

宁夏水汽输送气候特征

陈海波^{1,2}, 杨建玲¹, 丁建军², 严华生³, 张成军²

(1. 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 宁夏 银川 750002; 2. 宁夏气象局, 宁夏 银川 750002; 3. 云南大学大气科学系, 云南 昆明 659001)

摘要:利用 NCEP/NCAR 和欧洲中心提供的逐日、逐月再分析资料(包括风场、湿度场资料, 分别为 17 层等压面和 23 层等压面)和地面气压场资料, 计算了宁夏区域的水汽汇和水汽通量。结果表明: 宁夏区域水汽汇空间分布在春季为南北正东西负型, 夏季为中间正、东西侧负型, 秋季为南正北负型, 冬季为东正西负型。夏季整个区域的水汽汇为正值。各季的多年时间变化具有相似的特点, 为线性减少趋势, 3 次曲线拟合为先增后减再增的趋势。宁夏地区的水汽来自 3 个方向: 西向、西南向和东南向, 其中西南向的值较大, 是宁夏的主要水汽通道。多年水汽汇的 19 a 周期通过了 0.1 信度的红噪声检验, 多年水汽汇序列变化较为剧烈, 发生了多次突变。

关键词:宁夏; 水汽汇; 水汽通量; 时空分布

文章编号:1006-7639(2013)-03-0491-06 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-03-0491

中图分类号:P426

文献标识码:A

引言

水汽是降水的物质基础, 旱涝等降水异常与水汽输送异常存在着直接的联系。水汽输送等水循环活动异常, 无论从资料诊断还是数值模拟的角度, 都是气候变率研究中重点关注的热点话题^[1]。降水是一个地方水分收支的主要来源, 受青藏高原阻挡, 西南暖湿气流很难到达中国西北地区。另外, 受西太平洋副热带高压强度和位置的影响, 来自东南到达西北地区的暖湿气流存在年代和季节的变化, 从而影响西北地区降水的变化。姚俊强等^[2]分析了近 10 a 我国水汽研究的趋势及进展; 王宝鉴等^[3]研究表明东亚夏季风西北影响区降水的水汽来源于南风水汽通量; 强夏季风年, 到达东亚夏季风西北影响区的水汽通量显著增加, 该区降水偏多; 施小英等^[4]研究表明印度大陆和孟加拉湾北部、长江中下游地区、南海以及热带西太平洋地区纬向水汽输送从 1973 年起由弱变强, 年代变化增强; 陈际龙等^[5]分析认为 ERA-04 资料对亚洲夏季风水汽输送年际变化的描述能力强于 NCEP-IR 资料; 张洁等^[6]研究认为在气候平均态下, 来自青藏高原南缘的西

风水汽输送是中国春季降水的重要水汽源地之一; 史玉光等^[7]利用 NCEP/NCAR 再分析逐日资料, 分析了新疆地区对流层不同层次空中水汽输送特征, 夏季水汽输送量占全年的 38%; 马京津等^[8]研究认为华北夏季水汽输送通量及其轨迹有明显的年际和年代际变化特征, 降水偏多年水汽大部分来自南海, 并且输送轨迹较长, 水汽主要从西南方向输送到华北; 周长艳等^[9]通过分析得出秋季各个月东亚大陆的主要水汽来源地并不相同, 西太平洋副热带高压南侧的东南风水汽输送所能到达的西界为甘肃东南部 100°E 附近^[10]; 黄荣辉等^[11]指出东亚季风区夏季水汽输送特征明显不同于印度季风区夏季水汽输送, 东亚季风区夏季水汽输送经向输送要大于纬向输送, 而印度季风区夏季水汽输送以纬向输送为主; 周晓霞等^[12]研究认为大部分水汽集中在对流层中下层, 主要来自印度季风区; 顾伟宗等^[13]认为印度洋海温异常造成华北地区春季降水异常的可能机制是海温异常激发大气环流和风场异常, 大气环流通过遥相关影响华北地区降水, 风场影响水汽输送, 从而影响华北降水; 闵凡花等分析了重庆夏季大气可

收稿日期: 2013-04-24; 改回日期: 2013-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(41065005)、宁夏科技攻关项目(KGX-12-09-02)及宁夏自然科学基金(NZ08159)共同资助

作者简介: 陈海波(1977-), 男, 宁夏陶乐人, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事气象资料分析评估应用工作。E-mail: chenhaibo123@hotmail.com

降水量的特征^[14]。

气候变化对西北地区影响十分显著^[15],生态脆弱带对降水有着非常敏感响应^[16]。区域气候变化的程度还与区域的地形、地貌、相对地理位置以及下垫面状况等有着直接关系^[17-18],地形对降水天气系统有很大的影响^[19]。宁夏位于西北地区东部、黄河中上游地区,是沙漠与黄土高原的交接地带,跨东部季风区域和西北干旱区域,是海洋暖湿气流进入西北内陆的门户^[20-21],是维系西北内陆地区空中水汽输送的关键区^[22]。李艳春^[23-24]、郑广芬等^[25-26]对宁夏降水变化特征进行了初步分析。郑广芬等^[27]指出宁夏夏季降水偏少主要是水汽条件缺乏。但是目前针对宁夏地区水汽汇和水汽通量变化情况研究开展的还不多见,水汽汇如何变化、水汽通量特点如何有待于深入研究。

1 资料与方法

1.1 资料

采用 NCEP/NCAR 提供的 1950~2009 年(样本容量 $n=60$)的再分析逐日资料(包括风场、湿度场资料,17 层等压面)和地面气压场资料,水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,纬向 144 个格点,经向 73 个格点,共计 $144 \times 73 = 10\ 512$ 个格点,范围为 $0^\circ\text{E} \sim 360^\circ\text{E}$, $90^\circ\text{S} \sim 90^\circ\text{N}$ 。

为了验证相关结论,选用了 EAR-04 的 1957 年 9 月至 2002 年 8 月的月平均再分析资料(包括风场、湿度场资料,23 层等压面)和地面气压场资料,分辨率同 NCEP 资料。

1.2 方法

首先计算了宁夏区域的年、季水汽汇。大气中的水汽汇 Q 可由大尺度的观测量通过下面的方程求得^[28]:

$$Q = -L \left[\frac{\partial q}{\partial t} + V \cdot \nabla q + \omega \frac{\partial q}{\partial p} \right] \quad (1)$$

式中 Q 单位为 W/m^2 , q 为比湿, V 为水平风矢量, ω 为 P 坐标系中的垂直速度, L 为水汽凝结潜热。通过连续方程积分得到:

$$\frac{1}{a \cos \varphi} \left[\frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (v \cos \varphi) \right] + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0 \quad (2)$$

接着计算了宁夏区域的水汽输送情况。某地的气柱可降水量与水汽输送有关。在 P 坐标系中,单位时间通过垂直于风向底边为单位长度、高为整层大气柱的面积上的总的水汽通量 Q (垂直积分的水汽通量)的经、纬向计算公式为^[29]:

$$\begin{aligned} Q_u &= -\frac{1}{g} \int_{P_s}^{P_t} q u dp \\ Q_v &= -\frac{1}{g} \int_{P_s}^{P_t} q v dp \end{aligned} \quad (3)$$

式中, Q_u 和 Q_v 的单位为 $\text{kg} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, P_s 为地表面气压, P_t 为大气层顶气压, q 为比湿, g 为重力加速度。整层积分时地形以下等压面的值不作梯形累加,地形处的值由其最接近的标准等压面的值代替。

利用谱分析对多年水汽汇序列进行周期分析,具体算法见文献^[30]。

另外采用非参数检验法 (Mann-Kendall 法)^[31]对多年水汽汇资料序列进行突变检验。Mann-Kendall 法是一种非参数统计检验方法,其优点是不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,计算比较方便。

2 结果与分析

2.1 空间分布

2.1.1 各季水汽汇

宁夏各季的水汽汇空间分布呈现不同的特点,如图 1 所示。春季宁夏区域的水汽汇西南部为一个正值(汇)区,北部存在一个正值区,而东、西侧均为负值(源)区,水汽自东西方向流出宁夏。整个区域的水汽汇为负值,表明宁夏春季水汽输出大于水汽输入。夏季宁夏区域的水汽汇自北部向南为一个正值(汇)区,南部和东、西侧均为负值(源)区,水汽自东南和西南方向流入宁夏。整个区域的水汽汇为正值,表明宁夏夏季水汽输入大于水汽输出。秋季宁夏区域的水汽汇南部为一个较高的正值(汇)区,东北、西北侧均为负值(源)区,水汽自南部流入宁夏,北部流出。整个区域的水汽汇为负值,表明宁夏秋季水汽输出大于水汽输入。冬季宁夏区域的水汽汇整个西部为一个较低负值(源)区,东侧为弱的正值(汇)区,水汽自东部流入宁夏,西部流出。整个区域的水汽汇为负值,表明宁夏冬季水汽输出大于水汽输入。

2.1.2 年水汽汇

由图 2 可以看出,宁夏南部为一个 $>4\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 的正值区域,且在中部向北贯通,在西部有一个强的负值中心,东部有一个弱的负值中心。但是整个区域的水汽汇为负值。水汽自南部输入,但在西部强烈输出。

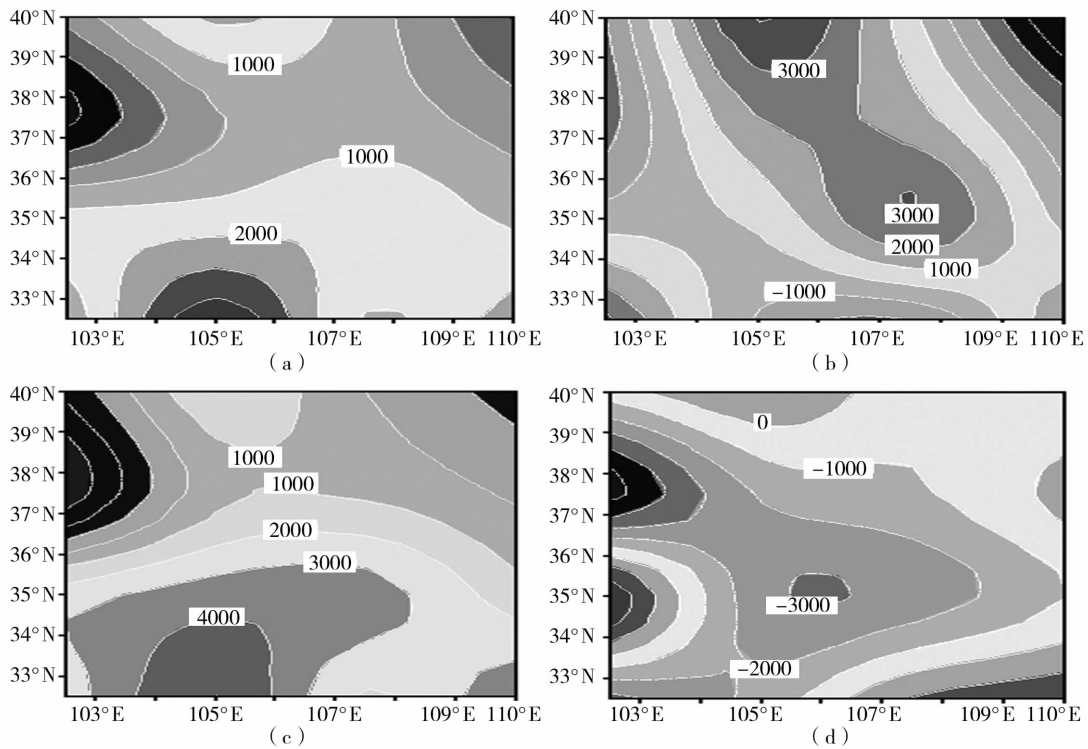


图1 宁夏春(a)、夏(b)、秋(c)、冬(d)季水汽汇多年平均空间分布(单位:W/m²)

Fig.1 The spatial distribution of seasonal mean moisture sinks during 1950 - 2009 in Ningxia (Unit:W/m²)

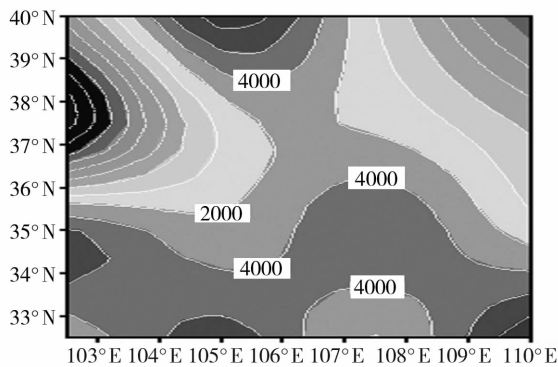


图2 宁夏年均水汽汇的空间分布(单位:W/m²)

Fig.2 The spatial distribution of annual mean moisture sinks during 1950 - 2009 in Ningxia(Unit:W/m²)

利用 ERA - 04 资料计算了多年平均的水汽通量(平均到月,图3),可以看出,宁夏地区的水汽通道分为3个方向:西向、西南向和东南向,其中西南向孟加拉湾的水汽通道的值较大,贡献较大,是宁夏的主要水汽通道。

2.2 时间变化

2.2.1 季水汽汇

宁夏各季的水汽汇的时间变化分布具有相似的特点,如图4所示。春季宁夏区域的水汽汇为线性减少趋势,偏多偏少年变化较为剧烈。3次曲线拟合为先增后减再增的趋势,1960和1980年代正值年较多,而1990年代减少明显,进入2000年以后又

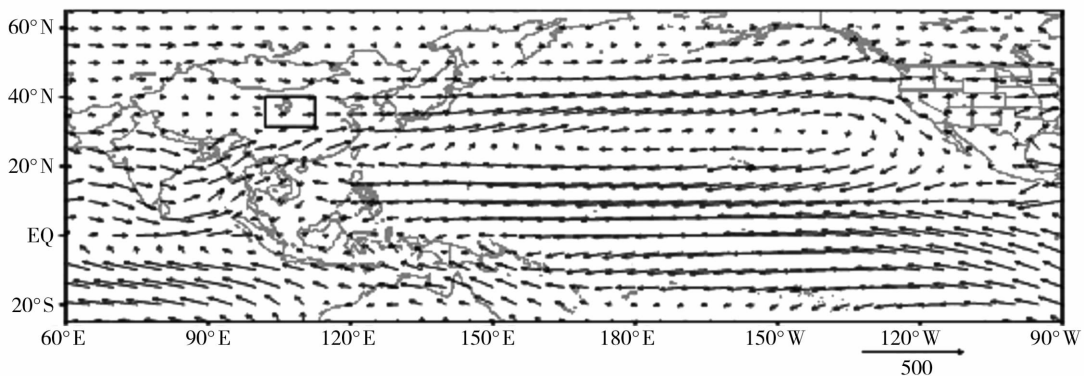


图3 宁夏多年月平均水汽通量空间分布

Fig.3 The spatial distribution of monthly mean vapor flux during 1958 - 2001 in Ningxia

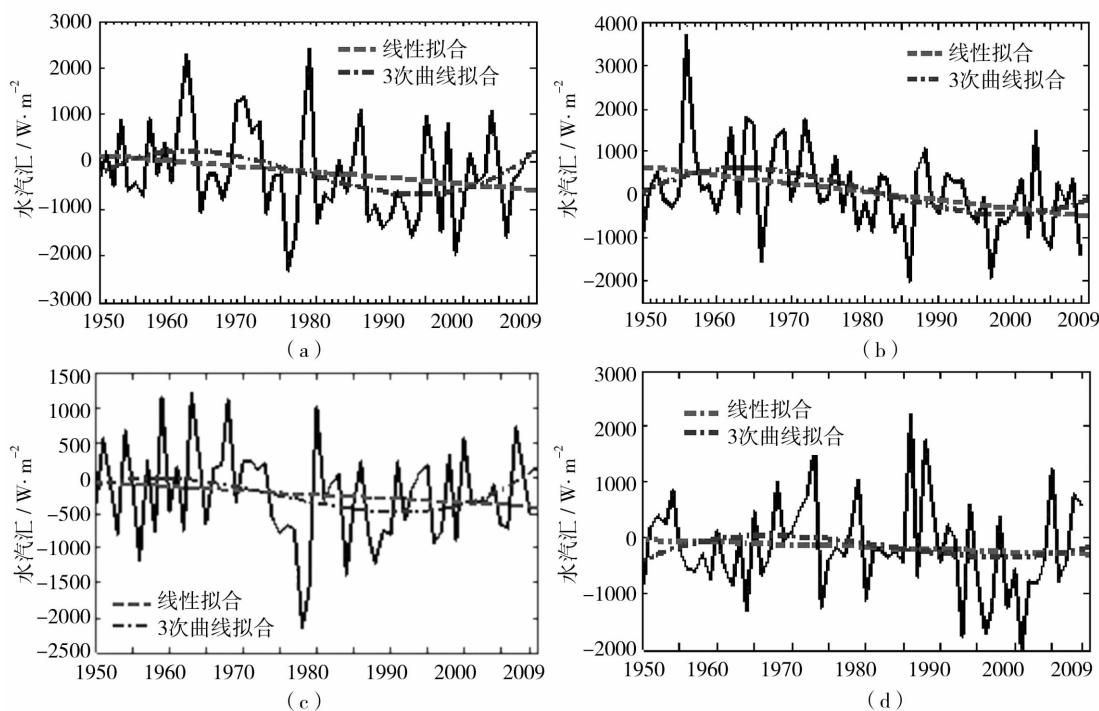


图4 宁夏春(a)、夏(b)、秋(c)、冬(d)季水汽汇变化曲线

Fig. 4 The temporal change of seasonal mean moisture sinks during 1950 – 2009 in Ningxia

呈逐渐增多趋势,且增多趋势明显。夏季宁夏区域的水汽汇与春季较为相似,但是减少的线性趋势更为剧烈。秋季也与之相似,但进入2000年以后增多的趋势更加明显。冬季与春季也相似,但是线性减少趋势较为平缓,3次拟合曲线也较为平直,变化较小。

2.2.2 年水汽汇

(1) 年际变化

由图5可以看出,宁夏年水汽汇线性趋势呈明显下降,3次拟合曲线表明1960年代增加,1990年代达到最低值,2000年以后转为增加。1960年代多为正值期,1970年以后多为负值期,1997年达到了极小值。2000年以后增加趋势较为明显。

由图6可以看出,宁夏年水汽通量在 u 、 v 方向

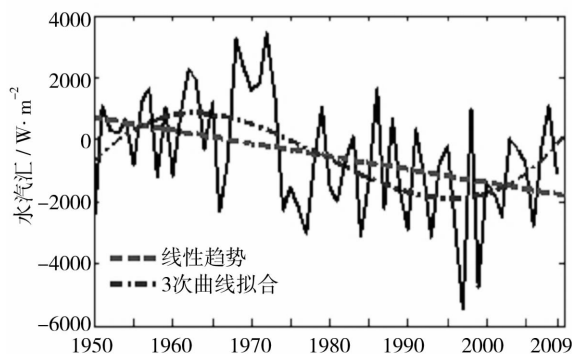


图5 宁夏多年水汽汇时间变化

Fig. 5 The temporal change of yearly mean moisture sinks during 1950 – 2009 in Ningxia

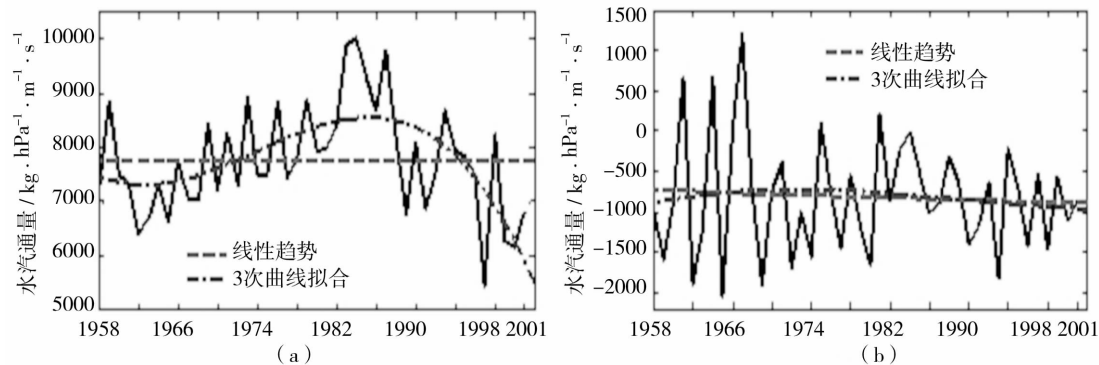
图6 宁夏多年月平均水汽通量 u (a)、 v (b)方向时间变化

Fig. 6 The temporal change of meridional (a) and zonal (b) monthly mean vapor flux during 1958 – 2001 in Ningxia

的线性趋势较为平直,均为线性减少趋势,u方向的3次拟合曲线变化较大,呈先减后增再减变化,在1980年代达到一个高值期,接着1990年代进入一个低值期。而v方向的3次拟合曲线与线性趋势线接近重合,1960年代年变化较大,自1970年代以后变化较为平缓,呈逐渐减小趋势。

(2) 周期分析

从图7中可以看出,宁夏多年水汽汇具有2 a、5 a、10 a、11 a、17 a、19 a的周期变化,最显著的是19 a周期变化,通过了0.1信度的红噪声检验。从宁夏多年降水分布来看(图略),总体呈线性下降趋势,1960年代是一个降水偏多期,之后逐渐减少,特别是进入2000年以后降水进入一个明显的偏少时段,但近几年有增多的趋势。

(3) 突变分析

经过Mann-Kendall法检验,宁夏多年水汽汇序列变化较为剧烈,尤其是在1959年、1969年、1976年、1979年、1982年、1989年、1999年和2004年前后发生了明显的趋势改变。1959年、1976年、

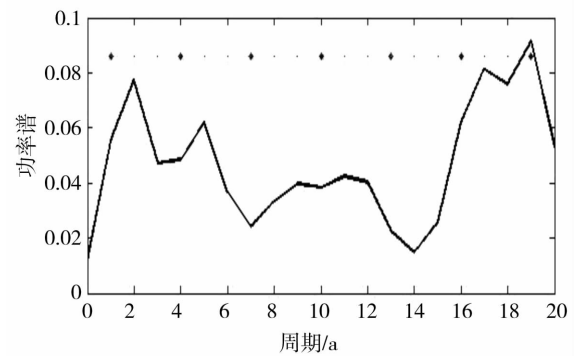


图7 宁夏多年水汽汇的周期功率谱图
Fig. 7 The periodic power spectrum of annual moisture sinks in the period of 1950 - 2009 in Ningxia

1982年、1999年前后变化趋势由减少转为增加,1969年、1979年、1989年、2004年前后变化趋势由增加转为减少。2009年有可能又是一个突变年,如图8所示。1970、1980年代降水趋势变化频繁,发生了2次突变。

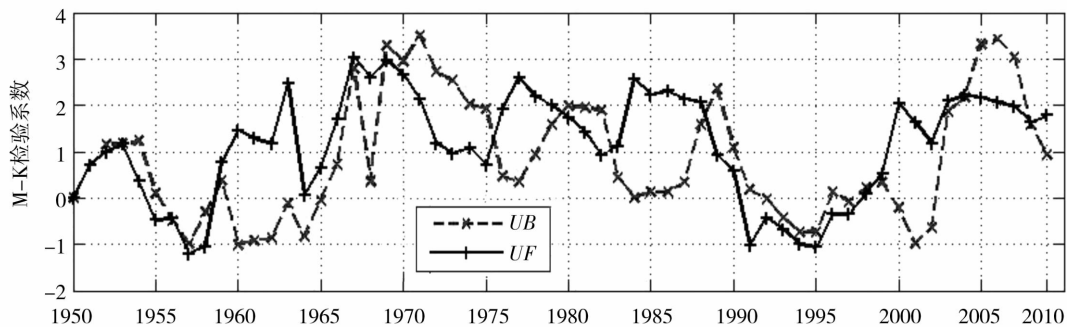


图8 宁夏多年水汽汇的突变分析
Fig. 8 Mann-Kendall test for annual moisture sinks in the period of 1950 - 2009 in Ningxia

3 结论

(1) 宁夏区域的水汽汇的空间分布春季呈南北正东西负型分布,夏季为中间正、东西侧负型分布,秋季为南正北负型,冬季为东正西负型。夏季整个区域的水汽汇为正值。

(2) 宁夏各季的水汽汇的时间变化具有相似的特点,为线性减少趋势,3次曲线拟合为先增后减再增的趋势。

(3) 宁夏区域的年水汽汇在南部为正值区域,且在中部向北贯通,在西部有一个强的负值中心,东部有一个弱的负值中心。多年时间变化的线性趋势较为平直,与3次拟合曲线接近重合。宁夏地区的水汽主要来自3个方向:西向、西南向和东南向,其

中西南向的值较大,是宁夏的主要水汽通道。

(4) 宁夏多年水汽汇的19 a周期通过了0.1信度的红噪声检验。宁夏多年水汽汇序列变化较为剧烈,尤其是在1959年、1969年、1976年、1979年、1982年、1989年、1999年和2004年前后发生了明显的趋势改变,2009年可能又是一个突变年。

本文对宁夏区域的水汽汇和水汽通量进行了初步计算和分析,造成这些变化的原因有待于进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 周天军,宇如聪,张学洪,等. 海气耦合气候模式对大气中水汽输送、辐散辐合与海气间水通量交换的模拟[J]. 大气科学, 2001, 25(5): 596 - 608.

- [2] 姚俊强,杨青. 近 10a 我国大气水汽研究趋势及进展[J]. 干旱气象, 2011, 29(2): 151-155.
- [3] 王宝鉴,黄玉霞,何金海,等. 东亚夏季风期间水汽输送与西北干旱的关系[J]. 高原气象, 2004, 23(6): 912-918.
- [4] 施小英,施晓晖,毛嘉富. 夏季东亚地区水汽输送年代际变化特征及其对中国东部降水的影响[J]. 地理学报, 2009 - 64(7): 861-870.
- [5] 陈际龙,黄荣辉. 亚洲夏季风水汽输送的年际年代际变化与中国旱涝的关系[J]. 地球物理学报, 2008, 51(2): 325-395.
- [6] 张洁,周天军,宇如聪,等. 中国春季典型降水异常及相联系的大气水汽输送[J]. 大气科学, 2009, 33(1): 121-134.
- [7] 史玉光,孙照渤. 新疆水汽输送的气候特征及其变化[J]. 高原气象, 2008, 27(02): 310-319.
- [8] 马京津,于波,高晓清,等. 大尺度环流变化对华北地区夏季水汽输送的影响[J]. 高原气象, 2008, 27(3): 517-523.
- [9] 周长艳,李跃清,李薇,等. 东亚地区秋季水汽输送特征及水汽源地分析[J]. 热带气象学报, 22(4): 380-385.
- [10] 周长艳,何金海,李薇,等. 夏季东亚地区水汽输送的气候特征[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(1): 18-27.
- [11] 黄荣辉,张振洲,黄刚,等. 夏季东亚夏季风水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别[J]. 大气科学, 1998, 22(4): 460-469.
- [12] 周晓霞,丁一汇,王盘兴. 夏季亚洲季风区的水汽输送及其对中国降水的影响[J]. 气象学报, 2008, 66(1): 59-70.
- [13] 顾伟宗,陈海山. 华北春季降水及其与前期印度洋海温的关系[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(4): 484-490.
- [14] 闵凡花,夏伯成,刘德,等. 大气可降水量在重庆夏季暴雨天气过程中的特征分析[J]. 干旱气象, 2013, 31(3): 126-130.
- [15] 张强,陈丽华,王润元,等. 气候变化与西北地区粮食和食品安全[J]. 干旱气象, 2012, 30(4): 509-513.
- [16] 纳丽,李欣,朱晓炜. 宁夏夏季降水集中程度与旱涝关系的研究[J]. 干旱气象, 2012, 30(3): 215-219.
- [17] 王式功,王金艳,周自江,等. 中国沙尘天气的区域特征[J]. 地理学报, 2003, 58(2): 193-200.
- [18] 陈海波,严华生,陈文,等. 宁夏六盘山区多年降水的时空变化分析[J]. 干旱气象, 2009, 27(2): 103-110.
- [19] 陈志昆,张书余. 地形在降水天气系统中的作用研究回顾与展望[J]. 干旱气象, 2010, 28(4): 460-466.
- [20] 姚辉. 中国西北降水分区及其近代变化分析[J]. 干旱区地理, 1992, 15(4): 27-33.
- [21] 王秀荣,徐祥德,王维国. 西北地区春、夏季降水的水汽输送特征[J]. 高原气象, 2007, 26(4): 749-758.
- [22] 任宏利,张培群,李维京,等. 中国西北东部地区春季降水及其水汽输送特征[J]. 气象学报, 2004, 62(3): 365-374.
- [23] 李艳春,李艳芳. 宁夏近百年来气候变化及突变分析[J]. 高原气象, 2001, 20(1): 100-104.
- [24] 李艳春,赵光平,胡文东,等. 宁夏河东沙地气候变化对全球变暖的响应[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(2): 36-42.
- [25] 郑广芬,陈晓光,孙银川,等. 宁夏气温、降水、蒸发的变化及其对气候变暖的响应[J]. 气象科学, 2006, 26(4): 412-421.
- [26] 陈海波,严华生,苏发奋,等. 宁夏夏季降水的时空分布特征及变化分析[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(34): 19597-19601.
- [27] 郑广芬,冯建民,马宏永,等. 宁夏 7 月严重干旱事件的成因分析[J]. 干旱气象, 2012, 30(3): 332-338.
- [28] 简茂球,罗会邦. 华南大气热源和水汽汇的时间变化[J]. 热带海洋, 1996, 15(1): 60-67.
- [29] 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.
- [30] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京: 气象出版社, 2003. 222-245.
- [31] 黄嘉佑. 气候状态变化趋势与突变分析[J]. 气象, 1995, 21(7): 54-57.

Analysis on Characteristic of Vapor Transportation in Ningxia

CHEN Haibo^{1,2}, YANG Jianlin¹, DING Jianjun², YAN Huasheng³, ZHANG Chengjun²

(1. Key Laboratory of Meteorology Disaster Preventing and Reducing in Ningxia, Yinchuan 750002, China;

2. Ningxia Hui Autonomous Region Meteorological Bureau, Yinchuan 750002, China;

3. Department of Atmospheric Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: Based on the reanalysis data of the global daily and monthly mean wind and humidity fields provided by NCEP/NCAR and ECMWF as well as surface pressure fields, the moisture sink and vapor transport flux in Ningxia were calculated. The results show that in spring there was positive moisture sink in north and south region, and negative in east and west region of Ningxia, in summer it was positive in the middle region and negative in east and west sides, and in autumn it was positive in south and negative in north, in winter it was positive in east and negative in west. In summer, the moisture sink in the whole region was positive. The temporal changes of moisture sink were similar in four seasons and presented decline trend, the cubic curve fitting showed increase-decrease-increase trend. The vapor over Ningxia came from west, southwest and southeast direction, but the vapor mainly from southwest. The 19-year period of moisture sinks was through the red noise test at 0.1 confidence level, and the moisture sink sequence changed sharply these years.

Key words: Ningxia; moisture sink; vapor flux; spatial and temporal distribution