

王雷, 刘辉志, Bettina Ketzer, 等. 2009. 放牧强度对内蒙古半干旱草原地气间能量和物质交换的影响 [J]. 大气科学, 33 (6): 1201–1211.  
Wang Lei, Liu Huizhi, Bettina Ketzer, et al. 2009. Influence of grazing intensity on energy and mass exchange between the surface and atmosphere over semi-arid grassland in Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1201–1211.

# 放牧强度对内蒙古半干旱草原地气间能量 和物质交换的影响

王雷<sup>1, 2</sup> 刘辉志<sup>1</sup> Bettina KETZER<sup>3</sup> David SCHAFFRATH<sup>3</sup>  
Christian BERNHOFER<sup>3</sup>

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 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 德国德累斯顿理工大学水文和气象研究所, 德累斯顿 01737

**摘 要** 利用涡度相关技术, 于 2006 年 7 月 27 日至 8 月 10 日在内蒙古半干旱草原三种放牧强度的下垫面进行微气象观测。本文分析了放牧强度对内蒙古半干旱草原地气间能量和物质交换的影响, 发现: (1) 放牧降低植被覆盖率, 使地表反射率增大。(2) 放牧使潜热通量减小。而放牧强度最大的锡林河河道潜热通量最大, 表明土壤水分状况是半干旱草原地表能量收支的决定性因素。(3) 羊草和冬季放牧观测点日平均  $\text{CO}_2$  通量分别为  $-1.92 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  和  $0.73 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 表明放牧可以使草地由  $\text{CO}_2$  的汇转变为源。锡林河河道为  $\text{CO}_2$  的汇, 日平均  $\text{CO}_2$  通量  $-3.35 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 与羊草比较, 锡林河河道吸收  $\text{CO}_2$  更多, 表明土壤湿度是影响半干旱草原  $\text{CO}_2$  通量交换的重要因素。(4) 放牧通过减小叶面积指数, 减弱植被的光合作用能力。

**关键词** 半干旱草原 放牧强度 能量交换 二氧化碳通量

**文章编号** 1006-9895 (2009) 06-1201-11

**中图分类号** P463

**文献标识码** A

## Influence of Grazing Intensity on Energy and Mass Exchange between the Surface and Atmosphere over Semi-Arid Grassland in Inner Mongolia

WANG Lei<sup>1, 2</sup>, LIU Hui-Zhi<sup>1</sup>, Bettina KETZER<sup>3</sup>, David SCHAFFRATH<sup>3</sup>,  
and Christian BERNHOFER<sup>3</sup>

1 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029

2 Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049

3 Institute of Hydrology and Meteorology, Dresden University of Technology, Tharandt 01737

**Abstract** Eddy covariance technique was used to conduct the micrometeorological measurements over three kinds of semi-arid grasslands under three different grazing intensities in Inner Mongolia from 27 July to 10 August 2006. The influence of grazing intensities on the energy and mass exchange between the surface and atmosphere over semi-arid grasslands in Inner Mongolia was analyzed. The main results are listed as following:

**收稿日期** 2008-09-07, 2009-03-11 收修定稿

**资助项目** 德国联邦联合会资助项目“不同放牧强度对内蒙古草原生态系统物质流的影响”MAGIM, 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-YW-219

**作者简介** 王雷, 男, 1982 年出生, 博士研究生, 主要从事地气相互作用的研究。E-mail: fisherray@163.com

(1) Grazing reduced the vegetation cover ratio and therefore increased albedo.

(2) Grazing decreased the latent heat flux. Although the Xilin River site had the pronounced grazing intensity, its latent heat flux was largest. This indicated that soil water condition was the key factor which controlled the surface energy budget over semi-arid grasslands.

(3) The daily average  $\text{CO}_2$  fluxes at Leymus site and winter grazed site were  $-1.92 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  and  $0.73 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  respectively, which showed that grazing could make grasslands change from  $\text{CO}_2$  sink to  $\text{CO}_2$  source. The Xilin River site was  $\text{CO}_2$  sink and its daily average  $\text{CO}_2$  flux was  $-3.35 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ . Compared to Leymus site, the Xilin River site absorbed more  $\text{CO}_2$ , indicating that soil moisture was an important factor which influenced  $\text{CO}_2$  flux exchange over the semi-arid grassland.

(4) By decreasing the leaf area index, grazing decreased the photosynthesis capacity of vegetations.

**Key words** semi-arid grassland, grazing intensity, energy exchange,  $\text{CO}_2$  flux

## 1 引言

放牧是草原土地利用方式中最为常见的一种,它通过减小草原地上生物量和叶面积指数,改变了植被覆盖状况,影响着地表温度、地表反射率和地表粗糙度等下垫面微气象特征 (Li et al., 2000),继而作用于地气间的能量分配、植被蒸散和  $\text{CO}_2$  通量交换 (Xue, 1996; Bremer et al., 2001; Rogiers et al., 2005)。因此,放牧对区域尺度上的碳、水循环都有着重要的影响。在生态条件脆弱的半干旱区,过度放牧是气候变化外导致草原土壤荒漠化的重要因子 (Li et al., 2006)。

目前,关于放牧对草原蒸散的影响,科学界尚未得到统一的结论。一般情况下,放牧会使蒸散总量减少,而在出现土壤水分胁迫时,过度放牧样地的蒸散量可能会大于适度放牧样地,这与适度放牧样地拥有更强的植被持水能力保持一致 (Day et al., 1994)。但美国陆面过程实验 FIFE 得到了意外的观测结果,尽管叶面积指数差异显著,过度放牧和禁牧样地的蒸散却是近似的,放牧对蒸散的影响很小 (Stewart et al., 1992)。Bremer et al. (2001) 的研究指出,土壤水分充足时,放牧样地的蒸散大于禁牧样地,是由于放牧样地新长出的草叶具有较小的气孔阻力 (stomatal resistance)。 $\text{CO}_2$  通量交换方面, Rogiers et al. (2005) 人工管理草地的试验得出结论,人工割草和放牧都会大幅减少光合作用对  $\text{CO}_2$  的吸收 (分别为 50% 和 37%),但总生态系统呼吸作用并没有明显的变化,这是因为在土壤温度和湿度变化不大的条件下,呼吸作用只依赖于土壤中可利用的有机碳质。Polley et al. (2008) 利用美国混合草牧场放牧与禁牧两块样地的观测结果进

行模拟后得出,放牧引起的植被功能改变对  $\text{CO}_2$  净交换的影响是环境因子直接作用的两倍。由此可见,放牧强度的影响对于全面准确地理解草原生态系统地气间能量和物质交换意义重大。

大陆性温带半干旱气候下的典型草原生态系统 (Typical steppe ecosystem) 面积约  $4.1 \times 10^7 \text{ hm}^2$ , 占我国领土总面积约 10.5% (郝彦宾等, 2006), 是我国温带草原里最有代表性的类型。近几十年来,在全球变暖和干旱化的大背景下 (符淙斌等, 2008), 过度放牧加剧了内蒙古草原土壤荒漠化的趋势。研究表明 (Xue, 1996), 过度放牧引起的地表能量分配改变和蒸散的减少, 会减弱潜热在植被退化区域向上的对流性输送和向南的平流输送, 使季风环流减弱, 降水量减少, 干旱加剧。所以, 关于放牧强度如何影响内蒙古草原地气间能量、水汽和  $\text{CO}_2$  交换过程的研究就显得尤为重要, 有助于改善区域及全球气候模式在该地区的参数化方案, 提高气候预报水平。但是, 除了 Li et al. (2000) 的研究揭示了放牧对内蒙古半干旱草原下垫面微气象特征的影响外, 其他涉及到内蒙古半干旱草原放牧强度影响的研究还很少 (吕达仁等, 2002, 2005; 郝彦宾等, 2006; Hao et al., 2007)。

2006 年 7 月 27 日至 8 月 10 日, 中国科学院大气物理研究所在内蒙古锡林河河道进行了短期的微气象观测, 再加上中德合作项目“不同放牧强度对内蒙古草原生态系统物质流的影响 (MAGIM)” 第六分项目同期在中国科学院内蒙古草原生态系统定位站所属 79 围封羊草样地和冬季放牧样地的观测资料。本文利用三种放牧强度下羊草草原下垫面的湍流数据, 初步分析了放牧强度对内蒙古半干旱草原地气间能量和物质交换的影响。

2 观测场地和仪器

观测场位于我国内蒙古锡林郭勒盟锡林河流域(43°33'N, 116°40'E), 平均海拔 1200 m。气候类型属于大陆性气候中的温带半干旱草原气候, 四季分明, 春季常有大风, 夏季气候暖湿, 而秋冬季受蒙古高压的控制, 寒冷干燥。平均气温 -0.4℃, 最冷月(1月)为-22.3℃, 最热月(7月)平均温度达到 18.8℃。年平均降雨量 350 mm 左右, 降雨量年际变化较大, 变化幅度常在 30%以上, 最高年份达到 645 mm, 而最低年份不过 182 mm。另外, 降雨量月际间差异很大, 主要集中于 6~9 月份, 约占全年降水量的 80% (郝彦宾等, 2006)。下垫面植被以抗低温的旱生草本植物区系为主导成分。优势物种是旱生根茎型禾草羊草 (*Leymus chinensis*), 其次分别为大针茅 (*Stipa grandis*)、苔草 (*Agropyron cristatum*) 和冰草 (*Cleistogenes squarrosa*) 等旱生密丛禾草。主要土类是栗钙土, 腐殖层厚度一般在 30~45 cm 之间, 有机质含量 2.0%~4.0%之间; 质地较轻, 多为沙土和粉壤土 (<http://eco.ibcas.ac.cn/station/ingers/jianjie.htm>)。

三种放牧强度的样地分别为 79 围封羊草样地、冬季放牧样地和锡林河河道(距锡林河约 200 m), 放牧强度依次增大, 叶面积指数依次减小。表 1 给出了三个观测点的下垫面特征。羊草和冬季放牧相距约 700 m, 锡林河河道在其他两观测点北面, 距离约 9 km, 三者的相对位置由图 1 给出。

三个观测点的系统配置大致相同。试验观测项目包括平均场和湍流场两部分, 主要观测近地层基本气象要素、土壤温度以及近地面层的物质和能量通量。气象观测塔高 3 m。2 m 处安装水汽、CO<sub>2</sub> 分析仪 (LI-7500, LICOR) 和三维超声风温仪 (CSAT3, CSI) 进行快响应观测, 取样频率 20 Hz。慢响应观测包括, 1.5 m 处的辐射仪 (CNR-1, KIPP&ZONEN), 两个土壤热通量仪 (3 cm, HFP01, Hukseflux) 分布在辐射仪两侧, 温度和湿度传感器 (1.8 m, HMP45C, VAISALA), 雨量筒 (1.2 m, 52202, YOUNG), 三层土壤温度传感器 (2 cm, 5 cm, 10 cm, 107, CSI)。慢响应观测 10 分钟给出一组平均值。所有仪器由 CR5000 数据采集器 (CSI) 控制测量、数据采集和存储, 以 SDM 端口输出到 1 GCF 卡, 每 11 天换卡。整套系统由 4 块

表 1 实验样地的名称、放牧强度和下垫面特征  
Table 1 Short names, grazing intensities and surface characteristics of the sites

样地简称	放牧强度	平均盖度	平均草高	地形
羊草	1979 年开始禁牧	30%~40%	25~40 cm	轻微斜率
冬季放牧	只在冬季放牧	20%~25%	15~30 cm	轻微斜率
锡林河河道	自由放牧	15%~25%	10~20 cm	局地平坦

50 W 太阳能板和 2 块 50 AH 的蓄电池供电。需要说明的是, 冬季放牧样地没有土壤温度的测量, 降雨量的观测只在羊草样地进行。

本文利用 EDIRE 软件处理湍度相关湍流资料, 经过野点去除、坐标旋转、湿度修正 (Schotanus et al., 1983)、频率衰减修正 (Moore, 1986) 和密度脉动修正 (Webb et al., 1980), 计算得到感热通量、潜热通量和 CO<sub>2</sub> 通量。输出间隔为 30 分钟。通量的计算公式如下:

$$H = \rho_a c_p \overline{w'T'}, \tag{1}$$

$$L_E = L_v \overline{w'\rho_v}, \tag{2}$$

$$F_c = \overline{w'\rho_c}, \tag{3}$$

式中,  $H$ 、 $L_E$ 、 $F_c$  分别为感热通量、潜热通量和 CO<sub>2</sub> 通量,  $c_p$  和  $L_v$  分别为定压比热和水汽的汽化热系数,  $\rho_a$ 、 $\rho_v$  和  $\rho_c$  分别为空气密度、水汽密度和 CO<sub>2</sub> 密度。

湍流数据的质量控制方面, 去掉因仪器故障、天气等原因产生的不合理数据, 因此产生的数据空缺, 对于缺失 3 个以下的半小时数据点, 以线性回归修补。观测时间为 2006 年 7 月 27 日至 8 月 10 日, 冬季放牧平均场的数据每日 00:00 至 06:30 (北京时, 下同) 有不同程度的缺测。

3 观测结果与分析

3.1 天气条件

试验只在羊草进行了降雨量的观测。由于羊草和冬季放牧观测点相距约 700 m, 可近似地认为两点降雨量相同。2006 年 7 月 27 日至 8 月 10 日总降雨量 16.4 mm (如图 2 所示), 远低于 1982~2005 年同期降雨量平均 35.4 mm (降雨量数据来自中国科学院内蒙古草原生态系统定位站)。值得指出的是, 因锡林河观测点距河流较近, 其土壤水分状况良好。

图 3 给出了 7 月 31 日至 8 月 6 日羊草、冬季放牧和锡林河河道的气温的逐日变化。羊草和冬季放牧的气温大致相同, 而日间锡林河河道的气温峰

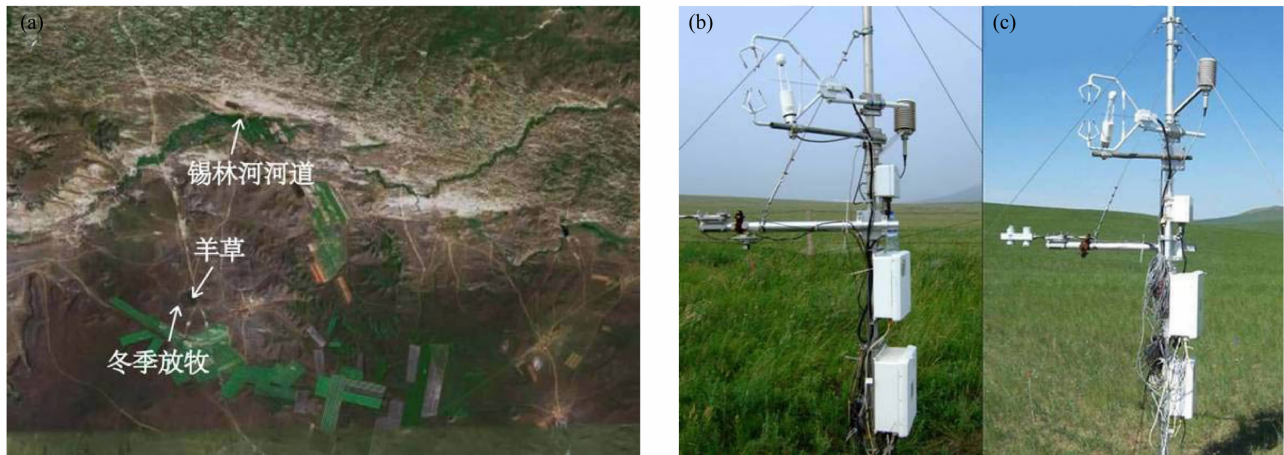


图 1 (a) 三个观测点的地理位置示意图; (b) 羊草观测点和 (c) 冬季放牧观测点的气象塔和下垫面

Fig. 1 (a) The location of the three sites; the micrometeorology towers and land surfaces of (b) Leymus and (c) winter grazed site

值较小, 夜间气温较大, 是受其土壤湿度较大的影响。降雨后的 7 月 31 日气温较低, 一方面受天气过程 (多云, 见图 6 太阳总辐射的变化) 影响, 另一方面雨后土壤湿度较大, 日间地表温度较小, 近地层湍流不强, 地面加热大气的作用减弱, 气温增幅变小。同理, 土壤湿度持续减小, 则是 7 月 31 日至 8 月 6 日气温稳定升高的原因。

图 4 给出了空气温度的平均日变化曲线 (冬季放牧凌晨 00:00 至 06:30 缺失)。三种下垫面气温日变化趋势一致, 日出前 05:30 气温最低 (冬季放牧最低温缺失), 之后温度逐渐升高, 午后 15:00 达到最大。羊草和锡林河河道的气温日较差分别为 12.0℃ 和 11.2℃, 植被覆盖较差的锡林河河道的气温日较差反而较小, 这是湿润的土壤水分条件影响

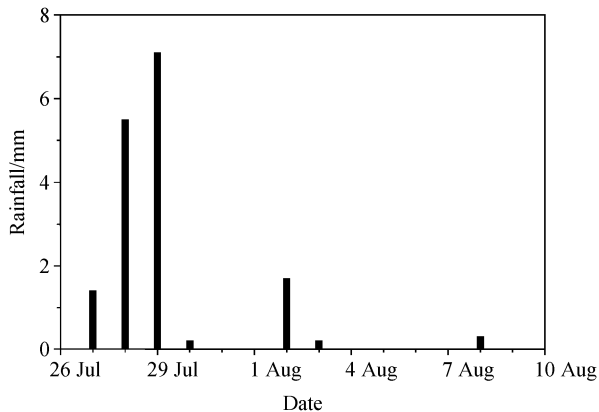


图 2 观测期间羊草降雨量的变化  
Fig. 2 Daily variation of rainfall at Leymus during the measurement period

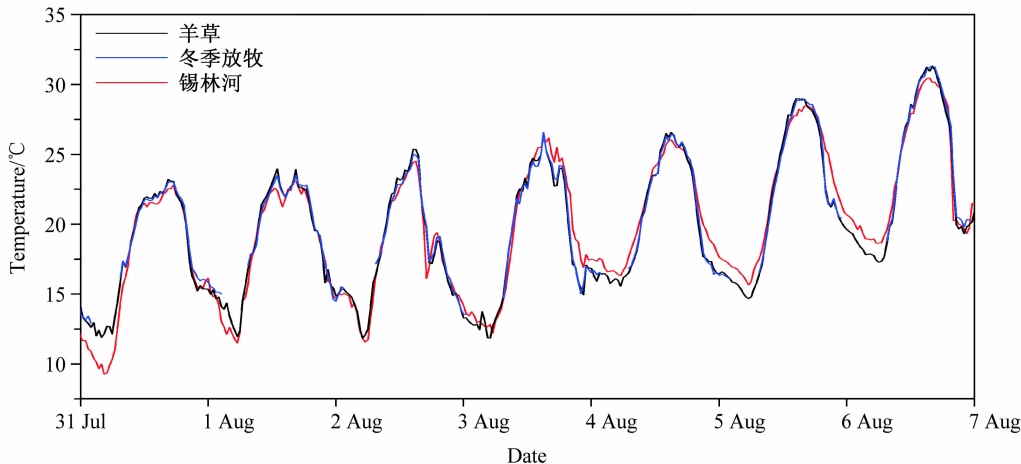


图 3 2006 年 7 月 31 日至 8 月 6 日三种下垫面气温的逐日变化  
Fig. 3 Daily variation of air temperature over the three surfaces from 31 Jul to 6 Aug 2006

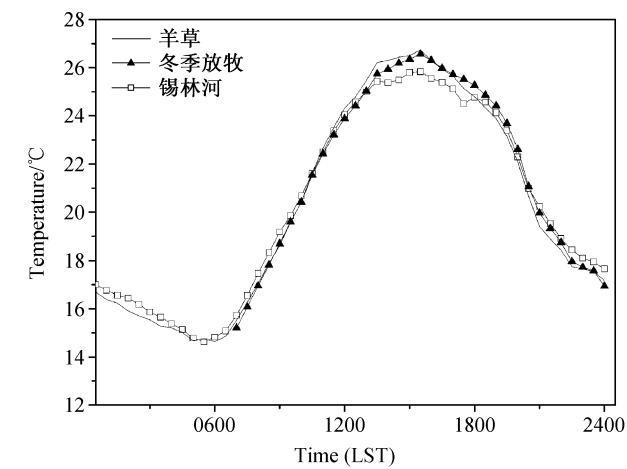


图4 2006年7月27日至8月10日三种下垫面气温的平均日变化

Fig. 4 Average diurnal variation of air temperature over the three surfaces from 27 Jul to 10 Aug 2006

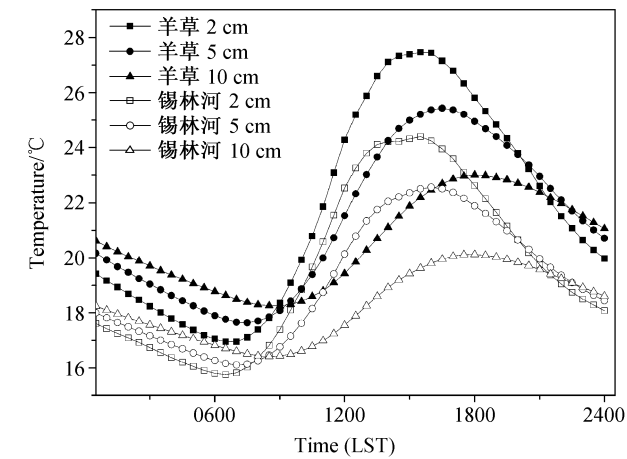


图5 2006年7月27日至8月10日羊草和锡林河河道三层土壤温度(2 cm、5 cm、10 cm)的平均日变化

Fig. 5 Average diurnal variation of the three layers' soil temperature (2 cm, 5 cm, 10 cm) at Leymus and the Xilin River site from 27 Jul to 10 Aug 2006

局地环境的结果。日平均气温并没有表现出类似的规律。

### 3.2 土壤温度

图5给出了羊草和锡林河3层土壤温度的平均日变化曲线。两种下垫面土壤温度的变化规律是一致的：浅层土壤温度日变化与深层相比更为剧烈，日间温度更高，夜间温度更低；2 cm、5 cm和10 cm的土壤温度最小值出现的时间分别为06:00、07:00和08:30，达到最大值的时间分别为15:00、16:00和17:30，深层土壤温度极值出现的时间有一定滞

后，原因是外界环境因子的变化通过热量的逐层传导对土壤温度起作用。与空气温度类似，土壤湿度的差异是决定土壤温度的主要环境因素。以2 cm土壤温度为例，羊草地温的日较差(10.5℃)大于锡林河的(8.6℃)；在日间，平均地温(24.3℃)同样要大于锡林河的(22.1℃)。

### 3.3 辐射收支

图6(见文后彩图)给出了7月31日至8月6日羊草、冬季放牧和锡林河河道太阳总辐射、地表反射辐射、向下长波辐射和向上长波辐射的逐日变化。观测期间太阳总辐射的最大值是在羊草观测到的1003.7 W/m<sup>2</sup>，大于刘辉志等(2003)在2000年7月21日至8月10日在内蒙古奈曼流动沙丘观测到的太阳总辐射最大值960 W/m<sup>2</sup>。与奈曼沙丘相比，内蒙古锡林河流域纬度较大，但海拔更高，太阳辐射更强。太阳总辐射受天气变化控制，较小的太阳总辐射表明是阴雨天气，如7月31日阴天，太阳总辐射整体最小；三种下垫面太阳总辐射的差异，体现出当地降雨或云的空间分布不均匀。地表反射辐射与太阳总辐射变化趋势大体相同，锡林河的地表反射辐射明显大于羊草和冬季放牧的，与植被覆盖状况较差有关。向下长波辐射是大气反射回地面的长波部分，云量越大，向下长波辐射越大，因此，向下长波辐射变化没有明显规律，波动很频繁。向上长波辐射决定于地表温度，从图6d中我们可以看到，羊草和冬季放牧向上长波辐射的逐步增大，与气温的变化一致，原因是土壤湿度的持续减小，而锡林河向上长波辐射没有明显增大的趋势，说明它受到河流的影响，土壤水分条件良好。

图7给出了晴天三个观测点辐射分量的平均日变化的比较。太阳总辐射在羊草和冬季放牧的变化规律相同，即清晨05:30开始大于0，12:00左右由于天气原因出现波动，之后逐渐减少，至20:00变为0，而锡林河河道午间无此波动；羊草、冬季放牧和锡林河河道观测点日间出现的最大太阳总辐射分别为778.0 W/m<sup>2</sup>、774.5 W/m<sup>2</sup>和767.2 W/m<sup>2</sup>。向下长波辐射的日变化微弱，约50 W/m<sup>2</sup>；与太阳总辐射类似，三观测点向下长波辐射的差异是由天气状况的局地变化造成的。地表反射辐射和向上长波辐射可以体现出不同植被覆盖类型的下垫面特征。地表反射辐射的日变化趋势与太阳总辐射相同，大小与地表反射率相关，羊草和冬季放牧地表

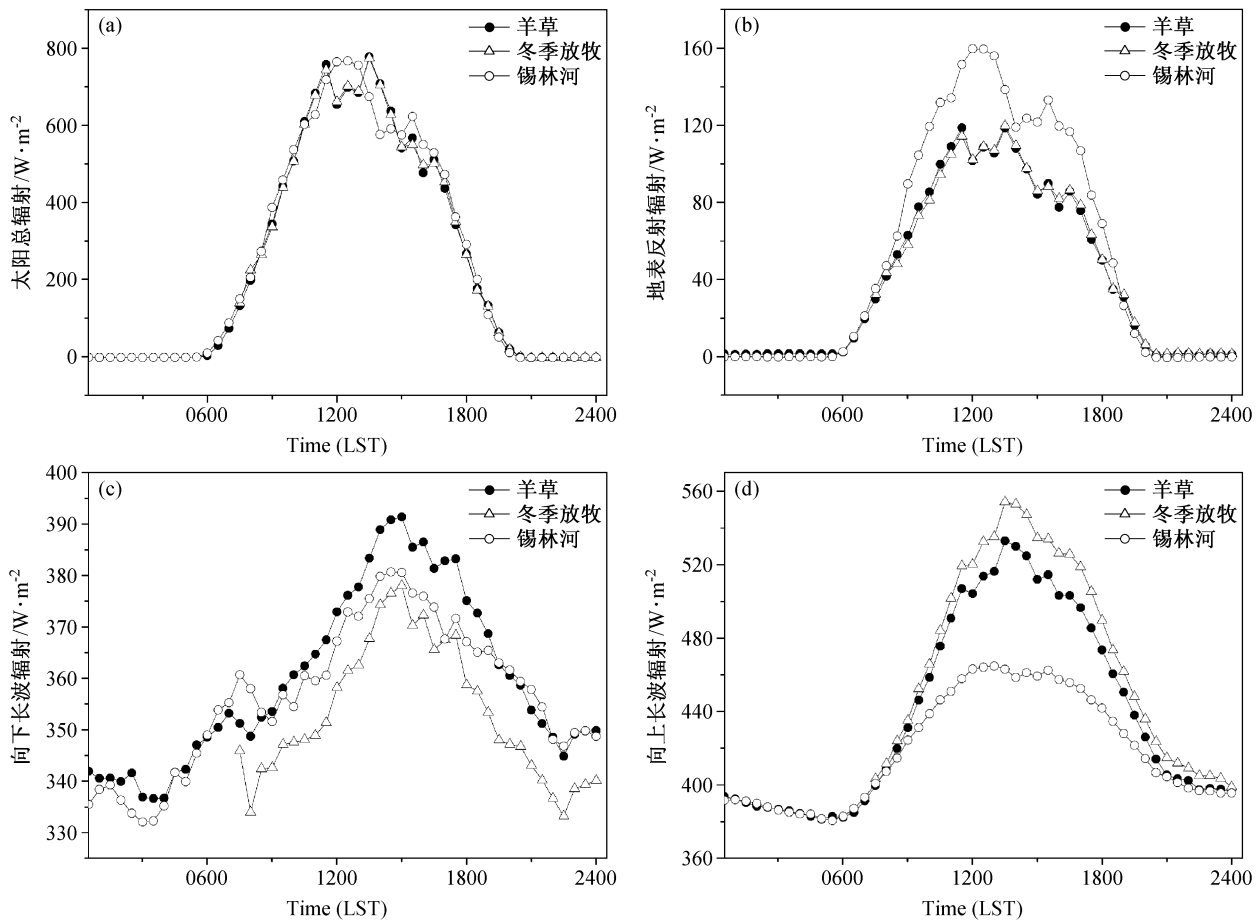


图7 2006年7月27日至8月10日晴天三种下垫面辐射分量的平均日变化: (a) 太阳总辐射; (b) 地表反射辐射; (c) 向下长波辐射; (d) 向上长波辐射

Fig. 7 Diurnal variation of radiation components over the three surfaces averaged over the clear days from 27 Jul to 10 Aug 2006; (a) Total solar radiation; (b) reflective solar radiation; (c) incoming long wave radiation; (d) outgoing long wave radiation

反射辐射近似, 而锡林河的地表反射辐射明显更大。向上长波辐射与地表温度有关, 达到最大值在14:00左右, 和太阳总辐射相比有一定滞后; 冬季放牧的向上长波辐射大于羊草的, 这是由于放牧使植被覆盖率降低, 更多的裸地使地表接收到更多的辐射用来直接加热土壤, 地表温度的升高引起向上长波辐射的增大; 而植被覆盖最差的锡林河河道的向上长波辐射反而最小, 是受土壤水分充足的影响。

地表反射率是指地表反射辐射与太阳总辐射之比, 是描述下垫面特征的重要参数。我们在太阳总辐射大于  $300 \text{ W/m}^2$  (08:30至17:00) 计算地表反射率。图8给出了2006年8月4日至6日地表反射率的日变化。日间地表反射率呈“U”型变化, 随着太阳高度角的增加而增大, 早晚小中午大; 早晚地表反射率的变化很大, 这与太阳高度角的急剧

变化有关。晴天羊草、冬季放牧和锡林河河道地表反射率的平均值分别为0.161、0.162和0.216。羊草和冬季放牧的地表反射率几乎没有区别; 放牧强度最大的锡林河河道地表反射率最大, 是由于裸地和植被其他部分的光学特征不同, 而锡林河河道下垫面裸地的比例最大。由此可见, 放牧通过降低植被覆盖率来增大地表反射率, 与Li et al. (2000) 的研究结果一致。三种下垫面地表反射率的差异体现出放牧影响了地表能量分配, 并且, 能量平衡中其他的量(如潜热通量)也可能受到放牧的影响。

### 3.4 近地层能量交换

图9(见文后彩图)给出了7月31日至8月6日羊草、冬季放牧和锡林河河道净辐射、土壤热通量、感热通量和潜热通量的逐日变化。决定净辐射逐日变化的主要因素是天气变化, 7月31日为多云

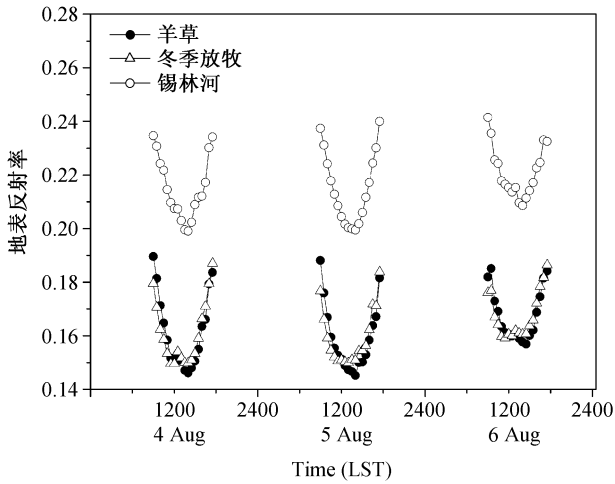
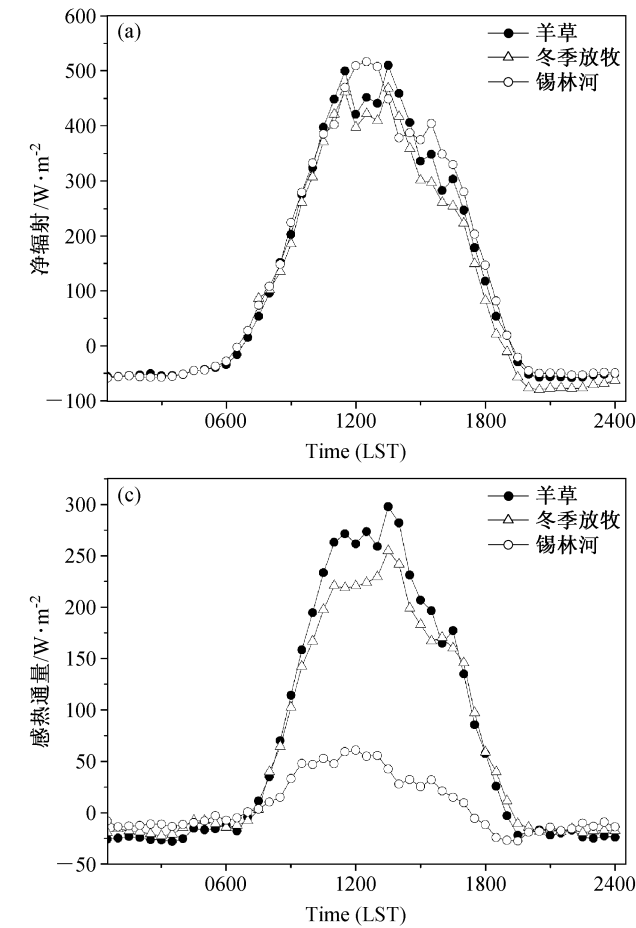


图 8 2006 年 8 月 4 日至 6 日三种下垫面地表反射率的日变化  
Fig. 8 Diurnal variation of albedo from 4 Aug to 6 Aug 2006 over the three surfaces



天气，净辐射最小。羊草和冬季放牧土壤热通量的差异不大，日峰值在  $75\text{ W/m}^2$  左右，锡林河土壤热通量的日变化则较为平缓，日峰值在  $25\text{ W/m}^2$  左右。羊草和冬季放牧感热通量的逐日变化趋势明显，7 月 31 日至 8 月 4 日，天气由多云向晴朗转变，再加上土壤湿度减小，地表温度升高，近地层湍流作用增强，导致感热通量在这几天稳定增大。而锡林河河道的感热通量始终很小，日峰值在  $100\text{ W/m}^2$  以下。羊草和冬季放牧的潜热通量的变化表现出相似性，7 月 31 日以后，随着土壤湿度的持续减小，这两种下垫面的潜热通量开始逐步减小，日峰值由  $150\text{ W/m}^2$  降至  $50\text{ W/m}^2$  以下。锡林河河道则由于充足的水分条件，潜热通量逐日变化没有明显趋势，日峰值在  $150\text{ W/m}^2$  至  $300\text{ W/m}^2$  间波动。

如图 10a 所示，晴天羊草、冬季放牧和锡林河河道净辐射的日变化规律与太阳总辐射保持一致，清晨 06:30 由负变正，在 11:30 左右达到最大值，

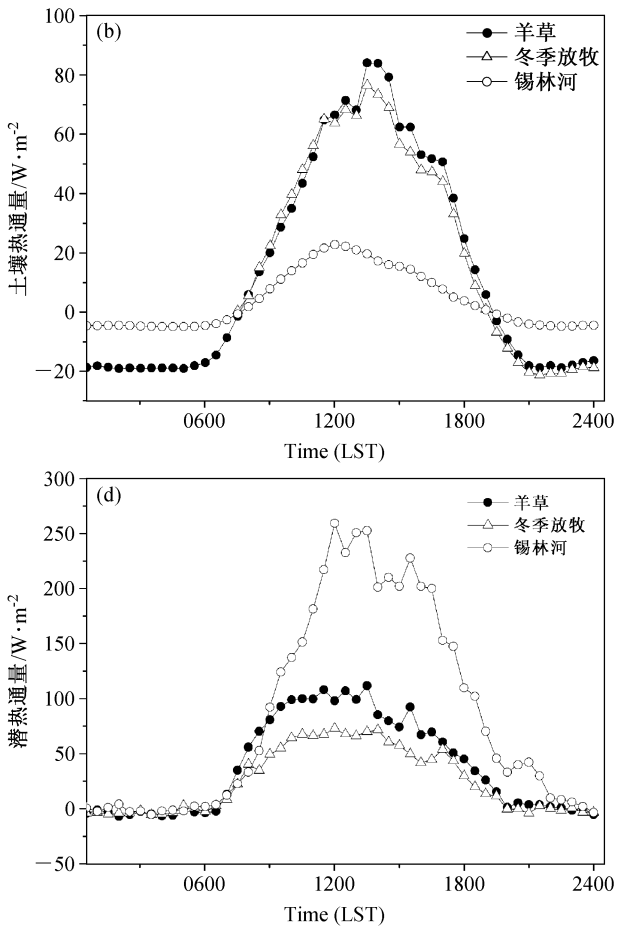


图 10 2006 年 7 月 27 日至 8 月 10 日三种下垫面 (a) 净辐射、(b) 土壤热通量、(c) 感热通量和 (d) 潜热通量的平均日变化  
Fig. 10 Diurnal variation of (a) net radiation, (b) soil heat flux, (c) sensible heat flux, (d) latent heat flux over the three surfaces averaged over the clear days from 27 Jul to 10 Aug 2006

分别为 509.8 W/m<sup>2</sup>、468.3 W/m<sup>2</sup> 和 516.5 W/m<sup>2</sup>。锡林河的土壤热通量清晨 07:30 由负变正, 12:00 到最大值 22.4 W/m<sup>2</sup>, 同一时间羊草和冬季放牧达到最大值 84.0 W/m<sup>2</sup> 和 76.5 W/m<sup>2</sup>, 之后在 18:30 由正变负 (图 10b)。锡林河的土壤热通量远比其他两个观测点小, 这是因为锡林河河道土壤湿度大, 植被的热容量大。当净辐射大于 50 W/m<sup>2</sup> 时, 计算日间的平均有效能量 (净辐射与土壤热通量之差), 羊草为 258.2 W/m<sup>2</sup>, 冬季放牧为 234.2 W/m<sup>2</sup>, 锡林河河道为 293.9 W/m<sup>2</sup>。由羊草和冬季放牧的比较可知, 在同样干旱的土壤水分条件下, 放牧使有效能量减小; 锡林河河道的有效能量最大, 体现出土壤湿度对半干旱草原地表能量获得的决定性作用。

除了有效能量的大小, 放牧也会影响有效能量分配为感热通量和潜热通量。图 10c、d 给出了晴天感热通量和潜热通量的平均日变化曲线。锡林河河道的感热通量在清晨 06:30 由负变正, 11:30 达到最大, 为 61.1 W/m<sup>2</sup>, 之后开始减小, 由正变负的时间为 17:00。而羊草和冬季放牧感热通量在 13:00 达到最大值, 分别为 297.6 W/m<sup>2</sup> 和 254.9 W/m<sup>2</sup>, 由正变负的时间分别为 18:30 和 19:00, 放牧使其有一定时间的滞后。日出后, 太阳辐射对地面的加热使地表温度升高, 水汽的蒸散显著增加, 羊草和冬季放牧的潜热通量在 13:00 达到最大值, 分别为 112.0 W/m<sup>2</sup> 和 69.9 W/m<sup>2</sup>, 而锡林河潜热通量的最大值 259.5 W/m<sup>2</sup>, 时间为 11:30。夜间 21:00 后至清晨 06:00, 三观测点的潜热交换很微弱, 有正有负, 绝对值在 10 W/m<sup>2</sup> 以下。全天潜热通量日平均的大小关系为, 锡林河 (81.3 W/m<sup>2</sup>) > 羊草 (47.3 W/m<sup>2</sup>) > 冬季放牧 (33.5 W/m<sup>2</sup>), 一方面, 良好的土壤水分条件使植被覆盖率最小的锡林河河道的蒸散反而最大, 另一方面, 放牧使植被的蒸散减小, 与 Bremer et al. (2001) 的结论一致。

图 11 给出了 8 月 4 日至 6 日三种下垫面波文比日间的变化。由于降水量很少, 土壤干旱, 羊草和冬季放牧的有效能量主要分配为感热通量, 波文比随着土壤湿度的减小而增大; 平均波文比分别为 1.26 和 1.70。羊草的波文比在 07:30 至 17:30 间大于 1, 冬季放牧波文比大于 1 的时段更长, 为 08:00 至 18:00, 体现出放牧对地表能量分配的影响。而锡林河的有效能量主要分配为潜热通量, 平均波文比为 0.11, 决定因素是土壤湿度。

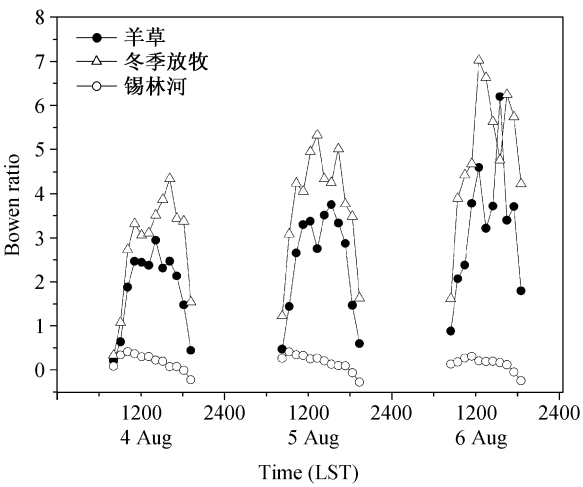


图 11 2006 年 8 月 4 日至 6 日三种下垫面日间的波文比变化  
Fig. 11 Variation of Bowen ratio at Leymus, winter grazed site, and the Xilin River site during the daytime from 4 Aug to 6 Aug 2006

3.5 二氧化碳交换

地气间 CO<sub>2</sub> 交换过程由光合作用和呼吸作用组成。全天都存在呼吸作用, 而光合作用只在日间进行。表 2 给出了 CO<sub>2</sub> 日平均通量, 日间吸收量平均和夜间释放量平均。整个观测期间, 锡林河河道和羊草表现为 CO<sub>2</sub> 的汇, 冬季放牧则是 CO<sub>2</sub> 的源, 表明放牧可以使草地由 CO<sub>2</sub> 的汇转变为源。三种下垫面日平均 CO<sub>2</sub> 通量的绝对值都不大, 符合郝彦宾等 (2006) 观测到的 CO<sub>2</sub> 通量范围 -7.4 ~ 5.4 g·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>。日间, 吸收 CO<sub>2</sub> 的平均量由多到少分别是锡林河河道、羊草和冬季放牧, 夜间 CO<sub>2</sub> 释放量平均也是同样的顺序, 即 CO<sub>2</sub> 通量变化剧烈程度依次减弱。羊草和冬季放牧 CO<sub>2</sub> 通量较小的波动与天气干旱造成的土壤水分胁迫有关, 而在锡林河河道则受制于其叶面积指数以及光合作用能力。

图 12 表示的是三种下垫面 CO<sub>2</sub> 源汇状态的变化。观测期间降雨很少, 随着土壤湿度的减小, 羊草和冬季放牧 CO<sub>2</sub> 交换的趋势是由 CO<sub>2</sub> 的吸收向

表 2 2006 年 7 月 27 日至 8 月 10 日三种下垫面的 CO<sub>2</sub> 交换 (单位: g·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>)

	日平均通量	日间吸收量平均	夜间释放量平均
羊草	-1.92	-7.82	5.90
冬季放牧	0.73	-3.67	4.40
锡林河河道	-3.35	-9.75	6.40



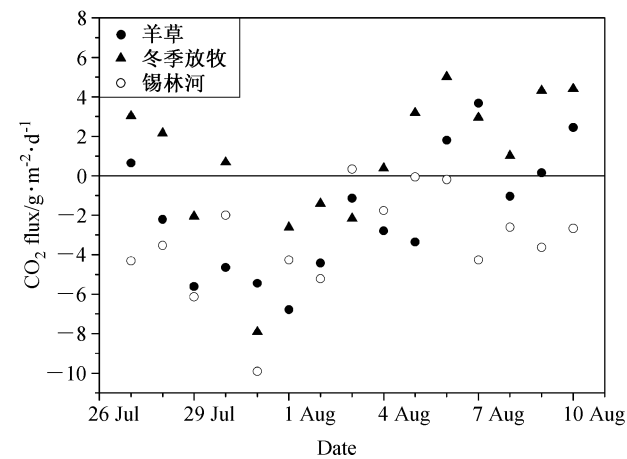


图 12 三种下垫面 CO<sub>2</sub> 源汇状态的逐日变化 (单位:  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )  
Fig. 12 Daily variation of CO<sub>2</sub> flux at Leymus, winter grazed site, and the Xilin River site (units:  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )

释放转变, 而由于锡林河河道土壤水分充足, 其主要表现为 CO<sub>2</sub> 的汇, CO<sub>2</sub> 源汇的状态没有明显的变化趋势。可见, 土壤水分状况是影响半干旱草原 CO<sub>2</sub> 交换的重要环境因子。

图 13 给出了 CO<sub>2</sub> 通量的平均日变化。白天, 羊草和冬季放牧的草地在高温度和土壤水分胁迫的耦合作用下, 午间 (10:00 至 14:00) 出现了 CO<sub>2</sub> 交换衰减的现象 (Fu et al., 2006); 锡林河没有类似现象。羊草、冬季放牧和锡林河河道由于光合作用吸收 CO<sub>2</sub> 的 通 量 最 大 值 分 别 为  $0.41 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.29 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $0.37 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 羊草 CO<sub>2</sub> 吸收的通量最大, 这也体现出羊草最强的光合作用能力, 与其最大的叶面积指数一致。夜间, CO<sub>2</sub> 通量通常小于  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 三种下垫面释放 CO<sub>2</sub> 变化规律不明显, 与土壤温度无明显的正指数关系, 这是因为半干旱草原的呼吸作用在土壤有机质的可利用性、土壤水分和土壤温度的综合作用下, 显示出复杂的变化特征, 其定量关系需要进一步的研究。

## 4 小结

本文利用 2006 年夏内蒙古半干旱草原的观测资料, 初步分析了不同放牧强度下, 羊草、冬季放牧和锡林河河道能量、物质交换特征的差异, 主要结论如下:

(1) 三种草地下垫面气温、各辐射分量的逐日变化由天气条件决定。同时, 气温、地表反射辐射

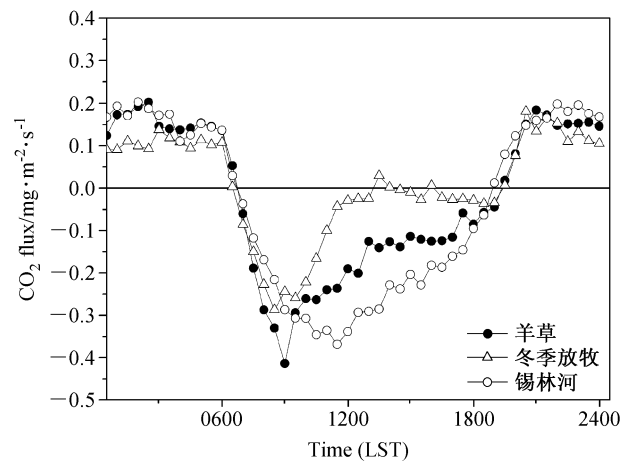


图 13 三种下垫面 CO<sub>2</sub> 通量的平均日变化 (单位:  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
Fig. 13 Average diurnal variation of CO<sub>2</sub> flux at Leymus, winter grazed site, and the Xilin River site (units:  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

和向上长波辐射会受到土壤湿度的影响。

(2) 放牧降低植被覆盖率, 使气温日较差和地表温度变大, 地表反射率增大。

(3) 羊草和冬季放牧观测点的地表有效能量主要分配为感热通量, 锡林河河道地表有效能量主要分配为潜热通量, 羊草、冬季放牧和锡林河河道观测点的平均波文比分别为 1.26、1.70 和 0.11。土壤湿度的持续减小使羊草和冬季放牧的潜热通量减小、感热通量增大, 而土壤水分条件良好的锡林河河道的感热通量和潜热通量无明显变化趋势。

(4) 放牧使潜热通量减小。而放牧强度最大的锡林河河道潜热通量最大, 表明土壤水分状况是半干旱草原地表能量收支的决定性因素。

(5) 羊草和冬季放牧观测点日平均 CO<sub>2</sub> 通量分别为  $-1.92 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  和  $0.73 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 表明放牧可以使草地由 CO<sub>2</sub> 的汇转变为源。锡林河河道为 CO<sub>2</sub> 的汇, 日均 CO<sub>2</sub> 通量为  $-3.35 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 是受土壤湿度的影响。

(6) 羊草和冬季放牧观测点出现了 CO<sub>2</sub> 通量衰减现象, 但日间羊草吸收 CO<sub>2</sub> 的最大值仍大于锡林河的, 体现出更强的光合作用能力, 表明放牧通过减小叶面积指数, 减弱植被的光合作用能力。

(7) 土壤水分状况是影响半干旱草原 CO<sub>2</sub> 交换的另一重要因子; 随着土壤湿度的减小, 羊草和冬季放牧观测点的 CO<sub>2</sub> 交换都有由 CO<sub>2</sub> 的吸收向释放转变的趋势。

**致谢** 感谢参加中国科学院大气物理研究所内蒙古锡林河河道微气象观测的所有人员。感谢德国德累斯顿大学水文和气象研究所 Uwe Eichelmann 在野外观测实验和数据处理方面给予的帮助。

## 参考文献 (References)

- Bremer D J, Auen L M, Ham J M, et al. 2001. Evapotranspiration in a prairie ecosystem: Effects of grazing by cattle [J]. *Agronomy Journal*, 93: 338–348.
- Day T A, Detling J K. 1994. Water relations of *Agropyron smithii* and *Bouteloua gracilis* and community evapotranspiration following long-term grazing by prairie dogs [J]. *American Midland Naturalist*, 132: 381–392.
- 符淦斌, 马柱国. 2008. 全球变化与区域干旱化 [J]. *大气科学*, 32 (4): 752–760. Fu Congbin, Ma Zhuguo. 2008. Global change and regional aridification [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (4): 752–760.
- Fu Y, Yu G, Sun X, et al. 2006. Depression of net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in semi-arid *Leymus chinensis* steppe and alpine shrub [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137: 234–244.
- 郝彦宾, 王艳芬, 孙晓敏, 等. 2006. 内蒙古羊草草原碳交换季节变异及其生态学解析 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 36 (S1): 174–182.
- Hao Y, Wang Y, Sun X, et al. 2006. Seasonal variation in carbon exchange and its ecological analysis over *Leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia [J]. *Science in China (Ser. D)* (in Chinese), 36 (S1): 174–182.
- Hao Y, Wang Y, Huang X, et al. 2007. Seasonal and interannual variation in water vapor and energy exchange over a typical steppe in Inner Mongolia China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 146: 57–69.
- Li S G, Harazono Y, Oikawa T, et al. 2000. Grassland desertification by grazing and the resulting micrometeorological changes in Inner Mongolia [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 102: 125–137.
- Li S G, Eugster W, Asanuma J, et al. 2006. Energy partitioning and its biophysical controls above a grazing steppe in central Mongolia [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137: 89–106.
- 刘辉志, 洪钟祥, 张宏升, 等. 2003. 内蒙古奈曼流动沙丘下垫面湍流输送特征初步研究 [J]. *大气科学*, 27: 389–398. Liu Huizhi, Hong Zhongxiang, Zhang Hongsheng, et al. 2003. The turbulent characteristics in the surface layer over dune at Naiman in Inner Mongolia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 27: 389–398.
- 吕达仁, 陈佐忠, 王庚辰, 等. 2002. 内蒙古半干旱草原气候生态相互作用问题—IMGRASS 计划初步结果 [J]. *地学前缘*, 9 (2): 307–320. Lü Daren, Chen Zuozhong, Wang Gengchen, et al. 2002. Climate-ecology interaction in Inner Mongolia semi-arid grassland—preliminary results of IMGRASS project [J]. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 9 (2): 307–320.
- 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: 571–593. Lü Daren, Chen Zuozhong, Chen Jiayi, et al. 2005. Study on soil-vegetation-atmosphere interaction in Inner-Mongolia semi-arid grassland [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 63: 571–593.
- Moore C J. 1986. Frequency response corrections for eddy correlation systems [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 27: 17–35.
- Polley W, Frank A B, Sanabria J, et al. 2008. Interannual variability in carbon dioxide fluxes and flux-climate relationships on grazed and ungrazed northern mixed-grass prairie [J]. *Global Change Biology*, 14: 1620–1632.
- Rogiers N, Eugster W, Furger M, et al. 2005. Effect of land management on ecosystem carbon fluxes at a subalpine grassland site in the Swiss Alps [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 80: 187–203.
- 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]. *Boundary-Layer Meteorology*, 26: 81–93.
- Stewart J B, Verma S B. 1992. Comparison of surface fluxes and conductances at two contrasting sites within the FIFE area [J]. *J. Geophys. Res.*, 97: 18623–18628.
- 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: 85–100.
- Xue Y. 1996. The impact of desertification in the Mongolian and the Inner Mongolian grassland on the regional climate [J]. *J. Climate*, 9: 2173–2189.

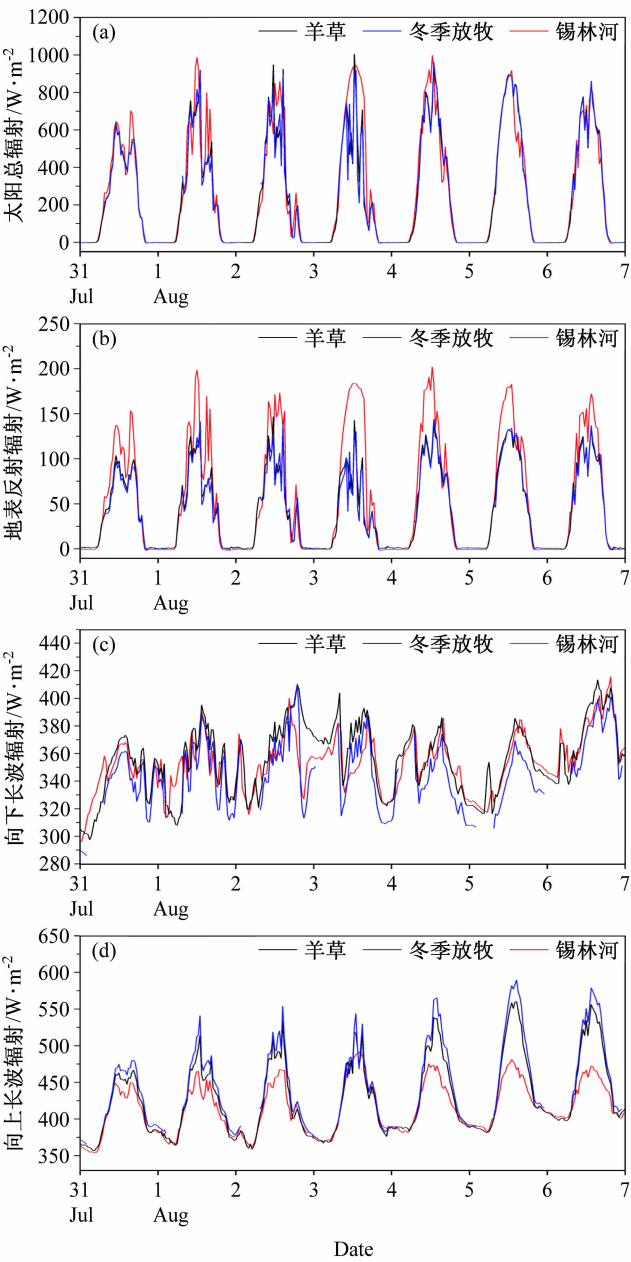


图6 2006年7月31日至8月6日三种下垫面 (a) 太阳总辐射、(b) 地表反射辐射、(c) 向下长波辐射和 (d) 向上长波辐射的逐日变化

Fig. 6 Daily variation of (a) total solar radiation, (b) reflective solar radiation, (c) incoming long wave radiation, (d) outgoing long wave radiation over the three surfaces from 31 Jul to 6 Aug 2006

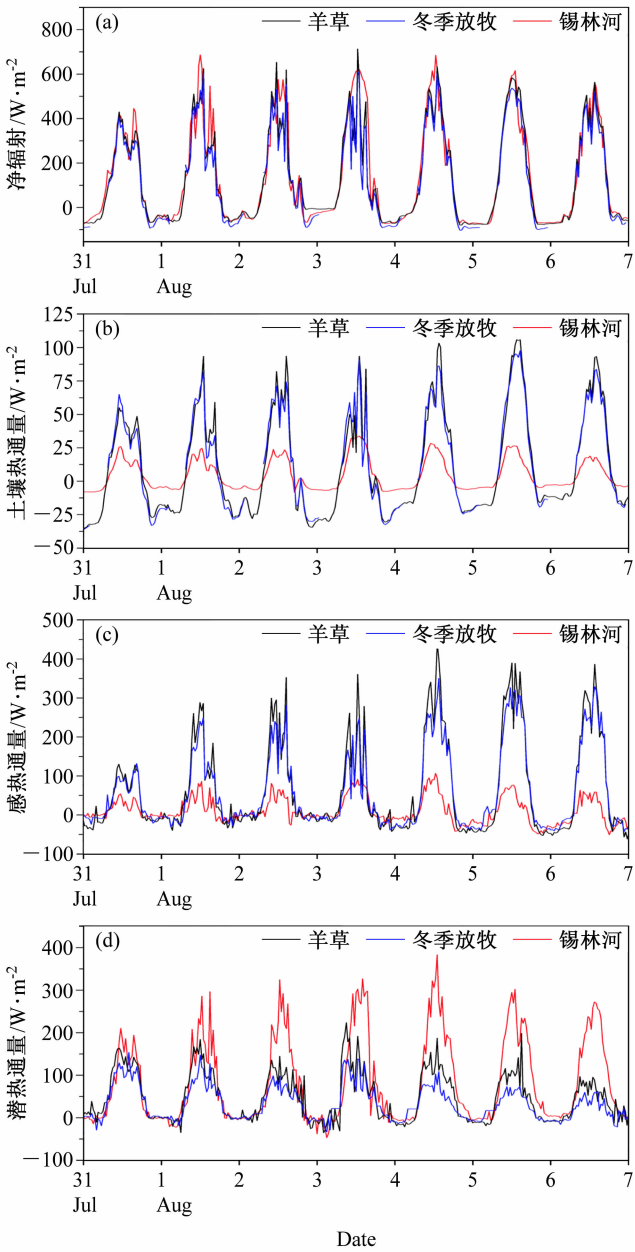


图9 2006年7月31日至8月6日三种下垫面 (a) 净辐射、(b) 土壤热通量、(c) 感热通量和 (d) 潜热通量的逐日变化

Fig. 9 Daily variation of (a) net radiation, (b) soil heat flux, (c) sensible heat flux, and (d) latent heat flux over the three surfaces from 31 Jul to 6 Aug 2006