

引用格式: 余忠水, 陈华, 德吉白玛, 高佳佳, 卓嘎, 刘俊卿. 基于 ERA-Interim 的青藏高原近 40 年云量的时空分布特征[J]. 山地学报, 2022, 40(6): 811-822.

YU Zhongshui, CHEN Hua, DEJI Baima, GAO Jiajia, ZHUO Ga, LIU Junqing. Spat-temporal distribution of the cloud amount in the Qinghai-Tibet Plateau of China for the past 40 years based on ERA-Interim [J]. Mountain Research, 2022, 40(6): 811-822.

基于 ERA-Interim 的青藏高原近 40 年云量的 时空分布特征

余忠水¹, 陈华², 德吉白玛³, 高佳佳^{1*}, 卓嘎¹, 刘俊卿³

(1. 青藏高原大气环境科学研究所, 拉萨 850000; 2. 西藏自治区大气探测技术与装备保障中心, 拉萨 850000;
3. 西藏自治区人工影响天气中心, 拉萨 850000)

摘要: 青藏高原云量变化直接影响对流层中上部地气系统能量交换和大气水分循环, 影响区域和全球气候。已有研究主要集中在总云量, 鲜见对云量进行全要素分析, 无法形成对青藏高原云量变化特征的全面认识。本文利用欧洲中期数值预报中心(ECMWF) 1979—2018 年高水平分辨率 ERA-Interim 再分析资料, 采用区域平均法、线性趋势分析和经验正交函数 EOF 等方法, 分析青藏高原云量全要素的时空分布及气候特征。结果表明: (1) 受高原大地形和山脉走向的影响, 青藏高原云量具有明显的空间分布特征, 且低云量对总云量的空间分布型贡献最大。(2) 近 40 年, 总云量增多趋势显著的区域主要分布在青藏高原北部和东部边缘等地, 减少趋势较明显的区域主要分布在西藏东部和西南部; 高云量在高原南部有显著增加趋势, 其他区域增减不明显; 中云量在高原中部呈减少趋势, 北部和南部边缘呈显著增多趋势; 低云量在高原东南部和西南部呈显著减少趋势, 其他大部分区域呈增多趋势。(3) 总云量和高云量第一空间模态均表现为青藏高原大部区域一致性变化, 中云量和低云量在青藏高原均没有显著一致变化的空间模态。研究结果可以为应对青藏高原气候变化和生态修复型人工影响天气业务规划提供科学依据。

关键词: 青藏高原; 云量; 时空分布; 气候特征; ERA-Interim

中图分类号: P466

文献标志码: A

云是空中重要的水物质, 云参数的任何变化都可能对区域和全球气候产生重大影响^[1]。云通过反射和吸收太阳短波辐射和地球长波辐射而影响地气系统的能量收支, 同时云水的相态变化以及云降水产生的潜热吸收与释放加热或冷却大气, 进而作用于大气环流和短期气候^[2-3]。云和气候之间存在复杂的相互作用。一方面, 云直接影响地气系统的能量交换、热量平衡和温湿分布^[4], 对青藏高原和全球的能量和水分收支起调控作用, 并作用于大气

环流和短期气候; 另一方面, 云是空中水资源的重要载体, 是产生大气可降水的决定性因素之一。在众多云参数中, 云量作为辐射强迫和反馈因子, 是全球气候研究的重要参数^[5]。同时, 包含云量在内的云水资源也是自然生态资源的重要组成部分。

青藏高原特殊的大地动力和热力作用影响着亚洲乃至全球大气水分循环, 影响全球气候与环境^[6]。青藏高原云形成的物理机制受高原地形影响明显, 热力、动力过程较复杂, 是气候变化研

收稿日期(Received date): 2020-11-28; 改回日期(Accepted date): 2022-11-01

基金项目(Foundation item): 西藏自治区自然科学基金(XZ-2019ZRG-150)。[Natural Science Foundation of Tibet(XZ-2019ZRG-150)]

作者简介(Biography): 余忠水(1971-), 男, 江西上饶人, 高级工程师, 主要研究方向: 气象学。[YU Zhongshui(1971-), male, born in Shangrao, Jiangxi province. senior engineer, research on meteorology] E-mail: yu_zstb@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): 高佳佳(1986-), 女, 河北邯郸人, 工程师, 主要研究方向: 气候变化。[GAO Jiajia(1986-), female, born in Handan, Hebei province. engineer, research on climate change] E-mail: gaojj12@lzu.edu.cn

究的重要对象^[7-15]。研究云量时空分布状况及其变化规律具有重要的实践意义,如人工增雨就是开发利用云水资源的重要表现,对于解决局地至区域尺度干旱问题、缓解水资源的供需矛盾具有重要意义^[16-18]。分析青藏高原云量全要素的时空分布及气候特征,对科学应对青藏高原气候变化和促进地区生态修复具有重要意义。

已有研究利用地面观测云量资料、卫星资料以及 ERA-Interim 等数据,分析云量的分布特点和变化特征,一定程度上反映了气候变化状况,并从气候影响角度出发,提出云和气候之间存在复杂的相互作用^[19-21]。研究发现^[22],1960—2012 年间中国总云量主要表现为显著的下降趋势,EOF 分解的前两个模态表明总云量不仅具有一致减少的变化特征,还具有明显的区域差异。利用 MODIS 月平均液相云水路径、冰相云水路径资料等资料分析,得出青藏高原年平均和季节平均两者在 2001—2016 年间均以减少趋势为主,这一变化趋势与云量和降水变化趋势一致^[23]。基于 CERES 卫星资料分析认为近 15 年来中国总云量年际变化整体呈下降趋势,主要受较低层云量减少的影响,高云则呈现一定的增加趋势;青藏高原上空不同高度云量变化趋势较其他地区显著,并以减少趋势为主^[24]。还有学者利用青藏高原 80 个测站总云量资料,得到 1961—2000 年青藏高原的总云量从东南向西北减少,年际变化总体呈显著下降趋势,最明显的是高原西南部、西北部和东南部。但前期大多研究主要集中在总云量,鲜见对云量进行全要素分析,无法形成对青藏高原云量变化特征的全面认识。

本文基于 1979—2018 年高时空分辨率的 ERA-Interim 再分析数据,采用区域平均法、线性趋势分析和经验正交函数(EOF)等方法,从时空细节上开展青藏高原云量全要素的时空结构分析、稳定性检验、突变检测和气候特征分析,以便全面把握青藏高原云量的变化规律。

1 研究数据和方法

1.1 研究数据

所用数据为欧洲中期数值预报中心(ECMWF)发布的 1979—2018 年全球高分辨率 ERA-Interim 逐日云量再分析数据,包括逐日总云量(TCC)、高云量

(HCC)、中云量(MCC)和低云量(LCC)4个要素,时间分辨率为每天4个基本时次(UTC:0,6,12,18),水平分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 。已有大量文献结合 CloudSat、ISCCP 和 MODIS 等卫星数据开展 ERA-Interim 数据的适用性研究^[25-27]。研究表明,相对于卫星数据,ERA-Interim 数据的时间尺度更长、空间分辨率更高、更均一化,因此更适用于长时间的云水气候态及其变化特征的研究,应用 ERA-Interim 数据开展中国区域云水量的分布和变化特征的研究具有一定可信度^[28-29]。本文使用 ERA-Interim 再分析数据进行青藏高原云量分析并进行时空细节展现。

研究区域为 $78^\circ \sim 105^\circ \text{E}$ 和 $26^\circ \sim 40^\circ \text{N}$ 范围内的青藏高原主体,包括西藏自治区和青海省全部,以及新疆、甘肃、四川和云南四省(区)内平均海拔3000 m以上的区域。为更好展现数据的空间细节,绘图时在高原轮廓内叠加了省、市(州)界,所用地理数据来源于全国地理信息资源目录服务系统(www.webmap.cn)发布的非涉密2017版1:100万的矢量地图数据,平面坐标系为2000国家大地坐标。

1.2 研究方法

1.2.1 区域平均法

因青藏高原边界为不规则的多边形,在计算区域平均时,利用掩膜的方法,首先获取青藏高原边界的地理经纬度,将青藏高原边界以外区域格点设置为缺测值,计算位于 $78^\circ \sim 105^\circ \text{E}$ 和 $26^\circ \sim 40^\circ \text{N}$ 矩形地理范围内的区域平均,经过处理后仅青藏高原边界范围内的格点值参与平均运算,得出青藏高原的区域平均值。

1.2.2 经验正交函数 EOF 分解

EOF 分解由于没有固定的函数,具有展开收敛快、易将变量场的信息集中在几个模态上,以及分离出的空间结构具有一定物理意义等优点,被广泛应用大气科学研究中。气象场的自然正交展开,是将 X 分解为时间函数 Z 和空间函数 V 两部分,即: $X = VZ$,具体计算过程这里不再赘述。分解出的经验正交函数利用特征值误差范围来进行显著性检验,在95%置信度水平下的特征值 λ_j 误差范围为:

$$e_j = \lambda_j \left(\frac{2}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中, e_j 为第 j 个特征值 λ_j 的误差; n 为样本量(个)

。当相邻的特征值 λ_{j+1} 满足 $\lambda_j - \lambda_{j+1} \geq e_j$ 时,这两个特征值所对应的经验正交函数被认为是有价值的信号^[30]。

1.2.3 稳定性检验

离散系数(Coefficient of Variation),又称变异系数,是概率分布离散程度的归一化量度,是衡量数据序列变异程度的无量纲统计量。其计算公式为:

$$C_v = \sigma/\mu \quad (2)$$

式中, C_v 为样本离散系数,离散系数大说明数据的离散程度也大,离散系数小说明数据的离散程度也小; σ 为标准差; μ 为平均值。

1.2.4 突变检测

曼-肯德尔(Mann-Kendall)法是一种非参数统计检验方法^[31],是目前常用的突变检测方法。对于具有 n 个样本量的时间序列 x ,构造一秩序列为:

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i, \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

式中,

$$r_i = \begin{cases} -1, & \text{当 } x_i > x_j, \\ 0, & \text{当 } x_i \leq x_j \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, i \quad (4)$$

可见,秩序列 s_k 是第 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的累计数。

在时间序列随机独立的假定下,定义统计量为:

$$UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{\text{var}(s_k)}}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中, $UF_1 = 0$; $E(s_k)$ 、 $\text{var}(s_k)$ 是累计数的均值和方差,在 x_1, x_2, \dots, x_n 相互独立,且有相同连续分布时,它们可由下式计算:

$$\begin{cases} E(s_k) = \frac{k(k-1)}{4}, \\ \text{var}(s_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}, \end{cases} \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

UF_i 为标准正态分布,它是按时间序列 x 顺序 x_1, x_2, \dots, x_n 计算出的统计量序列,给定显著性水平 α ,若 $|UF_i| > |U_\alpha|$,则表明序列存在明显的趋势变化。

按时间序列逆序 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 ,再重复上述过程,同时使 $UB_k = -UF_k (k = n, n-1, \dots, 1)$, $UB_1 = 0$ 。

这一方法的优点在于不仅计算简便,而且可以明确突变开始的时间,并指出突变区域。

2 云量时空结构

2.1 云量空间分布

分别计算青藏高原总云量(TCC)、高云量(HCC)、中云量(MCC)和低云量(LCC)的40年平均空间场(图1)。可以看出,受大地形和山脉走向的影响,青藏高原云量有明显的空间分布特征。

总云量在21%~87%,低值区分布在藏西和柴达木盆地等地,高值中心出现藏东南和川西高原,其中藏东南有一条狭长的高值中心,总云量80%以上(图1a)。高云量在6%~36%,低值区主要分布在高原西部,高云量不足10%,青海省东部小范围30%以上,其他区域高云量在10%~30%(图1b);中云量在6%~49%,在高原上呈中部高、南北低的空间分布,高值区主要在高原中部,中云量40%以上(图1c);低云量在0.1%~79%,低值区主要分布在藏西北和柴达木盆地,高值区分布在藏东南和川西高原边缘地带,低云量达50%以上,其中藏东南有一条狭长的低云量70%以上的高值中心。低云量与总云量空间分布较为相似,表明青藏高原低云量对总云量的空间分布型贡献最大。总云量和低云量在高原南部的空间分布与山脉走向大体一致,表明云量的空间分布与高原大地形及山脉走向密切相关。

2.2 云量年内分布

利用区域平均法,分别计算青藏高原总云量、高云量、中云量和低云量的年、月、旬和候(5 d)的40年平均值(图2)。各时段平均云量年内均呈现中间高两边低的时间分布型。总云量呈单峰型分布,7月份最大,为70%,12月份最小,仅31%;增加最快的是2月份和月内的第2旬第3候,减少最快的是10月份和月内第3旬第5候(图2a)。高云量呈双峰型分布,4月份最大,为30%,7月份为另一个高值,为27%,11月份最小,仅7%;增加最快的是3月份和月内第2旬第3候,减少最快的是9月份(图2b)。中云量呈单峰型分布,6月份最大,为43%,11月份最小,仅20%;增加最快的是2月份和月内第2旬第3候,减少最快的是11月份(图2c)。低云量也呈单峰型分布,7月份最大,达40%,12月份最小,仅10%;增加最快的是6月份和月内第2旬第4候,减少最快的是10月份和月内第1旬(图2d)。

2.3 云量 EOF 展开

对青藏高原年均总云量、高云量、中云量和低云量的时间序列分别进行 EOF 展开,得到前 3 个空间典型场(或称模态)的特征值及其对应的误差范围和方差贡献率(表 1),经显著性检验,总云量、高云量、中云量前 3 个模态和低云量的第 2 个和第 3 个模态通过 95% 的置信度检验(式 1)。

总云量第一模态表现为:青藏高原大部区域为一致性变化,即总云量同时增多或减少,且在中北部强度变化相对明显(图 3a);第二模态大致表现为:西南部与东北部相反的空间变化,且强弱信号由西南向东北呈现为明显的强-弱-强信号交替变化(图 3b);第三模态大致表现出西北部与东南部相反的空间变化状态,且东南部边缘强度变化较明显(图 3c)。

高云量第一模态表现为青藏高原区域为一致性变化,即高云量同时增多或减少,且自南向北逐渐推进,中部到南部强度变化相对明显(图 3d);第二模态表现为南部与中北部相反的变化状态,中部为强信号区(图 3e);第三模态表现为青藏高原中部与北部、东南部相反的变化状态,北部强度变化相对明显(图 3f)。

中云量第一模态表现为青藏高原中部大部区域

与北部、南部边缘区域相反的变化状态,且变化强度由中部向南北两个方向推进(图 3g);第二模态表现为明显的南北相反的变化状态,且强度信号由南向北逐步推进(图 3h);第三模态表现为西北部与东南部相反的变化状态,强度信号自西北部向东南部逐步推进(图 3i)。

低云量第一模态表现为南部边缘和西南部与北部呈相反的空间分布,但没有通过显著性检验(图 3j);第二模态和第三模态均通过显著性检验,第二模态主要表现为中北部与其他区域相反的空间变化,且西南部强度变化相对较明显(图 3k);第三模式表现为明显的西北与东南相反的空间变化格局,且西北部强度变化比较明显(图 3l)。

若某年时间系数为正值,则代表该年云量的空间分布型就是对应的空间模态;若时间系数为负值,则表明该年呈相反的空间分布型。时间系数绝对值越大,这类空间分布型就越显著。

综合来看,总云量和高云量第一空间模态均表现为青藏高原大部区域一致性变化,中云量和低云量在青藏高原均没有显著一致变化的空间模态。

2.4 稳定性检验

利用区域平均法和离散系数,分别计算年月平均云量年际变化的离散系数(表 2)。

表 1 青藏高原云量 EOF 前 3 个特征值及其对应的误差范围和方差贡献

Tab. 1 EOF foremost three eigenvalues and corresponding error range and variance contribution of cloud amount in the Qinghai-Tibet Plateau

云量类型 特征值	总云量			高云量			中云量			低云量		
	λ_1	λ_2	λ_3									
λ_j	4.03	2.90	1.73	2.62	1.43	1.08	2.61	1.66	1.10	3.01	2.81	1.43
e_j	0.90	0.67	0.39	0.59	0.32	0.24	0.58	0.37	0.25	0.67	0.63	0.32
$\lambda_j - \lambda_{j+1}$	1.05	1.25	0.65	1.19	0.35	0.30	0.95	0.56	0.31	0.20	1.38	0.23
方差贡献	26.95	19.95	11.595	31.85	17.36	13.07	29.58	18.86	12.51	22.26	20.80	10.59

表 2 青藏高原云量年际变化稳定性检验的离散系数

Tab. 2 Discrete coefficient of stability test of inter-annual variation of cloud amount in the Qinghai-Tibet Plateau

云量类型	离散系数/%												
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
总云量	21.39	18.01	13.03	11.47	10.54	10.03	10.39	12.10	11.50	17.95	27.40	27.58	4.88
高云量	42.64	39.13	27.54	22.83	24.66	28.35	23.98	28.29	29.99	46.03	51.44	52.63	10.02
中云量	25.04	22.63	17.64	16.02	16.35	14.95	15.37	17.26	17.84	23.57	32.62	31.04	6.63
低云量	36.97	31.73	26.94	25.28	23.01	20.09	20.39	22.82	20.50	28.55	37.76	41.91	10.58

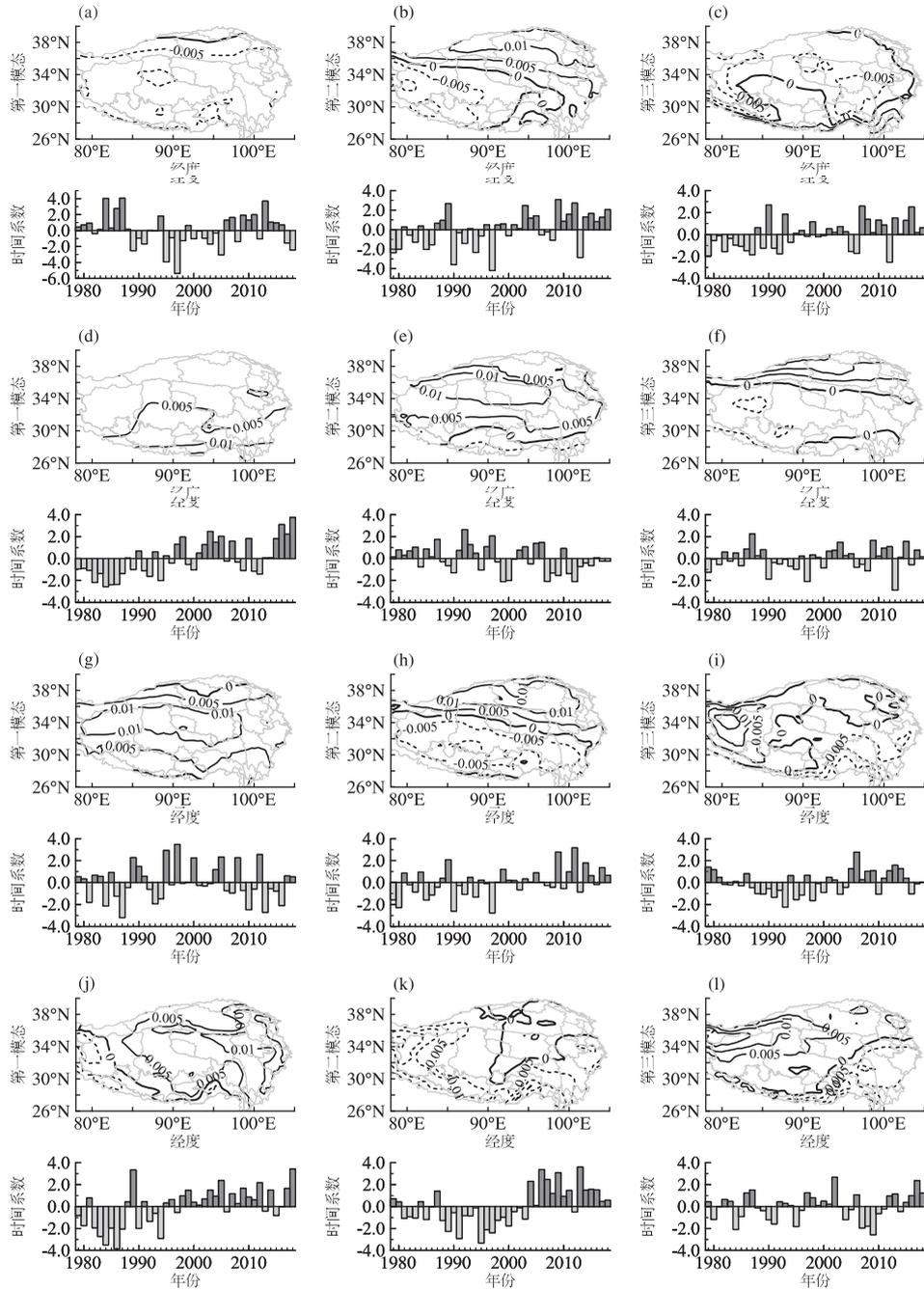


图 3 青藏高原云量 EOF 展开前 3 个特征向量和对应的时间系数:

(a ~ c) 总云量; (d ~ f) 高云量; (g ~ i) 中云量; (j ~ l) 低云量

Fig. 3 EOF foremost three eigenvectors and time coefficients of cloud amount in the Qinghai-Tibet Plateau:

(a ~ c) TCC; (d ~ f) HCC; (g ~ i) MCC; (j ~ l) LCC

总体来看,年云量的离散系数较月云量离散系数小得多,表明青藏高原云量年际变化具有年云量变化小、月云量变化大的特点,即年云量年际变化相对稳定,而月云量的年际稳定性相对较差;从月云量的离散系数来看,总云量离散系数最小,高云量离散系数最大,表明月总云量年际变化相对稳定,月高

云量年际变化相对最不稳定。结合图 2 来看,大致呈现云量越多的月份离散系数越小,其年际变化越稳定,反之亦然。

月总云量的离散系数为 10.0% ~ 27.6%,最小值出现在 6 月份,最大值出现在 12 月份;年总云量的离散系数仅 4.9%,相比其他 3 种云量,年际变化

最为稳定。月高云量的离散系数高达 22.8% ~ 52.6%, 最小值出现在 4 月份, 最大值出现在 12 月份; 年高云量的离散系数为 10.0%。月中云量的离散系数为 14.9% ~ 32.6%, 最小值出现在 6 月份, 最大值出现在 11 月份; 年中云量离散系数仅为 6.6%, 表明中云量的年际变化相对较稳定。月低云量的离散系数为 20.1% ~ 41.9%, 最小值出现在 6 月份, 最大值出现在 12 月份; 年低云量离散系数达 10.6%, 相比其他 3 种云量, 年际变化最为不稳定。由此可见, 青藏高原总云量、中云量和低云量 6 月份, 高云量 4 月份年际变化最为稳定, 11 月和 12 月的云量年际变化最不稳定。

2.5 突变检测

利用曼-肯德尔 (Mann-Kendall) 法分别计算绘制 4 种云量的 UF 和 UB 曲线图 (图 4)。从 UF 曲线可见, 40 年间 4 种云量均先后经历了先减少后增多再减少的波动式变化, 总体来看, 云量呈增多趋势的年份多于减少的年份, 云量保持增多趋势的年代大致在 1991—2015 年。其中, 总云量 1991—2016 年呈增多趋势, 但只在 2002—2007 年这种增多趋势超过显著性水平临界线。高云量自 1991 年开始一直

保持增多趋势, 也只在 2004—2008 年增多趋势是显著的。中云量在 1995—2016 年保持增多趋势, 但增多趋势不显著。低云量自 1989—2015 年保持增多趋势, 只在 1998—2004 年增多趋势超过显著性水平临界线。UB 曲线也有明显的波动变化, 且与 UF 曲线出现多个交点。因此, 云量这种波动式的变化无法判断其发生突变。

3 云量气候特征

计算青藏高原区域所有格点年平均云量的 40 年时间序列的回归系数, 以展示云量变化的空间分布情况, 变化趋势通过 95% 信度检验的区域用灰色表示 (图 5)。

近 40 年, 青藏高原总云量增多趋势显著的区域主要分布在北部和东部边缘等地 (图 5a)。包括新疆巴州南部, 青海省西宁市、海北州、海南州、海东州全境, 以及海西州西北部和东部、玉树州北部、果洛州西北部, 甘肃省酒泉市南部、张掖市西南部和甘南州西部, 四川省阿坝州东部、甘孜州东南部等地, 总云量增多速率在 5%/100a 以上。总云量减少趋势

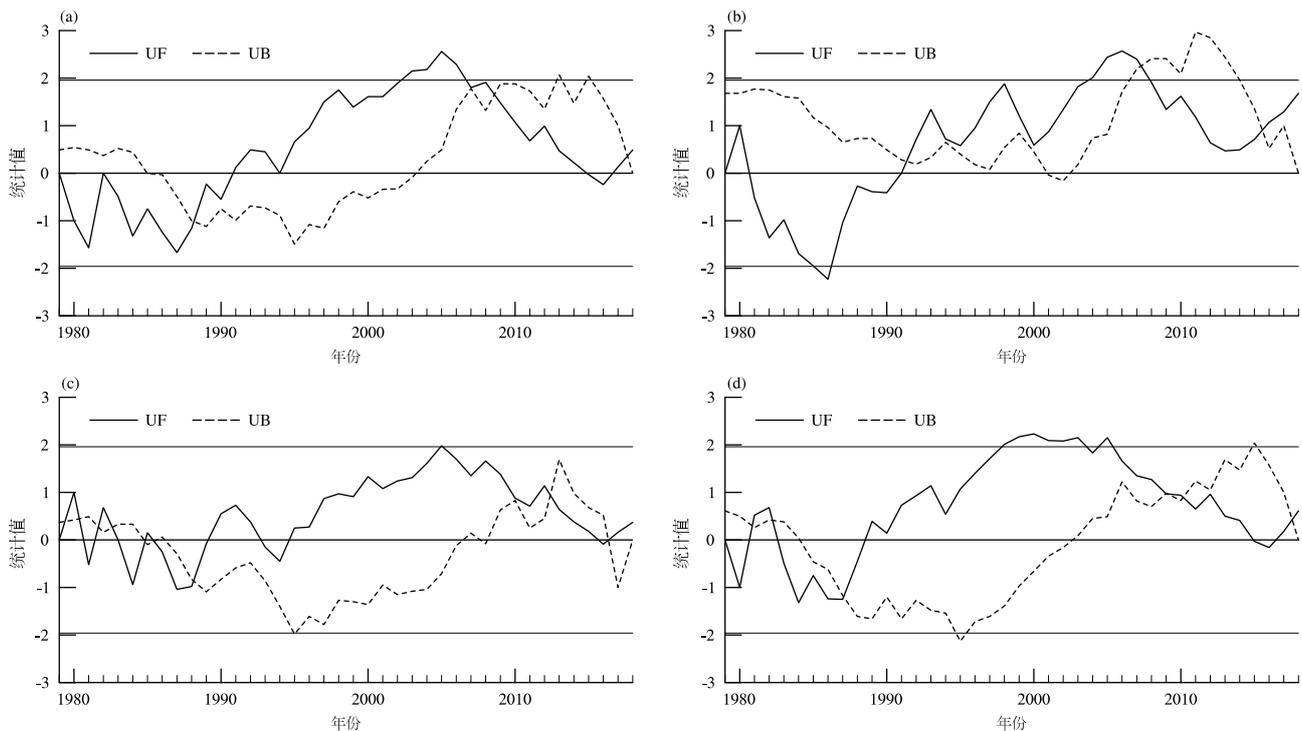


图 4 青藏高原年平均云量曼-肯德尔统计量曲线: (a) 总云量; (b) 高云量; (c) 中云量; (d) 低云量

Fig. 4 Mann-Kendall statistical curve of annual mean cloud amount in the Qinghai-Tibet Plateau: (a) TCC; (b) HCC; (c) MCC; (d) LCC

注: 直线为 $\alpha = 0.05$ 显著性水平临界线。

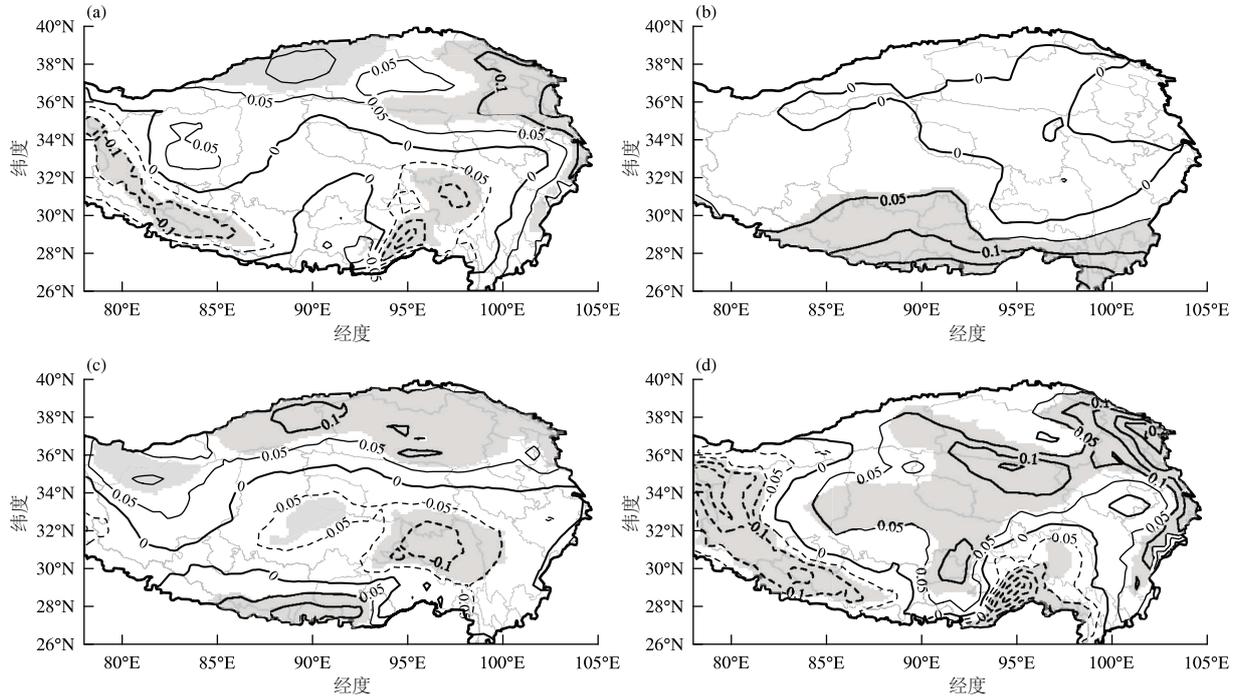


图5 青藏高原年平均云量回归系数空间分布:(a)总云量;(b)高云量;(c)中云量;(d)低云量

Fig.5 Spatial distribution of regression coefficient of annual mean could amount in the Qinghai-Tibet Plateau:

(a) TCC; (b) HCC; (c) MCC; (d) LCC

注:灰色区域为通过95%信度检验的区域。

较明显的区域主要分布在西藏东部和西南部,以及青海省南部等地,包括西藏昌都市的中东部、林芝市中南部、山南市东南部、日喀则市西南部和阿里地区南部,以及青海省玉树州东南部,减少速率为5%/100a以上,部分区域达10%/100a。

青藏高原南部的高云量有显著增加趋势(图5b)。覆盖西藏中部和南部、云南省西北部和川西高原南部。包括西藏拉萨市、那曲市南部、日喀则市中东部、阿里地区东南部、山南市大部、林芝市南部,云南省怒江州北部、迪庆州大部、丽江市北部,以及四川省甘孜州南部。高云量增速5%/100a以上,南部边缘区域增多速率达10%/100a以上。其他区域增减趋势不明显。

从青藏高原中云量变化趋势空间分布来看(图5c),高原中部呈减少趋势,北部和南部边缘呈显著增多趋势。其中,西藏那曲市北部和东部、昌都市大部,以及青海省玉树州东南部,四川省甘孜州西部等地减少趋势显著,中云量减少速率5%/100a以上,其中昌都市中部至玉树州东南部减少速率达10%/100a;西藏南部、新疆南部、青海省北部和甘肃

省西北部等地呈显著增多趋势,中云量增多速率5%/100a以上,部分区域增加速率达10%/100a。

青藏高原东南部和西南部的低云量呈显著减少趋势(图5d)。其中,西藏昌都市中部、林芝市中部和南部、山南市东南部、日喀则市西南部和阿里地区西南部等地减少速率5%/100a以上,部分区域达10%/100a以上。青藏高原其他大部分区域低云量呈增多趋势,其中青藏高原中部腹地、东北部和东部边缘地区增多趋势显著,增多速率5%/100a以上,部分区域达10%/100a以上。

4 结论

通过对1979—2018年青藏高原云量的时空分布及气候特征的分析,得出如下主要结论:

(1)受高原大地形和山脉走向的影响,青藏高原云量具有明显的空间分布特征,且低云量对总云量的空间分布型贡献最大。

(2)青藏高原云量年内呈现中间高两边低的时间分布型,总云量、中云量和低云量呈单峰型分布,

高云量呈双峰型分布。除高云量的最大峰值出现在 4 月份外,云量峰值基本出现在 6—7 月份,4 种云量依次为 70%、30%、43% 和 40%,低值出现在 11—12 月份,4 种云量依次为 31%、7%、20% 和 10%。

(3)总云量和高云量第一空间模态均表现为青藏高原大部区域一致性变化,中云量和低云量在青藏高原均没有出现显著一致变化的空间模态。

(4)近 40 年,青藏高原总云量增多趋势显著的区域主要分布在青藏高原北部和东部边缘等地,总云量增多速率 5%/100a 以上;总云量减少趋势较明显的区域主要分布在西藏东部和西南部,以及青海省南部等地,减少速率为 5%/100a 以上,部分区域达 10%/100a。该结论与利用 80 个测站资料得出青藏高原总云量下降趋势最明显的是高原西南部、西北部和东南部基本一致。青藏高原高云量南部有显著增加趋势,南部边缘增多速率达 10%/100a 以上。青藏高原中云量中部呈减少趋势,北部和南部边缘呈显著增多趋势,增减速率均在 5%/100a 以上。青藏高原东南部和西南部的低云量呈显著减少趋势,其他大部分区域低云量呈增多趋势,其中青藏高原中部腹地、东北部和东部边缘地区增多趋势显著,部分区域达 10%/100a 以上。

(5)青藏高原云量具有年云量变化小、月云量变化大的特点,即年云量年际变化相对稳定,而月云量的年际稳定性相对较差;月总云量年际变化相对稳定,月高云量年际变化相对最不稳定,大致呈现云量越多的月份离散系数越小,其年际变化越稳定,反之亦然。

(6)青藏高原云量经历了先减少后增多再减少的波动式变化,云量呈增多趋势的年份多于减少的年份,云量保持增多趋势的年代大致在 1990s 至 2010s 中期。经检测,云量这种波动式的变化无法判断其发生突变。

由于青藏高原地区观测资料缺乏,本文基于再分析云资料得到的结果仅具有一定的参考性,并有待于观测资料的进一步验证。

参考文献 (References)

[1] 李义华,韩志刚,姚志刚,等. 青藏高原及周边地区气候特征[J]. 科学技术与工程, 2011, **11**(33): 8145–8148. [LI Yihua, HAN Zhigang, YAO Zhigang, et al. Characteristics of cloud

climatology over the Tibetan Plateau and its neighborhood [J]. Science Technology and Engineering, 2011, **11**(33): 8145–8148] DOI: 10.3969/j.issn.1671–1815.2011.33.010

[2] 魏丽,钟强. 青藏高原的气候学特征[J]. 高原气象, 1997, **16**(1): 11–16. [WEI Li, ZHONG Qiang. Characteristics of cloud climatology over Qinghai–Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology, 1997, **16**(1): 11–16]

[3] 余忠水,拉巴,周洪莉,等. 近 40 年西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. [YU Zhongshui, LA Ba, ZHOU Hongli, et al. Distribution and coupling changes of cloud cover and precipitation on Tibet Plateau in recent 40 years [J]. Tibet Science and Technology, 2018(9): 49–55+59]

[4] 张琪,李跃清,陈权亮,等. 近 46 年西南地区云量的时空变化特征[J]. 高原气象, 2011, **30**(2): 339–348. [ZHANG Qi, LI Yueqing, CHEN Quanliang, et al. Temporal and spatial distributions of cloud cover over southwest China in recent 46 years [J]. Plateau Meteorology, 2011, **30**(2): 339–348]

[5] 陈少勇,董安祥. 青藏高原总云量的气候变化及其稳定性[J]. 干旱区研究, 2006, **23**(2): 327–333. [CHEN Shaoyong, DONG Anxiang. Climatic change and stability of total cloud amount over the Qinghai–Tibetan Plateau [J]. Arid Zone Research, 2006, **23**(2): 327–333] DOI: 10.13866/j.azr.2006.02.023

[6] 徐祥德,赵天良,LU Chungu,等. 青藏高原大气水分循环特征[J]. 气象学报, 2014, **72**(6): 1079–1095. [XU Xiangde, ZHAO Tianliang, LU Chungu, et al. Characteristics of the water cycle in the atmosphere over the Tibetan Plateau [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, **72**(6): 1079–1095] DOI: 10.11676/qxxb2014.091

[7] FU Chuanbo, DAN Li, LIN Xiaobin, et al. Long-term change of total cloud cover and its possible reason over south China during 1960–2012 [J]. Atmospheric Science Letters, 2019, **20**(11): e943. DOI: 10.1002/asl.943

[8] PYRGOU A, SANTAMOURIS M, LIVADA I. Spatiotemporal analysis of diurnal temperature range: Effect of urbanization, cloud cover, solar radiation, and precipitation [J]. Climate, 2019, **7**(7): 89. DOI: 10.3390/cli7070089

[9] YONG J C, HWANG Y T, ZELINKA M D, et al. Distinct patterns of cloud changes associated with decadal variability and their contribution to observed cloud cover trends [J]. Journal of Climate, 2019, **32**(21): 7281–7301. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0443.1

[10] 王新,黄菲,王宏. 春季北极地区云量跷跷板式的趋势变化特征及其对北极放大的云反馈作用[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, **50**(7): 10–17. [WANG Xin, HUANG Fei, WANG Hong. Seesaw pattern of Arctic cloud cover trend in spring and its cloud feedback effect for arctic amplification [J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, **50**(7): 10–17]

- DOI:10.16441/j.cnki.hdxh.20190187
- [11] 刘健. 三种卫星云量数据在青藏高原地区的比对分析[J]. 遥感学报, 2021, **25**(7):1445-1459. [LIU Jian. Performance of cloud fraction of three satellite cloud climate data records over the Tibetan Plateau [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, **25**(7):1445-1459] DOI: 10.11834/jrs.20219262
- [12] 陶丽,袁媛,梁津. 峨眉山云海景观预报方法及云量特征研究[J]. 科技创新与应用, 2019(30):124-125. [TAO Li, YUAN Yuan, LIANG Jin. Study on prediction method and cloud cover characteristics of cloud sea landscape in Mount Emei [J]. Technology Innovation and Application, 2019(30):124-125]
- [13] 段皎,刘煜. 近20年中国地区云量变化趋势[J]. 气象科技, 2011, **39**(3):280-288. [DUAN Jiao, LIU Yu. Variation and trends of cloud amount in China over past 20 years [J]. Meteorological Science and Technology, 2011, **39**(3):280-288] DOI: 10.19517/j.1671-6345.2011.03.004
- [14] 李慧晶,刘建西,刘东升,等. 西南地区云量变化特征[J]. 干旱气象, 2014, **32**(2):194-200+219. [LI Huijing, LIU Jianxi, LIU Dongsheng, et al. Variation characteristics of cloud cover over southwestern China [J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, **32**(2):194-200+219] DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-02-0194
- [15] 王捷馨,赵中军,尚可政,等. 环渤海地区云量的时空分布特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2019, **55**(1):125-133+140. [WANG Jiexin, ZHAO Zhongjun, SHANG Kezheng, et al. Spatial and temporal distribution of cloud covers in the Bohai Sea region [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2019, **55**(1):125-133+140] DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059.2019.01.018
- [16] 牛晓瑞,王淑瑜. 华北地区低云量的变化特征及其影响因子分析[J]. 高原气象, 2012, **31**(5):1340-1347. [NIU Xiaorui, WANG Shuyu. Change characteristic of low cloud over north China region and its relationship with large scale circulation [J]. Plateau Meteorology, 2012, **31**(5):1340-1347] DOI: 10.3969/j.issn.1009-4393.2012.05.059
- [17] 刘瑞霞,刘玉洁,杜秉玉. 中国气候特征的分析[J]. 应用气象学报, 2004, **15**(4):468-476. [LIU Ruixia, LIU Yujie, DU Bingyu. Cloud climatology characteristics of China from ISCCP data [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2004, **15**(4):468-476] DOI: 10.3969/j.issn.1001-7313.2004.04.009
- [18] 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. [QIANG Anfeng, WANG Ni, WEI Jiahua, et al. Study on cloud water resources distribution and precipitation efficiency in the three river headwaters region during the past 50 years [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, **28**(3):574-593] DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2020.03.007
- [19] 衡志炜. 基于卫星及数值模式资料的云水凝物的气候特征分析和检验[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2013. [HENG Zhiwei. Analysis and evaluation of hydrometeors based on satellite and model datasets [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013]
- [20] 朱小祥,孟旭,方宗义,等. 利用卫星资料计算云南地区云量及云特征分析[J]. 气象, 1995, **21**(1):32-36. [ZHU Xiaoxiang, MENG Xu, FANG Zongyi, et al. Cloudiness calculation and characteristic analysis over Yunnan with polar orbiting meteorological satellite data [J]. Meteorology, 1995, **21**(1):32-36] DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.1995.1.007
- [21] 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, **49**(11):1105-1111. [DING Shouguo, SHI Guangyu, ZHAO Chunsheng. Using ISCCP D2 data to analyze the changes of global different cloud cover and cloud types in recent 20 years and their possible impacts on climate [J]. Science Bulletin, 2004, **49**(11):1105-1111] DOI: 10.3321/j.issn:0023-074X.2004.11.016
- [22] 符传博,丹利,冯锦明,等. 1960-2012年中国地区总云量时空变化及其与气温和水汽的关系[J]. 大气科学, 2019, **43**(1):87-98. [FU Chuanbo, DAN Li, FENG Jiming, et al. Temporal and spatial variations of total cloud amount and their possible relationships with temperature and water vapor over China during 1960 to 2012 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, **43**(1):87-98] DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17235
- [23] 李文韬,李兴宇,张礼林,等. 青藏高原云水气候特征分析[J]. 气候与环境研究, 2018, **23**(5):574-586. [LI Wentao, LI Xingyu, ZHANG Lilin, et al. Climatic characteristic analysis of cloud water over the Tibetan Plateau [J]. Climatic and Environmental Research, 2018, **23**(5):574-586] DOI: 10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18039
- [24] 马茜蓉,游庆龙,蔡森,等. 基于 CERES 卫星资料分析中国近15 a 云量变化[J]. 干旱气象, 2018, **36**(6):911-920. [MA Qianrong, YOU Qinglong, CAI Miao, et al. The cloud variation over China in recent 15 years based on CERES satellite data [J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, **36**(6):911-920] DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-06-0911
- [25] 李晓攀. 基于 MODIS 卫星数据分析近十四年中国地区云参数的时空变化特征[D]. 成都:成都信息工程大学, 2019. [LI Xiaopan. Spatial and temporal variation characteristics of cloud parameters in China in recent 14 years based on MODIS satellite data [D]. Chengdu: Chengdu University of Information Technology, 2019] DOI: 10.27716/d.cnki.gcdxx.2019.000021
- [26] 耿蓉. 基于卫星和再分析数据的大气水循环变量比较和分析[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2017. [GENG Rong.

- Comparison and analysis of atmospheric water cycle variables based on satellite and reanalysis data [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017]
- [27] 白磊,王维霞,姚亚楠,等. ERA - Interim 和 NCEP/NCAR 再分析数据气温和气压值在天山山区适用性分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2013,7(3):51 - 56. [BAI Lei, WANG Weixia, YAO Ya'nan, et al. Applicability of ERA - Interim and NCEP/NCAR reanalysis of air temperature and pressure on the Tianshan Mountains [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2013,7(3):51 - 56] DOI: 10.3969/j.issn.1002-0799.2013.03.012
- [28] 刘菊菊,游庆龙,周毓荃,等. 基于 ERA - Interim 的中国云水量时空分布和变化趋势[J]. 高原气象, 2018,37(6):1590 - 1604. [LIU Jujū, YOU Qinglong, ZHOU Yuquan, et al. Distribution and trend of cloud water content in China based on ERA - Interim reanalysis [J]. Plateau Meteorology, 2018,37(6):1590 - 1604] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00059
- [29] 杜晖,贾晓红,尚子激,等. ERA Interim 再分析资料的云量可靠性分析—以太原和五寨为例[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2020,56(2):253 - 259. [DU Hui, JIA Xiaohong, SHANG Ziwei, et al. Cloud reliability analysis of ERA Interim reanalysis data: Taking Taiyuan and Wuzhai as examples [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2020,56(2):253 - 259] DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059.2020.02.014
- [30] 肖王星. 东北亚海冰变化特征及其原因分析[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2017. [XIAO Wangxing. Characteristics of sea ice in northeast Asia and its reasons [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2017]
- [31] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第2版)[M]. 北京: 气象出版社, 2007. [WEI Fengying. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology (2nd edition) [M]. Beijing: Meteorological Press, 2007]

Spat-Temporal Distribution of the Cloud Amount in the Qinghai-Tibet Plateau of China for the Past 40 Years Based on ERA-Interim

YU Zhongshui¹, CHEN Hua², DEJI Baima³, GAO Jiajia^{1*}, ZHUO Ga¹, LIU Junqing³

(1. Tibet Institute of Plateau Atmospheric and Environmental Science, Lhasa 850000, China;

2. Tibet Atmospheric Detection Technology and Equipment Support Center, Lhasa 850000, China;

3. Tibet Weather Modification Center, Lhasa 850000, China)

Abstract: Changes in cloud cover of the Qinghai-Tibet Plateau directly affects the energy exchange and atmospheric moisture circulation of the upper-mid tropospheric geo-gas system, and consequently affects both regional and global climate. Past studies mainly concerned about total cloud cover, scarcely relative to the total factor analysis of cloud cover, resulting in an incomplete knowledge of the pattern of cloud cover changes in the Qinghai-Tibet Plateau. In this paper, the spat-temporal distribution and climate characteristics of the total factor of cloud cover in the Qinghai-Tibet Plateau were analyzed by using the high-level resolution ERA-Interim reanalysis data of 1979 - 2018 obtained from the European Center for Medium-Term Numerical Forecast (ECMWF), using the methods of regional average, linear trend analysis and empirical orthogonal function (EOF). Results show that: (1) Due to the influence of the plateau topography and the mountain tendency, the cloud cover over the Qinghai-Tibet Plateau showed obvious spatial distribution characteristics, and the low cloud cover contributed the most to the spatial distribution pattern of the total cloud cover. (2) In the past 40 years, the regions with a significant increase tendency in total cloud cover were mainly distributed in northern and eastern margins of the Qinghai-Tibet Plateau, whereas the regions with a significant decrease tendency were mainly distributed in eastern and southwestern parts of Tibet; high cloud cover had a significant increase tendency in southern part of the plateau, whereas the increase and decrease in other regions were not obvious; the medium cloud cover decreased in the central part of the

plateau, and increased significantly in northern and southern regions; low cloud cover decreased significantly in the southeast and southwest of the plateau, and increased in most other regions. (3) The first spatial mode of total cloud cover and high cloud cover showed consistent variation in most regions of the Qinghai-Tibet Plateau, whereas the spatial mode of medium cloud cover and low cloud cover had no significant consistent change in the Qinghai-Tibet Plateau. The research results can provide scientific basis for the climate change of the Qinghai-Tibet Plateau and the operational planning of weather modification for ecological restoration.

Key words: the Qinghai-Tibet Plateau; cloud amount; spatial-temporal distribution; climatic characteristics; ERA-Interim