

# 不同降水梯度下草地生态系统地表能量交换

刘 帅<sup>1,2</sup>, 李胜功<sup>1,\*</sup>, 于贵瑞<sup>1</sup>, 孙晓敏<sup>1</sup>, 张雷明<sup>1</sup>, 杉田伦明<sup>3</sup>, 李英年<sup>4</sup>,  
张宪洲<sup>5</sup>, 王艳芬<sup>2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, CERN 综合研究中心, 北京 100101;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 日本筑波大学生命与环境科学大学院, 筑波 305-8572;

4. 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001; 5. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:**通过对不同降水梯度下的蒙古中部针茅草原(KBU)、内蒙古羊草草原(NM)、海北高寒灌丛草甸(HB)和当雄高寒草甸草原(DX)4个草地生态系统的能量通量连续4-5a的测定,分析了影响青藏高原和蒙古高原草地生态系统生长季中地表能量交换的主要因素。研究表明:相对于KBU、NM和DX,HB高寒灌丛草甸NDVI(0.58)和土壤含水量(28.3%)最大,因而地表短波反射率( $\alpha_k$ )最低(0.12),从而获得了最大的净辐射( $R_n$ )。KBU、NM和DX3个草地生态系统生长季中, $\alpha_k$ 随着植被的生长而降低,在生长季末期,随着植被的凋落而增加;HB的 $\alpha_k$ 季节变化趋势与其它生态系统相反。从蒙古高原(KBU和NM)到青藏高原(HB和DX),随着降水量的增加,波文比( $B$ )逐渐减小(2.25-0.53),即生态系统与大气的能量交换从显热( $H$ )占主导转变为潜热( $LE$ )占主导。植被状况对草地生态系统与大气之间能量交换的季节动态有重要的调控作用,在NDVI较低的时候,4个生态系统 $H/R_n$ 都大于 $LE/R_n$ , $LE/R_n$ 随着NDVI的增加而增加,而 $H/R_n$ 呈现出与 $LE/R_n$ 相反的季节变化趋势。

**关键词:**青藏高原;蒙古高原;草地生态系统;辐射平衡;反射率;能量分配

## Surface energy exchanges in grassland ecosystems along a precipitation gradient

LIU Shuai<sup>1,2</sup>, LI Shengcong<sup>1,\*</sup>, YU Guirui<sup>1</sup>, SUN Xiaomin<sup>1</sup>, ZHANG Leiming<sup>1</sup>, SUGITA Michiaki<sup>3</sup>, LI Yingnian<sup>4</sup>, ZHANG Xianzhou<sup>5</sup>, WANG Yanfen<sup>2</sup>

1 Synthesis Research Center of Chinese Ecosystem Research Network & Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

3 Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba 305-8572, Japan

4 Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China

5 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**Abstract:** This paper explore surface energy exchanges and their underlying mechanisms during the growing season in four grassland ecosystems in Qinghai - Tibetan Plateau and Mongolian Plateau through analyzing the 4—5 - year continuous flux data obtained by the eddy covariance technique. The four ecosystems are a temperate steppe ecosystem in central Mongolia (KBU), a temperate steppe ecosystem in Inner Mongolia (NM), an alpine shrub - meadow ecosystem (HB) and an alpine steppe meadow (DX) in Qinghai - Tibetan Plateau along a precipitation gradient. The results show that the surface reflectivity (albedo) for short - wave radiation ( $\alpha_k$ ) was lowest (0.12) in HB because of highest NDVI (0.58) and volumetric soil water content (28.3%) compared with those of other three ecosystems. The  $\alpha_k$  values in KBU, NM and DX decreased with the growth of plant, and increased as the plant senesced during the late growing season; but the seasonal variation of  $\alpha_k$  in HB exhibited an opposite trend to those at other three sites. The Bowen ratio decreased from 2.25 to 0.53

**基金项目:**中国科学院“百人计划”资助项目;中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX2-YW-432);日本科学技术振兴机构“东北亚草原大气-水圈-生物圈相互作用研究实验”(RAISE)资助项目

**收稿日期:**2008-11-07; **修订日期:**2009-02-06

\*通讯作者 Corresponding author E-mail: lishg@igsnrr.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

from the Mongolian Plateau to Qinghai - Tibetan Plateau with the increase of precipitation, suggesting that there is a shift of the sensible heat flux ( $H$ ) dominated energy partitioning to the latent heat flux ( $LE$ ) dominated energy partitioning. Vegetation growth played an important role in controlling energy exchange between grassland ecosystems and the atmosphere. The evaporative fraction of net - radiation ( $LE/R_n$ ) was lower than  $H/R_n$  when NDVI was low; but with an increase in NDVI,  $LE/R_n$  increased whereas  $H/R_n$  decreased.

**Key Words:** Qinghai - Tibetan Plateau; Mongolian Plateau; grassland ecosystem; radiation balance; albedo; energy partitioning

太阳辐射是地球能量的主要来源,也是地球表层各种物理过程、生物过程的基本动力。当太阳辐射穿过大气到达地球表面时将产生一系列的能量再分配,包括地面、大气及地 - 气系统的吸收、反射和二次辐射等。陆地表层获得的净辐射主要以潜热和显热形式向大气输送水汽和热量,还有部分向土壤中传导以及储存于植物冠层中。不同陆地生态系统由于地理位置和地形等的不同获得辐射能量也不同,加上下垫面(植被、土壤状况)的不同,导致了陆地与大气间水热交换的差异,进而对气候产生不同的影响。

青藏高原和蒙古高原是世界气候变化敏感区,青藏高原和蒙古高原气候受全球变暖影响出现了显著变化。研究表明,自20世纪50年代中叶以来,青藏高原有变暖趋势,特别是在冬季更为明显<sup>[1]</sup>;1955—1996年青藏高原气象观测台站的年平均温度和冬季平均温度每10a分别增加0.16和0.32,超过北半球及同纬度地区<sup>[2]</sup>;蒙古高原在过去的60a中气温呈增加趋势,夏季降水却呈减少趋势<sup>[1]</sup>。在两个高原上,草地生态系统均占主导地位<sup>[3-4]</sup>。由于其独特的区域位置、地貌和气候特点导致青藏高原和蒙古高原草地生态系统和大气之间的水汽、能量交换过程对亚洲乃至全球的气候变化有重大影响。

目前,有关陆地生态系统和大气之间水汽、能量交换过程的研究有很多,从热带到北半球中高纬度囊括了森林、草地、农田及苔原等不同生态系统类型<sup>[5-9]</sup>。然而针对青藏高原和蒙古高原草地生态系统的研究还不多,已经发表的一些研究基本上都是基于1—2a的观测数据<sup>[10-12]</sup>,多年连续观测资料的匮乏使人们对青藏高原和蒙古高原草地生态系统与大气之间的能量交换过程还缺乏充分的认识。本研究依据对青藏高原和蒙古高原4个不同草地生态系统能量通量连续4—5a的测定,对不同草地生态系统生长季的辐射平衡以及可利用能量的分配进行比较,从而分析影响青藏高原和蒙古高原不同类型草地生态系统辐射平衡和地表能量交换的主要因素。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

本研究的4个草地生态系统分别代表了蒙古中部针茅草原(KBU)、内蒙古羊草草原(NM)、海北高寒灌丛草甸(HB)和当雄高寒草甸草原(DX)4个不同类型草地生态系统。HB和DX处于青藏高原东部湿润半湿润地区;KBU和NM处于蒙古高原,属于半干旱草原。KBU位于蒙古共和国Hentiy省(约在乌兰巴托东南250 km),属于温带大陆性气候,年平均气温为1.2,平均年降水量181 mm,其中88%的降水量集中于6—9月份(1993—2002年)。研究区植被为有数百年放牧历史的干草原<sup>[12]</sup>,植物以C3植物为主(约占75%),如克氏针茅(*Stipa krylovii*)、寸草苔(*Carex duriuscula*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、蒙古韭(*Allium mongolicum*)、羊草(*Leymus chinensis*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)。通量观测系统及微气象观测系统是在国际合作项目“东北亚草原大气 - 水圈 - 生物圈相互作用研究实验”(RAISE)的支持下于2003年3月建成并投入使用。NM、HB和DX通量观测站都处于中国草地样带上,隶属于中国通量观测网(ChinaFLUX)<sup>[14]</sup>。其中NM位于内蒙古锡林郭勒盟锡林河流域中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站羊草样地。根据该定位研究站的观测资料,1982—1998年平均气温为0.57,年降水量在182—645.6 mm之间,多年平均为350 mm,多发生在夏季。植物群落属于温带半干旱典型草原,以C3植物羊草(*Leymus chinensis*)为建群种,冰草(*Agropyron cristatum*)、大针茅(*Stipa grandis*)、洽草(*Koeleria cristata*)、寸草苔(*Carex duriuscula*) (C3植物)和糙隐子草

(*Salsola collina*) (C4植物)为优势种。通量观测系统及微气象观测系统于2003年4月建成并投入使用。青藏高原植被都以C3植物为主。其中HB位于青海省门源回族自治县境内,地处青藏高原东北隅,受高海拔环境的制约,常年气温较低,无明显四季之分。多年平均气温为 $-1.6^{\circ}\text{C}$ ,年降水量在425.3—850.4 mm之间,多年平均为560.0 mm,植被以金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛为主要建群种,草本以线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)、矮嵩草(*Kobresia humilis*)、美丽风毛菊(*Saussurea superba*)等为主。通量观测系统及微气象观测系统于2002年10月建成并投入使用。DX位于西藏拉萨市北当雄县的草原站内,地处念青唐古拉山的南缘,地形属于丘间盆地,多年平均气温 $1.3^{\circ}\text{C}$ ,多年平均降水量476.8 mm。植被以小嵩草(*Kobresia parva*)、丝颖针茅(*Stipa capillacea*)、窄叶苔草(*Carex montis-everestii*)等为主。通量观测系统及微气象观测系统于2003年7月建成并投入使用。

## 1.2 实验观测与数据处理

### 1.2.1 通量和微气象数据的观测

本研究采用广泛应用的涡度相关技术连续测定4个草地生态系统与大气间的潜热和显热通量。由于NM、HB和DX都隶属于ChinaFLUX,因而它们采用了一致的涡度相关观测系统(开路系统),KBU站的通量观测也采用了开路涡度相关系统,但仪器配置等与其它站有所不同(如三维超声风速仪等,ChinaFLUX采用型号为Model CSA T-3 (Campbell Scientific, Logan, Utah, USA);而KBU为SAT-550 (Kaijo Sonic Co., Tokyo, Japan))。另外,KBU站仪器观测高度为地面以上2.5 m,其它3站观测高度为2.2 m。

在辐射测定方面,4个观测站都采用了相同型号的辐射表(Model CNR-1, Kipp & Zonen)来测定向上、向下的短波辐射和长波辐射。在土壤热通量测定方面,NM、HB和DX利用2个土壤热通量板(HFP01, Hukseflux Inc)测定距地表5 cm处土壤热通量。在KBU观测站,采用2个土壤热通量板(PHF-1.1 REBS, Inc)分别测定了距地表2和10 cm深度的土壤热通量。有关更详细的通量观测和常规气象要素测定情况可参考已发表的文献<sup>[12-14]</sup>。

各个站采用样方法对通量观测塔周围的样区进行叶面积指数(LAI)的测定,由于在LAI的实际测定中,有的年份存在数据缺失。利用NDVI数据分析不同生态系统生长季(5—9月份)的植被生长状况(NDVI的时间分辨率为10d,空间分辨率为1 km, <http://free.vgt.vito.be/index.php>)。

### 1.2.2 数据处理

在通量数据处理过程中,对于NM、HB和DX3个草地生态系统首先利用3次坐标旋转和WPL校正对30 min原始通量数据进行校正<sup>[15-16]</sup>,然后通过ChinaFLUX质量控制流程对数据进行筛选,然后再通过平均日夜变化法(MDV)和线性内插法对缺失数据进行插补。对于KBU草地生态系统获得的通量数据处理与ChinaFLUX稍有不同,在剔除异常值后采用了线性内插和查表法进行插补,计算表明两种插补方法获得的KBU显热和潜热结果相关性非常高(显热: $r = 0.96, n = 153, P < 0.001$ ;潜热: $r = 0.94, n = 153, P < 0.001$ ),说明由方法引起的误差可以忽略。

能量平衡闭合程度常被作为评价涡度相关数据可靠性的方法已经被人们广泛接受。其中对于ChinaFLUX各草地生态系统的能量闭合状况已经有了大量的研究,能量闭合度在0.61—0.75之间<sup>[12,17]</sup>,位于已经报道的0.55—0.99能量闭合度的区间之内<sup>[8]</sup>。KBU站2003—2004一年研究期间的能量闭合度约为0.71,即 $LE + H = 7.41 + 0.714(R_n - G)$  ( $r^2 = 0.909, n = 366$ ),其中 $LE$ 、 $H$ 、 $R_n$ 和 $G$ 分别为潜热、显热、净辐射和土壤热通量<sup>[11]</sup>。0.714的斜率表明利用涡度相关法计算得到的潜热和显热可能存在着低估。能量不闭合在通量观测站普遍存在,造成不闭合的原因有很多,包括观测系统的采样误差、仪器偏差、湍流通量观测中的高低频损失、水平平流、垂直平流等。

### 1.2.3 参数计算

为了评价植物生理因素和环境因素对生态系统水汽交换的影响,计算了冠层导度( $g_s$ )和解耦系数( $\gamma$ ): 0.5 h尺度上的 $g_s$ 通过Penman-Monteith公式整理后得到的公式计算<sup>[18]</sup>:

<http://www.ecologica.cn>

$$\frac{1}{g_s} = \frac{C_p VPD}{LE} + \frac{\frac{(R_n - G - LE)}{LE} - 1}{g_a} \quad (1)$$

式中,  $\rho_a$  为空气密度,  $C_p$  为空气的定压比热,  $VPD$  为大气饱和水汽压差,  $\gamma$  为干湿表常数,  $e_s$  为饱和水汽压斜率,  $g_a$  为空气动力学导度。  $g_a$  采用 Lloyd<sup>[19]</sup> 的方法计算得到。无量纲的  $g_s$  的计算方法为:

$$g_s = \frac{g_a}{1 + \frac{g_a}{g_y}} \quad (2)$$

在计算过程中,  $g_s$  和  $g_y$  为当日 9:00—16:00 0.5h 数据的平均值, 选取时采取了以下原则<sup>[20]</sup>: (1) 有降水记录 (大的降水事件后推 2d); (2) 湍流较小 (摩擦风速  $u_* < 0.1 \text{ m s}^{-1}$ ); (3) 较低的光合有效辐射 ( $PAR < 25 \mu\text{mol}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) 的数值都被排除在外。

Priestley - Taylor 常数的计算: 在日尺度上计算实际蒸散 ( $ET$ ) 与平衡蒸散 ( $ET_{eq}$ ) 的比值, 即为 Priestley - Taylor 常数, 其中平衡蒸散的计算方法为<sup>[21]</sup>:

$$ET_{eq} = \frac{L (R_n - G)}{L (1 + \gamma)} \quad (3)$$

短波辐射的地表反射率为 30min 数据的日平均值, 其中 30min 向下的短波辐射为选取大于  $200 \text{ W m}^{-2}$  的数据以减小太阳高度角的影响。

## 2 结果和讨论

### 2.1 生长季环境、植被条件比较

KBU 和 NM 具有典型的温带大陆性半干旱气候特征, 夏季炎热, 冬春寒冷干燥多风, 气温年较差较大。而 HB 和 DX 都处于青藏高原高海拔地区, 冬季漫长, 夏季温和而短促。有关它们的基本信息可参照表 1。就生长季降水量而言,  $HB > DX > NM > KBU$ , 相对于同处于青藏高原的 HB, DX 降水主要集中在夏季 (6—8 月份), 而 HB 降水的季节分配更为均匀。KBU 2003—2006 生长季 (5—9 月份) 平均降水量为 143mm (最小

表 1 4 个草地生态系统 (KBU, NM, DX 和 HB) 生长季 (5—9 月份) 气象、土壤和植被信息

Table 1 Meteorological conditions, soil and vegetation information in the growing season (May—September) in four grassland ecosystems (KBU, NM, DX and HB)

站点 Site	KBU	NM	HB	DX
研究时期 Time period	2003—2006	2003—2007	2003—2007	2004—2007
位置 Location	47°13' N 108°44' E	43°33' N 116°40' E	37°40' N 101°20' E	30°51' N 91°05' E
海拔 Elevation /m	1235	1189	3293	4333
降水 Precipitation /mm	142.7 ±62.4	243.9 ±99.2	433.6 ±26.6	388.9 ±129.3
平均气温 Mean air temperature /	15.5	15.4	6.6	9.4
7月平均温度 Mean air temperature in July/	20.3	19.0	9.1	11.3
1月平均温度 Mean air temperature in January/	-22.1	-19.2	-13.5	-6.6
风速 Wind speed / ( $\text{m s}^{-1}$ )	3.9	3.6	2.0	2.7
饱和水汽压差 Atmospheric water vapor deficit/kPa	1.1	0.9	0.33	0.51
土壤类型 Soil type	栗钙土	栗钙土	黑毡土	草毡土
土壤体积分含水量 Volumetric soil water content/%	6.6	14.2	28.3	12.9
冠层高度 Canopy height/cm	20	45	55	10
最大叶面积指数 Maximal LAI	0.6	1.5	2.8	1.0
平均植被指数 Average NDVI	0.27 ±0.04	0.40 ±0.08	0.58 ±0.01	0.25 ±0.04
管理方式 Management	放牧	围封 (从 1979 年)	冬季放牧	冬季放牧

NM, HB 和 DX 风速测定高度为 2.2 m, KBU 风速测定高度为 2.5 m; 土壤体积分含水量深度均为 20 cm

量和最大量为 98 mm 和 232 mm, 分别发生在 2006 和 2003 年), 年际间变化较大。NM、HB 和 DX 生长季平均降水量分别比 KBU 高 71%、205% 和 172%。HB 土壤湿度最高, 而且由于降水季节分配均匀其生长季波动较小; KBU 土壤湿度最小。尽管 DX 降水量与 HB 相近, 但土壤体积含水量却低于 HB, 这与 DX 砾石含量高 (约 30%)、土壤持水能力差以及土壤瘠薄 (土壤有机质 0.9%—2.97%, 全氮 0.05%—0.19%, 全磷 0.03%—0.07%)、植被盖度低 (DX 为 40%, 而 HB 为 75%) 导致地表径流大有关。4 个生态系统生长季日平均风速、饱和水汽压差 ( $VPD$ ) 的排序均为:  $KBU > NM > DX > HB$ 。4 个生态系统最大 LAI 排序为:  $HB > NM > DX > KBU$ , 但从生长季平均 NDVI 来看, KBU 与 DX 相当。

## 2.2 辐射平衡

对于地表均一的草地生态系统而言, 地表获得的净辐射由向下与向上的短波辐射和长波辐射决定, 即:

$$R_n = K_n - L_n = K_d - K_u + L_d - L_u \quad (4)$$

式中,  $K$  和  $L$  分别代表短波辐射和长波辐射, 下标中的  $n$  分别代表向上和向下辐射之差,  $d$  和  $u$  代表向下和向上方向。 $K_n$  由地表短波反射率 ( $k$ ) 决定 ( $k = K_u / K_d$ )。比较 4 个草地生态系统生长季中向上和向下的短波、长波辐射 (表 2), DX 接受的太阳辐射最大 (约为  $3332 \text{ MJ m}^{-2}$ ), 然后为 KBU、NM 和 HB。然而 HB 的  $R_n$  最大, KBU 最小 (比 HB 少 30%), NM 稍高于 DX。生长季中不同草地生态系统  $L_u / L_d$  在 1.23—1.33 之间变化, 其中 KBU、NM 和 DX 相差不大 (1.28—1.33), HB 最低, 这可能与其较低的气温有关。4 个生态系统  $k$  的变化范围为 0.12—0.21,  $KBU > NM, DX > HB$ 。虽然向上和向下的长波辐射的绝对值要大于短波辐射, 但净辐射的大小主要还是由  $K_n$  决定的, 即  $k$  的大小对  $R_n$  值有重要的影响。对于 HB 来说, 它的  $k$  和  $L_u / L_d$  都是 4 个生态系统中最小的; NM 的  $k$  和 DX 相等, 而  $L_u / L_d$  却小于 DX; KBU 的  $L_u / L_d$  与 DX 大致相当, 而  $k$  却大于 DX, 即 4 个草地生态系统  $R_n$  大小的排序与辐射反射率正好相反。4 个草地生态系统的  $R_n / K_d$  都在 0.4 以上, 其中 HB 由于  $k$  值最低  $R_n / K_d$  达到了 0.6, 表明在太阳总辐射相差不大的条件下, 金露梅灌丛草甸草原可以获得比其它 3 个草地生态系统多 10% 以上的能量。这可能与其较高的土壤体积含水量和二层的冠层结构有关, 一层即为金露梅所处的灌丛高度, 最高可达 60 cm, 低层多以矮嵩草、线叶嵩草、针茅等植物组成的草甸植被, 高度在 30 cm 左右。

研究表明 KBU、NM、HB 和 DX 4 个草地生态系统  $L_u / L_d$  (1.23—1.33) 大于纬度更高的阿拉斯加苔原—森林过渡带 (1.10—1.21)<sup>[61]</sup>, 这与本研究中的草地生态系统具有更高的地表温度有关。KBU、NM 和 DX 的  $k$  变化范围 (0.17—0.21) 与北美灌木、苔原生态系统 (0.15—0.19) 相近<sup>[61]</sup>。其中 KBU、NM 与欧洲同纬度草地生态系统的  $k$  (0.17—0.19)<sup>[221]</sup> 及北美高草草原 (0.19—0.23) 相当<sup>[231]</sup>, 而 HB 的  $k$  (0.12) 更接近于中高纬度森林生态系统 (0.10—0.11)<sup>[61]</sup>, 与欧洲湿润亚高山草地的  $k$  相当 (8、9 月份为 0.11)<sup>[241]</sup>。此外, 土地利用方式以及管理方式 (如火烧、放牧等) 通过改变草地生态系统的冠层结构、生物量以及土壤水分状况等因素而进一步对地表辐射平衡、能量交换产生影响。

## 2.3 地表反射率的季节变化

生长季  $k$  的大小是生态系统地表状况 (如植被的生长动态、土壤湿度等) 的反映, 4 个草地生态系统生长季  $k$ 、表层土壤湿度和 NDVI 如表 1 和表 2 所示,  $k$  随着土壤含水量的增加而减小。4 个草地生态系统生长季  $k$  和 NDVI 的季节变化如图 1 所示, KBU、NM 和 DX 的  $k$  变化趋势相近, 随着植被生长而降低; 在生长季末期,  $k$  随着植被的凋落而增加; 3 个草地生态系统  $k$  和 NDVI 的季节变化趋势由于年际间降水的季节分配的不同而有所不同。需要说明的是, NM 的  $k$  在 2006 年 9 月初异常高, 这是由于在 2006 年 9 月 7 日—8 日, 内蒙古中东部赤峰、锡林郭勒两地遭受特大暴雪袭击, 大雪覆盖草地导致的。HB 的  $k$  季节变化趋势先增加后减少, 与其它生态系统相反; 它与 LAI 的关系可以用乘幂曲线来拟合 (2004—2007 年:  $k = 0.117 LAI^{0.135}$ ,  $n = 229$ ,  $R^2 = 0.314$ ,  $P < 0.001$ ), 类似的关系在其它降水较多的温带草地也有报道<sup>[25]</sup>。李国平等研究表明青藏高原地面反射率随地表 0—30 cm 土壤湿度的增加而降低, 当土壤湿度增加到一定程度, 由于植被覆盖已形成或裸土含水量已近饱和, 地面反射率就基本维持不变<sup>[26]</sup>。由于 HB 降水季节分配均匀, 生长季土壤体积

含水量波动较小,因此相对于其它3个草地生态系统,波动也较小(0.10—0.14)。

表2 4个草地生态系统(KBU, NM, DX和HB)生长季(5—9月份)辐射平衡和地表能量交换信息

Table 2 Radiation balance and surface energy exchanges in the growing season (May - September) at four grassland ecosystems (KBU, NM, DX and HB)

站点 Site	KBU	NM	HB	DX
向下短波辐射 / (MJ m <sup>-2</sup> ) Downward short - wave radiation ( $K_d$ )	3237.1 ±87.1	3174.1 ±55.8	3023.6 ±31.6	3331.9 ±90.5
向上短波辐射 / (MJ m <sup>-2</sup> ) Upward short - wave radiation ( $K_u$ )	686.0 ±53.5	540.0 ±27.4	373.7 ±15.1	597.6 ±42.0
向下长波辐射 / (MJ m <sup>-2</sup> ) Downward long - wave radiation ( $L_d$ )	4096.7 ±20.8	4171.7 ±29.9	3870.9 ±54.7	3806.9 ±55.5
向上长波辐射 / (MJ m <sup>-2</sup> ) Upward long - wave radiation ( $L_u$ )	5360.0 ±50.3	5298.2 ±79.5	4695.6 ±19.8	5081.9 ±84.9
净辐射 Net all - wave radiation ( $R_n$ ) / (MJ m <sup>-2</sup> )	1282.1 ±14.3	1499.8 ±73.2	1824.9 ±36.2	1462.8 ±89.5
短波反射率 $K_u/K_d$ ( )	0.21 ±0.01	0.17 ±0.01	0.12 ±0.01	0.17 ±0.01
净辐射 / 向下短波辐射 $R_n/K_d$	0.40 ±0.01	0.47 ±0.03	0.60 ±0.01	0.44 ±0.04
长波反射率 $L_u/L_d$	1.32 ±0.01	1.28 ±0.02	1.23 ±0.02	1.33 ±0.04
波文比	2.25 ±0.83	1.03 ±0.43	0.64 ±0.05	0.53 ±0.13
潜热 / 净辐射 $L_E/R_n$	0.23 ±0.06	0.41 ±0.07	0.56 ±0.05	0.63 ±0.06
显热 / 净辐射 $H/R_n$	0.48 ±0.04	0.40 ±0.10	0.35 ±0.02	0.33 ±0.06
土壤热通量 / 净辐射 $G/R_n$	0.11 ±0.02	0.04 ±0.01	0.04 ±0.01	0.039 ±0.001
冠层导度 Canopy conductance ( $g_s$ ) / (mm s <sup>-1</sup> )	2.20 ±0.43	3.12 ±0.73	9.22 ±0.87	6.89 ±2.19
解耦因子 Decoupling factor ( )	0.25 ±0.04	0.29 ±0.04	0.56 ±0.03	0.58 ±0.06
实际蒸散 / 平衡蒸散 $ET/ET_{eq}$	0.28 ±0.07	0.46 ±0.05	0.63 ±0.04	0.51 ±0.08

KBU土壤热通量测定土壤深度为表层下2cm Soil heat flux was measured at the depth of 2 cm at KBU

在全球变暖背景下,到本世纪末,受气温升高的影响,蒸发增加和降水减少有可能导致蒙古草地生产力下降10%—30%<sup>[11]</sup>。植被的减少将促进 $\lambda$ 的增加,而北半球春季生长季的提前将使储存在土壤中的水分提前被利用而导致夏季干旱<sup>[27]</sup>,从而进一步加强这种趋势。在太阳总辐射不变的条件下, $\lambda$ 的增加将减少草地生态系统净辐射。HB和DX都处于青藏高原东部湿润半湿润地区,由于HB土壤体积含水量较高,因此增温后植被条件的改变对 $\lambda$ 的影响可能不如蒙古高原显著。而对于DX,由于土壤贫瘠植被条件较差,且降水集中在夏季,因此春季增温有可能降低土壤水分,从而增加 $\lambda$ 。除气温升高外,极端天气事件的增加也是气候变化的一个方面。研究表明降水间隔时间加长将导致北方草地土壤水分的降低,并增加了土壤水分的波动,从而降低草地生产力,改变生态系统的结构<sup>[28]</sup>,从而间接影响地表辐射平衡和能量交换。

#### 2.4 地表能量分配

陆地生态系统通过潜热和显热的形式与大气进行水、热交换,不同草地生态系统由于环境因素(辐射、温度和降水等)和下垫面(土壤和植被等)的不同导致地表能量交换过程存在差异。草地生态系统能量交换各组分年际、季节间变化如图2所示。在KBU, $H$ 从1月份开始随着气温的升高而增加,一般在5月份达到最大值(5.4 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>),然后随着植被的生长而下降, $LE$ 逐渐增加,一般在7月份达到最大值;但由于水分匮乏 $LE$ 一般都低于 $H$ (2003年除外),且受年际间降水影响波动较大(2.0—3.9 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)。NM的 $H$ 和 $LE$ 的季节变化趋势与KBU相似,但由于水分条件更好导致 $LE$ 值更大(7月份变化范围为4—5.7 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>),而5月份 $H$ 变化范围为3.5—5.6 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>。在HB和DX,6—9月份 $LE$ 都要大于 $H$ ,7月平均值分别为8.2 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>和7.0 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>,5月份 $H$ 平均值分别为6.2 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>和4.8 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>。

从蒙古高原到青藏高原, $LE/R_n$ 随着降水的增加而增加,波文比( )呈下降趋势(表2)。HB和DX两个生态系统生长季平均 $LE/R_n$ 都在0.5以上, $LE$ 占主导;而KBU和NM都在0.5以下,即 $H$ 占主导。NM、HB和DX的 $G/R_n$ 相差不大(约0.04),而在KBU, $G$ 在地表能量分配中有重要作用( $G/R_n$ 约为0.1)。这可能与不同

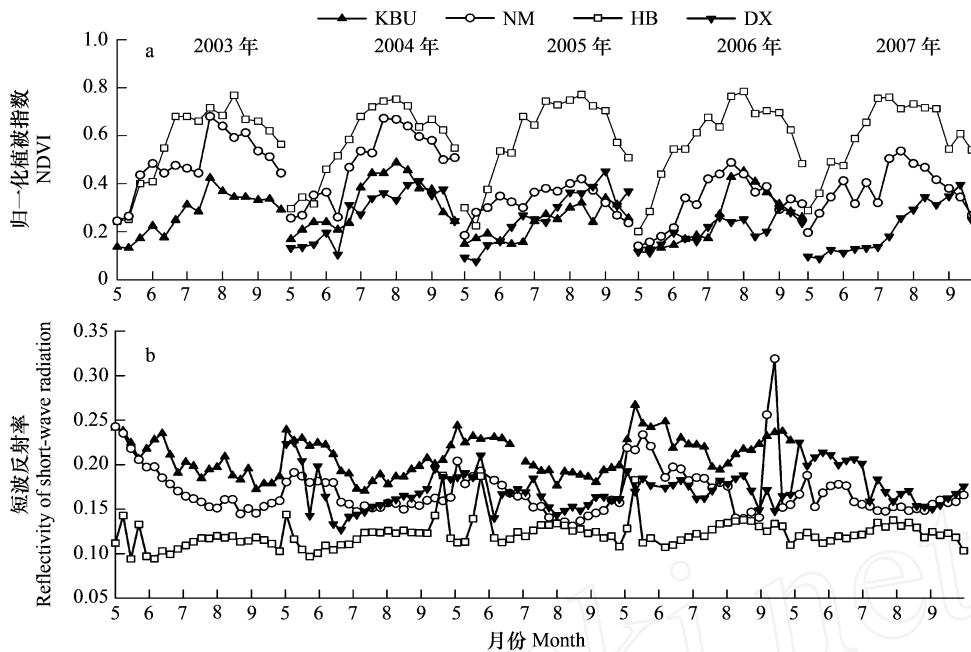


图 1 4个草地生态系统(KBU, NM, DX和HB)生长季(5—9月)归一化植被指数(NDVI)

Fig 1 Seasonal variation of NDVI (a), albedo (b) in the growing season at four grassland ecosystems (KBU, NM, HB and DX)

(a)和短波辐射反射率(b)的季节变化(a中NDVI的时间分辨率为10d,空间分辨率为1km, <http://free.vgt.vita.be/index.php>; b中每一点为7d平均值)

草地生态系统的植被条件、土壤性质及热通量板在土壤中埋设深度等有关。由于NM、HB和DX的土壤热通量板的埋设深度(5 cm)稍大于KBU(2 cm),因此本研究以NM为例计算了2004年热通量板与地表之间的热储存项对 $G$ 的影响,结果表明加上储存项后获得的地表热通量与热通量板直接测定的结果差异很小( $G_{\text{地表}} = 1.093 \times G_{5\text{cm}} - 0.009$ , adjusted  $R^2 = 0.975$ ,  $n = 365$ ,  $F = 14312$ ,  $P < 0.001$ )。土壤热通量是由地表土壤所吸收辐射的多少来决定的,有研究表明 $G/R_n$ 随着地上 $LAI$ 的增加而下降<sup>[24]</sup>。在KBU,由于受放牧影响,植被盖度较低,而且相对于其它3个生态系统,其土壤水分最低,因而 $G/R_n$ 最高。

地表能量交换过程受植被、 $g_s$ 等生物因素以及VPD、土壤湿度等环境因素的影响。不同草地生态系统生长季每月平均NDVI与 $H/R_n$ 、 $LE/R_n$ 的关系如图3所示。在NDVI较低的时候,4个生态系统 $H/R_n$ 都大于 $LE/R_n$ ,随着NDVI的增加, $H/R_n$ 和 $LE/R_n$ 呈现出相反的变化趋势。不同生态系统 $H/R_n$ 、 $LE/R_n$ 与NDVI的关系都可以用二次方程曲线来拟合。即随着植被的生长, $LE/R_n$ 逐渐增加,草地生态系统向大气输送更多的水汽。由于水分供给的差异,导致了不同生态系统 $H/R_n$ 、 $LE/R_n$ 与NDVI的变化趋势稍有不同。在KBU,由于土壤体积含水量较低,植被经常受到水分胁迫的影响造成NDVI值很低,虽然 $LE/R_n$ 随着NDVI的增加而增加,但始终低于 $H/R_n$ (两条拟合线无交点)。对于NM和HB, $LE/R_n$ 都在NDVI约为0.4时大于 $H/R_n$ ,在DX,在NDVI约为0.15时 $LE/R_n$ 超过 $H/R_n$ 。

土壤湿度是影响草地生态系统蒸散的一个重要因素,尤其是在干旱半干旱地区。生长季 $ET/ET_{eq}$ 反映了土壤中可利用水分对于蒸散的影响,与HB和DX相比,KBU和NM位于蒙古高原,处于半干旱区, $ET/ET_{eq}$ 值较低(都在0.5以下)(表2)。然而在本研究中,除DX外,KBU、NM和HB生长季每月平均 $LE/R_n$ 与土壤体积含水量之间的相关性并不显著(KBU:  $r = 0.297$ ,  $n = 20$ ,  $P > 0.05$ ; NM:  $r = 0.326$ ,  $n = 22$ ,  $P > 0.05$ ; HB:  $r = -0.297$ ,  $n = 25$ ,  $P > 0.05$ )。对于HB,由于降水充足,土壤体积含水量季节间波动较小,不是限制蒸散的主要因素。而对于KBU和NM,这种相关性的不显著可能是由于其降水特点和计算的时间尺度造成的。KBU和NM都位于半干旱区,降水事件以脉冲性降水为主,日降水量一般都小于5 mm,因而降水仅能湿润土壤表面。测定土壤体积含水量的土壤深度为20 cm,而表层含水量的波动不能被探针测定。另外,在计算到

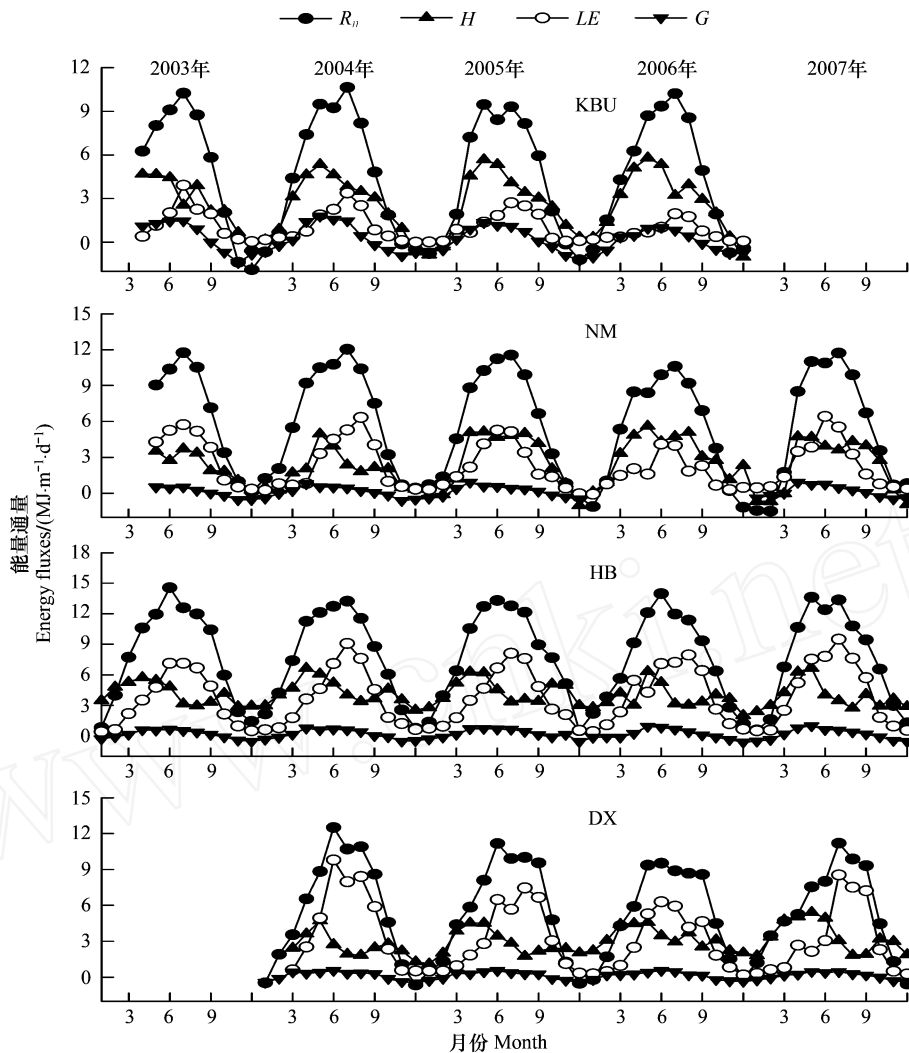


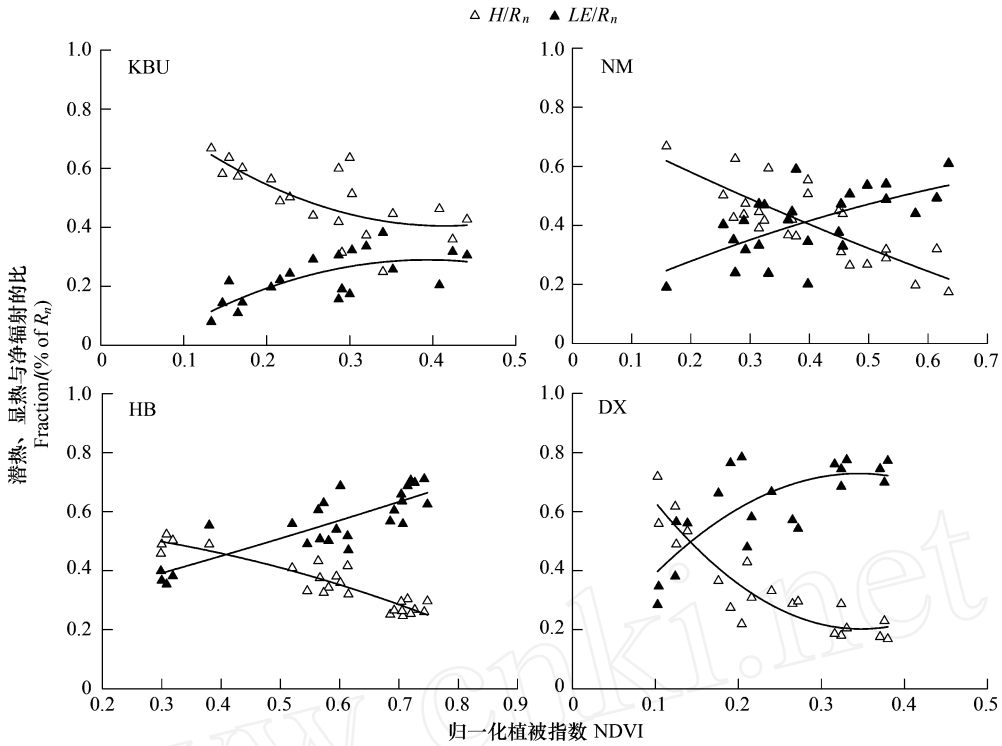
图 2 4个草地生态系统 (KBU、NM、HB和DX)日能量通量(净辐射( $R_n$ )、潜热( $LE$ )、显热( $H$ )和土壤热通量( $G$ ))的月平均值

Fig 2 Monthly average of daily integrated net radiation ( $R_n$ ), latent heat flux ( $LE$ ), sensible heat flux ( $H$ ), and soil heat flux ( $G$ ) in four grassland ecosystems (KBU, NM, HB and DX)

月尺度上以后,很多的土壤湿度波动的信息被掩盖。有研究表明,在KBU和NM,降水后土壤体积含水量的增加能够迅速增加蒸散,提高 $LE/R_n$ <sup>[11-12]</sup>。

对于KBU和NM等半干旱草地生态系统,由于土壤水分主要来源于降水,因此,通过分析生长季降水量的变化对不同生态系统能量交换的影响。从蒙古高原到青藏高原,生长季随着降水量的增加而下降(图4),而且年际间变化较大,多年生长季平均为2.25—0.53(表2)。的变化范围与北美草地相当(1.91—0.34)<sup>[8]</sup>,都存在放牧草原异常高的现象;HB和DX较低的(0.64和0.53)甚至与一些落叶林<sup>[8]</sup>及降水较多(约2000mm)的欧洲亚高山草地(0.6—0.9)<sup>[24]</sup>相当。有研究认为不同草地生态系统及年际间的变幅较大是由于:(1)草地生态系统对人类活动(放牧等)非常敏感;(2)相对于森林生态系统来说,草地生态系统由于根系较浅利用土壤深层水分的能力有限,因此对表层土壤含水量的变化更加敏感<sup>[8,29]</sup>。以KBU和NM为例,KBU在2005年和2006年(生长季降水量分别为101和98mm)、NM在2005—2007年(生长季降水量分别为147、210和164mm)降水量异常低,造成土壤含水量较低,从而限制了生态系统 $LE$ ,更多的可利用能量以 $H$ 的形式向大气输送热量(造成增加),使大气边界层温度升高。而向大气输送的水汽的减少,导致云量减少,从而进一步影响了降水的发生。即土壤水分条件通过地表能量交换过程影响降水,二者之间存在着反馈





站点 Site	方程 Equation	n	r <sup>2</sup>	F	P
KBU	$H/R_n = 3.054x^2 - 2.529x + 0.928$	20	0.48	8.09	<0.01
	$LE/R_n = -2.572x^2 + 2.024x - 0.109$	20	0.50	8.51	<0.01
NM	$H/R_n = 0.218x^2 - 1.014x + 0.774$	25	0.64	19.69	<0.001
	$LE/R_n = -0.391x^2 + 0.917x + 0.111$	25	0.39	7.04	<0.01
HB	$H/R_n = -0.457x^2 - 0.075x + 0.562$	25	0.86	68.90	<0.001
	$LE/R_n = 0.086x^2 + 0.517x + 0.229$	25	0.69	24.95	<0.001
DX	$H/R_n = 6.98x^2 - 4.856x + 1.047$	20	0.85	47.44	<0.001
	$LE/R_n = -5.646x^2 + 3.9x + 0.06$	20	0.60	12.69	<0.001

图 3 4个草地生态系统(KBU、NM、HB和DX)生长季每月平均归一化植被指数(NDVI)与显热/净辐射(H/R<sub>n</sub>)、潜热/净辐射(LE/R<sub>n</sub>)的关系

Fig 3 Relationships between monthly average NDVI and H/R<sub>n</sub>, LE/R<sub>n</sub> in the growing season at four grassland ecosystems (KBU, NM, HB and DX) respectively

通过二次方程来拟合,其中x代表NDVI

关系<sup>[30-31]</sup>。

很多研究利用解耦系数( )分析和评价地表与大气之间水气交换的耦合状况<sup>[12, 20]</sup>。值在0—1之间变化,为1时表明冠层的水汽交换与大气解耦,ET主要是受R<sub>n</sub>的控制。当值接近0时,表明ET主要是受VPD的控制。在本研究中,DX和HB生长季值都在0.5以上,在生长高峰期均在0.6以上变化,表明LE主要是受R<sub>n</sub>的限制;而KBU和NM生长季的值均在0.3以下,表明VPD对这两个生态系统LE有重要的调控作用。对于年际间的变化来说,KBU和NM 2个生态系统值在干旱年更低,表明VPD对水汽交换控制作用的增强。与其它研究比较发现,KBU与纬度相近的加拿大北部草地的值(0.1—0.3)相近<sup>[20]</sup>。HB和DX的值与日本草地生态系统相当(0.5—0.8)<sup>[32]</sup>。

然而在本研究中,KBU和NM草地生态系统生长季每月平均LE/R<sub>n</sub>与VPD之间的相关性并不明显(KBU: r = 0.073, n = 20, P > 0.05; NM: r = -0.165, n = 25, P > 0.05; HB: r = -0.297, n = 25, P >

0.05)。这与干旱胁迫和研究所选择的时间尺度有关。研究表明在生长季, KBU的  $LE$  在土壤水分充足的条件下, 随着  $VPD$  的增加而增加; 在土壤水分匮乏的条件下, 随着  $VPD$  的增加而减小。4个草地生态系统  $g_s$  随着土壤体积含水量的增加、 $VPD$  的降低而增加。HB和DX的  $g_s$  (日平均值) 最大可达  $20 \text{ mm s}^{-1}$  左右。有研究表明, 美国加利福尼亚的一年生草地最大日平均  $g_s$  可达到  $25 \text{ mm s}^{-1}$  [33], 美国大平原高草草原可达到  $20\text{--}25 \text{ mm s}^{-1}$  [34-35]。KBU和NM的  $g_s$  较小, 日平均值一般在  $10 \text{ mm s}^{-1}$  以下, 与加拿大温带草地相近 ( $9 \text{ mm s}^{-1}$  左右, 干旱年更低) [20], 稍低于内华达萨瓦纳灌木生态系统以及附近的1年生草地 ( $15 \text{ mm s}^{-1}$  左右) [15]。

### 3 结论

对 KBU、NM、HB和DX连续4—5a的向上、向下的长短波辐射测定表明: 随着生态系统土壤含水量的升高,  $k$  逐渐下降; 相对于 KBU、NM和DX, HB草地生态系统NDVI(0.58)和土壤含水量(28.3%)最大, 因而  $k$

最低(0.12), 从而获得了最大的  $R_n$ 。KBU、NM和DX3个草地生态系统生长季中  $k$  随着植被的生长和土壤水分的增加而降低, 在生长季末期, 随着植被的凋落而增加; HB的  $k$  季节变化趋势与其它生态系统相反。

从KBU和NM到HB和DX, 随着降水量的增加, 逐渐减小(2.25—0.53)。即从蒙古高原半干旱草原到青藏高原高寒草甸, 生态系统与大气的能量交换从  $H$  占主导转变为  $LE$  占主导。植被状况对草地生态系统与大气之间能量交换的季节动态有重要的调控作用, 在NDVI较低的时候, 4个生态系统  $H/R_n$  都大于  $LE/R_n$ , 随着NDVI的增加,  $H/R_n$  和  $LE/R_n$  呈现出相反的季节变化趋势。

由于蒙古高原处于干旱半干旱区, 在气候变暖的条件下, 蒙古草地生产力有可能进一步下降, 引起  $k$  的增加, 进一步改变地表辐射平衡和能量交换。当然不同生态系统由于土壤性质以及管理方式或人类活动的影响存在差异, 即便是在同一气候区, 其生态系统结构和功能对气候变化过程的响应也会不同。

### References:

- [1] IPCC. Summary for Policymakers. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Zheng D, Yao T D. Uplifting of Tibetan Plateau with Its Environmental Effects. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(5): 451 - 458.
- [3] World Resources Institute (WRI). A Guide to World Resources 2002 - 2004: Decisions for the Earth Balance, Voice, and Power. Washington, DC: World Resources Inst., 2003: 328.
- [4] Zheng D. Mountain Geocology and Sustainable Development of the Tibetan Plateau. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000: 303.
- [5] Baldocchi D D, Xu L K, Kiang N. How plant functional - type, weather, seasonal drought, and soil physical properties alter water and energy fluxes of an oak - grass savanna and an annual grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 123: 13 - 39.
- [6] Beringer J, Stuart Chapin F, Thompson C C, McGuire A D. Surface energy exchanges along a tundra - forest transition and feedbacks to climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 131: 143 - 161.
- [7] Sauer T J, Singer J W, Prueger J H, Desutter T M, Hatfield J L. Radiation balance and evaporation partitioning in a narrow - row soybean canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 145: 206 - 214.
- [8] Wilson K B, Baldocchi D D, Aubinet M, Berbigier P, Bernhofer C, Dolman H, Falge E, Field C, Goldstein A, Granier A, Grelle A, Halldor T, Hollinger D, Katul G, Lao B E, Lindroth A, Meyers T. Energy partitioning between latent and sensible heat flux during the warm season at FLUXNET sites. *Water Resources Research*, 2002, 38(12): 1294. doi:10.1029/2001WR 000989.
- [9] Liu C F, Zhang Z Q, Cha T G, Ge S, Chen J Q, Zhu J Z, Shen L H, Zhang J L, Chen J, Cui L J. Soil moisture affects energy allocation and diurnal evapotranspiration of a poplar plantation an eddy - covariance - based study. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2549 - 2557.

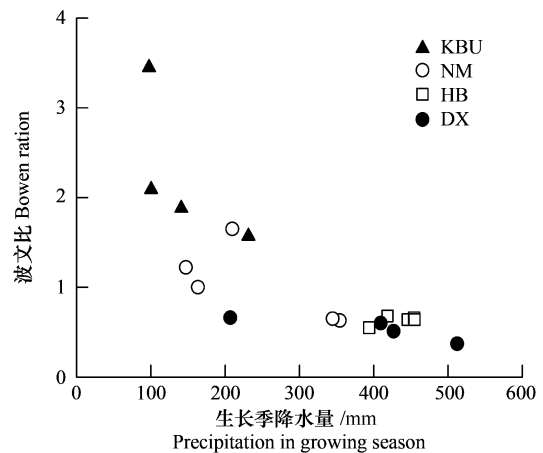


图4 4个草地生态系统(KBU、NM、HB和DX)生长季降水与波文比的关系

Fig. 4 Relationship between Bowen ratio and precipitation in the growing season at four grassland ecosystems (KBU, NM, HB and DX)

- [10] Gu S, Tang Y H, Cui X Y, Kato T, Du M Y, Li Y N, Zhao X Q. Energy exchange between the atmosphere and a meadow ecosystem on the Qinghai - Tibetan Plateau *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 129: 175 - 185.
- [11] Li S G, Eugster W, Asanuma J, Kotani A, Davaa G, Oyunbaatar D, Sugita M. Energy partitioning and its biophysical controls above a grazing steppe in central Mongolia *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137: 89 - 106.
- [12] Hao Y B, Wang Y F, Huang X Z, Cui X Y, Zhou X Q, Wang S P, Niu H S, Jiang G M. Seasonal and interannual variation in water vapor and energy exchange over a typical steppe in Inner Mongolia, China *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 146: 57 - 69.
- [13] Li S G, Asanuma J, Eugster W, Kotani A, Liu J J, Urano T, Oikawa T, Davaa G, Oyunbaatar D, Sugita M. Net ecosystem carbon dioxide exchange over grazed steppe in central Mongolia *Global Change Biology*, 2005, 11: 1941 - 1955.
- [14] Yu G R, Wen X F, Sun X M, Tanner B D, Lee X H, Chen J Y. Overview of ChinaFLUX and evaluation of its eddy covariance measurement *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137: 125 - 137.
- [15] Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilted correction algorithms *Boundary - Layer Meteorology*, 2001, 99: 127 - 150.
- [16] Webb E K, Peaman G I, Leuning R. Correction of flux measurement for density effects due to heat and water vapour transfer *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, 1980, 106: 85 - 100.
- [17] Li Z Q, Yu G R, Wen X F, Zhang L M, Ren C Y, Fu Y L. Energy balance closure at China FLUX sites *Science in China, Series D, Earth Science*, 2005, 48(1): 51 - 62.
- [18] Monteith J L, Unsworth M H. *Principles of Environmental Physics*, second ed. London: Edward Arnold, 1990: 291.
- [19] Lloyd J, Grace J, Miranda A C, Meir P, Wong S C, Miranda H S, Wright I R, Gash J H C, McIntyre J. A simple calibrated model of Amazon rain - forest productivity based on leaf biochemical - properties *Plant Cell and Environment*, 1995, 18: 1129 - 1145.
- [20] Wever L A, Flanagan L B, Carlson P J. Seasonal and interannual variation in evapotranspiration, energy balance and surface conductance in a northern temperate grassland *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 112: 31 - 49.
- [21] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters *Monthly Weather Review*, 1972, 100: 275 - 292.
- [22] Rosset M, Riedo M, Grub A, Geismann M, Fuhrer J. Seasonal variation in radiation and energy balances of permanent pastures at different altitudes *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 86: 245 - 258.
- [23] Bremer D J, Ham J M. Effect of spring burning on the surface energy balance in a tallgrass prairie *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 97: 43 - 54.
- [24] Rosset M, Montani M, Tanner M, Fuhrer J. Effects of abandonment on the energy balance and evapotranspiration of wet subalpine grassland *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2001, 86: 277 - 286.
- [25] Hammerle A, Haswanter A, Tappeiner U, Cemusca A, Wohlfahrt G. Leaf area controls on energy partitioning of a temperate mountain grassland *Biogeosciences*, 2008, 5: 421 - 431.
- [26] Li G P, Xiao J. Diurnal variation of surface albedo and relationship between surface albedo and meteorological factors on the western Qinghai - Tibet plateau *Scientia Geographica Sinica*, 27(1): 63 - 67.
- [27] Angert A S, Biraud C, Bonfils C C, Henning C C, Bueemann B, Pinzon J, Tucker C J, Fung I. Drier summers cancel out the CO<sub>2</sub> uptake enhancement induced by warmer springs *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(31): 10823 - 10827.
- [28] Fay P A, Carlisle J D, Knapp A K, Blair J M, Collins S L. Altering rainfall timing and quantity in a mesic grassland ecosystem: Design and performance of rainfall manipulation shelters *Ecosystems*, 2000, 3(3): 308 - 319.
- [29] Meyers T P. 2001. A comparison of summertime water and CO<sub>2</sub> fluxes over rangeland for well watered and drought conditions *Agricultural and Forest Meteorology*, 106: 205 - 214.
- [30] Xu J J, James S, Gao X, Soroosh S, Eric S. Soil moisture - precipitation feedback on the North American monsoon system in the MM5 - OSU model *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 2004, 130: 2873 - 2890.
- [31] Schär C, L ühi D, Beyerle U. The soil - precipitation feedback: A process study with a regional climate model *Journal of Climate*, 1999, 12: 722 - 741.
- [32] Li S G, Lai C T, Lee G, Shimoda S, Yokoyama T, Higuchi A, Oikawa T. Evapotranspiration from a wet temperate grassland and its sensitivity to microenvironmental variables *Hydrological Processes*, 2005, 19: 517 - 532.
- [33] Ryu Y, Baldocchi D D, Ma S, Hehn T. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: D09104, doi: 10.1029/2007JD009263.
- [34] Kim J, Vema S B. Components of surface - energy balance in a temperate grassland ecosystem. *Boundary Layer Meteorology*, 1990, 51(4): 401 - 417.
- [35] Stewart J B, Vema S B. Comparison of surface fluxes and conductances at two contrasting sites within the FIFE area *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97: 18623 - 18628.

#### 参考文献:

- [2] 郑度, 姚檀栋. 青藏高原隆升及其环境效应. *地球科学进展*, 2006, 21(5): 451 - 458.
- [9] 刘晨峰, 张志强, 查同刚, Ge Sun, Chen Jiquan, 朱金兆, 申李华, 张津林, 陈军, 崔令军. 湿度相关法研究土壤水分状况对沙地杨树人工林生态系统能量分配和蒸散日变化的影响. *生态学报*, 2006, 26(8): 2549 - 2557.
- [26] 李国平, 肖杰. 青藏高原西部地面反射率的日变化以及若干气象因子的关系. *地理科学*, 2007, 27(1): 63 - 67.