

黑子周围光球亮点的特征提取与比较*

屈会雪 杨云飞 冯松 王锋 邓辉 季凯帆[†]

(昆明理工大学信息工程与自动化学院 昆明 650500)

摘要 光球亮点是位于米粒暗径中的小尺度发亮结构, 普遍认为它是千高斯磁流管的足点. 采用云南澄江抚仙湖1 m新真空太阳望远镜(New Vacuum Solar Telescope, NVST)在TiO波段的NOAA 11598观测数据, 研究黑子周围光球亮点的特性变化. 首先识别黑子, 通过形态学膨胀技术把黑子外围划分为4个环形区域, 然后采用一个结合了拉普拉斯与形态学技术的自动算法识别亮点, 并在三维时空立方体中跟踪亮点的演化, 最后研究了4个环形区域中亮点的特性变化, 包括密度、强度、面积、形状和速度. 统计结果和假设检验均表明位于黑子外围不同区域的光球亮点的密度、等效直径和速度明显受黑子强磁场的影响, 其峰值不在最靠近黑子的区域, 而是位于第2个区域, 并随着远离黑子, 其密度减小, 直径减小而速度增加; 最大强度比总体呈现出逐渐减小的趋势; 而形状基本没有变化, 与所处的区域无关.

关键词 太阳; 光球; 技术: 图像处理, 方法: 数据分析, 方法: 统计
中图分类号: P182; **文献标识码:** A

1 引言

在太阳光球中, 存在于米粒暗径的小尺度和短寿命的增亮现象称为光球亮点(photospheric bright points, PBPs). 目前普遍认为, 光球亮点与磁场有着密切的关系, 是目前观测手段能够分辨的最小磁结构. 通过研究光球亮点可以促进太阳磁场的研究, 促进更深层和更热的等离子体和日冕加热等太阳物理现象的研究^[1-3].

光球亮点在太阳表面分布的密度约在1%~6%^[4]之间, 它的等效直径约为100~300 km^[5-8], 最大强度比为0.8~1.8^[4,9-10], 其形状近似圆形, 也有部分呈条状^[4], 水平运动速度为1~7 km·s⁻¹^[4,6,11-13]. 普遍认为, 活动区中的亮点与宁静区相比更加密集^[4,14], 其等效直径更大^[6,14-15], 强度更强^[4], 而速度却更慢^[16-18]. 但是, 也有文献得出了不同的结论. 比如, Romano等^[14]认为活动区和宁静区的亮点平均强度比分别约为1.05和1.09; Feng等^[4]认为活动区和宁静区的亮点等效直径没有什么不同.

黑子是太阳表面上强磁场的聚集区域, 在黑子周围也分布着大量的光球亮点, 研究黑子外围从内到外不同区域的光球亮点特性对了解黑子的形成以及对周围的磁场影响

2015-02-03收到原稿, 2015-03-11收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11303011, 11263004, 11463003, 11163004, U1231205)资助

[†]jikaifan@cnlab.net

具有重大意义. 本文采用1 m新真空太阳望远镜^[19-20]在TiO波段观测到的一组活动区数据来研究黑子外围亮点的特性变化, 主要包括密度、强度、面积、形状和速度. 文章的结构如下: 第2章简单介绍了数据来源; 第3章介绍了识别和跟踪光球亮点的方法; 第4章介绍了光球亮点特性的统计和假设检验结果; 第5章进行了总结.

2 数据

我们采用了NVST的一组TiO(705.8 nm)时间序列图像. 观测对象为2012年10月29日06:03:37UT—06:43:25UT的一个活动区(NOAA 11598), 时间分辨率大约为40 s, 像元分辨率为 $0.041 \text{ arcsec} \cdot \text{pixel}^{-1}$, 整个视场为 $73.8 \text{ arcsec} \times 82 \text{ arcsec}$. 该数据由云南天文台南方基地科研组进行了高分辨重建处理. 序列图像采用Yang等^[21]的方法进行了对齐. 图1为序列中的第1帧高分辨率像, 在那些米粒暗径之间有增亮结构.

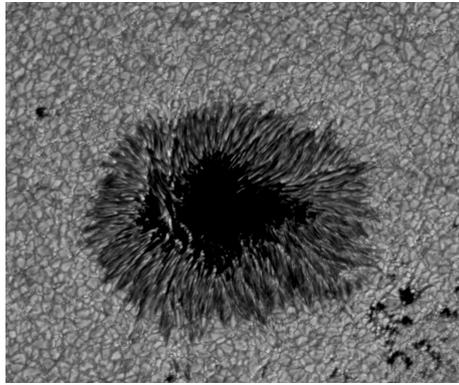


图1 云南天文台澄江抚仙湖观测站1 m新真空太阳望远镜在2012年10月29日6时3分37秒观测的高分辨率像

Fig. 1 The NOAA 11598 image observed by NVST at 06:03:37UT on 2012 October 29 with the TiO filter

3 方法

3.1 黑子外围分区

为了研究黑子外围的亮点从内到外的特性变化规律, 首先采用区域增长的方法识别黑子, 然后采用形态学中的膨胀运算以黑子为中心进行了区域的划分.

膨胀是形态学图像处理的基础运算, 是指将图像或图像的一部分区域(称为 A)与核(称为 B)进行卷积^[22], 即计算核 B 覆盖区域像素的最大值, 并把最大值赋值给核原点对应的像素. 在数学上, 膨胀定义为集合运算, A 被 B 膨胀, 记为 $A \oplus B$, 定义为^[22]:

$$A \oplus B = \{Z | (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset\},$$

其中, \emptyset 为空集, B 为结构元素, A 被 B 膨胀是所有结构元素原点位置组成的集合, 其中映射并平移后的 B 至少与 A 的某些部分重叠.

我们以黑子的质心为中心, 分别采用5 arcsec、10 arcsec、15 arcsec、20 arcsec为半径向外膨胀依次得到4个环形区域, 从靠近黑子到视场边界依次记作1区、2区、3区和4区, 如图2所示.

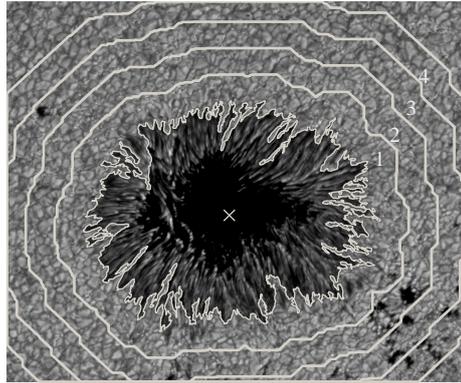


图 2 黑子外围的4个分区

Fig. 2 Four regions outside the sunspots

3.2 亮点的识别

接下来, 我们对每一帧图像中的亮点进行自动识别. 算法主要由以下几个步骤组成: (1)将黑子区域赋值为0得到图像 I_1 ; (2)考虑到黑子的半影边界会产生较大的梯度差, 对标记出黑子的二值图通过膨胀20个像元后(保证黑子边界完全覆盖)取反得到 I_2 ; (3)对 I_1 用结构为 $[-1 \ -1 \ -1; -1 \ 8 \ -1; -1 \ -1 \ -1]$ 的拉普拉斯算子卷积得到 I_3 ; (4) I_3 与图 I_2 相乘得到 I_4 ; (5)计算 I_4 的均值 μ 和标准差 σ , 通过反复实验后选取 $\mu+2.8\sigma$ 为阈值提取亮点的候选种子图 I_5 ; (6)根据光球亮点存在于米粒暗径这一特征, 计算 I_5 中每个候选种子的边缘像元位于暗径的比例, 如果超过阈值0.6则认为是亮点, 否则去掉, 最终得到 I_6 . 关于算法中阈值的选择问题, Feng等^[4]在文中有详细的讨论. 考虑到该组数据的右下角有很多磁孔, 为了避免对4个区域的统计产生影响, 我们去掉了所有区域右下角的亮点. 识别的亮点在原图点亮如图3所示.

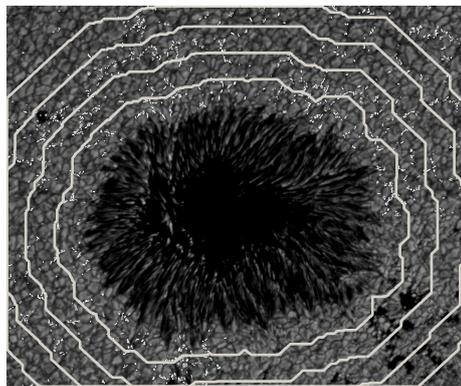


图 3 识别的亮点在原图点亮

Fig. 3 The bright points highlighted on the TiO image

3.3 亮点的跟踪

在每一帧图像上识别出亮点之后, 我们接着在时间序列图像中跟踪其演化过程. 跟踪的关键技术是确定被跟踪目标在前后图像中的对应关系, 主要方法有: 最近邻法(Muller等^[23]、Sánchez Almeida等^[9]、Crockett等^[24]、Utz等^[16]、Abramenko等^[25])、局部相关跟踪(Local Correlation Tracking, LCT)技术(Möstl等^[17]、Keys等^[11-12])、三维亮点树跟踪(Berger等^[13]、Yang等^[26]). 根据现有的高分辨率图像观测资料和研究成果, 可以估算出在时间间隔为40 s的序列图像中, 亮点的水平位移在280 km以下(最大水平运动速度不超过 $7 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$), 也就是说小于一个光球亮点的尺寸, 这意味着亮点在相邻帧的时间轴上会有位置重叠, 即在立体空间上它们具有关联性. 因此采用三维时空立方体的思想对光球亮点进行跟踪是可行的. 我们建立了一个三维坐标系(x, y, t), x 和 y 是平面坐标, t 是时间坐标, 然后采用三维空间中特征相邻的方法来解决亮点的三维跟踪问题. 假设 p 和 q 是三维立方体中的两个点, 分别表示为: $p = (p_x, p_y, p_t)$, $q = (q_x, q_y, q_t)$, 如果满足 $|p_x - q_x| \leq 1$, $|p_y - q_y| \leq 1$, $|p_t - q_t| \leq 1$, 则称为26联通. 从图4中能看出, 26联通是最能表现亮点在三维时空立方体中演化的一种方式.

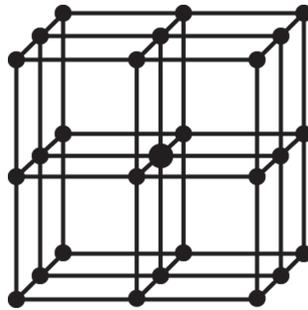


图4 26联通模型

Fig. 4 The diagram of 26-adjacent model

我们对62张连续图像识别出的亮点采用26联通来标记每一个亮点的三维演化结构, 图5是连续24帧的一个局部区域的立方体结构. 可以看出, 其中有些简单的圆柱状结构, 还有些错综复杂的树状结构. 如果一个亮点在生命期中没有发生过合并或者分裂, 则称之为孤立点, 否则称为非孤立点. 在三维立方体中, 孤立点的演化过程可用一个圆柱状结构来描述, 其水平速度就显示为这个圆柱状结构在时间轴上的扭曲情况, 而生命周期就是这个圆柱状结构在时间轴上的开始和截止. 去掉了637个只出现了1帧的短命噪声后, 62张图中一共识别了80 677个亮点, 这些亮点产生了10 002个三维的演化结构. 为了研究亮点的完整演化过程, 我们把第1帧已经出现或最后1帧还没结束的36 566个亮点构成的1 297个三维演化结构去掉, 这些亮点大多为非孤立点, 其中第1帧已经出现并且最后一帧还没有结束的非孤立三维演化结构共20个. 剩下的44 111个亮点构成的8 705个三维演化结构中有16 919个孤立亮点产生了5 837个孤立的三维演化结构.

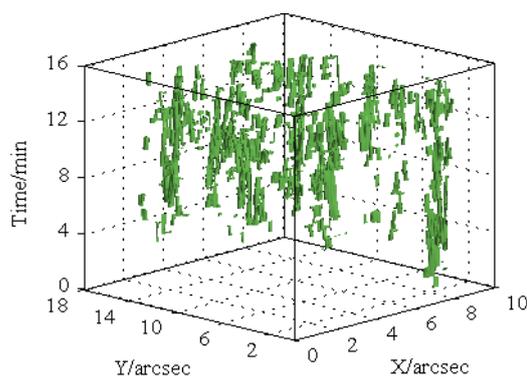


图 5 连续16 min的三维时空立方体

Fig. 5 A segment of 3D space-time cube with a time span of 16 min

4 结果及分析

我们分别对4个环形区域中的光球亮点的密度、孤立点的最大强度比(最大强度/宁静区域的平均强度)、孤立点的等效直径(面积看作等效圆)、孤立点的扁平程度(长轴/短轴)、孤立点的速度这几个主要特性做了统计, 统计结果见表1(表1中描述了4个区域不同特性的均值和标准差). 其中, 在密度的计算中, 由于不需要考虑时间演化, 我们采用的是62张图中识别的80 677个亮点进行相关统计. 4个区域从1到4区分别对应的亮点数是: 24 003、24 273、20 886、11 515. 在最大强度比、等效直径、扁平程度和速度的统计中, 我们采用的是具有完整生命期的孤立亮点数据. 4个区域从1到4区分别对应的亮点数是: 5 710、4 698、3 765、2 746, 分别产生了1 970、1 621、1 299、947个三维演化结构.

表 1 4个区域光球亮点不同特征的参数值

Table 1 The parameters of the bright points in the four regions

Region	Density	Equivalent diameter /km	Maximum intensity contrast	Ratio of major axis to minor axis	Horizontal velocity /($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	0.025 ± 0.0026	166 ± 48	1.052 ± 0.058	1.394 ± 0.709	1.89 ± 1.49
2	0.029 ± 0.0030	167 ± 48	1.050 ± 0.056	1.386 ± 0.714	1.84 ± 1.47
3	0.025 ± 0.0031	160 ± 48	1.044 ± 0.059	1.367 ± 1.056	1.88 ± 1.42
4	0.018 ± 0.0025	157 ± 55	1.043 ± 0.057	1.375 ± 1.713	1.92 ± 1.55

4.1 光球亮点的密度统计

每个区域的光球亮点的密度用环形区域亮点面积和除以环形区域总面积来计算. 我们分别计算了62幅图的4个区域的亮点密度, 并用直方图求密度的均值. 如图6所示, 区域1到4的密度均值分别为0.025、0.029、0.025、0.018, 这意味着光球亮点的密度分布不均匀, 最靠近黑子的区域亮点并不多, 而第2个区域的亮点覆盖面积最大, 随着距离增大,

密度逐渐变小. Romano等^[14]以磁孔为中心径向分了7个区域对亮点的个数与区域总面积的比也做过研究, 他们认为从内到外其浓度逐渐减小. 与Romano不同的是, 我们研究的是一个成熟黑子的外围区域. 最靠近黑子的区域可能受黑子强磁场的影响, 亮点反而相对较少, 而随着距离的增加, 磁场逐渐减弱, 也导致了亮点密度的降低. 可以看出, 从第2个区域到远离黑子的区域, 其规律和Romano是一致的. 此外, Feng等^[4]采用G波段图得出活动区和宁静区的密度分别约为1.3%和0.7%, 这也意味着磁场相对强的区域亮点的密度大. 为了证明实验结果的可靠性, 我们把每个区域的数据作为样本, 进行了双样本的T检验. T检验可以用来比较两组数据的均值在统计上是否有显著差异. 检验结果表明, 两个相邻区域存在显著性差异, 这意味着不同区域亮点的密度分布确实是不同的.

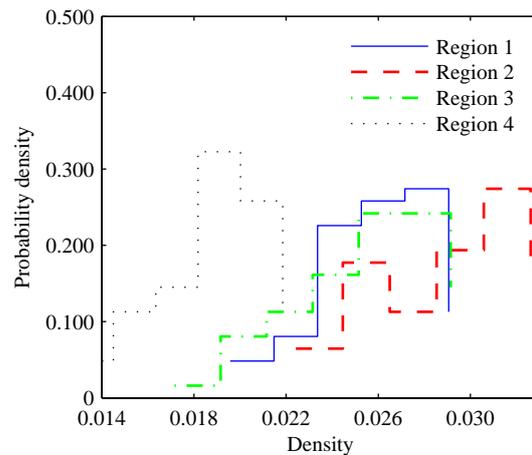


图 6 4个区域亮点的密度比较

Fig. 6 The density distributions of bright points in the four regions

4.2 孤立点的等效直径统计

我们将光球亮点的面积等效为圆来计算其等效直径, 然后对4个区域的亮点等效直径的分布进行拟合, 都能很好地满足正态函数. 如图7(a)所示, 类似于密度, 黑子周围孤立点的等效直径为166 km, 第2区域略有增加, 并随着远离黑子, 等效直径逐渐减小到157 km. Romano等^[14]得出活动区和宁静区的等效直径分别约为268 km和218 km, 而磁孔附近7个区域的亮点等效直径的峰值逐渐增加, 同时得出均值却没有明显变化. Romano得出的结果和我们有所不同, 作者在文中说明该组数据因为自适应光学的原因导致周边的图像质量下降引起亮点的面积增加. Feng等^[4]采用G波段图得到活动区等效直径分别约为 (224 ± 45) km, 宁静区约为 (232 ± 40) km, 但他们认为活动区和宁静区的结果没有本质上的差别. 最近, Keys等^[27]得出活动区和宁静区的等效直径分别约为190 km和175 km. 我们也对等效直径进行了双样本T假设检验, 检验结果表明相邻区域间存在显著性差异.

4.3 孤立点的最大强度比统计

光球亮点的最大强度比=亮点的最大强度/宁静区域的平均强度, 其中宁静区域指去掉黑子和磁孔的区域. 4个区域的最大强度比均符合正态分布, 从图7(b)和表1可看出

孤立点的最大强度比的均值约为1.05, 虽然差别很小, 但可以看出从1区到4区逐渐变小. Romano等^[14]认为磁孔附近的亮点的平均强度比(亮点的平均强度/宁静区域的平均强度)为1.09, 最外围为1.05, 从内到外逐渐减小, 这和我们的结论是一致的; Feng等^[4]得到活动区和宁静区的最大强度比分别为1.6和1.3. 这都意味着磁场强的地方, 亮点有更亮的趋势. T检验显示最大强度比的1区和2区、3区和4区不存在显著性差异, 但是2区和3区存在差异, 这意味着总体来说, 强度从内到外具有逐渐变小的趋势.

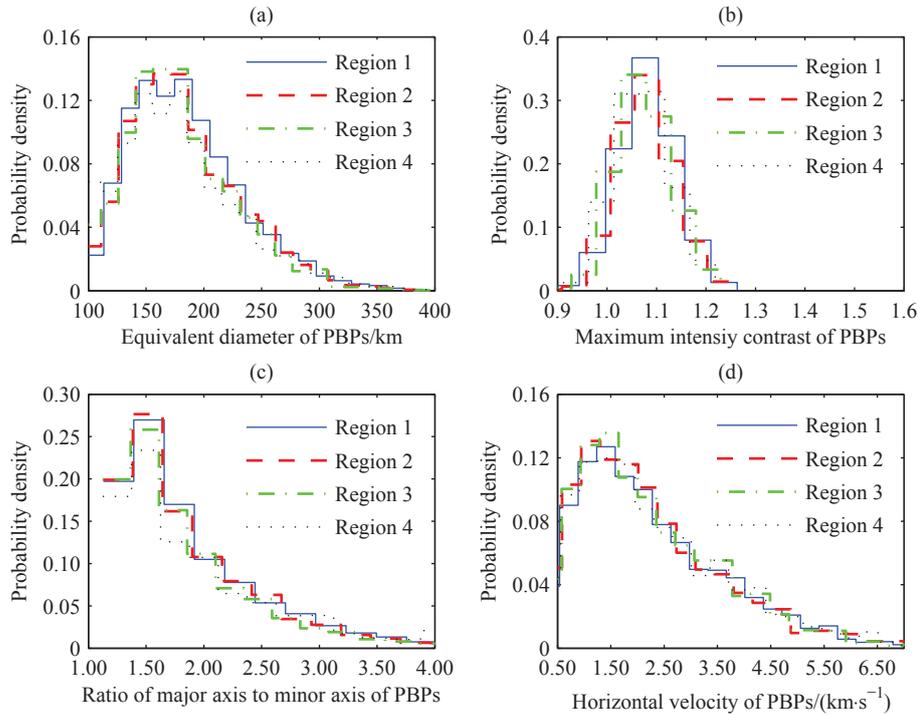


图 7 4个区域的不同特性比较

Fig. 7 The parameter distributions of bright points in the four regions

4.4 孤立点的形状统计

普遍认为孤立亮点的形状绝大多数为圆形, 少部分为椭圆, 我们采用亮点的长轴/短轴来衡量其扁平程度, 长轴短轴比越接近1说明光球亮点的形状越接近圆形. 从图7(c)孤立点的长轴短轴比概率密度分布图可以看出, 黑子周围4个区域孤立点的偏心率峰值依次为: 1.394、1.386、1.367、1.375. 总体来看, 呈现出下降的趋势, 也就是趋向于圆形, 但是不得不注意的是标准差都非常大. Feng等^[4]得出的结论是大约50%的光球亮点的长轴短轴比小于1.5, 而且宁静区和活动区几乎没有差别. T检验表明这4个区域间均不存在显著性差异, 这与Feng等人的结论是一致的, 也就意味着亮点的形状与所在区域无关, 与磁场强弱无关.

4.5 孤立点的水平速度统计

我们用 $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$ 计算亮点的水平运动速度, 每个区域的速度均可以很好

地用瑞利函数拟合. 从图7(d)和表1看出速度均值约为 $1.90 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 最靠近黑子的速度是 $1.89 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 第2区域减小为 $1.84 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 然后又逐渐增大到 $1.92 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. 这与前面分析的亮点的密度和面积的特性变化非常相似, 磁场强的区域亮点的速度偏慢, 磁场弱则速度偏快. Utz等^[16]利用日出卫星(Hinode)搭载的太阳光学望远镜(Solar Optical Telescope, SOT)在G波段观测的数据发现宁静区光球亮点的速度约为 $(1.62 \pm 0.05) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$; Möstl等^[17]采用瑞典的太阳望远镜(Swedish Solar Telescope, SST)的数据, 得出活动区光球亮点的水平速度约为 $(1.11 \pm 0.7) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. 还有一些文献直接得出活动区中亮点的水平速度比宁静区的慢的结论. 例如, Berger等^[13]得出亮点在活动区和宁静区的平均速度分别为 $0.95 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$; Möstl等^[17]得到的结论是活动区的速度比宁静区的慢大约 $0.2 \sim 0.35 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

T检验结果显示1区和2区、2区和4区都存在显著性差异, 所以可以认为黑子外围的从内到外的区域, 亮点的速度开始有所下降, 然后又逐渐增加.

5 总结

本文采用NVST在TiO波段的一组活动区编号为11598的观测数据, 研究了黑子外围亮点的密度、强度、面积、形状和速度的变化规律. 我们首先用区域增长方法识别了黑子, 通过形态学膨胀运算将黑子外围划分为4个环形区域, 采用一个结合拉普拉斯和形态学技术的算法识别出每幅图像的光球亮点, 然后利用三维联通技术对三维时空立方体中的亮点跟踪其演化, 最后对每个区域中的亮点的特性进行统计分析, 并进行了双样本T假设检验. 结果表明黑子外围从内到外区域中的光球亮点, 其分布密度、面积和速度明显受黑子强磁场的影响, 其峰值不在最靠近黑子的区域, 而是位于第2个区域, 随着远离黑子, 密度减小, 直径减小而速度增加. 最大强度比总体呈现出逐渐减小的趋势, 而其形状与所处的区域无关, 基本保持不变. 研究黑子周围的光球亮点对进一步研究太阳磁场的演化、色球和日冕加热、太阳风加速等具有重要的意义.

本文得到了黑子周围亮点的一些基本特性的变化规律, 但由于该组数据的视场不够大, 黑子外围的区域相对较小, 因此还未能探究到更远离黑子的区域. 在今后的工作中, 需要结合磁图进一步深入研究.

致谢 感谢中国科学院云南天文台抚仙湖太阳观测基地提供的高分辨率观测资料.

参考文献

- [1] 杨煦, 季海生, 黎皓川. 天文学报, 2014, 55: 193
- [2] Yang X, Ji H S, Li H C. ChA&A, 2015, 39: 66
- [3] 刘艳霄, 林隽, 吴宁. 天文学进展, 2014, 32: 1
- [4] Feng S, Deng L H, Yang Y F, et al. Ap&SS, 2013, 348: 17
- [5] Muller R, Keil S L. SoPh, 1983, 87: 243
- [6] Utz D, Hanslmeier A, Möstl C, et al. A&A, 2009, 498: 289
- [7] Wiehr E, Bovelet B, Hirzberger J. A&A, 2004, 422: L63
- [8] 刘艳霄, 杨云飞, 林隽. 天文研究与技术, 2014, 11: 145
- [9] Sánchez Almeida J, Márquez I, Bonet J A, et al. ApJL, 2004, 609: L91
- [10] Berger T E, Schrijver C J, Shine R A, et al. ApJ, 1995, 454: 531

- [11] Keys P H, Mathioudakis M, Jess D B, et al. *ApJL*, 2011, 740: L40
- [12] Keys P H, Mathioudakis M, Jess D B, et al. *MNRAS*, 2013, 428: 3220
- [13] Berger T E, Löfdahl M G, Shine R S, et al. *ApJ*, 1998, 495: 973
- [14] Romano P, Berrilli F, Criscuoli S, et al. *SoPh*, 2012, 280: 407
- [15] Bovelet B, Wiehr E. *A&A*, 2003, 412: 249
- [16] Utz D, Hanslmeier A, Muller R, et al. *A&A*, 2010, 511: A39
- [17] Möstl C, Hanslmeier A, Sobotka M, et al. *SoPh*, 2006, 237: 13
- [18] 李东, 宁宗军. *天文学进展*, 2012, 30: 172
- [19] Liu Z, Xu J, Gu B Z, et al. *RAA*, 2014, 14: 705
- [20] Xu Z, Jin Z Y, Xu F Y, et al. *IAUS*, 2014, 300: 117
- [21] Yang Y F, Qu H X, Ji K F, et al. *RAA*, 2015, 15: 569
- [22] Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L. *数字图像处理(MATLAB版)*. 阮秋琦等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2005: 255-256
- [23] Muller R, Roudier Th. *SoPh*, 1992, 141: 27
- [24] Crockett P J, Jess D B, Mathioudakis M, et al. *MNRAS*, 2009, 397: 1852
- [25] Abramenko V, Yurchyshyn V, Goode P, et al. *ApJL*, 2010, 725: L101
- [26] Yang Y, Lin J, Deng L. *Automatic Tracking Algorithm of Solar G-Band Bright Points // 2013 6th International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems (ICINIS)*. IEEE Computer Society, 2013: 304
- [27] Keys P H, Mathioudakis M, Jess D B, et al. *A&A*, 2014, 566: 99

Properties of Photospheric Bright Points outside Sunspots

QU Hui-xue YANG Yun-fei FENG Song WANG Feng DENG Hui JI Kai-fan
(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500)

ABSTRACT Photospheric bright points are tiny bright features located in intergranular lanes. They are widely believed as the foot points of magnetic flux tubes. In this paper, various properties of bright points outside NOAA 11598 sunspots are analyzed using the TiO-band data detected by the 1-m New Vacuum Solar Telescope of Yunnan Observatories, which is located at the Fuxian Solar Physics Observing Station, Yunnan Province. We divide the periphery of the sunspot into four annular regions based on the dilation technology of image morphology. Then, a Laplacian and morphological dilation algorithm is used to identify bright points, and a three-dimensional segment algorithm is applied to track the evolution of bright points. Finally, we detect the parameters of the bright points in the four annular regions, including the density, intensity, size, shape, and velocity. Statistical results show that the density, size, and velocity of photospheric bright points are obviously affected by the strong magnetic fields of sunspots, and their peak values are in the second region instead of the closest region of the sunspot. The bright points decrease their densities and sizes, but increase their velocities with the distance away from the sunspot center. Additionally, the maximum intensity contrast presents the decreasing trend. However, the bright point shapes are basically invariant, and independent of this distance.

Key words sun: photosphere, techniques: image processing, methods: data analysis, methods: statistical