

森林生态系统土壤呼吸测定方法研究进展

魏书精¹, 罗碧珍², 魏书威³, 孙龙², 文正敏¹, 胡海清^{2*}

1. 桂林理工大学广西矿冶与环境科学实验中心, 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004;

2. 东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 3. 兰州理工大学, 甘肃 兰州 730050

摘要: 森林是陆地生态系统的主体, 是最大的植被碳库和土壤碳库, 其碳通量和碳储量的变化对生态系统的碳循环乃至全球碳收支平衡具有决定性影响。土壤呼吸是森林生态系统碳循环过程的关键环节, 亦是森林生态系统的碳素向大气输出的主要途径, 是土壤圈与大气圈交流的重要形式, 是森林生态系统能量流动和物质循环的重要生态过程。目前, 土壤呼吸已经成为陆地生态系统向大气排放CO₂最大的源, 在区域乃至全球碳循环与碳平衡中具有重要作用。随着全球气候变化的加剧, 森林土壤呼吸在全球碳平衡中的作用引起了人们的广泛关注, 成为科学界研究的热点问题。土壤呼吸测定方法是科学有效地测定土壤呼吸的重要手段以及对土壤呼吸定量化研究的重要媒介, 科学有效地加强森林土壤呼吸测定方法的精确化与定量化研究, 对了解森林土壤呼吸在全球碳循环和碳平衡中的地位以及实现森林土壤碳汇效应与固碳潜力的研究均有重要意义。本文系统阐明了森林土壤呼吸的国内外研究现状及进展, 论述比较了土壤呼吸的各种测定方法, 特别比较了静态气室法和动态气室法的优缺点, 为人们对测定方法的选择提供参考。虽然测定森林生态系统土壤呼吸的方法均存在某种程度的不足, 但目前最理想的方法是动态红外气体分析法, 亦是最可靠的方法之一。此外, 本文亦阐述了森林生态系统土壤呼吸各组分的区分方法, 最后讨论了森林生态系统土壤呼吸测定方法研究存在的问题, 探讨了解决问题的方向, 并总结了土壤呼吸测定方法研究的趋势以及进一步的研究发展方向。

关键词: 森林生态系统; 土壤呼吸; 测定方法; 自养呼吸; 异养呼吸

中图分类号: Q148; S718.5

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2014) 03-0504-11

引用格式: 魏书精, 罗碧珍, 魏书威, 孙龙, 文正敏, 胡海清. 森林生态系统土壤呼吸测定方法研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(3): 504-514.

WEI Shujing, LUO Bizhen, WEI Shuwei, WEN Zhengmin, SUN Long, HU Haiqing. Methods of measuring of soil respiration in forest ecosystems: A review [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(3): 504-514.

陆地生态系统是人类赖以生存和发展的生命支持系统, 是受人类活动影响最大的区域, 亦是影响全球碳循环与碳平衡的重要碳库, 在生物地球化学循环过程中发挥着举足轻重的作用(刘立新等, 2004)。全球陆地土壤的碳储量约为1300~2000 Pg, 是全球陆地植被碳库500~600 Pg的2~3倍和大气碳库750 Pg的2倍多(汪业勤等, 1995), 在全球碳循环和碳平衡中起着不可替代的作用。森林生态系统是陆地生态系统的主体, 是最大的植被碳库和土壤碳库, 其碳通量和碳储量的变化对全球碳收支平衡具有决定性影响。其土壤碳储量高达 1.394×10^{18} g, 是陆地生态系统最大的碳库, 是全球碳库的重要组成部分(魏书精, 2013; 胡海清等, 2012a)。土壤呼吸作为森林生态系统物质循环和能量流动的重要生态过程, 是将土壤中的有机碳以CO₂形式

归还到大气的主要途径, 是陆地生态系统和大气生态系统之间碳转移的主要方式之一, 亦是全球碳循环中主要的通量之一, 是陆地生态系统碳循环的关键环节, 在区域乃至全球碳循环中具有重要作用(肖复明, 2007; 魏书精等, 2011)。土壤呼吸每年的CO₂排放量为50~76 Pg, 占陆地生态系统与大气生态系统之间碳交换总量的2/3, 约为大气碳库的1/10, 比陆地生态系统净初级生产力(NPP)吸收的碳量多30%~60%(Raich等, 1995), 亦远远超过由于化石燃料燃烧每年向大气排放的5 Pg碳量。由于土壤碳库巨大, 流通量达 $68 \pm 4 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$ (李玉宁等, 1995), 因此, 土壤碳库的微小变化将会对大气CO₂浓度的变化产生较大的影响(Raich等, 2000), 从而加剧或减缓全球气候变化(Schlesinger等, 2000)。碳库对全球气候的影响作用已引起世

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208244; 31070544); 博士科研启动项目(002401003421); 广西建筑新能源与节能重点实验室(001102213185); 973项目(2011CBA403203); 国家科技支撑计划项目(2011BAD37B0104); 林业公益性行业科研专项(200804002)

作者简介: 魏书精(1979年生), 男, 博士, 主要从事气候变化、生态系统碳循环与城乡规划方向研究。

*通讯作者: 胡海清(1961年生), 男, 内蒙古敖汉人, 教授, 博士, 博士生导师。主要从事森林生态学与林火生态方向研究。

收稿日期: 2013-11-06

界各国学者的广泛关注(胡海清等, 2012b)。土壤呼吸作为陆地生态系统向大气中排放CO₂最大的源,亦是影响大气CO₂浓度变化的关键生态学过程,很早以前就引起人类的极大关注,对其进行深入研究有利于理解全球碳平衡中的“迷失的碳汇”问题及全球气候变化问题。本文通过综述土壤呼吸及其测定方面的研究进展,将有助于人们更好地理解土壤呼吸作用在不同生态系统中的生态过程,为该领域的进一步量化研究提供重要的数据基础和参考依据。

1 森林生态系统土壤呼吸研究概况

国外对土壤呼吸的研究已经有很长的历史,最早可追溯到Wollny对土壤代谢特征的研究。19世纪末,有关土壤呼吸的研究主要针对农田耕作土壤且集中于欧洲和北美。20世纪土壤呼吸的研究可大致划分为4个阶段,在20世纪初,土壤呼吸的研究主要是利用农业土壤在实验室中进行,土壤呼吸主要用于评价土壤肥力和土壤生物的活性,产生了一些较为原始的测量土壤呼吸的方法。20世纪30年代末到50年代初,有关土壤呼吸的研究相对较少。从50年代末到70年代,有关土壤呼吸的研究逐渐活跃,然而,大规模的研究始于20世纪70年代,这一时期不仅研究深度得以深化,而且由于测定方法的改进、测定器具的改善以及对相关因素的综合考虑,精度也得以提高(魏书精等, 2013)。这一时期的研究主要是从生态学的角度进行的,在测量方法、影响因子、组分的区分、与其他生态系统碳过程的关系以及推广到对全球范围的估计等方面均有较大的发展(Luo等, 2007)。20世纪90年代以来,随着全球气候变化研究成为公众和科学界关注的热点之一,对土壤呼吸的研究主要受全球变化的驱动,因而土壤呼吸特别是森林土壤呼吸作为大气CO₂重要的源越来越受到关注,特别是测定技术的进步使得现代活跃的土壤呼吸研究更为量化(侯琳等, 2006)。目前,国外对土壤呼吸研究较多,如影响森林土壤呼吸的因素,营林措施、大气CO₂浓度升高、全球升温、N沉降等对其影响亦有较多的报道(刘绍辉等, 2006; 胡海清等, 2012c)。

国内土壤呼吸研究开展得较晚。近年来,对森林生态系统的土壤呼吸研究较多,主要集中研究呼吸速率与环境因子的关系及全年土壤呼吸量的估算。我国的森林资源按纬度分布在热带、亚热带、暖温带、温带和寒温带的广大地区,森林植被类型丰富(魏书精等, 2013)。我国的科研工作者相继在这些不同地理分布区域,对多种森林类型的土壤呼吸进行了测定(侯琳等, 1995)。在热带地区,吴仲民等(1997)、骆士寿等(2001)、沙丽清等

(2004)、房秋兰等(2006)对森林生态系统的土壤呼吸进行研究;在亚热带地区,杨玉盛等(2004)、刘建军等(2003)、罗辑等(2000)、冉景丞等(2001)、莫江明等(2005)、张连举等(2007)、方晰等(2005)等对森林生态系统的土壤呼吸进行研究;在暖温带地区,刘绍辉等(1997)、蒋高明等(1997)、孙向阳等(2001)等对森林土壤呼吸研究多集中在北京山地温带森林;在温带地区,董云社等(1996)、王森等(2003)、蒋丽芬等(2004)、杨金艳等(2005)等主要对长白山和帽儿山等森林生态系统的土壤CO₂释放特征、影响因素及年排放量估计等进行了研究;在寒温带地区,王传宽等(2005)对北方森林土壤呼吸释放出的CO₂通量进行研究。Tan等(2012)对我国北方落叶松林火后土壤呼吸进行研究。但由于测定方法的不同,许多研究结果无法进行直接比较。同时许多研究局限在某些区域或某些时间段,缺乏对土壤呼吸进行全面深入的研究。

2 土壤呼吸概念及产生机制

2.1 土壤呼吸概念

土壤呼吸亦称土壤总呼吸,是指土壤中有机体和植被的地下部分产生CO₂的过程,即土壤释放CO₂的过程,包括未扰动土壤中产生CO₂的所有代谢作用(Luo等, 2007; Singh等, 1977)。它主要有3个生物学过程(土壤微生物呼吸、根系呼吸、土壤动物呼吸)和一个非生物学过程(含碳矿物质的化学氧化作用)。土壤中有机质的化学氧化作用以及无脊椎动物呼吸作用十分微弱,常常忽略不计,因此在森林生态系统中,土壤微生物呼吸以及植被根系呼吸成为土壤呼吸研究中的主要研究对象。土壤呼吸是通过根呼吸、微生物对凋落物和土壤有机质分解以及动物呼吸,从土壤中释放CO₂的生态过程(侯琳等, 2006; 姜丽芬等, 2004),是土壤有机碳输出的主要形式,是土壤碳素同化异化平衡作用的结果,表现为土壤与大气CO₂的交换(侯琳等, 2006; 齐志勇等, 2003)。土壤呼吸速率决定了土壤中碳素周转速度。研究表明,土壤呼吸释放的CO₂约30%~50%来自根系活动(自养呼吸)作用,其余部分主要来源于土壤微生物对有机质的分解作用(Bowden等, 2006)。根系呼吸的贡献率因生态系统不同差异很大,而且难以与土壤异养呼吸完全分开(Blanke等, 2006),林地根系呼吸的贡献率在5%~90%(侯琳等, 2006)。由于土壤自养微生物同化CO₂的速度一般远低于土壤排放CO₂的速率,因此除特殊情况外,土壤呼吸都表现为土壤向大气净释放CO₂。

2.2 土壤呼吸原理及产生机制

从土壤呼吸产生的生理学机制来看,植被纯根

系呼吸为自养呼吸,土壤微生物呼吸和土壤动物呼吸以及含碳矿物质的化学氧化作用为异养呼吸。土壤呼吸所排放的CO₂主要来自于土壤微生物对有机质(土壤有机质、枯枝落叶、死根等)的分解,剩余部分被微生物用于自身合成,这一过程就是土壤异养呼吸。而根系通过呼吸把光合作用合成的碳水化合物氧化分解,释放能量和CO₂,这一过程就是土壤的自养呼吸(高亚琴,2009;陈高娃,2012;侯琳等,2006;Luo等,2007)。另外,土壤动物和含碳物质的化学氧化作用在土壤呼吸中占的比例很小,故相关研究较少(王爱东,2009)。

2.3 土壤呼吸的作用

土壤呼吸是全球碳循环中一个主要的流通途径,是土壤与大气交换CO₂的过程,是土壤碳素同化和异化平衡的结果。土壤呼吸的作用主要表现为(崔骁勇等,2001;苏永红等,2008;侯琳等,2006):(1)在有冠层的植被类型中,土壤呼吸释放的CO₂改变了冠层CO₂浓度,为下层植被提供了较充足的光合作用原料;(2)土壤呼吸是表征土壤质量和肥力的重要生物学指标,尤其是基础土壤呼吸部分反应了土壤的生物活性和土壤物质代谢的强度,反映了土壤养分的转化及供应能力(崔骁勇等,2001;Liebig等,1996);(3)土壤呼吸是碳循环中重要的通量,其通量的大小对气候变化和温室效应应具有重要影响;(4)土壤呼吸是在土壤内的CO₂浓度梯度驱动下,向土表扩散的生态学过程,是衡量土壤通气性的重要标志;(5)土壤呼吸也是反映系统对环境胁迫响应的指标之一,其速率变化与否以及变化的方向反应了系统对胁迫的敏感程度和响应模式。此外土壤呼吸还可以作为环境污染程度和生态系统对污染承受力的一个判据。同时土壤生物能够降解某些污染物质,某些污染物的分解速率与土壤呼吸强度呈正相关关系(王鹤松,2007;杨玉盛等,2004;郭婷,2006)。

2.4 土壤呼吸的测定原理

土壤呼吸量的测定主要基于两种基本原理:一是土壤呼吸过程中所消耗O₂量。二是土壤呼吸过程中所产生CO₂量。土壤排放CO₂的测定方法较多,测定方法的不同将造成测定结果差异较大,然而土壤呼吸量测定的基本原理大同小异(侯琳等,2006)。

3 土壤呼吸的测定方法

土壤呼吸强度通常是根土壤表面释放出的CO₂量来确定的,由于森林生态系统的复杂性和异质性,土壤呼吸测定方法较多,但各有优点与局限性。目前主要分为直接测定法和间接测定法,同时,2种测定方法又细分出不同的方法(梁宇,2009;

陈宝玉等,2009;齐永昌,2012)。直接法通常是通过测定土壤表面释放出来的CO₂量来确定土壤呼吸量;间接法是根据其他指标,如土壤腐殖质层重量变化、土壤三磷酸腺苷含量等,进而推算土壤呼吸值(Robert等,2006)。间接法需建立所测指标与土壤呼吸间的定量关系,因为这种定量关系是在特定条件下建立的,有较大的时空局限性,测定结果也难以和其它方法直接比较,所以间接法只适用于特定的生态系统。直接法有原位测定(野外测定)和室内测定(室内培养)两类,按测定(取样)方法分为箱式法(静态箱Closed Chamber与动态箱Dynamic Chamber)和微气象学法两类,原位测定又可分为静态气室法(Static Chamber Method)、动态气室法(Dynamic Chamber Method)和微气象法,表1概括地比较了森林生态系统土壤呼吸测定方法。

3.1 直接测定法

3.1.1 土壤呼吸总量的测定

3.1.1.1 静态气室法

静态气室法是指土壤排放的CO₂经过一定时间的积累进入到收集容器,再对容器内的CO₂进行定量计算,由此得到单位时间内土壤释放的CO₂量。一般是在一个密闭的气室内放置能吸收CO₂的物质(如氢氧化钠、氢氧化钾、氢氧化钡等)来测定被测土壤表面CO₂释放量。即用观测箱盖住一定面积的被测土壤表面并密封,使观测箱内部空气与外界隔绝,然后对箱内气体的浓度进行分析。静态气室法又可分为静态碱液吸收法(Static Alkali Absorption)和静态密闭气室法(包括气相色谱法和静态箱红外分析法)2种方法。碱液吸收法是用碱液(NaOH或者KOH溶液)或固体碱粒吸收CO₂,形成碳酸根,再用滴定法计算出剩余的碱量,再使用差减法计算出一定时间内土壤排放的CO₂量。静态密闭气室法(包括气相色谱法和静态箱红外分析法)是将一无底无盖的管状容器一端插入土壤中,经过一段时间的稳定后加盖,然后用针状连接器以一定的时间间隔抽取气体样品放入真空容器内,用气相色谱仪或红外分析仪测定其中CO₂的体积分数,从而计算得出CO₂的排放速率(赵宁伟等,2011)。静态箱红外分析法是定时将气体从箱内抽出,通过用红外线气体分析仪(IRGA)测定气体浓度的变化来计算地气交换通量。

3.1.1.2 动态气室法

动态气室法是用不含CO₂的空气或已知其中CO₂体积分数的空气,以一定的速率通过一个密闭容器覆盖的土壤样品表面,然后用红外气体分析仪测定其中CO₂含量。根据进出容器的CO₂体积分数

表1 森林生态系统土壤呼吸测定方法比较表
Table 1 Comparison of Soil Respiration Measurement Method in Forest Ecosystem

	测定方法	优点	缺点	适用范围	
	野外原位测定	对土壤扰动较小,测量结果能较好地代表实际水平	影响因素较多,难于观测某一因子对土壤呼吸的影响	适用于大部分土壤,特别是小尺度土壤	
	气室法(叶室法)	在土壤表面安装用金属或树脂制作的气室,根据气室内从土壤表面向大气扩散CO ₂ 的速率进而算出土壤呼吸速率的方法	能观测到小范围的土壤呼吸特性及其细微的变化	受到空间不均一性的影响下,进行大尺度扩展同样有一定的困难;从气室安置于地表时起,气室内的环境就和自然状态产生一定差异,由此会产生一些误差	适用于大部分土壤,特别是小尺度
	静态气室法	通过覆盖一定范围的地表区域来完成对土壤呼吸的测定;在一个密闭的气室内放有吸收CO ₂ 的物质来测定土壤CO ₂ 的释放量;用观测箱盖住一定面积的被测表面并密封,使观测箱内部空气与外界没有任何交换,然后对箱内气体的浓度进行分析;测定时气室内的空气暂时与外界隔绝;通过测定气室内CO ₂ 浓度随时间的变化而获得土壤呼吸释放CO ₂ 的速率;测定一个时间段前后气室内的CO ₂ 浓度,由此得到单位时间内土壤释放的CO ₂ 量	能够同时进行多样品的重复测定和多点测定;适用于各种土壤;便于对较大空间变异性的气体通量的测量;对设备的要求不高,花费较低,操作相对简单	改变了近地面微气象条件;密闭箱体对对被测表面的自然状态产生干扰,而且测量面积也相对较小;但由于所需时间相对较长,故不能反应土壤呼吸在一天之内随时间的变化	适于空间异质性大的土壤
直接测定法	静态箱红外分析法(密闭室IRGA/GC法)	定时将气体从箱内抽出,通过用红外线气体分析仪(IRGA)测定气体浓度的变化来计算地气交换通量,根据CO ₂ 浓度的时间变化算出土壤的呼吸速率;将一无底盖的管装容器一端插入土壤中,经过一段时间稳定后,加盖,用一针状连接器以一定的时间间隔抽取气体样品进入真空容器,用红外分析仪测定其中CO ₂ 的浓度,计算出CO ₂ 的排放速率	可连续进行监测;操作较简便(在野外期间只采样气,不需要药品和动力,运用也很普遍,操作简便,测量原理更为先进,结果更为准确	仪器设备成本比较高;取样间隔不可过短;需要补充同体积空气	适于空间异质性大的土壤
	静态碱液吸收法	基于CO ₂ 的聚集或吸收;用碱液,也可以用固体碱粒,在一定时间内碱液吸收CO ₂ 形成碳酸根,再用重量法或者中和滴定法计算出剩余的碱量,进而计算出一定时间内土壤排放的CO ₂ 总量	简单方便,设备简单,测定时不需要复杂的设备,测定费用低、操作简单、便于野外测定;并且特别适用于土壤呼吸空间变化较大的区域;可同时进行多样点多次重复,有利于进行多次重复测定,是传统测定方法中被普遍采用的方法	难以连续监测;碱的用量对结果影响较大,碱的用量需事先确定;影响因素很多(如碱液的用量;呼吸室插进土壤的深度;碱液的吸收面积;碱液距地面的高度;呼吸室的高度;测量面积等),在土壤呼吸速率低的情况下,测定的结果比真实值偏高;反之,偏低,导致测定的精度存在不确定性,碱液吸收法测定的精度不理想,与实际土壤呼吸速率存在差异,限制了其应用	适于空间异质性大的土壤,实验室内培养
	动态气室法	将箱体在两端开口后,通过测量入口处和出口处气体浓度的变化,计算被测表面的气体通量;向气室内注入一定流量的气体,通过计算入口处与出口处CO ₂ 浓度而获得土壤呼吸速率	对CO ₂ 扩散影响较小;解决了密闭气室法应用过程中存在的问题;能基本保持被测测量表面的环境状况而使得测量结果能较好地反映土壤呼吸的实际水平,且可连续测量土壤呼吸的变化过程	改变了近地面微气象条件;对箱体内外的气压和被测气体的浓度要求很高,因此限制了其应用,不能同时进行多样点的测量	适用于大部分土壤类型
	动态碱吸收法	用一定体积的呼吸室罩住选择的样点,以一定的气流量通过呼吸室,测量进气和出气中CO ₂ 的浓度,便可得到土壤呼吸速率	较静态碱吸收准确,可同多样点重复	设备复杂,难以连续监测,碱的用量需事先确定	适用于大部分土壤类型
	动态红外气体分析法(动态IRGA法)	通过一个气流交换式的气体采样箱与红外线气体分析仪(IRGA)相联接,连成闭合型流路,使一定流量的空气在流路内循环,同时检测其中CO ₂ 浓度随时间的变化,对采样箱中产生的CO ₂ 直接进行连续测定。	移动测定方便,可连续测定;结果准确,能基本保持被测表面的环境状况而使测量结果更接近于真实值,今后动态IRGA法将是测量土壤呼吸的主导方向,是目前最理想的测定方法,以美国LI-COR的相关仪器最为著名	对内外压力差极敏感;进出口气压难以控制;空气流通速率和室内外的压力差对测定所造成的负面影响	适用于大部分土壤类型

续表 1

	测定方法	优点	缺点	适用范围
微气象学	根据气象学原理及依据微气象学原理,测量近地层的湍流状况和微量气体的浓度变化来推算土壤CO ₂ 气体的排放通量;气流运动从土壤表面通过涡流来测定	不改变土壤表面的微环境条件,对土壤系统几乎不造成干扰,可以长时间连续测定土壤CO ₂ 通量;适合测定大尺度内CO ₂ 的排放;可在较大的空间异质区内取样;可测定较大范围内的气体通量,避免了密闭系统带来的误差;可获得较长时间内的气体变化规律,在下垫面均匀且尺度较大的区域获得的数据具有较好的代表性;适于大面积测定	其应用依赖于许多先决条件,如广阔的风向区、大气的稳态条件;需要同时测定冠层光合,植物和动物呼吸速率;其测定土壤CO ₂ 排放的准确度很大程度上受到大气、土壤表面和仪器设备的影响;对土壤表面的异质性和地形条件要求相对苛刻;对仪器灵敏度要求较高;仪器造价非常昂贵;仅为土壤呼吸真实碳通量的近似估计,特别是通过短时间内测值的外推尤为如此;不能够准确测定土壤呼吸,测定的是群落整体的CO ₂ 动态变化,包括土壤层和植被地上层两部分。	适于大尺度内地形条件简单的土壤
涡度相关法	作为微气象学的代表方法,它根据微气象学原理在植被层上方直接测量CO ₂ 的涡流传递速度,从而计算出植物群落的CO ₂ 收支动态;通过计算物理量的脉动与风速脉动的协方差求算湍流输送量的方法,是一种非破坏性测定的微气象技术,通过测量近地层的湍流状况和被测气体的浓度而获得该气体的通量值	对土壤系统几乎不造成干扰;可进行不同面积上的测定;可以长时间连续测定土壤CO ₂ 通量;在允许的植被冠层高度范围内,不受生态系统类型的限制,特别适用于大范围、中长期的定位观测,能推算出数公顷的植被的代表值	要求植被均匀;要求下垫面气流保持一定的稳定性,受地表附近的地形和植被构造的影响显著;受到成本和技术的限制,设备昂贵;结果变异大;涡度相关技术是从土壤表面测得的CO ₂ 通量,仅为土壤呼吸真实碳通量的近似估计,其测定的呼吸量通常低于红外气体分析法;利用涡度相关法估测土壤CO ₂ 通量仍存在很大的局限性	适于大尺度内地形条件简单的土壤
室内培养测定		室内培养便于对其它环境因子进行控制,因此得到的结果比较一致,条件可控,可多重复,可长时间连续测定	严重扰动土壤;与野外条件不一致	实验室内培养
原状土柱		保持了一定的原状结构	工作量大;土壤和植物都受到扰动	适用于小尺度特定的生态系统
非原状土		不受时间限制,可得到土壤碳分级信息	不能得到实际呼吸量	实验室内培养
间接测定法	通过测定其他相关指标来推算土壤呼吸速率,这种方法需要建立所测指标(土壤总的新陈代谢、温度和水分、三磷酸腺苷(ATP)含量等)与土壤间的定量关系,而这种关系一般只适用于特定的生态系统。此外,还有通过研究温度和水分对土壤呼吸的影响,建立回归方程,计算得出土壤呼吸	经济简便	具有较大的时空局限性,并且测定结果难以和其他方法进行比较	适用于特定的生态系统

差,计算土壤呼吸速率,即通过一个密闭的或气流交换作用的采样系统连接红外气体分析仪对气室中的CO₂进行连续测定。动态气室法通常包括动态密闭气室法和动态红外气体分析法(动态IRGA法),一般认为动态气室法比静态法更能准确地测定土壤呼吸的真实速率。因此,它更适于测定瞬时和整段时间CO₂排放速率。动态气室法部分解决了密闭气室法应用过程中存在的问题,将箱体在两端开口后,通过测量入口处和出口处气体浓度的变化,计算被测表面的气体通量(侯琳等,2006)。但此方法对箱体内外的气压和被测气体的浓度要求很高,因此应用较为局限。对于静态气室法和动

态气室法的测量精度问题,研究者也做了大量的对比研究。动态方法得到的结果的精确率比静态方法要高10%~40%(Eve等,1979),它能较好地反映土壤呼吸的实际水平,且可连续测量土壤呼吸的变化过程,今后动态IRGA法将是测量土壤呼吸的主导方向。

3.1.1.3 微气象法

微气象法是依据微气象学原理测定地表气体排放通量,通过测量近地层的气流状况和微量气体的浓度变化来推算土壤CO₂气体的排放通量(侯琳等,2003)。与箱式方法相比,微气象法可测定较大范围内的气体通量,避免了密闭系统带来的限

制, 特别适合测定大尺度内土壤CO₂的排放, 同时对土壤系统几乎不造成干扰。同时, 可获得较长时间内的气体变化规律, 在下垫面均匀且尺度较大的区域内获得的数据具有较好的代表性。但是微气象法对土壤表面的异质性和地形条件要求相对苛刻, 对仪器灵敏度要求较高, 且仪器购买费用非常昂贵, 所以目前还不能完全替代静态箱法的应用。

3.1.1.4 土壤呼吸测定仪器的发展

土壤呼吸测定方法的不唯一性, 导致其测定结果可比性差, 研究成果交流受阻, 因此对测定方法进行统一, 是进行研究结果比较与交流的前提。相比之下, 动态气室法能更好地反映土壤呼吸的真实速率, 适用于大部分土壤类型, 而该方法的缺点是空气流通速率和气室内外的压力差会对测定结果所造成的较大影响(陈宝玉等, 2009)。美国LI-COR公司很好地解决了这一问题, 该公司的第三代产品Li-cor-6400采用透气式的6400-09土壤呼吸室, 使腔室内外的气压处于动态平衡状态。但此方法所需设备昂贵而且必须保证持续的电力供应, 使它在使用和推广上受到一定限制。随着6400-09土壤呼吸室在土壤碳循环研究中的广泛应用, 2004年LI-COR公司在6400-09土壤呼吸室的基础上成功研发出最新LI-8100开路式土壤碳通量测量系统(赵宁伟等, 2011)。此设备或将成为今后土壤呼吸研究的首选。

自动开闭气室法克服了动态密闭气室法早期的各种不足之处, 能够进行长期连续测定和多点测定, 进气口和压力通风口的设计独特, 大大提高了测量的精确度。自动开闭气室法在开发初期是不能搬运的, 而且常常出现气室开闭的机械故障, 但目前已经得到大大改善。LI-COR公司开发的分别适合于单点测定和多点测定的LI-8100和LI-8150测定系统虽然价格比较昂贵, 但其测量准确性、稳定性和使用便利性等方面都达到了较高的水准。因而, LI-COR公司的单点和多点测定系统在测定自然环境条件下的总呼吸速率研究中受到广泛欢迎。可以预测, 该系统将在今后的土壤呼吸测定中占据主导地位。

3.1.2 土壤呼吸各分量的测定

土壤呼吸主要包括根呼吸和基础土壤呼吸。基础土壤呼吸由土壤微生物参与的有机物质矿化、土壤动物呼吸和土壤有机物质的化学氧化分解过程产生(苏永红等, 2008)。一般来讲, 土壤中有有机物质的化学氧化作用很弱, 对土壤呼吸的贡献极小, 而有关土壤动物对土壤呼吸的贡献, 说法不一。此外, 根呼吸的贡献率在不同的生态系统中差异很大, 而且很难和基础土壤呼吸完全分开(Blank等, 1997)。

3.1.2.1 根系呼吸

根系呼吸的直接测定方法有离体根法(Isolated/Invitro Root Methods)、PVC管气室法(Cuvette Methods)、同位素法(Isotopic Methods)等(Blank等, 1997)。

(1) 离体根法 离体根法(Isolated/invitro root methods)是从林木根系中切除待测根后, 在大气或土壤CO₂浓度环境下迅速测定离体根呼吸(侯琳等, 2006; Zogg等, 1996)。该方法操作相对简单, 可以绘制对温度的响应曲线, 常用于森林生态系统中。主要缺点有: 一是破坏性较大, 且出现创伤呼吸; 二是不能重复测定同一样品; 三是由少数根测定结果推算整个生态系统根呼吸存在尺度转换误差问题。

(2) 同位素法 同位素法(Isotopic Methods)消除了对土壤的干扰, 可原位测定根呼吸。同位素法又可分为间歇标记(Pulse Labeling)、重复间歇标记(Repeated Pulse Labeling)和连续标记(Continuous Labeling)。间歇标记和重复间歇标记是通过添加C示踪物测定植物体内标记C的分布和特定时间内植物地上和地下部分呼吸中标记C的丰度变化。它适于生长在密闭气室内的小型植物同化CO₂去向的追踪(Zogg等, 1996)。由于植物中易分解的碳化合物较易标记, 用此法可能高估了根呼吸。连续标记是指在室内或野外条件下, 在植物不同生长季节里加入特殊标记C。连续标记优于间歇标记之处在于它能提供较均匀标记的植物碳, 经常处于稳定状态且容易计算。缺点是不适合研究瞬时植物碳动态, 研究设备笨重且昂贵, 野外应用较困难, 难以区分根呼吸和土壤有机质分解释放的CO₂(Hanson等, 2000)。

(3) PVC管气室法 PVC管气室法是从树干基部出发沿根生长方向寻找合适的测定根安装PVC管气室。粗根PVC管气室安装完后可连续测定, 细根PVC管气室则只能即安装即测(因细根周转快)。因细根较脆嫩和根际微生物等问题, 测定细根呼吸时有一定难度(Vose等, 2002)。PVC管气室法的优点在于可重复和连续测定同一根样品, 缺点是操作难度大, 工作量较大, 只能测定表层的根, 且安装PVC管气室时经常扰动立地, 干扰根际微环境, 使根系发生栓化。

3.1.2.2 土壤微生物呼吸

常用方法为培养法, 即将测定样品中的土壤微生物经室内培养后, 用Warburg微量呼吸检测仪测定微生物呼吸速率, 微生物数量用稀释平板法测定(中国科学院南京土壤研究所土壤微生物室编, 1985)。这种方法的缺点在于由于根际微生物的活

性极大依赖于根际创造的微域环境,故根际微环境的微生物数量和活性明显高于非根际环境,因此用此方法测定微生物呼吸速率将会低估其呼吸作用(Liebig等,1996)。

3.1.2.3 凋落物分解量

凋落物的分解量通常采用投袋法测定。投袋法是把野外样地中秋季或落叶季节凋落物样品带回室内洗净后,置于80℃恒温箱烘干至恒重,计算落叶的平均含水量,然后再称一定重量的新鲜样品装入尼龙网袋中,记录每袋样品的干重作为分解实验的起始值。根据,将样品平铺于森林立地条件不同的土壤表面,将样袋用尼龙绳系起来并栓在树干基部,然后根据森林立地类型、落叶质地以及季节不同来确定回收测定的时间。每次从各样点分别取出1个样品袋,将样品带回室内,去除杂物,烘干称重,测定消失量及分解速率(王妮等,2002)。

3.2 间接测定法

对于大尺度的研究,直接测定法无法进行,间接推算法则是较好的选择。间接测定法是通过其他参数来估算土壤CO₂释放量,从而推算土壤呼吸速率。例如,土壤总的新陈代谢,可以从净初级生产力中扣除地上食草动物所消耗的能量进行估算。也有研究者用土壤中的三磷酸腺苷(ATP)含量估算土壤呼吸,认为1g土壤呼吸速率与1g ATP质量分数有较明显的线性关系。同时也可通过研究各种影响因子对土壤呼吸的影响,建立回归方程,从而计算出土壤呼吸速率。间接方法需要建立所测指标与土壤间的定量关系,而且这种定量关系一般适用于特定的生态系统,测定的结果也难以和其他方法直接比较,因此不利于大规模推广。

3.2.1 根移走法

首先原位测定土壤呼吸速率,然后分层将样地中的根去掉,将无根土按土层放回原处,用隔离物将无根土与周围环境隔开,待土壤理化性质相对稳定后,测定得到的呼吸速率与土壤总呼吸速率之差,即得到土壤呼吸速率。根移走法不会带入大量死根而影响土壤呼吸速率,还可得到根生物量数据,但对土壤扰动太大,影响了土壤呼吸速率的准确测量(易志刚等,2002)。

3.2.2 开沟法

开沟法也叫土壤折断法。在选定的样地内,首先测定土壤总呼吸,然后在样点边缘开沟,将样地中的根与外界切断而不移走,同时用隔离物将样点与周围环境隔开,3~5个月后样点内的根死亡分解,定期测定该样点内的土壤呼吸速率,最终最稳定的土壤呼吸速率即为无根土壤的呼吸速率,两者相减即得到根呼吸速率(Marshall等,2002)。该方法

与根移走法相比,对土壤扰动较小,对土壤呼吸速率影响较小,最大的缺点是残留在样地中的死根将分解,而且有研究认为根在很长一段时间内不会死亡(Horwath等,2002),结果导致对根呼吸估计偏低。

4 森林生态系统土壤呼吸组分的区分方法

根系呼吸占土壤总呼吸的比例是确定陆地生态系统碳平衡关系和土壤有机碳周转速率的一个关键参数,对准确估计全球变化对土壤碳储量和碳循环的影响至关重要,不过将根系呼吸从土壤总呼吸中分离出来在技术上一直比较困难,主要原因是多数植被根系发达,容易损伤,不便测定,但是基于其重要的生态学意义仍然有很多方法尝试区分它们。

4.1 成分综合法

成分综合法(Component Integration)也称组分合成法,就是将土壤释放的CO₂按不同来源测定不同组分的呼吸速率,然后再将每部分的呼吸速率相加,即得出土壤总呼吸速率(Rakonczay等,1997; Micksa等,2004)。土壤呼吸分为根系、无根土壤和凋落物等不同组成部分,然后分别测定不同组分释放的CO₂量,各组分之和就被认为是土壤呼吸所释放的CO₂总量。许多学者利用该方法测得各组分在森林生态系统中所占的比例,但事实上成分综合法只是基于理论上的假定,实际分组测定时不可能将所有组分完全包括在内,各组分释放CO₂量之和不可能完全等于原位测定土壤呼吸释放总量。这种方法存在如下缺点,土壤各组分的区分过于人为化,某些组分的呼吸不能精确地加以区分,如土壤动物和微生物,一般算在矿质土壤呼吸内或者枯枝落叶层呼吸内;该方法对系统的扰动剧烈,会破坏土壤的自然状态,使各组分的测量结果与真实值有一定的差距,例如把凋落物迁移后,土壤表层的水分状态就会改变,从而对呼吸产生一系列的影响,因此这种方法在实践中很少被应用(刘立新等,2004)。

4.2 根去除法

根去除法(Root Exclusion)是一种间接测定根系呼吸的方法,通过测定有根和无根情况下的土壤呼吸通量来推算根系呼吸量(Johnson等,1994)。具体可以分为根移除法、挖沟隔离法和林隙法(林窗分析法)等。根去除法是应用最为广泛的测定法,其优点在于实用简单、成本低、可用于与原位测定结果比较等。这些方法最大的问题就是对土壤的自然性状破坏较大,使土壤的温度、湿度、有机质含量等都发生很大的改变,从而造成土壤微生物呼吸的不确定性。而且对于森林生态系统来说,草本植

物根系细小繁多,很难将根系完全清除,再生幼苗的影响也不能完全避免,诸多因素使得测量结果的精确性受到影响,因此限制了其应用。

4.3 同位素标记法

同位素标记法(Isotope labeling Method)是利用碳的同位素在植物体内和土壤有机物中的差别对根系呼吸和土壤有机物进行区分的方法。放射性的或稳定的碳都可以用来跟踪土壤呼吸的产生。相对于以上两种方法,同位素标记法的优点在于使根和土壤保持原状,可在原位区分根呼吸和土壤有机质分解,避免对土壤的干扰效应和破坏土壤碳库的平衡。因此,同位素标记法是一种能够比较精确测量土壤呼吸的方法,是目前区分森林土壤呼吸中根呼吸最可靠的一种方法。但是目前同位素标记法大多只应用于实验室内,野外的报道很少。一方面原因是昂贵的费用支出,另一方面是实验周期长,分析难度大,不适合研究植物碳动态的短期变化。长时间的辐射还可以使土壤有机物也具有同位素显示,不利于与根系呼吸间的区分(刘立新等,2004;Pper等,1985)。可见,尽管同位素法相对于其它方法有很大的先进性,其测定结果仍存在一定的偏差。

5 研究展望

森林生态系统土壤呼吸是森林土壤碳库向大气碳库输入的主要途径,主要是指植物根系的自养呼吸和土壤微生物的异养呼吸。科学家使用31个大气环流模型进行预估,到2100年全球平均气温将提高1.4~5.8℃,这将造成土壤呼吸速率在其他影响因子不变的前提下,排放更多的CO₂,从而使全球气候更加恶化。随着近年来全球变暖问题的日益加剧,作为自始至终均伴随碳输入的植物光合与碳输出的土壤呼吸的这两个重要的生态过程,已经成为植物生理学家、生态学家、林学家、农学家和土壤学家共同关注的方向和研究的热点。但是由于受到跨学科研究内容差异限制以及学者探讨问题的关注角度的差异,最初的碳循环研究多为纯粹的植物生理学、生态学、林学、农学以及土壤学等单一学科研究,缺乏学科交叉与融合,严重阻碍了碳循环研究的发展(胡海清等,2012b;何学敏等,2012)。这种现象向我们揭示了未来碳循环研究发展的重要方向,亦为进一步的研究开辟新的路径。因此,量化测定森林生态系统土壤呼吸速率及其时空变化规律,对于全球碳平衡预算和全球变化潜在效应估算具有重要意义。然而,由于森林生态系统的异质性和复杂性,对土壤呼吸的影响因子及生态系统间土壤呼吸空间变化规律的研究仍存在局限性,许多关键的过程和机制尚有待进一步探索。

测定土壤呼吸的方法多种多样(表1),不同测定方法都存在着各自的优点与不足。目前,我国土壤呼吸测定仪器基本依赖国外进口,因此我国需在仪器生产方面加强力量。在测定土壤呼吸并计量土壤释放CO₂过程中,由于忽视了影响温室气体排放的植物类型、土壤类型以及气候的差异等,有些年排放量计算建立在少数的几个测点上,甚至有些测定只在某个特定的季节进行,忽视了温室气体排放的季节性和日变化特征,尤其是许多在计量土壤呼吸值时缺乏冬季土壤呼吸数据而假定冬季土壤呼吸为零,这就增加土壤呼吸计量的不确定性。提高土壤呼吸测定的精度与准确性,并积极研发适合国内不同地域、不同生态系统的测定仪器设备,制定统一规范的测定方法和测定标准与规程是开展土壤异养呼吸的空间分布格局方面的研究需要解决的迫切问题。各种测量森林土壤呼吸的方法都存在其不足之处,红外CO₂分析仪法是目前测定土壤呼吸最理想的方法,但该法也是基于样地测定数据来推算区域尺度的土壤碳通量,在尺度转换方面仍然有许多工作亟需发展完善,所以如何解决从样地到区域甚至全球范围的尺度转换问题是今后研究的难点和关键所在(栾军伟等,2006;胡海清等,2012a)。土壤呼吸速率受多种因子影响,日波动和季节波动较大,尤其在植物的生长季节,很难掌握其典型变化规律(耿绍波等,2010)。就目前发表论文来看,我国建立起的能实行全年不间断观测的试验点不多,尤其是北方地区,冬季温度过低,仪器容易产生故障,难以获取非生长季节土壤呼吸的完整数据。并且在已有的观测中,夜间的土壤呼吸数据极少,经常忽略夜间的土壤呼吸而仅仅研究白天的土壤呼吸变化规律,因此在解决全年不间断观测之前,需要加强夜间观测测定以及非生长季连续观测测定,实现全年全天候的观测数据的定量测定。

尺度转化问题是估算区域及全球土壤呼吸的难点问题。当前利用各种测定方法测定土壤呼吸也是基于样地测定数据来推算区域尺度的土壤碳通量,所以如何解决从样地到区域甚至全球尺度的转换问题是今后研究的难点所在(胡海清等,2012)。如何实现观测结果的尺度提升及外延扩展,是碳通量界面临的难点之一。遥感技术及地理信息技术的发展,为解决这一难题提供了思路。目前的遥感技术可以比较准确地估算地表温度和植被覆盖度等信息,但准确估算地表碳通量和土壤碳通量还有很大难度。加强尺度转化的理论与实践研究,实现尺度间的合理转换将是今后关注的热点与研究的难点问题,在以后的研究中需加强“3S”的应用,实现

多时相多角度的观测。

目前,在森林生态系统中,土壤微生物呼吸以及植物根系呼吸成为土壤呼吸研究中的重要组成部分,尤其是一直作为研究难点的植物根系呼吸与土壤微生物呼吸的区分问题近年来逐渐倍受关注。目前,区分土壤根系呼吸与微生物呼吸的方法与技术还处于探索性研究阶段,很多干扰因素尚无法克服,不同方法间的数据结果也存在较大的差异,而具体的对比试验相对较少,因此很难确切说明哪种方法更具优越性。同位素标记法在理论上比较合理,但分析的难度和较大的开支限制了该研究方法的广泛应用,也有人认为根去除法可行,其数据结果的变动范围不大,但由于在去除根的过程中对土壤环境造成较大扰动,导致破坏了原来的环境,使得测定的数据存在一定的误差。因此,只有准确和科学有效地区分土壤各呼吸组分,才能精确了解土壤呼吸的本质,正确反馈其对环境及全球变化的作用以及变化趋势。

综上所述,土壤呼吸定量化测定问题是森林生态系统碳循环实验研究中迫切需要解决的一个关键问题。尽管许多科学工作者在这方面做了大量的工作,但研究领域仍然存在许多空白点,要充分认识到森林生态系统与之的交互关系,就需要针对不同的森林群落进行大量的野外定位实验研究工作,而不能只局限于对某几个样点的临时研究,而应进行长期连续的测定。同时,在呼吸通量测定方面,也不能只对短期流量、季节动态及相应的影响因子进行分析,而应该从生态系统整体及碳循环过程的整体出发,测定并计算土壤呼吸的年度总量数据资料,并综合考虑未来全球气候变化和人类活动干扰的可能影响,这均需世界各国研究者的通力合作。在土壤呼吸定量化测定问题上,尤其重要的是加强土壤呼吸测定方法研究,实现测定方法的科学性与可操作性。

参考文献:

BLANKE M M, BARRITT B H, KAPPEL F. 1997. Contribution of soil respiration to the carbon balance of an apple orchard [J]. *Acta Hort.*, 451: 337-341.

BOWDEN R D, NADELHOFFER K J, BOONE R D, et al. 1993. Contribution s of above ground litter, below ground litter, and root respiration to interperate mixed hardwood forest[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 23: 1402-1407.

EVE K V, COYNE P I, GOODWIN E, et al. 1979. A comparison of four methods for measuring respiration in organic material[J]. *Soil Biol. Biochem.*, 11: 237-246.

HANSON P J, EDWARDS N T, GARTEN C T, et al. 2000. separating root and microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations[J]. *Biochemistry*, 48: 115-146.

HORWATH W R, PREGITZER K S, PAUL E A. 1994. ^{14}C allocation in

tree soil systems[J]. *Tree Pysiol.*, 14: 1163-1176.

JOHNSON D, GEISINGER D, WALKER R, et al. 1994. Soil CO_2 , soil respiration, and root activity CO_2 fumigated and nitrogen fertilized ponderosa pine[J]. *Plant soil*, 165: 129-138.

LIEBIG M A, DORAN J W, GARDNER J G. 1996. Evaluation of a field test kit for measuring select soil quality indication [J]. *Agro J.*, 88(4): 683-686.

LUO YIQI, ZHOU XUHUI. 2007. 土壤呼吸与环境[M].姜丽芬, 曲来叶, 周玉梅, 等, 译. 北京: 高等教育出版社, 1-10.

MARSHALL J D, PERRY D A. 1987. Basal and maintenance respiration of nonmycorrhizal root system of conifers[J]. *Can. J. For. Res.*, 17: 872-877.

MICKSA P, ABER J D, BOONE R D, et al. 2004. Short term soil respiration and nitrogen immobilization response to nitrogen applications in control and nitrogen-enriched temperate forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 196: 57-70.

PPER W P JR, EWEL K C, RAICH J W. 1985. The measurement of oil CO_2 evolution in situ[J]. *Pedobiologia*, 28: 35-40.

RAICH J W, POTTER C S. 1995. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils[J]. *Global Biogeochemistry Cycles*, 9: 23-36.

RAICH J W, TUFEKCIOGLU A. 2000. Vegetation and soil respiration: correlation and controls[J]. *Biogeochemistry*, 48: 71-90.

RAKONCZAY Z, SEILER J R, SAMUELSON J. 1997. A method for the in situ measurement of fine root gas exchange of forest trees[J]. *Experiment Botany*, 37: 107-113.

ROBERT E S AND KEITYVAN C. 1985. Relationships between CO_2 evolution from soil substrate temperature, and substrate moisture in four mature forest types in interior Alaska [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 15: 23-28.

SCHLESINGER W H, ANDREWS J A. 2000. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 48: 7-20.

SINGH J S, GUPTA W H. 1977. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems[J]. *Botanical Review*, 43: 449-529.

TAN W, SUN L, HU H, et al. 2012. Effect of fire disturbances on soil respiration of *Larix gmelinii* Rupr. forest in the Daxing'an Mountain during growing season[J]. *African Journal of Biotechnology*. 11(21): 4833-4840.

VOSE J M , RYAN M G. 2002. Seasonal respiration of foliage, fine root, and woody tissues in relation to growth, tissue N, and photosynthesis[J]. *Global Change Biology* , 8 :164-175.

ZOGG G P, ZAK D R, BURTON A J, et al. 1996. Fine root respiration in northern hardwood forests in relation to temperature and nitrogen availability[J]. *Tree Physiology*, 16: 719-725.

陈宝玉,王洪君,杨建,等.2009.土壤呼吸组分区分及其测定方法[J].东北林业大学学报, 37(1):96-99.

陈高娃. 2012. 兴安落叶松林土壤温室气体通量特征研究[D].呼和浩特: 内蒙古农业大学.

崔晓勇, 陈佐忠, 陈四清. 2001. 草地土壤呼吸研究进展[J]. 生态学报, 21(2): 315-314.

董云社, 彭公炳, 李俊. 1996. 温带森林土壤排放 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 时空特征[J]. 地理学报, 51(增刊): 120-128.

方晰, 田大伦, 项文化. 2005. 杉木人工林林地土壤 CO_2 释放量及其影响因素的研究[J]. 林业科学, 41(2): 1-7.

房秋兰, 沙丽清. 2006. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸[J]. 植物生态学报, 30(1): 97-103.

高亚琴. 2009. 黄土高原农田退耕还草对土壤碳、氮库及 CO_2 、 N_2O 排放通量的影响[D].兰州: 甘肃农业大学.

耿绍波, 饶良懿, 鲁绍伟,等.2010. 国内应用 LI-8100 开放式土壤碳通量测量系统测量土壤呼吸研究进展[J].内蒙古农业大学学报: 自然科

- 学版,31(3):309-316.
- 郭婷. 2006. 皇甫川五分地沟小流域不同土地利用方式下土壤呼吸特征的研究[D].呼和浩特: 内蒙古大学.
- 何学敏, 吕光辉, 秦璐, 等. 2012. 艾比湖地区棉花与芦苇群落光合和土壤呼吸特性对比整合初探[J]. 新疆农业科学, 49(8):1509-1518.
- 侯琳, 雷瑞德, 王得祥, 等. 2006. 森林生态系统土壤呼吸研究进展[J]. 土壤通报, 37(3):589-594.
- 胡海清, 魏书精, 金森, 等. 2012a. 森林火灾碳排放计量模型研究进展[J]. 应用生态学报, 23(5):1423-1434.
- 胡海清, 魏书精, 孙龙. 2012b. 大兴安岭2001-2010年森林火灾碳排放的计量估算[J]. 生态学报, 32(17):5373-5386.
- 胡海清, 魏书精, 孙龙. 2012c. 1965-2010年大兴安岭森林火灾碳排放的估算研究[J]. 植物生态学报, 36(7):629-644.
- 姜丽芬, 石福臣, 王化田, 等. 2004. 东北地区落叶松人工林的根系呼吸[J]. 植物生理学通讯, 40(1): 27-30.
- 蒋高明, 黄银晓. 1997. 北京山区辽东栋林土壤释放CO₂的模拟实验研究[J]. 生态学报, 11(5): 477-482.
- 李玉宁, 王关玉, 李伟. 2002. 土壤呼吸与碳循环[J]. 地学前缘, 9(2): 351-356.
- 梁宇. 2009. 针阔混交林带退化生态系统的土壤呼吸响应研究[D]. 长春: 东北师范大学.
- 刘建军, 王德祥, 雷瑞德, 等. 2003. 秦岭天然油松、锐齿栎林地土壤呼吸与CO₂释放[J]. 林业科学, 39(2): 8-13.
- 刘立新, 董云社, 齐玉春. 2004. 草地生态系统土壤呼吸研究进展[J]. 地理科学进展, 23(4): 35-42.
- 刘绍辉, 方精云. 1997. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响[J]. 生态学报, 17(5): 469-476.
- 栾军伟, 向成华, 骆宗诗, 等. 2006. 森林土壤呼吸研究进展[J]. 应用生态学报, 17(12):2451-2456.
- 罗辑, 杨忠, 杨清伟. 2000. 贡嘎山东坡峨嵋冷杉林区土壤CO₂排放[J]. 土壤学报, 37(3): 402-409.
- 骆士寿, 陈步峰, 李意德, 等. 2001. 海南岛尖峰岭热带山地雨林土壤和凋落物呼吸研究[J]. 生态学报, 21(12): 2013-2017.
- 莫江明, 方运霆, 徐国良, 等. 2005. 鼎湖山苗圃和主要森林土壤CO₂排放和CH₄吸收对模拟N沉降的短期响应[J]. 生态学报, 25(4): 682-690.
- 齐永昌. 2012. 干旱区绿洲果林土壤呼吸特征及影响因素研究——以阿克苏地区温宿县佳木斯试验站果林为例[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学.
- 齐志勇, 王宏燕, 王江丽, 等. 2003. 陆地生态系统土壤呼吸研究进展[J]. 农业系统科学与综合研究, 19(2): 116-119.
- 冉景丞, 何师意, 曹建华. 2001. 亚热带森林岩溶区土壤CO₂迁移动态初步研究[J]. 贵州地质, 18(4): 247-252.
- 沙丽清, 郑征, 唐建维, 等. 2004. 西双版纳热带季节雨林的土壤呼吸研究[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 34(增刊): 167-174.
- 苏永红, 冯起, 朱高峰, 等. 2008. 土壤呼吸与测定方法研究进展[J]. 中国沙漠, 28(1): 57-65.
- 孙向阳, 乔杰, 谭笑. 2001. 温带森林土壤中的CO₂排放通量[J]. 东北林业大学学报, 29(1): 34-39.
- 汪业勳, 赵士洞, 牛栋. 1995. 陆地土壤碳循环的研究动态[J]. 生态学杂志, 18(5): 29-35.
- 王爱东. 2009. 东祁连山高寒灌丛与草甸生态系统CO₂释放速率研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学.
- 王传宽, 杨金艳. 2005. 北方森林土壤呼吸和木质残体分解释放出的CO₂通量[J]. 生态学报, 25(3): 633-638.
- 王鹤松. 2007. 华北石质山区典型人工林土壤呼吸特征的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院.
- 王森, 姬兰柱, 李秋荣, 等. 2003. 土壤温度和水分对长白山不同森林类型土壤呼吸研究[J]. 应用生态学报, 14(8): 1234-1238.
- 王妮, 郭继勋. 2002. 东北松嫩平原羊草群落的土壤呼吸与枯枝落叶分解释放的CO₂的贡献量[J]. 生态学报, 22(5): 655-660.
- 魏书精, 胡海清, 孙龙, 等. 2011. 气候变化背景下我国森林防火工作的形势及对策. 森林防火, (2):1-4.
- 魏书精, 罗碧珍, 孙龙, 等. 2013. 森林生态系统土壤呼吸时空异质性及影响因子研究进展[J]. 生态环境科学, 22(4): 689-704.
- 魏书精, 孙龙, 魏书威, 等. 2013. 气候变化对森林灾害的影响及防控策略[J]. 灾害学, 28(1):36-64.
- 魏书精. 2013. 黑龙江省森林火灾碳排放定量评价方法研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学.
- 吴仲民, 曾庆波, 李意德, 等. 1997. 尖峰岭热带森林土壤C储量和CO₂排放量的初步研究[J]. 植物生态学报, 21(5): 416-423.
- 肖复明. 2007. 毛竹林生态系统碳平衡特征的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院.
- 杨金艳, 王传宽. 2005. 东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量[J]. 生态学报, 25(11): 2877-2882.
- 杨玉盛, 陈水光, 董彬, 等. 2004. 格氏栲天然林和人工林土壤呼吸对干湿交替的响应[J]. 生态学报, 24(5): 954-958.
- 杨玉盛, 董彬, 谢锦升, 等. 2004. 林木根呼吸及测定方法进展[J]. 植物生态学报, 28(3): 426-434.
- 易志刚, 蚁伟民, 周丽霞. 2003. 土壤各组分呼吸区分方法研究进展[J]. 生态学杂志, 22(2): 65-69.
- 易志刚, 蚁伟民. 2003. 森林生态系统中土壤呼吸研究进展[J]. 生态环境, 12(3): 361-365.
- 张连举, 王兵, 刘苑秋. 2007. 大岗山四种林型夏秋季土壤呼吸研究[J]. 江西农业大学学报, 29(1): 72-84.
- 赵宁伟, 郜春花, 李建华. 2011. 土壤呼吸研究进展及其测定方法概述[J]. 山西农业科学, 39(1):91-94.
- 中国科学院南京土壤研究所土壤微生物室编. 1985. 土壤微生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社.

Methods of measuring of soil respiration in forest ecosystems: A review

WEI Shujing¹, LUO Bizhen¹, WEI Shuwei², WEN Zhengmin², SUN Long¹, HU Haiqing¹

1. Guangxi Scientific Experiment Center of Mining, Metallurgy and Environment, College of Civil and Architecture Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;

3. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

Abstract: Forest ecosystems are the main terrestrial ecosystems. It is the largest vegetation- and soil carbon pools, and its carbon fluxes and changes in carbon stocks have a decisive influence on the global carbon budget. Soil carbon plays an important role in

global carbon cycle and carbon balance. Soil respiration is hot topic in the area of carbon cycle research. Soil respiration is a key link in the forest ecosystem carbon cycle, the output of the main ways of the forest ecosystem carbon to the atmosphere, important ecological processes of energy flow and material cycling in forest ecosystems, soil respiration has become a terrestrial ecosystem to the largest source of atmospheric emissions of CO₂, the system plays an important role in regional and global carbon cycle. With the intensification of global climate change, the role of forest soil respiration in the global carbon balance has aroused widespread concern. Scientific and effective way to strengthen the forest soil respiration determination of quantitative research have important significance for understanding the status of forest soil respiration in the global carbon cycle and carbon balance and forest soil carbon sequestration effect. This article illustrates the research advances of the forest soil respiration, a variety of measurement methods of soil respiration, compared the advantages and disadvantages of the static chamber method and dynamic chamber method, although the measurement of forest soil respiration deficiencies, but currently the best method is a dynamic infrared gas analysis method, one of the most reliable method, and elaborated the distinction of forest ecosystem components of soil respiration. Finally, we discuss the problems of forest ecosystems determination of soil respiration, and look determination of trends in soil respiration and further research directions.

Key words: forest ecosystem; soil respiration; methods of measurement; autotrophic respiration; heterotrophic respiration