

文章编号: 1000-0534(2005)06-0905-08

西北地区空中云水资源的时空分布特征

陈勇航¹, 黄建平¹, 陈长和¹, 张强²,
冯建东¹, 金宏春¹, 王天河¹

(1. 兰州大学 大气科学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国气象局 兰州干旱气象研究所, 甘肃 兰州 730020)

摘要: 利用 1983 年 7 月至 1998 年 12 月国际卫星云气候计划 ISCCP D2 的月平均云资料, 对西北地区空中云水资源的时空分布特征进行了系统的研究。结果表明: 三个不同区域的月平均总云量、光学厚度和云水路径的区域平均值分别在 52.5%~58.3%, 2.6~6.6 和 44.9~77.6 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间; 西北地区空中云水资源多年平均分布有其沿地形分布的特点, 总云量、中云量、总光学厚度和总云水路径的高值区均在天山、昆仑山、祁连山一带, 而低值中心一般分布在塔里木盆地—内蒙古西部戈壁沙漠—黄土高原西北部一带。此外, 祁连山、青海所在的高原气候区云水资源近年呈上升趋势, 特别是总光学厚度和总云水路径 15 年来呈明显上升趋势, 分别约上升了 0.8 和 16.4 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

关键词: 云量; 光学厚度; 云水路径

中图分类号: P402 **文献标识码:** A

1 引言

西北地区干旱少雨, 大多数河流年内长时间干枯, 水资源严重缺乏。该地区虽然面积约占全国的 42%, 但降水量只占全国 17%。多年平均降水量在 235 mm 左右, 而年蒸发量却高达 1000~2600 mm, 年可蒸发量是降水量的 4~11 倍。据统计, 20 世纪 90 年代初以来, 西部地区农田每年受旱面积 $860 \times 10^4 \text{hm}^2$, 占耕地总面积的 1/3, 比 80 年代增加 1/3, 呈加剧趋势。据估计, 到 2010 年西北地区年缺水量将超过 $250 \times 10^8 \text{m}^3$, 由此造成西北地区经济和环境可持续发展所面临的首要问题就是解决水资源短缺问题^[1]。不管是地表水, 还是地下水, 都来自大气中的云中降水, 大气降水是水资源中可持续利用的重要来源。因此, 着眼于空中云水资源的研究, 从而增加对空中云水资源的利用是缓解水资源短缺问题的有效途径之一。

长期以来, 常规的云的观测只能依靠地面观测台站的人工目测, 这本身就存在很大的局限性。而西北地区地形复杂, 存在大量无人区, 加之经济条件所限, 使得地面台站稀少, 即使常规的目测云资料也非常缺乏, 这些严重制约了对该地区云的研

究。随着国际卫星技术以及云反演技术的发展, 国际卫星云气候计划 ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) 为我们提供了一种难得的适合于揭示大范围气候特征的手段, 并提供了地面观测无法提供的云的物理性质参量——光学厚度 (optical thickness) 和云水路径 (water path), 为我们能够比较系统地研究西北地区的云的时空分布特征提供了可参考的观测事实。采用 ISCCP 资料, 一些作者^[2~9]对云已做了一些初步研究; 另外文献 [10~18] 对青藏高原、中国地区的云的辐射特性也作过一些研究, 这些工作为我们提供了有益的参考。

但上述工作中所用的资料时段较短, 且主要是对云量的研究。据研究, 云光学厚度对地气系统的辐射收支有很大的影响^[19, 20], 并且是地气辐射系统的主要调节参数。而在中尺度模式中, 潜热效应的大小与云水路径密切相关, 对于云模式或者是气候模式, 其微物理过程可以用云中液态水的测量结果进行测试或验证。正如 Webster 等^[21]指出的, CO_2 的加倍所引起的增温效应, 可由低云 10% 的增加或高云 10% 的减少所补偿。因此, 研究云量、云光学厚度和云水路径的分布及其变化趋势对西北

收稿日期: 2004-06-17; 改回日期: 2004-09-03

基金项目: 国家科技攻关计划重大项目“祁连山空中云水资源开发利用研究”(2004BA901A16); 中国气象局沙漠气象研究所课题 (sqj2004013); 中国气象局气候变化专项经费共同资助

作者简介: 陈勇航(1965—), 女, 湖南人, 博士研究生, 主要从事大气辐射与遥感研究。E-mail: yonghangchen@hotmail.com

地区气候变化研究也具有重要意义。为此,本文采用了 15 年的 ISCCP D2 资料,不仅对云量,而且对云光学厚度和云水路径的时空分布特征进行了分析,以期为准评估西北地区空中水资源的利用潜力、优化设计土地利用和生态系统的空间格局、准确评估未来气候、环境变化趋向、减少气候模式试验中云的不确定性等提供基本的参考依据。

2 资料选取和区域划分

作为世界气候研究计划(WCRP)主要项目之一的国际卫星云气候计划(ISCCP),通过收集、分析卫星辐射测量值以推断云的时空分布特征及其变化,从而促进科学界对云在辐射平衡过程和全球水循环过程中的作用的研究。本文采用 1983 年 7 月至 1998 年 12 月 ISCCP D2 的 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 分辨率的月平均云气候资料。该资料是由 4 颗地球同步卫星(GMS, METEOSAT, GOES, INSAT)和至少 1 颗太阳同步极轨卫星(NOAA)获取的辐射测量值,经过云识别、辐射分析、统计分析处理后才得到。中国西部地区的资料主要由 INSAT, GMS 系列静止卫星和 NOAA 系列极轨卫星提供。较之此前的 C2 数据集, D2 数据集有较大改进^[14],在进行了大量的云物理试验观测的基础上给出了更详细、更准确的结果,在辐射定标、阈值确定方面运用了新的方法,减少了误差。最明显的变化是 D2 数据集除了给出 15 种不同类型云的云量外(单位为云所占天空的百分比),还给出了其平均物理性质,如光学厚度、云水路径等。

D2 资料中的云是按照云顶气压和光学厚度进行分类的(图 1),云顶气压 > 680 hPa 的定义为低云, $680 \sim 440$ hPa 的定义为中云, < 440 hPa 的定义为高云。然后根据光学厚度的不同把云分为 9 种具体云类,再把中云和低云中的各种具体云类分为水云和冰云,而高云被认为全部是冰云,这样一来,就把云分成了 15 种具体类型。魏丽等^[4]、王可丽等^[5]、翁笃鸣等^[6]在资料的准确性方面作了研究; Rossow 等^[10]用其它资料与 ISCCP 资料进行了对比研究,得到的结论是 ISCCP 资料的云量与其它资料吻合得比较好,全球偏差在 4% 左右。文献 [3~6]对中国大陆上云量的 ISCCP 资料和地面观测资料进行的对比分析工作,也证明了 ISCCP 资料在中国地区的可用性。1999 年 Rossow 等^[10]公布了对 D2 资料准确性进行的研究,结论是云量的误差 5%,光学厚度的误差 10%。虽然该资料

的准确性还有待改进,但与地面观测资料相比其优势是显而易见的,它是在目前条件下用来探讨云的时空分布特征的一个难得的科学途径。

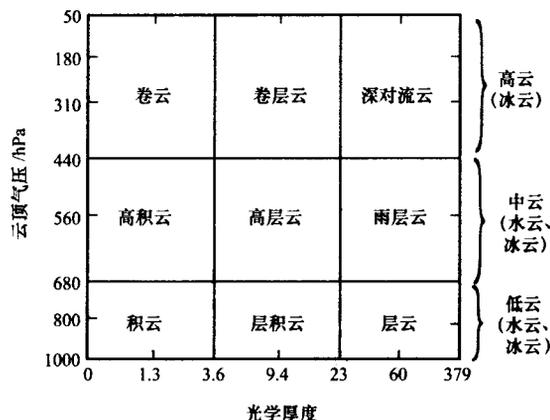


图 1 ISCCP - D2 云分类示意图

Fig. 1 ISCCP - D2 cloud classification

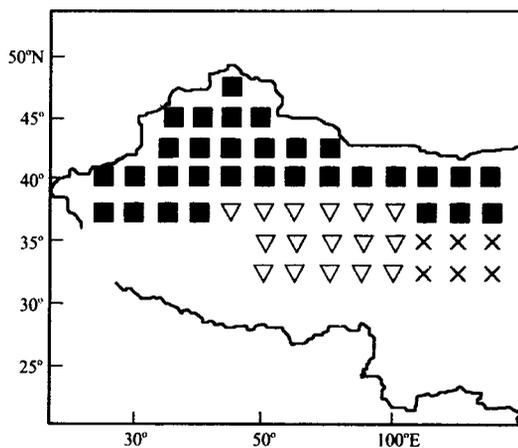


图 2 西北地区分区示意图

表示 A 区, ∇ 表示 B 区, \times 表示 C 区

Fig. 2 The three different regions of Northwest China

与东北、华北、长江流域、珠江流域等地区相比,西北地区的气候分区更为复杂,据宋连春等^[2]、谢金南等^[11]研究发现,西北地区可以划分为以下三个气候区:西北地区中、西部(包括新疆、柴达木盆地和甘肃河西走廊中西段)为西风带气候区;青海省及祁连山区为高原气候区;西北地区东部(陕西、宁夏、甘肃河西走廊东段以东、青海东部)为亚洲季风影响区及其边缘区域。这三个气候区对全球增暖具有不同的响应。据此,本文也把西北地区分为与之相应的 A、B、C 三个区域(图 2): A 区包括新疆、柴达木盆地、甘肃河西走廊中西段和內

蒙古西部,共31个格点,为西风带气候区;B区包括青海省及祁连山区,共16个格点,为高原气候区;C区包括陕西、宁夏、甘肃河西走廊东段以东、青海东部,共6个格点,为亚洲季风影响区及其边缘区域。

3 区域平均特征

为了了解对西北不同区域云量的总体情况,我们把A、B、C三区每一区的所有格点值作平均后代表该区的值,再把15年(1984年1月至1998年12月共180个月)的月平均云量进行平均,得到各区云参量的平均值、最大值、最小值及标准差。

从表1中可看到,C区的月平均总云量区域平均值最大,为58.3%,该区月平均云量最大可达81.9%,最小可达27.5%,标准差为12.5%;其次为B区,月平均总云量区域平均值为55.4%,该区月平均云量最大可达76.9%,最小可达29.8%,标准差为11.3%;A区的月平均总云量区域平均值最小,为52.5%,该区月平均云量最大可达73.6%,最小可达31.0%,标准差为10.2%。由此可见,就整个西北地区来说,各区月平均总云量的区域平均值在52.5%~58.3%之间。属亚洲季风影响区及其边缘区域的C区,即陕西、宁夏、甘肃河西走廊东段以东、青海东部一带,平均总云量资源最多,且三区中月平均总云量的最大值81.9%和最小值27.5%均出现在该区。属高原气候区的青海省及祁连山区,平均总云量资源次之。属西风带气候区的新疆、柴达木盆地、甘肃河西走廊中西段和内蒙古西部,平均总云量资源相对最少。

表1 A、B、C各区云参量的区域平均情况

Table 1 The regional averages of cloud parameters over region A, B, C

	A区		B区		C区	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
总云量/%	52.5	10.2	55.4	11.3	58.3	12.5
总光学厚度	2.6	0.6	3.0	1.0	6.6	4.3
总云水路径 ($g \cdot m^{-2}$)	44.9	14.3	50.7	19.4	77.6	29.6

从表1中还可看到,C区月平均总光学厚度区域平均值最大,为6.6。该区月平均总光学厚度最大可达18.2,最小可达0.2,标准差为4.3;其次为B区,月平均总光学厚度平均值为3.0,该区月平均总光学厚度最大可达5.6,最小可达1.3,标准差

为1.0;A区月平均总光学厚度平均值最小,为2.6,该区月平均光学厚度最大可达4.8,最小可达1.0,标准差为1.0。由此可见,就整个西北地区来说,各区月平均总光学厚度区域平均值在2.6~6.6之间。属亚洲季风影响区及其边缘区域的C区,即陕西、宁夏、甘肃河西走廊东段以东、青海东部一带,总光学厚度区域平均值最大,且三区中月平均总光学厚度的最大值18.2和最小值0.2均出现在该区。属高原气候区的青海省及祁连山区,总光学厚度区域平均值次之。属西风带气候区的新疆、柴达木盆地、甘肃河西走廊中西段和内蒙古西部,总光学厚度区域平均值相对最小。

表1还反映出,C区月平均总云水路径区域平均值也是最大的,为 $77.6 g \cdot m^{-2}$ 。该区月平均总云水路径最大可达 $182.6 g \cdot m^{-2}$,最小可达 $21.5 g \cdot m^{-2}$;其次为B区,月平均总云水路径区域平均值为 $50.7 g \cdot m^{-2}$,该区月平均总云水路径最大可达 $96.8 g \cdot m^{-2}$,最小可达 $17.6 g \cdot m^{-2}$;A区月平均总云水路径区域平均值最小,为 $44.9 g \cdot m^{-2}$,该区月平均云水路径最大可达 $100.5 g \cdot m^{-2}$,最小可达 $12.0 g \cdot m^{-2}$ 。就整个西北地区来说,各区月平均总云水路径区域平均值在 $44.9 \sim 77.6 g \cdot m^{-2}$ 之间。陕西、宁夏、甘肃河西走廊东段以东、青海东部一带,即C区,总云水路径区域平均值最大,表明该区平均来说云中含水量最大,且三区中月平均总云水路径的最大值 $182.6 g \cdot m^{-2}$ 也出现在该区。属高原气候区的青海省及祁连山区,即B区,平均总云水路径区域平均值介于A区和C区之间。属西风带气候区的新疆、柴达木盆地、甘肃河西走廊中西段和内蒙古西部的A区,总云水路径区域平均值最小,但与B区的值相当接近。且三区中的月平均总云水路径的最小值 $12.0 g \cdot m^{-2}$ 也出现在该区。

4 多年平均空间分布特征

将1983年7月至1998年12月,共186个月的ISCCP D2月平均资料进行平均,得到总云量及低、中、高云量的空间分布多年平均特征。

从图3来看,西北地区总云量普遍在50%~60%之间。总云量和中云量的分布形势很相似,高值区具有沿山脉分布的特征,这与在山脉的迎风坡由于气流抬升作用而容易形成云、特别是中云有关。沿着天山—昆仑山—祁连山一带以及陇南、陕

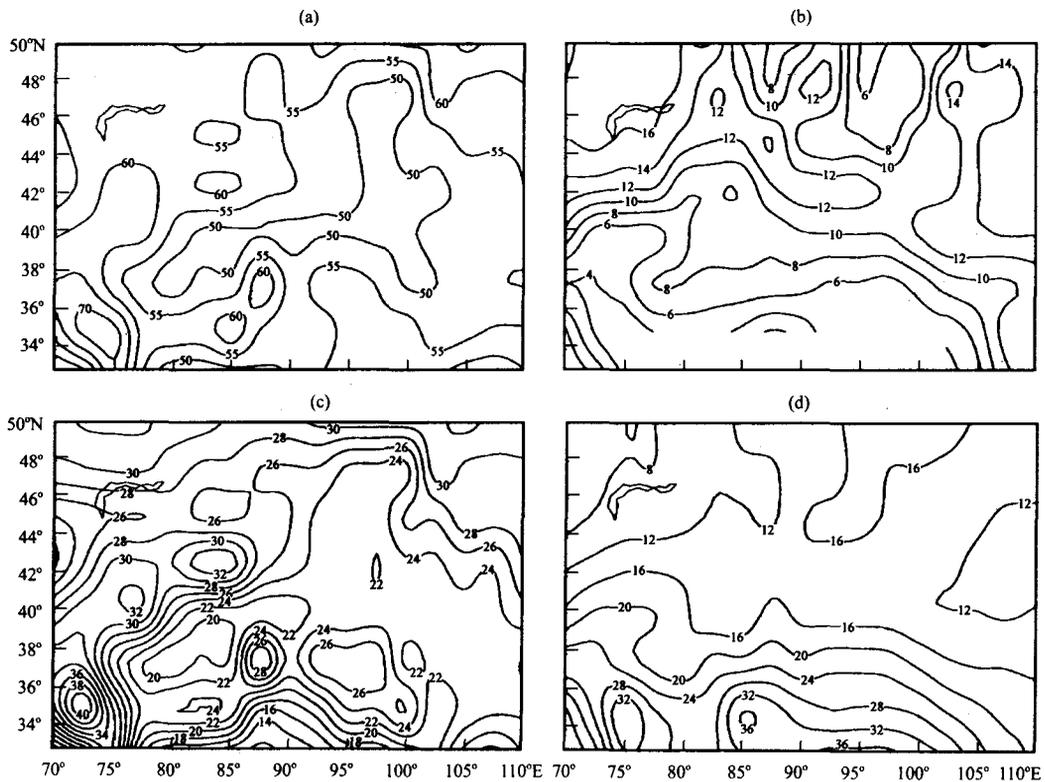


图3 总云量(a)及低云量(b)、中(c)、高云量(d)的多年平均分布

Fig. 3 The spatial distribution of multi-year averaged cloud amount for (a) total, (b) low, (c) middle, and (d) high clouds

南是总云量的高值区,约56%~60%。总云量的低值区在塔里木盆地—内蒙古西部戈壁沙漠—黄土高原西北部一带,最低值在48%左右。北疆北部是次低值中心,最低值约52%。中云量的分布与总云量相仿,沿着天山—昆仑山—祁连山一带以及陕南也是高值区,约为26%~40%;在塔里木盆地—内蒙古西部戈壁沙漠—黄土高原西北部一带为中云量的低值区,最低值在20%左右。高云云量和低云云量的分布形式相反,西天山—帕米尔高原—青藏高原以北为低云量的高值区(12%~14%)、高云量的低值区(12%~14%),而西天山—帕米尔高原—青藏高原北部则为低云量的低值区(<8%)、高云量的高值区(16%~36%),但高云云量的高值区同时还具有沿山脉分布的倾向。需要说明的一点是:由于ISCCP定义的低云云顶气压在680 hPa以上,而高山地区一般海拔在2000~3000 m以上,680 hPa以下的大气层很薄或不存,因而造成ISCCP资料在高山地区和青藏高原上低云量很低或不存。而ISCCP定义的深对流云和中云,特别是云层比较厚的中云大多属于地面观测中的低层云。

图4给出了总光学厚度、总云水路径的多年平

均空间分布。西北地区总光学厚度普遍在1~5之间,总云水路径普遍在24~96 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间。总光学厚度和云水路径的分布形势与总云量很相似,只是除了高值区沿山脉分布的特征以外,在北疆北部还存在另一个高值区。北疆北部及西天山—帕米尔高原—昆仑山—祁连山一带以及陇南、陕南的高值区,总光学厚度值约为4~5,总云水路径值约为80~96 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,表明在这些地方云的厚度和含水量在西北地区是最大的。总光学厚度和总云水路径的低值区也与总云量一样,在塔里木盆地—内蒙古西部戈壁沙漠—黄土高原西北部一带,总光学厚度最低值在1.5左右,总云水路径最低值在24 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右。

值得注意的是,上述分布特征与西北地区的降水分布特征有着相当好的一致性。总云量、中云量、总光学厚度、总云水路径的高值区,即天山—昆仑山—祁连山一带以及陕南(和陇南)地区也是西北地区雨量最丰沛的地区。另外,与总光学厚度和总云水路径在北疆北部的另一个高值区相对应,天山北麓也是西北地区的一个相对多雨区。而最干旱少雨的地区是吐鲁番盆地和塔里木盆地,相应地也

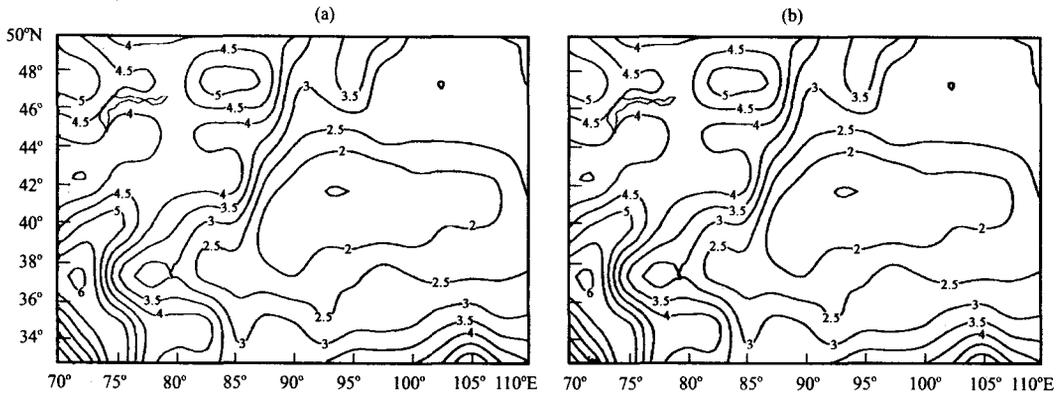


图 4 总光学厚度(a)、总云水路径(b)多年平均空间分布

Fig. 4 The spatial distribution of multi-year averaged (a) optical thickness and (b) water path for total cloud

是总云量、中云量、总光学厚度、总云水路径值最低的地区。

5 季节变化特征

为了更直观地了解各区云性质的季节变化，我们对 A, B, C 各区的所有格点值取平均后，再对每个月取 15 年平均，得到季节变化图(图 5)。

从图 5a 来看，A, B, C 三区总云量的年较差分别约可达 21%，24%和 29%。A 区在 4~7 月的总云量平均值接近 60%，是全年总云量最多的月份，自 8 月开始总云量急剧下降，11 月达到全年最低值，12 月略有回升，1 月又有些下降，之后的 2, 3 月总云量迅速上升；B 区在 3~6 月总云量的平均值维持在全年的最高水平，7 月开始逐渐下降，11 月达到全年最低值，12 月后开始回升；C 区在 3~6 月总云量的平均值维持在全年的最高水平，超过了 65%，7, 8 月虽然下降，但降幅不大，总云量平均值仍超过 60%，9 月还有所回升，10 月开始总云量急剧下降，到 12 月达到最低值后，1, 2 月总云量又迅速上升。总的来说，整个西北地区总云量春夏

季明显多于秋冬季，其中 A, B 两区在 3~7 月总云量的平均值维持在全年的高值区，而 C 区这个高值区还延伸到 8, 9 月。

从图 5b 和 c 来看，A, B, C 三区总光学厚度的年较差分别约可达 0.9, 1.1 和 3.0，总云水路径的年较差分别约可达 22.1, 42.9 和 64.8。在 A 区总光学厚度和总云水路径季节变化相对于其它两区来说比较平缓，6~8 月比较大，7 月达峰值，10 月为最低值。有关研究表明^[23]，蒙新地区的降水量也主要集中在夏季的 6~8 月；B 区总光学厚度和总云水路径从 3 月开始到 9 月是一个高值区，在 6 月达到峰值。10 月到来年 2 月维持较低。而在青海和祁连山大部分地区的春雨和夏雨都很明显，有些地方秋雨较春雨更多^[22-24]，看起来这与 B 区云的总光学厚度和总云水路径的季节分布特征有着内在的联系；与其它两区相比，C 区总光学厚度和总云水路径的值较早(3 月)就已达到相当高的水平，然后是一个逐渐升高的过程，在 7~9 月的值比较大。总光学厚度在 8 月达峰值、总云水路径在 9 月达峰值之后直到 10 月仍维持较高，其后逐渐下降，到 1

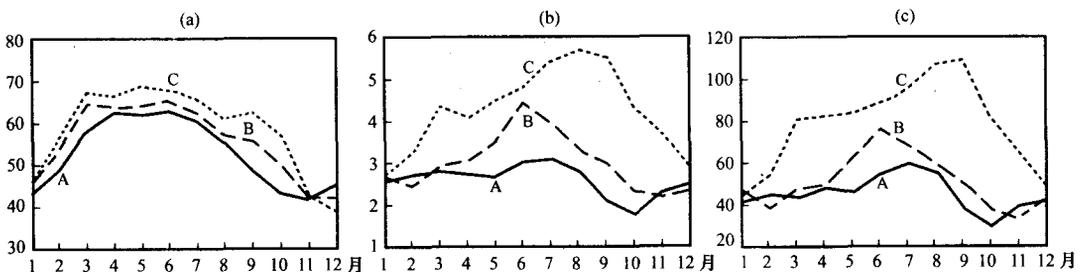


图 5 各区总云量(a)、光学厚度(b)及云水路径(c)的季节变化

Fig. 5 Seasonal variation of total cloud amount (a), optical thickness (b) and water path (c) over regions

月达最低值。这与黄土高原南部及渭河流域雨季来得早,且因多秋雨,雨季较长,各为5~9月和4~10月^[23]的降水季节变化也吻合得较好。

6 云水资源的变化趋势

图6给出了三个区域180个月(1984年1月至1998年12月)的月距平图和变化趋势。从图中可以看到:包括新疆、柴达木盆地、甘肃河西走廊中西段和内蒙古西部的西风带气候区A区,15年来,总云量略呈下降趋势,约下降了2.4%;总光学厚度和总云水路径均略呈上升趋势,分别约上升了0.2和 $5.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。而包括青海省及祁连山区的B区,总云量15年来略呈下降趋势,约下降了0.7%(近几年呈上升趋势);但总光学厚度和总云水路径15年总的变化均呈明显上升趋势,分别约上升了0.8和 $16.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$;包括陕西、宁夏、甘肃河西走廊东段以东、青海东部,为亚洲季风影响区及其边

缘区域的C区,15年来,总云量呈下降趋势,约下降了4.4%;总光学厚度呈较明显的上升趋势,约上升了0.4;总云水路径略呈上升趋势,约上升 $4.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

从上述结果来看,15年来各区云量总的变化趋势没有上升,但各区云的总光学厚度和总云水路径均呈上升趋势,也就是说,西北地区云的厚度和含水量总的变化趋势均是上升的。这有利于在西北地区开展人工增雨作业,特别是对于包括祁连山在内的B区。我们知道,位于甘肃河西走廊西南、青海高原东北部的祁连山平均海拔在3700 m以上,是甘肃河西黑河等内陆河、青海大通河的发源地和青海湖最主要的补给水源地,也是河西绿洲的天然水库,因此祁连山地区水资源的变化直接影响着河西内陆河、青海湖与大通河的水量,在这一地区实施人工增雨作业将会产生极大的社会、经济效益。而与其它两个区域比较而言,在B区总光学厚度

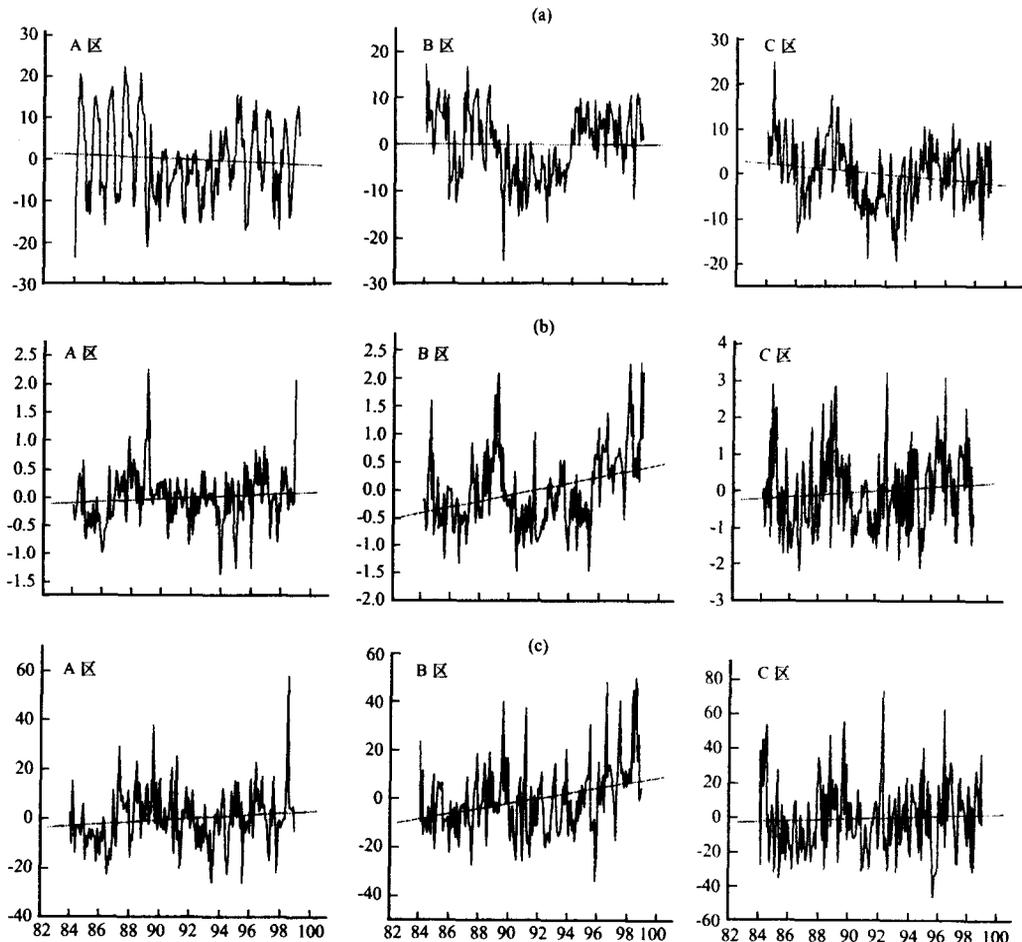


图6 A, B, C三区云参量月距平的年际变化和趋势

(a) 总云量, (b) 总光学厚度, (c) 总云水路径

Fig. 6 The interannual variation and trend of monthly anomalies of (a) cloud amount, (b) optical thickness and (c) water path for total cloud over region A, B, C

和总云水路径 15 年来总的变化均呈明显上升趋势,也就是说,该地区云的厚度和含水量 15 年来的变化趋势是明显增加的。这一趋势如能维持将有利于该地区的人工增雨作业。

7 结论

通过上述分析,可以得到以下结论:

(1) 就区域平均特征来看,各区月平均总云量的区域平均值在 52.5%~58.3%之间,总光学厚度区域平均值在 2.6~6.6 之间,总云水路径区域平均值在 44.9~77.6 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间。属亚洲季风影响区及其边缘区域的 C 区,即陕西、宁夏、甘肃河西走廊东段以东、青海东部一带,平均总云量、总光学厚度和总云水路径最大,表明该区云水资源最丰富。且三区中月平均总云量的最大值 81.9% 和最小值 27.5% 均出现在该区;属高原气候区的青海省及祁连山区,平均总云量资源次之;属西风带气候区的新疆、柴达木盆地、甘肃河西走廊中西段和内蒙古西部,平均总云量资源相对最少。

(2) 从多年平均空间分布特征来看,西北地区总云量普遍在 50%~60% 之间,总光学厚度普遍在 1~5 之间,总云水路径普遍在 24~96 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间。总云量、中云量、总光学厚度和总云水路径的分布形势很相似,并与西北地区的降水分布特征有着相当好的一致性。总光学厚度和总云水路径除了也具有高值区沿山脉分布的特征以外,在北疆北部还存在另一个高值区,低值区都在塔里木盆地—内蒙古西部戈壁沙漠—黄土高原西北部一带;另外,高云量 and 低云量的分布形势相反,西天山—帕米尔高原—青藏高原以北为低云量的高值区(12%~14%)、高云量的低值区(12%~14%),而西天山—帕米尔高原—青藏高原北部则为低云量的低值区(<8%)、高云量的高值区(16%~36%)。

(3) 从季节变化来看,整个西北地区总云量春夏季明显多于秋冬季,其中 A、B 两区在 3~7 月总云量的平均值维持在全年的高值区,而 C 区这个高值区还延伸到 8、9 两月;总光学厚度和总云水路径 A 区在 6~8 月最大, B 区在 5~7 月最大, C 区在 8~10 月最大,其它月份较小,这与各区降水量的季节变化有较好的一致性。

(4) 15 年来总的变化趋势是:各区总云量没有上升,但各区云的总光学厚度和总云水路径均呈上升趋势。A 区总云量略呈下降趋势,总光学厚度和总云水路径均略呈上升趋势;而 B 区总云量 15

年来的变化趋势不明显,只在近几年呈上升趋势,但总光学厚度和总云水路径 15 年来的变化均呈明显上升趋势; C 区 15 年来总云量呈下降趋势,总光学厚度呈较明显上升趋势,总云水路径略呈上升趋势。

致谢:在本文的工作过程中曾得到邵爱梅、黄艇、季明霞、李皓睿等同志的协助,在此表示衷心的感谢!

参考文献

- [1] 林奇胜,刘洪萍,张安录. 论我国西北干旱地区水资源持续利用[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(3): 54 - 58
- [2] 宋连春,张存杰. 20 世纪西北地区降水量变化特征[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 143 - 148
- [3] 魏丽,钟强,侯萍. 中国大陆卫星反演云参数的评估[J]. 高原气象, 1996, 15(2): 147 - 156
- [4] 魏丽,钟强. 青藏高原云的气候学特征[J]. 高原气象, 1997, 16(1): 10 - 15
- [5] 王可丽,江灏,吴红. 青藏高原地区的总云量[J]. 高原气象, 2001, 20(3): 252 - 257
- [6] 翁笃鸣,韩爱梅. 我国卫星总云量与地面总云量分布的对比分析[J]. 应用气象学报, 1998, 9(1): 33 - 37
- [7] 刘瑞霞,刘玉洁,杜秉玉等. 利用 ISCCP 资料分析青藏高原云气候特征[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(2): 226 - 234
- [8] 宜树华,刘洪利,李维亮等. 中国西北地区云时空分布特征的初步分析[J]. 气象, 2003, 29(1): 7 - 11
- [9] 刘洪利,朱文琴,宜树华等. 中国地区云的气候特征分析[J]. 气象学报, 2003, 61(4): 466 - 473
- [10] Rossow WB, A W Walker, L C Garder. Comparison of ISCCP and other cloud amounts[J]. J Climate, 1993, 1(6): 2394 - 2418
- [11] 谢金南主编. 中国西北干旱气候变化与预测研究(第一卷)[M]. 北京:气象出版社, 2000. 1 - 8
- [12] 沈志宝,陈有虞. 青藏高原地区平均云量的估算及其分布特征[J]. 高原气象, 1987, 6(4): 335 - 343
- [13] 李栋梁. 中国西北地区年平均气温的气候特征及异常研究[C]. 见:刘晓东主编. 中国西部区域气候变化及相关问题的研究. 中国科学院兰州高原大气物理研究所青年气候学论文集刊(1993 - 1994)
- [14] Rossow WB, A R Schiffer. Advances in understanding clouds from ISCCP[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1999, 80(11): 2261 - 2287
- [15] 马晓燕,季国良. 利用 ERBE 资料分析中国地区云辐射强迫的时空变化[J]. 高原气象, 2000, 19(2): 150 - 158
- [16] 王可丽,钟强,侯萍. 青藏高原地区云对地面有效辐射的影响[J]. 高原气象, 1994, 13(1): 57 - 64
- [17] 王可丽,吴国雄,江等. 青藏高原云-辐射-加热效应和南亚夏季风[J]. 气象学报, 2002, 60(2): 173 - 180
- [18] 汪宏宇,赵高祥. 云和辐射[J]. 大气科学, 1994, 18(增刊): 910 - 932

- [19] Wetherald R T, S Manabe. Cloud feedback procession in a general circulation model[J]. *J Atmos Sci*, 1988, 45: 1397 - 1415
- [20] Zhao Bolin, Zhang Xiaoli, Zhu Yuanjing. Study-radiation effect on climate in eastern Asia[J]. *Adv Atmos Sci*, 1992, 9: 257 - 267
- [21] Webster P J, G L Stephens. Cloud-radiation and the climate problem[M]. In: Houghton J T ed. *The Global Climate*. Cambridge University Press, 1984. 63 - 78
- [22] 李栋梁, 冯建英, 陈雷等. 黑河流域和祁连山气候的年代际变化[J]. *高原气象*, 2003, 22(2): 104 - 110
- [23] 盛成禹等编著. *中国气候总论*[M]. 北京: 科学出版社, 1986. 428 - 470
- [24] 朱守森, 王强. 祁连山北坡降水的时空分布及近期变化[J]. *冰川冻土*, 1996, 18(增刊): 196 - 204

Temporal and Spatial Distributions of Cloud Water Resources over North western China

CHEN Yong-hang¹, HUANG Jian-ping¹, CHEN Chang-he¹, ZHANG Qiang²,
FENG Jian-dong¹, JIN Hong-chun¹, WANG Tian-he¹

(1. *College of Atmospheric Sciences of Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*; 2. *Lanzhou Institute of Arid Meteorology, Chinese Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China*)

Abstract : The temporal and spatial characteristics of cloud water resources over Northwestern China have been analyzed using the ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) monthly mean D2 data from July 1983 to December 1998. The Northwestern China has been divided into three climatical regions in this study. The results show that the regional averaged total cloud amount, optical thickness and water path are between 52.5% ~ 58.3%, 2.6 ~ 6.6 and 44.9 ~ 77.6 g · m⁻², respectively. The major feature of spatial distribution resources that higher value areas of cloud properties are all over Tianshan Mountains, Kunlun Mountains and Qilian Mountains, while the lower values of cloud properties locate over Tarim Basin, the western desert of Inner Mongolia and the northwestern part of Loess Plateau. The cloud properties also show an increasing tendency during recent years over the Plateau climatical region which includes Qilian Mountains and Qinghai province. In particular, the optical depth and water path have risen 0.8 and 16.4 g · m⁻² in the 15 years, respectively.

Key words : Cloud amount; Cloud optical thickness; Cloud water path