

张西营,朱海霞,朱磊,等.不同时间尺度下气象-水文要素变化对察尔汗盐湖盐田蒸发作用的影响[J].盐湖研究,2024,32(1):88-98.
Zhang X Y, Zhu H X, Zhu L, et al. The variations of meteorological and hydrological factors across different temporal scales and their influences on evaporation within salt ponds of the Qarhan Salt Lake[J]. Journal of Salt Lake Research, 2024, 32(1): 88-98.
DOI:10.12119/j.yhj.202401010

不同时间尺度下气象-水文要素变化对察尔汗盐湖盐田蒸发作用的影响

张西营^{1,2*},朱海霞^{1,2,3},朱磊⁴,陈文祥⁴,陈亮^{1,2},李雯霞^{1,2,3},曾方明^{1,2},
朱登贤⁵,段心怡^{1,2,3}

(1. 中国科学院青海盐湖研究所,中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室,青海 西宁 810008;
2. 青海省盐湖地质与环境重点实验室,青海 西宁 810008; 3. 中国科学院大学,北京 100049;
4. 青海盐湖工业股份有限公司钾肥分公司,青海 格尔木 816009;
5. 青海盐湖工业股份有限公司资源分公司,青海 格尔木 816000)

摘要:目前对察尔汗盐湖蒸发量的研究主要集中在气象-水文因素与卤水蒸发量定量关系,缺乏在不同时间尺度下盐湖蒸发量的驱动因素动态变化研究。利用2020年11月5日—2023年5月1日察尔汗盐湖盐田的空气温度、露点温度、风速、相对湿度、总辐射日累计以及盐田的蒸发量、水温、水位等监测数据,结合获取的察尔汗盐湖补给河流格尔木河流量等水文资料,采用相关性分析、多元回归模型等方法探讨了不同时间尺度下盐田蒸发作用与气象-水文因素之间的关系。研究表明,不同盐田的水温、水位、淡水蒸发量变化保持一致,卤水蒸发量变化与盐田密度有关。随着时间尺度的增大,蒸发量与气象要素之间的相关性增强。察尔汗盐田蒸发量在逐小时与逐月尺度主要受到环境温度的影响,日尺度下主要受到太阳辐射的影响。在极端天气作用下河流水文与盐湖微气象因子呈同步变化,对蒸发量的影响具有滞后性。这一研究结果可为盐田生产工艺优化提供理论指导。

关键词:察尔汗盐湖;盐田;蒸发作用;气象因素;水文参数;不同时间尺度

中图分类号:TS352

文献标志码:A

文章编号:1008-858X(2024)01-0088-11

察尔汗盐湖是我国最重要的钾肥生产基地^[1],盐田过程是该盐湖钾肥生产必不可少的关键环节。气象要素与盐田过程关系密切^[2],直接影响到盐田的蒸发作用强度和效率。开展察尔汗盐湖盐田过程蒸发作用及其影响因素研究,对于提升盐田生产效率乃至我国钾肥保供意义重大。

诸多学者对盐湖区气象要素与蒸发作用的关系进行了研究和探讨。齐文等研究发现,西藏扎布耶盐湖卤水蒸发量与温度、太阳辐射等气象因子呈正相关^[3];祁贵明等认为,卤水蒸发量是卤水浓度、黏度与气温、相对湿度、风等因素综合作用的结果^[4];董生发等研究了大气湿度对盐湖老卤蒸发的影响,建立了盐湖老卤蒸发模型^[5];成春春等分析了太阳辐射对不同盐田蒸发量、成矿量的影响,发现蒸发量随太阳

辐射单调递增^[6];李志伟等开展的察尔汗盐湖卤水天然蒸发实验分析结果显示,卤水蒸发速度随辐照强度、风速、环境温度和卤水温度的增加呈线性增大,而随相对湿度和浓度的增加呈线性减小^[7]。目前的研究普遍集中在水文-气象因素在某时间段内对卤水蒸发量的影响,但有研究表明,不同时间尺度下卤水蒸发作用的驱动因素可能不同^[8]。研究不同时间尺度下气象-水文因素对盐田蒸发作用的影响,对盐田生产非常重要。

基于以上背景,中国科学院青海盐湖研究所与青海盐湖工业股份有限公司针对察尔汗盐湖盐田气象观测站获取的数据资料开展合作研究,通过对2020年11月5日—2023年5月1日察尔汗盐田气象和水文要素分析,结合格尔木河水文变化特征,采

收稿日期:2023-10-20;修回日期:2023-11-20

基金项目:柴达木盆地盐湖区资源与环境科学观测系统平台(2021-ZJ-T07);中国科学院“西部之光-西部交叉团队”重点实验室专项(xbzg-zdsys-202107)

作者简介:张西营(1977-),男,博士,研究员,主要研究方向为盐类矿床研究。E-mail:xyzhchina@isl.ac.cn。

用相关性分析和多元回归模型探讨不同时间尺度下盐田蒸发的主要驱动因素,以期系统了解不同时间尺度下气象-水文因素对盐田蒸发作用的影响,从而为察尔汗盐湖盐田生产提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 数据来源

察尔汗盐湖钾盐盐田生产工艺为原卤进入钠盐池,在钠盐池中滩晒蒸发并析出氯化钠,达到一定浓度时导入钠调池和光调池继续蒸发析盐;卤水在调节池中蒸发至光卤石饱和点时导入光卤石池,尽可能在这里将光卤石全部析出;晒完光卤石后的老卤排走,晒制的光卤石原矿输送到加工车间生产钾肥。从钠调池,到光调池,再到光卤石池,卤水密度逐渐增大。

主要实验仪器包括日照时数传感器,TBS-2A;风速仪,EC-9S;光照度传感器,TBQ-6;紫外表,TBQ-ZW-2;环境温湿度传感器,PTS-3;温度传感器,PTWD-3A;水面蒸发传感器,ZFL1;多通道数据采集器,TRM-ZS2;以上设备均采购自锦州阳光气象科技有限公司。

于2021年11月5日—2023年5月1日监测了察尔汗盐湖盐田的空气温度、露点温度、相对湿度、风速、总辐射日累计等气象要素;并在2#钠调池、2#光调池以及2#光卤石池设立了自动气象远程数据采集系统,用于监测淡水、卤水蒸发量以及水温和水位的变化。数据采集间隔为1 h,但观测期为2021.09.01—2021.10.19, 2022.02.26—2023.04.05, 2022.07.07—2022.09.18时段的监测数据缺失,而2022.11.01—2023.05.01期间的盐田蒸发量则为一月一测。此外,察尔汗盐湖补给河流格尔木河及其支流奈金河的逐日流量数据来源于青海省水利厅水资源测报中心。

1.2 分析方法

采用Spearman相关分析方法进行相关性分析。将空气温度、露点温度、相对湿度、风速、总辐射日累计、水温和蒸发量数据进行归一化处理,并建立了蒸发量与气象-水文要素的多元线性回归模型。采用逐步回归分析法进行变量引入,根据方差分析结果选择符合判据条件且对因变量影响最大的自变量进入回归模型。根据向前选择法则进入自变量,然后根

据向后剔除法,将模型中F检验概率最小的且符合剔除判据条件的自变量剔除,重复进行直到模型中的自变量均符合进入的判据条件,模型外的自变量都不符合进入模型的判据为止。逐步回归分析法会从相关性很强的自变量中选择最显著的因子放入回归模型,避免多重共线性问题。本文采用F检验的概率作为判断标准,使用系统默认,进入模型概率为小于0.05,移出概率为大于0.1。

2 结果与讨论

2.1 察尔汗盐湖盐田气象-水文因子变化特征

分析结果显示,2021年年均温度为7.09℃,2022年为8.19℃,温度呈现上升趋势。其中,年平均温度增加了1.1℃,夏季增加了约0.8℃,冬季增加了约1.2℃,主要气象因子随时间变化特征见图1。相对湿度的变化与温度成反比关系,温度升高时,虽然蒸发加强使实际水汽压增大一些,但因饱和水汽压增大得更多,结果相对湿度反而减小;温度降低时则相反,相对湿度增大^[10]。因此,相对湿度的年度化与气温的年变化相反,温暖季节小,寒冷季节大。总辐射日累计体现了一天內水平地表所接收到的太阳直接辐射和天空辐射程度,一般与时间相关,太阳落山后不再变化^[11]。其与温度呈正比关系,随着气温的变化,逐渐增加或降低。察尔汗盐田的风速集中在2~7 m/s之间,处于轻风、微风以及和风的狀態。通过察尔汗盐田实时监测气象数据综合分析,我们发现相比于2021年,2022年的温度呈现上升趋势,空气始终保持未饱和状态,温度与露点温度的变化相一致,与相对湿度呈反比,与总辐射日累计呈正比关系,说明影响察尔汗盐湖盐田的主要气象因素应该是环境温度。

各盐田卤水温度在-10~30℃间变化,以2#光调池的温度最高,光卤石池的温度最低。盐田水温与空气温度显著正相关($R^2=0.989$),但其变化幅度小于空气温度。由于风速增加会导致水温增大^[12],研究发现水温和风速呈显著正相关关系($R^2=0.802$)。盐田水位以光卤石池的水位最高,其次是光调池,钠调池最低,各盐田水位基本上在一定的范围内波动,变幅不大(图2)。

各盐田淡水蒸发量基本保持一致,但卤水蒸发在不同盐田具有不同的变化。光调池、钠调池、光卤石池卤水密度逐渐增大,而卤石池蒸发水量要低于

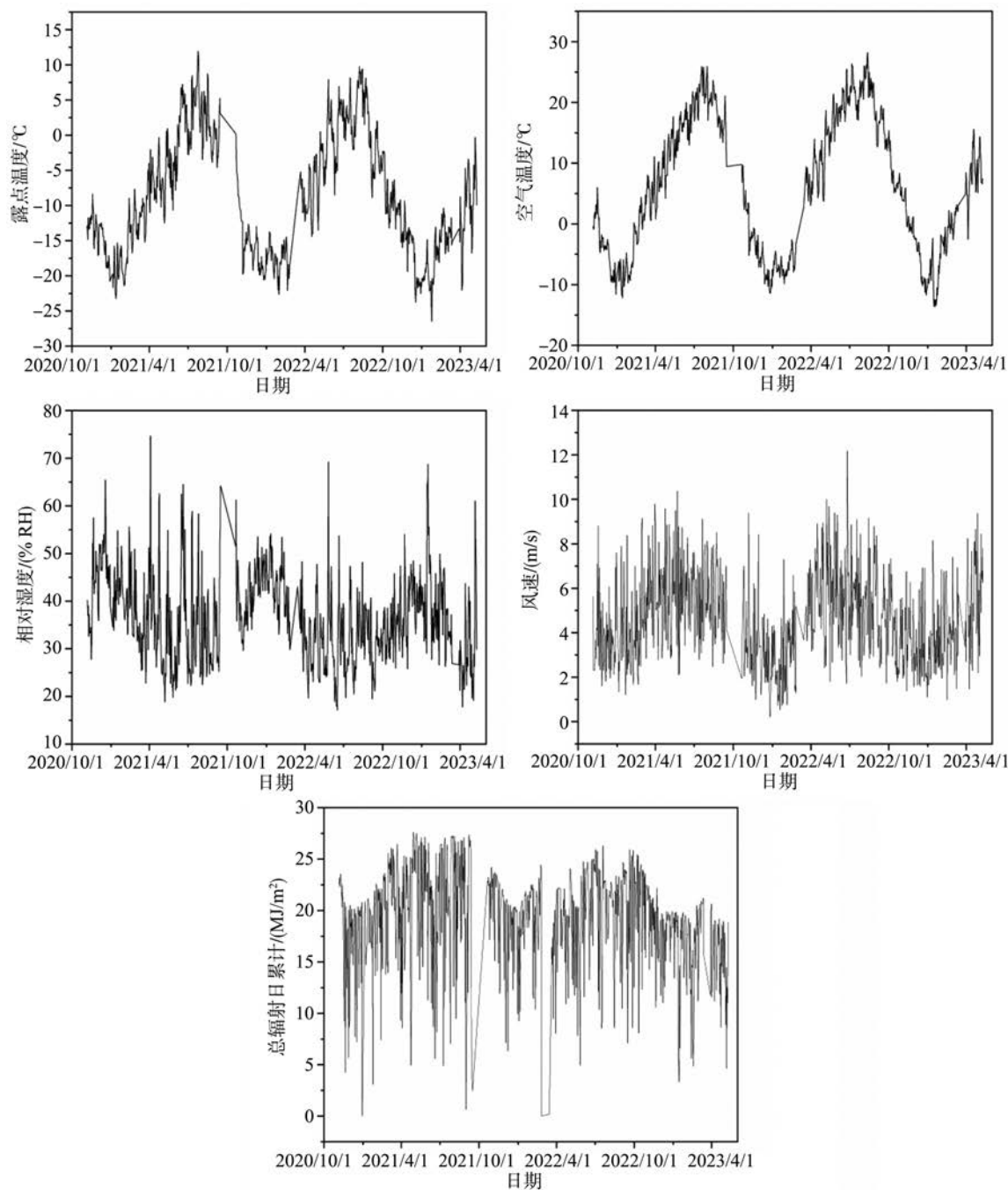


图1 察尔汗盐田观测期间气象因子的变化

Fig. 1 The variance of meteorological element during observation period in salt ponds of the Qarhan Salt Lake

钠盐池、钠调池。各盐田年淡水蒸发量相差不大,约为 4 400 mm/a,2#钠调池年卤水蒸发量为 1 740.89 mm/a,光调池为 1 831.35 mm/a,光卤石池为 1 095.68 mm/a,淡水蒸发量明显高于卤水蒸发量,这也与其他研究的结果相一致^[4]。假如气象条件恒定,则蒸发主要取决于卤水浓度。如美国大盐湖的淡水蒸发量为 1 500 mm/a,而卤水蒸发量仅有 600 mm/a^[12],智利的阿塔卡马盐湖淡水蒸发量为 3 780 mm/a,卤水蒸发

量约 1 075 mm/a^[8]。本研究得到的淡水、卤水蒸发量高于其他地区的蒸发量,可能是因为察尔汗盐湖位于极度干旱的柴达木盆地,日照丰富,且近年温度明显上升^[13],导致蒸发量增大。

2.2 不同时间尺度下蒸发量与气象因子的关系

不同时间尺度下盐田蒸发量受到不同气象-水文因子的影响。以 2#钠调池、光调池和光卤石池为

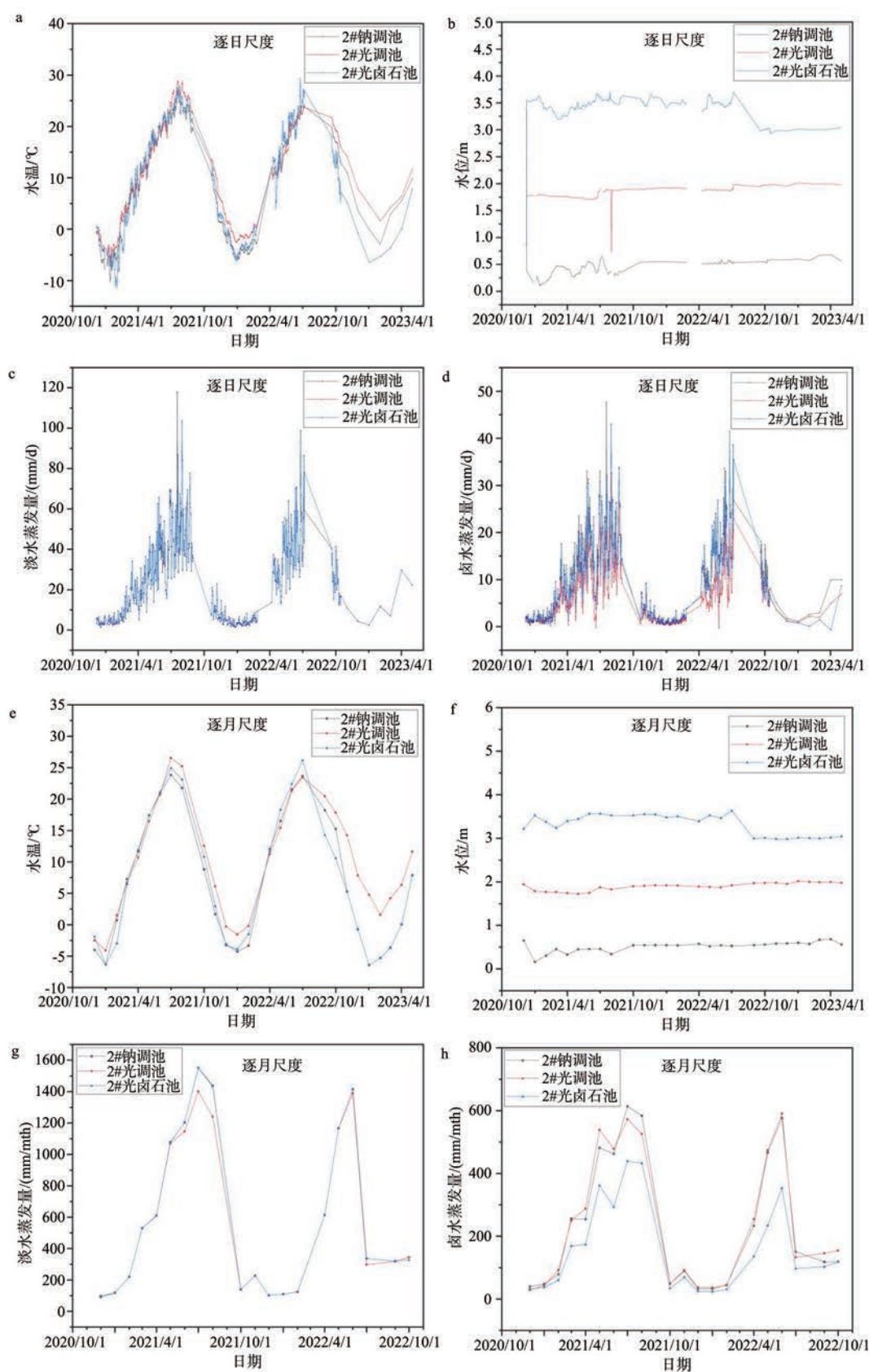


图2 观测期间察尔汗盐湖各盐田中水温(a/e)、水位(b/f)、淡水蒸发量(c/g)、卤水蒸发量(d/h)的逐日和逐月变化
 Fig. 2 Daily and monthly variations of water temperature(a/e), water depth(b/f), freshwater evaporation(c/g) and brine evaporation(d/h) in Qarhan Salt Lake fields during observation period

例分析了逐小时、日、月尺度下淡水、卤水蒸发量与气象-水文因子间的相关性,并做逐步回归分析,利用气象因子拟合蒸发量并与观测值比较,得到不同时间尺度下对盐田蒸发影响最强烈的气象-水文因素(表1,2,3)。

研究结果显示,逐小时尺度下淡水蒸发量与空

表1 逐小时尺度下气象-水文因子与盐田淡水/卤水蒸发量的相关性

Table 1 The correlation between meteorological and hydrological factors and brine/freshwater evaporation in salt ponds on hourly scale

相关性 r	空气温度	露点温度	相对湿度	风速	水温
淡水蒸发量	0.708	0.633	-0.473	0.564	0.720
2#钠调池卤水蒸发量	0.711	0.551	-0.560	0.500	0.724
2#光调池卤水蒸发量	0.708	0.460	-0.582	0.455	0.661
2#光卤石池卤水蒸发量	0.756	0.546	-0.551	0.508	0.712

表2 逐日尺度下气象-水文因子与盐田淡水/卤水蒸发量的相关性

Table 2 The correlation between meteorological and hydrological factors and brine/freshwater evaporation in salt ponds on daily scale

相关性 r	空气温度	露点温度	相对湿度	风速	总辐射日累计	水温
淡水蒸发量	0.881	0.802	-0.543	0.638	0.987	0.862
2#钠调池卤水蒸发量	0.862	0.734	-0.631	0.602	0.984	0.841
2#光调池卤水蒸发量	0.802	0.650	-0.659	0.547	0.921	0.793
2#光卤石池卤水蒸发量	0.853	0.735	-0.612	0.606	0.967	0.839

表3 逐月尺度下气象-水文因子与盐田淡水/卤水蒸发量的相关性

Table 3 The correlation between meteorological and hydrological factors and brine/freshwater evaporation in salt ponds on monthly scale

相关性 r	空气温度	露点温度	相对湿度	风速	总辐射日累计	水温
淡水蒸发量	0.808	0.817	-0.598	0.764	0.521	0.797
2#钠调池卤水蒸发量	0.808	0.811	-0.616	0.781	0.540	0.773
2#光调池卤水蒸发量	0.805	0.801	-0.636	0.792	0.541	0.739
2#光卤石池卤水蒸发量	0.794	0.794	-0.618	0.730	0.536	0.786

卤水蒸发量与空气温度、露点温度、水温和风速呈显著正相关关系,与相对湿度呈显著负相关关系。逐小时尺度下空气温度、露点温度和水温与钠调池卤水蒸发量相关性最强,其次是光卤石池,与光调池相关程度最低;相对湿度和风速与光卤石池相关程度最高,其次是钠调池,与光调池相关程度最低。不同功能的盐田对不同气象因子的相关程度可能与其卤水密度以及水位相关,有研究发现太阳辐射对低密度卤水的蒸发影响更为显著^[7],因此低密度的钠调池蒸发水量与气温的相关程度高于光调池和光卤石池,而钠调池是三个盐田中水位最小的,因此其蒸发量更容易受到太阳辐射、环境温度等气象因素的影响^[15,16]。逐日、月卤水蒸发的相关性与逐小时相似,在各个盐田的变化规律也相同。逐小时和月尺度下影响盐田卤水蒸发量的主要因素是空气温度,逐日

气温度、露点温度、水温和风速呈显著正相关关系,与相对湿度呈显著负相关关系,影响盐田淡水蒸发量的主要因素是水温。逐日与逐小时尺度的相关性类似,但是相关程度明显大幅度提升,主要影响因素是太阳辐射。奈金河和格尔木河流量与蒸发量相关性小于0.1,因此未作分析。逐月与日尺度的相关性类似,除露点温度与风速外,其他因素的相关程度有所降低,其中总辐射日累计在逐月尺度的相关性远远低于日尺度,逐月尺度下淡水蒸发量的主要影响因素是露点温度。露点温度升高1℃可以解释为大气含水量增加7%^[14]。因此在长时间尺度下露点温度增加,导致空气中水汽含量增加,使得淡水蒸发量增加^[9]。不同季节的气象-水文因素对淡水蒸发量具有不同的影响,在春季和秋季的主要因素是风速,夏季和冬季主要是太阳辐射。

尺度下是太阳辐射。除此之外,不同季节下气象-水文因子对卤水蒸发量的影响不同,春季和秋季的主要因素是空气温度和风速,夏季和冬季是太阳辐射。

采用逐步回归分析法对逐小时、日、月蒸发量与气象-水文数据建立多元线性回归模型,得到的结果表示为,逐小时尺度下:淡水蒸发量, $Y = 0.337 X_T - 0.159 X_{RH} + 0.326 X_v - 0.070$; 2#钠调池, $Y = 0.446 X_T - 0.397 X_{RH} + 0.448 X_v + 0.022$; 2#光调池, $Y = 0.191 X_T - 0.263 X_{RH} + 0.225 X_v + 0.183$

2#光卤石池, $Y = 0.201 X_T - 0.184 X_{RH} + 0.211 X_v + 0.239$ 。逐日尺度下:淡水蒸发量, $Y = 0.440 X_T - 0.147 X_{RH} + 0.349 X_v + 0.041 X_Q - 0.109$; 2#钠调池, $Y = 0.348 X_T - 0.279 X_{RH} + 0.342 X_v + 0.053 X_Q - 0.028$; 2#光调池, $Y = 0.279 X_T - 0.352 X_{RH} + 0.294 X_v + 0.099 X_Q$;

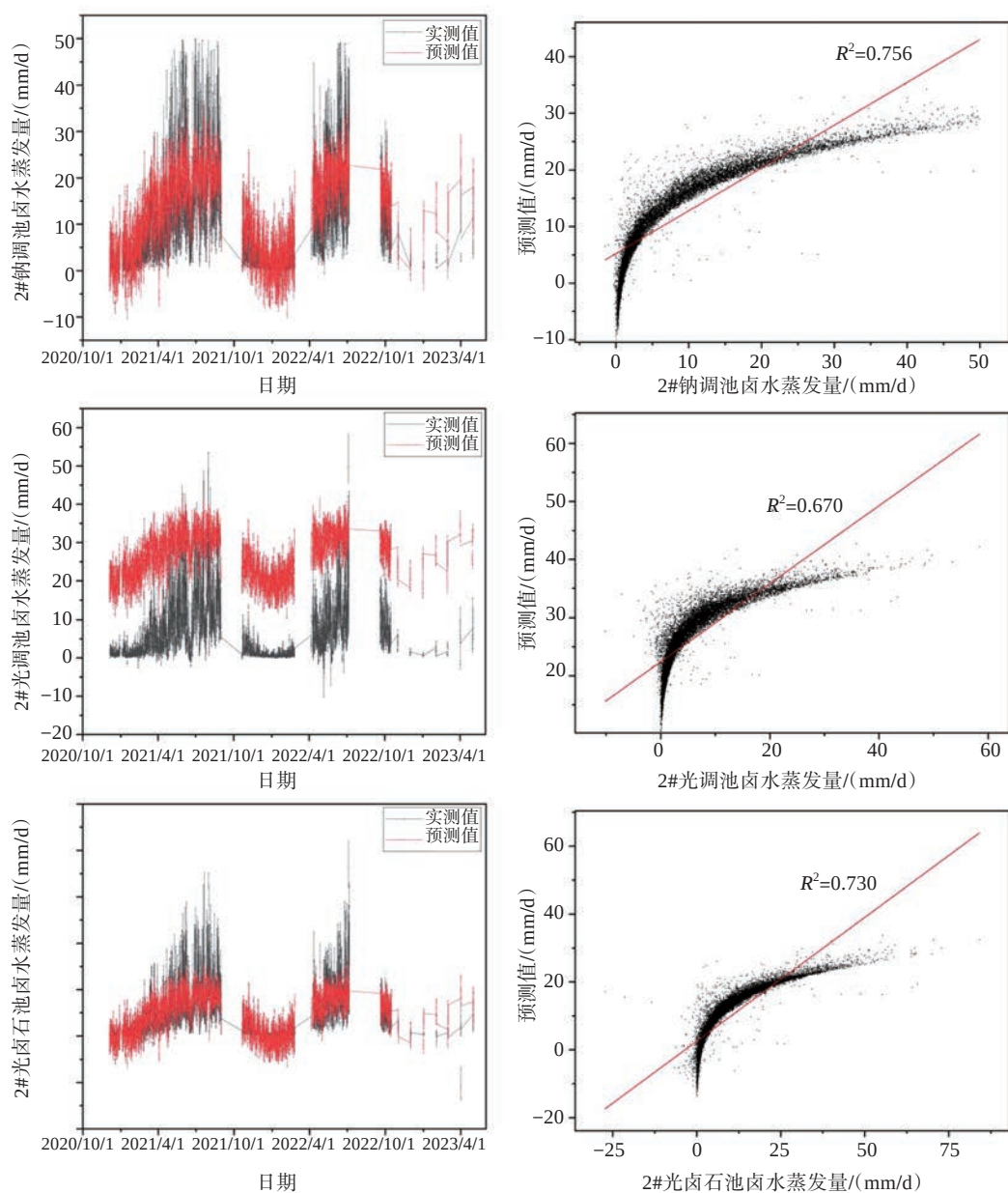


图3 逐小时尺度下盐田蒸发量预测值与实测值对比

Fig. 3 The comparison of predicted value and measured value of evaporation in salt fields on hourly scale

2# 光卤石池, $Y = 0.369 X_T - 0.267 X_{RH} + 0.350 X_v + 0.077 X_Q - 0.045$ 。逐月尺度下: 淡水蒸发量, $Y = 0.969 X_T + 0.672 X_Q - 0.764$; 2# 钠调池, $Y = 0.835 X_T + 0.713 X_Q - 0.685$; 2# 光调池, $Y = 0.890 X_T + 0.678 X_Q - 0.620$; 2# 光卤石池, $Y = 0.921 X_T + 0.711 X_Q - 0.733$; 式中, X_T 为空气温度, X_{RH} 为相对湿度, X_v 为风速, X_Q 为总辐射日累计。为避免多重共线性问题, 根据相关性分析结果, 选择了相关性最显著的因子放入回归模型。空气温度、露点温度、水温之间具有很高的相关性, 因此只有空气温度被保留。在逐小时、日尺度下, 淡水蒸发量与温度、相对湿度、风速和太阳辐射

关系显著, 逐月尺度下, 与温度和太阳辐射关系显著。多元回归模型的相关系数分别为 $R_{时}^2=0.763$ 、 $R_{日}^2=0.851$ 、 $R_{月}^2=0.929$, Nash 效率系数 $NSE_{时}=0.763$ 、 $NSE_{日}=0.857$ 、 $NSE_{月}=0.944$, 说明回归模型总体效果较好。而逐月尺度的拟合程度远远好于逐小时、日尺度, 但与逐月淡水蒸发量相关的只有空气温度和太阳辐射, 可能是因为温度和辐射对于蒸发量的影响存在累积效应^[17], 因此时间尺度越长, 它们所产生的影响也越大。

该模型说明淡水蒸发量的变化主要取决于环境中温度的变化, 其中还掺杂着相对湿度和风速的影

响。逐小时、日尺度下多元回归拟合的淡水蒸发量与实测值相比,除了在个别时段预测值较大外,其余

时间段均为实测值相对较高(图3,图4),逐月尺度下的拟合结果最好但预测值较小(图5)。说明淡水

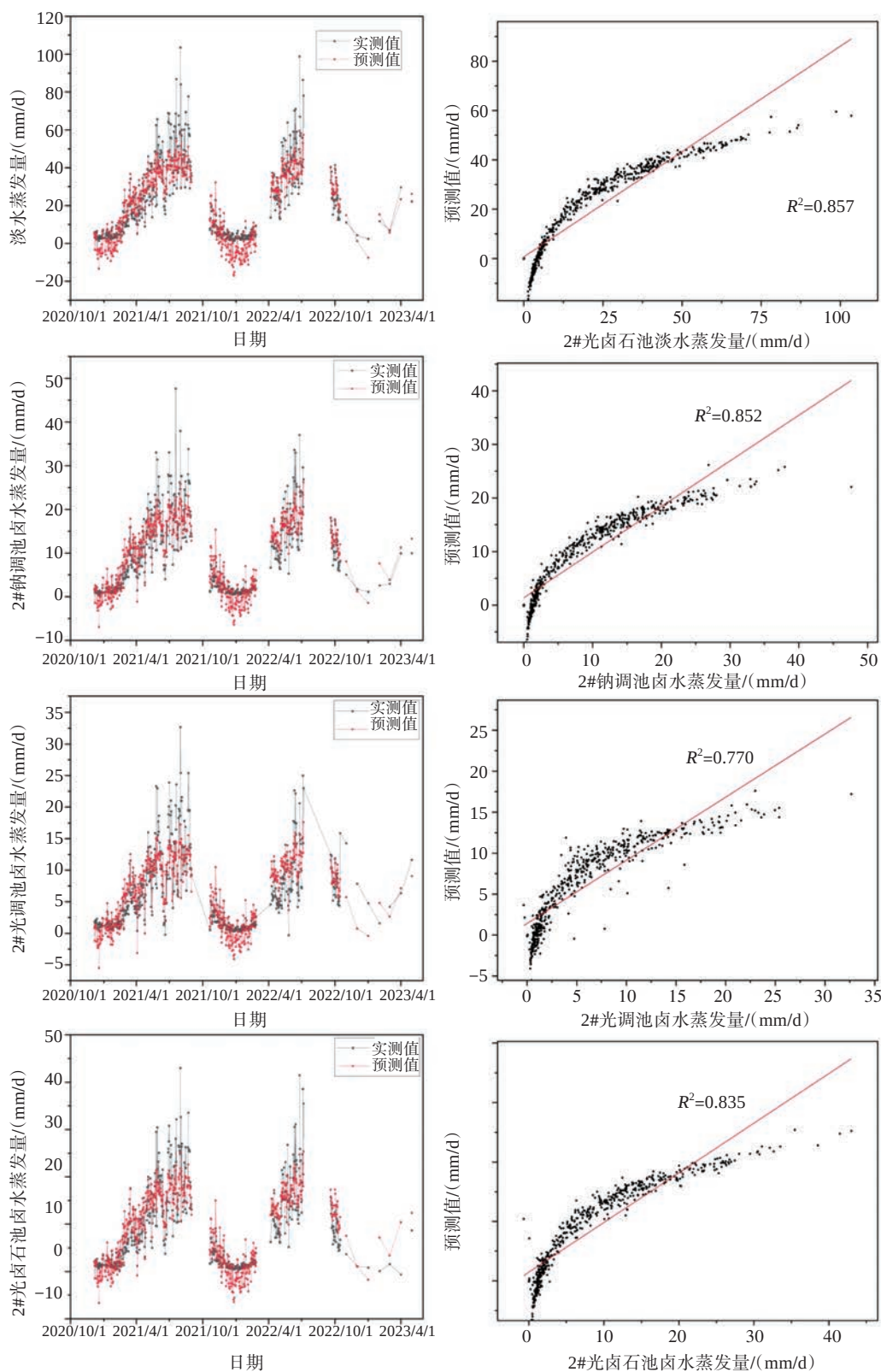


图4 逐日尺度下盐田蒸发量实测值与预测值对比

Fig. 4 The comparison of predicted value and measured value of evaporation in salt fields on daily scale

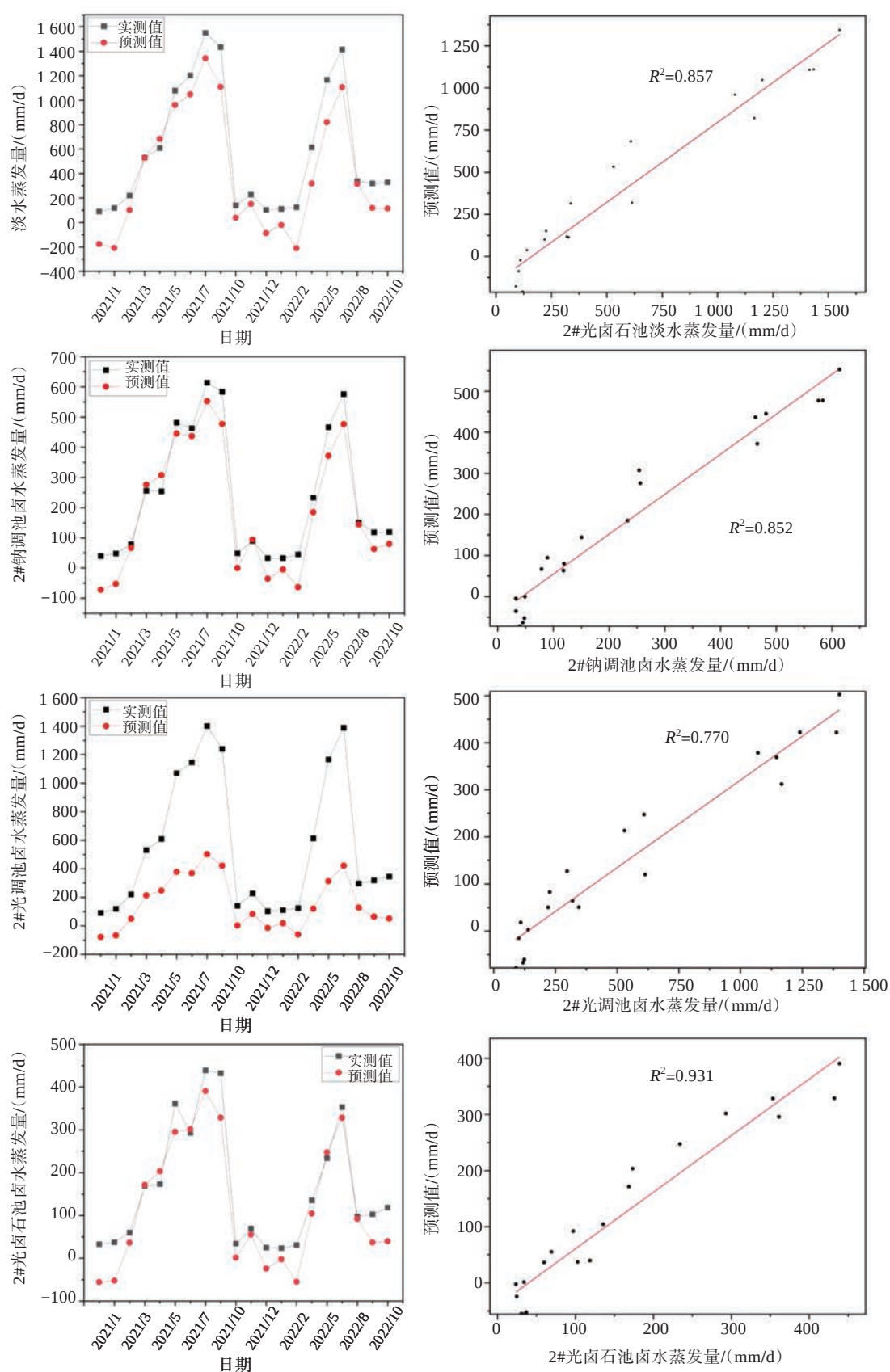


图5 逐月尺度下卤水蒸发量预测值与实测值对比

Fig. 5 The comparison of predicted value and measured value of evaporation in salt fields on monthly scale

蒸发量除了气象因素外,可能还受到很多其他环境因素诸如水汽压、饱和差等的影响^[18-20]。该结果也与江西鄱阳湖^[19]、新疆尉犁^[21]、西藏^[22]等地区得到的淡水湖泊温度是制约蒸发主要驱动因素的结果一致。

卤水蒸发量多元回归模型中与气象-水文因子的关系与淡水基本相似。逐小时尺度下,多元回归模型的相关系数分别为 $R_{\text{钠调池}}^2 = 0.755$, $R_{\text{光调池}}^2 = 0.670$, $R_{\text{光卤石池}}^2 = 0.730$, Nash 效率系数分别为 $NSE_{\text{钠调池}} = 0.756$, $NSE_{\text{光调池}} = 0.670$, $NSE_{\text{光卤石池}} = 0.730$, 逐日尺度下分别为 $R_{\text{钠调池}}^2 = 0.845$, $R_{\text{光调池}}^2 = 0.761$, $R_{\text{光卤石池}}^2 = 0.828$, Nash 效率系数分别为 $NSE_{\text{钠调池}} = 0.852$, $NSE_{\text{光调池}} = 0.770$, $NSE_{\text{光卤石池}} = 0.835$, 逐月尺度下分别为 $R_{\text{钠调池}}^2 = 0.944$, $R_{\text{光调池}}^2 = 0.916$, $R_{\text{光卤石池}}^2 = 0.943$, Nash 效率系数分别为 $NSE_{\text{钠调池}} = 0.953$, $NSE_{\text{光调池}} = 0.937$, $NSE_{\text{光卤石池}} = 0.931$, 说明回归模型总体效果较好,但略差于淡水蒸发量模型,拟合效果随时间尺度的增大而不断提升。

逐小时、日尺度下,2#钠调池卤水蒸发量与环境因子的拟合程度最好,其次是光卤石池和光调池,其多元回归拟合值与实测值的对比与淡水蒸发量的结果相同,但逐日尺度下整体拟合效果较好。逐月尺度下钠调池、光卤石池的对比结果与逐小时、日尺度下相似,但光调池拟合结果完全相反,实测值远远高于预测值,甚至高 300~800 mm。此外,在合适的蒸发量区间内(如光调池卤水蒸发量逐小时尺度下在 5~25 mm/d,逐日在 2~20 mm/d),回归模型预测值与实测值拟合较好,而该模型在极大、极小蒸发量下拟合效果不佳(图 3,图 4),说明该多元回归拟合得到的结果需要增加更多的环境变量进一步分析。

根据相关性分析和多元回归模型,我们发现在逐小时、日、月、季度尺度下,影响淡水蒸发量的主要因素分别是温度、太阳辐射和风速,影响卤水蒸发量的是空气温度、风速和太阳辐射。与本研究结果相似,不同时间尺度下,在巴丹吉林沙漠湖泊影响淡水蒸发量的主要因素是太阳辐射、温度^[23],在鄱阳湖是太阳辐射、温度、风速^[19]。卤水相关的研究较少,阿塔卡玛盐湖卤水蒸发量在不同时间尺度下,主要与风速、太阳辐射和温度有关^[8],在西藏扎布耶盐湖以及察尔汗盐湖等地进行的卤水蒸发实验也说明太阳辐射、风速和空气温度是制约卤水蒸发量的主要因素^[3,6-7],与本研究结果一致。

2.3 极端气候对盐田微气象的影响

强降雨以及洪水等极端气象和水文事件在干旱

区十分常见,会对盐湖区产生严重影响。1989 年格尔木河发生特大洪水,使得达布逊湖水域面积突增,其东岸和北岸察尔汗老盐滩大片被淹,同时导致大量盐田设施被淹没破坏^[24]。1986 年,美国大盐湖湖区贝尔河突发洪水,使得盐湖的水位达到历史记录的较高水位,并且冲毁了全部盐田^[25],造成了极大的经济损失。盐湖盐田极端气候在不同的时间尺度呈现不同的影响,逐小时尺度下由于时间跨度短无法很好地体现气象-水文因子的变化,逐月尺度的因子变化受到其他时间气象水文因素的影响较大,难以辨识极端气候的影响,因此,在逐日尺度下讨论极端气候对盐田气象-水文因素的影响最为合适。

以 2021 年 7 月 19 日—8 月 19 日为例,研究了逐日尺度下极端条件下水文因素对盐田气象、蒸发量的影响。在 2021 年 7 月 22—25 日,格尔木地区发生极端暴雨天气,这导致上游奈金河和下游格尔木河的流量突增(图 6)。分析结果显示,在河流流量突增的情况下,处于同一区域或流域的察尔汗盐田露点

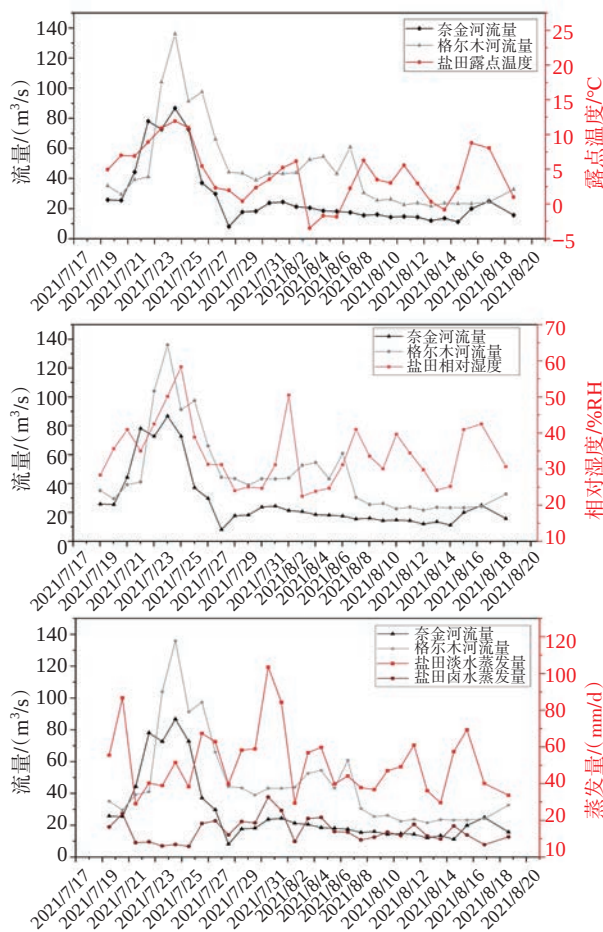


图6 逐日尺度下极端天气与盐田微气象关系

Fig. 6 The relationship of extreme weather conditions and micro-meteorological factors in salt fields on daily scale

温度和相对湿度出现了同步的变化,即亦呈现为高值,说明极端天气导致河流水文要素的改变对盐田微气象产生了极大的影响。这可能是因为露点温度和相对湿度反映了水汽含量^[9],与降水间的关联非常稳健^[26],因此极端降水对露点温度的影响非常大^[27],该变化会导致相对湿度的相应变化^[28]。然而相对湿度的增加,则会导致蒸发量明显减少,呈现为低值。7月24日,奈金河和格尔木河的流量达到了最大值,在两天后的7月26日,盐田淡水、卤水蒸发量达到了最小值,这与河流流量与蒸发量呈负相关的结果一致^[29],很可能表明盐田区气象要素对区域极端水文事件的响应有一定的滞后性。以上的分析结果说明在逐日尺度下水文要素对盐田气象因子的整体趋势没有直接影响,但是在极端天气的影响下,水文因子会影响盐田微气象。

针对研究区一次极端气象时间区域水文-气象变化对盐湖区的影响进行分析,获得了一些初步认识。实际上,区域气候及河流水文对尾间湖泊(盐湖)具有重要影响,不仅仅是盐田生产,还包括盐湖区的生态环境,因此,很有必要从地球系统的角度对此开展深入研究。

3 结 论

1) 察尔汗盐湖盐田各气象因子彼此相关,不同盐田的水温、水位、淡水蒸发量变化保持一致,卤水蒸发量变化与盐田密度有关。

2) 从逐小时、日、月尺度,淡水、卤水蒸发量受到不同的气象-水文因素的影响且相关性逐渐增强,在逐小时与逐月尺度主要受到环境温度的影响,日尺度下主要受到太阳辐射的影响。

3) 在极端天气的影响下,河流水文因子会影响盐田微气象,对盐田蒸发量的影响具有滞后性。

参考文献:

- [1] Wang X, Miller J D, Cheng F, *et al.* Potash flotation practice for carnallite resources in the Qinghai Province, PRC [J]. Minerals Engineering, 2014, 66-68: 33-39.
- [2] 曹正祥. 关于盐田生产工艺的探讨与分析[J]. 科技信息, 2010, 323(3): 25-27.
- [3] 齐文, 郑绵平. 西藏盐湖卤水蒸发速率的实验与计算[J]. 地质学报, 2007, (12): 1727-1733.
- [4] 祁贵明, 王发科, 贺海成, 等. 气象条件对察尔汗盐田卤水蒸发的影响分析[J]. 青海科技, 2008, (5): 30-32.
- [5] 董生发, 张志宏, 朱建荣, 等. 盐湖老卤蒸发气候条件研究与蒸发模型建立[J]. 化工矿物与加工, 2012, 41(10): 15-17.
- [6] 成春春, 李春丽, 王永梅, 等. 太阳能辐射对盐田生产中卤水蒸发过程的影响[J]. 化工矿物与加工, 2017, 46(5): 57-61.
- [7] 李志伟, 付振海, 张志宏, 等. 察尔汗盐湖卤水蒸发速度影响因素的量化研究[J]. 盐湖研究, 2022, 30(1): 57-67.
- [8] Lobos-roco F, Hartogensis O, Suárez F, *et al.* Multi-scale temporal analysis of evaporation on a saline lake in the Atacama Desert [J]. Hydrology and earth system science, 2022, 26(13): 3709-3729.
- [9] 张志富, 希爽. 关于露点温度计算的探讨[J]. 干旱区研究, 2011, 28(2): 275-281.
- [10] 吴雪亚, 吴明, 皮小雯. 江口国家气象观测站迁站对比观测数据差异分析[J]. 贵州科学, 2021, 39(6): 68-72.
- [11] 温秀秀, 张峰, 师庆东, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地逐日太阳总辐射模拟计算——以达里雅博依绿洲为例[J]. 沙漠与绿洲气象, 2018, 12(6): 16-21.
- [12] 肖薇薇, 安彬. 1960-2017年黄土高原地区风速时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 103-109.
- [13] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2020)[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [14] Bui A, Johnson F, Wasko C. The relationship of atmospheric air temperature and dew point temperature to extreme rainfall [J]. Environmental Research Letters, 2019, 14(7): 074025.
- [15] 王石军. 盐田成矿机理与盐田生产管理探讨[J]. 海湖盐与化工, 1998, (5): 3-7.
- [16] Li X Y, Ma Y J, Huang Y M, *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(18): 10470-10485.
- [17] 王石军. 察尔汗盐湖盐田生产现状及改进措施[J]. 盐湖研究, 2001, 9(2): 42-47.
- [18] 包玉存, 王海平, 蒋中华, 等. 科学管理盐田意义的探讨[J]. 盐科学与化工, 2019, 48(5): 23-25.
- [19] 欧阳千林, 黄孝明. 鄯阳湖蒸发量对气象因子响应研究[J]. 江西水利科技, 2019, 45(5): 363-367.
- [20] 李军, 赵乐. 用气象因子推算自然水面蒸发量的探讨[J]. 内蒙古水利, 2021, 228(8): 70-72.
- [21] 徐仁. 水面蒸发量与各气象因素关系的通径分析[J]. 地下水, 2010, 32(4): 133-149.
- [22] 李景玉, 张志果, 徐宗学, 等. 影响西藏地区蒸发皿蒸发量的主要气象因素分析[J]. 亚热带资源与环境学报, 2009, 4(4): 20-29.
- [23] 韩鹏飞, 王旭升, 胡晓农, 等. 巴丹吉林沙漠湖泊水面蒸发与气象要素的动态关系[J]. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1012-1020.
- [24] 唐渊. 从1989年的洪水灾害谈察尔汗盐湖资源的开发与环境保护[J]. 盐湖研究, 1990, (4): 52-58.
- [25] Atwood G. Geomorphology applied to flooding problems of closed-basin lakes... specifically Great Salt Lake, Utah [J]. Geomorphology, 1994, 10(1): 197-219.
- [26] Denson E, Wasko C, Peel M C. Decreases in relative humidity across Australia [J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(7): 074023.
- [27] Wasko C, Nathan R. The local dependency of precipitation on historical changes in temperature [J]. Climatic Change, 2019, 156(1): 105-120.

- [28] Mortuza M R, Selmi S, Khudri M M, *et al.* Evaluation of temporal and spatial trends in relative humidity and dew point temperature in Bangladesh [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014, 7(12):5037-5050.
- [29] 李军, 赵乐. 用气象因子推算自然水面蒸发量的探讨[J]. *内蒙古水利*, 2021, 228(8):70-72.

The Variations of Meteorological and Hydrological Factors across Different Temporal Scales and Their Influences on Evaporation within Salt Ponds of the Qarhan Salt Lake

ZHANG Xiyi^{1,2*}, ZHU Haixia^{1,2,3}, ZHU Lei⁴, CHEN Wenxiang⁴, CHEN Liang^{1,2},
LI Wenxia^{1,2,3}, ZENG Fangming^{1,2}, ZHU Dengxian⁵, DUAN Xinyi^{1,2,3}

(1. CAS Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China; 2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lake, Xining, 810008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China; 4. Qinghai Salt Lake Industry Co., Ltd., Golmud, Potassium Fertilizer Branch, Golmud, 816009, China; 5. Qinghai Salt Lake Industry Co., Ltd., Golmud, Resources Branch, Golmud, 816000, China)

Abstract: At present, studies on evaporation in the Qarhan Salt Lake mainly focus on the influence of meteorological factors on brine evaporation. Whereas, the relationship between brine evaporation and meteorological factors in different time scales is less constrained. In this study, we observed meteorological factors such as temperature, dew point temperature, wind speed, relative humidity, daily solar radiation in the Qarhan Salt Lake, as well as fresh water and brine evaporation rates, water temperature and water depth of salt ponds with different brine densities from November 5, 2020 to May 1, 2023. We also monitored hydrological factors such as flow rate of the replenishing river, Golmud River, in the Qarhan Salt Lake. Correlation analysis, multiple regression modeling techniques are applied to simulate evaporation at hourly, daily, and monthly intervals. The findings indicate a consistent pattern in the variations of water temperature, water level, and freshwater evaporation rates across different salt ponds. The fluctuations in brine evaporation show direct correlation with the densities of the salt ponds. Additionally, the correlation between evaporation and meteorological factors is enhanced with the increase of time scale. The evaporation of the Qarhan salt ponds is mainly affected by ambient temperature on hourly and monthly scale, and by solar radiation on daily scale. Under extreme weather condition, it exhibits synchronous variations between the hydrological factors of river and micro-meteorological factors of the salt ponds, while, a subsequent lag effect on evaporation. The results can provide theoretical guidance for the production of salt pans.

Key words: Qarhan Salt Lake; Salt ponds; Evaporation; Meteorological factors; Hydrological parameters; Different temporal scale