

土壤呼吸影响因素概述及展望

李元¹, 时伟宇², 闫美杰³, 杜盛³, 毕润成¹, 李华⁴

(1. 山西师范大学 生命科学学院, 山西 临汾 041004; 2. 中国科学院 地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075; 3. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 山西大学 环境与资源学院, 太原 030006)

摘要: 土壤呼吸是全球碳循环中重要的流通途径之一, 是陆地生态系统最大的二氧化碳释放源, 也是碳循环的研究领域中一个普遍关注的热点问题。土壤呼吸是土壤中生物与周围环境之间一个相互作用的过程, 可以被看作作为一个生态系统, 明白影响该土壤生态系统里面生物和环境要素、相互作用过程以及其对该系统所排放出二氧化碳的影响有着非常重要的意义。通过分析影响土壤呼吸的主要因素, 土壤温度、土壤湿度、土壤有机质和氮含量、生物因子以及人类活动与土壤呼吸的相互作用方式, 概括了影响土壤呼吸因素之间的关系, 并对土壤呼吸研究今后的发展趋势进行了展望。

关键词: 土壤呼吸; 土壤温度; 土壤湿度; 影响因素

中图分类号: S154

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)05-0311-06

Review and Prospect on Impact Factors of Soil Respiration

LI Yuan¹, SHI Wei-yu², YAN Mei-jie³, DU Sheng³, BI Run-cheng¹, LI Hua⁴

(1. School of Life Science, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041004, China;

2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. School of Environmental Science and Resources, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Soil respiration is not only an important circulation route in global carbon cycle but also the largest CO₂ release source in terrestrial ecosystem, so it is a common focus of attention in the field of the carbon cycle study. Soil respiration is a process of interaction between the biological and ambient soil. The soil can be regarded as an ecological system, and understanding the impact of the soil ecosystem inside biological and environmental factors, interaction, and the impact of the carbon dioxide emissions of the system has a very important significance. In order to describe the main factors affecting soil respiration, such as soil temperature, soil moisture, soil organic matter and nitrogen, biological factors, human activities, etc., the relationship between soil respiration factors was summarized, and the future development of soil respiration was prospected.

Key words: soil respiration; soil temperature; soil moisture; impact factors

在土壤的新陈代谢过程中, 有大量的二氧化碳产生, 并通过土壤向大气释放的过程称为土壤呼吸, 它反映了土壤物质代谢强度和土壤生物活性, 是表征土壤肥力和质量的重要生物学指标之一^[1-2]。同时其在生态演替中也扮演着重要的角色, 植被的变化通过归还有机物和吸收养分等, 影响着土壤的化学、物理以及生物学性状, 土壤呼吸也从而随之变化, 所以, 通过分析观测土壤呼吸的变化即可指示出生态演替的过程和方向^[3]。此外, 从气候学的角度看, 土壤呼吸作

用所释放的二氧化碳改变了近地面的微气候条件, 为植物的下部冠层提供了丰富的碳源, 对植物生长发育起着积极的作用^[4]。由此可以看出, 土壤碳循环在陆地生态系统中处于极为重要的地位, 其对预测土壤自身性状构成、植物生长发育以及生态系统可持续发展方面起着非同小可的作用^[5]。

因此, 只有正确理解土壤碳循环, 才能真正了解人类生存与发展的需求是否已影响并改变了陆地生态系统原有的稳定性, 从而可以对其进行有效的评

估,同时也有利于指导人类的生产改造行为^[6]。为了有效区分系统中人类与自然之间的错综复杂关系,就必须先确定大气—陆地—海洋之间碳的交换与分配以及碳储量^[7]。陆地生物圈碳库主要有生物量、土壤碳、凋落物和泥炭等,其中的土壤碳储量占整个陆地生物圈碳储量的绝大部分,其次是陆地的生物量。土壤呼吸作用是土壤碳库变化的主要途径之一,每年大气中 10% 的二氧化碳是由土壤呼吸输送的^[8]。因此,土壤呼吸微小变化都会导致大气中二氧化碳浓度的较大变化,所以有效掌握土壤呼吸规律可以帮助增加土壤碳储量,来抵消由于人类活动而过多释放的二氧化碳^[9]。反之,如若任其发展,土壤有机碳的过量释放会导致大气中的二氧化碳浓度显著增加,进而最终加剧全球变暖进程^[12]。所以对土壤呼吸作用的充分理解,有助于了解土壤中碳素的变化速率与趋势以及陆地生态系统碳循环过程的机制,这对减缓全球变暖具有至关重要的意义^[10]。

1 土壤呼吸影响因素

土壤呼吸是土壤中生物与周围环境之间一个相互作用的过程^[11]。它可以被看作是一个生态系统,明白影响该土壤生态系统里面生物和环境要素、相互作用过程以及其对该系统所排放出二氧化碳的影响有着非常重要的意义^[12]。土壤呼吸是指土壤新陈代谢作用释放出二氧化碳的过程,该过程包括三个生物化学过程(土壤动物呼吸、土壤微生物异氧呼吸以及植物根系呼吸)和一个非生物过程(即少量土壤有机质氧化产生二氧化碳),其中土壤根系呼吸和微生物异氧呼吸是最重要的组成部分^[13-14]。土壤呼吸本身就是一种极为复杂的生物化学过程,不仅受到土壤温度、土壤湿度、土壤有机质和氮含量以及生物因子的影响,而且还受到人类生产生活活动的综合影响,所以要弄清土壤呼吸作用机制首先要明白各种影响因

子是如何作用且相互关联的。

1.1 土壤温度

温度是土壤呼吸的关键影响因素,由于其具有强烈的时空变异性特点,因此它表现为明显的季节变化与日变化幅度大的特征。而此二者的变化规律主要是受气温变化所支配,据相关学者研究,二氧化碳释放速率的日均值与气温、地表温度呈显著的相关关系^[15]。Gupta 等学者研究认为:一天中土壤呼吸的高峰期滞后于最高温出现的 2:00 左右,可发现真正作用于土壤呼吸的主要是地表 5—20 cm 处的土温,所以土温经由热传递作用升温再影响到土壤呼吸是需要一个加热过程,因此根据土地覆盖植被类型的不同,其延迟相应时间也有所不同,草地、农田为 2~4 h,森林则为 6 h^[16];Schleser 指出,随着季节的更替,不同生态系统中的植物群落会相应产生不同的特征变化,从而影响到土壤呼吸的变化,例如季相变化引起的生物量、根系数量与活性以及凋零物数量与质量等的变化都会反作用于土壤呼吸的季相变动^[17]。

为了便于定量分析研究土壤呼吸与温度之间如何相互作用,学者习惯用 Q_{10} 函数来表达二者的关系,即温度每升高 10℃ 土壤呼吸速率增加的倍数。例如在不同程度的沙化土壤研究中发现, Q_{10} 值的变化范围比较小,一般为 1.80~2.16,总体的趋势呈现出当低含水量时,土壤 Q_{10} 值在较低情况下,其值随着土壤中含水量的上升而上升,含水量超过一定程度时, Q_{10} 值又会有点下降^[18]。虽然关于土壤呼吸速率和温度之间关系现已有较为一致的认识(通常 Q_{10} 用常数 2 表示),但是土壤呼吸和温度变化关系模型比较混乱,有二次方模型、线性模型、指数模型、对数模型、乘幂模型等,目前没有一个较为统一的模型能够说明二者关系。下面列出国外学者经过长期观测得出的一些土壤呼吸与温度的定量函数关系表达式,详见表 1^[19]。

表 1 土壤呼吸与温度的关系式

地点	植被类型	关系式	
哥伦比亚	冬小麦系统	$\ln\text{CO}_2 = 7.0687 + 0.1329T - 0.00197T^2$	($R^2 = 0.66$) T——地下 10 cm 的温度
密苏里大学	高草草原	$\ln\text{CO}_2 = -1.66 + 2.02\ln(T+10)$	($R^2 = 0.89$) T——土壤温度
美国西海岸	落叶针叶林	$\text{CO}_2 = 0.1301 + 0.0064T$	($R^2 = 0.28$) T——空气温度
阿拉斯加	冻原	$\text{CO}_2 = 89.78 + 1.54T + 5T^2$	T——日平均土壤温度

1.2 土壤湿度

土壤湿度对土壤呼吸作用存在极为复杂的影响。当土壤湿度在较低情况下,土壤呼吸和水分之间表现出显著的相关关系,而且呼吸强度在一定范围内还随着土壤水分增加而增加^[20]。Guptaetal 与 Holtetal 的研究都发现,呼吸强度与水分在土壤持水量的范围内是呈明显的正相关关系^[21]。在西双版纳的热带季

节雨林和橡胶林的两种林地中,土壤呼吸速率和土壤含水率二者之间都具有明显的线性关系^[22]。但是不同类型的生态系统,呼吸速率和土壤含水量之间关系不是都一样的。在很多情况下,土壤表面二氧化碳的通量和土壤湿度呈现出正相关,但是当土壤中含水量大于一定阈值,湿度就变成了抑制土壤呼吸的因子^[23]。水分同时也对植物根系、土壤通透性与微生

物活动产生影响,其影响最终也会作用到土壤呼吸量上。其中土壤的孔隙通透性受到土壤中水分含量的明显影响,因为氧气作为植物根系和土壤微生物进行有氧呼吸的必要条件,土壤含水量过高会限制土壤中氧气的扩散,这时候土壤处于嫌气状态,好氧微生物和植物根系的活动就会受到抑制,有机质分解速率就会降低,土壤呼吸的二氧化碳排放必会减少^[24]。Oberbauer 等发现,北极苔原中潜水位上升到水平面以上后,土壤通气状况出现堵塞,土壤的呼吸量随潜水位增加而下降^[25]。与之相反,人们对泥潭地、沼泽以及其他类型的过湿地排水,土壤通气状况得到改善,通常会使得土壤呼吸量增加,道理也就在此。土壤中的溶解性有机碳是微生物活动的主要能量来源,而土壤中水分的变化有可能使得土壤溶液中溶解有机碳的总量出现变化,当土壤中水分的含量过低,土壤溶液中的可溶性有机碳扩散受到阻碍,这时候细菌等一些微生物会处于饥饿的环境之中,导致土壤呼吸作用下降。植物和微生物能量分配也同样受到水分的影响,当土壤中水分的含量出现变化时,微生物和

植物就会适当的调整能量用途。比如,一旦土壤中水势降低,土壤中的微生物为了避免发生萎蔫现象,就会被动把能量转移到合适的溶质中,进而减少二氧化碳的排放^[26]。Linn 与 Doran 通过研究得出将水分少于某一最合适状态时土壤水膜上的可溶性有机碳含量归结是土壤呼吸量下降的原因^[27]。

非灌溉土壤中的含水量主要来自降水,而降水通过影响根系生长需水量、土壤微生物活性以及土壤含水量来影响土壤呼吸。那么,季节性的降雨在干湿交替生态系统或者湿润生态系统中,可能会对土壤呼吸产生较明显的抑制现象,但是在干旱生态系统或者干湿生态系统中,降水可能会加剧土壤呼吸的进行^[28]。学者经研究发现,土壤呼吸强度与降水量之间在很多情况下都是正相关关系。尤其在森林生态系统研究中,降雨发生以后,土壤呼吸呈现出明显的增加。例如 Haynes 等研究发现,降水两个小时以后,红松林中的测量点比对照点土壤呼吸速率提高大约三倍^[29]。经研究发现,部分生态系统类型中土壤呼吸与水分之间的相关关系见表 2。

表 2 土壤呼吸与水分之间的相关关系

地点	生态系统或群落类型	土壤呼吸与水分的关系	来源
South Wisconsin, USA	Prairie, Corn (tilled), Corn (not tilled)	正相关,但不显著, $R^2 = 0.04 \sim 0.20, P > 0.05$	Wagai 等 ^[30]
Massachusetts, USA	Temperate Mixed Hardwood Forest	8月、9月正相关, $R^2 = 0.48, P < 0.05$	Davidson 等 ^[31]
Schlewig-Holstein, Germany	Agroecosystem	正相关, $R^2 = 0.51, s = 0.56$	Kutesch 和 Kappen ^[32]
Xilin River Basin, China	Stipa Grand is Steppe	与土壤水分的常用对数正相关, $R^2 = 0.92, P < 0.01$	陈四清等 ^[33]

1.3 土壤有机质和氮含量

土壤有机质对土壤的呼吸来说至关重要,土壤的通风性、湿度、阳离子保持能力等性质都会受到来自土壤有机质含量的影响,与此同时它还是微生物进行分解活动排放二氧化碳的物质基础,也是土壤中含量最大的碳库。由于相关研究表明土壤呼吸强度和微生物种群与土壤有机质含量是正相关关系,耿远波等学者研究土壤呼吸速率时采用土壤有机质含量作为标准^[34]。然而在张庆忠等学者的研究中表明,农田生态系统中土壤呼吸受土壤有机质含量的影响较小^[35]。所以有关此方面的研究,还在进一步深入中。近几年,由于农业肥料的过分使用,土壤含氮含量日益增高,已引起人们的普遍关注。而土壤中氮含量的过高与过低都会抑制到微生物活性,由于微生物呼吸作为重要的土壤呼吸组成部分,微生物活性的变化最终会影响到土壤呼吸。例如骆土寿等学者发现对土壤施加氮素肥料后引起土壤有机质 C/N 比下降,土壤呼吸有显著下降^[36]。因此关于土壤有机质中 C/N 与土壤呼吸相互作用的机制是目前的热点研究领域。

1.4 生物因子

生物因子中的根系生物量、叶面积指数以及凋落

物等都会通过作用于土壤的理化性质而影响到土壤呼吸。而土壤自身发生的理化过程虽然能够产生少量的二氧化碳,例如溶解态二氧化碳的释放以及有机质氧化等,但是其生化过程产生的二氧化碳占绝大部分。因此,从本质上看土壤呼吸是植物根系呼吸、土壤微生物和土壤动物呼吸的总和,其中由于无脊椎动物呼吸产生的二氧化碳量少到难以统计,在此不作赘述。所以事实上,土壤呼吸可以分为根系的自养呼吸与土壤微生物的异养呼吸。根际呼吸由植物光合作用控制,异养呼吸则由土壤有机质控制^[37]。它们各自呼吸利用的碳源不同,对土壤呼吸的贡献也有差异,对研究土壤呼吸产生的作用也就不同。在各类生态系统中土壤呼吸的根呼吸所占比例如表 3 所示^[37-38]。由表 3 可知,根系呼吸受植被类型与生态环境的影响很大,所占比例有很大的差异,但它都是土壤呼吸中主要的组成部分之一。因此根系生物量作为直接影响根系呼吸的关键因素,在生物因子中发挥着决定性作用。根系生物量的多寡与根系呼吸有显著的正相关关系,同时死根与根系分泌物等也间接作用于根系呼吸的强度^[39]。叶面积指数与凋落物,它们都对生态

系统的环境、土壤和植被有一定的塑造作用,所以,两者均有通过改变近地面微气候、表层土壤活性、土壤温湿度以及作为重要的土壤有机质输入源来影响土壤呼吸的。土壤微生物包括细菌、真菌和放线菌等,温度和降水等气候因子通过调控土壤的有机质组成、比例和活性等影响土壤微生物呼吸作用。土壤是微生物生存的基础,土壤环境变化对微生物呼吸作用产生直接影响,其中包括土壤水分、土壤有机质、土壤 pH 值等。李凌浩等认为,在温度小于 15℃ 的 6 月中旬之前与 8 月下旬之后,土壤呼吸作用以微生物对土壤有机质分解为主^[40]。土壤微生物与根系呼吸作用是反映生态系统对环境胁迫响应的指标之一,其呼吸速率变化与否以及变化方向反映了生态系统对胁迫的敏感程度与响应模式。鉴于此,生物因子作为影响土壤根系呼吸和微生物呼吸的间接因素有着不可小视的地位,但目前对于土壤呼吸中生物因子的研究很少,所以相关的机理还不够清楚,需要做更多的深入研究。

表 3 不同生态系统土壤呼吸中根呼吸所占比例

生态系统	根系呼吸所 占比例/%	生态系统	根系呼吸所 占比例/%
寒带森林	50~93	冻原、苔原	33~90
温带森林	33~62	温带草原	25~35
热带森林	5~46	热带草原	36~42
农田	11~95	人工草地	35~45

1.5 人类活动因素

人类活动作为人为干扰因素在土壤呼吸研究上一直是热点问题,其中又以农业行为对土地扰动最大。许多人类农业活动都能够直接和间接地改变土壤理化状况以及近地面植被覆盖、微气候等,从而对土壤的碳呼吸产生影响,例如直接方式主要包括施肥、灌溉、排水等,这些会通过直接改变土壤水分状况、土壤有机质构成等来对土壤呼吸排放速率产生显著影响;而间接方式包括砍伐森林、割草、放牧等,这些活动都会使得地表植被、土壤结构、土壤水分循环以及运动受到较大的影响,导致土壤呼吸也随之变化。研究人类农业活动对土壤二氧化碳释放产生的影响,有助于人们在自然资源的利用过程中调节以及控制自身行动,达到人与自然和谐共处的目的。(1) 施肥。在未施肥和施肥土壤碳通量研究中,虽然其它条件相同,但是土壤在施肥后,土壤呼吸速度总体上会增加。例如对红松树林施加多种养分肥料后,有研究发现,土壤施肥明显作用于土壤呼吸,施肥后的红松林粗根和细根的生产力明显变大,其二氧化碳通量也与未施肥料对照显著增加^[28]。(2) 耕作方式。土壤耕作与灌溉之后的土壤呼吸迅速增强,比未耕作

的土壤呼吸高出很多,但随着时间延续,此差别会变得越来越小。例如 Calderón 等研究发现,耕作之后的土壤呼吸量比未耕作的土壤增大很多^[41],而 Petersen 等研究却发现土壤灌溉之后土壤呼吸增大到一定值后,又再缓慢减少^[42]。(3) 土地利用方式。微生物活性、生物量以及植被类型等都和土地利用管理方式息息相关。森林砍伐、草地开垦等是最常见土地利用方式的变化,其中以草地开垦对土壤碳储量影响最为剧烈,开垦过程使致密的根系层遭到破坏,土壤深层有机碳在空气中暴露,土壤呼吸过程极具加速。Anderson 等研究发现草地开垦变为农田后会导致原来的土壤碳库总量 30%~50% 损失掉,这种损失绝大部分是由土壤呼吸排放造成^[43]。森林砍伐是森林资源管理重要手段,也是人类对土地改变利用方式之一。森林砍伐一般会使土壤湿度降低、土壤温度升高以及凋落物的分解速度加快,进而使土壤呼吸增强。所以,森林砍伐一般会使得土壤碳排量增加,但是也有研究发现,不是森林砍伐就一定会影响到土壤碳排量,甚至 Nakane 等研究证明,森林砍伐后再对土壤二氧化碳排放量测量,其排放量相对未经砍伐前呈现出减小的趋势,这可能由于森林砍伐后微生物呼吸和根系呼吸的减少造成的^[44]。

2 讨论

大多数情况下,土壤呼吸的关键制约因子是温度,表现为明显的日变化与有规律的季节变化特征。其随温度的变化用一次函数、指数函数模拟都可以较好模拟出土壤呼吸的发展趋势。Lloyd 等研究土壤呼吸与温度变化依赖关系时有详尽阐述^[45]。而土壤湿度又与温度变化息息相关,尤其是在干旱半干旱区更是如此,所以也是影响土壤呼吸重要的因素之一。降水作为影响土壤直接水分变化的主要因素,与气候一起是调节土壤温湿度的关键因子。土壤根系呼吸和异氧呼吸均受到来自温湿度调节,温湿度过低和过高都可能导致根系以及微生物酶丧失活性,所以,降水、灌溉等方式都能够通过改变土壤温湿度以及根系、微生物活性来影响到土壤呼吸。因此,在土壤温湿度作为协同因子的研究中,采用改进 Arrhenius 指数方程可以在土壤温湿度正常比例下较好解释绝大部分土壤呼吸的变异情况^[46]。土壤有机质作为土壤根系及微生物生长发育的必须场所,是土壤呼吸重要的环境因子之一。它通过直接作用土壤理化状况来对土壤呼吸的发展趋势产生明显影响。同时它与生物因子中的根系生物量和叶面积指数等因素也是相互关联的,环境因子与生物因子如同温湿度一样也共同作用

于土壤呼吸^[47]。在人类活动的影响下,土壤呼吸影响因素更加复杂,在特定生态环境下,任何影响土壤呼吸过程的限制因子均可能变为关键影响因子。事实上,土壤呼吸的各项影响因子之间并不是孤立的,不仅会同时影响土壤呼吸,它们之间也还彼此影响。所以,土壤呼吸是一个复杂生态系统中的复杂过程,虽然存在一定的规律,但是同时也表现出不规则性,对其完全了解以及准确描述还需做进一步研究工作。

3 展望

土壤呼吸是碳循环中重要的环节,在全球变暖的今天已成为一个重要科学问题。对土壤呼吸关键因子的确定,并且准确估算出土壤呼吸变化是对全球变化下碳循环的研究基础。基于已有研究成果,在未来应该加强以下工作:(1)土壤呼吸机理研究深入不够,尤其是明确土壤呼吸总量的三个组成部分分别占有的比例,这对控制碳流失有实际应用意义。(2)由于生物因素在实际观测中较难区分测量,例如根系自身呼吸与根系微生物呼吸的区分,学者往往更多是关注环境因子与土壤呼吸的相关关系,所以应加强对不同的生物以及非生物的生态环境因子同步测定,尤其重视生物因子影响。(3)目前研究热点往往集中于植物生长季里的土壤呼吸,假定非植物生长季土壤呼吸极少,这对准确估计全年特定生态系统碳通量产生不良影响^[48]。因此,应加强典型的物候期以及不同季节的典型生态系统土壤呼吸测定。(4)人类活动较之环境与生物因素更加复杂,但却是更应要重点关注的问题。只有解决好人类活动与土壤呼吸的问题才能真正意义上达到人与自然的和谐共处。此处尤以农业问题突出,其中主要是关于土地利用方式不同对于土壤呼吸扰动大小的确定。所以,应加强土地利用与土地覆被变化等对碳平衡的影响研究,进一步探讨土地利用与土地覆被变化、气候变化与碳平衡之间相互的作用机制。(5)碳固定始终是此研究领域最实际的应用问题,类似免耕少耕等真正减少碳流失措施的研究尚且不足,还是停留在观测分析问题上,未提出有效的解决问题方法。鉴于此,应在深入研究不同生态系统的土壤呼吸的基础上,提出对土壤有机碳有效的固定碳措施。

参考文献:

- [1] 陈泮勤,黄耀,于贵瑞.地球系统碳循环[M].北京:科学出版社,2004.
- [2] 杜宝华,杨平,全乘风.农田土壤二氧化碳释放问题的研究[J].水土保持研究,1996,3(3):101-103.
- [3] 张金波,宋长春,杨文燕.不同土地利用下土壤呼吸温度敏感性差异及影响因素分析[J].环境科学学报,2005,25(11):1538-1541.
- [4] 杨刚,何寻阳,王克林,等.不同植被类型对土壤微生物量碳氮及土壤呼吸的影响[J].土壤通报,2008,39(1):190-191.
- [5] 耿元波,董云社,齐玉春.草地生态系统碳循环研究评述[J].地理科学进展,2004,23(3):75-78.
- [6] 杨玉盛,董彬,谢锦升,等.森林土壤呼吸及其对全球变化的响应[J].生态学报,2004,24(3):584-588.
- [7] 韩广轩,周广胜.土壤呼吸作用时空动态变化及其影响机制研究与展望[J].植物生态学报,2009,33(1):197-205.
- [8] 李玉宁,王关玉,李伟.土壤呼吸作用和全球碳循环[J].地学前缘,2002,9(2):157-160.
- [9] Ciais P, Tans P P, Trolier M, et al. A large northern hemisphere terrestrial CO₂ sink indicated by ¹³C/¹²C ratio of atmospheric CO₂[J]. Science,1995,269:1098-1102.
- [10] 刘绍辉,方精云.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,1997,17(5):469-476.
- [11] 马秀梅,朱波,韩广轩,等.土壤呼吸研究进展[J].地球科学进展,2004,19(S1):492-494.
- [12] 王庚辰,杜睿,孔琴心,等.中国温带典型草原土壤呼吸特征的实验研究[J].科学通报,2004,49(7):692-695.
- [13] 闫美杰,时伟宇,杜盛.土壤呼吸测定方法述评与展望[J].水土保持研究,2010,17(6):149-157.
- [14] 苏永红,冯起,朱高峰,等.土壤呼吸与测定方法研究进展[J].中国沙漠,2008,28(1):58-62.
- [15] 张东秋,石培礼,张宪洲.土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J].地球科学进展,2005,20(7)779-783.
- [16] Singh J S, Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems[J]. Bot. Rev., 1997,43(4):449-450.
- [17] Schleser G H. The response of CO₂ evolution from soils to global temperature changes[J]. Zeitschrift Naturforschung Teil A,1982,37:287-289.
- [18] 李玉强,赵哈林,赵学勇,等.土壤温度和水分对不同类型沙丘土壤呼吸的影响[J].干旱区资源与环境,2006,20(3):78-81.
- [19] 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):1961-1966.
- [20] Wang Y S, Hu Y Q, Ji B M, et al. An investigation on the relationship between emission/uptake of greenhouse gases and environmental factors in semiarid grassland[J]. Advances in Atmospheric Sciences,2003,20(1):119-127.
- [21] Hanson P J, Wullschlegler S D, Bohlman S A, et al. Seasonal and topographic patterns of forest floor CO₂ efflux from an upland oak forest[J]. Tree Physiology,

- 1993,13(1):1-15.
- [22] Lee M S, Nakane K, Nakatsubo T, et al. Effects of rainfall events on soil CO₂ flux in a cool temperature deciduous broad leaved forest[J]. *Ecological Research*, 2002,17(3):401-409.
- [23] Rochette P, Desjardins R L, Pattey E. Spatial and temporal variability of soil respiration in agricultural fields[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1991, 71(2):189-196.
- [24] Dilusro J J, Collins B, Duncan L, et al. Moisture and soil texture effects on soil CO₂ efflux components in southeastern mixed pine forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005,204(1):85-95.
- [25] Oberbauer S F, Gillespie C T, Cheng W, et al. Environmental effects on CO₂ efflux from riparian tundra in the northern foothills of the Brooks Range, Alaska, USA[J]. *Oecologia*, 1992,92(4):568-577.
- [26] Fierer N, Schimel J P. A proposed mechanism for the pulse in carbon dioxide production commonly observed following the rapid rewetting of a dry soil[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2003,67(3):798-805.
- [27] Kowalenko C G, Varson K C I, Carmerson D R. Effect of moisture content, temperature and nitrogen fertilization on carbon dioxide evolution from field soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1978,10(5):417-423.
- [28] Haynes B E, Gower S T. Belowground carbon allocation in unfertilized and fertilized red pine plantations in northern Wisconsin[J]. *Tree Physiology*, 1995,15(5):317-325.
- [29] Linn D M, Doran J W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and non-tilled soils[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1984,48(6):1267-1272.
- [30] Wagai R, Brye K R, Gower S T, et al. Land use and environmental factors influencing soil surface CO₂ flux and microbial biomass in natural and managed ecosystems in Southern Wisconsin[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998,30(12):1501-1509.
- [31] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest[J]. *Global Change Biology*, 1998,4(2):217-227.
- [32] Kutech W L, Kappen L. Aspects of carbon and nitrogen cycling in soils of the Bornhoved Lake district: II. Modelling the influence of temperature increase on soil respiration and organic carbon content in arable soils under different managements [J]. *Biogeochemistry*, 1997,39:207-224.
- [33] Chen S Q, Cui X Y, Zhou G S, et al. Study on the CO₂-release rate of soil respiration and litter decomposition in stipa grand is steppe in Xilin River Basin, Inner Mongolia [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1999,41(6):645-650.
- [34] 耿远波,章申,董云社,等. 草原土壤的碳氮含量及其与CO₂, N₂O, CH₄等温室气体通量的相关性[J]. *地理学报*, 2001,56(1):44-53.
- [35] 张庆忠,吴文良,王明新,等. 秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2005,25(11):205-209.
- [36] 骆士寿,陈步峰,李意德,等. 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*, 2001,21(12):311-313.
- [37] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, et al. Root exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration[J]. *Nature*, 1998,396:570-572.
- [38] Kucera C, Kirkham D. Soil respiration studies in tall-grass prairie in Missouri[J]. *Ecology*, 1971,52(5):912-915.
- [39] 马涛,周金星. 滩地人工杨树林土壤呼吸变化规律与环境因子的关系研究[J]. *水土保持研究*, 2011,18(6):132-136.
- [40] Li L H, Wang Q B, Bai Y F, et al. Soil respiration of a *Leymus chinensis* grassland stand in the XiLin river basin as affected by over-grazing and climate[J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2000,24(6):680-686.
- [41] Jong D E, Schappert H J V, MacDonald K B. Carbon dioxide evolution from virgin and cultivated soil as affected by management practices and climate[J]. *Soil Science*, 1974,54(3):299-307.
- [42] Petersen S O, Klug M J. Effects of sieving, storage, and incubation temperature on the phospholipid fatty acid profile of a soil microbial community[J]. *Application of Environmental Microbiology*, 1994,60(7):2421-2430.
- [43] Anderson D W, Coleman D C. The dynamics organic matter in grass land soils [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1985,40(2):211-216.
- [44] Nakane K, Tsubota H, Yamamoto M. Cycling of soil carbon in a Japanese red pine forest: II. Change occurring in the first year after a clear-felling [J]. *Ecology Research*, 1986,1(1):47-58.
- [45] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration [J]. *Functional Ecology*, 1994,8(3):315-323.
- [46] Hendrickson O Q, Chatarpaul L, Burgess D. Nutrient cycling following whole-tree and conventional harvest in northern mixed forest [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1989,19(6):725-735.
- [47] 陈素英,胡春胜. 太行山前平原农田生态系统土壤呼吸速率的研究[J]. *生态农业研究*, 1997,5(2):44-46.
- [48] 李新玉,耿绍波,赵淑琴,等. 淮北平原农林复合生态系统非生长季 CO₂ 通量变化特征[J]. *水土保持研究*, 2011,18(5):69-74.