

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2020.0076

乔丽, 王文科, 马稚桐, 等. 拉萨河流域潜在蒸散发的气象因子敏感性[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(4): 97-103.
QIAO L, WANG W K, MA Z T, et al. Sensitivity analysis of potential evapotranspiration to key climatic factors in the Lhasa River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(4): 97-103. (in Chinese)

拉萨河流域潜在蒸散发的气象因子敏感性

乔丽^{1,2}, 王文科^{1,2}, 马稚桐^{1,2}, 张正宇^{1,2}

(1. 旱区地下水与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054; 2. 长安大学 环境科学与工程学院, 西安 710054)

摘要: 蒸散发可以反映气候变化对水资源的影响状况, 根据拉萨河流域两个站点 1955—2018 年的逐日气象数据, 采用 FAO-56-Penman-Monteith 公式计算潜在蒸散发 (ET_0), 进而采用敏感性分析、Mann-Kendall 趋势检验、气候倾向率及小波分析等方法对拉萨河流域 ET_0 的变化特征及其影响因素进行分析。对比两个站点的变化规律, 结果表明: 流域 ET_0 整体对最高温度最为敏感, 最高温度的贡献率最大, 气象因子的敏感系数年内变幅为相对湿度 > 最高温度 > 风速 > 日照时数 > 最低温度; 流域 ET_0 的日变化趋势为每 10 年增加 0.03 mm, Mann-Kendall 检验流域 ET_0 增长并不显著; 流域的 ET_0 在 25~30 a 尺度上周期振荡明显, 出现了 7 次循环交替。

关键词: 潜在蒸散发; 彭曼公式; 敏感性分析; 小波分析; 拉萨河流域

中图分类号: P426.2 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Sensitivity analysis of potential evapotranspiration to key climatic factors in the Lhasa River basin

QIAO Li^{1,2}, WANG Wenke^{1,2}, MA Zhitong^{1,2}, ZHANG Zhengyu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
2. School of Environment and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710021, China)

Abstract: Evapotranspiration can reflect the impact of climate change on water resources. Based on the daily weather data from 1955 to 2018 at two sites in the Lhasa River basin, the potential evapotranspiration (ET_0) was calculated using the FAO-56-Penman-Monteith formula. The sensitivity analysis, Mann-Kendall trend test, climatic tendency rate, and wavelet analysis were used to analyze the variation law of ET_0 in the Lhasa River basin and its influencing factors. Comparing the changes changing characteristics of of the two stations, the results show that: The whole basin ET_0 is the most sensitive to the highest temperature, and the contribution of highest temperature contribution to ET_0 was the largest, the sensitivity coefficient of meteorological factors varies vary within the year; relative humidity > maximum temperature > wind speed > sunshine hours > minimum temperature, respectively; the daily variation trend of ET_0 in the basin is was 0.03 mm per 10 years and the increase of ET_0 in the watershed by Mann-Kendall was not significant; the ET_0 of the basin has a cyclical oscillation on the 25-30 year scale, and there are were obviously 7 cycles of alternating.

Key words: potential evapotranspiration; Penman-Monteith method; sensitivity analysis; wavelet analysis; Lhasa River basin

收稿日期: 2019-10-19 修回日期: 2020-03-31 网络出版时间: 2020-04-17

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.tv.20200417.1332.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金(U1603243; 41230314)

作者简介: 乔丽(1995—), 女, 陕西榆林人, 主要从事旱区水文生态效应研究。E-mail: 2629663463@qq.com

通信作者: 王文科(1962—), 男, 陕西宝鸡人, 教授, 博士, 主要从事旱区水文生态效应研究。E-mail: 764933538@qq.com

蒸散发作为衡量区域潜在蒸散发的重要指标和水量平衡的组成部分^[1],广泛地应用于气候干湿状况分析、水资源评价和利用、农业作物需水和生产管理、生态环境等研究中^[2]。近几十年来,全球气候发生了显著性的改变,气候变化通过影响温度、降水进而改变径流的时空分布特征,此外气候变化还影响着潜在蒸散发(ET_0)^[3]。因此,研究 ET_0 可以帮助理解其对流域未来水分循环变化的影响,并对合理规划用水、生态环境保护以及提高水资源利用效率等有着科学意义^[4-5]。

目前,许多学者^[6-9]利用长时间序列的气象资料分析地区的 ET_0 变化机制及其影响因素的研究,不同地区 ET_0 的变化趋势不同,影响 ET_0 的主导因子也不同。Roderick 等^[10]依据蒸发皿的观测数据得出 50 年来北半球蒸发量普遍减小的结论;Dinpa-shoh 等^[11]发现伊朗北部的风速和相对湿度是影响 ET_0 变化的主要因素;Limjirakan 等^[12]提出由于风速、日照时间的降低导致泰国的 ET_0 整体上持续减小;白桦等^[13]得出潜在蒸发的倾向率变化低值区为中国东部和新疆中部,高值区位于中国中部和新疆东部;刘昌明等^[14]认为潜在蒸散发在东南流域对最高温度最为敏感,西北流域对相对湿度最为敏感,西南流域对太阳辐射最为敏感;李斌等^[15]认为澜沧江流域 ET_0 受日照时数影响最大,相对湿度影响次之;刘胜娅等^[16]发现气温和降水对北京地区的 ET_0 影响更大;杨林山等^[17]研究表明洮河流域 ET_0 对日照时数的敏感度最高;张永生等^[18]则得出风速对 ET_0 的影响程度自北向南递减的结论;安彬等^[19]认为陕西省 ET_0 对相对湿度最为敏感;郭金路等^[20]确定了辽西地区 ET_0 对相对湿度的敏感性最高,且 ET_0 与相对湿度变化呈负相关。可见,平原区最高温度和相对湿度对 ET_0 影响大,而高原区日照时数和相对湿度对 ET_0 影响大。

关于 ET_0 的估算方法主要有 Hargreaves 法、Hamon 法、Makkink 法、Rohwer 法、Priestley-Taylor 法和 Penman-Monteith 法等 6 种方法,每种方法形式和意义各不相同^[21]。其中 Penman-Monteith 法适用范围广,计算精度高,因此是应用最多的一种估算方法。

ET_0 作为反映气候变化对水资源影响的重要因素,目前拉萨河流域对 ET_0 的相关研究相对较少。史海匀等^[22]提出了基于水-气温差和气温修正的道尔顿模型来估算拉萨河流域的蒸发力,但未涉及 ET_0 的演变规律及其对气象因子的敏感性分析。因此,本文基于逐日气象资料,对拉萨河流域潜在蒸

发的敏感性进行系统分析,探讨潜在蒸发的变化原因。

1 研究区概况

拉萨河流域地处北纬 $29^{\circ}20' \sim 31^{\circ}15'$,东经 $90^{\circ}05' \sim 93^{\circ}20'$,海拔处于 $3\,598 \sim 7\,074$ m,干流全长 551 km,平均比降 0.29‰,多年平均径流量 110 亿 m^3 ,流域面积约为 3.26 万 km^2 ;地势表现为北高南低,中上游多为山地地形较为复杂,下游地势较为平坦多为河谷平原^[23-24]。

2 数据与方法

2.1 数据

本文所用的气象资料均来源于中国气象科学数据共享服务平台(<http://data.cma.cn/>),用拉萨河流域当雄和拉萨气象站的 1962—2018、1955—2018 年气象资料中的逐日平均、最低和最高气温、风速、相对湿度、日照时数等 5 个气象因子计算区域 ET_0 。当雄站点位于河流的中上游,海拔较高,地貌较为复杂,基本为山地;拉萨站点位于河流的下游地区,为海拔相对较低的河谷平原区。

2.2 计算方法

2.2.1 潜在蒸散发计算方法

FAO-56-Penman-Monteith 适合在不同气候条件下 ET_0 的计算^[25],因此采用该方法计算逐日潜在蒸散发 ET_0 ^[3,26]其计算公式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{900\gamma U_2(e_s - e_a)}{T + 273}}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中: ET_0 为潜在蒸散发,mm/d; R_n 为净辐射, MJ/($m^2 \cdot d$); G 为土壤热通量, MJ/($m^2 \cdot d$); γ 为湿度表常数, kPa/C; U_2 为 2 m 处风速, m/s; e_s 为饱和水气压, kPa; e_a 为实际水气压, kPa; Δ 为水气压斜率, kPa/C。

2.2.2 敏感性分析

利用 McCuen^[27]提出的敏感性系数法对气象因子进行无量纲化,从而对敏感性系数的大小进行排序比较,其计算公式为

$$S_{v_i} = \lim_{\Delta v_i \rightarrow 0} \left[\frac{\Delta ET_0 / ET_0}{\Delta v_i / v_i} \right] = \frac{\partial ET_0}{\partial v_i} \frac{v_i}{ET_0} \quad (2)$$

式中: S_{v_i} 为 ET_0 对 v_i 的敏感系数; Δv_i 为气象因子的变化; ΔET_0 为 Δv_i 导致的 ET_0 变化。 S_{v_i} 的正负值表示 ET_0 与 v_i 的正负相关性,绝对值的大小表明 v_i 对 ET_0 的影响程度。

本文将影响潜在蒸散发的 5 个气象因子分别变

化 10%,在其他变量不变的情况下得到 ΔET_0 ,依次计算最高温度、最低温度、相对湿度、风速、日照时数

的敏感性系数 S_{TH} 、 S_{TL} 、 S_{RH} 、 S_{AW} 、 S_{SD} 。参照文献 [28]划分敏感系数等级,具体见表 1。

表 1 敏感系数等级
Tab. 1 The grades of sensitivity coefficient

敏感系数	$0.00 \leq S_x < 0.05$	$0.05 \leq S_x < 0.20$	$0.20 \leq S_x < 1.00$	$ S_x > 1.00$
敏感程度	忽略不计	中等	高	非常高

2.2.3 贡献率分析

依据尹云鹤等^[6]和谢平等^[29]提出的气象因子对 ET_0 贡献率的计算方法,气象因子的敏感系数与其相对变化率的乘积,即为该因子变化引起的 ET_0 变化程度,公式为

$$Con_x = S_x \cdot R_{C_x}, R_{C_x} = \frac{a \cdot bX}{|V_x|} \times 100\% \quad (3)$$

式中: Con_x 为气象因子 X 对 ET_0 变化的贡献率; R_{C_x} 为 X 的多年相对变化率; a 、 b 分别为研究时段的年数 X 的倾向率; V_x 为相应时段 X 的平均值。 Con_x 的绝对值的大小表示气象因子对 ET_0 的影响程度。

2.2.4 Morlet 小波分析

该种小波是 20 世纪 80 年代由 Morlet 提出的具有时频多分辨功能的时间尺度分析方法。能够消除用小波变换系数作为判据产生的虚假振荡且不具有正交性^[30],在揭露时间序列的周期变化特性的同时也可以进行未来变化的趋势预测^[31-32]。因此,

本文采用 Morlet 小波来分析 ET_0 序列的周期变化特征。其小波母函数^[33]为

$$\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} \exp\left[-\frac{t^2}{f_b} + (2\pi t f_c) i\right] \quad (4)$$

式中: f_b 为小波带宽; f_c 为小波中心频率; i 为虚数符号。

2.2.5 其他方法

本文还采用气候倾向率计算各气象因子的多年变化速率,并借助 Mann-Kendall 趋势检验对各因子的变化趋势进行显著性检验^[34-35]。

3 结果与分析

3.1 拉萨河流域气象因子及 ET_0 的变化特征

计算两个气象站的平均、最低和最高气温,风速,相对湿度,日照时数及 ET_0 的多年日平均并绘制对应的曲线,见图 1。

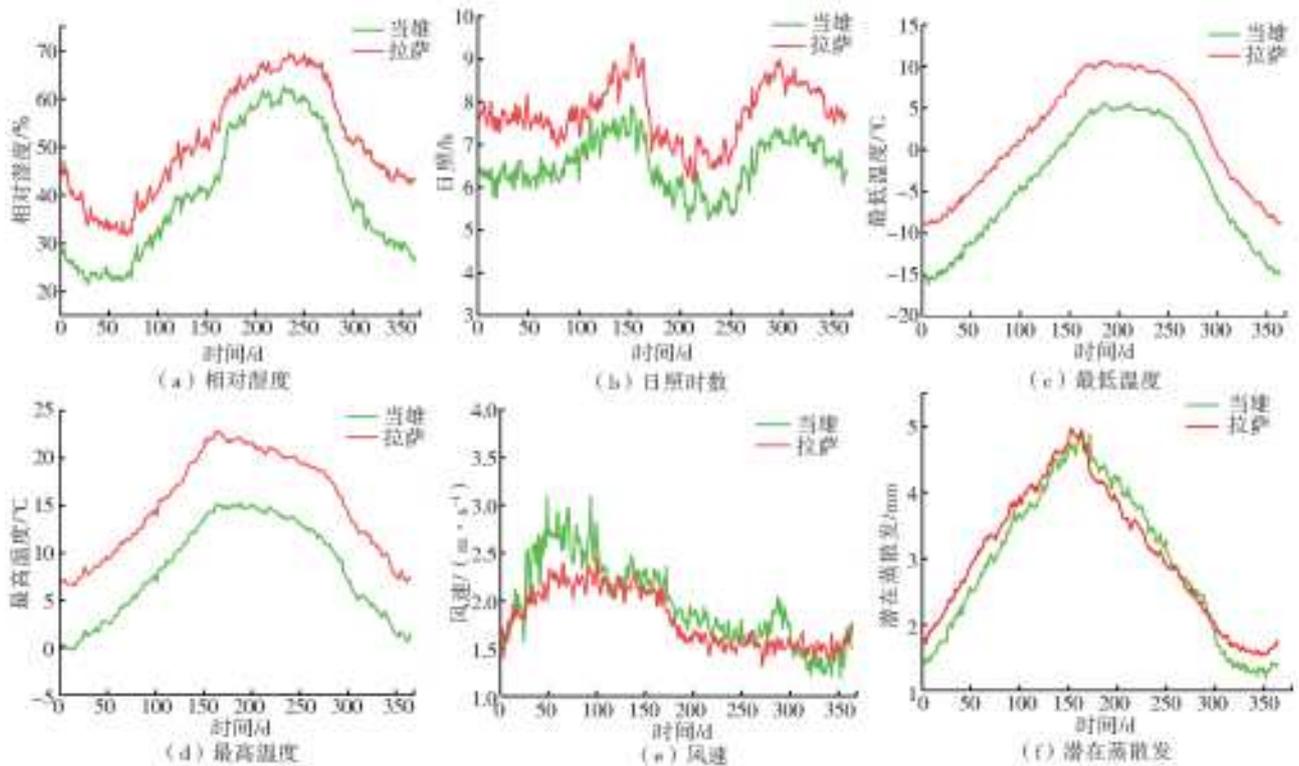


图 1 拉萨河流域的气象因子及 ET_0 年内逐日变化

Fig. 1 Mean daily variation of meteorological factors and ET_0 in Lhasa River basin

根据图 1 的曲线可以看出拉萨河流域的最高温度、最低温度、相对湿度的变化均呈现单峰型变化,其空间变化表现为拉萨大于当雄;最高温度的峰值出现在 6 月,谷值出现在 1 月,最低温度的峰值出现在 8 月,谷值出现在 1 月;相对湿度的峰值出现在 8、9 月,谷值出现在 2 月;最高温度、最低温度、相对湿度拉萨和当雄两个站点之间的差异较小,且变化规律一致;平均风速的年内波动明显,呈现正弦曲线变化,最大值出现在 2、3 月,最小值出现在 1 月,空间上表现为拉萨<当雄;日照时数年内变化明显,两个站点均呈现双峰型变化,峰值出现在 5 月和 10 月,谷值出现在 8 月,空间上表现为拉萨>当雄; ET_0 的变化也呈现双峰型变化峰值出现在 6、8 月。

对气象因子 ET_0 进行变化趋势分析及显著性检验,两个站点的气象因子变化趋势整体一致(表 2)。拉萨站点最高温度 1963 年以来有上升趋势,气候倾向率为每 10 年 0.32 °C;当雄站点 1956 年以来

也有上升趋势,气候倾向率为每 10 年 0.43 °C。两个站点都通过了 $\alpha=0.05$ 置信水平检验。拉萨站点和当雄站点的最低温度均呈现上升趋势,气候倾向率分别为每 10 年 0.61 °C 和每 10 年 0.44 °C,均通过了 $\alpha=0.05$ 置信水平检验。拉萨站点和当雄站点相对湿度趋势一致且均为下降趋势:拉萨站点下降幅度显著,且通过 $\alpha=0.05$ 置信水平检验,当雄站点变化不显著,气候倾向率分别为每 10 年 -0.21% 和每 10 年 -1.38%。两个站点的风速都在减小但拉萨站点变化显著,通过了 $\alpha=0.05$ 置信水平检验,当雄站点变化不显著,气候倾向率拉萨为每 10 年 -0.01 m/s,当雄为每 10 年 -0.02 m/s。拉萨和当雄的日照时数均呈现下降趋势且二者变化均不显著,气候倾向率分别为每 10 年 -0.02 h 和每 10 年 -0.01 h。拉萨和当雄的 ET_0 变化趋势一致,都表现出增长趋势,但是二者变化并不显著,未通过检验,拉萨的气候倾向率为每 10 年 0.02 mm,当雄的气候倾向率为每 10 年 0.04 mm。

表 2 拉萨河流域气象因子及 ET_0 的气候倾向率

Tab. 2 Trends of meteorological factors and ET_0 of in the Lhasa River basin

站点	最高温度/°C	最低温度/°C	相对湿度/%	风速/($m \cdot s^{-1}$)	日照时数/h	ET_0 /mm
拉萨	0.32	0.61	-0.21	-0.01	-0.02	0.02
当雄	0.41	0.44	-1.34	-0.02	-0.01	0.04

3.2 ET_0 周期特征分析

图 2 为流域的小波交换系数实部等值线图,反映了 ET_0 的周期变化特征,横轴为时间(年份),纵轴为时间尺度。图中的“H”“L”分别代表了正负值中心,实线表示 ET_0 的值偏高,虚线表示 ET_0 的值偏低。等值线的疏密程度反映了信号振荡的强弱,等值线越稀疏表示 ET_0 较常年偏低。

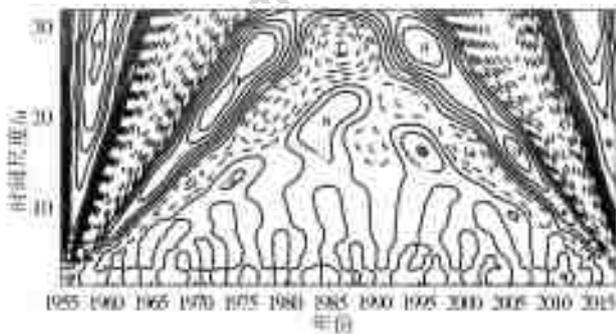


图 2 复 Morlet 小波系数实部图

Fig. 2 The real part of Morlet complex wavelet coefficient

通过图 2 可以发现拉萨河流域 ET_0 有着多个尺度振荡周期和突变特征,25~30 a 较大尺度的周期振荡明显,多年来经历了 7 次循环交替变化。 ET_0 在 1963 年之前、1972—1981 年、1993—2000 年、

2011 年之后偏大,其余时间 ET_0 偏小。等值线图在 2011 年之后并未形成闭合,说明 ET_0 在未来的一段时间内可能会持续增大。此外,振荡的中心比 2011 年之前的时期低,说明流域的 ET_0 近几年的变化与以往时期有所差异。25~30 a 较大尺度和 17~22 a 中尺度 ET_0 的变化存在升高—降低交替变化,中尺度的等值线比较稀疏,小尺度的周期特征不明显。

3.3 潜在蒸散发的敏感性分析

根据图 3 的最高温度、最低温度、日照时数、湿度、风速等 5 个气象因子的敏感系数的变化情况进行相关分析。当雄和拉萨两个地方的 ET_0 对日照时数的敏感度均达到高等以上,拉萨的日照时数敏感系数(S_{SD})为 0.07~0.33,当雄的 S_{SD} 为 0.1~0.27, ET_0 随着日照时数的增大而增大说明 ET_0 与日照时数的变化呈现正相关。 S_{SD} 的峰值出现在 6 月份;最低温度敏感系数(S_{TL})的变化幅度较小,呈现正弦曲线变化,敏感程度可以忽略不计,拉萨和当雄的 S_{TL} 为 -0.009~0.08、0.02~0.07,拉萨和当雄的 S_{TL} 最大值出现在 6 月份;拉萨的最高温度敏感系数(S_{TH}),为 0.26~0.52,当雄的 S_{TH} 为 0.12~

0.51,两个站点的 ET_0 对最高温度的敏感度均达到了高等以上并且随着最高温度的增大而增大峰值出现在6月份;当雄和拉萨的 ET_0 与湿度呈现的均是负相关,当雄的 ET_0 对湿度的敏感度达到了高等,拉萨的 ET_0 对湿度的敏感度达到了中等,二者的敏感系数(S_{RH})分别为当雄 $-0.42\sim 0.09$,拉萨 $-0.27\sim$

0.07 ; ET_0 对风速的敏感系数为(S_{AW})拉萨 $0.12\sim 0.41$,当雄 $0.07\sim 0.33$,表明 ET_0 随着风速的增大而增大且变化趋势基本一致, S_{AW} 的最小值出现在7月,最大值出现在11月。从两个站点的 ET_0 对气象要素的敏感系数变化幅度来看, S_{TH} 、 S_{SD} 、 S_{AW} 的敏感系数是拉萨 $>$ 当雄,而当雄的 S_{TL} 、 S_{RH} 均大于拉萨。

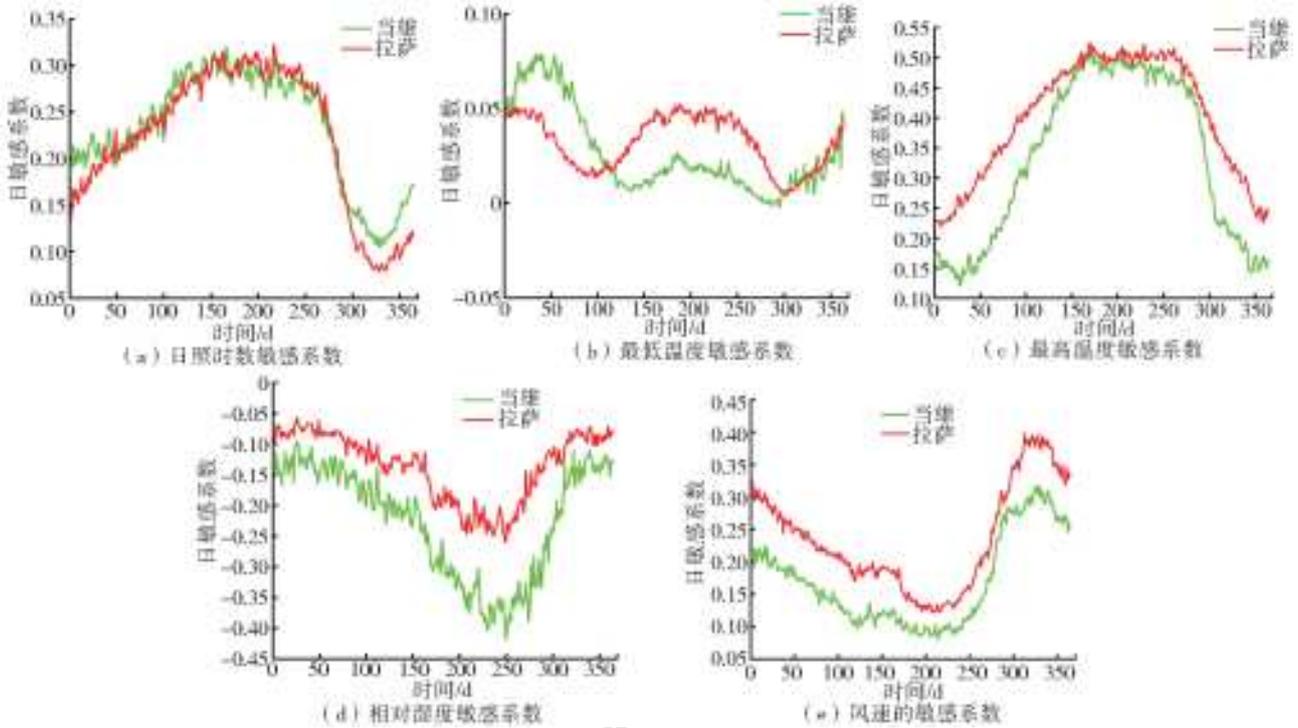


图3 拉萨河流域气象因子敏感系数年内逐日变化

Fig. 3 Mean daily variation of sensitivity coefficients to meteorological factors in Lhasa River basin

3.4 贡献率分析

通过表3的数据可以看出,拉萨站的最高温度对 ET_0 贡献率最高,其值达到了50.51%,最低温度的贡献率相对次之为42.14%,湿度、日照时数及风速对 ET_0 为负贡献。虽然日照时数和湿度的敏感度都处于“高”,但湿度和日照时数的年际变化幅度小使得湿度和日照时数对 ET_0 的贡献率都较低。尽管最低温度的敏感程度几乎忽略不计,但由于最低温度的年际变化幅度大, ET_0 随着最低温度的增大而增大。当雄

站的日照时数、风速及最低温度对 ET_0 都是负贡献。对当雄站来说,最高温度对 ET_0 的贡献率最为显著,湿度的贡献率略大于最低温度的贡献。湿度和最高温度的敏感系数均处于“高”敏感度范围内,二者的年际变化幅度也较高,所以贡献率都较高。尽管日照时数的敏感系数在5个气象因子中处于较高的程度,但由于其年际变化幅度过低,所以贡献率小。同样地,虽然最低温度的敏感系数是5个气象因子中最低的,但其年际变化幅度较大,所以贡献率较高。

表3 气象因子的贡献率、敏感系数及变化率

Tab. 3 Sensitivity coefficient, rate of change and contribution rate of meteorological factors

地区	最高温度			最低温度			湿度			日照时数			风速		
	Con	S	Rc	Con	S	Rc	Con	S	Rc	Con	S	Rc	Con	S	Rc
拉萨	50.51	0.40	1.34	42.14	0.02	22.85	4.35	-0.14	-0.33	-3.53	0.23	-0.15	-7.94	0.24	-0.33
当雄	69.3	0.33	2.31	15.45	0.03	5.15	31.97	-0.23	-1.46	-1.56	0.22	-0.07	-8.16	0.17	-0.48

ET_0 的变化受气象因子的敏感性和各因子的变化幅度共同影响。因此,考虑气象因子的敏感性及其变化程度,能定量分析 ET_0 与各因子变化的之间响应关系^[36]。 ET_0 空间分布具有差异性^[37-38],

两个站点的气象因子的贡献率不同可能与处于不同的地貌单元有关。这与钟巧等^[39]在博斯腾湖流域得到的不同地貌单元下气象因子的贡献率不同结论一致。本文气象因子的敏感性是利用气象数据进

行的相关分析,在之后的研究中可以采用遥感数据进一步详细地探讨不同地貌单元对气象因子敏感性的影响。

4 结 语

对比拉萨站点和当雄站点的气象因子以及 ET_0 的变化规律,对气象因子敏感性的变化规律进行相关分析,得出以下结论。

(1)最高温度、最低温度以及相对湿度的年内日平均的变化为单峰型变化,风速接近正弦曲线变化,日照时数和 ET_0 的变化曲线均是双峰型曲线。

(2)两个站点的最低温度和最高温度均呈现上升趋势且变化趋势显著, ET_0 也表现出上升趋势但趋势不明显,相对湿度、日照时数及平均风速都表现出下降的趋势。

(3)气象因子的敏感系数年内变幅为 $|S_{RH}| > |S_{TH}| > |S_{AW}| > |S_{SD}| > |S_{TL}|$,其中 S_{TL} 、 S_{TH} 、 S_{SD} 、 S_{AW} 均为正值而 S_{RH} 为负值。

(4)流域的 ET_0 在 25~30 a 尺度上周期振荡明显,出现了 7 次循环交替。1963 年之前、1972—1981 年、1993—2000 年、2011 年之后的蒸散发量偏大,其余时间蒸散发量偏小,2011 年之后蒸散发量有增加的趋势。

参考文献:

[1] GONG L, XU C, CHEN D, et al. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 329(3): 620-629. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2006. 03. 027.

[2] 高歌, 陈德亮, 任国玉, 等. 1956—2000 年中国潜在蒸散发量变化趋势[J]. *地理研究*, 2006(3): 378-387. DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-0585. 2006. 03. 002.

[3] ZHANG S H, LIU S X, MO X G, et al. Assessing the impact of climate change on potential evapotranspiration in Aksu River basin[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(4): 609-620. DOI: 10. 1007/s11442-011-0867-0.

[4] 宁婷婷, 刘文兆, 林文, 等. 近 56 年来内蒙古东胜矿区潜在蒸散发的时程变化[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 62-66, 82. DOI: 10. 13870/j. cnki. stbcb. 2014. 03. 012.

[5] 左德鹏, 徐宗学, 李景玉, 等. 气候变化情景下渭河流域潜在蒸散发量时空变化特征[J]. *水科学进展*, 2011, 22(4): 455-461. DOI: 10. 13099. P. 20110709. 1619. 009.

[6] YIN Y H, WU S H, DAI E F. Determining factors in potential evapotranspiration changes over China in the

period 1971-2008[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(29): 3329-3337. DOI: 10. 1007/s11434-010-3289-y.

[7] 董煜, 陈学刚. 新疆参考作物蒸散量敏感性分析[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(8): 82-86. DOI: 10. 13522/j. cnki. ggps. 2015. 08. 016.

[8] 赵娜, 王治国, 张复明, 等. 海河流域潜在蒸散发估算方法及其时空变化特征[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(16): 11-16, 65. DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2017. 06. 002.

[9] 谢虹. 青藏高原蒸散发对其气候变化的响应(1970-2010)[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.

[10] RODERICK M L, FARQUHAR G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years[J]. *Science*, 298. DOI: 10. 1126/science. 1075390-a.

[11] DINPASHOH Y, JHAJHARIA D, FAKHERI-FARD A, et al. Trends in reference crop evapotranspiration over Iran[J]. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 2011, 399(3): 422-433. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2011. 01. 021.

[12] LIMJIRAKAN S, LIMSAKUL A. Trends in Thailand pan evaporation from 1970 to 2007[J]. *Atmospheric Research*, 2012, 108(none): 0-127. DOI: 10. 1016/j. atmosres. 2012. 01. 010.

[13] 白桦, 鲁向晖, 杨筱筱, 等. 基于彭曼公式日均值时序分析的中国蒸发能力动态成因[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(1): 235-244. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 01. 026.

[14] 刘昌明, 张丹. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析[J]. *地理学报*, 2011, 66(5): 579-588. DOI: 10. 11821/xb201105001.

[15] 李斌, 李丽娟, 覃馥楚, 等. 澜沧江流域潜在蒸散发敏感性分析[J]. *资源科学*, 2011, 33(7): 1256-1263.

[16] 刘胜娅, 王会肖, 王艳阳, 等. 北京市潜在蒸散发量的时间序列变化特征分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(4): 13-16. DOI: 10. 3724/SP. J. 1201. 2013. 04013.

[17] 杨林山, 李常斌, 王帅兵, 等. 洮河流域潜在蒸散发的气候敏感性分析[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(11): 102-109. DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-6819. 2014. 11. 013.

[18] 张永生, 陈喜, 高满, 等. 不同气候区潜在蒸散发全局敏感性分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(2): 137-144. DOI: 10. 3876/j. issn. 1000-1980. 2017. 02. 007.

[19] 安彬, 肖薇薇. 陕西省潜在蒸散发的敏感性及其变化成因分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(4): 90-97, 113. DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2018. 0101.

[20] 郭金路, 谷健, 扬筑筑. 辽西地区潜在蒸散发敏感性分析及变化成因研究[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(1):

- 121-128. DOI:10.13522/j.cnki.ggps.2016.0225.
- [21] 曹永强,刘明阳,李元菲,等.不同潜在蒸散发估算方法在辽宁省的适用性分析[J].资源科学,2019,41(10):1780-1790. DOI:10.18402/resci.2019.10.02.
- [22] 史海匀,傅旭东,王远见,等.拉萨河流域蒸发力估算:改进道尔顿模型[J].应用基础与工程科学学报,2012,20(2):219-227. DOI:10.3969/j.issn.1005-0930.2012.02.006.
- [23] 韩王亚,张超,曾源,等.2000—2015年拉萨河流域NPP时空变化及驱动因子[J].生态学报,2018,38(24):8787-8798. DOI:10.5846/stxb201806021233.
- [24] 包小婷,丁陆彬,姚帅臣,等.拉萨河流域植物群落数量分类与排序[J].生态学报,2019,39(3):26-33. DOI:105846/stxb201808021646.
- [25] PIRKNER M, DICKEN U, TANNY J. Penman-Monteith approaches for estimating crop evapotranspiration in screen houses: a case study with table-grape[J]. International Journal of Biometeorology, 2014, 58(5): 725-737. DOI: 10.1007/s00484-013-0653-z.
- [26] 邹磊,夏军,马细霞,等.潜在蒸散发量估算方法在河南省的适用性分析[J].水文,2014,34(3):17-23. DOI:10.3969/j.issn.1000-0852.2014.03.004.
- [27] MCCUEN R H. The role of sensitivity analysis in hydrologic modeling[J]. Journal of Hydrology, 1973(18):37-53.
- [28] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56[R]. FAO, Rome, 1998, 300: 6541.
- [29] 谢平,龙怀玉,张杨珠,等.云南省四季潜在蒸散发时空演变的主导气象因子分析[J].水土保持研究,2017,24(2):184-193. DOI:10.13869/j.Cnki.Rswc.2017.02.032.
- [30] 费佩燕,刘曙光.几种常见小波的应用性能分析[C]//中国电子学会第七届学术年会论文集.北京:中国电子学会,2001.
- [31] 王文圣,丁晶,向红莲.小波分析在水文学中的应用研究及展望[J].水科学进展,2002(4):515-520. DOI:10.3321/j.issn:1001-6791.2002.04.021.
- [32] 桑燕芳,王中根,刘昌明.小波分析方法在水文学研究中的应用现状及展望[J].地理科学进展,2013,32(9):1413-1422. DOI:10.11820/dlkxjz.2013.09.011.
- [33] 冯禹昊,朱江玲.基于Morlet小波的辽河径流量变化及其成因分析[J].水土保持研究,2019,26(2):208-215. DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2019.02.030.
- [34] YUE S, WANG C Y. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test[J]. Water Resources Research, 2002, 38(6): 4-1.
- [35] ZHENG H, ZHANG L, LIU C, et al. Changes in stream flow regime in headwater catchments of the Yellow River basin since the 1950s[J]. Hydrological Processes, 2007, 21. DOI:10.1002/hyp.6280.
- [36] 刘小莽,郑红星,刘昌明,等.海河流域潜在蒸散发的气候敏感性分析[J].资源科学,2009,31(9):1470-1476. DOI:10.1029/2007WR006665.
- [37] 刘洪敏.1957—2009年辽宁省气候变化趋势分析[D].兰州:西北师范大学,2011.
- [38] 王琼,张明军,潘淑坤,等.长江流域潜在蒸散发量时空变化特征[J].生态学杂志,2013,32(5):1292-1302. DOI:10.13292/j.1000-4890.2013.0233.
- [39] 钟巧,焦黎,李稚,等.博斯腾湖流域潜在蒸散发时空演变及归因分析[J].干旱区地理,2019,42(1):105-114. DOI:10.12118/j.issn.1000-6060.2019.01.12.