

郭艳君, 丁一汇. 2014. 1958~2005 年中国高空大气比湿变化 [J]. 大气科学, 38 (1): 1–12, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12212. Guo Yanjun, Ding Yihui. 2014. Upper-air specific humidity change over China during 1958–2005 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (1): 1–12.

1958~2005 年中国高空大气比湿变化

郭艳君 丁一汇

中国气象局国家气候中心, 北京 100081

摘 要 利用经过质量控制和均一化的 92 站探空露点温度序列, 研究了中国高空大气比湿气候学特征和 1958~2005 年比湿时间、空间演变以及不同时段线性变化趋势地区和季节差异。中国比湿气候场特征显示, 垂直方向上 90% 以上的水汽集中在对流层中低层, 空间呈南高北低的纬向分布。通过累积距平、滑动平均和突变点分析等方法研究了中国平均高空比湿的年代际变化, 得到 1958~2005 年中国对流层中低层大气比湿经历“湿”、“干”、“湿”阶段性变化。不同时段线性变化趋势分析表明, 1958~2005 年对流层低层比湿呈上升趋势, 对流层中层、高层和平流层下层为下降趋势; 1979~2005 年对流层低层上升趋势和对流层高层下降趋势均较整个时段明显增强。近 50 年来中国高空各层温度与比湿变化基本同步, 统计达到显著相关, 说明温度是影响比湿变化的重要因子。趋势的空间分布显示对流层下层全国大部比湿为上升趋势, 且 1979 年以来上升趋势更加明显, 对流层中层趋势呈北升南降分布, 对流层高层多为下降趋势。中国五个分区中西北地区对流层低层比湿上升趋势最明显, 长江和华南地区升幅较小。1958~2005 年对流层下层各季节比湿变化趋势差异较明显, 上升趋势发生在夏、冬两季, 1979~2005 年四季比湿均呈上升趋势, 其中夏季上升趋势最为明显。

关键词 中国 高空大气 探空观测 比湿 趋势

文章编号 1006-9895(2014)01-0001-12

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12212

Upper-Air Specific Humidity Change over China during 1958–2005

GUO Yanjun and DING Yihui

National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract The changes in the upper-air specific humidity during 1958–2005 were studied based on time series of homogenized radiosonde dewpoint data from 92 selected stations in China. The data suggest that in the vertical direction more than 90% of water vapor is concentrated in the lower and middle troposphere, and the horizontal structure shows zonal distribution decreasing with latitude. Temporal analysis of the annual specific humidity time series by using the moving average and accumulation anomalies shows decadal variability in the lower and middle troposphere with negative anomalies from late 1960s to early 1980s and positive anomalies after the late 1980s. The linear trend of the average specific humidity in China is positive in the lower troposphere and negative above the mid-troposphere for 1958–2005. During 1979–2005, a positive trend in the lower troposphere and a negative trend in the lower stratosphere were both prominent. Time series of temperature and specific humidity in the troposphere and lower stratosphere simultaneously changed during 1958–2005; furthermore, their correlations at all levels are statistically significant, which suggests that temperature strongly affects the specific humidity changes. The spatial distribution of the linear trend suggests that the specific humidity in the lower troposphere increase in most stations during 1958–2005 and the increasing trends are more obvious after 1979. In the mid-troposphere, negative trends are in the regions south of the Yangtze River and positive

收稿日期 2012-12-04, 2013-04-26 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划 2010CB428606、2013CB430201

作者简介 郭艳君, 女, 1973 年出生, 正研级高工, 主要从事气候监测诊断研究。E-mail: gyj@cma.gov.cn

trends are in the rest of China. The analysis of the vertical profiles of the linear trends in five subregions of China shows that the highest positive trends are over Northwest China and slightly positive trends are over the regions south of the Yangtze River in the lower and middle troposphere. During 1958–2005, the trends of seasonal specific humidity in the lower troposphere exhibit obvious differences with a wetting trend in the summer and winter, and a drying trend in spring and autumn. In contrast, during 1979–2005, the specific humidity trends for all seasons are consistently positive, and the wetting trend in the summer is more prominent in the lower and middle troposphere.

Keywords China, Upper air, Radiosonde observation, Specific humidity, Trend

1 引言

水汽是气候中的重要变量。对流层下部的水汽凝结过程是大气潜热传输的关键 (Trenberth and Stepaniak, 2003a, 2003b); 同时水汽也是重要的温室气体, 占晴天自然温室气体作用的 60% (Kiehl and Trenberth, 1997), 是最重要的气候变化正反馈因子 (Held and Soden, 2000)。因此, 大气水汽变化是气候学和天气学研究的重要问题。通常用露点温度、绝对湿度相对湿度和比湿等参考指标表征水汽变化。绝对湿度是单位体积空气中所含水汽的质量 (单位: g m^{-3}), 比湿是水汽与湿空气的质量之比 (单位: g kg^{-1})。与绝对湿度相比, 气压变化导致的大气膨胀或收缩对比湿的影响不大, 因此在描述全球大气水汽分布中比湿尤为重要。研究水汽变化通常基于探空观测、卫星遥感和再分析三种资料来源, 其中探空观测始于 20 世纪 50 年代后期, 具有历史序列长、区域尺度上观测站点分布密集、垂直分辨高等优点, 但前期的感应器问题较多而且频繁的更新仪器导致了人为的不连续性 (Elliott et al., 2002), 在对流层高层可信度也非常有限 (Elliott and Gaffen, 1991)。在海洋和无观测台站陆地区域卫星观测具有显著的优越性, 特别是 1979 年后红外卫星观测 (Television Infrared Observation Satellite, TIROS) 业务垂直探测仪和多通道微波扫描辐射计 (Scanning Multichannel Microwave Radiometer, SMMR) 的应用为高空水汽提供新的信息来源, 1987 年应用特殊传感器微波成像仪 (Special Sensor Microwave Imager, SSM/I) 后资料质量得到提高。卫星遥感提供了海洋上空最为可信的对流层低层大气水汽总量序列 (Trenberth et al., 2005)。上世纪 90 年代后期以来, 再分析资料也成为研究水汽变化的资料来源之一。本文将通过探空观测的露点温度转化的比湿序列, 研究中国对流层至平流层下层比湿变化。

IPCCAR4 (2007) 总结全球高空水汽变化研究

成果时指出, 上世纪 70 年代以来对流层低层大气水汽全球总体呈上升趋势, 但存在明显的区域差异, 其中北半球和海洋为明显的上升趋势; 对流层中上层相对湿度无明显趋势, 但比湿上升趋势较明显, 这与全球对流层温度升高一致; 平流层水汽 20 世纪 50 年代以后有显著的上升趋势。海洋上空对流层低层在近 20 年出现较大的变率, 1988~2004 年间海洋上空水汽上升趋势为 $1.2\% (10\text{a})^{-1}$ 。McCarthy et al. (2009) 基于北半球探空资料指出北半球热带外地区对流层中低层比湿呈上升趋势 [$1\% \sim 5\% (10\text{a})^{-1}$]。Paltridge et al. (2009) 基于 NCEP 再分析资料得到 1973~2007 年北半球对流层中下层比湿上升, 而南半球和热带地区 850 hPa 以上各层均为显著的下降趋势。Dai et al. (2011) 基于均一化探空露点温度得到全球对流层大气水汽呈增加趋势。

高空大气水汽来源于水平和垂直方向的水汽输送, 气候因子的差异也可能导致高空大气水汽分布的区域差异。中国高空水汽变化与全球或北半球尺度的变化差异如何? 全国呈一致性变化还是有明显的地区差异, 这是本文要解决的主要问题。实际上, 中国高空水汽研究可追溯至上世纪 50 年代末, 徐淑英 (1958)、谢义炳和戴武杰 (1959) 等学者就十分关注我国大气水分的变化, 当时受到资料限制通常采用个例分析方法研究我国水汽输送和水分平衡。中国气象局整编出版中国高空气候资料后, 邹进上和刘惠兰 (1981)、陆渝蓉和高国栋 (1984) 利用 100 余个探空站资料计算了我国高空水汽输送特征。我国大气探空观测始于 20 世纪 50 年代后期, 60 年代中期进行了仪器换型和辐射方法订正, 由此导致的非均一性问题在 90 年代以前的研究中关注较少。Zhai and Eskridge (1996)、翟盘茂 (1997) 首次研究了中国探空资料的非均一化性问题, 并基于均一化序列研究了 1970~1990 年我国大气水分气候特征及变化趋势 (Zhai and Eskridge, 1997; 翟盘茂和周琴芳, 1997)。Guo and Ding (2009, 2011) 基于较为完整的中国百余个探空站资料研究

了均一化过程中的不确定性,指出中国对流层中低层温度呈上升趋势,并在 80 年代后升温趋势明显增加。Zhao et al. (2012) 基于均一化全球探空资料集 (Dai et al., 2011) 研究了 1970~2008 年以来中国对流层湿度变化,指出对流层比湿受 80 年代中期温度上升的影响总体也呈上升趋势。关于气候事件对湿度的影响, Trenberth et al. (2005) 指出海洋上空大气水汽含量与 ENSO 事件关系密切, Ross and Elliott (2001) 指出火山爆发释放的烟尘会影响对流层上部和平流的水汽含量。SMMR 和 SSM/I 等卫星序列检测到热带海洋上空水汽总含量对 ENSO 和火山爆发的响应, 1982~1983 年、1986~1987 年、1997~1998 年 ENSO 暖事件后热带海洋上空水汽总量上升 1~2 mm; 1991 年 Pinatubo 火山爆发后对流层降温, 水汽亦稍有下降 (IPCCAR4)。Guo and Ding (2009) 研究了中国对流层温度对火山爆发和 ENSO 事件的响应与全球结果一致, 而中国湿度的响应尚无明确结论。

本文选取探空资料有效率大于 70% 的 92 个探空站的层露点温度序列进行质量控制和均一化后转化为比湿序列, 首先分析中国高空各层季节和年均比湿的气候学特征; 其次, 从不同时段距平和线性变化趋势、滑动平均和突变点等角度分析了中国平均高空比湿的时间变化特征、与同期中国高空温度变化的关系以及对火山爆发和 ENSO 事件的响应, 最后分析了不同时段比湿线性变化趋势的空间分布, 各分区和季节变化趋势差异及原因。

2 资料和方法

2.1 台站选取

原始资料来自中国约 120 个高空气象站 1958~2005 年逐日 00 时和 12 时 (协调世界时) 850、700、500、400、300、200 和 100 hPa 的露点温度序列。与地面观测 672 个国家基准基本气象站相比, 中国探空站点分布明显较地面稀疏, 且具有多层次结构, 观测仪器的感应和传输方式决定探空序列比地面观测具有更高的缺测率, 特别是上世纪 60 年代探空网初建时期。为避免高缺测序列对区域平均结果的代表性和可信度产生影响, 需要舍去缺测率较高的台站。如何选定取舍的阈值, 既去除缺测的影响, 还能最大限度地应用现有数据, 获得更具代表性的结果, 是资料处理的首先面临的问题。Gaffen et al. (2000) 利用全球探空温度集研究对流层和平

流层温度变化时将最小资料有效率 85% (Minimum Data percentage requirement, MDR) 作为选取台站的标准。对于区域尺度这一标准可适当降低。Guo and Ding (2009) 基于中国 1958~2005 年 850~100 hPa 探空温度, 研究了最小资料有效率与台站数的关系, 指出随最小资料有效率阈值上升满足条件的台站数减少, MDR 处于 70% 以下时, 台站数变化较平缓, 当 MDR 升到 70% 以上时台站数减少较为剧烈。再结合不同 MDR 对趋势的影响, 选 MDR 70% 作为台站取舍标准。本文沿用这一方法选取满足 MDR 为 70% 的 92 个探空站作为研究对象, 站点空间分布如图 1 所示。

2.2 质量控制和均一化方法

我国自从上世纪 50 年代开展探空观测以来观测仪器和方法历经数次变化, 1966 年左右进行了仪器换型和辐射订正变更。有研究表明 20 世纪 60 年代 500 hPa 以上探空湿度资料可信度较差 (Elliott et al., 1991, 2002)。翟盘茂 (1997) 指出中国高空湿度 60 年代探测值偏高并探查到与仪器更新相关的间断点。因此利用探空序列研究长期变化趋势时, 原始资料的质量控制和均一化处理非常必要。首先用静力平衡法对 92 个站逐日两个时次的露点温度序列进行质量控制, 其基本原理为当两气压层之间的静力学残差超过判据, 该记录被认定为错误资料 (Collins and Gandin, 1990)。经过质量控制后, 逐日两个时次平均得到日平均序列, 任一个时次缺测则日平均为缺测; 由逐日资料平均得到月序列, 当月有效日值不足 15 天则为缺测。季内 3 个月平均即为季平均序列, 有效月不足 2 个月定义季值为缺测。利用两相回归法对季平均露点温度序列做均一化处理, 其基本原理是对任一时间点前后的序列进行线性回归模拟, 当两序列的残差达到最小值时该时间的资料为间断点。在找出所有可能不连续点后, 进一步检验每个可能间断点的显著性, 通过检验的可能间断点才是真实的间断点, 订正间断点前所有的点后得到均一化序列 (方法详见郭艳君等, 2009; Guo and Ding, 2009, 2011)。

利用均一化露点温度转换为比湿, 简化转换公式如下 (翟盘茂, 1997):
当气温度高于 -40°C 时,

$$\begin{cases} E_s = 1.000071e^{0.0000045p} E, \\ E = 6.1094e^{\frac{17.625T}{243.04+T}}, \end{cases} \quad (1)$$

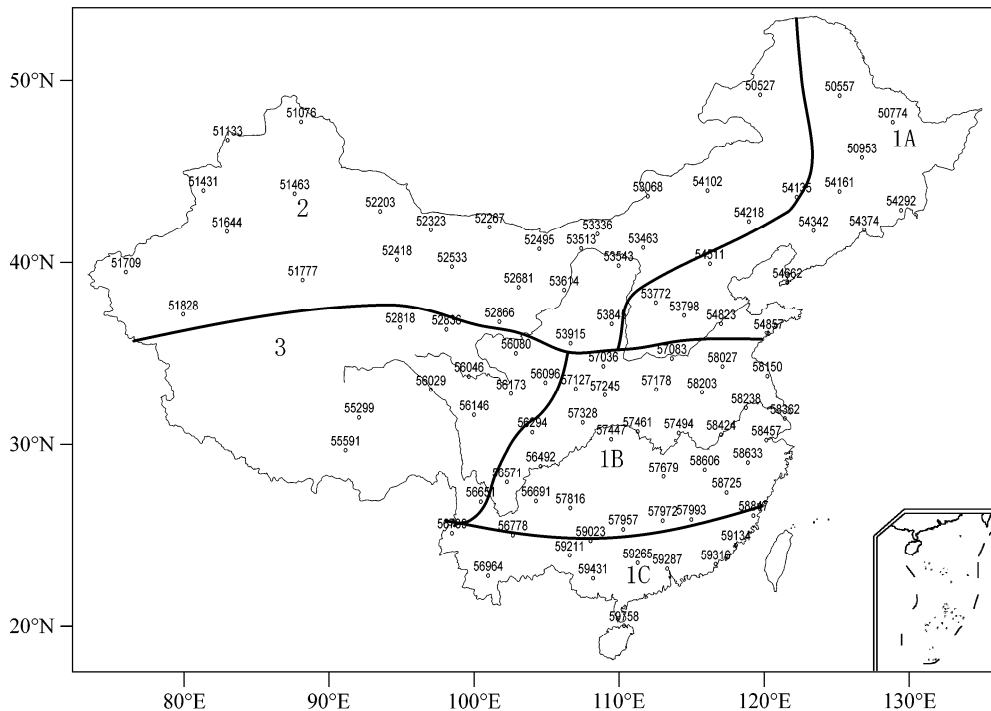


图1 中国探空台站和5个气候分区分布

Fig. 1 Distribution of radiosonde stations and five sub-climatic regions in China

在气温低于 -40°C 时,

$$\begin{cases} E_s = 0.99882e^{0.000008P} E, \\ E = 6.1121e^{\frac{22.587T}{273.86+T}}, \end{cases} \quad (2)$$

其中, T 为气温, p 为气压, E 为水汽压, E_s 为饱和水汽压。

$$\text{RH} = \frac{E_s(T_d)}{E_s(T)} \quad (3)$$

$$q = 0.622 \frac{E_s(T) \text{RH}}{p} \quad (4)$$

其中, T_d 为露点温度, RH 为相对湿度, q 为比湿。

2.3 分区划分和区域平均

鉴于中国地域宽广, 跨约 50 个纬度和 62 个经度, 不同区域大气环流系统、自然地理条件和人类活动的差异决定了高空气候变化具有区域性, 因此分区研究非常必要。么枕生 (1951) 曾将中国分为季风气候、温带内陆气候、温带高原气候, 其中季风气候中又分为热带、大陆型和海洋性。沿用以上气候区划并考虑高空大气特征和中国季风降水的特点, 将中国划分为东部季风区、西北干旱区和青藏高寒区三个大区, 其中东部季风区按照气候特征不同自南向北分为华南、长江流域、东北和华北区域三个亚区。五个分区划分见图 1。

通过气候距平法 (Jones, 1994) 得到区域平均

序列。这一方法用于地表要素研究时, 由于不同区域地面测站分布密度差别较大, 通常需要先通过格点平均去除分布密度差别过大的影响, 我国探空观测网分布明显较地面测站稀疏 (见图 1), 网格内站数较少导致网格平均与算术平均相当。因此本文采用距平平均法, 即根据各站各层比湿和 1971~2000 年气候平均场计算距平, 再由研究区域内所有站距平的算术平均得到区域平均。

3 研究结果

3.1 中国高空比湿的气候学特征

表 1 为中国平均各等压面各季节 1971~2000 年气候平均值和标准差。各层比湿平均值表明, 90% 以上的水汽集中在 500 hPa 以下大气层, 400 hPa 气压层上的比湿仅为 850 hPa 的 10%, 300 hPa 以上各层比湿和仅为 850 hPa 的 1%。比湿在垂直方向上变化显示对流层 850~200 hPa 比湿随高度增加而减小, 但 100 hPa 呈现季节差异: 夏季随高度上升比湿减少 (降幅为 0.032 g kg^{-1}), 春秋变化较小 (降幅分别为 0.001 和 0.005 g kg^{-1}), 冬季则上升 0.007 g kg^{-1} 。100 hPa 冬季比湿随高度上升的原因与对流层顶高度季节变化有关: 夏季随着对流层温度升高, 对流层顶高度上升, 我国南方大部地区 100

hPa 气压层在对流层顶以下, 温度随高度上升而递减, 比湿也随高度下降; 春秋季 100 hPa 位于对流层顶附近, 温度随高度变化小, 因而与 200 hPa 比湿数值接近, 冬季我国大部地区对流层顶位于 120~280 hPa, 100 hPa 处于平流层下层, 温度随高度略有增加, 因而比湿也较 200 hPa 略有上升。季节平均值和标准差表明, 夏季比湿最大, 年际变化的离散程度最高, 其次为春、秋季, 冬季最小。各季节比湿均值显示对流层夏季比湿最高, 春秋其次, 冬季最小, 这除了与夏季平均温度高有关外, 还与我国季风性气候有关。夏季, 源于印度洋的西南季风和西太平洋的东南季风为我国带来充足的水汽, 造成东部和南部季风区比湿增加; 冬季我国大部地区盛行寒冷干燥的西北和东北气流, 比湿值下降。标准差的季节特征与平均值一致, 同样呈现夏季最高冬季最低。夏季比湿标准差高主要是由于夏季温度高、比湿绝对数值大, 同时也与夏季大气环流年际变化较大有关。由于对流层上层水汽被认为是气候变化的放大器 (Held and Sold, 2000), 同时对流层上层和平流层下层也是对流层与平流层之间的过渡区域, 是大气动力、热力和大气成分结构发生巨大转换的区域, 水汽和臭氧等痕量气体的垂直分布与对流层顶的热力结构特征有很大关联 (卞建春, 2009), 对流层上部较低层大气的水汽含量对自然的温室效应 (气候变暖引起的反馈) 的贡献更为显著。因此尽管对流层上层到平流层下层水汽含量远小于对流层中低层, 但其时空演变和在气候变化和大气化学中所起作用正日益受到科学家的关注。

表 1 中国平均高空各层各季节比湿 1971~2000 年平均值和标准差 (单位: g kg^{-1})

Table 1 Average and standard deviation of seasonal specific humidity averaged in China (unit: g kg^{-1} , base period: 1971–2000)

气压层 (hPa)	冬季 12~2 月		春季 3~5 月		夏季 6~8 月		秋季 9~11 月	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
850	2.439	0.043	4.543	0.061	9.599	0.084	5.021	0.069
700	1.837	0.03	3.191	0.042	6.351	0.06	3.497	0.052
500	0.519	0.013	1.063	0.02	2.566	0.038	1.267	0.026
400	0.23	0.006	0.483	0.009	1.304	0.021	0.59	0.012
300	0.063	0.002	0.132	0.003	0.446	0.01	0.174	0.005
200	0.021	0.001	0.023	0.001	0.054	0.001	0.028	0.001
100	0.028	0.001	0.022	0.001	0.022	0.001	0.023	0.001

1971~2000 年平均比湿气候场空间分布 (见图 2) 显示年均比湿基本呈南高北低的纬向分布, 数

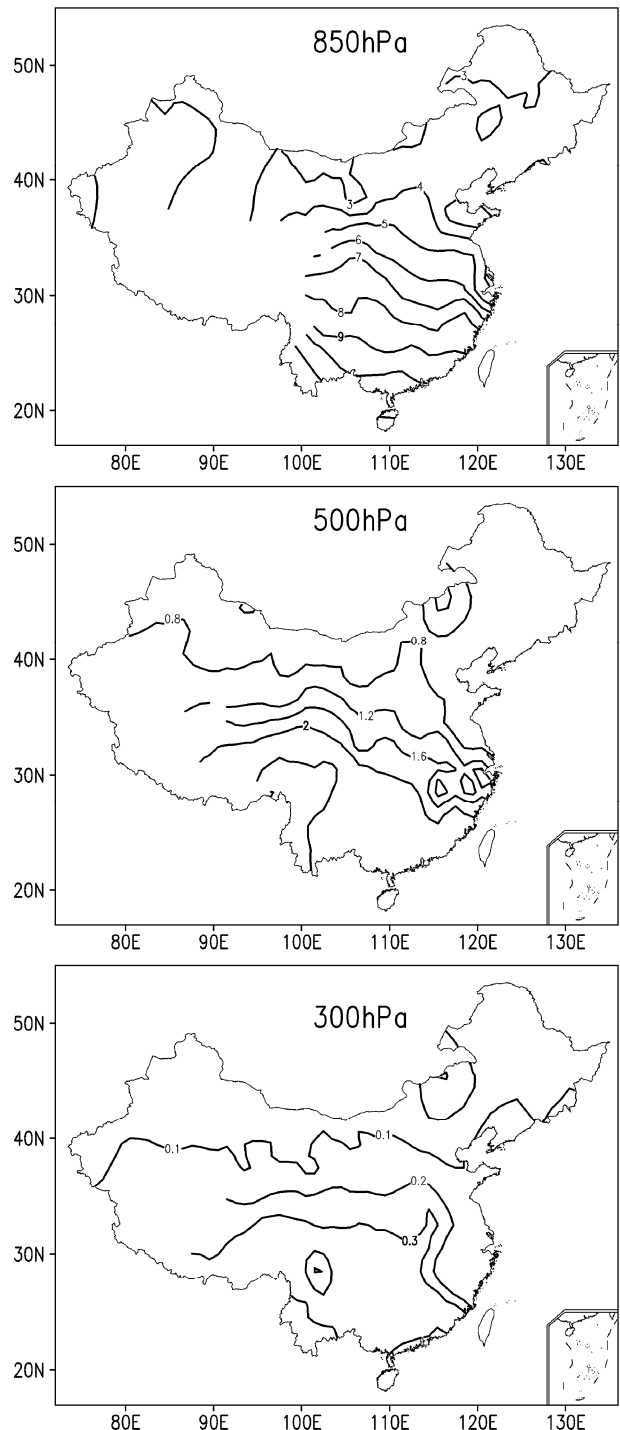


图 2 中国 850 hPa、500 hPa 和 300 hPa 年平均比湿 (单位: g kg^{-1}) 气候场 (1971~2000 年平均)

Fig. 2 Climatological distribution of mean annual specific humidity (g kg^{-1}) in China at 850 hPa, 500 hPa and 300 hPa (based period is 1971–2000)

值随纬度增高呈梯度递减, 850、500 和 300 hPa 变化范围分别是 $2\sim12 \text{ g kg}^{-1}$ 、 $0.1\sim2.5 \text{ g kg}^{-1}$ 和 $0.01\sim0.6 \text{ g kg}^{-1}$ 。比湿纬向分布主要是受南北温度差异的影响。除温度外, 海陆差异也是影响比湿的又一因素, 由于大气中水汽主要来源于地表蒸发, 海洋上

空水汽充沛,我国南部和东部沿海地区比湿明显高于西部和北部内陆地区。

综合上述结果,中国高空大气比湿的气候学特征表现为对流层内大气比湿随高度升高迅速下降,90%以上的水汽集中在 500 hPa 以下,空间分布呈南高北低的纬向分布,温度、海陆差异和大气环流是影响高空比湿分布的主要因子。

3.2 时间变化特征

本节以 850 和 700 hPa、500 和 400 hPa、300 和 200 hPa、100 hPa 分别代表对流层低、中、高层和平流层下层,以中国平均的年均比湿距平序列为研究对象分析 1958~2005 年中国高空比湿时间变化。由于 60 年代探空资料缺测较多且存在明显的非均一性,卫星遥感序列始于 1979 年,综合考虑多源资料的完整性和可比性,将研究时段分为 1958~2005 年、1958~1978 年和 1979~2005 年研究其线性变化趋势(表 2)。通过年代距平(表 2)和多年滑动平均(图 3)分析年代际变化特征,通过突变点分析确定发生显著变化的年份。

不同时段线性趋势(表 2)表明,1958~2005 年,对流层低层为上升趋势[850 hPa 为 $0.018 \text{ g kg}^{-1} (10\text{a})^{-1}$],对流层中层(500 和 400 hPa)、高层(300 和 200 hPa)和平流层下层(100 hPa)为下降趋势;1958~1978 年,对流层各层均为下降趋势,平流层下层探空资料缺测较多,不能得到准确的趋势值;1979~2005 年,对流层低层比湿上升趋势较整个时段明显增加,850 hPa 为 $0.090 \text{ g kg}^{-1} (10\text{a})^{-1}$,略小于北半球对流层低层比湿上升趋势 $0.10 \text{ g kg}^{-1} (10\text{a})^{-1}$ (McCarthy et al., 2009),对流层中层变化趋势接近于零,对流层高层仍为弱下降趋势,平流层下层下降趋势明显增强。根据克拉珀龙方程,比湿与温度变化密切关。Guo and Ding (2009) 指出

1958~2005 中国对流层低层温度趋于上升 [$0.11 \text{ K} (10\text{a})^{-1}$],对流层中层为弱降温趋势 [$-0.06 \text{ K} (10\text{a})^{-1}$],对流层高层和平流层低层温度趋于下降 [-0.10 和 $-0.17 \text{ K} (10\text{a})^{-1}$];1958~1978 年整层均为降温趋势,1979~2005 年对流层低层升温和平流层低层的降温趋势均加强。与比湿变化趋势比较可得三个研究时段中国高空大气比湿与温度变化均呈一致的变化趋势:温度上升(下降),比湿上升(下降),这是由于大气最大含水量(饱和水汽压)随温度升高(降低)而呈指数增大(减小),同时,温度上升(下降)导致蒸发加强(减弱),导致大气中水汽增加(减少),比湿上升(下降)。同时,水汽是一种温室气体,其增加或减少导致温度上升或下降,两者具有正反馈作用。统计了 1958~2005 年中国高空温度和比湿的相关,结果表明对流层低、中、高层和平流层下层均达到显著相关,相关系数分别为 0.77、0.78、0.80 和 0.78,进一步证明了中国高空温度与比湿的同步变化。这一结论与 Ross et al. (2002) 对北美地区探空温度和比湿的相关研究结果一致。各不同年代距平(表 2)表明中国对流层中下层大气比湿由 1960 年代的“湿”(正距平)转变为 1970 和 1980 年代“干”(负距平)再转变 1990 年代的“湿”(正距平),这与中国对流层中低层温度“暖”“冷”“暖”呈同步变化 (Guo and Ding, 2009)。同时应该注意到 1960 年代前期对流层整层“湿”(正距平)可能与测湿元件存在局限造成的数值偏高(翟盘茂, 1997)有关,这一偏差可能造成 1958~1978 年整层比湿呈下降趋势。11 年滑动平均(见图 3)也显示对流层低层和中层大气比湿在 1960 年代中期由正转负,1980 年代后期由负转正。突变分析检查出对流层中低层比湿序列在 1965 年和 1987 年出现超过 5%显著性

表 2 中国平均比湿不同时段距平 (g kg^{-1}) 及其线性变化趋势 [$\text{g kg}^{-1} (10 \text{ a})^{-1}$] 比较

Table 2 Comparison among decadal anomalies (g kg^{-1}) and linear trends in specific humidity [$\text{g kg}^{-1} (10 \text{ a})^{-1}$] averaged in China for different periods

气压层 (hPa)	不同时段比湿距平 (g kg^{-1})					比湿线性变化趋势 [$\text{g kg}^{-1} (10 \text{ a})^{-1}$]		
	1960~1969	1970~1979	1980~1989	1990~1999	2000~2005	1958~1978	1979~2005	1958~2005
100	-0.018	-0.018	0.001	0.001	0.001		-0.021	-0.001
200	0.002	0.001	0.003	0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.001
300	0.018	0.003	0.005	0.002	-0.010	-0.024	-0.004	-0.006
400	0.020	-0.011	0.002	0.009	-0.024	-0.038	-0.001	-0.005
500	0.072	-0.026	-0.013	0.016	-0.039	-0.091	0.004	-0.011
700	0.119	-0.064	-0.021	0.076	0.016	-0.135	0.057	0.005
850	0.178	-0.094	-0.051	0.127	0.083	-0.184	0.090	0.018

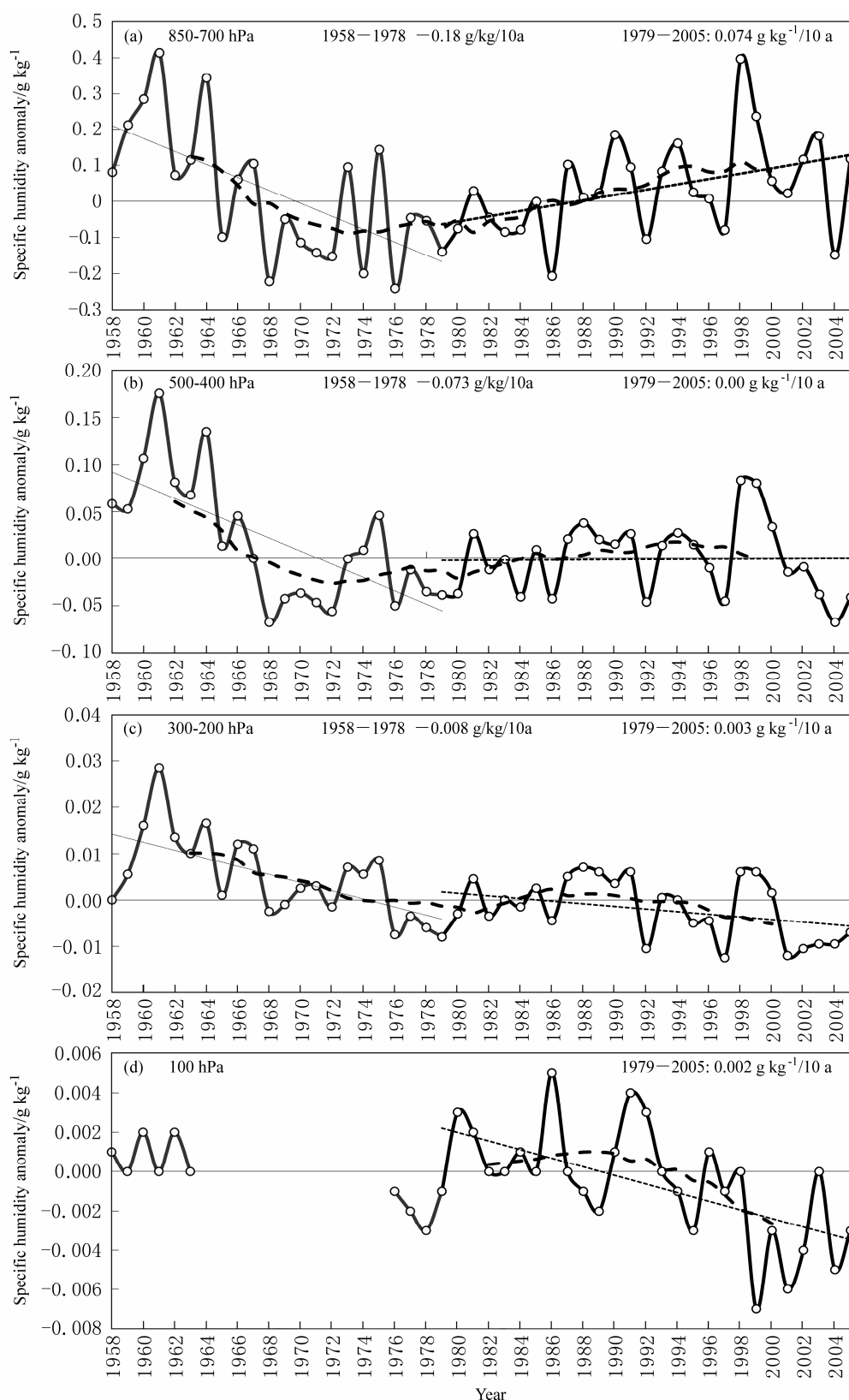


图 3 1958–2005 年中国年平均比湿距平 (单位: g kg^{-1}) 时间序列: (a) 对流层下层; (b) 中层; (c) 上层; (d) 平流层下层。带圆实线: 年均比湿距平; 细虚线: 线性趋势; 粗虚线: 11 年滑动平均

Fig. 3 Time series of mean annual specific humidity anomalies (g kg^{-1}) averaged over China during 1958–2005: (a) Lower troposphere; (b) middle troposphere; (c) upper troposphere; (d) lower stratosphere. Solid line with circles: mean annual anomaly; thin dashed line: linear trend; bold dashed line: 11-year moving average

检验的突变点,同一时段中国对流层低层和中层温度也出现超过 5%显著性检验的突变点(1967 和 1987 年)。1966 年中国多数探空站经历了仪器换型和订正方法的重大变更,1966 年左右的突变点可能与这些变更相关,而非气候意义的突变点;历史沿革信息中 1980 年代无变更记录,对照对流层中低层温度和比湿距平序列 1987 年均由负距平转为正距平,说明高空温度和湿度年代际转折也基本同步,可见中国高空温度和比湿互为影响因子,两者同步变化。

Guo and Ding (2009) 曾指出火山爆发导致平流层升温和对流层降温,强 ENSO 暖事件造成我国对流层温度提高 1~2 K,同时平流层低层也出现明显的降温。由于高空温度与比湿的同步变化,可以推得火山爆发和 ENSO 事件也是影响中国高空比湿变化的重要因子。分析了 1963 年 Agung、1982 年 El Chichon 和 1991 年 Pinatubo 三次火山爆发事件、1997/1998 年强 ENSO 暖事件和 1976 年 ENSO 强冷事件前后 24 个月比湿变化,结果表明,火山爆发后我国对流层比湿下降 0.004~0.06 g kg⁻¹,下降幅度随高度增加降低。1997/1998 年 20 世纪最强的 ENSO 暖事件后对流层低层、中层和高层比湿分别上升 0.19、0.04 和 0.03 g kg⁻¹,1998 年对流层低层和中层比湿均为 1979 年以来的最高值,对流层高层为 1979 年以来的次高值;1976 年强 ENSO 冷事件后对流层下、中和上层比湿下降了 0.11、0.06 和 0.01 g kg⁻¹,1976 年对流层低层、中层和高层比湿分别为 1958 年以来第 1、第 4 和第 8 低值(图 3),由此证明火山爆发和 ENSO 暖、冷事件均是影响中国高空大气比湿变化的因子。McCarthy et al. (2009) 对北半球对流层比湿序列中也可呈现一致的峰值和谷值,说明中国比湿对于火山爆发和 ENSO 事件的响应与北半球一致。

3.3 线性变化趋势空间分布

全国高空比湿变化线性趋势空间分布表明,1958~2005 年(见图 4 左),对流层下层(850~700 hPa)多数站比湿呈上升趋势(空心圆表示上升)。850 hPa 上有 42 个站比湿呈上升趋势,其中 22 个站达到显著(黑色表示通过 5%的显著性水平检验),主要分布在西北和华北地区,33 个站呈下降趋势,3 个达到显著,主要分布华东地区。700 hPa 与 850 hPa 分布类似(图略),上升和下降趋势比例为 45:40,达到显著的比例为 22:7。对流层中层(500~400 hPa)比湿变化趋势呈西北部上升东南部下降分布。500 hPa 上,西北地区大部呈上升趋

势,长江以南大部地区、江淮等地呈下降趋势,上升和下降趋势站数比为 39:53,但显著上升的站多于下降的站(27:23)。400 hPa 趋势分布特征与 500 hPa 相近(图略),中东大部为下降趋势,西部为上升趋势,下降趋势站略有增加,上升和下降趋势比例为 38:54,达到显著的比例为 20:21。对流层高层(300~200 hPa)多数站比湿呈下降趋势,特别是 300 hPa 最为明显,共有 74 个站为下降趋势,50 个达到显著。平流层下层(100 hPa,图略)仅东北、内蒙古和新疆北部有资料,呈上升和下降的站数为 15:8,达到显著的 9 个站均为下降趋势。1979~2005 年(见图 4 右),对流层低层比湿上升趋势较整个时段增强,达到显著的台站数也明显增多,其中西北增幅最大。850 hPa 上多数站(61 个)呈上升趋势,达到显著上升趋势的站较整个时段增加了 6 个,仅 8 个站呈下降趋势且未达到显著。700 hPa 上,72 个站为上升趋势,其中 34 个站达到显著,13 个站呈下降趋势,2 个达到显著(图略)。这一特征与 1979~2005 年对流层低层升温趋势加大有关。对流层中层(500~400 hPa)变化趋势空间分布与整个时段类似,仍大致呈北升南降,但上升趋势的站数明显多于下降站数。500 hPa 上,江南和华南地区为下降趋势,北方大部地区呈上升趋势,上升和下降站数比 57:35,达到显著站数比 28:4。400 hPa 变化趋势空间分布与 500 hPa 相似(图略),上升和下降趋势的站数比 53:39,达到显著站数比 22:8,但上升趋势值明显小于 500 hPa。对流层高层(300~200 hPa)比湿下降趋势占多数,与整个时段不同的是 200 hPa 的下降趋势最为明显。300 hPa 上升和下降趋势站数比为 56:36,均有 12 个站达到显著。200 hPa 上,中、东大部多数站呈下降趋势,呈上升趋势的站主要位于西北、华北和长江流域部分地区,下降显著的站明显多于上升的站(56:6)。中国高空温度变化趋势也显示出相似的分布特征:1958~2005 年对流层高层降温趋势在 300 hPa 最明显(Guo and Ding, 2009),1979~2005 年 400 hPa 以上各层温度下降趋势随高度增加而增大,对流层顶高度升高温度下降,由对流层上层温度变化和对流层顶升高造成比湿下降趋势最明显的层由 300 hPa 上升为 200 hPa。平流层低层 100 hPa 仍然是仅北方地区有资料,与整个时段相比呈显著下降趋势的站增加了 4 个(图略)。

3.4 线性变化趋势的区域和季节差异

按东部季风区(含东北和华北区域、长江流域、

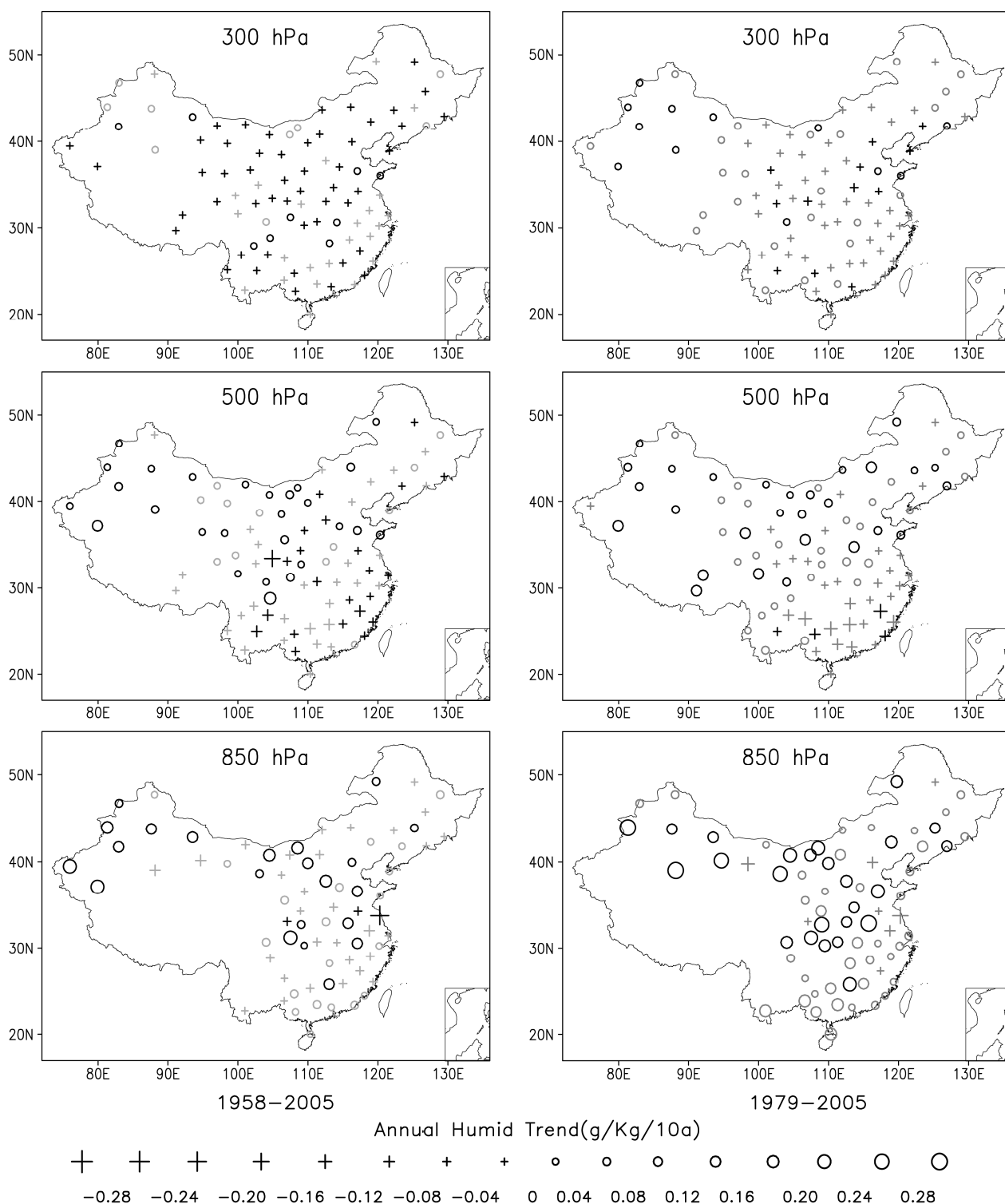


图4 1958~2005年(左)、1979~2005年(右)中国年均比湿线性趋势[单位: $\text{g kg}^{-1}(10\text{a})^{-1}$]空间分布。空心圆和加号分别表示上升和下降趋势,黑和灰色分别表示通过和未通过5%水平的显著性检验

Fig. 4 Spatial distribution of linear trend for mean annual specific humidity in China at 850, 500, and 300 hPa for 1958–2005 (left) and 1979–2005 (right). Circles/pluses indicate wetting/drying trend [$\text{g kg}^{-1}(10\text{a})^{-1}$], black/grey means below/ above statistically significance level of 0.05

华南3个分区)、西北干旱区、青藏高寒区等五个分区(见图1)研究中国高空比湿变化的区域差异。结果表明,1958~2005年中国高空比湿线性变化趋

势有明显区域差异:全国对流层低层比湿趋于上升,500 hPa以上趋于下降;东北和华北区与全国特征最为接近;西北对流层下层和中层比湿上升趋

势最为明显；长江流域整层均为下降趋势；华南对流层低层为上升趋势，中层 500 hPa 下降最为明显；青藏高原对流层中层为上升趋势。1979~2005 年，全国和各分区变化特征较为一致，均显示对流层下层比湿上升趋势明显加强，尤其是西北地区上升趋势仍最明显，长江流域和华南地区上升趋势较小（见图 5）。

大气水汽主要集中在对流层低层和地表，中国各个分区对流层下层和地表比湿变化是否一致？Song et al. (2012) 研究了中国不同地区地表比湿变化，除东北和华北分为两个区外与本文区域划分基本一致，将其各分区地面比湿与对流层低层比湿进行了对比（见表 3），结果表明：1960~2010 年不同分区地表大气比湿呈现一致的上升趋势，其中西北上升趋势最为明显，高原、东北和华北区域其次，长江和华南上升趋势最弱；1958~2005 年对流层低层与地表相比，东北和华北区域、高原较为一致，西北差别较明显（相差 0.06），长江流域和华南则呈现相反趋势。考虑到 1960 年代前期探测元件和辐射订正的局限导致数值偏高影响，去除前期数据的趋势值（1970~2005 年）结果表明，长江流域和华南对流层低层比湿与近地层比湿一致呈上升趋势，西北上升趋势最为明显，华南上升趋势最弱。这与西北地区对流层低层升温明显而华南升温幅度较小的变化一致。因此，在应用探空序列研究

长期变化时需注意 1960 年代探空资料对长期趋势的影响，翟盘茂（1997）曾指出中国对流层高层湿度资料精度不可靠，各分区地表与对流层低层比湿变化趋势差异表明这一问题在对流层中、低层同样存在。尽管本文在资料的质量控制和均一化过程中采用统计方法进行了订正，仍未能完全消除其在线性趋势分析中的影响。根据以 1958 年和 1970 年为起始年的趋势差来看，这一时段数据偏差对华南、长江流域两个分区的趋势值影响较大，其次是西北，对高原、东北和华北区域影响较小。如何针对这一明显的偏差和区域影响差异改进订正方案仍有待进一步的工作。

表 3 我国不同分区对流层低层与地表大气比湿线性变化趋势 [单位: $\text{g kg}^{-1} (10 \text{ a})^{-1}$]

Table 3 Comparison of linear trend [$\text{g kg}^{-1} (10 \text{ a})^{-1}$] in specific humidity in sub-regions in the lower troposphere and surface atmosphere

	不同分区大气比湿线性变化趋势 ($\text{g kg}^{-1}/10 \text{ a}$)				
	东北和华北	长江流域	华南	西北	高原
地表大气* (1960~2010 年)	0.05/0.03*	0.02*	0.01*	0.08*	0.06*
对流层低层 (1958~2005 年)	0.05	-0.06	-0.18	0.02	0.05
对流层低层 (1970~2005 年)	0.05	0.05	0.01	0.11	0.05

*引自 Song et al. (2012), 其中 0.05/0.03 表示东北和华北地表比湿线性变化趋势分别为 0.05 和 0.03

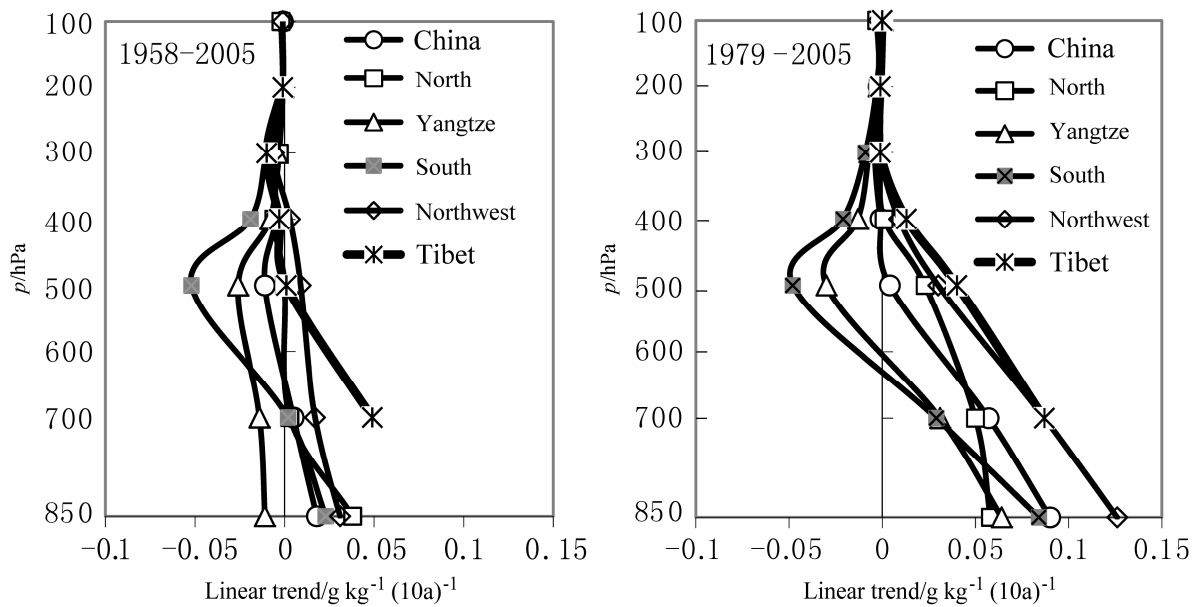


图 5 1958~2005 (左)、1979~2005 (右) 中国及各分区高空比湿线性趋势廓线 [单位: $\text{g kg}^{-1} (10 \text{ a})^{-1}$]
Fig. 5 Vertical profiles of linear trend for mean annual specific humidity [$\text{g kg}^{-1} (10 \text{ a})^{-1}$] in China and five sub-regions during 1958~2005 (left) and 1979~2005 (right)

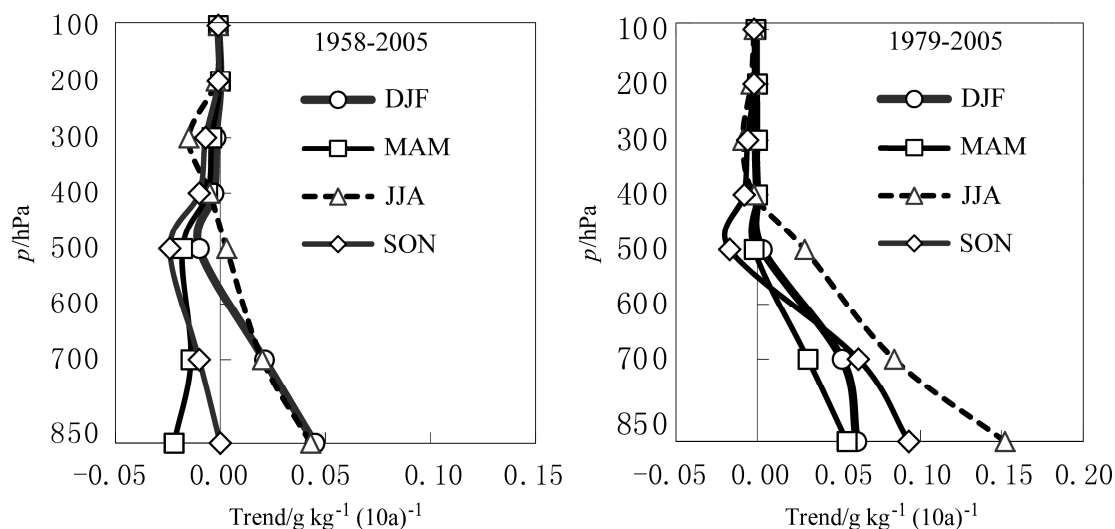


图6 1958~2005 (左)、1979~2005 (右) 中国平均各季节比湿变化趋势廓线 [单位: $\text{g kg}^{-1} (10\text{a})^{-1}$]。DJF: 12~2 月; MAM: 3~5 月; JJA: 6~8 月; SON: 9~11 月

Fig. 6 Vertical profiles of trends for mean seasonal specific humidity [$\text{g kg}^{-1} (10\text{a})^{-1}$] in China during 1958–2005 (left) and 1979–2005 (right). DJF: Dec–Jan–Feb; MAM: Mar–Apr–May; JJA: Jun–Jul–Aug; SON: Sep–Oct–Nov

各个季节中国平均比湿线性变化趋势廓线 (见图6) 表明, 1958~2005 年各季比湿变化存在明显差异: 冬、夏季对流层低层比湿上升, 对流层中上层主要为下降趋势, 夏季最大下降趋势出现在 300 hPa; 春、秋季对流层低层比湿为下降趋势。这与同时段中国冬季对流层低层明显升温、夏季对流层高层 200~300 hPa 降温幅度最大的特征一致 (Guo and Ding, 2009)。1979~2005 年四季对流层下层比湿均为上升趋势, 夏季升幅最大, 其次为秋季和冬季, 春季上升趋势最小。这与 1979~2005 年对流层中、下层各季节升温趋势相一致。虽然夏季对流层中下层温度上升幅度明显小于冬、秋和春季, 但比湿上升却明显高于冬、春和秋季, 说明比湿的变化不完全取决于温度, 温度上升导致饱和水汽压呈指数上升, 仅代表大气持水能力的增加, 实际大气含水量还与大气环流的水汽输送条件有关。我国夏季西南和东南暖湿气流提供了充足的水汽来源, 与对流层升温共同导致了夏季比湿增加。

4 结论

本文利用经过质量控制和均一化处理的 92 个台站探空露点温度资料, 研究了我国近 50 年来对流层至平流层下层大气比湿气候学特征、时间序列演变、变化趋势的空间分布、区域和季节差异, 得到以下结论:

(1) 中国高空大气 90% 以上的水汽集中对流层中下层, 比湿随高度升高迅速下降, 年平均比湿气候场呈南高北低的纬向分布, 温度、海陆差异和大气环流是影响比湿分布的主要因子。

(2) 1958~2005 年对流层低层比湿趋于上升, 对流层中层、高层和平流层下层趋于下降; 1979~2005 年对流层中低层的上升趋势和对流层高层下降趋势均较整个时段明显增强, 年代际变化显示高空大气比湿“湿”、“干”、“湿”的阶段性与温度“暖”、“冷”、“暖”基本同步变化; 相同年份的突变点 (1987 年) 表明对流层中低层温度和比湿年代际转折基本同步, 各层温度与湿度的显著相关也说明高空温度是影响高空比湿的重要因子。

(3) 1958~2005 年对流层下层比湿变化呈上升趋势, 1979 以来上升趋势更加明显; 对流层中层变化趋势呈北升南降分布; 对流层高层以下降趋势为主, 中国大部地区比湿下降。

(4) 区域差异显示对流层中下层西北区比湿上升最为明显, 长江流域和华南区上升幅度较小。季节差异显示 1958~2005 年对流层下层比湿趋于增加主要发生在夏、冬季, 1979~2005 年各季比湿均上升, 夏季上升趋势最明显。

(5) 强 ENSO 暖 (冷) 事件后我国对流层比湿增加 (下降), 火山爆发导致我国对流层比湿下降, 其影响程度随高度增加而降低。

参考文献 (References)

- 卞建春. 2009. 上对流层/下平流层大气垂直结构研究进展 [J]. 地球科学进展, 24 (3): 262–271. Bian Jianchun. 2009. Recent advances in the study of atmospheric vertical structures in upper troposphere and lower stratosphere [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 24 (3): 262–271.
- Collins W G, Gandin L S. 1990. Comprehensive hydrostatic quality control at the National Meteorological Center [J]. Mon. Wea. Rev., 118: 2752–2767.
- Dai Aiguo, Wang Junhong, Thorne P W, et al. 2011. A new approach to homogenize daily radiosonde humidity data [J]. J. Climate, 24: 965–991.
- Elliott W P, Gaffen D J. 1991. On the utility of radiosonde humidity archives for climate studies [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 72: 1507–1519.
- Elliott W P, Ross R J, Blackmore W H. 2002. Recent changes in NWS upper-air observations with emphasis on changes from VIZ to Vaisala radiosondes [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 83: 1003–1017.
- Gaffen D J, Sargent M A, Habermann R E, et al. 2000. Sensitivity of tropospheric and stratospheric temperature trends to radiosonde data quality [J]. J. Climate, 13: 1776–1796.
- Guo Yanjun, Ding Yihui. 2009. Long-term free-atmosphere temperature trends in China derived from homogenized in situ radiosonde temperature series [J]. J. Climate, 22 (4): 1037–1051.
- Guo Yanjun, Ding Yinhui. 2011. Impacts of reference time series on the homogenization of radiosonde temperature [J]. Adv. Atmos. Sci., 28 (5): 1011–1022.
- 郭艳君, 李庆祥, 丁一汇. 2009. 探空资料中的人为误差对中国温度长期变化趋势的影响 [J]. 大气科学, 33 (6): 1309–1318. Guo Yanjun, Li Qingxiang, Ding Yihui. 2009. The effect of artificial bias on free air temperature trend derived from historical radiosonde data in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1309–1318.
- Held I M, Soden B J. 2000. Water vapor feedback and global warming [J]. Annu. Rev. Energy Environ., 25: 441–475.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis [M]. Solomon S, Qin D, Manning M, et al., Eds. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 996.
- Jones P D. 1994. Hemispheric surface air temperature variations: A reanalysis and an update to 1993 [J]. J. Climate, 7: 1794–1802.
- Kiehl J T, Trenberth K E. 1997. Earth's annual global mean energy budget [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 78: 197–208.
- 陆渝蓉, 高国栋. 1984. 我国大气中平均的水汽含量与水分平衡特征 [J]. 气象学报, 42 (3): 301–310. Lu Yurong, Gao Guodong. 1984. The water vapour content and the water budget in the atmosphere over China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 42 (3): 301–310.
- McCarthy M P, Thorne P W, Titchner H A. 2009. An analysis of tropospheric humidity trends from radiosondes [J]. J. Climate, 22 (22): 5820–5838.
- Paltridge G, Arking A, Pook M. 2009. Trends in middle- and upper-level tropospheric humidity from NCEP reanalysis data [J]. Theor. Appl. Climatol., 98: 351–359.
- Ross R J, Elliott W P. 2001. Radiosonde-based Northern Hemisphere tropospheric water vapor trends [J]. J. Climate, 14: 1602–1612.
- Ross R J, Elliott W P, Seidel D J. 2002. Lower-tropospheric humidity-temperature relationships in radiosonde observations and atmospheric general circulation models [J]. J. Hydrometeorol., 3: 26–38.
- Song Yafang, Liu Yanju, Ding Yihui. 2012. A study of surface humidity changes in China during the recent 50 years [J]. Acta Meteor. Sinica, 26 (5): 541–553.
- Trenberth K E, Stepaniak D P. 2003a. Covariability of components of poleward atmospheric energy transports on seasonal and interannual timescales [J]. J. Climate, 16: 3690–3704.
- Trenberth K E, Stepaniak D P. 2003b. Seamless poleward atmospheric energy transports and implications for the Hadley circulation [J]. J. Climate, 16: 3705–3721.
- Trenberth K E, Fasullo J, Smith L. 2005. Trends and variability in column integrated atmospheric water vapor [J]. Climate Dyn., 24: 741–758.
- 谢义炳, 戴武杰. 1959. 中国东部地区夏季水汽输送个例计算 [J]. 气象学报, 30 (2): 173–185. Hsieh Yiping, Tai Wuja. 1959. Certain computational results of water vapour transport over eastern China for a selected synoptic case [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 30 (2): 173–185.
- 徐淑英. 1958. 我国的水汽输送和水分平衡 [J]. 气象学报, 29 (1): 33–43. Hsü Shuying. 1958. Water vapour transfer and water balance over the eastern China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 29 (1): 33–43.
- 么枕生. 1951. 由年温变化之谐波分析论中国气候 [J]. 地理学报, 18(Z1): 41–68. Yao C S. 1951. The climate of China as based upon the analysis of monthly temperatures [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 18 (Z1): 41–68.
- Zhai Panmao, Eskridge R E. 1996. Analysis of inhomogeneities in radiosonde temperature and humidity time series [J]. J. Climate, 9: 884–894.
- Zhai Panmao, Eskridge R E. 1997. Atmospheric water vapor over China [J]. J. Climate, 10: 2643–2652.
- 翟盘茂. 1997. 中国历史探空资料中的一些过失误差及偏差问题 [J]. 气象学报, 55: 563–572. Zhai Panmao. 1997. Some gross errors and biases in China's historical radiosonde data [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 55: 563–572.
- 翟盘茂, 周琴芳. 1997. 中国大气水分气候变化研究 [J]. 应用气象学报, 8 (3): 341–351. Zhai Panmao, Zhou Qinfang. 1997. A study of climate change of atmospheric water vapor in China [J]. J. Appl. Meteor. (in Chinese), 8 (3): 341–351.
- Zhao Tianbao, Dai Aiguo, Wang Junhong. 2012. Trends in tropospheric humidity from 1970 to 2008 over China from a homogenized radiosonde dataset [J]. J. Climate, 25 (13): 4549–4567.
- 邹进上, 刘惠兰. 1981. 我国平均水汽含量分布的基本特点及其控制因子 [J]. 地理学报, 36 (4): 377–391. Zou Jinshang, Liu Huilan. 1981. The basic features of distribution of water vapour content and their controlling factors in China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 36 (4): 377–391.