

# 半干旱区退化草地地表能量收支

涂钢<sup>1,3,5</sup> 刘辉志<sup>2</sup> 董文杰<sup>4</sup> 石利庆<sup>2</sup>

1 中国科学院大气物理所东亚区域气候—环境重点实验室, 全球变化东亚区域研究中心, 北京 100029

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

3 吉林省气象科学研究所, 长春 130062

4 国家气候中心, 北京 100081

5 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 利用吉林通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测试验站2002年10月~2003年12月在退化草地下垫面获得的近地层湍流通量及能量的连续观测资料(样本间隔30 min), 分析了半干旱地区退化草地下垫面近地层能量的日变化、季节变化特征; 同时还讨论了干湿季转换期及不同季节近地层能量收支特征, 以及天气状况对近地面层能量收支的影响。

**关键词** 退化草地 近地层能量 日变化 季变化

**文章编号** 1006-9585 (2006) 06-0723-10 **中图分类号** P404 **文献标识码** A

## The Near Surface Layer Energy Budget on Degraded-grassland in Semi-arid Area at Tongyu in Jilin Province

TU Gang<sup>1,3,5</sup>, LIU Hui-Zhi<sup>2</sup>, DONG Wen-Jie<sup>4</sup>, and SHI Li-Qing<sup>2</sup>

1 *Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences; START Regional Center for Temperate East Asia, Beijing 100029*

2 *State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

3 *Institute of Meteorological Science of Jilin Province, Changchun 130062*

4 *National Climate Center, Beijing 100081*

5 *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

**Abstract** By using the observation data collected at long-term field experiment station on aridification and ordered human activity during the period of October 2002–December 2003, the diurnal and seasonal variations of surface energy flux on degraded-grassland over semi-arid area have been analyzed. And the near surface energy budget also has been discussed during different seasons and the transition period between dry and wet season, and also including the impact of weather.

**Key words** degraded-grassland, near surface layer energy budget, diurnal and seasonal variation

## 1 引言

大气运动的主要能源之一是

与下垫面的能量交换, 即下垫面通过感热和潜热的湍流输送以及向上的长波辐射, 将吸收的太阳辐射能传输给大气, 地气间的物质和能量通量交换强烈地影响大

**收稿日期** 2005-06-01 收到, 2006-07-05 收到修定稿

**资助项目** 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB400501

**作者简介** 涂钢, 女, 1968 年出生, 博士研究生, 副研究员, 主要从事陆气相互作用研究。E-mail: tugang@tea.ac.cn

气边界层结构,进而影响局地天气过程和大气环流。因此了解陆气间物质和能量通量交换过程的日、季变化特征,是检验和改进陆面过程参数化方案,发展更接近于真实的陆面过程的基础。

20世纪90年代以来,北方干旱化已成为我国面临的重大生存环境问题之一<sup>[1]</sup>。有关研究<sup>[2~4]</sup>显示90年代中期以来,整个东北地区干旱化趋势明显,尤其东北西部半干旱地区的干旱化相对更严重。符淙斌等<sup>[5]</sup>在对东北西部(主要是吉林西部)和内蒙古东部进行调研、考察和分析的基础上,认为北方干旱化的形势依然严峻,生态环境仍在继续恶化。如何改善其生态环境,保障其可持续性发展,是当前我们面临的亟待解决的主要课题。另外位于气候和生态系统过渡带的半干旱区具有敏感性和可恢复性的双重特征,是干旱化研究的重点地区之一。为此,国家基础研究发展规划项目“我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究”,在半干旱的吉林省通榆县建立了吉林通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测试验站,开展人类活动、地气交换及生态过程的长期定位观测<sup>[6]</sup>。本观测改变以往的陆面试验(HEIFE、GAME-Tibet和TIPEX等)<sup>[7]</sup>仅在夏季进行加强期观测,采取地气间物质和能量交换过程的全年不间断的连续观测;同时通榆观测站已纳入国际协同强化观测计划CEOP的观测网<sup>[8]</sup>,是CEOP计划亚澳季风比较研究(CAMP)的一个地面观测基准站(www.ceop.net)。

本文利用本实验站2002年10月~2003年12月期间的观测资料(样本间隔30 min),分析了东北半干旱区退化草地近地层能量收支的日、季节变化特征。

## 2 试验场地及观测仪器

通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测试验站位于吉林省白城市通榆县新华乡境内,实验站地理位置为(44°25'N,122°52'E)。通榆县地处白城至双辽沙丘覆盖的冲积平原区,平均海拔184 m,地形非常平坦,无长年流水的河流,唯有霍林河、额门太河的支流等3条季节性无尾河,除丰水年外,基本处于无水状态。由通榆县气象站资料统计,年平均气压996.8 hPa,气温5.2℃,

湿度57%,年降水量404.3 mm,年平均盛行风SSW,年平均风速为4.2 m·s<sup>-1</sup>。平均而言,当地每年6~9月的降水总量占年总量的82%,因此称这段时间为一年中的湿季,其他时段称为干季。

退化草地下垫面土壤主要有盐碱土、草甸土和淡黑钙土。退化草地上的草在夏季一般在10 cm以下,冬春季在5 cm以下,覆盖度只有60%~70%;属严重退化的草地。具体观测仪器及设置参见文献[9]。辐射测量分向上、向下的长、短波测量,辐射仪器安装于距地面1.5 m高度处。湍流观测仪器由超声风速/温度仪(CSAT3)、水汽和CO<sub>2</sub>脉动仪(LI-COR,CS7500)组成,测量动量、热量、水汽及CO<sub>2</sub>通量。湍流仪器安装于2.0 m高度上,采样频率为10 Hz。平均场、湍流场及辐射资料每个样本取样时间长度为30 min。

除仪器出现故障,仪器检修,或因天气、供电等原因出现的缺测外,观测几乎一直连续进行,目前已经连续运行两年多,总有效资料长度达到全年的75%以上。

## 3 结果分析

### 3.1 典型天气条件下近地面层能量日变化特征

图1、图2给出不同季节典型天气下的近地面层辐射和能量收支的日变化(时间间隔30 min)。不失一般性,选择2003年4月6~10日、2003年8月4~8日、2003年10月6~10日、2002年12月15~19日4个时段,每段均包括晴天、多云(阴)、雨天,分别代表春、夏、秋、冬四季的典型天气下的辐射和能量收支的日变化。另外,图2中通量值的正负表示能量的传播方向,具体地说,净辐射、地热流通量为正表示向下传播,而潜热通量、感热通量为正表示向上传播,反之亦然。本文所用地热流通量板是放置在地表以下5 cm处,对于0~5 cm的土壤储能未做订正。

大体来看,每个季节各个量日变化周期十分清楚(除大气逆辐射外),但晴天、多云、阴天、雨天的日变化在幅度、形态上有一定差异,而且每个量的日变化振幅、日最大值等的季节差异也很明显。

图1可以看到,晴天的各辐射分量变化曲线十分光滑,显示出非常标准的日变化曲线,而多

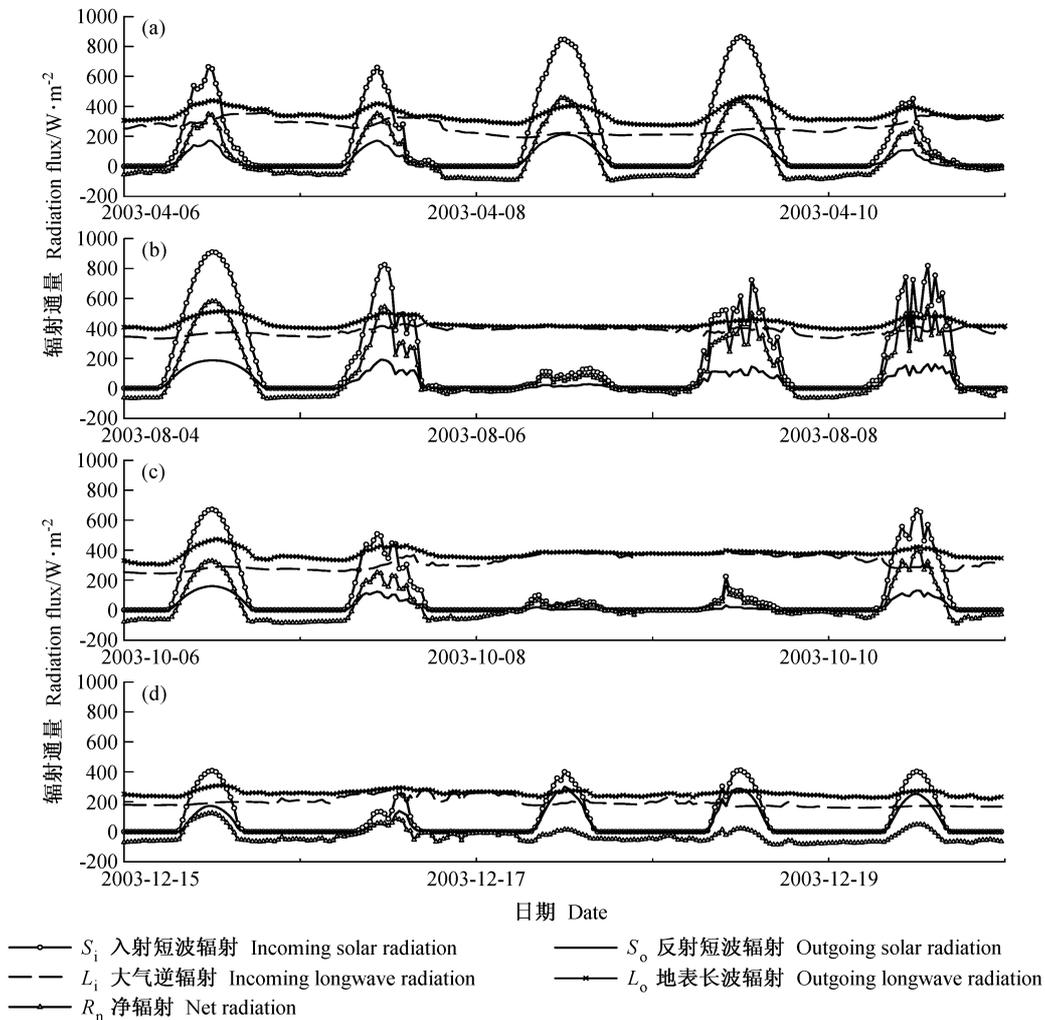


图 1 不同季节典型天气下近地面辐射收支的日变化 (间隔 30 min): (a) 2003 年 4 月 6~10 日; (b) 2003 年 8 月 4~8 日; (c) 2003 年 10 月 6~10 日; (d) 2003 年 12 月 15~19 日

Fig. 1 Diurnal variation of the surface radiation budget under typical weather conditions in different seasons (30 min interval): (a) 6-10 Apr 2003; (b) 4-8 Aug 2003; (c) 6-10 Oct 2003; (d) 15-19 Dec 2003

云和阴天曲线波动较大,且阴天和雨天的各个量日振幅降低相对比较,尤其雨天几乎看不到标准的日变化曲线。

向下短波辐射即是太阳辐射,它是地表的能量来源,入射短波辐射随天气变化(尤其是云)波动较为明显,如:从晴天(8月4日)中午 895  $W \cdot m^{-2}$  降到阴天(8月7日)中午 503.6  $W \cdot m^{-2}$ ,以至于雨天(8月6日)中午 83.5  $W \cdot m^{-2}$ (为便于比较中午取 11:00~13:00 间平均值(北京时间,下同));入射短波辐射的变化十分清楚地再现了逐日白天的天气变化,如:8月5日上午晴→午后多云→傍晚雨→6日雨→7日阴到多云。晴天入射短波辐射日最大值的季节变

化是春季 864  $W \cdot m^{-2}$ ,夏季 909  $W \cdot m^{-2}$ ,秋季 672.4  $W \cdot m^{-2}$ ,冬季 402.2  $W \cdot m^{-2}$ 。

反射短波辐射的日变化趋势在各个季节内、各种天气下与入射短波辐射非常一致,原因在于反射短波辐射只随入射短波辐射和反照率的变化而变化,在地表改变不大的一段时间内,即反照率变化不大,反射短波辐射与入射短波辐射保持一致的变化。4个时段的反照率分别为 0.26、0.22、0.24、0.30,可以看到反照率的季节变化特征,这与地表的变化关系密切,冬季草已枯萎,春季草还未返青从而反照率高;到了夏季和秋季,相对来说覆盖率要高,草生长旺盛呈现绿色,地表也湿润些,此时反照率低。与黑河地区张掖

(麦地)和沙漠<sup>[10]</sup>测量结果相比:张掖4、8、10、12月分别为0.162、0.133、0.175、0.277;同期沙漠为0.269、0.257、0.298、0.369,本站下垫面为退化草地,植被覆盖率低,观测结果介于麦地和沙漠之间,比较合理,且3种下垫面均表现为冬季反照率最大,夏季最小,即植被覆盖率低反照率高。

大气逆辐射的日变化很弱,全天几乎维持在同一水平上,雨天稍有增加,而且随季节有一定变化,平均值春、夏、秋、冬四季分别为264.2、381.3、319.8、192.4  $W \cdot m^{-2}$ 。

地表长波辐射决定于地面温度的变化,日变化幅度相对较小,日振幅晴天最大,多云次之,阴天最小,雨天几乎为0;日振幅春季最大为190  $W \cdot m^{-2}$ ,冬季最小为85  $W \cdot m^{-2}$ ,说明春季的地面温度日较差大,冬季小;平均而言地表长波辐射春、夏、秋、冬四季分别不低于270、390、300、210  $W \cdot m^{-2}$ 。

净辐射是辐射平衡的结果,是衡量地球表面通过辐射最终获得的能量大小。日变化中,白天净辐射与入射短波辐射变化非常同步,即向下短波辐射起主导作用,而夜间地表的长波辐射成为主导。春、夏、秋、冬晴天日最大值分别为435.3、581.5、329.2、177.0  $W \cdot m^{-2}$ 。比较HEIFE试验结果<sup>[11]</sup>,夏季(8月30日)戈壁和沙漠两站的净辐射,其极大值约为430  $W \cdot m^{-2}$ ;IMGRASS<sup>[12]</sup>在内蒙草原(8月17日)净辐射约为600  $W \cdot m^{-2}$ 。HEIFE试验区位于39°N附近,IMGRASS位于44°N附近,与本实验站同属中纬度,净辐射存在的差异说明这3种下垫面的反照率相比沙漠和戈壁要大,相对于内蒙草原,本实验站退化草地的反照率要大,这与前面分析的反照率结果一致。

图2给出了不同季节典型天气下近地层能量平衡,各通量日变化同样十分清楚。潜热通量和感热通量日变化在趋势上与净辐射相似,但由于它们的变化还受着平流、下垫面等复杂因素的影响,它们的变化即使晴天也不如净辐射那样光滑。

地热流通量只在夏季有较弱的日变化,到达日最大值时间滞后于净辐射,夏季晴天日振幅不超过120  $W \cdot m^{-2}$ ;其他季节几乎看不到日变化,值接近或等于0。

潜热通量日变化夏季最强,春、夏、秋、冬季晴天日最大值分别为48.0、304.3、61.3、8.7  $W \cdot m^{-2}$ ;感热通量日变化春季最强,同样四季晴天日最大值分别为219.0、111.5、162.3、75.3  $W \cdot m^{-2}$ 。可见潜热通量、感热通量日变化的季节性很明显。

春、夏、秋、冬四季典型晴天正午(10:00~14:00)潜热通量占净辐射比例分别为12%、46%、17%、6%;感热通量占净辐射比例分别为46%、19%、55%、48%。可以看到除夏季外感热在能量平衡中的比例均高于潜热,另外夏季与极端干旱区(沙漠或戈壁)的地表平衡中以感热为主有很大的不同,敦煌的观测结果<sup>[13]</sup>:夏季晴天日总量潜热、感热、地热流通量占净辐射2%、84%、11%。

此外,观测到的感热、潜热和地热流通量很难与净辐射平衡,存在明显的余差,晴天下能量平衡余差:春、夏季不超过9%,秋季21%,到了冬季大于50%。这一现象在GAME-Tibet/TIPEX试验<sup>[1]</sup>、内蒙古草原和流动沙丘<sup>[14]</sup>、国外的森林及农田下垫面等<sup>[15~17]</sup>许多近地层观测中也存在,具体原因有待进一步试验和研究。

### 3.2 近地面层通量月平均的日变化

利用连续观测资料计算了2003年逐月近地层能量收支的月平均的日变化。图3只给出了2003年3、8、10、12月4个月的结果。为了便于比较逐月通量幅度变化,纵坐标轴的标尺均为-100~500  $W \cdot m^{-2}$ ,另外要说明的是在统计某一时刻的月平均值时,某一时刻的值不超过24天不作统计。

大体上来看,净辐射、潜热通量、感热通量全年均有相似的标准日变化过程,幅度随季节而不同;地热流通量只有在5~8月才有微弱的日变化,而其他各月几乎看不到明显的日变化。净辐射、潜热、地热流均在8月有最大的日变化,但感热在5月。一年中各个通量夜间值变化不大,基本上各自维持在同一水平上。白天各月比较净辐射最大值出现在8月,为474.1  $W \cdot m^{-2}$ ;感热通量在5月,为171.3  $W \cdot m^{-2}$ ;潜热通量在8月,为216.3  $W \cdot m^{-2}$ ;最小值净辐射出现在12月为110.5  $W \cdot m^{-2}$ ,潜热通量在2月为21.5  $W \cdot m^{-2}$ ,感热通量在12月为59.1  $W \cdot m^{-2}$ ,即

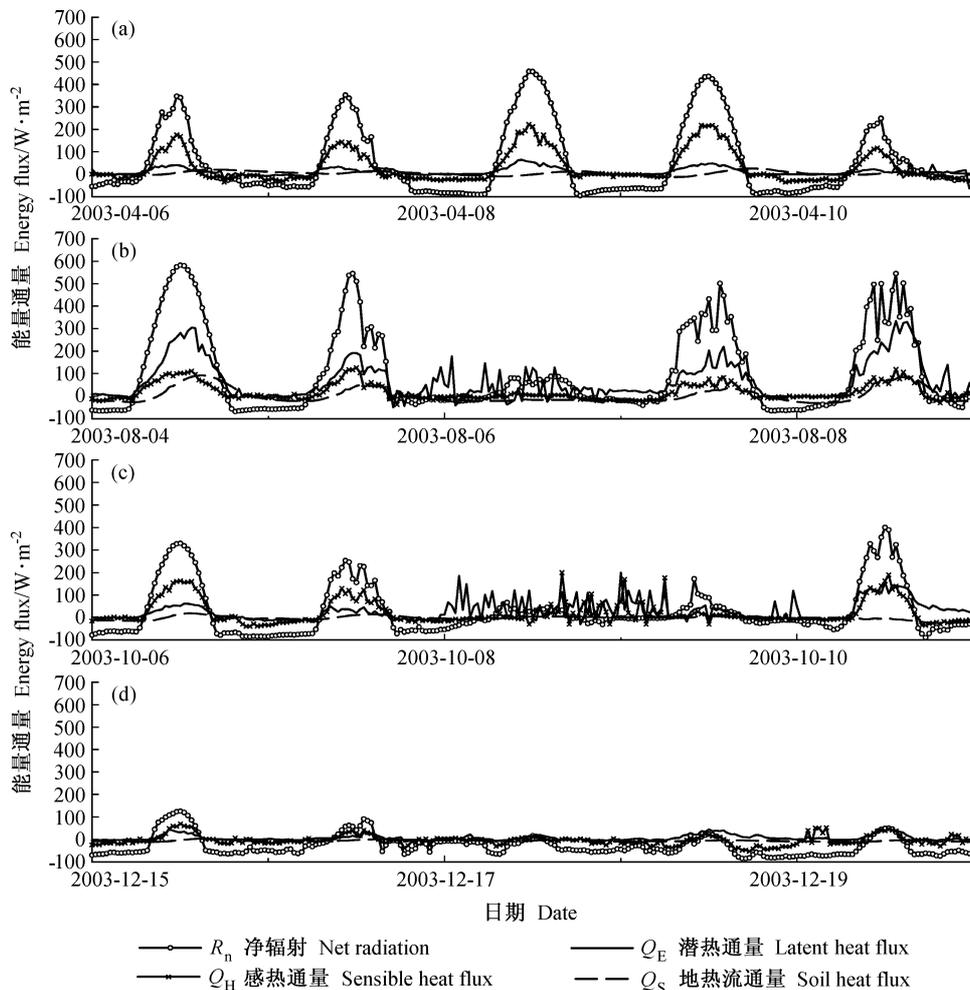


图 2 不同季节典型天气下近地层能量收支的日变化 (间隔 30 min): (a) 2003 年 4 月 6~10 日; (b) 2003 年 8 月 4~8 日; (c) 2003 年 10 月 6~10 日; (d) 2003 年 12 月 15~19 日

Fig. 2 Diurnal variation of the surface energy budget under typical weather conditions in different seasons (30 min interval): (a) 6-10 Apr 2003; (b) 4-8 Aug 2003; (c) 6-10 Oct 2003; (d) 15-19 Dec 2003

净辐射、潜热通量夏季最大，冬季小；感热通量春季大，冬季小。

在日变化中，净辐射达到最大值时间全年平均在 12:00 左右，感热、潜热的最大值出现时间相对于净辐射提前或滞后一般不超过 30 min，地热通量夏季最大值出现在 14:00。

近地层能量收支日变化中，白天，地表吸收来的净辐射除了以感热、潜热的形式传播到大气中，还有一部分能量向下传导到土壤中去，即为地热通量（也叫土壤热通量）。具体来说白天净辐射方向向下，表明向下的辐射大于离开地面向上的辐射，向下短波辐射起主导作用；潜热和感热方向向上，表明热量和水汽都是由地面向上输

送的；此时地热通量也为正值，即向下传导的热量从暖地面进入地下。夜晚，净辐射为负即是地表的长波辐射成为主导；感热方向向下表明空气的热通量向下输送；而在 5~10 月夜晚潜热方向仍向上，表明此段时间有很小的蒸发潜热，在其他月份（冬春季）潜热为向下的热通量，这可能与冬季地面的会出现霜冻有关；地热通量方向向上表明热量从土壤层向地表传输。

从图 3 还能明显的看到干湿季日变化的不同，干季能量平衡以感热为主，湿季以潜热为主，6 和 9 月的日变化中潜热和感热相当，可能是当地的干湿季转换期。2003 年观测资料分析表明，在 6 月 5~11 日从干季进入湿季，另一个转换期是 9 月

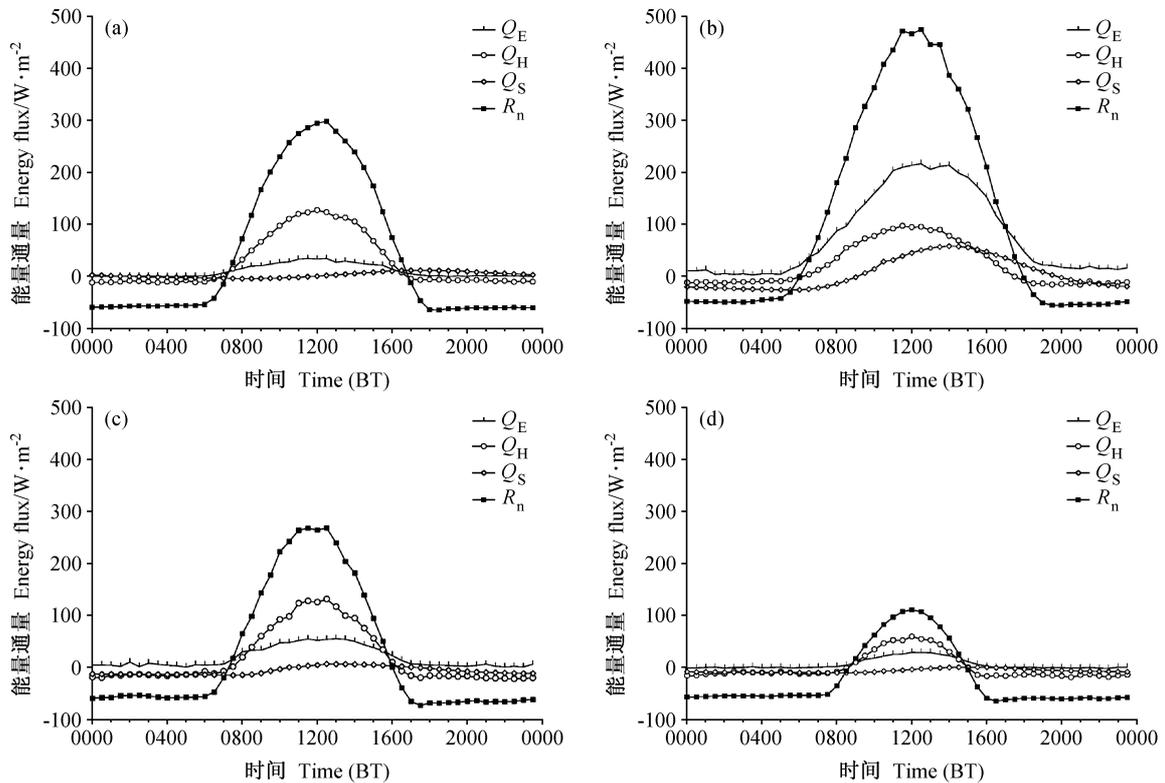


图3 近地层地表能量收支月平均的日变化: (a) 2003年3月; (b) 2003年8月; (c) 2003年10月; (d) 2003年12月

Fig. 3 The monthly-averaged diurnal variation of the surface energy budget: (a) Mar 2003; (b) Aug 2003; (c) Oct 2003; (d) Dec 2003

13~17日由湿季转成干季,完成一次年循环。当然这个转换期是会随着每年的气候不同有所变化,年际变化规律需要更长时间的连续观测。

日变化中净辐射的分配比例也存在季节变化,2002年11月~2003年12月各月白天潜热占净辐射的比例和感热占净辐射的比例如图4。由图4a可见,潜热所占比例呈U形变化,早晨和傍晚高,正午低(本文中正午指10:00~14:00),也就是说早晨和傍晚潜热占净辐射的比例大,并迅速下降和上升,这与此时段的净辐射的变化有关,值比较小且变化较快,并且此时段空气中的水汽较白天也大;在正午时段潜热所占比例维持一稳定值(统计这一时段的平均值列于表1),可以看到所占比例随季节而变化,从2003年2月(8.8%左右)开始逐步上移,此时的潜热所占的比例几乎最小,到了8月(46.6%左右)升到最高,即净辐射分配给潜热的比例最大,9月开始下移,但到12月没有随着11月继续下移反而上移,但2002年12月却下移,分析其原因(图略),这两个月的净辐射相差不大,但潜热的相差

近2倍,而且同期的温度和湿度2003年12月也明显高于2002年12月,这说明净辐射的分配不仅与季节有关,也与当年的气候状况有一定联系。潜热占净辐射的比例夏季最大,春秋次之,冬季最小。

同样,日变化中感热占净辐射的比例如图3b,可以看到冬、夏季(11、12、6、7、8月)基本上呈U型变化但开口方向相反,即冬季早晚高,夏季早晚低;春、秋季(2、3、9、10月)呈S型变化方向相反,即春季早高晚低,秋季早低晚高。与潜热相似,大致也是在正午时段维持一稳定的比例(统计平均后列于表1)。感热所占的比例冬季大,春、秋季次之,夏季最小。

从表1还可以看到只有在夏季潜热所占的比例高于感热,其他季节感热都要高些。这与前面典型天气下的能量收支分析结果一致。

### 3.3 近地面层能量收支的年变化特征

图5给出了2002年10月1日~2003年12月31日净辐射( $R_n$ )、潜热通量( $Q_E$ )、感热通量( $Q_H$ )、地热流通量( $Q_S$ )日均值及其10天的滑

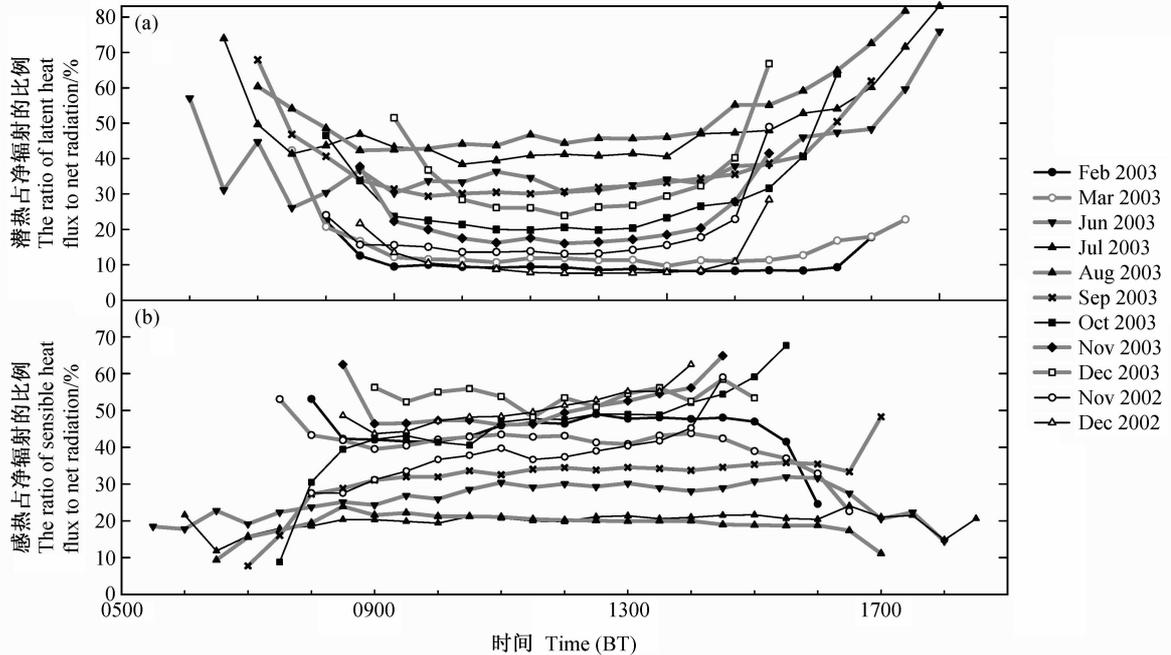


图 4 月平均日变化中各月 (a) 潜热、(b) 感热占净辐射的比例 (2002 年 11 月~2003 年 12 月)

Fig. 4 The monthly-averaged diurnal variation of (a) the ratio of latent heat flux to net radiation and (b) the ratio of sensible heat flux to net radiation (Nov 2002—Dec 2003)

表 1 湍流通量月平均的日变化中净辐射分配给潜热和感热的平均比例

Table 1 The midday mean ration of latent flux to net radiation and ratio of sensible heat flux to net radiation

%

|           | Nov 2002 | Dec 2002 | Feb 2003 | Mar 2003 | Jun 2003 | Jul 2003 | Aug 2003 | Sep2003 | Oct 2003 | Nov 2003 | Dec 2003 |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|
| $Q_E/R_n$ | 15.3     | 8.5      | 8.8      | 11.1     | 33.7     | 41.9     | 46.6     | 32.1    | 22.2     | 18.6     | 28.9     |
| $Q_H/R_n$ | 39.4     | 52.3     | 46.2     | 42.6     | 28.9     | 20.6     | 20.4     | 33.6    | 47.0     | 50.1     | 53.4     |

注：数据统计时间是 2002 年 11 月~2003 年 12 月 10:00~14:00

Note: The used data is between 1000—1400 BT from Oct 2002 to Dec 2003

动平均。

可以看到各个量都有着明显的季节变化，年变化幅度有差异，地热流通量的季节变化较弱，净辐射和潜热通量的变化趋势比较接近。年较差净辐射为  $199.66 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、潜热通量为  $99.12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、感热通量为  $68.67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、地热流通量为  $33.32 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

从净辐射的变化趋势来看，从 2002 年 10 月下旬到 2003 年 1 月下旬近 3 个月的时间净辐射基本维持负值，说明此时向下的辐射总量小于离开地面的辐射总量，平均为  $12.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  左右，同时潜热和感热的起伏不大，维持在很低的值附近，平均约为  $3.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $5.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，而此时地热流通量约在  $10.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  左右，方向向上即土壤向地表输送能量，可见此时土壤通过感热和潜

热失去储存的热量，地面成为热源。

从 2003 年 2 月初（早春）开始，净辐射开始转正并逐渐增加，感热紧随之增加，而潜热的增长相对缓慢，分析其原因，在干旱、半干旱的退化草原地区，此时正值干季，虽然净辐射在增加，但土壤正在逐渐解冻从而吸收了较多的热量，地气温差大，且此时的土壤湿度比较低，因此潜热小而感热相对大。而后感热仍随着净辐射增加不断增大，到 5 月下旬~6 月上旬，达到了最大，平均为  $46.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，此时净辐射、潜热、地热流通量分别为  $92.3$ 、 $34.6$ 、 $9.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，这段时期感热占主导地位，地热流通量为正即土壤在吸收热量。随后感热开始明显的下落，此时的潜热迅速增加，到 6 月中旬~8 月上旬潜热达到最大，平均而言，潜热为  $71.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，感热  $23.8$

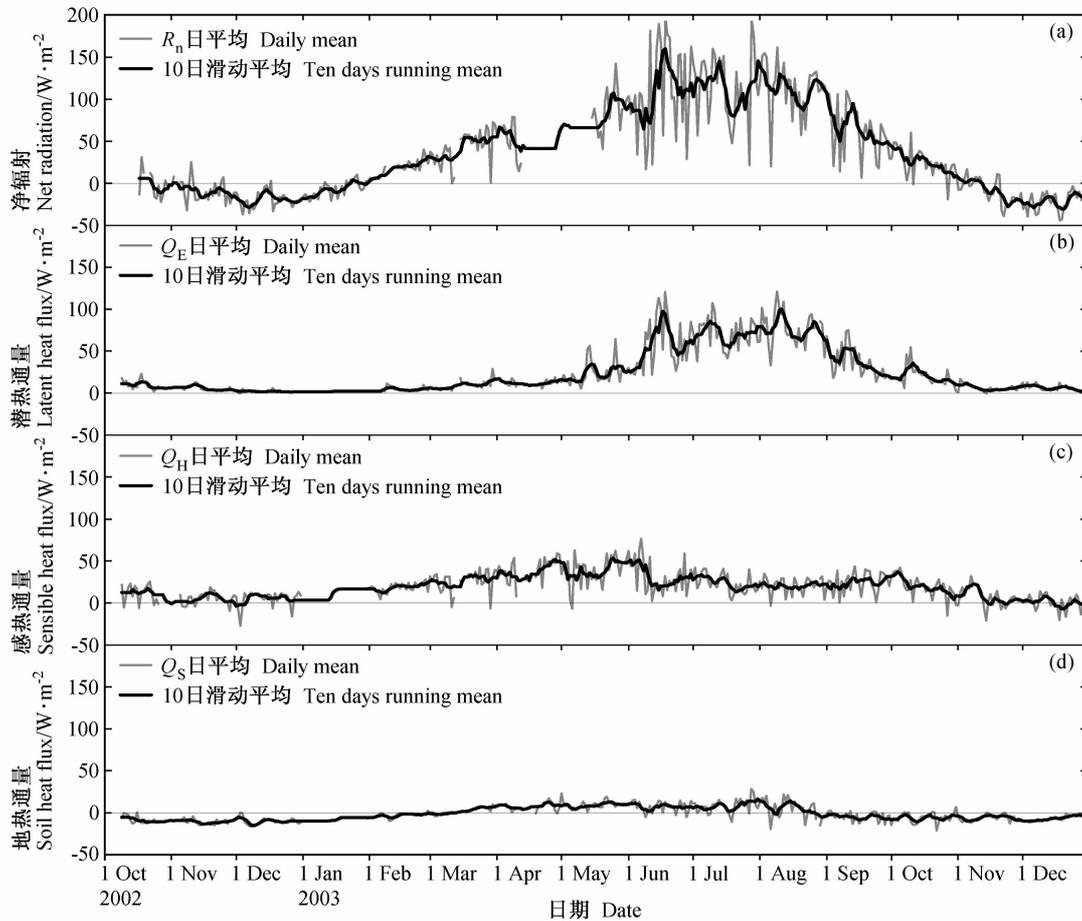


图5 (a) 净辐射 ( $R_n$ )、(b) 潜热通量 ( $Q_E$ )、(c) 感热通量 ( $Q_H$ )、(d) 地热通量 ( $Q_S$ ) 日均值及其 10 天的滑动平均 (2002 年 10 月 1 日~2003 年 12 月 30 日)

Fig. 5 Daily mean and 10-day running average of (a) net radiation ( $R_n$ ), (b) latent heat flux ( $Q_E$ ), (c) sensible heat flux ( $Q_H$ ) and (d) soil heat flux ( $Q_S$ ) (from 1 Oct 2002 to 30 Dec 2003)

$W \cdot m^{-2}$ , 地热流  $7.7 W \cdot m^{-2}$ , 净辐射  $119.5 W \cdot m^{-2}$ , 此段时间潜热迅速增加并占主导地位, 潜热几乎是感热的 3 倍, 一个原因是雨季的到来 (通榆地区降水主要集中在每年 6~9 月), 另一个原因是草已经返青、生长, 此段时间应该是植被生长最旺盛的时期, 蒸发有所加强, 而且生命活动、光合作用较强, 吸收的  $CO_2$  增加, 这与观测的  $CO_2$  通量的变化十分吻合 (图略)。从 8 月中旬开始净辐射逐渐减小, 潜热略微滞后, 也随之减小但速度较辐射要快, 而感热没有明显的减小直到 10 月上旬开始逐渐减弱。

湍流通量日均值观测结果表明, 2003 年 5~9 月期间, 潜热占净辐射比例变化范围  $0.26 \sim 0.82 R_n$ , 感热为  $0.09 \sim 0.83 R_n$ ; 地热通量为  $0.03 \sim 0.15 R_n$ 。比较 FIFE (the First ISLCP Field

Experiment) 试验<sup>[18]</sup>, 美国堪萨斯州曼哈顿附近高秆草原站点, 5~10 日中午 (当地时间 12:30~14:30 平均), 潜热占净辐射比例的变化范围为  $0.08 \sim 0.83 R_n$ , 感热为  $0.1 \sim 0.78 R_n$ , 地热通量为  $0.10 \sim 0.27 R_n$ , 两者结果比较一致。

## 4 结论

分析 2002 年 10 月~2003 年 12 月在退化草地下垫面获得的连续近地层湍流通量及能量的观测资料, 得出如下结论:

(1) 半干旱区退化草地近地层各能量分量的季节性变化非常明显, 表现在日变化幅度的季节变化、晴天日最大值的季节变化、日均值的季节变化。2003 年观测资料显示年较差净辐射为

199.66  $W \cdot m^{-2}$ 、潜热通量为 99.12  $W \cdot m^{-2}$ 、感热通量为 68.67  $W \cdot m^{-2}$ 、地热流通量为 33.32  $W \cdot m^{-2}$ 。能量分配的季节变化主要表现在月平均的日变化中, 潜热占净辐射的比例夏季最大, 春秋次之, 冬季最小; 感热所占的比例冬季大, 春秋次之, 夏季最小; 而且除夏季外潜热所占比例均小于感热。2003 年 5~9 月间日均值观测结果表明: 潜热占净辐射比例变化范围 0.26~0.82  $R_n$ , 感热为 0.09~0.83  $R_n$ ; 地热流通量为 0.03~0.15  $R_n$ 。地表反照率同样存在季节变化特征, 冬季大, 夏季小。

(2) 不同季节典型天气下近地层能量的日变化周期十分明显, 但幅度随天气、季节变化而不同。晴天各辐射分量呈现出光滑的标准日变化曲线, 多云和阴天曲线波动大, 日振幅降低, 雨天几乎看不到标准的日变化曲线。潜热通量和感热通量日变化在趋势上与净辐射相似, 但由于天气条件(云)等复杂因素的影响, 日变化的波动相对较大。月平均的日变化反映了能量收支日变化的平均状况, 净辐射、潜热通量、感热通量全年均有相似的标准日变化曲线, 幅度随季节变化; 地热流通量只有在夏季才有微弱的日变化。日变幅最大净辐射、潜热通量、地热流通量出现在 8 月, 感热通量在 5 月。

(3) 干季日变化中能量平衡以感热为主, 湿季以潜热为主, 在年变化周期中存在着干湿季的转换期。2003 年的观测资料显示: 大约是在 6 月 5~11 日从干季进入湿季, 另一个转换期是 9 月 13~17 日由湿季转成干季。

### 参考文献 (References)

[1] 符淙斌, 安芷生. 我国北方干旱化研究一面向国家需求的全球变化科学问题. 地学前沿, 2002, **9** (2): 271~275  
Fu Congbin, An Zhisheng. Study of aridification in northern China—a global change issue facing directly the demand of nation. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2002, **9** (2): 271~275

[2] 廉毅, 高枫亭, 任红玲, 等. 20 世纪 90 年代中国东北地区荒漠化的发展与区域气候变化. 气象学报, 2001, **59** (6): 720~726  
Lian Yi, Gao Zongting, Ren Hongling, et al. Desertification development and regional climatic change in northeast

China in the 1990s. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, **59** (6): 720~726

[3] 谢安, 孙正罡, 白人海. 中国东北近 50 年干旱发展及对全球气候变暖的响应. 地理学报, 2003, **58** (增刊): 76~82  
Xie An, Sun Zhenggang, Bai Renhai. Arid climate trend over northeastern China and its response to global warming. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2003, **58** (Suppl.): 76~82

[4] 孙继敏, 刘东生. 中国东北黑上地的荒漠化危机. 第四纪研究, 2001, **21** (1): 72~78  
Sun Jimin, Liu Dongsheng. Desertification in the northeastern China. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 2001, **21** (1): 72~78

[5] 符淙斌, 温刚. 中国北方干旱化的几个问题. 气候与环境研究, 2002, **7** (1): 22~29  
Fu Congbin, Wen Gang. Sever issues on aridification in the northern China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (1): 22~29

[6] 叶笃正, 符淙斌, 董文杰, 等. 全球变化科学领域的若干进展. 大气科学, 2003, **27** (4): 435~450  
Ye Duzheng, Fu Congbin, Dong Wenjie, et al. Some advance in global change science study. *Chinese Journal of atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (4): 435~450

[7] 王介民. 陆面过程实验和地气相互作用研究——从 HEIFE 到 IMGRASS 和 GAME-Tibet/TIPEX. 高原气象, 1999, **18** (3): 280~294  
Wang Jiemin, Land surface process experiments and interaction study in China—from HEIFE to IMGRASS and GAME-TIBET/TIPEX. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, **18** (3): 281~294

[8] Bosilovich M G, lawford R. Coordinated Enhanced Observation Period (CEOP) international workshop. *Bulltin of Amer. Meteorol. Soc.*, 2002, **83** (10): 1495~1499

[9] 刘辉志, 董文杰, 符淙斌, 等. 半干旱地区吉林通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测实验. 气候与环境研究, 2004, **9** (2): 378~389  
Liu Huizhi, Dong Wenjie, Fu Congbin, et al. The long-term field experiment on aridification and the ordered human activity in semi-arid area at Tongyu, northeast China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (2): 378~389

[10] 季国良, 马晓燕, 邹基玲, 等. 黑河地区绿洲和沙漠地面辐射收支的若干特征. 干旱气象, 2003, **21** (3): 29~33  
Ji Guoliang, Ma Xiaoyan, Zou Jiling, et al. Characteristics of the Radiation Budget over oases in arid region. *Arid Meteorology* (in Chinese), 2003, **21** (3): 29~33

[11] 胡隐樵, 高由禧. 黑河试验 (HEIFE) ——对干旱地区陆

- 面过程的一些新认识. 气象学报, 1994, **52** (3): 285~296
- Hu Yinqiao, Gao Youxi. Some new understandings of processes at the land surface in arid area from the HEIFE. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1994, **52** (3): 285~296
- [12] 吕达仁, 陈佐忠, 陈家宜, 等. 内蒙古半干旱草地土壤-植被-大气相互作用 (IMGRASS) 综合研究. 地学前缘, 2002, **9** (2): 295~306
- Lü Daren, Chen Zuozhong, Chen Jiayi, et al. Composite study on inner Mongolia semi-arid grassland soil-vegetation-atmosphere interaction (IMGRASS). *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2002, **9** (2): 295~306
- [13] 张强, 曹晓彦. 敦煌地区荒漠化戈壁地表热量和辐射平衡特征的研究. 大气科学, 2003, **27** (2): 245~254
- Zhang Qiang, Cao Xiaoyan. The influence of synoptic conditions on the averaged surface heat and radiation budget energy over desert or gobi. *Chinese Journal of Atmospheric sciences* (in Chinese), 2003, **27** (2): 245~254
- [14] 刘辉志, 洪钟祥, 张宏升, 等. 内蒙古奈曼流动沙丘下垫面湍流输送特征初步研究. 大气科学, 2003, **27** (3): 389~398
- Liu Huizhi, Hong Zhongxiang, Zhang Hongsheng, et al. The turbulent Characteristics in the surface layer over Dune at Naiman in Inner Mongolia. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (3): 389~398
- [15] Christain Bernhofer and Voget Roland, Energy balance closure gaps-A methodical problem of eddy covariance measurements? Proceeding of the Conference ICB-ICUC'99, Sydney, Australia, 8-12 November 1999, 199~203
- [16] Shin Miyazaki, Osukamoto, Ichiro Kaihostu, Tadashi Miyamoto, et al. The energy imbalances observed in Tibetan Plateau and Monogolian Plateau, Proceedings of the Second Session of international Workshop on TIPEX GAME/Tibet, Kunming, China, 20-22 July 2000, 1~3
- [17] Kim J, Choi T J. On measuring and modeling surface energy partitioning on the Tibetan Plateau, Proceedings of the 5th international Study Conference on GEWEX in Asia and GAME. Nagoya, Japan, 3-5 October 2001, 18~25
- [18] Kim J, Verma S B. Components of surface energy balance in a temperate grassland ecosystem. *Boundary-Layer Meteorology*, 1990, **51** (4): 401~417