

草地土壤呼吸对全球变化的响应

付 刚^{1,2}, 沈振西¹, 张宪洲¹, 余桂荣¹, 何永涛¹, 武建双^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室 拉萨高原生态系统研究站, 北京 100101;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要:草地是陆地生态系统主体生态类型之一,其土壤呼吸是全球碳循环的重要过程之一,草地土壤呼吸的动态变化将直接影响全球碳平衡。相对于其他陆地生态系统,草地对全球变化的响应更为迅速。因此,在全球变化的趋势下,草地土壤呼吸将首先受到影响。本文综述了全球变化下CO₂浓度上升、全球气温升高、全球降水增多、放牧、草地农垦以及土地利用管理措施(施肥、灌溉)的草地土壤呼吸响应。土壤呼吸对大气CO₂浓度上升和全球气温升高的响应都存在增加、减少和无显著变化3种情况,这与大气CO₂浓度上升和全球气温升高引起的土壤含水量、土壤N的可利用性等因素的改变与否有关。土壤呼吸Q₁₀受到土壤温度、土壤含水量、降水、土壤深度、土壤有机碳、海拔高度、土地利用方式和时间尺度等因素的影响。降水增多一般可以促进土壤呼吸,但降水引起的温度以及土壤通透性的降低也会导致土壤呼吸的降低。因放牧强度、频度和方式的差异,放牧对土壤呼吸的影响出现增加、减少和无显著影响的不同结果;人工剪草对土壤呼吸及其各组分的影响也存在差异。草地农垦后,土壤呼吸增强,土壤碳损失约为20%~50%。施肥对土壤呼吸的影响有增加、减少和无显著影响,因肥料种类和施用剂量等而异。在干旱和半干旱地区,灌溉会促进草地土壤呼吸。但是,目前全球变化对草地土壤呼吸的综合影响尚不清楚,因此深入探讨草地土壤呼吸对全球气候变化和土地利用变化的响应等仍是今后努力的主要方向。

关 键 词:土壤呼吸;全球变化;草地生态系统;响应;Q₁₀

全球变化不仅是当今科学界的热点研究问题之一,而且引起了世界各国政府的密切关注。全球变化是指“自然和人为因素造成的全球性环境变化,主要包括气候变化、大气组成变化,如CO₂及其他温室气体浓度的变化,以及由于人口、经济、技术和社会压力而引起的土地利用方式的变化3个方面”^[1]。其中气候变化是指“气候平均值和离差值两者中的一个或两者同时随时间出现了统计意义上的显著变化”^[1-4]。平均值的升降,表明气候平均状态的变化;离差值增大,表明气候状态不稳定性增加,气候异常愈明显^[1-4]。而土地利用是指“人类依据土地的自然属性,根据一定的经济、社会目的,通过采取一系列的生物、技术手段对土地进行的长期性或周期性经营活动,把土地的自然属性逐渐变为非自然属性的过程”^[1]。

工业革命以来,人类活动所导致的CO₂等温室气体的不断增多,大气CO₂浓度不断升高,预计到

21世纪末将达到700 μmol·mol⁻¹^[2],进而导致全球温度不断升高。Rustad等^[3]指出在未来的50—100年里,由于温室气体排放而引起的全球平均气温升高约1.0~3.5℃。Houghton等^[4]也指出,相对于1990年而言,2100年全球平均表面温度将升高1.4~5.8℃。总之,全球气候变暖已成为不可否认的事实。在全球变化的背景下,全球水分时空格局也发生巨大改变^[2,4]。20世纪以来,全球年均降水增加约2%^[5-6],其中,秋冬季节降水增加幅度较大^[4]。研究表明,气候变化和碳循环过程紧密联系在一起^[7-8],地下碳贮存和释放会随着气候变化而发生变化^[9]。

土地利用方式的转变会非常显著地影响陆地生态系统土壤有机碳的贮存和释放^[10],而土地利用引起的陆地生态系统向大气的碳释放是导致大气CO₂浓度升高的一个重要原因^[11],因此,土地利用和碳循环过程也是紧密联系在一起的。

由于放牧和农垦活动频繁,草地生态系统是目

收稿日期:2010-03; 修订日期:2010-07.

基金项目:国家自然科学基金项目(40771121);国家科技支撑计划项目(2007BAC06B01,2006BAC01A04)。

作者简介:付刚(1984-),男,河北保定人,博士研究生。研究方向为高原生态学,草地生态系统碳循环研究。

E-mail: fugang09@126.com

通讯作者:沈振西(1963-),男,河南新郑人,副研究员,主要研究领域:草地植物种群和群落生态、生理生态学、草地管理、退化草地的恢复生态学、全球变化生态学。E-mail: shenzx@igsnrr.ac.cn

前人类活动影响较为严重的区域之一^[12]。同时,草地生态系统的生态环境比较脆弱,因此,较其他陆地生态系统(如森林、农田等)而言,其对全球气候变化和人类活动(土地利用方式的改变等)的响应更为迅速^[11,13]。

作为陆地生态系统的主体类型之一^[14],草地生态系统是第二大陆地面积植被层,约占全球绿色植被生物量的36%,其总碳储量和土壤有机碳储量分别占陆地生态系统总碳储量和全球土壤有机碳储量的12.7%和15.5%^[15],其中89.4%的碳贮存在土壤中,而仅有10.6%的碳贮存在植被中^[16]。因此,全球变化对草地生态系统碳循环的影响主要是对土壤碳的影响。

土壤呼吸是指未经扰动的土壤由于代谢活动而产生CO₂的所有代谢过程,它包括3个生物过程(土壤微生物呼吸、根系呼吸、土壤动物呼吸)和1个非生物化学氧化分解过程^[17]。土壤呼吸是第二大陆地生态系统碳通量,仅小于植被光合作用^[18-21]。因此,土壤呼吸研究是当前科学研究的热点话题之一。目前,关于草地土壤呼吸对全球气候变化以及人类活动(如放牧、农垦等)的响应研究已经取得了一定程度的进展,本文对已经取得的相关研究成果综述如下。

1 土壤呼吸对气候变化的响应

1.1 土壤呼吸对全球大气CO₂浓度升高的响应

草地土壤呼吸对全球大气CO₂浓度升高的响应较复杂。大多数研究表明,大气CO₂浓度升高将促进草本植物尤其是C3植物光合作用,而抑制呼吸作用,因此将增加草地生态系统的碳净积累^[15]。如Ineson等^[22]在瑞士的多年生黑麦草(*Lolium perenne*)的Free Air Carbon Dioxide Enrichment (FACE)试验中观察到,对照(350 ppm)的土壤呼吸量要比CO₂浓度增加处理(600 ppm)的土壤呼吸量高约10%。也有研究表明,大气CO₂浓度升高将促进土壤呼吸。如Pendall等^[23]在某矮草草原群落发现,CO₂浓度加倍处理分别增加了干、湿生长季节约85%、25%的土壤呼吸量,土壤含水量可以在一定程度上解释增加的土壤呼吸量。

根系呼吸和土壤微生物呼吸是土壤呼吸的最重要的2个过程,因此,大气CO₂浓度升高对土壤呼吸的影响主要是作用于这2个过程。大气CO₂浓度

升高促进土壤呼吸的机理:①对植物而言,大气CO₂浓度升高存在着施肥效应和抗蒸腾效应,因此将促进植物的生长和根生物量的增加^[24]。同时,大气CO₂浓度升高将促进光合作用,增加光合产物,并促使更多的光合产物流向根系^[25]。CO₂浓度升高还将加速细根的衰老,增加土壤碳损失^[26]。因此,CO₂浓度升高将引起根系呼吸增强。②大气CO₂浓度升高促进了微生物活动,增加了微生物量,从而可以促进微生物呼吸^[27]。

CO₂浓度加倍试验表明高浓度CO₂可能会抑制根系呼吸和土壤微生物呼吸,这可能与土壤表面高浓度的CO₂阻碍了CO₂的扩散速率有关^[28]。如对某矮草草原群落的研究表明,CO₂浓度加倍虽然使得土壤有机质分解速率加倍,但是并没有显著改变根系呼吸速率^[23]。在森林和农田生态系统里,甚至发现在土壤CO₂浓度较高的情况下不但没有增加根系呼吸量,相反却抑制了根系呼吸^[29-31]。Hu等^[32]在美国加利福尼亚州的某砂岩草原群落发现,CO₂浓度(360→720 ppm)加倍显著抑制了生长季末的每单位微生物量的微生物呼吸,这可能与CO₂浓度加倍导致的土壤可利用N的减少以及土壤微生物N限制有关。

另有研究表明,大气CO₂浓度升高对土壤呼吸无显著影响。如在美国加利福尼亚州的某砂岩草原群落,CO₂浓度(360→720 ppm)加倍并没有显著改变平均的土壤呼吸($P=0.514$),这可能与根生物量的C:N比没有改变有关^[32]。

1.2 土壤呼吸对全球气温升高的响应

国际地圈生物圈计划的全球变化和陆地生态系统的核心项目最近已经启动了一个生态系统变暖研究网络,该研究网络的目的主要是研究生态系统水平的增温响应^[3]。生态系统增温试验可以为陆地生态系统如何响应全球变暖研究提供有价值的理论和相关基础数据^[3]。在全球温度升高的背景下,草地土壤呼吸对气温升高的响应研究已经引起了科学界的广泛关注。不同的研究者对此的看法不一,对此响应具有影响的因素有群落类型、土壤含水量和光合产物等。

温度升高既可促进土壤呼吸,也可以抑制土壤呼吸,因为土壤呼吸对温度的响应还受到其他因素的制约,如土壤含水量、酶的活性等^[33]。Rustad等^[3]利用元分析方法(Meta-analysis)探讨了32个站点土壤呼吸对生态系统增温的响应,研究结果表明,2—

9年的试验增温(增温幅度为 $0.3 \sim 6.0^{\circ}\text{C}$)显著地增加了土壤呼吸(约 $20\% \pm 2\%$),相对于森林生态系统,草地生态系统的土壤呼吸对试验增温的响应要小。而在欧洲一个森林草原交错地带,连续4年的增温试验发现,增温降低了土壤呼吸约 $7\% \sim 15\%$,这可能与增温引起的土壤含水量的减少有关^[34]。另有研究^[35-36]表明,2年的控制性增温并没有显著改变土壤呼吸速率。

土壤呼吸对增温的响应会随着研究时间的推移而发生变化。如在美国一个高草草原,连续6年(2000—2005)的控制性增温试验结果表明,增温第1年土壤呼吸下降了约 5% ^[37];增温第2、3年土壤呼吸分别增加了约 15.6% 和 8.0% ^[38],而前3年的增温效果只有第2年的达到了显著性水平^[38];增温第4年土壤呼吸增加了约 9.9% ^[39];增温第5、6年土壤呼吸分别增加了约 7.6% 和 8.4% ^[40]。

土壤呼吸各组分对温度升高的响应有差异。Zhou等^[40]在美国某高草草原群落的控制性增温试验中观察到,在整个研究期间(2002—2005年),增温显著增加了2002、2004—2005年的土壤异养呼吸,同时也显著增加了2002—2003、2005年的土壤自养呼吸;平均而言,增加了约 $13.3\% \sim 14.5\%$ 的土壤异养呼吸,同时增加了约 2.3% 的土壤自养呼吸。在西藏高原某草原化蒿草草甸的雨季和旱季时的土壤呼吸的 Q_{10} 值分别为2.54和2.34;而雨季和旱季的土壤异养呼吸的 Q_{10} 值分别为3.8和2.3^[41-42]。

研究表明,温度升高会降低土壤呼吸对温度的敏感性,即 Q_{10} 值下降^[37,39-40]。大多数研究表明, Q_{10} 值和土壤含水量呈正相关关系^[43-45]。刘立新等^[46]则认为土壤呼吸 Q_{10} 值随着土壤含水量的增大而减小。而罗光强和耿元波^[47]认为 Q_{10} 值随着 $0 \sim 10\text{cm}$ 土壤含水量的增加先增加后减小。土壤 Q_{10} 值和土壤含水量的复杂关系,主要归因于土壤含水量变化范围^[47]。以上研究^[43-47]表明,土壤呼吸 Q_{10} 和土壤含水量的关系比较复杂。 Q_{10} 不仅受土壤温度^[44,47-48]和土壤含水量^[43-47]的影响,且还受降水^[39]、土壤深度^[48]、土壤有机碳^[49]、海拔高度^[50]、人工剪草^[40]、土地利用方式^[33,51]、时间尺度^[52]等因素的影响,因而必然导致土壤呼吸对温度升高响应的复杂关系。

1.3 土壤呼吸对全球降水增多的响应

定量化生态系统碳过程对降水的响应对于评价气候变化对陆地生态系统影响是非常重要的^[53]。

大多数研究表明,降水增多将促进土壤呼吸作

用,这是因为降水一方面可以增加土壤含水量,另一方面则可以通过冲刷和淋洗作用促使枯枝落叶向地下转移,增加土壤呼吸底物^[54]。脉冲式降水可以增强土壤呼吸作用,且土壤呼吸会随着脉冲式降水强度的增加而增强^[55]。水的添加增加土壤呼吸速率,改变沙质草原生态系统的碳平衡格局^[56]。在美国某高草草原,增温和降水两因子试验表明,降水加倍显著增加了约 9.0% 的土壤呼吸^[39]。在美国德克萨斯州的某热带草原,灌溉不尽促进了土壤呼吸,而且显著提高了土壤呼吸的温度敏感性(Q_{10} 值从非灌溉处理的1.6变为灌溉处理的2.6)^[57]。

沿着时间或空间上的自然降水梯度也表明降水增多会促进土壤呼吸作用。在美国俄克拉荷马州的温带草原,土壤呼吸随着年均降水量的增加而线性增加^[53]。董云社等^[58]在比较内蒙古锡林河流域4种草地群落(贝加尔针茅草原、羊草草原、大针茅草原和克氏针茅草原)土壤呼吸时发现土壤呼吸量沿着降水梯度递减。

也有研究表明,降水将抑制土壤呼吸作用。在高寒矮嵩草草甸群落,吴琴等^[59]发现,生长季节的土壤呼吸多次出现低谷,这是由于频繁降水引起的土壤温度降低而造成的;同时,当降水发生时,土壤气孔被雨水充满,降低了土壤通气性,减少 CO_2 的逸出量^[60],土壤 CO_2 不易产生或产生后易溶于水中,而 CO_2 在水中扩散速率($1.77 \times 10^{-5} \text{cm/s}$)很低^[61],进而减少了土壤 CO_2 的释放量。

除此之外,土壤呼吸对降水的响应还具有时间效应。在美国一个高草大草原生态系统,模拟降水(0、10、25、50、100、150、200和300 mm 8个水平)试验表明,随着时间的推移,土壤含水量和土壤呼吸开始迅速增加,达到峰值后开始逐渐下降,该过程可以用方程 $Y=Y_0+ate^{-bt}$ 表示(Y 代表土壤呼吸或土壤含水量; Y_0 代表水添加前的土壤呼吸或土壤含水量; t 代表时间; a 和 b 是系数);其中添加10 mm水的 a 、 b 值最大^[62]。

1.4 土壤呼吸对全球大气 CO_2 浓度和气温共同升高的响应

大气 CO_2 浓度或空气温度的升高都可能改变生态系统C循环过程,进而对气候变化产生正反馈或负反馈机制^[63]。因此,两者的交互作用也有可能影响土壤呼吸。

Coughenour和Chen^[64]在美国的两个州(科罗拉多州和堪萨斯州)和肯尼亚,利用植物-土壤过程模

型对碳循环过程进行了模拟,结果表明,通过影响植物生长和分解过程,5℃的增温减少了约20%~30%的土壤有机碳;而CO₂浓度加倍引起的植物生长的增加减少了土壤C损失。在美国的怀俄明州的某干旱草地群落的CO₂浓度和温度两因子试验,Parton等^[65]则发现,整体而言,增温对土壤呼吸有轻微的正效应;由于较高的土壤含水量,CO₂浓度增加促进大多数年份的土壤异养呼吸;温度和CO₂浓度增加的交互作用较少地促进大多数年份的土壤呼吸,而较多地促进了2010和2013年土壤呼吸,这主要是由于2010和2013年环境湿度较高。

1.5 土壤呼吸对全球气温和降水共同变化的响应

温度升高和降水增多对土壤呼吸的影响都存在着促进或抑制的两种截然相反的结果,因此两者的交互作用也必然会对土壤呼吸造成一定程度的影响。

降水虽然可以增加土壤含水量和土壤呼吸底物^[54],但是降水引起的土壤温度下降会导致土壤呼吸速率下降^[59]。Zhou等^[39]的研究也表明,只增温处理显著减少了约29.4%的土壤含水量,而增温和降水的交互作用则仅仅减少了约25.1%的土壤含水量,这说明降水削弱了增温引起的土壤含水量下降的效果,即增加了土壤含水量。同时,只增温处理显著增加了约2.97℃的土壤温度,而增温和降水的交互作用则仅仅显著增加了约2.5℃的土壤温度,这说明降水削弱增温效果,即降低了土壤温度^[39]。

温度升高和降水增多的交互作用对土壤呼吸的影响取决于两者中起主导作用的因子。虽然温度升高和降水加倍的交互作用增加了土壤呼吸的温度敏感性,但是两者的交互作用对土壤呼吸无显著影响,这主要归因于研究年份的异常较低的降水量及其较高的时间变异性,长期的干旱将削弱人工模拟降水的效果^[39]。在中国北方一个温带半干旱大草原群落,增温和降水增多的交互作用对根系生产力、死亡率和现存量存在着显著的拮抗作用,而土壤呼吸和根系生产力及其死亡率表现为正相关关系^[66],因此,增温和降水增多对土壤呼吸的影响也可能表现为拮抗作用。

综上,降水和温度的交互作用对土壤呼吸的影响机理:①降水可以增加土壤含水量,促进土壤呼吸,增温则导致土壤含水量降低,减少土壤呼吸;②降水引起土壤温度下降,减少土壤呼吸,增温则使得土壤温度升高,促进土壤呼吸;③降水增多和增

温引起的土壤温湿度的变化会对植被和土壤微生物活动造成影响,进而导致土壤呼吸的变化。

2 土壤呼吸对人类活动的响应

影响草地生态系统土壤呼吸的人类活动主要包括土地利用方式(如放牧、农垦等)和土地利用管理措施(如施肥、灌溉等)。

土地利用方式的改变会对植被、土壤微生物的组成和活性以及土壤理化性质(如土壤温湿度、土壤通透性)等方面产生影响^[11,67-68],因此,不同土地利用方式的土壤呼吸速率^[69-70]及其Q₁₀值不同^[33,51,71]。

2.1 放牧

放牧是草地生态系统常见的一种土地利用方式。放牧对草地生态系统的影响是多方面的,它会对植被、土壤微生物及土壤理化性质等方面产生影响^[11,67-68],进而可影响土壤呼吸。放牧对土壤呼吸的影响会因放牧强度、频度和放牧方式而有所不同。研究表明,放牧降低土壤呼吸速率^[51,71-75],这可能与地上生物量的减少和土壤含水量的改变有关^[72-73]。在科尔沁沙质草原,不同放牧强度(对照、轻度放牧、中度放牧和重度放牧4个水平)后自然恢复的碳循环的对比研究发现,土壤呼吸速率的大小为轻度放牧>对照>中度放牧>重度放牧,适度放牧(轻度和中度)后围栏封育更有利于增加碳汇^[74]。Wang等^[75]在内蒙古四子王旗短花针茅草原,则发现随着载畜量的增加土壤呼吸强度降低,且过度放牧(中度和重度放牧)与对照的土壤呼吸差异显著,轻度放牧、中度放牧和重度放牧的土壤呼吸分别比对照减少了17%、47%和57%。

也有研究表明,放牧不但不会降低土壤呼吸速率,反而会增强呼吸速率。如Frank等^[76]在美国大平原地区的一个大草原发现,放牧群落的生长季节的日均呼吸总量(4.3 gCm⁻²d⁻¹)要大于无放牧群落(3.5 gCm⁻²d⁻¹)。在内蒙古锡林河流域羊草草原,Li等^[77]发现40年的过度放牧导致表层土壤(0~20 cm)的碳贮量下降了约12.4%,损失的碳主要是活性炭和缓性碳。另外的研究表明,放牧虽然可以改变土壤呼吸,但是差异并不显著。李凌浩等^[78]在锡林河流域的羊草草原群落发现,放牧和无放牧羊草群落生长季节的土壤呼吸总量分别为237.0~305.6 gCm⁻²和249.4~320.7 gCm⁻²,而两者间差异并不显著。陈海军等^[79]在呼伦贝尔贝加尔针茅草原,一个

生长季节不同放牧强度(对照、轻度放牧、中度放牧和重度放牧4个水平)的土壤微生物和土壤呼吸的观测结果表明,沿着放牧梯度,土壤呼吸增强,微生物量减少,但方差分析的结果表明,各放牧水平间差异不明显,这可能与土壤滞后于植被对放牧的反应有关。

放牧还可改变土壤呼吸对温度的敏感性^[39]。重度放牧高寒草甸群落的 Q_{10} 值要小于轻度放牧群落^[51]。Zhou等^[40]也发现在美国某高草草原,人工剪草处理使得土壤呼吸及其各组分(土壤异养呼吸和根系呼吸)的 Q_{10} 值显著下降($P<0.05$)。

土壤呼吸对人工模拟放牧(人工剪草处理)的响应也存在差异。土壤呼吸速率对人工模拟放牧频率和研究时长的响应不同,连续4年的每年一次的人工模拟放牧对土壤呼吸的影响不显著($P=0.66$),而一次的人工模拟放牧后的两个月内的土壤呼吸显著降低了16.1%($P<0.05$)^[39]。Wan等^[38]则认为当土壤含水量不是限制性因子时,人工模拟放牧会增强土壤呼吸强度。

人工模拟放牧对土壤呼吸不同组分的影响不同。人工模拟放牧虽然没有显著降低土壤呼吸速率,但却显著降低了微生物呼吸速率^[80]。在美国某高草草原,连续6年(2000—2005)每年一次的人工模拟放牧试验结果表明,人工模拟放牧虽然显著减少了2004—2005年的土壤呼吸量,并显著减少了2002—2005年的土壤异养呼吸量,但对根系呼吸的影响不明显^[40]。

2.2 草地农垦

草地农垦是影响草地土壤呼吸最为剧烈的人类活动^[81]。农垦对草地生态系统的影响也是多方面的,它会对植被、土壤微生物以及土壤理化性质等方面产生影响^[67]。草地农垦同放牧对土壤呼吸的影响类似,也会因农垦强度、频率和耕作措施而有所不同。

多数研究表明,草地开垦为农田后土壤呼吸增强^[11,82-83]。这主要归因于以下2个方面:①草地开垦为农田的过程中会引起土壤有机碳的大量释放,农垦伴随的烧荒等措施将会导致原本固定在植物中的有机碳全部释放到空气中,同时农田收获又减少了土壤有机碳的输入;②农垦使得土壤温、湿度环境得到改善,加速了土壤有机质的分解,进而促进了土壤呼吸。如Zhou等^[70]沿着东北样带的碳平衡研究发现,开垦草甸草原的土壤呼吸(1707.9 mg

$\text{Cm}^{-2}\text{h}^{-1}$)要大于未开垦草甸草原的土壤呼吸(1304.3 $\text{mg C m}^{-2}\text{h}^{-1}$)。

闫玉春等研究^[10]表明,土壤呼吸对草地农垦的响应具有时间效应,即翻耕措施短期内导致土壤呼吸迅速增加,且随翻耕深度的增加而增加,这主要归因于土壤不稳定性碳成分的迅速氧化和土壤团聚体的破坏;翻耕一段时间后,土壤呼吸增强趋势减弱并趋于稳定,主要的原因是此时土壤不稳定性碳组分氧化趋于平衡和翻耕引起的根系死亡减弱了根系呼吸的贡献。许多研究表明,草地开垦为农田后,土壤碳素总量将损失约20%~50%^[67,82,84-88]。

2.3 施肥

目前,施肥(包括有机肥和无机肥)对土壤呼吸的影响还存在着争论^[19,89]。

土壤有机质是土壤呼吸的主要碳源,因此施用有机肥通常会增加土壤呼吸量^[17]。有机肥的施用提高人工草地的土壤呼吸^[90]。在苏格兰爱丁堡某温带草原,有机肥料(牛浆、污水淤渣、家禽粪便)的添加处理也显著增加了土壤呼吸,而无机肥(硝酸铵、尿素)的添加处理对土壤呼吸的作用不显著^[91]。

无机肥对土壤呼吸影响比较复杂。有研究^[83]表明,矿质元素N肥的添加减少了天然草地和农田的土壤呼吸速率。但也有研究^[19]表明,无机肥的施用对土壤呼吸的作用并不显著。珊丹等^[35]发现,在某荒漠草原N肥的施用没有明显增加土壤呼吸。于占源等^[56]在内蒙古科尔沁沙质草原也发现N肥的添加虽然增加了地上生物量,但并没有明显影响土壤呼吸,磷肥添加对土壤呼吸的影响也不明显。

此外,施肥对土壤呼吸各组分(微生物呼吸、根系呼吸)的影响程度不同。如Stark等^[80]的研究表明,虽然施肥(N、P、K分别为8 g/m^2 、2 g/m^2 、8.6 g/m^2)显著增强了土壤呼吸,但是并没有显著影响微生物呼吸,这说明施肥主要是促进了根系呼吸。

2.4 灌溉

在干旱和半干旱地区,灌溉可以弥补干旱对植物生长的限制,因此能够促进土壤呼吸^[19]。研究^[83]表明,灌溉增加了天然草地和农田的土壤呼吸量。

3 研究展望

草地土壤呼吸对全球变化的响应机理是复杂的,它受到各种生物因子和非生物因子的综合影响。因此,今后应该加强以下5个方面的研究:①

草地土壤呼吸对气温升高、降水增多、放牧、草地农垦等的响应会随着时间的推移而发生变化,因此,应该加强长期连续的试验观测;②草地长期农垦对碳循环的影响的报道已经很多,但关于农垦短期内对碳循环影响的研究比较少,因此,应该加强农垦短期内对碳收支影响的研究;③加强土壤呼吸各组分对全球变化的响应机理研究;④加强土壤呼吸各影响因子对土壤呼吸的综合效应研究;⑤加强土壤呼吸 Q_{10} 值与各影响因子的关系研究。

参考文献

- [1] 周广胜, 王玉辉. 全球生态学. 北京: 气象出版社, 2003: 17-40.
- [2] Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J J. Climate Change: The IPCC Scientific Assessments. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [3] Rustad L E, Campbell J L, Marion G M, et al. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia*, 2001, 126(4): 543-562.
- [4] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 1-896.
- [5] Hulme M, Osborn T J, Johns T C. Precipitation sensitivity to global warming: Comparison of observations with HadCM2 simulations. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(17): 3379-3382.
- [6] Jones P D, Hulme M. Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: Methods and illustrations. *International Journal of Climatology*, 1996, 16(4): 361-377.
- [7] Wan S Q, Xia J Y, Liu W X, et al. Photosynthetic overcompensation under nocturnal warming enhances grassland carbon sequestration. *Ecology*, 2009, 90(10): 2700-2710.
- [8] Yurova A Y, Volodin E M, Agren G I, et al. Effects of variations in simulated changes in soil carbon contents and dynamics on future climate projections. *Global Change Biology*, 2010, 16(2): 823-835.
- [9] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature*, 2010, 464(7288): 579-583.
- [10] 闫玉春, 王旭, 李林芝, 等. 翻耕短期内对草原土壤呼吸的影响. *中国草地学报*, 2010, 32(1): 75-78.
- [11] 李凌浩. 土地利用方式对草原生态系统土壤碳贮量的影响. *植物生态学报*, 1998, 22(4): 300-302.
- [12] 周萍, 刘国彬, 薛莲. 草地生态系统土壤呼吸及其影响因素研究进展. *草业学报*, 2009, 18(2): 184-193.
- [13] 张芳, 王涛, 薛娴, 等. 影响草地土壤呼吸的主要自然因子研究现状. *中国沙漠*, 2009, 29(5): 872-877.
- [14] 赵有益, 龙瑞军, 林慧龙, 等. 草地生态系统安全及其评价研究. *草业学报*, 2008, 17(2): 143-150.
- [15] 刘立新, 董云社, 齐玉春. 草地生态系统土壤呼吸研究进展. *地理科学进展*, 2004, 23(4): 35-42.
- [16] 齐志勇, 王宏燕, 王江丽, 等. 陆地生态系统土壤呼吸的研究进展. *农业系统科学与综合研究*, 2003, 19(2): 116-119.
- [17] Singh J S, Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *The Botanical Review*, 1977, 43(4): 449-528.
- [18] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(1): 23-36.
- [19] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, 44(2): 81-99.
- [20] Schlesinger W H. Carbon balance in terrestrial detritus. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1977, 8(1): 51-81.
- [21] Stoffel J L, Gower S T, Forrester J A, et al. Effects of winter selective tree harvest on soil microclimate and surface CO_2 flux of a northern hardwood forest. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(3): 257-265.
- [22] Ineson P, Coward P A, Hartwig U A. Soil gas fluxes of N_2O , CH_4 and CO_2 beneath *Lolium perenne* under elevated CO_2 : The Swiss free air carbon dioxide enrichment experiment. *Plant and Soil*, 1998, 198(1): 89-95.
- [23] Pendall E, Del Grosso S, King J Y, et al. Elevated atmospheric CO_2 effects and soil water feedbacks on soil respiration components in a Colorado grassland. *Global Biogeochemistry Cycles*, 2003, 17(2): 1046, doi:10.1029/2001GB001821.
- [24] Owensby C E, Auen L M, Coyne P I. Biomass production in a nitrogen-fertilized, tallgrass prairie ecosystem exposed to ambient and elevated levels of CO_2 . *Plant and Soil*, 1994, 165(1): 105-113.
- [25] Hungate B A, Holland E A, Jackson R B, et al. The fate of carbon in grasslands under carbon dioxide enrichment. *Nature*, 1997, 388(6642): 576-579.
- [26] 曹裕松, 李志安, 江远清, 等. 陆地生态系统土壤呼吸研究进展. *江西农业大学学报*, 2004, 26(1): 138-143.
- [27] Berntson G M, Bazzaz F A. Belowground positive and negative feedbacks on CO_2 growth enhancement. *Plant and Soil*, 1996, 187(2): 119-131.
- [28] 周玉梅, 韩士杰, 辛丽花. CO_2 浓度升高对红松和长白松土壤呼吸作用的影响. *应用生态学报*, 2006, 17(9): 1757-1760.
- [29] Harris D G, van Bavel C H M. Growth, yield, and water absorption of tobacco plants as affected by the composi-

- tion of the root atmosphere. *Agronomy Journal*, 1957, 49 (1): 11-14.
- [30] Harris D G, van Bavel C H M. Root respiration of tobacco, corn, and cotton plants. *Agronomy Journal*, 1957, 49 (4): 182-184.
- [31] Qi J E, Marshall J D, Mattson K G. High soil carbon-dioxide concentration inhibit root respiration of Douglas-Fir. *New Phytologist*, 1994, 128(3): 435-442.
- [32] Hu S, Chapin F S, Firestone M K, et al. Nitrogen limitation of microbial decomposition in a grassland under elevated CO₂. *Nature*, 2001, 409(6817): 188-191.
- [33] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 温带草原 11 个植物群落夏秋土壤呼吸对气温变化的响应. *植物生态学报*, 2003, 27(4): 441-447.
- [34] Lellei-Kovács E, Kovács-Láng E, Kalapos T, et al. Experimental warming does not enhance soil respiration in a semiarid temperature forest-steppe ecosystem. *Community Ecology*, 2008, 9(1): 29-37.
- [35] 珊丹, 韩国栋, 赵萌莉, 等. 控制性增温和施氮对荒漠草原土壤呼吸的影响. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(9): 106-112.
- [36] Briones M J I, Ostle N J, McNamara N R, et al. Functional shifts of grassland soil communities in response to soil warming. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(2): 315-322.
- [37] Luo Y, Wan S, Hui D F, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature*, 2001, 413(6856): 622-625.
- [38] Wan S Q, Hui D F, Wallace L, et al. Direct and indirect effects of experimental warming on ecosystem carbon process in a tallgrass prairie. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(2): GB2014, doi:10.1029/2004GB002315.
- [39] Zhou X H, Sherry R A, An Y, et al. Main and interactive effects of warming, clipping, and doubled precipitation on soil CO₂ efflux in a grassland ecosystem. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20(1): GB1003, doi:10.1029/2005GB002526.
- [40] Zhou X H, Wan S Q, Luo Y Q. Source components and interannual variability of soil CO₂ efflux under experimental warming and clipping in a grassland ecosystem. *Global Change Biology*, 2007, 13(4): 761-775.
- [41] 张东秋. 西藏高原草原化嵩草草甸生态系统呼吸及碳平衡[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2005: 59-61.
- [42] 张东秋, 石培礼, 何永涛, 等. 西藏高原草原化小嵩草草甸生长季土壤微生物呼吸测定. *自然资源学报*, 2006, 21(3): 458-464.
- [43] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 典型温带草原群落土壤呼吸温度敏感性与土壤水分的关系. *生态学报*, 2004, 24 (4): 831-836.
- [44] 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. *生态学报*, 2007, 27(5): 1960-1968.
- [45] Conant R T, Dalla-Betta P, Klopatek C C, et al. Controls on soil respiration in semiarid soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(6): 945-951.
- [46] 刘立新, 董云社, 齐玉春, 等. 内蒙古锡林郭勒流域土壤呼吸的温度敏感性. *中国环境科学*, 2007, 27(2): 226-230.
- [47] 罗光强, 耿元波. 温度和水分对羊草草原土壤呼吸温度敏感性的影响. *生态环境学报*, 2009, 18(5): 1938-1943.
- [48] 齐玉春, 董云社, 刘立新, 等. 内蒙古锡林河流域主要针茅属草地土壤呼吸变化及其主导因子. *中国科学: D 辑*, 2010, 40(3): 341-351.
- [49] 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. *环境科学学报*, 2005, 25(11): 1537-1542.
- [50] 施政, 汪家社, 何容, 等. 武夷山不同海拔植被土壤呼吸季节变化及对温度的敏感性. *应用生态学报*, 2008, 19 (11): 2357-2363.
- [51] Cao G M, Tang Y H, Mo W H, et al. Grazing intensity alters soil respiration in an alpine meadow on the Tibetan plateau. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(2): 237-243.
- [52] Wang W, Peng S S, Wang T, et al. Winter soil CO₂ efflux and its contribution to annual soil respiration in different ecosystems of a forest-steppe ecotone, North China. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42(3): 451-458.
- [53] Zhou X H, Tallev M, Luo Y Q. Biomass, litter, and soil respiration along a precipitation gradient in southern Great Plains, USA. *Ecosystems*, 2009, 12(8): 1369-1380.
- [54] Gupta S R, Singh J S. Soil respiration in a tropical grassland. *Soil Biology and Biochemistry*, 1981, 13(4): 261-268.
- [55] Munson S M, Benton T J, Lauenroth W K, et al. Soil carbon flux following pulse precipitation events in the short-grass steppe. *Ecological Research*, 2010, 25(1): 205-211.
- [56] 于占源, 曾德慧, 姜凤岐, 等. 半干旱区沙质草地生态系统碳循环关键过程对水肥添加的响应. *北京林业大学学报*, 2006, 28(4): 45-50.
- [57] McCulley R L, Boutton T W, Archer S R. Soil respiration in a subtropical savanna parkland: Response to water additions. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71 (3): 820-828.
- [58] 董云社, 齐玉春, 刘纪远, 等. 不同降水强度 4 种草地群落土壤呼吸通量变化特征. *科学通报*, 2005, 50(5): 473-480.
- [59] 吴琴, 曹广民, 胡启武, 等. 矮嵩草草甸植被-土壤系统 CO₂ 的释放特征. *资源科学*, 2005, 27(2): 96-102.
- [60] 张金霞, 曹广民, 周党卫, 等. 草毡寒冻锥形土 CO₂ 释放特征. *生态学报*, 2001, 21(4): 544-549.
- [61] 张金霞, 曹广民, 周党卫, 等. 退化草地暗沃寒冻锥形土 CO₂ 释放的日变化和季节动态. *土壤学报*, 2001, 38(1):

- 31-40.
- [62] Liu X Z, Wan S Q, Su B, et al. Response of soil CO₂ efflux to water manipulation in a tall grass prairie ecosystem. *Plant and Soil*, 2002, 240(2): 213-223.
- [63] Pendall E, Bridgham S, Hanson P J, et al. Below-ground process responses to elevated CO₂ and temperature: A discussion of observations, measurements methods, and models. *New Phytologist*, 2004, 162(2): 311-322.
- [64] Coughenour M B, Chen D X. Assessment of grassland ecosystem responses to atmospheric change using linked plant-soil process models. *Ecological Applications*, 1997, 7(3): 802-827.
- [65] Parton W J, Morgan J A, Wang G M, et al. Projected ecosystem impact of the prairie heating and CO₂ enrichment experiment. *New Phytologist*, 2007, 174(4): 823-834.
- [66] Bai W M, Wan S Q, Niu S L, et al. Increased temperature and precipitation interact to affect root production, mortality, and turnover in a temperate steppe: Implications for ecosystem C cycling. *Global Change Biology*, 2010, 16(4): 1306-1316.
- [67] 闫玉春, 唐海萍, 常瑞英, 等. 长期开垦与放牧对内蒙古典型草原地下碳截存的影响. *环境科学*, 2008, 29(5): 1388-1393.
- [68] 齐玉春, 董云社, 耿元波, 等. 我国草地生态系统碳循环研究进展. *地理科学进展*, 2003, 22(4): 342-352.
- [69] 曹广民, 李英年, 张金霞, 等. 高寒草甸不同土地利用格局土壤CO₂的释放量. *环境科学*, 2001, 22(6): 14-19.
- [70] Zhou G S, Wang Y H, Jiang Y L, et al. Carbon balance along the Northeast China Transect (NECT-IGBP). *Science in China: Series C*, 2002, 45(Suppl.): 18-29.
- [71] 李志刚, 侯扶江. 管理方式与地形对黄土高原丘陵沟壑区草地土壤呼吸的影响. *土壤通报*, 2009, 40(4): 721-724.
- [72] 车宗玺, 刘贤德, 王顺利, 等. 祁连山放牧草原土壤呼吸及影响因子分析. *水土保持学报*, 2008, 22(5): 172-175.
- [73] 贾瑞端, 周广胜, 王凤玉, 等. 放牧与围栏羊草草原土壤呼吸作用及其影响因子. *环境科学*, 2005, 26(6): 1-7.
- [74] 李玉强, 赵哈林, 赵学勇, 等. 不同强度放牧后自然恢复的沙质草地土壤呼吸、碳平衡与碳储量. *草业学报*, 2006, 15(5): 25-31.
- [75] Wang Z W, Jiao S Y, Han G D, et al. Soil respiration response to different stocking rates on *Stipa breviflora* Griseb. Desert Steppe. *Journal of Inner Mongolia University*, 2009, 40(2): 186-193.
- [76] Frank A B, Liebig M A, Hanson J D. Soil carbon dioxide fluxes in northern semiarid grasslands. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34(9): 1235-1241.
- [77] Li L H, Chen Z Z, Wang Q B, et al. Changes in soil carbon storage due to over-grazing in *Leymus chinensis* steppe in the Xilin River Basin of Inner Mongolia. *Journal of Environmental Sciences(China)*, 1997, 9(4): 486-490.
- [78] 李凌浩, 王其兵, 白永飞, 等. 锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子的研究. *植物生态学报*, 2000, 24(6): 680-686.
- [79] 陈海军, 王明玖, 韩国栋, 等. 不同强度放牧对贝加尔针茅草原土壤微生物和土壤呼吸的影响. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(4): 165-169.
- [80] Stark S, Kytöviita M M. Simulated grazer effects on microbial respiration in a subarctic meadow: Implications for nutrient competition between plants and soil microorganisms. *Applied Soil Ecology*, 2006, 31(1-2): 20-31.
- [81] 耿元波, 罗光强, 袁国富, 等. 农垦及放牧对温带半干旱草原土壤碳素的影响. *农业环境科学学报*, 2008, 27(6): 2518-2523.
- [82] 王艳芬, 陈佐忠, Tieszen L T. 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响. *植物生态学报*, 1998, 22(6): 545-551.
- [83] De Jong E, Schappert H J V, MacDonald K B. Carbon dioxide evolution from virgin and cultivated soil as affected by management practices and climate. *Canadian Journal of Soil Science*, 1974, 54(3): 299-307.
- [84] 李明峰, 董云社, 齐玉春, 等. 农垦对温带草地生态系统CO₂、CH₄、N₂O通量的影响. *中国农业科学*, 2004, 37(12): 1960-1965.
- [85] Aguilar R, Kelly E F, Heil R D. Effects of cultivation on soils in Northern Great Plains Rangeland. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52(4): 1081-1085.
- [86] Davidson E A, Ackerman I L. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils. *Biogeochemistry*, 1993, 20(3): 161-193.
- [87] Lal R. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. *Environmental Pollution*, 2002, 116(3): 353-362.
- [88] Tiessen H, Stewart J W B, Bettany J R. Cultivation effects on the amounts and concentration of carbon, nitrogen, and phosphorus in grassland soils. *Agronomy Journal*, 1982, 74(5): 831-835.
- [89] Picek T, Kaštovská E, Edwards K, et al. Short term effects of experimental eutrophication on carbon and nitrogen cycling in two types of wet grassland. *Community Ecology*, 2008, 9(Suppl): 81-90.
- [90] 套格图, 赵吉, 孙启忠. 多年生人工草地对沙质土壤呼吸作用的影响. *中国沙漠*, 2008, 28(2): 301-305.
- [91] Jones S K, Rees R M, Kosmas D, et al. Carbon sequestration in a temperate grassland, management and climatic controls. *Soil Use and Management*, 2006, 22(2): 132-142.

Responsence of Grassland Soil Respiration to Global Change

FU Gang^{1,2}, SHEN Zhenxi¹, ZHANG Xianzhou¹, YU Guirong¹, HE Yongtao¹, WU Jianshuang^{1,2}

(1. Lhasa Plateau Ecosystem Research Station, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling,

Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Grassland is one of the main terrestrial ecotypes and the dynamic change of its soil respiration can directly affect the global C cycle. Grassland responses more rapidly to global C cycle than other terrestrial ecosystems. Therefore, grassland soil respiration could be firstly affected by global climate change and land use change. The objective of this paper is to provide a scientific review on grassland soil respiration response to global change and human activities. The elevated atmospheric CO₂ and rising temperature can both stimulate, suppress or show no significant effect on grassland soil respiration, depending on whether changes of soil moisture, soil available N and other related factors occur or not. The Q₁₀, which is the temperature sensitivity index of soil respiration, of grassland soil respiration is affected by soil temperature, soil moisture, precipitation, soil depth, soil organic carbon, altitude, land use patterns, time scales and other related factors. This implies that the relationships between grassland soil respiration and soil temperature is affected by other factors and grassland soil respiration is actually affected by the combined effects of multiple factors. Increasing precipitation will generally stimulate grassland soil respiration. However, the decrease of soil temperature and soil permeability which are caused by precipitation will reduce soil respiration amount. Due to grazing intensity, grazing frequency and grazing forms, the impact of grazing on soil respiration appears to increase, decrease or show no significant effect. The effects of clipping on soil respiration and its components (soil heterotrophic respiration and root respiration) are different. When agricultural reclamation occurs in grassland, soil respiration could enhance and the soil carbon will lose approximately 20%-50%. Fertilization might increase, decrease or show no significant effect on grassland soil respiration, according to fertilizer type, loading levels and so on. In the arid and semi-arid regions, irrigation might promote grassland soil respiration. However, the integrated effects of these global changes, i.e., elevated atmospheric CO₂, rising temperature, increasing precipitation, grazing, land reclamation, fertilization and irrigation, are unclear. Therefore, the research on the response of soil respiration to global climate change and land use change should be enhanced in the future.

Key words: soil respiration; global change; grassland ecosystem; response; Q₁₀

本文引用格式:

付刚, 沈振西, 张宪洲, 等. 草地土壤呼吸对全球变化的响应. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1391-1399.