氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

全球云水量气候分布及变化趋势特征分析

程敬雅 游庆龙 蔡淼

Climatic Distribution and Trend Characteristics of Global Cloud Water Content

CHENG Jingya YOU Qinglong CAI Miao

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20137

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

基于资料的中国西南地区云水含量和粒子有效半径分布及变化特征

Distribution and Variation of Cloud Water Content and Particle EffecticeRadius in Southwest China Based on CERES Data

气候与环境研究. 2019, 24(3): 383 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18071

青藏高原云水气候特征分析

Climatic Characteristic Analysis of Cloud Water over the Tibetan Plateau

气候与环境研究. 2018, 23(5): 574 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18039

南亚高压的东西偏向对亚洲季风区对流层顶附近水汽分布的影响

Impact of the East-West Phase of South Asia High on Water Vapor Distribution near Tropopause over the Asian Monsoon Region

气候与环境研究. 2018, 23(3): 341 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17048

青藏高原西部春季降水年代际变化趋势

Study on the Decadal Trend of Spring Precipitation in the Western Tibetan Plateau

气候与环境研究. 2019, 24(5): 639 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19005

Nudging方法对中国西北强降水过程的模拟试验研究

A Numerical Simulation Study on Heavy Rain Processes in Northwest China Using the Nudging Method

气候与环境研究. 2017, 22(5): 563 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16177

华北背景地区大气能见度变化特征及影响因素分析

Variation Characteristics of Atmospheric Visibility and Its Influence Factors in the background area of North China

气候与环境研究. 2019, 24(2): 277 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18085

关注微信公众号，获得更多资讯信息

程敬雅, 游庆龙, 蔡淼. 2021. 全球云水量气候分布及变化趋势特征分析 [J]. 气候与环境研究, 26(5): 541−555. CHENG Jingya, YOU Qinglong, CAI Miao. 2021. Climatic Distribution and Trend Characteristics of Global Cloud Water Content [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (5): 541−555. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20137

全球云水量气候分布及变化趋势特征分析

程敬雅[1] 游庆龙[1,2] 蔡淼[3]

1 复旦大学大气与海洋科学系，上海 200438
2 珠海复旦创新研究院，广东珠海 518057
3 中国气象科学研究院，北京 100081

摘 要 采用 20 世纪再分析版本 2c 数据集的云水量逐月再分析数据，通过数理统计方法，分析了 1960～2014 年全球、海洋和陆地上空云水量的分布和变化特征及其与水汽通量的关系。结果表明：1）全球云水量空间分布不均，海洋高于陆地且比例约为 4∶3，中低纬海洋、陆地上空云水量变化趋势分别为 0.07 g m^{-2} (10 a)$^{-1}$ 和 −0.04 g m^{-2} (10 a)$^{-1}$，季节性差异主要体现于夏季在热带辐合带和南半球海洋高，冬季在北半球海洋和南半球陆地高。2）对比六大洲发现，云水量最高的南美洲有最快增加趋势，为 0.46 g m^{-2} (10 a)$^{-1}$，同时云水量最低的非洲有最快降低趋势，为−0.59 g m^{-2} (10 a)$^{-1}$。3）中低层整层水汽通量散度场的辐合、辐散区和云水量的高、低值区相对应，云水量与水汽通量散度变化呈负相关（相关系数为−0.44），负相关关系在赤道附近的低纬地区显著。本文揭示了在全球变暖背景下，大气中云水量分布和变化的时空格局，为模式参数化和未来气候预估提供参考。

关键词 云水量 水汽通量 水汽通量散度 分布特征 变化趋势
文章编号 1006-9585(2021)05-0541-15 **中图分类号** P466 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20137

Climatic Distribution and Trend Characteristics of Global Cloud Water Content

CHENG Jingya[1], YOU Qinglong[1,2], and CAI Miao[3]

1 *Department of Atmospheric and Oceanic Sciences*, *Fudan University*, *Shanghai* 200438
2 *Zhuhai Fudan Innovation Research Institute*, *Zhuhai*, *Guangdong Province* 518057
3 *Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *Beijing* 100081

Abstract Based on the monthly cloud water content of the 20th-century reanalysis version 2c dataset, mathematical-statistical methods are employed to analyze the distribution and variation characteristics of the global cloud water content, including oceans and land from 1960 to 2014, and their relationships with water vapor flux. Results show that: 1) The global cloud water content is unevenly distributed spatially, with the oceans having a higher content than the land at a ratio of approximately 4∶3. Variations in the trend of cloud water content over the middle and low latitude oceans and land are approximately 0.07 g m^{-2} (10 a)$^{-1}$ and −0.04 g m^{-2} (10 a)$^{-1}$, respectively. Seasonal differences are reflected mainly as high cloud water content in the Tropical Convergence Zone and the Southern Hemisphere oceans in summer, and the Northern Hemisphere oceans and the Southern Hemisphere land in winter. 2) South America, with the highest

收稿日期 2020-11-10；**网络预出版日期** 2021-05-16
作者简介 程敬雅，女，1997 年出生，硕士研究生，研究方向为气候变化。E-mail: jycheng19@fudan.edu.cn
通讯作者 游庆龙，E-mail: qlyou@fudan.edu.cn
资助项目 国家重点研发计划项目 2016YFA0601702
Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFA0601702)

cloud water content, has the fastest increasing trend of 0.46 g m^{-2} (10 a)$^{-1}$ whereas Africa, with the lowest cloud water content, has the fastest decreasing trend of −0.59 g m^{-2} (10 a)$^{-1}$, as shown by a comparison of six continents. 3) The convergence and divergence zones of the water vapor flux divergence field in the middle and lower layers correspond to the high and low-value zones of cloud water content. The variation in the cloud water content and water vapor flux divergence presents a negative correlation, with a correlation coefficient of −0.44. The negative correlation is significant at low latitudes near the equator. Herein, the temporal and spatial patterns of the distribution and change in the cloud water content under the background of global warming are revealed, providing a reference for model parameterization and future climate prediction.

Keywords Cloud water content, Water vapor flux, Divergence of water vapor flux, Distribution characteristic, Trend

1 引言

云是自然界水循环过程中有形的结果，全球云平均覆盖约为69%（Rossow and Schiffer, 1999; Stubenrauch et al., 2013），在气候系统中担任着绝对重要的角色。云相态的改变可释放大量潜热加热大气，同时它能吸收和反射太阳短波辐射并吸收和放射长波辐射，影响大气的能量收支平衡，驱动大气的运动，制约大气中水循环交换过程（Yang et al., 2006; 傅云飞等，2008; Kiemle et al., 2011）。云及其辐射相互作用是对未来气候预测的最大不确定性，云复杂的反馈机制使其成为气候敏感性的最大不确定源（Cess et al., 1989; Held and Soden, 2000; 汪方和丁一汇，2005）。云是由悬浮在大气中的小水滴和小冰晶等水凝物组成，云中水凝物的相态与分布对云的特性有直接的影响。在20世纪80年代之前还没有全球范围内云中水凝物含量的观测（Platt et al., 1987; Rossow and Schiffer, 1999），对于云中发生的微物理过程还无法进行描述，多基于经验理论参数化法来计算潜热通量（Kuo, 1965; Klemp and Wilhelmson, 1978）。Tao et al.（1990）提出云粒子相态的转变对云中热量平衡起决定性作用，云中液态水和固态水相对含量的多少及其分布廓线可以有效的估算潜热。云中水凝物含量差异还会导致云对长波辐射和太阳短波辐射的反射率、透过率和吸收率有所不同（汪宏七和赵高祥，1996），从而进一步影响云的辐射性质，制约地气系统的能量收支平衡（Somerville, 1985; Shupe and Intrieri, 2004），平均0.05 kg/m^2的液态水含量变化将导致云净辐射强迫改变－25 W/m^2（Greenwald et al., 1995）。同时，云中含水量与降水强弱也有直接联系，液态水含量高的低云有利于降水的发生发展（刘健和董超华，2002; 杨大生和王普才，2012）。云中包含的液态水和固态水物质，称为云液水含量（Cloud Liquid Water Content, LWC）和云冰水含量（Cloud Ice Water Content, IWC），其垂直积分为柱云水量（或液态水路径，Liquid Water Path, LWP）和柱云冰量（或冰水路径，Ice Water Path, IWP）（耿蓉等，2018），文中将两者合称为云水量（Cloud Water Content, CWC）。云水量的垂直和水平分布对全球气候变化和局地天气都具有重要影响，是云模式中微物理过程和气候积云模式的重要参数，也是人工降雨潜力区判断的重要依据（王颖等，2016）。

前人已有大量研究表明云水量与水汽、降水以及环流场配置关系密切。Greenwald et al.（1995）用SSM/I（Special Sensor Microwave/Imager）、ERBE（Earth Radiation Budget Experiment）和ISCCP（International Satellite Cloud Climatology Project）3套遥感资料对全球海洋上空的LWP的空间分布、时间变率以及和温度、辐射收支的相关关系进行了分析，发现LWP最大值出现在北半球中纬度急流处和热带对流区，在纬向平均上有3个极大峰值，全球海洋上空平均LWP约为0.113 kg/m^2。Yu et al.（2004）提出地表温度和低层云之间的反馈过程不同于对流云，地表温度升高将导致大气层结减少、相对湿度降低，会抑制陆地上空层云的形成，从而减少低云云水量。Xu et al.（2005）继而研究也发现，东南太平洋LWP的增加与智利西海岸以南异常反气旋环流的发展有关，反气旋环流带来的南极高纬干冷气流与之相关的沉降增温，加强了反气旋中逆温结构，有利于层云的发展。且还证明海平面气压和地面风等环流变量先于云中液态水约2周变化，而海表温度滞后于其变化约2周，表明低云中LWP变率是由大气环流引起的而不是下垫面。Zuidema and Joyce（2008）利用SSM/I、AMSR

（Advanced Microwave Scanning Radiometer）和地面测站的数据来研究北半球高纬海域的水汽、LWP 和降雨三者之间的关系，春季 LWP 增加通常与水汽路径（Water Vapor Path, WVP）增加同步，而秋季 LWP 降低滞后于 WVP 的降低，最显著滞后区域在北太平洋，LWP 最大值出现在 8 月，比北大西洋晚一个月，与 8 月最大降水相关。李兴宇等（2008）研究发现中国地区云水路径的分布与大气环流、地形特征和大气湿度分布及水汽传输密切相关，以增加趋势为主，存在季节性差异。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水汽的增加相关，符合气温增加导致水循环增强的观点。林丹和王维佳（2019）统计分析了西南地区云水含量等云参数的时空分布特征和变化趋势，结果表明云水含量在西部地区和海拔低的地区更高，各地液水和冰水含量均呈减少趋势。长期以来对大气中云水量的研究多限于局地云水的气候效应及成因分析，且时间尺度较短，本文关注在较长时间尺度上、全球范围内云水的时空特征，并将水汽场与环流场相结合，分析云水量与水平水汽输送通量及其散度的关系，为研究云的潜热、辐射和云降水等效应提供参考。

2　资料和方法

2.1　资料

所用资料为美国能源部（U.S. Department of Energy）、科学生物与环境研究所（Office of Science Biological and Environmental Research, BER）和美国国家大气海洋局（National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA）联合发布的 20 世纪再分析版本 2c（The NOAA-CIRES 20th Century Reanalysis version 2c）数据集（Compo et al., 2011），时间长度延伸到 1851 年，为 19 世纪气候应用生成的四维再分析数据集。20 世纪再分析版本 v2c 是目前国际上新发展的一套具有创新性、综合性的 20 世纪全球大气环流再分析数据集，该数据集与观测模式相结合，可提供一套极为全面的气候描述与分析（陈峥等，2018）。20 世纪再分析版本 2c 使用了与版本 2（20th Century Reanalysis version 2）相同的模式，在版本 2 的基础上，加入 COBE-SST2 海冰数据（Hirahara et al., 2014）、SODAsi.2 的海平面温度场（Giese et al., 2016）以及 ISPD（The International Surface Pressure Databank）观测数据资料对边界条件进行了优化。

云水量是 20 世纪再分析版本 2c 资料中的预报量（Moorthi et al., 2001）：

$$\frac{\partial q_c}{\partial t} = -\boldsymbol{V}\cdot\nabla q_c - \sigma\frac{\partial q_c}{\partial \sigma} + S_c - P - E + F_{qc}, \qquad (1)$$

其中，q_c 为云水量，数据中没有对云液水和云冰水进行区分，两者共同被储存为云水量；t 为时间变量；等号右侧的前两项表示三维空间的平流项，$\boldsymbol{V}$ 为风矢量；S_c 为对流活动产生的云水水凝物，由对流参数化中的云扰动项提供；P 为降水率，E 为云水水凝物的蒸发率，分别来自 Sundqvist et al.（1989）和 Zhao and Carr（1997）的参数化结果；F_{qc} 表示水平和垂直方向上云水水凝物的扩散。文中使用的云水量数据是对单位面积内，海平面（1000 hPa）至大气顶（10 hPa）共计 24 层的云水量进行垂直积分的积分量，表示整层大气中的柱云水量。

本文研究时间段为 1960～2014 年，月平均水平风场（u、v）、比湿、地表气压和云水量数据的水平空间分辨率为 2°（纬度）×2°（经度）。季节划分按照 3～5 月为春季，6～8 月为夏季，9～11 月为秋季，12 月至次年 2 月为冬季。使用一元线性回归方法计算变化趋势，9 点滑动平均来表征年代际变化特征，相关分析来分析云水量与水平水汽输送通量散度的关系。

2.2　水汽通量及散度计算方法

2.2.1　水平水汽输送通量

水平水汽输送通量（下文简称水汽通量）表示在单位时间内流经某一单位面积的水汽量（单位：kg m^{-1} s^{-1}）。整层水汽通量公式为

$$\boldsymbol{Q} = -\frac{1}{g}\int_{P_s}^{P_t}(\boldsymbol{V}q)\,\mathrm{d}p, \qquad (2)$$

其中，g 为重力加速度，p_t 和 p_s 分别为上边界气压（取 300 hPa）和海平面气压，垂直积分气压层包含从 1000 hPa 到 300 hPa，共计 15 层；q 为相应层大气的比湿。

2.2.2　水平水汽输送通量散度

水平水汽输送通量散度（下文简称水汽通量散度）表示单位时间、单位体积内汇聚或辐散出去的水汽量，利用中央有限差分方法计算散度（潘留杰等，2015）。水汽通量散度值为正时，表示辐散；为负时，表示辐合。整层水汽通量散度 [单位：10^{-5} kg m^{-2} (10 a)$^{-1}$] 是表示水汽输送聚集程度的物

理量：

$$\mathrm{DIV} = -\frac{1}{g}\int_{p_s}^{p_t}\left(\nabla\cdot\frac{\boldsymbol{V}q}{g}\right)\mathrm{d}p = -\frac{1}{g}\int_{p_s}^{p_t}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\boldsymbol{u}q}{g}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\boldsymbol{v}q}{g}\right)\right]\mathrm{d}p, \quad (3)$$

其中，$\boldsymbol{V}$ 为各层大气的风速矢量，$\boldsymbol{u}$、$\boldsymbol{v}$ 分别为各层的纬、经向风；∇为向量微分算子。

3 结论与讨论

3.1 多年平均态分布特征

图 1a 为 1960～2014 年多年平均云水量分布，全球云水量空间分布不均，大致呈现海洋高于陆地，南半球高于北半球的分布格局。海洋上空云水量大值区域位于热带辐合带、北太平洋、北大西洋、中印度洋、南半球中纬度等海域，在南半球中纬度 35°S～50°S 之间形成一纬向云水高值带，其平均云水量为 92.7 g m^{-2}，这与中纬度地区气旋活动频繁相一致（Sinclair, 2002）。北半球对应纬度受地形影响，高值带断裂成北大西洋和北太平洋两个高值区域，其值分别约为 98.4 g m^{-2} 和 106.2 g m^{-2}。海洋上低值区域主要位于中低纬副热带大陆西海岸海域，全球大致有 5 个低值中心，分别位于南北美洲、以赤道为界的南北非洲和大洋洲西侧。全球海洋上空纬向平均上有 4 个极大峰值，分别位于 50°N、7°N、5°S、45°S 左右纬度处，其中最大值为 97.7 g m^{-2}，对应位于南半球中纬度海洋上；陆地上云水量分布的区域性差异更加显著，大值区域主要集中在北美东部平原、亚马孙平原、巴西高原、北欧、非洲中部、中国东南部以及东南亚地区等，

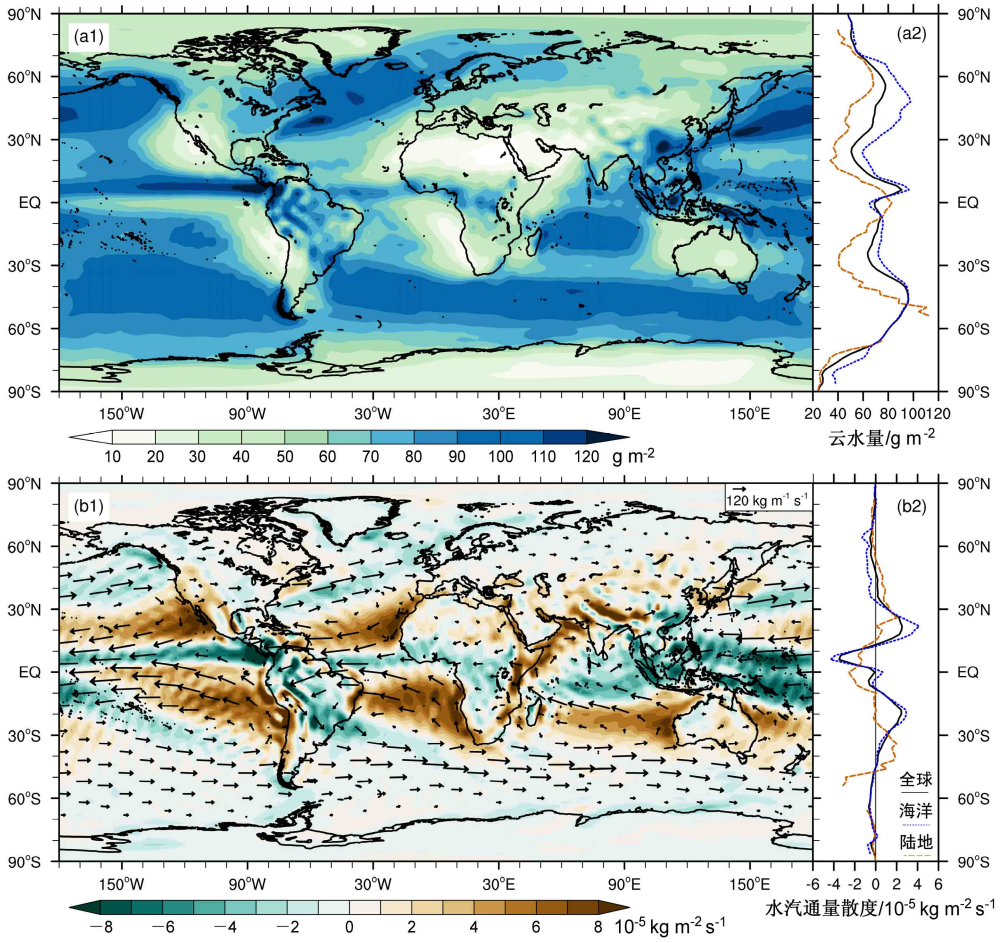

图 1 全球 1960~2014 年（a1）云水量多年平均分布及其（a2）纬向平均、（b1）300 hPa 以下整层水汽通量（箭头，单位：kg m^{-1} s^{-1}）和水汽通量散度多年平均分布（阴影，绿色表示辐合，棕色表示辐散）及其（b2）散度场纬向平均

Fig. 1 Global average distributions of (a1) cloud water content and (a2) its zonal average and (b1) water vapor flux in the whole layer below 300 hPa (arrows, units: kg m^{-1} s^{-1}) and its divergence (shadow, green for convergence and brown for divergence) and (b2) zonal average of divergence during 1960−2014

全球在南北美交界处约 4°N 热带辐合带的陆地上空有云水量最高值，高达 168.8 g m^{-2}，而撒哈拉沙漠中心地区上空年均云水值低于 5 g m^{-2}。陆地纬向平均波动较之海洋上空更大，有 3 个极大峰值，分别位于 55°N、0°、54°S 纬度处，赤道处云水量约为 79.6 g m^{-2}。高纬度地区，无论是北极海洋上空还是南极大陆上空，云水量都较为贫乏。海洋和陆地上空云水量占比约为 4∶3，全球云水量纬向平均分布与海洋纬向平均相当接近，特别是在赤道峰值及以南纬度，黑、蓝曲线大致趋于重合，表明在赤道附近及南半球上空，海洋上的云水量占据全球云水量的主体地位，对全球云水量的分布起着决定性的作用。

水汽主要存在于 300 hPa 以下的大气低层，水汽输送和辐合程度决定了云中水凝物的分布和降水的多寡，云液水含量大值区对应低层的辐合上升运动，对流层中低层水汽通量散度可在一定程度上表征云水含量（衡志炜，2013；刘菊菊等，2018）。图 1b 为相应的 300 hPa 以下整层积分的水汽通量和水汽通量散度的多年平均分布。在中、低纬地区，水汽通量散度场的辐合、辐散区和云水量的高、低值区域有很好一致性。赤道辐合带 8°N 左右无论是海洋还是陆地都为显著的水汽辐合区以及其南北两侧的陆地上空也有水汽的辐合，水汽主要来源于 10°N～30°N 和 0°～40°S 的低纬海洋。中高纬地区在西风带控制下，表现为稳定的水汽通量带，水汽通量散度较小，为水汽辐合区，陆地上的巴西高原和东南亚等云水大值区，都受到来自南半球中高纬强水汽通量带辐散出来的水汽影响。

各季的云水量分布在空间上和全年平均整体大致相似（如图 2 所示），各个地区含量值高低存在季节差异，四季中春、秋季云水量分布相似，南北半球分布较为均匀，和全年平均分布大致一致，夏、冬季节云水量分布体现了显著的季节性差异。海洋上空，夏季热带辐合带和南半球海洋上空云水量有显著的发展加宽加强，而冬季海洋云水量大值带集中于北半球北大西洋和北太平洋上空，低纬和南半球的纬向云水大值带有明显的缩窄减弱。在海洋上空对应的纬向平均上，夏季南半球在 40°S 和 10°S 左右出现双峰值，分别云水量约为 110.8 g m^{-2} 和 84.2 g m^{-2}，热带辐合带处峰值位于 8°N 纬度处，约为 107.1 g m^{-2}；冬季热带辐合带峰值含量显著降低，约为 86.7 g m^{-2}，北半球海洋上空发展到 103.2 g m^{-2} 左右。陆地上空，夏季中低纬陆地上空云水量差异

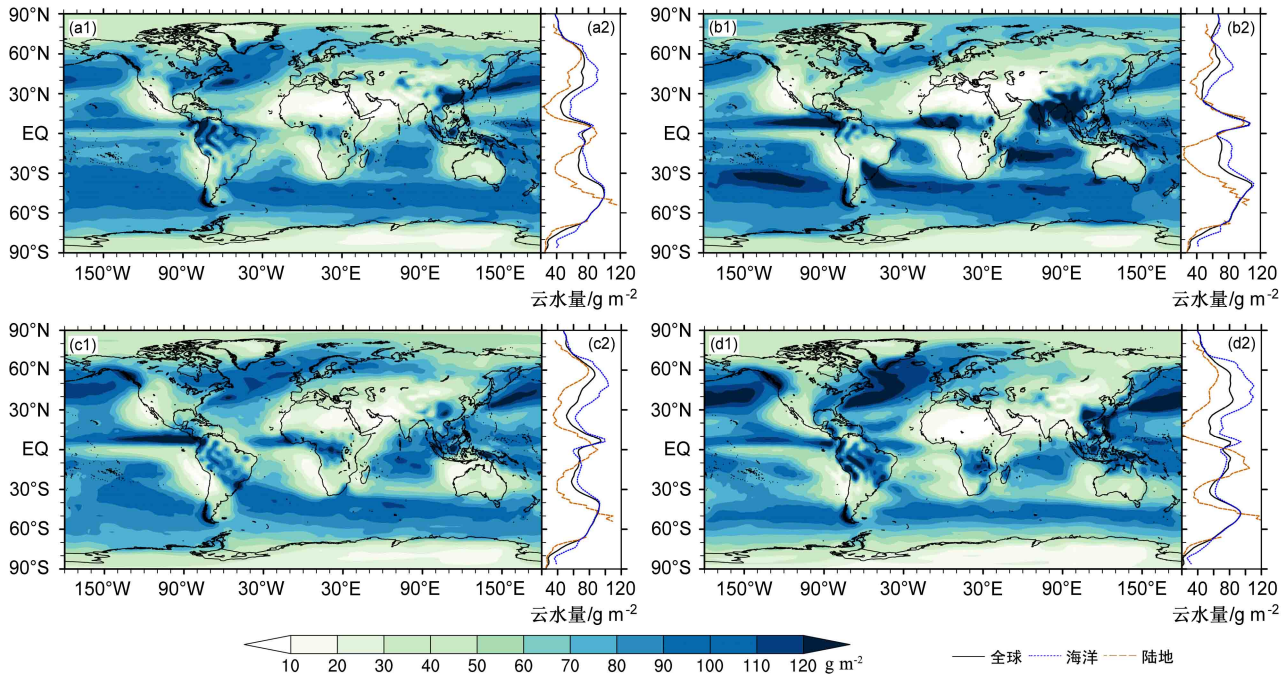

图 2　全球（a1）春季、（b1）夏季、（c1）秋季、（d1）冬季云水量多年平均分布及其（a2）春季、（b2）夏季、（c2）秋季、（d2）冬季纬向平均

Fig. 2　Global average distributions of seasonal cloud water content in (a1) spring, (b1) summer, (c1) autumn, and (d1) winter and (a2) spring, (b2) summer, (c2) autumn, and (d2) winter zonal average

显著，大多集中于热带辐合带和亚洲、南美季风区，而原本在春季处于云水低值的区域，其上空云水量在夏季进一步降低，例如中东及南、北非等区域，造成夏季在这些区域之间高空干湿对比加剧。从夏季到冬季，热带辐合带的云水量逐渐减少，大值带有整体有南移倾向，导致南半球的南美和南非大陆上空云水量有明显增多发展。夏、冬两季云水量在陆地上空对应纬度处形成近反向分布，这一特征在中低纬大陆上空显著。

海陆整体而言，夏季云水大值区域集中于热带辐合带和南半球海洋上空，冬季则主要位于北半球海洋和南半球陆地上空，春、秋两季属于云水大值带过渡发展季节。秋季云水量发展大致表现为海洋上空北半球增加南半球减少，陆地上空热带辐合带的大值区向南扩散，春季则与之相反。值得注意的是，南北半球海洋上空云水量大值区域的位置随季节变化较为稳定，属于常年维持的相对稳定的多云带，陆地上空云水大值区域位置则会发生季节性偏移。

图 3 给出了全球多年平均各个季节云水量在全年中占比的空间分布情况。海洋上，北半球海洋上空云水量在秋、冬季节占比较高，南半球在春、夏季占比较高。陆地上，春、秋季全球云水分布较为平均，其中全球年均最低云水量的东撒哈拉沙漠上空云水量大多集中于秋季；夏、冬季陆地上云水分布则有明显季节性差异。受热带辐合带和夏季风影响下的中非大陆、南亚、东亚以及南美巴拉那高原地区，云水量在夏季占全年大部分比重，特别是 10°N～20°N 之间的撒哈拉沙漠、印度半岛和中南半岛地区，云水量大多集中出现于夏季，占比能达全年云水量的一半以上；而中低纬的南、北美洲、南非大陆、大洋洲以及阿拉伯半岛到伊朗高原一带上空的云水大多出现的冬季。在高纬南北极区，无论是冰、水下垫面的北冰洋上空还是冰原大陆的南极上空，云水量都是在夏季占比最高，秋季次之，冬季、春季含量低，这与下垫面的性质有很大关系。

全球水汽输送辐合、辐散区和云水高、低值区分布在各个季节也很好吻合（图 4）。海洋上，相比夏季，北半球北大西洋和北太平洋上空反气旋性环流水汽输送在冬季显著减弱，适宜的环流场配置大量的水汽输送，有利于冬季在该两处海域生成云水量；而南半球上冬季的气旋性环流水汽输送有明显发展且南移倾向，由角动量守恒原理可知，中高纬的西风环流带缩窄加强，从而影响到南半球中高纬纬向云水大值带的分布。由于水汽大多来自洋面上的蒸发，在水平风场的作用下被输送到全球各地，陆地上云水量小于海洋上空，且来自海洋的水汽是形成陆地上空云水水凝物的主要来源，所以水汽通量季节差异导致的云水季节性分布不同在陆地上更为明显。南美热带雨林上空是全球云水量最为丰富

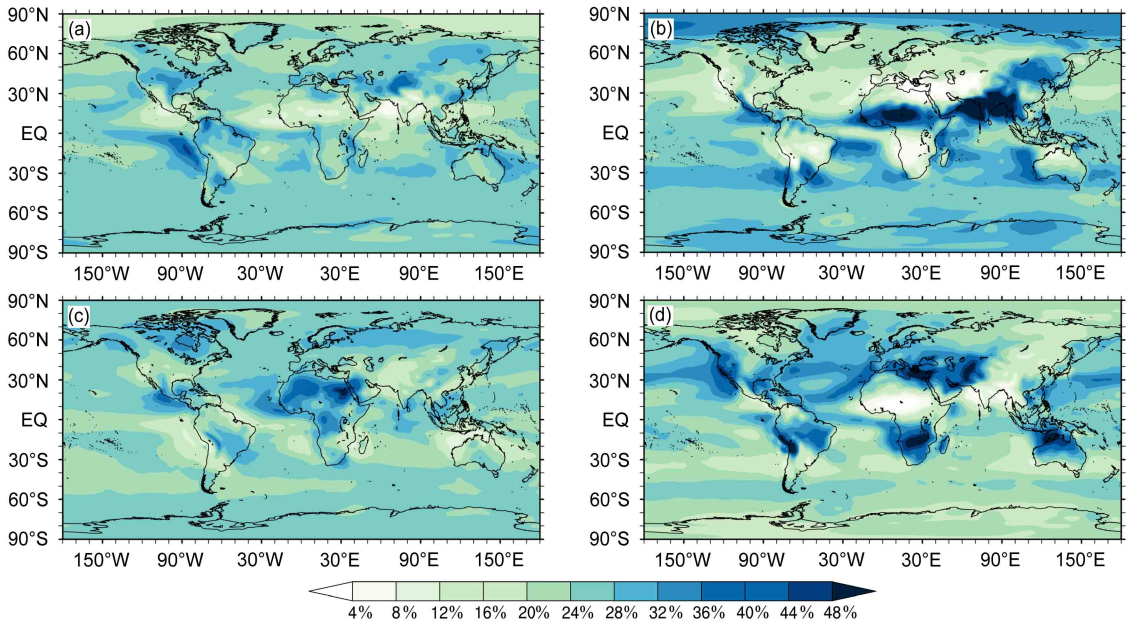

图 3 全球云水量（a）春季、（b）夏季、（c）秋季、（d）冬季多年平均的全年占比分布

Fig. 3 Percentage distributions of global average cloud water content in (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter

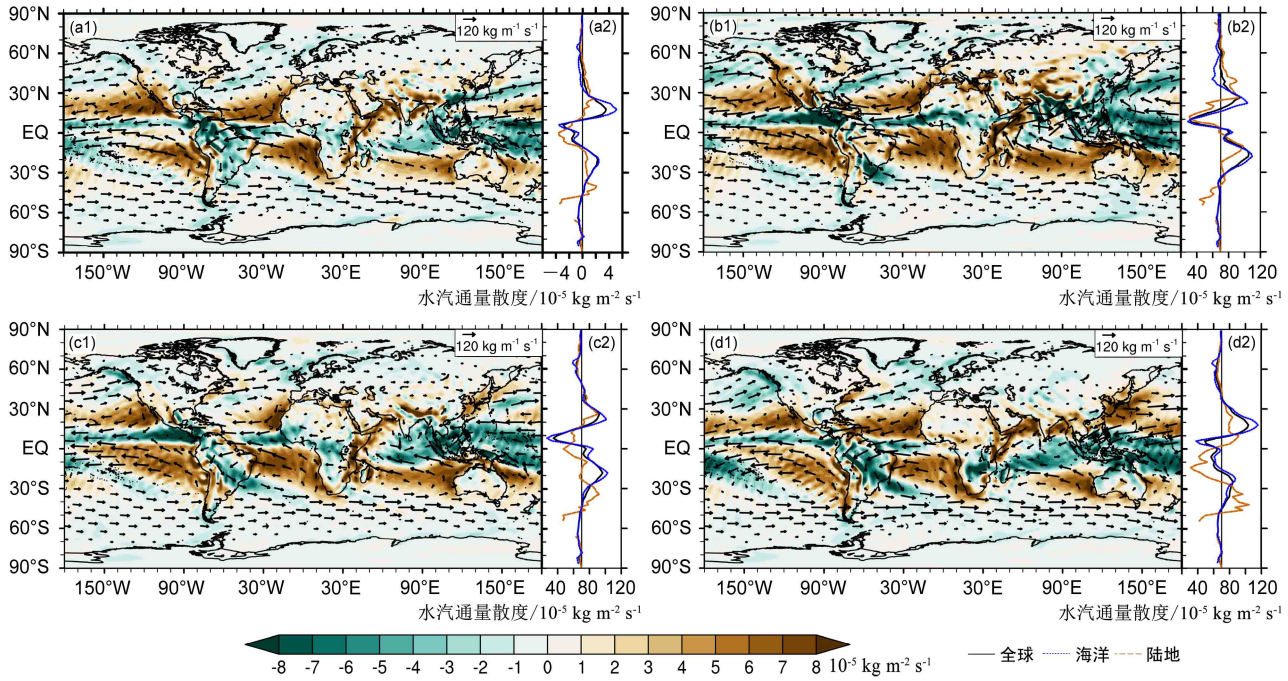

图 4　全球（a1）春季、（b1）夏季、（c1）秋季、（d1）冬季 300 hPa 以下整层水汽通量（箭头，单位：kg m^{-1} s^{-1}）、水汽通量散度（阴影，绿色表示辐合，棕色表示辐散）多年平均分布及其（a2）春季、（b2）夏季、（c2）秋季、（d2）冬季纬向平均

Fig. 4　Global average distributions of water vapor flux in the whole layer below 300 hPa (arrows, units: kg m^{-1} s^{-1}) in (a1) spring, (b1) summer, (c1) autumn, and (d1) winter and its divergence (shadow, green for convergence and brown for divergence) and (a2) spring, (b2) summer, (c2) autumn, and (d2) winter zonal average of divergence

的区域之一，在 10°N～20°S 的区域之间年均云水量约 77.1 g m^{-2}，但各季含量分别约为 85.5 g m^{-2}、54.0 g m^{-2}、74.4 g m^{-2}、94.3 g m^{-2}，发现夏季云水量有明显的降低，在图 2b 上表现为亚马孙平原上空云水量显著减少，而其东南侧的巴拉那高原地区云水量显著增加。对应南美的水汽通量和水汽通量散度场上可以看到，该区域全年受气旋性环流的控制，盛行东北风，来自北印度洋的水汽与南太副高辐散的东南气流相遇辐合抬升，易形成云水。而夏季的东北气流偏转为偏东风，水汽并不在平原上空抬升，而与中高纬平直西风带于南纬 30°S 左右形成辐合中心，从而致使夏季云水大值区域南移。非洲大陆受到环流场影响较大，风场的季节性南北移动致使水汽辐合带由夏季赤道偏北位置偏移到冬季非洲南端，非洲大陆上空云水量大值带中心纬度由夏到冬从北纬 8°N 到南纬 15°S 左右，冬季水汽通量散度的纬向平均上该纬度有显著辐合。约 10°N～40°N 的东南亚地区及邻近海域在夏季时表现为强的水汽辐合，有两条主要的水汽通道，北印度洋的跨赤道气流和西太平洋的偏东气流，将来自洋面上的暖湿水汽输送到大陆，两支水汽在此辐合抬升（黄荣辉和陈际龙，2010；李文韬等，2018），可形成丰富的云水。南北极区云水量少很大程度上也是因为通向极区的水汽通量少，没有充分的水汽来抬升形成水凝物。

3.2　变化趋势特征及相关性分析

早期研究中指出对云微物理过程在高纬极区的观测模拟不够完善（Rossow and Schiffer, 1999），所以文中在计算时间序列时选用 60°S～60°N 范围内数据（如图 5 所示）。该纬度范围内，海陆整体、海洋上空、陆地上空的平均云水量分别约为 61.8 g m^{-2}、73.5 g m^{-2}、55.0 g m^{-2}。海陆整体表现为不显著增加趋势，约每十年增加 0.04 g m^{-2}。从其 9 年滑动平均序列上来看，云水量呈现先减少后增加的趋势，20 世纪 80 年代之前云水量表现为显著下降趋势，约为−0.64 g m^{-2} (10 a)$^{-1}$，80 年代之后表现为中低纬度云水量在增加，其趋势值约为 0.32 g m^{-2} (10 a)$^{-1}$，符合 20 世纪 70 年代末全球变暖背景下大气总水量增加和大气水循环加快的结论（Held and Soden, 2006; Wentz et al., 2007）。对应纬度范围的海洋上空云水量的变化和海陆整体有很高的一致性，其增长趋势为 0.07 g m^{-2} (10 a)$^{-1}$。陆地上空云水量呈现

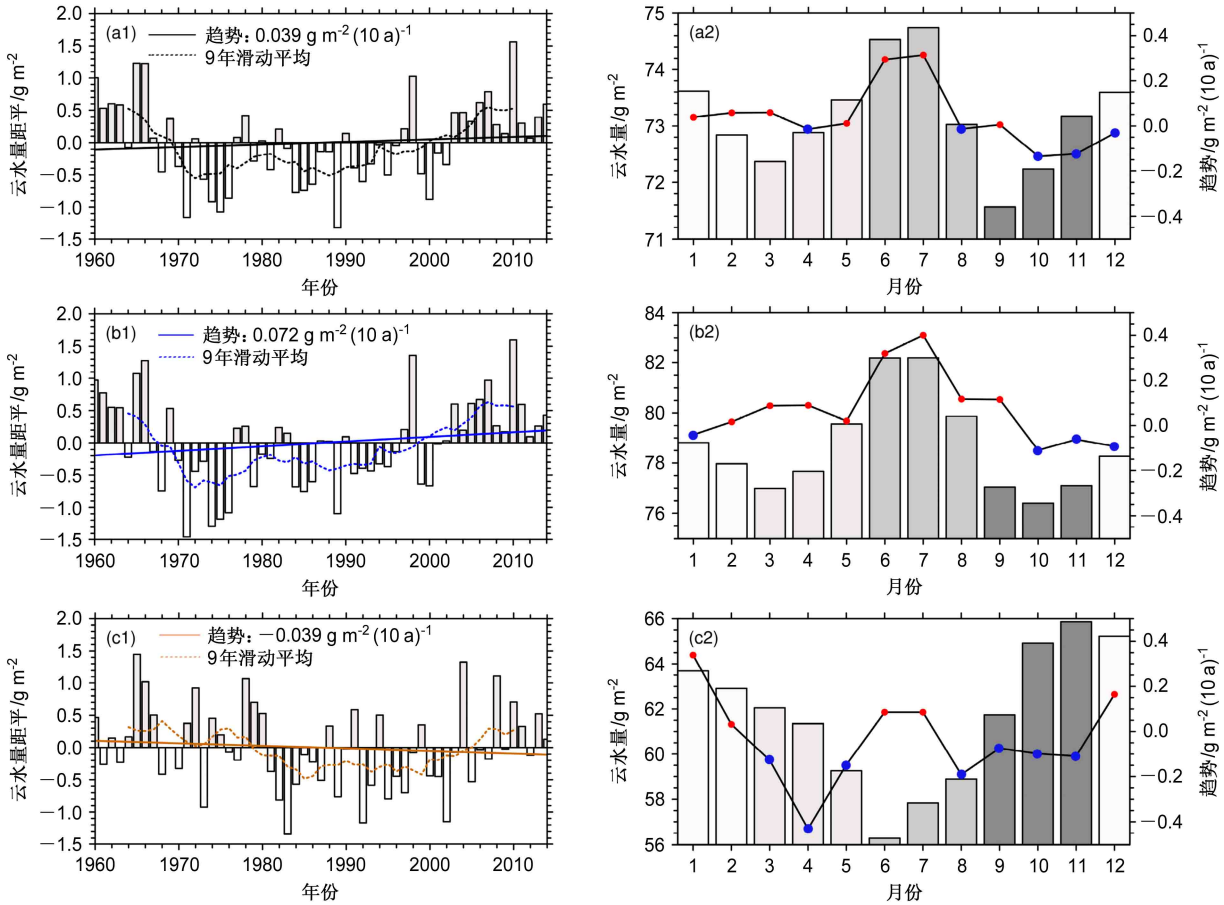

图 5 60°S～60°N（a1）海陆整体、（b1）海洋、（c1）陆地上空云水量距平序列（柱状图）及其各自 9 年滑动平均（虚线）和线性趋势（实线）；（a2）、（b2）、（c2）分别为 60°S～60°N 海陆整体、海洋、陆地上空各季云水量月均含量（柱状，不同色柱表示不同季节；带点线表示各月云水量变化趋势，红点表示增加，蓝点表示降低）

Fig. 5 Sequence of cloud water content anomaly over the (a1) whole, (b1) ocean, and (c1) land (histogram) of 60°S–60°N and their nine-year moving average line (dashed line) and linear trend (solid line); Monthly cloud water content of 60°N–60°S over the (a2) whole, (b2) ocean, and (c2) land of each month (histogram, different color bars indicate different seasons; line with dots represents the monthly trend, red and blue dots are for increasing and decreasing trend, respectively]

不显著的年代际下降趋势，约为−0.04 g m^{-2} (10 a)$^{-1}$。对比海、陆时间序列，陆地上空云水量的年际变化更加剧烈，多为低值年和高值年交替出现。

图 5a2、5b2、5c2 分别为 60°S～60°N 范围内海陆整体、海洋、陆地上空 55 年月平均云水量柱状图及各月云水量变化趋势点线。年内循环体现出季节性差异，海洋上空云水量在春、夏、秋、冬四季依次为77.6 g m^{-2}、81.4 g m^{-2}、76.5 g m^{-2}、77.2 g m^{-2}，各季距平序列上（图 6a2−d2），春、夏季有增长趋势，秋、冬季呈现不显著下降趋势，其中夏季全年增长趋势约为 0.28 g m^{-2} (10 a)$^{-1}$。大陆上空四季依次为60.9 g m^{-2}、57.6 g m^{-2}、64.1 g m^{-2}、63.9 g m^{-2}，大陆上大致表现为夏季、冬季增加，春季、秋季减少（图 6a3−d3），其中春季和冬季年代际变化剧烈，分别约为−0.24 g m^{-2} (10 a)$^{-1}$ 和 0.16 g m^{-2} (10 a)$^{-1}$。海洋上空夏季云水量远高于其他三季和陆地水平，秋季云水量最低，说明夏、秋之际中低纬海洋上空云水量迅速降低；而陆地上空与海洋上空云水量呈现反向季节分布，陆地上表现为夏季云水量最低，秋季最高，且逐月连续变化，从全年陆地最低水平的 6 月 56.2 g m^{-2} 逐月递增，11 月大陆上空云水量增长到 65.9 g m^{-2} 后又依次递减。

尽管海洋上空云水量远多于陆地上空，但陆地上的云水量与天气变化的关系更为直接，是直接影响陆地及区域气候的主要因素之一。欧洲、亚洲、北美洲、非洲、大洋洲、南美洲这六大洲平均云水量分别为67.7 g m^{-2}、53.3 g m^{-2}、60.9 g m^{-2}、40.7 g m^{-2}、50.7 g m^{-2}、74.0 g m^{-2}。各大洲的云水量距平序列

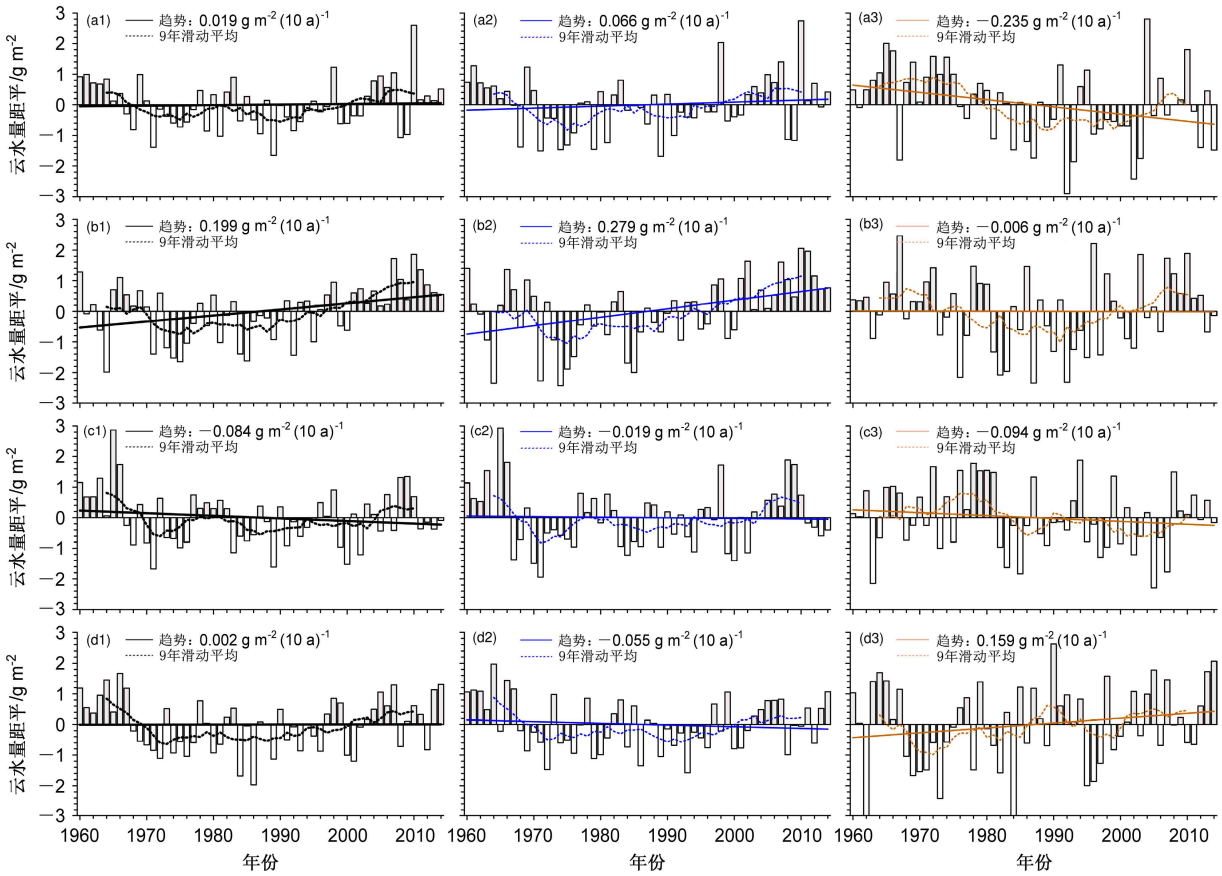

图 6　60°S～60°N 海陆整体（左列）、海洋（中列）、陆地（右列）上空（a1−a3）春季、（b1−b3）夏季、（c1−c3）秋季、（d1−d3）冬季云水量距平序列（柱状）及其各自 9 年滑动平均（虚线）和线性趋势（实线）

Fig. 6　Sequence (bar chart) of cloud water content anomaly over the whole (left panel), ocean (middle panel), and land (right panel) for (a1−a3) spring, (b1−b3) summer, (c1−c3) autumn, and (d1−d3) winter for 60°S–60°N and their nine-year moving average (dashed line) and trend (solid line)

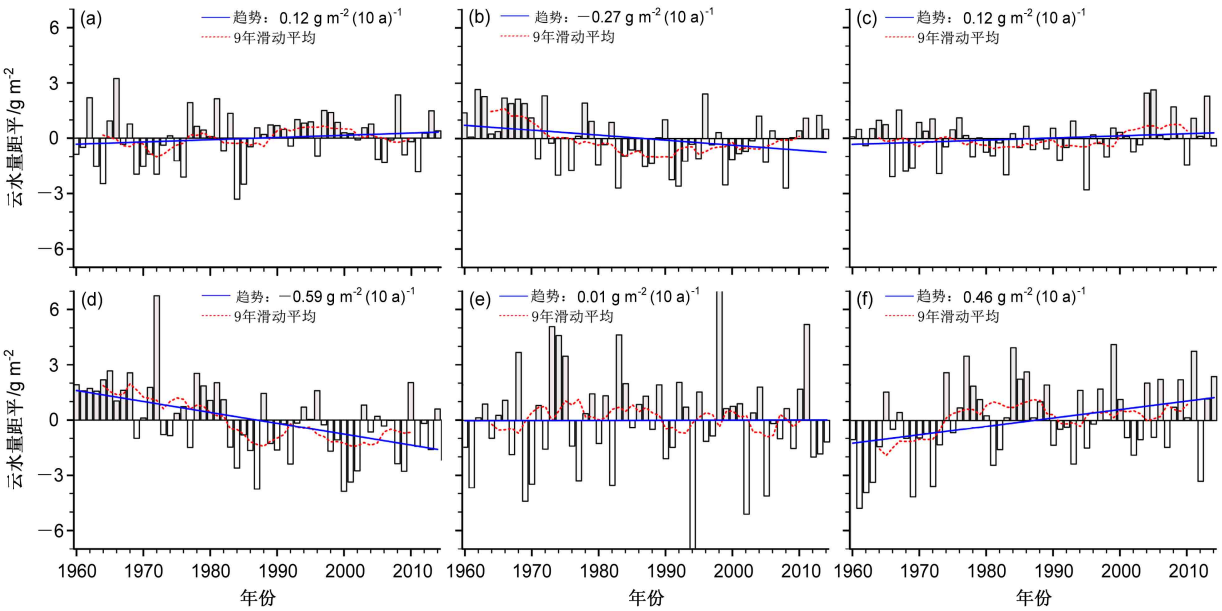

图 7　陆地六大洲（a）欧洲、（b）亚洲、（c）北美洲、（d）非洲、（e）大洋洲、（f）南美洲云水量距平序列（柱状）及其各自 9 年滑动平均（红线）和各自线性趋势（蓝线）

Fig. 7　Sequence of cloud water content anomaly for six continents (a) Europe, (b) Asia, (c) North America, (d) Africa, (e) Oceania, and (f) South America (bar chart) and their nine-year moving average (red line) and trend (blue line)

如图 7 所示，非洲和亚洲大陆上空云水量分别以每十年−0.59 g m^{-2} 和−0.27 g m^{-2} 的幅度下降，南美洲具有较快增幅，为 0.46 g m^{-2} (10 a)$^{-1}$，欧洲和北美洲以较平缓的年代际增幅增加，约为 0.12 g m^{-2} (10 a)$^{-1}$，大洋洲在这 55 年云水量无明显变化。对比六大洲整体发现，年均云水量含量高的大洲云水量有增长趋势，而原本含量低的大洲却在进一步降低。同时，位于北半球的三大洲云水量年际波动较小，而同经度的南半球三大洲云水量年际波动都十分剧烈，其中又尤以四面临海的大洋洲最为显著。各大洲 9 年滑动平均曲线皆呈现为波动状序列，这可能与大气中 3～5 年 ENSO 准周期变化相关。前人也已有研究指出云水量的年际变化有 El Niño 和 La Niña 事件有很好的响应，云水量正异常往往对应海表温度的正异常（Weng et al., 1997; Heng et al., 2014）。

各大洲各季节云水量均值及变化趋势值如表 1 所示。欧洲和南美洲云水量季节差异显著，欧洲春、夏季云水量低，秋、冬季高，南美洲冬、春季云水量高，夏、秋季较低。各季变化趋势上，非洲大陆除夏季有不显著增加趋势以外，其余三季都表现为突出的下降趋势，其中秋季下降高达−1.6 g m^{-2} (10 a)$^{-1}$；南美洲表现与之恰好相反，除夏季有不显著减少趋势，其余三季增加趋势显著。

上文中云水量趋势变化在空间分布上如图 8a 所示。可以看到全球云水量变化在空间上分布不均匀，分散多个增、减大值区域。其中海洋上空增加趋势较为显著的区域位于南半球中高纬海洋和赤道中东、西太平洋；陆地上空主要集中在南北美洲的墨西哥高原、亚马孙平原、巴西高原和东南亚地区

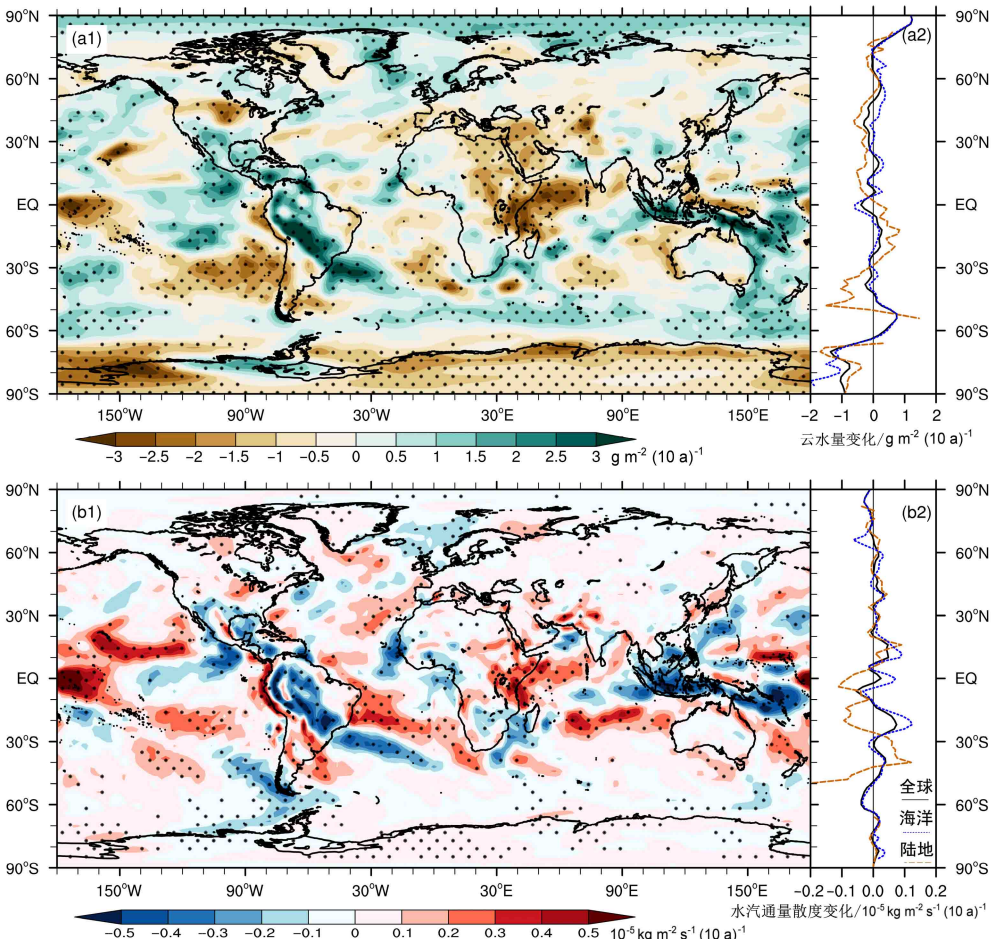

图 8 全球（a1）云水量变化趋势分布及其（a2）纬向平均、（b1）300 hPa 以下整层水汽通量散度变化趋势分布（蓝色表示散度值减少，红色表示散度值增大）及其（b2）纬向平均（打点区域通过 α=0.05 水平的显著性检验）

Fig. 8 Global trend distribution of (a1) cloud water content and (a2) its zonal mean and (b1) divergence of water vapor flux in the whole layer below 300 hPa (blue and red are for decreasing and increasing divergence, respectively) and (b2) its zonal mean (dotted area passes the significance test at α=0.05 level)

等区域。在图 1b 水汽通量散度场上上述对应区域主要表现为辐合，在图 8b 上体现辐合加强趋势。云水量减少显著区域集中位于北美中部、东南太平洋、中东地区、东非大陆及邻近阿拉伯海海域，对应图 8b 上水汽通量散度在北美中部表现为水汽辐合减弱，东南太平洋和东非及邻近海域有水汽辐散加强和辐合减弱。除此之外还能看到在整个北极海洋上空云水量呈显著增长状态，而南极大陆上空表现为显著降低趋势。

不同区域上空的云水量变化趋势也体现出季节性差异（图 9）。海洋上，在夏季，太平洋的变化趋势明显小于其他季节，而南半球中高纬海洋上空增加显著，冬季北半球海洋上空云水量增加显著，这和各季云水量大值出现的区域是相一致的。季节性变化特征在大陆上体现得更为明显。亚马孙平原上空云水量在冬、春季增加趋势显著，在夏季主要表现为减少趋势。非洲大陆及邻近的中东地区、阿拉伯海和中印度洋部分海域上空云水量在夏季也有不同其他季节的表现，夏季中非大陆有增加趋势，以南区域表现为降低趋势，秋、冬季与之相反，春季主要为下降趋势。受季风影响显著的东亚地区在春季表现为显著降低趋势，其余各季均为增加趋势。

各季水汽通量散度的变化相对于全年平均而言在空间分布上更加不均匀（图 10），但与各季云水量变化趋势显著的区域有较好的一致性。为进一步探讨全球、海洋和陆地上空云水量与水汽通量散度的相关关系，计算了两者年均和各季节的相关系数（表 2）。结果表明全年和各季平均而言，全球、海洋和陆地上空云水量与水汽通量散度皆呈现负相关关系，即水汽通量散度增大（辐散增强，辐合减弱），云水量减少；水汽通量散度减小（辐散减弱，辐合增强），云水量增加。全球年均云水量和水汽通量散度相关系数为−0.44，通过了 α=0.1 水平的显著性检验，海洋上空全年和各季都通过了 α=0.1 水平的显著性检验，陆地上空都通过了 α=0.05 水平的显著性检验，表明云水量的变化和水汽通量辐合、辐散的变化具有较高的一致性。

4　总结与讨论

本文分析指出全球、海洋和陆地上空云水量的分布和变化存在区域性和季节性差异，且与水汽通量及其散度的关系密切。全球云水量主要集中于南

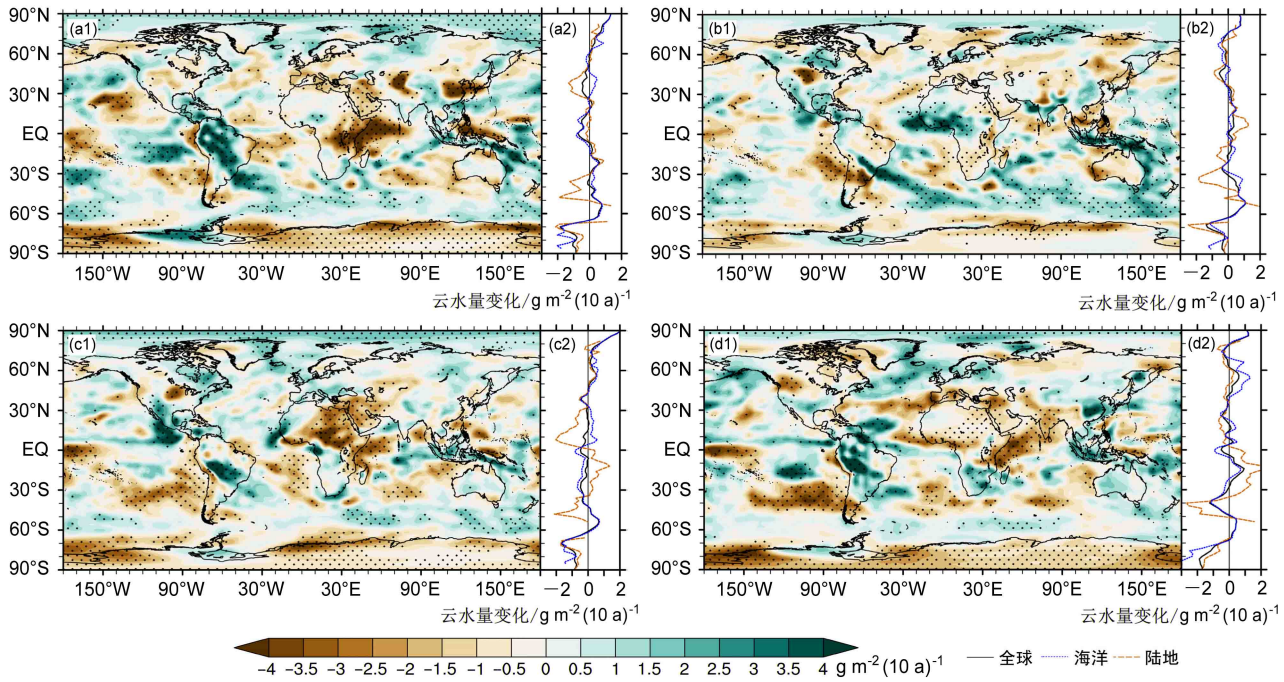

图 9　全球（a1）春季、（b1）夏季、（c1）秋季、（d1）冬季云水量变化趋势分布（打点区域通过了 α=0.05 水平的显著性检验）及其（a2）春季、（b2）夏季、（c2）秋季、（d2）冬季纬向平均

Fig. 9　Global distributions of the seasonal cloud water content in (a1) spring, (b1) summer, (c1) autumn, and (d1) winter and (a2) spring, (b2) summer, (c2) autumn, and (d2) winter zonal average (dotted area passes the significance test at α=0.05 level)

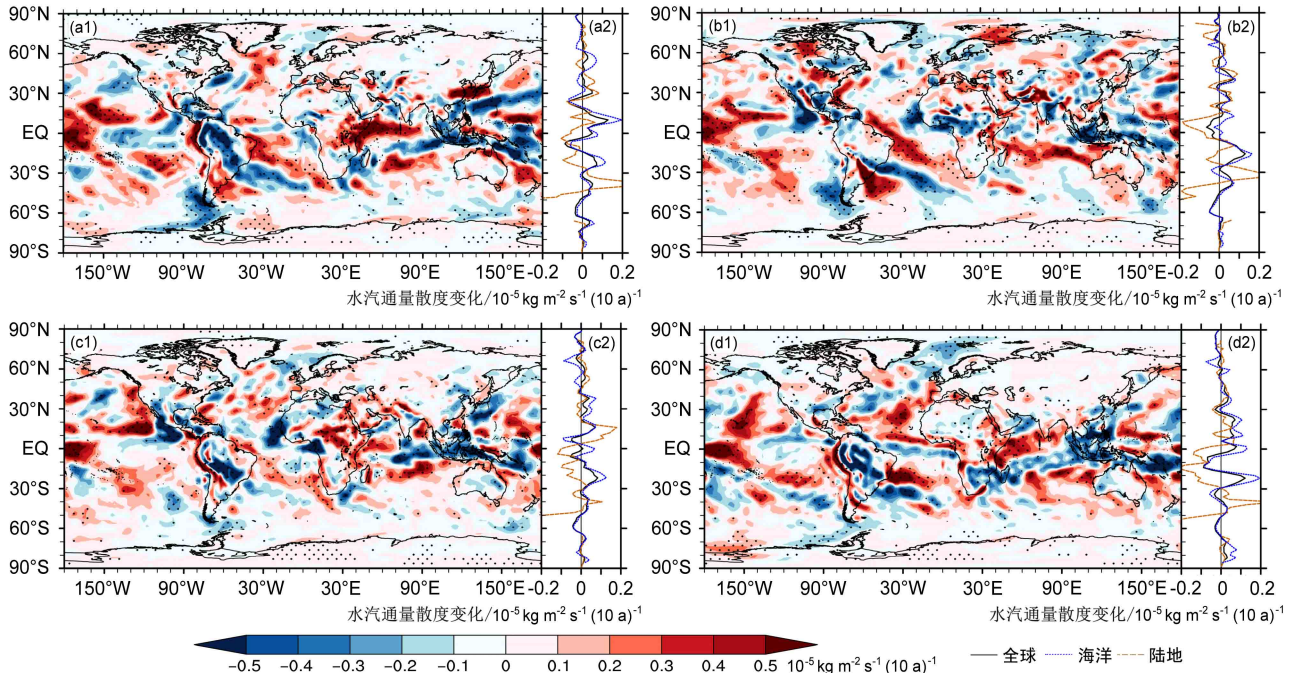

图 10 全球（a1）春季、（b1）夏季、（c1）秋季、（d1）冬季 300 hPa 以下整层水汽通量散度变化趋势分布（红色表示散度值增大，蓝色表示散度值减少，打点区域通过了 α=0.05 水平的显著性检验）及其（a2）春季、（b2）夏季、（c2）秋季、（d2）冬季纬向平均

Fig. 10 Global distribution of the seasonal divergence in the water vapor flux in the whole layer below 300 hPa in (a1) spring, (b1) summer, (c1) autumn, and (d1) winter and (a2) spring, (b2) summer, (c2) autumn, and (d2) winter zonal average (red and blue dots are for increasing and decreasing trend, respectively, dotted area passes the significance test at α=0.05 level)

表 1 陆地六大洲欧洲、亚洲、北美洲、非洲、大洋洲、南美洲各季节云水量均值、变化趋势以及不同季节云水量标准差

Table 1 The mean value and trend value of cloud water content in each season of six continents Europe, Asia, North America, Africa, Oceania, and South America and their standard deviation

	云水量均值/g m^{-2}、变化趋势/g m^{-2} (10 a)$^{-1}$					
	欧洲	亚洲	北美洲	非洲	大洋洲	南美洲
春季	65.2、−0.08	55.2、−0.26*	60.4、−0.09	36.6、−0.79**	43.1、−0.36	78.1、1.46**
夏季	50.3、−0.32	58.2、−0.18	53.7、0.11	41.6、0.21	39.0、−0.68	62.5、−0.20
秋季	71.0、0.21	53.9、−0.23*	62.7、0.31**	47.7、−1.6**	37.9、0.08	70.0、0.39*
冬季	73.1、0.28	47.2、−0.26	61.6、−0.05	37.5、−0.59**	50.6、0.48	81.5、1.33**
标准差	10.29	4.65	4.32	5.06	5.75	8.51

注：*表示通过α=0.1水平的显著性检验，**表示通过α=0.05水平的显著性检验。

表 2 全球、海洋和陆地云水量与 300 hPa 以下整层水汽通量散度全年及各季节的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between cloud water content and divergence of water vapor flux in the whole layer below 300 hPa of global, ocean, and land

区域	相关系数				
	年均	春季	夏季	秋季	冬季
全球	−0.44*	−0.45*	−0.42	−0.45*	−0.42
海洋	−0.47*	−0.46*	−0.42*	−0.45*	−0.44*
陆地	−0.39**	−0.44**	−0.42**	−0.46**	−0.38**

注：*表示通过 α =0.1水平的显著性检验，**表示通过α=0.05水平的显著性检验。

北半球的中高纬海洋、热带辐合带和季风区，在空间分布形态上与水汽通量辐合区域一致性高。平均而言，南半球云水量高于北半球，海洋云水量高于陆地。夏、冬季节性特征显著，夏季大值区位于热带辐合带和南半球海洋上空，冬季位于北半球海洋和南半球陆地上空，春、秋两季属于云水大值带过

渡发展季节。

1960～2014 年来全球中低纬云水量呈增加趋势，表现为海洋上以 0.07 g m^{-2} (10 a)$^{-1}$ 趋势增加，陆地上以−0.04 g m^{-2} (10 a)$^{-1}$ 趋势减小。海洋上空云水量在春、夏季各月均表现为年代际增长趋势，秋、冬季呈现不显著下降趋势，陆地上大致表现为夏、冬季增加，春、秋季减少。其中海洋夏季和陆地春季变化最为显著，趋势分别为 0.28 g m^{-2} (10 a)$^{-1}$ 和−0.24 g m^{-2} (10 a)$^{-1}$。

在全球平均气温自 20 世纪 70 年代末显著增温（IPCC, 2013）的背景下，空气中的水汽以 7%/°C 的速率增长（Held and Soden, 2006; Back et al., 2013）已被广泛认可，水汽的增加将为有利于云水水凝物的生成。云水水凝物相比于等量水汽辐射效应更强，对全球能量平衡起着极其重要的作用（Ramanathan, 1987; Cess et al., 1996）。同时，云水水凝物作为降水的唯一和直接来源（蔡淼，2013），是可以通过人工干预来开发利用的空中水资源。在今后的研究中加强全球云水量的观测和研究，对模式参数化、人工影响天气以及未来气候预估都具有重要意义。

致谢 感谢美国能源部、科学生物与环境研究所和美国国家大气海洋局联合提供 NOAA-CIRES 20 世纪再分析 2c 版本数据集的数据支持。

参考文献（References）

Back L, Russ K, Liu Z Y, et al. 2013. Global hydrological cycle response to rapid and slow global warming [J]. J. Climate, 26(22): 8781−8786. doi:10.1175/JCLI-D-13-00118.1

蔡淼. 2013. 中国空中云水资源和降水效率的评估研究 [D]. 南京信息工程大学博士学位论文, 142 pp. Cai M. 2013. Cloud water resources and precipitation efficiency evaluation over China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology, 142pp.

Cess R D, Potter G L, Blanchet J P, et al. 1989. Interpretation of cloud-climate feedback as produced by 14 atmospheric general circulation models [J]. Science, 245(4917): 513−516. doi:10.1126/science.245.4917.513

Cess R D, Zhang M H, Ingram W J, et al. 1996. Cloud feedback in atmospheric general circulation models: An update [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 101(D8): 12791−12794. doi:10.1029/96JD00822

陈峥, 甘波澜, 吴立新. 2018. 基于 CMIP3 与 CMIP5 模式对北太平洋大气环流模态的评估分析 [J]. 中国海洋大学学报, 48(1): 1−11. Chen Z, Gan B L, Wu L X. 2018. The assessment of North Pacific atmospheric circulation patterns based on CMIP3 and CMIP5 models [J]. Periodical of Ocean University of China (in Chinese), 48(1): 1−11. doi:10.16441/j.cnki.hdxb.20170085

Compo G P, Whitaker J S, Sardeshmukh P D, et al. 2011. The twentieth century reanalysis project [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 137(654): 1−28. doi:10.1002/qj.776

傅云飞, 刘奇, 自勇, 等. 2008. 基于 TRMM 卫星探测的夏季青藏高原降水和潜热分析 [J]. 高原山地气象研究, 28(1): 8−18. Fu Y F, Liu Q, Zi Y, et al. 2008. Summer precipitation and latent heating over the Tibetan Plateau based on TRMM measurements [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 28(1): 8−18. doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2008.01.002

耿蓉, 王雨, 傅云飞, 等. 2018. 中国及其周边地区多种水凝物资料的气候态特征比较 [J]. 气象学报, 76(1): 134−147. Geng R, Wang Y, Fu Y F, et al. 2018. Comparison of climatological characteristics of several hydrometeors in China and the surrounding region [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 76(1): 134−147. doi:10.11676/qxxb2017.077

Giese B S, Seidel H F, Compo G P, et al. 2016. An ensemble of ocean reanalyses for 1815–2013 with sparse observational input [J]. J. Geophys. Res.: Oceans, 121(9): 6891−6910. doi:10.1002/2016JC012079

Greenwald T J, Stephens G L, Christopher S A, et al. 1995. Observations of the global characteristics and regional radiative effects of marine cloud liquid water [J]. J. Climate, 8(12): 2928−2946. doi:10.1175/1520-0442(1995)008<2928:OOTGCA>2.0.CO;2

Held I M, Soden B J. 2000. Water vapor feedback and global warming [J]. Ann. Rev. Energy Environ., 25: 441−475. doi:10.1146/annurev.energy.25.1.441

Held I M, Soden B J. 2006. Robust responses of the hydrological cycle to global warming [J]. J. Climate, 19(21): 5686−5699. doi:10.1175/JCLI3990.1

衡志炜. 2013. 基于卫星及数值模式资料的云水凝物的气候特征分析和检验 [D]. 中国科学技术大学博士学位论文, 1–103. Heng Z W. 2013. Analysis and evaluation of hydrometeors based on satellite and model datasets [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), University of Science and Technology of China, 1–103.

Heng Z W, Fu Y F, Liu G S, et al. 2014. A study of the distribution and variability of cloud water using ISCCP, SSM/I cloud product, and reanalysis datasets [J]. J. Climate, 27(9): 3114−3128. doi:10.1175/JCLI-D-13-00031.1

Hirahara S, Ishii M, Fukuda Y. 2014. Centennial-scale sea surface temperature analysis and its uncertainty [J]. J. Climate, 27(1): 57−75. doi:10.1175/JCLI-D-12-00837.1

黄荣辉, 陈际龙. 2010. 我国东、西部夏季水汽输送特征及其差异 [J]. 大气科学, 34(6): 1035−1045. Huang R H, Chen J L. 2010. Characteristics of the summertime water vapor transports over the eastern part of China and those over the western part of China and their difference [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34(6): 1035−1045. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.06.01

IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis.

Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovern-Mental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1535pp.

Kiemle C, Wirth M, Fix A, et al. 2011. Latent heat flux measurements over complex terrain by airborne water vapour and wind lidars [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 137(S1): 190−203. doi:10.1002/qj.757

Klemp J B, Wilhelmson R B. 1978. The simulation of three-dimensional convective storm dynamics [J]. J. Atmos. Sci., 35(6): 1070−1096. doi:10.1175/1520-0469(1978)035<1070:TSOTDC>2.0.CO;2

Kuo H L. 1965. On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection [J]. J Atmos. Sci., 22(1): 40−63. doi:10.1175/1520-0469(1965)022<0040:OFAIOT>2.0.CO;2

李兴宇, 郭学良, 朱江. 2008. 中国地区空中云水资源气候分布特征及变化趋势 [J]. 大气科学, 32(5): 1094−1106. Li X Y, Guo X L, Zhu J. 2008. Climatic distribution features and trends of cloud water resources over China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(5): 1094−1106. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.05.09

李文韬, 李兴宇, 张礼林, 等. 2018. 青藏高原云水气候特征分析 [J]. 气候与环境研究, 23(5): 574−586. Li W T, Li X Y, Zhang L L, et al. 2018. Climatic characteristic analysis of cloud water over the Tibetan Plateau [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 23(5): 574−586. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18039

林丹, 王维佳. 2019. 基于 CERES 资料的中国西南地区云水含量和粒子有效半径分布及变化特征 [J]. 气候与环境研究, 24(3): 383−395. Lin D, Wang W J. 2019. Distribution and variation of cloud water content and particle effectice radius in southwest China based on CERES data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(3): 383−395. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18071

刘健, 董超华. 2002. 卫星资料在云顶粒子尺度特征分析中的应用 [J]. 红外与毫米波学报, 21(2): 124−128. Liu J, Dong C H. 2002. Using satellite data to analyze properties of cloud particles size on the top of cloud [J]. J. Infrared Millim. Waves (in Chinese), 21(2): 124−128. doi:10.3321/j.issn:1001-9014.2002.02.010

刘菊菊, 游庆龙, 周毓荃, 等. 2018. 基于 ERA-Interim 的中国云水量时空分布和变化趋势 [J]. 高原气象, 37(6): 1590−1604. Liu J J, You Q L, Zhou Y Q, et al. 2018. Spatiotemporal distribution and trend of cloud water content in China based on ERA-interim reanalysis [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 37(6): 1590−1604. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00059

Moorthi S, Pan H L, Caplan P. 2001. Changes to the 2001 NCEP operational MRF/AVN global analysis/forecast system [J]. NWS Tech. Pro. Bull., 484: 14.

潘留杰, 张宏芳, 周毓荃, 等. 2015. 1979~2012 年夏季黄土高原空中云水资源时空分布 [J]. 中国沙漠, 35(2): 456−463. Pan L J, Zhang H F, Zhou Y Q, et al. 2015. Spatial−temporal distribution of summer cloud water resources over the Loess Plateau from 1979 to 2012 [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 35(2): 456−463. doi:10.7522/j.issn.1000-694X.2014.00034

Platt C M R, Scott S C, Dilley A C. 1987. Remote sounding of high clouds. Part VI: Optical properties of midlatitude and tropical cirrus [J]. J. Atmos. Sci., 44(4): 729−747. doi:10.1175/1520-0469(1987)044<0729:RSOHCP>2.0.CO;2

Ramanathan V. 1987. The role of earth radiation budget studies in climate and general circulation research [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 92(D4): 4075−4095. doi:10.1029/JD092iD04p04075

Rossow W B, Schiffer R A. 1999. Advances in understanding clouds from ISCCP [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 80(11): 2261−2288. doi:10.1175/1520-0477(1999)080<2261:AIUCFI>2.0.CO;2

Shupe M D, Intrieri J M. 2004. Cloud radiative forcing of the arctic surface: The influence of cloud properties, surface albedo, and solar zenith angle [J]. J. Climate, 17(3): 616−628. doi:10.1175/1520-0442(2004)017<0616:CRFOTA>2.0.CO;2

Sinclair M R. 2002. Extratropical transition of southwest Pacific tropical cyclones. Part I: Climatology and mean structure changes [J]. Mon. Wea. Rev., 130(3): 590−609. doi:10.1175/1520-0493(2002)130<0590:ETOSPT>2.0.CO;2

Somerville R C J. 1985. Cloud optical thickness feedbacks in the CO_2 climate problem [J]. Adv. Space Res., 5(6): 209−212. doi:10.1016/0273-1177(85)90323-0

Stubenrauch C J, Rossow W B, Kinne S, et al. 2013. Assessment of global cloud datasets from satellites: Project and database initiated by the GEWEX radiation panel [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 94(7): 1031−1049. doi:10.1175/BAMS-D-12-00117.1

Sundqvist H, Berge E, Kristjansson J E. 1989. Condensation and cloud parameterization studies with a mesoscale numerical weather prediction model [J]. Mon. Wea. Rev., 117(8): 1641−1757. doi:10.1175/1520-0493(1989)117<1641:CACPSW>2.0.CO;2

Tao W K, Simpson J, Lang S, et al. 1990. An algorithm to estimate the heating budget from vertical hydrometeor profiles [J]. J. Appl. Meteor.,29(12):1232−1244.doi:10.1175/1520-0450(1990)029<1232:AATETH>2.0.CO;2

汪宏七, 赵高祥. 1996. 云微物理特性对云光学和云辐射性质的影响 [J]. 应用气象学报, (1): 36−44. Wang H Q, Zhao G X. 1996. The influences of cloud microphysical parameters on cloud optical and radiative properties [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), (1): 36−44.

汪方, 丁一汇. 2005. 气候模式中云辐射反馈过程机理的评述 [J]. 地球科学进展, 20(2): 207−215. Wang F, Ding Y H. 2005. An evaluation of cloud radiative feedback mechanisms in climate models [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 20(2): 207−215. doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2005.02.011

王颖, 李国春, 高阳华, 等. 2016. AMSR-E 数据参数化法反演液态云水路径研究 [J]. 气象与环境学报, 32(2): 59−65. Wang Y, Li G C, Gao Y H, et al. 2016. Polarization-difference parameterization in estimating liquid water path based on AMSR-E data [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 32(2): 59−65. doi:10.11927/j.issn.1673-503X.2016.02.008

Weng F Z, Grody N C, Ferraro R, et al. 1997. Cloud liquid water climatology from the special sensor microwave/imager [J]. J. Climate, 10(5): 1086−1098. doi:10.1175/1520-0442(1997)010<1086:CLWCFT>2.0.CO;2

Wentz F J, Ricciardulli L, Hilburn K, et al. 2007. How much more rain will global warming bring? [J]. Science, 317(5835): 233−235. doi:10.1126/science.1140746

Xu H M, Xie S P, Wang Y Q. 2005. Subseasonal variability of the southeast Pacific stratus cloud deck [J]. J. Climate, 18(1): 131−142. doi:10.1175/JCLI3250.1

杨大生, 王普才. 2012. 中国地区夏季 6～8 月云水含量的垂直分布特征 [J]. 大气科学, 36(1): 89−101. Yang D S, Wang P C. 2012. Characteristics of vertical distributions of cloud water contents over China during summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36(1): 89−101. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.01.08

Yang S, Olson W S, Wang J J, et al. 2006. Precipitation and latent heating distributions from satellite passive microwave radiometry. Part II: Evaluation of estimates using independent data [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 45(5): 721−739. doi:10.1175/JAM2370.1

Yu R C, Wang B, Zhou T J. 2004. Climate effects of the deep continental stratus clouds generated by the Tibetan Plateau [J]. J. Climate, 17(13):2702−2713. doi:10.1175/1520-0442(2004)017<2702:CEOTDC>2.0.CO;2

Zhao Q Y, Carr F H. 1997. A prognostic cloud scheme for operational NWP models [J]. Mon. Wea. Rev., 125(8): 1931−1953. doi:10.1175/1520-0493(1997)125<1931:APCSFO>2.0.CO;2

Zuidema P, Joyce R. 2008. Water vapor, cloud liquid water paths, and rain rates over northern high latitude open seas [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 113(D5): D05205. doi:10.1029/2007JD009040