

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201309027

崔树娟, 朱小雪, 汪诗平, 等. 增温和放牧对草地土壤和生态系统呼吸的影响[J]. 广西植物, 2015, 35(1):126-132

Cui SJ, Zhu XX, Wang SP, et al. Effects of warming and grazing on soil and ecosystem respirations in grasslands: mini review[J]. *Guihaia*, 2015, 35(1):126-132

增温和放牧对草地土壤和生态系统呼吸的影响

崔树娟^{1,3}, 朱小雪^{1,3}, 汪诗平^{2*}, 王常顺^{2,3}, 孟凡栋^{2,3}, 王奇^{2,3}

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008; 2. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 草地生态系统作为世界陆地生态系统的主体类型, 其土壤呼吸和生态系统呼吸是陆地生态系统碳循环的重要组成部分, 土壤呼吸是未经扰动的土壤由于代谢活动而产生 CO₂ 的过程, 生态系统呼吸包括地下部分的土壤呼吸和地上部分植被的自养呼吸。研究增温和放牧对草地土壤和生态系统呼吸的影响, 可为预测未来气候变化条件下的全球碳收支以及草地的可持续经营与管理提供重要的科学依据。该文扼要综述了关于草地土壤和生态系统呼吸对增温和放牧的响应方面的研究。结果表明: 草地土壤和生态系统呼吸对增温和放牧的响应非常复杂, 受多种因素的综合影响, 无论是增温还是放牧对草地土壤和生态系统呼吸的影响均具有不确定性, 因草地类型、增温幅度、增温时间、放牧强度、放牧频度和放牧方式的不同而不同。在此基础上, 指出了以后应加强研究的方向, 草地的利用离不开放牧, 对于未来气候变化条件下的草地, 温度升高和放牧这两个因素必然是同时存在的, 以前多数实验是单独研究增温或放牧对它们的影响, 然而, 这两者对草地生态系统的影响并非可加的, 因此, 需要加强增温与放牧的耦合试验, 同时加强关于生态系统呼吸不同组分对两者的响应的研究, 以便更好地理解增温和放牧的影响机制。另外, 草地土壤和生态系统呼吸对增温和放牧的响应会随着时间的推移而发生变化, 因而加强长期连续的试验观测很有必要。

关键词: 增温; 放牧; 草地; 土壤呼吸; 生态系统呼吸

中图分类号: Q948.11 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2015)01-0126-07

Effects of warming and grazing on soil and ecosystem respirations in grasslands: mini review

CUI Shu-Juan^{1,3}, ZHU Xiao-Xue^{1,3}, WANG Shi-Ping^{2*},
WANG Chang-Shun^{2,3}, MENG Fan-Dong^{2,3}, WANG Qi^{2,3}

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; 2. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As one of the main types of terrestrial ecosystems, grasslands ecosystem plays an important role in global carbon cycle. Soil respiration is the process of undisturbed soil producing CO₂ as a result of metabolic activities. Ecosystem respiration includes underground soil respiration and autotrophic respiration of aboveground vegetation. Grasslands soil respiration and ecosystem respiration are important parts of terrestrial ecosystem carbon cycle. Researches on the effects of warming and grazing on soil and ecosystem respirations in grasslands can provide important scientific basis for predicting global carbon budget under future climate change conditions and sustainable operation and management of grasslands. This article briefly reviewed these studies and found that there were no consistent results

收稿日期: 2014-02-28 修回日期: 2014-08-25

基金项目: 中国科学院青藏专项 B(XDB03030403); 中国科学院碳专项项目(XDA05070205)。

作者简介: 崔树娟(1988-), 女, 河北石家庄市人, 在读硕士, 气候变化与放牧生态学专业, (E-mail) cuishujuankaty@163.com。

* 通讯作者: 汪诗平, 博士, 研究员, 从事全球变化生态学研究, (E-mail) wangsp@itpcas.ac.cn。

about the response of soil and ecosystem respirations in grasslands to warming and grazing, which vary with warming methods, warming time and grazing intensity, frequency and the types of grassland. Based on our results, we pointed out the research fields that should be strengthened in the future. Grazing is one of the most important utilization modes of grasslands, and for the grasslands under climate change conditions in the future, the two factors, warming and grazing, will have effects on grassland soil and ecosystem respiration simultaneously. However, most experiments before were independent study on the influence of warming or grazing, therefore, interactive effects between warming and grazing on soil and ecosystem respirations in grasslands should be performed because they are non-additive effects of warming and grazing on them. Meanwhile, it is necessary to strengthen the study on the response of different components of the ecosystem respiration to warming and grazing, thus understanding the influential mechanism of the two better. In addition, the response of soil and ecosystem respiration to warming and grazing will change with time, so long-term continuous observations are necessary.

Key words: warming; grazing; grasslands; soil respiration; ecosystem respiration

目前,碳循环研究作为揭示全球变暖的成因及控制方法的重要科学手段已受到全球科学家的广泛关注(IPCC,2007)。生态系统呼吸是生态系统碳循环的一个重要组成部分,包括地上部分植被的自养呼吸和地下的土壤呼吸(付刚等,2010)。其中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,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)和一个非生物的化学氧化分解过程(刘允芬等,2001)。土壤呼吸与生态系统呼吸相互关联而又有所区别,土壤呼吸是生态系统呼吸的重要组成部分,通常能占到生态系统呼吸的47.5%~96.4%,对生态系统呼吸起着重要作用(Wang *et al.*,2008),生态系统呼吸除土壤呼吸外还包括地上部分植被的自养呼吸,是整个生态系统向大气释放CO₂的过程(付刚等,2010)。土壤呼吸是全球碳循环的重要途径,每年由于土壤呼吸而向大气中释放的碳为 $68 \times 10^9 \sim 100 \times 10^9$ t,约占大气中碳总储量的10%(Stoffel *et al.*,2010),因此,量化生态系统呼吸和/或土壤呼吸的时空变化是量化全球碳循环的重要挑战之一。

草地生态系统作为世界陆地生态系统的主体类型,在全球碳循环中扮演着重要角色,世界草地总面积约为 44.5×10^8 hm²,覆盖地球表面土地总面积的30%(朱玲玲等,2013; Wang *et al.*,2008),草地碳贮量约为761 PgC,占陆地生物区总碳贮量的25%(耿元波等,2004)。热带草原土壤呼吸速率约为 629 gC·m⁻²·a⁻¹,温带草原约为 442 gC·m⁻²·a⁻¹(耿元波等,2004),高寒矮嵩草草甸约为 250 gC·m⁻²·a⁻¹,草地土壤呼吸是大气中CO₂的重要来源(陶贞等,2007)。草地生态系统通常在某一种或几种环境因子受到限制的情况下形成,由于降水量少

或温度较低或土壤贫瘠等,因此草地生态系统的生态环境较脆弱,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(张芳等,2009)。因此,研究草地生态系统碳平衡和碳循环对于理解其对全球碳收支的贡献具有重要作用。草地生态系统对气候变化和人类活动干扰非常敏感,而众所周知的,全球气候变暖已是不争的事实,1850年以来全球平均温度已经增长了0.76℃,并且预测到本世纪末将会再增长1.8~4.0℃(IPCC,2007)。气候变化(温度和降水的改变)能显著影响生态系统碳循环的关键过程,同时又反馈于正在发生的气候变化(Lin *et al.*,2011; Luo *et al.*,2001),准确地预测未来气候变化条件下的碳交换强烈的依赖于生态系统呼吸和土壤呼吸对增温的响应(Lin *et al.*,2011)。因此,研究温度升高对土壤和生态系统呼吸的影响对于预测气候变化对碳循环的影响是不可或缺的。目前已开展了许多田间尺度的草地生态系统增温实验来研究潜在的温度增加对草地生态系统碳交换的影响(Amthor *et al.*,2010; Kimball *et al.*,2010; Zhou *et al.*,2007)。但由于生态系统土壤和生态系统呼吸受生态系统类型、气候条件、土壤理化性质等生物或非生物因素的驱动和调控,目前关于生态系统温室气体排放对温度升高的响应的研究并未取得一致的结果(Rustad *et al.*,2001; Wu *et al.*,2011; Beier *et al.*,2012)。因此,量化土壤呼吸和生态系统呼吸对温度升高的响应对于评价气候变化对陆地生态系统的影响非常重要。放牧是草地生态系统最主要的一种利用方式(Lin *et al.*,2011),能导致土壤温度升高(Luo *et al.*,2010)、草地养分库、植被覆盖和植被群落组成很快发生变化(Klein *et al.*,2007)。

放牧活动也会引起草地生态系统 CO₂ 排放的改变,对内蒙古锡林河流域草原 40 年的研究发现,过度放牧使表层 0~20 cm 土壤的碳储量降低 12.4%(乔春连等,2012)。可见,长期过度放牧加速了土壤有机碳向大气中的释放。因此,研究放牧条件下草地土壤和生态系统呼吸的变化对于探讨如何对草地生态系统进行科学合理的放牧管理,使得能够在对草地进行合理利用的同时减少草地生态系统 CO₂ 的排放,具有重要意义。另外,草地的利用离不开放牧,对于未来气候变化条件下的草地,温度升高和放牧这两个因素必然是同时存在的,因此,要想准确地预测未来气候变化条件下的草地生态系统的碳循环,必须同时综合考虑二者的影响。目前,关于增温和放牧对生态系统呼吸的影响,前人已经进行了较多的研究,但鲜有对前人研究结果进行总结比较的报道。由于许多研究要么针对草地土壤呼吸要么针对草地生态系统呼吸进行研究的,因此,本文扼要综述了近十五年来关于增温和放牧对分别对草地土壤呼吸和生态系统呼吸影响方面的研究成果,旨在探讨增温和放牧对不同类型草地土壤和生态系统 CO₂ 排放的影响,在总结前人研究的基础上,提出可能存在的问题和以后需要加强的研究方向。

1 增温对草地土壤和生态系统呼吸的影响

增温几乎影响草地生态系统的所有的物理、化学和生物过程,因此,增温引起的草地土壤和生态系统呼吸的变化可能是多个过程改变的结果。增温提高了土壤温度(Luo *et al.*,2010),延长了生长季长度(Lin *et al.*,2011),改变了植物的物候,刺激植物生长(Wan *et al.*,2002),改变土壤微生物群落结构,促进土壤和凋落物的分解(Luo *et al.*,2010),减少土壤含水量。所有这些过程都可能在不同的时间尺度上直接或间接地影响草地土壤和生态系统呼吸。例如,在青藏高原高寒草甸研究发现,增温增加整个生长季内土壤呼吸的平均值,但增温对 6 月以后的土壤呼吸没有影响,表明生长季的提前和较低的背景温度下增温可能有助于高寒地区生长季早期土壤呼吸的增加(Lin *et al.*,2011)。

1.1 增温对草地土壤呼吸的影响

土壤呼吸是土壤中有机体和植物的地下部分产

生 CO₂ 的过程,通常对温度的变化反应比较敏感(骆亦其等,2007)。天然草地生态系统在实验增温条件下,土壤 CO₂ 通量一般是增加的(Lin *et al.*,2011;Zhou *et al.*,2007)。Rustad *et al.*(2001)利用多元分析方法对 17 个不同地点的增温试验分析表明,增温(增温年限 2~9 年)显著增加了土壤的 CO₂ 排放量(约 20%),Lin *et al.*(2011)在青藏高原高寒草甸的研究也发现增温增加了整个生长季内的土壤呼吸 9.2%。Wan *et al.*(2005)认为增温提高了土壤呼吸主要是由于增温显著促进了地上生物量生长,土壤呼吸与总的地上部分生物量呈正相关。另外温度升高能增加土壤中 CO₂ 的通量,是因为增温增加了土壤和凋落物的分解(Luo *et al.*,2010)。然而,增温降低了高寒草原土壤呼吸,其原因可能是增温抑制了适于低温条件的微生物的活性(Chang *et al.*,2012a)。增温在提高土壤温度的同时降低了土壤水分含量,从而使得土壤呼吸速率的变化更为复杂,而研究发现同时增温和增加降水则大大增加高寒草甸的土壤呼吸(Chang *et al.*,2012b)。因此,增温的净效应可能会导致高寒草甸土壤呼吸速率降低,故长期以来公认的土壤温度与土壤呼吸之间的关系仍有争议(王常顺等,2013)。另外,土壤呼吸各组分对温度升高的响应有差异,Zhou *et al.*(2007)在美国高草草原群落的控制性增温试验中观察到,增温显著增加了 2002、2004—2005 年的土壤异养呼吸和 2002—2003、2005 年的土壤自养呼吸,平均增加了 13.3%~14.5% 的土壤异养呼吸和约 2.3% 的土壤自养呼吸。

在空间上,增温对土壤呼吸的影响因地点而异,寒冷的高纬度生态系统的土壤呼吸对土壤增温的响应大于温暖的温带地区(Parton *et al.*,1995)。在时间上,土壤呼吸作用对升温响应的大小随着温度持续升高和升温时间延长而下降的趋势(陈全胜等,2003)。增温尽管可在短时间内刺激土壤呼吸产生大量 CO₂,但增温不能长期使土壤呼吸持续增加,即随着增温时间延长,土壤呼吸对温度变化表现出一定的适应和驯化现象(卫云燕等,2009)。Luo *et al.*(2001)在美国高草草原研究发现,温度升高对土壤 CO₂ 排放的刺激效应会因土壤 CO₂ 排放的“适应性”逐渐减弱。土壤呼吸对增温的“适应性”可能是底物不足,土壤水分含量降低或者生物对温度的适应等造成的(徐小锋等,2007)。但德国南部一个农场的土壤 CO₂ 排放经历了 10 a 的持续增温后并未

观察到“适应现象”(Reth *et al.*, 2009)。

1.2 增温对草地生态系统呼吸的影响

温度对生态系统呼吸的影响因不同地点或生态系统类型而异,如 Updegraff *et al.* (2001) 研究发现,增温能显著增加阿拉斯加冻原生态系统的 CO₂ 的排放;Lin *et al.* (2011) 在青藏高原研究发现,增温 1.2~1.5 °C 对高寒草甸生态系统呼吸无显著影响;Xia *et al.* (2009) 在温带草地生态系统研究发现,增温对生长季生态系统呼吸也没有产生显著影响(Wu *et al.*, 2011; Xia *et al.*, 2009), 而 Melillo *et al.* (2002) 的研究发现,温度升高刺激了微生物活性,加快了土壤有机碳的分解,从而使土壤释放更多的碳到大气中,增加了 CO₂ 排放,降低了土壤碳蓄积,但这种变化只发生在增温早期,后期影响不大。因此增温对草地生态系统 CO₂ 排放的影响会随着草地类型、水分条件及观测时间的不同而改变(Wan *et al.*, 2007; Xia *et al.*, 2009)。

关于增温对生态系统呼吸影响的原因, Wu *et al.* (2011) 的研究结果发现,在大多增温实验中(运行时间 1~11 a), 由于增温刺激了微生物活性,促进了有机质的分解,同时又通过增加植物的生物量提高了 C 的输入,从而显著增加了生态系统 CO₂ 的排放。然而 Bontti *et al.* (2009) 研究发现只有在水分不是限制因素的情况下,增温才能促进土壤有机质的分解。因此增温对 CO₂ 排放的影响因试验地点、生态系统类型而异,尤其是水分条件对增温效果具有明显影响,在水分不是限制因素的情况下,CO₂ 排放与温度升高呈显著正相关关系(Lin *et al.*, 2011)。由于增温能引起土壤湿度的降低,在一定程度上限制了温度对 CO₂ 排放的正效应,进而使增温对生态系统 CO₂ 排放无显著影响甚至是负效应(Bontti *et al.*, 2009)。如 Shi *et al.* (2012) 的研究发现,温度升高刺激了土壤微生物活性,显著增加了 33.4% 的 CO₂ 排放,但增温同时降低了土壤水分含量而限制了土壤微生物的活性,显著降低了 32.3% 的生态系统 CO₂ 排放。

2 放牧对草地土壤和生态系统呼吸的影响

放牧通过放牧牲畜的采食、践踏和排泄物归还等许多过程直接或间接地影响草地土壤和生态系统

呼吸(Jia *et al.*, 2007)。如放牧减少生物量,调节植物群落组成,改变植物冠层结构,改变输入到土壤中凋落物的化学组成,使输入到土壤中的尿和粪便增加,引起植物根系分泌物的增加或减少以及影响土壤微气候等(骆亦其等, 2007)。放牧提高土壤温度(Cao *et al.*, 2004; Ford *et al.*, 2012; Lin *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2011), 降低土壤湿度(Cao *et al.*, 2004; Ford *et al.*, 2012; Jia *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2011), 减少地上生物量(Cao *et al.*, 2004; Ford *et al.*, 2012; Lin *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2011), 这些都会对草地土壤和生态系统呼吸产生重要影响。放牧对草地土壤和生态系统 CO₂ 排放的影响非常复杂,是诸多因素如土壤性质、植被特征、放牧动物的类型、放牧强度及放牧历史等综合作用的结果(Wang *et al.*, 2008)。一般放牧处理影响 CO₂ 的排放强度,而对草地土壤和生态系统呼吸通量的季节变化模式无影响(Allard *et al.*, 2007; Jia *et al.*, 2007; Lin *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2011)。

2.1 放牧对草地土壤呼吸的影响

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产生影响,进而可影响土壤呼吸。放牧对草地土壤呼吸的影响依赖于不同的放牧强度, Wang *et al.* (2009) 的研究发现,随着载畜量的增加土壤呼吸强度降低, Cao *et al.* (2004) 在青藏高原高寒草甸的研究表明,重度放牧较轻度放牧降低了土壤 CO₂ 的排放,这可能是由于放牧减少了地下生物量、微生物易分解碳的供应以及分解有机碳的微生物数量而造成的(齐玉春等, 2005; Cao *et al.*, 2004)。然而,放牧增加土壤 CO₂ 通量,如在内蒙古温带草原,自由放牧增加了土壤 CO₂ 的年排放量,而且土壤呼吸与放牧强度呈正相关(王跃思等, 2003); Frank (2002) 等在美国大平原地区的一个研究发现,放牧群落在生长季节的土壤日均呼吸总量显著大于不放牧群落;李凌浩等(1997) 在内蒙古锡林河流域羊草草原的研究也发现 40 年的过度放牧导致表层土壤(0~20 cm) 的碳储量下降了约 12.4%。放牧增加土壤呼吸的原因可能是放牧牲畜加快了营养循环的速度,从而提高了微生物活性和土壤呼吸(Allard *et al.*, 2007; Stark *et al.*, 2002)。此外,动物产生的排泄物也会促进土壤微生物过程。放牧对土壤呼吸的影响并不显著(李凌浩等, 2000); 吴启华等(2013) 在青藏高原高寒草

甸的研究发现,轻牧、中牧和重牧三种处理下的生态系统呼吸没有显著差异。因此,放牧对土壤呼吸的影响会因放牧强度、频度、放牧方式和草地类型而有所不同(付刚等,2010)。

放牧对土壤呼吸不同组分的影响也不同。Stark 等(2002)研究发现人工模拟放牧虽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;在美国高草草原,连续 6 a(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降低了 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,但对根系呼吸无显著影响(Zhou *et al.*,2007)。放牧还可改变土壤呼吸对温度的敏感性(Zhou *et al.*,2006),如重度放牧高寒草甸群落土壤呼吸对温度的敏感性要小于轻度放牧群落土壤呼吸对温度的敏感性(Cao *et al.*,2004),Zhou *et al.*(2007)在美国高草草原的研究也发现,模拟放牧(人工剪草)处理使得土壤呼吸对温度的敏感性显著下降。

2.2 放牧对草地生态系统呼吸的影响

对于不同的草地类型,放牧对其生态系统呼吸的影响不同。Ford *et al.*(2012)在英国里布尔湾的沼泽草地研究发现,放牧条件下的生态系统呼吸显著低于不放牧处理;万运帆等(2010)在藏北高寒草原的研究也发现,放牧显著地降低生态系统 CO₂ 排放,原因可能是放牧采食减少了地上生物量降低了植物自养呼吸,同时降低了对地下根和微生物碳的供应从而降低了土壤呼吸。Lin *et al.*(2011)在青藏高原高寒草甸研究显示,放牧对生态系统呼吸没有显著影响,原因可能是放牧在减少地上和地下生物量及土壤 C 从而降低植物的自养呼吸和微生物的呼吸的同时也提高了土壤温度,增加土壤呼吸,这两方面的影响相互抵消的缘故。因此放牧对生态系统呼吸的净效应由放牧对生态系统呼吸过程的正效应和负效应的平衡来决定。而对于温带典型草原,研究结果不尽相同,Wilsey *et al.*(2002)在巴拿马温带草原研究发现,放牧条件显著降低了草地生态系统呼吸速率。Liebig *et al.*(2013)半干旱的北美大草原研究发现,重度放牧与适度放牧相比,对生态系统呼吸没有显著影响。内蒙古典型草原,有的研究表明放牧降低生态系统呼吸(齐玉春等,2005),但放牧增加了草地生态系统呼吸,可能是由于家畜的选择性采食和践踏对土壤物理性状以及对土壤的持水能力造成的影响不同有关(王跃思等,2002)。

不同的放牧制度对草地生态系统呼吸的影响具有较大差异。在云南迪庆亚高山草甸,全年放牧与季节性放牧(冬季放牧)相比,提高了生态系统呼吸速率(Wang *et al.*,2008),原因可能是全年放牧条件下更多的排泄物进入土壤增加了有机质的分解,促进了土壤中植物根和微生物的代谢活动,从而增加了土壤呼吸造成的。在西藏那曲高寒小嵩草草甸的研究也得出了相似的结论,夏季休牧与全年放牧相比,生态系统呼吸通量降低了 21%(李玉娥等,2007)。因此,总体上看,轮牧较全年放牧降低了草地生态系统 CO₂ 的排放。不同的放牧强度对生态系统呼吸也会有不同程度的影响。在内蒙典型草原和荒漠草原,随放牧强度的增加,CO₂ 排放降低。典型草原轻度、中度、重度放牧分别较不放牧降低了 CO₂ 排放的 32%、45% 和 63%(陈志芳等,2012)。而王跃思等(2003)的研究发现,在内蒙古温带草原,在一定范围的放牧压力下,随放牧强度的增加,CO₂ 排放通量呈线性增长。虽然关于放牧对草地生态系统呼吸的影响没有一致的结论,但不论放牧是提高还是降低生态系统呼吸,其影响的程度整体上随放牧强度的增大而增加。

3 研究展望

草地土壤和生态系统呼吸对增温和放牧的响应是复杂的,受多种因素的综合影响,今后应加强以下方面的研究:

(1)目前,国内外关于增温和放牧对草地土壤和生态系统呼吸的影响虽已开展了大量研究,但多数是对于影响结果现象的描述,关于影响机制方面的研究较少,因此特别需要加强关于草地土壤和生态系统呼吸各组分对增温和放牧的响应机理研究。

(2)温度升高是近些年来较热门的全球变化的一个方面,许多增温试验已经过了几年甚至十几年,这已影响了生态系统各个组成部分原有的功能及其对于环境的反作用,可以此为出发点进一步深入开展增温对草地生态系统碳循环的研究。

(3)草地土壤和生态系统呼吸能在短期内对增温和放牧作出响应,但响应会随着时间的推移而发生变化,而土壤碳库的响应则需要更长时间,Liebig *et al.*(2006)研究表明放牧对土壤性质产生可观测出的影响通常需要十几甚至几十年的时间,而目前除在美国北大平原地区有长达几十年的长期的研

究,其他多为十年以内的短期研究,因此,需要加强长期连续的试验观测,以便观测草地土壤和生态系统呼吸以及土壤碳库对长期增温和放牧的响应以及随着时间推移其响应发生的变化。

(4)草地的利用离不开放牧,对于未来气候变化条件下的草地,温度升高和放牧这两个因素必然是同时存在的,因此,要想准确地预测未来气候变化条件下的草地生态系统的碳循环,必须同时综合考虑二者的影响。目前的很多研究多是单独的增温实验研究或放牧实验研究,但事实上增温与放牧对草地生态系统的影响并不是“可加的”(Klein *et al.*, 2007),也就是说,两个独立的增温和放牧实验是不能全面预测在同时增温和放牧条件下草地土壤和生态系统呼吸的反应的。因此有必要加强关于增温和放牧的耦合实验研究,以便更好地预测在未来增温同时放牧条件下草地 CO₂ 排放的响应。

参考文献:

- Allard V, Soussana J, Falcimagne R, *et al.* 2007. The role of grazing management for the net biome productivity and greenhouse gas budget (CO₂, N₂O and CH₄) of semi-natural grassland[J]. *Agric Ecosyst Environ*, **121**(1-2): 47-58
- Amthor JS, Hanson PJ, Norby RJ, *et al.* 2010. A comment on “Appropriate experimental ecosystem warming methods by ecosystem, objective, and practicality” by Aronson and McNulty[J]. *Agric For Meteorol*, **15**: 497-498
- Beier C, Beierkuhnlein C, Wohlgemuth T, *et al.* 2012. Precipitation manipulation experiments—challenges and recommendations for the future[J]. *Ecol Lett*, **15**: 899-911
- Bontti EE, Decant JP, Munson SM, *et al.* 2000. Litter decomposition in grasslands of central North America (US Great Plains) [J]. *Glob Chang Biol*, **15**(5): 1 356-1 363
- Cao GM, Tang YH, Mo WH, *et al.* 2004. Grazing intensity alters soil respiration in an alpine meadow on the Tibetan plateau[J]. *Soil Biol & Biochem*, **36**(2): 237-243
- Chang XF, Wang SP, Luo CY, *et al.* 2012. Responses of microbial respiration to thermal stress in alpine steppe on the Tibetan plateau[J]. *Eur J Soil Sci*, **63**(3): 325-331
- Chang XF, Zhu XX, Wang SP, *et al.* 2012. Temperature and moisture effects on soil respiration in alpine grasslands[J]. *Soil Sci*, **177**(9): 554-560
- Chen ZF(陈志芳), Jia PY(贾平洋), Yang Y(杨阳), *et al.* 2012. Effects of grazing intensity on ecosystem gas exchange of different grassland types in Inner Mongolia(放牧强度对不同草地类型生态系统气体交换影响的研究)[J]. *Acta Agr Sin*(草地学报), **20**(03): 464-470
- Cui XY(崔晓勇), Chen SQ(陈四清), Chen ZZ(陈佐忠). 2000. CO₂ release from typical *Stipa grandis* grassland soil(大针茅典型草原土壤 CO₂ 排放规律的研究)[J]. *Chin J Appl Environ Biol*(应用生态学报), **11**(3): 390-394
- Ford H, Garbutt A, Jones L, *et al.* 2012. Methane, carbon dioxide and nitrous oxide fluxes from a temperate salt marsh; grazing management does not alter global warming potential[J]. *Estuar Coast Shelf Sci*, **113**: 182-191
- Frank AB, Liebig MA, Hanson JD. 2002. Soil carbon dioxide fluxes in northern semiarid grasslands[J]. *Soil Biol & Biochem*, **34**(9): 1 235-1 241
- Fu G(付刚), Shen ZX(沈振西), Zhang XZ(张宪洲), *et al.* 2010. Response of grassland soil respiration to global change(草地土壤呼吸对全球变化的响应)[J]. *Progr Geogr*(地理科学进展), **29**(11): 1 391-1 399
- Geng YB(耿元波), Dong YS(董云社), Qi YC(齐玉春). 2004. Review about the carbon cycle researches in grassland ecosystem(草地生态系统碳循环研究评述)[J]. *Progr Geogr*(地理科学进展), **23**(03): 74-81
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. United Kingdom/New York: Cambridge University Press: 749-766
- Jia BR, Zhou GS, Wang FY, *et al.* 2007. Effects of grazing on soil respiration of *Leymus chinensis* steppe[J]. *Clim Chang*, **82**(1-2): 211-223
- Kimball BA, Conley MM. 2010. Infrared heater arrays for warming field plots scaled up to 5-m diameter[J]. *Agric For Meteorol*, **149**(3-4): 721-724
- Klein JA, Harte J, Zhao XQ. 2007. Experimental warming, not grazing, decreases rangeland quality on the Tibetan plateau[J]. *Ecol Appl*, **17**(2): 541-557
- Li LH(李凌浩), Liu XH(刘先华), Chen ZZ(陈佐忠). 1998. Study on the carbon cycle of leymus chinensis Steppe in the Xilin river basin(内蒙古锡林河流域羊草草原生态系统碳素循环研究)[J]. *Acta Bot Sin*(植物学报), **40**(10): 955-961
- Li LH(李凌浩), Wang QB(王其兵), Bai YF(白永飞), *et al.* 2000. Soil respiration of *Aleymus Chinensis* grassland stand in the Xilin river basin as affected by over-grazing and climate(锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子的研究)[J]. *Acta Phytoecol Sin*(植物生态学报), **24**(6): 680-686
- Li YE(李玉娥), Qin XB(秦晓波), Li WF(李文福), *et al.* 2007. Impacts of no grazing in summer on greenhouse gas emissions from *Kobresia humilis* alpine meadow(夏季休牧对高寒矮嵩草甸温室气体排放的影响)[J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*(农业工程学报), **23**(04): 206-211
- Liebig MA, Gross JR, Kronberg SL, *et al.* 2006. Soil response to long-term grazing in the northern great plains of North America [J]. *Agric Ecosyst Environ*, **115**(1-4): 270-276
- Liebig MA, Kronberg SL, Hendrickson JR, *et al.* 2013. Carbon dioxide efflux from long-term grazing management systems in a semiarid region[J]. *Agric Ecosyst Environ*, **164**: 137-144
- Lin XW, Zhang ZH, Wang SP, *et al.* 2011. Response of ecosystem respiration to warming and grazing during the growing seasons in the alpine meadow on the Tibetan Plateau[J]. *Agric Fore Meteorol*, **151**(7): 792-802
- Liu YF(刘允芬), Ouyang H(欧阳华), Cao GM(曹广民), *et al.* 2001. Soil carbon emission from ecosystems of eastern Qinghai-Tibet Plateau(青藏高原东部生态系统土壤碳排放)[J]. *J Nat Res*(自然资源学报), **16**(2): 152-160
- Luo YQ(骆亦其), Zhou XH(周旭辉), *et al.* 2007. Soil respiration and environment(土壤呼吸与环境)[M]. Beijing(北京): Higher Education Press(高等教育出版社): 204-210
- Luo YQ, Wan SQ, Hui DF, *et al.* 2001. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. *Nature*, **413**: 622-625

- Luo CY, Xu GP, Chao ZG, *et al.* 2010. Effect of warming and grazing on litter mass loss and temperature sensitivity of litter and dung mass loss on the Tibetan plateau[J]. *Glob Chang Biol*, **16**(5):1 606—1 617
- Melillo JM, Steudler PA, Aber JD, *et al.* 2002. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system[J]. *Science*, **298**(5 601):2 173—2 176
- Qi YC(齐玉春), Dong YS(董云社), Yang XH(杨小红), *et al.* 2005. Effects of grazing on carbon dioxide and methane fluxes in typical temperate grassland in Inner Mongolia, China(放牧对温带典型草原含碳温室气体 CO₂、CH₄ 通量特征的影响)[J]. *Res Sci(资源科学)*, **27**(2):103—109
- Reth S, Graf W, Reichstein M, *et al.* 2009. Sustained stimulation of soil respiration after 10 years of experimental warming[J]. *Environ Res Lett*, **4**,024005,doi:10. 1088/1748—9326/4/2/024005
- Rustad LE, Campbell JL, Marion GM, *et al.* 2001. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming[J]. *Oecologia*, **126**(4):543—562
- Stark S, Strommer R, and Tuomi J. 2002. Reindeer grazing and soil microbial processes in two suboceanic and two subcontinental tundra heaths[J]. *Oikos*, **97**(1):69—78
- Stark S, Kytöviita MM. 2006. Simulated grazer effects on microbial respiration in a subarctic meadow; Implications for nutrient competition between plants and soil microorganisms[J]. *Appl Soil Ecol*, **31**(1—2):20—31
- Stoffel JL, Gower ST, Forrester JA, *et al.* 2010. Effects of winter selective tree harvest on soil microclimate and surface CO₂ flux of a northern hardwood forest[J]. *For Ecol Manag*, **259**(3):257—265
- Tao Z, Shen CD, Gao QZ, *et al.* 2007. Soil organic carbon storage and soil CO₂ flux in the alpine meadow ecosystem[J]. *Sci Chin Ser D: Earth Sci*, **50**(7):1 103—1 114
- Updegraff K, Bridgman SD, Pastor J, *et al.* 2001. Response of CO₂ and CH₄ emissions from peatlands to warming and water table manipulation[J]. *Ecol Appl*, **11**(2):311—326
- Wan SQ, Hui DF, Wallace L, *et al.* 2005. Direct and indirect effects of experimental warming on ecosystem carbon processes in a tallgrass prairie[J]. *Glob Biogeochem Cycle*, **19**(2), GB2014, doi:10. 1029/2004GB002315
- Wan SQ, Norby RJ, Ledford J, *et al.* 2007. Responses of soil respiration to elevated CO₂, air warming, and changing soil water availability in a model old-field grassland[J]. *Glob Chang Biol*, **13**(11):2 411—2 424
- Wan YF(万运帆), Li YE(李玉娥), Gao QZ(高清竹), *et al.* 2010. Effect of summer grazing intensity on GHG emission in the North Tibet steppe(夏季放牧强度对藏北草原温室气体排放的影响)[J]. *Pratac Sci(草业科学)*, **11**:1—6
- Wang CS(王常顺), Meng FD(孟凡栋), Li XE(李新娥), *et al.* 2013. Responses of alpine grassland ecosystem on Tibetan Plateau to climate change; a mini review(青藏高原草地生态系统对气候变化的响应)[J]. *Chin J Ecol(生态学杂志)*, **32**(6):1 587—1 595
- Wang J, Sha LQ, Li JZ, *et al.* 2008. CO₂ efflux under different grazing managements on subalpine meadows of Shangri-la, northwest Yunnan Province, China[J]. *Acta Ecol Sin*, **28**(8):3 574—3 583
- Wang RZ(王仁忠). 1996. The influence of grazing on the *Aneurolepidium Chinense* grassland in Song-nen plain(放牧干扰对松嫩平原羊草草地的影响)[J]. *J Northeast Norm Univ; Nat Sci Ed(东北师大学报·自然科学版)*, **04**:77—82
- Wang YF, Cui XY, Hao YB, *et al.* 2011. The fluxes of CO₂ from grazed and fenced temperate steppe during two drought years on the inner mongolia plateau, china[J]. *Sci Total Environ*, **410**—**411**:182—190
- Wang YS(王跃思), Xue M(薛敏), Huang Y(黄耀), *et al.* 2003. Greenhouse gases emission or uptake in Inner Mongolia natural and free-grazing grasslands(内蒙古天然与放牧草原温室气体排放研究)[J]. *Chin J Appl Environ Biol(应用生态学报)*, **14**(3):372—376
- Wang ZW, Jiao SY, Han GD, *et al.* 2009. Soil respiration response to different stocking rates on *Stipa breviflora* Griseb. Desert Steppe[J]. *J Inn Mong Univ*, **40**(2):186—193
- Wei YY(卫云燕), Yin HJ(尹华军), Liu Q(刘庆), *et al.* 2009. Advance in research of forest carbon cycling under climate warming(气候变暖背景下森林土壤碳循环研究进展)[J]. *Chin J Appl Environ Biol(应用生态学报)*, **15**(6):888—894
- Wilsey BJ, Parent G, Roulet NT, *et al.* 2002. Tropical pasture carbon cycling; relationships between C source/sink strength, above-ground biomass and grazing[J]. *Ecol Lett*, **5**(3):367—376
- Wu QH(吴启华), Li YN(李英年), Liu XQ(刘晓琴), *et al.* 2013. Ecosystem respiration and carbon sink strength of the alpine weeds meadow in Qinghai-Tibetan Plateau under grazing gradient(牧压梯度下青藏高原高寒杂草类草甸生态系统呼吸和碳汇强度估算)[J]. *Chin J Agrometeorol(中国农业气象)*, **34**(4):390—395
- Wu ZT, Koch GW, Dijkstra P, *et al.* 2011. Responses of ecosystem carbon cycling to climate change treatments along an elevation gradient[J]. *Ecosystems*, **14**(7):1 066—1 080
- Wu ZT, Dijkstra P, Koch GW, *et al.* 2011. Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change; a meta-analysis of experimental manipulation[J]. *Glob Chang Biol*, **17**(2):927—942
- Xia JY, Niu SL, Wan SQ. 2009. Response of ecosystem carbon exchange to warming and nitrogen addition during two hydrologically contrasting growing seasons in a temperate steppe[J]. *Glob Chang Biol*, **15**(6):1 544—1 556
- Xu XF(徐小锋), Tian HQ(田汉勤), Wan SQ(万师强). 2007. Climate warming impacts on carbon cycling in terrestrial Ecosystems(气候变暖对陆地生态系统碳循环的影响)[J]. *J Plant Ecol(植物生态学报)*, **31**(2):175—188
- Zhang F(张芳), Wang T(王涛), Xue X(薛娴), *et al.* 2009. Research status of natural factors influencing soil respiration of grassland ecosystem(影响草地土壤呼吸的主要自然因子研究现状)[J]. *J Desert Res(中国沙漠)*, **29**(5):872—877
- Zhou XH, Sherry RA, An Y, *et al.* 2006. Main and interactive effects of warming, clipping, and doubled precipitation on soil CO₂ efflux in a grassland ecosystem[J]. *Glob Biogeochem Cycles*, **20**(1):GB1003, doi:10. 1029/2005GB002526
- Zhou XH, Wan SQ, Luo YQ. 2007. Source components and interannual variability of soil CO₂ efflux under experimental warming and clipping in a grassland ecosystem[J]. *Glob Chang Biol*, **13**(4):761—775
- Zhu LL(朱玲玲), Rong YP(戎郁萍), Wang WG(王伟光), *et al.* 2013. Effects of grazing on the net ecosystem exchange of carbon dioxide in grassland ecosystems(research review)(放牧对草地生态系统 CO₂ 净气体交换影响研究概述)[J]. *Acta Agr Sin(草地学报)*, **21**(01):3—10