

雅鲁藏布江流域潜在蒸散发的气候敏感性及其变化的主导因子分析

段娅楠^{1,5}, 季漩^{2,3}, 郭若愚^{2,3}, 王静⁴, 白央⁴

(1.云南大学 资源环境与地球科学学院, 昆明 650500; 2.云南大学 国际河流与生态安全研究院,

昆明 650500; 3.云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室, 昆明 650091;

4.西藏自治区水文水资源勘测局, 拉萨 850000; 5.四川大学 建筑与环境学院, 成都 610065)

摘 要:潜在蒸散发敏感性分析是研究水资源对气候变化响应的基础内容之一。基于气象站点的观测资料,应用 Penman-Monteith 公式计算雅鲁藏布江流域 1961—2012 年逐日的潜在蒸散发,并分析其时空分布特征;在此基础上,分析潜在蒸散发对 4 个气象因子(平均气温、风速、太阳辐射、相对湿度)的敏感程度及各气象因子的贡献率,识别出雅鲁藏布江流域潜在蒸散发的敏感因子和主导因子。结果表明:(1) 1961—2012 年,雅鲁藏布江流域的潜在蒸散发呈现显著增加趋势,增幅为 8.81 mm/10 a;年潜在蒸散发空间分布表现为中游河谷地区高于其他地区;(2) 对于雅鲁藏布江流域大部分区域,潜在蒸散发量对气候因子的敏感性排序为:太阳辐射>平均气温>相对湿度>风速,各气象因子的贡献率从高到低为:平均气温>风速>相对湿度>太阳辐射。总体而言,雅鲁藏布江流域潜在蒸散发对太阳辐射最为敏感,而平均气温是 1961—2012 年间潜在蒸散发变化的主导因子。

关键词:潜在蒸散发; Penman-Monteith; 主导因子; 雅鲁藏布江流域; 国际河流

中图分类号:P426.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)02-0261-08

Analysis on the Sensitivity and Dominant Meteorological Factors Identification of Potential Evapotranspiration Variation in Yarlung Zangbo River Basin

DUAN Yanan^{1,5}, JI Xuan^{2,3}, GUO Ruoyu^{2,3}, WANG Jing⁴, BAI Yang⁴

(1.School of Resources, Environment and Earth Science, Yunnan University, Kunming 650500,

China; 2.Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming 650500, China;

3.Yunnan Key Laboratory of International Rivers and Transboundary Eco-Security, Kunming 650091,

China; 4.Hydrology and Water Resources Survey Bureau of the Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000,

China; 5.College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Analysis on the sensitivity of potential evapotranspiration is one of the basic research topics of water cycle responds to climate change. Based on the ground meteorological data in the Yarlung Zangbo River Basin, we calculated the daily potential evapotranspiration from 1961 to 2012 by using the Penman-Monteith formula, and analyzed its temporal and spatial distribution characteristics. On these bases, the sensitivity of potential evapotranspiration to four meteorological factors (average temperature, wind speed, solar radiation, and relative humidity) and the contribution rate of each meteorological factor to the variation of potential evapotranspiration were also calculated, and then the more sensitive factor and the dominant factor were identified. The results showed that: (1) from 1961 to 2012, the potential evapotranspiration in the Yarlung Zangbo River Basin presented the significantly increasing trend with an increase of 8.81 mm/decade; the annual potential evapotranspiration had obvious spatial distribution characteristics that was higher in mid-stream valley than in other regions; (2) with respect to most regions of the Yarlung Zangbo River Basin, the poten-

收稿日期:2019-05-24

修回日期:2019-09-24

资助项目:国家自然科学基金“雅鲁藏布江—布拉马普特拉河跨境流域水资源脆弱性与水安全调控研究”(41661144044);国家自然科学基金“怒江上游流域冰雪融水—径流过程及影响机制研究”(41561003)

第一作者:段娅楠(1996—),女,云南普洱人,硕士研究生,研究方向为自然地理学研究。E-mail:duan.yn@qq.com

通信作者:季漩(1984—),男,陕西西安人,博士,主要从事气候变化与水文水资源研究。E-mail:jixuan@ynu.edu.cn

tial evapotranspiration was more sensitive to solar radiation, and followed by average temperature, relative humidity, wind speed; and the contribution rate of each meteorological factor decreased in the order: average temperature > wind speed > relative humidity > solar radiation. In general, the average temperature was the leading factor responsible for the change of the potential evapotranspiration in the Yarlung Zangbo River Basin between 1961 and 2012.

Keywords: potential evapotranspiration; Penman-Monteith; dominant meteorological factor; Yarlung Zangbo River Basin; international river

潜在蒸散发(ET_0)是假设充分供水情况下的最大实际蒸散量,可反映区域的蒸发能力^[1],也称为可能蒸散量或参考作物蒸散量^[2]。 ET_0 的气候敏感性分析有助于探究气象因子的变化对 ET_0 的影响机制,进而理解气象因子与水循环的关系。

为了深入分析 ET_0 与气象因子之间的关系,近年来许多学者使用敏感系数^[3-6]、贡献率^[4-6]和数理统计^[7]等多种方法将其由定性转为定量研究。Yin 等在 ET_0 敏感性分析的基础上,进一步提出气象因子的贡献率计算方式,即气象因子多年相对变化率与 ET_0 对气象因子的敏感系数相乘^[8];该方法考虑了气象因子本身的变化,能更准确地定量表示气象因子对 ET_0 变化的影响,为 ET_0 变化的主导因子识别提供了支撑,并得到了广泛的应用。

大量的研究表明, ET_0 对气象因子的敏感性和气象因子对 ET_0 的贡献率在不同时间尺度及空间分布上具有差异。时间尺度上, ET_0 敏感因子和主导因子可能有季节性及其不一致性。如谢平等发现云南省 ET_0 的主导因子具有阶段性和季节性,敏感系数与贡献率也并非完全一致^[9];陕西省^[10]、鲁中地区^[5]在部分季、月尺度下 ET_0 变化的主导因子与年尺度下的主导因子不同。空间上, ET_0 敏感因子和主导因子尚无明确的分布规律。如敏感因子的研究表明其在海河流域^[11]和北方农牧交错带^[4]等区域是相对湿度,在西南诸河流域^[1]是太阳辐射,在云南省^[12]是气温,也有区域是风速^[6]、日照时数^[13]等因子的情况;而主导因子的研究显示其在海河流域^[11]等是风速和日照时数,在毛乌素沙漠^[6]是气温,各区域情况因地而异。

雅鲁藏布江是亚洲重要的国际河流,研究流域 ET_0 的气候敏感性及其变化的主导因子有助于深入了解气候变化对流域水循环的影响,进而为流域资源配置和农业灌溉等实际应用提供一定参考。杨志刚等分析了雅鲁藏布江流域 ET_0 的变化特征^[2]。唐小萍等根据雅鲁藏布江中游地区 4 个气象站的资料,分析了 ET_0 的时空特征并用多元回归法定量了各气象因子对 ET_0 的影响,发现中游地区 ET_0 自西向东递增的空间分布规律,风速

和气温的变化是影响 ET_0 的重要因子^[14]。

由于不同气候环境、不同时空尺度下识别出的敏感因子和主导因子存在差异,因此对区域内 ET_0 进行多角度深入的研究是必不可少的。本文基于 1961—2012 年雅鲁藏布江流域及周边共 32 个气象站的气象数据,用 Penman-Monteith 方法计算 ET_0 ,并从全流域的角度出发分析雅鲁藏布江流域 ET_0 的时空分布特征;分析潜在蒸散发与气候因子的关系,判识 ET_0 的敏感因子和主导因子。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

雅鲁藏布江是世界上海拔最高的大河,发源于杰马央宗冰川,自西向东横贯西藏南部,绕过喜马拉雅山脉东端的南迦巴瓦峰后转向南流,在中国的巴昔卡附近出境后称为布拉马普特拉河,流经印度和孟加拉国^[15],最终在孟加拉湾汇入印度洋。流域海拔高度绝大部分在 3 000 m 以上,流域内气候区涵盖了湿润地区、半干旱半湿润地区、干旱地区^[16]。本文的研究区为雅鲁藏布江—布拉马普特拉河流域的中国境内部分,位置如图 1 所示。

雅鲁藏布江是我国水能资源最丰富的河流之一,年平均流量为 4 425 m³/s,年径流量为 1 359 亿 m³,天然水能蕴藏量十分丰富,约 1 亿 kW 左右,约占中国水能蕴藏总量的 1/6,仅次于长江^[17]。雅鲁藏布江流域内分布着西藏自治区主要区县和城市,流域内人口达到西藏自治区总人口的 50.7%^[15]。雅鲁藏布江也是亚洲重要的国际大河,其流域水资源问题一直是中国、印度、孟加拉三国关注的焦点。

1.2 数据获取与处理

本文共收集 1961—2012 年雅鲁藏布江流域及其周边区域 32 个气象站点(图 1)的逐日观测数据,包括平均气温、相对湿度、风速、日照时数等,来源于国家气象科学数据共享服务平台(<http://data.cma.cn/>)。因需要综合考虑区域总体情况,对于流域潜在蒸散发时空变化的分析,采用流域内 20 站点、流域周边 12 个站点的数据。

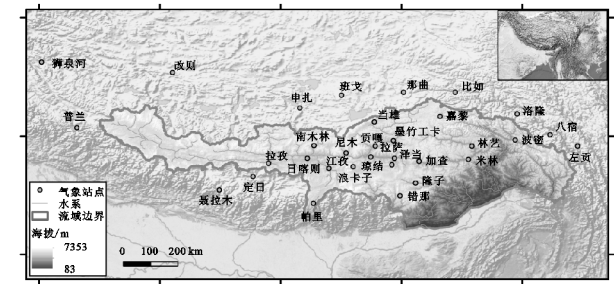


图 1 雅鲁藏布江流域及气象站点分布

表 1 气象站点及数据情况

站名	时间段	缺失时段	站名	时间段	缺失时段
当雄	1963.01—2012.12		波密	1961.01—2012.12	
拉孜	1978.01—2012.12		加查	1978.01—2012.12	
南木林	1979.01—2012.12		林芝	1961.01—2012.12	
日喀则	1961.01—2012.12		米林	1980.01—2012.12	
尼木	1974.01—2012.12		狮泉河	1961.01—2012.12	
贡嘎	1978.01—2012.12		改则	1973.01—2012.12	
拉萨	1961.01—2012.12	缺 1968.06—1968.10	班戈	1961.01—2012.12	缺 1965.04
墨竹工卡	1978.01—2012.12		那曲	1961.01—2012.12	
琼结	2006.01—2012.12		普兰	1973.01—2012.12	
泽当	1961.01—2012.12		申扎	1961.01—2012.12	
江孜	1961.01—2012.12		聂拉木	1967.01—2012.12	
浪卡子	1962.01—2012.12	缺 1969.11—1969.12	定日	1961.01—2012.12	缺 1968.11—1969.01;
错那	1967.01—2012.12		比如	1979.01—2012.12	1969.08—1970.09
隆子	1961.01—2012.12		洛隆	1979.01—2012.12	
帕里	1961.01—2012.12		八宿	1980.01—2012.12	
嘉黎	1961.01—2012.12		左贡	1978.01—2012.12	

1.3 研究方法

1.3.1 潜在蒸散发的计算 Penman-Monteith 方法^[18]综合了空气动力学等关键因素的影响,具有很好的物理基础,适宜不同气候类型的 ET₀ 计算^[19]。本文采用 Penman-Monteith 公式对雅鲁藏布江流域的 ET₀ 进行计算:

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

式中:ET₀ 为潜在蒸散发(mm/d)。Δ 为饱和水汽压曲线斜率(kPa/℃);R_n 为净辐射[MJ/(m²·d)];G 为土壤热通量[MJ/(m²·d)],其在一天中变化幅度很小,可忽略;γ 为干湿常数(kPa/℃);T_{mean} 为平均气温(℃);U₂ 为 2 m 高处的风速(m/s),可据公式 U₂ = 4.87U_z/ln(67.8z - 5.42) ≈ 0.748U₁₀ 由 10 m 高处 的风速转换;e_s 为平均饱和水汽压(kPa);e_a 为实际水汽压(kPa)。各参量计算公式如下:

$$R_n = (1 - \alpha) R_s - \left(\frac{1.35 R_s}{R_{s0}} - 0.35 \right) \times (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \sigma \frac{(T_{max}^4 + T_{min}^4)}{2}$$
$$e_s = 0.6108 \exp \left(\frac{a T_{mean}}{T_{mean} + b} \right)$$

由于收集到的各气象站点数据起始年份略有不同(详见表 1),其中 9 个站点于 1961 年开始,在保证足够长的时间序列及不影响结果的情况下,本文研究期设为 1961 年 1 月 1 日至 2012 年 12 月 31 日,其余站点从数据的起始年份进行研究。对少数站点缺失的个别日数据,连续缺失序列 ≤ 3 日采用相邻日均值线性插值替换,连续缺失序列 > 3 日采用相邻年份同日数据替换。

站名	时间段	缺失时段
波密	1961.01—2012.12	
加查	1978.01—2012.12	
林芝	1961.01—2012.12	
米林	1980.01—2012.12	
狮泉河	1961.01—2012.12	
改则	1973.01—2012.12	
班戈	1961.01—2012.12	缺 1965.04
那曲	1961.01—2012.12	
普兰	1973.01—2012.12	
申扎	1961.01—2012.12	
聂拉木	1967.01—2012.12	
定日	1961.01—2012.12	缺 1968.11—1969.01;
比如	1979.01—2012.12	1969.08—1970.09
洛隆	1979.01—2012.12	
八宿	1980.01—2012.12	
左贡	1978.01—2012.12	

式中:R_n 为净辐射[MJ/(m²·d)];α 为地表反照率,取经 验值 0.23;R_s 为太阳辐射[MJ/(m²·d)],采用天文太阳 辐射公式计算;R_{s0} 为晴空辐射[MJ/(m²·d)];σ 为 Stefan-Boltzmann 系数,4.903 × 10⁻⁹ MJ/(K⁴·d); T_{max}⁴, T_{min}⁴ 分别为 24 h 内的最高和最低绝对温度,详见 文献^[18]。当 T_{mean} ≥ 0℃ 时, a = 17.27, b = 237.3℃; 当 T_{mean} < 0℃ 时, a = 21.88, b = 265.5℃。RH 为相对 湿度(%)。c_p 表示在固定大气压下湿润空气的比热, 为 1.013 × 10⁻³ MJ/(kg·℃);P 为大气压(kPa),详 见文献^[18];ε 表示水蒸汽和干空气的分子重量比,为 0.622;λ 为蒸发潜热(MJ/kg),可据公式 λ = 2.501 - 2.361 × 10⁻³ T_{mean} 计算。

1.3.2 敏感系数 敏感系数能够定量说明敏感程 度,且其无量纲有利于各气象因子敏感系数之间的比 较^[3,9]。敏感系数为正(负)表明 ET₀ 随该气象因子

的增大而增大(减小),敏感系数的绝对值大(小)则表明 ET_0 对该气象因子敏感程度高(低)。若某气象因子的敏感系数为 0.1 表示当其余气象因子不变时,该气象因子增加 10% 则 ET_0 增加 1%。敏感系数的偏导数计算公式如下^[3,9]:

$$S_x = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta ET_0 / ET_0}{\Delta x / x} \right) = \frac{\partial ET_0}{\partial x} \cdot \frac{|x|}{ET_0}$$

式中: ET_0 为潜在蒸散发 (mm/d); S_x 为潜在蒸散发关于气象因子 x 的敏感系数,无量纲。

Penman-Monteith 公式的偏导数繁琐复杂,因此,本文计算敏感系数的具体方法^[20]为:保持影响 Penman-Monteith 公式的其他气象因子不变,依次仅将风速(2 m 高度)、平均气温、太阳辐射、相对湿度中的 1 个气象因子发生改变,设定变化范围为 (−100%, 100%),变化幅度为 ±10%,求取每次变化后 $\frac{\Delta ET_0}{\Delta x}$

的平均值为系数,最后对该系数乘以 $\frac{|x|}{ET_0}$ 进行无量纲化,得到该气象因子的敏感系数 S_x 。可依据敏感系数的绝对值 ($|S_x|$) 按照 Lenhart 等^[21] 提出的等级划分敏感程度: $|S_x| \geq 1$ 则敏感程度非常高, $1 > |S_x| \geq 0.2$ 则敏感程度高, $0.2 > |S_x| \geq 0.05$ 则敏感程度中,若 $0.05 > |S_x|$ 则敏感程度可以忽略。

1.3.3 贡献率 将气象因子的敏感系数与该气象因子的多年相对变化率相乘,得到由该气象因子引起的 ET_0 的变化,即该要素对 ET_0 变化的贡献^[8,12]。贡献率为正(负)表明该因子引起 ET_0 的增加(减少),贡献率的绝对值大(小)则表明该气象因子对 ET_0 变化的影响大(小)。贡献率计算公式如下^[8,12]:

$$Con_x = S_x \cdot RC_x$$
$$RC_x = \frac{n \cdot b_x}{|V_x|} \times 100\%$$

式中: Con_x 表示气象因子 x 对 ET_0 变化的贡献率; S_x 表示 x 的敏感系数; RC_x 表示 x 的多年相对变化率; n 表示年数; V_x 表示相应时间段 n 年 x 的平均值。 b_x 表示相应研究时段气象因子 x 的倾向率,即

斜率,可通过最小二乘法计算得到。

2 结果与分析

2.1 流域潜在蒸散发时空变化特征

雅鲁藏布江流域年平均 ET_0 为 977.47 mm,最大值出现于 2009 年,为 1 050.92 mm,最小值出现于 1963 年,为 906.86 mm。如图 2 所示,1961—2012 年流域 ET_0 呈显著上升趋势 ($\alpha = 0.01$),增幅为 8.81 mm/10 a。对各站点多年平均 ET_0 进行反距离权重法插值如图 3A 所示,雅鲁藏布江流域的年均 ET_0 呈中游河谷地区高于上下游高海拔山区的空间分布特征。各站点年均 ET_0 为 664~1 309 mm,高值集中于流域中部的拉孜、泽当、琼结、墨竹工卡、拉萨、江孜和尼木等站点, ET_0 多为 1 000 mm 以上;东、南部错那、波密、米林和林芝等站点的 ET_0 均在 900 mm 以下。

区域内 ET_0 增加速率最大的为定日站,平均每 10 a 增加约 15.3 mm,并通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验,降低速率最大的为南木林站,平均每 10 a 降低 40.8 mm,并通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验(琼结站下降速率为 72.4 mm/10 a,因数据序列较短且趋势不显著,未采纳)。线性拟合各站点 ET_0 变化的趋势,并进行反距离权重法插值,根据图 3B 可以看出,流域内部 20 个站点,有 11 个站点表现为增加趋势,另 9 个站点表现为减少趋势;并且又各有 4 个站点的变化趋势显著。总体上,流域平均 ET_0 呈显著增加趋势,但是流域中部年年 ET_0 较高的区域有降低的趋势。

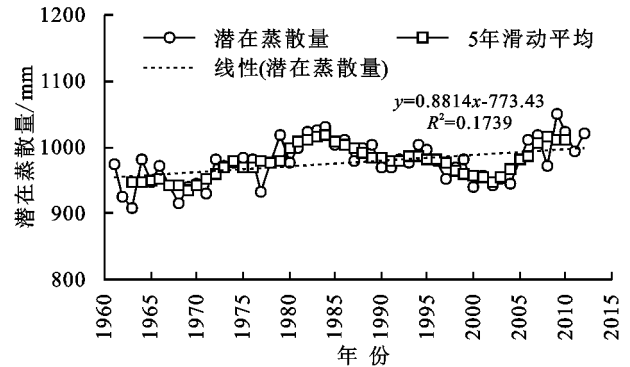


图 2 雅鲁藏布江流域的年潜在蒸散发变化趋势

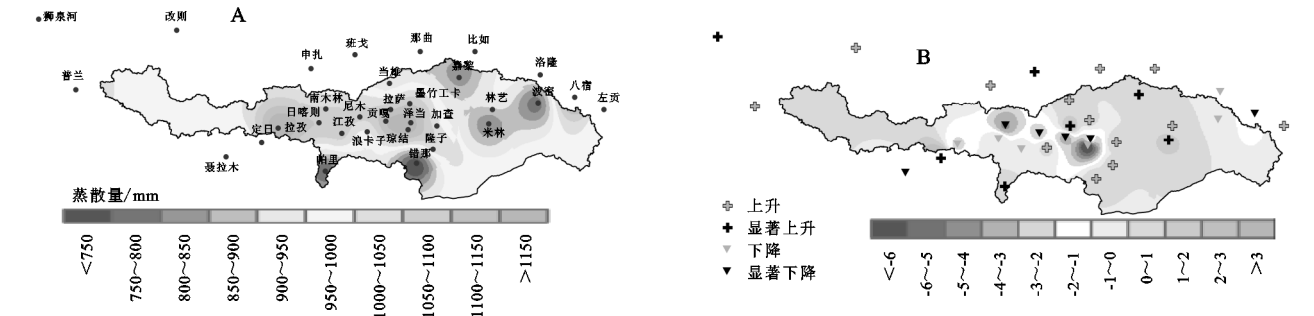


图 3 雅鲁藏布江流域年均 ET_0 空间分布(A)和变化趋势(B)

2.2 流域潜在蒸散发的敏感性

2.2.1 敏感系数的年内与年际变化 雅鲁藏布江流域 ET_0 对气象因子的敏感系数年内变化如图 4 所示。可以看出, S_{SR} (太阳辐射的敏感系数)、 S_{AT} (平均气温的敏感系数) 和 S_{WS} (风速的敏感系数) 在 12 个月份均为正数, 表明 ET_0 随这 3 个因子的增大而增大; 其中, S_{SR} 和 S_{AT} 具有比较明显的季节变化, 这可能是由于潜在蒸散发的年内分布不平衡的程度远大于太阳辐射或平均气温年内分布的不平衡, 例如雅鲁藏布江流域夏季潜在蒸散发量高于冬季, 太阳辐射和平均气温也表现为夏季高于冬季, 但是太阳辐射或平均气温增减相同的量, 在夏季导致潜在蒸散发的变化也要大于冬季; S_{WS} 在各月份都较低并且年内变化很小, 这说明平均风速的年内变化对于 ET_0 的年内分布差异影响很小; S_{RH} (相对湿度的敏感系数) 为负值, 表明 ET_0 随相对湿度的增大而减小, 取值 $-0.285 \sim -0.162$, 年内变化也并不显著, 即相对湿度在不同季节的变化对潜在蒸散发的影响也较小。

按照敏感程度等级, ET_0 对太阳辐射在各月份都属于高度敏感; 对平均气温除 2 月、3 月、11 月为中度敏感以外, 其余月份都属于高度敏感; 对风速的敏感程度几乎可以忽略; 尽管对相对湿度为负敏感, 但敏感程度除冬季为中度敏感外, 其他月份都是高度敏感。综合来看, ET_0 的敏感性与气象因子年内变化存在不同程度的响应, 但 ET_0 对 4 个气象因子的敏感程度相对大小并没有随着季节变化而改变, 即一致为: 太阳辐射 > 平均气温 > 相对湿度 > 平均风速。

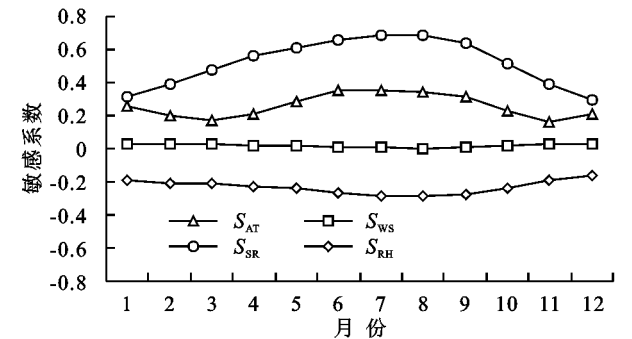


图 4 敏感系数月尺度变化趋势

对于年际变化, 见表 2, ET_0 对气象因子敏感性的逐年变化趋势都通过了 $\alpha = 0.01$ 的 Mann-Kendall 显著性检验。其中对平均气温的敏感性正逐年减弱, 变化率为 $-0.002/10\text{ a}$; 对风速、太阳辐射的敏感程度呈上升趋势, 变化率分别为 $0.002/10\text{ a}$ 和 $0.004/10\text{ a}$ 。 ET_0 对相对湿度负敏感, 因此其敏感系数的增加 ($0.015/10\text{ a}$) 意味着敏感程度 (即敏感系数绝对值) 的降低。总体而言, ET_0 对气象因子敏感性的变化幅度均较小, 52 a 间变化不大。 ET_0 对 4 个气象因子

的敏感性相对大小规律与年内特征一致, 最敏感的是太阳辐射, 最不敏感的是风速。

2.2.2 敏感系数的空间分布 雅鲁藏布江流域 ET_0 对各气象要素敏感系数空间分布如图 5 所示, 敏感系数大小与空间分布都存在较大的差异。流域内风速敏感系数取值在 $-0.008 \sim 0.167$ 之间变化, 整体上自西向东降低 (图 5A), 拉孜、日喀则和南木林 3 个站点的 S_{WS} 明显大于其他站点, 以浪卡子站和尼木站为界开始及以东地区, 对风速的敏感程度低于其以西地区。相对湿度的敏感系数全部为负值, 在 $-0.646 \sim -0.054$ 间变化, 但敏感程度整体上表现为流域中部低于上、下游区域 (图 5B), 如位于流域中南部地区的错那、帕里和隆子等和波密、林芝和米林等东部地区的 ET_0 对相对湿度的敏感程度大于其余地区。平均气温的敏感系数 S_{AT} 具有明显的分布特征 (图 5C), 除流域上游拉孜以上区域敏感系数较小外, 大部分区域都为正值, 变化范围为 $-0.084 \sim 0.295$ 。太阳辐射的敏感系数都为正值, 取值 $0.409 \sim 0.573$, 整体上自西向东增加 (图 5D), 但在流域中部的琼结出现一个低值区, 由于琼结站数据时间序列较短, 因此具有不确定性。就 ET_0 对气象因子的敏感程度而言, 雅鲁藏布江流域内, 除错那站的最敏感因子为相对湿度外, 其余站点最敏感因子都是太阳辐射。

表 2 气象因子敏感系数年际变化趋势

项目	平均气温	风速	太阳辐射	相对湿度
最大值	0.279	0.031	0.547	-0.158
最小值	0.242	0.008	0.486	-0.303
平均	0.257	0.019	0.518	-0.235
幅度	-0.002/10 a	0.002/10 a	0.004/10 a	0.015/10 a
趋势	下降**	上升**	上升**	上升**

注: ** 表示通过了 $\alpha = 0.01$ 的 Mann-Kendall 显著性检验。

2.3 气象因子对流域潜在蒸散发变化的贡献

贡献率分析有助于揭示流域 ET_0 变化的主导因子。图 6 反映了各气象要素对 ET_0 变化贡献率的年内特征分布。雅鲁藏布江流域各月平均气温对 ET_0 的贡献率最大, 但各气象因子贡献率的月变化特征大不相同。 C_{SR} (太阳辐射的贡献率) 在各月份均为负贡献, 取值 $-0.13\% \sim -0.01\%$, 尽管取值都非常小, 但按贡献程度 (贡献率绝对值) 呈现明显的夏季高、冬季低的特征, 8 月达其峰值, 1 月为最低值。 C_{WS} (风速的贡献率) 也是负贡献, 但年内分布模式则与 C_{SR} 相反, 按贡献率绝对值, 1 月贡献率最高为 1.76% , 8 月最值为 0.16% 。 C_{RH} (相对湿度的贡献率) 年内变化幅度很小, 5—10 月间较低, 平均 0.01% 左右, 11 月至次年 4 月间较高, 平均 0.16% 左右。

C_{AT} (平均气温的贡献率) 取值明显高于其他 3 个因子, 贡献率 17.95%~103.55%, 冬季的贡献率最高,

依次是夏季、秋季和春季。总体来说, 平均气温对 ET_0 季节变化的贡献率远高于其他因子。

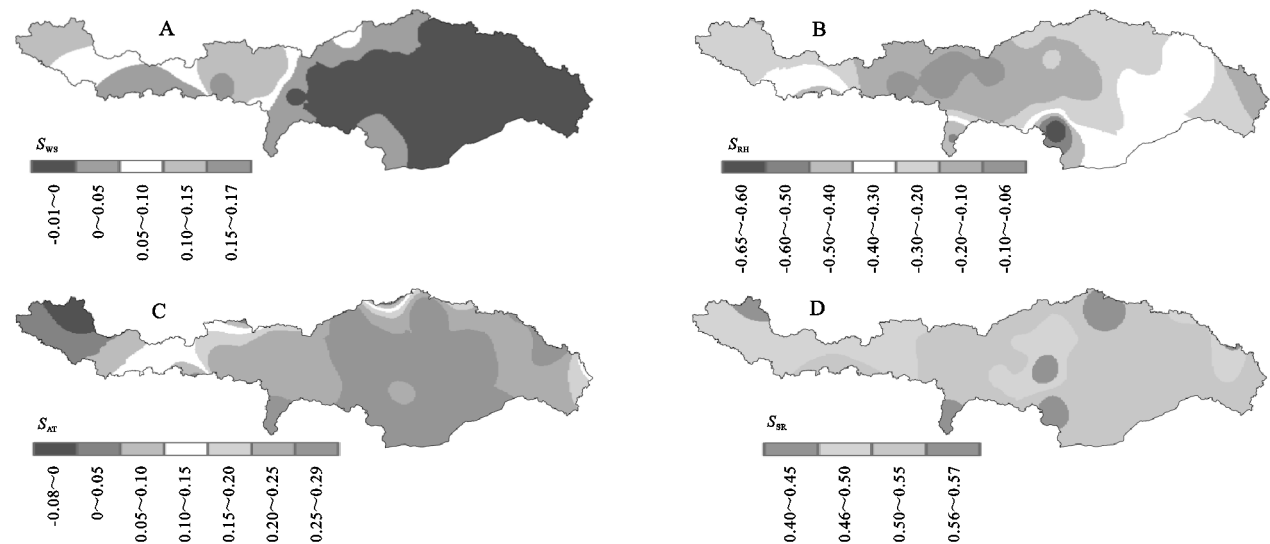


图 5 雅鲁藏布江流域 ET_0 对气象因子敏感系数空间分布

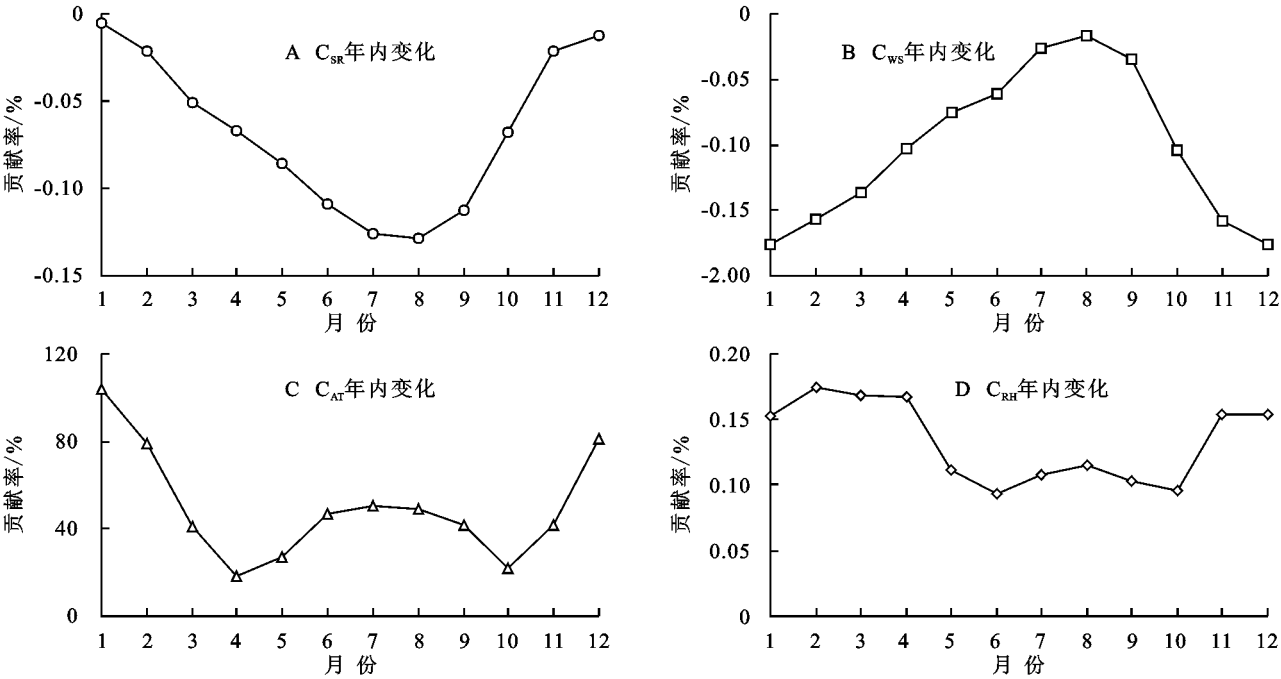


图 6 贡献率月尺度变化趋势

从贡献率的年际变化来看(表 3), C_{AT} , C_{WS} 和 C_{SR} 都呈显著逐年减小的趋势, 其中 C_{AT} 减幅最大, 为 $-2.315/10\text{ a}$; C_{WS} 虽然也呈减小趋势, 为 $-0.211/10\text{ a}$, 但由于是负贡献, 按其绝对贡献来说, 风速对 ET_0 的影响力有加强趋势; 太阳辐射虽然是流域 ET_0 最为敏感的因子, 但是其多年平均的贡献率 C_{SR} 仅为 -0.056 ; C_{RH} 呈显著的上升趋势, 每 10 a 增加 0.061, 说明相对湿度对 ET_0 的影响越来越大。

流域内平均气温、风速、太阳辐射和相对湿度对 ET_0 的贡献率依次为 50.747%, -0.923% , -0.056% , 0.111%, 可以看出平均气温对流域 ET_0 变化的绝对主导地位。从

空间分布来看, 尽管各站点 C_{AT} , C_{WS} , C_{SR} 和 C_{RH} 占比各不相同, 见图 7, 流域内 80% 的站点是以平均气温为主导, 其他如琼结站和米林站以相对湿度的贡献为主导, 拉孜站和南木林站以风速贡献最大, 为其主导因子。

表 3 雅鲁藏布江流域 ET_0 变化的气象因子贡献率 %				
	平均气温	风速	太阳辐射	相对湿度
最大值	83.195	-0.164	0.113	0.349
最小值	24.027	-1.768	-0.192	-0.198
多年平均	50.747	-0.923	-0.056	0.111
幅度	$-2.315/10\text{ a}$	$-0.211/10\text{ a}$	$-0.037/10\text{ a}$	$0.061/10\text{ a}$
趋势	下降**	下降**	下降**	上升**

注: ** 表示通过了 $\alpha=0.01$ 的 Mann-Kendall 显著性检验。



图7 雅鲁藏布江流域 ET_0 变化的主导因子空间分布

3 讨论

根据敏感性分析结果可知,在平均气温、太阳辐射、风速和相对湿度4种气象因子中,雅鲁藏布江流域 ET_0 最敏感的因子是太阳辐射,其次才是平均气温。而贡献率分析结果表明平均气温是流域 ET_0 变化的主导因子,太阳辐射是贡献率最小的气象因子。最敏感因子与主导因子的不一致,说明气象因子的敏感系数并不能完全反映其对 ET_0 变化的实际影响力,仅仅采用敏感系数无法揭示 ET_0 变化的实际原因,这也印证了董煜^[22]和谢平^[9]等的研究。

参考贡献率的定义,主导因子是由区域内气象因子敏感性及其变化趋势与程度共同决定。雅鲁藏布江流域4个气象因子的变化趋势和变化程度差异较大,见图8。1961—2012年,平均气温和太阳辐射增加趋势,相对湿度和风速呈减小趋势,其中平均气温和风速的变化通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。

根据前文计算结果,雅鲁藏布江流域 ET_0 呈显著增加趋势。尽管平均气温不是最敏感的气象因子,但其对 ET_0 正贡献率高达50.747%,并且平均气温本身有显著增加趋势,相对变化率较大,进一步解释了流域平均气温的显著上升是 ET_0 增加的最主要原因。风速是相对最不敏感的气象因子,却也对 ET_0 的增加有重要影响;这是因为其贡献率为负(−0.923%),而本身变化趋势与潜在蒸散发相反,即显著减小,说明风速的逐年减小助长了 ET_0 的增加趋势。相对湿度的贡献率为0.111%,但其本身呈减小趋势,与 ET_0 的变化趋势相反,说明相对湿度一定程度上引起潜在蒸散发的减少。太阳辐射是最敏感的因子,但其贡献率为负且取值较小仅为−0.056%;本身呈增加趋势,说明太阳辐射也使得 ET_0 有一定量的减少。尽管太阳辐射和相对湿度对流域 ET_0 的增加起到了削弱作用,但由于这两个因子相对变化量较小,被主导因子——平均气温升高的正贡献所抵消。总体而言,太阳辐射是雅鲁藏布江流域 ET_0 最敏感的气象因子,而平均气温在1961—2012年对 ET_0 变化的贡献率最大,是52 a间 ET_0 变化的主导因子。

在本文研究中,受数据限制仅选取了平均气温、风速、太阳辐射和相对湿度此4个气象因子做 ET_0 的敏感性和贡献率研究,可继续探究其他气象因子对 ET_0 的影响。

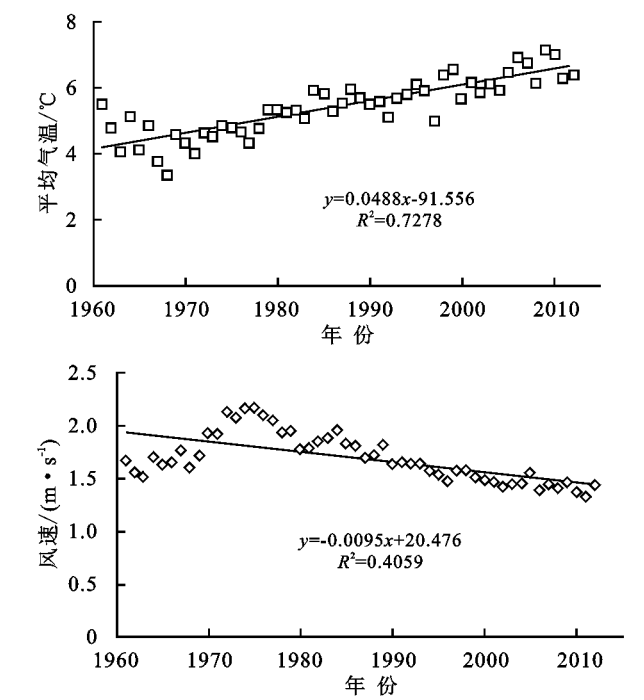


Figure 8 (Right): Two scatter plots showing annual trends of meteorological factors in the Yarlung Zaskarum River Basin from 1960 to 2010. The top plot shows solar radiation ($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) increasing from ~17 to ~18, with a regression line $y=0.0045x+8.567$ and $R^2=0.0598$. The bottom plot shows relative humidity (%) decreasing from ~55 to ~45, with a regression line $y=-0.0585x+169.11$ and $R^2=0.0957$.

图8 雅鲁藏布江流域内各气象因子的年际变化趋势

征,探讨了 ET_0 对平均气温、太阳辐射、风速和相对湿度4种气象要素的敏感性,判识了引起流域 ET_0 变化的主导因子,得到以下结论:

(1) 1961—2012年,雅鲁藏布江流域 ET_0 呈显著上升趋势,增幅为 $8.81 \text{ mm}/10 \text{ a}$; ET_0 多年平均值 977.47 mm ,空间分布特征表现为中游河谷地区高于其他地区。

(2) 雅鲁藏布江流域 ET_0 对太阳辐射最为敏感,对风速最不敏感;相对湿度、风速和太阳辐射的敏感系数呈逐年增大趋势,平均气温敏感系数有减小趋势;潜在蒸散发对4个气象因子的敏感程度相对大小并没有随着季节变化而改变,即一致为:太阳辐射 > 平均气温 > 相对湿度 > 平均风速。

(3) 雅鲁藏布江流域各气象因子对 ET_0 的贡献率从高到低为:平均气温 > 风速 > 相对湿度 > 太阳辐射。平均气温的显著升高是流域 ET_0 增加的主要原因。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 杨志刚,唐小萍,路红亚,等.近50年雅鲁藏布江流域潜在蒸散量的变化特征[J].地理学报,2013,68(9):1263-1268.
- [3] 尹云鹤,吴绍洪,戴尔阜.1971—2008年我国潜在蒸散时空演变的归因[J].科学通报,2010,55(22):2226-2234.
- [4] 李英杰,延军平,王鹏涛.北方农牧交错带参考作物蒸散量时空变化与成因分析[J].中国农业气象,2016,37(2):166-173.
- [5] 环海军,杨再强,刘岩,等.鲁中地区参考作物蒸散量时空变化特征及主要气象因子的贡献分析[J].中国农业气象,2015,36(6):692-698.
- [6] 钱多,查天山,吴斌,等.毛乌素沙地参考作物蒸散量变化特征与成因分析[J].生态学报,2017,37(6):1966-1974.
- [7] 靳晓言,陈艺冉,郭嘉琛,等.若尔盖湿地潜在蒸散时空动态特征及影响因子[J].水土保持研究,2019,26(1):234-239.
- [8] Yin Y, Wu S, Chen G, et al. Attribution analyses of potential evapotranspiration changes in China since the 1960s[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2010, 101(1/2):19-28.
- [9] 谢平,龙怀玉,张杨珠,等.云南省四季潜在蒸散量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.
- [10] 安彬,肖薇薇.1955—2015年陕西省潜在蒸散量时空变化特征及成因[J].水土保持研究,2018,25(4):146-151.
- [11] 杨艳娟,曹经福,熊明明,等.影响海河流域参考作物蒸散量的气象因子定量分析[J].干旱气象,2017,35(3):367-373.
- [12] 谢平,龙怀玉,张杨珠,等.近31年来云南省潜在蒸散量变化成因[J].中国农学通报,2017,33(5):77-84.
- [13] 冯禹,崔宁博,魏新平,等.川中丘陵区参考作物蒸散量时空变化特征与成因分析[J].农业工程学报,2014,30(14):78-86.
- [14] 唐小萍,罗礼洪,卓玛,等.气候变化对西藏雅鲁藏布江中游地区潜在蒸散量的影响分析[J].高原山地气象研究,2011,31(3):49-53.
- [15] 刘剑,姚治君,陈传友.雅鲁藏布江径流变化趋势及原因分析[J].自然资源学报,2007,22(3):471-477.
- [16] 付新峰,杨胜天,刘昌明.雅鲁藏布江流域 NDVI 时空分布及与站点气候因子的关系[J].水土保持研究,2006,13(3):229-232.
- [17] 黄俊雄,徐宗学,巩同梁.雅鲁藏布江径流演变规律及其驱动因子分析[J].水文,2007,27(5):31-35.
- [18] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration(Guidelines for computing crop water requirements) [M]. Rome, Italy: Fao, Irrigation and Drainage Paper No.56,1998.
- [19] 杨林山,李常斌,王帅兵,等.洮河流域潜在蒸散的气候敏感性分析[J].农业工程学报,2014,30(11):102-109.
- [20] Irmak S, Asce M, Payero J O, et al. Sensitivity Analyses and Sensitivity Coefficients of Standardized Daily ASCE-Penman-Monteith Equation[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2006,132(6):564-578.
- [21] Lenhart T, Eckhardt K, Fohrer N, et al. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002,27(9):645-654.
- [22] 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.