

石河子地区参考作物蒸散量变化特征及气候因子的定量分析

罗那那, 巴特尔·巴克, 吴燕锋

(新疆农业大学 草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052)

摘 要:基于石河子地区 1961—2012 年 4 个气象站数据,采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 模型计算了参考作物蒸散量(ET_0),分析了 ET_0 时间变化特征及其对气象因子的敏感性,并结合各气象要素的多年相对变化定量分析了气象因子对 ET_0 的贡献。结果表明:近 52 年来,石河子地区平均 ET_0 以 1.19 mm/a 的趋势增加,2004 年为突变年,并存在 27 a 左右的周期。 ET_0 变化对各气象要素的敏感性以及气象因子对 ET_0 变化的贡献有所不同,其中,平均气温的贡献率较小,但其敏感系数最高,对 ET_0 变化的贡献是最大,使平均气温成为 ET_0 变化贡献最大的气象因素。突变后最高气温和最低气温的贡献率较大,但其敏感系数较低,平均气温为主导因子明显上升。

关键词:参考作物蒸散量; Penman-Monteith; 敏感分析; 贡献分析

中图分类号:S161.4; S311

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)05-0251-05

Correlation Analysis of Potential Evapotranspiration and Key Climatic Factors in Shihezi City

LUO Nana, Batur · Bake, WU Yanfeng

(College of Grassland and Environmental Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract:Based on data obtained from four meteorological stations during the period from 1961 to 2012 in Shihezi City, the reference evapotranspiration (ET_0) was calculated using Penman-Monteith model recommended by FAO. Then, the contribution of meteorological factors to ET_0 was investigated by sensitive analysis and contribution analysis. The results showed that average of ET_0 presented increasing trend (1.19 mm/a) during the past 52 years and mutated in 2004 in Shihezi City. The meteorological factors have different sensitivity coefficients and contribution rates to variability of ET_0 . Among which, the contribution rate of average temperature is low, but sensitivity coefficients are the highest. Change in the average temperature becomes the largest contribution to ET_0 . The sensitivity coefficients and contribution rate presented some differences before and after the mutation of meteorological factors. Contributions of the maximum temperature and the minimum temperature are relatively great after mutations, but the sensitivity coefficients are low, the average temperature as the leading factor increased significantly. The average temperature is the driving force of the variability of ET_0 , especially more significant after mutation.

Keywords:reference crop evapotranspiration; Penman-Monteith; sensitivity analysis; contribution analysis

在全球和中国气候变暖背景条件下,风速、气温、太阳辐射、降水等气象要素都有不同程度的变化^[1-3],而这些要素与潜在蒸散的变化密切相关。潜在蒸散表示在一定气象条件下水分供应不受限制时,某一固定下垫面可能达到的最大蒸散量^[1]。而参考作物蒸

散量是表征大气蒸散能力,评价气候干旱程度、植被耗水量的重要指标。其在估算作物需水量、评价农业水分资源、制定合理的灌溉制度和预报作物产量中发挥着不可或缺的作用,FAO 推荐的基于气象要素的 Penman-Monteith 公式,具有充分的理论基础,结果

收稿日期:2015-11-03

修回日期:2015-11-16

资助项目:国家国际科技合作计划项目(2010DFA92720-13);2014 年度新疆研究生科研创新项目(XJGRI2014079);新疆维吾尔自治区土壤学重点学科

第一作者:罗那那(1989—),女,甘肃天水人,硕士研究生,研究方向为干旱区生态与环境。E-mail:luonan27@163.com

通信作者:巴特尔·巴克(1973—),男(维吾尔族),新疆莎车县人,博士,教授,主要从事干旱区生态与环境研究。E-mail:bateerbake@163.com

仅受当地气候要素的影响,与下垫面、土壤类型等无关^[4],在国内外不同气候区域的应用效果都比较理想^[5]。近年来,许多学者利用敏感性分析方法研究 ET_0 变化的原因,取得了一些有意义的成果。刘昌明等^[6]认为 ET_0 不同时空分布的敏感因子不一致;刘小莽等^[7]发现海河流域 ET_0 对水汽压最敏感;Gong等^[8]研究表明长江流域 ET_0 对相对湿度最敏感;曾丽红等^[9]发现东北地区生长季气温对 ET_0 的影响最明显;曹雯等^[10]研究了西北地区生长季的 ET_0 对气象要素的敏感性,表明太阳辐射对 ET_0 的变化最敏感;吴文玉等^[11]认为安徽省相对湿度对气候倾向率及相关性等分析方法可以从定性角度得出 ET_0 的变化与不同气象要素变化的关联性,但并不能客观定量地衡量气象要素变化导致的 ET_0 的变化,即气象要素变化对 ET_0 的变化贡献。因此,将敏感性分析和气象要素的相对变化结合起来,从而探讨气象要素对 ET_0 变化的贡献和响应,可以更好解释 ET_0 变化与各气象要素的相关性。

石河子市是新疆生产建设兵团农八师师部所在地。位于新疆维吾尔自治区北部,石河子垦区中部,天山北麓,准噶尔盆地南缘。东以玛纳斯河为界,与玛纳斯县为邻;南、西、北三面与沙湾县环接市区。市区东距自治区首府乌鲁木齐 150 km,西距霍尔果斯口岸 500 km。有汉、回、维吾尔、哈萨克等 27 个民族。地势平坦,平均海拔高度 450.8 m,自东南向西北倾斜。主要河流有玛纳斯河、宁家河、金沟河、大南沟等。属典型的大陆性气候,冬季严寒,夏季酷热,干燥少雨,蒸发量大,春季升温快,秋季降温迅速,昼夜温差大。在气候变暖的背景下,石河子地区各气象要素均有不同程度的变化,尤其是近年来变化趋势更为显著,其中气温呈上升趋势,风速、日照时数、降水呈减小的变化趋势^[12-13],由于最高最低气温、风速、日照时数、相对湿度等气象要素与 ET_0 的变化密切相关,各气象要素的变化必将导致 ET_0 的改变,因此,定量研究各气象要素对 ET_0 变化的贡献,可为深入理解 ET_0 对气候变化的响应提供科学依据。本文利用石河子地区 1961—2012 年 4 个气象站的气象观测数据和 Penman-Monteith 模型定量研究各气象要素对 ET_0 变化的敏感性和贡献率,以期为区域农业资源开发和利用、水资源优化配置研究提供参考。

1 数据和研究方法

1.1 数据

本研究使用的资料主要为石河子地区 4 个气象站点(石河子市、炮台、乌拉乌苏和莫索湾)观测数据

较完整的 1961—2012 年时段,数据经过严格的质量检验。气象因子包括逐日最高气温(T_{\max})、最低气温(T_{\min})、相对湿度(RH)、日照时数(SH)、风速(WS)、平均气温(T_{mean})等。

1.2 研究方法

1.2.1 Penman-Monteith 模型 利用 FAO 在 1998 年推荐的 Penman-Monteith 公式^[5]计算 ET_0 ,它以能量平衡和水汽扩散理论为基础,较全面地考虑了影响潜在蒸散的各种因素,有较好的物理依据,应用较广泛。

1.2.2 敏感性分析 ET_0 的敏感性分析是从定量角度分析一个或几个相关气象因子发生变化时,对 ET_0 变化影响的定量参数。通过假定其他参数不变,分析单个参数的变化对模型的作用,确定模型的敏感系数,是常用的敏感性分析方法^[14]。敏感系数定义为 ET_0 变化率与气象因子变化率的比值:

$$S_{V_i} = \lim_{\Delta V_i \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta ET_0 / ET_0}{\Delta V_i / V_i} \right) = \frac{\partial ET_0}{\partial V_i} \cdot \frac{V_i}{ET_0} \quad (1)$$

式中: S_{V_i} 为敏感系数; ΔET_0 无量纲,为参考作物蒸散量的变化量; V_i 和 ΔV_i 分别为气象因子及其变化量。

1.2.3 贡献分析 气象因子对 ET_0 的贡献将单个气象因子的敏感系数与该要素的多年相对变化相乘,得到由该要素引起的 ET_0 的变化,即该要素对 ET_0 变化的贡献^[14]。导致 ET_0 增加为正贡献,导致 ET_0 减小为负贡献。表达式如下:

$$\text{Con}_{V_i} = S_{V_i} \cdot \text{RC}_{V_i} \quad (2)$$

$$\text{RC}_{V_i} = \frac{n \cdot \text{Trend}}{|a_v|} \times 100\% \quad (3)$$

式中: Con_{V_i} 是气象因子 V_i 对 ET_0 变化的贡献; RC_{V_i} 是 V_i 的多年相对变化,利用 1961—2010 年 50 年 V_i 的平均值 a_v 和逐年变化率 Trend 计算得到;逐年变化率 Trend 可由趋势分析法计算得到; ET_0 多年相对变化 RC_{ET_0} 称为 ET_0 的实际变化,亦可依照 RC_{V_i} 的计算得到。

1.2.4 其他研究方法 采用 Mann-Kendall 非参数检验方法^[15]进行突变分析。气象要素的长期变化趋势采用线性回归分析^[16]。回归系数表示气候变量的趋势倾向,回归系数为正时,说明随时间的增加气候变量呈上升趋势;反之亦然,回归系数的大小反映了上升或下降的速率。气候趋势系数表示某气候要素的长期趋势变化的方向和程度,即时间和气候要素的相关系数。此外,基于小波分析探究年潜在蒸散量的周期特征。

2 结果与分析

2.1 参考作物蒸散量和各气候影响因子的年际变化 近 52 年来,石河子地区 ET_0 和降水量均呈明显

增加趋势,气候倾向率分别为 1.194,2.073 mm/a (图 1A,1E)。日照时数(0.007 h/a)、相对湿度(−0.042%/a)以及平均气温(0.019℃/a)、最高气温(0.028℃/a)、最低气温(0.035℃/a)略有增势,而相对风速(图 1B)无明显变化趋势。

各气象要素突变前后变化趋势和全时段变化趋势有所差异(表 1)。ET₀ 发生突变后都呈显著的增加趋势。其他各气象要素在 ET₀ 突变前后变化趋势差异明显,相对风速在 ET₀ 突变前减少趋势达 −0.034

m/(s·a),突变后增加到 0.064 m/(s·a),相对湿度在突变后减小趋势达 −0.185%/a,减少趋势极显著,日照时数突变后增加趋势极显著,为 0.069 h/a,平均气温呈减少趋势明显,为 −0.151℃/a,最高最低气温在突变后呈减少趋势,分别达到 −0.173℃/a, −0.165℃/a,综合来看,石河子地区 ET₀ 发生突变前,相对风速减少趋势最显著,其他各相关要素变化趋势均不显著,突变后相对风速减少趋势变小,其他各相关要素变化趋势极显著。

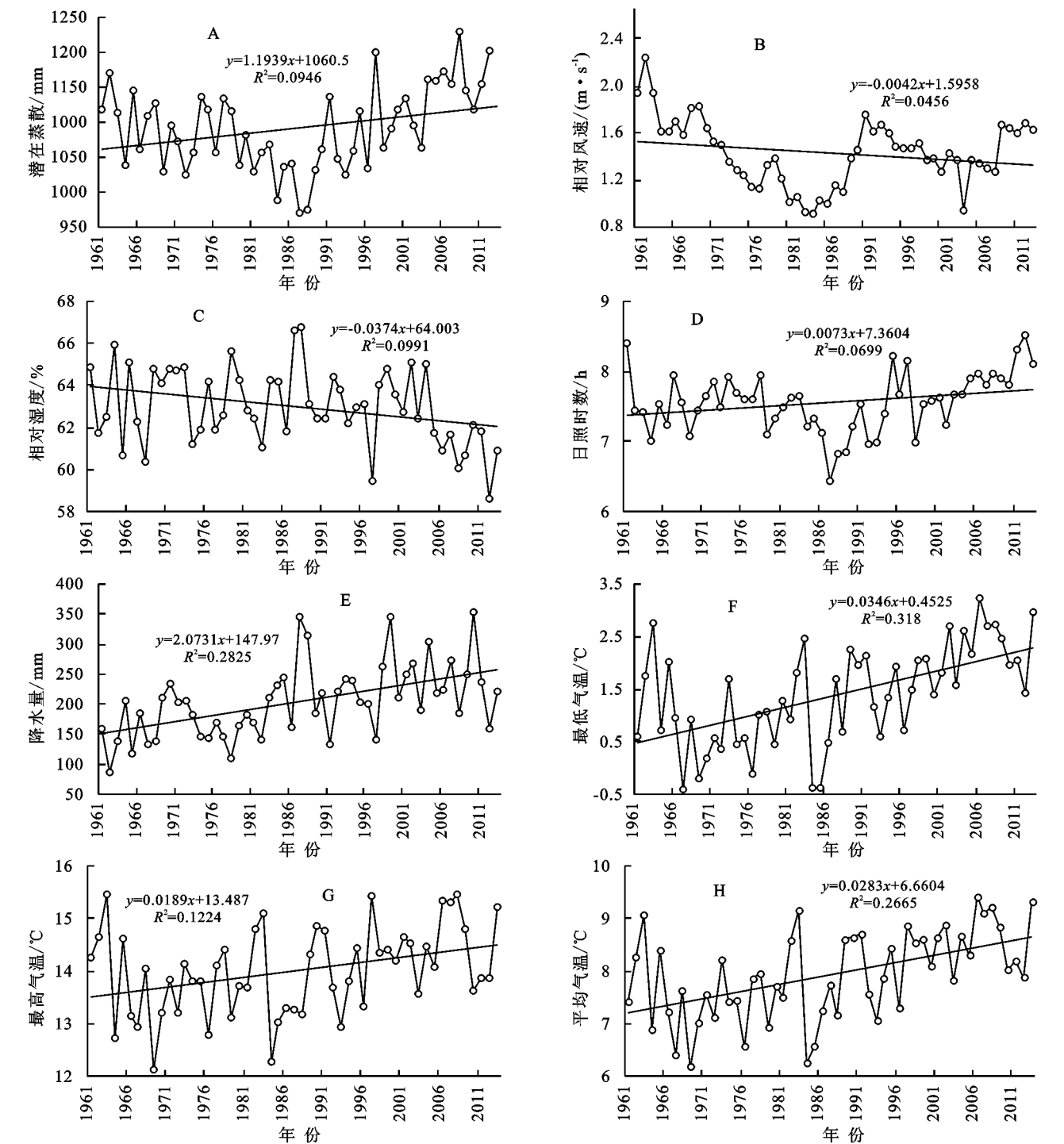


图 1 1961—2012 年石河子地区 ET₀ 和气象要素年际变化趋势

表 1 1961—2012 年石河子地区 ET₀ 和各气象要素分时段变化趋势

时段	ET ₀ / (mm · a ⁻¹)	WS / (m · s ⁻¹ · a ⁻¹)	RH / (% · a ⁻¹)	SH / (h · a ⁻¹)	T _{min} / (℃ · a ⁻¹)	T _{max} / (℃ · a ⁻¹)	T _{mean} / (℃ · a ⁻¹)
1961—2012 年	1.194	−0.004	−0.037	0.007	0.035	0.019	0.028
1961—2004 年	−0.233	−0.011	0.004	−0.003	0.027	0.013	0.024
2005—2012 年	0.249	0.064	−0.185	0.069	−0.165	−0.173	−0.151

2.2 参考作物蒸散量的突变分析

由突变检验曲线可见(图 2),M-K 突变检验图 UF(实线)和 UB(虚线)两条曲线在 2004 年相交,且交点在临界区域内,2011 年以后曲线超过了 0.05 信度线增加趋势显著。综合 M-K 突变检验结果,可确定石河子地区 ET₀ 在 2004 年发生突变,2011 年达到显著性水平。突变分析可以看出(图 3),年潜在蒸散量存在 27 a 左右的第一主周期。第一主周期小波谱可以看出,年潜在蒸散量在 1960s 和 1970s 前期以及 1990s 以后相对偏小,在 1970s 中期和 1980s 相对较大。其中,在 1970—2000 年还存在 17 a 左右的小周期。

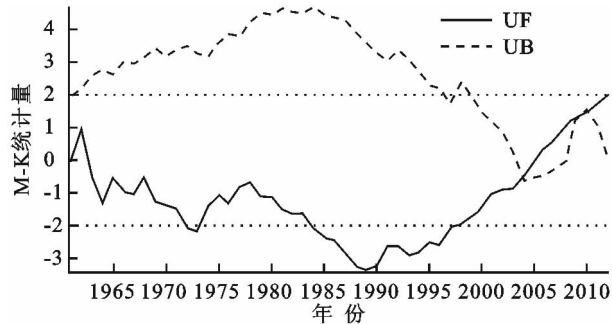


图 2 1961—2012 年石河子地区 ET₀ M-K 突变检验

2.3 参考作物蒸散量敏感系数及引起参考作物蒸散量变化的主导气象因子

各气象要素的敏感系数反映了气象要素对 ET₀ 年内变化的灵敏程度,其绝对值越大表示 ET₀ 对相应气象要素的变化越敏感,相关系数则表示了各气象要素与 ET₀ 的年际变化的一致性,相关系数绝对值大小表示 ET₀ 与相应气象要素年际变化同步程度,结合敏感系数和相关系数分析结果,可得到各气象要素对 ET₀ 变化的影响程度和主要影响区域。

表 2 1961—2012 年石河子地区气象要素敏感系数、相对变化率和贡献率

气象要素	1961—2012 年			1961—2004 年			2005—2012 年		
	S _{V_i}	RC _{V_i} / %	Con _{V_i} / %	S _{V_i}	RC _{V_i} / %	Con _{V_i} / %	S _{V_i}	RC _{V_i} / %	Con _{V_i} / %
WS	0.037	−0.141	−0.005	0.072	−0.330	−0.023	−0.148	0.332	−0.049
RH	−0.859	−0.031	0.025	−0.015	0.002	−4.101	−5.391	−0.024	0.131
SH	−2.549	0.048	−0.118	−1.455	−0.017	0.025	−8.093	0.068	−0.556
T _{max}	−1.216	0.071	−0.084	−0.787	0.041	−0.031	−3.524	−0.095	0.335
T _{min}	−2.317	1.342	−3.051	−17.381	1.009	−17.149	78.652	−0.564	−44.373
T _{mean}	0.959	0.196	0.185	−0.884	0.145	−0.125	10.866	−0.148	−1.616

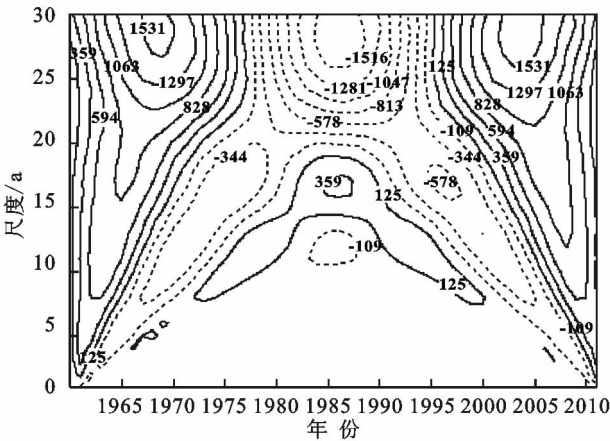


图 3 石河子年 ET₀ 小波分析

不同时段各气象要素的敏感系数(S_{V_i})、相对变化(RC_{V_i})、贡献率(Con_{V_i})都对 ET₀ 的发展有所不同。突变前后和全时段,ET₀ 对最低气温最敏感,而在突变前,ET₀ 对日照时数最敏感,突变后,ET₀ 对年平均气温也较为敏感。

不同时段相对湿度的敏感系数均为负值(表 2),其他各要素在整个时段内,从敏感系数绝对值大小可看出,ET₀ 对最低气温变化最敏感,其他各要素表现不同。日照时数次之,再其次为最高气温、平均气温、相对风速。虽然全时段平均气温的敏感系数较小,但其多年相对变化达较大,导致了 ET₀ 达到 0.185% 的变化贡献,成为 1961—2012 年 ET₀ 增大的最大贡献要素,其次是相对湿度,虽然日照时数的敏感系数绝对值最大,但其多年相对变化仅为 −0.048%,仅对 ET₀ 产生了一 0.118% 的负贡献,突变增大趋势不明显。从 ET₀ 突变后各气象要素贡献对比来看,最高气温的敏感系数相比其他因素小,多年相对变化也较小,但其对 ET₀ 的贡献最大呈正贡献,达到突变增加趋势。其次是相对湿度。

由于 ET_0 突变后相对风速增加趋势变小引起对 ET_0 的负贡献明显减小,而相对湿度的显著增加、最高最低气温的显著升高引起对 ET_0 的正贡献明显增加,虽然日照时数的极显著减少在一定程度上削弱了由其他要素引起 ET_0 的正贡献,但 ET_0 突变后仍呈增加的变化趋势。

通过比较各气象要素对 ET_0 变化贡献的绝对值,可判断出引起 ET_0 变化的主导因子。

石河子地区大多数站相对风速的减小和所有站日照时数减少对 ET_0 的变化为负贡献,平均分别为 -0.005 , -0.118 ;几乎所有站的最高最低气温的减小对 ET_0 变化为负贡献,平均分别为 -0.084 , -3.051 ;相对湿度的贡献则区域差异明显且正贡献,达到 0.025 mm/a。相对风速和日照时数的增加是导致 ET_0 增加的主导因子,而其他要素的变化则引起 ET_0 的减小,但增加贡献远大于减少贡献,整体表现为 ET_0 增加的变化趋势,导致 ET_0 增加的首要因子是平均气温。

3 讨论与结论

3.1 讨论

随着全球气候的变化,许多学者开始探讨 ET_0 变化的原因,如吴文玉等^[11]认为安徽省相对湿度对气候倾向率及相关性等分析方法可以从定性角度得出 ET_0 的变化与不同气象要素变化的关联性,但不能客观定量地衡量气象要素变化导致的 ET_0 的变化,即气象要素变化对 ET_0 的变化贡献。本文将敏感性分析和气象要素的相对变化结合起来,从而得到气象要素变化对 ET_0 变化的定量结果,可以全面地理解气象要素对 ET_0 变化的贡献和响应。结合研究得出,从敏感系数绝对值大小可看出, ET_0 对最低气温变化最敏感,其他各要素表现不同。日照时数次之。在整个年段内,平均气温的贡献率最大,其次是日照时数。参考作物蒸散量是表征大气蒸散能力,评价气候干旱程度,植被耗水量的重要指标。能否有效真实反映某地区气候干旱程度还有待进一步研究。因为气候条件受各种气象因素之间复杂的相互影响作用。在本研究中,石河子地区与新疆的参考作物蒸散量相比增加趋势明显^[17],并于2011年发生突变达到显著性水平。并对增加作物需水量和降低农田以及自然植被蒸散量,降低地表干燥度,改善石河子地区脆弱的生态环境都具有重要意义。

张山清^[17]、普宗朝^[18]等研究表明新疆潜在蒸散量以增势为主,但天山和阿勒泰山中高山带的局部区域年参考作物蒸散量以 $0.5\sim 3$ mm/a 的倾向率略有增大,这与本文的研究结果是一致的。 ET_0 增加会引

起区域水分匮乏的加大,可能导致区域干旱加剧,但吴燕锋等^[19-20]研究表明石河子干旱在有所缓解。这是因为,石河子降水量增势强于潜在蒸散量的增势(图2),降蒸差在逐渐缩小。

3.2 结论

(1) 近52年来,石河子地区 ET_0 平均以 1.194 mm/a 的趋势增加,1991年之后增加趋势最显著,在2004年前后 ET_0 发生突变,突变后有明显的增加趋势。

(2) 日照时数对 ET_0 的变化敏感性最高,但其多年相对变化不大,使其成为负贡献。其次是最低气温、最高气温、平均气温、相对湿度、相对风速。但相对风速和相对湿度多年相对变化分别达 -0.141% , -0.031% 的减小幅度,使得相对湿度成为石河子地区 ET_0 变化贡献最大的气象要素,平均气温次之,最高气温贡献最低。

(3) 石河子地区,相对湿度和平均气温对 ET_0 变化为正贡献,且平均气温的正贡献最大,达到 0.185 mm/a;最高气温、最低气温对 ET_0 变化为负贡献,对 ET_0 的影响贡献相对不大,相对风速和日照时数都表现为负贡献。

参考文献:

- [1] 丁一汇. 中国气候变化科学概论[M]. 北京:气象出版社,2008.
- [2] Wu Z, Mao Y, Li X, et al. Exploring spatiotemporal relationships among meteorological, agricultural, and hydrological droughts in Southwest China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2015,30(3):1-12.
- [3] Yuan X C, Tang B J, Wei Y M, et al. China's regional drought risk under climate change: a two-stage process assessment approach[J]. Natural Hazards, 2015,76(1): 667-684.
- [4] Yin Y H, Wu S H, Zheng D, et al. The regional differences of dry-wet change in China in recent 30 years[J]. Chinese Science Bulletin, 2005,50(15):1636-1642.
- [5] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper56[M]. Rome: FAO,1998.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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,2006,329(3):620-629.

- in perspective[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 251(1):1-9.
- [14] Jin T T, Fu B J, Liu G H, et al. Hydrologic feasibility of artificial forestation in the semi-arid Loess Plateau of China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2011, 8(1):653-680.
- [15] Feng X M, Sun G, Fu B J, et al. Regional effects of vegetation restoration on water yield across the Loess Plateau, China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(8):2617-2628.
- [16] Dodds W K, Perkin J S, Gerken J E. Human impact on freshwater ecosystem services: A global perspective [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(16):9061-9068.
- [17] Su C, Fu B. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes[J]. *Global & Planetary Change*, 2013, 101(1):119-128.
- [18] 赵同谦, 欧阳志云, 郑华. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价[J]. *自然资源学报*, 2004, 19(4):480-491.
- [19] 沈艳, 冯明农, 张洪政, 等. 我国逐日降水量格点化方法[J]. *应用气象学报*, 2010, 21(3):279-286.
- [20] Hutchinson M F. Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1995, 9(4):385-403.
- [21] Apaydin H, Sonmez F K, Yildirim Y E. Spatial interpolation techniques for climate data in the GAP region in Turkey[J]. *Climate Research*, 2004, 28(1):31-40.
- [22] 张建军, 朱金兆, 魏天兴. 晋西黄土区坡面水土保持林地产流产沙的观测分析[J]. *北京林业大学学报*, 1996, 8(3):14-20.
- [23] 杨海军, 孙立达, 余新晓. 晋西黄土区水土保持林水量平衡的研究[J]. *北京林业大学学报*, 1993, 15(3):42-50.
- [24] 方向京, 孟广涛, 郎南军, 等. 滇中高原山地人工群落径流规律的研究[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(1):66-84.
- [25] 杨芳, 王克勤, 延红卫. 尖山河流域不同植被类型坡面产流产沙量研究[J]. *林业调查规划*, 2009, 34(1):10-14.
- [26] 黄承标, 文受春. 里谿林区常绿阔叶林和人工杉木林气候水文效应[J]. *生态学杂志*, 1993, 12(3):1-7.
- [27] 王金叶, 李海防, 段文军, 等. 漓江上游降水特征及典型森林群落地表径流规律的研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(6):72-77.
- [28] 郑郁善, 陈卓梅, 邱尔发, 等. 不同经营措施笋用麻竹人工林的地表径流研究[J]. *生态学报*, 2003, 23(11):2387-2395.
- [29] 薛立, 薛晔, 郑卫国, 等. 佛山市湿地松林地地表径流中可溶性氮和磷的流失特征[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(1):31-34.
- [30] 申卫军, 周国逸, 彭少麟, 等. 南亚热带鹤山 5 种生态系统的地表径流[J]. *热带亚热带植物学报*, 1999, 7(4):273-281.
- [31] 朱连奇, 许叔明, 陈沛云. 山区土地利用/覆被变化对土壤侵蚀的影响[J]. *地理研究*, 2003, 22(4):432-438.
- [32] 李元寿, 王根绪, 王一博, 等. 长江黄河源区覆被变化下降水的产流产沙效应研究[J]. *水科学进展*, 2006, 17(5):616-623.
- [33] 姜立鹏, 覃志豪, 谢雯, 等. 中国草地生态系统服务功能价值遥感估算研究[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(2):161-170.
- [34] 方瑜, 欧阳志云, 肖燧, 等. 海河流域草地生态系统服务功能及其价值评估[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(10):1694-1706.

~~~~~

(上接第 255 页)

- [9] 曾丽红, 宋开山, 张柏, 等. 近 60 年来东北地区参考作物蒸散量时空变化[J]. *水科学进展*, 2010, 21(2):194-200.
- [10] 曹雯, 申双和, 段春锋. 西北地区近 49 年生长季参考作物蒸散量的敏感性分析[J]. *中国农业气象*, 2011, 32(3):375-381.
- [11] 吴文玉, 孔芹芹, 王晓东, 等. 安徽省近 40 年参考作物蒸散量的敏感性分析[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(7):1160-1166.
- [12] 唐湘玲, 刘月兰, 魏文寿. 石河子地区近 46 年来积温变化趋势特征研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(11):83-87.
- [13] 胡汝骥, 樊自立, 王亚俊, 等. 近 50 a 新疆气候变化对环境影响评估[J]. *干旱区地理*, 2001, 24(2):97-103.
- [14] 尹鹤, 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.
- [15] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. *大气科学*, 1992, 16(4):482-493.
- [16] 赵传成, 王雁, 丁永建, 等. 西北地区近 50 年气温及降水的时空变化[J]. *高原气象*, 2011, 30(2):385-390.
- [17] 张山清, 普宗朝. 新疆参考作物蒸散量时空变化分析[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(5):73-79.
- [18] 普宗朝, 张山清. 近 48 年新疆夏半年参考作物蒸散量时空变化[J]. *中国农业气象*, 2011, 32(1):67-72.
- [19] 吴燕锋, 巴特尔·巴克, 李维, 等. 基于 CI 指数石河子农垦区干湿变化特征[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(36):247-252.
- [20] 吴燕锋, 巴特尔·巴克, 李维, 等. 近 52 a 石河子地区 ET<sub>0</sub> 变化特征[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(1):69-74.