

格尔木河流域水面蒸发特征及影响因素分析

黄金廷, 李宗泽, 王文科, 宋 歌, 王嘉玮

Characteristics of evaporation and its effect factors in the Golmud River catchment

HUANG Jinting, LI Zongze, WANG Wenke, SONG Ge, and WANG Jiawei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202012023>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于野外观测与能量守恒原理分析饱和裸土与水面蒸发量的差异

Evaporation between saturated bare soil and water an analysis based on field observations and energy balance consideration

李婉歆, 尹红美, 王文科, 卢艳莹, 王艺柯 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 38-44

格尔木河流域山前平原区蒸散量的分布特征

Distribution characteristics of evapotranspiration in the valley piedmont plain of the Golmud River Basin

朱晓倩, 金晓媚, 张绪财, 张京 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 55-64

基于MODIS蒸散量数据的淮河流域蒸散发时空变化及影响因素分析

Spatio-temporal change and influencing factors of evapotranspiration in the Huaihe River Basin based on MODIS evapotranspiration data

郭晓彤, 孟丹, 蒋博武, 朱琳, 龚建师 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 45-52

鄂尔多斯高原湖泊蒸发原位试验研究

Research on in-situ test of lake evaporation in the Ordos Plateau

许文豪, 王晓勇, 张俊, 尹立河, 贾伍慧, 朱立峰, 董佳秋, 孙芳强 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 16-23

湘西峒河流域水化学特征及无机碳通量计算

Hydrochemical characteristics and estimation of the dissolved inorganic carbon flux in the Donghe River Basin of western Hunan

霍俊伊, 于, 张清华, 李亮 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 64-72

地形因素对白龙江流域甘肃段泥石流灾害的影响及权重分析

Impacts of topographical factors on debris flows and weight analysis at the Gansu segment of the Bailongjiang River Basin

刘德玉, 贾贵义, 李松, 丛凯, 张伟 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 33-33



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202012023

格尔木河流域水面蒸发特征及影响因素分析

黄金廷¹, 李宗泽¹, 王文科^{2,3}, 宋歌¹, 王嘉玮¹

(1. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学水利与环境学院, 陕西 西安 710054; 3. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 水面蒸发是水均衡的重要一项, 阐明其变化特征对水资源评价具有重要的指导意义。格尔木河流域是我国西北旱区典型的内陆河流域, 面临水资源开发利用与灾害减灾双重挑战。前人对流域内水面蒸发相关研究未考虑主控因素及空间异质性, 气候变化背景下水面蒸发特征也有待进一步研究。基于格尔木河流域气象观测资料, 采用时间序列分析、相关分析和多元回归分析方法, 研究了流域上游山区、中游戈壁砾石带及终端尾间湖的水面蒸发特征及其主要影响因素。结果表明: (1) 流域内水面蒸发呈波动下降趋势, 但蒸发量空间差异明显, 上游山区近 60 年蒸发量减少了 183.2 mm, 中游近 60 年减少了 1 135.1 mm, 下游尾间湖近 30 年减少了 241.7 mm; (2) 流域内水面蒸发主控因素不同, 上游山区主控因素为气温, 中游主控因素为风速, 终端尾间湖主控因素为水域面积; (3) 流域内气候变化总体呈暖湿化, 与全球气候变化一致, 但水面蒸发未随气温升高和降水增加而增加, 呈现出“蒸发悖论”特征。研究表明, 水面蒸发的空间差异性及其主控因素对旱区流域蒸发和水资源评价具有重要影响。

关键词: 水面蒸发; 气候变化; 格尔木河流域; 气象要素; 空间异质性

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)03-0031-07

Characteristics of evaporation and its effect factors in the Golmud River catchment

HUANG Jinting¹, LI Zongze¹, WANG Wenke^{2,3}, SONG Ge¹, WANG Jiawei¹

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region, Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Evaporation is the key item of water balance calculation. Clarifying its characteristics will be helpful in water resources assessment. The Golmud river catchment is a typical arid inland river catchment in northwest of China, facing the challenges of reasonable groundwater exploitation and retarded groundwater disaster. Previous studies on surface water evaporation in the catchment did not consider the spatial heterogeneity and main control factors, which limits deep understanding of the evaporation process under the background of climate change. In this paper, based on time series, correlation and multiple regression analysis, the variation characteristics and main affecting factors of water evaporation in the upstream, midstream and downstream of the catchment are analyzed. The results show that (1) the water surface evaporation in the basin shows a fluctuating downward trend, but the spatial difference is obvious: 183.2 mm decreased in the upstream mountainous area in recent 60 years, 1 135.1 mm

收稿日期: 2020-12-12; 修订日期: 2021-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672250; U1603243); 陕西省自然科学基金项目(2019JLZ-03; 2021ZDLSF05-09); 教育部重点实验室开放基金项目(310829171111)

第一作者: 黄金廷(1979-), 男, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事旱区地下水与生态效应研究。E-mail: hjinting@xust.edu.cn

通讯作者: 王文科(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事旱区地下水资源与生态效应研究。E-mail: wenkew@chd.edu.cn

decreased in the middle reaches in recent 60 years, and 241.7 mm decreased in the downstream terminal lake in recent 30 years. (2) The main controlling factors of water surface evaporation are different in the catchment: the main controlling factor is temperature in the upstream mountainous area, wind speed in the middle reaches, and water area in the terminal lake. (3) The climate change in the catchment is generally warm and humid, which is consistent with the global climate change. However, water evaporation does not increase with climate change, i.e., showing the “evaporation paradox” phenomena. The results indicate that great attention should be paid to the spatial differences and the main control factors, which have important influence on the evaporation research and water resource evaluation in arid areas.

Keywords: water evaporation; climate change; Golmud River catchment; meteorological factors; spatial heterogeneity

水面蒸发是水循环的重要环节,为重要的水均衡项。查明水面蒸发变化特征及其影响因素,在气候变化风险应对、水资源合理规划及水资源评价等多方面具有重要的理论和现实意义。近几十年来,国内外对蒸发变化开展了大量研究,发现部分区域水面蒸发量并未随全球气候变暖而增加,呈现出“蒸发悖论”现象。如Liu等^[1]基于全国气象站的蒸发皿观测数据分析,表明我国年均蒸发量显著下降。柳春等^[2]和王忠富等^[3]研究发现,不同流域蒸发量变化趋势不一致,即使是同一流域的不同位置也存在显著差异。

格尔木河流域地处柴达木盆地,面积约4 565 km²,是我国典型的西北内陆河流域,对全球气候变化十分敏感。同时,该流域也是柴达木循环经济试验区重要组成部分,流域内水环境、水问题受到学术界的高度关注^[4-5]。在蒸发研究方面,马日新等^[6]利用格尔木气象站1955—2014年气象数据,分析了降水、蒸发和温度变化趋势;朱晓倩等^[7]研究了格尔木河流域山前平原区蒸散量的分布特征。朱晓倩等^[7]、杨笑天^[8]、邓红章^[9]、王晓雪^[10]基于卫星影像资料估算了研究区山前平原区蒸散量,并分析其空间变化特征。这些研究为区域水均衡计算奠定了良好的基础。但是,前人的研究未考虑格尔木河流域上、中、下游水面蒸发的变化特征,限制了研究者对水面蒸发空间异质性的理解。基于此,本文利用格尔木河流域气象观测资料,分析流域内水面蒸发的变化特征及其影响因素,以期水均衡计算提供借鉴。

1 数据与方法

1.1 数据来源

根据格尔木河流域气象站空间位置及资料获取情况,选取五道梁气象站、格尔木气象站和察尔汗气象站分析流域上游(山区)、中游(戈壁砾石带)和下游

(终端尾间湖)水面蒸发和气象要素变化规律。五道梁气象站和格尔木气象站数据来自中国气象数据网(<https://data.cma.cn/>)。五道梁和格尔木气象数据起始时间为1956年,至今有60多年逐日小型蒸发皿实测水面蒸发等气象资料。为分析方便,将五道梁和格尔木站的逐日蒸发、降水、气温等数据处理为年均值。察尔汗气象站未实测水面蒸发量,水面蒸发量采用遥感影像估算后,结合咸水蒸发折算系数计算得到^[10-12]。

1.2 分析方法

(1) 时间序列分析

将蒸发、降水及温度形成时间序列,采用线性拟合的方法分析各要素变化趋势,拟合参数采用最小二乘法估计。

(2) 相关分析

相关分析是研究两个或两个以上有关联的随机变量间相关关系的统计分析方法。相关分析用于查明蒸发与其他气象要素之间的相关关系。

(3) 多元回归分析

多元回归分析是将一个变量视为因变量,其他变量视为自变量,建立多个变量之间线性或非线性数学关系式,并利用样本数据进行分析的统计分析方法。本文采用多元回归分析蒸发与其他气象因子的关系,以确定各变量对蒸发的贡献。

2 流域上游水面蒸发特征及影响因素

2.1 蒸发量、降水量及气温变化

流域上游五道梁气象站累计蒸发量、累计降水量及平均气温变化见图1。近60年来,山区水面蒸发量总体呈下降趋势,累计减少183.2 mm,其中1981—1989年间降幅最大,由1 276.7 mm降至1 061.9 mm;累计降水量和平均气温总体呈波动上升趋势,累计降

水量和平均气温分别增加 119.4 mm 和 1.94 ℃。由表 1 可以看出, 蒸发量每 10 年变化量依次为-4.98, -14.13, 1.24, 3.71, -15.4 mm。降水量每 10 年变化量依次为-0.62, -1.68, 5.1, 1.66, 5.85 mm。平均气温每 10 年变化量依次为 0.03, -0.02, 0.06, 0.05, 0.06 ℃。根据相邻 10 年的气象要素变化量, 可知格尔木河流域山区的蒸发量、降水量和气温在最近 10 年的变化最大, 意味着近年来气候变化剧烈, 暖湿化加剧。

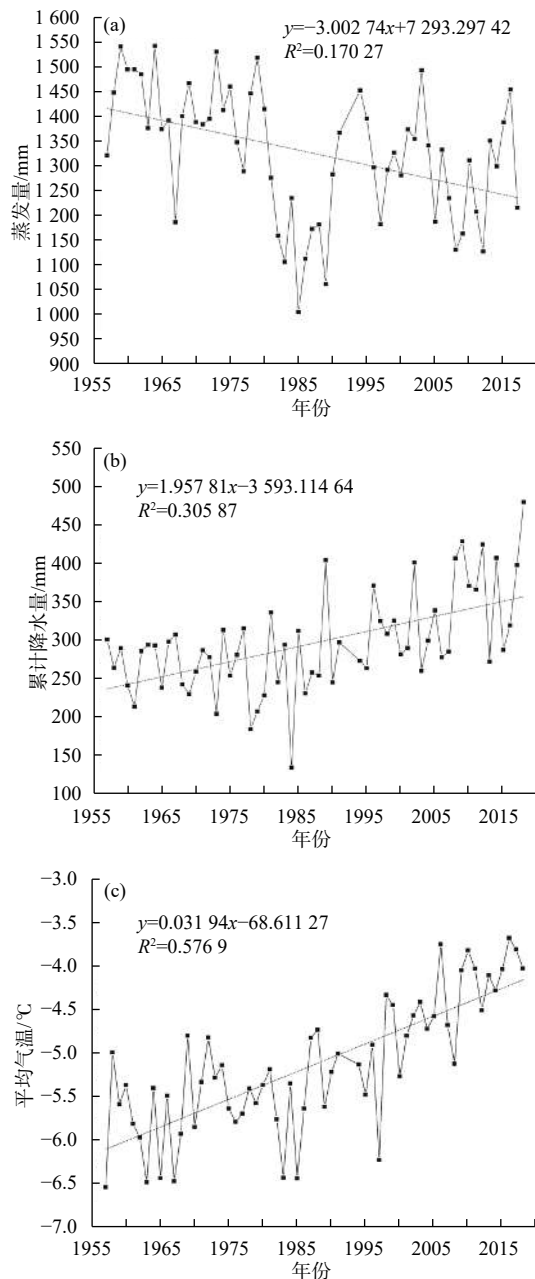


图 1 五道梁气象站累计蒸发量、累计降水量和平均气温时间序列
Fig. 1 Time series of cumulative evaporation, cumulative precipitation and average temperature in the Wudaoliang meteorological station

表 1 五道梁气象站蒸发、降水及气温每 10 年平均值
Table 1 Changes of the mean values of every 10 years of evaporation, precipitation and temperature in the Wudaoliang meteorological station

时间段	平均蒸发量/mm	平均降水量/mm	平均气温/℃
1957—1966	1 448.1	273.3	-5.8
1967—1976	1 398.3	267.1	-5.5
1977—1986	1 257.0	250.3	-5.7
1987—1998	1 269.4	301.3	-5.1
1999—2008	1 306.5	317.9	-4.6
2009—2018	1 152.5	376.4	-4.0

2.2 水面蒸发影响因素

五道梁气象站水面蒸发与其他气象因子的相关分析结果见表 2。在各影响因素中, 与累计蒸发量呈正相关的气象因子为累计降水、平均气压、平均相对湿度、平均气温以及平均太阳辐射, 相关系数分别为 0.50, 0.38, 0.34, 0.83, 0.87, 其中太阳辐射相关系数最大, 气温次之, 相对湿度最小。呈负相关的气象因子为风速, 相关系数为-0.37。

表 2 五道梁气象站蒸发量与气象因子相关系数
Table 2 Correlation coefficient of evaporation and climatic factors in the Wudaoliang meteorological station

	累计蒸发	累计降水	平均气压	平均相对湿度	平均气温	平均风速	平均太阳辐射
累计蒸发	1						
累计降水	0.50	1					
平均气压	0.38	0.39	1				
平均相对湿度	0.34	0.75	0.38	1			
平均气温	0.83	0.78	0.52	0.69	1		
平均风速	-0.37	-0.47	-0.45	-0.56	-0.60	1	
平均太阳辐射	0.87	0.66	0.39	0.56	0.88	-0.42	1

2.3 水面蒸发与其他气象因子的多元回归分析

以蒸发量为因变量的多元回归分析结果见表 3, 多元回归方程见式(1)。气温、风速和太阳辐射对水面蒸发为正贡献, 其中气温贡献最大, 系数为 0.61。降水量、相对湿度和气压对水面蒸发为负贡献, 其中相对湿度贡献最大, 系数为-0.36。

$$E = b_0 + b_1R_{ain} + b_2P_{re} + b_3RH + b_4T + b_5U + b_6R_{solar} \quad (1)$$

式中: E ——累计蒸发量;
 R_{ain} ——累计降水量;
 P_{re} ——平均气压;
 RH ——平均相对湿度;
 T ——平均气温;
 U ——平均风速;

表 3 五道梁气象站蒸发量与气象因子回归分析

Table 3 Regression analyses of evaporation and climatic factors in the Wudaoliang meteorological station

	相关系数	标准误差	t 统计量	P 值	下限 95.0%	上限 95.0%
截距	0.16	0.08	2.00	0.05	0.00	0.31
累计降水量	-0.17	0.03	-5.40	0.00	-0.23	-0.11
平均气压	-0.02	0.08	-0.24	0.81	-0.18	0.14
平均相对湿度	-0.36	0.02	-14.56	0.00	-0.41	-0.31
平均气温	0.61	0.04	17.44	0.00	0.54	0.68
平均风速	0.05	0.02	1.84	0.07	0.00	0.09
太阳辐射	0.30	0.02	15.31	0.00	0.26	0.34

R_{solar} ——平均太阳辐射。

3 流域中游水面蒸发特征及影响因素

3.1 蒸发量、降水量及气温变化

格尔木气象站累计蒸发量、累计降水量及平均气温变化见图 2。从 1955 年来,格尔木气象站蒸发量呈波动下降趋势,累计减少了 1 135.12 mm;降水量呈波动上升趋势,累计增加了 18.44 mm;平均气温呈波动上升趋势,累计增加了 3.56 ℃。

每相邻 10 年的平均蒸发量、平均降水量和平均气温变化见表 4。蒸发量每 10 年变化量依次为-33.9, -4.6, -12.0, -32.5, -17.8 mm;降水量每 10 年变化量依次为 1.2, -0.2, 0.1, -0.1, 1.2 mm;气温每 10 年变化量依次为 0.10, 0.10, 0.04, 0.10, 0.02 ℃。蒸发变化量表明,近 10 年来蒸发量较少且变化剧烈。降水和温度变化量表明,近 10 年,格尔木暖湿化更加明显。

3.2 水面蒸发影响因素

水面蒸发量与其他气象因子的相关分析系数见表 5。在各影响因素中,与累计蒸发量呈正相关的气象因子为平均气压、平均相对湿度、平均风速以及平均太阳辐射,相关系数分别为 0.08, 0.01, 0.75, 0.48。呈负相关的气象因子为累计降水量和平均气温,相关系数分别为-0.41, -0.81。其中平均风速的相关系数最大,平均相对湿度相关系数最小。

近 60 年风速的变化见图 3。60 年来,格尔木平均风速呈明显下降趋势,风速减小降低了空气流动性,导致水面蒸发量减少。平均风速变化线性拟合方程为:

$$y = -0.025\,92x + 54.1 \quad (2)$$

式中: y ——平均风速;

x ——年份。

3.3 水面蒸发与其他气象因子的多元回归分析

以蒸发量为因变量的多元回归分析见表 6,回归方程为:

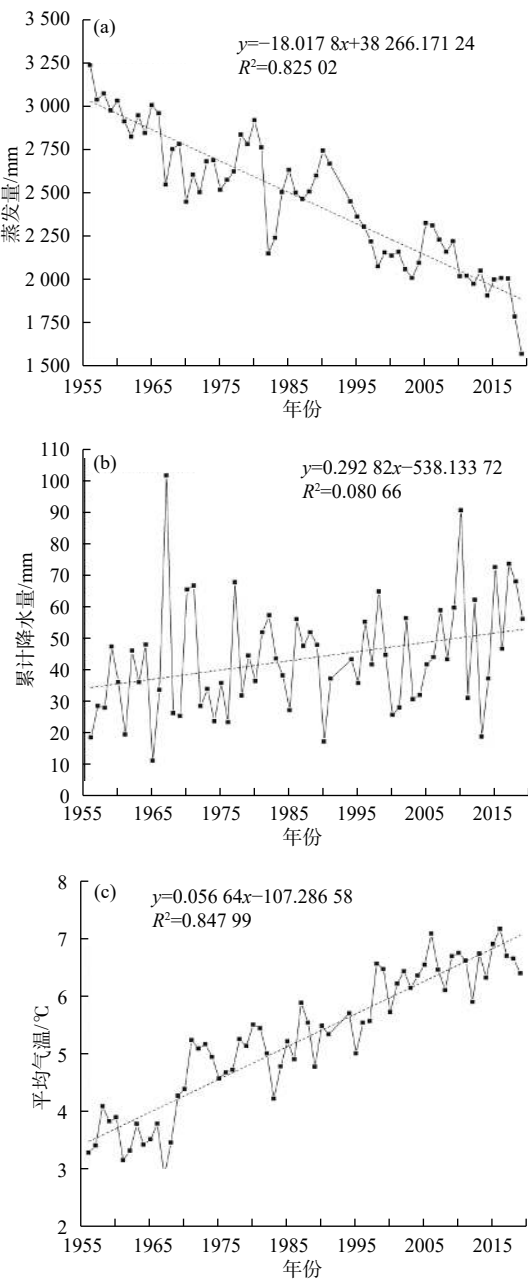


图 2 格尔木气象站累计蒸发量、累计降水量和平均气温时间序列图

Fig. 2 Time series of evaporation, precipitation and average temperature in the Golmud meteorological station

表 4 格尔木气象站蒸发、降水及气温每 10 年平均值

Table 4 Changes of the mean values of every 10 years of evaporation, precipitation and temperature in the Golmud meteorological station

时间段	平均蒸发量/mm	平均降水量/mm	平均气温/℃
1956—1965	2 985.4	32.2	3.6
1966—1975	2 646.3	44.3	4.4
1976—1985	2 600.5	42.4	5.0
1986—1997	2 481.0	43.6	5.4
1998—2007	2 156.5	42.9	6.4
2008—2019	1 978.6	55.2	6.6

表 5 格尔木气象站蒸发量与气象因子相关系数

	累计蒸发	累计降水	平均气压	平均相对湿度	平均气温	平均风速	平均太阳辐射
累计蒸发	1						
累计降水	-0.41	1					
平均气压	0.08	0.04	1				
平均相对湿度	0.01	0.43	-0.06	1			
平均气温	-0.81	0.25	0.12	-0.36	1		
平均风速	0.75	-0.21	-0.06	0.15	-0.69	1	
平均太阳辐射	0.48	-0.42	0.24	-0.34	-0.33	0.25	1

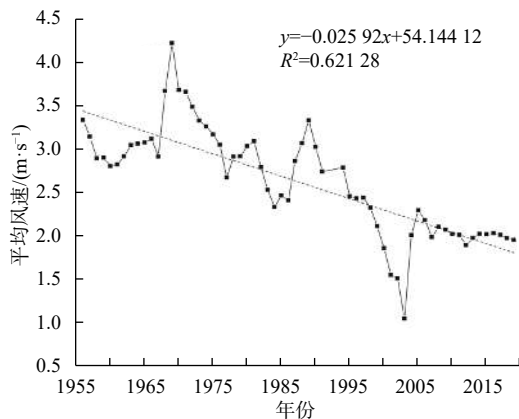


图 3 格尔木平均风速年变化趋势

Fig. 3 Changes of yearly average wind speed in the Golmud meteorological station

表 6 格尔木气象站蒸发量与气象因子回归分析

Table 6 Regression analyses of evaporation and climatic factors in the Golmud meteorological station

	相关系数	标准误差	t统计量	P值	下限 95.0%	上限 95.0%
截距	0.60	0.14	4.44	0.00	0.33	0.88
累计降水	-0.09	0.08	-1.13	0.26	-0.26	0.07
平均气压	0.20	0.08	2.60	0.01	0.04	0.35
平均相对湿度	-0.20	0.08	-2.54	0.01	-0.36	-0.04
平均气温	-0.54	0.08	-6.40	0.00	-0.70	-0.37
平均风速	0.37	0.09	4.00	0.00	0.18	0.56
平均太阳辐射	0.06	0.11	0.55	0.58	-0.16	0.28

$$E = b_0 + b_1 Rain + b_2 Pre + b_3 RH + b_4 T + b_5 U + b_6 R_{solar} \quad (3)$$

由各气象要素的回归系数可知,平均风速对蒸发的贡献最大,回归系数为 0.37,平均太阳辐射对蒸发量贡献最小,回归系数为 0.06。

4 流域下游水面蒸发特征

达布逊湖区累计蒸发量、累计降水量及平均气温变化见图 4,其中 1992—2012 年的降水和气温数据缺失。按现有数据分析,达布逊湖区蒸发量总体呈下降趋势,近 30 年累计减少了 241.7 mm。但在 2012 年,湖

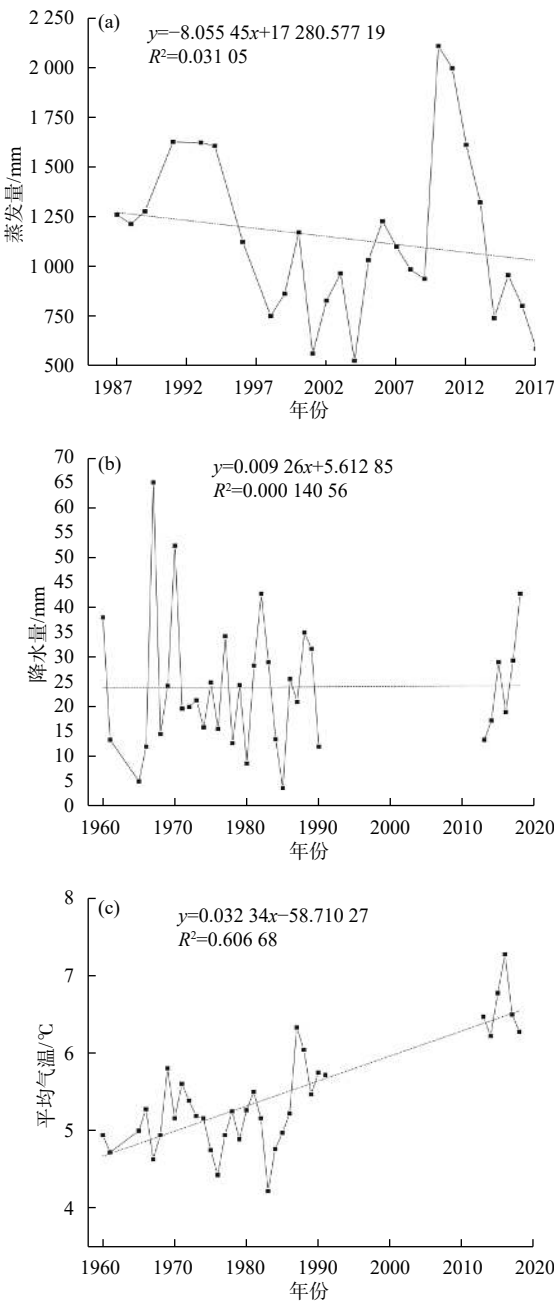


图 4 达布逊湖水面积蒸发、累计降水和平均气温时间序列图

Fig. 4 Time series of cumulative evaporation, cumulative precipitation and average air temperature in the Dabuxun Lake

区水面蒸发量急剧增加,这是因为降水量增加导致湖泊面积急剧增加^[4]。达布逊湖区降水量略有上升,但变化趋势不明显。从观测数据看,1967 年出现较大降水量,2018 年降水量同样较大。平均气温呈波动上升趋势,近 60 年来增加了 1.87 ℃。

每相邻 10 年的平均蒸发量、平均降水量和平均气温变化值见表 7。1990—2018 年平均蒸发量每 10 年变化量依次为-53.02, 35.12 mm。1960—1989 年平均降水量每 10 年变化量依次为-0.05, -0.02 mm。1960—1999 年平均气温每 10 年变化量依次为 0.003, 0.020, 0.040 ℃。降水和温度变化量表明,达布逊湖区降水变化量基本接近,但最近 10 年平均气温要高于以往平均气温,结合湖区的水面蒸发量,该区有暖湿化的发展趋势。

表 7 达布逊湖区蒸发、降水及气温每 10 年平均值

Table 7 Changes of mean values of every 10 years of evaporation, precipitation and temperature in the Dabuxun Lake

时间段	平均蒸发量/mm	平均降水量/mm	平均气温/℃
1960—1969	/	24.6	5.0
1970—1979	/	24.1	5.1
1980—1989	/	23.9	5.3
1990—1999	1 437.5	/	5.7
2000—2009	907.3	/	/
2009—2018	1 258.5	25.1	6.6

5 讨论

对格尔木河流域上游山区的五道梁气象站近 60 年、中游戈壁砾石带的格尔木气象站近 60 年和下游终端尾间湖近 30 年的水面蒸发数据分析发现,在流域内上、中、下游水面蒸发皆呈减少趋势。但是,水面蒸发减少量空间差异明显,减少量最多的是中游戈壁砾石带,其次是终端尾间湖,最后是山区。在每个区域水面蒸发的主控因素不同:山区主控因素为气温,戈壁砾石带主控因素为风速,终端尾间湖主控因素为湖水面积,显示出旱区内陆河流域蒸发影响因素的复杂性。

有气象数据记录以来,全球呈现暖湿化趋势。2019 年,全球平均气温较工业化前高出约 1.1 ℃,20 世纪 80 年代以来,每 10 年都比前一个 10 年更暖^[13]。对比格尔木河流域气温和降水的分析结果,流域气候变化总体呈暖湿化,尤其是近 10 年更为显著,这与全球气候变化趋势一致,但值得警惕的是,流域内气温升幅远超过全球气候变化增温幅度。

尽管流域内气温和降水都呈增加趋势,但是水面蒸发呈现减弱趋势,与温度增加可能会导致蒸发量增加的预期不符,呈现出“蒸发悖论”现象^[14]。Roderick 等^[15]认为全球许多地区观测到的蒸发减弱趋势主要是由于云量和气溶胶的增多,但本文分析表明,流域内不同区域水面蒸发主控因素不同,与 Roderick 等^[15]认识不一致,提供了水面蒸发影响因素研究的新线索。

值得提出的是,在格尔木河流域的终端尾间湖没有直接观测水面蒸发的数据,湖水蒸发是按遥感信息结合水域面积变化、咸水蒸发折算系数推求的结果,这在一定程度上限制了对格尔木河流域下游蒸发规律的认识。今后应在该区域开展尽可能的详尽观测,提高水面蒸发控制因素的认知水平。

6 结论

(1)流域内水面蒸发变化空间差异性显著。格尔木河流域上游山区近 60 年累计减少 183.2 mm,中游近 60 年累计减少 1 135.1 mm,下游近 30 年累计减少 241.7 mm。

(2)流域内不同区域水面蒸发主控因素不同。上游山区主控因素为气温,中游戈壁砾石带主控因素为风速,终端尾间湖主控因素为水域面积。

(3)流域内水面蒸发呈现出“蒸发悖论”现象。研究区气候呈暖湿化,与全球气候变化一致,但水面蒸发未随气温升高而增加。

参考文献 (References) :

- [1] LIU X M, LUO Y Z, ZHANG D, et al. Recent changes in pan-evaporation dynamics in China[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(13): L13404.
- [2] 柳春,王守荣,梁有叶,等. 1961—2010 年黄河流域蒸发皿蒸发量变化及影响因子分析[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(5): 327 - 334. [LIU Chun, WANG Shourong, LIANG Youye, et al. Analysis of pan evaporation change and the influence factors in the Yellow River Basin in 1961-2010[J]. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis, 2013, 9(5): 327 - 334. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 王忠富,杨礼箫,白晓,等. “蒸发悖论”在黑河流域的探讨[J]. 冰川冻土, 2015, 37(5): 1323 - 1332. [WANG Zhongfu, YANG Lixiao, BAI Xiao, et al. Evaporation paradox in the Heihe River basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(5): 1323 - 1332. (in Chinese with English abstract)]

- [4] 黄金廷,崔旭东,王冬,等. 格尔木河流域地下水生态功能及经济损失阈值解析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(2): 263 – 270. [HUANG Jinting, CUI Xudong, WANG Dong, et al. Groundwater ecological function and economic profit and loss threshold in Golmud River Catchment[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(2): 263 – 270. (in Chinese with English abstract)]
- [5] XIAO Y, SHAO J L, FRAPE S K, et al. Groundwater origin, flow regime and geochemical evolution in arid endorheic watersheds: a case study from the Qaidam Basin, northwestern China[J]. [Hydrology and Earth System Sciences](#), 2018, 22(8): 4381 – 4400.
- [6] 马日新,黄金廷,田华,等. 格尔木河流域近60 a降水、蒸发及温度变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2017, 40(5): 1005 – 1012. [MA Rixin, HUANG Jinting, TIAN Hua, et al. Characteristics of precipitation, evaporation and temperature at the Golmud River Catchment in recent 60 years[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(5): 1005 – 1012. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 朱晓倩,金晓媚,张绪财,等. 格尔木河流域山前平原区蒸散量的分布特征[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 55 – 64. [ZHU Xiaolian, JIN Xiaomei, ZHANG Xucui, et al. Distribution characteristics of evapotranspiration in the valley piedmont plain of the Golmud River Basin[J]. [Hydrogeology & Engineering Geology](#), 2019, 46(5): 55 – 64. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 杨笑天. 基于SEBS模型的格尔木河流域地表蒸散量遥感反演及其时空格局分析[D]. 西安: 长安大学, 2017. [YANG Xiaotian. Evapotranspiration estimating using remote sensing and spatial-temporal distribution of evapotranspiration in Golmud River basin based on SEBS model[D]. Xi'an: Changan University, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 邓红章. 基于MODIS的格尔木地区蒸散量研究[D]. 西安: 长安大学, 2010. [DENG Hongzhang. Study on evapotranspiration in Golmud region based on modis[D]. Xi'an: Changan University, 2010. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 王晓雪. 青海达布逊湖面积变化及湖泊蒸发量的计算[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019. [WANG Xiaoxue. Area change and the evaporation estimation of Dabson Lake in Qinghai province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 李健,王辉,黄勇,等. 柴达木盆地格尔木河流域生态需水量初步估算探讨[J]. [水文地质工程地质](#), 2008, 35(1): 71 – 75. [LI Jian, WANG Hui, HUANG Yong, et al. Preliminary estimation on ecological consumption of water of Gelmud River in Chaidamu Basin[J]. [Hydrogeology & Engineering Geology](#), 2008, 35(1): 71 – 75. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 张娟,宋昌斌,屈小荣,等. 察尔汗盐湖矿区气象因素变化规律分析[J]. [化工矿物与加工](#), 2020, 49(5): 48 – 50. [ZHANG Juan, SONG Changbin, QU Xiaorong, et al. Analysis on change rule of meteorological factors in Qarhan Salt Lake area[J]. [Industrial Minerals & Processing](#), 2020, 49(5): 48 – 50. (in Chinese with English abstract)]
- [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. [Climate Change Center of China Meteorological Administration. Blue book on climate change in China (2020)[R]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)]
- [14] BRUTSAERT W, PARLANGE M B. Hydrological cycle explain the evaporation paradox[J]. [Nature](#), 1998, 396: 30 – 31.
- [15] RODERICK M L, ROTSTAYN L D, FARQUHAR G D, et al. On the attribution of changing pan evaporation[J]. [Geophysical Research Letters](#), 2007, 34(17): L17403.

编辑: 张若琳