

中国大气水分气候变化研究*

翟盘茂 周琴芳

(国家气候中心, 北京 100081)

提 要

该文对我国逐日两次探空资料, 经过综合静力学质量控制系统(CHQC)和序列均一性检验后, 计算分析了我国大气水分的气候分布特点及近20年来气候变化趋势, 讨论了大气水分变化与地面气温、夏季大气水分与我国东部降水异常之间的关系。

关键词: 探空资料 大气水分 变化趋势

引 言

自探空观测一开始, 气象学家们就注意到了大气水分的重要作用, 并对其时、空分布特征进行了研究^[1]。最近, 随着全球能量和水分循环试验(GEWEX)战略计划的开展, 对全球气温增暖的研究更迫切地需要了解大气水分在气候系统中的作用^[2]。

中国幅员辽阔, 具有十分独特的气候条件。作为区域性的大气水分气候背景及其变化特点研究很有意义。早在50年代末, 徐淑英^[3]、谢义炳等^[4]学者就十分关注我国大气水分的研究。在1960~1969年我国高空气候资料出版之后, 一些学者又对大气水分气候背景进行了进一步的分析^[5, 6]。但过去的一些研究受到资料和计算条件等限制, 许多计算建立在简化了的计算方法基础上, 同时资料中还存在年代短、资料不可靠等问题。基于上述原因, 作者在我国100多个探空站中选取了建站以来资料完整可靠和气候代表性好的57个测站的探空资料, 并利用国际合作中改进的技术方法^[7, 8], 对基础资料进行了严格的质量控制和序列的不均一性检查, 研究了我国大气水分气候背景及近20多年的变化趋势, 并深入讨论了水分变化与地面气温、降水量之间的关系。

1 资料与分析方法

本文所使用的原始探空资料是自50年代至1990年的信息化探空资料。我们从100多个探空站中选取了空间均匀、资料年代完整的57个探空站, 以一日两次的原始压、温、湿资料为基础, 同时还选取了相应测站的月平均地面气温资料配合气候变化研究。

* 本文由气候诊断业务系统移植课题资助。
1996-01-08收到, 1996-04-22收到修改稿。

气候资料中的粗略误差和系统偏差会直接影响研究结果的可靠性. 本文在资料处理中, 采用最新的综合静力学质量控制系统(CHQC)对粗略误差进行检测. 该方法是在最近几年 WMO 支持项目——全球综合大气参考数据集(CARDS)中进一步发展起来的. 其基本思想是基于静力学方程, 计算要素余差:

$$Z_{i+1} - Z_i = - (R/g) \int_{p_i}^{p_{i+1}} - T_v d(\ln p)$$

然后进行余差分析, 最后通过一个决策算法对错误资料进行订正, 其方法详见文献[7].

对序列中的系统偏差, 作者采用了一种以夜间观测序列为参照序列的方法, 改进了 Esterling-Peterson 提出的气候序列不均一性检测技术, 这些方法曾在美国资料分析中心(NCDC)研制 CARDS 期间采用, 且得到较好的效果. 通过对我国探空资料的检测发现, 在 60 年代及其以前, 由于受观测规范、观测时间与观测仪器变更的影响, 温度和湿度序列中存在明显的不均一性^[8]. 基于目前对 70 年代以前的时间序列进行订正的条件尚不成熟, 为了避免因序列不均一性造成的影响, 本文分析中只选取了 1970 年以来相对均一的探空资料.

大气层间水分含量的计算, 我们采用以下方法进行. 首先利用露点温度差 D 反算相对湿度 U , 我国计算露点的方法为:

$$D = t - a/b$$

$$a = 237.3 \left(\frac{7.5 t}{237.3 + t} + \lg U - 2 \right)$$

$$b = 7.5 - \left(\frac{7.5 t}{237.3 + t} + \lg U - 2 \right)$$

式中 t 为温度.

接着计算大气水汽压 E 和比湿 q :

$$E = U \times E_s / 100$$

$$q = 0.622 E / (p - 0.278 E)$$

其中 E_s 为饱和水汽压, p 为气压, 饱和水汽压的具体算法为^[10]:

$$E_s = 1.00071 e^{0.000045 p} E_w$$

$$E_w = 6.1094 e^{\frac{17.625 t}{243.04 + t}}$$

在气温低于 -40°C 时,

$$E_s = 0.99882 e^{0.000008 p} E_i$$

$$E_i = 6.1121 e^{\frac{22.587 t}{273.86 + t}}$$

计算比湿 q 之后, 对两个气压层之间比湿积分即可得到气压层 p_i 到 p_{i+1} 之间的水分含量 WVC,

$$WVC = - \frac{1}{g} \int_{p_i}^{p_{i+1}} q dp$$

由于大气水分主要集中在对流层低层, 本文以地面到 200 hPa 的水分含量代表整层大气水分, 以地面到 700 hPa、700~400 hPa、400~200 hPa 水分含量分别代表对流层低、中、高层水分含量.

线性趋势估计主要通过线性回归方程求得，若以 Y 代表资料序列， T 为年份，则

$$Y'(T) = A + BT$$

$$A = \frac{\sum T^2 \sum Y - \sum T \sum TY}{n \sum T^2 - (\sum T)^2}$$

$$B = \frac{n \sum TY - \sum T \sum Y}{n \sum T^2 - (\sum T)^2}$$

其中 B 为气候变化趋势。利用上述方法，分别计算了 1970~1990 年四季及年平均大气水分和地面气温的线性变化趋势。

2 我国大气水分的气候学特点

我国大气水分含量分布主要受季节、纬度和地理因子影响，具有十分明显的年变化特征。图 1 是我国东部沿岸 113°E 不同纬度测站大气水分含量逐月变化图，该图清楚地显示出大气水分含量随纬度增高而迅速减少。大气水分含量南北差异很大，华北、西北地区大气非常干燥，最北测站水分含量即使在 7 月份达到最高值时亦比南部测站 1 月份达最低值时要低得多。我国大气水分含量主要年变化特征是 1 月份出现最低值，7 月份达到最高值。但南方岛屿和沿海测站例外，其最高值出现在 6 月和 8 月。大气水分含量从冬季向夏季转变时的增长速率比夏季向冬季转变时的减少速率要快。以下分别以 1 月和 7 月代表冬、夏季来分析我国大气水分含量的分布特点。

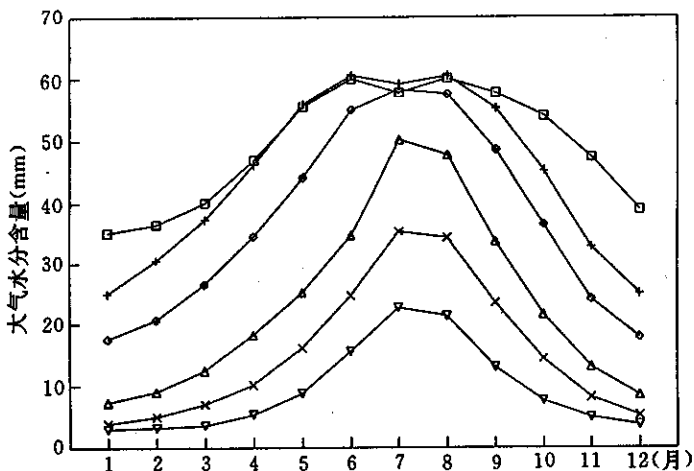


图 1 沿 113°E 不同纬度测站逐月大气水分含量分布(mm)

(□西沙(16.8°N), +广州(23.1°N), ◊长沙(28.2°N),
 △郑州(34.7°N), ×太原(37.8°N), ▽二连浩特(43.7°N)

Fig. 1 Water vapour content at different stations along 113° E(mm)

(□Xisha, +Guangzhou, ◊Changsha, △Zhengzhou, ×Taiyuan, ▽Erenhot)

1 月份(见图 2 a), 我国大部特别是北方地区由于受西伯利亚和蒙古高压的干冷气流影响, 大气水分含量是全年最少的月份。北方大部地区水分含量一般有 3~10 mm, 东北

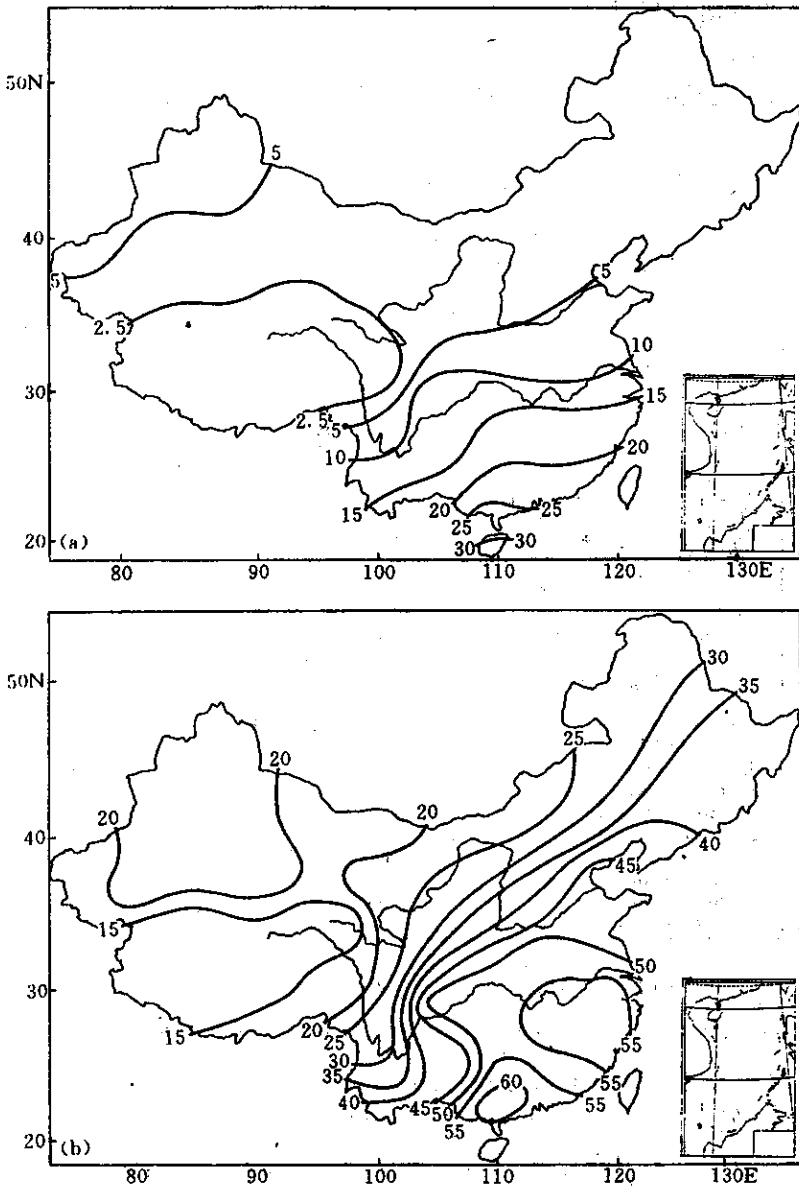


图 2 月平均大气水分含量(mm)

(a) 1月 (b) 7月

Fig. 2 Mean monthly water vapour distribution (mm)

(a) January (b) July

地区只有 2.5~3.5 mm；西北地区略高而青藏高原地区上空水分含量不足 2.5 mm. 中国南方大气水分含量相对较多，华南地区有 20~30 mm，其余大部分地区(江淮、江南和西南)大多在 10~20 mm 之间.

夏季我国大气水分含量最充分，7月份的分布型(见图2b)是从东南向西北递减的。中国东部淮河以南(包括四川盆地)大气水分含量高达50~60 mm；而西北大部只有15~25 mm，青藏高原地区不足15 mm；东北、华北和西南大部地区在25~50 mm之间。其等值线走向既明显反映了地形的影响，也显示出来源于南部海洋的季风影响特点。

3 我国大气水分含量的气候变化趋势

从我国整层大气水分含量的年平均气候变化线性趋势来看(见图3)，近20多年来大

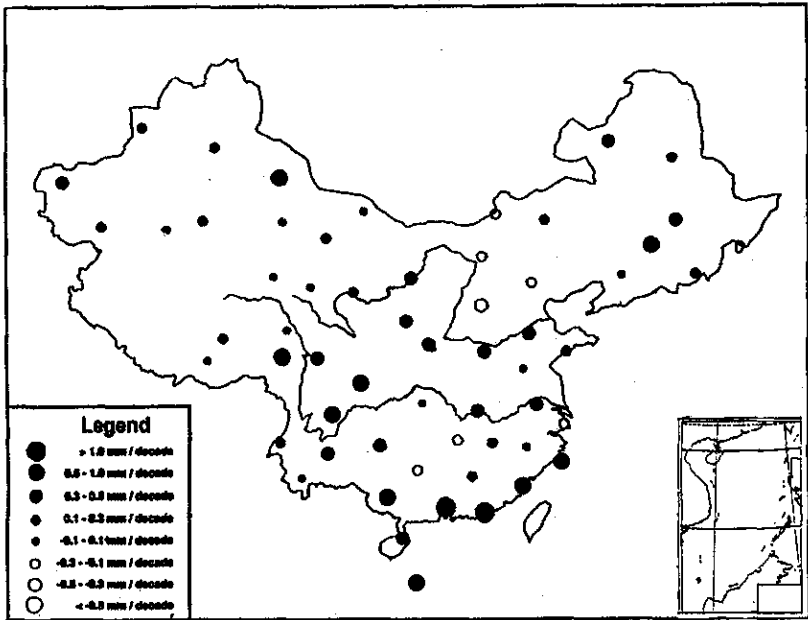


图3 年平均大气水分含量变化趋势分布(mm/10 a)

Fig. 3 Distribution of trend for annual mean water vapor content (mm/10 a)

部分地区对流层大气水分呈增长趋势。其中增长最大的区域在东南沿海、西南和东北地区，其增长率一般为0.4~0.5 mm/10 a，部分地区大于1.0 mm/10 a。然而，在华北和中南部分地区，大气水分呈下降趋势(-0.1~-0.3 mm/10 a)。其余地区变化相对较小。

在各个区域的不同季节里大气水分的变化趋势也是很不一致的(图略)。春季，大气水分在长江流域至江南大部、西南南部地区呈明显减少趋势(-0.2~-0.5 mm/10 a)，其余大部特别是东南沿海、黄河中下游和东北地区主要呈增长趋势。夏季大气水分变化趋势的地理分布与春季明显不同，在淮河以南至华南、西南和东北地区呈明显的增长趋势，大部分地区其增长率为0.5~1.0 mm/10 a，而华北、西北大部地区水分含量却明显减少，其中华北和西北东部地区减少率为-0.4~-0.6 mm/10 a，表现出明显的南部增长北部减少特征(东北除外)。秋季长江中上游、西南、华南沿海以及新疆等大部地区大气水分以0.3~0.6 mm/10 a趋势增长；在我国东部沿海、华北等地大气水分含量变化

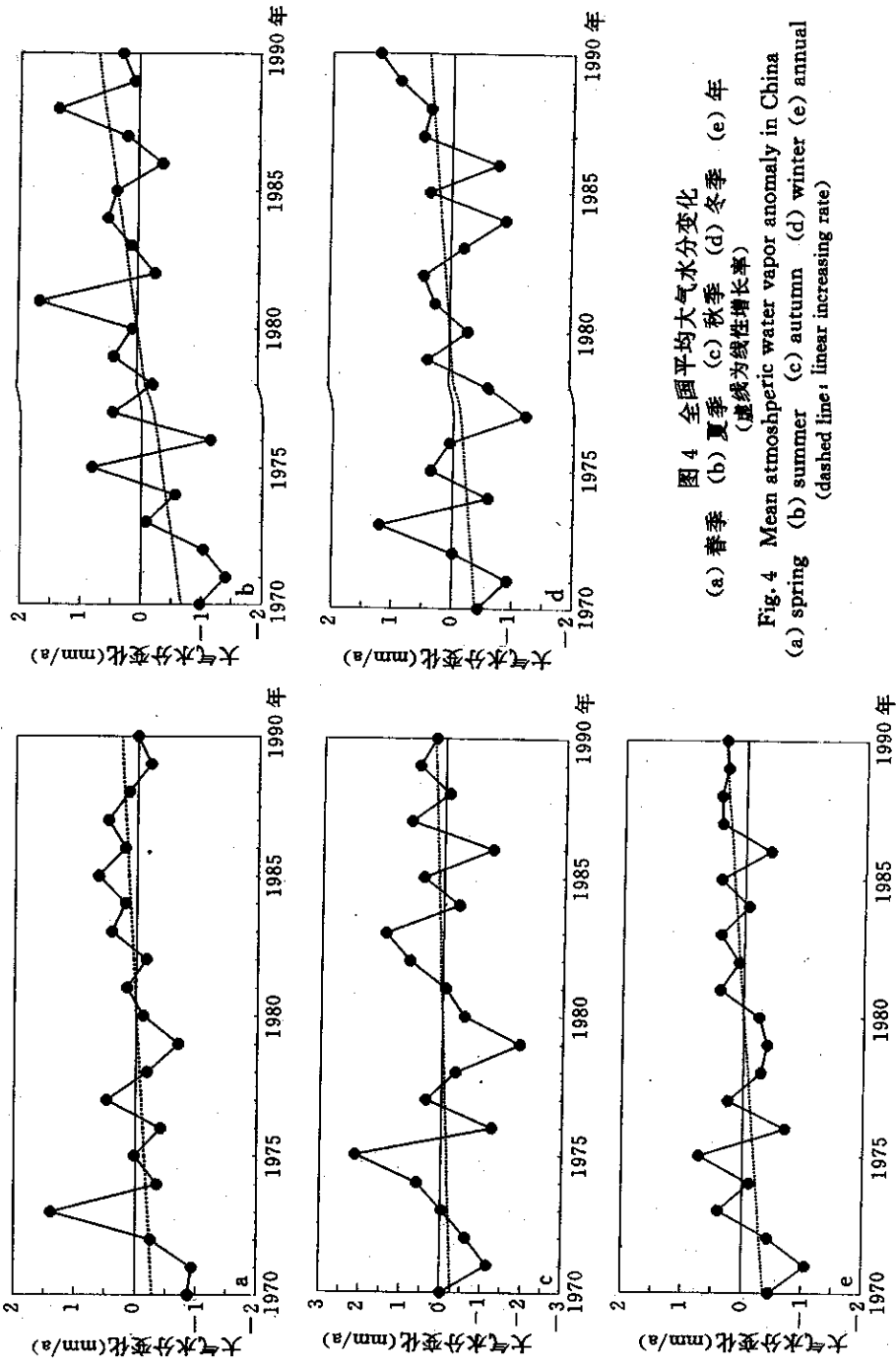


图4 全国平均大气水分变化
 (a) 春季 (b) 夏季 (c) 秋季 (d) 冬季 (e) 年
 (虚线为线性增长率)

Fig. 4 Mean atmospheric water vapor anomaly in China
 (a) spring (b) summer (c) autumn (d) winter (e) annual
 (dashed line: linear increasing rate)

不大. 冬季时, 中国大气水分以普遍略有增长为主要特点, 其中长江中游和华南沿海等地增长较为明显. 从地面到 700 hPa, 700~400 hPa, 400~200 hPa 不同大气层全国平均的水分逐年变化情况(见图 4)来看: 年际变化在秋季最大, 春季最小. 在对流层低层水分增长率比高层要大(见表 1). 但应该认识到, 夏季和对流层低层大气水汽含量本身偏高, 因此其相对增长率不一定很高, 冬季和对流层高层则相对增长量可能更重要一些.

表 1 中国大气水分含量变化趋势估计(mm/10 a)

Table 1 Increase rate for atmospheric water vapor content(mm/10 a)

	地面~700 hPa	700~400 hPa	400~200 hPa	地面~200 hPa
春季	0.13	0.11	0.02	0.29
夏季	0.24	0.10	0.02	0.38
秋季	0.14	0.06	0.02	0.20
冬季	0.12	0.09	0.03	0.27
年	0.17	0.11	0.04	0.26

图 4 中显示出我国大气水分含量具有明显的年际变化, 利用周期图方法对图 4 进行隐含周期提取, 发现序列中存在着比较明显的准 2 年周期和 6~7 年周期, 但在 0.05 信度水平下并不显著.

4 大气水分与地面气温变化的关系

分析近 20 多年我国地面气温的线性变化趋势(图略), 发现年平均地面气温除长江流域略有下降以外, 大部分地区尤其北方呈升温趋势, 东北、华北和西北地区升温最为显著. 对照同期大气水分年平均增长率, 可以清楚地看到在中国东北地区地面气温明显增暖伴随着大气水分含量的明显增长, 但在华北与西北东部地区, 与地面气温增暖相应的是大气水分含量的明显减少, 这可能与我国半干旱地区 70 年代以来沙漠化趋势有关. 在我国南方, 大气水分增长在西南、东南沿海较明显, 而地面气温增暖较小. 进一步分析大气水分增长最大的东北和西南地区四季大气水分和地面气温的相关关系(见表 2),

表 2 不同季节大气水分含量与地面气温的相关关系

Table 2 Correlation coefficients between atmospheric water vapor content and surface temperature in different seasons

	东北	西南
春季	0.68	0.21
夏季	0.62	0.17
秋季	0.63	0.75
冬季	0.65	0.77

我们发现东北地区大气水分与地面气温呈明显的正相关关系, 4 个季节的相关系数均大于 0.6; 但在西南地区虽然 4 个季节中两者之间也呈正相关关系, 但春、夏两季的相关系数很小, 只有在秋、冬两季大气水汽增加伴随着地面气温增暖. Gaffen 等^[11]的研究表明地面气温与大气水分之间的关系取决于温度范围, 这个结论可用以解释西南地区大气水分与地面气温的相关关系随季节变化的问题. 大气水分与地面气温之间的关系是复杂的, 可能与大气水分对短波和长波辐射的不同

影响有关. 大气水分既能够阻止长波辐射外逸产生温室效应, 也可以削减短波辐射影响地面气温. 我们已在文献[12]中通过最高最低温度变化来探讨西南地区温度变化的可能

原因。一些学者认为西南地区的地面温度变化可能与人类活动产生的气溶胶浓度变化有关^[13]，这是值得进一步研究的课题。此外，虽然东北地区大气水分与地面气温之间具有较好的正相关关系，但华北地区平均温度的升高却对应于大气水分的逐年减少。说明大气水分增长产生的温室效应无法完全解释我国北方的地面气温上升趋势，这可能与全球背景上的普遍升温有关。

5 大气水分变化与降水关系

从图 3 中可以看出，在 1970~1990 年期间，华北、广西东北部至湖南大部大气水分呈明显的减少趋势，陈隆勋等^[14]研究表明上述地区 80 年代的降水也是减少的。对年平均大气水分变少明显的一些测站资料序列研究表明，大气水分与降水量之间呈显著相关（信度水平达 0.01 以上）（见图 5）。因此，我国华北及中南一些地区的大气水分减少一方面可能与大气环流的影响有关，另一方面降水量的减少也会影响地面蒸发以减少大气水分，这对地面干燥的华北一带可能很重要。

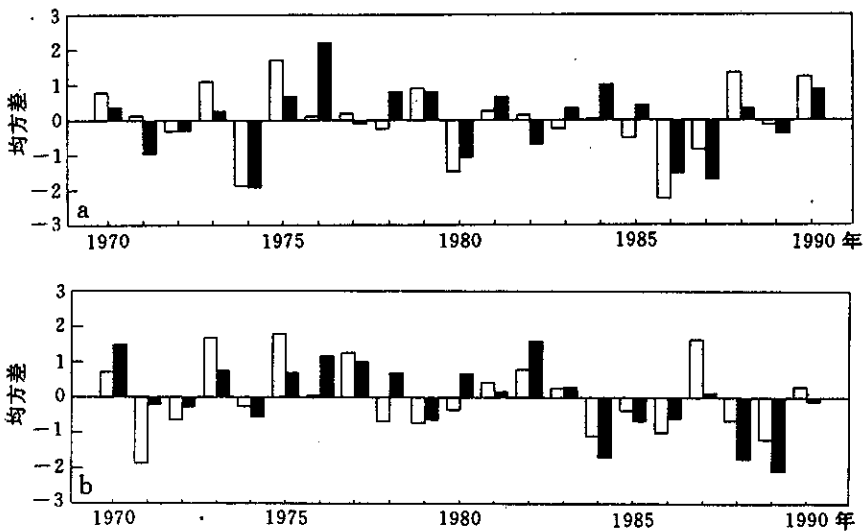


图 5 降水与大气水分的对应关系(黑条为标准化降水距平, 白条为标准化大气水分含量)
(a) 呼和浩特 (b) 桂林

Fig. 5 Normalized series for precipitation and atmospheric water vapour in two selected drying regions (black, precipitation, white, water vapor)
(a) Hohhot (b) Guilin

大气水分的异常会直接影响降水，以下通过对异常旱涝期间我国东部地区夏季大气水分含量异常与降水量的关系来揭示这一点。

1980 年夏季，长江流域经受严重洪涝而华北则出现严重干旱。在长江中下游一些地区 6~8 月降水量比常年偏多 200 mm 左右；在华北降水量较常年同期偏少 100~180 mm。相反，1985 年夏季长江中下游地区降水量比常年偏少 100~250 mm，而华北

至东北地区降水量较常年偏多 100~300 mm. 对比 1985 年夏季大气水分含量距平分布(图略), 发现 1980 年夏季长江中下游上空大气水分含量平均比常年同期偏多 2 mm 以上, 在华北上空则偏少 1~2 mm. 反之, 1985 年夏季长江中下游地区上空水分含量平均偏少 1 mm 以上, 东北地区上空大气水分明显偏多 2~3 mm. 这两个典型年份大气水分正负距平区域与降水量正负距平分布型完全相匹配. 这说明大气水分变异与我国东部降水有很好的关系.

6 小 结

(1) 我国大气水分分布主要依赖于季节、纬度和地理因子, 受季风影响很大, 年变化明显. 夏季大气水分含量丰富, 冬季最少, 东南沿海最多, 向北和内陆深入迅速减少.

(2) 全国平均来看, 大气水分在过去 20 多年中是增长的, 其中增长最多在对流层低层, 主要增长地区在东北、西南和南部沿海地区, 但在华北和中南部分地区呈下降趋势.

(3) 大气水分与地面气温的关系取决于地区与季节. 在东北地区大气水分的增长与地面气温增暖相一致, 华北地区则不然; 在西南地区只有秋冬两季的大气水分与地面气温有明显的相关关系, 这表明大气水分与地面气温的关系是比较复杂的, 有必要深入讨论.

(4) 大气水分与降水具有密切的关系, 我国华北及中南部地区大气水分的减少趋势与降水变化是相一致的.

参 考 文 献

- 1 Bannon J K and Steel L P. Averaged water vapor contents of the air. *Geophys. Memoris*, 1960, No 102. UK Meteorological Office, P 38.
- 2 Starr D O, Melfi S H. The role of water vapor in climate system. Maryland, USA, 30 Oct~1 Nov., 1990.
- 3 徐淑英. 我国的水汽输送与水分平衡. *气象学报*, 1958, 29(1): 33~43.
- 4 谢义炳, 戴武杰. 中国东部地区夏季水汽输送个例计算. *气象学报*, 1959, 30(2): 173~185.
- 5 陆渝蓉, 高国栋. 中国水分气候图集. 北京: 气象出版社, 1984.
- 6 Zou Jinshang and Liu Huilan. Distribution of water vapor content and its seasonal variation over the mainland China. *Advance in Atmospheric Sciences*, 1986, 3(3): 385~396.
- 7 翟盘茂, 周琴芳. 高空资料质量控制的 CHQC 方法. *气象科技*, 1993, (3): 92~97.
- 8 Zhai Panmao and Eskridge R E. Analyses of in homogeneities in radiosonde temperature and humidity time series. *J. Climate*, 1996, 9(4): 884~894.
- 9 Gaffen D J. History changes in radiosonde instruments and practices. WMO Instruments and Observing Method Report No. 50, WMO/TD No. 541. 1992.
- 10 Alduchov A O and Eskridge R E. Improved Magnus' form approximation of saturation vapor pressure. *J. Appl. Meteorol.* 1996, 35, 601~609.
- 11 Gaffen D J, Elliot W P and Robok A. Relationship between tropospheric water vapor and surface temperature as observed by radiosondes. *Geophys. Res. Lett.*, 1992, 19: 1839~1879.
- 12 翟盘茂, 任福民. 我国近四十年最高最低温度变化规律研究. *气象学报*, 1997, 55(待发表).
- 13 李晓文. 四川地区近四十年来的降温及其可能机制分析. 中国气象科学研究院硕士论文, 1994.
- 14 陈隆勋, 邵永宁, 张清芬, 等. 近四十年我国气候变化的初步分析. *应用气象学报*, 1991, 2(2): 164~173.

A STUDY OF CLIMATE CHANGES OF ATMOSPHERIC WATER VAPOUR IN CHINA

Zhai Panmao Zhou Qinfang

(*National Climate Center, Beijing 100081*)

Abstract

The climate distribution features of atmospheric water vapour and the climatic change trend for recent 20 years are analyzed by using the sounding data twice daily which are made through the quality control of CHQC and the check of sequence homogeneity. The linkages between the change trend of atmospheric water vapour and surface air temperature, and between summer water vapour content and precipitation anomaly of eastern China are discussed.

Key words: Sounding data Atmospheric water vapour Changing trend