

Vertical Distribution of Ice Particle Property in Sheet Cloud over Xinjiang

Shijian Ma¹, Xu Wang^{1*}, Yu Ma², Ren Cai³

¹Xinjiang Weather Modification Office, Urumqi Xinjiang

²Climatic Center of Xingjiang, Urumqi Xinjiang

³Urumqi Meteorological Bureau, Urumqi Xinjiang

Email: *wangxu2323@vip.163.com

Received: Dec. 3rd, 2016; accepted: Dec. 18th, 2016; published: Dec. 23rd, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Sheet cloud is the main precipitation cloud system and the main target of artificially enhancing precipitation in Xinjiang. By use of the data from 2009 to 2010 of cloud classification product, ice particles equivalent radius (IER), ice particle number concentration (INC) and ice water content (IWC) obtained from CloudSat satellite, 2B-CLDCLASS dataset and 2B-CWC-RVOD dataset, meanwhile the analysis for seasonal change of sheet cloud in Xinjiang, it shows that the thickness of sheet cloud (7 km) in winter is thinner than that (10 km) in other seasons in Xinjiang. The occurrence frequency of low IER (0 - 50 μm), moderate IER (50 - 80 μm) and high IER ($\geq 80\mu\text{m}$) are respectively 18.0%, 72.9% and 9.2%; that of low INC (0 - 50 L^{-1}), moderate INC (50 - 100 L^{-1}) and high INC ($\geq 100 \text{L}^{-1}$) are respectively 85.7%, 12.7% and 1.5%; and that of low IWC (0 - 50 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$), moderate IWC (50 - 100 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) and high IWC ($\geq 100 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) are respectively 92.4%, 6.5% and 1.3%. The occurrence frequency of low and moderate value section of IER, INC and IWC shows single-peak distribution in vertical height, and is much higher in the middle of the cloud.

Keywords

Cloudsat, Sheet Cloud, Microphysical Property, Vertical Distribution, Seasonal Change

新疆层状云冰粒子属性的垂直分布特征

马士剑¹, 王旭^{1*}, 马禹², 蔡仁³

作者简介: 马士剑(1973-), 男, 安徽淮南人, 主要从事人工影响天气方面的研究。

*通讯作者。

文章引用: 马士剑, 王旭, 马禹, 蔡仁. 新疆层状云冰粒子属性的垂直分布特征[J]. 水资源研究, 2016, 5(6): 583-591.
<http://dx.doi.org/10.12677/jwrr.2016.56067>

¹新疆维吾尔自治区人工影响天气办公室, 新疆 乌鲁木齐

²新疆维吾尔自治区气候中心, 新疆 乌鲁木齐

³乌鲁木齐市气象局, 新疆 乌鲁木齐

Email: *wangxu2323@vip.163.com

收稿日期: 2016年12月3日; 录用日期: 2016年12月18日; 发布日期: 2016年12月23日

摘要

层状云是新疆主要的降水云系, 是开展人工增水作业的主要对象。利用2009~2010年CloudSat卫星2B-CLDCLASS和2B-CWC-RVOD数据集提供的云分类产品和冰粒子等效半径(IER)、冰粒子数浓度(INC)、冰水含量(IWC)三种微物理量, 对新疆层状云季节变化的分析表明, 层状云冬季云层厚度较薄为7 km, 其他季节云层较厚为10 km。IER低(0~50 μm)、中(50~80 μm)、高($\geq 80 \mu\text{m}$)三种值段年出现频率分别为18.0%、72.9%、9.2%, INC低(0~50 L^{-1})、中(50~100 L^{-1})、高($\geq 100 \text{L}^{-1}$)三种值段年出现频率分别为85.7%、12.7%、1.5%, IWC低(0~50 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)、中(50~100 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)、高($\geq 100 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)三种值段年出现频率分别为92.4%、6.5%、1.3%。在垂直高度上三种微物理量低、中值段出现频率随高度呈单峰分布, 在云层中部出现较多。

关键词

CloudSat, 层状云, 微物理属性, 垂直分布, 季节变化

1. 引言

新疆深处欧亚大陆腹地, 远离海洋, 是水资源匮乏的干旱半干旱地区, 水资源的短缺严重制约着社会和经济的发展[1] [2] [3]。通过人工增水开发空中云水资源是缓解水资源短缺的一种有效途径。王旭等对2009年~2010年新疆的人工增水作业进行评估后发现, 与1981年~2008年相比, 在人工增水作业影响区域, 天山山区、天山以北地区、天山以南地区的年平均降水量分别增加了4%、9%和8% [4]。层状云是我国北方地区的主要云类, 云水路径值较大的层状云的云量多寡与降水多寡相一致[5], 层状云单独出现时常伴随间歇性或连续性降水[6]。因此层状云是缓解我国北方干旱, 开展人工增水作业的主要对象。

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。2006年4月CloudSat卫星发射成功, 其唯一有效载荷仪器94GHz的云剖面雷达(CPR)于2006年6月开始运转, 它能够测量云的垂直剖面特征, 实现了云高、云厚、云顶类型等宏观物理属性以及云粒子云滴数浓度、液态水路径等微观物理属性垂直分布的探测, 相比地面常规观测和星载被动式遥感观测而言, 这种主动式卫星遥感在云系垂直结构特征监测方面取得了历史性的突破。

利用CloudSat卫星资料对云层进行科学研究, 在国内外已有一些成果, 如邓军英等采用CloudSat卫星云廓线雷达反演资料对新疆天山及其附近地区云中冰粒子等效半径的垂直分布特征及其与地面降水量的相关性进行了分析[7], 常倬林等利用CERES/Terra资料分析宁夏空中云水资源分布特征[8], 王胜杰[9]等利用CloudSat卫星的回波信息分析了青藏高原云的高度和厚度, 杨大生[10]等利用CloudSat卫星数据分析了我国夏季云水含量的垂直分布, 赵姝慧[11]等利用CloudSat卫星资料分析了冰云粒子的垂直结构, 彭杰[12]等利用CloudSat和CALIPSO卫星资料分析发现东亚地区云垂直分布具有明显的季节变化。Haynes [13] [14]等利用CloudSat卫星数据研究了全球热带海洋区域的云, 讨论了产生降水的云模式及降水效率的地区差异。Luo [15]等利用CloudSat资料对比分析了东亚地区和印度季风区, 云垂直结构及其季节变化特征。Wu [16]等通过对比CloudSat、MLS

和 MODIS、ECMWF、AMSU-B 等数据集, 分析了冰云物理量的全球分布情况。这些研究证明了卫星反演结果的可靠性, 对深入了解和掌握我国空中水资源的时空分布和变化规律以及局部地区的增雨作业有着重要意义。因而, 本文采用 CloudSat 卫星资料, 分析新疆地区四季层状云(层云与层积云)冰粒子等效半径、数浓度、含水量等微物理属性的垂直分布规律, 以期降水预报和实际播云作业提供参考依据。

2. 资料与方法

CloudSat 卫星可以测量云的垂直剖面特征, 包括云顶和云底高度、云层厚度, 观察云层的形成和演变过程, 确定云对气候环境的影响程度; 还可以反演得到云水含量等剖面图以及云的光学特征[17]。CloudSat 卫星 2B-CLDCLASS 产品提供云分类信息, 2B-CWC-RVOD 产品[18]能够提供云水含量数据, 包括云液态水含量(LWC)、云冰水含量(IWC), 以及对应的云滴液态有效粒子半径(LRE)和云滴冰晶有效粒子半径(IRE)的廓线信息。在对冰相云的反演中, 当滴谱分布符合对数正态分布时, 根据滴谱分布可反演得到含水量、等效半径、粒子数浓度等微物理属性参量。

本文采用 CloudSat 卫星资料 2B-CLDCLASS 和 2B-CWC-RVOD 数据集, 对 2009~2010 年春、夏、秋、冬四个季节层状云(层云和层积云)微物理属性的垂直分布特征进行分析。在对卫星数据进行处理的过程中, 首先根据各季节的分布特征, 将冰粒子等效半径、冰粒子数浓度、冰水含量分别划分为低、中、高三种值段。冰粒子等效半径的三种值段范围分别为小于 50 μm 、50~80 μm 、大于等于 80 μm , 冰粒子数浓度的三种值段范围是小于 50 L^{-1} 、50~100 L^{-1} 、大于等于 100 L^{-1} , 冰水含量的三种值段范围是小于 50 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、50~100 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、大于等于 100 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。然后统计各值段在四个季节中的百分比, 最后分析得出四个季节中各值段在垂直高度上的分布情况。

3. 结果与分析

3.1. 冰粒子等效半径的季节变化

层状云冰粒子等效半径(IER)的最小值出现在春季为 1.3 μm , 其他季节 33~36 μm ; 最大值出现在冬季为 145.9 μm , 其他季节 123~130 μm ; 最大、最小值的跨度春季最大, 相差 128 μm (见表 1)。四季层状云 IER 的平均值为 60~64 μm , 夏季大冬季小; IER 低值段(0~50 μm)平均为 43~45 μm , 冬季大春季小; IER 中值段(50~80 μm)平均为 61~65 μm , 夏季大冬季小; IER 高值段($\geq 80 \mu\text{m}$)平均为 87~92 μm , 秋季大夏季小。IER 低、中、高三种值段的年平均值分别为 43.7、63.1、88.3 μm 。

表 2 给出不同值段 IER 出现频率的季节变化情况。从表 2 可以看出, 层状云主要出现在春季和夏季, 冬季出现较少。层状云 IER 中值段出现频率各季最多, 为 11%~24%; 低值段出现频率次之, 为 3%~7%; 高值段出现频率最少, 少于 3%。一年内层状云 IER 低、中、高值段出现频率分别为 18.0%、72.9%、9.2%。

图 1 给出 IER 三种值段出现频率随高度的变化情况。图中纵坐标标值 1 表示云层厚度 1~2 km, 标值 2 表示云层厚度 2~3 km, 其余依次类推。图 2、图 3 情况类似。

春季 IER 低值段、中值段分布在云层(1~11 km), 高值段分布在云层下部和中部(1~8 km); IER 低值段在云层中部(4~7 km)出现较多, 中值段在云层中部(4~6 km)出现较多, 高值段在云层中部(4~5 km)出现较多。

夏季 IER 低值段、中值段分布在云层(2~10 km), 高值段分布在云层下部和中部(2~8 km); IER 低值段在云层中部(6~7 km)出现较多, 中值段在云层中部(5~7 km)出现较多, 高值段在云层中部(5~6 km)出现较多。

秋季 IER 低值段、中值段分布在云层(1~10 km), 高值段分布在云层下部和中部(1~7 km); IER 低值段在云层中部(6~7 km)出现较多, 中值段在云层中部(4~6 km)出现较多, 高值段在云层中部(4~5 km)出现较多。

冬季 IER 低值段、中值段分布在云层(1~8 km), 高值段分布在云层下部(1~4 km); IER 低值段在云层中部(4~6 km)出现较多, 中值段在云层中部(3~5 km)出现较多, 高值段在云层下部(2~3 km)出现较多。

Table 1. Seasonal change of ice particle effective radius (unit: μm)
表 1. 冰粒子等效半径的季节变化(单位: μm)

	最小值	最大值	平均	0~50 μm	50~80 μm	$\geq 80 \mu\text{m}$
春	1.3	129.8	61.2	42.7	63.3	87.2
夏	33.1	123.4	63.7	43.3	64.9	86.9
秋	33.8	122.6	62.8	44.4	63.0	91.7
冬	36.3	145.9	60.1	44.5	61.3	87.4
平均	26.1	130.4	62.0	43.7	63.1	88.3

Table 2. Frequency of ice particle effective radius within variational radius range in season (unit: %)
表 2. 不同尺度冰粒子等效半径出现频率的季节变化(单位: %)

	0~50 μm	50~80 μm	$\geq 80 \mu\text{m}$	合计
春	6.6	23.1	2.7	32.4
夏	4.7	23.6	3.0	31.3
秋	3.6	15.5	2.2	21.3
冬	3.1	10.7	1.3	15.1
合计	18.0	72.9	9.2	100

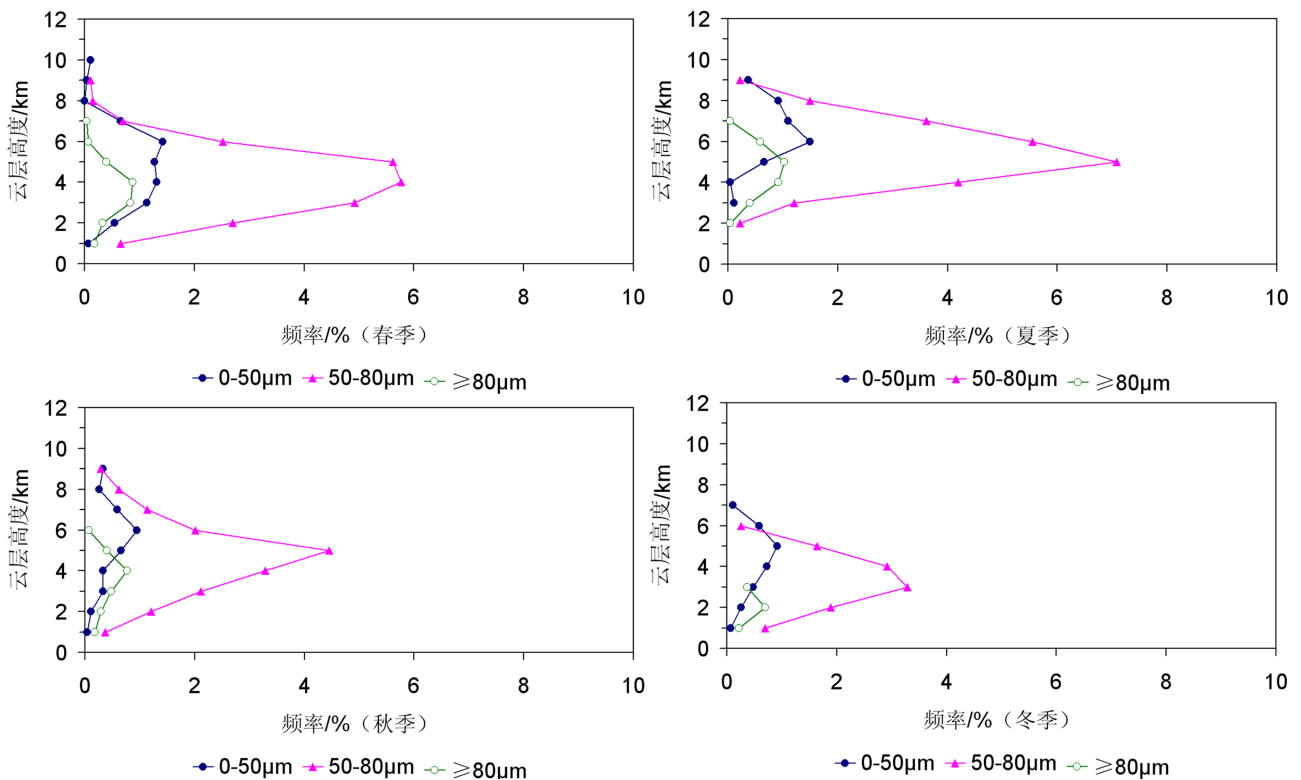


Figure 1. Vertical distribution of frequency of ice particle effective radius within variational radius range
图 1. 不同尺度冰粒子等效半径出现频率的垂直分布

综上所述,春季至秋季层状云云层较厚,厚度达 10 km,冬季层状云云层较薄,厚度达 7 km。IER 低值段、中值段分布在云层,高值段分布在云层下部和中部。IER 三个值段出现频率集中在云层中部。

3.2. 冰粒子数浓度的季节变化

层状云冰粒子数浓度(INC)的最小值出现在春季为 0.1 L^{-1} (表示每升包含 0.1 个冰粒子), 其他季节 $0.3 \sim 0.7 \text{ L}^{-1}$; 最大值出现在春季为 167 L^{-1} , 其他季节 $78 \sim 129 \text{ L}^{-1}$; 最大、最小值的跨度春季最大, 相差 167 L^{-1} (见表 3)。四季层状云 INC 的平均值为 $26 \sim 29 \text{ L}^{-1}$, 夏季大秋季小; INC 低值段($0 \sim 50 \text{ L}^{-1}$)平均为 $21 \sim 24 \text{ L}^{-1}$, 冬季大夏季小; INC 中值段($50 \sim 100 \text{ L}^{-1}$)平均为 $57 \sim 66 \text{ L}^{-1}$, 春季大冬季小; INC 高值段($\geq 100 \text{ L}^{-1}$)冬季没有出现, 其他季节平均为 $110 \sim 127 \text{ L}^{-1}$, 春季大。INC 低、中、高三种值段的年平均值分别为 21.7 L^{-1} 、 62.1 L^{-1} 、 117.6 L^{-1} 。

表 4 给出不同值段 INC 出现频率的季节变化情况。从表 4 可以看出, 层状云 INC 低值段出现频率各季最多, 为 $14\% \sim 28\%$; 中值段出现频率次之, 为 $2\% \sim 5\%$; 高值段出现频率最少, 少于 1% 。一年内层状云 INC 低、中、高值段出现频率分别为 85.7% 、 12.7% 、 1.5% 。

春季 INC 低值段分布在整个云层($1 \sim 11 \text{ km}$), 中值段分布在云层中部和下部($1 \sim 8 \text{ km}$), 高值段分布在云层中部($5 \sim 8 \text{ km}$); INC 低值段在云层下部($3 \sim 5 \text{ km}$)出现较多, 中值段在云层中部($5 \sim 6 \text{ km}$)出现较多, 高值段在云层中部($6 \sim 7 \text{ km}$)出现较多(见图 2)。

夏季 INC 低值段分布在整个云层($2 \sim 10 \text{ km}$), 中值段和高值段分布在云层上部和中部($4 \sim 10 \text{ km}$); INC 低值段在云层中部($5 \sim 7 \text{ km}$)出现较多, 中值段、高值段在云层上部($7 \sim 8 \text{ km}$)出现较多。

秋季 INC 低值段分布在整个云层($1 \sim 10 \text{ km}$), 中值段分布在云层上部和中部($3 \sim 10 \text{ km}$), 高值段在云层上部($6 \sim 8 \text{ km}$)稍有出现; INC 低值段在云层中部($4 \sim 6 \text{ km}$)出现较多, 中值段在云层中部($5 \sim 6 \text{ km}$)出现较多。

冬季 INC 低值段分布在整个云层($1 \sim 8 \text{ km}$), 中值段分布在云层上部和中部($3 \sim 7 \text{ km}$); INC 低值段在云层中部($3 \sim 4 \text{ km}$)出现较多, 中值段在云层中部($4 \sim 5 \text{ km}$)出现较多。

综上所述, INC 低值段分布在整个云层, 中值段分布在云层上部和中部, INC 低、中值段出现频率集中在

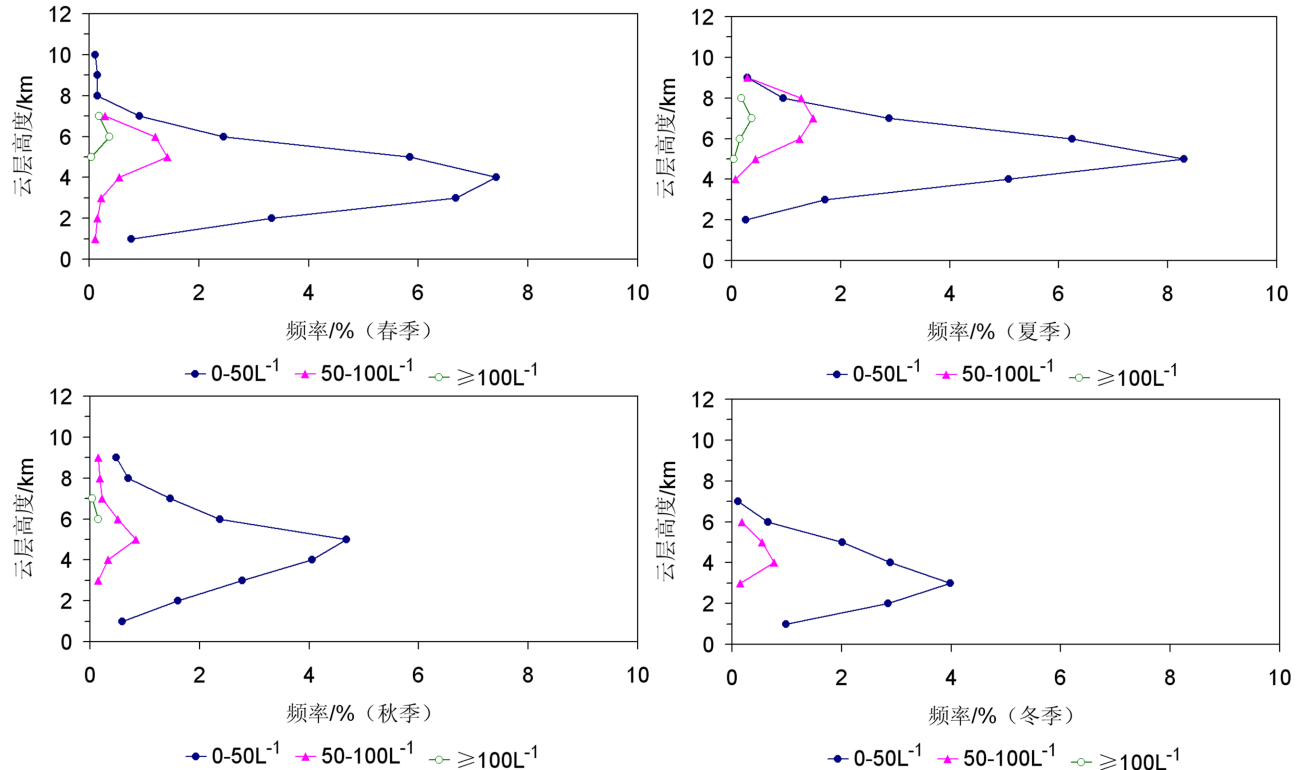


Figure 2. Vertical distribution of frequency of ice particle number concentration within variational concentration range

图 2. 不同等级冰粒子数浓度出现频率的垂直分布

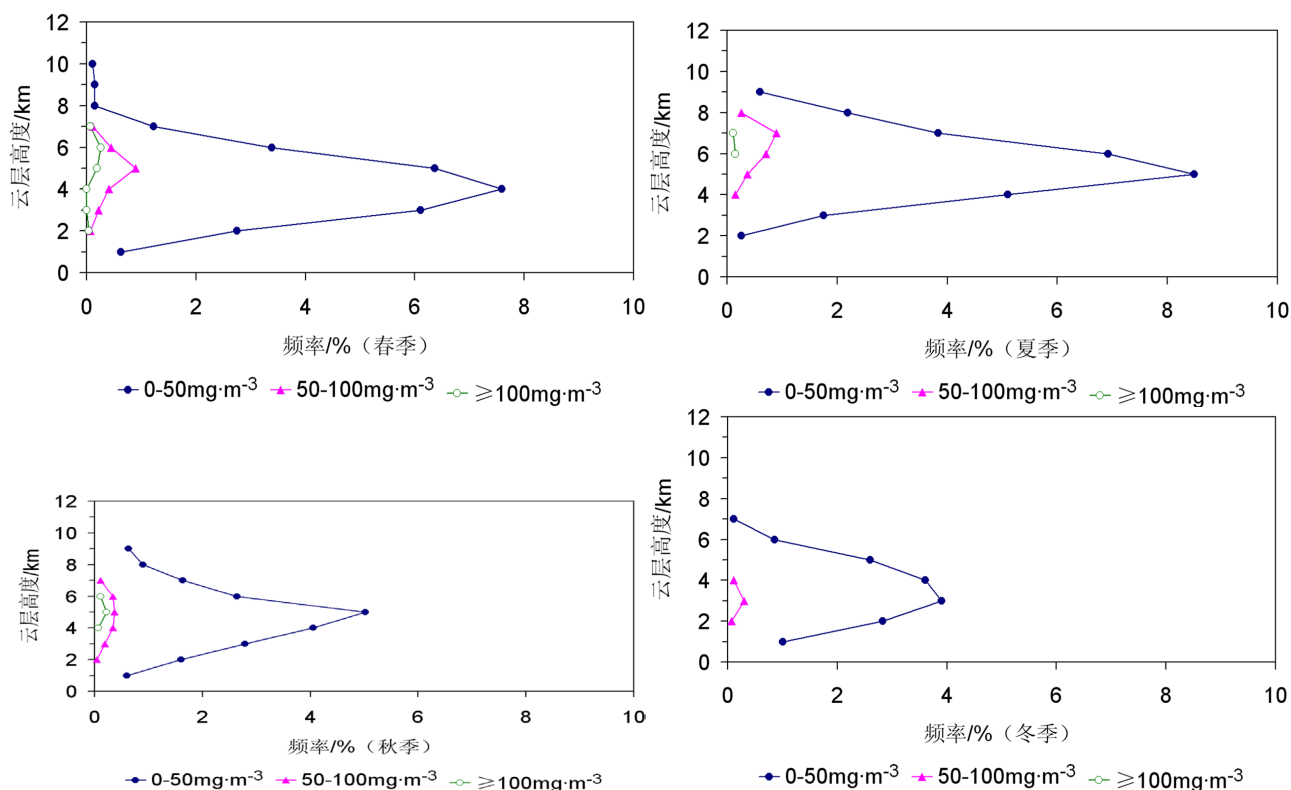


Figure 3. Vertical distribution of frequency of ice water content within variational content range

图 3. 不同等级冰水含量出现频率的垂直分布

Table 3. Seasonal change of ice particles number concentration (unit: L⁻¹)

表 3. 冰粒子数浓度的季节变化(单位: L⁻¹)

	最小值	最大值	平均	0~50 L ⁻¹	50~100 L ⁻¹	≥100 L ⁻¹
春	0.1	167.0	28.6	21.3	65.7	126.8
夏	0.3	128.6	29.4	20.8	63.1	109.9
秋	0.4	126.9	26.4	21.0	62.6	116.1
冬	0.7	78.3	27.3	23.6	57.1	
平均	0.4	125.2	27.9	21.7	62.1	117.6

Table 4. Frequency of ice particles number concentration within variational concentration range in season (unit: %)

表 4. 不同等级冰粒子数浓度出现频率的季节变化(单位: %)

	0~50 L ⁻¹	50~100 L ⁻¹	≥100 L ⁻¹	合计
春	27.8	3.9	0.6	32.3
夏	25.7	4.8	0.7	31.2
秋	18.7	2.4	0.2	21.3
冬	13.5	1.6		15.1
合计	85.7	12.7	1.5	100

云层中部。

3.3. 冰水含量的季节变化

层状云冰水含量(IWC)的最小值四个季节均为 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 最大值出现在秋季为 $402.4 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 其他季节 $95\sim 381 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$; 最大、最小值的跨度秋季最大, 相差 $401 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (见表 5)。四季层状云 IWC 的平均值为 $15\sim 21 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 春季大冬季小; IWC 低值段($0\sim 50 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$)平均为 $13\sim 16 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 夏季大冬季小; IWC 中值段($50\sim 100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$)平均为 $64\sim 70 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 冬季大夏季小; IWC 高值段($\geq 100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$)冬季没有出现, 其他季节平均为 $123\sim 207 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 秋季大。IWC 低、中、高三种值段的年平均值分别为 $14.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $66.2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $163.8 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

表 6 给出不同值段 IWC 出现频率的季节变化情况。从表 6 可以看出, 层状云 IWC 低值段出现频率各季最多, 为 $15\%\sim 29\%$; 中值段出现频率次之, 为 $1\%\sim 2\%$; 高值段出现频率最少, 少于 1% 。一年内层状云 IWC 低、中、高值段出现频率分别为 92.4% 、 6.5% 、 1.3% 。

春季 IWC 低值段分布在整个云层($1\sim 11 \text{ km}$), 中值段、高值段分布在云层中部和下部($2\sim 8 \text{ km}$); IWC 低值段在云层中部($4\sim 6 \text{ km}$)出现较多, 中值段在云层中部($5\sim 6 \text{ km}$)出现较多, 高值段在云层中部($6\sim 7 \text{ km}$)出现较多 (见图 3)。

夏季 IWC 低值段分布在整个云层($2\sim 10 \text{ km}$), 中值段分布在云层上部和中部($4\sim 9 \text{ km}$), 高值段仅在云层中部($6\sim 8 \text{ km}$)稍有出现; IWC 低值段在云层中部($5\sim 7 \text{ km}$)出现较多, 中值段在云层上部($7\sim 8 \text{ km}$)出现较多。

秋季 IWC 低值段分布在整个云层($1\sim 10 \text{ km}$), 中值段分布在云层中部和下部($2\sim 8 \text{ km}$), 高值段在云层中部($4\sim 7 \text{ km}$)稍有出现; IWC 低值段、中值段、高值段均在云层中部($5\sim 6 \text{ km}$)出现较多。

冬季 IWC 低值段分布在整个云层($1\sim 8 \text{ km}$), 中值段分布在云层中部和下部($2\sim 5 \text{ km}$); IWC 低值段在云层中部($3\sim 5 \text{ km}$)出现较多, 中值段在云层中部($3\sim 4 \text{ km}$)出现较多。

综上所述, IWC 低值段分布在整个云层, 中值段分布在云层中部和下部, IWC 低、中值段出现频率集中在云层中部。

Table 5. Seasonal change of ice water content (unit: $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)

表 5. 冰水含量的季节变化(单位: $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)

	最小值	最大值	平均	$0\sim 50 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$	$50\sim 100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\geq 100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$
春	1.0	380.8	21.3	15.3	64.3	161.7
夏	1.0	150.2	20.6	16.2	64.0	122.7
秋	1.0	402.4	20.7	13.6	66.7	206.9
冬	1.0	95.0	14.7	13.0	69.6	
平均	1.0	257.1	19.3	14.5	66.2	163.8

Table 6. Frequency of ice water content within variational content range in season (unit: %)

表 6. 不同尺度冰水含量出现频率的季节变化(单位: %)

	$0\sim 50 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$	$50\sim 100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\geq 100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$	合计
春	28.5	2.2	0.6	31.3
夏	29.1	2.4	0.3	31.8
秋	19.9	1.4	0.4	21.7
冬	14.9	0.5		15.4
合计	92.4	6.5	1.3	100

4. 结论

新疆层状云主要出现在春季和夏季, 冬季出现较少。春季、夏季、秋季层状云云层较厚, 厚度达 10 km, 冬季云层较薄, 厚度达 7 km。层状云冰粒子等效半径(IER)低(0~50 μm)、中(50~80 μm)、高($\geq 80 \mu\text{m}$)三种值段的年平均值分别为 43.7 μm 、63.1 μm 、88.3 μm , 三种值段出现频率分别为 18.0%、72.9%、9.2%。在垂直高度上, IER 低、中值段分布在整个云层, 高值段分布在云层下部和中部。IER 三个值段出现频率集中在云层中部。

层状云冰粒子数浓度(INC)低(0~50 L^{-1})、中(50~100 L^{-1})、高($\geq 100 \text{L}^{-1}$)三种值段的年平均值分别为 21.7 L^{-1} 、62.1 L^{-1} 、117.6 L^{-1} , 三种值段出现频率分别为 85.7%、12.7%、1.5%。INC 低值段分布在整个云层, 中值段分布在云层上部和中部, INC 低、中值段出现频率集中在云层中部。

层状云冰水含量(IWC)低(0~50 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)、中(50~100 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)、高($\geq 100 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)三种值段的年平均值分别为 14.5 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、66.2 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、163.8 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 三种值段出现频率分别为 92.4%、6.5%、1.3%。IWC 低值段分布在整个云层, 中值段分布在云层中部和下部, IWC 低、中值段出现频率集中在云层中部。

基金项目

新疆维吾尔自治区人民政府重大专项《新疆吐鲁番哈密地区空中云水资源开发利用》课题《新疆对流性天气的时空分布特征及其原因、风对 WR-98 型人影火箭弹道的影响》资助。

参考文献 (References)

- [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, 35(1): 1-9.
CHEN Yaning, YANG Qing, LUO Yi, et al. Ponder on the issues of water resources in the arid region of northwest China. Arid Land Geography, 2012, 35(1): 1-9. (in Chinese)
- [2] 孙桂燕, 郭玲鹏, 常存, 等. 新疆天山中段南北坡水储量变化对比分析[J]. 干旱区地理, 2016, 39(2): 254-264.
SUN Guiyan, GUO Lingpeng, CHANG Cun, et al. Contrast and analysis of water storage changes in the north slopes and south slopes of the central Tianshan Mountains in Xinjiang. Arid Land Geography, 2016, 39(2): 254-264. (in Chinese)
- [3] 夏富强, 唐宏, 杨德刚, 等. 绿洲城市水资源压力及其对城市发展的影响——以乌鲁木齐为例[J]. 干旱区地理, 2014, 37(2): 380-387.
XIA Fuqiang, TANG Hong, YANG Degang, et al. Water resources pressure of oasis city and its impact on urban development—Taking Urumqi as an example. Arid Land Geography, 2014, 37(2): 380-387. (in Chinese)
- [4] WANG, X., MA, Y. The effect evaluation of weather modification in the range of 2009-2010 years in Xinjiang. Journal of Water Resources Research, 2015, 4(5): 450-457. <https://doi.org/10.12677/JWRR.2015.45055>
- [5] 陈勇航, 黄建平, 王天河, 金宏春, 葛颀铭. 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, 16(6): 717-728.
CHEN Yonghang, HUANG Jianping, WANG Tianhe, JIN Hongchun and GE Jinming. Temporal and spatial distribution of the different clouds over northwestern china with the relation to precipitation. Journal of Applied Meteorological Science, 2005, 16(6): 717-728. (in Chinese)
- [6] 高翠翠, 方乐铨, 李昀英, 寇雄伟. 1985~2011 年中国不同类型云发生频率、持续时数及伴随降水概率[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(3): 206-214.
GAO Cuicui, FANG Lexin, LI Yunying and KOU Xiongwei. Cloud occurrence frequency duration time and accompanying rainfall probability in China during 1985-2011. Torrential Rain and Disasters, 2015, 34(3): 206-214. (in Chinese)
- [7] 邓军英, 丁明月, 王文彩, 等. 冰云粒子微物理属性在一次强降雨过程中的垂直分布[J]. 干旱区地理, 2016, 39(3): 590-599.
DENG Junying, DING Mingyue, WANG Wencai, et al. Vertical distributions microphysical properties of ice particles in a heavy rain. Arid Land Geography, 2016, 39(3): 590-599. (in Chinese)
- [8] 常倬林, 崔洋, 张武, 田磊, 翟涛. 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, 2015, 38(6): 1112-1120.
CHANG Zhuolin, CUI Yang, ZHANG Wu, TIAN Lei and ZHAI Tao. Characteristics and developing potential of cloud water resource in Ningxia with the CERES data. Arid Land Geography, 2015, 38(6): 1112-1120. (in Chinese)
- [9] 王胜杰. 星载测云雷达资料的初步分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2008.
WANG Shengjie. Space borne cloud radar measurement data of the preliminary analysis. Nanjing: Nanjing Information Engi-

- neering University, 2008. (in Chinese)
- [10] 杨大生. 基于星载云廓线雷达观测资料对中国地区云属性参量的时空分布特征分析[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院, 2009.
YANG Dasheng. Based on the space borne cloud profile radar observation data of space-time distribution features of cloud properties parameters analysis in China. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese)
- [11] 赵姝慧. 利用 TRMM 卫星和 Cloudsat 卫星对不同类型云系的中微尺度结构的研究分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2008.
ZHAO Shuhui. Using TRMM satellite and CloudSat satellite for different types of structures in the micro-scale structure analysis. Nanjing: Nanjing Information Engineering University, 2008. (in Chinese)
- [12] 彭杰, 张华, 沈新勇. 东亚地区云垂直结构的 CloudSat 卫星观测研究[J]. 大气科学, 2013, 37(1): 91-100.
PENG Jie, ZHANG Hua, SHEN Xinyong. New cloud vertical structure in east Asia CloudSat satellite observation research. Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 37(1): 91-100. (in Chinese)
- [13] HAYNES, J. M., STEPHENS, G. L. Tropical oceanic cloudiness and the incidence of precipitation: Early results from CloudSat. Geophysical Research Letters, 2007, 34(9): 1-9.
- [14] HAYNES, J. M., L'ECUYER, T. S., STEPHENS, G. L., et al. Precipitation estimation from CloudSat. American Geophysical Union, Fall Meeting, 2007, 1-10.
- [15] LUO, Y. L., ZHANG, R. H. and WANG, H. Comparing occurrences and vertical structures of hydrometeors between eastern China and the Indian monsoon region using CloudSat CALIPSO data. Journal of Climate, 2009(22): 1052-1064.
<https://doi.org/10.1175/2008JCLI2606.1>
- [16] WU, D. L., JIANG, J. H., READ, W. G., et al. Validation of the Aura MLS cloud ice water content measurements. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012), 2008(113): D15S10.
- [17] STEPHENS, G. L., VANE, D. G., TANELLI, S., et al. CloudSat mission: Performance and early science after the first year of operation. Journal of Geophysical Research, 2008(113): D00A18.
- [18] 丁晓东, 黄建平, 李积明, 等. 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[J]. 干旱气象, 2012, 30(4): 529-538.
DING Xiaodong, HUANG Jianping, LI Jiming, et al. Based on the active satellite remote sensing research in northwest cloud vertical structure characteristics and the people work the influence of precipitation. Journal of Meteorological Drought, 2012, 30(4): 529-538. (in Chinese)