

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2013.04.003

吴启华,李英年,刘晓琴,等. 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]. 中国农业气象,2013,34(4):390-395

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*

吴启华^{1,3},李英年^{1,2**},刘晓琴^{1,3},李红琴^{1,2},毛绍娟^{1,3}

(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;3. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:于2010年5月-2011年12月在祁连山北坡夏季牧场的高寒杂草类草甸进行生物量监测,并利用密闭箱-气相色谱法进行土壤呼吸观测,以探讨不同牧压梯度下生态系统呼吸、土壤呼吸及碳汇强度的变化。结果表明,(1)生态系统和土壤呼吸速率与5cm日均地温具有极显著的指数关系($P < 0.01$),轻牧、中牧和重牧条件下生态系统呼吸对温度的敏感性系数(Q_{10})分别为4.28、4.16和4.43,土壤呼吸的 Q_{10} 分别为3.33、3.24和3.44;(2)生态系统呼吸和土壤呼吸均表现出冬季低,夏季高。轻牧、中牧和重牧梯度下生态系统年呼吸碳量分别为854.64、909.79和811.70 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$,而土壤呼吸碳量分别为564.24、606.92和534.56 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ 。各牧压梯度下生态系统和土壤的年总释放碳量均无显著差异;(3)随着放牧强度增大,净初级生产碳量(分别为766.65、707.75和570.36 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)和生态系统碳汇能力(分别为351.93、261.68和177.46 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)逐渐减弱,但均表现为强碳汇区。研究结果可为了解青藏高原高寒杂草类草甸碳循环特征提供依据。

关键词:高寒杂草类草甸;牧压梯度;净初级生产力;生态系统呼吸;土壤呼吸;碳汇强度

Ecosystem Respiration and Carbon Sink Strength of the Alpine Weeds Meadow in Qinghai-Tibetan Plateau under Grazing Gradient

WU Qi-hua^{1,3}, LI Ying-nian^{1,2}, LIU Xiao-qin^{1,3}, LI Hong-qin^{1,2}, MAO Shao-juan^{1,3}

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China; 2. Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: In order to discuss the variation of the ecosystem respiration, soil respiration and carbon sink strength under grazing gradient, the biomasses in alpine weeds meadow lying to the north slope of Qilian mountain were observed from May, 2010 to December, 2011. Meanwhile the respiration of ecosystem and soil were tested by the static chamber. Results showed that (1) the respiration of ecosystem and soil had an exponential relationship with 5cm soil temperature significantly ($P < 0.01$). The Q_{10} values of ecosystem respiration under light, moderate and heavy grazing were 4.28, 4.16 and 4.43 and the Q_{10} values of soil respiration were 3.33, 3.24 and 3.44, respectively. (2) Ecosystem respiration and soil respiration were higher in summer and lower in winter, carbon released from ecosystem respiration were 854.64, 909.79 and 811.70 $g \cdot m^{-2} \cdot y^{-1}$ and released from soil respiration were 564.24, 606.92 and 534.56 $g \cdot m^{-2} \cdot y^{-1}$ respectively under light, moderate and heavy grazing; there was no significant difference of the carbon released between different grazing intensity. (3) Total net primary productivity which was 766.65, 707.75 and 570.36 $g \cdot m^{-2} \cdot y^{-1}$, carbon sink which was 351.93, 261.68 and 177.46 $g \cdot m^{-2} \cdot y^{-1}$ respectively under light, moderate and heavy grazing both reduced with grazing pressure. The alpine weedy meadow was a carbon sink whether under light grazing or heavy grazing, and carbon sequestration potential was huge. The results provide a basis for understanding the characteristics of carbon cycle of alpine weedy meadow in Qinghai-Tibetan plateau.

* 收稿日期:2012-12-03 ** 通讯作者. E-mail: ynli@nwipb.cas.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(31070437;31270523);中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”(XDA05050601;XDA05050404)

作者简介:吴启华(1987-),女,湖北咸宁人,硕士生,主要从事全球变化生态学研究. E-mail: wqh5859@126.com

Key words: Alpine weedy meadow; Grazing pressure gradient; Net primary productivity reduces; Ecosystem respiration; Soil respiration; Carbon sink strength

陆地生态系统中植被碳库和土壤碳库碳贮存量约为大气碳库的2倍^[1],其中草地生态系统因面积大(约占全球陆地面积的20%)、地下生物量高、土壤有机质丰富,具有很高的碳蓄积能力,在全球碳循环中起着巨大作用^[2,3]。同时,草地生态系统类型因地域气候条件及人类活动而异,导致碳循环模式复杂多样。陆地生态系统呼吸一直是全球碳循环研究的重点,准确测定陆地生态系统呼吸对科学估算陆地生态系统碳源/汇功能具有重要作用。青藏高原占地球陆地表面积的1.69%,而其碳储量却占全球总碳库的2.4%~2.6%^[4]。但人类活动(如超载放牧)及气候变化等原因,极大影响了青藏高原生态系统尤其是主体生态类型即高寒草甸系统的碳循环过程和强度^[5]。

目前,青藏高原的碳源/碳汇研究多集中于分布面积较广的高寒矮嵩草草甸、金露梅灌丛草甸和沼泽化藏嵩草草甸^[6-12],而对分布面积较小的高寒杂草类草甸研究不多。高寒杂草类草甸一般分布在高山雪线区稀疏植被至嵩草草甸或金露梅灌丛草甸的过渡带,植物种类组成多以杂草为主,禾草类较少,土层浅薄,多为夏季放牧草场。高寒杂草类草甸作为轮牧制度的重要组成部分,虽然面积不大但地位突出,区域因非生长季积雪深厚且维持时间长,导致土壤、植被呼吸强度有别于嵩草草甸和灌丛草甸。研究该类型区域的生态系统和土壤呼吸、植被净初级生产力等碳过程,对生态系统碳汇能力的估算和碳循环的研究十分必要。本文拟以青藏高原高寒杂草类草甸为研究对象,分析高寒杂草类草甸牧压梯度下生态系统呼吸规律、净初级生产力以及净生态系统生产力(碳源/汇强度),以期为深入研究高原生态系统因放牧强度的改变引起的碳源/汇效应提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2010年5月-2011年12月在青海海北高寒草甸生态系统国家野外科学观测研究站(海北站)进行。海北站地处青藏高原东北隅祁连山北支冷龙岭东段南麓坡地(37°29′-37°45′N, 101°12′-101°23′E, 海拔3200-3600m)。该区位于亚洲大陆腹地,具有明显的高原大陆性气候,东南季风及西南季风微弱。受高海拔条件制约,气温极低,无明显四季之分,仅有冷暖季之别,干湿季分明。年平均气温-1.7℃,降水量约560mm,降水主要集中于植物生长季的5-9

月,约占年降水量的80%,年平均日照时数2462.7h^[13]。

不同放牧强度的夏季放牧梯度试验样地位于海北站东北9km处祁连山冷龙岭南麓坡地,系金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛草甸上沿的高寒杂草类草甸,优势种及伴生种有青藏苔草(*Carex moorcroftii*)、矮火绒草(*Leontopodium nanum*)、早熟禾(*Poa* spp.)、重齿风毛菊(*Saussurea katochaete*)、矮嵩草(*Kobresia humilis*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、异针茅(*Stipa aliena*)等,约12科24属31种。土壤类型为暗沃寒冻锥形土。海拔相对较高,气温比海北站低0.4℃。试验区地势开阔,坡度约为5°,中心点地理坐标为37°41′N、101°21′E,海拔3545m。参考以往研究放牧强度经验^[14],牧压梯度设置为轻牧(4.5只羊/hm²)、中牧(7.5只羊/hm²)和重牧(15只羊/hm²)3个管理方式,中度放牧与自然放牧强度基本一致,故未进行对照样地及自然放牧状况下生态系统和土壤呼吸的测定,仅设3个处理。试验地用围栏围封,试验羊为当地藏系绵羊。按当地放牧方式在每年的6月1日-9月15日期间进行,即每年放牧时间3.5个月。

1.2 项目观测和估算

1.2.1 植被生物量监测及年净初级生产碳量计算

2010年开始进行牧压梯度试验,生物量资料为2011年观测值。2011年6月上旬-9月中旬每隔15d左右对轻牧、中牧、重牧3个牧压梯度试验区进行植被生物量监测。监测时分别在每个牧压梯度试验区随机选取5个50cm×50cm样方,先将样方内的凋落物收集装入纸袋,再将植物活体齐地面剪下后装袋,然后用手刮的方式收集地表残留物装袋,最后在收集地上生物量的样方内用直径8cm的根钻,按0-10cm、10-20cm和20-40cm分层取样装入自封塑料袋。样品带回实验室后对所收集的根系在清水中清洗干净置入纸袋。而后将收集的所有样品分别装入纸袋在恒温65℃的烘干箱烘至恒重,称重,并以地上部分为45%、地下部分为40%的含碳量换算成植被碳量^[6]。其中,以当年植物生长末期8月底9月初地上活体生物量达最大的值为年地上净初级生产量,以相同放牧强度当年地下生物量季节动态中最大值与最小值之差表示年地下净初级生产量^[15]。放牧后植被的地上净初级生产量应为净生物群区生产力,但考

考虑到地上生物量远小于地下生物量,加之放牧后地表仍存留较高的生物量,故本文在进行资料处理时,地上净初级生产力用净生物群区生产力替代仍不失一般性。

1.2.2 生态系统呼吸及土壤呼吸速率

生态系统呼吸和土壤呼吸(每次观测前地表植被用剪刀清理后的裸露地表)采用静态密闭箱-气相色谱法进行。采集箱由 304K 薄不锈钢板制作,体积均为 50cm × 50cm × 50cm。底座(50cm × 50cm × 10cm),上端有密闭水槽。顶箱为五面体,箱顶壁装有搅拌风扇、侧壁装有电源插头、取气体样品接口、便携式温度计探头,配有 F46 采气导管线。试验前将底座埋入带有植被的土壤中,为减小土壤扰动对测定结果的影响,四周用泥土压实,试验期间不再取出。试验期间底座密闭水槽内加水,以使箱与底座间的气路密闭,切断箱内外空气的自由交换。

Dugas 等^[16]曾提出 9:00 - 11:00 所采的气样能代表土壤或生态系统呼吸的日平均量,考虑到海北站当地时间与北京时间相差 1.25h,同时考虑观测强度大,本试验观测在 2010 年 5 月 - 2011 年 12 月期间每 5 ~ 7d 不定期地在上午 10:00 - 11:00 观测一次作为当日平均量。对每个牧压梯度生态系统呼吸和土壤呼吸 3 次重复。用 100mL 医用注射器在 3 ~ 5m 距离处通过取气接口取样,间隔时间为 0、10、20、30min。每个放牧强度试验地架设包括 5cm 土壤温度在内的多层次土壤温湿度自动观测仪(ARS Data Logger. Avalon, USA),输出数据为 30min 值,并自动输出储存于记录仪中。取样后及时带回实验室采用 HP4890D 气相色谱仪进行分析。被测 CO₂ 气体排放通量(F, mg·m⁻²·h⁻¹)为

$$F = \rho \cdot \frac{V}{A} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{dC_t}{dt} \quad (1)$$

式中,ρ 为标准状态下的被测气体密度(1.96g·L⁻¹);V 为箱体体积(0.125m³);A 为箱体底面积(0.25m²);T₀和 P₀分别为标准状况下的空气绝对温度(0℃)和气压(101.3kPa);P 为采样地点的实际气压(kPa);T 为采样时的实际气温(℃)。dC_t/dt 为观测时间内箱内 CO₂ 浓度随时间变化的回归直线斜率,C_t为 t 时刻箱内被测气体的体积混合比浓度(μL·L⁻¹),t 为采样时间(min)。

1.2.3 碳源/汇强度的估算

牧压梯度下净生态系统生产量(碳源/汇能力,NEP)采用净初级生产量与土壤呼吸(异养呼吸)量的差值来估算^[17]。

1.2.4 数据处理

首先利用 10:00 - 11:00 监测的资料,建立土壤及生态系统日呼吸速率与 5cm 日均地温间的指数关系,即

$$R = ae^{bT} \quad (2)$$

式中,R 为土壤或生态系统的呼吸速率(g·m⁻²·d⁻¹);T 为相应的 5cm 日平均地温(℃);a 为截距;b 为温度反应系数。

其次,计算出土壤及生态系统呼吸对温度的敏感性系数(Q₁₀),即温度每升高 10℃,生态系统呼吸增加的倍数

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (3)$$

利用相关数学统计(Analyst Application of SAS V9.2)方法和 Excel 作图软件对观测数据进行统计和分析。单因子方差分析(ANOVA)和新复极差法(SSR)用于牧压梯度下各指标间的比较和差异显著性检验(α = 0.05)。

2 结果与分析

2.1 牧压梯度下生态系统和土壤呼吸的温度敏感系数

图 1 为生态系统和土壤呼吸速率与 5cm 日均地温的关系。由图可见,不同牧压梯度下生态系统呼吸速率与 5cm 地温日均值间均具有极显著的指数关系。轻牧、中牧和重牧条件下二者对应的模拟方程分别为

$$Re = 4.7871e^{0.1455T_d} \quad (n=26, R^2=0.8215, P<0.01) \quad (4)$$

$$Re = 5.1826e^{0.1426T_d} \quad (n=26, R^2=0.8329, P<0.01) \quad (5)$$

$$Re = 4.4566e^{0.1489T_d} \quad (n=26, R^2=0.8132, P<0.01) \quad (6)$$

式中,Re 为各级牧压梯度下生态系统的呼吸速率,T_d为各处理 5cm 日均地温,方程均通过了 0.01 水平的显著性检验。方程的决定系数反映 5cm 土壤温度对生态系统呼吸速率变异的解释率在 80% 以上,说明利用地温观测资料可以模拟估算牧压梯度下生态系统呼吸速率。根据该方程进一步计算得到相应牧压条件下生态系统呼吸速率的温度敏感系数,轻度、中度和重度放牧强度下的 Q₁₀ 分别为 4.28、4.16 和 4.43,可见中度放牧条件下的温度敏感性最弱,重牧条件下最强。

同理,由图 1 可见,牧压梯度下土壤呼吸速率的观测值(R_s)与 5cm 地温的日平均值(T_d)间也具有极显著的指数关系。轻牧、中牧和重牧条件下相应的模拟方程分别为

$$R_s = 3.6356e^{0.1203T_d} \quad (n=26, R^2=0.7643, P<0.01) \quad (7)$$

$$R_s = 3.9662e^{0.1176T_d} \quad (n=26, R^2=0.7702, P<0.01) \quad (8)$$

$$R_s = 3.3846e^{0.1236T_d} \quad (n=26, R^2=0.7507, P<0.01) \quad (9)$$

可见 5cm 土壤温度对土壤呼吸速率变异的解释率在 75% 以上, 亦可说明利用地温观测资料可以模拟估算牧压梯度下土壤呼吸速率。轻牧、中牧和重牧

3 种牧压梯度下土壤呼吸速率的温度敏感系数 Q_{10} 分别为 3.33、3.24 和 3.44, 中度放牧条件下土壤呼吸速率的温度敏感性最弱, 重牧最强。

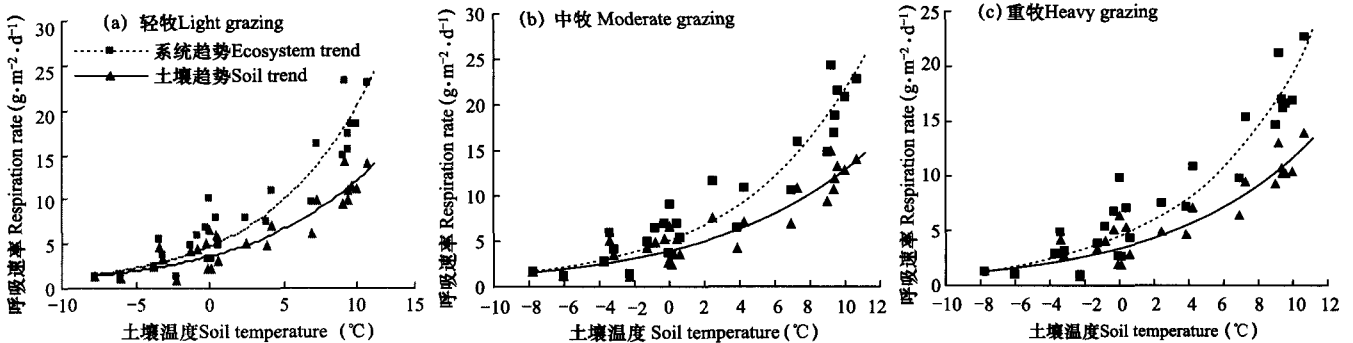


图 1 高寒杂草类草甸中生态系统 (■) 和土壤呼吸速率 (▲) 与 5cm 日均地温的关系

Fig. 1 The relationship of ecosystem respiration (■) and soil respiration (▲) with the average soil temperature in 5cm layer under grazing pressure gradient in alpine weedy meadow

2.2 牧压梯度下生态系统和土壤呼吸的年变化

利用 5cm 连续观测计算的日平均地温资料, 由式(4) - 式(9)可以模拟得到牧压梯度下生态系统和土壤呼吸速率的年动态变化。由于轻牧、中牧和重牧 5cm 土壤温度的变化趋势基本一致, 仅数量上有差异, 故本文仅就中度放牧条件下生态系统和土壤呼吸速率的年变化分布作图(图 2)。由图 2 可

见, 5月中旬开始, 生态系统及土壤呼吸速率随温度的上升而增加, 7月达年内最高, 9月以后随温度下降而降低, 12月 - 翌年2月最低。总体来看其生态系统呼吸及土壤呼吸排放量在年内呈单峰型变化过程。但可以看到, 由冬春季到夏季日排放量随时间进程的增加比由夏季到秋冬季过渡期间的下降相对缓慢。

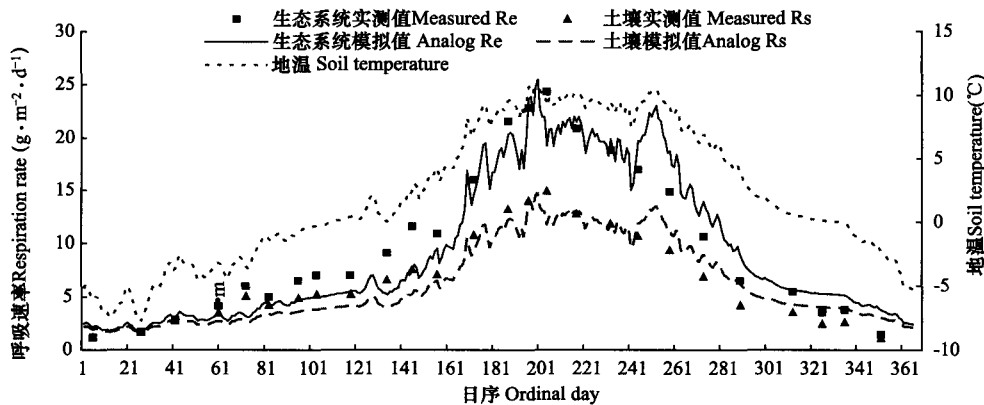


图 2 高寒杂草类草甸中度放牧条件下生态系统、土壤呼吸速率及 5cm 日平均地温的逐日变化过程

Fig. 2 Daily variation of ecosystem respiration, soil respiration rate and 5cm soil average temperature in alpine weedy meadow under moderate grazing (2011 - 01 - 01 - 12 - 31)

统计 2011 年全年轻牧、中牧和重牧条件下生态系统年总释放碳量, 分别为 854.64、909.79 和 811.70 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$, 而土壤呼吸的年总释放碳量分别为 564.24、606.92 和 534.56 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ (表 1), 3 种放牧强度下土壤呼吸年总量占生态系统呼吸年总量的比例分别为 66.02%、66.71% 和 65.86%, 中牧最大, 重牧最小, 但方差分析表明三者无显著差异。

2.3 牧压梯度下碳汇/源能力的初步估算

2.3.1 地上、地下净初级生产碳量

统计发现, 2011 年夏季放牧草场轻牧、中牧和重牧条件下, 年地上净初级生产碳量依次为 110.48、79.36 和 67.63 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$, 地下量依次为 656.17、628.39 和 502.74 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$, 总量分别为 766.65、707.75 和 570.36 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ (表 1)。表现为放牧强度越大, 植物的净初级生产碳量越低, 轻牧与中牧之

间的差异不显著,二者与重牧差异均达显著水平($P < 0.05$)。

2.3.2 碳汇/源强度的估算

一般认为,土壤呼吸包括土壤微生物对有机质的分解和植物根系呼吸两大部分^[18],受试验条件限制,本研究未进行植物根系呼吸以及根系分泌量的测定,即假设植物根系分泌碳量为0,以往研究将高寒草甸地区植物根系分泌归入土壤有机碳量观测也甚少,甚至未查到该类文献。Rochette等^[19]综合考虑各种因素及不同方法的比较时提出了根去除法是区分土壤各组分呼吸的一种较切实可行的方法,吴琴等^[7]在海北高寒矮嵩草草甸采用该方法区分土壤各组分 CO_2 释放速率的差异,得出了高寒矮嵩草草甸植物根系呼吸占土壤呼吸的26.5%,土壤微生物呼吸占土壤呼吸的73.5%的结论,这个比例在Silvola研究结果指出

根系呼吸可占到土壤呼吸的10%~40%范围内^[20],也与Coleman等^[21]采用土壤碳收支平衡法算得次生Broomsedge草原群落根系呼吸占土壤呼吸的24%~35%相近。本实验研究区涉及的高寒杂草类草甸与吴琴等研究的高寒矮嵩草草甸相距较近,且土壤类型及气候条件基本一致,因此,利用吴琴等在高寒矮嵩草草甸研究得出的比例替代本试验区的土壤呼吸中根系自养呼吸量和微生物的异养呼吸量,进而利用净初级生产碳量与微生物异养呼吸的差值来估算牧压梯度下高寒杂草类草甸生态系统的碳汇/源强度,其结果见表1。

由表1可见,海北夏季放牧草场在不同牧压条件下生态系统的年净生产碳量均为正值,说明高寒杂草类草甸生态系统具有碳汇特点,且放牧强度越小碳汇能力越强,反之系统的碳汇能力越弱。

表1 海北夏季高寒杂草类草甸牧压梯度下生态系统碳分配估算($g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)

Table 1 The carbon flux of ecosystem in summer pasture of alpine weeds meadow in Haibei($gC \cdot m^{-2} \cdot y^{-1}$)

	RCs	RCa	RCh	NPP	NEP
轻牧 Light grazing	564.24a	149.52a	414.72a	766.65a	351.93a
中牧 Moderate grazing	606.92a	160.84a	446.08a	707.76a	261.68a
重牧 Heavy grazing	534.56a	141.66a	392.9a	570.36b	177.46b

注:RCs为年单位面积土壤呼吸的碳量,由实测值计算;RCa为单位面积年根系呼吸的碳量,为RCs的26.5%;RCh为单位面积年土壤微生物呼吸碳量,为RCs的73.5%;NPP为净初级碳生产力,由实测值计算;NEP为净生态系统生产力,NEP=NPP-RCh。每列相同字母表示处理间的差异不显著,不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Note: RCs is carbon released from soil respiration; RCa is carbon released from root respiration, account for 26.5% of RCs; RCh is carbon released from microbial respiration, account for 73.5% of RCs; NPP is net primary carbon productivity computed by measured value; NEP is net ecosystem carbon productivity, NEP = NPP - RCh. The same letter within row means no significant differ between treatments and different letter means $P < 0.05$.

3 结论与讨论

(1)牧压梯度下青藏高原高寒草甸生态系统呼吸速率和土壤呼吸速率年内均呈单峰式变化过程,7月达最大,9月以后下降,其下降速率大于上升速率。中度放牧条件下呼吸速率最大,重牧下最小,但三者差异不显著。中度放牧条件下植被生长较好,土壤的水热、通气条件也较好^[22],中牧还可刺激植物的生长,自养呼吸也较高,生态系统呼吸速率和土壤速率均最大。因本实验处于不同放牧强度试验的初级阶段(放牧强度实验第2年的测定值),故可认为放牧强度的改变在较短的时间内对土壤性状影响不甚明显,虽然改变了植被的净初级生产量及其地上与地下生物量的分配^[23],而对土壤呼吸及生态系统呼吸影响仍微弱,导致牧压梯度下生态系统呼吸速率和土壤呼吸速率差异不显著。

(2)生态系统呼吸和土壤呼吸的温度敏感性均表现为中牧强度下最弱,重牧条件下最强。说明中牧时生态系统呼吸和土壤呼吸较稳定,对温度变化的响

应小,而重牧时二者稳定性差,对温度变化响应大。在全球变暖背景下,中度放牧是较合理的选择。此外,各放牧强度下生态系统呼吸 Q_{10} 值较土壤呼吸大0.92以上,这可能是因为植物地上立枯部分及凋落物含有更多且易分解的碳归入土壤,从而使生态系统呼吸的基质活性高于土壤呼吸所致^[24]。

(3)轻、中和重牧强度下,年净生态系统生产碳量依次为351.93、261.68和177.46 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$,表明随着放牧强度的增大,生态系统的碳汇能力逐渐减弱,同时也可认为,不论是轻牧还是重牧,高寒杂草类草甸为一碳汇区,且碳汇能力较大。海北站分布着多样的高寒草甸类型,Kato等^[8-10]利用涡度相关法分别对高寒金露梅灌丛草甸和高寒矮嵩草草甸植被进行观测表明,二者均表现为碳汇,矮嵩草草甸为78.5~192.5 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$,金露梅灌丛草甸为58.5~75.5 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$;利用同样观测方法,张法伟等^[11]研究表明海北站高寒湿地碳通量为碳源,对青海湖东北岸的草甸草原测定分析表明为碳汇^[12]。本试验得出牧

压梯度下高寒杂草类草甸的年净生态系统生产碳量在 $177.46 \sim 351.93 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 比矮嵩草草甸、金露梅灌丛草甸、草甸草原均高。其原因可能是矮嵩草草甸、金露梅灌丛草甸和藏嵩草沼泽草甸均位于海拔 3200m 的位置, 而本试验的高寒杂草类草甸位于海拔 3600m 的祁连山冷龙岭南麓坡地, 是高山雪线区稀疏植被到嵩草草甸或金露梅灌丛草甸的过渡带, 土壤有机质含量丰富^[25], 加之海拔相对高易产生逆温层, 同时积雪维持时间长, 积雪覆盖具有保温作用, 使高寒杂草类草甸的地温相对较高, 且该地土壤湿度大, 也可使土壤呼吸出现较大的排放量。但由于试验条件限制, 没有进行根系呼吸和微生物异养呼吸的实地测定, 故对净生态系统生产力估算会造成影响^[26]。本文仅借用对相距较近的矮嵩草草甸试验得出的数据进行异养呼吸估算, 极有可能低估了高寒杂草类草甸的微生物异养呼吸作用, 也会使得到的净生态系统生产力偏大, 有待今后作深入的观测研究。

参考文献:

- [1] 杨昕, 王明星. 陆地碳循环研究中若干问题的评述[J]. 地球科学进展, 2001, 16(3): 427-435.
- [2] 于贵瑞, 李海涛, 王绍强, 等. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 182.
- [3] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2003, 33(1): 72-80.
- [4] 王根绪, 程国栋, 沈永平. 青藏高原草地土壤有机碳库及其全球意义[J]. 冰川冻土, 2002, 24(6): 693-700.
- [5] 莫志鸿, 李玉娥, 高清竹. 主要草原生态系统生产力对气候变化响应的模拟[J]. 中国农业气象, 2012, 33(4): 545-554.
- [6] 张金霞, 曹广民, 周党卫, 等. 高寒矮嵩草草甸大气-土壤-植被-动物系统碳素储量及碳素循环[J]. 生态学报, 2003, 23(4): 627-634.
- [7] 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[J]. 资源科学, 2005, 27(2): 96-102.
- [8] Kato T, Tang Y, Gu S, et al. Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. Agriculture and Forest Meteorology, 2004, 124(1-2): 121-134.
- [9] Zhao L, Li Y, Xu S, et al. Diurnal, seasonal and annual variation in net ecosystem CO₂ exchange of an alpine shrubland on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Global Change Biology, 2006, 12(10): 1940-1953.
- [10] Kato T, Tang Y, Gu S, et al. Temperature and biomass influences on interannual changes in CO₂ exchange in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan plateau [J]. Global Change Biology, 2006, 12(7): 1285-1298.
- [11] 张法伟, 刘安花, 李英年, 等. 青藏高原高寒湿地生态系统 CO₂ 通量[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 453-462.
- [12] 张法伟, 李英年, 曹广民, 等. 青海湖北岸高寒草甸草原生态系统 CO₂ 通量特征及其驱动因子[J]. 植物生态学报, 2012, 36(3): 187-198.
- [13] 李英年, 赵新全, 曹广民, 等. 海北高寒草甸生态系统定位站气候、植被生产力背景的分析[J]. 高原气象, 2004, 23(4): 558-567.
- [14] 赵新全. 高寒草甸生态系统与全球变化[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 56-62.
- [15] 李英年. 高寒草甸植物地下生物量与气象条件关系及周转值分析[J]. 中国农业气象, 1998, 19(2): 36-38.
- [16] Dugas W A, Heuer M L, Mayeux H S. Carbon dioxide fluxes over *Bermuda* grass, native prairie and sorghum [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 93(2): 121-139.
- [17] 方精云, 柯金虎, 唐志尧, 等. 生物生产力的“4P”概念、估算及其相互关系[J]. 植物生态学报, 2001, 25(4): 414-419.
- [18] Singh J S, Gupta W H. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems [J]. The Botanical Review, 1997, 43(4): 449-529.
- [19] Rochette P, Flanagan L B. Quantifying rhizosphere respiration in a corn crop under field conditions [J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(2): 466-474.
- [20] Silvola J, Alm J, Ahlholm U. The effect of plant roots on CO₂ release from peat soil [J]. Suo., 1992, 43(4-5): 259-262.
- [21] Coleman D C. Soil carbon balance in a successional grassland [J]. Oikos, 1973, 24(2): 195-199.
- [22] Jia B, Zhou G, Wang Y, et al. Effects of temperature and soil water content on soil respiration of grazed and ungrazed *Leymus chinensis* steppes, Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Environments, 2006, 67(1): 60-76.
- [23] 高永恒, 陈槐, 罗鹏, 等. 放牧强度对川西北高寒草甸植物生物量及其分配的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(3): 26-32.
- [24] Davidson E A, Janssens I V, Luo Y Q. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q₁₀ [J]. Global Change Biology, 2006, 12(2): 154-164.
- [25] 薛晓娟, 李英年, 杜明远, 等. 祁连山东段南麓不同海拔土壤有机质及全氮的分布状况[J]. 冰川冻土, 2009, 31(4): 642-649.
- [26] 任景全, 王连喜, 陈书涛, 等. 免耕与翻耕条件下农田土壤呼吸的比较[J]. 中国农业气象, 2012, 33(3): 388-393.