

鄱阳湖五河流域入湖径流泥沙变化特征及影响因素分析

莫明浩^{1,2}, 杨筱筱³, 肖胜生^{1,2}, 涂安国^{1,2}

(1. 江西省水土保持科学研究院, 南昌 330029;

2. 江西省土壤侵蚀与防治重点实验室, 南昌 330029; 3. 江西省水文局, 南昌 330002)

摘要:为探讨鄱阳湖五河流域入湖径流泥沙变化特征,以便为流域水土保持生态建设和湖泊水资源的合理利用提供科学依据,根据鄱阳湖五河流域5个入湖水文控制站1959—2012年径流量和1980—2012年输沙量数据资料,采用过程线法、滑动平均值法、相关系数检验法和年不均匀系数法进行了分析。结果表明:五河入湖径流量整体无明显上升或下降趋势;五河年平均输沙量均有整体显著下降趋势;赣江流域的年均输沙量从80年代初开始有显著减少趋势,而其他的抚河、信江、饶河、修河四个流域的年平均输沙量均是从21世纪初有显著减少趋势;水利、水保及林业工程是鄱阳湖五河流域入湖径流泥沙变化的主要影响因素。

关键词:径流;泥沙;变化;影响因素;鄱阳湖

中图分类号:P333.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)05-0197-07

Analysis on Runoff and Sediment Change Characteristics and Influence Factors of Poyang Lake Five Rivers Basin

MO Minghao^{1,2}, YANG Xiaoxiao³, XIAO Shengsheng^{1,2}, TU Anguo^{1,2}

(1. Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang 330029, China; 2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention, Nanchang 330029, China; 3. Hydrological Bureau of Jiangxi, Nanchang 330002, China)

Abstract: To explore characteristics of runoff and sediment into Poyang Lake from five rivers basin, to provide a scientific basis for basin soil and water conservation ecological construction and rational utilization of lake water resources, according to runoff data of five water control stations from 1959 to 2012 and sediment data from 1980 to 2012, the process line method, the sliding average value method, correlation coefficient test and in non-uniform coefficient method are used to analyze these data. The results show that the runoff into the lake has no obvious rising or falling trend as a whole. Average sediment presents the significant decreasing trend. The annual average sediment of Ganjiang River basin has an obvious decreasing trend from the beginning of 1980s, while these of Fuhe River, Xinjiang River, Raohe River and Xiuhe River presented the reduction trend in the early 21st century. Water conservancy projects, soil and water conservation projects and forestry project are the main influence factors on the changes of runoff and sediment in Poyang Lake.

Keywords: runoff; sediment; change; influence factor; Poyang Lake

鄱阳湖位于长江中下游南岸,为我国第一大淡水湖,是长江干流重要的调蓄性湖泊,在长江流域中发挥着巨大的调蓄洪水和保护生物多样性等特殊生态功能。鄱阳湖流域面积为16.22万km²,其中97%位于江西省境内,承纳赣江、抚河、信江、饶河、修河五大河流水系。灾害性洪水和泥沙淤积等径流泥沙问题是鄱阳湖始终面临的重大问题,对江西省及长江干流水情会产生重大影响^[1-2]。近几十年来,五河流域入鄱阳湖的径流量和泥沙量发生了一定的变化,水库

等水利工程与水土保持工程对其有着深刻的影响。对于鄱阳湖水沙变化,已开展过不少研究,重点主要集中在对入湖径流量变化趋势^[3-6]或其某一子流域径流泥沙量变化^[7-8]的分析,而对整个鄱阳湖流域入湖径流量和泥沙量的变化、五河流域水沙变化的差异以及影响入湖径流泥沙原因的系统研究较少。本文全面分析鄱阳湖五河流域入湖径流泥沙变化特征及影响因素,以期掌握在水土保持工程和水利工程影响下流域径流泥沙的演变规律,不仅有利于流域水土保持

收稿日期:2016-08-24

修回日期:2016-09-12

资助项目:国家自然科学基金项目(41501300);江西省水利科技项目(KT201418,KT201420,KT201521);江西省自然科学基金(20161BAB216148);水利部公益性项目(201401051)

第一作者:莫明浩(1981—),男,江西抚州人,高级工程师,博士,主要从事水土保持和流域生态环境研究。E-mail:mominghao@126.com

生态建设,同时也有利于对湖泊水资源的合理利用。

1 数据来源和分析方法

1.1 数据来源

鄱阳湖流域径流泥沙等数据均来源于江西省水文部门,本文选取鄱阳湖五河流域入湖口水文站的长系列径流泥沙数据和降雨量数据,各水文站基本情况详见表 1。

1.2 径流泥沙特征分析方法

本文分别从趋势、年内分配两方面研究五河流域入湖径流泥沙特征。

表 1 鄱阳湖五河流域入湖口水文站一览表

站次	河名	站名	测站位置	坐标		流域 面积/km ²	资料序列年限		
				东经/(°)	北纬/(°)		逐日平均流量	逐日平均含沙量	逐日降雨量
1	赣江	外洲	南昌市桃花镇观洲村外洲	115.84	28.63	80948	1959—2012	1980—2012	1956—2012
2	抚河	李家渡	南昌市进贤县李渡镇鉴良村	116.16	28.21	15811	1959—2012	1980—2012	1956—2012
3	信江	梅港	上饶市余干县梅港乡梅港村	116.81	28.43	15535	1959—2012	1980—2012	1956—2012
4	饶河	渡峰坑	景德镇市垦殖场庄屋下村	117.21	29.26	5013	1959—2012	1980—2012	1956—2012
5	修河	万家埠	南昌市安义县万埠镇桥南街	115.64	28.85	3548	1959—2012	1980—2012	1956—2012

(3) 相关系数检验法。如果序列中存在线性趋势,可采用线性相关方程进行描述,其数学模型为

$$X_t=a+bt+\eta t \quad (t=1,2,\cdots n) \tag{1}$$

序列 X_t 与时间 t 的相关系数为

$$r=\frac{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})(t-\bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^n(t-\bar{t})^2}} \tag{2}$$

式中: $\bar{t}=\frac{1}{n}\sum_{n=1}^nt$, $\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{t=1}^nx_t$ 。

相关系数 r 的检验采用数理统计中的假设检验方法。对于给定的显著性水平 α 为 0.01 或 0.05,查表或计算得到相关系数的临界值 r_α ,如果样本相关系数 r 满足 $|r|\geq r_\alpha$,即认为线性趋势是存在的,反之认为线性趋势不存在。

1.2.2 年内分配变化分析方法 由于气候的季节性波动,气象要素如降水和气温等都有明显的季节性变化,从而在相当大程度上决定了水文要素年内分配的不均匀性。本文采用年不均匀系数来反映水文要素的年内分配情况。

1.2.1 趋势分析方法 采用过程线法、滑动平均值法、相关系数检验法对五河入湖口水文站的年平均流量和年平均输沙量系列进行趋势分析。

(1) 过程线法。即将水文序列点绘在方格纸上,通过目估判断序列的趋势是否明显。该方法计算方便,判断直观,但只能判别较为明显的趋势。

(2) 滑动平均值法。由于水文序列的随机波动,直接从过程线中判断趋势往往比较困难。因此,可对序列 x_1,x_2,\cdots,x_n 的几个前期值和后期值取平均,消除波动的影响,使原序列光滑化,然后从新序列中通过目估判断序列是否有明显的趋势。

$$C_i=\frac{\sigma}{\bar{R}}=\frac{\sqrt{1/12\sum_{i=1}^{12}(R_i-\bar{R})^2}}{1/12\sum_{i=1}^{12}R_i} \tag{3}$$

式中: R_i 为各月的水文要素值。从公式(3)中可以看出, C_i 值越大,年内各月水文要素相差悬殊,年内分配越不均匀。

2 径流量特征分析

2.1 径流极值分析

从表 2 可以看出,5 个控制站多年平均径流量由大到小依次为外洲(赣江)、梅港(信江)、李家渡(抚河)、渡峰坑(饶河昌江)、万家埠(修河)。各站径流量年际变化较大,极值比为 4~6,其中李家渡站变化较大,为 6.19,万家埠站变化较小,为 4.06。各站径流量最大值出现在 1973 年和 1998 年,这两年均为全球涝年^[9];最小值除万家埠站出现在 1968 年外,其余各站均出现在 1963 年。近 50 a 来,1963 年为鄱阳湖特旱年,1963 年 2 月 6 日湖口站当日平均水位为 5.90 m(吴淞基面),为历年最低水位^[10]。

表 2 鄱阳湖流域五河年径流量极值统计

站名	多年平均径流量/ 10 ⁸ m ³	最大年		最小年		极值比
		径流量/10 ⁸ m ³	对应年份	径流量/10 ⁸ m ³	对应年份	
外洲	682.8	1149.0	1973	236.7	1963	4.85
李家渡	123.7	226.4	1998	36.6	1963	6.19
梅港	179.7	344.4	1998	80.0	1963	4.31
渡峰坑	45.2	95.9	1998	18.2	1963	5.27
万家埠	34.5	71.8	1998	17.7	1968	4.06

2.2 径流趋势分析

根据五河入湖口水文站 1959—2012 年径流资料,利用过程线法、滑动平均值法、相关系数法对其系列进行统计分析,研究鄱阳湖五河流域径流年际变化趋势。

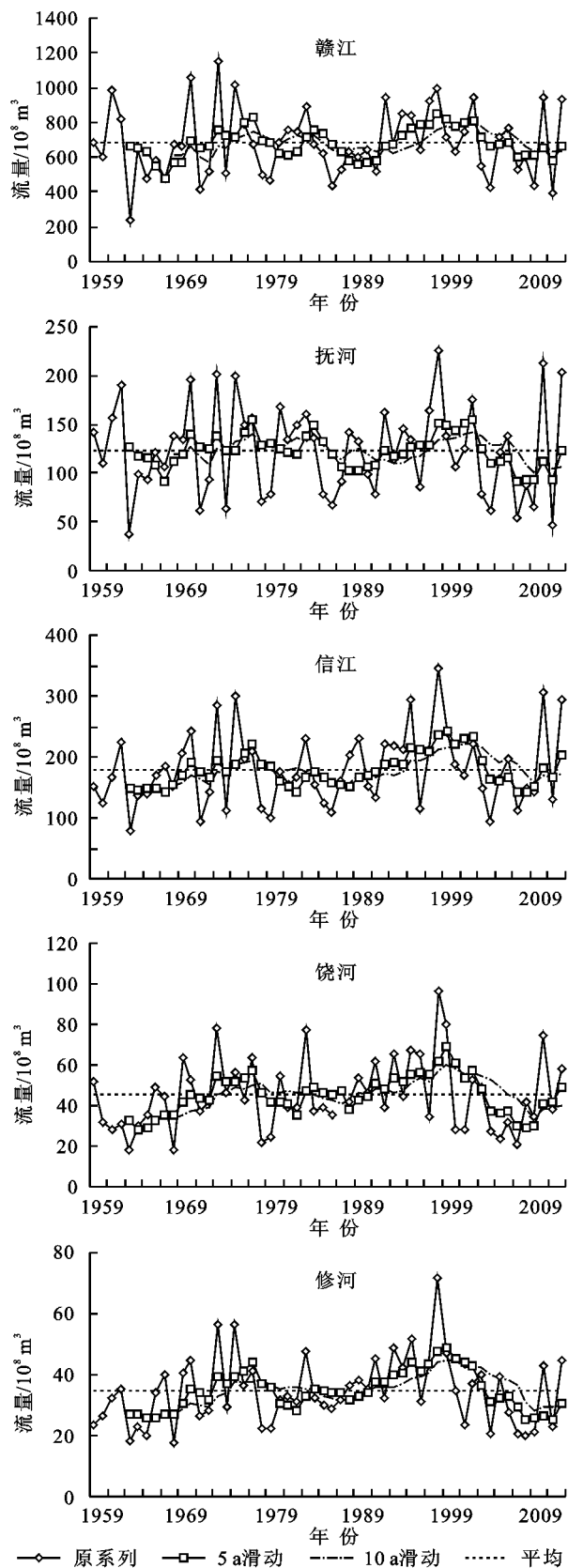


图1 五河年平均流量过程线及滑动平均值过程线

根据五河入湖口水文站的年均流量系列以及 5 a 滑动平均系列和 10 a 滑动平均系列曲线(图 1)可以看出,其年平均流量在 20 世纪 60 年代初至 70 年代中期有上升趋势;70 年代后期至 80 年代末期有下降趋势;90 年代呈上升趋势;21 世纪初至现在呈下降趋势;但整体无明显上升或下降趋势。由相关系数检验法计算得到这 5 个水文站年平均流量序列的相关系数 r 分别为 0.06, -0.04, 0.14, 0.13, 0.20, 取显著水平 $\alpha=0.05$ 时, $r_\alpha=0.27$, $|r| < r_\alpha$, 5 个水文站年平均流量的线性趋势不存在。由以上几种分析方法可知,鄱阳湖流域年平均流量系列无明显整体变化趋势。

2.3 径流年内分配特征分析

根据鄱阳湖流域五河入湖口各水文站 1959—2012 年径流系列,采用多年平均月流量过程线和年内分配不均匀系数进行年内分配情况及趋势变化分析。

从图 2 和表 3 中可以看出,五河流域多年平均月流量过程线呈现出单峰型,年径流量主要集中在 4—9 月份,约占全年径流量的 75% 左右,特别是在主汛期 4—6 月份,其径流量占全年径流量约 50%,与文献[4]得出的结果一致。

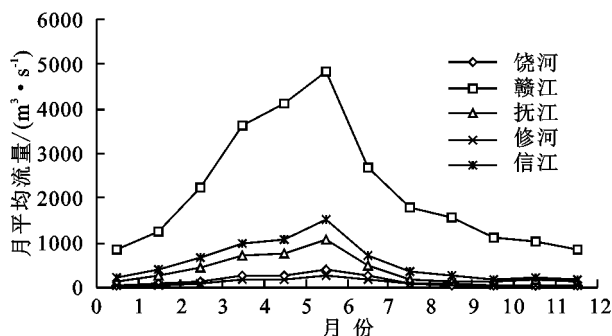


图2 五河流域多年平均月流量年内分配

由五河入湖口水文站的径流年不均匀系数过程线图(图 3)可以看出各水文站径流序列的年不均匀系数波动较大,但这种波动趋势自 80 年代末期有所减小,且年不均匀系数序列都有减小的趋势。其中,赣江流域、修河流域及信江流域减小的趋势比较显著;抚河流域和饶河流域年不均匀系数减小的趋势较小。这说明鄱阳湖流域自 80 年代末期开始径流年内分配越来越均匀,且相对稳定。

3 输沙量特征分析

3.1 输沙量极值分析

对五河年输沙量年际变化(年均输沙量和极值)进行统计分析见表 4。鄱阳湖五河中赣江年输沙量最大,修河输沙量最小。20 世纪 80 年代以来,各站平均输沙量年际变化较大,其中饶河昌江渡峰坑站年

际变化最大,极值比达到 41.55,万家埠站年输沙量极值比最小。极值出现年份与鄱阳湖流域径流量的年际变化和不同年代的变化基本一致,可见径流量对泥沙量的变化具有重要影响。

表 3 五河流域多年平均流量年内分配比例 %

流域	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	汛期
赣江	3.37	4.39	8.73	13.7	16.1	18.3	10.6	7.10	6.01	4.41	3.92	3.35	71.8
抚河	3.28	5.10	10.2	15.0	16.9	22.2	10.4	4.29	3.22	2.61	3.53	3.25	72.0
信江	3.19	5.16	9.97	14.4	16.1	22.2	10.8	5.27	4.07	2.84	3.11	2.83	72.9
饶河	2.05	4.17	8.99	14.3	16.6	22.2	17.1	6.35	2.79	2.12	1.84	1.56	79.3
修河	3.13	4.22	7.78	11.9	15.3	19.1	13.3	8.31	6.05	3.97	3.92	3.08	73.9

表 4 鄱阳湖流域五河年输沙量极值统计

站名	多年平均	最大年		最小年		极值比
	输沙量/ 10^4t	输沙量/ 10^4t	对应年份	输沙量/ 10^4t	对应年份	
外洲	629.9	1460.0	1984	111.0	2011	13.15
李家渡	142.7	352.0	1998	27.4	2007	12.85
梅港	173.9	426.0	1983	26.3	2007	16.20
渡峰坑	45.9	155.0	1998	3.7	2005	41.55
万家埠	32.2	82.4	1983	6.4	2008	12.94

3.2 输沙量趋势分析

根据五河入湖口水文站 1980—2012 年输沙量资料,利用过程线法、滑动平均值法、相关系数检验法对其系列进行统计分析,研究鄱阳湖流域输沙量年际变化趋势。

根据五河入湖口水文站的年平均输沙量系列以及五年滑动平均系列和十年滑动平均系列曲线(图 4)可以看出,其年平均输沙量均有整体下降趋势;特别是赣江流域的年均输沙量从 20 世纪 80 年代初开始有显著减少趋势,而其他四河流域的年平均输沙量均是从 21 世纪初有显著减少趋势。由相关系数检验法计算得到这 5 个水文站年平均输沙量序列的相关系数 r 分别为 $-0.84, -0.32, -0.05, -0.43$ 和 -0.38 ,取显著水平 $\alpha=0.05$ 时, $r_{\alpha}=0.34$,赣江流域、修河流域和信江流域的年均输沙量序列的 $|r|>r_{\alpha}$,说明其年平均输沙量序列有显著减少趋势;而抚河流域和饶河流域的年平均输沙量序列的 $|r|<r_{\alpha}$,结合前述方法可知其有一定的整体下降趋势,这说明其年平均输沙量序列的线性趋势不显著。

3.3 输沙量年内分配特征分析

根据鄱阳湖流域五河入湖口各水文站 1980—2012 年输沙量系列进行年内分析,采用多年平均月输沙量过程线和年内分配不均匀系数进行年内分配情况及趋势变化分析。

从表 5 中可以看出,五河流域多年平均月输沙量呈现双峰型,主要集中在 4—9 月,占全年输沙量的 90%左右;特别是主汛期 4—6 月份的输沙量占全年输沙量的 60%左右,这与径流年内分配情况一致。由五河入湖口水文站的年平均输沙量年内分配不均匀系数过程线图(图 5)可以看出各水文站的年平均

输沙量年内分配不均匀系数都有一定的波动性,从 80 年代初至 90 年代初期,5 个水文站点年平均输沙量的年内分配不均匀系数有减小趋势,这说明其输沙量的年内分配越来越趋于均匀;从 20 世纪 90 年代初至 21 世纪初期,年内分配不均匀系数波动较小,说明其输沙量年内分配相对比较稳定;从 2005 年至现在,除了赣江流域外洲水文站年均输沙量的年内分配不均匀系数变小以外,其他 4 个站点都有上升的趋势。

4 径流泥沙变化的影响因素分析

影响流域径流和泥沙的因素主要是自然和人为两个方面。自然因素包括地质地貌、土壤、植被以及气候等;人为因素主要包括水利工程蓄水拦沙,水土保持,工程建设增沙及河道采沙等。在这些影响因素中,地质地貌、土壤和植被因子相对稳定,对近几十年来产流产沙量的变化影响较小;气候(主要是降水)和人类活动通常具有不同时间尺度的周期性,对流域侵蚀产沙有重要影响^[11],是径流泥沙变化的重要影响因素。

通过计算分析并绘制年降水量过程线图(图 6),经分析可知,五河流域 1956—2012 年降水量没有显著变化趋势,由此可知人类活动是影响鄱阳湖流域径流泥沙变化的主要驱动因素。

从以上分析可知,近 50 a 来,五河入湖径流量整体无明显上升或下降趋势,径流年内分配自 80 年代末开始越来越趋于均匀。五河平均输沙量均有整体显著下降趋势,输沙量年内分配从 80 年代至 90 年代末趋于均匀,但之后又变得不均匀。五河输沙量整体变化趋势与文献^[7]分析的赣江入湖泥沙量的变化趋

势一致;同时,鄱阳湖入湖泥沙量的变化与文献^[2]分析得出的洞庭湖泥沙量的变化趋势一致,均呈现减少趋势。鄱阳湖五河流域年径流量和年输沙量的变化可以从以下几方面来分析。

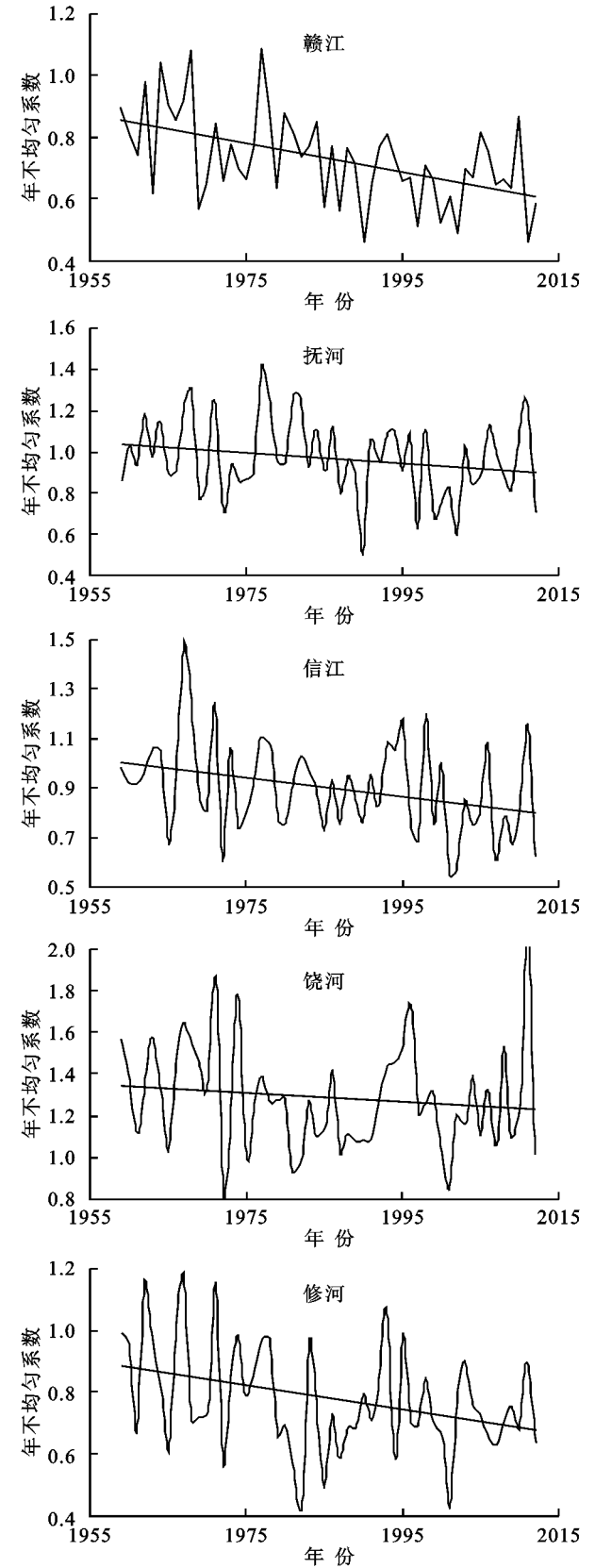


图 3 五河径流量年不均匀系数过程线

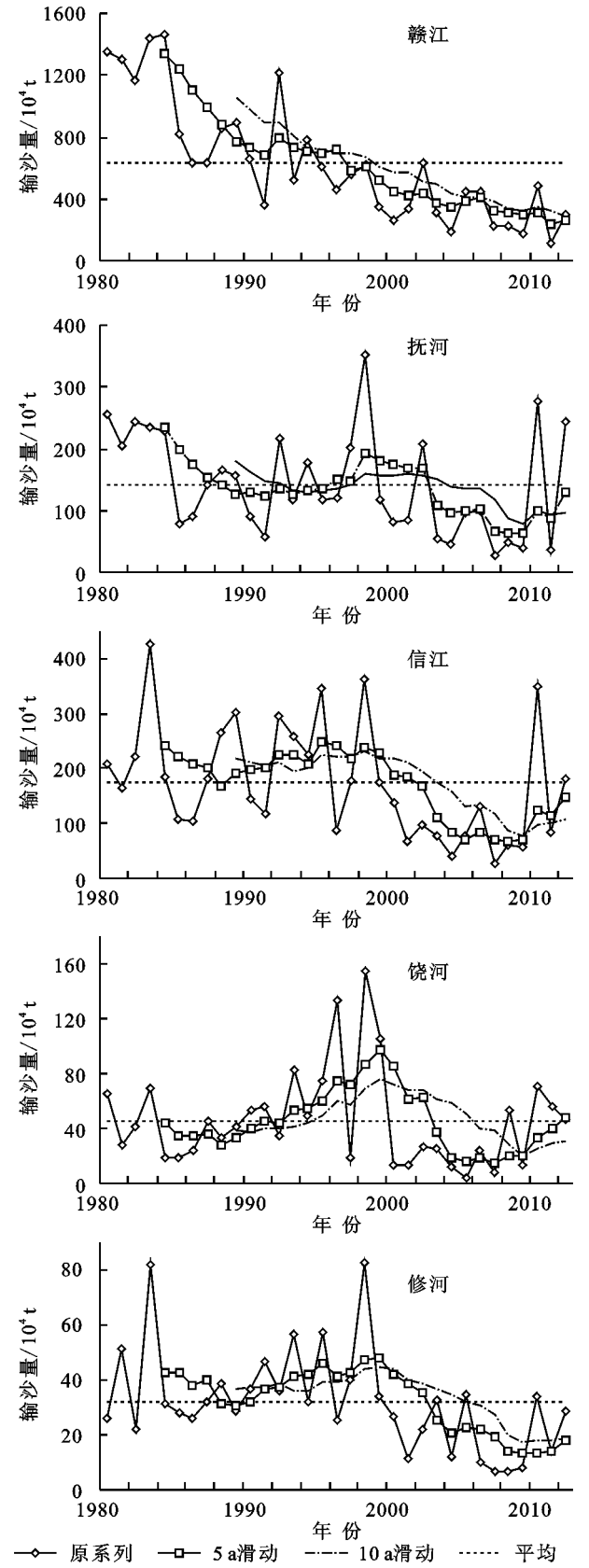


图 4 五河年平均输沙量过程线及滑动平均值过程线

20 世纪 80 年代前几年,大规模的森林砍伐造成植被破坏,森林覆盖率急剧降低,如 1983 年江西省森林覆盖率仅为 33%。从 80 年代初江西实施了“山江湖”工程、退耕还林工程、长防林工程、中德造林工

程等一系列工程以及各种人造林工程,90 年代年均人工造林面积 26.3 万 hm^2 ,森林覆盖率提高到 60%,列全国第二位。森林覆盖率的提高,起到了很好的涵养水源的作用。从 80 年代初开始,国家在江西省也陆续开展了“国家水土流失重点治理工程”和“国家农业综合开发水土保持项目”等“小流域综合治理”的水土保持工程,将各种水土保持措施结合起来,治管并重,形成了一个综合的防护体系,并取得了良好生态、社会和经济效益。这些水土保持措施通过不同的方式对流域的产流产沙过程进行干扰,使得流域内需水量增加,地表径流减少,输沙量也随之减少。

水利设施的加固和修建,尤其是水库的建设,也是入湖径流泥沙变化的影响因素之一。根据江西省第一次水利普查结果,江西省已建水库 10 785 座,总库容 302.82 亿 m^3 ;在建水库 34 座,总库容 17.99 亿 m^3 。1985 年前,鄱阳湖流域修建大中型水库共 148 座,总库容为 84.23 亿 m^3 ;其中赣江流域 86 座,总库容为 52.41 亿 m^3 ;抚河流域 17 座,总库容为 16.30 亿 m^3 ;信江流域 30 座,总库容为 10.16 亿 m^3 ;饶河流域 10 座,总库容为 3.49 亿 m^3 ;修河流域 5 座,总库容为 1.87 亿 m^3 。1986—2005 年,鄱阳湖流域又修建水库 31 座,总库容为 33.63 亿 m^3 ^[12]。水库的修建,对入湖的径流泥沙均具有调节作用。

造林工程和水保工程,使得坡面产沙量大为减少,加上水利工程的拦截作用,导致输沙量呈下降趋势。经过水利水保工程措施、生物林草措施及耕作措施等调节,尤其是水库的调节作用,使得径流的分配越来越均匀。

而随着社会经济的发展,特别是进入 21 世纪后,生产建设活动加剧,大规模的开发建设项目造成大量水土流失,已成为新时期水土保持面临的主要问题,这也使得这一时期河流输沙量分配不均匀。鄱阳湖五河流域与洞庭湖四水流域径流泥沙变化的影响因素类似,文献^[2]指出“四水流域连年兴建的水利工程和水土保持措施,已逐步在发挥着较大的生态效益”,这与文本分析所得的观点一致。

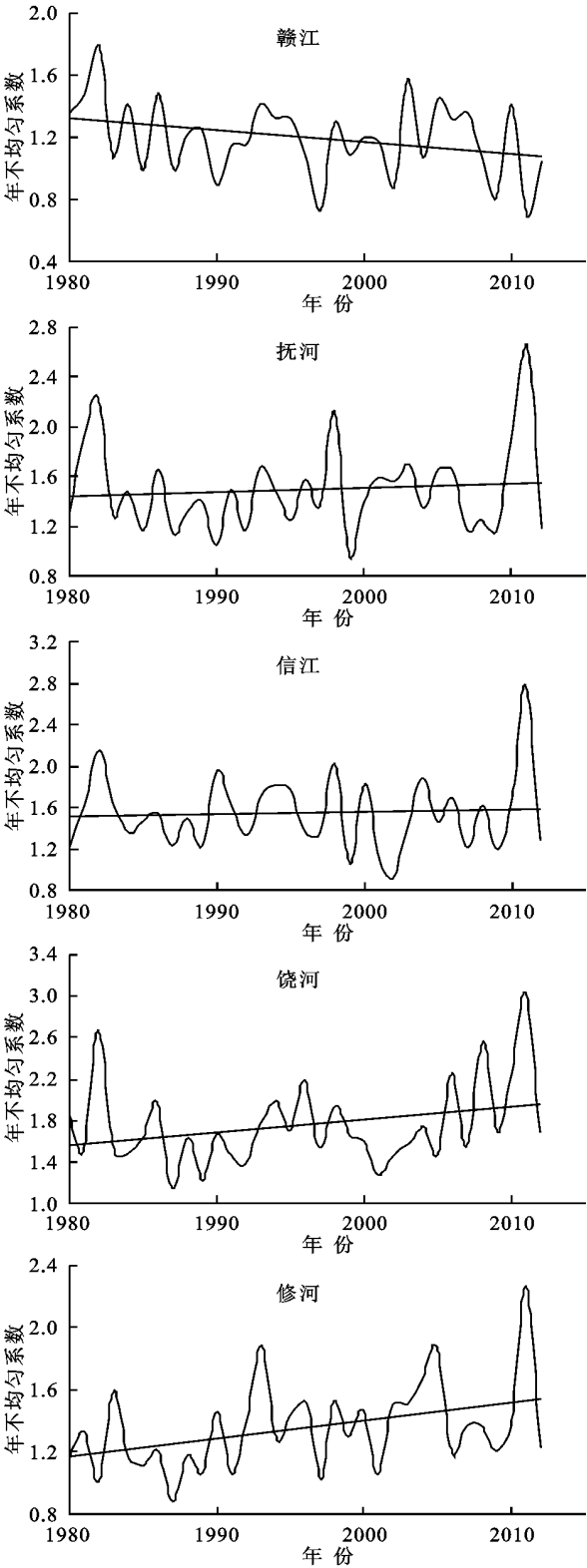


图 5 五河输沙量年不均匀系数过程线

表 5 五河流域多年平均输沙量年内分配比例 %

流域	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	汛期
赣江	1.49	2.79	11.9	20.7	18.9	22.6	8.78	3.80	4.73	1.60	1.67	1.06	79.5
抚河	1.23	3.16	9.37	17.7	15.5	33.0	10.5	3.01	2.61	1.17	1.69	1.09	82.3
信江	1.08	3.11	10.8	16.9	14.5	36.1	10.8	2.40	1.73	0.42	1.47	0.76	82.4
饶河	0.38	1.25	4.90	9.58	12.4	35.6	27.0	7.11	0.88	0.45	0.33	0.16	92.5
修河	0.96	2.58	7.27	13.8	17.4	22.8	19.7	6.47	4.74	1.64	2.00	0.69	84.9

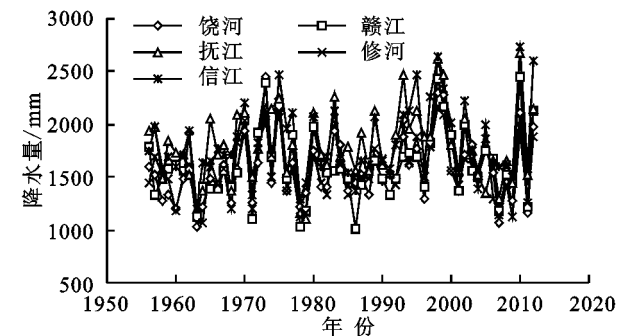


图 6 五河流域年降水量过程线

5 结论

- (1) 近 50 多年来,鄱阳湖流域“五河”入湖径流量整体无明显上升或下降趋势。
- (2) 近 30 多年来,“五河”年平均输沙量均有整体显著下降趋势;赣江流域的年均输沙量从 80 年代初开始有显著减少趋势,而其他的抚河、信江、饶河、修河四个流域的年平均输沙量均是从 21 世纪初有显著减少趋势。
- (3) 降水量对鄱阳湖“五河”流域径流泥沙变化无显著影响,人类活动是主要驱动因素,水利、水保及林业工程是径流泥沙变化的主要影响因素。

参考文献:

[1] 叶许春,张奇,刘健,等. 鄱阳湖天然径流变化特征与水

旱灾害[J]. 自然灾害学报,2012,21(1):140-147.

[2] 李景保,王克林,秦建新,等. 洞庭湖年径流泥沙的演变特征及其动因[J]. 地理学报,2005,60(3):503-510.

[3] 郭华,苏布达,王艳君,等. 鄱阳湖流域 1955—2002 年径流系数变化趋势及其与气候因子的关系[J]. 湖泊科学,2007,19(2):163-169.

[4] 刘健,张奇,许崇育,等. 近 50 年鄱阳湖流域径流变化特征研究[J]. 热带地理,2009,29(3):213-218,224.

[5] 李微,李昌彦,吴敦银,等. 鄱阳湖近 60 年天然入湖径流特征分析[J]. 人民长江,2015,46(17):18-23.

[6] 刘成,张翔,肖洋,等. 鄱阳湖五河流域入湖年径流变化特征分析[J]. 水电能源科学,2015,33(5):1-4,18.

[7] 涂安国,杨洁,李英,等. 人类活动对赣江入湖泥沙量的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(2):76-79.

[8] 罗蔚,张翔,邹大胜,等. 鄱阳湖流域抚河径流特征及变化趋势分析[J]. 水文,2012,32(3):75-82.

[9] 施能,陈绿文. 全球陆地年降水场的长期变化(1948—2000 年)[J]. 科学通报,2002,47(21):1671-1674.

[10] 闵赛,闵聃. 鄱阳湖区干旱演变特征与水文防旱对策[J]. 水文,2010,30(1):84-88.

[11] 王宏,冉大川,白志刚,等. 人类活动对黄河中游水沙影响的分析计算[J]. 水土保持研究,2007,14(5):157-159.

[12] 龚向民,李昆,刘筱琴,等. 赣江流域水土流失现状与发展态势研究[J]. 人民长江,2006,37(8):48-50.



(上接第 196 页)

[3] Brown P J, Bradley R S, Keimig F T. Changes in extreme climate indices for the Northeastern United States, 1870—2005[J]. Journal of Climate, 2010,23(24):6555-6572.

[4] IPCC SREX. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation[M]. London: Cambridge University Press,2012.

[5] Murray V, Ebi K L. IPCC special report on managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation(SREX)[J]. Journal of Epidemiology and Community Health, 2012,66(9):759-760.

[6] IPCC AR5. Intergovernmental Panel on Climate Change Climate Change Fifth Assessment Report (AR5) [C]. Cambridge, UK: Cambridge University Press,2013.

[7] Benestad R E, Nychka D, Mearns L O. Spatially and temporally consistent prediction of heavy precipitation from mean values[J]. Nature Climate Change, 2012,2(7):544-547.

[8] Berg P, Moseley C, Haerter J O. Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures[J]. Nature Geoscience, 2013,6(3):181-185.

[9] Easterling D R, Evans J L, Groisman P Y, et al. Observed variability and trends in extreme climate events; a brief review[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000,81(3):417-425.

[10] Zhai P, Sun A, Ren F, et al. Changes of climate extremes in China[J]. Climatic Change, 1999,42(1):203-218.

[11] Zhai P, Zhang X, Wan H, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. Journal of Climate, 2005,18(7):1096-1108.

[12] Qian W, Fu J, Zhang W, et al. Changes in mean climate and extreme climate in China during the last 40 years[J]. Advances in Earth Science, 2007,22(7):673-684.

[13] Zhang X, Zwiers F W, Hegerl G C, et al. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends[J]. Nature, 2007,448(7152):461-465.

[14] 史培军,孔锋,方佳毅. 中国年代际暴雨时空变化格局[J]. 地理科学,2016,34(11):1281-1290.

[15] 史培军,孙劭,汪明,等. 中国气候变化区划(1961—2010 年)[J]. 中国科学地球科学:中文版,2014,44(10):2294-2306.

[16] Fischer E M, Knutti R. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes[J]. Nature Climate Change, 2015,5(6):560-564.