

# 湖南四水入洞庭湖水沙演变及成因分析

覃红燕<sup>1</sup>, 谢永宏<sup>2</sup>, 邹冬生<sup>1</sup>

(1. 湖南农业大学生物科学技术学院, 湖南 长沙 410128; 2. 中国科学院亚热带农业生态所洞庭湖  
湿地生态系统观测研究站, 湖南 长沙 410125)

**摘要:** 以湖南四水入洞庭湖的代表性控制站 1951~2009 年长系列水文数据为基础, 运用 Mann-Kendall 趋势突变检验等方法探讨水沙演变过程并分析了其成因。结果表明: 四水年径流量变化比较复杂, 存在多个上升-下降过程, 但总体上无明显上升或下降趋势; 年输沙量总体上呈明显下降趋势, 且突变时间存在差异, 湘水是 1996 年, 资水是 1973~1974 年, 沅水是 1997~1998 年, 澧水是 1998 年。年径流量的减少、植被覆盖增加以及大中型水库的建设等综合作用是 2001 年后年输沙量较大幅度减少的主要原因。

**关键词:** 湖南四水; 突变; 水文过程; 水库

**中图分类号:** P349

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0690(2012)05-0609-07

洞庭湖位于湖南省东北部, 长江中游荆江南岸, 为中国第二大淡水湖, 是长江中游最重要的行蓄洪湖泊之一, 发挥着巨大的调蓄洪水和保护生物多样性等重要生态服务功能。洞庭湖总面积为 2 625 km<sup>2</sup>, 其多年平均地表径流达 3 126×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>, 约为黄河的 6 倍, 鄱阳湖的 3 倍, 太湖的 10 倍。入湖径流按来源通常分为长江四口、湖南四水及区间三部分, 其中来自四口的为 1 119×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>, 占 37.1%; 来自四水的为 1 647×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>, 占 54.6%, 在洞庭湖水资源组成中占有重要地位。近年来, 由于气候异常、人类高强度干扰等多重因素的影响, 湖泊泥沙淤积严重, 湿地面积不断萎缩, 洪涝灾害加剧, 生物多样性受损, 生物灾害频发等多种生态环境问题日趋严峻<sup>[1]</sup>, 而最近几年几乎年年都发生的水资源短缺事件尤为引人关注, 并引发人们对湿地生态环境加剧恶化的担忧<sup>[2]</sup>。因此, 阐明流域水沙演变趋势是湿地生态环境保护的重要基础性工作之一。

流域的水沙变化一直是河流地貌、水利工程等领域倍受关注的科学问题<sup>[3,4]</sup>。水文特征如水沙的流动对很多因素都很敏感, 包括水利工程(如水库、大坝、水管理措施)、土地利用变化以及气候变

化等<sup>[5-7]</sup>。目前, 国内外对于河流水沙变化的影响因素已有大量研究, 尤其是人类活动对河流水沙变化的影响方面较为广泛。这些研究对于揭示地表水减少过程、气候变化的水沙响应以及人类活动的干扰过程与调控机制有着重要意义<sup>[8,9]</sup>。然而, 以往的研究主要集中在土地利用、水库拦沙、水土保持、植被覆盖等方面<sup>[10-12]</sup>, 且主要集中在单个河流上, 以全流域为基础、以河流进入湖泊的水沙演变为研究对象的相对较少。基于此, 本研究的主要目的是通过移动平均值法、Mann-Kendall 趋势突变检验、双累积曲线等方法探讨湖南四水入洞庭湖水沙演变的规律性、突变性及其成因, 以期充分合理利用四水水资源, 保护洞庭湖湿地生态环境提供依据。

## 1 数据来源和研究方法

### 1.1 水沙数据

长系列水沙数据来源于湖南省水文局和《长江泥沙公报 2003~2009》<sup>[13]</sup>。本研究以湘潭水文站(湘水)、桃江水文站(资水)、桃源水文站(沅水)、石门水文站(澧水) 1951~2009 年的实测数据作为湖南四水入洞庭湖水沙演变分析的基础(图 1)。

**收稿日期:** 2011-05-25; **修订日期:** 2011-07-22

**基金项目:** 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX2-YW-435)、国家重大基础研究计划(2009CB 421103)资助。

**作者简介:** 覃红燕(1975-), 女, 湖南石门人, 博士研究生, 主要从事生态水文研究。E-mail: qhy@hunau.net

**通讯作者:** 谢永宏, 研究员, 博导。E-mail: yonghongxie@163.com

主要指标包括年径流量和年输沙量。

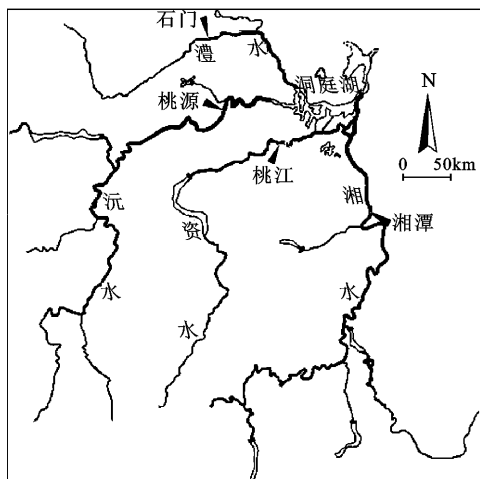


图1 湖南四水代表性控制站位置

Fig.1 Location of representative hydrological stations of Four Rivers in Hunan Province

## 1.2 研究方法

主要研究方法如下:

1) 采用移动平均值法判定水沙演变趋势, 期数设定为5。

2) 采用非参数 Mann-Kendall (以下简称 M-K) 法检验趋势突变点, 具体计算方法参见[8,14]。M-K 法以时间序列平稳为前提, 且时间序列是随机独立的, 其概率分布等同。设定原假设  $H_0$ : 在时间序列没有变化的情况下, 设此序列为  $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ , 用  $m_i$  表示第  $i$  个样本  $x_i$  大于  $x_j$  ( $1 \leq j \leq i$ ) 的累计数, 则可以定义一统计量:  $d_k = \sum_{i=1}^k m_i$  ( $2 \leq k \leq n$ )。

在原序列随机独立的假定下,  $d_k$  的均值、方差分别为:  $E[d_k] = k(k-1)/4$ ,  $\text{var}[d_k] = k(k-1)(2k+5)/72$  ( $2 \leq k \leq n$ )。将  $d_k$  标准化, 得到标准变化量, 则  $UF_k = \frac{d_k - E[d_k]}{\sqrt{\text{var}[d_k]}}$  ( $k=1, 2, 3 \dots n$ ), 当  $k > 10$  时,  $UF_k$  收

敛于标准正态分布。原假设  $H_0$  无趋势, 采用双边趋势检验, 给定一定显著水平  $\alpha$ , 在正态分布表中查得临界值  $U_{\alpha/2}$ 。当  $|UF_k| < U_{\alpha/2}$  时, 接受原假设, 则趋势不显著; 当  $|UF_k| > U_{\alpha/2}$  时, 拒绝原假设, 即认为趋势显著, 且  $UF_k$  值为正表明具有上升或增加趋势,  $UF_k$  值为负则意味着下降或者减少趋势。把此方法引到反序列中, 即按时间序列  $x$  逆序  $x_n, x_{n-1}, x_{n-2} \dots x_1$ , 再重复上述过程, 同时使  $UB_k = -UF_k$  ( $k=n, n-1, \dots, 1$ )。  $UF_k$  和  $UB_k$  在图中分别以曲线  $C_1$  和  $C_2$  表

示, 两条曲线在时间序列的某一部分发生交叉, 交叉点便是突变点, 如果突变点位于给定置信度水平线之间, 则突变时间在统计意义上是显著的。

3) 采用双累积曲线法检验年径流量和年输沙量累积变化的转折点。同时, 通过转折点的获取估计了不同时段的变化量, 即通过前一时段的线性模拟方程按后一时段最后 1 a 的累积径流量换算得到的后一时段最后 1 a 的理论累积输沙量。减少输入总量为后一时段最后 1 a 的理论累积输沙量与实际累积输沙量的差值, 平均减少量为减少输入总量与后一时段年数的比值。

## 2 年径流量和年输沙量的演变特征

### 2.1 年径流量

湖南四水入洞庭湖代表性水文站在 1951~2009 年的总径流量多年平均为  $1\,673 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。年径流量以湘水最高 ( $657 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 占四水总径流的 39.3%), 其次为沅水 ( $640 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 占 38.3%), 再次为资水 ( $229 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 占 13.7%), 最少的为澧水 ( $147 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 占 8.8%)。从移动平均值来看 (图 2), 总体上呈波动状态, 除澧水外, 湘、资、沅均体现为三个波峰 (1950 s 初期、1960 s 末至 1970 s 初期、1990 s) 和三个波谷 (1950 s 末至 1960 s 初、1980 s、2001~2009), 且三个水系的总径流量都在 1990 s。相比之下, 澧水波动更为频繁但幅度相对较小。

### 2.2 年输沙量

湖南四水入洞庭湖代表性水文站在 1951~2009 年总输沙量多年平均  $2\,591 \times 10^4 \text{ t}$ 。与年径流量不同的是, 年输沙量以沅水最高 ( $1\,051 \times 10^4 \text{ t}$ , 占四水总输沙量的 40.6%), 其次为湘水 ( $959 \times 10^4 \text{ t}$ , 占 37.0%), 再次为澧水 ( $382 \times 10^4 \text{ t}$ , 占 14.7%), 最少的为资水 ( $199 \times 10^4 \text{ t}$ , 占 7.7%)。从不同年代来看, 四水的总输沙量呈不断下降趋势, 如 1951~1960 年为  $3\,543 \times 10^4 \text{ t}$ , 1981~1990 年为  $2\,280 \times 10^4 \text{ t}$ , 到 2001~2009 年仅为  $876 \times 10^4 \text{ t}$ , 下降 75.3%。从移动平均值来看 (图 2), 总体上呈不断下降趋势, 其中以沅水下降最多, 2001~2009 年比 1951~1960 年下降 90.6%; 其次为资水, 下降 88.3%; 再次为澧水, 下降 73.5%; 最少的为湘水, 下降 53.9%。从快速下降的年代来看, 存在明显差异, 湘水在 1980 s, 资水在 1960 s, 沅水在 1980 s 和 2001~2009 年, 澧水在 1990 s 后期。从径流量和输沙量的变化趋势看, 湘水在 1980 s 以前、资水在 1960 s 以后、沅水在 1980 s

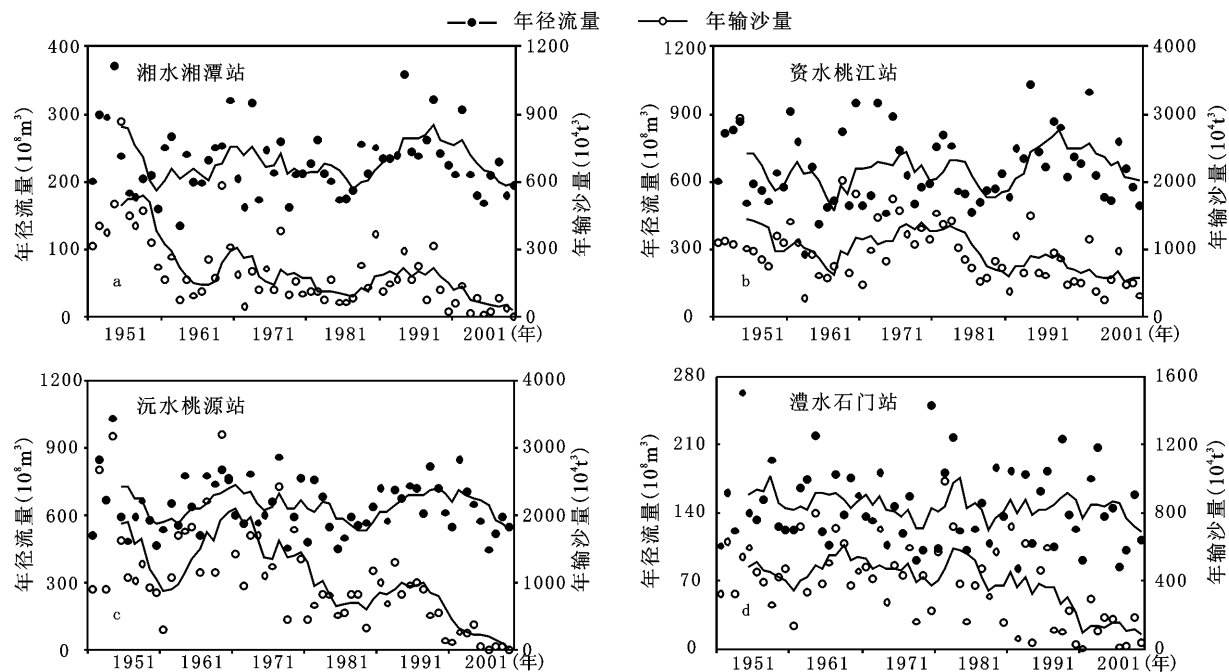


图2 湖南四水入洞庭湖代表性水文站1951~2009年的年径流量和年输沙量移动均值

Fig.2 Moving average values of annual runoff and sediment discharge in representative hydrological stations of Four Rivers of Hunan Province in 1951-2009

年前、澧水在1990 s以前呈明显的一致性变化趋势。

### 3 M-K趋势突变检验

#### 3.1 年径流量

从M-K检验结果可以看出(图3),四水入洞庭湖代表性水文站年径流量曲线变化较为复杂,存在多个上升-下降过程,表现为波动状态。以湘水湘潭站为例,在经历了1954~1958年的下降后,1958~1963年有所上升,1963~1967年又有所下降,1967~1983年为波浪式上升,1983~1990年又有所下降,1993~2002年间的上升过程相对较大,此后又呈下降趋势。虽然四水的 $UF_k$ 和 $UF_k$ 都存在多个交叉点,但M-K曲线一直处于置信区间内波动( $|Z| < 1.96$ ,  $P_{上}$ 或 $P_{下} > 0.05$ ),说明变化并不显著。相比之下,澧水的波动较小,而湘水、资水和沅水的波动幅度相对较大。可以认为,四水的年径流量在近59 a里未表现明显的上升或下降的趋势性变化。

#### 3.2 年输沙量

从M-K检验结果可以看出(图3),四水入洞庭湖代表性站点年输沙量总体上存在极其显著的下降趋势( $Z < -3.29$ ,  $P_{下} < 0.001$ ),但曲线变化过程较为复杂,存在多个上升-下降过程。以湘水湘潭站

为例,1956~1965、1971~1986和1998~2009年有三个明显的下降过程,并在1987~1998年有一个上升过程。湘水、资水和沅水的波动幅度相对较大,而澧水的波动较小,在1951~1996年间 $UF_k$ 为小幅波动,其后呈明显下降趋势。从突变时间来看,也存在差异,湘水为1996年,1999年后突破95%置信区间;资水的突变时间为1973~1974年间,在1963年即突破95%置信区间;沅水的突变时间为1997~1998年间,1988年突破95%置信区间;澧水的突变时间为1998年,此后几乎呈直线下降,突破95%置信区间时间为2001年。此外,从四水年径流量和年输沙量的M-K曲线变化过程来看,湘水在1996年前基本一致,而在1997年后不一致。可以认为,四水年输沙量在近59 a里呈极显著的下降趋势,但突变时间存在极大差异。

### 4 成因分析

#### 4.1 年径流量

尽管湖南四水入洞庭湖年径流量存在波动,但都无明显的上升或下降趋势,与其它河流的研究结论是一致的<sup>[1]</sup>。流域内年径流量的变化可能主要受降水量丰缺的影响<sup>[2]</sup>。李景保等对湘江流域数十年河流水文变化规律的研究表明,湘江及其支

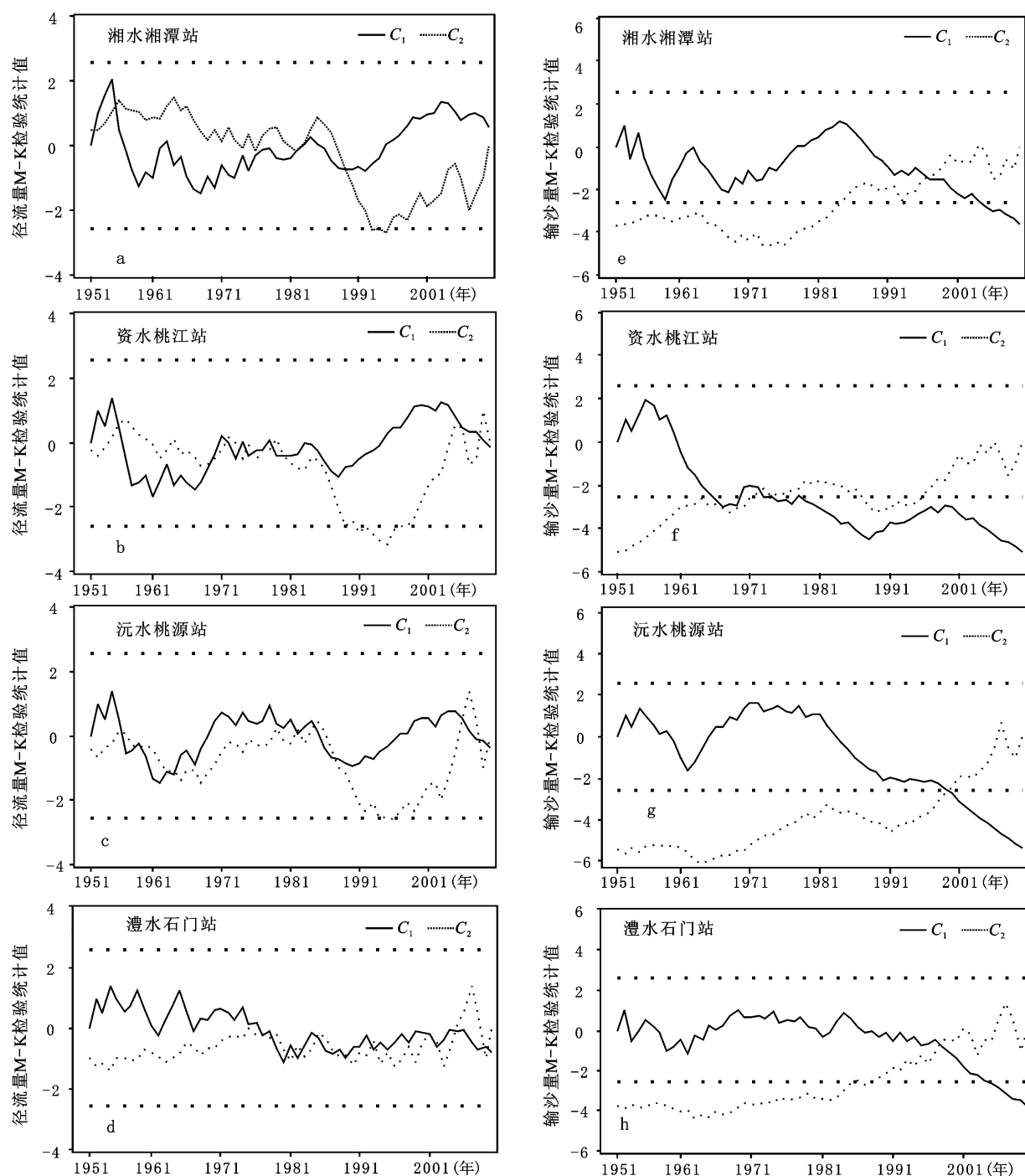


图3 1951~2009年湖南四水代表性水文站年径流量(a, b, c, d)和  
年输沙量(e, f, g, h)的M-K检验统计值

Fig.3 Statistical values of M-K test for annual runoff (a, b, c, d) and sediment discharge (e, f, g, h) of the representative hydrological stations of Four Rivers in Hunan Province in 1951–2009

流水位变化规律与流域降水变化完全一致<sup>[15]</sup>。四水在1990 s的最大径流量与同期的最大降水量是非常吻合的<sup>[16]</sup>。影响入湖径流因素众多,包括流域内水库、居民和工农业用水量变化等。至2008年,湖南省14个地州市共建有大中小型水库11 466

座,约占全国水库总数1/9,总库容为 $392.6 \times 10^8 \text{m}^3$ <sup>[17]</sup>,占1951~2009年湖南四水多年平均径流23.5%。同时,随工农业发展和居民生活水平提高,用水量呈持续增长状态,如2009年湖南规模工业企业取水总量 $68.02 \times 10^8 \text{m}^3$ ,比2005年增长3.07%(<http://www.>



hunan.gov.cn/zwgk/tjsj/sjfxjd/201005/t20100505\_206096.html)。因此,湖南四水入湖径流无明显的上升或下降趋势说明湖南四水流域产水量大,水系发达,水利工程蓄水和工农业用水量的增加未能对四水河流整体水文特征及其系统功能产生根本性的影响。

## 4.2 年输沙量

湖南四水年输沙量变化的原因可分两个方面,一是自然因素(如降雨)导致的年径流量变化;二是人类活动干扰。泥沙移动是伴随水文而发生的自然现象,即年径流量对年输沙量的调控作用明显。尽管湖南四水入洞庭湖的年径流量和年输沙量变化较复杂,均表现出年径流与年输沙量变化趋势高度一致现象,如1980s以前湘水湘潭站、资水桃江站以及澧水石门站及1960s以后沅水桃源站。

湘水湘潭站双累积曲线只有1991年一个转折点(图4a)。经计算,1991~2009年共减少泥沙输入 $11\,095\times 10^4\text{t}$ ,年平均为 $584\times 10^4\text{t}$ 。在四水流域,470余座大中型水库的建设是影响年输沙量的主要因素之一<sup>[18]</sup>。在湘水流域,全省最大的东江水库(库容为 $91.48\times 10^8\text{m}^3$ ,占多年平均径流的13.9%)于1987年开始二次建设,于1991年开始蓄水发电,

1992年全面竣工。建成运行后的东江水库对输沙量的减少作用非常明显,致使1993~2002年间湘潭站年输沙量比多年平均少17.9%,双累积曲线也在蓄水的当年发生趋势性变化。

资水桃江站年径流量和年输沙量的双累积曲线有三个转折点,即1961、1981和1997年(图4b)。经计算,从1961年到1981年共减少泥沙输入总量为 $5\,639\times 10^4\text{t}$ ,年平均为 $282\times 10^4\text{t}$ ,减沙效应最为明显;1982~1998年共减少泥沙输入总量为 $942\times 10^4\text{t}$ ,年平均为 $55\times 10^4\text{t}$ ;1999~2009年共减少泥沙输入总量为 $1\,105\times 10^4\text{t}$ ,年平均为 $111\times 10^4\text{t}$ 。资水干流的柘溪水库库容为 $35.65\times 10^8\text{m}^3$ ,占多年平均径流的15.6%,于1958年开始建设,1961年2月开始蓄水,1962年开始发电,这一工程的建设是导致桃江站双累积曲线最明显变化的最主要原因。在资水流域,陆续建成的中型水库有40座,总库容达 $19\times 10^8\text{m}^3$ ,占多年平均径流的8.3%,大量中型水库的综合作用是1982和1998年转折点形成主要原因。

沅水桃源站年径流量和年输沙量的双累积曲线有两个转折点,即1979和1997年(图4c)。经计算,1980~1997年共减少泥沙输入总量为 $11\,175\times 10^4\text{t}$ ,年平均为 $621\times 10^4\text{t}$ ;1998~2009年共减少泥沙

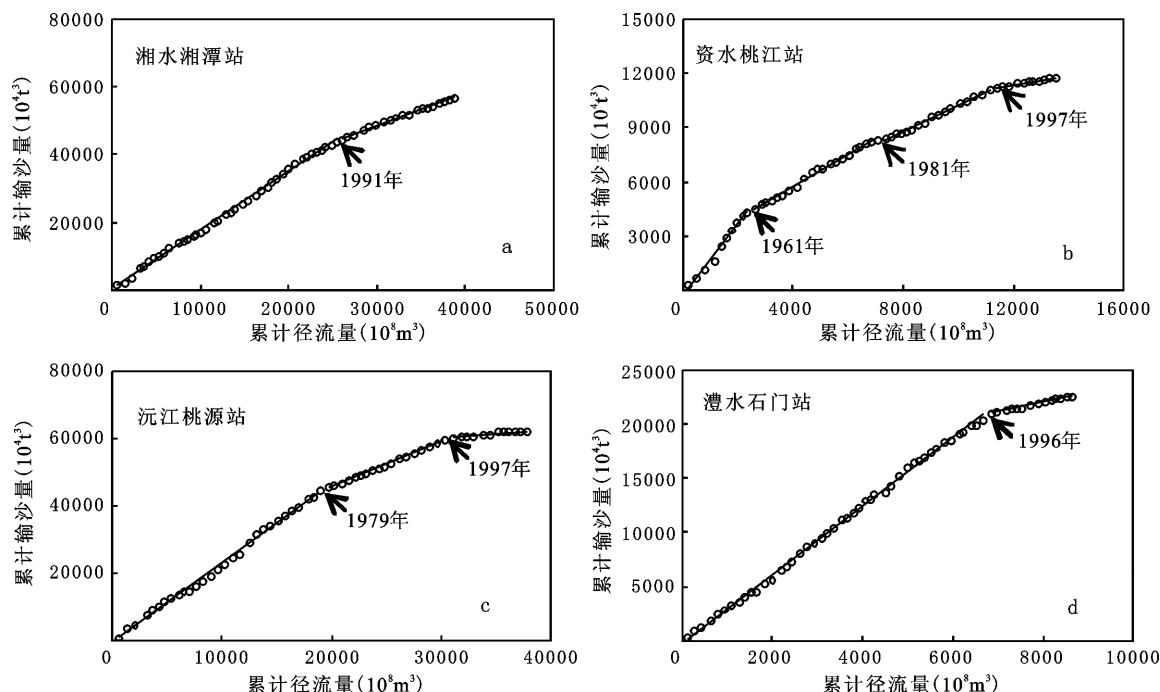


图4 1951~2009年湖南四水年径流量和年输沙量双累积曲线变化

Fig.4 Double mass analysis between annual runoff and sediment discharge of Four Rivers of Hunan Province in 1951-2009

输入总量为  $7\,439 \times 10^4 \text{t}$ , 年平均为  $620 \times 10^4 \text{t}$ 。沅江支流的风滩水库(库容为  $16.76 \times 10^8 \text{m}^3$ , 占多年平均径流的 2.6%)于 1970 年开始建设, 于 1978 年建成蓄水发电, 这一工程是 1979 年转折点形成的主要原因。此外, 沅江干流的五强溪水库(库容为  $42.9 \times 10^8 \text{m}^3$ , 占多年平均径流的 6.7%)于 1989 年开始建设, 于 1994 年建成蓄水发电, 这一水库的建成是 1997 年转折点形成的主要原因。同时, 1998 年以后陆续建成的凌津滩水库(库容为  $6.34 \times 10^8 \text{m}^3$ )、碗米坡水库(库容为  $3.78 \times 10^8 \text{m}^3$ )、洪江水库(库容为  $3.2 \times 10^8 \text{m}^3$ )和蟒塘溪水库(库容为  $1.53 \times 10^8 \text{m}^3$ )对输沙量的下降也有一定作用, 体现了水库群的综合减沙效应, 对 1997 年转折点的形成有一定的推动作用。

澧水石门站年径流量和年输沙量的双累积曲线仅在 1996 年形成转折点(图 4d)。经计算, 1997~2009 年共减少泥沙输入总量为  $4\,616 \times 10^4 \text{t}$ , 年平均为  $355 \times 10^4 \text{t}$ 。澧水支流的江垭水库(库容为  $17.41 \times 10^8 \text{m}^3$ , 占多年平均径流的 11.9%)于 1993 年开始建设, 于 1997 年建成, 是形成这一转折点的主要原因。

此外, 1980 s 以来开展的植树造林活动使湖南省的森林面积不断增加, 森林覆盖率由 1983 年的 40.2% 提高为 2007 年的 51.6%<sup>[19]</sup>, 森林的大面积增加有助于提高四水流域的水土保持功能, 减少水土流失, 降低四水的输沙量。因此, 径流量偏小、森林面积的增加以及大中型水库的综合作用可能是导致 2001~2009 年湖南四水入洞庭湖年输沙量下降的主要原因。

## 5 结 论

1) 59 a 来湖南四水入洞庭湖年径流量存在多个上升—下降过程, 但无明显的增加或减少趋势。虽然四水年输沙量也存在多个上升—下降过程, 但总体上呈下降趋势。

2) 年输沙量突变分析表明, 59 a 来湘、资、沅、澧四水的突变时间分别为 1996、1973~1974、1997~1998、1998 年, 突破 95% 置信区间的时间分别为 1999、1963、1988、2001 年, 其中资水和沅水的突变趋势比湘水和澧水的更强。

3) 双累积曲线法消除径流量的影响后表明, 大中型水库的建设是年输沙量减少的主要原

因。此外, 水土保持工程的实施、大中型水库建设以及径流量的减少等综合作用是 2001 年后输沙量减少的主要原因。

## 参考文献:

- [1] 谢永宏, 王克林, 任 勃, 等. 洞庭湖生态环境的演变、问题及保护措施[J]. 农业现代化研究, 2007, **28**(6): 678~681.
- [2] Chang J, Li J B, Lu D Q, et al. The hydrological effect between Jingjiang River and Dongting Lake during the initial period of Three Gorges Project operation[J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, **20**: 771~786.
- [3] 门宝辉, 刘昌明, 夏 军, 等. 南水北调细线一期工程调水区径流量与影响因子关系分析——以达曲为例[J]. 地理科学, 2006, **26**(6): 674~681.
- [4] Jacky C. Sediment concentration changes in runoff pathways from a forest road network and the resultant spatial pattern of catchment connectivity[J]. Geomorphology, 2005, **68**: 257~268.
- [5] 徐海量, 叶 茂, 宋郁东. 塔里木河源流区气候变化和年径流量关系初探[J]. 地理科学, 2007, **27**(2): 219~224.
- [6] 李子君, 李秀彬. 近 45 年来降水变化和人类活动对潮河流域年径流量的影响[J]. 地理科学, 2008, **28**(6): 809~813.
- [7] 陈 莹, 许有鹏, 尹义星. 土地利用/覆被变化下的暴雨径流过程模拟分析——以太湖上游西苕溪流域为例[J]. 地理科学, 2009, **29**(1): 117~123.
- [8] 刘宇峰, 孙 虎, 原志华. 近 60 年来汾河入黄河水沙演变特征及驱动因素[J]. 山地学报, 2010, **28**(6): 668~673.
- [9] 王 钧, 蒙古军. 黑河流域近 60 年来径流量变化及影响因素[J]. 地理科学, 2008, **28**(1): 83~88.
- [10] Zhang Q, Xu C, Stefan B. Sediment and runoff changes in the Yangtze River basin during past 50 years[J]. Journal of Hydrology, 2006, **331**: 511~523.
- [11] 孙 鹏, 张 强, 陈晓宏, 等. 鄱阳湖流域水沙时空演变特征及其机理[J]. 地理学报, 2010, **65**(7): 828~840.
- [12] 许炯心, 孙 季. 长江上游重点产沙区产沙量对人类活动的响应[J]. 地理科学, 2009, **27**(2): 211~218.
- [13] 水利部长江水利委员会. 长江泥沙公报 2003~2009[M]. 武汉: 长江出版社, 2003~2009.
- [14] 符宗斌, 王 强. 气候突变的定义和检验方法[J]. 大气科学, 1992, **16**(6): 482~493.
- [15] 李景保, 吴桂生, 刘晓清. 近数十年湘江流域河流水文变化规律[J]. 热带地理, 1997, **17**(3): 295~302.
- [16] 张剑明, 黎祖贤, 章新平. 1960~2005 年湖南省降水的变化[J]. 气候变化研究进展, 2008, **4**(2): 101~105.
- [17] 戴乐平. 湖南统计年鉴(2009) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2009.
- [18] 叶泽纲. 湖南省大型水库特点及防洪格局[J]. 中南水力发电, 2003, (1): 52~57.
- [19] 覃红燕, 谢永宏, 邹冬生. 湖南省农业洪旱灾害演变趋势和成因及防灾减灾措施[J]. 农业现代化研究, 2011, **32**(2): 101~105.

## Changes of Runoff and Sediment Discharge into Dongting Lake from the Four Rivers in Hunan Province

QIN Hong-yan<sup>1</sup>, XIE Yong-hong<sup>2</sup>, ZOU Dong-sheng<sup>1</sup>

(1. College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China;

2. Dongting Lake Station for Wetland Ecosystem Observation and Research, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410125, China)

**Abstract:** On the basis of hydrological data from 1951 to 2009 of four representative gauging stations (Xiangtan, Taojiang, Taoyuan, Shimen), the changes of runoff and sediment discharge into Dongting Lake from the Four Rivers (Xiang River, Zi River, Yuan River and Li River) in Hunan Province were investigated using Mann-Kendall trend test, moving average value and double mass analysis. The results showed that annual runoff was highest in Xiang River ( $657 \times 10^8 \text{ m}^3$ ), intermediate in Yuan River ( $640 \times 10^8 \text{ m}^3$ ) and Zi River ( $229 \times 10^8 \text{ m}^3$ ), and lowest in Li River ( $147 \times 10^8 \text{ m}^3$ ). However, the changes of annual runoff of the Four Rivers were insignificant ( $P > 0.05$ ), with several up-down processes. Annual sediment discharge was highest in Yuan River ( $1\,051 \times 10^4 \text{ t}$ ), intermediate in Xiang River ( $959 \times 10^4 \text{ t}$ ) and Li River ( $382 \times 10^4 \text{ t}$ ), and lowest in Zi River ( $199 \times 10^4 \text{ t}$ ). The annual sediment discharge from the Four Rivers showed a significantly decreasing trend generally ( $P < 0.001$ ). Changes of annual runoff and annual sediment discharge were consistent in Xiang River before 1980s, in Zi River after 1960s, in Yuan River before 1980s and in Li River before 1990s. Moreover, the time of abrupt change in annual sediment discharge was different among the Four Rivers, with Xiang River in 1996, Zi River in 1973-1974, Yuan River in 1997-1998 and Li River in 1998, and the time of abrupt beyond 95% confidence interval was 1999, 1963, 1988, 2001 in Xiang River, Zi River, Yuan River and Li River, respectively. Double mass analysis between annual runoff and annual sediment discharge showed that Xiang River had one turning point in 1991, Zi River three points in 1961, 1981 and 1997, Yuan River two points in 1979 and 1997, Li River one point in 1996. Turning points of annual sediment discharge in Four Rivers were closely related to the construction of large-scale reservoirs. The reduction of annual runoff, increase of vegetation cover and construction of medium- and large-scale reservoirs were the main reasons accounting for the great reduction of annual sediment discharges of Four Rivers after 2001.

**Key words:** Four Rivers; abrupt change; hydrological process; reservoir