

# 北洛河上游径流变化特征及其驱动因素研究

陈玫君<sup>1,2</sup>, 穆兴民<sup>1,3</sup>, 高鹏<sup>1,3†</sup>, 赵广举<sup>1,3</sup>, 孙文义<sup>1,3</sup>, 赵建民<sup>4</sup>

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 712100, 陕西杨凌;  
2. 中国科学院大学, 100049, 北京; 3. 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,  
712100, 陕西杨凌; 4. 南昌工程学院水利与生态工程学院, 330099, 南昌)

**摘要:** 研究人类活动及降水变化对北洛河上游径流的影响, 分析径流变化的主要驱动因子, 为北洛河上游及相类似的其他流域水土保持、水资源合理利用提供决策依据。采用累积距平法、Mann-Kendall 趋势检验法、降水-径流双累积曲线法对北洛河上游 1971—2014 的年降水量和径流量变化进行趋势分析与变异点诊断, 并采用双累积曲线法和线性回归模型量化分析降水变化和人类活动对年径流、汛期径流变化的影响程度。结果表明: 2003 年大规模退耕还林实施后, 北洛河上游降水-径流关系发生突变, 突变后的年径流和汛期径流显著低于突变前; 年径流变化主要是汛期径流减少造成的; 人类活动相比降水对年和汛期的贡献率分别为 106% 和 114%; 突变后植被调节径流的能力显著增加, 日径流量 > 100、> 1.15 和 < 0.5 m<sup>3</sup>/s 所占比例分别为 0.27%、59.2% 和 8%, 径流变化对降水变化的敏感性降低。认为: 大规模化植被恢复是北洛河源区径流量减少的直接因素, 而退耕还林(草)、水土保持政策是核心驱动力; 同时, 随着退耕还林时间的延长, 北洛河径流不会持续减少, 未来将维持在相对低而稳定的水平。

**关键词:** 水土保持; 退耕还林; 径流; 降水; 北洛河上游

**中图分类号:** S157.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2673(2018)06-0001-08

**DOI:** 10.16843/j.sswc.2018.06.001

## Characteristics and driving factors of runoff changes in the upper reach of the Beiluo River basin

CHEN Meijun<sup>1,2</sup>, MU Xingmin<sup>1,3</sup>, GAO Peng<sup>1,3</sup>, ZHAO Guangju<sup>1,3</sup>, SUN Wenyi<sup>1,3</sup>, ZHAO Jianmin<sup>4</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 712100, Yangling, Shaanxi, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, 10009, Beijing, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, 712100, Yangling, Shaanxi, China; 4. College of Water and Ecology Engineering, Nanchang Institute of Technology, 330099, Nanchang, China)

**Abstract:** [Background] Studying the impact of human activities and precipitation changes on runoff and analyzing the main driving factors of the runoff changes in the upper reach of the Beiluo River basin could provide decision-making basis for water and soil conservation and rational use of water resources in the upper reaches of the Beiluo River basin and similar watersheds. [Methods] Based on the daily precipitation data and runoff data of Wuqi meteorological station in the upper reach of the Beiluo River basin from 1971 to 2014, the study uses the cumulative anomaly method, Mann-Kendall trend test, and precipitation-runoff double mass curve method to analyze the changes in trends and diagnosis the variation point of the annual precipitation and runoff changes in the upper reaches of the Beiluo River during 1971

收稿日期: 2018-03-26 修回日期: 2018-09-04

项目名称: 国家重点研发计划专题计划“黄土高原水土流失治理与生态产业协同发展技术集成与模式”(2016YFC0501707);  
国家科技基础工作专项“生态工程与水沙变化调查”(2014FY210100)

第一作者简介: 陈玫君(1993—),女,硕士研究生。主要研究方向:生态水文及水土保持研究。E-mail:1016030360@qq.com

†通信作者简介: 高鹏(1976—),男,博士,副研究员。主要研究方向:生态水文及水土保持研究。E-mail:gaopeng@ms.iswc.ac.cn

-2014. The double mass curve method and linear regression model are used to quantify the impact of climate change and human activities on precipitation and runoff changes in the annual scale and flood season. [Results] The results show that after the implementation of the Grain for Green Program in 2003, the precipitation-runoff relationship in the upper reach of the Beiluo River changed abruptly. The annual runoff and the flood season runoff after the mutation were significantly lower than those before the mutation, and the annual runoff changes were mainly caused by the reduction of the flood season runoff. Before 2003, the average daily runoff  $> 100 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $> 1.15 \text{ m}^3/\text{s}$ , and  $< 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  were 0.27%, 59.2%, and 8%, respectively, decreased to 0.07%, 44.9%, and 0.048 after 2003. The contribution of human activities to the annual runoff and the reduction of runoff during the flood season was 106% and 114% respectively. The capacity of vegetation to regulate runoff is significantly increases a few years after the implementation of the Grain for Green Program due to the increase in the area of forest land and the reduction of farmland area. The number of the days that have extreme runoff has decreased obviously after 2003. The proportion of the non-flood season runoff accounts for annual runoff has decreased in recent years. At the same time, the ratio of moderate flow after the mutation increased compared to the previous years. Changes in runoff are less sensitive to changes in precipitation. [Conclusions] Large-scale of the vegetation restoration is a direct factor for the decrease of runoff in the Beiluo River's source area, and the policy of Grain for Green Program and soil and water conservation is the core driving force. At the same time, with the extension of the time for Grain for Green Program, the runoff in the upper reach of Beiluo River will not continue to decrease, and will remain at a relatively low and stable level in the future.

**Keywords:** soil and water conservation conversion; Grain for Green Program; runoff; rainoff; the upper reach of Beiluo River

20世纪以来,由于气候变化和人类活动的综合作用,干旱半干旱地区河流水沙过程发生了显著变化,并已成为世界性的研究热点<sup>[1-4]</sup>,其中黄河中游黄土高原一直是该研究的热点地区。研究表明,1996年以来,黄河水沙进一步发生显著变化,实测径流量、输沙量急剧减少,这对黄河的治理与开发带来重大影响<sup>[5]</sup>。岳晓丽<sup>[6]</sup>分析了黄河中游不同流域面积多个水文站点近60年来的水沙数据,认为人为因素是导致水沙下降的主要原因。Zhao Guangju等<sup>[7]</sup>对渭河流域1950—2008年的径流变化研究发现,不同水土保持措施实施阶段,人类活动和气候变化对径流减少的贡献率有所不同,但人类活动均占主导地位。北洛河是陕北高原最大的河流,也是黄河中游重要的多砂粗砂区和暴雨洪水的主要源头,其水文水资源的变化引起了学者们的关注。董起广等<sup>[8]</sup>分析了北洛河交口河水文站月径流资料,指出20世纪60年代以来北洛河径流呈减小趋势,冬季缓慢,其他季节较为明显。刘红英<sup>[9]</sup>对北洛河上游吴旗、刘家河、志丹水文站自建站到2006年的月径流数据减少趋势的原因进行分析,得出2000—2006年,人类活动影响程度大于降水,充分说明退耕还林、水土保持等流域综合治理等措施的成效。蒋观

滔等<sup>[10]</sup>通过对北洛河吴旗水文站1971—2010年4—10月实测水文资料的定量分析,综合4种突变点检验方法,认为1971—2010年降水量并未发生显著的趋势性变化,径流量突变在2003年。以上研究表明,气候变化和人类活动对径流变化的影响因地而异,因此,在特定区域开展针对性研究,对区域水资源合理配置具有重要意义。北洛河上游是率先开展退耕还林(草)的试点地区,笔者以北洛河上游(吴旗水文站以上流域)为研究对象,分析吴旗站1971—2014年来径流量、汛期径流量以及非汛期径流量的变化规律,阐明人类活动和气候变化对年、汛期径流过程的影响,并对未来径流量的变化趋势进行预测。本研究有助于认识退耕还林对河流水沙变化的影响,为北洛河流域水土流失治理提供理论依据和技术支撑。

## 1 流域概况

本研究区为北洛河上游(吴旗水文站以上流域),属于黄土丘陵沟壑区,地理坐标E 107°32'40"~108°32'45",N 36°44'53"~37°19'28",海拔1 270.6~1 888.9 m,控制流域面积3 408 km<sup>2</sup>(图1)。地形破碎、沟壑纵横,植被稀少,水土流失严重,是黄河重要

的粗砂多砂区。流域内年均温度 7.5℃，无霜期 96~146 d，多年平均降雨量 454.9 mm，主要集中在 6—9 月，多年平均陆地蒸发量 400~450 mm。吴旗站多年平均径流量 8 523.5 万 m<sup>3</sup> [11]，主要土壤类型黄绵土 [12-13]。从 20 世纪末开始，北洛河上游开始大规模的退耕还林(草)工程，植被、土地利用和生态环境发生了显著变化。退耕还林对北洛河上游水资源、水文过程的影响及变化趋势，已经成为一个亟待深入研究的热点问题。

## 2 材料与方 法

### 2.1 数据的收集与整理

笔者根据中国气象数据共享网 (<http://data.cma.gov.cn>) 中吴旗气象站 1971—2014 年日降水数据和《黄河流域水文年鉴》中北洛河吴旗水文站 1971—2014 年日径流数据，汇总得到年、月降水、径流量。

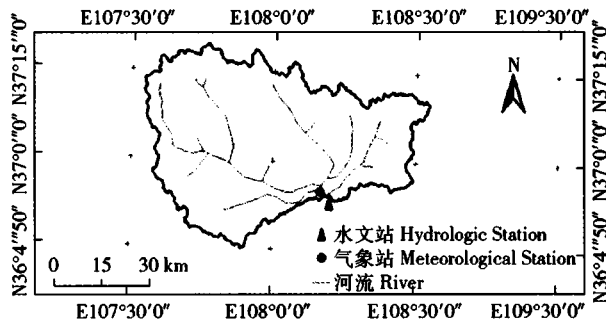


图 1 研究区地理位置图

Fig. 1 Geographical location of the study area

### 2.2 研究方法

采用线性趋势法、累积距平法、流量历时曲线法、非参数 Mann-Kendall (MK 法) 趋势检验法和双累积曲线法对降雨、径流序列的趋势性、突变性进行分析，并定量评价降水与人类活动对流域径流变化的影响。线性趋势法较为简单，不在赘述。

1) 累积距平法。用于反映数据增加或减小的趋势，若曲线某一时间值左右分别有明显增大和减小的趋势，则可把该点作为变化趋势的拐点，详情参考文献 [14]。

2) 流量历时曲线法。反映该时间序列不同量级数据的分布情况，反映该时间序列不同等级的分布情况 [15]，以大于或等于某一流量的比例表征。

3) 非参数 Mann-Kendall (MK) 趋势检验法。是一种常用的对水文序列数据随年序变化进行趋势性检验的非参数统计方法 [16-17]。设同一时间序列  $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ，其统计量为

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k), \quad (1)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} -1 & x_j - x_k < 0 \\ 0 & x_j - x_k = 0 \\ 1 & x_j - x_k > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $x_j, x_k$  为趋势检验序列的统计值 (年径流量，亿 m<sup>3</sup>)； $n$  为检验序列统计值的个数。则 MK 统计结果为

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

若  $Z$  为正值则表示序列有增加趋势，负值则为减少趋势。当  $Z$  的绝对值  $\geq 1.28, 1.96, 2.32$  时，序列趋势通过 90%、95%、99% 的显著检验。其统计量的计算与判读详见文献 [18-19]。

4) 双累积曲线法。年降水与径流数据逐年累加得到双累积曲线，以曲线斜率的改变判断降水径流关系突变点，根据基准期的降水-径流关系得到突变后由降水量决定径流量，其与实际径流量之间的差值，为人类活动影响的径流量，同时也可以计算得到降水变化引起的径流变化 [14, 20]。

## 3 结果与分析

### 3.1 北洛河上游降雨量、径流量年际变化特征

3.1.1 北洛河上游降水径流变化趋势 1971—2014 年流域内年均面降水量 455 mm，略呈增加趋势，平均增加量为 0.537 mm/a，但变化趋势不显著。流域内年径流量随降雨变化而波动，并呈逐年减少的趋势，年均减少量为 120 万 m<sup>3</sup>/a。在代际间，1971—1980 年间最大，1991—2000 年为不稳定的高产流时段，此阶段径流增量超过降水增量，蒸发减少。2000 年以后降水最多，但径流量最小 (图 2 和表 1)。

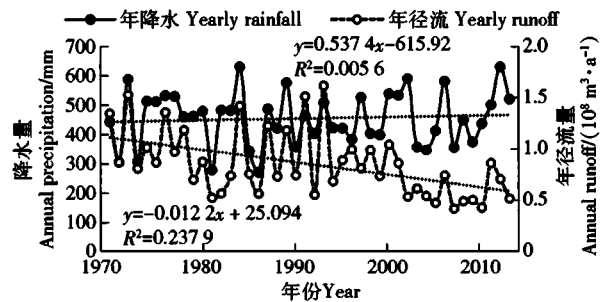


图 2 北洛河上游降雨量及径流量变化趋势

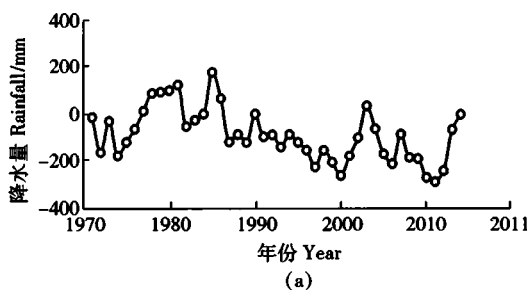
Fig. 2 Trends of rainfall and runoff in the upper reaches of the Beiluo River

表1 北洛河上游流域不同年代水文要素特征

Tab.1 Hydrological characteristics in different years in the upper Beiluo River basin

年份 Year	降水量 Rainfall			径流量 Discharge		
	年均 Annual average/mm	极值比 Exterme ratio	变差系数 Cv	年均 Annual average/ $10^8 \text{ m}^3$	极值比 Exterme ratio	变差系数 Cv
1971—2014	455	2.33	0.200	0.852	2.87	0.371
1971—1980	465	1.93	0.192	1.065	2.17	0.244
1981—1990	445	2.33	0.253	0.858	2.69	0.346
1991—2000	429	1.47	0.119	0.953	2.92	0.349
2001—2014	473	1.82	0.196	0.625	2.50	0.294

3.1.2 北洛河上游流域降水、径流的突变特征 降雨量年际之间频繁波动,距平曲线1974—1981、1982—1985、2001—2003和2012—2014年呈上升趋势,降水量增加;1985—2000、2004—2011年曲线呈下降趋势,降水量减少(图3(a))。1977—1986年距平值基本 $>0$ ,属于降水较多的时段。在过去40多年里该地区流域降水量整体变化趋势不明显,没有明显的多雨期和少雨期。



径流量累计距平在2003年前后达到最大值。从1971年到20世纪90年代初,累计距平波动上升,年径流整体上大于平均值;20世纪90年代中期到2000年前后,累积距平维持在最大值附近,形成了平台期,2003年以后,累积距平迅速减小,年径流量长期小于多年平均值(图3(b))。说明北洛河流域在1999年实行退耕还林(草)政策改变了流域下垫面状况,并进一步影响流域的水循环过程,作用明显。



图3 1971—2014年降雨量距平动态与年径流量距平动态

Fig.3 1971—2014 rainfall anomalies (a) and runoff anomalies (b)

### 3.2 降雨量、径流量年内分布

3.2.1 降雨量、径流量的年内季节分布 图4显示:北洛河上游降水主要集中在每年的6—9月,占全年降水量的73%;由于夏季降雨影响,径流量在7—8月份出现较大峰值;在3—4月出现较小峰值,主要由于冬季冰雪融水及春季降雨增加,同时温度低、蒸发弱,易产生径流,径流量在5月出现一个低

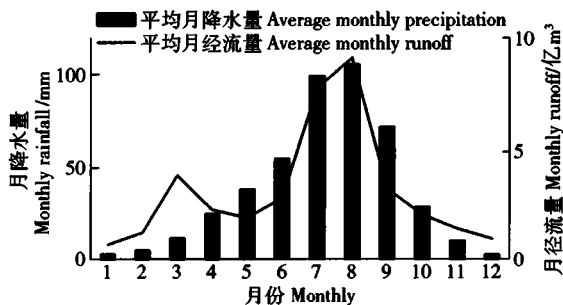


图4 1971—2014年月平均降雨量、径流量

Fig.4 1971—2014 average monthly rainfall, runoff

谷,说明由于温度升高、蒸发加大、春旱严重。

3.2.2 日径流量的变化特征  $Q_x$ 为大于某一流量 $Q$ 的天数占总天数的比例。2003年以后大流量和小流量出现的频率都在减少,而中等流量出现的频率增加。如2003年以前日均径流 $>100$ 、 $>1.15$ 、 $<0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 出现的频率分别是0.27%、59.2%、8%,2003年后则降低到0.07%、44.9%、0.048(图5)

### 3.3 径流变化趋势及突变分析

采用Mann-Kendall(M-K)趋势分析检验法进行突变检验(图6),年、汛期径流的突变年都在2003年左右,同时在20世纪80年代前期,年、汛期径流变化也接近达到突变水平。非汛期流量相对少而平稳,对径流变化趋势不起主导作用。因此,根据年、汛期径流的变化规律可先将研究区间划分为2段,分别是I:1971—2002年;II:2003—2014年。

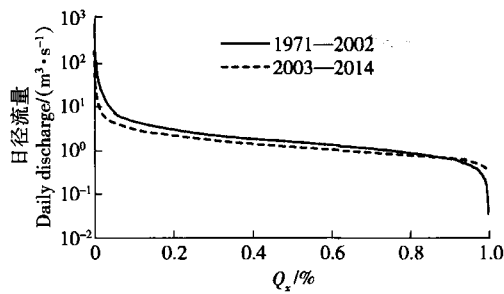


图 5 北洛河上游日径流量历时曲线

Fig. 5 Flow duration curves of daily discharge and at Huangfu station

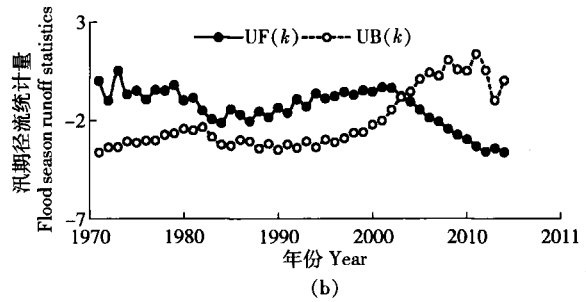
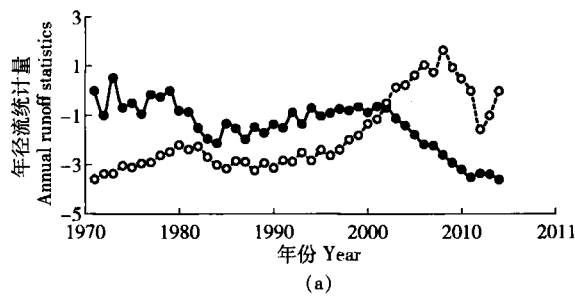


图 6 年径流 Mann-Kendall 与汛期径流 Mann-Kendall 突变检验结果

Fig. 6 Annual runoff Mann-Kendall mutation test results (a) and annual runoff Mann-Kendall mutation test results (b)

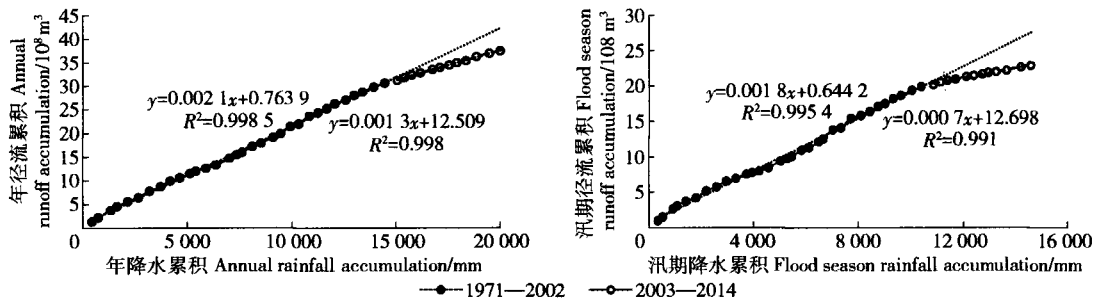


图 7 北洛河上游年降雨量—径流量双累积曲线与汛期降雨量—输径流双累积曲线

Fig. 7 The annual cumulative rainoff-runoff double cumulative curve in the upper reaches of Beiluo River (a) and the flood season cumulative rainoff-runoff double cumulative curve in the upper reaches of Beiluo River (b)

表 2 北洛河上游段各时段年、汛期径流量变化原因分析

Tab. 2 Analysis of the variation of runoff in year and flood season in the upper reaches of Beiluo River

时段 period	实际径流量 Observed runoff/ $10^8 \text{ m}^3$	实际降水量 Annual rainfall/mm	降水决定 Rainfall determination/ $10^8 \text{ m}^3$	人类活动影响量 Impact of human activity/ $(10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	人类活动影响 Impact of human activity/%
年份 Year	I <sub>a</sub>	0.958	452	0.958	
	II <sub>a</sub>	0.570	463	0.981	106
汛期 Flood season	I <sub>b</sub>	0.621	325	0.621	
	II <sub>b</sub>	0.252	351	0.671	114

以 1971—2002 年(时段 I)为基准期,分析人类活动对径流量变化的影响。分析结果见表 2,与时段 I 相比:时段 II 降水增加,而径流量减小,故人

### 3.4 径流变化成因分析

由双累积曲线看出,流域年、汛期径流都在 2003 年出现 1 个比较明显的转折点(图 7),与之前得出的年、汛期径流量突变点一致,据此,可通过线性拟合将其可分 2 段,分别是 I:1971—2002 年;II:2003—2014 年。年径流双累积曲线的斜率分别是 I<sub>a</sub>:21 万  $\text{m}^3/\text{mm}$ , II<sub>a</sub>:13 万  $\text{m}^3/\text{mm}$ 。汛期径流累积曲线的斜率分别是 I<sub>b</sub>:18 万  $\text{m}^3/\text{mm}$ , II<sub>b</sub>:7 万  $\text{m}^3/\text{mm}$ 。时段 II 的斜率明显小于时段 I (1971—2002 年)。

类活动的减流效益达超过 100%,年和汛期减流效益分别为 106%、114%。

建立突变前后年降水量—径流深、汛期降水量—

径流深(图8)的对应关系,突变前后的差异则较为明显,相同降水下突变后无论是年径流与汛期径流

总显著小于突变前。说明造成北洛河上游年径流和汛期径流显著减少的主要因素是人类活动。

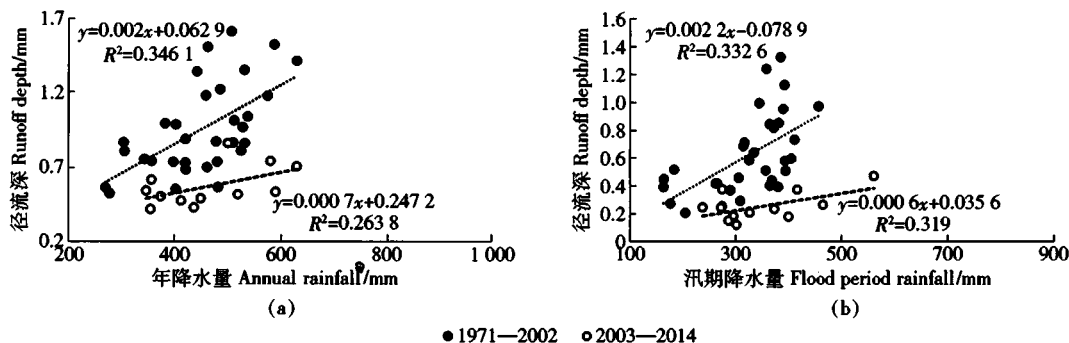


图8 北洛河上游年降水与径流的对应关系与北洛河上游汛期降水与径流的对应关系

Fig. 8 Correlation between rainfall and runoff at Wuqi station

自1999年吴起县开展退耕还林工程以来,研究区的林地面积、植被覆盖度等指标明显上升<sup>[21]</sup>。表3<sup>[22]</sup>显示了北洛河上游退耕还林前后3个典型时期,从1990—2005年,草地和耕地面积明显减少,林地面积和建设用地大幅增加。2005到2010年林地

面积缓慢增加,草地和耕地减少,建设用地有所增加。对比2005年和1990年的土地利用类型可知,早期的水土流失治理速度缓慢,程度低,后期发展快,水土保持以林草措施为主。因此,水土保持措施是导致北洛河上游径流急剧减少的主要原因。

表3 不同时期的土地利用面积比例

Tab. 3 Area percentage of land use in different periods

土地利用类型 Land type	1990		2005		2010		变化率 change rate/%	
	面积 Area/km <sup>2</sup>	比例 Percentage/%	面积 Area/km <sup>2</sup>	比例 Percentage/%	面积 Area/km <sup>2</sup>	比例 Percentage/%	1990— 2005	2005— 2010
林地 Forest	79.07	2.32	1 025.88	30.10	1 189.82	34.91	1 197.41	15.98
草地 Grass	1 840.46	54.00	1 438.96	42.22	1 389.88	40.78	-21.81	-3.41
耕地 Farmland	1 483.95	43.54	929.43	27.27	810.82	23.79	-37.37	-12.76
水域 Water area	2.04	0.06	2.39	0.07	2.04	0.06	16.67	-14.29
建设用地 Construction land	2.73	0.08	11.59	0.34	15.68	0.46	325.00	35.29

注:表中数据解译自1990年、2005年、2010年的遥感数据。Notes: The data in the table is interpreted from the remote sensing data of 1990, 2005 and 2010.

基于2个时段的划分,用线性回归方程分析降水和人类活动(水土保持)对北洛河上游径流和洪水的影响,采用治理时限 $T$ (距离1971年的时间)代替水土保持的治理进度, $P$ 为年降水量(mm), $R$ 为年径流量( $10^6 \text{ m}^3$ ),拟合回归方程(表4)。可知总体上,年径流和汛期径流都与治理时间的呈负相关关系,与降水量呈正相关关系。其显著性水平达到 $\alpha = 0.05$ ,影响显著,说明降水量和降水强度能显著增加流域内径流量和洪水量的作用,水土保持有一定程度的减水、减洪作用。但时段II的显著性低于时段I,反映随着治理年限的增加和植被恢复,径流逐渐趋于稳定,受非规则因素的随机作用加强,与降雨量和治理期限的相关关系减弱。

对于整个研究期,年径流量随治理时间的延长

下降趋势明显,说明人类活动特别是水土保持显著减少了径流量,其主要原因是可能是旱作耕地(特别是基本农田面积)扩大,小块水浇地的发展,以及坝库拦蓄等。当然,如前文(图4)所述,在时段I的后半段,出现了一个径流变化不大的平台期,20世纪90年代的降雨量低于80年代,但径流量却高于80年代。这主要可能是由于2方面的因素,第一水土保持治理进入了一个瓶颈阶段,部分工程措施损坏,丧失了拦蓄能力,第二,径流变化对降水变化有一定的滞后性,80年代后期出现连续多雨年份,使流域内土壤储水量增加,径流系数增大,这可能是90年代前期径流量普遍较高的一个原因。2000年前后大规模退耕还林使降水-径流关系发生了新的变化。在时段II,治理时间和降水都和径流都呈正

相关关系,且  $P < 0.05$ 。这表明时段 II 的径流量虽然和时段 I 相比,显著减少,但这是水土保持和随退耕还林作用长期累积的结果,随着植被恢复年限的增长,径流量并没有持续减少,反而有微弱的增加。由表 3 可知:退耕还林后林地主要取代的是耕地和荒草地,农田用水量减小,一部分农田和裸地的耗水转化为植被耗水,森林的水源涵养能力较强,使地表径流相对稳定<sup>[23]</sup>。森林涵养水源的作用,也反映在北洛河上游径流对降水变化的敏感性在时段 II 明显低于时段 I 及整个研究期。从长期看,北洛河源区径流量的年减少的趋势已经放缓,北洛河源区植被

已经稳定,近 40 年来降雨也没有显著变化;因此,在可以预见的将来,北洛河源上游的径流量也会趋于稳定,不会一直减少下去。

在对汛期径流回归方程中,整个研究期和时段 I<sub>b</sub>、II<sub>b</sub>相关性总体上很好,同年径流变化相似,汛期径流变化在时段 II<sub>b</sub>的显著性也低于时段 I<sub>b</sub>,这也反映了植被对洪水的调节作用:说明 21 世纪初的一个时期,北洛河上游年径流的变化虽已趋于稳定,但水土保持措施的蓄洪能力仍呈增加趋势。时段 II<sub>b</sub>汛期径流对汛期降水变化的敏感性明显低于时段 I<sub>b</sub>及整个研究期也反映了森林的蓄洪作用。

表 4 降雨量、径流量之间的相关系数

Tab.4 Correlation between rainfall and runoff in years and in flood season

时段 period	拟合方程 Regression equation	$R^2$	$F$	Sig.	$n$
I <sub>a</sub> - II <sub>a</sub>	$S = 40.997 - 1.304T + 0.162P$	0.454	17.056	0.000 <sup>b</sup>	44
I <sub>a</sub>	$S = 14.129 - 0.499T + 0.199P$	0.370	8.499	0.001 <sup>b</sup>	32
II <sub>a</sub>	$S = 20.207 + 0.134T + 0.068P$	0.265	1.622	0.250 <sup>b</sup>	12
I <sub>b</sub> - II <sub>b</sub>	$S = 26.74 - 1.258T + 0.161P$	0.406	14.039	0.000 <sup>b</sup>	44
I <sub>b</sub>	$S = -2.983 - 0.336T + 0.217P$	0.344	7.614	0.002 <sup>b</sup>	32
II <sub>b</sub>	$S = 27.139 - 0.674T + 0.068P$	0.370	2.645	0.125 <sup>b</sup>	12

#### 4 结论

从 1971 到 2014 年,北洛河上游年降雨和汛期降雨没有明显趋势性变化,降雨年际变化较大,但丰枯往往交错分布。

年径流和汛期径流有显著下降趋势,非汛期径流随降雨变化围绕平均值波动,北洛河上游径流减少主要是汛期径流变化造成的,人类活动(水土保持治理以及退耕还林措施)对径流变化起到主导作用。

退耕还林改变了北洛河流域的植被覆盖情况和降雨-径流关系,但更主要的是影响了汛期径流,径流不会因植被恢复一直减少下去,未来北洛河上游的年径流、汛期径流将维持在一个相对低而且稳定的水平。

#### 5 参考文献

- [1] WALLING D E. Human impact on land-ocean sediment transfer by the world's rivers[J]. *Geomorphology*, 2006, 79(3):192.
- [2] CARRIQUIRY J D, SANCHEZ A. Sedimentation in the Colorado River delta and Upper Gulf of California after nearly a century of discharge loss[J]. *Marine Geology*,

1999,158(1/2/3/4):125.

- [3] 刘惠英,白桦. 赣江上游章水流域水沙变化的驱动力分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2018,27(3):615.  
LIU Huiying, BAI Hua. Relationship of Zhangriver Watershed in the Upper Region of Ganjiang Watershed[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(3):615.
- [4] 王振平,汪小钦,林敬兰,等. 1982—2014 年汀江流域长汀段水沙演变规律分析[J]. *长江科学院院报*, 2018,35(2):8.  
WANG Zhenping, WANG Xiaoqin, LIN Jinglan, et al. Evolution of Runoff and Sediment Load in Changting Segment of Tingjiang River Watershed from 1998 to 2014 [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(2):8.
- [5] 姚文艺,冉大川,陈江南. 黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J]. *水科学进展*, 2013,24(5):607.  
YAO Wenyi, RAN Dachuan, CHEN Jiangnan. Recent changes in runoff and sediment regimes and future projections in the Yellow River basin[J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(5):607.
- [6] 岳晓丽. 黄河中游径流及输沙格局变化与影响因素研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2016:65.  
YUE Xiaoli. Spatial patterns and trends in runoff and sediment load in the Middle Reaches of the Yellow River

- and their potential cause[D]. Yangling, Shannxi: Northwest A&F University, 2006:65.
- [7] ZHAO Guangju, MU Xingmin, TIAN Peng, et al. Climate changes and their impacts on water resources in semiarid regions: A case study of the Wei River basin, China[J]. *Hydrological Processes*, 2013,27(26):3852.
- [8] 董起广, 周维博, 刘雷, 等. 北洛河径流量变化特征分析[J]. *人民黄河*, 2014(2):20.  
DONG Qiguang, ZHOU Weibo, LIU Lei, et al. Analysis of runoff variation characteristics of Beiluo River[J]. *Yellow River*, 2014(2):20.
- [9] 刘红英. 降水变化和人类活动对北洛河上游水沙特性的影响研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2012:45.  
LIU Hongying. Influence of precipitation changes and human activities on runoff and sediment characteristics in the upstream of Beiluo River[D]. Yangling, Shannxi: Northwest A&F University, 2012:45.
- [10] 蒋观滔, 高鹏, 穆兴民, 等. 退耕还林(草)对北洛河上游水沙变化的影响[J]. *水土保持研究*, 2015,22(6):1.  
JIANG Guantao, GAO Peng, MU Xingmin, et al. Effect of Conversion of Farmland to Forestland or Grassland on the Change in Runoff and Sediment in the Upper Reaches of Beiluo River[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015,22(6):1.
- [11] 葛芬莉. 北洛河上游区水沙特性变化分析研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2013,24(4):145.  
GE Fenli. Analysis of feature variation of water sediment and probing of reasons in upstream area of Beiluo River[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2013,24(4):145.
- [12] 陈兴旺. 定边县志[M]. 方志出版社, 2003:2.  
CHEN Xingwang. Dingbian county annals[M]. Fangzhi Press, 2003:2.
- [13] 张世杰. 吴旗县志[M]. 西安:三秦出版社, 1991:2.  
ZHANG Shijie. Wuqi county annals[M]. Xi'an:Sanqin Press, 1991:2.
- [14] 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[J]. *水文*, 2010, 30(4):47.  
MU Xingmin, ZHANG Xiuqin, GAO Peng, et al. Theory of double mass curves and its applications in hydrology and meteorology[J]. *Journal of China Hydrology*, 2010, 30(4):47.
- [15] MU Xingmin, ZHANG Lu, MCVICAR T R et al. Analysis of the impact of conservation measures on stream flow regime in catchments of the Loess Plateau, China[J]. *Hydrological Processes*, 2010,21(16):2124.
- [16] YU Paoshan, YANG Taochang, WU Chihkang. Impact of climate change on water resources in southern Taiwan[J]. *Journal of Hydrology*, 2002,260(1):161.
- [17] XU Zongxue, TAKEUCHI K, ISHIDAIRA H. Long-term trends of annual temperature and precipitation time series in Japan[J]. *Journal of Hydroscience & Hydraulic Engineering*, 2002,20(2):11.
- [18] MANN H B. Nonparametric Tests Against Trend[J]. *Econometrica*, 1945,13(3):245.
- [19] SHENG Yue, PILON P, CAVADIAS G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series[J]. *Journal of Hydrology*, 2002,259(1):254.
- [20] 冉大川, 刘斌, 付良勇, 等. 双累积曲线计算水土保持减水减沙效益方法探讨[J]. *人民黄河*, 1996(6):24.  
RAN Dachuan, LIU Bin, FU Liangyong, et al. Calculation method of water saving and sediment reduction efficiency in soil and water conservation using double accumulation curve[J]. *Yellow River*, 1996(6):24.
- [21] 王丹丹, 吴普特, 赵西宁. 黄土高原退耕还林(草)效益评价研究进展[J]. *西北林学院学报*, 2010,25(3):223.  
WANG Dandan, WU Pute, ZHAO Xining. Benefit evaluation of conversion of cropland to forest project in the Loess Plateau: A review[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2010,25(3):223.
- [22] 蒋观滔. 基于SWAT模型的北洛河上游土地利用/覆被变化水沙响应研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2016:12.  
JIANG Guantao. Responses of runoff and sediment to land use cover changes in the upper reaches of Beiluo river based on SWAT model[D]. Yangling, Shannxi: Northwest A&F University, 2016:12.
- [23] MU Xingmin, ZHANG Xiuqin, SHAO Hongbo, et al. Dynamic changes of sediment discharge and the influencing factors in the Yellow River, China, for the recent 90 Years[J]. *Acta Hydrochimica Et Hydrobiologica*, 2012,40(3):303.