

乌兰木伦河 1960—2015 年水沙周期性分析

任宗萍¹, 谢梦瑶¹, 马勇勇¹, 李鹏¹

(1. 西安理工大学, 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要:采用 Mann-Kendall 检验、Pettitt 检验以及小波周期分析等方法对乌兰木伦河流域王道恒塔站 1960—2015 年的降水、径流和输沙过程进行了分析。结果表明:乌兰木伦河流域降水量变化趋势不显著($Z=1.19$),在 2010 年之后有增加趋势。Mann-Kendall 检验结果表明年径流量($Z=-5.62$)和年输沙量有显著减沙趋势($Z=-5.56$),采用 Pettitt 检验结果表明年径流量和年输沙量突变点均发生在 1996 年。相比 60 年代,2010 年之后径流量从 2.5 亿 m^3 减少到 0.9 亿 m^3 ,输沙量也从 2 965.1 万 t 减少到 1.5 万 t。年降水量周期与年径流年输沙的周期不同步,仅在 2~4 a 和 8~10 a 时间尺度上具有周期性同步,而径流量和输沙量的周期有一定的同步性。研究表明,流域径流量和输沙量的短周期变化主要受降雨、太阳活动等自然因子调控,同时受到人类活动的影响,而更长周期的水沙变化特征则有赖于百年以上的水文序列。

关键词:径流量;输沙量;突变点;乌兰木伦河

中图分类号:P333.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)06-0074-05

Periodic Characteristics of Streamflow and Sediment Discharge in Wulanmulun River from 1960 to 2015

REN Zongping, XIE Mengyao, MA Yongyong, LI Peng

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: This study analyzes the variability of annual precipitation, streamflow and sediment discharge in Wulanmulun River. The Mann-Kendall test, Pettitt's test and wavelet analysis were applied to analyze the trends of the streamflow and sediment discharge in the Wulanmulun River from 1960 to 2015. The results showed that both the abrupt change points of streamflow and sediment discharge appeared in 1996. There was no significant change in precipitation ($Z=1.19$), and was a slight increase after 2010. Reductions of both streamflow ($Z=-5.62$) and sediment discharge ($Z=-5.56$) were found. The streamflow decreased from 250 million m^3 to 90 million m^3 , the sediment discharge also decreased from the 29 651 thousand tons to 15 thousand tons. The main cycle of the annual streamflow was different from that of the annual precipitation, only the similar cycle occurred at 2~4 years and 8~10 years, and the annual streamflow and the sediment discharge had the similar cycle. The research result showed that the short cycle of the streamflow and sediment discharge was controlled by the natural factors including precipitation and solar activity, and also affected by human activity; long cycle characteristics relied on the more than hundred years of hydrological sequence.

Keywords: streamflow; sediment discharge; abrupt change point; Wulanmulun River

径流和泥沙是表征河流系统的重要水文要素,水沙变化趋势及其周期特征是河流系统研究的重要内容^[1-2]。受气候变化和人类活动的共同影响,国际上许多大河流域(如埃及尼罗河、美国科罗拉多河)径流量和输沙量在过去几十年来发生了显著变化^[3-4]。在

我国,黄河流域径流量和输沙量的变化尤为突出^[5-6]。黄河潼关水文站径流量和输沙量已由多年平均约 400 亿 m^3 , 16 亿 t 锐减到近年来的 200 亿 m^3 , 1 亿 t 左右^[6]。河流水沙变化对流域水资源开发利用,环境保护、流域地貌演变、海洋海岸带生态系统等将会

产生一系列重要影响^[7]。研究河流水沙变化趋势及其周期特征对于准确预测流域径流和输沙特征,科学合理地管理水资源具有重要的理论和现实意义。

乌兰木伦河位于黄土高原和毛乌素沙漠过渡带,是黄河流域窟野河的一级支流。该区是黄河流域土壤侵蚀最为严重的地区和黄河粗泥沙的主要产区之一,对黄河下游河道淤积有严重影响^[8]。同时,乌兰木伦河流域蕴藏着丰富的煤炭资源,流域内分布着我国已探明储量的最大煤田——神府东胜煤田。随着煤田的大规模开发,流域内生产生活用水快速增加,对流域生态环境及水文过程均产生显著影响。已有研究表明,乌兰木伦河流域径流量从 20 世纪 80 年代开始出现明显下降趋势,2000 年以后下降趋势更为显著^[9-10]。进一步研究发现,降雨和气温等自然因素对流域径流量下降的贡献为 10%~20%,煤炭开采等人类活动的贡献达 80%~90%^[11]。然而上述工作并没有对流域径流量变化周期进行研究,也没有涉及流域输沙量的变化。因此,本文采用 Mann-Kendall 检验、Pettitt 检验和小波分析等方法分析乌兰木伦河流域 1960—2015 年径流量和输沙量的变化趋势,揭示其周期变化特征,为流域未来水资源优化配置和开发利用提供科学依据。

1 研究区概况

乌兰木伦河发源于内蒙古,流经伊金霍洛旗,在下游王道恒塔处与悖牛川河汇合后称为窟野河,进入陕西境界后流经神木县注入黄河。流域全长 138 km,面积 3 857 km²。研究区海拔 1 150~1 524 m,中、西部为坡梁起伏的鄂尔多斯高原地貌,东部为晋陕黄土高原北缘的丘陵沟壑地貌。该区属大陆性季风气候,多年平均降水量 357 mm,平均气温 6.2℃。流域地带性植被自东南向西北由典型草原向荒漠草原过渡,典型草原以针茅、百里香等植物类型为主,荒漠草原以沙米、沙蒿等植物为建群种^[12]。近几十年来流域植被盖度总体呈现上升趋势,沙地和低盖度植被面积大幅减少,中高盖度植被面积大幅增加^[13]。

乌兰木伦河流域从 1985 年开始进行煤炭资源开发,开采量在 100 万 t,1993—1998 年开采量突破千万 t。从 2000 年之后,煤炭产量呈现指数增长,2012 年,煤炭产量达到 2.7 亿 t,占全国煤炭产量的 7.3%,是我国目前开发建设项目强度较大的流域^[10]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文利用乌兰木伦河流域王道恒塔水文站 1960—2015 年的径流和泥沙数据,分析乌兰木伦河

流域近 60 a 来水沙变化趋势与周期特征。其中 1960—1990 年、2006—2015 年径流泥沙资料来源于黄河流域水文年鉴,1991—2005 年的径流输沙资料来源于榆林水文手册。降水量数据为 1960—2010 年王道恒塔、神木站,1977—2010 年石圪台、大柳塔、刘家沟、孙家岔、张家村,1978—1990 年和 2006—2010 年高家塔、大卡钳沟、全和常、布尔台,由于雨量站某些年份存在缺失,因此采用算术平均法求得全流域降水量。

2.2 研究方法

(1) 水文序列非参数检验。采用 Mann-Kendall 检验乌兰木伦河流域降雨量、径流量和输沙量的变化趋势;基于 Pettitt 非参数检验方法进行突变点分析^[3]。

(2) 小波分析方法。小波分析的基本原理是假设 $\varphi(t)$ 为平方可积的实数空间,即 $\varphi(t) \in L^2(R)$,其傅里叶变化为 $\psi(\omega)$ 满足条件:

$$C_\varphi = \int_R \frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

则 $\varphi(t)$ 为小波母函数,小波函数 $\varphi(t)$ 经伸缩和平移后,得到连续小波序列为

$$\Psi_{a,b}^{(t)} = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (a, b \in R; a \neq 0) \quad (2)$$

式中: a 为伸缩因子; b 为平移因子。

由于 Morlet 小波与降水、径流时间序列的波形较为接近,在时频域局部性都较好^[14],所以本文选择 Morlet 小波对乌兰木伦河降水和径流进行小波分析。Morlet 小波函数的表达式为:

$$\varphi(t) = e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2} \quad (3)$$

式中: ω_0 为常数; i 为虚数。小波方差反映了波动随着时间的分布,可用来确定时间序列各种扰动的相对强度,对应峰值处的尺度为该序列的主周期。因此可以通过小波方差图来确定降水、径流序列中的主周期。小波方差的函数表达式为:

$$\text{var}(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (4)$$

3 结果与分析

3.1 乌兰木伦河降水特性分析

乌兰木伦河流域 1960—2015 年平均降雨量为 377.6 mm,流域降雨量总体呈现出丰—枯—丰的变化趋势(图 1)。利用 Mann-kendall 趋势变点进行降雨序列的趋势性检验,得到 $Z=1.19$,未通过置信度 95% 的显著性检验,表明流域 1960—2015 年降雨量无显著的变化趋势。

选择 Morlet 连续复小波函数,对乌兰木伦河流域降水序列进行周期性分析,发现流域年降水量存在

35~42 a, 20~25 a, 8~10 a 和 2~4 a 共 4 个尺度的周期变化。其中, 在 35~42 a 的尺度上出现了丰枯丰交替, 在 20~25 a 的时间周期尺度上, 丰枯交替也比较明显且比较稳定; 但是在 5~10 a 时间尺度上, 1960—1980 年降水周期特征比较明显, 而 2~4 a 尺度上的周期特征在 1950—1960 年比较明显。基于年降水小波方差图(图 2), 对应的峰值分别为 40, 24, 8, 3 a。这些不同的周期共同控制着乌兰木伦河流域降雨的“丰—枯”特征。

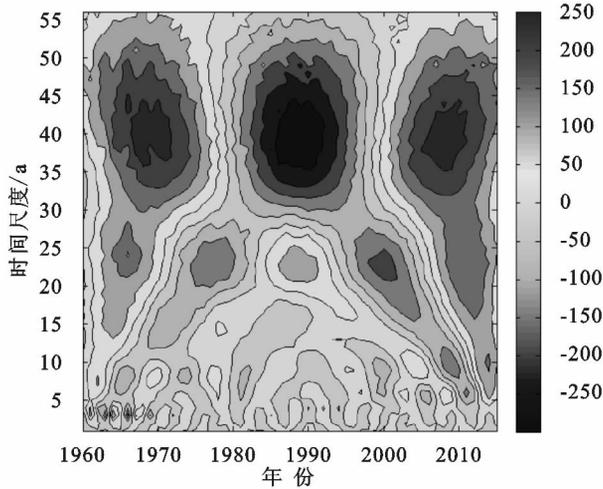


图 2 乌兰木伦河年降水小波系数、小波方差

3.2 乌兰木伦河水沙趋势分析

乌兰木伦河流域径流量在 1960—2015 年呈阶梯状下降趋势, 流域 60, 70 年代年均径流量分别为 2.5 亿 m^3 , 2.4 亿 m^3 , 80, 90 年代年均径流量分别为 1.9 亿 m^3 , 1.4 亿 m^3 , 2000—2015 年年均径流量为 0.7 亿 m^3 (表 1)。基于 Mann-Kendall 趋势分析, 乌兰木伦河流域年径流的变化趋势 $Z = -5.62$, $|Z| > 1.96$, 通过置信度 99% 的显

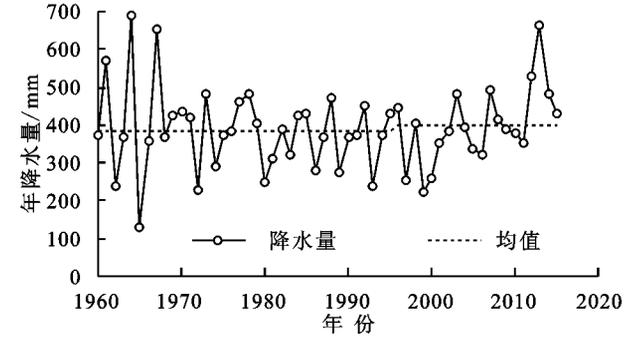
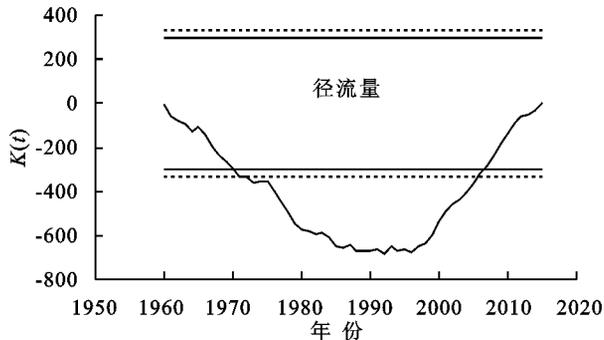


图 1 乌兰木伦河流域 1960—2015 年降雨量变化特征

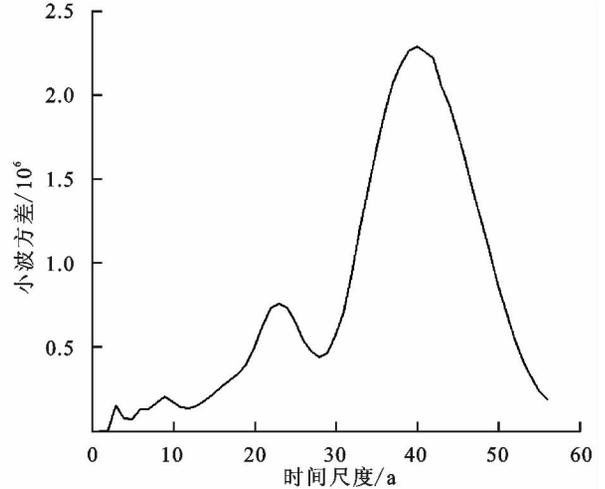
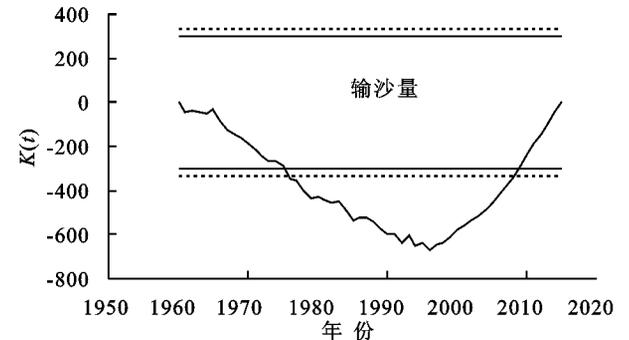


图 3 乌兰木伦河年径流量和输沙量的 Pettitt 非参数检验

著性检验, 表明乌兰木伦河流域径流呈显著下降趋势。基于 Pettitt 非参数方法检验, 得到乌兰木伦河径流序列的突变点在 1996 年(图 3)。以 1996 年为界, 1960—1996 年和 1997—2015 年流域年均径流量分别为 2.12 亿 m^3 , 0.76 亿 m^3 , 与 1960—1996 年相比, 流域径流量下降 64.1%; 1997—2015 年流域年径流量的标准差为 0.2, 年际径流变化幅度明显变小。

著性检验, 表明乌兰木伦河流域径流呈显著下降趋势。基于 Pettitt 非参数方法检验, 得到乌兰木伦河径流序列的突变点在 1996 年(图 3)。以 1996 年为界, 1960—1996 年和 1997—2015 年流域年均径流量分别为 2.12 亿 m^3 , 0.76 亿 m^3 , 与 1960—1996 年相比, 流域径流量下降 64.1%; 1997—2015 年流域年径流量的标准差为 0.2, 年际径流变化幅度明显变小。



的变化趋势 $Z = -5.56$, $|Z| > 1.96$, 通过置信度 99% 的显著性检验, 表明乌兰木伦河流域输沙量呈显著下降趋势。基于 Pettitt 非参数方法检验, 得到乌兰木伦河输沙量变化的突变点也在 1996 年。以 1996 年为界, 1960—1996 年和 1997—2015 年流域年均输沙量分别为 2 659.8 万 t 和 41.7 万 t, 与 1960—1996 年相比, 流域年输沙量下降高达 98.4%。

表 1 乌兰木伦河径流泥沙特征表

控制站	时段	年径流量/ 标准差/		输沙量/ 标准差/	
		亿 m ³	亿 m ³	万 t	万 t
	1960—1969	2.5	1.2	2965.1	4007.0
	1970—1979	2.4	0.9	3417.8	3410.7
	1980—1989	1.9	0.6	1949.8	2313.7
	1990—1999	1.4	0.5	1543.6	2021.0
王道恒塔	2000—2009	0.7	0.2	43.3	33.9
	2010—2015	0.9	0.3	1.5	2.0
	1960—2015	1.7	1.0	1771.5	2779.8
	1960—1996	2.12	0.9	2659.8	3105.3
	1997—2015	0.76	0.2	41.7	59.2

3.3 乌兰木伦河水沙变化周期特征

进一步分析径流输沙的周期规律,对年径流和年输沙进行小波周期分析。得到乌兰木伦河年径流量存在 2~4 a, 8~10 a, 15~17 a 共 3 个尺度的周期

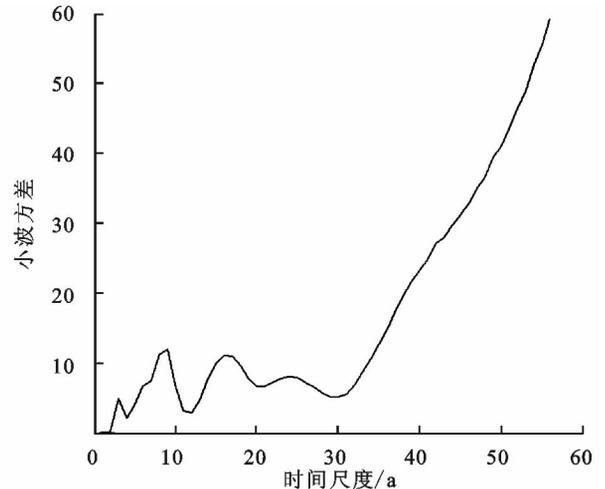
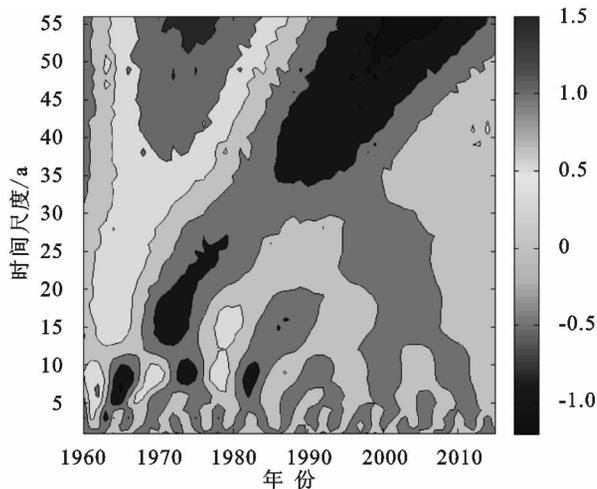


图 4 乌兰木伦河年径流小波系数、小波方差

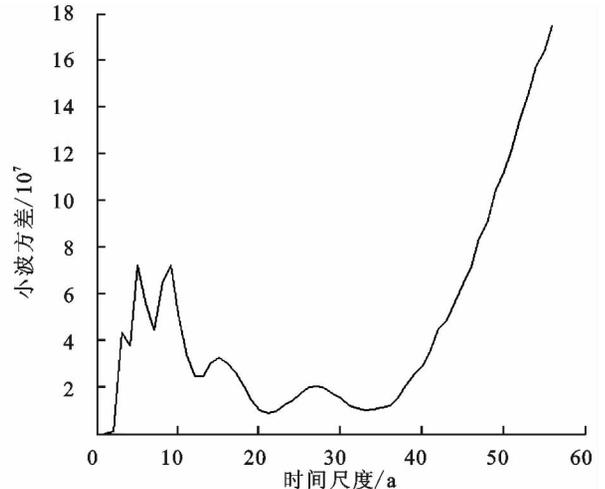
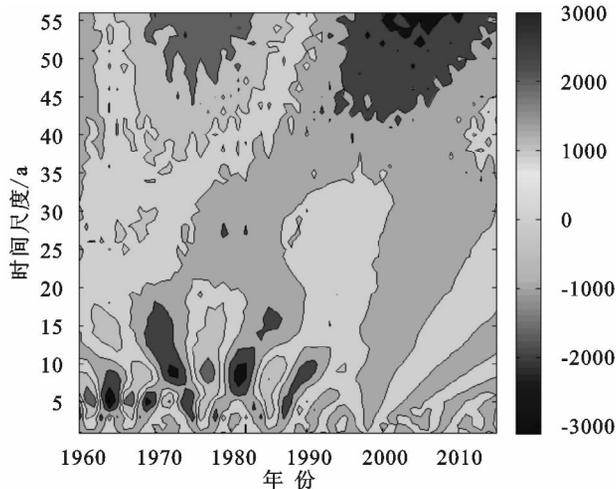


图 5 乌兰木伦河年输沙量小波系数、小波方差

4 讨论

4.1 乌兰木伦河水沙变化归因分析

乌兰木伦河 1960—2015 年径流量和输沙量均呈显著下降趋势,且下降具有明显的阶段性特征,这与

(图 4),径流过程存在多周期的时间特征,而且径流的周期在整个时段并不稳定,只是在 60 年代到 80 年代相对稳定。从小波系数实部图和小波系数方差图得到乌兰木伦河枯水年多于丰水年,在 56 a 的时间序列上,主周期为 16 a 左右,更长时间尺度的周期,需要进一步增加时间序列。

从年输沙小波系数图可以得出(图 5),年输沙量的周期与径流量周期相似,在 2~4 a, 5~8 a, 8~10 a, 15~17 a 存在 4 个周期;不同尺度的周期只是在 60 年代到 80 年代相对稳定,而且主周期也未形成,周期的时间特征与径流周期特征几乎一致,说明乌兰木伦河流域水沙相关性很大,泥沙特征很大程度上受到径流序列演变特征的影响。与降水的周期相比,径流输沙周期在小的周期上与降雨的相似。

黄河中游干流及主要支流水沙变化趋势基本一致^[3,6]。自 20 世纪 50 年代,黄河水沙急剧减少,黄河潼关站 1960—1986 年平均径流量和输沙量分别为 402.3 亿 m³, 12.1 亿 t, 1987—1999 年径流量和输沙量分别为 261.4 亿 m³, 8.1 亿 t, 2000—2012 年径流

量和输沙量分别为 229.0 亿 m^3 , 2.8 亿 $\text{t}^{[5]}$ 。

尽管乌兰木伦河径流量和输沙量从 1980 年代以后发生明显下降趋势,但流域年径流量和输沙量下降的突变点均发生在 1996 年(图 3)。与 1960—1996 年相比,1997—2015 年流域径流量和输沙量分别下降达 64.1% 和 98.4%。这一突变时间与窟野河年径流量发生突变时间一致^[15-16]。20 世纪 90 年代大规模的煤炭开采被认为是乌兰木伦河径流减少的主要原因^[15,17]。乌兰木伦河流域 1985—1992 年煤炭开采处于较低水平,年产能不足 100 万 t,从 1990 年代后期开始,流域内煤炭产能呈指数式增长,2012 年煤炭产能达 2.7 亿 $\text{t}^{[10]}$ 。由于煤炭资源大规模开采,造成采矿区地表塌陷,导致地表水大量渗漏,引起河川径流量减少,进而输沙量下降^[17]。张思锋等研究认为,人类活动导致乌兰木伦河流域径流量下降 89.5%,其中,采煤活动对径流量下降的贡献占 77.3%。在采煤活动中,由煤炭开采导致的地表塌陷占 52.5%,矿井疏排水占 24.8%。除煤炭开采外,尽管流域降雨量近几十年来无明显变化,但雨强持续减小,尤其是 2000 年以后降雨强度持续偏小,中小雨强有利于降雨就地入渗,减小地表径流;长期无连续高强度降雨,使得流域产流系数减小^[18]。另外,流域最近几十年来植被盖度明显增加^[13],从 1986—2008 年中高盖度植被面积比例由 15.9% 增加到 40.7%,植被覆盖结构进一步优化,高覆盖度面积增加,低覆盖度面积下降^[19],植被盖度的增加也有利于减少水土流失,进而减少流域径流量和输沙量。

4.2 乌兰木伦河水沙变化周期特征

乌兰木伦河流域径流量和输沙量变化分别存在 15~17 a, 8~10 a, 2~4 a 和 15~17 a, 8~10 a, 5~8 a, 2~4 a 不同尺度的周期特征。其中, 8~10 a 和 2~4 a 的径流量和输沙量变化周期与流域短时间尺度的降雨量变化周期基本一致,反映了流域径流量和输沙量在短时间尺度上主要受到降雨量变化的影响。赵广举等的研究也发现,黄河中游干流龙门站水沙短周期性振荡主要是降水季节和年际变化的结果,并且,月流量 3~4 a 的变化周期与影响我国西部地区降雨的副高脊线位置的准 3 a 周期具有一致性;而 7~9 a 的振荡中心与地极移动振幅变化的 7 a 周期以及 ENSO 的周期特征一致。此外,有研究表明太阳活动通过影响降水变化进而对流域径流产沙影响^[20]。乌兰木伦河流域径流量和输沙量 8~10 a 的周期与太阳黑子 11 a 左右的活动周期接近,反映了太阳黑子对流域径流量和输沙量在 8~10 a 年尺度上可能有一定的影响。另外,流域水沙变化的长时间尺度周期并未形成,并且径流周

期以及输沙周期在 1990s 年代后期也逐渐消失,这可能是因为大规模的人类活动改变了流域水沙变化的自然周期。综上,乌兰木伦河流域径流量和输沙量的短周期变化主要受降雨、太阳活动等自然因子调控,并受到人类活动的影响,而更长周期的水沙变化特征则有赖于百年以上的水文序列。

5 结论

(1) 乌兰木伦河降水量没有表现出明显上升或下降趋势变化,流域降水量存在 4 个尺度的周期变化,并且在 35~42 a 和 20~25 a 的时间尺度上,存在着明显的丰枯丰交替,且时间周期特征比较稳定。

(2) 乌兰木伦河径流量和输沙量呈梯状下降趋势,径流量在流域 60,70 年代年均径流量约为 2.5 亿 m^3 ,90 年代年均径流量为 1.4 亿 m^3 ,2000 年以后年均径流量为 0.7 亿 m^3 。流域年输沙量下降趋势更加剧烈,年均输沙量在 60—70 年代约为 3 000 万 t;2000 年以后下降到 100 万 t 以下,2008 年以后下降至不足 10 万 t。

(3) 径流量和输沙量的突变点均在 1996 年,径流量存在 2~4 a, 8~10 a, 15~17 a 共 3 个尺度的周期,而输沙量存在 2~4 a, 5~8 a, 8~10 a, 15~17 a 共 4 个周期,径流周期和输沙周期特征相似,不同时间尺度的周期并不稳定,在 1990s 年代后期也逐渐消失。

参考文献:

- [1] 魏艳红,焦菊英. 皇甫川流域 1955—2013 年水沙变化趋势与周期特征[J]. 水土保持研究,2017,24(3):1-6.
- [2] 任宗萍,张光辉,杨勤科. 近 50 年延河流域水沙变化特征及其原因分析[J]. 水文,2012,32(5):81-86.
- [3] 赵广举,穆兴民,田鹏,等. 近 60 年黄河中游水沙变化趋势及其影响因素分析[J]. 资源科学,2012,34(6):1070-1078.
- [4] Siam M S, Eltahir E A B. Climate change enhances inter annual variability of the Nile river flow[J]. Nature Climate Change,2017,7(5):350-354.
- [5] 姚文艺,焦鹏. 黄河水沙变化及研究展望[J]. 中国水土保持,2016(9):55-63.
- [6] 胡春宏. 黄河水沙变化与治理方略研究[J]. 水力发电学报,2016(10):1-11.
- [7] Zhao G J, Tian P, Mu X, et al.. Quantifying the impact of climate variability and human activities on streamflow in the middle reaches of the Yellow River basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2014,519:387-398.
- [8] 王波雷,马孝义,范严伟. 基于洛伦兹曲线的乌兰木伦河径流变化分析[J]. 水文,2008,28(5):40-42.
- [9] 王波雷,马孝义,季万才,等. 乌兰木伦河径流变异特征分析研究[J]. 水土保持研究,2007,14(6):250-252.

的大趋势^[14],这是本区气候状态的突变还是一个渐进的过程,还取决于今后进一步加强对西北脆弱带气候变化事实、降水量时空变化未来趋势的全面分析及其机制的深入研究,这无论对气象学还是国民经济发展都将是一个重大的课题。

参考文献:

- [1] 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [2] 牛文元. 生态环境脆弱带 ECOTONE 的基础判定[J]. 生态学报,1989,9(2):97-105.
- [3] 刘洪来,王艺萌,窦潇,等. 农牧交错带研究进展[J]. 生态学报,2009,29(8):4420-4425.
- [4] 常学礼,赵爱芬,李胜功. 生态脆弱带的尺度与等级特征[J]. 中国沙漠,1999,19(2):115-119.
- [5] 刘军会,高吉喜. 气候和土地利用变化对中国北方农牧交错带植被覆盖变化的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(9):2016-2022.
- [6] 汪朝辉,王克林,李仁东,等. 水陆交错生态脆弱带景观格局时空变化分析:以洞庭湖区为例[J]. 自然资源学

报,2004,19(2):240-247.

- [7] 丁彩霞,延军平,李敏敏. 西北地区气候变化与风速响应特征[J]. 水土保持通报,2014,32(4):134-137.
- [8] 贾文雄,何元庆,李宗省,等. 祁连山及河西走廊气候变化的时空分布特征[J]. 中国沙漠,2008,28(6):1151-1155.
- [9] 杨金虎,江志红,魏锋,等. 近 45 a 来中国西北年极端高、低温的变化及对区域性增暖的响应[J]. 干旱区地理,2006,29(5):625-631.
- [10] 王遵娅,丁汇,何金海,等. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析[J]. 气象学报,2004,62(2):228-236.
- [11] 杨蓉,延军平. 宁夏旱涝灾害对气候变化的响应[J]. 水土保持通报,2014,34(5):272-277.
- [12] 左洪超,吕川华,胡隐樵. 中国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析[J]. 高原气象,2004,23(2):238-244.
- [13] 李双双,延军平,杨蓉,等. 气候变暖背景下 1961—2010 年宁夏旱涝灾害空间分布特征和变化规律[J]. 中国沙漠,2013,33(5):1552-1559.
- [14] 赵俊虎,封国林,张世轩,等. 近 48 年中国的季节变化与极端温度事件的联系[J]. 物理学报,2011,60(9):842-850.

(上接第 78 页)

- [10] 朱金方,全占军,王琦,等. 乌兰木伦河径流量衰减驱动因素研究[J]. 水土保持研究,2014,21(1):34-38.
- [11] 张思锋,马策,张立. 榆林大柳塔矿区乌兰木伦河径流量衰减的影响因素分析[J]. 环境科学学报,2011,31(4):889-896.
- [12] 占光辉. 基于乌兰木伦河流域 SWAT 模型的植被与水资源关系研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2010.
- [13] 邓飞,全占军,于云江,等. 20 年来乌兰木伦河流域植被盖度变化及影响因素[J]. 水土保持研究,2011,18(3):137-152.
- [14] Gao P, Violette G., Temme A. A M, et al. A wavelet analysis of the relationship between Loess Plateau erosion and sunspots[J]. Geoderma, 2014,213:453-459.
- [15] 刘二佳,张晓萍,张建军,等. 1956—2005 年窟野河径流

变化及人类活动对径流的影响分析[J]. 自然资源学报,2013,28(7):1159-1168.

- [16] 李舒,吕志方. 窟野河径流突变点分析[J]. 人民黄河,2015,37(1):27-29.
- [17] 吴喜军,李怀恩,董颖. 煤炭开采对水资源影响的定量识别:以陕北窟野河流域为例[J]. 干旱区地理 2016,39(2):246-253.
- [18] 高文永,高亚军,徐建华. 采矿塌陷对窟野河流域水沙的影响[J]. 人民黄河,2017,39(11):76-80,102.
- [19] 王童,何海,吴志勇,等. 近 30 年来窟野河流域土地利用与植被盖度变化分析[J]. 水电能源科学,2017,35(11):127-130,183.
- [20] 刘笑彤,蔡运龙. 基于小波分析的径流特性和影响因素多尺度分析:以通天河为例[J]. 北京大学学报:自然科学版,2014,50(3):549-556.

(上接第 84 页)

- [8] Barbosa F T, Bertol I, Werner R D S, et al. Critical slope length for water erosion for three crop residue types and rates in two sowing directions in no-till[J]. Revista Brasileira De Ciênci Do Solo, 2012, 36(4): 1279-1290.
- [9] 黎四龙,蔡强国,吴淑安,等. 坡长对径流及侵蚀的影响[J]. 干旱区资源与环境,1998(1):29-35.
- [10] 郭新亚,张兴奇,顾礼彬,等. 坡长对黔西北地区坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(2):40-44.

- [11] 吴淑芳,吴普特,原立峰. 坡面径流调控薄层水流水力学特性试验[J]. 农业工程学报,2010,26(3):14-19.
- [12] 张乐涛,高照良,田红卫. 工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀水动力学过程[J]. 农业工程学报,2013,29(24):94-102.
- [13] 齐洪亮,田伟平,舒延俊. 基于坡面径流强度的中国公路水文区划研究[J]. 公路交通科技,2010,27(3):12-16.
- [14] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素[J]. 水土保持通报,1982(3):40-44.
- [15] 李小昱,雷廷武,王为. 电容式传感器测量水流泥沙含量的研究[J]. 土壤学报,2002,39(3):429-435.