

祁连山北坡云垂直分布特征

黄颖^{1,2} 张文煜^{1,2,3*} 冒立鑫⁴ 王开强⁴

(1 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000; 2 中国气象局云雾物理环境重点实验室, 北京 100081;
3 郑州大学地球科学与技术学院, 郑州 450001; 4 甘肃省民乐县气象局, 张掖 734500)

摘要 利用敦煌、酒泉、张掖、民勤探空站 2014—2019 年的探空数据,对祁连山北坡云的发生频率及云垂直结构特征进行分析。结果表明:祁连山北坡全年云的发生频率为 20%~40%,以 1~3 层云为主,且单层云的发生频率高于多层云,多层云以 2 层云为主;云的发生频率夏高冬低,夏季单层云和 2 层云出现的频率较为接近,而春、秋、冬季节单层云出现频率远高于 2 层云和 3 层云;全年平均云高度 2 层云的下层云厚度明显大于上层云,3 层云的底层云与中层云之间晴空夹层厚度大于中层云与顶层云之间的晴空厚度;祁连山北坡云层高度季节变化显著,单层云和多层云的高度都表现为夏高冬低。

关键词 祁连山北坡;云;频率;垂直结构

中图分类号: P426.5 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20200555 **文献标识码:** A

引言

河西走廊位于中国西北干旱、半干旱区,年降水量较小且降水量空间分布严重不均,生态环境脆弱^[1-2]。水资源短缺严重制约着河西地区的农业生产及经济发展,通过人工影响天气开发利用空中云水资源是当前解决水资源短缺的有效途径之一^[3-4]。云是人工增雨的作业对象,云的结构与降水机制及降水效率密切相关^[5-7]。因此,充分认识云的垂直结构特征对有效地选择催化作业时机和最佳作业部位、提高人工影响天气的作业效果具有重要的意义。

国内外学者们从不同角度对各地区的云垂直分布特征进行了诸多研究^[8-14]。Weisz 等对 AIRS、MODIS、CloudSat 和 CALIPSO 反演的云顶高度进行了比较,并讨论了红外辐射探测器探测云顶高度的优缺点^[8]。丁守国等利用 ISCCP 的 D2 云气候资料集分析了总云量及高云、中云和低云的全球分布特征,并分析了全球不同云类云量的长期变化趋势^[9]。韩丁等基于 COSMIC 掩星资料,利用相对湿

度阈值法判定云底及云顶高度,并对中国及周边地区云的垂直结构特征进行了研究^[10]。叶培龙等利用 CloudSat 与 CALIPSO 卫星结合的云分类产品,对中国西部及周边地区的云层数、云高度及其季节变化进行了分析^[11]。张正国等利用飞机云物理探测资料对层状云的结构特征进行了研究,探讨了层状云降水的机制^[12]。刘蓓对祁连山南麓的地形云特征进行了分析,并探讨了山谷风对其造成的影响^[13]。

关于中国西北地区云垂直分布的研究多集中于青藏高原和天山地区。祁连山脉处于青藏高原东北部边缘,其北坡的云分布特征与河西走廊的降水有着密切关系。目前对于云垂直结构的研究多采用云雷达资料,常见的有地基、机载和星载云雷达(CloudSat 卫星等)。地基云雷达目前还未做到广泛的布网,只有较少的观测点;CloudSat、CALIPSO 等卫星虽然能提供大范围的观测,但受卫星轨道限制,不能对某一点进行连续观测,且其对近地面云层的探测误差较大^[14-15]。广泛布网的无线电探空资料提供秒级分辨率的气温、湿度信息,可以用于检测

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

国家自然科学基金项目(41875085、41630421)、西北区域人工影响天气能力建设项目研究试验项目(ZQC-R18208)资助

作者简介:黄颖,女,1996 年生,博士研究生,主要从事大气探测与大气物理方面的研究,Email: huangy20@lzu.edu.cn

收稿日期:2020 年 12 月 24 日;定稿日期:2021 年 6 月 29 日

* 通信作者,Email: zhangwy@lzu.edu.cn

云的垂直分布。基于以上研究背景,本文利用祁连山北坡的探空资料对该地区云的出现频率及高度特征进行了详细分析,以期对祁连山地区降水的研究以及人工影响天气作业提供理论参考。

1 资料和方法

1.1 资料

本文使用的资料为祁连山北坡敦煌、酒泉、张掖、民勤 4 个探空站 2014—2019 年 1 日 2 次的探空数据。敦煌位于甘肃省河西走廊最西端,地处甘肃、青海及新疆交汇处,四周受沙漠戈壁包围,平均气温 $9.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 平均年降水 37.9 mm , 蒸发量达 $2505\text{ mm}^{[16]}$; 酒泉地处河西走廊西端,黑河流域中游,年均气温 $3.9\sim 9.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 年均降水量小于 176 mm , 蒸发量为 $2148\text{ mm}^{[17]}$; 张掖地处黑河中游地区,其北部为荒漠戈壁及巴丹吉林沙漠南部边缘,年平均降水量为 117 mm , 蒸发量为 2390 mm , 平均气温为 $7.6\text{ }^{\circ}\text{C}^{[18]}$; 民勤县位于河西走廊东北部,其东、西、北三面被腾格里和巴丹吉林沙漠包围,是一个半封闭的内陆荒漠区,年均气温 $7.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 年均降水量 113.2 mm 年均蒸发量高达 $2644\text{ mm}^{[19]}$ 。各站点的地理位置如图 1 所示。

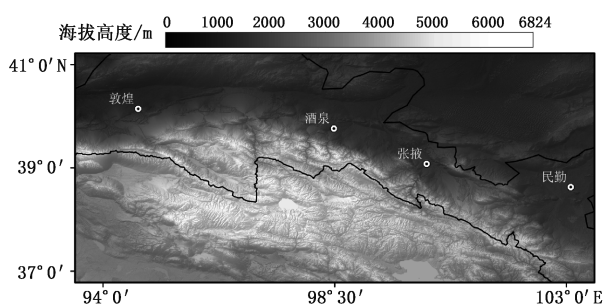


图 1 祁连山北坡探空站地理位置及地形高度

1.2 露点差和相对湿度阈值结合法

目前利用探空资料判定云垂直结构的方法中,相对湿度阈值法的应用最为广泛,但该方法存在一个缺陷:当发生降水或大雾等天气现象时,近地面的相对湿度可能会大于所设定的阈值,此时相对湿度阈值法判定的底层云云底高度是不准确的^[10]。而温度露点差阈值法的判定取决于大气温度和露点温度之差,可弥补相对湿度阈值法的缺陷^[20]。本文结合温度露点差阈值法和相对湿度阈值法对云垂直结构进行判定,先用相对湿度阈值法确定出所有云的

云顶高度和除最底层云之外的云底高度,再用温度露点差阈值法确定最底层云的云底高度。同时,参考欧建军^[21]、吴昊等^[22]的研究方法:若上下两云层间距小于 300 m 且夹层内相对湿度大于 80% , 则将该夹层视为云层,与上下两云层连为一体进行统计; 云层厚度小于 80 m 时,将该高度层视为大气湿层,不作为云层进行统计。

(1)温度露点差阈值法。温度露点差阈值法对不同的温度范围设定对应的温度露点差阈值(记为 ΔT_d), 当某个高度上的温度露点差小于设定的阈值时,将该高度的大气湿层判定为云层。本文参照 Poore 等设定的阈值^[23], 以温度露点差阈值法判定云的垂直结构, 阈值如表 1 所示。

表 1 温度露点差阈值法的阈值设定 $^{\circ}\text{C}$

气温 T 范围	温度露点差阈值 ΔT_d
$T > 0$	1.7
$-20 \leq T \leq 0$	3.4
$T < -20$	5.2

(2)相对湿度阈值法。相对湿度阈值法最早由 Wang 等于 1995 年提出^[24], 该方法判定某一高度范围内出现云层必须满足 3 个条件: 云层内相对湿度至少为 84% , 最大相对湿度大于或等于 87% , 且相对湿度在云顶和云底的跳变至少为 3% 。Zhang 等指出, WR95 法云顶和云底跳变 3% 的条件适用于低垂直分辨率的探空数据, 但对于秒级的高分辨率探空数据难以实现^[25]。故本文参照李绍辉等^[20]的做法, 将 WR95 法与 Zhang 等的研究相结合, 将相对湿度阈值法判定云层的条件改进为: 云层内相对湿度大于或等于 84% , 且最大相对湿度大于或等于 87% 。

2 云发生频率的统计分析

2.1 不同层数云的发生频率

Wang 等研究发现, 云的层数对于大气内部的辐射传输有重要的影响^[26], 因此表 2 对 2014—2019 年祁连山北坡 4 个站点有云及不同层数云的发生频率进行了统计。由表 2 可知, 祁连山北坡云的发生频率在 $20\% \sim 40\%$ 之间, 张掖地区出现云的频率最高, 为 37.72% , 其次是民勤 32.26% , 敦煌最低仅为 22.37% 。除张掖站之外, 云发生频率自东向西、自南向北递减, 这与祁连山大气水汽含量的空间分布

有较好的一致性^[27]。张掖是河西走廊最大的绿洲^[18],其局地的气候环境较其他3个站点更为湿润,水汽含量更高,因此云发生频率最高。由各站点不同层数云的出现频率可见,祁连山北坡单层云出现的频率明显高于多层云,其出现频率占有所有云的50%以上;其次为2层云,其出现频率约占所有云的30%;除敦煌站外,其他3站的3层云出现频率约占所有云的10%;4层及其以上层数的云出现频率较小,占有所有云的比例不到2%。祁连山北坡全年出现单层云的频率明显高于多层云,且多层云大多数为2层云和3层云,该特征与中国大部分地区的统计结果相一致^[28]。

表2 2014—2019年祁连山北坡单层云和多层云的发生率/%

站点	所有云	单层云	2层云	3层云	≥4层云
敦煌	22.37	13.68	7.53	0.89	0.27
酒泉	29.63	17.51	9.73	2.05	0.34
张掖	37.72	20.82	12.44	3.69	0.75
民勤	32.26	18.06	10.43	3.13	0.63

2.2 不同层数云发生频率的季节变化

祁连山北坡大部分云的层数小于4层,因此本文主要关注单层云、2层云和3层云的变化特征,图2给出各站点所有云以及各层数云出现频率的季节变化。由于夏季对流活动旺盛且水汽较为充沛,各站点云出现的频率都呈现出“夏季>秋季>春季>冬季”的规律,单层、2层和3层云在夏季出现频率皆大于其他季节。除夏季单层云和2层云出现的频率较为接近外,其他季节单层云出现频率远高于2层

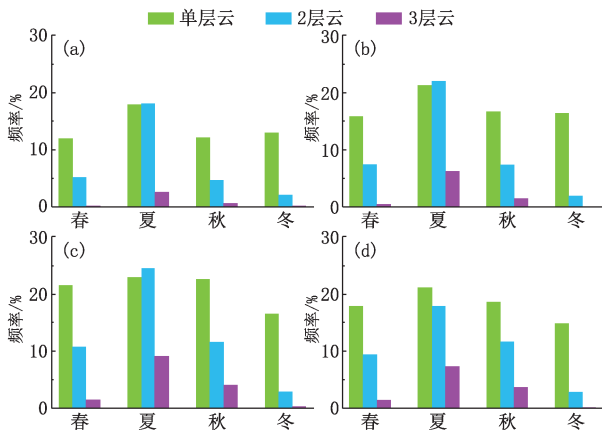


图2 祁连山北坡敦煌(a),酒泉(b),张掖(c),民勤(d)不同层数云发生频率的季节变化

云和3层云。冬季3层云出现频率极低,在6年的样本中,敦煌和张掖站冬季3层云的发生频率不足0.3%,酒泉和民勤站冬季则没有出现3层云。

3 云高度和厚度特征

3.1 平均云高度和厚度

利用2014—2019年4个探空站的探空资料对祁连山北坡的平均云顶高度、云底高度、云层厚度以及多层云相邻两层之间的晴空厚度进行统计(图3)发现,该地区所有云层的平均云底高度、云顶高度及云层厚度分别为3.2 km、4.4 km和1.2 km;多层云平均夹层厚度为0.5 km,其中2层云中的平均晴空厚度为0.4 km,3层云的下层与中层云、中层与上层云之间的平均晴空厚度分别为0.7 km和0.4 km。祁连山北坡各站点单层云的云底高度和云顶高度分别分布在2.4~2.8 km和3.4~3.9 km之间;各站点单层云的厚度较为接近,敦煌、酒泉、张掖的单层云厚度为1.1 km,民勤稍薄为1.0 km。双层云的下层云云底高度和云顶高度分别分布在2.4~3.0 km和4.1~4.4 km,厚度为1.4~1.8 km;双层云的上层云云底高度和云顶高度分别分布在4.5~4.7 km和5.5~5.8 km,厚度为0.9~1.0 km;双层云之间的晴空夹层厚度在0.3~0.4 km。3层云的底层云云底高度和云顶高度分别分布在2.0~2.5 km和2.8~3.5 km,厚度为0.8~1.0 km;中间层云云底高度和云顶高度分别分布在3.6~4.1 km和4.7~4.8 km,厚度为0.8~1.0 km;顶层云云底高度和云顶高度分别分布在5.0~5.3 km和5.9~6.2 km,厚度为0.9~1.0 km;底层与中间层云和中间层与顶层云之间的晴空夹层厚度分别为0.5~

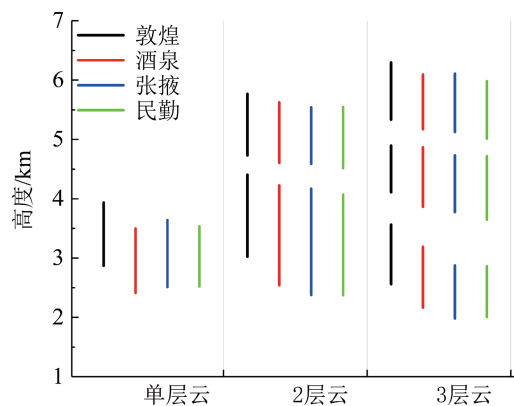


图3 2014—2019年祁连山北坡云垂直分布的平均范围

0.8 km 和 0.2~0.4 km。祁连山北坡双层云的下层云厚度明显大于上层云,而3层云中顶层云的厚度最大,此特征与基于掩星资料计算的中国地区云垂直结构相一致^[29]。

3.2 平均云高度和厚度的季节变化

图4为各站点不同层数云平均云底高度和云顶高度的季节变化,各站点云垂直结构的季节变化明显且变化规律较为一致,各层数云的云底高度、云顶高度都表现为夏高冬低。祁连山北坡单层云的云层厚度在春季最厚为1.3 km,夏季最薄为0.9 km,各站点春季和夏季的单层云厚度变化范围分别为1.2~1.4 km 和 0.9~1.0 km。双层云的下层云厚度大于上层云,上下层云之间的晴空夹层厚度冬天最大,春天最小。由于3层云在冬季出现的频率极低,且6年的样本中有2个站点未在冬季出现3层云,故仅对春夏秋三季的3层云进行分析,发现3层云的中层与下层云之间晴空厚度大于中层与上层云之间的晴空厚度。

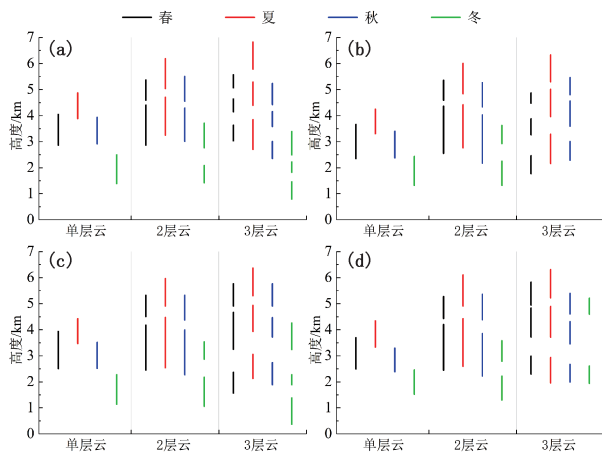


图4 2014—2019 祁连山北坡敦煌(a)、酒泉(b)、张掖(c)、民勤(d)云高度的季节变化

4 结论

利用2014—2019年敦煌、酒泉、张掖、民勤4个探空站的探空数据统计分析了祁连山北坡的云垂直结构特征,得到以下主要结论:

(1) 祁连山北坡全年云的发生频率较低,仅为20%~40%;单层云的发生频率高于多层云,且多层云以2层云和3层云为主。

(2) 祁连山北坡所有云的发生频率呈现夏高冬低的规律,单层、2层和3层云在夏季出现频率皆大

于其他季节;夏季单层云和2层云出现的频率较为接近,春秋三季单层云出现频率远高于2层云和3层云。

(3) 就全年平均云高度而言,祁连山北坡2层云的下层云厚度为1.4~1.8 km,上层云厚度为0.9~1.0 km,下层云厚度明显大于上层云;3层云中顶层云的厚度最大,为0.9~1.0 km,且底层云与中层云之间的晴空夹层厚度大于中层云与顶层云之间的晴空厚度。

(4) 祁连山北坡云层高度季节变化显著,各层数云的云底高度、云顶高度都表现为夏高冬低。单层云的云层厚度在春季最厚为1.3 km、夏季最薄为0.9 km;双层云上下层之间的晴空夹层厚度冬季最大,为0.7 km;3层云的中层与下层云之间晴空厚度大于中层与上层云之间的晴空厚度。

参考文献

- [1] 管梦鸾, 张正偲, 董治宝. 基于RS和GIS的河西走廊风沙灾害风险评估[J]. 中国沙漠, 2017, 37(5): 830-835.
- [2] 黄颖, 毛文茜, 王潇雅, 等. 近39 a 祁连山及其周边地区降水量时空分布特征[J]. 干旱气象, 2020, 38(4): 527-534.
- [3] Dennis A S. Changing perceptions of the Israeli weather modification program[J]. Journal of Weather Modification, 1996 (28): 83-85.
- [4] 张小娟, 王军, 黄观, 等. 新疆3大山区云中液态水时空分布特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(4): 846-854.
- [5] 张中波, 仇财兴, 王治平, 等. 一次积层混合云系人工增雨作业的综合观测分析[J]. 气象科技, 2014, 42(5): 897-905.
- [6] Orville H D. A review of cloud modeling in weather modification [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, 77(7): 1535-1556.
- [7] 洪延超, 雷恒池. 云降水物理和人工影响天气研究进展和思考[J]. 气候与环境研究, 2012, 17(6): 951-967.
- [8] Weisz E, Li J, Menzel W P, et al. Comparison of AIRS, MODIS, CloudSat and CALIPSO cloud top height retrievals [J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(17): L17811.
- [9] 丁守国, 石广玉, 赵春生. 利用ISCCP D2资料分析近20年全球不同云类云量的变化及其对气候可能的影响[J]. 科学通报, 2004(11): 1105-1111.
- [10] 韩丁, 严卫, 贾本凯, 等. 基于掩星资料的中国地区云垂直分布研究[J]. 电波科学学报, 2011, 26(6): 1040-1045+1227.
- [11] 叶培龙, 王天河, 尚可政, 等. 基于卫星资料的中国西部地区云垂直结构分析[J]. 高原气象, 2014, 33(4): 977-987.
- [12] 张正国, 卢广献, 汤达章, 等. 广西秋季层状云微物理特征分析[J]. 气象科技, 2018, 46(3): 545-555.
- [13] 刘蓓. 祁连山南麓夏季地形云特征及山谷风影响分析[J]. 气象科技, 2016, 44(1): 67-75.

- [14] 周毓荃, 欧建军. 利用探空数据分析云垂直结构的方法及其应用研究[J]. 气象, 2010, 36(11):50-58.
- [15] Welliver E. Remote detection of cloud base heights using CloudSat and CALIPSO [R]. Calhoun: The NPS Institutional Archive. Thesis Collection, 2009.
- [16] 巴金, 王秀琴. 敦煌近 56a 气候特征分析[J]. 干旱气象, 2010, 28(3):304-308.
- [17] 郭明, 肖笃宁, 李新. 黑河流域酒泉绿洲景观生态安全格局分析[J]. 生态学报, 2006(2):457-466.
- [18] 常学礼, 赵文智, 李秀梅, 等. 基于生态服务价值的张掖绿洲生态安全评价[J]. 自然资源学报, 2010, 25(3):396-406.
- [19] 柴成武, 徐先英, 王方琳. 石羊河下游民勤绿洲荒漠化影响因素趋势预测[J]. 中国水土保持科学, 2007(4):34-38.
- [20] 李绍辉, 孙学金, 张日伟, 等. 探空资料云检测及其统计研究[J]. 气象科学, 2017, 37(3):403-408.
- [21] 欧建军. 利用探空数据分析云垂直结构的方法及其应用研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2011.
- [22] 吴昊, 黄兴友, 杨荣康, 等. 两种探空仪判别云垂直结构的对比研究[J]. 气象科学, 2014, 34(3):267-274.
- [23] Poore K D, Wang J, Rossow W B. Cloud layer thicknesses from a combination of surface and upper-air observations [J]. Journal of Climate, 1995, 8(3):550-568.
- [24] Wang J, Rossow W B. Determination of cloud vertical structure from upper-air observations [J]. Journal of Applied Meteorology, 1995, 34(10):2243-2258.
- [25] Zhang J, Chen H, Li Z, et al. Analysis of cloud layer structure in Shouxian, China using RS92 radiosonde aided by 95 GHz cloud radar [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2010, 115(D7):D00K30.
- [26] Wang J, Rossow W B. Effects of cloud vertical structure on atmospheric circulation in the GISS GCM [J]. Journal of Climate, 1998, 11(11):3010-3029.
- [27] 巩宁刚, 孙美平, 闫露霞, 等. 1979—2016 年祁连山地区大气水汽含量时空特征及其与降水的关系[J]. 干旱区地理, 2017, 40(4):762-771.
- [28] 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, 30(1):38-52.
- [29] 韩丁, 严卫, 陆文, 等. 基于 COSMIC 掩星资料的中国及周边地区云垂直结构特征研究[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(1):36-48.

Vertical Distribution of Clouds in Northern Qilian Mountains

HUANG Ying^{1,2} ZHANG Wenyu^{1,2,3} MAO Lixin⁴ WANG Kaiqiang⁴

(1 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000;

2 Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081;

3 School of Geoscience and Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001;

4 Minle Meteorological Administration, Zhangye 7345000)

Abstract: Based on the radiosonde data of Dunhuang, Jiuquan, Zhangye and Minqin stations from 2014 to 2019, the characteristics of cloud vertical structure in the northern Qilian Mountains are analyzed. The results show that the occurrence frequency of clouds in the northern Qilian Mountains is 20% to 40% in the whole year, and the occurrence frequency of single-layer clouds is higher than that of multi-layer clouds, which are mainly 2-layer clouds; the occurrence frequency of clouds is higher in summer and lower in winter, the frequencies of single-layer and 2-layer clouds in summer are close, and the occurrence frequency of single-layer clouds is much higher than those of 2-layer clouds and 3-layer clouds in spring, autumn and winter; the thickness of the lower layer clouds of 2-layer clouds is obviously greater than that of the upper layer clouds, and the thickness of the clear air interlayer between the bottom layer and the middle layer of the 3-layer clouds is greater than that between the middle layer and the top layer; cloud heights in the northern Qilian Mountains change significantly in different seasons, higher in summer and lower in winter.

Keywords: northern Qilian Mountains; cloud; frequency; structure