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 Dan, Wang Weijia. 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

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

林丹[1, 2, 3]　王维佳[2, 4]

1 四川省人工影响天气办公室，成都 610072
2 中国气象局云雾物理环境重点实验室，北京 100081
3 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室，成都610072
4 成都市气象局，成都 610000

摘　要　利用NASA/CERES发布的2001～2015年云参数资料，选取高层云、雨层云、层积云的云水含量和云粒子有效半径，统计分析了西南地区云参数的时空分布特征和变化趋势。结果表明：从年均空间分布来看，西南地区液水和冰水含量均东部高于西部，海拔低的地区高于海拔高的地区；高层云和雨层云液相和冰相云粒子有效半径在川西高原最大。从数值大小来看，雨层云液水和冰水含量最多，分别介于90～230 g/m^{2}和100～300 g/m^2，层积云最少，分别介于0～80 g/m^{2}和0～60 g/m^2；冰相云粒子有效半径高于液相2～6 μm。从季节分布来看，雨层云液水和冰水含量秋季和冬季偏高，夏季和春季偏少，高层云和层积云季节差异较小；液相云粒子有效半径均夏季最大。从变化趋势来看，西南地区各地液水和冰水含量均呈减少趋势，液相和冰相云粒子有效半径有呈减少或增加趋势。

关键词　云水含量　粒子有效半径　云类型
文章编号　1006-9585(2019)03-0383-13　　**中图分类号**　P481　　**文献标识码**　A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18071

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

LIN Dan[1, 2, 3] and WANG Weijia[2, 4]

1 *Weather Modification Office of Sichuan Province*, *Chengdu* 610072
2 *Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081
3 *Heavy Rain and Drought−Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province*, *Chengdu* 610072
4 *Chengdu Meteorological Bureau*, *Chengdu* 610000

Abstract　Based on the NASA/CERES 2001−2015 data of stratocumulus, altostratus, and nimbostratus liquid and ice water paths and particle radius, the temporal and spatial distributions and variations trend of cloud parameters in the

收稿日期　2018-06-11；**网络预出版日期**　2019-03-12
作者简介　林丹，女，1987年出生，硕士，高级工程师，主要从事大气物理研究和人工影响天气业务。E-mail: ld8768@hotmail.com
通讯作者　王维佳，E-mail: wjwang1998@163.com
资助项目　四川省科技计划项目2019YJ0621，中国气象局云雾物理环境重点实验室开放课题2017Z01610，2018年度留学回国人员科技活动项目择优资助项目2018-72，高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金项目（省重实验室2018-青年-19、2018-重点-13）
Funded by　Sichuan Science and Technology Plan Project (Grant 2019YJ0621), Research Program of the Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration (Grant 2017Z01610), Science and Technology Activity Funding Project for Overseas Returnees (Grant 2018-72), Heavy Rain and Drought−Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory Project (Grants 2018-youth-19 and 2018-major-13)

Southwest China are analyzed in this study. The results show that according to annual spatial distribution, the annual liquid and ice water paths are greater in the east area than in the west area, and water paths are greater at low-latitude regions than at high-latitude regions. The annual altostratus and nimbostratus liquid and ice cloud particle radius in western Sichuan Plateau are the largest. The nimbostratus has the largest liquid and ice water paths between 90−230 g/m^2 and 100−300 g/m^2, respectively, stratocumulus has the least water path between 0−80 g/m^2 and 0−60 g/m^2, respectively. The ice cloud particle radius is larger than the liquid cloud particle radius by 2−6 μm. Considering the seasonal distribution, nimbostratus has the greatest liquid and ice water paths in autumn and winter and the least in summer and spring. There is less seasonal variation in stratocumulus and altostratus liquid and ice cloud water contents. The liquid cloud particle radius is the largest in summer. From the variation trend, the liquid and ice water paths of all types of clouds show a decreasing trend. The liquid and ice cloud particle radius of all types of clouds show a decreasing or increasing trend.

Keywords Clound water content, Particle effective radius, Cloud type

1 引言

云粒子有效半径、液水含量、光学厚度、云量等云参数，对于研究云系宏微观特征、气候变化以及降水演变等具有很重要的意义，且不同类型云的云参数在空间和时间上的特征差异较大。目前，常规气象台站提供的气象观测资料很难获得云中液水含量等云参数，主要通过微波辐射计（汪晓滨等，2001；侯叶叶等，2016）、飞机探测（孙鸿娉等，2014；庞朝云等，2016）、卫星探测（王洪强等，2011；林丹，2015）等手段获得云参数。相较于其他探测手段，卫星具备了大范围、全过程、长时间的优点（刘晓春和毛节泰，2008）。随着气象卫星的发展，卫星资料中的云参数被广泛应用于气象研究中。杨大生和王普才（2012）通过分析2006～2008年中国地区夏季云粒子有效半径发现，6月水云粒子有效半径最大，且水云和冰云的粒子尺度年际变化不明显。李特等（2017）研究得到，近5年来冰云发生概率呈上升趋势，冰云粒子有效半径分布整体由西南向东北逐渐增加，光学厚度与冰水含量的高值区位于南方地区。宋松涛等（2013）利用ISCCP云特性资料分析了西北地区云水含量的时空分布特征，西北地区云水含量总体呈上升趋势，具有明显的4、7年周期。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、水汽传输等密切相关，存在明显的季节变化。

以往研究学者们利用卫星资料对云参数进行了很多计算分析，但针对西南地区的研究还比较缺乏。西南地区地形结构复杂，主要以高原、山地、盆地为主，西临青藏高原，南面受西南季风和东南季风影响（王东等，2014），其中云贵高原属于热带—亚热带及亚热带高原湿润季风区，川西高原为温带—亚热带高原气候，四川盆地属于亚热带湿润季风气候，是一个气候多变区。由于西南地区的独特地理气候条件，以及降水的季节性区域性的不平衡，干旱频繁发生。春季，西南地区发生干旱的频率相对最高，过了夏季，随着降水量逐渐减少，秋季发生干旱的频率增加，特别是云贵高原和四川盆地地区（王东等，2014）。西南地区对人工增雨的需求巨大，而云的微物理结构影响降水产生的效率，也决定人工增雨的实际成效。层状云是西南地区增雨作业的主要对象，因此本文主要针对西南地区不同类型层状云的云参数，对其空间和时间分布演变特征进行分析。

2 资料选取

本文主要使用NASA“云与地球辐射能量系统（Clouds and the Earth’s Radiant Energy System，CERES）”发布的L3级云资料，分辨率为1°(纬度)×1°(经度)，该资料采用了先进的技术方法反演云粒子有效半径、云水含量、光学厚度等云特征参数，适合用来研究中小尺度区域以及不同地形条件下的云水资源的相关特征（常倬林等，2015）。CERES资料中的云分类是依据ISCCP D2的方法，按照云顶气压和光学厚度进行分类（表1），共分类为9种不同类型的云，低云包括层积云、层云、积云，中云包括高层云、高积云、雨层云，高云包括深对流云，卷云、卷层云，再把中云和低云划分为水云和冰云，高云则全部认为是冰云。

西南地区包括四川、贵州、云南、重庆（20.5°N～35.5°N，96.5°E～111.5°E）。对于西南地区而言，产生降水的云大多为层状云和对流云，不同类型的

表1 ISCCP D2云分类

Table 1 ISCCP D2 cloud classification

云分类	云类型	判别条件	
		云顶气压/hPa	光学厚度
高云	卷云	50～440	0～3.6
	卷层云		3.6～23
	深对流云		23～379
中云	高积云	440～680	0～3.6
	高层云		3.6～23
	雨层云		23～379
低云	积云	680～1000	0～3.6
	层积云		3.6～23
	层云		23～379

云，产生降水的强度和持续时间受水平范围、云水含量、云中升降气流等因素影响（李跃清和张琪，2014）。属于高云的卷云和卷层云通常不能产生降水。高积云云体不厚，发展比较稳定；积云云块之间多不相连，通常在湿润地区和热带地区出现；层云大多是在气层稳定的情况下，由于夜间强烈的辐射冷却或乱流混合作用使水汽凝结或雾抬升而成，这3种类型的云除非继续发展增厚，则产生降水的概率很小。深对流云云顶高度较高，云内具有强烈的垂直运动，带来雷电、狂风、短时强降水和冰雹等，不适宜进行人工影响天气作业。广义来说，除了对流云以外所有云都可归类为层状云，其中属于中云的雨层云云层深厚而均匀，伴随着持续性降水，高层云常由雨层云变薄而形成，伴随连续或间接性的降水；属于低云的层积云，由于云层较薄，云内上升运动较弱，产生持续降水的可能性较小，常出现零星小雨，这3种类型的云适宜进行人工影响天气作业。因此，本文主要讨论2001～2015年期间，层积云、高层云和雨层云的液水含量、冰水含量、以及液相和冰相云粒子有效半径分布与演变特征。

3 结果分析与讨论

3.1 多年年均分布特征

3.1.1 云水含量

从液水含量年均空间分布（图1）来看，受地形气候等影响，西南地区液水含量空间分布具有明显差异性，整体表现为西部液水含量偏低，东部液水含量偏高，海拔低的地区液水含量高于海拔高的地区，低值区位于川西高原。高层云和雨层云液水含量空间分布特征基本一致，在102°E以东地区，液水含量等值线呈经向分布，东部液水含量高于西部；在102°E以西的云南地区，液水含量呈纬向分布，南部液水含量高于北部。层积云液水含量在云南地区呈纬向分布，在四川、重庆和贵州地区呈经向分布。

从冰水含量年均空间分布来看，与液水含量分布特征基本一致，整体表现为西部冰水含量低于东部，海拔低的地区冰水含量高于海拔高的地区，低值区位于川西高原。高层云、雨层云和层积云冰水含量在四川、贵州、重庆地区均呈经向分布，在云南地区呈纬向分布；高层云和雨层云冰水含量在四川盆地与川西高原交界处、云南怒江附近等值线密集，冰水含量变化梯度较大。西南地区云水含量的分布特征与地形地貌相关，该区域地形复杂，地跨青藏高原、横断山脉、云贵高原、四川盆地等几大地貌单元，地势西高东低，西部大多高原高山地，东部为平原丘陵地带，云水含量表现为西部低于东部，且102°E附近是四川盆地与川西高原地区的交界处，海拔由300～700 m的盆地逐渐变为2000～4000 m高原，地形地貌的改变导致102°E附近云水含量等值线密集，变化梯度较大。

雨层云液水和冰水含量最多，分别介于90～230 g/m^{2}和100～300 g/m^{2}之间，其次是高层云，分别介于65～115 g/m^{2}和50～170 g/m^{2}之间，层积云液水和冰水含量最少，分别介于0～80 g/m^{2}和0～60 g/m^{2}之间。高层云和雨层云的冰水含量高于液水含量，层积云的冰水含量低于液水含量。属于低云的层积云液水和冰水含量在川西高原存在缺测，是由于四川地区西部主要为山地，地形气候复杂，且与地面观测不同，ISCCP认为680～1000 hPa这个高度段为低云，而川西高原的海拔约4000～4500 m，最高可达5100 m左右，造成了ISCCP的低云测量值在川西高原存在缺测（林丹，2015）。

3.1.2 云粒子有效半径

云粒子有效半径的大小会受到气溶胶、水汽、热力稳定度和上升运动等多个因素影响，历史研究得到全球年平均水云的云粒子有效半径约为11.4±5.6 μm，且海洋云的粒子有效半径比陆地云大约2～3 μm（杨大生和王普才，2012）。从西南地区液相云粒子有效半径年均空间分布（图2）来看，高层云和雨层云空间分布相似，川西高原液相云粒子有效半径最大，其余地区南部液相云粒子有效半径

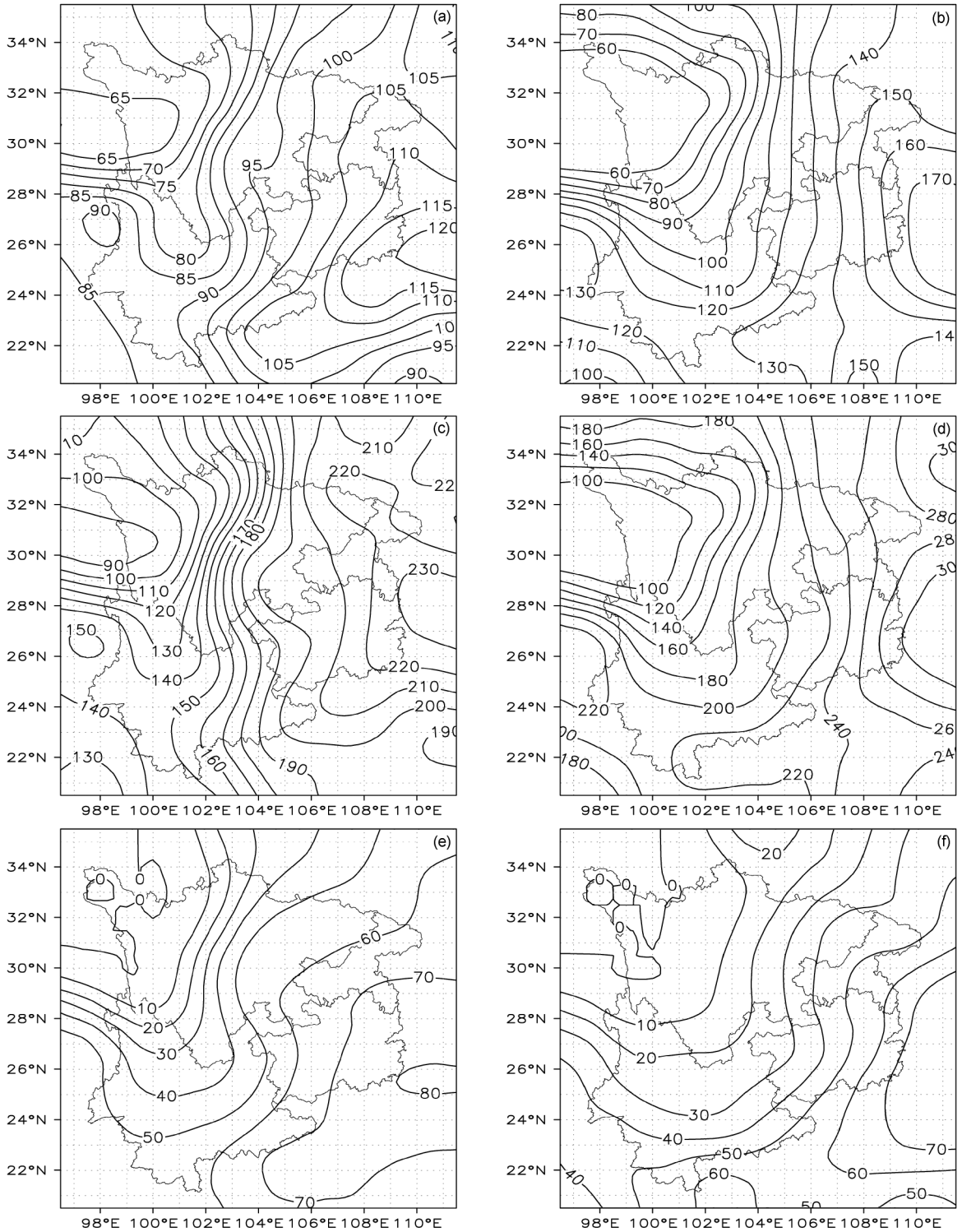

图1 2001～2015年（a、b）高层云、（c、d）雨层云、（e、f）层积云液水含量（左列）和冰水含量（右列）的平均分布（单位：g/m^2）

Fig. 1 Spatial distributions of (a, b) altostratus, (c, d) nimbostratus, and (e, f) stratocumulus liquid water path (left column) and ice water path (right column) averaged during 2001–2015 (units: g/m^2)

高于北部地区，相差大约1.5 μm。层积云在云南地区西部的液相云粒子有效半径略高于东部，在四川盆地、重庆和贵州地区液相云粒子有效半径数值相当。

从西南地区冰相云粒子有效半径年均空间分布来看，层积云冰相云粒子有效半径分布特征与液相

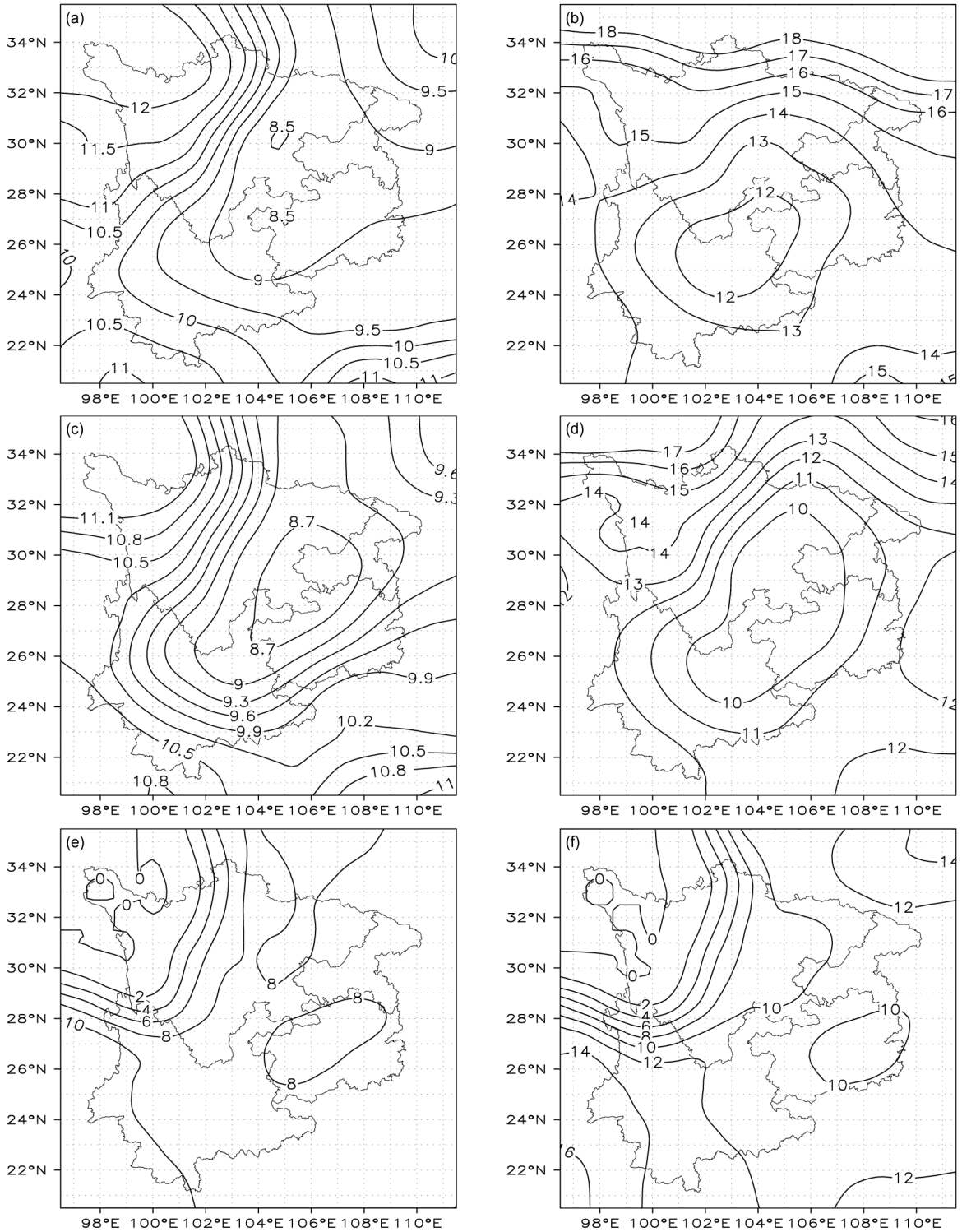

图2 2001～2015年（a、b）高层云、（c、d）雨层云、（e、f）层积云云粒子液相（左列）和冰相（右列）有效半径平均分布（单位：μm）

Fig. 2 Spatial distributions of (a, b) altostratus, (c, d) nimbostratus, and (e, f) stratocumulus liquid cloud particle effective radius (left column) and ice cloud particle effective radius (right column) averaged during 2001−2015 (units: μm)

云粒子有效半径分布基本一致，在云南地区西部高于东部，在四川盆地、重庆和贵州地区云粒子有效半径数值相当。高层云冰相云粒子有效半径在四川和重庆地区北部高于南部，低值区位于贵州和云南交界处。雨层云冰相云粒子有效半径高值区位于川西高原，四川盆地、云南、贵州和重庆地区冰相云

粒子有效半径数值相当。

整体来看，西南地区不同类型云的云粒子有效半径之间数值差异很小，高层云液相和冰相云粒子有效半径分别介于9～12 μm和12～18 μm之间，雨层云分别介于8.7～11 μm和10～16 μm之间，层积云分别介于0～10 μm和0～14 μm之间。冰相云粒子有效半径明显高于液相云粒子有效半径，高层云和雨层云的云粒子有效半径略高于层积云。

3.1.3 西南各地区对比

通过分别对重庆、云南、贵州、四川盆地和川西高原区域内部格点的相加平均后，得到各地区不同类型云的云水含量和云粒子有效半径的多年平均值。从表2中可以看出：1）高层云和雨层云的液水和冰水含量在重庆和贵州地区最多，其次是四川盆地和云南地区，川西高原地区液水和冰水含量均最少。2）除去川西高原外，层积云的液水和冰水含量在各地相差不大，相差约20 g/m^2，贵州和重庆地区液水和冰水含量略高，云南和四川盆地地区略低。3）高层云和雨层云冰水含量高于液水含量，高层云冰水含量在重庆和贵州地区明显高于液水含量，雨层云冰水含量在云南和重庆地区明显高于液水含量，四川地区液水含量和冰水含量差异较小。4）层积云冰水含量低于液水含量，其中四川盆地冰水含量明显低于液水含量。这可能是由于ISCCP定义层积云属于低云，位于680～1000 hPa，云层高度较低，云中温度较中云略高，导致云中液水含量高于冰水含量。

通过卫星资料计算得到，中国地区是全球中、低纬度层状云出现最多的区域，其中雨层云分布最多，地面观测资料也表明，层状云主要分布在中国南方地区（20°N～35°N，103°E～120°E）（李昀英等，2003）。这与西南地区具有充沛的水汽条件和大尺度上升运动有关，从对流层低层到中层，相对湿度的大值中心位于四川盆地、重庆和贵州地区（李昀英等，2003）。层状云的分布特征与西南地区云水含量分布特征较为一致，总体来说，西南地区雨层云和高层云液水和冰水含量偏多，且重庆、贵州、四川盆地地区液水和冰水含量高于云南地区。历史研究发现，由于多种因素的影响，使西南地区成云多，云水资源丰富，自然降水却不充分，如何有效合理开发空中云水资源显得尤为重要。层状云是人工增雨作业的主要目标云系（洪延超和周非非，2006），层状云往往和大尺度天气系统相关，伴随较长时间的连续性降水。从西南地区来看，属于层状云系的云，尤其是雨层云的云水含量更为充分。

表2 2001～2015年西南地区云水含量

Table 2 Cloud water content in Southwest China during 2001–2015 g/m^2

	高层云云水含量		雨层云云水含量		层积云云水含量	
	液水	冰水	液水	冰水	液水	冰水
云南	89.52	110.94	156.05	193.18	47.29	34.11
贵州	106.60	138.93	209.41	237.56	66.83	47.63
重庆	105.19	146.55	216.53	253.19	64.02	47.57
四川盆地	94.00	113.01	189.20	199.46	49.69	25.96
川西高原	71.04	64.09	115.23	119.59	10.46	3.09

表3 2001～2015年西南地区云粒子有效半径

Table 3 Cloud particle effective radius in Southwest China during 2001–2015 μm

	高层云粒子有效半径		雨层云粒子有效半径		层积云粒子有效半径	
	液相	冰相	液相	冰相	液相	冰相
云南	9.93	13.02	9.88	11.26	8.84	11.22
贵州	9.23	12.94	9.21	10.54	8.12	10.22
重庆	9.05	14.76	8.89	10.93	8.25	10.74
四川盆地	8.98	13.91	8.92	10.35	8.19	9.87
川西高原	11.44	16.09	10.68	14.33	2.76	2.17

从表3中可以看出：1）高层云和雨层云液相云粒子有效半径在川西高原地区最大，超过10 μm，其次是云南和贵州地区，四川盆地地区云粒子有效半径最小，不到9 μm。2）高层云冰相云粒子有效半径在川西高原最大，超过16 μm，其次是重庆和四川盆地地区，贵州和云南地区云粒子有效半径最小，约13 μm左右。3）雨层云冰相云粒子有效半径在川西高原最大，贵州、重庆和四川盆地地区云粒子有效半径相当，约10.5 μm左右。4）层积云液相和冰相云粒子有效半径在各地区相差不大，云南地区云粒子有效半径略大。相较于川西高原地区，其他地区的大气污染程度相对较高，空气质量较差，则自然或人类活动等产生的云凝结核更多，云凝结核可以增加云滴数浓度，造成云滴尺度减小(Warner and Twomey, 1967)，这也可能是造成川西高原地区云粒子有效半径最大的原因。西南地区液相云粒子有效半径数值大小与段皎和刘煜（2011）研究一致，他们计算2000～2009年中国地区液相云粒子有效半径发现，云粒子有效半径东部

低于西部地区，青藏高原和内蒙古是粒子有效半径的高值区，西南和河套地区粒子有效半径一般在10 μm左右。

3.2 季节分布特征

3.2.1 云水含量

按照春季（3～5月）、夏季（6～8月）、秋季（9～11月）、冬季（12月至次年2月）计算了整个西南地区不同类型云的云水含量（表4）。高层云和层积云液水和冰水含量季节差异较小，液水含量最高值与最低值之差低于10 g/m^2，冰水含量最高值与最低值之差约30 g/m^2。雨层云液水和冰水含量季节差异较大，液水和冰水含量秋季最高，冬季次之，夏季和春季液水和冰水含量偏低，液水含量最高值与最低值之差高约25 g/m^2，冰水含量最高值与最低值之差约80 g/m^2。根据李泽明等（2014）研究出的重庆地区总云量分布在秋季和冬季偏多，春季和夏季偏少。张琪等（2011）通过计算西南地区46年的云量资料得到：秋季，四川盆地、贵州、重庆地区的云量达到全年总云量的最大值。比较发现，云量的季节分布与云水含量季节分布类似，云量的多少可能是造成云水含量季节分布特征的原因之一。

3.2.2 云粒子有效半径

从季节变化（表5）来看，西南地区云粒子有效半径的季节差异十分鲜明，液相粒子有效半径均表现为夏季最大。雨层云液相云粒子有效半径季节差异最大，夏季的最大值与春季的最小值之差约1.5 μm，高层云液相云粒子有效半径季节差异最小。历史研究表明，夏季是西南地区雨量丰沛的时候，夏季粒子有效半径比较大与雨量密切相关，另外一个原因可能是由于降雨频率高，大气中的颗粒污染物受到持续冲刷，造成作为云凝结核的颗粒物数量减少，从而云滴尺寸增大（杨大生和王普才，2012）。层积云液相云粒子有效半径表现为夏季数值最高，其次为秋季和春季，冬季云粒子有效半径最小。高层云和雨层云液相云粒子有效半径表现为夏季数值最高，其次为秋季，冬季和春季云粒子有效半径偏小，且春季略小于冬季。

西南地区高层云和雨层云冰相云粒子有效半径表现为冬季最大，层积云冰相云粒子半径夏季略大。高层云冰相云粒子有效半径季节差异最大，冬季的最大值与夏季的最小值之差约5 μm，层积云冰相云粒子有效半径季节差异最小，不到1 μm。高层云和雨层云冰相云粒子有效半径表现为冬季数值最高，其次为春季和秋季，夏季粒子有效半径最小。

3.3 多年年均变化趋势

3.3.1 云水含量

为了能更好地对比2001～2015年西南各地区云水含量和云粒子有效半径的逐年变化趋势，本文对云参数进行了距平百分率处理。距平百分率可以反映出某一时段的物理量值与同期平均状态的偏离程度。

从整体变化趋势（图3）来看，西南地区高层云和雨层云的液水含量距平百分率值在2001～2007年为正值，液水含量明显高于平均值，从2008年以后变为负值，液水含量低于平均值，正距平的最高值出现在2002年和2003年，负距平的最低值均出现在2013年，液水含量的正负距平百分率变化在－10%～15%之间。层积云液水含量年际变化悬殊相对较小，正负距平百分率变化在－10%～10%之间，距平百分率值从2006年开始逐渐变为负值。

西南地区高层云、雨层云和层积云的冰水含量变化趋势相似（图4），均呈减少趋势，高层云和雨层云距平百分率值在2001～2008年为正值，从

表4 2001～2015年中国西南地区云水含量季节分布

Table 4 Seasonal variations of cloud water content in Southwest China during 2001–2015 g/m^2

	高层云云水含量		雨层云云水含量		层积云云水含量	
	液相	冰相	液相	冰相	液相	冰相
春季	86.24	109.34	158.04	196.81	43.26	30.15
夏季	91.73	100.64	166.98	158.54	46.06	22.80
秋季	95.79	129.31	184.80	240.65	49.62	39.56
冬季	94.25	126.29	171.40	235.95	49.57	48.25

表5 2001～2015年西南地区云粒子有效半径季节分布

Table 5 Seasonal variations of cloud particle effective radius in Southwest China during 2001–2015 μm

	高层云云粒子有效半径		雨层云云粒子有效半径		层积云云粒子有效半径	
	液相	冰相	液相	冰相	液相	冰相
春季	9.86	15.06	9.29	11.76	7.24	9.33
夏季	10.71	12.53	10.70	10.56	7.95	9.61
秋季	10.18	14.72	10.14	12.57	7.42	9.27
冬季	9.89	17.24	9.64	14.91	6.78	9.46

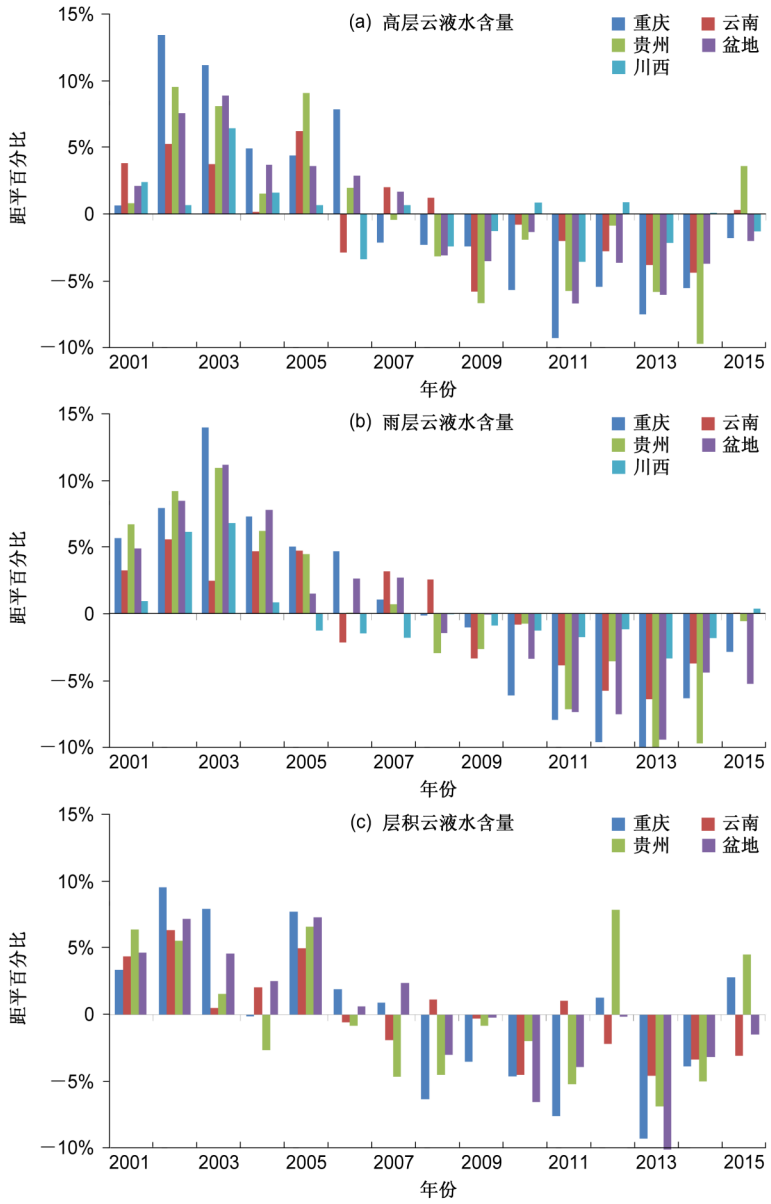

图3 2001～2015年液水含量年际变化趋势

Fig. 3 Annual variation trends of liquid water path from 2001 to 2015

2009年以后变为负值，层积云距平百分率值从2008年以后变为负值。正距平的最高值均出现在2002年和2003年，2011～2014年冰水含量明显偏低。相较而言，层积云冰水含量年际变化悬殊更大，正负距平百分率变化在－40%～50%之间，其次为雨层云，变化浮动在－20%～20%之间。

从各地区来看，对其云水含量进行线性趋势分析后发现，不同类型云的液水含量均呈减少趋势，在重庆、四川盆地和云南地区，液水含量的变化趋势均通过了0.01显著性水平检验，说明液水含量的减少趋势是显著的，而贵州地区的层积云液水含量没有通过显著性水平检验，川西高原地区的高层云和雨层云液水含量没有通过显著性水平检验。不同类型云的冰水含量也均呈减少趋势，且西南地区均通过了0.01显著性水平检验，冰水含量的减少趋势是明显的。西南地区受到季风的影响，降水的多寡季风活动相关（李聪等，2012），研究表明近60年来孟加拉湾季风撤退时间有明显的提前趋势，西南地区21世纪以来降水逐渐减少，尤其是秋季偏少情况最严重。云水含量的多少也与水汽含量和云量相关，范思睿等（2014）研究发现1961～2012年西南区域水汽含量整体呈减少趋势，特别是进入

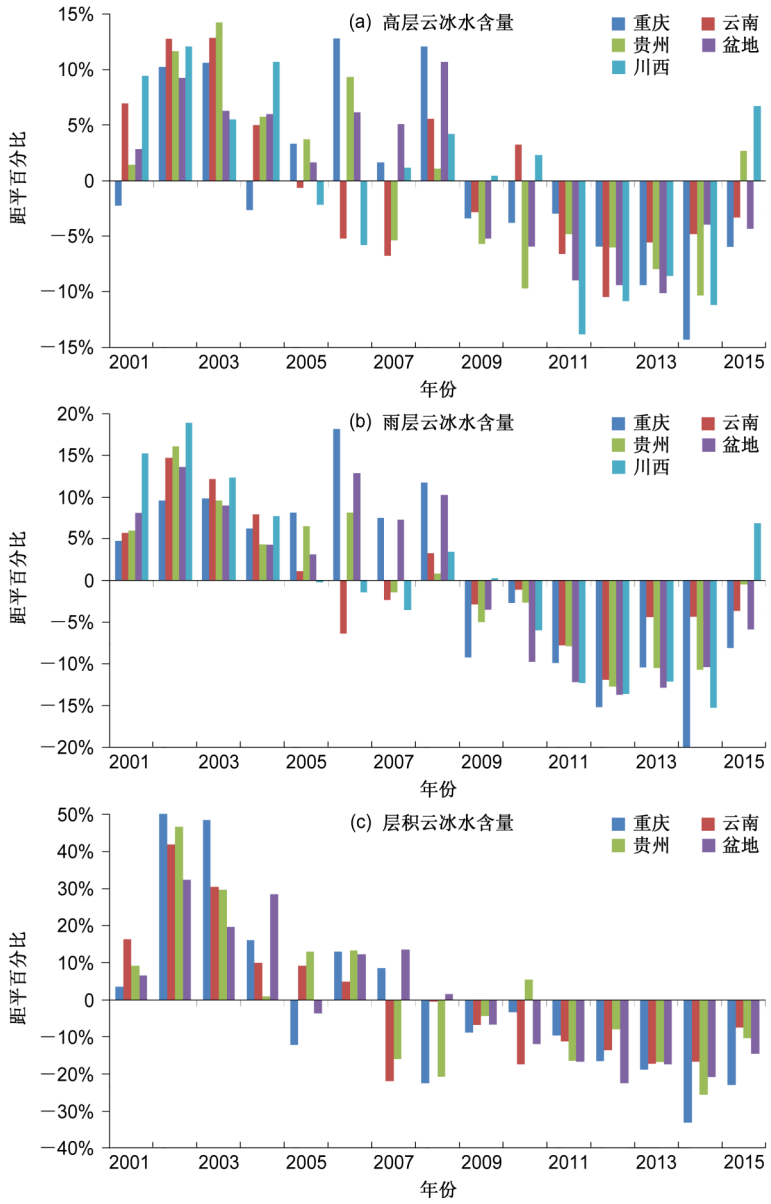

图4　2001～2015年冰水含量年际变化趋势

Fig. 4　Annual variation trends of ice water path from 2001 to 2015

21世纪后，减少趋势显著，主要原因是由于夏季风携带的偏南风水汽收入在青藏高原东部及邻近地区扩展强度的减弱导致水汽收入减少（周长艳等，2009）。

3.3.2　云粒子有效半径

西南地区云粒子有效半径的年际变化趋势与云水含量略有差异（图5和图6）。从整体变化趋势来看，不同类型云的冰相云粒子有效半径的年际变化浮动均比液相粒子有效半径更大，冰相云粒子有效半径正负距平百分率变化在－10%～10%之间，液相云粒子有效半径正负距平百分率变化在－4%～4%之间。层积云液相和冰相云粒子有效半径距平百分率值均呈增加趋势，在2001～2007年为负值，粒子有效半径低于平均值，2008年开始距平百分率变为正值，高于平均值。高层云和雨层云粒子有效半径偏大年和偏小年交替出现，贵州和重庆地区高层云冰相和液相云粒子有效半径年际变化浮动较大，云南和四川盆地地区变化浮动较小；重庆和攀西地区雨层云冰相云粒子有效半径年际变化浮动较大，贵州地区雨层云液相云粒子有效半径年际变化浮动较大。

从各地区来看，对其云粒子有效半径进行线性

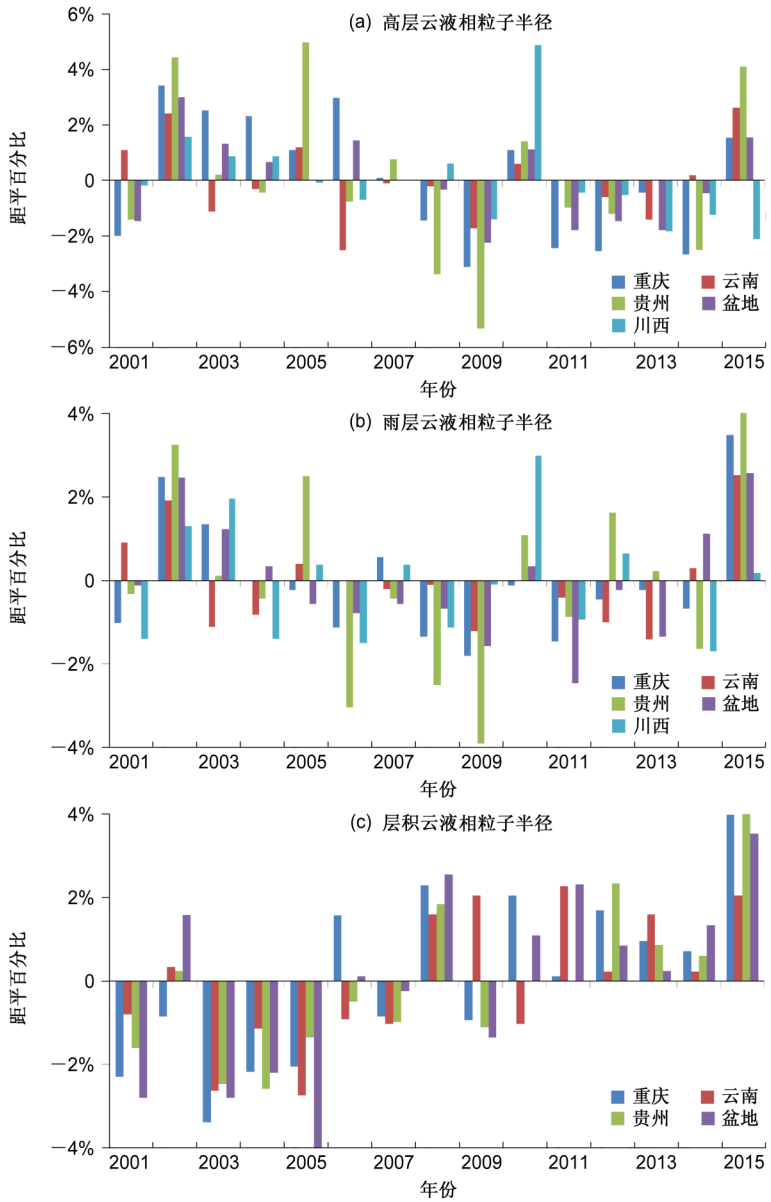

图5 2001～2015年液相云粒子有效半径年际变化趋势

Fig. 5 Annual variation trends of liquid cloud particle effective radius from 2001 to 2015

趋势分析后发现，层积云的液相和冰相云粒子有效半径均呈增加趋势，高层云和雨层云的液相和冰相云粒子有效半径含量均呈减少趋势，与邻近区域比较，隆璘雪（2016）对青藏高原地区2007～2014年云粒子有效半径的研究发现，总云云粒子有效半径在青藏高原西南侧以2 μm （10 a）$^{-1}$的趋势减少，液相云粒子有效半径在整个青藏高原地区呈减小趋势，冰相粒子有效半径在东南部呈减少趋势。

3.4 讨论

西南地区季节性干旱突出，且干旱持续时间有逐年增多的趋势，但由于多种因素的影响，西南地区成云多，自然降水却不充分，降水量呈减少趋势，工程性、区域性、季节性水资源紧缺，因此对通过人工增雨作业来增加降水的需求巨大。除了云自身的云水含量以外，水汽输入对降水的形成也至关重要，西南地区水汽输送主要从西太平洋、南海、孟加拉湾和印度洋等，常年水汽输送通道畅通，为西南地区上空带来丰富的水汽输入。以往研究表明，贵州、四川和重庆大部分地区处于水汽通量散度负值区，全年水汽辐合，结合西南地区层状云的云水含量空间分布，贵州、重庆和四川盆地地区的云水含量较高，具有理想的人工增雨作业

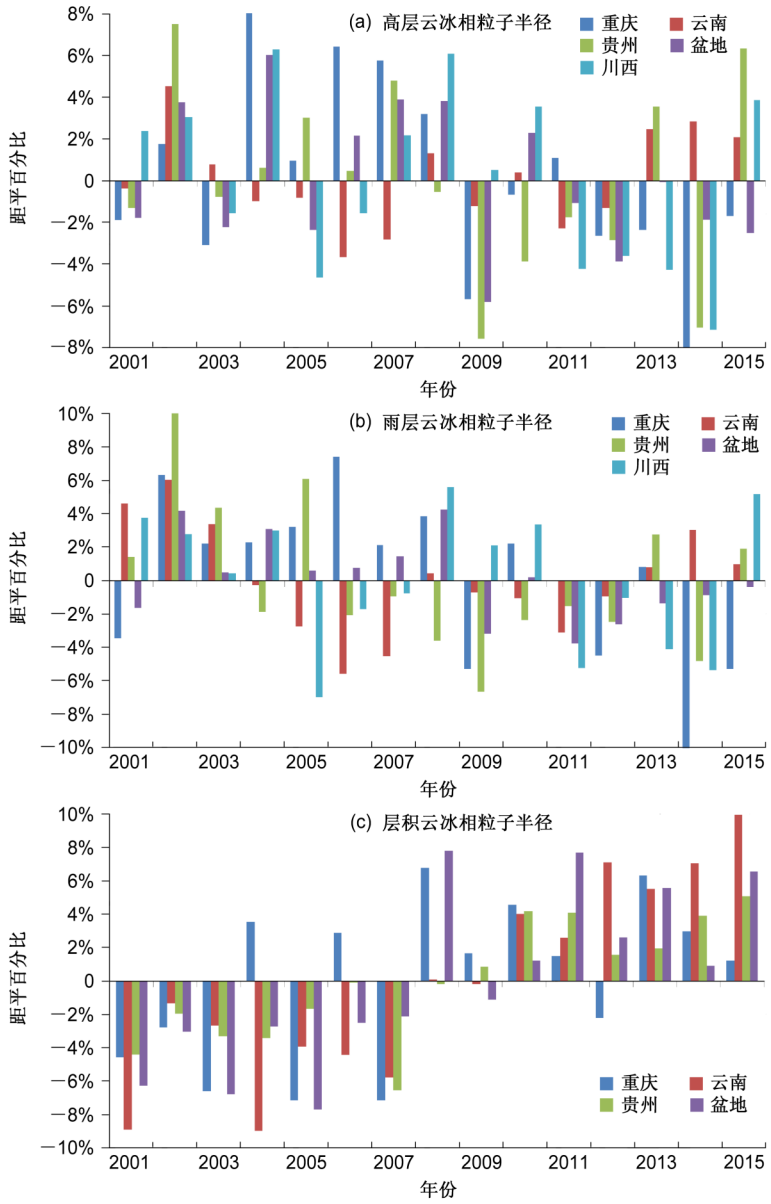

图6 2001～2015年冰相云粒子有效半径年际变化趋势

Fig. 6 Annual variation trends of ice cloud particle effective radius from 2001 to 2015

条件。

西南地区一年四季均有人工增雨作业需求，影响西南地区的干旱主要为春旱和伏旱，在春季和秋季，受西南涡、高原低槽等天气系统影响，带来大范围降水天气过程，加之秋季层状云液水和冰水含量均较高，飞机作业高度3000～6000 m，适合针对层状中云开展飞机人工增雨作业，对缓解旱情、保障粮食生产都具有重要意义。夏季由于强降水过程较多，且以大雨形式降落到地面的云水资源不易被农业等利用，故夏季人工增雨作业较少。冬季，是西南地区降水最少的季节，同时对降低森林火险等级、净化空气质量等又有较大需求，结合西南地区层状云的云水含量来看，冬季西南地区也具有丰富的液水和冰水含量，但由于大范围降水天气过程较少，适合针对局地过程，采用高炮、火箭等作业装备实施人工增雨地面作业。

4 结论

本文采用了2001～2015年的CERES资料，对西南地区不同类型层状云的云粒子有效半径和云水含量进行了统计分析。从云水含量年均分布特征来

看：1）液水含量和冰水含量的年均空间分布特征类似，整体表现为西部地区液水含量低于东部地区，海拔低的地区液水含量高于海拔高的地区。2）雨层云液水和冰水含量最多，其次是高层云，层积云相对最少。从粒子有效半径年均分布特征来看：1）高层云和雨层云液相和冰相云粒子有效半径高值区位于川西高原，层积云液相和冰相云粒子有效半径高值区位于云南西部。2）不同类型云的液相云粒子有效半径之间数值差异较小，冰相粒子有效半径差异较大。3）高层云和雨层云云粒子有效半径高于层积云。

从西南各地区来看：1）高层云和雨层云年均液水和冰水含量在重庆和贵州地区最多，其次是四川盆地地区，再次是云南地区，川西高原地区最少。层积云年均液水和冰水含量在西南各地区差异很小。2）高层云和雨层云液相云粒子有效半径在川西高原最大，四川盆地最小。高层云和雨层云冰相云粒子有效半径在川西高原最大。层积云液相和冰相云粒子有效半径在西南各地区差异很小，云南地区略高。

从季节分布来看：1）雨层云液水和冰水含量季节差异较大，秋季和冬季液水含量偏高，夏季和春季液水含量偏少。高层云、层积云液水和冰水含量季节差异较小。2）不同类型云的液相云粒子有效半径均表现为夏季最大，雨层云液相云粒子有效半径季节差异较大，高层云液相云粒子有效半径季节差异较小。3）高层云、雨层云冰相云粒子有效半径表现为冬季最大，高层云冰相云粒子有效半径季节差异较大，层积云冰相云粒子有效半径季节差异较小。

从年际变化趋势来看：1）西南地区不同类型云的液水和冰水含量均呈减少趋势。2）不同类型云的冰相云粒子有效半径年际变化浮动比液相云粒子有效半径更大，高层云和雨层云液相和冰相云粒子有效半径有略微减少趋势，层积云液相和冰相云粒子有效半径增加趋势显著。

参考文献（References）

常倬林, 崔洋, 张武, 等. 2015. 基于CERES的宁夏空中云水资源特征及其增雨潜力研究 [J]. 干旱区地理, 38(6): 1112−1120. Chang Zhuolin, Cui Yang, Zhang Wu, et al. 2015. Characteristics and developing potential of cloud water resource in Ningxia with the CERES data [J]. Arid Land Geography (in Chinese), 38(6): 1112−1120. doi:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2015.06.004

段皎, 刘煜. 2011. 中国地区云光学厚度和云滴有效半径变化趋势 [J]. 气象科技, 39(4): 408−416. Duan Jiao, Liu Yu. 2011. Trends of cloud optical thickness and cloud effective radius variation in China [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 39(4): 408−416. doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2011.04.004

范思睿, 王维佳, 刘东升, 等. 2014. 基于再分析资料的西南区域近50a空中水资源的气候特征 [J]. 暴雨灾害, 33(1): 65−72. Fan Sirui, Wang Weijia, Liu Dongsheng, et al. 2014. Climatological characteristics of water vapor over southwest China during the recent 50 years based on the reanalysis data [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 33(1): 65−72. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2014.01.009

洪延超, 周非非. 2006. 层状云系人工增雨潜力评估研究 [J]. 大气科学, 30(5): 913−926. Hong Yanchao, Zhou Feifei. 2006. The study of evaluation of potential of artificial precipitation enhancement in stratiform cloud system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30(5): 913−926. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.05.20

侯叶叶, 刘红燕, 鲍艳松. 2016. 地基微波辐射计反演水汽密度廓线精度分析 [J]. 气象科技, 44(5): 702－709. Hou Yeye, Liu Hongyan, Bao Yansong. 2016. Accuracy analysis of vapor density profiles measured by ground - based microwave radiometer [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 44(5): 702−709. doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2016.05.002

李聪, 肖子牛, 张晓玲. 2012. 近60年中国不同区域降水的气候变化特征 [J]. 气象, 38(4): 419－424. Li Cong, Xiao Ziniu, Zhang Xiaoling. 2012. Climatic characteristics of regions of China for precipitation in various the past 60 years [J]. Meteorological Monthly, 38(4): 419−424. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2012.4.005

李特, 郑有飞, 王立稳, 等. 2017. 基于MODIS产品的中国陆地冰云季节变化特征 [J]. 应用气象学报, 28(6): 724−736. Li Te, Zheng Youfei, Wang Liwen, et al. 2017. Ice cloud distribution and seasonal migration over land area of China based on MODIS data [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 28(6): 724−736. doi:10.11898/1001-7313.20170608

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 Xingyu, Guo Xueliang, Zhu Jiang. 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

李跃清, 张琪. 2014. 西南地区夏季云量与降水的关系特征分析 [J]. 自然资源学报, 29(3): 441－453. Li Yueqing, Zhang Qi. 2014. Contemporaneous relationships between summer cloudiness and precipitation over southwest China [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 29(3): 441−453. doi:10.11849/zrzyxb.2014.03.008

李泽明, 李永华, 白莹莹, 等. 2014. 重庆主城区云量变化特征 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 36(7): 117－125. Li Zeming, Li Yonghua, Bai Yingying, et al. 2014. Variation characteristics of cloud amount over the main urban area of Chongqing [J]. Journal of

Southwest University (Natural Science Edition) (in Chinese), 36(7): 117−125. doi:10.13718/j.cnki.xdzk.2014.07.020

李昀英, 宇如聪, 徐幼平, 等. 2003. 中国南方地区层状云的形成和日变化特征分析 [J]. 气象学报, 61(6): 733−743. Li Yunying, Yu Rucong, Xu Youping, et al. 2003. The formation and diurnal changes of stratiform clouds in southern China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61(6): 733−743. doi:10.11676/qxxb2003.074

林丹. 2015. 西南地区不同类型云的云水含量时空分布和变化趋势 [J]. 干旱气象, 33(5): 748−755, 801. Lin Dan. 2015. Temporal and spatial distribution and change trend of cloud water of different types clouds in Southwest China [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 33(5): 748 − 755, 801. doi: 10.11755 / j. issn. 1006-7639 (2015)-05-0748

刘晓春, 毛节泰. 2008. 云中液水含量与云光学厚度的统计关系研究 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 44(1): 115−120. Liu Xiaochun, Mao Jietai. 2008. Statistical relation research between cloud liquid water content and cloud optical thickness from multiple observations [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese), 44(1): 115−120. doi:10.3321/j.issn:0479-8023.2008.01.021

隆璘雪. 2016. 2017～2014年青藏高原地区云的变化特征及其影响因子分析 [D]. 云南大学硕士学位论文, 1−88. Long Linxue. 2016. Analysis of variation characteristics of cloud and influence factors over the Tibetan Plateau from 2007 to 2014 [D]. M.S. thesis (in Chinese), Yunnan University, 1−88.

庞朝云, 黄山, 张丰伟. 2016. 甘肃中部降水性层状云微物理结构特征个例分析 [J]. 气象科技, 44(5): 805 − 810. Pang Zhaoyun, Huang Shan, Zhang Fengwei. 2016. Microphysical structure of a stratiform cloud precipitation event in central Gansu Province [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 44(5): 805−810. doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2016.05.019

宋松涛, 张武, 陈艳, 等. 2013. 中国西北地区近20年云水路径时空分布特征 [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 49(6): 787−793, 798. Song Songtao, Zhang Wu, Chen Yan, et al. 2013. Temporal and spatial distributions of cloud water path over Northwestern China in the recent 20 Years [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese), 49(6): 787 − 793, 798. doi: 10.13885 / j. issn. 0455-2059.2013.06.022

孙鸿娉, 李培仁, 闫世明, 等. 2014. 山西省2008～2010年64架次飞机云物理观测结果分析 [J]. 气象科技, 42(4): 682−689. Sun Hongping, Li Peiren, Yan Shiming, et al. 2014. Characteristics of cloud microphysical structure based on aircraft data in 2008−2010 in Shanxi Province [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 42(4): 682−689. doi: 10.3969 / j. issn. 1671 - 6345.2014. 04.027

王东, 张勃, 安美玲, 等. 2014. 基于SPEI的西南地区近53a干旱时空特征分析 [J]. 自然资源学报, 29(6): 1003 − 1016. Wang Dong, Zhang Bo, An Meiling, et al. 2014. Temporal and spatial distributions of drought in Southwest China over the past 53 years based on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 29(6): 1003−1016. doi:10.11849/zrzyxb.2014.06.009

王洪强, 陈勇航, 彭宽军, 等. 2011. 基于Aqua卫星总云量资料分析山区云水资源 [J]. 自然资源学报, 26(1): 89 − 96. Wang Hongqiang, Chen Yonghang, Peng Kuanjun, et al. 2011. Study on cloud water resources of mountain ranges in Xinjiang based on Aqua satellite data [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 26(1): 89−96. doi:10.11849/zrzyxb.2011.01.009

汪晓滨, 李淑日, 游来光, 等. 2001. 北京冬夏降水系统中的云水量及其统计特征分析 [J]. 应用气象学报, 12(S1): 107−112. Wang Xiaobin, Li Shuri, You Laiguang, et al. 2001. Cloud liquid water and precipitation studies and its statistic characteristics in Beijing [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 12(S1): 107−112. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2001.z1.014

Warner J, Twomey S. 1967. The production of cloud nuclei by cane fires and the effect on cloud droplet concentration [J]. J. Atmos. Sci., 24(6): 704−706. doi:10.1175/1520-0469(1967)024<0704:TPOCNB>2.0.CO;2

杨大生, 王普才. 2012. 中国地区夏季云粒子尺寸的时空分布特征 [J]. 气候与环境研究, 17(4): 433 − 443. Yang Dasheng, Wang Pucai. 2012. Tempo - spatial distribution characteristics of cloud particle size over China during summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17(4): 433−443. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10066

张琪, 李跃清, 陈权亮, 等. 2011. 近46年西南地区云量的时空变化特征 [J]. 高原气象, 30(2): 339−348. Zhang Qi, Li Yueqing, Chen Quanliang, et al. 2011. Temporal and spatial distributions of cloud cover over Southwest China in recent 46 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30(2): 339−348.

周长艳, 蒋兴文, 李跃清, 等. 2009. 高原东部及邻近地区空中水汽资源的气候变化特征 [J]. 高原气象, 28(1): 55−63. Zhou Changyan, Jiang Xingwen, Li Yueqing, et al. 2009. Features of climate change of water vapor resource over eastern region of the Tibetan Plateau and its surroundings [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28(1): 55−63.