

文章编号: 2096-1618(2022)03-0302-06

三江源地区冬半年云光学特性与积雪的分布及相关性研究

郭晓宇, 程志刚, 毕瑞君

(成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225)

摘要:为研究三江源地区冬半年云光学特性与积雪分布等的关系,选取近20 a MODIS 云顶高度、云光学厚度、气溶胶光学厚度、云覆盖及云粒子有效半径等光学特性数据及卫星遥感积雪数据,利用特征向量、相关性分析等气象统计方法,对三江源地区冬半年(10月~次年4月)云光学特性时空分布特征及其与积雪面积、雪水当量等相关关系进行分析。结果表明,在空间上,云光学厚度、云顶高度呈南高北低分布,其大值区位于杂多中部和治多东部;云粒子有效半径呈北高南低分布,其大值区多分布在曲麻莱县东部及玛多县西侧;气溶胶光学厚度、雪水当量则呈西高东低的分布特征;云覆盖率和积雪覆盖率则呈现相反分布特征。时间上,气溶胶光学厚度、云光学厚度与云顶高度呈增加趋势,云粒子有效半径、雪水当量、积雪覆盖率、云覆盖率呈微弱减小趋势。云覆盖率与积雪的覆盖率相关性较强,相关系数达0.7,其次是云光学厚度0.43、雪水当量与积雪覆盖率相关系数为0.43,其他因子与积雪覆盖率相关性不显著。

关键词:大气科学;气候变化及其诊断;三江源地区;云光学特性;雪水当量;积雪覆盖率

中图分类号:P467

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2022.03.010

0 引言

作为地球大气层中必不可少的组分之一,云在全球能量循环、热量传输及海气、地气循环中起着至关重要的作用。云通过影响辐射收支的平衡,对气候环境产生重要影响^[1-4]。现有研究表明,云的分类及各项参数对区域降水、云水资源等有重要的影响和作用^[5-7]。张杰等^[8]分析祁连山地区云光学特性及云水资源时发现,云光学厚度、云粒子有效半径受海拔高度影响存在显著的区域差异,且云水资源较多的地区,云的宏观参数与地面降水正相关。蔡森等^[9]对比分析卫星反演云光学特性与地面观测降水资料,结果表明当云系发展,云顶升高,云光学厚度增大,云顶温度降低,且地面降水增加时,云光学厚度也会增加。李特等^[10]运用MODIS产品分析中国冰云的季节变化特征时发现,冰云光学特性的时空演变特征与强对流过程及东亚季风的产生有着密切的联系。王磊等^[11]研究表明,云光学厚度与华北地区的降水呈正相关,且云光学厚度对区域降水具有较好的指示意义。刘健等^[12]利用卫星红外数据对江淮区域一次极端降雨过程进行分析,结果表明该过程的降水量与云光学厚度呈显著正相关。

青藏高原上空的云及其相关联的降水和辐射影响高原上空非绝热加热的空间结构,因此其云量、云顶高度及云光学特性,乃至云对降水的影响等也引起大量学者的关注。余中水等^[13]发现,西藏高原日降水量为

0.4 mm以下时平均云量最少,且随着降水量的增加,高云也有所增加。常祎^[14]认为,青藏高原地区高云量较大,中云量较小,且冬季云量存在减小趋势,但云光学厚度、云量与气溶胶之间的关系非常复杂。赵仕伟等^[15]研究MODIS气溶胶参数与云光学特性之间的关系发现,高原地区气溶胶光学厚度与云光学厚度及水含量呈负相关关系,冰云粒子有效半径则与气溶胶光学厚度呈较弱的正相关关系。

三江源地区地处青藏高原东北部(图1),位于31°N~36°N,89°E~102°E,是中国最大的自然保护区,也是黄河、长江及澜沧江发源地。三江源地区海拔2614~6622 m,属于典型的高原大陆性气候。积雪融水是三江源地区重要的水源补给,冬半年积雪对源区乃至下游人们生产生活产生重要影响。鉴于此,本文以三江源地区冬半年光学特性及积雪为主要研究对象,分析其时空分布特征及二者之间关系,以期三江源地区水资源合理开发利用提供参考依据。

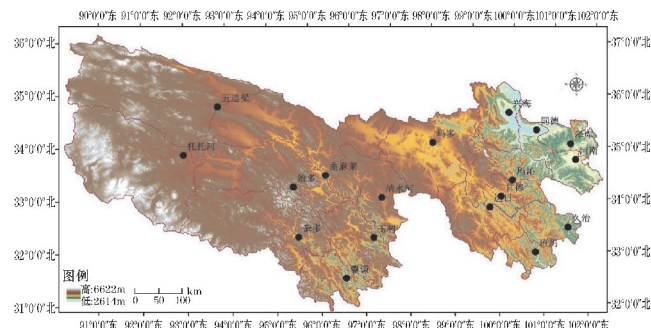


图1 三江源地区概况

收稿日期:2021-04-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41971026)

1 研究资料及方法

本文所用云光学特性资料为 MODIS 的月平均数据(MOD08_M3),其中包含云顶高度、云光学厚度、气溶胶光学厚度及云粒子有效半径等。资料时间尺度为 2001–2019 年的冬半年(10 月–次年 4 月),经纬度网格分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$,数据来源于美国的 NASA 官网(<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/search>)。积雪产品包含 1980–2020 年逐日雪水当量(分辨率为 25 km)和 2000–2019 年逐日无云积雪面积(分辨率为 $0.05^{\circ}\times 0.05^{\circ}$),数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://www.ncdc.ac.cn>)。所用方法主要包含相关性、线性倾向率等常规气象统计方法。

2 结果分析

2.1 空间特征

为探讨三江源地区云基本特征、云光学特性及积

雪相关特征,图 2~3 给出了 2001–2019 年气溶胶光学厚度、云粒子有效半径、云光学厚度、云顶高度、雪水当量、积雪覆盖率及云覆盖率的多年平均分布及其变化率。从图 2 可以看出,气溶胶光学厚度总体呈现西高东低、由西北向东南递减,西部年均最大值达 2.56,东南部地区最低值仅为 0.45;云粒子有效半径空间分布特征与气溶胶光学厚度类似,其最大值在北部地区达 $17.49\text{ }\mu\text{m}$,最小值在东南部地区为 $14.55\text{ }\mu\text{m}$;云光学厚度在源区呈现南高北低的分布特性,西南部云光学厚度最大达 18.58。北部地区则仅为 10.93 左右;源区南部地区的云顶高度明显高于北部地区,最大值达到 8177.59 m,北部地区最低为 7459.91 m;雪水当量分布西部地区要大于中部及东部,其中西部地区最大深度为 14.31 mm,东北部地区最小为 3.54 mm;积雪覆盖率和云覆盖率空间差异性较大,多年平均积雪覆盖率最大值为源区南部(33.95%),而多年平均云覆盖率最大值则位于源区西北部,为 81.89%。

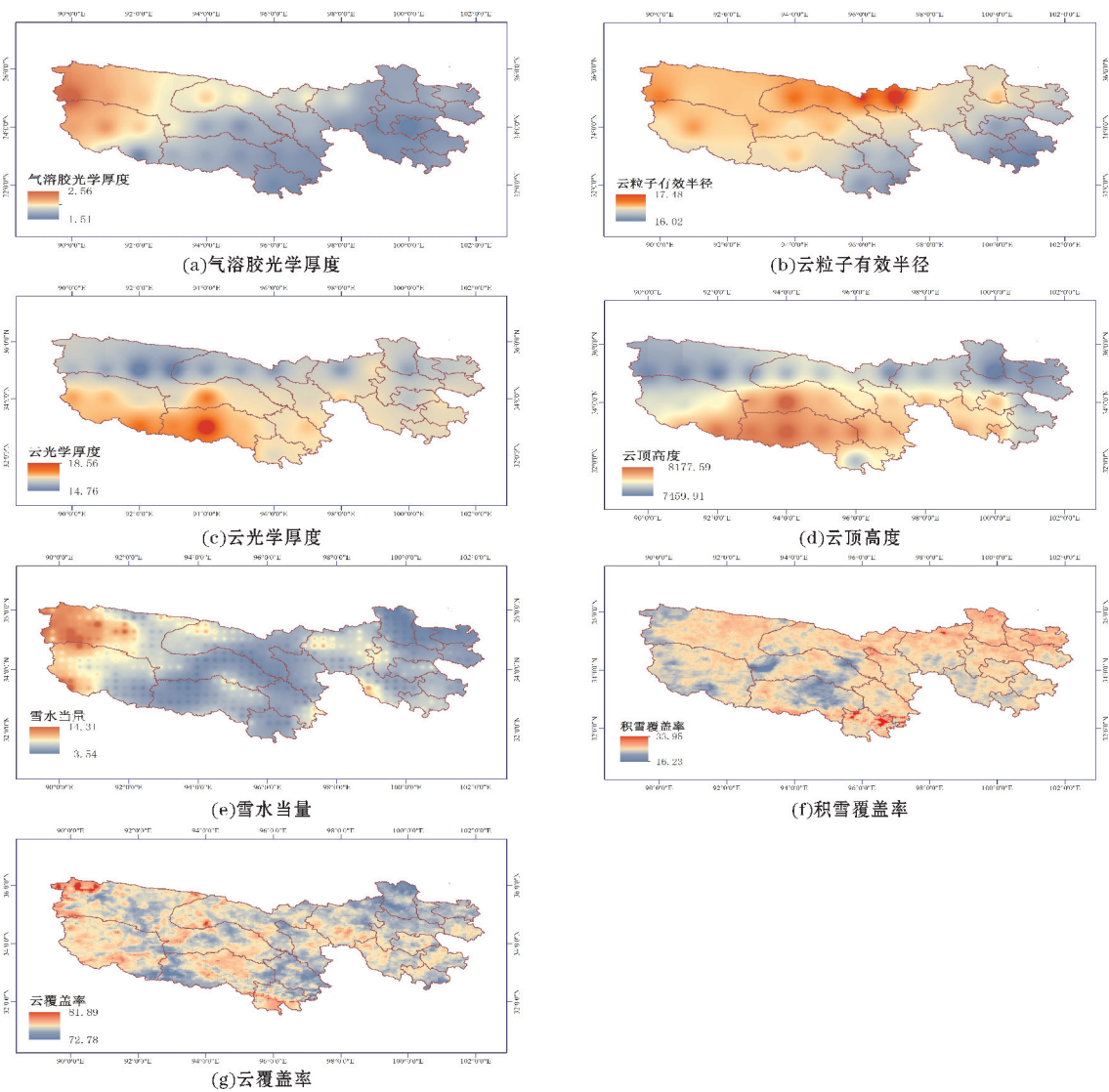


图2 各参数多年平均空间分布

与此同时,为分析各参数变化特征,进一步计算了其线性倾向率(图3)。结果表明:源区气溶胶光学厚度呈增加趋势,增加最明显的西部地区达0.047,源区中部及南部地区增加速度最为缓慢只有0.008;云粒子有效半径在西部及中南部部分地区呈现微弱的增加趋势($0.0096\text{ }\mu\text{m/a}$),在源区其他大部分地区呈减少趋势,以东部和中南部地区减少最明显($0.02\sim0.05\text{ }\mu\text{m/a}$);云光学厚度除西部部分地区有减少的趋势,其他大部分地区均呈增加趋势,中部及东部部分地

区增加趋势最大为0.291;雪水当量在北部地区呈增加趋势,最大值为0.46 mm/a,西部及东南部地区呈现减少的趋势,最大值为0.28 mm/a;云覆盖率在源区西北部及东北部地区呈逐年增加趋势,其最大值为0.57%/a,西南部地区及中部地区则相反,变化值为 $-0.03\text{ }\%/a$;积雪覆盖率在中南部和西南部地区呈增加的趋势,最大值为0.33%/a,而西北部及东部大部地区则呈减少的趋势,最大值为0.15%/a。

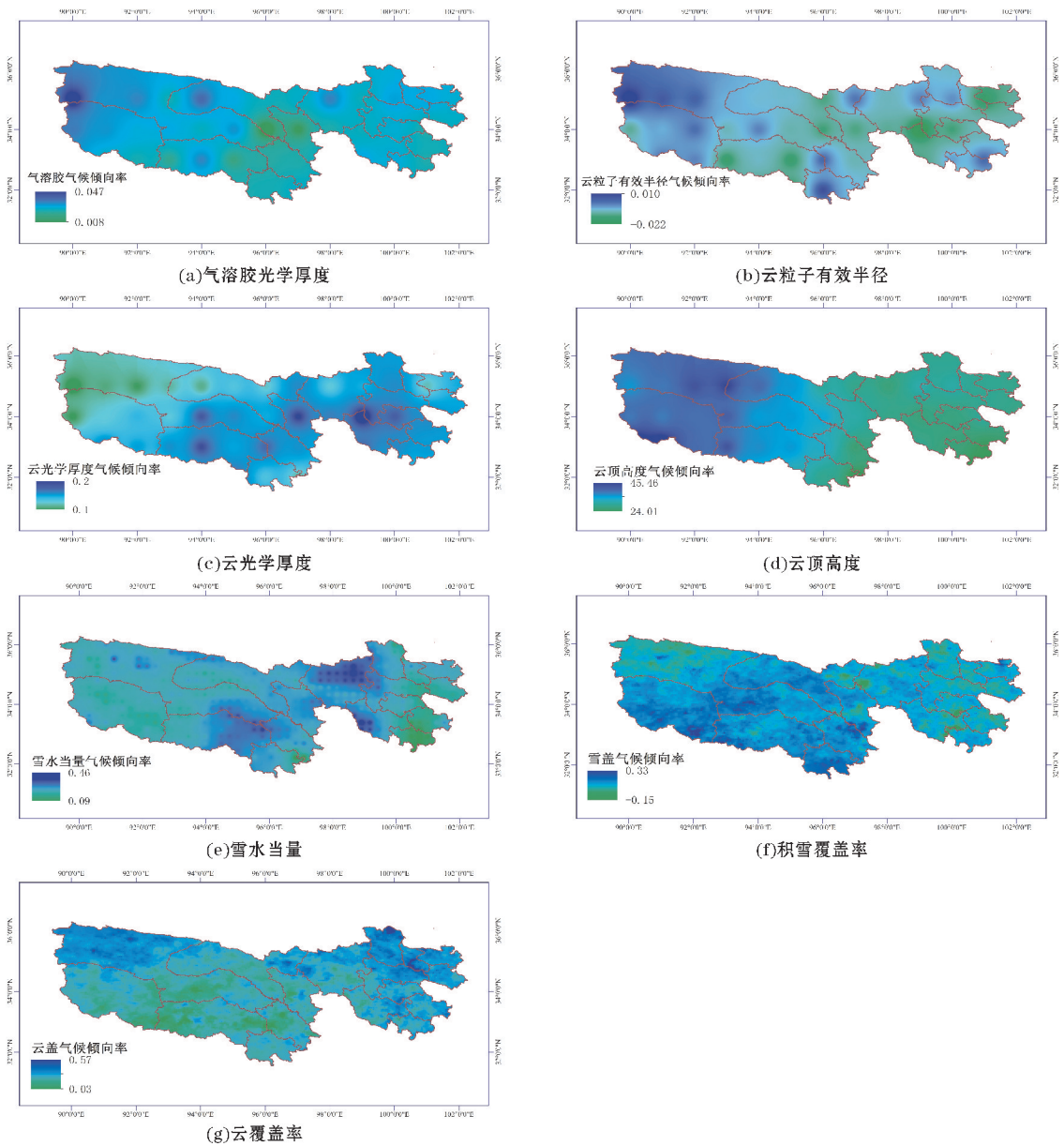


图3 各参数年平均气候倾向率

2.2 时间特征

为分析三江源地区各云特性参数、积雪及雪水当量等要素变化趋势,对整个源区各要素时间序列进行统计比较(图4)。就整个三江源地区而言,气溶胶光

学厚度、云光学厚度、云顶高度均呈增加趋势,其变化率分别为0.05/10 a、0.72/10 a和223.8 m/10 a;云粒子有效半径、雪水当量、积雪覆盖率及云覆盖率均呈微弱的减小趋势,其变化率分别为 $0.25\text{ }\mu\text{m}/10\text{ a}$ 、 $0.28\text{ mm}/10\text{ a}$ 、 $0.54\text{ }\%/10\text{ a}$ 、 $0.42\text{ }\%/10\text{ a}$ 。

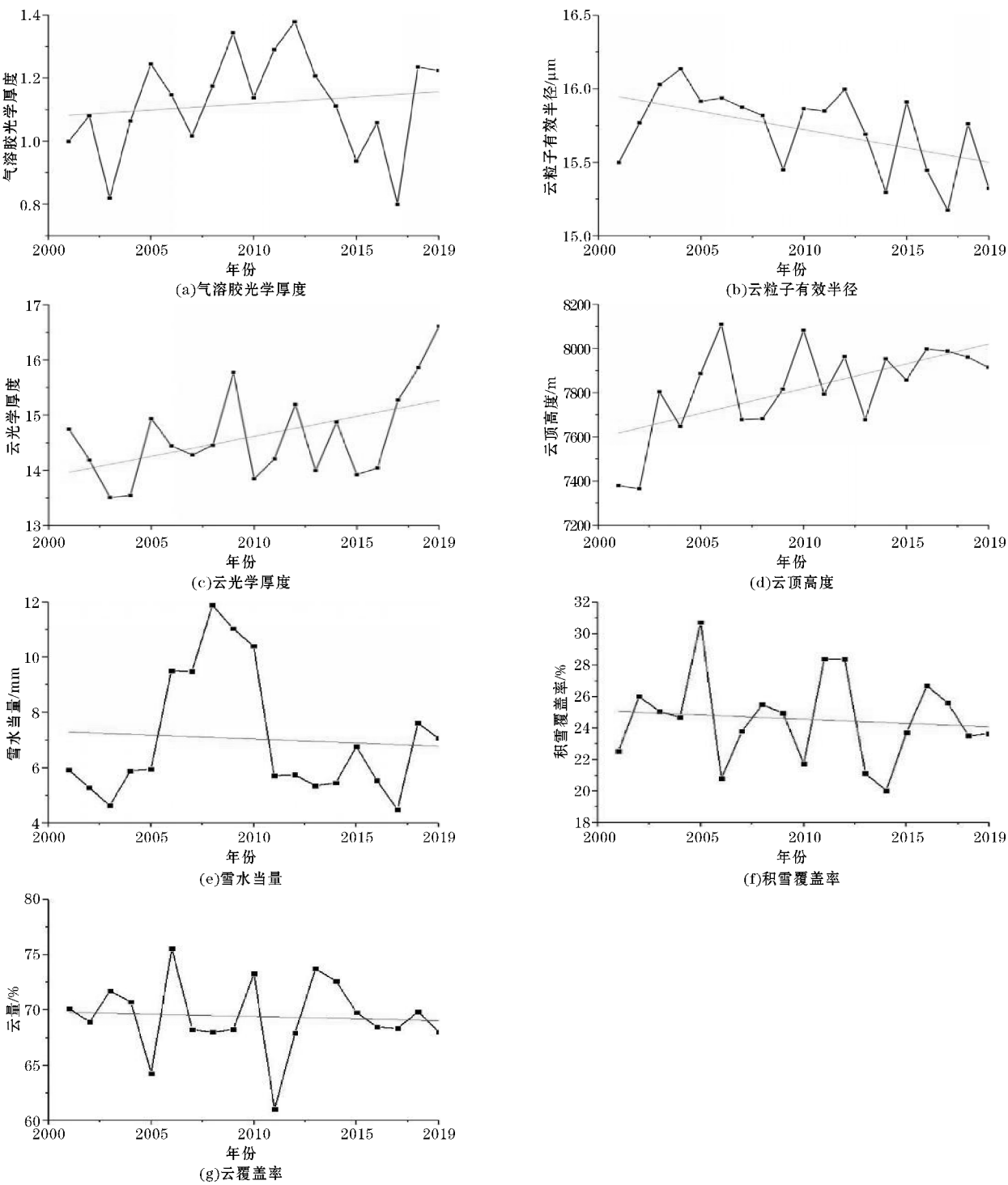


图4 各参数多年时间序列分布图

2.3 各要素相关性分析

为初步了解各要素之间相互影响,还讨论了以上7个要素之间的相关性,并进行显著性检验(图5)。结果表明:积雪覆盖率和云覆盖率呈负相关,相关系数为0.7(通过95%显著性检验);积雪覆盖率与云光学厚度和雪水当量均呈负相关,且相关系数均为0.43(通过95%显著性检验);积雪覆盖率与云顶高度、气溶胶光学厚度以及云粒子有效半径呈负相关,但相关系数均小于0.3;气溶胶光学

厚度和云覆盖率、云粒子有效半径及雪水当量呈正相关,相关系数分别为0.51、0.59、0.48(均通过95%的显著性检验);气溶胶光学厚度与云顶高度和云光学厚度呈负相关,相关系数分别为0.45、0.29(均通过95%的显著性检验);云覆盖率则与云粒子有效半径及雪水当量呈正相关,相关系数分别为0.36和0.34(均通过95%的显著性检验);云顶高度与云光学厚度呈正相关,相关系数为0.73(通过95%显著性检验);云粒子有效半径与雪水当量呈正相关,相关系数为0.32(通过95%的显著性检验)。

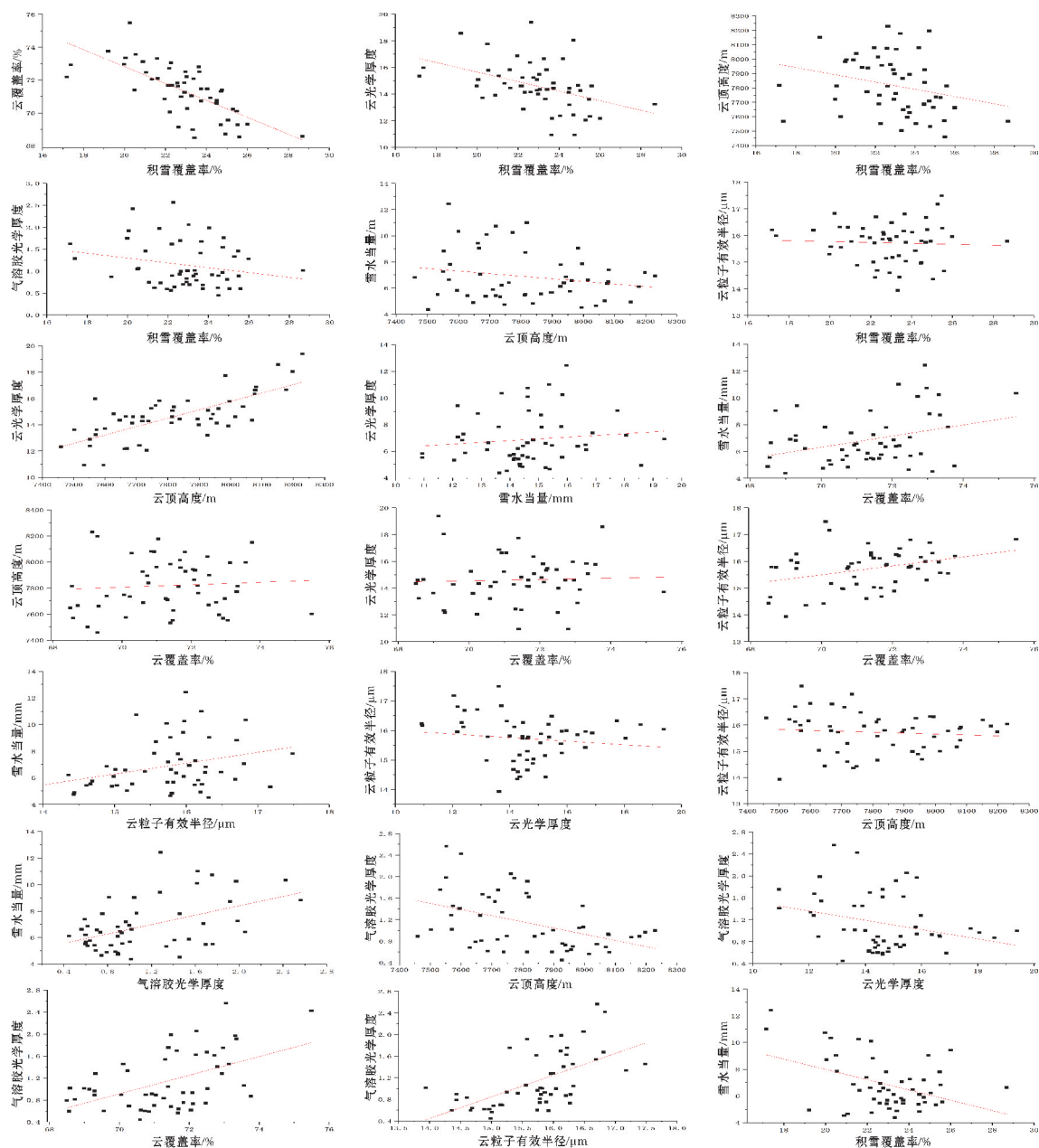


图5 各要素之间的相关性分布

3 结论与讨论

本文以近 20 a 高分辨率遥感卫星资料为基础,对比分析了气溶胶光学厚度、云粒子有效半径等云光学特性、云覆盖率、积雪覆盖率及雪水当量等要素,并初步探讨了各要素之间相关关系,得出如下结论:

(1)各要素多年平均空间分布表明,云顶高度在源区的分布呈现中部、中南部高,北部低;云光学厚度最大值主要分布在东部地区;云粒子有效半径、气溶胶光学厚度均呈现由西北向东南减少趋势;云覆盖表现为西部、中西部地区大于其他地区,东北部地区云覆盖最少;积雪覆盖呈现南部大于东北部,其最小值位于西部;雪水当量则呈现西部、中东部地区高,中西部及东

部较低。

(2)近 20 a 来,三江源地区云顶高度、云光学厚度及气溶胶光学厚度均呈增加趋势,其变化率分别为 223.8 m/10 a、0.72/10 a、0.05/10 a;而云粒子有效半径、云覆盖率、积雪覆盖率以及雪水当量则呈逐年减少趋势,其变化率分别为-0.25 $\mu\text{m}/10\text{ a}$ 、-0.54%/10 a、-0.28 mm/10 a。

(3)三江源地区各要素冬半年相关性分析表明,积雪覆盖率与云覆盖率、云顶高度、云光学厚度及雪水当量均呈负相关,其相关系数分别为0.72、0.27、0.43、0.43,且均通过 95% 显著性检验。

尽管本文分析了三江源地区云光学厚度、云粒子有效半径等云光学特性及云覆盖率、积雪覆盖和雪水

当量等要素时空分布特征及其变化趋势,并探讨了各要素之间相关性,但并未给出各要素之间相关性的物理含义,这也是未来需要进一步讨论和分析的。

参考文献:

- [1] 强安丰,汪妮,魏加华,等.近50年三江源地区云水资源分布及降水效率研究[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(3):574-593.
- [2] J Liu, C Dong, X Zhu. Thermodynamic phase analysis of cloud particles with FY-1C data[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2002, 80(1-4).
- [3] 李兴宇,郭学良,朱江.中国地区空中云水资源气候分布特征及变化趋势[J].大气科学,2008(5):1094-1106.
- [4] 陈桂英,李小泉.北半球云量的空间分布和季节变化特征[J].气象,1991(2):3-9.
- [5] 苏立娟,达布希拉图,卢士庆等.内蒙古中部地区春夏季云与降水的特征分析[J].内蒙古气象,2007(4):7-9.
- [6] 吴兑,黄浩辉.广东云与降水的宏微观物理特征[J].气象科技,1994(1):14-24.
- [7] 严异德,张国庆.结古地区云与降水关系的分析[J].青海科技,2007,14(5):19-22.
- [8] 张杰,张强,田文寿,等.祁连山区云光学特征的遥感反演与云水资源的分布特征分析[J].冰川冻土,2006(5):722-727.
- [9] 蔡森,周毓荃,朱彬. FY2C/D 卫星反演云特性参数与地面雨滴谱降水观测初步分析[J]. 气象与环境科学, 2010, 33(1): 1-6.
- [10] 李特,郑有飞,王立稳,等.基于MODIS产品的中国陆地冰云季节变化特征[J].应用气象学报,2017,28(6):724-736.
- [11] 王磊,周毓荃,蔡森,等.华北云特征参数与降水相关性的研究[J].气象与环境科学,2019,42(3):9-16.
- [12] 刘健,张文建,朱元竞,等.中尺度强暴雨云团云特征的多种卫星资料综合分析[J].应用气象学报,2007(2):158-164.
- [13] 余忠水,拉巴,周洪莉,等.近40年青藏高原云量与降水分布及耦合变化特征[J].西藏科技,2018(9):49-55+59.
- [14] 常祎.青藏高原那曲地区夏季云和降水特征分析[D].北京:中国气象科学研究院,2016.
- [15] 赵仕伟,高晓清.中国西北地区气溶胶参数与云参数的空间分布特征及相关性分析[A].中国气象学会.第34届中国气象学会年会S9大气成分与天气、气候变化及环境影响论文集[C].中国气象学会,2017:10.

Study on the Distribution and Correlation of Cloud Optical Properties and Snow Accumulation in the Three-River Headwaters Region during the Winter Half Year

GUO Xiaoyu, CHENG Zhigang, BI Ruijun

(College of Atmospheric Sciences/Key Laboratory of Plateau Atmosphere and Environment in Sichuan Province, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: In order to study the relationship between cloud optical characteristics and snow distribution in the winter half of the year in the Three-River Headwaters Region, in this paper, based on the recent 20 years of MODIS cloud top height, cloud optical depth, aerosol optical depth, cloud cover and cloud effective radius and other optical characteristics data and satellite remote sensing snow data, combined with characteristic vector, correlation analysis and other meteorological statistical methods, the paper analyses the Three-River Headwaters Region in the winter half of the year (October to April) cloud optical characteristics of spatial and temporal distribution characteristics and its correlation with the snow area, snow water equivalent. The results show that, spatially, the cloud optical depth and cloud top height are distributed high in the south and low in the north, and their large value areas are located in the central part of Zadoi County and eastern part of Zhiduo; cloud effective radius is high in the north and low in the south, and the large value areas are mostly distributed in the east of Qumalai County and the west of Maduo County. Aerosol optical depth and snow water equivalent are distributed high in the west and low in the east; the cloud cover and snow cover show opposite distribution characteristics. As for the part of time, aerosol optical depth, cloud optical depth and cloud top height show an increasing trend, while cloud effective radius, snow water equivalent, snow cover and cloud cover show a slight decreasing trend. The correlation between cloud cover and snow cover is strong, with a correlation coefficient of 0.7, followed by cloud optical depth of 0.43, snow water equivalent and snow cover with a correlation coefficient of 0.43, and the correlation between other factors and snow cover is not significant.

Keywords: atmospheric science; climate change; Three-River Headwaters Region; cloud optical properties; snow water equivalent; snow cover