

区域太阳高度角平均偏差的统计特征规律

张行清^{1,2**}, 庞芳^{3*}, 卢伟萍^{1,2}, 谭孟祥^{1,2}

¹国家卫星气象中心遥感应用试验基地, 广西南宁 530022;

²广西壮族自治区气象科学研究所, 广西南宁 530022;

³广西壮族自治区气象台, 广西南宁 530022

摘要 为把握好地球系统模拟、遥感地物反演的太阳辐射数据精度,需要探讨尺度效应引起的太阳高度角的区域代表性问题以及确定太阳高度角数据密度的方法。设计区域太阳高度角平均偏差计算方法,建立分布合理的样本数据,根据计算方法选择样本数据,计算区域太阳高度角平均偏差,按制定的统计方法归纳其规律特征。统计得到,区域太阳高度角平均偏差与区域直径为实质性相关,为正相关近线性关系,线性系数随着区域直径的增大而略微减小,当区域直径小于 3000 km 时,线性系数为 $(1.8969\sim 1.9084)\times 10^{-3}(\text{°})\cdot \text{km}^{-1}$,同宽区域的太阳高度角平均偏差的离散程度极小。结果表明:统计规律具有简洁性、高稳定性及高可靠性,为地域性或全球性地球系统模拟、地物反演中太阳高度角数据密度的确定提供科学依据。

关键词 辐射; 高度角; 偏差; 规律; 线性

中图分类号 P422

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.033501

Statistical Characteristic Law of Average Deviation of Solar Elevation in Different Regions

Zhang Xingqing^{1,2**}, Pang Fang^{3*}, Lu Weiping^{1,2}, Tan Mengxiang^{1,2}

¹Remote Sensing Application and Testing Base, National Satellite Meteorological Center, Nanning, Guangxi 530022, China;

²Institute of Meteorological Sciences, Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning, Guangxi 530022, China;

³Guangxi Zhuang Autonomous Region Meteorological Observatory, Nanning, Guangxi 530022, China

Abstract In order to grasp the accuracy of solar radiation data from earth system simulation and remote sensing ground object inversion, it is necessary to discuss the regional representation of solar elevation caused by scale effect and the method for determining the data density of solar elevation. The calculation method of average deviation of regional solar elevation is designed and the sample data with reasonable distribution is established. The average deviation of regional solar elevation is calculated with the sample data selected according to the calculation method. Its regular characteristics are summarized according to the established statistical method. According to the statistics, the average deviation of regional solar elevation is substantially correlated with the regional diameter, they are nearly linear relation of positive correlation, and the linear coefficient slightly decreases with the increase of the regional diameter. When the regional diameter is less than 3000 km, the deviation has positive linear relation with the regional diameter with the coefficient of $(1.8969\sim 1.9084)\times 10^{-3}(\text{°})\cdot \text{km}^{-1}$. The dispersion degree of the average deviation of solar elevation in the region with the same width is very small. The results show that the statistical law is simple, with high stability and high reliability. The scientific evidence is provided for determining the data density of solar elevation in the regional or global earth system simulation and ground object inversion.

Key words radiation; elevation; deviation; law; linear

OCIS codes 350.5610; 010.0280; 350.6050

收稿日期: 2019-06-24; 修回日期: 2019-07-04; 录用日期: 2019-07-23

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506017, GYHY201406030)

* E-mail: 13878818115@qq.com; ** E-mail: zhangxingqing168@126.com

1 引言

太阳辐射是地球主要的能量来源,对地球系统中的辐射场^[1]、温度场、气压场、电场^[2]等产生作用,引起其动态变化,通过光合作用^[3]、光化学反应^[4]影响地表大气物质,是地球万物生长的依靠,许多自然现象如大气环流^[5]、洋流、城市热岛、大气污染等与其有密切关系,是地球科学研究的热点。太阳辐射也是被动遥感对地监测、预测的手段:通过各种先进的探测器^[6-7]采集的地表大气空间结构的太阳辐射频谱数据,可用于地球陆地、海洋及大气的监测和预测。通过模拟地球系统演变或者反演识别地物,被动遥感广泛应用于军事、资源、环境、海洋、气象、测绘、规划等领域。太阳高度角是衡量太阳向地球表面辐射能量的因子,是地球系统应用模式中太阳辐射的代表参数,是遥感反演识别中消除太阳辐射差异的主要控制参数,纠正不同地域或不同时间产生的太阳高度角影响差异是辐射校正^[8-9]的重要环节之一。球面曲率效应影响太阳高度角区域代表的有效性,因此需要考虑太阳高度角数据密度的合理性。采取恰当的数据密度是为了很好地利用大数据,以及合理使用数据存储、计算、通信等涉及的硬件资源。合理计算太阳高度角数据密度需要使用区域太阳高度角偏差特征规律^[10],这是研究的关键点。对于辐射亮度、表观反射率^[11-12]和地表反射率^[13-14]等太阳辐射成熟模式,可按天文年历计算太阳高度角,计算结果精确但计算过程复杂,常用的计算方法有数值模拟法^[15]和理论展开式法^[16]。区域太阳高度角平均偏差是评价太阳高度角区域代表性的重要依据,本文利用区域太阳高度角平均偏差方式探讨太阳高度角区域代表性问题,设计区域太阳高度角平均偏差的计算方法,按制定的统计方法归纳其规律特征,为太阳辐射的地域性或全球性地球系统模拟、通过地物反演确定太阳高度角数据密度提供科学依据。

2 数据与方法

要完成特征规律的统计,先设计区域太阳高度角平均偏差的计算方法,准备计算所需要的样本数据,根据计算方法及样本数据设计数据统计方法。

2.1 计算方法

区域太阳高度角平均偏差的计算方法包括制定计算规划、太阳高度角计算、制定权重规则及区域太阳高度角平均偏差计算。

2.1.1 制定计算规划

考虑太阳位置变化,利于衡量区域太阳高度角平均偏差,选定圆形区域作为考察对象;从编程计算角度考虑,需要使用二维数组,采取方形区域,圆形区域包含在方形区域内,引入权重规则区分有效区域与非有效区域。

设圆形区域直径为 D_R (单位为 km),二维数组统计数据分辨率(即数据格点宽度)为 D_S (单位为 km),确定二维数组行列数 m, n :

1) $\text{INT}(D_R/D_S) = D_R/D_S$ [注: $\text{INT}(\cdot)$ 为取整函数], 二维数组行列数 $m = n = \text{INT}(D_R/D_S) + 1$;

2) $\text{INT}(D_R/D_S) < D_R/D_S$, 二维数组行列数 $m = n = \text{INT}(D_R/D_S) + 3$ 。

2.1.2 太阳高度角计算

根据太阳高度角计算公式及二维数组行列数,确定区域各格点太阳高度角计算方法。

1) 格点太阳高度角计算方法

使用常用的太阳高度角计算式,即

$$\sin \theta_{SE} = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \tau, \quad (1)$$

式中: θ_{SE} 为观测地太阳高度角; φ 为观测地纬度; δ 为太阳赤纬; τ 为观测地时角。规定赤道纬度为 0° , 北纬为 $0^\circ \sim 90^\circ$, 南纬为 $-90^\circ \sim 0^\circ$; 格林尼治天文台经度为 0° , 东经为 $0^\circ \sim 180^\circ$, 西经为 $-180^\circ \sim 0^\circ$ 。可得到区域各格点太阳高度角为

$$\theta_{SEij} = \arcsin(\sin \varphi_{ij} \sin \delta + \cos \varphi_{ij} \cos \delta \cos \tau_{ij}), \quad (2)$$

式中: $i, j = 0, 1, 2, \dots, n-1$ 。

2) 太阳高度角各个参数计算

① 赤纬参数计算。太阳赤纬 δ 即观测日太阳直射地球的纬度,计算公式为^[17-19]

$$\delta = 0.3723 + 23.2567 \sin \theta + 0.1149 \sin 2\theta - 0.1712 \sin 3\theta - 0.758 \cos \theta + 0.3656 \cos 2\theta + 0.0201 \cos 3\theta, \quad (3)$$

$$\theta = 2\pi \{ J_D - 79.6764 + \text{INT}[(J_Y - 1985)/4] - 0.2422(J_Y - 1985) - \lambda_C/360 + T/24 \} / 365.2422, \quad (4)$$

式中: θ 为日角(rad); J_D 为积日(d); J_Y 为监测公历年份; λ_C 为监测地经度; T 为监测地国际时间(h)。

② 各格点纬度 φ_{ij} 参数计算。假设地球为圆形且半径为 6371.004 km, 则 111.193 km 等于 1° 纬度差的宽度。参照区域中心点纬度 φ_0 , 得到区域各格点纬度为

$$\varphi_{ij} = \varphi_0 + [(m-1)/2 - j] D_S / 111.193. \quad (5)$$

③ 各格点时角 τ_{ij} 参数计算。时角 $\tau = 15(t_0 -$

12), t_0 为观测地真太阳时时间, 平太阳时时角计算公式^[17-19]为

$$\tau_{ij} = 15(t_a + \Delta t/60) + \lambda_{ij} - 300, \quad (6)$$

$$\Delta t = 0.0028 - 1.9857 \sin \theta + 9.9059 \sin 2\theta - 7.0924 \cos \theta - 0.6882 \cos 2\theta, \quad (7)$$

式中: t_a 为观测地北京时时间; λ_{ij} 为各格点经度; Δt 为真平太阳时差(min)。 θ 按(4)式计算, 参照区域中心点经度 λ_0 。 计算 λ_{ij} 参数, 若整个计算区域经纬度跨度小, 设各格点之间距离相等且经度差相等, 则区域各格点经度为

$$\lambda_{ij} = \lambda_0 + [i - (n - 1)/2] D_s / (111.193 \cos \varphi_{ij}). \quad (8)$$

3) 计算各格点太阳高度角 θ_{SEij}

将上述得到的赤纬、纬度及时角的参数代入太阳高度角公式, 计算区域各格点太阳高度角 $\theta_{SEij} = \arcsin(\sin \varphi_{ij} \sin \delta + \cos \varphi_{ij} \cos \delta \cos \tau_{ij})$ 。

2.1.3 制定权重规则

制定的权重规则包括点状态判断规则和点权重赋值规则。

1) 点状态判断规则: 需要识别点位置状态才能对点权重进行赋值。

圆形区域内点条件为

$$D_R \geq 2D_s \{ \{ [i - \text{INT}(n/2)]^2 + [j - \text{INT}(m/2)]^2 \}^{1/2} + 1/2 \}. \quad (9)$$

圆形区域外点条件为

$$D_R \leq 2D_s \{ \{ [i - \text{INT}(n/2)]^2 + [j - \text{INT}(m/2)]^2 \}^{1/2} - 1/2 \}. \quad (10)$$

圆形区域边界点条件为

$$2D_s \{ \{ [i - \text{INT}(n/2)]^2 + [j - \text{INT}(m/2)]^2 \}^{1/2} - 1/2 \} < D_R < 2D_s \{ \{ [i - \text{INT}(n/2)]^2 + [j - \text{INT}(m/2)]^2 \}^{1/2} + 1/2 \}. \quad (11)$$

2) 点权重赋值规则: 设圆形区域内点权重为 1, 外点权重为 0, 边界点采取简化处理。 边界点中心在圆形区域内的权重为 1, 在区域外的权重为 0。 各格点权重可表示为 W_{ij} : 若 $D_R \geq 2D_s \{ [i - \text{INT}(n/2)]^2 + [j - \text{INT}(m/2)]^2 \}^{1/2}$, 则 $W_{ij} = 1$; 若 $D_R < 2D_s \{ [i - \text{INT}(n/2)]^2 + [j - \text{INT}(m/2)]^2 \}^{1/2}$, 则 $W_{ij} = 0$ 。

2.1.4 区域太阳高度角平均偏差计算

1) 计算各格点太阳高度角偏差 $\theta_{SE} V_{ij}$ 。 根据太阳高度角公式, 计算各格点太阳高度角偏差 $\theta_{SE} V_{ij} = \theta_{SEij} - \theta_{SE0}$, θ_{SEij} 参照(2)式进行计算, θ_{SE0} 为区域中心点太阳高度角。

2) 遍历计算二维数组区域点权重 W_{ij} 。 根据前述点权重赋值规则, 若格点在设定的圆形区域内或区域边界上, 赋值为 1; 若格点在该区域外, 赋值为 0; 前述已确定 i, j 值域, 遍历计算二维数组区域点权重 W_{ij} 。

3) 计算圆形区域太阳高度角平均偏差 $\theta_{SE} V_P$ 。 根据前述 $\theta_{SE} V_{ij}$ 及 W_{ij} 的计算结果, 按权重规则计算圆形区域各格点太阳高度角偏差绝对平均值:

$$\theta_{SE} V_P = \sum_{i,j=0}^{n-1} |\theta_{SE} V_{ij} W_{ij}| / \sum_{i,j=0}^{n-1} W_{ij}. \quad (12)$$

2.2 样本数据

统计特征规律需要准备计算太阳高度角的样本数据, 涉及区域直径、地域、年份、季节和时点因子。 采用 9 种不同区域、4 个不同纬度的地域点、不同年代的 4 个年份、4 个不同季节代表日、8 个不同真太阳时点, 组合得到 4608 组数据。 区域直径为 1.000, 10.000, 100.000, 300.000, 500.000, 700.000, 1000.000, 1500.000, 3000.000 km; 地域点为佳木斯(130.37°E, 46.82°N)、北京(116.39°E, 39.91°N)、成都(104.07°E, 30.67°N)、广州(113.28°E, 23.13°N); 年份以 1925, 1975, 2005, 2015 年为例; 以 3 月 22 日、6 月 22 日、9 月 22 日和 12 月 22 日为季节代表日; 真太阳时点以 08:30、09:30、10:30、11:30、13:30、14:30、15:30、16:30 为例。

2.3 统计方法

2.3.1 平均偏差计算

平均偏差计算包括形成数据集、设计计算方法、落实处理过程、编制计算机软件及数据计算结果。 样本数据中 9 种区域直径参数数据形成 1 个数据集, 地域点经纬度、年月日及时点形成另 1 个含 512 组的数据集; 根据数学关系和计算过程, 按前述制定计算规划、太阳高度角计算、制定权重规则、区域太阳高度角平均偏差计算 4 步骤, 设计区域太阳高度角平均偏差的计算方法; 按密集格点方式确定二维数组行列数, 以 $m, n = 2001$ 为例, 按不同区域直径对样本数据进行分级, 根据设计计算方法, 计算每级组样本数据的区域各格点太阳高度角, 按权重规则计算有效区域太阳高度角平均偏差, 将结果记录在相应级别数组中, 并完成所有各级组样本数据计算; 本实例采用 IDL 语言, 根据设计计算方法及数据处理过程, 用双精度编写程序代码, 调试好计算机软件; 运行计算机软件, 自动调用各级组样本数据, 计算得到区域各格点太阳高度角及有效区域太阳高度角的平均偏差。

2.3.2 计算结果归纳

计算结果归纳包括分组考察和分组汇总。考虑区域直径与区域太阳高度角平均偏差存在较明显的正相关关系,按区域直径分级组考察区域直径与区域太阳高度角平均偏差的实际相关关系,统计各级组平均偏差数据集的均值、最大值、最小值及离散度,考察各级组中的地域点、年份、季节及时点因子与区域太阳高度角平均偏差的相关关系;根据各级组归纳结果,汇总区域太阳高度角平均偏差的特征规律: $\theta_{SE}V_P = f(D_R, \varphi_0, \lambda_0, y, m_{th}, d, h)$,其中 y 为监测年, m_{th} 为监测月, d 为监测日, h 为监测时点,综合考察 $\theta_{SE}V_P$ 均值、最大值、最小值及离散度状况,以反映区域太阳高度角平均偏差特征规律与区域直径、地域、年代、季节、时点的相关关系。

2.3.3 计算结果精度分析

受月球和其他行星引力作用,地球绕太阳公转的轨道近似椭圆,离太阳近的地球公转速度大于离太阳远的地球公转速度,地球公转速度不同引起地球日所需自转角度有微小差别,使得不同地球日存在时差,并且黄赤交角为 $23^{\circ}26'$,因此准确计算太阳位置相当困难。本文采用王炳忠等^[17,19]改进的天文参数公式计算太阳高度角有关的赤纬和时角参数,该公式对起始日、年份、经度和时刻等作了修正,能够较为准确地计算太阳高度角,计算太阳高度角的数据精度参见文献^[17,19]。计算得到太阳高度角的数据精度随时空变化存在一定幅度的动态变化,个例不具有代表性。受同时性及大尺度时空

的限制,通过观测数据归纳区域太阳高度角平均偏差的数据精度变化规律非常困难。本文使用成熟的计算方法计算太阳高度角,计算同时刻区域中心点和其周围点的太阳高度角所使用的天文参数的同向性变化,区域太阳高度角平均偏差的计算精度比太阳高度角更高。

3 结果与讨论

3.1 统计结果

经 9 种直径区域共 4608 组样本数据验算,统计区域太阳高度角平均偏差均值、最大值、最小值与区域直径的关系,如图 1 所示,分级组计算平均偏差标准差,对级组平均偏差均值线性系数进行分段计算,见表 1。

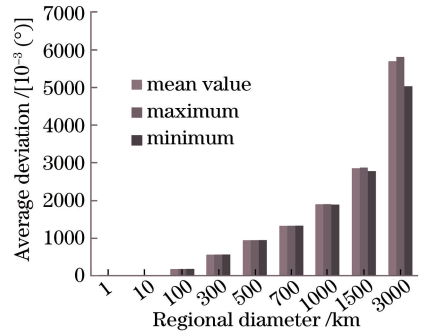


图 1 区域太阳高度角平均偏差均值、最大值、最小值与区域直径的关系

Fig. 1 Mean value, maximum value, and minimum value of average deviation of regional solar elevation versus regional diameter

表 1 区域太阳高度角平均偏差均值、标准差及线性系数与区域直径的关系

Table 1 Relationship between mean value, standard deviation, and linear coefficient of average deviation of regional solar elevation and regional diameter

Regional diameter /km	Mean value / [10 ⁻³ (°)]	Standard deviation / 10 ⁻⁶	Linear coefficient / [10 ⁻³ (°) · km ⁻¹]
1	1.90844	0.00731	1.9084
10	19.0844	0.07322	1.9084
100	190.843	3.17701	1.9084
300	572.516	83.5122	1.9084
500	954.147	389.948	1.9082
700	1335.71	1085.05	1.9078
1000	1907.84	3267.81	1.9071
1500	2860.44	12237.3	1.9052
3000	5705.73	104265	1.8969

区域太阳高度角平均偏差特征规律可归纳为:

1) 区域直径为区域太阳高度角平均偏差的实质性相关因子。大小相同区域的太阳高度角平均偏差值非常接近,区域太阳高度角平均偏差均值与区域直径为正相关的近线性关系,线性系数随着区域

直径的增大而略微减小,即区域太阳高度角平均偏差均值 $\theta_{SE}V_P$ 与区域直径 D_A 的关系为

$$\theta_{SE}V_P = C_1 D_A, \quad (13)$$

式中: C_1 为区域太阳高度角平均偏差均值与区域直径的线性系数,单位为 $(^{\circ}) \cdot \text{km}^{-1}$, C_1 随着区域直径

的增大而略微减小,当区域直径小于 3000 km 时,线性系数为 $(1.8969\sim 1.9084)\times 10^{-3}(\text{°})\cdot \text{km}^{-1}$ 。

2) 太阳高度角与监测地经纬度、监测日期及监测时间因子的相关关系非常明确[(1)式];从统计结果得出区域太阳高度角平均偏差与监测地经纬度、监测日期及监测时间因子无明显关联,为弱相关关系。

3) 经统计得到区域太阳高度角平均偏差的离散度,其值极小,主要与区域直径因子有关,随着区域直径增大,标准差相应增大。区域小,则均值与最大值、最小值较接近,最大值或最小值随着区域直径的增大而逐渐发散,表现为均值与区域直径的相关系数随着区域直径的增大而缓慢减小,最大值缓慢增大,最小值则微快减小;当地域纬度变大,或时间接近午时,均值与区域直径的相关系数略微减小,最大值或最小值与区域直径的相关系数略微增大,当靠近 3 月,均值、最大值或最小值与区域直径的相关系数略微增大,而年份影响差异不明显。

3.2 讨 论

参照本文计算方法,同样可计算地面上不同高度球面的区域太阳高度角平均偏差,得到与前述类似的规律特征。

鉴于太阳位置变化的日和年的周期性,圆形区域面最适合用于计算区域中心点与周围点的太阳高度角偏差,避免因区域形状产生差异。

4 结 论

为了得到区域太阳高度角平均偏差的特征规律,首先设计区域太阳高度角平均偏差的计算方法,建立了分布合理的样本数据,然后进行计算和统计归纳,在该过程中取得了如下成果:

1) 设计区域太阳高度角平均偏差的计算方法。以圆形区域作为考察区域、二维数组计算空间为方形区域,以权重规则区分出有效区域;根据太阳高度角公式及二维数组参数,落实区域各格点太阳高度角及其参数的计算方法,计算区域各格点太阳高度角;制定权重规则,包括点状态判断规则和点权重赋值规则;根据平均偏差计算方法及权重规则计算圆形区域太阳高度角偏差的绝对平均值。

2) 区域太阳高度角平均偏差与区域直径为实质性相关。大小相同区域的太阳高度角平均偏差值非常接近,平均偏差与区域直径为正相关的近线性关系,线性系数随着区域直径的增大而略微减小,当区域直径小于 3000 km 时,线性系数为 $(1.8969\sim$

$1.9084)\times 10^{-3}(\text{°})\cdot \text{km}^{-1}$;相同宽度的区域太阳高度角平均偏差的离散程度极小。

3) 区域太阳高度角平均偏差的离散程度极小,表明所设计的计算方法可准确计算单元面积内太阳高度角平均变化的太阳辐射,精确分析元数据太阳高度角的代表性。

4) 统计规律表现出简洁性、高稳定性和高可靠性,可用于解决太阳高度角区域代表性问题,构建确定太阳高度角数据密度的方法。

参 考 文 献

- [1] He X F, Yuan C H, Yang Z B. Performance evaluation of Chinese solar radiation forecast based on three global forecast back ground fields [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2016, 37(4): 897-904.
何晓凤, 袁春红, 杨振斌. 3 种全球预报背景场对中国太阳辐射预报的性能评估 [J]. *太阳能学报*, 2016, 37(4): 897-904.
- [2] Zhang Y, Zhang W B, Wang Z H, et al. Analysis of fair-weather atmospheric electric field over Eurasian Continent [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2015, 38(5): 703-709.
张祎, 张卫斌, 王振会, 等. 欧亚大陆晴天大气电场变化特征统计分析 [J]. *大气科学学报*, 2015, 38(5): 703-709.
- [3] Liang S Z, Sui X Y, Hou X H, et al. Simulation and analysis on green fraction of absorbed photosynthetically active radiation of deciduous broadleaved forests canopy through remote sensing model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(10): 3415-3424.
梁守真, 隋学艳, 侯学会, 等. 落叶阔叶林冠层光合有效辐射分量的遥感模拟与分析 [J]. *生态学报*, 2017, 37(10): 3415-3424.
- [4] Zhang Y H, Shao K S, Tang X Y, et al. The study of urban photochemical smog pollution in China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 1998, 34(2/3): 392-400.
张远航, 邵可声, 唐孝炎, 等. 中国城市光化学烟雾污染研究 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1998, 34(2/3): 392-400.
- [5] Liu X, Wu G X, Li W P. The diurnal variation of the atmospheric circulation and diabatic heating over the Tibetan Plateau [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(12): 1273-1282.
刘新, 吴国雄, 李伟平. 夏季青藏高原加热和环流场的日变化 [J]. *地球科学进展*, 2006, 21(12): 1273-

- 1282.
- [6] Gao X Y, Zhang Y, Cui Y X, et al. Research progress in organic photomultiplication photodetector [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 070001.
高秀云, 张叶, 崔艳霞, 等. 有机光电倍增探测器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(7): 070001.
- [7] Liu Y Z, Li G H, Cui Y X, et al. Research progress in perovskite photodetectors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(1): 010001.
刘艳珍, 李国辉, 崔艳霞, 等. 钙钛矿光电探测器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(1): 010001.
- [8] Nan T L, Shen H H, Yang M Y, et al. Fast radiometric calibration method for long wave infrared detectors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 122501.
南童凌, 沈宏海, 杨名宇, 等. 一种长波红外探测器的快速辐射定标方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 122501.
- [9] Su W, Zhang M Z, Jiang K P, et al. Atmospheric correction method for Sentinel-2 satellite imagery[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0128001.
苏伟, 张明政, 蒋坤萍, 等. Sentinel-2 卫星影像的大气校正方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0128001.
- [10] Zhang X Q. The method of calculating solar elevation by block interpolation for space-based remote sensing: 201510340050.9[P]. 2015-09-09.
张行清. 天基遥感分块插值计算太阳高度角的方法: 201510340050.9[P]. 2015-09-09.
- [11] Price J C. Calibration of satellite radiometers and the comparison of vegetation indices[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1987, 21(1): 15-27.
- [12] Markham B L, Barker J L. Thematic Mapper bandpass solar exoatmospheric irradiances [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1987, 8(3): 517-523.
- [13] Vermote E F, Tanre D, Deuze J L, et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(3): 675-686.
- [14] Ji C D, Sun D Z, Ma C N. NPP VIIRS data fast atmospheric correction and accuracy evaluation based on 6S model[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 080101.
吉长东, 孙道中, 马传宁. 基于 6S 模型 NPP VIIRS 数据快速大气校正及精度评估[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 080101.
- [15] Spencer J W. Fourier series representation of the position of the sun[J]. *Search*, 1971, 2(5): 172.
- [16] Michalsky J J. The Astronomical Almanac' s algorithm for approximate solar position (1950-2050) [J]. *Solar Energy*, 1988, 40(3): 227-235.
- [17] Wang B Z, Liu G S. Improvement in the astronomical parameters computation for solar radiation observation [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 1991, 12(1): 27-32.
王炳忠, 刘庚山. 日射观测中常用天文参数的再计算[J]. *太阳能学报*, 1991, 12(1): 27-32.
- [18] Wang B Z. Calculation of astronomical parameters in solar energy[J]. *Solar Energy*, 1999(2): 8-10.
王炳忠. 太阳能中天文参数的计算[J]. *太阳能*, 1999(2): 8-10.
- [19] Wang B Z, Tang J. Comparison of the different methods for solar position calculation [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2001, 22(4): 413-417.
王炳忠, 汤洁. 几种太阳位置计算方法的比较研究[J]. *太阳能学报*, 2001, 22(4): 413-417.