

## 1960—2020 年千岛湖流域蒸散发演变特征及驱动因素解析<sup>\*</sup>

董 颖<sup>1,2</sup>, 杜军凯<sup>1,2\*\*</sup>, 俞发康<sup>3</sup>, 仇亚琴<sup>1,2</sup>, 吕向林<sup>1,2</sup>

(1: 中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

(2: 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

(3:淳安县千岛湖生态综合保护局, 杭州 311716)

**摘要:** 为探究淡水湖库及其所属流域蒸散发演变特征, 以及气象因子对蒸散发的影响规律。以长三角地区最大的淡水人工湖和重要的水源地——千岛湖为研究对象, 采用 Penman-Monteith 等方法与 WEP-L 分布式水文模型, 分别计算千岛湖流域 1960—2020 年潜在蒸散发( $ET_0$ )与实际蒸散发( $ET_a$ ), 分析二者年际变化趋势及突变年份; 采用偏微分方法分析气象因子对  $ET_0$  的敏感性和贡献度; 采用归因分析法分析突变前后气象因子对  $ET_a$  变化的贡献度, 并利用蒸发表面水分指数( $E_{MI}$ )解析流域蒸发互补关系。结果表明:  $ET_0$  与  $ET_a$  多年平均值分别为 1021.7 和 857.5 mm, 整体皆呈减少趋势, 倾向率分别为 -0.77 和 -1.03 mm/a, 二者均在 1980 和 2000 年左右发生突变;  $ET_0$  对相对湿度变化最为敏感,  $ET_0$  增加的月份主要是由于相对湿度、平均气温的正贡献, 风速呈负贡献但相对较小,  $ET_0$  减少的月份主要是由于日照时数和风速的负贡献, 平均气温呈正贡献但相对较小;  $ET_a$  空间分布呈现东高西低格局, 驱动因素按贡献率大小为相对湿度 > 风速 > 日照时数 > 气温; 流域整体存在“蒸发悖论”现象, 日照时数和风速的减小是引起  $ET_0$  近年来下降的主要原因;  $E_{MI}$  愈趋近于 1 时, 反映流域  $ET_0$  和  $ET_a$  取值愈加接近, 蒸散发互补理论在千岛湖流域适用。

**关键词:** 流域蒸散发; 气候变化; 互补关系; 千岛湖; 新安江水库

### Evolution characteristics and influencing factors of evapotranspiration in Lake Qiandao Basin from 1960 to 2020<sup>\*</sup>

Dong Hao<sup>1,2</sup>, Du Junkai<sup>1,2\*\*</sup>, Yu Fakang<sup>3</sup>, Qiu Yaqin<sup>1,2</sup> & Lv Xianglin<sup>1,2</sup>

(1: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, P.R.China)

(2: State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, P.R.China)

(3: Chun'an County Ecological Comprehensive Protection Bureau, Hangzhou 311716, P.R.China)

**Abstract:** The largest freshwater artificial lake and important water source in the Yangtze River Delta region, Lake Qiandao, was chosen as the research region to explore the evolution characteristics of evapotranspiration in freshwater lakes and their watersheds, as well as the influence of meteorological elements on evapotranspiration. The Penman-Monteith method and WEP-L distributed hydrological model were employed to calculate the potential evapotranspiration ( $ET_0$ ) and actual evapotranspiration ( $ET_a$ ) in the Lake Qiandao basin from 1960 to 2020. The annual variations and mutation years of both  $ET_0$  and  $ET_a$  were analyzed. The sensitivity and contribution of meteorological elements to  $ET_0$  were analyzed using the partial derivative method. The contribution of meteorological elements to the change in  $ET_a$  before and after the mutation was analyzed using the attribution analysis method. Additionally, the evaporative surface water index ( $E_{MI}$ ) was used to analyze the complementarity of basin evapotranspiration. The results showed that the multi-year average values of  $ET_0$  and  $ET_a$  were 1021.7 and 857.5 mm, respectively, both exhibiting decreasing trends with inclination rates of -0.77 and -1.03 mm/a. Both  $ET_0$  and  $ET_a$  experienced mutations around 1980 and 2000. Relative humidity had the highest sensitivity to  $ET_0$  changes, and  $ET_0$  increased mainly due to positive contributions from relative humidity and average temperature, with wind speed making a relatively small negative contribution.  $ET_0$  decreased mainly due to negative contributions from sunshine duration and wind speed, with average temperature making a relatively small positive contribution.

\* 2023-05-25 收稿; 2023-11-08 收修改稿。

国家自然科学基金项目(52279030)和国家重点研发计划项目(2021YFC3201101, 2021YFC3201105)联合资助。

\*\* 通信作者; E-mail: du\_djk@163.com。

The spatial distribution of  $ET_a$  showed an east-high and west-low pattern, with the driving factors in order of contribution rate being relative humidity, wind speed, sunshine duration, and temperature. The basin exhibited an “evaporation paradox” and the reduction in sunshine duration and wind speed were the main reasons for the recent decline in  $ET_0$ . As  $E_{MI}$  approaches 1, it indicated that  $ET_0$  and  $ET_a$  values in the basin were getting closer, and the theory of evapotranspiration complementarity was applicable in the Lake Qiandao basin.

**Keywords:** Watershed evapotranspiration; climate change; complementary relationship; Lake Qiandao; Xin'anjiang Reservoir

随着人类活动强度的持续增加和全球变暖引起的气候变化,流域水文循环特征已发生变化,水资源及环境压力很可能会进一步增加。蒸散发是流域水文循环过程的重要环节,与水量平衡过程和能量平衡过程息息相关,蒸散发量的变化对水循环过程有重要影响作用<sup>[1-2]</sup>。气象因子变化是导致蒸散发量变化的主要因素,但不同区域其主导因素存在差异。叶林媛等发现长江流域亚热带气候区风速和辐射是蒸发皿蒸发下降的主导因子<sup>[3]</sup>;赵梓琨等发现气温上升和相对湿度下降是黄河流域上游蒸发皿蒸发量上升的主要原因<sup>[4]</sup>;白鹏等采用去趋势法发现净辐射变化对丹江口水库水面蒸发变化贡献最大<sup>[5]</sup>;罗丽等根据相关性分析法认为相对湿度是影响松花江流域蒸发量变化的主要气象因素<sup>[6]</sup>。此外,变化环境下蒸散发也表现出蒸发悖论现象并发展出蒸发互补理论<sup>[7-9]</sup>。千岛湖即新安江水库,是浙江省和杭州市极为重要的水源保护地<sup>[10]</sup>,是居民用水和工业用水的重要来源,年供水量9.78亿t,惠及杭州市区及工程沿线806余万居民<sup>[11]</sup>。在未来经济社会发展压力和极端气候变化事件频发的大背景下,探究千岛湖潜在蒸散发、实际蒸散发变化特征及气象因子对二者的影响规律,对解析流域水循环过程变化和水资源管理都极为重要。

近年来,蒸散发演变规律及互补关系相关研究多从互补关系出发推求实际蒸发量<sup>[12-13]</sup>,对互补关系的适用性评价以及实际蒸发量的影响因素研究较少。本文选用 Penman-Monteith 公式计算陆面蒸散发与 Penman 公式计算水面蒸散发,二者按面积加权求得千岛湖流域潜在蒸散发  $ET_0$ ,用分布式水文模型 WEP-L 估算求得流域实际蒸散发  $ET_a$ ,研究  $ET_0$  与  $ET_a$  在 1960—2020 年年际变化趋势,定量、定性分析引起  $ET_0$  和  $ET_a$  近 61 年发生变化的主要气象驱动因子,解析  $ET_a$  在不同时段的空间分布格局,研究蒸散发互补关系在千岛湖流域的适用性。

## 1 研究区概况

千岛湖流域( $29^{\circ}11' \sim 30^{\circ}13'N, 117^{\circ}38' \sim 119^{\circ}20'E$ ,图 1),面积为  $10410\text{ km}^2$ ,多年平均降水量  $1733\text{ mm}$ ,属亚热带季风气候,温暖湿润、雨量充沛,多年平均气温  $17^{\circ}\text{C}$ ;地貌以山地丘陵为主,海拔为  $57 \sim 1764\text{ m}$ ;植被茂密,森林覆盖率达 75% 以上。千岛湖流域水系发达,水质状况优良,主要河流有新安江、武强溪等 30 余条,其中新安江是千岛湖的入湖最大河流,发源于安徽省黄山市休宁县<sup>[14-15]</sup>。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据

DEM 数据来源于美国航空航天局(NASA)和美国国家测绘局(NIMA)联合发布的数字高程(DEM)数据集,分辨率为  $90\text{ m}$ 。气象数据选用研究区内及周边 20 个气象站点 1960—2020 年降水、气温、日照时数、风速与相对湿度的逐日数据,来源于国家气象科学数据中心。植被数据包括叶面积指数(LAI)和归一化植被指数(NDVI),空间分辨率均为  $500\text{ m}$ ,LAI 数据来源于 USGS 和 NASA 联合在线发布的全球数据库(land processes distributed active archive center, LP DAAC),NDVI 数据来源于中国科学院地理空间数据云。土地利用选取 1980、1990、2000、2010、2015、2020 年共 6 期数据,来源于中国科学院资源环境科学与数据中心。1980—2016 年源口站水面蒸发数据来源于全国第三次水资源调查评价。

### 2.2 潜在蒸散发

采用标准化 FAO56 Penman-Monteith 公式(P-M 法)与 Penman 公式分别计算流域陆面蒸散发与水域蒸散发,二者通过面积加权的方式得到千岛湖流域潜在蒸散发量( $ET_0$ ),气象数据选择研究区内部 1960—2020 年具有完整日气象数据序列的 5 个气象站点。

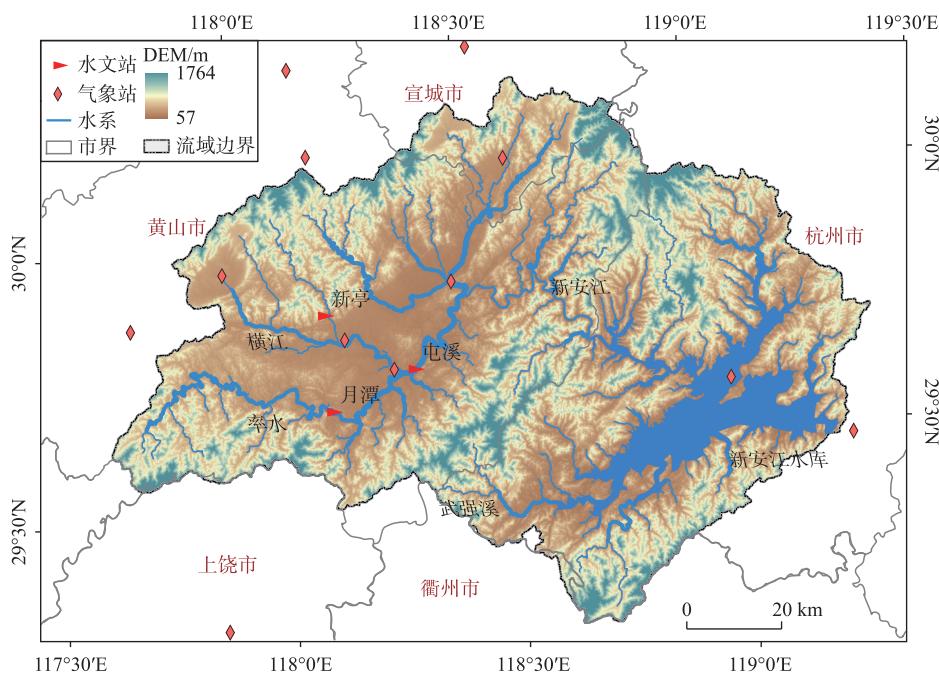


图 1 千岛湖流域地理位置与站点分布

Fig.1 Location of Lake Qiandao Basin and the distribution of monitoring stations

潜在蒸散发敏感系数( $S_i$ )为潜在蒸散发变化率与各气象因素变化率的比值<sup>[16]</sup>, $S_i>0$ 即表示 $ET_0$ 随气象因子*i*的增加而增加,反之亦然, $S_i$ 绝对值越大,表明气象因子*i*对 $ET_0$ 的影响越大,本文关于 $ET_0$ 对日照时数、日平均气温、风速和相对湿度的敏感系数进行讨论,分别表示为 $S_N$ 、 $S_T$ 、 $S_U$ 、 $S_{RH}$ 。气象因子对 $ET_0$ 的贡献 $Con_i$ 为该气象因子的敏感性系数与其多年相对变化率的乘积,贡献为正表示使得 $ET_0$ 增加,贡献为负表示使得 $ET_0$ 减少<sup>[17]</sup>, $Con_{ET_0}$ 为各气象因子累加后的总贡献,是 $ET_0$ 的估计相对变化率, $RC_{ET_0}$ 为 $ET_0$ 的实际相对变化率<sup>[18]</sup>。

### 2.3 实际蒸散发

采用分布式水文模型 WEP-L 计算千岛湖流域实际蒸散发量( $ET_a$ ),WEP-L 分布式水文模型在划分流域计算单元、模拟流域水文循环过程等方面均有较大优势,模型采用反比例权重等方法将气象站点 1960—2020 年逐日降水、气温、日照、风速及湿度数据展布到子流域上,再作为模型输入计算流域实际蒸散水量<sup>[19]</sup>。

选取研究区内月潭站、新亭站、屯溪站 3 个水文站点进行验证对比。率定期为 1960—2000 年,验证期为 2001—2016 年,模型模拟效果评估选定 Nash 效率系数和相对误差两项指标。如表 1 所示,所选站点率定期

表 1 各水文站月径流过程模拟结果

Tab.1 Simulation results of monthly runoff process at each hydrological station

水文站	多年平均观测径流量/亿 m <sup>3</sup>	多年平均模拟径流量/亿 m <sup>3</sup>	率定期		验证期	
			Nash 系数	相对误差	Nash 系数	相对误差
月潭站	11.86	11.45	0.91	1.0%	0.85	10.3%
新亭站	1.94	2.06	0.83	-6.3%	0.90	-6.0%
屯溪站	31.13	32.46	0.91	-6.2%	0.93	1.0%

Nash 效率系数介于 0.83~0.91 之间, 相对误差介于 -6.3%~1.0% 之间; 验证期 Nash 效率系数介于 0.85~0.93 之间, 相对误差介于 -6.0%~10.3% 之间。整体而言模拟结果精度较高, 可较好地模拟千岛湖流域水文过程。3 个水文站点模拟径流与观测径流过程对比如图 2 所示。

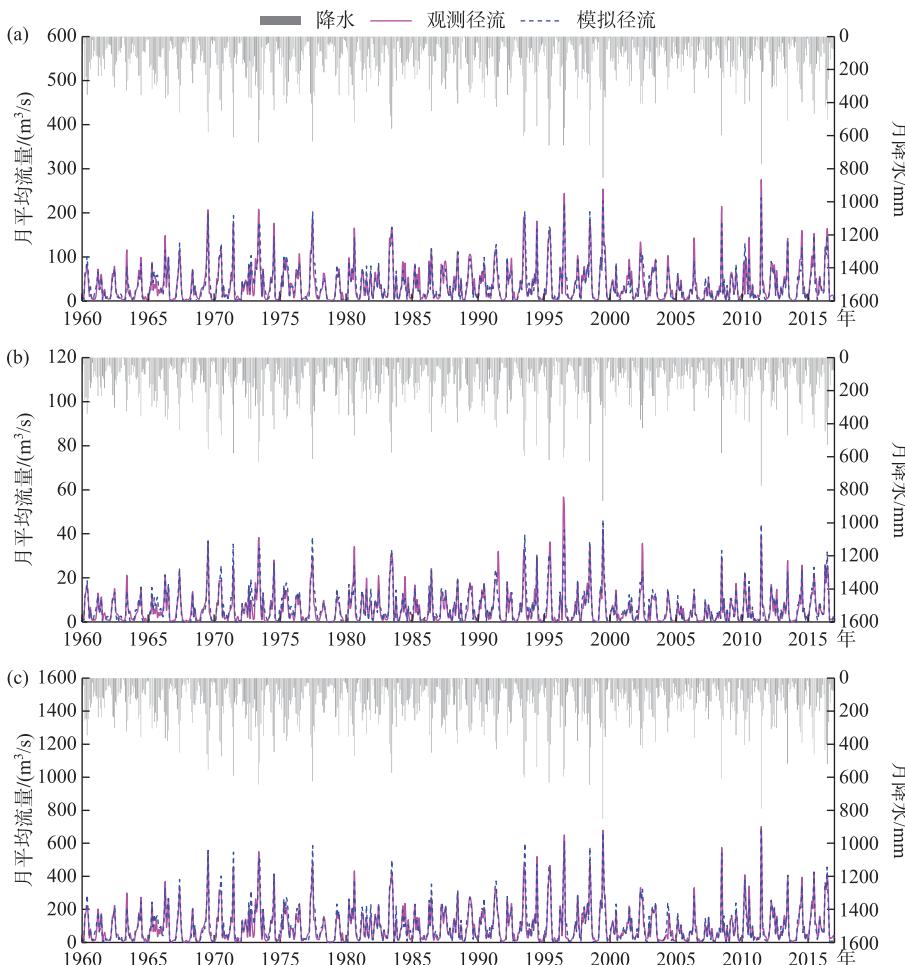


图 2 各水文站观测径流与模拟径流过程对比:(a)月潭站;(b)新亭站;(c)屯溪站

Fig.2 Comparison of observed runoff and simulated runoff at each hydrological station;

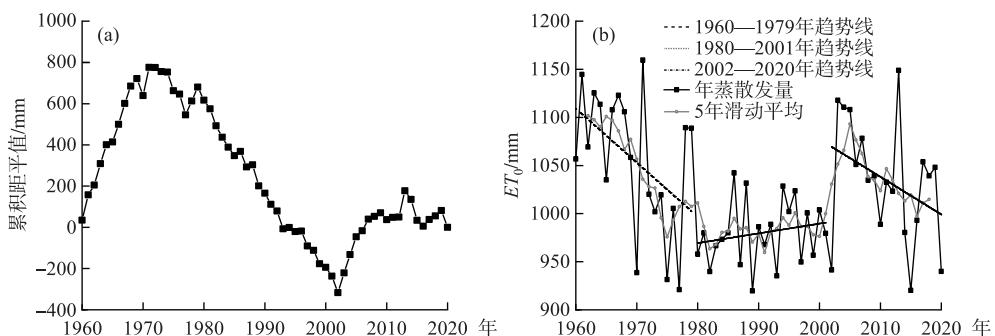
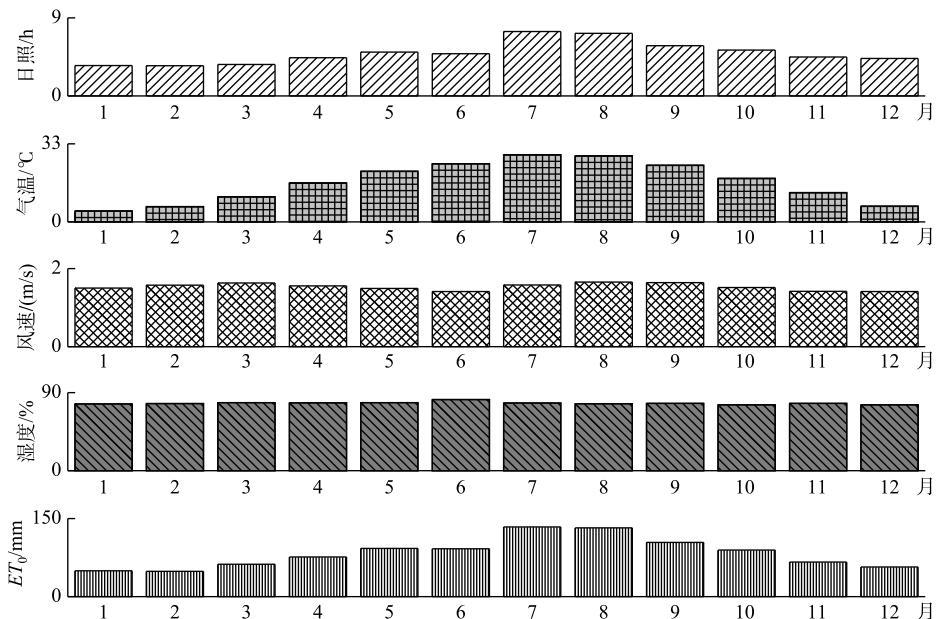
(a) Yuetan Station; (b) Xinting Station; (c) Tunxi Station

### 3 结果

#### 3.1 潜在蒸散发变化及驱动因素

如图 3 所示, 1960—2020 年  $ET_0$  多年平均值为 1021.7 mm, 在 919.6~1159.5 mm 范围内,  $ET_0$  于 1980、2002 年发生突变, 按照突变点划分年段为 1960—1979 年、1980—2001 年、2002—2020 年, 各年段多年平均年蒸散发量分别为 1055.7、980.0、1034.2 mm。流域  $ET_0$  变化整体呈下降趋势, 倾向率为 -0.77 mm/a, 从各年段来看蒸散发增加或减少速率分别为 -5.62、1.01、-3.90 mm/a。

3.1.1 潜在蒸散发 & 气象因子年内变化特征 潜在蒸散发以及气象因子的年内变化特征如图 4 所示, 日照和气温呈单峰状结构, 7 月为最大值, 日照年内变化较小而气温变化较大。风速和湿度在 1—12 月中较为稳定, 没有明显波动。 $ET_0$  年内分布特征与日照一致呈单峰状结构, 7 月出现最大值。

图 3  $ET_0$  突变检验及年际变化趋势:(a)  $ET_0$  累积距平变化曲线;(b)  $ET_0$  年际变化Fig.3  $ET_0$  mutation test and interannual variation trends图 4  $ET_0$  以及气象因子的年内变化特征Fig.4 Intra-annual variations of  $ET_0$  and meteorological elements

计算得到气象因子多年相对变化率(表2)。日照仅3—5月份存在增加趋势,其余月份皆为下降趋势,其中1月份日照时数下降40.8%。气温皆呈上升趋势,月平均气温较低的12—3月变化较大,而6—9月变化较小。风速在1—12月都表现为下降趋势,而湿度仅1和11月明显升高,其余月份无显著变化或明显下降。

**3.1.2 敏感系数** 计算得到 $S_N$ 、 $S_T$ 、 $S_U$ 、 $S_{RH}$ 的逐月变化(图5)。 $S_N$ 、 $S_T$ 、 $S_U$ 均为正值,即 $ET_0$ 随着日照时数、气温和风速的增加而增加。 $S_N$ 介于0.23~0.41之间,7月最大,2月最小,呈单峰型结构,2—7月呈逐渐增加趋势,7—12月呈逐月减少趋势; $S_T$ 在0.14~0.52范围内,8月最大,1月最小; $S_U$ 在0.17~0.22之间,1月最大,6月最小,月间变幅较为稳定。 $S_{RH}$ 为负值,表示 $ET_0$ 随湿度的增大而减小, $S_{RH}$ 在-0.74~-1.33之间,最大值出现在3月,最小值出现于7月。由敏感系数绝对值大小得到 $ET_0$ 对相对湿度最为敏感,其敏感系数绝对值大小关系为 $|S_{RH}|>|S_T|>|S_N|>|S_U|$ 。

表 2 气象因子年内相对变化率  
Tab.2 Meteorological elements intra-annual relative rate of change

月份	相对变化率/%			
	日照	气温	风速	湿度
1	-40.81	26.37	-20.76	3.43
2	-16.34	32.80	-24.09	0.63
3	8.34	16.00	-22.15	-6.03
4	12.11	9.04	-16.45	-7.21
5	2.56	7.41	-13.25	-5.97
6	-34.03	2.27	-5.70	0.05
7	-19.57	1.82	-11.28	-2.91
8	-33.41	1.18	-8.64	0.02
9	-21.24	3.93	-10.65	-3.60
10	-8.16	8.71	-10.17	-5.69
11	-23.00	9.02	-16.10	2.48
12	-17.23	13.09	-14.67	-0.58

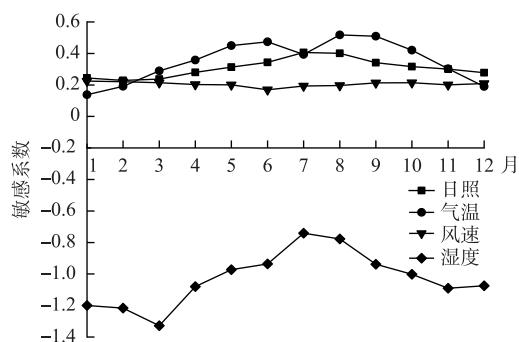


图 5  $ET_0$  对各气象因子敏感系数的年内变化

Fig.5 Intra-annual variation of  $ET_0$  sensitivity coefficients for each meteorological factor

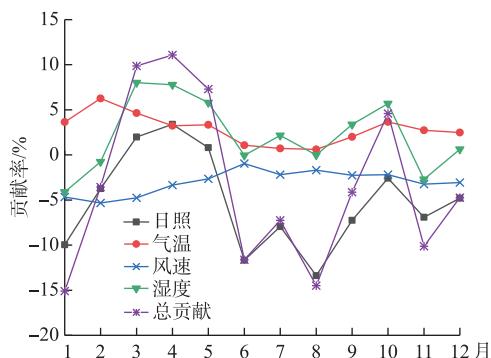


图 6 各气象因子贡献率变化  
Fig.6 Changes in the contribution rate of each meteorological factor

3.1.3 贡献率 气象因子贡献率如图 6 所示, 日照时数、平均气温、风速和相对湿度的各月贡献率平均值分别为  $-5.17\%$ 、 $2.87\%$ 、 $-3.03\%$ 、 $2.15\%$ 。由于气温年内相对变化率与  $ET_0$  对气温敏感系数在年内分布中变化趋势相反, 且气温年内相对变化率波动更大, 导致气温贡献率年内分布与敏感系数呈相反趋势。日照与气温敏感系数年内分布虽相似但由于年内相对变化率不同导致贡献率存在差异。6—8 月潜在蒸散发量的下降对年潜在蒸散发量的下降贡献最大, 为  $-33.35\%$ 。其中, 3—5 月贡献均为正, 总贡献率为  $28.23\%$ , 呈上升趋势, 分项上日照、气温、湿度为正贡献, 风速为负贡献; 6—8 月总贡献均为负, 表现为减少趋势, 分项上日照和风速为负贡献, 气温为正贡献, 相对湿度贡献率 7 月为正, 6 月、8 月贡献约为 0; 9—11 月总贡献为  $-9.67\%$ , 10 月为正, 分项上气温和湿度是正贡献率, 9、11 月为负, 分项上主要是因为日照和风速为负贡献; 12—来年 2 月总贡献为  $-23.39\%$ , 各月贡献率均为负值, 表现为减少趋势, 主要受日照和风速引起的负贡献影响。

$ET_0$  与源口站水面蒸发对比、 $ET_0$  与气温距平变化趋势分别如图 7、8 所示。 $ET_0$  与源口站水面蒸发量的线性关系拟合结果较好,  $R^2 = 0.49$ , 认为  $ET_0$  计算结果具有可靠性, 可反应潜在蒸散变化趋势。在 1960—2020 年间气温总体呈上升趋势, 速率为  $0.18^\circ\text{C}/10\text{ a}$ ,  $ET_0$  整体呈下降趋势, 速率为  $-7.7 \text{ mm}/10\text{ a}$ , 长序列时间趋势上来看千岛湖流域存在  $ET_0$  随气温升高反而减少的现象。贡献率的计算可以在一定程度上解释  $ET_0$  随气温升高反而下降现象, 由图 6 可知, 在 1—12 月份, 气温的增加对  $ET_0$  的变化均为正贡献, 但是在 1、2、6、7、8、9、11、12 月, 由于日照与风速等对  $ET_0$  的负贡献率大于气温对  $ET_0$  的正贡献率, 引起  $ET_0$  的减少趋势大于增加趋势, 使得  $ET_0$  呈现减少状态, 即存在“蒸发悖论”现象, 主要原因是日照时数与风速的减少。

由表 3 可看出, 气温增加对  $ET_0$  的变化均为正贡献, 风速减少对  $ET_0$  变化均为负贡献。 $ET_0$  的估计相对变化率在  $-15.10\% \sim 11.07\%$  范围内, 4 月最大, 此时实际相对变化率为  $10.20\%$ , 误差为  $0.87\%$ ; 1 月由于负贡献大于正贡献, 使得  $ET_0$  的估计相对变化率达到最小, 为  $-15.10\%$ , 而实际相对变化率为  $-15.01\%$ , 误差为  $-0.09\%$ 。3、4、5、10 月为正贡献, 平均值为  $8.21\%$ , 其余月份均为负贡献, 平均值为  $-8.88\%$ , 由于负贡献整体大于正贡献,  $ET_0$  的减少趋势大于增加趋势, 使得  $ET_0$  近 61 年来减少。

利用t检验来判断 $Con_{ET_0}$ 与 $RC_{ET_0}$ 之间的差异性,得到 $P=0.9093>0.05$ ,说明二者之间不存在显著性差异,即使用贡献率定量化阐述引起千岛湖流域 $ET_0$ 变化的气象影响因子,具备合理性与可行性。

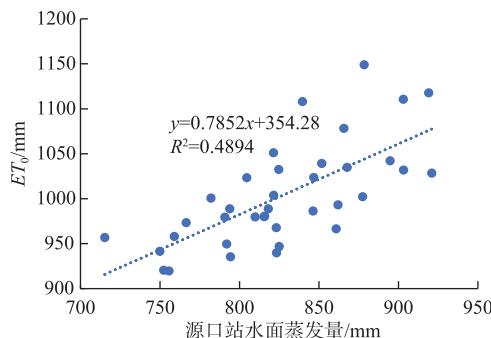


图7  $ET_0$  与代表站水面蒸发量对比

Fig.7  $ET_0$  vs. representative station  
water surface evaporation

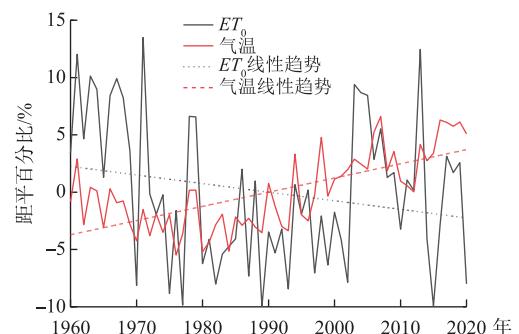


图8  $ET_0$  与气温距平百分比

Fig.8  $ET_0$  vs. temperature distance  
level percentage

### 3.2 实际蒸散发变化及驱动因素

采用WEP-L模型计算千岛湖流域逐年实际蒸散发量 $ET_a$ 以及各子流域实际蒸散发量( $ET_s$ )。由表4可知,1960—2020年 $ET_a$ 多年平均值为857.5 mm,范围为767.9~936.7 mm,最大值出现在1961年,最小值出现于2019年,突变点年份为2002、2012年,根据突变点划分3个年段:1960—2001年(T1)、2002—2011年(T2)、2012—2020年(T3),各年段平均年蒸散发量分别为861.4、872.5、822.4 mm。总体呈下降趋势,倾向率为-1.03 mm/a,3个年段变化下降或上升速率分别为-1.93、3.08、-8.77 mm/a,呈现先减小后增大再减小的趋势。

图9为流域 $ET_a$ 根据突变点划分的3个年段T1、T2、T3的年段平均 $ET_s$ 空间分布,从 $ET_s$ 时间变化趋势来看:3个时间段 $ET_s$ 范围分别为480.2~968.8、314.7~1019.6、129.7~968.8 mm,T1—T2期间,主要呈上升趋势,166个子流域蒸散发量有所增加,34个子流域蒸散发量减少;T2—T3期间,主要呈下降趋势,198个子流域蒸散发量减少,2个子流域蒸散发量有所增加。从 $ET_s$ 空间分布来看:总体呈现东高西低的格局分布,其中东北部、东南部 $ET_s$ 值较高,中西部 $ET_s$ 值较低,具有明显的空间分异特征。中西部部分子流域森林面积比例小于其他区域,不透水域面积占比大于其他区域,从而导致蒸散发量相比于其他区域较低。

利用归因分析法探究影响 $ET_a$ 变化的气象成因,从表5可以看出,T1—T2期间,湿度是引起 $ET_a$ 变化的主导因子,对 $ET_a$ 贡献量为60.41 mm,贡献率为67.11%,影响大小绝对值排序为湿度>风速>日照>气温;T2—T3期间,湿度仍然是变化主要驱动因素,对 $ET_a$ 贡献量为-25.06 mm,贡献率为48.97%,影响大小为湿度>日照>风速>气温。

表3 估计相对变化率 $Con_{ET_0}$ 与  
实际相对变化率 $RC_{ET_0}$

Tab.3 Estimated relative rate of change vs.  
actual relative rate of change

月份	$Con_{ET_0}/\%$	$RC_{ET_0}/\%$	误差/%
1	-15.10	-15.01	-0.09
2	-3.56	-3.16	-0.40
3	9.87	10.25	-0.37
4	11.07	10.20	0.87
5	7.29	6.84	0.45
6	-11.62	-11.64	0.02
7	-7.25	-8.50	1.25
8	-14.49	-15.80	1.31
9	-4.14	-5.25	1.11
10	4.59	3.45	1.14
11	-10.12	-10.31	0.19
12	-4.73	-4.52	-0.22

表4  $ET_a$  突变检验及年际变化趋势

Tab.4  $ET_a$  mutation test and  
interannual variation trends

时段	时段均值/mm	时段变化率/(mm/a)
1960—2020年	857.5	-1.03
1960—2001年	861.4	-1.93
2002—2011年	872.5	3.08
2012—2020年	822.4	-8.77

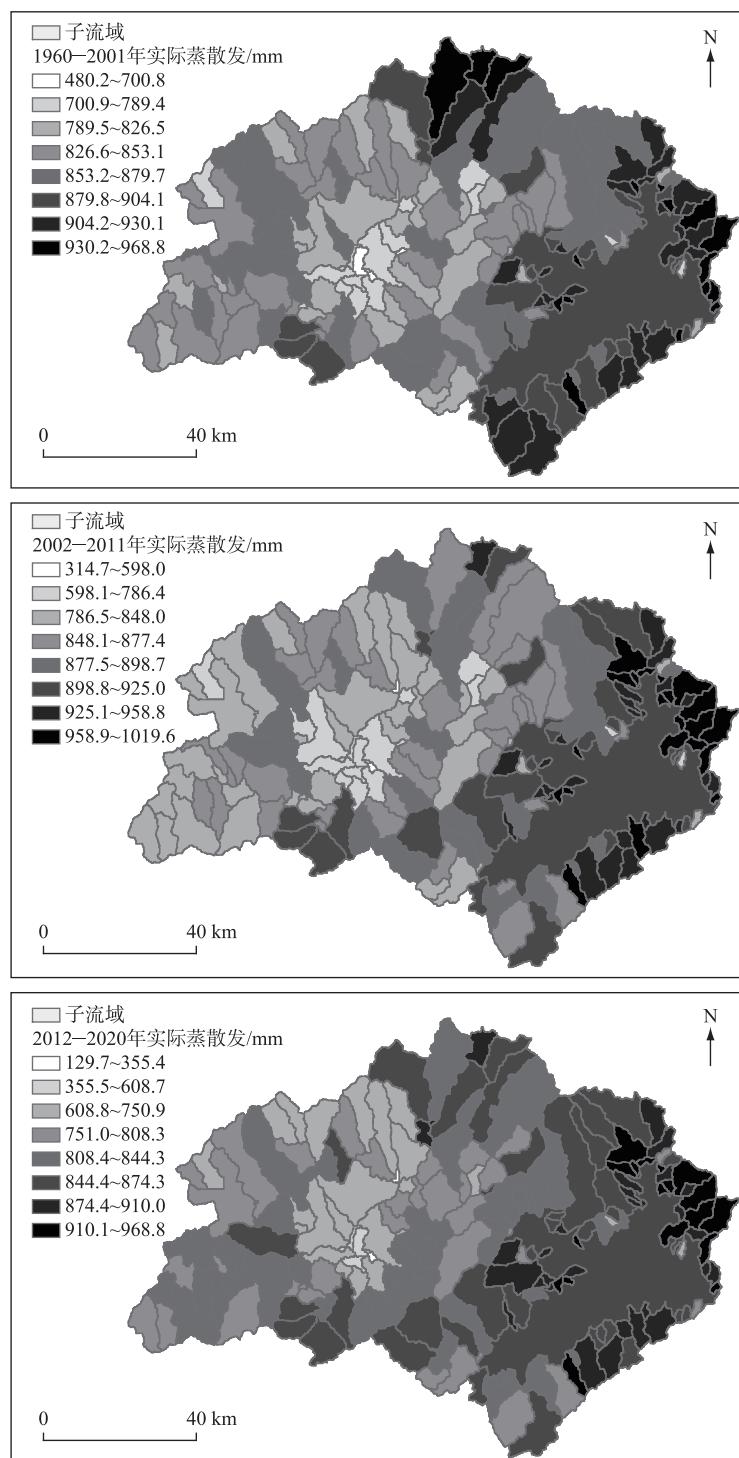
图 9 不同时段  $ET_s$  的空间分布Fig.9 Spatial distribution of  $ET_s$  at different time periods

表 5 气象因子对  $ET_a$  变化贡献量与贡献率  
Tab.5 Contribution and contribution rate of main meteorological factors to  $ET_a$

气象要素	T1—T2		T2—T3	
	贡献量/mm	贡献率/%	贡献量/mm	贡献率/%
气温	4.42	4.91	-5.05	9.86
日照	10.08	11.20	-10.63	20.78
湿度	60.41	67.11	-25.06	48.97
风速	-15.11	16.78	-10.43	20.39

### 3.3 $ET_0$ 与 $ET_a$ 互补关系分析

互补关系侧重蒸散发的大气过程,反映了陆面蒸散发变化对大气蒸发能力的反馈作用,也被称为Bouchet假设<sup>[7]</sup>,与Penman方法的蒸散发正比假设和Budyko方程的水热耦合平衡假设一起构成了蒸散发研究中描述陆面和大气之间水分和能量交换过程的三大本构关系。已有研究表明  $ET_a$  和  $ET_0$  之间关系在干旱区存在明显互补而在湿润区较为复杂<sup>[20]</sup>。在千岛湖流域验证Bouchet的蒸散发互补理论的适用性,选取蒸发表面水分指数  $E_{MI}$  ( $E_{MI} = ET_a / ET_0$ ) ,用WEP-L模型计算得到的  $ET_a$  和公式加权计算所得  $ET_0$  与  $E_{MI}$  进行绘制,  $E_{MI}$  表示景观接近潜在条件的程度,最大值为1<sup>[21-22]</sup>。如图10所示,随着湿度的增加,  $ET_a$  增加,  $ET_0$  降低,  $ET_a$  呈上升趋势( $R^2 = 0.03$ ,  $P < 0.05$ ),  $ET_0$  呈显著下降趋势( $R^2 = 0.55$ ,  $P < 0.05$ )。 $ET_a$  与  $ET_0$  之间取值愈加趋近,研究区长时间序列上存在CR,表明Bouchet的CR理论在千岛湖流域中是适用的。

流域  $ET_a$  变化主要受到水分供给因素和能量供给因素两方面控制<sup>[23]</sup>,在南方湿润地区  $ET_a$  主要被能量供给因素制约<sup>[24]</sup>。 $E_{MI}$  与  $ET_a$  之间决定系数较小,主要原因是研究区风速、日照、温度与降水量的变化不同步。研究区位于湿润地区且水域占比较大,导致实际蒸散发量接近潜在蒸散发量<sup>[9]</sup>,年际变化中  $ET_a$  变化范围相对较小,而  $ET_0$  变化范围较大,这也导致  $ET_0$  与  $ET_a$  在年际变化中互补关系表现较不明显,相关性较低。短时间窗口上, $ET_a$  与  $ET_0$  存在明显的负相关关系(如1966—1969年、1974—1979年等)。从长期水量平衡关系来看,当实际蒸散发量持续低于潜在蒸散发量时,研究区  $ET_a$  与  $ET_0$  的互补关系成立<sup>[25]</sup>。湿润地区蒸散发互补理论适用的时空异质性有待进一步探讨和研究。

## 4 讨论

本研究结果表明,千岛湖流域  $ET_0$  大致以2002年为分界点,呈先降低后增加的趋势。郝振纯等研究发现长江流域  $ET_0$  在1960—2002年波动减少,2003—2009年显著增加<sup>[26]</sup>;黄会平等发现东南诸河年际波动较大,在2000年前后由降转升<sup>[27]</sup>;Chu等发现1961—2014年间淮河流域  $ET_0$  呈先下降再增加的趋势<sup>[22]</sup>,与本研究结果大体相符。变化环境下,全球多地区观测到  $ET_0$  随气温升高而降低的现象,由图8所示,本研究发现千岛湖流域1960—2020年气温总体呈上升趋势,而  $ET_0$  为下降趋势,而年内尺度上不同月份该现象存在差异,6—9月、11月—来年2月存在此现象,而其他月份气温与  $ET_0$  变化趋势一致。海河流域、黄河流域相关研究也被证实存在“蒸散发悖论”现象<sup>[28-29]</sup>。

前人一些研究表明这主要是由气象因子的变化不同导致的。Liu和Zhang研究发现风速的减小和气温、风速的增加分别是西北地区  $ET_0$  降低和增加的主要原因<sup>[30]</sup>。孙萌等发现风速和实际水汽压的变化是导

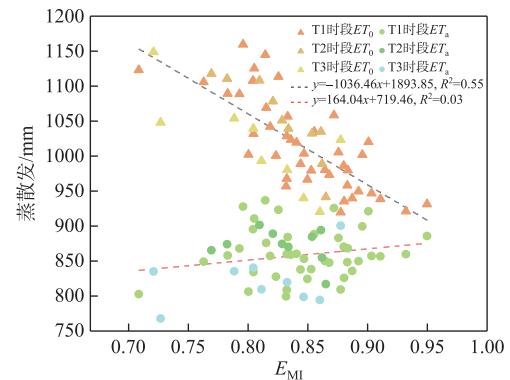


图10 千岛湖流域  $ET_0$  与  $ET_a$  关系解析  
Fig.10 Analysis of the relationship between  $ET_0$  and  $ET_a$  in Lake Qiaodao Basin

致三峡库区  $ET_0$  增加的主要驱动因素<sup>[31]</sup>。千岛湖流域多年平均月  $ET_0$  中 3—5、10 月呈增加趋势,其余均呈下降趋势,其中气温始终对  $ET_0$  呈正贡献,日照时数和风速的减小是  $ET_0$  下降的主要原因。

$ET_0$ 、 $ET_a$  与  $E_{MI}$  的关系表明,千岛湖蒸散发过程符合 Bouchet 蒸发互补理论。Li 等研究发现,湄公河流域同样存在蒸发互补关系,且比值随海拔的降低而增加<sup>[32]</sup>。这一结果也与在青藏高原、黄河流域的一些研究结论相似<sup>[33-34]</sup>。对比气象因子对  $ET_0$ 、 $ET_a$  的影响规律,日照时数和风速仍然是导致  $ET_a$  变化的重要因素,但由于相对湿度对  $ET_a$  的制约,相对湿度对  $ET_a$  的变化贡献最大。

此外,本研究发现千岛湖流域降水量  $P$ 、产水深  $R$  之间变化趋势虽高度相关但未完全一致,  $R$  变幅更加明显,主要是由蒸散发变化导致的。1980s—1990s 与 1960s—1970s 比较,流域  $R$  增加了 250.0 mm, 相对变化率为 23.2%, 同时段相比,  $P$  增加了 186.4 mm, 相对变化率为 10.5%;  $ET_a$  下降了 46.7 mm, 相对变化率为 -5.3%。2000s—2010s 与 1980s—1990s 比较,  $R$  下降了 196.1 mm, 相对变化率为 -14.8%, 同时段对比  $P$  下降了 183.2 mm, 相对变化率为 -9.3%;  $ET_a$  增加了 9.7 mm, 相对变化率为 1.1%。李明乾发现变化环境下降水—蒸散发—产流的水循环模式使得实际蒸散发显著增加,产流减少<sup>[35]</sup>;王庆明等认为蒸散发消耗增加是大清河流域径流衰减的主要因素<sup>[36]</sup>。 $ET_a$  与流域产水深  $R$  密切相关,通过模型不仅可以定性定量得出  $ET_a$  的变化与分布特征,还可定量推得千岛湖流域径流量对气象因子变化的响应规律。

## 5 结论

1) 1960—2020 年千岛湖流域  $ET_0$  与  $ET_a$  多年平均值分别为 1021.7 和 857.5 mm, 均呈减少趋势, 倾向率分别为 -0.77 和 -1.03 mm/a, 二者均在 1980 和 2000 年左右发生突变。实际蒸散发空间分布总体呈现东高西低格局, 其中东北部、东南部  $ET_a$  值较高, 中部  $ET_a$  值较低。

2) 敏感性分析中, 相对湿度对各月潜在蒸散发敏感系数呈负值且最为敏感, 日照时数、平均气温、风速敏感系数均呈正值。通过贡献率与归因分析可得, 气象因子对潜在蒸散发的影响按贡献率大小为日照时数>风速>气温>相对湿度, 对实际蒸散发贡献率大小为相对湿度>风速>日照时数>气温。

3) 千岛湖流域 1960—2020 年间整体存在潜在蒸散发随气温的增加反而下降的现象, 气温的增加虽呈正贡献, 但日照时数和风速的负贡献更大, 导致潜在蒸散发下降。 $E_{MI}$  趋近于 1 时, 流域实际蒸散发量和潜在蒸散发量取值愈加接近, 二者存在“趋同”现象。

致谢: 本文撰写过程中得到了气象共享数据网和全国第三次水资源调查评价全国技术组的数据支持, 在此致谢!

## 6 参考文献

- [ 1 ] Han SJ, Tian FQ. Research progress of the generalized nonlinear complementary relationships of evaporation. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(8): 849-861. [ 韩松俊, 田富强. 广义非线性蒸发互补关系研究进展. 地球科学进展, 2021, 36(8): 849-861. ]
- [ 2 ] Brutsaert W. A generalized complementary principle with physical constraints for land-surface evaporation. *Water Resources Research*, 2015, 51(10): 8087-8093. DOI: 10.1002/2015WR017720.
- [ 3 ] Ye LY, Lu H, Qin SJ et al. Changes in pan evaporation and actual evapotranspiration of the Yangtze River Basin during 1960–2019. *Advances in Water Science*, 2022, 33(5): 718-729. [ 叶林媛, 鲁汉, 秦淑静等. 长江流域 1960—2019 年蒸发皿蒸发和实际蒸散发演变规律. 水科学进展, 2022, 33(5): 718-729. ]
- [ 4 ] Zhao ZK, Sun WY, Mu XM et al. Temporal and spatial variation and difference of pan evaporation between hydrological station and meteorological station in the Yellow River Basin. *Yellow River*, 2023, 45(6): 24-31. [ 赵梓琨, 孙文义, 穆兴民等. 黄河流域水文站和气象站蒸发皿蒸发量时空变化及其差异. 人民黄河, 2023, 45(6): 24-31. ]
- [ 5 ] Bai P, Liu XM, Liu L et al. Variation characteristics and influencing factors of open-water evaporation in Danjiangkou Reservoir. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2022, 20(4): 643-649, 723. [ 白鹏, 刘小莽, 刘璐等. 丹江口水库水面蒸发变化特征及影响因素. 南水北调与水利科技: 中英文, 2022, 20(4): 643-649, 723. ]
- [ 6 ] Luo L, Dai CL, Li ML et al. Spatiotemporal changes characteristics and influencing factors of evaporation in Songhua River Basin. *Water Resources and Power*, 2022, 40(10): 5-9. [ 罗丽, 戴长雷, 李梦玲等. 松花江流域蒸发量的时空变化特征及影响因子分析. 水电能源科学, 2022, 40(10): 5-9. ]
- [ 7 ] Bouchet R. Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique. *International Association of Hydrological Sciences Publication*,

- 1963, **62**: 134-142.
- [ 8 ] Han SJ, Xu D, Wang SL *et al*. Similarities and differences of two evapotranspiration models with routinely measured meteorological variables: Application to a cropland and grassland in northeast China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, **117**(3): 501-510. DOI: 10.1007/s00704-013-1016-8.
- [ 9 ] Han SJ, Tian FQ, Hu HP. Positive or negative correlation between actual and potential evaporation? Evaluating using a nonlinear complementary relationship model. *Water Resources Research*, 2014, **50**(2): 1322-1336. DOI: 10.1002/2013wr014151.
- [ 10 ] Jin T, Mu Q, Wang LZ *et al*. Nature-based solutions to water crisis practice in China: Eco-friendly water management in Qiandao Lake, Zhejiang Province. *Natural Protected Areas*, 2021, **1**(4): 10-19. [ 詹彤, 穆泉, 王龙柱等. 基于自然的解决方案: 应对水资源危机中国实践——浙江千岛湖水源地保护案例. 自然保护地, 2021, **1**(4): 10-19.]
- [ 11 ] 杭州市水务集团有限公司. 杭州市第二水源千岛湖配供水工程. 浙江水利科技, 2020, **48**(6): 2-5.
- [ 12 ] Jiang XM, Wang GQ, Xue BL *et al*. Spatiotemporal variations and driving forces of actual evapotranspiration in Hunhe River Basin based on Budyko theory and complementary model. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, **41**(7): 1361-1368. DOI: 10.13292/j.1000-4890. [ 蒋小满, 王国强, 薛宝林等. 基于 Budyko 理论和互补模型的浑河流域实际蒸散发时空变化特征及驱动力分析. 生态学杂志, 2022, **41**(7): 1361-1368.]
- [ 13 ] Han SJ, Zhang BZ. Advances of evapotranspiration research based on the Penman approach and complementary principle. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, **49**(9): 1158-1168. [ 韩松俊, 张宝忠. 基于 Penman 方法和互补原理的蒸散发研究历程与展望. 水利学报, 2018, **49**(9): 1158-1168.]
- [ 14 ] Zheng YN, Wen X, Fang GH *et al*. Research on climate change and runoff response in Xin'an river basin. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2015, **26**(1): 106-110. [ 郑艳妮, 闻昕, 方国华. 新安江流域气候变化及径流响应研究. 水资源与水工程学报, 2015, **26**(1): 106-110.]
- [ 15 ] Pan YY, Luo YZ, Wang YA *et al*. Characteristics of evolution of precipitation and runoff in Xin'An River Basin. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, **25**(6): 121-125. [ 潘娅英, 骆月珍, 王亚男等. 新安江流域降水、径流演变特征分析. 水土保持研究, 2018, **25**(6): 121-125.]
- [ 16 ] McCuen RH. A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evaporation. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 1974, **10**(3): 486-497. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1974.tb00590.x.
- [ 17 ] Yin YH, Wu SH, Chen G *et al*. Attribution analyses of potential evapotranspiration changes in China since the 1960s. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, **101**(1): 19-28. DOI: 10.1007/s00704-009-0197-7.
- [ 18 ] Zhao L, Liang C, Cui NB *et al*. Attribution analyses of  $ET_0$  change in hilly area of central Sichuan in recent 60 years. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, **44**(2): 183-190. [ 赵璐, 梁川, 崔宁博等. 川中丘陵区参考作物蒸发蒸腾量近 60 年变化成因研究. 水利学报, 2013, **44**(2): 183-190.]
- [ 19 ] 杜军凯. 考虑垂直地带性的山区分布式水文模拟与应用[ 学位论文 ]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- [ 20 ] 李修仓. 中国典型流域实际蒸散发的时空变异研究[ 学位论文 ]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [ 21 ] Kahler DM, Brutsaert W. Complementary relationship between daily evaporation in the environment and pan evaporation. *Water Resources Research*, 2006, **42**(5). DOI: 10.1029/2005WR004541.
- [ 22 ] Chu RH, Li M, Islam ARMT *et al*. Attribution analysis of actual and potential evapotranspiration changes based on the complementary relationship theory in the Huai River Basin of Eastern China. *International Journal of Climatology*, 2019, **39**(10): 4072-4090. DOI: 10.1002/joc.6060.
- [ 23 ] Gao G, Chen DL, Xu CY *et al*. Trend of estimated actual evapotranspiration over China during 1960–2002. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, **112**(D11). DOI: 10.1029/2006jd008010.
- [ 24 ] Liu J, Zhang Q, Xu CY *et al*. Change of actual evapotranspiration of Poyang Lake Watershed and associated influencing factors in the past 50 years. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, **19**(2): 139-145. DOI: 1004-8227(2010)02-0139-07. [ 刘健, 张奇, 许崇育等. 近 50 年鄱阳湖流域实际蒸发量的变化及影响因素. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(2): 139-145.]
- [ 25 ] Aminzadeh M, Or D. The complementary relationship between actual and potential evaporation for spatially heterogeneous surfaces. *Water Resources Research*, 2017, **53**(1): 580-601. DOI: 10.1002/2016wr019759.
- [ 26 ] Hao ZC, Yang RR, Chen XM *et al*. Tempo-spatial patterns of the potential evaporation in the Yangtze River Catchment for the period 1960–2011. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, **35**(2): 408-419. [ 郝振纯, 杨荣榕, 陈新美等. 1960—2011 年长江流域潜在蒸发量的时空变化特征. 冰川冻土, 2013, **35**(2): 408-419.]
- [ 27 ] Huang HP, Cao MM, Song JX *et al*. Temporal and spatial changes of potential evapotranspiration and its influencing factors in China from 1957 to 2012. *Journal of Natural Resources*, 2015, **30**(2): 315-326. DOI: 10.11849/zrzyxb.2015.02.014. [ 黄会平, 曹明明, 宋进喜等. 1957—2012 年中国参考作物蒸散量时空变化及其影响因子分析. 自然资源学报, 2015, **30**(2): 315-326.]
- [ 28 ] Zhao ZK, Sun WY, Mu XM *et al*. Temporal and spatial variation and difference of pan evaporation between hydrological station and meteorological station in the Yellow River Basin. *Yellow River*, 2023, **45**(6): 24-31. [ 赵梓琨, 孙文义, 穆兴民等. 黄河流域水文站和气象站

- 蒸发皿蒸发量时空变化及其差异. 人民黄河, 2023, 45(6) : 24-31.]
- [29] Xiong YL, Zhao N. Analysis of variation in pan evaporation and its influencing factors in Haihe River Basin. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(2) : 22-30. [熊玉琳, 赵娜. 海河流域蒸发皿蒸发量变化及其影响. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(2) : 22-30.]
- [30] Liu XM, Zhang D. Trend analysis of reference evapotranspiration in Northwest China: The roles of changing wind speed and surface air temperature. *Hydrological Processes*, 2013, 27(26) : 3941-3948. DOI: 10.1002/hyp.9527.
- [31] Sun M, Gao B, Xiao WH et al. Spatiotemporal variability of evapotranspiration in recent 61 years and its response to climate change in the Three Gorges Reservoir area. *Water Resources and Power*, 2022, 40(5) : 1-5. [孙萌, 高斌, 肖伟华等. 近61年三峡库区潜在蒸发量时空演变规律及其驱动因素. 水电能源科学, 2022, 40(5) : 1-5.]
- [32] Li B, Chen F, Guo HD. Regional complexity in trends of potential evapotranspiration and its driving factors in the Upper Mekong River Basin. *Quaternary International*, 2015, 380/381 : 83-94. DOI: 10.1016/j.quaint.2014.12.052.
- [33] Zhang YQ, Liu CM, Tang YH et al. Trends in pan evaporation and reference and actual evapotranspiration across the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D12). DOI: 10.1029/2006jd008161.
- [34] Wang WG, Shao QX, Peng SZ et al. Reference evapotranspiration change and the causes across the Yellow River Basin during 1957–2008 and their spatial and seasonal differences. *Water Resources Research*, 2012, 48(5). DOI: 10.1029/2011wr010724.
- [35] 李明乾. 变化环境下流域水循环演化研究[学位论文]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [36] Wang QM, Jiang S, Li S et al. Influencing factors of surface runoff attenuation in mountainous areas of Daqing River Basin. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, (4) : 669-679. [王庆明, 姜珊, 李森等. 大清河流域山区径流量衰减影响因素. 南水北调与水利科技: 中英文, 2021, (4) : 669-679.]