

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.04.007

衢江水沙变化趋势分析

宋逸云, 黄峰

(河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098)

摘要:以衢州水文站以上流域为研究区域,基于衢江衢州水文站1958—2006年径流量和输沙量序列,采用Mann-Kendall趋势检验法、Sen's坡度检验法、累加滤波器法与双累积曲线法,探讨近50年来衢江径流量和输沙量的变化趋势以及水沙关系的变化特征,并分析引起水沙序列变化的可能影响因素。结果表明:衢江年径流量无明显的变化趋势,而枯水月份(8月至次年1月)的径流量呈现显著增大的趋势,丰水月份中5月的径流量则呈现减小的趋势。输沙量变化趋势较为明显,自1980年以来衢江输沙量呈显著减小的趋势。从降水情况、水库拦沙和水土流失的治理状况等方面分析了引起衢江水沙变化的原因,提出衢江流域内水库所发挥的“蓄丰补枯”补水调节作用可能造成了径流量的变化,而水库建设与水土保持措施可能是流域输沙量减小的重要原因。

关键词:水沙变化;Mann-Kendall趋势检验法;Sen's坡度检验法;累加滤波器法;双累积曲线法;趋势分析;衢江

中图分类号:P33

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2017)04-0040-07

Trend analysis of runoff and sediment load variation in Qujiang River

SONG Yiyun, HUANG Feng

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Taking the Qujiang River Basin above the Quzhou Hydrological Station as the study site, the characteristics of the annual runoff and sediment load during the period from 1958 to 2006 were analyzed based on the hydro-data of the Quzhou Hydrological Station. The variation trends and features of runoff and sediment load in the study period were investigated using the Mann-Kendall trend test, Sen's slope method, cumulative filter method, and double mass curve method, and the influencing factors were analyzed. The results indicate that there was no significant change in the time series of annual runoff, while the runoff in the dry season (from August to January of the next year) showed a significant increasing trend and the runoff in the flood season (in May) showed a significant decreasing trend. The annual sediment load had shown a significant decreasing trend since 1980. The major factors correlated with the runoff and sediment load changes such as precipitation, sediment detention in reservoirs, and soil conservation were also analyzed. Water replenishing and regulating from the reservoirs in the Qujiang River Basin might cause the changes of runoff. The construction of reservoirs and implementation of soil conservation measures were the main factors that resulted in the decrease of sediment load in the basin.

Key words: runoff and sediment load variation; Mann-Kendall trend test; Sen's slope method; cumulative filter method; double mass curve method; trend analysis; Qujiang River

流域系统是对气候变化与人类活动异常敏感的动态系统,水沙变化是其中最为活跃的部分^[1]。因

此,径流量和输沙量的变化不仅关系到河流自身的发展演变,也反映了流域的环境状况、水土流失程度

基金项目:国家自然科学基金(41401011)

作者简介:宋逸云(1995—),女,本科生,专业方向为自然地理与资源环境。E-mail:songyiyun95@outlook.com

通信作者:黄峰,讲师,博士。E-mail:hfeng0216@163.com

及人类活动的影响^[2-3]。目前,已开展众多关于水沙变化特征的研究,但尚未针对衢江流域开展此类研究。衢江流域人口众多,城镇密集,近年来,衢江流域内气候降水条件不断变化,人类活动日益频繁,开展了众多水利工程与水土保持工程的建设,影响着衢江流域的水沙变化。因此,研究衢江流域的水沙变化趋势,有助于衢江流域乃至浙江全省的水资源保护与生态环境建设^[4]。

1 研究区概况

1.1 流域概况

衢江位于浙江省西部衢州市境内,是钱塘江的主要支流,也是钱塘江的源头之一。衢江流域对地表水的开发利用主要以蓄、引水工程为主,目前已建成大型水库5座,中型水库9座,小(一)型水库73座、小(二)型水库和山塘约2100座,总库容为35.4亿m³,部分大中型水库基本情况列于表1,水库具体位置见图1。

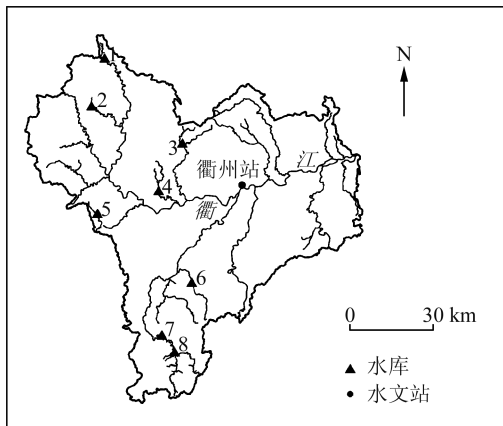


图1 衢江流域示意图

表1 衢州市大中型水库基本情况

县(市、区)	序号	水库名称	集雨面积/km ²	正常水位/m	正常库容/亿m ³	水库类型
开化县	1	齐溪水库	182.65	288.20	0.38	中型
	2	茅岗水库	30.00	301.04	0.09	中型
	3	芙蓉水库	126.00	275.08	0.08	中型
常山县	4	狮子口水库	84.43	101.80	0.09	中型
	5	千家排水库	27.00	216.60	0.16	中型
江山市	6	碗窑水库	212.50	194.24	2.15	大(二)型
	7	峡口水库	399.30	237.00	0.47	中型
	8	白水坑水库	330.00	348.30	2.15	大(二)型

1.2 衢江流域水沙年内分布特征

衢江流域水沙年内分布不均,4—7月是产流和产沙的集中时期。4—7月的多年平均月径流量之和占全年径流量的63.47%,其中6月产流占全年的20.66%。由图2可知,衢江流域月输沙量与月径流量年内分配基本相对应。4—7月的多年平均

月输沙量之和占全年输沙量的82.01%,其中6月产沙占全年的34.42%,由此可见,输沙量较径流量年内分布更为集中。

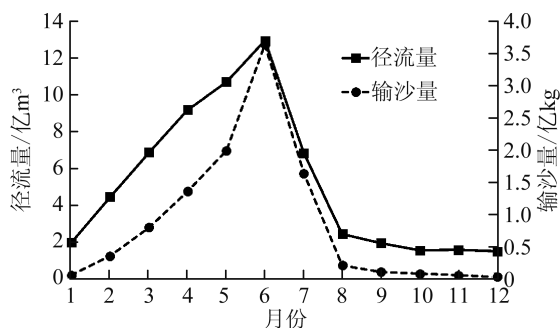


图2 衢江衢州站1958—2006年水沙年内分布情况

2 数据情况及研究方法

2.1 数据情况

研究数据为衢江流域衢州水文站的月均流量和月均输沙率,为了方便将输沙率与流量变化对应起来进行研究,将时间序列统一为1958—2006年,数据序列完整,无缺失。

2.2 研究方法

2.2.1 Mann-Kendall 趋势检验法和 Sen's 坡度检验法

Mann-Kendal 趋势检验法(以下简称 M-K 法)是提取趋势变化的有效工具,Sen's 坡度检验法是基于变化斜率的检测方法。这两种方法运用简单,不需要样本遵从一定的分布规律,也不受少数异常值的干扰,能很好地处理非正态分布的数据^[5-6],因此,适用于水文数据时间序列变化的趋势分析^[2-3, 7]。其中 M-K 法仅能判断序列变化的整体趋势,但无法详细说明具体变化幅度的大小,因而本文对所有运用 M-K 法并通过 95% 置信度检验的序列进行 Sen's 坡度检验,展现其具体的变化幅度。

M-K 法的基本原理^[8-9]是:设水文序列为 x_1, x_2, \dots, x_n, n 为时间序列的长度。M-K 法定义统计量 S :

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

式中: x_j, x_k 分别为 j, k 年相应的水文观测值,且 $k > j$, 而

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

其方差 $\text{var}(S)$ 及标准化后的统计量 Z 分别为

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, Z 为正态分布的统计量, $Z > 0$ 表示序列呈上升趋势, $Z < 0$ 表示序列呈下降趋势。

Sen's 坡度检验法^[10-12]的基本原理是: 设水文序列为 x_1, x_2, \dots, x_n , n 为时间序列的长度, 其中 x_j, x_k 分别为 j, k 年相应的水文观测值, 且 $k > j$, Q 表示 Sen's 坡度值。

$$Q = \text{median}\left(\frac{x_k - x_j}{k - j}\right) \quad (5)$$

2.2.2 累加滤波器法

累加滤波器法通过计算前 m 年的平均值与全序列段 n 的平均值的比值, 不仅可以通绘图直观展现水沙的整体变化趋势, 还可以反映水沙变化量的大小。相对于 M-K 法通过数值直接展现时间序列下水文要素的变化情况, 累加滤波器法可以更详尽的展现该时间序列下不同时段的具体变化趋势。其计算公式^[2]为

$$S' = \sum_{i=1}^m \frac{w_i}{m} / \bar{w} \quad (6)$$

式中: S' 为累积平均值; w_i 为水文变量系列值; \bar{w} 为水文变量系列平均值; n 为水文时间序列的长度, $m = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m$ 。

2.2.3 双累积曲线法

双累积曲线通过在直角坐标系中绘制同期内两个变量连续累计值的关系线, 检验两个参数间关系的一致性与变化。它可用于水文气象要素一致性的检验以及该要素变化趋势与强度的分析^[13]。

在应用双累积曲线时要选择具有相同的物理成因或成因关系好的两个因素, 而河道径流量与输沙量则具有密切的因果关系, 在相同的自然条件下二者累积曲线也表现为显著的直线关系。因此, 在河流水沙关系研究中, 通过建立径流量与输沙量双累积曲线可以分析河流水沙的趋势性变化^[14-15]。

3 结果与分析

3.1 衢州站径流变化趋势

M-K 趋势检验结果表明, 衢州站年平均径流

表2 衢江衢州站 1958—2006 年月平均径流量 M-K 趋势检验结果

时段	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
Z	2.55*	0.36	1.16	0.10	-1.69	0.84	1.41	2.32*	2.84*	1.28	2.19*	2.07*

注: * 表示在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下, 增大或减小趋势是显著的。

量的 M-K 统计量 $Z = 1.34$, 呈正趋势变化, 但低于显著性 $\alpha = 0.05$ 时的临界值 1.96, 即未通过 95% 置信度检验, 说明衢江衢州站径流量年际变化趋势性不显著。

图 3 为累加滤波器法对 1958—2006 年衢江衢州站年平均径流量的分析结果, 反映出 1958—2006 年衢州站径流量的累积平均过程。其结果表明, 衢州站径流量在 1958—1967 年有明显波动, 1968—1977 年整体表现为增大趋势, 1978—1990 年为波动变化, 1991—1999 年出现短暂的增大变化, 2000—2006 年整体基本稳定, 呈现微弱的减小趋势。但总体上, 衢州站年平均径流量呈现增大趋势, 这与 M-K 法的趋势检验结果相对一致。

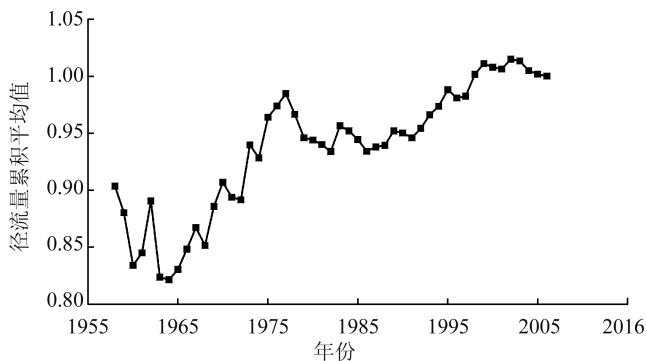


图3 衢江衢州站 1958—2006 年年均径流量累积平均过程曲线

表 2 为 1958—2006 年衢江衢州站月平均径流量 M-K 趋势检验结果。由表 2 可见, 衢州站各月的平均径流量变化趋势较为一致, 除 5 月经流量呈减小趋势外, 其余各月均呈增大趋势, 其中 1、8、9、11、12 月平均径流量呈显著增大趋势, 通过了 95% 置信度检验。对上述各月的月平均径流量变化情况作 Sen's 坡度检验, 结果如图 4 所示。其中, 5 月为负 Sen's 坡度值, 且数值较大, $Q = -0.092$ 亿 m^3/a , 而 1、8、9、11、12 月均为正值, 且集中在 0.015 亿 m^3/a 至 0.035 亿 m^3/a 之间, 这与 M-K 法的趋势检验结果相吻合。

3.2 衢州站输沙变化趋势

M-K 趋势检验结果表明, 衢江衢州站年平均输沙量的 M-K 统计量 $Z = -2.97$, 呈负趋势变化, 超过显著性 $\alpha = 0.05$ 时的临界值 -1.96, 即通过了 95% 置信度检验, 表示年平均输沙量序列呈显著减小趋势。

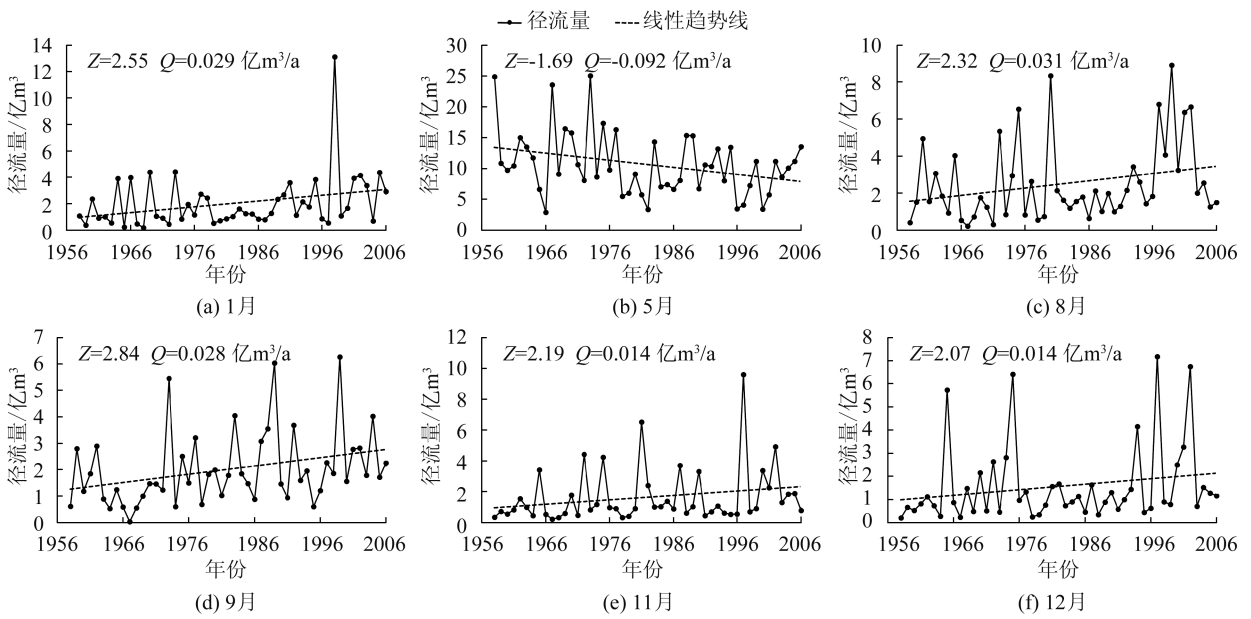


图4 衢江衢州站月平均径流量变化趋势分析

图5为累加滤波器法对1958—2006年衢江衢州站年平均输沙量的分析结果,反映出1958—2006年衢州站输沙量的累积平均过程。由图5可见,衢州站输沙量在1958—1967年有明显波动,1968—1976年整体呈增大趋势,1977—2006年整体呈下降趋势。总体上,衢州站年平均输沙量呈现较

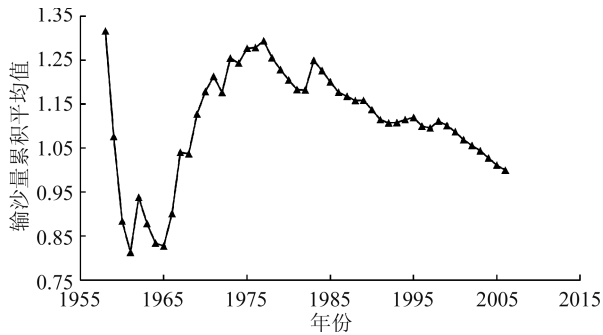


图5 衢江衢州站年均输沙量累积平均过程曲线

为明显的下降趋势,这与M-K法的趋势检验结果相对一致。

表3为1958—2006年衢江衢州站月平均输沙量M-K趋势检验结果。由表3可见,衢州站各月平均输沙量的变化趋势一致性较差,其中1、11、12月呈增大趋势,2—6月呈减小趋势。对通过95%置信度检验的年平均输沙量与1、5月平均输沙量作Sen's坡度检验(结果用Q表示,单位:亿kg/a),结果如图6所示。其中,衢州站年平均输沙量的Sen's坡度值为-0.131亿kg/a,可见衢江输沙量不仅减小趋势显著,减小幅度也较大。

3.3 径流量与输沙量双累积分析

图7是衢江衢州站累积年径流量和累积年输沙量双累积曲线。若流域水沙特性发生系统变化,水沙量双累积曲线图上将出现明显的转折,即累积曲

表3 衢江衢州站1958—2006年月平均输沙量M-K趋势检验结果

时段	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
Z	2.17*	-1.09	-1.29	-1.81	-3.53*	-1.00	0.15	0.27	-0.34	0.06	1.52	1.29

注: *表示在显著性水平 $\alpha=0.05$ 下,增大或减小趋势是显著的。

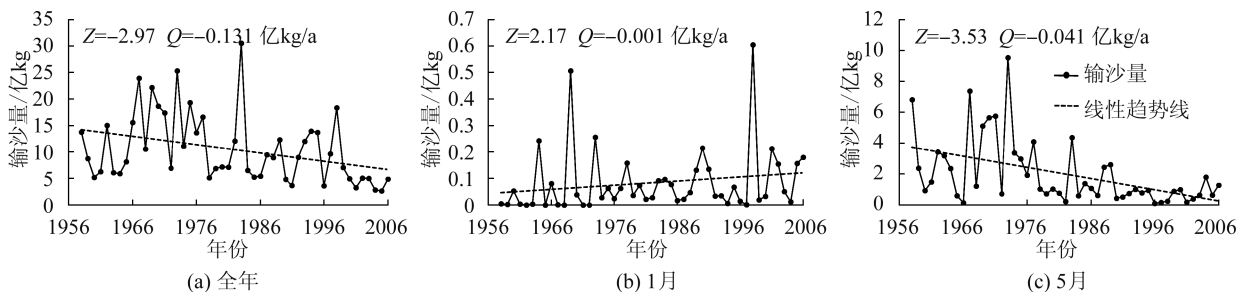


图6 衢江衢州站月/年平均输沙量变化趋势分析

线斜率明显变大或变小^[16-17]。衢江径流—输沙双累积曲线基本呈一条直线,但在1982年出现转折,因此将时间序列划分为1958—1982年与1983—2006年两个阶段。图7中显示了两个阶段的线性拟合方程,可见1983—2006年的斜率明显小于1958—1982年。结合图8可知,衢江年均输沙量的减小幅度明显大于年均径流量的变化幅度,这与双累积曲线整体呈现为向径流量轴偏转相吻合。

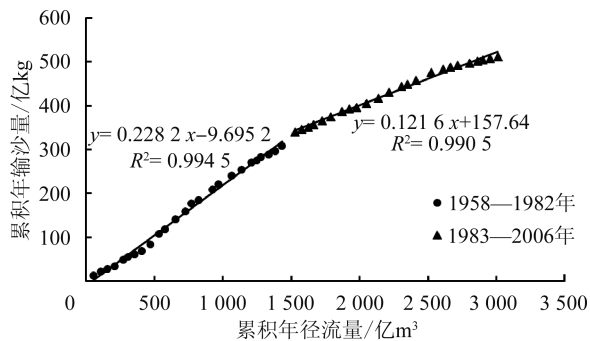


图7 衢江衢州站1958—2006年径流—输沙双累积曲线

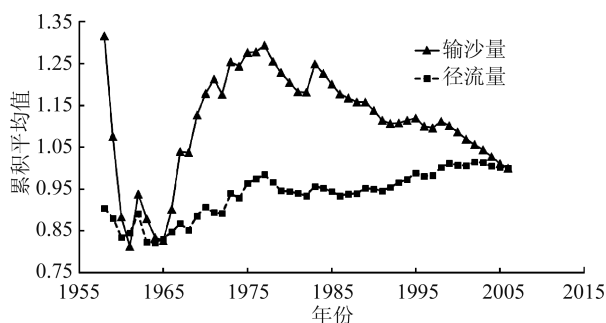


图8 衢江衢州站1958—2006年年均径流量和年均输沙量累积平均过程曲线

计算得衢州站1990年代输沙量为1960年代输沙量的80.77%,1970年代的68.08%,1980年代的91.49%。如图8所示,自1977年以来,衢州站年平均输沙量呈减小趋势,结合双累积曲线的转折点——1982年可知,1980年前后为衢江流域输沙量发生突变的时间。

此外,若径流—输沙双累积曲线发生偏转,表明除径流变化外,输沙量还受其他因素影响^[18-19]。如图7所示,曲线向径流轴偏转,说明除径流的变化对输沙产生影响外,人类活动可能导致了衢江输沙量呈现减小趋势。

3.4 水沙变化影响因素分析

3.4.1 径流变化的影响因素分析

由图2可知衢江流域水沙年内分布不均,每年8月至次年1月径流量明显较少,其多年平均月径流量之和仅占全年径流量的18.29%。M-K法趋势检验结果显示8—12月径流量呈显著增大趋势,并

通过了95%置信度检验,但8—12月降水量的M-K趋势检验结果并未呈现显著的变化趋势(表4),由此可推测,衢江流域所建设的水库群发挥了补水调节的作用,使得枯水月份的径流量呈增大趋势。而1月的降水量与径流量M-K趋势检验结果均呈现显著增大的趋势,因此降水量的变化与水库的补水调节作用均可能导致其径流量的变化。

表4 衢江衢州站1958—2006年月平均径流量、降水量M-K趋势检验结果

月份	Z	
	降水量	径流量
1	2.59*	2.55*
5	-1.84	-1.69
8	0.92	2.32*
9	-0.63	2.84*
10	-0.75	1.28
11	0.76	2.19*
12	-0.14	2.07*

注:*表示在显著性水平 $\alpha=0.05$ 下,增大或减小趋势是显著的。

由表4可知,5月的降水量与径流量M-K趋势检验结果一致。由此可推测,降水量的变化可能造成了5月径流量的变化。此外,每年5月产流量较大,水库蓄水也可能会导致其径流量减小。

3.4.2 输沙变化的影响因素分析

a. 水库拦沙。水库拦沙对输沙量的影响主要有两个方面:①水库的建设使库区河道流速减慢,泥沙淤积,使得下游河道输沙量大幅度减小;②水库将经历相当长的时间才可以达到冲淤平衡,在未达到冲淤平衡之前,水库将会产生持续的拦沙效果^[20]。

近50年来,衢江流域水库的修建经历了阶段性发展,已由个别水库的修建发展到梯级式水库群的建设,特别是1980年以来众多大型水库的建设,使得水库拦沙在人类活动对河流泥沙的影响中所占的比重越来越大。截至2014年底,衢江流域干支流上已建成5座大型水库以及众多中小型水库,总库容达到35.4亿 m^3 。众多水库调节了河流水沙过程,拦蓄了部分径流和泥沙,使得进入下游的输沙量大大减小。而梯级水库将永久性地使大量泥沙淤积在库尾和死库容内,并在长时间内使河流输沙量减小^[21]。因此,衢江流域的输沙量将在相当长的时间内呈现减小趋势。

b. 水土保持措施。自1985年衢州撤地建市后,特别是《中华人民共和国水土保持法》颁布实施以来,衢州市城区共新建(改造)水土保持设施100.52 hm^2 ,绿化覆盖面积增至4640 hm^2 ,绿化覆盖率达42.46%;城区水土流失面积不断减小,目前仅

占土地面积的 5.22%。伴随衢州市森林植被的逐步恢复,其水源涵养功能逐步凸显,水土流失面积逐年减小,衢江干支流泥沙也明显减小。

4 结 论

a. 衢江流域的年平均径流量无明显的变化趋势,但水库“蓄丰补枯”补水调节的作用明显,使得枯水月份(8月至次年1月)的径流量呈现显著增大的趋势,5月份的径流量则呈现减小的趋势。另外,1月、5月降水量与径流量的变化趋势较为一致,降水量的变化也可能导致了径流量的变化。

b. 衢江流域的月输沙量除1月呈显著增大趋势,5月呈显著减小趋势外,其余各月均未呈现显著的变化趋势。而衢江流域的年输沙量则呈现显著减小的趋势,利用双累积曲线与累加滤波器法推测突变时间为1980年前后。

c. 衢江流域输沙量的变化受人类活动影响显著,特别是1980年前后衢江上游众多大中型梯级水库的建设与投入使用,使支流与干流的来沙被大量拦截,水库对泥沙的滞淤作用明显。此外,衢州市自1985年来开展的水土保持措施也是造成衢江流域输沙量减小的重要因素。

此外,水沙变化受气候、下垫面状况变化等多种因素影响,本文仅针对降水情况与人类活动两方面探讨了衢江流域水沙变化的可能影响因素。而其他影响因素,如蒸发量、植被指数的变化等,对流域水沙变化情况的影响程度如何,有待进一步研究。

参考文献:

[1] 张强,陈桂亚,姜彤,等.近40年来长江流域水沙变化趋势及可能影响因素探讨[J].长江流域资源与环境,2008,17(2):257-263. (ZHANG Qiang, CHEN Guiya, JIANG Tong, et al. Changing characteristics of sediment yield and discharge during past 40 years in catchment of the Yangtze River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(2):257-263. (in Chinese))

[2] 王延贵,刘茜,史红玲.江河水沙变化趋势分析方法与比较[J].中国水利水电科学研究院学报,2014(2):190-195. (WANG Yangui, LIU Xi, SHI Hongling. Analytical methods and their comparisons for water and sediment variation trends [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2014(2):190-195. (in Chinese))

[3] 刘茜,王延贵.江河水沙变化突变性与周期性分析方法及比较[J].水利水电科技进展,2015,35(2):17-23. (LIU Xi, WANG Yangui. Comparison of analytical methods of runoff and sediment load mutation and periodical variation [J]. Advances in Science and Technology of Water

Resources, 2015, 35(2):17-23. (in Chinese))

[4] 胡春宏,王延贵,张燕菁,等.中国江河水沙变化趋势与主要影响因素[J].水科学进展,2010,21(4):524-532. (HU Chunhong, WANG Yangui, ZHANG Yanjing, et al. Variation tendency of runoff and sediment load in China major rivers and its causes [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4):524-532. (in Chinese))

[5] 邢万秋,王卫光,吴杨青,等.淮河流域降雨集中度的时空演变规律分析[J].水电能源科学,2011,29(5):1-5. (XING Wanqiu, WANG Weiguang, WU Yangqing, et al. Change properties of precipitation concentration in Huaihe River Basin [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(5):1-5. (in Chinese))

[6] 朱非林,王卫光,孙一萌,等.汉江流域实际蒸散发的时空演变规律及成因分析[J].河海大学学报(自然科学版),2013(4):300-306. (ZHU Feilin, WANG Weiguang, SUN Yimeng, et al. Spatial and temporal variations of actual evapotranspiration and their causes in Hanjiang River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013(4):300-306. (in Chinese))

[7] 郭世兴,刘斌,王光社,等.基于Mann-Kendall法的汉江上游水沙趋势分析[J].水电能源科学,2015,33(11):140-142. (GUO Shixing, LIU Bin, WANG Guangshe, et al. Trend analysis of flow and sediment in upstream of Hanjiang Basin based on Mann-Kendall test method [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(11):140-142. (in Chinese))

[8] 蔺学东,张懿铨,姚治君,等.拉萨河流域近50年来径流变化趋势分析[J].地理科学进展,2007,26(3):58-67. (LIN Xuedong, ZHANG Yili, YAO Zhijun, et al. Trend analysis of the runoff variation in Lhasa River Basin in Tibetan Plateau during the last 50 years [J]. Progress in Geography, 2007, 26(3):58-67. (in Chinese))

[9] BURN D H, ELNUR M A H. Detection of hydrologic trends and variability [J]. Journal of Hydrology, 2002, 255(1-4):107-122.

[10] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau [J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324):1379-1389.

[11] 刘扬,杨永春,张轲,等.1960—2011年河西走廊地表干湿状况的时空变化及影响因素[J].水土保持通报,2015,35(1):54-60. (LIU Yang, YANG Yongchun, ZHANG Ke, et al. Temporal and spatial variation of humidity and its influential factors in Hexi Corridor during 1960—2011 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(1):54-60. (in Chinese))

[12] 邱临静,郑粉莉,尹润生.1952—2008年延河流域降水与径流的变化趋势分析[J].水土保持学报,2011,25(3):49-53. (QIU Linjing, ZHENG Fenli, YIN Runsheng. Trend analysis of precipitation and streamflow during 1952—2008 in Yanhe River Basin [J]. Journal of

- Soil and Water Conservation, 2011, 25 (3): 49-53. (in Chinese))
- [13] ALBERT J M. Hydraulic Analysis and double mass curves of the middle rio grande from Cochiti to San Marcial, New Mexico [D]. Fort Collins: Colorado State University, 2004.
- [14] 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. (ZHAO Yu, MU Xingmin, HE Yi, et al. Relationship between runoff and sediment discharge in the main channel of Yellow River from 1950 to 2011 [J]. Journal of Sediment Research, 2014(4): 32-38. (in Chinese))
- [15] 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 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): 47-51. (in Chinese))
- [16] 许全喜, 石国钰, 陈泽方. 长江上游近期水沙变化特点及其趋势分析[J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 420-426. (XU Quanxi, SHI Guoyu, CHEN Zefang. Analysis of recent changing characteristics and tendency runoff and sediment transport in the upper reach of Yangtze River [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(4): 420-426. (in Chinese))
- [17] 戴会超, 王玲玲, 蒋定国. 三峡水库蓄水前后长江上游近期水沙变化趋势[J]. 水利学报, 2007(增刊1): 226-231. (DAI Huichao, WANG Lingling, JIANG Dingguo. Near term water flow and silt concentration variation trend of Yangtze River before and after impounding of Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(Sup1): 226-231. (in Chinese))
- [18] 杜俊, 师长兴, 张守红, 等. 人类活动对长江上游近期输沙变化的影响[J]. 地理科学进展, 2010, 29(1): 15-22. (DU Jun, SHI Changxing, ZHANG Shouhong, et al. Impact of human activities on recent changes in sediment discharge of the Upper Yangtze River [J]. Progress in Geography, 2010, 29(1): 15-22. (in Chinese))
- [19] 许炯心. 长江上游干支流近期水沙变化及其与水库修建的关系[J]. 山地学报, 2009, 27(4): 385-393. (XU Jiongxin. Recent variations in water and sediment in relation with reservoir construction in the Upper Changjiang River Basin [J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27(4): 385-393. (in Chinese))
- [20] 王延贵, 胡春宏, 刘茜, 等. 长江上游水沙特性变化与人类活动的影响[J]. 泥沙研究, 2016(1): 1-8. (WANG Yangui, HU Chunhong, LIU Xi, et al. Study on variations of runoff and sediment load in the Upper Yangtze River and main Influence factors [J]. Journal of Sediment Research, 2016(1): 1-8. (in Chinese))
- [21] 陈进, 黄薇. 梯级水库对长江水沙过程影响初探[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(6): 786-791. (CHEN Jin, HUANG Wei. Preliminary study on the change of water flow and sediment process in the Changjiang River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005, 14(6): 786-791. (in Chinese))
- (收稿日期: 2016-11-26 编辑: 徐娟)

(上接第 31 页)

- [11] 陈占民, 江振杨, 卓镇南, 等. 福安幅 G-50-12 三沙幅 G-51-7 福州幅 G-50-18 浮鹰岛幅 G-51-13 1/20 万区域水文地质普查报告[R]. 福州: 福建省水文工程地质队, 1977.
- [12] 李绪谦, 谢雪, 李红艳, 等. pH 值对弱透水层中硝酸盐迁移转化的影响[J]. 水资源保护, 2011, 27(1): 67-72. (LI Xuqian, XIE Xue, LI Hongyan, et al. pH impact on nitrate migration and transformation in the aquitard [J]. Water Resources Protection, 2011, 27(1): 67-72. (in Chinese))
- [13] 刁美娜, 温小虎, 张志东, 等. 莱州湾东岸地下水硝酸盐空间变异特征研究[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(3): 137-141. (DIAO Meina, WEN Xiaohu, ZHANG Zhidong, et al. On the spatial nitrate concentration variations in the groundwater of the eastern coast of Laizhou Bay [J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(3): 137-141. (in Chinese))
- [14] 屈忠义, 林雪松, 冯兆忠, 等. 内蒙古河套灌区解放闸灌域地下水水质与硝态氮时空变化研究[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(2): 40-44. (QU Zhongyi, LIN Xuesong, FENG Zhaozhong, et al. Temporal and spatial changes of farmland nitrate nitrogen and groundwater quality in Jiefangzha irrigation area of Hetao irrigation district of Inner Mongolia Autonomous Region [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(2): 40-44. (in Chinese))
- [15] WAKIDA F T, LERNER D N. Non-agricultural sources of groundwater nitrate: a review and case study. [J]. Water Research, 2005, 39(1): 3-16.
- [16] 赵新锋, 陈法锦, 陈建耀, 等. 城市地下水硝酸盐污染及其成因分析: 以珠海香洲区为例[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(3): 87-92. (ZHAO Xinfeng, CHEN Fajin, CHEN Jianyao, et al. Using nitrogen isotope to identify the sources of Nitrate contamination in urban groundwater: a case study in Zhuhai City [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008, 35(3): 87-92. (in Chinese))
- (收稿日期: 2017-04-15 编辑: 王芳)