

王雷, 刘辉志, Christian Bernhofer. 2017. 土壤水分条件对内蒙古典型草原水汽和二氧化碳通量的影响研究 [J]. 大气科学, 41 (1): 167–177. Wang Lei, Liu Huizhi, Christian Bernhofer. 2017. A study of the impact of soil water conditions on water and carbon dioxide fluxes over typical grasslands in Inner Mongolia of China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (1): 167–177, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1602.15313.

土壤水分条件对内蒙古典型草原水汽和二氧化碳通量的影响研究

王雷¹ 刘辉志¹ Christian Bernhofer²

¹ 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

² 德国德累斯顿技术大学水文和气象研究所, 德累斯顿 01737

摘 要 本文基于 2007 年和 2008 年生长季内蒙古羊草和大针茅草原湍流观测资料, 分析了两种典型草原下垫面生长季的不同土壤水分条件下水汽和二氧化碳通量交换特征及其控制因子。主要结果如下: (1) 在植被生长峰值期, 日尺度上, 干旱条件下土壤湿度是潜热通量的主要控制因子, 而土壤水分条件较好时潜热通量主要受净辐射控制。(2) 与大针茅草原相比, 羊草草原叶面积指数较大, 水分条件较好时, 其潜热通量平均值更大, CO₂ 吸收能力更强, 吸收 CO₂ 更多; 但在土壤水分胁迫出现时, 羊草草原叶面的气孔闭合度急剧增加, 大针茅草原的潜热通量、和 CO₂ 吸收反而更大, 表现出更为耐旱的植被特性。(3) 地表导度可以用来解释土壤水分条件对羊草和大针茅草原碳通量的影响。

关键词 羊草草原 大针茅草原 能量交换 二氧化碳通量

文章编号 1006-9895(2017)01-0167-11

中图分类号 P463

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1602.15313.

A Study of the Impact of Soil Water Conditions on Water and Carbon Dioxide Fluxes over Typical Grasslands in Inner Mongolia of China

WANG Lei¹, LIU Huizhi¹, and Christian Bernhofer²

¹ LAPC, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029

² Institute of Hydrology and Meteorology, Dresden University of Technology, Dresden 01737 Germany

Abstract Based on turbulence observations during the growing seasons of 2007 and 2008 in the semi-arid grasslands of Inner Mongolia, where *Leymus Chinensis* and *Stipa Grandis* are two dominant species, the characteristics of water and CO₂ fluxes under different soil water conditions and the controlling factors of these fluxes are analyzed. Results indicate that: (1) during the peak growing season on a daily time scale, the surface latent heat flux is largely dependent on soil water content under dry conditions, while it is more determined by net surface radiation under wet conditions when soil moisture content is sufficient; (2) compared with the grassland where *Stipa Grandis* is the dominant species, the grassland with dominant species of *Leymus Chinensis* has higher leaf area index, larger latent heat flux, higher CO₂ assimilation capacity and larger net CO₂ uptake under conditions with ample water in the soil. In contrast, the stomata of the grass leaf close at the *Leymus Chinensis* site in response to soil water stress, and the latent heat flux and the CO₂ uptake are larger at

收稿日期 2015-11-29; **网络预出版日期** 2016-02-04

作者简介 王雷, 男, 1982 年生, 助理研究员, 主要从事地气相互作用的研究. E-mail: wangl@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金 41275023、41461144001、41305012, 德国联邦联合资助项目 “不同放牧强度对内蒙古草原生态系统物质流的影响” (MAGIM)

Funded by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grants 41275023, 41461144001, 41305012), Sino-German Cooperation Project ‘Matter fluxes in grasslands of Inner Mongolia as influenced by stocking rate’ (MAGIM)

the *Stipa Grandis* site. This indicates that the *Stipa Grandis* grassland is more drought-resistant than the *Leymus Chinensis* grassland; (3) the surface conductance is a key factor that can explain impacts of soil water condition on the water and CO₂ fluxes over *Leymus Chinensis* and *Stipa Grandis* grasslands.

Keywords *Leymus Chinensis*, *Stipa Grandis*, energy exchange, carbon dioxide flux

1 引言

典型草原是欧亚大陆温带草原的典型代表 (Hao et al., 2007), 也是我国草原生态系统的主要类型之一, 占我国草原总面积的 10.5% (Liu et al., 2008)。典型草原生态系统建群种以旱作丛生禾草为主, 主要分布在温带半干旱区 (如内蒙古), 其对气候变化和极端天气事件响应敏感。上世纪 80 年代以来, 在气候变化和人类活动的共同作用下, 内蒙古典型草原出现了严重的植被退化和荒漠化现象, 其中 34% 的草原出现退化, 22% 已经不可利用 (Chuluun and Ojima, 2002)。草原生态系统可以通过陆面—大气间的交换改变不同时空尺度上的天气气候及二氧化碳收支 (Pielke Sr et al., 1998), 已有模拟结果表明, 内蒙古草原的荒漠化会减小地表蒸发, 减弱季风环流 (Xue, 1996); 另一方面, 不同时间尺度上, 内蒙古羊草草原下垫面地表能量收支、水汽、CO₂ 通量交换又受到降雨及土壤水分条件的显著影响 (Hao et al., 2008)。羊草草原和大针茅草原是典型草原的两种主要类型, 因此, 进行羊草和大针茅草原陆气相互作用的观测研究, 将会完善典型草原通量观测数据库, 有助于增进我们对典型草原在全球变化中的作用的理解, 对于内蒙古典型草原生态系统的可持续发展有重要意义。

过去十几年来, 基于涡动相关技术, 已有不少羊草草原地气间湍流和 CO₂ 通量的观测试验 (吕达仁等, 2005; Hao et al., 2008; Ketzer et al., 2008; Chen et al., 2009; Wang et al., 2012), 但是, 羊草和大针茅草原的比较研究还很少。杜占池和杨宗贵 (1990) 在 5 个晴天和实验室条件下测定了羊草和大针茅群落光合作用速率的日变化特征, 并不能反映生态系统尺度上自然条件下的净 CO₂ 交换特征。王雷等 (2010) 基于生长季涡动相关技术的连续观测, 发现大针茅草原的潜热通量和 CO₂ 吸收比羊草草原更大, 由于观测时间较短 (近一个月), 并未全面给出两种典型草原的差异及其原因。本文基于中德合作项目“不同放牧强度对内蒙古草原生态系统物质流的影响” (MAGIM) 第六课题 2007 和 2008 年生长季 (2007 年 8 月 18 日至 9 月 12 日, 2008

年 6 月 29 日至 10 月 14 日) 在内蒙古羊草和大针茅草原的湍流通量观测资料, 比较了两种典型草原下垫面不同土壤水分条件下水汽和 CO₂ 通量交换特征及其控制因子。

2 站点介绍和观测仪器

观测场位于内蒙古锡林郭勒盟锡林河流域, 分别为中国科学院草原生态系统定位站 (IMGERS) 的羊草 (43.55°N, 116.67°E) 和大针茅样地 (43.54°N, 116.56°E), 两块样地均于 1979 年开始围封禁牧。羊草和大针茅样地群落分别以羊草 (*Leymus chinensis*) 和大针茅 (*Stipa gradis*) 为主 (Xiao et al., 1997)。该区域为大陆性温带半干旱草原气候 (Hao et al., 2007), 多年平均气温 -0.4°C, 最冷月 (1 月) 为 -22.3°C, 最热月 (7 月) 平均温度达到 18.8°C; 年平均降水量为 331.1 mm, 生长季 (5 月至 9 月) 降水占全年降水量的 85% (基于 1982 至 2008 年 IMGERS 气象数据)。锡林河流域的主要土壤类型是栗钙土, 表层 0~4 cm 土壤容重为 $1.14 \pm 0.02 \text{ g cm}^{-3}$ (Zhao et al., 2011)。

涡动相关系统由三维超声风温仪 (CSAT3, Campbell Scientific, USA) 和开路式水汽、CO₂ 气体分析仪 (LI-7500, LICOR, USA) 组成, 观测高度为 2 m, 相隔距离 10 cm, 采样频率 10 Hz。慢响应观测包括空气温度和湿度 (2 m, HMP45C, Campbell Scientific)、四分量辐射 (1.5 m, CNR1, KIPP & ZONEN, Netherlands)、有效光合辐射 (地上 1.5 m, PAR Quantum SKP 215, Skye Instruments LTD. UK)、土壤热通量 (5 cm, HFP01, Hukseflux, Netherlands)、土壤温度 (5 cm, 107, Campbell Scientific) 和土壤湿度 (5 cm, Type ML2x, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK) (大针茅样地的土壤温度探头安装于 2008 年)、降雨量 (1 m, 52202 Tipping Bucket Rain Gauge, RM Young, USA)。叶面积指数由 LI-3050A 叶面积仪测量 (LI-COR, USA) (Fan et al., 2009)。

湍流通量的 10 Hz 原始数据采用 EdiRe 软件 (from R. Clement, UK: [http://www.geos.ed.ac.uk/homes/rclement/micromet/EdiRe/\[2015-11-01\]](http://www.geos.ed.ac.uk/homes/rclement/micromet/EdiRe/[2015-11-01])) 进行

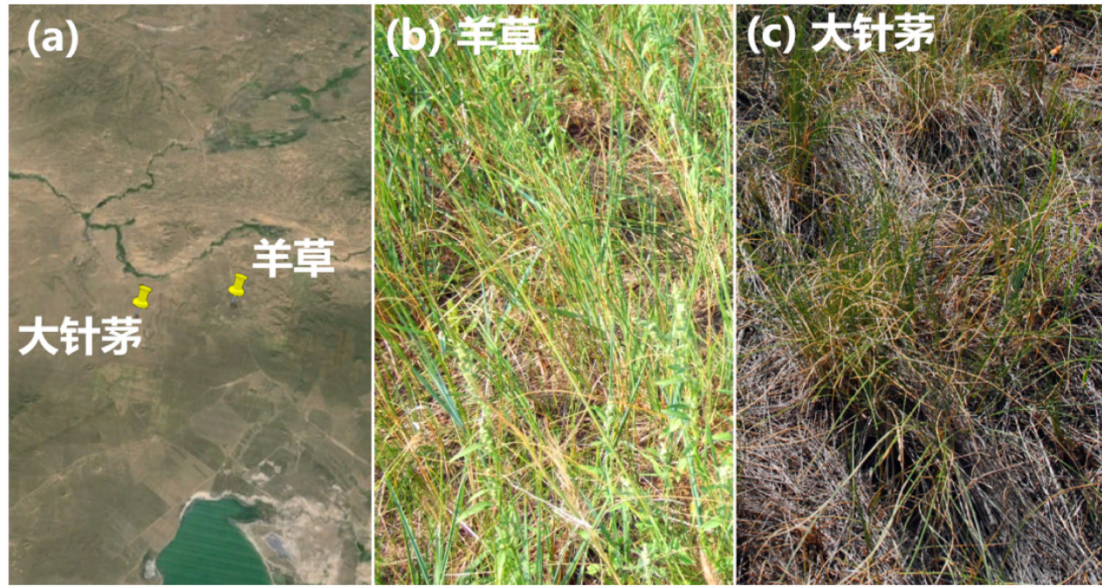


图 1 (a) 羊草和大针茅样地的位置示意图；(b) 羊草样地下垫面；(c) 大针茅样地下垫面

Fig. 1 (a) The locations of the UG79 (*Leymus chinensis* site ungrazed since 1979) and UG79 (*Stipa gradis* site ungrazed since 1979) sites; (b) the picture of the land surface at UG79; (c) the picture of the land surface at UG79

后处理。在去除不合理的野点和 2 次坐标旋转后 (Kaimal and Finnigan, 1994), 还要进行湿度修正 (感热通量, Schotanus et al., 1983), 频率衰减修正 (感热、潜热和 CO_2 通量, Moore, 1986) 和密度脉动修正 (潜热和 CO_2 通量, Webb et al., 1980)。在应用稳定度检验和湍流特性检验 (Foken and Wichura, 1996) 进行质量控制后, 去除的感热、潜热和 CO_2 通量数据的百分比分别为 15%、23% 和 22%。对于 2 小时以内的空缺用线性插值进行填补, 对于 2 小时以上空缺用平均日变化法进行填补 (Falge et al., 2001)。

地表导度 (g_s) 由彭曼公式的变化式计算 (Monteith and Unsworth, 1990), 具体公式如下:

$$\frac{1}{g_s} = \frac{\rho c_p \text{VPD}}{\gamma \text{LE}} + \frac{\frac{\Delta H}{\gamma \text{LE}} - 1}{g_a}, \quad (1)$$

其中, ρ 为空气密度 (kg m^{-3}), c_p 为定压比热, VPD 为水汽压亏值 (kPa), LE 为潜热通量 (W m^{-2}), H 为感热通量 (W m^{-2}), Δ 为饱和水汽压相对平均空气湿球湿度曲线的斜率, γ 为干湿表常数, g_a 为空气动力学导水率 (mm s^{-1}), 其计算公式为 (Monteith and Unsworth, 1990)

$$\frac{1}{g_a} = \frac{u}{u^{*2}} + 6.2u^{*-0.67}, \quad (2)$$

其中, u 为 2 m 高度的风速 (m s^{-1}), u^* 为摩擦速度 (m s^{-1})。

平衡态潜热通量 (LE_{eq}) 的计算公式如下 (Priestley and Taylor, 1972):

$$\text{LE}_{eq} = \frac{\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma}, \quad (3)$$

其中, R_n 为净辐射 (W m^{-2}), G 为土壤热通量 (W m^{-2})。

日间 CO_2 通量 ($\text{NEE}_{\text{daytime}}$, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 与有效光合辐射 (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 利用下式进行拟合回归 (Falge et al., 2001):

$$\text{NEE}_{\text{daytime}} = \frac{\alpha \text{NEE}_{\text{max}} \text{PAR}}{\alpha \text{PAR} + \text{NEE}_{\text{max}}} + \text{RE}, \quad (4)$$

其中, α 为表观量子效率 [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \mu\text{mol}^{-1} \text{photons}$], NEE_{max} 为有效光合辐射饱和时生态系统的净碳吸收速率 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), RE 为生态系统呼吸作用的整体速率 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)。

3 结果分析

3.1 天气条件

观测期间, 羊草和大针茅样地太阳总辐射的平均值差异不到 1%, 大针茅样地的日平均气温略高于羊草样地, 分别为 16.9°C 和 15.7°C 。羊草和大针茅样地土壤湿度的平均值均为 $0.11 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$; 但在日

尺度上, 两个样地的土壤湿度差异最大可达 $0.08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, 这是降雨的空间分布不均匀造成的。羊草和大针茅样地的土壤湿度对降雨 (IMGERS 数据) 响应敏感, 均在雨后升高, 而后缓慢降低 (图 2)。

羊草和大针茅样地的叶面积指数的季节变化相近, 均在 7 月由于较少的降雨 (26.3 mm , 历史平均值为 100.0 mm) 而缓慢增加, 在 8 月达到峰值, 之后开始下降 (图 2)。2007 和 2008 年生长季降雨量 (基于 IMGERS 数据) 分别为 177.5 和 297.1 mm , 2008 年羊草样地的叶面积指数要显著高于 2007 年同期。具体来说, 以 2007 年 8 月 18 日至 31 日为例, 羊草和大针茅样地的土壤湿度平均值分别为 0.07 和 $0.08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; 2008 年 8 月 18 日至 31 日, 羊草和大针茅样地土壤湿度平均值均为 $0.16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$,

土壤水分条件较好。羊草样地在这两段时间内实测的叶面积指数分别为 0.48 和 $1.12 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ 。

3.2 地表湍流通量和能量分配

与羊草样地相比, 大针茅样地因其地表温度和地表反照率较高, 净辐射较小 (表 1), 羊草和大针茅净辐射日均值最大可达 196.0 和 179.8 W m^{-2} , 平均值分别为 116.0 和 95.1 W m^{-2} 。两样地土壤热通量的逐日变化较小, 在 -20 至 30 W m^{-2} 间波动, 观测期间的日平均值分别为 3.1 和 2.9 W m^{-2} 。感热通量和潜热通量的逐日变化波动很大, 雨后潜热通量的日均值可升高到 100 W m^{-2} 以上, 感热通量日均值降至 20 W m^{-2} 以下, 之后随着土壤湿度的降低, 潜热通量减少, 感热通量增加 (图 3)。湍流通量这一变化特征也表现为波文比对降雨和土壤湿度变

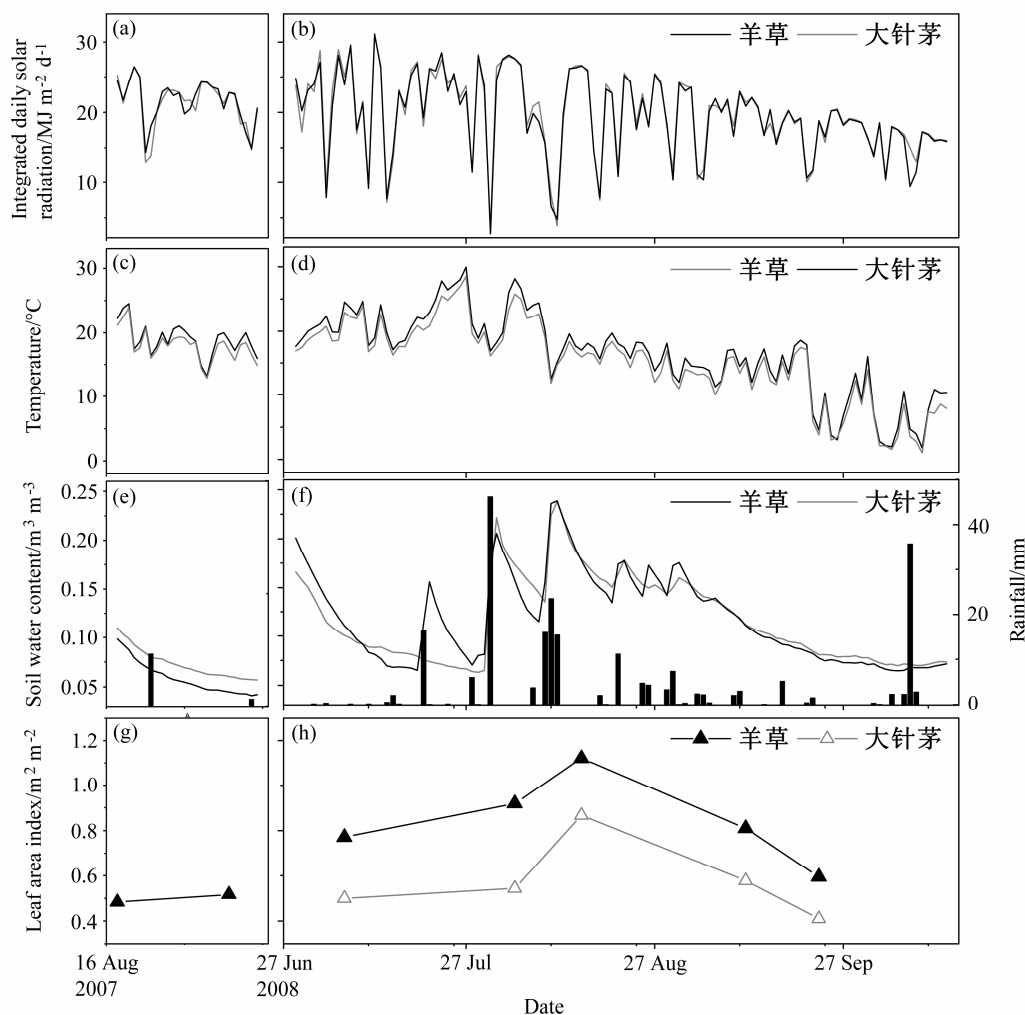


图 2 2007 年 8 月 16 日至 9 月 12 日和 2008 年 6 月 29 日至 10 月 15 日羊草样地和大针茅样地 (a, b) 太阳总辐射的日累积值、(c, d) 日平均气温、(e, f) 土壤湿度的日平均值和降雨量 (基于 IMGERS 数据) 的日总量、(g, h) 叶面积指数的观测值

Fig. 2 (a, b) Integrated daily solar radiation, (c, d) daily average air temperature, (e, f) daily average soil water content and daily rainfall (IMGERS data), (e, f) leaf area index at the UG79 and SUG sites from 16 August to 12 September 2007 and from 29 June to 15 October 2008

化的响应（图 4）。除了波文比， LE/LE_{eq} 是表现地表能量分配的均一化比例，可用于不同生态系统下垫面间的比较。在气候湿润区土壤水分充足、植被生长状况良好时，潜热通量可以接近 $1.26 LE_{eq}$ ，即潜在蒸发（Burba and Verma, 2005; Wang et al., 2016）；而在半干旱区，由于土壤水分胁迫的普遍存在， LE/LE_{eq} 往往远小于 1.26（Li et al., 2007），例如 2007 年实测值表明，羊草和大针茅样地的

LE/LE_{eq} 在气象干旱时均可低于 0.2（图 4）。
Wang et al. (2012) 指出当土壤湿度的日均值高于 $0.12\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ 时，羊草草原的 LE/LE_{eq} 相对稳定，而当土壤湿度小于 $0.12\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ 时， LE/LE_{eq} 会随土壤湿度的降低而急剧减小，即草原生态系统出现土壤水分胁迫。因此，本文以 $0.12\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ 为临界值来划分土壤水分条件，并发现在不同土壤水分条件下，典型草原潜热通量对气象因子的响应是不同

表 1 干旱（2007 年 8 月 18~31 日）和湿润（2008 年 8 月 18~31 日）条件下，羊草和大针茅样地太阳总辐射（ S_{in} , $\text{MJ m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ ）、地表反照率、气温（ T_a , $^{\circ}\text{C}$ ）、5 cm 土壤温度（ T_s , $^{\circ}\text{C}$ ）、土壤湿度（SWC, $\text{m}^3\text{ m}^{-3}$ ）、水汽压亏值（VPD, kPa ）、净辐射（ R_n , W m^{-2} ）、感热通量（ H , W m^{-2} ）、潜热通量（ LE , W m^{-2} ）、波文比、 LE/LE_{eq} 、地表导度（ g_s , mm s^{-1} ）、 CO_2 通量的日平均值 [NEE, $\text{g (C) m}^{-2}\text{ d}^{-1}$] 及 NEE_{max} ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$)

Table 1 Daily averages of solar radiation (S_{in} , $\text{MJ m}^{-2}\text{ d}^{-1}$), air temperature (T_a , $^{\circ}\text{C}$), 5-cm soil temperature (T_s , $^{\circ}\text{C}$), soil water content (SWC, $\text{m}^3\text{ m}^{-3}$), vapor pressure deficit (VPD, kPa), net radiation (R_n , W m^{-2}), sensible heat flux (H , W m^{-2}), latent heat flux (LE , W m^{-2}), Bowen ratio, LE/LE_{eq} , surface conductance (g_s , mm s^{-1}), CO_2 flux [NEE, $\text{g (C) m}^{-2}\text{ d}^{-1}$], and NEE_{max} ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$) at the *Leymus Chinensis* and *Stipa Grandis* sites under dry (August 18 to 31, 2007) and wet (August 18 to 31, 2008) soil water conditions

水分条件	站点	S_{in}	反照率	T_a	T_s	SWC	VPD	R_n	H	LE	波文比	LE/LE_{eq}	g_s	NEE	NEE_{max}
干旱	羊草	21.8	0.16	19.2	20.6	0.07	1.35	121.4	58.5	24.3	2.41	0.31	0.31	-0.25	-3.0
	大针茅	21.6	0.17	20.1	—	0.08	1.37	100.9	56.0	29.0	1.93	0.40	0.41	-0.29	-4.9
湿润	羊草	19.6	0.16	15.2	16.2	0.16	0.68	128.1	20.7	71.4	0.29	0.83	5.63	-1.53	-15.2
	大针茅	19.9	0.17	16.4	18.5	0.16	0.70	112.8	22.0	65.1	0.34	0.82	5.19	-1.12	-12.5

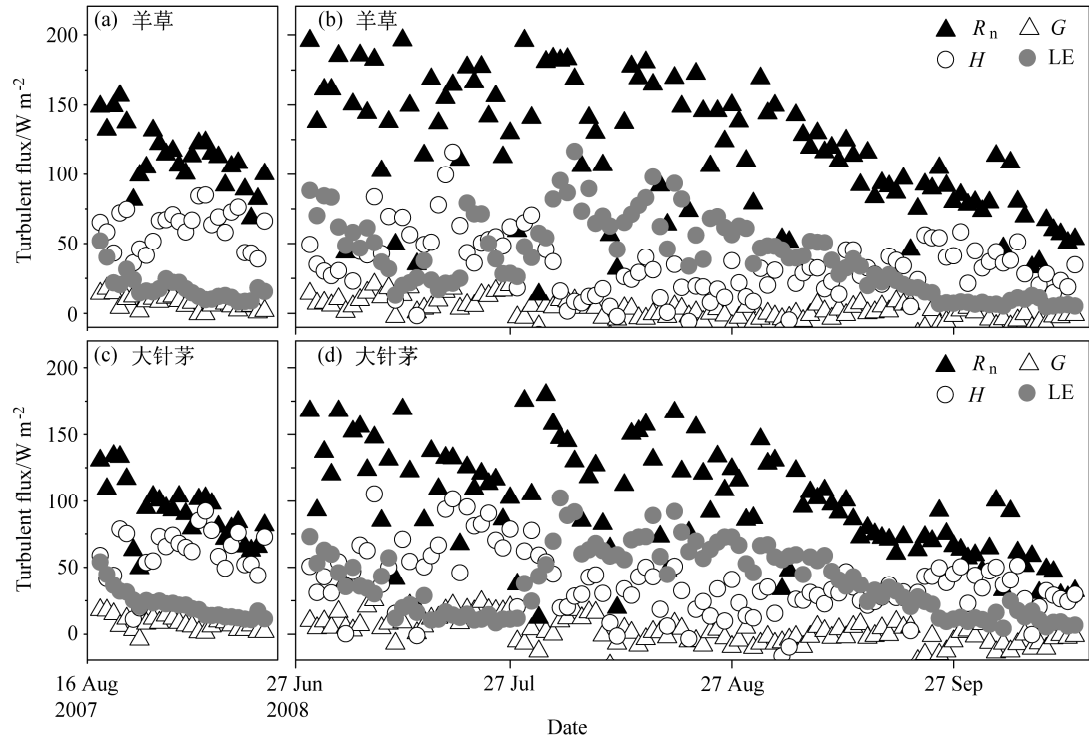


图 3 2007 年 8 月 16 日至 9 月 12 日和 2008 年 6 月 29 日至 10 月 15 日 (a、b) 羊草样地和 (c、d) 大针茅样地的净辐射 (R_n)、土壤热通量 (G)、感热通量 (H) 和潜热通量 (LE) 的日平均值
Fig. 3 Daily average net radiation (R_n), soil heat fluxes (G), sensible heat fluxes (H), and latent heat fluxes (LE) at (a, b) UG79 and (c, d) SUG sites from 16 August to 12 September 2007 and from 29 June to 15 October 2008

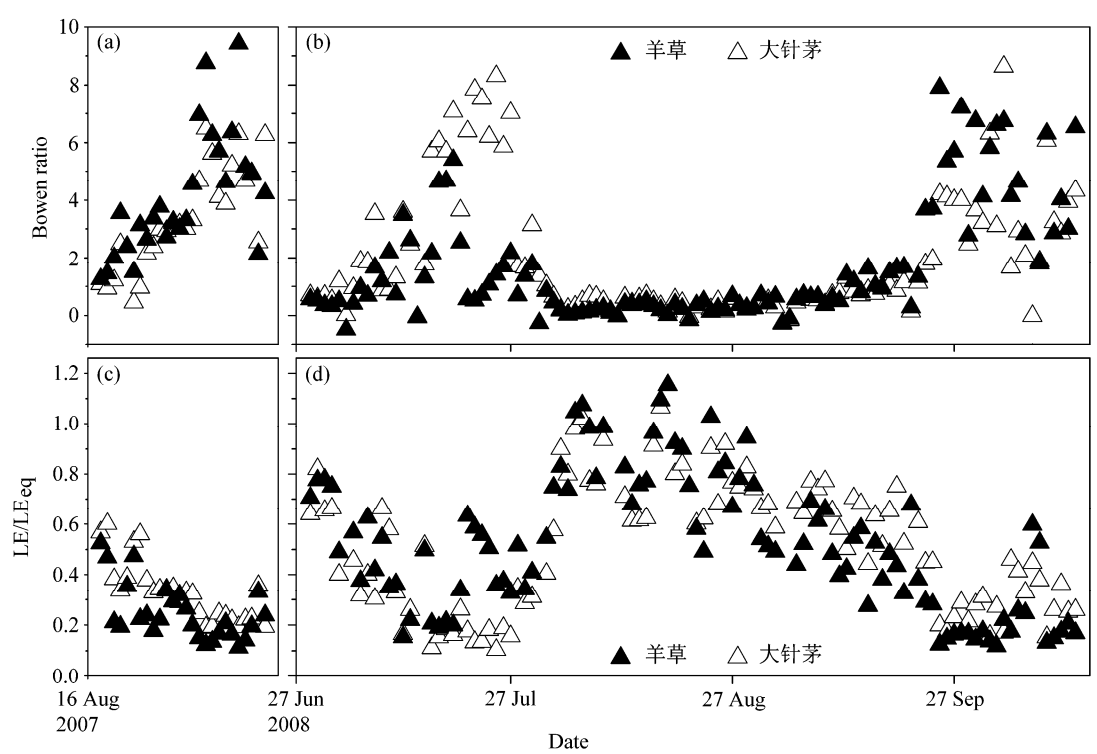


图4 2007年8月16日至9月12日和2008年6月29日至10月15日羊草样地和大针茅样地(a, b) Bowen比的日平均值、(c, d) LE/LE_{eq} 的日平均值

Fig. 4 Daily average (a, b Bowen ratio and (c, d) LE/LE_{eq} at UG79 and SUG sites from 16 August to 12 September 2007 and from 29 June to 15 October 2008

的。表2表明,在羊草和大针茅样地,净辐射和土壤湿度分别是土壤湿润和干旱时潜热通量的主要控制因子,气温的影响次之,而水汽压亏值和风速的影响很小。除此之外,羊草和大针茅样地地表湍流通量的差异也因土壤湿度的变化而存在不同(表1)。土壤湿润条件下,羊草样地的叶面积指数较大,其潜热通量和 LE/LE_{eq} 均较大;而土壤干旱时,羊草样地的潜热羊草样地的潜热通量和 LE/LE_{eq} 均较小(表1)。

3.3 二氧化碳通量的日变化和季节变化

土壤水分条件显著影响着两种典型草原下垫面 CO_2 通量的日变化(图5)。干旱条件下,羊草和大针茅样地 CO_2 通量均出现了明显的午间衰减的现象, CO_2 吸收的峰值出现在 07:30(北京时间,下同)(CO_2 通量分别为 -3.39 和 $-2.31 \mu mol m^{-2} s^{-1}$),之后急剧减小,12:00 时羊草样地的 CO_2 通量仅为 $-0.14 \mu mol m^{-2} s^{-1}$,而大针茅样地在午间甚至开始释放 CO_2 ($0.06 \mu mol m^{-2} s^{-1}$),午后再次由 CO_2 的释放变成吸收,并在 17:00 达到下午的峰值。这一现象在半干旱草原普遍存在(Li et al., 2005; Fu et al., 2006),与杜占池和杨宗贵(1990)利用植被同化

表2 干旱(2007年8月18日至31日)和湿润(2008年8月18日至31日)条件下,羊草和大针茅样地潜热通量和净辐射(R_n)、气温(T_a)、5 cm 土壤温度(T_s)、土壤湿度(SWC)、水汽压亏值(VPD)和风速(WS)的相关系数(R)

Table 2 Correlation coefficients (R) between latent heat flux and net radiation, air temperature, soil temperature at the 5 cm depth, soil water content, water vapor pressure deficit, and wind speed at the *Leymus Chinensis* and *Stipa Grandis* sites under dry (18 to 31 August 2007) and wet (18 to 31 August 2008) conditions

站点	水分条件	潜热通量的相关系数					
		R_n	T_a	T_s	SWC	VPD	WS
干旱	羊草	0.43	0.51	0.34	0.73	-0.1	-0.26
	大针茅	0.63	0.57	—	0.94	-0.04	-0.18
湿润	羊草	0.57	0.55	0.38	-0.38	0.47	-0.25
	大针茅	0.81	0.21	0.38	-0.19	0.23	-0.17

作用仪在特定晴天条件下测定的羊草和大针茅草原光合作用的日变化特征也是一致的。午间高温引起的生物酶活性的降低和高水汽压亏值引起的叶面气孔闭合度的增加被认为是 CO_2 吸收衰减的原因(Zhang et al., 2007)。其中,叶面气孔闭合度随水汽压亏值的增加在干旱条件下更为敏感(Jones,

1998), 因此, 湿润条件下, CO_2 吸收的日峰值出现提前(10:00), CO_2 吸收的午间衰减显著减弱(图 5)。

羊草和大针茅样地的 CO_2 通量均有明显的季节变化(图 6)。2008 年 8 月, 植被生长达到顶峰和土壤水分条件较好时, 羊草和大针茅草原的 CO_2 吸收达到最大值, 这与羊草草原更大的 $\text{NEE}_{\max}$ 相对应。值得指出的是, 即便在生长季中期, 土壤干旱也可以让两种典型草原由吸收 CO_2 转变为释放 CO_2 , 例如 2007 年 8 月和 2008 年 7 月, 土壤干旱的这一作用常见于干旱半干旱区草原(Hao et al., 2008; Yang et al., 2011)。观测期间, 羊草和大针茅草原 CO_2 吸收的最大值分别为 -3.32 和 $-1.87 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 其中大针茅草原的 CO_2 吸收最大值小于羊草草原和蒙古典型草原的 ($-2.3 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, Li et al., 2005), 而略大于内蒙古荒漠草原的最大值 ($-1.6 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, Yang and Zhou, 2013)。

图 7 给出的日间 CO_2 通量和有效光合辐射的关系表明, 2008 年较大的叶面积指数和较好的水分条

件会使植被吸收 CO_2 的能力显著增强(可用 $\text{NEE}_{\max}$ 表征, 公式 4), 即羊草和大针茅样地在湿润年份的 $\text{NEE}_{\max}$ (2008 年, -15.2 和 $-12.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) 均明显大于干旱年份的 $\text{NEE}_{\max}$ (2007 年, -3.0 和 $-4.9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)。土壤干旱条件下, 有效光合辐射约为 $600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时草地吸收 CO_2 达到峰值, 之后开始下降, 而土壤湿润时, 有效光合辐射的临界值会增加到 $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 这一临界值与另一典型草原的值近似 (1000 至 $1200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; Zhang et al., 2007), 但明显小于荒漠草原的值 ($1600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; Yang et al., 2011)。与大针茅样地相比, 羊草样地的叶面积指数较大(图 2), 在 2008 年植被生长顶峰期土壤水分条件较好时, 羊草样地拥有更大的 $\text{NEE}_{\max}$ 和 CO_2 吸收量, 但在土壤干旱时(2007 年, 同样为植被生长顶峰期), 大针茅的 $\text{NEE}_{\max}$ 和 CO_2 吸收量反而更大(表 1)。

3.4 碳水通量对地表导度的响应

地表导度是彭曼公式计算实际蒸散发的关键

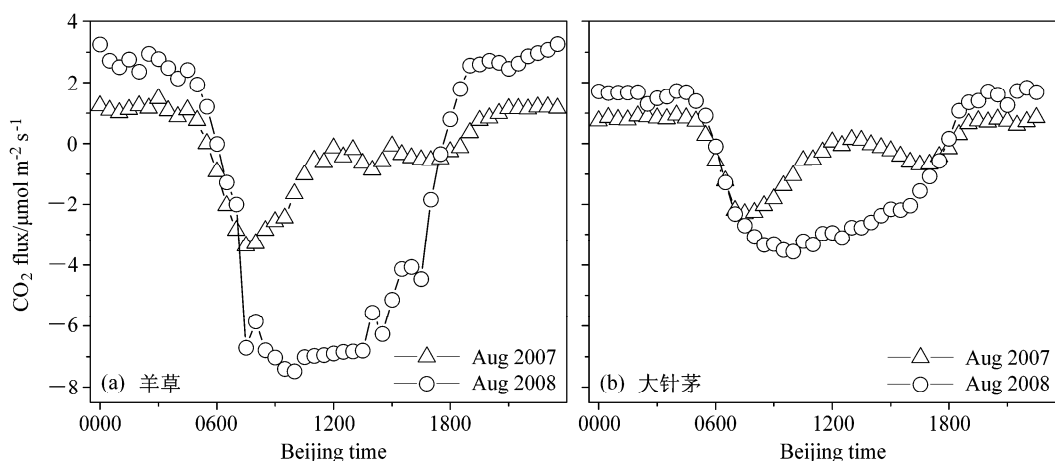


图 5 2007 年 8 月 18~31 日和 2008 年 8 月 18~31 日 (a) 羊草样地和 (b) 大针茅样地 CO_2 通量的平均日变化

Fig. 5 Diurnal variation of CO_2 fluxes at (a) UG79 and (b) SUG sites averaged from 18 to 31 August 2007 and from 18 to 31 August 2008

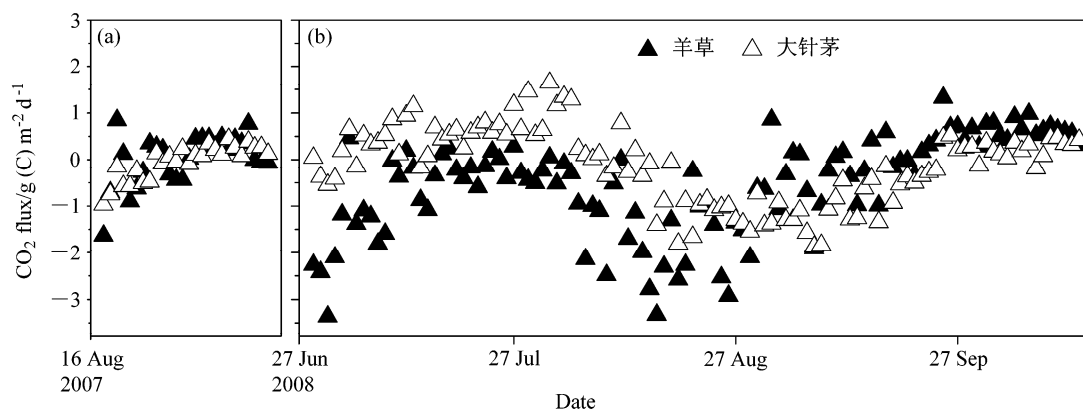


图 6 2007 年 8 月 16 日至 9 月 12 日和 2008 年 6 月 29 日至 10 月 15 日羊草样地和大针茅样地 CO_2 通量的日均值

Fig. 6 Daily CO_2 fluxes at UG79 and SUG sites from 16 August to 12 September 2007 and from 29 June to 15 October 2008

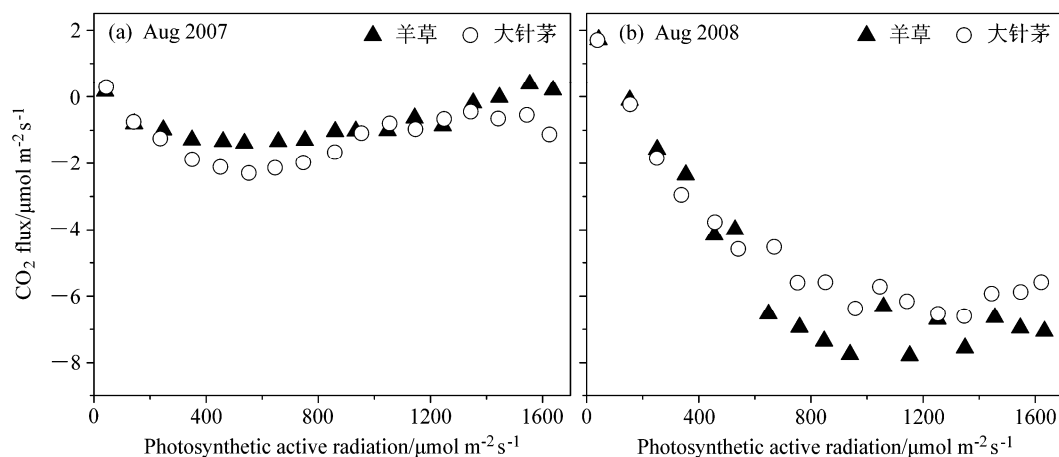


图7 (a) 2007年8月18~31日和(b) 2008年8月18~31日羊草样地和大针茅样地日间 CO_2 通量和有效光合辐射的关系

Fig. 7 Relationships between daytime CO_2 fluxes and photosynthetic active radiation at UG79 and SUG sites (a) from 18 to 31 August 2007 and (b) from 18 to 31 August 2008

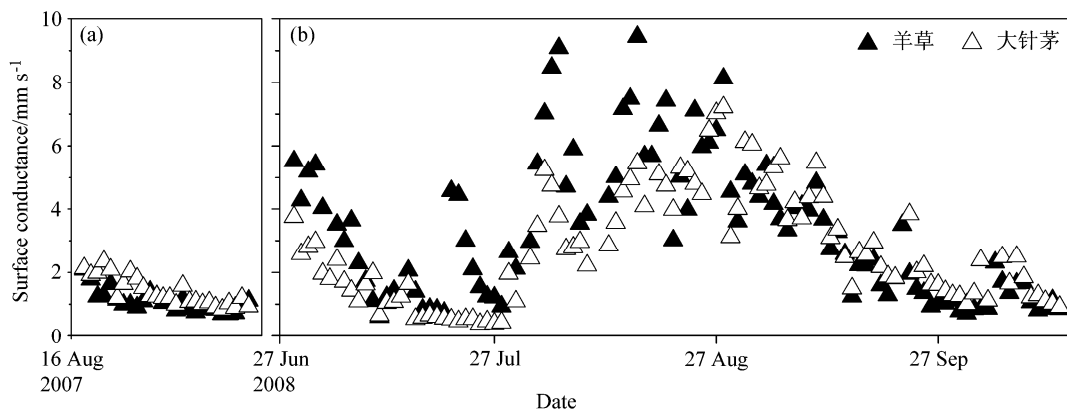


图8 2007年8月16日至9月12日和2008年6月29日至10月15日羊草样地和大针茅样地地表导度的日均值

Fig. 8 Daily averages of surface conductance at UG79 and SUG sites from 16 August to 12 September 2007 and from 29 June to 15 October 2008

参数, 随着植被生长、叶面积指数的增大而增加, 早期地表导度的估算仅依靠叶面积指数一个参数 (Monteith and Unsworth, 1990)。实际观测表明, 地表导度在半干旱草原与叶面积指数并不完全耦合, 例如 2008 年 7 月, 叶面积指数缓慢增加, 但地表导度由近 6 mm s^{-1} 降低至 1 mm s^{-1} 以下 (图 2, 8)。日尺度上, 2008 年土壤湿度分别可以解释 69% 和 66% 羊草和大针茅样地的地表导度日均值的变化, 地表导度随土壤湿度的增加而线性增大 (图 9), 这一现象在加拿大温带草原、蒙古典型草原和地中海湿润草原均有发现 (Wever et al., 2002; Li et al., 2006; Aires et al., 2008)。

羊草和大针茅样地 $\text{LE}/\text{LE}_{\text{eq}}$ 随着地表导度的增大而指数增加 (羊草: $\text{LE}/\text{LE}_{\text{eq}} = 0.2814 \ln(g_s) + 0.2256$; 大针茅: $\text{LE}/\text{LE}_{\text{eq}} = 0.2679 \ln(g_s) + 0.2961$) (图 10a),

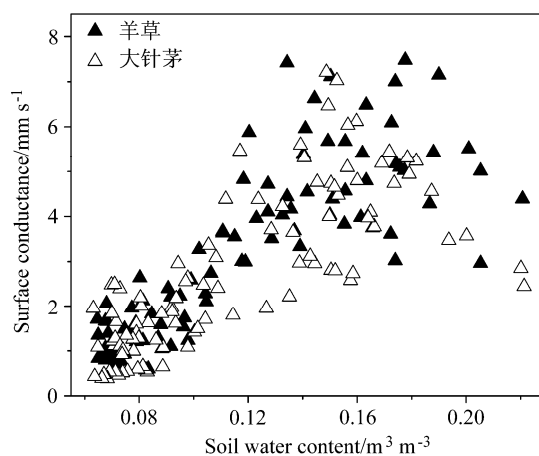
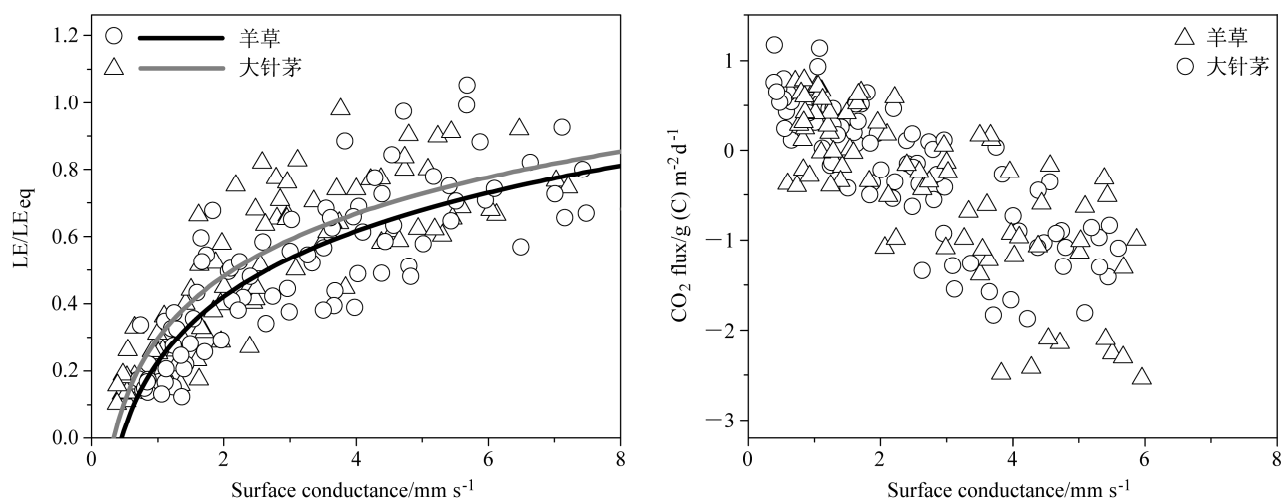


图9 2008年6月29日至10月14日日尺度上, 羊草样地和大针茅样地地表导度和土壤湿度的关系

Fig. 9 Relationship between surface conductance and soil water content on the daily scale from 29 June to 14 October 2008

图 10 2008 年 6 月 29 日至 10 月 14 日日尺度上, 地表导度和 (a) LE/LE_{eq} 、(b) CO_2 通量的关系Fig. 10 Relationships between surface conductance and (a) LE/LE_{eq} , (b) CO_2 fluxes on the daily scale from 29 June 29 to 14 October 2008

这与海北高山草甸的观测结果一致 (Gu et al., 2008)。对于 CO_2 通量交换来说, 生态系统光合作用需通过叶面气孔与外界进行气体交换, 气孔闭合度越大, 地表导度越小 (Monteith and Unsworth, 1990), 光合作用速率越低, 因此, CO_2 吸收也会随着地表导度的减小而降低 (图 10b)。除此之外, 地表导度还可以解释羊草和大针茅碳水通量在不同水分条件下的差异正好相反的原因。土壤水分条件较好时, 草叶面气孔闭合较少, 叶面积指数较大的羊草样地的地表导度更大, 羊草样地潜热通量和 CO_2 吸收量因此较大 (表 1)。而当土壤水分胁迫出现时, 羊草扁平叶面的气孔闭合度增加, 导致地表导度急剧降低, 而由于大针茅叶片呈针状, 叶面气孔闭合度增加较少, 其地表导度比羊草草原的更大, 因此, 叶面积指数较小的大针茅草原的潜热通量和 CO_2 吸收量反而较大。大针茅草原针状叶片及其生理特性是其比羊草草原更加耐旱的原因 (戚秋慧等, 1989)。

4 小结

本文分析了 2007 和 2008 年生长季内蒙古半干旱区羊草和大针茅草原湍流通量的实测数据, 发现不同水分条件下, 两种典型草原潜热通量和 CO_2 通量对气象因子的响应并不相同。土壤湿度和净辐射分别是土壤干旱和湿润时潜热通量的主要控制因子。土壤湿润时, CO_2 吸收随着有效光合辐射的升高而增加, 在有效光合辐射为 $1000 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ 时达到峰值 (羊草和大针茅草原的 NEE_{max} 分别为

-15.2 和 $-12.5 \mu mol m^{-2} s^{-1}$), 之后下降, 而在土壤干旱时, 有效光合辐射的临界值下降至 $600 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ (羊草和大针茅草原的 NEE_{max} 分别为 -3.0 和 $-4.9 \mu mol m^{-2} s^{-1}$)。另外, 羊草和大针茅草原碳水通量的差异在不同水分条件下也存在不同。土壤湿润时, 羊草草原的潜热通量、 LE/LE_{eq} 和 CO_2 吸收较大, 原因是其叶面积指数和地表导度较大。土壤干旱时, 羊草草原叶面气孔闭合度增加的比例比大针茅草原更大。因此, 羊草草原较小的地表导度造成其潜热通量、 LE/LE_{eq} 和 CO_2 吸收更小。这说明大针茅草原比羊草草原对不良环境的适应能力更强, 但在水分条件较好时, 大针茅水汽通量和 CO_2 吸收的增加幅度也较小。

致谢 感谢德国德累斯顿大学 Uwe Eichelmann 在野外观测实验方面给予的帮助。

参考文献 (References)

- Aires L M, Pio C A, Pereira J S. 2008. The effect of drought on energy and water vapour exchange above a Mediterranean C3/C4 grassland in southern Portugal [J]. *Agric. For. Meteorol.*, 148 (4): 565–579, doi:10.1016/j.agrformet.2007.11.001.
- Burba G G, Verma S B. 2005. Seasonal and interannual variability in evapotranspiration of native tallgrass prairie and cultivated wheat ecosystems [J]. *Agric. For. Meteorol.*, 135 (1–4): 190–201, doi:10.1016/j.agrformet.2005.11.017.
- Chen S P, Chen J Q, Lin G H, et al. 2009. Energy balance and partition in Inner Mongolia steppe ecosystems with different land use types [J]. *Agric. For. Meteorol.*, 149 (11): 1800–1809, doi:10.1016/j.agrformet.2009.06.009.
- Chuluun T, Ojima D. 2002. Land use change and carbon cycle in arid and

- semi-arid lands of East and Central Asia [J]. Sci. China Ser. C: Life Sci., 45 (S): 48–54.
- 杜占池, 杨宗贵. 1990. 羊草和大针茅光合作用午间降低与生态因子关系的研究 [J]. 自然资源学报, 5 (2): 177–188. Du Z C, Yang Z G. 1990. A study on the relation between the decline in photosynthesis at midday and ecological factors for *Aneurolepidium chinense* and *Stipa grandis* [J]. J. Nat. Resour. (in Chinese), 5 (2): 177–188, doi:10.11849/zrzyxb.1990.02.010.
- Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. 2001. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange [J]. Agric. For. Meteor., 107 (1): 43–69, doi:10.1016/S0168-1923(00)00225-2.
- Fan L, Gao Y, Brück H, et al. 2009. Investigating the relationship between NDVI and LAI in semi-arid grassland in Inner Mongolia using *in-situ* measurements [J]. Theor. Appl. Climatol., 95 (1–2): 151–156, doi:10.1007/s00704-007-0369-2.
- Foken T, Wichura B. 1996. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements [J]. Agric. For. Meteor., 78(1–2): 83–105, doi:10.1016/0168-1923(95)02248-1.
- Fu Y L, Yu G R, Sun X M, et al. 2006. Depression of net ecosystem CO₂ exchange in semi-arid *Leymus chinensis* steppe and alpine shrub [J]. Agric. For. Meteor., 137 (3–4): 234–244, doi:10.1016/j.agrformet.2006.02.009.
- Gu S, Tang Y H, Cui X Y, et al. 2008. Characterizing evapotranspiration over a meadow ecosystem on the Qinghai–Tibetan Plateau [J]. J. Geophys. Res., 113 (D8): doi:10.1029/2007JD009173.
- Hao Y B, Wang Y F, Huang X Z, et al. 2007. Seasonal and interannual variation in water vapor and energy exchange over a typical steppe in Inner Mongolia, China [J]. Agric. For. Meteor., 146 (1–2): 57–69, doi:10.1016/j.agrformet.2007.05.005.
- Hao Y B, Wang Y F, Mei X R, et al. 2008. CO₂, H₂O and energy exchange of an Inner Mongolia steppe ecosystem during a dry and wet year [J]. Acta Oecol., 33 (2): 133–143, doi:10.1016/j.actao.2007.07.002.
- Jones H G. 1998. Stomatal control of photosynthesis and transpiration [J]. J. Exp. Bot., 49 (S): 387–398, doi:10.1093/jxb/49.Special_Issue.387.
- Kaimal J C, Finnigan J J. 1994. Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement [M]. New York: Oxford University Press, 289pp.
- Ketzer B, Liu H Z, Bernhofer C. 2008. Surface characteristics of grasslands in Inner Mongolia as detected by micrometeorological measurements [J]. Int. J. Biometeor., 52 (7): 563–574, doi:10.1007/s00484-008-0148-5.
- Li S G, Asanuma J, Eugster W, et al. 2005. Net ecosystem carbon dioxide exchange over grazed steppe in central Mongolia [J]. Global Change Biol., 11 (11): 1941–1955, doi:10.1111/j.1365-2486.2005.01047.x.
- Li S G, Eugster W, Asanuma J, et al. 2006. Energy partitioning and its biophysical controls above a grazing steppe in central Mongolia [J]. Agric. For. Meteor., 137 (1–2): 89–106, doi:10.1016/j.agrformet.2006.03.010.
- Li S G, Asanuma J, Kotani A. 2007. Evapotranspiration from a Mongolian steppe under grazing and its environmental constraints [J]. J. Hydrol., 333 (1): 133–143, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.07.021.
- Liu J, Zhang Y, Li Y, et al. 2008. Overview of grassland and its development in China [M]//Multifunctional Grasslands in a Changing World Volume (I). Guangzhou: Guangdong People's Publishing House, 3–5.
- 吕达仁, 陈佐忠, 陈家宜, 等. 2005. 内蒙古半干旱草原土壤—植被—大气相互作用综合研究 [J]. 气象学报, 63 (5): 571–593. Lü D R, Chen Z Z, Chen J Y, et al. 2005. Study on soil–vegetation–atmosphere interaction in Inner-Mongolia semi-arid grassland [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 63 (5): 571–593, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2005.05.004.
- Monteith J L, Unsworth M H. 1990. Principles of Environmental Physics [M]. 2nd ed. New York: Chapman and Hall.
- Moore C J. 1986. Frequency response corrections for eddy correlation systems [J]. Bound.-Layer Meteor., 37 (1–2): 17–35, doi:10.1007/BF00122754.
- Pielke Sr R A, Avissar R, Raupach M, et al. 1998. Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: Influence on weather and climate [J]. Global Change Biol., 4 (5): 461–475, doi:10.1046/j.1365-2486.1998.t01-1-00176.x.
- Priestley C H B, Taylor R J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters [J]. Mon. Wea. Rev., 100 (2): 81–92, doi:10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2.
- 戚秋慧, 盛修武, 姜恕, 等. 1989. 羊草和大针茅群落光合速率的比较研究 [J]. 植物生态学与地植物学学报, 13 (4): 332–340. Qi Q H, Sheng X W, Jiang S, et al. 1989. A comparative study of the community photosynthesis of *Aneurolepidium chinense* and *Stipa grandis* [J]. Acta Phytocool. Geobotan. Sinica (in Chinese), 13 (4): 332–340.
- Schotanus P, Nieuwstadt F T M., De Bruin H A R. 1983. Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes [J]. Bound.-Layer Meteor., 26 (1): 81–93, doi:10.1007/BF00164332.
- 王雷, 刘辉志, Schaffrath D, 等. 2010. 内蒙古羊草和大针茅草原下垫面水汽、CO₂ 通量输送特征 [J]. 高原气象, 29 (3): 605–613. Wang L, Liu H Z, Schaffrath D, et al. 2010. Transfer characteristics of water vapor and CO₂ flux over *Leymus chinensis* and *Stipa grandis* steppe surfaces in Inner Mongolia [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29 (3): 605–613.
- Wang L F, Liu H, Ketzer B, et al. 2012. Effect of grazing intensity on evapotranspiration in the semiarid grasslands of Inner Mongolia, China [J]. J. Arid Environ., 83: 15–24, doi:10.1016/j.jaridenv.2012.04.005.
- Wang L, Liu H Z, Sun J H, et al. 2016. Water and carbon dioxide fluxes over an alpine meadow in Southwest China and the impact of a spring drought event [J]. Int. J. Biometeor., 60 (2): 195–205, doi:10.1007/s00484-015-1016-8.
- Webb E K, Pearman G I, Leuning R. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 106 (447): 85–100, doi:10.1002/qj.49710644707.
- Wever L A, Flanagan L B, Carlson P J. 2002. Seasonal and interannual variation in evapotranspiration, energy balance and surface conductance in a northern temperate grassland [J]. Agric. For. Meteor., 112 (1): 31–49, doi:10.1016/S0168-1923(02)00041-2.
- Xiao X, Ojima D, Parton W, et al. 1997. Modelling of biomass and soil organic matter of *Leymus chinensis* steppe and *Stipa grandis* steppe [C]// Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station, Research on Grassland Ecosystem Beijing: Science Press, 118–129.
- Xue Y K. 1996. The impact of desertification in the Mongolian and the Inner Mongolian grassland on the regional climate [J]. J. Climate, 9 (9): 2173–2189, doi:10.1175/1520-0442(1996)009<2173:TIODIT>2.0.CO;2.

- Yang F L, Zhou G S, Hunt J E, et al. 2011. Biophysical regulation of net ecosystem carbon dioxide exchange over a temperate desert steppe in Inner Mongolia, China [J]. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 142 (3–4): 318–328, doi:10.1016/j.agee.2011.05.032.
- Yang F L, Zhou G S. 2013. Sensitivity of temperate desert steppe carbon exchange to seasonal droughts and precipitation variations in Inner Mongolia, China [J]. *PLoS One*, 8 (2): e55418, doi:10.1371/journal.pone.0055418.
- Zhang W L, Chen S P, Chen J, et al. 2007. Biophysical regulations of carbon fluxes of a steppe and a cultivated cropland in semiarid Inner Mongolia [J]. *Agric. For. Meteorol.*, 146 (3–4): 216–229, doi:10.1016/j.agrformet.2007.06.002.
- Zhao Y, Peth S, Reszkowska A, et al. 2011. Response of soil moisture and temperature to grazing intensity in a *Leymus chinensis* steppe, Inner Mongolia [J]. *Plant Soil*, 340 (1–2): 89–102, doi:10.1007/s11104-010-0460-9.