

文章编号: 2096-1618(2016)05-0523-08

秦巴山区云垂直结构分析

周镜石^{1,2}, 王东海²

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

摘要:为探讨秦巴地区降水与云垂直结构特征之间的关系,利用近8年(2006年7月~2014年6月)的 CloudSat 数据,通过归一化等频率高度图(NCFAD)统计方法统计了各物理量各层的发生频数并对秦巴山区降水云的雷达反射率、云类型、云微物理量及热力参数的垂直分布特征进行了研究,结果表明:(1)秦巴山区降水云以层云和雨层云为主,夏季对流云的垂直发展最旺盛;(2)降水云雷达回波随高度先增加后减少,夏季具有典型强降水回波特征,春秋呈一般降水回波特征,即回波大值区同时出现几个极值,冬季降水回波特征不显著;(3)冰云粒子主要分布在3~8 km,粒子浓度随高度递增;液云粒子集中在2~4 km,粒子浓度随高度递减;(4)热力结构季节差异不大,且季节平均呈大气对流稳定。

关键词:气象学;云微物理;秦巴山区;云垂直结构特征;水汽-云-降水相互关系

中图分类号:P463.21⁺3

文献标志码:A

0 引言

云对全球地球辐射收支和水循环起重要的调节作用,其中描述云的宏观和微观的众多云参数中,云的垂直结构能够影响到大气环流^[1-2]。云的垂直结构反映了云体内部热力和动力结构,以及降水过程的微物理特征。云和降水过程,除了受到动力、热力条件的影响外,其内部的微物理过程也起到很重要的作用。云层的垂直分布直接影响模式对降水的预报^[3]。云的宏观垂直结构反映了云水资源的分布状况以及向降水转化的条件^[4]。因此,云的垂直结构信息对降水有着重要的意义。

秦巴山区位于青藏高原的东部,包含秦岭山脉和大巴山脉地貌,以山地和盆地为主,地形结构复杂,土质疏松,因此极端强降水引发的泥石流及山体滑坡等灾害造成的影响更为剧烈^[5],对山区人民的财产安全威胁尤为突出。为了更深入的了解该地降水的本质,揭示该地降水特性,对本地云的特性进行深入了解才能更好地理解该地成云致雨的过程。已有学者对秦巴近50年的极端降水阈值及夏季降水时空分布做研究^[6-7],并探讨强降水与地形之间的联系,如秦岭大巴山地形对陕南降水的影响^[8]。尽管如此,复杂的地形降水机理、观测站稀疏等仍然制约着该地区降水预报技术。

目前对云的探测手段有:通过地面观测、卫星观测、机载设备观测和云雷达等^[9-11]的直接观测获取,由

探空湿度参量判断,数值模式模拟等方法间接获取云信息。地面人工观测的主观性较强,易受到环境因素的影响,且一般仅能获取云底信息,但时间序列长、空间密度大,利于分析云的属性等气候特征;激光云幕测量仪主要是获取云底信息;卫星观测一般获取云顶信息,因此对低云的探测能力较差;利用飞机备载的观测设备对云的观测准确性较好,但仅适用于小范围且成本过高;云雷达的观测资料准确性高,Cloudsat 搭载的云雷达为94 GHz,3mm波长的激光雷达,它以被动遥感的方式探测全球范围的云廓线及其时空变化,可获得的信息包括雷达反射率、云类型、云粒子有效半径、含水量、粒子浓度和光学厚度等^[12]。因此这种直接观测可认为是云观测有效的途径之一。

对于东亚和青藏高原的降水云垂直结构已有类似的分析,赵艳风等^[13]利用 Cloudsat 数据对青藏高原的云微物理特征进行了讨论,尹金方等^[14]利用 Cloudsat 数据对东亚地区的降水云垂直结构进行了分析,韩丁等^[15]利用 Cloudsat 数据分析了热带气旋的结构及热力特征。可见,Cloudsat 资料已经广泛地应用于云的宏微观结构分析中。为讨论秦巴山区内降水云的垂直结构,利用 CloudSat 资料从不同季节分析秦巴山区降水云的结构、云微物理特性及热力结构。

1 数据与方法

1.1 区域选取

广义的秦巴山区为秦岭和大巴山脉主体,包括秦

收稿日期:2016-02-20

基金项目:财政部/科技部行业专项资助项目(GYHY201306005);
国家自然科学基金重点资助项目(91437221)

岭以南大巴山以北的地区^[6],选取广义秦巴山区,地理范围为 31°N – 35°N , 102.5°E – 111.5°E ,如图1所示。该区域覆盖了陕西、湖北、四川3个省份及重庆市。

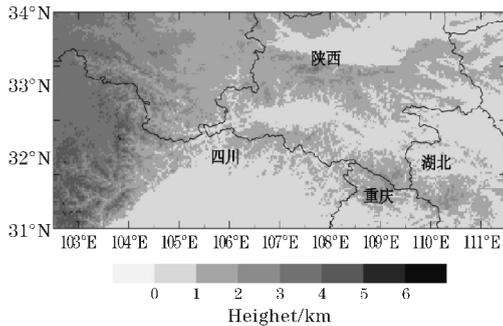


图1 秦巴山区地形分布(填色表示海拔高度)

1.2 数据

利用2006年7月~2014年7月Cloudsat数据对云的宏微观结构进行分析,Cloudsat卫星每天可以产生14~15个轨道,为了更好地了解云的内部结构,对2006~2014年过境的Cloudsat数据进行收集,轨道数情况如表1所示。选取2B-CWC-RO,2B-GEOPROF,2B-CLDCLASS数据产品分析云的结构特征,此外,还利用了ECMWF-AUX对云内热力结构进行探讨,如表2所示,各产品依次包含了冰云相关微物理参数,高度、雷达反射率、云盖、大气衰减率等,云的分类信息,ECMWF提供的温度、气压、比湿等辅助数据。

表1 秦巴山区Cloudsat过境轨道数

年份	扫过轨道数	降水云发生的轨道数
2006~2014	14442	1042

其中2B-CLDCLASS资料可利用自身所探测到的宏观结构参数、热力特征等将云分为8种类型,通常认为高云不产生降水,为探讨降水云的特征,因此仅针对除高层云和卷云外的六类降水云进行讨论。归一化等频率高度图(NCFAD)是分析云垂直结构时较为常见的一类方法,即某一高度、某值域的某物理量出现的频数占有高度层上该物理量出现次数的百分比^[14]。

表2 秦巴山区数据集

数据类型	产品描述	
Cloudsat	2B-CWC-RO	冰云液云相关微物理参数
	2b_GEOPROF	雷达反射率、云盖等
	2B-CLDCLASS	云类型
	ECMWF-AUX	ECMWF提供的温度、压力、比湿等辅助数据

2 云结构

2.1 云的组成

降水是水循环的重要环节之一,水汽凝结成云后,只有通过降水云的进一步发展产生降水。因此,仅针对降水云进行分析。降水云可分为高积云(Ac)、层云(St)、积云(Cu)、层积云(Sc)、雨层云(Ns)、深对流云(Deep)六种类型。据Yin统计结果表明^[14],各类降水云对降水贡献率从大到小依次为深对流云、雨层云、积云、层积云、高积云、层云,且降水主要来自深对流云和雨层云,其贡献率之和可达85%以上。表3为降水云出现在各个季节中的比例。

表3 各季节降水云出现比率

季节	春	夏	秋	冬
比率/%	0.2633	0.2941	0.2448	0.1978

图2为秦巴山区降水云的云类型的发生频率。春季(图2a),雨层云和层积云出现频率最高,其中层积云集中出现在1~5 km,而雨层云则集中出现在2~11 km;积云、深对流云和高积云发生概率次之,主要集中在10 km以下,由深对流云的分布可以看出在春季,对流发展得并不强烈,可见春季主导秦巴山区降水的主要为雨层云。

夏季(图2b),高积云、卷云、层积云、雨层云和深对流云出现频率均较大,达到0.12%。其中深对流云垂直伸展范围最大,向上可伸展至18 km,向下可延伸到地面1 km;雨层云次之,主要发生在3~8 km的高度。可见夏季对流发展旺盛,且垂直发展十分强烈。在该季节两个主要降水云均有出现频率都很大,两者共同主导该季节的降水。

秋季(图2c),云类分布与夏季相似,除深对流云的垂直伸展范围有所减小外,各类云的发生概率明显增大,接近0.15%。深对流云较夏季弱,体现在其云顶高度达到15 km左右,并且出现频率最大的区域分布在1~8 km。降水贡献主要来自于雨层云和深对流云。

冬季(图2d),主要为层积云和雨层云两类,发生的最大频率可达0.15,层积云主要出现在2~5 km,雨层云主要出现在2~8 km;高积云与积云存在但是极少。可以看出冬季对流云出现频率不高,因此冬季降水主要来自雨层云的贡献。

层积云和雨层云始终伴随着各个季节,且发生概率高于其他云类,而层云在各个季节几乎都不出现,对

流云在夏季发展的最高,在秋季最强,而冬季出现极少,表3可见,夏季降水云出现的比率最高。结合各类云的降水频率来看,夏季和秋季应较其他季节具有更强的降水能力。

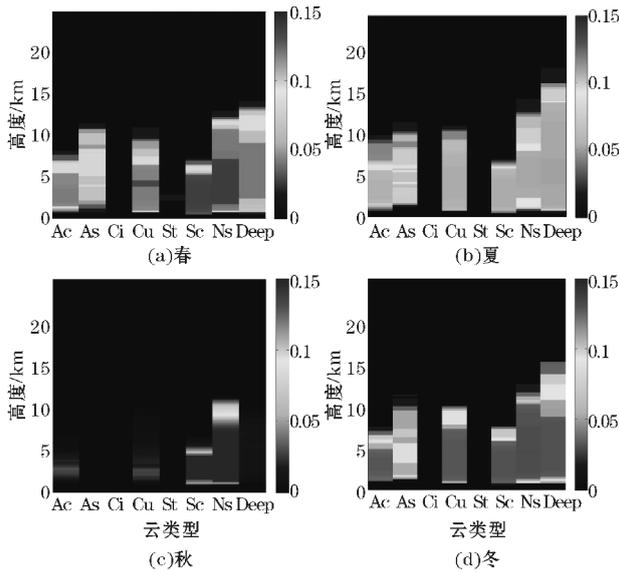


图2 各类云型的发生频率

基于以上分析可知,秦巴山区降水云基本出现在15 km以下,夏季雷达反射率强于其他季节,且垂直伸展最高,具有最显著的强对流云的,相应冬季最弱,且垂直伸展低于其他季节。除冬季外,4~10 km左右的高度在雷达反射率快速减小。

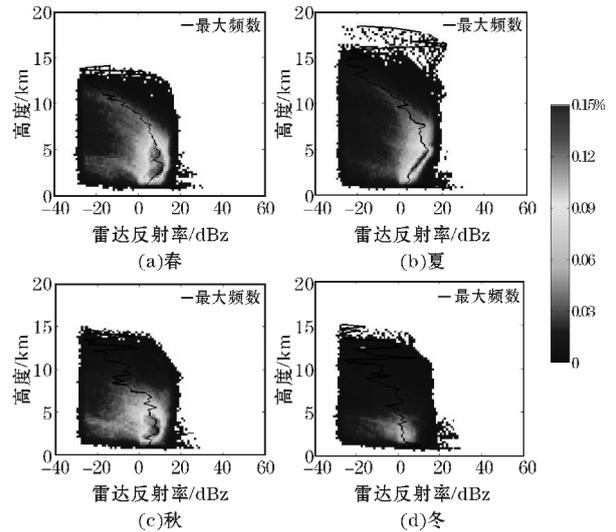


图3 雷达反射率的垂直分布

2.2 雷达反射率

云的垂直结构可通过雷达反射率的垂直分布体现,而每层雷达反射率的最大频率连线也可作为云垂直结构廓线。云的垂直结构可通过雷达反射率的垂直分布体现,也可将每层雷达反射率的最大频率连线作为云垂直结构廓线。图3为降水云的雷达反射率的垂直分布,春季(图3a),降水云主要集中在1~9 km,雷达反射率在0~17 dBz,从雷达反射率的垂直廓线来看,3 km以下雷达反射率随高度递增,在4~5 km雷达反射率最大且出现了两个极大值,达到15 dBz,从5 km高度以上,雷达反射率逐渐递减,到达高层后云发生频率较低,因此出现了一个雷达反射率的较大波动。夏季(图3b),降水云的垂直伸展幅度最大,最高可以伸展到17 km左右,雷达反射率的垂直分布与春季相似,但主要集中在1~8 km。从垂直廓线来看,1~5 km雷达反射率随高度增加,在5 km左右达到最大值17 dBz,5 km以上,雷达反射率逐渐减小。秋季(图3c),降水云主要集中在7 km以下,雷达反射率最大值出现在3 km附近,达到10 dBz且随高度变化的过程中波动较大。冬季(图3d),降水云仅分布在11 km以下且主要集中在5 km以下,雷达反射率在2 km处达到最大值10 dBz,在3~5 km雷达反射率基本无变化,5 km以上,雷达反射率随高度逐渐减小,在6 km与10 km出现了两个极大值。

3 云微物理参数垂直分布

云的内部结构可以由云微物理参数和热力结构了解,这些要素的分布可对降水的发生产生直接的影响。接下来对冰云参数和液云参数两类云微物理参数垂直分布特征进行探讨。

3.1 冰云参数

从雷达反射率的垂直分布可见云粒子在4~10 km内累积增长,因此,进一步来看冰云、液云粒子在云内的分布情况。在强烈不稳定环境中,虽然冰相微物理过程会增加上升气流速度和地面降水,但冰相微物理过程相对次要,而有在弱不稳定环境中冰相微物理过程中十分重要^[16]。冰云参数包括冰粒子有效半径、冰水含量、冰粒子数浓度。图4为秦巴山区不同季节内不同冰云物理参数的垂直分布。从图4可见秦巴山区降水云内冰粒子有效半径范围在30~150 μm 左右,冰水含量在0~1300 mg/m^3 ,冰粒子浓度范围为0~500 L^{-1} ,并随着季节变化。春季,冰粒子主要集中在4~8 km左右的高度,有效半径集中在60~120 μm ,虽然冰水含量最大可达1500 mg/m^3 ,但主要集中在150 mg/m^3 以下,冰粒子浓度在主要集中在180 L^{-1} 以下,发生在4~8 km;相比春季冰粒子分布,夏季冰粒子分布存在明显的抬升,冰粒子仍集中分布

在 5 ~ 8 km, 粒子有效半径在 80 ~ 130 μm 的冰粒子最多, 冰水含量主要在 200 mg/m^3 以下, 冰粒子浓度的范围也比春季大, 主要集中在 0 ~ 200 L^{-1} ; 秋季与春季的各冰云参数差别不大, 垂直分布十分相近, 但是秋季粒子半径更为集中在 100 μm 左右; 冬季, 与其他季节有着很明显的差异, 冰粒子的分布较其他季节低, 冰粒子的有效半径值分布并不集中, 100 μm 左右的冰粒子相对较多, 冰水含量较其他季节更加集中, 冰粒子集中分布在 3 ~ 8 km 的高度, 0 ~ 350 mg/m^3 , 冰粒子浓度也是在 0 ~ 200 L^{-1} 出现频率最大, 出现在 3 ~ 5 km。

冰云粒子集中分布在 3 ~ 8 km, 各季节冰粒子垂直分布趋势基本相同, 但仍存在明显的季节变化, 夏季冰粒子分布会有明显的抬升, 且粒子半径相对其他的季节略大一些, 冬季不同尺寸冰粒子分布相较其他季节比较均匀, 但是冰水含量要高于其他季节, 且冰粒子浓度也大一些。图中黑色实线为 $-15\text{ }^\circ\text{C}$ 在不同高度上的频数分布, 可见 $-15\text{ }^\circ\text{C}$ 层出现在 5 ~ 8 km 左右 (冬季除外) 与冰云参数的频率大值区出现的高度一致, 且在 $-15\text{ }^\circ\text{C}$ 层上方出现冰水含量的最大值。表明 $-15\text{ }^\circ\text{C}$ 利于冰粒子的碰冰增长。

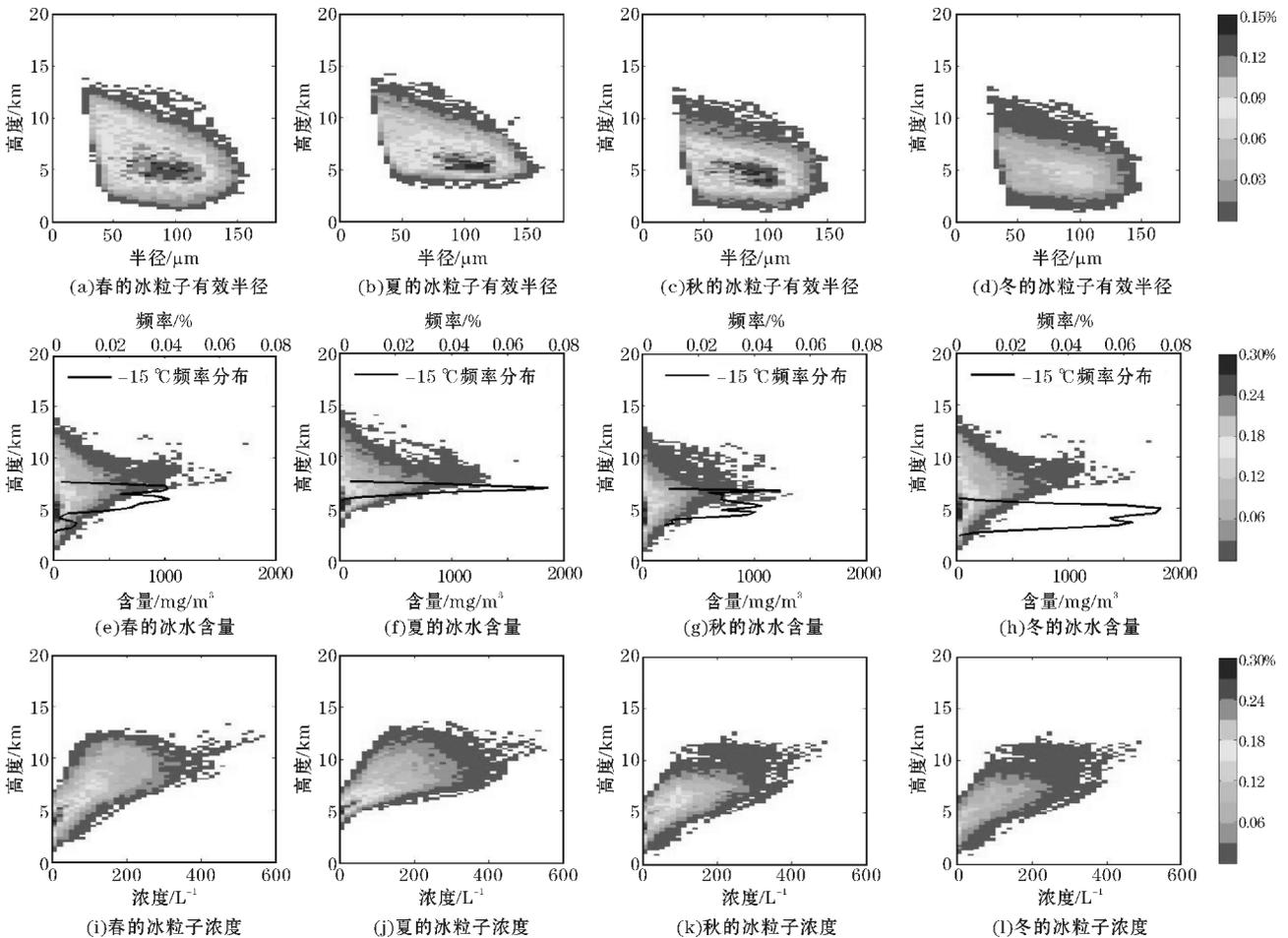


图4 冰云参数

3.2 液云参数

液云参数包括液水粒子半径、液水含量和液粒子浓度数, 液云粒子与降水的联系更加直接。从图 5 可见, 液云粒子分布在 7 km 以下, 集中在 2 ~ 4 km, 以 10 μm 左右的粒子出现最多, 随着高度增加液粒子半径逐渐减小, 特别是在 4 km 以上, 粒子有效半径变化梯度增大。液水粒子季节变化也不显著。液水含量的变化趋势也基本随高度递减, 从图中可以看出冰水含量在底层 1 km 左右和 3 ~ 4 km 左右的位置会出现两个

极大值, 液水含量主要集中在 50 ~ 500 mg/m^3 , 夏季的液水含量最大值高于其他季节, 且液水含量在区间 150 ~ 300 mg/m^3 出现频率最大, 春秋季液水含量集中在 100 ~ 300 mg/m^3 , 冬季则是集中出现在 100 ~ 250 mg/m^3 。液粒子浓度的季节变化比较明显, 春秋季液粒子浓度的垂直分布较相近, 随高度逐渐减少, 液云粒子主要在 4 km 以下, 春季主要分布在 1 ~ 3 km, 秋季主要分布在 2 km 左右, 均在 75 ~ 90 L^{-1} , 夏季降水云中液粒子的含量明显高于其他季节, 云内液粒子浓度基本都在 50 L^{-1} 以上, 冬季, 液粒子含量主要集中在

60 ~ 110 L⁻¹。

研究表明,对于明显的降水,云滴的有效半径至少要达到12 μm^[17]。秦巴山区降水云内液态粒子有效半径基本在8 ~ 30 μm,液水含量在1800 mg/m³以内,而液粒子浓度在110 L⁻¹以下,这表明本地具备强降水的能力。液水含量在垂直方向出现两个峰值,一个出现在1 km左右,另一个出现在4 km附近,这与杨大生^[18]对中国地区分析结果类似,可能是由于秦巴山区

处于青藏高原的下游,因而受到青藏高原的影响。不仅如此,从0 °C频数线可以看到,春秋季节0 °C频数大值区与液水含量上层大值区对应,夏季0 °C层较高,液云粒子基本分布在0 °C以下,冬季0 °C频率最值位于液水含量两极大值高度之间,春秋季节0 °C层则与高层液水含量大值区相对应。在0 °C环境下,利于液云粒子的累计,夏季可提供更多潜在的降水粒子,而冬季能提供的较少。

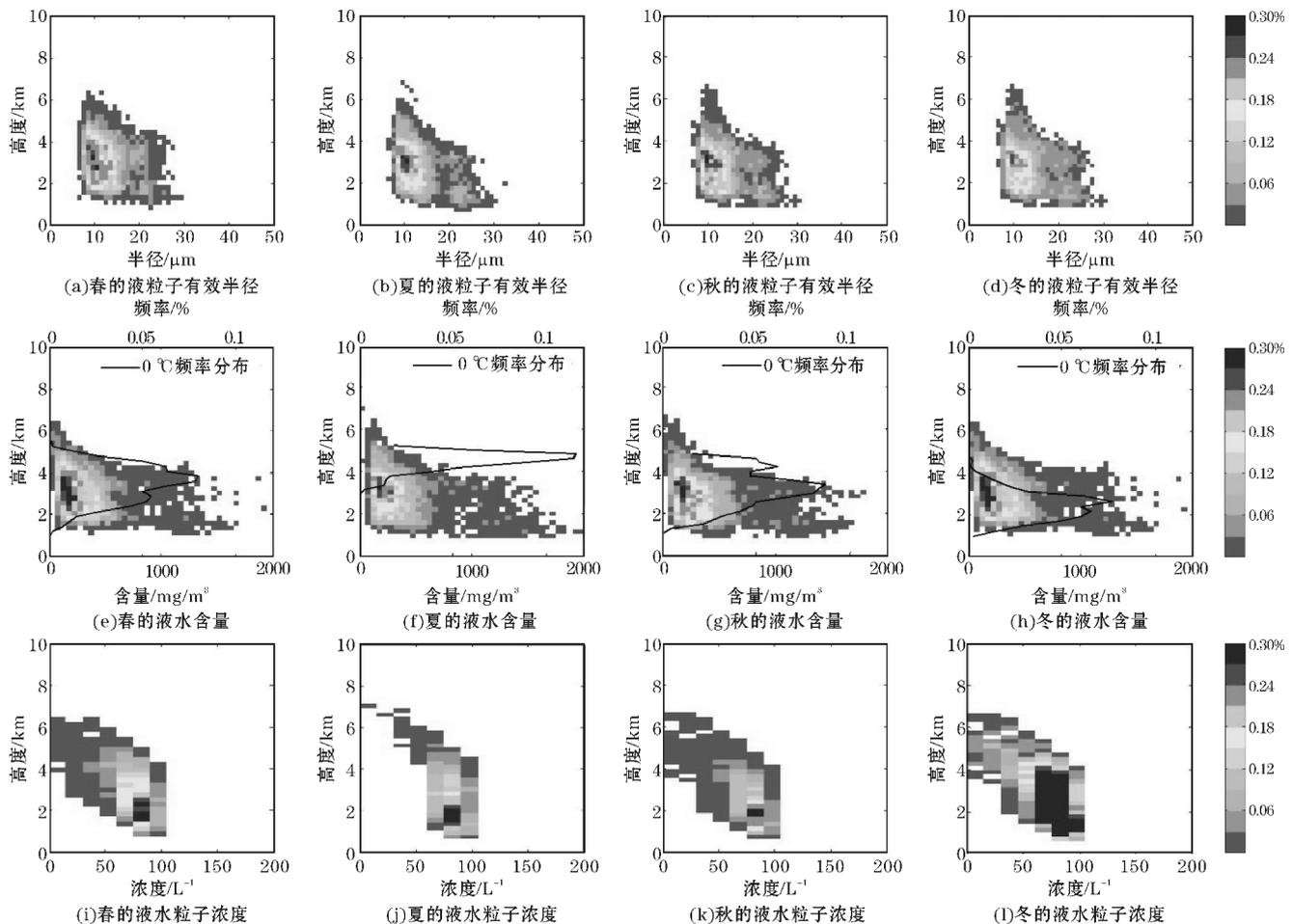


图5 液云参数

3.3 热力结构

云内热力结构能够直接影响云内各物理量的分布,以下分别对温度、比湿、相对湿度、假相当位温进行讨论。后两者由 ECMWF-AUX 提供的温压和比湿信息进一步算得,相对湿度可以反映云内水汽和温度的分布特点,假相当位温递减率可以判定大气的对流稳定性。

图6和图7分别是各季节平均温度和比湿垂直廓线,其变化趋势的季节差异不大,均随高度逐渐减少,但是云顶与云底之间的差异季节变化明显,春季和秋季温度相差无几,温度范围在-70 °C ~ 18 °C,夏季温

度较高,且垂直伸展更强,因此云内温度范围更大,为-80 °C ~ 25 °C,冬季云低且气温低,因此,温度在-60 °C ~ 5 °C,可见0 °C层在2 ~ 5 km附近的位置,这与雷达反射率最大值出现的位置有较好的对应关系,通常在0 °C层附件会产生回波亮带,即雷达反射率的大值区。

根据前面分析可知,5 km 以下为液水粒子主要存在的区域,比较各季节的比湿可见夏季云内湿度最大可达15 g/kg,其次为秋季和春季,冬季最小,在5 g/kg 以下,这也许是冬季降水云发生概率小于其他季节的原因。季节平均的相对湿度垂直廓线(图8)范围内也是有类似的趋势,但垂直方向的波动很大,相对湿度的

最大值在5 km以下。

假相当位温(图9)的垂直变率可以体现云内的稳定度,当直减率大于0时为对流性稳定层结,小于0位对流性不稳定层结,否则为中性层结。各个季节内的

平均状态均为条件稳定,表明该地区由中尺度不稳定系统而造成的强降水是少数,所以在平均状态下并不显现。

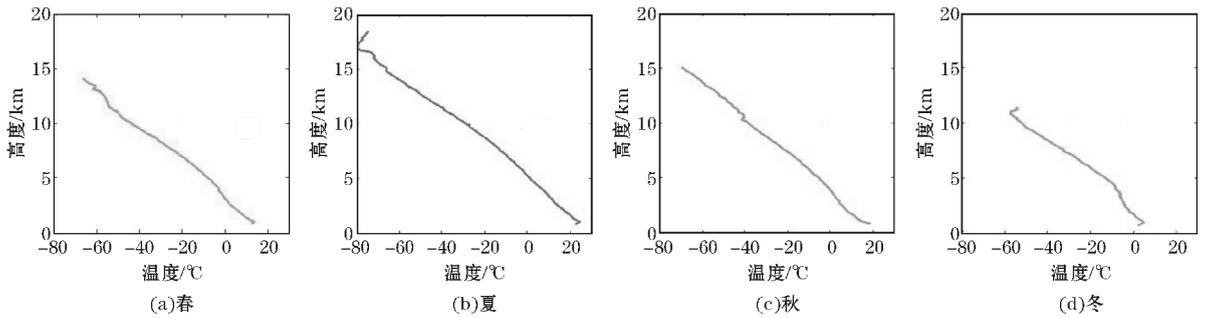


图6 温度垂直廓线

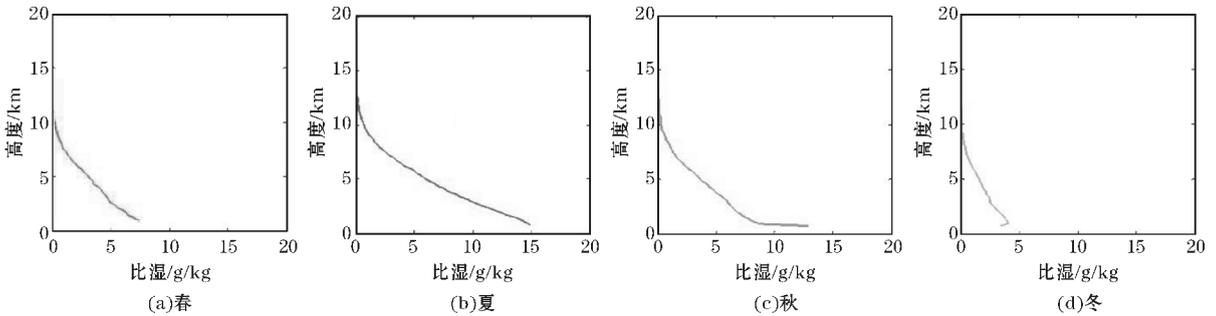


图7 比湿垂直廓线

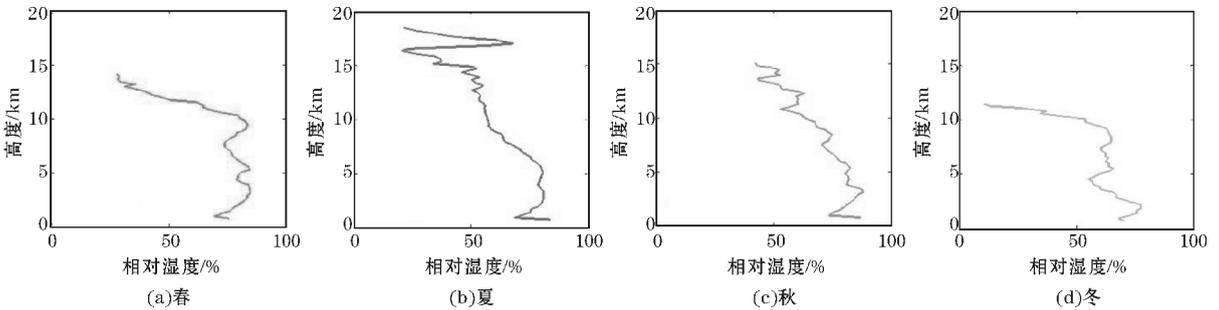


图8 相对湿度垂直廓线

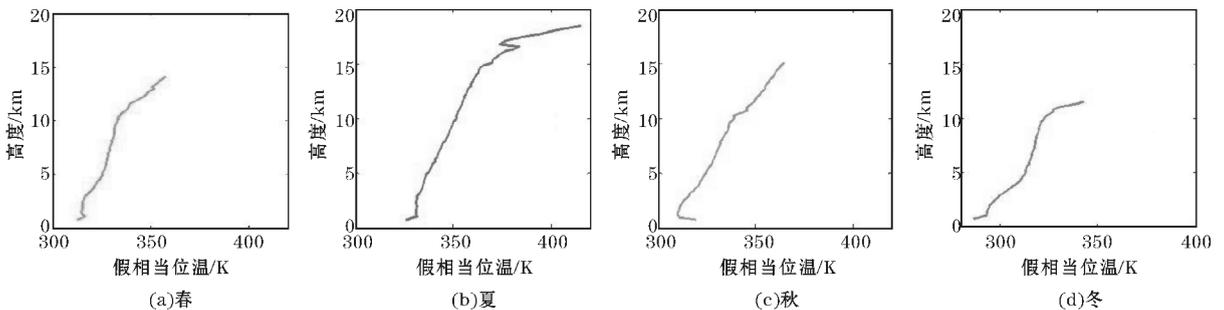


图9 假相当位温垂直廓线

4 结论

利用近8年的 CloudSat 经过秦巴山区的降水云数

据,对秦巴山区降水云不同季节的垂直结构进行分析,结果表明:

(1)秦巴山区各季节的降水云之间有明显的差异,层积云和雨层云始终伴随着各个季节,且发生概率

也较其他云类高,而层云在各个季节几乎都不出现,对流云在夏季发展的最高,在秋季最强,而冬季出现极少,夏季降水云出现的比例最高,更容易出现降水云。

(2)降水云通常出现在15 km以下,雷达反射率随高度先增加后减小,其中最大值出现在2~5 km。夏季的雷达回波具有典型强降水雷达回波的特点,春秋季节则呈现一般雷达回波的特点,冬季降水回波特征不显著。

(3)云微物理参数的垂直分布特质:冰云粒子主要集中在3~8 km,以半径100 μm左右冰云粒子最多;主要分布在150 mg/m³以内,8 km左右冰水含量达到最大;冰粒子浓度随高度递增,在12~13 km左右达到最大。液云粒子分布在1~7 km,主要集中在2~4 km。液云粒子有效半径为10 μm左右的粒子最多;液水含量随高度递减,在2 km和4 km左右出现两个极大值;液粒子浓度随高度递减,季节之间变化比较明显。

(4)热力结构的变化趋势季节差异不大,差异主要体现在要素值的范围上。温度和比湿均随高度逐渐减小,相对湿度在底层的大值区与雷达反射率的大值区基本对应,与0℃的位置也基本一致。假相当位温随高度呈正变化,表明秦巴山区的季节平均状态为大气对流稳定。

综上所述,可见秦巴山区降水特点四季分明,夏季利于对流云的发展,更容易产生强降水,而冬季则云内水汽不充沛,降水能力最弱。春夏季则为过渡季节,降水能力介于冬夏之间。

参考文献:

- [1] 王标. 气候变化研究中大气垂直结构探测评述[J]. 大气与环境光学学报, 2011, 6(1): 2-10.
- [2] 李积明, 黄建平, 衣育红, 等. 利用星载激光雷达资料研究东亚地区云垂直分布的统计特征[J]. 大气科学, 2009, 33(4): 698-707.
- [3] Jakob C, Klei S A. The role of vertically varying cloud fraction in the parametrization of microphysical processes in the ECWMF model [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1999, 125(555): 941-965.
- [4] 张中波, 仇财兴, 王治平, 等. 一次积层云混合云系人工增雨作业的观测分析[J]. 气象科技, 2014, 42(5): 897-905.
- [5] 李玉文, 王盘兴, 杜继稳, 等. 秦巴山区暴雨及其诱发地质灾害的特征分析[J]. 陕西气象, 2007, (1): 21-25.
- [6] 杨波, 张勃, 安美玲, 等. 1961-2011年秦巴山区极端降水事件的时空分布特征分析[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 110-116.
- [7] 朱梅, 肖天贵, 余兴, 等. 秦巴谷底夏季降水的时空分布特征分析[J]. 气象科技, 2014, 42(4): 664-670.
- [8] 毕宝贵, 刘月巍, 李泽椿. 秦岭大巴山地形对陕南强降水的影响[J]. 高原气象, 2006, 25(3): 495-494.
- [9] 马学谦, 陈跃, 张国庆, 等. X波段双偏振雷达对不同坡度地形云探测个例分析[J]. 干旱气象, 2015, 33(4): 675-683.
- [10] 郑国光, 陈跃, 陈添宇, 等. 祁连山夏季地形云综合探测试验[J]. 地球科学进展, 2011, 26(10): 1057-1070.
- [11] 王德旺, 刘黎平, 仲凌志, 等. 毫米波雷达资料融化层亮带特征的分析及识别[J]. 气象, 2012, 38(6): 712-721.
- [12] 马占山, 刘奇俊, 秦琰琰, 等. 云探测卫星 cloudsat[J]. 气象, 2008, 34(8): 104-111.
- [13] 赵艳风, 王东海, 尹金方. 基于 CloudSat 资料的青藏高原地区云微物理特征分析[J]. 热带气象学报, 2014, (2): 239-248.
- [14] 尹金方, 王东海, 翟国庆, 等. 基于星载云雷达资料的东亚大陆云垂直结构特征分析[J]. 气象学报, 2013, 71(1): 121-133.
- [15] 韩丁, 严卫, 叶晶, 等. 基于 CloudSat 卫星资料分析东太平洋的云、降水和热力特征[J]. 大气科学, 2013, 37(3): 691-704.
- [16] 廖菲, 洪延超, 郑国光. 影响云和降水的动力、热力与微物理因素的研究概述[J]. 气象, 2006, 32(11): 3-11.
- [17] 陈英英, 周毓荃, 毛节泰, 等. 利用 FY-2C 静止卫星资料反演云粒子有效半径的试验研究[J]. 气象, 2007, 33(4): 29-34.
- [18] 杨大生, 王普才. 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, 2012, 36(1): 89-101.

The Vertical Structure of Cloud in the Qinling-Daba Mounts

ZHOU Jing-shi^{1,2}, WANG Dong-hai²

(1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory Sichuan Province, Chengdu 610225, China; 2. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 10081, China)

Abstract: To discuss the relationship between the precipitation and cloud vertical structure over the Qinling-Daba Mounts (DQM), the research analyzed with the CloudSat data during the period from July 2006 to June 2014 presents the vertical distribution of the radar reflectivity, cloud type, the microphysical parameters and the thermal parameters by using NCFAD statistical methods to calculate the occurrence frequency of each physical quantity in each layer. The results show that, (1) the main type of precipitation-cloud in DQM are stratus and nimbostratus, the deep convective clouds fully develop in vertical in summer; (2) the radar reflectivity of precipitation-cloud increase and then decrease with height and shows typical heavy precipitation echo characteristics in summer, verage precipitation echo characteristics in autumn and spring several extreme values occur at same time, characteristics of the precipitation echo was not significant in winter; (3) Ice cloud particles are mainly distributed in 3–8 km, particle concentration increases with height; liquid cloud particles concentration in 2–4 km, the particle concentration decreases with height; (4) Thermal structure varies little in different seasons, and the atmosphere seasonis convectivestab.

Key words: meteorology; cloud microphysics; the Qinling-Daba Mounts; vertical structure of cloud; the relationship of vapor; cloud and precipitation