

青海湖湖陆风的数值研究*

陈万隆 孙卫国 周竞南
(南京气象学院, 南京 210044)

陈江
(新疆气象局, 乌鲁木齐 830002)

提要 用一个含植被参数化的二维中尺度模式研究青海湖夏季的湖陆风, 模拟结果再次表明该模式具有重现局地中尺度环境特征, 如冷(热)岛环境和湿岛等, 同时表明, 模式对植被覆盖度是敏感的, 即有稀疏植被覆盖($\sigma=30\%$)情况的湖陆风白天比裸地情况要小, 夜间则大, 湖岸水平温度(或湿度)梯度随植被覆盖度增加而减小。

关键词 湖陆风 植被覆盖度 青海湖 数值模拟

青海湖位于青藏高原西北端, 祁连山东南, 其流域介于 $97^{\circ}50' \sim 101^{\circ}13'E$ 和 $36^{\circ}15' \sim 38^{\circ}20'N$ 之间, 是我国最大的内陆高原咸水湖泊。湖盆形状似梨形, 西北—东南向最长处达 109km, 东北—西南向最宽处有 67km。1981 年平均水位为 3193.92m, 最大水深约 27m, 湖水面积为 4340.0km² 左右^[1]。湖体周围是山前倾斜平原, 海拔在 3200~3500m 之间, 地势较平坦, 草场因过度放牧而遭破坏。年最高水温出现在 8 月, 达 21~25℃, 10 月末至 11 月初开始进入冰期, 至次年 4 月至 5 月初结束, 冰下水温维持在 -0.5℃ 左右, 年均水温为 5~6℃。

该湖的形成及其变迁虽有较多的研究, 但对它们的气象科学问题至今还研究得不多, 许协江等利用湖四周气候站的资料分析发现, 一年四季均有湖陆风出现^①。

关于湖陆风的数值模拟研究, 在国外开展的很多。例如, Moroz^[2], Patrinos 等^[3], Estoque^[4], Ballentine^[5], Alpert 等^[6], Maddukuri^[7] 等采用静力学中尺度数值模式对安大略湖、密执安湖等世界著名的平原大湖泊的湖陆风进行了数值模拟。最近, 我国的王浩和傅抱璞针对小型湖泊提出一个非静力平衡中- γ 尺度的数值模式^[8]。陈万隆等则建立了一个含植被影响的湖陆风中- β 尺度数值模式^[9], 本文将利用这个模式对静稳的气象背景下青海湖的湖陆风和温、湿度分布特征进行数值研究。

1 模式与试验方案

1.1 模式简介

本模式为二维中- β 尺度静力学数值模式, 通过地面能量平衡方程将大气动力学模式与

① 许协江等。青海湖湖陆风气候分析。青海环境, 1981, (3)。

* 国家气象局高原气象研究基金和江苏省自然科学基金共同资助项目(编号: BK93139202)。

收稿日期: 1993 年 7 月 20 日; 接受日期: 1995 年 3 月 10 日。

作者简介: 陈万隆, 男, 1940 年生, 副教授。1964 年南京大学气象系毕业, 主要从事小气候与边界层气象研究与教学工作。合著有《小气候与农田小气候》、《小气候学》, 并发表有关论文 70 余篇。

土壤模式耦合起来,植被参数化是在地面能量平衡方程中引入^[9]。

1.1.1 大气模式 以局地坐标系 (x, y, γ) 表示,其中垂直坐标 γ 与常用的垂直坐标 σ 之间满足 $\sigma = (4\gamma - \gamma^4)$,式中 $\sigma = (P - P_T)/\pi, \pi = P_s - P_T$ 表示下边界气压 P_s 与模式顶气压 P_T 之差。在二维条件下,模式大气方程组为:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{\partial(Uu)}{\partial x} - \frac{1}{\sigma'} \frac{\partial(\sigma'U\dot{\gamma})}{\partial \gamma} + fV + (\Phi - \frac{R_s T^* \sigma \pi}{P}) \frac{\partial \pi}{\partial x} - \frac{\partial(\pi \Phi)}{\partial x} + F_s \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{\partial(Vu)}{\partial x} - \frac{1}{\sigma'} \frac{\partial(\sigma'V\dot{\gamma})}{\partial \gamma} - fU + F_s \quad (2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{\partial(Su)}{\partial x} - \frac{1}{\sigma'} \frac{\partial(\sigma'S\dot{\gamma})}{\partial \gamma} + F_s + R \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -\frac{\partial(Qu)}{\partial x} - \frac{1}{\sigma'} \frac{\partial(\sigma'Q\dot{\gamma})}{\partial \gamma} + F_q \quad (4)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} = -\int_0^1 \sigma' \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right) d\gamma \quad (5)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{\pi \sigma'} \int_0^1 \sigma' \left(\frac{\partial \pi}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} \right) d\gamma \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -C_p \theta (1 + 0.61q_v) \quad (7)$$

式中, $U = \pi u, V = \pi v, S = \pi (\ln \frac{T}{P} + \frac{Lq_v}{C_p T}), Q = \pi q_v, f$ 表示柯氏参数, R_s 为普适气体常数, T^* 表示虚温, θ 代表位温, $\kappa = 2/7, q_v$ 为水汽混合比, R 表示由于辐射所引起的熵变化, F_s 和 F_q 表示雷诺应力作用项, F_s 和 F_q 分别表示热量和水汽的湍流扩散项。式中还利用了以下关系: $\sigma' = \frac{d\sigma}{d\gamma}, \Phi = gZ, \dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}, T^* = T(1 + 0.61q_v), \hat{P} = (P/P_0)^\kappa, \theta = T/\hat{P}, L = 597.3 - 0.566(T - 273.16)$,其它符号同常用。

方程组(1)~(7)共含有12个未知变量,即 $U, V, \dot{\gamma}, \pi, \Phi, S, Q, F_s, F_v, F_q$ 和 R ,故为非闭合方程组。为了闭合和求解以上控制方程组,必须对湍流扩散项 F 和辐射加热项 R 进行次网格参数化。大气边界层中垂直湍流扩散项 F 的参数化采用了Therry等提出的湍流动能平衡改进方案,而辐射加热项 R 的参数化参照了Mahrer等的方案^[9]。

1.1.2 土壤模式 采用的是McCumber等提出的土壤温度 T_s 和容积湿容量 η 的预报方程^[9],即:

$$\rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} (\lambda \frac{\partial T_s}{\partial Z}) \quad (8)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} (D_v \frac{\partial \eta}{\partial Z}) + \frac{\partial K_v}{\partial Z} \quad (9)$$

式中 ρ_s 和 C_s 分别表示土壤的密度和比热,而 $\rho_s C_s$ 则表示土壤容积热容量, λ 表示土壤导热系数, D_v 表示土壤水力扩散系数, K_v 为水分渗透系数。方程(8)和(9)是以Clapp一组经验关系来闭合求解的^[9]。

1.1.3 模式的边界条件 上边界, S 和 Q 均取为常值, $\dot{\gamma} = 0, P_T = 100 \text{ hPa}$;大气侧边界取周期性侧边界条件;土壤层下边界, T_s 和土壤水分势 ψ 取为常数。

地面,取 $U = V = 0$,且满足水量平衡和热量平衡条件,即在晴天(无降水、径流)条件

下,土壤蒸发量 E 与土壤湿通量 W_{ζ} 达到平衡,则有:

$$E - W_{\zeta} = 0 \quad (10)$$

而大气与土壤表面的能量交换达到平衡时有:

$$R_s + R_L - \sigma_0 \delta T_0^4 + LE + H_s - \rho_s K_{\zeta} \left. \frac{\partial T_{\zeta}}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad (11)$$

式中, R_s 表示太阳短波净辐射, R_L 表示大气向下辐射, T_0 表示地面温度, σ_0 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数, δ 为灰体辐射系数(取 0.95), LE 和 H_s 分别表示潜热通量和感热通量。

水面,用温度和比湿的连续条件分别取代方程(10)和(11),且 $U = V = 0$ 。

当地面有植被覆盖时则引入 Deardorff 植被参数对方程(10)和(11)进行修正。修正后的土壤-植被层的感热(潜热)通量是由土壤与植被冠层的感热(潜热)通量和植被冠层与其上邻近大气的感热(潜热)通量所组成^[9]。

1.1.4 差分方案 采取有限差分格式,模式大气垂直方向对 y 均分成 15 层,模式顶取在 100hPa 等压面上。对土壤模式深度坐标进行对数变换,即 $\zeta = \ln(1 + z/d)$,然后将 ζ 等分为 13 层,这里 $d = 1\text{cm}$, $0 \leq z \leq 100\text{cm}$ 。时间差分取中央差分,空间差分取蛙跃格式,垂直湍流扩散项采用 Crank-Nicholson 格式。

1.2 试验方案

本文研究二维问题, X 轴取为东西向。设坐标原点位于 $37^{\circ}30'N$ 和 $99^{\circ}30'E$ (大约在湖中心),通过此点的湖泊东西宽度为 90km。水平格距取为 10km,共取 26 个格点,第 9 至第 18 个格点表示东西向湖区。

试验中以 σ 表示植被覆盖度,它代表在单位水平地面面积中,植被阻挡太阳短波辐射到达地面的程度, $0 \leq \sigma \leq 1$, $\sigma = 0$ 指裸地, $\sigma = 1$ 表示地面完全被稠密植被覆盖^[9]。考虑湖泊周围有植被和裸地两种情况,土壤为沙质土,试验参数列于表 1。试验日期选在水温最高季节的 8 月 15 日,并假定为晴天、无任何扰动系统影响,初始大气处于准静止状态。初始温、湿度廓线采用茫崖站 8 月份平均温、湿度探空资料,初始风速如表 1 所示,并设初始气象要素场为水平均匀,湖面水温为 $21^{\circ}C$ 。

表 1 试验地点参数和初始风速

Tab. 1 Parameters of land and initial windspeed in the numerical experiment site

试 验	植被覆盖度 σ (%)	植被高度(m)	土壤湿度(%)	初始风速 V_0 (m/s)
1	0	0	12	0.001
2	30	0.1	12	0.001

积分从地方时 06h 开始,时步取为 10s,共积分 24h。每 600s 用 5 点平滑公式对时间积分结果平滑一次。

2 结果分析

2.1 湖陆风的数值模拟

据观测,青海湖一年四季地面白天盛行湖风,夜间吹陆风。刚察站观测到的岸边地面年

平均风速为 3.6m/s,江西沟站为 2.4m/s^①。

试验 1 表示没有植被的情况。计算结果均以地方时(LST)表示。图 1 为青海湖四周没有植被时正午(12:00LST) U 和 W 的分布。由图清楚看出,白天湖区出现明显的湖风环流,最大水平风速出现在 100 多米高度上,正午达 5m/s,湖面上方为下沉运动区,最大下沉速度达 7~8cm/s。夜间(图略)则出现陆风环流,午夜最大水平风速可达 2~3m/s,湖面上方的上升运动在 1cm/s 以下。若以 U 为分量粗略判断,青海湖 8 月湖陆风环流的厚度约为 1km。

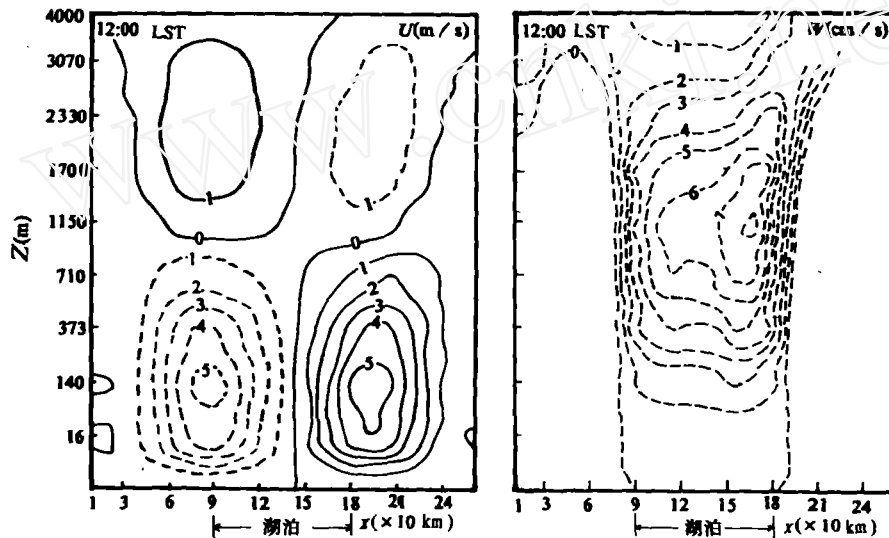


图 1 青海湖 8 月 15 日正午湖岸无植被覆盖($\sigma=0\%$)的水平风速 U (实线表示西风,虚线代表东风)和垂直速度 W (实线表示上升运动,虚线为下沉运动)的垂直剖面图

Fig. 1 Vertical cross sections of horizontal windspeed U (m/s) with the positive (negative) values denoting west (east) wind and vertical velocity W (cm/s) with the positive (negative) values denoting updraft (downdraft) over Qinghai Lake for the parameter of vegetative cover $\sigma=0\%$, respectively

图 2 显示湖岸有植被覆盖($\sigma=30\%$)时的流场。由图 2 与图 1 相比看出,正午有植被覆盖时的湖风比无植被时减少 1~2m/s,最大下沉速度减小 2cm/s。但是,夜间最大水平风速和最大上升运动分别比无植被时增大 1m/s 和 1cm/s 左右(图略)。这是容易理解的。因为白天牧草阻挡部分太阳短波辐射到达地面,部分净辐射消耗在植物蒸腾上,致使湖岸 10km 内地面水平温度梯度比裸地湖岸减少约 2K(图 3),所以湖风减弱。而在夜间,由于有植被的湖岸白天土壤获得的太阳短波辐射比裸地湖岸土壤要少,故夜间土壤温度较低,湖陆表面温差较大,以致陆风比无植被情况有所增强。

另外,由上述二图的 U 分量看出,在 3km 高度以下其垂直分布出现 2 个极大值,但速度都低于地转风。显然,这种低空急流是由下垫面非均匀热力强度作用的周期性变化引起的。这种现象与均匀边界的低空急流不同,后者仅在夜间出现,并可超过地转风,常以惯性振荡理论加以解释^[10]。

① 许协江等. 青海湖湖陆风气候分析. 青海环境, 1981, (3).

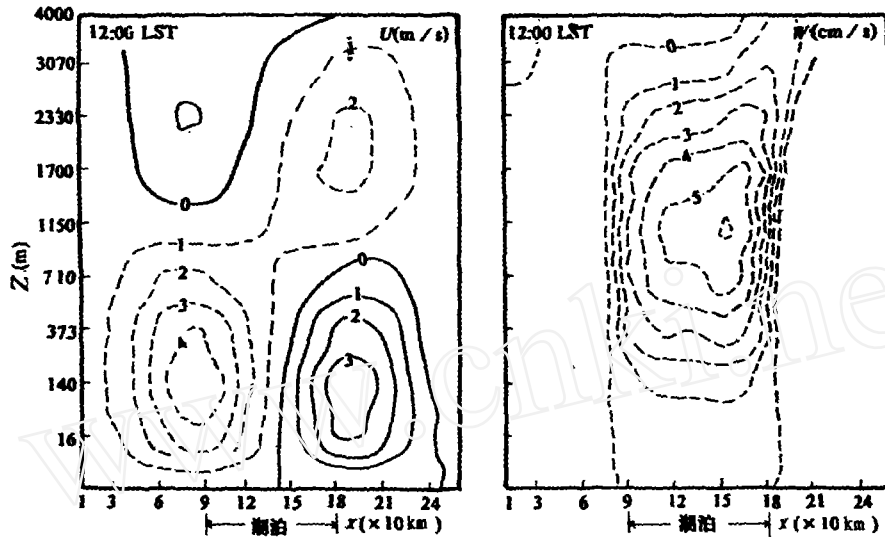


图2 青海湖湖岸植被覆盖度为 $\sigma = 30\%$ 的水平风速 U 和垂直速度 W 的剖面图

Fig. 2 As in Fig. 1, but for $\sigma = 30\%$

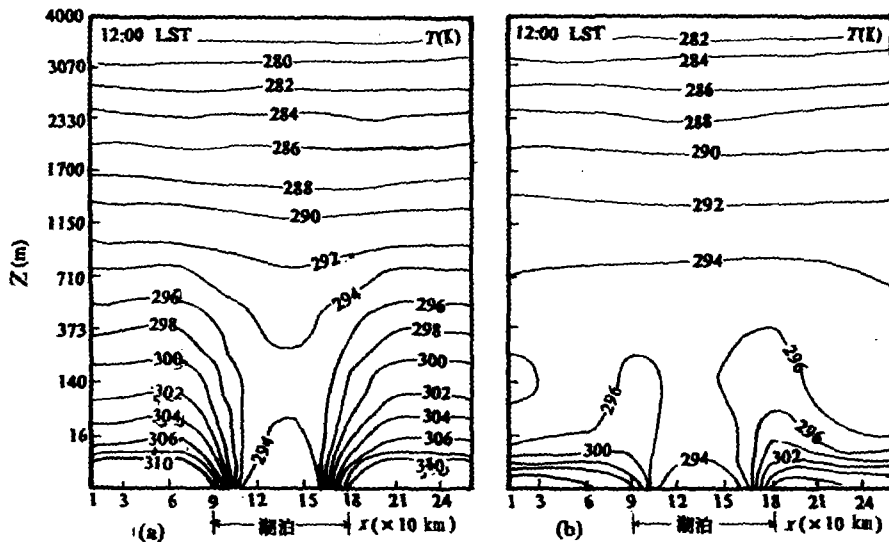


图3 青海湖8月15日正午的温度 T (K)分布

(a) $\sigma = 0\%$; (b) $\sigma = 30\%$

Fig. 3 Vertical cross section of air temperature (K) at 12:00 LST, August 15, over Qinghai Lake for the parameters of vegetative cover $\sigma = 0\%$ (a) and $\sigma = 30\%$ (b), respectively

2.2 冷、热岛和湿岛的数值模拟

夏季白天,湖泊获得的净辐射大部分用于水面蒸发上。因此,湖面近地层空气及水体增温很慢,相反湖岸上获得的净辐射主要用于加热土壤和近地层空气,结果水面温度低于陆面温度,于是湖泊相对于陆地便形成一冷岛。而夜间因陆地辐射冷却快,陆面温度低于湖面温

度,结果在湖面上形成一热岛.图3已清晰反映出冷岛的特征,即不论湖岸有无植被覆盖,正午湖面温度比陆面低12K左右,且陆地上温度垂直分布呈超绝热递减率,湖面上大气层结为近中性.夜间(图略)湖面温度比陆面高好几度,且水面上大气层结呈现为弱不稳定状态,而陆地上变为稳定层结.

图3还表明,冷(热)岛的热力扰动高度,无植被时可达1km左右,而在有植被情况下仅达到700m附近.从水平梯度来看,正如上节所述,白天(正午)裸地情况下湖岸附近近地面温度水平梯度大于有植被覆盖的情况,夜间(图略)则小于后者.

干旱和半干旱气候区,在没有大尺度水汽平流条件下,湖泊便是主要的水汽源地,在空气比湿的空间分布上湖区表现出湿岛的特征,即比湿由湖区向外逐渐递减.青海湖白天和夜间均为湿岛,尤其在夜间,湿岛特征更为明显.图4表示湖岸有植被覆盖、初始大气处于准静止状态条件的比湿空间分布.白天因湖泊四周的湍流交换强烈,比湿等值线呈扁平状,夜间湍流因受到逆温层结的抑制,水汽主要藉助垂直运动向上输送,所以比湿等值线呈向上递减的湿舌状.当湖岸没有植被时,比湿空间分布形状大致与上述有植被情况类似,所不同的是裸地上比湿的水平梯度要比有植被覆盖条件下大(图略).图4还说明,湖泊湿岛的垂直扰动可达到4km的高度,远远超过了冷(热)岛的热力扰动厚度.这是干旱和半干旱气候区非均匀湿边界层的重要特征.

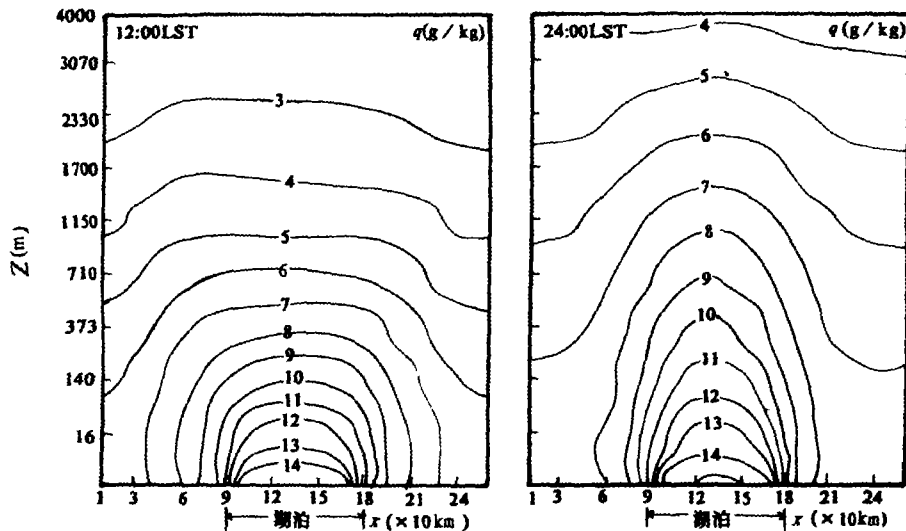


图4 青海湖湖岸有植被($\sigma=30\%$)时8月15日正午、午夜空气比湿 q (g/kg)分布

Fig. 4 Vertical cross section of specific humidity q (g/kg) at 12:00 LST and 24:00 LST for the parameter of vegetative cover $\sigma=30\%$, others as in Fig. 3

3 讨论与小结

目前,尚缺少青海湖大气边界层的观测资料,因此对于上述数值计算结果还无法用实测资料加以验证.但是从定性上看,这些计算结果,尤其是在有植被覆盖($\sigma=30\%$)的情况下,

类似于苏从先等^[1]在戈壁滩的绿洲上所观测到的冷(热)岛和湿岛的事实。从温度分布的模拟来看,无论有植被还是没有植被覆盖时,陆地贴地气温正午达到或超过 30℃,这比高原夏季实际气温偏高了幾度。其中没有植被的陆地气温比有植被的情况更高,说明考虑植被的模拟效果比不考虑植被要好。贴地层气温模拟偏高的主要原因,是由于本模式垂直分辨率较低,第二层高度约为 16m,此高度以下的气温等值线是由第一层地面温度与第二层气温内插得到的,故贴地层气温受地面温度影响的权重自然加大了。另外,由于初始场没有引入平流作用,易造成湖岸垂直速度等值线呈陡直形状,且湖陆空气比湿梯度较大。本计算采用周期性侧边界条件,看来对结果也会造成一定影响。以上问题都有待进一步研究解决。

如上所述,本模式的计算结果能较好地重现高原湖泊的局地环流。夏季数值试验表明,高原上水陆表面的热力差异是驱动青海湖湖陆风的最重要的因素,白天湖面为冷岛,夜间则为热岛。湖岸植被覆盖的作用是通过调整下垫面的热量平衡及由此改变水陆的温、湿度差异,来对湖陆局地环流施加影响。稀疏植被覆盖($\sigma=30\%$)可使白天湖风减弱和夜间陆风有所增强,并使湖岸空气比湿的水平梯度减小。考虑有植被覆盖比不考虑植被覆盖时能改进温度分布的模拟。

致谢 范建华博士为本研究提供了有关资料,苗永耀硕士协助调试模式,濮培民研究员对本工作提出宝贵意见,在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 青海水文总站. 青海湖水文特征. 水文, 1984, (2): 47~49
- 2 Moroz W J. A lake breeze on the eastern shore of Lake Michigan: Observations and model. *J Atmos Sci*, 1967, 24: 337~355
- 3 Patrino A N A et al. A numerical study of the Chicago lake breeze. *Boundary-Layer Meteorol*, 1977, 12: 93~123
- 4 Estoque M A et al. Further studies of a lake breeze, Part II: Theoretical study. *Mon Wea Rev*, 1981, 109: 619~634
- 5 Ballentine R J. Numerical simulation of land-breeze-induced snowbands along the western shore of Lake Michigan. *Mon Wea Rev*, 1982, 110: 1544~1553
- 6 Alpert P et al. A simulation of a Lake Michigan winter land breeze on the 7th of November, 1978. *Mon Wea Rev*, 1983, 111: 1873~1881
- 7 Maddukuri C S. A numerical simulation of an observed lake breeze over southern Lake Ontario. *Boundary-Layer Meteorol*, 1982, 23: 369~387
- 8 王浩等. 一个用于研究湖泊对气候环境影响的非静力平衡数值模式. *气象科学*, 1992, 12: 1~13
- 9 陈万隆等. 一个含植被影响湖陆风数值模式. *南京气象学院学报*, 1994, 17(1): 64~72
- 10 Blackadar A K. Boundary layer wind maxima and their significance for the growth of nocturnal inversions. *Bull Amer Meteor Soc*, 1957, 38: 283~290
- 11 苏从先等. 河西地区绿洲的小气候特征和“冷岛效应”. *大气科学*, 1987, 11(4): 390~396

A NUMERICAL SIMULATION ON LAKE-LAND BREEZE OF QINGHAI LAKE

Chen Wanlong Sun Weiguo Zhou Jingnan

(*Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044*)

Chen Jiung

(*Xinjiang Meteorological Bureau, Urumqi 830002*)

Abstract

A 2-D mesoscale model including a vegetative parameterization is used to study the lake-land breeze of Qinghai Lake during summer and a lake-land breeze is again simulated, thereby confirming the ability of the model to reproduce the known properties of this local mesoscale circulation, such as cold (heat) island circulation and wet island. The results show that this model is sensitive to changes in the vegetative cover, namely, the lake-land breeze with shore covered by sparse vegetation ($\sigma=30\%$) is smaller (greater) than that at daytime (night) in the case of bare shore. It is also shown that the horizontal temperature (or humidity) gradient is decreased when the vegetative cover is increased.

Key Words Qinghai Lake, lake-land breeze, vegetative cover, numerical simulation