

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

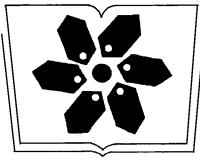
(Shengtai Xuebao)

第 30 卷 第 21 期
Vol.30 No.21
2010



中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 30 卷 第 21 期 2010 年 11 月 (半月刊)

目 次

棉铃虫幼虫对人类呈味物质的取食反应·····	李为争,付国需,王英慧,等 (5709)
西藏拉萨机场周边风沙源空间分布及演变趋势·····	李海东,沈渭寿,邹长新,等 (5716)
新疆沙湾冷泉沉积物的细菌系统发育多样性·····	曾 军,杨红梅,徐建华,等 (5728)
应用鱼类完整性评价体系评价辽河流域健康·····	裴雪姣,牛翠娟,高 欣,等 (5736)
不同海拔天山云杉叶功能性状及其与土壤因子的关系·····	张慧文,马剑英,孙 伟,等 (5747)
滨河湿地不同植被对农业非点源氮污染的控制效果·····	徐华山,赵同谦,贺玉晓,等 (5759)
内蒙古温带荒漠草原能量平衡特征及其驱动因子·····	阳伏林,周广胜 (5769)
南北样带温带区栎属树种功能性状对气象因子的响应·····	冯秋红,史作民,董莉莉,等 (5781)
伏牛山自然保护区物种多样性分布格局·····	卢训令,胡 楠,丁圣彦,等 (5790)
减弱 UV-B 辐射对烟草形态、光合及生理生化特性的影响 ·····	陈宗瑜,钟 楚,王 毅,等 (5799)
川西亚高山针阔混交林乔木层生物量、生产力随海拔梯度的变化 ·····	刘彦春,张远东,刘世荣,等 (5810)
三峡库区消落带水淹初期地上植被与土壤种子库的关系·····	王晓荣,程瑞梅,肖文发,等 (5821)
洞庭湖西岸区防护林土壤和植物营养元素含量特征·····	柏方敏,田大伦,方 晰,等 (5832)
择伐对阔叶红松林主要树种径向与纵向生长的影响·····	蒋子涵,金光泽 (5843)
野鸭湖典型湿地植物光谱特征·····	刘 克,赵文吉,郭逍宇,等 (5853)
三种线性模型在杉木与马尾松地位指数相关关系研究中的比较·····	朱光玉,吕 勇,林 辉,等 (5862)
不同干扰类型下羊草种群的空间格局·····	陈宝瑞,杨桂霞,张宏斌,等 (5868)
基于 SWAT 模型的祁连山区最佳水源涵养植被模式研究——以石羊河上游杂木河流域为例 ·····	王军德,李元红,李赞堂,等 (5875)
2D 与 3D 景观指数测定山区植被景观格局变化对比分析 ·····	张志明,罗亲普,王文礼,等 (5886)
基于投影寻踪的珠江三角洲景观生态安全评价 ·····	高 杨,黄华梅,吴志峰 (5894)
海峡两岸 16 个沿海城市生态系统功能比较 ·····	张小飞,王如松,李 锋,等 (5904)
同安湾围(填)海生态系统服务损害的货币化预测评估 ·····	王 萱,陈伟琪,张璐平,等 (5914)
太阳辐射对玉米农田土壤呼吸作用的影响 ·····	孙敬松,周广胜,韩广轩 (5925)
水分胁迫下 AM 真菌对沙打旺生长和抗旱性的影响·····	郭辉娟,贺学礼 (5933)
宁夏南部旱区坡地不同粮草带比间作种植模式比较·····	路海东,贾志宽,杨宝平,等 (5941)
节节草生长对铜尾矿砂重金属形态转化和土壤酶活性的影响·····	李 影,陈明林 (5949)
自然植物群落形成过程中铜尾矿废弃地氮素组分的变化 ·····	安宗胜,詹 婧,孙庆业 (5958)
硅介导的水稻对二化螟幼虫钻蛀行为的影响 ·····	韩永强,刘 川,侯茂林 (5967)
饥饿对转基因鲤与野生鲤生长竞争和性腺发育的影响·····	刘春雷,常玉梅,梁利群,等 (5975)
专论与综述	
河流水质的景观组分阈值研究进展 ·····	刘珍环,李 猷,彭 建 (5983)
研究简报	
长期模拟增温对岷江冷杉幼苗生长与生物量分配的影响 ·····	杨 兵,王进闯,张远彬 (5994)
环境因素对长额斗蟋翅型分化的影响 ·····	曾 杨,朱道弘,赵吕权 (6001)

内蒙古温带荒漠草原能量平衡特征及其驱动因子

阳伏林^{1,3}, 周广胜^{2,1,*}

(1. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; 2. 中国气象科学研究院, 北京 100081;
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:基于内蒙古苏尼特左旗温带荒漠草原生态系统观测站 2008 年全年的涡度相关观测与相应的生物、环境观测资料,对生态系统能量平衡特征及其驱动因子分析表明:能量平衡各分量(净辐射, R_n ;感热通量, H ;潜热通量, LE ;土壤热通量, G)呈单峰型日动态,白天大部分时间 $H/R_n > G/R_n > LE/R_n$;夜间 G/R_n 占主导;全天 LE/R_n 相对较小,即使在植物生长盛期。较低的 LE/R_n 可能与荒漠草原气候干旱及植被分布稀少有关。日 R_n 受天气变化的影响,特别是在雨季, R_n 日间差异较大,呈现锯齿状波动。能量平衡各分量季节变化明显, R_n 、 H 、 LE 和 G 最大月分别为7、5、6月份和6月份。全年 H 是 R_n 的主要能量支出项(58%); LE 其次(26%),年蒸散量(190.3 mm)大于年降水量(136.3 mm),与多年平均降水量接近(183.9 mm),其中最大日蒸散率3.8 mm/d; G 所占比例较小(1%),全年基本保持平衡。然而 G 白天吸收能量,夜间释放能量;夏季储存能量,冬季释放能量的特点,在能量平衡中存在类似“能量缓存”的作用,不能被忽略。降水过程显著影响内蒙古温带荒漠草原水热交换。降水后较降水前 LE 峰值明显增大,而 H 峰值降低。日蒸散率峰值多数与降水事件有关。而且,生长季日蒸散率波动与降水引起的 SWC 变化趋势一致。生长季潜热分配(LE/R_n)主要受到土壤含水量(SWC)、饱和水汽压差(VPD)及叶面积指数(LAI)共同影响。 LE/R_n 随 SWC 增大呈增加趋势, LE/R_n 随 VPD 增大而降低, LE/R_n 随 LAI 增大呈二次曲线变化。其中 LAI 为 $0.2 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 是一个阈值,当 $LAI < 0.2 \text{ m}^2/\text{m}^2$, SWC 是 LE/R_n 主要驱动因子;当 $LAI > 0.2 \text{ m}^2/\text{m}^2$, SWC 和 LAI 共同驱动 LE/R_n 。应用退耦因子(Ω)评价了荒漠草原与大气之间水汽交换的耦合状况。与其他草原类型相比,本研究区退耦因子(Ω)相对较低(生长季平均0.15)。生长盛期 Ω 相对较高, R_n 是 LE 的主导因子;而生长前期和后期 Ω 相对较低, VPD 是 LE 的主要控制因子。

关键词:温带荒漠草原;涡度相关;能量平衡;潜热;退耦因子

Characteristics and driving factors of energy budget over a temperate desert steppe in Inner Mongolia

YANG Fulin^{1,3}, ZHOU Guangsheng^{2,1,*}

1 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The driving factors of water vapor and energy exchange over an Inner Mongolian temperate desert steppe (Sunitezuoqi Temperate Desert Steppe Ecosystem Research Station) were investigated during the year of 2008, using eddy covariance, biotic and environmental data. The results showed that diurnal variation of energy balance components (net radiation (R_n); sensible heat flux (H); latent heat flux (LE); soil heat flux (G)) followed the expected single-peak shape. During daylight hours, $H/R_n > G/R_n > LE/R_n$, and at night the ratio G/R_n dominated the energy balance. On a daily basis, LE/R_n was relatively lower than H/R_n , even during the peak growth period. This energy partitioning could be explained by the typical dry climate and low vegetation cover of the desert steppe. The values of daily R_n were affected by the weather variation, especially during the rainy season when high day-to-day variation was observed. Energy balance components showed different seasonal patterns. The maximum monthly totals of R_n , H , LE and G occurred in July, May,

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2006CB400502);国家高技术研究发展规划(2006AA10Z225);国家自然科学基金重点项目(90711001)

收稿日期:2009-10-13; 修订日期:2010-01-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gszhou@ibcas.ac.cn

June and June, respectively. On an annual scale, H was 58% and LE was 26% of Rn . Annual evapotranspiration (190.3 mm) was higher than the annual precipitation (136.3 mm), and got close to the annual average precipitation (183.9 mm). The maximum daily evapotranspiration rate was 3.8 mm d^{-1} . As expected, G was a minor component of the annual energy balance (1%). Nevertheless, G was highly relevant on different time scales, acting as an "energy buffer" in the energy balance, i. e., the soil stored energy in the daytime and in the summer and released energy at night and in the winter, respectively. Precipitation profoundly affected the water vapor and energy exchange over the steppe, mainly by changing the soil water content (SWC). After precipitation events, the midday values of LE increased considerably, while H showed the opposite. The variation of daily evapotranspiration rates followed closely the variation of SWC during the growing season (from May 1st to October 15th), showing a direct relationship with SWC . On the daily scale, LE/Rn was effected by SWC , saturation water vapor pressure deficit (VPD), and leaf area index (LAI) during the growing season. Linear increase of LE/Rn with SWC and linear decrease of LE/Rn with VPD were observed. Additionally, quadratic curve variation of LE/Rn with LAI was shown. It was also found a LAI threshold of $0.2 \text{ m}^2/\text{m}^2$. When the value of LAI was less than $0.2 \text{ m}^2/\text{m}^2$, LE/Rn was driven by SWC alone; otherwise if LAI was more than $0.2 \text{ m}^2/\text{m}^2$, LE/Rn was co-driven by SWC and LAI . Decoupling coefficient was applied to assess degree of the coupling between the desert steppe and the atmosphere. Compared with other grassland ecosystems, the decoupling coefficient of this steppe was relative low (0.15 in growing season). Nevertheless, results showed that LE was mainly controlled by Rn during the peak-growth stage, because of the relatively high decoupling coefficient values. On the other hand, VPD was the main controlling factor during the early and later growth stages, due to the relatively low decoupling coefficient values.

Key Words: temperate desert steppe; eddy covariance; energy budget; latent heat; decoupling coefficient

地表与大气之间的相互作用是影响区域和全球气候变化的重要因素之一。准确地理解不同地表类型与大气之间的能量和水分交换特征及其驱动因子,对认识区域乃至全球的水循环与气候变化有着重要的意义^[1-2]。

草原占全球陆地总面积的40%以上,是畜牧生产和人类栖息生存的基地,大部分草原处于气候变化的敏感区域^[3]。人类活动,尤其是过度放牧改变了草原地表粗糙度,植被覆盖度和土壤水分条件等,引起了区域的气候变化。气候变化进而影响地表过程。内蒙古草原面积占全国草原面积20%,草地资源丰富,其中荒漠草原881.9万 hm^2 ^[4]。近年来,由于过度放牧等不合理的草原利用方式,草场退化、沙化现象严重,生态环境恶化。研究表明,内蒙古荒漠草原地区年均气温在1961—2000年呈升高趋势,春季、冬季降水呈减少趋势^[5],而且暖干气候将持续发展^[6]。暖干化的气候变化将可能影响区域的水、热交换。评估以及如何应对气候变化对生态环境的影响,必须了解地表与大气之间能量与物质交换过程。然而,关于温带荒漠草原的植被-大气间水热交换研究较少。加强内蒙古温带荒漠草原生态系统能量平衡特征研究,有助于增强地表过程与气候变化相互作用的认识。

随着涡度相关技术的发展,以其测量精度高、理论假设少的优势,成为观测地表与大气之间水、热和碳通量交换的重要技术^[7-9]。目前,已广泛应用于北美大草原^[10-12]、欧亚大陆典型草原^[13-15]、稀树干草原^[16]、地中海地区C3/C4草原^[17]以及青藏高原高寒草甸草原^[18-19]等草原生态系统植被-大气间的能量平衡特征研究。

本研究试图采用内蒙古苏尼特左旗温带荒漠草原生态系统观测站2008年全年的涡度相关观测与相应的生物、环境观测资料,分析温带荒漠草原生态系统能量平衡特征及其驱动因子,以增进对温带荒漠草原植被-大气间水热交换机制的理解,并为研究气候变化的陆面过程模式在温带荒漠草原地区的验证提供参考。

1 研究地点与方法

1.1 研究地点概况

研究地点位于内蒙古锡林郭勒盟苏尼特左旗温带荒漠草原生态系统观测站($44^{\circ}05' \text{ N}$, $113^{\circ}34' \text{ E}$, 海拔

970 m)。该地区属温带干旱-半干旱大陆性气候,年均气温 3.2℃,月均最低气温 -18.7℃(1 月份),月均最高气温 22.1℃(7 月份);年均降水量 183.9 mm,其中 5—9 月份降水占全年降水总量的 85%。下垫面平坦均匀,土壤类型为棕钙土,土壤容重 1.63 g/cm³。优势植物种为小针茅(*Stipa klemenzii*)和多根葱(*Allium polyrrhizum*),伴生种有无芒隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、沙葱(*Allium mongolicum* Regel)、狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla* Pojark)、冰草(*Agropyron cristatum* (Linn.) Gaertn)、寸草苔(*Carex duriuscula* C. A. Mey.)等。

1.2 观测方法

本研究采用 2008 年全年的涡度相关系统观测资料和气象梯度系统观测资料。开路式涡度相关系统主要由开路式 CO₂/H₂O 分析仪(LI-7500, LI-COR Inc., USA)和三维超声风速仪(CSAT-3, Campbell Scientific Inc., USA)和数据采集器组成(CR5000, Campbell Scientific Inc., USA)。CO₂/H₂O 分析仪与三维超声风速仪观测高度为 2 m,采样频率为 10 Hz。气象梯度系统主要由 1 个风速传感器(014A, Campbell Scientific Inc., USA)(测定高度 2 m)、1 个风向风速传感器(034B, Met One Inc., USA)(测定高度 3.4 m)、1 个净辐射传感器(CNR-1, Kipp & Zonen, Netherlands)及 1 个光合有效辐射传感器(LI-190SB, LI-COR Inc., USA)(安装在 2.4m 微气象观测塔支架上)、1 个自动雨量计(52203, RM Young Inc., USA)(固定于气象观测塔西面 2 m 处)和 2 层温湿度传感器(HMP45C, Vaisala, Finland)(分别安装在 2 m 和 3.4 m 处)组成,观测量包括常规气象要素风速、风向、气温、相对湿度及辐射。同时,利用热电偶温度传感器(107L, Campbell Scientific Inc., USA)测定地下 5cm 的土层温度;利用土壤水分时域反射仪(CS616, Campbell Scientific Inc., USA)测定地下 10 cm 土壤含水量(soil water content, SWC);利用两块土壤热通量板(HFP01, Hukseflux Inc., Netherlands)测定 8 cm 深处的土壤热通量。常规气象要素和土壤环境要素采样频率均为 0.5 Hz,由数据采集器(CR23X, Campbell Scientific Inc., USA)按 30 min 的步长计算并存储平均值。

在植物生长季内(5 月 1 日—10 月 15 日)的每月中旬左右开展叶面积指数(leaf area index, LAI)观测。采用直接测定和干重系数相结合的方法测定植被 LAI^[20]。然后,将测得 LAI 资料进行日间的线性插补,得到连续日时间序列 LAI 资料^[14]。

1.3 数据处理

感热通量(H)与潜热通量(LE)可计算如下^[21]:

$$H = \rho C_p \overline{w'T'}$$

$$LE = \rho \lambda \overline{w'q'}$$

式中, ρ 为空气密度; C_p 为空气热容量; λ 为蒸发潜热; w' 、 T' 和 q' 分别表示垂直风速、气温和比湿的脉动值。

H 和 LE 是根据涡度相关系统的原始观测数据,采用半小时采样进行通量计算。首先,对 30min 的涡度相关系统的原始观测数据进行两次坐标旋转,并对 H 进行超声虚温订正,对 LE 进行 WPL 校正^[22]。在此基础上,对获取的 H 和 LE 进行降水同期 H 、 LE 剔除,并采用“差分法”(敏感性取值为 4)进行异常值剔除^[23]。通过数据校正与噪声剔除,有效数据占总数据的 75%。为了解水、热通量随时间的动态变化,需要有连续的水、热通量数据。为此,对缺失的水、热通量数据作如下插补:≤2h 的数据缺失作线性内插; >2h 的数据缺失,基于 LE 、 H 与光合有效辐射(photosynthetically active radiation, PAR)、饱和水汽压差(vapor pressure deficit, VPD)相关关系,用查表法插补^[24]。

1.4 能量闭合

为了解能量闭合状况,需要获取整个土壤层的热通量。但现有的气象梯度观测系统仅观测了 0.08 m 处的土壤热通量。土壤热通量(G)不仅指土壤热通量板测定的热通量(G_0),还包括土壤热通量板以上的土壤热储量(G_s)^[25]:

$$G = G_0 + G_s = G_0 + G_s \frac{\partial T}{\partial t}$$

式中, G_0 为热通量板测得的土壤热通量; G_s 为土壤热储量; C_s 为土壤热容量; $\partial T/\partial t$ 为一定时间间隔 (1800s) 的土壤温度变化; d 为土层厚度 (0.08 m)。

$$C_s = \rho_b C_d + \theta \rho_w C_w$$

式中, ρ_b 为土壤密度 (1630 kg/m^3); C_d 为土壤比热 ($890 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$); θ 为 SWC (m^3/m^3); ρ_w 为水的密度 (1000 kg/m^3); C_w 为水的比热 ($4190 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)。

温带荒漠草原的能量平衡可表示为^[26]:

$$R_n - G = H + LE$$

式中, R_n 为净辐射; G 为土壤热通量; H 为感热通量; LE 为潜热通量。通常称 $R_n - G$ 为可利用能量, $H + LE$ 为有效能量。

采用能量平衡比率 (energy balance ratio, EBR) 来评价能量平衡闭合程度^[26]。能量平衡比率指由涡度相关仪器直接观测的有效能量 ($H + LE$) 与可利用能量 ($R_n - G$) 的比值:

$$EBR = \frac{\sum (LE + H)}{\sum (R_n - G)}$$

对内蒙古温带荒漠草原涡度相关通量的有效数据计算得年 EBR 值为 0.866, 表明涡度相关系统观测数据的能量闭合达到 86.6%。

1.5 退耦系数

植被与大气之间的水、热交换能力可以通过植被-大气耦合程度来反映。水热交换过程中植被与大气的耦合程度可采用退耦因子 (Ω) 表示^[21,27-28]:

$$\Omega = \frac{\Delta/\gamma + 1}{\Delta/\gamma + 1 + g_a/g_c}$$

$$g_c = \frac{\gamma LE g_a}{\Delta(R_n - G) + \rho c_p g_a VPD - LE(\Delta + \gamma)}$$

$$g_a = \left(\frac{\bar{u}}{u_*^2} + 6.2 u_*^{-0.67} \right)^{-1}$$

$$\gamma = 0.665 \times 10^{-3}$$

式中, Ω 为退耦因子; g_c 为冠层表面导度 (m/s); g_a 为空气动力导度 (m/s); γ 为干湿表常数 (kPa/K); Δ 为饱和水汽压曲线斜率 (kPa/K); ρ 为空气密度 (kg/m^3); c_p 为空气热容量 ($1013 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$); \bar{u} 为 2m 高的风速 (m/s); u_* 为摩擦风速 (m/s); P 为大气压 (kPa)。计算 Ω 时, 以下几种情况的资料没有考虑: (1) 降水当天资料; (2) 低湍流 ($u_* < 0.2 \text{ m/s}$); (3) 低光合有效辐射 ($PAR < 25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)。

2 结果与分析

2.1 水、热通量交换动态

内蒙古温带荒漠草原能量平衡各分量均呈显著的日动态 (图 1)。晴好天气下的 R_n 呈单峰型日动态, 峰值出现在 12:00—12:30, 在植物生长季与非生长季无明显差异。 R_n 由负值变为正值的时间在不同生长时期不同, 生长季的 5 月份和 8 月份出现时间较早 (6:00—7:00), 非生长季的 2 月份和 11 月份稍迟 (7:30—8:30)。一日之中 R_n 由正值变为负值的时间在生长季为 17:00—18:00, 而非生长季为 16:00 左右。 LE 、 H 和 G 达到峰值时间接近, 但滞后于 R_n 。 R_n 、 LE 、 H 和 G 的半小时通量密度最大值分别为 686.5 W/m^2 (7 月 11 日, 12:30)、 425.4 W/m^2 (6 月 2 日, 13:30)、 319.0 W/m^2 (5 月 30 日, 13:30) 和 235.5 W/m^2 (6 月 30 日, 12:30), 均出现在生长季。

内蒙古温带荒漠草原的能量分配在白天和夜间存在明显差异 (图 1)。白天大部分时间表现为 $H/R_n > G/R_n > LE/R_n$, 只有在日出、日落附近几小时才出现 $LE/R_n > G/R_n$ 。夜间能量分配表现为 $G/R_n > H/R_n > LE/R_n$, G/R_n 占主导部分。夜间的 G 多为负值, 表明地表向大气提供热量, 是系统的主要热源。能量分配的

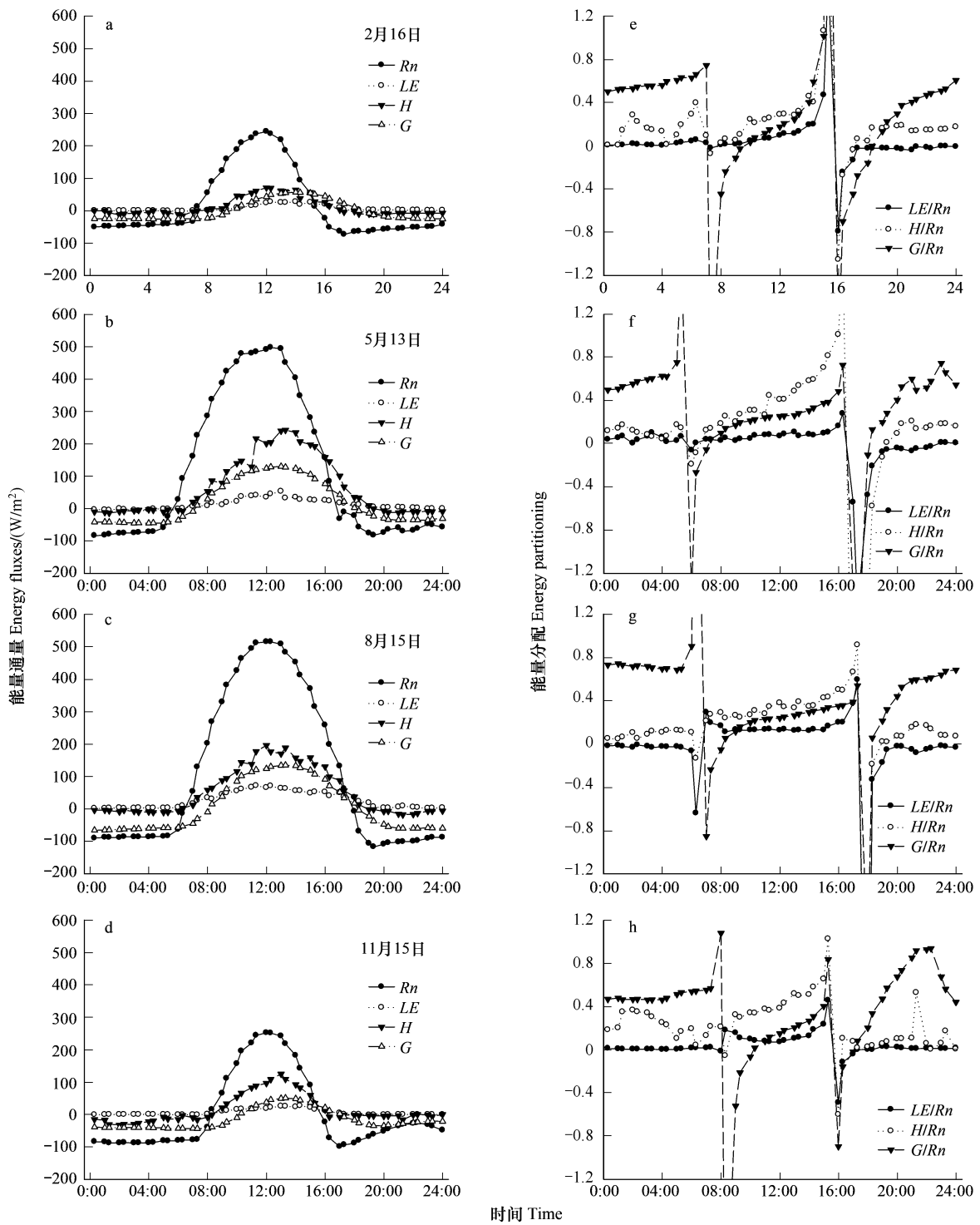


图1 内蒙古温带荒漠草原能量通量与能量分配日动态

Fig.1 Diurnal variations of energy fluxes and energy partitioning in Inner Mongolia temperate desert steppe

非生长季典型日:2月16日(图 a,e);11月15日(图 d,h);生长季典型日:5月13日(图 b,f),8月15日(图 c,g) (R_n 为净辐射; LE 为潜热通量; H 感热通量; G 土壤热通量)

日动态表明(图 1e-h), LE/R_n 夜间变化较小(值接近 0),日出、日落前后变化较大,9:00—14:30 相对平稳,正午前后略有下降,白天整体高于夜间。 H/R_n 与 G/R_n 从 9:00—15:30 呈增加趋势,夜间波动较大。

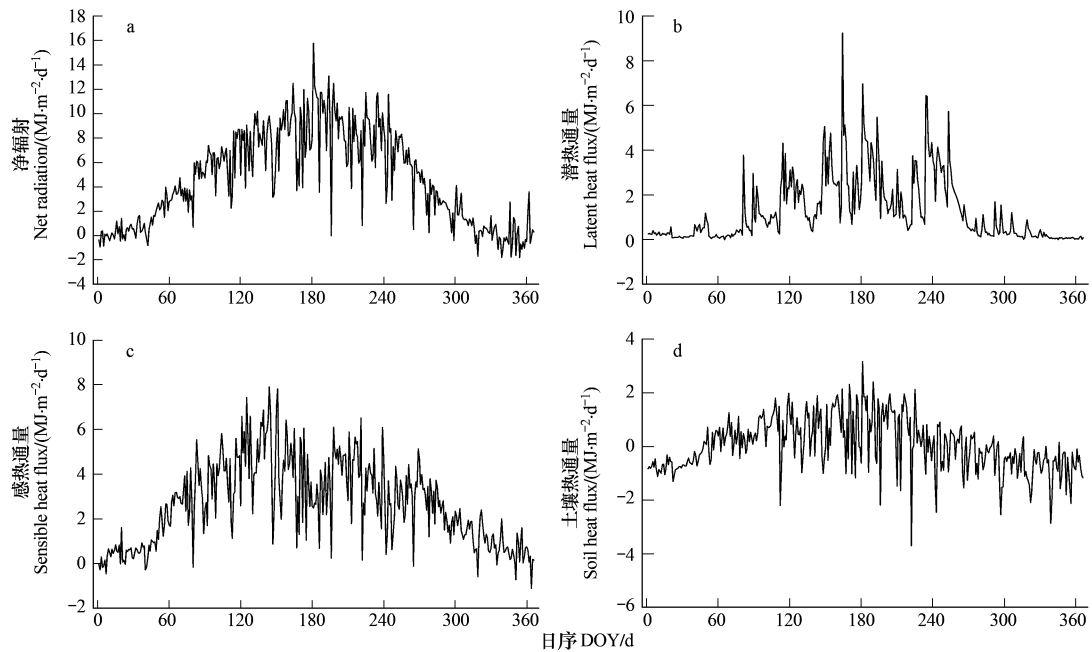


图2 内蒙古温带荒漠草原能量通量日总量的季节动态

Fig. 2 Seasonal variation of energy daily fluxes in Inner Mongolia temperate desert steppe

内蒙古荒漠草原全年的日 R_n 近似呈单峰型变化(图2),受中小尺度天气变化的影响, R_n 呈现锯齿状波动,特别是在雨季, R_n 日间差异较大。日 R_n 总量在 $-1.8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (12月19日)— $15.8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (6月29日)之间变化。其中,42d的 R_n 存在负值,主要分布在非生长季的11—2月份。 R_n 最大月为7月份(282.3 MJ/m^2),最低值在12月份,为负值(表1)。

H 在1月最小,5月份最大,而不是在 R_n 最大的7月份(表1)。 H 日最大值在5月23日($7.9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$);最小值出现在12月29日($-0.1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)。 LE 最大月6月份,最小月12月份(表1)。日 LE 最小值接近0(3月5日, $-0.009 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$);最大值为 $9.2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (6月12日),相当于 3.8 mm/d 日蒸散率。 G 日通量最大、最小值分别为 $3.2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (6月29日)、 $-3.7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (8月9日); G 值最大和最小的月份分别为6月份和12月份(表1)。 G 日通量在5—8月份的大部分时间表现为正值,但在降水和云量较多的阴天将出现负值。全年有190d的 G 表现为负值(10—2月份多达89%的天数为负值)。表1显示出各月 $H/R_n > LE/R_n > G/R_n$ (R_n 为负值的12月份除外),然而年内各分量也存在明显的变化。

2.2 潜热分配对环境因子的响应

选取生长季(5月1日—10月15日)晴天资料进行分析,以避免降水对 LE 观测结果带来的影响。图3—图5分别给出了内蒙古温带草原植被生长季日尺度的 SWC 、 LAI 和 VPD 与潜热分配(LE/R_n)的关系。为减少日间观测数据波动对整体趋势判断的影响,在分析之前分别按照 SWC 1%、 LAI $0.05 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 和 VPD 0.4 kPa 分组对 LE/R_n 进行了平均。 LE/R_n 随 SWC 增大呈增加趋势(图3), LE/R_n 随 VPD 增大而降低(图4), LE/R_n 随 LAI 增大呈二次曲线变化(图5),即当 LAI 较大时($>0.2 \text{ m}^2/\text{m}^2$), LE/R_n 随 LAI 增大而增加;当 LAI 较小时($<0.2 \text{ m}^2/\text{m}^2$), LE/R_n 随 LAI 增大呈下降趋势。显然,与 LE/R_n 随 LAI 增大而增大的一般性认识不一致,这可能与 SWC 的变化有关。进一步分析,同样按照 LAI $0.05 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 分组对 SWC 进行了平均。图5显示 SWC 与 LAI 也呈二次曲线关系,而且变化趋势与 $LE/R_n - LAI$ 变化趋势近似一致。 LAI 为 $0.2 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 时, LE/R_n 生长季最低,而此时的 SWC 也处在最低值(图5)。

表 1 内蒙古温带荒漠草原的月能量通量、分配及环境因子特征

Table 1 Characteristics of monthly energy flux, partitioning and environmental factors in Inner Mongolia temperate desert steppe

月份 Month	R_s /(MJ/m ²)	R_n /(MJ/m ²)	LE /(MJ/m ²)	H /(MJ/m ²)	G /(MJ/m ²)	LE/R_n	H/R_n
1	299.6	5.2	6.3	11.2	-24.3	1.20	2.14
2	400.5	42.9	9.4	31.8	-5.6	0.22	0.74
3	517.2	124.6	16.6	92.1	10.6	0.13	0.74
4	642.9	188.3	46.4	119.1	22.9	0.25	0.63
5	711.8	229.8	60.0	159.6	15.8	0.26	0.69
6	703.0	272.3	90.7	113.0	27.4	0.33	0.42
7	741.5	282.3	79.3	118.1	25.6	0.28	0.42
8	696.1	251.7	75.8	112.4	8.0	0.30	0.45
9	585.6	184.3	58.1	91.7	-1.3	0.32	0.50
10	433.3	78.4	13.4	71.5	-15.8	0.17	0.91
11	306.9	17.7	8.5	33.9	-21.3	0.48	1.92
12	257.1	-4.7	1.7	15.8	-27.4	-0.36	-3.33
平均值 共计 Sum	6295.5	1672.8	466.3	970.1	14.7	0.28	0.58

月份 Month	G/R_n	β	LAI /(m ² /m ²)	PPT /mm	SWC /%	VPD /kPa
1	-4.63	1.78		0	3.13	0.05
2	-0.13	3.39		0	3.25	0.13
3	0.09	5.55		2.2	3.40	0.38
4	0.12	2.56		0.8	5.30	0.89
5	0.07	2.66	0.01	12.6	4.78	1.10
6	0.10	1.25	0.06	48.3	7.57	1.34
7	0.09	1.49	0.16	23.6	7.71	1.95
8	0.03	1.48	0.29	45.0	9.74	1.51
9	-0.01	1.58	0.26	2.7	8.90	0.94
10	-0.20	5.33	0.09	1.1	4.86	0.52
11	-1.21	4.01		0	4.68	0.21
12	5.77	9.28		0	3.99	0.10
平均值 Mean 共计 Sum	0.01	2.08	0.18	136.3	5.61	0.76

R_s 为太阳总辐射; R_n 为净辐射; LE 为潜热; H 为感热; G 为土壤热通量; β 为波文比; LAI 为叶面积指数; PPT 为降水量; SWC 为土壤含水量; VPD 为饱和水汽压差

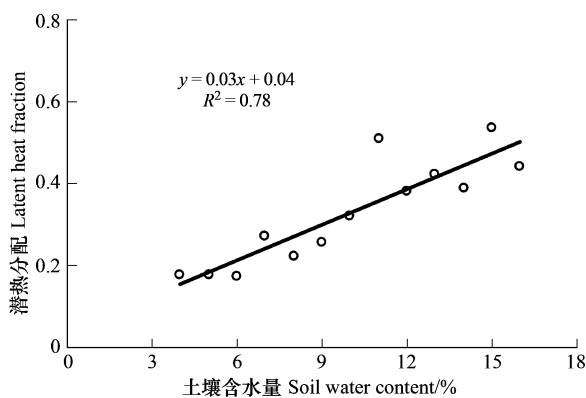


图 3 内蒙古温带荒漠草原生长季 LE/R_n 对土壤含水量的响应 (晴天)

Fig. 3 Response of LE/R_n to soil water content in Inner Mongolia temperate desert steppe during growing season (on clear days)

将 LE/R_n 按 1% 土壤含水量进行分组平均, LE/R_n 为潜热分配

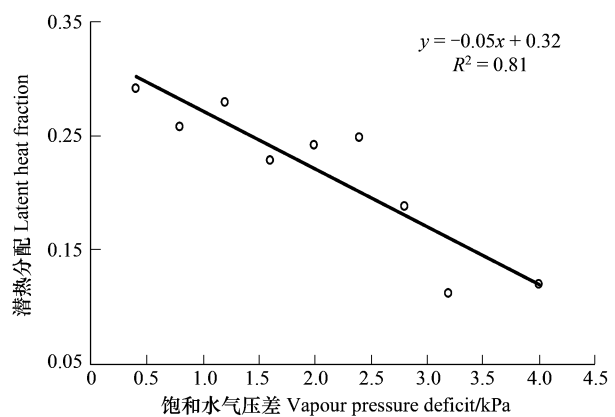


图 4 内蒙古温带荒漠草原生长季 LE/R_n 对饱和水汽压差的响应 (晴天)

Fig. 4 Response of LE/R_n to vapor pressure deficit in Inner Mongolia temperate desert steppe during growing season (on clear days)

将 LE/R_n 按 0.4 kPa 饱和水汽压差进行分组平均, LE/R_n 为潜热分配

3 讨论

3.1 内蒙古温带荒漠草原能量交换动态

LE 、 H 与 R_n 在晴天天气下呈单峰型日动态。但 LE 与 H 的动态曲线不如 R_n 平滑,可能是间歇性湍流传输引起^[29]。 LE/R_n 全天均相对较小,即使在植物生长盛期也是这样(图 1c, g),没有出现北美大草原^[12]、亚洲典型草原^[13] 在植物生长盛期 LE/R_n 高于 H/LE 的情况,这可能与荒漠草原气候干旱及植被分布稀少有关。

全年 R_n 为 1672.8 MJ/m^2 ,占太阳总辐射 27%,生长季高于非生长季。 H 是 R_n 的最大能量支出项, H/R_n 为 0.58,与典型草原接近(0.56)^[14]。全年 LE 为 466.3 MJ/m^2 ,相当于 190.3 mm 蒸散,显著高于 2008 年降水量(136.3 mm),然而与多年平均降水量接近(183.9 mm)。 LE/R_n 为 0.28,与典型草原相近(0.26)^[14],低于地中海 C3/C4 草原(0.45)^[12]。全年 G 为 14.7 MJ/m^2 ,基本保持平衡。 G/R_n 为 0.01,相对降低,与地中海 C3/C4 草原接近^[17],低于典型草原的报道(0.05)^[14]。

G 占 R_n 的比例虽然很小,然而 G 白天吸收能量,夜间释放能量;夏季储存能量,冬季释放能量的特点,对昼夜及不同季节系统能量收支起类似“能量缓存”作用,因此研究内蒙古温带荒漠草原不同时间尺度能量平衡 G 不能被忽略。

3.2 降水对水热交换的影响

天气变化,尤其是降水过程在很大程度上影响了水、热通量的交换。在 8 月 4—15 日期间存在一次明显的降水过程(16.6 mm 降水),8 月 7、9、11、12 日有降水,其中 8 月 9 日降水达 16 mm ,占 2008 年年降水量 12%。从降水前后对比来看,降水虽然没有改变昼夜 H/R_n 、 G/R_n 和 LE/R_n 的相对大小(图 6b, d),然而,降水后较降水前 LE 峰值明显增大,而 H 峰值降低(图 6a, c)。表 2 也显示,降水后 LE/R_n 增大; H/R_n 则相反; G/R_n 也明显呈降低趋势。降水使得 SWC 升高(表 2),土壤蒸发增加,导致 LE 增大, H 相应减小。这类降水天气在 6—8 月份出现较为频繁。

表 2 降水事件前后内蒙古温带荒漠草原能量通量与分配比较

Table 2 Comparison between before and after precipitation events in energy fluxes and partitioning characteristics in Inner Mongolia temperate desert steppe

阶段 Time period	日期 Day	PPT /mm	SWC /%	R_n /($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	LE /($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	H /($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
降水前 Before PPT	8 月 4—6 日	0	4.32	7.46	0.69	4.88
降水后 After PPT	8 月 13—15 日	0	11.18	9.58	2.81	3.96
阶段 Time period	日期 Day	G /($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	LE/R_n	H/R_n	G/R_n	β
降水前 Before PPT	8 月 4—6 日	1.30	0.09	0.65	0.17	7.07
降水后 After PPT	8 月 13—15 日	0.58	0.29	0.41	0.06	1.41

PPT 为降水量; R_n 为净辐射; LE 为潜热; H 感热; G 土壤热通量; SWC 为土壤含水量; β 为波文比

图 7 显示,日蒸散率峰值多数与降水事件有关。而且,生长季日蒸散率波动与 SWC 变化趋势一致。日蒸散率随着 SWC 升高而增大,随着 SWC 降低而减少。 SWC 从 16.0% (DOY 181) 减少到 6.8% (DOY 192),日蒸散率则相应地从 2.8 mm/d (DOY 181) 降低到 0.7 mm/d (DOY 192) (其中 DOY 180 有 18.9 mm 降水)。内蒙古温带荒漠草原的最大日蒸散率 3.8 mm/d ,明显高于蒙古典型草原(2.8 mm/d)^[14] 和干旱年地中海 C3/C4

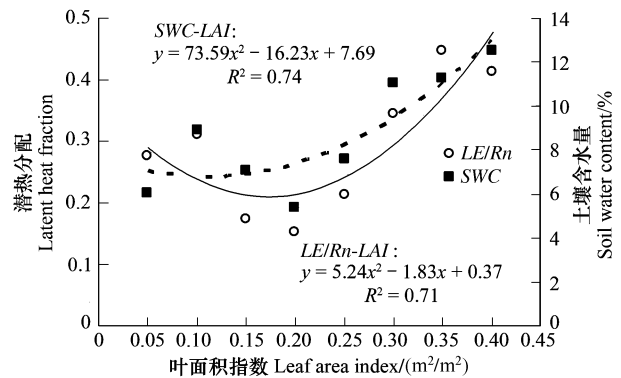


图 5 内蒙古温带荒漠草原生长季 LE/R_n 对叶面积指数的响应及土壤含水量与叶面积指数的关系(晴天)

Fig. 5 Response of LE/R_n to leaf area index in Inner Mongolia temperate desert steppe, and the relationship between soil water content and leaf area index during growing season (on clear days)

将 LE/R_n 及土壤含水量按 $0.05 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 叶面积指数进行分组平均。实线为空心圆数据点拟合曲线,虚线为实心正方形数据点拟合曲线。 LE/R_n 为潜热分配, SWC 为土壤含水量, LAI 为叶面积指数

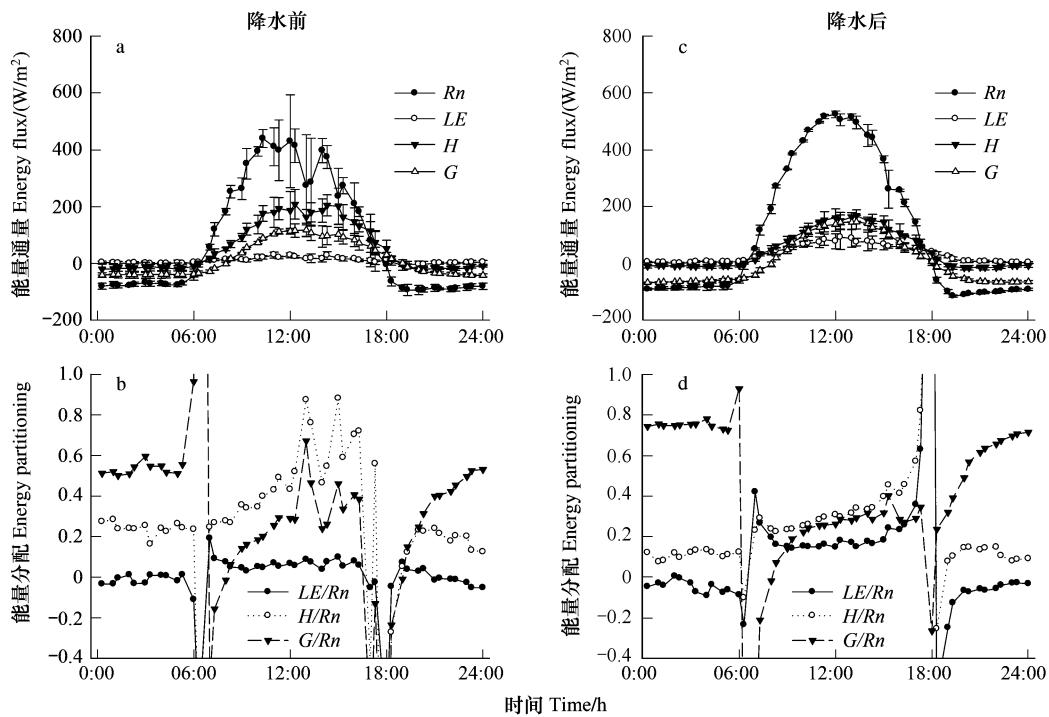


图6 降水对内蒙古温带荒漠草原能量通量(平均值 ± 标准误, 95% 置信区间)与能量分配的影响

Fig. 6 Effects of precipitation on energy fluxes (mean ± SE, 0.05 confidence) and partitioning in Inner Mongolia temperate desert steppe

Rn 为净辐射; *LE* 为潜热通量; *H* 为感热通量; *G* 为土壤热通量

草原(2.8 mm/d)^[17], 但低于正常年地中海 C3/C4 草原(4.5 mm)^[17] 以及其他草原生态系统报道(4.1—6.2 mm/d)^[30-31]。由此可见, 降水的强度以及年季分布对草原生态系统水热交换特征变化存在明显影响。

3.3 内蒙古温带荒漠草原能量交换的环境控制

潜热通量将生态系统丧失的水分与驱动蒸散作用的能量联系在一起, 是能量平衡与水循环过程的重要纽带。内蒙古温带荒漠草原生长季的 *LE/Rn* 主要受 *SWC*、*VPD* 以及 *LAI* 共同影响(图3—图5)。*LAI* 为 0.2 m^2/m^2 是一个阈值。*LAI* 较小时 ($< 0.2 m^2/m^2$), *LE/Rn* 主要驱动因子是 *SWC*, *LE* 主要来源于地表蒸发; 当 *LAI* 增大到一定程度后 ($> 0.2 m^2/m^2$), *LE/Rn* 驱动因子除 *SWC* 外, *LAI* 也是一个重要影响因子, *LE* 来源包括地表蒸发和植物蒸腾。5 月份植物萌芽生长开始, 叶片还未完全展开。降水少(仅有 12.6 mm), 加之地表积累枯落物较多, 容易干扰雨水向地表渗透^[13], *SWC* 较低, *LE/Rn* 相对较低; 6 月份植物进入快速生长期, 具有了一定的叶面积, 月降水量达到全年最高(48.3 mm), *SWC* 明显增大, *LE/Rn* 增加至 0.33, β 降到全年最低(1.25); 7 月份植物生长较快, *LAI* 还是相对较低 ($< 0.2 m^2/m^2$), *SWC* 略有增大(相对于 6 月份), 然而 *VPD* 增加幅度很大, 达到全年最大, *LE/Rn* 略有下降; 8—9 月份中旬植物进入生长盛期, *LAI* 较大 ($> 0.2 m^2/m^2$), *SWC* 较高(接近 10%), *VPD* 下降, *LE/Rn* 处于相对较高的水平。10 月份植被开始枯黄, *LAI* 降低, 加之降水锐减, *SWC* 下降明显, *LE/Rn* 显著降低, β 达到 5.33(表 2)。

McNaughton 和 Jarvis^[32] 发展了植被-大气系统耦合概念, 用退耦因子(Ω)定量描述水、热交换过程中植被

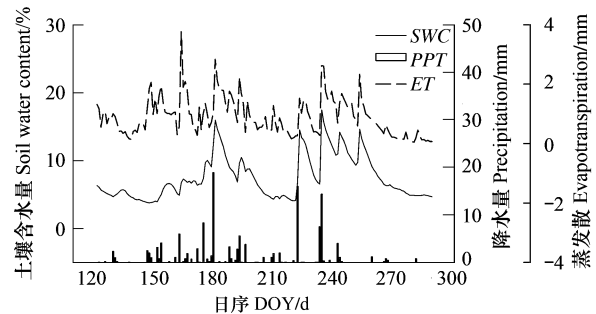


图7 降水量对土壤含水量与蒸发散的影响

Fig.7 Effect of precipitation on soil water content and evapotranspiration

SWC: 土壤含水量 Soil water content; *PPT*: 降水量 Precipitation; *ET*: 蒸发散 Evapotranspiration

与大气耦合程度,同时反映环境因子(如 R_n 、 VPD 、 g_a 、风速等)对蒸散影响过程中的相对重要性。 Ω 值在 0—1 之间变化,当 Ω 值趋近 1,表示植被与大气耦合较差, LE 主要受 R_n 主导;当 Ω 值趋近 0,表示植被与大气耦合较好, LE 主要受 VPD 控制。近年来,许多研究应用 Ω 评价了陆地表面与大气之间水汽交换的耦合状况^[12-13, 17-18]。

图 8 显示了内蒙古温带荒漠草原生长季 Ω 的日变化相对平稳,图 8b 反映出在下午 Ω 略有增加趋势。整个生长季的 Ω 平均值为 0.15,在 Valentini^[33] 报道范围内(0.1—0.8)。然而,与其他草原类型相比^[12-13, 17],本研究荒漠草原 Ω 相对较低,说明植被与大气耦合程度较高。与生长前期(图 8a)、后期(图 8c)相比,植物生长盛期(图 8b) Ω 值相对较高,表明在植物生长盛期 R_n 是 LE 的主导因子, VPD 是生长前期、后期 LE 的主要驱动因子,与 Gu 研究结果一致^[12-13, 17-18]。

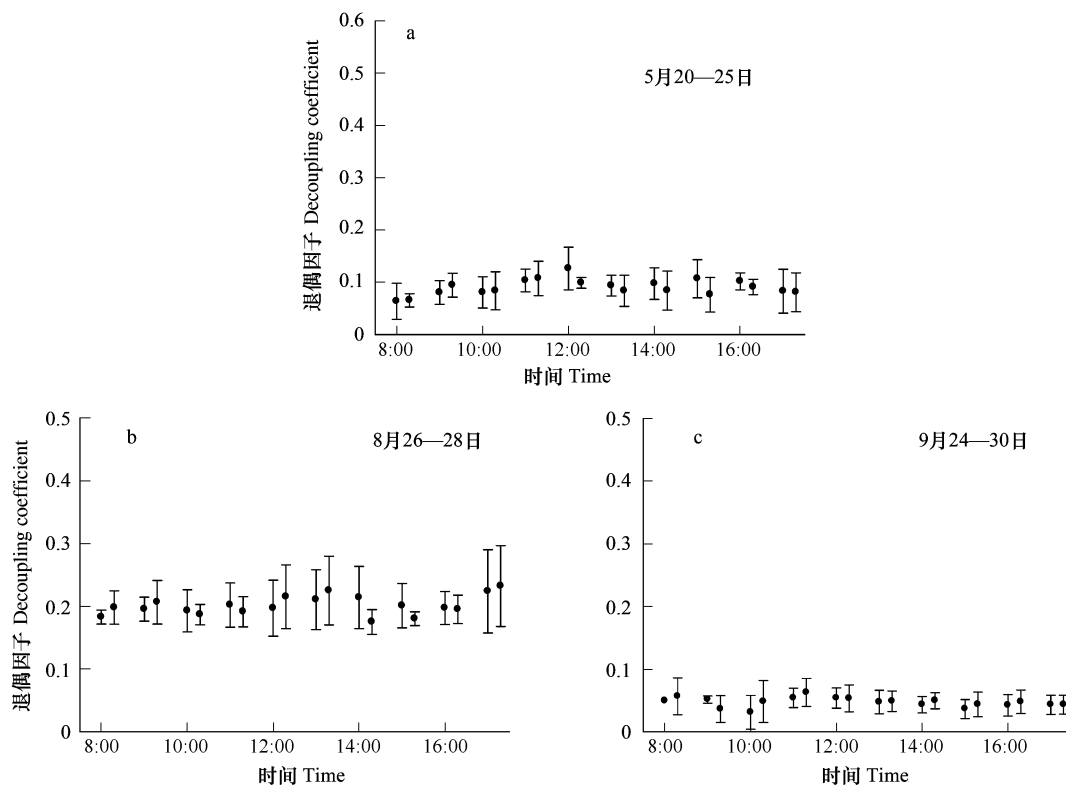


图 8 内蒙古温带荒漠草原的退耦因子典型日过程的季节变化

Fig. 8 Seasonal variation of the mean diurnal course of the decoupling coefficient from typical days

典型日包括生长前期:5月20—25日;生长盛期:8月26—28日;生长后期:9月24—30日;图中数据是各生长阶段典型日30min时间间隔的平均值±标准差(95%的置信区间)

4 结论

(1) 内蒙古苏尼特左旗温带荒漠草原能量平衡各分量具有明显单峰型日动态,昼夜能量平衡特征也存在明显差异,主要与太阳高度角有关,同时受降水过程影响。白天大部分时间 $H/R_n > G/R_n > LE/R_n$;夜间 G/R_n 占主导;全天 LE/R_n 均相对较低,可能与干旱—半干旱气候以及稀少的植被分布特征有关。能量平衡各分量季节变化明显。

(2) H 是 R_n 的主要分配组分, LE 其次,最大日蒸散率 3.8 mm/d。全年蒸散大于降水量,与多年平均降水量接近。 G 所占比例相对较低,然而它在系统能量收支过程中起到类似“能量缓存”作用,研究荒漠草原能量平衡 G 不能被忽略。

(3) 温带荒漠草原生长季 LE/R_n 主要受 SWC 、 VPD 及 LAI 共同影响。 $LAI < 0.2 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 时, LE/R_n 主要驱动因子是 SWC , LE 主要来源于地表蒸发;当 $LAI > 0.2 \text{ m}^2/\text{m}^2$, SWC 和 LAI 共同驱动 LE/R_n , LE 主要来源包括

地表蒸发和植物蒸腾。

(4) R_n 是生长盛期 LE 的主导因子,而 VPD 则是生长前、后期 LE 主要驱动因子。

References:

- [1] Dou J X, Zhang Y P, Yu G R, Zhao S J, Song Q H. Inter-annual and seasonal variations of energy and water vapour fluxes above a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, SW. China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(8): 3099-3109.
- [2] Sellers P J, Dickinson R E, Randall D A, Betts A K, Hall F G, Berry J A, Collatz G J, Denning A S, Mooney H A, Nobre C A. Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. *Science*, 1997, 275(5299): 502.
- [3] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, Ojima D S. Analysis of factors controlling soil organic-matter levels in great-plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51(5): 1173-1179.
- [4] The Department of Animal Husbandry and Veterinary and the General Station of Animal Husbandry and Veterinary of the Ministry of Agriculture, P. R. China. *Rangeland Resources of China*. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1996: 348.
- [5] Li X B, Chen Y H, Zhang Y X, Fan Y D, Zhou T, Xie F. Impact of climate change on desert steppe in northern china. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(2): 254-261.
- [6] You L, Shen J G. Climate changes in the past 50 years and future trends of 10—20 years in Inner Mongolia. *Inner Mongolia meteorology*, 2002, (4): 14-18.
- [7] Baldocchi D, Valentini R, Running S, Oechel W, Dahlgren R. Strategies for measuring and modelling carbon dioxide and water vapour fluxes over terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 1996, 2(3): 159-168.
- [8] Hu Z M, Yu G R, Wang Q F, Zhao F H. Ecosystem level water use efficiency: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, (3): 1498-1507.
- [9] Qin Z, Yu Q, Xu S H, Hu B M, Sun X M, Liu E M, Wang J S, Yu G Y, Zhu Z L. Water, heat fluxes and water use efficiency measurement and modeling above a farmland in the north china plain. *Science in China: Series D*, 2004, 34(S2): 183-192.
- [10] Burba G G, Verma S B. Prairie growth, par albedo and seasonal distribution of energy fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(3): 227-240.
- [11] Burba G G, Verma S B. Seasonal and interannual variability in evapotranspiration of native tallgrass prairie and cultivated wheat ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 135(1/4): 190-201.
- [12] 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(1): 31-49.
- [13] Hao Y, Wang Y, Huang X, Cui X, Zhou X, Wang S, Niu H, Jiang G. Seasonal and interannual variation in water vapor and energy exchange over a typical steppe in Inner Mongolia, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 146(1/2): 57-69.
- [14] 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(1/2): 89-106.
- [15] Yang J, Zhou G S, Wang Y L, Wang Y H. Estimation of sensible and latent heat fluxes of typical steppe in Inner Mongolia based on variational method. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(3): 533-538.
- [16] Baldocchi D D, Xu L, 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(1/2): 13-39.
- [17] Aires L M, Pio C A, Pereira J S, Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. The effect of drought on energy and water vapour exchange above a Mediterranean C3/C4 grassland in southern portugal crop evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(4): 565-579.
- [18] Gu S, Tang Y, Cui X, Kato T, Du M, Li Y, Zhao X. Energy exchange between the atmosphere and a meadow ecosystem on the Qinghai Tibetan plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 129(3/4): 175-185.
- [19] Yao J, Zhao L, Ding Y, Gu L, Jiao K, Qiao Y, Wang Y. The surface energy budget and evapotranspiration in the Tanggula region on the Tibetan plateau. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 52(3): 326-340.
- [20] Du Z C, Yang Z G, Cui X Y. A comparison study on leaf area index of five plant communities in typical steppe. *Grassland of China*, 2001, 23(5): 13-18.
- [21] Monteith J L, Unsworth M H. *Principles of Environmental Physics*. London: Edward Arnold, 1990: 291.
- [22] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106(447): 85-100.
- [23] Papale D, Reichstein M, Aubinet M, Canfora E, Bernhofer C, Kutsch W, Longdoz B, Rambal S, Valentini R, Vesala T. Towards a standardized processing of net ecosystem exchange measured with eddy covariance technique: Algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosciences*, 2006, 3

- (4): 571-583.
- [24] Falge E, Baldocchi D, Olson R, Anthoni P, Aubinet M, Bernhofer C, Burba G, Ceulemans R, Clement R, Dolman H. Gap filling strategies for long term energy flux data sets. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 71-77.
- [25] Oliphant A J, Grimmond C S B, Zutter H N, Schmid H P, Su H B, Scott S L, Offerle B, Randolph JC, Ehman J. Heat storage and energy balance fluxes for a temperate deciduous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 126(3/4): 185-201.
- [26] Twine T E, Kustas W P, Norman J M, Cook D R, Houser P R, Meyers T P, Prueger J H, Starks P J, Wesely M L. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 103(3): 279-300.
- [27] Jarvis P G, McNaughton K G. Stomatal control of transpiration: Scaling up from leaf to region. *Advances in Ecological Research*, 1986, 15(1): 1-49.
- [28] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998: 19.
- [29] Wu J B, Guan D X, Zhao X S, Han S J, Jin C J, Yu G R. Characteristic of the energy balance in broad-leaved Korean pine forest of northeastern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10): 2520-2526.
- [30] Kelliher F M, Leuning R, Schulze E D. Evaporation and canopy characteristics of coniferous forests and grasslands. *Oecologia*, 1993, 95(2): 153-163.
- [31] Hunt J E, Kelliher F M, McSeveny T M, Byers J N. Evaporation and carbon dioxide exchange between the atmosphere and a tussock grassland during a summer drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111(1): 65-82.
- [32] McNaughton K G, Jarvis P G. Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation//McNaughton K G, Jarvis P G ed. *Water Deficits and Plant Growth*. New York: Academic Press, 1983: 1-47.
- [33] Valentini R, Gamon J A, Field C B. Ecosystem gas-exchange in a California grassland-seasonal patterns and implications for scaling. *Ecology*, 1995, 76(6): 1940-1952.

参考文献:

- [1] 窦军霞, 张一平, 于贵瑞, 赵双菊, 宋清海. 西双版纳热带季节雨林水热通量. *生态学报*, 2007, 27(8): 3099-3109.
- [4] 中华人民共和国农业部畜牧兽医司, 全国畜牧兽医总站主编. *中国草地资源*. 北京: 中国科学技术出版社, 1996: 348.
- [5] 李晓兵, 陈云浩, 张云霞, 范一大, 周涛, 谢锋. 气候变化对中国北方荒漠草原植被的影响. *地球科学进展*, 2002, 17(2): 254-261.
- [6] 尤莉, 沈建国. 内蒙古近 50 年气候变化及未来 10—20 年趋势展望. *内蒙古气象*, 2002(4): 14-18.
- [8] 胡中民, 于贵瑞, 王秋风, 赵风华. 生态系统水分利用效率研究进展. *生态学报*, 2009(3): 1498-1507.
- [9] 秦钟, 于强, 许守华, 胡秉民, 孙晓敏, 刘恩民, 王吉顺, 于贵瑞, 朱治林. 华北平原农田水热通量与作物水分利用效率的特征与模拟. *中国科学: D 辑*, 2004, 34(增 2): 183-192.
- [15] 杨娟, 周广胜, 王云龙, 王玉辉. 内蒙古克氏针茅草原生态系统——大气通量交换特征. *应用生态学报*, 2008, 19(3): 533-538.
- [20] 杜占池, 杨宗贵, 崔骁勇. 内蒙古典型草原地区 5 类植物群落叶面积指数的比较研究. *中国草地*, 2001, 23(5): 13-18.
- [29] 吴家兵, 关德新, 赵晓松, 韩士杰, 金昌杰, 于贵瑞. 东北阔叶红松林能量平衡特征. *生态学报*, 2005, 25(10): 2520-2526.

2008 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2009 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	8956	1	生态学报	1.669
2	应用生态学报	7979	2	植物生态学报	1.656
3	植物生态学报	3742	3	应用生态学报	1.632
4	西北植物学报	3584	4	生物多样性	1.474
5	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3460	5	生态学杂志	1.276
6	植物生理学通讯	3187	6	植物学通报	1.058
7	生态学杂志	3148	7	西北植物学报	1.046
8	遗传学报	2142	8	植物生理与分子生物学 学报	1.034
9	植物生理与分子生物学学报	1855	9	遗传学报	0.887
10	昆虫学报	1580	10	遗传	0.835

★《生态学报》2008 年在核心版的 1868 种科技期刊排序中总被引频次 8956 次,全国排名第 2; 影响因子 1.669,全国排名第 14;第 1~8 届连续 8 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生态学报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 30 卷 第 21 期 (2010 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 30 No. 21 2010

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 冯宗炜
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂
发 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail:journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel:(010)62941099
www.ecologica.cn
Shengtaixuebao@rcees.ac.cn

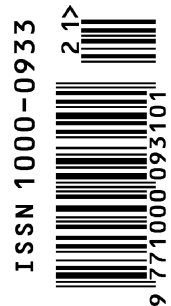
Editor-in-chief FENG Zong-Wei
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel:(010)64034563
E-mail:journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元