

# 中国近 50 年太阳直接辐射和散射辐射 变化趋势特征\*

马金玉<sup>1)2)†</sup> 梁宏<sup>3)</sup> 罗勇<sup>2)</sup> 李世奎<sup>3)</sup>

1) (南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044)

2) (国家气候中心, 北京 100081)

3) (中国气象科学研究院, 北京 100081)

(2010 年 8 月 13 日收到; 2010 年 9 月 9 日收到修改稿)

利用近 50 年(1961—2009 年)14 个站以及 31 年(1961—1991 年)49 个气象站点的地面直接辐射和散射辐射观测资料,采用线性倾向估计、小波分析和 Mann-Kendall(M-K)统计检验等方法,分析了太阳直接辐射和散射辐射年际、季节的长期变化趋势特征、年代际距平、周期和突变点.研究表明:1)采用归一化的气候倾向系数方法,有更好的比较性,能较好地揭示辐射气候趋势的时空分布特征;2)全国太阳直接辐射和散射辐射总体呈下降趋势,但地区、年代际和季节有升降的差异;3)基于观测站点地理分布的特点,按气候带划分和站点占有的百分比进行分类统计分析,更能阐明辐射长期变化具有一定的地带性和局地差异性;4)采用小波分析和 M-K 统计检验方法分析,得到各地辐射周期和突变时段的异同;5)大部分省际大城市的直接辐射和散射辐射长期变化的下降趋势较其他城市更明显,这可能与城市化发展快慢引起的环境要素变化有关.

**关键词:** 直接辐射, 散射辐射, 变化趋势, 小波分析

**PACS:** 96. 60. Ub, 92. 60. Vb, 92. 70. Kb

## 1. 引言

太阳辐射是自然环境中各种物理过程的主要能量来源,是驱动天气、气候形成和演变的基本动力<sup>[1,2]</sup>,是地面生态系统的能量主要来源.太阳辐射在经过大气层时,由于受到云<sup>[3]</sup>、水汽、大气中的 CO<sub>2</sub> 和臭氧<sup>[4]</sup> 等气体以及气溶胶粒子<sup>[5]</sup> 等的吸收、反射和散射作用,使到达地面的太阳辐射减弱.到达地表的太阳辐射由太阳直接辐射和散射辐射两部分组成.其中,以平行光线的形式直接投射到地面上的辐射能为直接辐射,而经大气散射到达地面的辐射能为散射辐射<sup>[6]</sup>.

有研究表明,20 世纪 50—80 年代,包括中国<sup>[7—11]</sup> 在内的全球<sup>[12—14]</sup> 大部分地区地面总辐射和直接辐射基本上呈减少趋势,并推测大气中悬浮粒子浓度的增加可能是造成这种趋势的主要原因,而

90 年代后,部分地区有所回升<sup>[15,16]</sup>,但散射辐射变化不明显.自工业革命以来,日趋严重的大气污染、气溶胶粒子增加等环境问题给直接辐射和散射辐射带来很大影响,已经引起国内外学者的高度重视.以往国内直接辐射和散射辐射观测资料较少,研究的资料大多数为气候学估算<sup>[17—19]</sup>,而采用观测资料的研究成果多为单点或一定地区范围的,有的资料系统性和连续性不能满足要求<sup>[20—22]</sup>,用到近十多年来观测资料的研究不多.由于以往实际观测资料的限制和处理方法不同<sup>[7—11]</sup>,研究结果有所不同,可比性差,揭示地区差异性和特殊性不够深入.

本研究突出以下特点:1)将资料进行归一化处理,使分析结果具有可比性、代表性;2)在全国部分已有直接辐射和散射辐射观测站点中,增补了至 2009 年的实际观测资料,使这部分站点资料具有较长年代和较好的连续性和系统性;3)分析内容更着重于揭示地区的差异性和特殊性.

\* 国家自然科学基金青年科学基金(批准号:40905038)、国家自然科学基金(批准号:40775020)和公益性行业(气象)科研专项基金(批准号:GYHY200706030)资助的课题.

† E-mail: mgy0525@163.com

## 2. 资料与方法

### 2.1. 资料来源

我国在 1992 年对全国辐射观测站进行调整,直接辐射和散射辐射的观测站由 78 个调整为 17 个,且观测年代长短不一. 其中,1961—2009 年具有较完整观测序列(近 50 年)的站点仅有 14 个. 本研究从全国选取了两组不同时间序列的直接辐射和散射辐射观测资料:一组资料时间序列为近 50 年(1961—2009 年)共 14 个站,另一组为 31 年(1961—1991 年)共 49 个站,其观测资料均来自国家气象信息中心. 对个别缺测数据,采用本站的相邻月值和年值的均值代替.

1961—1991 年的直接辐射和散射辐射资料基本符合下述要求:观测站点分布在全国各个地理气候区域(见图 1). 从区域分布看,东北 5 个、华北 8 个、华中(把浙江、上海和江西归在此区)8 个、华南(把福建归在此区)6 个、西南 6 个、西北 12 个、青藏高原 4 个. 从气候带<sup>[23]</sup>看(见图 1 和表 1),中温带 11 个,暖温带 14 个、北亚热带 8 个、中亚热带 5 个、南亚热带 7 个、青藏高原 4 个. 从城市看,主要省际大城市 26 个、其他城市 23 个.

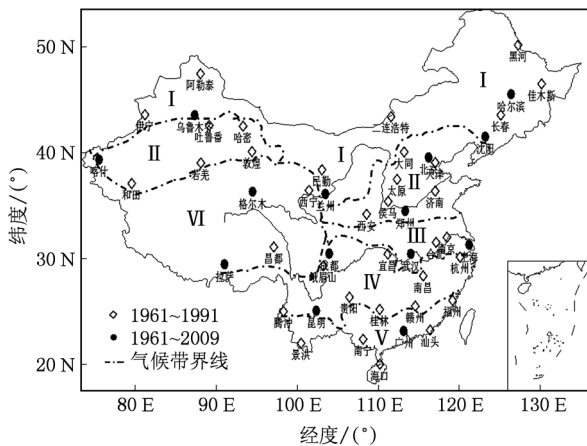


图 1 地面直接辐射和散射辐射观测站点和气候界线分布示意图 I 为中温带, II 为暖温带, III 为北亚热带, IV 为中亚热带, V 为南亚热带, VI 为青藏高原

### 2.2. 研究方法

#### 2.2.1. 归一化气候趋势倾向系数及其分类标准

为了便于比较分析各站气候倾向趋势,需要消

除量纲的影响. 将原始资料序列归一化处理,生成新的序列资料. 归一化公式为

$$m = \frac{y - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}}, \quad (1)$$

其中,  $y$  为每站每年的原始序列数据,  $y_{\max}$  和  $y_{\min}$  分别为每站原始序列的最大值和最小值,  $m$  为每站归一化后新生成的序列数据.

表 1 各气候带站点分布(1961—1991 年)

编号	气候带	站点名
I	中温带	阿勒泰、沈阳、长春、伊宁、乌鲁木齐、佳木斯、兰州、哈尔滨、二连浩特、黑河、民勤
II	暖温带	吐鲁番、北京、太原、天津、大同、敦煌、西安、喀什、济南、哈密、和田、若羌、侯马、郑州
III	北亚热带	贵阳、武汉、腾冲、南京、峨眉山、合肥、上海、杭州
IV	中亚热带	成都、南昌、昆明、赣州、宜昌
V	南亚热带	广州、汕头、福州、海口、景洪、南宁、桂林
VI	青藏高原	西宁、拉萨、昌都、格尔木

将(1)式新生成的序列数据,通过最小二乘法计算得到趋势倾向系数<sup>[24]</sup>,将该系数放大 10 倍即为太阳总辐射每 10 年增(减)的幅度,分类如表 2.

表 2 归一化倾向系数( $m$ )分类标准

趋势类型	倾向系数
下降极显著	< -0.25
下降显著	-0.25—-0.15
下降明显	-0.15—-0.05
变化不明显	-0.05—0.05
上升明显	0.05—0.15
上升显著	0.15—0.25
上升极显著	> 0.25

#### 2.2.2. 小波分析

为了进一步识别时间序列的周期成分及其在时域上的分布,利用 Morlet 小波对太阳直接辐射和散射辐射进行周期性分析. 计算方法详见参考文献[24]. 小波分析是一种时、频多分辨率分析方法,是一个时间和频率的区域变换,因而能有效的从信号中提取信息,通过伸缩和平移等运算功能对函数或信号进行多尺度细化. 在实际应用时常将连续小波变换离散化. 小波方差随尺度  $a$  变化过程称小波方差图,反映了波动的能量随尺度的分布,能量显著对应的尺度就是给定时间序列存在的主要周期成分.

2.2.3. 趋势突变检测方法

检测气候突变有多种方法,本研究采用 Mann-Kendall (M-K) 法对近 50 年辐射长时间序列进行突变检验. M-K 非参数突变检验方法不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异样值的干扰,具有检验范围宽、定量化程度高、人为性小等优点,是目前突变性检验方法中理论基础较强且应用较多的一种<sup>[25]</sup>. 计算方法详见参考文献[24]. 在正序列曲线超过临界值信度线的前提下,若正序列和反序列两个统计量序

列仅有一个明显的交叉点,且位于信度线之间,则表明该交叉点为突变点,且统计上显著.

3. 结果分析

3.1. 全国太阳直接辐射和散射辐射时空分布特征

青藏高原直接辐射年曝辐量为全国最多,超过 1300 kWh·m<sup>-2</sup>;四川盆地及周边至长江中下游为低

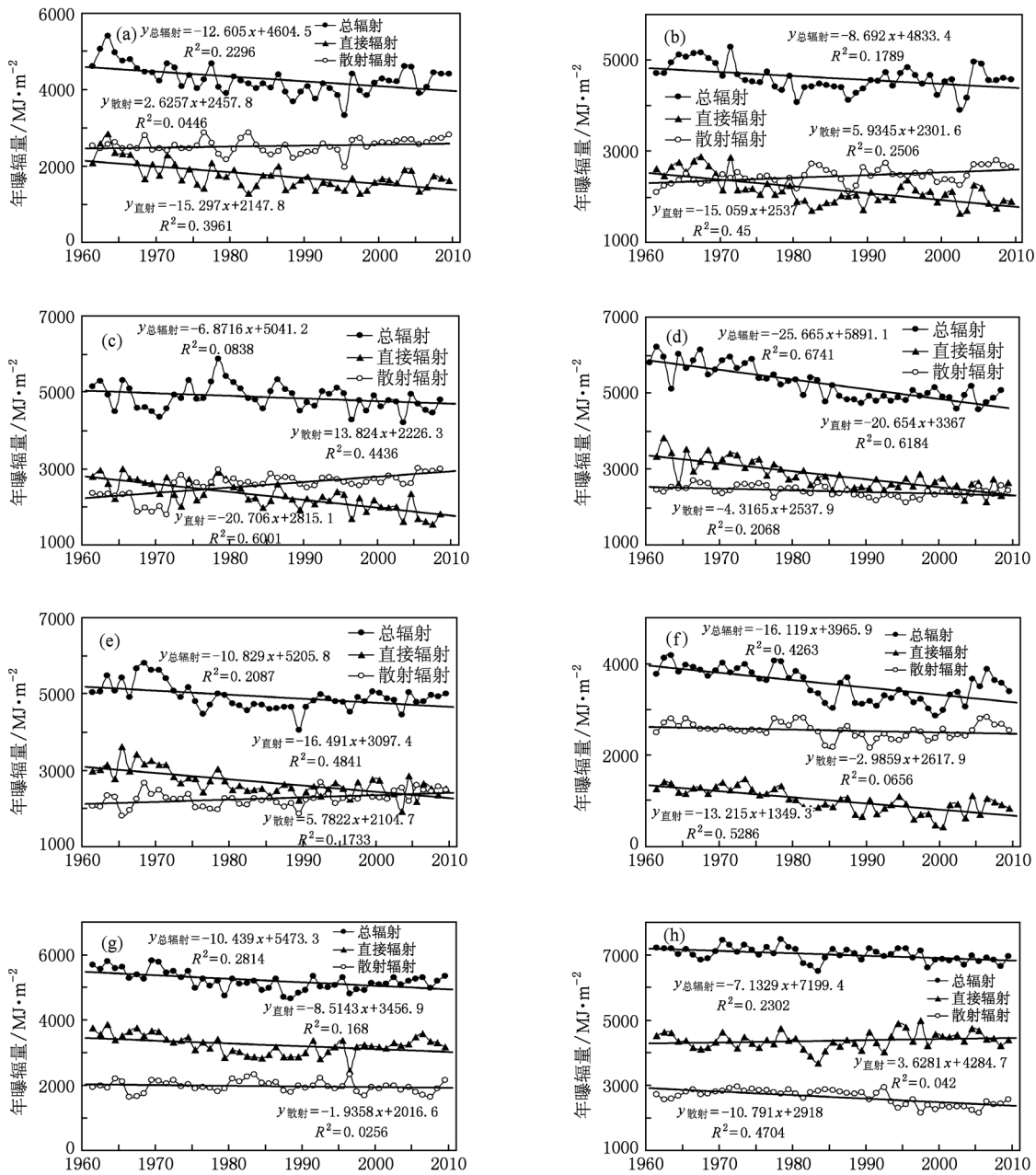


图2 典型站点太阳总辐射、直接辐射和散射辐射的年曝辐量年际变化 (a)广州;(b)上海;(c)郑州;(d)北京;(e)沈阳;(f)成都;(g)乌鲁木齐;(h)格尔木

值区,其中四川盆地小于  $300 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ ,为低值中心.全国高、低中心值的直接辐射年曝辐量相差超过4倍.另外,在我国西部有两个相对低值区,一个是青藏高原东南部和横断山脉的迎风坡地区,云雨较多,大气对直接辐射的削弱较强;另一个是为大气混浊度较大的沙漠地区——塔里木盆地<sup>[26]</sup>.

散射辐射年曝辐量的分布是低纬地区大于高纬地区,低海拔地区大于高海拔地区,西部干燥区大于东部湿润区.其高值区位于我国东、南部地区,超过  $700 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ ,主要是由于云和气溶胶较多.高值中心主要出现在两广丘陵、上海周边、湖北及四川盆地,超过  $900 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ .青藏高原空气洁净、空气分子散射弱,但由于该地区海拔高,总辐射量多,散射辐射也相对较多.在纬度较高的  $45^\circ\text{N}$  以北地区,散射辐射普遍较少,年曝辐量最低不足  $400 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ <sup>[26]</sup>.

本文从全国选择了8个典型站点,分别对1961—2009年近50年各站的太阳总辐射、直接辐射和散射辐射的年曝辐量年际变化进行分析,如图2所示.各站点的总辐射年曝辐量气候线性倾向趋势呈下降,且全部通过0.05显著性检验.但在90年代后,个别站点有回升波动趋势,其中北京在90年代中期,广州、成都和乌鲁木齐在2000年初.直接辐射年曝辐量线性倾向趋势呈缓慢下降,除格尔木站外,其余全部通过0.05显著性检验.上海、北京、沈阳从90年代初开始回升,广州和成都在2000年以后有波动回升.除广州、成都和乌鲁木齐以外,其余各站散射辐射年曝辐量线性倾向趋势均通过0.05显著性检验,其中上海和郑州呈上升趋势,北京和格尔木呈下降趋势.北京从1998年开始,散射辐射逐渐回升.总的看,这8个站点太阳总辐射和直接辐射的年曝辐量以下降为主,散射辐射年曝辐量各站不同时段升降有差异,这可能与各地区大气环境的变化状况和人类活动有关,其原因较复杂,有待进一步研究.

### 3.2. 变化趋势

#### 3.2.1. 年太阳直接辐射长期变化趋势分析

近50年(1961—2009年)14个站点太阳直接辐射变化趋势如图3所示.各站点的变化趋势只有变化不明显和下降明显两类,分别占总站数的

57.1%和42.9%.

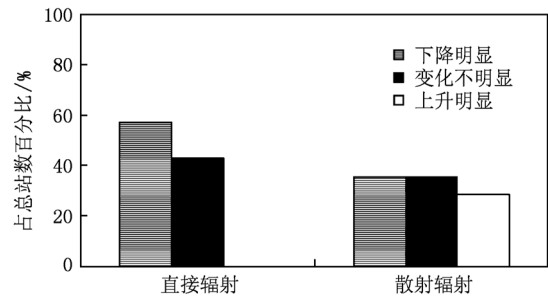


图3 1961—2009年全国年直接辐射和散射辐射变化趋势分类图

1961—1991年太阳直接辐射变化趋势如图4所示.在49个站点中,绝大部分站点为下降趋势,其中下降显著的站点居多,占总站数的46.9%,其次为下降明显和下降极显著,分别占30.6%和12.2%,而变化不明显的仅占10.2%.总之,1961—1991年全国49个站点的年太阳直接辐射基本呈下降趋势,其中下降明显的站点最多.

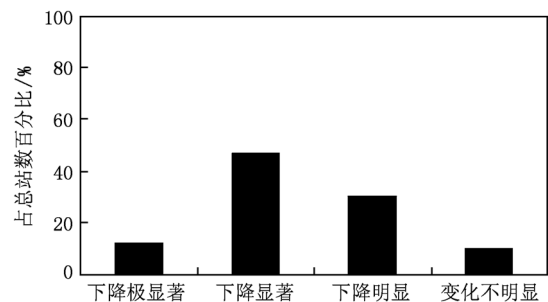


图4 1961—1991年年直接辐射变化趋势分类图

由于近50年直接辐射和散射辐射观测站点仅有14个,其地理分布不具代表性,但从1961—1991年49个站的观测资料分析来看,直接辐射的变化趋势具有明显的地理分布特征.由图5和表3可见,1961—1991年各气候带太阳直接辐射变化趋势有明显差别.在中温带,下降的站点占该带总站数的72.7%,其中下降明显和下降显著的分别占54.5%和18.2%,变化不明显的占27.3%.在暖温带,下降的站点占92.8%,其中下降明显、下降显著和下降极显著的依次占35.7%,35.7%和21.4%,变化不明显的占7.1%.在北亚热带,下降的站点占87.5%,其中下降显著的最多,占50.0%,下降极显

著的占 25.0%，而变化不明显的占 12.5%。在中亚热带，下降显著的站点最多，占 80.0%，其次下降明显的占 20.0%。在南亚热带，所有站点均为下降显著。在青藏高原，下降明显的站点最多，占 50.0%，其次为下降显著和下降极显著，分别均占 25.0%。总之，各个热量带虽大都为下降，但下降的幅度有明显差异，其中，中亚热带、南亚热带和青藏高原所有站点均为下降，而中温带有 27.3% 的站点为变化不明显。

表 3 1961—1991 年不同气候带年直接辐射变化趋势分类 (占该带总站数百分比 单位: %)

气候带	下降极显著	下降显著	下降明显	变化不明显
中温带		18.2	54.5	27.3
暖温带	21.4	35.7	35.7	7.1
北亚热带	25.0	50.0	12.5	12.5
中亚热带		80.0	20.0	
南亚热带		100.0		
青藏高原	25.0	25.0	50.0	

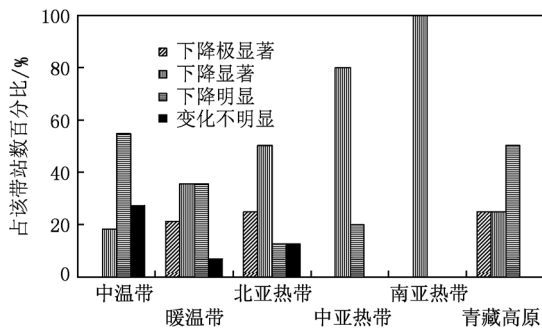


图 5 1961—1991 年不同气候带年直接辐射变化趋势分类

由图 6 和表 4 可见，1961—1991 年全国 49 个站点年太阳直接辐射各类变化趋势具有明显的地域性。在东北区，以下降明显的站点居多，占总站数的百分比为 60.0%，其次为下降显著和变化不明显，分别均占 20.0%。在华北区，全部站点为下降趋势，其中，下降显著的站点最多，占 50.0%，其次为下降极显著和下降明显，分别均占 25.0%。在华中区，75.0% 站点为下降显著，其次 25.0% 的站点为下降极显著。在华南区，全部站点为下降显著。在西北区，50.0% 的站点为下降明显，而 25.0% 的站点为变化不明显。在西南区，下降显著的站点居多，占 50.0%，其次为下降明显和变化不明显，分别占 33.3% 和 16.7%。在青藏高原，全部站点均为下降

趋势，其中下降明显的站点最多，占 50.0%，其他是下降显著和下降极显著，分别均占 25.0%。总的来看，1961—1991 年全国 49 个站点的年直接辐射以下降趋势为主，而华北区、华中区、华南区和青藏高原的站点下降趋势尤为明显。

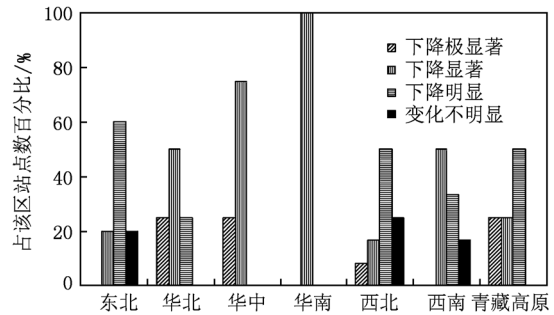


图 6 1961—1991 年各区域年直接辐射变化趋势分类

表 4 1961—1991 年各区域年直接辐射变化趋势分类 (占该区域总站数百分比 单位: %)

区域	下降极显著	下降显著	下降明显	变化不明显
东北			60.0	20.0
华北	25.0	50.0	25.0	
华中	25.0	75.0		
华南		100.0		
西北	8.3	16.7	50.0	25.0
西南		50.0	33.3	16.7
青藏高原	25.0	25.0	50.0	

按省际大城市与其他城市来分，1961—1991 年全国 49 个站点年直接辐射各类变化趋势的站数占该类城市总站数的百分比如图 7 所示。省际大城市的年太阳直接辐射均为下降趋势，其中，下降显著的站点最多，占该类城市站点数的 57.7%，其次为下降极显著和下降明显，分别占 23.1% 和

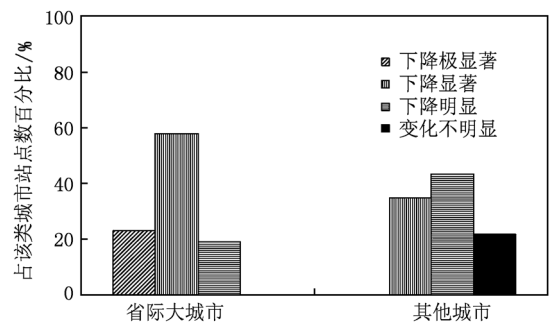


图 7 1961—1991 年省际大城市和其他城市年直接辐射的变化趋势分类

19.2%。其他城市以下降明显的站点居多,占43.5%,其次为下降显著和变化不明显,分别占34.8%和21.7%。总之,省际大城市下降的站点和下降趋势较其他城市要更多、更明显,这可能与省际大城市发展较快,影响到与辐射密切相关的大气环境状况<sup>[27]</sup>,这方面还有待研究。

3.2.2. 年散射辐射长期变化趋势分析

全国具有较长年代的14个站点,近50年太阳散射辐射变化趋势分类如图3所示,年散射辐射变化趋势为下降明显和变化不明显,该类趋势的站点数占总站点数的百分比均为35.7%,上升明显的占28.6%,例如昆明、沈阳、上海、郑州。

1961—1991年全国49个站点年太阳散射辐射变化趋势如图8所示。在49个站点中,40.8%的站点为下降趋势,22.5%的站点为上升趋势,36.7%的为变化不明显。其中,下降明显和下降显著的站点分别占34.7%和6.1%,上升明显和上升显著的站点分别占14.3%和8.2%。

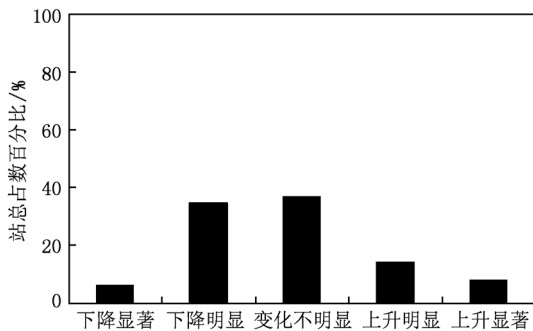


图8 1961—1991年全国年散射辐射变化趋势分类

1961—1991年全国49个站点的太阳散射辐射变化趋势具有明显的地理分布特征。由图9和表5可见,1961—1991年各气候带散射辐射变化趋势有明显差别。在中温带,变化不明显的站点最多,占该带总站数的63.6%,其次为下降明显和上升明显,分别均占18.2%。在暖温带,下降的站点占42.8%,其中下降明显和下降显著分别占35.7%和7.1%;上升的站点占28.5%,其中上升显著和上升明显分别占21.4%和7.1%;变化不明显的占28.6%。在北亚热带,下降明显的站点占62.5%,变化不明显的占25.0%,上升明显的占12.5%。在中亚热带,上升明显的站点居多,占40.0%,其次下降明显和下降显著的分别均占20.0%,而变化不明显的占20.0%。在南亚热带,变化不明显的站点最多,占42.9%,下降明显的占28.6%,而上升明显和上

升显著的分别均占14.3%。在青藏高原,下降的站点占75.0%,其中下降明显和下降显著的分别占50.0%和25.0%,变化不明显的占25.0%。总之,各热量带大部分为下降趋势,但也有上升的站点。

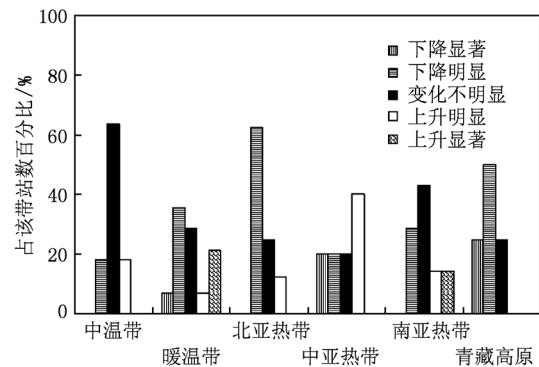


图9 1961—1991年不同气候带年散射变化趋势分类

表5 1961—1991年不同气候带年散射辐射变化趋势分类 (占该带总站数百分比 单位:%)

气候带	下降显著	下降明显	变化不明显	上升明显	上升显著
中温带		18.2	63.6	18.2	
暖温带	7.1	35.7	28.6	7.1	21.4
北亚热带		62.5	25.0	12.5	
中亚热带	20.0	20.0	20.0	40.0	
南亚热带		28.6	42.9	14.3	14.3
青藏高原	25.0	50.0	25.0		

1961—1991年全国49个站点各区域年散射辐射变化趋势占该区域站点数百分比由图10和表6可见。在东北区,变化不明显的站点最多,占60.0%,其次为下降明显和上升明显,分别均占20.0%。在华北区,上升显著的站点最多,占37.5%,其次为变化不明显和上升明显,分别均占25.0%,其中,上升趋势的站点占50.0%以上。在华

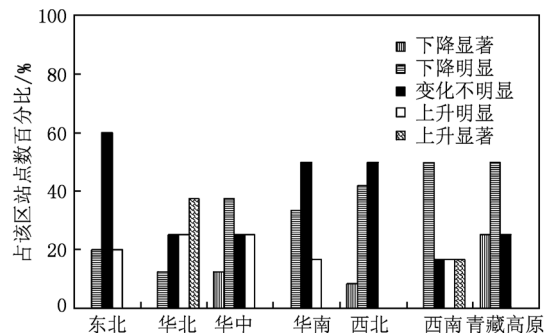


图10 1961—1991年各区域年太阳散射辐射变化趋势分类

中区,下降明显的站点占 37.5%,其次变化不明显和上升明显的分别均占 25.0%。在华南区,变化不明显的站点最多,占 50.0%,其次下降明显和上升明显的分别占 33.3%和 16.7%。在西北区,变化不明显的站点居多,占 50.0%,其次为下降明显,占 41.7%。在西南区,下降明显的站点最多,占 50.0%,其次变化不明显、上升明显和上升显著的分别均为 16.7%。在青藏高原,下降明显的站点最多,占 50.0%,其次下降显著和变化不明显的分别均占 25.0%。

表 6 1961—1991 年各区域年散射辐射变化趋势分类  
(占该区域总站数百分比 单位:%)

区域	下降显著	下降明显	变化不明显	上升明显	上升显著
东北		20.0	60.0	20.0	
华北		12.5	25.0	25.0	37.5
华中	12.5	37.5	25.0	25.0	
华南		33.3	50.0	16.7	
西北	8.3	41.7	50.0		
西南		50.0	16.7	16.7	16.7
青藏高原	25.0	50.0	25.0		

按省际大城市与其他城市的年散射辐射变化趋势分类来看,各类趋势站点数占该类城市总站数的百分比由图 11 可见。1961—1991 年全国 49 个站点中,省际大城市下降明显的站点占大多数,约占 38.5%,其次为变化不明显和上升明显,分别占 26.9%和 19.2%。其他城市变化不明显的站点居多,占 47.8%,其次为下降明显的,占 30.4%。总之,省际大城市以下降明显的站点最多,而其他城市以变化不明显居多。

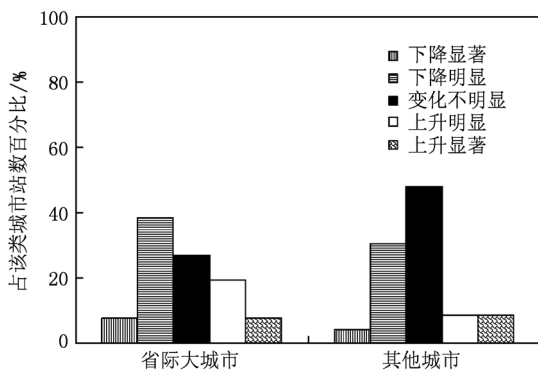


图 11 1961—1991 年省际大城市和其他城市年散射辐射的变化趋势分类

由上可见,散射辐射的趋势在全国各区均有上升和下降的站点,但广州、上海、天津、沈阳、济南、郑州、哈尔滨这些主要大城市都呈上升趋势。据有关研究<sup>[27—30]</sup>,可能与城市化发展、气溶胶增多导致散射辐射增多有关(这可能与城市化发展的快慢导致大气污染和气溶胶增减有关)。而散射辐射下降比较明显的分布在西北、青藏高原的一些中小城市,但是有些大城市,如北京、武汉、成都、兰州、乌鲁木齐、杭州、南京等这些大城市散射辐射略有减少,可能与近期该地区大气环境改善有关,这还有待研究。

### 3.3. 太阳辐射的年代际变化

本文将年太阳直接辐射和散射辐射的年代际变化距平百分比分为 5 类,分别为下降显著、下降明显、变化不明显、上升明显和上升显著,其分类标准见表 7。

表 7 年太阳总辐射年代际距平分类标准

趋势类型	距平百分比/%
下降显著	-20—-10
下降明显	-10—-1
变化不明显	-1—1
上升明显	1—10
上升显著	10—20

#### 3.3.1. 全国 14 个站点年太阳直接辐射年代际变化

在全国具有较长年代观测资料的 14 个站点中,近 50 年年太阳直接辐射年代际变化如图 12 所示。60 年代,上升明显、上升显著和上升极显著的站点居多,分别均占总站数的 28.6%。70 年代,上升明显的居多,占 50.0%,其次为变化不明显的,占 21.4%。80 年代,下降明显的最多,占 71.4%,其次为下降显著的,占 28.6%。90 年代,下降明显的最

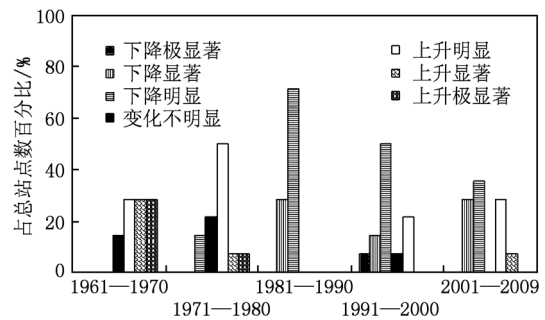


图 12 1961—2009 年年直接辐射年代际距平百分比分类

多,占 50.0%,其他依次为上升明显(24.1%)、下降显著(14.3%)、下降极显著(7.1%)和变化不明显(7.1%)。2000 年以后,下降明显的稍多,为 35.7%,其次为下降显著和上升明显,均分别占 28.6%。总之,全国 14 个站点年太阳直接辐射的年代际变化可分为 3 个阶段:1)60 年代和 70 年代以上升为主;2)80 年代以下降为主;3)90 年代以后虽以下降为主,但部分站点开始有上升的变化趋势。

### 3.3.2. 全国 14 个站点年太阳散射辐射年代际变化

在全国具有较长年代观测资料的 14 个站点中,近 50 年年太阳散射辐射年代际变化分类如图 13 所示。60 年代,以上升明显和变化不明显的站点居多,分别占 35.7% 和 28.6%,其次为下降明显,占 21.4%。70 年代,下降明显和上升明显的居多,分别占 42.9% 和 28.6%,其次为变化不明显,占 21.4%。80 年代,下降明显和上升明显的站点分别为 57.1% 和 42.9%。90 年代,以下降明显的最多,占 57.1%,其次为上升明显,占 35.7%。2000 年以后,以上升明显为主,占 57.1%,其次为下降明显,占 28.6%。总之,这 14 个站点 60 年代散射辐射以上升明显和变化不明显为主,70 年代至 90 年代以下降明显为主,但上升和下降比例波动不大,均在 30%—57% 之间,2000 年以后转为以上升明显为主。

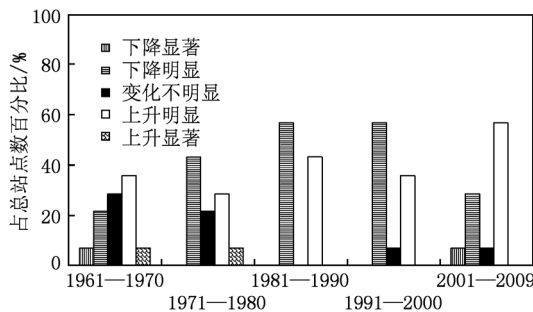


图 13 1961—2009 年年散射辐射年代际距平百分比分类

### 3.3.3. 省际大城市直接辐射和散射辐射年代际变化

在全国具有较长年代观测资料的 14 个站点中,12 个省际大城市站点近 50 年的直接辐射年代际距平分类如图 14 所示。在 20 世纪 60 年代,绝大部分呈上升趋势,其中上升显著和上升极显著的站点均各占 33.3%;在 70 年代,以上升明显为主,占 58.3%;从 80 年代起,转为以下降明显为主。总之,大城市直接辐射在 80 年代以前,大部分站点为明显上升,从 80 年代起至今以下降明显为主,但有波动。

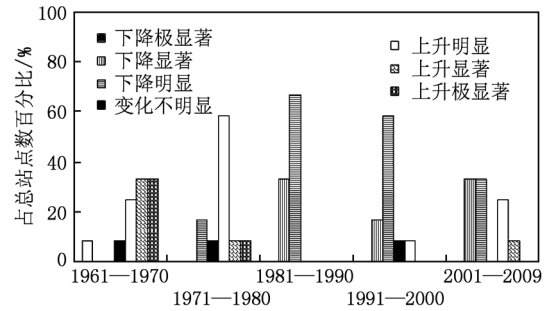


图 14 1961—2009 年省际大城市年直接辐射年代际距平百分比分类

全国 12 个省际大城市站点近 50 年的散射辐射年代际距平分类如图 15 所示。在 20 世纪 60 年代,下降明显、变化不明显和上升明显的站点所占的比例分别为 25.0%,33.3% 和 25.0%。在 70 年代,以下降明显为主,占 50.0%,其次为变化不明显和上升明显,分别占 25.0% 和 16.7%。在 80 年代和 90 年代,均以下降明显为主,约占 50.0%—60.0%,其次为上升明显,分别均占 41.7%。2000 年以后,转为以上升明显为主,占 66.7%,而下降明显仅占 25.0%。总之,2000 年以前以下降明显为主,之后以上升明显为主。

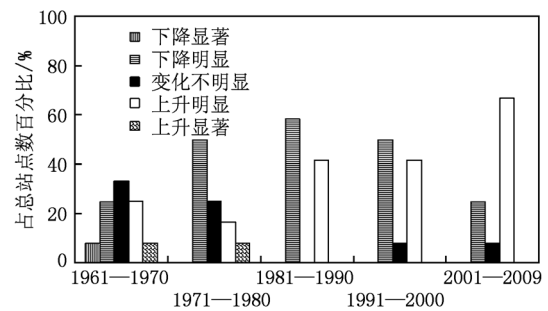


图 15 1961—2009 年省际大城市年散射辐射年代际距平百分比分类

这里以 4,7,10,1 月分别作为春、夏、秋、冬四季的代表月份。在具有较长年代观测资料的全国 14 个站点中,近 50 年年内各季年直接辐射长期变化趋势分类如图 16 所示。冬季(1 月)以下降明显为主,占 64.3%,其次为变化不明显,占 35.7%;春季(4 月)基本上为变化不明显;夏季(7 月)和秋季(10 月)下降明显和变化不明显的站点均占 50.0% 左右。总之,这 14 个站冬季以下降明显为主,春季以变化不明显最多,夏、秋季均为下降明显和变化不明显。

在全国具有较长年代观测资料的 14 个站点中,近 50 年年内各季年散射辐射的长期变化趋势如图

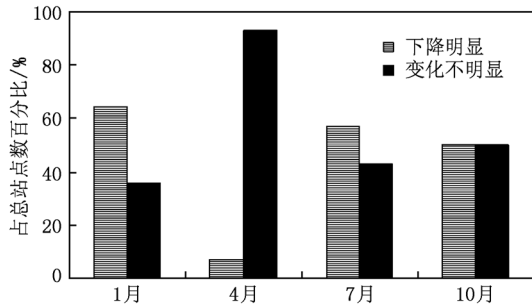


图 16 1961—2009 年全国直接辐射季节变化趋势分类

17 所示. 冬季(1 月)以变化不明显和下降明显为主,分别占 57.1% 和 42.9%; 春季(4 月)和夏季(7 月)均以变化不明显为主,分别均占 50.0% 左右; 秋季(10 月)以变化不明显为主,占 42.9%,其次为下降明显,占 35.7%. 总之,这 14 个站四季散射辐射均以变化不明显为主,但秋、冬季下降明显的比例比春、夏季要大,其原因尚待分析.

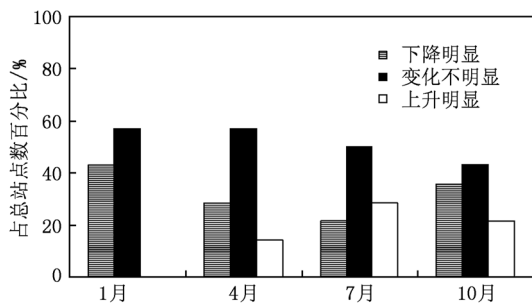


图 17 1961—2009 年全国散射辐射季节变化趋势分类

### 3.4. 基于小波分析的年太阳直接辐射和散射辐射周期变化

采用 Morlet 小波对全国具有较长年代辐射观测资料的 14 个站点,1961—2009 年年太阳辐射变化的多时间尺度进行分析,图 18 和图 19 分别为典型站点直接辐射和散射辐射的小波变换和小波方差图. 分析结果表明:各站直接辐射的主周期有差异, 昆明的主周期为 8 年,哈尔滨、喀什为 15—18 年,乌鲁木齐、格尔木、兰州为 33—34 年,而沈阳、北京、成都、郑州、武汉、上海、广州的主周期可长达 45 年以上. 各站散射辐射的主周期有差异,哈尔滨、乌鲁木齐、上海为 8—10 年,广州为 25 年,武汉、成都为 30—36 年,兰州、北京、格尔木、沈阳、昆明、郑州、喀什的主周期可长达 40 年以上. 但由于观测资料时间序列长度有限,以上较长年代(30 年以上)的主周

期还有待今后进一步分析验证.

大部分直接辐射的次周期为 5—8 年、11—13 年和 18—25 年. 大部分散射辐射的次周期为 5—7 年、10—14 年和 30—34 年.

### 3.5. 突变检测

本文采用 M-K 法对全国具有较长年代辐射观测资料的 14 个站点,1961—2009 年年太阳直接辐射和散射辐射变化趋势进行突变检测,取显著性水平  $\alpha=0.05$ ,则相应的检验临界值  $U_{\alpha/2} = \pm 1.96$ ,图 20 和图 21 为典型站点直接辐射和散射辐射的 M-K 突变检测. 根据 M-K 方法计算出的统计量序列(UF)和(UB)两条曲线相交的点位于信度曲线之间的特点可知,14 个直接辐射观测站中,各个年代只有一个突变点的有:兰州和昆明发生在 60 年代中期,乌鲁木齐发生在 60 年代末;沈阳、拉萨、武汉和上海发生在 70 年代中期,成都发生在 70 年代末;郑州发生在 80 年代中期. 喀什的突变主要发生在 3 个时段:60 年代中期、90 年代中期和 2000 年中期. 哈尔滨的突变主要发生在 4 个时段:60 年代中期、80 年代中期、90 年代初和 2000 年初. 突变的发生时段可能与各地区的气候变化有关系,这有待进一步研究.

全国具有较长年代散射辐射观测资料的 14 个站点中,各个年代只有一个突变点的有:成都发生在 60 年代末,北京、郑州发生在 70 年代后期,喀什和拉萨发生在 80 年代中期,兰州、昆明发生在 80 年代末,格尔木发生在 90 年代中期,沈阳发生在 2000 年初. 有两个突变点的有:哈尔滨发生在 60 年代中期、90 年代后期到 2000 年初,乌鲁木齐发生在 90 年代后期和 2000 年初期,武汉发生在 60 年代初期和 2000 年中期,上海发生在 60 年代中后期和 80 年代初.

## 4. 结 论

1) 采用归一化气候倾向系数进行变化趋势分类分析,使各站点的气候趋势倾向率转换为统一标准、无量纲的气候倾向系数,分类简明,使各站分析结果具有可比性、代表性.

2) 1961—2009 年全国 14 个站点太阳直接辐射年际变化趋势为变化不明显和下降明显. 其年代际变化为:60 年代和 70 年代以上升为主;80 年代以下降为主;90 年代以后虽以下降为主,但部分站点开

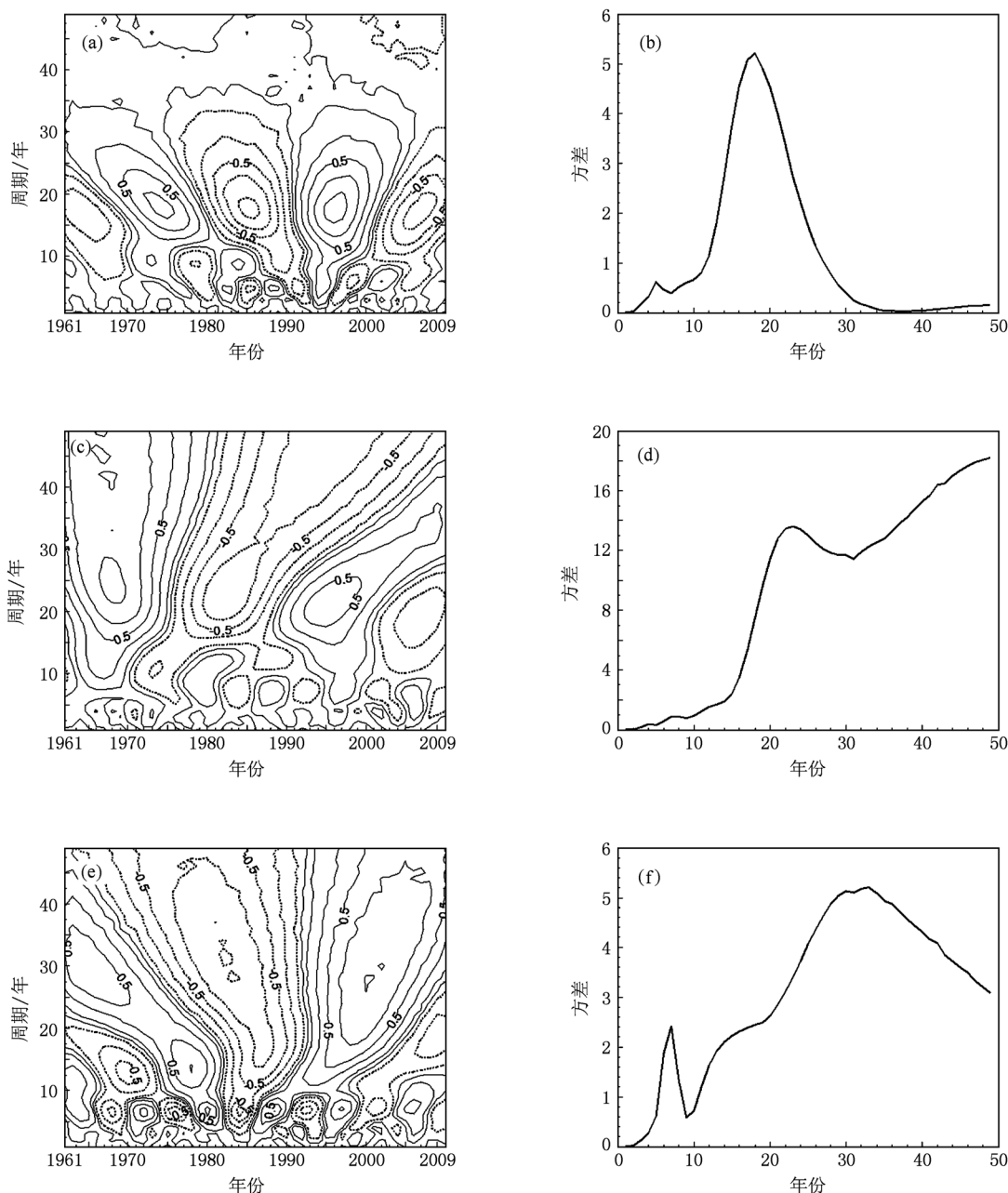


图 18 典型站点直接辐射的小波变换(a),(c),(e)和小波方差(b),(d),(f) (a),(b)哈尔滨;(c),(d)上海;(e),(f)格尔木

始有上升的变化趋势. 1961—1991 年全国 49 个站点太阳直接辐射年际变化均呈下降趋势, 其中下降明显的站点最多.

3) 1961—2009 年全国 14 个站点太阳散射辐射年际变化趋势依次为下降明显、变化不明显和上升明显. 其年代际变化为: 在 60 年代以上升明显和变化不明显为主, 70 年代至 90 年代以下降明显为主, 2000 年以后转为以上升明显为主. 1961—1991 年全国 49 个站点太阳散射辐射年际变化如下: 40.8% 的站点为下降趋势, 22.5% 的站点为上升趋势,

36.7% 的为变化不明显.

4) 从地理分布来看, 1961—1991 年全国 49 个站点中, 各气候带的直接辐射虽大都为下降, 但下降的幅度有明显差异. 其中, 中亚热带、南亚热带和青藏高原所有站点均为下降, 而中温带有 27.3% 的站点为变化不明显. 各气候带的散射辐射大部分为下降趋势, 但下降幅度不同, 另外也有上升的站点. 1961—1991 年省际大城市直接辐射下降的站点和下降趋势较其他城市要更多、更明显. 省际大城市的年太阳散射辐射以下降明显的站点最多, 而其他

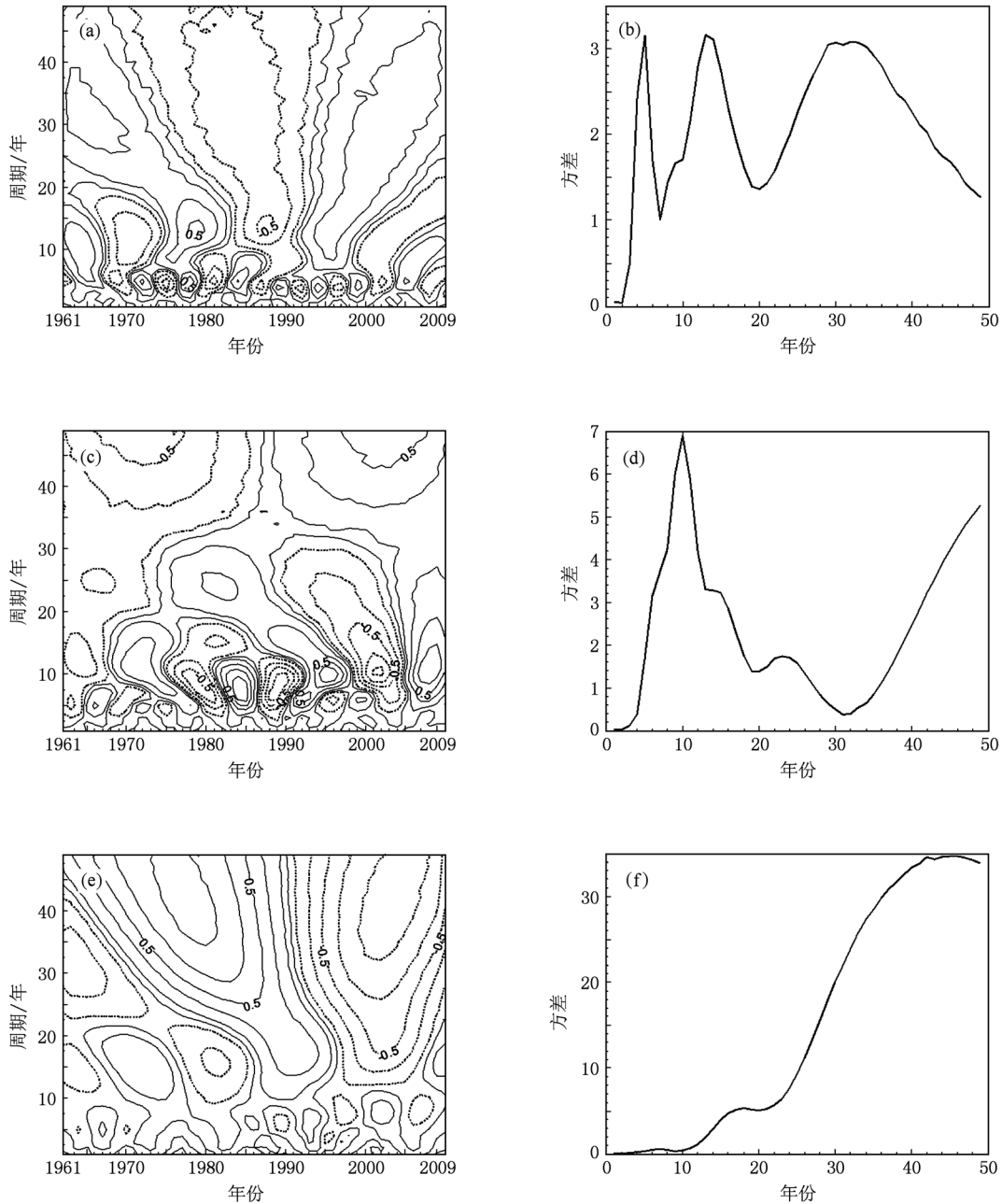


图 19 典型站点散射辐射小波变换(a),(c),(e)和小波方差(b),(d),(f) (a),(b)哈尔滨;(c),(d)上海;(e),(f)格尔木

城市以变化不明显居多。

5) 1961—2009 年全国 12 个省际大城市直接辐射在 80 年代以前,大部分站点为明显上升,从 80 年代起至今以明显下降为主,但有波动;而散射辐射在 2000 年以前以下降明显为主,2000 年以后以上升明显为主。1961—2009 年全国 14 个站点季节太阳辐射的长期变化趋势也有差异。直接辐射在冬季以下降明显为主,春季以变化不明显最多,夏、秋季均为下降明显和变化不明显;散射辐射在各季均以变化不明显为主,但秋、冬季下降的站比春、夏季要

多一些,其原因尚待分析。

6) 从周期来看,近 50 年全国 14 个站直接辐射有 15—18 年、33—34 年或以上的主周期;散射辐射有 8—10 年、30—36 年或以上的主周期,但以上较长年代(30 年以上)的主周期还需今后较长时间序列资料进行分析验证。各站点的突变时间不完全一致,直接辐射的突变主要发生在 60 年代中期和 70 年代中期,散射辐射主要发生在 80 年代末到 90 年代初。

以上分析指出了近 50 年来我国太阳辐射(直

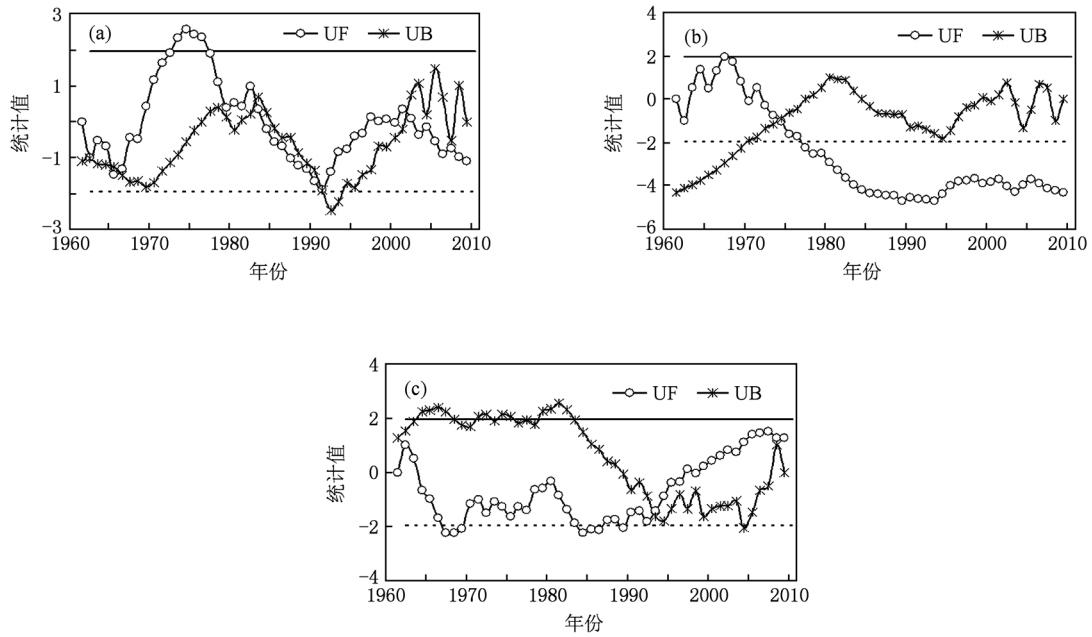


图20 直接辐射典型站点 M-K 突变检测 (a) 哈尔滨; (b) 上海; (c) 格尔木

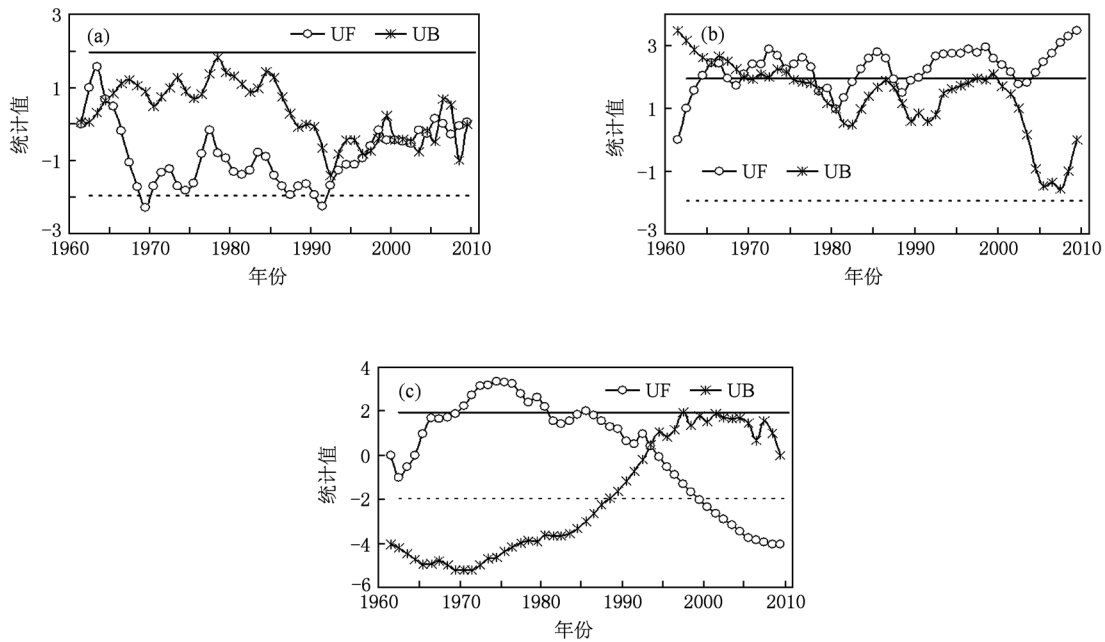


图21 散射辐射典型站点 M-K 突变检测 (a) 哈尔滨; (b) 上海; (c) 格尔木

接辐射和散射辐射) 长期演变总体上具有一定的基本特征趋势, 但趋势的升(降)幅度也存在一定区域地带性差异. 其归因除太阳本身要素变化外, 据有关研究, 可能与云量<sup>[31]</sup>、大气气溶胶<sup>[32-34]</sup>等有关, 还有不同地理气候区环境要素<sup>[35]</sup>对全球变化、气候变化的响应不同, 也会影响各地区太阳辐

射长期变化趋势特征的差异. 另外, 我国主要太阳辐射观测站点大部分位于城市, 随着各城市发展的差异, 其影响太阳辐射的环境要素特征变化也有较大差异. 因而, 也会造成不同地理区域太阳辐射变化趋势的差异, 这些差异的原因和机理还有待进一步研究.

- [1] Zuo D K, Zhou Y H, Xiang Y Q, Zhu Z H, Xie X Q 1991 *Studies on Radiation in the Epigeosphere* (Beijing: Science Press) p1 (in Chinese) [左大康、周允华、项月琴、朱志辉、谢贤群 1991 地球表层辐射研究(北京:科学出版社)第1页]
- [2] Shi Y L, Chen C Y, He X J, Rong D G, Shen C J 2006 *Resource Science* (Beijing: Higher Education Press) p395—396 (in Chinese) [石玉林、陈传友、何贤杰、容洞谷、沈长江 2006 资源科学(北京:高等教育出版社)第395—396页]
- [3] Xia X A 2010 *Ann. Geophys.* **28** 1121
- [4] Chen D, Zhou B, Hao N, Chen L M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5555 (in Chinese) [陈丹、周斌、郝楠、陈立民 2006 物理学报 **55** 5555]
- [5] Luo Y F, Lü D R, Li W L, Zhou X J 2000 *Chin. Sci. Bull.* **45** 549 (in Chinese) [罗云峰、吕达仁、李维亮、周秀骥 2000 科学通报 **45** 549]
- [6] “Atmospheric Science Dictionary” Editorial Board 1994 *Atmospheric Science Dictionary* (Beijing: China Meteorological Press) p803 (in Chinese) [《大气科学词典》编委会 1994 大气科学词典(北京:气象出版社)第803页]
- [7] Zha L S 1996 *Sci. Geograph. Sin.* **16** 232 (in Chinese) [查良松 1996 地理科学 **16** 232]
- [8] Shi G Y, Hayasaka T, Ohmura A, Chen Z H, Wang B, Zhao J Q, Che H Z, Xu L 2008 *J. Appl. Meteorol. Climatol.* **47** 1006
- [9] Yang S P, Wang K L, Lü S H 2007 *Acta Energ. Solar. Sin.* **28** 227 (in Chinese) [杨胜朋、王可丽、吕世华 2007 太阳能学报 **28** 227]
- [10] Li X W, Li W L, Zhou X J 1998 *Quart. J. Appl. Meteorol.* **9** 24 (in Chinese) [李晓文、李维亮、周秀骥 1998 应用气象学报 **9** 24]
- [11] Che H Z, Shi G Y, Zhang X Y, Arimoto R, Zhao J Q, Xu L, Wang B, Chen Z H 2005 *Geophys. Res. Lett.* **32** L06803
- [12] Gilgen H, Wild M, Ohmura A 1998 *J. Clim.* **11** 2042
- [13] Wild M 2009 *J. Geophys. Res.* **114** D00D16
- [14] Wild M, Gilgen H, Roesch A, Ohmura A, Long C N, Dutton E G, Forgan B, Kallis A, Russak V, Tsvetkov A 2005 *Science* **308** 847
- [15] Wen X H, Shang K Z, Wang S G, Yang D B, Fan W Y 2008 *J. Desert Res.* **28** 554 (in Chinese) [文小航、尚可政、王式功、杨德保、樊文雁 2008 中国沙漠 **28** 554]
- [16] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M 2004 *Theor. Appl. Clim.* **78** 217
- [17] Zhu C H 1985 *Acta Energ. Solar. Sin.* **6** 1 (in Chinese) [祝昌汉 1985 太阳能学报 **6** 1]
- [18] Zhu C H 1984 *Acta Energ. Solar. Sin.* **5** 242 (in Chinese) [祝昌汉 1984 太阳能学报 **5** 242]
- [19] Zhao D, Luo Y, Gao G, Zhu C H 2009 *Acta Energ. Solar. Sin.* **30** 946 (in Chinese) [赵东、罗勇、高歌、祝昌汉 2009 太阳能学报 **30** 946]
- [20] Wen D M, Zhang W Z 1984 *J. Nanjing Inst. Meteorol.* **1** 28 (in Chinese) [翁笃鸣、张文宗 1984 南京气象学院学报 **1** 28]
- [21] Skartveit A, Olseth J A 1997 *Proceedings of the Third Satellight Meeting* Les Marecottes, Switzerland, January 16—17, 1997 p1
- [22] Li R, Ji G L, Yang W, Lü L Z, Zhou X P 2004 *Plat. Meteorol.* **23** 116 (in Chinese) [李韧、季国良、杨文、吕兰芝、周晓平 2004 高原气象 **23** 116]
- [23] “Climatological Atlas of the People’s republic of China” Editorial Board 2002 *Climatological Atlas of the People’s Republic of China.* (Beijing: China meteorological Press) p6—7 (in Chinese) [《中华人民共和国气候图集》编委会 2002 中华人民共和国气候图集(北京:气象出版社)第6—7页]
- [24] Wei F Y 2007 *Statistic Diagnose and Foreshadow Technology in Present Climate* (Beijing: Meteorological Press) (in Chinese) [魏凤英 2007 现代气候统计诊断与预测技术(北京:气象出版社)]
- [25] Fu C B, Wang Q 1992 *Chin. J. Atmosph. Sci.* **16** 482 (in Chinese) [符淙斌、王强 1992 大气科学 **16** 482]
- [26] Zhao D 2009 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology) (in Chinese) [赵东 2009 博士学位论文(南京:南京信息工程大学)]
- [27] Du C L, Shen X Y, Chen W M, Shi S H 2008 *J. Nanjing Inst. Meteorol.* **31** 200 [杜春丽、沈新勇、陈渭民、施帅红 2008 南京气象学院学报 **31** 200]
- [28] Zhang X Q, Peng L L, Zheng D, Tao J 2007 *Acta Geograph. Sin.* **62** 959 (in Chinese) [张雪芹、彭莉莉、郑度、陶杰 2007 地理学报 **62** 959]
- [29] Wang B Z, Pan G D 1982 *Acta Meteorol. Sin.* **40** 443 (in Chinese) [王炳忠、潘根娣 1982 气象学报 **40** 443]
- [30] Du J, Bian D, Hu J, Liao J, Zhou M J 2007 *Acta Geograph. Sin.* **62** 492 (in Chinese) [杜军、边多、胡军、廖健、周明君 2007 地理学报 **62** 492]
- [31] Sun X M, Han Y P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 682 (in Chinese) [孙贤明、韩一平 2006 物理学报 **55** 682]
- [32] Shen Y B, Zhao Z C, Shi G Y 2008 *Adv. Earth Scie.* **23** 915 (in Chinese) [申彦波、赵宗慈、石广玉 2008 地球科学进展 **23** 915]
- [33] Han Y, Wang T J, Rao R Z, Wang Y J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7396 (in Chinese) [韩永、王体健、饶瑞忠、王英俭 2008 物理学报 **57** 7396]
- [34] Wang B Z, Liu G S 1992 *Acta Energ. Solar. Sin.* **13** 79 (in Chinese) [王炳忠、刘庚山 1992 太阳能学报 **13** 79]
- [35] Zeng Y, Qiu X F, He Y J, Liu C M 2008 *Chin. J. Geophys.* **51** 991 (in Chinese) [曾燕、邱新法、何永健、刘昌明 2008 地球物理学报 **51** 991]

## Variation trend of direct and diffuse radiation in China over recent 50 years\*

Ma Jin-Yu<sup>1)2)†</sup> Liang Hong<sup>3)</sup> Luo Yong<sup>2)</sup> Li Shi-Kui<sup>3)</sup>

1) (*College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*)

2) (*National Climate Center, Beijing 100081, China*)

3) (*Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081, China*)

(Received 13 August 2010; revised manuscript received 9 September 2010)

### Abstract

Using the direct and diffuse solar radiation data during 1961—2009 from 14 stations and during 1961—1991 from 49 stations in China, and the method of linear regression (taken time as an independent variable), wavelet analysis and Mann-Kendall statistical test, we analyze the characteristics of the direct and diffusion radiation from different aspects including decadal variation, long-term seasonal change, inter-decadal anomaly, cycle and abrupt change. The results are as follows. 1) The spatial and temporal distribution of the climatic trend for the direct and diffuse radiation are revealed by using the normalized climatic tendency coefficient. At the same time, these results are comparable. 2) The direct solar and diffuse radiation in China show decreasing trend, but there are many differences in region, inter-annual and seasonal trend. 3) Based on the characteristics of the geographical distribution on observation stations and according to the climate zone, the classification and the statistical analysis of the percentage of site occupation the long-term changes of the radiation can be clearly shown to have the characteristics of area and local difference. 4) Using wavelet and Mann-Kendall test method, the statistical results show that the radiations in different regions have different periods and abrupt change. 5) The long-term variations of the direct and diffuse radiation in most big cities turn to decrease more obviously than in other cities. Some. Other studies show that such a climatic phenomenon may be caused by environmental factor change of urbanization related to the difference in development speed between cities.

**Keywords:** direct radiation, diffuse radiation, trend of change, wavelet analysis

**PACS:** 96. 60. Ub, 92. 60. Vb, 92. 70. Kb

---

\* Project supported by the Young Scientist Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40905038), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40775020), and the Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant No. GYHY200706030).

† E-mail: m jy0525@163. com