

洪雯, 王毅勇, 聂晓. 2011. 湿地下垫面大气边界层温、湿廓线的数值模拟及影响因素分析 [J]. 气候与环境研究, 16 (4): 494–504.
Hong Wen, Wang Yiyong, Nie Xiao. 2011. Numerical simulation of temperature and humidity profiles in atmospheric boundary layer over wetland and analysis in influence factors [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (4): 494–504.

湿地下垫面大气边界层温、湿廓线的数值模拟 及影响因素分析

洪雯^{1,2,3} 王毅勇¹ 聂晓^{1,3}

1 中国科学院湿地生态与环境重点实验室, 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012

2 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 应用大气二维边界层数值模式, 对2008年夏季洪河国家级自然保护区沼泽湿地1000 m高度边界层的温度、湿度廓线进行了3次模拟试验, 并模拟分析了风速和下垫面粗糙度对湿地边界层温、湿廓线结构的影响。结果表明: (1) 大气二维边界层模式可以较好的模拟湿地下垫面边界层的温、湿结构, 并且该模式对位温的模拟效果优于比湿; (2) 风速和粗糙度是湿地下垫面大气边界层温、湿廓线结构的主要影响因素。60 m以下风速与边界层位温显著正相关; 200 m以下风速与边界层比湿显著负相关; 风速对位温和比湿的影响程度均随高度上升而增加。粗糙度对湿地边界层位温的影响高度为60 m, 对比湿的影响高度为10~20 m; 在影响高度之下粗糙度与位温和比湿均显著正相关, 且其影响程度均随高度增加减小; (3) 高层大气的位温和比湿变化主要受风速的影响, 而低层大气的位温和比湿变化则受到风速和粗糙度的共同影响。

关键词 湿地 大气边界层 温度和湿度廓线 数值模拟

文章编号 1006-9585 (2011) 04-0494-11 **中图分类号** P404 **文献标识码** A

Numerical Simulation of Temperature and Humidity Profiles in Atmospheric Boundary Layer over Wetland and Analysis of Influence Factors

HONG Wen^{1,2,3}, WANG Yiyong¹, and NIE Xiao^{1,3}

1 Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment Science, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012

2 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Ürümqi 830011

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract To study the vertical structure of temperature and humidity in the atmosphere boundary layer over the homogeneous wetland underlying surface, the two-dimensional numerical model was applied to simulate the potential temperature and specific humidity profiles within 1000 m in Honghe National Nature Reserve in the summer of 2008. Besides, the numerical simulation was also used to analyse the correlation between the structure of the atmospheric boundary layer and the two main influence factors (wind velocity and roughness length), and to investigate

收稿日期 2009-09-16 收到, 2011-03-07 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 40971026, 中科院知识创新项目 KZCX2-YW-Q06-03、KZCX2-YW-425

作者简介 洪雯, 女, 1983年出生, 博士研究生, 主要从事湿地气候效应数值模拟研究。E-mail: platypus11.11@163.com

通讯作者 王毅勇, E-mail: wangyiyong@neigae.ac.cn

their effects on the potential temperature and specific humidity at different heights. The results indicated that: (1) The two-dimensional numerical model could provide a fair description of the vertical structure of the atmosphere boundary layer over the wetland underlying surface, the simulated results of potential temperature were superior to the results of specific humidity. (2) Wind velocity and roughness length are the main factors influencing temperature and humidity profiles over the wetland underlying surface. Wind velocity performed remarkable positive correlation with potential temperature and negative correlation with specific humidity. Wind velocity had a similar correlation coefficient with potential temperature below 60 m, and significant negative correlation with specific humidity below 200 m. The effect of wind on potential temperature and specific humidity increased with height over wetland. The effective height of roughness length on potential temperature was 60 m, and that on specific humidity was between 10 m and 20 m. Roughness length of wetland underlying surface has a significant positive correlation with potential temperature and specific humidity under the affect altitude, and its influence decreased with increase in altitude. (3) The variation of potential temperature and specific humidity in high altitude were controlled by wind velocity mainly, but they were both influenced by wind velocity and roughness length in low altitude.

Key words wetland, atmosphere boundary layer, temperature and humidity profile, numerical simulation

1 引言

大气边界层是地球大气动量、热量和各种物质上下输送的重要通道,地表下垫面作为大气唯一的物理边界,在不同时空尺度上影响着气候变化和大气运动状态。下垫面的湿度是影响地—气相互作用的重要因子,它可改变能量平衡及地—气间的水循环速率,从而对其上的大气结构产生重要影响(Mahmood and Hubbard, 2003)。在干旱—半干旱地区进行的大量观测试验和模拟研究指出,由于荒漠和绿洲下垫面的不均匀性,可产生绿洲冷湿岛效应,并引起边界逆湿和局域环流等现象(苏从先等, 1987; 左洪超等, 2004; 吕世华和罗斯琼, 2005; 文莉娟等, 2008)。有关城市下垫面的边界层研究也表明,较为集中的植被和水域可影响局地气温和风速,明显削弱城市的热岛效应,并有助于改善大气污染状况(Civerolo et al., 2000; 佟华等, 2004; Robitu et al., 2006; Rizwan et al., 2008)。而湿地作为一种特殊的下垫面,其地表积水或过湿,具有独特的水成土和适水生物活动(陈宜瑜和吕宪国, 2003)。由于热容量大,导热性差,湿地的气温日较差和年较差较小;另外湿地的地表积水,或较高的潜水位,为大气提供充沛的水汽源,增大局地空气湿度。经过长时间的环境效应积累,大面积的湿地可形成较明显的冷湿小气候,从而影响大气边界层的水热状况和温、湿结构(陆健健等,

2006)。作为我国沼泽湿地面积最大和最集中的地区,三江平原的淡水沼泽湿地具有很好的典型性和代表性。已有研究表明三江平原大面积的湿地具有比较明显的“冷湿气候效应”,并且其影响程度与积水深度、植被状况及湿地尺度密切相关(高俊琴等, 2003; 张芸等, 2004)。但多数研究的范围仅局限在 2 m 高度以下,并没有上升到大气边界层高度,且已有工作多为定性的观测研究,对湿地下垫面大气边界层进行定量分析和模拟的研究尚很少见。因此本文基于湿地边界层 1000 m 高度的探空资料,应用大气二维边界层数值模式定量描述湿地下垫面大气边界层温、湿廓线的结构特征及其变化,并分析其影响因素的作用范围和影响程度,为湿地冷湿气候效应的深入研究提供模型基础。

2 研究区概况

选取位于三江平原东北部的洪河国家级湿地自然保护区($47^{\circ}42'18''\text{N}\sim 47^{\circ}52'07''\text{N}$, $133^{\circ}34'38''\text{E}\sim 133^{\circ}46'29''\text{E}$)为研究区域,总面积为 $2.18\times 10^4\text{ hm}^2$ 。保护区内集中分布着大面积的沼泽湿地,其沼泽类型、植被类型和土壤类型在三江平原均具有代表性和典型性。本区微地貌复杂,由各种洼地、低平地和平地组成,洼地常年积水,分布有多种类型的草本沼泽和沼泽化草甸。本区属温带湿润半湿润季风气候,年平均降水量 585 mm,其中 50%~70%的降水集中在 7~9 月。海

拔 58~61 m, 地面坡降 1/5000~1/10000, 主要土壤类型为草甸沼泽土、腐殖沼泽土、潜育沼泽土和白浆土, 试验区下垫面植物主要为毛苔草 (*Carex lasiocarpa*)、漂筏苔草 (*Carex pseudocuraica*) 和小叶章 (*Calamagrostis angustifolia*) 等 (倪红伟和李君, 1999)。

3 数据与方法

在 2008 年夏季选取晴朗微风的天气, 分别为 6 月 1 日、8 月 12 日和 9 月 14 日, 在洪河湿地自然保护区沼泽湿地中心 (47°47'16.10"N, 133°37'42.10"E) 进行系留气球探空观测, 观测高度为 1000 m, 同步记录湿地下垫面 0.5 m 的位温和比湿。由于野外试验条件的局限性, 每个观测日仅进行 2 次探空, 并且由于系留气球受风的制约较大, 因而 3 个观测日的探空时间并不一致, 2 次探空观测的时间间隔也不相同, 但观测时间均为上午。

采用系留气球对湿地下垫面边界层温、湿度廓线结构进行探空观测时, 将 3 个温湿度传感器系在气球下部, 随气球逐步上升到 1000 m 高度, 并自动记录沿途不同高度的气温和相对湿度。在剔除噪声值后, 取 3 组数据的平均值, 得到可信数据点。应用的大气温湿度传感器为 JL-06 型, 可根据设定的时间步长自动测量并记录气温和相对湿度, 气温精度为 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对湿度精度为 $\pm 3\%$ 。

在大气边界层的观测试验和模拟研究中, 通常用位温和比湿来表示大气的温、湿结构。位温 (θ) 是被订正到 1000 hPa 标准高度处的空气温度, 单位为 K。由于在遵循干绝热升降时, 位温恒定不变, 因而在研究大气垂直结构时常用位温表示空气温度。比湿 (q) 是每千克质量湿空气中所含水汽质量克数, 单位为 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。因为比湿不随空气团的体积变化而改变, 所以在讨论空气的垂直运动时, 常用比湿表示真实的空气湿度 (周淑贞, 1997)。将对应观测高度传感器测得的气温和相对湿度, 通过计算转换为位温和比湿, 从而对边界层温、湿度结构进行科学合理的描述 (徐玉貌等, 2000)。

基于探空试验所得的温、湿廓线和同步地表

观测, 设置模式的初始和边界条件, 通过求解大气二维边界层模式控制方程组的数值解, 模拟湿地下垫面边界层的温、湿廓线。将相同时间间隔的模拟廓线与同一观测日的第 2 次探空实测廓线进行对比, 应用相关系数法、相对误差法和 Nash-Sutcliffe 效率指数法 (模型效率系数 E_{ns}) 评价模拟结果, 并模拟分析风速和下垫面粗糙度在不同高度对位温和比湿的影响。

3.1 控制方程

目前已广泛应用大气边界层基本动力学方程组, 对不同下垫面边界层气象要素进行数值模拟研究, 并且在戈壁、绿洲和森林等下垫面均有较好的模拟效果 (刘树华等, 1995, 2005a, 2005b)。设定水平方向为 x , 垂直方向为 z , 则在平坦、均匀的下垫面条件下, 根据大气边界层基本方程组, 可得 $x-z$ 上位温和比湿的控制方程:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -u \frac{\partial \theta}{\partial x} - w \frac{\partial \theta}{\partial z} + K_H \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{z\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -u \frac{\partial q}{\partial x} - w \frac{\partial q}{\partial z} + K_H \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zq} \frac{\partial q}{\partial z} \right), \quad (2)$$

其中, θ 为大气位温, 单位为 K; q 为大气比湿, 单位为 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; u 和 w 分别为水平风速和垂直风速, 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; K_H 和 K_z 分别为水平和垂直方向的湍流交换系数, 单位为 $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 其中 K_H 作为已知参数设定, K_z 为混合层高度的函数, 可通过大气边界层湍流参数化求得 (刘树华等, 1995); 假设垂直方向热量和水汽通量的湍流交换系数相等, 即 $K_{z\theta} = K_{zq}$ 。式中 t 、 x 和 z 作为分母的项分别为时间导数项、水平平流项和垂直扩散项。

3.2 定解条件和差分格式

3.2.1 初始与边界条件

初始条件由 3 个观测日的第 1 次探空实测资料给出。图 1 为 3 次模拟的初始位温和比湿廓线, 时间分别为 2008 年 6 月 1 日 10 时 (北京时间, 下同)、8 月 12 日 06 时和 9 月 14 日 09 时。夏季晴天上午湿地下垫面边界层位温变化规律基本一致, 位温随高度增加而升高; 比湿变化规律相同, 随高度增加而减小。这均与典型晴天大气边界层位温和比湿的垂直变化规律相符 (翁笃鸣等, 1981)。

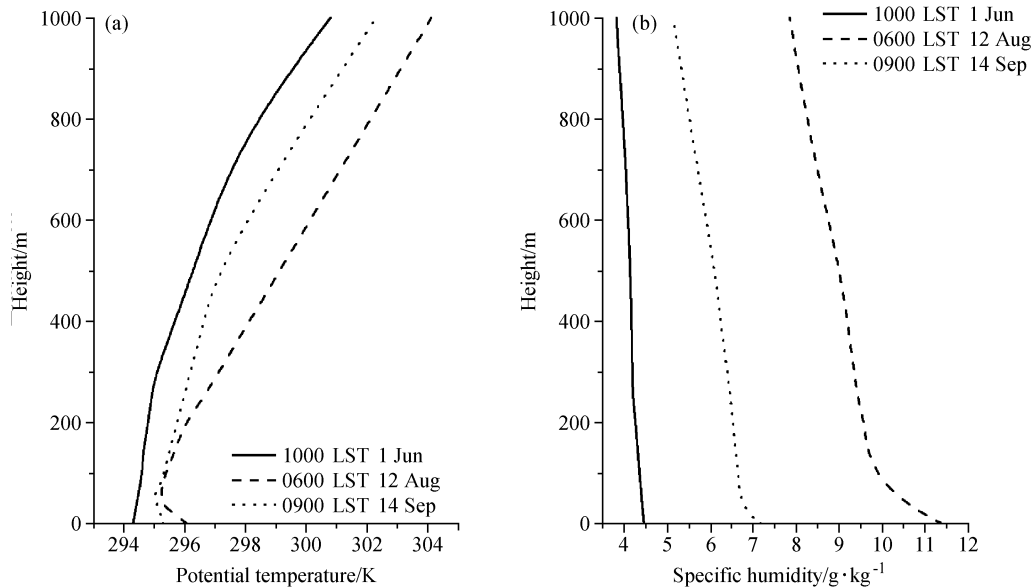


图1 初始 (a) 位温和 (b) 比湿廓线

Fig. 1 Initial profiles of (a) potential temperature and (b) specific humidity

尽管由于观测时期的不同导致廓线值整体差异较大,但廓线形状仍可代表该时刻的廓线特征。由图 1a 的位温廓线图可见,06 时(8 月 12 日)在 60 m 以下出现较强的超绝热递减层,位温直减率可达 $2.14 \text{ K} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$;至 09 时(9 月 14 日)位温递减层依旧存在,但强度明显减小,位温直减率下降到 $0.53 \text{ K} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$;随着太阳辐射对大气增温逐渐强烈,低层大气中的超绝热递减层逐渐减弱,至 10 时(6 月 1 日)已完全消失,位温直减率转为负,位温开始随高度增加。60 m 以上,随太阳高度角的增大位温的变化趋于缓和,位温直减率逐渐减小,06 时(8 月 12 日)、09 时(9 月 14 日)和 10 时(6 月 1 日)的位温直减率分别为 -0.97 , -0.78 和 $-0.69 \text{ K} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ 。

由图 1b 的比湿廓线图可见,100 m 以下的比湿随高度迅速减小,且随太阳辐射的增加,比湿直减率迅速减小。06 时(8 月 12 日)比湿直减率为 $1.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$,到 09 时(9 月 14 日)已降到 $0.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$;至 10 时(6 月 1 日)比湿变化已很微弱,直减率仅为 $0.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ 。100 m 以上比湿均随高度继续保持递减,但直减率明显小于低层大气,并随太阳辐射的加强其变化趋于缓和,比湿直减率逐渐减小。100~1000 m 范围内,06 时(8 月 12 日)的比湿直减率为 $0.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$,09 时

(9 月 14 日)下降到 $0.17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$,而 10 时(6 月 1 日)的比湿直减率仅为 $0.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ 。

比较图中廓线可得,位温和比湿均呈现出 8 月 > 9 月 > 6 月,表现为雨热同步,这和 2008 年夏季实际观测的气温规律相一致,也与三江平原沼泽湿地的降水特点相吻合。

模式的边界条件设置如下:

上边界: $z=1000 \text{ m}$;

下边界: $\theta(I,k)=\theta'(n)$, $q(I,k)=q'(n)$;

左边界: $\theta(I,k)=\theta(2,k)$, $q(1,k)=q(2,k)$;

右边界: $\theta(I,k)=\theta(I-1,k)$, $q(I,k)=q(I-1,k)$ 。

其中, I 和 K 分别为水平格点总数和垂直格点总数, i 和 k 分别为水平格点数和垂直格点数,即 $i=1, 2, 3, \dots, I$, $k=1, 2, 3, \dots, K$; N 为时间格点总数, n 为时间格点数, $n=1, 2, 3, \dots, N$; 下边界中的 $\theta'(n)$ 和 $q'(n)$ 分别为湿地下垫面 0.5 m 高度同步观测所得的位温和比湿。

3.2.2 计算解域与差分格式

模拟时间区间为北京时间 06 时至 18 时,时间步长取 $\tau=30 \text{ s}$ 。计算空间为水平尺度 10 km,高度为 1 km 的空间区域。水平格点数 $I=20$,格距 $\Delta x=500 \text{ m}$ 。考虑到近地面物理量变化剧烈,在垂直方向上采用上疏下密的非等距网格,垂直格点数 $K=15$,分别取 0.5、10、20、40、60、

80、100、150、200、250、300、400、500、750、1000 m。本文所输出的位温和比湿的垂直廓线模拟结果为 $I=11$ 处的值。模式中时间导数项采用向前差分格式，水平和垂直湍流扩散项采用隐式差分格式（孙志忠，2005）。

3.3 参数设定

3.3.1 风速

由于下垫面摩擦速度在近地层内基本不随高度变化，因此根据中性层结条件下的风速廓线方程，可由 10 m 高度风速计算出近地层风速廓线（Mihailovic et al., 1999）。垂直方向 z 高度上风速 $u(z)$ 与 10 m 高度风速 u_{10} 的关系如下：

$$u(z) = u_{10} \times \frac{\ln(\frac{z}{z_0})}{\ln(\frac{10}{z_0})} \quad (3)$$

依据三江沼泽湿地生态试验站气象观测站 10 m 高度的 10 分钟平均风速资料，即可得出中性层结大气条件下理想的风速廓线，作为风速数据输入。

3.3.2 粗糙度

空气动力学粗糙度 (Z_0) 是风速等于 0 的某一几何高度，是流体力学、大气边界层理论研究的一个重要参数（刘小平和董治宝，2003）。根据典型地形的空气动力学粗糙度研究，在地形平坦的草地下垫面，其粗糙度数量级为 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ m（Stull, 1988）。表 1 中列出了一些计算植被覆盖地表的空气动力学粗糙度 Z_0 的经验公式，反映出下垫面植被高度对 Z_0 的影响（李振山和陈广庭，1997）。本文综合考虑几种经验公式的计算结果，分别对应 3 次观测时期研究区内植被平均高度，设定 3 次模拟时间的下垫面粗糙度分别为 0.03、

0.05 和 0.04 m。

4 结果与分析

4.1 位温廓线的模拟

图 2 给出了 3 次实测位温廓线和模拟值的比较，实点为实测位温值，圈点为模拟位温值。模拟的位温廓线基本再现了实测位温的空间分布特征。

6 月 1 日 11 时 30 分，在 0~200 m 位温模拟值与实测值吻合较好，100~500 m 模拟值高于实测值，500 m 以上模拟值与实测值又呈现较好的吻合。8 月 12 日 07 时，在 0~60 m 位温随高度递减，模拟值和实测值吻合较好，60 m 以上，位温开始转为随高度递增，60~500 m 模拟值略大于实测值，500 m 以上模拟值和实测值很接近。9 月 14 日 10 时 30 分，在 0~100 m 模拟值与实测值较好吻合，而在 100~400 m 模拟值略大于实测值，400 m 以上位温模拟值又小于实测值，模拟廓线与实测廓线表现出波动的相关关系。

对 2008 年 3 次位温模拟结果的精度评价如表 2，表中可以看出该模式对位温的模拟效果较好。模拟值与实测值之间呈极显著正相关 ($P < 0.01$)；其相对误差 $R_E \leq 0.2\%$ ，模拟值与实测值相近程度高，模拟值略大于实测值；Nash 效率系数法检验均满足 $E_{ns} > 0.75$ ，表明模拟效果较好。说明该模式对位温的模拟可信，模拟的位温廓线基本反映了湿地下垫面实际大气边界层的温度特征。

4.2 比湿廓线的模拟

图 3 给出了 3 次实测比湿廓线和模拟值的比较。模拟的比湿廓线基本再现了实测比湿的空间

表 1 湿地下垫面空气动力学粗糙度的经验估算

Table 1 Empirical formula and estimate for aerodynamic roughness length of wetland surfaces

		不同月份的植被高度对应的粗糙度估算值/m		
		6 月 ($h=40$ cm)	8 月 ($h=60$ cm)	9 月 ($h=50$ cm)
经验公式	$Z_0=0.04H^{1.417}$ (Sellers, 1965)	0.011	0.019	0.015
	$Z_0=0.13H^{0.997}$ (Tanner and Pelton, 1960)	0.052	0.078	0.065
	$Z_0=0.06H^{1.19}$ (Kung, 1961, 1963)	0.020	0.033	0.026
	$Z_0=0.1H$ (Saxton, 1974; Houghton, 1985)	0.040	0.060	0.050
平均粗糙度		0.031	0.047	0.039

注： H 为下垫面植被高度； h 为月平均植被高度。

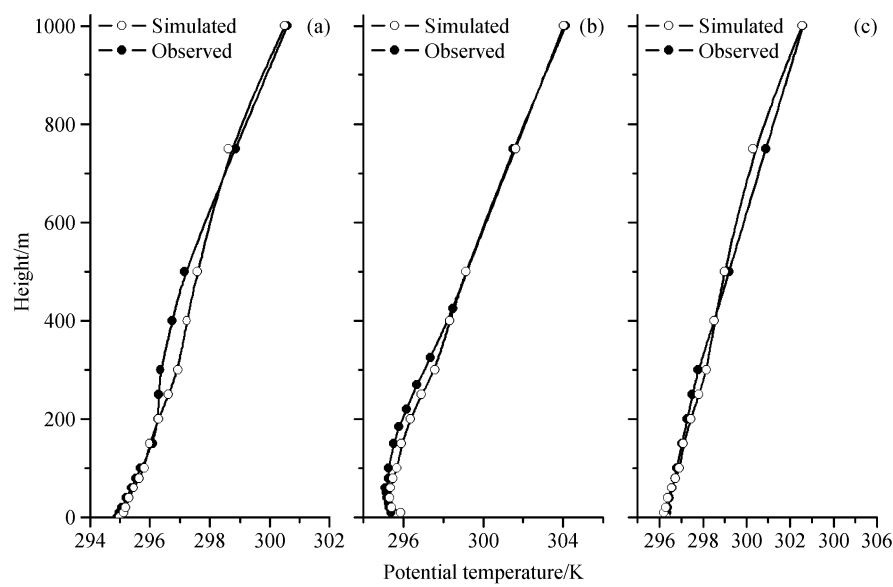


图2 位温廓线的实测值与模拟值的比较: (a) 2008年6月1日11时30分; (b) 2008年8月12日07时; (c) 2008年9月14日10时30分

Fig. 2 Comparison between the measured and simulated potential temperature profiles: (a) 1130 LST 1 Jun 2008; (b) 0700 LST 12 Aug 2008; (c) 1030 LST 14 Sep 2008

表2 位温模拟值的精度评价

Table 2 Accuracy assessment of calculated potential temperature profiles

方法	2008年6月1日 11时30分	2008年8月 12日07时	2008年9月14日 10时30分	效果 评价
相关系数法	$r=0.989^{**}$ sig. =0.000	$r=0.991^{**}$ sig. =0.000	$r=0.982^{**}$ sig. =0.000	极显著线性正相关
相对误差法	$R_E=0.18\%$	$R_E=0.2\%$	$R_E=0.01\%$	$R_E<0.2\%$, 效果好
效率系数法	$E_{ns}=0.78$	$E_{ns}=0.93$	$E_{ns}=0.96$	$E_{ns}\geq 0.75$

* 表示显著性水平 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, r 为相关系数, sig. 是差异显著性系数, 下同。

分布特征。

6月1日11时30分,在0~200 m模拟值明显低于实测值,200~400 m模拟值与实测值吻合较好,400 m以上模拟值又大于实测值。尽管图中显示的模拟值和实测值之间存在较明显差异,但由于6月1日10时至11时30分的比湿垂直变化幅度很小,因而其实际差异也比较微弱。8月12日07时,0~100 m比湿随高度迅速减小,随后比湿直减率明显减小,模拟廓线很好的反映了这一特征,但模拟值略小于实测值,而在400 m以上模拟值和实测值较吻合。9月14日10时30

分,在0~100 m实测比湿直减率较大,100~200 m其递减速率减缓,至200 m以上又迅速增大。而模拟的比湿廓线则未能较好的反映出这一特征,整体表现较为平滑,仅在300 m以下呈现出较大的比湿直减率,而300 m以上比湿直减率减小。

对2008年3次比湿模拟结果的精度评价如表3,表中可以看出该模式对比湿有较好的模拟效果。模拟值与实测值之间呈极显著正相关 ($P < 0.01$);其相对误差 $R_E \leq 5\%$,相近程度较高;依据Nash效率系数法,6月1日和8月12日 $E_{ns} > 0.75$,模拟效果好,而根据经验值判定区间 $0.36 \leq E_{ns} \leq 0.75$,认为9月14日的模拟结果令人满意,但不及前两次好。整体表明该模式对比湿的模拟可信,模拟的比湿廓线基本反映了湿地下垫面实际大气边界层的湿度特征。

综合3次模拟精度评价结果可得,该模式对位温的模拟值更接近于实测值,即位温的模拟效果优于比湿。这一结果与应用同一模式的研究结果相似,在黑河戈壁下垫面大气边界层模拟研究中,利用二维大气边界层模式得出位温的模拟结果与实际观测结果基本一致,而比湿的模拟值比实际值偏小。刘树华等(1995)认为这主要是由

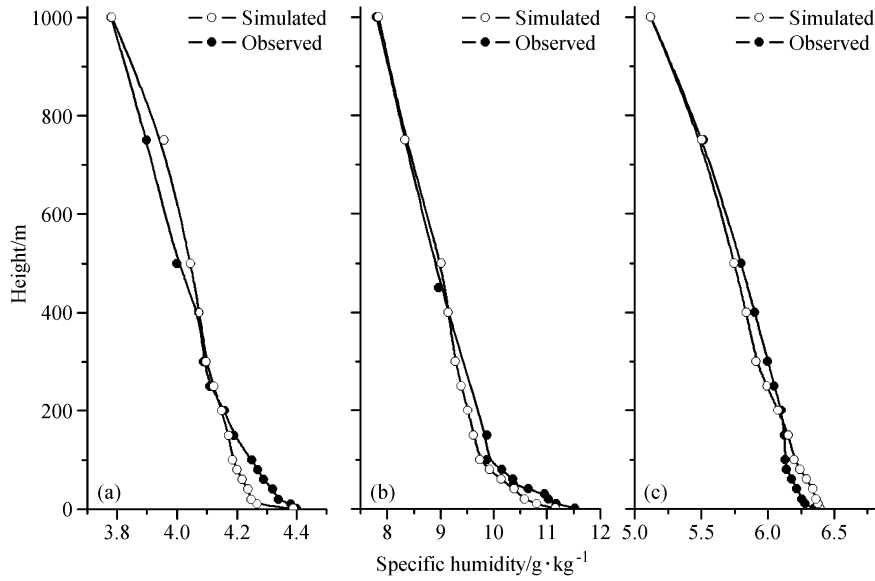


图3 同图2, 但为比湿廓线的实测值与模拟值的比较
Fig. 3 Same as Fig. 2, but for specific humidity profile

表3 比湿模拟值的精度评价

Table 3 Accuracy assessment of calculated specific humidity profiles

	2008年6月1日 方法 11时30分	2008年8月 12日07时	2008年9月14日 10时30分	效果 评价
相关系 数法	$r=0.974^{**}$ sig. =0.000	$r=0.995^{**}$ sig. =0.000	$r=0.933^{**}$ sig. =0.000	极显著线 性正相关
相对误 差法	$R_E=-1.63\%$	$R_E=-4.28\%$	$R_E=0.47\%$	$R_E<5\%$, 效果好
效率系 数法	$E_{ns}=0.80$	$E_{ns}=0.84$	$E_{ns}=0.47$	$E_{ns}>0.36$, 效果好

于位温受地面垂直交换影响较大, 而比湿除受垂直交换影响外, 还显著受到局地环流因素的影响所致。

4.3 影响因子模拟分析

湿地下垫面大气边界层结构的影响因素主要是太阳辐射、风速、天气条件等外部因子, 以及下垫面的植被高度、密度、地表积水深度、水平尺度等内部因子。由于风速和粗糙度是多个影响因素共同作用的结果, 也分别代表了外部和内部因素的综合影响。因此, 研究风速和粗糙度对湿地下垫面大气边界层结构的影响具有重要意义。本文以2008年8月12日的模拟试验为例, 选取12时的模拟结果, 分析风速和下垫面粗糙度对湿地大气边界层温、湿廓线结构的影响。

4.3.1 风速的影响

由于不同高度风速差异较大, 对温、湿度的影响程度也不同, 因此在垂直方向上设立5个高度, 分别为10、60、100、200和500 m, 比较不同高度上风速与位温和比湿的相关性(表4)。

表4 风速与位温、风速与比湿相关性分析

Table 4 Analysis of correlation between wind velocity and potential temperature, wind velocity and specific humidity

高度/m	风速与位温			风速与比湿		
	r	sig.	P	r	sig.	P
10	0.937*	0.019	<0.05	-0.946*	0.015	<0.05
60	0.937*	0.019	<0.05	-0.946*	0.015	<0.05
100	0.940*	0.017	<0.05	-0.945*	0.015	<0.05
200	0.942*	0.016	<0.05	-0.946*	0.015	<0.05
500	0.954*	0.012	<0.05	-0.949*	0.014	<0.05

风速与位温的相关性分析表明: 5个不同高度上风速与位温均呈显著正相关($P<0.05$), 即位温随风速的增大而升高, 且影响程度随高度增大而加强, 即高空风速对位温的影响程度要大于近地面(表4)。已有研究表明, 由于地表积水和湿地植被等独特的下垫面性质, 大面积的湿地能够产生明显的冷湿气候特征, 表现为相对于周围区域, 湿地近地边界层气温相对较低, 湿度相对较大(高俊琴等, 2003; 徐惠风等, 2006)。当风

速增大，湍流增强，有利于湿地上空的热量交换，从而削弱了湿地的冷气候效应，使湿地边界层内温度升高。60 m 以下风速与位温的相关系数为 0.937，在此高度以下风速对位温的影响程度近似；60 m 以上相关系数随高度增加，至 500 m 相关系数已达到 0.954。因此认为在 60 m 以上风速对位温的影响程度随高度增加，随风速增大，高层大气的位温升高速率大于低层。

风速与比湿的相关性分析表明：5 个不同高度上的风速与比湿均呈显著负相关 ($P < 0.05$)，即比湿随风速的增加而减小。风速对比湿的影响主要是由于风速增大，湍流增强，水汽交换增大，湿地上空形成的较多的水汽，易被气流吹散，湿地的湿气候效应也得到减弱，风速越大，这种减弱效应越明显。风速对比湿的影响程度随高度增加，即高空风速对比湿的影响程度大于低空。200 m 高度以下，风速与比湿的相关系数相近，因此认为在此高度以下风速对比湿的影响程度近似；200 m 以上相关系数随高度增加，至 500 m 高度相关系数已达到 -0.949。随风速增大，高层大气的比湿减小速率大于低层。

4.3.2 粗糙度的影响

有关研究表明，下垫面的粗糙度影响仅在近地面层较为显著 (岳天祥等, 2006)。因此在近地层 100 m 高度内增加对比梯度，在垂直方向上设立 8 个高度，分别为 10、20、40、60、80、100、200 和 500 m。

粗糙度与位温的相关性分析表明 (见表 5)：8 个不同高度上的粗糙度与位温均呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，即位温随粗糙度的增大而升高。当湿地下垫面粗糙度增大，低层大气的空气水平运动受到下垫面摩擦的影响，风速降低，水平方向上的热量交换减弱，则位温维持在一个较稳定的水平。10 m 高度相关系数为 0.959，随高度上升相关系数增大，20~40 m 相关系数较大，其中 20 m 高度的相关系数值达到 0.965，至 60 m 相关性系数已迅速减小到 0.944。之后随高度上升相关系数又开始增大，但并没有达到 40 m 以下的较高值，这说明湿地下垫面的粗糙度对位温的影响在低空高于高空。这主要是由于随高度升高风速迅速增大，依据上一部分的分析，高空风速对位温的影响要大于低空，这与下垫面粗糙度对位温产

生的作用相抵消，甚至以风速的影响占主导，因而在 60 m 高度以上相关性系数又增大，但这与下垫面的粗糙度已无直接联系，粗糙度与位温的相关关系仅为一种假象。因此认为下垫面粗糙度对湿地边界层位温的影响只能达到 60 m 高度。60 m 以下，粗糙度对位温的影响程度随高度增加而减小。

表 5 粗糙度与位温、比湿相关性分析

Table 5 Analysis of correlation between roughness and potential temperature, roughness and specific humidity

高度/m	风速与位温			风速与比湿		
	<i>r</i>	sig.	<i>P</i>	<i>r</i>	sig.	<i>P</i>
10	0.959**	0.002	<0.01	0.966**	0.002	<0.01
20	0.965**	0.002	<0.01	-0.941**	0.005	<0.01
40	0.962**	0.002	<0.01	-0.950**	0.004	<0.01
60	0.944**	0.003	<0.01	-0.953**	0.003	<0.01
80	0.956**	0.003	<0.01	-0.953**	0.003	<0.01
100	0.956**	0.003	<0.01	-0.954**	0.003	<0.01
200	0.951**	0.004	<0.01	-0.953**	0.003	<0.01
500	0.956**	0.003	<0.01	-0.949**	0.004	<0.01

粗糙度与比湿的相关性分析表明 (见表 5)：8 个不同高度上的粗糙度与比湿的关系较复杂。10 m 粗糙度与比湿呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，其相关系数为 0.966。而至 20 m 高度，粗糙度与比湿开始呈负相关，其相关系数为 -0.941，随后相关系数随高度升高而增大。因此认为湿地下垫面的粗糙度对比湿的影响高度在 10~20 m 之间。在 10 m 贴地气层内，比湿随粗糙度增大而显著增加，这主要是由于湿地边界层内的湿环境，除了地表积水的水分蒸发外，还有日间湿地植被蒸腾的增强作用。当植被高度增大或覆盖程度增加时，下垫面粗糙度增大，植物的水汽蒸腾作用也增强，因而在距离地表较近的贴地气层内产生较大的空气比湿。另一方面，粗糙度增大，低层大气的风速受到下垫面摩擦的影响而降低，水平方向上水汽交换的减弱，有利于湿地下垫面湿环境的形成和增强。

湿地下垫面粗糙度对大气边界层位温和比湿的影响高度分别为 60 m 和 10~20 m 之间，这与前人对下垫面粗糙度的研究成果能够对应。已有研究表明粗糙元素斑块阻滞作用的最大高度为 60 m (Pasquill, 1972; Pretel, 1984; Wieringa,

1986), 这与本研究模拟得出的粗糙度对位温的影响高度是一致的, 而模拟的粗糙度对比湿的影响高度则较低, 这主要是由湿地特殊的地表水文状况和水生植被共同作用引起的。

对比同一高度风速、粗糙度与位温的相关性可得: 在低空粗糙度的影响大于风速, 随高度升高, 二者对位温的影响程度逐渐接近。对比同一高度风速、粗糙度与比湿的相关性可得: 在低空下垫面粗糙度的影响程度大于风速, 随高度增加, 粗糙度对比湿转为负影响, 与风速的负影响作用相互加强。

5 结论与讨论

本文基于湿地边界层 1000 m 高度的探空资料, 应用大气二维边界层数值模式模拟分析了湿地下垫面大气边界层温、湿廓线的结构特征及其变化, 并模拟分析了其影响因素, 研究结果如下:

(1) 本文采用的大气二维边界层模式可应用于湿地下垫面, 2008 年夏季的 3 次模拟试验结果表明, 该模式对湿地下垫面边界层温、湿廓线的模拟结果能基本反映实际边界层结构特征, 并且位温的模拟效果优于比湿。

(2) 风速和粗糙度是湿地下垫面大气边界层温、湿廓线结构的主要影响因素。模拟结果表明: 风速与湿地边界层位温显著正相关, 60 m 以下其影响程度相同; 风速与比湿显著负相关, 200 m 以下其影响程度相近; 风速的影响程度均随高度增加。粗糙度对湿地边界层位温的影响高度为 60 m, 对比湿的影响高度为 10~20 m 之间, 在影响高度之下粗糙度与位温和比湿均显著正相关, 且其影响程度均随高度减小。

(3) 高层大气的位温和比湿变化主要受风速影响, 而低层大气的位温和比湿变化则受到风速和粗糙度的共同作用。

由于模拟中应用的风速场为理想的中性层结条件, 而这与实际大气层结状况有所差异, 由于风速对比湿的影响较大, 因而这也很可能是导致比湿模拟效果较差的原因。此外, 本文对下垫面粗糙度的设置仅简单参考了植被高度, 并没有考虑植被密度和尺度, 因而可能产生模拟结果的差异。另外, 受到观测方式的局限, 野外系留气球

试验受风的影响较大, 因而导致 3 次边界层探空观测的时间不一致, 且初始廓线与验证廓线的时间间隔也较短, 不利于模型的验证。在今后的试验中应增加不同时段探空观测, 并将观测的时间间隔加大, 以对模型进行精细校正。在湿地均匀下垫面大气边界层结构的模拟基础上, 下一步工作可结合农田等其他下垫面, 对湿地冷湿气候效应及湿地—农田的水热交换的空间过程进行深入而细致的研究。

参考文献 (References)

- Civerolo K L, Sistla G, Rao S T, et al. 2000. The effects of land use in meteorological modeling: Implications for assessment of future air quality scenarios [J]. *Atmos. Environ.*, 34 (10): 1615–1621.
- 陈宜瑜, 吕宪国. 2003. 湿地功能与湿地科学的研究方向 [J]. *湿地科学*, 1 (1): 7–11. Chen Yiyu, Lü Xianguo. 2003. Wetland function and its research direction [J]. *Wetland Science (in Chinese)*, 1 (1): 7–11.
- 高俊琴, 吕宪国, 刘红玉. 2003. 湿地冷湿效应初探 [J]. *农村生态环境*, 19 (1): 18–21. Gao Junqin, Lü Xianguo, Liu Hongyu. 2003. Cold-humid effect of wetlands [J]. *Rural Eco-Environment (in Chinese)*, 19 (1): 18–21.
- Houghton D D. 1985. *Handbook of Applied Meteorology* [M]. New York: John Wiley and Sons, 1461pp.
- Kung E C. 1961. Derivation of roughness parameters from wind-droly profile data above tall vegetation [R]. *Annual Report of the Meteorology Department, University of Wisconsin, U. S.*, 27–35.
- Kung E C. 1963. Climatology of aerodynamic roughness parameter and energy dissipation in the planetary boundary layer over the Northern Hemisphere [R]. *Annual Report of the Meteorology Department, University of Wisconsin, U. S.*, 37–96.
- 李振山, 陈广庭. 1997. 粗糙度研究的现状及展望 [J]. *中国沙漠*, 17 (1): 99–102. Li Zhenshan, Chen Guangting. 1997. A review of roughness length [J]. *Journal of Desert Research (in Chinese)*, 17 (1): 99–102.
- 刘树华, 洪钟祥, 李军, 等. 1995. 戈壁下垫面大气边界层温、湿结构的数值模拟 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 31 (3): 345–350. Liu Shuhua, Hong Zhongxiang, Li Jun, et al. 1995. The two dimensional numerical simulation of temperature and humidity profiles structure of atmospheric boundary layer over Gobi underlying surface [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese)*, 31 (3): 345–350.
- 刘树华, 胡予, 胡非, 等. 2005a. 绿洲效应的模拟及内外因子的敏感性实验 [J]. *大气科学*, 29 (6): 997–1009. Liu Shuhua, Hu Yu, Hu Fei, et al. 2005a. Numerical simulation of oasis effect

- and its sensitivity test of inside and outside factors [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (6): 997 - 1009.
- 刘树华, 胡予, 胡非, 等. 2005b. 沙漠—绿洲陆—气相互作用和绿洲效应的数值模拟 [J]. 地球物理学报, 48 (5): 1019 - 1027.
- Liu Shuhua, Hu Yu, Hu Fei, et al. 2005b. Numerical simulation of land-atmosphere interaction and oasis desert [J]. Chinese Journal of Geophys (in Chinese), 48 (5): 1019 - 1027.
- 刘小平, 董治宝. 2003. 空气动力学粗糙度的物理与实践意义 [J]. 中国沙漠, 23 (4): 337 - 346.
- Liu Xiaoping, Dong Zhibao. 2003. Review of aerodynamic roughness length [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 23 (4): 337 - 346.
- 陆健健, 何文珊, 童春富, 等. 2006. 湿地生态学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 283pp.
- Lu Jianjian, He Wenshan, Tong Chunfu, et al. 2006. Wetland Ecology [M] (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 283pp.
- 吕世华, 罗斯琼. 2005. 沙漠—绿洲大气边界层结构的数值模拟 [J]. 高原气象, 24 (4): 465 - 470.
- Lü Shihua, Luo Siqiong. 2005. Numerical simulation of boundary layer structure in desert-oasis [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (4): 465 - 470.
- Mahmood R, Hubbard K G. 2003. Simulating sensitivity of soil moisture and evapotranspiration under heterogeneous soils and land uses [J]. J. Hydrol., 280: 72 - 90.
- Mihailovic D T, Lalic B, Rajkovic B, et al. 1999. A roughness sublayer wind profile above a non-uniform surface [J]. Bound. - Layer Meteor., 93: 425 - 451.
- 倪红伟, 李君. 1999. 洪河自然保护区生物多样性 [M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 20 - 21.
- Ni Hongwei, Li Jun. 1999. Biodiversities of Honghe National Nature Reserve [M] (in Chinese). Harbin: Science and Technology Press, 20 - 21.
- Pasquill F. 1972. Some aspects of boundary layer description [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 98: 469 - 494.
- Pretel J. 1984. Describing the terrainhomogeneity in the bottom layer of atmosphere [J]. Journal of Meteorology (in German), 34: 253 - 255.
- Rizwan A M, Dennis L Y C, Liu C, et al. 2008. A review on the generation, determination and mitigation of urban heat island [J]. Journal of Environmental Sciences, 20 (1): 120 - 128.
- Robitu M, Musy M, Inard C, et al. 2006. Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate [J]. Solar Energy, 80: 435 - 447.
- Saxton K E, Johnson H P, Shaw R H. 1974. Watershed evapotranspiration estimated by the combination method [J]. Transactions of the American Society for Aerospace Education, 17 (4): 668 - 672.
- Sellers W D. 1965. Physical Climatology [M]. Chicago: University of Chicago Press, 272pp.
- Stull R B. 1988. An Introduction to Boundary Layer Meteorology [M]. New York: Kluwer Academic Publishers, 378pp.
- 苏从先, 胡隐樵, 张永丰, 等. 1987. 河西地区绿洲小气候特征和“冷岛效应” [J]. 大气科学, 11 (4): 390 - 396.
- Su Congxian, Hu Yinqiao, Zhang Yongfeng, et al. 1987. The microclimate character and “cold island effect” over the oasis [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 11 (4): 390 - 396.
- 孙志忠. 2005. 偏微分方程数值解法 [M]. 北京: 科学出版社, 86 - 94.
- Sun Zhizhong. 2005. Numerical Solution Method of Partial Differential Equations [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 86 - 94.
- Tanner C B, Pelton W L. 1960. Potential evapotranspiration estimates by the approximate energy balance method of Penman [J]. J. Geophys. Res., 65: 3391 - 3413.
- 佟华, 刘辉志, 桑建国, 等. 2004. 城市人为热对北京热环境的影响 [J]. 气候与环境研究, 9 (3): 409 - 421.
- Tong Hua, Liu Huizhi, Sang Jiangu, et al. 2004. The impact of urban anthropogenic heat on Beijing heat environment [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (3): 409 - 421.
- 文莉娟, 吕世华, 孟宪红, 等. 2008. 夏季绿洲气候效应的观测和数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 13 (3): 300 - 308.
- Wen Lijuan, Lü Shihua, Meng Xianhong, et al. 2008. Observation and numerical simulation of microclimate of oasis in summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (3): 300 - 308.
- 翁笃鸣, 陈万隆, 沈觉成, 等. 1981. 小气候和田间小气候 [M]. 北京: 中国农业出版社, 93 - 123.
- Weng Duming, Chen Wanlong, Shen Juecheng, et al. 1981. Microclimate and Agricultural Microclimate [M] (in Chinese). Beijing: China Agricultural Press, 93 - 123.
- Wieringa J. 1986. Roughness-dependent geographical interpolation of surface wind speed averages [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 112: 867 - 889.
- 徐惠风, 金研铭, 刘兴土, 等. 2006. 长白山山区沟谷乌拉苔草 *Carex meyerianaz* 沼泽湿地气候效应 [J]. 生态环境, 15 (1): 120 - 123.
- Xu Huifeng, Jin Yanming, Liu Xingtu, et al. 2006. The Hydrologic-physical effects of *Carex meyeriana* in the Changbai Mountain valley [J]. Ecology and Environment (in Chinese), 15 (1): 120 - 123.
- 徐玉貌, 刘红年, 徐桂玉. 2000. 大气科学概论 [M]. 南京: 南京大学出版社, 219pp.
- Xu Yumao, Liu Hongnian, Xu Guiyu. 2000. Introduction of Atmosphere Science [M] (in Chinese). Nanjing: Nanjing University Press, 219pp.
- 岳天祥, 王薇, 于强, 等. 2006. 中性条件下垂直风速廓线及其参数模拟分析 [J]. 资源科学, 28 (1): 136 - 144.
- Yue Tianxiang, Wang Wei, Yu Qiang, et al. 2006. Simulation of vertical wind profile and its relevant parameters under neutral condition [J]. Resource Science (in Chinese), 28 (1): 136 - 144.
- 张芸, 吕宪国, 倪健. 2004. 三江平原典型湿地冷湿效应的初步研究 [J]. 生态环境, 13 (1): 37 - 39.
- Zhang Yun, Lü Xianguo, Ni Jian. 2004. Cold-humid ecological effects of the Sanjiang Plain [J]. Ecology and Environment (in Chinese), 13 (1): 37 - 39.

周淑贞. 1997. 气象与气候学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 260pp. Zhou Shuzhen. 1997. Meteorology and Climatology [M] (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 260pp.

左洪超, 吕世华, 胡隐樵, 等. 2004. 非均匀下垫面边界层的观测和数值模拟研究 (I): 冷岛效应和逆湿现象的完整物理图像

[J]. 高原气象, 23 (2): 155-162. Zuo Hongchao, Lü Shihua, Hu Yinqiao, et al. 2004. Observation and numerical simulation of heterogenous underlying surface boundary layer (I): The whole physical picture of cold island effect and inverse humidity [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (2): 155-162.