

多时间尺度下黄河上游径流复杂度变化特征研究

苏贤保¹, 李勋贵^{1,2}, 王义鹏¹, 陆晨遨¹, 王乃昂¹

(1. 兰州大学 资源环境学院, 冰川与沙漠研究中心, 甘肃 兰州 730000; 2. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 研究黄河上游径流复杂度变化特征,对揭示区域径流演化规律具有重要意义。同时采用灵活样本熵和多尺度熵对该区域干、支流 12 个水文站 1956–2015 年的年、汛期及非汛期径流复杂性进行测度,分析不同时间尺度下径流复杂度变化特征。结果表明:黄河上游干流的年径流呈不显著减小趋势,汛期径流减小的同时非汛期径流增大。支流除湟水民和站外,其他站年、汛期及非汛期径流均呈显著减小趋势。在不同时间尺度下,黄河上游干流贵德站至兰州站、支流湟水民和站的年、汛期和非汛期径流复杂度差异明显,径流复杂度变化具有指示人类活动影响的作用。人类活动在单一时间尺度下对年和汛期径流的影响作用强于汛期,在多时间尺度下对汛期径流的影响作用强于年和非汛期,而对湟水民和站径流的影响在不同时间尺度和不同时段下差异较大。同时使用灵活样本熵和多尺度熵能详尽测度径流复杂度的变化特征,识别人类活动影响强度的差异。基流对黄河上游年径流和非汛期径流的补给比例大于全流域,其变化对年径流有重要影响。

关键词: 径流复杂度; 多时间尺度; 人类活动; 黄河上游

中图分类号:TV121⁺.4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2021)05-0001-10

Change characteristics of runoff complexity in the upper reaches of the Yellow River under multiple time scales

SU Xianbao¹, LI Xungui^{1,2}, WANG Yipeng¹, LU Chen'ao¹, WANG Naiang¹

(1. Research Center for Glacier Region and Desert, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Studying the change characteristics of the runoff complexity in the upper reaches of the Yellow River has great significance to the understanding of regional runoff evolution. Here, both flexible sample entropy and multiscale entropy were used to measure the annual, flood and non-flood season runoff complexity of 12 hydrological stations located in the main stream and tributaries of this region from 1956 to 2015, based on which the change characteristics of runoff complexity under different time scales was analyzed. The results showed that the annual runoff of the upper reaches of the Yellow River showed an insignificant downward trend, and the runoff decreased during the flood season but increased during the non-flood season. Except for the Minhe Station of Huangshui River, all the other stations in the tributaries showed a significant downward trend in runoff including annual, flood season and non-flood season runoff. Under different time scales, the runoff complexity of annual, flood and non-flood season from Guide Station to Lanzhou Station in the main stream was greatly differentiated from that of Minhe Station of Huangshui River in the upper reaches of the Yellow River. The changes in runoff complexity also reflected the impacts of human activities. On a single time scale, the impacts of human activities on annual and non-flood season runoff were stronger than that on flood season runoff, whereas on multiple time scales, it was the opposite. But, regarding to Minhe Station of Huangshui River, the impacts of human activities varied significantly at different time scales and different periods. Using the flexible sample entropy and multiscale entropy at the same time can help obtain detailed runoff complexity change character-

收稿日期:2021-05-20; 修回日期:2021-06-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51679115、51109103)

作者简介:苏贤保(1993-),男,云南楚雄人,博士研究生,研究方向为水文学与水资源。

通讯作者:李勋贵(1978-),男,广西北流人,博士,教授,研究方向为水文水资源、水资源系统工程。

istics, and identify the intensity difference of the impacts of the human activities. The recharge ratio of base flow to annual runoff and non-flood season runoff in the upper reaches of the Yellow River was higher than that of the whole basin, and the change of base flow had a significant impact on annual runoff.

Key words: runoff complexity; multiple time scales; human activity; the upper reaches of the Yellow River

1 研究背景

河川径流作为水文系统变化的指示器,记录了气候变化和人类活动等非线性因素对水文系统的影响^[1],径流序列的非线性本质是产生复杂行为的根源^[2],对径流序列的复杂性进行测度与分析,可以识别气候变化和人类活动对水文系统的影响^[3-4]。目前复杂性测度的方法主要有 3 大类:基于自身相似性的分形理论、基于相空间吸引子的非线性动态方法、基于系统有序和无序状态的熵值法^[4]。动态熵作为熵值法的一种,以其计算简单且对数据需求量小,抗噪能力强,从众多的方法中脱颖而出^[5-6],在水文系统复杂性分析中得以广泛应用^[7-12]。然而,动态熵在改进过程中发展出多种形式,这些动态熵及其改进方法中究竟哪种方法对河川径流序列的分析更加有效,前人进行了理论方法总结^[4-6],但仍需要在实际应用中对比证实,才能更有效地识别气候变化和人类活动对径流的影响。

近似熵 (approximate entropy) 是动态熵的基本形式,由 Pincus^[13] 提出,在水文非线性系统领域取得了较好的应用^[9]。Richman 等^[14] 为消除近似熵的自匹配性,在近似熵的基础上提出样本熵 (sample entropy),但两种方法统计距离时只能得出 0 或 1 的不连续性二元决策函数。Chen 等^[15] 在近似熵和样本熵的基础上,引入高斯函数提出模糊熵,弱化统计距离的判别边界,得出完全分布于 0~1 之间的连续分布函数,但模糊函数的选取具有不确定性,不同方法得出的结果存在差异^[16]。以上 3 种方法很好地保留了原序列的信息,但都只考虑了单一时间尺度,不能详尽测度水文系统的复杂性。为充分揭示多时间尺度下时间序列隐藏的信息,Costa 等^[17-19] 提出多尺度熵 (multiscale entropy, MSE),并在径流序列复杂性分析中取得了很好的成果^[8-9,11]。但多尺度熵对序列的粗粒化损失了原序列的细节信息,且只有第 1 次粗粒化的序列能够进行熵值计算,随着时间尺度加大,序列长度变短而且熵值波动加大^[20],对此,很多学者提出改进粗粒化过程的方法^[21-23],尤以 Wu 等^[22] 提出的复合多尺度熵 (composite multiscale entropy) 将所有粗粒化熵值的均值代替第 1

次粗粒化的熵值改进效果最佳。Zhou 等^[20] 基于 Wu 等^[22] 的方法提出灵活多尺度熵 (flexible multiscale entropy, FME),引入灵活尺度因子 f (即容限阈值 r),将所有向量与 f 比较的结果按比例一一映射在 0~1 范围内,再次提高了多尺度熵的平稳性和可靠性,同时也增加了计算过程的复杂度,不利于处理长序列水文数据。Su 等^[24] 将 Zhou 等^[20] 的灵活尺度因子引入原始的样本熵和多尺度熵,称为灵活样本熵和多尺度熵,从而在提高原始样本熵和多尺度熵精度的同时,不至使计算过程更为复杂,该方法在黄河上游径流复杂度的研究中已得到良好应用。

目前动态熵在水文系统复杂性分析的应用中能准确识别人类活动对径流影响的时间节点,但只能单独使用单一时间尺度或多时间尺度的熵值法,不能详尽分析人类活动对径流的影响。少数研究用样本熵或多尺度熵测度黄河上游径流复杂度,分析人类活动对径流的影响^[2,24-25],但对多时间尺度下年内径流复杂度变化特征研究不足,两种方法对径流复杂性测度的有效性以及对人类活动影响的识别仍需深入研究。对此,本研究同时采用灵活样本熵和多尺度熵详细测度黄河上游 1956-2015 年径流在年、汛期及非汛期的复杂性,对比分析两种方法对径流复杂性检测的效果,研究黄河上游不同时间段的径流复杂度变化特征以及人类活动的影响强度,以期对区域多时间尺度下径流演化规律提供参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

黄河上游从河源到内蒙古自治区河口镇头道拐站,以兰州站为界划分为上段和下段。本文的研究区位于河源到兰州站 (即黄河上游上段),该流域介于 $95^{\circ}52'27.23'' \sim 104^{\circ}24'22.54''$ E、 $32^{\circ}09'14.36'' \sim 38^{\circ}20'52.10''$ N 之间,研究区水系及气象站点、水文站点和水库分布如图 1 所示。

兰州站以上流域包括青藏高原和黄土高原两大部分^[26],属青藏高原和温带大陆性气候,年平均气温为 2.7°C ,日照时长为 $2\,554.7\text{ h}$,年蒸发量为 $1\,428.9\text{ mm}$,年平均降水量为 446.4 mm ^[26-27]。河源至龙羊峡段地形复杂,两岸地貌类型齐全,龙羊峡

至兰州段河流比降大,自上游至下游分布有7个大中型水库^[26],对水库下游的贵德站、循化站、小川站、上迳站和兰州站的径流变化有重要影响。本研究选取干、支流12个水文站和6个气象站为研究对象(位置见图1),其中,干流从上游到下游分布有吉迈站、玛曲站、唐乃亥站、贵德站、循化站、小川站、上迳站和兰州站8个水文站,4条支流的把口站分别为湟水的民和站、大通河的享堂站、洮河的红旗站和大夏河的折桥站。兰州站作为该区域干、支流的把口站,控制流域面积为222 551.4 km²^[27],占黄河流域面积的29.6%,其干流长2 119.1 km,占总河长的38.9%^[26],该站多年平均径流量为327.4 × 10⁸ m³,产水量占全流域的61.7%^[26-27],其径流变化对全流域的影响巨大。

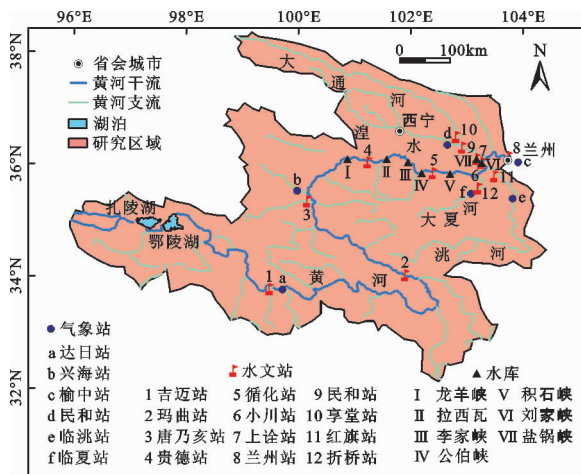


图1 研究区水系及气象站点、水文站点和水库分布

2.2 数据来源

本研究所用数据包括黄河上游6个气象站1960–2015年降水数据,以及12个水文站1956–2015年径流数据。逐年和逐月降水数据均来源于中国气象数据共享服务网(<http://data.cma.cn>)。径流数据包括年、月、日数据,实测径流来源于两方面,1956–1987年和2009–2015年来源于《中华人民共和国水利部黄河流域水文资料第4卷(第一册)》,1988–2008年来源于水利部黄河水利委员会。天然年、月径流由黄河水利委员会根据中华人民共和国水利行业标准《水利水电工程水文计算规范》(SL 278—2002)中的分项调查法还原^[28],天然日平均径流由实测日平均流量根据天然月平均流量与实测月平均流量的比例缩放得到。

2.3 研究方法

灵活样本熵参照Zhou等^[20]的灵活多尺度熵和

样本熵^[14]改进而来,使用灵活尺度因子 f 替代 r ,将向量间的距离与灵活尺度因子 f (f 即容忍阈值 r ,通常取序列的0.2倍标准差)的比值分布在0~1范围内,将其变为连续函数。对于包含 N 个数据的时间序列 $X_i(i=1,2,\dots,N)$,预先设定嵌入维数 m (通常取2),将序列转换为 m 维空间向量 $X_m(i)$,其表达式如下:

$$X_m(i) = [x(i), x(i+1), \dots, x(i+m-1)] \quad (1 \leq i \leq N-m+1) \quad (1)$$

通过计算每一个向量与自身以外其他向量之间的距离,取其最大值作为该向量与其他向量的距离 $d[X_m(i), X_m(j)]$,如公式(2)所示:

$$d[X_m(i), X_m(j)] = \max_{k=0 \rightarrow m-1} \{ |X(i+k) - X(j+k)| \} \quad (1 \leq i, j \leq N-m+1) \quad (2)$$

给定灵活尺度因子 f ,比较每个向量间距离与灵活尺度因子的大小 $D_m(i, j)$,如公式(3)所示:

$$D_m(i, j) = \begin{cases} 1 - \frac{d[X_m(i), X_m(j)]}{f} & (d[X_m(i), X_m(j)] < f) \\ 0 & (d[X_m(i), X_m(j)] \geq f) \end{cases} \quad (3)$$

统计其距离小于 f 的向量数量与向量总量的比值 $B_m(i, j)$,如公式(4)所示:

$$B_m(i, j) = \frac{1}{N-m} \sum_{i,j=1}^{N-m+1} D_m(i, j) \quad (1 \leq i, j \leq N-m+1, i \neq j) \quad (4)$$

计算 $B_m(i, j)$ 的平均值 C_f^m ,如公式(5)所示:

$$C_f^m = \frac{1}{N-m+1} \sum_{i=1}^{N-m+1} B_m(i, j) \quad (5)$$

将维数变为 $m+1$,重复上述公式(1)~(5),得到 C_f^{m+1} ,将两次计算结果的比值求对数,则得出灵活样本熵(FSE),如公式(6)所示:

$$FSE(m, f, N) = -\ln[C_f^m / C_f^{m+1}] \quad (6)$$

灵活样本熵值越大,则序列复杂度越大,自相似程度越低,周期性和规律性越差,可预测性越低,反之亦然^[4]。

多尺度熵(MSE)的计算过程与灵活样本熵相似,只在两个步骤不同,首先,在第1步计算前需对每一个时间尺度 τ 下的时间序列进行粗粒化(如公式(7)所示)。其次,计算灵活尺度因子 f 时($f=0.2SD$), SD (standard deviation)为未经粗粒化的原始序列的标准差,这是多尺度熵反映不同时间尺度下系统复杂度的基础。具体计算过程如文献[20]所示。

$$Y_j^{(\tau)} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=(j-1)\tau+1}^{j\tau} X_i \quad (7)$$

$$(1 \leq j \leq N/\tau, j = i + 1, i + 2, \dots, N)$$

多尺度熵相当于计算多时间尺度下的灵活样本熵值,当熵值随时间尺度单调递增时,则表示系统复杂度较大,反之亦然。

3 结果与分析

3.1 径流变化过程

采用 Mann - Kendall 趋势检验^[29] 对 1956 - 2015 年黄河上游 12 个水文站的年、汛期和非汛期径流进行分析,结果如表 1 所示。由表 1 中径流变化趋势可知,总体而言,黄河上游干流年径流呈不显著减小趋势,汛期径流减小的同时非汛期径流增

大^[24-25]。在所有站点中,变化最为显著的是干流贵德站至兰州站以及支流湟水的民和站。兰州站作为研究区干、支流的把口站,其径流变化可大致反映出整个区域的径流变化过程,该站在研究时段内的年、汛期和非汛期径流变化过程如图 2 所示。

从图 2 中可以看出,黄河上游实测年径流和汛期(6 - 10 月)径流出现明显减小的趋势,非汛期(1 - 5 月和 11 - 12 月)径流出现急剧增大的趋势。干流径流在 1968 和 1986 年刘家峡和龙羊峡水库蓄水后,实测年和汛期径流减小较为显著,而实测非汛期径流急剧增大,说明大型水库的蓄丰补枯对该区域径流量产生了显著的影响^[30-31]。

表 1 1956 - 2015 年黄河上游 12 个水文站多时间尺度下径流变化趋势 M - K 检验值

序列	吉迈	玛曲	唐乃亥	贵德	循化	小川	上迳	兰州	民和	享堂	红旗	折桥
实测年	0.89	-0.77	-0.70	-1.44	-1.39	-2.07 *	-1.47	-1.68	-0.97	-2.28 *	-2.93 **	-2.86 **
天然年	0.89	-0.77	-0.67	-1.23	-0.17	-1.15	-1.15	-1.30	1.89	-1.09	-2.83 **	-2.58 **
实测汛期	0.39	-0.29	-0.80	-4.44 **	-4.27 **	-4.00 **	-4.14 **	-3.51 **	-0.98	-1.79	-2.91 **	-2.64 **
天然汛期	0.44	-0.71	0.12	-1.52	-0.82	-2.03 *	-1.51	-2.03 *	0.68	-1.27	-2.60 **	-2.40 **
实测非汛期	2.07 *	-1.49	0.03	6.66 **	5.73 **	4.73 **	5.26 **	4.34 **	0.10	-2.66 **	-2.11 *	-3.25 **
天然非汛期	1.97 *	-0.13	1.97 *	0.45	2.20 *	1.73	1.97 *	1.12	4.23 **	0.43	-1.58	-3.34 **

注:“*”“**”分别表示 95%、99% 显著性水平。

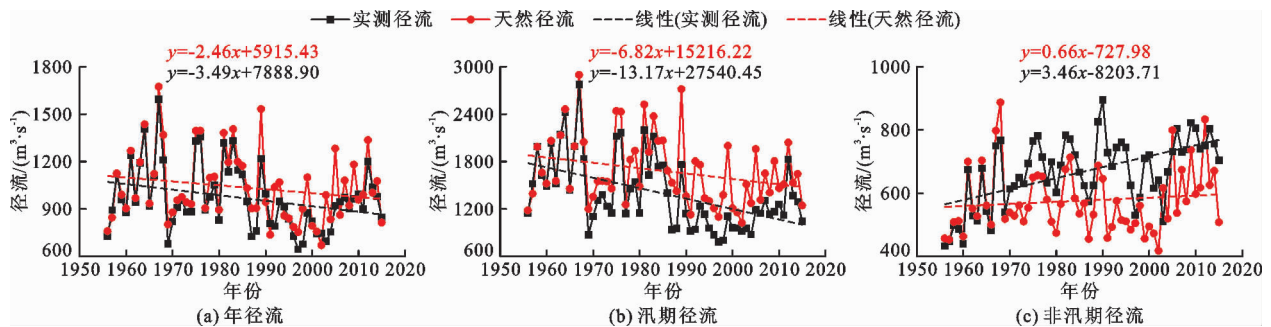


图 2 1956 - 2015 年黄河上游兰州站水文站年、汛期和非汛期径流变化过程

3.2 不同时间尺度下径流复杂度变化特征

分别选取 12 个水文站 1956 - 2015 年逐年日平均径流、逐年汛期日平均径流和非汛期日平均径流连接成一个序列,采用灵活样本熵测度全年、汛期和非汛期在单一时间尺度的逐年径流复杂度。然后将该 60 a 的年日平均径流、汛期日平均径流和非汛期日平均径流连接成一个序列,采用多尺度熵测度不同时间尺度下的径流复杂度,3 个时段时间尺度 τ 分别为 210、90 和 90 d。根据本文 3.1 节径流变化过程和趋势分析,以及 Su 等^[24]、苏贤保等^[25]的研究结果,该区域径流复杂度变化最显著的是干流贵德站至兰州站以及支流湟水的民和站,故主要展示

这 6 个水文站的径流复杂度变化过程,其灵活样本熵计算结果如图 3 ~ 5 所示,多尺度熵计算结果如图 6 ~ 8 所示。

对比图 3 ~ 5 中实测径流和天然径流的灵活样本熵(FSE)计算结果可知,在年、汛期和非汛期尺度下,干流贵德站至兰州站、支流湟水民和站的实测径流和天然径流复杂度存在明显的差值,说明人类活动对这几个站点的年、汛期和非汛期径流复杂度影响较大,但不同时段内的影响程度有所不同。具体分析如下:

(1) 在年尺度下,贵德站和循化站(图 3(a)、3(b))以 1986 年为分界点,该时间节点正是龙羊峡水库开闸蓄水的时间点,1986 年前后实测径流复杂

度出现跳跃式增大,水库建设对径流复杂度影响显著^[30]。小川站至兰州站(图3(c)~3(e))径流复杂度的变化以1968年和1986年为分界点,这两个时间节点分别对应刘家峡水库和龙羊峡水库蓄水的时间点^[31],水库蓄水前后实测径流复杂度出现两个峰

值。但龙羊峡蓄水量($193.6 \times 10^8 \text{ m}^3$)大于刘家峡($35.0 \times 10^8 \text{ m}^3$),1986年前后复杂度变化更显著,1992年后两大水库联合调度使实测径流复杂度急剧减小^[30-31]。湟水民和站(图3(f))在整个研究期的实测和天然径流复杂度差值较小。

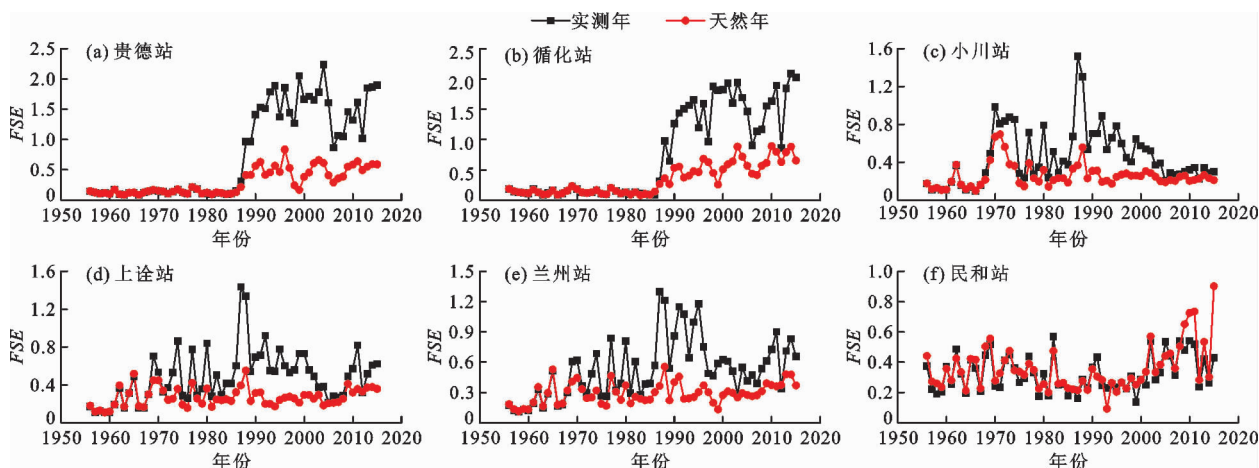


图3 1956-2015年黄河上游6个水文站年径流灵活样本熵(FSE)计算结果

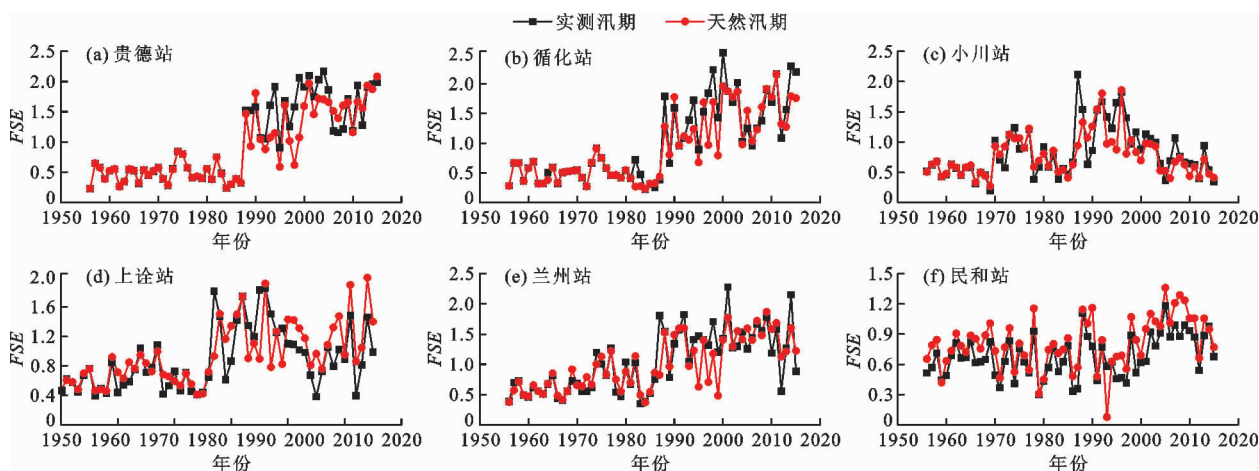


图4 1956-2015年黄河上游6个水文站汛期径流灵活样本熵(FSE)计算结果

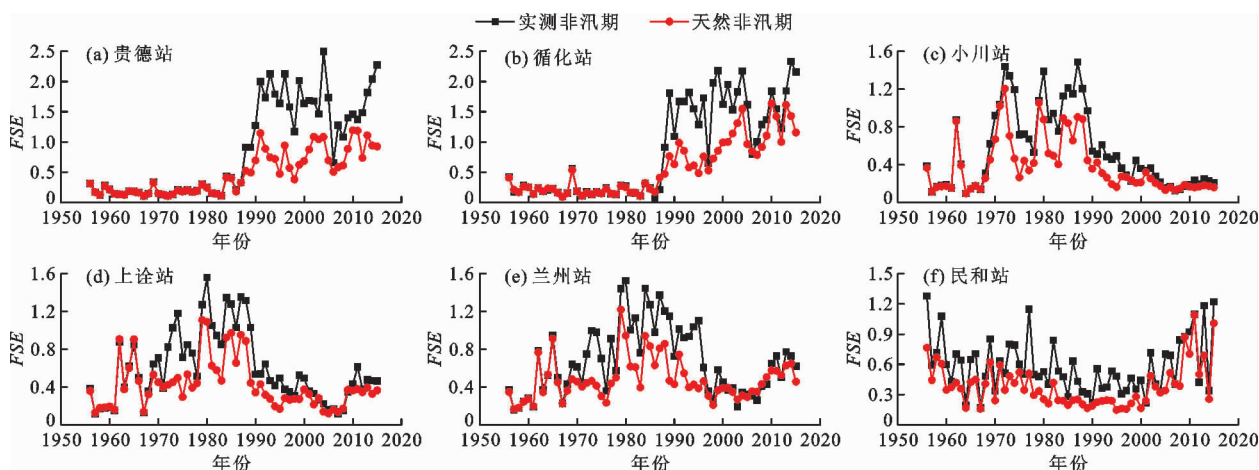


图5 1956-2015年黄河上游6个水文站非汛期径流灵活样本熵(FSE)计算结果

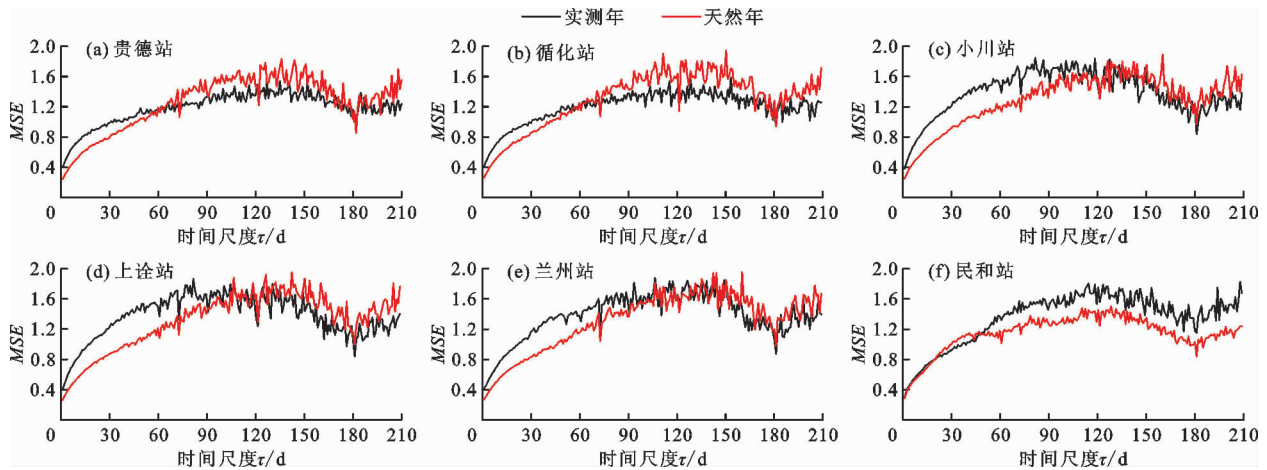


图6 1956–2015年黄河上游6个水文站年径流多尺度熵(MSE)计算结果

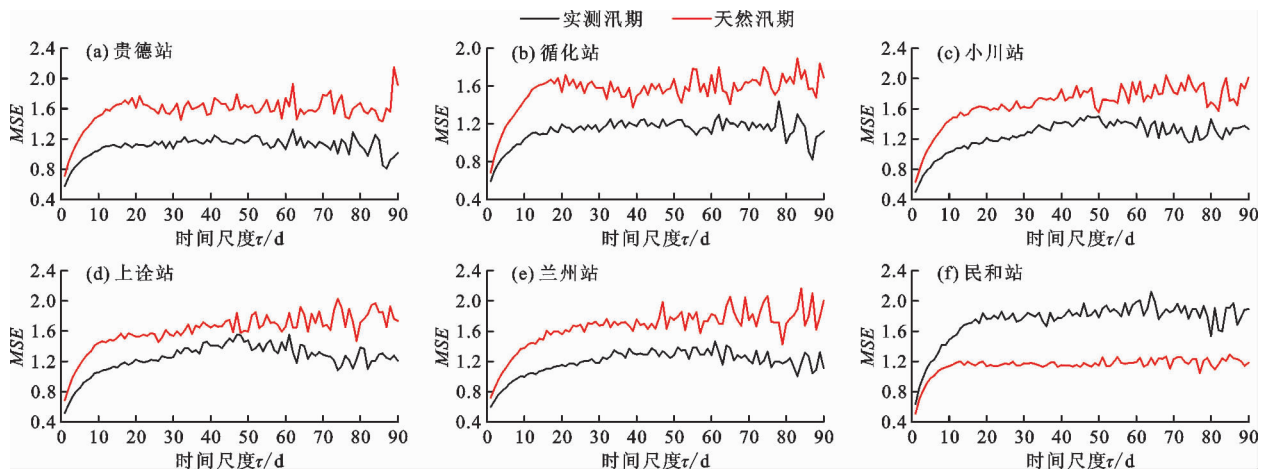


图7 1956–2015年黄河上游6个水文站汛期径流多尺度熵(MSE)计算结果

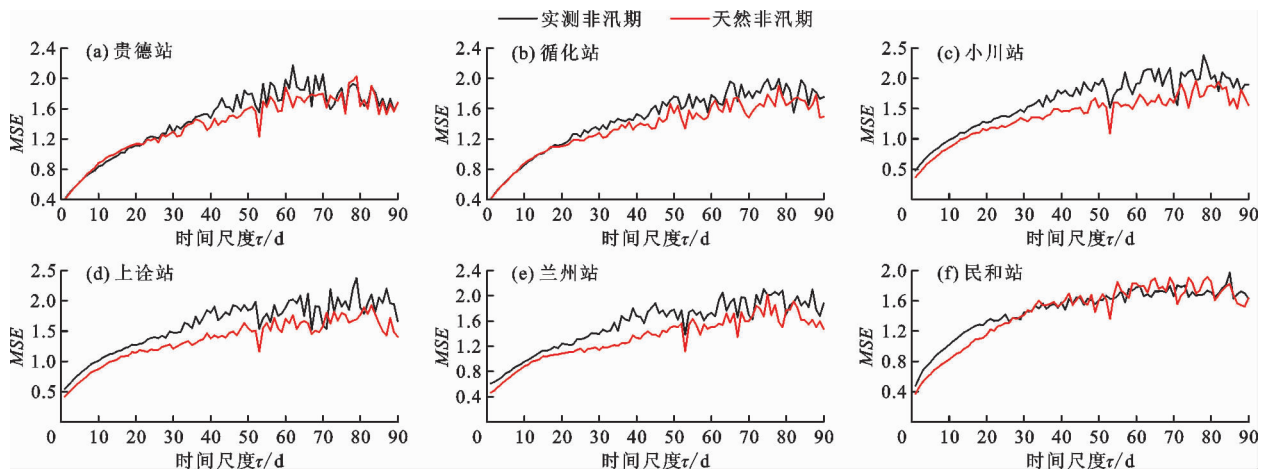


图8 1956–2015年黄河上游6个水文站非汛期径流多尺度熵(MSE)计算结果

(2)在汛期尺度下,各站汛期径流复杂度均在1986年后出现显著增大,这与该区域整体的气候暖湿化带来的水量增加有关^[32]。在汛期尺度和非汛期尺度下,干流贵德站至兰州站在1968和1986年前后出现两次峰值增加了汛期和非汛期径流复杂度(图4、图5(a)~5(e)),但汛期增大的幅度小于年

尺度和非汛期,这与刘家峡和龙羊峡在非汛期大量补水(年补水量为 $20 \times 10^8 \sim 80 \times 10^8 \text{ m}^3$)^[30]而在汛期防洪截流相关。支流湟水民和站在汛期和非汛期尺度下径流复杂度的变化相反(图4(f)、5(f)),实测汛期径流复杂度小于天然汛期,实测非汛期径流复杂度大于天然非汛期。该流域天然汛期径流微弱

增加的同时,工农业用水量和耕地量剧增的影响使实测汛期径流减少^[33],同时湟水流域在2000年后大力实施退耕还林还草等水土保持工程,下垫面的恢复和人类用水削弱了汛期径流的增加,维持了径流平稳,从而减小了汛期径流复杂度^[34]。而非汛期径流显著增加^[35],致使天然非汛期径流复杂度小于实测非汛期。

对比图6~8中实测径流和天然径流的多尺度熵(*MSE*)计算结果可知,年、汛期和非汛期径流复杂度变化差异显著的站点与单一时间尺度下的站点一致。具体分析如下:

(1)在年尺度下,人类活动在60 d前、后分别增大和减小了贵德站和循化站的径流复杂度(图6(a)、6(b));在120 d前增大了小川站至兰州站的径流复杂度(图6(c)~6(e)),120 d后影响较微弱;人类活动在45 d前、后分别减小和增大了民和站的径流复杂度(图6(f))。

(2)在汛期尺度下,干流贵德站至兰州站、支流湟水民和站的实测径流与天然径流复杂度的差值显著(图7(a)~7(f)),且差值大于年尺度(图6);干流贵德站至兰州站在全时间尺度下实测汛期径流复杂度均小于天然汛期径流复杂度(图7(a)~7(e))。1968和1986年两个大型水库建成后,由于大型水库群在汛期对径流的调洪拦截,兰州站汛期径流占年径流的比例从60%分别下降至52.8%、41%^[36],该区域7个大中型水库的拦截作用显著减小了干流贵德站至兰州站汛期径流复杂度^[10-11]。支流湟水民和站(图7(f))所有时间尺度下实测汛期径流复杂度均大于天然汛期径流复杂度,这与前文中(图4(f))单一时间尺度下的复杂度变化相反,单一时间尺度测度的是逐年汛期径流复杂度,而多尺度熵测度的是多年汛期径流复杂度,人类活动虽然减小了逐年汛期径流复杂度,但在长时间尺度下,人类用水量的增加和大量耕地存在会增大汛期径流复杂度。除此之外,该流域汛期内还受到70余座小型梯级水库群无序蓄、泄水的影响^[37],也增大了汛期径流复杂度。

(3)在非汛期尺度下,实测径流与天然径流复杂度的差值小于汛期。干流贵德站和循化站在25 d前实测非汛期径流复杂度与天然非汛期保持同步变化(图8(a)、8(b)),之后实测非汛期径流复杂度大于天然非汛期。该河段非汛期受大型水库补水的影响(年补水量为 $20 \times 10^8 \sim 80 \times 10^8 \text{ m}^3$)^[30],使径流复杂度增大。小川站至兰州站各时间尺度下实测非

汛期径流复杂度均大于天然非汛期径流复杂度(图8(c)~8(e)),这与龙羊峡和刘家峡水库联合调度防止黄河宁蒙河段凌汛有关^[31]。支流湟水民和站28 d前实测非汛期径流复杂度大于天然非汛期径流复杂度(图8(f)),之后实测非汛期径流复杂度与天然非汛期保持同步变化,这与该流域小型梯级水库群非汛期集中蓄水有关^[37]。

综合对比灵活样本熵(*FSE*)和多尺度熵(*MSE*)对径流复杂度测度的结果发现,径流复杂度在干流贵德站至兰州站、支流湟水民和站变化显著,人类活动对该区间径流复杂度影响剧烈,但影响强度存在差异。在单一时间尺度下,人类活动对干流贵德站至兰州站的影响集中在1968、1986年后,人类活动对年、非汛期径流的影响强于汛期^[24]。这说明大中型水库在非汛期的补水对当年非汛期径流序列的扰动强烈,在年尺度下同时存在汛期拦截蓄水和非汛期补水、发电、灌溉等,年径流序列受到的扰动较强,而汛期拦截蓄水多发生在需要削减洪峰流量的暴雨天气,故扰动较非汛期和年尺度弱。在多时间尺度下,人类活动不仅对当年的径流产生影响,对研究期1956~2015年不同时段径流均产生显著影响,但对年、非汛期径流复杂度的影响分别集中在120和30 d前,而在所有时间尺度下对汛期径流复杂度的影响均较显著,说明1956~2015年该区域的大中型水库在汛期的防洪功能最为显著,对多年径流的调节作用巨大。人类活动对湟水民和站的影响在不同时间尺度和不同时段下差异较大,这一结果既受到该流域小型梯级水库群的影响,也受到耕地变化、人类用水等活动的影响,还与气候变化造成非汛期径流增加相关。如果仅采用单一时间尺度的熵值法或者多时间尺度熵值法对区域径流复杂度进行检测,尤其针对湟水流域这种不同时间尺度下径流复杂度差异较大的区域,则得出的径流复杂度结果不够全面和详尽。本研究同时使用两种方法,逐年径流和多年径流在不同时间尺度下的复杂度差异均能被检测到,说明同时使用灵活样本熵和多尺度熵能获得更详尽的径流复杂度变化特征,从而能更好地识别不同时间尺度下人类活动对径流影响的差异。

3.3 不同时间尺度下径流复杂度之间的关系

对比图3~8中汛期和非汛期与全年径流的复杂度变化,发现非汛期径流与年径流的复杂度变化过程较一致,为进一步明确这种变化趋势的一致性,计算单一时间尺度和多时间尺度下汛期和非汛期径流与年径流的复杂度相关系数,结果如表2所示。

表2 黄河上游 12 个水文站汛期和非汛期径流与年径流复杂度相关系数

检测指标	序列	吉迈	玛曲	唐乃亥	贵德	循化	小川	上谕	兰州	民和	享堂	红旗	折桥
灵活样本熵	实测汛期	0.22	0.51**	0.50**	0.94**	0.91**	0.73**	0.74**	0.70**	0.53**	0.70**	0.68**	0.51**
	实测非汛期	0.25	0.57**	0.55**	0.98**	0.96**	0.67**	0.49**	0.54**	0.56**	0.84**	0.73**	0.56**
	天然汛期	0.22	0.51**	0.42**	0.83**	0.88**	0.31**	0.41**	0.52**	0.53**	0.72**	0.65**	0.56**
	天然非汛期	0.25	0.56**	0.47**	0.91**	0.93**	0.58**	0.39**	0.44**	0.77**	0.92**	0.74**	0.60**
多尺度熵	实测汛期	0.82**	0.68**	0.66**	0.49**	0.61**	0.81**	0.70**	0.71**	0.69**	0.44**	0.88**	0.83**
	实测非汛期	0.97**	0.96**	0.96**	0.93**	0.97**	0.94**	0.93**	0.95**	0.92**	0.95**	0.97**	0.97**
	天然汛期	0.82**	0.68**	0.66**	0.51**	0.62**	0.81**	0.83**	0.76**	0.64**	0.45**	0.88**	0.86**
	天然非汛期	0.98**	0.96**	0.96**	0.92**	0.94**	0.95**	0.93**	0.93**	0.95**	0.93**	0.98**	0.96**

注：“*”“**”分别表示 95%、99% 显著性水平。

由表 2 可以看出:(1)在单一时间尺度下,除源区吉迈站外,所有站点汛期和非汛期与年径流的复杂度相关性均很显著。对比相关系数大小,除干流小川站至兰州站外,其他站点实测非汛期径流与年径流的复杂度相关系数均高于汛期;除干流上谕站和兰州站外,天然非汛期径流与年径流的复杂度相关系数均高于汛期。(2)在多时间尺度下,汛期和非汛期径流与年径流的复杂度相关性均很显著,各站点实测非汛期径流和天然非汛期径流的复杂度与年径流的复杂度相关系数均高于汛期。对比单一时间尺度下和多时间尺度下汛期和非汛期径流与年径流的复杂度相关系数差值,发现多时间尺度下汛期和非汛期径流与年径流的复杂度相关系数差值远高于单一时间尺度,这说明长时间尺度下,非汛期径流与年径流的复杂度相关性更强。

综上所述,非汛期径流与年径流的复杂度变化趋势较汛期更一致,相关性更高,而依据常规认识,黄河上游年径流的主要补给来源为汛期降水,汛期径流复杂度应该与年径流的复杂度变化较一致,这与本文得出的结果不相符。究其原因,该区域径流补给并不是以汛期降水形成的地表径流为主,而是以降水下渗形成的地下水为主^[38]。地下水补给径流的水量称之为基流,基流来源于汛期降水的补给(1956–2000 年兰州以上基流和降水相关系数为 0.88)^[39],储存于下垫面中,在非汛期和降水不足时排泄至河道补给河流水量,是调节该区域年径流稳定的主要因素^[40]。在该区域 1956–2000 年年径流的主要补给来源中,基流对年径流量的补给比例介于 52%~67% 之间^[36],基流对该区域年径流的补给比例高于全流域的平均比例(44%)^[41],是该时段年径流的主要补给方式,非汛期径流对基流补给的依赖程度远高于年径流^[42–43],二者具有相同的补给来源,故复杂度变化过程较一致。表 3 列出了 1960–

2015 年黄河上游 6 个气象站降水量变化趋势 M–K 检验值。

表3 1960–2015 年不同时段黄河上游 6 个气象站降水量变化趋势 M–K 检验值^[29]

时段	达日	兴海	榆中	民和	临洮	临夏
年	0.13	1.43	-1.07	-0.43	-1.86	-0.35
汛期	1.25	1.55	-1.22	-0.39	-1.85	-0.42
非汛期	2.35**	0.71	0.16	0.01	-0.83	0.13

注：“*”“**”分别表示 95%、99% 显著性水平。

由表 3 可知,达日站非汛期降水量呈显著增加趋势;湟水民和站、洮河临洮站、大夏河临夏站和榆中站年和汛期降水量呈减少趋势,而非汛期降水量呈增加趋势。源区达日站和兴海站降水量有所增加,是经历 1960–2002 年的减小后,再转为急剧增大,故降水量整体趋势为增大^[44]。总体来看,除源区唐乃亥水文站以上区域外,整个区域汛期降水量呈减少趋势。而非汛期径流增加,致使基流补给量减少,排泄量增大,基流补给年、非汛期径流的比例增加,导致基流呈持续减小趋势。据钱云平等^[36]、王雁林等^[39]、林学钰等^[41]对黄河流域基流量变化的研究,1950–2000 年黄河上游基流补给比例逐渐增大,源区至玛曲河段基流量减少了 2%~3%,玛曲至兰州河段基流量减少了 11%~12%,20 世纪 90 年代基流衰减比例达到 8%~38%,基流减少量占径流减少量的 30%~68%,该时段径流减少的主要原因是降水量减少引起基流的减少。Cuo 等^[42]对兰州以上区域 1957–2009 年基流的变化进行分析表明,整个区域基流量均呈减小趋势,且唐乃亥站以上区域基流的减小量略大于年径流减小量。余张琛^[45]对黄河源区吉迈站 2000–2012 年基流分割的结果显示,该时段基流指数由 0.54 上升至 0.63,降水量增加引起基流补给年径流的比例增加,这充分说明基流的变化对年径流的影响显著。但引起基流

变化的因素复杂,既要考虑气候因子变化,还要考虑下垫面的变化对降水量的再分配过程^[46],2002年后黄河源区降水量增大^[45-46]、冻土层退化使其储水层和隔水层功能消失^[47-48]以及陆续推进的生态修复工程^[42,49],均会对基流的变化产生影响,这方面的研究仍有待进一步深入。

综上所述,基流对黄河上游的年、非汛期径流补给比例高于全流域,相同的补给来源促使其复杂度变化相关性较高,基流变化对年径流有重要影响。

4 结 论

近几十年来在气候变化和人类活动的影响下,黄河上游兰州站以上区域水文系统发生了不同程度的变异。本文同时采用灵活样本熵和多尺度熵测度年、汛期和非汛期径流复杂性,对比分析不同时间尺度下径流复杂度的关系,主要得出以下结论:

(1)总体而言,黄河上游干流年径流量呈不显著减小趋势,汛期径流减小的同时非汛期径流增大。支流除湟水民和站外,年、汛期和非汛期径流均呈显著减小趋势。

(2)黄河上游不同时间尺度下的径流复杂性变化差异明显,干流贵德站至兰州站、支流湟水民和站的年、汛期和非汛期径流复杂度变化较大,其他站点变化较小。

(3)径流复杂度变化具有指示人类活动影响的作用,在单一时间尺度下,人类活动对年和非汛期径流影响强于汛期,在多时间尺度下对汛期径流影响强于年、非汛期,而对湟水民和站的影响在不同时段和时间尺度下差异较大。

(4)同时使用灵活样本熵和多尺度熵能更全面详尽地测度不同时间尺度的径流复杂性变化特征,识别不同时间尺度下人类活动对径流影响强度的差异。

(5)基流对黄河上游的年径流和非汛期径流补给比例高于全流域,基流变化对年径流有重要影响。

参考文献:

- [1] BAYAZIT M. Nonstationarity of hydrological records and recent trends in trend analysis: A state-of-the-art review[J]. *Environmental Processes*, 2015, 2(3): 527–542.
- [2] 李勋贵,王晓磊,魏霞. 泾河流域径流复杂度的多维特性[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2015, 51(4): 447–453.
- [3] CHOU Chienming. Complexity analysis of rainfall and runoff time series based on sample entropy in different temporal scales[J]. *Stochastic Environment Research and Risk Assessment*, 2014, 28(6): 1401–1408.
- [4] TANG Ling, LÜ Huiling, YANG Fengmei, et al. Complexity testing techniques for time series data: A comprehensive literature review[J]. *Chaos Solitons Fractals*, 2015, 81 (Part A): 117–135.
- [5] XIONG Guoliang, ZHANG Long, LIU Hesheng. A comparative study on ApEn, SampEn and their fuzzy counterparts in a multiscale framework for feature extraction[J]. *Journal of Zhejiang University – Science A (Applied Physics & Engineering)*, 2010, 11(4): 270–279.
- [6] YENTES J M, HUNT N, SCHMID K K, et al. The appropriate use of approximate entropy and sample entropy with short data sets[J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2013, 41(2): 349–365.
- [7] LI Zhongwei, ZHANG Youkuan. Multi-scale entropy analysis of Mississippi River flow[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2008, 22(4): 507–512.
- [8] CHOU Chienming. Wavelet based multiscale entropy analysis of complex rainfall time series[J]. *Entropy*, 2011, 13(1): 241–253.
- [9] CHOU Chienming. Applying multiscale entropy to the complexity analysis of rainfall – runoff relationships[J]. *Entropy*, 2012, 14(5): 945–957.
- [10] 王远坤,王栋. 基于样本熵理论的长江干流径流序列复杂度分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(3): 203–207.
- [11] 王远坤,李建,王栋. 基于多尺度熵理论的葛洲坝水库对长江干流径流影响研究[J]. *水资源保护*, 2015, 31(5): 14–18.
- [12] LI Xungui, WEI Ning, WEI Xia. Complexity analysis of precipitation – runoff series based on a new parameter-optimization method of entropy[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2017, 22(9): 04017029.
- [13] PINCUS S M. Approximate entropy as a measure of system complexity[J]. *Proceeding of the National Academy Science*, 1991, 88(6): 2297–2301.
- [14] RICHMAN J S, MOORMAN J R. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy[J]. *American Journal of Physiology Heart and Circulatory Physiology*, 2000, 278(6): 2039–2049.
- [15] CHEN Weiting, ZHUANG Jun, YU Wangxin, et al. Measuring complexity using FuzzyEn, ApEn, and SampEn[J]. *Medical Engineering & Physics*, 2009, 31(1): 61–68.
- [16] XIE Hongbo, CHEN Weiting, HE Weixing, et al. Complexity analysis of the biomedical signal using fuzzy entropy measurement[J]. *Applied Soft Computing*, 2011, 11(2): 2871–2879.
- [17] COSTA M, GOLDBERGER A L, PENG C K. Multiscale entropy analysis of complex physiologic time series[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(6): 068102.

- [18] COSTA M, GOLDBERGER A L, PENG C K. Multiscale entropy to distinguish between physiologic and synthetic RR time series[J]. *Computer Cardiology*, 2002, 29(29): 137–140.
- [19] COSTA M, GOLDBERGER A L, PENG C K. Multiscale entropy analysis of biological signals[J]. *Physical Review E*, 2005, 71(2): 021906.
- [20] ZHOU Renjie, YANG Chen, WAN Jian. Measuring complexity and predictability of time series with flexible multiscale entropy for sensor networks[J]. *Sensors*, 2017, 17(4): 787–806.
- [21] WU Shuende, WU Chiuwen, LEE Kungyen, et al. Modified multiscale entropy for short-term time series analysis[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2013, 392(23): 5865–5873.
- [22] WU Shuende, WU Chiuwen, LIN Hiougwo, et al. Time series analysis using composite multiscale entropy[J]. *Entropy*, 2013, 15(3): 1069–1084.
- [23] WU Shuende, WU Chiuwen, LIN Hiougwo, et al. Analysis of complex time series using refined composite multiscale entropy[J]. *Physics Letters A*, 2014, 378(20): 1369–1374.
- [24] SU Xianbao, LI Xungui, NIU Zhenmin, et al. A new complexity-based three-stage method to comprehensively quantify positive/negative contribution rates of climate change and human activities to changes in runoff in the upper Yellow River[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 287: 125017.
- [25] 苏贤保, 李勋贵, 张建香, 等. 气候变化和人类活动对黄河上游径流影响的时空差异[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(3): 285–293.
- [26] ZHANG Hongbo, SINGH V P, ZHANG Qiang, et al. Variation in ecological flow regimes and their response to dams in the upper Yellow River basin[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(11): 1–16.
- [27] ZHAO Fangfang, XU Zongxue, ZHANG Lu, et al. Streamflow response to climate variability and human activities in the upper catchment of the Yellow River Basin[J]. *Science in China*, 2009, 52(11): 3249–3256.
- [28] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程水文计算规范: SL 278—2002[S]. 北京: 中国水电出版社, 2016.
- [29] SANG Yanfang, WANG Zhonggen, LIU Changming, et al. Comparison of the MK test and EMD method for trend identification in hydrological time series[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 510: 293–298.
- [30] 郭彦, 侯素珍, 胡恬, 等. 龙刘水库联合运用对黄河上游径流量变化的影响[J]. *水电能源科学*, 2014, 32(8): 39–42+47.
- [31] 许伟. 龙羊峡—刘家峡河段梯级水库联合运用相关问题研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [32] 杨芳, 刘倩. 湟水流域降水量长期变化趋势的时空分布特征及与气温的关系[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(5): 201–206.
- [33] 张调风, 朱西德, 王永剑, 等. 气候变化和人类活动对湟水河流域径流量影响的定量评估[J]. *资源科学*, 2014, 36(11): 2256–2262.
- [34] 刘朝松, 肖可可. 湟水谷地土地利用/覆盖变化分析[J]. *科技视界*, 2014(14): 170–171.
- [35] 祁文燕, 钱鞠, 葛雷, 等. 湟水干流近 60 年径流变化特征分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(3): 45–49.
- [36] 钱云平, 金双彦, 蒋秀华, 等. 黄河兰州以上河川基流量变化对黄河水资源的影响[J]. *水资源与水工程学报*, 2004, 15(1): 19–23.
- [37] 李小荣. 大通河跨流域引水和梯级水电站建设对径流的影响分析[J]. *地下水*, 2017, 39(4): 134–136.
- [38] 梁四海, 徐德伟, 万力, 等. 黄河源区基流量的变化规律及影响因素[J]. *地学前缘*, 2008, 15(4): 280–289.
- [39] 王雁林, 王文科, 钱云平, 等. 黄河河川基流量演化规律及其驱动因子探讨[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(3): 479–486.
- [40] 陈利群, 刘昌明, 杨聪, 等. 黄河源区基流估算[J]. *地理研究*, 2006, 25(4): 659–665.
- [41] 林学钰, 廖资生, 钱云平, 等. 基流分割法在黄河流域地下水研究中的应用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2009, 39(6): 959–967.
- [42] CUO Lan, ZHANG Yongxin, GAO Yanhong, et al. The impacts of climate change and land cover/use transition on the hydrology in the upper Yellow River Basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 502(Complete): 37–52.
- [43] 代军臣, 王根绪, 宋春林, 等. 三江源区径流退水过程演变规律[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(6): 1342–1350.
- [44] ZHOU Degang, HUANG Ronghui. Response of water budget to recent climatic changes in the source region of the Yellow River[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(17): 2155–2162.
- [45] 余张琛. 黄河源区径流组分对气候要素的响应特征研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2016.
- [46] 亢小语, 张志强, 陈立欣, 等. 黄土高原中尺度流域基流变化驱动因素分析[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(3): 563–572.
- [47] 黄荣辉, 周德刚. 气候变化对黄河径流以及源区生态和冻土环境的影响[J]. *自然杂志*, 2012, 34(1): 1–9.
- [48] 周旭东, 杨涛. 三种基流分割方法在黄河源区应用中的对比分析[J]. *水电能源科学*, 2014, 32(10): 18–21.
- [49] 徐德伟, 单威, 孙皓, 等. 黄河源区基流变化及其植被响应研究[J]. *地下水*, 2014, 36(5): 109–111.