

54 年来和田地区潜在蒸散量的变化特征及影响因素

胡雪瑛^{1,2}, 武胜利^{1,2}, 刘强吉^{1,2}, 房靓^{1,2}

(1. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054;

2. 新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室/新疆师范大学, 乌鲁木齐 830054)

摘 要:为了在全球气候变暖的背景下,探讨和田地区干湿状况的变化,为该区水资源的合理利用及保护脆弱的生态环境提供科学依据。应用 Penman-Monteith 模型计算潜在蒸散量,采用 Mann-Kendall 突变检验、小波分析等方法分析了潜在蒸散量的变化特征,结合相关性分析探讨了气候因子对其影响强度。结果表明:1960—2013 年和田地区潜在蒸散量呈“增加—减小—增加”的变化趋势,年际变化倾向率为 -2.74 mm/a ,总体上呈减小趋势;四季潜在蒸散量表现出夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季,均呈减小趋势,其中春季的减小趋势最显著;潜在蒸散量最大值出现在 6 月,最小值出现在 12 月;潜在蒸散量在 1980 年发生一次减少突变,并存在 21 年的第一主周期和 12 年的第二主周期;平均风速的减小和降水量的增加是导致潜在蒸散量减小的主要原因。

关键词:和田地区;潜在蒸散量;Penman-Monteith 模型;气候因子

中图分类号:S161.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)01-0145-06

Variation Characteristics and Influence Factors of Potential Evapotranspiration in Hotan Region in Recent 54 Years

HU Xueying^{1,2}, WU Shengli^{1,2}, LIU Qiangji^{1,2}, FANG Liang^{1,2}

(1. College of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China;

2. Xinjiang Key Laboratory of Lake Environment and Resources, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China)

Abstract: The paper aims to explore the change of dry-wet conditions in Hotan region under the background of the global warming, so as to provide the scientific reference for the effective use of water resources and protect the fragile ecological environment. Based on the daily meteorological data from 1960 to 2013 provided by 5 meteorological stations in Hotan region, the Penman-Monteith model was used to calculate potential evapotranspiration, and the variations of potential evapotranspiration were analyzed by the methods of Mann-Kendall abrupt test, Morlet wavelet function and so on, and the correlation analysis was used to discuss the dominant factor affecting the potential evapotranspiration. The results indicated that the variation trends of annual potential evapotranspiration was ‘increase—decrease—increase’ from 1960s, there was a decreasing trend in general because the changing rate varied at -2.74 mm/year . Seasonal potential evapotranspiration decreased in the order: summer > spring > autumn > winter, and decreased in each seasons especially in spring. The maximum value of potential evapotranspiration was observed in June, the minimum value was found in December. Change of potential evapotranspiration had the 12-year and 21-year periods, and the abrupt change happened in 1980. The decrease of wind speeds and a significant increase of precipitation in Hotan region in recent 54 years were the dominating factors leading to the decrease of potential evapotranspiration.

Keywords: Hotan region; potential evapotranspiration; Penman-Monteith model; climatic factors

气候变暖已成为不争的事实,随着气温上升,全球及区域干湿状况也将发生变化,进而对各地社会、经济、农牧业产生深刻影响^[1]。同时在干旱、半干旱区,水资源短缺、水库和灌溉的潜在蒸发损失极大、洪

涝或干旱灾害也时有发生,严重威胁着作物的生长^[2]。因此,气候的干湿变化已经得到了越来越多的关注,尤其是西北地区的干湿状况成为研究热点。蒸散是水文循环过程中十分重要的环节,是影响一个地

收稿日期:2016-05-06

修回日期:2016-06-17

资助项目:国家自然科学基金项目“艾比湖流域抛物线沙丘形成与演变研究”(41161004);国家自然科学基金委员会—新疆维吾尔自治区人民政府联合基金重点项目“新疆博斯腾湖环境演变及对气候变化的响应”(U1138302);新疆干旱区湖泊与资源重点实验室基金项目“500 年来博斯腾湖流域柽柳沙堆年层沉积及其环境记录”(XJDX0909-2012-03)

第一作者:胡雪瑛(1992—),女,新疆吉木萨尔县人,硕士研究生,研究方向为干旱区环境演变与灾害防治。E-mail:519288698@qq.com

通信作者:武胜利(1977—),男,河南西平县人,教授,博士,主要从事干旱区环境演变与灾害防治研究。E-mail:wushengli77@126.com

区水热平衡的重要气候因子和参数,在很大程度上影响气候的干湿状况^[3]。潜在蒸散量,又称参考作物蒸散量或最大可能蒸散量,是表征大气蒸发能力的一个量度,它标志大气中存在着一种控制充分湿润下垫面蒸发过程的能力,通常是利用气象要素计算得出^[4]。Penman-Monteith 法是联合国粮食及农业组织(FAO)推荐计算潜在蒸散量的唯一标准方法,该方法有较充分的理论依据,所计算的潜在蒸散量仅受制于当地气候条件,与作物种类、土壤类型等无关,是目前公认的无论在干旱还是湿润地区计算潜在蒸散量精度都较高的方法之一^[5-6]。

近年来,利用 Penman-Monteith 模型作为研究气候干湿状况的工具得到了广泛的应用。黄会平等^[7]研究表明 1957—2012 年中国各分区潜在蒸散量均呈减小趋势,西北诸河区减小趋势最显著;王琼等^[8]研究发现 1961—2011 年长江流域潜在蒸散量呈减小趋势,年际变化倾向率为 -0.34 mm/a ,且夏季的减小趋势最显著;王允等^[9]研究得到近 50 a 中国西南地区有变干趋势,且各年代变干幅度大于变湿幅度;而黄小燕等^[10]研究得到近 50 a 中国西北地区有变湿趋势,潜在蒸散量明显减小;普宗朝等^[11]研究表明新疆乌昌地区 1961—2009 年潜在蒸散量呈减小趋势、干湿指数呈增大趋势,气候总体上有较明显的变湿特征;谢姆斯叶·艾尼瓦尔等^[12]研究认为塔里木盆地有暖湿化的趋势,其南、北缘潜在蒸散量均在波动中减小,南缘递减速度比北缘快。应用 Penman-Monteith 模型来分析区域干湿状况的变化规律,对评价气候干旱程度,估算农作物需水量,提高水资源利用效率,保护生态环境等具有十分重要的现实意义^[13-14]。

和田地区深居内陆,远离海洋、气候干旱、沙漠广布、自然条件十分恶劣、生态环境极为脆弱、水资源非常短缺、是典型的少、边、穷地区^[15]。目前对和田地区气候变化的研究比较多,但针对潜在蒸散量的研究很少,因此本文探讨气候变化背景下潜在蒸散量的变化特征及影响因素,既可以揭示中高纬度西风带控制下干旱区潜在蒸散量的变化规律,也可以为该区水资源合理开发与利用以及生态环境保护提供科学依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

和田地区位于新疆维吾尔自治区南端,东部与巴音郭楞蒙古自治州毗连,西部连喀什地区,南越昆仑山抵藏北高原,北部深入塔克拉玛干腹地,与阿克苏地区相邻。西部、北部的帕米尔高原、天山阻挡了西伯利亚的冷空气,南部的昆仑山、喀喇昆仑山阻隔了来自印度洋的暖湿气流,形成夏季炎热、冬季寒冷、降水稀少、蒸

发强烈的极端干旱荒漠气候。农业用地基本集中在仅有的一些绿洲区域,发源于昆仑山、喀喇昆仑山的各大小河流纵穿绿洲是灌溉农田的唯一水源^[16]。

1.2 数据基础与方法

本文数据来自国家气象地面基准站,选取和田地区 5 个气象站 1960—2013 年逐日气象数据(平均气温、最高气温、最低气温、降水量、日照时数、平均风速、相对湿度),其中安德河站的气象数据是从 1960—1988 年。计算出各站点的日潜在蒸散量,然后进行月、季、年潜在蒸散量的统计。其中,季节的划分采用气象季节,即 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月至翌年 2 月为冬季。

1.3 研究方法

本文采用世界粮农组织(FAO)1998 年修正的 Penman-Monteith 模型来计算潜在蒸散量,见计算公式(1)~(2)^[17-18]。

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

式中: ET_0 为潜在蒸散量(mm/d); R_n 为净辐射 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; G 为土壤热通量 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; γ 为干湿常数 ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); Δ 为饱和水汽压曲线斜率 ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); U_2 为 2 m 高处的风速 (m/s); e_s 为平均饱和水汽压 (kPa); e_a 为实际水汽压 (kPa); T 为平均气温 ($^\circ\text{C}$)。

$$R_n = (1 - a) \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a - Q \left(\frac{T_{\max}^4 + T_{\min}^4}{2} \right) \\ (0.56 - 0.08\sqrt{e_a}) \left(0.1 + 0.9 \frac{n}{N} \right) \quad (2)$$

式中: R_a 为大气顶层的太阳辐射 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; a 为地表反射度,取值 0.23; Q 为波尔兹曼常数 $4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ}/(\text{K}^4 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d})$; N 为最大日照时数 (h); n 为实际日照时数 (h); T_{\max} 为最高绝对气温 (K); T_{\min} 为最低绝对气温 (K); a_s 为云全部遮盖下 ($n=0$) 大气外界辐射到达地面的分量; b_s 为晴天 ($n=N$) 大气外界辐射到达地面的分量。 a_s, b_s 采用祝昌汉^[19]推荐的适合于西北干旱区的系数,分别取值 0.225, 0.525。

运用一元线性回归法对年、季潜在蒸散量进行趋势分析;采用 Mann-Kendall 突变检验法和 Morlet 小波分析法对年潜在蒸散量进行突变检验和周期分析;结合 SPSS 相关分析探讨影响潜在蒸散量的气候因子。

2 结果与分析

2.1 潜在蒸散量的年代际、年际变化

由表 1 可知,和田地区潜在蒸散量年代际变化趋势明显,20 世纪 70 年代潜在蒸散量最高,达到 912.8 mm,90 年代最低,为 671.4 mm。60, 70 年代及

2000—2013 年潜在蒸散量为正距平,分别比多年均值高 54.4,86.1,0.6 mm;80,90 年代为负距平,分别比多年均值低 33,155.3 mm。季节潜在蒸散量变化与年潜在蒸散量变化基本一致,均表现为 60,70 年代和 2000 年以后偏高,80,90 年代偏低,呈“多—少—多”的变化特点。其中,60 年代春季的增加趋势最明显,70—80 年代夏季的减小趋势最明显,90 年代之后夏季又转为明显的增加趋势。

由图 1 可知,1960—2013 年和田地区平均年潜在蒸散量为 817.8 mm,1970 年达到最高值,为 996.3 mm,

1996 年达到最低值,为 627.6 mm,极差为 368.7 mm。年潜在蒸散量以 -2.74 mm/a 的速率呈明显的减小趋势,减小速率低于塔里木盆地 $(-2.9\text{ mm/a})^{[20]}$;但高于西北地区 $(-1.2\text{ mm/a})^{[7]}$ 。5 a 滑动曲线显示,和田地区年潜在蒸散量 1960—1969 年呈上升趋势,1970—1992 呈持续明显下降趋势,1993—2013 年又呈明显上升趋势。分析发现,各站点潜在蒸散量有较明显的空间分异,年潜在蒸散量表现出安德河>和田>民丰>皮山>于田,分别为 1 008.4 mm,911.1 mm,819.4 mm,755.2 mm,731.9 mm。

表 1 和田地区年及季节潜在蒸散量的年代际变化 mm

季节	60 年代	70 年代	80 年代	90 年代	2000—2013 年	1960—2013 年
春季	304.2	321.8	278.0	238.5	280.7	286.5
夏季	376.1	391.6	334.4	297.4	362.3	354.5
秋季	152.1	164.0	135.1	102.9	136.0	139.4
冬季	48.7	53.6	46.2	32.7	47.9	46.3
全年	881.1	912.8	793.7	671.4	826.9	826.7

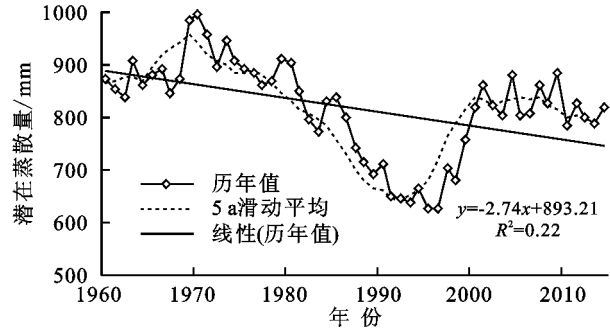


图 1 和田地区潜在蒸散量年际变化趋势

2.2 潜在蒸散量的季节变化

由图 2 可知,1960—2013 年,和田地区春、夏、秋、冬四季平均潜在蒸散量分别为 283.4 mm,351.3 mm,136.9 mm 和 46.0 mm,是夏季>春季>秋季>冬季。且四季均呈减小趋势,变化速率分别为 -1.05 mm/a , -0.81 mm/a , -0.71 mm/a , -0.17 mm/a ,春季减小幅度最大,冬季最小。可见,对年潜在蒸散量的减小来说,春季的贡献最大,冬季最小。5 a 滑动曲线显示,四季潜在蒸散量在 1970 年左右达到高值,在 1995 年左右达到低值,均呈“增加—减小—增加”的变化趋势。

2.3 潜在蒸散量的月变化

由图 3A 可知,全区平均月潜在蒸散量为 11.0~129.8 mm,呈现单峰型,最大值出现在 6 月,为 129.8 mm,最小值出现在 12 月,为 11.0 mm,1—6 月潜在蒸散量持续上升,7 月以后不断下降,在 12 月达到最小。各月潜在蒸散量均呈减小趋势,减小速率为 $0.04\sim0.43\text{ mm/a}$,4 月的减小速率最大,12 月最小。各气象站的逐月变化趋势与全区平均基本一致(图 3B),安德河略有差异,在 5 月、7 月均为较大,呈双峰型,月最高潜在蒸散量表现为安德河>和田>民丰>皮山>于田。

2.4 潜在蒸散量的突变分析

图 4A 中 UF 代表年潜在蒸散量的顺序统计曲线,UB 为年潜在蒸散量的逆序列统计曲线,并给定显著性水平,当 $\alpha=0.05$,即临界值为 ± 1.96 。由图 4A 可以看出,曲线 UF 和 UB 在 1980 年相交,且交点在两条临界线之间,同时图 4B 显示,对应的累积距平曲线也在 1980 年存在明显的拐点,且从 1980 年开始表现为明显的下降趋势。说明潜在蒸散量时序数据在 1980 年发生了一次减少突变,即潜在蒸散量由偏高时期进入偏低时期,此次突变具体表现为:全区 1960—1980 年的年均潜在蒸散量为 897.27 mm,1981—2013 年的年均潜在蒸散量为 767.15 mm,后者比前者减少了 130.12 mm。分析发现,春季潜在蒸散量在 1981 年发生突变,夏季为 1977 年,秋季为 1982 年,冬季为 1980 年。

2.5 潜在蒸散量的周期分析

通过对年潜在蒸散量进行 Morlet 小波变换,得到小波系数实部等值线图(图 5A),图中实线表示取正值的小波系数等值线,代表潜在蒸散偏高的时期,虚线表示小波系数取负值的等值线,代表潜在蒸散量偏低的时期,黑粗实线表示小波系数取零值的等值线,代表潜在蒸散量发生急剧变化的时期。从图 5A 可以看出,潜在蒸散量存在 7 a、12 a 左右的周期变化外,还存在着 21 a 左右的长周期变化。其中,12 a 和 21 a 左右的周期变化贯穿于 54 a 当中,而 7 a 左右的周期变化只存在于 60 年代至 80 年代。小波系数符号表现为正负交替震荡过程,表明潜在蒸散量在 1960—2013 年经历了偏低、偏高的循环交替过程,特别是 80,90 年代以偏低期为主,与潜在蒸散量的年代际变化结果相符。

为了确定一个对潜在蒸散量变化规律最有影响力

的时间尺度,需要通过小波方差来鉴定,根据小波方差曲线图(图 5B),在 32 a 以内时间尺度上,潜在蒸散量表现出两个明显的波峰,分别是在 12 a 和 21 a 的时间

尺度上,小波方差在时间尺度为 21 a 的时候取得了最大值,表明潜在蒸散量在 21 a 的振荡周期最强烈,为时序变化的第一主周期,第二主周期为 12 a。

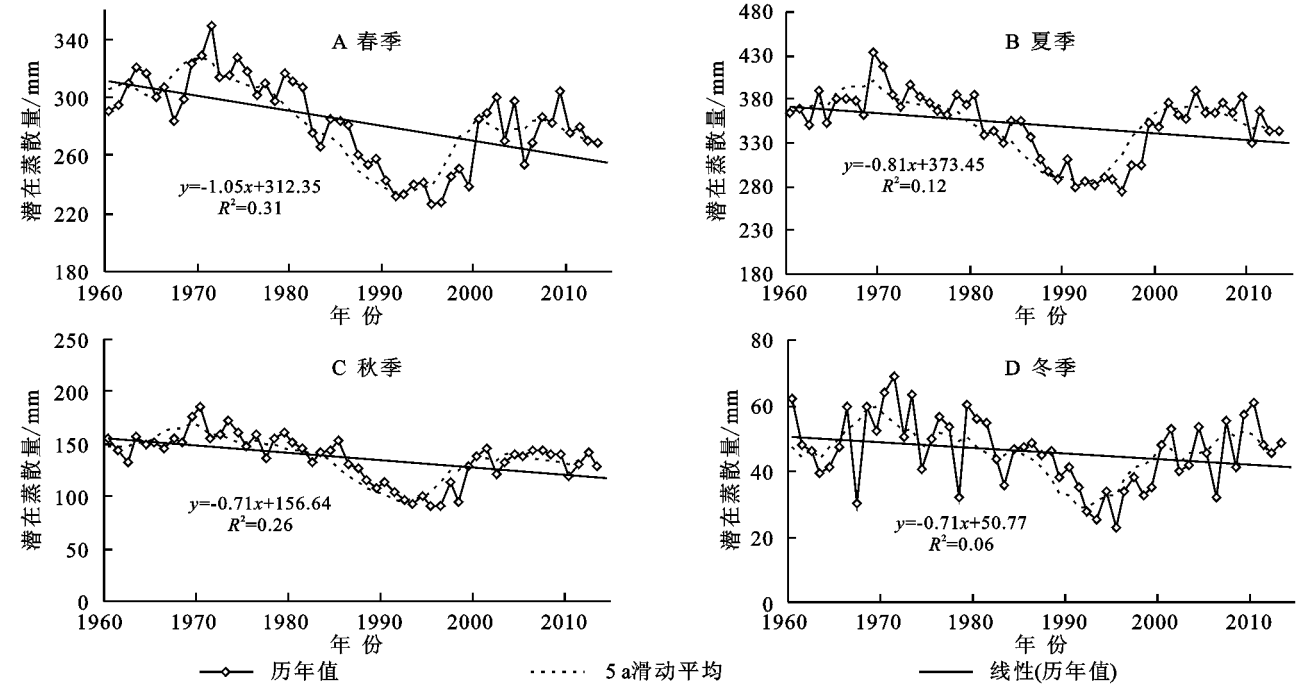


图 2 和田地区四季潜在蒸散量变化趋势

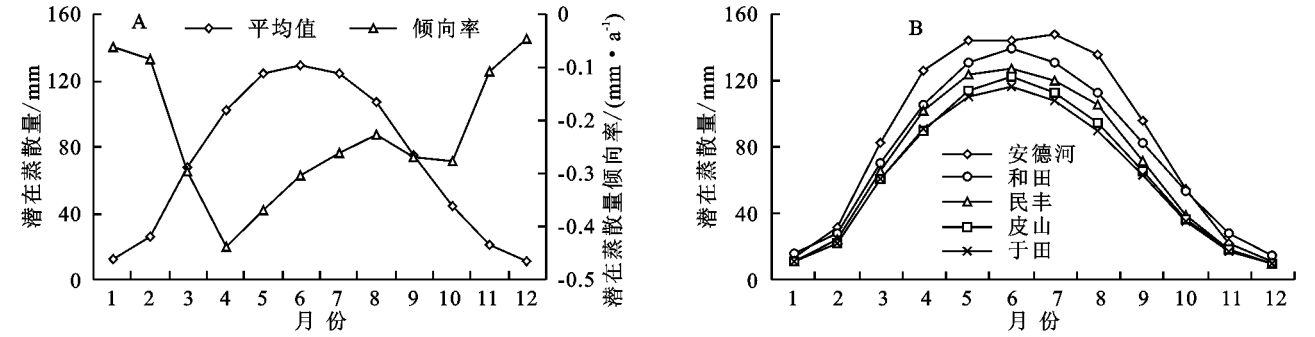


图 3 全区及各站点潜在蒸散量月变化

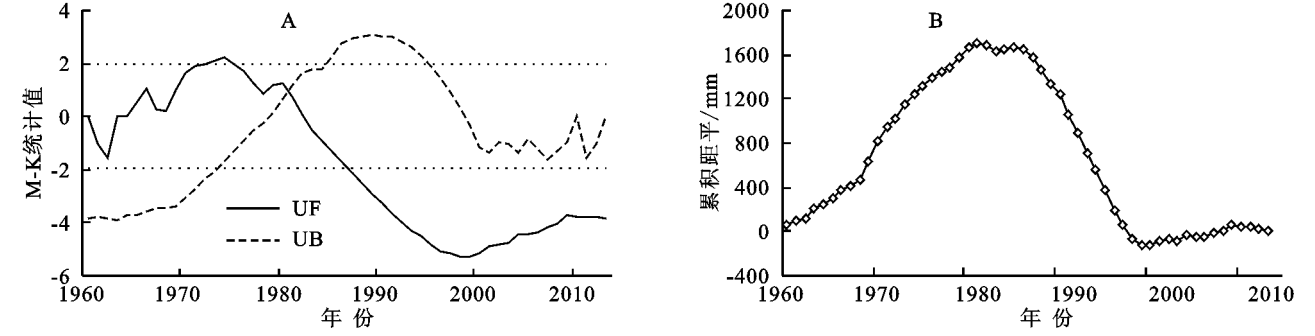


图 4 潜在蒸散量的 Mann-Kendall 突变检验及累积距平

2.6 潜在蒸散量变化的成因

潜在蒸散量受多种气候因子的综合影响,如气温、降水、风速、日照时数、相对湿度等。由于影响因素众多,且气候因子的变化趋势各不相同,所以潜在蒸散量的变化成因十分复杂。为了探讨和田地区潜在蒸散量变化的成因,选取平均风速代表动力因子,平均气温、日照时数代表热力因子,相对湿度、降水量代表湿度因

子,探讨潜在蒸散量与以上 5 个气候因子的关系,以探究影响其变化的主导因素。从表 2 看出,季节潜在蒸散量、年潜在蒸散量与各气候因子的相关性基本一致,即平均风速、平均气温、日照时数与潜在蒸散量呈正相关,这些气候因子的增加会导致潜在蒸散量的增加,而相对湿度、降水量与潜在蒸散量呈负相关,这些气候因子的增加会导致潜在蒸散量的减少。

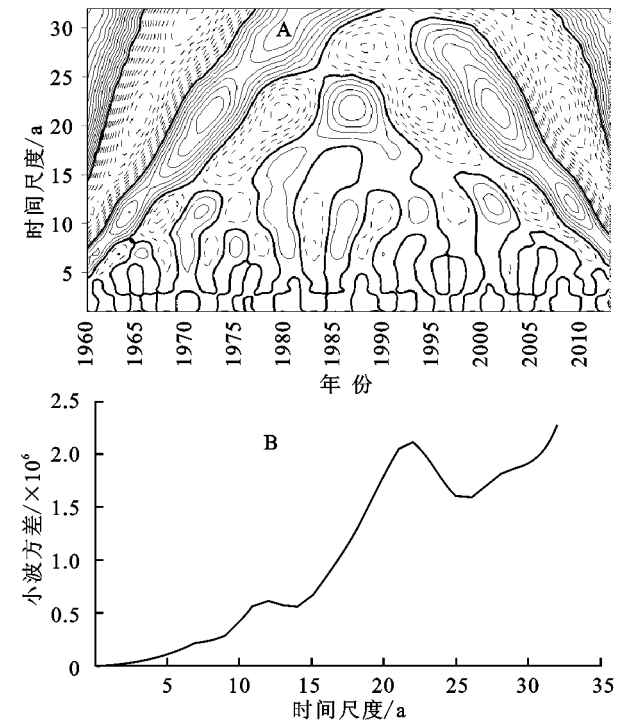


图 5 和田地区 1960—2013 年潜在蒸散量的 Morlet 小波系数实部等值线及方差变化

表 2 和田地区年及季节潜在蒸散量与气候因子相关性分析

季节	平均 风速	平均 气温	日照 时数	相对 湿度	降水量
春季	0.93**	0.20	0.14	-0.36**	-0.24
夏季	0.94**	0.23	0.05	-0.61**	-0.41**
秋季	0.95**	0.11	0.08	-0.48**	-0.22
冬季	0.82**	0.28*	0.05	-0.59**	-0.37**
全年	0.96**	0.02	0.05	-0.47**	-0.34*

注: ** 表示通过了 0.01 的显著性检验, * 表示通过了 0.05 的显著性检验。

从气候因子变化趋势来看(图 6),1960—2013 年平均风速以 $-2.74 \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{a})$ 的速率呈下降趋势,且与潜在蒸散量的年际变化基本一致,都表现为 60 年代呈上升趋势,70 年代至 90 年代中期呈下降趋势,之后又呈上升趋势,且二者在 $\alpha=0.01$ 水平上呈显著正相关,相关系数为 0.96,说明平均风速的减小是影响潜在蒸散量减小的重要原因。众多研究表明^[21-22],风速是影响潜在蒸散量变化的主导因素;近 54 a 来气温以 $0.04^\circ\text{C}/\text{a}$ 的速率呈明显的上升趋势,尤其是 90 年代中期以后呈加速上升之势,气温与潜在蒸散量无显著相关;近 54 a 来日照时数以 $0.01 \text{ h}/\text{a}$ 的速率呈上升趋势,也在 90 年代中期以后呈加速上升之势,日照时数与潜在蒸散量无显著相关;1960—2013 年平均相对湿度呈下降趋势,但变化趋势不明显,相对湿度与潜在蒸散量在 $\alpha=0.01$ 水平上显著负相关,相关系数为 -0.47 ;近 54 a 来降水量以 $0.27 \text{ mm}/\text{a}$ 的速率呈明显上升趋势,且 80 年代中期至 2013 年间的降水量明显高于 80 年代中期以前,降水量与潜在蒸散量在 $\alpha=0.05$ 的水平上显著负相关,相关系数为 -0.34 。

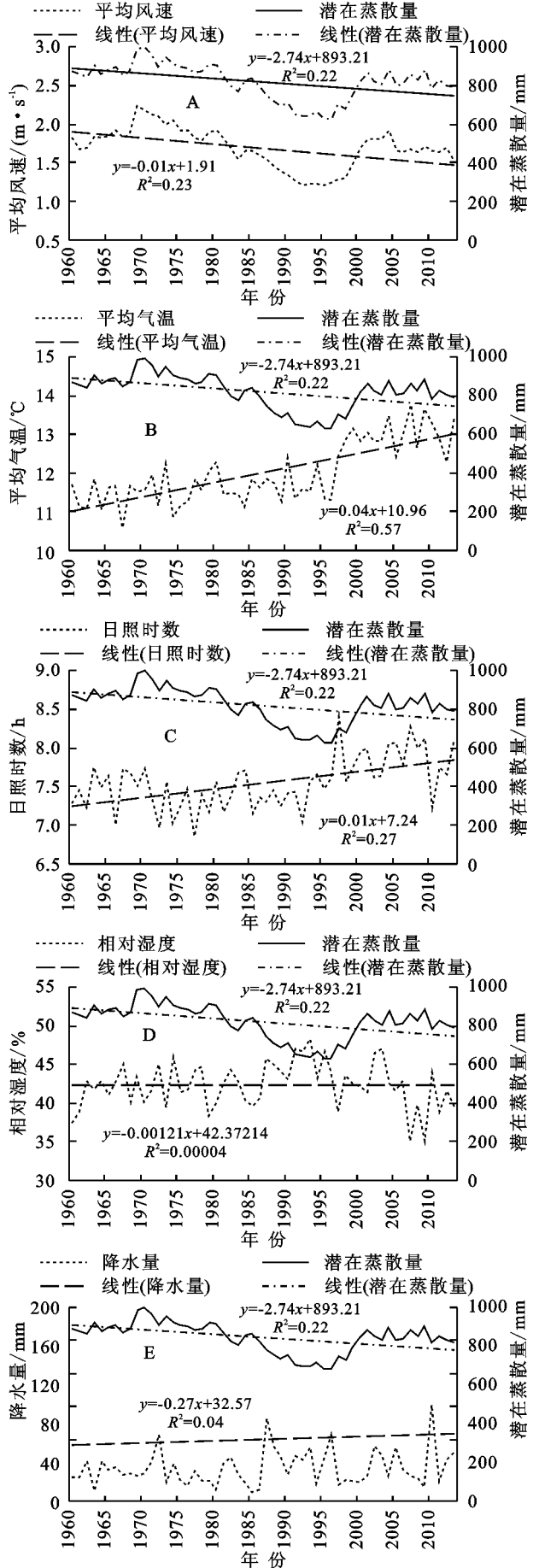


图 6 潜在蒸散量与各气候因子之间的关系

综上所述,虽然近 54 a 和田地区平均气温和日照时数呈上升趋势,但由于平均风速的减小,降水量的增加,受其综合影响 54 a 来潜在蒸散量总体呈减小趋势。自 20 世纪 90 年代中期以后虽然降水量呈上升趋势,但平均风速、平均气温和日照时数也都呈明显的上升趋势,这是导致和田地区潜在蒸散量于 90 年代中期后由持续减少转为增多的根本原因。

3 结论与讨论

(1) 和田地区潜在蒸散量在 20 世纪 60、70 年代偏高,80 年代以来偏低,90 年代达到最低,2000 年以后明显回升。年潜在蒸散量在 1960—2013 年总体呈减小趋势,减小速率为 2.74 mm/a,最大值出现在 1970 年,比多年均值高 178.5 mm,最小值出现在 1996 年,比多年均值低 190.2 mm。

(2) 四季潜在蒸散量春夏较大、秋冬较小,均呈减小趋势,减小速率分别为 -1.05 mm/a, -0.81 mm/a, -0.71 mm/a, -0.17 mm/a。年内潜在蒸散量最大值出现在 6 月,最小值出现在 12 月,各月潜在蒸散量均呈减小趋势,4 月变化速率最大,12 月最小。

(3) 年潜在蒸散量在 1980 年发生了一次减少突变,春季潜在蒸散量在 1981 年发生突变,夏季为 1977 年,秋季为 1982 年,冬季为 1980 年。潜在蒸散量在 21 a 的振荡周期最强烈,为时序变化的第一主周期,第二主周期为 12 a。

(4) 潜在蒸散量的变化是风速、气温、日照时数、降水量等综合作用的结果,平均风速的减小和降水量的增加是造成和田地区潜在蒸散量减小的主要原因,90 年代中期以后,平均风速、平均气温和日照时数的增加,使和田地区潜在蒸散量由持续减少转为增多。

(5) 近 54 a 在潜在蒸散量下降的同时,温度以 $0.04^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 的速率上升,降水量以 0.27 mm/a 的速率增加,可以认定 1960—2013 年和田地区气候有暖湿化的特征,气候暖湿化对改善和田地区脆弱的生态环境、增加植被覆盖度、促进农业生产及经济发展都将产生积极的作用。

参考文献:

- [1] 普宗朝,张山清,王胜兰.近 48 a 新疆干湿气候时空分布特征[J].中国沙漠,2011,31(6):1563-1572.
- [2] 苏秀程,王磊,李奇临,等.近 50 a 中国西南地区地表干湿状况研究[J].自然资源学报,2014,29(1):104-118.
- [3] 谢贤群,王菱.中国北方近 50 年潜在蒸发的变化[J].自

然资源学报,2007,22(5):683-691.

- [4] 尹云鹤,吴绍洪,郑度,等.近 30 年我国干湿状况变化的区域差异[J].科学通报,2005,50(15):1636-1642.
- [5] 高歌,陈德亮,任国玉,等.1956—2000 年中国潜在蒸散量变化趋势[J].地理研究,2006,25(3):378-387.
- [6] 刘绍民,孙中平,李小文,等.蒸散量测定与估算方法的对比研究[J].自然资源学报,2003,18(2):161-167.
- [7] 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[J].自然资源学报,2015,30(2):316-326.
- [8] 王琼,张明军,潘淑坤,等.长江流域潜在蒸散量时空变化特征[J].生态学杂志,2013,32(5):1292-1302.
- [9] 王允,刘普幸,曹立国,等.基于湿润指数的 1960—2011 年中国西南地区地表干湿变化特征[J].自然资源学报,2014,29(5):830-838.
- [10] 黄小燕,张明军,贾文雄,等.中国西北地区地表干湿变化及影响因素[J].水科学进展,2011,22(2):151-159.
- [11] 普宗朝,张山清,宾建华,等.新疆乌—昌地区干湿气候要素时空变化分析[J].资源科学,2011,33(12):2314-2322.
- [12] 谢姆斯叶·艾尼瓦尔,塔西甫拉提·特依拜,买买提·沙吾提,等.近 50 年来塔里盆地南、北缘干湿状况变化趋势分析[J].干旱区资源与环境,2013,27(3):40-46.
- [13] 王晓东,马晓群,许莹,等.淮河流域参考作物蒸散量变化特征及主要气象因子的贡献分析[J].中国农业气象,2013,34(6):661-667.
- [14] 王莺,李耀辉,姚玉璧,等.石羊河流域地表干湿变化的时空分布特征[J].资源科学,2013,35(10):2112-2120.
- [15] 阿依努尔·买买提,时丕龙,赵改君,等.基于 GIS 的新疆和田地区人居环境适应性评价[J].干旱区地理,2012,35(5):843-855.
- [16] 安瓦尔·买买提明,张小雷,杨德刚.新疆和田地区城市化与土地利用变化的定量分析[J].中国人口·资源与环境,2009,19(6):137-141.
- [17] 吴绍洪,尹云鹤,郑度,等.近 30 年中国陆地表层干湿状况研究[J].中国科学 D 辑,2005,35(3):276-283.
- [18] 朱国锋,何元庆,蒲焘,等.1960—2009 年横断山区潜在蒸发量时空变化[J].地理学报,2011,66(7):905-916.
- [19] 祝昌汉.再论总辐射的气候学计算方法(二)[J].南京气象学院学报,1982(2):196-206.
- [20] 普宗朝,张山清,李景林,等.近 47 a 塔克拉玛干沙漠周边地区气候变化[J].中国沙漠,2010,30(2):413-421.
- [21] 董煜,海米提·依米提.1961—2013 年新疆潜在蒸散量变化特征及趋势[J].农业工程学报,2015,31(3):153-161.
- [22] 段春锋,缪启龙,曹雯,等.塔克拉玛干沙漠周边地区潜在蒸散时空演变特征及其主要影响因素[J].中国沙漠,2012,32(6):1723-1730.