

昆明市太阳辐射变化特征及影响因子分析

何 萍¹, 崔梅艳¹, 李矜霄², 刘树华^{3*}

(1. 云南省楚雄师范学院地理科学与旅游管理学院, 云南 楚雄 675000;

2. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球物理流体学数字模拟国家重点实验室, 北京 100029;

3. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871)

摘 要:根据1993—2016年昆明市24 a太阳辐射及其他相关资料,采用回归分析、Mann-Kendall突变检验、小波分析和灰色关联度等方法,分析昆明市地面太阳辐射变化特征,并对其影响因子进行了分析。结果表明,近24 a来昆明市地面接收年太阳辐射量在4620.21~6221.65 MJ/m²之间变化,最大值出现在2016年,最小值出现在2008年,平均每年的太阳辐射为5598.06 MJ/m²,且整体上呈现波动式上升趋势。昆明市干湿季分明,干季(11月—次年4月)地面得到的太阳辐射量较多,为2825.22 MJ/m²,雨季(5—10月)较少,为2774.41 MJ/m²;一年中地面接收太阳辐射量最多月份在4月,其值为604.75 MJ/m²,最少的是12月,其值为361.01 MJ/m²,相差243.74 MJ/m²。地面接收的太阳辐射有一个突变点为2014年,但不明显。年小波分析表明,近24 a昆明市各年地面接收的太阳辐射量主周期为15 a;季节小波分析发现,干季比雨季振幅大,其主周期都为19 d。近24 a昆明市地面太阳辐射受自然和人为因子共同影响,其中自然因子对太阳辐射影响最大的是降水量,人为因子中对太阳辐射影响最大的是工业总产值,且自然因子的作用大于人为因子。

关 键 词:太阳辐射;变化特征;影响因素;昆明市

近年来,空气中CO₂等温室气体所占比例不断升高,全球变暖现象越来越突出(齐月等, 2014),对地面接收的太阳辐射量具有一定的影响。太阳辐射能是自然界中各种物理变化过程必不可少的能量来源,并且对城市的健康发展有直接影响,故此,太阳辐射是一个很重要的气候因子(姬兴杰等, 2007)。太阳辐射与白昼的长度、云量、降水和地形等条件息息相关,一直以来,太阳辐射变化研究受到学界高度重视,前人已经做了一些研究(周淑贞等, 1994; 彭艳等, 2012; 汪凯等, 2010)。

随着众多城市大规模高层建筑持续不断地增多,人为产生的热量和污染物的大量排放等对城区太阳辐射的影响越来越受到国内外学者的关注,国外学者已有较为丰富的研究成果。Oke从20世纪70年代就对伦敦太阳辐射进行了研究,发现伦敦在1950年以前,城市与近郊、远郊太阳辐射变化差异很

显著,城市太阳辐射比郊区少,这种情况主要是由于城市空气烟尘污染、多对流云和冬季多雾等原因造成的(Oke, 1978);日本的许多大都市从20世纪30至70年代因工商业迅速发展,城市大气混浊系数逐年增加,近80 a来东京的总太阳辐射和年日照百分率逐渐减少(Wldm et al, 2005);Beer等(2000)曾研究过大气层顶部的太阳辐射,研究表明,1978—2000年太阳辐射的变化,主要是由于大气湿度、云量和气溶胶等物质对太阳辐射的吸收、反射以及散射作用造成的,从而影响到全球的气候;Arturo等(2017)分析了1983—2010年欧洲地面太阳辐射变化趋势。

近年来国内一些学者对城市太阳辐射变化展开了多方面的研究。有研究发现中国东部城市太阳辐射月变化最大值出现在8月,最小值出现在1月,且城市热岛强度与太阳直接辐射日总量呈正相关关系(马琪等, 2012; 买苗等, 2102; 齐月等, 2014;

收稿日期:2018-10-29;修订日期:2019-02-15。

基金项目:国家自然科学基金项目(41465001)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41465001.]

第一作者简介:何萍(1965—),女,硕士生导师,教授,主要从事气象、气候与自然地理综合研究。E-mail: heping@extc.edu.cn

*通信作者简介:刘树华(1952—),男,教授,博士生导师,从事大气物理、大气环境教学与研究。E-mail: lshuhua@pku.edu.cn

引用格式:何萍,崔梅艳,李矜霄,等. 2019. 昆明市太阳辐射变化特征及影响因子分析[J]. 地理科学进展, 38(11): 1793-1801. [He P, Cui M Y, Li J X, et al. 2019. Characteristics and influencing factors of surface solar radiation variation in Kunming City. Progress in Geography, 38(11): 1793-1801.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.11.014

陈慧等, 2015; 李小军等, 2017; 姬兴杰等, 2017; 冯娇娇等, 2018); 对近 50 a 西北地区地面太阳辐射变化特征及相关影响因子的研究发现, 太阳辐射四季都呈下降趋势, 与总云量和气溶胶有关, 西北地区地面太阳辐射经历了维持、变暗、变亮和回落 4 个阶段(杨勤等, 2009; 徐建明等, 2010; 彭艳等, 2012; 周秉荣等, 2012); 汪凯等(2010)、周志高等(2017)利用中国东南部近半个世纪以来太阳辐射量数据, 分析中国东南部太阳辐射变化的影响因素以及太阳辐射对区域气候变化的影响, 结果表明, 中国东南部总太阳辐射在整体上呈现下降趋势; 何萍等(2011)对云南高原楚雄市的日照时数变化特征进行了研究, 发现其日照时数的年变化和季节变化规律。

总之, 国外研究表明大部分地区都出现地面太阳总辐射减少的趋势, 不同地区的减少幅度有差异。国内学者研究发现大多数城市太阳辐射在整体上呈现下降趋势, 太阳辐射月变化最大值出现在 7 月或者 8 月, 最小值出现在 12 月或 1 月; 成因主要与大气湿度、云量和气溶胶等物质对太阳辐射的吸收、反射以及散射作用有关。由于多数研究选择的辐射数据空间范围较大, 大都是沿海或者西北的大城市, 而较少研究云贵高原的太阳辐射变化特征, 对昆明市太阳辐射的研究更少, 因此本文选择昆明市作为研究区域, 立足前人研究, 以全球变暖为背景, 根据 1993—2016 年近 24 a 的辐射资料、气象要素资料和人文资料等, 分析昆明市近年来太阳辐射变化特征及其影响因素, 对昆明市城市天气预报、防灾减灾、环境保护和经济发展等具有重要指导意义。

1 研究区概况

昆明市位于 102°43'E、25°2'N, 坐落在云贵高原的中部, 是云南省省会城市, 地势北高南低, 建成区面积约 420.50 km², 人口达 371.34 万人。属低纬度高原季风气候, 日照时间较长, 日照时数年均 2388.9 h, 年均气温 16.2 °C, 最热月均温 19.9 °C, 最冷月均温 8.9 °C, 年较差小, 四季如春; 全年降水量在 1190.7 mm 左右, 霜冻期较短, 气候条件较温和舒适, 所以昆明是全国闻名遐迩的“春城”。

2 资料与方法

2.1 资料来源

本文所用气象资料来源于云南省气象局信息

中心。由于昆明市气象局的太阳辐射从 1993 年才开始观测, 所以选取 1993—2016 年昆明市气象站点的地面太阳辐射总量资料, 计算出昆明市近 24 a 的年、季、月的太阳辐射量, 分析其变化特征。根据前人的研究(何萍等, 2011)并结合当地实际, 收集相关的人文资料(人口、建成区面积、绿化覆盖率、工业总产值)和气象资料(平均气温、降水量、云量、相对湿度), 比较自然因子和人为因子对昆明市地面接收太阳辐射的影响程度。

2.2 研究方法

2.2.1 回归分析

本文采用线性回归分析方法, 分析昆明市太阳辐射年、月变化在时间尺度上的演变趋势。将太阳辐射 y 看做关于时间 t 的函数关系, 公式如下:

$$y = \alpha + \beta t \quad (1)$$

式中: β 表示线性函数的斜率, 当 $\beta > 0$ 时, 表明气象要素值随着时间的变化整体上呈现上升的趋势, 当 $\beta < 0$ 时, 表明气象要素值随着时间的变化整体上呈现下降的趋势, 当 $\beta = 0$ 时, 则表明无明显变化; α 为截距。

2.2.2 灰色关联度

对多个影响因素进行统计分析可以采用灰色关联度方法, 找出影响太阳辐射的因素, 用灰色关联度来分析地面得到的太阳辐射量与各个要素之间的关系, 如果 2 个因素之间的影响比较明显, 那么这 2 个要素之间的关联度就比较大; 反之, 关联度就较小(何萍等, 2011)。灰色关联度分析公式如下:

关联系数:

$$\gamma_{oi}(k) = \frac{m' + \xi M'}{\Delta_i(k) + \xi M'} \quad (2)$$

$$\xi \in (0, 1); k = 1, 2, \dots, n; i = 0, 1, 2, \dots, m$$

式中: $\gamma_{oi}(k)$ 为比较数列相对于参考数列的关联系数; ξ 为分辨系数, $\xi \in (0, 1)$; M' 表示两级最大差; m' 表示两级最小差; n 为参加计算资料的项数; 各比较数列曲线上的每一个点与参考数列曲线上的每一个点的绝对差值为 $\Delta_i(k)$ 。

灰色关联度:

$$\beta(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_{oi}(k) \quad (i = 0, 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

式中: $\beta(k)$ 为比较数列与参考数列的关联度。

2.2.3 Mann-Kendall 突变检验

Mann-Kendall (M-K) 突变检验方法是一种非参数检验方法, 通过对其进行突变检测, 分析突变的时间。当趋势线大于 0 时说明具有上升的趋势; 当

趋势线小于0时,说明有下降的趋势;当趋势线大于信度检验的临界值时,说明这种变化趋势较为显著;如果两条趋势线相交,就是突变开始的时间,公式为(魏凤英, 2007):

$$UF_k = \frac{d_k - E(d_k)}{\sqrt{\text{Var}(d_k)}} \quad (4)$$

式中: d_k 表示时间序列的样本累积数; $E(d_k)$ 表示 d_k 的均值; $\text{Var}(d_k)$ 表示 d_k 的方差; UF_k 则表示在时间序列随机独立假定下定义的统计量。

2.2.4 小波分析

由于小波系数等值线是对特定尺度下原数据序列信息的提取,因而小波系数等值线可以反映数据序列在该尺度下的波动信息(魏凤英, 2007)。一般常用 Morlet 小波实部等值线图来反映气候序列的多时间尺度变化, Morlet 小波是一种单频复正弦调制高斯波,具有很好的时域和频域局部性,常用于复数信号的分解和时频分析;由于 Morlet 小波的实部本身也是一个对称的小波函数,小波系数的实部可以表示不同特征时间尺度信号在不同时间的强弱和位相两方面的信息;小波方差随着尺度的变化称为小波方差图,而小波方差图则可以呈现序列变化的干扰强度和主周期,该图能反映降水量时间序列中所包含的各种尺度(周期)的波动及其强弱(能量大小)随尺度变化的特性。

在 Matlab 软件的支持下,本文采用 Matlab 小波分析计算得到图像以及小波方差图像,其公式(魏凤英, 2007)如下:

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \bar{\psi}(\frac{t-b}{a}) dt \quad (5)$$

式中: W_f 是根据 $f(t)$ 计算得出的小波变换系数; $\bar{\psi}(\frac{t-b}{a})$ 为基本小波或母小波,又称窗函数; a 是频率参数; b 是时间参数,表示波动在时间上的平移。

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (6)$$

式中: $\text{Var}(a)$ 表示小波方差。

3 结果与分析

3.1 太阳辐射年变化特征

图1为1993—2016年昆明市地面太阳辐射年变化图。通过分析昆明市逐年地面得到的太阳辐射变化值,得出近24 a 昆明市地面接收的太阳辐射平均值为 5598.06 MJ/m^2 ,整体呈现微弱的增长趋势,趋势方程为 $y=13.346x+5431.2$,地面接收的太阳

辐射量以 13.346 MJ/a 的速率在逐渐增加。昆明市总太阳辐射最大值出现在2016年,太阳辐射量为 6221.65 MJ/m^2 ,最小值出现在2008年,为 4620.21 MJ/m^2 ,二者的差值达到了 1601.44 MJ/m^2 。2008年地面接收到的太阳辐射量最小是因为当年降雨天数较多,而云南滇中地区年初下大雪,秋季又出现了罕见连续强降水天气过程(李宏波等, 2010),阴雨天气多,空气湿度大,云层相对较厚,对太阳辐射具有较大的削弱作用,致使地面得到的太阳辐射量较少;2016年情况刚好与之相反。但从整体上看,24 a 太阳辐射有所增加但变化幅度不大。

3.2 太阳辐射逐月变化特征

昆明市1993—2016年各月太阳辐射量变化曲线如图2所示,可以看出,年内昆明市太阳辐射量呈现先增加后减小的变化趋势。地面接收的太阳辐射量最多出现在4月,达到 604.75 MJ/m^2 ,之后慢慢减小;12月最低,只有 361.01 MJ/m^2 ,二者相差

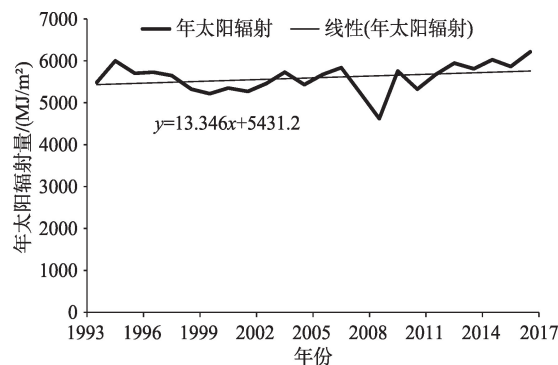


图1 1993—2016年昆明市年太阳辐射变化曲线
Fig.1 Annual variation of solar radiation in Kunming City, 1993–2016

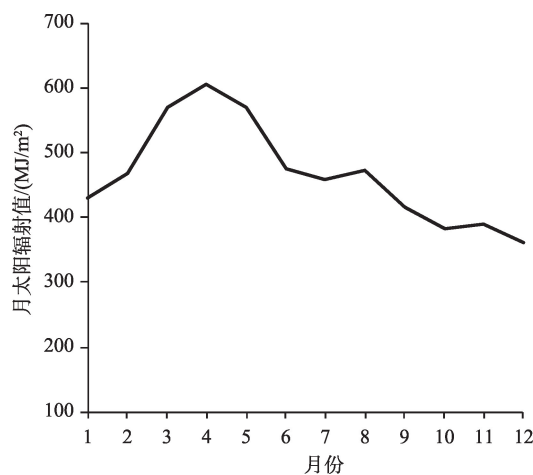


图2 昆明市逐月太阳辐射值变化曲线
Fig.2 Monthly variation of solar radiation in Kunming City

243.74 MJ/m²。昆明市11月—次年4月主要受偏西干暖气流的影响,气流经过撒哈拉大沙漠,并且沿着青藏高原南侧陆地而来,十分干燥,在此环流控制下,昆明干季后期经常处于长时间的晴好天气,云和降水较少,对太阳辐射的削弱作用小,这是4月太阳辐射最强的重要原因;另外,4月太阳高度角又较干季的其他月份大,又是云南雨季来临前的一个月,所以4月地面获得的太阳辐射量达全年最大值。5—10月是云南的雨季,太阳高度角尽管在6月份达最大,但密云暴雨之下会使到达地面的太阳辐射被削弱,所以6月份的太阳辐射量比4月份小。12月份尽管处于干季,但太阳高度角最小,因此,地面接收到的太阳辐射值仍然是最低。与长江中下游平原的上海(周淑贞等, 1994)等地相比较,上海等大城市太阳辐射最大值出现在6月,最小值出现在12月,而云南高原昆明市的太阳辐射最大值却出现在雨季来临前的4月,最小值与上海一致,这与云南高原干湿季分明的季风气候特点有关,长江中下游平原主要受东亚季风影响,而云南高原昆明市主要受南亚季风影响。

3.3 太阳辐射季节变化特征

昆明干湿季分明,将季节分为雨季(5—10月)和干季(11月—次年4月)两季,计算1993—2016年两季地面得到的太阳辐射平均值,发现地面得到的太阳辐射量最多的是干季,达到2825.22 MJ/m²,雨季地面接收的太阳辐射量最少,为2774.41 MJ/m²,2个季节地面接收的太阳辐射量相差50.81 MJ/m²,差值不大。

决定地面接收的太阳辐射多少的因素主要有太阳高度角、大气透明度、降雨量和云量等(姬兴杰等, 2017)。昆明市气候分干湿季,雨季空气中水汽含量最大,水汽能吸收大量的太阳辐射,云层也比较厚,降水也比较多,太阳辐射被削弱,因此,尽管雨季太阳高度角比干季大,但地面得到的太阳辐射量仍然小于干季;而干季,太阳高度角虽然比雨季小,但干季晴朗天气较多,云雨较少,日照比较充足,相对湿度也比较小,使得昆明市干季地面得到的太阳辐射量较多。

3.4 太阳辐射突变年的M-K检验

对1993—2016年昆明市太阳辐射进行M-K突变检验,给定显著水平 $\alpha=0.05$,UF曲线值在信度检验值-1.96~1.96之间,如图3所示,UF曲线的上升或者下降代表昆明市太阳辐射增加或减少趋势。

从图3可以看出,UF曲线在整体上呈现上升—下降—上升—下降—上升的波动变化。对昆明市太阳辐射量与降水量进行相关分析发现,昆明市太阳辐射量与降水量呈现负相关关系(图1和图4)。1995—2001年UF曲线下降趋势明显,表明昆明市太阳辐射减少,原因主要与这几年昆明市降水量偏多有关,云雨削弱了太阳辐射;2009—2016年上升趋势明显,说明昆明市太阳辐射呈增加趋势,分析降水量变化,发现这几年降水量也偏少,特别是2009—2013年出现了连续5 a连旱,太阳辐射增加的原因主要是这几年降水量少,云雨对太阳辐射削弱作用减弱,使太阳辐射量增加。UF曲线与UB曲线在2014年相交,说明昆明市太阳辐射值2014年有一个突变,但UF曲线刚好与临界线相交,说明突

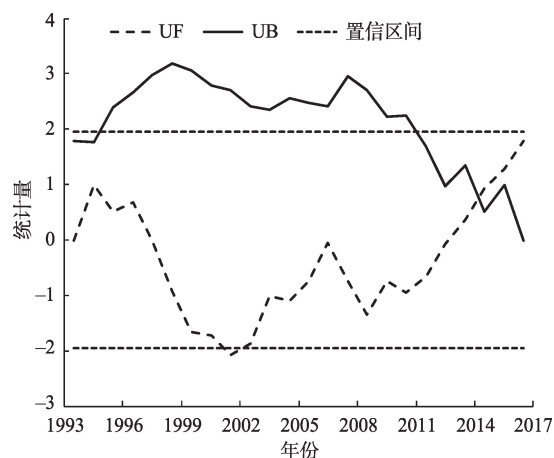


图3 1993—2016年昆明市太阳辐射M-K检验
Fig.3 Mann-Kendall (M-K) test of solar radiation in Kunming City, 1993–2016

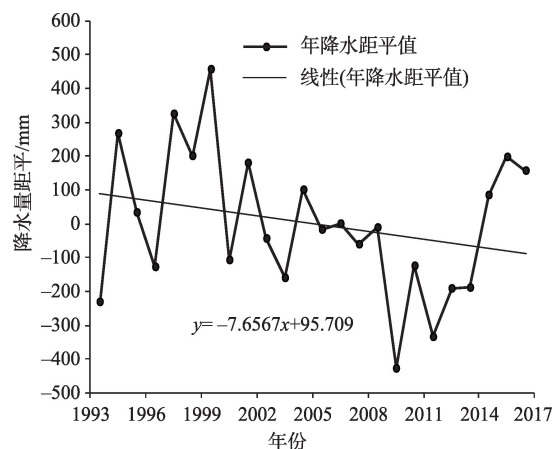


图4 1993—2016年昆明市年降水量距平
Fig.4 Annual precipitation anomaly in Kunming City, 1993–2016

变不明显。

3.5 太阳辐射的小波分析

3.5.1 年太阳辐射

采用小波分析对昆明市近 24 a 的太阳辐射进行周期变化分析。从昆明市太阳辐射 Morlet 小波分析(图 5)可以看出,其年太阳辐射周期交替震荡变化十分强烈,大尺度下嵌套着复杂的小尺度。图 5b 是小波系数图,根据式(5)计算的小波系数显示了滇中城市近 24 a 太阳辐射在不同时间尺度上的周期震荡,图中等值线表示小波系数,太阳辐射的强弱通过小波系数的大小来表示,等值线红色代表太阳辐射偏多,蓝色代表太阳辐射偏少。根据式(6)计算了各序列的小波方差,据此确定各序列中存在的主要周期,图 5a 是太阳辐射小波方差图,反映了太阳辐射随时间尺度的分布,可以确定一个时间序列中各种尺度扰动的相对强度,对应峰值处的尺度称为该序列的主要时间尺度,反映太阳辐射时间序列的主要周期。从小波方差图 5a 可以看出 2 个明显的峰值,为 15 a 和 25 a 的特征周期,但 25 a 未闭合,说明昆明地面太阳辐射的变化主要周期为 15 a。

如图 5b 显示了昆明市 1993—2016 年地面接收到的太阳辐射在不同时间尺度周期变化的情况。从年太阳辐射的主周期 15 a 这个尺度看,存在 5 个“多—少”的震荡,太阳辐射量较多时期分别出现在 1993—1997、2004—2008 和 2014—2016 年;太阳辐射量较少时期分别出现在 1998—2003、2009—2013 年。小波系数等值线在 2016 年以后未闭合,预示昆明市未来太阳辐射量较多。

3.5.2 季节太阳辐射

对昆明市近 24 a 来干季和雨季地面得到的总太阳辐射进行小波分析。

(1) 雨季太阳辐射

昆明 5—10 月为雨季,7 月份是昆明降水最多的季节,以 7 月作为雨季的代表月,从 7 月份的小波变化(图 6a)可以看出,昆明市太阳辐射时间序列的小波方差存在 2 个明显的峰值,为 19 d 和 30 d 的特征周期,但 30 d 等值线未闭合,说明 7 月份地面太阳辐射的变化主要周期是 19 d。对主周期 19 d 作小波系数图(图 6b),可以看出昆明市太阳辐射变化主要经历了 5 个时间尺度上的正负交替变化,即 7 月

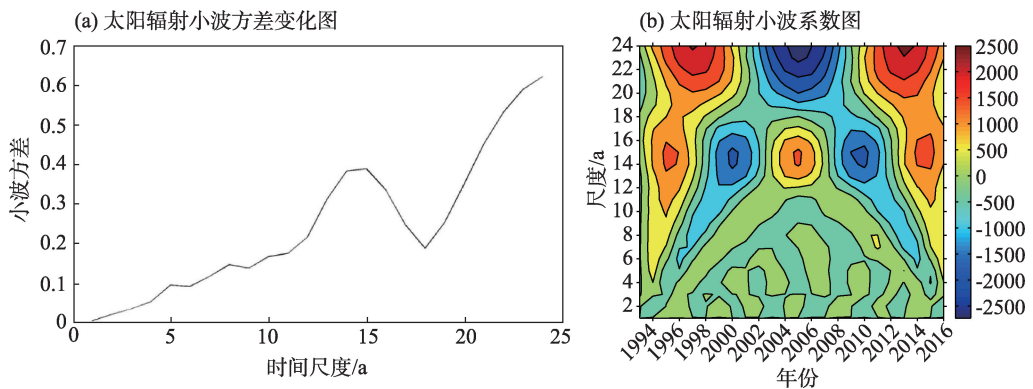


图5 昆明市1993—2016年太阳辐射年小波变化图

Fig.5 Wavelet transform of annual solar radiation in Kunming City, 1993–2016

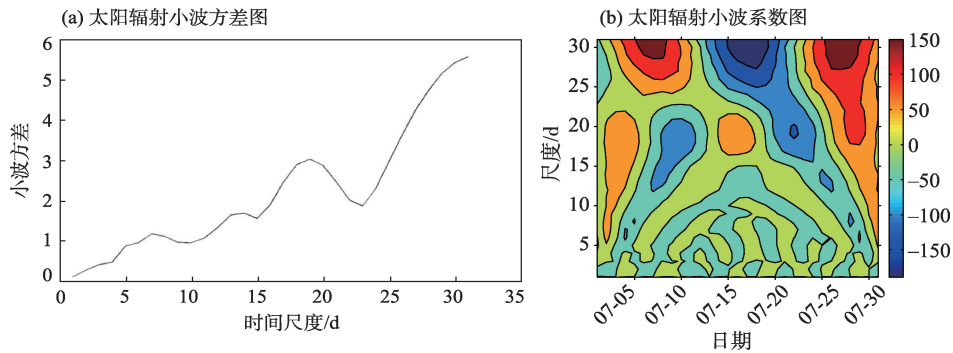


图6 昆明市1993—2016年雨季太阳辐射小波变化图

Fig.6 Wavelet transform of rainy season solar radiation in Kunming City, 1993–2016

1—6日地面太阳辐射量偏多,7—14日偏少,15—20日偏多,21—26日偏少,27—31日偏多。

(2) 干季太阳辐射

昆明市11月—次年4月为干季,4月份昆明太阳辐射最强,刚好位于干季末,以4月作为干季的代表月。从干季的小波方差图(图7a)可以看出,昆明市地面接受的太阳辐射的峰值为19 d和30 d,但30 d未闭合,说明干季地面接受的太阳辐射的变化主要是以19 d为主周期。对主周期19 d作小波系数图(图7b),可以看出昆明市太阳辐射主要经历了5个时间尺度上的正负交替变化,即4月1—6日地面接受的太阳辐射量偏多,7—14日偏少,15—20日偏多,21—26日偏少,27—30日偏多。

与雨季相比,干季主周期19 d小波方差达到1.2左右,而雨季主周期19 d尺度的小波方差只有1.0左右,即干季振荡幅度较雨季大、梯度也大一些;共同之处是,地面接受的太阳辐射偏多或者偏少的时间段干季和雨季相似,主周期都是19 d。

4 太阳辐射的影响因素

4.1 自然因子对太阳辐射的影响

选取了昆明市2000—2016年的气象数据,采用灰色关联度分析法对昆明市地面太阳辐射量与其自然影响因子(气温、降水、总云量、相对湿度)的相关程度进行了分析,昆明市地面太阳辐射与各自然影响因子的关联度如表1所示,均通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。从表1可以看出,自然因子的关联度从大到小排序为:降水量>云量>相对湿度>气温。

降水量对地面接受的太阳辐射量的影响程度

最大,关联度达到0.985,这与昆明市的气候和地形有关,昆明市分干季和雨季,且地势北高南低,雨季(5—10月),西南季风从印度洋上吹来并受地形的影响,为昆明市带来了丰沛的降水,使空气中的水汽含量增加,云雨也增多,云雨对太阳辐射具有较强的削弱作用,从而使雨季地面接收到的太阳辐射相对干季较少。干季(11月—次年4月),主要受偏西风带来的干暖气团控制,从高纬度吹来的冷气流受北边高大山脉的阻挡难以到达昆明市,云雨较少,空气湿度小,对太阳辐射的削弱作用小,所以干季地面得到的太阳辐射相对较多,昆明的4月刚好处于干季末雨季前,是太阳辐射最强的月份,这与昆明市太阳辐射月变化特征相一致。

云量是影响昆明市地面接收太阳辐射量的另一主要因素,关联度达到了0.984。大气中的云层能够直接吸收和反射太阳短波辐射,使得地面太阳辐射下降,云量与地面太阳辐射量呈负相关的关系,即云量增加,太阳辐射量会相应减少。

相对湿度对昆明太阳辐射量也有一定的影响,关联度为0.982。空气湿度大,水汽含量多,水汽能直接吸收部分太阳短波辐射,使地面接收的太阳辐射下降。

在4个影响因子中,气温对太阳辐射量的影响程度最小,关联度为0.961。气温主要受太阳直射点移动的影响,太阳高度角大,气温高,使地面接收的太阳辐射量增多;太阳高度角小,气温低,地面接收到的太阳辐射量少,即地面接收到的太阳辐射与气温呈正相关的关系。

4.2 人为因子对太阳辐射的影响

太阳辐射与人为因子(建成区面积、绿地覆盖

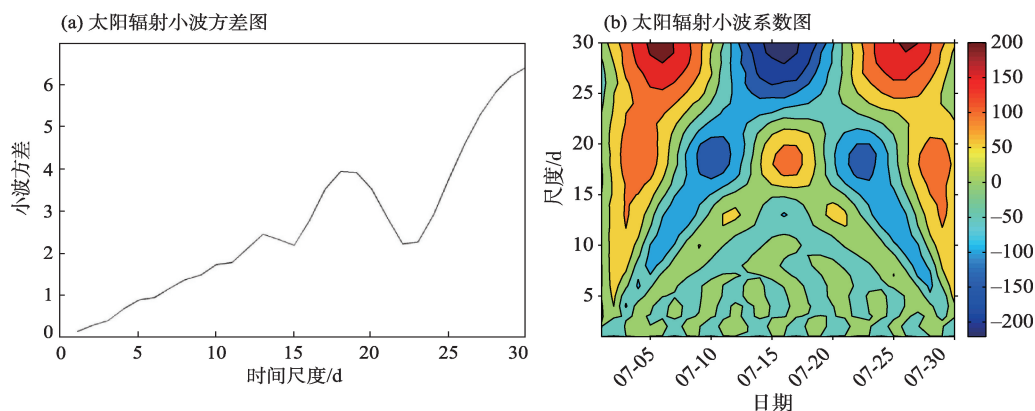


图7 昆明市1993—2016年干季太阳辐射小波变化图

Fig.7 Wavelet transform of dry season solar radiation in Kunming City, 1993–2016

率、人口、工业总产值)之间的灰色关联度分析如表 1 所示,均通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。人为影响因子从大到小排序为工业总产值>绿地覆盖率>建城区面积>人口。工业总产值与地面接收到的太阳辐射量关联度最大,达到 0.765,主要是在经济发展的过程中,人为水汽和工业废气大量排放到大气中,大气中的水汽和污染物增多,到达地面的太阳辐射会减少,从而影响地面接收到的太阳辐射量,但作用较自然因子小。工业总产值与地面接收到的太阳辐射呈负相关关系。

绿地覆盖率与地面接收的太阳辐射的关联程度仅次于工业总产值,为 0.697。绿色植被能吸收、反射和阻挡太阳辐射,从而使昆明市地面得到的太阳辐射量呈现减少趋势,间接影响到地面接受太阳辐射量,绿地覆盖率与地面接收到的太阳辐射呈负相关关系。

建城区面积与地面接收的太阳辐射的关联为 0.654。因为昆明城市发展速度加快,城市面积大范围扩大,面积由 2000 年的 145.00 km²增加到 2016 年的 420.50 km²,城市热岛效应明显,城市热岛环流近地层风从郊区吹向城市,把沿途松土浮尘和工业废气等带到城市上空,使城市污染物增加,能见度降低,从而减少了到达地面的太阳辐射量。因此,建城区面积与昆明市地面太阳辐射呈负相关关系。但是昆明气象站是在昆明市主城区的上风方向,加之又在滇池边,昆明的工业企业又较其他发达城市偏少,受到城市污染影响程度相对较轻,所以城市发展对太阳辐射的削弱作用也相对较小。

关联度最小的为人口,关联度为 0.587。2000—2016 年昆明市人口由 210.81 万人增加到 371.34 万人,人口增加较快,因人类生产生活的需

要,人为产生的杂质和人为水汽等也随之不断增加,从而削弱了太阳辐射,使昆明市地面太阳辐射量也在不断减少,人口数量与昆明市地面太阳辐射量呈负相关关系。

总体上看,自然因子对昆明市太阳辐射的影响程度比人为因子大,自然因子中起主导作用的是降水量和云量,而这 2 个量又受到大气环流的影响,大气环流造成云雨多,则地面得到太阳辐射就少,反之,天气干旱则地面得到太阳辐射就多。近 24 a 昆明市地面接收太阳辐射值整体上呈现波动上升趋势,主要是因为昆明市降水量、云量和降水天数等减少造成的,特别是 2009—2013 年昆明市连续 5 a 的持续干旱,使 2009 年以后昆明市地面得到太阳辐射量增加趋势明显。人为因子工业总产值、绿地覆盖率、建城区面积和人口等对太阳辐射量的变化也有影响,从表 1 可以看出人为因子的关联度小于自然因子,尽管昆明市城市化进程在加快,工业总产值、建城区面积和人口等都在增加,但其作用不如自然因子明显,工业总产值等人为因子对太阳辐射的削弱效应弱于降水量减少对太阳辐射的增加效应,导致近 24 a 来昆明市地面接收太阳辐射值整体呈现波动上升趋势。

5 结论

(1) 近 24 a 昆明市地面太阳辐射量整体上呈现波动上升趋势,以 13.346 MJ/a 的速率在逐渐增加,2009 年以后增加趋势明显。

(2) 近 24 a 昆明市季节地面太阳辐射量干季多,为 2825.22 MJ/m²;雨季较少,为 2774.41 MJ/m²。

(3) 昆明市近 24 a 各月地面太阳辐射量先增加后减小,最多的为 4 月,达到 604.75 MJ/m²;最少的为 12 月,为 361.01 MJ/m²。

(4) 对昆明市近 24 a 的年太阳辐射进行突变检验,结果表明,地面接收的太阳辐射有一个突变点为 2014 年,但不明显。昆明市太阳辐射年小波分析表明,近 24 a 昆明市太阳辐射量主周期为 15 a;季节小波分析表明,干季比雨季振幅大,其主周期都为 19 d。

(5) 近 24 a 昆明市太阳辐射受自然和人为因素影响,其中自然因素中影响程度最大的是降水量,最小的为气温;人为因子中影响最大的是工业总产值,最小的是人口;且自然因子的作用大于人为因子。

表 1 昆明市太阳辐射影响因子关联度
Tab.1 Correlation degree of solar radiation influencing factors in Kunming City

类别	影响因子	关联度
自然因子	降水量	0.985
	云量	0.984
	相对湿度	0.982
	气温	0.961
人为因子	工业总产值	0.765
	绿地覆盖率	0.697
	建城区面积	0.654
	人口	0.587

6 讨论

国外研究表明(Arturo S et al. 2017),大部分地区都出现地面太阳总辐射减少的趋势,不同地区的减少幅度有所差异。中国学者对大多数城市研究发现太阳辐射整体上呈现下降趋势,太阳辐射月变化最大值出现在7月或8月,最小值出现在12月或1月;成因主要与大气湿度、云量和气溶胶等物质对太阳辐射的吸收、反射以及散射作用有关。而本文通过关联度分析发现影响昆明市的主要因子不是人为因子而是自然因子,影响最大的是降水量。主要原因是云南重工业少,主要发展旅游业和轻工业等,所以气溶胶等大气污染物相对其他大城市少,雾霾也少,相对蓝天比较多,所以太阳辐射呈现波动式递增趋势。

参考文献(References)

- 陈慧, 闫业超, 岳书平, 等. 2015. 中国避暑型气候的地域类型及其时空分布特征 [J]. 地理科学进展, 34(2): 175-184. [Chen H, Yan Y C, Yue S P, et al. 2015. Types of summer comfortable climate in China and their temporal and spatial distribution. *Progress in Geography*, 34(2): 175-184.]
- 冯娇娇, 王维真, 李净, 等. 2018. 基于BP神经网络的华东地区太阳辐射模拟及时空变化分析 [J]. 遥感技术与应用, 33(5): 881-889. [Feng J J, Wang W Z, Li J, et al. 2018. Simulation of solar radiation based on BP neural network and its spatio-temporal change analysis in East China. *Remote Sensing Technology and Application*, 33(5): 881-889.]
- 何萍, 李宏波, 黄惠. 2011. 1960—2009年云南高原楚雄市气候年代际变化特征及城市气候分析 [J]. 地理科学进展, 30(1): 65-72. [He P, Li H B, Huang H. 2011. Interdecadal variability of climate and urban climate in Yunnan Plateau, Chuxiong, 1960-2009. *Progress in Geography*, 30(1): 65-72.]
- 姬兴杰, 贾志军, 肖国杰, 等. 2017. 近60年郑州市地面太阳辐射变化的影响因素分析 [J]. 太阳能学报, 38(5): 1212-1219. [Ji X J, Jia Z J, Xiao G J, et al. 2017. Analysis of factors affecting surface solar radiation in Zhengzhou in recent 60 years. *Journal of Solar Energy*, 38(5): 1212-1219.]
- 李宏波, 何萍, 王金萍. 2010. 2008年云南滇中秋季罕见连续强降水过程诊断 [J]. 安徽农业科学, 38(27): 15123-15126. [Li H B, He P, Wang J P. 2010. Diagnosis of rare continuous heavy rainfall in autumn of central Yunnan in 2008. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 38(27): 15123-15126.]
- 李小军, 辛晓洲, 彭志晴. 2017. 2003—2012年中国地表太阳辐射时空变化及其影响因子 [J]. 太阳能学报, 38(11): 3057-3066. [Li X J, Xin X Z, Peng Z Q. 2017. Change analysis of surface solar radiation in China from 2003 to 2012. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 38(11): 3057-3066.]
- 马琪, 杜继稳, 延军平, 等. 2012. 1961-2009年大同市太阳辐射变化特征及其与气象要素的关系 [J]. 气象与环境学报, 28(2): 22-27. [Ma Q, Du J W, Yan J P, et al. 2012. Characteristics of solar radiation in Datong in the past 1961-2009 years and their relationship with meteorological elements. *Journal of Meteorology and Environment*, 28(2): 22-27.]
- 买苗, 火焰, 曾燕, 等. 2012. 江苏省太阳总辐射的分布特征 [J]. 气象科学, 32(3): 270-274. [Mai M, Huo Y, Zeng Y, et al. 2012. Distribution characteristics of total solar radiation in Jiangsu. *Meteorological Science*, 32(3): 270-274.]
- 彭艳, 王榛, 李星敏, 等. 2012. 近50年西安太阳辐射变化特征及相关影响因子分析 [J]. 干旱区地理, 35(5): 738-745. [Peng Y, Wang Z, Li X M. et al. 2012. Variation characteristics of solar radiation and related factors in Xi'an in recent 50 years. *Arid Land Geography*, 35(5): 738-745.]
- 齐月, 房世波, 周文佐. 2014. 近50年来中国地面太阳辐射变化及其空间分布 [J]. 生态学报, 34(24): 7444-7453. [Qi Y, Fang S B, Zhou W Z. et al. 2014. Changes of surface solar radiation over China in recent 50 years and their spatial distribution. *Acta Ecologica Sinica*, 34(24): 7444-7453.]
- 汪凯, 叶红, 曾燕, 等. 2010. 中国东南部太阳辐射变化特征、影响因素及其对区域气候的影响 [J]. 生态环境学报, 19(5): 1119-1124. [Wang K, Ye H, Zeng Y, et al. 2010. Variation characteristics of solar radiation in Southeast China and its influencing factors and their impacts on regional climate. *Ecology and Environmental Sciences*, 19(5): 1119-1124.]
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社. [Wei F Y. 2007. Modern climate statistical diagnosis and prediction techniques. Beijing, China: Meteorological Press.]
- 徐建明, 何金海, 闫凤霞, 等. 2010. 1961—2007年西北地区地面太阳辐射长期变化特征研究 [J]. 气候与环境研究, 15(1): 89-96. [Xu J M, He J H, Yan F X, et al. 2010. Long term variation characteristics of surface solar radiation in Northwest China during the past 1961-2007 years. *Climate and Environment Studies*, 15(1): 89-96.]
- 杨勤, 梁旭, 赵光平, 等. 2009. 宁夏太阳辐射逐日、月、年总量的变化特征 [J]. 干旱区研究, 26(3): 413-423. [Yang Q, Liang X, Zhao G P, et al. 2009. Variation characteristics of solar radiation daily, monthly and annual in Ningxia. *Arid Area Study*, 26(3): 413-423.]
- 周秉荣, 颜亮东, 校瑞香. 2012. 三江源地区太阳辐射与日照时空分布特征 [J]. 资源科学, 34(11): 2075-2079. [Zhou B

- R, Yan L D, Xiao R X. 2012. Temporal and spatial distribution characteristics of solar radiation and sunshine in San Jiang Source area. *Resources Science*, 34(11): 2075-2079.]
- 周淑贞, 束炯. 1994. 城市气候学 [M]. 北京: 气象出版社. [Zhou S Z, Shu J. *Urban climatology*. Beijing, China: Meteorological Publishing House.]
- 周志高, 林爱文, 王伦澈, 等. 2017. 长江中游城市群太阳辐射长期变化特征及其与气象要素的关系研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 24(4): 563-571. [Zhou Z G, Lin A W, Wang L C, et al. 2017. Long term variation of solar radiation and its relationship with meteorological elements in urban agglomeration of the middle reaches of Yangtze River. *Resources and Environment in the Yangtze River Basin*, 24(4): 563-571.]
- Arturo S, Martin W, Trentmann J, et al. 2017. Trends in downward surface solar radiation from satellites and ground observations over Europe during 1983–2010 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 18(9): 108-117.
- Beer J, Mende W, Stellmacher R. 2000. The role of the sun in climate forcing [J]. *Quaternary Science Reviews*, 19(1-5): 403-415.
- Oke T R. 1978. *Boundary layer climate* [M]. London, UK: Methen & Co. Ltd, 263.
- Wldm M, Gilgen H, Roesch A, et al. 2005. From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at Earth's surface [J]. *Science*, 308: 847-850.

Characteristics and influencing factors of surface solar radiation variation in Kunming City

HE Ping¹, CUI Meiyang¹, LI Jinxiao², LIU Shuhua^{3*}

(1. The college of Geography and Tourism Management, Chuxiong Normal University, Chuxiong 675000, Yunnan, China;

2. State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029, China;

3. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Based on the 24 years (1993–2016) meteorological data including solar radiation and other related variables, this study analyzed the characteristics of surface solar radiation variation in Kunming City, and examined its influencing factors by using the methods of regression analysis, Mann-Kendall (M-K) abrupt test, wavelet analysis, and grey correlation degree analysis. The results show that surface solar radiation varied between 4620.21 MJ/m² and 6221.65 MJ/m², the maximum occurred in 2016 and the minimum occurred in 2008, and the annual mean was 5598.06 MJ/m². Annual mean solar radiation showed a fluctuating rising trend. The dry and wet seasons are distinct in Kunming City, and the maximum surface solar radiation appeared in dry season (November to April of the following year at 2825.22 MJ/m²), but the minimum appeared in rainy season (May to October, at 2774.41 MJ/m²). Maximum monthly variation of surface solar radiation in Kunming City appeared in April (604.75 MJ/m²), and the minimum appeared in December (361.01 MJ/m²). The difference of surface solar radiation between April and December was 243.74 MJ/m². According to the M-K abrupt test, the point of abrupt change appeared in 2014, but it is statistically insignificant. On the one hand, annual wavelet analysis detected a 15-year primary period of surface solar radiation. On the other hand, using seasonal wavelet analysis of surface solar radiation, the amplitude of surface solar radiation in dry season was stronger than in rainy season, but the primary periods are both 19 days. Finally, through grey relational analysis, the 24-year surface solar radiation was influenced by both human and natural factors. Precipitation is an important natural factor, but gross industrial output value is an important human factor influencing the surface solar radiation variation in Kunming City. Compared to the human factor, natural factor is the main contributor of the surface solar radiation variation in Kunming City.

Keywords: solar radiation; variation characteristics; influencing factors; Kunming City