

# Analysis of Low-Flow Characteristics in the Yan River Basin

Wenbing Gao<sup>1,2</sup>, Shuqi Zhang<sup>3</sup>, Yan Xia<sup>1,2</sup>, Xingchen Wei<sup>3\*</sup>, Xiaolin Yu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Exploration and Development Research Institute of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>National Engineering Laboratory for Exploration & Development of Low Permeability Oil/Gas Fields, Xi'an Shaanxi

<sup>3</sup>School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

Email: gaowb\_cq@petrochina.com.cn, jessiezhang@chd.edu.cn, xy1\_cq@petrochina.com.cn,

\*2018129022@chd.edu.cn, 2605179882@qq.com

Received: Oct. 12<sup>th</sup>, 2020; accepted: Nov. 17<sup>th</sup>, 2020; published: Dec. 22<sup>nd</sup>, 2020

## Abstract

In this paper, six probability distribution functions were employed to analyze annual minimum 7d runoff series from 1971 to 2014 at Zaoyuan, Xinghe and Yanan gauged stations, located at the main and tributaries in the Yan River basin. The different low runoff was calculated under different guarantee rates and the trend change of runoff series was investigated. The results demonstrate that the annual minimum 7d runoff at Xinghe and Yanan stations shows a significant upward trend, while Zaoyuan station shows a non-significant upward trend. Focused on distribution characteristics of low runoff, the lognormal distribution (LN-2) can fit annual minimum 7d runoff series well at Xinghe station, while the P-III distribution is more suitable for the Yanan and Zaoyuan stations. The 95% frequency corresponding low runoff is 21,254.4 m<sup>3</sup>, 11,387.5 m<sup>3</sup> and 10,800.0 m<sup>3</sup>, respectively.

## Keywords

Low Flows, Optimal Distribution, PPCC, Trend Analysis, Yan River Basin

# 延河枯水径流特征分析与计算

高文冰<sup>1,2</sup>, 张姝琪<sup>3</sup>, 夏岩<sup>1,2</sup>, 卫星辰<sup>3\*</sup>, 喻晓琳<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 陕西 西安

<sup>2</sup>低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安

<sup>3</sup>长安大学水利与环境学院, 陕西 西安

Email: gaowb\_cq@petrochina.com.cn, jessiezhang@chd.edu.cn, xy1\_cq@petrochina.com.cn,

\*2018129022@chd.edu.cn, 2605179882@qq.com

作者简介: 高文冰(1978-), 男, 河北沧州人, 高级工程师, 主要研究方向: 水文学及水资源。

\*通讯作者。

文章引用: 高文冰, 张姝琪, 夏岩, 卫星辰, 喻晓琳. 延河枯水径流特征分析与计算[J]. 水资源研究, 2020, 9(6): 589-596.

DOI: 10.12677/jwrr.2020.96064

收稿日期：2020年10月12日；录用日期：2020年11月17日；发布日期：2020年12月22日

## 摘要

本文以1971~2014年延河干支流的枣园站、杏河站及延安站的年最小7d径流量数据为研究对象，分析了其径流序列的趋势变化及概率分布函数特征关系，得到了不同保证率下的枯季径流。结果显示延河流域杏河和延安水文站的年最小7d径流量序列表现为显著上升趋势，枣园站呈非显著上升趋势。从枯水分布特征上看，杏河站年最小7d径流量序列的最优分布为两参数对数正态分布(LN-2)，而枣园和延安站的最优拟合分布为P-III型，各站点对应的95%频率下的枯水径流分别为1.14万 $\text{m}^3$ 、1.08万 $\text{m}^3$ 和2.13万 $\text{m}^3$ 。

## 关键词

枯水径流，最优分布，PPCC，趋势分析，延河流域

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来，受气候变化和人类活动双重影响，世界上很多地区或流域都出现了水文情势异变的现象，如枯水流量持续走低，甚至断流事件等，而这些问题直接威胁了区域水资源保障，甚至是全球水安全[1]。我国北方地区是气候变化与人类活动的典型耦合影响区，多地河流水文情势都发生了明显变化，河道流量锐减，甚至断流等现象频发，生态环境问题严重。黄土高原地处我国半湿润气候区向干旱半干旱气候区的过渡带，是最大的水土流失区，也是我国“一带一路”建设的主战区和生态文明建设的核心区，其枯季径流演变规律及水安全问题一直备受关注，相关领域的研究也成为了国内外学者追逐的热点。

延河是黄河中游的一级支流，也是陕北黄土丘陵沟壑区的重要水源，其地处中部黄土丘陵区，是黄土高原地区的一个代表性流域。相关研究成果表明，受气候变化、人类取水活动以及黄土高原变绿的影响，延河的水文要素正在发生改变，径流量逐年减少。张小苗[2]和赵跃中[3]通过分析延河年径流量以及极端日流量等指标的趋势性、阶段性和周期变化，已论证了2010年之前延河的径流量、极端日流量及其发生天数确实已呈现出了显著的下降趋势，这可能对未来延河流域的水资源安全产生威胁，也对流域的水资源科学管理提出了挑战。

众所周知，在干旱缺水地区，河流枯水径流是水资源的重要组成部分，直接关系到取水量的保证程度。因此，生产实践中，河流枯水径流的数量、质量等基本特征常作为工程规划设计、水资源科学分配与保护的重要依据[4]。实际上，枯水期主要是指无雨水或融雪水补给河流的时期，亦指地表水补给中断，河川径流主要由地下水补给的时期。枯季径流通常指一年中地表水补给减少而主要由地下水补给时期的径流可用年最小流量、最小月径流量、7-day、10-day、15-day最小流量等来表征[5]。枯水与洪水是水文学中的两个重要组成部分。就目前而言，无论是研究内容、方法以及研究深度等方面，枯水研究水平远低于洪水。而对于黄土高原区延河流域的枯水径流研究则更少。随着黄土高原区社会经济不断发展，人口与经济总量不断增加，水资源的供求矛盾也日益突出。加之在枯水季节河流径流量偏少，水质污染持续加重，人类过度开发利用枯水资源等不合理方式，常造

成区域河流断流、地面下沉、海水入侵等一系列的环境问题。因此,研究河流枯水径流特征对黄土高原区尤为必要[6]。

枯水径流研究的重要内容之一是枯水径流频率分析。其主要目的是采用概率分布来揭示枯水径流与发生频率之间的关系从而获得研究区域的设计枯水径流。通常情况下,是由经验频率建立长系列连续枯水实测资料的枯水径流频率曲线。但在实际中,实测枯水系列长度往往有限,故常采用不同的理论频率曲线来对实测资料进行拟合,并通过拟合优度检验选出最佳的理论曲线。常用的理论分布曲线有皮尔逊 III 型分布(P-III)、对数皮尔逊 III 型分布(LP-III)、三参数对数正态分布(LN-3)、两参数对数正态分布(LN-2)、耿贝尔分布(EV-I)、截尾正态分布(TN)等分布[2][3]。针对某一流域,在枯水频率分析中,概率点据相关系数(PPCC)检验法广泛应用于寻求最适宜于描述该流域枯水径流概率分布的线型。

鉴于此,本文拟基于延河流域杏河站、枣园站和延安站年最小 7d 径流量数据,探索各站年最小 7d 径流量概率分布的最优拟合,确定最适合延河流域各站的分布函数,计算枯水期不同频率下的特征值,以为缓解流域水资源供需矛盾,提升区域水资源安全水平提供技术支持。

## 2. 研究区概况与数据来源

延河也称延水,是黄河的一级支流,延安市第二大河流,也常被称作中国革命母亲河(图 1)。其发源于于山附近,由西北向东南流动,最终注入黄河。河流全长 286.9 km,流域面积 7725 km<sup>2</sup>。流域地势西北高,东南低,水系结构呈树枝状,多年平均径流量为 2.89 亿 m<sup>3</sup>,多年平均输沙量为 4150 万 t [7]。延河径流年内分配不均匀,主要集中于夏季(6~9 月),冬季径流最少。延河流域属中温带大陆性半干旱季风气候,年平均气温 8.8℃,年平均降水量 505 mm [8]。

延安站位于延河上游干流,控制流域面积 3188 km<sup>2</sup>,多年平均径流量  $1.21 \times 10^8$  m<sup>3</sup>,多年平均输沙量 2929 万 t。杏河站位于延河一级支流杏子河上,控制流域面积 461.5 km<sup>2</sup>,多年平均径流量  $0.20 \times 10^8$  m<sup>3</sup>。枣园站位于延河一级西川河上,控制流域面积 713.2 km<sup>2</sup>,多年平均径流量  $0.22 \times 10^8$  m<sup>3</sup>。本文选取延河流域杏河、枣园及延安水文站 1971~2014 年最小 7d 径流量数据开展枯水特征分析与频率计算。三个水文站的实测日径流数据来源于黄河水利委员会印制的水文数据年鉴。

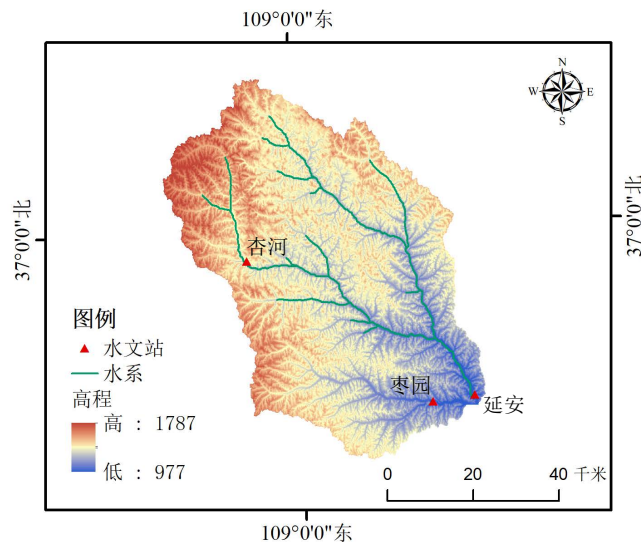


Figure 1. Study area and locations of three hydrological stations

图 1. 延河流域图及水文站点分布情况

### 3. 研究方法

#### 3.1. Mann-Kendall 趋势分析

Mann-Kendall(M-K)检验是一种较为常用的非参数趋势检验法,主要通过构建时间序列秩序列的统计量  $Z$  来判断时间序列的变化趋势。若  $Z > 0$ , 则表明时间序列具有上升趋势, 若  $Z < 0$  则表明时间序列有下降趋势。若统计量  $|Z| > 1.96$ , 则表明超过 0.05 的置信水平, 即时间序列变化呈显著上升或下降。具体计算公式参见文献[9]。本文采用 M-K 趋势检验法检验年最小 7d 径流量时间序列的趋势变化。

#### 3.2. 参数估计与拟合优度检验

本研究采用皮尔逊 III 型分布(P-III)、对数皮尔逊 III 型分布(LP-III)、三参数对数正态分布(LN-3)、两参数对数正态分布(LN-2)、耿贝尔分布(EV-I)、截尾正态分布(TN)这 6 种分布分别拟合三个站点的年最小 7d 径流量序列, 并用 PPCC 法检验各个分布的拟合优度。最后, 使用拟合优度最佳的频率分布曲线计算三个水文站不同频率下所对应的枯水径流值。

概率点据相关系数(Probability Plot Correlation Coefficient, PPCC)检验法由 Filiben 及 Looeny 和 Gullede 提出, 主要用于正态分布, 一般在线型选择中有较好的实用性[4]。方法将概率点据和相关系数相结合, 概念明确, 便于应用, 现已被推广到对数正态分布、皮尔逊III型分布、对数皮尔逊III型分布、均匀分布、耿贝尔分布及韦布尔分布阵[10]。PPCC 检验法, 作为概率分布线型的一种有效的判定方法, 在枯水频率分析中应用较为广泛[11]。其主要是假设待检样本服从某种理分布, 排序后的观测值  $X_{(i)}$  与该假设的理论分布值  $Y_{(i)}$  的概率点据近似线性相关, 相关系数为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{(i)} - X_m)(Y_{(i)} - Y_m)}{\left[ \sum_{i=1}^n (X_{(i)} - X_m)^2 \sum_{i=1}^n (Y_{(i)} - Y_m)^2 \right]^{1/2}} \quad (1)$$

式中:  $Y_{(i)} = E[X_{(i)}]$ ;  $X_m = Y_m$ 。式中,  $n$  为序列长度;  $X_{(i)}$ 、 $X_m$  分别为排序后的样本实测值、均值;  $Y_{(i)}$ 、 $Y_m$  分别为假设分布与  $X_{(i)}$  相应的理论值、均值。实际上, PPCC 检验法是根据实测样本序列排序后各观测值  $X_{(i)}$  和经验频率  $P_i$ , 推求出假设分布上  $P_i$  对应的期望值  $Y_{(i)} = E[X_{(i)}] = F^{-1}(P_i)$ , 再求两序列  $X_{(i)}$ 、 $Y_{(i)}$  的相关系数  $R$ , 并根据一定的检验准则判断是否拒绝假设分布或比较不同假设分布函数线型的优劣[12]。

### 4. 结果与分析

#### 4.1. 年最小 7d 径流量序列基本统计特征

表 1 列出了 3 个水文站年最小 7d 径流量序列的基本统计特征值。其中, 四分位区间距(Inter-Quantile Range, IQR)定义为样本数据 75%和 25%分位数之差。如果数据中没有奇异值, 则 IQR 较标准差更适合描述水文序列的波动特征。

**Table 1.** Statistical features of the annual minimum 7d runoff at Xinghe, Zaoyuan and Yanan gauged stations

**表 1.** 杏河、枣园和延安水文站年最小 7d 径流量基本水文统计特征(万  $m^3$ )

水文站	均值	中位数	四分位区间距	最小值(年份)	变差系数
杏河	5.1214	5.4518	3.0132	1.8144(2003 年)	0.3579
枣园	4.6727	4.3286	3.3566	1.0368(1977 年)	0.5232
延安	17.7258	12.1565	26.0842	0.3974(1991 年)	0.9138

由表 1 可以看出,三个水文站发生最小年最小 7d 径流量的年份分别是 2003、1977 和 1991 年。延河干流延安站年最小 7d 径流量序列总体上要比支流杏河站和枣园站要大。3 个水文站点年最小 7d 径流量变化特征有所差异,反映出干支流在降水、人类活动、地貌以及产汇流特征等诸多方面的差异性。年最小 7d 径流量的变化能很好地反映流域干旱实际发生情况。

#### 4.2. 年最小 7d 径流量序列的变化趋势

使用 M-K 趋势检验法对杏河站、枣园站及延安站 1971~2014 年的年最小 7d 径流量序列进行趋势分析,具体结果如图 2 所示。

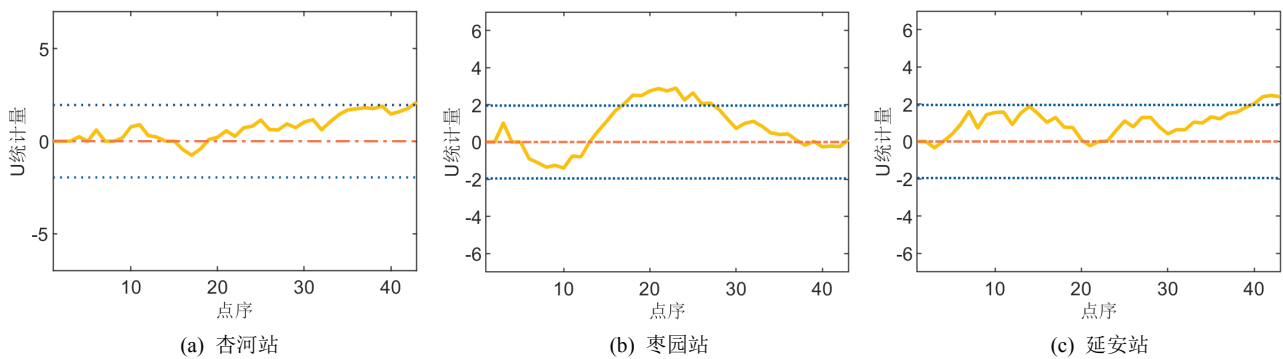


Figure 2. Mann-Kendall test results of the annual minimum 7d runoff series

图 2. 年最小 7d 径流量序列的 Mann-Kendall 检验结果

由图 2 可知,杏河站年最小 7d 径流量序列呈现出显著上升趋势( $Z = 2.1139$ ),枣园站呈现不显著上升趋势( $Z = 0.1315$ ),延安站呈现显著上升趋势( $Z = 2.3971$ )。该检验结果与图 3 中各站点年最小 7d 径流量过程所显示的趋势变化较为一致。

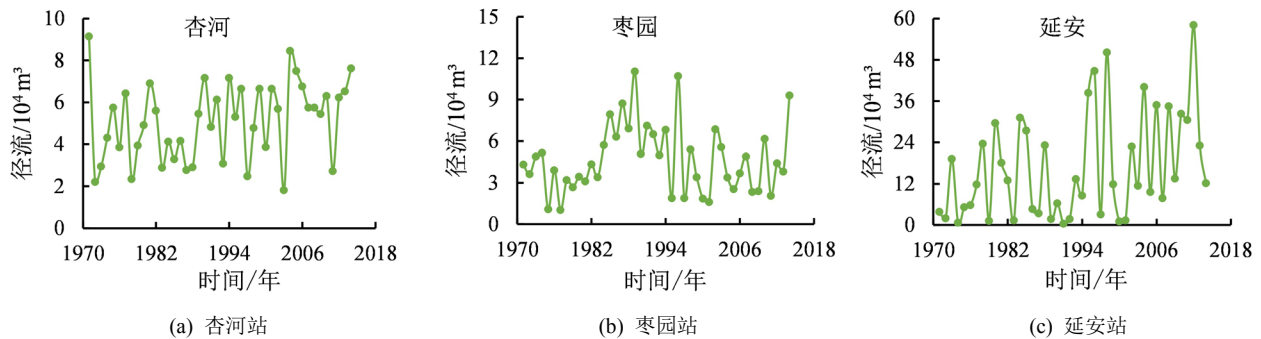


Figure 3. Annual minimum 7d runoff hydrographs

图 3. 年最小 7d 径流量过程线

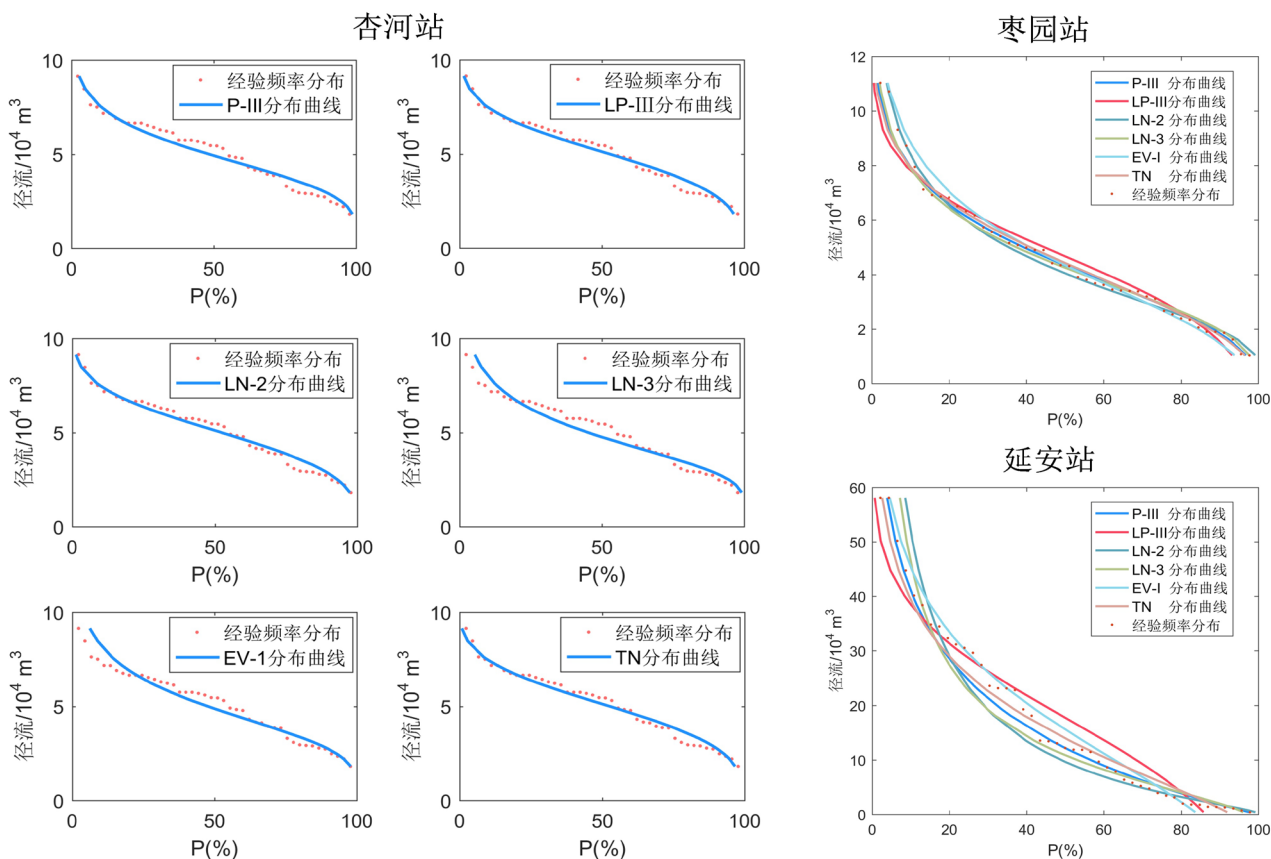
#### 4.3. 频率分布函数拟合优度检验

运用线性矩法估计 6 种概率分布函数的参数,并用 PPCC 法对拟合优度进行检验,相关系数最大( $R_{max}$ )的分布,即为拟合效果最好的分布,所得结果如表 2 所示。

由表可知,对杏河站的年最小 7d 径流量而言,两参数对数正态分布(LN-2)呈现出了最好的拟合效果。而 P-III 分布则是枣园和延安站拟合效果最好的分布。图 4 显示了不同站点不同分布的拟合效果对比图,从图中不难发现其结果与表 2 中所示的结果是一致的。

**Table 2.** Goodness fit results of PPCC test  
**表 2.** PPCC 拟合优度检验结果

水文站	P-III	LP-III	LN-3	LN-2	EV-1	TN	R <sub>max</sub>
杏河	0.9893	0.9869	0.9885	0.9921	0.9466	0.9885	0.9921
枣园	0.9952	0.9609	0.9936	0.9844	0.9752	0.9945	0.9952
延安	0.9843	0.9549	0.9835	0.8709	0.9484	0.9835	0.9843



**Figure 4.** Frequency curve fitting results for annual minimum 7d runoff  
**图 4.** 延河流域各站年最小 7d 径流频率拟合结果

#### 4.4. 频率计算

众所周知，枯水径流的频率分析主要是通过概率分布揭示枯水径流与发生频率间的相互关系，并得到研究区不同频率下的枯水径流值。遂根据上述小节中得到的不同站点的最佳拟合分布，可计算延河流域杏河站、枣园站及延安站  $P = 50\%$ 、 $75\%$ 、 $90\%$ 和  $95\%$ 四种频率下的年最小 7d 径流量，具体结果如表 3 所示。

**Table 3.** The annual minimum 7d runoff under different frequency at different hydrological gauges  
**表 3.** 不同水文站点不同枯水频率下的年最小 7d 径流量(万  $m^3$ )

	50%	75%	90%	95%
杏河	4.91	3.86	2.92	1.14
枣园	4.31	2.67	1.86	1.08
延安	13.03	5.78	3.09	2.13

由表可知,延安站作为延河上游的干流站,其水量最大,支流杏河站和枣园站次之。在  $P = 50\%$  频率下,延安站的年最小 7d 径流量为 13.03 万  $\text{m}^3$ ,杏河站径流量为 4.91 万  $\text{m}^3$ ,枣园站径流量为 4.31 万  $\text{m}^3$ 。在  $P = 95\%$  情况下,延安站的年最小 7d 径流量为 2.13 万  $\text{m}^3$ ,杏河站径流量为 1.14 万  $\text{m}^3$ ,而枣园站最小,径流量仅为 1.08 万  $\text{m}^3$ 。

#### 4.5. 年最小 7d 径流量变化归因

相关研究表明,21 世纪初国家开始在黄土高原区实行“退耕还林”政策,延河流域从 2000~2010 年间的土地利用情况发生了较大改变,主要体现在耕地与草地向林地的转移。延河流域在“退耕还林”政策的推动下,耕地面积大幅减少,草地及林地的面积显著增加,流域植被的整体覆盖度趋好,尤其 2010 年后植被改善更为显著,呈现了显著“变绿”的景象,如图 5 所示。

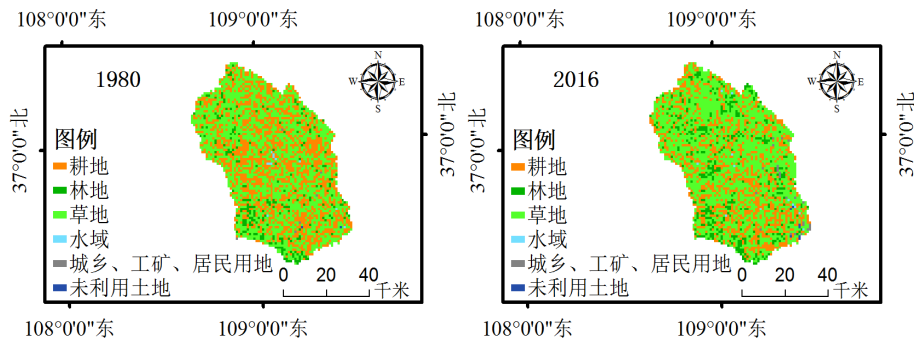


Figure 5. Changes in vegetation cover in the Yan River basin

图 5. 延河流域植被覆盖变化

流域植被趋好提高了流域水土涵养能力,有效增加了流域的枯季径流量,表现在三个水文站点上,即年最小 7d 径流量序列的 Mann-Kendall 检验结果呈现上升趋势。

## 5. 结论

本文综合运用 Mann-Kendall 趋势检验法、概率分布函数及拟合优度检验法分析了延河不同断面年最小 7d 径流量的演变特点,使用 6 种不同的分布模型确定了杏河站、枣园站及延安站年最小 7d 径流量序列的最优拟合分布。取得相关结论如下:

1) 趋势检验结果表明,1971~2014 年间延河流域杏河站、枣园站及延安站的年最小 7d 径流量均呈现上升趋势,其中杏河站和延安站显著上升,其  $Z$  值分别为 2.1139 和 2.3971。

2) 概率分布函数及拟合优度检验结果表明,杏河站年最小 7d 径流量的最佳拟合分布为两参数对数正态分布(LN-2),枣园和延安站的最佳拟合分布为 P-III 分布。

3) 三个水文站年最小 7d 径流量的频率分析结果表明,延安站在  $P = 95\%$  情况下的年最小 7d 径流量最大,为 2.13 万  $\text{m}^3$ ,杏河站年最小 7d 径流量次之,为 1.18 万  $\text{m}^3$ ,而枣园站最小,仅为 1.08 万  $\text{m}^3$ 。

河川径流的演变多为不同驱动因素共同作用的结果,其机制极其复杂。本文通过较为简单的手段,选出适合该区域年最小 7d 径流量序列的概率分布曲线,给出 4 种频率下的径流值,并分析了其趋势变化,所得成果可为流域水资源规划、工程设计以及水安全保障方案提供技术参考,以切实保障新时期黄土高原区的用水安全。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(51979005);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2020JM-250);陕北油田区地表水资源评价(技 2019-52)。

## 参考文献

- [1] 薛鑫, 王瑞峰, 叶长青. 南渡江流域枯水流量概率特征及成因与影响研究[J]. 水力发电, 2020, 46(5): 16-21.  
XUE Xin, WANG Ruifeng and YE Changqing. Research on probability characteristics and causes and effects of low flow in Nandu River basin. *Water Power*, 2020, 46(5): 16-21. (in Chinese)
- [2] 张小苗, 穆兴民, 赵广举, 等. 基于极端日流量的延河径流变化特征研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(8): 12-18.  
ZHANG Xiaomiao, MU Xingmin, ZHAO Guangju, et al. Study on the characteristics of Yanhe river runoff variation based on extreme daily flow. *Yellow River*, 2018, 40(8): 12-18. (in Chinese)
- [3] 赵跃中. 延河流域径流泥沙变化及其驱动因素研究[D]: [硕士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.  
ZHAO Yuezhong. Study on runoff and sediment variation and its driving factors in Yanhe River basin. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
- [4] 冯国章, 王双银. 河流枯水流量特征研究[J]. 自然资源学报, 1995, 10(2): 127-135.  
FENG Guozhang, WANG Shuangyin. Research on the characteristics of river low flow. *Journal of Natural Resources*, 1995, 10(2): 127-135. (in Chinese)
- [5] 倪雅茜. 枯水径流研究进展与评价[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2005.  
NI Yaqian. Research progress and evaluation of low-water runoff. Wuhan: Wuhan University, 2005. (in Chinese)
- [6] 涂新军, 陈晓宏. 基于 PPCC 检验法的枯水径流概率分布选型研究[J]. 水电能源科学, 2006, 24(1): 76-79.  
TU Xinjun, CHEN Xiaohong. Research on the selection of low-flow probability distribution based on PPCC inspection method. *Water Resources and Power*, 2006, 24(1): 76-79. (in Chinese)
- [7] 李正国, 王仰麟, 吴健生, 等. 不同土地利用方式对黄土高原植被覆盖季节变化的影响——以陕北延河流域为例[J]. 第四纪研究, 2005, 25(6): 762-769.  
LI Zhengguo, WANG Yanglin, WU Jiansheng, et al. The influence of different land use methods on the seasonal changes of vegetation cover in the Loess Plateau: Taking the Yanhe Basin in northern Shaanxi as an example. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(6): 762-769. (in Chinese)
- [8] 陈淑娟, 温仲明. 延河流域地带性物种分布对未来气候变化的响应[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 157-161.  
CHEN Shujuan, WEN Zhongming. The response of zonal species distribution in the Yanhe River basin to future climate change. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(1): 157-161. (in Chinese)
- [9] ZHANG, S., ZHANG, H., LI, J., et al. AGCT: A hybrid model for identifying abrupt and gradual change in hydrological time series. *Environmental Earth Sciences*, 2019(78): 433.
- [10] 周芬, 郭生练, 肖义, 等. P-III型分布参数估计方法的比较研究[J]. 水电能源科学, 2003, 21(3): 10-13.  
ZHOU Fen, GUO Shenglian, XIAO Yi, et al. Comparative study of P-III distribution parameter estimation methods. *Water Resources and Power*, 2003, 21(3): 10-13. (in Chinese)
- [11] 赵茹欣, 赵雪花. 基于 PPCC 检验的径流指数对汾河上游水文干旱演变分析[J]. 水力发电, 2016, 42(7): 20-23.  
ZHAO Ruxin, ZHAO Xuehua. Analysis of hydrological drought evolution in the upper reaches of Fen River based on PPCC test runoff index. *Water Power*, 2016, 42(7): 20-23. (in Chinese)
- [12] 万东辉, 石赞赞, 何用, 等. 西江流域枯水径流频率分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(4): 11-13.  
WAN Donghui, SHI Yunyun, HE Yong, et al. Frequency analysis of low-water runoff in the Xijiang River Basin. *Water Resources and Power*, 2011, 29(4): 11-13. (in Chinese)