

泾河上游流域实际蒸散发变化趋势及成因分析

党素珍^{1,2}, 蒋晓辉^{1,2}, 董国涛^{1,2}, 程春晓^{1,2}, 白 乐^{1,2}

(1. 黄河水利委员会 黄河水利科学研究院, 郑州 450003; 2. 黄河水利科学研究院
水利部 黄土高原水土流失过程与控制重点实验室, 郑州 450003)

摘 要:利用泾河上游流域 1973—2012 年的径流和蒸发皿观测资料,验证了该区域蒸散发量存在互补关系;在此基础上,利用区域内 1966—2012 年的气象资料,采用蒸散发互补关系模型估算区域实际蒸散发量,并进一步分析实际蒸散发的变化趋势及成因。结果表明,泾河上游流域蒸散发互补关系显著,平流—干旱模型计算该区域 1966—2012 年多年平均实际蒸散发量为 529.4 mm,总体呈减少趋势,变化率为 $-4.64 \text{ mm}/(10 \text{ a})$ 。季节变化上,春、夏、秋季的实际蒸散发量均呈下降趋势,其中夏季实际蒸散发量下降趋势显著,冬季蒸散发略有上升。通过分析实际蒸散发与气象因子的相关关系以及各气象因子变化趋势可知,研究区实际蒸散发的变化与降水、相对湿度和日照时数呈正相关关系,而与风速的变化呈负相关,该区域年实际蒸散发减少的主要原因可能是由于日照时数减少导致太阳辐射能量下降及降水量减少使可供蒸发的水量减少。

关键词:实际蒸散发; 蒸散发互补关系; 平流—干旱模型(AA 模型); 泾河流域

中图分类号:P426.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)02-0143-05

Variation of Actual Evapotranspiration and Its Causes Analysis in the Upper Reaches of the Jinghe River Basin

DANG Suzhen^{1,2}, JIANG Xiaohui^{1,2}, DONG Guotao^{1,2}, CHENG Chunxiao^{1,2}, BAI Le^{1,2}

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China; 2. Key Laboratory of Soil and Water Loss Process and Control on the Loess Plateau, MWR, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Based on the runoff, precipitation and pan evaporation data from the upper reaches of the Jinghe River basin from 1973 to 2012, the complementary relationship of evapotranspiration was analyzed. The monthly actual evapotranspiration from 1966 to 2012 was calculated by the complementary relationship evapotranspiration model, the variation of actual evapotranspiration and its causes were analyzed. The results indicated that there existed an obvious complementary relationship of evapotranspiration in the study area. The average annual actual evapotranspiration in the upper reaches of the Jinghe River basin was 529.4 mm, and it had a downward trend at a rate of $4.64 \text{ mm}/\text{decade}$. All of the actual evapotranspiration in spring, summer and autumn presented the downward trend, and the decreasing trend of actual evapotranspiration in summer was significant at the level of 0.01. An upward trend was observed in the actual evapotranspiration in winter. Through the analysis of the correlation between actual evapotranspiration and meteorological factors and the changing trend of various meteorological factors, precipitation, sunshine hours and relative humidity have the effective effect on the actual evapotranspiration, while wind has the negative effect. The decrease of actual evapotranspiration is mainly due to the reduction in solar radiation caused by the decrease of sunshine hours and the reduction of the available water for evapotranspiration caused by the decrease of precipitation.

Keywords: actual evapotranspiration; complementary relationship of evapotranspiration; Advection-Aridity model (AA model); the Jinghe River basin

流域蒸散发是指一个区域内各种下垫面条件下的总蒸发,包括植被蒸腾和土壤蒸发,是地表水量平衡和热量平衡的组成部分。实际蒸散发是水文循环过程的直接参与变量,也是水文循环中最复杂的环节,因而备受关注^[1-2]。在全球气候变化的大背景下,准确估算蒸散发量及其变化趋势对于深入理解流域水文循环规律及科学规划和管理流域水资源具有重要意义。

在区域尺度上,很难通过仪器测定足够数量的、可靠的实际蒸散发数据,因此往往采用模型计算的方式获取区域实际蒸散发量。1963 年,Bouchet 提出蒸散发互补关系原理,开辟了实际蒸散发估算的新途径。随后许多学者基于该原理建立了实际蒸散发计算模型,主要有:AA(the Advection-Aridity model)模型^[3]、CRAE(the Complementary Relationship Areal Evapotranspiration-model)模型^[4]、GG(Granger and Gray)模型^[5-6]。该类模型估算实际蒸散发时只需常规的气象观测资料,避开了土壤—植被—大气系统的复杂性,便于大范围推广。近些年来,该类模型被广泛用于估算实际蒸散发量,例如在计算黄河流域、长江流域、海河流域、汉江流域、第二松花江流域及中国西北地区的实际蒸散发量时,均取得了良好的效果^[7-13]。其中,刘绍民等利用黄河流域 1981—2000 年的气象、水文资料,结合卫星遥感信息和数字高程模型,检验了 AA, CARE, Granger 等互补相关模型在不同时间尺度、不同气候类型区域的计算精度,结果表明 AA 模型估算的月蒸散量比较合理,计算结果比较理想^[7]。曾燕等将净辐射、气温、水汽压等系列要素分布式模拟与 AA 模型耦合,实现了黄河流域蒸散发量的分布式模拟,与基于水量平衡的黄河流域多年平均蒸散量空间分布吻合很好^[13]。

本文以泾河上游流域为研究区,首先验证蒸散发互补关系在该区的适用性,进而采用蒸散发互补相关关系模型计算 1966—2012 年的实际蒸散发量,并进一步分析了该区域实际蒸散发量的变化趋势及其影响因素。

1 研究区和数据介绍

1.1 研究区概况

泾河是黄河流域十大水系之一,发源于六盘山东麓,流经宁夏、甘肃、陕西三省(区),注入渭河。泾河上游流域(泾川水文站以上流域)位于泾河流域西南部(106°11′—107°21′E, 35°15′—35°45′N),面积 3 164 km²,处于土石山区向黄土高原的过渡地带,地势西高东低,以西部六盘山山脉为最高,最高海拔 2 922 m,最

低海拔 1 026 m。该区属于半湿润过渡带,具有黄土高原暖温带气候和山地气候特征。根据区域内气象站点的多年观测资料,泾河上游流域多年平均气温为 8.9℃,年降水量为 355~845 mm,多年平均年降水量 586 mm,其中汛期(6—9 月)平均降雨量为 409 mm,占年降水量的 53%~85%。降水量的年际变化显著,夏秋季节出现大强度暴雨的频率也较高。

1.2 数据来源

本研究中所采用的数据包括研究区 1973—2012 年逐月面降水量、泾川水文站 1973—2012 年的月径流量和平凉气象站 1966—2012 年的常规观测资料。其中研究区的面降水量是基于区域内 34 个雨量站的月降水数据在 ArcGIS 软件中采用泰森多边形法计算得到,数据由黄河水利委员会水文局提供。气象站的常规观测数据包括月降水量、月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温、月日照时数、10 m 处风速和相对湿度,数据来自中国气象局气象中心。

2 研究方法

2.1 蒸散发互补关系原理

Bouchet 提出的陆面实际蒸散发与可能蒸散发之间的互补相关原理认为在能量供给恒定的情况下^[14],区域实际蒸散发与潜在蒸散发(即蒸散发能力)之间存在互补关系,即实际蒸散发量减小或增加的速率等于相应的潜在蒸散发增加或减小的速率,公式表示为:

$$ET_a + ET_p = 0 \quad (1)$$

式中: ET_a ——区域实际蒸散发量; ET_p ——潜在蒸散发。

对上式(1)进行积分可得

$$ET_a + ET_p = C \quad (2)$$

式中: C ——积分常数,由边界条件进行确定。

定义“湿润环境”区域蒸散发(ET_w)为潜在蒸散发与区域实际蒸散发相等时的蒸散发量,则式(2)中的积分常数项 C 等于 2 倍的“湿润环境”区域蒸散发量,即

$$ET_a + ET_p = 2ET_w \quad (3)$$

式中: ET_w ——“湿润环境”区域蒸散发量。由式(3)可知,对于完全干燥的环境,下垫面无水分供给,此时, $ET_a = 0$, $ET_p = 2ET_w$ 。

2.2 AA 模型

Brutsaert 等依据 Bouchet 的互补相关原理,采用 Penman 公式计算潜在蒸散发量(ET_p),选取 Priestley-Taylor 公式计算“湿润环境”区域蒸散发量(ET_w),进而提出计算实际蒸散发量的 AA 模型:

$$ET_p = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} e_a \quad (4)$$

$$ET_w = \frac{\alpha \Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{\lambda} \quad (5)$$

$$ET_a = (2\alpha - 1) \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{\lambda} - \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} e_a \quad (6)$$

式中: Δ ——温度—饱和水汽压曲线斜率 ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); λ ——热通量 (W/m^2); γ ——温度常数 ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); e_a ——空气干燥力 (mm/d); R_n ——地面净辐射 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; α ——经验系数, 反映无平流条件下陆面可利用能量转化为潜热通量的能力, α 推荐取值为 1.26^[15]。

杨汉波等研究认为参数随着纬度增加而增大, 随着离海洋距离的增大而减小, 根据研究区域的具体情况调整参数 α 以反映蒸散发互补关系的区域变异性^[16]。

2.3 Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall 是一种非参数检验方法^[17-18], 不受少数异常值的干扰, 也无需样本服从一定分布, 适用于气象、水文等非正态分布数据, 且计算简便^[19]。本研究实际蒸散发及气象因子的变化趋势采用该方法进行检验。

3 结果与分析

3.1 蒸散发互补关系的验证

首先对研究区实际蒸散发与潜在蒸散发的关系进行验证。本文根据研究区内 34 个雨量站 1973—2012 年的降水量资料, 采用泰森多边形法求得区域平均降水量, 以平凉站的蒸发皿观测资料代表流域年潜在蒸散发量, 径流采用泾川站的年径流资料, 并将年径流量转化为年径流深, 用流域年降水量与流域年径流深之差代表流域年实际蒸散发量。流域的湿润情况采用流域年降水量作为代表, 进而得到研究区实际蒸散发量与潜在蒸散发量间的关系 (图 1)。

由图 1 可以看出, 随着下垫面供水条件 (以降水量刻画) 的增加, 研究区潜在蒸散发量呈现明显的下降趋势 (显著性水平为 0.01), 而实际蒸散发呈现明显的上升趋势 (显著性水平 0.001), 二者之间的互补关系良好, 因而本研究采用基于互补相关理论的实际蒸散发量模型来计算泾河上游流域的实际蒸散发是可行的。

3.2 实际蒸散发变化趋势及成因分析

3.2.1 年实际蒸散发变化趋势与突变点分析 许崇育等的研究认为参数 α 与区域特征有关^[20] 采用 AA 模型计算泾河上游流域的实际蒸散发量时, 可利用水量平衡原理对参数 α 进行率定。根据泾川水文站的实测径流资料和流域内及周边 1973—2012 年 34 个雨量站的月降水量, 应用水量平衡方程计算可得研究

区多年平均实际蒸散发量为 518.6 mm。取水量平衡闭合误差为 0 时参数 α 值为最优值, 进而得到泾川以上泾河流域 AA 模型的参数 α 取值为 0.96。1973—2012 年, AA 模型计算的多年平均实际蒸散发为 526.4 mm, 以应用水量平衡方法计算的该区域多年平均实际蒸散发量为基准值, AA 模型计算结果的相对误差为 1.5%, 精度较高。因此认为, 经过率定的 AA 模型可以用来计算研究区的实际蒸散发量。

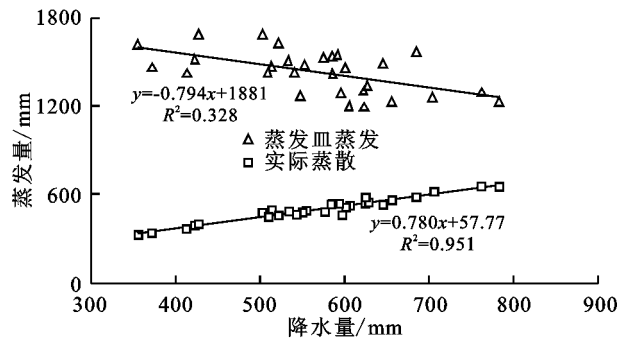


图1 泾河上游流域实际蒸散发与潜在蒸散发互补关系

图 2 给出了 AA 模型计算的研究区 1966—2012 年实际蒸散发量变化过程, 实际蒸散发量在 478.4~582.3 mm, 多年平均实际蒸散发量为 529.4 mm, 最大值出现在 1968 年, 最小值出现在 1989 年。由图 2 可以看出, 研究区年实际蒸散发呈下降的变化趋势, 变化幅度分别为 $-4.64 \text{ mm}/(10 \text{ a})$ 。这与刘绍民等 (2004 年) 计算的 1981—2000 年黄河流域实际蒸散发总体呈下降趋势相一致。Mann-Kendall 趋势检验结果显示年实际蒸散发的下降趋势不显著 (表 1)。图 3 显示了研究区实际蒸散发量的累积距平变化过程。通过对实际蒸散发量累积距平曲线斜率变化进行分析, 即可得知与多年平均实际蒸散发量相比, 各阶段实际蒸散发量的变化情况。通过图 3 可以看出, 1966—2012 年研究区实际蒸散发量的变化分为 4 个阶段, 即 1966—1978 年, 研究区实际蒸散发量累积距平曲线的斜率为正, 这段时间的实际蒸散发量大于多年平均实际蒸散发量; 1979—1992 年, 研究区实际蒸散发量累积距平曲线的斜率为负, 此时段的实际蒸散发量小于多年平均实际蒸散发量; 而 1993—2006 年, 实际蒸散发量累积距平曲线的斜率为正, 实际蒸散发量大于多年平均实际蒸散发量; 2007—2012 年研究区实际蒸散发量累积距平曲线的斜率为负, 说明 2006 年之后实际蒸散发量又小于多年平均实际蒸散发量。

3.2.2 季节实际蒸散发变化趋势 率定后的 AA 模型计算的泾河上游流域多年平均实际蒸散发量为 529.4 mm, 其中, 夏季最高, 为 249.7 mm; 春季和秋季次之, 分别为 153.1 mm 和 100.5 mm; 冬季最小, 为 26.1 mm。

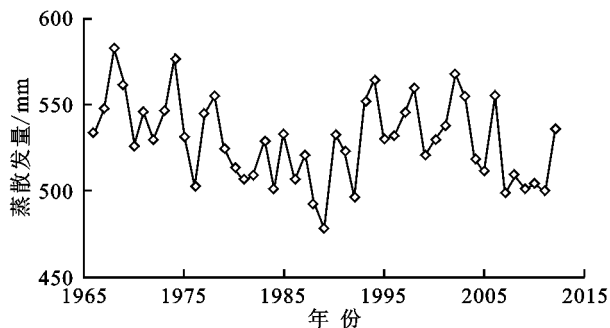


图 2 研究区 1966—2012 年实际蒸散量变化过程

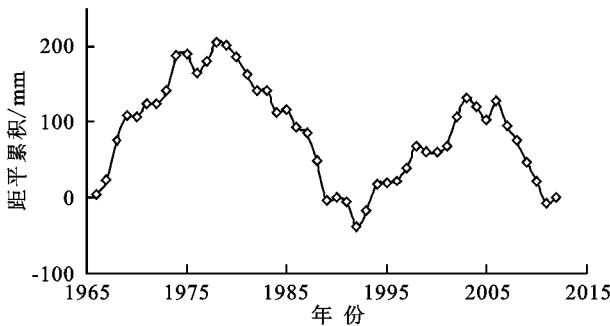


图 3 泾河上游流域 1966—2012 年实际蒸散量距平累积过程

图 4 给出了研究区 1966—2012 年季节实际蒸散发的变化过程。可以看出,泾河上游流域春季、夏季和秋季的实际蒸散发呈下降的变化趋势,冬季呈上升趋势,春夏秋冬各季的变化幅度分别为 $-0.97,-4.15,-0.16,0.6\text{ mm}/(10\text{ a})$ 。Mann-Kendall 趋势检验结果显示(表 1),夏季实际蒸散量呈显著的下降趋势,

表 1 研究区年及季节潜在蒸散发与气象因子 Mann-Kendall 检验统计量 Z 值

季节	实际蒸散发	降水	最高气温	最低气温	风速	相对湿度	日照时数
年尺度	-1.84	-1.4	3.59***	6.14***	-3.09**	-1.97*	-1.96*
春季	-0.78	-1.51	3.49***	4.65***	-1.19	-2.46*	0.44
夏季	-2.80**	-0.64	2.14*	5.17***	-0.53	-1.08	-2.77**
秋季	-0.80	-0.97	2.76**	3.81***	-1.38	-0.63	-1.05
冬季	0.98	1.99*	2.51**	4.30***	-1.50	0.26	-1.13

注:* 通过了 0.05 的置信度检验,** 通过了 0.01 的置信度检验,*** 通过了 0.01 的置信度检验。

表 2 给出了研究区实际蒸散发与气象因子的相关系数。从简单相关关系来看,泾河上游流域实际蒸散发减少主要是由与实际蒸散发呈正相关关系的要素的下降及呈负相关关系的要素的升高引起的。

由表 2 分析与年和季节实际蒸散发呈显著相关的气象因子可知,降水、相对湿度和日照时数对实际蒸散发的变化起正作用,风速对实际蒸散发的变化产生负作用。根据实际蒸散发与各气象因子的相关关系以及各气象因子变化趋势的分析,造成研究区实际蒸散发变化的原因归结为:(1) 在年尺度上,实际蒸散发与日照时数、降水量和相对湿度呈显著的正相关,且与日照时数的相关系数通过了 0.05 的置信度

且通过了 0.01 显著性水平检验,春季、秋季和冬季的实际蒸散发变化趋势未通过显著性检验。

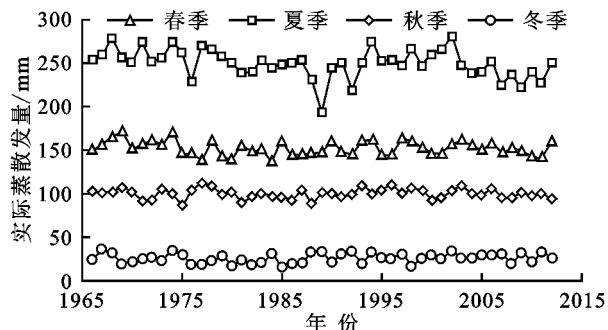


图 4 研究区 1966—2012 年季节实际蒸散发量变化过程

3.2.3 实际蒸散发变化成因分析 为探讨区域实际蒸散发变化的成因,采用 MK 检验法分析影响实际蒸散发的各气象因子(包括降水量、最低气温、最高气温、相对湿度、风速和日照时数)的变化趋势。表 1 给出了年及季节实际蒸散发和气象因子的 Mann-Kendall 检验的统计量 Z 值,结果表明:降水在冬季呈显著的上升趋势,在年及春夏秋冬四季呈减少趋势;最高气温和最低气温在年尺度和季节尺度上均呈显著的上升趋势;风速在年尺度上和季节尺度均呈下降趋势,且在年尺度上的下降趋势通过了 0.01 显著性检验;除冬季外,相对湿度呈下降的变化趋势,且在年尺度和春季的下降趋势达到了 0.05 显著性水平;日照时数在年尺度和夏季呈显著的下降变化趋势,分别通过了 0.05,0.01 置信水平的检验。

检验。研究区 1966—2012 年实际蒸散发的降低主要是由日照时数减少导致太阳辐射能量下降及降水量减少使可供蒸发的水量减少引起的。(2) 春季实际蒸散发的降低主要是由于春季降水和相对湿度的减少引起的。夏季日照时数显著下降致使太阳辐射能量下降,进而导致夏季实际蒸散发量减少,而且补偿了由于最高气温升高引起的实际蒸散发的增量,从而使得夏季实际蒸散发呈显著下降趋势。日照时数的下降导致太阳辐射能量减少也可能是导致秋季实际蒸散发的减少的主要原因。冬季实际蒸散发的增加是由于冬季降水量和相对湿度的增加以及风速的下降。

表 2 研究区实际蒸散发与气象因子的相关系数

实际蒸散发	降水	最高气温	最低气温	风速	相对湿度	日照时数
年尺度	0.196	0.079	−0.187	−0.068	0.16	0.581**
春季	0.322*	0.093	0.173	−0.353*	0.309*	0.247
夏季	0.013	0.345*	−0.193	0.075	−0.039	0.859**
秋季	−0.001	0.245	0.013	−0.022	0.091	0.418**
冬季	0.410**	−0.318*	0.026	−0.763**	0.802**	−0.214

注:* 通过了 0.1 的置信度检验,** 通过了 0.05 的置信度检验。

4 结 论

(1) 依据泾河上游流域的实测资料分析表明该区域存在蒸散发互补关系,进而采用基于蒸散发互补关系的实际蒸散发计算模型得到泾河上游流域多年平均实际蒸散发量为 529.4 mm。

(2) 1966—2012 年研究区年实际蒸散发呈下降趋势;夏季蒸散发呈显著下降趋势,冬季蒸散发略有上升。

(3) 对实际蒸散发与气象因子的相关关系以及各气象因子变化趋势进行分析表明,降水、相对湿度和日照时数对实际蒸散发的变化起正作用,风速对实际蒸散发的变化产生负作用。研究区年实际蒸散发的减少的主要原因可能是由于日照时数减少导致太阳辐射能量下降及降水量减少使可供蒸发的水量减少。

参考文献:

[1] 王军,李和平,鹿海员,等. 典型草原地区蒸散发研究与分析[J]. 水土保持研究,2013,20(2):69-72.

[2] 温鲁哲,陈喜,王川子,等. 基于蒸渗仪测量的水文要素影响因素分析[J]. 水土保持研究,2012,19(4):252-255.

[3] Brutsaert W, Stricker H. An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration[J]. Water Resources Research, 1979,15(2):443-450.

[4] Morton F I. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology[J]. Journal of Hydrology, 1983,66(1):1-76.

[5] Granger R J, Gray D M. Evaporation from natural non-saturated surfaces[J]. Journal of Hydrology, 1989,111(1):21-29.

[6] Granger R J. A complementary relationship approach for evaporation from nonsaturated surfaces[J]. Journal of Hydrology, 1989,111(1):31-38.

[7] 刘绍民,孙睿,孙中平,等. 基于互补相关原理的区域蒸散量估算模型比较[J]. 地理学报,2004,59(3):331-340.

[8] 王艳君,姜彤,刘波. 长江流域实际蒸发量的变化趋势[J]. 地理学报,2010,65(9):1079-1088.

[9] Li X, Gemmer M, Zhai J, et al. Spatio-temporal variation of actual evapotranspiration in the Haihe River Basin of the past 50 years[J]. Quaternary International, 2013,304:133-141.

[10] 翟禄新,冯起,李艺,等. 基于 CRAE 模型的西北地区实际蒸散发量计算[J]. 灌溉排水学报,2010(5):33-38.

[11] 朱非林,王卫光,孙一萌,等. 汉江流域实际蒸散发的时空演变规律及成因分析[J]. 河海大学学报:自然科学版,2013,41(4):300-306.

[12] 谢今范,韦小丽,张晨琛,等. 第二松花江流域实际蒸散发的时空变化特征和影响因素[J]. 生态学杂志,2013,32(12):3336-3343.

[13] 曾燕,邱新法,刘昌明. 黄河流域蒸散量分布式模拟[J]. 水科学进展,2014,25(5):632-640.

[14] Bouchet R J. Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique[J]. IAHS Publ., 1963,62:134-142.

[15] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters[J]. Monthly Weather Review, 1972,100(2):81-92.

[16] 杨汉波,杨大文,雷志栋,等. 蒸发互补关系的区域变异性[J]. 清华大学学报:自然科学版,2008,48(9):33-36.

[17] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1945,13:245-259.

[18] Kendall M. Rank correlation methods[M]. London: Charles Griffin,1975.

[19] 韩雪云,杨青,姚俊强. 新疆天山山区近 51 年来降水变化特征[J]. 水土保持研究,2013,20(2):139-144.

[20] Xu C Y, Singh V P. Evaluation of three complementary relationship evapotranspiration models by water balance approach to estimate actual regional evapotranspiration in different climatic regions[J]. Journal of Hydrology, 2005,308(1):105-121.