

华南大尺度空中水资源时空演变特征^{*}

简茂球^{1,2}, 秦晓昊¹, 乔云亭¹

(1 中山大学季风与环境研究中心 大气科学系, 广东 广州 510275;
2 广东省气象局, 广东 广州 510080)

摘 要: 用 1958 – 2004 年 NCEP NCAR 再分析资料和中国 160 站月降水量资料分析了华南年平均大尺度大气水汽汇的时空变化。结果表明: 华南地区年平均水汽汇的主要变异区在华南中、东部地区以及华南西南地区。华南中、东部的年平均水汽汇与该地区的年平均降水一样, 存在增加的气候变化趋势, 而该地区的蒸发量则有减少的趋势。华南西南部年平均水汽汇则以年际变化为主。华南中、东部以及西南部的水汽汇偏强 (弱) 时, 东亚沿海上空水汽输送异常强 (弱) 导致这些地区的垂直积分的水汽通量辐合的增强 (减弱)。

关键词: 华南; 大尺度水汽汇; 时空变化

中图分类号: P434 文献标识码: A 文章编号: 0529-6579 (2006) 06-0097-05

华南地处热带亚热带季风气候区, 是我国旱涝灾害发生较频繁的地区之一。有关南方尤其华南的旱涝时空分布特征及其可能的影响因素已有许多研究^[1-7]。但在以上的研究中, 对华南旱涝的研究绝大部分是以分析降水量为基础的。虽然空中降水的多寡对旱涝的发生有非常重要的影响, 然而, 大气与陆地的水资源交换不仅包括大气中降到地面的水, 还包括了地面蒸发到大气中的水分, 二者之差才真正代表陆 - 气间的水交换量或者空中水资源, 因此, 用降水量和蒸发量的差值 (即大气的水汽源汇) 来研究华南水资源的变化特征更为准确。虽然实际的蒸发量不能直接观测得到, 但降水量和蒸发量的差值可以通过水汽方程计算得到, 从而避免了估算实际的蒸发量这一难题。到目前为止, 涉及华南地区较长时段的水汽汇年际和年代际变化特征的研究非常少见。本文的主要目的是利用多年的大气水汽汇资料来分析华南大尺度空中年平均水资源的时空变化特征。同时, 与华南地区空中水资源 (大气水汽源汇) 异常有关的大尺度水汽输送的研究也甚少见, 这也是本文要研究的问题。由于海南省的面积相对较小, 故本文分析华南地区时没有考虑海南省。

1 方法和资料

本文使用的资料是 1958 – 2004 年共 47 年 NCEP / NCAR 再分析逐日资料, 包括 u 、 V 、 ω 及 q 分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。本文分析所用的水汽汇资料是

对由下面的方法算得的逐日垂直积分视水汽汇进行月平均处理而得。视水汽汇的计算采用倒算法^[8], 其公式为:

$$Q_2 = -L \left[\frac{\partial q}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla q + \omega \frac{\partial q}{\partial p} \right] \tag{1}$$

其中 q 为比湿, $\mathbf{V}$ 为水平风矢量, ω 为 p 坐标垂直速度, L 为蒸发潜热参数。

水汽汇、水汽通量的垂直积分可表示为:

$$\langle Q_2 \rangle = \frac{1}{g} \int_{p_r}^{p_s} Q_2 dp \cong L (P - E) \tag{2}$$

$$\langle Vq \rangle = \frac{1}{g} \int_{p_r}^{p_s} (uq - vq) dq \tag{3}$$

其中 p_s 为地面气压, 由于 NCEP 高空水汽资料只到 300 hPa 故 $p_r = 300$ hPa P 和 E 分别为降水率和地面蒸发率。

此外, 本文还用到 1958 – 2004 年中国 160 站逐月降水量资料。

2 华南年平均水汽汇的 EOF 分析

首先, 对 ($105 - 120^{\circ}\text{E}$, $20 - 27.5^{\circ}\text{N}$) 范围的年平均大气水汽汇 $\langle Q_2 \rangle$ 作 EOF 分析, 其前 5 个模态分别占总方差的 39.5%、19.9%、11%、8.4% 和 6.9%。由于在前五个模态中, 与华南关系密切的模态只有第一和第五模态, 故下面重点讨论这两个模态。第一和第五特征向量及对应的模态点方差贡献分布如图 1 所示。需说明的是, 模态点

^{*} 收稿日期: 2006-01-04
基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (05003339); 中国气象局气候变化专项基金资助项目 (CCSF2006-39)
作者简介: 简茂球 (1965 年生), 男, 教授; E-mail: jee@mail.sysu.edu.cn
(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

方差贡献是指某模态的还原场各点时间序列方差占该点原始时间序列方差的百分比，与通常的特征向量场的方差贡献百分比相比，它可以更加细致地描述各模态方差贡献的空间分布特征。第一模态特征向量场如图 1a 所示，该模态的主要负中心区分别位于广东东部、福建和江西中 - 南部，而华南都处于负值区范围，即整个华南地区的变化是同号的，其中负中心对应的点方差贡献百分比可高达 80%，而模态点方差贡献百分比在 30% 以上的区域覆盖了福建、广东全区以及广西东部和东南部（图 1b）。对应第一模态的时间系数即第一主分量有明显的年代际变化特征（图 2a），年代际气候变化转折点出现在 1983 年，1983 年之前系数主要为正，之后主要为负，同时在显著的年代际变化上还叠加着较明显的年际变化。结合特征向量场和时间系数

的符号分析可知，在 1983 年以前，华南中东部上空的水汽汇是相对偏弱的，而在 1983 年后则是偏强的，从年代际尺度看，华南中东部上空的水资源是呈增长趋势。尽管主分量曲线上 2003、2004 年的数值有明显的增加，但目前华南中东部上空的水资源是否处于从偏多位相转向偏少位相的过渡期还不是非常明朗。

第五特征向量如图 1c 所示，其主要中心区位于粤西雷州半岛、广西南部 and 北部湾一带，中心区的模态点方差贡献达 40%（图 1d），因此该特征向量主要反映了华南西南部地区水汽汇的异常变化。从对应的时间系数（图 2b）看，其变化主要以年际变化为主，变化幅度没有第一主分量的明显，其中在 1965 年前后和上世纪九十年代中后期的振幅较大。

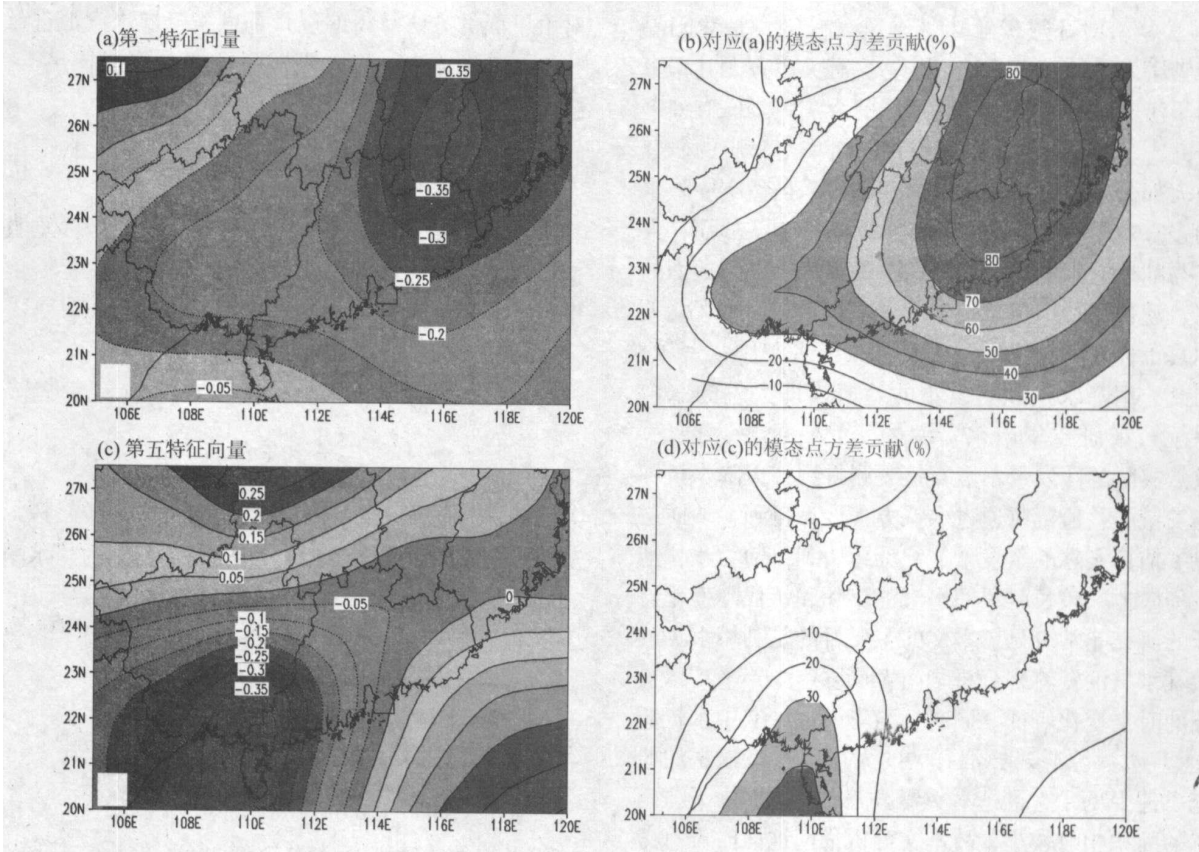


图 1 华南年平均水汽汇 EOF 分析的特征向量及点方差贡献

Fig. 1 Spatial patterns of the EOF modes and mode station variance percentage of annual mean atmospheric moisture sink

上述 EOF 分析结果表明，华南中东部和西南部都是年平均水汽汇的主要气候变异中心，由于水汽汇与降水量和地表蒸发量都有密切的关系，下面进一步分析两中心区的水汽汇与降水量和地表蒸发量的变化关系，其中蒸发量值通过将降水量和水汽汇值代入（2）式求出。华南中东部的变异中心区取图 1b 中模态点方差贡献大于 40% 的范围，并由

该区域内的永安、广昌、吉安、赣州、郴县、浦城、福州、厦门、梅县、汕头、曲江、河源、广州、阳江和梧州共 15 个站的降水量和 9 个格点的水汽汇的平均值来代表中心区域平均降水和水汽汇。从图 3a 可以看出，华南中东部年平均降水在过去的 47 a 里有较弱的增加趋势，而该区域的水汽汇的年际变化与降水非常相似，但水汽汇的线性

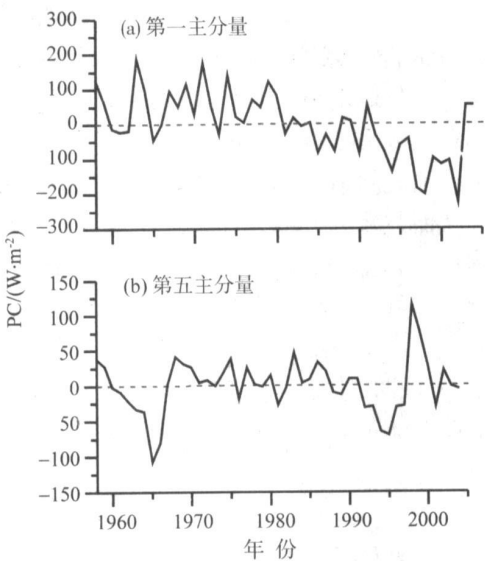


图 2 年平均水汽汇 EOF 分析的主分量

Fig 2 The first and fifth principle components for the EOF analysis of annual mean atmospheric moisture sink

变化增加趋势比降水的明显。蒸发量则有减弱的变化趋势（图 3b）。Thomas 的研究^[9] 也表明中国东南部的潜在蒸发量（potential evapotranspiration）有下降的趋势，并指出主要是由于太阳总辐射量下降引起的。

华南西南部水汽汇变异中心区取图 1d 中模态点方差贡献大于 30% 的范围，区域平均降水量由该区域内的湛江、北海和海口 3 站降水量平均得到，水汽汇则由位区域内的 2 个格点值平均得到。从图 3c 看出，华南西南部的年平均降水和水汽汇都有微弱的增加趋势，而且两者的年际变化趋势也是非常相似的。中心区蒸发量的趋势变化不明显，主要以年际变化为主，兼有弱的年代际变化（图 3d）。

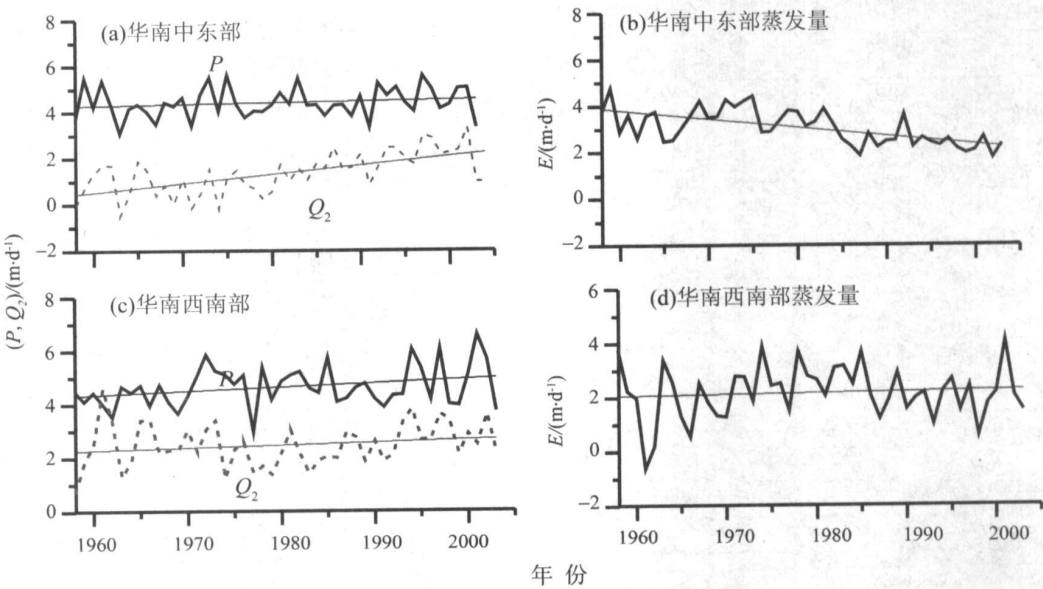


图 3 华南中东部和西南部年平均的降水量 (P) 和水汽汇 (Q_2) 蒸发量 (E) 随时间变化曲线，直线代表各曲线的线性趋势

Fig. 3 Time series of annual mean precipitation (P), moisture sink (Q_2) and evaporation (E), averaged in central and eastern parts of Southern China. The thin lines denote the linear trends of curves

3 华南年平均水汽汇气候变化与水汽输送变异的关系

从大气的水汽方程可知，水汽汇变化与大气中的水汽通量的散度有密切的关系。那么上一节的结果显示的华南中东部和西南部地区水汽汇的异常与大气中的水汽输送异常有着何种联系？这是本节要分析的问题。为此，我们根据华南中东部、西南部

中心区的 $\langle Q_2 \rangle$ 曲线（图 3a 和图 3c）的距平值，以各曲线一倍标准差为阈值分别选出各中心的强弱（正负）异常年。华南中东部水汽汇的强年有 1987 1993 1994 1997 1998 2000 2002 弱年有 1958 1963 1964 1967 1969 1971 1972 1974 1979。华南西南部水汽汇的强年有 1961 1962 1965 1966 1973 1993 1994 1997 1998 2002 弱年有 1958 1963 1974

1977 1979 1983 2004 然后根据上述强弱年对垂直积分的水汽通量分别进行合成。

图 4 给出了华南中东部水汽汇气候平均场和强弱年水汽通量距平场及其散度分布。在 1958 – 2004 年气候平均场上（图 4c），西北太平洋是一反气旋式水汽通量场，华南处于来源于孟加拉湾 – 中南半岛 – 南海的水汽输送的辐合区控制之下。另外，在孟加拉湾及其南北附近地区存在一东北 – 西南走向的水汽辐合辐散中心相间分布的波列。在华南中东部水汽汇的偏强年（图 4a），我国中东部至西北太平洋地区为一气旋式水汽通量距平场，南海

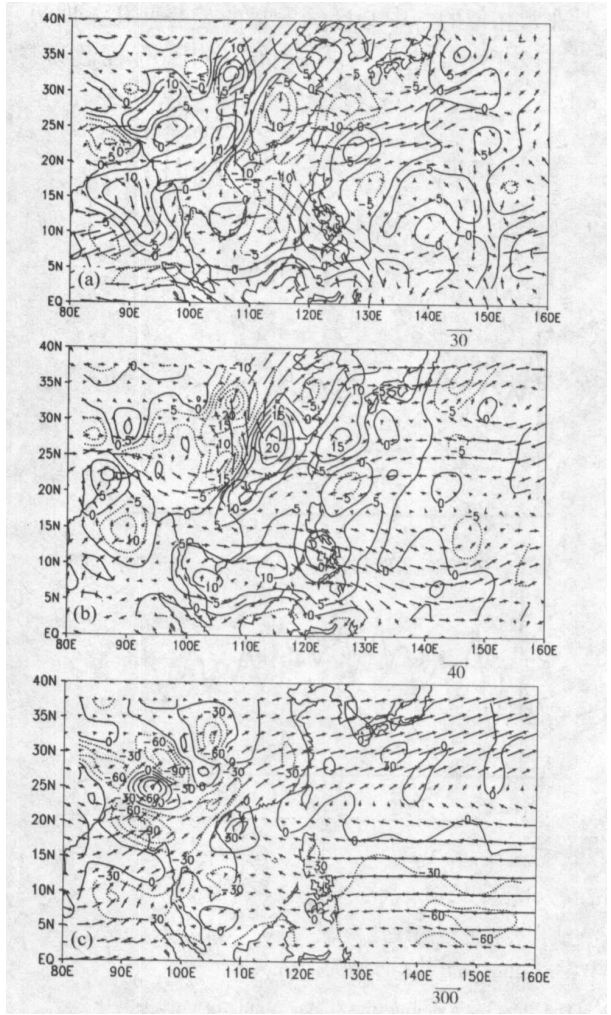


图 4 （a），（b）分别为华南中东部年平均水汽汇强、弱年的垂直积分水汽通量距平矢量场（ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ）及其散度（等值线场，实线为辐散，虚线为辐合， $10^{-6} \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ）。（c）1958 – 2004 年平均的垂直积分水汽通量场

Fig. 4 Anomaly patterns of annual mean moisture flux (vector $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) and its divergence (contours $10^{-6} \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) averaged in strong years (a), in weak years (b) of moisture sink over the central and eastern parts of Southern China (c) The Climatology of annual mean moisture flux and its divergence

中部至菲律宾及以东洋面则为一反气旋式水汽通量距平，从华北沿我国中部至西南到孟加拉湾东部有一向南的水汽通量距平带，这些分布特征说明，在强年，西北太平洋的反气旋式水汽通量场较常年是偏南的，而我国中东部地区的西南气流的水汽输送减弱，从而在南海中部至华南中东部的水汽通量辐合加强而导致空中的水资源增多（水汽汇偏强）。在华南中东部水汽汇的偏弱年（图 4b），我国东部及其以东区域为一反气旋式水汽通量距平场，其南面则是一气旋式通量距平场，这意味着弱年西北太平洋的反气旋式水汽通量场较常年是偏北的，因此而导致华南中东部的水汽通量辐合减弱（正散度距平）。

对于华南西南部地区，其年平均大气水汽汇强弱年合成的垂直积分水汽通量距平场如图 5 所示。在强年（图 5a），南海北部至 30°N 以南地区存在一气旋式水汽通量距平场，而在南海南部出现一反气旋通量距平场，因此在华南地区至南海北部地区（尤其是华南西南部地区）出现负水汽通量散度距平场，使得原来的水汽通量辐合得以加强，因而导致水汽汇偏强。在弱年（图 5b），我国东部及其以

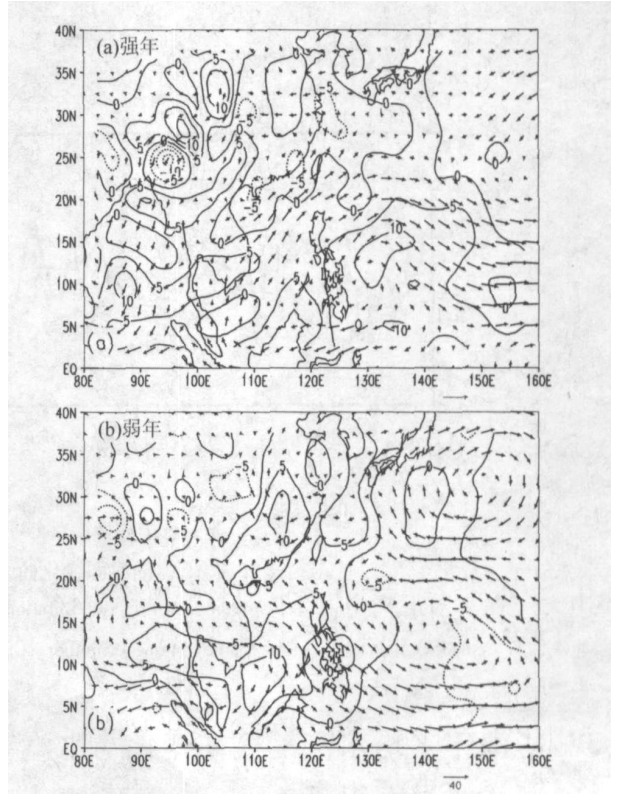


图 5 华南西南部年平均水汽汇强弱年的大气垂直积分水汽通量距平矢量场（ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ）及其散度（等值线场，实线为辐散，虚线为辐合， $10^{-6} \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ）距平场分布

Fig. 5 Same as in Fig. 4 but for the strong years (a) and weak years (b) of moisture sink over the south western part of Southern China

东洋面上为一反气旋式水汽通量距平场，而在菲律宾以东洋面是一气旋式水汽通量距平场，以及在南海北部及华南上空的水汽通量距平场呈现南北辐散的态势，于是在我国东南部地区出现水汽通量散度正距平场，使得其上空原来的水汽通量辐合减弱，导致大气水汽汇偏弱。

4 结 论

以上对华南年平均大尺度大气水汽汇的时空变化分析表明：

- (1) 华南中、东部地区（广东-福建）、华南西南地区（广西东南部至广东西南部）是华南地区年平均水汽汇两个主要的变异中心区。
- (2) 华南中、东部地区地区的年平均水汽汇与该地区的年平均降水一样，存在增加的气候变化趋势，而该地区的蒸发量则有减少的变化趋势。华南西南部地区的年平均水汽汇则以年际变化为主，其气候变化趋势不明显。
- (3) 华南中、东部地区以及西南部地区的水汽汇偏强（弱）时，东亚沿海上空水汽输送异常偏强（弱）从而导致上述地区的垂直积分的水汽通量辐合的增强（减弱）。

参考文献：

[1] 覃武, 孙照渤, 丁宝善, 等. 华南 4-6 月降水异常的环境特征 [J]. 南京气象学院学报, 1994 17(3): 327-331.

[2] 贺海晏. 近 40 年广东省的旱涝特征 [J]. 热带气象学报. 1998 14(4): 297-305.

[3] 梁巧倩, 简茂球. 干旱指数 AW TP 在广东冬半年干旱分析中的应用 [J]. 广东气象, 2001 11(4): 7-9.

[4] 梁建茵, 吴尚森. 广东省汛期旱涝成因和前期影响因子探讨 [J]. 热带气象学报, 2001 17(2): 97-108.

[5] 吴尚森, 梁建茵. 华南前汛期旱涝时空分布特征 [J]. 热带气象, 1992 8(1): 87-92.

[6] 吴尚森, 黄成昌, 薛惠娴. 华南后汛期降水的年际变化 [J]. 热带气象, 1990 6(4): 348-356.

[7] 林爱兰. 广东前汛期月降水异常的强信号研究及预测概念模型 [J]. 热带气象学报, 2002 18(3): 219-226.

[8] YANA IM, ESBENSEN S, CHU JH. Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large-scale heat and moisture budgets [J]. J Atmos Sci 1973 30: 611-627.

[9] THOMAS A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China [J]. International Journal of Climatology 2000 20(4): 381-396.

Spatial and Temporal Variations of Large scale Atmospheric Water Resources over Southern China

JIAN Mao-qiu^{1, 2}, QIN Xiao-hao¹, QIAO Yun-ting¹

- (1. Research Center for Monsoon and Environment Department of Atmospheric Sciences
Sun Yat sen University, Guangzhou 510275 China
- 2. Guangdong Meteorological Bureau Guangzhou 510080 China)

Abstract The spatial and temporal variations of annual mean large scale atmospheric water resources (moisture sinks) over Southern China during a 47-year period from 1958 to 2004 are studied using the NCEP NCAR reanalysis data and the precipitation data at 160 stations in China. The results reveal that two main anomalous centers of moisture sinks are located in the central eastern part and the south-western part of Southern China respectively. There exists an increasing trend variation in the annual mean moisture sink and the precipitation over the central eastern part of Southern China and a decreasing trend in the evaporation. The annual mean moisture sink over the south-western part of Southern China mainly experiences a interannual scale variation. These anomalous variations of moisture sinks over the sub-regions in Southern China are closely linked to the anomalous variations in the divergence field of the vertical integrated moisture flux over East Asia.

Key words Southern China large scale moisture sink spatial and temporal variations