

黄河流域降雨-径流关系时空演变研究

郑金丽¹, 严子奇¹, 李东², 周祖昊¹, 张学成², 刘佳嘉¹

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 黄河水文水资源科学研究院, 河南 郑州 450003)

摘要: 由于气候变化和人类活动的影响,黄河流域的降雨-径流关系发生了显著性变化,严重影响流域水资源的规划和管理。为了揭示黄河流域降雨-径流关系的变化特征、趋势及主要驱动因素,研究采用 Mann-Kendall 检验、双累积曲线法、Copula 函数、累积量斜率变化率法分析 1960-2010 年黄河流域的径流系数时空变化规律、7 个主要区间降雨-径流关系的突变年份、降雨径流组合概率变化,以及气候变化和人类活动对降雨-径流关系变化的贡献率。结果表明:黄河全流域降雨-径流关系有明显的趋势性变化,其中除黄河源区的径流系数没有明显变化及少数地区的径流系数有增大的趋势外,绝大部分地区的径流系数有明显减小的趋势;黄河流域 7 个主要区间,即唐乃亥以上、唐乃亥-兰州、兰州-头道拐、头道拐-龙门、龙门-三门峡、三门峡-花园口及花园口-利津的降雨-径流关系突变年份依次为 1989、1984、1997、1979、1992、1987 和 1970 年,年份差异主要受到人类活动时间的影响,流域内大规模水土保持措施开展的年份、水利工程的兴建时间都是造成降雨-径流关系发生转折的重要因素;黄河流域主要区间降雨-径流关系发生转折后,同等降雨条件下其产流能力降低;人类活动是降雨-径流关系变化的主要驱动因素,贡献率均在 50% 以上,且越往下游,影响越大。

关键词: 天然径流量; 降雨量; 时空演变; 贡献率; 黄河流域

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)04-0077-09

Spatio-temporal evolution of the rainfall-runoff relationship in the Yellow River Basin

ZHENG Jinli¹, YAN Ziqi¹, LI Dong², ZHOU Zuhao¹, ZHANG Xuecheng², LIU Jiajia¹

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Yellow River Institute of Hydrology and Water Resources, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Due to the impact of climate change and human activities, the rainfall-runoff relationship in the Yellow River Basin has undergone significant changes, seriously affecting the planning and management of water resources in the basin. In order to reveal the change characteristics, trends and main driving factors of the rainfall-runoff relationship in the Yellow River Basin, we adopted Mann-Kendall test, double accumulation curve method, Copula function and slope change ratio of cumulative quantity (CSRCQ) method to analyze the spatio-temporal variation of runoff coefficient, years with abrupt changes of rainfall-runoff relationship in seven main regions, probability change of rainfall-runoff combination, and the contribution rate of climate change and human activities to the relationship in the Yellow River Basin during 1960-2010. Results show that the changes of the rainfall-runoff relationship in the whole basin showed obvious trend characteristics, among which the runoff coefficient in most areas showed a downward trend, except that the source area of the Yellow River showed no obvious change and a few areas had a tendency to increase. The abrupt change years of the seven main regions of above Tangnaihai, Tangnaihai-Lanzhou, Lanzhou-Toudaoguai, Toudaoguai-Longmen, Longmen-Sanmenxia, Sanme-

收稿日期:2020-12-19; 修回日期:2021-06-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0402405); 中国工程院咨询研究项目(2019-XZ-65); 国家自然科学基金项目(51779270); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室项目(SK12018TS04)

作者简介:郑金丽(1997-),女,河南周口人,硕士研究生,主要从事水文及水资源领域研究。

通讯作者:严子奇(1983-),男,河北深州人,正高级工程师,主要从事水文及水资源领域研究。

nia - Huayuankou and Huayuankou - Lijin were 1989, 1984, 1997, 1979, 1992, 1987 and 1970 respectively. The time difference of the abrupt changes was mainly affected by the time of human activities. Moreover, the year when large-scale soil and water conservation measures were carried out in the basin and the time when water conservancy projects were constructed were all important factors that caused the turning point of the relationship between rainfall and runoff. After the abrupt change of the rainfall - runoff relationship in the main regions of the Yellow River Basin, the runoff generation capacity under the same rainfall conditions decreased. Human activities were the main driving factors for changes of the relationship between rainfall and runoff, with a contribution rate of more than 50%, and the further downstream, the greater the impact.

Key words: natural runoff; rainfall; spatio-temporal evolution; contribution rate; the Yellow River Basin

1 研究背景

全球气候变化和人类活动的影响导致流域水循环中的降雨、入渗、蒸发、径流等各个环节发生了改变,流域的降雨 - 径流关系也发生了显著变化,严重影响到区域的水资源管理^[1-3]。流域降雨 - 径流关系演变是当前水文水资源领域研究分析的热点问题,其影响着区域水资源的基本分布^[1, 3]。国内外学者对于降雨 - 径流关系已开展了广泛的研究,包括从区域性规律发展到以降雨 - 径流关系为基础的水资源评价研究等内容^[4-7],确定了气候变化和人类活动是影响降雨 - 径流关系发生变化的主要因素。目前,已有对不同区域、不同尺度、不同分析方法等的研究,但是对降雨 - 径流关系演变的认识存在差异,其中大江大河的降雨 - 径流关系演变一直是学者们研究的热点^[8]。因此,科学地认识流域降雨 - 径流关系的演变规律,对于经济社会的可持续发展及水资源的合理分配具有重要意义。

黄河作为中国第二大河,是中国北方地区重要的淡水资源,其总供水量达到 $512 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。许多研究表明,黄河流域的实测径流量总体呈现显著性减少趋势,且越往下游河川径流量的减少幅度越大,趋势越显著,其原因主要是受气候变化和人类活动等多因素变化的影响^[9-12]。黄河干流的花园口、利津水文站年径流量由 20 世纪 60 年代的 494×10^8 、 $483 \times 10^8 \text{ m}^3$ 分别减少至 20 世纪 90 年代的 249×10^8 、 $132 \times 10^8 \text{ m}^3$,减幅达到 49.8%、72.6%^[13-14]。但与径流衰减相应的是,黄河流域降雨并未发生显著的趋势性变化,这说明流域内径流形成机制发生了变化,降雨径流关系有了重大改变^[15-16]。黄河流域的人类活动主要是引水、水土保持措施^[17-19]。Miao 等^[20]的研究表明,20 世纪 90 年代三门峡至花园口段气候和人类活动对径流变化的影响分别为 1 812% 和 -1 712%。郭爱军

等^[2]和张淑兰等^[21]采用双累积曲线、Copula 函数和线性回归等研究方法对黄河的主要支流泾河展开了研究,结果均表明泾河流域径流显著减少主要与强烈的人类活动密切相关。从已有研究来看,针对气候变化和人类活动对黄河水沙影响贡献率的研究多集中在小尺度流域,而关于黄河流域的降雨 - 径流关系变化以及全面分析自然因素与人类活动对径流的影响等方面的研究相对较少。

本文针对黄河流域降雨和天然径流关系演变规律和驱动因素开展研究,其目标是:(1)系统识别黄河流域不同地区降雨与天然径流关系变化的趋势和突变特性;(2)根据各重点断面降雨 - 径流关系转折年份,采用累积量斜率变化率比较法(slope change ratio of cumulative quantity, SCRCQ)分析气候变化、人类活动对突变的贡献程度。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

黄河流域界于 $32^\circ \sim 42^\circ \text{N}$, $96^\circ \sim 119^\circ \text{E}$ 之间,干流总长 5 464 km,流域总面积约为 $79.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,位于干旱和半湿润气候之间的过渡带,多年平均降水量在 200 ~ 600 mm 之间,天然径流量为 $580 \times 10^8 \text{ m}^3$,水资源短缺十分严重,生态环境也相对脆弱。黄河流域横跨中国地貌结构的“三个主要阶梯”,即青藏高原,黄土高原和华北平原,然后流入渤海。上游从河源延伸到河口镇,全长 3 472 km,流域面积为 $42.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。中游从河口镇延伸至桃花峪,全长 1 206 km,流域面积为 $34.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。下游从桃花峪一直延伸到黄河三角洲,全长 786 km,流域面积为 $2.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

2.2 数据来源

本研究收集了黄河水利委员会发布的黄河流域 1956 - 2010 年 34 个水文站点的天然径流资料,以及国家气象局 568 个气象站点的气象资料,包括降

雨量、最高气温、最低气温、平均气温、相对湿度、10 m 风速、大气压强和日照时数据等。根据黄河流域各重点断面将流域划分为7个主要区间,即唐乃亥以上、唐乃亥—兰州、兰州—头道拐、头道拐—龙门、龙门—三门峡、三门峡—花园口及花园口—利津。然后根据各水文站的空间位置,将黄河流域划分成了34个控制分区(图1)。

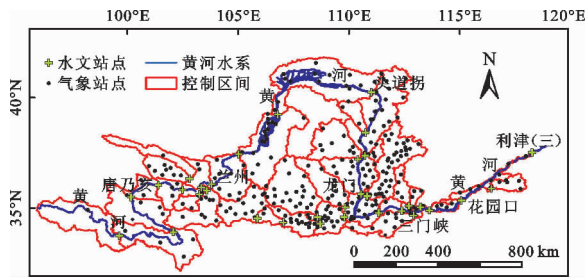


图1 研究区黄河流域概况及34个控制分区划分

2.3 研究方法

2.3.1 Mann-Kendall(M-K)方法 采用 Mann-Kendall(M-K)方法作为非参数检验法,可对各区间降雨、径流深的趋势性进行检验。已有研究表明^[22],为避免检验产生误差,在进行 M-K 检验前应判断气象序列的自相关性,然后通过计算进行剔除。对于给定的时间序列 $\{x_i, i = 1, 2, \dots, n\}$, 计算一阶自回归系数 ρ_1 :

$$\rho_1 = \frac{\text{Cov}(x_i, x_{i+1})}{\text{Var}(x_i)} = \frac{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \bar{x})(x_{i+1} - \bar{x})}{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

利用变换 $x'_i = x_i - \rho_1 x_{i-1}$ 剔除自相关性得到新序列 $\{x'_i, i = 1, 2, \dots, n\}$, 为简便计算,将变换后的新序列仍然记为 $\{x_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ 。确定该序列的对偶数 $(x_i < x_j, i, j = 1, 2, \dots, n)$ 的个数 p , 然后计算 Kendall 统计量 τ , 方差 σ_τ^2 和标准化变量 U :

$$\tau = \frac{4p}{n(n-1)} - 1 \quad (2)$$

$$\sigma_\tau^2 = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)} \quad (3)$$

$$U = \frac{\tau}{\sigma_\tau} \quad (4)$$

统计量 U 是趋势性大小的衡量标准。 U 的正负值分别对应序列增大趋势和减小趋势, $|U|$ 越大,表明变化趋势越明显。当给定显著性水平 α 后,可在正态分布表中查得临界值 $U_{\alpha/2}$, 若 $|U| > U_{\alpha/2}$, 即说明序

列的趋势性显著^[22]。本研究选定置信水平 $\alpha = 0.05$ 情况下的 M-K 检验阈值分界 ± 1.96 , 当 $|U| > 1.96$ 时,说明序列变化的趋势显著。

2.3.2 双累积曲线法 双累积曲线法^[3]用于判断降雨-径流关系变化转折年,通过建立累积年径流与累积年降雨量的经验统计模型,查找降雨-径流关系突变的时间点,以此划分天然期和变化期,基于此计算得到人类活动和气候变化对径流系数变化的影响程度。其公式为:

$$\sum R = a \sum P + b \quad (5)$$

式中: $\sum R$ 为多年累积径流量, mm; $\sum P$ 为多年累积降雨深, mm; a, b 为常数。

2.3.3 Copula 函数 为明确降雨和径流突变前后二者之间的联系,采用构造简单的 Archimedean Copula 函数计算二者之间的联合分布概率。在采用 Copula 函数^[23]进行降雨和径流之间联合分布计算前,首先选取4种常见的单变量分布(威尔布分布、伽马分布、指数分布和对数正态分布)依次拟合降雨和径流2个变量,并通过 Kolmogorov-Smirnov 检验法确定边缘分布函数的最优值。Archimedean Copula 函数最常用的有 Clayton Copula、Frank Copula 及 Gumbel Copula 函数。令 $u = F_P(p), v = F_Q(q)$, 则:

$$\text{Clayton Copula: } F_{P,Q}(p, q) = C(u, v) = \exp\{-[(-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta]^{1/\theta}\} \quad (6)$$

$$\text{Frank Copula: } F_{P,Q}(p, q) = C(u, v) = (u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{1/\theta} \quad (7)$$

$$\text{Gumbel Copula: } F_{P,Q}(p, q) = C(u, v) = -\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{(e^{-\theta} - 1)} \right] \quad (8)$$

式中: θ 为参数,可由降雨和径流间的 Kendall 相关系数求出,再由公式(6)~(8)求得二者之间的联合分布概率,最后利用平方欧式距离(D)选择一种最优的 Copula 函数。

$$D = \sum_{i=1}^n (P_i - P_{ei})^2 \quad (9)$$

式中: n 为联合观测的样本数; P_i 为 Copula 函数计算的降雨和径流联合分布的理论概率值; P_{ei} 为计算的经验联合概率分布值。

2.3.4 累积量斜率变化率 Wang 等^[24]建立的累积量斜率变化率方法考虑了气候变化(降水、蒸发)、地下水及人类活动对黄河流域径流变化的贡献率。本文对累积量斜率变化率法进行改进来确定

气候变化(蒸发)和人类活动对降雨-径流关系变化的贡献率。假设累积径流-降雨线性关系式的斜率在拐点前后两个时期分别为 S_b 和 S_a ; 累积蒸发量-时间线性关系式的斜率在拐点前后两个时期分别为 S_{Eb} 和 S_{Ea} (mm/a), 则累积径流-降雨斜率变化率 R_s (%) 为:

$$R_s = \frac{(S_a - S_b)}{S_b} \times 100\% = \left(\frac{S_a}{S_b} - 1 \right) \times 100\% \quad (10)$$

气温变化导致蒸发量变化从而可以引起降雨-径流关系发生变化, 其中采用 Budyko^[25] 假设来计算实际蒸发量, 则累积蒸发量-时间斜率变化率 R_{ES} (%) 为:

$$R_{ES} = \frac{(S_{Ea} - S_{Eb})}{S_{Eb}} \times 100\% = \left(\frac{S_{Ea}}{S_{Eb}} - 1 \right) \times 100\% \quad (11)$$

式中: R_s 、 R_{ES} 为正数表示斜率增大, 为负数表示斜率减小。

蒸发量变化对降雨-径流关系变化的贡献率 C_E (%) 可表示为:

$$C_E = \frac{R_{ES}}{R_s} \times 100\% = \left(\frac{S_{Ea}}{S_{Eb}} - 1 \right) / \left(\frac{S_a}{S_b} - 1 \right) \times 100\% \quad (12)$$

基于水量平衡原理, 人类活动对于降雨-径流

关系变化的贡献率 C_H (%) , 可以表示为:

$$C_H = 100 - C_E - C_G \quad (13)$$

式中: C_G 为地下水对降雨径流关系变化的贡献率, Wang 等^[26] 研究发现了黄河流域抽取地下水可能导致降雨-径流关系变化, 而这种影响可以视为人类活动的一部分, 因此公式(13)中的 C_G 在研究区域中可以视为 0。

3 结果与分析

3.1 径流系数的时空演变趋势

采用 ArcGIS 对黄河流域水文站各控制分区的年径流系数和汛期径流系数进行空间展布, 结果如图 2 所示。由图 2 可知, 黄河流域 34 个水文站的控制分区中, 径流系数均存在较大的空间差异, 年径流系数变化在 0.07~0.60 之间, 相差接近 10 倍, 年径流系数最小值出现在状头分区, 最大值出现在花园口分区; 汛期径流系数变化在 0.05~0.60 之间, 最小值出现在三门峡分区, 最大值出现在花园口分区。

采用 Mann-Kendall 秩次相关检验法分别对年径流系数和汛期径流系数的变化趋势进行分析检验, 结果如图 3 所示。

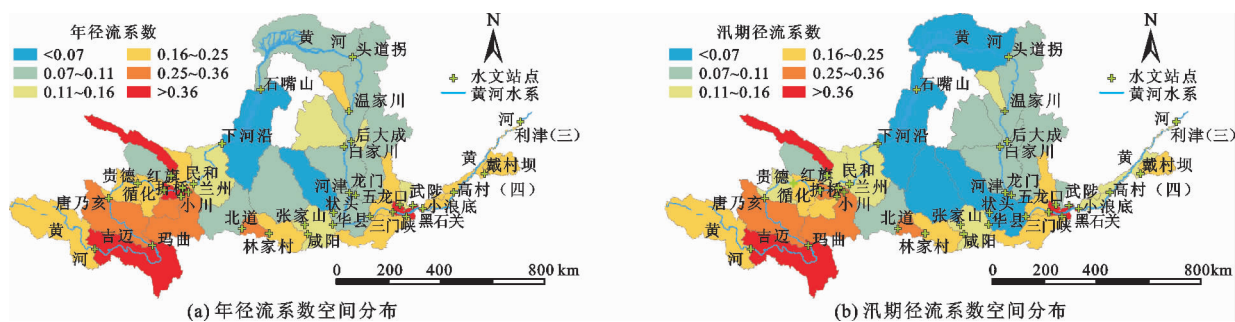


图 2 黄河流域各水文站控制分区的年径流系数和汛期径流系数

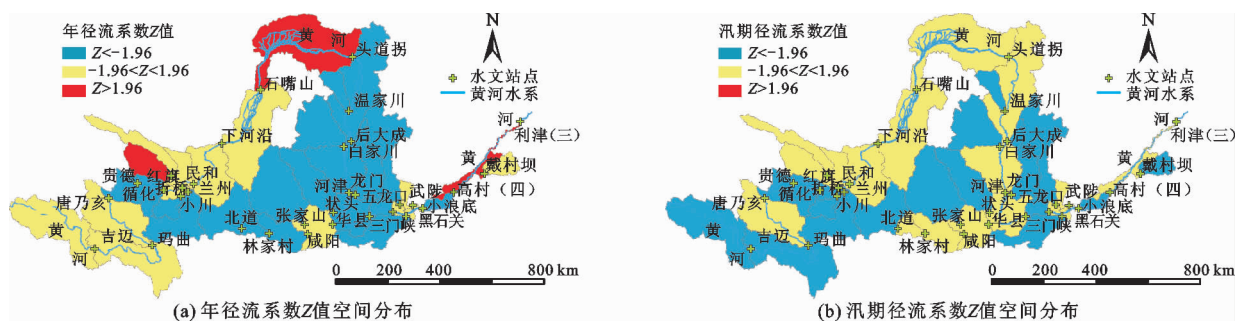


图 3 黄河流域各水文站控制分区的年径流系数和汛期径流系数 M-K 检验 Z 值

由图 3 可知, 对于年径流系数来说, 民和、利津、头道拐 3 个分区年径流系数呈现显著增加趋势, 并且通过了置信度 95% 的显著性检验; 小川、花园口、华县、下河沿、武陟、玛曲、亭堂、吉迈、兰州、唐乃亥、

石嘴山、戴村坝等 12 个分区没有显著性趋势; 其余 19 个分区均出现了径流系数显著减小的趋势, 并且通过了置信度 95% 的显著性检验。

对于汛期径流系数来说, 华县、咸阳、利津、民

和、武陟、兰州、石嘴山、下河沿、唐乃亥、三门峡、头道拐、龙门、花园口、林家村、亭堂等 15 个控制分区的汛期径流系数没有显著性变化;其余 19 个控制分区的汛期径流系数均出现显著减小的趋势,并且通过了置信度 95% 的显著性检验。

3.2 降雨-径流关系突变特征识别

计算黄河流域主要区间降雨量-径流量关系发生突变的年份,结果如表 1 所示,各区间突变年份不尽相同,反映出不同区间下垫面变化并不同步。如果径流只受年降雨量影响,则双累积曲线应是一条直线。但实际情况是双累积曲线发生系统性偏转,表明环境变化对降雨-径流关系的影响具有明显的阶段性,可以分别用不同的方程式来拟合。

表 1 黄河流域主要区间降雨-径流关系发生突变的年份

序号	区间	突变年份
1	唐乃亥以上	1989
2	唐乃亥—兰州	1984
3	兰州—头道拐	1997
4	头道拐—龙门	1979
5	龙门—三门峡	1992
6	三门峡—花园口	1987
7	花园口—利津	1970

采用降雨量-径流深双累积曲线法进行径流深序列的突变分析,结果如图 4 所示。

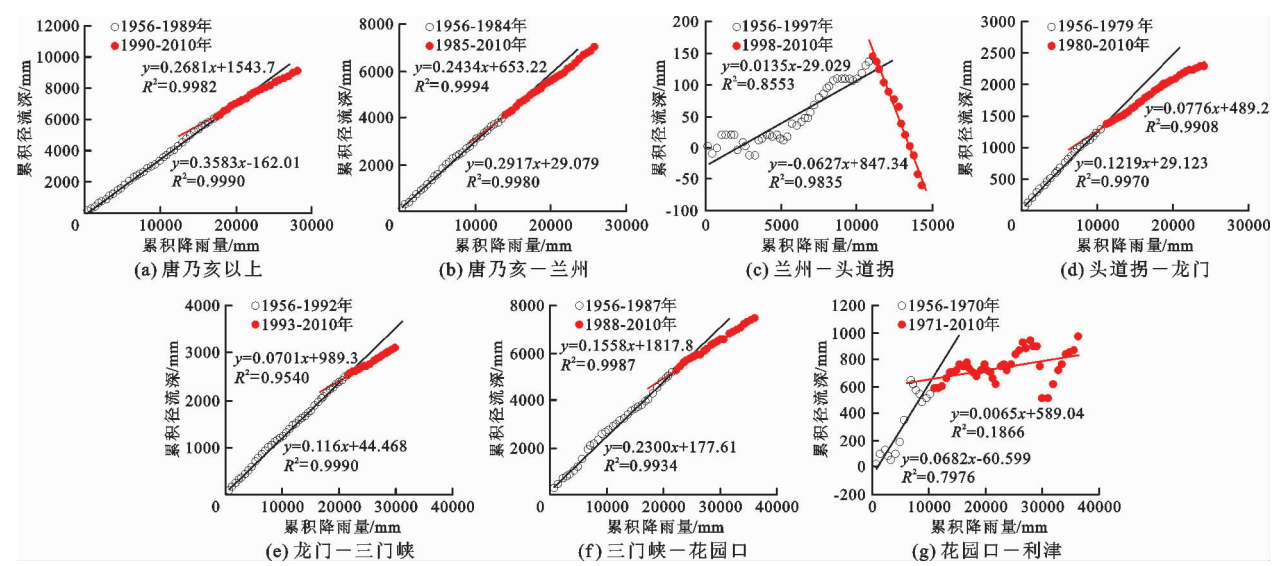


图 4 黄河流域各水文站控制区间累积降雨量-累积径流深关系斜率变化

由图 4 可知,各区间降雨量-径流深双累积曲线在突变年份直线斜率发生明显偏折,突变后发生向下偏离(斜率减小)的现象,环境变化导致各区间径流系数减小。这其中,一方面是由于气候变化气温升高,导致蒸发量增加,从而导致单位降雨量形成的径流量减少;另一个重要的原因是人类活动对下垫面的改变,各类水土保持工程、拦河蓄水工程的兴建,导致下垫面产流、回流过程发生显著改变,人工植被的增加极大地增强了下垫面的蓄水能力,随着水利工程的不断修建,流域内降雨-径流关系更为复杂,变化更为剧烈。

3.3 基于 Copula 函数的降雨径流组合概率变化分析

通过计算理论 Copula 值和经验 Copula 值之间的平方欧式距离对降雨-径流联合分布的拟合优度进行检验,结果如表 2 所示。

由表 2 可知,唐乃亥以上、花园口-利津区间年

降雨-径流突变前后联合分布随之变化;而唐乃亥-兰州、兰州-头道拐、头道拐-龙门、龙门-三门峡及三门峡-花园口区间年降雨-径流突变前后联合分布保持一致。

7 个区间降雨-径流关系突变前后联合分布等值线图如图 5~11 所示。

由图 5~11 可知,随着降雨量和径流深的不断增加,二者的联合分布概率也随之升高。而降雨-径流的联合分布在突变前后的变化非常明显,降雨-径流关系的规律性在突变后明显减弱。如头道拐-龙门 1956-1979 年降雨量小于 500 mm,且年径流深小于 40 mm 的联合分布概率为 15.5%,1979-2010 年降雨量小于 500 mm,且年径流深小于 40 mm 的联合分布概率为 74.2%;龙门-三门峡 1956-1992 年降雨量小于 500 mm,且年径流深小于 40 mm 的联合分布概率为 6.9%,1992-2010 年

降雨量小于 500 mm,且年径流深小于 40 mm 的联合分布概率为 40.3%。这两个区间降雨量-径流深关系发生突变后,其联合分布概率有明显增大的趋势。其他区间降雨量-径流深关系的联合分布概率突变前后也有相似的变化趋势,所不同的是各区间降雨量-径流深关系联合分布概率等值线突变前后的疏密程度不同,也反映出降雨量-径流深关系的变化程度不同。其中兰州-头道拐区间联合分布概率等值线的疏密程度变化最大,突变前该区间多

发生径流深在 0~20 mm、相应的降雨量在 200~350 mm 的降雨量-径流深关系,突变后降雨量基本不变,而产生径流较少,降雨量-径流深关系发生显著变化。

总体上,相同降雨量-径流深关系条件下,年降雨量-径流深突变后的同等降雨量-径流深组合的联合分布概率均高于突变前二者的联合分布概率,即在同等降雨条件下,产流量越大概率越低,也反映了突变后同等降雨条件下 7 个区间的产流能力明显降低。

表 2 1956-2010 年黄河流域各主要区间降雨-径流突变前后 Copula 函数拟合优度评价

区间	突变前后	Frank-copula	Clayton-copula	Gumbel-copula
唐乃亥以上	1956-1989 年	0.0068	0.0178	0.0137
	1990-2010 年	0.0112	0.0304	0.0093
唐乃亥-兰州	1956-1984 年	0.0074	0.0318	0.0107
	1985-2010 年	0.0130	0.0237	0.0184
兰州-头道拐	1956-1997 年	0.0179	0.0178	0.0247
	1998-2010 年	0.0463	0.0352	0.0541
头道拐-龙门	1956-1979 年	0.0159	0.0261	0.0199
	1980-2010 年	0.0190	0.0325	0.0241
龙门-三门峡	1956-1992 年	0.0096	0.0350	0.0130
	1993-2010 年	0.0130	0.0268	0.0256
三门峡-花园口	1956-1987 年	0.0149	0.0522	0.0088
	1988-2010 年	0.0171	0.0525	0.0120
花园口-利津	1956-1970 年	0.0080	0.0244	0.0045
	1971-2010 年	0.0168	0.0089	0.0204

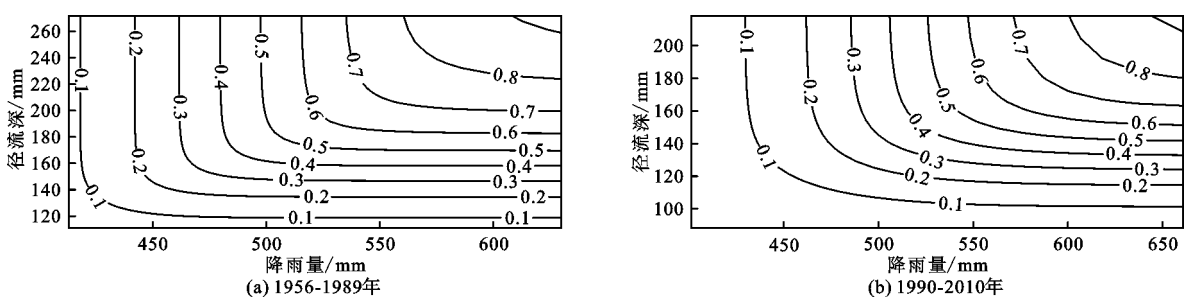


图 5 唐乃亥以上降雨量-径流深联合分布概率等值线图

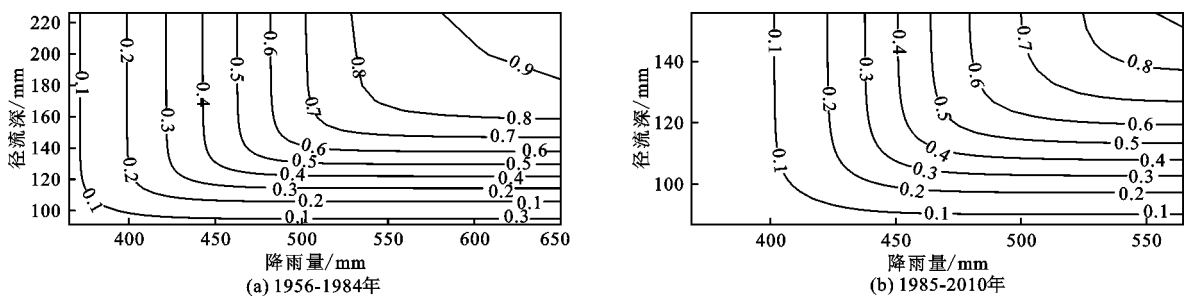


图 6 唐乃亥-兰州区间降雨量-径流深联合分布概率等值线图

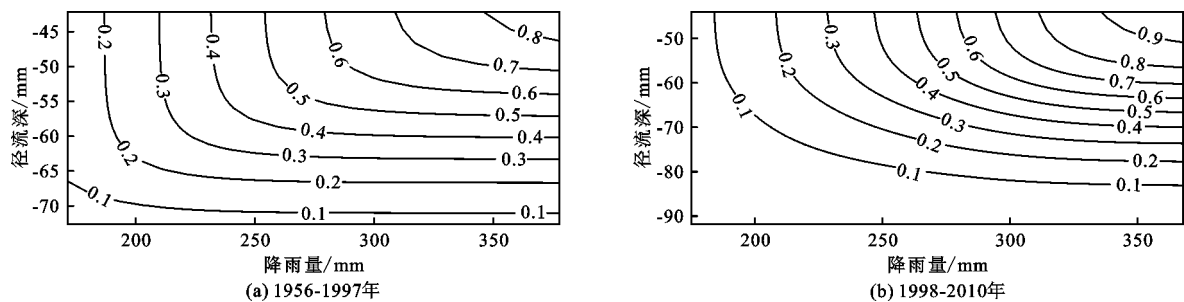


图 7 兰州—头道拐区间降雨量-径流深联合分布概率等值线图

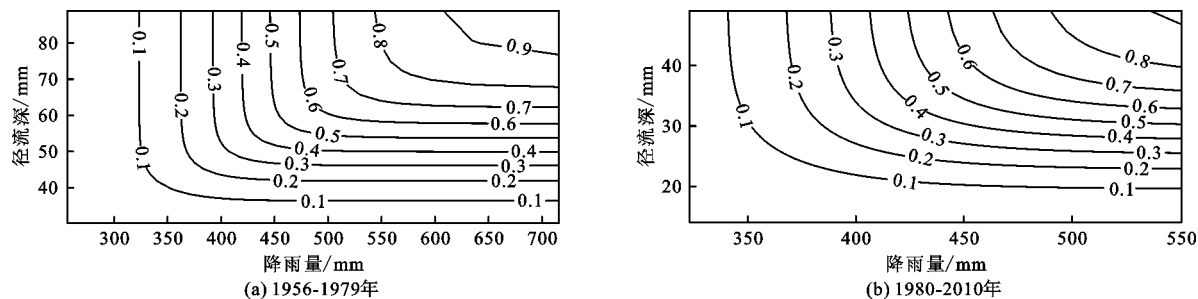


图 8 头道拐—龙门区间降雨量-径流深联合分布概率等值线图

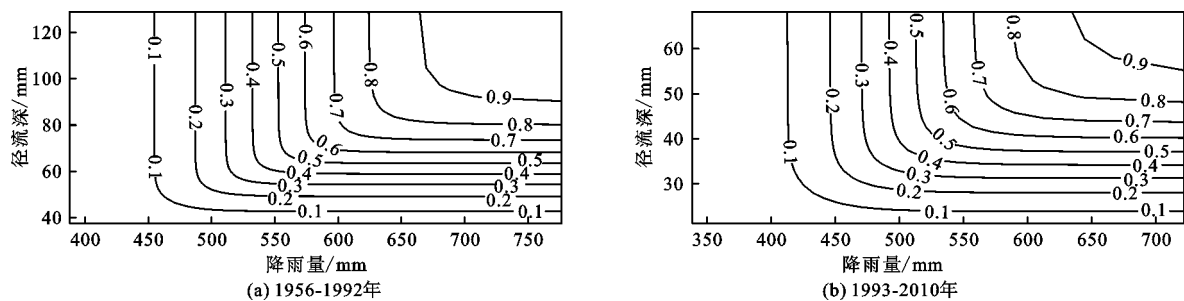


图 9 龙门—三门峡区间降雨量-径流深联合分布概率等值线图

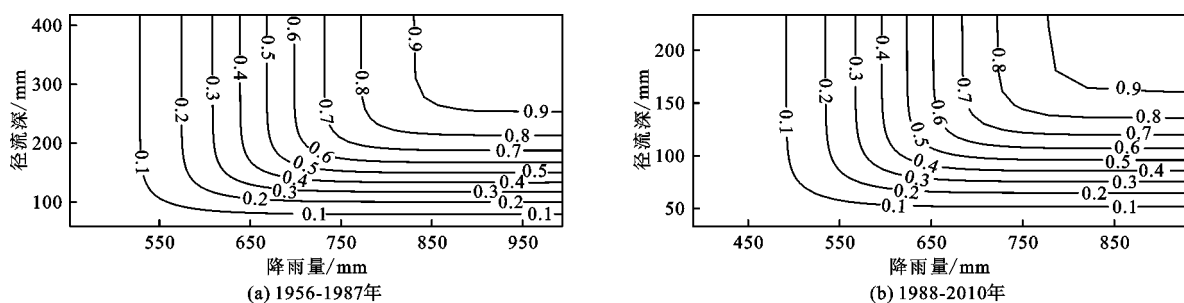


图 10 三门峡—花园口区间降雨量-径流深联合分布概率等值线图

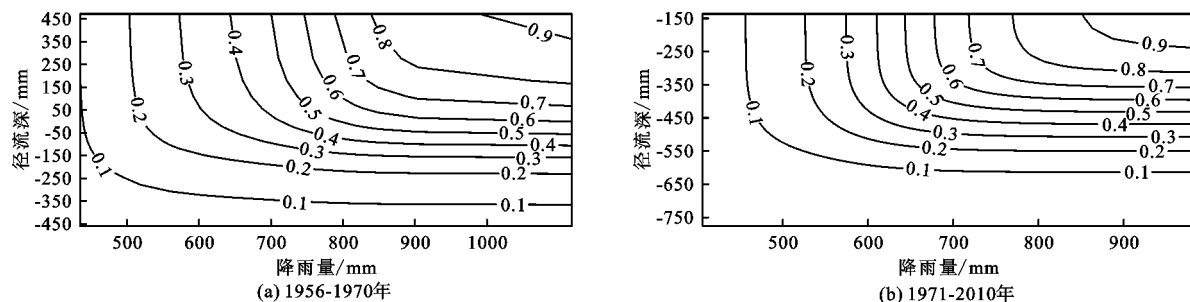


图 11 花园口—利津区间降雨量-径流深联合分布概率等值线图

3.4 降雨-径流关系变化原因分析

采用公式(10)~(13)对黄河流域7个区间进

行了降雨量-径流深关系变化归因分析,结果如表3所示。

表3 黄河流域气候变化和人类活动对降雨-径流关系的影响

区间	降雨-径流累积曲线斜率			蒸发-时间累积曲线斜率			贡献率/%	
	前期斜率	后期斜率	变化率/%	前期斜率	后期斜率	变化率/%	气候变化	人类活动
唐乃亥以上	0.36	0.27	-25	312	349	12	47	53
唐乃亥-兰州	0.29	0.24	-17	373	382	2	15	85
兰州-头道拐	-0.22	-0.26	17	270	265	-2	10	90
头道拐-龙门	0.12	0.08	-36	405	392	-3	9	91
龙门-三门峡	0.12	0.07	-40	489	472	-3	9	91
三门峡-花园口	0.23	0.16	-32	554	548	-1	4	96
花园口-利津	-0.04	-0.74	1816	527	505	-4	0	100

由表3可知,相对于拐点之前,各区间降雨-径流关系变化的主要驱动因素是人类活动,贡献率均超过50%,且越往下游,人类活动的贡献率最大。唐乃亥以上气候变化的贡献率最大,达到47%,也反映出该地区人类活动强度较低,气候变化导致的气温升高和蒸发量增加在降雨-径流关系变化中起到了显著的作用。唐乃亥以下人类活动贡献率在85%及以上,反映出越靠近下游,气候变化的作用越弱,人类活动在降雨-径流关系变化的作用越显著。

上述结论与已有研究成果基本一致。对于7个主要区间,唐乃亥以上地区人口较少,人类对当地下垫面的改造较弱,但是气候变暖导致当地蒸发量增加,减少了断面径流,气候变化的贡献率最大,达到47%^[27]。胡春宏等^[16]也指出了人类活动是兰州至潼关年径流锐减的主导因素,平均贡献率达到了88.9%,而兰州断面以上,气候变化是径流减少的主因,平均贡献率为66.57%。头道拐-龙门、龙门-三门峡两段径流量增量的减少主要受水土保持措施的影响。这两个地区位于黄土高原,在20世纪70年代和80年代,开发了一系列具有总体规划的区域性土壤保护措施(如植树、植草、修建水平梯田和修建拦水坝等)。这些人类活动改变了当地的微地形,提高了拦截降雨的能力,因此延迟和减少了这两个区间的径流系数^[20]。

4 讨论

4.1 径流系数的显著变化

刘昌明等^[13]指出,近20年黄河流域全流域年降雨量、径流量和径流系数与多年平均值相比分别减小了7.7%,22.7%和16.3%;黄河流域汛期降雨

量、径流量和径流系数与多年均值相比减小了8.7%,27.4%和20.9%。胡春宏^[28]通过分析实测资料,发现了随着人类活动的日益加剧和自然气候的变化,1986-2012年黄河流域实测年平均水量较1919-1959年减少了42.3%;2000年以来较1919-1959年减少了45.7%。本文中指出,黄河流域有多达19个分区均出现了径流系数显著减少的趋势,并且通过了置信度95%的显著性检验,而各个分区降雨均没有出现大范围的趋势性变化,说明黄河全流域范围内降雨-径流关系均出现了趋势性的变化。这与前人的研究结果基本一致,即降雨量没有发生显著变化的情况下,径流量出现显著减少,径流系数出现明显降低。但是,本文也发现全流域内并不是所有地区均出现径流系数减少的情况,源区的径流系数没有明显变化,个别地区径流系数还有增大的趋势。

4.2 降雨-径流关系的拐点与原因分析

研究发现黄河流域7个主要区间的降雨量-径流深关系发生转变的年份不尽相同,这一特点与王随继等^[29]的研究结果基本一致。总体来说,降雨量-径流深关系变化的突变年在花园口至利津段最早,该地区位于黄河下游,人类影响比其他河段更为强烈而且开始也更早。兰州以上地区位于上游和源头地区,人类影响有限,突变点出现相对较晚。兰州-头道拐和头道拐-龙门区间的突变年份与这两个区间内大规模开展水土保持措施的年份基本一致;龙门-三门峡和三门峡-花园口区间降雨量-径流深关系突变的年份与区间内水利工程的兴建关系密切。采用Copula函数进行降雨径流组合概率分析,相同降雨-径流条件下,拐点之后的同等降雨

-径流组合的联合分布概率均高于突变前二者的联合分布概率,也反映了突变后同等降雨条件下7个区间的产流能力明显降低。

5 结 论

根据黄河流域1956-2010年的水文气象数据,研究了黄河流域内降雨与天然径流关系的时空变化规律,重点分析了7个主要区间的降雨-径流关系变化特性,量化了气候变化和人类活动对每个区间降雨-径流关系变化的贡献,得出以下结论:

(1)黄河全流域范围内降雨-径流关系均出现了趋势性的变化。黄河流域大范围内在降雨没有发生显著变化的情况下,径流显著减少,径流系数明显降低。黄河源区的径流系数没有明显变化,个别地区径流系数还有增大的趋势。

(2)黄河流域7个主要区间唐乃亥以上、唐乃亥-兰州、兰州-头道拐、头道拐-龙门、龙门-三门峡、三门峡-花园口及花园口-利津的降雨量-径流深关系突变年份不尽相同,但是均存在1个突变年份,突变年份依次为1989、1984、1997、1979、1992、1987和1970年。突变时间节点的不同是因为大规模人类活动开始的时间不同,其中重要的影响因素主要有流域内大规模水土保持措施开展的年份、水利工程的兴建时间等。

(3)黄河流域7个主要区间降雨-径流关系联合分布概率突变后高于突变前,也反映了同等降雨条件下突变后其产流能力明显降低,其中兰州-头道拐、头道拐-龙门和龙-三门峡区间降雨-径流关系突变前后变化程度较大。

(4)定量分析气候变化和人类活动对降雨-径流关系的影响,在黄河流域7个主要区间降雨-径流关系中,人类活动是各个区间降雨-径流关系变化的主要驱动因素,贡献率均在50%以上,且越往下游,人类活动的贡献率越大。

参考文献:

- [1] 王芳,王天慈,白雁翎,等.大通河降雨径流关系演变与水资源衰减初步研究[J/OL]. 中国水利水电科学研究院学报,2021,1-10[2021-06-02]. <https://doi.org/10.13244/j.cnki.jiwhr.20200107>.
- [2] 郭爱军,畅建霞,王义民,等.近50年泾河流域降雨-径流关系变化及驱动因素定量分析[J]. 农业工程学报,2015,31(14):165-171.
- [3] 程娅姗,王中根,刘丽芳,等.近50年潮河流域降雨-径流关系演变及驱动力分析[J]. 南水北调与水利科技,

2018,16(2):45-50.

- [4] 邓元倩,李致家,刘甲奇,等.半湿润半干旱地区降雨径流关系的区域规律[J]. 水电能源科学,2018,36(5):13-16.
- [5] 韩琳,袁秀忠,张飞云.内陆河流域山区温度和冻土作用下的径流过程模拟[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2017,15(6):460-467.
- [6] 李巧玲,李致家,陈利者,等.半湿润半干旱流域降雨径流关系及下垫面相似性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(2):95-99.
- [7] 樊慧静,赵红莉,蒋云钟.气候变化条件下流域径流演变趋势分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2012,10(3):174-179.
- [8] 刘丽芳,王中根,姜爱华,等.近50年济南三川流域降雨-径流关系变化分析[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(1):22-27+56.
- [9] 赵建华,刘翠善,王国庆,等.近60年来黄河流域气候变化及河川径流演变与响应[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(3):1-5+12.
- [10] 鲍振鑫,严小林,王国庆,等.1956-2016年黄河流域河川径流演变规律[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(5):52-57.
- [11] 王远见,傅旭东,王光谦.黄河流域降雨时空分布特征[J]. 清华大学学报(自然科学版),2018,58(11):972-978.
- [12] 江净超,刘军志.基于似然函数的黄河降水-径流关系变点分析[J]. 人民黄河,2018,40(2):10-13.
- [13] 刘昌明,张学成.黄河干流实际来水量不断减少的成因分析[J]. 地理学报,2004,59(3):323-330.
- [14] GAO Zhaoliang, ZHANG Lu, ZHANG Xiaoping, et al. Long-term streamflow trends in the middle reaches of the Yellow River Basin: Detecting drivers of change[J]. Hydrological Processes, 2016, 30(9): 1315-1329.
- [15] GAO Peng, ZHANG Xuanchang, MU Xinming, et al. Trend and change-point analyses of streamflow and sediment discharge in the Yellow River during 1950-2005[J]. Hydrological Sciences Journal, 2010, 55(2): 275-285.
- [16] 胡春宏,张晓明.论黄河水沙变化趋势预测研究的若干问题[J]. 水利学报,2018,49(9):1028-1039.
- [17] 王国庆,管晓祥,王乐扬,等.气候变化和人类活动对黄河重点区间径流的影响[J]. 人民黄河,2019,41(10):26-30+39.
- [18] 周帅,王义民,郭爱军,等.气候变化和人类活动对黄河源区径流影响的评估[J]. 西安理工大学学报,2018,34(2):205-210.
- [19] 李万志,刘玮,张调风,等.气候和人类活动对黄河源区径流量变化的贡献率研究[J]. 冰川冻土,2018,40(5):985-992.

(下转第92页)

- els for annual peak breakup flow forecasting [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2017, 143: 59–69.
- [3] SUN Wei. River ice breakup timing prediction through stacking multi-type model trees [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 644(1): 1190–1200.
- [4] GUO Xinlei, WANG Tao, FU Hui, et al. Ice-jam forecasting during river breakup based on neural network theory [J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2018, 32(3): 1–8.
- [5] ZHAO Liming, HICKS F, FAYEK A R. Long lead forecasting of spring peak runoff using Mamdani-type fuzzy logic systems at Hay River, NWT [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2015, 42(9): 665–674.
- [6] BRAYALL M, HICKS F. Applicability of 2-D modeling for forecasting ice jam flood levels in the Hay River Delta, Canada [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2012, 39(6): 701–712.
- [7] BELTAOS S, TANG P, ROWSELL R. Ice jam modelling and field data collection for flood forecasting in the Saint John River, Canada [J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(17): 2535–2545.
- [8] LINDENSCHMIDT K E. RIVICE – A non-proprietary, open-source, one-dimensional river-ice model [J]. *Water*, 2017, 9(5): DOI: 10.3390/w9050314.
- [9] 邵国明, 邓宇, 田治宗, 等. 黄河冰凌近期研究简述与展望 [J]. *人民黄河*, 2019, 41(10): 77–81 + 108.
- [10] 王玲, 刘吉峰, 谢文轩. 黄河宁蒙河段冰凌预报模型研究进展 [J]. *人民黄河*, 2014, 36(12): 8–10.
- [11] 刘吉峰, 霍世青, 王春青. 黄河凌情预报研究与防凌需求 [J]. *中国防汛抗旱*, 2017, 27(6): 10–13.
- [12] 杨开林. 冰盖河渠水深平均流速的横向分布 [J]. *水利学报*, 2015, 46(3): 291–297.
- [13] 张防修, 席广永, 张晓丽, 等. 凌汛期槽蓄水增量过程模拟 [J]. *水科学进展*, 2015, 26(2): 201–211.
- [14] SUI Jueyi, WANG Jun, HE Yun, et al. Velocity profiles and incipient motion of frazil particles under ice cover [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2010, 25(1): 39–51.
- [15] 王恺桢, 王军, 隋觉义. 黄河宁蒙河段冰期洪水波运动过程中的变形分析 [J]. *水利学报*, 2018, 49(7): 869–876.
- [16] YANG Wanlong, WANG Jun, SUI Jueyi, et al. A Modified Muskingum flow routing model for flood wave propagation during river ice thawing – breakup period [J]. *Water Resources Management*, 2019, 33(14): 4865–4878.
- [17] 冯国华, 朝伦巴根, 闫新光. 黄河内蒙古段冰凌形成机理及凌汛成因分析研究 [J]. *水文*, 2008, 28(3): 74–76.
- [18] BILELLO M A. Maximum thickness and subsequent decay of lake, river, and fast sea ice in Canada and Alaska [R]. US: Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1980.
- [19] 姚惠明, 秦福兴, 沈国昌, 等. 黄河宁蒙河段凌情特性研究 [J]. *水科学进展*, 2007, 18(6): 893–899.
- [20] 郭立兵, 周跃华, 田福昌, 等. 黄河宁蒙段凌汛致灾影响因素及灾害演变特点 [J]. *人民黄河*, 2020, 42(2): 22–26.
- [21] 黄兴春, 董增川, 陈甜, 等. 基于遗传算法的马斯京根模型参数优化 [J]. *水电能源科学*, 2014, 32(7): 11–13 + 22.

(上接第 85 页)

- [20] MIAO Chiyuan, NI Jinren, BORTHWICK A G L, et al. A preliminary estimate of human and natural contributions to the changes in water discharge and sediment load in the Yellow River [J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 76(3–4): 196–205.
- [21] 张淑兰, 王彦辉, 于澎涛, 等. 定量区分人类活动和降水量变化对泾河上游径流变化的影响 [J]. *水土保持学报*, 2010, 24(4): 53–58.
- [22] 余敦先, 夏军, 张永勇, 等. 近 50 年来淮河流域极端降水的时空变化及统计特征 [J]. *地理学报*, 2011, 66(9): 1200–1210.
- [23] NELSEN R B. An introduction to Copulas [M]. New York: Springer Science & Business Media, 2006.
- [24] WANG Suiji, YAN Yunxia, YAN Ming, et al. Quantitative estimation of the impact of precipitation and human activities on runoff change of the Huangfuchuan River Basin [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(5): 906–918.
- [25] BUDYKO M I, MILLER D H. Climate and life [M]. New York: Academic Press, 1974.
- [26] WANG Suiji, HASSAN M A, XIE Xiaoping. Relationship between suspended sediment load, channel geometry and land area increment in the Yellow River Delta [J]. *Catena*, 2006, 65(3): 302–314.
- [27] CHEN Deliang, GAO Ge, XU Chongyu, et al. Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman – Monteith estimates of reference evapotranspiration in China [J]. *Climate Research*, 2005, 28(2): 123–132.
- [28] 胡春宏. 黄河水沙变化与治理方略研究 [J]. *水力发电学报*, 2016, 35(10): 1–11.
- [29] 王随继, 闫云霞, 颜明, 等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析——累积量斜率变化率比较方法的提出及应用 [J]. *地理学报*, 2012, 67(3): 388–397.