0254-6124/2022/42(1)-0034-10 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

YANG Xiaohua, WANG Qixi, XIA Zhongfei, BAO Yun, PENG Dailiang, TIAN Tian, XU Long. Quantitative Characterization of Photospheric Magnetic Field in Solar Active Regions (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(1): 34–43. DOI:10.11728/cjss2022.01.200826076

太阳活动区光球磁场特征的量化*

杨晓华[1] 王栖溪[1] 夏仲飞[1] 包 赟[1]
彭代亮[2] 田 天[3] 徐 龙[4]

1(中国人民解放军 31010 部队 北京 100081)

2(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

3(中国人民解放军 61741 部队 北京 100094)

4(中国科学院国家天文台 北京 100012)

摘 要 为有效解决太阳活动区磁场特征量化问题，对所有 SOHO 卫星 MDI 磁图预处理后，分割出日面角 45°以内的活动区，分析活动区投影面积变形来源，研究建立 Cosine 面积校正因子，校正活动区面积，构建具有 21 个特征参数的活动区磁场特征量化指标体系，通过主成分分析法对量化结果计算累积方差，结合活动区 10486 爆发 X17.2 级耀斑时的磁场变化定性分析。结果表明：强梯度极性分隔线权重磁场绝对值之和 R、极性分隔线长度 L_{PS}、强梯度极性分隔线长度 L_{sg} 和强梯度极性分隔线磁场绝对值之和 ϕ_{PSL} 能够解释活动区磁场结构变化; 磁场通量绝对值总和 ϕ_{uns}、磁场负通量总和 ϕ_{-}、磁场值代数和 ϕ_{tot} 和磁场绝对值之和的平均值 ϕ_{mean} 能够解释活动区磁场通量变化。ϕ_{PSL} 为本文新构建特征参数。上述参数可有效监测耀斑爆发前后活动区磁场结构和磁场通量的变化情况，量化结果可作为耀斑、质子事件监测及耀斑预报模型输入，为开展太阳爆发活动监测预警提供技术支撑。

关键词 太阳活动区，面积校正，磁场，量化体系

中图分类号 P353

Quantitative Characterization of Photospheric Magnetic Field in Solar Active Regions

YANG Xiaohua[1] WANG Qixi[1] XIA Zhongfei[1] BAO Yun[1]

PENG Dailiang[2] TIAN Tian[3] XU Long[4]

1(31010 *Troops of PLA*, *Beijing* 100081)

2(*Aerospace Information Research Institute*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100094)

3(61741 *Troops of PLA*, *Beijing* 100094)

4(*National Astronomical Observatories*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100012)

* 国家自然科学基金项目资助（11033001）

2020-08-26 收到原稿，2021-06-29 收到修定稿

E-mail：yxhua3@163.com

Abstract In order to resolve the quantitative technique of photospheric magnetic field in solar active regions, all SOHO Michelson Doppler Interferometer (MDI) magnetograms from 1996 to 2011 have been used, and all solar active regions located within 45° solar surface angle have been segmented. The projection distortion of magnetogram area have been studied, then the consine factors for area correction have been established, and solar active regions area have been corrected. Based on the photospheric parameters quantified by Ref. [18–20], the index system has been built and improved, and it has been used to quantity characterization of magnetic field. The quantitative result has been analyzed by the Principal Component Analysis (PCA), and magnetic field of active region10486 erupted X17.2 flare has been analyzed. The results show that R, $L_{\rm PS}$, $L_{\rm sg}$ and $\phi_{\rm PSL}$ can explain the change of magnetic field structure in active region, and $\phi_{\rm uns}$, ϕ_{-}, $\phi_{\rm tot}$, and $\phi_{\rm mean}$ can explain the change of magnetic flux in active region. $\phi_{\rm PSL}$ is the new characteristic parameters in this paper. The above parameters can monitor the changes of magnetic field structure and magnetic flux in the active region effectively before and after the flare eruption; the quantitative results could be used as the input of flare, proton event monitoring and flare prediction model, and provided technical support for the monitoring and early warning of solar flare activity.

Key words Solar active region, Area correction, Magnetic field, Quantitative index system

0 引言

太阳耀斑定义为发生在太阳表面局部区域中突然和大规模的能量释放过程[1,2], 是最剧烈的太阳活动现象之一。强耀斑爆发将会引发 X 光辐射增强、高能粒子事件、地磁暴和电离层暴等灾害性事件[3], 因而对太阳活动区磁场特征量化以实现对耀斑的监测预报具有实用价值。

通过太阳观测卫星对耀斑爆发过程的磁场状态进行监测和分析可知, 耀斑爆发与活动区的磁场结构及特征有关, 但从空间物理学的角度还无法建立基于物理过程的耀斑预报模型, 通过多年的观测数据, 人们总结出耀斑与其他太阳活动现象的相关规律, 通过这些规律可以对太阳耀斑的未来形成和发展进行大致描述[4-10]。研究表明, 太阳耀斑的发生与太阳黑子具有紧密联系[11], 各空间天气研究中心开发的太阳耀斑预报模型选择太阳黑子数据作为预报参量。NOAA 空间环境实验室和 Colorado 大学联合开发了一个专家系统预报太阳耀斑[11]。美国大熊湖天文台的 Gallagher 等利用黑子组的 McIntosh 分类开发了一个预报系统, 该系统可以估计太阳上每个活动区产生 C、M、X 级耀斑的概率[11]。北京天文台使用多元回归方法建立了太阳耀斑预报模型, 该模型使用了太阳黑子数据、射电流量和磁场位型等预报因子, 预报未来 48 h 内 M 和 X 级耀斑发生概率[12-13]。Li 等[14-15]提出了一种结合支持向量机和近邻法的太阳耀斑预报方法, 通过输入活动区面积、磁类型和射电流量等特征参数, 使用 SVM-KNN 分类算法预报模型, 预报该活动区未来二天内是否发生太阳耀斑。Lui 等[16]利用多模型融合方法建立了一个多元异构模型用于耀斑短期预报。Carolus 等[17] 量化了活动区强磁场梯度附近的磁场通量、强磁场极性分隔线和强磁场极性分隔线附近磁场通量绝对值进行耀斑预报。Falconer 等[18,19] 量化了活动区主要中性线上磁剪切长度(所有水平场>150×10^{-4} T, 剪切角>45°的中性线长度), 主要中性线上强梯度长度(所有潜在水平场>150×10^{-4} T, 磁场垂直组分的水平梯度>50×10^{-4} T 的中性线长度), 强磁剪切中性线长度和强梯度中性线长度等磁场特征参数。Higgins 等[20] 量化了活动区磁场最大值、磁场最小值、磁场正通量总和、磁场负通量总和、磁场通量不平衡率和磁场净通量增加率等磁场特征参数。

本文在结合文献 [18–20] 研究中量化的活动区磁场特征参数的基础上, 通过改进和修改现有特征参数, 提出 4 个新的特征参数, 确定了 3 组 21 个特征参数的量化指标体系, 计算了 1996—2011 年历时 16 年的太阳观测磁图影像数据, 对量化结果进行了评价。

1 数据预处理

研究数据包括 1996—2011 年历时 16 年的太阳观测磁图数据，由于卫星在不同时期运行方位不同造成磁图方向不同，并且卫星在方位旋转时造成磁图只有半个日面影像或磁图呈条纹状等质量问题，本文对方向不同的磁图进行了方向校正，对存在质量问题的磁图进行了剔除。磁图预处理过程主要包括磁图方向校正、像元损失校正和面积校正[21]。

1.1 磁图方向校正

SOHO 卫星在运行期间，一直使 MDI CCD 相机的列与太阳旋转轴保持精确平行，从 1995—2002 年在磁图上太阳北极始终向上，即旋转角度 P_{angle} 为 0°；从 2003 年开始，为了调节高增益天线的定向问题，SOHO 卫星每年周期性翻转四次，每次翻转 180° 左右，即第一次和第三次翻转后，P_{angle} 位于 180°左右，磁图上太阳南极向上，因此，此时的 P_{angle} 数据需要使用者自行校正为 0°，本文根据磁图数据头文件记录，对 P_{angle} 为 180°左右的所有磁图进行了角度旋转校正，校正后 P_{angle} 为 0°。

1.2 像元损失校正

对于损失的像元，利用最近邻采样进行插值。对于二维图像，即选择损失像元周围 4 个相邻像元中距离最近的 1 个相邻点的灰度值作为损失像元的像素值。最近邻插值数学公式为

$$\begin{cases} g(x',y') = f(x,y); \\ x = [m+0.5]; \\ y = [n+0.5]. \end{cases} \tag{1}$$

式中，[ ] 表示取整数。此种方法计算量小，算法简单。

1.3 磁图面积校正

由于太阳全日面影像相当于太阳半球面的平面投影而造成活动区面积误差，对趋于日面边缘的活动区特征参数量化精度影响较大。为校正此影响，根据面积变形来源(见图 1)，推导如下面积校正公式：

$$\begin{cases} \cos(\alpha_1) = x/R_{\text{sun}}, \\ \cos(\alpha_2) = 2x/R_{\text{sun}}, \\ \cos(\alpha_3) = 3x/R_{\text{sun}}, \\ \cdots\cdots \\ \cos(\alpha_{497}) = 497x/R_{\text{sun}}; \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} \alpha_1 = \dfrac{\arccos(x/R_{\text{sun}})}{2/\pi} \times 90, \\ \alpha_2 = \dfrac{\arccos(2x/R_{\text{sun}})}{2/\pi} \times 90, \\ \alpha_3 = \dfrac{\arccos(3x/R_{\text{sun}})}{2/\pi} \times 90, \\ \cdots\cdots \\ \alpha_{497} = \dfrac{\arccos(497x/R_{\text{sun}})}{2/\pi} \times 90, \\ R_{\text{sun}} = 497x; \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} \alpha_1 = \dfrac{\arccos(1/497)}{2/\pi} \times 90, \\ \alpha_2 = \dfrac{\arccos(2/497)}{2/\pi} \times 90, \\ \alpha_3 = \dfrac{\arccos(3/497)}{2/\pi} \times 90, \\ \cdots\cdots \\ \alpha_{497} = \dfrac{\arccos(497/497)}{2/\pi} \times 90; \end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{cases} \varphi_1 = 90 - \alpha_1, \\ \varphi_2 = 90 - \alpha_2, \\ \varphi_3 = 90 - \alpha_3, \\ \cdots\cdots \\ \varphi_{497} = 90 - \alpha_{497}; \end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{cases} \theta_1 = \varphi_1, \\ \theta_2 = \varphi_2 - \varphi_1, \\ \theta_3 = \varphi_3 - \varphi_2, \\ \cdots\cdots \\ \theta_{497} = \varphi_{497} - \varphi_{496}; \end{cases} \tag{6}$$

$$\begin{cases} l_1 = \dfrac{2\pi R_{\text{sun}}}{4} \times \dfrac{\theta_1}{90}, \\ l_2 = \dfrac{2\pi R_{\text{sun}}}{4} \times \dfrac{\theta_2}{90}, \\ l_3 = \dfrac{2\pi R_{\text{sun}}}{4} \times \dfrac{\theta_3}{90}, \\ \cdots\cdots \\ l_{497} = \dfrac{2\pi R_{\text{sun}}}{4} \times \dfrac{\theta_{497}}{90}; \end{cases} \tag{7}$$

$$\begin{cases} c_1 = l_1/x, \\ c_2 = l_2/x, \\ c_3 = l_3/x, \\ \cdots\cdots \\ c_{497} = l_{497}/x; \end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{cases} c_1 = \dfrac{497\pi}{2} \times \dfrac{\theta_1}{90}, \\ c_2 = \dfrac{497\pi}{2} \times \dfrac{\theta_2}{90}, \\ c_3 = \dfrac{497\pi}{2} \times \dfrac{\theta_3}{90}, \\ \cdots\cdots \\ c_{497} = \dfrac{497\pi}{2} \times \dfrac{\theta_{497}}{90}. \end{cases} \tag{9}$$

根据图 1 所示参量, 通过式(1)～(9)可以计算得到每个像元的 Cosine 面积校正系数 c_i。

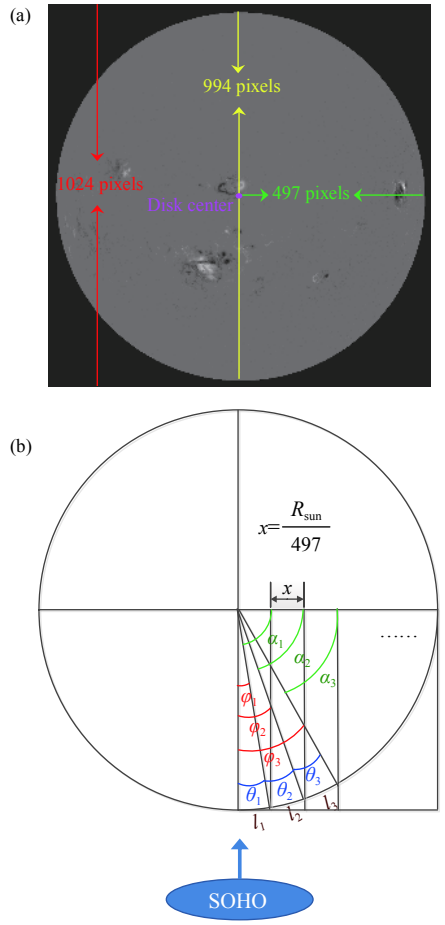


图 1　太阳球面面积校正。(a) 表示磁图影像为 1024 pixel×1024 pixel (红线), 太阳圆盘直径为 994 pixel (黄线), 太阳圆盘半径为 497 pixel (绿线), 紫色点为日面中心。(b) R_{sun} 表示太阳半径, x表示一个像元的边长, l_i 表示平面图中像元边长所对应的弧长x, θ_i表示弧长 l_i 对应的日心角, α_i 和φ_i表示计算过程中的变量

Fig. 1　Schematic diagram of solar spherical area correction. (a) Shows that the magnetic image is 1024 pixel×1024 pixel (red line), the diameter of the solar disk is 994 pixel (yellow line), the radius of the solar disk is 497 pixel (green line), and the purple point is the center of the Sun. (b) R_{sun} denotes the solar radius, x represents the edge length of a pixel, l_i represents the arc length corresponding to the pixel edge length x in the plane view, θ_i represents the heliocentric angle corresponding to the arc length l_i, a_i and φ_i represent the variables in the calculation process

2　量化指标构建

在文献 [18-20] 研究中量化的活动区磁场特征参数基础上, 根据变量表达的物理意义, 对活动区 10486 的形态、面积、磁场结构和磁场极性等特征进行量化比较, 提出 3 个新的特征参数(极性分隔线最大磁场梯度$\nabla\phi_{max}$、极性分隔线平均磁场梯度$\nabla\phi_{mean}$和强梯度极性分隔线磁场绝对值之和ϕ_{PSL}), 形成 3 组 21 个特征参数的量化指标体系。通过对活动区 10486 进行磁场结构分析, 在对其太阳黑子群解译(见图 2)的基础上, 统计分析了耀斑爆发情况, 并解析了其磁场结构变化对耀斑爆发的指示作用, 确定了量化指标体系, 包括活动区特征参数 10 个, 极性分隔线特征参数 8 个和活动区类型特征参数 3 个(见表 1)。

3　量化结果

处理 1996—2011 年历时 16 年的太阳观测磁图影像数据, 数据总量达 289 GByte, 处理完成的监测结果记录为 376197 条。影像数据经过预处理后, 分割出日面角 45°以内所有面积≥50 个像元的活动区; 对所有活动区进行特征量化, 产生 10 个特征参数; 对极性分隔线进行特征量化, 产生 8 个特征参数; 再对活动区进行分类, 产生 3 个特征参数; 对量化结果通过主成分分析[22], 进行特征参数定量评价; 选取活动区 10486 对量化结果进行定性分析; 分析出对耀斑爆发贡献较大的特征参数组合。

3.1　总体量化结果分析

基于 SPSS PASW Statistics v18.0 统计软件, 利用该软件提供的因子分析技术, 对所有量化结果包括 376197 条记录的 21 个参数进行主成分分析[23-24], 计算得到的各特征参数方差和累积方差见表 2。

从主成分分析结果可以得出: 表 2 中前 5 个特征参数的初始特征值都大于 1, 且累积方差达到 74.803%; 本研究为提高特征参数贡献率, 选取主成分分析后的前 9 个特征参数, 使累积贡献率达到 90%, 提取的特征参数包括 R、ϕ_{uns}、L_{PS}、ϕ_{-}、ϕ_{tot}、ϕ_{min}、L_{sg}、ϕ_{PSL} 和ϕ_{mean}, 其中 4 个特征参数与极性分隔线有关, 另外 5 个与活动区磁场通量有关。

3.2　活动区 10486 量化结果分析

本文仅列出活动区 10486 在 2003 年 10 月 28 日,

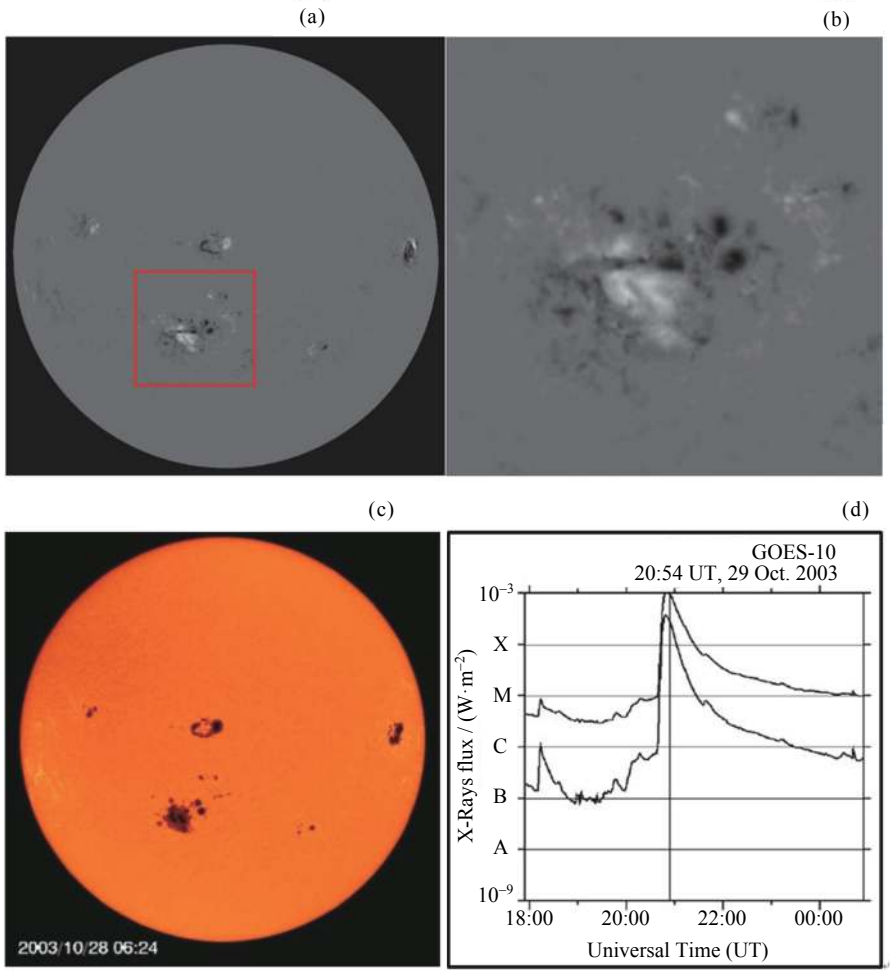


图 2 活动区 10486 磁场 (a)(b)、黑子群 (c) 和 X 射线通量 (d)

Fig. 2 Magnetic field (a)(b), sunspot (c) and X-ray flux (d) of active region 10486

位于日面爆发 X17.2 级耀斑前后时刻的量化结果(见表 3)。

活动区 10486 在 28 日 11:06 UT 爆发了 1 次X17.2 级耀斑,依据量化结果(见表 3 和图 3),定性分析各量化指标对耀斑爆发的作用。

3.2.1 活动区特征参数量化结果

从活动区特征参数看,耀斑爆发时(08:00—11:12 UT),$A_{\rm tot}$、$\phi_{\rm max}$、$\phi_{\rm min}$ 和$\phi_{\rm imb}$ 增加率都小于 50%;$\phi_{\rm tot}$ 增加率为 93.40%;$\phi_{\rm mean}$、ϕ_{+}、ϕ_{-}和 $\phi_{\rm uns}$ 的增加率均大于 100%,分别为 108.42%、105.26%、127.74% 和 111.03%,而 $\mathrm{d}\phi/\mathrm{d}t$ 从 09:36 UT 到 11:12 UT 增加率为–164.69%。说明$\phi_{\rm tot}$、$\phi_{\rm mean}$、ϕ_{+}、ϕ_{-}、$\phi_{\rm uns}$ 和 $\mathrm{d}\phi/\mathrm{d}t$ 对耀斑爆发具有较好的指示作用,这 6 个特征参数的变化趋势表明,耀斑爆发时磁场结构变化较大,有新的磁通量浮现,当新浮磁场出现在已存在活动区内时,将造成活动区磁场结构不稳定,易爆发耀斑;新浮磁流与老磁场的相互作用可能导致磁场剪切和变形,随着磁场复杂性的增强,达到某种条件后,积累的磁场能量在较短的时间内释放出来,可能导致太阳耀斑爆发。另外,有研究表明,1980 年 6 月有一个活动区在 7 天中,产生的 86 个耀斑有 54% 产生在新浮磁通量区,20% 位于新浮磁通量区和老磁场区交界处,26% 的耀斑发生在新浮磁通量区之外[25-26],这与本文研究结论具有一致性。

3.2.2 极性分隔线特征参数量化结果

从极性分隔线特征参数看,$L_{\rm PS}$ 和 R 从 08:00 UT 到 11:12 UT 增加率分别为 766.67% 和 906.91%;$L_{\rm sg}$、$\nabla\phi_{\rm max}$、$\nabla\phi_{\rm mean}$、$W_{\rm Lsg}$、$W^{*}_{\rm Lsg}$和$\phi_{\rm PSL}$ 在耀斑爆发前后为 0,而爆发时达到最大值(7.00、319.35、28.85、319.35、663.44、855.14),说明极性分隔线特征参数对

表 1　太阳活动区磁场特征量化指标

Table 1　Quantitative index of magnetic field characteristics in solar active region

	特征参数	提出或优化算法表达	指标描述(均为单个活动区的量化指标)	编号
活动区磁场特征量化	活动区面积$A_{\rm tot}$	$\sum_p A_{{\rm cos},t,i}$	计算磁图面积校正后的活动区面积	1
	磁场最大值$\phi_{\rm max}$	$\phi_{{\rm max},t,i}$	提取活动区中磁场最大值	2
	磁场最小值$\phi_{\rm min}$	$\phi_{{\rm min},t,i}$	提取活动区中磁场最小值	3
	磁场值代数和$\phi_{\rm tot}$	$\sum_p \phi_{t,i}$	活动区中所有正负磁场值的代数和	4
	磁场绝对值和的平均值$\phi_{\rm mean}$	$\sum_p \lvert\phi_{t,i}\rvert \Big/ \sum_p A_{{\rm cos},t,i}$	活动区中所有正负磁场值的绝对值和的平均值	5
	磁场正通量总和ϕ_+	$\sum_p (\phi_{t,i}>0)$	活动区中所有正磁场值的代数和	6
	磁场负通量总和ϕ_-	$\sum_p (\phi_{t,i}<0)$	活动区中所有负磁场值的代数和	7
	磁场通量绝对值总和$\phi_{\rm uns}$	$\sum_p \lvert\phi_{t,i}\rvert$	活动区中所有正负磁场值的绝对值的和	8
	磁场通量不平衡率$\phi_{\rm imb}$	$\lvert(\phi_{+,t,i}-\lvert\phi_{-,t,i}\rvert)\rvert/\phi_{uns,t,i}$	正负磁场通量差值相对于磁通量绝对值总和的变化率	9
	磁场净通量增加率$\mathrm{d}\phi/\mathrm{d}t$	$\left.\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}\right\rvert_{net,t,i}=\sum_p \left.\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}\right\rvert_{t,i}=\frac{\sum_p \phi_{t,i}-\sum_p \phi_{t-\Delta t,i}}{\Delta t}$	正负磁场值的代数和在单位时间内变化情况	10
	强梯度极性分隔线长度L_{sg}	$\sum_p \nabla\phi_{t,i}>50\times10^{-4}$ T,$\nabla\phi_{t,i}$用三点拉格朗日插值获取,获取后选取$\nabla\phi_{t,i}>50\times10^{-4}$ T的像元,计算其个数。	极性分隔线上相邻磁场值差值>50×10^{-4} T的像元个数总和	11
	极性分隔线长度$L_{\rm PS}$	$\sum_p P\neq0$	极性分隔线上磁场值≠0的像元个数总和	12
	极性分隔线最大磁场梯度$\nabla\phi_{\rm max}$	$\nabla\phi_{\rm max}$	极性分隔线上相邻磁场值差值最大的值	13
	极性分隔线平均磁场梯度$\nabla\phi_{\rm mean}$	$\nabla\phi_{\rm mean}$	极性分隔线上相邻磁场值差值的平均值	14
活动区极性分隔线特征量化	强梯度极性分隔线的梯度权重(非势场测量)W_{Lsg}	$W_{Lsg}=\int(\nabla\phi z)\mathrm{d}l$,选取极性分隔线上磁场值>$150\times10^{-4}$ T的像元,计算其三点拉格朗日插值,后利用此公式计算W_{Lsgi}	极性分隔线上磁场值>150×10^{-4} T的像元拉格朗日插值长度积分	15
	修正的W_{Lsg}, W^*_{Lsg}	$\sum_p M_{{\rm PSL},t,i}\ \nabla\phi_{t,i}$, $\nabla\phi_{t,i}$用三点拉格朗日插值获取。	极性分隔线上磁场值>150×10^{-4} T的像元拉格朗日插值磁场值积分	16
	强梯度极性分隔线权重磁场绝对值之和R	$\sum_p (M_{{\rm PSL},t,i}G_{\rm 2D})\phi_{t,i}$	强梯度极性分隔线上磁场值乘以高斯权重后绝对值之和	17
	强梯度极性分隔线磁场绝对值之和$\phi_{\rm PSL}$	$\sum_p \lvert\phi_{{\rm PSL},t,i}\rvert$	强梯度极性分隔线上磁场值绝对值之和	18
	磁场极性类别(单极/多极)	$\phi_{{\rm imb},t,i}\geqslant90\%$为单极,$\phi_{{\rm imb},t,i}<90\%$为多极	根据磁场通量不平衡率,分单极或多极	19
活动区分类	磁场强弱类别(强/弱)	$\phi_{{\rm uns},t,i}\geqslant10^{21}Mx$为强通量,$\phi_{{\rm uns},t,i}<10^{21}Mx$为弱通量	根据磁场通量绝对值总和,分强通量或弱通量	20
	磁场通量演化状态(增加/下降)	$\mathrm{d}\phi/\mathrm{d}t_{\,t,i}\geqslant0$为磁通量增加,$\mathrm{d}\phi/\mathrm{d}t_{\,t,i}<0$为磁通量下降	根据磁场净通量增加率,分磁通量增加或下降	21

注　$L_{\rm sg}$、$\nabla\phi_{\rm max}$、$\nabla\phi_{\rm mean}$、$\phi_{\rm PSL}$为本研究中新提出变量; $A_{\rm tot}$、$\phi_{\rm max}$、$\phi_{\rm min}$、$\phi_{\rm tot}$、$\phi_{\rm mean}$、ϕ_+、ϕ_-、$\phi_{\rm uns}$、$\phi_{\rm imb}$、$\mathrm{d}\phi/\mathrm{d}t$、$L_{\rm PS}$、$W^*_{Lsg}$和$R$由文献[21]提出; $L_{\rm sg}$和W_{Lsg}由文献[18, 19]提出; 所有公式中的t, i分别表示t时刻影像的第i个像元; P为pixel取值范围; $G_{\rm 2D}$为二维高斯平滑。

表 2 磁场特征量化结果主成分分析结果

Table 2 Results of principal component analysis of quantitative results of magnetic field characteristics

特征参数	初始特征值			提取的平方和载入值		
	合计	方差/(%)	累积 /(%)	合计	方差 /(%)	累积 /(%)
极性分隔线权重磁场值的和R	8.049	38.327	38.327	8.049	38.327	38.327
磁场通量绝对值总和$\phi_{\rm uns}$	3.404	16.208	54.535	3.404	16.208	54.535
极性分隔线长度$L_{\rm PS}$	1.782	8.488	63.023	1.782	8.488	63.023
磁场负通量总和ϕ_-	1.360	6.479	69.501	1.360	6.479	69.501
磁场值代数和$\phi_{\rm tot}$	1.113	5.302	74.803	1.113	5.302	74.803
磁场最小值$\phi_{\rm min}$	0.985	4.693	79.496	0.985	4.693	79.496
强梯度极性分隔线长度$L_{\rm sg}$	0.889	4.234	83.729	0.889	4.234	83.729
强梯度极性分隔线磁场绝对值之和$\phi_{\rm PSL}$	0.800	3.812	87.541	0.800	3.812	87.541
磁场绝对值之和平均值$\phi_{\rm mean}$	0.562	2.678	90.219	0.562	2.678	90.219
极性分隔线最大磁场梯度$\nabla\phi_{\rm max}$	0.501	2.387	92.606	—	—	—
磁场强弱类别(强/弱)	0.454	2.164	94.770	—	—	—
修正的W_{Lsg}(W^*_{Lsg})	0.370	1.763	96.533	—	—	—
磁场净通量增加率$\mathrm{d}\phi/\mathrm{d}t$	0.271	1.289	97.822	—	—	—
强梯度极性分隔线梯度权重$W_{\rm Lsg}$	0.180	0.857	98.679	—	—	—
磁场通量不平衡率$\phi_{\rm imb}$	0.135	0.641	99.320	—	—	—
磁场极性类别(单极/多极)	0.088	0.421	99.741	—	—	—
磁场正通量总和ϕ_+	0.034	0.163	99.903	—	—	—
磁场最大值$\phi_{\rm max}$	0.020	0.096	100.000	—	—	—
磁场通量演化状态(增加/下降)	0.000	0.000	100.000	—	—	—
极性分隔线平均磁场梯度$\nabla\phi_{\rm mean}$	0.000	0.000	100.000	—	—	—
面积$A_{\rm tot}$	0.000	0.000	100.000	—	—	—

耀斑爆发具有主导作用,极性分隔线变化时活动区磁场结构发生变化,可能出现磁场剪切或磁场扭曲等运动,导致耀斑爆发。近年来有研究表明,由纵场推求出极性分隔线附近的磁场梯度与由向量磁场求出的磁剪切之间具有很好的相关性,说明磁场梯度是能否产生耀斑的一个更好指标[18,27],且具有强磁场梯度的极性分隔线长度也与耀斑爆发具有密切关系[28],此研究结果能够很好支撑本文研究结论。

3.2.3 活动区状态分类特征参数量化结果

从活动区状态分类特征参数看,与耀斑爆发过程关系不大。综上所述,从活动区 10486 的定性分析得出:$\phi_{\rm tot}$、$\phi_{\rm mean}$、ϕ_+、ϕ_-、$\phi_{\rm uns}$、$\mathrm{d}\phi/\mathrm{d}t$、$L_{\rm PS}$、$R$、$L_{\rm sg}$、$\nabla\phi_{\rm max}$、$\nabla\phi_{\rm mean}$、$W_{\rm Lsg}$、$W^*_{Lsg}$和$\phi_{\rm PSL}$ 对耀斑爆发过程具有较好的指示作用,同时也说明耀斑爆发时有新的磁通量浮现,并伴有磁场结构的变化。

3.3 最优特征参数选取

根据量化结果的主成分分析累积方差结果选取的最优变量包括 R、$\phi_{\rm uns}$、$L_{\rm PS}$、ϕ_-、$\phi_{\rm tot}$、$\phi_{\rm min}$、$L_{\rm sg}$、$\phi_{\rm PSL}$ 和$\phi_{\rm mean}$;根据活动区 10486 定性分析结果选取的最优变量包括$\phi_{\rm tot}$、$\phi_{\rm mean}$、ϕ_+、ϕ_-、$\phi_{\rm uns}$、$\mathrm{d}\phi/\mathrm{d}t$、$L_{\rm PS}$、$R$、$L_{\rm sg}$、$\nabla\phi_{\rm max}$、$\nabla\phi_{\rm mean}$、$W_{\rm Lsg}$、$W^*_{Lsg}$和$\phi_{\rm PSL}$。本研究结合主成份分析累积方差和活动区 10486 定性分析结果,选取了两类分析结果中共有的变量,包括 R、$\phi_{\rm uns}$、$L_{\rm PS}$、ϕ_-、$\phi_{\rm tot}$、$L_{\rm sg}$、$\phi_{\rm PSL}$ 和$\phi_{\rm mean}$ 等 8 个特征

表 3　2003 年 10 月 28 日活动区 10486 磁场特征参数量化结果

Table 3　Quantitative results of characteristic parameters of magnetic field in 10486 active area on 28 October 2003

特征参数	08:00 UT	09:36 UT	11:12 UT	12:48 UT	14:24 UT	08:00—11:12 UT(增加率)
活动区面积$A_{\rm tot}$ / pixel	1576.05	1588.32	1596.42	1597.98	1621.87	1.29%
磁场最大值$\phi_{\rm max}$ / $(\times10^{-4})$T	314.97	368.60	468.80	542.06	385.04	48.84%
磁场最小值$\phi_{\rm min}$ / $(\times10^{-4})$T	–247.11	–206.13	–301.62	–491.54	–545.70	22.06%
磁场值代数和$\phi_{\rm tot}$ / $(\times10^{-4})$T	4283.35	7262.43	8284.17	6309.44	4197.62	93.40%
磁场绝对值和的平均值$\phi_{\rm mean}$ / $(\times10^{-4})$T	5.58	7.25	11.63	6.94	9.54	108.42%
磁场正通量总和ϕ_{+} / $(\times10^{-4})$T	6542.03	9385.23	13428.10	8700.38	9836.09	105.26%
磁场负通量总和ϕ_{-} / $(\times10^{-4})$T	–2258.68	–2122.80	–5143.94	–2390.94	–5638.47	127.74%
磁场通量绝对值总和$\phi_{\rm uns}$ / $(\times10^{-4})$T	8800.72	11508.03	18572.04	11091.32	15474.56	111.03%
磁场通量不平衡率$\phi_{\rm imb}$	0.49	0.63	0.45	0.57	0.27	–8.16%、–164.69%
磁场净通量增加率$\mathrm{d}\phi/\mathrm{d}t$	14.66	–25.52	16.51	1.32	–25.11	09:36—11:12 UT
强梯度极性分隔线长度$L_{\rm sg}$ / pixel	0.00	0.00	7.00	0.00	0.00	—
极性分隔线长度$L_{\rm PS}$ / pixel	6.00	12.00	52.00	14.00	15.00	766.67%
极性分隔线最大磁场梯度$\nabla\phi_{\rm max}$ / $(\times10^{-4})$T	0.00	0.00	319.35	0.00	0.00	—
极性分隔线平均磁场梯度$\nabla\phi_{\rm mean}$ / $(\times10^{-4})$T	0.00	0.00	28.85	0.00	0.00	—
强梯度极性分隔线的梯度权重$W_{\rm Lsg}$/ pixel	0.00	0.00	319.35	0.00	0.00	—
修正的$W_{\rm Lsg}$, $W^{*}_{L_{\rm sg}}$/ pixel	0.00	0.00	663.44	0.00	0.00	—
极性分隔线权重磁场值之和R / $(\times10^{-4})$T	1317.16	3163.26	13262.56	3569.14	4297.99	906.91%
强梯度极性分隔线磁场绝对值之和$\phi_{\rm PSL}$ / $(\times10^{-4})$T	0.00	0.00	855.14	0.00	0.00	—
磁场极性类别(单极/多极)	多极	多极	多极	多极	多极	—
磁场强弱类别(强/弱)	弱	弱	弱	弱	弱	—
磁场通量演化状态(增加/下降)	增加	下降	增加	增加	下降	—

注　表中灰色部分表示耀斑爆发前后磁场特征值变化较大的特征参数。

参数, 作为耀斑爆发时磁通量和磁场结构变化的最优特征参数, 其中 R、$L_{\rm PS}$、$L_{\rm sg}$ 和$\phi_{\rm PSL}$ 4 个变量来自活动区极性分隔线特征, $\phi_{\rm uns}$、ϕ_{-}、$\phi_{\rm tot}$ 和$\phi_{\rm mean}$ 4 个变量来自活动区磁场通量特征, 8 个变量在耀斑爆发前后的变化趋势如图 3 所示, 通过这些变量可以有效监测耀斑爆发时活动区磁场通量和磁场结构的变化。

4　结论

利用 1996—2011 年 SOHO 卫星 MDI 磁图, 经过图像预处理, 在分析活动区 10486 的基础上, 构建了太阳活动区磁场特征量化指标体系, 包括太阳活动区磁场量化指标、活动区极性分隔线量化指标和活动区分类量化指标共三组 21 个特征参数; 对所有磁图活动区提取的 21 个特征参数, 通过主成分分析法对总体量化结果进行定量分析, 在对活动区 10486 爆发 X17.2 级耀斑时磁通量和磁场结构进行定性分析的基础上, 得出结论: R、$L_{\rm PS}$、$L_{\rm sg}$ 和$\phi_{\rm PSL}$ 4 个活动区极性分隔线特征参数能够很好地说明耀斑爆发时磁场结构变化, 这些指标变化时活动区可能出现磁场剪切或磁场扭曲等运动, 对耀斑爆发时的磁场结构具有很好的指示作用; $\phi_{\rm uns}$、ϕ_{-}、$\phi_{\rm tot}$ 和$\phi_{\rm mean}$ 4 个活动区磁场通量特征参数, 能够很好地说明耀斑爆发时活动区磁通量变化情况, 指标变化时活动区有新浮磁通量出现, 因此其对耀斑爆发时的磁场通量变化具有直接监测作用; $\phi_{\rm PSL}$ 是本文新构建的特征参数; 8 个特征参数共同使用, 可有效监测耀斑爆发前后活动区磁场结构和磁场通量的变化情况; 量化的特征参数后续研究中

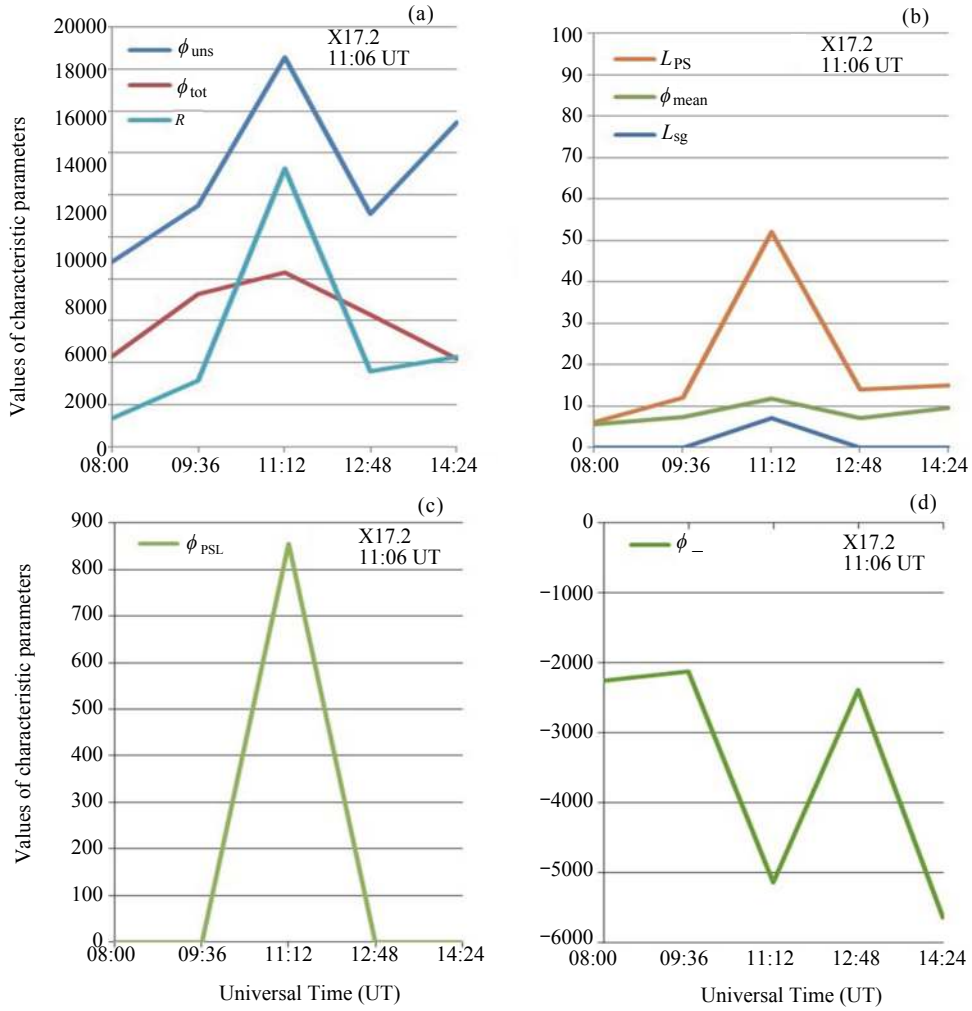


图 3 耀斑爆发前后最优特征参数变化趋势

Fig. 3 Variation trend of the optimal characteristic parameters before and after the flare eruption

可作为耀斑、质子事件监测预警及耀斑预报模型的输入，并且丰富太阳活动监测预警手段，提高太阳活动监测预警能力。

参考文献

[1] WEI Fengsi. Some thoughts on the development strategy of space weather security in China[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2011, **1**(4): 53-57 (魏奉思. 关于我国空间天气保障能力发展战略的一些思考[J]. 气象科技进展, 2011, **1**(4): 53-57)

[2] JIAO Weixin. Science of Space Weather[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003 (焦维新. 空间天气学[M]. 北京: 气象出版社, 2003)

[3] MA Jie, FANG Hanxian, WANG Shijin, *et al*. Systemic quantitative evaluation of the radiation belt AP9 model in SAA region[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2017, **37**(4): 395-402 (马杰, 方涵先, 王世金, 等. 辐射带AP9模式在南大西洋异常区的系统性量化评估[J]. 空间科学学报, 2017, **37**(4): 395-402)

[4] LIU X Z, DONG S L. Solar flare predictions based on fuzzy classification of active regions[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1989, **34**(1): 49-52

[5] XUAN J Y, ZHONG S H, LUO Z, *et al*. The spectral observation of continuous emission of a solar flare on Jan. 18, 1989[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1992, **37**(5): 391-396

[6] XU A A, WU G P, TANG Y H, *et al*. A phenomenological model of the solar flare based on the evolution of filament current[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1994, **39**(9): 759-765

[7] HU Y Q, LI X, AI G X. Mechanism for magnetic energy release in solar flares[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, **40**(23): 1983-1987

[8] HE L S, NISHINO M, ZHANG B C, *et al*. Absorption events associated with solar flares[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, **46**(5): 369-372

[9] HUANG X, WANG H N, DAI X H. Influences of mispre-

diction costs on solar flare prediction[J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2012, **55**(10): 1956-1962

[10] XIE W B, WANG H M, JING J, *et al*. The correlation between expansion speed and magnetic field in solar flare ribbons[J]. *Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy*, 2009, **52**(11): 1754-1759

[11] GALLAGHER P T, MOON Y J, WANG H M. Active-region monitoring and flare forecasting- I. Data processing and first results[J]. *Solar Physics*, 2002, **209**(1): 171-183

[12] ZHAO Haijuan, ZHAN Lasheng, RONG Yonghui. Alert and short-term prediction of solar activity[J]. *Astronomical Research and Technology—Publications of National Astronomical Observatories of China*, 2004, **1**(1): 28-46 (赵海娟, 占腊生, 戎永辉. 国内外空间天气短期预报和警报及其现状[J]. 天文研究与技术-国家天文台台刊, 2004, **1**(1): 28-46)

[13] LI R, WANG H N, CUI Y M, *et al*. Solar flare forecasting using learning vector quantity and unsupervised clustering techniques[J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2011, **54**(8): 1546-1552

[14] LI Rong, CUI Yanmei. Solar flare forecasting method of combining support vector machine with nearest neighbors[J]. *Computer Engineering and Design*, 2009, **30**(15): 3605-3607, 3611 (李蓉, 崔延美. 结合支持向量机和近邻法的太阳耀斑预报方法[J]. 计算机工程与设计, 2009, **30**(15): 3605-3607, 3611)

[15] LI R, ZHU J. Solar flare forecasting based on sequential sunspot data[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2013, **13**(9): 1118-1126

[16] LIU J F, LI F, WAN J, *et al*. Short-term solar flare prediction using multi-model integration method[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2017, **17**(4): 034

[17] SCHRIJVER C J. Characteristic magnetic field pattern associated with all major solar flares and its use in flare forecasting[J]. *The Astrophysical Journal*, 2007, **655**(2): L117-L120

[18] FALCONER D A, MOORE R L, GARY G A. A measure from line-of-sight magnetograms for prediction of coronal mass ejections[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(A10): 1380

[19] FALCONER D A, MOORE R L, GARY G A. Magnetogram measures of total nonpotentiality for prediction of solar coronal mass ejections from active regions of any degree of magnetic complexity[J]. *The Astrophysical Journal*, 2008, **689**(2): 1433-1442

[20] HIGGINS P A, GALLAGHER P T, MCATEER R T J, *et al*. Solar magnetic feature detection and tracking for space weather monitoring[J]. *Advances in Space Research*, 2011, **47**(12): 2105-2117

[21] FALCONER D, BARGHOUTY A F, KHAZANOV I, *et al*. A tool for empirical forecasting of major flares, coronal mass ejections, and solar particle events from a proxy of active-region free magnetic energy[J]. *Space Weather*, 2011, **9**(4): S04003

[22] JOLLIFFE I T. Principal Component Analysis[M]. 2 nd ed. New York: Springer, 2002

[23] LIN H M, ZHANG W L. The relationship between principal component analysis and factor analysis and SPSS software—to discuss with comrade Liu Yumei, Lu Wendai *etc*[J]. *Statistical Research*, 2005(3): 65-69 (林海明, 张文霖. 主成分分析与因子分析的异同和SPSS软件—— 兼与刘玉玫、卢纹岱等同志商榷[J]. 统计研究, 2005(3): 65-69)

[24] LIN Haiming. The similarities and differences between the principal component analysis and initial factor analysis[J]. *Statistics and Decision*, 2006(8): 33-34 (林海明. 主成分分析与初始因子分析的异同—— 兼与卢纹岱《SPSS for Windows统计分析》商榷[J]. 统计与决策, 2006(8): 33-34)

[25] MCINTOSH P S, DRYER M. Solar Activity Observations and Predictions[M]. Cambridge: MIT Press, 1972: 371

[26] FANG Cheng, DING Mingde, CHEN Pengfei. Physics of Solar Active Regions[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2008 (方成, 丁明德, 陈鹏飞. 太阳活动区物理[M]. 南京: 南京大学出版社, 2008)

[27] WANG H M, SONG H, JING J, *et al*. The relationship between magnetic gradient and magnetic shear in five super active regions producing great flares[J]. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 2006, **6**(4): 477-488

[28] JING J, SONG H, ABRAMENKO V, *et al*. The statistical relationship between the photospheric magnetic parameters and the flare productivity of active regions[J]. *The Astrophysical Journal*, 2006, **644**(2): 1273-1277

(责任编辑: 李莉)