

1959—2000 年妫水河流域气候变化与水文响应分析

许海丽^{1,2,3}, 潘云^{1,2,3}, 宫辉力^{1,2,3}, 周德民^{1,2,3}, 武鹏飞^{1,2,3}

(1. 首都师范大学 城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地, 北京 100048; 2. 首都师范大学 资源环境与地理信息系统北京市重点实验室, 北京 100048; 3. 首都师范大学 三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048)

摘要: 基于北京延庆县东大桥气象水文站观测的气温、降水和径流数据, 采用 Thornthwaite 水文模型和 Mann—Kendall 突变与趋势检验法, 对该站点所控制的部分妫水河流域的年平均气温和降水进行长期趋势检验和突变分析, 同时对模型模拟的径流、蒸散量、土壤含水量进行长期趋势检验和突变分析。结果表明: 1980—2000 年与 1959—1979 年相比, 研究区气温升高了 2.45%, 降水量减少了 8.57%, 地表径流减少了 8.86%, 实际蒸散量降低了 8.54%, 土壤含水量减少了 76.95%。20 世纪 50 年代以来, 研究区一致表现为气温升高和降水减少。径流、实际蒸散量、土壤含水量也随之减少, 并在 1975 年左右发生突变, 整体表现出干旱化倾向。气候变化已经对区域水循环产生重要影响。

关键词: Thornthwaite 水文模型; Mann—Kendall 趋势检验法; 气候变化; 水文响应

中图分类号: P333.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2012)02-0043-05

Analysis of the Climate Change and Hydrological Responses in Guishui River Basin from 1959 to 2000

XU Hai-li^{1,2,3}, PAN Yun^{1,2,3}, GONG Hui-li^{1,2,3}, ZHOU De-min^{1,2,3}, WU Peng-fei^{1,2,3}

(1. Base of the State Key Laboratory of Urban Environmental Processes and Digital Modeling, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Key Lab of 3-D Information Acquisition and Application of MOE, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 3. Beijing Key Lab of Resources Environment and GIS, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: The lumped water balance of Guishui River Basin in Yanqing, Beijing was simulated with Thornthwaite model at a monthly interval from 1959 to 2000. The simulated hydrological components, including surface runoff, evapotranspiration and soil moisture, precipitation as well as air temperature were analyzed with the Mann—Kendall method for long-term trend and abrupt change investigation. The results showed that the study area had experienced an increase in air temperature and a decrease in precipitation since 1950s. Surface runoff, actual evapotranspiration and soil moisture were subsequently reduced. Compared with the period of 1959—1979, the air temperature had increased 2.45%, while the precipitation had decreased 8.57% from 1980 to 2000, resulting in the decrease in 8.86% for surface runoff, the decrease in 8.54% for evapotranspiration, and the decrease in 76.95% for soil moisture. The abrupt change of these hydrological components was observed to occur in 1975 and indicated the drought trend. It can be concluded that the climate change has indeed impacted hydrological processes in this basin.

Key words: Thornthwaite water—balance model; Mann—Kendall trend analysis; climate change; hydrological responses

研究气候变化对水文水资源的影响, 对于理解和解决可能引起的工业、农业、城市发展等经济领域密切相关的水文水资源系统的规划管理、环境保护、生

态平衡等问题具有重要的理论和现实意义^[1]。气候变化将改变全球水文循环的现状, 引起水资源在时空上的重新分配, 并对降水、蒸散、径流、土壤湿度等造

收稿日期: 2011-06-15

修回日期: 2011-10-24

资助项目: 国家自然科学基金(41101033); 国际科技合作项目(2010DFA92400); 北京市自然科学基金(8082010, 8101002); 水利部公益性行业科研专项经费项目(200901091)

作者简介: 许海丽(1986—), 女, 硕士研究生, 山东德州人, 研究方向: RS 和 GIS 在水文水资源中的应用研究。E-mail: xhaili@126.com

通信作者: 潘云(1980—), 男, 讲师, 江苏溧阳人, 研究方向: 地下水水文、水文遥感。E-mail: panyun86@hotmail.com

成直接影响^[2]。气候变化对水量平衡的影响显著,气候变化时,对径流的主要影响因素为降水,其次为气温;而影响陆面蒸散的主要气候因子为气温。气候变化对水量平衡的影响程度取决于降水和气温的变化幅度及其组合关系^[3]。

利用 Thornthwaite 水量平衡模型进行水文模拟,对于水文数据缺乏地区具有很大的优势,不需要输入过多的水文参数,就可以进行水文模拟^[4],且 Thornthwaite 模型在降雨、蒸散和径流等水文过程中已被广泛应用。很多研究学者以 Thornthwaite 模型为基础,做了大量发展与研究。McCabe 根据 Thornthwaite 模型和气候变化情况估算了美国特拉华流域的季节径流和土壤含水量^[5]。Cohen 用 Thornthwaite 模型研究了不同的 GCM 输出结果对加拿大 Saskatchewan 河的影响^[6]。Zimmermann 利用 Thornthwaite 模型结合曲线数值法估算径流,而且通过不同的径流值建立渗透网进而估算土壤水补给量^[4]。Ahmadi 和 Fooladmand 利用修正过的 Thornthwaite 方程来模拟月蒸散量空间分布情况^[7]。McCabe 和 Wolock 使用 Thornthwaite 模型进行了全球的径流模拟^[8]。这些应用推动了 Thornthwaite 模型的研究和发展。

本文应用此模型,基于妫水河流域中延庆东大桥站气象、水文观测数据,通过水文模拟得到蒸散、径流、土壤含水量等水文参量值及 1959—2000 年期间研究区气候因素和水文参量的变化趋势与突变点。研究区位于北京市西北部,是北京市重要的生态屏障及重要水源地。本文研究结果对于流域生态环境保护、城市农业用水等具有一定的指导意义和参考价值。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

本文选取延庆县东大桥水文监测站控制的流域范围,属妫水河流域。流域地形以山地为主,中部地势较低,属平原区,海拔 476~1 606 m。流域范围 40°21.5′—40°42′N,115°36.6′—116°33′E,面积 580.84 km²,东大桥站点坐标 40°27′N,115°58′E,海拔 488 m。妫水河的径流主要由降水产生,但在上游永宁镇出露的地下水亦以泉的形式对其进行补给。研究区土地利用类型以耕地、林地、草地为主。国际土壤类型库^[9]数据表明,研究区土壤类型以壤土为主,占 44.4%,主要分布在研究区中西北部;砂质黏壤土占 22.5%,主要分布在研究区东北部;砂质土壤占 18.1%,主要分布在研究区东南部,小部分分布于研究区北部;壤砂

土占 15%,主要分布在研究区北部。

研究区处于温带半湿润大陆性季风气候区,冬季受蒙古高压影响,盛行偏北风,寒冷干燥;夏季受大陆性低气压控制,盛行偏南风,炎热多雨。多年平均气温在 9℃左右,多年平均降雨量在 470 mm 左右,且多集中在 7—9 月 3 个月,占全年降水总量的 68%。

1.2 数据资料

本文所用资料为延庆东大桥水文监测站所测 42 a 的气温、降水数据(北京气象局《北京气候资料》),年限为 1959—2000 年,月平均气温和月总降水量作为水文模拟输入数据,模拟得出径流、蒸散、土壤含水量等水文参量。流量数据为延庆东大桥站 1986 年、1987 年、1989 年和 1991 年共 4 a 的月平均流量值,用以模型结果精度验证。土壤类型数据使用国际土壤数据库中所下载的数据。

1.3 研究方法

1.3.1 Thornthwaite 模型进行水文模拟 Thornthwaite 模型是建立在水量平衡的基础上,以月为计算步长,描述径流从陆地的降雨,经过蒸散、入渗及产流等过程到出口断面产生的径流模型(模型结构图,见图 1)。模型基于一定的物理过程,研究气候、径流的因果关系,以及流域水资源对气候条件的响应^[10-12]。模型内主要水文过程计算公式如下:

$$DRO = P_{\text{rain}} \times \text{drofrac} \quad (1)$$

式中: DRO——地表径流(mm); P_{rain} ——降雨量(mm); drofrac——比例系数。

$$PET = 13.97 \times d \times D^2 \times W_t \quad (2)$$

$$W_t = \frac{4.95 \times e^{0.0062T}}{100} \quad (3)$$

式中: PET——月潜在蒸散量(mm); d ——每月天数; D ——月平均白昼时长(12 h⁻¹); W_t ——饱和的水蒸气密度(g/m³); T ——月平均气温(℃)。

$$AET = \begin{cases} P + STW & P < PET \\ AET & P \geq PET \end{cases} \quad (4)$$

$$STW = ST_{i-1} - [\text{abs}(P - PET) \times (\frac{ST_{i-1}}{STC})] \quad (5)$$

式中: AET——月实际蒸散量(mm); P ——月总降水量(mm); STW——土壤水分缺失量(mm); ST_{i-1} ——上一个月的土壤含水量; STC——土壤水分吸收能力。

模型输入数据为月平均气温(℃)、月总降水量(mm)和纬度(°),需要设定的参数有区分是降雨或降雪的气温阈值(℃)、融雪比率、径流比率和土壤持水力(mm)。在模型的基本参数设定时,土壤持水能力值参考了 SWIM 用户手册中提供的参考值^[13],其他参数使用了 McCabe 和 Markstrom 研究中提供的参

考值^[12]。模拟结果中的径流值即为径流深(mm);土壤含水量是指 100 cm 深土层内的含水量(mm)。

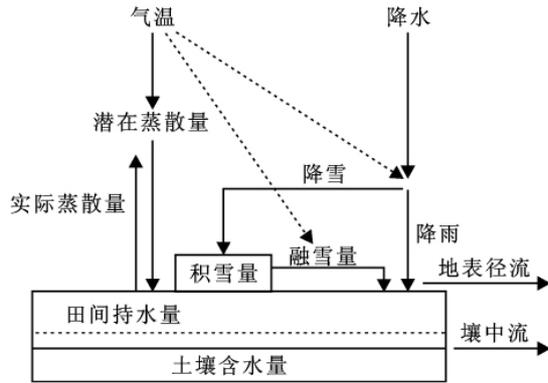


图 1 Thornthwaite 模型结构图

1.3.2 M—K 方法进行趋势分析 本文使用 Mann—Kendall 趋势检验和突变检测法(以下简称 M—K 法)^[14],用于气温、降水和模拟结果中的径流、蒸散量、土壤含水量的突变检测和长期趋势分析。陈亚宁等利用此方法对新疆水文水资源 1957—2005 年期间的变化进行了分析^[15]。郭宗峰等利用此方法对流沙河流域 1959—2000 年的降水与径流变化进行了分析^[16]。方法简述如下:

对于具有 n 个样本量的时间序列,设序列 $x_1, x_2, \dots, x_n, S_k$ 为第 i 时刻数大于 j 时刻值个数的累计数。

$$U_K = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad k=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中, $U_K=0, E(S_k), \text{var}(S_k)$ 是累计数 S_k 的均值和方差,在 x_1, x_2, \dots, x_n 相互独立且有相同连续分布时,它们可由下式算出:

$$\begin{cases} E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4} \\ \text{var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \end{cases} \quad (7)$$

所有 $U_K (1 \leq k \leq n)$ 组成一条曲线 UK,通过信度检验可得出其是否有明显的变化趋势;将序列反转后计算得到另一条曲线 UB_k ,若 UK_k 和 UB_k 的交点在置信区间内,则该点为突变点。给定显著性水平 $\alpha = 0.05$,临界值 $u_{0.05} = \pm 1.96$ 。 UF_i 和 UB_k 两个统计量序列曲线和 ± 1.96 两条直线均绘在同一张图上。 $UF > 0$,则表明序列呈上升趋势,反之,则表明呈下降趋势。大于或小于 ± 1.96 ,则表示上升或下降趋势明显。

2 结果与分析

2.1 模型验证

使用模型计算结果中的径流值,反推流量值,与

延庆东大桥站实测流量值对比,进行模型精度验证。经验证,实测值与模拟值相关系数为 0.60,变化趋势基本吻合,模拟径流量大部分明显小于实际径流量,如图 2 所示,造成此结果的原因可能是,该区域河流的主要补给方式降水占一部分,上游地下水出露也是补给方式之一。

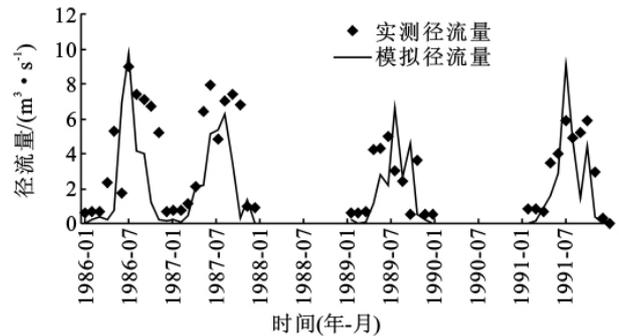


图 2 实际径流量与模拟径流量

2.2 气候变化特征分析

研究区 42 a 气温和降水时间序列的长期变化趋势 M—K 检验结果显示(图 3),年均气温表现为明显的增长趋势,年均降水量表现为明显的下降趋势。其中,气温序列发生突变的年份是 1996 年,而降水发生突变的年份则在 1975 年左右。20 世纪 90 年代中期以来该地区气温明显升温,1991—2000 年年平均气温 9.05°C ,比 1980 年代、1970 年代和 1960 年代分别增长 $0.6, 0.43, 0.59^\circ\text{C}$,年均增长率为 0.02°C/a ;降水减少十分明显,1970 年前年平均降水量为 514.65 mm ,1970 年后年平均降水量为 442.01 mm ,降水偏少的概率增大,年均减少率为 2.77 mm/a 。将研究时间段平均分为两段,1980—2000 年与 1959—1979 年相比,研究区气温升高了 2.45% ,降水量减少了 8.57% 。研究区气温升高是全球变暖化的局地表现,显示了区域气候系统对全球气候变化的积极响应。降水是陆地表面水文气象的重要因素,对区域水循环过程和水平衡具有重要的意义。

2.3 水文变化对气候变化的响应

2.3.1 径流变化 气候变化给水资源带来的最直接影响就是改变径流的大小及其空间分布。本文研究区较小,所以只分析受气候变化影响的径流变化特征。根据 Thornthwaite 模型模拟结果,研究区 42 a 的径流变化大致经历两个阶段,即 1959—1970 年的丰水阶段和 1970—2000 年的下降阶段,且总体表现为下降趋势。年径流深大于 150 mm 的年份为 1959 年、1964 年、1967 年、1969 年、1973 年、1998 年,即 1970 年前占 $2/3$ 。20 世纪 70 年代、80 年代、90 年代比 20 世纪 60 年代分别减少了 $197.40, 195.70, 211.20 \text{ mm}$ 。1980—2000 年与 1959—1979 年相比,地表径流深减

少了 8.86%。M—K 趋势检验显示,研究区 42 a 径流呈显著性减少(图 4a),其中径流序列发生突变的年份为 1975 年左右,1993 年、1994 年径流发生了显

著性突变,整个时间段内年均减少率为 1.40 mm/a。与延庆东大桥站点以南官厅水库的入库流量变化趋势一致,突变点也发生在 1975 年左右(图 4b)。

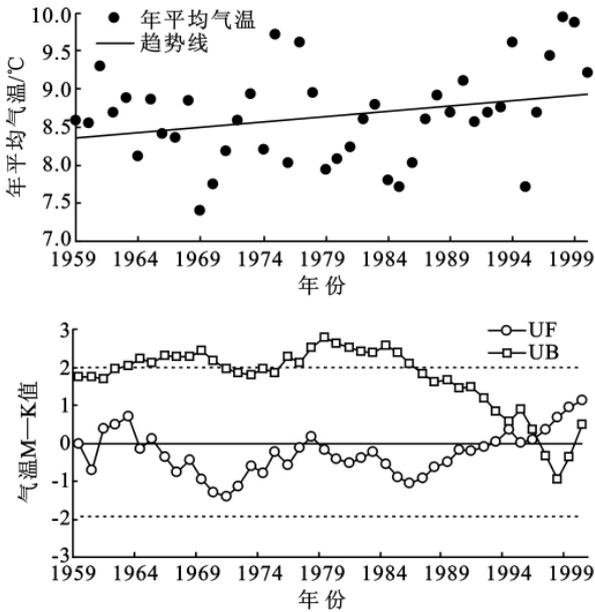


图 3 研究区 1959—2000 年气温和降水时间序列变化及突变检测

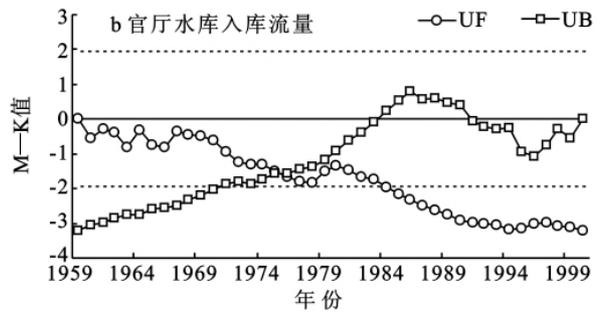
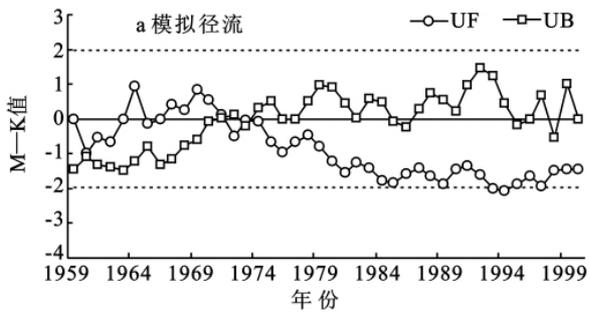


图 4 M—K 统计量曲线

2.3.2 蒸散变化 蒸散是生态系统水分循环与水量平衡的重要组成部分,直接关系到地表能量平衡和水量平衡。中国北方气候干旱,水分短缺,蒸散的任何变化都将对水分平衡和农业生产产生重要影响^[17]。根据 Thornthwaite 模型模拟结果,研究区 1959—2000 年月平均实际蒸散量为 29.29 mm,其中 1980 年前为 31.24 mm,1980 年后为 27.34 mm,年内最大实际蒸散量出现在 7 月或 8 月,占全年的 20%~30%,1980—2000 年与 1959—1979 年相比,实际蒸散量降低了 8.54%。实际蒸散的年际波动性较大,波动范围为 217.60~445.90 mm,M—K 趋势检验显示(图 5),实际蒸散量自 1972 年开始呈下降趋势,并突破了显著水平临界值,下降趋势显著,主要是因为研究时间段内降水量的减少和气温的升高造成的。根据本文所用模型计算方法,大部分降水量小于潜在蒸散量,实际蒸散量与降水量直接相关,而降水量逐年减少,导致实际蒸散减少。

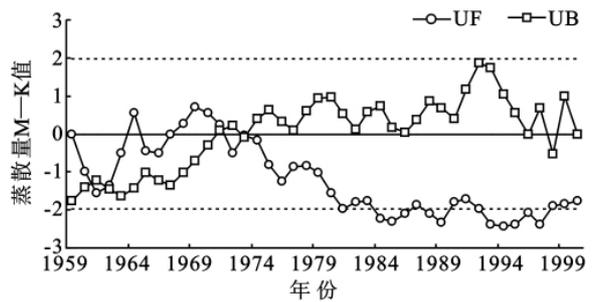


图 5 实际蒸散量 M—K 统计量曲线

2.3.3 土壤含水量变化 根据模拟结果(图 6),研究区在 1959—2000 年期间土壤含水量呈明显减少趋势,线性减少率为 2.71 mm/a。M—K 趋势检验分析显示,研究时间段内,土壤含水量下降趋势明显,1975 年左右发生突变,1985 年突破显著性水平。1975 年前月平均土壤含水量为 47.09 mm,1975 年后月平均土壤含水量为 11.71 mm。降水量的减少和气温的升高导致土壤含水量下降,土壤中可散失水分所占比例减少,土壤干旱化加重,尤其是在 1985 年后,月平均

土壤含水量仅为 7.65 mm。经计算,1980—2000 年与 1959—1979 年相比,土壤含水量减少了 76.95%。

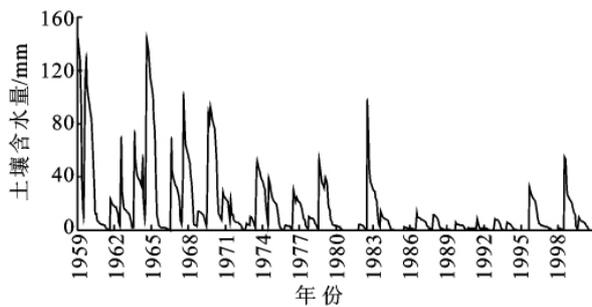


图6 土壤含水量变化趋势

3 结论

(1)1980—2000 年与 1959—1979 年相比,研究区气温升高了 2.45%,降水量减少了 8.57%,该地区明显表现为气温升高、降水量减少的干旱化趋势。

(2)地表径流变化受气温、降水变化影响。1980—2000 年与 1959—1979 年相比,地表径流深减少了 8.86%,与降水量变化趋势及大小基本一致,研究区内是以雨雪为主要补给形式的河流,径流与降水之间存在较大相关性,即径流更容易受到降水变化的影响,降水是影响水资源变化的主导因子。

(3)实际蒸散量变化受气温、降水变化的影响。1980—2000 年与 1959—1979 年相比,实际蒸散量降低了 8.54%。研究时间段内,研究区月平均实际蒸散量为 29.29 mm,最大蒸散量均出现在 7 月或 8 月,占全年的 20%~30%。

(4)土壤含水量变化受气温、降水变化的影响。受气温升高、降水减少的影响,研究区土壤含水量严重减少,1980—2000 年与 1959—1979 年相比,土壤含水量减少了 76.95%。土壤含水量的减少,迫使农业需水量增加,将增加干旱事件发生的频率,对农业生产与水资源的利用均有不利影响。

参考文献:

[1] 张利平,陈小凤,赵志鹏,等.气候变化对水文水资源影响的研究进展[J].地理科学进展,2008,27(3):60-66.
[2] 王国庆,张建云,刘九夫,等.气候变化对水文水资源影响研究综述[J].中国水利,2008(2):47-51.
[3] 丁永建,刘凤景.近三十年来青海湖流域气候变化对水量平衡的影响及其趋势预测[J].地理科学,1995,15(2):128-135.

[4] Zimmermann E. Bayesian approach to daily rainfall modeling to estimate monthly net infiltration using the Thornthwaite water budget and Curve Number methods [J]. Hydrogeology Journal,2006,14(5):648-656.
[5] McCabe G J, Wolock D M. Effects of climate change and climatic variability on the Thornthwaite Moisture Index in the Delaware River Basin[J]. Climatic Change,1992,20(2):143-153.
[6] Cohen J S, Allsopp R T. Potential impacts of a scenario of CO₂-induced climatic change on Ontario, Canada[J]. Journal of Climatology,1988,1(7):669-681.
[7] Ahmadi S H, Fooladmand H R. Spatially distributed monthly reference evapotranspiration derived from the calibration of Thornthwaite equation: A case study, South of Iran[J]. Irrigation Science,2008,26(4):303-312.
[8] McCabe G J, Wolock D M. Joint variability of global runoff and global sea surface temperatures[J]. Journal of Hydrometeorology, 2007,9(4):816-824.
[9] Nachtergaele F, Velthuisen H V, Verelst L. Harmonized World Soil Database[EB/OL]. [2009-3-26]. http://www.fao.org/uploads/media/Harm-World-Soil-DBv7cv_1.pdf.
[10] Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate [J]. Geographical Review, 1948,38(1):55-94.
[11] McCabe G J, Ayers M A. Hydrologic effects of climate change in the Delaware River Basin[J]. Water Resources Bullentin,1989,25(6):1231-1242.
[12] McCabe G J, Markstrom S L. A monthly water-balance model driven by a graphical user interface: U. S. Geological Survey Open-File Report 2007-1088[R]. 2007:1-6.
[13] Krysanova V, Wechsung F, Arnold J, et al. SWIM (Soil and Water Integrated Model) User Manual [EB/OL]. [2000-12-08]. http://www.pik-potsdam.de/~valen/swim_manual/swim-chapter1.pdf.
[14] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007:63-66.
[15] 陈亚宁,徐长春,杨余辉,等.新疆水文水资源变化及区域气候变化的响应[J].地理学报,2009,64(11):1331-1341.
[16] 郭宗峰,马友鑫,李红梅,等.1959—2000年流沙河流域降水与径流变化研究[J].水土保持研究,2006,13(4):150-157.
[17] 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.