

赵福年,赵 铭,王 莺,等. 石羊河流域 1960~2009 年参考蒸散量与蒸发皿蒸发量变化特征[J]. 干旱气象,2014,32(4):560-568, [ZHAO Funian, ZHAO Ming, WANG Ying, et al. Variation Characteristics of Reference Evapotranspiration and Pan Evaporation During 1960-2009 in Shiyang River Basin[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(4):560-568], doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-04-0560

石羊河流域 1960~2009 年参考蒸散量 与蒸发皿蒸发量变化特征

赵福年¹,赵 铭²,王 莺¹,张鹏飞³

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所,中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室,甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,甘肃 兰州 730020;2. 河北省秦皇岛市气象局,河北 秦皇岛 066000;3. 甘肃省武威市气象局,甘肃 武威 733000)

摘 要:以石羊河流域 5 个气象站点 1960~2009 年逐日气象资料为基础,从估算模型和统计角度计算分析了该流域参考蒸散量及蒸发皿蒸发量的变化趋势和变化原因。结果表明:过去 50 a 石羊河流域蒸散发呈增加趋势,个别站点达极显著水平($p < 0.01$),1960~2009 年和 1970~2009 年不同时段的选择对分析结果有一定的影响。估算模型理论分析认为桑斯威特法计算的参考蒸散量变率主要由气温决定,蒸发皿蒸发量和彭曼蒙蒂斯公式计算的参考蒸散量变化则是辐射、气温、风速及空气饱和差共同作用的结果,而相关分析和突变检验的分析结果验证了上述结论,并得出过去 50 a 石羊河流域蒸发皿蒸发量和彭曼蒙蒂斯公式计算的参考蒸散量变化的主要决定因素是空气饱和差。

关键词:参考蒸散量;蒸发皿蒸发量;石羊河流域;彭曼蒙蒂斯公式;桑斯威特法

文章编号:1006-7639(2014)-04-0560-09 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-04-0560

中图分类号:S161.4

文献标识码:A

引 言

在干旱和半干旱地区研究干旱,不仅要着眼于区域水分平衡的“源”(降水),更应该注意水分平衡中的“汇”(蒸散发)。蒸散发在干旱发生发展中的作用不容忽视^[1],目前越来越多的干旱指标开始考虑蒸散发在干旱监测中的影响,如 *CI* 指数、*K* 指数以及标准化降水蒸散指数(*SPEI*)等^[2-4]。

实际陆地蒸散发的测定非常困难,因而在实际应用中往往以其他方法估计实际陆地蒸散发。就目前的应用来看,主要有 2 种方法:一是利用蒸发皿观测蒸发量,二是使用气象观测站的观测要素计算参考蒸散量^[5]。蒸发皿蒸发量虽不能直接代表陆地实际蒸发,但实际蒸散与水面蒸发之间存在很好的相关关系;而参考蒸散量作为一个非常重要的农业和水文变量,已被广泛应用在实际蒸散和作物需水计算以及其他气象水文模拟^[6-8]。目前对蒸发皿蒸发量、参考作物蒸散量在气候变暖背景下的变化趋

势研究较多,取得了许多有意义的结果^[9-12]。其中最重要的是发现了“蒸发悖论”^[13-17],所谓“悖论”是指随着气温的升高,预期的结果是蒸发量会随之增大,然而全球各地的观测事实发现,蒸发皿蒸发量在全球气温不断升高的背景下逐渐减小,这一发现与预期结果的差异被称为“蒸发悖论”。“蒸发悖论”在全球大部分地区普遍存在,从北半球的北美到欧亚大陆,从南半球的澳大利亚到巴西^[5,18]。在中国,蒸散发的变化趋势也引起了广泛关注,并取得了一定的成果^[19-21]。然而蒸散发的变化趋势及其变化原因一直存在争议^[16],且不论其变化原因受多种因素的影响,就其变化趋势是否在全球各个区域完全一致,尚存在很大的不确定性。因此,基于对西北干旱半干旱区干旱变化趋势及其监测的全面分析,本文以石羊河流域为例,探讨了该地区不同方法计算获取的蒸散发变化趋势和原因,以期判断该地区气候变暖背景下气候干湿的变化方向提供准确依据。

收稿日期:2013-12-03;改回日期:2014-03-28

基金项目:由中国气象局兰州干旱气象研究所科研启动项目(KYS2012SSKY05)和科研业务费(KYYWF201323)共同资助

作者简介:赵福年(1987-),甘肃武威人,硕士,助理工程师,主要从事农业气象与干旱气候变化研究. E-mail:zfn0622@163.com

1 资料与方法

1.1 区域概况及资料来源

石羊河流域位于河西走廊东部,该区处于青藏高原北坡,南靠祁连山脉,北邻腾格里和巴丹吉林沙漠,东接黄土高坡西缘。由于深居内陆,远离海洋,加上境内地形和海拔高度的影响,长期高温干旱,降水稀少且年际及年代际变率很大,是典型的干旱和半干旱区。

利用石羊河流域5个气象观测站1960~2009年降水量、气温、风速、日照时数、相对湿度及蒸发皿蒸发量(用 E_{pan} 表示)等逐日气象资料,原始数据源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)和甘肃省气象局。石羊河流域海拔高度及观测台站分布见图1。

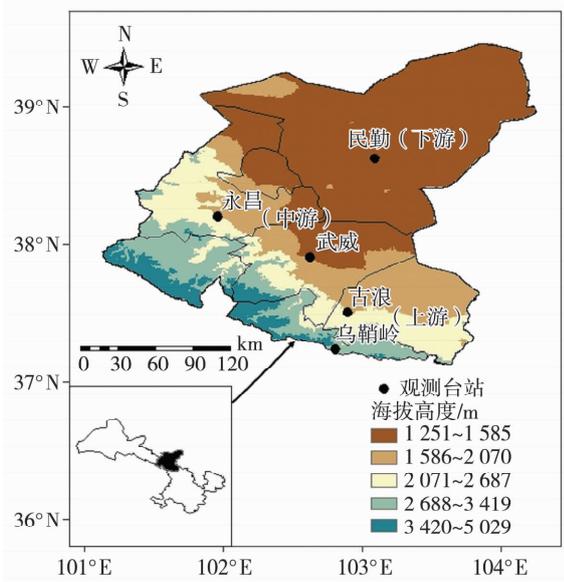


图1 石羊河流域海拔高度及5个气象观测站空间分布

Fig. 1 The altitude and spatial distribution of observation stations in Shiyang river basin

1.2 计算方法

参考蒸散量的计算采用2种方法:一是国际粮农组织(FAO)推荐的彭曼蒙蒂斯(Penman - Monteith)公式(用 E_{PM} 表示)^[22],二是桑斯威特法(Thornton)公式(用 E_{TH} 表示)^[23-24]。前者依据的气候因子较多,主要包括气温、风速、相对湿度以及净辐射等,后者主要依赖于气温,所以这2种计算方法各具特点。

桑斯威特法计算参考蒸散量的方法为:

$$E_{TH} = 16 K \left(\frac{10 T}{I} \right)^m \quad (1)$$

式中, E_{TH} 为桑斯威特法计算获得的参考蒸散量, K 为与日长和纬度有关的调整系数, m 为热量指数的函数, I 为温度效率指数, T 为月平均气温。

蒸发皿蒸发量计算模型^[25-27]如下:

$$E_{pan} = E_{p,R} + E_{p,A} \\ = \left(\frac{\Delta}{\Delta + \alpha \gamma} \frac{R}{\lambda} \right) + \left(\frac{\alpha \gamma}{\Delta + \alpha \gamma} f_q(u) VPD \right) \quad (2)$$

式中, E_{pan} 为蒸发皿蒸发量, $E_{p,R}$ 为蒸发皿蒸发量的辐射项, $E_{p,A}$ 为蒸发皿蒸发量的空气动力项, λ 是水汽化潜热, α 是水热传输有效面积的比率, $f_q(u)$ 为风速函数, R 是太阳净辐射, Δ 为饱和水汽压—气温的关系斜率, γ 是干湿常数, u 为2 m高处风速, VPD 是空气饱和差。

彭曼蒙蒂斯公式计算模型也可分解为辐射项和空气动力项2部分,计算方法如下:

$$E_{PM} = E_{PM(rad)} + E_{PM(aero)} \\ = \frac{0.408 \Delta (R - G) + \frac{900 \gamma u VPD}{T_a + 273}}{\Delta \gamma (1 + 0.34u)} \quad (3)$$

式中, E_{PM} 为彭曼蒙蒂斯公式计算的参考蒸散量, $E_{PM(rad)}$ 为参考蒸散量的辐射项, $E_{PM(aero)}$ 为参考蒸散量的空气动力项, G 是土壤热通量, T_a 是平均气温,其他参数与(2)式相同。

变异系数是衡量各观测值变异程度的一个统计量,它是标准差与平均数的比值,计算公式如下:

$$C \cdot V = \frac{S}{\bar{x}} \times 100\% \quad (4)$$

式中, $C \cdot V$ 是变异系数, S 是标准差, \bar{x} 是均值。

气候因子序列的变化趋势采用一次线性倾向分析法;采用相关系数法分析要素之间的相关关系;气候因子的均值突变时间确定采用 t 检验法^[28]。

2 结果与分析

2.1 参考蒸散量与蒸发皿蒸发量的变化趋势

在石羊河流域上、中、下游各取1个站点,对比分析这3个站点1960~2009年蒸发皿蒸发量与参考蒸散量(图2)。可以看出,随着海拔高度的下降,蒸发皿蒸发量以及2种不同方法获得的参考蒸散量均逐渐增大。其中,上游的乌鞘岭蒸发皿年蒸发量在1500 mm波动,桑斯威特法获得的参考蒸散量在400 mm左右变化,彭曼蒙蒂斯公式计算的参考蒸散量介于二者之间;位于下游的民勤蒸发皿年蒸发量在2400~2950 mm之间,桑斯威特法、彭曼蒙蒂斯公式计算的参考蒸散量分别在650 mm、1000 mm上下波动;处于中游的武

威,蒸发皿年蒸发量和参考蒸散量均小于下游民勤的而大于上游乌鞘岭的。另外,对比蒸发皿蒸发量和参考蒸散量发现,各站点均是蒸发皿蒸发量明显大于参考蒸散量,且彭曼蒙蒂斯公式计算的参考蒸散量又明显大于桑斯威特法计算的参考蒸散量。这是因为蒸发皿蒸发量观测的是开放的小尺度水面的蒸发状况,而参考蒸散量是充分灌

水的草地水分蒸散的状况,虽然二者都由气象条件决定,但后者明显小于前者。桑斯威特法计算参考蒸散量时,依赖月平均气温,在冬季月平均气温小于 0°C 时,计算获得的参考蒸散量也为 0 mm ,而彭曼蒙蒂斯公式计算的参考蒸散量并不为 0 mm ,故桑斯威特法计算的参考蒸散量年值要明显小于彭曼蒙蒂斯公式计算的参考蒸散量。

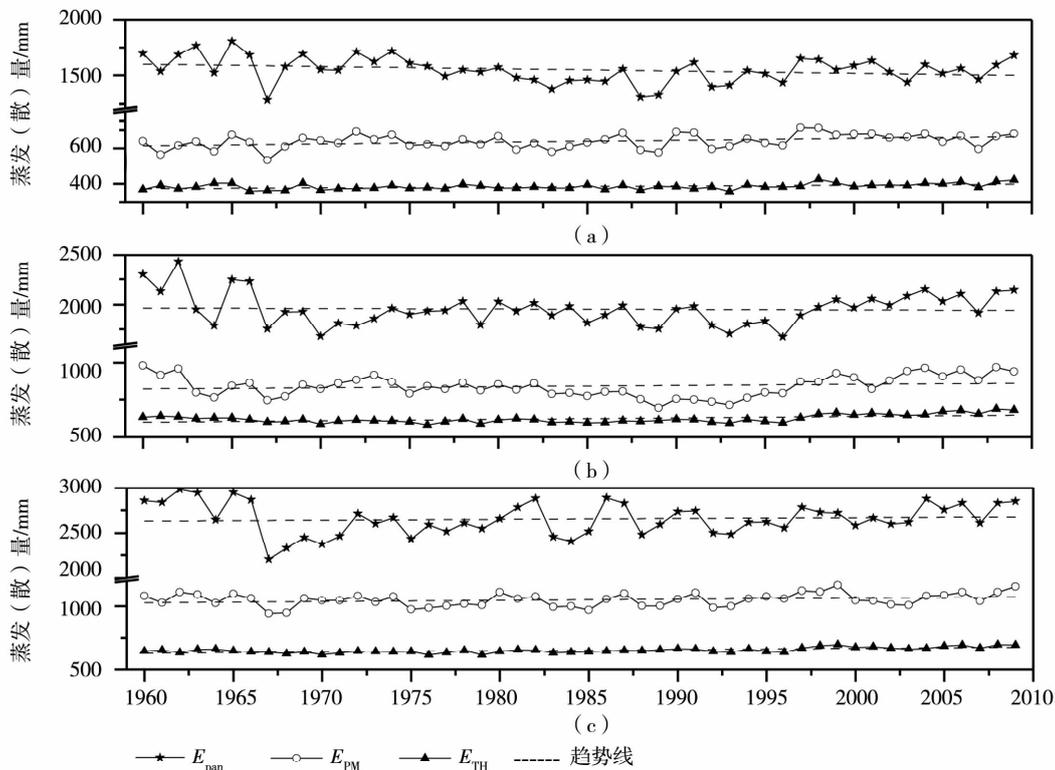


图2 1960~2009年石羊河流域上、中、下游蒸发皿蒸发量与参考蒸散量年际变化
(a) 乌鞘岭(上游);(b) 武威(中游);(c) 民勤(下游)

Fig. 2 The annual variation of pan evaporation and reference evapotranspiration in Shiyang river basin from 1960 to 2009

(a) Wushaoling(upstream), (b) Wuwei(midstream), (c) Minqin(downstream)

由于石羊河流域各站点1960年代蒸发皿蒸发量和参考蒸散量变异系数较大(表略),明显大于其他年代和近50 a的平均值。另外,除武威站有搬迁外,其他各站均没有调整变动,可认为是气候本身变率较大造成的。鉴于该年代数据的特殊性,将资料分成1960~2009年和1970~2009年2个时段来分析石羊河流域各站蒸发皿蒸发量和参考蒸散量的倾向率(表1)。可以看出,各站点2个观测时段的蒸发皿蒸发量和参考蒸散量变化趋势不完全一致。

表1显示,1960~2009年,除了乌鞘岭和武威2站蒸发皿蒸发量(E_{pan})呈减小趋势外,其他各站都呈增加趋势,其中上游区的古浪蒸发皿蒸发量的增加趋势达0.05显著性水平;彭曼蒙蒂斯公式和桑斯

威特法计算的参考蒸散量都呈增加趋势,其中上游区的乌鞘岭由彭曼蒙蒂斯公式计算的蒸散量达0.05显著性水平,而古浪增加趋势极显著($P < 0.01$),桑斯威特法计算的参考蒸散量,5个站点均呈极显著的增加趋势。由此可见,不同计算方法所获得的蒸散量的变化趋势在石羊河流域不完全一致。

1970~2009年,蒸发皿蒸发量的变化除了上游区的乌鞘岭有微弱的减少趋势外,其余各站均呈极显著的增加趋势,且增加量均超过了 $50\text{ mm}/10\text{ a}$ (表1),说明1970~2009年期间,石羊河流域大部分地区蒸发皿蒸发量存在增加趋势,这与全球其他地区的观测结果有一定的出入^[5],与1960~2009年相比,不同时段的选择对气候变化倾向

的分析结果有很大的影响。此外,彭曼蒙蒂斯公式计算的1970~2009年石羊河流域各站点参考蒸散量大部分都呈增加趋势(永昌存在微弱的减

少趋势),而桑斯威特法计算的参考蒸散量都呈极显著增加趋势(表1),变化趋势与1960~2009年的趋势一致。

表1 石羊河流域不同区位蒸发皿蒸发量与参考蒸散量变化趋势(单位:mm/10 a)

Tab.1 The change trend of pan evaporation and reference evapotranspiration for different area in Shiyang river basin (Unit:mm/10 a)

时段	方法	上游		中游		下游
		乌鞘岭	古浪	武威	永昌	民勤
1960~2009	E_{pan}	-20.372	29.519*	-4.630	22.381	9.413
	E_{PM}	10.028*	17.819**	7.569	5.178	9.401
	E_{TH}	5.023**	7.183**	9.581**	5.852**	9.750**
1970~2009	E_{pan}	-3.020	96.054**	51.641**	56.295**	53.056**
	E_{PM}	8.434	15.308*	21.255	-0.960	17.100*
	E_{TH}	7.969**	12.382**	19.238**	9.857**	15.520**

注: *表示线性趋势达0.05显著水平; **表示线性趋势达0.01极显著水平

2.2 参考蒸散量与蒸发皿蒸发量变化原因的估算模型分析

依据参考蒸散量、蒸发皿蒸发量的估算模型,对它们求时间的导数,从而观察引起参考蒸散量、蒸发皿蒸发量变化的原因。

对桑斯威特法计算参考蒸散量的(1)式求时间的导数:

$$\frac{dE_{pan}}{dt} = \frac{dE_{P,R}}{dt} + \frac{dE_{P,A}}{dt} \approx \frac{\partial E_{P,R}}{\partial R} \frac{dR}{dt} + \frac{\partial E_{P,A}}{\partial u} \frac{du}{dt} + \frac{\partial E_{P,A}}{\partial VPD} \frac{dVPD}{dt} + \frac{\partial E_{P,A}}{\partial \Delta} \frac{d\Delta}{dt} \frac{dT_a}{dt} \quad (6)$$

$$\frac{dE_{pan}}{dt} = \frac{dE_{P,R}}{dt} + \frac{dE_{P,A}}{dt} \approx R^* + U^* + VPD^* + T_a^* \quad (7)$$

式中,分别定义 R^* 、 U^* 、 VPD^* 、 T_a^* 为蒸发皿蒸发量计算模型中辐射量、风速、空气饱和差、平均气

$$\frac{dE_{TH}}{dt} = 16 K \frac{dT}{dt} \approx T^* \quad (5)$$

温的变率对蒸发量变化的贡献。

对蒸发皿蒸发量计算模型(2)式求时间的导数:

温的变率对蒸发量变化的贡献。

对彭曼蒙蒂斯公式计算模型(3)式求时间的导数:

$$\frac{dE_{PM}}{dt} \approx \frac{\partial E_{PM(rad)}}{\partial R} \frac{dR}{dt} + \frac{\partial E_{PM(aero)}}{\partial u} \frac{du}{dt} + \frac{\partial E_{PM(aero)}}{\partial VPD} \frac{dVPD}{dt} + \frac{\partial E_{PM(aero)}}{\partial \Delta} \frac{d\Delta}{dt} \frac{dT_a}{dt} \quad (8)$$

$$\frac{dE_{PM}}{dt} = \frac{dE_{PM(rad)}}{dt} + \frac{dE_{PM(aero)}}{dt} \approx R'^* + U'^* + VPD'^* + T_a'^* \quad (9)$$

式中,分别定义 R'^* 、 U'^* 、 VPD'^* 、 $T_a'^*$ 为彭曼蒙蒂斯公式计算的参考蒸散量模型中辐射量、风速、空气饱和差、平均气温对蒸散量变化的贡献。

由(5)式可以看出,桑斯威特法中参考蒸散量的变化量主要由气温变化率项 $(\frac{dT}{dt})$ 所决定,即桑斯威特法计算的参考蒸散量的变化趋势与气温的变化趋势一致。观察(7)式和(9)式发现,蒸发皿蒸发量和彭曼蒙蒂斯公式计算的参考蒸散量均由辐射变

化项(R^* 和 R'^*)、风速变化项(U^* 和 U'^*)、空气饱和差变化项(VPD^* 和 VPD'^*)、气温变化项(T_a^* 和 $T_a'^*$)共同决定,可见蒸发皿蒸发量和彭曼蒙蒂斯公式计算的参考蒸散量变化趋势不完全决定于一项气候因子的变化。当上述所有气候因子变化趋势相同时,蒸散发与这些因子具有相同的变化趋势,当上述气候因子变化趋势相反时,蒸散发的变化趋势应与起主导作用的气候因子变化趋势相同,当上述气候因子所引起的蒸散发变化趋势相反,且变率相当并

相互抵消时,蒸散发有可能保持不变。从以上分析中可知,只有桑斯威特法计算的参考蒸散量与气温密切相关,而另2种方法计算的蒸散发则所受因素较多,无法从理论上断定其变率受何种因子主导,又由于气候因子变动较快,所以可能在不同地区、不同时期造成蒸散发变化的主导因子会不完全相同。

2.3 参考蒸散量与蒸发皿蒸发量变化原因的统计分析

由于观测站点缺乏辐射资料,而FAO一般推荐使用每日的日照时数推算区域的辐射量^[22],因而在分析气候因子对蒸散发的影响时,本文选择日照时数作为辐射项。表2为石羊河流域不同区位蒸发皿蒸发量和参考蒸散量与气候因子的相关关系。可以看出,对于蒸发皿蒸发量和2种不同方法计算的参考蒸散量都与流域内各站点空气饱和差存在极显著的相关关系($P < 0.05$),说明在石羊河流域空气饱和差对蒸散发的作用较大。全流域只有桑斯威特法计算的参考蒸散量与气温呈极显著的相关关系($P < 0.05$),而蒸发皿蒸发量和彭

曼蒙蒂斯公式计算的蒸散量与气温的相关关系却因站点或观测时段的不同而有所差异。其中在流域中游,辐射项、风速与彭曼蒙蒂斯公式计算的蒸散量相关性极显著,而在其他站点则相关性较差。流域各站点降水与蒸发皿蒸发量呈较好的负相关关系,且大部分站点的相关性甚至达到极显著水平,这可能与“蒸发补充理论”有一定的联系^[16]。气温日较差的变化与气溶胶和云量的变化有关系。观察蒸散量与气温日较差的相关关系发现,仅上游的乌鞘岭蒸散量变化受气温日较差影响较大,而其他各站点无明显相关。此外还发现,不同时段,气候因子与蒸散量的相关关系存在变动,1960~2009年,彭曼蒙蒂斯公式计算的参考蒸散量与乌鞘岭日照时数和风速呈极显著相关,而1970~2009年,上述变量间的相关性极小;同样,1960~2009年,武威站蒸发皿蒸发量与日照时数和风速存在显著相关关系,而1970~2009年,它们的相关关系不显著,从而进一步说明时间段的选择对短期气候分析影响较大。

表2 石羊河流域各站点蒸发皿蒸发量和参考蒸散量与气候因子的相关分析
Tab.2 The correlation analysis between pan evaporation, reference evapotranspiration and climatic factors at different area in Shiyang River Basin

气候因子	上游		中游		下游	
	乌鞘岭	古浪	武威	永昌	民勤	
E_{pan}	辐射项 日照时数	-0.038/0.396 *	-0.195/-0.206	0.335 */0.225	-0.283 */-0.360 *	0.173/-0.060
	动力项 风速	-0.037/0.398 *	-0.195/-0.204	0.335 */0.224	-0.284 */-0.363 *	0.171/-0.063
	气温	0.296/0.324 *	0.562 **/0.680 **	0.501 **/0.677 **	0.582 **/0.590 **	0.480 **/0.563 **
	空气饱和差	0.744 **/0.710 **	0.764 **/0.820 **	0.743 **/0.810 **	0.780 **/0.765 **	0.740 **/0.758 **
其他	降水	-0.613 **/-0.573 **	-0.539 **/-0.499 **	-0.458 **/-0.431 **	-0.403 **/-0.244	-0.462 **/-0.390 *
	气温日较差	0.590 **/0.606 **	0.066/-0.218	0.123/-0.131	0.509 **/0.448 **	0.297 */0.003
E_{PM}	辐射项 日照时数	0.377 **/0.097	0.247/0.034	0.695 **/0.629 **	0.382 **/0.365 **	0.347 */0.288
	动力项 风速	0.378 **/0.098	0.247/0.036	0.693 **/0.628 **	0.381 **/0.363 *	0.346 */0.284
	气温	0.639 **/0.610 **	0.603 **/0.559 **	0.606 **/0.650 **	0.339 */0.207	0.560 **/0.575 **
	空气饱和差	0.871 **/0.950 **	0.866 **/0.895 **	0.813 **/0.802 **	0.729 **/0.701 **	0.834 **/0.801 **
其他	降水	-0.394 **/-0.477 **	-0.466 **/-0.686 **	-0.260/-0.175	-0.322 */-0.390 *	-0.338 */-0.268
	气温日较差	0.668 **/0.665 **	-0.133/0.104	-0.090/-0.314 *	0.323 */0.270	0.202/0.138
E_{TH}	辐射项 日照时数	0.131/-0.100	-0.466 **/-0.636 **	0.053/-0.012	-0.508 **/-0.588 **	-0.329 */-0.381 *
	动力项 风速	0.132/-0.100	-0.464 **/-0.633 **	0.051/-0.013	-0.509 **/-0.589 **	-0.331 */-0.382 *
	气温	0.634 **/0.705 **	0.881 **/0.900 **	0.914 **/0.939 **	0.844 **/0.858 **	0.861 **/0.887 **
	空气饱和差	0.366 **/0.472 **	0.785 **/0.848 **	0.903 **/0.940 **	0.661 **/0.690 **	0.736 **/0.831 **
其他	降水	0.131/-0.068	-0.386 **/-0.456 **	-0.222/-0.186	-0.022/0.045	-0.039/-0.050
	气温日较差	0.287 */0.339 *	-0.405 **/-0.516 **	-0.158/-0.283	0.144/0.092	-0.455 **/-0.523 **

注:“/”的左边为1960~2009年的相关系数,右边为1970~2009年的相关系数;*表示相关系数达0.05显著性水平,**表示相关系数达0.01极显著性水平

对流域各站点气候因子和蒸散发分年代求算变异系数,比较分析引起各区域蒸散发变异的因素。由表3可以看出,全流域蒸发皿蒸发量的变异系数与空气饱和差、气温日较差的变异系数相关性极显著,可知石羊河流域蒸发皿蒸发量的变异主要是由空气饱和差和气温日较差的变异所引起的;彭曼蒙蒂斯公式获得的参考蒸散量变异主要由日照时数、风速、空气饱和差以及气温日较差引起,而桑斯威特法计算获得的参考蒸散量变异原因在于气温和空气饱和差的变化。从站点来看,上游的乌鞘岭蒸发皿蒸发量的变化由日照时数、风速、气温和气温日较差决定,彭曼蒙蒂斯法、

桑斯威特法计算的蒸散量变异均由空气饱和差的变化决定;古浪蒸发皿蒸发量的变化由日照时数、风速、气温、空气饱和差以及气温日较差决定,彭曼蒙蒂斯公式计算的参考蒸散量变异主要由日照时数和风速引起。中游的武威蒸发皿蒸发量变化受气温日较差的影响,彭曼蒙蒂斯公式计算的参考蒸散量变异主要决定于日照时数、风速以及空气饱和差和气温日较差,桑斯威特法获得的参考蒸散量主要受气温和空气饱和差的影响;永昌蒸发皿蒸发量和彭曼蒙蒂斯公式计算的蒸散量都受空气饱和差的影响。下游的民勤蒸散量的变异与各要素的相关性均不显著。

表3 石羊河流域各站点蒸发皿蒸发量和参考蒸散量变率与气候因子变异系数的相关分析

Tab.3 The correlation analysis between variable coefficient of pan evaporation, reference evapotranspiration and variable coefficient of climatic factors in different area in Shiyang river basin

区域		辐射项		动力项		其他	
		日照日数	风速	气温	空气饱和差	降水	气温日较差
全流域	E_{pan}	0.349	0.352	0.278	0.666 **	0.216	0.630 **
	E_{PM}	0.702 **	0.702 **	0.184	0.853 **	0.496 **	0.724 **
	E_{TH}	0.151	0.151	0.412 *	0.529 **	0.039	0.272
乌鞘岭	E_{pan}	0.917 **	0.918 **	0.861 *	0.719	0.715	0.800 *
	E_{PM}	0.631	0.629	0.566	0.954 **	0.406	0.795 *
	E_{TH}	0.365	0.366	0.654	0.796 *	0.308	0.206
古浪	E_{pan}	0.873 *	0.872 *	0.364 *	0.761 *	0.148	0.873 *
	E_{PM}	0.821 *	0.820 *	0.318	0.652	-0.101	0.716
	E_{TH}	0.079	0.069	0.649	0.442	0.032	0.001
武威	E_{pan}	0.674	0.675	0.437	0.730	0.322	0.793 *
	E_{PM}	0.967 **	0.967 **	0.754	0.918 **	0.088	0.779 *
	E_{TH}	0.567	0.566	0.908 **	0.778 *	-0.713	0.331
永昌	E_{pan}	0.387	0.388	0.197	0.874 *	0.479	0.202
	E_{PM}	0.273	0.280	-0.149	0.833 *	0.797 *	0.733
	E_{TH}	0.567	0.562	0.508	-0.122	-0.119	0.092
民勤	E_{pan}	0.323	0.334	0.299	0.636	0.296	0.674
	E_{PM}	0.505	0.512	0.568	0.425	0.425	0.484
	E_{TH}	0.342	0.342	0.741	0.107	0.286	0.313

注: * 表示相关关系达0.05显著性水平, ** 表示相关关系达0.01极显著性水平

t 检验法主要应用于气候突变检验^[21],其本质是检测一个取值点两端 n 个单位时间段内所检验要素平均值的差异,从而表征该取值点前后要素平均值是否存在显著差异。对石羊河流域蒸发量及其气

候影响因子进行 t 检验(表4),以便分析气候因子跃变对蒸散量变化的影响或气候因子对蒸散发跃变的响应。可以看出,乌鞘岭蒸发皿蒸发量在1980年发生了极显著的突变(减少),而对应的气候因子产

生突变的是日照时数和风速,说明这二者对乌鞘岭蒸发皿蒸发量的突变(减少)贡献较大,同时还发现该站蒸发皿蒸发量的增加突变与气温和空气饱和差的突变增加时期一致,说明气温和空气饱和差对乌鞘岭蒸发皿蒸发量的增加影响较大。此外,乌鞘岭日照时数、风速以及气温分别在 1970、1985 年存在极显著的增加突变,但是对应的时段蒸发皿蒸发量并未显著变化,这可能是由于同期其他气候因子存在相反的变化趋势,制衡了蒸发量的变化。同样看出,乌鞘岭站,彭曼蒙蒂斯公式、桑斯威特法计算的参考蒸散量分别在 1997、1998 年发生了突变,这与气温和空气饱和差的突变相一致。古浪站 1970 年蒸发皿蒸发量的显著减少与同期气温日较差的显著减少一致,其在 1984 年的增加与同时期风速的增加一致,桑斯威特法计算的蒸散量在 1998 年的增加与同时期气温的增加一致。同时发现日照时数、风速、气温日较差分别在 1998、1998、1997 年的极显著减少并没有引起蒸发量的突变。武威蒸发皿蒸发量在 1988 年的显著减少与空气饱和差同期的显著减少

一致,彭曼蒙蒂斯公式计算的参考蒸散量在 1985 年的极显著减少与风速和日照时数同期的显著减少一致。另外,武威蒸发皿蒸发量在 1998 年的增加与气温和空气饱和差同期的增加一致,彭曼蒙蒂斯公式、桑斯威特法计算的参考蒸散量分别在 1997、1998 年的突变,与气温和空气饱和差同期的变化一致。永昌蒸发皿蒸发量在 1991 年的增加与同期气温日较差的增加一致,而其彭曼蒙蒂斯公式、桑斯威特法计算的参考蒸散量的增加与同时期的日照时数、风速以及气温的增加一致。民勤只有桑斯威特法计算的参考蒸散量在 1998 年的突变与同时期气温的突变一致,说明气温是引起民勤桑斯威特法获得的参考蒸散量在 1998 年突变的主要原因,而日照时数、风速、气温、空气饱和差以及气温日较差其他时期的突变并没有引起蒸散发的突变。上述分析说明蒸发皿蒸发量以及参考蒸散量的变化是许多气候因子共同作用的结果,在某些时期一些要素的作用较大,而在另外一些时期,气候因子的作用相互制衡,相互抵消,从而导致蒸散发的变化并不明显。

表 4 石羊河流域各站点蒸发皿蒸发量、参考蒸散量以及气候因子均值突变年份的比较

Tab. 4 The comparison for the mutation years of pan evaporation, reference evapotranspiration and climatic factors in different area in Shiyang river basin

区域	E_{pan}	E_{PM}	E_{TH}	辐射项		动力项		其他	
				日照日数	风速	气温	空气饱和差	降水	气温日较差
乌鞘岭	1980 **	/	/	1981 **	1981 **	/	/	/	/
	<u>1997</u> *	<u>1997</u> *	<u>1998</u> **	<u>1970</u> **	<u>1970</u> **	<u>1985</u> **, <u>1998</u> **	<u>1997</u> **	/	/
古浪	1970 **	/	/	1998 **	1998 **	/	/	/	1973 *, 1997 **
	<u>1984</u> **	/	<u>1998</u> **	<u>1970</u> **, <u>1983</u> *	<u>1970</u> **, <u>1983</u> * <u>1986</u> **, <u>1998</u> **	<u>1997</u> *	/	/	/
武威	1970 *, 1988 *	1985 **	/	1985 **	1985 **	/	1987 *	/	1998 **
	<u>1998</u> **	<u>1997</u> **	<u>1998</u> **	<u>1972</u> *, <u>1995</u> **	<u>1972</u> *, <u>1995</u> **	<u>1998</u> **	<u>1998</u> **	/	<u>1976</u> *, <u>1990</u> **
永昌	/	/	/	1980 **, 1996 **	1980 **, 1996 **	/	/	/	2000 *
	<u>1991</u> *	<u>1971</u> *	<u>1998</u> **	<u>1970</u> **	<u>1970</u> **	<u>1977</u> *, <u>1998</u> **	1977 **	/	<u>1992</u> **
民勤	/	/	/	1984 **, 2000 *	1984 **, 2000 *	/	/	/	<u>1975</u> *, <u>1997</u> **
	/	/	<u>1998</u> **	/	/	<u>1986</u> **, <u>1998</u> **	<u>1985</u> *, <u>1997</u> *	/	/

注:有下划线的年份表示增加,无下划线的年份表示减少;“/”表示所检验时段无显著变化;* 表示相关系数达 0.05 显著性水平,** 表示相关系数达 0.01 极显著性水平

3 讨论与结论

从全球大部分区域的研究结果看,蒸发皿蒸发量和参考蒸散量呈一定的下降趋势,这与全球气候变暖背景下,世界气象组织预计的结果相反^[16,29-31]。然而,石羊河流域的研究发现 1960~2009 年期间 5 个气象站中有 3 个气象站蒸发皿蒸发量呈增加趋势,而

由彭曼蒙蒂斯公式、桑斯威特法计算的参考蒸散量在 5 个气象站均呈增加趋势。1970~2009 年,除了上游的乌鞘岭蒸发皿蒸发量呈微弱的减少趋势外,流域其他站点蒸发皿蒸发量均增加极显著。这一结果与国外大部分结论以及中国其他流域所得的结果不尽一致,也说明了全球不同区域气候变化具有特性。此外,时间段的选择对分析结论的影响较大,这在已有

的文献中也有一定的反映^[4],造成差异的原因是某些时段气候因子的年际变率过大,对整个分析时期的结果产生了影响,因而在气候分析中应该特别注意一些气候因子变率过大的时期,其选取或剔除可能会获得完全不同的结果。

通过对估算模型的分析得出,区域蒸散发的变化受气温、辐射、空气饱和差以及风速变化项的共同影响。任何一项的变动都可能会引起蒸散发的变化,这正是随着全球气候的变暖,各地蒸发皿蒸发量并没有随之增加的原因所在。此外,空气饱和差是影响石羊河流域蒸发量变动的主要因素,这与已有的研究结论一致^[32]。桑斯威特法计算的参考蒸散量由模型分析可知气温是决定其变化的主要因素,通过相关分析及突变时间的确定也验证了这一结论。

从突变理论的角度来看,蒸散发的每一次突变都伴随着相应的气候因子的突变,在这些气候因子的作用下,蒸散发也发生了急剧的变化,从而产生了跃变。同时也注意到,某些时期一些影响蒸散发变动的关键气候因子尽管发生了突变,但蒸散发未发生任何变动,进一步说明了影响蒸发量变动的各要素均处于不断的变化中,有时它们变动方向一致,相互加强,有时变动方向相反,相互减弱,抵消了对蒸散发的影响。

参考文献:

- [1] 马柱国,黄刚,甘文强,等.近代中国北方干湿变化趋势的多时段特征[J].大气科学,2005,29(5):671-681.
- [2] 杨小利,王丽娜.4种干旱指标在甘肃平凉地区的业务适应性分析[J].干旱气象,2013,31(2):419-424.
- [3] 王劲松,郭江勇,倾继祖.一种K干旱指数在西北地区春旱分析中的应用[J].自然资源学报,2007,22(5):709-717.
- [4] Vicente S M, Begueria S, Lopez - Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate, 2010, 23(7):1696-1718.
- [5] Fu G B, Stephen P C, Yu J J. A critical overview of pan evaporation trends over the last 50 years[J]. Climatic Change, 2009,97(1-2):193-214.
- [6] 汪治桂,王建兵,冯景昌,等.甘肃玛曲县近40a潜在蒸散量的变化趋势[J].干旱气象,2011,29(4):488-491.
- [7] 张方敏,申双和.我国参考作物蒸散的空间分布和时间趋势[J].南京气象学院学报,2007,30(5):705-709.
- [8] 段春锋,缪启龙,曹雯.西北地区参考作物蒸散变化特征及其主要影响因素[J].农业工程学报,2011,27(8):77-83.
- [9] 段春锋,缪启龙,曹雯,等.西北地区小型蒸发皿资料估算参考作物蒸散[J].农业工程学报,2012,28(4):94-99.
- [10] Cohen S, Iantetz A, Stanhill G. Evaporative climate changes at Bet Dagan, Israel, 1964-1998[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002,111(2):83-91.
- [11] 李景鑫,王式功,李艳,等.西宁市蒸发量变化特征及其影响因素[J].干旱气象,2013,31(3):497-504.
- [12] Lawrimore J H, Peterson T C. Pan Evaporation Trends in Dry and Humid Regions of the United States[J]. Journal of hydrometeorology, 2000,1(12):543-546.
- [13] Michael L R, Farquhar G D. Changes in New Zealand pan evaporation since the 1970s[J]. International Journal of Climatology, 2005,25(15):2031-2039.
- [14] Hossein T, Safar M. Changes of pan evaporation in the West of Iran[J]. Water Resources Management, 2011,25(1):97-111.
- [15] Brutsaert W, Parlange M B. Hydrological cycle explains the evaporation paradox[J]. Nature,1998,396:30-31.
- [16] Ohmura A, Martin W. Is the Hydrological Cycle Accelerating[J]. Science, 2002,298:1345-1346.
- [17] Farquhar G D, Michael L R. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002[J]. International Journal of Climatology, 2004,24(9):1077-1090.
- [18] Gifford R M, Farquhar G D, Nicholls N, et al. Workshop summary on pan evaporation; an example of the detection and attribution of climate change variables [A]. Australia Academy of Sciences, 2005. 22-23.
- [19] 左洪超,鲍艳,张存杰,等.蒸发皿蒸发量的物理意义、近40年变化趋势的分析和数值试验研究[J].地球物理学报,2006,49(3):680-688.
- [20] 丛振涛,倪广恒.“蒸发悖论”在中国的规律分析[J].水科学进展,2008,19(2):147-152.
- [21] 宋萌勃,陈吉琴,张晓健,等.长江流域1951-2000年蒸发皿蒸发量变化趋势[J].水资源保护,2011,27(1):24-28.
- [22] Pereira L S, Allen R G, Raes D, et al. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements - FAO irrigation and drainage paper No. 56 [M]. Rome:FAO, 1998.
- [23] 刘晓英,林而达,刘培军. Priestley - Taylor 与 Penman 法计算参照作物腾发量的结果比较[J].农业工程学报,2003,19(1):32-36.
- [24] 何炎红,田有亮,郭连生.乌兰布和沙漠可能蒸散的研究[J].干旱气象,2007,25(2):61-66.
- [25] Michael L R, Rotstayn L D, Farquhar G D, et al. On the attribution of changing pan evaporation[J]. Geophysical Research Letters, 2007,34(17):L17403.
- [26] Linacre E T. Estimating U. S. class a pan evaporation from few climate data[J]. Water International, 1994,19(1):5-14.
- [27] Thom A S, Thony J L, Vauclin M. On the proper employment of evaporation pans and atmometers in estimating potential transpiration [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1981, 107:711-736.
- [28] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术(2版)[M].北京:气象出版社,2007.42-63.
- [29] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength[J]. Nature,1995,377:687-688.
- [30] Michael L R, Michael T H, Farquhar G D. Pan Evaporation Trends and the Terrestrial Water Balance. I[J]. Energy Balance

and Interpretation Geography Compass, 2009, 3(2):746-760.

(1):94-99.

[31] 张高斌, 郭建茂, 吴元芝, 等. 山西万荣县近 52 a 气候特征及其与参考作物蒸散量和土壤湿度的关系[J]. 干旱气象, 2011, 29

[32] 李玲萍, 李岩瑛, 刘明春. 石羊河流域 1961-2005 年蒸发皿蒸发量变化趋势及原因初探[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3):832-841.

Variation Characteristics of Reference Evapotranspiration and Pan Evaporation During 1960-2009 in Shiyang River Basin

ZHAO Funian¹, ZHAO Ming², WANG Ying¹, ZHANG Pengfei³

(1. Institute of Arid Meteorology, CMA, Key Open Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of CMA, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020, China;

2. Qinhuangdao Meteorological Bureau of Hebei Province, Qinhuangdao 066000, China;

3. Wuwei Meteorological Bureau of Gansu Province, Wuwei 733000, China)

Abstract: Based on the daily meteorological data of 5 weather stations in Shiyang river basin during 1960-2009, the change trends of pan evaporation and reference evapotranspiration and their cause were analyzed by using estimation model and statistical method. The results showed that the evapotranspiration of Shiyang river basin had an increasing trend in the past 50 years, and in some observational stations it had an extremely significant increase. There was a certain influence on the results of evapotranspiration analysis in different periods of 1960-2009 and 1970-2009. According to theoretical analysis of estimation models, it was thought that the change of reference evapotranspiration calculated by Thornthwaite method mainly determined by the temperature, while the pan evaporation and reference evapotranspiration calculated by Penman-Monteith formula were resulted from interactions among radiation, temperature, wind speed and vapor pressure deficit. Meanwhile, the results of the correlation analysis and mutations test verified the conclusion from above, and it was also concluded that the mainly determinant factors of the change of the pan evaporation and reference evapotranspiration in Shiyang river basin in the past 50 years was vapor pressure deficit.

Key words: reference evapotranspiration; pan evaporation; Shiyang river basin; Penman-Monteith formula; Thornthwaite method