

文章编号: 2096-1618(2023)05-0610-05

# 四川省 1969–2018 年日照时数变化规律及未来趋势分析

胡慧敏<sup>1,2</sup>, 吴薇<sup>1,2</sup>, 杜冰<sup>1,2</sup>

(1. 四川省气象探测数据中心, 四川 成都 610072; 2. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川 成都 610072)

**摘要:**为更好地分析四川省长时间序列人工观测日照时数时空变化规律及未来变化趋势,利用四川省 148 个气象站点 1969–2018 年逐月日照时数资料,采用气候倾向率、M-K 突变检验、重标极差分析、经验正交函数分析等进行了讨论和分析。结果表明:四川年平均日照时数为 1459.6 h,整体随时间序列呈下降趋势,每 10 年减少 28.7 h;平均日照时数夏季>春季>秋季>冬季;除春季外,其余季节和年际日照时数最大值均出现于 20 世纪 70 年代;日照时数在 1979 年发生突变,由日照偏多阶段转为偏少阶段;四川省日照时数序列未来变化趋势会在一定时间内与过去一致,春、夏、秋、冬季和年际的平均循环长度分别是 6 年、8 年、5 年、8 年、9 年;四川省日照时数主导分布类型为“一致型”,表现为全省一致偏少。

**关键词:**日照时数;变化特征;突变;未来趋势;空间分布

**中图分类号:**P412.14

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcui.2023.05.017

## 0 引言

多种气象观测数据和资料研究表明,全球气候正在经历一次变暖过程,平均地表温度在增高,但观测到的日照时数却在减少。1951–2001 年中国平均地表温度增加约 1.1 °C,平均每 10 年增加 0.22 °C,1956–2002 年全国年平均日照时数每 10 年下降 37.6 h<sup>[1]</sup>。随着城市化进程的快速推进,气象台站周边环境遭到破坏,高大建筑物部分遮挡日照观测仪器使日照时数观测值减小<sup>[2–3]</sup>。近年来有较多关于日照时数变化规律的研究。在气候变化蓝皮书中,1961–2019 年中国平均日照时数整体呈下降趋势,速率为每 10 年减少 32.8 h<sup>[4]</sup>。对广东省 86 个气象站 1965–2015 年逐月日照时数资料统计分析,得出四季日照时数均呈下降趋势,秋季下降最明显<sup>[5]</sup>。曾钦文等<sup>[6]</sup>通过 8 个站 50 年日照数据研究发现,东江中上游日照时数年际和夏秋季减少明显,且日照时数与云量、降水量、雾等要素呈负相关。何彬方等<sup>[7]</sup>通过 80 个站 50 年数据分析得出,安徽省日照时数每 10 年下降 88.3 h,能见度、大气水汽压、降水量、云量均可能会对日照时数产生影响;郑小波等<sup>[8]</sup>发现,在云贵高原总云量未发生明显变化的情况下,184 个站有 85% 的台站日照时数下降,每 10 年减少 12.2 ~ 173.7 h。王钊等<sup>[9]</sup>研究近 60 年西安市日照时数变化特征,发现该市日照时数呈下降趋势,春夏季下降明显,且区域性日照时数下降很可能

是受气溶胶堆积产生的辐射效应的影响。还有研究表明西藏、祁连山、福建省、羌塘国家级自然保护区等地日照时数整体均呈逐年下降趋势<sup>[10–13]</sup>。

四川省是中国地形最复杂的省,位于中国西南地区,同时拥有山地、丘陵、平原、高原,川西到川东落差近 7000 m。目前对四川省整体日照时数长时间序列的研究较少,且四川省国家站在 2019 年前一直采用暗筒式日照计进行日照观测。2018 年 12 月 20 日前完成了光电式数字日照计安装建设,且完成了人工和自动平行观测对比评估,结论为相关性较好<sup>[14]</sup>。但后期厂家检定发现日照传感器长时间运行后会出现加热膜断路,灵敏度偏移等现象,从而导致日照观测数据异常。因此本文挑选 1969–2018 年四川省国家站人工观测逐月日照时数资料,运用气候统计诊断分析方法<sup>[15]</sup>对全省 50 年间年均日照时数变化趋势、变化速率、突变年份进行分析,计算四川省人工观测日照时数序列季节和年际未来变化趋势和平均循环长度,从时空层面分析全省日照时数变化趋势是否一致,为后期台站日照自动化观测数据的订正提供基本依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 气象数据

对四川省气象探测数据中心提供的四川省 1951 年气象建站至今 156 个国家站日照时数数据进行统计,1968 年以前日照数据缺测站数较多,1969–2018 年有 8 个站缺测 10 次以上,舍弃这 8 个站点数据,对其余

收稿日期:2022-11-03

基金项目:高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金资助项目(SCQXKJQN202121)

缺测 5 年以下站点缺失值用当年日照均值插补。故本文日照时数资料选取四川省 148 个国家站 1969–2018 年的逐月日照时数资料。在北半球,按温度划分,春季为 3、4、5 月,夏季为 6、7、8 月,秋季为 9、10、11 月,冬季为 12、1、2 月,生成四季序列。四川省日照时数数据在研究时段均处于人工观测阶段,几乎不存在因仪器灵敏度漂移而产生误差问题,该段数据经过质控,达到研究所需精度。四川日照时数可用气象站点个数逐年变化及挑选出的 148 个气象站点空间位置如图 1 所示。

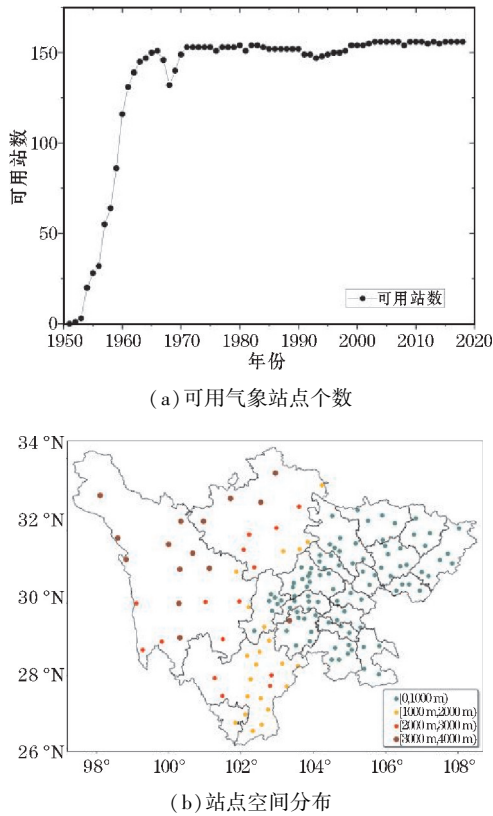


图 1 四川日照时数可用气象站点个数逐年变化及挑选出的 148 个气象站点空间分布

1.2 方法

1.2.1 M-K 突变检验

M-K 检验在气象上是一种便捷的突变检测方法,能够明确突变开始的时间点并指出突变的时间区域。假定时间序列  $x(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ , 包含  $n$  个独立且随机变量服从统一分布的样本, 构成 1 个秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i$$

式中:  $r_i = \begin{cases} +1, & \text{if } x_i > x_j \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (j=1, 2, \cdots, i);$

$S_k$  为  $x_i > x_j$  个数的累计数。

定义:  $UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad (k=1, 2, \cdots, n)$

式中,  $UF_1=0$ ,  $S_k$  的均值、方差分别为  $E(S_k)$ 、 $\text{Var}(S_k)$ :

$$E(S_k) = \frac{n(n-1)}{4}, \text{Var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72}$$

$UF_i$  是标准正态分布, 给定置信水平  $\alpha$ , 若  $|UF_i| > U_\alpha$ , 则说明序列具有明显的趋势变化。

将  $x$  逆序得到  $x_n, x_{n-1}, \cdots, x_1$ 。重复上述计算, 同时使  $UB_k = -UF_k, k=n, n-1, \cdots, 1, UB_1=0$ 。若  $UB_k$  和  $UF_k$  出现交叉点, 并位于临界线之间, 该交叉点即为突变开始的时间。

1.2.2 重标极差(R/S)分析

R/S 分析法体现了长程时间序列的自相关性, 能够量化时间序列的相对趋势, 其基本内容为: 对一个时间序列, 将其均分为  $A$  个长度为  $n$  的子区间。假定

$$X_{t,a} = \sum_{u=1}^t x_{u,a} - M_a \quad (t=1, 2, \cdots, n)$$

式中:  $M_a$  为第  $a$  个区间内  $x$  的平均值,  $X_{t,a}$  为第  $a$  个区间内第  $t$  个元素的累计离差, 则极差为

$$R_\alpha = \max X_{t,\alpha} - \min X_{t,\alpha}$$

以  $S_a$  为第  $a$  个区间的样本标准差, 则可定义重标极差 R/S: 每一个  $R_\alpha$  均由对应的  $S_a$  标准化后得到:

$$(R/S)_n = \frac{1}{A} \sum_{a=1}^A \frac{R_\alpha}{S_\alpha}$$

子区间长度  $n$  可变, 不同分段情况对应不同 R/S, Hurst 通过对尼罗河水文长时间序列数据分析总结出如下规律:

$$(R/S)_n = K_n^H$$

式中  $K$  为常数,  $H$  为对应的 Hurst 指数, 将上式两边取对数可得

$$\lg((R/S)_n) = \lg(k) + H \lg(n)$$

对  $\lg n$  和  $\lg(R/S)$  进行最小二乘法回归分析即可计算出  $H$  近似值,  $H$  即为 Hurst 指数值,  $0 < H < 1$ 。若  $H=0.5$ , 表明时间序列前后的变化无关, 即无后效性; 当  $H>0.5$  时, 时间序列的变化前后正相关; 当  $H<0.5$  时, 时间序列的变化前后负相关。

Hurst 指数可以表征未来时间序列变化趋势, 但是趋势的持续时间未知。通过统计信息可以检验复杂系统是否具有周期性, 并计算其平均循环周期。统计量  $V$ :

$$v_n = \frac{(R/S)_n}{\sqrt{n}}$$

在  $V-\ln n$  曲线上, 出现明显转折点所对应的时间长度  $n$ , 即为过去变化趋势的影响消失的平均循环长度。

1.2.3 EOF 正交分解

EOF 正交分解法是提取主要数据特征量的一种方法, 针对气象数据也可以重新拟合要素场。可以对一定区域内空间分布不同的气象站点的原始数据进行分解, 分解的空间结构具有物理意义, 且空间模态对应的时间系数可以反映相应空间模态随时间的权重变

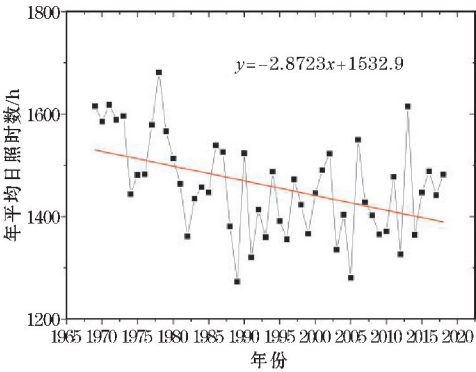
化。本文将四川省 148 个气象站点 50 年的日照时数以矩阵形式  $X_{m \times n}$  给出,其中  $m$  是空间点, $n$  为时间序列长度,对  $X_{m \times n}$  进行标准化处理后得到新矩阵  $N_{m \times n}$ ,利用特征向量分析将  $N_{m \times n}$  分解为  $V_{m \times p} Z_{p \times n}$ ,其中  $V_{m \times p}$  为空间特征向量, $Z_{p \times n}$  为时间系数。

2 结果与分析

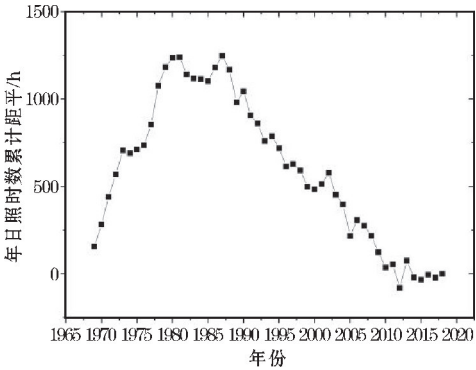
2.1 日照时数的变化规律

2.1.1 年际变化及累计距平变化

图 2 为 1969–2018 年间四川省平均日照时数年际变化曲线和累计距平图。四川省 148 个站 50 年间平均日照时数为 1459.6 h。图 2 中全省平均日照时数分布在 1272.7 ~ 1681.5 h,波动性明显,偏高期与偏低期交替出现。最大值出现在 1978 年,最小值出现在 1989 年。全省日照时数呈整体下降趋势,每 10 年减少 28.72 h,年平均日照时数与时间序列之间相关系数为 -0.44 (通过显著性检验)。从累计距平曲线可明显看出,全省日照时数分为上升和下降两个阶段。1969–1981 年累计距平曲线呈明显上升趋势,为日照时数偏高阶段。1981 年之后累计距平曲线呈下降趋势,大部分年份日照时数低于 50 年平均值,为日照时数偏低阶段,在这个转折点附近可能会出现突变点。



(a) 年际变化曲线



(b) 累计距平曲线

图 2 四川省年平均日照时数年际变化曲线及累计距平曲线

2.1.2 季节变化和年代际变化

由表 1 可知,四川省夏季平均日照时数最多,为 455 h;春季次之,为 423 h;春夏季日照时数均值相差不大,秋冬季较少,分别为 295 h、282 h。夏季、秋季、冬季与年平均日照时数最大值均出现在 20 世纪 70 年代,70 年代日照时数平均值大于 50 年全省日照时数平均值,为日照时数偏高的年代,其余年代日照时数均小于 50 年全省日照时数平均值,为日照时数偏低年代,其中 90 年代日照时数平均值最低,21 世纪年平均日照时数较 90 年代有所增加。

表 1 四川省不同季节平均日照时数的年代际变化 单位:h

年份	春季	夏季	秋季	冬季	年平均值
1970–1979 年	428.8	521.8	311.1	298.2	1559.9
1980–1989 年	430.3	435.0	286.3	286.7	1419.3
1990–1999 年	398.3	445.2	298.1	267.7	1409.3
2000–2009 年	430.6	420.5	299.8	275.1	1426.0
2010–2018 年	427.1	451.8	278.0	284.4	1441.3

2.1.3 突变点检验

M-K 突变检验主要用于均值突变的检验,取显著性水平  $\alpha=0.05$ ,临界值  $U_{0.05}=\pm 1.96$ 。1969–2018 年四川省年平均日照时数的 M-K 突变检验曲线可看出(图 3),UF 值小于 0,曲线呈明显的振动下降趋势,1982 年超过的 -1.96 的临界值线,表明 1982 年后日照时数呈显著减小趋势。1979 年 UF 和 UB 曲线相交,且交叉点位于  $\pm 1.96$  临界值线之间,说明日照时数在 1979 年发生了突变,日照时数由偏多期突变为偏少期。

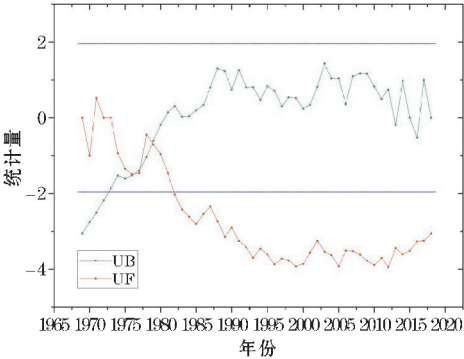


图 3 四川省年平均日照时数 M-K 曲线

2.2 未来趋势分析

由重标极差分析法计算得出 1969–2018 年四川省日照时数序列的四季和年际 Hurst 指数(表 2)并绘制  $\ln(R/S)-\ln n$  曲线和  $V-\ln n$  曲线图(图 4)。 $\ln(R/S)-\ln n$  曲线斜率即为 Hurst 指数值,从图 4(a)、(c)、(e)、(g)、(1)可以看出四川省四季及年际日照时数序列 Hurst 指数均在 0.5 ~ 1,表明该时间序列存在长期的记忆性。四川省日照时数未来变化趋势会受到过去的影响,且与过去数年间变化趋势一致,即在一定时间内呈现出下降趋势。Hurst 指数值年际最高,秋季最小,表明年际日照时数下降最明显,秋季下降趋势最弱。



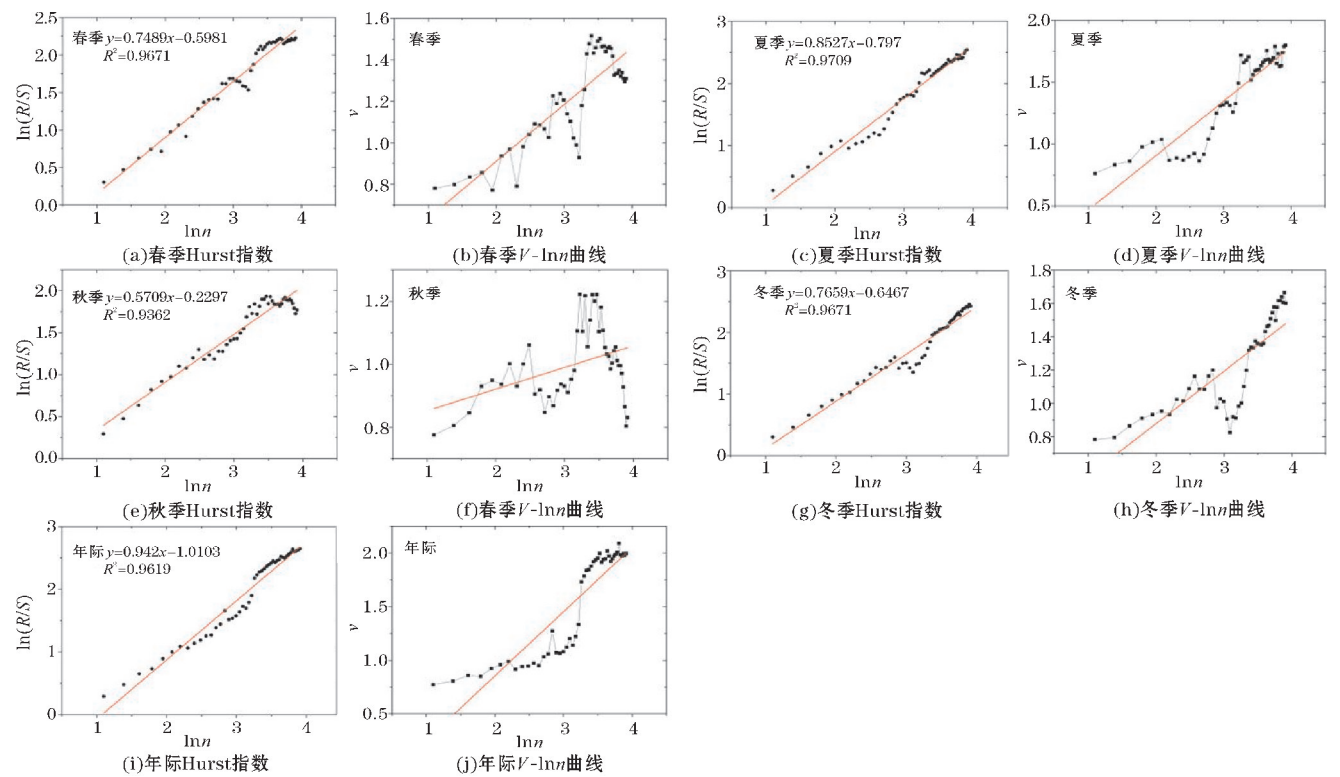


图4 四川省季节和年际的日照时数的变化趋势

图4(b)、(d)、(f)、(h)、(j)分别为四川省季节和年际的日照时数  $V\text{-}lnn$  图,可看出拟合线均向上倾斜,表明未来的趋势与过去一致,与 Hurst 指数结果相符合。年际日照时数  $V\text{-}lnn$  曲线倾斜度最大,持续性最强,变化曲线上第一个拐点在  $lnn=2.2$  处,  $n=e^{2.2}\approx 9$ ,平均循环长度为9年。秋季日照时数下降趋势的持续性最弱,第一个拐点在  $lnn=1.61$  处,平均循环长度为5年。该结果符合 Hurst 指数的计算值结果。以此类推,春季日照时数序列平均循环长度为6年,夏季8年,冬季为8年。春、夏、秋、冬季及年际未来变化趋势受过去变化趋势影响的持续时间分别为6年、8年、5年、8年、9年。

大体为高原负、盆地正的分布形式。海拔2000 m以上区域除阿坝藏族羌族自治州东部和南部部分区域外,均为负值,成都市大部分区域位于正值大值区,四川盆地基本表现为正值。1990年之前和2008年之后日照时数高原偏多,盆地偏少;1990–2008年日照时数高原偏少,盆地偏多,出现该情况可能与四川盆地上空总云量的变化有关。

表2 1969–2018年四川省日照时数四季和年际的 Hurst 指数

指数	春季	夏季	秋季	冬季	年际
Hurst 指数	0.749	0.853	0.571	0.766	0.942
$R^2$	0.967	0.971	0.936	0.952	0.962

2.3 时空分布特征

由图5可看出,第一特征向量空间分布图呈现出一致的负值分布,即四川省日照时数在空间上具有整体一致性,日照时数会表现为一致偏多或一致偏少。第一特征向量的方差贡献率最大,为45.2%,“全区一致型”为四川省日照时数的主要分布类型,四川盆地为负值大值区。从图5可以明显看出四川省日照时数呈现下降趋势,由一致偏多转变为一致偏少,最大值出现在1989年,表示该年全省日照时数一致偏小,最小值出现在2013年,该年全省日照时数一致偏多。第二特征向量方差贡献率为9.6%,为高原—盆地型分布,

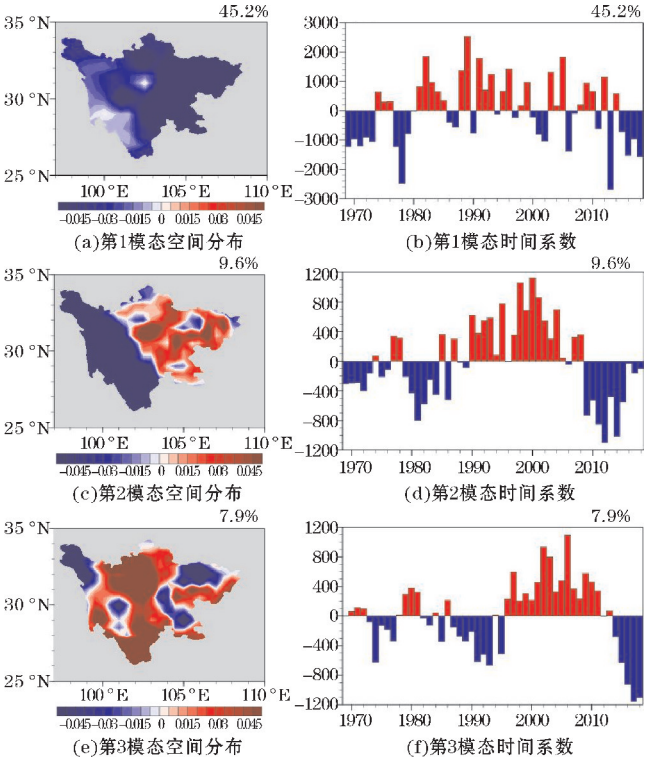


图5 四川省日照时数 EOF 分析前3模态的空间分布和时间系数图

### 3 结论

利用四川省气象探测数据中心提供的四川 148 个国家站的逐月日照时数资料,通过线性倾向估计、M-K 检验等进行统计诊断分析,用重标极差法(R/S)对未来变化趋势进行预测,用经验正交函数分解法(EOF)对四川省日照时数进行时空特征分析,得到如下结论:

(1)四川省日照时数人工观测期间 50 年平均日照时数为 1459.6 h,年平均日照时数在 1272.7 ~ 1681.5 h,下降速率约为每 10 年下降 28.7 h,整体呈显著下降趋势,在 1979 年发生一次突变。

(2)四川省日照时数年际、季节 Hurst 指数数值均在 0.5 ~ 1,即未来变化趋势会在一定时间内受过去变化趋势的影响,呈下降趋势。后期可与四川省 2019 年以后日照自动化观测数据做连续性研究,结合气候变化观察日照时数是否会因观测方式的改变而发生突变。

(3)四川省日照时数空间分布类型主要为两种,一种为“全区一致型”,还有一种为“高原—盆地型”,其中“全区一致型”占比最大,全省日照会表现出一致偏多或一致偏少的现象。“高原—盆地型”以海拔 2000 m 为界,区域划分十分明显,需结合四川盆地上空总云量做进一步分析研究。

### 参考文献:

- [1] 任国玉,郭军,徐铭志,等.近 50 年中国地面气候变化基本特征[J].气象学报,2005(6):942-956.
- [2] REN J, LEI X H, ZHANG Y H, et al. Sunshine duration variability in Haihe River Basin, China during 1966-2015 [J]. Water, 2017, 9(10): 770.
- [3] SONG Z Y, CHEN L T, WANG Y J, et al. Effects of urbanization on the decrease in sunshine duration over eastern China[J]. Urban climate, 2019,

28:100471.

- [4] 中国气象局气候变化中心.中国气候变化蓝皮书 2020[M].北京:科学出版社,2020.
- [5] 吴桂明,覃丰阜,林益才,等.1965-2015 年广东省日照时数时空变化特征[J].广东气象,2019, 41(3):14-16.
- [6] 曾钦文,谢玉仙,殷美祥,等.东江中上游流域日照变化特征及其影响因素[J].广东气象,2019, 41(4):27-30.
- [7] 何彬方,冯妍,荀尚培,等.安徽省 50 年日照时数的变化特征及影响因素[J],自然资源学报, 2009, 24(7):1275-1285.
- [8] 郑小波,罗宇翔,段长春,等.云贵高原近 45 年来日照及能见度变化及其成因初步分析[J].高原气象,2010, 29(4):992-998.
- [9] 王钊,彭艳,白爱娟,等.近 60 年西安日照时数变化特征及其影响因子分析[J].高原气象, 2012, 31(1):185-192.
- [10] 杜军,边多,胡军,等.西藏近 35 年日照时数的变化特征及其影响因素[J].地理学报,2007, 62(5):492-500.
- [11] 付建新,曹广超,李玲琴,等.1960-2014 年祁连山日照时数时空变化特征[J].山地学报, 2018, 36(5):709-721.
- [12] 孙晓航,丘永杭,黄奇晓,等.福建省近 60 年日照时数时空变化特征及未来趋势分析[J].福建农林大学学报(自然科学版),2020,49(5):9.
- [13] 杜军,高佳佳,次旺顿珠.1971-2019 年羌塘国家级自然保护区日照时数变化特征及其影响因素[J].太阳能学报,2022,43(2):287-295.
- [14] 杜冰,吴薇,黄晓龙,等.四川地区人工观测日照时数与自动观测对比分析[J].高原山地气象研究, 2020, 40(1):7.
- [15] 魏凤英,编著.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007.

## Analysis of Sunshine Hours Change Law and Future Trend in Sichuan Province from 1969 to 2018

HU Huimin<sup>1,2</sup>, WU Wei<sup>1,2</sup>, DU Bing<sup>1,2</sup>

(1. Sichuan Meteorological Observation and Data Center, Chengdu 610072, China; 2. Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** To analyze the spatio-temporal variation of sunshine duration and its future trend in Sichuan Province, the monthly sunshine duration data of 148 meteorological stations in Sichuan Province during 1969-2018 were analyzed through climate tendency rate, M-K mutation test, re-scale range analysis and empirical orthogonal function analysis. The results show that the annual average sunshine duration in Sichuan is 1459.6 h, which shows a decreasing trend with time series, decreasing 28.7 h every 10 years. The sequence of average sunshine duration from high to low is: summer, spring, autumn, winter. Except spring, the maximum number of seasonal and interannual sunshine hours appeared in the 1970 s. The number of sunshine hours decreased sharply in 1979, and since then, the sunshine has entered the stage of less sunshine. The future variation trend of the sunshine duration series in Sichuan Province will be consistent with the past in a certain period time, and the average cycle length of spring, summer, autumn, winter and interannual is 6, 8, 5, 8 and 9 years, respectively. The dominant distribution type of sunshine hours in Sichuan Province is "consistent type", which is less consistent in the whole province.

**Keywords:** sunshine hours; dynamic characteristics; sudden changes; future trend; spatial distribution