

文章编号 1001-8166(2004)增-0491-05

土壤呼吸研究进展

马秀梅^{1,2} 朱波 韩广轩¹ 陈玉成² 高美荣¹ 张中杰²

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 四川 成都 610041;

2. 西南农业大学 重庆 400716)

摘要 根据近些年国内外文献资料,综合分析介绍了土壤呼吸的研究进展情况。土壤呼吸是个复杂的生物化学过程,土壤释放的 CO_2 具有一定的时空特性,土壤呼吸受多种因素影响,不但受生物因素(植被净初级生产力和凋落物及微生物等)影响,还受环境因素(温度、土壤水分、气候等)的影响。近年来人类活动改变了土地利用和土地覆被,很大程度上影响了土壤呼吸。土壤呼吸通量是直接测定从土壤表层释放的 CO_2 通量,测定方法也逐渐由静态气室法向动态气室法完善。作者认为,土壤呼吸及其影响因素之间的数量关系,区域及全球土壤呼吸释放 CO_2 总量和 C 减排对策是未来的研究方向。

关键词 土壤呼吸;测量方法;排放特性;影响因素;研究展望

中图分类号 S15 文献标识码 A

土壤呼吸严格意义上讲是指未受扰动土壤中产生 CO_2 的所有代谢作用,它包括3个生物学过程(即土壤有机质的分解和土壤微生物的呼吸、植物的根系呼吸、及土壤动物的呼吸)和一个非生物学过程,即含碳矿物质的化学氧化作用等^[1]。所以说土壤呼吸是土壤环境中生物学和生物化学综合作用的结果,而土壤 CO_2 排放是一个物理扩散过程,两者作用的桥梁就是土壤空气中的 CO_2 含量,由于土壤中生物的呼吸作用和有机质的分解,不断消耗 O_2 和放出 CO_2 ,使得土壤空气中 CO_2 含量比空气中高出几十甚至几百倍,一部分以气体扩散和交换的方式进入近地面空气层,供植物叶子吸收,构成了土壤—大气之间的交换模式。

1 土壤呼吸的生物化学原理

一般认为土壤 CO_2 排放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(即异氧呼吸, RH)及植物根系呼吸(自养呼吸, RA)两大部分。有机质进入土壤后,在微生物酶的作用下发生氧化反应,彻底分解而最终释放 CO_2 、 H_2

和能量,剩余的部分被微生物用于自身的合成,这一过程就是土壤微生物的异氧呼吸。 CO_2 的释放速率是衡量土壤微生物活性的重要指标;植物体中除绿色细胞可以直接利用光能外,其他生命活动所需能量均依赖于呼吸作用,根系通过呼吸作用把光合作用合成的碳水化合物氧化分解,释放出能量和 CO_2 ,这一过程就是植物根系的自养呼吸;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,故研究的也不多,但是关于甲烷在水稻根际及土壤和灌溉水交界面两个区域^[2]的氧化却很多,水稻田土壤中甲烷的氧化包括厌氧氧化和有氧氧化过程,主要的是有氧氧化过程,最终生成 CO_2 ,这一过程则属于含碳物质的化学氧化作用。

2 土壤呼吸的测定方法

土壤呼吸通量决定了土壤中碳素周转速度,也反映了凋落物碎屑的生产与输入特点和根系呼吸量的水平。土壤呼吸量通常是通过直接测定从土壤表面释放出的 CO_2 量来确定的。测定土壤呼吸量的技

收稿日期 2004-04-10.

* 基金项目 中国科学院知识创新工程重大项目(编号:KZCX1-SW-01-01B) LAC开放室基金资助.

作者简介 马秀梅(1978-),女,辽宁人,硕士研究生,主要从事碳循环方面的研究. E-mail: bzhzhu@imde.ac.cn

术有多种并在不断完善,常用的测定方法和技术有:

2.1 静态气室法

通过碱液(KOH/NaOH)吸收CO₂,标定一定时间间隔内的土壤呼吸量,即为传统的土壤释放CO₂速率测定方法之一^[3-5]。其原理是将一定浓度的碱液装入开敞的玻璃罐瓶中,放置在测定的土壤表面上,用一个上端密闭的金属圆桶罩住(下端嵌入土中至少2cm),当CO₂从土壤表面释放出来时,被保持在圆桶内并扩散,以过量的碱液(KOH/NaOH)吸收土壤所释放的CO₂,用BaCl₂沉淀后再用HCl滴定(耗去体积为V₁mL),同时做空白实验用去盐酸V₂mL,得出土壤释放的CO₂量为M(mmol)=(V₂-V₁)N·E/2N,为盐酸的摩尔浓度,E为摩尔质量。此法虽然因其简便、经济等优点沿用至今已有70余年,但其最大的缺陷是不能进行短时间内连续测量;此外,研究还表明碱液吸收法由于滴定等误差导致结果低于或高于红外气体交换的情况^[3-5],因而有局限性,并且随着科学技术的发展,碱吸收法将很快被取缔。

2.2 静态箱—气相色谱法

利用密闭的静态箱收集土壤表面释放的CO₂,通过气相色谱技术分析测定CO₂浓度,利用静态箱内CO₂浓度随时间的变化,便可以计算出土壤CO₂的排放速率,通量计算公式一般表达为:

$$F = m / t \cdot D \cdot V / A = h D \cdot m / t$$

(F为CO₂通量mg/(m·h),h是箱高p为箱内气体密度D=p/RT,p为箱内气压,T为箱内气温,R为气体常数,m/t是CO₂浓度在观测时间内随时间变化的直线斜率)。这是目前国际国内广泛使用的比较经济可靠的通量测量方法^[6],应用此法,还可以通过对箱内保留植物与否的对比采样,分析单纯土壤排放以及与植物呼吸共同作用的结果对比^[7]。这一技术的不足之处在于它的使用明显地改变了被测地表的物理状态;另外,人为扰动很大影响了测量结果。但是作为一种简便的方法,在大气化学的研究中得到了广泛的应用^[8]。

2.3 动态气室法

通过一个密闭或气流交换式的采集气体系统连接红外线气体分析仪(IRGA)对气室中产生的CO₂进连续测定,目前被认为是最为理想的测定方法^[9]。密闭箱的土壤呼吸通量计算公式为Q=(c/t)·V/A=(c/t)·h,式中c为时间间隔t的箱内CO₂的浓度差(μmol/m³),h为箱高(m)。开放箱是测量箱子进气口和出气口浓度差值而计算

释放量Q=(c/A)·f,c为进出气口的浓度差值(μmol/m³),f为流经箱子的空气速率(m³/s),A为被测土壤面积(m²)。两种方法都影响土壤表面的微环境,特别是温度和气压,可乘系数κ来修正κ=(Pc/Ps)(273.16/273.16+Tc)式中Pc为箱内气压,Ps为标准气压(1013.25hPa),Tc为箱内温度(°C)。

2.4 各测量方法的比较

不同的测量方法得出的结果存在很大差异: Bekku等^[10]在室内模拟实验中用了4种方法:AA(碱吸收法);OF(动态开放式气流法);CC(密闭式箱法);DC(动态式密闭箱法)。研究发现AA法过高估计了土壤呼吸速率的值,并且根据土地类型不同,过高估计的值不同,而另外3种方法所测得的值却很接近。当前我们使用密闭箱法和动态气室法测定农林复合生态系统的土壤呼吸通量,结果发现用密闭箱法测得的结果稍小于动态气室法,可能是后者受土壤—大气气体交换速度的影响而造成的。

3 土壤CO₂排放的基本特性

土壤呼吸是个复杂的生物学过程,受多种因素的限制,这使得土壤CO₂排放一方面具有某种规律性,另一方面又表现出不规则的变化。大量的研究证明^[11,12]土壤CO₂排放具有明显的日变化和季节变化规律,通常不同植被下的土壤呼吸通量是:林地>作物及人工草地>裸地,不同土地利用方式的土壤呼吸通量是:耕地>未被扰动的土壤;另外从作物发育期看,植物旺盛生长期土壤CO₂排放通量高于发育后期,很显然,生长盛期植物根系活动强,呼吸旺盛所导致;从环境条件看,大气低的CO₂浓度和气压降低了土壤气体的扩散阻力,加快了土壤呼吸,而在土壤呼吸的主要影响因素温度和水分互相成为限制因子的时候,土壤CO₂排放是毫无规律的。

3.1 温度作用下的土壤呼吸

土壤CO₂释放的日变化规律主要是气温变化的结果,CO₂排放速率的日均值与气温、地表温度呈显著的相关关系^[13-15]。一天中的最高气温出现在下午2:00左右,而土壤呼吸的高峰期则滞后于最高气温,因为真正起作用的是土壤温度而不是气温,所以土壤温度达到高峰期是需要一个热传递过程的,根据土地所覆植被类型不同其滞后时间也不等,草地和农田作物的滞后时间约为2~4h,而森林土壤的土壤呼吸日高值大约相对气温滞后6h^[14]。王跃思等^[12]对内蒙古草原的3种典型草原(天然羊草草

原、自由放牧羊草草原、天然大针茅草原)进行了连续两年的观测实验,结果表明所有草原植物生长季节 CO_2 净排放日变化形式均为白天出现排放低值,夜间出现排放高值。

长久以来,人们习惯用 Q_{10} 函数表达温度对土壤呼吸的影响,即温度每升高 10 $^{\circ}\text{C}$ 土壤呼吸速率增加的倍数。通常 Q_{10} 被认为是常数($Q_{10} = 2$),但不同的生态系统和不同的地理位置它的值不同。尤其是近年来的温室效应导致了全球增温,更加导致了 Q_{10} 值的变异。在中纬度地带土壤温度上升,短时期内将增加土壤有机质的矿化速率,反过来释放刺激光合作用、叶面积增加和树木生长的营养物质^[17],然而, Luo 等^[18] 实验证明:在土壤升温作用更长时间之后,土壤呼吸将适应温度的上升,逐渐稳定并接近初始速率,所以在气候变暖的今天温暖地区 Q_{10} 较低,而在寒冷气候区的 Q_{10} 值却高达 4.6^[19],正是由于 Q_{10} 的变异性对于估算整个生态系统总碳收支上产生了很大的差异。

另外,国内外研究者们通过长期观测还得出了一些土壤呼吸与温度的定量关系。

Kucera^[20] 等在 1968—1970 年得出下列回归方程

$$\ln y = a + b \ln(T + 10) \quad (1)$$

(1) 式中: y 为土壤 CO_2 释放量; a 为常数; b 为温度系数(10~30 $^{\circ}\text{C}$ 时取 1.6~2.3); T 为土壤温度($^{\circ}\text{C}$)。

Mathes^[21] 等通过实验得出回归方程

$$Y = a + bx^2 \quad (2)$$

(2) 式中: Y 为土壤 CO_2 释放量; x 为土壤温度; a 、 b 为统计常数。并且认为 x 值用地表下 5cm 处的温度比用地表温度效果要好些^[22]。

吴仲民等^[23] 研究尖峰岭热带森林土壤 CO_2 排放量发现林地 CO_2 的排放率(R_s)与地表温度(T)之间具有极显著的指数函数相关关系,相关系数 $r = 0.89$,两者之间可用如下函数关系式表示:

$$\ln R_s = 0.7531808 + 4.754104E - 02 T \quad (3)$$

3.2 温度和土壤水分共同作用下的土壤呼吸

土壤呼吸的季节动态是温度和土壤水分共同作用的结果。一年中最高气温出现在 8 月,土壤呼吸的高峰期也出现在 8 月。另外 8 月正是植被生长最旺盛的季节,不但植株呼吸作用增强了,其根系也随着光合作用的增强而变得发达,所以根系呼吸也相应增强。同时 8 月是温度和雨水最充沛的季节,为土壤微生物提供了良好的生存环境,提高了其活性,

增强了土壤呼吸。Monteith 经长期观测也发现:冬季 CO_2 释放较少,初春后逐渐增加,当 8 月份土温升到最高时, CO_2 释放量最大。

很多研究者的研究证实^[21~23],在土壤水分含量充足、不成为限制因素的条件下土壤呼吸与土壤温度呈正相关。而在水分含量成为限制因子的干旱、半干旱地区,水分含量和温度共同起作用,因为水的热容量很大,对土壤温度影响很大,水分过多则会限制温度的作用,同样,水分过少也限制温度对土壤呼吸的作用,因此在沼泽、积水、冻原和湿地等生态系统中土壤呼吸与温度的关系是非线性的。

3.3 生物因素对土壤呼吸的影响

由于土壤微生物的活动依赖于植物地上部分和根系输入的有机物,并且植物根系是土壤呼吸的重要组成部分,因此植被及地表覆被的凋落物对土壤呼吸的影响是十分重要的。裸地土壤 CO_2 释放量之所以较林地、草地少,是因为植被的多重作用造成的,植被的覆盖不但可以使土层蒸发减少,致使土层湿度较大,植被还改善了土层结构,使土层疏松多孔;另外植被在土层中产生了很多有机质,为微生物提供了能源,促进了微生物的活性,增加了土壤中 CO_2 的含量,进而提高了土壤 CO_2 释放。

人类活动的影响导致大气 CO_2 浓度上升,对于植物生长而言是有益的,其施肥效应和抗蒸腾效应有利于植物生物量的提高,这必将引起植物碎屑向土壤的更大传输,从而改变植物的年回归土壤的植物碎屑量,其中一小部分将保持未分解状态而为大气 CO_2 的汇作贡献。然而,土壤呼吸的作用也相应增加了,在许多土壤中,微生物类群受土壤有机质基质的可利用性的限制,如果给予它们更多的基质,微生物将更容易分解有机质,即增加了来自土壤微生物分解有机质释放的 CO_2 。当然,这在北方森林中是个例外,在那里,寒冷的温度抑制了微生物的分解作用,与此同时,大量的植物碎屑积累在土壤中,因此,变化的气候和高的大气 CO_2 浓度对土壤碳吸存(sequestration)是高度相互作用和复杂的^[20]。

3.4 土地利用变化对土壤呼吸的影响

土地利用变化是影响陆地碳源和碳汇变化的主要因素,全球土地利用变化资料表明,在过去 2 个世纪,陆地生态系统排放的碳量占人类活动释放 CO_2 总量的 1/2^[24]。根据 Houghton^[25] 的估算,全世界在 1850—1980 年期间因土地利用变化而导致的 CO_2 释放总量为 120 Pg,年释放量由 1850 年的 0.4 Pg/a 增加到 1990 年的 1.7 Pg/a,其中大约 1/3 释放量来

自开垦所致的土壤有机质流失,其余 2/3 则来自于植物生物量氧化(燃烧或分解)。

不同的土地利用方式(如耕作、排灌条件的改变等)不仅改变了地表植被,而且改变了土壤透气性,从而使土壤有机质含量、微生物的组成和活性、根生物量等发生改变,相应的土壤呼吸也大不相同。其中最严重的干扰就是将自然植被转变成了耕地,一是新鲜植物碎屑的输入量较以前减少,二是耕地破坏了土壤的团粒结构,使稳定的被吸附的有机质易分解,三是耕作为土壤微生物提供了良好的生活条件,提高其活性,促进土壤呼吸。

4 土壤呼吸总量估算

目前,土壤呼吸总量估算一般是通过土壤呼吸通量与温度、湿度、和生物量等相关因子拟合方程而积分得来的。迄今,欧美和日本等发达国家已开展了各种生态系统土壤呼吸的测定,但是他们的测定主要集中在温带地区,低纬度的工作很少见报道,因此,对全球土壤呼吸的估算还缺乏足够的资料;另外由于土壤呼吸的影响因素很复杂,又没有固定的模型可以利用,同时,由于根系和土壤微生物的密切关系,加之地下部分 C 的定量化很难精确获得,所以很难估算出根系呼吸和土壤微生物对有机质的分解作用在土壤呼吸中所做的贡献比,基于以上 3 种原因,以致于在估计陆地生态系统的 CO₂ 排放量时增加了很大的不确定性。尽管如此, Raich 等^[26]还是对全球土壤的呼吸总量进行了十分有意义的概算,按照他们的估算,通过土壤呼吸由全球土壤向大气释放的高达 68 PgC/a,该值相当于人工使用化石燃料向大气释放 CO₂ 量的 1.2 倍。中国仅见极少量的土壤呼吸的系统观测数据,方精云只能依靠国外数据对中国土壤呼吸总碳量作了估算(4.2 × 10⁹ t/a)^[20],而单正军^[20]等则是依据土壤有机质矿化率估算土壤 CO₂ 排放量,而不是土壤中净 CO₂ 排放量。

5 土壤呼吸的研究展望

土壤呼吸作为土壤碳的主要输出途径和大气 CO₂ 重要的源,其精确测定已成为全球变化研究中的关键问题之一。因此深入研究不同陆地生态系统土壤呼吸速率及其时空波动性,阐明控制土壤 CO₂ 释放量的环境因子和人为因素的影响,客观估计区域乃至全球土壤 CO₂ 的排放总量并提出切实可行的土壤固碳措施发挥其强大的碳汇功能乃是未来的研究方向。这些研究方向包括:土壤呼吸的机理研

究,尤其是明确土壤呼吸总量的三个不同来源所占贡献的百分比,这对于控制土壤中的碳损失至关重要;温度和湿度影响下的土壤呼吸很复杂,目前还没有很明确的定量关系来说明这个问题,许多研究者试图得出相关模型,但至今还没有固定的模型可以利用,所以在这方面还需更深入地研究;通过土壤呼吸通量与温度、湿度、和生物量等相关因子拟合方程来推算年排放总量;提出土壤有机碳的固定措施。

参考文献(References):

- [1] Singh J S, Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystem of J. The Botanical Review, 1997, 43: 449-528.
- [2] Sass R L. Methane production and emission in a Texas agriculture wetland [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1990, 4: 47-68.
- [3] Kucera, Kirkham D. Soil respiration studies in tall grass prairie in Missouri [J]. Ecology, 1971, 52: 912-915.
- [4] Coleman D C. Soil carbon balance in a successional grassland [J]. Oikos, 1973, 24: 195-199.
- [5] Anderson J P E. Soil respiration [A]. In: Page A L, ed. Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties [C]. Madison W I. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1982. 485-500.
- [6] Wassmann R, Neue H U, Lantin R S, et al. Temporal patterns of methane emissions from rice fields treated by different modes of N application [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99: 457-462.
- [7] Yu Guirui (于贵瑞). Global Change, Carbon Cycling and Stock in Terrestrial Ecosystem [M]. Beijing: Meteorology Press, 2003.
- [8] Wen Yupu (温玉璞), Tang Jie (汤洁), Shao Zhiqing (邵志清), et al. A study of atmospheric CO₂ concentration variation and emission from the soil surface at Mt. Wailiguan [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1997, 8: 129-136.
- [9] Li Linghao (李凌浩), Chen Zuozhong (陈佐忠). Soil respiration in grass community [J]. Chinese Journal of Ecology, 1998, 17: 45-51 (in Chinese).
- [10] Bekku Y, Koizumi H, Oikawa T, et al. Examination of four methods for measuring soil respiration [J]. Ecology Research, 1997, 8: 65-71.
- [11] Jiang Gaoming (蒋高明), Huang Yinxiao (黄银晓). A study on the measurement of CO₂ emission from the soil of the simulated Quercus Liaotungensis forest sampled from Beijing mountain areas [J]. Acta Ecologica Sinica, 1997, 17(5): 477-482.
- [12] Cui Xiaoyang (崔晓勇), Wang Yianfen (王艳芬). A preliminary study of soil respiration from typical plant communities in the Inner Mongolia [J]. Acta Agrestia Sinica, 1999, 7(3): 245-250 (in Chinese).
- [13] Luo Ji (罗辑), Yang Zhong (杨忠), Yang Qingwei (杨清伟). CO₂ emission from soils in Abies Fabri forest region on the east

- slope of Gongga Mountain [J]. *Acta Pedologica Acta* ,2000 ,37 (3) :402-409 (in Chinese) .
- [14] Zhao Jingbo (赵景波) , Du Jun (杜娟) , Yuan Daoxian (袁道先) , et al. Release quantity of CO₂ from soils in Xian [J]. *Environmental Science* ,2002 ,23(1) :22-25 (in Chinese) .
- [15] Wei Changzhou (危常州) , et al. Study on green house gasses release from agricultural soils [J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)* ,2001 ,5 (4) :267-270 (in Chinese) .
- [16] Shen Renxing (沈壬兴) , Shanguan Xingjian (上官行健) , et al. Methane emission from rice field in Guanzhou region and spatial variation of methane emission in China [J]. *Advance in Earth Sciences (地球科学进展)* ,1995 ,10 (4) :270 (in Chinese) .
- [17] Boone R D , Nadelhoffer K J , Canary J D , et al. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration [J]. *Nature* ,1998 ,396 :570-572 .
- [18] Luo Yiqi. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie [J]. *Nature* ,2001 ,413 :622-625 .
- [19] Fang Jingyun (方精云) . *Global Ecology [M]* . Beijing : China Higher Education Press ,2000 .12 .
- [20] Joukosllvola. CO₂ fluxes from peat in boreal mires under varying temperature and moisture conditions [J]. *Journal of Ecology* ,1996 ,84 :219-229 .
- [21] Yang Ping (杨平) , Du Yuhua (杜玉华) . Foreign Research trends on soil CO₂ emission [J]. *China Agricultural Meteorology* ,1996 ,17 (1) :48-50 (in Chinese) .
- [22] Li C S. Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems [J]. *Nutrient Cycling in Agro-ecosystems* ,2000 ,58 :259-276 .
- [23] Wu Zhongmin (吴仲民) , Zeng Qingbo (曾庆波) , Li Yide (李意得) . A preliminary research on carbon storage and CO₂ release of the tropical forest soils in Jianfengling Hainan Island , China [J]. *Acta Phytocologica Sinica* ,1997 ,21(5) :416-423 (in Chinese) .
- [24] Post W M , Peng T H , Emanuel W R. The global carbon cycle [J]. *American Scientist* ,1990 ,78 :310-326 .
- [25] Houghton R A. Changes in the storage of terrestrial carbon since 1850 [A] . In : Lal R , et al. *Soil and Global Change [M]* . Boca Raton Florida , USA : CRC Press ,1995 .45-65 .
- [26] Raich J W , Nadelhoffer K J. Below ground carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship of vegetation and climate [J]. *Tellus* ,1992 ,44B :81-99 .

THE ADVANCE IN RESEARCH OF SOIL RESPIROTIION

MA Xiu-mei^{1,2} , ZHU Bo¹ , HAN Guang-xuan¹ ,
CHEN Yu-cheng² , GAO Mei-rong¹ , ZHANG Zhong-jie²

(1. Institute of Mountain Hazard and Environment , CAS , Chengdu 610041 , China ;

2. Southwest Agricultural University , Chongqing 400716 , China)

Abstract Soil respiration was mainly produced by soil microorganism and plant roots. As a complicate ecological process , soil respiration was affected not only by biological factors (vegetation and microorganism , etc) but also by environmental factors (temperature , moisture , and pH , etc) . With the increasing human impacts , it was influenced more and more strongly by human activities (land-use/land-cover change) . Based on the previous research , main factors of soil respiration and their interrelationships were discussed. Soil respiration efflux was the CO₂ evolution process from soil surface its measuring methods were being improved from static chamber method to dynamic closed chamber method. In the end , it was recommended that further study should be focused on quantitative description between soil respiration and its key factors , estimation of regional and global amount of CO₂ emission , and development of reducing carbon source and increasing carbon sink for soil in the future .

Key words Soil respiration ; Impact factors ; Measuring methods ; Advance in research .