

三种高寒草甸植被分布及与湍流 交换通量关系的比较

李英年, 古松, 赵新全, 赵亮, 徐世晓

(中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001)

摘要: 对海北定位站分布的金露梅灌丛草甸、矮嵩草草甸、藏嵩草沼泽化草甸 3 种高寒植被类型群落结构、感热 (H) 和潜热 (LE) 通量比较观测表明, 3 种植被类型年地上净初级生产力表现出矮嵩草草甸 ($318.600 \text{ g } \text{m}^{-2}$) > 藏嵩草沼泽化草甸 ($258.341 \text{ g } \text{m}^{-2}$) > 金露梅灌丛草甸 ($217.695 \text{ g } \text{m}^{-2}$)。植物种类组成有矮嵩草草甸 (54 种) > 金露梅灌丛草甸 (47 种) > 沼泽草甸 (24 种)。3 种植被类型区近地表大气能量交换过程中, LE 和 H 的月际变化明显, 而且随植被类型的不同月际变化差异显著。3 种不同植被类型在年内均表现出 $H + LE > 0$ 表明在青海海北高寒草甸地区, 太阳辐射强烈, 近地层湍流输送明显, 地表为一热源。3 类型高寒草甸植被的年地上净生产量基本与波文比 (β) 呈现正效应, 与 $LE + H$ 呈现明显的反效应。植物种类组成基本与 $LE + H$ 有反效应, 与 β 呈明显的正效应。

关键词: 植被类型; 潜热通量; 感热通量; 波文比

中图分类号: Q948.15

文献标识码: A

地表湍流通量是表征地-气相互作用过程的重要物理量, 其变化特征对近地层大气状态产生深远的影响。因此, 研究近地面层湍流输送过程, 及其动量、热量、水汽和质量的交换过程有着重要的实际意义。叶笃正等^[1]在讨论青藏高原加热场和加热强度时认为, 在整个青藏高原蒸发潜热 (LE) 明显小于感热 (H), 指出 LE 要比 H 小 18% 左右, 也就是说 H 对 LE 的比值 (波文比, β) 明显大于 1。这对高原的西部干燥或半干燥地区、或寒冷的冬季可能适应。但对青藏高原及其周围边缘分布的高寒草甸区域来讲, 由于其降水相对丰富, 土壤湿润, 在夏季多处于湿润或半湿润状态, LE 和 H 变化复杂, β 随植被类型的不同而有所不同。甚至在夏半年出现 LE 明显大于 H 的可能, 导致 β 明显变小。作者在研究中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站 (海北站) 高寒矮嵩草草甸分布区的热量平衡时发现^[2], 植物生

长期内, 日间土壤热通量 (G)、 LE 和 H 所占净辐射通量 (R_n) 的比例在不同季节变化差异较大, 在 6 月到 9 月选择个例状况分析表明, 所占的比例分别为 3.4%、68.0% 和 28.6%。表现出 LE 占 R_n 的比例较大, H 次之, G 很小。这说明在青藏高原高寒草甸分布区多出现 LE 较大, H 较小的可能。为了对高寒草甸不同植被类型分布区的 LE 及 H 变化等有较为翔实的认识, 本文调查海北站附近金露梅 (*Potentilla fruticosa*) 灌丛草甸、矮嵩草 (*Kobresia humilis*) 草甸、藏嵩草 (*Kobresia tibetica*) 沼泽化草甸 3 种高寒植被类型植物群落结构及生物生产力, 并联系在这 3 种不同植被类型生态系统架设的涡度相关观测系统所观测的 LE 和 H 进行比较分析。旨在揭示植被类型对气候条件的反应情况, 对高寒草甸生态系统的形成与演化、结构功能特征、生态适应性等具有重要的理论与实践意义, 并为青藏高原气候动力学机制的

收稿日期 (Received date): 2006-03-08; 改回日期 (Accepted): 2006-09-30.

基金项目 (Foundation item): 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”及中日合作“亚太地区环境创新战略计划 (APEIS)”资助。[Knowledge Innovation of CAS (NO. KZCX1-SW-01-01A), State Key Basic Research on Development Strategy (NO. 2002CB412501), Sino-Japan cooperation of “Comprehensive Carbon Budget Study in Asian Terrestrial Ecosystem Carbon Management” and Sino-Japan cooperation of “Asia Pacific Environmental Innovation Strategy (APEIS)”.]

作者简介 (Biography): 李英年 (1962-), 男, 高级工程师, 从事生物气象研究工作 [Li Yingnian (1962-), Senior Engineer Major research field in Biometeorology. E-mail: ynl@nwnib.ac.cn]

研究以及对高原加热强度的研究提供科学依据。

1 研究材料及方法

1.1 研究区自然概况

海北站地处青藏高原东北隅祁连山北支冷龙岭东段南麓,地理坐标为 $37^{\circ}29' \sim 37^{\circ}45' \text{N}$, $101^{\circ}12' \sim 101^{\circ}23' \text{E}$,海拔 3 200 ~ 3 600 m。该地具明显的高原大陆性气候,季风气候微弱。受高海拔条件制约,气温极低,无明显四季之分,仅有冷暖二季之别,干湿季分明;地区年平均气温 -1.7°C ,最暖的 7 月平均气温 9.8°C ,最冷的 1 月平均气温 -14.8°C ;年降水量 580 mm 左右,降水主要集中于暖季的 5 ~ 9 月,占年降水量的 80%。年内相对无霜期约为 20 d 在最热的 7 月仍可出现霜冻、结冰、降雪(雨夹雪)等天气现象。表现出冷季寒冷、干燥、漫长,暖季凉爽、湿润、短暂^[3]。

涡度相关观测系统分别设置在海北站地区分布面积广的高寒矮嵩草草甸、金露梅灌丛草甸和藏嵩草沼泽化草甸地势平坦、地形开阔、具有足够“风浪区”的中央。其中:矮嵩草草甸、金露梅灌丛草甸和藏嵩草沼泽化草甸分别处在海北站西北 1.8 km、东北 6 km 和东南 1.5 km 处。观测系统 CSAT 型超声风速温度仪(CSI)和 LI-7500CO₂ H₂O 红外分析仪(LI-COR Inc.),依不同植被类型下垫面性质不同,安装高度略有不同。3 种植被类型架设高度分别离地表面高为 2.2 m、2.5 m 和 2.5 m。

1.2 研究资料与方法

1.2.1 LE 和 H 资料的观测

众所周知,近地面层大气湍流场中任何一种标量属性(c)遵从下面的方程^[4 5]

$$-\frac{\partial}{\partial z}(\overline{w'c'})=0 \quad (1)$$

其中 z 为高度; w' 垂直速度。这就是常通量层的条件,它是近地表面层湍流通量的基础,在此基础上才发展有湍流通量的观测方法,包括了涡度相关法、空气动力学法、热量平衡法等。涡度相关法就是以上述通量层的基本方程为基础,对(1)求层内积分,通过选用自然坐标(x, y, z)投影计算得到水平风速分量的脉动值(u' 和 v'),垂直速度(w'),温度和比湿的脉动值(t' 和 q')。由处理后的湍流脉动量序列得到 LE 、 H , 以及动量通量(τ)

$$\tau = -\rho \overline{u'w'} = \rho u_*^2 \quad (2)$$

$$H = \rho C_p \overline{\theta'w'} \quad (3)$$

$$LE = \rho L_v \overline{w'q'} \quad (4)$$

式中 ρ 为空气密度; u' 为水平脉动风速; C_p 为定压比热; L 为蒸发潜热; u_* 为摩擦速度; θ' 和 q' 分别为气温和比湿的脉动量。这样直接测量协方差就得到各种湍流量。

在湍流资料处理中,采用每小时 30 min 资料,利用剔除和内插方法消除由于各种原因引起的噪声和峰值干扰。

1.2.2 植物群落及生物量调查

植物群落调查在上述 3 点涡度相关法观测塔所在的区域进行^[9]。于 2003-09 在观测塔附近开始向外缘每间隔 10 m (沼泽地为 20 m) 取 25 cm × 25 cm 大小的样方,进行群落种类、高度、盖度及生物量调查,共获得 10 个样方资料。季节地上生物量测定是在 2004 年植物生长期每月 15 日和最后一日,随机选择 6 个 50 cm × 50 cm 的样方,用剪刀齐地面剪下装入纸袋,然后在恒温控制 65°C 的烘箱,烘干至恒重后称重,单位取 g m^{-2} 。植物地上年净生产量则为 2004-08-30 到 09-15 达最大时的测定值。

2 结果分析

2.1 3 种不同植被类型群落结构特征与地上净初级生产量调查结果

金露梅灌丛草甸多处在山地阴坡、沿河边缘阶地及土壤湿度较高的平缓滩地。金露梅灌丛草甸是高寒落叶灌木的典型代表,其群落外貌高低不等,一般由 2 层群落层组成,除上层金露梅灌丛组成木本植物群落外,下部生长有多种优良牧草,构成了底层植物群落。金露梅灌丛株高在 30 ~ 40 cm 间,最高可达 60 cm 其盖度为 60% ~ 70%。随海拔升高,气候变得愈加寒冷,植株逐渐变得低矮。其下部草本植物因生境和灌木层高度、盖度的差异分布,种类组成、盖度等差异较大。就调查地段来看,草本层中主要有 47 种植物组成,隶属 15 科 37 属,群落总盖度约为 91%,草本叶层平均高约为 8 ~ 16 cm。金露梅灌丛草甸中其草本层的优势种有针茅(*Stipa capillata*)、藏异燕麦(*Helictotrichon tibeticum*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*),次优势种有羊茅(*Festuca ovina*)、紫羊茅(*Festuca rubra*)、线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*),伴生种有柔软紫菀(*Aster flaccidus*)、早熟禾(*Poa orinosa*)、棘豆(*Oxytropis* sp.)、瑞苓草(*Saussurea nigrescens*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、矮

火绒草 (*Leontopodium nanum*)、尖叶龙胆 (*Gentiana aristata*)、野青茅 (*Deyeuia macilentia*)、花苜蓿 (*Trigonella ruthenica*)、摩苓草 (*Morina chinensis*)等。

矮嵩草草甸多在平缓滩地和山地阳坡等地分布,矮嵩草草甸植物群落外貌整齐、均匀,植被总盖度为 93%,主要由 54 种植物种类组成,隶属 19 科 40 属,草层高度为 10~20 cm。除以矮嵩草为建群种外,从重要值分析结果来看,该群落的主要优势种为针茅,次优势种有麻花艽 (*Gentiana straminea*)、甘肃棘豆 (*Oxytropis kansuensis*)、紫羊茅,伴生种有瑞苓草、针茅、花苜蓿、青海凤毛菊 (*Saussurea kokonorensis*)、垂穗披碱草、美丽凤毛菊 (*Saussurea superba*)、柔软紫菀 (*Aster flaccidus*)等。

藏嵩草沼泽化草甸主要分布在土壤通透性差的河畔、湖滨、盆地,以及坡麓潜水溢出和高山冰雪下缘等地带,其植物群落的组成比较单一,结构简单,总盖度高,可达 95% 左右。植物优势种中央与边缘地带略有不同,中央部以帕米尔苔草 (*Carex Pamirensis*)为主要植物建群种,而边缘地带以藏嵩草为主要建群种。其总的趋势是中央植被高、种类组成少;边缘区植被高度低,物种比中央带丰富。调查表明主要有 24 种植物组成,隶属 10 科 20 属,草群高为 10~50 cm。群落的优势种为帕米尔苔草,次优势种有华扁穗草 (*Blymus sinocompressus*)、黑褐苔草 (*Carex atrofusca*)、伴生种有杉叶藻 (*Hippuris vulgaris*)、斑唇马先蒿 (*Pedicularis longiflora*)、祁连獐芽菜 (*Swertia przewalskii*)等。在边缘带还有大量的矮嵩草。

对植被年净初级生产力调查表明,矮嵩草草甸、金露梅灌丛草甸和沼泽化藏嵩草草甸 3 种不同植被

类型其净初级生产力差异明显,3 种植被类型地上年净初级生产力分别为 318.600 g m⁻², 217.695 g m⁻² 和 258.341 g m⁻²,表现出矮嵩草草甸>沼泽化藏嵩草草甸>金露梅灌丛草甸。

2.2 3 种不同植被类型 *LE* 和 *H* 的月际分布及波动变化情况

2.2.1 *LE* 和 *H* 的月际变化情况

图 1 给出了海北高寒草甸地区矮嵩草草甸、金露梅灌丛草甸和沼泽化藏嵩草草甸 3 种不同植被类型,2003-07 到 2004-08 近地表大气能量交换过程中的 *LE* 和 *H* 的月际变化。图 1a 看到,3 种植被类型区 *LE* 和 *H* 均有明显的季节变化过程,而且随植被类型的不同差异明显。年平均 *LE* 表现出藏嵩草沼泽化草甸 (44.494 W m⁻²)>金露梅灌丛草甸 (40.095 W m⁻²)>矮嵩草草甸 (28.825 W m⁻²)。月际变化中,3 种不同植被类型区的 *LE* 在 3 月以后开始,随季节进程升高,在水热配合良好的植物生长期均表现较高的水平,9 月以后下降迅速,12 月到翌年 2 月达最低,但藏嵩草沼泽化草甸因地表湿润, *LE* 的变化相对平稳,而且变化值较低。 *LE* 的这种月变化情况与温度变化引起季节转化过程中土壤融冻及冻结时土壤湿度的变化、雨季来临、结束及雨季持续时间长度和雨水分配及强度等有关。一般土壤潮湿、雨水丰沛其 *LE* 高,反之在冷季或在暖季受强太阳辐射影响并遇晴天状况, *LE* 将有所下降。

统计不同植被类型的 *H* 发现 (图 1b),金露梅灌丛草甸 (48.367 W m⁻²)年平均 *H*>矮嵩草草甸 (28.825 W m⁻²)>藏嵩草沼泽化草甸 (20.134 W m⁻²)。这与藏嵩草沼泽化草甸在年内大部分时间地表积水,水的热容量大使表面热量易传导深层,金露

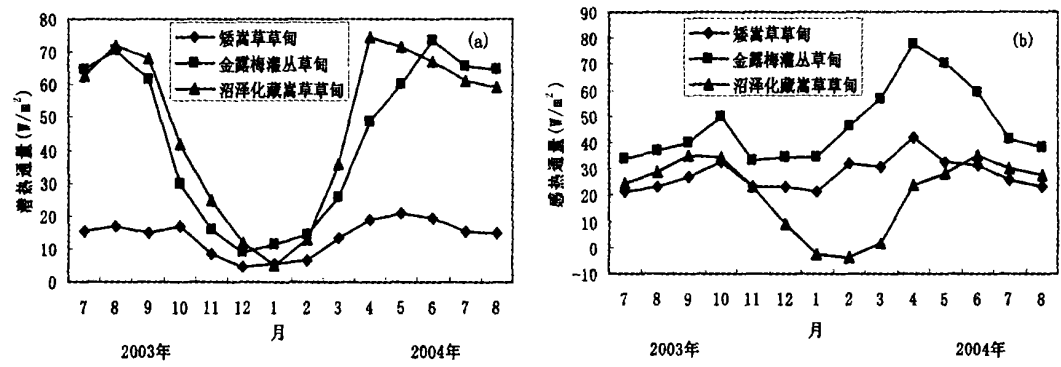


图 1 3 种高寒草甸植被类型分布区 *LE* (a) 和 *H* (b) 的月变化 (2003-07~2004-08)

Fig.1 Monthly change of Latent heat (a) and Sensible heat (b) in three kinds of alpine meadow vegetation distribution region (July 2003 - August 2004)

梅灌丛草甸有较高的高度,易在地表层贮存较多的热量有关。从季节变化过程来看, H 冷季低,暖季高,特别是在植物生长初期的4~5月,降水少,近地表植物因冬季牧事活动及吹风作用减少严重,地表近似裸露,当地表面受太阳辐射后急剧散热,导致金露梅灌丛草甸和矮嵩草草甸的 H 高于其他时期。6~8月虽温度在年内为最高时期,但因该期植被生长茂盛,植物发生光合的同时势必较大的水汽输送,下垫面不仅有强烈的蒸发过程,而且植被的蒸腾作用也很强烈,从而影响到 H 的提高。3种植被类型的 H 的季节变化合乎一般性规律,但从2003-07到2004-08观测资料看出,不同年景的不同月份因受降水和温度条件的分配影响,各月或不同年景的同一个月 H 则有所不同,如:2003-08降水明显高于2004-08导致2004-08 H 高于2003-08。再从2003-10看到 H 有明显的增高,这也与当月降水明显减少,但气温明显偏高有关(据测定,2003-10平均气温比正常年份偏高 2.3°C)。藏嵩草沼泽化草甸因地表常年处于过湿(冬季下垫面基本为结冰所覆盖)状态而较一致,导致 H 的月变化不甚复杂。

2.2.2 3种植被类型 β 的月际变化

图2给出了3种植被类型 β 的月变化过程。可以看到,在矮嵩草草甸分布区,因下垫面均匀且土壤相对金露梅灌丛草甸和藏嵩草沼泽化草甸干燥,致使在全年内的任何月份表现有 $H > LE$ ($\beta > 1$),冷季的11月到次年的4月表现尤为明显;金露梅灌丛草甸植被类型区, H 与 LE 在不同月份其大小不同,一般在植物非生长季节及其前后的10月到次年5月表现出 $H > LE$ ($\beta > 1$),而在植物生长旺盛,降水丰富,温度较高的6到9月表现出 $H < LE$ ($\beta < 1$);藏

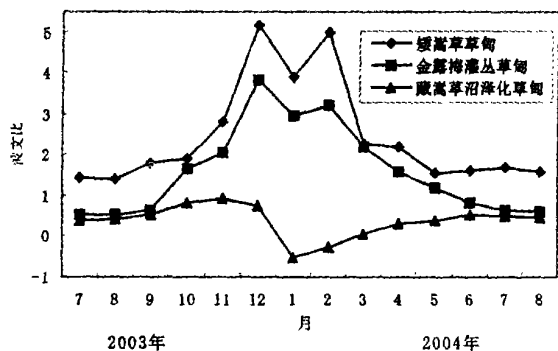


图2 3种高寒草甸植被类型分布区 β 月变化
(2003-07~2004-08)

Fig.2 Monthly change of Bowen ratio in three kinds of alpine meadow vegetation distribution region (July 2003 - August 2004)

嵩草沼泽化草甸植被类型区,因近地表层(下垫面)常年处于积水或结冰的状态,在全年的任何时期均表现出与矮嵩草草甸截然不同,均表现出 $H < LE$ ($\beta < 1$),其中在冷季的1~3月因下垫面结冰,冰面温度低常从大气吸热,导致 H 的传输方向向下,造成 $H < 0$ 在该时期出现 $\beta < 0$ 。这些随植被类型不同所表现出 H 与 LE 的大小不同,表明了不同植被类型 H 与 LE 变化在青藏高原季节变化过程中,具有很大的不一致性。同时还表现出随气候年景的不同,因降水、温度分配不一致, H 与 LE 在不同月份分配差异明显。

2.2.3 3种植被类型 $LE+H$ 的月际变化

$H+LE$ 或者净辐射和土壤热通量的差($R_n - G$)表示了水热交换过程,也表示了地面加热场的强度, $H+LE > 0$ 表示地面有热量盈余,热量自地表输送给大气,地面为热源; $H+LE < 0$ 表示地表面热量亏损,地面需从大气获得热量,地面为冷源。图3给出了3种高寒草甸植被区 $LE+H$ 的月变化过程。

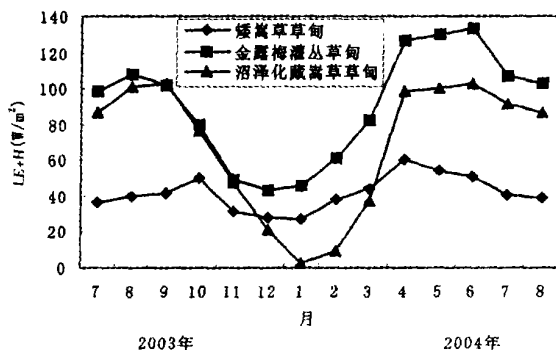


图3 3种高寒草甸植被类型分布区 $LE+H$ 的月变化
(2003-07~2004-08)

Fig.3 Monthly change of $LE+H$ in three kinds of alpine meadow vegetation distribution region (July 2003 - August 2004)

由图3看出,3种不同植被类型在年内均表现出 $H+LE > 0$ 表明在青海海北高寒草甸区,太阳辐射强烈,近地层湍流输送明显,地表为一热源。所不同的是因下垫面性质的不同,3种植被类型所产生的热源强度有所不同,从年平均(2003-09到2004-08)来讲地表热源强度出现有金露梅灌丛草甸 $>$ 沼泽化藏嵩草草甸 $>$ 矮嵩草草甸,其年平均通量值分别为 $1\ 061\ 549\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $775\ 540\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $506\ 321\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,折合年总量分别约为 $2\ 797\ 395\ \text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $2\ 043\ 692\ \text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $1\ 334\ 256\ \text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

图3还表明,3种植被类型分布区的 $H+LE$ 月

变化明显, 其中藏嵩草沼泽化草甸区月变化幅度最大, 矮嵩草草甸最小, 金露梅灌丛草甸居中。在藏嵩草沼泽化草甸的 1 月 $H + LE$ 最低接近 2.414 W m^{-2} , 表明该区域冬季又是在小尺度范围内有一相对的冷岛效应, 实际上在冬季该区域近地层被冰雪所覆盖, H 很低, 甚至出现负值, LE 也因温度影响下发生的冰面蒸发小, 水汽输送弱而降低, 暖季因近地表层常有积水, 地下水位高, 地表潮湿, 导致下垫面 (包括土壤表层) 热容量大, 导热率小, 易贮存热量而导致较大的 LE 有关。金露梅灌丛草甸在年内任何月份均表现较高的水平, 这与金露梅灌丛草甸因金露梅灌木的存在, 白天吸收太阳辐射后易在灌木中贮存能量有关。矮嵩草草甸区植被高度较低, 最高也仅在 20 cm 左右, 热量不易贮存, 土壤又相对干燥, 致使 $H + LE$ 变化较金露梅灌丛草甸和藏嵩草沼泽化草甸相对平稳。

2.3 3 种不同植被类型植物种类、净初级生产力与 β 的对应关系

众所周知, H 表征了大气与地表之间的热量交换, 它的变化一定程度上影响着底层空气的温度。当 H 增加时, 气温升高; H 支出减少时, 气温下降。而 LE 是与一地地表 (包括植被) 水分散失多少有关, 在近地表层, 由于水汽变化 (如蒸发、蒸腾, 以及升华等) 也使近地表层的气温变化受到影响。而对于一地的地表热量交换的总的特征可以用下列热量平衡方程来表示^[6]

$$R_n = H + LE + G + S + \mu A + J + D + \Delta W$$

式中 R_n 净辐射; H 感热通量; LE 潜热通量; G 土壤热通量; S 植物层贮存热; μA 生物化学贮存热, 即净光合作用时发生的热量失; J 从地表到观测高度处单位横截面积空气柱中物理方式贮存的能量; D 因水平流被水平方向流走的能量; ΔW 为寒冷地区因固体降水融雪耗热项。由于在同一地区的年平均 $G = 0$, 加之 S 、 μA 、 J 、 D 、 ΔW 等变化极小, 因此对于年平均而言, 上述热量平衡方程可简化为

$$R_n = H + LE$$

由此可以看到, H 与 LE 的关系出现一个数值的变化会引起另一个数值的向反相变化。即在净辐射 (辐射平衡, R_n) 不变时, H 的增加则有 LE 的减少, 底层气温升高, 相反当有 H 的降低, 则有 LE 的增加, 导致下层空气温度的下降。

不论是 H 与 LE 的比值, 即 β 还是水热交换过程的 $LE + H$, 在各地因地带性植被景观不同下就显

得特别重要。从而认为 β 不仅与太阳辐射、地表面粗糙度有关, 而且与当地的气候湿润情况、植被覆盖度、下垫面性质等有很大的联系, 这种联系归根结底与一地的土壤温湿度有关。正是因土壤温湿度及降水等地理地带性的差异, 导致不同地区的 β 差异明显, 进而表现出不同植被类型分布区有不同的 β 值, 当然 β 值的差异将导致植被产量也有所不同。正是 H 和 LE 的反相变化, 影响着地理环境的结构和动态变化, 应该说同时也影响着植被的群落结构、植被生产力等不同的自然景观及生态特征。在图 4 绘出了海北高寒草甸 3 种不同植被类型区不同的 β 和 $LE + H$ 状况下所对应的植物群落组成种类和年地上净生产量的情况。

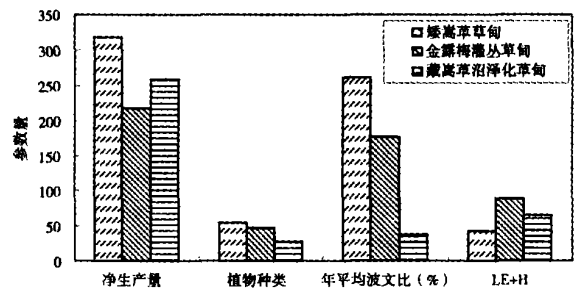


图 4 3 种植被类型植物种类、群落净生产量、 β 及的比较和 $H + LE$ 相互关系

Fig.4 The comparison of three types of vegetation composition community net productivity with Bowen ratio and the interrelationship of them with $H + LE$

图 4 表明, 3 类型高寒草甸植被的年地上净生产量基本与 β 呈现正效应, 与 $LE + H$ 呈现明显的反效应 (反相关) 表现有 β 高, $LE + H$ 低植被净生产量高, 反之, 有 β 低, $LE + H$ 高植被净生产量较低; 3 种植被类型区的植物种类组成基本与 $LE + H$ 有的反效应, 与 β 呈明显的正效应 (正相关), 表现出 $LE + H$ 低, β 高, 植物组成种类丰富, 反之, $LE + H$ 高, β 低, 对应的植物组成种类相对减少。

3 结语

1. 海北高寒草甸地区矮嵩草草甸、金露梅灌丛草甸和沼泽化藏嵩草草甸 3 种植被类型区 LE 和 H 、 β 和 $LE + H$ 均有明显的季节变化过程, 而且随植被类型的不同, 其变化过程有所不同。

2. 3 种植被类型年地上净初级生产力表现出

矮嵩草草甸 (318.600 g m^{-2}) > 沼泽化藏嵩草草甸 (258.341 g m^{-2}) > 金露梅灌丛草甸 (217.695 g m^{-2}), 植物种类组成有矮嵩草草甸 (54种) > 金露梅灌丛草甸 (47种) > 沼泽草甸 (24种)。

3.3类型高寒草甸植被的年地上净生产量基本与 β 呈现正效应, 与 $LE+H$ 呈现明显的反效应; 3种植被类型区的植物种类组成基本与 $LE+H$ 有的反效应, 与 β 呈明显的正效应 (正相关), 表现出 $LE+H$ 低, β 高, 植物组成种类丰富, 反之, $LE+H$ 高, β 低, 对应的植物组成种类相对减少。

参考文献 (References)

- [1] Ye Duzheng, Gao Youxi. Meteorology of Qinghai Tibet Plateau [M]. Beijing: Science Press, 1979. [叶笃正, 高由禧. 青藏高原气象学 [M]. 北京: 科学出版社, 1979.]
- [2] Li Yingnian, Zhao Liang, Gu Song, et al. Characters of energy balance in Haibei alpine meadow [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2003, 11(4): 289~295 [李英年, 赵亮, 古松, 等. 海北高寒草甸地区能量平衡特征 [J]. 草地学报, 2003, 11(4): 289~295]
- [3] Li Yingnian, Zhao Xinquan, Cao Guangni, et al. Analysis of climate, vegetational productivity background and their correlation of Haibei Alpine Meadow Ecosystem Research Station [J]. *Plateau Meteorology*, 2004, 23(4): 558~567 [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]

- [4] Hu Yingqiao. On some aspects of the observations of turbulent fluxes in surface layer [J]. *Plateau Meteorology*, 1990, 9(1): 74~87 [胡隐樵. 论近地面层湍流通量观测的一些问题 [J]. 高原气象, 1990, 9(1): 74~87]
- [5] Diawara A., Loustau D., Berbigier P. Comparison of two methods for estimating the evaporation of a Pinus pinaster (Ait.) stand: sap flow and energy balance with sensible heat flux measurements by an eddy covariance method [J]. *Agric For Meteorol*, 1991, 54: 49~66
- [6] Li Yingnian, Wang Qinxue, Fu Yuling, et al. The observation and analysis of alpine vegetation types and primary production [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(1): 40~48 [李英年, 王勤学, 伏玉玲, 等. 高寒植被类型及其植物生产力的监测 [J]. 地理学报, 2004, 59(1): 40~48]
- [7] Monteith J. L. (Lu Qiyao, Jiang Guangheng, Gao Liangzhi, et al., edited and translated). *Vegetation and the Atmosphere* [M]. Beijing: Agriculture Press, 1985. 68~129 [J. L. 蒙特思 (卢其尧, 江广恒, 高亮之, 等编译). 植被与大气—原理 [M]. 北京: 农业出版社, 1985. 68~129]
- [8] Esmaeil M., Gail E. B. Comparison of Bowen ratio, energy balance and the water balance methods for the measurement of evapotranspiration [J]. *J Hydrol*, 1993, 146: 209~220

The Distribution of Three Kinds of Different Alpine Meadow Vegetation and the Comparison of the Vegetation with Sensible Heat and Latent Heat Flux

LI Yingnian, GU Song, ZHAO Xinquan, ZHAO Liang, XU Shixiao

(Northwest Institute of Plateau Biology, CAS, Xining 100001, China)

Abstract The comparison of *Potentilla fruticosa* shrub meadow, *Kobresia humilis* meadow and *Kobresia tibetica* of swamp meadow with Sensible heat and Latent heat flux was studied in Haibei Station. The annual primary productivity of three vegetation types showed that *Kobresia humilis* meadow (318.6 g m^{-2}) > *Kobresia tibetica* of swamp meadow (258.341 g m^{-2}) > *Potentilla fruticosa* shrub meadow (217.695 g m^{-2}). As to vegetation composition, the results showed *Kobresia humilis* meadow (54) > *Potentilla fruticosa* shrub meadow (47) > *Kobresia tibetica* of swamp meadow (24). The monthly changes of Sensible heat and Latent heat were significant ($P < 0.05$) in the atmospheric energy exchange process in the ground level of three different vegetation types. The annual results of three vegetation types showed that $H + LE > 0$. It is showed that in Haibei alpine area solar radiation is strong, the flux is obvious in ground level and the ground is one of heat source. The annual ground biomass of three types of alpine vegetation has a positive relationship with Bowen ratio, and had a strong negative relationship with $H + LE$. However, the composition of vegetation had a negative relationship with $H + LE$, and positive relationship with Bowen ratio.

Key words vegetative type, Latent heat flux, Sensible heat flux, Bowen ratio