

近 54 年博州地区低云量变化特征及影响因素分析

巴清虎, 曹月娥*, 张翌璇, 张珍珍 (新疆大学资源环境与科学学院, 新疆乌鲁木齐 830046)

摘要 选取新疆博州地区 4 个气象站 1960—2013 年逐月的气象数据, 通过线性拟合、Mann-Kendall 突变检验、小波分析、相对贡献率和敏感系数分析方法, 分析近 54 年来该地区的低云量变化特征及与其他气候因子的关系。结果表明, 近 54 年博州地区低云量呈明显上升趋势, 上升幅度约为 1.2%/10 a, 多年平均值为 22.57%, 且序列的正持续性较强; 夏季的低云量最低, 为 20.47%, 春季最高, 为 24.17%; 全年低云量从在 2001 年发生突变性增加; 春季和夏季低云量均值不存在突变性增加, 秋季和冬季低云量分别于 1999 和 1989 年发生突变性增加; 低云量演变过程中存在着 8~9 和 25~26 年尺度的周期变化规律; 8 年的时间尺度是低云量变化的第 1 主周期, 14 年的时间尺度为低云量变化的第 2 周期; 相对湿度对低云量具有最高的相对贡献率, 达 51.3%, 而降水量对低云量的相对贡献率最小, 仅为 6.1%, 降水量与低云量的相关性最高, 相关系数达 0.67 ($P < 0.01$), 平均气温的相关系数最低, 仅为 0.29 ($P < 0.05$)。

关键词 低云量; 变化特征; 突变检验; 小波分析; 相对贡献率; 敏感系数; 影响因素; 博州地区

中图分类号 P 468 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)08-0202-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.08.053

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis on the Change Characteristics and Influencing Factors of Low Cloud Cover in Bozhou Area in Recent 54 Years

BA Qing-hu, CAO Yue-e, ZHANG Zhao-xuan et al (College of Resources, Environment and Science, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046)

Abstract The meteorological data of 4 meteorological stations in Bozhou area of Xinjiang from 1960 to 2013 were selected, the characteristics of low cloud cover and its relationship with other climatic factors in the past 54 years were analyzed by linear fitting, Mann-Kendall mutation test, wavelet analysis, relative contribution rate and sensitivity coefficient analysis method. The results showed that the low cloud cover in Bozhou area had shown an obvious upward trend in the past 54 years, with an increase of about 1.2%/10 a, with an average of 22.57% for many years, and the sequence had a strong positive sustainability; the lowest amount of low cloudiness in summer was 20.47%, and the highest amount in spring was 24.17%. The annual low cloud volume increased from 2001; there was no increase in the mean value of low cloud cover in spring and summer, and the increase in the amount of low cloud in autumn and winter increased in 1999 and 1989, respectively; During the evolution of low cloud quantity, there were periodic variations of 8~9 and 25~26 years; the 8-year time scale was the 1st main cycle of low cloud cover change, and the 14-year time scale is the second period of low cloud cover change; relative humidity had the highest relative contribution rate to low cloud amount, reaching 51.3%, while the relative contribution rate of precipitation to low cloud amount was the smallest, only 6.1%. The correlation between precipitation and low cloud cover was the highest, the correlation coefficient was 0.67 ($P < 0.01$), and the correlation coefficient between average temperature and low cloud cover was the lowest, only 0.29 ($P < 0.05$).

Key words Low cloud amount; Change characteristics; Mutation test; Wavelet analysis; Relative contribution rate; Sensitivity coefficient; Influencing factors; Bozhou area

云是调节辐射平衡和水汽循环、影响气候变化的重要因子, 其形成与特性是地表与大气各种动力、热力过程作用的结果, 在地气系统中居重要地位^[1-3]。云的生成和变化, 不仅受气候其他因子的影响, 而且是引起日照、气温、相对湿度等发生变化的原因。云覆盖率的气候性年代际变化, 不仅会增加气候系统的区域性差异, 同时也会使地表生态系统发生适应性调整, 以及使植物生长物候发生改变^[4]。其中, 对于低云的研究一直是云量研究所关注的热点。

低云在地气系统中主要表现为致冷效应, 又是降水的主要云系^[5], 与降水关系密切。迄今为止, 大量学者对于区域低云量做了许多工作, 封彩云等^[6]通过观测资料得出, 我国北方低云量与降水量具有更显著的相关性; 张亚洲^[7]分析了南海及周边地区的云量特征, 指出低云主要分布在南海海区, 并且受海表温度影响较大; 敖泽建等^[8]研究指出, 甘南地区低云分布呈南多北少和东多西少的趋势; 牛晓瑞等^[9]研究发现, 华北地区秋季的低云量减少趋势最为显著; 阿丽亚·拜都热拉等^[10]分析指出, 新疆山区的低云量明显高于沙漠地

区。但已有的研究多集中在较大尺度, 对于一些典型小尺度区域缺乏关注, 同时对于干旱-半干旱地区低云量与其他气候因子的关系鲜有报道。博州地区位于亚欧大陆腹地, 降水稀少, 蒸发强烈, 同时该区域对于气候变化的响应也具有独特性^[11]。因此, 该研究以博州地区为靶区, 分析近 54 年该区域低云量的变化趋势, 并探讨其他气候因子对低云量的影响, 以期为该区域农业生产和水资源的合理利用提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 研究区概况 博尔塔拉蒙古自治州地处亚欧大陆腹地, 位于新疆维吾尔自治区西北部, 地理位置为 79°53'~83°53'E, 44°02'~45°23'N。在准噶尔盆地西缘, 东连塔城地区, 南接伊犁哈萨克自治州, 西北部与哈萨克斯坦接壤, 总面积 2.7 万 km², 边境线长 380 km。博州地区包括阿拉山口市、博乐市、温泉县和精河县, 年日照时数约为 2 800 h, 年平均降水量为 90.99 mm, 降水稀少, 蒸发强烈, 是典型的干旱-半干旱大陆性气候, 日照时间长, 昼夜温差大, 春季气温冷暖多变, 夏季高温, 气候炎热, 伴有干热风, 秋季气爽, 冬季长而寒冷, 日平均气温 6~8℃, 极端最高气温 44℃, 极端最低气温 -36℃, ≥10℃的积温 3 137.9℃·d, 无霜期 169 d。该区域主要植物类型包括胡杨、怪柳、梭梭、芦苇等^[12]。

1.2 数据来源 精河站、博乐站、温泉站和阿拉山口市的气

基金项目 国家自然科学基金项目(41461056)。

作者简介 巴清虎(1993—), 男, 新疆沙湾人, 硕士研究生, 研究方向: 人文地理。*通信作者, 副教授, 博士, 硕士生导师, 从事干旱区人文地理研究。

收稿日期 2018-12-17

象数据来自于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn>), 分别获取各站点 1960—2013 年逐月的平均气温、降水量、相对湿度等气象数据。季节划分为春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)、冬季(12 月—翌年 2 月)。各气象站点基本资料如表 1 所示。

表 1 博州地区各气象站基本资料

Table 1 Basic information of various weather stations in Bozhou area

气象站 Weather station	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude m	编号 No.
精河 Jinghe	82°54'E	44°37'N	321.2	51 334
博乐 Bole	82°04'E	44°54'N	531.9	51 238
温泉 Wenquan	81°01'E	44°58'N	1 354.6	51 330
阿拉山口 Alashankou	82°34'E	45°11'N	284.8	51 232

1.3 研究方法

1.3.1 线性拟合法。采用一元线性回归方法分析气候要素的变化趋势,计算方法见文献[13]。

1.3.2 R/S 法。对于时间序列 $\{x(t)\} (t=1, 2, \dots, n)$, 定义均值序列 x_τ :

$$x_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} x(i) \quad (\tau=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

累积离差 $X(T, \tau)$:

$$X(t, \tau) = \sum_{k=1}^t (x(k) - x_\tau) \quad (1 \leq t \leq \tau) \quad (2)$$

极差序列 $R(\tau)$:

$$R(\tau) = \max X(t, \tau) - \min X(t, \tau) \quad (1 \leq t \leq \tau) \quad (3)$$

标准差序列 $S(\tau)$:

$$S(\tau) = \left(\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (x(t) - x_\tau)^2 \right)^{0.5} \quad (4)$$

对于比值 $R(\tau)/S(\tau) \equiv R/S$, 若存在 $R/S \propto \tau^H$, 则说明时间序列 $\{x(t)\} (t=1, 2, \dots, n)$ 存在 Hurst 现象。以 H 表示 Hurst 指数, H 值可根据计算出的 $(\tau, R/S)$ 值, 在双对数坐标系 $(\ln(\tau), \ln(R/S))$ 中利用最小二乘法拟合, H 为拟合直线的斜率。当 $H=0.5$ 时, 表明时间序列是随机变化的; 当 $0.5 < H < 1$ 时, 表明时间序列具有正的持续性, 且越接近于 1.0 正持续性越强; 当 $0 < H < 0.5$ 时, 表明时间序列具有负的持续性, 且越接近于 0 反持续性越强^[14]。

1.3.3 Mann-Kendall 突变分析。Mann-Kendall 突变分析是用于水文气象要素在长时间监测数列的变化趋势和突变点的确定。具体计算方法见文献[15]。

1.3.4 小波分析法。小波分析在气候变化研究中显现了年与年之间、波长与波长之间的波幅变化形态与特征, 已广泛地应用于气象领域, 并成为研究气象要素长期变化的重要工具^[16]。具体计算方法如下^[17]: 小波分析是一种时、频多分辨分析方法, 是傅里叶分析发展史上的一座里程碑。小波函数 $J(t)$ 指具有振荡特性、能迅速衰减到零的一类函数, 若其 Fourier 变换 $J(k)$ 满足允许条件: $\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|J(k)|^2}{k} dk < \infty$, 则称其为基本小波或母小波, 通过 $J(t)$ 伸缩和平移后派生出一函数 $J_{a,b}(t)$:

$$J_{a,b}(t) = a^{-1/2} J\left[\frac{t-b}{a}\right] \quad (a, b \in R, a \neq 0) \quad (5)$$

式中, $J_{a,b}(t)$ 称连续小波, a 为尺度因子, b 为时间因子。

1.3.5 相对贡献率。采用多元回归分析各气候因子对低云量变化的影响, 并计算各气候因子对低云量的相对贡献率大小。首先对数据序列进行标准化, 使其值在 0~1, 之后对序列值进行回归分析, 得到回归方程, 可根据各因子在回归方程中的系数计算其对低云量的相对贡献率:

$$Y = ax_1 + bx_2 + cx_3 + \dots \quad (6)$$

$$\mu = \frac{|a|}{|a| + |b| + |c| + \dots} \quad (7)$$

式中, Y 为低云量标准化值, x_1, x_2, x_3, \dots 为各气候因子标准化值, a, b, c, \dots 为回归方程系数, μ 为各气候因子对低云量的相对贡献率。

1.3.6 气候敏感系数。敏感系数的优点在于将各个气候因子无量纲化, 以便于不同气候因子之间的比较^[18], 具体计算方法如下^[19]: 为定量分析各气象因子变化对博州地区干湿状况的影响, 该研究引入了干燥指数的气候敏感系数的概念, 定义为干燥指数变化率与气象因子变化率之比, 即:

$$S_X = \lim \left[\frac{\Delta AI / AI}{\Delta X / X} \right] = \frac{\partial AI / \partial X}{AI / X} \quad (8)$$

式中, S_X 为干燥指数 AI 关于气候因子 x 的敏感系数。在式(8)中, $\partial AI / \partial X$ 可视为 AI 的相对变化率, 而 $\partial X / X$ 则表示各气象因子的相对变化率。 S_X 是一个无量纲的指标, 表示的是气象因子 X 的波动或变化对干燥指数 AI 影响程度, 其值越大即表明干燥指数对该气象因子变化的响应越敏感。结合干燥指数的定义, 容易求得干燥指数关于降水的敏感系数为 -1.0, 即表明降水增加(或减少)10%, 干燥指数将相应地减少(或增加)10%。敏感系数的优点在于将各个气候因子无量纲化, 以便于不同气候因子之间的比较。

2 结果与分析

2.1 低云量变化趋势 从图 1 可以看出, 近 54 年博州地区低云量呈上升趋势, 上升幅度约为 1.2%/10 a, 非参数 Mann-Kendall 单调趋势检验的统计量 $|z| = 0.302 6 > z(0.05) = 0.183 6$, 说明研究区年际低云量的上升趋势显著。低云量多年平均值为 22.57%, 最大值为 30.56% (2010 年), 最小值为 15.89% (1974 年), 变差系数 C_v 为 0.176, 偏态系数 C_s 为 0.199, 说明年际低云量序列的离散程度较小, 并且为正偏分布。Hurst 指数 H 为 0.810, 说明年际低云量序列具有正的持续性, 即过去的一个增长趋势意味着将来的一个增长趋势, 且序列的正持续性较强。

距平值表示了气候变量偏离正常情况的程度。从表 2 可以看出, 博州地区低云量在各年代为波动上升趋势, 20 世纪 70 年代的均值最低, 仅为 19.19%, 2000 年后的均值最大, 达 26.75%; 20 世纪 60—90 年代的距平值均为负值, 说明这 4 个时期的平均低云量均小于年际序列均值, 但整体为上升趋势, 2000 年后的低云量均值较年际序列均值更大。4 个季节的低云量中, 夏季的低云量最低 (20.47%), 春季最高

(24.17%),各年代春、夏、秋3个季节的低云量均为波动上升趋势,其中春季的变化最为平缓,并且3个季节20世纪70—90年代的低云量均较低,在2000年后春季和秋季均转为正距平,与全年低云量的变化趋势较为一致;各年代冬季低云量为持续上升趋势,且上升趋势显著,2000年后的低云量比20世纪60年代增加了76.6%,并且具有最高的正距平。4个季节低云量序列的Hurst指数 H 分别为0.64、0.81、0.78和0.86,4个季节均为正的持续性,春季的正持续性较弱,冬季的正持续性最强。

2.2 低云量突变检验及周期变化分析 从研究区年际及季节Mann-Kendall突变检验结果(图2)可以看出,全年低云量20世纪60—70年代有一个小的减小趋势,但从80年代开始

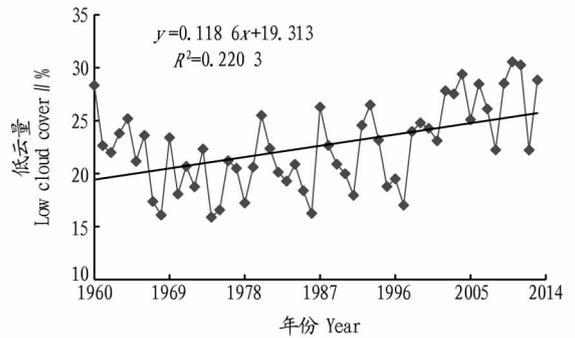


图1 1960—2013年研究区低云量变化趋势

Fig.1 Change trends of low cloud cover in the study area from 1960 to 2013

表2 1960—2013年研究区低云量年际与季节变化

Table 2 Interannual and seasonal variations of low cloud cover in the study area from 1960 to 2013

时段 Period	全年 Whole year	距平 Anomaly	春季 Spring	距平 Anomaly	夏季 Summer	距平 Anomaly	秋季 Autumn	距平 Anomaly	冬季 Winter	距平 Anomaly
1960—1969	22.36	-0.21	25.40	1.23	25.45	4.98	21.21	-0.92	17.38	-6.15
1970—1979	19.19	-3.38	20.08	-4.09	18.31	-2.16	19.86	-2.27	18.5	-5.03
1980—1989	21.27	-1.30	23.73	-0.44	17.15	-3.32	21.78	-0.35	22.41	-1.12
1990—1999	21.63	-0.94	24.29	0.12	17.36	-3.11	19.06	-3.07	25.8	2.27
2000年后	26.75	4.18	26.44	2.27	23.05	2.58	26.83	4.70	30.69	7.16
1960—2013	22.57		24.17		20.47		22.13		23.53	

转为上升趋势。通过UF和UB曲线的交点可知,全年低云量在2001年发生突变性增加。对1960—2001年和2002—2013年进行 t 检验,结果为 $|t_0| = 4.06 > t_{0.01}(t_{0.01} = 2.674)$,这2个时期低云量均值具有显著差异,2001年为突变点。同理,由UF和UB曲线可知,春季和夏季低云量均值不存在突变点,而秋季和冬季UF和UB的交点分别为1999和1989年,对这2个季节交点前后2个时段进行 t 检验,其 $|t_0|$ 分别为3.87和5.64,因此秋季和冬季低云量分别于1999和1989年发生突变性增加。

小波系数实部等值线图能反映干燥指数序列不同时间尺度的周期变化及其在时间域中的分布,进而能判断在不同时间尺度上干燥指数的未来变化趋势^[20]。当小波系数实部值为正时,表示干燥程度较大,反之,则代表干燥程度较低。等值线的密集程度代表了信号振荡的强弱,等值线越密集说明比常年越干燥^[21]。从图3可以看出,低云量在长时间序列演变过程中存在多时间尺度特征。总体上来说,研究区低云量演变过程中存在着8~9年和25~26年尺度的周期变化规律。其中,在25~26年尺度上出现了小一大交替的准3次振荡,8~9年尺度上出现了准2次振荡,这2个尺度的周期变化在整个时间序列上表现得比较稳定,具有全域性。并且小波系数实部等值线在2000年之后更加密集,说明研究区低云量在2000年之后的变化更为剧烈。

在得出了研究区干燥指数的振荡规律之后,为了进一步确定干燥指数变化的主周期,接下来计算了小波方差。从图4可以明显看出,干燥指数的小波方差图中存在2个明显的峰值,依次为8和14年的时间尺度。其中,最大峰值对应着8年的时间尺度,第2峰值对应着14年的时间尺度,说明8

年左右的周期振荡最强,是低云量变化的第1主周期,而14年的时间尺度为低云量变化的第2周期。上述2个周期的波动控制着研究区低云量在整个时间域的变化特征。

2.3 低云量气候敏感系数及贡献率分析 该研究选取了研究区平均气温、降水量、相对湿度、风速和辐射量作为低云量的影响因子,从各气候因子对低云量的相对贡献率和敏感系数(表3)可以看出,研究区的相对湿度对低云量具有最高的相对贡献率,达51.3%,其次为辐射量,达28.0%,而降水量对低云量的相对贡献率最小,仅为6.1%。由各气候因子的敏感系数可知,低云量对于相对湿度、风速和辐射量的响应呈减小趋势,而对平均气温和降水量的响应为增加趋势。低云量对于相对湿度最为敏感,敏感系数为-8.15,而对风速最不敏感,敏感系数仅为-0.46。这说明研究区平均气温和降水

表3 低云量与各气候因子的关系

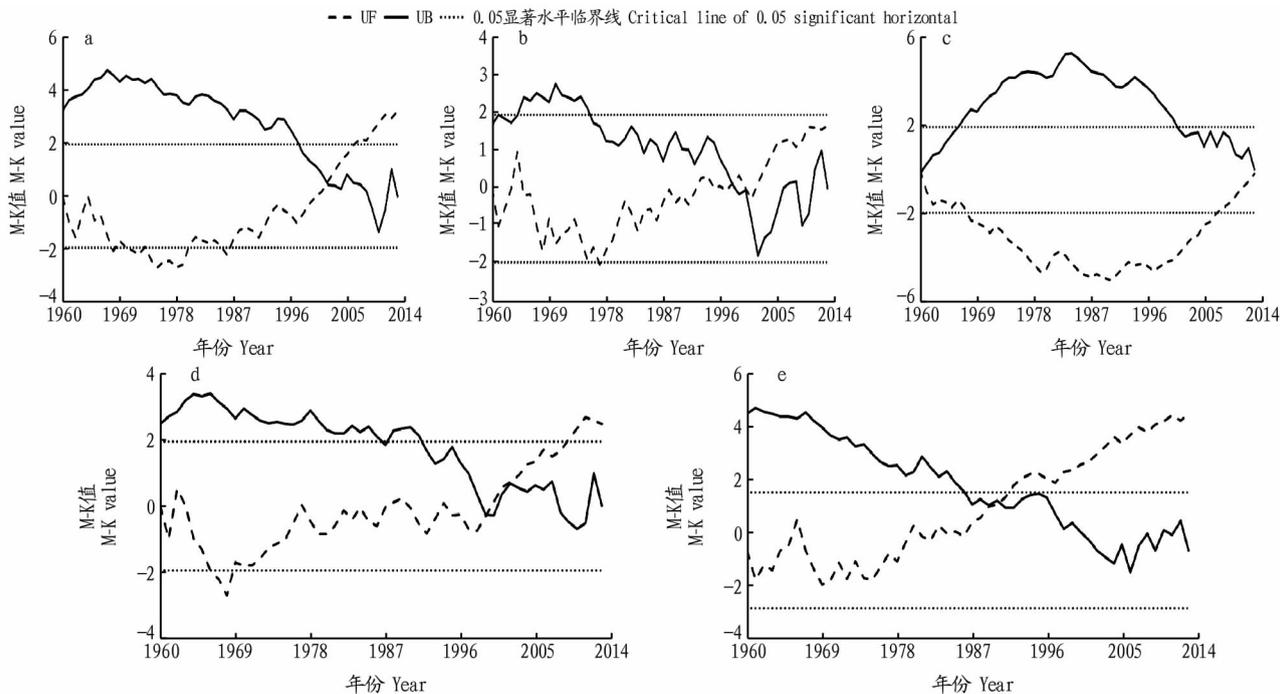
Table 3 Relationship between low cloud cover and various climatic factors

气候因子 Climatic factor	相对贡献率 Relative contribution rate//%	敏感系数 Sensitivity coefficient	相关系数 Correlation coefficient
平均气温 Average temperature	8.3	1.02	0.29*
降水量 Precipitation	6.1	0.72	0.67**
相对湿度 Relative humidity	51.3	-8.15	0.38**
风速 Wind speed	6.3	-0.46	0.36**
辐射量 Radiation amount	28.0	-0.99	0.48**

注: *为通过0.05的显著性检验, **为通过0.01的显著性检验
Note: * is a significant test by 0.05, ** is a significant test by 0.01

量每增加 10%,低云量就会增加 10.2%和 7.2%,而当相对湿度、风速和辐射量每增加 10%,低云量则分别减少 81.5%、4.6%和 9.9%。各气候因子中,相对湿度均具有最高的相对贡献率和敏感系数,而降水量的相对贡献率和敏感系数均较

低。从各气候因子与低云量的相关性分析可以看出,降水量与低云量的相关性最大,相关系数达 0.67($P<0.01$),平均气温的相关系数最小,仅为 0.29($P<0.05$);相对湿度、风速和辐射量与低云量的相关性较为接近。



注:a.全年;b.春季;c.夏季;d.秋季;e.冬季
Note:a.Whole year;b.Spring;c.Summer;d.Autumn;e.Winter

图 2 1960—2013 年博州地区年际与季节低云量 Mann-Kendall 突变检验

Fig.2 Mann-Kendall mutation test of interannual and seasonal low cloud cover in Bozhou area from 1960 to 2013

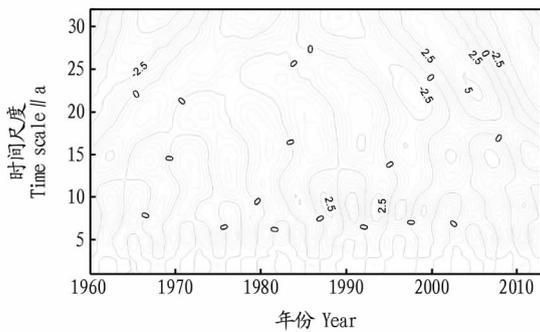


图 3 1960—2013 年博州地区低云量小波实部等值线

Fig.3 Wavelet real contours of low cloud cover in Bozhou area from 1960 to 2013

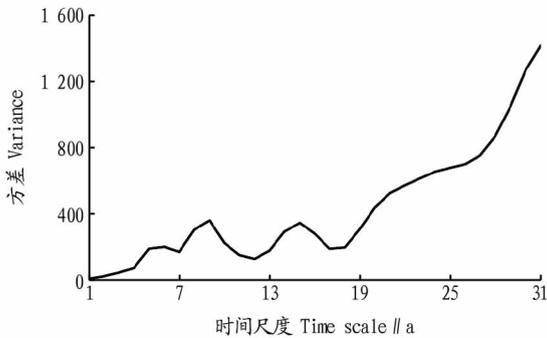


图 4 1960—2013 年博州地区低云量小波方差

Fig.4 Wavelet variance of low cloud cover in Bozhou area from 1960 to 2013

3 讨论

近几十年来,西北地区的气候已逐渐由暖干向暖湿转变^[22],已有研究表明,博州地区的气温和降水均呈上升趋势,而蒸散呈下降趋势^[23]。由于低云量与降水量具有较好的相关性,研究区低云量的增加趋势可能是该区域降水增加和蒸散下降的原因。但在不同的地形,低云量与降水量的关系具有明显差别,尤其是在高原区域,低云量与降水量并没有表现出很好的相关性,因此在进行云量分析时应注意区域地形的影响。在 4 个季节中,春季具有最高的低云量,Koren 等^[24]研究指出,气溶胶粒子对太阳辐射具有强烈的吸收作

用,会加热大气,从而抑制云的形成。而张喆等^[25]分析博州地区气溶胶的发生发展指出,春季是该区域气溶胶活动最为活跃的时期,而这与博州地区春季较高的低云量并不一致,这可能是由于该区域位于阿拉山口大风主通道,大风使气溶胶颗粒向其他方向移动,从而减少了对云量的影响。云主要由水汽凝结或凝华而成,一个区域云量的多少与湿度也有紧密关系^[26]。该研究得出的相对湿度对低云量具有最高的相对贡献率,并且低云量对相对湿度最为敏感也符合这一规律,因此西北地区逐渐向暖湿变化的气候是该区域低云量增加的主要原因。

随着人类对地球陆地表面的改造不断加剧,对于土地利用/覆被变化所引起的水资源变化也受到学者的重视^[27]。土地利用变化很大程度上改变了辐射、云、地表反射率等,进而影响陆-气之间的能量、水分交换和水循环过程,是水资源变化的重要影响因素^[28]。该研究仅对不同气候因子对低云量的影响进行了分析,而缺少对人类活动影响的分析,在今后的研究中,应当从自然因素和人为因素的共同作用下分析区域云量的变化。

4 结论

该研究通过对近 54 年博州地区低云量的变化趋势分析,以及其他气候因子对该区域低云量的影响分析,得出以下结论:

(1) 近 54 年博州地区低云量呈明显上升趋势,上升幅度约为 1.2%/10 a,多年平均值为 22.57%,且序列的正持续性较强;夏季的低云量最低(20.47%),春季最高(24.17%),4 个季节均为正的持续性,春季的正持续性较弱,冬季的正持续性最强。

(2) 全年低云量 20 世纪 60—70 年代有一个小的减小趋势,但 80 年代开始转为上升趋势,在 2001 年发生突变性增加;春季和夏季低云量均值不存在突变性增加,秋季和冬季低云量分别于 1999 和 1989 年发生突变性增加。

(3) 低云量演变过程中存在着 8~9 年和 25~26 年尺度的周期变化规律;8 年的时间尺度是低云量变化的第 1 主周期,14 年的时间尺度为低云量变化的第 2 周期。

(4) 相对湿度对低云量具有最高的相对贡献率,达 51.3%,其次为辐射量,达 28.0%,而降水量对低云量的相对贡献率最小,仅为 6.1%;低云量对于相对湿度最为敏感,敏感系数为-8.15,而对风速最不敏感,敏感系数仅为-0.46;降水量与低云量的相关性最高,相关系数达 0.67 ($P < 0.01$),平均气温的相关系数最低,仅为 0.29 ($P < 0.05$)。

参考文献

[1] RAMANATHAN V, CESS R D, HARRISON E F, et al. Cloud-radiative forcing and climate: Results from the earth radiation budget experiment [J]. *Science*, 1989, 243(4887): 57-63.
 [2] SUN B, GROISMAN P Y. Cloudiness variations over the former Soviet Union [J]. *International journal of climatology*, 2000, 20: 1097-1111.
 [3] 丁守国, 赵春生, 石广玉, 等. 近 20 年全球总云量变化趋势分析 [J]. *应用气象学报*, 2005, 16(5): 670-676.

[4] 徐兴奎. 中国区域总云量和低云量分布变化 [J]. *气象*, 2012, 38(1): 90-95.
 [5] 丁生祥, 郭连云. 近 50 年三江源地区低云量变化特征及与其他气候因子的关系 [J]. *中国农学通报*, 2016, 32(13): 141-146.
 [6] 封彩云, 王式功, 尚可政, 等. 中国北方水汽与云和降水的关系 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2009, 45(4): 30-36.
 [7] 张亚洲. 南海及周边地区云量分布及低云量与南海海温的关系 [J]. *气象科学*, 2012, 32(3): 260-268.
 [8] 敖泽建, 王殿国, 王成福. 甘南高原低云量的变化趋势分析 [J]. *甘肃科技*, 2015, 31(5): 22-24.
 [9] 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.
 [10] 阿丽亚·拜都热拉, 玉米提·哈力克, 陈勇航, 等. 基于低层云的新疆城市区域人工增水潜力分析 [J]. *水土保持研究*, 2013, 20(3): 278-282.
 [11] 秦鹏, 刘强. 艾比河流域潜在蒸散量时空变化特征 [J]. *中国农村水利水电*, 2017(6): 111-117.
 [12] 亢庆, 张增祥, 王长有, 等. 艾比湖绿洲农业区土地利用动态与盐碱化影响的遥感应用研究 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(2): 73-78.
 [13] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 2007.
 [14] 雷江群, 刘登峰, 黄强. 渭河流域气候变化及干湿状况时空分布分析 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(3): 175-181.
 [15] 李颖, 孜比布拉·司马义, 董煜, 等. 艾比湖绿洲地区降水变化规律及突变分析 [J]. *节水灌溉*, 2017(10): 41-45.
 [16] 成鹏. 乌鲁木齐地区近 50 a 降水特征分析 [J]. *干旱区地理*, 2010, 33(4): 580-587.
 [17] 薛小杰, 蒋晓辉, 黄强, 等. 小波分析在水文序列趋势分析中的应用 [J]. *应用科学学报*, 2002, 20(4): 426-428.
 [18] YIN Y H, WU S H, GANG C, et al. Attribution analyses of potential evapotranspiration changes in China since the 1960s [J]. *Theoretical & applied climatology*, 2010, 101(1/2): 19-28.
 [19] 郑红星, 刘静. 东北地区近 40 年干燥指数变化趋势及其气候敏感性 [J]. *地理研究*, 2011, 30(10): 1765-1774.
 [20] 陈素景, 李丽娟, 李九一, 等. 基于干燥指数的洮儿河上游地区水分适宜性的时间变化特征分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(9): 149-154.
 [21] 宁婷婷, 刘文兆, 韩晓阳, 等. 东胜矿区近 50 年地表干湿状况时程变化分析 [J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(2): 99-105.
 [22] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨 [J]. *第四纪研究*, 2003, 23(2): 152-164.
 [23] 热孜宛古丽·麦麦提依明, 杨建军, 刘巍. 艾比湖流域 1957—2013 年潜在蒸散、气温、降水变化特征分析 [J]. *冰川冻土*, 2016, 38(1): 69-76.
 [24] KOREN I, KAUFMAN Y J, REMER L A, et al. Measurement of the effect of Amazon smoke on inhibition of cloud formation [J]. *Science*, 2004, 303(5662): 1342-1345.
 [25] 张结, 丁建丽, 王瑾杰, 等. 艾比湖盐尘气溶胶光学特性卫星和地基遥感观测 [J]. *遥感学报*, 2017, 21(5): 665-678.
 [26] 吴鹤轩. 青藏高原的低云 [M]. 北京: 气象出版社, 1985.
 [27] KUANG W H, LIU J Y, ZHANG Z X, et al. Spatiotemporal dynamics of impervious surface areas across China during the early 21st century [J]. *Chines science bulletin*, 2013, 58(14): 1691-1701.
 [28] 陈海山, 李兴, 华文剑. 近 20 年中国土地利用变化影响区域气候的数值模拟 [J]. *大气科学*, 2015, 39(2): 357-369.

(上接第 201 页)

[8] 于新, 李双异, 陆璐, 等. 基于 AHP-SWOT 模型的高标准基本农田建设发展策略研究: 以沈阳市为例 [J]. *中国农业资源与区划*, 2016, 37(8): 84-88, 109.
 [9] 杨伟, 谢德体, 廖和平, 等. 基于高标准基本农田建设模式的农用地整治潜力分析 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29(7): 219-229, 298.
 [10] 郭贝贝, 金晓斌, 杨绪红, 等. 基于农业自然风险综合评价的高标准基本农田建设区划定方法研究 [J]. *自然资源学报*, 2014, 29(3): 377-386.
 [11] 胡娟, 刘新平, 张琳. 基于模糊综合评价法的土地整治效益评价: 以新

疆沙湾县金沟河镇宋圣宫村为例 [J]. *新疆农垦经济*, 2016(11): 48-54, 84.

[12] 郭阳. 葫芦岛市高标准基本农田建设项目综合成效评价 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
 [13] 赵建军, 张洪岩, 王野乔, 等. 基于 AHP 和 GIS 的省级耕地质量评价研究: 以吉林省为例 [J]. *土壤通报*, 2012, 43(1): 70-75.
 [14] 信桂新, 杨朝现, 杨庆媛, 等. 用熵权法和改进 TOPSIS 模型评价高标准基本农田建设后效应 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(1): 238-249.
 [15] 潘延立. 高标准基本农田建设项目效益评价研究: 以滕州市羊庄镇为例 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2015.