integration. *Biogeochemistry*, 2010, 102:1-13.
- [12] 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.
- [13] FAO (Food and Agriculture Organization of the United States). <http://faostat.fao.org>. 2012.
- [14] Follett R F, Kimble G M, Lal R. The Potential of U.S. Grazing Lands to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect. Boca Raton: CRC Press LLC, 2001.
- [15] Pan G X, Li L Q, Zheng J F, Zhang X H, Zhou P. Perspectives on cycling and sequestration of organic carbon in paddy soils of China. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 901-914.
- [16] Fang C, Moncrief J B. An open-top chamber for measuring soil respiration and the influence of pressure difference on CO₂ efflux measurement. *Functional Ecology*, 1998, 12:319-325.
- [17] Wang B, Jiang Y, Guo H, Zhao G D, Bai X L. Soil respiration and its three biological processes. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(2): 483-490.
- [18] Baggs E M. Partitioning the components of soil respiration: a research challenge. *Plant Soil*, 2006, 284:1-5.
- [19] Jin Z, Dong Y S, Qi Y C. Review on the approaches of separating autotrophic and heterotrophic components of soil respiration. *Progress in Geography*, 2006, 25(4):22-23.
- [20] Wu H J, Cai D X. A review of soil respiration fractionation and the effect of agriculture management. *Chinese Soil and Fertilizer*, 2010, 6:10-15.
- [21] Raich J W, Nadelhoffer K J. Belowground carbon allocation in forest ecosystems: global trends. *Ecology*, 1989, 70:1346-1354.
- [22] Bond-Lamberty B, Wang C K, Gower S T. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration. *Global Change Biology*, 2004, 10: 1756-1766.
- [23] Werth M, Subbotina I, Kuzyakov Y. Three-source partitioning of CO₂ efflux from soil planted with maize by ¹³C natural abundance fails due to inactive microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38:2772-2781.
- [24] Taneva L, Gonzalez-Meler M A. Distinct patterns in the diurnal and seasonal variability in four components of soil respiration in a temperate forest under free-air CO₂ enrichment. *Biogeosciences Discuss*, 2011, 8:2875-2911.
- [25] Kuzyakov Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 425-448.
- [26] Hogberg P, Buchmann N, Read D J. Comments on Yakov Kuzyakov's review "Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods". *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(9):2997-2998
- [27] Kuzyakov Y. Response to the comments by Peter Hogberg, Nina Buchmann and David J. Read on the review "Sources of CO₂ efflux from soil and

- review of partitioning methods". *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(9): 2999-3000.
- [28] Kelting D L, Burger J A, Edwards G S. Estimating root respiration, microbial respiration in the rhizosphere, and root-free soil respiration in forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(7): 961-968.
- [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, 115-146.
- [30] Subke J A, Inglis I, Cotrufo M F. Trends and methodological impacts in soil CO₂ efflux partitioning: A meta-analytical review. *Global Change Biology*, 2006, 12: 1-23.
- [31] Bond-Lamberty B, Bronson D, Bladyka E, Gower S T. A comparison of trenched plot techniques for partitioning soil respiration. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43: 2108-2114.
- [32] Cheng S Y, Zhang X Z. A review on differential methods for root and soil microbial contributions to total soil respiration. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(4): 597-602.
- [33] Tang L Z. A review on method of separating root contribution to soil respiration. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Editions)*, 2008, 32(2): 97-102.
- [34] Werth M, Kuzyakov Y. ¹³C fractionation at the root-microorganisms-soil interface: A review and outlook for partitioning studies. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42: 1372-1384.
- [35] Suleau M, Moureaux C, Dufrane D, Buysse P, Bodson B, Destain J P, Heinesch B, Debacq A, Aubinet M. Respiration of three Belgian crops: Partitioning of total ecosystem respiration in its heterotrophic, above- and below-ground autotrophic components. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151: 633-643.
- [36] Werth M, Subbotina I, Kuzyakov Y. Three-source partitioning of CO₂ efflux from soil planted with maize by ¹³C natural abundance fails due to inactive microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 2772-2781.
- [37] Sayer E J, Tanner E V J. A new approach to trenching experiments for measuring root-rhizosphere respiration in a lowland tropical forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42: 347-352.
- [38] Rochette P, Flanagan L B. Quantifying rhizosphere respiration in a corn crop under field condition. *Soil Science Society of American Journal*, 1997, 61: 466-474.
- [39] Warembourg F R, Estelrich H D. Towards a better understanding of carbon flow in the rhizosphere: a time-dependent approach using carbon-14. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 30: 528-534.
- [40] Moyano F E, Kutsch W L, Schulze E-D. Response of mycorrhizal, rhizosphere and soil basal respiration to temperature and photosynthesis in a barley field. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 843-853.
- [41] Bowling D R, Pataki D E, Randerson J T. Carbon isotopes in terrestrial ecosystem pools and CO₂ fluxes. *New Phytology*, 2008, 178: 24-40.
- [42] Trumbore S. Radiocarbon and soil carbon dynamics. *Annual Review on Earth Planet Science*, 2009, 37: 47-66.
- [43] Braig E, Tupek B. Separating soil respiration components with stable isotopes: natural abundance and labelling approaches. *iForest*, 2010, 3: 92-94. doi: 10.3832/for0541-003.
- [44] Zobitz J M, Moore D J P, Sacks W J, Monson R K, Bowling D R, Schimel D S. Integration of process-based soil respiration models with whole-ecosystem CO₂ measurements. *Ecosystem*, 2008, 11: 250-269.
- [45] Herbst M, Hellebrand H J, Bauer J, Huisman J A, Simunek J, Weihermuller L, Graf A, Vanderborght J, Vereecken H. Multiyear heterotrophic soil respiration: Evaluation of a coupled CO₂ transport and carbon turnover model. *Ecological Modelling*, 2008, 214: 271-283.
- [46] Koerber G R, Hill P W, Edwards-Jones G, Jones D L. Estimating the component of soil respiration not dependent on living plant roots: Comparison of the indirect y-intercept regression approach and direct bare plot approach. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42: 1835-1841.
- [47] Jassal R S, Black T A. Estimating heterotrophic and autotrophic soil respiration using small-area trenched plot technique: Theory and practice. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140: 193-202.
- [48] Xu X L, Kuzyakov Y, Wanek W, Richter A. Root-derived respiration and non-structural carbon of rice seedling. *European Journal of Soil Biology*, 2008, 44: 22-29.
- [49] Lar R. Soil carbon sequestration impact on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304: 1623-1627.
- [50] Smith P. Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context. *European Journal of Agronomy*, 2004, 20: 229-236.
- [51] Smith P. Agricultural greenhouse gas mitigation potential globally, in Europe and in the UK: What have we learnt in the last 20 years?. *Global Change Biology*, 2012, 18: 35-43.
- [52] Rodeghiero M, Cescatti A. Indirect partitioning of soil respiration in a series of evergreen forest ecosystem. *Plant and Soil*, 2006, 284: 7-22.
- [53] Werth M, Kuzyakov Y. Root-derived carbon in soil respiration and microbial biomass determined by ¹⁴C and ¹³C. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40: 625-637.

- [54] Kuzyakov Y, Cheng W. Photosynthesis controls of rhizosphere respiration and organic matter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33:1915-1925.
- [55] Larionova A A, Saponov D V, Lopes de Gerenyu V O, Kuznetsova L G, Kudeyarov V N. Contribution of plant root respiration to the CO₂ emission from soil. *Eurasian Soil Science*, 2006, 39(10):1248-1257.
- [56] Aubinet M, Moureaux C, Bodson B, Dufranne D, Heinesch B, Suleau M, Vancutsem F, Vilret A. Carbon sequestration by a crop over a 4-year sugar beet/winter wheat/seed potato/winter wheat rotation cycle. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149:407-418.
- [57] Jans W W P, Jacobs C M J, Kruijt B, Elbers J A, Barendse S, Moors E J. Carbon exchange of a maize (*Zea mays* L.) crop: Influence of phenology. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 139:316-324.
- [58] Cui Y T, Han C R, Lu J D. Dynamics of organic material decomposition and soil respiration in intensive and high-yield agroecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(1):59-64.
- [59] Li H, Qiu J J, Wang L G. Characterization of farmland soil respiration and modeling analysis of contribution of root respiration. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(4):14-20.
- [60] Han G X, Zhu B, Zhang Z J, Gao M R, Jiang C S, Zheng X H. CO₂ emission from soil-wheat system in a paddy-dryland rotation area in purple soil and its influence factors. *Ecology and Environment*, 2004, 13(2):182-185.
- [61] Liu Q H, Huang Y, Zheng X H. Determination of upland soil respiration and its components with BaPS system. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(8):1105-1111.
- [62] Zhang Y H, Zhu H X, Li Y X, Huang B B, Peng X D, Zuo X R, Yu Y W. Effect of nitrogen fertilization on temperature sensitivity of rhizosphere respiration during maize growing stages. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10):2033-2039.
- [63] Kou T J, Xu X F, Zhu J G, Xie Z B, Guo D Y, Miao Y F. Contribution of wheat rhizosphere respiration to soil respiration under elevated atmospheric CO₂ and nitrogen application. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(10):2533-2538.
- [64] Han G X, Zhou G S, Xu Z Z, Yang Y, Liu J L, Shi K Q. Spatial heterogeneity of soil respiration and contribution of root respiration in a maize agricultural field. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12):5254-5261.
- [65] Han G X, Zhou G S, Xu Z Z. Seasonal dynamics of soil respiration and carbon budget of maize (*Zea mays* L.) farmland ecosystem. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(5):874-879.
- [66] Zhang Y, Zhang H L, Chen J K, Chen F. Tillage effects on soil respiration and contribution of its components in winter wheat field. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(9):3354-3360.
- [67] Zhang X S, Shen S H, Xie T S, Deng A J. Contribution of root respiration to total soil respiration in winter wheat field in North China Plain. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(3):289-296.
- [68] Cai Y, Ding W X, Cai Z C. Soil respiration in a maize-soil ecosystem and contribution of rhizosphere respiration. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12):4273-4280.
- [69] Li J M, Ding W X, Cai Z C. Effects of nitrogen fertilization on soil respiration during maize growth season, 2010, 21(8):2025-2030.
- [70] Meng L, Ding W X, He Q X, Cai Z C. Effect of long-term fertilization on soil respiration flux and its components under winter wheat/summer maize rotation. *Soils*, 2008, 40(5):725-731.
- [71] Liu H S, Li F M. Root respiration, photosynthesis and grain yield of two spring wheat in response to soil drying. *Plant Growth Regulation*, 2005, 46:233-240.
- [72] Li X D, Fu H, Guo D, Li X D, Wan C G. Partitioning soil respiration and assessing the carbon balance in a *Setaria italic* (L.) Beauv. Cropland on the Loess Plateau, Northern China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42:337-346.
- [73] Yang J Y, Wang C K. Partitioning soil respiration of temperate forest ecosystem in Northeastern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6):1640-1647.
- [74] Chang J G, Liu S R, Shi Z M, Chen B Y, Zhu X L. Soil respiration and its components partitioning in the typical forest ecosystems at the transitional area from the northern subtropics to warm temperate, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5):1791-1802.
- [75] Zhang J C, Kong Y G, Wang Y H, Yang C Q, Hu D M. Components separation of soil respiration in two typical shelter forestlands in silting coastal area, Northern Jiangsu Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(12):3144-3154.
- [76] Han T F, Zhou G Y, Li Y L, Liu J X, Zhang D Q. Partitioning soil respiration in lower subtropical forests at different successional stages in southern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(9):946-954.
- [77] Li L H, Han X G, Wang Q B, Chen Q S, Zhang Y, Yang J, Bai W M, Song S H, Xing X R, Zhang S M. Separating root and soil microbial contributions to total soil respiration in a grazed grassland in the Xilin River Basin. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(1):29-32.
- [78] Liu L X, Dong Y S, Qi Y C, Zhou L X. Study of distinguish root respiration from total soil respiration by root exclusion method in the temperate semi-arid grassland in Inner Mongolia, China. *Environmental Science*, 2007, 28(4):689-694.

参考文献:

- [12] 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.
- [15] 潘根兴, 李恋卿, 郑聚峰, 张旭辉, 周萍. 土壤碳循环研究及中国稻田土壤固碳研究的进展与问题. 土壤学报, 2008, 45(5): 901-914.
- [17] 王兵, 姜艳, 郭浩, 赵广东, 白秀兰. 土壤呼吸及其三个生物学过程研究. 土壤通报, 2011, 42(2):483-490.
- [19] 金钊, 董云社, 齐玉春. 综述土壤呼吸各组分区分方法. 地理科学进展, 2006, 25(4):22-23.
- [20] 吴会军, 蔡典雄. 土壤呼吸组分测定技术与农田管理措施影响的研究进展. 中国土壤肥料, 2010, 6:10-15.
- [32] 程慎玉, 张宪洲. 土壤呼吸中根系与微生物呼吸的区分方法与应用. 地球科学进展, 2003, 18(4):597-602.
- [33] 唐罗忠. 土壤中根系呼吸通量的分离测定方法综述. 南京林业大学学报(自然科学版), 2008, 32(2):97-102.
- [58] 崔玉亭, 韩纯儒, 卢进登. 集约高产农业生态系统有机物分解及土壤呼吸动态研究. 应用生态学报, 1997, 8(1):59-64.
- [59] 李虎, 邱建军, 王立刚. 农田土壤呼吸特征及根呼吸贡献的模拟分析. 农业工程学报, 2008, 24(4):14-20.
- [60] 韩广轩, 朱波, 张中杰, 高美荣, 江长胜, 郑循华. 水旱轮作土壤小麦系统 CO₂ 排放及其影响因素. 生态环境, 2004, 13(2):182-185.
- [61] 刘巧辉, 黄耀, 郑循华. 基于 BaPS 系统的旱地土壤呼吸作用及其分量确定探讨. 环境科学学报, 2005, 25(8):1105-1111.
- [62] 张耀鸿, 朱红霞, 李映雪, 黄宾宾, 彭晓丹, 左小瑞, 余焰文. 氮肥施用对玉米根际呼吸温度敏感性的影响. 农业环境科学学报, 2011, 30(10):2033-2039.
- [63] 寇太记, 徐晓峰, 朱建国, 谢祖彬, 郭大勇, 苗艳芳. CO₂ 浓度升高和施氮条件下小麦根际呼吸对土壤呼吸的贡献. 应用生态学报, 2011, 22(10):2533-2538.
- [64] 韩广轩, 周广胜, 许振柱, 杨扬, 刘景利, 史奎桥. 玉米农田土壤呼吸作用的空间异质性及其根系呼吸作用的贡献. 生态学报, 2007, 27(12):5254-5261.
- [65] 韩广轩, 周广胜, 许振柱. 玉米农田生态系统土壤呼吸作用季节冻土与碳收支初步估算. 中国农业生态学报, 2009, 17(5):874-879.
- [66] 张宇, 张海林, 陈继康, 陈阜. 耕作方式对冬小麦田土壤呼吸及各组分贡献的影响. 中国农业科学, 2009, 42(9):3354-3360.
- [67] 张雪松, 申双和, 谢铁嵩, 邓爱娟. 华北平原冬麦田根呼吸对土壤总呼吸的贡献. 中国农业气象, 2009, 30(3):289-296.
- [68] 蔡艳, 丁维新, 蔡祖聪. 土壤-玉米系统中土壤呼吸强度及各组分贡献. 生态学报, 2006, 26(12):4273-4280.
- [69] 李建敏, 丁维新, 蔡祖聪. 氮肥对玉米生长季土壤呼吸的影响. 应用生态学报, 2010, 21(8):2025-2030.
- [70] 孟磊, 丁维新, 何秋香, 蔡祖聪. 长期施肥对冬小麦/夏玉米轮作下土壤呼吸及其组分的影响. 土壤, 2008, 40(5):725-731.
- [73] 杨金艳, 王传宽. 东北东部森林生态系统土壤呼吸组分的分离量化. 生态学报, 2006, 26(6):1640-1647.
- [74] 常建国, 刘世荣, 史作民, 陈宝玉, 朱学凌. 北亚热带-南暖温带过渡区典型森林生态系统土壤呼吸及其组分分离. 生态学报, 2007, 27(5):1791-1802.
- [75] 韩天丰, 周国逸, 李跃林, 刘菊秀, 张德强. 中国南亚热带森林不同演替阶段土壤呼吸的分离量化. 植物生态学报, 2011, 35(9):946-954.
- [76] 张金池, 孔雨光, 王因花, 杨传强, 胡丁猛. 苏北淤泥质海岸典型防护林地土壤呼吸组分分离. 生态学报, 2010, 30(12):3144-3154.
- [77] 李凌浩, 韩兴国, 王其兵, 陈全胜, 张焱, 杨晶, 白文明, 宋世环, 邢雪荣, 张淑敏. 锡林河流域一个放牧草原群落中根系呼吸占土壤总呼吸比例的初步估计. 植物生态学报, 2002, 26(1):29-32.
- [78] 刘立新, 董云社, 齐玉春, 周凌西. 应用根去除法对内蒙古温带半干旱草原根系呼吸与土壤总呼吸的区分研究. 环境科学, 2007, 28(4):689-694.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.22 Nov., 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The review of methods for mapping species spatial distribution using presence/absence data LIU Fang, LI Sheng, LI Diqiang (7047)
- A research review of landscape service LIU Wenping, YU Zhenrong (7058)
- Progress on techniques for partitioning soil respiration components and their application in cropland ecosystem CHEN Minpeng, XIA Xu, LI Yinkun, MEI Xurong (7067)

Autecology & Fundamentals

- Effect of different stubble height treatments on the annual growth index and physiological characteristics of *Tetraena mongolica* in two growing seasons WANG Zhen, ZHANG Liwen, YU Yi, et al (7078)
- Photosynthetic characteristics of an endangered species *Tetrameles nudiflora* under different light and water conditions DENG Yun, CHEN Hui, YANG Xiaofei, et al (7088)
- The compensation capacity of tillering and production of main stem nodes in rice WEI Ming, LI Dongxia (7098)
- Simulation of leaf area and dry matter production of tobacco leaves based on product of thermal effectiveness and photosynthetically active radiation ZHANG Mingda, LI Meng, HU Xueqiong, et al (7108)
- Effects of different tillage and straw systems on soil water-stable aggregate distribution and stability in the North China Plain TIAN Shenzhong, WANG Yu, LI Na, et al (7116)
- Effects of the *Larix gmelinii* grown under different light intensities on the development and defensive enzyme activities of *Lymantria dispar* larvae LU Yifang, YAN Junxin, LI Shuangwen, et al (7125)
- Biological control efficiency of *Orius similis* Zheng (Hemiptera: Anthocoridae) on *Frankliniella occidentalis* (Pergande) under different spatial and caged conditions MO Lifeng, ZHI Junrui, TIAN Tian (7132)
- Preliminary study on scavenging mechanism of dissolved aluminum by phytoplankton WANG Zhaowei, REN Jingling, YAN Li, et al (7140)
- Leaf-form characteristics of plants in *Quercus aquifolioides* community along an elevational gradient on the Balang Mountain in Wolong Nature Reserve, Sichuan, China LIU Xingliang, HE Fei, FAN Hua, et al (7148)
- Comparison of shrimp density between the Minjiang estuary and Xinhua bay during spring and summer XU Zhaoli, SUN Yue (7157)
- The feeding selectivity of an herbivorous amphipod *Ampithoe valida* on three dominant macroalgal species of Yundang Lagoon ZHENG Xinqing, HUANG Lingfeng, LI Yuanchao, et al (7166)

Population, Community and Ecosystem

- Effects of four different agricultural prevention and control measures on rice yellow stem borer *Tryporyza incertulas* (Walker) (Lepidoptera: Pyralidae) ZHANG Zhenfei, HUANG Bingchao, XIAO Hanxiang, et al (7173)
- Soil nitrogen concentrations and transformations under different vegetation types in forested zones of the Loess Gully Region XING Xiaoyi, HUANG Yimei, AN Shaoshan, et al (7181)
- Ecosystem health assessment based on diagnosis CAI Xia, XU Songjun, CHEN Shanhao, et al (7190)
- The production and accumulation of phytoliths in rice ecosystems: a case study to Jiaxing Paddy Field LI Zimin, SONG Zhaoliang, JIANG Peikun (7197)
- Application of a free search-based projection pursuit model in investigating reed in wetlands LI Xinhua, ZHAO Chengyi (7204)

- Soil microbial diversity under typical vegetation zones along an elevation gradient in Helan Mountains
 LIU Bingru, ZHANG Xiuzhen, HU Tianhua, et al (7211)
- Effects of shrub encroachment on biomass and biodiversity in the typical steppe of Inner Mongolia
 PENG Haiying, LI Xiaoyan, TONG Shaoyu (7221)
- Research on diaspore morphology and species distribution of 80 plants in the hill-gully Loess Plateau
 WANG Dongli, ZHANG Xiaoyan, JIAO Juying, et al (7230)
- Habitat suitability assessment of blue sheep in Helan Mountain based on MAXENT modeling
 LIU Zhensheng, GAO Hui, TENG Liwei, et al (7243)
- Characteristic of phytoplankton primary productivity and influencing factors in littoral zone of Lake Taihu
 CAI Linlin, ZHU Guangwei, LI Xiangyang (7250)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- Responses of soil respiration to changes in depth of seasonal frozen soil in Ebinur Lake area, arid area of Northwest China
 QIN Lu, LV Guanghui, HE Xuemin, et al (7259)
- Seasonal and annual variation characteristic in basal soil respiration of black loam under the condition of farmland field
 ZHANG Yanjun, GUO Shengli, LIU Qingfang, et al (7270)
- Resource and Industrial Ecology**
- Economic evaluation and protection of *Amygdalus mira* genetic resource ZHANG Lirong, MENG Rui, LU Guobin (7277)
- Meteorological grading indexes of water-saving irrigation for cotton XIAO Jingjing, HUO Zhiguo, YAO Yiping, et al (7288)
- Research Notes**
- Sprouts characteristic structure of *Taxus yunnanensis* plantation SU Lei, SU Jianrong, LIU Wande, et al (7300)
- The effects of forest conversion on soil N mineralization and its availability in central jiangxi subtropical region
 SONG Qingni, YANG Qingpei, YU Dingkun, et al (7309)

《生态学报》2014 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,探索生态学奥秘,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,280 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 杨志峰

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 22 期 (2013 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 22 (November, 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

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元