

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.030.

戴中山, 李海峰. 2011—2020年赣江上游主要支流水沙变化特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 178-186.

Dai Zhongshan, Li Haifeng. Variation of Runoff and Sediment in the Main Tributaries of the Upper Ganjiang River in the Period from 2011 to 2020 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 178-186.

2011—2020年赣江上游主要支流水沙变化特征

戴中山^{1,3}, 李海峰^{1,2}

(1.江西农业大学 国土资源与环境学院 南昌市景观与环境重点实验室, 南昌 330045;

2.江西省土壤侵蚀与防治重点实验室, 南昌 330029; 3.华中农业大学 资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要: [目的] 探讨近十年来赣江流域上游主要支流水沙变化的基本特征, 阐明赣江上游水土保持措施与河川输沙量的关系, 为赣江流域的水土流失综合治理提供科学依据。 [方法] 以赣江流域上游4条主要支流把口站2011—2020年水沙实测资料为基础, 采用累积距平、双累积曲线等方法对支流水沙变化特征进行分析, 并结合相关水土保持措施统计数据对输沙模数进行线性回归分析。 [结果] (1) 赣江上游主要支流的降雨量和径流量的变化趋势大体相同, 主要支流的输沙量呈现“丰水丰沙, 贫水贫沙”的特征。(2) 四条支流的输沙量均表现出持续2~3 a的上升(下降)随后出现下降(上升)的间歇性态势。除平江流域外其他流域输沙能力受非自然因素影响较大, 影响因素较为复杂。(3) 2011—2020年赣江流域上游支流中平江、桃江及贡水流域输沙模数与5个水土保持因子无显著相关关系。章水流域输沙模数与新增水保林面积呈显著正相关。章水流域输沙模数与水土保持措施因子的关系方程如下: $M_z = 0.019S_{\text{水保林}} + 5.126$ (M_z 表示章水的年输沙模数, $S_{\text{水保林}}$ 代表对应支流流域内水土保持措施年新增面积)。(4) 提出新增水土保持措施的面积占比: 封育治理(52.0%~60.0%), 经果林(22%~25%), 水保林(20%~23%), 种草(2%~3%), 坡改梯(2%~3%)。 [结论] 赣江上游主要支流的降雨量和径流量的变化特征大体相同, 但个别年份存在径流量与降雨量不成正比的反常情况。影响赣江上游主要支流输沙能力的因素较为复杂, 其中水土保持措施是影响赣江上游章水流域水沙变化的主要人为因素, 章水流域输沙模数与新增水保林面积呈显著正相关。

关键词: 径流; 输沙; 累积距平; 双累积曲线; 水土保持

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0178-09

Variation of Runoff and Sediment in the Main Tributaries of the Upper Ganjiang River in the Period from 2011 to 2020

Dai Zhongshan^{1,3}, Li Haifeng^{1,2}

(1. Nanchang Key Laboratory of Landscape and Environment, School of Environmental and Land Resource Management, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;

2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention, Nanchang 330029, China;

3. College of Resources & Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the variation characteristics of runoff and sediment in the main tributaries of Ganjiang River watershed, to quantify the relationship between water and soil conservation measures and sediment transport in the upper reaches of Ganjiang River, and to provide a theoretical basis for soil erosion comprehensive management in Ganjiang River watershed. [Methods] Based on the measured runoff and sediment data of four main tributaries in Ganjiang River watershed from 2011 to 2020, hydrological analysis, cumulative anomaly and double cumulative curve method were used to study runoff and sediment variation. Meanwhile, linear regression analysis was carried out to quantify the relation-

收稿日期: 2022-06-18

修回日期: 2022-11-20

资助项目: 江西省土壤侵蚀与防治重点实验室开放基金“红壤坡耕地地下垫面变化条件下的生态效应研究”(9131208013)

第一作者: 戴中山(1999—), 男, 江西修水人, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: zhongshand1999@163.com

通信作者: 李海峰(1984—), 男, 江西宁都人, 博士, 副教授, 主要从事水土资源可持续利用研究。E-mail: haifengl1984@jxau.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

ship between soil and water conservation measures and sediment transport based on the statistical data of soil and water conservation measures in Ganzhou. [Results] (1) Variation trend of rainfall and runoff in the main tributaries of the upper reaches of Ganjiang river was roughly the same. The sediment transport of the main tributaries of the upper Ganjiang River changed with the variation of runoff, presenting a situation of abundant water and abundant sediment, poor water and poor sediment. (2) Sediment discharge in the four basins showed an intermittent trend of increasing (decreasing) and then decreasing (increasing) at two-year or three-year intervals. (3) Linear regression analysis quantified the response of sediment transport modulus to the scale of soil and water conservation measures: $M_z = 0.019 S_{\text{water conservation forest}} + 5.126$ (M_z representing the annual sediment transport module of Zhangshui, $S_{\text{water conservation forest}}$ representing the annual increase area of soil and water conservation measures in the corresponding tributary watershed). (4) Based on the structure of soil and water conservation measures in Ganzhou, the optimal area proportion of newly incremental water and soil conservation measures was put forward: enclosure management (52.0%~60.0%), fruit forest (22%~25%), water conservation forest (20%~23%), grass planting (2%~3%), slope improvement (2%~3%). [Conclusion] Variation trend of rainfall and runoff in the main tributaries of the upper reaches of Ganjiang river was roughly the same between the year of 2011 and the year of 2020, except the year of 2018. The factors affecting sediment transport of the main tributaries of the upper Ganjiang River are complex. Soil and water conservation measures were the dominant human activities for variation of runoff and sediment load in Zhangshui River Watershed. There was a significant positive correlation between sediment transport modulus and newly increased forest area in Zhangshui River Watershed.

Keywords: runoff; sediment; cumulative anomaly; double cumulative curve; soil and water conservation

江河水沙变化情况及成因分析对流域的可持续发展至关重要^[1-2]。旱涝灾害与水沙年内和年际分布密切相关^[3],对河川水沙变化进行归因和预测分析有助于旱涝灾害的科学防御^[4]。作为鄱阳湖流域的第一大河,赣江入湖平均年径流量和输沙量分别占全流域的 40.4%和 62.8%,赣江是鄱阳湖泥沙的主要策源地,而赣江上游又是赣江泥沙的主要来源地^[5-7]。江西自 80 年代末开展“治江必先治山”理念指导下的流域综合治理以来,水土流失状况明显改善,相关水土保持措施取得了良好效果^[8-9]。因此,进一步认识赣江流域水沙变化特征对水资源管理及水土保持工作意义重大,也能为应对极端气候条件下流域水旱灾害提供思路。

赣江上游是江西省水土流失最严重的地区之一,对赣江上游的水沙变化特征及归因分析已有诸多研究成果^[10]。例如丁倩倩等分析了桃江流域水沙对全球气候变化的响应,发现了太阳黑子等气候因子与输沙量的关系^[11]。刘惠英等基于坝上水文站 1956—2015 年的长序列资料采用多种统计学方法对章水流域的水沙变化驱动力进行分析,研究发现水土保持等人类活动对输沙量变化有显著影响^[12]。赵淑云等对贡水流域输沙量变化进行分析指出降水是影响输沙的主要因素,径流是直接因素^[13]。江辉等对万安水

库建库前后的水沙变化进行分析发现水利工程的显著减沙效益^[14]。黄达等运用 CBA 经济学理论对赣江上游水土保持效益进行评价,考虑土地机会成本等因素后指出水土保持措施发挥的生态效益最大^[15]。刘明霞研究发现赣江上游未来植被覆盖度呈下降趋势等^[16]。以上研究为认识赣江上游流域水沙变化特征和了解流域水土保持效益奠定了坚实的基础。但对赣江上游水沙变化的研究局限在个别支流,对上游支流群综合分析不足,缺乏水土保持措施效果的量化研究。此外,大多数研究采用长序列资料分析,在气候变化和人类活动不可预测性大的背景下,短序列的资料分析或许更具有现实意义。

本文基于赣江上游 4 大支流(章水、平江、桃江、贡水)的把口站水沙资料(2011—2020 年),采用水文分析、累积距平、双累积曲线法对赣江上游支流群水沙变化特征进行分析,并对所得的结果进行析因,在寻找到的各支流输沙影响因子的基础上量化影响因子的作用,构建关系方程。本研究以期为赣江流域的水沙变化分析和水土流失治理与水旱灾害防御提供科学依据。

1 研究区概况

赣江为江西第一大河,发源于江西和福建交界处的石寨崇^[17],自南向北流经赣州、吉安、南昌等 20 多

个县市最后分为四支汇入鄱阳湖。赣江上游是指万安棉津以上区域,面积约 36 800 km²,占整个赣江流域的 45.5%^[18-19]。该流域属亚热带季风气候区,雨量和光照均充足,4—6 月降雨集中。DEM 显示赣江上游地势起伏较大,各支流发源于崇山峻岭之间(图 1)。上游主要岩体为易蚀性花岗岩和变质岩,特殊的地形和地质条件使得赣江上游流域易形成洪灾^[20]。赣江上游主要支流有章水、贡水、平江、桃江等^[21]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

各支流把口站的气象数据和水沙数据是经过对 2011—2020 年《江西省水土保持公报》的数据进行整理而获得(图 1)。研究区位图中用到的相关矢量数据和栅格(DEM)数据底图来自国家基础地理信息网(<http://www.ngcc.cn/ngcc/>)以及地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),流域范围与河流网络运用 ArcGIS 10.2 软件通过一系列水文分析步骤获得。赣州市各类水土保持措施规模数据来自 2011—2020 年《江西省水土保持公报》的统计数据,各支流区域内水土保持规模数据是基于赣州市数据采用支流流域面积占比的方法通过计算获得。

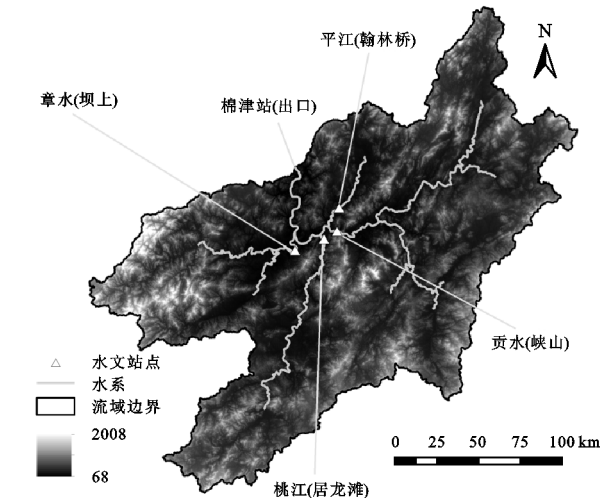


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

2.2 研究方法

针对各支流把口站降雨量、径流量以及输沙量的年际变化特征采用 OriginPro 2021 作图进行分析,采用 SPSS(IBM SPSS Statistics 24)软件进行皮尔逊相关分析获得水沙年际变化的相关性,同样采用此软件对流域输沙模数和水土保持影响因子进行逐步回归分析获得线性回归方程。

2.2.1 累积距平法 累积距平法常用于判断变化阶段性^[22],表达式为:

$$S_i = \sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X}) \quad (i=1,2,3,\dots,n)$$

式中: S_i 为累积距平值; X_i 降雨量(mm)、或径流量(亿 m³)或输沙量(万 t); \bar{X} 为降雨量、径流量或输沙量的多年平均值。

2.2.2 双累积曲线法 双累积曲线法是将两个不同变量的同期累积值绘制在一个坐标系中,一般横坐标为参考或基准变量,纵坐标为被检验变量。双累积曲线法常用于水文气象等要素的一致性检验。在研究河川径流量和流域输沙量的归因分析中应用广泛^[23-25]。通过作出累积降雨量—累积径流量、累积降水量—累积输沙量的双累积曲线图,可以清楚了解水沙变化受人为因素和自然因素影响的程度和进一步的变化趋势。

3 结果与分析

3.1 水文特征

赣江上游四大支流的坝上站、翰林桥站、居龙滩站和峡山站降雨量与径流量的年际变化特征如图 2 所示。由图 2 可知,近十年间(2011—2020 年)四大支流的把口站降雨量和径流量均在 2016 年达到峰值,四大支流各自的把口站径流量大体上随降雨量变化而变化,但 2018 年坝上、翰林桥、居龙滩测站的径流量在降雨量与 2017 年相比增加的情况下反而减小,峡山站在 2018 年降雨量较前一年小幅度下降的情况下其径流量则大幅下降。2019 年坝上站降雨量相比 2018 年略降而其径流量则大幅增加。

由图 3 可知,2018 年以前各测站的输沙量随径流量变化而变化,呈现“丰水丰沙,贫水贫沙”的情况;但在 2018 年除桃江的居龙滩站仍维持“水少沙少”的状况外,其他测站呈现“贫水丰沙”的态势,在之后的 2019 年恢复正常。

表 1 相关性分析结果

Table 1 Correlation analysis result

站名	控制 面积/km ²	指标 名称	均值	标准差	皮尔逊 相关性
坝上	7657	年径流量/亿 m ³	62.97	19.00	0.626
		年输沙量/万 t	48.39	33.21	
翰林桥	2689	年径流量/亿 m ³	24.25	10.01	0.979 **
		年输沙量/万 t	46.43	27.80	
居龙滩	7751	年径流量/亿 m ³	54.99	19.99	0.892 **
		年输沙量/万 t	38.01	35.80	
峡山	16033	年径流量/亿 m ³	139.82	56.85	0.916 **
		年输沙量/万 t	172.02	134.48	

注:**表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著。

对 4 个测站的径流量与输沙量进行相关性分析,分析结果如表 1 所示,4 个测站中除坝上站外其他测

站的皮尔逊相关系数都在 0.9 左右,其中以平江流域(翰林桥站)的皮尔逊相关系数最高,达到 0.985;且平江、桃江和贡水三大支流的年径流量和年输沙量相关

性显著。章水流域的年径流量和年输沙量的皮尔逊相关系数只有 0.613,相对其他三大支流而言年径流量和输沙量相关性较差。

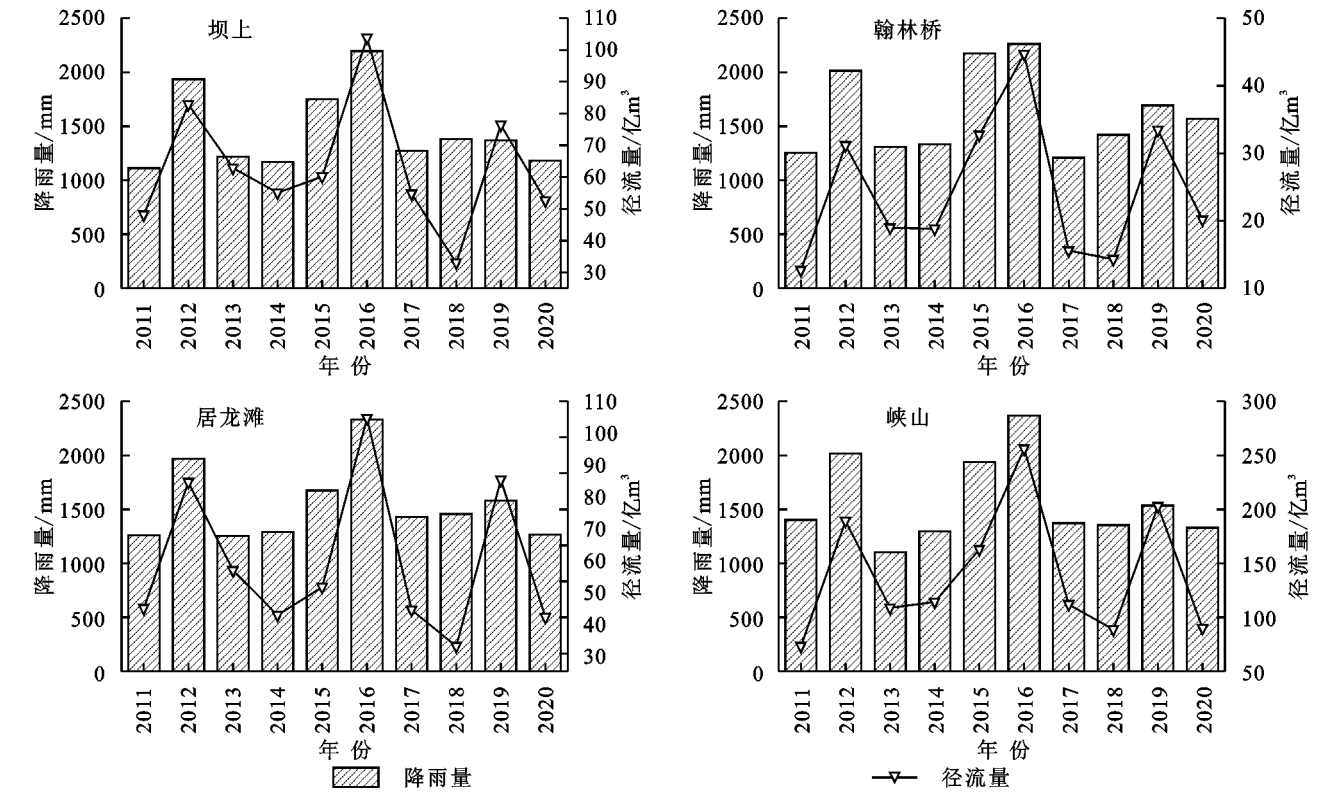


图 2 主要测站的降雨量、径流量年际变化

Fig. 2 Temporal variations of annual precipitation and streamflow at major stations

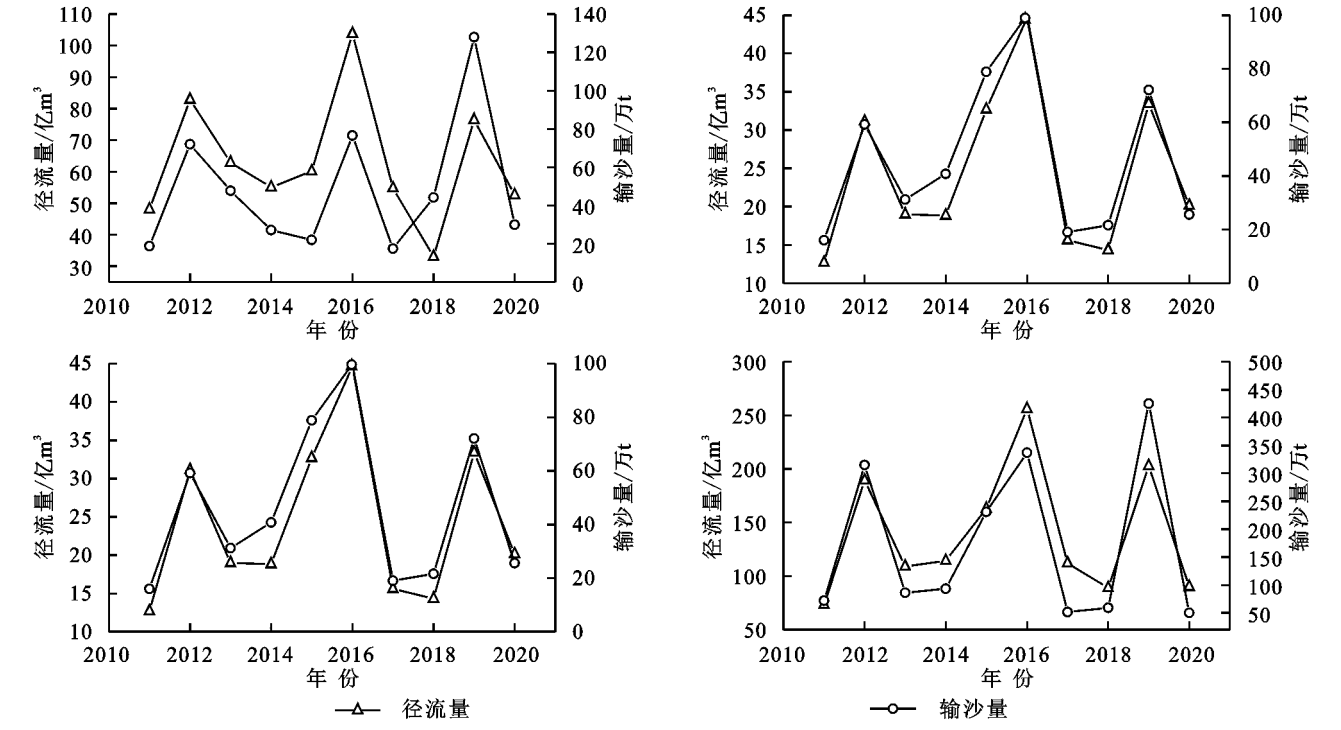


图 3 主要测站的径流量、输沙量年际变化

Fig. 3 Temporal variations of annual streamflow and sediment at major stations

由于选取的赣江上游四大主要支流面积相差较大,采用河川径流输沙模数的方式能更好体现各支流

年输沙量的变化特征,分析结果如图 4 所示。各支流的输沙模数在短期内呈双峰变化,2011—2018 年四

大支流的输沙模数都在 2016 年达到最大值,这与前文分析得出的“丰水丰沙,贫水贫沙”结论相符合。但在 2019 年四大支流降水量小于 2016 年的情况下却

有 3 条支流达到了新的输沙模数峰值,推测是大尺度水土保持措施结构变化产生影响,也可能与流域内水库修建等因素有关,影响因素较为复杂。

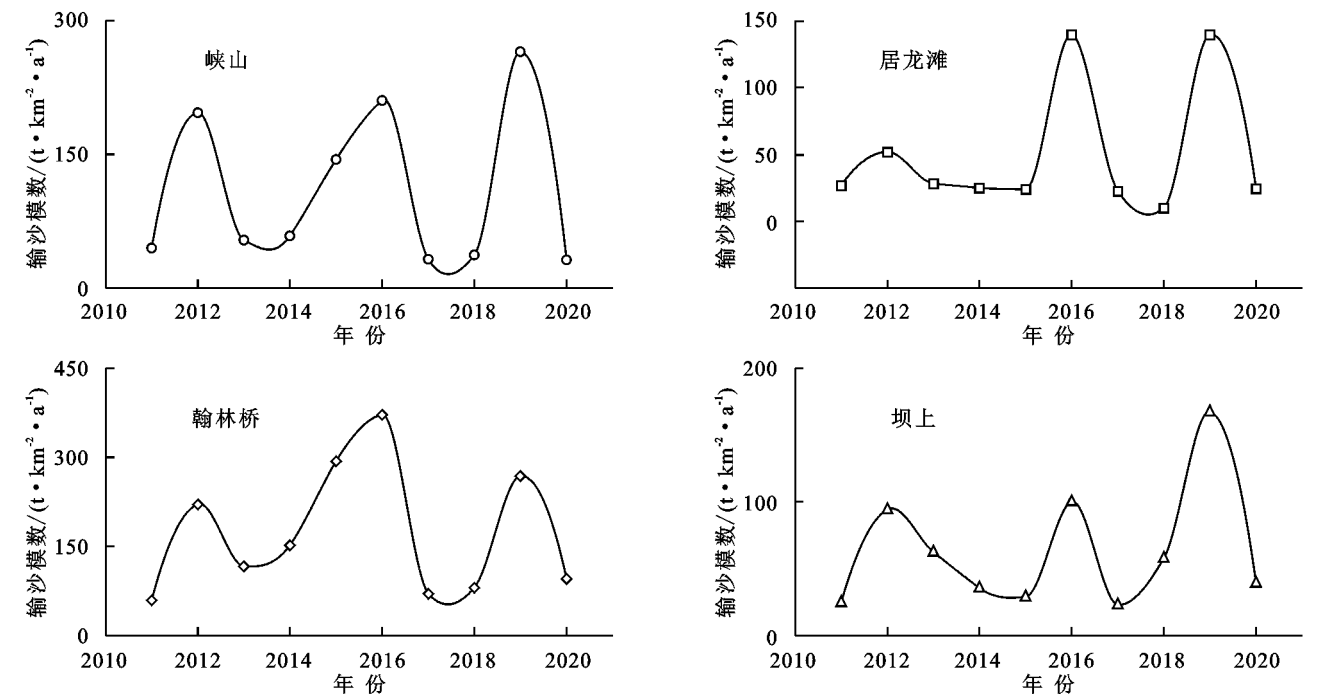


图 4 流域输沙模数
Fig. 4 Modulus of sediment transport in basin

3.2 水沙变化特征

4 个测站的降水量、径流量和输沙量各自的累积距平值结果见图 5,不难看出 4 条支流的降水量与径流量的变化特征大体吻合,且平江流域的吻合度最好,另外 3 条支流的降水量与径流量的阶段性变化不稳定,呈现出较大的波动性,以章水流域最为明显;在 2015 年、2019 年章水和桃江的降雨量与径流量变化趋势相反,2019 年贡水的降雨量与径流量变化趋势亦相反。4 条支流的径流量与输沙量的变化特征具有很好的一致性,采用径流量的累积距平值来划分赣江上游主要支流的输沙量变化阶段比采用降雨量的累积距平值更为合适。章水流域在 2012—2015 年和 2016—2018 年这两个短时段内径流量和输沙量处于下降阶段;平江流域在 2012—2014 年和 2016—2018 年两个短时段内径流量和输沙量处于下降阶段,中间时段处于上升阶段;桃江流域在 2012—2015 年和 2016—2018 年两个短时段内径流量和输沙量处于下降阶段;贡水流域在 2012—2014 年和 2016—2018 年两个短时段内径流量和输沙量处于下降阶段,中间时段则为上升阶段。

总之,4 个流域的输沙量在短期内都是表现出持续 2~3 a 的上升(下降)随后出现下降(上升)的间歇性态势,说明赣江上游的主要支流章水、平江、桃江和

贡水的输沙量在较短的时间尺度上仍然随径流量的变化而变化。

3.3 输沙量变化与归因分析

3.3.1 变化特征 为进一步探究赣江上游四大支流的输沙量影响因素,采用双累积曲线法对相关测站的累积降雨量、累积径流量和累积输沙量进行分析。此处由于数据序列较短,为方便观察输沙量的变化特征,在径流量—输沙量双累积曲线图中作出趋势线,如图 6 所示。四大支流的降雨量—径流量双累积曲线线性拟合良好,线性拟合优度 R^2 均在 0.99 以上;说明四大支流的径流量没有受到大的影响,与降雨量具有较好的一致性,可以以径流量累积值为横坐标来分析输沙量受其他因素的影响程度。

从径流量—输沙量累积曲线分析图中可以明显看出平江流域的双累积曲线斜率基本无变化,以此可以判断该流域的河流输沙量主导因素为径流量,与水土保持等其他因素关联程度不大,也可能是该流域水土保持效果已经达到阈值。其他三大支流的双累积曲线均在不同时段出现斜率的变化,说明流域输沙量受到除径流量之外的其他自然因素或人为因素的影响。其中贡水流域的双累积曲线斜率变化最不规则,可能是流域面积大导致输沙量受到的影响因素较为复杂。除平江流域外,其他三大支流

的累积曲线斜率在研究时段后期均有上升的趋势,在输沙模数分析过程中出现的“2016 年输沙模数出现峰值后 2019 年再次达到峰值”的现象与此可能有一定的关联性。

综合而言,赣江上游的支流群中除了平江流域

外,其他流域的泥沙输移能力可能受到较大的非自然因素影响,也可能存在未考虑到的自然因素影响。由于主要分析支流水沙变化特征,本文讨论的非自然因素影响主要是流域内水土保持措施规模,其他因素尚未考虑。

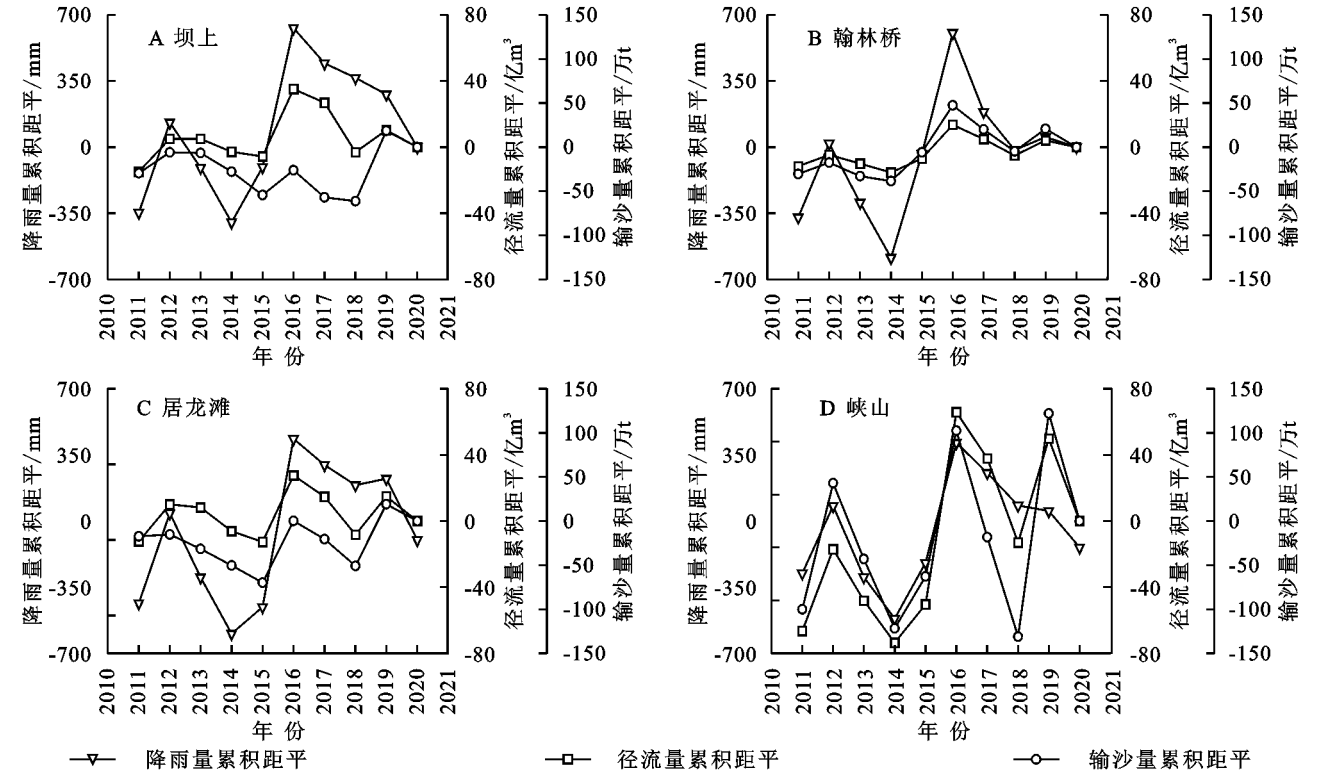


图 5 累积距平分析结果

Fig. 5 Cumulative anomaly analysis results

3.3.2 归因分析 为了对双累积曲线分析出现的特征和流域输沙模数峰值年份出现的情况进行分析,考虑到影响因素以人为因素为主,而具体的人为因素又以水土保持为代表,因此以赣江流域每年新增水土保持措施规模为切入点进行归因分析。

由于赣江上游流域几乎都在赣州市境内,所以采用赣州市每年新增的水土保持措施规模进行分析,在原始水土保持公报数据中没有将水土保持措施规模细分到各市的年份采用全省的水土保持措施规模乘以赣州市占江西省面积的比例(约占 23.59%)进行计算,并对所得结果进行适当的修正,统计结果如表 2 所示。对各年份的各类水土保持措施新增面积占比结果分析可知,2011—2014 年新增封育治理面积占比处于下降趋势(67.4%~52.8%),经果林面积占比上升(17.9%~22.3%),水保林(17.9%~24.9%)、坡改梯(0.7%~3.9%)和种草(1.8%~3.1%)变化不大。2015 年、2016 年新增封育治理面积占比增大,其中 2016 年,新增封育治理面积比重达 74.3%,其他治理措施新增面积占比均下降。2017 年新增水保林比

重高达 41.4%,与 2011—2016 年相比成倍增加;2018—2020 年水保林所占比重均较大,且变化不稳定。2019 年四大支流降水量小于 2016 年的情况下却有 3 条支流达到了新的输沙模数峰值可能与水土保持措施结构变化有关。

表 2 2011—2020 年赣州市新增水保措施规模

Table 2 Scale of new water conservation measures in Ganzhou City from 2011 to 2020

年份	坡改梯/ hm ²	水保林/ hm ²	经果林/ hm ²	种草/ hm ²	封育 治理/hm ²	汇总/ hm ²
2011	593	4919	2843	617	18556	27528
2012	372	13471	5433	994	33910	54180
2013	1675	11287	7377	1533	27407	49279
2014	1915	9469	11064	998	26200	49646
2015	1808	7700	5208	311	22253	37280
2016	65	9884	5663	427	46406	62445
2017	3220	13653	5561	269	10252	32955
2018	702	14192	8224	1889	36650	61657
2019	120	36401	5227	1182	43805	86735
2020	0	14260	1945	12	49342	65559

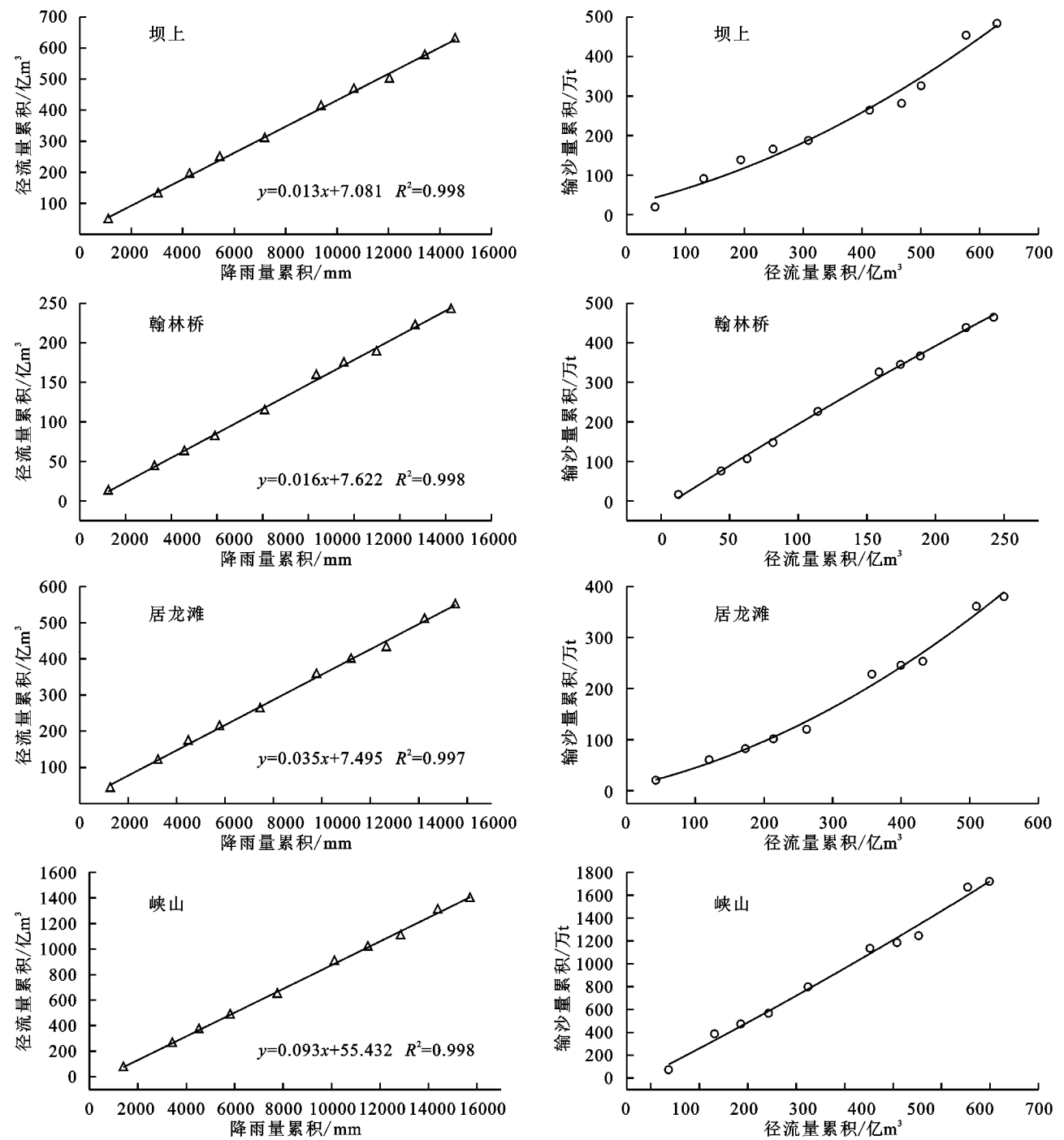


图 6 双累积曲线法分析结果

Fig. 6 Double accumulation curve analysis results

表 3 支流输沙模数与水土保持因子相关性分析

Table 3 Correlation analysis between sediment transport modulus of tributaries and water conservation measures

站名	影响因素	显著水平	线性关系	线性拟合优度	德宾—沃森
章水(M_z)	水保林	0.005	$M_z = 0.019S_{\text{水保林}} + 5.126$	61.1%	2.585

注:表中 M_z 代表输沙模数, $S_{\text{水保林}}$ 代表流域内对应水土保持措施年新增面积(hm^2)。

基于表 2,采用各支流流域面积占比的情况计算相应水土保持规模,采用逐步回归的分析方法寻找各支流输沙模数和 5 个水土保持因子(坡改梯、水保林、经果林、种草、封育治理)之间的关系,并进行量化分析。结果表明:2011—2020 年赣江流域上游支流中平江、桃江及贡水流域输沙模数与 5 个水土保持因子无显著相关关系。章水流域输沙模数与新增水保林面积呈显著正相关。章水流域输沙模数与水土

保持措施因子的关系方程如下: $M_z = 0.019S_{\text{水保林}} + 5.126$ (表 3)。结合 2011—2020 年逐年新增各类水土保持措施所占的比重数据,提出适用于赣江上游地区水土流失防治的年新增水土保持措施配比——封育治理:52.0%~60.0%,经果林:22%~25%,水保林:20%~23%,种草:2%~3%,坡改梯:2%~3%。在制定水土保持规划时建议在因地制宜的基础上适当提高新增经果林的占比,适度压缩新增封育治理的面积,同时不可对新增水土保持措施的结构占比大幅度调整。

4 结 论

(1) 赣江上游主要支流的降雨量和径流量的变化特征大体相同,但个别年份存在径流量与降雨量不成正比的反常情况。赣江上游主要支流的输沙量随径流量变化而变化,呈现“丰水丰沙,贫水贫沙”的态势,但在 2018 年除桃江外其他支流呈现“水少沙多”的反常情况。皮尔逊相关分析显示除章水外其他支流的径流量和输沙量相关系数都在 0.9 左右;在 2011—2018 年中的 2016 年各支流的输沙模数达到相应时期内的最大值,而在 2019 年降水量小于 2016 年的情况下有 3 条支流达到新的峰值,影响赣江上游主要支流输沙能力的因素较为复杂。

(2) 采用径流量的累积距平值划分赣江上游主要支流的输沙量变化阶段更为合适,4 个流域的输沙量在短期内都是表现出持续 2~3 a 的上升(下降)随后出现下降(上升)的间歇性态势。

(3) 双累积曲线法分析显示赣江上游四大支流的累积降雨量和径流量斜率无明显变化,线性拟合优度 R^2 均大于 0.99;径流量—输沙量的双累积曲线分析发现除平江外其他支流的输沙量可能受到非自然因素的较大影响,斜率变化不稳定。

(4) 人为影响因素对江河水沙变化的影响以水土保持措施为主,新增水土保持措施结构的变化可能与输沙量变化特征和输沙模数峰值出现波动有关。采用逐步回归的方式量化了章水流域输沙模数与水土保持因子之间的关系: $M_z = 0.019S_{\text{水保林}} + 5.126$ (M_z 代表输沙模数, $S_{\text{水保林}}$ 代表流域内对应水土保持措施年新增面积)。提出赣江上游水土流失防治的新增水土保持措施配比范围:封育治理(52.0%~60.0%),经果林(22%~25%),水保林(20%~23%),种草(2%~3%),坡改梯(2%~3%)。

参考文献:

[1] 宁珍,高光耀,傅伯杰.黄土高原流域水沙变化研究进展

[J].生态学报,2020,40(1):2-9.

Ning Z, Gao G Y, Fu B J. Changes in streamflow and sediment load in the catchments of the Loess Plateau, China:a review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(1):2-9.

[2] 赵阳,胡春宏,张晓明,等.近 70 年黄河流域水沙情势及其成因分析[J].农业工程学报,2018,34(21):112-119.

Zhao Y, Hu C H, Zhang X M, et al. Analysis on runoff and sediment regimes and its causes of the Yellow River in recent 70 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the Csa), 2018,34(21):112-119.

[3] 张颖,宋成成,肖洋,等.近 50 年来赣江流域水沙年内分配变化分析[J].水文,2013,33(3):80-84.

Zhang Y, Song C C, Xiao Y, et al. Variation of annual runoff and sediment distribution in Ganjiang River Basin over past 50 Years[J]. Hydrology, 2013,33(3):80-84.

[4] 李华东,曾伽丽,盘懿霏,等.东江流域水沙变化定量归因及对河道冲淤影响研究[J].人民珠江,2020,41(9):1-10.

Li H D, Zeng J L, Pan Y F, et al. Quantitative attribution of runoff and sediment changes in the East River basin and impact on erosion and siltation of river channel [J]. Pearl River, 2020,41(9):1-10.

[5] 张思华,黄军源.赣江上游水文特征[J].江西师范大学学报:自然科学版,1986(2):111-120.

Zhang S H, Huang J Y. Hydrological characteristics of the upper reaches of Ganjiang River[J]. Journal of Jiangxi Normal University: Natural Science Edition, 1986 (2):111-120.

[6] 顾朝军,穆兴民,高鹏,等.赣江流域径流量和输沙量的变化过程及其对人类活动的响应[J].泥沙研究,2016 (3):38-44.

Gu C J, Mu X M, Gao P, et al. Variation of runoff and sediment discharge and response to human activities in the Ganjiang River[J]. Journal of Sediment Research, 2016(3):38-44.

[7] 郭鹏,陈晓玲,刘影.鄱阳湖湖口、外洲、梅港三站水沙变化及趋势分析(1955—2001 年)[J].湖泊科学,2006,18 (5):458-463.

Guo P, Chen X L, Liu Y. Analysis on the runoff and sediment transportation in the Houkou, Waizhou and Meigang Stations of Lake Poyang during 1955—2001 [J]. Journal of Lake Science, 2006,18(5):458-463.

[8] 丁倩倩,刘友存,焦克勤,等.赣江上游典型流域水沙过程及驱动因素[J].水土保持通报,2018,38(4):19-26.

Ding Q Q, Liu Y C, Jiao K Q, et al. Changes and driving factors of runoff and sediment yield of typical watershed in Upper Reaches of Ganjiang River[J]. Bulletin of

- Soil and Water Conservation, 2018, 38(4):19-26.
- [9] 徐夏楠, 高建华, 贾建军, 等. 气候变化和人类活动对鄱阳湖流域入湖输沙量影响的定量估算[J]. 地理研究, 2015, 34(5):838-850.
- Xu X N, Gao J H, Jia J J, et al. The quantitative estimation of sediment load changes entering Poyang Lake Basin induced by climate change and anthropogenic impacts[J]. Geographical Research, 2015, 34(5):838-850.
- [10] 孙昕, 李德成, 梁音. 南方红壤区小流域水土保持综合效益定量评价方法探讨: 以江西兴国县为例[J]. 土壤学报, 2009, 46(3):373-380.
- Sun X, Li D C, Liang Y. Quantitative evaluating comprehensive benefit of soil and water conservation at small watershed scale in southern red soil region: A case study of Xingguo County, Jiangxi Province[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(3):373-380.
- [11] 丁倩倩, 刘友存, 焦克勤, 等. 赣江上游典型流域水沙过程对全球气候变化的响应[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(1):174-186.
- Ding Q Q, Liu Y C, Jiao K Q, et al. Response of water and sediment processes of typical watershed upstream of Ganjiang river to global climate change [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(1):174-186.
- [12] 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):615-623.
- Liu H Y, Bai Y. Contribution rate analysis of driving factors on the Rainfall-Sediment relationship of Zhan-griver Watershed in the upper region of Ganjiang Watershed[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(3):615-623.
- [13] 赵淑云, 苗帅升, 刘友存, 等. 赣江上游典型流域输沙过程及对降水与径流变化的响应: 以贡水流域为例[J]. 江西理工大学学报, 2018, 39(1):37-43.
- Zhao S Y, Miao S S, Liu Y C, et al. Temporal and spatial variation of sediment transport in Gongshui River and its response to precipitation [J]. the Jiangxi University of Science and Technology Journal, 2018, 39(1):37-43.
- [14] 江辉, 刘瑶, 陈晓玲, 等. 1965—2011年赣江中上游年输沙量变化及影响因素[J]. 人民长江, 2017, 48(24):66-70.
- Jiang H, Liu Y, Chen X L, et al. Variation characteristics of annual sediment discharge and its influential factors in middle-upper Ganjiang River during 1965—2011[J]. Yangtze River, 2017, 48(24):66-70.
- [15] 黄达, 张翔, 夏军, 等. 赣江上游流域水土保持效益评价[J]. 中国农村水利水电, 2020(7):91-94.
- Huang D, Zhang X, Xia J, et al. Benefit evaluation of soil and water conservation in the upper reaches of Ganjiang river[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(7):91-94..
- [16] 刘明霞, 刘友存, 陈明, 等. 2000—2018年赣江上游植被覆盖度时空演化及其对气候变化的响应[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5):284-290.
- Liu M X, Liu Y C, Chen M, et al. Spatiotemporal evolution of vegetation coverage and its response to climate change in Upper Reaches of Ganjiang River Basin during 2000—2018[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5):284-290.
- [17] 黄建刚, 刘惠英. 赣江主源贡水流域 1957—2016 年降雨特性[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3):91-100.
- Huang J G, Liu H Y. Precipitation characteristics of Gongshui Basin in the Primary Source of Ganjiang Basin During the Period 1957—2016 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(3):91-100.
- [18] 郑海金, 方少文, 杨洁, 等. 近 40 年赣江年径流泥沙变化及影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1):28-32.
- Zheng H J, Fang S W, Yang J, et al. Analysis on evolution characteristics and impacting factors of annual runoff and sediment in the Ganjiang River During 1970—2009 [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(1):28-32.
- [19] 徐启渝, 王鹏, 王涛, 等. 土地利用结构与景观格局对鄱阳湖流域赣江水质的影响[J]. 湖泊科学, 2020, 32(4):1008-1019.
- Xu Q Y, Wang P, Wang T, et al. Investigation of the impacts of land use structure and landscape pattern on water quality in the Ganjiang River, Lake Poyang Basin [J]. Journal of Lake Science, 2020, 32(4):1008-1019.
- [20] 向志奇, 李丹. 2010 年 6 月赣江特大暴雨洪水分析[J]. 水资源研究, 2014, 35(2):16-20.
- Xiang Z Q, Li D. Analysis of heavy rainstorm flood in Ganjiang River in June 2010 [J]. Journal of Water Resources Research, 2014, 35(2):16-20.
- [21] 刘星根, 李昌彦, 吴敦敏. 近 60 年赣江水沙变化特征及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(11):1920-1928.
- Liu X G, Li C Y, Wu D Y. Changing characteristic and its impact factor analysis of streamflow and sediment of Ganjiang River Basin during past 60 years[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(11):1920-1928.
- [22] 万晓丹, 周晓岚, 赵丽霞, 等. 皇甫川流域水沙变化趋势及影响因素分析[J]. 中国农村水利水电, 2019(12):90-93.
- Wan X D, Zhou X L, Zhao L X, et al. An analysis of the trend of water and sediment change and its influencing factors in Huangfuchuan River Basin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(12):90-93.

- drought event occurred from 1941 to 1943 in North China and its influence[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2011, 29(4): 423-426, 432.
- [36] 胡子瑛, 周俊菊, 张利利, 等. 中国北方气候干湿变化及干旱演变特征[J]. *生态学报*, 2018, 38(6): 1908-1919.
Hu Z Y, Zhou J J, Zhang L L, et al. Climate dry-wet change and drought evolution characteristics of different dry-wet areas in northern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(6): 1908-1919.
- [37] 宋家喜. 1997/98 年强厄尔尼诺现象及其对热带大气环流和我国重大气象、气候年际变化的影响[C]// 国减灾与新世纪发展战略: 首届“中国 21 世纪安全减灾与可持续发展战略高级研讨会”论文集. 北京: 气象出版社, 1998: 154-157.
Song J X. Strong El Niño Phenomenon in 1997/98 and its influence on tropical atmospheric circulation and major meteorological and climate interannual variations in China[C]// *China's Disaster Reduction and New Century Development Strategy: Proceedings of the First "Senior Seminar on China's 21st Century Security Disaster Reduction and Sustainable Development Strategy"*. Beijing: Meteorological Press, 1998: 154-157.
- [38] 周丹, 张勃, 任培贵, 等. 基于标准化降水蒸散指数的陕西省近 50 年干旱特征分析[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(4): 677-688.
Zhou D, Zhang B, Ren P G, et al. Analysis of drought characteristics of Shaanxi Province in recent 50 years based on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(4): 677-688.
- [39] 赵嘉阳. 中国 1960—2013 年气候变化时空特征、突变及未来趋势分析[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
Zhao J Y. Changes and mutation in temperature and precipitation of China during 1960—2013 and future prediction[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017.
- [40] 滕怀颐, 冯克鹏. 基于 SPEI 干旱指数的西北地区干旱时空分布[J]. *农业与技术*, 2021, 41(8): 887-893.
Teng H Y, Feng K P. Temporal and spatial distribution of drought in northwest China based on SPEI drought index[J]. *Agriculture and Technology*, 2021, 41(8): 887-893.
- [41] 刘宇, 李雯晴, 刘招, 等. 基于 SPEI 渭北黄土台塬区干旱时空演变特征[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(1): 109-117.
Liu Y, Li W Q, Liu Z, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of the drought in Weibei Loess Tableland Area based on SPEI[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(1): 109-117.
- [42] 李洁, 莫淑红, 沈冰, 等. 基于 SPEI 的渭河流域干旱特征分析[J]. *西安理工大学学报*, 2016, 32(1): 70-76.
Li J, Mo S H, Shen B, et al. Analysis of drought characteristics of the Weihe River Basin based on SPEI[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2016, 32(1): 70-76.
- [43] Miao L, Li S, Zhang F, et al. Future drought in the dry lands of Asia under the 1.5 and 2.0°C warming scenarios[J]. *Earth's Future*, 2020, 8(6): e2019 EF001337.
- [44] 孙洋洋. 渭河流域气象与水文干旱时空演变特征[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
Sun Y Y. Characteristics of temporal and spatial evolution of hydrological and meteorological drought in the Wei River Basin[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.

(上接第 186 页)

- [23] 胡彩虹, 管新建, 吴泽宁, 等. 水土保持措施和气候变化对汾河水库入库径流贡献定量分析[J]. *水土保持措施*, 2011, 25(5): 12-16.
Hu C H, Guan X J, Wu Z N, et al. Analysis for contribution of soil and water conservation and climate change to runoff in the upper reaches of Fenhe reservation[J]. *Chinese Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5): 12-16.
- [24] 胡彩虹, 王艺璇, 管新建, 等. 基于双累积曲线法的径流变化成因分析[J]. *水资源研究*, 2012(1): 204-210.
Hu C H, Wang Y X, Guan X J, et al. The causes of runoff variation based on double cumulative curve analysis method[J]. *Journal of Water Resources Research*, 2012(1): 204-210.
- [25] 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.
Mu X M, Zhang X Q, Gao P, et al. Theory of double mass curves and its applications in hydrology and meteorology[J]. *Chinese Journal of Hydrological*, 2010, 30(4): 47-51.