

刘璐,郭月峰,姚云峰,等. 西柳沟流域水沙关系及变化趋势[J]. 江苏农业科学,2020,48(21):269-273.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.21.051

# 西柳沟流域水沙关系及变化趋势

刘璐<sup>1</sup>,郭月峰<sup>1</sup>,姚云峰<sup>1</sup>,祁伟<sup>1,2</sup>,刘晓宇<sup>1</sup>,杨燕<sup>3</sup>,王贺<sup>4</sup>

(1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院,内蒙古呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区水利水电勘测设计院,内蒙古呼和浩特 010020;

3. 内蒙古自治区水土保持监测站,内蒙古呼和浩特 010020; 4. 辽宁省铁岭市水利事务服务中心,辽宁铁岭 112000)

**摘要:**根据西柳沟流域水沙特点,利用该流域 54 年的实测年径流量及年输沙量资料,采用相关系数分析法、5 年滑动平均法、双累积曲线法,结合流域降水量分析西柳沟流域水沙相关关系及变化趋势。结果表明:(1)西柳沟流域降水量与径流量呈显著的正相关关系,降水量与泥沙相关性变异较大;1964—1979 年输沙量与径流量呈显著相关关系,其他不同时段输沙量与径流量均呈极显著相关关系;(2)西柳沟流域 1964—2017 年水沙变化趋势基本对应,输沙量下降趋势明显,输沙量突变年份为 1989 年和 1998 年,径流量突变年份为 1989 年和 2003 年。进一步分析表明,西柳沟流域径流量主要受到降水的影响,径流量与输沙量在水土保持措施下对降雨的响应呈减少状态。

**关键词:**输沙量;径流量;降水量;水沙关系;5 年滑动平均法;双累积曲线法

**中图分类号:** S157 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)21-0269-05

河流系统为易受到外界影响且处于波动状态的自然系统<sup>[1-3]</sup>。其中河流水沙变化是反映河流系统变化的关键因素,其主要受到降水量、河势稳定、河道演变、水土保持措施等气候变化与人类活动的影响<sup>[4-6]</sup>;此外河流水沙关系能表现出河流径流量和输沙量的匹配程度,不同类型水沙关系的河流,有着不同的泥沙沉积特征<sup>[7]</sup>。众多学者基于水沙变化特征对流域开展研究,这对揭示河流泥沙时空变化规律和来源,分析河流泥沙沉积特征和优化河道整治措施有重要作用<sup>[8]</sup>。贾运岗基于滑动平均法及 MK(Mann-Kendall)检验法对沂河流域进行水沙变化趋势研究,结果表明该流域多年径流量与输沙量在一定水平下,均呈明显下降趋势<sup>[9]</sup>;杨敏等通过分析 1951—2015 年洞庭湖水沙变化特征,得出洞庭湖水沙均呈下降趋势,水沙序列存在突变现

象<sup>[10]</sup>;刘希胜基于水文站实测资料对湟水干流进行水沙演变过程及相互关系的研究后发现,湟水干流多年平均输沙量与径流量存在年内分配不均衡且变化趋势不一致等特点<sup>[11]</sup>。李洋洋等利用水文站实测资料,采用双累积曲线法等多种方法分析了灞河流域水沙变化特征,发现该流域水沙总体呈下降趋势且具有多尺度特征,但年内分布极不均匀且变化尺度不一致<sup>[12]</sup>。本文针对西柳沟流域 1964—2017 年水沙资料,从降水量、径流量、泥沙量三者关系入手,运用相关分析、5 年滑动平均及双累积曲线研究方法,分析西柳沟流域 54 年水沙关系及其变化趋势,研究该流域降雨对径流和泥沙产生的影响,揭示流域水沙特点,从而为该地区水土流失治理及生态环境保护提供理论支持。

## 1 研究区概况

西柳沟为十大孔兑典型流域之一,发源于鄂尔多斯市东胜区,经库布齐沙漠后汇入黄河<sup>[13]</sup>,流域全长 106.5 km,流域面积 1 356.3 km<sup>2</sup>,范围为 109°24′~110°45′E,39°47′~40°30′N,该流域具有典型的干旱大陆性季风气候,气候干燥,风大沙多,多年平均降水量为 305.9 mm,76% 的降水集中在 6—9 月份,蒸发量为 2 149.2~2 234.2 mm,是降水量的 7 倍多。西柳沟流域最大洪峰量为 6 940 m<sup>3</sup>/s,最大含沙量为 1 550 kg/m<sup>3</sup>,最大输沙量为 4.75×10<sup>7</sup> t/年。西柳沟地形南高北低,海拔高

收稿日期:2020-02-10

资助项目:内蒙古自治区应用技术与开发资金计划(编号:201702109);国家自然科学基金(编号:31960329、31500584);内蒙古农业大学优秀青年科学基金(编号:2017XYQ-3);内蒙古自治区青年科技英才支持计划(编号:NJYT-17B19);内蒙古自治区自然科学基金(编号:2018MS03019)。

作者简介:刘璐(1995—),女,内蒙古乌兰察布人,硕士研究生,主要从事水土保持与荒漠化防治方面的研究。E-mail:1321058961@qq.com。

通信作者:郭月峰,博士,副教授,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:guoyuefeng0525@126.com。

度在 1 000 ~ 1 500 m 之间,相对高差 500 m 左右。流域内的地貌主要为丘陵区、库布其沙漠风沙区以及沿河平原区。丘陵区地面支离破碎,土壤侵蚀剧烈,以水力侵蚀和重力侵蚀为主,多年平均侵蚀模数为 8 500 t/(km<sup>2</sup>·年),土壤主要为栗钙土,该区优势植物为百里香和针茅<sup>[14]</sup>。风沙区为库布其沙漠中段,以风蚀为主,多年平均侵蚀模数为 10 000 t/(km<sup>2</sup>·年),其土层较厚,有机质含量极低,主要植物有油蒿、沙竹等。

## 2 材料与方法

### 2.1 资料数据

本次分析利用西柳沟流域 1964—2017 年水文资料。其中逐年径流、逐年输沙数据来源于鄂尔多斯水土保持龙头拐水文站实测资料;逐年、逐月降水量数据来源于柴登毫、高头窖和龙头拐 3 个雨量站实测资料。

### 2.2 研究方法

2.2.1 采用相关分析法分析水沙关系 对不同时段径流量和输沙量之间的相关关系进行定量描述,并进行显著性检验,从而揭示要素间相互关系的密切程度。

2.2.2 采用 5 年滑动平均法<sup>[15-16]</sup>分析水沙趋势 滑动曲线可更直接准确地表达水文时间序列下降雨、径流、输沙的变化趋势。

2.2.3 采用双累积曲线法分析水沙突变 双累积曲

线法由美国学者 Merriam 于 1937 年提出<sup>[17-18]</sup>,其曲线斜率用于反映参数变量的一致性及其变化趋势,若斜率发生突变,即表明参数变量对应的累积值发生变化,则斜率突变点所对应的时间即为径流、输沙变量趋势发生突变的年份,因此采用双累积曲线法分析西柳沟水沙突变年份,从而研究水沙变化机制。

## 3 结果与分析

### 3.1 水沙关系分析

3.1.1 降雨与径流输沙关系分析 降雨量是河流水沙变化的重要影响因素之一,对西柳沟流域的输沙量、径流量分别与降水量进行相关关系分析。由图 1、表 1 可知,在不同时段降水量与径流量均呈正相关关系,除 1980—1989 年、2010—2017 年降水量与径流量呈中低度相关之外,其他不同时段均呈高度相关,而且保持较好的同步性。在此划分时段下,降水量与泥沙量的相关性变异较大,总体相关性较差,基于相等降水量条件下,输沙量呈逐渐减少趋势。基于平均降水量,西柳沟流域 1964—1979 年年均输沙量约为  $4.08 \times 10^6$  t,1980—1999 年年均输沙量约为  $6.63 \times 10^6$  t,2000—2017 年年均输沙量约为  $1.02 \times 10^6$  t,可以看出在降水量相同的条件下,西柳沟输沙量在 21 世纪初呈明显下降趋势。因此,降水量的波动是径流量年际变化的主要影响因素,而输沙量在 21 世纪初的明显减少主要与水土保持等人类活动密切相关。

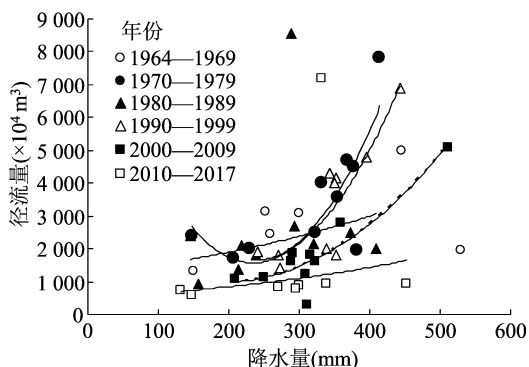
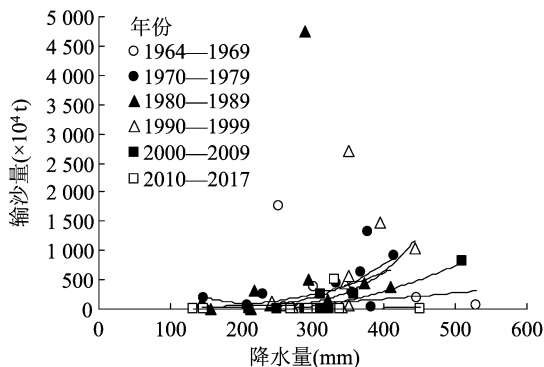


图1 西柳沟流域不同时段年降水量与年输沙量及年径流量相关关系



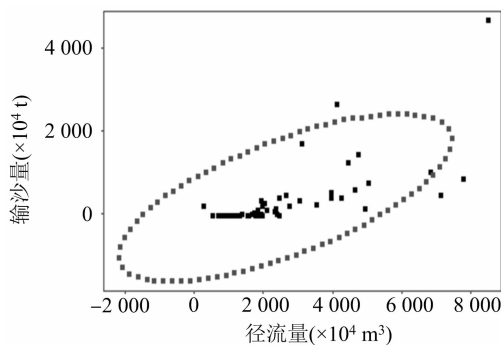
3.1.2 不同年代径流量与输沙量相关分析 分别对西柳沟流域 1964—2017 年、1964—1979 年、1980—1999 年和 2000—2017 年 4 个不同时段进行径流量和输沙量相关关系分析,并进行显著性检验。由置信椭圆(图 2)及相关系数(表 1)可以看出,1980—1999 年输沙量与径流量关系最为密切,

相关系数达到最大值,为 0.835 9,其置信椭圆呈极扁长状,(置信椭圆长短轴之比与变量相关程度成正比),1964—1979 时段下输沙量与径流量呈中度相关,显著性水平  $P$  值小于 0.05,呈显著相关,其置信椭圆基本呈圆状。其他不同时段输沙量与径流量呈极显著相关关系,输沙量与径流量置信椭圆呈

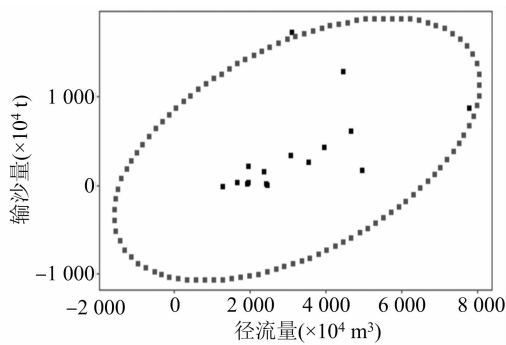
表 1 西柳沟流域不同时段输沙量与径流量关系特征

时间(年)	相关系数	<i>P</i> 值
1964—2017	0.687 0***	<0.000 1
1964—1979	0.504 9*	0.046 1
1980—1999	0.835 9***	<0.000 1
2000—2017	0.806 9***	<0.000 1

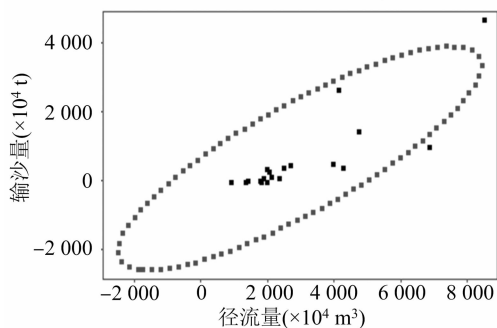
注: \* 表示  $P < 0.05$ ; \*\*\* 表示  $P < 0.001$ 。



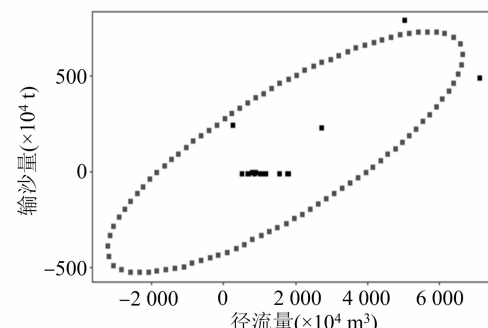
a. 1964—2017 年



b. 1964—1979 年



c. 1980—1999 年



d. 2000—2017 年

图2 西柳沟流域不同时段输沙量与径流量 95% 预测置信椭圆

### 3.2 水沙变化趋势分析

**3.2.1 降水量、径流量及输沙量变化分析** 基于 1964—2017 年西柳沟流域实测水文资料分析降水量、径流量及输沙量变化趋势。对流域径流量和输沙量取 5 年进行滑动平均,使序列对水沙变化趋势分析的影响得以弱化,结果如图 3 所示。输沙量及径流量在年际间变化过程中均有波动,年径流量变化幅度更加明显,但水沙总体变化基本趋于一致,二者均呈明显的下降趋势。其中输沙量下降趋势更加明显。流域多年平均径流量为  $2.65 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,多年平均输沙量为  $4.00 \times 10^6 \text{ t}$ 。流域径流量和输沙量年际差异极大,西柳沟流域年径流量处于  $2.98 \times 10^6 \text{ m}^3 \sim 8.56 \times 10^7 \text{ m}^3$  之间,最大值(1989 年)约为最小值(2008 年)的 29 倍。年输沙量在  $0.01 \times 10^4 \sim 4.75 \times 10^7 \text{ t}$  之间,最大值(1989 年)约为最小值(2011 年)的 365 384 倍。2000—2017 年均径流量

扁长状, $P$  值均小于 0.000 1。西柳沟流域总水文时间序列下(1964—2017 年)径流量与输沙量相关系数为 0.687 0,该时段数据集中分布在椭圆内部,说明输沙量与径流量关系未出现系统偏离。由此通过 54 年水沙资料的统计特征分析可以看出,西柳沟流域径流量与输沙量之间存在显著或极显著正相关关系。

为  $1.74 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,分别比 1964—1979 年和 1980—1999 年减少了 46.61% 和 41.48%。2000—2017 年均输沙量为  $1.02 \times 10^6 \text{ t}$ ,分别比 1964—1979 年和 1980—1999 年减少了 74.88% 和 84.54%。

由表 2 可知,西柳沟流域在 1964—1979 年期间,多年平均径流量及降水量分别达到最大值,其变差系数分别为 0.509 和 0.333,此阶段降水量多年平均值及变差系数均达到最大值,表明这期间产生的大量径流主要受降雨因素的影响。从总体变化趋势来看,各时段降水量呈波动状,其变差系数变化幅度较小,但径流量与输沙量变差系数总体呈上升趋势,在 2000—2017 年期间,多年平均径流量和输沙量分别达到最小值,且其变差系数分别处于最大值,分别为 0.998 和 2.160,由于此阶段降水量并无显著变化,说明径流量与输沙量受到水土保持等人类活动的影响,对降雨的响应趋于迟缓状态。

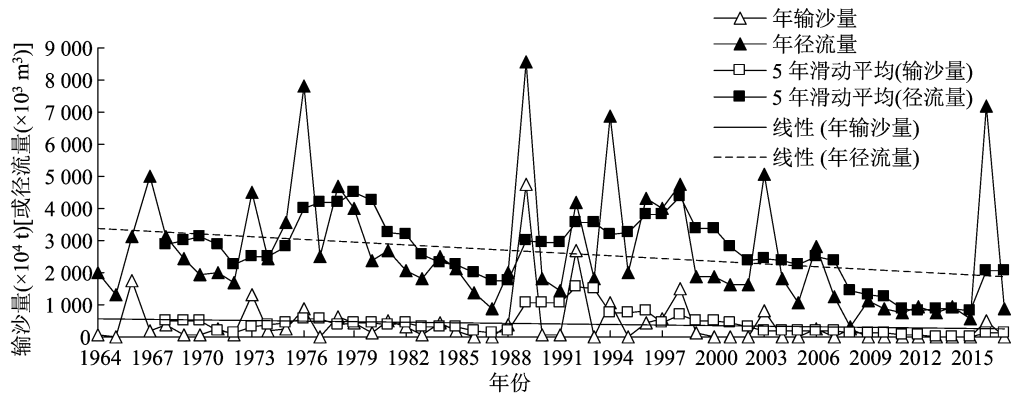


图3 西柳沟流域输沙量与径流量波动变化趋势

表 2 西柳沟流域不同时期降水量与输沙量及径流量变化特征

时间 (年)	径流量(×10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )		输沙量(×10 <sup>4</sup> t)		降水量(mm)	
	多年平均	变差系数	多年平均	变差系数	多年平均	变差系数
1964—1979	3 259	0.509	408	1.254	317	0.333
1980—1999	2 974	0.658	663	1.751	301	0.271
2000—2017	1 740	0.998	102	2.160	302	0.298
1964—2017	2 647	0.712	400	1.980	306	0.296

说明 54 年西柳沟流域水沙年际变化具有明显差异,且近些年输沙量年际减小程度大于径流量。

3.2.2 降水量、输沙量及径流量突变趋势分析 累积水沙关系曲线出现明显转折,说明水沙发生了趋势性变化,由西柳沟流域输沙量、径流量双累积曲线(图 4)可以看出,输沙量于 1989 年和 1998 年发生趋势性突变,径流量于 1989 和 2003 年发生转变,因此径流量按时间序列可分为三个阶段:1964—1988 年、1989—2002 年和 2003—2017 年,输沙量变化可分为 1964—1988 年、1989—1997 年和 1998—2017 年 3 个阶段。径流量和输沙量在第 1 阶段基本呈同步变化趋势,两者均有较强的线性相关关系,拟合效果较好。均于 1989 年发生趋势性突变,且该流域于 1989 年发生特大级别暴雨,说明该阶段

是由于降水量的显著变化所引起的突变现象。

累积径流量曲线基本呈一条直线,于 2003 年再次发生转折变化,径流量第 2 阶段曲线斜率变化相对平稳,径流量和降水量较第 1 阶段相关关系更加密切,由此可以看出径流量的变化受到了降水量的影响。第 2 阶段累积输沙量变化显著,于 1998 年再次发生趋势突变,输沙量第 2 阶段曲线斜率呈增大状,发生剧烈转折变化,且输沙与降雨关系减弱,由此可以看出西柳沟流域水沙变化规律的复杂性。径流量与输沙量在第 3 阶段期间与降水量的关系无显著变化,且该阶段期间斜率变化均呈减少状态,由此可以看出,该阶段发生的趋势性转变主要受到水土保持措施等人类活动的影响。

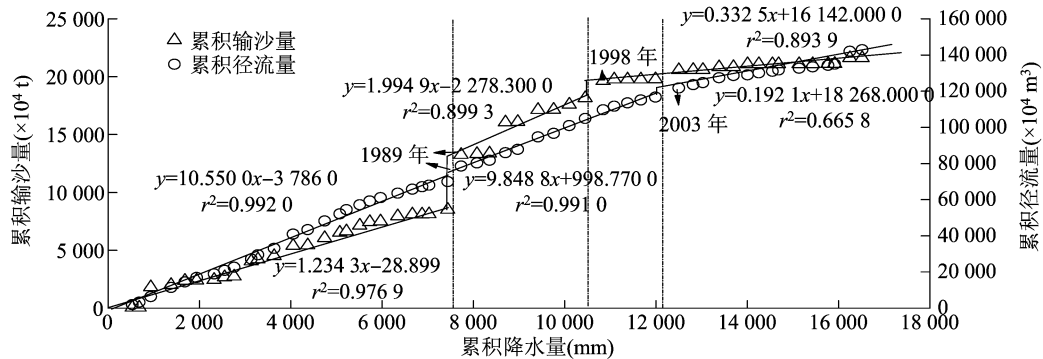


图4 西柳沟流域年输沙量与径流量双累积曲线

### 3 讨论

河流径流量与输沙量的变化是流域内气候变化与人类活动共同作用的结果<sup>[19-20]</sup>。本研究表明,西柳沟流域径流量主要受到降水量变化的影响,且降水量与径流量呈显著的正相关关系,基于水土保持措施的开展,输沙量有显著改善,径流量在水土保持措施的制约下对降水量的响应处于迟缓状态。西柳沟流域自 1986 年先后开展了黄土高原水土保持世行贷款项目、骨干坝工程、沙棘示范区治理、水土保持综合治理等项目。截至 2015 年,西柳沟流域上、中游丘陵风沙区林草措施总面积 731.93 km<sup>2</sup>,骨干坝 92 座,控制面积 442.11 km<sup>2</sup>,总库容 1.01 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,拦沙库容 5.41 × 10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>,水土保持治理度 55.74%,大规模水土保持措施的实施使西柳沟流域下垫面情况发生变化,改善该流域土壤侵蚀情况,使西柳沟流域径流量及输沙量呈明显下降趋势。

此外,对流域进行水沙关系及变化趋势分析时,应考虑流域降雨产流产沙的复杂性,应对汛期降水量以及最大一日降水量与径流量、输沙量的相关关系进行分析研究,更进一步地探索流域径流量与输沙量对降雨的响应机制。且应结合水保法,基于水土保持林草措施和生态修复封禁治理等具体单项措施指标,定量分析流域水沙变化对其响应作用,从而为有效治理区域水土流失提供科学依据,具有重要意义及科学价值。

### 4 结论

通过分析西柳沟流域降水量与径流量、输沙量的相关关系,结果表明,降水量与径流量呈显著的正相关关系,降水量与泥沙相关性变异程度较大,且基于平均降水量之下,不同时期的输沙量均呈下降趋势。西柳沟流域径流量和输沙量年际间变化极为明显,多年分配不均匀,输沙量的年际变化程度大于径流量;1964—1979 年输沙量与径流量属于中度相关,各分段年输沙量与年径流量属于高度正相关,水沙相关系数  $P$  值均小于 0.001,达到极显著性水平。输沙量和径流量在年际间变化过程中均有波动,但水沙变化基本趋于一致,均呈下降趋势。输沙量—径流量双累积曲线,输沙量分别在 1989 年和 1998 年发生转折,径流量分别在 1989 年、2003 年发生转折,表明西柳沟流域水沙变化规律的复杂性。

### 参考文献:

- [1] Walling D E, Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers[J]. Global and Planetary Change, 2003, 39(1/2): 111–126.
- [2] Peng G, Zhang X C, Mu X M, et al. Trend and change – point analyses of streamflow and sediment discharge in the Yellow River during 1950—2005[J]. Hydrological Sciences Journal, 2010, 55(2): 275–285.
- [3] Xin Z B, Yu B F, Han Y G. Spatiotemporal variations in annual sediment yield from the middle Yellow River, China, 1950—2010[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2015, 20(8): 04014090.
- [4] 许全喜, 童 辉. 近 50 年来长江水沙变化规律研究[J]. 水文, 2012, 32(5): 38–47, 76.
- [5] Stover S C, Montgomery D R. Channel change and flooding, Skokomish River, Washington[J]. Journal of Hydrology, 2001, 243(3/4): 272–286.
- [6] 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.
- [7] 赵 玉, 穆兴民, 何 毅, 等. 1950—2011 年黄河干流水沙关系变化研究[J]. 泥沙研究, 2014(4): 32–38.
- [8] 管 华. 秦岭—黄淮平原交接带河流水沙关系分析[J]. 山地学报, 1999, 17(2): 110–114.
- [9] 贾运岗. 沂河流域水沙变化趋势及成因分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 142–145.
- [10] 杨 敏, 毛德华, 刘培亮, 等. 1951—2015 年洞庭湖水沙变化特征分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(12): 1050–1062, 1071.
- [11] 刘希胜. 湟水干流水沙演变过程与相互关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(12): 152–158.
- [12] 李洋洋, 白洁芳, 周维博, 等. 50 年来澜河流域水沙变化特征分析[J]. 泥沙研究, 2017, 42(3): 20–25.
- [13] 王金花, 张荣刚, 李占斌, 等. 内蒙古西柳沟流域致洪暴雨特征分析[J]. 中国水土保持, 2014(8): 39–41.
- [14] 冉大川, 张 栋, 焦 鹏, 等. 西柳沟流域近期水沙变化归因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(5): 143–149.
- [15] 王 圣, 丁 晶, 李跃清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 110–112.
- [16] 魏炳乾, 苟洪运, 孙小军, 等. 基于时窗滑动平均法的水沙代表系列研究[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(6): 147–152.
- [17] 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): 47–51.
- [18] Merriam C F. A comprehensive study of the rainfall on the Susquehanna Valley[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1937, 18(2): 471.
- [19] 柳莎莎, 王厚杰, 张 勇, 等. 气候变化和人类活动对黄河中游输沙量影响的甄别[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(4): 41–50.
- [20] 信忠保, 许炯心, 余新晓. 近 50 年黄土高原水土流失的时空变化[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1129–1139.