

## 陆地生态系统有机碳储量和碳排放的研究进展

夏雪<sup>1</sup>, 车升国<sup>2</sup>

<sup>1</sup>山东省菏泽市环境保护局, 山东菏泽 274008;

<sup>2</sup>中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

**摘要:** 陆地生态系统土壤有机碳储量和土壤呼吸的微小变化, 会引起大气 CO<sub>2</sub> 浓度的巨大变化以及全球碳循环的明显改变, 从而引起全球气候的巨大变化。提高 SOC 储量、减少土壤 CO<sub>2</sub> 排放对减缓大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高具有重要意义。根据国内外文献数据资料, 综合分析陆地生态系统土壤有机碳储量和土壤呼吸的研究进展, 并对最近土壤呼吸影响因素的研究热点因子, 如土壤温度、土壤水分、大气降水和耕作等进行分析讨论, 指出陆地生态系统碳循环研究中应重点加强土壤呼吸的机理、土壤呼吸影响因素、土壤呼吸模型、土壤固碳措施、减排对策的研究。

**关键词:** 土壤有机碳; 土壤有机碳储量; 土壤呼吸

中图分类号: S181, S154

文献标志码: A

论文编号: 2011-0655

### Advance in Organic Carbon Stock and Carbon Emission in Terrestrial Ecosystem

Xia Xue<sup>1</sup>, Che Shengguo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Environmental Protection Agency of Heze City, Heze Shandong 274008;

<sup>2</sup>Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

**Abstract:** Global warming is one of the urgent environmental problems. Carbon cycle takes a major role in climate changes, which becomes a hot issue interesting more and more scientists. The fractional change of SOC pool and soil respiration may cause violent changes in the climate of the earth. Increasing SOC sequestration and reducing soil carbon dioxide emissions play an important role for relieving global warming. Based on the previous research, the author mainly discusses the research and prospects for soil organic carbon stock and carbon dioxide missions. Meanwhile, the author also analyzes the factors of soil respiration, such as soil temperature, soil water content, atmospheric precipitation and tillage. The author discusses key issues and further tasks, including the mechanism of soil respiration, the factors of carbon emissions, the carbon sequestration and the measures for emission reduction.

**Key words:** soil organic carbon; soil organic carbon stock; soil respiration

### 0 引言

全球碳循环与目前人们面临的主要环境问题——全球变暖密切相关, 其研究对全球气候变化至关重要, 并日益成为公众和科学界关注的热点。大量研究表明, 人类向大气排放的温室气体, 如 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 等是温室效应的主要原因, 其中 CO<sub>2</sub> 对全球变暖的贡献

率高达 70%。过去 100 年间, 大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加了近 25%, 即从工业化前的 280 μL/L 上升至 380 μL/L, 致使全球平均气温上升了约 0.6℃; 预测到 2050 年, 大气 CO<sub>2</sub> 浓度将增至 550 μL/L, 约为工业化前的 1 倍, 可使全球增温 3~4℃, 造成极地冰冻层部分融化, 导致海平面在 100~300 年的时间里上升 5 m, 从而大大减少陆地

**基金项目:** 公益性行业(农业)科研专项经费项目(200903001); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2011-26)。

**第一作者简介:** 夏雪, 女, 1985 年出生, 山东菏泽人, 硕士, 研究方向为农业废弃物资源循环化利用。通信地址: 100097 北京市海淀区曙光花园中路 9 号 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, E-mail: cheshg@163.com。

**通讯作者:** 车升国, 男, 1983 年出生, 山东临沂人, 硕士, 研究方向为土壤碳氮循环。通信地址: 253015 山东省德州市德城区德兴中大道 852 号 中国农业科学院德州试验站, E-mail: cheshg1983@nwsuaf.edu.cn。

**收稿日期:** 2011-03-15, **修回日期:** 2011-08-02。

面积,并对全球生态系统带来灾难性后果<sup>[1-2]</sup>。但是,人类活动在增加大气CO<sub>2</sub>的同时,完全可以通过实施可行性方案,在未来50年内,缓解全球变暖的危机<sup>[3]</sup>。

Pacala等<sup>[3]</sup>提出15条控制大气CO<sub>2</sub>浓度的措施中,有2条涉及土壤固碳,即通过植树造林和农地管理措施来提高土壤固碳能力,增加土壤碳储量。据研究,全球土壤碳储量为2500 Pg,其中土壤有机碳储量约占62%,为1500 Pg,是陆地生物碳库(560 Pg)的2.8倍,是全球大气碳库(760 Pg)的2倍<sup>[4]</sup>。全球土壤呼吸中每年的碳排放量为76.5 Pg,约占大气CO<sub>2</sub>总量的10%,是化石燃料燃烧释放CO<sub>2</sub>的10倍,是输入土壤表层新鲜岩屑的2.3~3.3倍,仅次于全球陆地总初级生产力(CPP)的估算值100~120 Pg,而高于全球陆地净初级生产力(NPP)的量值50~60 Pg<sup>[5]</sup>。土壤有机碳库和土壤呼吸的微量变化也会引起大气CO<sub>2</sub>浓度的巨大变化以及全球C循环的明显改变,从而影响到全球气候变化。Paustian等<sup>[6]</sup>研究表明,通过采用合理的管理措施,农业土壤固碳潜力为0.4~0.9 Pg,直接降低CO<sub>2</sub>排放的潜力为0.01~0.05 Pg,通过生物能源生产替代化石能源的减排潜力为0.5~1.6 Pg。Lal<sup>[4]</sup>研究表明,在历史上因土地利用方式改变和土壤开垦导致的土壤有机碳库的流失量累计为55~78 Gt。通过采用免耕、高效的养分管理、水土流失治理、填闲作物种植等技术措施,土壤有望增加的碳汇量达到其历史时期累计流失量的50%~66%。土壤增加的碳汇可以抵消全球化石燃料排放CO<sub>2</sub>的5%~15%。采用合理管理措施后,全球土壤的固碳潜力有望达到年均0.4~1.2 Gt。通过提高能源的利用效率和合理耕作管理技术,在全球范围内可降低10~50 TgC的CO<sub>2</sub>排放。因此,通过优化土地利用模式、改善土壤和作物管理措施等在农林牧业领域实现节能减排与增汇,具有很大的发展空间<sup>[7-10]</sup>。笔者根据国内外文献数据资料,综合分析陆地生态系统土壤有机碳储量和土壤呼吸的研究进展,并对最近土壤呼吸影响因素的研究热点因子,如土壤温度、土壤水分、大气降水和耕作等进行分析讨论,指出陆地生态系统碳循环研究中应重点加强土壤呼吸的机理、土壤呼吸影响因素、土壤呼吸模型、土壤固碳措施、减排对策等的研究。

### 1 陆地生态系统碳储量研究进展

目前,SOC储量估算通常采用生命土组法、地带类型法、森林类型法、气候参数法、碳拟合法、模型法、土壤类型法和遥感反演法等。20世纪80年代前,国际上主要利用土壤剖面有机碳资料对全球SOC的总库存量进行估算;20世纪80年代后,SOC研究开始应用

各种数学统计方法研究全球碳循环与环境因子的相关关系;20世纪90年代来,随着RS、GIS、GPS和计算机技术的发展,计算机模拟模型成为估算和预测SOC的主要手段。

据统计,全球SOC储量估算值700~2500 Pg之间。Bohn等<sup>[11-12]</sup>早在1976年、1982年分别利用土壤分布图和FAO土壤图187个剖面土壤碳密度值,估算全球SOC储量分别为2946、2200 Pg。Potter等<sup>[13]</sup>根据Century模型计算的全球表层有机碳库为455 Pg。Post等<sup>[14]</sup>通过Holdridge生命带模型和2696个土壤剖面数据,估算1 m深的SOC储量为1395.5 Gt。Batjes<sup>[15]</sup>通过划分世界土壤图得出,全球100 cm土层的SOC储量为1462~1548 Gt。Schleisinger<sup>[5]</sup>根据FAO计算全球SOC储量为1500 Gt。Lal<sup>[4]</sup>近年来采用1500 Pg作为全球土壤总有机碳库的估算值。

国内土壤碳储量研究起步相对较晚,但2次全国土壤普查为中国SOC储量估算提供了大量土壤属性数据资料。由于选用SOC统计方法、数据处理及储量估量方法不同,SOC储量估算值也存在差异,而近年来发表的中国土壤碳库估算值有不断趋近的趋势<sup>[16]</sup>。王绍强等<sup>[17]</sup>根据2次全国土壤普查的土壤类型分布面积、土壤有机质含量等数据,结合地理信息系统技术估算出土壤碳总量为100.18 Pg和92.418 Pg,平均碳密度为10.83 kg/m<sup>2</sup>和10.53 kg/m<sup>2</sup>。李克让等<sup>[18]</sup>利用0.5°经纬网格分辨的土壤、植被和气候数据驱动的生物地球化学模型(CEVSA),估算中国平均SOC密度为9.17 kg/m<sup>2</sup>,土壤碳储量为82.65 Pg。于东升等<sup>[19]</sup>根据中国1:100万土壤数据库,采用“土壤类型GIS链接法”计算中国平均SOC密度为9.60 kg/m<sup>2</sup>,SOC处理为89.14 Pg。

### 2 陆地生态系统碳排放研究进展

土壤CO<sub>2</sub>排放通量,即通常所指的土壤呼吸,是土壤碳排放的主要形式,是土壤碳素同化异化平衡作用的结果。土壤呼吸主要指未受扰动的土壤中产生CO<sub>2</sub>的所有代谢作用,包括3个生物学过程,即土壤微生物呼吸、土壤动物呼吸和植物根系呼吸以及1个非生物学过程,含碳矿物质化学氧化作用的非生物过程的总和,其中土壤动物呼吸量和化学氧化量非常微小,通常可忽略不计。由于土壤呼吸影响因素复杂以及土壤呼吸估算缺乏足够的材料,导致估计陆地生态系统的CO<sub>2</sub>排放量时增加了很大的不确定性。Raich等<sup>[20]</sup>对全球土壤的呼吸总量进行了十分有意义的概算,按照估算通过土壤呼吸由全球土壤向大气释放量高达每年68 Pg,该值相当于人工使用化石燃料箱大气释放CO<sub>2</sub>

的12倍。方精云<sup>[21]</sup>依靠国外数据对中国土壤呼吸总碳量作了估算,为 $4.2 \times 10^9$  t/a。

土壤呼吸发生微小的变化,也会引起大气中 $\text{CO}_2$ 浓度和全球碳循环的明显改变,从而影响到全球气候变化。土壤呼吸过程是一个复杂的生物学过程,又是一个非生物学氧化过程,它不仅受气温、土壤温度、土壤含水量、pH等自然环境田间的影响,还受到植物、土壤动物、土壤微生物等生物因素以及人为因素,如环境污染、土地管理等因素的影响。

### 2.1 土壤水分对土壤呼吸的影响

土壤水分是土壤的重要物理性质,参与植物微生物的许多生命活动,是影响土壤呼吸的一个重要环境因子。土壤水分强烈影响着土壤微生物群落的组成、土壤养分等各种物质的迁移和活性,进而影响土壤呼吸的变动,尤其在干旱半干旱地区土壤水分可能成为限制土壤呼吸的主控因子。在华盛顿东部,干旱草原土壤呼吸速率与土壤水分呈显著正相关<sup>[22]</sup>;而在亚马逊地区,森林和草地土壤呼吸作用与土壤水分显著负相关<sup>[23]</sup>。在亚马逊中部、中国西双版纳的研究,黄土高原旱塬区发现土壤呼吸速率与土壤水分呈显著二次曲线相关<sup>[24]</sup>。而Keith等<sup>[25]</sup>指出桉树土壤呼吸与土壤水分呈显著指数相关;邹建文等<sup>[26]</sup>研究认为,稻田土壤 $\text{CO}_2$ 排放量与土壤水分呈显著线性相关。土壤呼吸与土壤水分模型选择的多样性,可能是由于呼吸作用影响因素众多,影响机制复杂,在不同地区、不同时段以及不同时空尺度上,对不同植被、不同土地利用方式,居于主导地位的因素不同,影响和决定土壤呼吸的机制也有所变化,导致水分对土壤呼吸的影响难以用一个统一的方程来描述。另有研究表明,土壤呼吸与土壤水分的共同变化趋势并不明显,甚至无明显关系。韩广轩等<sup>[27]</sup>在分析土壤呼吸的水热因子时表明,农田生态系统由于受人为干预,只有在极端条件下水分才会对土壤呼吸作用起限制作用。一般认为,土壤水分在特定范围或在较小范围内变动时,土壤呼吸作用对土壤水分不敏感。只有当土壤水分超过田间持水量或降低到永久萎蔫点以下时,土壤呼吸作用才开始下降<sup>[28]</sup>。这可能由于农田土壤水分过低时将限制土壤微生物呼吸作用和根系呼吸作用,而土壤水分过高时则会阻塞土壤空隙,从而减少土壤中的 $\text{O}_2$ 浓度,限制 $\text{CO}_2$ 的释放<sup>[29]</sup>。

### 2.2 土壤温度对土壤呼吸的影响

土壤温度是影响土壤呼吸的另一个重要因子。温度对土壤呼吸的影响主要通过通过对土壤微生物活性、微生物的能量供应和体内再分配、土壤通透性和气体的

扩散以及根系生长的影响造成。随着温度升高可促进土壤微生物活动和有机质分解,土壤呼吸量也随之增加,但是温度过高,土壤呼吸作用反而会下降。在湿度不成为限制因子的情况下,土壤呼吸和土壤温度间具有较明显的规律性。车升国等<sup>[30]</sup>研究农田生态系统表明,土壤呼吸与土壤温度之间存在着显著地相关关系。Vogel等<sup>[31]</sup>报道高纬度地区的根系和微生物呼吸都会随着气候的变暖而增加,从而导致土壤呼吸的增加;Peterjohn等<sup>[32]</sup>指出,在温度升高的长期监测试验中,土壤呼吸速率随着温度升高而增加。Borken等<sup>[33]</sup>对德国3种森林生态系统土壤呼吸研究结果表明,土壤温度与土壤水分呈显著的指数相关,但Chimmer等<sup>[34]</sup>报道,土壤呼吸与土壤温度呈显著线性关系。不同模型的选择、模型的显著程度以及决定系数可能与当地气候特征、土壤质地、土壤水分状况密切相关。

Q10函数来表示土壤呼吸对土壤温度变化响应的敏感程度,即温度每升高10土壤呼吸增加的倍数,它是生物地球化学模型描述碳循环过程的一个重要参数。通常Q10被认为是常数(Q10=2),但不同的生态系统和不同的地理位置不同,陆地生态系统土壤呼吸的Q10值变化范围为1.3~5.6<sup>[20]</sup>,平均约为2.0~2.4。周涛等<sup>[35]</sup>基于碳循环过程模型(CASA),利用反演分析方法估算了中国土壤呼吸温度敏感性空间分布,结果显示全国平均Q10值为1.80。Q10具有明显的空间异质性,不同土壤类型的Q10值在1.09~2.38之间变化,其中火山灰土的Q10值最大2.38,冷棕钙土的值最小1.09;从植被类型看,森林土壤的Q10值最大2.11,草地土壤的Q10值最低2.01,农田土壤的Q10值介于森林与草地土壤之间,为2.08。陈全胜等<sup>[36]</sup>对锡林河流域典型草原退化群落土壤呼吸进行研究表明,5、10、15、20 cm的Q10值依此为1.52、1.70、1.90、1.97。Kirschbaum<sup>[37]</sup>总结了不同实验室的结果,发现土壤温度敏感性在低温下都非常高,而在高温下却较为平稳,温度在20℃以上时的Q10值一般在2左右,0℃时Q10却能够高于8。王小国等<sup>[38]</sup>研究同样发现,Q10值与土壤温度呈显著负相关关系,在温度较高的7月份,Q10值最低仅为1.25,而在温度较低的1月份Q10值最高为3.23。

### 2.3 降水对土壤呼吸的影响

降水可以通过影响土壤中生物活动和根系生长所需要的水量、土壤含水量以及土壤温度来影响土壤呼吸。降雨不仅可以给土壤提供水分,而且会促进地上的有机残体向地下运输,使之成为土壤呼吸的重要基质<sup>[35]</sup>。土壤呼吸在降雨后明显增强<sup>[33]</sup>,这可能由于:

(1)降雨沿着土壤空气下渗或侧渗,填充了原先空气所占据的土壤孔隙,使CO<sub>2</sub>在短时间内迅速排出;(2)土壤水分亏缺导致土壤微生物活性降低,限制植物活性,影响生态系统自养和异养呼吸,而降雨可促进N矿化,激活微生物和植物活性,提高有机碳分解速率,进而促进土壤呼吸作用;(3)降雨可促进土壤微生物量激增。然而,一些研究同样发现雨后土壤呼吸受到明显抑制<sup>[39]</sup>。Ito等<sup>[40]</sup>研究农田时也发现降水引起CO<sub>2</sub>降低,这可能由于水分取代了土壤中CO<sub>2</sub>占据的位置,同时也是土壤的通透性变差,CO<sub>2</sub>在土壤中的扩散阻力增大,导致雨后实际测定的土壤CO<sub>2</sub>速率降低<sup>[39]</sup>。也有研究认为,土壤呼吸在降雨刚开始时土壤呼吸迅速增强,降雨结束后很快回到降雨前的水平<sup>[41]</sup>。土壤呼吸对降雨的响应,在不同生态系统类型中,可能因植被/土地利用类型、土壤类型及理化性质、降雨前土壤中的水分状况、微生物群落以及降雨的强度、时长的差异而不同。

#### 2.4 耕作方式对土壤呼吸的影响

农田耕作是世界上最大规模的人类活动,对土壤系统产生一系列不同程度的扰动。耕作不仅引起植物残留物(根系、根茬和凋落物等)和土壤有机质重新分布,同时也改变了土壤结构,随之影响土壤微生物的群落结构、土壤酶活性、土壤呼吸等生物学特性变化。许多研究表明,耕作存在激发效应,可明显提高土壤呼吸速率,增加CO<sub>2</sub>排放量<sup>[30,42-43]</sup>。目前,全球受耕作影响而产生的碳丢失高达 $8 \times 10^{16}$  g/a。黄土高原、华北平原、Wisconsin南部报道翻耕可增加土壤CO<sub>2</sub>排放量<sup>[22,30,43]</sup>。Dao<sup>[44]</sup>研究发现,翻耕后土壤呼吸速率较对照处理提高2倍;而Reicosky等<sup>[42]</sup>研究发现,耕翻后土壤CO<sub>2</sub>排放量较不耕翻处理提高几十倍甚至百倍,而采用不同的耕翻工具对呼吸作用的影响强度也有差别。这可能是由于耕作破坏了土壤的团粒结构,使稳定的、被吸附的有机质更易分解,增强土壤有机质的矿化。同时,耕作不仅增大了土壤孔隙度,有助于O<sub>2</sub>的进入和CO<sub>2</sub>排出,也使不同层位的土壤暴露在空气中,改善了有机质分解条件如土壤的通气性和土壤含水量,加速深层土壤有机质氧化分解,促进土壤呼吸作用。

#### 2.5 其他影响因素

除以上论述土壤呼吸影响因素外,其他影响因子还有很多,如土壤的物理化学特性(土壤有机质、容重、孔隙度等)、土地利用方式、植被类型、根系生物量、凋落物叶面积指数等。

### 3 结论与讨论

目前,全球SOC储存量估算值约位于700~2500 Pg之间,平均为1550 Pg。中国SOC储量估算约为

82.65~100 Pg。土壤呼吸主要是指未受扰动的土壤中产生CO<sub>2</sub>的所有代谢作用,包括3个生物学过程,即土壤微生物呼吸、土壤动物呼吸和植物根系呼吸以及1个非生物学过程,含碳矿物质化学氧化作用的非生物过程的总和。目前,全球土壤碳排放量为75 Pg/a,而中国土壤呼吸总碳量 $4.2 \times 10^9$  t/a。土壤呼吸程,它不仅受气温、土壤温度、土壤含水量、pH等自然环境田间的影响,还受到植物、土壤动物、土壤微生物等生物因素以及人为因素,如环境污染、土地管理等因素的影响。

土壤呼吸作为土壤碳的主要输出途径和大气CO<sub>2</sub>重要的源,在未来气候变化情景下的变化时一个重要的科学问题。深入研究不同陆地生态系统土壤呼吸时空波动性及其关键影响因子,客观估算区域乃至全球土壤CO<sub>2</sub>的排放量,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研究方向。基于现有成果,未来应加强4个方面的工作:(1)土壤呼吸的机理研究:采取典型区域深化研究与大区域常规观测相结合的方式,研究土壤呼吸微环境土壤有机碳循环机制以及全球变化条件下土壤呼吸过程机理;(2)土壤呼吸模型研究:目前土壤呼吸不同尺度呼吸模拟难以融合,具有一定的局限性,应研究大、中、小尺度土壤呼吸模型在尺度上的推延,增加不同模型的兼容性;(3)土壤呼吸影响因素研究:温度和湿度影响下的土壤呼吸动态变化较为复杂,目前还没有统一明确的定量关系来说明这个问题,许多研究试图得出相关模型,但至今还没有固定的模型可以利用,因此在这方面还需深入地研究;(4)加强土壤呼吸数据统计工作,了解整个陆地生态系统土壤有机碳的储量特征、碳排放的影响因素,为准确估算陆地生态系统有机碳储量和排放量提供科学依据。同时,也为中国环境外交谈判提供部分碳排放收支清单,为国家信息报告做好必要的知识、技术和数据贮备。

#### 参考文献

- [1] Manabe S, Stouffer R J. CO<sub>2</sub>-climate sensitivity study with a mathematical model of the global climate[J]. *Nature*,1979,282(5738):491-493.
- [2] Rodhe H. A Comparison of the Contribution of Various Gases to the Greenhouse Effect[J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 1990,248(4960):1217-1219.
- [3] Pacala S R Socolow. Stabilization wedges: Solving the climate problem for the next 50 years with current technologies[J]. *Science*, 2004,305(5686):968-972.
- [4] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change

- and food security[J]. *Science*,2004,304(5677):1623-1627.
- [5] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*,2000,48(1):7-20.
- [6] Paustian K, Cole C V, Sauerbeck D, et al. CO<sub>2</sub> mitigation by agriculture: An overview[J]. *Climatic Change*,1998,40(1):135-162.
- [7] Lal R. Enhancing Eco-efficiency in Agro-ecosystems through Soil Carbon Sequestration[J]. *Crop Science*,2010,50(2):S120-S131.
- [8] 郭胜利,马玉红,车升国,等.黄土区人工与天然植被凋落物量和土壤有机碳变化的影响[J].*林业科学*,2009(10):14-18.
- [9] 车升国,郭胜利.黄土塬区小流域深层土壤有机碳变化的影响因素[J].*环境科学*,2010(5):1372-1378.
- [10] Smith P. Land use change and soil organic carbon dynamics[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*,2008,81(2):169-178.
- [11] Bohn H L. Estimate of Organic Carbon in World Soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*,1976,40(3):468-470.
- [12] Bohn H L. Estimate of Organic Carbon in World Soils: II[J]. *Soil Science Society of America Journal*,1982,46(5):1118-1119.
- [13] Potter K N, Torbert H A, Johnson H B, et al. Tischler. Carbon storage after long-term grass establishment on degraded soils[J]. *Soil Science*,1999,164(10):718-725.
- [14] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential[J]. *Global Change Biology*,2000,6(3):317-327.
- [15] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*,1996,47(2):151-163.
- [16] 潘根兴.中国土壤有机碳和无机碳库量研究[J].*科技通报*,1999,15(5):330-332.
- [17] 王绍强,周成虎,李克让,等.中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J].*地理学报*,2000,55(5):533-544.
- [18] 李克让,王绍强,曹明奎.中国植被和土壤碳储量[J].*中国科学*,2003,33(1):72-80.
- [19] 于东升,史学正,孙维侠,等.基于1:100万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究[J].*应用生态学报*,2005,16(12):2279-2283.
- [20] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon-dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*,1992,44(2):81-99.
- [21] 方精云.全球生态学[M].北京:中国高等教育出版社,2000.
- [22] Wagai R, Brye K R, Gower S T, et al. Bundy. Land use and environmental factors influencing soil surface CO<sub>2</sub> flux and microbial biomass in natural and managed ecosystems in southern Wisconsin[J]. *Soil Biology & Biochemistry*,1998,30(12):1501-1509.
- [23] Davidson E A, Verchot L V, Cattanio J H, et al. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia[J]. *Biogeochemistry*,2000,48(1):53-69.
- [24] Sha L Q, Zheng Z, Tang J W, et al. Soil respiration in tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, SW China[J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*,2005,48:189-197.
- [25] Keith H, Jacobsen K L, Raison R J. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in *Eucalyptus pauciflora* forest[J]. *Plant and Soil*,1997,190(1):127-141.
- [26] 邹建文,黄耀,宗良纲,等.稻田 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放及其影响因素[J].*环境科学学报*,2003,23(6):758-764.
- [27] 韩广轩,周广胜,许振柱.中国农田生态系统土壤呼吸作用研究与展望[J].*植物生态学报*,2008(3):204-218.
- [28] Pangle R E J, Seiler. Influence of seedling roots, environmental factors and soil characteristics on soil CO<sub>2</sub> efflux rates in a 2-year-old loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation in the Virginia Piedmont[J]. *Environmental Pollution*,2002,116:S85-S96.
- [29] Cable J M, Ogle K, Williams D G, et al. Soil texture drives responses of soil respiration to precipitation pulses in the sonoran desert: implications for climate change[J]. *Ecosystems*,2008,11(6):961-979.
- [30] 车升国,郭胜利,张芳,等.黄土区夏闲期土壤呼吸变化特征及其影响因素[J].*土壤学报*,2010,47(6):131-142.
- [31] Vogel J G, Valentine D W, Ruess R W. Soil and root respiration in mature Alaskan black spruce forests that vary in soil organic matter decomposition rates[J]. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere*,2005,35(1):161-174.
- [32] Peterjohn W T, Melillo J M, Steudler P A, et al. Responses of trace gas fluxes and n availability to experimentally elevated soil temperature[J]. *Ecological Applications*,1994,4(3):617-625.
- [33] Borken W, Xu Y J, Davidson E A, et al. Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce, and Scots pine forests[J]. *Global Change Biology*,2002,8(12):1205-1216.
- [34] Chimner R A. Soil respiration rates of tropical peatlands in Micronesia and Hawaii[J]. *Wetlands*,2004,24(1):51-56.
- [35] 周涛,史培军,惠大丰,等.中国土壤呼吸温度敏感性空间格局的反演[J].*中国科学C辑:生命科学*,2009(3):315-322.
- [36] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,等.水热条件对锡林河流域典型草原退化群落土壤呼吸的影响[J].*植物生态学报*,2003,27(2):202-209.
- [37] Kirschbaum M U F. The temperature-dependence of soil organic-matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic-c storage[J]. *Soil Biology & Biochemistry*,1995,27(6):753-760.
- [38] 王小国,朱波,王艳强,等.不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性[J].*生态学报*,2007,27(5):1960-1968.
- [39] Bouma T J, Bryla D R. On the assessment of root and soil respiration for soils of different textures: interactions with soil moisture contents and soil CO<sub>2</sub> concentrations[J]. *Plant and Soil*,2000,227(1/2):215-221.
- [40] Ito, D., K. Takahashi. Seasonal changes in soil respiration rate in a mulberry[J]. *Journal of Agricultural Meteorology*,1997,53(3):209-215.
- [41] Lee X, Wu H J, J. Sigler, et al. Rapid and transient response of soil respiration to rain[J]. *Global Change Biology*,2004,10(6):1017-1026.
- [42] Reicosky, D.C. Tillage-induced CO<sub>2</sub> emission from soil[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*,1997,49(1/3):273-285.
- [43] 孟磊,丁维新,蔡祖聪,等.长期定量施肥对土壤有机碳储量和土壤呼吸影响[J].*地球科学进展*,2005(6):687-692.
- [44] Dao, T H. Tillage and crop residue effects on carbon dioxide evolution and carbon storage in a Paleustoll[J]. *Soil Science Society of America Journal*,1998,62(1):250-256.