

王晓梅,张山清,普宗朝,等. 2013. 近 50 年乌鲁木齐市太阳能资源时空变化分析. 气象,39(4):443-452.

近 50 年乌鲁木齐市太阳能资源时空变化分析^{*1}

王晓梅¹ 张山清² 普宗朝³ 阿帕尔⁴ 刘卫平¹

1 新疆气象信息中心,乌鲁木齐 830002

2 新疆农业气象台,乌鲁木齐 830002

3 新疆乌鲁木齐市气象局,乌鲁木齐 830001

4 新疆昌吉市气象局,昌吉 831100

提 要: 利用新疆乌鲁木齐地区 9 个气象站 1961—2010 年的逐日日照时数资料和乌鲁木齐站逐日太阳总辐射资料,在使用气候学方法估算出各站逐月太阳总辐射的基础上,采用线性趋势分析和 Mann-Kendall 检测对全市冬、春、夏、秋四季和年日照时数、太阳总辐射变化趋势以及突变特征进行分析,应用混合插值法,在 ArcGis 平台上完成基于数字高程模型(DEM)数据的四季和年日照时数、太阳总辐射及其突变前后变化量的精细化分布式模拟。结果表明:乌鲁木齐市春、夏、秋季和年的日照时数及太阳总辐射总体呈现“平原多,山区少”的空间分布格局,冬季日照时数、太阳总辐射呈现“山区多,平原少”的分布特点。近 50 年来,乌鲁木齐市春、夏季日照时数、太阳总辐射变化趋势不显著,但秋、冬季和年的日照时数及太阳总辐射呈显著的减少趋势,并于 1981 和 1991 年分别发生了突变性的减少,突变前后秋、冬季和年日照时数、太阳总辐射的变化具有明显的区域性差异,减少幅度的空间分布总体呈现“平原多,山区少”的特点。

关键词: 乌鲁木齐市,日照时数,太阳辐射,时空变化, GIS

中图分类号: P461

文献标识码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.04.006

Analysis on Spatial-Temporal Variation of Solar Energy Resource in Urumqi City in Recent 50 Years

WANG Xiaomei¹ ZHANG Shanqing² PU Zongchao³ Apear⁴ LIU Weiping¹

1 Xinjiang Meteorological Information Centre, Urumqi 830002

2 Xinjiang Agrometeorological Observatory, Urumqi 830002

3 Urumqi Meteorological Bureau of Xinjiang, Urumqi 830001

4 Changji Meteorological Office of Xinjiang, Changji 831100

Abstract: Based on the daily sunshine hours data of 9 meteorological stations and daily solar radiation data of Urumqi Meteorological Station from 1961 to 2010 in Urumqi, Xinjiang, the monthly solar radiation of spring, summer, autumn, winter and year from 1961 to 2010 of each meteorological station was estimated by using of climatic methods, and the fundamental spatial-temporal change trends of spring, summer, autumn, winter and annual sunshine hours and solar radiation were analyzed by using of linear trend, Mann-Kendall test and three-dimensional and quadratic trend surface simulation and inverse-distance squared weighting residual error revision based on GIS. The main results show that spring, summer, autumn and annual sunshine hours and solar radiation in Urumqi are more in plain and valley areas than in Tianshan Mountain areas, but winter sunshine hours and solar radiation are more in Tianshan Mountain areas than in plain and valley areas. The variation trends of spring, summer sunshine hours and solar radiation are

* 新疆气象科研项目(201127)资助

2011 年 7 月 9 日收稿; 2012 年 3 月 19 日收修定稿

第一作者:王晓梅,主要从事气候变化研究. Email: wxm0391@126.com

通信作者:张山清,主要从事生态与气候变化研究. Email: zhangshanqing@163.com

not so obvious, but sunshine hours and solar radiation of autumn, winter and year have significantly decreased in recent 50 years, and they had abrupt decrease in 1981 and 1991 respectively. And before and after the sudden change, the autumn, winter and annual sunshine hours and solar radiation had distinct regional differences. In general, the decrease range of sunshine hours and solar radiation shows the characteristics of “more in plain, but less in mountain areas”.

Key words: Urumqi City, sunshine hours, solar radiation, spatial-temporal change, GIS

引 言

太阳辐射是地球生命活动的能量源泉(刘明昌等,2009),也是大气中一切物理过程或现象的基本动力因子(文小航等,2008)。近百年来,在全球矿物燃料过度开采造成能源危机日趋严重、温室气体过量排放导致气候变暖日益加剧的形势下,太阳能作为一种清洁能源受到世人越来越广泛的关注,对太阳能资源的时空变化规律、开发利用潜力的研究和评估也成为国内外学者近年来研究的热点(刘明昌等,2009;文小航等,2008;曹雯等,2008;吴其重等,2010;赵东等,2010;杜尧东等,2003;王学锋等,2009;张雪芬等,1999;张德山等,2005;韩世涛等,2010;Allen et al, 1998)。

乌鲁木齐市地处天山北麓中段,准噶尔盆地南缘,位于 $42^{\circ}45' \sim 45^{\circ}00'N$ 、 $86^{\circ}48' \sim 88^{\circ}58'E$,总面积 $1.4216 \times 10^4 \text{ km}^2$,地形地貌复杂,地势起伏悬殊,总体呈南高北低、东高西低的高程分布格局,山地面积约占总面积的40%左右。气候特点是冬季寒冷漫长,夏季湿润宜人,春、秋季短暂且气温波动大,全年无霜期短,热量资源较少且时空分布不均,气温日较差大,降水少,日照充足,属典型的大陆性气候。由于能源结构不合理,煤炭在乌鲁木齐市一次能源消费量构成中的比例高达70%以上,因此,随着经济、社会的快速发展,近年来,乌鲁木齐市的大气污染日趋严重、生态环境日益恶化(钱翌等,2004)。为此,新疆维吾尔自治区党委、政府对优化乌鲁木齐市能源结构,改善脆弱的生态环境给予了高度重视,出台了一系列政策、措施,积极鼓励对太阳能、风能等清洁能源的开发应用。

日照时数和太阳总辐射是定量描述太阳能资源丰富程度的主要指标(刘明昌等,2009;文小航等,2008;曹雯等,2008;吴其重等,2010;赵东等,2010;杜尧东等,2003;王学锋等,2009;张雪芬等,1999;张德山等,2005;韩世涛等,2010;Allen et al, 1998)。

近年来,有学者对全球变化背景下的乌鲁木齐市气候变化开展过一些研究,结果表明,在过去的数十年里,各地因年平均气温上升、年降水量增多而表现出不同程度的“暖湿化”趋势(普宗朝等,2010),但有关乌鲁木齐市日照时数和太阳总辐射时空变化的研究目前还很少。因此,全面客观地研究分析乌鲁木齐市太阳能资源的精细化时空变化特征,对合理利用太阳能资源,降低煤炭等化石能源的消耗量,减少污染物和温室气体排放,促进社会经济的持续、稳定发展具有重要意义。

1 资料和方法

1.1 资料及其来源

乌鲁木齐市气象站点稀疏,资料序列较长的仅乌鲁木齐、达坂城、大西沟、小渠子和米泉5个台站,为丰富气候资料的信息量和代表性,同时也为了在进行太阳能资源空间分布的研究分析时尽可能减少边界效应的影响,本研究还将乌鲁木齐市近邻的隶属于昌吉回族自治州的昌吉、阜康、蔡家湖和天池4个站列入研究范围。研究区域和所选气象站点的分布情况见图1。利用上述9个地面气象观测站1961

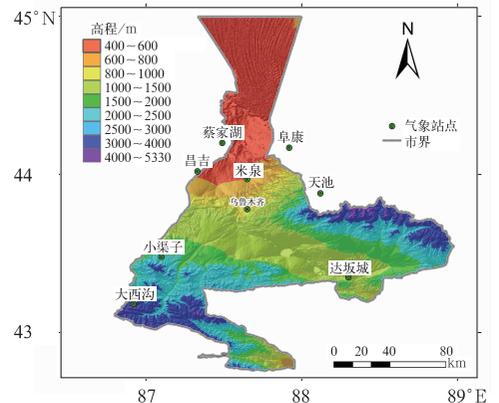


图1 乌鲁木齐市高程和气象站点分布
Fig. 1 The geomorphology and distribution of meteorological stations in Urumqi City

—2010 年的逐日日照时数和乌鲁木齐站逐日太阳辐射资料研究分析乌鲁木齐市日照时数和太阳总辐射的时空变化。研究所用气象数据和乌鲁木齐市 1:50000 地理信息数据由新疆气象信息中心提供。

1.2 太阳总辐射计算方法

所选用的 9 个气象台站中,仅乌鲁木齐站有太阳辐射观测资料,其他 8 个台站的太阳总辐射使用气候学方法计算获取。目前,国内外有关太阳总辐射的气候学计算方法有多种(刘明昌等,2009;文小航等,2008;曹雯等,2008;吴其重等,2010;赵东等,2010;杜尧东等,2003;王学锋等,2009;张雪芬等,1999;张德山等,2005;韩世涛等,2010),本研究采用基于天文辐射的方法进行计算,其计算式为

$$Q = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) Q_0 \quad (1)$$

式中, a_s 和 b_s 为回归常数, Q 为日太阳总辐射(单位: $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), Q_0 为日天文辐射(单位: $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。

$$Q_0 = \frac{1440}{\pi} I_0 \rho [\omega_0 \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_0] \quad (2)$$

I_0 为太阳常数, $I_0 = 0.0820$ (单位: $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$); ρ 为日地相对距离的倒数

$$\rho = 1 + 0.033 \cos \left(\frac{2\pi}{365} J \right) \quad (3)$$

δ 为太阳赤纬(rad)

$$\delta = 0.409 \sin \left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39 \right) \quad (4)$$

J 为计算日在一年中的日序,1 月 1 日为 1,取值范围为 1 到 365 或 366; ω_0 为日落时角(rad)

$$\omega_0 = \arccos[-\tan \varphi \tan \delta] \quad (5)$$

φ 为纬度(rad); n 为实际日照时数(单位:h); N 为最大可能日照时数(单位:h):

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_0 \quad (6)$$

n/N 为日照百分率; a_s 和 b_s 为随大气状况和太阳赤纬而变化的参数。当没有实际的太阳辐射资料和经验参数可以利用时,联合国粮农组织(FAO)推荐 $a_s = 0.25, b_s = 0.50$ (Allen et al, 1998)。本研究以乌鲁木齐站 1961—2010 年各月的日太阳总辐射实测值与同期天文辐射之比作为因变量,以实际日照时数与可照时数之比(日照百分率)作为自变量,通过最小二乘法拟合出各月的经验系数 a_s 和 b_s 值(表 1),各月回归方程的复相关系数 R 均大于 0.4478, F 值均通过了 $F_{0.01}$ 的显著性检验。利用无辐射观测数据的 8 个台站 1961—2010 年逐日日照时数和表 1 中相应月份的 a_s 和 b_s 值,根据式(1)~(6)计算 1961—2010 年各站逐日太阳总辐射,将春(3—5 月)、夏(6—8 月)、秋(9—11 月)、冬(12—2 月)四季和年内逐日太阳总辐射求和即可计算出四季和年的太阳总辐射。

表 1 乌鲁木齐站各月经验系数 a_s 和 b_s 值及其统计检验

Table 1 Experiential coefficients a_s , b_s and their statistical tests for different months in Urumqi Station

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
a_s	0.2853	0.2276	0.2341	0.2020	0.2694	0.3057	0.2875	0.2794	0.3409	0.1625	0.2022	0.2619
b_s	0.4331	0.5518	0.4985	0.5118	0.3969	0.3308	0.3491	0.3919	0.3418	0.6297	0.5981	0.4501
R	0.7695	0.7833	0.7798	0.7566	0.5866	0.6144	0.5539	0.4886	0.4478	0.6999	0.8224	0.7544
F	68.2447	74.6348	72.0478	63.9912	24.6596	28.4948	20.7976	14.7398	11.7886	45.1213	98.4178	57.8458

1.3 太阳能资源变化趋势及突变分析方法

分别用线性倾向率和 Mann-Kendall 法(以下简称 M-K)对乌鲁木齐市 1961—2010 年四季和年日照时数、太阳总辐射变化趋势、突变特征进行分析和检测,具体方法见文献(普宗朝等,2010;魏凤英,2007)。

1.4 太阳能资源的栅格化空间插值模型

乌鲁木齐市地形地貌复杂,气候类型多样,但气

象站点稀疏,为提高太阳能资源栅格化插值的精度,本研究采用混合插值法(即趋势面模拟和残差内插)(赵东等,2010;杜尧东等,2003;曾燕等,2003;金志凤等,2011;谢云峰等,2007;张山清等,2011;李军等,2010;普宗朝等,2011;王怀清等,2011)进行乌鲁木齐市四季和年日照时数、太阳总辐射的 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 栅格的精细化空间插值模拟,计算公式

$$P = p(\lambda, \varphi, h) + \varepsilon \quad (7)$$

式中, P 为四季和年日照时数、太阳总辐射的栅格点模拟值; $p(\lambda, \varphi, h)$ 为宏观地理因子影响的四季和年

日照时数、太阳总辐射的栅格点模拟值,用三维二次趋势面模型表示(曾燕等,2003;金志凤等,2011;谢云峰等,2007;张山清等,2011;李军等,2010;普宗朝等,2011;王怀清等,2011)

$$p(\lambda, \varphi, h) = b_0 + b_1\lambda + b_2\varphi + b_3h + b_4\lambda\varphi + b_5\varphi h + b_6\lambda h + b_7\lambda^2 + b_8\varphi^2 + b_9h^2 \quad (8)$$

式中, λ 为栅格点平均经度; φ 为栅格点平均纬度; h 为栅格点平均海拔高度(100 m), $b_0 \sim b_9$ 为待定系数。 ε 为局部小地形因子和随机因素对四季和年日照时数、太阳总辐射的影响,也称作残差项,由于其影响机制很复杂,到目前为止还没有公认的最好的模拟模式,一般采取反距离加权法(IDW)、样条函数法(Spline)和克里格法(Kriging)进行插值运算(曾燕等,2003;金志凤等,2011;谢云峰等,2007;张山清等,2011;李军等,2010;普宗朝等,2011;王怀清等,2011),经对比试验,反距离加权法能够较好地体现乌鲁木齐市复杂多样的局地环境因素对日照时数、太阳总辐射残差项的影响,插值模拟效果较好。反距离加权法的基本思想为地理学的第一定律,即距离越近的两个事物,它们的属性就越相似,反之这种相似性随着距离的增加而减小。在具体的插值计算中,以插值点与样本点(已知气象站点)的距离为权重,插值距离越近样本点赋予的权重就越大,其贡献与距离成反比,计算式为

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i}{\sum_{i=1}^n d_i^k} \quad (9)$$

式中, ε 为日照时数或太阳总辐射残差项的栅格点模拟值; n 为用于插值的气象观测站点的数目; ε_i 为第*i*个气象站点日照时数或太阳总辐射的实际残差值,由该站实际日照时数或太阳总辐射与通过宏观地理因子的三维二次趋势面模拟值之差计算获取; d_i 为插值的栅格点与第*i*个气象站点之间的欧氏距离, k 为距离的幂,其选择标准是平均绝对误差最小,本研究取 $k=3$ 。

利用上述方法,在 ArcGis 9.3 平台上完成基于 1:50000 数字高程模型(DEM)数据的乌鲁木齐市 100 m×100 m 栅格的四季和年日照时数、太阳总辐射 1961—2000 年平均值的精细化分布式模拟。

1.5 太阳能资源突变前后变化量的空间分布模拟方法

对在近 50 年发生突变的要素,采用上述混合插

值法,分别对突变前和突变后的多年平均值进行精细化分布式模拟,将突变后的栅格数据减突变前的,即可获得突变发生前后要素变化量的空间分布式模拟。

2 结果分析

2.1 太阳能资源的空间分布

2.1.1 四季和年日照时数空间分布

乌鲁木齐市光照资源丰富,但时空分布不均。就四季日照时数的空间分布(图 2)来看,夏、秋季日照时数总体呈现“平原多,山区少”的分布格局。海拔 600 m 以下的北部平原受准噶尔盆地荒漠气候的影响,云雨天气少、空气干燥,夏、秋季日照时数较多,分别为 930~990 和 680~700 h;向南、向东,随着海拔高度的上升日照时数逐渐减少,海拔 600~1500 m 的山前倾斜平原和低山带以及东部的柴窝堡至达坂城峡谷地带夏、秋季日照时数分别为 780~930 和 620~680 h;1500 m 以上的中、高山带日照时数较少,分别只有 680~780 和 590~620 h。春季日照时数的空间分布在海拔 2800 m 以下与夏、秋季相似,也表现为“平原多,山区少”的分布格局,其中,海拔 600 m 以下的北部平原为 800~850 h,600~1500 m 的山前倾斜平原和低山带以及柴窝堡至达坂城峡谷地带为 720~800 h,1500~2800 m 的中、高山带日照时数较少,只有 685~720 h,但 2800 m 以上的高寒地带因春季空气干燥、云雨较少,日照时数又呈增多之势,为 720~850 h。冬季是乌鲁木齐市日照时数最少且分布格局较为独特的季节,其空间分布总体呈现“山区多,平原少”的特点。北部平原受准噶尔盆地冬季持续、稳定的雾、霾天气的影响(张学文等,2006),日照时数较少,一般只有 400~440 h,向南、向东,随着海拔高度的上升日照时数逐渐增多,海拔 600~1500 m 的山前倾斜平原和低山带以及柴窝堡至达坂城峡谷地带冬季日照时数为 440~500 h;1500~2800 m 的中、高山带为 500~554 h,但 2800 m 以上的高寒地带日照时数又略有减少,为 440~480 h。

受四季日照时数空间分布的共同影响,乌鲁木齐市年日照时数的空间分布(图 2e)总体呈现“平原

多,山区少;东部山间峡谷地带多,西部少”的特点。南部天山山区年日照时数一般小于2600 h,其中,海拔 1700 m 以上的中、高山带不足 2500 h;山前倾

斜平原年日照时数为 2600~2700 h,柴窝堡至达坂城山间峡谷地带和海拔 1000 m 以下的中北部平原可达 2700~3100 h,是全市年日照时数最多的区域。

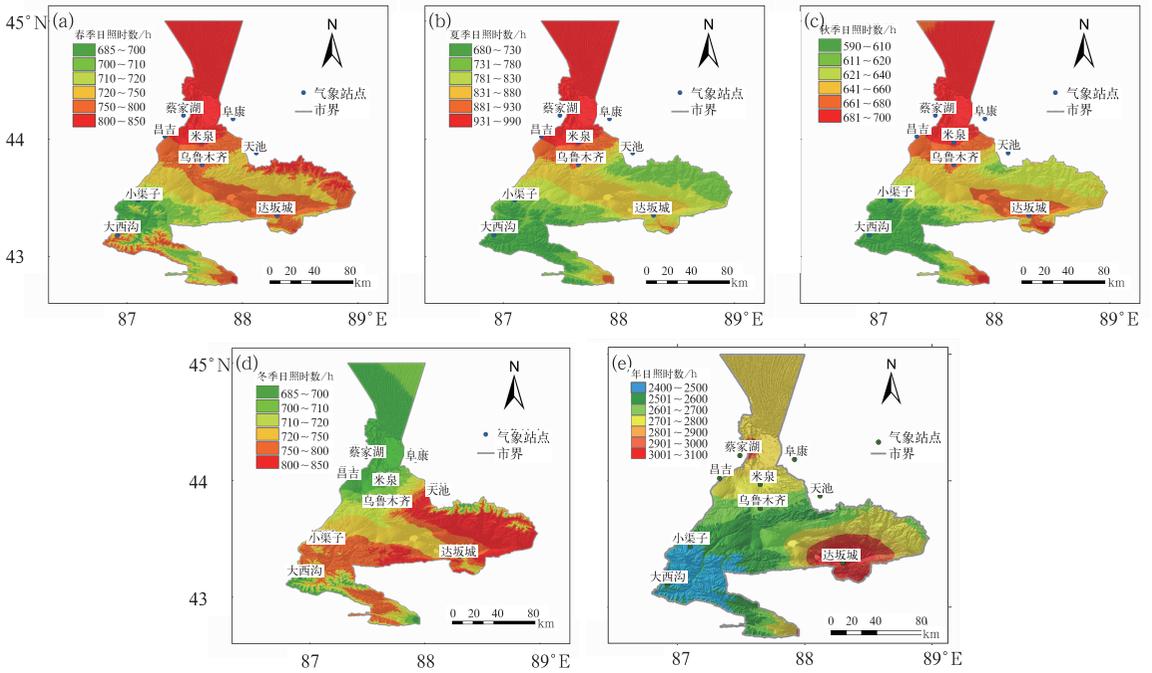


图 2 1961—2010 年乌鲁木齐市春(a)、夏(b)、秋(c)、冬季(d)和年(e)日照时数分布
 Fig. 2 Distributions of sunshine hours in spring (a), summer (b), autumn (c), winter (d) and year (e) in Urumqi City during 1961—2010

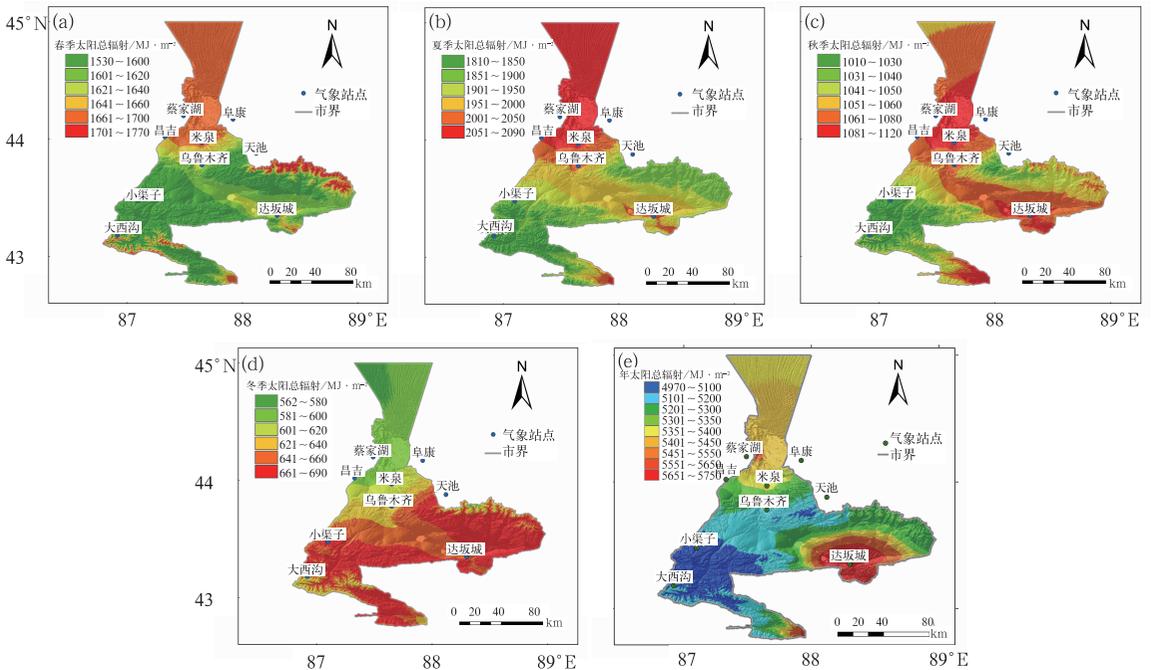


图 3 1961—2010 年乌鲁木齐市春(a)、夏(b)、秋(c)、冬季(d)和年(e)太阳总辐射分布
 Fig. 3 Distributions of solar radiation in spring (a), summer (b), autumn (c), winter (d) and year (e) in Urumqi City during 1961—2010

2.1.2 四季和年太阳总辐射空间分布

与日照时数空间分布相似,乌鲁木齐市夏、秋季太阳总辐射也呈现“平原多,山区少”的分布格局(图 3)。海拔 1200 m 以下的中、北部平原和柴窝堡

直达坂城峡谷地带夏、秋季太阳总辐射分别为 1950~2090 和 1050~1120 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$;海拔 1200~1500 m 的山前倾斜平原和低山带分别为 1900~1950 和 1040~1060 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$;1500 m 以上的天山山区中、

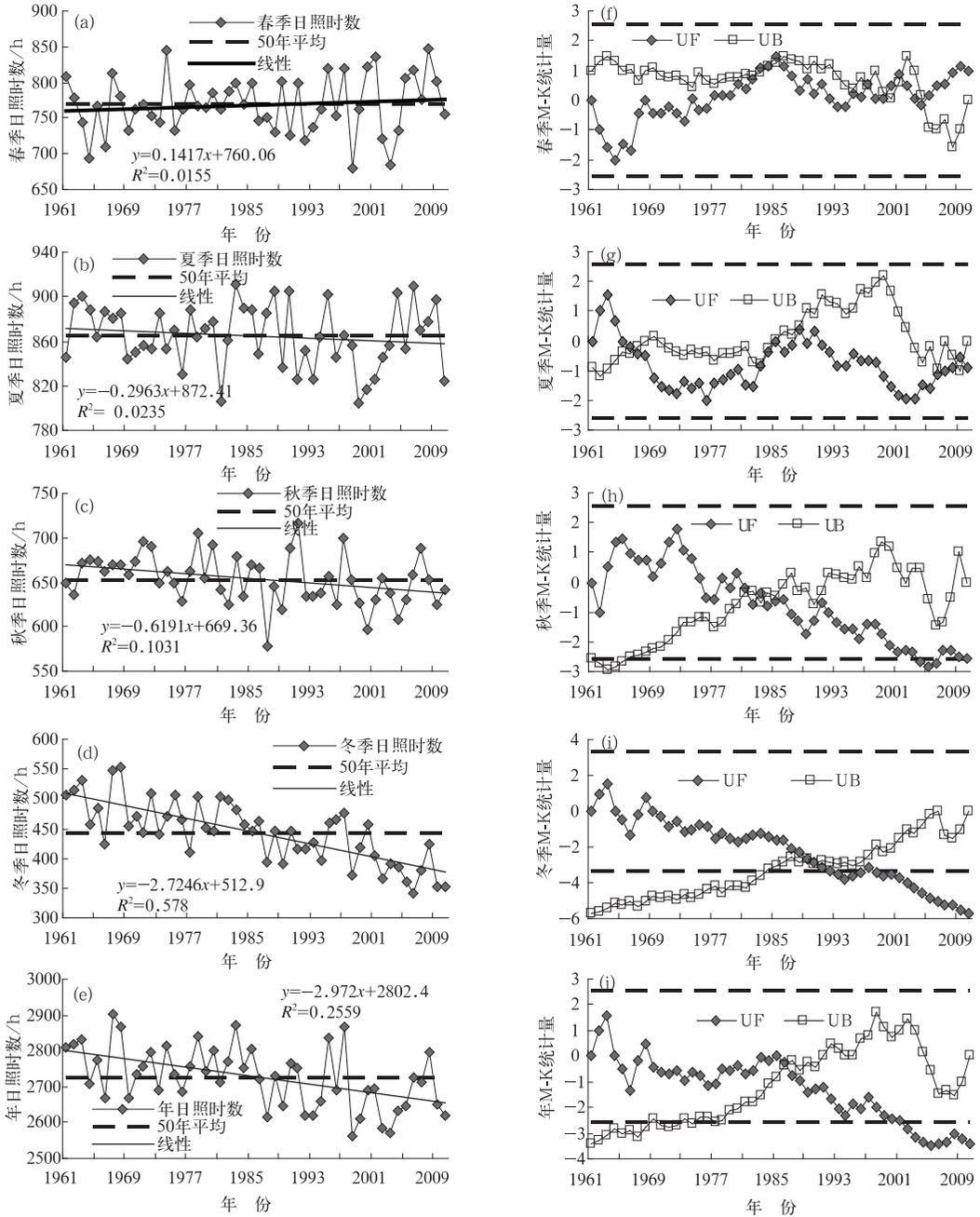


图 4 1961—2010 年乌鲁木齐市春、夏、秋、冬四季和年日照时数变化(a~e)

及其 Mann-Kendall 检测结果(f~j)

(UF 为 M-K 正序特征曲线,UB 为 M-K 逆序特征曲线)

Fig. 4 Changes of spring, summer, autumn, winter and annual sunshine hours (a~e) and the Mann-Kendall test (f~j) in recent 50 years in Urumqi City during 1961—2010

(UF is the sequence characteristic curve of Mann-Kendall, UB is the reverse characteristic curve of Mann-Kendall)

高山带夏、秋季太阳总辐射较少,分别只有 $1810 \sim 1900$ 和 $1010 \sim 1040 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。春季太阳总辐射在海拔 1200 m 以下的中、北部平原和柴窝堡至达坂城峡谷地带也较多,为 $1620 \sim 1770 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$;海拔 $1200 \sim 3000 \text{ m}$ 的山前倾斜平原至高山带太阳总辐射较少,为 $1530 \sim 1620 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$;但 3000 m 以上的高寒地带春季太阳总辐射又呈增多之势,为 $1660 \sim 1770 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。冬季乌鲁木齐地区太阳总辐射空间分布与其他季节不同,总体呈现“山区多,平原少”的特点。受准噶尔盆地冬季雾、霾天气的影响,北部平原冬季太阳总辐射最少,只有 $562 \sim 620 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$;山前倾斜平原和柴窝堡至达坂城峡谷地带以及 1600 m 以下的低山带为 $621 \sim 640 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, $1600 \sim 3000 \text{ m}$ 的中、高山带冬季太阳总辐射较多,为 $660 \sim 690 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,但 3000 m 以上的高寒地带太阳总辐射又略有减少,为 $580 \sim 620 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

受四季太阳总辐射空间分布的共同影响,乌鲁木齐市年太阳总辐射的空间分布(图 3e)总体呈现“平原多,山区少;东部山间峡谷地带多,西部少”的特点。北部平原大部年总辐射量多在 $5200 \sim 5450 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,柴窝堡至达坂城山间峡谷地带年太阳总辐射高达 $5400 \sim 5750 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,是全市太阳总辐射最丰富的区域。天山山区和山前丘陵地带年太阳总辐射量一般少于 $5200 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,其中,中、高山带甚至不足 $5100 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。按照王炳忠等(1998)对我国年太阳能辐射资源丰富程度的划分标准,除天山山区和山前丘陵地带属太阳能资源一般地带外,全市的大部分区域属太阳能资源较丰富地带。

2.2 太阳能资源时间变化

2.2.1 四季和年日照时数变化

线性趋势分析表明,1961—2010年,乌鲁木齐市春、夏季日照时数变化趋势不明显,线性倾向率分别只有 1.42 和 $-2.96 \text{ h} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,未通过显著性检验,但秋、冬季日照时数分别以 -6.19 和 $-27.25 \text{ h} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的倾向率呈较显著($\alpha=0.05$)和极显著($\alpha=0.001$)的减少趋势(图 4a~4d)。M-K 检测表明,1961—2010年春季和夏季日照时数未发生突变,但秋、冬季日照时数分别于 1984 和 1991 年发生了突变性的减少(图 4h~4i),突变后较突变前,全市平均秋、冬季日照时数分别减少了 19.3 和 70.3 h 。但突变前后各地秋、冬季日照时数的变化具有较大的区域性差异,由图 5 可以看出,突变后较突变前,秋、冬季日照时数的减少幅度总体呈现“平原多,山区少”的格局。海拔 800 m 以下的北部平原,秋、冬季日照时数减少幅度最大,分别为 $-60 \sim -30$ 和 $-120 \sim -75 \text{ h}$; $800 \sim 1500 \text{ m}$ 的山前倾斜平原和低山带以及柴窝堡至达坂城峡谷地带秋、冬季日照时数减少幅度次之,分别为 $-30 \sim -10$ 和 $-75 \sim -25 \text{ h}$; 1500 m 以上的中、高山带变化不明显,其中,中山带的冬季日照时数还以 $1 \sim 25 \text{ h}$ 的幅度略有增多。

受四季日照时数变化的共同影响,1961—2010年乌鲁木齐市年日照时数以 $-29.72 \text{ h} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的倾向率呈极显著($\alpha=0.001$)的减少趋势(图 4e),并于 1987 年发生了突变性的减少(图 4j),突变后较突变前,全市平均年日照时数减少了 120.4 h ,但减

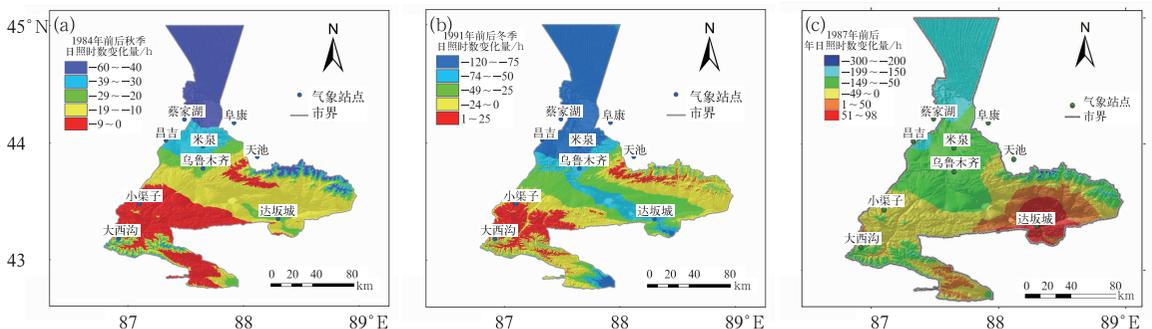


图5 1961—2010年乌鲁木齐市秋(a)、冬(b)季和年(c)日照时数突变前后变化量空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of autumn (a), winter (b) and annual (c) sunshine hours before and after the 1987 abrupt change in Urumqi City during 1961–2010

少幅度的区域性差异十分明显,总体呈现“平原多,山区少”的格局(图 5c)。海拔 1500 m 以下的中北

部平原和低山带年日照时数减少较明显,一般可达 $-200 \sim -50 \text{ h}$, 1500 m 以上的天山山区中、高山带

减少幅度较小,大多不足-50 h,柴窝堡至达坂城山间峡谷地带年日照时数非但没有减少,还增多了1~98 h。

2.2.2 四季和年太阳总辐射变化

与日照时数变化趋势相似,1961—2010年,乌鲁木齐市春、夏季太阳总辐射变化趋势不明显,变化

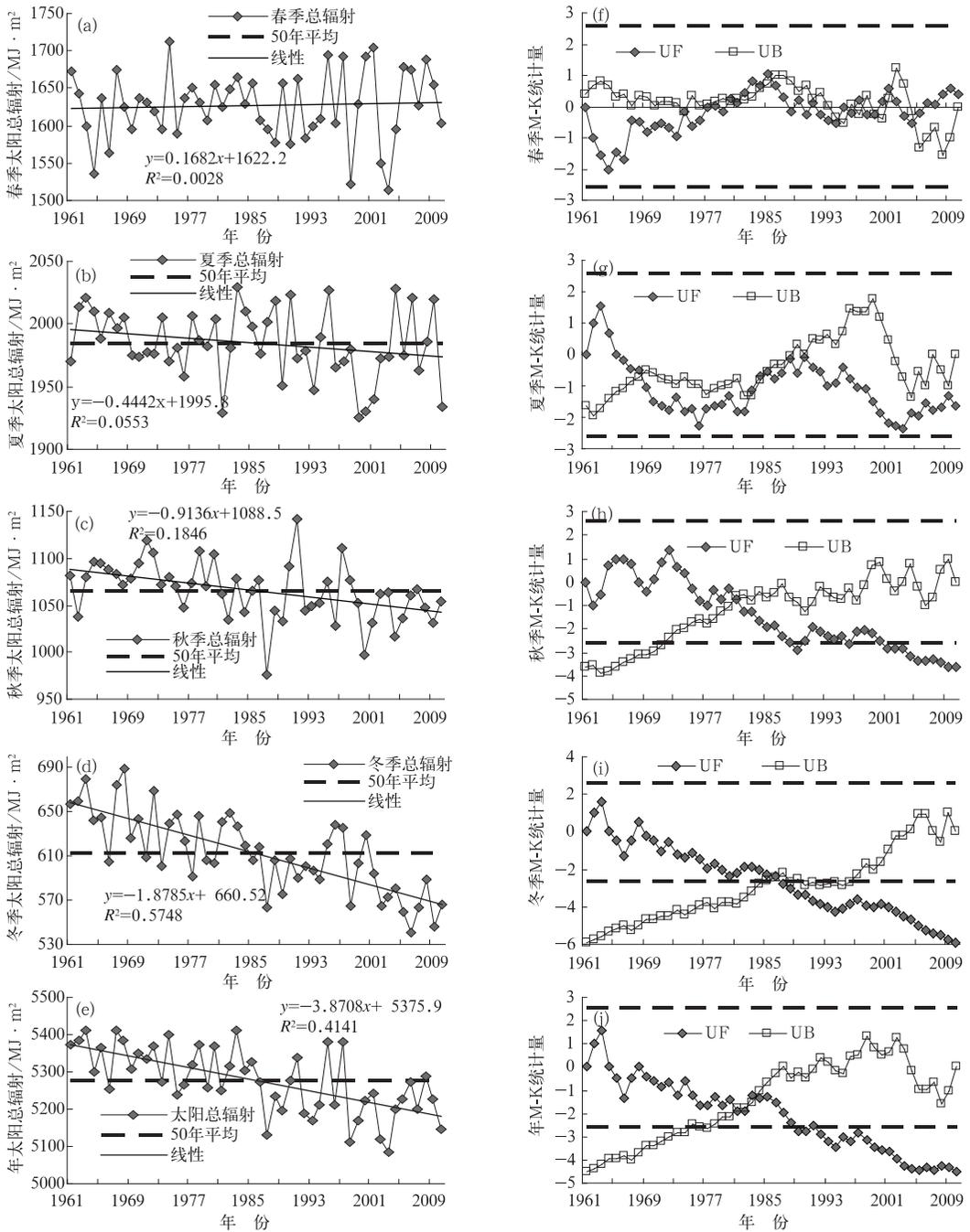


图 6 1961—2010 年乌鲁木齐市四季和年太阳总辐射变化(a~e)

及其 Mann-Kendall 检测(f~j)

(UF 为 M-K 正序特征曲线, UB 为 M-K 为逆序特征曲线)

Fig. 6 Changes of spring, summer, autumn, winter and annual solar radiation (a~e)

and the Mann-Kendall test (f~j) in Urumqi City during 1961—2010

(UF is the sequence characteristic curve of Mann-Kendall, UB is the reverse characteristic curve of Mann-Kendall)

倾向率分别只有 1.68 和 $-4.44 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 均未通过显著性检验, 但秋、冬季太阳总辐射分别以 -9.14 和 $-18.79 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的倾向率呈极显著 ($\alpha=0.001$) 的减少趋势(图 6a~6d)。M-K 检测表明, 1961—2010 年春、夏季太阳总辐射未发生突变, 但秋、冬季太阳总辐射分别于 1981 和 1987 年发生了突变性的减少(图 6h~6i), 突变后较突变前, 全市平均秋、冬季太阳总辐射分别减少了 29.6 和 $48.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。但突变前后各地的变化具有明显的区域性差异, 由图 7 可以看出, 突变后较突变前秋、冬季太阳总辐射的减少幅度总体呈现“平原多, 山区少”的格局。海拔 1000 m 以下的北部平原, 秋、冬季太阳总辐射减少幅度最大, 分别为 $-50 \sim -20$ 和 $-80 \sim -40 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$; $1000 \sim 1400 \text{ m}$ 的山前倾斜平原和柴窝堡至达坂城峡谷地带太阳总辐射减少幅度次之, 分别为 $-19 \sim -10$ 和 $-39 \sim -20 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$; 海拔 1400 m 以上的天山山区变化不明显。

受四季太阳总辐射变化的共同影响, 1961—2010 年, 乌鲁木齐市年太阳总辐射以 $-38.7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的倾向率呈极显著 ($\alpha=0.001$) 的减少趋势(图 6e), 并于 1984 年发生了突变性的减少(图 6j), 突变后较突变前年太阳总辐射平均减少了 $108.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。但各地变化具有明显的区域性差异, 由 1984 年前、后年太阳总辐射变化量的空间分布可以看出(图 7c), 除柴窝堡至达坂城的山间峡谷地带年太阳总辐射以 $1 \sim 80 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 的幅度略有增多外, 全市的绝大部分区域以 $-280 \sim 0 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 的幅度减少, 其中, 北部平原减少幅度较大, 为 $-280 \sim -100 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 天山山区减少幅度较小, 为 $-99 \sim -0 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。上述分析表明, 近 50 年乌鲁木齐市年日照时数和太阳总辐射的显著减少主要是秋、冬季太阳总辐射明显减少所致, 其中冬季太阳总辐射的减少起主导作用, 春、夏季太阳总辐射的变化及其对年太阳总辐射变化的影响相对较小。

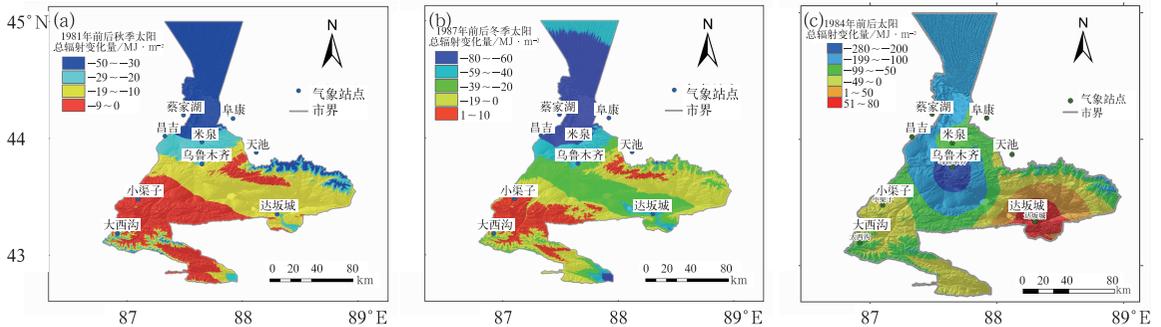


图7 1961—2010年乌鲁木齐市秋(a)、冬(b)季和年(c)太阳总辐射突变前后变化量空间分布

Fig. 7 Spatial distributions of autumn (a), winter (b) and annual (c) solar radiation before and after the 1984 abrupt changes in Urumqi City during 1961—2010

3 结论和讨论

(1) 采用基于 GIS 的混合插值法, 对乌鲁木齐市春、夏、秋、冬四季和年日照时数、太阳总辐射的精细化空间分布模拟表明: 乌鲁木齐市春、夏、秋季和年日照相照时数、太阳总辐射总体呈现“平原多, 山区少”的空间分布格局, 冬季日照时数、太阳总辐射表现为“山区多, 平原少”的空间分布格局。

(2) 近 50 年, 乌鲁木齐市春、夏季日照时数、太阳总辐射变化趋势不显著, 但秋、冬季和年的日照时数及太阳总辐射总体呈显著的减少趋势, 并于 20 世

纪 80 年代发生了突变性的减少, 但突变后较突变前秋、冬季和年的日照时数及太阳总辐射的变化具有明显的区域性差异, 减少幅度总体呈现“平原多, 山区少”的分布特点。

(3) 近 50 年乌鲁木齐市日照时数、太阳总辐射明显减少, 其成因十分复杂, 既有自然因素也有人为因素, 概括起来主要有以下两点, 一是受全球变化的影响, 近 50 年来, 尤其 20 世纪 80 年代中期以来乌鲁木齐市的气候发生了突变性的变湿(普宗朝等, 2011), 云量和降水量显著增多, 导致日照时数、太阳总辐射减少; 二是作为新疆维吾尔自治区首府的乌鲁木齐市, 近 50 年, 尤 20 世纪 80 年代以来经济、社会迅猛

发展,城市规模日益扩大,能源消耗增多,大气污染日益严重(钱翌等,2004),导致大气气溶胶浓度上升,大气透射率降低(王炳忠等,1998),日照时数、太阳总辐射减少。

参考文献

- 曹雯,申双和. 2008. 我国太阳日总辐射计算方法的研究. 南京气象学院学报,31(4):587-591.
- 杜尧东,毛慧琴,刘爱君,等. 2003. 广东省太阳总辐射的气候学计算及其分布特征. 资源科学,25(6):66-70.
- 韩世涛,刘玉兰,刘娟. 2010. 宁夏太阳能资源评估分析. 干旱区资源与环境,24(8):131-135.
- 金志凤,黄敬峰,李波,等. 2011. 基于 GIS 及气候-土壤-地形因子的浙江省茶树栽培适宜性评价. 农业工程学报,27(3):231-236.
- 李军,杨青,史玉光. 2010. 基于 DEM 的新疆降水量空间分布. 干旱区地理,33(6):868-873.
- 刘昌明,刘小莽,郑红星,等. 2009. 海河流域太阳辐射变化及其原因分析. 地理学报,64(11):1283-1291.
- 普宗朝,张山清,宾建华,等. 2011. 新疆乌昌地区干湿气候要素时空变化分析. 资源科学,33(12):2314-2322.
- 普宗朝,张山清,李景林,等. 2010. 近 48 年新疆乌昌地区气候变化. 干旱区研究,27(3):422-432.
- 钱翌,巴雅尔塔. 2004. 乌鲁木齐市大气污染物时空分布特征研究. 新疆农业大学学报,27(4):51-55.
- 王炳忠,邹怀松. 1998. 我国太阳能辐射资源. 太阳能,1998(4):19.
- 王怀清,殷剑敏,辜晓青,等. 2011. 中国热量资源精细化估算. 气象,37(10):1283-1291.
- 王学锋,朱勇,范立张,等. 2009. 1961—2007 年云南太阳总辐射时空变化特征. 气候变化研究进展,5(1):29-34.
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与观测技术(第二版). 北京:气象出版社,69-72.
- 文小航,尚可政,王式功,等. 2008. 1961—2000 年中国太阳辐射区域特征的初步研究. 中国沙漠,28(3):554-561.
- 吴其重,王自发,崔应杰. 2010. 我国近 20 年太阳辐射时空分布状况模式评估. 应用气象学报,21(3):343-351.
- 谢云峰,张树文. 2007. 基于数字高程模型的复杂地形下的黑龙江平均气温空间插值. 中国农业气象,28(2):205-211.
- 曾燕,邱新法,刘昌明,等. 2003. 基于 DEM 的黄河流域天文辐射空间分布. 地理学报,58(6):810-816.
- 张德山,丁德平,穆启占,等. 2005. 北京太阳能气象指数预报研究与应用. 气象,31(8):81-83.
- 张山清,普宗朝. 2011. 新疆参考作物蒸散量时空变化分析. 农业工程学报,27(5):73-79.
- 张雪芬,陈东,付祥,等. 1999. 河南省近 40 年太阳辐射变化规律及其成因探讨. 气象,25(3):21-25.
- 张学文,张家宝. 2006. 新疆气象手册. 北京:气象出版社,100-102.
- 赵东,罗勇,高歌,等. 2010. 1961 年至 2007 年中国日照的演变及其关键气候特征. 资源科学,3(4):701-711.
- Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage. Roma: FAO, (56):8-10.