

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.01.018

1960—2005 年长江上游水文循环变化特征

刘 波¹,翟建青²,高 超³,姜 彤²

(1. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098;2. 中国气象局国家气候中心,北京 100081;
3. 安徽师范大学国土资源与旅游学院,安徽 芜湖 241000)

摘要:对长江上游水汽含量以及各边界水汽通量、水汽收支的变化特征进行分析,建立了长江上游水文循环概念模型,并通过分析水循环参数的变化特征讨论水文循环的陆面分支与大气分支之间的相互作用和变化过程.结果表明:长江上游为水汽汇区,净水汽收支为 23 790 t/s,纬向为水汽输出,纬向水汽通量减小趋势显著.整个上游地区水汽收支变化趋势不显著,水汽输入总体呈微弱减小趋势.尽管当地蒸散发形成的降水在区域总降水量中的贡献尚不足 10%,但蒸散发量对当地水文循环的作用正逐年增加.

关键词:水文循环;水汽收支;概念模型;长江上游

中图分类号:P339 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2012)01-0095-05

Variation of water cycle in upper reaches of Yangtze River from 1960 to 2005

LIU Bo¹, ZHAI Jian-qing², GAO Chao³, JIANG Tong²

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;
3. College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China)

Abstract: Variations of the water vapor content, water vapor flux, and water vapor budget in the upper reaches of the Yangtze River were analyzed, and a conceptual model of the water cycle was established in this study. Through analysis of the variation of water cycle parameters, the interaction and change process of the land surface branch and the atmosphere branch of the water cycle were studied. The results show that the water vapor was concentrated in the upper reaches of the Yangtze River, and the net water vapor input was 23 790 t/s. Water vapor flowed out in the latitudinal direction, and there was a significant declining trend of the water vapor flux in this direction. There was a slight variation in the water vapor budget in the upper reaches of the Yangtze River and a slightly decreasing trend of the water vapor input. Although the precipitation caused by the local evapotranspiration accounts for less than 10% of the total regional precipitation, it has an increasing effect on the local water cycle year by year.

Key words: water cycle; water vapor budget; conceptual model; upper reaches of Yangtze River

相对于地表水循环过程,水文循环的大气过程具有更大的空间尺度,对于流域水分循环起着至关重要的作用.长江上游由源头至湖北宜昌,长约 4 500 km,约占长江总长度的 70%,集水面积占流域总面积的 58.9%,河川径流量占全流域的 48%^[1].近几年,受到气候变化的影响,长江上游的洪涝、干旱^[2-3]等极端气候事件呈增加态势.而随着三峡工程的建设、南水北调工程的开工和长江上游流域经济的进一步发展,人们更加迫切需要全面了解整个长江上游的水循环规律及其长期变化特征^[4-5].

收稿日期:2011-01-14

基金项目:国家自然科学基金(40701028);中央高校基本科研业务费专项(2009B01514)

作者简介:刘波(1980—),女,山东东营人,讲师,博士,主要从事气候变化与水循环研究.E-mail:BOBOL3705@163.com

关于长江流域水分收支与水分循环年际变化的研究,主要分析流域旱涝与其水汽通道和水汽源汇之间的关系^[6-7],并且关于长江流域水汽输送的研究大多集中于长江中下游地区^[8-9],对长江上游的相关研究较为有限.而长江上游由于受多重气候的影响,旱涝灾害经常发生,且对周围地区的水分收支有重要影响.陶诗言等^[10]指出,高原对水汽通量的分布及其季节变率有很大影响.由于青藏高原独特的地形作用,夏季风从印度洋及南海洋面携带大量水汽经过长江上游地区,对该地区水文循环过程产生影响,同时间接影响我国其他地区的水汽循环特征.研究^[11]表明,美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析资料(简称NRA)的水分循环可以合理反映长江流域水分循环的季节、年际变化以及部分年代际气候变化特征.本文利用NRA资料分析长江上游流域各边界水汽输送以及水循环要素的变化特征.

1 数据与方法

本文所使用的大气水汽数据为NRA资料中1960—2005年的 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 空间分辨率下1次/6h网格资料,包括8层等压面(至300hPa)的水平风速和湿度、地面的水平风速和湿度以及地面气压资料.分别计算了垂直积分(考虑地形)的整层大气水汽含量和整层水汽输送量.降水量等气象资料来自国家气象局整编的47个国家标准气象站1960—2005年逐月观测成果;蒸散发量采用平流-干旱模型,根据上述气象资料计算求得,长江上游干流径流分析选用控制站宜昌的月径流数据^[15].

对时间序列低频振荡特征的分析采用Tome等^[12]提出的非线性趋势分析NLTF(non-linear trend forecast)方法.此外,通过对水文循环参数变化特征的分析,建立长江上游总的水文循环概念模型.本文水文循环参数的计算,采用刘国纬^[13]提出的一系列参数及相应公式:外来水汽形成的降水量

$$P_1 = \frac{P}{1 + E(2I)^{-1}} \tag{1}$$

当地蒸发形成的降水量

$$P_E = \frac{P}{1 + 2IE^{-1}} \tag{2}$$

式中: P ——区域降水量的面平均值; E ——区域蒸发量的面平均值; I ——水汽总输入量的面平均值.

水文内循环系数 K_E 表示当地蒸发的水汽 E 与其在区域内经过多次水分再循环过程所形成的降水量 P_E 的比值,反映了当地蒸发对区域内水文循环的作用.

$$K_E = \frac{P_E}{E} \tag{3}$$

水文循环系数

$$K = \frac{P_1}{P} \tag{4}$$

分析过程中采用的系数 $1 - K$,反映了当地蒸发形成的降水 P_E 对区域内总降水量的贡献.

2 结果分析

2.1 大气水文循环要素变化

通过对长江上游地区各方向边界月平均水汽通量变化过程(图1)的NLTF分析,可见水汽输送总体均呈减小趋势,且20世纪70年代前减小速率较大.东边界(图1(a))平均水汽通量为92100t/s,总体减小趋势显著,1974年前呈现迅速减小过程,水汽通量由1974年前的平均104200t/s减小到其后的86200t/s,平均线性倾向率高达 $-2510\text{t}\cdot\text{s}^{-1}/\text{a}$.西边界平均水汽通量为63800t/s,波动过程与东边界较为一致,但1974年后呈缓慢上升趋势.南、北边界的平均水汽通量分别为58200t/s和5500t/s,其中北边界1977年后水汽通量均值由11900t/s减小到1300t/s,水汽输出量显著减小,部分年份该边界转化为水汽输入边界.

各边界中,南边界为水汽主要输入边界,其中夏季输入量最大,但南边界水汽通量减小的趋势也非常显著,平均线性倾向率达到 $-1890\text{t}\cdot\text{s}^{-1}/\text{a}$,且南边界水汽通量减小的速率在各个季节中均为最快.各季节中东边界均为水汽主要输出边界,其中春季水汽通量最大,为109900t/s,夏季水汽通量最小,而夏季通量减小的趋势最为显著.北边界的水汽通量为各边界中最小,春季与冬季北边界通量转为负值,即北边界由水汽输出转化为水汽输入边界,其中冬季水汽输入量呈微弱增加趋势.从季节上看,夏季各边界水汽通量减小的幅度均为最大,而冬季各边界水汽通量减小最为缓慢.

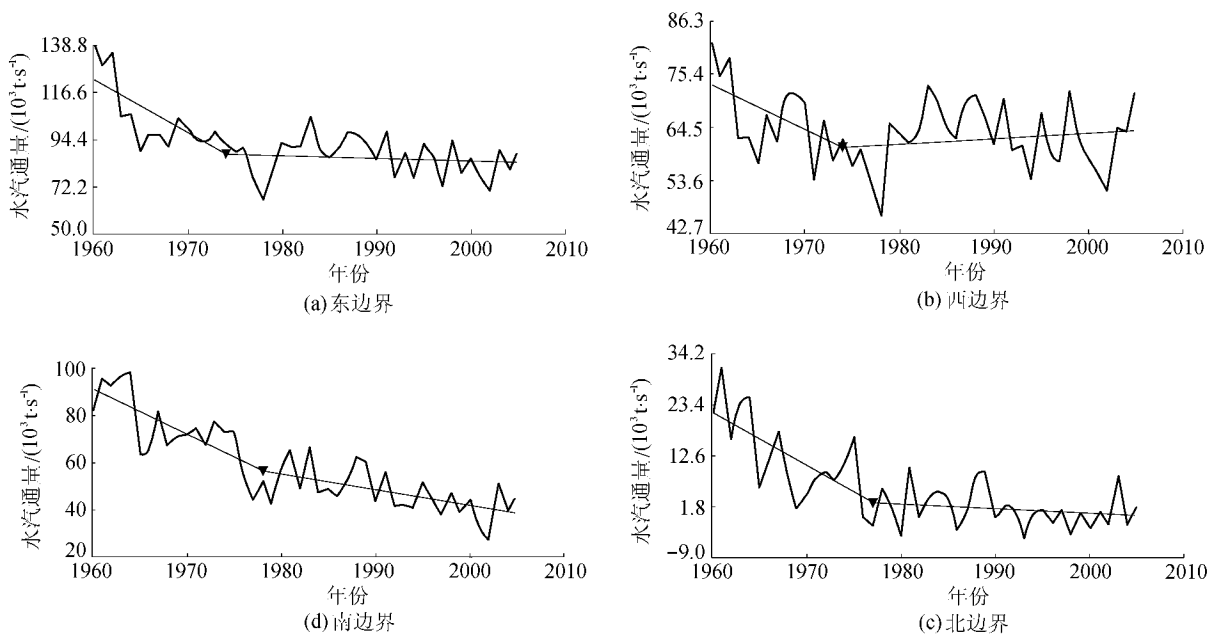


图 1 长江上游各边界水汽通量变化过程

Fig. 1 Variation of water vapor flux at four boundaries of upper reaches of Yangtze River

总的来看,长江上游地区水汽净收支为正,是水汽汇区.上游地区纬向为水汽输出向,纬向平均水汽输出量为 27 650 t/s,经向平均水汽输入量为 51 440 t/s,净水汽输入为 23 790 t/s.经向、纬向、净水汽收支年际变化过程如图 2 所示,整个上游地区纬向水汽通量减小趋势显著,平均线性倾向率为 $551 \text{ t}\cdot\text{s}^{-1}/\text{a}$,其中 20 世纪 70 年代前减小趋势非常显著,平均减小速率达到 $4 643 \text{ t}\cdot\text{s}^{-1}/\text{a}$.总的来看,长江上游地区水汽收支变化趋势不显著,水汽输入总体呈微弱减小趋势,线性倾向率为 $123 \text{ t}\cdot\text{s}^{-1}/\text{a}$.

2.2 水文循环概念模型的建立

根据上述分析,整个长江上游区年平均水汽总输入量为 122 550 t/s,折合水量 2 555.29 mm,929.36 mm 的总降水量中水汽来自外来源的为 847.23 mm,占总降水量的 91%;当地蒸散发形成的降水量为 84.99 mm,占总降水量的 9%.水文内循环系数 K_E 为 0.17,表明当地蒸散发的水汽对区域内水文循环的贡献率为 0.17.根据上述分析,建立了长江上游地区水文循环概念模型,如图 3 所示.图中: I 为水汽总输入量; O 为水汽总输出量; R 为流域出口径流量; O_E 为当地蒸发形成的水汽输出量.

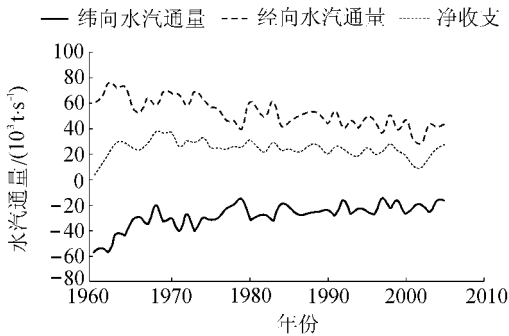


图 2 长江上游经向、纬向水汽通量及净收支

Fig. 2 Water vapor flux in longitudinal and latitudinal directions and net water vapor budget in upper reaches of Yangtze River

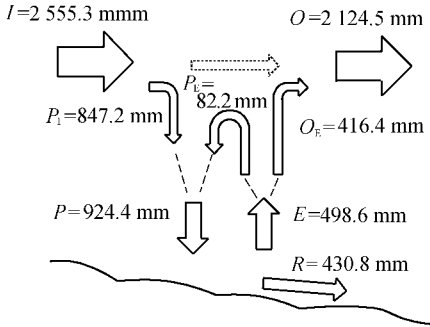


图 3 长江上游地区水文循环概念模型

Fig. 3 Conceptual model of water cycle of upper reaches of Yangtze River

在空间上,长江源头区年水汽输入总量为 8 650 t/s,折合水量 1 202.34 mm.该区域 377.62 mm 的年降水量中有 334.96 mm 的水量来自外界水汽输送.当地蒸散发形成的降水量为 42.41 mm,占总降水量的 11%.当地蒸散发量对区域水循环的贡献为 0.14.横断山区年水汽输入总量为 76 460 t/s,折合水量 3 985.44 mm.该区域

年降水量 822.21 mm,其中当地蒸散发形成的降水量为42.76 mm. 该地区蒸散发量对区域水循环的贡献显著小于源头区,水文内循环系数为 0.10. 四川盆地区年水汽输入总量为 100 210 t/s,折合水量4 642.90 mm. 该区域年降水量 1 061.36 mm,其中当地蒸散发形成的降水量为 62.75 mm. 该地区蒸散发量对区域水循环的贡献相对较小,水文内循环系数 K_E 为 0.06.

2.3 水文循环参数变化特征

水文内循环系数 K_E 表示当地蒸发的水汽 E 与其在区域内经过多次水分再循环过程所形成的降水量 P_E 的比值,反映了当地蒸发对区域内水文循环的作用,是代表陆面与大气水循环联系的重要参数之一,因此,围绕水文内循环系数 K_E ,以长江上游及其各子区域为对象,对 K_E 的时间变化特征进行了分析.

分析结果(图4)表明,长江上游水文内循环参数总体呈增加趋势,1977年前,上游内循环参数快速增加,其后增加幅度减缓. 各区域的增加过程有所不同:长江源头区水文内循环系数增加的平均速率为 0.001 29/a,1981年前增速较快,线性倾向率为 0.002 21/a,其后略有放缓;横断山区 K_E 增加幅度相对较小,平均速率为 0.000 50/a,变化过程总体存在 2 个阶段,1988年前 K_E 变化缓慢,平均值为 9.4%,其后增加幅度有所加快,尤其 20 世纪 90 年代后, K_E 快速增加,1998年后平均值增加到 11.3%. 四川盆地水文内循环参数的变化过程明显地分为 2 个阶段,1977年前, K_E 快速增加,平均增速达到 0.002 57/a,随后变化趋势有所放缓,但增加特征仍然非常显著, K_E 的平均值由 20 世纪 60 年代的 0.0877 增长到 20 世纪 90 年代的 0.1279. 对于整个长江上游,由于四川盆地的面积最大,且水分循环特征最活跃,因此上游的水循环参数变化特征与四川盆地较为一致.

根据前文分析可知,长江上游西边界与南边界水汽输入量均呈减小趋势,总的水汽收支也具有一定的减小特征,而降水量自 2000 年后减小特征非常显著,蒸散发量也具有缓慢波动减小的趋势. 尽管当地蒸散发量形成的降水在区域总降水量中的贡献尚不足 10%,但随着水循环过程的一系列变化,长江上游以及各子区域中蒸散发量对当地水文循环的作用正逐年增加.

3 结 论

a. 长江上游地区水汽净收支为正,是水汽汇区,净水汽收支为 23 790 t/s,纬向平均水汽输出量为 27 650 t/s,经向平均水汽输入量为 51 440 t/s. 整个上游地区纬向水汽通量减小趋势显著,至 20 世纪 90 年代中期后,部分年份纬向净水汽收支由输出转化为输入,经向水汽通量亦存在减小趋势. 总的来看,长江上游地区水汽收支变化趋势不显著,水汽输入总体呈微弱减小趋势.

b. 长江上游西边界与南边界水汽输入量均呈减小趋势,总的水汽收支也具有一定的减小特征,而降水量自 2000 年后减小特征非常显著,蒸散发量也具有缓慢波动减小的趋势. 尽管当地蒸散发量形成的降水在区域总降水量中的贡献尚不足 10%,但随着水循环过程的一系列变化,长江上游以及各子区域中蒸散发量对当地水文循环的作用正逐年增加.

参考文献:

[1] 姜彤,施雅风. 全球变暖、长江水灾与可能损失[J]. 地球科学进展, 2003, 18(2): 277-284. (JIANG Tong, SHI Ya-feng. Global climatic warming, the Yangtze floods and potential loss[J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(2): 277-284. (in Chinese))

[2] ZHANG Zeng-xin, ZHANG Qiang, JIANG Tong. Changing features of extreme precipitation in the Yangtze River basin during 1961-2002[J]. Journal of Geographical Sciences, 2007(1) 33-42.

[3] 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. (ZENG Xiao-fan, ZHAI Jian-qing, JIANG Tong, et al. Spatial characteristics and evolutionary trends of annual precipitation in the Yangtze River Basin[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36(6): 727-732. (in Chinese))

[4] LIU Bo, JIANG Tong, REN Guo-yu, et al. Projected surface water resource of the Yangtze River Basin before 2050[J]. Advances in Climate Change Research 2009(Sup) 54-59.

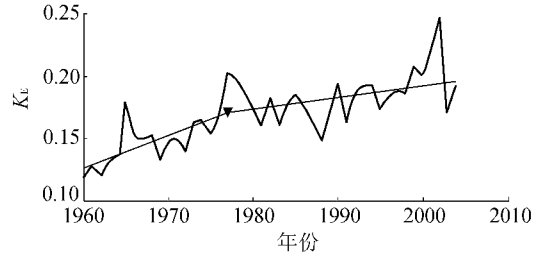


图4 长江上游内循环系数的演变特征
Fig. 4 Variation of internal cycle parameters for upper reaches of Yangtze River

- [5] 陈莹,许有鹏,尹义星,等.长江干流日径流序列的多重分形特征[J]. 地理研究,2008,27(4):819-828. (CHEN Ying, XU You-peng, YIN Yi-xing, et al. Multifractal characteristics of daily discharge series in the Yangtze River[J]. Geographical Research, 2008, 27(4): 819-828. (in Chinese))
- [6] 苗秋菊,徐祥德,张胜军.长江流域水汽收支与高原水汽输送分量“转换”特征[J]. 气象学报,2005,63(1):93-99. (MIAO Qiu-ju, XU Xiang-de, ZHANG Sheng-jun. Whole layer water vapor budget of Yangtze River valley and moisture flux components transform in the key areas of the plateau[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(1): 93-99. (in Chinese))
- [7] 叶笃正,陶诗言.长江黄河流域旱涝规律和成因研究[M]. 济南:山东科学技术出版社,1996:388.
- [8] 陶杰,陈久康.江淮梅雨暴雨的水汽源地及其输送通道[J]. 南京气象学院学报,1994(4):443-447. (TAO Jie, CHEN Jiu-kang. Diagnosis of role of moisture sources and passages in Meiyu rain gush genesis[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1994(4): 443-447. (in Chinese))
- [9] 曹丽青,葛朝霞.江淮地区大气中平均水汽含量特征及变化趋势[J]. 河海大学学报:自然科学版,2004,32(6):636-639. (CAO Li-qing, GE Zhao-xia. Characteristics of average water vapor content in the atmosphere in Yangtze-Huaihe region and its variation [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2004, 32(6): 636-639. (in Chinese))
- [10] 陶诗言,伊兰.第二次青藏高原大气科学实验理论研究进展[M]. 北京:气象出版社,1999:204-214.
- [11] 徐影,丁一汇,赵宗慈.美国 NCEP/NCAR 近 50 年全球再分析资料在我国气候变化研究中可信度的初步分析[J]. 应用气象学报,2001,12(3):337-347. (XU Ying, DING Yi-hui, ZHAO Zong-ci, Confidence analysis of NCEP/NCAR 50-year global reanalyzed data in climate change research in China[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2001, 12(3): 337-347. (in Chinese))
- [12] TOME A R, MIRANDA P M A. Continuous partial trends and low-frequency oscillations of time series[J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2005(12): 451-460.
- [13] 刘国纬.水文循环的大气过程[M]. 北京:科学出版社,1997.

《水利水电科技进展》征订启事

(邮发代号 28-244, CN32-1439/TV, ISSN1006-7647, 双月刊, A4 开本)

《水利水电科技进展》由河海大学主办,是中国科学引文数据库(CSD)来源期刊,全国中文核心期刊,中国科技核心期刊, RCCSE 核心期刊,全国水利系统优秀期刊,华东地区优秀期刊,江苏省优秀期刊.主要刊登水科学、水工程、水资源、水环境、水管理方面的科技论文,主要栏目有水问题论坛、研究探讨、工程技术、水管理、专题综述、国外动态等,适合水科学、水工程、水资源、水环境领域的科研、工程、管理人员以及大专院校师生阅读.

《水利水电科技进展》由邮局发行,邮发代号 28-244,2012 年每期定价 12 元,全年 6 期共计 72 元.可在全国各地邮局订阅,也可直接向编辑部订阅.

编辑部地址:南京市西康路 1 号 《水利水电科技进展》编辑部

邮政编码 210098

电话/传真 025-83786335

E-mail: jz@hhu.edu.cn

http://kbb.hhu.edu.cn/web/indexjz.asp?id=5