

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.035.

温艳霞, 燕鑫, 李志. 秃尾河流域河川径流组分变化及归因分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 86-94.

Wen Yanxia, Yan Xin, Li Zhi. Detecting and Attributing the Changes in Components of Streamflow in Tuweihe River Watershed[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 86-94.

# 秃尾河流域河川径流组分变化及归因分析

温艳霞, 燕鑫, 李志

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 探究秃尾河流域河川径流组分和基流指数(BFI)的变化特征, 阐明环境因子对其变化的影响, 识别主导因子, 为流域水资源管理提供科学依据。[方法] 以黄河中游的秃尾河流域为研究区, 分析了 1958—2017 年流域地表径流、基流和基流指数(BFI)的变化, 并通过相关性分析、弹性系数等方法定性定量分析了环境因子对它们的影响。[结果] 地表径流和基流分别以 4.55, 9.73 mm/10 a 的速度显著下降( $p < 0.01$ ), BFI 呈显著上升趋势( $p < 0.05$ )。地表径流(或基流、BFI)对潜在蒸散发、归一化植被指数(NDVI)和土壤含水量的变化高度敏感。NDVI 和潜在蒸散发是导致地表径流(−34%, −29%)、基流(−39%, −29%)和 BFI(33%, 31%)变化的主要原因。[结论] 植被恢复的直接及潜在水文效应对于河川径流组分减少发挥着重要作用。河川径流组分变化及其与环境变化之间的关系可为水资源和植被的可持续性提供理论依据。

**关键词:** 秃尾河流域; 基流分割; 径流组分变化; 弹性系数; 归因分析

中图分类号: P333; P339

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0086-09

## Detecting and Attributing the Changes in Components of Streamflow in Tuweihe River Watershed

Wen Yanxia, Yan Xin, Li Zhi

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to explore the variation characteristics of streamflow components and baseflow index (BFI) in the Tuweihe River Basin, to clarify the impact of environmental factors on their variations, to identify the dominant factors, and to provide scientific basis for watershed water resources management. [Methods] Tuweihe River Basin in the middle reaches of the Yellow River was taken as the study area. The changes of surface runoff, baseflow and baseflow index (BFI) during the period 1958—2017 were analyzed. The correlation analysis and elasticity coefficient methods were employed to qualitatively and quantitatively analyze the influence of environmental factors on them. [Results] The surface runoff and baseflow significantly decreased at a rate of 4.55 and 9.73 mm/decade ( $p < 0.01$ ), respectively, while the BFI showed a significant upward trend ( $p < 0.05$ ). Surface runoff (or baseflow, BFI) was highly sensitive to the changes in potential evapotranspiration, normalized difference vegetation index (NDVI), and volumetric soil water. The changes in NDVI and potential evapotranspiration contributed to the majority of the changes in surface runoff (−34% and −29%), baseflow (−39% and −29%), and BFI (33% and 31%). [Conclusion] The direct and potential hydrological effects of vegetation restoration play an important role in reducing the streamflow components. The changes of streamflow components as well as their relations to environmental changes provide a theoretical basis for the sustainability of water resources and vegetation.

收稿日期: 2023-04-04

修回日期: 2023-10-04

资助项目: 国家自然科学基金(42071043); 中央高校基本科研业务费专项资金(2452020002)

第一作者: 温艳霞(1999—), 女, 内蒙古乌兰察布人, 在读硕士, 研究方向为流域水文循环。E-mail: wenxiaohua@nwfau.edu.cn

通信作者: 李志(1978—), 男, 山东临沂人, 博士, 教授, 主要从事旱区水循环与水环境演变机理与调控研究。E-mail: lizhibox@nwfau.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

**Keywords:** Tuweihe River Basin; baseflow separation; streamflow components changes; elasticity coefficient; attribution analysis

近些年来,由于受到气候变化和人类活动的双重影响,世界各地许多流域的河川径流都发生了显著变化,对区域的水资源安全造成重要影响<sup>[1]</sup>。河川径流通常划分为地表径流和基流。地表径流为由降水或冰雪融水产生的地表快速流,对于降水变化迅速反应,对农业灌溉、经济活动和人类健康至关重要<sup>[2]</sup>。基流为地下水或是其他延迟水源补给河川径流的那部分水量,是河川径流中相对稳定的部分,是地表水与地下水之间的连接。基流与流域的气候以及下垫面情况密切相关,对于维持河川生态系统的可持续至关重要<sup>[3]</sup>。研究河川径流组分变化及其影响因素有助于合理和高效利用水资源,对于维持生态系统的稳定发展至关重要。

大多数流域的水文循环由气候变化主导,但人类活动在一些流域中决定河川径流组分的变化,如植树造林、水库和淤地坝建设<sup>[4]</sup>。具体而言,气候变化可通过改变降水输入和蒸散发损失直接影响河川径流组分<sup>[5]</sup>。人类活动主要通过改变流域的下垫面条件影响水文过程,包括土地利用<sup>[6]</sup>、节水措施<sup>[7]</sup>和水利工程<sup>[8]</sup>对产流过程的影响。植被恢复以及土地利用变化导致土壤入渗增加,河川径流组分减少;也会通过影响蒸散发、土壤含水量,从而间接影响河川径流组分<sup>[9]</sup>。此外,人类还通过农业灌溉<sup>[10]</sup>、地下水开采<sup>[11]</sup>和城市供水和排水<sup>[12]</sup>影响水文过程。可见,河川径流的组分同时受到多个环境因素的影响,分析其变化时应考虑多种因素的综合作用。

黄土高原是世界上水土流失最严重的地区<sup>[13]</sup>。为了控制水土流失,该地区1999年实施了世界上规模最大、投资最多的“退耕还林”工程,区域土地覆盖显著改变。尽管“退耕还林”工程在控制水土流失和生态环境恶化方面发挥了重要的作用,但在2000—2010年期间,导致土壤水分和河川径流分别以 $(2.4 \pm 0.9)$ 、 $(0.5 \pm 0.3)$  mm/a的速度减少,区域接近可持续的极限<sup>[14]</sup>。因此,在变化环境下确定影响区域水资源可持续性的主导因素对于维护黄土高原可持续发展具有重要意义。

本研究以黄河流域中游的秃尾河流域为研究对象,主要研究目标为识别并归因环境剧烈变化的干旱地区河川径流组分变化。具体而言,我们提出以下研究问题:(1)地表径流、基流和基流指数(BFI)及环境因子如何变化?(2)地表径流、基流和BFI与环境因

子有何关系?(3)环境因子对地表径流、基流和BFI的相对贡献如何?研究结果将有助于改进生态环境建设以及水资源可持续管理。

## 1 研究区概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

秃尾河流域位于陕西省境内,是黄河中游右岸一级支流。地理坐标为 $110^{\circ}32'—110^{\circ}05'E$ , $39^{\circ}00'—39^{\circ}27'N$ ,流域面积为 $3\,294\text{ km}^2$ ,全长 $139.6\text{ km}$ ,河道平均比降 $3.87\%$ 。流域控制站是高家川水文站,地理坐标为 $110^{\circ}48'E$ , $38^{\circ}25'N$ ,控制流域面积 $3\,253\text{ km}^2$ ,多年平均流量为 $9.2\text{ m}^3/\text{s}$ 。年均降水量 $414.7\text{ mm}$ ,汛期(6—10月)降水量可占全年降水量的 $80\%$ 。秃尾河流域海拔高程的范围为 $716\sim 1\,399\text{ m}$ ,地处毛乌素沙漠与黄土高原过渡地带,具有黄土高原区河流的典型特点,即上、中游属于风沙区(占流域总面积的 $64\%$ ),下游属于黄土丘陵沟壑区(占总面积的 $26\%$ )。大部分降雨量入渗到地下,由第四系松散含水层储存、调节后排泄于河道。基流占河川径流量的 $68\%$ 左右,对地下水的依赖较强。秃尾河流域以农业发展为主,导致流域内植被破坏严重,自然环境发生恶化。1999年,流域实施退耕还林还草工程,植被覆盖度显著提高,2013年归一化植被指数(NDVI)值增长到 $0.45$ ,水土流失得到控制。

### 1.2 数据来源

为了研究地表径流、基流变化及其影响因素,收集了河川径流、环境因子(气候、土壤含水量、植被覆盖和土地利用)的数据。1958—2017年高家川水文站的实测日径流数据来源于《黄河流域水文资料》。1958—2017年降水量数据来源于国家地球系统科学数据中心,空间分辨率为 $1\text{ km}$ (<http://www.geodata.cn>)。1958—2017年潜在蒸散发数据来源于Terrestrial Climate数据集,空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ <sup>[15]</sup>。干燥指数等于潜在蒸散发与降雨量的比值。1982—2017年土壤含水量数据由ERA5-Land数据集提供,空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ <sup>[16]</sup>。

我们同时使用土地利用和NDVI数据分析土地利用/覆被变化。1985年、2000年、2017年土地利用数据来自武汉大学发布的基于Landsat系列的中国土地覆被数据集(CLCD),空间分辨率为 $30\text{ m}$ <sup>[17]</sup>。1982—2015年植被覆盖变化采用GIMMS NDVI3g(v1)数据集<sup>[18]</sup>,时间分辨率为 $15\text{ d}$ ,空间分辨率为 $8\text{ km}$ 。

## 2 研究方法

### 2.1 基流分割

由于基流无法直接测量,国内外学者提出许多方法从河川径流中分离基流。本研究选择了 8 种(4 种类型)基流分割方法,包括 PART 模型法、3 种时间步长法(HySEP-Fixed, HySEP-Locmin 和 HySEP-Slide 方法)、两种基流指数法(BFI-Standard 和 BFI-Modified 方法)和两种数字滤波法(Lyne-Hollick 单参数数字滤波法和 Eckhardt 双参数数字滤波法)。每种基流分割方法的算法细节在相关论文中已有详细介绍。

为选择适合秃尾河流域的基流分割方法,采用枯水指数法估计年基流量。枯水指数<sup>[19]</sup>可以用来反映地下水补给给河川径流的流量特征, $Q_{90}$ 和 $Q_{50}$ 分别表示研究时段内出现频率大于等于 90% 和 50% 时的河川径流量,可通过日流量历时曲线确定。枯水指数( $Q_{90}/Q_{50}$ )与年河川径流量的乘积可用于估算年基流量,将其与 8 种基流分割方法的计算的基流量进行比较。

### 2.2 趋势与相关性分析

线性回归分析和 Mann-Kendall 非参数检验<sup>[20]</sup>用于时间序列的趋势分析,并检测其变化的显著性及突变点。重标极差分析法(R/S)主要用来表征时间序列的趋势持续性<sup>[21]</sup>。采用皮尔逊相关以及偏相关分析河川径流组分、BFI 变化与环境因子变化的相关性。

### 2.3 河川径流组分变化归因

弹性系数<sup>[22]</sup>的概念已被广泛用于评估河川径流对气候变化的敏感性。 $|\epsilon|$  越大,表明敏感性越强。河川径流的气候弹性系数( $\epsilon$ )定义为河川径流变化率与某个气候因子变化率的比值,其表达式为:

$$\epsilon = \frac{\partial Q/Q}{\partial X/X} \quad (1)$$

式中: $\epsilon$  为河川径流的气候弹性系数; $Q$  为河川径流; $X$  为影响因子。

使用最小二乘法估计环境因子(本文指降雨量  $P$ 、潜在蒸散发  $PET$ 、干燥指数  $AI$ 、土壤含水量  $VSW$ 、NDVI)对地表径流、基流和 BFI 变化的弹性系数并量化其相对贡献。为了保证数据时间尺度的一致性,在进行归因分析时,将环境因子的数据统一至 1982—2015 年,分为基准期(1982—1999 年)和变化期(2000—2015 年)两个时期进行贡献分析。

$$\epsilon = \frac{\bar{X}}{\bar{Q}_b^a} \sum (X_i - \bar{X}) \left( \frac{Q_{bi}^a - \bar{Q}_b^a}{\sum (X_i - \bar{X})^2} \right) = \frac{\rho_{QX} C_Q}{C_X} \quad (2)$$

式中: $Q_b^a$  为年地表径流(或基流、BFI); $X$  为环境因子( $i$  指代:  $P$ ,  $PET$ ,  $AI$ ,  $VSW$ ,  $NDVI$ ); $\bar{X}$  和  $\bar{Q}_b^a$  分别为环境因子和地表径流(或基流、BFI)的多年平均

值; $\rho_{QX}$  为环境因子与地表径流(或基流、BFI)之间的相关系数; $C_X$  和  $C_Q$  分别为环境因子和地表径流(或基流、BFI)的变异系数。

根据公式(3),计算环境因子在变化期(2000—2015 年)相对于基准期(1982—1999 年)导致地表径流(或基流、BFI)的变化:

$$\Delta \bar{Q}_{bX_n}^a = (\epsilon_{X_n} \Delta X_n / X_n) Q_b^a \quad (3)$$

式中: $\Delta \bar{Q}_{bX_n}^a$  为由环境因子引起的年均地表径流(或基流、BFI)的变化; $\Delta X_n$  为环境因子的变化; $X_n$  和  $Q_b^a$  分别为基准期环境因子和地表径流(或基流、BFI)的长期均值。

因此,由其他人类活动引起的年均地表径流(或基流、BFI)的变化  $\Delta \bar{Q}_{bHuman}^a$  可计算为:

$$\Delta \bar{Q}_{bHuman}^a = \Delta Q_b^a - \sum \Delta \bar{Q}_{bX_n}^a \quad (4)$$

式中: $\Delta Q_b^a$  为地表径流(或基流、BFI)的变化。因此,各影响因素导致地表径流(或基流、BFI)变化的相对贡献计算如下:

$$P_{X_n} = \frac{\Delta \bar{Q}_{bX_n}^a}{\sum |\Delta \bar{Q}_{bX_n}^a| + |\Delta \bar{Q}_{bHuman}^a|} \times 100\% \quad (5)$$

$$P_{Human} = \frac{\Delta \bar{Q}_{bHuman}^a}{\sum |\Delta \bar{Q}_{bX_n}^a| + |\Delta \bar{Q}_{bHuman}^a|} \times 100\% \quad (6)$$

## 3 结果与分析

### 3.1 基流分割方法的选择

对比 8 种基流分割方法所计算基流指数的特征参数(平均值、极值比、标准差、变异系数),得到不同方法计算结果的差异和稳定性(表 1)。其中,PART 模型、HySEP-Fixed, HySEP-Locmin, HySEP-Slide 和 Lyne-Hollick 基流指数的平均值比较接近(0.78~0.80),而 BFI-Standard, BFI-Modified 和 Eckhardt 的结果比较接近(0.73~0.74)。根据极值比、标准差和变异系数的结果,Eckhardt 计算结果的波动范围最小,最稳定。

对比枯水指数法估计的基流量与基流分割方法计算的结果,Eckhardt 的拟合结果最好( $R^2 = 0.73$ ),计算出的基流量更接近估计值(图 1)。因此,选取基于 Eckhardt 计算的河川径流组分进行进一步分析。

### 3.2 河川径流组分和 BFI 的变化

3.2.1 趋势变化及突变点检验 1958—2017 年秃尾河流域的年均地表径流和基流深分别为(26.2±10.5), (69.6±18.7) mm(图 2),均呈显著下降趋势;而年均 BFI 为(0.73±0.04),呈显著上升趋势( $p < 0.05$ )。重标极差 R/S 法的结果表明:未来地表径流、基流、BFI 将延续之前的变化趋势,即地表径流、基流继续减小,BFI 持续增大(Hurst 指数 > 0.5)。

表 1 8 种基流分割方法的年基流指数统计特征

项目	PART	HySEP-Fixed	HySEP-Loeclin	HySEP-Slide	BFI-Standard	BFI-Modified	Lyne-Hollick	Eckhardt
平均值	0.79	0.79	0.78	0.79	0.74	0.74	0.80	0.73
最小值	0.62	0.63	0.61	0.63	0.59	0.59	0.66	0.63
最大值	0.92	0.89	0.90	0.90	0.89	0.89	0.90	0.79
极值比	1.49	1.41	1.47	1.43	1.50	1.49	1.37	1.26
标准差	0.07	0.06	0.07	0.06	0.07	0.07	0.06	0.04
变异系数	0.09	0.08	0.09	0.08	0.09	0.09	0.07	0.05

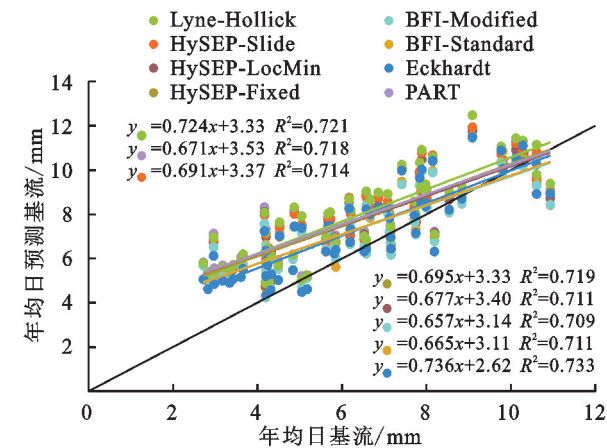
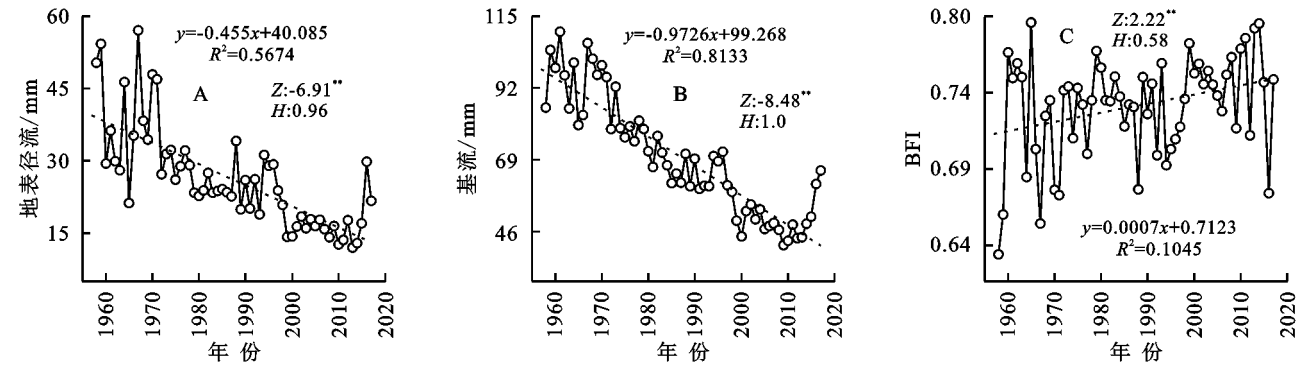


图 1 8 种基流分割方法计算值与实际观测值的比较

Fig. 1 Comparison of the calculated values from the eight baseflow separation methods with actual observations

Mann-Kendall 检验的结果表明,地表径流、基流没有显著突变点(图 3);而 BFI 在 1999 年发生显著突变( $p<0.05$ ),与区域退耕还林还草工程开始时间一致。因此,本研究分为  $T_1$  期(1958—1999 年)和  $T_2$  期(2000—2017 年)两个时期进行分析。

3.2.2 年内分布 总体来说, $T_2$  期的月地表径流和基流(均)小于  $T_1$  期(图 4)。 $T_1$  期的月均地表径流、基流分别为  $(2.52\pm1.55)$ ,  $(6.52\pm1.08)$  mm,  $T_2$  时期的月均地表径流、基流分别为  $(1.39\pm0.53)$ ,  $(4.12\pm0.47)$  mm。 $T_1$ ,  $T_2$  期的地表径流、基流都呈双峰趋势,地表径流的峰值都出现于 3 月和 8 月,基流的峰值出现于 3 月和 8 月(或 10 月);BFI 出现两个低值,  $T_1$  期为 2 月、7 月,  $T_2$  期为 3 月和 8 月。 $T_2$  期基流(或 BFI)峰值(或低值)的出现时间存在一定的滞后。



注: \* 代表显著  $p<0.05$ ; \*\* 代表极显著  $p<0.01$ 。

图 2 年地表径流、基流和 BFI 的时间序列和线性趋势

Fig. 2 Time series and linear trend in annual surface runoff, baseflow and BFI

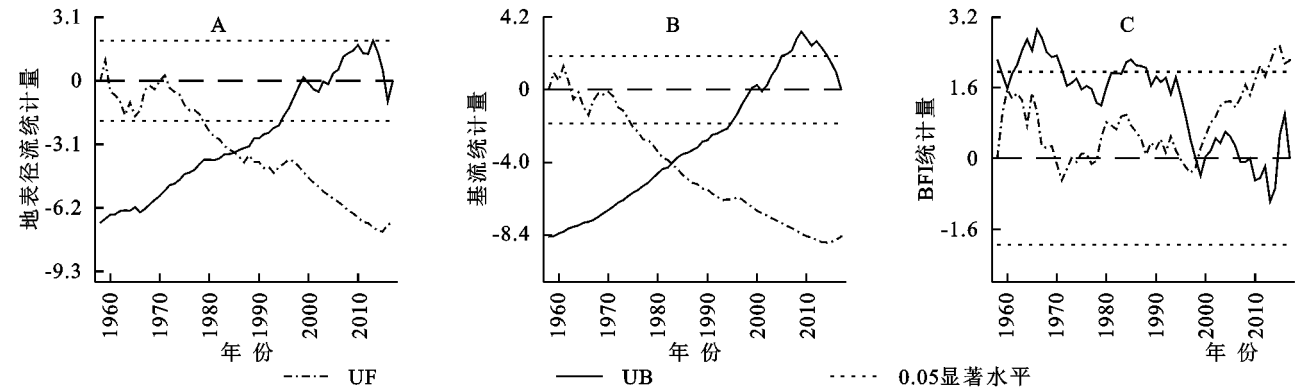


图 3 年地表径流、基流和 BFI 的 Mann-Kendall 检验

Fig. 3 Mann-Kendall test in annual surface runoff, baseflow and BFI



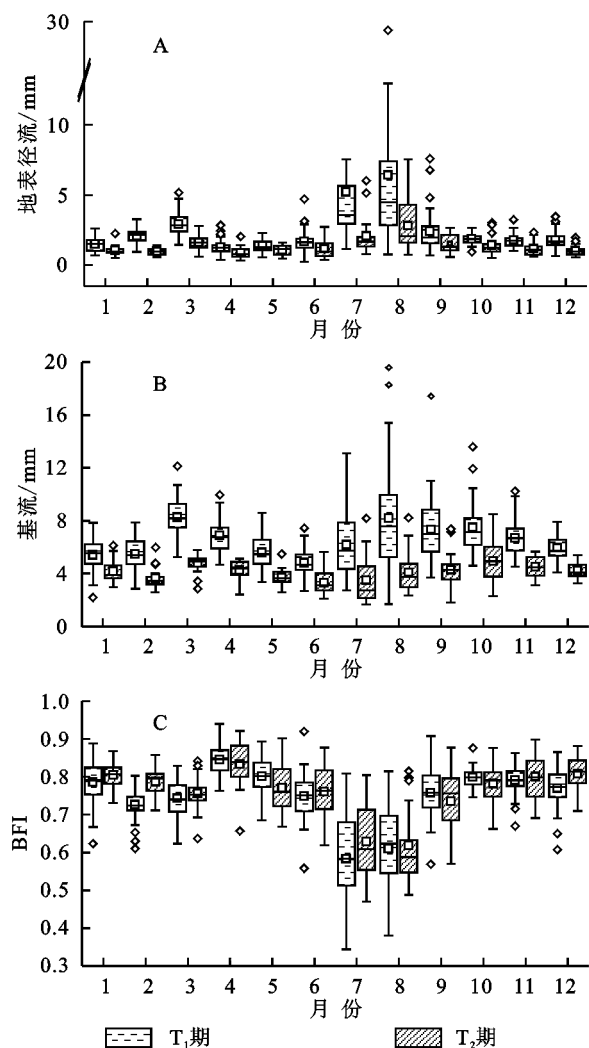


图4 地表径流、基流和BFI月分布的箱形图

Fig. 4 Box plots of monthly distribution of surface runoff, baseflow and BFI

### 3.3 环境因子的变化

潜在蒸散发量和NDVI分别以14.6 mm/10 a和0.049/10 a的速率显著上升( $p < 0.01$ ),其他环境因子(降雨量、干燥指数和土壤含水量)变化不显著(图5)。潜在蒸散发在1974年之后持续增加,NDVI在1982—2015年期间一直呈上升趋势。潜在蒸散发、干燥指数和土壤含水量分别在1995年、1972年、2004年发生显著突变( $p < 0.05$ ),其他因子均不存在显著突变点(图6)。重标极差R/S法的结果表明,除干燥指数未来趋向于随机变化以外,其他环境因子将延续之前的变化趋势,即潜在蒸散发、干燥指数、NDVI继续增大,降水、土壤含水量继续减小(Hurst指数 $> 0.5$ )。

土地利用类型主要为草地、耕地和未利用地,覆盖了约98%的研究区域(图7)。1985—2000年土地利用无显著变化,我们使用1985年、2017年的数据表示 $T_1$ — $T_2$ 期土地利用的总体变化。相比 $T_1$ 期, $T_2$ 期的耕地和未利用地面积分别减少了127,661 km<sup>2</sup>,草

地、城镇、林地和水面面积分别增加了758,25,2,4 km<sup>2</sup>,主要表现为耕地、未利用地向草地的转变。

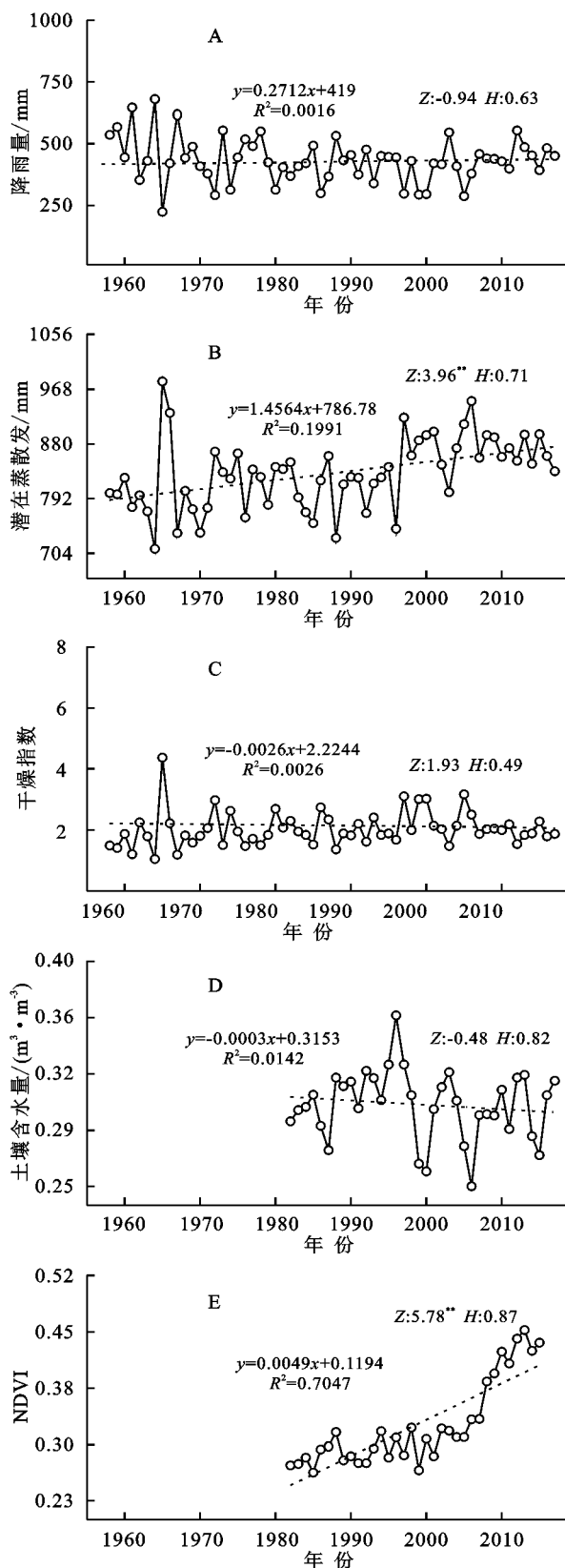


图5 降水量、潜在蒸散发、干燥指数、土壤含水量和NDVI的时间序列和线性趋势

Fig. 5 Time series and linear trend in precipitation, potential evapotranspiration, Aridity index, volumetric soil water, and NDVI

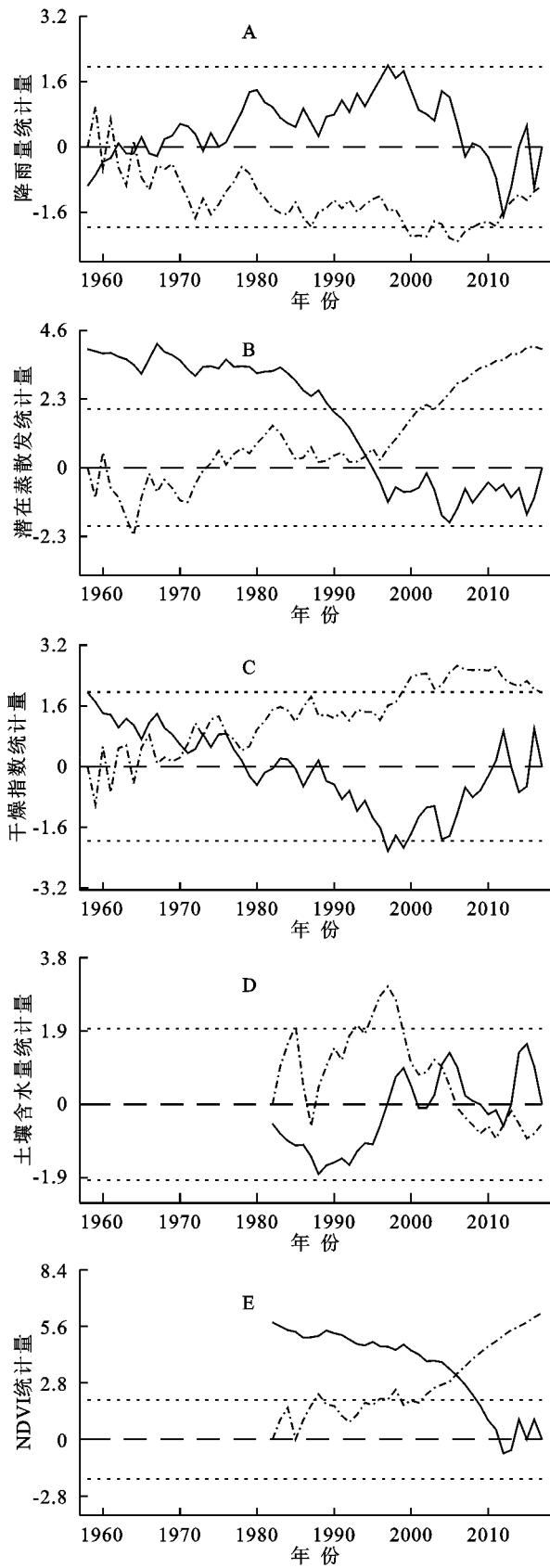


图 6 降水量、潜在蒸散发、干燥指数、土壤含水量和 NDVI 的 Mann-Kendall 检验

Fig. 6 Mann-Kendall test in precipitation, potential evapotranspiration, Aridity index, volumetric soil water, and NDVI

3.4 环境因子对河川径流组分的影响

3.4.1 河川径流组分变化的主控因子 采用 Pearson 相关分析(表 2),发现地表径流与环境因子之间的相关性系数大小排序为:潜在蒸散发>NDVI>土壤含水量>干燥指数>降雨量。地表径流与土壤含水量呈显著正相关,与潜在蒸散发和 NDVI 呈显著负相关( $p<0.05$ )。基流与环境因子之间的相关性大小排序为:NDVI>潜在蒸散发>土壤含水量>干燥指数>降雨量。基流与土壤含水量呈显著正相关,与潜在蒸散发和 NDVI 呈显著负相关。BFI 与环境因子之间的相关性大小排序为:潜在蒸散发>土壤含水量>NDVI>干燥指数>降雨量。BFI 与潜在蒸散发和 NDVI 呈显著正相关,与土壤含水量呈显著负相关。

进一步进行偏相关分析,发现 NDVI 与地表径流呈显著负相关,基流与 NDVI、降雨量和干燥指数呈显著负相关,而 BFI 与环境因子均不显著相关(表 2)。可见,NDVI 即植被变化对地表径流或基流的影响具有稳定性和主导性。

3.4.2 环境因子对河川径流组分变化的贡献 地表径流的  $\epsilon_P, \epsilon_{PET}, \epsilon_{AI}, \epsilon_{VSW}, \epsilon_{NDVI}$  分别为 0.28, -2.87, -0.38, 1.66, -0.90(图 8A),意味着降水、潜在蒸散发、干燥指数、土壤含水量和 NDVI 每增加 1%,地表径流将变化 0.28%, -2.87%, -0.38%, 1.66%, -0.90%。地表径流对潜在蒸散发的变化最敏感,其次是土壤含水量、NDVI、干燥指数和降水变化。基流、BFI 的变化对潜在蒸散发的变化最敏感,潜在蒸散发、土壤含水量、NDVI、干燥指数和降水每增加 1%,基流将变化 -1.81%, 0.91%, -0.66%, -0.17%, 0.01%, BFI 将变化 0.25%, -0.17%, 0.07%, 0.05%, -0.06%。

NDVI 和潜在蒸散发的变化是导致地表径流和基流减少的主要原因,对地表径流变化的贡献分别为 -34%, -29%, 对基流变化的贡献率分别为 -39%, -29%。根据弹性系数法(图 8B),降水、潜在蒸散发、干燥指数、土壤含水量、NDVI 和其他人类活动对地表径流变化的相对贡献分别为 2%, -29%, -1%, -10%, -34%, 24%, 对基流变化的贡献率分别为 0.1%, -29%, -1%, -9%, -39%, 22%。各影响因素对 BFI 的影响相反,降水(-4%)和其他人类活动(-16%)导致其减少,而潜在蒸散发(31%)、干燥指数(2%)、土壤含水量(14%)和 NDVI(33%)导致其增加。需要注意的是,弹性分析是针对单独影响因素进行的,因此影响因素之间的相关性可能会掩盖某些因素的真正贡献。

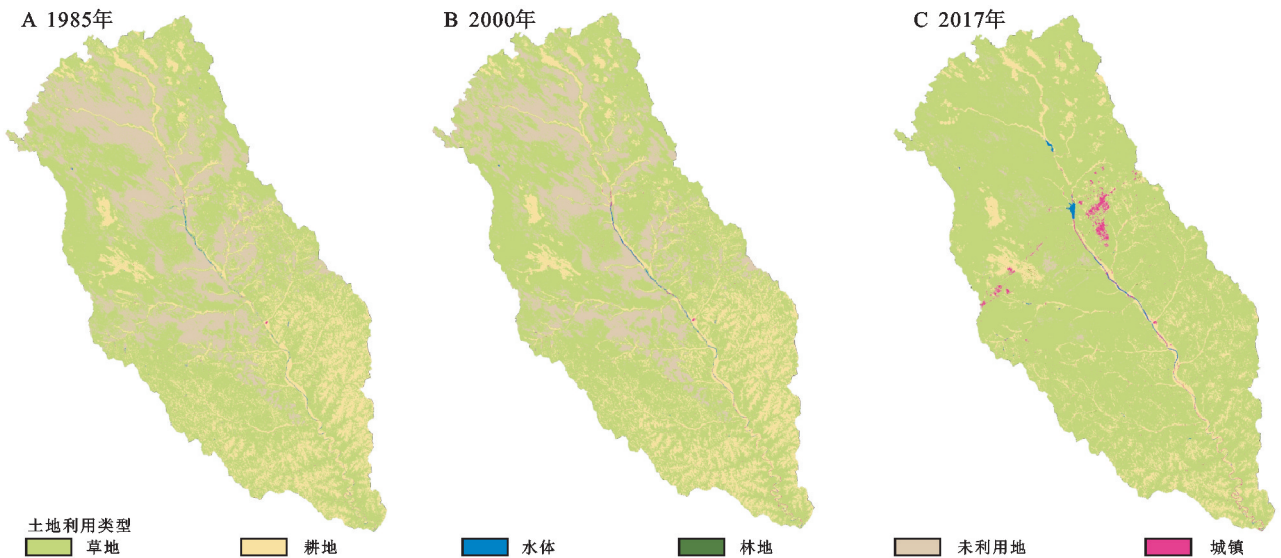


图 7 1985—2017 年秃尾河流域土地利用变化

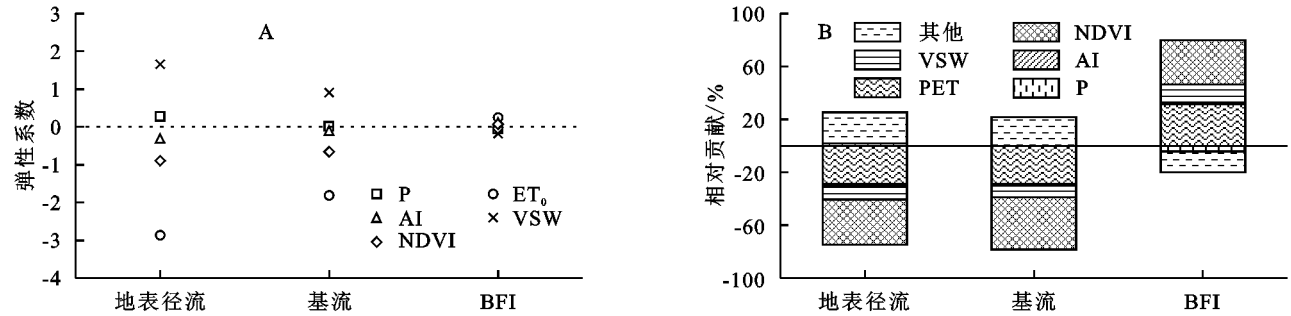
Fig. 7 Changes in landuse from 1985 to 2017 in the Tuwei River Watershed

表 2 地表径流、基流和 BFI 与环境因子的相关性

Table 2 Correlation of surface runoff, baseflow and BFI with environmental factors

环境因子	Pearson 相关			偏相关		
	地表径流	基流	BFI	地表径流	基流	BFI
降雨量	0.162	0.012	−0.252	−0.005	−0.397 *	−0.304
潜在蒸散发	−0.628 **	−0.637 **	0.419 *	−0.239	−0.136	0.213
干燥指数	−0.297	−0.217	0.272	−0.021	−0.368 *	−0.25
土壤含水量	0.435 *	0.384 *	−0.352 *	0.195	0.231	−0.115
NDVI	−0.555 **	−0.656 **	0.340 *	−0.423 *	−0.504 **	0.322

注：\* 代表显著  $p<0.05$ ；\*\* 代表极显著  $p<0.01$ ；其他则为不显著。



注：环境因子包括降雨量(P)、潜在蒸散发(PET)、干燥指数(AI)、土壤含水量(VSW)、NDVI。

图 8 地表径流、基流和 BFI 的弹性系数及环境因子的相对贡献

Fig. 8 Elasticity coefficients of surface runoff, baseflow and BFI and relative contributions of environmental factors

4 讨论

4.1 NDVI 和潜在蒸散发对河川径流组分的影响

植被恢复导致地表径流显著减少,同时增强土壤渗透性。因此,更多降水入渗到土壤中,地表径流被进一步消耗和蒸发,导致 BFI 相对较大,呈上升趋势。河川径流组分的年内分布呈双峰趋势,一个峰值在 3 月,另一个峰值在 8 月(或 10 月);BFI 存在两个低值,  $T_1$  期在 2 月、7 月,  $T_2$  期在 3 月和 8 月,  $T_2$  期基流(或 BFI)峰值(或低值)出现的时间有一定的滞后。

我们认为 3 月的峰值是春季气温回升,土壤和积雪融化所致。第 2 个峰值是由于该流域在 6—9 月多发生强降雨,补给河川径流,且产流方式以超渗产流为主,更有利于产生地表径流。尽管地表径流和基流都显著减少,但更多的降水转化为地表径流,所以 BFI 出现低值。植被改变土壤的结构,增强土壤的渗透性,导致降水入渗增强,所以地表径流的增加有所减缓, BFI 低值的出现时间有所滞后。随植被恢复时间的增加,茎、叶等凋落物和植被根系在减少河川径流组分方面发挥着更加稳定的作用<sup>[23]</sup>。

土地利用变化会深刻影响水循环,不同土地利用类型可能对地表径流、基流产生不同影响。秃尾河流域中, $T_1$ 期主要土地利用类型为,草地 63.3%、耕地 14.7%和未利用地 21.6%(图 7),年均 NDVI 值为 0.29; $T_2$ 期主要为草地 86.6%和耕地 10.8%,年均 NDVI 值为 0.37。草地面积增加了约 37%,年均 NDVI 值增长 28%。随草地面积的增加,地表径流和基流逐渐减少。植被通过截留降雨减少河川径流,并增强土壤表面粗糙率和渗透性,提升土壤的入渗和蓄水能力,导致干旱区的地表径流、基流显著下降<sup>[24]</sup>。黄土高原约 38%地区的河川径流以 1~48 mm/a 的速度下降<sup>[25]</sup>。

植被通过增加蒸散发,加剧土壤干燥,进一步减少河川径流组分。蒸散发(蒸腾、截留蒸发和土壤蒸发)的增加是区域水循环变化的重要指标,与土地利用变化和气候变化密切相关。一般来说,假设植被密度恒定,蒸散发随植被面积的增加而逐渐增强。秃尾河流域中, $T_1$ 期年均潜在蒸散发为 815 mm, $T_2$ 期为 875 mm。2000—2015 年期间,黄土高原大部分地区的蒸腾和拦截损失都有增加的趋势,年蒸散量以平均 5.8 mm/a 的速度增加<sup>[23]</sup>,植被恢复是黄土高原蒸散发增加的主要驱动因素<sup>[26]</sup>。除此之外,植被(植被根系的特征)通过改变土壤的入渗和蓄水能力,影响土壤含水量<sup>[27]</sup>。秃尾河流域中, $T_1$ 期年均土壤含水量为 0.31 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, $T_2$ 期为 0.30 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>。黄土高原大规模植被恢复后,地下层和深层土壤含水量大幅下降,植被重建是引起近表层以下土壤水分不足的主要因素<sup>[28]</sup>。潜在蒸散发和土壤含水量的变化证实了植被对河川径流组分的间接影响。

#### 4.2 其他人类活动对河川径流组分的影响

除大规模植被重建以外,其他人类活动对地表径流和基流变化的贡献率分别为 24%,22%(图 7)。1959—2006 年,秃尾河流域的淤地坝面积从 0.2 km<sup>2</sup>增加到 24.1 km<sup>2</sup>,梯田面积从 1 km<sup>2</sup>增加到 82.1 km<sup>2</sup>。梯田和淤地坝可拦截河川径流并储存,增加土壤入渗和蓄水量,在一定程度上减缓地表径流、基流的减少<sup>[29]</sup>。到 2010 年底,秃尾河流域内主要有 2 座中型供水水库:瑶镇水库和采兔沟水库。水库具有调蓄作用,在汛期蓄水、枯水期泄洪,调节地表径流的季节分配,同时由于水面面积的扩大和下渗的增加导致地下水位提高,有助于维持环境流量,并抵消河川径流的减少<sup>[30]</sup>。

## 5 结论

在过去的 60 年里,河川径流组分显著减少,基流指数(BFI)显著增加。河川径流组分和 BFI 对潜在蒸散发、归一化植被指数(NDVI)以及土壤含水量的

变化最为敏感。潜在蒸散发和 NDVI 的增加在河川径流组分减少过程中起主导作用,而土壤含水量的减少可能起次要作用。植被变化对地表径流、基流的直接或间接影响应引起区域可持续发展的高度重视。

#### 参考文献(References):

- [1] Haddeland I, Heinke J, Biemans H, et al. Global water resources affected by human interventions and climate change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014,111(9):3251-3256.
- [2] Yin J B, Gentile P, Zhou S, et al. Large increase in global storm runoff extremes driven by climate and anthropogenic changes [J]. *Nature Communications*, 2018,9(1):4389.
- [3] 张华,张勃,赵传燕.黑河上游多年基流变化及其原因分析[J].*地理研究*,2011,30(8):1421-1430.  
Zhang H, Zhang B, Zhao C Y. Annual base flow change and its causes in the upper reaches of Heihe River[J]. *Geographical Research*, 2011,30(8):1421-1430.
- [4] Gao P, Mu X M, Wang F, et al. Changes in streamflow and sediment discharge and the response to human activities in the middle reaches of the Yellow River[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011,15(1):1-10.
- [5] Wang D D, Yu X X, Jia G D, et al. Sensitivity analysis of runoff to climate variability and land-use changes in the Haihe Basin mountainous area of north China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019,269:193-203.
- [6] Bronstert A, Niehoff D, Bürger G. Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: Present knowledge and modelling capabilities[J]. *Hydrological Processes*, 2002,16(2):509-529.
- [7] Nyssen J, Clymans W, Descheemaeker K, et al. Impact of soil and water conservation measures on catchment hydrological response: A case in north Ethiopia [J]. *Hydrological Processes*, 2010,24(13):1880-1895.
- [8] 李子君,李秀彬.水利水保措施对潮河流域年径流量的影响:基于经验统计模型的评估[J].*地理学报*,2008,63(9):958-968.  
Li Z J, Li X B. Impacts of engineering measures for water conservancy on annual runoff in the Chaohe River Basin based on an empirical statistical model[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008,63(9):958-968.
- [9] Zheng Y T, Huang Y F, Zhou S, et al. Effect partition of climate and catchment changes on runoff variation at the headwater region of the Yellow River based on the Budyko complementary relationship[J]. *Science of the Total Environment*, 2018,643:1166-1177.
- [10] Lorente C, Causape J, Glud R N, et al. Impacts of agricultural irrigation on nearby freshwater ecosystems: the



- seasonal influence of triazine herbicides in benthic algal communities[J]. *Science of the Total Environment*, 2015,503:151-158.
- [11] Liu C M, Yu J J, Eloise K. Groundwater exploitation and its impact on the environment in the North China Plain[J]. *Water International*, 2001,26(2):265-272.
- [12] Miller J D, Kim H, Kjeldsen T R, et al. Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover[J]. *Journal of Hydrology*, 2014,515:59-70.
- [13] Zhao G, Mu X, Wen Z, et al. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China[J]. *Land Degradation & Development*, 2013, 24(5):499-510.
- [14] Feng X M, Fu B J, Piao S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11):1019-1022.
- [15] Abatzoglou J T, Dobrowski S Z, Parks S A, et al. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958—2015[J]. *Scientific Data*, 2018,5(1):1-12.
- [16] Muñoz-Sabater J, Dutra E, Agustí-Panareda A, et al. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications[J]. *Earth system science data*, 2021,13(9):4349-4383.
- [17] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021,13(8):3907-3925.
- [18] Tucker C J, Pinzon J E, Brown M E, et al. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005,26(20):4485-4498.
- [19] Smakhtin V U. Low flow hydrology: A review[J]. *Journal of Hydrology*, 2001,240(3/4):147-186.
- [20] He Y, Qiu H J, Song J X, et al. Quantitative contribution of climate change and human activities to runoff changes in the Bahe River watershed of the Qinling Mountains, China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019,51:101729.
- [21] 张鑫,蔡焕杰,尹晓楠.应用重标度极差分析法(R/S)分析无定河流域水沙变化[J].*农业工程学报*,2010,26(S2):212-217.
- Zhang X, Cai H J, Yin X N. Variation trends analysis of runoff and sediment time series based on R/S method in Wuding River Basin[J]. *Transactions of the CASE*, 2010,26(S2):212-217.
- [22] Tan X J, Liu B J, Tan X Z. Global changes in baseflow under the impacts of changing climate and vegetation[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(9): e2020WR027349.
- [23] Zheng H Y, Miao C Y, Zhang G H, et al. Is the runoff coefficient increasing or decreasing after ecological restoration on China's Loess Plateau[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021, 9(3): 333-343.
- [24] Wu J W, Miao C Y, Duan Q Y, et al. Dynamics and attributions of baseflow in the semiarid Loess Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019,124(7):3684-3701.
- [25] Feng X M, Sun G, Fu B J, et al. Regional effects of vegetation restoration on water yield across the Loess Plateau, China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012,16(8):2617-2628.
- [26] Jin Z, Liang W, Yang Y T, et al. Separating vegetation greening and climate change controls on evapotranspiration trend over the Loess Plateau[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):8191.
- [27] 穆兴民,顾朝军,孙文义,等.植被恢复改变黄土高原产流模式问题初探[J].*人民黄河*,2019,41(10):31-39.
- Mu X M, Gu C J, Sun W Y, et al. Preliminary assessment effect of vegetation restoration on runoff generation pattern of the Loess Plateau[J]. *Yellow River*, 2019,41(10):31-39.
- [28] Yang L, Wei W, Chen L D, et al. Response of temporal variation of soil moisture to vegetation restoration in semi-arid Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2014, 115:123-133.
- [29] Yang X N, Sun W Y, Mu X M, et al. Run-off affected by climate and anthropogenic changes in a large semi-arid river basin[J]. *Hydrological Processes*, 2020,34(8):1906-1919.
- [30] 尚文绣,许明一,尚弈,等.龙羊峡水库调度对径流的影响及蓄补水规律[J].*南水北调与水利科技*,2022,20(3):451-458.
- Shang W X, Xu M Y, Shang Y, et al. Influence of Longyangxia Reservoir operation on Yellow River runoff and its water storage[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2022,20(3):451-458.