

中国地区冰云时空分布特征研究

李昭霞

(双流区气象局,四川 双流 610200)

摘要:使用 MODIS 资料,分析了 2001–2012 年中国地区冰云光学厚度和粒子有效半径的时空分布特征。结果表明:在中国区域内冰云光学厚度的空间分布呈现出南方多于北方,而冰云粒子有效半径的空间分布呈现出北方大于南方的现象。春季冰云光学厚度及粒子有效半径季节平均最小;夏季冰云光学厚度以及粒子有效半径的空间分布范围最广,并且夏季冰云光学厚度以及粒子有效半径季节平均值达到最大;冬季时冰云光学厚度及粒子有效半径季节平均随时间的变化剧烈,在中国地区冰云较少分布。冰云光学厚度的分布与地形也存在关系,盆地区域小于山地区域;青藏高原东南部冰云光学厚度的空间分布广。同时发现,冰云的光学厚度与温度有关,温度越高光学厚度值也会越大。研究中国地区冰云的时空分布对我们掌握不同地区的降水、环境气候等的变化有很大的帮助。

关键词:中国地区;冰云光学厚度;冰云粒子有效半径;MODIS

0 引言

云也可以分为水云和冰云,冰云相较于液态水云在形态、大小上存在明显不同。本文主要研究冰云在中国的时空分布特征,冰云在三类云中是位于对流层上部的高云,高云是由冰晶组成,部分中云也属于冰云。由于中国不同地区在气候、温度等气象因素上存在差异,所以冰云的时空分布也有很大差异。现在已有的一些研究资料^[1]不难看出研究领域中大部分还是着重于对中国部分区域云的研究,如西北、西南、南方等地区云粒子大小和光学厚度对降水等的影响,但是对于全国范围内冰云的时空分布特征方面的研究并不是很多,研究冰云在中国区域的时空分布将对我们了解不同地区的气候、环境等方面的差异提供很大帮助。

段皎等^[2]根据 ISCPP 最新的 D2 云气候资料并且集合 MODIS 云资料进行统计分指出:夏季云的光学厚度与云滴有效半径的变化趋势最显著,并进行了显著性检验。结合云量变化发现云滴有效半径的变化对云光学厚度的影响可能在夏季最大。杨大生等^[3]利用 CloudSat 卫星资料分析了 2006–2008 年中国地区夏季月平均云粒子有效半径的垂直和区域变化特征,得出不同纬度带上冰云粒子有效半径相类似,在冰云下边界最大,随高度增加而减小。陈勇航等^[4]利用 1983 年 7 月–2001 年 9 月国际卫星云气候计划 ISCPP D2 的月平均资料,对西部不同区域不同类型的云的云量和云水路径的时空分布及其与降水的关系进行了研究。叶晶等^[5]主要针对薄的冰云覆盖在低层水云的多层云情形,利用 MODIS 吸收通道和非吸收通道同时进行反

演算法,提出云光学厚度和有效粒子半径反演算法要考虑多层云的因素,并设计了方案。邓军英等^[6]采用 CloudSat 卫星云廓线雷达反演资料 2B-CLDCLASS, 2B-CWC-RO 和 2B-GEOPROF 以及地面气象站降水资料,得出冰粒子主要分布在 2 ~ 13 km 的高程内,等效半径的低值主要分布在云层上部,高值主要分布在云层下部。赵凤生等^[7]开发出利用 NOAAVHRR 资料反演云光学厚度和云滴有效半径的迭代方案。在国外的研究现状,Rosenfeld 等^[8]利用 NOA A 上的 AVH RR 数据反演云顶附近的云滴有效半径,通过与雷达回波的对比发现 3.7 μm 的辐射中确实包含降水云云顶粒子物理状态的信息。

中国国土面积排在世界前茅,拥有众多河流、湖泊及海洋,但是可供人类生活用的淡水资源却相当匮乏,淡水资源的人均占有量特别少。在我国大部分地区为了解决社会快速发展而导致的水资源短缺的问题,靠节流和开源已经对地下、地表水进行了大量开发,现在可使用的空间更是少之又少。地表和地下水的主要来源是大气中云的降水,雨水便成了水循环的非常重要的组成部分,更是宝贵的水资源可持续利用的重要来源^[6]。一般在积云、层云、卷云中最易于形成降水的是积云,积云中很少包括冰云在内,冰云距地面的高度相当高,冰云光学厚度不大,形成冰云的主要是冰粒子,所以在那个高度水汽含量少,凝华增长进行得很慢,冰云粒子之间相互碰撞的机会少,降水形成的更少。即使引起了降水,也往往在下降途中被蒸发掉,很少能落到地面,虽然如此却不能忽略云中冰粒子的分布对降水的影响,相同的地方在不同降水过程时云里面冰粒子的等效半径的竖直分布具有特别高的相似

性^[6]。所以对于中国地区冰云时空分布特征的研究是有意义的,我们可以根据冰云的分布从而推测该地区的降水和气候的情况,利于解决水资源短缺的状况。其次,冰云中冰晶粒子的形状、粒径大小和其对辐射的吸收、散射等的作用比水云复杂,所以对气候环境的影响不可小看,了解中国地区冰云的时空分布可以更好掌握不同地区气候环境。

1 研究方法与资料概况

为了研究冰云在中国地区的大气中分布情况,利用冰云光学厚度及有效半径的数据资料,这些资料来源于MODIS。MODIS 资料的空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。选取的时间为 2001–2012 年,区域范围是中国地区 ($16^\circ \text{N} \sim 53^\circ \text{N}$, $73^\circ \text{E} \sim 135^\circ \text{E}$),资料将全球区域按经纬度划分成 180×360 的矩形网格点,每一个网格点内的数据资料都足以代表那个地方的特征。首先在分析空间分布时,对 12 张格点图中的每一个格点进行逐个平均,再进行冰云在中国区域的空间分布的分析;分析随时间变化时,先对冰云光学厚度和有效半径逐年、逐月相加求平均值,为了更好讨论中国地区冰云在不同季节随时间的变化,按照相关季节划分标准:把 3–5 月定为春季,每年 6–8 月定为夏季,秋季是在 9–11 月,而 12 月至次年 2 月为冬季,分别将每年不同季节相加取平均作为季节平均,根据这些数据资料分析其变化。

选用了中分辨率成像光谱仪 MODIS 是 EOS 系列卫星上的最主要的仪器,EOS 卫星是美国地球观测系统计划中一系列卫星的简称。MODIS 卫星资料来源于美国国家宇航局(NASA),EOS 观测计划中的 Terra 和 Aqua 两颗太阳同步极轨卫星。MODIS 拥有 36 个光谱通道,覆盖可见光、近红外和热红外波段,拥有 250 m、500 m、1000 m 三个不同的空间分辨率,扫描宽度 2330 km。MODIS 每两天连续提供地球上任何地方白天反射图像和昼夜的发光光谱图像数据,包括对地球陆地、海洋和大气观测的可见光和红外波谱数据。国内接收使用 MODIS 数据开始于 2001 年,且大多用在陆地和大气研究方面,卫星资料具有覆盖范围广、云参数完备、资料真实度高等优势,在对云的研究中起到的良好的作用,使研究更加真实、更具科学依据。

2 中国地区冰云空间分布状况

2.1 中国地区年均冰云光学厚度与粒子有效半径空间分布

图 1 是 2001–2012 年中国区域年均冰云光学厚度

在中国大气的空间分布状况:横断山、秦岭、华北平原以南地区冰云光学厚度大于以北的地区,冰云光学厚度由南向北呈现逐层递减的变化形式。在图上显示新疆吐鲁番盆地、塔里木盆地和青海柴达木盆地以及青藏高原珠峰附近的冰云少,冰云光学厚度为 8~10,盆地地区冰云少可能是因为盆地地势低以至于抬升气流较弱而不易于形成冰云。而从青藏高原东南部、中国东海这一沿线(包括海南岛)的区域光学厚度都很大,湖南省是中国冰云光学厚度最大的省份,达到 30 左右。冰云光学厚度基本是南部地区大于北部地区,说明在横断山、秦岭、华北平原以北的区域尤其是新疆地区主要是以低云为主,所以冰云光学厚度小而其以南地区对流发展旺盛使云抬升高度要比北方地区高,所以西南地区尤其是四川盆地主要是以高云和中云为主。这种分布情况与南北方气候有明显的关系,南方气候温暖湿润为冰云的形成提供了有利的外在条件。根据有关文献研究指出^[9]:青藏高原区域的云在气候形成因素-气候发生过程-气候类型以及三者之间的联系上具有明显意义。以往的统计数据结果也证明,对流云在青藏高原出现的比其他地区多,基本一年 365 天都出现且频率高特别是在暖季,几乎每天都能可见到对流云团,与同纬度东部地区的武汉、杭州比起来还要多 3~7 倍,甚至比低纬度区域的广州还要多 3~5 倍。文献的记录结果与 MODIS 卫星观测到的结果是一直。根据过去的资料显示中国的大部分地方云的光学厚度表现出增长的形势,在这些增长的地区里面很明显的有两个:一个是以青藏高原东部地区为中心,包括西南区域及部分西北区域;二是以内蒙古的东部及蒙古国东部为中心,其中包括东北地区,最大变化可以达到每年 0.12。然后在东南沿海地区与新疆西部地区却发现冰云光学厚度有减少的形势^[2]。这种变化也可以从图中看出,从 2001–2012 年青藏高原的东部及四川盆地东部冰云光学厚度达到 18 以上,内蒙古东部及中国东北地区冰云光学厚度也都在 14 以上。

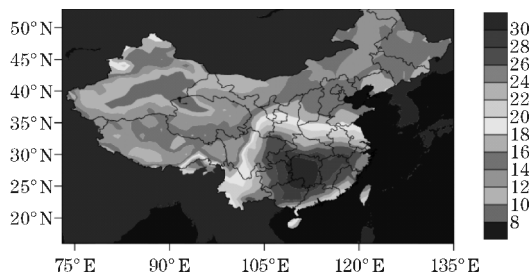


图 1 2001–2012 年中国地区年均冰云光学厚度空间分布

根据 2001–2012 年 MODIS 资料,图 2 展示了这 12

年期间中国地区年均冰云粒子有效半径的空间分布状况。中国地区冰云粒子有效半径呈现昆仑山-秦岭以北大于以南的地区,粒子有效半径值逐层递减。冰云粒子有效半径最大的地方是在内蒙古自治区的满洲里附近和黑龙江省乌苏里江最南部的地区,最大甚至达到了 $28\text{ }\mu\text{m}$;最小值则出现在四川、重庆、贵州三个省份相接壤的区域,平均为 $19\text{ }\mu\text{m}$ 左右。如果以 35°N 为界限可以大致将中国区域分成两个部分,在中国 35°N 以北冰云的有效直径在那些地方呈现出了增长的形势,特别是在西北地区,最大增加在河套地区,达到每年增加 $0.3\text{ }\mu\text{m}$;然后在长江以南部分区域,比如广州、广西、四川盆地及云南等冰云的有效直径却又表现出了降低得形势,其中发现华南减少的最快,每年减少 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ ^[2],这一结论与本文提到的冰云粒子有效半径的分布的现象基本是一致的。通过与12年平均的空间分布图作对比,可以得出结论:在2001–2012年期间中国地区冰云浓度越大的区域,冰云粒子半径越小而粒子半径越大浓度却越小。产生这种现象的原因可能是,在秦岭以南的区域普遍是中国人口比较密集的地区,而秦岭以北尤其是西北地区人口较少且分布不密集,所以人为排放的气溶胶在数量上南方远远大于北方,这样就会使得南方地区大气中可以形成冰云粒子的凝结核增多,冰云宏观数量虽然多,但是就微观而言都为小粒子,有效半径比较小。Twomey 在其的研究中提出假设云的液态水含量不变,此时当大气中的气溶胶含量变多时,云滴的数浓度会变多,从而产生大量的小云滴。这个被称为第一间接效应,也叫作 Twomey 效应^[10]。

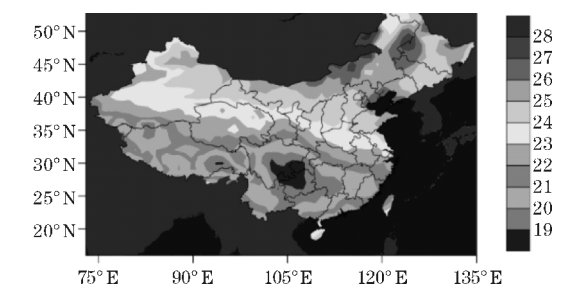
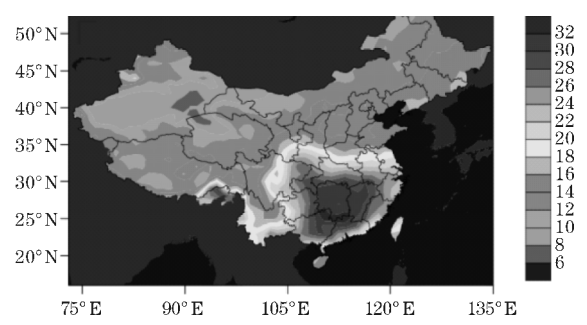


图2 2001–2012年中国地区年均冰云粒子有效半径空间分布

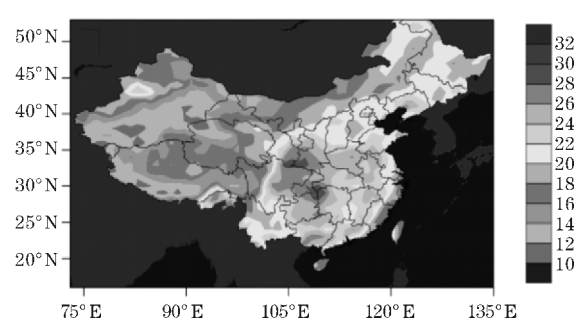
2.2 中国地区季平均冰云光学厚度与粒子有效半径空间分布

图3是中国地区季平均冰云光学厚度的时空分布图,冰云的光学厚度在不同季节的空间分布存在差异。春季(图3a):中国的广西、广东、湖南三省交界接壤处为高值中心达到32;向南冰云光学厚度值逐层递减,

新疆东部和青海西北部的部分地区冰云光学厚度在6~8,造成此现象的原因可能是在这两部分地区地势低气流辐合上升少而不易于云的形成。在夏季(图3b)中发现,高值中心向西北方向移动,高值比春季有所减小在26~28;从图上的黄色区域看出平均值大于20的区域范围扩大,其北部由秦岭扩大至宁夏平原,东部则由黄淮平原向东北方向延伸至东北平原地区,新疆西北部分地区光学厚度也在增大,造成这种现象的原因可能是:在夏季时,低层大气中的太平洋副高和印度低压为最主要的气压系统。在7月,太平洋副高中心位于太平洋东部,强度为102.5 kPa,太平洋副高脊影响中国天气,是东南季风的源头。印度低压的出现与消长和大陆增温的程度有关,5月出现,7月达到最强,影响范围大,9月消退,大陆出现热低压,气流向大陆辐合上升^[11]。从秋季(图3c)来看,整个东北地区、西北地区冰云光学厚度相比于夏季明显减小,天气晴朗,而且高值区仍旧在南部地区为30~32,冰云光学厚度最大值同夏季相比有所增加。冬季(图3d)与春季图相比看出冰云光学厚度平均值大于20的范围是大致相同的,并且高值中心的位置及大小也基本相同,但是在中国北方(蒙古东部、东北、京津冀地区)区域冰云光学厚度平均值整体大幅度减小,漠河地区甚至减小到5为中国地区的最小值。但从图中发现天山北部区域光学厚度达到20其原因是:冬天的时候极地大陆气团与冰洋气团被困在天山北坡围成的密闭空间中,从而形成了地形锋性质的准静止锋,导致产生微雪或雾的天气^[12]。



(a) 春季



(b) 夏季

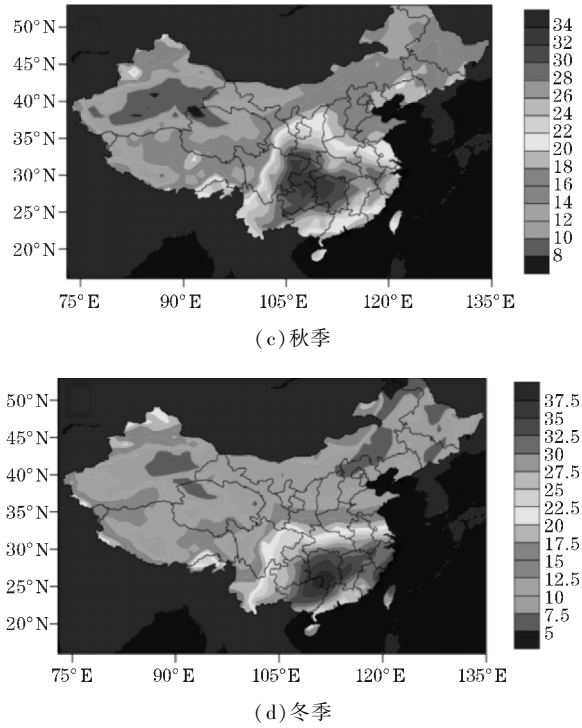


图 3 2001-2012 年中国地区季平均冰云光学厚度空间分布

图 4 描述了中国地区冰云粒子有效半径季平均在不同季节的分布状况,从中国地区冰云粒子有效半径多年平均春季分布图(图 4a)看出:大值区位于环绕渤海的陆地、内蒙古的满洲里和黑龙江的齐齐哈尔地区附近,达到 $27\text{ }\mu\text{m} \sim 28\text{ }\mu\text{m}$;小值区位于青藏高原的东南部 and 我国四川盆地、重庆、湖南接壤处,为 $20\text{ }\mu\text{m} \sim 19\text{ }\mu\text{m}$ 。在夏季(图 4b)时冰云云滴有效半径相比于春季增大,而且大于 $24\text{ }\mu\text{m}$ 的区域在中国分布的范围也有所扩大;由原来的黄淮平原向西南方向扩大至长江中下游平原地区,中国沿海的几个省份(云南省南部、江浙地区、福建两广以及海南省)冰云粒子有效半径均达到大于 $23\text{ }\mu\text{m}$;青藏高原部分地区冰云粒子有效半径也大于春季,在西藏自治区的尼玛县体现明显平均值大于 $23\text{ }\mu\text{m}$,但是最小值的区域慢慢向西移动到达成藏高原西南部分地区。秋季(图 4c)高值区域范围向北有所回退,位于内蒙古和东北地区在 $26\text{ }\mu\text{m} \sim 27\text{ }\mu\text{m}$;南方的低值向东回退至与春季大致相同的范围为 $18\text{ }\mu\text{m} \sim 19\text{ }\mu\text{m}$ 。冬季(图 4d)大于 $24\text{ }\mu\text{m}$ 的区域继续减小,高值中心位于蒙古高原和东北平原地区为 $30\text{ }\mu\text{m} \sim 32\text{ }\mu\text{m}$;低值区域的范围增加,同比秋季比较则分别向西南和东南方向扩增,冰云粒子有效半径小于 $16\text{ }\mu\text{m}$ 。从中国地区冰云粒子有效半径在不同季节的空间分布状况与年均的空间分布状况作比较得出:分布的总体形势相同,新疆、内蒙古、东北地区以及秦岭以北的地区大于这些地方以南的地区。此外夏季时,冰云粒子有效半径的纬度-高度分布有特点是冰云

底边出现高度南高北低的现象,对于 20°N ,达到 5 km ,而对于 45°N ,却不到 3 km 。这可以看作是由南北区域的温度层结的明显差异而造成的。在夏季的时候,低纬地区的热对流明显是强于中纬度地区的,低层大气的温度也显然是高于中纬度地区。冰云粒子有效半径季节空间分布与光学厚度季节空间分布也是呈相反状况^[3]。

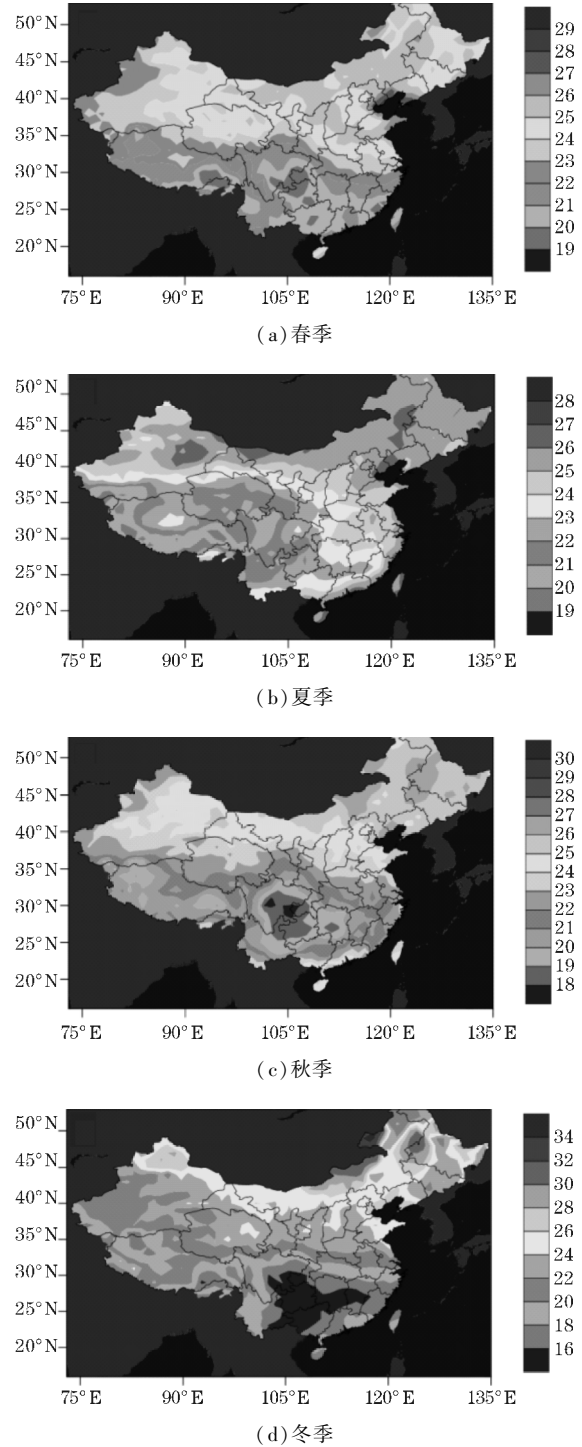


图 4 2001-2012 年中国地区季平均冰云粒子有效半径空间分布

3 中国地区冰云随时间变化

3.1 中国地区年均冰云光学厚度与有效半径随时间变化

图 5 是 2001–2012 年这 12 年期间中国地区冰云光学厚度每一年平均随时间变化曲线图,从图中可以清楚地看到冰云光学厚度在这些年期间表现出减小的形势。存在 2 个峰值分别是 2002 年 17.55 和 2008 年 17.07,其中光学厚度最大值出现在 2002 年,而最小值出现在 2011 年为 15.66。这 12 年期间 2001–2002 年和 2007–2008 年中国地区冰云光学厚度涨幅较大,在 1999 年、2000 年、连续大旱的 2001 年,中国北方地区又出现了旱灾,导致全国大部分地区温度偏高。云光学厚度(COT)是云对太阳光的衰减作用,所以在高温的影响下云对阳光的衰减作用增强,所以导致冰云光学厚度增加^[10];2007 年是自从 1951 年有气象观测以来最暖的一年,这同 2002 年导致冰云光学厚度增加的原因相同。同时图上还显示出 2011 年是冰云光学厚度值最小的年份,2011 年中国呈现北涝南旱的局面,全国平均降水量由 2010 年的历史次高值迅速降为历史最低值,所以冰云的光学厚度也相应有所减少。2004–2007 年和 2009–2010 年中国地区冰云光学厚度随时间变化不大,所以在这几年期间中国的气候没有出现极端的状况。

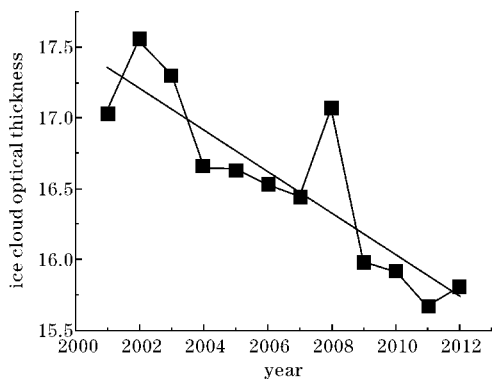


图 5 2001–2012 年中国地区年均冰云光学厚度随时间的变化

图 6 是 2001–2012 年中国地区冰云粒子有效半径每年平均值随时间变化的曲线图,从图中看出中国地区冰云粒子有效半径在这些年期间总体呈现出减小的趋势。冰云粒子有效半径年均随时间的变化存在 4 个峰值分别是:2002 年为 23.86 μm 、2004 年和 2006 年相同均为 24.06 μm 、2008 年为 23.92 μm 、2010 年 24 μm ,其中最大值是在 2004 年与 2006 年的 24.06 μm ,2011 年为最小值 22.12 μm ;变化平稳的是

在 2001–2008 年,而在 2008 年之后出现两次大幅度减小的情况且 2010–2011 年的减小幅度比 2008–2009 年的减小幅度大得多,造成这两次大幅度的减小的原因可能是多方面的,但与图 5 对比来看在这一段时间内中国地区冰云的光学厚度也是略微减小的,根据第一间接效应:冰云粒子数浓度的减少会直接导致粒子有效半径增加,但是从图 5 和图 6 发现冰云光学厚度与有效半径却是一起减小的,在中国的西部 12 个省级行政区、内蒙古西部以及蒙古国,冰云的光学厚度与有效直径这两个变量呈现出正相关;而中国的东部省份和内蒙古东北地区,冰云的光学厚度和有效直径却是呈现出负相关,由此可见冰云变化的复杂性^[2]。

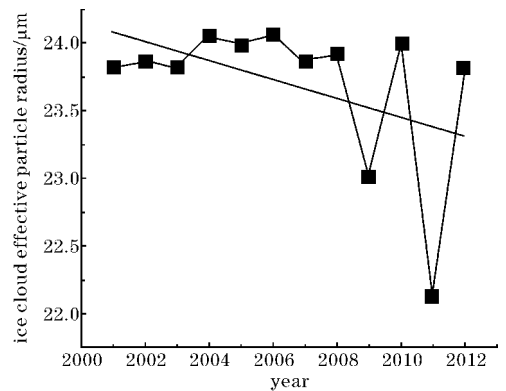
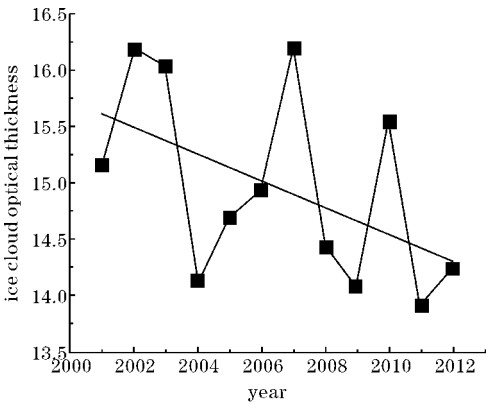


图 6 2001–2012 年中国地区年均冰云粒子有效半径随时间变化

3.2 中国地区季平均冰云光学厚度与有效半径随时间变化

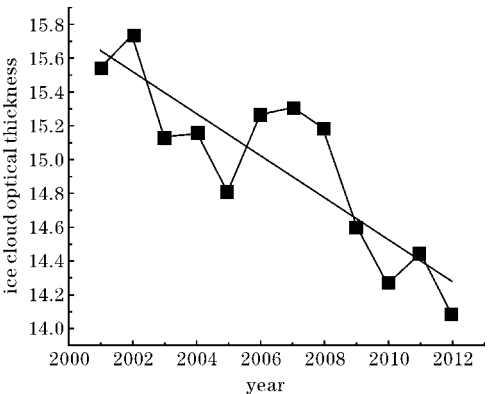
图 7 是 2001–2012 年冰云光学厚度在不同季节随时间的变化曲线图,从图中可以看出:春季时(图 7a)有 4 个峰值,分别是 2002 年 15.74、2004 年 15.16、2007 年 15.31 和 2011 年 14.45,2002 年出现春季最大值,2012 年值最小为 14.08;细分这 12 年间的变化:2002–2005 年下降,2008–2010 年大幅下降,2011 年略微上升但 2012 年又下降。夏季中国地区冰云光学厚度随时间的变化(图 7b)呈现 3 个峰值分别为 2002 年 20.08、2005 年 19.48 和 2008 年 19.06 其中最大值也出现在 2002 年,最小值出现在 2010 年 17.36。秋季中国地区冰云光学厚度随时间的变化曲线(图 7c)也呈现 3 个峰值,峰值出现在 2002 年 18.22、2005 年 17.49 和 2008 年 17.8 最大值出现在 2002 年,2011 年最小值 16.15;2003–2004 年和 2006–2011 年大幅下降,秋季冰云光学厚度随时间变化过程中波动较大。冬季(图 7d)同样呈现 3 个峰值,峰值为 2002 年 16.18、2007 年 16.23 和 2010 年 15.57 其中最大值在 2007 年,最小值出现在 2011 年 13.87;2004 年和 2009 年之后冰云光学

厚度均出现大幅上升幅度大,波动最为剧烈。四个季节冰云光学厚度最大值均出现在 2002 年与年均随时间变化最大值出现的年份是相同的。夏季冰云光学厚度最大的原因是:温度基本是全年中最高时候,而冰云的形成与云顶的对流活动有关系,夏季的高温为对流层顶云层的活动提供有利的条件,对流层顶活动越剧烈对云的形成越有利,所以形成的中云和高云越多。导致冬季冰云光学厚度的变化剧烈可能与日照时间和降雪之后雪面对太阳光的反射有关,并且低温对形成冰云是有利的但是冬季云顶的对流不旺盛却又抑制冰云形成。

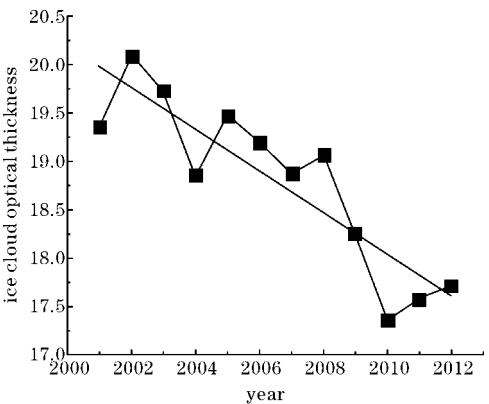


(d) 冬季

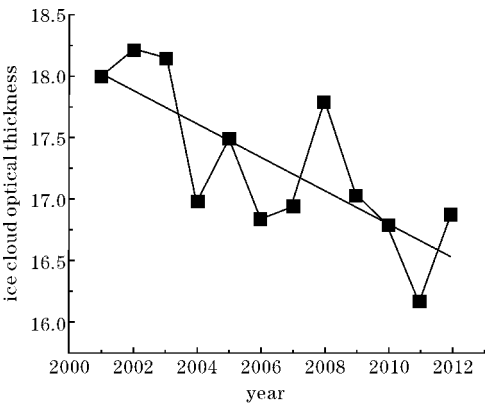
图 7 2001-2012 年中国地区年均冰云光学厚度在不同季节随时间变化曲线



(a) 春季

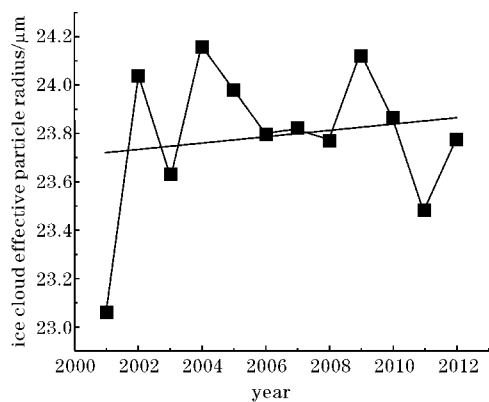


(b) 夏季

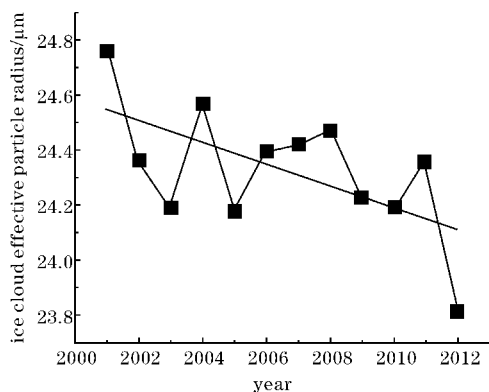


(c) 秋季

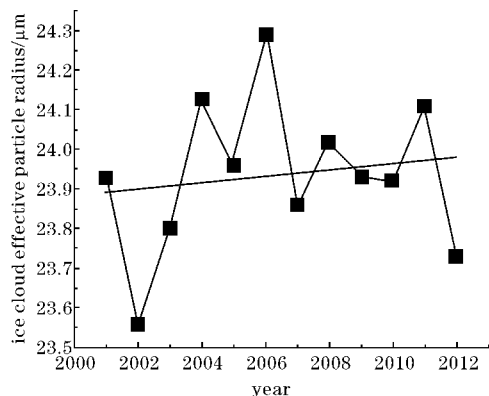
图 8 是 2001-2012 年中国地区冰云粒子有效半径在不同季节随时间变化曲线图,从图 8 可以看到的现象如下:纵观春季变化曲线图(图 8a)发现冰云粒子有效半径随时间变化平稳略微增加的趋势,图中有 3 个峰分别出现在 2002 年 $24.04\text{ }\mu\text{m}$ 、2004 年 $24.16\text{ }\mu\text{m}$ 和 2009 年 $24.13\text{ }\mu\text{m}$ 最大值出现在 2004 年,最小值出现在 2001 年为 $23.06\text{ }\mu\text{m}$;2001-2002 年呈现直线增加并且涨幅较大,而 2006-2008 年这 3 年春季期间冰云粒子有效半径变化不大且其值基本在一条直线。夏季(图 8b)呈现减少的变化趋势,有 4 个峰值分别为 2001 年 $24.76\text{ }\mu\text{m}$ 、2004 年 $24.57\text{ }\mu\text{m}$ 、2008 年 $24.47\text{ }\mu\text{m}$ 和 2011 年 $24.36\text{ }\mu\text{m}$ 最大值出现在 2001 年,最低值出现在 2012 年为 $23.81\text{ }\mu\text{m}$;与春季相同的现象是在 2006-2008 年中国地区冰云粒子有效半径平均值的变化不明显也是基本呈现一条直线,而在 2001-2003 年和 2011-2012 年中国地区冰云粒子有效半径随时间变化是呈直线减少且减少的幅度较大。秋季变化曲线图(图 8c)总体上是稳中上升的变化形势,秋季是四季节中波动最为剧烈的季节,出现了 4 个峰值分别为 2004 年 $24.13\text{ }\mu\text{m}$ 、2006 年 $24.29\text{ }\mu\text{m}$ 、2008 年 $24.02\text{ }\mu\text{m}$ 和 2011 年 $24.11\text{ }\mu\text{m}$ 最大值出现在 2006 年,最小值在 2002 年为 $23.56\text{ }\mu\text{m}$;2002-2004 年冰云粒子有效半径增加幅度较大,2006-2007 年和 2011-2012 年为减小。冬季变化曲线图(图 8d)总体是下降的趋势,有 2 个峰值为 2002 年 $23.85\text{ }\mu\text{m}$ 和 2004 年 $24.2\text{ }\mu\text{m}$ 最大值为 $24.2\text{ }\mu\text{m}$,冬季与春、夏、秋季相比不同;没有很高的峰值,2001-2007 年变化比较稳定,但是在 2007 年之后冰云粒子有效半径值急速减小至最小值 $16.79\text{ }\mu\text{m}$,2010 年过后又急速增加。



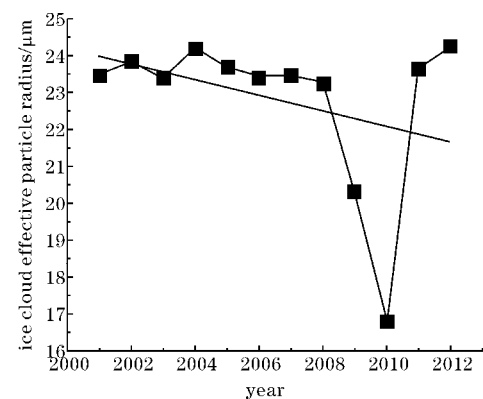
(a) 春季



(b) 夏季



(c) 秋季



(d) 冬季

图8 2001–2012年中国地区年均冰云粒子有效半径在不同季节随时间变化曲线

4 结论

利用了 MODIS 云资料中 2001–2012 年中国地区冰云光学厚度和粒子有效半径的数据,通过这两个变量的变化分析了中国地区冰云的时空分布特征,由此对于冰云时空分布得出以下结论:

(1)通过上述结果和分析,可以得出中国地区冰云光学厚度在空间的分布是横断山-秦岭-华北平原以南地区大于以北地区,且由南向北有明显的递减趋势;而中国地区冰云粒子有效半径值总体是昆仑山-秦岭-长江中下游平原以北大于以南地区,由北向南逐层递减。冰云光学厚度和粒子有效半径的这种分布与中国不同区域的气候环境、海拔、地形地势等的不同有关系,并且也大气中气溶胶的含量有一定的关系。

(2)中国地区冰云光学厚度和粒子有效半径在不同季节的分布状况:夏季冰云光学厚度的分布范围比春、秋、冬 3 个季节大,新疆和青藏高原地区部分区域冰云光学厚度同其在其他 3 个季节中相比值是最大的。并且夏季冰云粒子有效半径的分布范围也是最大的,大于 $23\text{ }\mu\text{m}$ 的区域包括我国东部地区以及新疆、内蒙古在内。夏季具有分布范围广的这种特征也与一些研究报告中得出的结论相一致。

(3)中国冰云光学厚度从 2001 年到 2012 年出现下降的变化,冰云粒子有效半径也是下降的变化。夏季是冰云光学厚度与粒子有效半径最大的时期。冰云光学厚度在四个季节中均为下降的趋势;冰云粒子有效半径在夏季和冬季时下降,而在春季和秋季呈现稳中上升的形势。

(4)青藏高原东南部地区冰云光学厚度的分布比高原其他地区多而且广,与其同纬度的高原其他地区冰云光学厚度值较小。还发现青藏高原东南部冰云粒子有效半径小,说明在这个地区冰云光学厚度与粒子有效半径是相反的关系,一个变量增长另一个变量就减小。

(5)仅根据 MODIS 云资料中冰云光学厚度与粒子有效半径对中国地区冰云的时空分布做出分析,但这些分布状况形成的机理还需进一步的研究和探索。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 段皎,刘煜.中国地区云光学厚度和云滴有效半径变化趋势[J].气象科技,2011,39(4):408–

- 416.
- [3] 杨大生,王普才. 中国地区夏季云粒子尺寸的时空分布特征[J]. 气候与环境研究. 2012, 17(4): 433-443.
- [4] 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, 16(6): 717-728.
- [5] 叶晶,李万彪,严卫. 利用 MODIS 数据反演多层云光学厚度和有效粒子半径[J]. 气象学报, 2009, 67(4): 613-622.
- [6] 邓军英,邱昀,陈勇航,等. 强降雨过程中冰云粒子等效半径的垂直分布及其与降水的相关性[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(2): 120-128.
- [7] 赵凤生,丁强,孙同明,等. 利用 NOAA-AVH RR 观测数据反演云辐射特性的一种迭代方法[J]. 气象学报, 2002, 60(5): 594-601.
- [8] Rosenfeld D, Woodley W L. Satellite-inferred impact of aerosols on the microstructure of Thai convective clouds [C]. Process Seventh Scientific Conference on Weather Modification, 1999, Chiang Mai, Thailand, World Meteorological Organization, 17-20.
- [9] 盛成禹. 中国气候总论[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 428-407.
- [10] 邓学良,邓伟涛,聂肃平. 基于 MODIS 的春、夏季中国近海气溶胶对于云参数的影响差异研究[J]. 南京信息工程大学(自然科学版), 2014, 6(4): 349-355.
- [11] 俞亚勋,王劲松,李青燕. 西北地区空中水汽时空分布及变化趋势分析[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 149-156.
- [12] 刘瑞霞,刘玉洁,杜秉玉,等. 中国云气候特征的分析[J]. 应用气象报, 2004, 15(4): 468-476.
- [13] 石睿,王体健,李树,等. 东亚夏季气溶胶—云—降水分布特征及其相互影响的资料分析[J]. 大气科学, 2015, 39(1): 12-22.
- [14] 汪宏七,赵高翔. 云和辐射(I)云气候学和云的辐射作用[J]. 大气科学, 1994, 18(增刊): 910-932.
- [16] 曾昭美. 近 40 年中国云量变化的分析[J]. 大气科学, 1993, 17(6): 687-696.
- [17] 吴伟,王式功,邓莲堂,等. 中国北方云量的四季分布与降水[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2010, 46(3): 32-40.