

# 鄂陵湖湖滨地区夏季近地层微气象特征与 碳通量变化分析

李照国<sup>1,2</sup>, 吕世华<sup>1</sup>, 奥银焕<sup>1</sup>, 王少影<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 兰州 730000;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要:**利用2010年夏季鄂陵湖湖滨地区试验观测资料,从中选取资料较好的5个连续晴天,分析了该地区高寒草甸夏季局地气候、辐射与能量平衡特征以及碳通量的日变化。结果表明:①夏季晴天湖滨地区近地层气象要素受到湖陆风的较大影响,风向昼夜交替变化,垂直风速和摩擦速度明显大于玛曲草原,全天盛行上升气流,昼夜温差较小;②湖滨地区日均太阳总辐射与净辐射高于玛曲草原和金塔绿洲,地表能量不平衡现象较显著,湍流输送以潜热为主,夜间近地层存在明显的逆温和逆湿现象;③夏季湖滨草甸碳吸收的日最大值出现在上午11时前后,碳吸收显著大于碳排放,其水分利用效率与海北草甸生态系统接近,总体偏低。

**关 键 词:**黄河源区;湖泊效应;能量平衡;碳通量;鄂陵湖

## 1 引言

由于水陆热力差异,湖泊及其周围地区常形成特殊的气候特征,盛行湖陆风等典型的局地环流系统。20世纪至今,众多学者对湖泊效应开展了大量的观测试验,国内对高原湖泊的气候效应也开展了一些工作,主要分布在云贵高原和青藏高原。张克映<sup>[1]</sup>的研究发现,滇池的存在减小了周围地区的昼夜温差,其在夜间至清晨的增温效应尤其显著,滇池是形成昆明盆湖区四季如春特征的因素之一。徐安伦等<sup>[2-3]</sup>分析了云南洱海湖滨及湖面的观测资料后发现,受湖泊与山谷地形的共同影响,该地区形成强烈的局地环流,并且水面各月平均气温都比陆面高。游庆龙等<sup>[4]</sup>用纳木错塔站观测资料分析了纳木错全年近地层风、温、湿等要素,发现湖陆风在夏季最为显著,其他季节不明显。吕雅琼等<sup>[5]</sup>分析了纳木错夏季探空资料后发现,纳木错湖白天的冷湖效应推迟了边界层湍流混合及对流边界层出现的时间,在晴天条件下,湖陆风控制范围常超过边界层高度,可达对流层中部。随着全球气候变化,近年来,高原湖泊地区碳通量的变化也受到关注,

朱志鹏等<sup>[6]</sup>分析了纳木错湖滨地区CO<sub>2</sub>通量的变化特征,表明在生长季CO<sub>2</sub>通量白天为净吸收,夜间为稳定的净排放。魏达等<sup>[7]</sup>研究了纳木错湖滨草甸CO<sub>2</sub>通量与环境因子的关系,发现其CO<sub>2</sub>排放与青藏高原其他观测点相比均偏低,可能与湖区降水少、温度较低等因素有关。

上述观测研究揭示了高海拔地区湖泊气候与环境的一些特征,但由于青藏高原幅员辽阔,不同地区环境条件差异巨大,湖泊效应的特征可能有所不同。鄂陵湖位于青海省玛多县,地处被誉为“中华水塔”的青藏高原东部,与扎陵湖一起构成黄河源区的“姊妹湖”,同时也是青藏高原最大的淡水湖,对黄河源头径流量具有重要调节作用<sup>[8]</sup>。玛多县平均海拔4200 m以上,曾有“千湖之县”的美誉,湖泊的存在与变化对当地气候与环境有着重要影响。该地区分布有“湖泊-湿地-高寒草甸-沙地-季节性雪山”等多种下垫面,是黄河源区复杂下垫面的典型代表,是开展陆面过程及大气边界层研究的理想区域,也是对气候变化响应最为敏感和生态环境最为脆弱的地区之一<sup>[9]</sup>。然而由于高寒缺氧,条件简陋,长期以来缺乏对该地区湖泊气候效应和碳

收稿日期:2011-10; 修订日期:2012-02.

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2010CB950503);国家自然科学基金项目(41130961);中国科学院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室开放基金项目(LPCC201101);中国科学院“西部之光”博士资助项目(29Y128871)。

**作者简介:**李照国(1985-),男,河南洛阳人,硕士研究生,主要从事大气边界层观测与模拟研究。E-mail: lzguist@163.com

通量变化的有效观测。2010年夏季起,科研人员在鄂陵湖地区相继架设了涡动相关系统、梯度气象观测塔等设备,逐步开始了对该地区气候与环境特征的综合研究。

为了了解鄂陵湖湖滨地区夏季局地气候特征以及碳通量变化,本文选择2010年7月22-27日天气持续晴好、资料连续可靠的5个观测日,对近地层气象要素特征和碳通量日变化进行了详细分析。

## 2 观测试验与数据处理

鄂陵湖观测点位于鄂陵湖西北侧的岸上(35.032°N, 97.651°E),距离湖面1 km。下垫面为高约5 cm的高寒草甸,海拔4280 m。周围地势开阔,其西北方1 km外分布着相对海拔50~100 m的丘陵。

架设的涡动相关系统主要由三维超声风速仪(CSAT3, Campbell, USA)、开路式CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O气体分析仪(LI-7500, LI-cor, USA)、数据采集器(CR3000和CR1000, CSI, USA)组成,采样频率10 Hz。此外,还安装了CNR-1型净辐射仪(KIPP&ZONEN, Netherlands)、HMP45C空气温湿度传感器(Vaisala, Finland)和土壤温湿度及热通量传感器。涡动相关系统安装高度为3 m,4层土壤温湿度深度分别为5 cm、10 cm、20 cm、40 cm,在5 cm和20 cm同时进行土壤热通量的观测。

为提高数据准确性,剔除了其中明显不合理的数据,对涡动观测数据进行了质量控制,少量的缺失数据采用内插方法插补。数据处理模块利用上述的高频采样数据,计算各观测量间的协方差,即:

$$H = \rho C_p \overline{w'T} \quad (1)$$

$$LE = L\rho \overline{w'q'} \quad (2)$$

$$Fc = \overline{w's'} = \frac{1}{T} \int_0^T w's' dt \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w's' \quad (3)$$

式中:  $H$  为感热通量;  $LE$  为潜热通量;  $Fc$  为CO<sub>2</sub>通量;  $\rho$  为空气密度;  $C_p$  是空气的定压比热;  $\overline{w'T}$ 、 $\overline{w'q'}$  和  $\overline{w's'}$  分别为垂直速度与超声虚温、水汽脉动量和CO<sub>2</sub>密度脉动量的协方差。

## 3 结果分析

### 3.1 局地气候特征

由图1a可以看到,连续晴天时,湖滨地区风速

有明显的日变化,夜间风速大于白天,最大值出现在夜间0:00前后(北京时间,下同),这与玛曲草原<sup>[10]</sup>和敦煌绿洲<sup>[11]</sup>有所不同,玛曲和敦煌最大风速常出现于傍晚;受水陆热力差异的影响,湖滨风场具有典型的湖陆风特征(图1b),白天尤其是中午和下午盛行来自湖面的偏东南风,夜间则以来自陆地的偏北风为主。与纬度较为接近的低海拔的洞庭湖湖风<sup>[12]</sup>相比,受高寒环境影响,鄂陵湖的湖风每天开始较晚,持续时间较短。摩擦速度表现了空间各向的扩散输送能力,可以作为湍流运动的速度尺度。图1a中摩擦速度大多在0.1 m·s<sup>-1</sup>以上,峰值达到0.55 m·s<sup>-1</sup>,表明该地区湍流混合较为充分,观测结果较为可信。水平风速和摩擦速度的日变化表现出较好的一致性,说明这一地区在晴好天气条件下动量湍流通量受风速切变控制,而非荒漠那样大多由热力稳定度控制<sup>[13]</sup>。晴空条件下,湖滨地区垂直风速大部分为正值(图1c),平均达到0.14 m·s<sup>-1</sup>,峰值为0.52 m·s<sup>-1</sup>,显著大于夏季晴天玛曲草原<sup>[10]</sup>和金塔绿洲边缘<sup>[14]</sup>的观测结果,上升运动强烈,这可能与本地区存在较强的湖陆风环流有关。白天,受热力与地形作用,湖风在登陆后逐渐抬升并且在高空形成回流支;夜间,受暖湖效应影响,湖面及邻近地区常被上升气流控制。湖滨日气温最小值出现于早晨7点,最大值出现在傍晚前后;5 d中,在日净辐射基本相同的情况下,地面气温先升后降(图1d),和玛曲草原<sup>[10]</sup>不同,这可能与湖区的局地环流变化有关;与前两日不同,25和26日傍晚观测点仍受较强湖风的影响,来自冷水面上的湖风降低了气温峰值。近地层大气比湿的日变化主要取决于下垫面的蒸发和湍流水汽交换的强弱;湖滨地区早晨比湿较小(图1e),日出后气温升高蒸发增大,比湿增加,在中午前后达到峰值,而后随着垂直湍流交换的加强,近地层比湿逐渐下降,傍晚进入低谷;与气温类似,5d中比湿的变化与玛曲草原<sup>[10]</sup>的总体上升趋势有所差异,表现了湖滨小气候特征的复杂性。土壤温度方面(图1f),除40 cm外,其他层次的温度都呈准正弦变化,低层峰值均比上一层滞后,且随时间推移表现为缓慢的上升趋势,这可能是因为天气持续晴好使土壤含水量减少,造成土壤热容量降低致使土壤温度升高。

### 3.2 地表辐射特征

太阳辐射是地表辐射平衡的主要分量,显著影响着其他分量的特征变化。5 d太阳总辐射(向下短

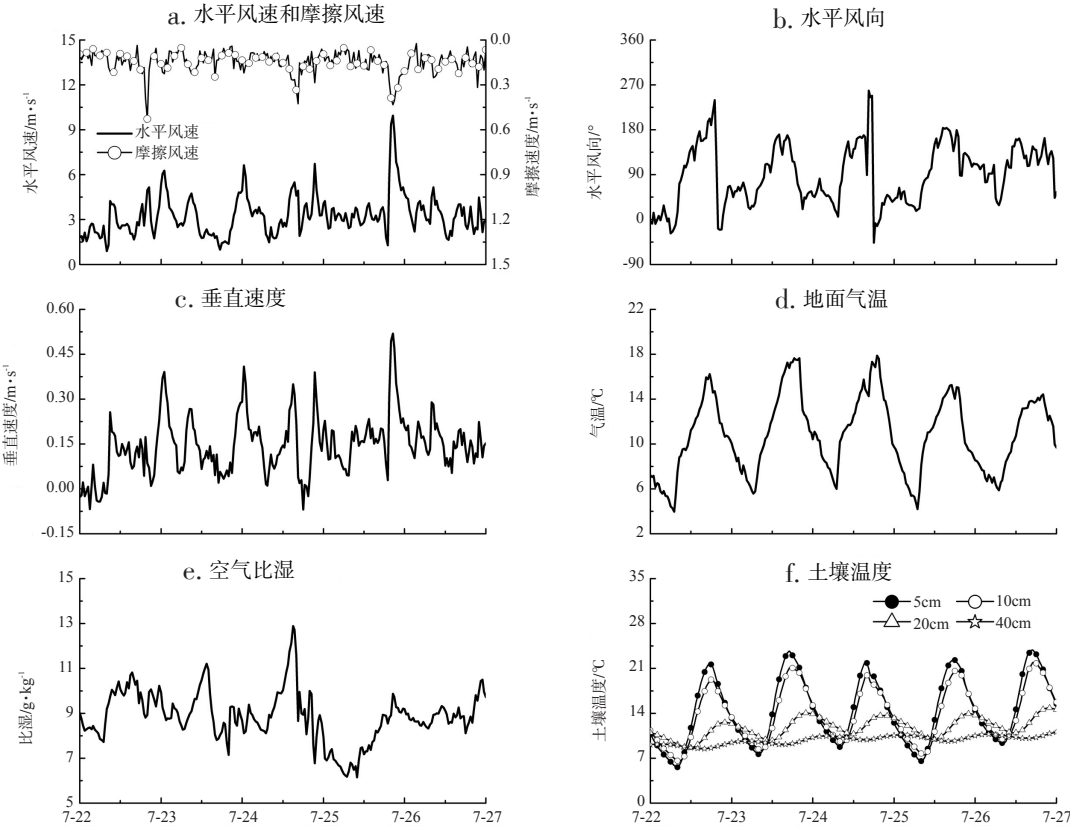


图1 鄂陵湖湖滨高寒草甸夏季持续晴天条件下近地层气象要素日变化  
Fig.1 The daily variations of micrometeorology factors over the high-cold meadow vegetation in Lake Ngoring lakeside region for a summer continuous fine weather

波辐射,图2a)最大值分别为 $1089\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $1093\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $1100\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $1099\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $1219\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,略高于黄河上游的玛曲草原<sup>[10]</sup>,也比金塔绿洲<sup>[14]</sup>同期辐射高 $100\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右。太阳总辐射的大小主要取决于太阳高度角的变化,同时受空气密度、云量等影响,具有明显的日变化,夜间为零,早晚很小,日最大值出现于14:00。由于高原夏季对流云发展旺盛,造成了图中曲线的不光滑,但是云过后立即恢复到原来状态,因此对总的辐射特征影响较小。在观测时段内未出现超太阳常数现象。地表的反射辐射(向上短波辐射,图2a)随着太阳总辐射的增加(降低)而增大(减小),5 d内日最大值介于 $182\sim 236\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,出现在14:00左右,且辐射值随着时间推移有所增加,这可能是由土壤含水量减少导致的地表反照率增加造成的。

大气向下长波辐射(图2a)维持在 $231\sim 350\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,早晨小傍晚大,波动幅度大于玛曲草原<sup>[10]</sup>和金塔绿洲<sup>[14]</sup>,可能是受高原对流云系较为旺盛的影响。大气向下长波辐射主要受大气密度、水汽含

量、气溶胶浓度及云等因子的影响,尤其对水汽含量最为敏感,由于高原大气水汽含量较低,因此该区域向下长波辐射明显小于同纬度低海拔地区<sup>[15]</sup>。

地面向上长波辐射可以表示为: $F=\varepsilon\sigma T_g^4$  (4)  
式中: $\varepsilon$ 是比辐射率; $\sigma$ 是斯蒂芬-玻尔兹曼常数; $T_g$ 是地表温度。由此可见,在地表性质相似的情况下地表温度的大小决定着向上长波辐射的强弱,湖滨地区的地面长波辐射(图2a)表现出规则的日变化,并且随时间缓慢增加。辐射量值介于 $320\sim 500\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,早晨最小,下午14:00~15:00最大,由于高寒草甸昼夜温差较大,因此虽然午后地面向上长波辐射与金塔绿洲<sup>[14]</sup>相当,但夜间至早晨明显低于后者,所以就总量而言,高原的地面向上长波辐射低于相邻的低海拔地区。

太阳总辐射、反射辐射、大气长波辐射和地面向上长波辐射的日积分值分别为 $29.93\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $5.79\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $23.46\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $33.24\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ,可见在湖滨地区的辐射平衡中,地面向上长波



辐射贡献最大,其次是太阳总辐射,第三是大气长波辐射,贡献最小是反射辐射,量值与玛曲草原<sup>[10]</sup>接近,但明显小于敦煌绿洲地区<sup>[11]</sup>。

地表反照率是陆面过程研究中的一个重要物理量,由于大气对太阳辐射的吸收较弱,其能量收入大部分来自地表,因此地表反照率的变化必然影响地表能量收支进而改变陆-气间的能量输送最终影响局地的大气环流。湖滨地区下垫面为高寒草甸,晴天条件下反照率有明显的日变化(图2b),呈不太规则的“U”型,地方时正午前后反照率最小,清晨可能因为露水的存在而使反照率明显较大,计算得到5 d地表反照率的平均值为0.21,高于玛曲草原<sup>[10]</sup>,并且随着时间的推移,土壤含水量减小,反照率增大。

3.3 地表能量平衡

图3a给出5 d中净辐射、感热、潜热和土壤热通量(5 cm)的日变化。可以看到,4者都具有显著的周期变化,早晨开始升高,午后达到最大,随后逐渐减小,但位相并不完全一致,土壤热通量与净辐射

通量变化一致,两者峰值均出现在13:30左右,感热和潜热的日最大值比净辐射平均晚0.5 h左右。净辐射的范围介于-100~780 W·m<sup>-2</sup>,大于玛曲草原<sup>[10]</sup>和金塔绿洲<sup>[14]</sup>,净辐射夜间为负白天为正,并且白天量值远大于夜间,表明该地区夜晚为弱冷源,白天为强热源。通过向下短波辐射与净辐射的比较可以发现,早晨日出后约1 h净辐射开始转为正值,傍晚日落前约1 h净辐射由正变负,与玛曲草原相比<sup>[10]</sup>,净辐射的转正和转负时间分别滞后和提前了0.5 h以上,可能与湖滨的高寒环境有关。

净辐射中所占份额由大到小依次是潜热通量、土壤热通量(5 cm)和感热通量,而玛曲草原<sup>[10]</sup>感热通量大于土壤热通量,这可能是由于湖滨地区地表温度与气温的差偏小进而导致感热较小。5 d日平均的感热通量33.5 W·m<sup>-2</sup>,潜热通量100.4 W·m<sup>-2</sup>,波文比达到0.3,表明在湖滨地区陆气之间由于水相变引起的热量交换的贡献要远大于因湍流运动引起的热量交换的贡献。与玛曲草原<sup>[10]</sup>观测场相比,湖滨观测点土壤水含量平均偏小0.1以上,植被

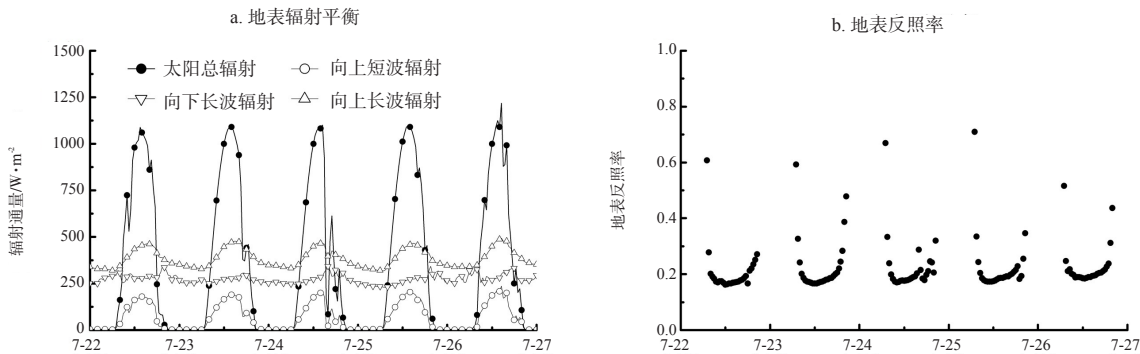


图2 鄂陵湖湖滨高寒草甸夏季持续晴天条件下地表辐射平衡和地表反照率日变化  
Fig. 2 The daily variations of the ground surface radiation balance and albedo over the high-cold meadow vegetation in Lake Ngoring lakeside region for a summer continuous fine weather

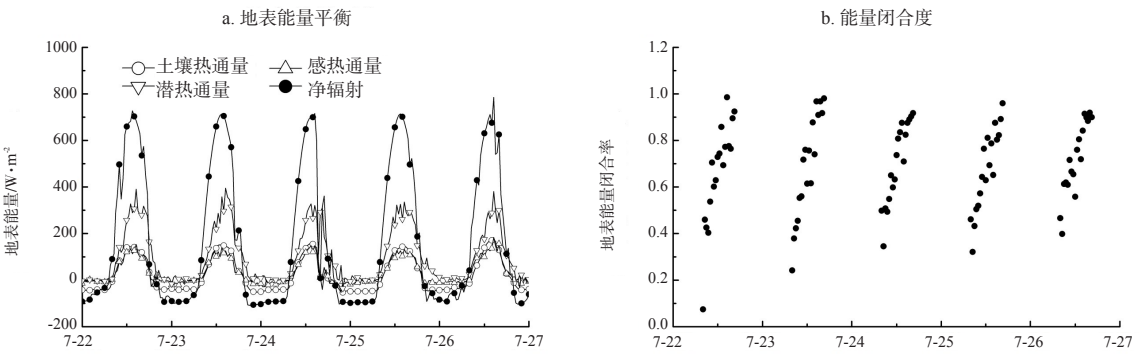


图3 鄂陵湖湖滨高寒草甸夏季持续晴天条件下地表能量平衡和能量闭合度日变化  
Fig.3 The daily variations of the ground surface energy balance and closure ratio over the high-cold meadow vegetation in Lake Ngoring lakeside region for summer continuous fine weather

覆盖度偏低并且植株更加矮小,然而两地白天的潜热量值基本相当,这可能是湖滨观测受到了湖风携带的水汽平流的影响所致。

湖滨地区在夜间出现了负的感热与潜热,说明该地区夜间近地层存在逆温和逆湿,热量与水汽向下输送,大气向地表补充了热量和水分;其中负的感热连续性好且量值较大,而在玛曲草原<sup>[10]</sup>则无此现象,这可能与湖泊的存在有关,夜间的暖湖效应抬升了湖区及周边的气温,而地表由于土壤水分少热容量小而迅速降温,气温高于地温因此产生了较为显著的负感热。

观测中的能量不平衡现象依然是野外试验中的一个重要问题,能量平衡闭合是以热力学第一定律为基础,认为感热与潜热通量之和应该和净辐射通量、土壤热通量以及其他形式的热量之和相互平衡。其基本公式为 $H+LE=R_n-G-S-Q$ ,其中, $H$ 是感热通量, $LE$ 是潜热通量, $R_n$ 是净辐射, $S$ 是冠层热储量, $Q$ 是其他形式能量的和,一般很小常忽略不计。对湖滨地区白天的地表能量闭合度做了初步分析,由于草甸低矮, $S$ 可以忽略,因此计算能量闭合度的公式为 $(H+LE)/(R_n-G)$ ,其中土壤热通量用5 cm深度的观测值代替。图3b可以看到,能量闭合度具有显著的日变化,从早晨到傍晚前夕呈线性趋势增加,5 d能量闭合度平均值分别为0.69、0.67、0.70、0.67、0.69,5 d能量不闭合程度平均达到了0.32,非常明显。

一般认为地表能量不平衡主要是由于仪器误差、观测误差、可利用能量高估、有效能量低估、忽视了热储存和地表非均匀性等众多因素所致。本次观测中,可能的原因主要是:①早晨日出前后,近地层湍流较弱,涡动观测的感热与潜热通量的准确性降低;②由于观测点离湖面不远,因地表非均匀性造成的湖陆风等中小尺度环流在湖滨附近引发了较强的垂直运动,白天垂直速度峰值可达 $0.52\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,其形成的能量垂直平流输送对地表能量平衡的影响不可低估;③地下5 cm处草根分布较多,可能对土壤热通量的测定造成干扰,另外,土壤热通量值不但依赖于自然的热通量板观测值,而且依赖于热通量板上的土壤热储量,热储量值与土壤温湿度和体积密度密切相关,由于热储量难以直接测定,因此造成了热通量的误差。另外,Foken<sup>[16]</sup>认为能量闭合问题是一个尺度问题,能量收支分量观测涉及多种仪器(如涡动相关仪器、辐射仪、土壤热通

量板),不同仪器观测源区大小各异,源区差异对能量闭合度造成重要影响,尤其是在非均匀下垫面。

3.4 CO<sub>2</sub>通量变化

图4可以看到,湖滨地区高寒草甸的CO<sub>2</sub>通量较弱,碳吸收峰值为 $-0.39\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (负值表示吸收,正值表示排放),平均值 $-0.15\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,碳排放的峰值 $0.31\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,平均值仅为 $0.07\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,碳吸收的能力显著大于碳排放,生态系统起着碳汇作用。CO<sub>2</sub>通量在晴天具有典型的日变化特征,白天为负值,夜间为正值,碳吸收的最大值并非出现在太阳辐射最强的正午,而是在上午10:30~11:30。整体上,每天碳吸收的时间长度略长于碳排放,两者的转换期与日出日落时间接近。CO<sub>2</sub>浓度白天低夜间高,最小值出现在傍晚附近,5d中,随着时间的推移,浓度逐渐下降,表明这一时期湖滨草甸起到了碳汇作用。

水分利用效率(WUE)不仅反映了生态系统碳、水循环及其相互的关系,而且已成为揭示陆地植被对全球变化响应和适应对策的重要手段<sup>[17]</sup>。在各种表达水分利用效率的方法中,以涡动相关为基础,通过测定CO<sub>2</sub>通量和水分通量进而计算WUE的方法被广泛应用<sup>[18]</sup>,其可以表示为: $WUE=-F_c/ET$ , $F_c$ 表示植被上方的CO<sub>2</sub>通量, $ET$ 表示蒸散通量, $ET=LE/L$ , $L$ 表示汽化潜热,参考当地白天气温,取值约为 $2.46\times10^6\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。以往的一些研究中,植被的蒸腾被视为生态系统的水分损耗,基于这种算法的生态系统WUE反映了植物群落本身利用水分的能力;随着观测技术的改善,越来越多的研究将实测的生态系统总蒸散( $ET$ )(即植被蒸腾与

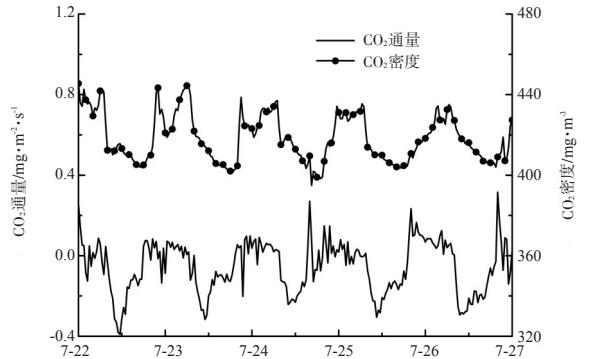


图4 鄂陵湖滨高寒草甸夏季持续晴天条件下CO<sub>2</sub>通量和密度日变化  
Fig.4 The daily variations of the CO<sub>2</sub> flux and density over the high-cold meadow vegetation in Lake Ngoring lakeside region for summer continuous fine weather

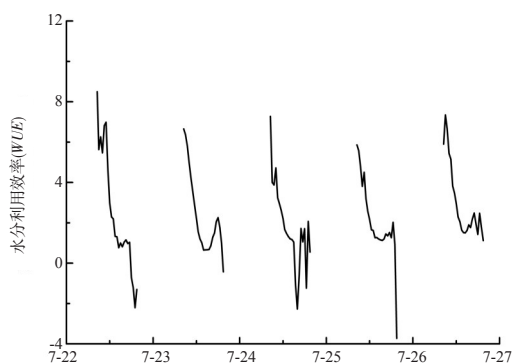


图5 鄂陵湖湖滨高寒草甸生态系统夏季持续晴天条件下水分利用效率(WUE)日变化

Fig.5 The daily variations of the water use efficiency (WUE) over the high-cold meadow vegetation ecosystem in Lake Ngoring lakeside region for summer continuous fine weather

土壤蒸发之和)作为生态系统的水分损耗<sup>[19]</sup>,同时由于在涡动观测中,拆分ET存在很大难度,因此本文采用了将植被蒸腾与土壤蒸发之和作为生态系统总蒸散(ET)的方式,计算WUE。

在计算WUE时,日出日落阶段CO<sub>2</sub>通量( $F_c$ )和蒸散通量(ET)均接近零值,两者比值很大或很小,但这并不代表实际的WUE也如此<sup>[17]</sup>,需要舍去,本文中采用08:30~19:30的值代表WUE的日变化。结果表明湖滨高寒草甸生态系统的水分利用效率总体偏低,日最大值仅为8.5 g CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>O,与海北高寒草甸较为接近<sup>[20]</sup>。WUE具有显著的日变化,从早到晚由高变低,最大值常出现于日出后的一段时间。出现这一结果的原因比较复杂,植被生长状况、气孔阻力、太阳辐射和CO<sub>2</sub>浓度对植物的光合作用(或CO<sub>2</sub>通量的变化)影响明显,而太阳辐射、空气温湿度和土壤含水量对蒸散通量影响较大。有关研究发现<sup>[21]</sup>,水分利用效率与植物的气孔阻力呈正相关,气孔阻力一般上午大、下午小,而早晨由于CO<sub>2</sub>浓度相对较高,有利于光合作用的进行,提高了水分利用效率。另外,上午气温较低,相对湿度大,蒸散较弱,而下午相反,高温低湿度利于蒸散尤其是土壤水分的蒸发,导致生态系统总的蒸散量(ET)维持在较高水平,因此,多种原因造成了WUE由早到晚呈下降趋势。

## 4 结论与讨论

通过对夏季连续晴天条件下鄂陵湖湖滨地区

高寒草甸下垫面近地层微气象特征和碳通量变化的综合分析,可以得出以下主要结论:

(1) 湖滨地区近地层气象要素受到湖陆风环流的较大影响,水平风向昼夜交替变换,全天以上升气流为主,垂直风速和摩擦风速明显大于玛曲草原,昼夜温差较小。

(2) 湖滨地区夏季辐射各分量具有典型日变化,5d太阳总辐射、反射辐射、大气长波辐射和地表长波辐射的日积分平均值分别为29.93 MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>、5.79 MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>、23.46 MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>和33.24 MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>,地表反照率平均值为0.21;该地区太阳总辐射和地表反照率高于玛曲草原和金塔绿洲,向下和向上长波辐射比同纬度低海拔地区低。

(3) 湖滨地区日均净辐射高于玛曲草原和金塔绿洲,湍流输送以潜热为主,夜间具有较显著的负感热和负潜热,表明其近地层存在逆温和逆湿现象;地表能量不平衡现象较为明显,可能与湖陆风环流以及土壤热通量的测定误差等因素有关。

(4) 夏季湖滨地区碳吸收显著大于碳排放,表现为“碳汇”,5d中日均CO<sub>2</sub>浓度随时间逐渐减小,碳吸收的日最大值出现在上午11时前后;湖滨草甸生态系统的水分利用效率与海北草甸生态系统接近,总体偏低,日最大值仅为8.5 gCO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>O。

由于观测站点少以及选择的资料时间较短,因此分析结果可能存在一定局限性。今后通过多种手段的长时间综合观测,将有助于我们对鄂陵湖地区湖泊-大气-陆地相互作用特征的深入了解。

## 参考文献

- [1] 张克映. 昆明滇池对其周围地区温度的贡献及其特征. 地理研究, 1986, 5(3): 22-38.
- [2] 徐安伦, 董保举, 刘劲松, 等. 洱海湖滨大气边界层结构及特征分析. 高原气象, 2010, 29(3): 637-644.
- [3] 徐安伦, 赵晓红, 付志嘉, 等. 洱海盆地水面与地面气象要素变化特征的比较. 大气科学学报, 2011, 34(2): 225-231.
- [4] 游庆龙, 康世昌, 李潮流, 等. 青藏高原纳木错气象要素变化特征. 气象, 2007, 33(3): 54-60.
- [5] 吕雅琼, 马耀明, 李茂善, 等. 青藏高原纳木错湖区大气边界层结构分析. 高原气象, 2008, 27(6): 1205-1210.
- [6] 朱志鹏, 马耀明, 李茂善, 等. 青藏高原纳木错地区CO<sub>2</sub>通量的日变化及季节变化分析. 中国环境科学学会大气环境分会, 第十四届全国大气环境学术会议, 昆明, 2007.
- [7] 魏达, 旭日, 王迎红, 等. 青藏高原纳木错高寒草原温室气体通量及与环境因子关系研究. 草地学报, 2011, 19



- (3): 412-419.
- [8] 李万寿, 冯玲, 孙胜利. 扎陵湖、鄂陵湖对黄河源头年径流的影响. 地理学报, 2001, 56(1): 75-82.
- [9] 封建民, 王涛, 谢昌卫, 等. 黄河源区生态环境退化研究. 地理科学进展, 2004, 23(6): 56-62.
- [10] 奥银焕, 吕世华, 李锁锁, 等. 黄河上游夏季晴天地表辐射和能量平衡及小气候特征. 冰川冻土, 2008, 30(3): 426-432.
- [11] 张强, 周毅. 敦煌绿洲夏季典型晴天地表辐射和能量平衡及小气候特征. 植物生态学报, 2002, 26(6): 717-723.
- [12] 林必元, 李敏娟. 洞庭湖湖陆风特征与降水. 南京气象学院学报, 1988, 11(1): 78-88.
- [13] Hu Y Q, Yang X L, Zhang Q, et al. The characters of energy budget on the gobi and desert surface in Hexi region. Acta Meteorologica Sinica, 1992, 26(1): 82-91.
- [14] 张宇, 吕世华, 陈世强, 等. 绿洲边缘夏季小气候特征及地表辐射与能量平衡特征分析. 高原气象, 2005, 24(4): 527-533.
- [15] 王永生. 大气物理学. 北京: 气象出版社, 1987: 222-223.
- [16] Foken T. The energy balance closure problem: An overview. Ecological Applications, 2008, 18(6): 1351-1367.
- [17] 闫巍, 张宪洲, 石培礼, 等. 青藏高原高寒草甸生态系统 CO<sub>2</sub> 通量及其水分利用效率特征. 自然资源学报, 2006, 21(5): 756-767.
- [18] Baldocchi D D. A comparative study of mass and energy exchange over a closed (wheat) and an open (corn) canopy: II. Canopy CO<sub>2</sub> exchange and water use efficiency. Agricultural and Forest Meteorology, 1994, 67: 291-322.
- [19] 胡中民, 于贵瑞, 王秋凤, 等. 生态系统水分利用效率研究进展. 生态学报, 2009, 29(3): 1498-1506.
- [20] 朱治林, 孙晓敏, 张仁华, 等. 作物群体 CO<sub>2</sub> 通量和水分利用效率的快速测定. 应用生态学报, 2004, 15(9): 1684-1686.
- [21] Wang H. The stomatic resistance and water use efficiency of wheat in Beijing Agro-ecosystem Experimental Station, CAS. Study on Energy and Mass Exchange in Farmland. Beijing: China Meteorological Press. 1987: 254-261.

## Analysis of Micrometeorology and CO<sub>2</sub> Flux Characteristics over Lake Ngoring Lakeside Region in Summer

LI Zhaoguo<sup>1,2</sup>, LV Shihua<sup>1</sup>, AO Yinhan<sup>1</sup>, WANG Shaoying<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou, 730000, China;  
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In this paper, by using the measured data observed in Lake Ngoring lakeside region during the summer of 2010, five fine days with continuous and integrated data are selected, and then their characteristics of daily variations of the surface radiation and energy budget and CO<sub>2</sub> flux and microclimate are analyzed over the high-cold meadow vegetation ecosystem in summer. The main conclusions can be drawn as follows. (1) For fine summer weather, the characteristics of micrometeorology are significantly affected by the lake breeze in lake-side region, not only the wind direction changes alternately but also the difference in temperature is relatively small between day and night. In addition, the updraft prevails in lakeside region, and the vertical wind speed and the friction velocity are much greater than those in Maqu grasslands. (2) The daily mean values of solar radiation and net radiation are larger than those in Maqu grasslands and Jinta oasis. As to the energy budget, the latent flux is significantly higher than the sensible flux, and the energy imbalance is large in the observation. There are distinct temperature inversion and humidity inversion phenomena in the surface layer at the night. (3) The maximum value of carbon absorption usually is observed at about 11 o'clock every morning over the meadow in lake-side region, and carbon absorption is significantly more than carbon emission. In terms of the water use efficiency (WUE), it is small, which is similar to that in Haibei meadow.

**Key words:** the source region of Yellow River; lake effect; energy budget; CO<sub>2</sub> flux; Lake Ngoring

本文引用格式:

李照国, 吕世华, 奥银焕, 等. 鄂陵湖湖滨地区夏季近地层微气象特征与碳通量变化分析. 地理科学进展, 2012, 31(5): 602-608.