

洞庭湖入出湖径流泥沙年内变化规律及成因分析

毛德华¹, 曹艳敏¹, 李锦慧¹, 胡光伟², 李正最³, 周慧³

(1. 湖南师范大学 资源与环境科学学院, 湖南 长沙 410081; 2. 湖南工业大学 建筑与城乡规划学院, 湖南 株洲 412007; 3. 湖南省水文水资源勘测局, 湖南 长沙 410007)

摘要: 根据洞庭湖入出湖水文站实测月径流泥沙长序列观测资料, 运用不均匀系数、集中度和集中期、Mann-Kendall 趋势检验法等方法, 分析了洞庭湖入出湖径流泥沙年内变化规律及其成因。结果表明: 四水入湖径流量年内分配不均, 集中于5-7月; 输沙量年内分配极为不均并呈现出越来越不均匀的趋势, 集中于6-7月; 荆江三口各站历年径流量年内分配整体趋势上变化不大, 三口径流集中期均为每年的7月份, 输沙量年内分配越来越不均匀; 城陵矶径流量和输沙量不同年代之间的 C_{vy} 值差异较大, 输沙量 C_{vy} 值呈较为明显的波动增大趋势, 径流量 C_{vy} 值无明显趋势性变化; 径流集中在7月, 输沙在水沙交互影响下集中于4月; 水利工程和水土保持工作的实施使得洞庭湖水沙年内分配更加均匀。四水、三口和出湖集中期呈逐渐推迟的规律, 泥沙的集中度均高于径流。

关键词: 径流; 泥沙; 年内变化规律; 年不均匀系数; 集中度; 集中期; 洞庭湖

中图分类号: TV12; P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)01-0032-08

Analysis on annual variation law and its causes of runoff and sediment flowing in and out of the Dongting Lakes

MAO Dehua¹, CAO Yanmin¹, LI Jinhui¹, HU Guangwei², LI Zhengzui³, ZHOU Hui³

(1. College of Resources and Environmental Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China;

2. College of Architecture and Urban and Rural Plan, Hunan Industry University, Zhuzhou 412007, China;

3. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Hunan Province, Changsha 410007, China)

Abstract: According to the long time series observation data of monthly runoff and sediment, annual variation law and its causes of runoff and sediment flowing in and out of the Dongting Lake were analyzed by means of non-uniformity coefficient, concentration degree and concentration period, and the Mann-Kendall trend test methods. The results showed that: Annual runoff distribution of the four Rivers (i. e., the Xiang River, Zi River, Yuan River and Li River) into the Dongting Lake were uneven, the concentration period was from May to July. Annual sediment distribution were very uneven and had a trend of being more and more uneven, the concentration period was from June to July; Annual runoff distribution of three outlets of Jingjiang into the Dongting Lake changed little in general trend, but the annual distribution of sediment were more and more uneven, the concentration period of runoff and sediment were both July; The CVY values of annual runoff and sediment in Chenglingji differed for different years, CVY values of annual sediment fluctuated and had increase trend, but there was no trend for CVY of annual runoff; the concentration period of runoff was in July, but the concentration period of sediment was in April due to the interaction of runoff and sediment; Annual distribution of runoff and sediment became more uniform because of the application of the hydraulic engineering construction and conservation of water and soil. The concentration period of runoff and sediment for the four rivers, three outlet and the lake delayed gradually, the concentration degree of sediment was higher than runoff.

Key words: runoff; sediment; annual variation law; annual nonuniformity coefficient; concentration de-

收稿日期: 2016-08-02; 修回日期: 2016-10-11

基金项目: 湖南省教育厅重点项目(15A114); 湖南省水利科技重大项目(湘水科计[2015]13-22); 湖南省重点学科建设项目(2011-001)

作者简介: 毛德华(1964-), 男, 湖南益阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水文学与水资源与洪旱灾害研究。

gree; concentration period; Dongting Lake

洞庭湖位于湖南省北部、长江中游荆江河段以南,是中国的第二大淡水湖,承载着调蓄长江中游洪水、平衡长江与湖区湿地生态系统,并为湖区社会发展提供支撑等重要功能。

洞庭湖南纳四水(湘江、资水、沅水、澧水)、吞吐长江,水系十分复杂(图 1),径流泥沙变异十分强烈,对洞庭湖区水资源安全、生态安全乃至经济安全产生了系列连锁效应。因此,对洞庭湖入湖径流泥沙的变化规律及其效应与归因分析,成为研究的热点与难点,并取得了丰硕的成果^[1]。但大多数研究集中于年代际(阶段性)与年际变化分析^[2-8],鲜有涉及年内变化规律的研究^[9-10],而对洞庭湖入湖径流泥沙的年内变化规律的系统研究还未见报道。鉴于此,本文以入湖洞庭湖的湖南代表水文站 1955 - 2010 年的实测逐月径流泥沙数据为基础,通过计算年内不均匀系数、集中度与集中期并进行 Mann - Kendall 趋势检验等,定量分析洞庭湖径流泥沙年内变化规律,以期为湖区水资源的合理利用与湖区治理开发提供科学依据。

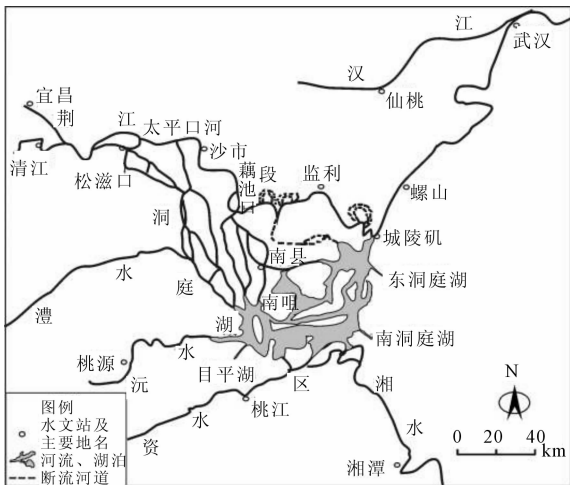


图 1 洞庭湖水系示意图

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

以入洞庭湖的湘、资、沅、澧四水 4 个水文站(湘潭、桃江、桃源、石门)和荆江三口松滋口(新江口、沙道观)、太平口(弥陀寺)、藕池口(康家岗、管家铺)5 个水文站以及洞庭湖出湖城陵矶站 1955 - 2010 年的实测逐月泥沙径流数据作为本研究的基础数据。长时间序列水沙数据来源于湖南省水文水资源勘测局和《长江泥沙公报 2000 - 2010》。

1.2 研究方法

1.2.1 不均匀系数 由于气候的季节性波动,气象要素如降水和气温都有明显的季节性变化,从而在相当程度上决定了径流泥沙年内分配的不均匀性。年内分配不均匀系数(C_{v_y}),是反映某一时间序列分配不均匀性的一个重要判断标准^[11-14]。 C_{v_y} 值是一个无量纲值,值越小,则年内各月径流量和输沙量相差值越小,即年内分配差异性越小,年内分配越均匀,反之则相反。

1.2.2 Mann - Kendall 趋势检验法 若某一径流或泥沙序列随着时间呈增加或者减少或者不变的这种倾向,称之为时间序列的趋势性。为了更好地了解各站逐月径流量和输沙量变化的趋势性特征,运用 Mann - Kendall 趋势检验法对各站的逐月平均、汛期和枯季的径流量和输沙量分别进行趋势性检验,以期得到径流泥沙年内分配的趋势性变化特点。

Mann - Kendall 趋势检验法(简称 M - K 法)是一种较为常用的非参数统计分析法。该方法由 Mann 和 Kendall 最早提出并对其进行逐步改进^[15]。后来 Senyars 在此基础上完善了这一方法,使其运用范围扩大,也更富有生命力。非参数检验法也时常被称之为无分布检验,是因为该方法的变量可以不服从正态分布,并且也不受个别异常值的影响^[16-20]。

1.2.3 集中度和集中期 集中度与集中期分析法是最早应用于气象领域内分析气象因素在年内分配的一种向量方法,后被引入到河流径流泥沙年内分配规律分析中来,应用于不同的流域中^[21-25]。由于这种方法简单易行,精度很高,计算简单,可以将其作为分析径流泥沙年内变化规律的方法。集中度反映了径流泥沙量年内的非均匀分布特征,集中期则反映了全年径流泥沙量集中出现的时期(即月份)。

该方法是利用向量的计算原理,把 12 个月的径流量或者输沙量看作向量,向量的长度即为各个月的径流量或输沙量,向量的方向即为各个月的径流量或输沙量所对应的月份^[26]。

1.2.4 变化幅度 变化幅度是研究平稳程度的重要指标。在径流研究方面,变化幅度过大,需增强水利调节的力度以解决开发难度增加的问题。变化幅度适中,则有利于维持水生生物生境,维护生态安全。本文用两个指标来衡量河川径流泥沙的变化幅度,一个是相对变化幅度,即最大最小月径流量(输

沙量)之比;另一个是绝对变化幅度,即最大最小月径流量(输沙量)之差^[12]。

2 结果分析

2.1 洞庭湖入湖径流泥沙年内分配不均匀性特征

2.1.1 湖南四水入湖径流泥沙年内分配不均匀性特征

利用湖南四水 1994–2010 年逐月径流量和输沙量计算四站历年 C_{V_y} 值作图 2。从图 2 中可以看出:四站历

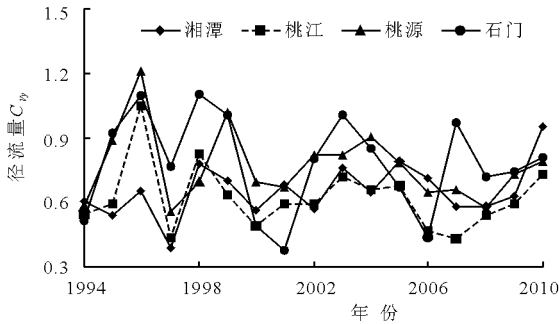
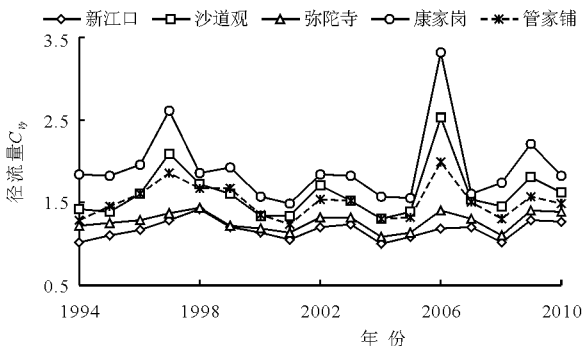


图 2 湖南四水历年径流量与输沙量不均匀系数变化

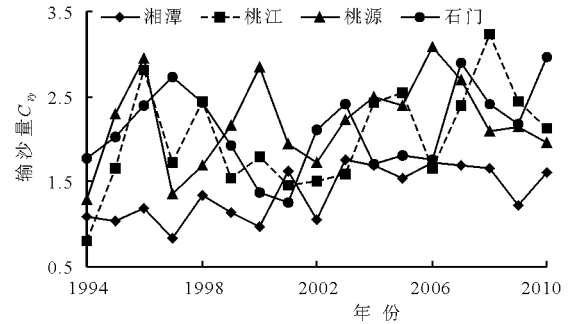
2.1.2 荆江三口入湖径流泥沙年内分配不均匀性特征

运用荆江三口各站 1994–2011 年逐月径流量和输沙量数据计算 C_{V_y} 作图 3,可以看出荆江三口各站径流量和输沙量的年内分配有以下特征:荆江三口各站历年径流量年内分配整体趋势上变化不大,特别是新江口和弥陀寺两站均处于 1.0~1.5 范围内波动,波动较大的是康家岗和沙道观两站,1997 年和 2006 年是荆江三口各站径流量年内分配不均匀性特征表现的较为明显的年份。但荆江三口各站历年输沙量 C_{V_y} 值总体上呈上升趋势,说明三口输



沙量年内分配越来越不均匀。荆江三口各站 C_{V_y} 值均在 2006 年达到最大值,且各站年内分配不均匀性特征越来越明显。

其中湘潭站和桃江站径流量 C_{V_y} 值呈微弱增大趋势,而桃源站和石门站径流量 C_{V_y} 值则逐渐减小。但四站历年输沙量 C_{V_y} 值总体上呈上升趋势,石门站输沙量上升趋势较小,湘潭站输沙量 C_{V_y} 值上升趋势最为显著,表明湘潭站输沙量年内分配呈越来越不均匀态势。



沙量年内分配越来越不均匀。荆江三口各站 C_{V_y} 值均在 2006 年达到最大值,且各站年内分配不均匀性特征越来越明显。

2.1.3 城陵矶出湖径流泥沙年内分配不均匀性特征

利用城陵矶出湖径流量和输沙量的计算该站历年 C_{V_y} 值作图 4。从图 4 中可以看出城陵矶出湖径流量和输沙量的年内分配有以下特征:从径流量和输沙量历年 C_{V_y} 值来看,径流量和输沙量 C_{V_y} 值均波动较大,其中,输沙量 C_{V_y} 值呈较为明显的波动增大趋势,径流量 C_{V_y} 值无明显趋势性变化。

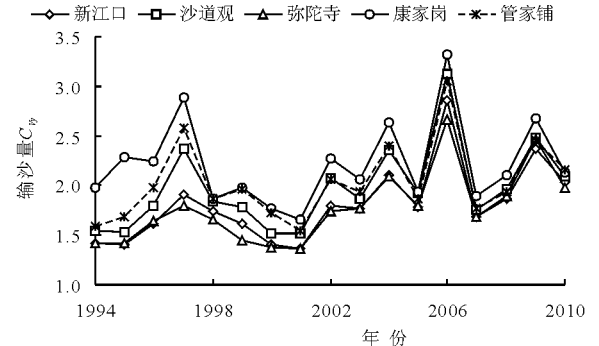


图 3 荆江三口历年径流量与输沙量不均匀系数变化

2.2 洞庭湖入出湖月径流量变化趋势

2.2.1 湖南四水入湖月径流量变化趋势

利用 M-K 法计算湖南四水湘潭、桃江、桃源和石门四站 1994–2010 年逐月径流输沙变化趋势结果见表 1。

从表 1 可以看出:

(1)湘潭站径流量在 1 月、2 月、5 月和 7 月呈增加趋势,1 月份增加趋势显著,其余月份均呈减少趋势,均没有通过显著性检验;输沙量 1 月、2 月、10

月、11 月和 12 月呈增加趋势,其余呈减少趋势,均未通过显著性检验;

(2)桃江站径流量在 4 月、6 月、8 月、9 月、10 月和 11 月呈减少趋势,其余均呈增加趋势,但不显著;

(3)桃源站径流量在 4 月无趋势性变化,在 6 月、8 月、9 月、10 月和 11 月呈减少趋势,其余呈增加趋势,其中 7 月份径流量呈显著增加;输沙量也在 7 月份呈显著增加,1 月、2 月、10 月和 12 月无趋势性变化,其余均呈减少趋势;

(4)石门站径流量在 1 月、3 月和 12 月呈增加趋势,其余月份均呈减少趋势,均不显著。输沙量在

2 月、3 月、8 月和 9 月呈增加趋势,其余均呈减少趋势,均未通过显著性检验。

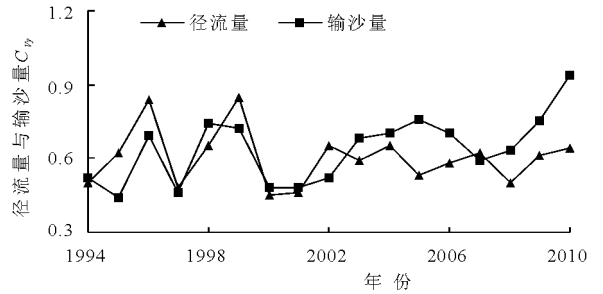


图 4 城陵矶历年径流量与输沙量不均匀系数变化

表 1 四水水系逐月径流量和输沙量趋势检验

站名	项目	月 份												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
湘潭站	径流量	占全年百分比/%	4.63	5.56	8.63	12.25	14.34	17.00	10.27	9.41	5.46	4.62	3.91	3.91
	Z 值	2.15	1.19	-0.33	-1.94	1.48	-0.45	0.7	-0.70	-0.12	-0.29	-0.54	-0.54	
	趋势性	增加	增加	减少	减少	增加	减少	增加	减少	减少	减少	减少	减少	
	显著性	显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	
	输沙量	占全年百分比/%	1.62	2.90	6.13	11.98	15.93	26.65	13.10	12.22	3.99	2.74	1.53	1.21
	Z 值	0.04	1.11	-0.37	-0.70	-0.29	-0.37	-0.45	-1.11	-0.04	1.03	1.44	0.7	
桃江站	径流量	占全年百分比/%	4.77	6.00	8.76	10.39	13.21	15.54	13.56	9.06	5.24	4.88	4.65	3.94
	Z 值	1.11	0.95	1.28	-0.70	0.04	-1.19	0.37	-1.52	-0.21	-0.95	-1.36	0.7	
	趋势性	增加	增加	增加	减少	增加	减少	增加	减少	减少	减少	减少	增加	
	显著性	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	
	输沙量	占全年百分比/%	0.77	1.10	1.99	7.71	11.29	31.57	28.87	10.00	1.33	1.82	2.82	0.73
	Z 值	-0.33	-1.28	-0.87	-2.51	0.54	-0.12	0.95	-0.08	-0.41	-1.52	-0.62	-0.87	
桃源站	径流量	占全年百分比/%	3.61	3.88	6.65	9.15	14.90	18.17	17.37	8.58	4.94	5.17	4.30	3.28
	Z 值	1.28	1.28	0.87	0	0.12	-0.45	2.76	-0.87	-0.54	-0.12	-0.04	0.7	
	趋势性	增加	增加	增加		增加	减少	增加	减少	减少	减少	减少	增加	
	显著性	不显著	不显著	不显著		不显著	不显著	显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	
	输沙量	占全年百分比/%	0.00	0.10	0.47	4.35	9.86	25.44	50.22	2.93	0.40	5.59	0.64	0.00
	Z 值	0	0	-1.65	-1.69	-0.78	-1.44	2.55	-1.32	-0.91	0	0.08	0	
石门站	径流量	占全年百分比/%	3.05	3.72	6.03	8.98	13.19	16.25	21.13	10.17	4.83	5.00	4.45	3.18
	Z 值	0.04	-0.54	1.44	-0.12	-1.11	-0.95	-0.12	-0.29	-0.08	-0.62	-1.36	1.07	
	趋势性	增加	减少	增加	减少	减少	减少	减少	减少	减少	减少	减少	增加	
	显著性	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	
	输沙量	占全年百分比/%	0.01	0.08	0.23	1.90	5.30	23.32	58.78	9.22	0.38	0.38	0.40	0.01
	Z 值	-0.49	0.82	1.40	-1.11	-1.52	-1.36	0.12	0.12	0.16	-0.29	-0.49	-1.77	

2.2.2 荆江三口入湖月径流量变化趋势 利用 M 年逐月径流量和输沙量变化趋势,结果见表2。由表 -K 趋势检验方法计算荆江三口各站 1994 - 2010 2 可以看出:

表2 三口各站逐月径流量和输沙量趋势检验

站名	项目	月 份											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
新江口	径流量	0.10	0.08	0.26	1.20	5.60	13.18	26.95	21.82	17.63	9.32	3.30	0.54
	Z 值	-0.87	0.70	-0.12	-0.29	1.03	-0.62	0.16	-0.04	-1.03	1.94	1.69	-2.18
	趋势性	减少	增加	减少	减少	增加	减少	增加	减少	减少	增加	增加	减少
	显著性	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	显著
	占全年百分比/%	0.00	0.00	0.00	0.01	0.68	8.92	37.37	29.68	19.02	3.90	0.42	0.00
	Z 值	0	0	0	0.04	0.29	-0.12	0.87	-0.62	-0.45	-0.66	-0.99	0
沙道观	径流量	0.00	0.00	0.00	0.04	1.63	11.22	36.87	25.23	18.47	5.72	0.82	0.00
	Z 值	0	0	0	-0.58	2.02	-0.62	-0.21	0	-1.03	2.18	0.37	0
	趋势性				减少	增加	减少	减少		减少	增加	减少	
	显著性				不显著	显著	不显著	不显著		不显著	显著	不显著	
	占全年百分比/%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	7.16	39.85	30.80	18.73	2.88	0.27	0.00
	Z 值	0	0	0	0	-0.04	-1.11	0.87	-0.21	-0.45	0.49	-0.37	0
弥陀寺	径流量	0.00	0.00	0.02	0.50	4.76	13.49	28.34	23.55	18.76	8.56	1.96	0.05
	Z 值	0	0	0.12	-0.41	2.02	-0.62	1.44	0	-1.03	2.18	0.04	-0.49
	趋势性			增加	减少	增加	减少	增加		减少	增加	增加	减少
	显著性			不显著	不显著	显著	不显著	不显著		不显著	显著	不显著	不显著
	占全年百分比/%	0.00	0.00	0.00	0.05	1.08	8.11	35.30	31.14	20.09	3.88	0.36	0.00
	Z 值	0	0	0	-0.66	2.43	-0.12	0.21	-1.44	-0.70	-0.25	0.12	-0.58
康家岗	径流量	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	7.85	43.90	27.75	17.73	2.17	0.26	0.00
	Z 值	0	0	0	0	-0.16	-0.04	0.45	-0.21	0.12	-1.40	0.08	0
	趋势性					减少	减少	增加	减少	增加	减少	增加	
	显著性					不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	
	占全年百分比/%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	4.16	43.64	32.73	18.21	1.19	0.00	0.00
	Z 值	0	0	0	0	-0.21	-0.58	0.87	-0.21	-0.82	-0.78	0	0
管家铺	径流量	0.00	0.00	0.00	0.14	2.95	12.43	35.15	25.02	18.11	5.33	0.88	0.00
	Z 值	0	0	0	-0.49	2.18	0.37	0.45	-0.21	0.12	-1.19	0.08	0
	趋势性				减少	增加	增加	增加	减少	增加	减少	增加	
	显著性				不显著	显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	
	占全年百分比/%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	6.07	42.52	30.09	18.65	2.30	0.08	0.00
	Z 值	0	0	0	-0.58	-0.70	-1.11	0.87	-0.21	-0.45	-0.66	0.37	0

(1) 松滋口: 新江口站径流量在 2 月、5 月、7 月、10 月和 11 月呈增加趋势,但并不显著,其余月份呈减少趋势,其中 12 月份减少趋势显著。而输沙

量在 1 月、2 月、3 月和 12 月无明显趋势性变化,其余月份变化趋势并不显著。由于河流断流的影响,沙道观在 1 月、2 月、3 月和 12 月径流量和输沙量处

于断流状态,其径流量在 5 月和 10 月份呈显著增加趋势。

(2)太平口:径流量在 3 月、5 月、7 月、10 月和 11 月份均呈增加趋势,其中 5 月和 10 月份径流量呈显著增加趋势,而月输沙量无显著性变化。

(3)藕池口:康家岗径流量和输沙量在 1 月、2 月、3 月、4 月和 12 月处于断流状态,径流量和输沙量无明显趋势性变化。其余月份径流量和输沙量增加或减少趋势并不显著,均未通过显著性检验。管家铺站在 1 月、2 月、3 月和 12 月份径流量和输沙量处于断流状态,无明显趋势性变化。径流量在 5 月、6 月、7 月、9 月和 11 月呈增加趋势,其中,5 月份的径流量变化呈显著增加趋势,通过了显著性检验,其

余月份变化并不显著。

2.2.3 城陵矶出湖月径流量变化趋势 根据 Z 统计值计算结果见表 3。城陵矶径流量在汛期(5-10 月)呈减少趋势,只有 7 月份径流量有增加趋势,但并不显著。而 11 月-次年 3 月本应是洞庭湖区的枯水期,城陵矶出湖径流量反而呈增加趋势,城陵矶径流量在汛期呈减少趋势,在枯水期呈增加趋势,反映了径流量年份分配趋于平均。城陵矶输沙量在汛期(5-10 月)呈减少趋势,而在 7 月份呈增加趋势,且通过显著性检验,呈显著增加趋势。11 月和 12 月输沙量呈不明显的增加趋势外,其余各月城陵矶输沙量均呈减少趋势,总体看来,城陵矶输沙量减少趋势较为明显。

表 3 城陵矶逐月径流量和输沙量 Z 统计值计算结果

站名	项目	月 份											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
新江口	占全年百分比/%	3.24	3.71	6.08	8.03	11.37	13.65	16.43	13.38	9.91	6.52	4.52	3.16
	Z 值	0.12	1.19	1.28	-0.12	-1.28	-0.54	0.37	-1.52	-0.78	-0.12	0.78	0.70
	趋势性	增加	增加	增加	减少	减少	减少	增加	减少	减少	减少	增加	增加
	显著性	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著
	占全年百分比/%	3.64	5.58	10.20	13.84	12.42	12.10	10.12	8.61	7.61	7.16	5.34	3.37
	Z 值	-0.04	-0.04	-0.21	-0.45	-1.28	-1.69	2.02	-0.37	-0.29	-1.19	0.78	1.19
	趋势性	减少	减少	减少	减少	减少	减少	增加	减少	减少	减少	增加	增加
	显著性	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著	显著	不显著	不显著	不显著	不显著	不显著

2.3 洞庭湖入出湖径流泥沙集中度与集中期

2.3.1 湖南四水入湖径流泥沙集中度与集中期

利用集中度和集中期法以及变化幅度计算方法计算湖南四水 1956-2010 年各站径流输沙量集中度、集中期、相对变化幅度、绝对变化幅度,结果见表 4。从表 4 可以看出:

(1)径流集中度与集中期:四水径流集中度介于 32.2%~43.7% 之间,石门站径流集中度最大为 43.7%,表明石门站年内径流分配最不均匀,桃江站集中度最小为 32.2%;集中期为每年的 5-7 月,湘潭和桃江径流集中在每年的 5 月份,桃源集中在 6 月份,石门集中在 7 月份;径流集中期合成向量方向介于 103.2°~190.2° 之间,均能够反映各河流入湖径流量最大值出现的月份,与实际径流年内分配统计数据相一致。其中湘潭和桃源的绝对变化幅度较为一致,桃江和石门的绝对变化幅度较为一致,这与四水各河流的集水面积与流域控制面积大小有着密切关系,河流流域控制面积大则变化幅度也相应较大;相对变化幅度以石门 8.9 最大,反映了石门的年内分配不均匀性最大。

表 4 湖南四水各站径流量和输沙量集中度与集中期计算结果

项目水文站	时段	集中	合成向	所在	相对	绝对变
		度/ %	量方向/ (°)	月份	变化 幅度	化幅度 $10^8/m^3, 10^4/t$
径流量	湘潭 1956-2010	38.2	106.5	5	5.0	91.1
	桃江 1956-2010	32.2	103.2	5	3.8	25.8
	桃源 1956-2010	41.0	145.3	6	6.1	94.8
	石门 1956-2010	43.7	180.4	7	8.9	24.5
输沙量	湘潭 1994-2010	57.2	159.1	6	21.9	173.1
	桃江 1994-2010	70.9	163.0	6	43.2	31.5
	桃源 1994-2010	81.3	191.5	7	*	162.6
	石门 1994-2010	90.3	194.9	7	6213.6	165.9

注:“*”代表部分月径流量/输沙量为零。相对变化幅度为月径流量/输沙量最大值除以月径流量/输沙量最小值的商,绝对变化幅度为最大月径流量/输沙量与最小月径流量/输沙量的差值。以下同。

(2)输沙集中度与集中期:介于 57.2%~90.3% 之间,其中石门集中度最大为 90.3%;集中期为每年的 6-7 月,湘潭和桃江输沙集中在每年的 6 月份,桃源和石门集中在每年的 7 月份;桃源站和石门站输沙量相对变化幅度最大,其中桃源发生了月输沙量为 0 的情况,说明其年内输沙量变化不均匀性较为显著,其中桃源站 1 月和 12 月输沙量极

小,绝对变化幅度桃江最小,其余各站相差不大。

根据年内径流泥沙统计数据,四水流域各河流径流年内变化具有很好的一致性,4-5月份四水开始进入多雨期,径流量迅速增加,汛期径流量峰值出现在5月底至6月初,在形态上表现出较为对称的单峰形态,其中,湘江和沅江汛期峰值较大。输沙量表现出一定的滞后性,输沙量最大出现在6-7月份。

2.3.2 荆江三口入湖径流泥沙集中度与集中期

运用同样的方法计算方法计算荆江三口1956-2010年各站径流输沙量集中度、集中期等,结果见表5。从表5可以看出:荆江三口各站入湖径流泥沙年内分配具有较为明显的不均匀性,荆江三口输沙年内分配不均匀性更显著。

(1)三口径流集中期与集中度:三口径流集中度在66.9%~85.2%之间,其中安乡河(康家岗)径流集中度最大为85.2%,表明安乡河径流年内分配最不均匀;松滋河西支(新江口)径流集中度最小为66.9%,松滋河西支径流年内分配相对较为均匀。三口径流集中期均为每年的7月份,径流集中期合成向量方向介于175.4°~190.2°之间,均能够反映三口各洪道入湖径流量最大值出现的月份,与实际径流年内分配统计数据相一致。三口各站月径流量相对变化幅度差异较大,其中以管家铺站相对变化幅度最大为2626.3,表明最大月径流量与最小月径流量相差悬殊。而康家岗站由于枯季径流量经常有4个月以上时间处于断流状态,因此,其相对变化幅度无意义。绝对变化幅度以管家铺站最大,康家岗站最小,说明管家铺站最大与最小月径流量相差较大。

(2)三口输沙集中期与集中度:三口输沙集中度介于84.7%~91.0%之间,其中安乡河(康家岗)输沙集中度最大为91.0%,表明安乡河输沙年内分配最不均匀;虎渡河(弥陀寺)输沙集中度最小为84.7%,松滋河西支输沙年内分配不均匀程度较低。三口输沙集中期均为每年7月份,输沙集中期合成向量方向介于189.6°~194.4°之间,均能够反映三口各洪道入湖输沙量最大值出现的月份,与实际输沙年内分配统计数据相一致。荆江三口各站输沙量在枯季均处于断流状态,故输沙相对变化幅度无意义,而绝对变化幅度以新江口站最大,康家岗站最小。

2.3.3 城陵矶出湖径流泥沙集中度与集中期 根据城陵矶出湖径流量和输沙量集中期和集中度计算结果表6可知,城陵矶出湖径流集中度为37.8%,径流集中期为7月。径流集中期合成向量方向为170.1°,能够反映城陵矶出湖径流量最大值出现的

月份,与实际径流年内分配统计数据相一致。城陵矶出湖输沙集中度为25.7%,集中期为4月,输沙集中期合成向量方向为91.3°,能够反映城陵矶输沙量最大值出现的月份。

表5 荆江三口径流量和输沙量集中度与集中期计算结果

项目	水文站	时段	集中度/ %	合成向 量方向/ (°)	所在 月份	相对 变化 幅度	绝对变 化幅度/ $10^8/m^3, 10^4/t$
径流量	新江口	1955-2010	66.9	175.4	7	166.8	70.0
	沙道观	1955-2010	75.1	181.1	7	639.9	28.6
	弥陀寺	1955-2010	69.3	179.6	7	362.0	36.9
	康家岗	1955-2010	85.2	190.2	7		7.3
	管家铺	1955-2010	75.3	178.9	7	2626.3	80.4
输沙量	新江口	1994-2010	85.2	190.4	7		584.2
	沙道观	1994-2010	87.8	191.5	7		176.1
	弥陀寺	1994-2010	84.7	189.6	7		247.8
	康家岗	1994-2010	91.0	194.4	7		32.8
	管家铺	1994-2010	89.3	192.9	7		520.9

从径流输沙年内变化幅度看,径流量相对变化幅度较输沙量相对变化幅度要大,城陵矶出湖径流量绝对变化幅度为 $402.5 \times 10^8 m^3$,输沙量绝对变化幅度为 $218.8 \times 10^4 t$ 。

表6 城陵矶径流量和输沙量集中度与集中期计算结果

项目	水文站	时段	集中度/ %	合成向 量方向/ (°)	所在 月份	相对 变化 幅度	绝对变 化幅度 $10^8/m^3, 10^4/t$
径流量	城陵矶	1951-2010	37.8	170.1	7	6.7	402.5
输沙量	城陵矶	1994-2010	25.7	91.3	4	4.0	218.8

3 洞庭湖入湖径流泥沙年内变化规律成因分析

在径流长期变化中,气候因素是主导因素,水利工程建设等人类活动加速径流演变。洞庭湖作为一个特殊的流域,地表水资源的动态变化过程除了受降水多年变化的影响外,还受到人类生产生活引起的流域下垫面条件的改变和工业、农业及居民生活用水量增加等因素综合影响。上游河流的产沙量主要受人类活动和自然侵蚀的影响。由于洞庭湖是典型的通江型湖泊,其径流和输沙的演变特征受到人类活动和自然的双重影响。

3.1 自然因素

3.1.1 气候因素 洞庭湖流域径流主要来源于降水,气候因素的变化异常是引起洞庭湖径流阶段性演变的主导因素。其最直接的影响是导致汛期降水增多。洞庭湖泥沙主要来自降水特别是暴雨对流域

表土的侵蚀,汛期河流含沙量最大,水土流失现象也从上而下逐渐加剧。近 50a 来,特别是 20 世纪 90 年代以来洞庭湖流域的气温上升明显,气候变暖容易诱发极端天气事件,使得径流泥沙年内分配呈现出越来越不均匀的趋势。

3.1.2 水沙交互影响 洞庭湖入湖径流量和出湖径流量年内分配都集中在 5-7 月份。但出湖径流量与泥沙量的年内分配不相一致。洞庭湖湖是一个吞吐型湖泊,与长江相通,7-9 月为长江主汛期,受长江洪水顶托和倒灌影响,泥沙出湖困难,常出现江水倒灌现象,同时长江泥沙也随江水倒灌入湖,因此 4 月是洞庭湖泥沙淤积期。

3.2 人为因素

水土流失和水利工程建设等人类活动也在一定程度上加速了径流演变的进程。从汛期和枯季径流量百分比来看,四站汛期径流量所占比例依次减少,枯季所占比例则依次增大。说明随着四水上游水库等水利工程建设增多,四水入湖水量变得更加均匀。而输沙量在汛期和枯季的变化却表现出不同的特征,输沙量在汛期所占百分比有增大趋势,相反枯季输沙量所占百分比则有下降趋势。但是随着荆江裁弯、葛洲坝水利枢纽和三峡蓄水运用等水利工程的兴建,洞庭湖与长江中游特别是荆江三口的关系发生多次大的调整,三口输沙量 60a 来呈显著下降趋势,输沙量显著减少发生在 1950 年代。城陵矶汛期径流量不增反减说明三峡水库在汛期拦截洪水的作用非常明显,枯水期三峡水库对下游进行补水调度。通过三峡水库的调度,洞庭湖的径流量年内分配更加均匀。

4 结 论

(1)洞庭湖入湖径流和泥沙的年内分配不均匀性、集中度与集中期差异明显,表现在泥沙年内分配不均匀性更大、集中程度更高、集中期滞后,且呈现出越来越不均匀的趋势。

(2)从入湖径流泥沙来看,荆江三口的年内不均匀性明显高于四水,表明长江水文变化对入湖径流泥沙的年内变化影响更大,特别是三峡工程的修建,影响突出。

(3)入湖径流泥沙年内变化特征对比分析表明:出湖径流泥沙的年内不均匀性与集中度均低于入湖,出湖径流集中期在 7 月、泥沙在 4 月。这主要是洞庭湖巨大的调蓄作用的结果。

本文通过不同指标来衡量洞庭湖入湖径流泥

沙年内分配的特征及其变化规律,可以从不同侧面反映分配情况,但统计方法众多,因此需要进一步探讨更合适的指标进行科学分析。另外洞庭湖径流泥沙年内分配的变化是由降水条件、人类活动、三峡工程等多种因素影响造成的,需要进一步深入研究不同要素对流域径流年内分配变化的定量影响。

参考文献:

- [1] 胡光伟,毛德华,李正最,等.三峡工程对洞庭湖的影响研究综述[J].自然灾害学报,2013,22(5):44-52.
- [2] 高俊峰,张琛,姜加虎,等.洞庭湖的冲淤变化和空间分布[J].地理学报,2001,56(3):269-277.
- [3] 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成因[J].地理学报,2005,60(3):503-510.
- [4] 张细兵,卢金友,王敏,等.三峡工程运行后洞庭湖水沙情势变化及其影响分析[J].长江流域资源与环境,2010,19(6):640-643.
- [5] 李正最,谢悦波,徐冬梅.洞庭湖水沙变化及影响初探[J].水文,2011,31(1):45-53.
- [6] 尹辉,杨波,蒋忠诚,等.近 60 年洞庭湖形态与水沙过程互动效应[J].地理研究,2012,31(3):471-483.
- [7] 胡光伟,毛德华,李正最,等.荆江三口 60a 来入湖水沙变化规律及其驱动分析[J].自然资源学报,2014,29(1):129-142.
- [8] 周永强,李景保,张运林,等.三峡水库运行下洞庭湖盆冲淤过程响应与水沙调控阈值[J].地理学报,2014,69(3):409-421.
- [9] 胡光伟,毛德华,李正最,等.三峡工程运行对洞庭湖与荆江三口关系的影响分析[J].海洋与湖沼,2014,45(3):453-461.
- [10] 胡光伟,毛德华,李正最,等.60 年来洞庭湖区进出湖径流特征分析[J].地理科学,2014,34(1):89-96.
- [11] 郭巧玲,杨云松,畅祥生,等.1957-2008 年黑河流域径流年内分配变化[J].地理科学进展,2011,30(5):550-556.
- [12] 刘德林,刘贤赵,张继平.大沽夹河流域径流年内分配特征的量化研究[J].水土保持研究,2006,13(6):107-109+114.
- [13] 孙永寿,段永强,李燕,等.近年来青海三江源区河川径流变化特征及趋势分析[J].水资源与水工程学报,2015,26(1):52-57.
- [14] 董佳秋,常亮.海流兔河径流特性变化及影响分析[J].水资源与水工程学报,2014,25(1):144-147.
- [15] 张建业,章四龙,王金星,等.近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J].水科学进展,2007,18(2):230-234.

要原因。

4 结 论

(1)新安江模型对闽江流域日水文过程具有较好的模拟效果,率定期和试预报期的 Nash 系数均在 0.85 左右,相对误差也控制在 2% 之内,说明新安江模型对该流域具有较好的适用性。

(2)基于 LM 算法改良的 BP 神经网络模型有效地避免了传统神经网络模型收敛速度慢、产生震荡等缺陷,而且其模拟机预报结果明显优于新安江模型的预报结果,这与神经网络在水文模拟中采用了更多的数据源有较大的关系。多源数据和大数据的使用可在一定程度上提高水文模拟精度。

(3)在闽江流域的水文预报业务中,将多种模型进行有机地耦合,充分利用各模型的优势,相互弥补模型的不足之处,将是水文预报系统建设的重要方向。

参考文献:

[1] 张心凤,赖万安. 新安江水文模型在水文预报中的应用[J]. 水科学与工程,2014(4):42-45.

[2] 芮孝芳,凌哲,刘宁宁,等. 新安江模型的起源及对其进一步发展的建议[J]. 水利水电科技进展,2012,32(4):1-5.

[3] 尚晓三,王栋. 基于 L-M 算法的 BP 神经网络在水文预报中的应用研究[C]//. 中国水论坛. 2007.

[4] 李致家,姚成,汪中华. 基于栅格的新安江模型的构建和应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2007,35(2):131-134.

[5] 吕志朋. 基于遗传算法优化参数的新安江三水源模型研究[J]. 广东水利水电,2012(5):9-13.

[6] 覃光华,丁晶,刘国东. 自适应 BP 算法及其在河道洪水预报上的应用[J]. 水科学进展,2002,13(1):37-41.

[7] 刘星才,许有鹏,唐郑亮. 改进的人工神经网络模型在水文序列预测中的应用研究[J]. 南京大学学报(自然科学),2008,44(1):85-90.

[8] 宋晓猛,孔凡哲. 新安江模型和人工神经网络的耦合应用[J]. 水土保持通报,2010,30(6):135-138.

[9] 张建云,王国庆等. 河川径流变化及归因定量识别[M]. 北京:科学出版社,2014.

[10] 赵人俊. 流域水文模拟[M]. 北京:中国水利电力出版社,1984.

[11] 侯翔,汤元斌,刘笃晋,等. 三种神经网络在洪水预报中应用的比较[J]. 计算机系统应用,2013,22(12):35-38.

[12] 李云良,张奇,李森,等. 基于 BP 神经网络的鄱阳湖水文模拟[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(2):233-240.

[13] 阎平凡,张长水. 人工神经网络与模拟进化计算[M]. 清华大学出版社,2005.

[14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T22482-2008 水文情报预报规范[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

[15] Zhao Renjun. The Xinanjiang model applied in China[J]. Journal of hydrology,1992,135(1-4):371-381.

[16] Rooij A J F V, Johnson R P, Jain L C. Neural network training using genetic algorithms[M]. World Scientific, 1996.

(上接第 39 页)

[16] 李丽娟,郑红星. 华北典型河流年径流演变规律及其驱动力分析——以潮白河为例[J]. 地理学报,2000,55(3):309-317.

[17] 李运刚,何大明,叶长青. 云南红河流域径流的时空分布变化规律[J]. 地理学报,2008,63(1):41-49.

[18] 王文圣,李跃清,解苗苗,等. 长江上游主要河流年径流序列变化特性分析[J]. 四川大学学报(工程科学版),2008,40(3):70-75.

[19] 韩博闻,李娜,曾春芬,等. 大型水利工程对长江中下游水沙变化特征影响分析[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(2):139-144.

[20] 倪培桐,闻平,刘剑宇. 珠江三角洲水沙年际变化趋势分析[J]. 人民珠江,2016,37(1):19-24.

[21] Zhang Lujun, Qian Yongfu. Annual distribution features of the yearly precipitation in China and their interannual

variations[J]. Acta Meteorological Sinica,2003,17(2):146-163.

[22] 丁瑾佳,许有鹏,潘光波. 杭嘉湖地区城市发展对降水影响的分析[J]. 地理科学,2010,30(6):886-891.

[23] 白红英,侯钦磊,马新萍,等. 50 年来秦岭金钱河流域水文特征及其对降水变化的响应[J]. 地理科学,2012,32(10):1229-1235.

[24] 刘新有,何大明,袁树堂,等. 怒江干流水沙年内分配特征及变化趋势[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(4):133-135+142.

[25] 郑红星,刘昌明. 黄河源区径流年内分配变化规律分析[J]. 地理科学进展,2003,22(6):585-590.

[26] 刘贤赵,李嘉竹,宿庆,等. 基于集中度与集中期的径流年内分配研究[J]. 地理科学,2007,27(6):791-795.