西北植物学报,2007,27(5):0859 - 0863
Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.

文章编号:1000-4025(2007)05-1054-07 *

青藏高原高寒草甸生态系统碳通量特征及其控制因子

赵 亮[1,2],古 松[1,2],徐世晓[1,2],赵新全[1,2],李英年[1,2]

(1 中国科学院 西北高原生物研究所,西宁 810001;2 中国科学院 高原生物适应与进化重点实验室,西宁 810001)

摘 要:青藏高原特殊的气候变化特征,在区域生态系统碳动态平衡起着重要作用。本文就青藏高原不同生态系统 CO_2 通量的时空变化及其影响因子和控制途径进行综述,以明确青藏高原植草地生态系统的碳源汇状况及时空变化特征,为全球变化的研究提供依据。

关键词:青藏高原;碳汇/源;环境因子;控制过程

中图分类号:Q948.1 **文献标识码**:A

Carbon Flux and Controlling Process of Alpine Meadow on Qinghai-Tibetan Plateau

ZHAO Liang[1,2], GU Song[1,2], XU Shi-xiao[1,2], ZHAO Xin-quan[1,2], LI Ying-nian[1,2]

(1 Northwest Plateau Institute of Biology, the Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China; 2 Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China)

Abstract: The Qinghai-Tibetan plateau possesses the largest area of natural grasslands in China. The grassland ecosystem on the plateau is hypothesized to play an important role in the carbon balance in both regional and global ecosystems. It is therefore of great significance to study the carbon flux of alpine meadow vegetation. The paper mainly summarizes research advances about the characters of carbon source/sink and carbon spatio-temporal variation for alpine meadow ecosystem on Qinghai-Tibetan plateau as well as conducts some analysis of related researches in the future.

Key words: Qinghai-Tibetan plateau; carbon source/sink; environment factor; controlling process

世界经济的快速增长和强烈的人类活动引起的气候变暖和淡水资源短缺已经成为21世纪社会发展所面临的最为严重的资源与环境问题,是全世界的科学家、政策制定者和公众们共同关注的最为严峻的挑战[1,2]。全球变暖的根本原因是由人类活动影响下的生物圈碳循环过程的改变所引起的。21世纪末期大气的 CO_2 体积比可能达到650～700 mL·$^{-3}$,全球平均温度将大约增加2 ℃(变异范围为1.3～5.5 ℃)[3]。陆地生态系统的碳氮循环是驱动生态系统变化的关键过程,也是重要的生态系统支持服务,这些过程的变化将反馈影响全球变化的进程。生态系统碳水通量之间的平衡关系的改变是导致生态环境问题的根本原因[4]。草地是世界最广布的植被类型之一,草地生态系统参与了包括陆地生态系统在内的全球碳循环过程,草地植被对全球气候变化具有重大影响[1,2]。我国天然草地面积占

* 收稿日期:2007-01-10;修改稿收到日期:2007-04-20
基金项目:中国科学院知识创新工程项目(KJCX2-YW-432-1);百人计划(0429091211);国家重点基础发展计划(2005CB422005-01);国家科技支撑计划(2006BAC01A02);国家自然科学基金(30500080)
作者简介:赵 亮(1974-),男(汉族),助理研究员,从事生态学和数学建模研究。E-mail:Lzhao@nwipb.ac.cn

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

陆地面积的 41.4 %,其中 85 %以上的有机碳分布于高寒和温带地区。高寒地区草地拥有丰富的碳储量,占全国草地生态系统的 40.11 %[5]。在高寒草地中,95 %的碳储存在土壤中,约占全国土壤碳储量的 55.16 %[5]。草地生态系统,特别是在高海拔和高纬度地区,气温低、植被层植物根/茎比高,凋落物和地下死根由于温度低而不易分解,生态系统同化的有机碳可以较长时间地储存于地下根系和土壤中[5]。因此高纬度或高海拔的天然草地生态系统可能是我国一个重要的碳汇,并对我国和全球碳循环产生重要影响。

青藏高原草地面积约 1.2 ×106 km^2,占青藏高原陆地面积 48 %以上,分布在海拔 4 000 m 以上,辐射强、年均温低、昼夜温差大、雨热同期、降雨主要集中在短暂的生长季、降雨变辐大、土壤湿度受降雨时间格局的影响等显著特征[6]。由于青藏高原这种特殊的地理和生态单元及其对全球变化的重要作用,研究青藏高原草地生态系统碳平衡具有重要科学和实际意义,但一直缺乏足够的试验数据来验证。本文就近年来对青藏高原高寒草甸 CO_2 通量动态和碳收支状况进行长期监测和研究结果作一概述,以分析确定青藏高原草甸生态系统的源汇状况,及源汇的时空变化和控制机制,以期能够为我国的碳温室气体管理提供更为直接有效的科学数据支撑,为我国参与全球变化研究的国际合作、履行相关国际环境公约提供技术支撑。

1　生态系统 CO_2 通量的变化特征

高寒草甸的植物生长发育以及微生物的活动受气候的影响,具有鲜明的季节变化和年际变化。因此,高寒草甸生态系统的 CO_2 通量同样具有明显的季节性和年际差异。

1.1　生态系统净 CO_2 交换量(NEE)的日变化

在植物非生长期,高寒草甸的 NEE 日变化不明显,波动多且变化幅度小,表现为向大气中释放 CO_2[7-11]。在非生长季的 CO_2 释放速率因植被类型不同而存在差异,表现为高寒藏嵩草(*Kobresia tibetica*)沼泽化草甸 > 高寒矮嵩草(*K. humilis*)草甸 > 高寒金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛草甸[9]。在植物生长期,NEE 日变化规律明显,表现为白天吸收,夜间排放,凌晨 NEE 由正值(释放)转换为负值(吸收),中午前后吸收量达到最大,傍晚 NEE 由负值转换为正值[9]。日间最大吸收率和最大排放率分别出现在 11:00～12:00 和 4:00～5:00(北京时,下同),但正负转换时间随月际变化明显。在 6～7 月份,正值时间缩短,负值维持时间长,在太阳高度角相对较低,光合有效辐射下降,植物生长前期和后期的 5 月或 9 月,正值出现时间延长,负值维持时间缩短[9],即表明在不同月份因日照时间的缩短和延长。由晚间的正值向白昼负值转换时间因季节变化的不同出现时间不一致,如在 5 月份嵩草草甸由正转换为负的时间大致在 9:00～10:00,由负转换为正的时间大致在 17:00～18:00,NEE 为负的时间只有 8 h 左右,在 7 月份由正转换为负的时间在 7:00～8:00,由负转换为正的时间在 19:00～20:00,NEE 为负的时间约 12 h 左右。到 9 月份开始,正值转换为负值时间逐渐推后,而由负转换为正的时间逐渐提前。NEE 正、负值转换变化特征不仅在不同月份不同,而且在同月份不同草甸类型之间也有较大的差异。如在 5 月份,嵩草草甸 NEE 有正、负变化过程,而灌丛草甸和沼泽草甸不存在正负变化过程[9]。由此可见,在非生长季 NEE 日变化由温度来控制,而在生长季节 NEE 日变化主要由光合有效辐来控制。由于植物生长期内太阳高度角的变化而引起白昼时间长短而变化,导致 NEE 的日变化特征存在季节变化。

1.2　生态系统净 CO_2 交换量(NEE)的季节变化

青藏高原高寒草甸生态系统 NEE 的季节变化非常显著,在一年内存在 2 个释放 CO_2 高峰期(4 月和 10 月)。从 1 月到 4 月份日释放量(NEE > 0)为第一个高峰,在 5 月或 6 月份由释放 CO_2 (NEE > 0)逐渐变为吸收 CO_2 (NEE < 0),尔后吸收量逐渐增至最大值,在 9 月或 10 月份从吸收 CO_2 逐渐变为释放 CO_2,释放量很快达到第二个高峰,尔后下降,最后释放量降至全年的最低水平[9,11]。高寒草甸 NEE 由正值转为负值或由负值转为正值时间同样因植被类型不同而不同,NEE 由负值 →正值时间:藏嵩草沼泽草甸最早,金露梅灌丛草甸次之,矮嵩草草甸最晚,时间相差约 15 d 左右;而 NEE 由正值 →负值时间恰与由负值 →正值时间相反,矮嵩草草甸最早,金露梅灌丛草甸次之,藏嵩草沼泽草甸最晚,时间相差约 20～30 d。一年内,CO_2 吸收维持时间(矮嵩草草甸、金露梅灌丛草甸和藏嵩草沼泽化草甸分别约 133、106 和 74 d)小于释放 CO_2 的时间(矮嵩草草甸、金露梅灌丛草甸和藏嵩草沼泽化草甸分别约 232、249 和 291 d),但是单位时间的吸收量大于单位时间的释放量[9]。

矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸的 NEE 在 6～9

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

月份 NEE 月总量均小于零,均为吸收,其余月份为释放;藏嵩草沼泽化草甸只有 6～8 月份 3 个月为吸收,其它月份为释放。金露梅灌丛草甸在 7 月份 CO_2 吸收量最大,为 204 gCO_2/m^2,而矮嵩草草甸和藏嵩草沼泽化草甸出现在 8 月份,分别为 281 gCO_2/m^2 和 260 gCO_2/m^2;矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸在 4 月份的 CO_2 释放量最大,分别为 121 gCO_2/m^2、96 gCO_2/m^2,而藏嵩草沼泽化草甸出现在 5 月份,为 171 gCO_2/m^2[9]。比较这 3 种植被类型月最大释放量(NEE > 0),藏嵩草沼泽化草甸 > 矮嵩草草甸 > 金露梅灌丛草甸(最小);月最大吸收量(NEE < 0),则有矮嵩草草甸 > 藏嵩草沼泽化草甸 > 金露梅灌丛草甸(最小)[9]。在同一区域内的,由于下垫面不同,生态系统 NEE 的季节变化和交换量存在明显差异。

1.3 CO_2 最大交换率

矮嵩草草甸、金露梅灌丛草甸和藏嵩草沼泽化草甸 CO_2 最大吸收率分别为 0.74、0.46 和 0.73 $mgCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, CO_2 最大排放率分别为 0.36、0.34 和 0.82 $mgCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$[9]。表明青藏高原同一地区不同植被类型之间的 CO_2 最大交换量存在着较大差异。CO_2 最大吸收率,矮嵩草草甸和藏嵩草沼泽化草甸基本相同,金露梅灌丛草甸最小,而 CO_2 最大排放率,藏嵩草沼泽化草甸 > 矮嵩草草甸 > 金露梅灌丛草甸。比较这 3 个草甸类型的 CO_2 最大吸收率与排放率之比,发现藏嵩草沼泽化草甸的这一比值为 0.88,小于 1,而矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸分别为 2.04 和 1.35,均大于 1,从而说明藏嵩草沼泽化草甸具有较高的排放潜能。

另外,青藏高原矮嵩草草甸和藏嵩草沼泽化草甸的 CO_2 吸收率最大值与俄克拉荷马州 C_3/C_4 草原(0.68 $mgCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)[12]和美国科罗拉多州森林(0.68 $mgCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)[13]的最大值基本接近,而金露梅灌丛草甸的 CO_2 吸收率最大值是这两地区的三分之二;与其它一些 C_4 草原(1.1 $mgCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$[14], - 1.40 $mgCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$[15], - 2.50 $mgCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$[16])相比,青藏高原 3 种植被类型的最大值较小,甚至只是上述地区的 20 %～25 %。青藏高原矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸 CO_2 最大排放量小于其它草地的最大值(0.35～0.40 $mgCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$[12],0.44 $mgCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$[13],0.50 $mgCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$[14],0.95 $mgCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$[15]),而沼泽化草甸的最大 CO_2 排放量与美国科罗拉多州森林[12]、堪萨斯州 C_4 草原[14]和俄克拉荷马州高草草原[15]相比要高出三分之一,比日本的 C_3/C_4 草原[15]低三分之一。青藏高原不同草甸类型 CO_2 吸收/排放能力存在差异,矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸比 C_4 草原和一些低海拔草原和森林具有较低的 CO_2 吸收潜能,而藏嵩草沼泽化草甸具有较高的排放潜能。

2 不同生态系统 CO_2 通量变化的气象环境控制机制

高寒草甸生态系统与所有生态系统类型一样,绿色植物通过光合作用来实现系统碳固定,系统碳释放是通过植物根系死亡分解碳素在土壤中的再分配及土壤中有机物质在微生物作用下,分解释放使得碳素重新释放到大气中实现的。高寒草甸 NEE 完全取决于组成高寒草甸的植物种类的生理生态、光合作用特征以及它们的遗传特征、土壤机理,同时亦取决于组成高寒草甸的植物群落结构。

2.1 土壤温度和水分对 NEE 的影响

草地生态系统释放出的 CO_2 主要来自土壤,土壤呼吸强弱又受土壤水热的影响,且因植被群落类型和地理位置的不同而异。Rey[17]等指出植物根系呼吸以及土壤微生物活性对土壤温度的变化都很敏感,土壤水分充足且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。高寒草甸土壤温度虽未达到微生物活性的最适温度,但土壤微生物活动已长期适应了寒冷湿润的环境,因而当土壤温度稍有升高时,微生物活动便会急剧加强[5]。在不考虑土壤水分时,青藏高原高寒草甸 CO_2 通量与土壤温度呈正相关关系,但考虑土壤水分时,CO_2 通量与土壤温度关系因土壤水分条件不同而不同,并且还与植被类型不同分布而存在差异[18]。在较低或过高的水分条件下,矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸土壤呼吸对土壤温度比较敏感,但二者响应趋势截然相反,矮嵩草草甸的土壤呼吸依土壤温度增高而增大,而金露梅灌丛草甸则相反[17]。

在非生长季同一温度水平下,CO_2 排放速率为藏嵩草沼泽化草甸(Q_{10} = 4.6) > 矮嵩草草甸(Q_{10} = 2.9) > 金露梅灌丛草甸(Q_{10} = 2.3)[9];在生长季,矮嵩草草甸和藏嵩草沼泽化草甸的 Q_{10} 值约为 2.5,比金露梅灌丛草甸(2.9)的略低[9],表明 3 种生态系统的 CO_2 排放量对温度响应基本相同。但是,在温度低于 10 ℃时,3 种生态系统的 CO_2 排放量之间略有

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

差异,藏嵩草沼泽化草甸 > 矮嵩草草甸 > 金露梅灌丛草甸[9]。由于青藏高原高寒草甸地区低于 10 ℃的温度时间较多,因而藏嵩草沼泽化草甸累积排放量较大,导致在生长季有一个较高的排放量,从而降低了藏嵩草沼泽化草甸在生长季 CO_2 固定能力。

2.2　光合有效辐射与 CO_2 的交换量关系

不同植被类型在不同天气状况下,总碳吸收量对光合有效辐射响应趋势是一致的,均随光合有效辐射的升高而增大;另一方面,在较低光合有效辐射条件下,总碳吸收量随着光合有效辐射迅速增大[7,9,10,17]。然而,在较高的光合有效辐射条件下,总碳吸收量几乎不随光合有效辐射增大而增大,二者相互独立[17,18]。在相同的光合有效辐射的条件下,矮嵩草草甸总碳吸收量(25.81 g·m^{-2}·d^{-1})大于金露梅灌丛草甸(20.02 g·m^{-2}·d^{-1})[17]。少云天气状况下日总碳吸收量与多云天气状况下的大小因植被不同而不同,在矮嵩草草甸区少云天气状况下日总碳吸收量(26.41 g·m^{-2}·d^{-1})显著高于多云天气状况下的日平均量总碳吸收量(25.28 g·m^{-2}·d^{-1});而在金露梅灌丛草甸,少云天气状况下日总碳吸收量(19.39 g·m^{-2}·d^{-1})显著低于多云天气状况下的日平均总碳吸收量(20.61 g·m^{-2}·d^{-1})[17]。当光合有效辐射 > 1 200 μmol·m^{-2}·s^{-1}时,净 CO_2 交换量随着温度从 10 ℃到 22 ℃变化而显著地降低,嵩草草甸的降低速率大于灌丛草甸的降低速率。在一个较高的光合有效辐射水平下,温度对呼吸的影响比光合有效辐射对呼吸影响大,并且不同的草甸类型对温度响应程度是不一样的。

生态系统光合能力与光合有效辐射和叶面积指数呈显著正相关[7,9-11]。光合能力受光合有效辐射的控制,普遍呈非线性的直角双曲线关系,但光合潜力的大小受叶面积指数所调节。

2.3　昼夜温差与 NEE 的关系

高寒草甸植物具有耐寒抗寒能力,在温度小于 - 7 ℃的低温环境条件下仍可正常生长,即表明植物可进行光合作用[5]。在青藏高原东部的矮嵩草草甸和金露梅灌丛草甸,8 月份白天(从日出到日落)的平均气温比较低,分别为 11.43 和 11.02 ℃,晚上的平均气温分别为 7.07 和 6.07 ℃。2 种植被类型的最大昼夜温差达到 11 ℃。NEE 随昼夜温差的增加而增大[18,19],并且因植被类型的不同而增加率存在差异[18],说明了较高的昼夜温差有利于碳固定,但是这一结果与 Zhao 等[20]和 Shi 等[11]报道结果不一致,认为昼夜温差对碳固定影响不显著,甚至具有负效应。Gu 等[19]和 Zhao 等[18]报道结果认为差异可能是时间尺度引起的,Gu 等[19]和 Zhao 等[18]报道只选择 8 月份时段做为研究时间周期,而 Zhao 等[20]选择一个生长季节做为研究周期;与 Shi 等[11]报道结果差别可能由于时间和空间尺度引起的,因为后者的研究在西藏,纬度偏南,并且研究时间为 1 个生长期。因此,在分析昼夜温差与 NEE 的影响时应注意时空尺度的变化。

2.4　植被反射率与 NEE 的关系

植被反射率是作用层面最为重要的小气候参数,因它在能量分配中占据重要地位,故在土壤-植被的 C 固定方面有着重要的影响作用[21]。Zhao 等[18]和 Gu 等[19]报道,NEE 随植被反射率的增加而减少,并且因植被类型不同,植物群落结构(植物种类、层片结构、高度、盖度等)不同,而导致植被反射率差异[21],引起对生态系统 NEE 影响不同[18]。

2.5　积雪对 CO_2 通量的影响

有关季节性的积雪对 CO_2 通量影响已经进行了大量的研究[23,24],认为当地表有积雪时,土壤温度与 CO_2 通量不存在相关关系,这与青藏高原高寒草甸生态系统的结果一致,当地表有积雪时,CO_2 通量与 5 cm 土壤温度之间不存在相关关系[25]。虽然土壤表层(0～5 cm)的温度对植物和微生物的生命活动有着决定性的影响,它影响土壤排放 CO_2 的过程,但是当地表有积雪时,积雪的保温作用超过它的冷却作用,积雪时间越长,保温作用愈大,并且积雪减少了土壤温度的变化,使之处于一个稳定的阶段,当地表面有积雪时,5 cm 的土壤温度比较稳定,在 - 0.65～2.22 ℃范围内波动,最大值没有超过 5 ℃[25],以此影响土壤微生物的活动。

CO_2 通量与积雪时间的相关关系因下垫面不同而不同。金露梅灌丛草甸和藏嵩草沼泽草甸 CO_2 通量与积雪时间相关性不明显,而高寒草甸的 CO_2 通量与积雪时间之间相关性极显著,CO_2 通量随着积雪时间的增加而下降[25]。在北极的一些研究结果证明 CO_2 通量随积雪时间指数增长[22]。另外,地表有积雪时,CO_2 通量值显著地高于无积雪时。北极的 CO_2 通量随着积雪时间的延长而增加,而青藏高原北部地区的 CO_2 通量随积雪时间的延长而减少[25]。赵亮等[25]研究表明,积雪对青藏高原高寒草甸生态系统 CO_2 交换量的影响因生态系统的性质的不同而存在差异,如:矮嵩草草甸 CO_2 交换量,随着积雪时间的延长而呈线性降低,而金露梅灌丛和藏嵩草沼泽化生态系统 CO_2 交换量不随积雪时间

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的延长而降低[25]。这可能是由于在灌丛草甸由于植被盖度较高,积雪没有完全覆盖地表,土壤-大气之间存在一定的气体交换通道。藏嵩草沼泽草甸生态系统,在冬季下垫面全是冰面,已经把土壤-大气的物质循环分成了两个较为独立的系统,因而积雪对 CO_2 交换量影响不大。矮嵩草草甸生态系统,植被盖度低,约 10～15 cm,积雪完全覆盖地表,这样积雪使土壤-大气的物质循环隔离开,形成了两个较为独立的系统。虽然积雪把土壤-大气隔离为两个独立系统,但是由于积雪的存在增加了大气中的水汽浓度,地表有积雪时,平均水汽通量显著地高于地表无积雪,这样增加了 CO_2 交换速度,从而影响了 CO_2 通量。因此,藏嵩草沼泽草甸和矮嵩草草甸在地表有积雪时的 CO_2 通量值显著地高于无积雪的,而灌丛在这两个条件下 CO_2 通量值无显著性差异。

2.6 降雨对土壤呼吸的影响

不论生长季末期还是生长季初期,经过较长期的无雨时间段后,常有 5～10 mm 降雨[5],这种降雨事件能够在一定程度上显著增加土壤湿度。当一个降雨量适中的降雨事件发生时,青藏高原高寒草甸的土壤呼吸率首先略微降低,尔后迅速增加,增加量大于正常值,从而说明降雨事件刺激生态系统呼吸率的增大[10,11,26],但是当降雨量过大(>30 mm)时,降雨事件对生态系统呼吸基本没有影响[10],这充分说明在非生长季,降雨事件的大小作用于 CO_2 交换量。因此,脉冲性降水可能会促进生态系统的碳排放,降低生态系统总固定量;干冷的气候有可能降低生态系统呼吸,从而使得干冷的年份有利于生态系统的碳固定。

3 放牧强度对土壤 CO_2 释放速率的影响

在轻度放牧区(2.55 只羊/ hm^2)土壤 CO_2 释放强度比重牧区(5.35 只羊/ hm^2)大[27]。在 7 月中旬或 8 月初,轻度和重度放牧下土壤释放率达到最大,分别为 16.7 和 12.0 $gCO_2 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$,$Q_{10}$ 分别为 3.22 和 2.75,年释放量分别为 2 040 和 1 530 $gCO_2 \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$[27]。在不同放牧强度条件下,土壤 CO_2 释放速度之间差异显著,表明放牧强度大小作用生态系统的碳能力。在这里值得科学家们思考的是,既有利于生态系统碳的固定,又有利于区域经济发展的放牧强度应该是多大,这将是未来有待于进一步研究的问题。

4 生态系统的碳汇功能

青藏高原高寒草甸生态系统的 CO_2 释放直接作用于大气对流层的中层,相对于世界其他地区的对流层中层的大气来讲,高原大气 CO_2 浓度将更多地受陆地生态系统界面过程的影响[6]。因而,高原生态系统的碳汇功能对未来的全球气候变化起着非常重要的作用。研究表明,矮嵩草草甸(78.5～192.5 $gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)[28]和金露梅灌丛草甸(58.5～75.5 $gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)[10]都存在较强的 CO_2 吸收潜力,而藏嵩草沼泽草甸(16.10～76.73 $gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)[9]存在较强的 CO_2 排放潜力。西藏高原的草原化嵩草草甸的年净生态系统碳交换量为 -9.52～14.84 $gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$[11]。从而说明,青藏高原高寒草甸生态系统与大气间 CO_2 的全年交换量因植被类型的不同而存在差异,与此相对应的生态系统碳的源汇功能也不同。青藏高原高寒草甸生态系统在碳的生物地球化学循环方面具有低强度高循环的特点,同时也表现明显不同的碳源/汇特征,不同植被类型的碳源/汇差异明显。

5 高寒草甸生态系统碳源汇功能的控制过程

青藏高原高寒草甸生态系统的 NEE 在其气候和植被条件的影响下表现出明显的时空变化特征(图 1),如:日、季和年际变化。从控制时间上来看,这些变化特征是由短期和长期两种控制过程引起的。NEE 主要受到了光合有效辐射(PPFD)、温度和水分等环境因子的影响,在植物的生长季节,白天生态系统的 NEE 主要受 PPFD 和叶面积(LAI)的影响。在午后,由于生态系统光合作用基本达到饱合,光合能力近接最大值,但是土壤温度仍然升高而引起生态系统呼吸升高,导致此时段的 NEE 减小[7,10,20]。因此,午后的时间段在白天中是一个比较重要的时段;另外,较大的昼夜温差有利于一天系统的 NEE。在不同时间度上,NEE 受温度、PPFD 和 LAI 共同作用的控制。在非生长季与其它生态系统一样受温度地控制,但是一个偶然的较为适当的降雨事件也是一个重要的控制因子,Zhao 等[10]报道在一个偶然的较为适当的降雨事件后,生态系统呼吸迅速升高 1～2 倍。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

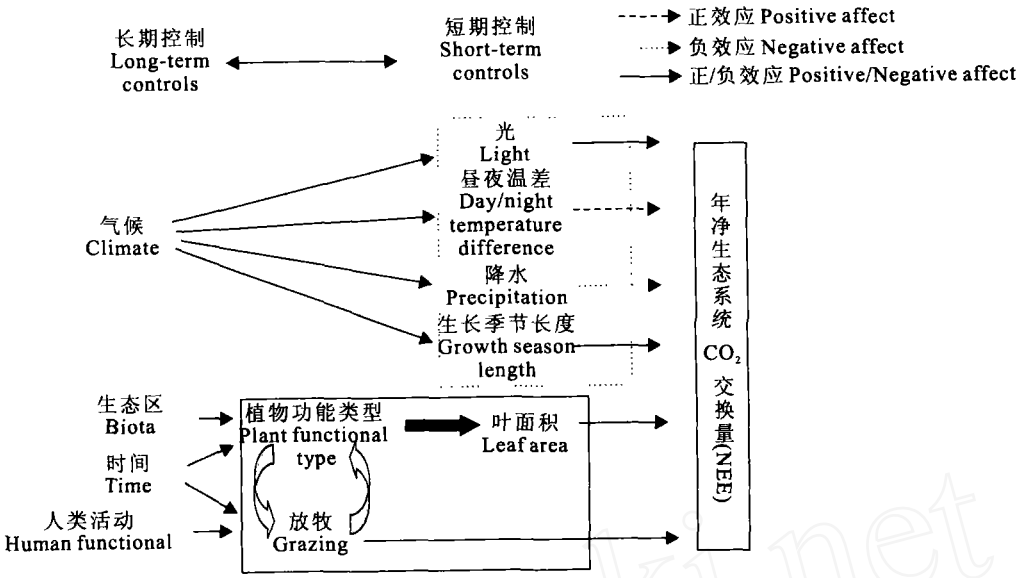

图 1　年净生态系统 CO_2 交换量控制过程

Fig. 1　The controlling process of annual net ecosystem CO_2 exchange

对于土壤-大气之间的界面来说,界面上面碳存在于大气中,构成大气库;而界面下面的碳存在于土壤中,构成土壤库。土壤作为碳累积库,存在一个碳的饱合值,如果碳的积累量超过这个阈值,那么生态系统排放碳,是一个碳源;反之,是一个碳汇。在青藏高原海北高寒草甸中,矮嵩草草甸和金露灌丛草甸是一个碳汇[10,28],而沼泽化草甸是一个碳源[9],究其原因除了上述的环境因子控制外,作者认为还受到人类活动-放牧的影响。在该地区最主要的人类活动是放牧,矮嵩草草甸和金露灌丛草甸每年固定的地上生物量的 80 %～90 %通过放牧被牲畜取食,只有非常少的比例返回土壤中,而沼泽化草甸只有 10 %～20 %被牲畜取食,大部分的地上生物量返回土壤中[5]。由于青藏高原高寒草甸生态系统温度低从而抑制了凋落物的分解,因此经过长期积累,使得沼泽化草甸生态系统中碳累积量远远大于矮嵩草草甸和金露灌丛草甸。所以,放牧也是一个非常重要的长期的控制因子。

总之,青藏高原的碳循环过程在时间尺度上由短期(包括光、昼夜温差、降雨、季节长度和叶面积)和长期(包括生态区、时间和人类活动)两条途径控制的,在空间尺度上,由自上而下的气候因子(温度、降雨)和自下而上的生物因子(叶面积和放牧)两条途径控制。

6　展　望

青藏高原独特环境下的温室气体释放与碳循环研究,无论对人类深入了解陆地生态系统碳循环机理以及认识整个青藏高原草地生态系统乃至世界上高海拔草原生态系统的碳循环都具有重要的理论与战略意义。目前,虽然已对青藏高原不同植被类型的碳平衡进行了长期的研究,但是对认识整个青藏高原的碳平衡还存在一定的差距。一是由于不同生态系统碳收支存在差异,区域尺度上计算碳固定和释放仍缺乏有效途径;二是在已有研究中还没有完全涉及草食动物是碳固定和呼吸,特别是家畜粪便对草地生态系统碳蓄积影响方面的研究还几乎是一个空白。草食动物的物质基础来自草地生态系统第一性生产,因而草食动物是的次级生物量的积累,是组成草地生态系统碳平衡的另一个重要方面;三是虽然降雨事件对生态系统呼吸有较大的影响,但是降雨量强度处于多大的一个阀值才有作用,这个问题还有待于今后进一步通过实验处理进行研究和探讨。

参考文献:

[1]　HALL D O,SCURLOCK J M O. Climate change and productivity of natural grasslands[J]. *Ann. Bot.* ,1991,**67**(S):49 - 55.

[2]　SCURLOCK J M O,HALL D O. The global carbon sink:a grassland perspective[J]. *Glob. Change Biol.* ,1998,4:229 - 233.

[3]　IPCC. Climate change 2001[A]. The scientific basis[M]. Cambridge University Press,UK,2001.

[4]　IPCC. Good practice guidance for land use,land-use change and forestry[A]. PENMAN J,GYTARSKY M,HIRAISHI T,KRUG T,

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

KRUGER D, PIPATTI R, BUENDIA L, MIWA K, NGARA T, TANABE K, WAGNER F. (eds). Intergovernmental panel on climate change (IPCC), IPCC/IGES[M]. Hayama, Japan, 2003.

[5] 周兴民. 中国嵩草草甸[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

[6] 孙鸿烈. 青藏高原的形成演化[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1996.

[7] KATO T, TANG Y H, GU S, CUI X Y, HIROTA M, DU M Y, LI Y N, ZHAO X Q, OIKAWA T. Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau China[J]. *Agric. For. Meteorol.*, 2004, 124: 121 - 134.

[8] XU SX, ZHAO XQ, FU YL, ZHAO L, LI Y N, CAO G M, GU S, WANG Q X, DU MY. Charancterizing CO_2 fluxes for growing and non-growing seasons in a shrub ecosystem on the Qinghai-Tibet plateau[J]. *Sinence in China* (Ser. D) (中国科学 ·D 辑), 2005, **48** (S. I): 133 - 140.

[9] ZHAO L, LI Y N, ZHAO X Q, XU S X, TANG Y H, YU G R, GU S, DU M Y, WANG Q X. Comparative study of the net exchange of CO_2 in 3 type of vegetation ecosystems on the Qinghai-Tibetan plateau[J]. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2005, 50: 1 767 - 1 774.

[10] ZHAO L, LI Y N, XU S X, ZHOU H K, GU S, YU G R, ZHAO X Q. Diurnal, seasonal and annual variation in net ecosystem CO_2 exchange of an alpine shrubland on Qinghai-Tibetan plateau[J]. *Glob. Change Biol.*, 2006, 12: 1 940 - 1 953.

[11] SHI P L, SUN X M, XU L L, ZHANG X Z, HE Y T, ZHANG D Q, YU G R. Net ecosystem CO_2 exchange and controlling factors in a steppe-*Kobresia* meadow on Tibetan plateau[J]. *Science in China* (Ser. D) (中国科学 ·D 辑), 2006, **49** (S. II): 207 - 218.

[12] SIMS P, BRADFORD J A. Carbon dioxide fluxes in a southern plains prairie[J]. *Agric. For. Meteorol.*, 2001, 109: 117 - 134.

[13] MONSON R K, TURNIPSEED A A, SPARKS J P. Carbon sequestration in a high-elevation subalpine forest[J]. *Glob. Change. Biol.*, 2002, 8: 459 - 478.

[14] HUM J M, KNAPP A K. Fluxes of CO_2, water vapor, and energy from a prairie ecosystem during the seasonal transition from carbon sink to carbon source[J]. *Agric. For. Meteorol.*, 1998, 89: 1 - 14.

[15] SUYKER A E, VERMA S B. Year-round observations of the net ecosystem exchange of carbon dioxide in a native tallgrass prairie[J]. *Glob. Change Biol.*, 2001, 7: 279 - 289.

[16] LI S G, OIKAWA T. Energy budget and canopy carbon dioxide flux over a humid C_3 and C_4 co-existing grassland[A]. In: Proceedings of the International Workshop for Advanced Flux Network and Flux Evaluation[C]. CGER-REPORT. CGER-M011, 2001: 23 - 28.

[17] REY A, PEGORARO E, TEDESCHI V. Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in central Italy [J]. *Glob. Change Biol.*, 2002, 8: 851 - 866.

[18] ZHAO L (赵 亮), XU SH X (徐世晓), LI Y N (李英年), ZHAO X Q (赵新全), GU S (古 松), DU M Y (杜明远), YU G R (于贵瑞). Relations between carbon dioxide fluxes and environmental factors of *Kobresia humilis* meadows and *Potentilla fruticosa* meadows[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.* (西北植物学报), 2006, **26** (1): 133 - 142 (in Chinese).

[19] GU S, TANG Y H, DU M Y, KATO, T, LI Y N, CUI X Y, ZHAO X Q. Short-term variation of CO_2 flux in relation to environmental controls in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan plateau[J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108** (D21), 467010. 1029/3003JD3584.

[20] ZHAO L, LI Y N, GU S, ZHAO X Q, XU S X, YU G R. Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an alpine shrubland meadow during the growing season on the Qinghai-Tibetan plateau[J]. *J. Integrative Plant Biology*, 2005, 47: 271 - 282.

[21] ZHAO L (赵 亮), GU S (古 松), DU M Y (杜明远), KATO T, TANG Y H (唐艳鸿), LI Y N (李英年), ZHAO X Q (赵新全). The seasonal variation s of radiation budget and of community biomass in the haibei alpine meadow[J]. *Acta Agrestia Sinica* (草地学报), 2004, **12** (1): 66 - 70 (in Chinese).

[22] ZIMOV S A, DAVIDOV S P, VOROPAEV Y V, PROSIANNIKOV S F. Planetary maximum CO_2 and ecosystems of the north[A]. In: Vinson TS, Kolchugina TP. (eds) Proceedings of the international workshop of carbon cycling in boreal forest and subarctic ecosystems [M]. United States Environmental Protection Agency, Corvallis, 1991: 21 - 34.

[23] SOMMERFELD R A, MOSIER A R, MUSSELMAN P C. CO_2, CH_4, and N_2O flux through a Wyoming snowpack[J]. *Nature*, 1993, 361: 140 - 143.

[24] SOMMERFELD RA, MASSMAN MJ, MUSSELMAN PC. Diffusional flux of CO_2 through snow: Spatial and temporal variability among alpine-subalpine sites[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1996, 10: 473 - 482.

[25] ZHAO L (赵 亮), XU SH X (徐世晓), FU YL (伏玉玲), GU S (古 松), LI Y N (李英年), WANG Q X (王勤学), DU M Y (杜明远), ZHAO X Q (赵新全), YU G R (于贵瑞). Effects of snow cover on CO_2 flux of northern alpine meadow on Qinghai-Tibetan plateau[J]. *Acta Agrestia Sinica* (草地学报), 2005, **13** (3) 242 - 247 (in Chinese).

[26] XU SH X (徐世晓), ZHAO L (赵 亮), ZHAO X Q (赵新全), LI Y N (李英年), GU S (古 松). Carbon dioxide flux characteristics of alpine shrubs in Qinghai-Tibet plateau beyond the growing season[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.* (西北植物学报), 2006, **26** (12): 2 528 - 2 532 (in Chinese).

[27] CAO G M, TANG Y H, MO W H, WANG Y S, LI Y N, ZHAO X Q. Grazing intensity alters soil respiration in an alpine meadow on the Tibetan plateau[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36: 237 - 243.

[28] KATO T, TANG Y H, GU S, CUI X Y, HIROTA M, DU M Y, LI Y N, ZHAO X Q. Temperature and biomass influences on interannual changes in CO_2 exchange in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan plateau[J]. *Glob. Change Biol.*, 2006, 12: 1 285 - 1 298.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net