

极端干旱条件下苦豆子蒸散量日变化研究

高冠龙^{1,2}, 张小由¹, 朱平^{1,2}, 赵虹³

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 浙江瑞启检测技术有限公司, 杭州 310000)

摘要:基于波文比—能量平衡法的实测资料,对极端干旱条件下苦豆子地的蒸散量及能量通量进行了连续测定,并针对蒸散量与能量平衡的日变化特点进行了分析与探讨,结果表明:(1) 蒸散速率在苦豆子不同的生长阶段具有不同的变化趋势,7 月份为双峰型,其余的月份为单峰型;(2) 在晴朗无云的天气条件下,苦豆子蒸散速率的日变化表现出明显的昼夜差异,即单峰或双峰曲线趋势,夜间水汽凝结,蒸散速率为负值;(3) 在晴朗无云的天气条件下,苦豆子蒸散速率的变化趋势与净辐射、热通量的日变化都具有相同的峰型;(4) 随着太阳辐射的逐渐增强,气温和水汽压均升高,蒸散作用增强。风速增大的同时,蒸散速率也随着升高。土壤温度升高值的变化趋势与蒸散速率的变化趋势基本一致。各环境因子对蒸散速率影响程度依次为:土壤温度升高值>冠层上方水汽压>气温>风速。

关键词:极端干旱; 苦豆子; 蒸散量; 日变化

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)05-0279-05

Diurnal Variation of Evapotranspiration of *Sophora alopecuroides* L. Under Extreme Dry Condition

GAO Guanlong^{1,2}, ZHANG Xiaoyou¹, ZHU Ping^{1,2}, ZHAO Hong³

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese

Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100049, China; 3. Zhejiang Ruiqi Testing Technology Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: We made use of the data which were measured by the Bowen Ratio-equilibrium Energy Method and measured the evapotranspiration and energy flux of *Sophora alopecuroides* L., analyzed the features of diurnal variation of evapotranspiration and energy equilibrium. The results showed that: (1) at different stages of growth of *sophora alopecuroides* L. and in different seasons, the evapotranspiration rate varied widely, the diurnal variation showed a bimodal type in July, while it was a unimodal type in the rest months; (2) the diurnal variation of evapotranspiration rate of *Sophora alopecuroides* L. was obvious under the clear and cloudless term, the curve trend was bimodal or unimodal, the evapotranspiration rate in the evening was negative and the atmospheric condensation process proceeded; (3) under the clear and cloudless term, the peak types of diurnal variations of evapotranspiration rate were the same as net radiation and heat flux; (4) with the increase of solar radiation, the temperature and the vapor pressure rose, the evapotranspiration enhanced. It also enhanced when the wind speed increased. The variation trend of diurnal variation of evapotranspiration was the same as the variation of soil temperature. The influence of environmental factors on evapotranspiration rate in turn is the order: variation of soil temperature>vapor pressure above canopy>temperature>wind speed.

Keywords: extreme dry condition; *Sophora alopecuroides* L.; evapotranspiration; diurnal variation

苦豆子(*Sophora alopecuroides* L.)是豆科槐属植物,主要分布于我国西北各省区,别名香豆、苦甘草、苦豆草、欧苦参、苦豆根、西豆根、草槐(甘肃)、白

头蒿子、布亚(维语)、胡兰—宝雅(蒙语)等^[1]。苦豆子为多年生草本植物,抗风固沙作用强;耐干旱,抗风蚀且有良好的沙生特性^[2]。另外,苦豆子具有清热燥

湿、止痛、杀虫等功效,在化妆品、生物制药、动物饲料等领域用途广泛^[3]。近年来由于荒漠化日趋严重,植被大面积退化,苦豆子野生资源量急剧下降^[4]。由于苦豆子广泛分布于我国的西北干旱区,水分成为了制约苦豆子生长的重要因素。目前,国内学者关于苦豆子的研究主要集中于其药用价值和经济价值方面,除此之外,郑祥霖等^[5]研究了额济纳绿洲苦豆子种群的盖度和地上生物量的空间分布及特征,赵雪等^[6]分析了额济纳绿洲供水持续恶化和改善后苦豆子群落结构和生长状态的变化,高晓原等^[7]研究了不同灌水量条件下苦豆子的生长发育情况及其有效成分积累的影响,而关于苦豆子蒸散耗水机理的研究工作尚未开展。

波文比—能量平衡法的物理概念明确、计算方法简单,对大气层没有特别的要求和限制,且通常情况下精度较高,在国内外应用较多^[8-10]。蒸散影响着区域气候和全球水循环^[11],因此,关于蒸散量的研究一直是国内外学术界广泛关注的焦点^[12-14]。在生态学中,能量因子的研究一直是非常重要的组成部分^[15]。近地面层辐射平衡和热量平衡的分配结构表征了大气与地面之间的湍流交换强弱,是决定小气候形成的基本因素^[16-17]。长期以来,国内外学者针对能量平衡做了大量的研究,总结了不同下垫面和不同气候条件下的辐射收支、热量平衡和蒸散分配的时空变化规律^[18-24]。本文运用波文比—能量平衡观测系统,针对极端干旱条件下苦豆子蒸散量的日变化特征及其与环境因子的关系进行研究,目的在于研究苦豆子的蒸散耗水机理,这对于其保护和恢复工作以及绿洲生态需水研究有着重要意义。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

额济纳绿洲的地理位置大致为 99°03′—100°00′E, 40°30′—42°30′N,属阿拉善台地的一部分,是黑河末端的大型冲积扇,东为巴丹吉林沙漠,西为马鬃山山地,北到中蒙边界,南到黑河下游上端的鼎新绿洲,绿洲面积 $3.12 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。由西南部剥蚀低山残丘、中东部冲积平原、湖盆洼地与南部巴丹吉林沙漠等组成,海拔为 850~1 100 m,总地形向东北倾斜;属极端大陆性气候,该地区年均降水量不足 40 mm,最少降水量为 7.0 mm;蒸发量高达 2 500~4 000 mm,空气相对湿度不足 35%;年均气温 8.6℃,年均风速 4.4 m/s,全年 8 级以上大风日数平均 54 d,属极端干旱区。本次试验于 2013 年 5—9 月份在额济纳旗一道桥附近的一处天然生长的苦豆子地进行,面积约为 0.87 hm²,覆盖度在 80%以上,地下水埋深为 1.5~3.5 m,苦豆子平

均株高 35 cm。样地周围生长有天然胡杨树,树龄为 20~25 a,平均树高在 10 m 左右,平均胸径 12 cm。

1.2 观测项目

试验采用波文比—能量观测系统对苦豆子的蒸散发进行连续测定,该系统由美国 COMBELL 公司生产,观测项目包括:总辐射、净辐射、土壤热通量、土壤温度、上下端空气温湿度、水汽压、风速、风向等。自动数采仪对各观测项目每 20 min 记录 1 次。

1.3 能量平衡方程及各分量计算

Bowen 于 1926 年提出了波文比(β)这一概念,并以下垫面的水热交换为基础,假定热量交换系数和水汽的湍流交换系数相等,其能量平衡方程为:

$$R_n = \lambda E + H + G \quad (1)$$

$$\lambda E = \frac{\lambda \epsilon}{P \rho k_w} \frac{\Delta e}{\Delta z} \quad (2)$$

$$H = PC_p k_h \frac{\Delta T}{\Delta z} \quad (3)$$

式中: R_n ——净辐射; λE ——潜热通量; H ——显热通量; G ——土壤热通量; ρ ——空气密度; P ——大气压; C_p ——空气定压比热; k_w, k_h ——潜热、显热交换系数; ϵ ——水汽分子对于空气分子的重重量比; Δz ——观测高度差。

根据莫宁—奥布霍夫相似理论,假设 $K_w = K_h$,同时引入波文比 β (显热通量与潜热通量之比),并将微分化为差分得:

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} = \frac{PC_p k_h \frac{\Delta T}{\Delta z}}{\frac{\lambda \epsilon}{P \rho k_w} \frac{\Delta e}{\Delta z}} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (4)$$

式中: γ ——湿度常数系数,代入常数则公式简化为:

$$\lambda E = \frac{R_n - G}{1 + 0.0646 \frac{\Delta T}{\Delta e}} \quad (5)$$

即植物层蒸散量(E)为:

$$E = \frac{R_n - G}{\lambda \left(1 + 0.0646 \frac{\Delta T}{\Delta e} \right)} = \frac{0.00144 (R_n - G)}{1 + 0.0646 \frac{\Delta T}{\Delta e}} \quad (6)$$

式中: ΔT ——上下空气温度差; Δe ——上下饱和气压差。根据边界层扩散理论,当只考虑热量和水汽的垂直输送时,可以利用波文比方法计算出植物的蒸发量。

2 结果与分析

2.1 蒸散速率日变化分析

在每个月选择一个晴朗无云的天气,对苦豆子的蒸散速率日变化特征进行分析。结果表明:在晴朗无云的天气条件下,苦豆子的蒸散速率表现出明显的昼夜变化趋势。由图 1 可知,上午随着太阳辐射的逐渐

增强,气温逐渐升高,蒸散速率逐渐增大,12:00 左右达到峰值。随后,太阳辐射减弱,气温逐渐降低,空气中的相对湿度增加,苦豆子叶片内外水汽压差减小,蒸散速率随之降低。夜间水汽凝结,蒸散速率为负值。

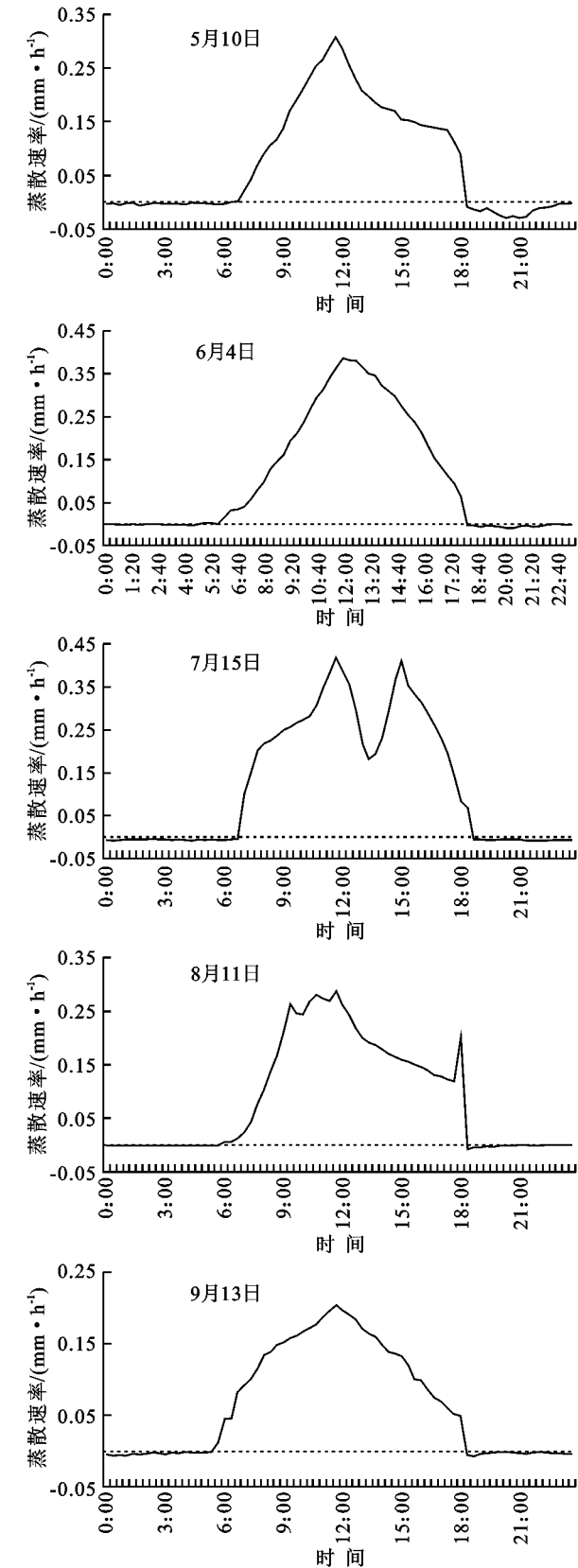


图 1 5—9 月苦豆子蒸散速率日变化特征

5 月、6 月苦豆子个体较小,蒸散速率也较小,5 月份最大值在 0.3 mm/h 左右,6 月份最大值在 0.4 mm/h 左右。7 月份苦豆子蒸散速率最大,但是正午时分蒸散速率较低,这是由于气温过高致使叶片气孔关闭,所以在正午前后出现两个峰值,蒸散速率超过 0.4 mm/h。8 月份蒸散速率有所下降,最大值在 0.3 mm/h 左右。9 月份苦豆子停止生长,蒸散速率下降,最大值在 0.2 mm/h 左右。

2.2 典型日蒸散速率与净辐射、热通量的关系

由图 2 可以看出,苦豆子蒸散速率的变化趋势与净辐射、热通量的变化趋势基本一致,日变化都具有相同的峰型。蒸散速率与净辐射强度、土壤热通量都有很好的相关性,相关系数分别为 0.937,0.835。净辐射在清晨 6:40 左右由负值转为正值并逐渐开始上升,蒸散速率也随着上升。随后土壤向下传导热量,能量由大气层流向土壤表层,土壤热通量约 2 h 后转为正值并开始上升。净辐射在 13:40 左右达到最大值,然后迅速下降,蒸散速率也随着下降。由大气层流向土壤表层的能量减少,土壤热通量约 1 h 后也迅速下降。在 20:00 以后,净辐射与蒸散速率都转为负值,随后热通量也变为负值,大气凝结过程开始。净辐射大部分用于土壤蒸发和植物蒸散,所以蒸散速率与净辐射、热通量的变化趋势基本一致。

2.3 蒸散速率日变化与环境因子的关系分析

影响蒸散速率变化的环境因子主要有:气温、土壤温度升高值、风速和冠层上方水汽压,同样选择晴朗无云的天气条件(2013 年 6 月 14 日),各环境因子对苦豆子蒸散速率日变化的影响见图 3。

由图 3 可以看出,在清晨日出前后,由于太阳辐射较弱,气温和水汽压也较低,蒸散作用很弱。随着太阳辐射的逐渐增强,气温和水汽压均升高,蒸散作用增强。在下午 16:00 左右,太阳辐射很强,气温和水汽压达到最大值,蒸散速率受水汽压、土壤含水量的影响^[28],提前达到最大值。随后太阳辐射减弱,气温和水汽压降低,蒸散速率波动下降。风速增大的同时,蒸散速率也随着升高。土壤温度升高值的变化趋势与蒸散速率的变化趋势基本一致,原因是土壤温度的升高值是净辐射和土壤热通量的直接反映。利用 SPSS 19.0 对蒸散速率与各环境因子进行相关性分析,得到各环境因子对蒸散速率影响程度依次为:土壤温度升高值($R=0.946$)>冠层上方水汽压($R=0.636$)>气温($R=0.577$)>风速($R=0.379$)。同步进行线性和曲线估计拟合,选择相关系数大者为最佳拟合模型,得到其回归方程,蒸散速率日变化与单个环境因子的关系模型见表 1。

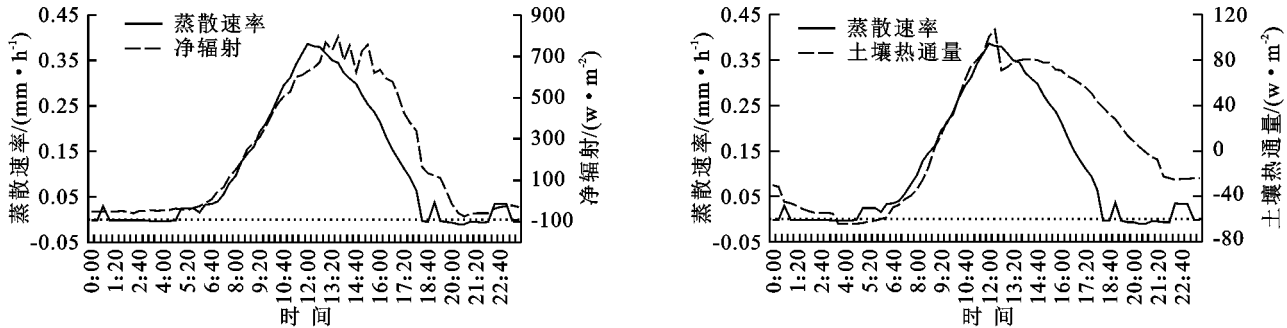


图 2 2013 年 6 月 14 日苦豆子蒸散速率与净辐射、热通量关系

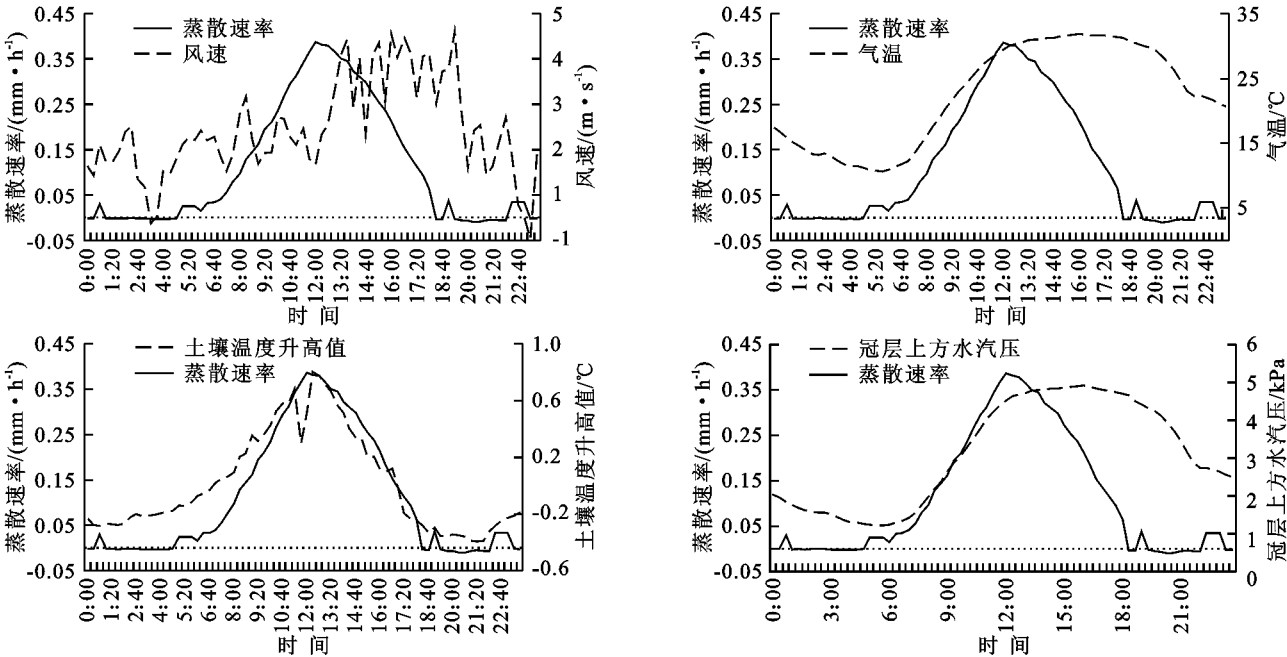


图 3 环境因子对苦豆子蒸散速率日变化的影响

表 1 蒸散速率日变化与单个环境因子的关系模型

| 环境因子 | 回归方程 |
|---------|----------------------------|
| 土壤温度升高值 | $E=0.002\Delta t^2-0.34$ |
| 冠层上方水汽压 | $E=0.355p^2+0.048p+0.1$ |
| 气温 | $E=-0.012T^2+0.012T+0.011$ |
| 风速 | $E=0.0884v^2-0.008v-0.048$ |

蒸散速率与环境因子的综合关系模型以蒸散速率为因变量,以各个环境因子为自变量,用 SPSS 统计软件进行多元线性逐步回归分析,采用自后淘汰变量法,得到其综合关系模型为:

$$E=-2.67\Delta t+24.15p+3.786T-2325v+3.569 \quad (7)$$

3 结论与讨论

额济纳绿洲位于黑河下游,属于极端干旱区,受环境条件的影响,苦豆子的蒸散量也较小,7 月份蒸散量最大,但其最大值也仅维持在 0.4 mm/h 左右。苦豆子在其生长季内经历了萌发、开花、结果、枯萎等

阶段,蒸散速率在苦豆子不同的生长阶段具有不同的变化趋势,大致趋势为低—高一低,这与于文颖等^[29]对盘锦芦苇湿地蒸散发特征的研究结果一致。7 月份由于气温过高致使叶片气孔关闭,所以在正午前后出现两个峰值,其余的月份为单峰型。苦豆子的蒸散速率的日变化表现出明显的昼夜差异,即单峰或双峰曲线趋势。夜间水汽凝结,蒸散速率为负值。

在晴朗无云的天气条件下,苦豆子蒸散速率的变化趋势与净辐射、热通量的变化趋势基本一致,日变化都具有相同的峰型。这一结论与司建华^[8]、张小由^[17]等对额济纳绿洲怪柳种群蒸散量日变化的研究结果一致。

随着太阳辐射的逐渐增强,气温和水汽压均升高,蒸散作用增强。风速增大的同时,蒸散速率也随着升高。土壤温度升高值的变化趋势与蒸散速率的变化趋势基本一致,原因是土壤温度的升高值是净辐射和土壤热通量的直接反映。各环境因子对蒸散速率影响程度依次为:土壤温度升高值>冠层上方水汽压>气温>风速。

参考文献:

- [1] 李艳艳,冯俊涛,张兴,等. 苦豆子化学成分及其生物活性研究进展[J]. 西北农业学报,2005,14(2):133-136.
- [2] 杨家新,喻志芳. 苦豆子的研究进展[J]. 天津药学,1998,10(1):43-46.
- [3] 陈晓丽,吴艳,郑雷,等. 苦豆子不同生育时期矿质元素分析[J]. 光谱学与光谱分析,2012,32(10):2831-2833.
- [4] 李爱华,孙兆军. 苦豆子资源开发现状及前景初探[J]. 宁夏大学学报,2001,25(4):354-356.
- [5] 郑祥霖,赵传燕,彭守璋. 黑河下游绿洲苦豆子种群的空间分布及特征[J]. 兰州大学学报:自然科学版,2010,46(S1):20-24.
- [6] 赵雪,明永飞. 黑河分水后额济纳绿洲柽柳(*Tamarix spp.*)和苦豆子(*Sophora alopecuroides*)群落的恢复[J]. 中国沙漠,2013,33(6):1684-1691.
- [7] 高晓原,贝盏临,刘方超,等. 水分对苦豆子的生长及其有效成分积累的影响[J]. 兰州大学学报:自然科学版,2008,46(S1):119-121.
- [8] 司建华,冯起,张小由,等. 极端干旱条件下柽柳种群蒸散量的日变化研究[J]. 中国沙漠,2005,25(3):380-385.
- [9] 马铃,赵平,饶兴权,等. 乔木蒸腾作用的主要测定方法[J]. 生态学杂志,2005,24(1):88-96.
- [10] Grace J, Lloyd J, McIntyre J, et al. Fluxes of carbon dioxide and water vapour over an undisturbed tropical forest in south-west Amazonia[J]. Global Change Biology,1995,1(1):1-12.
- [11] Garratt J R. Sensitivity of climate simulations to land-surface and atmospheric boundary-layer treatments: A review[J]. Journal of Climate,1993,6(3):419-448.
- [12] 周国逸,潘维涛. 森林生态系统蒸发散计算方法的研究[J]. 中南林学院学报,1988,8(1):22-27.
- [13] 魏天兴,朱金兆. 林分蒸散耗水量测定方法述评[J]. 北京林业大学学报,1999,21(3):85-91.
- [14] Pereira L S, Perrier A, Allen R G, et al. Evapotranspiration: Concepts and future trends[J]. American Society of Civil Engineers,1999,125(2):45-51.
- [15] 蔡锡安,任海,彭少麟,等. 鹤山亚热带草坡生态系统的能量平衡[J]. 热带亚热带植物学报,1997,5(1):27-32.
- [16] 张小由,康尔泗,司建华,等. 额济纳绿洲柽柳灌丛辐射特征与能量平衡研究[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(4):142-145.
- [17] 张小由,龚家栋,周茂先,等. 柽柳灌丛热量收支特性与蒸散研究[J]. 高原气象,2004,23(2):228-232.
- [18] 吴锦奎,丁永建,魏智,等. 干旱区天然低湿牧草地参考作物蒸散量研究:以黑河中游为例[J]. 干旱区研究,2005,22(4):514-519.
- [19] 李新,周宏飞. 干旱区农田蒸散量的日间变化分析[J]. 干旱区资源与环境,2000,14(3):82-88.
- [20] 马伟强,马耀明. 西北干旱区地表能量初步分析[J]. 干旱区研究,2006,23(1):76-82.
- [21] 张强,卫国安,黄荣辉,等. 西北干旱区荒漠戈壁动量和感热总体输送系数[J]. 中国科学:D辑,2001,31(9):783-792.
- [22] 王旭,尹光彩,周国逸,等. 鼎湖山针阔混交林旱季能量平衡研究[J]. 热带亚热带植物学报,2005,13(3):205-210.
- [23] 张强,胡隐樵,王喜红. 黑河地区绿洲内农田微气象特征[J]. 高原气象,1992,11(4):361-370.
- [24] 张强,王胜. 夏季绿洲生态环境对荒漠背景地表能量过程的扰动[J]. 生态学报,2005,25(10):2459-2466.
- [25] 马伟强,马耀明,胡泽勇,等. 藏北高原地区辐射收支和季节变化与卫星遥感的对比分析[J]. 干旱区资源与环境,2005,19(1):109-115.
- [26] 杨兴国,张强,王润元,等. 陇中黄土高原夏季地表能量平衡观测研究[J]. 高原气象,2004,23(6):828-834.
- [27] 关德新,吴家兵,王安志,等. 长白山阔叶红松林生长季热量平衡变化特征[J]. 应用生态学报,2004,15(10):1828-1832.
- [28] 张小由. 额济纳绿洲生态耗水与水量平衡研究[D]. 兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,2006.
- [29] 于文颖,迟道才,何奇瑾,等. 盘锦芦苇湿地蒸发散特征研究[J]. 沈阳农业大学学报,2007,37(5):758-762.