

doi:10.13866/j.azr.2016.06.01

# 巴丹吉林沙漠腹地湖泊水面蒸发模拟的特殊性<sup>①</sup>

马宁<sup>1,2</sup>, 王乃昂<sup>1</sup>

(1. 兰州大学资源环境学院干旱区气候变化与水循环研究中心, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院青藏高原研究所地表过程与环境变化重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 巴丹吉林沙漠腹地的湖泊形成机理一直存在较大争论。其中, 湖泊蒸发估算的不确定性可能是导致这一争论的重要原因。采用沙漠腹地的气象观测数据, 分析了沙漠腹地湖泊蒸发估算所具有的特殊性, 亦即沙漠腹地与外围的风速差异、腹地湖泊“冷岛效应”和“盐度效应”。具体而言, 腹地风速较外围风速小, 可引起传统的彭曼模型估算的蒸发偏大, 腹地湖泊的冷岛效应则使平流项在湖泊能量平衡过程中不可忽视, 腹地湖泊的盐度效应使得其蒸发速率要小于淡水蒸发。因此, 开展系统的定位观测是准确获取湖巴丹吉林沙漠腹地湖泊蒸发的一个合理途径, 并有助于揭示沙漠腹地湖泊的形成机理。

**关键词:** 湖泊蒸发; 冷岛效应; 湖陆风; 盐度效应; 巴丹吉林沙漠

巴丹吉林沙漠腹地湖泊广布, 然而这些湖泊的形成机理一直是学界争论的热点问题。众所周知, 蒸发作为湖泊水循环的关键环节, 是量化湖泊水量平衡的重要参数<sup>[1]</sup>。湖泊水量损失项(即蒸发)的估算误差可能是前人关于巴丹吉林沙漠湖泊形成机制存在较大争议<sup>[2-5]</sup>的主要原因。Chen等<sup>[2]</sup>认为巴丹吉林沙漠腹地的湖泊年蒸发量可达4 000 mm; Gates等<sup>[3]</sup>又估算该区湖泊年蒸发速率为2 800 mm。Yang等<sup>[4]</sup>基于Penman模型推出腹地湖泊的年蒸发量约为1 040 mm, 且这一结果可随年际气候波动而有约200 mm的变化。马宁<sup>[6]</sup>基于沙漠腹地矿化度约300 g·L<sup>-1</sup>的湖泊中心的涡度相关系统观测值推算, 2012年的蒸发量约1 400 mm。上述差异较大的蒸发估算对厘清巴丹吉林沙漠腹地湖泊形成机理这一科学问题造成了较大困扰。准确计算巴丹吉林沙漠腹地湖泊之蒸发量需考虑的因素较多, 单一地使用传统的蒸发模型(如整体输送模型)或能量平衡模型估算沙漠腹地的湖泊蒸发量会有较大误差。笔者利用巴丹吉林沙漠腹地的气象观测数据, 分析沙漠腹地湖泊蒸发估算应考虑的因素, 旨在为进一步定量探讨干旱区湖泊水循环特征提供参考。

## 1 研究区概况

巴丹吉林沙漠(图1)位于中国内蒙古阿拉善高

原西部, 其范围大致系合黎山、北大山以北, 拐子湖、古居延泽以南, 雅布赖山以西北, 黑河正义峡出口、弱水东岸至古日乃湖以东, 东西长约442 km, 南北约宽354 km, 面积约5.22 × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>, 系中国第二大沙漠<sup>[7]</sup>。该区夏季平均气温25.3℃, 冬季平均气温-9.1℃, 平均气温年较差达34.4℃, 属典型的“冷沙漠”<sup>[6, 8]</sup>。沙漠南缘年降水量90.1~115.4 mm, 北缘仅35.2~42.9 mm, 区域多年平均降水量76.9 mm<sup>[8-9]</sup>。本课题组曾在沙漠腹地(位于苏木巴润吉林的丘间地)开展了连续2 a的降水观测, 发现2010年为100.6 mm, 2011年为72.8 mm<sup>[10]</sup>, 而该区的年潜在蒸散量可达1 000 mm以上<sup>[11]</sup>。

本文所使用的观测资料皆来源于兰州大学巴丹吉林沙漠野外综合科学观测站(图1)。气温资料源于沙漠腹地的巴润苏木吉林东部高大沙山中下部的陆面能量平衡系统(E1)站和音德尔图湖泊的湖泊水热平衡系统(E2)站, 气温的观测是利用美国Li-Cor公司所产的安装在LI-7550数采器上的热敏电阻温度测量仪。风速、风向资料是位于巴润苏木吉林丘间地的自动气象站(V1)和位于车日格勒湖盆偏东南部的自动气象站(V3), 风速为芬兰Vaisala公司的WAA151传感器所测, 量程为0.4~75 m·s<sup>-1</sup>, 精度为0.17 m·s<sup>-1</sup>; 风向为芬兰Vaisala公司

① 收稿日期: 2015-02-09; 修订日期: 2015-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371114, 41530745)

作者简介: 马宁(1990-), 男, 博士研究生, 主要从事区域水循环研究。E-mail: ma.n2007@aliyun.com

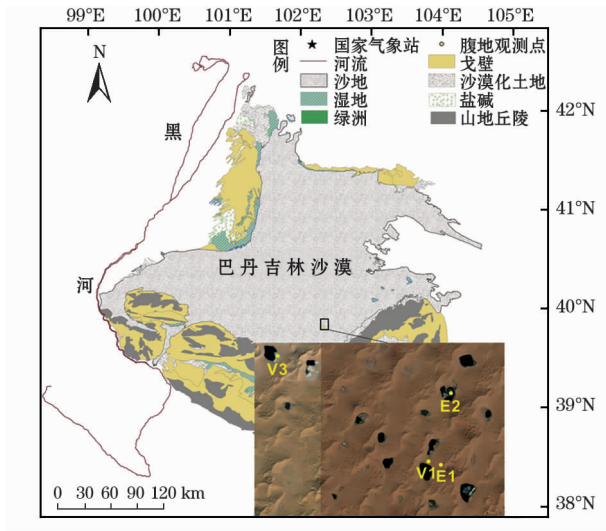


图1 巴丹吉林沙漠及其腹地定位观测点地理位置示意图  
Fig. 1 Geographic location of the observation sites in the hinterland of the Badain Jaran Desert

的 WAV151 传感器所测,量程为  $0 \sim 360^\circ$ ,精度为  $3^\circ$ 。上述观测资料、仪器位置与精度的详细情况参见文献[4,6]。如无特别说明,本文中所有时刻皆为北京时间。

## 2 沙漠腹地与外围的风速差异

前人关于腹地湖泊蒸发的估算多以沙漠外围气象站的观测数据来驱动蒸发模型,进而计算得到湖泊蒸发量。然而,部分外围气象站位于沙漠边缘的绿洲地带(如沙漠西北缘的额济纳旗),其与沙漠腹地的气候必然存在一定偏差。还需指出,在经典的 Penman 蒸发模型中<sup>[12]</sup>,空气动力学项中的风速函数(wind function)是利用两种埋藏型蒸发皿(两种蒸发皿的直径皆为  $0.76\text{ m}$ ,深度分别为  $0.61\text{ m}$  和  $1.83\text{ m}$ )的蒸发量拟合所得。此风速函数后来被 Brutsaert<sup>[13]</sup>修正为罗马(Rome)风速函数,以减小其因为显著的平流作用而在小尺度水域蒸发估算中产生的误差<sup>[14-15]</sup>。事实上,这亦是极端干旱区蒸发皿周围的干旱陆面环境的动力与热力作用导致的“晒衣生绳”效应的体现<sup>[16]</sup>:即对于某一相对湿润的较小空间尺度而言,周围的大环境极端干热,大量热量会通过平流输送供其蒸散消耗,增大了此湿润的小尺度环境之蒸散量,故蒸发皿蒸发应较实际湖泊的蒸发量明显偏大<sup>[16]</sup>。

Li 等<sup>[17]</sup>的研究表明,风速的变化是 1958—2010 年西北干旱区蒸发皿蒸发变化的主要原因。与此同时,关于我国西北地区参考蒸散发的影响因

素的研究近年来亦广泛开展。Huo 等<sup>[18]</sup>利用敏感性分析表明,风速的变化对西北地区参考蒸散发的贡献最大,这一观点与在河西走廊<sup>[20]</sup>、天山<sup>[21]</sup>等地的研究结果一致。马宁等<sup>[11]</sup>利用巴丹吉林沙漠西部毗邻的黑河流域气象站资料,推出黑河流域中下游在过去 50 a 来参考蒸散发呈显著下降趋势,并结合敏感性分析指出,风速的减小是造成这一现象的主要原因。McVicar 等<sup>[19]</sup>的综述表明,过去 50 a 来全球范围内风速的普遍减小对诸多地区参考蒸散发的减小贡献最大。

尽管参考蒸散量并不等同于水面蒸发量,然二者皆为供水充足条件下的蒸发过程,其影响因素应相差不大。因此,沙漠腹地与沙漠外围的风速是否有显著差别或将直接影响 Penman 模型计算的腹地湖泊蒸发之精度。图 2 为位于沙漠腹地苏木吉林间地的气象站(V1 站)观测的 2010 年月平均风速,笔者将其与沙漠北缘的拐子湖和南缘阿拉善右旗气象站风速作对比(所有数据均已校正成  $2\text{ m}$  高处风速),可以发现,沙漠腹地的风速远小于沙漠外围(图 2),其中沙漠北缘拐子湖气象站月平均风速约是腹地 V1 站的 2 倍,而沙漠南缘的阿拉善右旗比腹地高 25% 左右。笔者认为,沙漠腹地东南部广布相对高度为  $200 \sim 300\text{ m}$  的高大沙山,这种特殊的地形可能是造成上述较大风速差异的主要原因。因此,若直接利用外围气象站点的气象数据,驱动蒸发模型推算腹地湖泊蒸发量,必然会产生较大误差。

## 3 冷岛效应

关于湖泊特有的湖陆风现象的观测与模拟研究已然取得了诸多进展。新西兰 Tekapo 湖区<sup>[22]</sup>和日

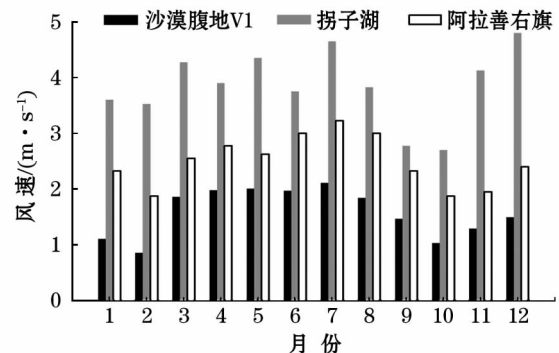


图2 巴丹吉林沙漠腹地(V1)与沙漠外围(拐子湖和阿拉善右旗)的2010年2 m高处逐月平均风速  
Fig. 2 Monthly mean wind speed at 2 m height above ground surface in the hinterland and the peripheral areas of the Badain Jaran Desert in 2010

本 Yahagi 河谷<sup>[23]</sup>的观测表明,湖陆风是导致当地空气污染的主要原因。北美五大湖区的研究显示,当地的湖陆风变化可影响周边 100 km 范围陆地的气象条件<sup>[24]</sup>。在中国,青海湖<sup>[25-26]</sup>、纳木错<sup>[27-28]</sup>、扎陵湖和鄂陵湖<sup>[29]</sup>、波斯腾湖<sup>[30]</sup>、太湖<sup>[31]</sup>、洞庭湖<sup>[32]</sup>、巢湖<sup>[33]</sup>、滇池<sup>[34]</sup>、洱海<sup>[35]</sup>皆开展了丰富的湖陆风观测及模拟工作。由于下垫面热力性质的差异,在晴天或少云天气条件下,沙漠腹地较大的湖泊相对于其周边环境是一个“冷源”,存在局地的“冷岛效应”。具体而言,在强辐射条件下湖泊的周围地区(即干旱地表)会形成超绝热不稳定层结,促进湍流发展,进而使下层被加热的空气输送至上层,与此同时,平流或者局地环流作用携带此热空气运移至“冷岛”上空,白天“冷岛”的近湖面层仅存在靠近湖面很薄的层结不稳定性大气,其感热通量向上输送;而上层大气却为逆温和感热通量向下输送<sup>[36-37]</sup>。结合野外考察与遥感影像解译可知,在沙漠腹地现存 6 个面积大于 0.9 km<sup>2</sup> 的湖泊<sup>[38]</sup>,本文选取其中之一车日格勒湖,以对其湖陆风进行分析。

笔者利用巴丹吉林沙漠腹地车日格勒湖盆偏东南缘的自动气象站(V3站,图1)所观测的风速与风向数据分析湖陆风现象。车日格勒湖泊面积约为 1.06 km<sup>2</sup><sup>[38]</sup>,自动气象站距湖泊约 300 m(图1),其中风速和风向观测频率每次分别为 1 s 和 0.25 s,输出数据皆为每 10 min 的平均值。选取 2012 年 1 月观测数据代表冬季(图3),2011 年 7 月数据代表夏季(图4)。

就湖陆风变化而言,冬季(图3)表现为白天湖风、夜晚陆风的现象,10:00 逐渐由陆风转成湖风,18:00—19:00 又由湖风反转为陆风。陆风一般较湖风小,前者大多 < 1 m·s<sup>-1</sup>,后者多集中于 2~4 m·s<sup>-1</sup>。整体而言,冬季陆风平均 0.2 m·s<sup>-1</sup>,湖风平均 0.7 m·s<sup>-1</sup>。与冬季类似,夏季(图4)亦是白天为湖风,夜晚为陆风,08:00 时左右陆风开始转湖风,19:00 左右逐渐由湖风转陆风。整体而言,夏季陆风平均 1.1 m·s<sup>-1</sup>,夏季湖风平均 2.2 m·s<sup>-1</sup>。就季节差异而言,湖风和陆风皆表现为夏季大于冬季,故夏季日平均风速亦大于冬季(图5),前者平均 1.6 m·s<sup>-1</sup>,后者仅 0.4 m·s<sup>-1</sup>。就日内差异而言,无论冬季还是夏季,白天风速大于夜间风速(图5),风速一般于 15:00—16:00 达到日最大值(湖风),而在凌晨 05:00—06:00 最小(陆风)。

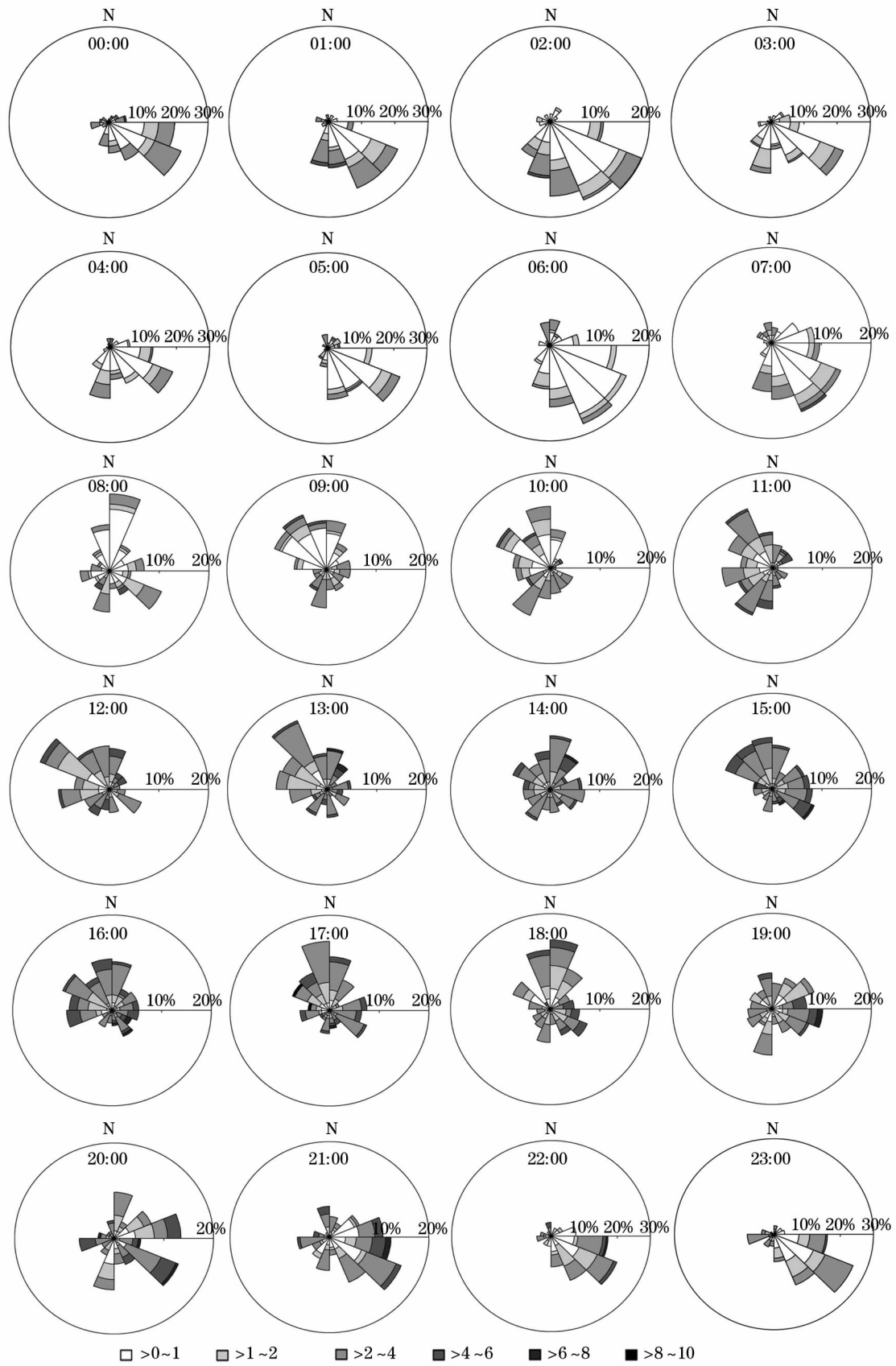
除湖陆风外,图6为苏木吉林东部高大沙山中下部的陆面能量平衡观测系统和音德尔图湖中心的

湖面水量平衡观测系统的近地层和近湖层(气温传感器距离地面/湖面皆高约 0.5 m)日均气温对比。需要指出的是,陆面能量平衡观测系统的海拔比湖面水量平衡观测系统的海拔高 88 m。即便如此,沙丘近地层气温仍高于湖面近湖层气温 0.5~1℃。可以推测,如果二者的海拔相等,这种差值应更大。与此同时,就二者 7 月平均的气温日内变化而言(图7),白天陆面气温整体高于湖面气温,前者峰值可达 33℃,后者峰值仅为 31.2℃;夜晚,二者关系与白天相反,亦即湖面气温高于陆面气温。湖面夜间较低的风速,导致绿洲水平交换较弱,一定程度上抑制了湖面辐射冷却效应向上扩散。这一结果与张强等<sup>[39]</sup>在敦煌地区小面积绿洲与戈壁区域的观测现象较为一致。以上湖陆风和不同下垫面气温的差异分析皆表明,巴丹机理沙漠腹地湖泊具有显著的冷岛效应,而这种“冷岛效应”使得传统的基于能量平衡的蒸发模型难以被成功运用,因为局地的水平平流和水平湍流会对湖泊能量平衡产生较大影响。张强等<sup>[40]</sup>在敦煌绿洲观测实验中,亦发现绿洲地表存在显著的能量不平衡现象(即可利用能量不等于湍流通量之和)。故笔者认为,最近报道的利用表面能量平衡模型所估算的巴丹吉林沙漠湖泊蒸发的研究中<sup>[41]</sup>,可能忽视了湖泊的冷岛效应,使其模拟效果存在一定误差。

事实上,“冷岛效应”早在 1987 年即被苏从先等<sup>[42]</sup>在张掖农田和民勤红崖山水库的观测实验中所发现。对面积较大的绿洲而言,冷岛效应不仅会影响自身的水分循环特征,还会通过水平方向的水汽输送来影响其周边荒漠地区的水循环。例如,张强等<sup>[43]</sup>在河西地区的化音观测站利用中尺度陆气耦合模式,模拟了临近绿洲的荒漠大气湿度的垂直分布特征,指出水平对流和水平湍流的作用向其周围的荒漠地区输送水汽,进而形成了荒漠地表的“逆湿”现象,促进了绿洲周边的荒漠地表水分的蒸发。这种现象亦属于一种绿洲水分局地循环再利用的过程。而对于较小的绿洲而言,其与周边荒漠地区产生的热力环流相对较弱,故对其周边的荒漠影响可能并不显著<sup>[44]</sup>。考虑到本文中车日格勒湖泊面积仅 1.06 km<sup>2</sup>,故湖泊蒸发是否会对周边的沙丘水循环产生影响,还有待于进一步研究。

## 4 盐度效应

早在 1887 年,法国科学家拉乌尔在研究含非挥



顶部数字为时刻, N 为正北方向。

图3 车日格勒气象站(V3 站)2012 年 1 月平均的日内逐小时风玫瑰图

Fig.3 Hourly variation of wind speed and wind rose at Cherigel Meteorological Station in January 2012

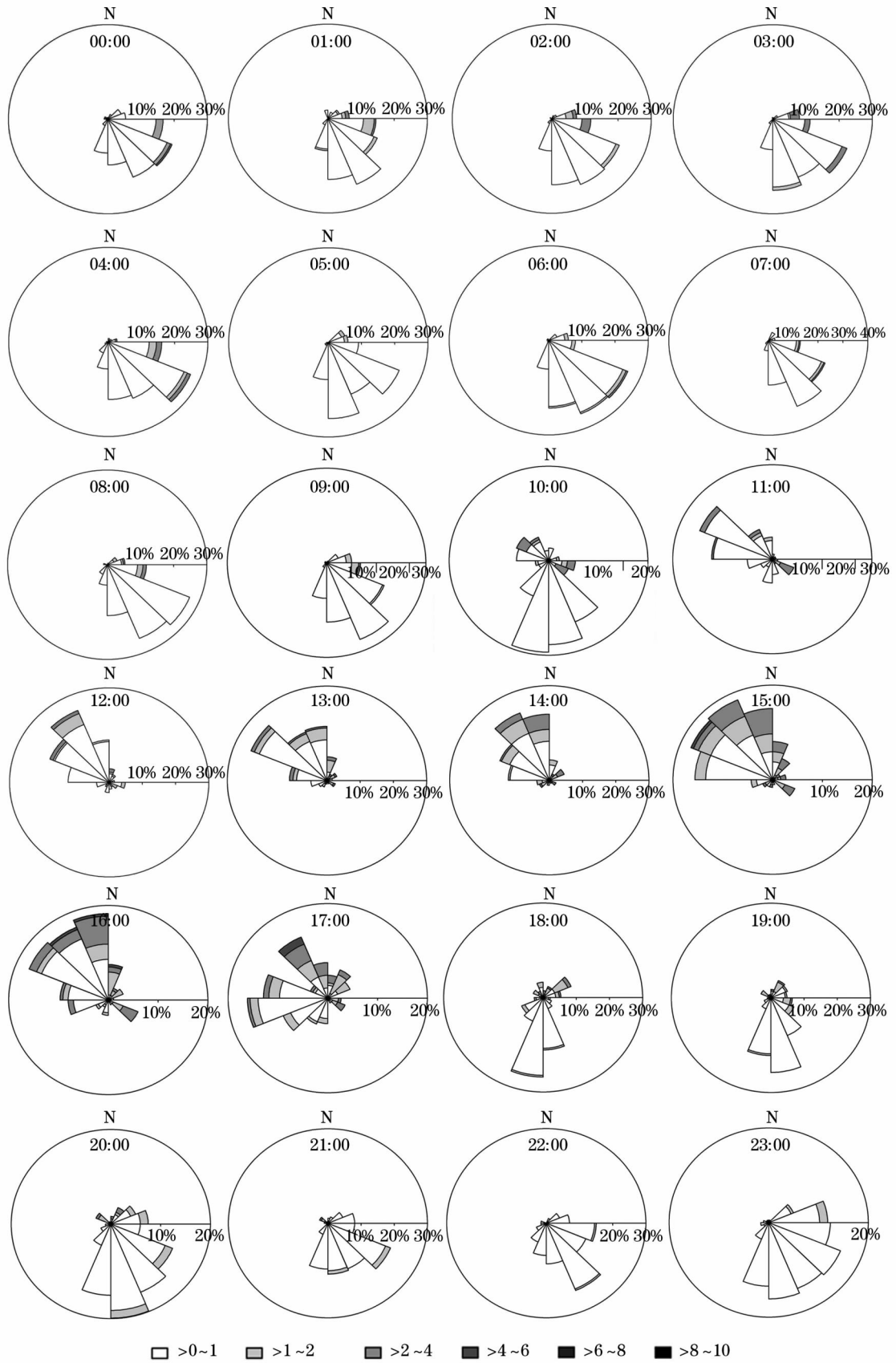


图4 车日格勒气象站(V3站)2011年7月平均的日内逐小时风玫瑰图

Fig.4 Hourly wind rose at Cherigel Meteorological Station in July 2011

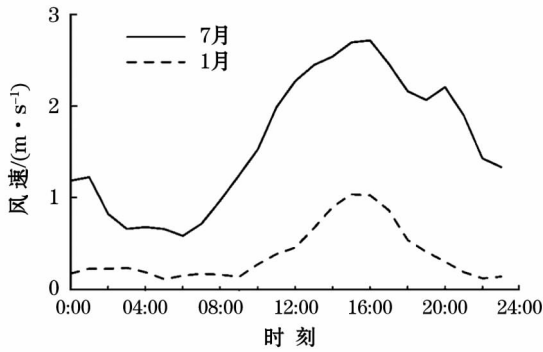


图5 车日格勒 V3 站夏季和冬季湖陆风的风速日变化

Fig. 5 Daily variation of land-lake breeze in summer and winter at Cherigel Meteorological Station

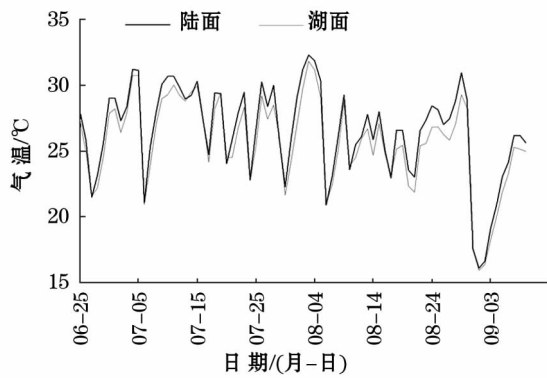


图6 2012年6月25日至9月9日湖泊近湖面层与沙丘近地层的日均气温变化

Fig. 6 Variation of daily mean air temperature over lake and land surfaces from 25 June to 9 September, 2012

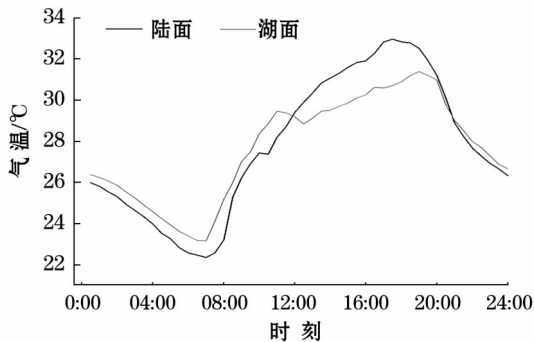


图7 2012年7月平均的湖泊近湖面层气温与沙丘近地层气温的日内变化

Fig. 7 Daily variation of the air temperature over lake and land surfaces in July 2012

发性溶质之稀溶液时提出了著名的“拉乌尔定律”，即同温度下，稀溶液的蒸气压等于纯溶剂蒸气压与其溶剂摩尔分数之积。目前，国内外已有诸多关于不同盐度的水体蒸发速率差异研究<sup>[45-47]</sup>，所得结果皆表明盐度越大的溶液，蒸发速率越小。Houston<sup>[48]</sup>基于蒸发皿的观测实验定量提出了“盐度效

应”的公式，并推出溶液密度每增加  $100 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ，年蒸发量约减小  $700 \text{ mm}$  (图8)。而巴丹吉林沙漠腹地广泛分布咸水湖，其中约 83% 的湖泊矿化度在  $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  以上， $200 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  以上的湖泊亦有 16% 之多<sup>[49-50]</sup>。沈士平<sup>[51]</sup>实施的巴丹吉林沙漠腹地咸淡水蒸发观测实验结果表明，受盐度效应影响，腹地咸水湖泊蒸发速率明显小于淡水。综上所述，在计算腹地湖泊蒸发时，若忽略盐度的影响，必将使计算结果偏大于真实蒸发量。

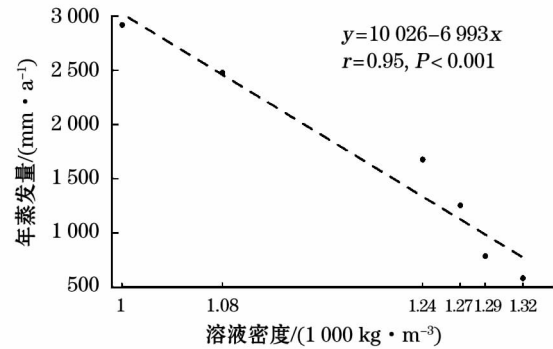


图8 盐度效应对水体蒸发影响

(据文献[48]观测数据改绘)

Fig. 8 Effect of water salinity on evaporation

## 5 小结

巴丹吉林沙漠腹地的湖泊蒸发研究需全面考虑实地情况：腹地的风速条件、冷岛效应和盐度效应皆对湖泊蒸发有显著影响。单纯利用经验型的蒸发模型会对其蒸发估算产生较大误差。故笔者认为，利用诸如波文比系统、涡度相关系统和大孔闪烁仪等对沙漠腹地湖泊蒸发进行定位观测，同时配以不同盐度的蒸发梯度实验，辅以常规气象要素（诸如风速、气温、湿度、辐射等）的长期观测，建立适用于沙漠腹地的湖泊蒸发模型才是解决这一问题的关键。事实上，近年来利用上述手段针对湖泊蒸发的定位观测研究在美国密西西比州的 Ross Barnett 水库<sup>[52]</sup>、加拿大西北部的 Great Slave 湖<sup>[53]</sup>、以色列北部的 Eshkol 水库<sup>[54]</sup>、澳大利亚东北部的珊瑚礁水域<sup>[55]</sup>、澳大利亚昆士兰的 Logan 水坝<sup>[56]</sup>、法国南部 Thau 泻湖<sup>[57]</sup>以及中国的太湖<sup>[58-59]</sup>、纳木错<sup>[60]</sup>、色林错<sup>[61]</sup>、洱海<sup>[62]</sup>、鄂陵湖<sup>[63]</sup>、青海湖<sup>[64]</sup>等地已然广泛开展。马宁<sup>[6, 65]</sup>首次利用涡度相关技术在巴丹吉林沙漠腹地开展了 2012 年夏季的湖泊-大气间能量交换和蒸发的观测研究，而未来更长时间序列的沙漠腹地湖气水热循环的定位观测依然需要进一

步研究。

### 参考文献 (References):

- [1] Ma N, Szilagyi J, Niu G Y, et al. Evaporation variability of Nam Co Lake in the Tibetan Plateau and its role in recent rapid lake expansion[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 537: 27 – 35.
- [2] Chen J, Li L, Wang J Y, et al. Groundwater maintains dune landscape[J]. *Nature*, 2004, 432: 459.
- [3] Gates J, Edmunds M, Ma J, et al. Estimating groundwater recharge in a cold desert environment in northern China using chloride[J]. *Hydrogeology Journal*, 2008, 16: 893 – 910.
- [4] Yang X P, M N, Dong J F, et al. Recharge to the inter-dune lakes and Holocene climatic changes in the Badain Jaran Desert, western China[J]. *Quaternary Research*, 2010, 73: 10 – 19.
- [5] Ma N, Wang N A, Zhao L Q, et al. Observation of mega-dune evaporation after various rain events in the hinterland of Badain Jaran desert[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(2): 162 – 170.
- [6] 马宁. 巴丹吉林沙漠能量分配与湖泊蒸发量的观测研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012. [Ma Ning. Observation of Energy Partitioning and Lake Evaporation in the Badain Jaran Desert [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.]
- [7] 朱金峰, 王乃昂, 陈红宝, 等. 基于遥感的巴丹吉林沙漠范围与面积分析[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(9): 1 087 – 1 094. [Zhu Jinfeng, Wang Naiang, Chen Hongbao, et al. Study on the boundary and the area of Badain Jaran desert based on the remote sensing imagery[J]. *Progress In Geography*, 2010, 29(9): 1 087 – 1 094.]
- [8] 马宁, 王乃昂, 朱金峰, 等. 巴丹吉林沙漠周边地区近 50 a 来气候变化[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(6): 1 541 – 1 547. [Ma Ning, Wang Naiang, Zhu Jinfeng, et al. Climate change around the Badain Jaran desert in recent 50 years[J]. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(6): 1 541 – 1 547.]
- [9] 马宁, 王乃昂, 李卓仑, 等. 1960—2009 年巴丹吉林沙漠南北缘气候变化分析[J]. *干旱区研究*, 2011, 28(2): 242 – 250. [Ma Ning, Wang Naiang, Li Zhuolun, et al. Analysis on climate change in the northern and southern marginal zones of the Badain Juran Desert during the period 1960 – 2009[J]. *Arid Zone Research*, 2011, 28(2): 242 – 250.]
- [10] 王乃昂, 马宁, 陈红宝, 等. 巴丹吉林沙漠腹地降水特征的初步分析[J]. *水科学进展*, 2013, 24(2): 153 – 160. [Wang Naiang, Ma Ning, Chen Hongbao, et al. A preliminary study for precipitation characteristics in the hinterland of Badain Jaran desert[J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24: 153 – 160.]
- [11] 马宁, 王乃昂, 王鹏龙, 等. 黑河流域参考蒸散量的时空变化特征及影响因素的定量分析[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(6): 975 – 989. [Ma Ning, Wang Naiang, Wang Penglong, et al. Temporal and spatial variation characteristics and quantification of the affect factors for reference evapotranspiration in Heihe River basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(6): 975 – 989.]
- [12] Penman L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass [J]. *Proceedings of The Royal Society A*, 1948, 193: 120 – 145.
- [13] Brutsaert W. *Evaporation into the Atmosphere: Theory, History and Applications*[M]. New York: Springer, 1982.
- [14] Ma N, Zhang Y, Szilagyi J, et al. Evaluating the complementary relationship of evapotranspiration in the alpine steppe of the Tibetan Plateau[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51: 1 069 – 1 083.
- [15] Lim W, Roderick M, Hobbins M, et al. The aerodynamics of pan evaporation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 152: 31 – 43.
- [16] 张强, 张之贤, 问晓梅, 等. 陆面蒸散量观测方法比较分析及其影响因素研究[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(5): 538 – 547. [Zhang Qiang, Zhang Zhixian, Wen Xiaomei, et al. Comparisons of observational methods of land surface evapotranspiration and their influence factors[J]. *Advances in Earth Sciences*, 2011, 26(5): 538 – 547.]
- [17] Li Z, Chen Y, Shen Y J, et al. Analysis of changing pan evaporation in the arid region of northwest China [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49: 2 205 – 2 212.
- [18] Huo Z, Dai X, Feng S, et al. Effect of climate change on reference evapotranspiration and aridity index in arid region of China [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 492: 24 – 34.
- [19] McVicar T, Roderick M T, Donohue R, et al. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 416/417: 182 – 205.
- [20] 贾文雄, 何元庆, 王旭峰, 等. 祁连山及河西走廊潜在蒸发量的时空变化[J]. *水科学进展*, 2009, 20(2): 159 – 167. [Jia Wenxiong, He Yuanqing, Wang Xufeng, et al. Temporal and spatial change of the potential evaporation over Qilian mountains and Hexi corridor from 1960 to 2006[J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(2): 159 – 167.]
- [21] 张明军, 李瑞雪, 贾文雄, 等. 中国天山山区潜在蒸发量的时空变化[J]. *地理学报*, 2009, 64(7): 798 – 806. [Zhang Mingjun, Li Ruixue, Jia Wenxiong, et al. Temporal and spatial changes of potential evaporation in Tianshan Mountains from 1960 to 2006[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(7): 798 – 806.]
- [22] McGowan H A, Sturman A P. Interacting multi-scale wind systems within an alpine basin, Lake Tekapo, New Zealand [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 1996, 58: 165 – 177.
- [23] Kitada T, Igarashi K, Owada M. Numerical analysis of air pollution in a combined field of land/sea breeze and mountain/valley wind [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1986, 44: 197 – 216.
- [24] Sills D M L, Brook J R, Levy I, et al. Lake breezes in the southern Great Lakes region and their influence during BAQS-Met 2007 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11: 7 955 – 7 973.
- [25] 陈万隆, 孙卫国, 周竞南, 等. 青海湖湖陆风的数值研究[J]. *湖泊科学*, 1995, 7(4): 289 – 296. [Chen Wanlong, Sun Weiguo, Zhou Jingnan, et al. A numerical simulation on lake-land breeze of Qinghai Lake[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1995, 7(4): 289 – 296.]
- [26] 吕雅琼, 杨显玉, 马耀明. 夏季青海湖局地环流及大气边界层特征的数值模拟[J]. *高原气象*, 2007, 26(4): 687 – 693. [Lv Yaqiong, Yang Xianyu, Ma Yaoming. Numerical simulation of summer circulation and atmospheric boundary layer characteristics over Qinghai Lake[J]. *Plateau Meteorology*, 2007, 26(4): 687 – 693.]
- [27] 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[J]. *高原气象*, 2008, 27(6): 1 205 – 1 210. [Lv Yaqiong, Ma Yaoming, Li Maoshan, et al. Study on characteristic of atmospheric boundary layer over lake Namco region, Tibetan Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(6): 1 205 – 1 210.]
- [28] 吕雅琼, 马耀明, 李茂善, 等. 纳木错湖夏季典型大气边界层特征的数值模拟[J]. *高原气象*, 2008, 27(4): 733 – 740. [Lv Yaqiong, Ma Yaoming, Li Maoshan, et al. Numerical simulation of

- typical atmospheric Boundary Layer characteristics over lake Namco region, Tibetan Plateau in Summer [J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(4): 733 - 740. ]
- [29] 杨显玉, 文军. 扎陵湖和鄂陵湖大气边界层特征的数值模拟 [J]. 高原气象, 2012, 31(4): 927 - 934. [ Yang Xianyu, Wen Jun. Numerical simulation of characteristic of atmospheric boundary layer over lake Gyaring and Ngoring [J]. Plateau Meteorology, 2012, 31(4): 927 - 934. ]
- [30] 王容, 杜勇. 博斯腾湖流域气候及湖陆风 [J]. 干旱区地理, 1994, 17(3): 90 - 94. [ Wang Rong, Du Yong. The climate and wind difference between the land and lake areas in the Bostan Lake basin [J]. Arid Land Geography, 1994, 17(3): 90 - 94. ]
- [31] 杨健博, 刘红年, 费松, 等. 太湖湖陆风背景下的苏州城市化对城市热岛特征的影响 [J]. 气象科学, 2013, 33(5): 473 - 484. [ Yang Jianbo, Liu Hongnian, Fei Song, et al. The impact of urbanization on the urban heat island in Suzhou under the influence of Taihu lake - land breeze [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2013, 33(5): 473 - 484. ]
- [32] 林必元, 李敏娴. 洞庭湖湖陆风特征与降水 [J]. 南京气象学院学报, 1988, 11(1): 78 - 88. [ Lin Biyuan, Li Minxian. Characteristic feature of the lake - land breeze and its effect on precipitation over the Dongting Lake [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1988, 11(1): 78 - 88. ]
- [33] 殷长秦, 王体健, 石春娥, 等. 巢湖流域典型站点的风场特征分析 [J]. 大气科学学报, 2012, 35(2): 249 - 256. [ Yin Changqin, Wang Tijian, Shi Chune, et al. 2012. Analysis on wind characteristics at typical sites over Chaohu Lake basin [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2012, 35(2): 249 - 256. ]
- [34] 张雷鸣. 滇池区域性环流的数值模拟 [J]. 热带气象学报, 1994, 10(2): 172 - 178. [ Zhang Leiming. Numerical study on local circulation in Dianchi area [J]. Journal of Tropical Meteorology, 1994, 10(2): 172 - 178. ]
- [35] 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 [J]. 大气科学学报, 2011, 34(2): 225 - 231. [ Xu Anlun, Zhao Xiaohong, Fu Zhijia, et al. Comparison of meteorological elements over water and land surfaces in the Erhai lake basin [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2011, 34(2): 225 - 231. ]
- [36] 张强, 胡隐樵, 王喜红. 黑河地区绿洲内农田微气象特征 [J]. 高原气象, 1992, 11(4): 361 - 370. [ Zhang Qiang, Hu Yinqiao, Wang Xihong. The Characters of micrometeorology on farmland in oasis in HEIFE region [J]. Plateau Meteorology, 1992, 11(4): 361 - 370. ]
- [37] 张强, 胡隐樵. 绿洲地理特征及其气候效应 [J]. 地球科学进展, 2002, 17(4): 477 - 486. [ Zhang Qiang, Hu Yinqiao. The geographic features and climate effects of oasis [J]. Advances in Earth Sciences, 2002, 17(4): 477 - 486. ]
- [38] Zhang Z Y, Wang N A, Ma N, et al. Lake area changes and the main causes in the hinterland of Badain Jaran Desert during 1973 - 2010, China [J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2014, 6(1): 22 - 29.
- [39] 张强, 王胜. 绿洲与荒漠背景夏季近地层大气特征的对比分析 [J]. 冰川冻土, 2005, 27(2): 282 - 289. [ Zhang Qiang, Wang Sheng. Comparison of atmospheric characteristics of near-surface layer between oasis and desert background in summer [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(2): 282 - 289. ]
- [40] 张强, 王胜. 夏季绿洲生态环境对荒漠背景地表能量过程的扰动 [J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2459 - 2466. [ Zhang Qiang, Wang Sheng. The characteristics of spatial disturbance of surface processes in oasis on the background of desert [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(10): 2459 - 2466. ]
- [41] 柯珂, 金晓媚, 高萌萌, 等. 以改进的 SEBS 模型估算苏木吉林南湖的水面蒸发 [J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 233 - 239. [ Ke Ke, Jin Xiaomei, Gao Mengmeng, et al. Evaporation estimation of the Sumu Jaran south lake in the Badain Jaran desert based on modified SEBS model [J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(1): 233 - 239. ]
- [42] 苏从先, 胡隐樵. 绿洲和湖泊的冷岛效应 [J]. 科学通报, 1987, 32(10): 756 - 758. [ Su Congxian, Hu Yinqiao. The cold island effect of the oasis and lake [J]. Chinese Science Bulletin, 1987, 32(10): 756 - 758. ]
- [43] 张强, 赵鸣. 绿洲附近荒漠大气逆湿的外场观测和数值模拟 [J]. 气象学报, 1999, 57(6): 729 - 740. [ Zhang Qiang, Zhao Ming. Field experiment and numerical simulation of inverse or humidity of atmosphere over desert near oasis [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1999, 57(6): 729 - 740. ]
- [44] 张强, 卫国安, 黄荣辉. 绿洲对其临近荒漠大气水循环的影响: 敦煌试验数据分析 [J]. 自然科学进展, 2002, 12(2): 170 - 175. [ Zhang Qiang, Wei Guoan, Huang Ronghui. The impact of oasis on the hydrological cycle of its adjacent desert area: Analysis based on the Dunhuang experiments [J]. Progress in Natural Science, 2002, 12(2): 170 - 175. ]
- [45] 张士宾, 邵兵. 海盐卤水比蒸发的测定与研究 [J]. 盐业与化工, 1981, 10(4): 1 - 7. [ Zhang Shibin, Shao Bing. The observation of the evaporation of the sea-salt water [J]. Salt and Chemical Engineer, 1981, 10(4): 1 - 7. ]
- [46] 关岳. 不同湿度条件下不同浓度卤水比蒸发实验式的推导 [J]. 盐业与化工, 1979, 8(1): 10 - 15. [ Guan Yue. The derivation of the evaporation estimation equation with different salt content under different humidities [J]. Salt and Chemical Engineer, 1979, 8(1): 10 - 15. ]
- [47] 洪嘉琏, 卢瑞芝. 我国北方四大盐海区卤蒸发计算及其分布 [J]. 地理研究, 1988, 7(2): 17 - 27. [ Hong Jialian, Lu Ruizhi. The estimation and the distribution of the evaporation of the brine of the four big sea-salt areas in the northern China [J]. Geographical Research, 1988, 7(2): 17 - 27. ]
- [48] Houston J. Variability of precipitation in the Atacama desert: Its cause and hydrological impact [J]. International Journal of Climatology, 2006, 26: 2181 - 2198.
- [49] 陈立, 王乃昂, 王浩, 等. 巴丹吉林沙漠湖泊与地下水化学参数初步研究 [J]. 中国沙漠, 2012, 32(2): 531 - 538. [ Chen Li, Wang Naiang, Wang Hao, et al. Spatial patterns of the chemical parameters of the lakes and groundwater in Badain Jaran Desert [J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(2): 531 - 538. ]
- [50] 陆莹, 王乃昂, 李卓仑, 等. 巴丹吉林沙漠湖泊水化学空间分带性与湖泊面积的等级关系 [J]. 地理研究, 2011, 30(11): 2083 - 2091. [ Lu Ying, Wang Naiang, Li Zhuolun, et al. Research on the relationship between lake hydro-chemical characteristics and its area in the Badain Jaran Desert [J]. Journal of Desert Research, 2011, 30(11): 2083 - 2091. ]
- [51] 沈士平. 巴丹吉林沙漠咸 - 淡水蒸发量对比及其影响因素对比 [D]. 兰州: 兰州大学, 2014. [ Shen Shiping. The Comparison of the Evaporation Between the Salt and Pure Water and The Influence Factors in Badain Jaran Desert [D]. Lanzhou: Lanzhou Uni-



- versity, 2014. ]
- [52] Liu H, Zhang Y, Liu S, et al. Eddy covariance measurements of surface energy budget and evaporation in a cool season over southern open water in Mississippi [ J ]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114, D04110, doi:10. 1029/2008JD010891.
- [53] Blaken P, Rouse W R, Culf A D, et al. Eddy covariance measurements of evaporation from Great Slave Lake, northwest Territories, Canada [ J ]. *Water Resources Research*, 2000, 36 ( 4 ) : 1 069 – 1 077.
- [54] Tanny J, Cohen S, Assouline S, et al. Evaporation from a small water reservoir: Direct measurements and estimates [ J ]. *Journal of Hydrology*, 2008, 351 : 218 – 229.
- [55] McGowan H A, Sturman A P, MacKellar M C, et al. Measurements of the local energy balance over a coral reef flat, Heron Island, southern Great Barrier Reef, Australia [ J ]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115, D19124, doi:10. 1029/2010JD014218.
- [56] McJannet D, Cook F, McGloin R, et al. Long-term energy flux measurements over an irrigation water storage using scintillometry [ J ]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 168 : 93 – 107.
- [57] Bouin M, Caniaux G, Traullé O, et al. Long-term heat exchanges over a Mediterranean lagoon [ J ]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117, D23104, doi:10. 1029/2012JD017857.
- [58] Lee X, Liu S, Xiao W, et al. The Taihu eddy flux network: An observational program on energy, water, and greenhouse gas fluxes of a large freshwater lake [ J ]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95 ( 10 ) : 1 584 – 1 594.
- [59] Wang W, Xiao W, Cao C, et al. Temporal and spatial variations in radiation and energy balance across a large freshwater lake in China [ J ]. *Journal of Hydrology*, 2014, 511 : 811 – 824.
- [60] Wang B, Ma Y, Chen X, et al. Observation and simulation of lake-air heat and water transfer processes in a high-altitude shallow lake on the Tibetan Plateau [ J ]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120 ( 44 ) : 12 327 – 12 344.
- [61] Guo Y, Zhang Y, Ma N, et al. Quantifying surface energy fluxes and evaporation over a significant expanding endorheic lake in the central Tibetan Plateau [ J ]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2016, 94 ( 5 ) , doi:10. 2151/jmsj. 2016 – 023.
- [62] Li Z, Lyu S, Ao Y, et al. Long-term energy flux and radiation balance observations over Lake Ngoring, Tibetan Plateau [ J ]. *Atmospheric Research*, 2015, 155 : 13 – 25.
- [63] Liu H, Feng J, Sun J, et al. Eddy covariance measurements of water vapor and CO<sub>2</sub> fluxes above the Erhai Lake [ J ]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58 ( 3 ) : 317 – 328.
- [64] Li X, Ma Y, Huang Y, et al. Evaporation and surface energy budget over the largest high-altitude saline lake on the Qinghai-Tibet Plateau [ J ]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121, doi:10. 1002/2016JD025027.
- [65] 马宁,王乃昂,黄银洲,等. 巴丹吉林沙漠腹地夏季不同天气条件下陆—湖面辐射收支与能量分配特征对比 [ J ]. *自然资源学报*, 2015, 30 ( 5 ) : 796 – 809. [ Ma Ning, Wang Naiang, Huang Yinzhou, et al. Characteristics of radiation budget and energy partitioning on land and lake surface under different summer weather conditions in the hinterland of Badain Jaran Desert [ J ]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30 ( 5 ) : 796 – 809. ]

## On the Simulation of Evaporation from Lake Surface in the Hinterland of the Badain Jaran Desert

MA Ning<sup>1, 2</sup>, WANG Nai-ang<sup>1</sup>

(1. *College of Environmental and Earth Sciences, Center for Climate Change and Hydrological Cycle in Arid Region, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China;*

2. *Key Laboratory of Surface Process and Environment Change, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

**Abstract:** There are substantial controversies about the formation mechanism of the lakes in the hinterland of the Badain Jaran Desert, China. In which the uncertainty of estimating lake evaporation may be one of the important reasons of such controversies. Based on the in-situ observation data, the particularity of evaporation over the lakes in the hinterland of the Badain Jaran Desert was analyzed, namely the wind speed difference between the hinterland and the peripheral areas and the “cold-island effect” and “salinity effect” of the lakes in the hinterland. Specifically, the wind speed in the hinterland was lower than that in the peripheral areas, which may cause the overestimation of the lake evaporation through the traditional Penman model. The “cold-island effect” of the lakes further led to the difference between the ordinary water surface evaporation, and the “salinity effect” made the lake evaporation rate be lower than fresh water evaporation. Therefore, it may be a rational way to acquire the accurate data of lake evaporation and reveal the formation mechanism of the lakes in the study area by carrying out the in-situ observations.

**Key words:** lake evaporation; cold-island effect; lake-land breeze; salinity effect; Badain Jaran Desert