

基于主动卫星遥感研究西北地区云层垂直结构特征及其对人工增雨的影响

丁晓东^{1,2}, 黄建平¹, 李积明¹, 王天河¹, 黄忠伟¹

(1. 兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 西安卫星测控中心厦门站, 福建 厦门 361023)

摘要:利用2007年1月至2008年12月CLOUDSAT和CALIPSO卫星主动遥感资料分析了我国西北3个典型区域不同云类型的宏观及微观的垂直结构特征。结果表明:黄土高原、祁连山和天山地区的年均总云分数分别为62.8%、65.2%和73.4%;3个区域的积状云在夏秋季节发展旺盛,而层状云在冬春季节占主导地位。云层垂直方向的概率密度分布具有显著的区域和季节变化特征,其峰值位于2~6 km之间。各个区域云液态水含量自云底向上有明显的递减趋势,夏季天山和祁连山地区低层具有丰富的云水资源,峰值分别达0.47 mg/m³、0.38 mg/m³。各个区域的云液态水含量峰值以冬季最小,夏季最大。对应的液态云有效粒子半径平均值位于8~16 μm之间。降水云的有效粒子半径随高度上升具有明显的递减趋势,而非降水云则存在较弱的增加趋势。这种云层垂直方向上的结构变化对降水有直接影响,是评估人工增雨潜力的重要依据。

关键词:人工增雨;主动卫星遥感;云分数;云水含量;有效粒子半径;垂直分布

中图分类号:P407.2

文献标识码:A

引言

西北地区占我国国土总面积的36%,达345万km²,涵盖内蒙古的中西部地区、新疆、青海、甘肃、宁夏和陕西以及黄河流域,是我国主要的干旱和半干旱区,同时也是全球干旱半干旱区域中人口密度最大的地区之一。该地区水资源总量仅占全国的5.84%,而年均蒸发量却是降水量的8~10倍^[1]。因此,水资源匮乏一直是制约社会发展,影响生态安全的重要因素。20世纪末以来,全球气候变暖幅度加大,黄建平、陈发虎等^[2-3]研究发现这种趋势在干旱半干旱地区尤为显著。因此,有效地开展人工影响天气作业,合理地实施人工增雨,开发利用空中水资源,补充地表水及地下水的严重不足,是缓解该地区水资源匮乏的重要途径。

国内外学者经过多年的实验与观测研究^[5-7],总结出人工增雨的基本原理就是对特定的自然云引入催化剂,影响云的微物理过程、热力及动力结构,

促进冰晶或大雨滴形成,使一些非降水的云产生降水,或使能降水的自然云提高降水效率从而增加降水量。但是在不同云系、地区、季节等条件下,人工增雨的潜力大不相同,所以研究自然云的物理特征(如:总云量、云层高度、水平及垂直伸展、云水含量、云粒子大小和相态的垂直分布等)是进行人工增雨工作的基础。我国学者对西北地区不同云系特征与降水的相关性做了大量研究,并得出一些重要结论,如吴伟^[8]等总结出我国北方低云的变化是影响降水的主要因素。陈少勇^[9-11]等发现祁连山地区在1月、5月、9~12月的层状云与降水关系最密切,3~5月及7月等强对流云的发生频次与月降水量大小有较好的正相关。郑国光、刘卫国^[12-13]等指出祁连山地区夏季地形的强迫抬升作用影响了积状云降水强度且改变了云水含量的结构特征。洪延超^[14]等人指明云水含量垂直结构的变化对人工增雨潜力也具有较大影响。刘奇俊^[15]等发现当人工增雨催化作业的高度不同时,增雨效果也不同,其原

收稿日期:2012-07-14;改回日期:2012-08-25

基金项目:国家重大科学研究计划(2012CB955301)、科技支撑计划(2009BAC51B04)、国家自然科学基金(41205015)及半干旱气候变化教育部重点实验室(兰州大学)开放基金共同资助。

作者简介:丁晓东(1987-),男,安徽怀宁县人,硕士研究生,研究方向为大气物理与大气遥感。E-mail:dingxd04@163.com

通讯作者:黄建平(1962-),男,福建漳平人,教授,主要从事气候变化和大气遥感的研究。E-mail:hjp@lzu.edu.cn

因是降水云层中不同相态(尤其是液态)粒子的垂直分布不同。这些研究很大程度上丰富了我国在云物理及人工增雨研究方面的内容,提高了我国在相关领域的研究水平,为我们进一步深入研究人工增雨条件的选取与云宏观、微物理特性及其垂直分布的关系奠定了良好基础。

目前,虽然地基观测技术发展迅猛,但是受到了观测站点覆盖范围限制,尤其是山区及无人区的观测非常匮乏。随着航天技术的发展,卫星遥感观测尤其是主动遥感技术已成为云及相关的天气与气候研究的重要手段。CLOUDSAT 卫星^[16]上的毫米波云廓线雷达(CPR)和 CALIPSO 卫星^[17]上的云—气溶胶正交偏振激光雷达(CALIOP),能够准确探测云层的内部垂直结构。相比地面常规观测和星载被动式遥感观测而言,这2种主动卫星的遥感在云系垂直结构特征监测方面具有独特优势。黄建平、罗亚丽、李积明、杨大生等^[18-25]先后利用 CLOUDSAT 和 CALIPSO 云观测数据做了大量相关研究,证明了卫星反演结果的可靠性。这些研究对深入了解和掌握我国空中水资源的时空分布特征和变化规律以及局部地区的增雨作业都有着重要意义。本文利用 CLOUDSAT 和 CALIPSO 主动卫星遥感数据对我国西北典型区域不同云类型的垂直分布、液态云水含量及有效粒子半径的特征做了相关研究,并探讨和分析了这些变化特征对人工增雨的可能影响,为我国西北地区人工增雨的相关研究提供必要的参考。

1 卫星遥感资料介绍

本文所使用的数据为 CLOUDSAT 云水含量产品 2B-CWC-RO 数据^[26]及其与 CALIPSO 结合的云产品分类 2B-CLDCLASS-LIDAR 数据^[27]。研究时间跨度为 2007~2008 年。CLOUDSAT 卫星和 CALIPSO 卫星同属美国宇航局 NASA 发射的 A-Train 卫星观测集群,具有相同的飞行轨道,轨道周期约 16 d,2 颗卫星扫描经过同一地点的时间相差仅 15 s 左右,因此对同一云系能够提供几乎同时的观测数据。这2种主动探测仪器的结合,能够更精确地判别云类型、探测云垂直廓线及其时空变化、识别云系降水的内部结构、反演液态水和冰水的含量以及云滴粒子尺度等^[28]。

2B-CLDCLASS-LIDAR 数据产品可以提供云层数、云顶高度、云底高度、云类型以及降水识别等参数。在云层识别方面,相比 MODIS 等被动遥感设

备,该数据集具有更高的精度和垂直分辨率。在云类型产品中,采用近似地面气象观测的云分类方法,其分类标准更加复杂^[29],该数据的优势在于能够同时识别 CLOUDSAT 无法探测的光学薄云 and CALIPSO 无法穿透的光学厚云及多层云的特征。另外 CLOUDSAT 的 2B-CWC-RO 产品能够提供云水含量数据,包括云液态水含量(简称 LWC)和云冰水含量(简称 IWC),以及对应的云滴液态有效粒子半径(简称 LRe)和云滴冰晶有效粒子半径(简称 IRe)的廓线信息,本文主要利用了其云液态水含量 LWC 和对应的云滴液态有效粒子半径 LRe 数据。所用的数据 CLOUDSAT 2B-CWC-RO 反演算法为最新的 Version 5.1 Release 4 版本^[30]。反演需要的先验信息主要包括根据不同云类型、地表状态、地理位置等来调整的先验参数。最终反演结果包含被反演量和反演结果的相关误差项。值得注意的是,本文中所指的高度如不加特殊说明均为相对于地表的高度,另外为了避免因近地面的杂波干扰所造成的误差,我们仅对地表 0.5 km 以上的数据进行分析^[24]。

2 区域划分

我国西北地区地域广阔,地形复杂多变,包含大型内陆盆地,以及延绵数千公里的大山脉。山区降水和冰雪融水是西北至关重要的水资源。有统计指出祁连山冰川融水占河西地区内陆河流流量的 63.7%,而冰川融水主要由山区降水供给^[4];新疆年降水量的 84% 来自山区,其中仅天山迎风坡地区就达 40%^[4]。可见,天山和祁连山是西北地区最丰富的天然水库,云水资源对周边地区的农业结构和生产力布局有着举足轻重的作用。同时,黄土高原地处亚洲季风影响的边缘区,是西北人口和工业最密集的地区,也是研究西北地区人类活动对气候影响的重要区域^[31-32]。本文参照陈勇航、陈乾等^[33-34]研究将我国西北干旱半干旱地区划分为 3 个典型区域,如图 1 所示,分别为黄土高原季风边缘区(A 区)、祁连山山脉地区(B 区)和天山山脉地区(C 区)。

3 不同子区域云系宏观特征

3.1 云类型及云分数特征

云分数和云类型,作为大气云辐射反馈中 2 个至关重要的因子,是云水资源丰富程度的指示剂,也是实施人工增雨中的重要参考因素。因此,本文将

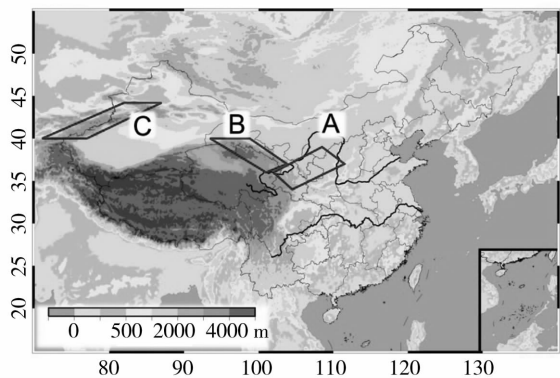


图1 中国西北典型区域的划分示意图
(A区代表黄土高原季风边缘区,B区代表祁连山地区,C区代表天山地区)

Fig. 1 Three typical regions in Northwestern China
(A for Loess Plateau, B for Qilian Mountain,
C for Tianshan Mountain)

从云分数开始探讨西北典型区域的云系整体特征。在本文的研究中,我们将云分数定义为:在一个给定的地球格点中,某类云的雷达廓线数与在该格点中总的采样雷达廓线数之间的比值^[35]:

$$P = \frac{N_{cloudy}}{N_{total}} \quad (1)$$

上式中 N_{cloudy} 为统计区域探测到含有某一类云的廓线数, N_{total} 为该区域总的采样廓线数。然而,云与地球辐射能量系统(CERES)将云量定义为给定CERES视场中有云的格点数与区域总格点数的比值。可以看出,本文获得的云分数与CERES云量具有相同的统计意义,因此下文对两者不再加以区分。值得注意的是,统计过程中对多层云中的每种云分别单独统计,因此各种云的云分数之和大于总云云分数。

首先利用2B-CLDCLASS-LIDAR数据分析了上述3个区域的年平均云分数。如表1所示,可以看出3个区域的云分数最大为天山,为73.4%,祁连山和黄土高原较为相似,分别为65.2%,62.8%。陈勇航等^[36]利用西北地区近20a的ISCCP D2数据获得云量多年平均值在50%~60%之间,而我们的研究表明,利用CLOUDSAT-CALIPSO结合观测的云分数同以上研究的区域分布趋势具有较好的一致性。但是本研究中云分数均偏大,这可能是结合激光雷达CALIPSO探测的云层精确度更高,它能探测到Modis等探测器所探测不到的光学薄云,且

主要以高的薄卷云为主^[37]。另外Wylie等^[38]利用22a HIRS数据研究指出全球总云分数保持在一个相对平稳的值,且大概在75%左右, Li等^[39]利用CLOUDSAT-CALIPSO结合观测数据发现了一致的结果。这也进一步验证了该数据集的可靠性。

众所周知,降水云系主要分为大范围气流抬升的层状云以及局地对流发展的积状云2类。已有研究表明^[40-41],西北地区降水年际变化与云水含量较大的层状云变化相一致,且夏季祁连山等山区主要降水与强对流的积状云关系密切。为此,本文将2B-CLDCLASS-LIDAR观测的8类云除去高云外,按层状云和积状云2大类分别加以分析。其中高层云、层云、雨层云归类为层状云,高积云、积云、层积云和深对流云归类为积状云。2类云的云分数年平均特征见表1。可以看出3个区域的2类云的年平均分布情况,祁连山层状云云分数最大为41.5%,其次天山、黄土高原分别为39.4%、34.9%;积状云云分数最大地区为天山(45.3%),其次为祁连山、黄土高原地区。

表1 西北典型区域云分数年均分布特征(单位:%)

Tab. 1 The annual mean cloud fraction over Northwestern China(Unit: %)

	总云分数	层状云	积状云
黄土高原	62.8	34.9	25.4
祁连山	65.2	41.5	33.2
天山	73.4	39.4	45.3

进一步分析该2类云的季节变化。如图2所示,黄土高原冬春2季以层状云为主,冬季最高为46.5%;夏秋季节以积状云为主,夏季最多为43%。祁连山云分数的季节变化趋势同黄土高原地区相似,但整体云分数偏大,层状云和积状云极值分别出现于春季56.2%和夏季47.5%。天山是3个区域中云分数最大的区域,积状云也较其他2个区域丰富,夏季的最大值可达54.6%,而层状云较祁连山略偏少,最大值出现在春季(48.5%)。整体而言,积状云和层状云在祁连山和天山地区偏多,且积状云季节变化比层状云显著。

3.2 云层的垂直分布特征

将整个区域的云层按相对高度划分为60层,每层0.25 km,统计云在每一高度层中出现频次和整层的出现总频次,然后计算各个高度层中云的发生概率。

图3为3个典型区域云垂直发生概率的季节变

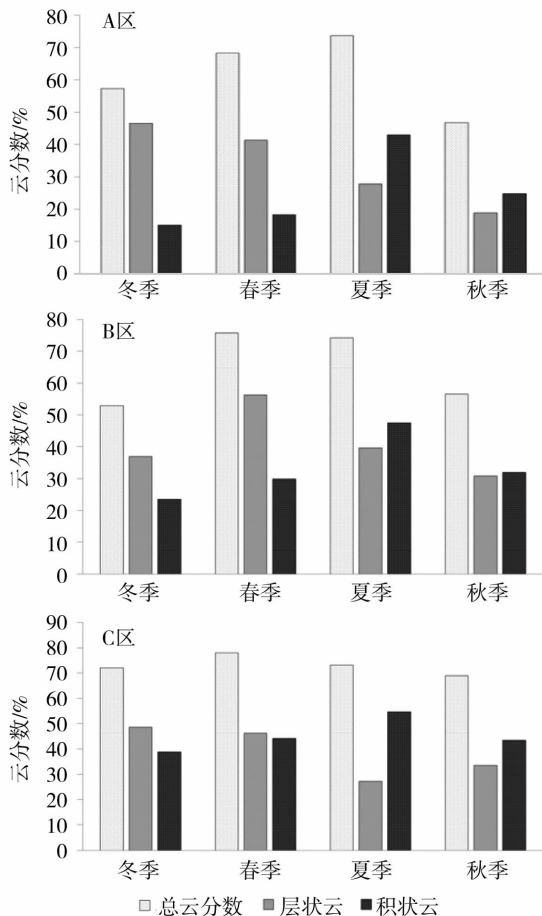


图2 西北典型区域云分数季节变化特征
(A区代表黄土高原季风边缘区,B区代表祁连山地区,C区代表天山地区)

Fig.2 Seasonal cloud fraction in three typical regions over Northwestern China (A for Loess Plateau, B for Qilian Mountain, C for Tianshan Mountain)

化特征。可以看出:祁连山和天山由于海拔较高,云层的发展相对高度较低,一般集中于1.5~6 km之间。2个区域云层发生概率峰值较为相似。相比之下,天山地区1 km和8~9 km处的云发生概率较祁连山地区稍大。黄土高原位于东亚季风的边缘地带,云系变化具有显著的季节特征,云层发生概率的峰值冬季位于7 km,而春季出现双峰结构,分别位于3.5 km和8 km,夏季的云层发生概率的分布较宽,峰值位于6 km,秋季最大值位于3 km左右。

因此我国西北地区,不同地区的云层垂直结构仍然具有很大的差异。另外进一步分析了层状云和积状云的垂直分布的季节变化特征,结果如图4所示。从积状云的云分数垂直分布特征中能看出,各个地区积状云均为单峰型结

构。祁连山和天山其积状云垂直结构较为相似。天山地区云层低层离地1 km处的云发生概率较祁连山地区稍微偏大,同时祁连山地区4~5 km处的分布峰值更加明显,说明在此高度层内云发生概率更大。此外,黄土高原积状云峰值区一般位于6 km左右,较祁连山和天山普遍偏高。这可能与黄土高原复杂的特殊下垫面类型和水汽来源有关。

另外,通过分析3个区域层状云垂直发生概率的季节变化特征(图5),发现祁连山层状云发生概率峰值一般位于1.5~2.5 km处,夏季稍高,冬季最低。天山地区同祁连山十分相似,但峰值高度略有偏低,季节变化同样不明显。层状云季节变化最显著的是黄土高原,在不同高度层中呈双峰甚至多峰结构特征,且普遍较祁连山和天山地区偏高,夏秋季节最为显著。此外还发现,黄土高原云层分布特征呈现宽峰型结构,尤其夏季峰值位于4~5 km之间且不明显,冬季集中于1.5 km处,春秋季介于冬夏之间。可知该地区层状云冬季以低层为主,而夏季中高层4 km以上的云层较多,约占整层发生概率的50%,春秋季节介于两者之间。总之,云层的垂直分布特征反映了局地空中云水资源的垂直结构,更有利于对人工增雨客观环境的认知。

4 不同子区域云系微物理特征

4.1 云液态水含量的垂直特征

云水含量是空中云水资源的直接反映。而云液态水含量是实施人工影响天气,特别是人工增雨过程中需要考虑的重要因子。洪延超^[42]等人研究指出云水含量和云厚度都较大时,有利于降水形成,也有利于催化增雨。因此,这些因子都是研究增雨潜力问题时需要考虑的要素,尤其是云水含量的垂直分布特征。陈少勇^[40-41]等人通过计算祁连山地区不同云类的出现频率与降水量的相关系数,发现西北地区降水年际变化与云水含量较大的层状云变化相一致,且夏季祁连山等山区主要降水与强对流的积状云关系密切。可见区分不同云类型的云水含量分布对研究西北地区人工增雨的可行性具有很明确的现实意义。对于云水含量探测方法也相对成熟^[43-44],本节将从层状云与积状云2方面分别讨论西北典型地区的云液态水含量的垂直分布特征。

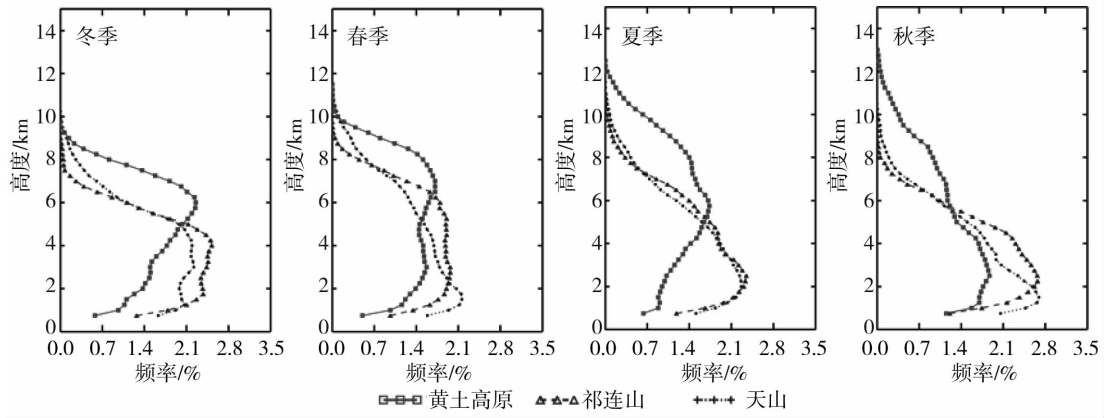


图3 西北典型区域云垂直发生概率的季节变化

Fig. 3 Seasonal probability distribution in three typical regions over Northwestern China

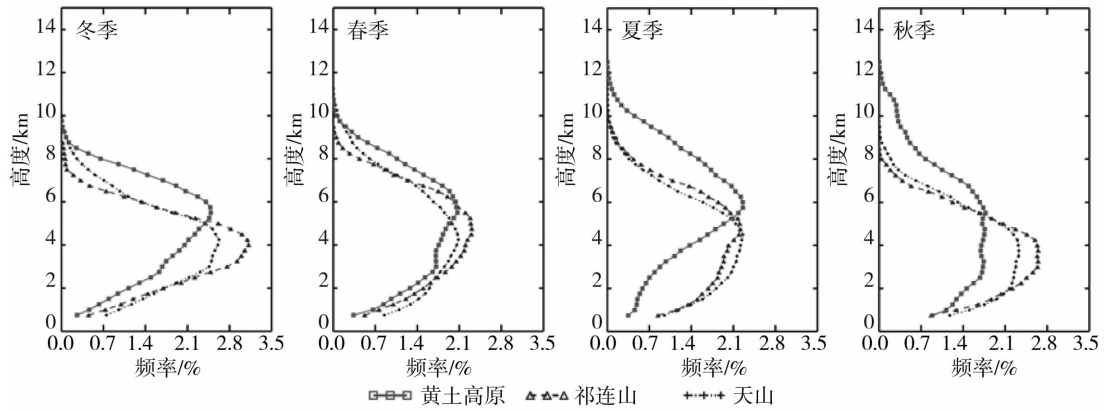


图4 西北典型区域积状云垂直发生概率的季节变化

Fig. 4 Seasonal probability distribution of cumulus clouds in three typical regions over Northwest China

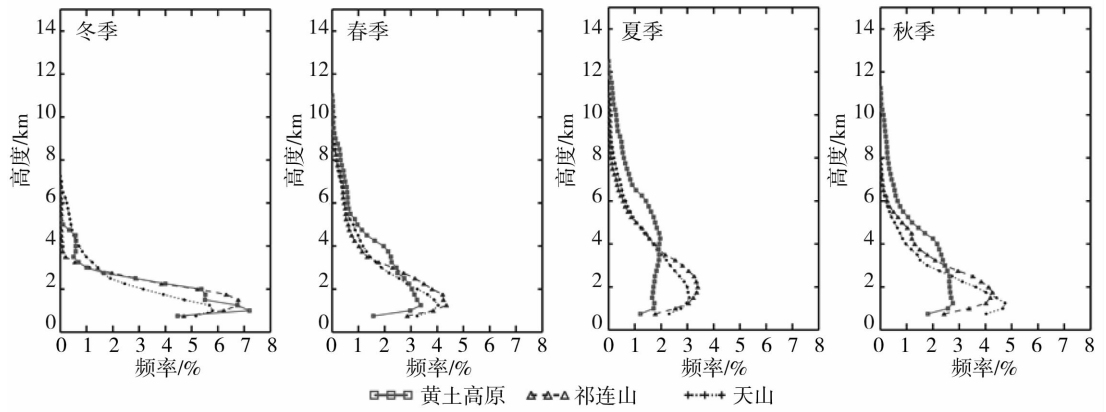


图5 西北典型区域层状云垂直发生概率的季节变化

Fig. 5 Seasonal probability distribution of stratiform clouds in three typical regions over Northwest China

图6是3个区域总云液态水含量(LWC)在垂直方向上的季节分布特征。仍然按照上述的统计方法将整个区域的云层数据按相对高度每0.25 km划分一层,在0~15 km范围内里共分60层。随后统计每一高度层中云液态水含量平均值及对应的置信度(99%)区间。杨大生等^[24]研究表明中国地区云液态水含量最大高度可达9 km。本文研究发现西北地区云液态水含量的分布相对地表高度最高不超过7.5 km,故图6中高度区间仅显示0~8 km有数据的区间,下同。根据Heggli和Rauber^[45]对塞拉合作试验计划(SCPP)的微波辐射仪测量资料的气候分析认为,云中液水含量主要集中于山区云层的底层1~2 km。而从图中可以发现各区域云液态水含量在低层2.5 km以下都较为丰富,平均值均 $>0.1 \text{ mg/m}^3$,最大值为夏季低层的天山地区,平均值达到 0.47 mg/m^3 。各个区域的云液态水含量具有较明

显的季节变化,冬季最小,夏秋较大。一个显著的特征是,3个区域的液态云水含量均随高度增加有递减的趋势,然而递减趋势从祁连山、天山、黄土高原依次减弱。尤其是夏季黄土高原1~4 km处,其云液态水含量平均值维持在 0.18 mg/m^3 左右不变。值得注意的是,天山地区云液态水含量呈双峰型分布,底层1 km处最大,较弱的第二个峰值位于3~5.5 km处,且具有随季节变动趋势。本结果与杨大生等^[24]研究结论相一致。但是除天山地区外,第二峰值在其它2个地区并不明显。

通过分析层状云的云液态水含量,如图7所示各个区域的云液态水含量季节变化差异较大,其中夏季祁连山地区峰值达 0.33 mg/m^3 ,天山地区和黄土高原次之,春秋季节天山和祁连山地区液态云水含量迅速减少,但黄土高原地区并不显著。值得注意的是,祁连山由于平均海拔高度较高,冬季液态层状云较少。

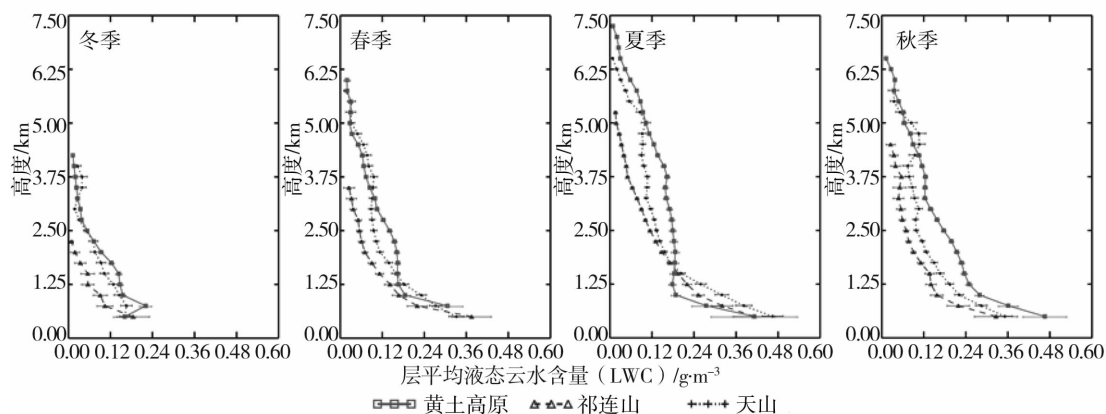


图6 西北典型区域云液态水含量的季节变化

Fig. 6 Seasonal distribution of LWC in three typical regions over Northwestern China

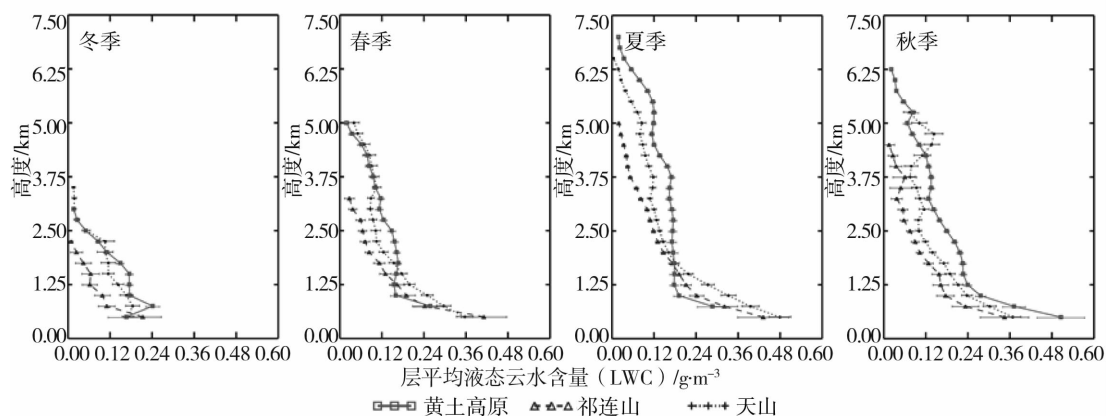


图7 西北典型区域层状云云液态水含量的垂直分布

Fig. 7 Seasonal distribution of LWC of cumulous clouds in three typical regions over Northwest China

同上,3个区域积状云的云液态水含量季节变化(图8)与总云的变化特征基本一致,此处不做赘述。以上研究发现西北3个典型区域云液态水含量的垂直分布具有较显著特征。积状云的云液态水含量同总云液态水含量分布特征相似,层状云的云液态水含量季节变化显著。陈勇航等^[49]利用 ISCCP

数据统计西北地区各类云的云量与降水的发生关系时指出云水路径较大的云层分布同降水有较大相关性。由此可以看出除冬季外,黄土高原、祁连山和天山地区低层云水含量较大,具有一定的人工增雨的潜力。这也与陈添宇等^[47]利用 GMS5 被动卫星研究的结论相一致。

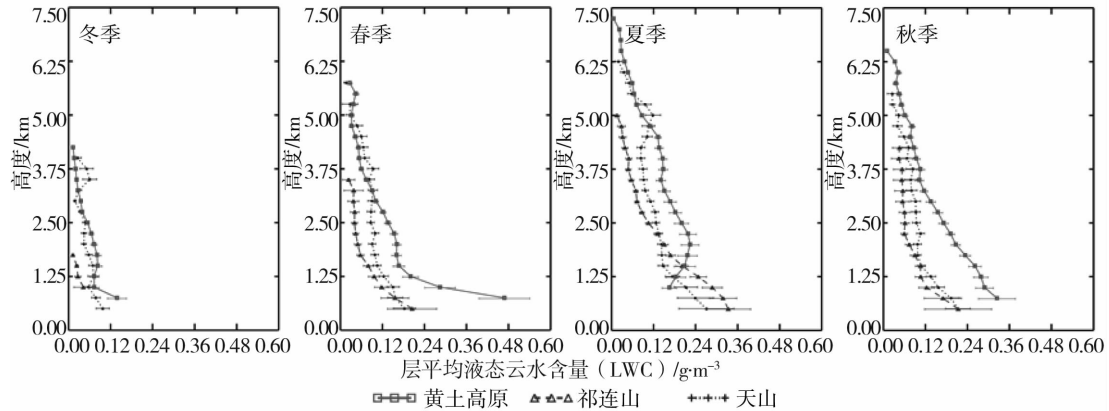


图8 西北典型区域积状云云液态水含量的垂直分布
Fig. 8 Seasonal distribution of LWC of stratiform clouds in three typical regions over Northwest China

4.2 液态云有效粒子半径的垂直分布

已有研究表明^[48-49],对于云顶有效粒子半径达到 $14 \mu\text{m}$ 的云层就有可能产生降水。云有效粒子半径的垂直分布特征更能反映云层在发展过程中的状态。对于发展中的云,主要以云层内部抬升,粒子以凝结增长机制为主,粒子增长速度缓慢,粒子半径自云底而上呈增加趋势;而在产生降水的云层中,上层的较大的云滴、雨滴所受重力大于浮力时开始下降,在下降过程中不断同底层较小的云滴粒子碰并增长,高度越低碰并吸收越强烈,粒子增长越大,从而粒子大小自云顶而下呈递增趋势。

云层中云滴粒子半径垂直分布的差异性对降水的影响也是显著的,同时也是判断实施人工增雨潜力的重要标准之一^[15,42]。因此本文也试探性地对西北典型区域云层有效粒子半径的垂直分布进行初步分析。所用方法同上,对每层的有效粒子半径求平均,获得垂直方向上的分布趋势。如图9所示,祁连山和天山云层的有效粒子半径 Re 平均值在近地面最大可达 $15 \mu\text{m}$,随高度增加具有显著的递减趋势。这种递减趋势在 $3 \sim 4 \text{ km}$ 处趋于平稳并维持在 $10 \sim 11 \mu\text{m}$ 左右,且季节变化不显著。有效粒子半径随高度分布的不同,反映了不同地区云层的垂直

结构差异。值得一提的是,夏季黄土高原地区非降水云低层的平均有效粒子半径明显小于天山和祁连山地区,同时较其它季节偏小。

此外,从图10液态非降水云的云有效粒子半径变化趋势可以看出在底层云滴粒子随高度具有微弱的增长趋势。这说明非降水云中,由于受不同地表热力状况以及其他因素影响,其有效粒子半径随高度增长有一定差异,但整体还是以抬升凝结增长为主。图11为降水云的有效粒子半径的垂直分布特征,可以看出在低层云滴粒子随高度增高具有显著减少趋势。这充分说明低层云滴的下降碰并增长的特征显著。但是在中高层(4 km 以上)这种趋势相反出现增加趋势。本文对这些数据进行研究发现,由于 CLOUDSAT 对云层温度的判断精度不高,对于较高云层而言,容易将粒子半径较大的冰晶误判为液态云滴而造成误差。因此对于中高层云滴随高度增加的趋势有待进一步验证。然而李国昌等^[50]利用飞机观测实验研究甘肃及周边地区的层状云宏观特征时指出 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 层高度一般为 4 km 左右,其结论与本文推断相一致。但是对于较低云层数据的判断精度仍然较高,因此研究结论是较为可信的。

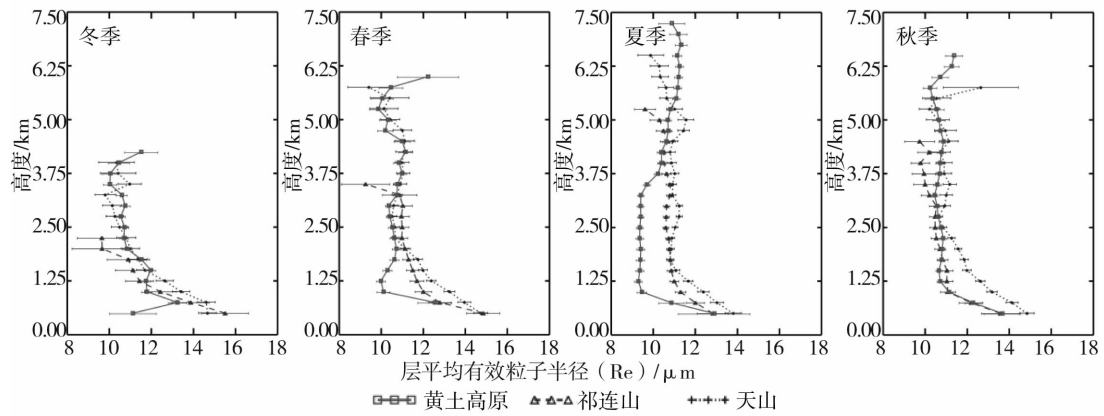


图9 西北典型区域液态云有效粒子半径的垂直分布
 Fig.9 Vertical distribution of liquid water effective radius
 in three typical regions over Northwestern China

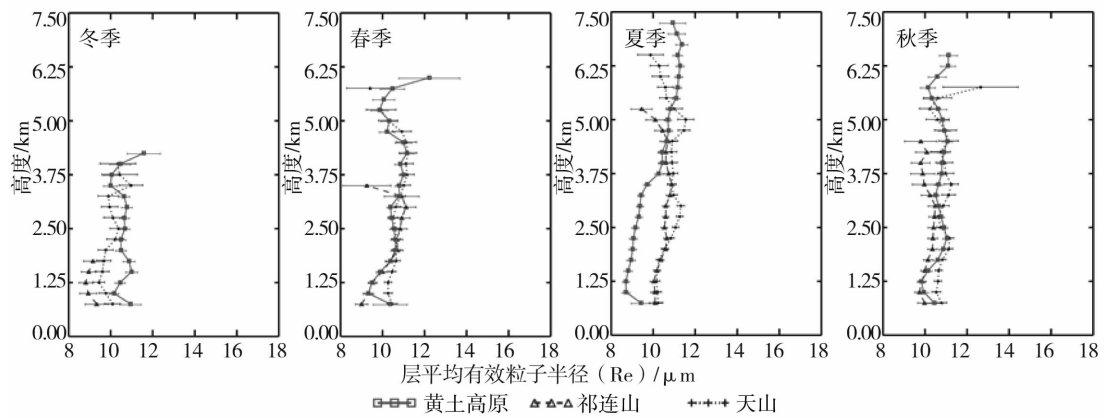


图10 西北典型区域液态非降水云有效粒子半径的垂直分布
 Fig.10 Vertical distribution of liquid water effective radius of
 non - precipitation cumulus clouds in three typical regions over Northwest China

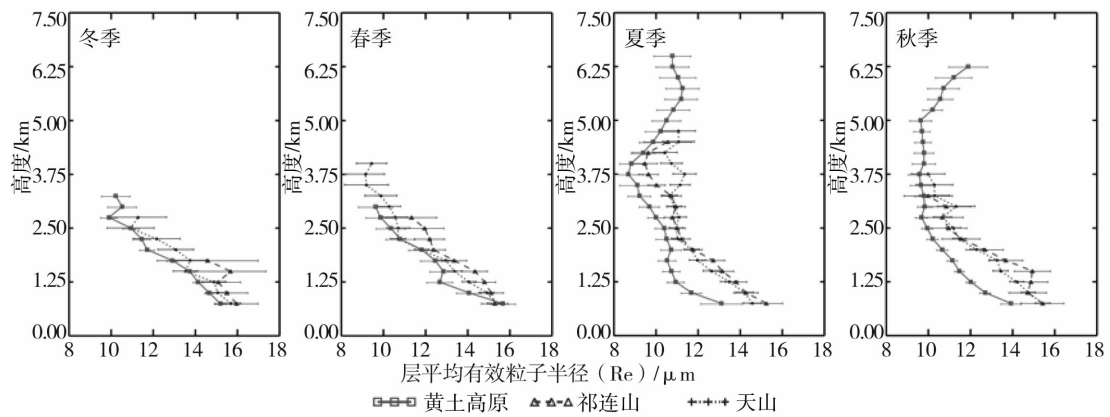


图11 西北典型区域液态降水云有效粒子半径的垂直分布
 Fig.11 Vertical distribution of liquid water effective radius of
 precipitation stratiform clouds in three typical regions over Northwest China

5 结 论

(1)西北3个区域的云分数,天山地区最大为73.4%,祁连山和黄土高原较为相似,分别为65.2%,62.8%。季节变化上,祁连山和黄土高原地区总云分数夏季最大,但天山地区春季最大。层状云冬春季较多,积状云夏季占主导地位,且积状云季节变化较层状云显著。

(2)祁连山和天山由于海拔较高,云层的发展相对高度较低且一般集中于1.5~6 km之间,黄土高原地区云层能延伸到9~12 km。其中层状云多集中于3 km以下,且季节变化不明显;积状云在3~8 km内出现较为频繁。各个区域的云液态水含量具有较显著的季节变化,冬季最小,夏季最大。云液态水含量随相对高度增加有显著的递减趋势,峰值一般位于近地层,最大值为夏季低层的天山地区,平均值达0.47 mg/m³。可知除冬季外,3个地区低层云水含量较大,均有一定的人工增雨的潜力。

(3)从观测上验证了液态降水云和非降水云有效粒子半径垂直结构的差异性:降水云有效粒子半径在低层随高度具有显著的递减趋势;非降水云则存在较弱的上升趋势。同时,在中高层降水云有效粒子随高度的增加而有增长的趋势,这可能由于受冰晶粒子污染所致。

人工增雨潜力与云系的宏观及微物理垂直结构有关,也与降水形成的物理过程有关,因此需要综合利用各类物理参数和物理过程才能系统地研究哪些云参量与西北典型区域降水量的相关性。目前鉴于卫星数据对云层内部气象要素及云相态的垂直结构数据较缺乏,有关降水效率和人工增雨潜力的研究主要限于定性的结论,利用实际观测验证这些结论甚至将增雨潜力的评估定量化,将是未来的主要研究工作之一。

致谢:感谢NASA提供宝贵的CLOUDSAT和CALIPSO数据。感谢国家重大科学研究计划(2012CB955301)和科技支撑计划(2009BAC51B04)资助。

参考文献:

- [1] 陈亚宁,杨青,罗毅,等.西北干旱区水资源问题研究思考[J].干旱区地理,2012(1):5-13.
- [2] 王劲松,陈发虎,张强,等.亚洲中部干旱半干旱区近100年来的气温变化研究[J].高原气象,2008(5):1035-1045.
- [3] Huang J, Guan X, Ji F. Enhanced cold-season warming in semi-arid regions[J]. Atmos Chem Phys, 2012,12(12):5391-5398.
- [4] 李泽椿,周毓荃,李庆祥,等.人工增雨是缓和干旱半干旱地区水资源匮乏的一个补充途径[J].新疆气象,2006(1):5-10.
- [5] Bruintjes RT. A review of cloud seeding experiments to enhance precipitation and some new prospects[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999,5:805-820.
- [6] Cotton W R. Weather Modification by Cloud Seeding - A Status Report 1989-1997[J]. Website of Department of, 2008.
- [7] Garstang M, Bruintjes R, Serafin R, et al. WEATHER MODIFICATION[J]. 2005.
- [8] 吴伟,王式功.中国北方云量变化趋势及其与区域气候的关系[J].高原气象,2011(3):651-658.
- [9] 陈少勇,董安祥,陈添宇,等.祁连山总云量变化及其与气候变暖的关系[J].干旱区研究,2007(1):98-102.
- [10] 陈少勇,董安祥,陈添宇,等.祁连山低云量对气候变暖的响应[J].干旱区资源与环境,2007(2):142-145.
- [11] 陈少勇,董安祥,王丽萍.中国西北地区总云量的气候变化特征[J].成都信息工程学院学报,2006,(3):423-428.
- [12] 刘卫国,刘奇俊.祁连山夏季地形云结构和云微物理过程的模拟研究(II):云微物理过程和地形影响[J].高原气象,2007(1):16-29.
- [13] 刘卫国,刘奇俊.祁连山夏季地形云结构和云微物理过程的模拟研究(I):模式云物理方案和地形云结构[J].高原气象,2007,(1):3-17.
- [14] 洪延超,李宏宇.一次锋面层状云云系结构、降水机制及人工增雨条件研究[J].高原气象,2011(5):1308-1323.
- [15] 陈小敏,刘奇俊,章建成.祁连山云系云微物理结构和人工增雨催化个例模拟研究[J].气象,2007(7):33-43.
- [16] Stephens G L, Vane D G, Boain R J, et al. The CloudSat mission and the A-Train[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002,12:1771-1790.
- [17] Winker D M, Pelon J R, McCormick M P. The CALIPSO mission: Spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds[J]. Proceedings of SPIE, 2003:1.
- [18] 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(4):698-707.
- [19] 李积明.结合主动和被动卫星遥感资料研究云的垂直分布特征[D].兰州大学,2011.
- [20] Luo Y, Zhang R, Wang H. Comparing Occurrences and Vertical Structures of Hydrometeors between Eastern China and the Indian Monsoon Region Using CloudSat/CALIPSO Data[J]. Journal of Climate, 2009, 4:1052-1064.
- [21] 尚博,周毓荃,刘建朝,等.基于Cloudsat的降水云和非降水云垂直特征[J].应用气象学报,2012(1):3-11.
- [22] 王帅辉,韩志刚,姚志刚,等.基于CloudSat资料的中国及周边地区云垂直结构统计分析[J].高原气象,2011(1):38-52.
- [23] 汪会,罗亚丽,张人禾.用CloudSat/CALIPSO资料分析亚洲季风区和青藏高原地区云的季节变化特征[J].大气科学,2011(6):127-141.
- [24] 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(1):91-103.
- [25] 黄建平,何敏,阎虹如,等.利用地基微波辐射计反演兰州地区液态云水路径和可降水量的初步研究[J].大气科学,2010(3):548-558.
- [26] Stephens G L, Vane D G, Tanelli S, et al. CloudSat mission: Performance and early science after the first year of operation[J]. J Geophys Res, 2008, C5:D00.

- [27] Winker D M, Hunt W H, McGill M J. Initial performance assessment of CALIOP [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 19: L19803.
- [28] 周毓荃, 赵妹慧. CloudSat 卫星及其在天气和云观测分析中的应用[J]. *南京气象学院学报*, 2008(5): 603-614.
- [29] Wang Z, Stephens G L, Vane D G, et al. Level 2 Combined Radar and Lidar Cloud Scenario Classification Product Process Description and Interface Control Document [M]. Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2011.
- [30] Austin R T, Stephens G L. Retrieval of stratus cloud microphysical parameters using millimeter-wave radar and visible optical depth in preparation for CloudSat 1. Algorithm formulation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, D22: 28,233-28,242.
- [31] Huang J, Zhang W, Zuo J, et al. An overview of the semi-arid climate and environment research observatory over the Loess Plateau [J]. *Advances in atmospheric sciences*, 2008, 6: 906-921.
- [32] Jing X, Huang J, Wang G, et al. The effects of clouds and aerosols on net ecosystem CO₂ exchange over semi-arid Loess Plateau of Northwest China [J]. *Atmos Chem Phys*, 2010: 8205-8218.
- [33] 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[J]. *高原气象*, 2005(6): 905-912.
- [34] 陈乾, 陈添宇, 张鸿. 用 Aqua/CERES 反演的云参量估算西北区降水效率率和人工增雨潜力[J]. *干旱气象*, 2006, 24(4): 1-8.
- [35] Hagihara Y, Okamoto H, Yoshida R. Development of a combined CloudSat-CALIPSO cloud mask to show global cloud distribution [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, null: D00H33.
- [36] 陈勇航, 陈艳, 黄建平, 等. 中国西北地区云的分布及其变化趋势[J]. *高原气象*, 2007(4): 741-748.
- [37] Sun W, Videen G, Kato S, et al. A study of subvisual clouds and their radiation effect with a synergy of CERES, MODIS, CALIPSO, and AIRS data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, D22: D22207.
- [38] Wylie D, Jackson D L, Menzel W P, et al. Trends in global cloud cover in two decades of HIRS observations [J]. *Journal of climate*, 2005(15): 3021-3031.
- [39] Li J, Yi Y, Minnis P, et al. Radiative effect differences between multi-layered and single-layer clouds derived from CERES, CALIPSO, and CloudSat data [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011, 2: 361-375.
- [40] 陈少勇, 石光普, 董安祥, 等. 祁连山层状云的时空分布及其环流特征分析[J]. *中国沙漠*, 2010(4): 946-953.
- [41] 陈少勇, 徐科展, 董安祥, 等. 祁连山积雨云的时空分布及其环流特征[J]. *干旱区研究*, 2010(1): 114-120.
- [42] 洪延超, 周非非. 层状云系人工增雨潜力评估研究[J]. *大气科学*, 2006(5): 187-200.
- [43] Huang J, Minnis P, Lin B, et al. Determination of ice water path in ice-over-water cloud systems using combined MODIS and AMSR-E measurements [J]. *Geophys Res Lett*, 2006: L21801.
- [44] 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 [J]. *Geophys Res Lett*, 2006: L19802.
- [45] Heggli M F, Rauber R M. The characteristics and evolution of supercooled water in wintertime storms over the Sierra Nevada: A summary of microwave radiometric measurements taken during the Sierra Cooperative Pilot Project [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1988: 989-1015.
- [46] 陈勇航, 黄建平, 王天河, 等. 西北地区不同类型云的时空分布及其与降水的关系[J]. *应用气象学报*, 2005(6): 717-727.
- [47] 陈添宇, 李照荣, 陈乾, 等. 用 GMS5 卫星反演水汽场分析中国西北地区大气水汽分布的气候特征[J]. *大气科学*, 2005(6): 22-29.
- [48] Rosenfeld D, Lensky I M. Satellite-based insights into precipitation formation processes in continental and maritime convective clouds [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 11: 2457-2476.
- [49] Rosenfeld D, Gutman G. Retrieving microphysical properties near the tops of potential rain clouds by multispectral analysis of AVHRR data [J]. *Atmospheric research*, 1994, 1: 259-283.
- [50] 李国昌. 甘肃省层状云宏微观结构及降水特征的观测分析[D]. 南京信息工程大学, 2006.

Study on Cloud Vertical Structure Feature over Northwest China Based on Active Satellite Remote Sensing and Its Influence on Precipitation Enhancement

DING Xiaodong^{1,2}, HUANG Jianping¹, LI Jiming¹, WANG Tianhe¹, HUANG Zhongwei¹

(1. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
2 Xi'an Satellite Control Center, Xiamen Stations, Xiamen 361023, China)

Abstract: The CLOUDSAT and CALIPSO active satellite remote sensing data from January 2007 to December 2008 are used to analyze macro and micro vertical structure characteristics of the different cloud types over three typical regions (the Loess Plateau, the Qilian Mountain region and Tishan Mountain region) in Northwest China. The results show that the total cloud fraction in the Loess Plateau, the Qilian and the Tianshan Mountain region was 62.8%, 65.2% and 73.4%, respectively. Over these regions cumulonimbus clouds are more in summer but stratiform clouds are more in winter. And the cloud vertical probability density distribution presented obvious regional and seasonal characteristics, and the peak region appeared at 2-6 km. The cloud liquid water content showed significant seasonal variations and decreasing trend with altitude, and the maximum value is 0.47 mg/m³ in summer in Tianshan Mountain region and 0.38 mg/m³ in the Qilian Mountain region. The average effective particle radius of liquid cloud is 8-16 μm. With altitude increasing, the effective particle radius presented a significant decreasing trend for precipitation clouds, while a weak increasing trend for non-precipitation clouds.

Key words: precipitation enhancement; active satellite remote sensing; cloud fraction; cloud water content; cloud effective particle radius; vertical distribution