

黄土高原中尺度流域基流变化驱动因素分析

亢小语^{1,2,3,4}, 张志强^{1,2,3,4}, 陈立欣^{1,2,3,4}, 冷曼曼^{1,2,3,4}, 杨锋伟⁵

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 国家林业局水土保持重点实验室, 北京 100083;

3. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 吉县 042200; 4. 北京市水土保持工程技术

研究中心, 北京 100083; 5. 国家林业局桉树研究开发中心, 湛江 524022)

摘要: 针对黄土高原基流的动态变化特征和驱动因素问题, 以昕水河流域为例, 采用数字滤波法(3次, $\alpha=0.925$)分割基流, 利用 Mann-Kendall、Pettitt、小波分析和 Hurst 法分析该流域基流的趋势性、突变性、周期性和持续性特点, 采用双累积曲线法对基流变化驱动因素进行分析。结果表明, 昕水河流域多年平均基流量为 0.45 亿 m^3 , 基流指数为 0.368; 流域年基流量呈显著下降趋势($P<0.01$), 在 1985 年发生突变; 基流变化周期为 27 年, 预计未来基流仍有进一步减少趋势($H>0.50$)。流域降水和人类活动是基流变化的根本原因, 人类活动通过植被覆盖度的变化、地下水的开发、煤矿开采和水土保持措施等方式影响基流。与第一阶段相比, 第二、第三阶段降水和人类活动对基流的影响比例分别为 25.89%、74.11% 和 0.37%、99.63%。进入 21 世纪, 人类活动逐渐成为影响基流变化的主要因素。

关键词: 黄土高原; 中尺度流域; 基流变化; 驱动因素

河川径流的变化受流域下垫面特征变化、气候变化和人类活动的影响。根据传播时间和运动路径, 径流可分为地表直接径流和基流^[1]。基流主要来自地下水存储和其他延迟径流的排放, 是河川径流中相对稳定的部分。研究表明, 黄河河川基流量约占河川径流量的 44%^[2], 黄河河川基流量在近 50 年呈现下降趋势^[3-6], 基流减少引起的生态问题, 严重制约着当地经济和生态环境建设。黄土高原地貌条件复杂, 基流补给方式存在差异, 不同学者对基流变化趋势和驱动因素进行了分析。白乐等^[7]计算了黄河支流秃尾河流域降水和人类活动对基流的贡献率, 人类活动逐渐成为影响该流域基流演变的主要驱动因子。刘柏君等^[8]和刘微等^[9]指出人类活动是影响黄土高原皇甫川流域基流变化的主要原因。雷泳南等^[10]认为黄土高原窟野河流域基流量呈减少趋势, 流域内大面积煤炭资源和地下水的过量开发是影响基流量的主要驱动因素。郭军庭等^[11]认为黄土丘陵沟壑区小流域不同的土地利用类型、降水、河网密度和河流比降影响基流的变化。对河川基流变化趋势和其驱动因素进行分析, 为合理开发当地水资源、布局水土保持措施和生态环境工程建设提供依据。

目前, 昕水河流域的研究主要集中在对径流、泥沙以及水沙运行规律^[12], 对基流的研究较少。本文采用数字滤波法(3次, $\alpha=0.925$)分割黄土高原昕水河流域 1955-2015 年

收稿日期: 2018-09-02; 修订日期: 2018-12-17

基金项目: 国家科技支撑重点项目(2015BAD07B030303)

作者简介: 亢小语(1993-), 女, 辽宁鞍山人, 硕士, 研究方向为水土保持、生态水文与流域管理。

E-mail: kxy942698@126.com

通讯作者: 张志强(1967-), 男, 内蒙古清水河人, 教授, 博士生导师, 研究方向为侵蚀控制、生态水文与流域管理教学与科研工作。E-mail: zhqzhang@bjfu.edu.cn

的基流,并分析其变化趋势和特征,对影响基流的驱动因素进行讨论,为黄土高原中尺度流域水资源合理利用和更好地建设当地生态环境提供科学依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

昕水河属于黄河一级支流,位于黄河东岸、吕梁山西侧,全长 134 km,流域总面积 4326 km²;地处 110°30′~111°30′E、36°22′~36°52′N 之间,包括蒲县、隰县等 5 县(图 1);位于中纬度地区,属于暖温带半湿润大陆性季风气候,多年平均降水量为 505.09 mm,年最大降水量和年最小降水量分别为 820.71 mm (1958 年)、300.12 mm (1997 年),多年平均气温为 9~11 ℃。大宁站多年平均年径流量为 1.23 亿 m³。

1.2 数据来源

大宁水文站控制流域面积 3992 km²,是昕水河流域最下游控制站。该站 1955-2015 年实测日径流量数据来自《黄河水文年鉴》,昕水河流域及其周边共有蒲县、大宁、隰县等 11 个气象(雨量)站(表 1),气象数据(1958-2016 年)来自中国气象科学数据共享网(<http://data.cma.cn/>)。

GIMMS-NDVI 数据由美国航空航天局(NASA)全球监测与模型研究组(GIMMS)发布,该数据通过半月最大值合成(MVC)^[13],空间分辨率为 8 km,时间段为 1982-2015 年。数据经过几何、辐射和大气校正等预处理,最大值合成法用于减少云、大气、太阳高度角的影响。

1.3 研究方法

1.3.1 降水量和潜在蒸散发

各站点潜在蒸散发根据 Penman-Monteith 公式^[14]计算。降水量和潜在蒸散发计算结果利用普通克里金(Kriging)插值法,得到昕水河流域平均降水量和平均潜在蒸散发^[15]。

1.3.2 基流分割

本文采用单参数滤波法,结合日流量过程线,将日径流数据分为直接径流(高频信号)和基流(低频信号)^[16],其计算方程为:

$$q_t = \beta q_{t-1} + \alpha(1 + \beta)(Q_t - Q_{t-1}) \quad (1)$$

$$Qb_t = Q_t - q_t \quad (2)$$

式中: q_t 为 t 时刻过滤出的快速径流; Q_t 为实测河川总径流; Qb_t 为 t 时刻基流, $0 < Qb_t < Q_t$; t 为时间(天); α 、 β 为滤波参数 ($0 < \alpha < 0.5$, $0 < \beta < 1$)^[1]。Arnold^[17]和 Nathan^[18]对比多个流域直接分割法和数字滤波法的结果,将 α 固定为 0.5。本文通过参数敏感性分析, β 取值 0.925 并采用正一反一正三次滤波时,效果最好。

1.3.3 趋势性、持续性、突变性和周期性分析

Mann-Kendall^[19](MK)是非参数检验方法,已被广泛应用于气象和水文时间序列的

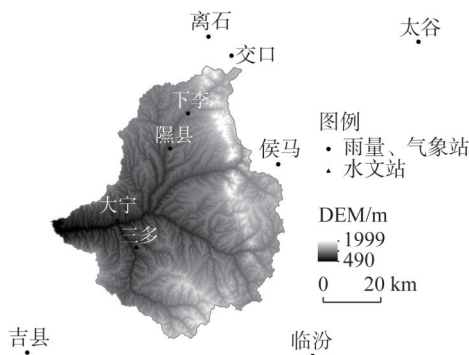


图 1 昕水河流域研究区概况

Fig. 1 The overview of the study area of Xinshui River Basin

表1 昕水河流域各雨量站、气象站和水文站的基本信息

Table 1 Basic information of raingauges, meteorological stations and hydrological stations in Xinshui River Basin

| 站别 | 站名 | 高程/m | 经度/° | 纬度/° | 数据序列/年 |
|--------|----|--------|--------|-------|----------------------------------|
| 雨量、气象站 | 下李 | — | 111.02 | 36.81 | 1977-2014 (降水) |
| | 三多 | — | 110.82 | 36.39 | 1977-2014 (降水) |
| | 交口 | — | 111.19 | 36.99 | 1977-2014 (降水) |
| | 大宁 | 765.9 | 110.45 | 36.28 | 1973-2006 (气象) 1958-2015 (降水) |
| | 侯马 | 433.8 | 111.37 | 35.65 | 1958-2016 (降水、气象) |
| | 吉县 | 851.3 | 110.68 | 36.08 | 1958-2016 (降水、气象) |
| | 临汾 | 449.5 | 111.50 | 36.05 | 1958-2016 (降水、气象) |
| | 隰县 | 1052.7 | 110.90 | 36.78 | 1958-2016 (降水、气象) |
| | 太谷 | 785.8 | 111.92 | 37.03 | 1958-2016 (降水、气象) |
| | 离石 | 950.8 | 111.10 | 37.05 | 1959-2016 (降水、气象) |
| | 蒲县 | 1030.6 | 111.06 | 36.24 | 1960-2006 (气象) |
| 水文站 | 大宁 | 765.9 | 110.45 | 36.28 | 1955-2015 |

趋势分析，其优势在于不需要样本遵循一定的分布，也不受少数异常值的干扰^[20]。当 $Z>0$ 时，序列呈上升趋势， $Z<0$ 时序列呈下降趋势。 Z 绝对值大于等于1.28、1.64、2.32时，通过信度区间90%、95%、99%的显著性检验。

Pettitt 检验法是检验水文时间序列突变点的方法^[10]。该方法基于Mann-Whitney 统计函数，计算简便，能较好地识别水文时间序列突变点。

Hurst 系数法定量表征时间序列持续性或长期相关性，当 $H=0.5$ 、 $H>0.5$ 和 $H<0.5$ 时分别表明序列零时刻过去变化与未来变化趋势不相关、正持续和反持续效应^[21]。

小波分析法是在时域分析法和频域分析法基础上提出的一种新分析方法^[22]，通过识别时间序列中多时间尺度演变特性，对水文序列的周期性进行分析。

1.3.4 双累积曲线法

双累积曲线法利用两个变量在相同时间长度内的累积值分析两变量之间响应关系。当曲线为一条直线时，其斜率是两变量对应的比例常数；曲线发生偏移，存在多种影响因素，斜率突变的对应年份是两个累积关系出现突变的时间^[23]。研究中利用双累积曲线将基流过程分为三个阶段。

2 结果分析

2.1 趋势性、持续性、突变性

昕水河流域 1955-2015 年多年平均基流量和多年基流指数分别为 0.45 亿 m^3 、0.368 (多年平均径流量为 1.23 亿 m^3)。1955-2015 年昕水河流域年基流量呈显著下降趋势 ($Z=-3.54$, $P<0.01$) (图2)。1985年前的基流量高于基流多年平均值，该时期的平均基流量为 14.43 mm。1985年后的平均基流量为 8.24 mm，多数年份基流量低于多年平均基流量。到21世纪初 (2001年)，基流量有所回升。该流域基流未来变化趋势与其历史变化趋势有长期相关性，基流有进一步减少趋势 ($H>0.5$)。

2.2 基流周期性变化

昕水河流域基流呈现20~32年、6~19年、3~5年共三个尺度周期变化特征(图3)。基流小波方差具有三个较为明显峰值27年、15年、10年。在5年以下尺度,没有明显的周期性规律。在靠近10年和15年的尺度上,周期趋于平稳,规律趋于明显。在20~32年尺度上,表现出丰—枯交替的准三次震荡。整个时间段,约以27年为中心的周期变化,表现为丰—枯的三个循环交替,小波方差第一峰值27年,是基流变化的第一主周期。

2.3 昕水河流域基流变化的驱动因素分析

昕水河流域降水—基流双累积曲线的趋势显示(图4),以1985年和2001年将水文序列划分为三个阶段:第一阶段1955-1985年,第二阶段1986-2001年,第三阶段2002-2015年。气象因素和人类活动都会引起流域水文效应的变化,是基流变化的重要原因。与基流相关的因素包括流域面积、流域坡度、河网密度、森林覆盖率等一系列土壤和地质指标^[24],下垫面在一定时间尺度上不会发生变化。本文的气象因素主要分析降水和潜在蒸散发。

2.3.1 降水和潜在蒸散发对基流的影响

昕水河流域降水呈减少趋势,突变点出现在1978年(表2),潜在蒸散发呈极显著减少趋势($Z=-2.51$, $P<0.01$),在2002年发生突变。降水和潜在蒸散发的未来与历史变化趋势有长期正相关性,未来的降水和潜在蒸散发有进一步减少的趋势($H>0.50$)。对基流与降水和潜在蒸散发进行相关性分析,基流与降水呈显著正相关($P<0.01$)。流

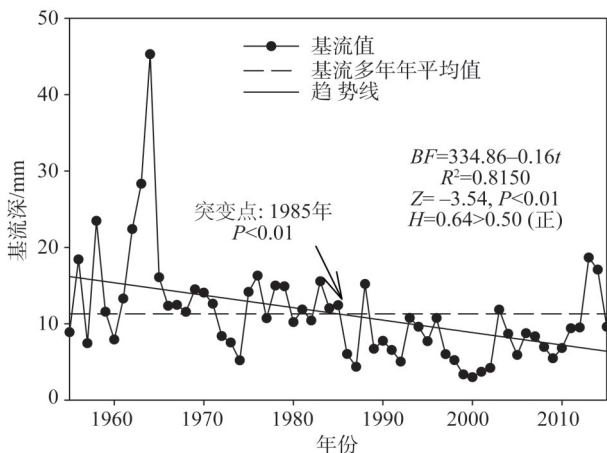


图2 1955-2015年昕水河流域基流年际变化趋势

Fig. 2 The tendency of the interannual change of base flow in Xinshui River Basin from 1955 to 2015

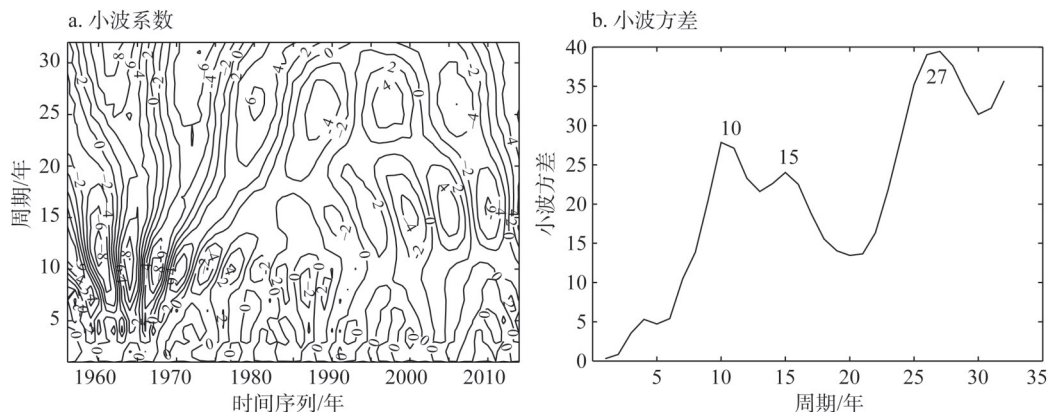


图3 1955-2015年昕水河流域基流小波系数实部等值线和小波方差

Fig. 3 Wavelet coefficient of base flow and Wavelet variance of Xinshui River during 1955-2015

域潜在蒸散发对基流量减少的影响不大, 降水是影响基流变化的主要气象因素。

昕水河流域降水演化过程呈现多尺度特征 (图5), 降水小波方差图中有4个较为明显的峰值。5年以下尺度, 没有明显的周期性规律。在靠近10年和20年的尺度上, 周期趋于平稳, 规律趋于明显。20~32年尺度上, 出现丰—枯交替的准三次震荡, 在整个时间段上约是以28年为中心的周期变化, 对应小波方差第一峰值28年时间尺度, 是降水变化的第一主周期, 为丰—枯的三个循环交替。降水与基流具有相同周期性变化。

在第一阶段和第二阶段, 降水与基流呈显著正相关 ($P<0.01$), 降水是影响基流的主要因素, 第三阶段, 降水与基流呈正相关 ($P<0.05$)。昕水河流域基流减少与降水量变化有关, 但基流和降水变化规律并不完全一致。第三阶段, 在其他自然条件相对不变的情况下, 人类活动逐渐成为影响基流的主要因素。

2.3.2 人类活动对基流的影响

本文利用 GIMMS-NDVI 遥感数据, 采用归一化植被指数 NDVI (Normalization Dif-

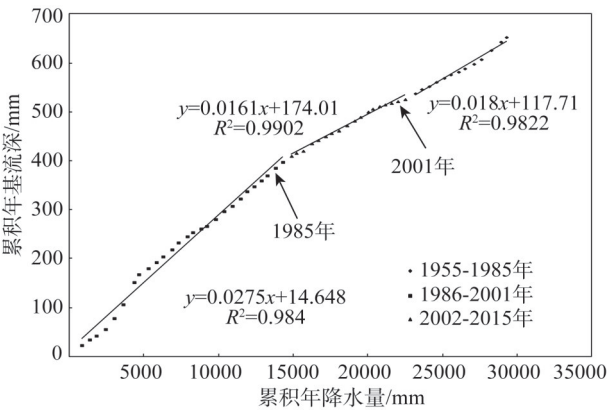


图4 1955-2015年昕水河流域基流深和降水量的双累积曲线

Fig. 4 Double mass curve of base flow depth and precipitation of Xinshui River Basin during 1955-2015

表2 昕水河流域降水和潜在蒸散发的趋势性、突变性和持续性分析

Table 2 Trend, mutability and persistence of precipitation and potential evapotranspiration in Xinshui River Basin

| 因子 | MK 检验 | | | Pettitt 检验 | | H 指数 |
|-------|-------|-------|-------|------------|-------|-----------------|
| | Z 值 | 显著性/% | Sen's | 年份 | 显著性/% | |
| 降水 | -1.53 | 90 | -1.48 | 1978 | 95 | 0.51>0.50 正持续效应 |
| 潜在蒸散发 | -2.51 | 99 | -1.36 | 2002 | 95 | 0.61>0.50 正持续效应 |

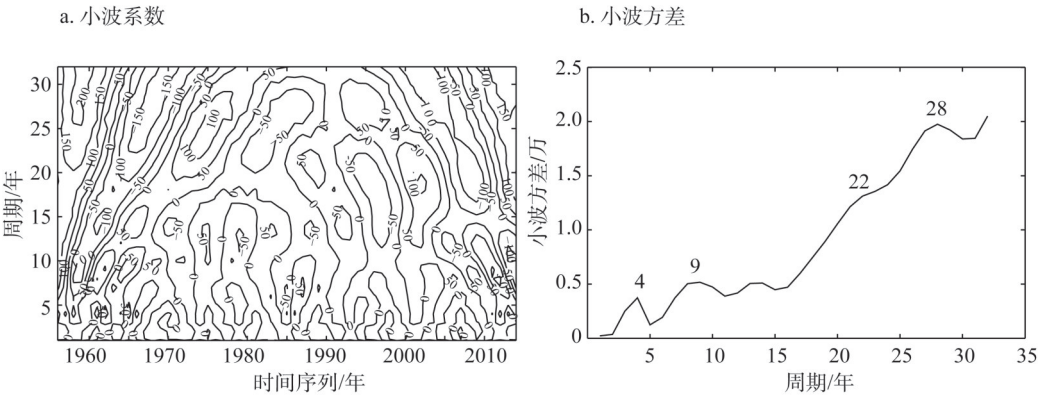


图5 1955-2015昕水河流域年降水小波系数实部等值线和方差

Fig. 5 Xinshui River wavelet coefficient of precipitation and wavelet variance during 1955-2015

ference Vegetation Index) 代表植被覆盖度的大小(图6a), 植被覆盖度的变化会影响基流指数的变化。在研究的第二、第三阶段(图6b), 基流指数和植被覆盖度呈显著正相关($P<0.01$), 第二阶段植被覆盖度和基流指数值相对稳定; 进入第三阶段, 降水量基本保持稳定, 基流量在该阶段减少幅度小于径流量减少幅度, 基流指数呈现增高趋势。植被覆盖度的突变点出现在2002年, 对应基流指数发生变化。第三阶段植被覆盖度成为影响基流的重要因素。基流指数随植被覆盖度的增大逐渐增大。这是由于黄河源区植被根系发达, 具有浅层分布和根系层结构致密等特点, 植被覆盖度增加, 径流减小, 基流指数增大^[6], 使壤中流在径流中比例提高, 流域保持水土能力增强。

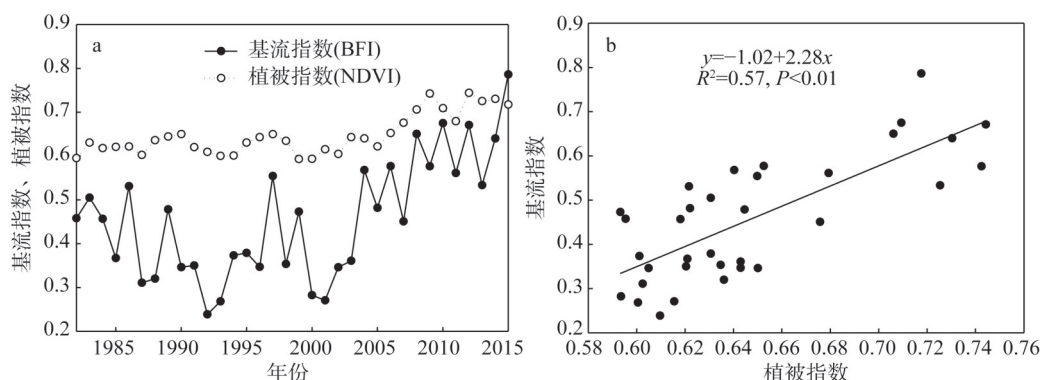


图6 基流指数与植被指数趋势图与植被指数与基流指数相关性分析图

Fig. 6 The tendency chart of base flow index and vegetation index and correlation analysis diagram of vegetation index and base flow index

地下水开采和非汛期灌溉引水量增加会减少基流, 因为地下水开采会导致地下水侧向排泄量减少, 从而减少河川基流量。黄河流域地下水开采量从1980年的92.4亿 m^3/a 上升到2003年的133.08亿 m^3/a , 增加了31%^[2]。地下水开采量的增加、重复利用率低和不合理的开发利用方式, 会导致地下水不断减少, 进而减少基流量^[7]。同时, 影响基流变化的人类活动还包括区域内煤矿开采产生的大量疏水物质、含水层遭到破坏等^[10]。山西省每年因煤矿破坏的地下水资源约达3亿 m^3/a , 河流基流量补给量减少^[2]。

水土保持措施通过拦截部分降水入渗补给地下水影响基流, 用基流指数变化代表水土保持措施对基流量的影响。研究表明, 20世纪60年代中期, 昕水河流域水土保持措施面积总体较少且变化较为稳定; 20世纪70年代, 林地面积显著增加, 水利工程建设影响径流。截至1999年, 共修建两座中小型水库, 总库容710万 m^3 , 修建骨干工程12座, 总控制面积61 km^2 ; 淤地坝885座, 谷坊3867道, 水窖19554眼; 梯田17951 hm^2 , 乔木林23793 hm^2 , 种草3332 hm^2 , 淤成坝地1794 hm^2 ^[11]。21世纪以来, 草地和坝地面积明显增加, 植被覆盖度增加, 基流量在该阶段减少幅度小于径流量减少幅度。因此, 进入21世纪, 基流指数呈上升趋势, 基流量仍呈显著下降趋势, 这是由于降水量变化和水土保持措施综合作用所引起的。在第一、第二阶段年径流量呈下减趋势(图7), 基流指数基本保持稳定, 进入第三阶段, 基流指数呈增加趋势。

2.3.3 降水和人类活动对基流量贡献率计算

昕水河流域基流量与降水量变化具有同步性(表3), 与第一阶段相比, 降水第二、

第三阶段分别减少了 75.72 mm 和 9.37 mm，相对减少率分别为 14.31% 和 1.77%；基流量分别减少 7.13 mm 和 5.06 mm，相对减少率分别为 49.41% 和 35.07%；基流量随降水量减少而减少。

与第一阶段相比，第二阶段降水和人类活动对基流的影响比例分别为 25.89% 和 74.11%，第三阶段降水和人类活动对基流影响比例分别为 0.37% 和 99.63%。在第三阶段，人类活动逐渐成为影响基流的主要因素（图 8）。

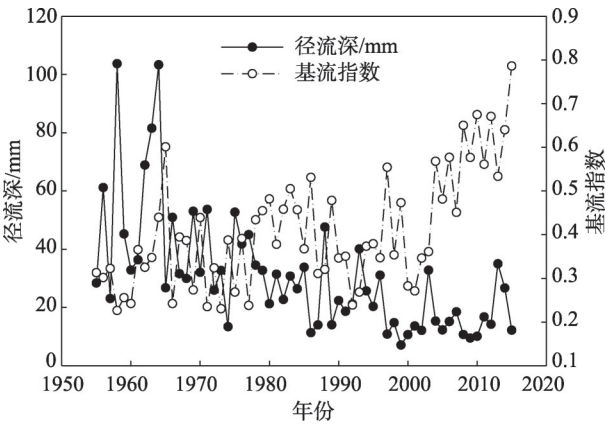


图 7 昕水河流域年径流深与基流指数过程线
Fig. 7 The annual runoff depth and base flow index process line in Xinshui River Basin

3 结论

本文采用国内外通用的数字滤波法（3 次， $\alpha=0.925$ ），可较好地应用于黄土高原中尺度流域（昕水河流域）的基流划分。1955-2015 年多年平均基流量和基流指数分别为 0.45 亿 m^3 和 0.368。黄土高原中尺度流域基流在 1955-2015 年间，呈现显著下降趋势，突变点出现在 1985 年。未来基流有进一步减少趋势。基流具有周期性变化，基流变化周期为 27 年。在黄土高原中尺度流域，降水和人类活动变化是影响基流量变化的直接和根本原

表 3 不同时间段基流与降水变化

Table 3 Change of base flow and precipitation in different time periods

| 时期 | 降水 | | | | 基流 | | | |
|------|--------|--------|----------|---------|-------|-------|----------|---------|
| | 累积斜率 | 均值/mm | 降水变化量/mm | 降水变化率/% | 累积斜率 | 均值/mm | 基流变化量/mm | 基流变化率/% |
| 第一阶段 | 517.08 | 529.31 | — | — | 13.95 | 14.43 | — | — |
| 第二阶段 | 454.72 | 453.59 | -75.72 | -14.31 | 7.45 | 7.30 | -7.13 | -49.41 |
| 第三阶段 | 516.42 | 519.94 | -9.37 | -1.77 | 9.16 | 9.37 | -5.06 | -35.07 |

注：第一阶段：1955-1985 年；第二阶段：1986-2001 年；第三阶段：2002-2015 年。

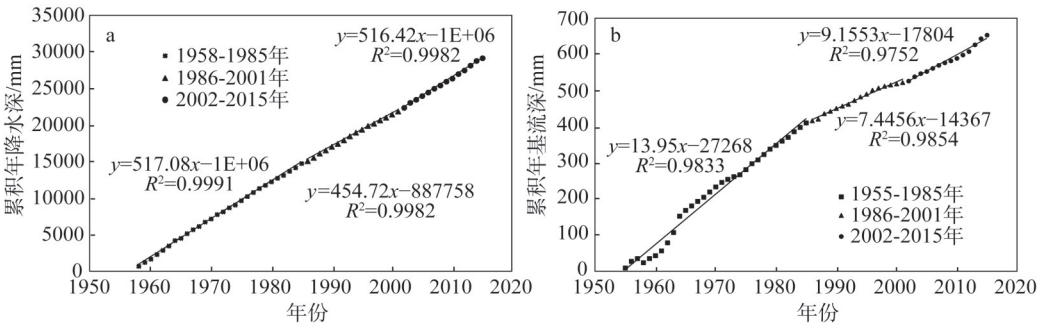


图 8 基流及降水累积曲线
Fig. 8 Base flow and precipitation accumulation curve

因,人类活动中植被覆盖度变化、地下水开发、煤矿开采和实施水土保持措施影响基流。与第一阶段相比,第二阶段降水和人类活动对基流影响比例分别为25.89%和74.11%,第三阶段降水和人类活动对基流影响比例分别为0.37%和99.63%。自21世纪初,人类活动逐渐成为影响基流变化的主要因素。

参考文献(References):

- [1] 陈利群,刘昌明,李发东,等.基流研究综述.地理科学进展,2006,25(1): 1-15. [CHEN L Q, LIU C M, LI F D, et al. Reviews on base flow researches. Progress in Geography, 2006, 25(1): 1-15.]
- [2] 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.自然资源学报,2008,23(3): 479-486. [WANG Y L, WANG W K, QIAN Y P, et al. Change characteristics and driving forces of base flow of Yellow River Basin. Journal of Natural Resources, 2008, 23(3): 479-486.]
- [3] 刘昌明,成立.黄河干流下游断流的径流序列分析.地理学报,2000,55(3): 257-265. [LIU C M, CHENG L. Analysis on runoff series with special reference to drying up courses of lower Yellow River. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(3): 257-265.]
- [4] 刘昌明,张学成.黄河干流实际来水量不断减少的成因分析.地理学报,2004,59(3): 323-330. [LIU C M, ZHANG X C. Causal analysis on actual water flow reduction in the mainstream of the Yellow River. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(3): 323-330.]
- [5] 钱云平,蒋秀华,金双彦,等.黄河中游黄土高原区河川基流特点及变化分析.地球科学与环境学报,2004,26(2): 88-91. [QIAN Y P, JIANG X H, JIN S Y, et al. Analysis on the characteristic and variation of base flow in Loessial Plateau of the middle reaches of Huanghe River. Journal of Earth Sciences and Environment, 2004, 26(2): 88-91.]
- [6] 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.地学前缘,2008,15(4): 280-289. [LIANG S H, XU D W, WAN L, et al. Periodic regularity of the base flow in the headwater region of the Yellow River and affecting factors. Earth Sciences Frontiers, 2008, 15(4): 280-289.]
- [7] 白乐,李怀恩,何宏谋.降水和人类活动对秃尾河流域基流的影响.自然资源学报,2014,29(12): 2078-2088. [BAI L, LI H E, HE H M. Assessing the impacts of precipitation and human activities on base flow in the middle Tuwei River Basin of the Yellow River. Journal of Natural Resources, 2014, 29(12): 2078-2088.]
- [8] 刘柏君,雷晓辉,刘胜胜,等.皇甫川流域降水基流特征及其响应关系.人民黄河,2016,38(4): 7-12. [LIU B J, LEI X H, LIU Z S, et al. Respective characteristics and mutual response relationship of precipitation and base-flow in Huangfuchuan Basin. Yellow River, 2016, 38(4): 7-12.]
- [9] 刘微.1954-2010年皇甫川流域基流变化及原因分析.人民黄河,2014,36(8): 21-23. [LIU W. Analysis of the base flow variation and cause in Huangfuchuan from 1954 to 2010. Yellow River, 2014, 36(8): 21-23.]
- [10] 雷泳南,张晓萍,张建军,等.窟野河流域河川基流量变化趋势及其驱动因素.生态学报,2013,33(5): 1559-1568. [LEI Y N, ZHANG X P, ZHANG J J, et al. Change trends and driving factors of base flow in Kuye River Catchment. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1559-1568.]
- [11] 郭军庭,张志强,王盛萍,等.黄土丘陵沟壑区小流域基流特点及其影响因子分析.水土保持通报,2011,31(1): 87-92. [GUO J T, ZHANG Z Q, WANG S P, et al. Features of baseflow and its influencing factors for small watersheds in Loess Hilly and Gully region. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(1): 87-92.]
- [12] 王国庆,张建云,李雪梅,等.黄土高原昕水河流域径流变化及其对环境要素的响应.水土保持研究,2014,21(3): 192-196. [WANG G Q, ZHANG J Y, LI X M, et al. Runoff variation of the Xinsuihe River catchment and its response to environment change on the Loess Plateau. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(3): 192-196.]
- [13] TUCKER C J, PINZON J E, BROWN MOLLY E, et al. An extended AVHRR 8 km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(20): 4485-4498.
- [14] 刘昌明,张丹.中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析.地理学报,2011,66(5): 579-588. [LIU C M, ZHANG D. Temporal and spatial change analysis of the sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological in-

- fluencing factors in China. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(5): 579-588.]
- [15] 张晓萍, 张鲁, 王勇, 等. 黄河中游地区年径流对土地利用变化时空响应分析. *中国水土保持科学*, 2009, 7(1): 19-26. [ZHANG X P, ZHANG L, WANG Y, et al. Tempo-spatially responses of the annual streamflow to LUCC in the middle reaches of Yellow River, China. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(1): 19-26.]
- [16] ECKHARDT D K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes*, 2005, 19(2): 507-515.
- [17] ARNOLD J G. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi River Basin. *Journal of Hydrology*, 2000, 227(1): 21-40.
- [18] NATHAN R J. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research*, 1990, 26(7): 1465-1473.
- [19] MANN H B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259.
- [20] 俞方圆. 近 50 年东北地区气候变化及其对河川径流和泥沙的影响研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011. [YU F Y. Climate change and its impacts on river runoff and sediment in Northeast China during the past 50 years. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2011.]
- [21] 谢平, 雷红富, 陈广才, 等. 基于 Hurst 系数的流域降雨时空变异分析方法. *水文*, 2008, 28(5): 6-10. [XIE P, LEI H F, CHEN G C, et al. A spatial and temporal variation analysis method of watershed rainfall based on Hurst coefficient. *Journal of China Hydrology*, 2008, 28(5): 6-10.]
- [22] 王文圣. 水文小波分析. 北京: 化学工业出版社, 2005. [WANG W S. *Hydrology Wavelet Analysis*. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.]
- [23] 穆兴民, 张秀勤, 高鹏, 等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题. *水文*, 2010, 30(4): 47-51. [MU X M, ZHANG X Q, GAO P, et al. Theory of double mass curves and its applications in hydrology and meteorology. *Journal of China Hydrology*, 2010, 30(4): 47-51.]
- [24] MEI Y, ANAGNOSTOU E N. A hydrograph separation method based on information from rainfall and runoff records. *Journal of Hydrology*, 2015, 523: 636-649.

Baseflow variation and driving factors for the last six decades in a watershed on the Loess Plateau, Northern China

KANG Xiao-yu^{1,2,3,4}, ZHANG Zhi-qiang^{1,2,3,4}, CHEN Li-xin^{1,2,3,4},
LENG Man-man^{1,2,3,4}, YANG Feng-wei⁵

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation, State Forestry Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. National Field Research Station of Forest Ecosystem, Jixian 042200, Shanxi, China; 4. Beijing Water and Soil Conservation Engineering Technology Research Center, Beijing 100083, China; 5. National Forestry Administration Eucalyptus Research and Development Center, Zhanjiang 524022, Guangdong, China)

Abstract: As an important part of streamflow and water cycle in a watershed, base flow can not only provide reliable water supply but also maintain healthy watershed ecologically and environmentally. It is of great significance to divide the base flow accurately from the measured streamflow and to analyze its variations for understanding the dynamics of base flow

changes and managing water resources. We used the measured daily streamflow data from Daning Hydrological Station of Xinshui River Basin (3992 km²) located on the Loess Plateau of northern China, climate data measured by meteorological stations and raingauge stations located within and in the vicinity of the basin from 1955 to 2015 and the GIMMS-NDVI data to explore the dynamic changes of base flow. Base flow partitioning was conducted by using digital filtering method (3 times, $\alpha=0.925$) from the daily streamflow data. Mann-Kendall test, Pettitt test, wavelet analysis and Hurst test were performed to explore the base flow changes in the aspects of trend, turning point, periodic behavior, and sustainability at annual scales. Averaged annual base flow from the basin was 45 million m³ and the base flow index (BFI) was 0.368 between 1955 and 2015. There were significant decreasing trends for yearly base flow ($P<0.01$), with the turning points occurring in the year of 1985. In addition, a 27-year periodical cycle was observed for annual base flow. It was predicted that the annual base flow will be further reduced in the future as indicated by a positive correlation between historical change and the future regime ($H>0.50$). Double mass analysis indicated that climate variability and human activities have contributed to a significant decrease in base flow. Precipitation was the major climate factor rather than temperature, which caused the decrease of base flow. The base flow is divided into three stages by the double mass curve method. Human activities affected the base flow by changing vegetation coverage, exploiting groundwater, mining coals and taking measures in soil and water conservation. Compared with the first stage, the proportion of precipitation and human activities in the second and third stages was 25.89%, 74.11% and 0.37%, 99.63%, respectively. There has been an increased impact of human activities on the decreased base flow since the beginning of the 21st century.

Keywords: Loess Plateau; middle-scale watershed; base flow variation; driving factors