



论文

近 50 年中国太阳总辐射长期变化趋势

马金玉^{①*}, 罗勇^②, 申彦波^③, 梁宏^④, 李世奎^④

① 中国气象局工程咨询中心, 北京 100081;

② 清华大学地球系统科学研究中心, 北京 100084;

③ 中国气象局风能太阳能资源中心, 北京 100081;

④ 中国气象科学研究院, 北京 100081

* E-mail: mgy0525@163.com

收稿日期: 2011-12-07; 接受日期: 2012-06-29

公益性行业(气象)科研专项(编号: GYHY201006036)、中国科学院知识创新工程大气所联合创新青年学者计划(编号: IAP09303)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2010CB428401)资助

摘要 利用具有长年代(1961~2009 年)的全国 57 个太阳总辐射观测站的地面太阳总辐射以及一些相关气象要素的观测资料, 采用线性倾向估计、小波分析和 Mann-Kendall 统计检验等方法, 分析地面太阳总辐射的变化趋势特征。结果表明: 在 57 个站中, 地面太阳总辐射长期变化趋势通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的有 33 个站, 总体呈下降趋势, 但随区域有所差异。其年代际距平变化趋势为: 20 世纪 60 年代和 70 年代以上升趋势为主, 但在 70 年代逐渐转为下降, 80 年代以后以下降明显为主, 90 年代以后个别站点略有上升。其累积距平的变化趋势有上升-下降型、上升-下降-略上升型、上升-下降-上升型和变化不明显型四种类型。其年内变化, 以冬季下降最为明显, 下降显著的站点最多, 而春、夏、秋季下降明显的站点较多。地面年太阳总辐射的主要周期有 6~9, 10~13, 29~33 a, 突变时段大多发生在 20 世纪 70 年代。导致以上变化的原因很复杂, 从有关要素与地面年太阳总辐射的统计关系看, 以年平均日照百分率、年平均风速和年平均低云量的关系较大, 还有人类活动引起的气候变化导致的影响, 这些要素在各站点的显著性分布具有一定的区域性和局地性。其中, 年平均日照百分率和年平均风速与地面年太阳总辐射呈正相关的站点较多, 具有普遍意义。

关键词

太阳总辐射

线性倾向估计

Mann-Kendall 突变检验

小波分析

太阳辐射是自然环境中各种物理过程的主要能量来源, 是天气、气候形成和演变的基本动力^[1~3]。国外学者对地面太阳总辐射的变化趋势进行了许多研究, 发现 1960~1990 年全球多个区域地面太阳总辐射呈减少趋势^[4,5], 但之后这种减少趋势并未继续^[6]。国内学者对我国地面太阳总辐射状况进行了研究^[7~9],

在过去 40 a 里(20 世纪 60~90 年代), 我国地面年太阳总辐射的年代际变化总体上呈减少趋势^[10,11], 90 年代与 40 年平均相比, 西北地区 and 东北地区减少幅度小于西南、华南、华北和华东, 其中华东减少幅度最大, 平均约为 6%。地面太阳总辐射减少可能与人类活动、一次性能源消耗量增加, 进而导致大气污染程度

加大等有关^[12,13]。李晓文等^[12]、Che 等^[14]分别研究了我国 1960~1990 年和 1960~2000 年地面年太阳总辐射的年平均距平变化, 认为 1960~1990 年我国地面年太阳总辐射呈下降趋势, 并推测可能与人为气溶胶的排放有关。但后者发现从 1990 年开始, 地面年太阳总辐射发生转折, 出现明显的上升, 持续到 1994 年。过去的研究揭示了我国不同地区地面年太阳总辐射的幅度变化和时间变化存在明显差异^[15], 并且认为可能与地理纬度、云量和大气环境质量有关, 如陈志华等^[15]、Zhang 等^[16]的研究反映了不同区域地面太阳总辐射状况的差异。但有关不同地区地面年太阳总辐射变化趋势的转折和周期变化的研究不多。另外, 由于以往站点分布不均和资料年代的限制, 我国地面年太阳总辐射长年代的变化趋势是否具有明显的区域性, 在这方面缺乏系统的研究。因此, 本文采用全国目前具有近 50 年地面年太阳总辐射长期变化趋势通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的长年代观测站点, 采用统一分类标准, 对全国和区域的年、季节地面太阳总辐射长期变化趋势特征进行系统分析。

1 数据与方法

1.1 数据来源

目前, 我国地面太阳总辐射观测站点为 98 个, 其观测年代长短不一。本研究从全国选取了具有长时间序列(1961~2009 年)的 57 个地面太阳总辐射观测站的辐射及相关要素观测数据, 这些数据全部来自国家气象信息中心, 其中辐射数据由国家气象信息中心按 WRR 计量标准进行了修订, 将全部数据统一为同一个标准。所有数据均经过严格的质量控制和检查, 质量良好。观测站点分布见图 1。对个别缺测数据, 采用该站的相邻年值(月值)的均值代替。

1.2 研究方法

1.2.1 气候倾向估计

本文采用气候倾向率和气候倾向相对变率两种指标来表达变化趋势。

气候倾向率采用公式(1)进行计算。用 y 表示样本量为 n 的某一要素, 用 x 表示 y 所对应的时间样本序列号, 建立 x 与 y 之间的一元线性回归方程, 见公

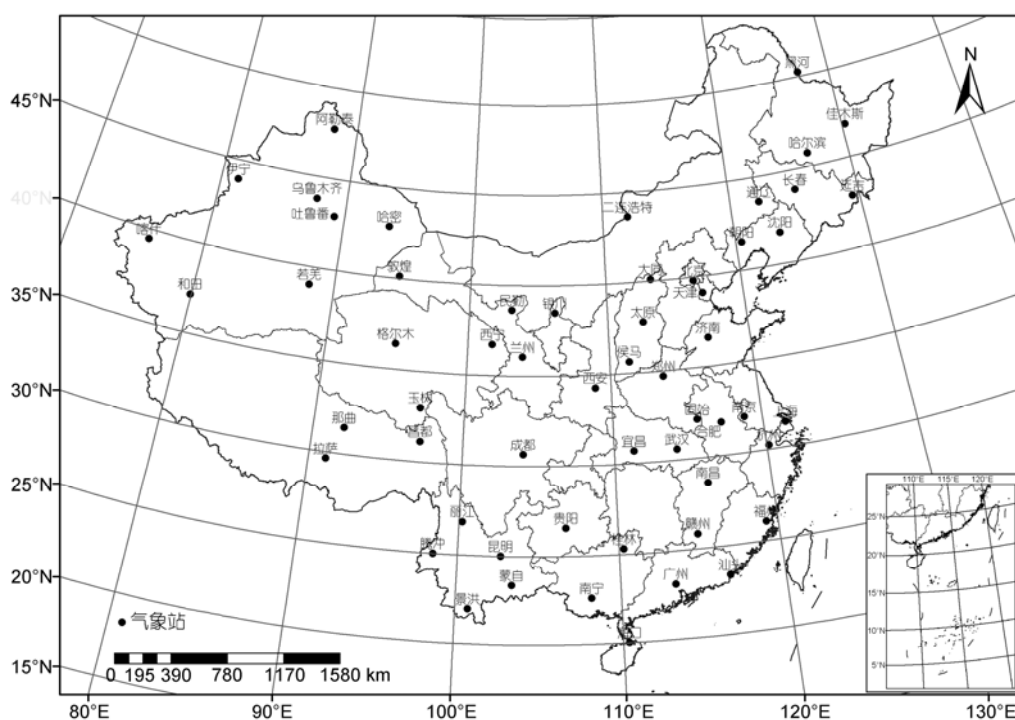


图 1 本文选取的地面太阳总辐射观测站点分布图

式(1):

$$y_i = a + bx_i, (i = 1, 2, \dots, n), \quad (1)$$

式中, a 为回归常数, b 为回归系数, 其值为上升或下降的速率, 即表示上升或下降的倾向度^[17], $b > 0$ 说明随时间 x 增加 y 呈上升趋势, $b < 0$ 说明随时间 x 增加 y 呈下降趋势. 其显著性通过 t 检验进行判断, 其检验统计量为

$$T_c = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}, \quad (2)$$

式中, r 为相关系数. 统计量 T_c 遵从自由度 $(n-2)$ 的 t 分布. 给定显著性水平 α , 若 $|T_c| > T_\alpha$, 则拒绝原假设 H_0 , 认为 y 的变化趋势是显著的. 本文主要选取通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验的站点进行分析. 为便于分析, 将系数 b 放大 10 倍, 即为地面太阳总辐射每 10 a 增(减)的幅度.

公式(1)中带量纲的气候倾向率可直观地反映各站地面年太阳总辐射趋势增(减)量的变化速率, 但不能反映其增(减)相对的幅度. 因此, 为了比较各站地面太阳总辐射变化趋势的相对幅度, 采用气候倾向相对变率, 其计算见公式(3):

$$k = [(b/a) \times 50] \times 100\%, \quad (3)$$

式中, k 是以 50 a 为单元的气候倾向相对变率(单位: %/50 a), a 和 b 同公式(1).

1.2.2 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 小波对地面太阳总辐射进行周期性分析. 计算方法详见参考文献[17]. 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, 它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.

给定小波函数 $\phi(t)$, 时间序列 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换定义为

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \phi' \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (4)$$

式中, $W_f(a, b)$ 为小波变换系数, 通过以 b 为横坐标、 a 为纵坐标绘制关于 $W_f(a, b)$ 的二维等值线图可以分析

时间序列的多时间尺度变化特征; $\phi'(t)$ 为 $\phi(t)$ 的复共轭函数; a 是尺度因子(频域), 反映小波的周期长度; b 是时间因子(时域), 反映时间上的平移.

将时间域上关于 a 的所有小波变换系数 $W_f(a, b)$ 的平方进行积分, 即为小波方差 $Var(a)$:

$$Var(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 db. \quad (5)$$

小波方差随尺度 a 的变化过程称小波方差图, 它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.

1.2.3 趋势突变检验方法

检验气候突变有多种方法, 本研究采用 Mann-Kendall 法对近 50 年地面年太阳总辐射长时间序列进行突变检验. Mann-Kendall 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^[18,19]. 计算方法详见参考文献[17]. 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有明显的交叉点, 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.

该方法以气候平稳为前提, 并且这序列是随机独立的, 其概率分布等同. 在原假设 H_0 : 气候序列没有变化的情况下, 设此气候序列 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$, m_i 表示第 i 个样本 $x_i > x_j$ ($1 \leq j \leq i$) 的累计数, 定义一统计量:

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i, \quad (2 \leq k \leq N). \quad (6)$$

在原序列随机独立的假设下, d_k 的均值、方差分别为

$$\begin{cases} E[d_k] = k(k-1)/4, \\ \text{var}[d_k] = k(k-1)(2k+5)/72, \end{cases} \quad (2 \leq k \leq N), \quad (7)$$

将 d_k 标准化:

$$u(d_k) = (d_k - E[d_k]) / \sqrt{\text{var}[d_k]}. \quad (8)$$

这里 $u(d_k)$ 为标准分布, 其概率 $\alpha_1 = \text{prob}(|u| > |u(d_k)|)$ 可以通过计算或查表获得. 给定一显著性水平 α_0 , 当 $\alpha_1 > \alpha_0$ 时, 接受原假设 H_0 ; 当 $\alpha_1 < \alpha_0$ 时, 则拒绝原假设 H_0 , 它表示此序列将存在一个强的增长或减少趋势, 所有 $u(d_k)$ ($1 \leq k \leq N$) 将组成一条曲线 UF , 通过信度检验可知其是否有变化趋势. 把此方法引

用到反序列中, $\overline{m_i}$ 表示第 i 个样本 x_i 大于 $x_j (i \leq j \leq N)$ 的累计数, 当 $i' = N + 1 - i$ 时, 如果 $\overline{m_i} = m_{i'}$, 则反序列的 $\overline{u}(d_i)$ 由下式给出:

$$\begin{cases} \overline{u}(d_i) = -u(d_{i'}), & (i = 1, 2, \dots, N). \\ i' = N + 1 - i, \end{cases} \quad (9)$$

$\overline{u}(d_i)$ 将组成一条曲线 UB , 当曲线 UF 超过信度线, 即表示存在明显的变化趋势, 如果曲线 UF 和 UB 的交叉点位于信度曲线之间, 这点便是突变的开始点.

2 结果分析

2.1 总体变化趋势

2.1.1 显著性检验

由表 1 可见, 在全国具有长时间序列(1961~2009 年)的 57 个地面太阳总辐射站中, 地面年太阳总辐射变化趋势通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验的有 33 个站, 每 50 年的气候倾向相对变率较大, 负值为 $-22.8\% \sim -4.3\%$, 正值仅有一个站, 即民勤站, 其气候倾向相对变率为

7.8%, 其中 78.8% 的站点的气候倾向相对变率小于 -8.0% . 由表 2 可见, 未通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验的有 24 个站, 每 50 年的气候倾向相对变率都较小, 其负值为 $-8.36\% \sim -0.50\%$, 正值为 $1.23\% \sim 4.46\%$, 其中 58.3% 的站点的气候倾向相对变率小于 -3.0% .

2.1.2 气候倾向率分布

本文所采用的气候倾向率是通过直线回归方法计算的带量纲的一种气候倾向指标, 是目前研究气候变化趋势常用的一种统计方法, 见文献[17]. 表 1 详细给出了近 50 a 通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验站点的地面年太阳总辐射每 10 a 的气候倾向率、相关系数以及线性回归公式. 由表 1 可见, 气候倾向率的变化范围为 $-257.1 \sim 91.0$ MJ/10 a, 倾向率为负值(下降)的站点占总站数的 97.0%, 正值(上升)的仅占 3.0%. 下降最大的站可达 -257.15 MJ/10 a(太原), 上升最大的站可达 91.0 MJ/10 a(民勤).

由表 3 可见, 近 50 a 全国通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验的站点总体呈下降趋势, 仅有个别站点呈上升趋势. 其中, 下降明显和下降显著的站点分别占 57.6% 和 39.4%, 这与许多研究认为年太阳总辐射基本为下降趋势的结果一致.

表 1 通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验站点的地面年太阳总辐射气候倾向率及气候倾向相对变率^{a)}

站名	倾向相对变率 (%/50 a)	倾向率 (MJ/10 a)	倾向率 线性回归公式	站名	倾向相对变率 (%/50 a)	倾向率 (MJ/10 a)	倾向率 线性回归公式
武汉	-22.8	-228.9	$y = -22.9x + 5029.1$	喀什	-11.7	-141.8	$y = -14.2x + 6070.4$
太原	-22.0	-257.1	$y = -25.7x + 5851.3$	沈阳	-10.4	-108.3	$y = -10.8x + 5195.0$
北京	-21.8	-256.6	$y = -25.7x + 5891.1$	银川	-9.9	-124.6	$y = -12.5x + 6315.4$
成都	-20.4	-161.2	$y = -16.1x + 3949.8$	宜昌	-9.7	-81.1	$y = -8.1x + 4185.5$
固始	-20.1	-213.7	$y = -21.4x + 5319.5$	乌鲁木齐	-9.6	-104.4	$y = -10.4x + 5462.9$
南昌	-19.2	-193.0	$y = -19.3x + 5017.0$	上海	-9.0	-86.9	$y = -8.7x + 4824.7$
侯马	-17.7	-192.9	$y = -19.3x + 5455.4$	伊宁	-8.6	-99.2	$y = -9.9x + 5759.4$
济南	-16.3	-174.0	$y = -17.4x + 5349.2$	赣州	-8.5	-80.9	$y = -8.1x + 4761.0$
天津	-15.6	-172.9	$y = -17.3x + 5537.6$	玉树	-8.1	-102.8	$y = -10.3x + 6377.6$
大同	-15.1	-183.3	$y = -18.3x + 6071.0$	和田	-7.9	-96.4	$y = -9.6x + 6119.1$
西宁	-15.0	-188.3	$y = -18.8x + 6290.2$	哈密	-7.7	-101.2	$y = -10.1x + 6573.1$
南京	-14.2	-140.6	$y = -14.1x + 4936.1$	阿勒泰	-7.2	-82.7	$y = -8.3x + 5717.5$
西安	-13.8	-133.1	$y = -13.3x + 4808.4$	郑州	-6.7	-67.1	$y = -6.7x + 5031.7$
广州	-13.7	-126.1	$y = -12.6x + 4591.9$	格尔木	-5.0	-71.3	$y = -7.1x + 7192.3$
吐鲁番	-13.4	-162.9	$y = -16.3x + 6073.4$	敦煌	-4.3	-56.6	$y = -5.7x + 6590.4$
合肥	-13.0	-123.9	$y = -12.4x + 4784.0$	民勤	7.8	91.0	$y = 9.1x + 5821.7$
拉萨	-12.1	-193.5	$y = -19.4x + 7966.6$				

a) 表 1 中各站均通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验

表 2 未通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验站点的地面年太阳总辐射气候倾向率及气候倾向相对变率^{a)}

站点	倾向相对变率 (%/50 a)	倾向率(MJ/10 a)	倾向率 线性回归公式	站名	倾向相对变率 (%/50 a)	倾向率 (MJ/10 a)	倾向率 线性回归公式
桂林	-8.36	-72.62	$y = -7.3x + 4343.5$	福州	-3.17	-28.66	$y = -2.9x + 4524.1$
昌都	-7.66	-97.54	$y = -9.8x + 6369.6$	延吉	-3.05	-29.06	$y = -2.9x + 4764.3$
贵阳	-6.38	-48.82	$y = -4.9x + 3824.7$	朝阳	-2.67	-27.97	$y = -2.8x + 5244.8$
蒙自	-6.27	-72.78	$y = -7.3x + 5805.9$	哈尔滨	-2.37	-22.66	$y = -2.3x + 4775.3$
兰州	-6.20	-68.23	$y = -6.8x + 5502.7$	丽江	-2.19	-27.43	$y = -2.7x + 6269.6$
若羌	-5.29	-66.42	$y = -6.6x + 6283.1$	黑河	-1.98	-18.52	$y = -1.9x + 4672.0$
杭州	-4.39	-38.29	$y = -3.8x + 4360.4$	通辽	-1.20	-12.22	$y = -1.2x + 5112.7$
长春	-4.10	-41.67	$y = -4.2x + 5082.8$	佳木斯	-0.81	-7.29	$y = -0.7x + 4534.9$
南宁	-3.85	-36.17	$y = -3.6x + 4697.0$	腾冲	-0.50	-5.48	$y = -0.5x + 5535.7$
海口	-3.69	-38.24	$y = -3.8x + 5178.3$	景洪	1.23	13.74	$y = 1.4x + 5585.0$
二连浩特	-3.48	-44.32	$y = -4.4x + 6375.7$	那曲	1.75	21.88	$y = 2.2x + 6268.6$
汕头	-3.23	-33.26	$y = -3.3x + 5150.7$	昆明	4.46	47.50	$y = 4.7x + 5325.60$

a) 表中各站均未通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验

表 3 通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验的站点的地面年太阳总辐射气候倾向率类型分布

趋势类型	气候倾向率 (MJ/10 a)	占总站数的 百分比(%)	站数(个)
下降显著	<-150	39.4	13
下降明显	-150~0	57.6	19
上升明显	0~150	3.0	1
上升显著	>150		
合计			33

表 4 通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验的站点的地面年太阳总辐射气候倾向相对变率类型分布

趋势类型	气候倾向相对变率 (%/50 a)	百分比(%)	站数(个)
下降显著	<-15	30.3	10
下降明显	-15~0	66.7	22
上升明显	0~15	3.0	1
上升显著	>15		
合计		100.0	33

2.1.3 气候倾向相对变率分布

气候倾向率与气候倾向相对变率的趋势类型分布是不一致的,这是由于两种指标的意义不同,其趋势类型也不尽相同.气候倾向率是一种带量纲单位的数值,只能表示数量增(减)的大小.而气候倾向相对变率是表示不带量纲的气候变化趋势倾向相对变幅,它是表示增(减)相对幅度的大小,用气候倾向相对变率可对各站进行比较,其比较的意义更加明确客观.由表 4 可见,近 50 a 全国通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验的站点的地面年太阳总辐射总体呈下降趋势,其中,分别有 66.7%和 30.3%的站点呈下降明显和下降显著,仅有个别站点为上升明显.

2.1.4 年代际差异

本文将地面年太阳总辐射的年代际变化距平百分比分为五类,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的变化趋势,其分类标准见表 5.

全国地面年太阳总辐射通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验

表 5 地面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

的站点的年代际距平变化分类如表 6 所示. 20 世纪 60 年代,上升明显的站点最多,占总站数的 69.7%,其他依次分别为上升显著(27.3%)和变化不明显(3.0%). 20 世纪 70 年代,上升明显的站点居多,占 69.7%,变化不明显和下降明显的分别占 21.2%和 9.1%. 20 世纪 80 年代,下降明显的站点最多,占 72.7%,其他依次分别为下降显著(15.2%)和变化不明显(12.1%). 20 世纪 90 年代和 2001~2009 年,下降明显的站点最多,占 69.7%,其次为变化不明显,占 21.2%. 总之,地面年太阳总辐射在 20 世纪 60 和 70 年代以上升趋势为主,80 年代开始以下降明显为主,90 年代以后个别站点略有上升. 根据有关文献[20],20 世纪 80 年代出现全国范围地面太阳总辐射偏低,可能与北美的 St Helens

表 6 地面年太阳总辐射通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验的站点的年代际距平分类

趋势类型	距平百分比(%)	1961~1970	1971~1980	1981~1990	1991~2000	2001~2009
下降显著	-20~<-10			15.2	3.0	3.0
下降明显	-10~<-1		9.1	72.7	69.7	69.7
变化不明显	-1~1	3.0	21.2	12.1	21.2	21.2
上升明显	>1~10	69.7	69.7		6.1	6.1
上升显著	>10~20	27.3				

火山(1980 年)、墨西哥的 E1 Chichon 火山(1982 年)和印尼的 Krakatoa 火山(1988 年)喷发有关, 火山灰进入对流层使地面太阳直接辐射减少, 导致对辐射敏感的高原地区地面太阳总辐射量显著减少. 另外, 1991 年菲律宾的 Pinatubo 火山喷发, 气溶胶到达我国一些地区(如北京), 使北京地区的平流层气溶胶增加, 从而影响到达地面的太阳辐射^[21,22].

累积距平是表示趋势变化的线性波动, 可以反映年代际变化的升降起伏, 而距平曲线则是表示在平均线上的年际波动, 因此采用累积距平来表示年代际的长期趋势变化更为直观和合理. 累积距平的具体计算方法详见参考文献[17]. 以下选取地面年太阳总辐射累积距平变化趋势的四种不同类型代表站点, 来分别阐述其升(降)变化趋势和转折点(见图 2). 第一类为上升-下降型, 以沈阳、武汉和北京站为代表(图 2(a)), 20 世纪 60 年代呈上升趋势, 90 年代以后一直呈下降趋势, 70 和 80 年代有波动变化. 其中, 沈阳、武汉和北京站的转折点分别在 1974, 1979 和 1981 年. 第二类为上升-下降-略上升型, 以乌鲁木齐、广州和成都站为代表(见图 2(b)), 20 世纪 60 年代呈上升趋势, 80 和 90 年代呈下降趋势, 2000 年以后略有小幅上升趋势. 其中, 乌鲁木齐、广州和成都站的转折点分别在 1974, 1977 和 1981 年. 第三类为上升-下降-上升型, 以民勤站为代表, 其累积距平趋势变化为: 20 世纪 60 年代波动上升, 70~80 年代下降, 1990~2009 年一直呈上升趋势, 其转折点为 1972 和 1988 年. 第四类为变化不明显型(见图 2(d)), 以杭州、黑河和二连浩特站为代表(这三个站点均不通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验), 其累积距平呈缓慢的波动变化, 且变化幅度较小.

由图 2 和 3 可见, 各代表站点的地面年太阳总辐射和年平均日照百分率累积距平的变化趋势基本一致, 可见地面年太阳总辐射变化与年平均日照百分率变化密切相关, 这一结果与有关文献研究结果类似^[23].

2.1.5 基于小波分析的地面年太阳总辐射周期变化

采用 Morlet 小波对全国地面年太阳总辐射变化趋势通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验的长年代(1961~2009 年)站点观测资料进行周期分析. 结果表明: 在华北及东北区, 大部分站的周期为 5~7, 9~13, 18~21 和 30~33 a; 在华中、华南及西南区, 大部分站的周期为 7~8, 11~14 和 29~33 a; 在西北及青藏高原区, 大部分站的周期为 6~8, 10~14 和 21~22 a. 归纳起来看, 地面年太阳总辐射的主要周期有 6~9, 10~13, 29~33 a, 但其周期在各区域有异同.

从各区域中挑选一些站点作为图例说明, 如图 4 所示. 例如: 从图 4(b)乌鲁木齐站地面年太阳总辐射的小波方差来看, 其年际周期为 6~9 a, 年代际周期为 35 a 以上. 但由于资料年代不够长, 35 a 以上的长周期变化还需今后更长的资料进一步分析验证. 从图 4(a)小波变换图来看, 该站的地面年太阳总辐射现正处于偏多期的后期, 今后将进入偏少期.

2.1.6 趋势突变检验

突变时间是表示地面年太阳总辐射长期变化趋势序列发生变化的一个突变时段, 本文采用 Mann-Kendall 法对全国地面年太阳总辐射变化趋势通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的站点的近 50 a 变化趋势进行突变检验, 取显著性水平 $\alpha=0.05$, 则相应的检验临界值 $U_{\alpha}=\pm 1.96$, 根据 UF 和 UB 两条曲线相交的点位于信度曲线之间的特点, 可得各站突变时段见表 7. 在华北和东北区, 突变主要发生在 20 世纪 70 年代初期和中期; 在华中、华南及西南区, 突变主要发生在 60 年代末 70 年代初; 在西北及青藏高原, 突变主要发生在 60 年代末期、70 年代中期和 80 年代初期. 总的来看, 各站地面年太阳总辐射的突变时段大多发生在 70 年代, 但各区域略有差异.

图 5 为代表站点的地面年太阳总辐射 Mann-Kendall 突变检验结果, 其中乌鲁木齐的突变时段在

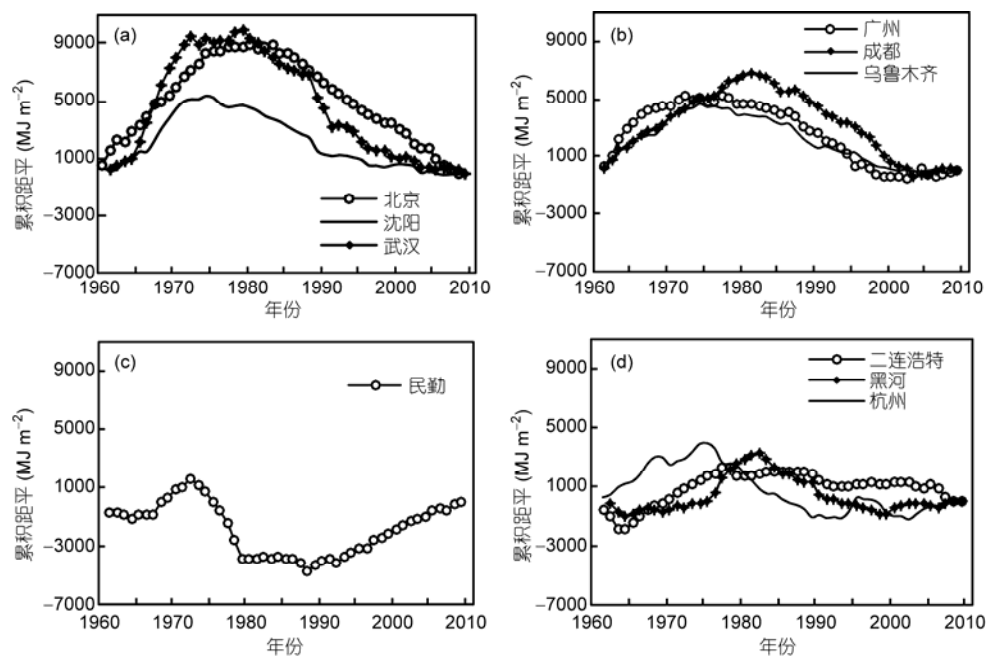


图 2 代表站点地面年太阳总辐射变化累积距平

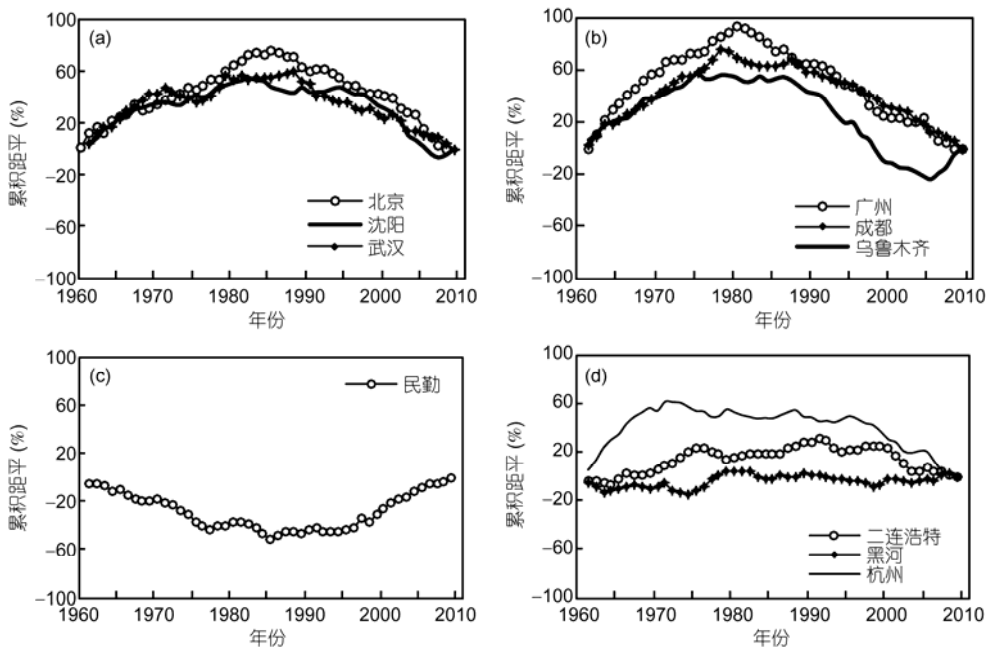


图 3 代表站点年平均日照百分率变化累积距平

1967~1971 年, 上海在 1971 年, 广州在 1967 年, 而北京没有通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验.

2.2 季节差异

表 8 以 4, 7, 10, 1 月分别代表春、夏、秋、冬四

季, 表中选取站点的地面太阳总辐射变化趋势均通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验.

由表 8 可见, 各季节中, 以冬季地面太阳总辐射通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验的站点最多, 下降最为明显, 其中下降显著和下降明显的站点分别占总站点数的

表 7 近 50 a 地面年太阳总辐射变化趋势通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验的站点的突变时段

区域	突变时段
华北及东北	北京(1978~1979)、侯马(1989~1994)、济南(1974~1975)、太原(1981~1982)、天津(1974~1975)、大同(1972~1973)、固始(1971~1972)、沈阳(1971~1972)、郑州(1995~1996)、西安(1976~1977)
华中、华南及西南	武汉(1972~1973)、南昌(1969~1970)、成都(1975~1976)、南京(1969~1970)、上海(1971~1972)、赣县(1967~1968)、宜昌(1963~1964, 1967~1968, 1972~1975)、广州(1967~1968)
西北及青藏高原	乌鲁木齐(1967~1971)、阿勒泰(1975~1976)、伊宁(1967~1981, 1986~1990)、吐鲁番(1974~1975)、喀什(1981~1982)、和田(1972~1973)、哈密(1982~1983)、敦煌(1967~1968)、西宁(1973~1974)、格尔木(1992~1993)、民勤(1967~1969, 1991~1992)

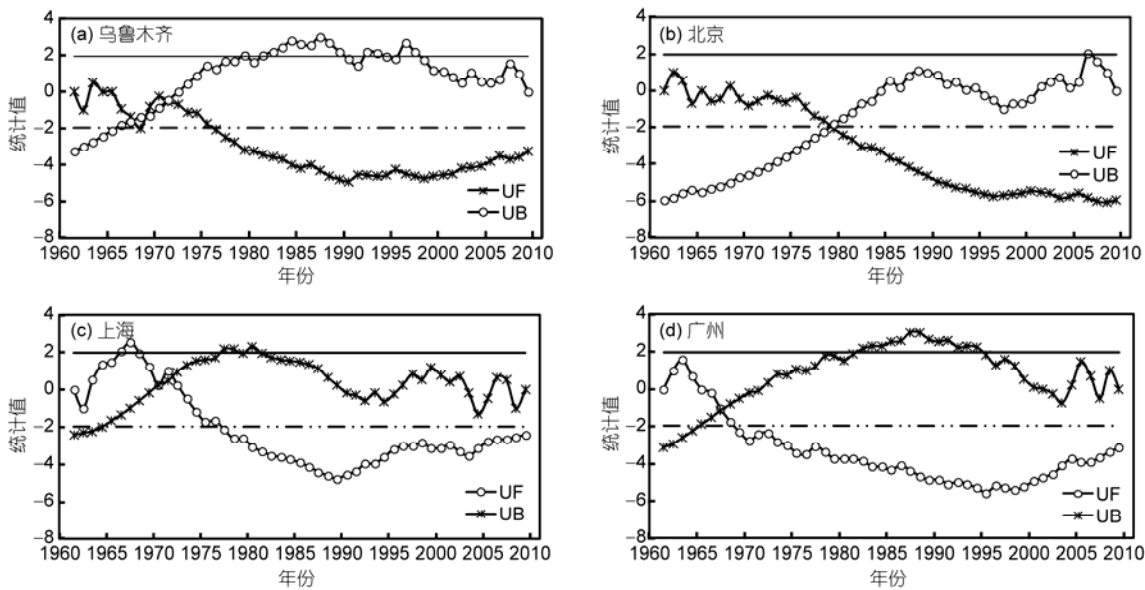


图 5 代表站点地面年太阳总辐射的 Mann-Kendall 突变检验结果

表 8 各季节基于地面太阳总辐射气候倾向相对变率分类占总站数百分比^{a)}

月份	下降显著	下降明显	上升明显	上升显著	总站数
1 月	88.1	11.9			42
4 月	14.3	71.4	14.3		7
7 月	42.1	52.6		5.3	19
10 月	58.3	41.7			24

a) 表 8 中的分类标准见表 4. 单位: %

88.1%和 11.9%, 这可能与冬季气溶胶光学厚度较大有关^[24]. 春季以下降明显为主, 占 71.4%, 夏、秋季下降显著和下降明显的站点分别占 58.3%和 41.7%. 各季上升站点数的比例均低于 15%.

2.3 区域差异

全国近 50 a 地面年太阳总辐射变化趋势通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验的站点中, 从气候倾向相对变率分

类看, 地面年太阳总辐射变化趋势有一定的区域差异. 由表 9 可见, 华北及东北地区下降显著的站点居多, 占该区域总站点数的 70.0%, 其余 30.0%的站点为下降明显. 华中、华南及西南地区下降明显和下降显著的站点依次分别为 66.7%和 33.3%. 西北及青藏高原地区有 92.9%的站点为下降明显, 仅有 7.1%的站点为上升明显.

表 9 各区域基于地面年太阳总辐射气候倾向相对变率分类的站点数占该区总站数百分比^{a)}

区域	下降显著	下降明显	上升明显	上升显著	总站点数
华北及东北	70.0	30.0			10
华中、华南及西南	33.3	66.7			9
西北及青藏高原		92.9	7.1		14

a) 表 9 中选取站点的地面年太阳总辐射变化趋势均通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验, 分类标准见表 4. 单位: %

中国由于海拔高度、纬度、大气透明度以及温度、水、风速等不同因素影响而形成的气候区域差异很大,使得地面太阳总辐射强度存在明显的地域差别,这也可能是造成不同气候区域地面太阳总辐射上升、下降幅度不一样的主要原因。

2.4 影响地面太阳辐射变化趋势的因素分析

影响地面年太阳总辐射变化趋势的因素很多,原因也较复杂。本节表 10 选取全国近 50 a 地面年太阳总辐射变化趋势通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的 30 个站点进行分析,主要选择一些与地面年太阳总辐射有关的因子,通过相关分析和显著性检验,查明哪些因子与地面年太阳总辐射变化趋势密切相关,是正相关还是负相关,这是原因分析的一个重要内容。这些相关因子与地面年太阳总辐射的相关关系通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的站点占总站点数的百分比按大小依次为:年平均日照百分率(86.7%)、年平均风速(60.0%)、年平均低云量(53.3%)、雾日数(36.7%)、降水日数(36.7%)、年平均气温(30.0%)、年平均降水量(33.3%)、年平均总云量(23.3%)、年平均相对湿度(20.0%)。这些因子的比例分布有的具有区域性,有的具有局地性,主要与该站点周围的气候环境变化有关。例如:年平均日照百分率和年平均风速与地面年太阳总辐射呈正相关分布的站点比较多,具有普遍意义。与年平均日照百分率的关系,全部站点均通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验,且均为正相关,这可能是由于年平均日照百分率与地面年太阳总辐射有密切关系。在与年平均风速的关系中,有 83.3% 的站点(15 个)为正相关,如阿勒泰、吐鲁番、格尔木、西宁、太原、北京、西安、武汉、上海、南昌、广州等站点。

一般认为大气污染物和气溶胶对地面太阳总辐射有显著影响,而风速大有利于气溶胶进行稀释和扩散,地面太阳辐射减少,反之,会使地面太阳总辐射增大。但地面扬沙不仅与风速有关,还与地表状况有关。在干旱沙化的沙漠地区,当风速达到起沙风速以上时,易产生扬沙,增加气溶胶含量,从而引起地面太阳总辐射下降。但是在我国广大的湿润半湿润地区,地表覆盖较好,即使风速达到起沙风速以上,也不易产生明显的扬沙现象。气溶胶与太阳辐射有密切关系,但是气溶胶的资料难以获得,而且据了解目前国内尚未有关于气溶胶系统的观测资料,即使有也是年代较短或零星的,不具有代表性,难以进一

步进行分析佐证。而与气溶胶有关的扬沙日数、浮尘日数和沙尘暴日数等要素,在一年中出现的几率很小,而且是随机的,它们与地面年太阳总辐射没有必然关联,因此本文也不采用这些要素进行统计分析。在表 10 中与地面年太阳总辐射有相关关系的因子之间是否存在机理意义,有的是可以解释的,但有的还有待进一步研究,这是查明影响地面太阳总辐射变化原因的关键。

前述指出的我国地面太阳总辐射变化趋势总体呈下降趋势,导致下降的原因很复杂,主要与云、气溶胶、日照、风速和相对湿度等关系较大。据有关研究认为^[23],我国东部地区轻雾和(或)霾的增加,以及西部地区低云和水汽的增加,都会造成日照下降,导致地面太阳辐射下降。气溶胶不仅可以直接影响日照,而且还可作为云凝结核,通过改变云的物理特性和结构,直接或间接影响地面太阳辐射。根据 IPCC AR4^[25],1950~2000 年间气溶胶对地面短波辐射的负强迫作用快速增强,这可能也是引起地面太阳辐射减少的一个原因^[26~33]。

表 10 中的结果仅是说明两种要素统计的相关关系,但据此并不能说明其原因,因为影响地面太阳辐射变化趋势的原因非常复杂,而且区域和局地的变化趋势也有异同,其各个地区变化趋势的原因也不尽相同,因此其机理性也并非一致,需要有不同影响因素的足够资料对各站的具体情况进行具体分析。目前尚缺乏系统的影响地面太阳辐射的相关要素实际观测资料,除有关个例外,国内外尚未见到有关一致认可的佐证和结论。因此,目前对地面太阳总辐射变化趋势的原因仍是国内外研究的焦点和难题,这方面有待今后进一步研究。

3 讨论与结论

(1) 在具有长年代(1961~2009 年)的全国 57 个地面太阳总辐射观测站点中,地面年太阳总辐射变化趋势通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的有 33 个站,总体呈明显下降趋势,其气候倾向率和气候倾向相对变率都较大。未通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的有 24 个站点,其气候倾向率和气候倾向相对变率都较小,倾向趋势不明显。

(2) 从区域差异看,通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的站点中,华北及东北地区以下降显著的站居多,华

表 10 有关要素与地面年太阳总辐射变化趋势的相关系数(R)及其显著性检验^{a)}

站名	年平均日照 百分率	年平均 风速	年平均 低云量	雾日数	日降水量 ≥0.1 mm 日数	年平均 气温	年平均 降水量	年平均 总云量	年平均 相对湿度
阿勒泰	0.34*	0.56*	-0.56*	-0.04	-0.33*	-0.04	-0.45*	-0.34*	-0.59*
伊宁	-0.10	0.19	-0.19	0.08	0.01	-0.25	-0.22	0.02	0.03
乌鲁木齐	0.56*	0.23	0.11	-0.37*	-0.36*	0.22	-0.57*	0.17	-0.32*
吐鲁番	0.61*	0.69*	-0.15	-0.07	-0.14	-0.46*	-0.25	-0.04	-0.08
哈密	0.24	0.49*	0.31*	0.06	-0.31*	-0.14	-0.13	-0.08	-0.39*
敦煌	0.04	0.02	-0.19	-0.03	-0.26	0.05	-0.30*	0.00	-0.16
民勤	0.40*	-0.18	-0.17	0.01	-0.33*	0.20	-0.10	0.06	-0.23
格尔木	0.36*	0.51*	-0.41*	-	-0.47*	-0.28*	-0.26	-0.03	-0.19
西宁	0.53*	0.52*	0.29*	-0.07	-0.41*	-0.26	-0.21	-0.45*	0.10
大同	0.49*	0.19	0.43*	-0.11	-0.14	-0.38*	-0.37*	0.15	-0.04
银川	0.68*	-0.40*	-0.07	-0.32*	-0.23	-0.59*	-0.02	-0.51*	0.20
太原	0.67*	0.59*	0.56*	-0.30*	0.02	-0.56*	-0.06	-0.17	0.02
沈阳	0.41*	0.22	-0.39*	0.15	-0.07	-0.39*	-0.03	0.00	0.09
北京	0.79*	0.54*	-0.60*	0.31*	-0.21	-0.61*	-0.13	-0.09	0.33*
天津	0.65*	0.46*	0.04	-0.10	-0.04	-0.24	-0.18	-0.15	-0.18
济南	0.69*	0.18	0.22	-0.12	-0.23	-0.20	-0.13	-0.17	-0.36*
拉萨	0.08	0.26	0.37*	-	-0.01	-0.21	0.11	0.02	0.16
玉树	0.30*	-0.08	-0.12	0.00	-0.11	-0.17	-0.18	-0.19	0.11
成都	0.75*	-0.38*	0.63*	0.28*	0.13	-0.17	0.19	-0.19	0.14
西安	0.73*	0.68*	0.46*	0.18	-0.23	-0.08	-0.31*	-0.07	-0.19
郑州	0.51*	0.09	0.08	-0.05	-0.27	-0.01	-0.28*	-0.30*	-0.18
宜昌	0.58*	0.36*	0.27	-0.30*	-0.23	0.38*	-0.23	-0.39*	-0.12
武汉	0.69*	0.60*	0.37*	0.33*	-0.21	-0.25	-0.50*	0.00	0.10
赣州	0.76*	0.14	-0.71*	-0.01	-0.39*	0.15	-0.35*	-0.48*	-0.13
固始	0.69*	0.42*	-0.07	-0.16	-0.39*	0.09	-0.28*	-0.11	-0.20
南京	0.68*	0.17	0.23	-0.30*	-0.21	0.00	-0.25	-0.13	-0.12
合肥	0.71*	-0.49*	-0.39*	-0.35*	-0.34*	0.29*	-0.17	-0.20	-0.26
上海	0.32*	0.35*	-0.08	0.46*	0.04	-0.26	-0.13	0.27	0.28*
南昌	0.43*	0.68*	-0.69*	-0.40*	-0.40*	0.05	-0.31*	-0.12	-0.16
广州	0.74*	0.57*	-0.79*	-0.13	-0.33*	-0.17	-0.25	-0.55*	0.05
R* 占总站数(%)	86.7	60.0	53.3	36.7	36.7	30.0	33.3	23.3	20.0
R* 正相关 站点(%)	100.0	83.3	50.0	36.4	0.0	22.2	0.0	0.0	33.3
R* 负相关 站点(%)	0.0	16.7	50.0	63.6	100.0	77.8	100.0	100.0	66.7

a) *为该要素与地面年太阳总辐射的相关关系通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验, R*表示通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验的站点

中、华南及西南地区以下降明显的站点较多, 西北及青藏高原地区以下降明显的站点最多.

(3) 从时间分布来看, 在通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的站点中, 其年代际距平变化趋势为: 20 世纪 60 年代和 70 年代以上升为主, 但在 70 年代由以上升为主逐渐转为下降, 80 年代以后以下降明显为主, 90 年代以后个别站点略有上升. 从累积距平看, 可分为以下四类: ① 上升-下降型(如沈阳、武汉和北京), 20 世纪 60 年代上升, 90 年代以后一直下降, 70 年代和 80 年代有波动变化; ② 上升-下降-略上升型(如乌鲁木

齐、广州和成都), 60 年代上升, 80 年代和 90 年代下降, 2000 年以后略有小幅上升; ③ 上升-下降-上升型(如民勤), 60 年代波动上升, 70~80 年代下降, 1990~2009 年一直上升; ④ 变化不明显型(如杭州、黑河和二连浩特), 呈小幅波动变化. 年内变化, 以冬季下降最为明显, 80%以上的站点为下降显著, 而春、夏、秋季下降明显的站点较多.

(4) 通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的站点中, 地面年太阳总辐射变化的主要周期有 6~9, 10~13, 29~33 a, 其突变时段大多发生在 20 世纪 70 年代.

影响地面太阳总辐射变化趋势的原因很复杂, 从有关要素与地面年太阳总辐射的统计关系看, 以年平均日照百分率、年平均风速和年平均低云量的关系较大. 其中, 年平均日照百分率、年平均风速与年

太阳总辐射呈正相关, 具有普遍意义. 有的研究认为气溶胶增加是导致地面太阳辐射变化趋势减弱的主要原因, 但目前由于缺乏充足可靠的资料分析佐证, 有待今后开展相关工作.

参考文献

- 1 左大康, 周允华, 项月琴, 等. 地球表层辐射研究. 北京: 科学出版社, 1991
- 2 刘晶淼, 马金玉, 李世奎, 等. 华北平原北部太阳辐射及地表辐射平衡特征分析——基于河北固城站的试验观测研究. 太阳能学报, 2009, 30: 577–585
- 3 申彦波, 赵宗慈, 石广玉. 地面太阳辐射的变化、影响因子及其可能的气候效应最新研究进展. 地球科学进展, 2008, 23: 915–923
- 4 Gilgen H, Wild M, Ohmura A. Means and trends of shortwave irradiance at the surface estimated from global energy balance archive data. J Clim, 1998, 11: 2042–2061
- 5 Liepert B G. Observed reductions of surface solar radiation at sites in the United States and worldwide from 1961 to 1990. Geophys Res Lett, 2002, 29: 61
- 6 Wild M, Ohmura A, Makowski K. Impact of global dimming and brightening on global warming. Geophys Res Lett, 2007, 34: L04702, doi: 10.1029/2006GL028031
- 7 Shi G Y, Hayasaka T, Ohmura A, et al. Data quality assessment and the long-term trend of ground solar radiation in China. J Appl Meteorol Climatol, 2008, 47: 1006–1016
- 8 杨胜朋, 王可丽, 吕世华. 近 40 年来中国大陆总辐射的演变特征. 太阳能学报, 2007, 8: 227–232
- 9 王雅婕, 黄耀, 张稳. 1961~2003 年中国大陆地表太阳总辐射变化趋势. 气候与环境研究, 2009, 14: 405–413
- 10 石玉林. 资源科学. 北京: 高等教育出版社, 2006
- 11 徐群. 近 29 年冬季我国太阳辐射的显著变化. 中国科学 B 辑, 1990, 10: 1112–1120
- 12 李晓文, 李维亮, 周秀骥. 中国近 30 年太阳辐射状况研究. 应用气象学报, 1998, 9: 24–31
- 13 杜春丽, 沈新勇, 陈渭民, 等. 43 年来我国城市气候和太阳辐射的变化特征. 南京气象学院学报, 2008, 31: 200–207
- 14 Che H Z, Shi G Y, Zhang X Y, et al. Analysis of 40 years of solar radiation data from China, 1961–2000. Geophys Res Lett, 2005, 32: L06803, doi: 10.1029/2004GL022322
- 15 陈志华, 石广玉, 车慧正. 近 40 年来新疆地区太阳辐射状况研究. 干旱区地理, 2005, 28: 734–739
- 16 Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M. Analysis of 40 year records of solar radiation data in Shanghai, Nanjing and Hangzhou in Eastern China. Theor Appl Climatol, 2004, 78: 217–227
- 17 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 第 2 版. 北京: 气象出版社, 2007
- 18 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法. 大气科学, 1992, 16: 482–493
- 19 吴洪宝, 吴蕾. 气候变率诊断和预测方法. 北京: 气象出版社, 2005
- 20 文小航, 尚可政, 王式功, 等. 1961~2000 年中国太阳辐射区域特征的初步研究. 中国沙漠, 2008, 28: 554–561
- 21 Wu B Y, Lü D R. Monitoring the evolution of 1991 Pinatubo aerosols over Beijing by combining twilight observations with Lidar Detection. J Geophys Res, 1993, 98: 22995–23001
- 22 白建辉, 王庚辰. 1979~1996 年期间北京地区太阳紫外总辐射的变化趋势. 大气科学, 1998, 22: 709–717
- 23 赵东, 罗勇, 高歌, 等. 1961 年至 2007 年中国日照的演变及其关键气候特征. 资源科学, 2010, 32: 701–711
- 24 韩霄, 张美根, 韩志伟, 等. 东亚地区气溶胶光学厚度时空分布模拟与分析. 中国科学: 地球科学, 2010, 40: 1446–1458
- 25 IPCC. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Solomon S, Qin D, Manning M, et al, eds. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- 26 Mishchenko M I, Geogdzhayev I V, Rossow W B, et al. Long-term satellite record reveals likely recent aerosol trend. Science, 2007, 315: 1543, doi: 10.1126/science.1136709
- 27 Robock A. Volcanic eruptions and climate. Rev Geophys, 2000, 38: 191–219
- 28 Mishchenko M I, Geogdzhayev I V, Cairns B, et al. Past, present, and future of global aerosol climatologies derived from satellite observations: A perspective. J Quant Spectrosc Radiat Transfer, 2007, 106: 325–347
- 29 Mishchenko M I, Geogdzhayev I V. Satellite remote sensing reveals regional tropospheric aerosol trends. Opt Express, 2007, 15: 7423–7438
- 30 Streets D G, Yu C, Wu Y, et al. Aerosol trends over China, 1980–2000. Atmos Res, 2008, 88: 174–182
- 31 张春桂, 彭云峰, 林晶, 等. 福建三大城市群气溶胶遥感监测及时空变化分析. 气象, 2010, 36: 92–99
- 32 张美根, 徐永福, 张仁健, 等. 东亚地区春季黑碳气溶胶源排及其浓度分布. 地球物理学报, 2005, 48: 46–51
- 33 Streets D G, Wu Ye, Chin M. Two-decadal aerosol trends as a likely explanation of the global dimming/brightening transition. Geophys Res Lett, 2006, 33: L15806, doi: 10.1029/2006GL026471