

DOI: 10.5846/stxb201710121828

张丽梅, 赵广举, 穆兴民, 高鹏, 孙文义. 基于 Budyko 假设的渭河径流变化归因识别. 生态学报, 2018, 38(21): - .

Zhang L M, Zhao G J, Mu X M, Gao P, Sun W Y. Attribution of runoff variation in the Wei River basin based on the Budyko hypothesis. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): - .

## 基于 Budyko 假设的渭河径流变化归因识别

张丽梅<sup>1</sup>, 赵广举<sup>1,2,\*</sup>, 穆兴民<sup>1,2</sup>, 高鹏<sup>1,2</sup>, 孙文义<sup>1,2</sup>

1 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

2 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100

**摘要:** 定量评价河川径流量变化特征, 开展其归因识别研究是制定气候变化应对策略与合理利用水资源的基础。以渭河流域为研究区, 采用 Mann-Kendall 趋势检验法、双累积曲线等方法分析渭河流域 1958—2015 年的气候、水文要素变化特征, 采用基于 Budyko 水热耦合平衡理论的水量平衡法估算径流变化对各驱动因素的弹性系数, 定量评价气候变化和人类活动对径流变化的贡献率。结果表明: 渭河流域咸阳、张家山、状头站的年径流量呈显著减少趋势, 径流深减少速率分别为:  $-1.520$ 、 $-0.501$ 、 $-0.322$  mm/a。3 个站控制流域面平均降雨量呈非显著性减少趋势, 年潜在蒸散发呈非显著增加趋势。剧烈的人类活动如工农业用水、大规模水土保持措施的实施及退耕还林草等引起的下垫面变化是径流量减少的主要因素, 渭河干流和泾河流域下垫面变化对径流减少的贡献率均超过了 60%, 降雨变化贡献次之, 潜在蒸散发的影响最小。

**关键词:** 渭河流域; 径流量; 气候变化; 人类活动; 归因分析; Budyko 水热耦合平衡方程

## Attribution of runoff variation in the Wei River basin based on the Budyko hypothesis

ZHANG Limei<sup>1</sup>, ZHAO Guangju<sup>1,2,\*</sup>, MU Xingmin<sup>1,2</sup>, GAO Peng<sup>1,2</sup>, SUN Wenyi<sup>1,2</sup>

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

**Abstract:** In recent years, numerous rivers around the world have shown significant changes in runoff due to climate change and human activities. Investigating the causes of changes in runoff is greatly helpful in adapting to climate change and intensive human activities. The present study applied the Mann-Kendall test and the double mass curve method to assess the temporal trends of hydro-climatic variables in the Wei River basin during 1958—2015. The results showed that annual runoff at all three hydrological stations (Xianyang, Zhangjiashan, and Zhuangtou) exhibited a significant decreasing trend ( $P < 0.05$ ). Annual rainfall and potential evapotranspiration showed decreasing and increasing trends, respectively, but neither were significant. Double mass curve analysis between annual runoff and precipitation showed abrupt changes in annual runoff in the Wei River basin. The periods before abrupt-change points, when runoff retained relatively pristine status and was affected by limited human activities, were regarded as baseline periods. Using the abrupt-change points, we obtained baseline periods of 1958—1970, 1958—1996, and 1958—1992 at Xianyang, Zhangjiashan, and Zhuangtou stations, respectively. The runoff elastic coefficients at each station were estimated using the Budyko hydrothermal equilibrium equation. The results showed that runoff depth was sensitive to the changes in land surface. Compared with runoff in the mainstream Wei River and the Jing River, runoff in the Beiluo River was less sensitive to climate changes.

**基金项目:** 国家重点研发计划(2016YFC0402401); 国家自然科学基金(41671279; 41671285); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室专项经费(A314021403-Q2)

收稿日期: 2017-10-12; 网络出版日期: 2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gjzhao@ms.iswc.ac.cn

Land surface changes played a dominant role in runoff reduction, followed by precipitation and potential evapotranspiration. Particularly in the mainstream Wei River and Jing River, land surface changes resulting from various human activities contributed more than 60% of runoff reduction.

**Key Words:** Wei River basin; runoff; climate variability; human activity; attribution analysis; Budyko equation

水资源是社会、经济和生态环境可持续发展的重要基础。河川径流是水资源最重要的存在形式和组成部分之一,是生产生活用水的最主要来源<sup>[1]</sup>。受到气候变化和人类活动的共同影响,全球许多河流的河川径流量发生了显著变化,严重威胁着区域水资源状况<sup>[2-3]</sup>,揭示径流变化的主要驱动力是全球水资源预测的关键,也是维持淡水资源可持续利用的基础<sup>[4-5]</sup>。

渭河流域位于黄河中游,是甘肃和陕西的母亲河,也是关中地区工农业取水用水的主要来源,是该地区经济社会发展的保障<sup>[6]</sup>。近年来,渭河径流量发生了显著变化,其变化原因引起了相关管理部门与研究人员的极大关注<sup>[7]</sup>。郭爱军等<sup>[8]</sup>研究发现人类活动对径流变化的影响作用处于主导地位,气候变化的影响呈不明显的增加趋势。毕彩霞等<sup>[9]</sup>采用水量平衡法以渭河流域的华县站为例研究 1958—2011 年径流减少的影响因素,结果表明:降雨变化和人类活动的贡献率分别为 49.0% 和 51.0%。Guo 等<sup>[10]</sup>研究渭河上游径流变化的驱动因素,结果表明,人类活动对径流的贡献占 59%—77%。Huang 等<sup>[11]</sup>分析了渭河不同年代际的径流变化及其原因,发现较 1960s 气候变化在 20 世纪 70 年代和 90 年代占主要因素,而人类活动在 20 世纪 80 年代和 2000 年之后起主导作用。尽管前人已经开展了许多关于渭河流域径流变化特征的研究,并识别其变化的主要驱动力,但研究结果仍存在较大的差异。

流域蒸散发在年尺度上受降水和蒸发能力两个因素控制,基于此理论,Budyko 提出了流域水量与能量(太阳辐射产生的能量)耦合平衡方程的构想,即 Budyko 假设<sup>[12]</sup>。目前,许多研究人员根据气象和径流资料在全球多个地区验证了 Budyko 假设的成立<sup>[13-15]</sup>。研究发现,影响流域水量平衡的因素除了蒸散和降水外,还包括以下两类因素的影响:一类是下垫面对流域的影响,包括土壤属性、地形、植被变化等<sup>[14-17]</sup>;另外一类为除蒸散和降水量以外的气候因子,包括降雨深度、降雨频次等<sup>[18]</sup>。因此,近年来许多学者提出了一系列反映下垫面因素的 Budyko 经验公式,如 Zhou 等<sup>[19]</sup>和杨大文等<sup>[20]</sup>分别就下垫面参数进行了推导和验证,研究表明 Budyko 解析式方程遵循能量和水分边界条件。基于 Budyko 水热耦合平衡理论的水量平衡法对定量区分气候和下垫面变化对流域径流的影响具有广阔的应用前景<sup>[21-22]</sup>,国内学者杨大文等<sup>[20]</sup>和孙福宝等<sup>[23]</sup>已证实了 Budyko 水热耦合平衡方程在黄河流域的适用性。

本研究在深入辨析渭河流域径流、降水、蒸发变化的基础上,采用 Budyko 水热耦合平衡方程估算流域年径流变化的气候和人类活动的弹性系数,量化降雨、蒸发以及下垫面变化对径流变化的影响,识别渭河径流锐减的原因,以为渭河流域水资源规划以及流域综合治理提供理论支持。

## 1 研究区与数据获取

### 1.1 研究区概况

渭河是黄河水量最多、面积最大的一级支流,流域面积 13.48 万 km<sup>2</sup>(103°55′—110°20′E, 33°40′—37°25′N)(图 1)。渭河发源于甘肃省渭源县鸟鼠山,由西向东流经甘肃、宁夏、陕西三省,于陕西省潼关县附近汇入黄河。渭河干流全长为 818 km,支流较多;第一大支流泾河,河长 455.1 km,流域面积为 4.54 万 km<sup>2</sup>;第二支流为北洛河,河长 680 km,流域面积为 2.70 万 km<sup>2</sup>。渭河流域多年平均降雨量约为 550.8 mm(1958—2015 年),在空间分布上呈现南多北少,山区降雨量大于河谷盆地,且多年平均潜在蒸散量为 995.0 mm(1958—2015 年)。

### 1.2 数据来源与处理

本文选取渭河流域咸阳、张家山、状头 3 个水文站点(表 1),年径流量数据来源于中国水文水资源科学数

据共享网和《黄河泥沙公报》等。本文选择了渭河流域 22 个气象站(图 1),数据采用中国气象数据共享网(<http://data.cma.cn>) 1958—2015 年逐月气象资料,包括降水量、平均气温、最高和最低气温、日照时数、平均风速、相对湿度等。本文采用 FAO 修正的 Penman-Monteith 公式<sup>[24]</sup>计算潜在蒸散发,计算公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中, $ET_0$ 为潜在蒸散量(mm/d); $\Delta$ 为饱和水汽压曲线斜率(kPa/°C); $R_n$ 为太阳净辐射( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ); $G$ 为土壤热通量( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ); $\gamma$ 为干湿常数(kPa/°C); $U_2$ 为 2 m 高处的风(m/s); $T$ 为平均气温(°C); $e_s$ 为平均饱和水汽压(kPa), $e_a$ 为实际水汽压(kPa), $(e_s - e_a)$ 为饱和水汽压差(kPa)。根据月气象资料计算得到潜在蒸发量,并统计不同季节和年潜在蒸发量。季节的划分采用气象季节即 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12—次年 2 月为冬季。

表 1 水文站基本情况

Table 1 Characteristics of the hydrological stations

流域 Watershed	站点 Station	经度 Longitude	纬度 Latitude	集水面积 Catchment area/ $\text{km}^2$	年均降雨量 Annual precipitation/mm	年均径流量 Annual runoff / $\times 10^8 \text{m}^3$	水文年份 Hydrological years
渭河	咸阳	108°42'E	34°19'N	46827	632.5	38.03	1958—2015 年
泾河	张家山	108°36'E	34°38'N	43216	503.8	15.33	1958—2015 年
北洛河	状头	109°50'E	35°02'N	25154	479.7	8.00	1958—2015 年

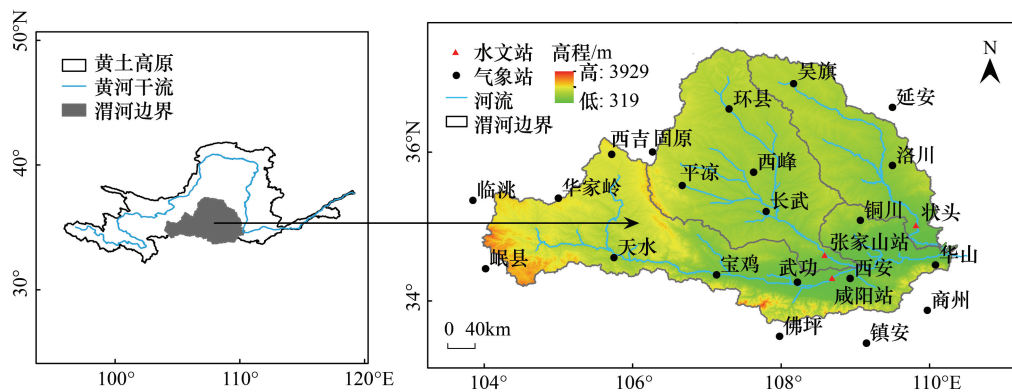


图 1 渭河流域水文站点和气象站点分布图

Fig.1 Locations of hydro-climatic stations in the Wei River basin

## 2 方法

### 2.1 Mann-Kendall 趋势检验

Mann-Kendall 趋势检验法,在气候和水文序列变化趋势分析中应用广泛,可以确定气候及水文时间序列变化趋势的显著性<sup>[25]</sup>。

### 2.2 双累积曲线

利用径流量与降雨量的双累积曲线,研究直线斜率的变化过程,直线斜率发生明显偏离的点对应径流量开始发生显著变化的年份<sup>[26]</sup>。

### 2.3 径流变化归因识别

基于 Budyko 水热耦合平衡理论的水量平衡法是区分气候和下垫面变化对径流变化贡献的有效方法。该方法与传统的数理统计方法相比,其物理意义更加明显,所用参数相对易获取,计算方法较简单,是研究河川

径流变化年序列尺度上一种有效且理想的分析方法,在研究气候和下垫面变化对径流影响程度时被广泛应用<sup>[27]</sup>。

### 2.3.1 水量平衡方程

流域水量平衡方程为:

$$R = P - ET - \Delta S \quad (2)$$

式中, $R$ 为径流深(mm); $P$ 为降水量(mm); $ET$ 为实际蒸散量(mm); $\Delta S$ 为储水量变化(mm)。

在流域尺度上,径流深和降雨量可通过实际观测获得,实际蒸散量可采用 Budyko 假设计算获取。Choudhury<sup>[13]</sup>和 Yang<sup>[28]</sup>等基于 Budyko 假设,推导出流域水热耦合平衡方程,表达式如下:

$$ET = \frac{P \times ET_0}{(P^\omega + ET_0^\omega)^{1/\omega}} \quad (3)$$

式中, $ET_0$ 为年平均潜在蒸散量(mm); $\omega$ 为下垫面特征参数。

下垫面特征参数( $\omega$ )是控制 Budyko 曲线形状的参数,其主要反映下垫面特征对流域水平衡的综合影响<sup>[29-30]</sup>,在本流域中主要表现为植被变化对流域蒸散发的影响。分析长时间水文序列,储水量的变化( $\Delta S$ )一般假定为零值<sup>[27]</sup>,即在假定储水量不变的情况下,对多年平均尺度及年际尺度的弹性系数进行计算。结合(2)、(3)式,水量平衡方程可以表示为如下公式:

$$R = P - \frac{P \times ET_0}{(P^\omega + ET_0^\omega)^{1/\omega}} \quad (4)$$

式中,已知 $R, P$ 和 $ET_0$ 可求算 $\omega$ 值。

### 2.3.2 敏感性分析

由于水量平衡方程(4)式可表示为 $R=f(P, ET_0, \omega)$ ,径流对特定独立变量 $x$ 的弹性系数可采用下式表示:

$$\varepsilon_{x_i} = \frac{\partial R}{\partial x_i} \times \frac{x_i}{R} \quad (5)$$

式中, $\varepsilon_{x_i}$ 是径流对特定独立变量 $x_i$ 的弹性系数(Elasticity coefficient), $x_i$ 表示 $P, ET_0$ 或 $\omega$ 。假设:

$$\phi = \frac{ET_0}{P} \quad (6)$$

各变量的弹性系数计算如下<sup>[27]</sup>:

$$\varepsilon_P = \frac{(1 + \phi^\omega)^{1/\omega+1} - \phi^{\omega+1}}{(1 + \phi^\omega) [(1 + \phi^\omega)^{1/\omega} - \phi]} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{ET_0} = \frac{1}{(1 + \phi^\omega) [1 - (1 + \phi^{-\omega})^{1/\omega}]} \quad (8)$$

$$\varepsilon_\omega = \frac{\ln(1 + \phi^\omega) + \phi^\omega \ln(1 + \phi^{-\omega})}{\omega(1 + \phi^\omega) [1 - (1 + \phi^{-\omega})^{1/\omega}]} \quad (9)$$

某个变量弹性系数的正值表示径流深( $R$ )随着该变量的增加而增加,负值则表示径流深( $R$ )随着该变量的增加而减小,使用(7)–(9)式分别求得,可以获得径流对降水的弹性系数( $\varepsilon_P$ )、径流对潜在蒸散发的弹性系数( $\varepsilon_{ET_0}$ )和径流对下垫面的弹性系数( $\varepsilon_\omega$ )。

### 2.3.3 下垫面变化对径流变化的贡献

根据突变点将研究时期划分为不同时段,时段1的多年平均径流深为 $R^1$ ,时段2的多年平均径流深为 $R^2$ ,从时段1到时段2的年径流的变化可以用径流前后两时段的多年平均径流深之差( $dR$ )表示,即:

$$dR = R^2 - R^1 \quad (10)$$

同理,降水量( $dP$ )、潜在蒸散发( $dET_0$ )和下垫面( $d\omega$ )的变化表示为:

$$dP = P^2 - P^1 \quad (11)$$

$$dET_0 = ET_0^2 - ET_0^1 \quad (12)$$

$$d\omega = \omega^2 - \omega^1 \quad (13)$$

由一定因子引起的径流变化可以通过因子变化及其偏导数的乘积来估计。因此,每个因子对径流变化的贡献可以使用以下微分方程来计算:

$$dR' = \frac{\partial R}{\partial P}dP + \frac{\partial R}{\partial ET_0}dET_0 + \frac{\partial R}{\partial \omega}d\omega \quad (14)$$

式中, $dR'$ 为计算求得的径流深变化。上式可化简为:

$$dR' = dR_p + dR_{ET_0} + dR_\omega \quad (15)$$

$dR_p$ 、 $dR_{ET_0}$ 和 $dR_\omega$ 分别是气候变化( $P$ 和 $ET_0$ )和下垫面( $\omega$ )的变化引起的径流变化。

将(5)式代入,可表示为:

$$dR_{x_i} = \varepsilon_{x_i} \frac{R}{x_i} dx_i \quad (16)$$

每个因素对径流变化的相对贡献可以计算如下:

$$C_{x_i} = \frac{dR_{x_i}}{dR'} \times 100\% \quad (17)$$

式中, $x_i$ 表示 $P$ 、 $ET_0$ 或 $\omega$ , $C_{x_i}$ 表示各因子对径流变化的贡献率(Contribution rate)。

### 3 结果与分析

#### 3.1 渭河径流、降雨及潜在蒸发变化趋势分析

表 2 为渭河流域咸阳站、张家山站、状头站 1958—2015 年径流深的统计特征。由表可知,咸阳站多年平均径流深较张家山和状头站高,且极值差异显著,各站年径流深的极大值均出现在 1964 年。采用非参数 Mann-Kendall 趋势检验对各站径流深进行趋势分析得出:渭河流域各站径流深均呈显著减少趋势,且均达到 0.01 的显著性水平。图 2 为渭河流域各水文站 1958—2015 年径流深变化。通过线性趋势分析发现,咸阳站、张家山站、状头站的径流深减少速率分别为: -1.520、-0.501、-0.322 mm/a。

表 2 各水文站 1958—2015 年径流深变化特征

Table 2 Runoff depth changes from 1958—2015

站点 Station	平均值 Mean/mm	最大值 Maximum/mm	最小值 Minimum/mm	极值比 Max/Min	检验统计量 Test statistics	显著性水平 Significance level
咸阳	80.92	238.54(1964)	11.27(1995)	21.16	-4.15	0.01
张家山	35.60	96.82(1964)	15.73(2009)	6.15	-4.84	0.01
状头	31.98	80.11(1964)	13.91(1995)	5.76	-3.90	0.01

显著性水平为 0.05 时,统计检验临界值为 $\pm 1.96$ ;显著性水平为 0.01 时,统计检验临界值为 $\pm 2.58$ ;显著性水平为 0.1 时,统计检验临界值为 $\pm 1.28$

图 3 为渭河各流域 1958—2015 年降雨量和潜在蒸散量的年际变化过程线,并采用 MK 检验分析渭河干流区域、泾河流域、北洛河流域的降雨量和潜在蒸散量 1958—2015 年变化趋势,结果表明(表 3):各流域降雨量的检验统计量为负,但显著性水平均未达到 0.1,减少趋势不显著;潜在蒸发的检验统计量呈正值,但显著性水平均未达到 0.1,增加趋势不显著。

#### 3.2 渭河径流量变化的归因分析

##### 3.2.1 渭河干支流径流量突变特征

渭河流域降雨—径流双累积曲线如图 4 所示。从图中可以发现,渭河干流降水径流累积曲线于 1971 年以及 1993 年发生明显偏移,泾河和北洛河流域分别在 1997、1993 年发生偏移。降水—径流的双累积曲线在发生偏移前的阶段一般视作河川径流量未受人类活动干扰或干扰较小的时期,即基准期<sup>[31]</sup>。因此,可以确定渭河干流、泾河和北洛河流域的基准期分别为 1958—1970 年、1958—1996 年和 1958—1992 年,图中基准期后的



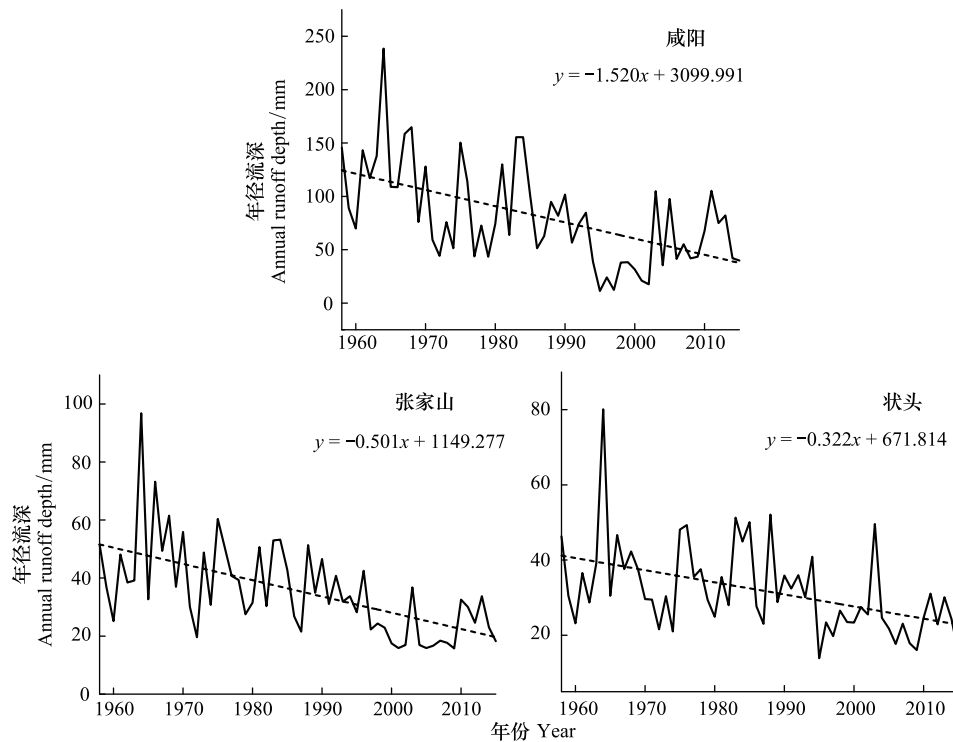


图2 咸阳站、张家山站、状头站 1958—2015 年径流深变化趋势

Fig.2 Variation of runoff depth at three stations during 1958—2015

累积曲线的斜率发生了一定程度的改变,曲线斜率变小,说明径流相对于降雨有了减少趋势,并以此将渭河流域径流序列划分为不同阶段,具体各个站点的划分时段见表 4。

表 3 渭河流域降雨量和潜在蒸发量 MK 检验分析结果

Table 3 MK test of annual precipitation and potential evaporation in the Wei River basin

流域 Watershed	年降雨量 Annual precipitation		年潜在蒸发量 Annual potential evaporation	
	检验统计量 Test statistics	显著性水平 Significance level	检验统计量 Test statistics	显著性水平 Significance level
渭河干流	-1.00	—	0.58	—
泾河	-0.73	—	0.58	—
北洛河	-1.04	—	0.92	—

表 4 渭河流域气象水文变量特征值

Table 4 Statistics in hydro-climatic variables of the Wei River basin

流域 Watershed	时期 Period	$ET_0/mm$	$R/mm$	$P/mm$	$\omega$	$R/P$	$ET_0/P$	弹性系数 Elasticity coefficient		
								$\varepsilon_P$	$\varepsilon_{ET_0}$	$\varepsilon_\omega$
渭河干流	1958—1970	891.9	129.7	674.6	2.08	0.19	1.32	2.51	-1.51	-1.32
	1971—1992	852.9	84.5	637.7	2.67	0.13	1.34	3.06	-2.06	-1.53
	1993—2015	912.7	50.0	603.7	2.97	0.08	1.51	3.51	-2.51	-1.99
泾河	1958—1996	964.8	42.2	508.1	2.33	0.08	1.90	3.02	-2.02	-2.25
	1997—2015	1039.2	22.1	495.0	2.72	0.04	2.10	3.50	-2.50	-2.83
状头	1958—1992	1085.7	36.6	488.0	2.14	0.08	2.23	2.89	-1.89	-2.47
	1993—2015	1147.7	24.9	467.2	2.26	0.05	2.46	3.06	-2.06	-2.83

$ET_0$ : 年平均潜在蒸散量, Annual average potential evapotranspiration;  $R$ : 径流深, Runoff depth;  $P$ : 降水量, Precipitation;  $\omega$ : 下垫面特征参数, Underlying surface feature parameters;  $R/P$ : 径流系数, Runoff coefficient;  $ET_0/P$ : 干旱指数, Drought index;  $\varepsilon_P$ : 降雨量的弹性系数, Elasticity coefficient of precipitation;  $\varepsilon_{ET_0}$ : 潜在蒸散发的弹性系数, Elasticity coefficients of potential evapotranspiration;  $\varepsilon_\omega$ : 下垫面特征参数的弹性系数, Elasticity coefficients of underlying surface feature parameters

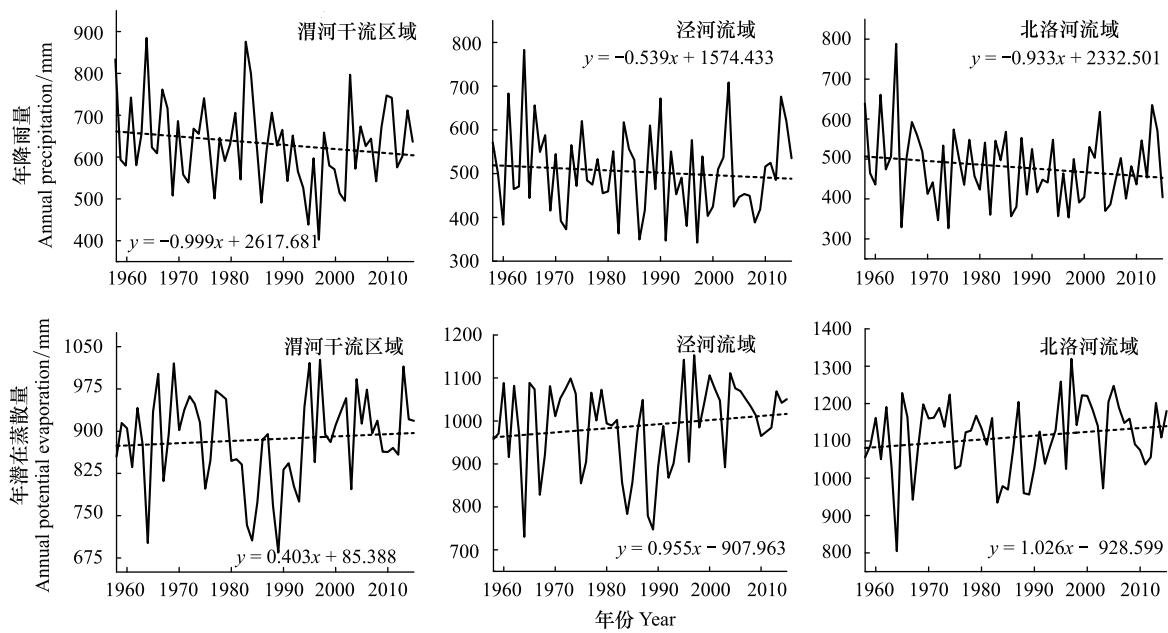


图 3 渭河流域 1958—2015 年降雨量和潜在蒸散量的变化趋势

Fig.3 Trends of annual precipitation and potential evaporation in the Wei River basin

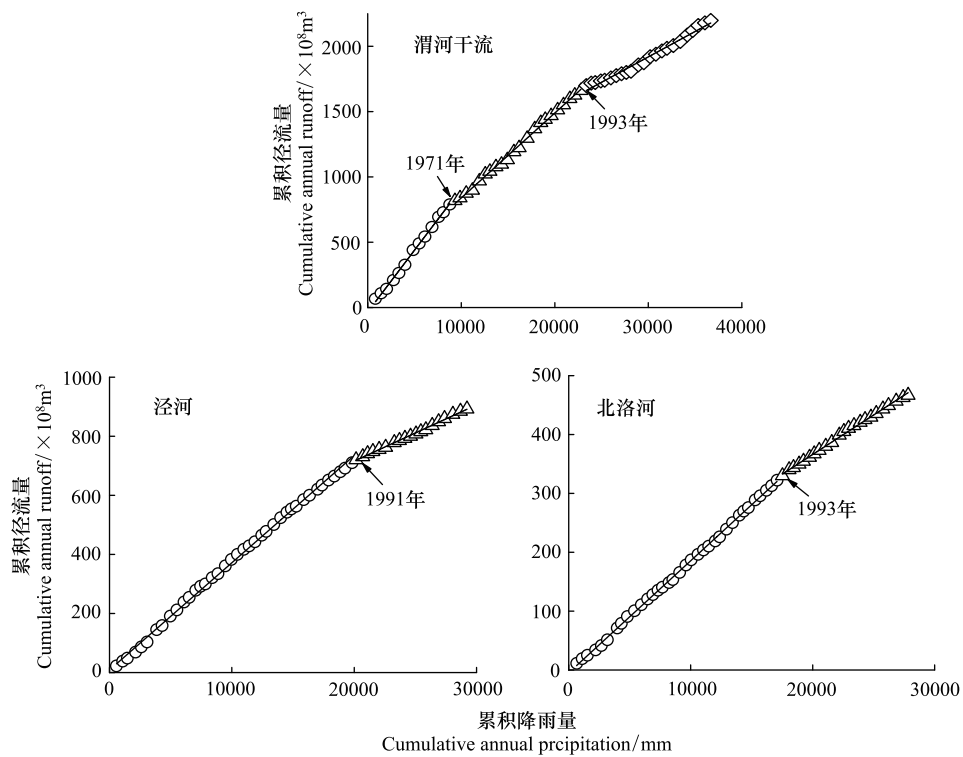


图 4 渭河流域径流-降雨双累积曲线

Fig.4 Double mass curve analysis between cumulative runoff and precipitation in the Wei River basin

### 3.2.2 径流对气候要素和下垫面变化的敏感性分析

表 4 列出了各流域各时段水文气候特征值和径流对潜在蒸散发、降水以及地表参数的弹性系数。各流域变化期的年平均降水、年均径流深均较基准期减少;除渭河干流区 1971—1992 年外,其余时段各流域年平均潜在蒸散量较基准期增加;干旱指数 ( $ET_0/P$ ) 较基准期增大,径流系数 ( $R/P$ ) 较基准期减小。

总体而言,径流与  $ET_0$ 、 $\omega$  呈负相关,但与  $P$  呈正相关。3 个弹性系数的绝对值最大的为  $P$ , 中间值为  $\omega$ , 最小的为  $ET_0$ 。  $ET_0$  的弹性系数范围为  $-2.51$ — $-1.51$ ,  $P$  为  $2.51$ — $3.51$ ,  $\omega$  为  $-2.83$ — $-1.32$ 。这些范围表明,  $ET_0$ 、 $P$  或  $\omega$  增加 1% 将导致 1.51%—2.51% 的下降, 2.51%—3.51% 的增加或 1.32%—2.83% 的径流减少。渭河干流区域的干旱系数均较小, 表明渭河干流气候较北洛河和泾河相对湿润。北洛河流域干旱指数大于 2.20, 径流系数较小, 年径流深约 32.0 mm, 属温带大陆性季风气候, 日照充足, 且雨量偏少。由表知, 弹性系数的绝对值在时间上均有增大趋势。

图 5 为 1958—2015 年各流域径流对气候和地表变化的年弹性系数, 其反映了气候与地表参数对径流影响不同时期的影响。由图可知, 渭河干流和泾河流域  $\varepsilon_p$  和  $\varepsilon_{ET_0}$  的绝对值显著增加 ( $P < 0.01$ ), 北洛河流域的增加趋势不显著, 这表明渭河干流和泾河流域径流深对气候变化的敏感性较高, 但北洛河流域的敏感性较差。3 个流域的  $\varepsilon_\omega$  的绝对值均显著增加 ( $P < 0.01$ ), 这表明径流深对下垫面条件的变化更为敏感。

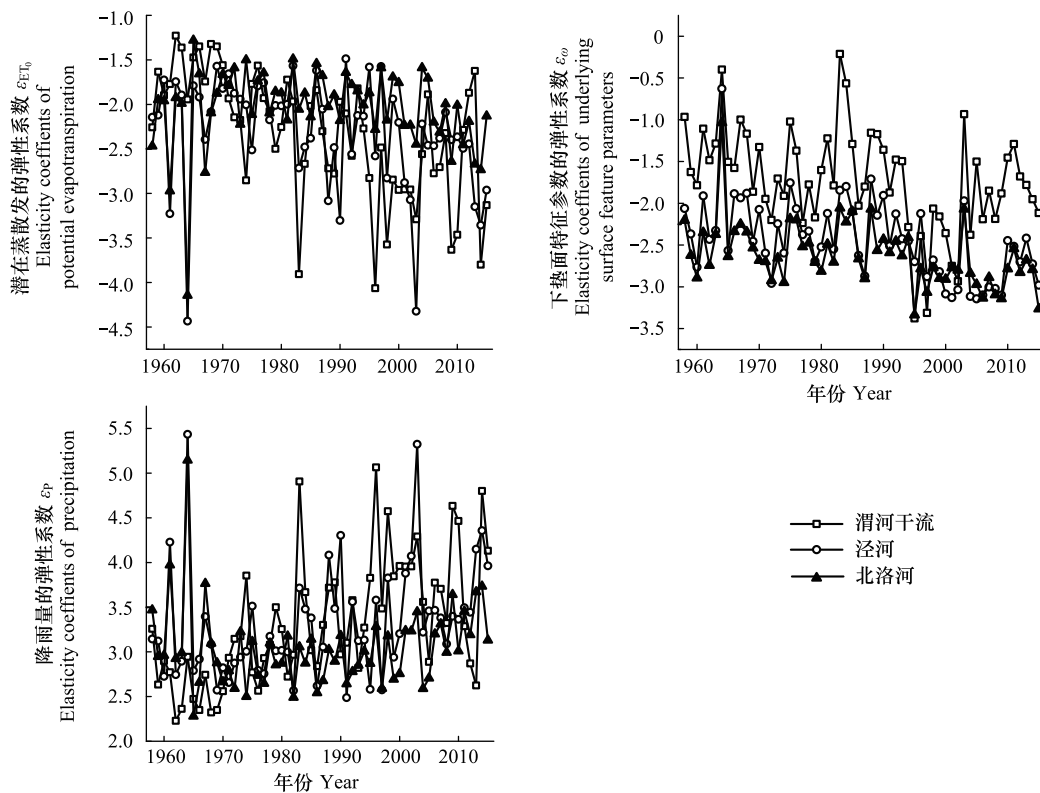


图 5 潜在蒸散量、下垫面参数、降雨量的弹性系数年际变化

Fig.5 Relationship between runoff depth and PE, land surface parameters and precipitation

### 3.2.3 渭河径流变化的归因识别

气候变化(降雨和潜在蒸散发)和下垫面变化(参数  $\omega$ )对径流变化的影响程度如表 5 所示。由表知, 计算求得的径流深变化( $dR'$ )与实际径流深的变化( $dR$ )相差很小, 这表明本文在评估相关环境因素对径流变化的贡献时所用的方法有效。降水量减少(或增加)和潜在蒸散发的增加(或减小)以及下垫面特征参数  $\omega$  值增大对径流的减少有正(负)贡献。

由表 5 看出, 渭河流域在不同时期、不同流域降雨、潜在蒸散量的变化和人类活动对径流变化影响程度不同。人类活动期与基准期相比, 年降水量和径流量均显著减少, 下垫面参数增加, 除渭河干流 1971—1992 年均潜在蒸发量减少外, 其他流域的年均潜在蒸发量人类活动期较基准期均增加; 不同流域的人类活动期下垫面的变化均为径流变化的主导因素; 渭河干流、泾河流域下垫面的变化对径流的影响均大于 60%, 即渭河干流和泾河的年径流深对下垫面的变化更为敏感; 泾河、北洛河流域对潜在蒸发因子变化的敏感度较高, 潜在蒸



散量的变化对径流变化也起到了重要作用。

综上,下垫面变化是渭河流域径流减少的主要影响因素,降雨量变化次之,潜在蒸散发的影响较小,下垫面变化对径流量减少的影响程度在渭河干流和泾河较剧烈。

表 5 渭河径流变化的归因识别

Table 5 Contribution of hydro-climatic variables to runoff changes

流域 Watershed	基准期 Base period	人类活动期 Human activity period	$dR_p$	$dR_{ET_0}$	$dR_{\omega}$	$dR$	$dR'$	$\delta$	$C_p/\%$	$C_{ET_0}/\%$	$C_{\omega}/\%$
渭河干流	1958—1970	1971—1992	-16.17	8.26	-35.37	-45.21	-43.28	1.93	37.36	-19.08	81.72
		1993—2015	-26.63	-3.61	-46.29	-79.74	-76.54	3.20	34.80	4.72	60.48
泾河	1958—1996	1997—2015	-2.91	-5.74	-13.84	-20.06	-22.48	-2.42	12.92	25.52	61.56
北洛河	1958—1992	1993—2015	-4.09	-3.48	-4.61	-11.69	-12.18	-0.48	33.56	28.56	37.88

$dR_p$ : 降雨量 P 引起的径流变化, Runoff changes caused by precipitation;  $dR_{ET_0}$ : 潜在蒸散量  $ET_0$  引起的径流变化, Runoff changes caused by potential evapotranspiration;  $dR_{\omega}$ : 下垫面  $\omega$  引起的径流变化, Runoff changes caused by underlying surface;  $dR$ : 径流深之差, Runoff depth difference;  $dR'$ : 计算求得的径流深变化, Runoff depth change calculated;  $\delta$ :  $dR'$  与  $dR$  的差值, Difference between  $dR'$  and  $dR$ ;  $C_p$ : 降雨对径流变化的贡献率, The contribution of precipitation to runoff changes;  $C_{ET_0}$ : 潜在蒸散量对径流变化的贡献率, The contribution of potential evapotranspiration to changes in runoff;  $C_{\omega}$ : 下垫面对径流变化的贡献率, The contribution of underlying surface to changes in runoff

#### 4 讨论

气候变化与人类活动是影响河川径流量变化的两个最重要的因素。分析渭河流域 22 个气象站点气象要素,发现降雨量在 1958—2015 年期间呈非显著性减少,而潜在蒸散发显著增加,这表明流域近 60 年来呈现暖干化趋势。降雨、潜在蒸发变化并不显著,二者对渭河径流量的减少的贡献占比约为 18.28%—62.12%,且在时间和空间上存在显著差异。

近几十年,黄土高原经过大规模的水土流失治理,土壤侵蚀量已显著降低,大部分河流的径流量和输沙量显著减少<sup>[32]</sup>。渭河流域除受水土保持措施的影响,土地利用、水库、工农业取水等对径流的减少起到很大的作用。表 6 为渭河流域水土保持措施的统计信息<sup>[7]</sup>。由表可知,截至 2006 年,流域累积修建梯田 206 万  $hm^2$ ,淤地坝坝控面积 1.41 万  $hm^2$ 。大规模的水土保持措施大大改变了地表产汇流特征与路径。1999 年,国家实施“退耕还林草”,渭河流域林草地面积大幅度上升,林草地的持水性能和截留量不断上升,导致径流量不断减少<sup>[33]</sup>。此外,流域内共有水库 302 座,总库容达到 27.3 亿  $m^3$ ,蓄、引、提工程有效灌溉面积 121 万  $hm^2$ <sup>[9]</sup>。水利工程建设和工农业耗水量的不断上升导致人类活动对渭河径流的影响越来越剧烈,致使径流量不断减少。坝库工程建成初期,其蓄水对河川径流的年内分配影响较大,然而在多年平均状况下,导致整个流域蒸发量增加。基于 Budyko 水热耦合平衡理论的基本假设是流域在某一段时间内储水变化量  $\Delta S$  为零,但

表 6 渭河流域水土保持措施信息表

Table 6 Statistics of soil and water conservation measures in the Wei River basin

控制措施 Control measures	不同时期的水土保持措施 Soil and water practices during different periods					
	1950—1959	1960—1969	1970—1979	1980—1989	1989—1996	1997—2006
梯田 Bench terrace/ $km^2$	198.6	1254	3317	5420.4	8104.9	20645.8
林地 Afforestation/ $km^2$	453.2	1790.4	4739.7	9964.1	13526.9	24777.9
草地 Grass planting/ $km^2$	58.2	272.1	525.1	3060	3475.4	7709.5
坝地 Check dams/ $km^2$	8	30.6	71.6	103.9	125.2	141.4
总面积 Area in total/ $km^2$	718	3347.1	8653.4	18548.4	25232.4	53274.6
百分比 Percentage/ $\%$	0.5	2.5	6.4	13.7	18.7	39.5

该计算方法忽略了流域水利工程尤其是水库和淤地坝对径流的拦蓄。尽管相关研究将人类活动的影响作为一个整体考虑<sup>[20,27]</sup>,但部分研究表明下垫面参数( $\omega$ )的物理意义和数学表达尚不准确,未来研究仍需剔除坝库工程拦蓄的影响。

## 5 结论

本文选取渭河流域为研究区,采用 Mann-Kendall 检验、双累积曲线等分析渭河流域 1958—2015 年的气候、水文要素变化,应用基于 Budyko 水热耦合平衡方程量化气候变化和人类活动对径流变化的贡献,主要结论如下:

(1) Mann-Kendall 趋势检验法对渭河流域咸阳、张家山、状头 3 个控制水文站的径流和气候资料趋势分析得出,径流深呈显著减少趋势,减少速率分别为: -1.520、-0.501、-0.322 mm/a。降雨量和潜在蒸散量分别呈减少和微弱增加趋势,但均不显著。

(2) 采用径流—降雨双累积曲线识别渭河各流域径流阶段性变化特征:渭河干流区域、泾河流域和北洛河流域径流变化的基准期分别为 1958—1970 年、1958—1996 年和 1958—1992 年。依据 Budyko 水热平衡方程计算径流对各因子弹性系数,结果显示径流深对下垫面条件变化更为敏感,人类活动期渭河干流和泾河流域下垫面条件对径流变化的贡献率均在 60% 以上,北洛河流域在 1993—2015 年下垫面条件对径流变化的贡献率为 37.88%。总体上,下垫面变化是渭河流域径流锐减的主要因素,降雨因素次之,潜在蒸散发的影响较小。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] 陈敏建,王浩,王芳. 内陆干旱区水分驱动的生态演变机理. 生态学报, 2004, 24(10): 2108-2114.
- [ 2 ] Zhang Q, Singh V P, Sun P, Chen X, Zhang Z X, Li J F. Precipitation and streamflow changes in china: Changing patterns, causes and implications. *Journal of Hydrology*, 2011, 410(3/4): 204-216.
- [ 3 ] Milly P C D, Dunne K A, Vecchia A V. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 2005, 438(7066): 347-350.
- [ 4 ] Milly P C D, Betancourt J, Falkenmark M, Hirsch R M, Kundzewicz Z W, Lettenmaier D P, Stouffer R J. Climate change. Stationarity is dead: Whither water management? *Science*, 2008, 319(5863): 573-574.
- [ 5 ] Wagener T, Sivapalan M, Troch P A, McGlynn B L, Harman C J, Gupta H V, Kumar P, Rao P S C, Basu N B, Wilson J S. The future of hydrology: An evolving science for a changing world. *Water Resources Research*, 2010, 46(5): W05301.
- [ 6 ] 任立良,沈鸿仁,袁飞,赵崇旭,杨肖丽,郑培丽. 变化环境下渭河流域水文干旱演变特征剖析. *水科学进展*, 2016, 27(4): 492-500.
- [ 7 ] ZHAO G J, MU X M, TIAN P, Wang F, Gao P. Climate changes and their impacts on water resources in semiarid regions: A case study of the Wei River basin, China. *Hydrological Processes*, 2013, 27(26): 3852-3863.
- [ 8 ] 郭爱军,畅建霞,黄强,孙佳宁. 渭河流域气候变化与人类活动对径流影响的定量分析. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2014, 42(8): 212-220.
- [ 9 ] 毕彩霞,穆兴民,赵广举,白桦. 渭河流域气候变化与人类活动对径流的影响. *中国水土保持科学*, 2013, 11(2): 33-38.
- [ 10 ] Guo Y, Li Z J, Amo-Boateng M, Deng P, Huang P N. Quantitative assessment of the impact of climate variability and human activities on runoff changes for the upper reaches of Weihe River. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2014, 28(2): 333-346.
- [ 11 ] Huang S Z, Huang Q, Chen Y T. Quantitative estimation on contributions of climate changes and human activities to decreasing runoff in Weihe River Basin, China. *Chinese Geographical Science*, 2015, 25(5): 569-581.
- [ 12 ] Budyko M I. *Climate and Life*. New York: Academic Press, 1974.
- [ 13 ] Choudhury B J. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model. *Journal of Hydrology*, 1999, 216(1/2): 99-110.
- [ 14 ] Yokoo Y, Sivapalan M, Oki T. Investigating the roles of climate seasonality and landscape characteristics on mean annual and monthly water balances. *Journal of Hydrology*, 2008, 357(3/4): 255-269.
- [ 15 ] Zhang S L, Yang H B, Yang D W, Jayawardena A W. Quantifying the effect of vegetation change on the regional water balance within the Budyko framework. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(3): 1140-1148.

- [16] Hickel K, Zhang L. Estimating the impact of rainfall seasonality on mean annual water balance using a top-down approach. *Journal of Hydrology*, 2006, 331(3/4): 409-424.
- [17] 刘艳丽, 王国庆, 金君良, 鲍振鑫, 刘翠善. 基于 Budyko 假设的环境变化对流域径流影响的界定. *水利水运工程学报*, 2014, (6): 1-8.
- [18] Li Z X, Feng Q, Liu W, Wang T T, Gao Y, Wang Y M, Cheng A F, Li J G, Liu L. Spatial and temporal trend of potential evapotranspiration and related driving forces in Southwestern China, during 1961-2009. *Quaternary International*, 2014, 336: 127-144.
- [19] Zhou S, Yu B F, Huang Y F, Wang G Q. The complementary relationship and generation of the Budyko functions. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(6): 1781-1790.
- [20] 杨大文, 张树磊, 徐翔宇. 基于水热耦合平衡方程的黄河流域径流变化归因分析. *中国科学: 技术科学*, 2015, 45(10): 1024-1034.
- [21] Dooge J C I. Sensitivity of runoff to climate change: A Hortonian approach. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1992, 73(12): 2013-2013.
- [22] Destouni G, Jaramillo F, Prieto C. Hydroclimatic shifts driven by human water use for food and energy production. *Nature Climate Change*, 2013, 3(3): 213-217.
- [23] 孙福宝, 杨大文, 刘志雨, 丛振涛. 基于 Budyko 假设的黄河流域水热耦合平衡规律研究. *水利学报*, 2007, 38(4): 409-416.
- [24] 张明军, 李瑞雪, 贾文雄, 王旭峰. 中国天山山区潜在蒸发量的时空变化. *地理学报*, 2009, 64(7): 798-806.
- [25] 赵广举, 穆兴民, 田鹏, 王飞, 高鹏. 近 60 年黄河中游水沙变化趋势及其影响因素分析. *资源科学*, 2012, 34(6): 1070-1078.
- [26] 穆兴民, 张秀勤, 高鹏, 王飞. 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.
- [27] Ning T T, Li Z, Liu W Z. Separating the impacts of climate change and land surface alteration on runoff reduction in the Jing River catchment of China. *CATENA*, 2016, 147: 80-86.
- [28] Yang H B, Yang D W, Lei Z D, Sun F B. New analytical derivation of the mean annual water - energy balance equation. *Water Resources Research*, 2008, 44(3): W03410.
- [29] Xu X Y, Yang D W, Yang H B, Lei H M. Attribution analysis based on the Budyko hypothesis for detecting the dominant cause of runoff decline in Haihe basin. *Journal of Hydrology*, 2014, 510: 530-540.
- [30] Yang H B, Qi J, Xu X Y, Yang D W, Lv H F. The regional variation in climate elasticity and climate contribution to runoff across China. *Journal of Hydrology*, 2014, 517: 607-616.
- [31] 侯钦磊, 白红英, 任园园, 贺映娜, 马新萍. 50 年来渭河干流径流变化及其驱动力分析. *资源科学*, 2011, 33(8): 1505-1512.
- [32] Zhao G J, Mu X M, Jiao J Y, An Z F, Klik A, Wang F, Jiao F, Yue X L, Gao P, Sun W Y. Evidence and causes of spatiotemporal changes in runoff and sediment yield on the Chinese Loess Plateau. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(2): 579-590.
- [33] 张连鹏, 刘登峰, 张鸿雪, 黄强, 孟宪萌. 气候变化和人类活动对北洛河径流的影响. *水力发电学报*, 2016, 35(7): 55-66.