

新疆降水量与参考作物腾发量的年际变化特性

付 军¹,丁志宏²,冯 平¹

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072; 2. 天津市中水科技咨询有限责任公司,天津 300170)

摘要:为了深入、系统地研究新疆地区降水量和参考作物腾发量的年际变化规律,在运用 FAO-56 Penman-Monteith 公式计算新疆地区 52 个气象站点的年参考作物腾发量序列基础上,采用 Mann-Kendall 趋势检验法和 BG 分割算法对各站点的降水量和参考作物腾发量序列的趋势性、突变性等年际变化特征进行了具体研究。结果表明:近 60 年来,新疆地区年降水量整体上呈增加趋势,而参考作物腾发量整体上呈减小趋势;参考作物腾发量的突变较降水量的突变更为频繁和复杂;新疆地区农业生产的水资源天然供需条件有改善倾向,有利于农业生产发展。

关键词:新疆;降水量;参考作物腾发量;Mann-Kendall 趋势检验法;BG 分割算法

中图分类号:TV121;P426 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)06-0044-07

Characteristics of interannual change of precipitation and reference evapotranspiration in Xinjiang area//FU Jun¹, DING Zhihong², FENG Ping¹(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Water Science and Technology Consulting Co., Ltd., Tianjin 300170, China)

Abstract: In order to thoroughly discuss the interannual change regulations of the precipitation and reference evapotranspiration in Xinjiang area, the Mann-Kendall trend analysis and BG segmentation algorithm were applied to study the trend and mutation characteristics of the annual precipitation and reference evapotranspiration of 52 meteorological stations in Xinjiang area, calculated with the FAO-56 Penman-Monteith formula. Results show that, over the last 60 years, the annual precipitation is increasing and the annual reference evapotranspiration is decreasing in general; furthermore, the mutation of annual reference evapotranspiration is more frequent and complicated comparing with annual precipitation. The natural supply and demand condition of water resources for agriculture in Xinjiang area is inclined to improve, which is beneficial to agriculture development.

Key words: Xinjiang; precipitation; reference evapotranspiration; Mann-Kendall trend analysis; BG segmentation algorithm

新疆维吾尔自治区面积约为 166 万 km², 占中国陆地面积的 1/6, 土地面积广阔、光热条件优越, 是我国土地资源的重要后备开发区域。新疆属于典型的干旱半干旱气候区域, 降水稀少, 蒸发强烈, 作物生长所需水分主要依靠人工灌溉方式予以满足, 水资源成为该区域自然生态系统和人类社会经济系统赖以维系和发展的关键制约因素。

作为使用间接法计算作物需水量的关键参数之一, 参考作物腾发量 (W_{ET_0}) 既是表征大气蒸发能力的重要气象参数, 也是确定地表耗水量、水量平衡研究及水资源配置的基本依据^[1], 因此, 有关参考作物腾发量的研究受到水文水资源学界的广泛关注, 研究成果丰富, 概括起来, 现有的研究工作主要集中在参考作物腾发量时间序列的变化特性研究^[2-5]、参考作物腾发量与其各类影响因素之间的因果关系研

究^[6-9]、参考作物腾发量时间序列的预测研究^[10-13]以及参考作物腾发量的随机模拟研究^[14-17]等四个方面。

降水量和参考作物腾发量均是气象水文系统的因变量, 也是表示地区水分收支状况的两个方面^[1], 而气象水文系统是典型的非线性复杂随机系统, 其变量演化的趋势性和突变性是普遍存在的。统筹考虑降水量和参考作物腾发量的趋势性和重要性对于分析区域生态系统宏观的水资源天然供需情势变化具有积极和重要的现实意义。目前, 关于降水量或参考作物腾发量趋势与突变特征的研究方法主要有双累计曲线法^[18]、滑动平均法^[19]、R/S 分析法^[20]、Mann-Kendall 趋势检验法^[21]等。在处理非线性的水文序列时, 这些方法各有特点, 均能在不同程度上揭示水文序列所具有的突变特征, 但也存在

着诸如只能找出一个突变点或者只能定性分析是否发生突变等不足^[22-23]。BG (Bernaola-Galvan) 分割算法是由 Bernaola-Galvan 等于 2001 年在研究心电图序列突变特征时提出的一种检测非线性和非平稳性时间序列突变特征的新方法^[24]。较传统方法, BG 分割算法是基于 t 检验而将非平稳序列分割成多个具有不同均值的平稳子序列, 各个子序列表征的是不同物理背景, 分解得到的各均值段的尺度具有可变性, 还可以进行多突变点检测^[23], 不受方法本身的限制^[24], 因而在气象、水文、遥感等研究领域得到了较为广泛的应用^[25-28]。

综上所述, 为了更加深入和系统地研究新疆地区降水量和参考作物腾发量的年际变化规律, 以便为区域水资源规划与管理提供科学参考, 本文分别采用 Mann-Kendall 方法、BG 分割算法对新疆 52 个气象站点近 60 年的降水量和参考作物腾发量序列年际变化的趋势性、突变性等特征进行研究。

1 数据和方法

1.1 数据来源

新疆 52 个气象站点位置如图 1 所示。本文所采用各气象站点年参考作物腾发量是基于其历年逐日气象资料并运用 Penman-Monteith 公式计算求得日值之后累计而得。在计算与分析过程中所使用的基础气象数据资料均来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.gov.cn/>), 原始数据文件均经过有关部门严格的质量控制和检查。

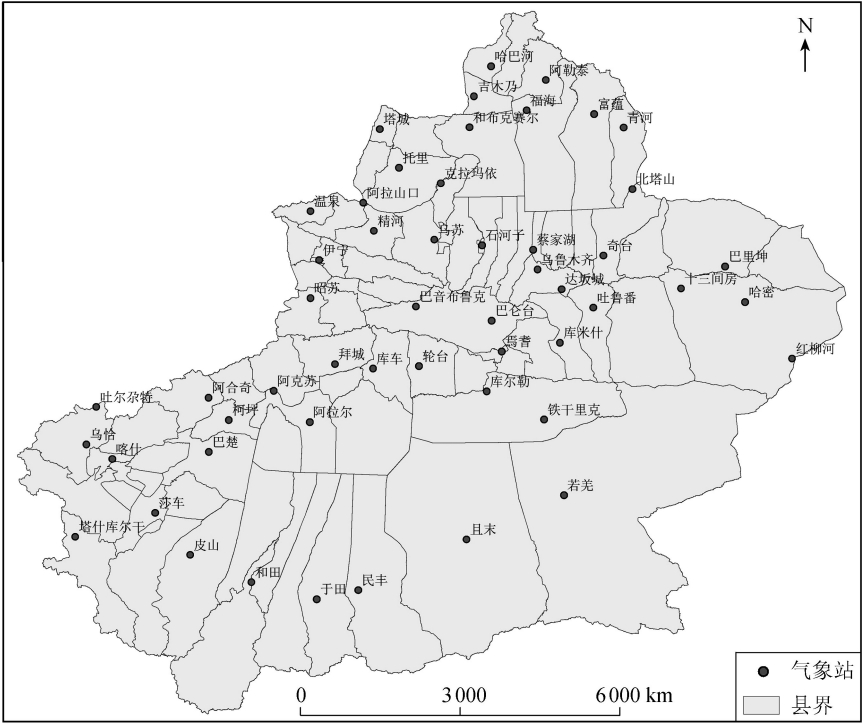


图 1 新疆 52 个气象站点位置

1.2 方法

1.2.1 Penman-Monteith 公式

1998 年, FAO 推荐的计算参考作物腾发量的 Penman-Monteith 公式既考虑了作物的生理特征, 又考虑了空气动力学参数的变化, 其具体形式为

$$W_{ET_0} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900u_2(e_s - e_a)}{T + 273}}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中: W_{ET_0} 为参考作物腾发量, mm/d; Δ 为饱和水汽压-温度曲线上的斜率, kPa/°C; R_n 为植物冠层表面净辐射, MJ/(m² · d); G 为土壤热通量, MJ/(m² · d), 逐日计算 $G=0$; γ 为湿度计常数, kPa/°C; u_2 为 2 m 高处的风速, m/s; e_s 和 e_a 分别为饱和水汽压和实际水汽压, kPa; T 为日平均气温, °C。

采用式(1)计算逐日 W_{ET_0} 时所使用的数据包括气象站点的高程、纬度、风速、测量高度等地理坐标数据以及日最高气温、日最低气温、日平均气温、日平均风速、日平均相对湿度和日照时数等气象观测数据。 W_{ET_0} 的计算起始日期为当年 1 月 1 日, 终止日期为当年 12 月 31 日。

1.2.2 Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall 检验中, 原假设 H_0 : 时间序列 $(x_1, \dots, x_t)$ 是 n 个独立随机变量的同分布样本; 选择假设 H_1 : 双边检验, 对于所有的 $k, j \leq n, x_k$ 和 x_j 的分布是不同的。当 $n > 10$ 时, 标准正态统计量 Z 可由下式计算(式中 S 服从正态分布, 其均值为 0):

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_i - x_k)$$

$$\text{sgn}(x_i - x_k) = \begin{cases} 1 & (x_i - x_k > 0) \\ 0 & (x_i - x_k = 0) \\ -1 & (x_i - x_k < 0) \end{cases}$$

$$\text{Var}(S) = \left[n(n-1)(2n+5) - \sum t(t-1)(2t+5) \right] / 18$$

进行双边趋势检验,置信度设为 α ,若 $|Z| \geq Z_{\frac{\alpha}{2}}$,则表示在置信度为 α 时,时间序列具有显著的上升或下降趋势。采用倾斜度指标 β 表征单调趋势,由下式计算:

$$\beta = \text{Median} \left[\frac{x_j - x_k}{j - k} \right] \quad (1 < k < j < n) \quad (3)$$

$\beta > 0$ 表示序列具有上升趋势, $\beta < 0$ 表示序列具有下降趋势。

1.2.3 BG 分割算法

对于一个长度为 n 的非线性时间序列 $X(t)$, $t = 1, 2, \dots, n$, BG 分割算法步骤如下:

步骤1 计算第 i 点左右两部分的平均值和标准差,分别记为 $\mu_L(i)$ 、 $\mu_R(i)$ 和 $S_L(i)$ 、 $S_R(i)$,其中 $i = 2, 3, \dots, n-1$ 。

步骤2 采用 t 检验的统计值来衡量 $\mu_L(i)$ 和 $\mu_R(i)$ 之间的差异,定义为

$$T(i) = \left| \frac{\mu_L(i) - \mu_R(i)}{S_D} \right| \quad (4)$$

其中 $S_D = \left[\frac{S_L^2(i) + S_R^2(i)}{N_L + N_R - 2} \right]^{1/2} (1/N_L + 1/N_R)^{1/2}$

式中: S_D 为联合方差; N_L 和 N_R 分别为第 i 点左右两部分序列的样本个数。

步骤3 计算 $T(i)$ 中的最大值 T_M 及其统计显著性 $P(T_M)$:

$$P(T_M) = P(T \leq T_M) \quad (5)$$

式中 $P(T_M)$ 为在随机过程中 T 值小于或等于 T_M 的概率,一般地,可近似表示为

$$P(T_M) = \left[1 - I_{v/(v+T_M^2)}(\delta v, \delta) \right]^\gamma \quad (6)$$

其中

$$\gamma = 4.19 \ln N - 11.54$$

$$\delta = 0.4 \quad v = N - 2$$

式中: N 为时序长度; $I_x(a, b)$ 为不完全 β 函数。显著性水平一般取0.95,若 $P(T_M)$ 大于所选取的显著

性水平,则在该点将时序 $X(t)$ 分割为两段,反之则不分割。对新得到的两个子序列重复上述计算步骤,直至所有的子序列均不能分割为止。通过上述计算,即将原时序 $X(t)$ 分割为具有不同均值的子序列,分割点即为均值突变点。

2 结果及分析

2.1 趋势性分析

运用 Mann-Kendall 检验法,对图1所示的新疆52个气象站点的降水量和参考作物腾发量序列进行年际变化趋势检验,置信度 α 取0.95,当 $|Z| \geq 1.64$ 时,表示通过了置信度95%的趋势检验,即该序列具有显著的趋势性,再根据 β 值来判断是上升趋势还是下降趋势,结果见表1。

降水量和参考作物腾发量是表示地区水分收支状况的两个方面^[1],是植被和农作物系统在水资源供应端和需求端的两个天然表征指标,二者相结合所表现出来的不同趋势组合对于农业生产,尤其是以人工灌溉为主的干旱区农业生产,具有重要意义。例如降水量呈增加趋势而参考作物腾发量呈减小趋势,意味着水资源的天然本地供给量在增加而作物系统的需水量在减小,这对于干旱区灌溉农业生产的发展是有利的,有助于水利工程增加可供水量或者扩大农田灌溉面积;而当降水量呈减小趋势、参考作物腾发量呈增加趋势则意味着水资源的天然本地供给量在减少、作物系统的需水量在增加,这就要求增加水利工程的外调水供水或者适当缩减农田灌溉面积以维持干旱区自然生态系统的脆弱平衡,这种情形是不利于干旱区灌溉农业生产发展的。

因此,为便于分析,本文对降水量和参考作物腾发量之间年际变化趋势的组合类型划分为9类,具体见表2,其中Ⅱ、Ⅲ和Ⅵ型是对区域农业生产发展明显有利的天然供水与耗水组合形式;Ⅳ、Ⅶ、Ⅷ型是对区域农业发展明显不利的天然供水与耗水组合形式;Ⅰ、Ⅸ型对区域农业生产发展的影响需要根据降水量和参考作物腾发量的相对变化情势来具体确定,本文通过比较二者的线性倾斜率来确定,若降水量的线性变化率大于参考作物腾发量的线性变化率,则是对区域农业生产发展有利的天然供水与耗水组合形式;若降水量的线性变化率小于参考作物腾发量的线性变化率,则是对区域农业生产发展不利的天然供水与耗水组合形式;Ⅴ型则是维持现状平衡的天然供水与耗水组合形式。

由表1和表2可知:①就降水量的年际变化趋势而言,在52个站点中,有35个站点呈显著增加趋

表 1 新疆降水量与参考作物腾发量的年际变化趋势

站点	起止年份	降水量			参考作物腾发量		
		Z	β	趋势性	Z	β	趋势性
哈巴河	1958—2013	2.51	1.15	增加	-0.99	-0.63	无
吉木乃	1961—2013	2.48	1.21	增加	-0.99	-0.61	无
福海	1958—2013	1.60	0.55	无	0.54	0.39	无
阿勒泰	1956—2013	1.99	1.03	增加	-3.87	-2.29	减少
富蕴	1962—2013	3.46	1.73	增加	2.44	1.72	增加
塔城	1956—2013	0.29	0.13	无	3.52	2.07	增加
和布克赛尔	1956—2013	0.56	0.20	无	-2.49	-1.52	减少
青河	1958—2013	1.77	0.85	增加	0.99	0.42	无
阿拉山口	1957—2013	2.36	0.83	增加	-7.15	-12.81	减少
托里	1957—2013	0.63	0.32	无	0.54	0.32	无
克拉玛依	1958—2013	2.27	0.78	增加	-4.54	-5.67	减少
北塔山	1958—2013	1.70	0.72	增加	0.89	0.47	无
温泉	1958—2013	2.72	1.50	增加	-1.05	-0.62	无
精河	1954—2013	2.25	0.61	增加	-2.27	-1.56	减少
乌苏	1956—2013	1.68	0.71	增加	-4.07	-2.93	减少
蔡家湖	1959—2013	2.42	0.73	增加	-2.03	-0.94	减少
奇台	1953—2013	1.44	0.59	无	-4.05	-2.22	减少
伊宁	1955—2013	2.03	1.25	增加	0.67	0.30	无
昭苏	1956—2013	0.03	0.01	无	0.89	0.35	无
乌鲁木齐	1953—2013	3.58	1.97	增加	-0.69	-0.52	无
巴伦台	1958—2013	1.23	0.55	无	-2.13	-1.02	减少
达坂城	1958—2013	1.65	0.43	增加	-1.18	-0.81	无
十三间房	1956—2013	-2.36	-0.30	减少	4.76	9.54	增加
库米什	1959—2013	1.66	0.25	增加	-0.79	-0.36	无
巴音布鲁克	1958—2013	1.76	0.76	增加	0.85	0.19	无
焉耆	1956—2013	1.21	0.26	无	-3.14	-1.64	减少

站点	起止年份	降水量			参考作物腾发量		
		Z	β	趋势性	Z	β	趋势性
吐鲁番	1956—2013	-0.25	-0.02	无	-5.68	-7.29	减少
阿克苏	1956—2013	2.36	0.63	增加	2.58	1.33	增加
拜城	1959—2013	3.22	1.17	增加	1.07	0.40	无
轮台	1959—2013	2.77	0.65	增加	-1.37	-1.80	无
库车	1954—2013	2.38	0.45	增加	-7.49	-6.39	减少
库尔勒	1959—2013	0.49	0.09	无	-4.24	-3.24	减少
吐尔尕特	1959—2013	2.09	1.13	增加	0.44	0.15	无
乌恰	1956—2013	2.16	1.34	增加	3.25	1.83	增加
喀什	1954—2013	1.89	0.43	增加	-1.07	-0.84	无
阿合奇	1957—2013	3.18	1.89	增加	-4.45	-2.60	减少
巴楚	1955—2013	2.44	0.62	增加	-0.89	-0.65	无
柯坪	1960—2013	3.31	1.13	增加	-4.47	-4.56	减少
阿拉尔	1959—2013	1.74	0.31	增加	-6.71	-3.51	减少
铁干里克	1957—2013	0.45	0.05	无	-3.46	-1.74	减少
若羌	1955—2013	3.88	0.50	增加	-5.81	-3.61	减少
塔什库尔干	1957—2013	2.01	0.49	增加	1.43	0.65	无
莎车	1956—2013	1.66	0.45	增加	-3.78	-2.19	减少
皮山	1959—2013	0.82	0.18	无	1.24	1.07	无
和田	1955—2013	1.12	0.18	无	1.95	1.52	增加
民丰	1957—2013	2.24	0.36	增加	2.80	1.56	增加
且末	1956—2013	2.23	0.25	增加	-4.05	-3.86	减少
于田	1956—2013	0.83	0.18	无	-3.42	-2.53	减少
巴里坤	1957—2013	2.44	0.84	增加	4.71	2.46	增加
哈密	1952—2013	1.93	0.29	增加	-6.28	-7.05	减少
红柳河	1956—2013	1.16	0.18	无	1.13	0.71	无
石河子	1957—2013	1.34	0.56	无	3.24	1.69	增加

势,占比为 67.31%;有 16 个站点无显著变化趋势,占比为 30.76%;有 1 个站点呈显著减少趋势,占比为 1.92%;②就参考作物腾发量的年际变化趋势而言,在 52 个站点中,有 9 个站点呈显著增加趋势;有 21 个站点无显著变化趋势;有 22 个站点呈显著减小趋势;③就降水量和参考作物腾发量年际变化趋势组合而言,在 52 个站点中,属于 I 型组合的有 5 个;属于 II 型组合的有 16 个;属于 III 型组合的有 14 个;属于 IV 型组合的有 3 个;属于 V 型组合的有 5 个;属于 VI 型组合的有 8 个;属于 VII 型组合的有 1 个;属于 VIII 型组合和 IX 型组合的均为 0 个。可见,对农业生产发展明显有利的 II、III、VI 型组合共有 38 个,占比为 73.07%;维持现状本地水资源供需情势的组合有 5 个,占比为 9.62%;对农业生产发展明显不利的 IV、VII、VIII 型组合共有 4 个,占比为 7.69%。

采用线性倾斜率对比法对 I 型组合的降水量和参考作物腾发量之间的年际相对变化关系进行定量分析,结果见表 3。从表 3 可知, I 型的 5 个组合均属不利于农业生产的组合,占全部 52 个站点的比例为 9.62%。

由表 1、表 2 和表 3 可知,在 52 个站点中,有 38 个站点的年降水量和年参考作物腾发量的变化趋势是

表 2 降水量与参考作物腾发量年际变化趋势的组合类型

降水量变化	参考作物腾发量变化		
	增加	无趋势	减小
增加	I	II	III
无趋势	IV	V	VI
减小	VII	VIII	IX

表 3 I 型组合降水量与参考作物腾发量年际变化趋势

站点	降水量年际变化倾斜率	W_{ET_0} 年际变化倾斜率	是否有利于农业生产
富蕴	1.65	2.52	否
阿克苏	0.76	1.10	否
乌恰	1.48	1.84	否
民丰	0.48	1.64	否
巴里坤	0.96	3.18	否

有利于农业生产的,占比为 73.07%;有 5 个站点的年降水量和年参考作物腾发量的变化趋势维持现状天然水资源供需情势,占比为 9.62%;有 9 个站点的年降水量和年参考作物腾发量的变化趋势是不利于农业生产的,占比为 17.31%。

2.2 突变性分析

运用 BG 分割算法,对图 1 所示的新疆 52 个气象站点的年降水量和年参考作物腾发量序列进行突变性分析,置信度 α 取 0.95,所得结果见表 4 和表 5。由表 4 和表 5 可知:①就降水量的年际突变性

表 4 降水量的年际突变分析

站点	突变年份	T_M	$P(T_M)$	站点	突变年份	T_M	$P(T_M)$
哈巴河	2000	2.97	0.96	巴音布鲁克	1998	3.43	0.98
吉木乃	1990	2.99	0.96	阿克苏	1992	3.46	0.98
阿勒泰	1992	3.18	0.97	拜城	1987	4.59	0.99
富蕴	1983	4.36	0.99	轮台	1961	2.07	0.96
阿拉山口	2001	4.13	0.99	轮台	1987	4.23	0.99
克拉玛依	2010	2.91	0.95	吐尔尕特	1991	3.14	0.97
温泉	1986	4.17	0.99	乌恰	1995	3.27	0.98
精河	1980	2.95	0.96	阿合奇	1990	3.95	0.99
蔡家湖	1983	3.56	0.99	巴楚	1986	2.91	0.95
乌鲁木齐	1960	4.16	0.99	柯坪	1980	3.63	0.99
乌鲁木齐	1978	4.26	0.99	若羌	1966	2.78	0.97
达坂城	1987	3.11	0.97	若羌	1980	3.45	0.98
十三间房	1996	3.40	0.98	塔什库干	2001	3.23	0.98
库米什	1987	3.16	0.97	且末	1963	3.43	0.98

而言,在 52 个站点中,发生过突变的有 25 个,占比为 48.08%,其中乌鲁木齐、轮台和若羌发生突变次数均为 2 次,其余 23 个站点仅发生了 1 次突变;年降水量的突变年份主要集中在 1980 年、1990 年和 2000 年左右。②就参考作物腾发量的年际突变性而言,在 52 个站点中,有 13 个站点未发生过突变,占比为 25%;发生过 1 次突变的站点有 10 个,占比为 19.23%;发生 2 次突变的站点有 14 个,占比为 26.92%;发生 3 次突变的站点有 11 个,占比 21.15%;发生 4 次突变的站点有 4 个,占比 7.69%;年参考作物腾发量的突变年份主要集中在 1960 年、1980 年和 2000 年左右。③年降水量和年参考作物

腾发量均未发生过突变的站点有 6 个,占比为 11.54%。④阿拉山口、乌鲁木齐、吐鲁番、莎车这 4 个站点的年参考作物腾发量发生突变最为频繁,阿拉山口站和乌鲁木齐站具有准 5 年、准 10 年和准 20 年突变周期,吐鲁番站具有准 10 年突变周期,莎车站具有准 5 年、准 20 年突变周期。⑤年参考作物腾发量序列比年降水量序列更易发生突变。

3 结 语

降水量和参考作物腾发量之间具有天然相关性,是自然与人工生态系统在供水端和需水端的重要表征因子,将二者相结合予以统筹考虑对于分析区域生态系统宏观的、整体的水资源天然供需情势变化具有积极的理论和现实意义。通过对新疆地区 52 个气象站点的降水量和参考作物腾发量序列变化的趋势性、突变性进行研究,可知新疆地区降水量整体上呈增加趋势,而参考作物腾发量整体上呈减小趋势,有约 60% 的站点呈现有利于农业生产发展的降水量与参考作物腾发量变化趋势,显示了新疆地区农业生产的水资源天然供需条件有改善的趋势;总体上,参考作物腾发量的突变较降水量的突变发生得更为频繁和复杂,这提示我们在区域生态系统水资源供需风险分析工作中,要更多地关注由于作物需水量的变化而导致的供需平衡分析的不确定性。

表 5 参考作物腾发量 W_{ET_0} 的年际突变分析

站点	突变年份	T_M	$P(T_M)$	站点	突变年份	T_M	$P(T_M)$	站点	突变年份	T_M	$P(T_M)$	站点	突变年份	T_M	$P(T_M)$
阿勒泰	1983	5.58	0.99	蔡家湖	2000	4.23	0.99	拜城	2005	4.08	0.99	若羌	1986	6.87	1
富蕴	1965	2.64	0.99	奇台	1983	6.18	1	轮台	1973	4.88	0.99	莎车	1961	2.98	0.97
富蕴	1978	4.07	0.99	伊宁	1985	2.82	0.95	轮台	2004	4.32	0.99	莎车	1966	4.58	0.99
塔城	1960	4.31	0.99	伊宁	1999	3.05	0.97	库车	1972	10.49	1	莎车	1986	5.71	1
塔城	1992	3.71	0.99	乌鲁木齐	1961	3.33	0.99	库车	1987	6.24	1	莎车	2004	4.23	0.99
和布克赛尔	1983	4.70	0.99	乌鲁木齐	1973	1.22	0.98	库尔勒	1974	3.68	0.99	皮山	1973	5.48	1
和布克赛尔	2003	4.05	0.99	乌鲁木齐	1978	2.99	0.96	库尔勒	1982	7.95	1	皮山	1999	6.18	1
青河	1973	3.32	0.98	乌鲁木齐	1999	4.71	0.99	库尔勒	1996	4.56	0.99	和田	1981	6.21	1
青河	1983	2.98	0.96	巴伦台	1986	3.80	0.99	乌恰	1989	3.53	0.98	和田	1999	6.46	1
青河	2005	3.07	0.97	达坂城	1961	3.52	0.98	喀什	1958	4.59	0.99	且末	1982	3.10	0.98
阿拉山口	1961	3.07	0.99	达坂城	1997	4.51	0.99	喀什	1981	9.55	1	且末	1986	9.28	1
阿拉山口	1973	1.66	0.99	十三间房	1999	20.36	1	喀什	1999	4.00	0.99	且末	2004	6.59	1
阿拉山口	1978	12.52	1	巴音布鲁克	1960	3.66	0.99	阿合奇	1986	8.63	1	于田	1963	3.93	0.99
阿拉山口	1997	7.04	1	焉耆	1985	5.63	1	柯坪	1969	5.12	0.99	于田	1981	7.97	1
克拉玛依	1961	4.24	0.99	焉耆	2003	8.43	1	柯坪	1990	11.72	1	于田	1998	3.11	0.98
克拉玛依	1983	6.19	1	吐鲁番	1968	10.01	1	阿拉尔	1963	3.64	0.99	巴里坤	1985	4.06	0.99
克拉玛依	2006	2.98	0.97	吐鲁番	1978	2.53	0.99	阿拉尔	1979	8.93	1	巴里坤	2004	6.24	1
精河	1971	4.59	0.99	吐鲁番	1986	4.80	0.99	阿拉尔	1990	3.22	0.98	哈密	1959	4.81	1
精河	1986	5.17	0.99	吐鲁番	2004	6.75	1	铁干里克	1987	5.50	1	哈密	1971	4.42	0.99
精河	2003	3.16	0.98	阿克苏	1959	4.79	0.99	铁干里克	1998	3.04	0.99	哈密	1983	9.05	1
乌苏	1983	6.45	1	阿克苏	1996	3.38	0.98	铁干里克	2007	2.78	0.97	红柳河	1961	5.18	0.99
蔡家湖	1980	4.21	0.99	阿克苏	2005	6.49	1	若羌	1974	2.77	0.96				

参考文献:

- [1] 彭世彰,魏征,窦超银,等. 加权马尔可夫模型在区域干旱指标预测中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2009,29(9):173-178. (PENG Shizhang, WEI Zheng, DOU Chaoyin, et al. Model for evaluating the regional drought index with the weighted Markov chain and its application [J]. Systems Engineering-Theory and Practice, 2009,29(9):173-178. (in Chinese))
- [2] 谢先红,崔远来,周玉桃. 参考作物腾发量时间序列的长程相关性和多重分形分布[J]. 水利学报,2008,39(12):1327-1333. (XIE Xianhong, CUI Yuanlai, ZHOU Yutao. Long term correlation and multi-fractality of reference crop evapotranspiration time series[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008,39(12):1327-1333. (in Chinese))
- [3] 罗玉峰,缴锡云,彭世彰,等. 海河流域参考作物腾发量长期变化趋势分析[J]. 灌溉排水学报,2009,28(1):11-13. (LUO Yufeng, JIAO Xiyun, PENG Shizhang, et al. Analysis of long term trends in reference crop evapotranspiration in Haihe Basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28 (1): 11-13. (in Chinese))
- [4] 郝振纯,安贵阳,王加虎,等. 淮河中上游参考作物腾发量趋势变化及其成因[J]. 生态环境学报,2013,22(9):1528-1533. (HAO Zhenchun, AN Guiyang, WANG Jiahu, et al. Trends in reference evapotranspiration and the main causes during 1959—2009 in upper and middle Huaihe River Basin, China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22 (9): 1528-1533. (in Chinese))
- [5] 栾策,陈涛涛,段亚飞,等. 基于 EMD 方法的参考作物腾发量振荡模态分析[J]. 沈阳农业大学学报,2014,45(3):315-320. (LUAN Ce, CHEN Taotao, DUAN Yafei, et al. Vacillations analysis of monthly reference crop evapotranspiration based in EMD method [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2014, 45 (3):315-320. (in Chinese))
- [6] 宋振伟,唐衡,孔管铎,等. 京郊平原参考作物腾发量及其与气象因子相关性研究[J]. 灌溉排水学报,2009,28(6):74-77. (SONG Zhenwei, TANG Heng, KONG Jinxin, et al. Crop reference evapotranspiration and its correlation with the meteorological factors in Beijing Plain [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009,28(6):74-77. (in Chinese))
- [7] 任玉忠,董新光,王志国. 基于灰色关联分析的参考作物腾发量影响因素分析[J]. 中国农学通报,2010,26(12):376-379. (REN Yuzhong, DONG Xinguang, WANG Zhiguo. Influential factors of evapotranspiration based on grey relational analysis[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26 (12): 376-379. (in Chinese))
- [8] 杨广,何新林,王振华,等. 北疆滴灌春小麦参考作物蒸发蒸腾量与气象因子的关系[J]. 石河子大学学报(自然科学版),2013,31(2):236-241. (YANG Guang, HE Xinlin, WANG Zhenhua, et al. The relationship between reference crop evapotranspiration and meteorological factors of spring wheat under drip irrigation systems in northern Xinjiang [J]. Journal of Shihezi University(Natural Science), 2013,31(2):236-241. (in Chinese))
- [9] 徐冰,汤鹏程,郭克贞,等. 藏中牧区近年 ET_0 变化及气象影响因子分析[J]. 人民黄河,2014,36(5):64-66. (XU Bing, TANG Pengcheng, GUO Kezhen, et al. Variation and influence of ET_0 in pastoral area of middle Tibet in recent years [J]. Yellow River, 2014, 36 (5): 64-66. (in Chinese))
- [10] 李彦,陈祖森,张保,等. 参考作物蒸发蒸腾量的多线性回归模型研究[J]. 新疆农业大学学报,2005,28(1):70-72. (LI Yan, CHEN Zusen, ZHANG Bao, et al. Study on the method of reference crop evapotranspiration by dependence analysis [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2005, 28 (1): 70-72. (in Chinese))
- [11] 高瑞忠,朝伦巴根,于婵,等. 基于随机样本的神经网络模型估算参考作物腾发量[J]. 农业工程学报,2006,22(2):42-45. (GAO Ruizhong, CHAO Lunbagen, YU Chan, et al. Estimating reference crop evapotranspiration using artificial neural network based on random samples [J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22 (2): 42-45. (in Chinese))
- [12] 王卫光,彭世彰,罗玉峰. 参考作物腾发量的混沌性识别及预测[J]. 水利学报,2008,39(9):1030-1036. (WANG Weiguang, PENG Shizhang, LUO Yufeng. Chaotic behavior analysis and prediction of reference crop evapotranspiration [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008,39(9):1030-1036. (in Chinese))
- [13] 迟道才,曲霞,刘婷婷,等. 基于偏最小二乘回归的投影寻踪耦合模型在参考作物腾发量预测中的应用[J]. 中国农村水利水电,2011(2):76-78. (CHI Daocai, QU Xia, LIU Tingting, et al. Projection pursuit based on PLS in prediction of reference crop evapotranspiration [J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(2):76-78. (in Chinese))
- [14] 赵旭,李毅,刘俊民. 新疆旱区草地参考作物腾发量随机模拟及其应用[J]. 水利学报,2008,39(11):1267-1272. (ZHAO Xu, LI Yi, LIU Junmin. Prediction of reference crop evapotranspiration with grey model in Xinjiang region [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008,39(11):1267-1272. (in Chinese))

- [15] 丁志宏,何宏谋,王浩. 灌区降水量与参考作物腾发量的联合分布模型研究[J]. 水利水电技术,2011,42(7):15-18. (DING Zhihong, HE Hongmou, WANG Hao. Joint distribution model of precipitation and crop evapotranspiration in irrigation area[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011,42(7):15-18. (in Chinese))
- [16] 王升,付智勇,陈洪松,等. 基于 GEP 和地理位置信息的湘鄂地区月参考作物腾发量模拟计算[J]. 中国生态农业学报,2015,23(4):490-496. (WANG Sheng, FU Zhiyong, CHEN Hongsong, et al. Simulation of monthly reference crop evapotranspiration in the Hunan and Hubei area based on GEP and geological information [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23 (4): 490-496. (in Chinese))
- [17] 孙怀卫,严冬,陈皓锐,等. 参考作物腾发量的 GARCH 类模型模拟与比较[J]. 农业工程学报,2015,31(7):131-136. (SUN Huaiwei, YAN Dong, CHEN Haorui, et al. Simulation and comparison of reference crop evapotranspiration with GARCH model[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(7):131-136. (in Chinese))
- [18] 马龙,刘廷玺,马丽,等. 气候变化和人类活动对黄河流域内蒙古段典型支流径流变化的贡献[J]. 水利水电技术,2014,45(11):18-23. (MA Long, LIU Tingxi, MA Li, et al. Contributions from climate change and human activities to runoff variations of typical tributaries within Inner Mongolia Section of Yellow River Basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014,45(11):18-23. (in Chinese))
- [19] 杨富程,夏自强,黄峰,等. 额尔齐斯河流域降水量变化特征[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(4):432-437. (YANG Fucheng, XIA Ziqiang, HUANG Feng, et al. Variation characteristics of precipitation over Irtysh River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40 (4): 432-437. (in Chinese))
- [20] 杨建军,吕光辉. 新疆潜在蒸散分形特征与 R/S 趋势分析[J]. 新疆农业科学,2011,48(5):882-888. (YANG Jianjun, LÜ Guanghui. Fractal character and rescaled range analysis of potential evapotranspiration in Xinjiang Uyghur Autonomous Region [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2011, 48 (5): 882-888. (in Chinese))
- [21] 顾世祥,何大明,李远华,等. 纵向岭谷区参考作物腾发量变化的特点和趋势[J]. 农业工程学报,2007,23(3):24-29. (GU Shixiang, HE Daming, LI Yuanhua, et al. Dynamic variation characteristics and tendency of reference crop evapotranspiration in the longitudinal range gorge region[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23 (3): 24-29. (in Chinese))
- [22] 杨文峰,李兆元,李星敏. 一种新的气候跃变方法及其应用[J]. 应用气象学报,1997,81(1):119-123. (YANG Wenfeng, LI Zhaoyuan, LI Xingmin. A new method and its application for computation climate mutation[J]. Journal of Applied Meteorology, 1997, 81 (1): 119-123. (in Chinese))
- [23] 张敬平,黄强,赵雪花. 漳泽水库水文序列突变分析方法比较[J]. 应用基础与工程科学学报,2013,21(5):837-843. (ZHANG Jingping, HUANG Qiang, ZHAO Xuehua. Comparative research on abrupt change analysis methods for hydrological time series in Zhangze Reservoir [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2013, 21 (5): 837-843. (in Chinese))
- [24] BERNOLA-GALVAN P, CH I P, NUNES A, et al. Scale invariance in the nonstationarity of human heart rate [J]. Physical Review Letters, 2001,87(16):1-4.
- [25] 龚志强,封国林,万仕全,等. 基于启发式分割算法检测华北和全球气候变化的特征[J]. 物理学报,2006,55(1):477-483. (GONG Zhiqiang, FENG Guolin, WAN Shiquan, et al. Analysis of features of climate change of Huabei area and the global climate change based on heuristic segmentation algorithm [J]. Acta Physica Sinica, 2006,55(1):477-483. (in Chinese))
- [26] 李海彬,张小峰,胡春宏,等. 基于 BG 分割算法的河川年输沙量突变分析[J]. 水利学报,2010,41(12):1387-1392. (LI Haibin, ZHANG Xiaofeng, HU Chunhong, et al. Analysis on annual sediment transport abrupt of river basin based on BG segmentation algorithm [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41 (12): 1387-1392. (in Chinese))
- [27] 黄生志,黄强,王义民,等. 基于启发式分割和近似熵法的径流序列变异诊断[J]. 中山大学学报(自然科学版),2014,53(4):154-160. (HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, WANG Yimin, et al. The Study on the runoff change based on the heuristic segmentation algorithm and approximate entropy[J]. Acta Scientiarum Naturalium University Sunyatseni, 2014, 53 (4): 154-160. (in Chinese))
- [28] 刘爽,马欣,李玉娥,等. 基于滑动分割算法的我国耕地熟制识别研究[J]. 资源科学,2014,36(9):1969-1976. (LIU Shuang, MA Xin, LI Yu'e, et al. Farmland cropping system identification in China based on a sliding segmentation algorithm[J]. Resources Science, 2014, 36 (9): 1969-1976. (in Chinese))

(收稿日期:2015-10-25 编辑:骆超)