

# 高寒矮嵩草草甸地面热源强度及与生物量关系的初步研究\*

张法伟<sup>1,2</sup>, 刘安花<sup>1,2</sup>, 李英年<sup>1\*\*</sup>, 赵亮<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海西宁 810001; 2. 中国科学院研究生院)

**摘要:**在青藏高原海北高寒矮嵩草草甸地区, 依据 2002 年涡度相关法观测的能量平衡各分量资料和 6-10 月植物地上、地下生物量测定值, 分析了高寒矮嵩草草甸近地表热量平衡、地面热源强度的变化特征, 讨论了地面热源强度与植物生物量季节变化过程中的相互关系。结果表明: 在青藏高原海北高寒矮嵩草草甸地区, 年内地面均为热源, 热源强度季节变化明显, 地面热源强度年平均为  $88.5 \text{ W/m}^2$ ; 地上生物量季节变化与热源强度具有显著的正相关关系, 而地下生物量季节变化与热源强度关系不明显。

**关键词:**矮嵩草草甸; 热源强度; 热量平衡; 生物量

## Primary Study on Surface Heating Field and Biomass in Alpine Kobresia Meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau

ZHANG Fa-wei<sup>1,2</sup>, LIU An-hua<sup>1,2</sup>, LI Ying-nian<sup>1</sup>, ZHAO Liang<sup>1</sup>

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, CAS, Xining 810001, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences)

**Abstracts:**Based on the data measured by the eddy covariance method in 2002, we analyzed the seasonal variations of the surface heating field, energy balance, aboveground biomass and belowground biomass of the *kobresia* alpine meadow in the Northern Qinghai-Tibetan Plateau. The results showed that the surface of the alpine meadow ecosystem was heat resources. There was evidently seasonal variation in heating field, whose annual mean value was with  $88.5 \text{ Wm}^{-2}$  in 2002. Both aboveground biomass and belowground biomass had seasonal variations as well as. There was positive correlation between aboveground biomass and heating field, while there was not significant relationship between belowground biomass and heating field.

**Key words:**Alpine *Kobresia* meadow; Heating field; Energy balance; Biomass

号称地球“第三极”的青藏高原, 其大范围异常的高原热力和动力作用以及地气物理过程, 对气候变化有着重要的影响。区域太阳辐射强烈, 温度变化剧烈, 降水分配不均, 地形、地貌复杂, 形成了复杂的生态系统空间格局<sup>[1]</sup>。高寒矮嵩草 (*Kobresia humilis*) 草甸是青藏高原寒冷高湿环境下形成的特殊植被类型, 约占青藏高原总面积的 40%, 牧草优质、牲畜喜食, 支撑着青藏高原地区的畜牧业发展。草甸大多分布在黄河、长江发源地, 北部祁连山地亦有大量分布, 因此, 合理利用和保护该类草地, 可涵养水源、有效控制水土流失、防止土地荒漠化, 为工农业可持续发展提供保证<sup>[2]</sup>。而研究该类区域的地面热源强度、地面热量平衡过程以及生物量的变化特征, 不仅为研究青藏高原热力状况提供资料, 也将对了解高寒矮嵩草草甸生命与非生命系统间的关系, 揭示系统间能量流动及其物质循环规律, 解释矮嵩草草甸植被类型区气候及物质循环等提供重要信息<sup>[3]</sup>。

近地层辐射平衡是土壤-植被-大气连续体中能量转换和分配的纽带, 是决定小气候形成的最基本的因素, 也是生物量形成的基础。只有清楚认识其能量流动的

分配过程, 找出局地小气候形成的机制及其分布规律, 才能更好地深入研究生态系统中物质循环和能量流动过程。为此, 研究者对青藏高原的科学实验及研究从未中断, 自 1979 年第一次青藏高原气象科学试验以来, 到 1998 年第二次大气科学实验, 有关能量平衡和地面热源强度的研究以及小气候变化特征等相继取得了重要的成果<sup>[3-10]</sup>。但因青藏高原地形复杂, 生态系统多样, 不同区域因受植被类型等差异的影响, 其能量平衡和能量分配也有明显不同。本文利用中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站 (简称海北站) 根据涡度相关法观测的能量平衡数据, 分析了海北高寒矮嵩草草甸地区地面热源强度的季节变化, 并尝试分析了地面热源强度与非冻结期植物生物量季节变化的关系, 解释热源强度在生物量形成过程中的可能作用。为深入研究高寒草甸生态系统结构功能, 物质循环和能量流动提供依据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

海北站地处青藏高原东北隅, 祁连山北支冷龙岭东段南麓的大通河谷 (37°37' N, 101°19' E), 海拔 3220m。

\* 收稿日期: 2006-04-28 \*\* 通讯作者。 E-mail: ynli@nwipb.ac.cn

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-SW-01-01A); 国家重点基础研究发展规划项目 (2002CB412501); 中日合作“以 21 世纪亚洲陆地生态系统碳管理为目标的综合碳收支研究”; “亚太地区环境创新战略计划 (APEIS)”

作者简介: 张法伟 (1981 - ), 河南义马人, 硕士生, 主要从事边界层生态学的研究。

具有明显的高原大陆性气候;年平均气温  $-1.7^{\circ}\text{C}$ ;年降水量约 580mm,夏季温暖多雨,集中了全年降雨的近 80%;最暖的 7 月平均气温  $9.8^{\circ}\text{C}$ ;冬季寒冷干燥,最冷的 1 月平均气温  $-14.8^{\circ}\text{C}$ ;年辐射总量为  $5 \times 10^3 \sim 8 \times 10^3 \text{ MJ/m}^2$ ,7、8 月的日平均辐射可达  $22 \text{ MJ/m}^2$  左右<sup>[11]</sup>。土壤类型为草毡寒冻锥形土 (*Mat Cryo-sod Soil*),呈微碱性,有机质含量丰富,土壤发育年轻,土层浅薄<sup>[12]</sup>。

涡度相关法观测塔设在海北站西北 1km 处的矮蒿草甸实验区,该实验样地地势平坦开阔,有足够大的“风浪区”。矮蒿草甸植被类型植物除矮蒿草为建群种外,群落的主要优势种有垂穗披碱草 (*Elymus nutans*)、异荆茅 (*Stipa aliena*),次优势种有麻花苳 (*Gentiana straminea*)、甘肃棘豆 (*Oxytropis kansuensis*)、紫羊茅 (*Festuca rubra*),伴生种有瑞苓草 (*Saussurea nigrescens*)、美丽凤毛菊 (*Saussurea kokonorensis*)、柔软紫菀 (*Aster flaccidus*) 等<sup>[3]</sup>。

## 1.2 研究资料

能量平衡和热源强度计算所需的数据取自涡度相关法观测系统和常规气象观测系统。涡度相关系统包括了三维超声风速仪 (CSAT3, Campbell, USA) 和开路红外  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  分析仪 (LF7500, LFCor Lnc, USA) 观测到的潜热通量 (LE) 和显热通量 (H), 净辐射通量 ( $R_n$ , CNR-1, Kipp&Zonen, Netherlands) 分别由向上、向下长、短波辐射的四个分表组成并计算后给出, 安装高度在距地表 150cm 处, 土壤热通量 (G, HFT-3, CSI, USA) 的观测距离地表 2cm。原始数据采样频率为 10Hz, 所有变量用 15min 平均值。文中采用数据为 2002 年的观测资料。

地上和地下生物量均采用“收获法”获取。在 5-10 月每月的 15 日和 30 日前后, 在植物分布均匀、地势平坦的样地上, 地上生物量用 50cm  $\times$  50cm 的样方随机选取 6 个样点, 用剪刀自地表剪齐后, 分类装入纸袋; 地下生物量在不同的地点经过选取地上生物量的 50cm  $\times$  50cm 的样方内再随机选取 25cm  $\times$  25cm 的二级样方, 垂直按 0-10cm、10-20cm 和 20-40cm 3 个层次, 用铁铲和切刀分层取出, 过 36 目筛挑出草根装入布袋, 分样冲洗干净, 入 65 的恒温箱烘干至恒重后称重。

## 1.3 原理和计算

H 和 LE 根据涡度相关原理连续测定。可直接由测定的三维风速、湿度和温度平均值和瞬时脉动值计算:

$$LE = L \frac{w}{q} \quad (1)$$

$$H = C_p w T \quad (2)$$

式中, L 为水的汽化潜热 ( $2.5 \times 10^6 \text{ J/kg}$ ), E 为垂直方向的水汽通量 ( $\text{g/s}$ ), w 为垂直风速 ( $\text{m/s}$ ), q 为比湿 ( $\text{g/g}$ ),  $\rho_a$  为空气密度 ( $\text{kg/m}^3$ ),  $C_p$  为空气的定压比热

( $1004 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ), T 为空气温度 (K), “ $\bar{\quad}$ ” 表示物理量的瞬时脉动量, “ $\overline{\quad}$ ” 表示一定时段内的平均值。

地面热源强度 ( $S_g$ ) 是  $R_n$  与 G 的差值。在能量闭合的情况下, 也可用 LE 与 H 之和表示, 因为涡度相关观测系统普遍存在能量不闭合现象 (一般为  $R_n - G > LE + H$ ), 甚至高达 30% 左右<sup>[12]</sup>, 因此本文用  $R_n$  和 G 的差值表示地面热源强度。

## 2 结果与分析

### 2.1 地表能量平衡和地面热源强度的季节变化

#### 2.1.1 净辐射通量 (Net radiation, $R_n$ )

图 1 给出了  $R_n$ 、LE、H、G 日均值在年内随时间进程的季节变化情况。由图 1a 可知, 年内  $R_n$  呈现明显的单峰式季节变化。在太阳高度角最低的 12 月,  $R_n$  的月平均值接近  $0 \text{ W/m}^2$ , 7 月是  $R_n$  最高时期, 日均值达  $250 \text{ W/m}^2$ 。暖季正是雨季, 天气变化频繁, 天空云系较多, 导致  $R_n$  的离散性显著, 日际间波动变化明显。冷季气候干燥, 天空多为晴天,  $R_n$  的变化较暖季集中。就全年来看, 年内  $R_n$  总量达  $2.76 \times 10^3 \text{ MJ/m}^2$ , 日均值为  $7.57 \text{ MJ/m}^2$ 。植物生长季的 5-9 月总量为  $1.80 \times 10^3 \text{ MJ/m}^2$ , 日均值为  $11.7 \text{ MJ/m}^2$ 。植物非生长季的 10 月翌年 4 月总量为  $0.97 \times 10^3 \text{ MJ/m}^2$ , 日均值为  $4.57 \text{ MJ/m}^2$ 。

#### 2.1.2 潜热通量 (LE)

自 1 月 1 日到 12 月 31 日, LE 的季节变化也十分明显 (图 1b), 在降水丰沛, 温度高的暖季 LE 比较高, 2002 年 7 月是年内 LE 最高的月份, 7 月日平均为  $120 \text{ W/m}^2$ 。冷季因降水稀少, 温度低, 加之冷季土壤表层经吹风等作用有干土层存在, 下垫面水分蒸散明显减弱, LE 很低且变化平稳, 1 月 LE 的平均值接近  $0 \text{ MJ/m}^2$ 。年内 LE 总量达  $0.92 \times 10^3 \text{ MJ/m}^2$ , 日均为  $2.53 \text{ MJ/m}^2$ 。植物生长季的 5-9 月总量为  $0.78 \times 10^3 \text{ MJ/m}^2$ , 日均为  $5.09 \text{ MJ/m}^2$ 。植物非生长季的 10 月翌年 4 月总量为  $0.14 \times 10^3 \text{ MJ/m}^2$ , 日均为  $0.69 \text{ MJ/m}^2$ 。

#### 2.1.3 显热通量 (H)

与  $R_n$  和 LE 相比, H 在年内的季节变化略有差异 (图 1c), 其变化特征与蔡锡安等对鹤山亚热带草坡热量平衡研究的结果相似<sup>[13]</sup>。表现出在年内形成 2 个高值区, 分别出现在 3-4 月和 10 月前后, 冬季最低, 6-7 月次低。这种变化与温度、降水分布以及植物蒸腾和土壤蒸发有关。3-4 月, 因冬春牧事活动植被少, 地表近似裸露, 随太阳总辐射加大, 地表易接受热量, 能量交换以显热为主。6-7 月正是降水丰沛, 植物生长旺盛时期, 潜热消耗增加, H 处于相对较低时期。9 月以后, 日均气温降到 5 以下, 大部分植物逐渐停止生长, 潜热消耗减少, H 相对提高。冬季因区域降水明显减少, 温度下降, H 较低。年内 H 总量达  $0.94 \times 10^3 \text{ MJ/m}^2$ , 日均为

2.57MJ/m<sup>2</sup>。植物生长季的 5-9月总量为 0.39 ×10<sup>3</sup>MJ/m<sup>2</sup>,日均为 2.53MJ/m<sup>2</sup>。植物非生长季的 10月 翌年 4

月总量为 0.55 ×10<sup>3</sup>MJ/m<sup>2</sup>,日均为 2.60MJ/m<sup>2</sup>。

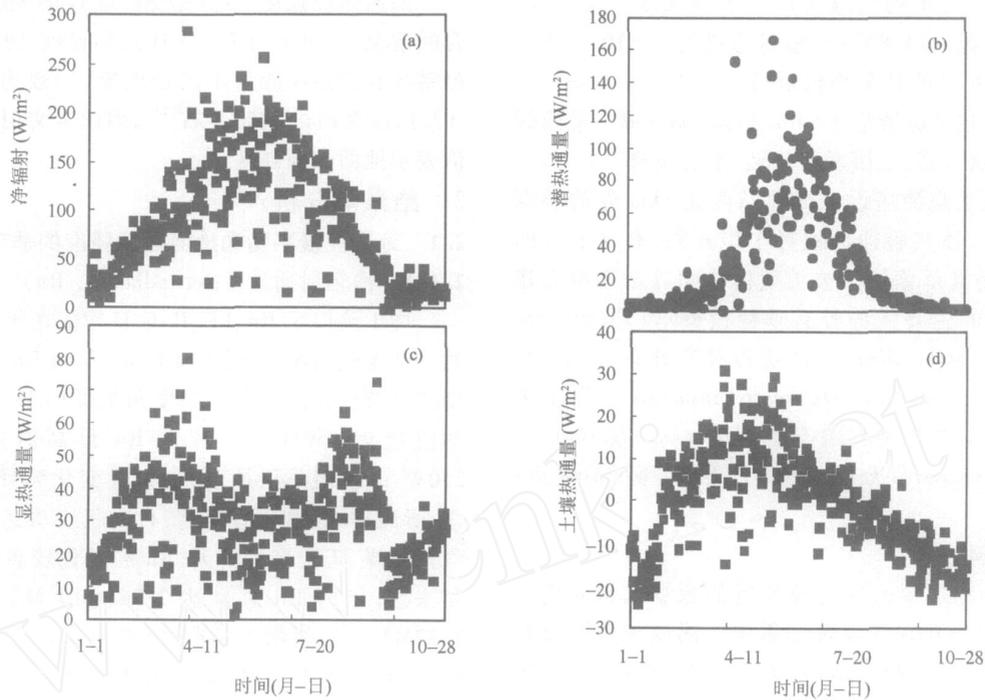


图 1 2002年矮嵩草草甸净辐射 (a)、潜热 (b)、显热 (c)和土壤热通量 (d)的逐日变化

2.1.4 土壤热通量 (G)

受高原气候条件的影响,土壤表面白天接受强烈的太阳辐射而快速升温,但是夜晚长波辐射的冷却效应同样剧烈,由于土壤的导热率很低,土壤温度变化主要发生在地表。同时,由于矮嵩草草甸的植物根系集中在 0 - 20cm 土层,该土层坚实有弹性,具有良好的隔热效果,所以在 2cm 处 G 的日、年变化幅度明显。由图 1d 可知,G 在 5 月最高,日平均为 30W/m<sup>2</sup>,1 月和 12 月最低。约在 2 月底从负值转入正值,9 月中旬起从正值转入负值。从图 1d 还可看到,G 在一年内维持正值的时间较维持负值的时间稍短,说明在高寒矮嵩草草甸区土壤热量的平衡过程中,暖季土壤吸热率比冷季散热率明显。年内 G 总量达 - 4.00MJ/m<sup>2</sup>,日均为 - 0.01MJ/m<sup>2</sup>。植物生长季的 5-9 月总量为 88.0MJ/m<sup>2</sup>,日均为 0.58MJ/m<sup>2</sup>。植物非生长季的 10 月 翌年 4 月总量为 - 91.12MJ/m<sup>2</sup>,日均为 - 0.43MJ/m<sup>2</sup>。

2.1.5 地表热源强度 (S<sub>g</sub>)

统计分析资料表明,青藏高原高寒矮嵩草草甸地区,地面全年均处于热源状况。图 2 给出了海北站 2002 年地表热源强度的年变化情况。由图 2 看到,在海北矮嵩草草甸地区,S<sub>g</sub> 的年平均值为 5.01MJ/m<sup>2</sup>。其中 7 月最大,日平均为 144.2W/m<sup>2</sup>; 12 月最小,平均值为

31.8W/m<sup>2</sup>。年内 S<sub>g</sub> 总量达 2.77 ×10<sup>3</sup> MJ/m<sup>2</sup>,日均为 7.58 MJ/m<sup>2</sup>。植物生长季的 5-9 月总量为 1.71 ×10<sup>3</sup> MJ/m<sup>2</sup>,日均为 11.19 MJ/m<sup>2</sup>。植物非生长季的 10 月 翌年 4 月总量为 1.06 ×10<sup>3</sup> MJ/m<sup>2</sup>,日均为 5.01MJ/m<sup>2</sup>。

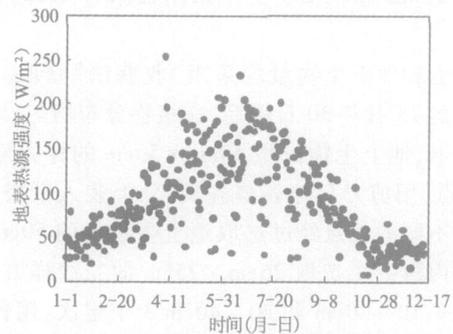


图 2 2002年矮嵩草草甸的地表热源强度逐日变化

就地面加热而言,青藏高原东北隅矮嵩草草甸不仅在夏季是一个强大的热源,在冬季的热源作用也是十分明显的,只不过强度是夏季的 1/4 左右。由于青藏高原海拔高,大气稀薄,致使地表空气密度较小,在研究区空气密度年平均为 0.88kg/m<sup>3</sup>,与同纬度海拔低的华北平原地区相比,约小 1/3,因而可认为,其地面加热效应要比平原地区大将近一倍左右,表现出高原地面加热作用的重要和强大<sup>[14]</sup>。

由图 2 还可看到,若以植物生长旺盛的 7 月为界限 ( $S_{H_i}$ 的月总量最大), 1-7 月  $S_{H_i}$ 随时间进程的增加速率 ( $0.65MJ/(m^2 d)$ )比 7-12 月的降低速率 ( $0.86MJ/(m^2 d)$ )低 24%,表明在 7 月以前,随冬季结束  $S_{H_i}$ 增加缓慢, 7 月以后随冬季来临  $S_{H_i}$ 下降迅速。

## 2.2 高寒矮蒿草甸生物量变化及其与热源强度的关系

### 2.2.1 生物量的季节变化

图 3 给出了海北高寒矮蒿草甸植物地上和地下生物量的季节变化,因条件限制 6 月初以前未进行观测, 10 月未进行地下生物量的观测,这里仅列出了 6 月 15 日 - 10 (9)月 30 日测定的地上(下)生物量的观测结果。由图 3 看到,矮蒿草甸植物地上生物量到 6 月中旬已达  $79.19g/m^2$ ,随着水热条件的协调配合,植物生长加快、生物量显著增加, 8 月中旬到达最高,为  $414.2g/m^2$ 。以后随气温降低,地上生物量逐渐降低。地上生物量年内变化表现出缓慢积累 快速增加 达最高后保持平稳 折损减少的过程,这个过程与当地气象条件的

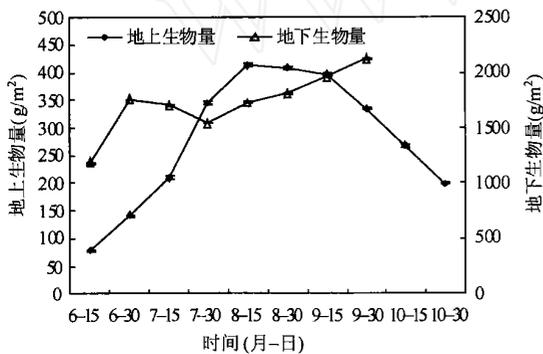


图 3 2002 年矮蒿草甸植物生长季节的地上生物量和地下生物量的变化过程

影响是分不开的,因为 6 月初以前,高寒地区气象条件仍较恶劣,日最低气温常在 0 以下,甚至可达 -10, 再加上降水少,限制了植物生长发育; 6、7 月日平均气温稳定 5, 降水丰沛,水热同季利于植物生长,地上生物量积累较快。8 月为成熟阶段, 9 月中旬以后日平均气温 5 结束,日最低气温多处 0 以下,植物停止生长。

地下生物量的变化不仅与气象条件有关,也与地上生物量变化过程中的物质能量分配及迁移有关。6-9 月地下生物量的变化基本呈现“N”型变化过程。在 6 月底出现第一个高峰 ( $1759.0g/m^2$ ),随后由于植物快速生长,地下生物量因植物的地上部生长迅速而快速消耗,逐渐下降,到 7 月底达到植物生长期内的最低值,以后随地上生物量达最大并出现相对平稳,到 9 月底达最高 ( $2122.7g/m^2$ )。

### 2.2.2 热源强度与生物量的关系

有关地上、地下生物量与环境气象条件的关系方面已有不少报道<sup>[2-3,15]</sup>,而地表热源强度是感热通量与潜热通量的综合反映,既表现了温度影响下的热量交换,也反映了水分分配过程中因蒸散作用而导致的热量分配。为此,本文尝试分析地表热源强度与生物量变化的关系。为了与高寒矮蒿草甸地上、地下生物量进行同步比较,按照生物量的日期间隔,将热源强度在生长季节中按照每 15d 取平均值进行处理。

相关分析结果见图 4。由图 4a 可见,地上生物量与热源强度间呈现显著的正相关关系,但生长季前期(7 月前)和后期(7 月后)的线性关系略有不同。前期植物生长随热源强度的增加而加快 ( $K = 0.12, R^2 = 0.96, n = 5$ ),通过了 0.01 水平的显著性检验,说明植物生长与  $S_{H_i}$ 具有极显著的相关性。后期由于植物光合作用下降、

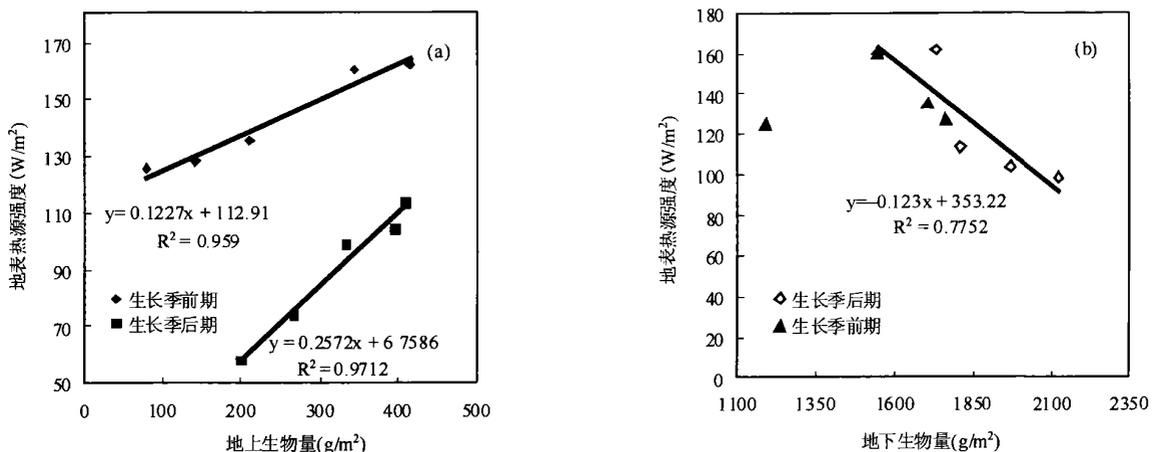


图 4 矮蒿草甸地表热源强度和地上、地下生物量的相关关系

呼吸作用消耗使地上生物量处于减退时期,生物量随  $S_{it}$  的降低而减少 ( $K = 0.26$ ,  $R^2 = 0.98$ ,  $n = 5$ ),通过了 0.01 水平的显著性检验,说明此期植物生长与  $S_{it}$  间也具有极显著的相关性。而且前期的增长速率比后期的降低速率低。可见,在高寒草甸地区,植物地上生物量的增加累计或折损减少可以用地面热源强度的增加和降低来解释,可依  $S_{it}$  建立回归模型来预测高寒植物地上生物量的变化情况。

就整个植物生长期 5-9 月而言,  $S_{it}$  与地下生物量的关系不甚明显。但将植物生长期进行划分发现,在生长季前期的 5 月开始到 7 月中旬,  $S_{it}$  与地下生物量之间的相关性很差。这是因为影响地下生物量累积的因素很多,除了热源强度以外还有光合作用与呼吸作用的交互影响,  $S_{it}$  呈现简单的线性变化而地下生物量呈现较为复杂的变化趋势。在生长季后期,地下生物量与  $S_{it}$  呈现一定的负相关线性关系(图 4b),也就是说在 7 月中旬  $S_{it}$  达最高以后的下降过程中,植物的地上部分的营养物质向地下转移,土壤水分也因受植物的蒸腾和土壤蒸发降低而增加,有利的土壤气候微环境,使植物根系得到良好的生长发育,对地下生物量的提高有利,地下生物量处于增加状况,因此,热源强度和地下生物量呈现一定的负相关关系。

### 3 结论

1) 净辐射、潜热和土壤热通量具有明显的单峰式变化趋势,即在生长季的旺盛期(7、8 月)达到最大值,在 12 月或 1 月达到最小值。净辐射、潜热和土壤热通量年总量分别为  $2.76 \times 10^3 \text{ MJ/m}^2$ ,  $0.92 \times 10^3 \text{ MJ/m}^2$  和  $-4.00 \text{ MJ/m}^2$ 。其日平均值分别为  $7.57 \text{ MJ/m}^2$ ,  $2.53 \text{ MJ/m}^2$  和  $-0.01 \text{ MJ/m}^2$ 。而显热通量则呈现了双峰式变化,在 4 月和 10 月出现两个高峰,其年总量达  $0.94 \times 10^3 \text{ MJ/m}^2$ ,日均值为  $2.57 \text{ MJ/m}^2$ 。

2) 在观测期内,矮高草草甸的地面均为热源,热源强度具有明显的单峰式季节变化,7 月最大,日平均值为  $144.2 \text{ W/m}^2$ ; 12 月最小,平均值为  $31.8 \text{ W/m}^2$ 。年内热源强度总量达  $2.77 \times 10^3 \text{ MJ/m}^2$ ,日均值为  $7.58 \text{ MJ/m}^2$ 。

3) 地上、地下生物量也呈现明显的季节变化,在植物生长初期低,8 月底 - 9 月初达最高,最高为  $414.2 \text{ g/m}^2$ 。而地下生物量则呈现“N 型变化趋势,在 6 月底出现第一个高峰期,9 月底达最高,7 月底最低。

4) 在植物生长季前期和后期,地上生物量与热源强度均具有极显著的正相关关系 ( $R^2 > 0.97$ ,  $P < 0.01$ ),而地下生物量在生长季前期与热源强度间关系不甚明显,在植物生长后期表现有一定的负相关性 ( $R^2 = 0.78$ ,  $P < 0.01$ )。

### 参考文献:

- [1] Zheng D, Zhang QS, Wu SH. Mountain geocology and sustainable development of the Tibetan Plateau [M]. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 2000.
- [2] 周兴民. 中国高草草甸 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [3] 李英年. 海北高寒植被在生长期辐射能量收支探讨 [J]. 草地学报, 2001, 9(1): 58-64.
- [4] 叶笃正, 高由禧. 青藏高原气象学 [M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [5] 章基嘉, 朱抱真, 朱福康, 等. 青藏高原气象学进展 [M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [6] Gu S, Tang YH, Cui XY, et al. Energy exchange between the atmosphere and a meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 129: 175-185.
- [7] 卞林根, 陆龙骅, 逯昌贵, 等. 1998 年夏季青藏高原辐射平衡分量特征 [J]. 大气科学, 2001, 25(5): 577-589.
- [8] 李国平, 段廷扬, 吴贵芬. 青藏高原西部的地面热源强度及地面热量平衡 [J]. 地理科学, 2003, 23(1): 13-18.
- [9] 李韧, 季国良, 杨文. 五道梁地区总辐射的年季变化 [J]. 高原气象, 2005, 24(2): 173-177.
- [10] 杨秀海, 刘晶森. 西藏改则地区冬夏地表热平衡特征 [J]. 西藏科技, 2002, 106(2): 48-54.
- [11] 李英年, 赵新全, 曹广民. 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.
- [12] Wilson K, Goldstein A, Falge E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 113: 223-243.
- [13] 蔡锡安, 任海, 彭少麟, 等. 鹤山南亚热带草坡生态系统的能量平衡 [J]. 热带亚热带植物学报, 1997, 5(1): 27-32.
- [14] 周明煜, 徐祥德, 卞林根, 等. 青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究 [M]. 北京: 气象出版社, 2000: 1-16.
- [15] 李英年, 王勤学, 古松, 等. 高寒植被类型及其植物生长力的监测 [J]. 地理学报, 2004, 59(1): 40-49.