

# Variation Characteristics of Water Vapor Transport and Precipitation in the Three Rivers' Headstream Region during the Recent Several Decades

Xiaofan Zeng<sup>1</sup>, Na Zhao<sup>1</sup>, Jianqing Zhai<sup>2</sup>, Jianzhong Zhou<sup>1</sup>, Bitao Fu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Hydropower & Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan

<sup>2</sup>Centre on Climate Change, China Meteorological Administration, Beijing

Email: [zengxiaofan2009@gmail.com](mailto:zengxiaofan2009@gmail.com)

Received: Nov. 27<sup>th</sup>, 2013; revised: Dec. 13<sup>th</sup>, 2013; accepted: Jan. 22<sup>nd</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

Based on daily meteorological factors at observation stations and daily reanalysis data (including daily wind and daily specific humidity) of NCEP/NCAR I Reanalysis data during 1971-2010, temporal-spatial distributions and variation characteristics of water vapor transport and precipitation in the Three Rivers' Headstream Region were analyzed. The results showed that the temporal-spatial distributions of water vapor transport and precipitation were similar in the Three Rivers' Headstream Region, but that variation characteristics were different in recent several decades. During 1971-2010, meridional water vapor transport showed the dramatic decreasing trend due to the decrease of water vapor transport on southern boundary, and zonal water vapor transport showed the significantly increasing trend due to the decrease of water vapor transport on eastern boundary. Water vapor budget in the whole region had the same decreasing trend as the meridional water vapor transport, while precipitation had a certain increasing tendency without passing the significance testing. Water vapor transport decreased significantly in the Three Rivers' Headstream Region especially in the southern-east part during 1971-2010, while water vapor transport in June and September decreased most. At the same time, the degree of convergence of water vapor flux divergence in lower-layer atmosphere reduced. However, annual precipitation didn't show the significantly decreasing trend in recent decades, except that precipitation in September decreased obviously.

## Keywords

Water Vapor Transport, Precipitation, Temporal and Spatial Distribution, Variation

\*作者简介: 曾小凡(1980-), 女, 湖北荆门人, 讲师, 主要从事水文水资源、气候变化及水文响应研究。

# 近几十年来三江源地区水汽输送与降水变化特征

曾小凡<sup>1</sup>, 赵娜<sup>1</sup>, 翟建青<sup>2</sup>, 周建中<sup>1</sup>, 付必涛<sup>1</sup>

<sup>1</sup>华中科技大学水电与数字化工程学院, 武汉

<sup>2</sup>中国气象局国家气候中心/气候变化中心, 北京

Email: [zengxiaofan2009@gmail.com](mailto:zengxiaofan2009@gmail.com)

收稿日期: 2013年11月27日; 修回日期: 2013年12月13日; 录用日期: 2014年1月22日

## 摘要

以三江源地区为研究区, 采用该地区1971~2010年观测气象资料和NCEP/NCAR I再分析资料的逐日风场和比湿数据, 分析了三江源地区近几十年来不同时间尺度上水汽输送及降水的时空特征和变化趋势。结果表明: 1971~2010年, 三江源地区水汽输送和降水的时空分布格局比较相似, 但近几十年来水汽输送和降水的变化趋势并不一致。1971~2010年, 三江源地区经向水汽输送呈显著减少趋势, 主要是由于南边界水汽输入减少; 纬向水汽输送呈显著增加趋势, 主要是由于东边界水汽输出显著减少; 区域边界总水汽收支变化趋势与经向水汽输送一致, 呈显著减少; 降水则呈一定的增加趋势, 但未通过显著性检验。三江源地区特别是东南部近几十年来水汽输送显著减少, 尤以6月和9月为甚, 且水汽通量散度在中低层大气中辐合程度降低, 但实测降水除9月明显减少外, 其他月份并没有相应减少。

## 关键词

水汽输送, 降水, 时空特征, 变化趋势, 三江源地区

## 1. 引言

在全球及区域气候变暖背景下, 长江、黄河、澜沧江三大水系的水资源情势在近几十年来发生变化, 长江洪涝、黄河缺水和断流问题频频告急[1]-[3]。这三条水系的源头, 即三江源地区, 也呈现湖泊萎缩、河流干涸和冰川退缩等趋势, 生态环境退化并面临严峻的考验[4]。相关研究表明, 三江源地区气温升高[5], 三江源地区所处的青藏高原降水和气温在近几十年来也发生变化并存在地区差异性[6][7]。

由于三江源地区地理位置、地形条件特殊, 实测气象资料少, 相关研究主要集中在包括长江源区的长江流域或整个青藏高原地区[8], 未能充分突出三江源地区的水汽输送变化特征, 因此, 本文着重以三江源地区为研究区, 基于实测气象资料和NCEP/NCAR I再分析资料, 研究近几十年来三江源地区不同时间尺度上水汽输送和降水变化特征, 为分析该区域的降水变化特征及其与水汽输送变化的可能联系提供参考。

## 2. 研究数据

本研究采用两部分数据, 一部分为实测气象要素数据, 包括三江源地区12个地面观测站1971~2010

年的逐日降水和气温;另一部分为 NCEP/NCAR I 再分析资料(下文简称 NCEP 再分析资料),包括 1971~2010 年的地面至 300 hPa 的逐日风场、逐日比湿和逐日温度,格点数据的水平分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。研究表明 NCEP 再分析资料在亚洲地区较其他的再分析资料更为合理、可信度更高[9] [10],且 1970 年代前的 NCEP 再分析资料在青藏高原与实测资料存在较大偏差[11]-[13]。此外,比较 2006~2010 年三江源地区探空站数据与再分析资料表明,NCEP 再分析资料能够比较准确地反映三江源地区大气状况[14]。

因此,本研究仅选用 1971~2010 年的 NCEP 再分析资料分析三江源地区水汽输送变化趋势。三江源地区地面气象观测站和 NCEP 再分析格点分布见图 1,其中 NCEP 再分析格点只给出三江源区域四个边界上的格点。

### 3. 研究方法

本研究中,对涵盖三江源地区的 NCEP 格点计算区域整层纬向水汽输送和经向水汽输送。计算格点整层纬向水汽输送( $Q_u$ )和经向水汽输送( $Q_v$ )的方法为[15] [16]:

$$Q_u(x, y, t) = -\frac{1}{g} \int_{P_s}^{P_t} q(x, y, p, t) u(x, y, p, t) dp \quad (1)$$

$$Q_v(x, y, t) = -\frac{1}{g} \int_{P_s}^{P_t} q(x, y, p, t) v(x, y, p, t) dp \quad (2)$$

其中,  $P_s$  为地面气压,单位为 hPa;  $P_t$  为大气顶部气压,取为 300 hPa;  $q$  为比湿,单位为 g/kg;  $u$  为纬向风,单位为 m/s;  $v$  为经向风,单位为 m/s;  $g$  为重力加速度  $m/s^2$ ; 水汽输送通量单位为  $g/(s \cdot cm \cdot hPa)$ 。三江源地区地面气压较低,在 700 hPa 左右,因此当  $P_s$  大于 700 hPa 时,取  $P_s = 700$  hPa; 当  $P_s$  小于 700 hPa 时,  $P_s$  不变。

对涵盖三江源地区的 NCEP 格点边界,各边界水汽输送的计算方法为:

$$Q_W = \sum_{y=\phi_1}^{\phi_2} Q_u(\omega_1, y, t); \quad Q_E = \sum_{y=\phi_1}^{\phi_2} Q_u(\omega_2, y, t) \quad (3)$$

$$Q_S = \sum_{x=\omega_1}^{\omega_2} Q_v(x, \phi_1, t); \quad Q_N = \sum_{x=\omega_1}^{\omega_2} Q_v(x, \phi_2, t) \quad (4)$$

四个区域边界的总水汽收支为:

$$Q_T = Q_W - Q_E + Q_S - Q_N \quad (5)$$

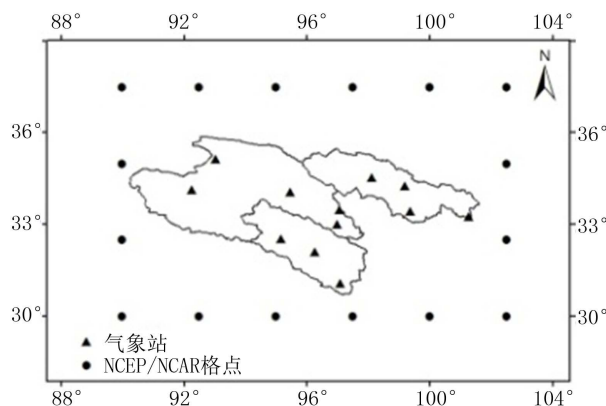


Figure 1. Meteorological stations in the Three Rivers' Headstream Region and the NCEP Reanalysis grids

图 1. 三江源地区气象站和区域边界 NCEP 再分析格点分布

其中,  $Q_W$ 、 $Q_E$ 、 $Q_S$ 、 $Q_N$  分别为西、东、南、北边界上的水汽输送通量;  $Q_T$  为区域边界的总水汽收支;  $\varphi_1, \varphi_2$  分别为南、北边界对应的纬度,  $\omega_1, \omega_2$  分别为西、东边界对应的经度。以三江源地区南边界与北边界水汽输送之差作为经向水汽输送, 西边界与东边界水汽输送之差作为纬向水汽输送, 经向与纬向水汽输送之和作为区域边界总水汽收支。

水汽通量的数值和方向只能表示水汽来源, 而水汽通量散度能考虑输送来的水汽集中程度及集中区域, 因此计算水汽通量散度以分析水汽在某地是汇合或辐散[15]。水平方向的水汽通量散度  $A$  的表达式为:

$$A = \nabla \cdot \left( \frac{1}{g} \mathbf{V}q \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{g} uq \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{g} vq \right) \quad (6)$$

其中,  $A$  表示水汽通量散度, 单位为  $g/(s \cdot cm^2 \cdot hPa)$ , 其他变量含义与计算水汽通量时相同。若  $A > 0$ , 则水汽通量辐散, 即水汽因输送出去而减少; 若  $A < 0$ , 则水汽通量辐合, 即水汽因输送进来而增加。

三江源地区不同时间尺度上的水汽输送变化趋势利用非参数 Mann-Kendall 方法(以下简称 MK 方法)[17]进行分析。MK 方法是基于秩的非参数方法, 不要求所分析数据服从某一概率分布[18], 适用于非正态分布的独立性数据序列的变化趋势检验[19] [20]。

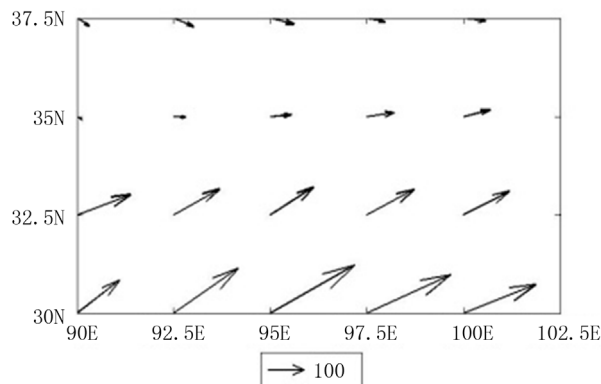
## 4. 三江源地区水汽输送和降水多年平均特征

### 4.1. 年平均空间分布

三江源地区全年水汽输送通量的多年平均空间分布见图 2, 可以看到在东亚季风和印度季风驱动下的西南暖湿气流是三江源地区空中主要水汽来源, 其次是来自西边界中东高压中的偏西气流和西风带中的偏北气流, 与李生辰等[21]研究一致。

对三江源地区四个边界而言, 1971~2010 年, 北边界上水汽输送通量为  $-265.1 g/(s \cdot cm)$ , 表明该边界上水汽自北向南输入三江源地区, 南边界上水汽输送为  $1897.2 g/(s \cdot cm)$ , 表明该边界上水汽从南向北输入三江源地区, 因此经向水汽净收入为正值, 即水汽在经向汇入三江源地区; 西边界、东边界上水汽输送分别为  $1008.4 g/(s \cdot cm)$ 、 $1625.4 g/(s \cdot cm)$ , 表明这两个边界上水汽都是自西向东输送, 由于西边界上的水汽输送通量小于东边界上的水汽通量, 因此纬向水汽净收入为负值, 即水汽在纬向输出三江源地区。

由于 400 hPa、300 hPa 水汽含量和水汽输送通量较小, 因此只计算 600 hPa 和 500 hPa 的水汽输送通



**Figure 2.** The averaged vertical moisture transport in the Three Rivers' Headstream Region during 1971-2010  
**图 2.** 三江源地区 1971~2010 年多年平均垂直整层水汽输送(单位:  $g/(s \cdot cm)$ )

量散度(见图 3)。600 hPa 水汽输送通量散度在三江源地区为负值,表示水汽辐合,特别是在三江源西南部的长江源头南部和澜沧江源头北部,水汽辐合较大;500 hPa 水汽输送通量散度除在长江源头的西南部分为辐合外,在三江源地区其他部分均为正值,即水汽辐散。同时,600 hPa 的水汽通量散度值要大于 500 hPa,表明自地面向 300 hPa,水汽通量散度越来越小,且在 500 hPa 水汽已为辐散。

三江源地区实测降水多年平均的空间分布与水汽输送及其散度的空间分布具有一定的相关性(见图 4),降水较大的地区是水汽输送量值较大且水汽通量散度为辐合的地区,澜沧江源头和黄河流域东部小部分地区年平均降水最大,在长江源头西北部和黄河源区中部年平均降水最小。

#### 4.2. 季节和逐月分布

计算三江源地区区域边界 1 月至 12 月总水汽收支在 1971~2010 年的多年均值表明,三江源地区在 1~10 月为水汽汇,其中 5 月至 9 月水汽输入最多,呈双峰型分布,在 11 月和 12 月则为水汽源,即水汽从三江源地区输出(见图 5)。有学者利用 1948~2007 年 NCEP 再分析资料研究也表明,三江源地区所在的青藏高原在夏半年是一个明显的大气水汽含量高值区,具有显著的“湿池”特征[22]。三江源地区 1 月至 12 月降水则呈单峰型分布,7 月降水量在全年最大,说明该地降水不仅与水汽输送条件有关,还与水汽转换效率、温度等因素有关,但总体而言,逐月降水与区域边界总水汽收支的年内分布是比较相似的,夏季各月份所占比重较大,其他月份相对较小。

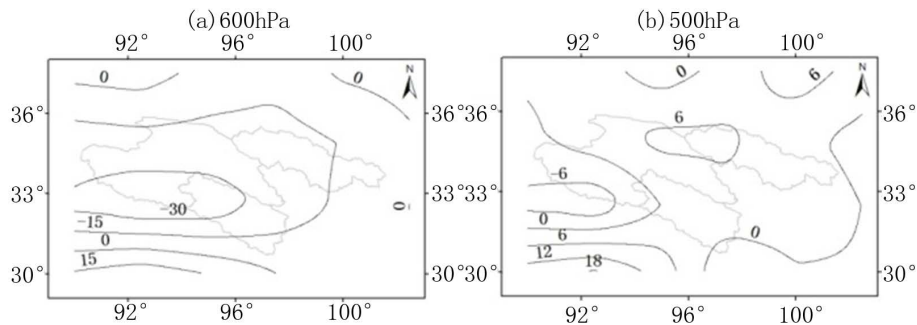


Figure 3. The contours of water vapor flux divergence at 600 hPa and 500 hPa in the Three Rivers' Headstream Region

图 3. 三江源地区 600 hPa 和 500 hPa 水汽输送通量散度多年平均等值线图(单位:  $10^{-7}g/(s \cdot cm^2 \cdot hPa)$ )

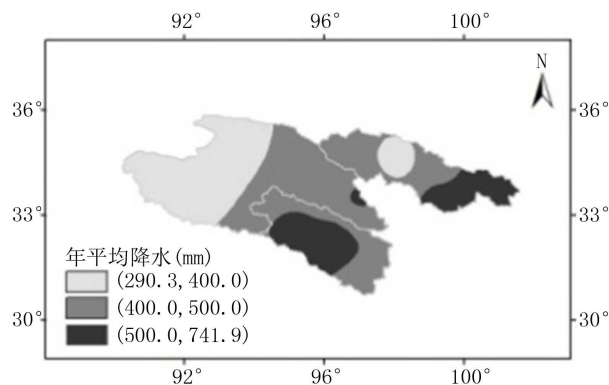


Figure 4. Spatial distribution of precipitation in the Three Rivers' Headstream Region during 1971-2010

图 4. 三江源地区 1971~2010 年多年平均实测降水空间分布

水汽收支和降水的季节分布进一步表明，三江源地区夏季水汽输送最为活跃，且同期降水量也是年内最大，春季和夏季基本相当，冬季水汽输送和降水都非常少(见图 6)。

## 5. 三江源地区水汽输送和降水时空变化分析

### 5.1. 年际变化

1971~2010 年，三江源地区南边界水汽输送呈显著减少趋势，通过置信度 99% 检验，一定程度上表明输入三江源地区的西南暖湿气流强度有所减弱，北边界水汽输送则呈明显增加趋势，但北边界水汽输送量值很小，因此经向水汽输送与南边界水汽输送变化趋势一致，呈显著减少，通过置信度 99% 检验，说明汇入三江源地区的经向水汽减少；西边界水汽输送无明显变化趋势，但东边界水汽输送呈显著减少趋势，通过置信度 99% 检验，纬向水汽输送因而呈显著增加趋势，即纬向水汽输出的量值在减少(见表 1)。

三江源地区区域边界总水汽收支在 1971~2010 年的变化趋势与经向水汽输送一致，呈显著减少，通过置信度 99% 检验；降水则呈一定的增加趋势，但未通过显著性检验(见图 7)，与降水在 1956~2004 年的变化趋势一致[23]，即降水变化不明显。

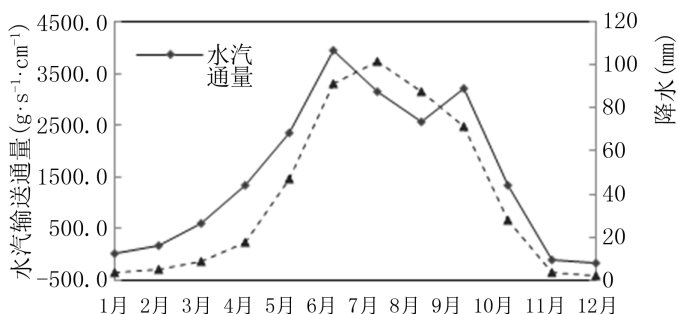


Figure 5. Monthly water vapor budget and monthly precipitation in the Three Rivers' Headstream Region

图 5. 三江源地区年内逐月区域总水汽收支与月平均降水分布

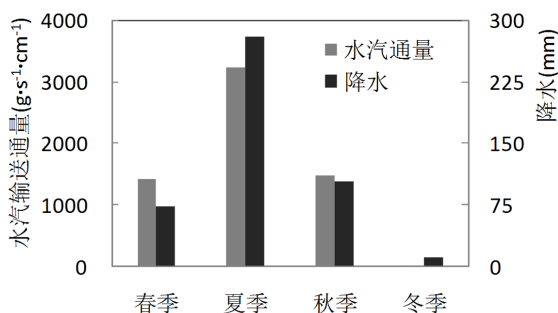


Figure 6. Seasonal water vapor budget and seasonal precipitation in the Three Rivers' Headstream Region

图 6. 三江源地区四个季节区域总水汽收支与降水年内分布

Table 1. MK statistics of water vapor transport and precipitation in the Three Rivers' Headstream Region during 1971-2010  
表 1. 1971~2010 年三江源地区水汽输送和降水 MK 统计值

| 指标  | 南边界    | 北边界   | 西边界   | 东边界    | 经向     | 纬向    | 总水汽收支  | 降水   |
|-----|--------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|------|
| MK值 | -3.87* | 2.33* | -1.03 | -3.98* | -4.38* | 2.91* | -2.98* | 1.17 |

注：\*表示通过置信度 99% 检验。



分析三江源地区水汽输送在 1971~2010 年的空间变化趋势可知(见图 8),三江源地区经向水汽输送的空间变化呈现纬度较高地区减少明显、低纬地区变化不明显的格局,如澜沧江源区、长江源区的南部和黄河源区的南部,经向水汽通量明显减少,但三江源西部和北部地区则无明显变化趋势;纬向水汽输送的空间变化格局为长江源区西部的小部分地区变化趋势不明显,但其他区域都明显减少。综合来看,1971~2010 年,三江源地区东南部水汽输送呈显著减少趋势,西北部地区变化趋势不明显。

仍以 600 hPa 和 500 hPa 为代表性气压层,分析其水汽输送通量散度在 1971~2010 年的变化可以发现(见图 8),600 hPa 和 500 hPa 水汽通量散度变化趋势不太一致。600 hPa 水汽通量散度在三江源地区中部和东南部呈明显增加趋势,三江源地区西北部则变化不明显;500 hPa 水汽通量散度除澜沧江源区东南部呈明显增加趋势外,三江源地区大部分地区无明显变化。由上文分析知,600 hPa 水汽输送通量散度多年平均在三江源地区为水汽辐合,而 1971~2010 年该气压层散度呈增加趋势,表明水汽汇聚或辐合程度变

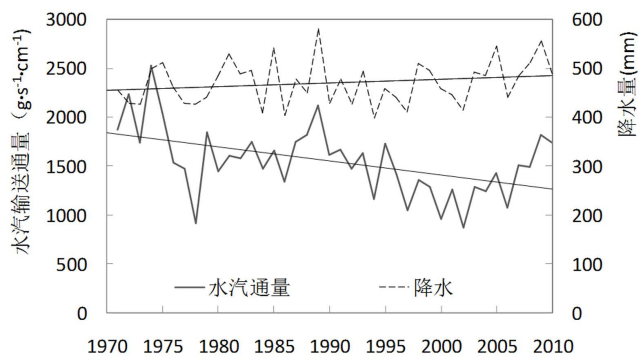


Figure 7. Variations and linear trends of water vapor budget and precipitation in the Three Rivers' Headstream Region during 1971-2010

图 7. 1971~2010 年三江源地区总水汽收支与降水变化及线性趋势

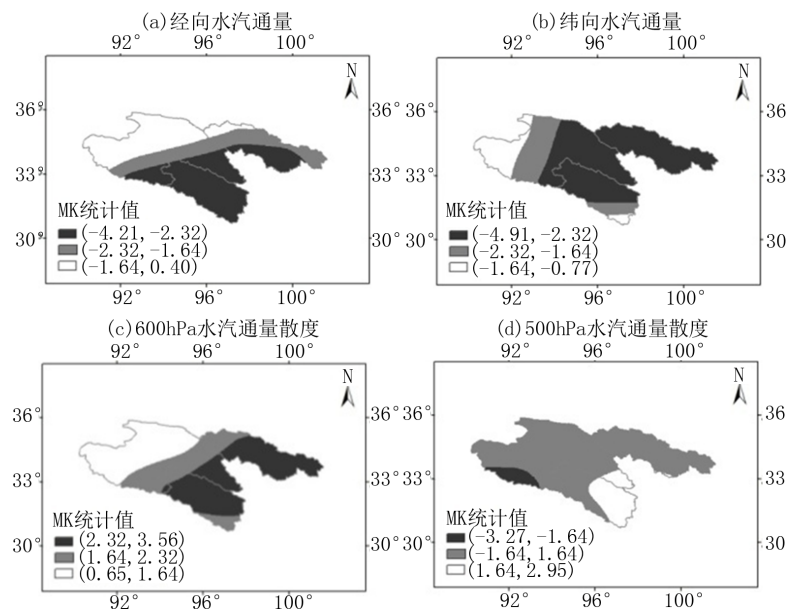


Figure 8. Spatial variations of water vapor budget in the Three Rivers' Headstream Region during 1971-2010

图 8. 1971~2010 年三江源地区水汽输送空间变化

小，特别是水汽辐合值较大的长江源头南部和澜沧江源头北部，水汽输送通量散度减小趋势比较明显。这表明，三江源地区近几十年来中低层大气水汽辐合程度有所减少，但高层大气中水汽辐合或辐散变化不大。

对降水而言，与水汽输送明显减少的空间变化格局不同，三江源地区降水在 1971~2010 年无明显空间变化差异，仅北部很小部分地区呈一定的增加趋势(见图 9)。

### 5.2. 年代际变化

将三江源地区水汽输送与降水在 1971~2000 年的多年均值作为基准值，分别计算该地区水汽输送和降水的年代际距平变化可以看到(见表 2)，三江源地区水汽输送在 1970s、1980s 的变化相对较小，在 1990s 和 2000s 的变化幅度则较大，且区域边界总水汽收支在 1990s、2000s 均减少；降水在四个年代中变化均不大，距平变化率不超过 5%。

### 5.3. 季节变化

1971~2010 年，三江源地区纬向水汽通量在四个季节均呈明显增加趋势，通过置信度 95%或置信度 99%检验；经向水汽通量在四个季节均呈显著减少趋势，通过置信度 99%检验；区域边界总水汽收支在春季、夏季和秋季明显减少，冬季变化不大；降水在春季和夏季呈一定的增加趋势，但未通过显著性检验，在秋季和冬季则减少，也未通过显著性检验(见表 3)。

### 5.4. 典型月份变化

由上文可知，三江源地区夏季和秋季(主要是 9 月份)水汽输送与降水在全年中占很大比重，且区域边

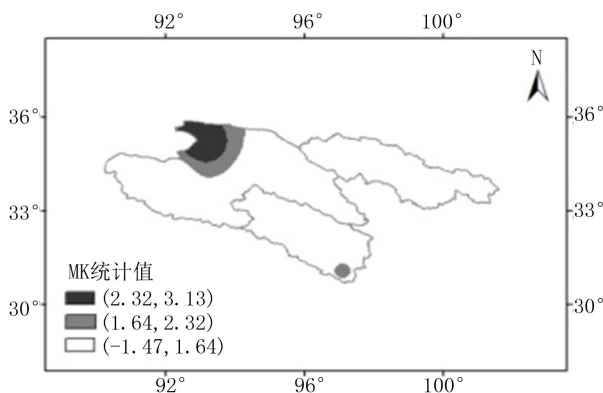


Figure 9. Spatial variations of precipitation in the Three Rivers' Headstream Region during 1971-2010

图 9. 1971~2010 年三江源地区实测降水空间变化

Table 2. Decadal anomalies of water vapor transport and precipitation in the Three Rivers' Headstream Region

表 2. 三江源地区水汽输送和降水的年代际距平变化(%)

| 年代    | 经向水汽输送 | 纬向水汽输送 | 区域边界总水汽收支 | 实测降水 |
|-------|--------|--------|-----------|------|
| 1970s | 4.4    | 8.7    | 10.0      | -1.8 |
| 1980s | 8.0    | -17.0  | 4.2       | 3.4  |
| 1990s | -12.5  | 8.3    | -14.2     | -1.6 |
| 2000s | -20.3  | 34.4   | -14.4     | 4.0  |



界总水汽收支在夏季和秋季减少趋势也非常明显,因此着重对夏季的6至8月和秋季的9月四个月份进行分析。结果表明,1971~2010年,三江源地区区域总水汽收支在6月和9月呈显著减少趋势,通过置信度99%检验,在7月和8月无明显变化趋势,未通过显著性检验;降水在6月呈增加趋势,未通过显著性检验,在7月和8月与水汽输送一致,无明显变化趋势,在9月也与水汽输送一致,呈减小趋势,但减少程度比水汽输送小(见表4)。可见,三江源地区水汽输送减少主要发生在夏季6月和秋季9月,且降水在9月份也明显减少,会加剧该地区的秋旱。

### 5.5. 变化原因分析

1971~2010年,三江源地区的区域总水汽收支呈明显减少趋势,特别是6月和9月减少趋势显著,但降水与水汽输送的变化趋势并不太一致,比如降水在6月呈一定的增加趋势。另外,三江源地区的水汽输送和降水存在空间变化差异,三江源地区特别是东南部年平均水汽输送减少显著,且水汽通量散度在中低层大气中辐合程度降低,但年平均降水在近几十年来并没有明显变化趋势,甚至在局部地区呈一定的增加趋势。

三江源地区降水与水汽输送的变化趋势不太一致,主要是因为降水除了受水汽输送条件影响,还与其他因素如温度、高原地形等诸多因素有关。以温度为例,分析三江源地区地面2 m处气温(基于观测资料)、600 hPa至300 hPa大气温度(基于NCEP再分析格点资料)在1971~2010年的变化趋势可知(见表5),地表至大气中低层的温度升高趋势非常明显,至少通过置信度95%检验。而局地温度升高,水分循环加剧,可能促使局域水汽转换效率增大,从而增加该地区降水。另一方面,三江源地区气温升高,其所在

**Table 3.** MK statistics of seasonal water vapor transport and seasonal precipitation in the Three Rivers' Headstream Region during 1971-2010

**表 3.** 1971~2010 年三江源地区季节水汽输送和降水的 MK 统计值

| 季节 | 经向水汽输送 | 纬向水汽输送 | 区域边界总水汽收支 | 实测降水  |
|----|--------|--------|-----------|-------|
| 春季 | -3.64* | 2.38*  | -1.72     | 1.57  |
| 夏季 | -2.45* | 1.68   | -2.14     | 1.56  |
| 秋季 | -4.19* | 2.03   | -3.10*    | -1.07 |
| 冬季 | -2.48* | 1.75   | 0.47      | -0.41 |

注: \*表示通过置信度99%检验。

**Table 4.** MK statistics of water vapor transport and precipitation from June to September in the Three Rivers' Headstream Region during 1971-2010

**表 4.** 1971~2010 年三江源地区6至9月水汽输送和降水的 MK 统计值

| 月份        | 6月     | 7月    | 8月   | 9月     |
|-----------|--------|-------|------|--------|
| 区域边界总水汽收支 | -3.24* | -1.49 | 0.70 | -3.29* |
| 实测降水      | 1.49   | 0.07  | 1.35 | -1.91  |

注: \*表示通过置信度99%检验。

**Table 5.** MK statistics of atmospheric temperature at different layers in the Three Rivers' Headstream Region during 1971-2010

**表 5.** 1971~2010 年三江源地区不同气压层温度的 MK 统计值

| 气压层    | 地面    | 600 hPa | 500 hPa | 400 hPa | 300 hPa |
|--------|-------|---------|---------|---------|---------|
| MK 统计值 | 4.92* | 2.31    | 2.21    | 1.24    | -0.68   |

注: \*表示通过置信度99%检验。

的青藏高原气温也呈增暖趋势, 青藏高原的热力因素改变可能引起亚洲季风区环流变化, 从而对高原地区降水产生影响[24] [25]。

## 6. 小结

在三江源地区气候发生变化、生态环境退化的背景下, 本文利用三江源地区的观测气象资料和 NCEP/NCAR I 再分析格点资料, 对该地区 1971~2010 年水汽输送及降水的时空特征和变化趋势进行了分析。主要结论包括:

1) 对多年平均尺度而言, 三江源地区北边界上水汽自北向南输入, 南边界上水汽从南向北输入, 水汽在经向汇入三江源地区; 西边界、东边界上水汽都是自西向东输送, 由于西边界上的水汽输送通量小于东边界上的水汽通量, 因此水汽在纬向输出三江源地区。自地面至 300 hPa, 水汽通量散度越来越小, 且在 500 hPa 水汽已为辐散。三江源地区降水与水汽输送及其散度的空间分布具有一定的相关性, 降水较大的地区是水汽输送量值较大且水汽通量散度为辐合的地区, 澜沧江源头和黄河流域东部小部分地区年平均降水最大。逐月降水与区域边界总水汽收支的年内分布比较相似, 夏季各月份所占比重较大, 其他月份相对较小。

2) 从时间变化看, 1971~2010 年, 三江源地区经向水汽输送呈显著减少趋势, 主要是由于南边界水汽输入减少; 纬向水汽输送呈显著增加趋势, 主要是由于东边界水汽输出显著减少。区域边界总水汽收支在 1971~2010 年的变化趋势与经向水汽输送一致, 呈显著减少, 通过置信度 99% 检验; 降水在 1971~2010 年则呈一定的增加趋势, 但未通过显著性检验。水汽输送在 1990s 和 2000s 的变化幅度较大, 且在 1990s、2000s 均减少; 降水的年代际变化不大, 距平变化率不超过 5%。1971~2010 年, 三江源地区区域边界总水汽收支在春季、夏季和秋季明显减少, 特别是夏季 6 月和秋季 9 月显著减少, 冬季变化不大; 降水在春季和夏季呈一定的增加趋势, 未通过显著性检验, 在秋季和冬季减少, 也未通过显著性检验, 但秋季 9 月降水与水汽输送一致, 呈明显减少趋势。

3) 从空间变化看, 1971~2010 年, 三江源地区东南部水汽输送呈显著减少趋势, 西北部地区变化趋势不大。同时, 三江源地区近几十年来中低层大气水汽辐合程度有所降低, 但高层大气水汽辐合或辐散变化不大。与水汽输送明显减少的空间变化不同, 三江源地区降水在 1971~2010 年的空间变化并无明显差异, 仅北部很小部分地区呈一定的增加趋势。

三江源地区近几十年来水汽输送显著减少, 但实测降水并没有相应减少, 甚至局部地区增加。这主要是因为降水不仅受水汽输送条件影响, 还与其他因素如温度等有关, 需进一步深入研究。

## 致 谢

本研究所使用的站点资料由中国气象局国家气象信息中心提供。在此诚挚感谢!

## 基金项目

国家自然科学基金重点项目(51239004); 湖北省自然科学基金(2012FFB02206); 中央高校基本科研业务费资助 HUST (2013TS093, 2012QN071)。

## 参考文献 (References)

- [1] 王可丽, 程国栋, 丁永建, 等. 黄河、长江源区降水变化的水汽输送和环流特征[J]. 冰川冻土, 2006, 28(1): 8-14. WANG Keli, CHENG Guodong, DING Yongjian, et al. Characteristics of water vapor transport and atmospheric circulation for precipitation over the source regions of the Yellow and Yangtze Rivers. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(1): 8-14. (in Chinese)
- [2] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进

- 展, 2006, 2(1): 3-8.  
DING Yihui, REN Guoyu, SHI Guangyu, et al. National assessment report of climate change (I): Climate change in China and its future trend. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(1): 3-8. (in Chinese)
- [3] 任国玉, 姜彤, 李维京, 等. 气候变化对中国水资源情势影响综合分析[J]. *水科学进展*, 2008, 19(6): 772-779.  
REN Guoyu, JIANG Tong, LI Weijing, et al. An integrated assessment of climate change impacts on China's water resources. *Advances in Water Science*, 2008, 19(6): 772-779. (in Chinese)
- [4] 李林, 李凤霞, 郭安红, 等. 近 43 年来“三江源”地区气候变化趋势及其突变研究[J]. *自然资源学报*, 2006, 21(1): 79-85.  
LI Lin, LI Fengxia, GUO Anhong, et al. Study on the climate change trend and Its catastrophe over “Sanjiangyuan” region in recent 43 years. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(1): 79-85. (in Chinese)
- [5] 张士锋, 华东, 孟秀敬, 等. 三江源气候变化及其对径流的驱动分析[J]. *地理学报*, 2011, 66(1): 13-24.  
ZHANG Shifeng, HUA Dong, MENG Xiujing, et al. Climate change and its driving effect on the runoff in the “Three-River Headwaters” region. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 13-24. (in Chinese)
- [6] 段克勤, 姚檀栋, 王宁练, 等. 青藏高原南北降水变化差异研究[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(5): 726-732.  
DUAN Keqin, YAO Shandong, WANG Ninglian, et al. The difference in precipitation variability between the North and South Tibetan Plateaus. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(5): 726-732. (in Chinese)
- [7] 李林, 陈晓光, 王振宇, 等. 青藏高原区域气候变化及其差异性研究[J]. *气候变化研究进展*, 2010, 6(3): 181-186.  
LI Lin, CHEN Xiaoguang, WANG Zhenyu, et al. Climate change and its regional differences over the Tibetan Plateau. *Advances in Climate Change Research*, 2010, 6(3): 181-186. (in Chinese)
- [8] 周长艳, 唐信英, 李跃清. 青藏高原及周边地区水汽、水汽输送相关研究综述[J]. *高原山地气象研究*, 2012, 32(3): 76-83.  
ZHOU Changyan, TANG Xinying and LI Yueqing. Overview of the research on the water vapor and water vapor transport over the Tibetan Plateau and its surroundings. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2012, 32(3): 76-83. (in Chinese)
- [9] SONG, Y., LAU, K. M. and KIM, K. M. Variations of the East Asian jet stream and Sian-Pacific-American winter climate anomalies. *Journal of Climate*, 2002, 15(3): 306-325.
- [10] TOMOSHIGE, I., MATSUMOTO, J. A comparison of summer sea level pressure over East Eurasia between NCEP-NCAR reanalysis and ERA-40 for the period 1960-99. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2004, 82(3): 951-985.
- [11] 周顺武, 张人禾. 青藏高原地区上空 NCEP/NCAR 再分析温度和位势高度资料与观测资料的比较分析[J]. *气候与环境研究*, 2009, 14(2): 284-292.  
ZHOU Shunwu, ZHANG Renhe. Comparison of NCEP/NCAR reanalysis data and radiosonde data about temperature and geo-potential height of upper air over the Tibetan Plateau. *Climatic and Environmental Research*, 2009, 14(2): 284-292. (in Chinese)
- [12] 赵天保, 符淙斌. 应用探空观测资料评估几类再分析资料在中国区域的适用性[J]. *大气科学*, 2009, 33(3): 634-648.  
ZHAO Tianbao, FU Congbin. Applicability evaluation for several reanalysis datasets using the upper-air observations over China. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2009, 33(3): 634-648. (in Chinese)
- [13] 高庆九, 管兆勇, 蔡佳熙, 等. 两种再分析资料中夏季地表气温与中国测站资料的差异[J]. *大气科学*, 2010, 34(4): 471-482.  
GAO Qingjiu, GUAN Zhaoyong, CAI Jiayi, et al. Differences in 1958-2001 summertime surface air temperatures between two reanalysis data and observations in China. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2010, 34(4): 471-482. (in Chinese)
- [14] 曾小凡, 苏布达, 易善楨, 等. 1971~2010 年三江源地区水汽输送变化分析[J]. *气候变化研究进展*, 2013, 9(3): 187-191.  
ZENG Xiaofan, SU Buda, YI Shanzhen, et al. Variations of water vapor transports in Three Rivers' Headstream Region during 1971-2010. *Advances in Climate Change Research*, 2013, 9(3): 187-191. (in Chinese)
- [15] 寿绍文编著. *天气学*[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 466-468.  
SHOU Shaowen. *Synoptic meteorology*. Beijing, China Meteorological Press, 2009: 466-468. (in Chinese)
- [16] 施小英, 徐祥德, 王浩, 等. 长江中下游地区旱涝异常的水汽输送结构特征及其变化趋势[J]. *水利学报*, 2008, 39(5): 596-603.  
SHI Xiaoying, XU Xiangde, WANG Hao, et al. Characteristics of moisture transport in middle and lower reaches of Yangtze River and its variation trend. *Journal of hydraulic engineering*, 2008, 39(5): 596-603. (in Chinese)
- [17] GERSTENGARBE, F.W., WERNER, P.C. Estimation of the beginning and end of recurrent events within a climate

- regime. *Climate Research*, 1999, 11: 97-107.
- [18] SERRANO, V. L., MATEOS, V. L. and GARCÍA, J. A. Trend analysis of monthly precipitation over the Iberian Peninsula for the period 1921-1995. *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 1999, 24(2): 85-90.
- [19] KUNDZEWICZ, Z. W., GRACZYK, D., MAURER, T., et al. Trend detection in river flow series: 1. Annual maximum flow. *Hydrological Sciences Journal*, 2005, 50(5): 797-810.
- [20] SVENSSON, C., KUNDZEWICZ, Z. W. and MAURER, T. Trend detection in river flow series: 2. Flood and low-flow index series. *Hydrological Sciences Journal*, 2005, 50(5): 811-824.
- [21] 李生辰, 李栋梁, 赵平, 等. 青藏高原“三江源地区”雨季水汽输送特征[J]. *气象学报*, 2009, 67(4): 591-598.  
LI Shengchen, LI Dongliang, ZHAO Ping, et al. The climatic characteristics of vapor transportation in rainy season of the origin area of three rivers in Qinhai-Xizang Plateau. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 67(4): 591-598. (in Chinese)
- [22] 王霄, 巩远发, 岑思弦. 夏半年青藏高原“湿池”的水汽分布及水汽输送特征[J]. *地理学报*, 2009, 64(5): 601-608.  
WANG Xiao, GONG Yuanfa and CEN Sixian. Characteristics of the moist pool and its moisture transports over Qinghai-Xizang Plateau in summer half year. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(5): 601-608. (in Chinese)
- [23] 周陈超, 贾绍凤, 燕华云, 等. 近 50a 以来青海省水资源变化趋势分析[J]. *冰川冻土*, 2005, 27(3): 432-437.  
ZHOU Chenchao, JIA Shaofeng, YAN Huayun, et al. Changing trend of water resources in Qinghai Province from 1956 to 2000. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(3): 432-437. (in Chinese)
- [24] 刘新, 李伟平, 许晃雄, 等. 青藏高原加热对东亚地区夏季降水的影响[J]. *高原气象*, 2007, 26(6): 1287-1292.  
LIU Xin, LI Weiping, XU Huangxiong, et al. The effect of Tibetan Plateau heating on the East Asian summer precipitation. *Plateau Meteorology*, 2007, 26(6): 1287-1292. (in Chinese)
- [25] 王同美, 吴国雄, 万日金. 青藏高原的热力和动力作用对亚洲季风区环流的影响[J]. *高原气象*, 2008, 27(1): 1-9.  
WANG Tongmei, WU Guoxiong and WAN Rijin. Influence of the mechanical and thermal forcing of Tibetan Plateau on the circulation of the Asian Summer Monsoon area. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(1): 1-9. (in Chinese)