

近 150 年来长江入海流量变化的趋势、 阶段与多尺度周期

万智巍¹, 连丽聪¹, 贾玉连¹, 洪祎君², 蒋梅鑫¹

(1. 江西师范大学 地理与环境学院 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西 南昌 330022;

2. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101)

摘要: [目的] 分析近 150 a 来长江入海流量变化的长期趋势、阶段性、突变性以及多尺度周期变化过程, 为揭示长江入海流量的长期变化特征提供理论支撑。[方法] 基于长江汉口站长时间实测水文数据, 利用现代汉口站和大通站流量一元回归模型, 恢复以长江大通站为代表的 1865—2014 年长江入海流量序列。综合利用多种方法开展多尺度分析。[结果] 长江近 150 a 入海流量序列表明, 平均值为 $29\,432\text{ m}^3/\text{s}$, 变异系数为 14.72%。趋势分析表明, 近 150 a 来长江入海流量呈现下降趋势, 变化速率为 $-23.7\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{a})$ ($p < 0.01$)。阶段性分析表明, 长江入海流量变化具有一定的波动性特征, 大体上以 1955 年为分界点, 在 1865—1955 年为流量上升阶段, 1955—2014 年为流量下降阶段。突变性分析表明, 长江入海流量在 1940s 发生了突变, 由丰水期转变为枯水期。多尺度周期性分析表明, 长江入海流量变化过程表现出明显的非线性和非平稳性, 具有 150 和 60 a 的长期趋势, 以及 34, 22, 3~7 a 的中高频振荡周期, 其中 22 a 周期最为明显, 可以通过 99% 置信度检验。[结论] 近 150 a 来长江入海流量总体上呈下降趋势; 其中自 1955 年以来长江入海流量处于一个显著的下降期; 长江流域降水量变化是影响长江入海径流变化的重要因素。

关键词: 长江入海流量; 长期趋势; 阶段性; 突变性; 周期性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)02-0014-05

中图分类号: TV121

文献参数: 万智巍, 连丽聪, 贾玉连, 等. 近 150 年来长江入海流量变化的趋势、阶段与多尺度周期[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 14-18. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.02.003. Wan Zhiwei, Lian Licong, Jia Yulian, et al. Trend phases and periodic changes of discharges from Yangtze River in past 150 years[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(2): 14-18.

Trend Phases and Periodic Changes of Discharges from Yangtze River in Past 150 Years

WAN Zhiwei¹, LIAN Licong¹, JIA Yulian¹, HONG Yijun², JIANG Meixin¹

(1. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research Ministry of Education, School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang, Jiangxi 330022, China; 2. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of

Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: [Objective] The long-term trend, staged, abrupt, and multi-scale periodic variations of the discharge from the Yangtze River into the sea were analyzed in the past 150 years to provide theoretical support for revealing the long-term variation characteristics of the flow of the Yangtze River into the sea. [Methods] Based on the hydrological data of the Hankou station in the Yangtze River, this paper reconstructed the runoff series of the Datong Station, Yangtze River from 1865 to 2014, by using the regression model derived from Hankou station and Datong station, and made use of a variety of methods to carry out multi-scale

收稿日期: 2017-08-21

修回日期: 2017-10-16

资助项目: 江西省自然科学基金项目“全新世中期江西清江盆地古人类生计模式及其对环境变化的响应”(20161BAB213075); 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室开放基金项目(PK2015003); 江西省重大生态安全问题监控协同创新中心项目(JXS-EW-00); 国家自然科学基金项目(41761045); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ150305); 江西师范大学博士启动基金项目(6902)

第一作者: 万智巍(1984—), 男(汉族), 江西省南昌市人, 博士、讲师, 主要从事全球变化与水资源方面的研究。E-mail: wzw3392008@sina.com。

通讯作者: 蒋梅鑫(1961—), 男(汉族), 江西省泰和县人, 学士, 教授, 硕导, 主要从事可持续发展方面的研究。E-mail: jiangmx610519@126.com。

analysis. [Results] The discharges from Yangtze River in nearly 150 years had an average flow of $29\,432\text{ m}^3/\text{s}$, and had a coefficient of variation of 14.72% . The trend analysis showed that the discharges from Yangtze River in the past 150 years showed a decreasing trend with rate of $-23.7\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{a})$ ($p<0.01$) per year. Although, the periodic analysis showed that the change of the series had fluctuation characteristic. Two obvious different stages were recognized and it was separated at 1955. From 1865 to 1955, it was at a rising stage; from 1955 to 2014, it was at a descending stage. Abrupt analysis showed that the series had an abrupt point in 1940s, around which the water flow changed from wet period into dry term. The multi-scale periodic analysis showed that the series were obvious non-linear and nonstationary, with 150 years and 60 years of long-term trends, and with 34 years, 22 years, 3 to 7 years of high frequency oscillation cycles. Among of the cycles, the most obvious was 22-year one, which can be tested at 99% confidence level. [Conclusion] In the past 150 years, the flow of Yangtze River into the sea had been in a downward trend, especially since 1955, it declined significantly. The variation of precipitation in the Yangtze River basin was an important factor that affected the runoff in the Yangtze River.

Keywords: discharges from Yangtze River; long term trend; stage; abrupt; periodic

长江是中国第一大河、世界第三大河,全长 $6\,371\text{ km}$,流域面积 $1.80\times 10^6\text{ km}^2$ 。长江流域大部分地区位于东亚季风区的核心地带,气候湿润、年平均降雨量在 $1\,000\text{ mm}$ 以上,有超过 $1/2$ 的降水转化为径流并最终汇入东海^[1]。大通站是海洋潮汐所能达到的上界,控制着长江流域 94% 的流域面积。长江自大通以下即为感潮河段,因此一般以大通站的流量作为长江入海流量^[2]。河流流量以及水文情况是整个区域降水、径流、蒸发以及水资源综合利用的整体体现,因此长江入海流量可以作为一个重要指标反映长江流域的总体水文状况。以往的研究表明^[3-4],长江流量在 1950s—1990s 为下降趋势,之后则转为上升趋势。夏雪瑾等^[5]对长江大通站流量的研究表明,大通站平均流量自 1978 年以来呈上升趋势,但是并不显著。由于中国大部分地区系统水文观测始于 1949 年之后,因此有关长江入海流量的研究大多起始于 1950 年有实测水文数据之后^[6]。为了探讨更长时间尺度上的流量变化规律和趋势,有必要利用更长时间的水文资料,研究百年尺度以上的长江入海流量变化。本研究拟利用 1865 年以来长江中游汉口站实测流量数据,基于近 50 a 大通站和汉口站流量一元回归模型,恢复近 150 a 来长江入海流量年平均序列。并以此为基础综合利用线性倾向法和 MK 趋势检验法^[7]进行趋势分析,利用累积距平法^[8]进行阶段分析,利用 MK 突变检验^[7]进行突变分析,并基于 MTM 多窗谱分析^[9]、小波功率谱^[10]、EEMD 集合经验模态分解^[11-12]等方法进行多尺度周期分析。

1 数据与方法

1.1 流量数据

所利用的流量数据主要来自相关年度中华人民

共和国水文年鉴和长江泥沙公报,主要包括 1950—2014 年长江大通水文站年均流量资料、1950—2014 年长江汉口站年均流量资料;1865—1949 年长江汉口站年均流量资料来源于长江水利委员会。

1.2 模型与流量重建

尽管长江大通站自 1923 年开始进行流量观测,但是 1930s—1940s 期间的相关数据有缺失^[13],因此选取大通站 1950—2014 年流量序列进行模型与流量重建。利用 SPSS 20 软件的游程检验(runs test)对序列进行一致性检验^[14],结果表明 $p=0.252>0.05$,因此可以在 95% 置信水平下认为序列具有一致性。另外,相关学者对三峡工程实施前后长江径流的变化趋势研究表明其变化无显著趋势^[15],刘嘉琦等^[16]对大通站近 60 a 来的流量数据分析表明,径流表现为无突变点的缓慢下降趋势。因此本研究利用具有连续水文数据的汉口站和大通站 1950—2014 年年均流量数据进行一元回归分析(图 1)。转换方程为:

$$y=1.395x-3\,021.1, r^2=0.889,$$

$$F\text{ 统计量}=504.8, p<0.001$$

由此可将方程可以通过 99.9% 显著性检验。1950—2014 年共 65 a 的数据表明,汉口站流量与大通站流量相关系数为 0.943 。由图 1 可以看出,除极少年份外,几乎所有的年份汉口站与大通站流量散点图都分布于 95% 置信区间范围之内。因此,通过该转换方程可以 1865—1949 年汉口站流量实测数据,恢复同一时期大通站流量。

2 结果与分析

2.1 入海流量序列

通过转换方程和相关实测数据,恢复了长江大通站 1865—2014 年年均流量(图 2)。近 150 a 的流量

均值为 $29\ 432\ \text{m}^3/\text{s}$, 变异系数为 14.72% , 其中最大值为 1954 年的 $43\ 094\ \text{m}^3/\text{s}$, 最小值为 1900 年的 $17\ 146\ \text{m}^3/\text{s}$ 。

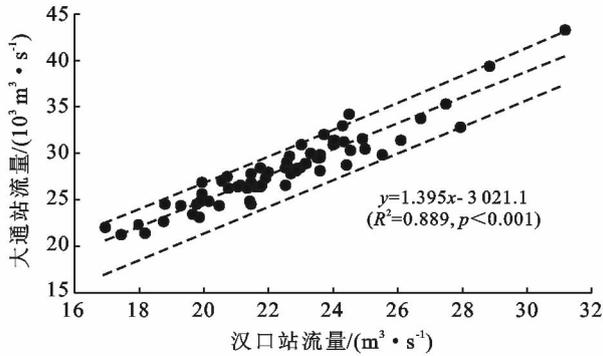


图 1 汉口站与大通站流量散点图

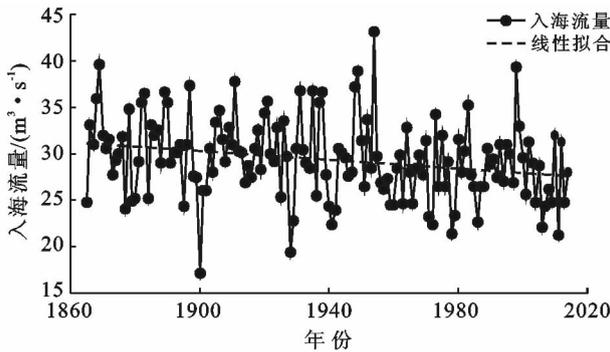


图 2 1865—2014 年长江入海流量序列

2.2 趋势

线性倾向分析表明(图 2), 近 150 a 来大通站流量呈现下降趋势, 速率为 $-23.7\ \text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ ($p = 0.003 < 0.01$)。进一步的 M-K 趋势检验显示, Z 统计量为 -3.26 , Z 的绝对值 > 2.32 通过 99% 置信度检验^[17-18]。因此, 可以认为在 99% 置信度下近 150 a 长江入海流量具有下降趋势。

2.3 阶段

累积距平分析结果表明(图 3), 流量变化具有一定的波动性特征, 经历了多次波动性振荡, 但是大体上以 1955 年为分界点, 在 1865—1955 年为流量上升阶段, 1955—2014 年为流量下降阶段。

2.4 突变检验

MK 突变检验表明(图 4), 在 1940, 1943 和 1949 年等年份, UF 统计量曲线和 UB 统计量曲线存在交点, 且位于 ± 1.96 范围内, 说明可以通过 95% 置信度检验。因此, 可以认为长江入海流量在 1940s 发生了突变。曾小凡等^[19] 对近 50 a 的长江流域 146 个气象站降水数据的统计分析和奇异谱分析的结果表明, 长江中游和下游地区降水有增加趋势, 并在 1970s 发生

了突变。之所以降水和径流两个方面发生突变的时间段不一致, 很可能是由于降水资料长度为 50 a 左右, 而本文重建的大通站流量为 150 a。

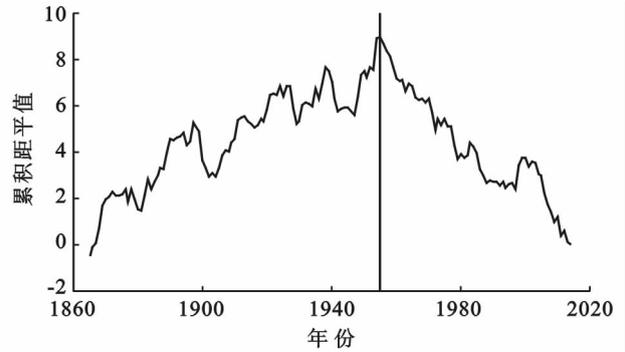


图 3 1865—2014 年长江入海流量序列的累积距平

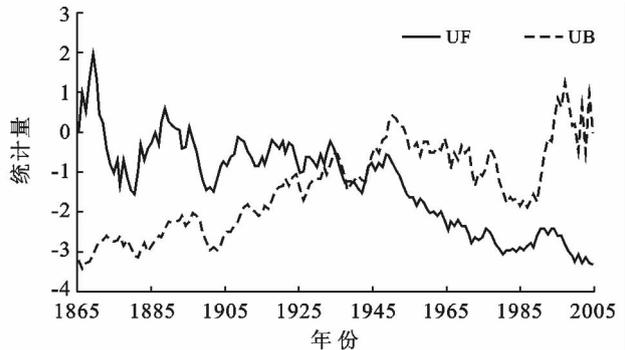


图 4 1865—2014 年长江入海流量序列的 MK 突变检验

2.5 周期分析

利用 MTM 多窗谱分析对近 150 a 来大通站流量序列进行周期分析, 结果表明(图 5), 存在 34, 22, 3.1 和 2.4 a 周期, 其中 22 a 周期可以通过 99% 置信度检验。利用 Morlet 小波分析方法对近 150 a 来大通站流量序列进行周期检测(图 6), 同样可以发现序列具有 2~4 a, 8~12 a, 16~32 a 周期。有较为详细的水文资料以来, 长江经历了总体上的 1950s, 1990s 丰水期; 1970s 和 2000 年以来的枯水期, 但是在 1998—2000 年出现了持续的正增长趋势^[16]。

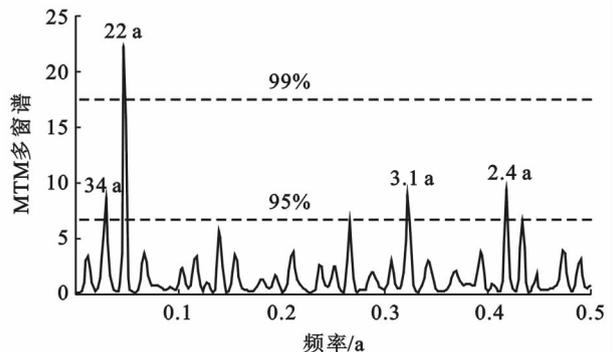


图 5 1865—2014 年长江入海流量序列的多窗谱分析

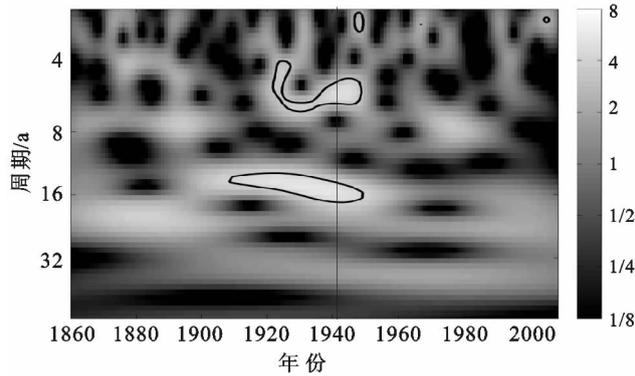


图 6 1865—2014 年长江入海流量序列的小波分析

利用 EEMD 方法对原始序列进行分解,可以获得 IMF1~6 等 6 个分量以及一个趋势项 (RES)。IMF1~6 表示大通站近 150 a 流量序列在不同时间尺度下的周期振荡过程,RES 项代表了原始序列的长期趋势。

RES 项呈现出单调下降的趋势,与线性倾向法

和 MK 趋势检验得出的长江入海流量长期下降的趋势相吻合。另一方面,相关研究指出^[11],如果趋势项为单调上升或单调下降的趋势则说明原始信号具有明显的非平稳性,这也说明长江入海流量的变化过程属于非线性和非平稳性特征。对各项 EEMD 分解系数的统计分析表明(表 1),近 150 a 来长江入海流量具有 3~7 a,14~30 a 以及 60 和 150 a 的长期趋势。在各项系数的最大振幅方面,随着分解的进一步深入,各项系数的振幅逐渐降低,这说明 EEMD 分解在降低原始序列的非平稳性方面具有较好的表现。IMF1~2 具有较高的振幅,代表着原始序列中高频振荡部分,其方差解释量之和为 69.5%。IMF3~4 的振荡幅度已经大幅下降,方程解释量之和为 17.8%,代表了原始序列中的中频振荡部分。其余各项分解系数的方差解释量之和只有 12.7%,代表了原始序列中的低频振荡部分和长期发展趋势。在相关系数方面,IMF1~4 与原始序列具有较高的相关性。

表 1 IMF 分量的主要统计值

| IMF 分量 | IMF1 | IMF2 | IMF3 | IMF4 | IMF5 | IMF6 | RES |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 主周期/a | 2.9 | 6.9 | 14.2 | 30 | 60 | 150 | — |
| 最大振幅/($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) | 1.243 7 | 0.945 7 | 0.891 9 | 0.428 9 | 0.266 5 | 0.086 4 | 0.453 5 |
| 方差解释量/% | 51.9 | 17.6 | 12.8 | 5.0 | 2.7 | 0.4 | 9.4 |
| 相关系数 | 0.71 | 0.53 | 0.37 | 0.29 | 0.08 | -0.11 | 0.24 |

3 讨论与结论

3.1 讨论

本研究基于恢复的大通站流量序列,利用线性倾向估计、MK 趋势检验和 EEMD 分解的趋势项,证实了近 150 a 来长江入海流量处于下降趋势。相关研究^[2,20]表明,1900s 以来的长江流域降水减少是造成入海径流缓慢下降的原因之一。张晓娅等^[21]的研究表明,整个长江流域平均降水量减少了 1% 左右,长江入海径流同样减少约 1%。齐冬梅等^[22]对 1960—2005 年长江上游通天河流域直门达水文站流量实测数据的研究表明,长江上游径流减少与降水量变化趋势一致。由此可见,长江流域降水量变化是影响长江入海径流变化的重要因素。

其他的实测流量数据同样表明^[4,16],长江流域各水文站的流量长期变化也处于下降趋势。如时兴合等^[23]的研究表明,近 50 a 以来长江上游径流量呈减小趋势;Wang 等^[24]对长江中游汉口站流量序列的研究表明,百年尺度上其流量变化具有下降趋势。结合本文重建的长江入海径流 150 a 的长时间序列,可以认为自 1865 年以来长江处于一个显著的流量下降期。

3.2 结论

(1) 1950—2014 年汉口站和大通站流量的一元回归分析表明,二者相关性明显,通过 99.9% 置信度检验,可以利用汉口站的数据恢复大通站流量。

(2) 以大通站为代表的长江近 150 a 入海流量序列表明,流量均值为 $29\,432 \text{ m}^3/\text{s}$,变异系数为 14.72%,其中最大值为 1954 年的 $43\,094 \text{ m}^3/\text{s}$,最小值为 1900 年的 $17\,146 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

(3) 趋势分析表明,近 150 a 来长江入海流量呈现下降趋势,速率为 $-23.7 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ ($p=0.003 < 0.01$)。

(4) 阶段性分析结果表明,长江入海流量变化具有一定的波动性特征,大体上以 1955 年为分界点,在 1865—1955 年为流量上升阶段,1955—2014 年为流量下降阶段。

(5) 突变性分析表明,长江入海流量在 1940s 发生了突变,由丰水期转变为枯水期。

(6) 周期性分析表明,长江入海流量变化过程表现出明显的非线性和非平稳性,具有 150 和 60 a 的长期趋势,以及 34 a,22 a,3~7 a 的中高频振荡周期,其中 22 a 周期最为明显,可以通过 99% 置信度检验。

[参 考 文 献]

- [1] 任美镔. 中国自然地理纲要[M]. 北京: 商务出版社, 1999: 1-430.
- [2] 张瑞, 汪亚平, 潘少明. 近 50 a 来长江入海径流量对太平洋年代际震荡变化的响应[J]. 海洋通报, 2011, 30(5): 572-577.
- [3] 刘嘉琦, 龚政, 张长宽. 长江入海径流量突变性和趋势性分析[J]. 人民长江, 2013, 44(7): 6-10.
- [4] 梁川, 侯小波, 潘妮. 长江源高寒区域降水和径流时空变化规律分析[J]. 南水北调与水利科技. 2011, 9(1): 53-59.
- [5] 夏雪瑾, 徐健, 冯文静, 等. 长江入海流量趋势及大通—徐六泾流量关系探讨[J]. 中国水运, 2016, 37(6): 71-73.
- [6] 张瑞, 汪亚平, 潘少明. 近 50 年来长江入海径流量对太平洋年代际震荡变化的响应[J]. 海洋通报, 2011, 30(5): 572-577.
- [7] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 1-190.
- [8] 穆兴民, 李靖, 王飞, 等. 黄河天然径流量年际变化过程分析[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(2): 1-5.
- [9] Mann M E, Lees J M. Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series[J]. Climatic Change, 1996, 33(3): 409-445.
- [10] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61-78.
- [11] Huang Norden E, Shen Zheng, Long Steven R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903-995.
- [12] Wu Zhaohua, Huang Norden E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.
- [13] 沈焕庭. 长江河口物质通量[M]. 北京: 海洋出版社, 2001: 39-80.
- [14] 史卫东. 水文资料系列的一致性分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2001, 37(1): 22-25.
- [15] 燕然然, 蔡晓斌, 王学雷, 等. 三峡工程对下荆江径流变化影响分析[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(4): 490-495.
- [16] 刘嘉琦, 龚政, 张长宽. 长江入海径流量突变性和趋势性分析[J]. 人民长江, 2013, 44(7): 6-10.
- [17] 秦年秀, 姜彤, 原峰. 1990s 长江下游干流径流量演变趋势[J]. 湖泊科学, 2003, 15(S1): 138-146.
- [18] 侯迎, 郑芳, 邵议. 基于交叉小波的多尺度气候变化及其对径流的影响[J]. 水资源研究, 2016, 5(6): 564-572.
- [19] 曾小凡, 翟建青, 姜彤, 等. 长江流域年降水量的空间特征和演变规律分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 36(6): 727-732.
- [20] Dai Zhijun, Du Jinzhou, Zhang Xiaoling, et al. Variation of riverine material loads and environmental consequences on the Changjiang estuary in recent decades (1955—2008)[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(1): 223-227.
- [21] 张晓娅, 杨世伦. 流域气候变化和人类活动对长江径流量影响的辨识(1956—2011)[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(12): 1729-1739.
- [22] 齐冬梅, 李跃清, 陈永仁, 等. 气候变化背景下长江源区径流变化特征及其成因分析[J]. 冰川冻土, 2015, 37(4): 1075-1086.
- [23] 时兴合, 秦宁生, 许维俊, 等. 1956—2004 年长江源区河川径流量的变化特征[J]. 山地学报, 2007, 25(5): 513-523.
- [24] Wang Houjie, Yang Zuosheng, Wang Yan, et al. Reconstruction of sediment flux from the Changjiang to the sea since the 1860s[J]. Journal of Hydrology, 2008, 349(3): 318-332.