

李兴宇, 郭学良, 朱江. 中国地区空中云水资源气候分布特征及变化趋势. 大气科学, 2008, **32** (5): 1094~1106

Li Xingyu, Guo Xueliang, Zhu Jiang. Climatic distribution features and trends of cloud water resources over China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, **32** (5): 1094~1106

中国地区空中云水资源气候分布特征及变化趋势

李兴宇^{1, 2} 郭学良¹ 朱江¹

¹ 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 利用 1984~2004 年国际卫星云气候学计划 (ISCCP) 的云水路径 (CWP) 资料, 分析了中国地区空中云水资源的分布特征、变化趋势以及与大气环流和湿度场的关系。研究发现, 中国地区 CWP 的分布与大气环流、地形特征和大气湿度分布及水汽传输密切相关, 中国地区 CWP 存在明显的季节变化, 6 月全国平均 CWP 最高, 10 月最低, 不同地区季节变化差异明显。从变化趋势看, 中国地区 CWP 以增加为主, 青藏高原东部、内蒙古东部地区以及西北东部地区 CWP 的增加趋势较强。全国范围内, 冬季和秋季 CWP 增加较大, 春季和夏季增加较小。这些变化主要与大气环流变化导致的抬升运动的增强以及大气湿度 (水汽) 增加有关。中国地区空中云水资源在全球变暖的背景下表现出增加的趋势, 符合气温增加导致水循环增强的观点。

关键词 中国云水资源 气候特征 变化趋势 ISCCP 资料

文章编号 1006-9895 (2008) 05-1094-13

中图分类号 P426

文献标识码 A

Climatic Distribution Features and Trends of Cloud Water Resources over China

LI Xingyu^{1, 2}, GUO Xueliang¹, and ZHU Jiang¹

¹ Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Analysis of cloud water path (CWP) data over China available by the International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) is performed for the period 1984–2004. The climatology, trends, and variability of CWP are examined. The climatological distribution and variation of CWP are dependent on the circulation, especially the monsoon circulation, topography and atmospheric moisture. Influenced by the Asia monsoon, China's CWP exhibits very large seasonal variations. All-China average shows the maximum CWP in June and the minimum CWP in October. Under the influences of the Tibetan Plateau and the westerly flow, the largest CWP is found in winter and early spring in southeastern China. Linear regression analysis is used to characterize seasonal and annual trends in CWP. Increasing trends in CWP are observed over most of China. Northwestern China, especially over the Tibetan Plateau, and the Inner Mongolia show significant increases of CWP. The largest increase in CWP is in winter and the increasing trend is weakest in spring. These increases in CWP are primarily dependent on the enhanced updraft deduced by the variation of circulation, including the weakening of the summer monsoon system. Interannual variation and trends in CWP are closely correlated to the rise of temperature in China, confirming the enhanced hydrological cycle under the background of global warming.

Key words cloud water path, climatic features, trend, ISCCP

收稿日期 2007-01-16, 2007-05-09 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40333033、40575003, 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 KZCX3-SW-225

作者简介 李兴宇, 男, 1978 年出生, 博士研究生, 主要研究方向为云降水物理学。E-mail: lxy@mail.iap.ac.cn

1 引言

我国是淡水资源严重短缺的国家, 由于降水的时空分布不均匀, 不仅位于干旱、半干旱气候区的西北地区缺水严重, 而且在浙江、广东等沿海省份也会出现季节性和区域性干旱。20 世纪 90 年代以来, 受全球气候变化、经济社会发展、人口增加、生态环境恶化等因素的影响, 水资源短缺问题已成为制约我国社会和经济发展的关键因素之一。因此, 了解我国空中水资源状况、变化趋势, 科学合理开发空中水资源, 对于有效缓解我国水资源紧缺状况, 改善生态环境, 保障社会经济的可持续发展, 具有十分重要的战略意义。

由于常规台站对云的观测主要通过目测方式对云量和云状等进行观测, 达不到对云水含量的定量观测。云水含量资料缺乏, 对定量研究中国地区的云水含量的长期变化、地理分布特征及其对气候变暖的响应造成困难, 这也在一定程度上阻碍了空中水资源开发和调配的关键科学问题的研究。

在 1980 年以前, 还没有针对云水含量的全球观测, 研究所利用的资料主要依靠外场观测, 由于观测需要较大的资金投入, 外场观测^[1~5]只能提供短期云水含量资料, 这些资料时空范围有限。随着卫星技术和云反演技术的发展, 国际卫星云气候学计划 (International Satellite Cloud Climatology Project, 简称 ISCCP) 为大尺度云气候学研究提供了有力的手段, 是目前时间覆盖最长的云特性气候学资料, 包含了云水含量和云光学厚度等地面观测无法获得的云物理参量。云水含量在 ISCCP 中用云水路径 (cloud water path, 简称 CWP) 参数表示, CWP 的物理意义是指在单位面积垂直气柱中所含有的液态云水 (cloud liquid water path, 简称 LWP) 和固态云水 (cloud ice water path, 简称 IWP) 的总和。

利用 ISCCP 资料对云特性的研究中, 对云量数据使用较多^[6~10]。Lin 和 Rossow^[11]针对不同微波反演方法得到 LWP 差别较大的问题, 对比 ISCCP 的光学反演 CWP 数据和微波 LWP 数据, 分析了微波反演的误差来源和影响因素。Lin 和 Rossow^[12]结合了海洋上空 ISCCP 的 CWP 数据和 SSM/I 的 LWP 数据估计了非降水云中 LWP 和 IWP 的季节变化。Huang 等^[13]利用 1984~2002

年 ISCCP D2 的 CWP 资料研究了沙尘系数与 CWP 之间的关系。陈勇航等^[14]利用 ISCCP D2 的 CWP 资料对西北地区空中云水资源的时空分布特征进行了系统的研究。

另一方面, 云在地球辐射收支和水循环研究中发挥重要作用, 大气中的水循环和辐射能量传输过程通过云连接起来。由于云对大气短波和长波辐射传输的影响, 大气的动力和热力过程也被间接改变。由于云水含量的观测缺乏, 对于云水含量气候反馈作用的了解也很有限, 许多 GCM 模拟研究中^[15~17], 由于云水含量参数化方案不同, 造成模拟得到的气候系统敏感性存在较大差异。

因此, 利用 ISCCP 对云水含量进行气候学研究, 不仅对于了解中国地区空中云水资源、评估空中云水资源的利用潜力具有重要意义, 也可以为气候变化研究、减少气候模式中云模拟的不确定性提供基本参考。

本文利用 ISCCP 月平均 CWP 资料, 研究中国地区 CWP 的多年平均和季节平均分布特征, 进而分析年平均和季节平均的变化趋势。并利用大气动力场、相对湿度资料对 CWP 的变化机制进行分析。

2 数据介绍和区域划分

ISCCP 计划始于 1982 年, 作为世界气候研究计划 (WCRP) 的一部分, 主要目标是通过收集和分析卫星辐射测量数据来获得全球云分布及其日变化、季节变化和年际变化信息。ISCCP 数据及其相关分析结果被用来提高云在气候系统中作用的理解, 改进气候模式中对云的模拟能力, 阐明云在辐射平衡中的作用, 同时, ISCCP 数据也为水循环等相关研究提供支持。本文中使用 1984 年 1 月至 2004 年 12 月的 ISCCP D2 数据集的月平均 CWP 数据, 空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。与之前的 C2 数据集相比, D2 数据集有较大的改进, 在进行大量外场观测基础上, 在辐射定标、阈值确定等方面采用新的方法, 减小了反演误差, 给出更为准确的结果。

ISCCP 使用的数据主要是业务卫星的可见光 (VIS) 和红外 (IR) 辐射数据。在数据分析中, 地理信息数据被用来说明经纬度、陆地和水体 (水平分辨率: 25 km)、平均地形 (水平分辨率: 25 km) 和地表植被类型 (水平分辨率: 大约 100 km)。每

日的大气温度、湿度廓线和臭氧含量数据由 NOAA 的 TOVS 业务垂直探测器提供。

在光学反演中,由于高纬度和高海拔的冰川、积雪和海冰与云的反射率接近,常常会被错误识别成云,ISCCP 通过每周更新来自 NOAA 和美国海军的积雪和海冰覆盖数据^[18],可以显著减少云识别中的错误。

在 D2 数据集中,根据云顶气压和光学厚度对云进行分类,将云分为高云、中云和低云三层,每层之中又按照光学厚度分为 3 类,共计九类云。国内外对于 ISCCP 资料准确性方面的研究^[6, 7, 19]指出,ISCCP 的云量资料与其他资料吻合得较好,在中国地区,通过对比地面观测资料,证明 ISCCP 资料在中国地区具有较好的可信度。Rossow 等^[20]指出,改进后的 D2 资料云量误差 $\leq 5\%$,与云水含量相关的光学厚度误差 $\leq 10\%$ 。就现有资料来看,ISCCP 的准确性还有待改进,但它与地面常规观测相比,采取较为完善的质量控制措施,且云参量全、时间覆盖范围长,是目前云气候学中一个较好的科学途径。

本文使用的 CWP 数据主要是在可见光波段反演液态水云和冰云的光学厚度,将二者详细区分,单独反演,提供了更加精确的云特性数据^[20, 21]。

通过利用云顶温度(T_c)作为判据,将 $T_c \geq 260$ K 的云判定为液态水云,使用按照 gamma 谱分布的液态水滴模式反演,有效粒子半径 $r_e = 10 \mu\text{m}$ 。冰云的判据为 $T_c < 260$ K,用于反演的冰晶模式中, $r_e = 30 \mu\text{m}$ ^[21]。

根据以上方法计算的 CWP 表达式如下:

$$W = \frac{4\rho r_e}{3Q_{\text{ext}}} \times \tau \quad (1)$$

其中, r_e 的单位为 μm , W 为 CWP (单位: g/m^2), τ 为云光学厚度, Q_{ext} 为 $0.6 \mu\text{m}$ 波长的 Mie 散射消光系数, ρ 为云粒子的密度,单位是 g/cm^3 。计算液态水云时, $r_e = 10 \mu\text{m}$, $Q_{\text{ext}} = 2.119$, $\rho = 1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$,

$$W = 6.292\tau \quad (2)$$

计算冰云时, $r_e = 30 \mu\text{m}$, $Q_{\text{ext}} = 2.0$, $\rho = 0.525 \text{ g}/\text{cm}^3$,

$$W = 10.500\tau. \quad (3)$$

反演中使用的参数来自于最新的研究结果^[12, 22~25],Rossow 和 Schiffer^[21]对 ISCCP 云参数选择和使用的合理性进行了详细的论述。

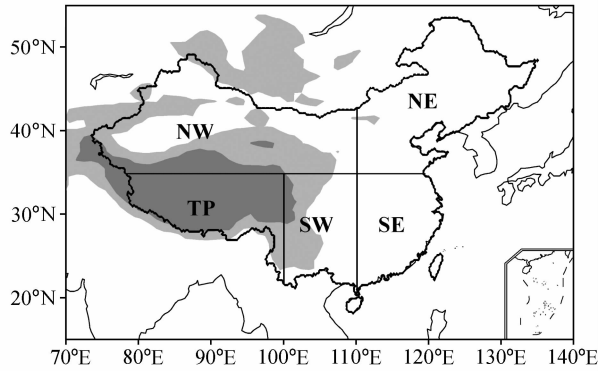


图1 中国地区分区示意图。NE: 东北; SE: 东南; NW: 西北; SW: 西南; TP: 青藏高原。浅阴影: 海拔 1500 m; 深阴影: 海拔 4000 m

Fig. 1 The regions described in this paper. NE: northeastern China; SE: southeastern China, NW: northwestern China; SW: southwestern China; TP: the Tibetan Plateau. Light shadow: 1500-m elevation; dark shadow: 4000-m elevation

本文使用的降水数据来自于全球降水气候学计划 (Global Precipitation Climatology Project, 简称 GPCP) 的 V. 2 系列卫星和地面观测整合降水数据,还使用了 NCEP Reanalysis I 的大气环流和相对湿度数据,数据时间为 1984 年 1 月至 2004 年 12 月。线性回归方法被用于计算物理量的变化趋势。

本文对中国地区进行分区研究,分区方法参照图 1,以 35°N 线区分南方和北方,以 110°E 线区分东部和西部,共分为 5 个区域:东北、东南、西北、西南和青藏高原。

3 云水路径的平均特征与季节变化

图 2a 为 1984~2004 年平均 CWP,从图中可以看出,CWP 的最大值大于 $0.12 \text{ kg}/\text{m}^2$,位于四川盆地和东南地区,CWP 值由南向北逐渐减小至 $0.04 \text{ kg}/\text{m}^2$ 以下,纬向分布特征明显。青藏高原尽管与四川盆地处于相同纬度,其 CWP 明显偏小。在云贵高原地区,由于东西两侧 CWP 差异较大,这一地区的 CWP 梯度最大。CWP 的低值区基本位于中国西北部,大部分地区小于 $0.06 \text{ kg}/\text{m}^2$ 。而在新疆北部地区,沿天山山脉以西,CWP 值相对较高,大于 $0.06 \text{ kg}/\text{m}^2$,这种分布形态是由于大气环流和当地地形共同作用而造成的。东北地区东部、内蒙古东部和华北大部分地区 CWP 偏小,平均值在 $0.05 \text{ kg}/\text{m}^2$ 左右。

图 2b 表示 1984~2004 年平均 GPCP V. 2 降

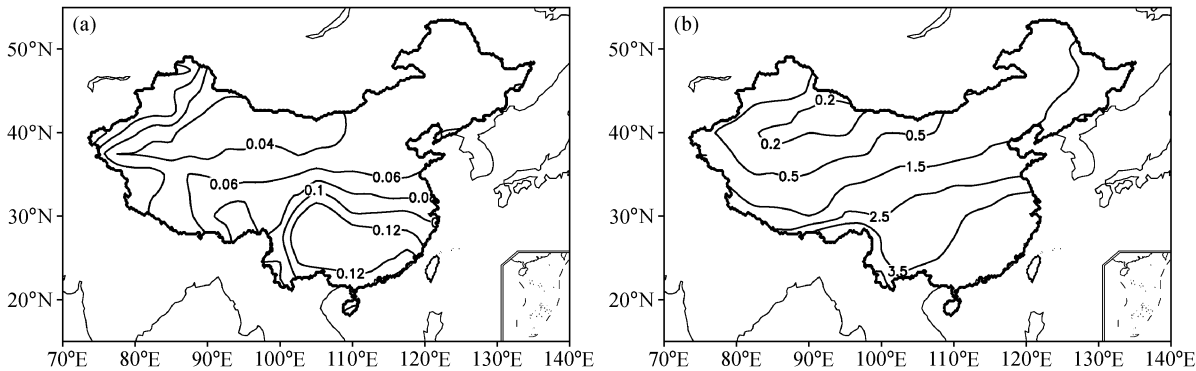


图 2 1984~2004 年平均 (a) CWP (单位: kg/m^2) 和 (b) 降水 (单位: mm)

Fig. 2 Annual mean (a) CWP (kg/m^2) and (b) precipitation (mm) for period 1984–2004

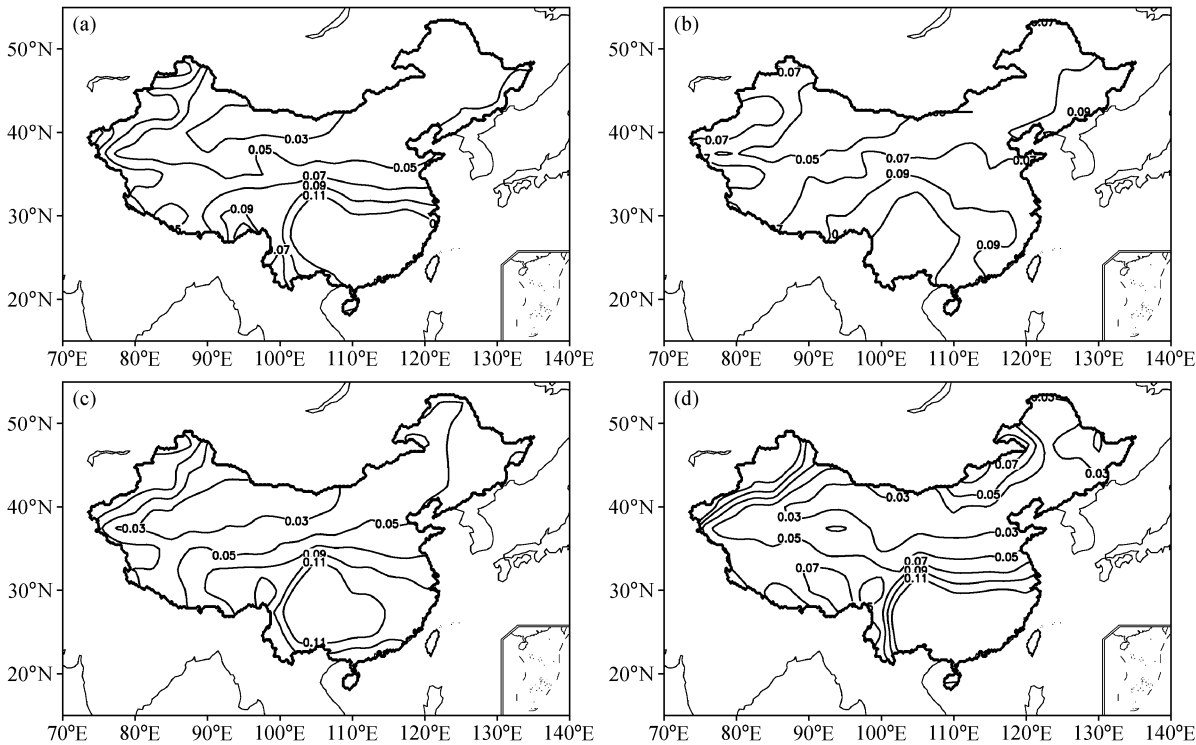


图 3 1984~2004 年各季节平均 CWP (单位: kg/m^2): (a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

Fig. 3 Seasonal mean CWP (kg/m^2) for period 1984–2004: (a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

水, 图中降水与 CWP 在空间分布形态上匹配较好, 年平均降水的高值区位于东南地区和江淮流域, 低值区在西北地区吻合较好, 同时降水和 CWP 都具有纬向分布特征。特别是在新疆北部地区, 降水明显高于新疆南部, 这样的分布特征与图 2a 中 CWP 的分布是一致的。

为了便于分析各季节 CWP 的地理分布特征, 将 1984~2004 年各季节平均 CWP 表示在图 3 中。首先分析冬季 (图 3d) 和春季 (图 3a) 的 CWP 分

布特征, 冬季 CWP 分布呈南多北少形态, 特征与多年平均的 CWP 分布特征十分相似。CWP 的高值区覆盖了整个青藏高原东侧地区, 包括西南和东南地区, 并向海洋延伸。

水汽和大尺度的抬升运动为南方地区 CWP 高值区的形成提供了基本条件。在冬半年, 西风气流影响我国, 西风气流受到青藏高原阻挡, 形成南北两支, 其中南支沿着喜马拉雅山脉向东流动, 成为“槽”型气流, 北支西风气流沿着高原北缘流动, 成

为“脊”型气流,两支气流在四川盆地上空重新汇合。南支槽会把印度洋孟加拉湾的暖湿空气带入我国,为我国冬半年南方降水创造了充足的水汽条件。另外,在东南和西南地区,特别是四川盆地地区,土壤湿度大,蒸发强,空气中水汽较多,相对湿度较大。以上条件为我国南方地区云的形成提供了水汽条件。在动力条件上,Yu等^[26]分析了ISC-CP D2 数据集中的云量和云光学厚度资料,发现中国东部低层云和中层云的云量和云光学厚度的高值区出现在冬季和早春,并指出青藏高原与西风气流的共同作用是造成云量和云光学厚度在该时段增加的主要原因。冬季西风气流开始影响东亚地区,受青藏高原影响,西风气流在对流层低层产生以高原为中心的绕流,并在高原东侧形成辐合,而在对流层中层,西风气流由于受到高原表面摩擦影响产生辐散^[26~28]。低层的辐合气流与中层的辐散气流共同作用,在高原东侧产生大尺度抬升气流,由于四川盆地和东南地区冬季地表相对湿度较高,在上升气流的作用下,十分有利于层状云的形成。另外,根据Li等^[27]的研究,高原东侧大气层结的变化是该地区层状云产生的原因之一。在高原东侧,低层气流上升降温、高层气流下沉增温显著,在600~500 hPa左右容易形成悬空逆温层,逆温层的高度随环流的强弱变化。由于逆温层的存在,大气层结稳定,限制了云向高层发展,致使在高原东侧的四川盆地地区形成了大范围的层状中云。

图4b为冬季27°N~32°N平均风速高度-纬向剖面图,图中阴影为相对湿度的垂直分布,从图中可以看到在青藏高原东侧100°E~110°E范围内,由于辐合作用形成较强的抬升气流,在抬升气流区地面相对湿度大于80%,二者相配合,在青藏高原东侧形成大范围层状中云,CWP高值区覆盖了整个中国东南地区,并延伸至中国东海。

在中国北方地区,除内蒙古东部地区外,CWP普遍小于0.03 kg/m²,这是由于北方冬季气温较低,缺乏成云的水汽条件。而在新疆地区北部,在西风气流和大尺度地形的共同作用下,在地形迎风一侧,形成气团抬升,虽然这些地区的水汽条件相比低纬度地区要小得多,但CWP仍然达到0.1 kg/m²以上,使该地区CWP明显高于天山山脉以南地区。

春季大气环流特征与冬季相似,但西风气流已明显减弱,特别在新疆北部地区,风速明显减小。随着环流场的减弱,提供成云的动力条件也在减弱,直接影响就是在与大尺度地形相互作用下,减小的气流不足以产生大尺度的抬升,造成中国北部地区,特别是新疆和内蒙古地区,CWP明显小于冬季。高原东侧的西南地区,特别是四川盆地地区(27°N~32°N, 100°E~110°E),仍然是CWP的高值区,但春季CWP小于冬季。春季由于环流形势发生变化,高原东侧下沉气流减弱,高空有利于中层云形成的大气层结稳定度小于冬季,上升气流的发展高度增加,在图4a中,可以明显看出春季高

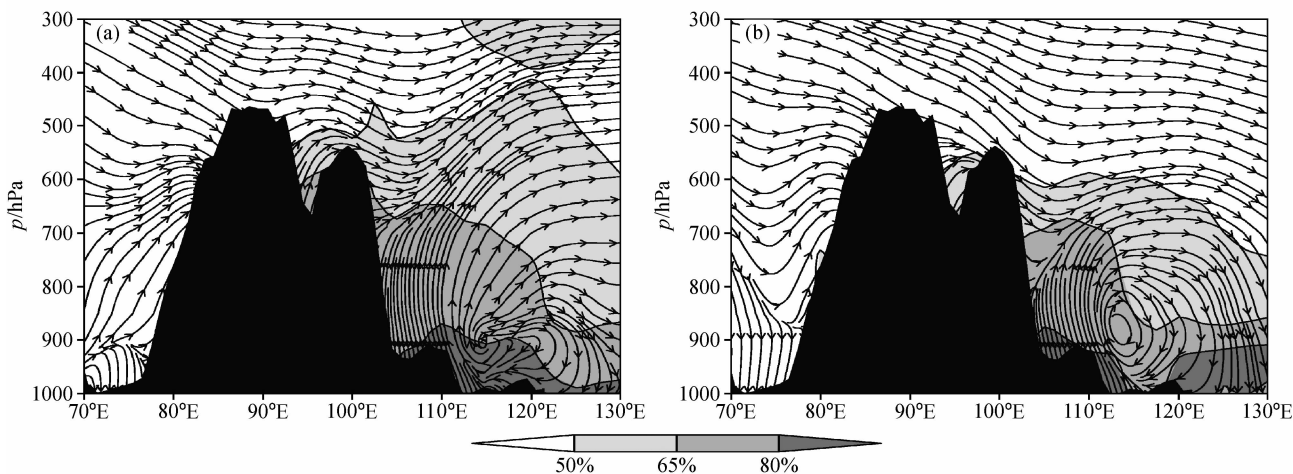


图4 1984~2004年27°N~32°N平均风场和相对湿度(阴影)高度-经度剖面图:(a)春季;(b)冬季。纬向风速单位:m/s,垂直风速单位:0.01 hPa/s

Fig. 4 Longitude-height cross sections (27°N-32°N) of seasonal mean wind field and relative humidity (shadow) for period 1984-2004: (a) Spring; (b) winter. Units for the zonal wind are m/s and for the vertical wind are 0.01 hPa/s

原东侧的上升运动强于冬季，不利于大气层状中云的形成和发展，造成四川盆地地区冬季 CWP 大于春季。

冬季和春季 CWP 的分布特征与环流特征变化密切相关，环流变化与大尺度地形相配合，产生的抬升作用的变化是造成 CWP 在冬季和春季变化的主要原因。在东北和华北地区，由于直接受到大尺度地形和动力影响较小，CWP 的变化也不明显；而在青藏高原上，CWP 在冬季和春季相对变化也较小。

夏季，由于季风环流的影响（图 3b），来自孟加拉湾和中国近海的水汽输送增强，中国地区除了东南部 CWP 相比冬季略有减少外，CWP 普遍上升。CWP 最小值仍然在西北地区，高值区位于青藏高原东侧的西南地区，但中心值覆盖区域明显小于冬季。东北和华北地区 CWP 增加明显，而内蒙古东部地区的 CWP 则小于冬季，同样变化也发生在新疆北部地区。东南地区 CWP 夏季明显小于冬季，这是由于影响该地区的盛行风向发生改变，从图 5a 中可以看出，携带大量水汽的夏季风在西南地区的云贵高原作用下发生抬升，同时在抬升区域地表相对湿度大于 80%，因此，在该地区形成云水高值区。从青藏高原东部地区的 CWP 变化可以分辨出大气环流在冬季和夏季存在明显的变化，夏季 CWP 高值区自孟加拉湾开始向北延伸，与该地区水汽传输密切联系。

秋季，CWP 的分布特征（图 3c）与夏季有明显差别，在全国范围内其分布特征与春季类似，特别是在中国北部地区，二者分布特征十分相似。在秋季，由于西风气流逐渐加强，夏季风减弱，环流的变化使 CWP 的分布特征也发生明显变化，CWP 的高值区域尽管仍然位于青藏高原东侧、云贵高原和四川盆地附近，但已逐渐向东扩展，从图 5b 可以看出，青藏高原东侧 20°N~30°N 范围内仍然以抬升气流为主，但抬升气流的强度以及垂直各气压层相对湿度的大小都小于夏季，CWP 高值区经向分布范围缩小。

图 6a 分别显示了五个不同区域各月份的多年平均。从各月份平均值分析，东南和西南地区是 CWP 的高值区，这两个地区虽然彼此相邻，但每年 CWP 最大值出现的月份却不尽相同。西南地区 CWP 最大值出现在每年的 6 月份，并且全年 CWP 变化比较稳定。而在东南地区，CWP 年内波动较大，从 3 月的最大值 0.14 kg/m² 下降到 7 月的最小值 0.08 kg/m²。东南地区的 CWP 变化与其他地区有明显不同，这是因为这个地区低层云和中层云占天空中云的绝大多数，在冬季和早春，特别是 3 月份，中低层云量受西风气流影响明显增加，而夏季则减小。根据以往的研究^[27]，东南地区多年气候平均云量与 CWP 的年内变化相吻合。在西南地区，CWP 与西风气流变化和水汽传输增加密切相关。

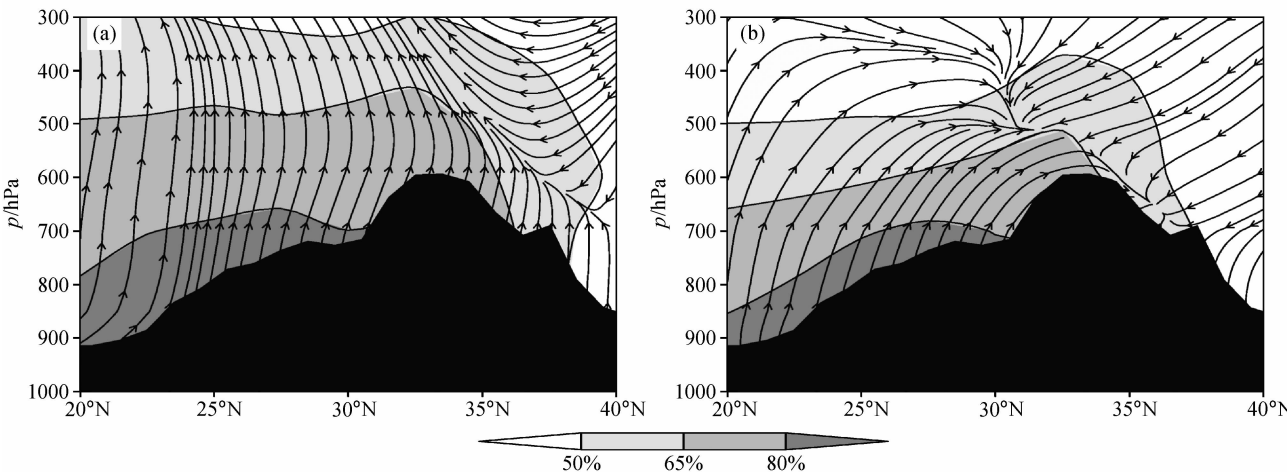


图 5 1984~2004 年 100°E~105°E 平均风场和相对湿度（阴影）高度-纬度剖面图：（a）夏季；（b）秋季。经向风速单位：m/s；垂直风速单位：0.01 hPa/s

Fig. 5 Latitude-height cross sections (100°E~105°E) of seasonal mean wind field and relative humidity (shadow) for period 1984-2004: (a) Summer; (b) autumn. Units for the meridional wind are m/s and for the vertical wind are 0.01 hPa/s

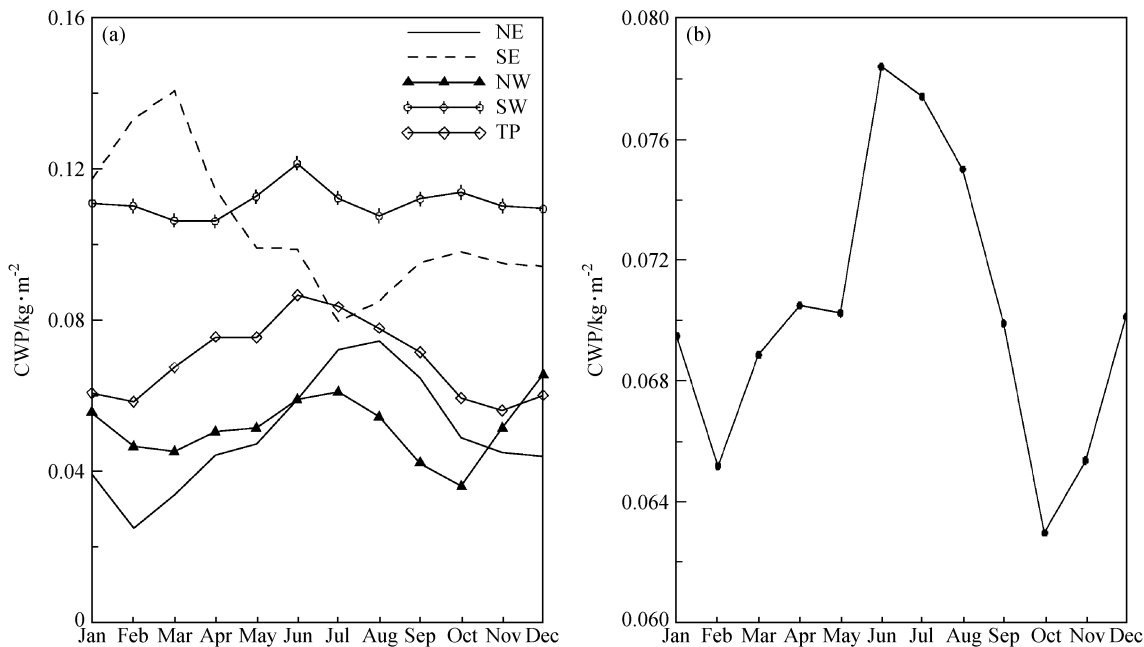


图 6 1984~2004 年东北、东南、西北、西南和青藏高原五个区域各月份平均 CWP (a) 和全国各月份平均 (b)

Fig. 6 The mean seasonal cycles of CWP (kg/m^2) in (a) five separated regions, NE, SE, NW, SW, TE, and (b) the whole China for period 1984–2004

值得注意的是, 东南地区夏半年水汽输送和降雨都明显大于冬半年, 这与图 6a 中东南地区 CWP 的季节变化正好相反。Li 等^[28] 分析了中国多年平均云量的变化, 发现我国东南地区层状云中云量最大, 其季节变化趋势与图 6a 中东南地区 CWP 季节变化相似。夏季我国东南地区对流云量明显多于冬季, 最大值出现在 7 月, 达到 17%, 增加 10% 左右, 而夏季层状云中云量要少于冬季, 减少至 40% 左右。由于层状云系的降水效率要明显小于对流云系, 尽管冬半年层状云系 CWP 较大, 但其较低的降水效率导致冬半年东南地区降水明显小于夏半年, 造成降水和 CWP 出现反相变化。另外, 由于层状云系 CWP 高, 降水效率低, 其人工增雨潜力成为人工增雨研究的一个重要方面。

在东北和青藏高原地区, 年内 CWP 的极大值出现在夏季; 而西北地区, 由于受到西风气流影响较大, CWP 年内变化具有双峰结构, 最大值出现在 12 月。

Wang 和 Gaffen^[29] 分析了 1961 年至 1990 年中国不同区域的地表相对湿度, 在划分的东北、东南、西北和西南四个区域内, 地表相对湿度与 CWP 有相似的年内变化结构。由于高的地表相对湿度配

合抬升运动有利于云的形成, 因此二者之间具有较高的相关关系。

综合各区域的变化, 中国地区的 CWP (图 6b) 最大值出现在夏季, 同时冬季受到环流变化影响, CWP 有明显的增加过程, 但与夏季相比仍然偏小。

4 云水路径的年际变化和长期变化趋势

图 7 是利用 1984 年至 2004 年 CWP 年平均距平计算的标准差 (SD) 和标准差百分率 (PSD), 标准差百分率由 SD 除以多年平均 CWP 得到。

从图 7a 中可以看到 SD 高值区位于中国东南、青藏高原东部、内蒙古东部和西北地区北部, 其中心值大于 $0.05 \text{ kg}/\text{m}^2$ 。在黄河流域西北和东北大部分地区 SD 较小。在新疆北部和内蒙古东部地区具有较大的 SD 梯度, SD 值由 $0.02 \text{ kg}/\text{m}^2$ 增加至 $0.05 \text{ kg}/\text{m}^2$ 。

在图 7b 中可以看到 PSD 变化较大的地区主要位于内蒙古东部地区, 中心值大于 75%, 其次是青藏高原东部、东南沿海和西北地区东部。黄河流域和西南地区 PSD 较小, 中心值小于 30%。

图 8 表示 1984~2004 年平均 CWP 线性变化

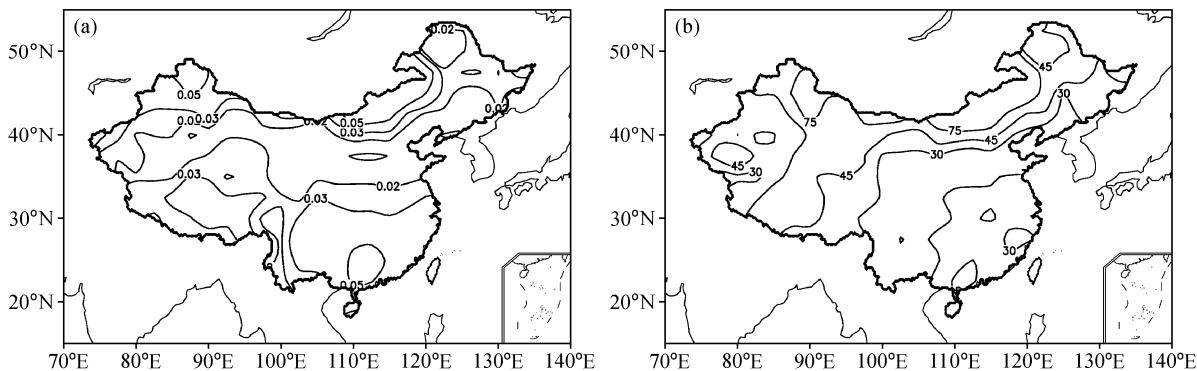


图 7 1984~2004 年 (a) 平均 CWP 标准差 (单位: kg/m^2) 和 (b) 标准差百分率

Fig. 7 (a) The standard deviation (SD, units: kg/m^2) of mean annual CWP and (b) the percentage of SD (PSD) for period 1984–2004

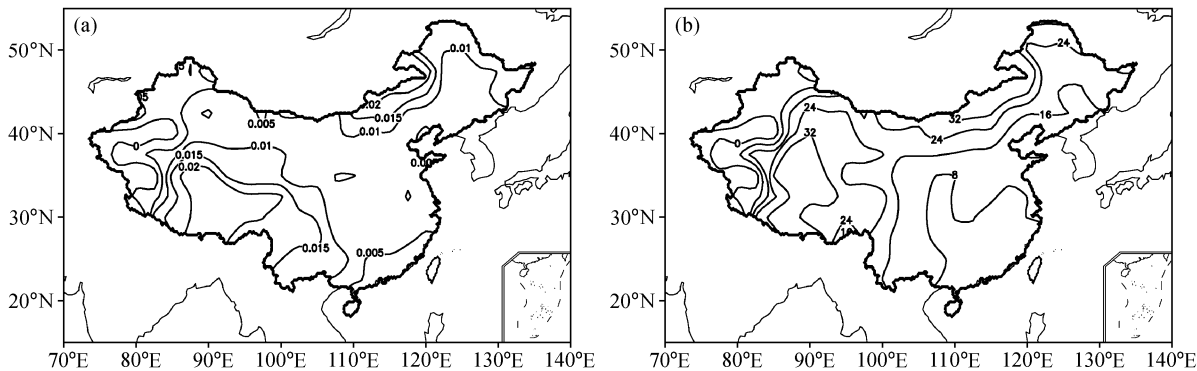


图 8 1984~2004 年 (a) 平均 CWP 线性变化趋势[单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]和 (b) 线性变化趋势百分率

Fig. 8 (a) Linear trend of mean annual CWP [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$] for period 1984–2004 and (b) its percentage

趋势和年平均 CWP 线性变化趋势百分率。从图 8a 可以看出中国大部分地区 CWP 都在增加, 其中, 青藏高原东部地区和内蒙古东部地区增加最大, 线性增加趋势大于 $0.015 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。在新疆西南部塔里木盆地附近, CWP 呈减小趋势, 减小幅度在 $0.005 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。在中国其他地区增加幅度相对较小, 在东部地区和西北部分地区, CWP 增加趋势为 $0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 左右。

由于 CWP 年平均值存在区域差异, 为了明确地表达增加幅度的大小, 利用线性趋势除以多年平均 CWP 求出线性趋势百分率 (图 8b)。从图 8b 中可以看出, 增加比例最大的地区位于青藏高原东部、西北地区 and 内蒙古东部, 增加幅度为 $20\% (10 \text{ a})^{-1} \sim 30\% (10 \text{ a})^{-1}$ 。新疆北部、东南和东部大部分地区增加幅度小于 $10\% (10 \text{ a})^{-1}$ 。在塔里木盆地附近 CWP 减少幅度小于 $5\% (10 \text{ a})^{-1}$ 。

从以上分析可以看出, CWP 主要的增加区域位于青藏高原及其周边地区、内蒙古东部地区, 这

两个主要增加区域分别与孟加拉湾和蒙古地区的 CWP 增长相一致。Trenberth 等^[30] 分析了 1988~2001 年 14 年的 SSM/I、ERA-40、NCEP-1 和 NVAP 水汽资料, 发现在孟加拉湾及其北部相邻地区水汽均呈增加趋势。Zhai 等^[31] 利用探空资料计算了 1970~1990 年中国地区的水汽变化趋势, 发现在青藏高原东部和西南地区水汽有明显的增加, 在内蒙古东部地区水汽也有增加趋势。

下面, 通过 1984~2004 年春季和冬季的 CWP 变化趋势, 进一步分析 CWP 季节变化的特征。图 9 表示夏季和冬季 CWP 线性变化趋势, 从图中可以看出夏季 CWP 增加最明显的区域在青藏高原东部和东南地区, 增长率大于 $0.015 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 在东北北部和新疆西北部地区, CWP 呈减少趋势。在冬季, 全国大部分地区 CWP 呈增加趋势, 增加最大的区域分别是青藏高原东部、西南地区 and 内蒙古东部地区, 各区域中心增长值均大于 $0.015 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

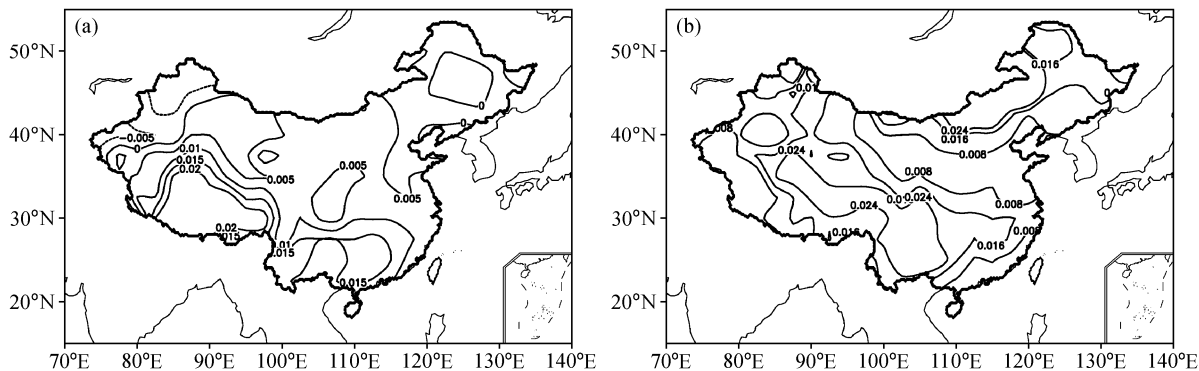


图 9 1984~2004 年 CWP 线性变化趋势[单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]: (a) 夏季; (b) 冬季

Fig. 9 Linear trend of seasonal mean CWP [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$] for period 1984–2004: (a) Summer; (b) winter

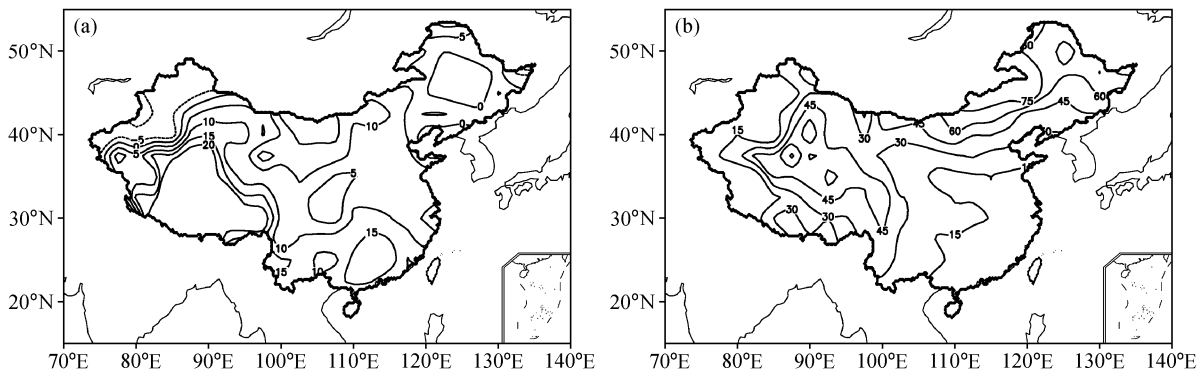


图 10 1984~2004 年 CWP 线性变化趋势百分率: (a) 夏季; (b) 冬季

Fig. 10 Percentage of the linear trend of seasonal mean CWP for period 1984–2004: (a) Summer; (b) winter

图 10 表示夏季和冬季 CWP 线性变化趋势百分率, 其中, 夏季增加最明显的区域为青藏高原东部, 增加趋势大于 $20\% (10 \text{ a})^{-1}$, 东南和内蒙古西部地区增加趋势大于 $15\% (10 \text{ a})^{-1}$; 减小趋势最明显的区域是新疆北部地区, 减小趋势大于 $10\% (10 \text{ a})^{-1}$ 。在冬季, 增加趋势最明显的区域为内蒙古东部、东北北部和西北东部地区。

青藏高原东部在夏季和冬季 CWP 都有明显的增加趋势, 李栋梁等^[32]研究了青藏高原地面感热状况, 指出 1961~2000 年期间, 冬季高原中部和东南部感热通量呈明显的上升趋势, 夏季高原主体及东部地区感热通量不断加强。地面向上的感热通量使加热区的垂直运动增强, 为云的形成提供了动力条件。另外, 通过分析 ERA-40 水汽资料发现, 青藏高原东部在 1984~2001 年夏季水汽明显增加, 增加百分率大于东部地区, 冬季水汽也有所增加, 为云的形成提供有利的水汽条件。

夏季东北和西北地区 CWP 的减小, 是与夏季

影响中国地区的夏季风环流的年际变化密切相关。研究^[33, 34]表明夏季风环流自 20 世纪 70 年代末开始减弱。在弱夏季风环流期间, 副高位置偏南, 致使水汽很难向北输送, 雨带长期停留在东南和长江流域, 造成南涝北旱, 这也是东南地区 CWP 增加多, 东北、西北地区 CWP 减少的主要原因。

图 11 为 1995~2004 年夏季平均 850 hPa 水平风场与 1984~1994 年夏季平均 850 hPa 水平风场之差, 图中虚线为海拔超过 1500 m 的地区, 圆圈表示具有明显气旋式环流特征的地区, 有利于 CWP 在该地区的形成。在北部地区, 则以偏北气流为主, 阻碍了水汽向华北和东北地区输送, 由于水汽供给减少, 导致 CWP 出现减少趋势; 而在西北地区, 来自东南的水汽输送带在 $(40^\circ\text{N}, 105^\circ\text{E})$ 周边区域受到增强东北气流的影响被阻断, 导致西北地区水汽供应减少, 不利于 CWP 的形成。

在图 9b 和图 10b 中, 内蒙古地区冬季 CWP 具有明显的增加趋势, 在 $100^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E}$ 之间,

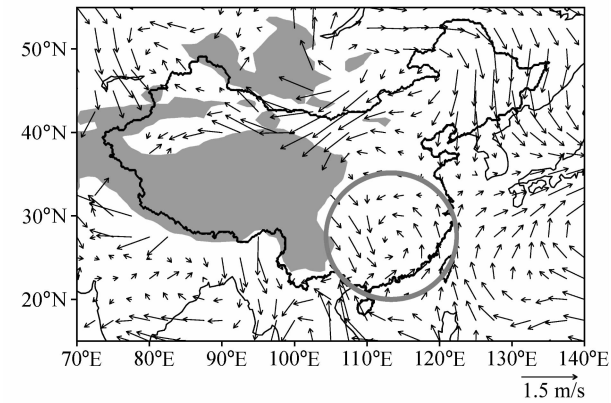


图 11 1995~2004 年夏季平均 850 hPa 水平风场与 1984~1994 年夏季平均 850 hPa 水平风场之差。阴影：海拔超过 1500 m
Fig. 11 Difference of summer horizontal wind field at 850 hPa between 1995 - 2004 and 1984 - 1994. Shading: elevation over 1500 m

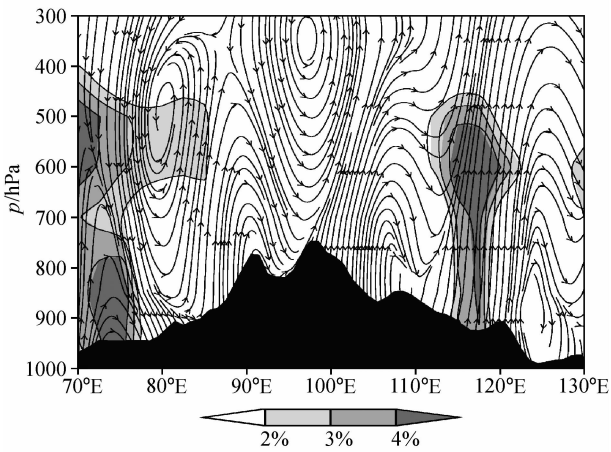


图 12 1995~2004 年与 1984~1994 年冬季平均的风场之差以及相对湿度之差（阴影）高度-经度剖面（45°N~50°N）。纬向风速单位：m/s；垂直风速单位：0.01 hPa/s
Fig. 12 Longitude-height cross sections (45°N-50°N) of the differences of winter mean wind field and relative humidity (shadow) between 1995 - 2004 and 1984 - 1994. Units for the zonal wind are m/s and for the vertical wind are 0.01 hPa/s

CWP 增加趋势达到 60% 以上。从图 12 中可以看出，在 1995~2004 年 100°E~120°E 区域内平均垂直上升运动大于 1984~1994 年，同时在 110°E~120°E 垂直区域内，相对湿度也有所增加，在垂直上升运动和相对湿度增加的共同作用下，造成了冬季内蒙古东部地区 CWP 的增加。在 100°E 以西地区，CWP 线性趋势百分率增加较小，在 70°E 和 90°E 范围附近地区 CWP 呈减小趋势（图 10b），在图 12 中可以看出，CWP 减小的区域都与下沉气流

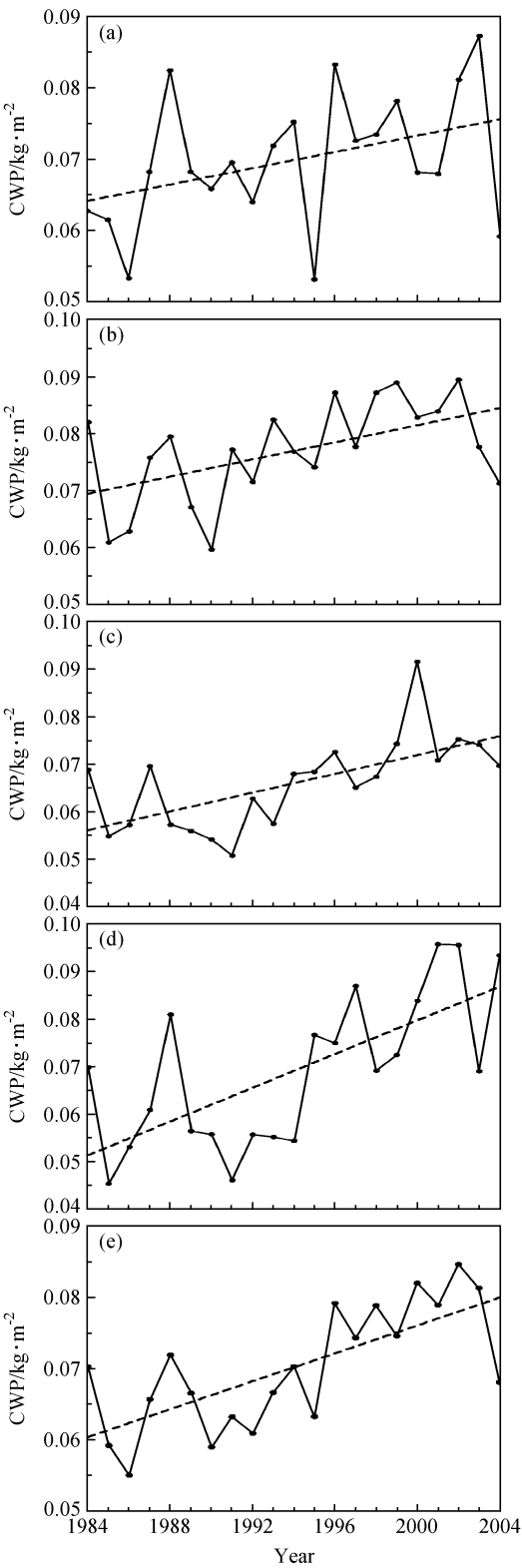


图 13 1984~2004 中国地区的平均 CWP：(a) 春季；(b) 夏季；(c) 秋季；(d) 冬季；(e) 年平均
Fig. 13 Seasonal mean CWP in China from 1984 to 2004: (a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter; (e) annual mean

表 1 中国地区 1984~2004 年各季节和年平均 CWP、CWP 标准差及其变化趋势

Table 1 Means, rates of increase, percentages of increase and standard deviations for seasonal and annual averaged CWP over China

季节	平均值/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	增加率/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	百分比增加率/ $(10 \text{ a})^{-1}$	标准差/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$
春季	0.070	0.006	8.57%	0.009
夏季	0.077	0.008	10.39%	0.009
秋季	0.066	0.010	15.15%	0.010
冬季	0.069	0.017	24.64%	0.016
年平均	0.070	0.010	14.29%	0.009

相联系, 尽管 $70^{\circ}\text{E} \sim 80^{\circ}\text{E}$ 之间区域相对湿度增加, 但由于垂直上升运动减弱, CWP 也没有明显的增加。

图 13 表示中国地区各季节平均和年平均 CWP 的年际变化, 各图的平均值、增加率、百分比增加率和标准差可参照表 1。

从图 13 中可以看出, 季节平均和年平均 CWP 的年际变化均显示出增加趋势, 其中冬季增加趋势最明显, 春、夏两季的增加趋势相对较小, 但多年平均值要大于冬季。通过计算的标准差可以看出, 最大的年际变化发生在冬季, 同时, 冬季的 CWP 百分比增加率达到 $24.64\% (10 \text{ a})^{-1}$ 。各季节平均的 CWP 变化趋势与水汽变化趋势^[31]一致。

5 结论与讨论

中国地区的 CWP 的分布与大气环流、地形和大气湿度的分布密切相关, 受到大气环流季节变化、地形和湿度变化的共同影响, 中国地区的 CWP 存在明显的季节变化, 全国 CWP 最高的月份是 6 月, 10 月全国 CWP 最低。受到西风气流和青藏高原的共同作用, 中国东南地区的冬季和春季 CWP 为全年最高值, 且大于全国其他地区; 最低值出现在华北和东北地区的冬季。东南地区较高的 CWP 与该地区层状云密切相关, 而层状云降雨特性也是人工影响天气的主要研究对象^[35, 36], 因此, 有必要对该地区的层状云降雨特性和影响因素进行深入研究。

中国地区的 CWP 在 1984~2004 年以增加为主, 除东南沿海和青藏高原西部小部分地区有较弱的减小外, 大部分地区都呈增加趋势, 其中青藏高原东部和内蒙古东部地区 CWP 的增加趋势较强, 西北东部地区、内蒙古地区和青藏高原东部地区线性趋势百分率较高。冬季和秋季 CWP 增加较大,

春季和夏季增加较小。冬季内蒙古东部地区和夏季青藏高原东部地区 CWP 增加最明显, 这些变化主要与大气环流变化导致的抬升运动增强以及大气湿度增加有关。

中国地区自 20 纪 80 年代开始气温有明显增加^[37, 38], CWP 在全球和中国地区变暖的背景下表现出增加的趋势, 符合气温增加导致水循环增强的观点, 也为人工影响天气提供有利的作业条件。

由于云的形成不仅受到动力过程和大气湿度的影响, 还受到大气气溶胶等的影响, 特别是大气污染导致的大气中气溶胶变化会直接影响云的物理特性以及水循环过程^[39~41], 因此有必要在今后的研究中引入气溶胶的分析作为环流分析和大气湿度分析的补充, 揭示影响 CWP 分布和变化的真正原因。

参考文献 (References)

[1] Hobbs P V, Rangno A L. Ice particle concentrations in clouds. *J. Atmos. Sci.*, 1985, **42**: 2523~2549

[2] Platt C M R, Scott S C, Dille A C. Remote sounding of high clouds. Part VI: Optical properties of midlatitude and tropical cirrus. *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**: 729~747

[3] Gamache J F. Microphysical observations in summer MON-EX convective and stratiform clouds. *Mon. Wea. Rev.*, 1990, **118**: 1238~1249

[4] Sassen K. The polarization lidar technique for cloud research: A review and current assessment. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1991, **72**: 1848~1866

[5] Sassen K, Zhao H. Supercooled liquid water clouds in Utah winter mountain storms: Cloud-seeding implications of a remote-sensing dataset. *J. Appl. Meteor.*, 1993, **32**: 1548~1558

[6] 魏丽, 钟强, 侯萍. 中国大陆卫星反演云参数的评估. 高原气象, 1996, **15** (2): 147~156

Wei Li, Zhong Qiang, Hou Ping. Evaluation on cloud variables from ISCCP data over Chinese continent. *Plateau Mete-*

- orology (in Chinese), 1996, **15** (2): 147~156
- [7] 翁笃鸣, 韩爱梅. 中国卫星总云量与地面总云量分布的对比分析. 应用气象学报, 1998, **9** (1): 32~37
Weng Duming, Han Aimei. Comparison between total cloudiness from satellite cloud pictures and ground observations over China. *Quart. J. Appl. Meteor.* (in Chinese), 1998, **9** (1): 32~37
- [8] Zhang M H, Yu R C, Yu Y Q. Comparing cloud radiative properties between the eastern China and the Indian monsoon region. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18**: 1090~1102
- [9] 丁守国, 石广玉, 赵春生. 利用 ISCCP D2 资料分析近 20 年全球不同云类云量的变化及其对气候可能的影响. 科学通报, 2004, **49** (11): 1105~1111
Ding Shouguo, Shi Guangyu, Zhao Chunsheng. Analyzing global trends of different cloud types and their potential impacts on climate by using the ISCCP D2 dataset. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49**: 1301~1306
- [10] 章丽娜, 王必正, 曾庆存. 高云与高层垂直速度关系的个例研究 I. 观测事实. 气候与环境研究, 2005, **10** (3): 588~603
Zhang Lina, Wang Bizheng, Zeng Qingcun. Case study on the relationships between high cloud and high-level vertical velocity Part I: Observations. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (3): 588~603
- [11] Lin B, Rossow W B. Observations of cloud liquid water path over oceans: Optical and microwave remote sensing methods. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**: 20907~20927
- [12] Lin B, Rossow W B. Seasonal variation of liquid and ice water path in nonprecipitating clouds over oceans. *J. Climate*, 1996, **9**: 2890~2902
- [13] Huang J, Lin B, Minnis P, et al. Satellite-based assessment of possible dust aerosols semi-direct effect on cloud water path over East Asia. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**, doi: 10.1029/2006GL026561
- [14] 陈勇航, 黄建平, 陈长和, 等. 西北地区空中云水资源的时空分布特征. 高原气象, 2005, **24** (6): 905~912
Chen Yonghang, Huang Jianping, Chen Changhe, et al. Temporal and spatial distributions of cloud water resources over Northwestern China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2005, **24** (6): 905~912
- [15] Somerville R C J, Remer L A. Cloud optical thickness feedbacks in the CO₂ climate problem. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**: 9668~9672
- [16] Senior C A, Mitchell J F B. Carbon dioxide and climate: The impact of cloud parametrization. *J. Climate*, 1993, **6**: 393~418
- [17] Tselioudis G, DelGenio A D, Kovari W Jr, et al. Temperature dependence of low cloud optical thickness in the GISS GCM: Contributing mechanisms and climate implications. *J. Climate*, 1998, **11**: 3268~3281
- [18] Rossow W B, Schiffer R A. ISCCP cloud data products. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1991, **71**: 2~20
- [19] Rossow W B, Walker A W, Garder L C. Comparison of ISCCP and other cloud amounts. *J. Climate*, 1993, **6**: 2394~2418
- [20] Rossow W B, Walker A W, Beusichel D, et al. International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) description of new cloud datasets. World Climate Research Programme (ICSU and WMO), 1996, 115pp
- [21] Rossow W B, Schiffer R A. Advances in understanding clouds from ISCCP. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1999, **80**: 2261~2287
- [22] Minnis P, Heck P W, Young D F. Inference of cirrus cloud properties using satellite-observed visible and infrared radiances. Part II: Verification of theoretical cirrus radiative properties. *J. Atmos. Sci.*, 1993, **50**: 1305~1322
- [23] Macke A, Mueller J, Raschke E. Single scattering properties of atmospheric ice crystals. *J. Atmos. Sci.*, 1996, **53**: 2813~2825
- [24] Mishchenko M I, Rossow W B, Macke A, et al. Sensitivity of cirrus cloud albedo, bidirectional reflectance, and optical thickness retrieval accuracy to ice particle shape. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**: 16973~16985
- [25] Desclotres J, Buriez J C, Parol F, et al. POLDER observations of cloud bidirectional reflectances compared to a plane-parallel model using the International Satellite Cloud Climatology Project cloud phase functions. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**: 11411~11418
- [26] Yu R C, Wang B, Zhou T J. Climate effects of the deep continental stratus clouds generated by the Tibetan Plateau. *J. Climate*, 2004, **17**: 2702~2713
- [27] Li Y Y, Yu R C, Xu Y P, et al. Spatial distribution and seasonal variation of cloud over China based on ISCCP data and surface observations. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2004, **82**: 761~773
- [28] Li Y, Gu H. Relationship between middle stratiform clouds and large scale circulation over eastern China. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**: L09706, doi: 10.1029/2005GL025615
- [29] Wang J X L, Gaffen D J. Late-twentieth-century climatology and trends of surface humidity and temperature in China. *J. Climate*, 2001, **14**: 2833~2845
- [30] Trenberth K E, Fasullo J, Smith L. Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor. *Climate Dyn.*, 2005, **24**: 741~758
- [31] Zhai P M, Eskridge R E. Atmospheric water vapor over China. *J. Climate*, 1997, **10**: 2643~2652
- [32] 李栋梁, 李维京, 魏丽, 等. 青藏高原地面感热及其异常的诊断分析. 气候与环境研究, 2003, **8** (1): 71~83
Li Dongliang, Li Weijing, Wei Li, et al. A diagnostic study of surface sensible heat flux anomaly over the Qinghai - Xizang Plateau. *Climatic and Environmental Research* (in Chi-

- nese), 2003, **8** (1): 71~83
- [33] Wang H J. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970s. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18**: 376~386
- [34] 吕俊梅, 任菊章, 嵇建华. 东亚夏季风的年代际变化对中国降水的影响. *热带气象学报*, 2004, **20**: 73~80
Lü Junmei, Ren Juzhang, Ju Jianhua. The interdecadal variability of East Asia monsoon and its effect on the rainfall over China. *J. Tropical Meteor.* (in Chinese), 2004, **20**: 73~80
- [35] 洪延超, 周非非. 层状云系人工增雨潜力评估研究. *大气科学*, 2006, **30** (5): 913~926
Hong Yanchao, Zhou Feifei. The study of evaluation of potential of artificial precipitation enhancement in stratiform cloud system. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (5): 913~926
- [36] 郭学良, 黄美元, 徐华英, 等. 层状云的雨滴谱分档数值模拟研究. *大气科学*, 1999, **23** (4): 411~421
Guo Xueliang, Huang Meiyuan, Xu Huaying, et al. The raindrop category model study on raindrop distribution of stratiform clouds. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23** (4): 411~421
- [37] Wang S, Gong D. Enhancement of the warming trend in China. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**: 2581~2584
- [38] 唐红玉, 翟盘茂. 1951~2002 年中国东、西部地区地面气温变化对比. *地球物理学报*, 2005, **48** (3): 526~534
Tang H Y, Zhai P M. Comparison of variations of surface air temperatures in eastern and western China during 1951 - 2002. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48** (3): 526~534
- [39] Rosenfeld D. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. *Science*, 2000, **287**: 1793~1796
- [40] Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. Aerosols, climate and the hydrological cycle. *Science*, 2001, **294**: 2119~2124
- [41] Rosenfeld D. Aerosols, clouds, and climate. *Science*, 2006, **312**: 1323~1324