

湖陆环流对博斯腾湖蒸发影响的数值模拟研究

张晔¹, 钟琦^{1,2*}, 张文煜³, 郭振海⁴, 陈昊明², 曹勇⁵, 魏晓敏¹

1. 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081;
2. 中国气象科学研究院, 北京 100081
3. 郑州大学地球科学与技术学院, 郑州 450001;
4. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029;
5. 国家气象中心, 北京 100081

摘要: 新疆地区地处亚欧大陆腹地, 气候条件干燥, 水资源时空分布不均, 可用水资源匮乏。湖泊是新疆水资源主要贮存方式之一, 其通过多界面、多要素大气边界层物理过程调控区域水热物质交换与循环, 对缓解干旱区沙漠化发挥不可或缺的作用。本文以博斯腾湖为研究对象, 利用 WRF-CLM 模拟 2020 年夏季 6 月~8 月共计 92 天的局地环流形势, 分析近地面风场、水汽分布并结合去湖试验, 获得局地环流对湖面蒸发的影响机制, 具体表现为: 盛行湖风时, 湖面蒸发的水汽会在上岸气流的携带下向陆地输送, 同时在湖风锋的上升气流影响下向高空扩散, 在山谷风等背景风的综合作用下, 湖风环流会携水汽下沉并聚集于湖岸形成离散分布的水汽聚集区, 这些区域的比湿保持在较高水平。博斯腾湖的水汽聚集区分布于湖区西侧, 这些区域具有边界层高度较周边其他陆面边界层低, 下垫面多为植被覆盖等特点。

关键词: 湖泊蒸发, 局地环流, 数值模拟, 湖陆风, 博斯腾湖

收稿日期 2024-09-04; **网络预出版日期**

作者简介 张晔, 女, 1990 年出生, 博士, 工程师, 主要从事数值模拟与机器学习交叉应用、短临天气预报方面的研究。E-mail: 2570881324@qq.com

通讯作者 钟琦, E-mail: zhongq@cma.gov.cn

资助项目 新疆自治区重点研发专项 (2022B03027-2)、国家自然科学基金项目 (42030611、42075154)、中国气象局气象干部培训学院科研项目-培育项目 (2024CMATCPY04)、中国气象局创新发展专项 (CXFZ2023J001)、灾害天气国家重点实验室开放课题 (2023LASW-B05)

Funded by Key Research and Development Project of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2022B03027-2); National Natural Science Foundation of China (42030611, 42075154); Scientific Research Project - Cultivation Project of China Meteorological Administration Training Centre (2024CMATCPY04); Innovation and Development Project of China Meteorological Administration (CXFZ2023J001); Open Project of State Key Laboratory of Severe Weather (2023LASW-B05).

文章编号:

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2502.24093

Numerical study on the influence of lake-land circulation on evaporation in Bosten Lake

ZHANG Ye¹, ZHONG Qi^{1,2*}, ZHANG Wenyu³, GUO Zhenhai⁴,

CHEN Haoming², CAO Yong⁵, WEI Xiaomin¹

¹China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081, China

² Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

³School of Geoscience and Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China

⁴State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

⁵ National Meteorological Center, Beijing 100081, China

Abstract: Xinjiang is situated in the interior of the Eurasian continent. It is characterized by arid climatic conditions, presenting an uneven spatial and temporal distribution of water resources and a paucity of accessible water resources. Lakes constitute one of the primary means of water resource storage in Xinjiang. They play a pivotal and irreplaceable role in combating desertification within the arid region. Through complex multi-interface and multi-factor physical processes occurring within the atmospheric boundary layer, lakes modulate the regional exchange and circulation of water and heat materials. In this research endeavor, Bosten Lake was chosen as the focal point. The WRF-CLM model was employed to simulate the local circulation patterns over a span of 92 days from June to August in the summer of 2020. By meticulously analyzing the near-surface wind fields and water vapor distribution, and in conjunction with lake-removal experimental setups, the mechanism underlying the influence of local circulation on the evaporation of the lake surface was unearthed. The details unfold as follows: When the lake breeze holds sway, the water vapor that evaporates from the lake surface is ferried towards the land, propelled by the onshore

air currents. Concurrently, under the sway of the updraft at the lake breeze front, it disperses into the upper atmosphere. Under the combined forces of the valley wind and background wind, the lake breeze circulation drives the water vapor downward, congregating it along the lakeshore to form discretely scattered water vapor accumulation zones. The specific humidity within these areas persists at an elevated level. The water vapor accumulation area of Bosten Lake is predominantly distributed on the western flank of the lake. Notably, the boundary layer height in these regions is lower than that of the neighboring land surfaces, and the underlying surface is largely blanketed by vegetation.

Keywords: lake evaporation, local circulation, numerical simulation, lake land breeze, Bosten Lake

1 引言

新疆维吾尔自治区地处亚欧大陆腹地,气候干燥,水资源匮乏且分布不均(巴乌龙, 2019),经济发展与水资源分布不匹配(刘东莱, 2023; 中国国家统计局, 2022),供需矛盾突出。在传统筑坝蓄水方式缓解水资源短缺遇瓶颈的情况下,从节流角度抑制湖面蒸发成为保持水源的有效途径。湖泊是新疆重要水资源贮存形式,对涵养水源、调节气候等意义重大(Zhou et al, 2021),其中博斯腾湖作为内陆最大淡水湖,蒸发量巨大,如 1958-2010 年间,蒸发量约为入湖水量的 50% 以上(伊丽努尔 阿力甫江等, 2015),抑制其蒸发量对保持水源极具价值。

目前抑制湖面蒸发的传统方法,如使用化学覆盖剂、搭建遮阳设施等,多适用于中小型湖泊或水库(Katti 等, 1986; 杨坤等, 2015; 武金慧, 2008; Mart ínez-Alvarez 等, 2006; Benzaghta 等, 2012; Cleugh 等, 2008),对大型湖泊实施困难且对生态环境影响大(唐凯等, 2017)。本研究设想通过影响湖泊周围大气动力或热力状况,改变湖陆局地大气边界层微气象特征来抑制湖面蒸发。

湖陆风作为一种中尺度天气现象,由湖陆热力差异引起,它能够促进湖面与陆面之间的水汽、热量和动量交换(陈曙阳, 2021; 王伟等, 2022)。相关研究表明,湖陆风对湖区周边气象要素变化影响显著(MacKay 等, 2003; Long 等, 2007)。例如,白天湖风盛行时,湖面水汽被携带至陆地,可增加陆地空气湿度,降低气温;夜间陆风主导,陆地上相对干燥、温暖的空气吹向湖面,影响湖面气象条件。在复杂地形下,湖陆风还会与山谷风等地形风相互作用,对局地环流产生深刻影响(Steenburgh 等, 2000; Laird 等, 2009; 麦子, 2016; Lyons 等, 1972; Pielke 等, 2001; Stivari 等, 2003)。像在一些山区湖泊,湖陆风与山谷风叠加,会改变局地气流的垂直运动和水平输送路径,进而影响区域的天气和气候。

不过，当前针对湖泊参与湖陆循环的研究，大多聚焦于污染物扩散聚集方面（Bytnerowicz 等，2013；Wentworth 等，2015；Lyons 等，1973；Comer 等，1993；Douglas 等，1991）。例如，研究发现湖陆风会影响污染物在湖面和陆面之间的传输与扩散，改变污染物的浓度分布和沉降区域。但对于湖泊蒸发水汽的聚集情况及其影响机制，相关研究相对较少。

本研究以博斯腾湖为对象，利用 WRF-CLM 模式模拟 2020 年夏季局地环流形势，核心目标是探讨基于气象学理论的抑制湖面蒸发技术可行性，通过研究局地环流对湖泊蒸发的影响机制，为后续湖泊周边风电场科学布设提供思路，实现发电与节水相得益彰，紧密契合相关政策，为水资源保护、风电建设和政府决策提供理论参考。本研究的创新点在于：一是利用数值模拟手段，如将 ERA5 再分析数据降尺度、提高模式分辨率等研究湖陆环流影响博斯腾湖蒸发过程；二是重点研究高蒸发天气过程中局地环流对湖面蒸发的影响机制，为后续风电场布设提供依据。

2 研究区域与使用数据

2.1 博斯腾湖研究区域地理位置及气候特征

博斯腾湖位于天山南麓（ $86^{\circ}40'\sim 87^{\circ}25'E$ ， $41^{\circ}56'\sim 42^{\circ}14'N$ ），焉耆盆地东南部，湖泊面积约为 1646 km^2 （图 1）。地势西高东低，北高南低（图 2），海拔范围约 $856\sim 4798\text{ m}$ ，形成高山、峡谷和盆地交错的复杂地形（艾则孜提约麦尔·麦麦提等，2018；肉克亚木·艾克木等，2020）。气象资料显示，该区域多年平均降水量 $47.7\sim 68.3\text{ mm}$ ，多集中于 6-8 月；夏季炎热，冬季寒冷少雪，形成中温带大陆性荒漠气候（王军强等，2022）。

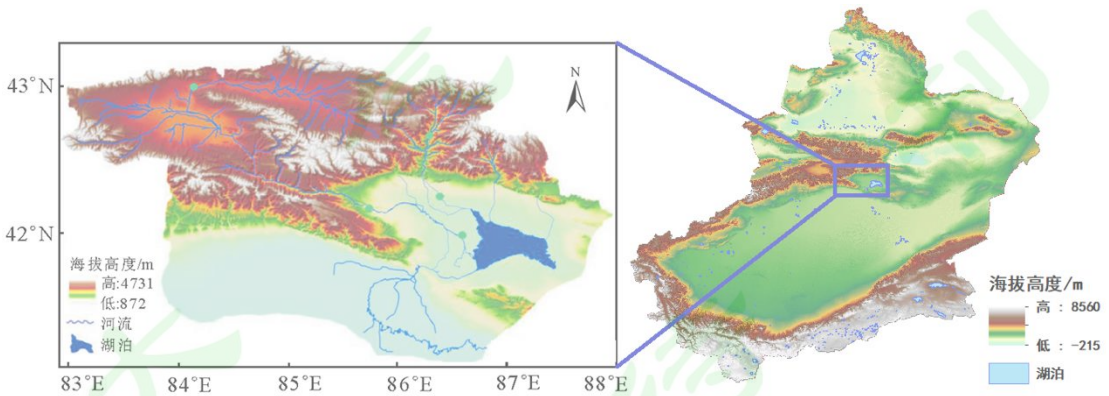


图 1 博斯腾湖地理位置

Fig. 1 Geographical location of Bosten Lake.

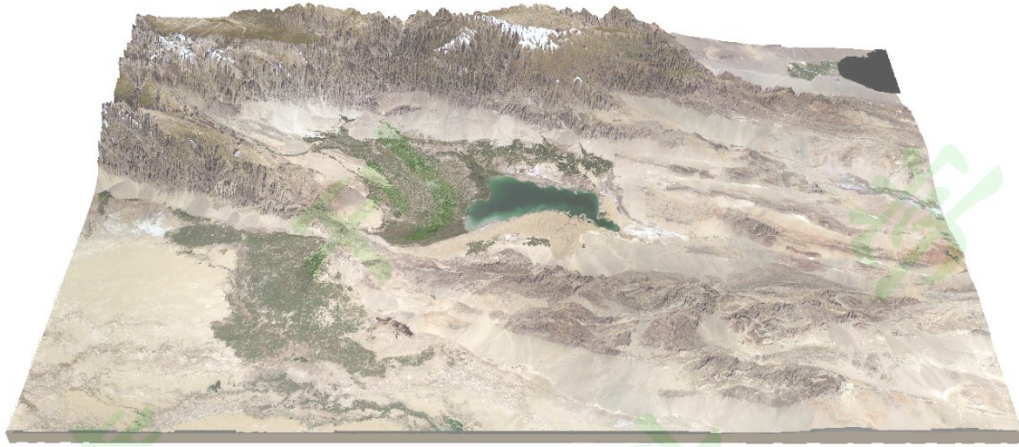


图 2 博斯腾湖研究区域地势情况（为突出地势差，此处地形进行 5 倍处理）

Fig. 2 Topographic situation of the research area of Bosten Lake (To highlight the topographic difference, the terrain here is processed five times).

2.2 数据资料介绍

（1）为了详细对比分析研究区域的气象要素、地形要素、边界层高度等要素，以及驱动 WRF 模式，本文选用了欧洲中期天气预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF）的第五代大气再分析数据集（ERA5）（Hersbach et al, 2020）。本研究选用的变量包括逐小时的各气压层的风矢量、气温、降水、蒸发、辐射、露点温度、边界层高度、位势高度、地表粗糙度、摩擦速度、地表感热通量、地表潜热通量等，空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。数据集下载链接：<https://cds.climate.copernicus.eu/>。数据时段取 2020 年 6 月至 8 月。

（2）为了统计研究区域近地面的每天气象要素的高分辨率信息，本文进一步选用欧洲中期天气预报中心第五代陆面再分析数据集（ERA5-Land）。本研究选用的变量包括逐小时的风矢量、气温、降水量、蒸发量等，其空间分辨率达到 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ （约 9 km），是目前最先进的全球土地利用再分析数据集（Joaquín et al, 2021；曲学斌等 2022），数据集下载链接：<https://cds.climate.copernicus.eu/>。数据时段取 2020 年 6 月至 8 月。

（3）观测资料：气象观测资料选用焉耆气象站（ 86.6°E , 42.05°N , 1055.4 m）、和静气象站（ 86.37°E , 42.33°N , 1113.2 m）、和硕气象站（ 86.85°E , 42.26°N , 1085.4 m）2020 年 6 月~8 月逐小时近地面气温、风速、风向，数据来源于中国气象局。

3 博斯腾湖研究区域局地环流数值模拟方案

焉耆盆地中不仅存在因山坡与坡前大气之间受热不均导致的热力差而形成的山谷风环流，还有博斯腾湖湖面与陆面间热力性质不同所引起的湖陆风。本文

利用 WRF 模拟 2020 年夏季博斯腾湖有湖体存在和无湖体存在的局地环流情况，对区域各气象要素以及水平场、垂直场、近地面边界层特征进行分析，探究博斯腾湖流域内的水汽环流机制。

3.1 有湖体存在情况下的模式方案

(1) 模式方案设计

本文使用 WRF-CLM 模式对博斯腾湖 2020 年夏季（6、7、8 月，当地时）共计 92 天的环流形势进行模拟。模拟区域以湖泊为中心（ 87°E ， 42°N ），采用三重网格双向嵌套，分辨率依次为 d01: $9\text{ km}\times 9\text{ km}$ 、d02: $3\text{ km}\times 3\text{ km}$ 和 d03: $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ ，其中研究区域为 d03 区域（如图 3 所示）；三层嵌套区域积分步长分别为 10s、6s、3s。模式垂直方向为 51 层，模式层顶大气压为 50hPa。模式选用的土地利用资料为包含湖泊类型的 USGS 资料，num_land_cat 设置为 28（即启用湖泊模块）。经过预处理的 ERA5 数据作为模式的初始场和边界场。为使模拟结果更稳定，采用单次模拟 1.5 天的模拟方式，其中前 0.5 天作为启动时间，后 1 天作为模式结果输出，每 1 小时输出 1 次模拟结果。为使日间对流边界层和夜间稳定边界层有较好的模拟效果，对比西北内陆湖泊研究中常用的模拟研究（张茜，2018；李岩，2018；张建彬等，2022），本文参数化方案选用考虑了卷夹作用的非局地 YSU（Yonsei University）行星边界层方案（Hu et al, 2010；Shin et al, 2011），以及与其配合的 MM5 近地层方案；另选择 Noah 的陆面过程方案为 YSU 提供水汽通量及感热通量，该方案基于 4 层土壤进行地温和水分的计算。参数化方案如表 1 所示。

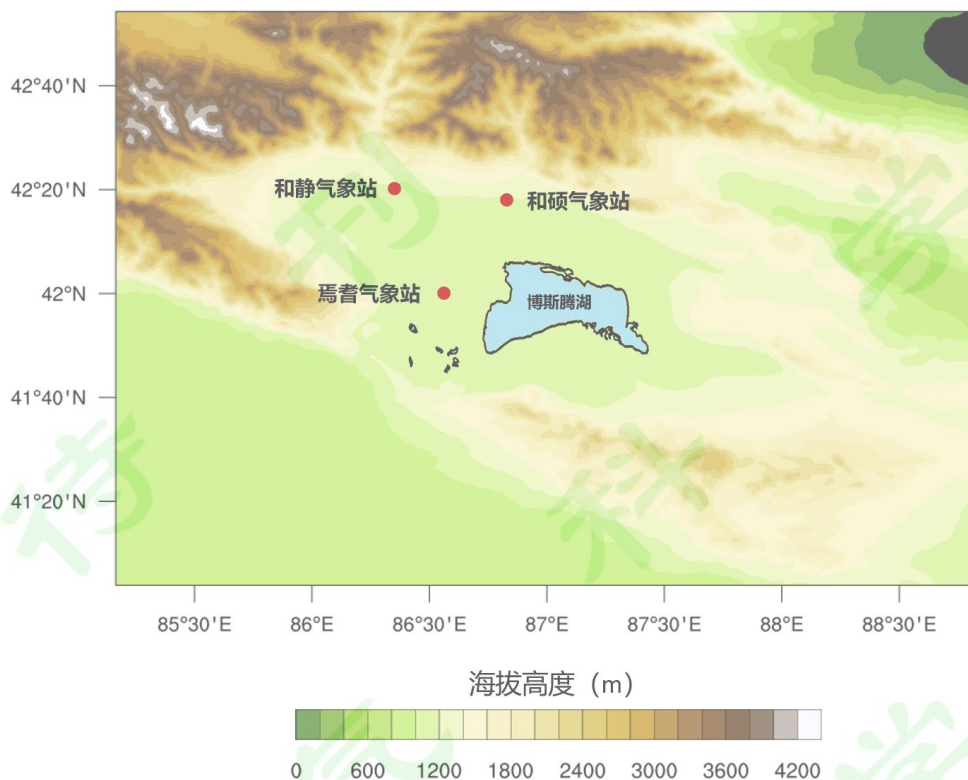


图 3 博斯腾湖研究区域 (d03), 研究区域内三个观测站点: 焉耆气象站 (86.6 E, 42.05 N)、和静气象站 (86.37 E, 42.33 N)、和硕气象站 (86.85 E, 42.26 N)

Fig. 3 Study area of Bosten Lake (d03) and three observational stations within the study area: Yanqi Meteorological Station (86.6 E, 42.05 N), Hejing Meteorological Station (86.37 E, 42.33 N), and Heshuo Meteorological Station (86.85 E, 42.26 N).

表 1 湖泊模式参数化方案

Table 1 Parameterization scheme of lake model.

物理过程	参数化方案
微物理过程方案	WSM6 方案
长波辐射方案	RRTM 方案
短波辐射方案	Dudhia 方案
近地面层参数化	MM5 方案
陆面过程参数化	Noah 陆面模式
行星边界层参数化	YSU 方案
湖泊物理过程	CLM 4.5 湖泊模式
	d01: Kain-Fritsch 方案
积云参数化方案	d02: 无
	d03: 无

(2) 模拟结果对比验证

为验证模拟效果,利用 2020 年 7 月 3 日至 11 日焉耆气象站(86.6 °E, 42.05 °N, 距离博斯腾湖西岸约 19.83 km)、和静气象站(86.37 °E, 42.33 °N, 距离博斯腾湖西北岸约 46.70 km)、和硕气象站(86.85 °E, 42.26 °N, 距离博斯腾湖西北岸约 17.76 km)观测数据的气温、风速、风向进行对比,对比结果如图 4、图 5 和图 6 所示。

从气温对比结果可以看出:焉耆气象站的气温模拟值的变化趋势与观测资料一致,但模拟均值略小于观测均值(气温观测平均值为 23.01 °C,模拟平均值为 22.30 °C),和静气象站的气温模拟值与观测值相差约 1 °C(气温观测平均值为 24.94 °C,模拟平均值为 25.87 °C),和硕气象站的气温模拟值与观测值相差约 0.5 °C(气温观测平均值为 24.38 °C,模拟平均值为 24.86 °C)。气温模拟值与观测值的偏差可能与博斯腾湖受西风环流的影响下天气形势变化较快、模式反应滞后有关(陈发虎等, 2006)。同时注意到,图 4 中的焉耆站在 7 月 6 日和 9 日中午时段的模拟气温最高值低于观测值约 3-5 °C,这可能是由于下垫面处于湖陆过渡区域,湖泊与陆地的热力差异在模型中可能没有得到充分体现,导致温度模拟的不准确。图 5 的和静与图 6 的和硕站在模拟时间段内,后几天的模拟温度也与观测温度有着 4 °C 的差距,这可能是研究区域为集高山、峡谷、盆地多种类型的地形以及植被、湖泊等交错分布的下垫面,研究模型对下垫面特性的描述可能不够精确,导致模拟温度与实际温度略有差距。

焉耆气象站风速观测值为 0~10 m/s,平均风速为 3.17m/s,白天风速大,夜间风速小。模拟风速平均值为 3.28m/s,略大于观测值,但变化趋势与观测值较为一致;和静、和硕气象站也有类似结论,风速模拟值与观测值变化趋势较为一致,尤其是和静站位于山谷风口处,风速较大,模拟结果同样可以较为准确的反映出风速大小和趋势。风向的模拟结果与观测值也较为一致,某些时刻偏差可能是由于该时刻模拟风速值较大,风向转变较慢(Jimenez et al, 2013)。总体来看,模拟结果可以反映出气象要素的变化特征。

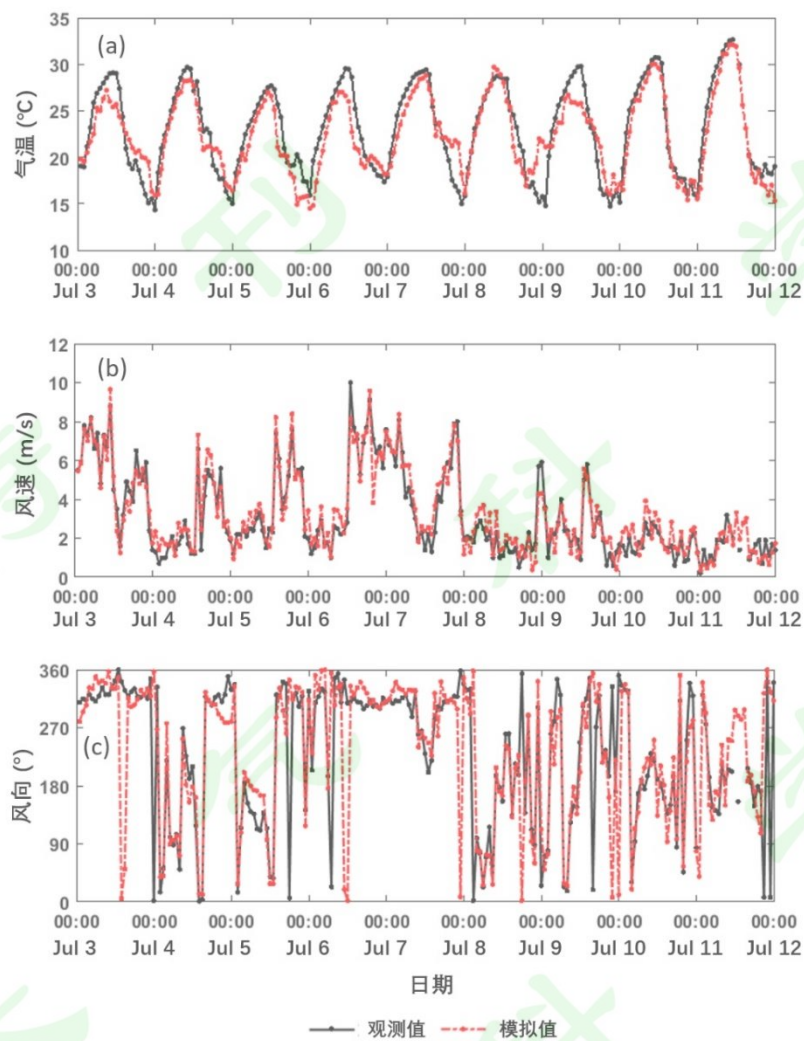


图 4 焉耆站模拟与观测值对比 (2m 气温、10m 风速、10m 风向, 当地时)

Fig. 4 Comparison between simulated and observed values at Yanqi Station (T2m, WS10m, WD10m, local time).

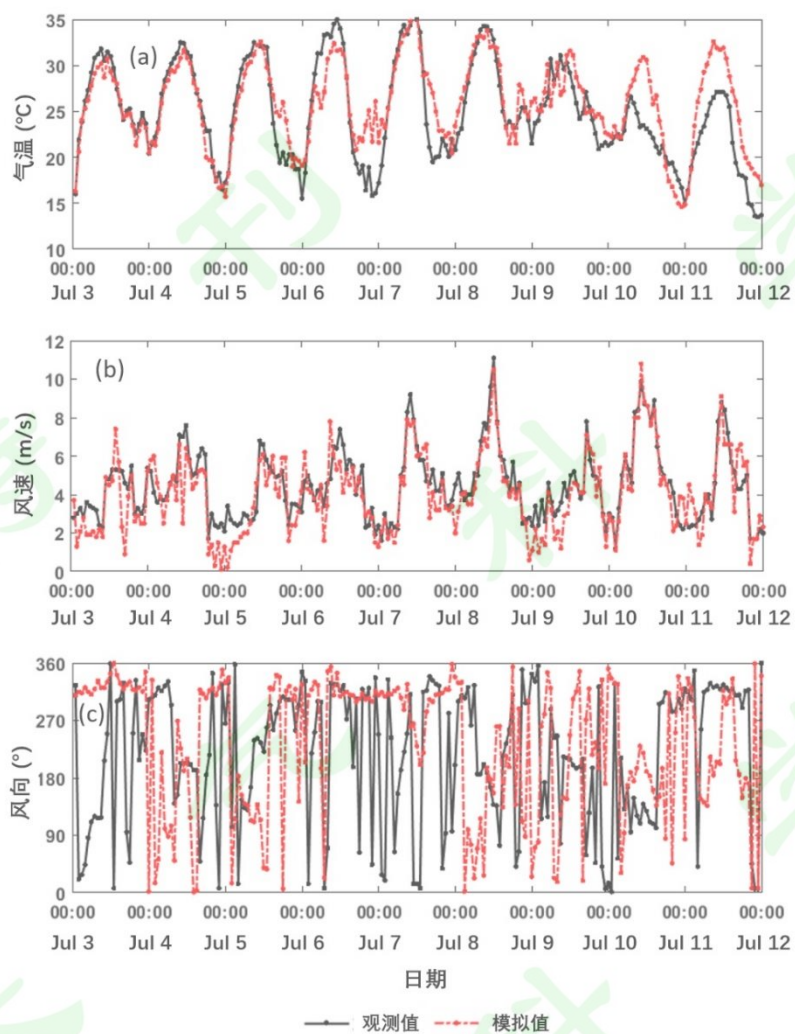


图 5 和静站模拟与观测值对比 (2m 气温、10m 风速、10m 风向, 当地时)

Fig. 5 Comparison between simulated and observed values at Hejing Station (T2m, WS10m, WD10m, local time).

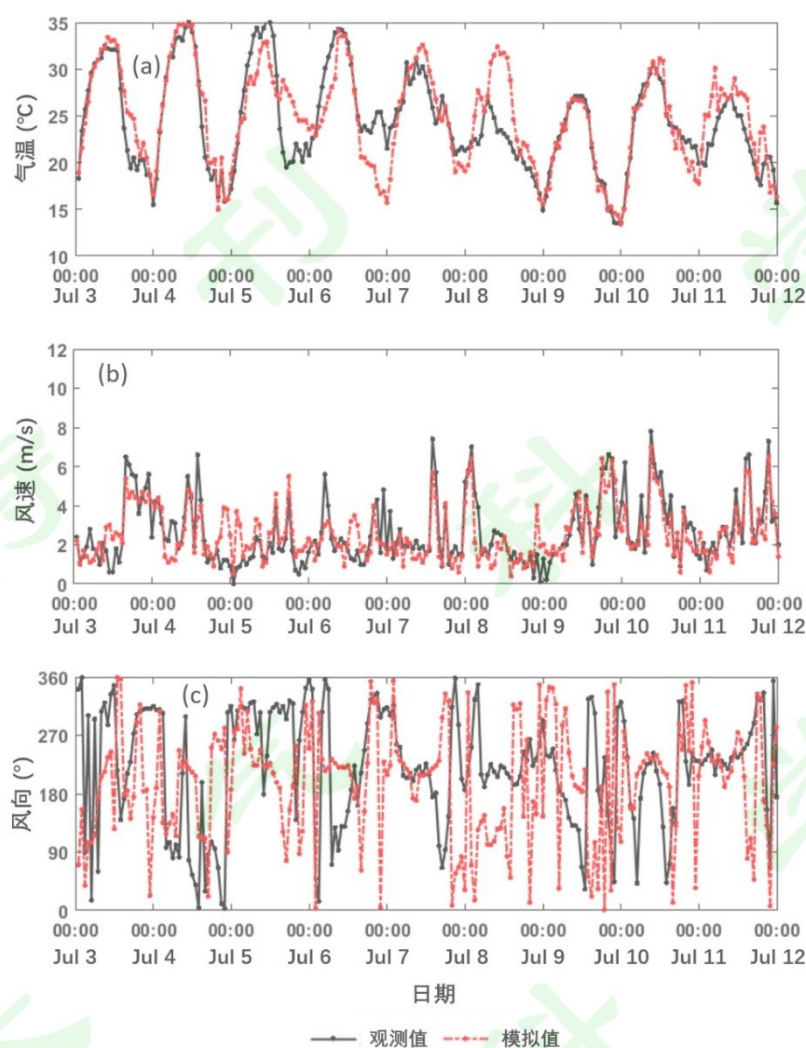
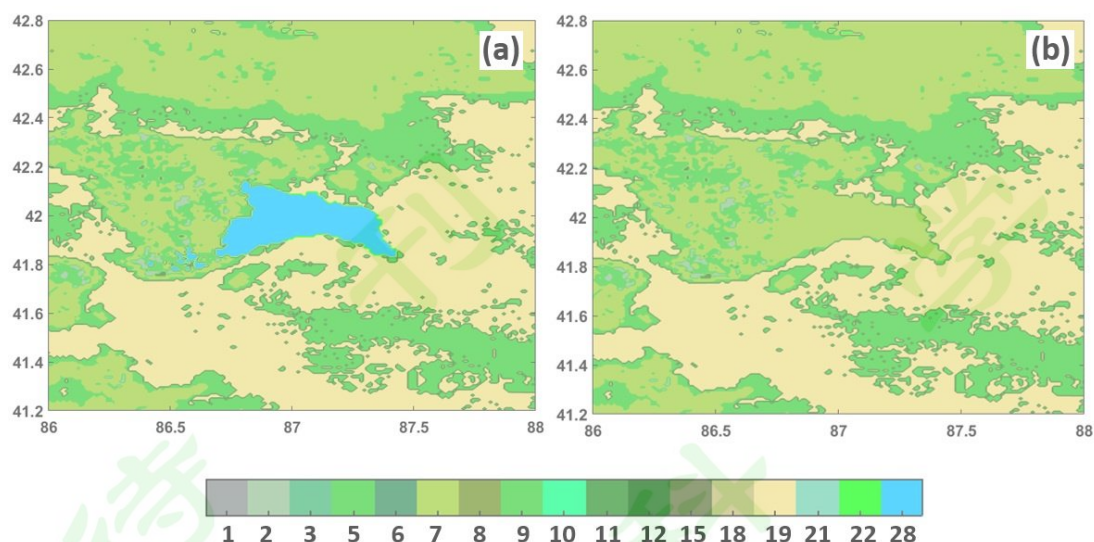


图6 和硕站模拟与观测值对比（2m 气温、10m 风速、10m 风向，当地时）

Fig. 6 Comparison between simulated and observed values at Heshuo Station (T2m, WS10m, WD10m, local time).

3.2 无湖体存在情况下的模式方案设计

敏感性试验（去湖试验）仍采用三重网格双向嵌套，模拟区域以原湖泊为中心（87°E，42°N），三层嵌套区域、参数化方案、模拟方式、模拟时间段与有湖体试验相同。区别在于去湖试验中将湖区水体的土地利用类型改为与周围下垫面一致的草地，土壤类型、土壤温度、土壤湿度、反照率、植被覆盖率均改为和周围的草地下垫面一致。图7（a）、（b）分别为有湖参照试验和去湖敏感性试验的土地利用类型分布。



图例：1. 城市规划区和城建区；2. 旱地农田和牧场；3. 灌溉农田和牧场5. 农田/草地镶嵌；6. 农田/林地镶嵌；7. 草地；8. 灌丛；9. 草地/灌丛混合；10. 热带稀树干草原；11. 落叶阔叶林；12. 落叶针叶林；15. 混交林；18. 林泽；19. 贫瘠或稀疏植被；21. 木本苔原；22. 混合型苔原；28. 湖泊

图 7 土地利用类型示意图(a)有湖控制试验(b)去湖试验

Fig. 7 Schematic diagram of land use types. (a) Lake control experiment. (b) Lake removal experiment.

4 研究区域有湖与去湖模拟试验结果对比分析

去湖试验中，焉耆盆地内原有的湖陆风场消失，区域内仅受背景风与山谷风等地形风控制。统计去湖前后研究区域内的近地面风场、风场辐散辐合区域数目、近地面比湿和蒸发变化情况。

4.1 湖区局地风场变化

以湖陆风现象明显的一天为例，在去湖试验中，近地面风场有明显变化，图 8（a、b）分别是 2020 年 7 月 10 日 12:00 有湖参照试验（a）和去湖敏感性试验（b）的 10 m 高度风场。在有湖参照试验（a）中，从湖面区域向四周有很明显的辐散气流，湖风现象明显。原湖区水体换成草地后（b），原湖面区域的辐散气流消失，湖面由偏东南风控制。对比两个试验中原湖区周围的风场，去湖试验中的风速明显比有湖试验中的风速小，这是由于博斯腾湖湖风消失，区域内只有天山山谷风作用，风速变小。

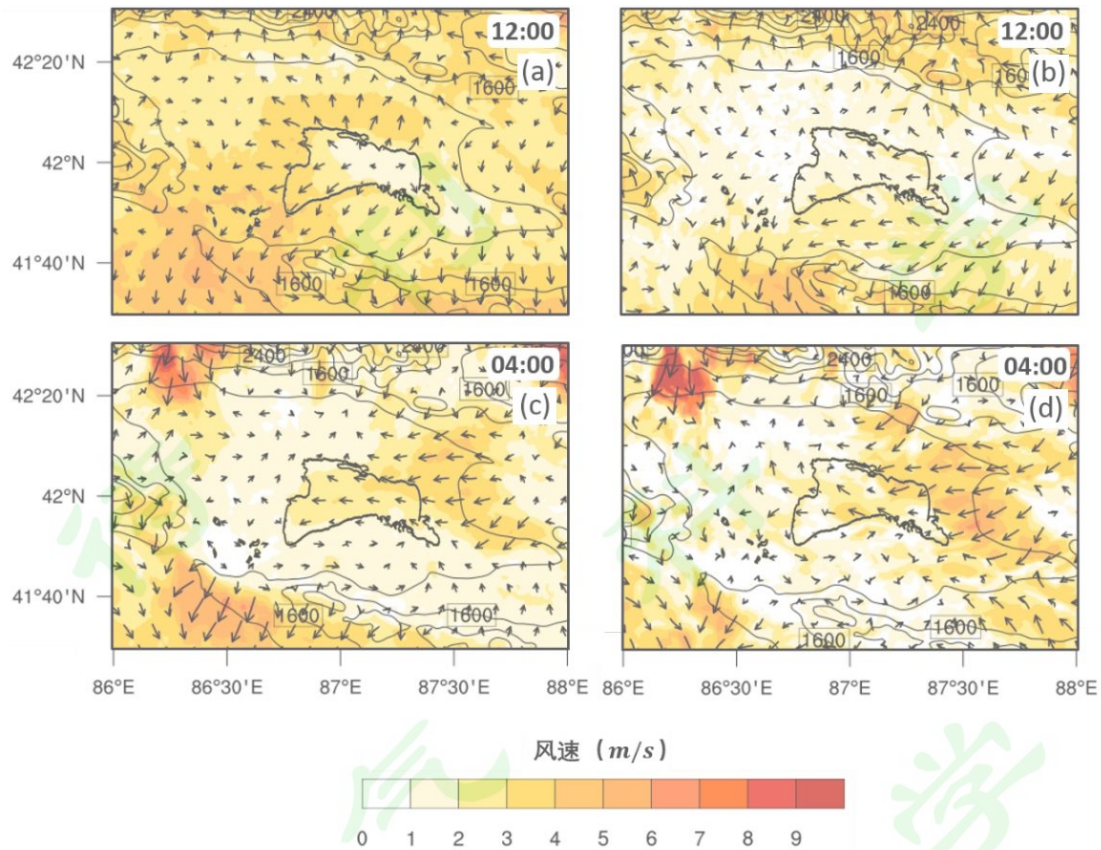


图8 2020年7月10日12:00和次日4:00的有湖参照试验(a、c)与去湖敏感性试验(b、d, 图中湖泊轮廓为原湖面位置)10 m高风场对比

Fig. 8 Comparison of the 10-meter high wind field between the lake control experiment (a, c) and the lake removal sensitivity experiment (b, d. The lake contour in the figure is the original lake surface position) at 12:00 on July 10, 2020 and 4:00 the next day.

图8(c、d)分别是2020年7月11日04:00有湖参照试验(c)和去湖敏感性试验(d)的10 m高度风场。对比去湖试验与有湖试验夜间风场,在有湖参照试验中(c),从湖面四周向湖中心有很明显的辐合气流,山风、陆风现象明显。将原湖区中水体移除后(d),原湖面区域的辐合气流不再明显,主要受偏东风控制。此外,对比有湖参照试验和去湖敏感性试验中原湖面风速,去湖试验中的风速明显比有湖参照试验中减小,这是因为水面比草地下垫面粗糙系数小,风速受摩擦力小,削弱的少,并且没有了陆风的加强作用,局地风场只受到天山山风的控制。

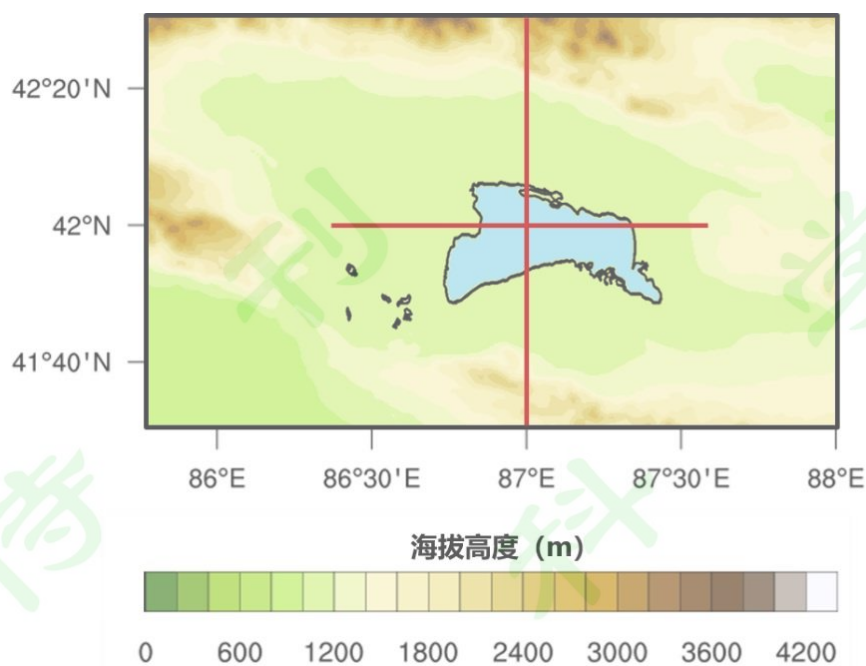


图9 垂直剖面位置示意

Fig. 9 Schematic diagram of the vertical section position.

为了进一步探究博斯腾湖湖体消失后对局地环流的影响，仍以 2020 年 7 月 10 日为例，沿着图 9 的两条切线（ $86.4^{\circ}\text{E}\sim 87.6^{\circ}\text{E}$ ， $41.5^{\circ}\text{N}\sim 42.5^{\circ}\text{N}$ ）做研究区域内的垂直剖面风场（图 10、图 11），对比去湖前后局地风场变化。去湖试验中（图 10），中午 12 时湖面上空只有由东向西的背景风场，与周围陆面风场相同，整个区域受背景风和谷风控制。原湖面上空仍以下沉气流为主，但湖面的辐散与下沉运动均有所减弱，同时伴有弱上升气流，陆面则为上升、下沉气流交替出现。次日 4 时（图 11），原湖面的辐合与上升运动均减弱，伴有弱下沉气流，陆面为上升、下沉气流交替出现。

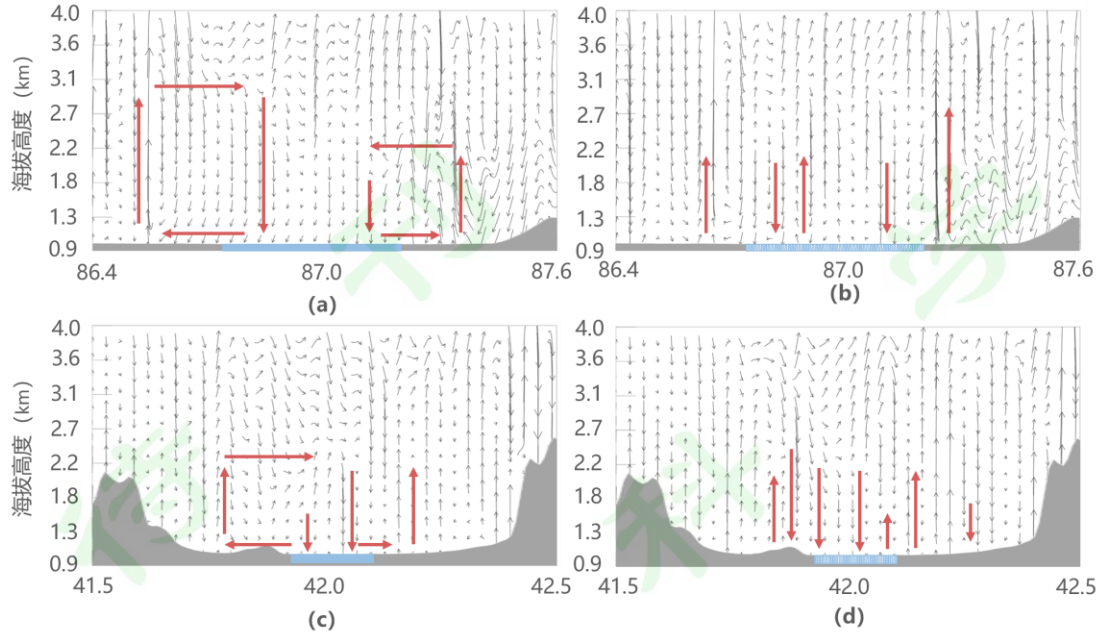


图 10 有湖试验 (a、c) 与去湖试验 (b、d) 湖区风场垂直剖面 (蓝点区域为原博斯腾湖范围): (a、b) 沿 42.0°N , $86.4^{\circ}\text{E} \sim 87.6^{\circ}\text{E}$ 的垂直剖面; (c、d) 沿 87.0°E , $41.5^{\circ}\text{N} \sim 42.5^{\circ}\text{N}$ 的垂直剖面 (2020 年 7 月 10 日 12 时)

Fig. 10 Vertical profiles of the wind field in the lake area for the experiment with lakes (a, c) and the experiment without lakes (b, d) (the blue - dotted area represents the original range of Bosten Lake): (a, b) vertical profiles along 42.0°N , $86.4^{\circ}\text{E} - 87.6^{\circ}\text{E}$; (c, d) vertical profiles along 87.0°E , $41.5^{\circ}\text{N} - 42.5^{\circ}\text{N}$ (at 12:00 on July 10, 2020)

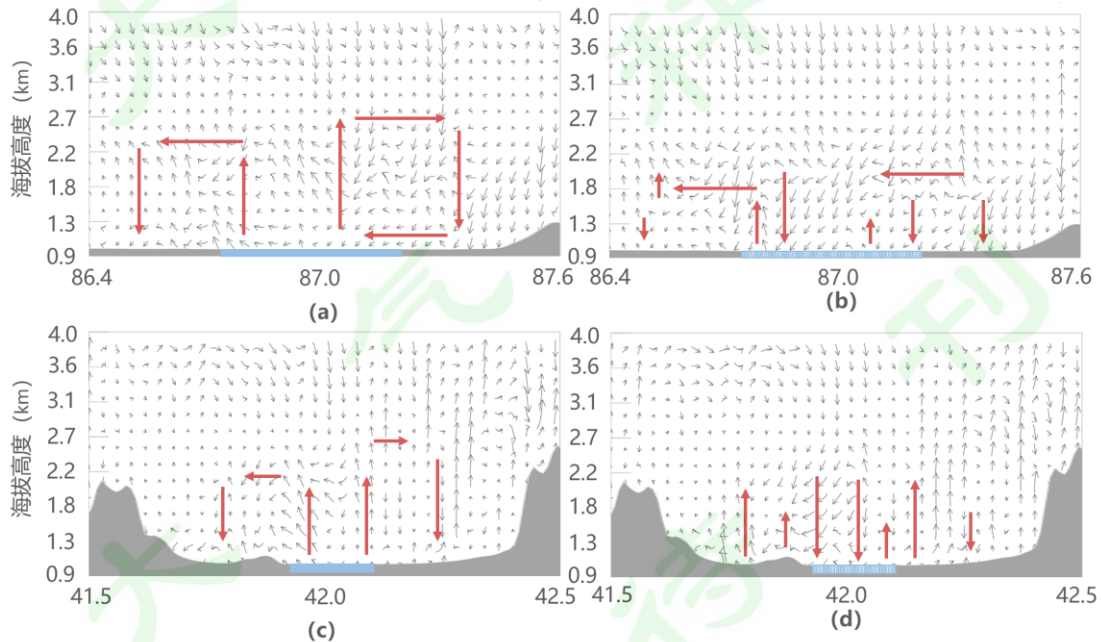


图 11 有湖试验 (a、c) 与去湖试验 (b、d) 湖区风场垂直剖面 (蓝点区域为原博斯腾湖范围): (a、b) 沿 42.0°N , $86.4^{\circ}\text{E} \sim 87.6^{\circ}\text{E}$ 的垂直剖面; (c、d) 沿 87.0°E , $41.5^{\circ}\text{N} \sim 42.5^{\circ}\text{N}$ 的垂直剖面 (2020 年 7 月 11 日 04 时)

Fig. 11 Vertical profiles of the wind field in the lake area for the experiment with lakes (a, c) and the experiment without lakes (b, d) (the blue - dotted area represents the original range of Bosten Lake): (a, b) vertical profiles along 42.0° N, 86.4° E - 87.6° E; (c, d) vertical profiles along 87.0° E, 41.5° N - 42.5° N (at 04:00 on July 11, 2020)

4.2 近地面风场辐散辐合区变化

选取焉耆盆地 2020 年夏季 3 个月共计 92 天（2208 个小时）的有湖体试验模拟结果，对风速度场的散度值进行计算，将各小时的风速度场散度值叠加对应时刻近地面风场图，统计辐散辐合区域数量和分布情况（如图 12）。

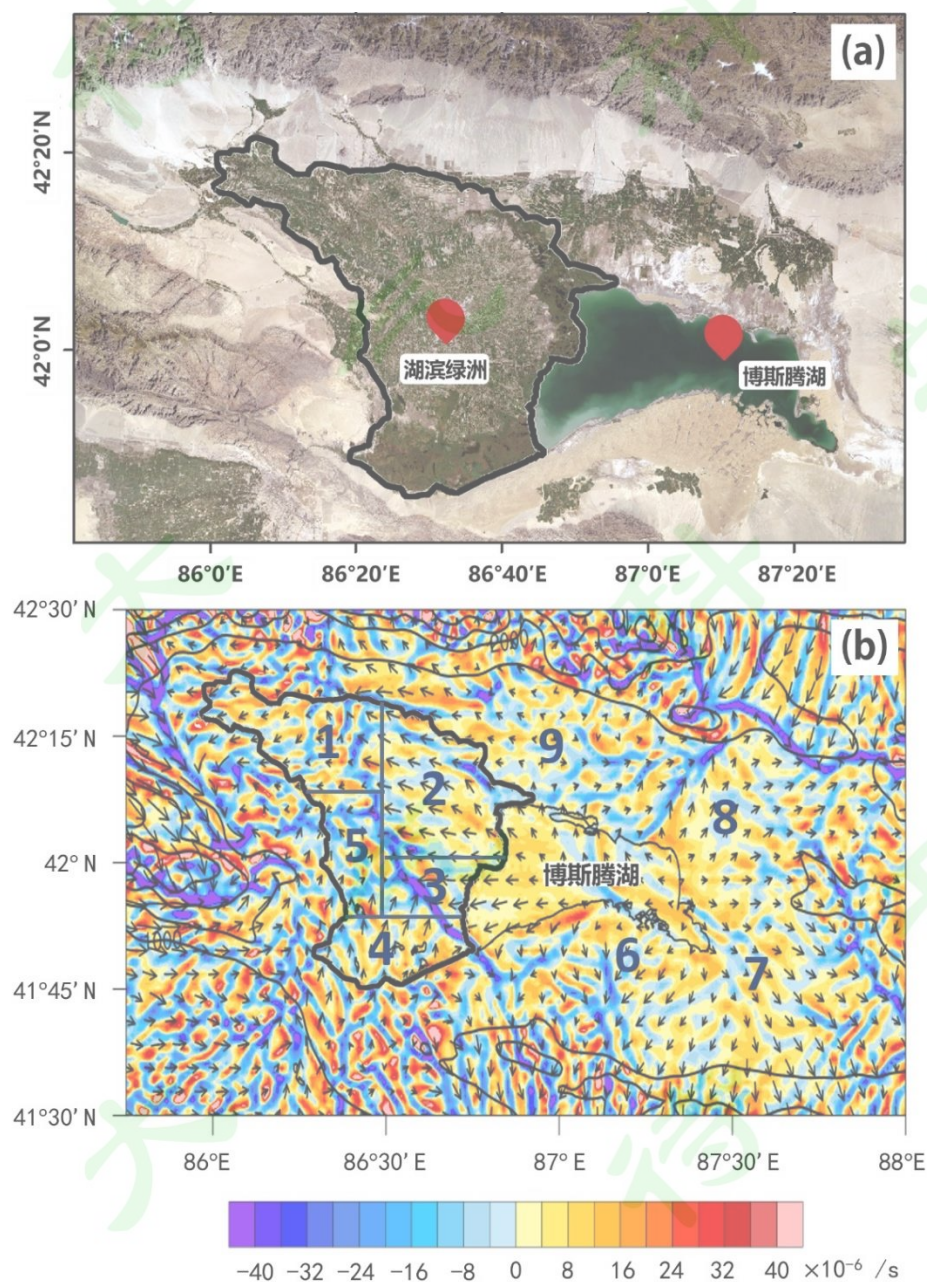


图 12 (a) 研究区域卫星图，(b) 2020 年 7 月 25 日 16 时近地面风速度场散度值，填色为散

度值，边缘黑色曲线为等高线，下同

Fig. 12 (a) Satellite image of the research area. (b) Divergence value of the near-surface wind speed field at 16:00 on July 25, 2020. The color fill is the divergence value. The black curve on the edge is the contour line. The same below.

以图 12 (b) 所示的 2020 年 7 月 25 日 16 时近地面风速度场散度分布情况为例，山区散度场呈窄条带状分布，而博斯腾湖周边陆面海拔 1000 m 附近区域的辐散辐合分布情况与山区有显著差别，可表现为区域性片状分布。这是由于山区地带山体表面与山前空气存在热力差，受气压梯度力作用，白天山顶出现辐合上升的气流而夜间出现辐散下沉气流，进而在近地面辐散辐合区呈窄条状交错排布（正值为辐散，负值为辐合）。这一现象主要是相向或同向的速度不同气流的辐合挤压空气形成的，不在本文研究范围内，本节及后续内容不再涉及。后文着重讨论焉耆盆地陆面海拔 1000 m 附近区域的风场情况。

对 2020 年夏季 2208 个小时的辐散辐合区域进行统计，对于出现 50 次以上的辐散（辐合）区即被列为主要辐合辐散区域进行区域划分。以 2020 年 7 月 25 日 16 时为例（见图 12 b，由于各区域出现辐散辐合时间不一定相同，本图仅作为区域划分示例，后文将分别介绍每个区域具体情况），共分为 9 个区域，呈离散分布：区域 1~区域 5 都分布在湖滨绿洲有植被覆盖的下垫面，具体排布如图所示，区域 6 位于博斯腾湖南侧，区域 7 位于湖泊东南方向，区域 8 位于湖泊东北方向，区域 9 位于湖泊正北偏西方向。各区域的中心位置坐标、区域到湖岸的距离如表 2 所示，每个区域出现辐散辐合现象的频数、概率如表 3 所示。

表 2 焉耆盆地内辐散辐合区域的位置

Table 2 Location of divergence and convergence areas in the Yanqi Basin.

区域	中心坐标 (E, N)	距湖岸距离 (km)
1	(86.30, 42.23)	47.30
2	(86.66, 42.18)	16.96
3	(86.83, 41.95)	9.59
4	(86.50, 41.82)	19.83
5	(86.43, 42)	27.39
6	(87, 41.85)	6.66
7	(87.50, 41.75)	9.79
8	(87.53, 42.06)	23.13
9	(87, 42.23)	16.65

表 3 辐散辐合区域出现的频数和出现的概率

Table 3 Frequency and probability of occurrence of divergence and convergence areas.

区域	区域内出现辐散辐合的频数（2020 年）				频率（%）
	6 月	7 月	8 月	总和	
1	187	205	193	585	26.5
2	375	348	355	1078	48.8
3	232	241	228	701	31.7
4	344	352	335	1031	46.7
5	162	193	178	533	24.1
6	262	271	258	791	35.8
7	138	142	115	395	17.9
8	182	174	168	524	23.7
9	78	90	72	240	10.9

对去湖试验的焉耆盆地 2020 年夏季 3 个月模拟结果速度场进行散度计算，并统计原 9 个辐散辐合区域中辐合辐散出现的频次和概率，计算与表 3 中有湖时出现频次、概率的差值（表 4）。

表 4 辐散辐合区域出现的频数和出现的概率以及变化量

Table 4 Frequency and probability of occurrence of divergence and convergence areas and the amount of change.

区域	区域内出现辐散辐合的频数（2020 年）				频率（%）
	6 月	7 月	8 月	总和（变化量）	（变化量/相对变化量）
1	177	193	169	539（-46）	24.4（-2.1/-7.9）
2	132	128	102	362（-716）	16.4（-32.4/-66.4）
3	24	33	28	85（-616）	3.8（-27.9/-87.9）
4	48	52	39	139（-892）	6.3（-40.4/-86.5）
5	36	44	31	111（-422）	5.0（-19.1/-79.2）
6	233	257	261	751（-40）	34.0（-1.8/-5.1）
7	98	143	127	368（-27）	16.7（-1.2/-6.8）
8	126	133	139	398（-126）	18.0（-5.7/-24.0）
9	73	88	91	252（12）	11.4（+0.5/+5.0）

去湖试验中，对于 9 个原辐散辐合区域，均发生辐散辐合现象的次数都有所变化，由表 4 可知，区域 2、3、4、5 出现辐散辐合现象的频率明显减少，分别减少了 32.4%、27.9%、40.4%、19.1%，相对于原次数分别减少了 66.4%、87.9%、86.5%、79.2%，说明这几个区域受湖陆风影响较大；区域 1、6、7、8、9 出现

辐散辐合的现象频率变化较小，仅为-2.1%、-1.8%、-1.2%、-5.7%、+0.5%，相对于原概率变化量为-7.9%、-5.1%、-6.8%、-24.0%、+5.0%，可以认为与有湖试验中的统计数据基本持平。

若将有湖条件下 6 至 8 月某一时段某区域出现辐散辐合定义为事件 X，无湖条件下发生辐散辐合定义为事件 Y，从相关系数定义（公式 1）可知：当湖泊对区域 i ($i = 1, 2, 3, \dots, 9$) 发生辐散辐合现象的影响程度高时，事件 X_i 、 Y_i 的相关系数小于 0；当湖泊对某区域发生辐散辐合现象的影响程度较低或无影响时，事件 X_i 、 Y_i 的相关系数大于 0。

$$\rho_{XY} = \frac{Cov(X,Y)}{\sqrt{D(X)}\sqrt{D(Y)}} \tag{1}$$

式中 $Cov(X,Y)$ 为事件 X、Y 的协方差， $D(X)$ 、 $D(Y)$ 为事件 X、Y 的方差，对于两个二项事件，相关系数表明了两个事件的相关性，越接近 1 则表明两事件正相关度高，接近 -1 表明两事件负相关度高。区域 1 至区域 9 事件 X、Y 的相关系数如表 5 所示：

表 5 有湖体、无湖体均发生辐散辐合现象的频次以及去湖试验前后各区域发生辐散现象的相关系数

Table 5 Frequency of divergence and convergence phenomena occurring with and without a lake body and correlation coefficients of divergence phenomena in each area before and after the lake removal experiment.

区域	6 月	7 月	8 月	相关系数
1	167	184	150	0.85
2	30	15	22	-0.33
3	5	6	2	-0.09
4	10	4	7	-0.20
5	2	4	3	-0.10
6	212	231	230	0.79
7	65	112	103	0.67
8	92	120	115	0.63
9	71	82	85	0.96

由表 5 的相关性分析可知，区域 1、6、7、8、9 的辐散辐合发生频次与湖泊的存在相关性弱，反之区域 2、3、4、5 的辐散辐合发生频次与湖体相关性强。由此可推断，区域 1、6、7、8、9 的环流形势基本不受湖体影响；而区域 2、3、

4、5 参与了湖陆局地环流之中。

4.3 近地面水汽分布变化

本节去湖试验确定了区域 2、3、4、5 为主要的参与湖陆风环流的区域，相应的可以认为湖面蒸发的水汽也主要参与这几个区域的局地环流，利用 2020 年夏季博斯腾湖研究区域去湖前后 2m 高比湿的统计平均结果来进行分析。

由图 13 研究区域夏季有湖情况下的蒸发均值统计可知，博斯腾湖白天蒸发量均值为 0.80 mm，夜间蒸发量均值为 0.39 mm，整个湖面是研究区域内的蒸发高值区。盛行湖风时，湖面蒸发的水汽会在上岸气流的携带下向陆地输送，同时在湖风锋的上升气流影响下向高空扩散，在山谷风、背景风等的综合作用下，湖风环流会携水汽下沉并聚集于博斯腾湖西岸形成离散分布的水汽聚集区，这些区域的比湿保持在较高水平（图 14）。夜间湖面气压低，有强烈的辐合上升气流，水汽随湖陆风系统参与到局地环流中，在陆面高压系统控制下，随下沉气流到达陆面，近地面风场将水汽聚集在湖区西侧的湖滨绿洲植被下垫面。

对比 2020 年夏季有湖参照试验和去湖试验的每小时 2 m 高比湿统计均值（图 15），该图展示了夜间和清晨湖面高蒸发时刻的水汽分布特点。如果区域内没有湖体存在，下垫面为草地、裸地等，如图 15 的 b、d、f、h，草地下垫面的平均比湿为 9 g/kg，裸地下垫面的平均比湿为 8 g/kg；当研究区域内有湖体存在时（图 15 a、c、e、g），湖泊西侧的区域 2、3、4、5 比湿的小时均值约为 10~11 g/kg，其它区域与去湖试验比湿值持平。这说明湖体的存在使得区域 2、3、4、5 夜间的比湿值更大，水汽更多的集中在这几个区域，再次说明了湖面蒸发的大部分水汽参与区域 2、3、4、5 的湖陆环流，表 6 的统计结果，即每个区域比湿变化量（去湖-有湖）的均值也同样验证了这个结论。

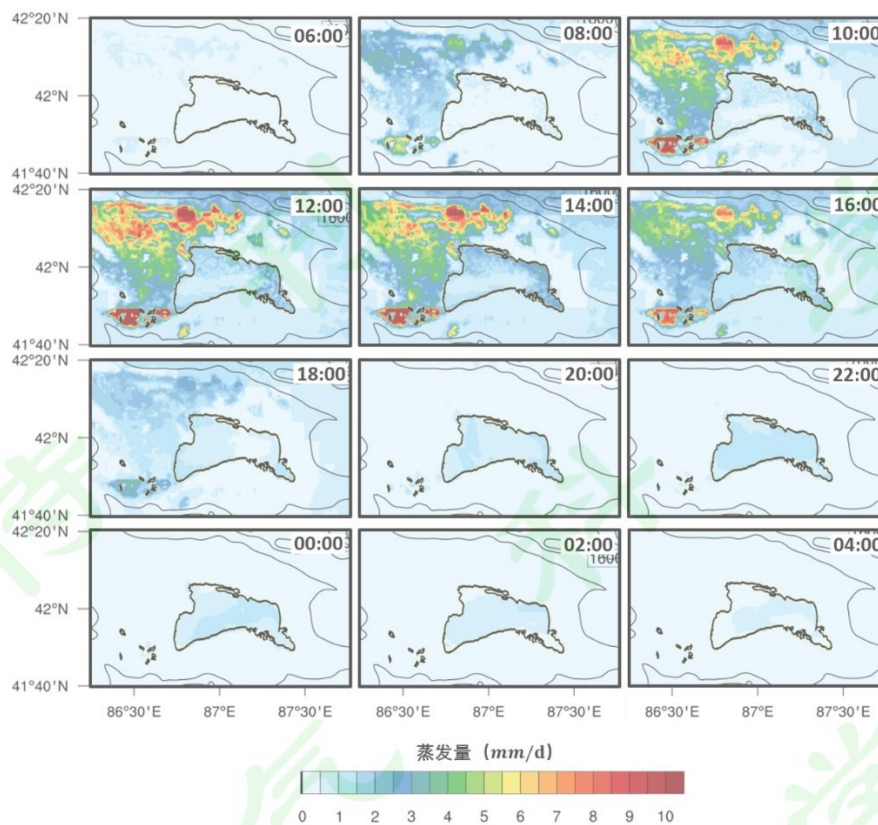


图 13 2020 年夏季焉耆盆地内蒸发量均值日变化的模拟结果

Fig. 13 The simulation results of the daily variation of the mean evaporation amount within the Yanqi Basin in the summer of 2020.

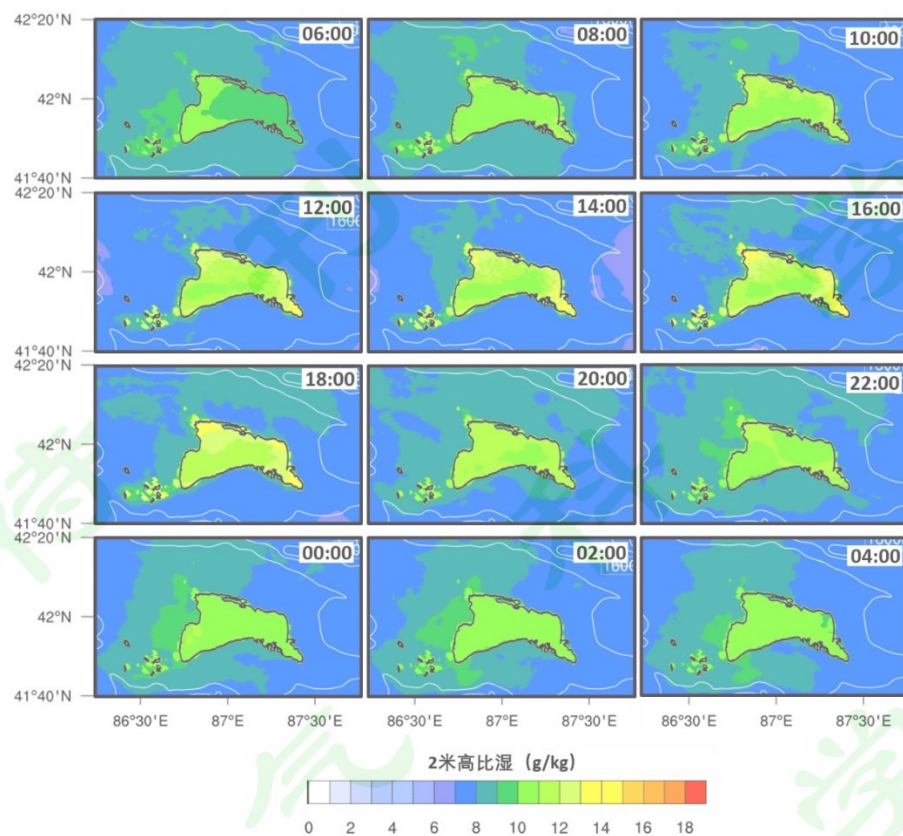


图 14 2020 年夏季焉耆盆地内 2 m 高比湿均值日变化的模拟结果

Fig. 14 The simulation results of the daily variation of the mean specific humidity at a height of 2 meters within the Yanqi Basin in the summer of 2020.

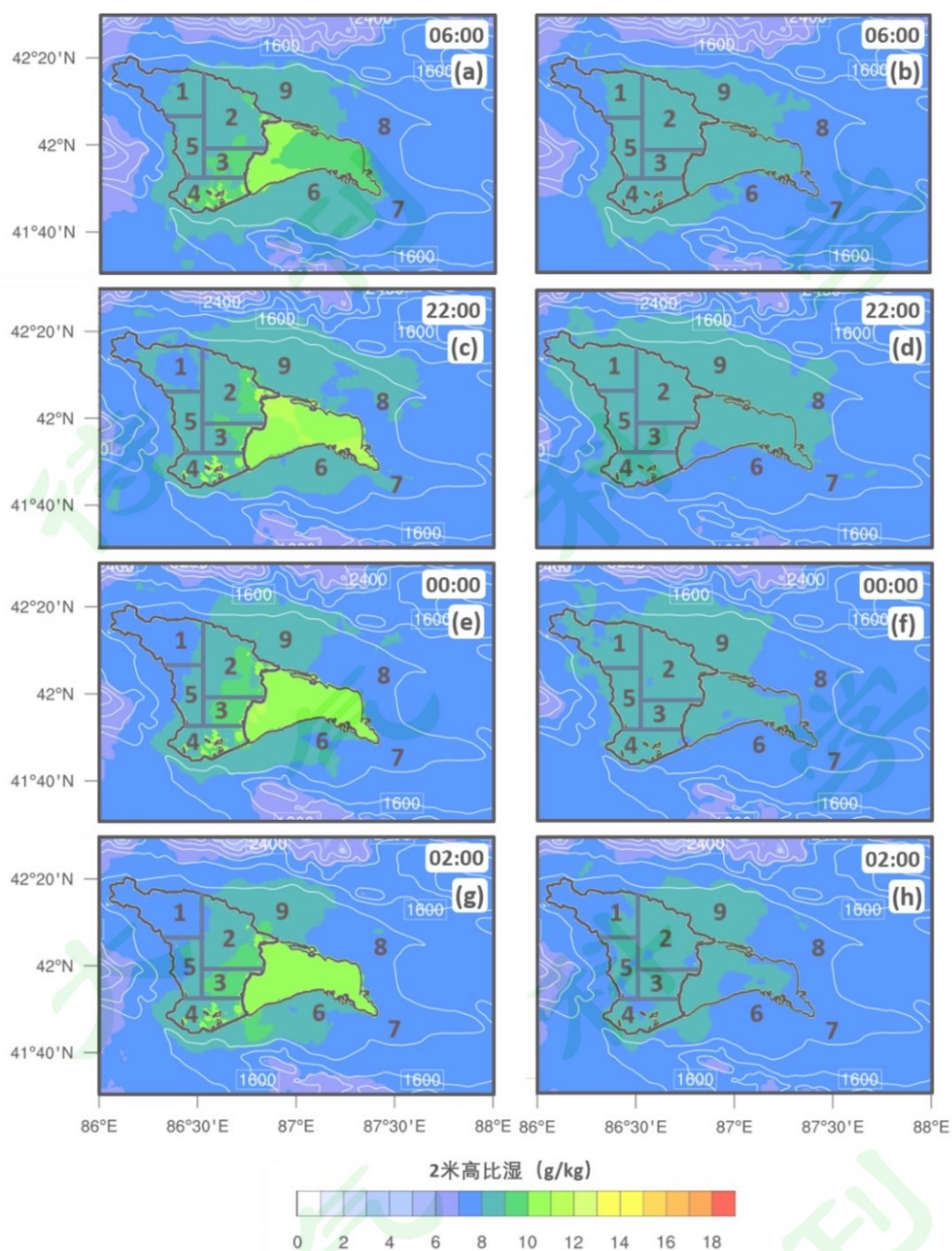


图 15 2020 年夏季博斯腾湖 2 m 高比湿统计均值: (a、c、e、g)有湖参照试验, (b、d、f、h)去湖试验

Fig. 15 Statistical mean of specific humidity at 2-meter height of Bosten Lake in summer 2020: (a, c, e, g) lake control experiment, (b, d, f, h) lake removal experiment.

表 6 有湖体、无湖体各区域 2 m 高比湿变化量均值 (g/kg)

Table 6 Mean variation of specific humidity at 2 meters above the ground in regions with and without lake (g/kg).

时间 (h)	区域									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	湖区
06	-0.06	-0.12	-0.87	-0.93	-0.04	-1.14	-0.23	-0.16	-0.09	-1.86
22	0.34	-0.73	-0.55	-1.03	0.04	-0.97	-0.07	0.12	-0.21	-4.23
00	0.89	-0.77	-0.86	-0.71	0.34	-0.69	-0.32	0.27	0.44	-3.81
02	0.68	-0.83	-1.13	-1.42	0.06	-1.22	0.14	-0.31	-0.17	-3.76

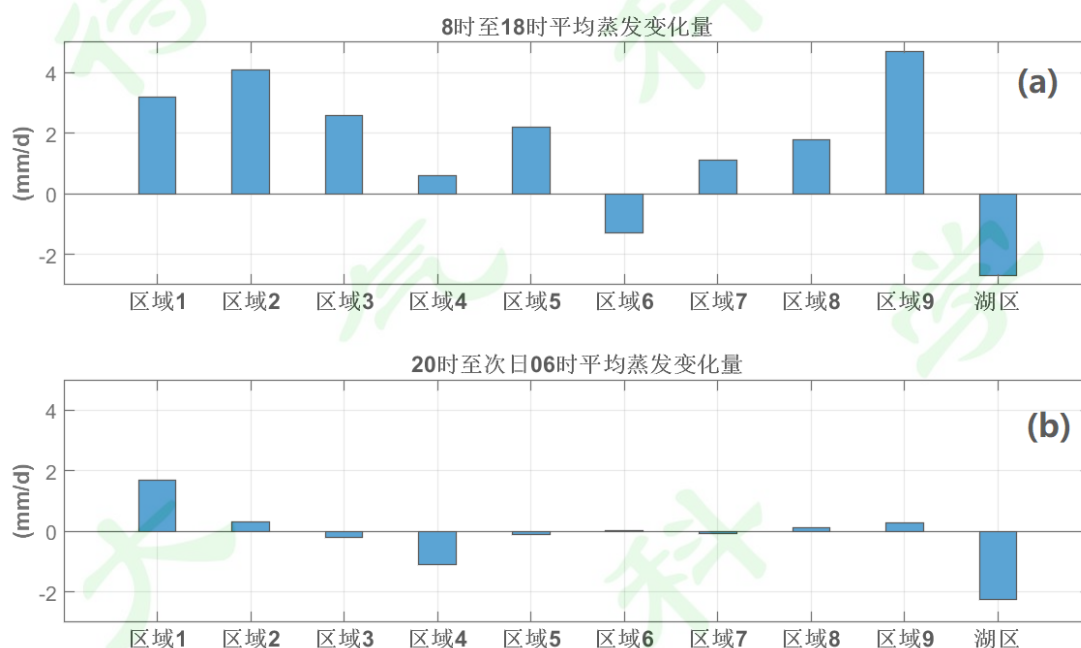


图 16 2020 年夏季博斯腾湖去湖试验与有湖试验各区域蒸发量变化均值 (mm/d)

Fig. 16 Mean variation of evaporation in each region in the lake-removal experiment and the lake-present experiment of Bosten Lake in the summer of 2020 (mm/d).

对比去湖前后各区域白天（8 时至 18 时）、夜间（20 时至次日 6 时）蒸发量的变化均值（图 16：去湖蒸发量减有湖蒸发量），湖区白天和夜间的蒸发量均明显减少，因为水体替换为草地后，可蒸发水源明显减少；而其他湖畔区域除了区域 6，白天蒸发量均为增加，这是因为区域内大型水体存在时，蒸发的大量水汽会抑制陆面蒸发，水体消失后，蒸发的水汽来源均为陆面，陆面蒸发量变大，夜间总体蒸发量小，因此变化量也较小。

4.4 近地面风速变化

近地面平均风速（图 17）的变化表明，无论是有湖还是去湖试验中，研究

区域内白天的平均风速较小；有湖试验（图 17 a、c）中由湖风耦合谷风，湖面有辐散气流，比去湖试验（图 17 b、d）湖岸风速更大，尤其是东北方向的越山风吹进盆地内，削弱了湖面东岸的湖风，加强了西岸的湖风（图 17 c），使得 18 时陆面风速均值约为 4~5 m/s，去湖试验中的原西岸陆面风速（图 17 d）在 2~3 m/s。

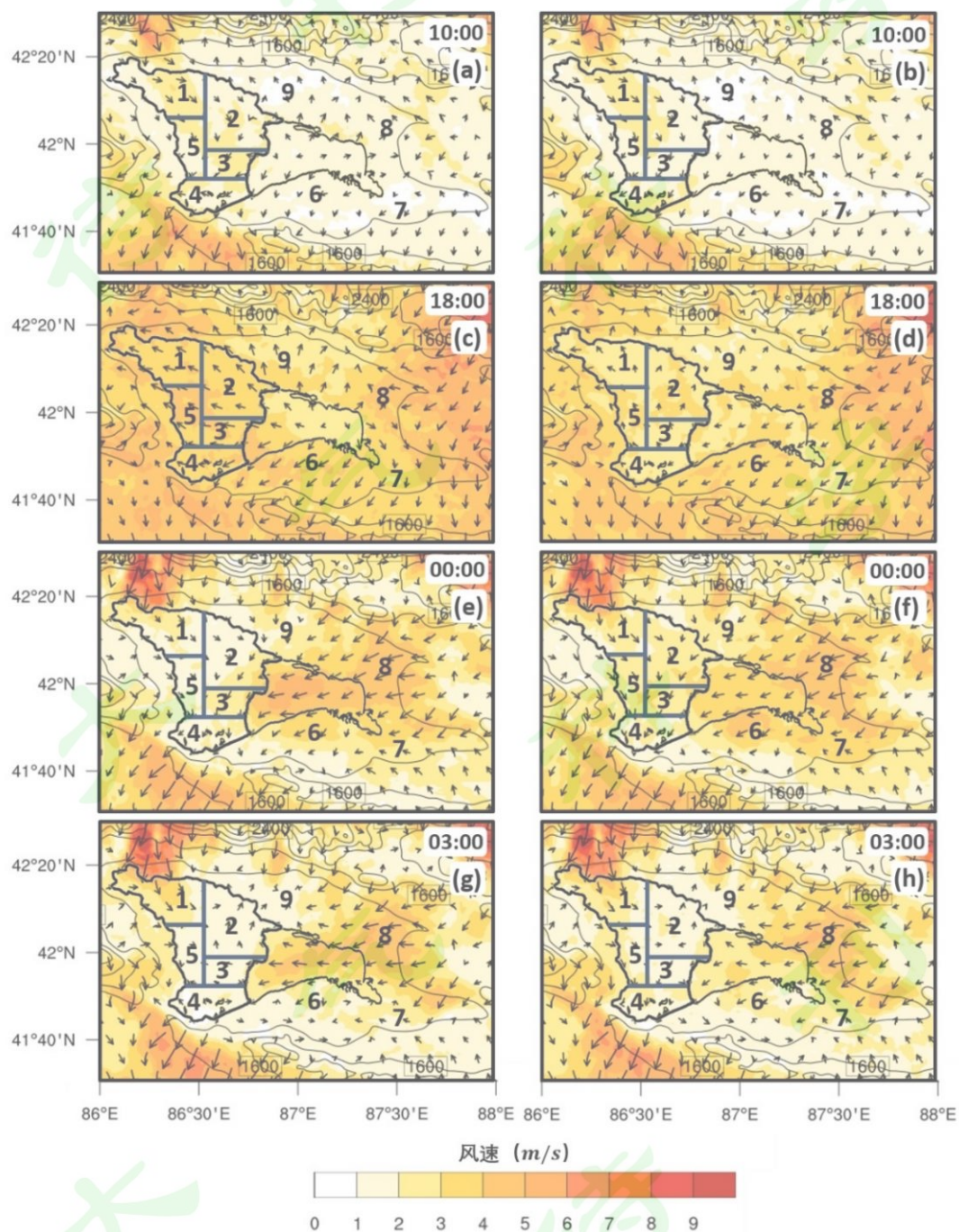


图 17 2020 年夏季博斯腾湖 10 m 高风速统计均值：(a、c、e、g)有湖参照试验，(b、d、f、h)去湖试验

Fig. 17 Statistical mean of wind speed at 10-meter height of Bosten Lake in summer 2020: (a, c, e, g) lake control experiment, (b, d, f, h) lake removal experiment.

由前文分析可知,夜间陆面受高压控制以下沉辐散气流为主,辐散中心风速较小,有湖存在时(图 17 e、g)区域 2、3、4、5 的风速较小,仅在 2 m/s 以下;去湖试验中(图 17 f、h)的该区域平均风速在 2~3 m/s,明显比有湖存在时风速大。

5 结论

以博斯腾湖为研究对象,利用 WRF-CLM 模式模拟博斯腾湖 2020 年夏季 6 月~8 月共计 92 天的局地环流形势,模拟结果显示其湖面蒸发的水汽会参与到局地环流中,并在湖陆风、山谷风等多种地形风作用下聚集在湖岸周围。通过计算近地面风场散度值,统计出湖岸周围有 9 个辐散辐合区,出现辐散辐合现象的概率分别为 26.5%(区域 1)、48.8%(区域 2)、31.7%(区域 3)、46.7%(区域 4)、24.1%(区域 5)、35.8%(区域 6)、17.9%(区域 7)、23.7%(区域 8)、10.9%(区域 9),并根据辐散辐合现象出现的频率判断出博斯腾湖西侧植被覆盖区的 4 个区域(区域 2、3、4、5)最有可能成为湖面蒸发水汽的主要聚集区。

利用 WRF-CLM 进行博斯腾湖水体消失的敏感性试验模拟,计算近地面风场散度值并统计出现辐散辐合现象的频率,与有湖参照试验做对比,发现湖区西北侧的区域 2,正西方向的区域 3、5,西南侧的区域 4 的辐散辐合现象明显减少,相对有湖试验分别减少了 66.4%(区域 2)、87.9%(区域 3)、86.5%(区域 4)、79.2%(区域 5),而其它区域辐散辐合现象频率的变化仅在 10%以内,确定了区域 2、3、4、5 为主要参与湖陆水汽循环的区域。

模拟试验获得局地环流对湖面蒸发的影响机制,具体表现为:盛行湖风时,湖面蒸发的水汽会在上岸气流的携带下向陆地输送,同时在湖风锋的上升气流影响下向高空扩散,在山谷风、背景风等的综合作用下,湖风环流会携水汽下沉并聚集于湖岸形成离散分布的水汽聚集区,这些区域的比湿保持在较高水平。博斯腾湖的水汽聚集区分布于湖区西侧,这些区域具有边界层高度较其他陆面边界层低,下垫面多为植被覆盖等特点。

致谢 本研究受新疆自治区重点研发专项(2022B03027-2)、国家自然科学基金项目(42030611、42075154)、中国气象局气象干部培训学院科研项目-培育项目(2024CMATCPY04)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J001)、灾害天气国家重点实验室开放课题(2023LASW-B05)共同资助。

参考文献(References)

艾则孜提约麦尔·麦麦提,玉素甫江·如素力,姜红. 2018. 2000 - 2014 年博斯腾湖流域 NPP 时空变化特征及影响因子分析 [J]. 草业科学, 35 (7):11. Aizeztiyormay Memet, Yusupjan Rusuli, Jiang Hong. 2018. Analysis of the Temporal and Spatial Variation

- Characteristics and Influencing Factors of Net Primary Productivity (NPP) in the Bosten Lake Basin from 2000 to 2014 [J]. *Pratacultural Science*, 35(7): 11.
- 巴乌龙. 2019. 基于气候变化和人类活动情景的开都河水文和水环境研究[D]. 北京: 清华大学. Ba Wulong. 2019. Research on the Hydrology and Water Environment of the Kaidu River Based on the Scenarios of Climate Change and Human Activities [D]. Beijing: Tsinghua University.
- Benzaghta, M.A., Mohammed, T.A.. 2012. Testing of evaporation reduction methods in humid climates[J]. *Water Management*, 166(4): 207-216.
- Bytnerowicz, A., Fenn, M., Gertler, A., et al. 2013. Distribution of ozone, ozone precursors and gaseous components of atmospheric nitrogen deposition in the Lake Tahoe Basin[R]. Riverside, CA: US Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Contract No. P063.
- 陈发虎, 黄小忠, 杨美临, 等. 2006. 亚洲中部干旱区全新世气候变化的西风模式——以新疆博斯腾湖记录为例[J]. *第四纪研究*, (06): 881-887. Chen Fahu, Huang Xiaozhong, Yang Meilin, et al. 2006. The Westerlies Pattern of Holocene Climate Change in the Arid Region of Central Asia: A Case Study of the Records from Bosten Lake in Xinjiang [J]. *Quaternary Sciences*, (06): 881-887. doi: 10.3321/j.issn:1001-7410.2006.06.001
- 陈曙阳. 2021. 2002 - 2018 年西昆仑山地区山谷地貌单元积雪变化及其对气候的响应 [D]. 兰州大学. Chen Shuyang. 2021. Changes in Snow Cover of Valley Geomorphic Units in the Western Kunlun Mountains Region from 2002 to 2018 and Their Responses to Climate [D]. Lanzhou University.
- Cleugh, H.A. 2008. Effects of windbreaks on airflow, microclimates and crop yields[J]. *Agroforestry Systems*, 41(1): 55-84.
- Comer, N.T., Mckendry, I.G. 1993. Observations and numerical modelling of Lake Ontario breezes[J]. *Atmosphere - Ocean*, 31(4): 481-499.
- Douglas, S.G., Kessler, R.C. 1991. Analysis of mesoscale airflow patterns in the south - central coast air basin during the SCCCAMP 1985 intensive measurement periods[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 30: 607-631.
- Hu, X.M., Nielsengammon, J.W., Zhang, F. 2010. Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model[J]. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 49(9): 1831-1844.
- Jimenez., Pedro, A., Dudhia., et al. 2013. On the Ability of the WRF model to reproduce the surface wind direction over complex terrain. [J]. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 52(7): 1610-1617.
- Katti, S.S., Natekar, M.V., Pathak, S. 1986. Evaporation studies on water evaporation control by

- monomolecular films of cetyl and stearyl alcohols, the corresponding alkoxy ethanol and their mixtures[J]. *Journal of Technology*, 6: 226-231.
- Laird, N., Sobash, R., Hodas, N. 2009. The frequency and characteristics of lake-effect precipitation events associated with the New York State Finger Lakes[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(4): 873-886.
- 李岩. 2018. 新疆博斯腾湖沿岸戈壁区低层大气物理特征及形成机制分析[D]. 国防科技大学.
- Li Yan. 2018. Analysis of the Physical Characteristics and Formation Mechanisms of the Lower Atmosphere in the Gobi Area along the Coast of Bosten Lake in Xinjiang [D]. National University of Defense Technology.
- 刘东莱. 2023. 突破瓶颈为高质量发展提供坚实水支撑[N]. 新疆日报, 2023-06-19(A01). Liu Donglai. 2023. Break through the Bottleneck to Provide Solid Water Support for High-quality Development [N]. *Xinjiang Daily*, 2023-06-19 (A01).
- Long, Z., Perrie, W., Gyakum, J., et al. 2007. Northern Lake impacts on local seasonal climate[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 8(4): 881-896.
- Lyons, W.A. 1972. The climatology and prediction of the Chicago Lake breeze[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 11(8): 1259-1270.
- Lyons, W.A., Olsson, L.E. 1973. Detailed Mesometeorological studies of air pollution dispersion in the Chicago Lake breeze 1[J]. *Monthly Weather Review*, 101(5): 387-403.
- 麦子. 2016. 鄱阳湖湖陆风的观测研究和数值模拟 [D]. 中国气象科学研究院. Mai Zi. 2016. Observational Study and Numerical Simulation of the Lake-land Breeze in Poyang Lake [D]. Chinese Academy of Meteorological Sciences.
- Ma, N., Szilagyi, J., Niu, G.Y., et al. 2016. Evaporation variability of Nam Co Lake in the Tibetan Plateau and its role in recent rapid lake expansion[J]. *Journal of Hydrology*, 537: 27-35.
- MacKay, M.D., Seglenieks, F., Verseghy, D., et al. 2003. Modeling mackenzie basin surface water balance during CAGES with the Canadian regional climate model[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 4(4): 748-767.
- Martínez - Álvarez, V., Baille, A., Martínez, J.M.M., et al. 2006. Efficiency of shading materials in reducing evaporation from free water surfaces[J]. *Agricultural Water Management*, 84(3): 229-239.
- Pielke, R.A. 2001. Influence of the spatial distribution of vegetation and soils on the prediction of cumulus convective rainfall[J]. *Reviews of Geophysics*, 39(2): 151-177.
- Shin, H.H., Hong, S.Y. 2011. Intercomparison of planetary boundary - layer parametrizations in the WRF model for a single day from CASES - 99[J]. *Boundary - Layer Meteorology*, 139(2): 261-281.

- Steenburgh, W.J., Halvorson, S.F., Onton, D.J. 2000. Climatology of lake - effect snowstorms of the Great Salt Lake[J]. *Monthly Weather Review*, 128(3): 709-727.
- Stivari, S.M.S., de Oliveira, A.P., Karam, H.A., et al. 2003. Patterns of local circulation in the Itaipu Lake area: numerical simulations of lake breeze[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 42(1): 37-50.
- 唐凯, 何新林, 姜海波. 2017. 干旱区平原水库水面蒸发消减研究综述[J]. *人民长江*, 48(5): 33-37. Tang Kai, He Xinlin, Jiang Haibo. 2017. A Review of Research on the Reduction of Water Surface Evaporation in Plain Reservoirs in Arid Regions [J]. *Yangtze River*, 48(5): 33-37.
- 王伟, 阿里木·赛买提, 马龙, 等. 2022. 1986-2019 年新疆湖泊变化时空特征及趋势分析[J]. *生态学报*, 42(4): 1300-1314. Wang Wei, Alim Saimaiti, Ma Long, et al. 2022. Analysis of the Temporal and Spatial Characteristics and Trends of Lake Changes in Xinjiang from 1986 to 2019 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 42(4): 1300-1314.
- 武金慧. 2008. 旱区水库抑制水面蒸发实验研究[D]. 西安: 西安理工大学. Wu Jinhui. 2008. Experimental Study on Inhibiting Water Surface Evaporation of Reservoirs in Arid Regions [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology.
- 许文豪, 王晓勇, 张俊, 等. 2019. 鄂尔多斯高原湖泊蒸发原位试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 46(5): 16-23. Xu Wenhao, Wang Xiaoyong, Zhang Jun, et al. 2019. In-situ Experimental Study on Lake Evaporation on the Ordos Plateau [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 46(5): 16-23.
- 杨坤, 叶含春, 肖让, 等. 2015. 南疆地区多浪水库漂浮网格法阻蒸发制剂阻蒸发效率实验[J]. *水电能源科学*, (11): 136-139. Yang Kun, Ye Hanchun, Xiao Rang, et al. 2015. Experiment on the Evaporation Resistance Efficiency of the Evaporation Resistance Preparation by the Floating Grid Method in Duolang Reservoir in Southern Xinjiang [J]. *Water Resources and Power*, (11): 136-139.
- 伊丽努尔·阿力甫江, 海米提·依米提, 买买提吐尔逊·艾则孜, 玉素甫江·如素. 2015. 1958 - 2012 年博斯腾湖水位变化驱动力[J]. *中国沙漠*, 35(01): 240-247. Ili Nur Alipjan, Hamit Emti, Memet Tursun Aizezi, Yusupjan Rusuli. 2015. Driving Forces of the Water Level Changes in Bosten Lake from 1958 to 2012 [J]. *Journal of Desert Research*, 35(01): 240-247.
- 张建彬, 高志球, 杨军等. 2022. 基于 WRF 模式的博斯腾湖地区暴雨数值模拟研究[J]. *高原气象*, 41(04): 887-895. Zhang Jianbin, Gao Zhiqiu, Yang Jun, et al. 2022. Numerical Simulation Study of Rainstorms in the Bosten Lake Area Based on the WRF Model [J]. *Plateau Meteorology*, 41(04): 887-895.

张茜. 2018. 博斯腾湖的湖陆风特征及其数值模拟研究[D]. 南京信息工程大学. Zhang Qian. 2018. Characteristics of the Lake-land Breeze in Bosten Lake and Its Numerical Simulation Study [D]. Nanjing University of Information Science and Technology.

Zhou, W., Wang, L., Li, D., et al. 2021. Spatial pattern of lake evaporation increases under global warming linked to regional hydroclimate change[J]. Communications Earth & Environment, 255(2): 1-10.

中国国家统计局. 2022. 国家统计数据库[DB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm>, 2022-10-03. National Bureau of Statistics of China. 2022. National Statistical Database [DB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm>, 2022-10-03.