

像素扭曲与有效对流观测范围

诸葛小勇¹ 邹晓蕾² 王元¹

(1 南京大学中尺度灾害性天气教育部重点实验室, 南京 210023;

2 马里兰大学地球科学系统跨学科中心, 马里兰 20740, 美国)

摘要: 像素扭曲反映卫星图像上的像素点面积和形状随地面位置的变化。像素扭曲值、星下点位置和分辨率决定卫星探测对流尺度天气现象的能力。对于位于105°E、星下点分辨率为2 km的静止卫星成像仪, 它的有效对流观测范围可覆盖几乎整个中国区域。

关键词: 像素扭曲, 有效对流观测范围, 静止气象卫星

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.01.001

Pixel Distortion and Convective-Scale-Appropriate Observing Domain

Zhugue Xiaoyong¹, Zou Xiaolei², Wang Yuan¹

(1 Key Laboratory of Mesoscale Severe Weather of Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing 210023

2 Earth System Science Interdisciplinary Center, University of Maryland at College Park, USA)

Abstract: Pixel distortion reflects a change of the area and shape of the pixel observed by a geostationary imager with the location of the earth. The ability of detecting convective-scale weather phenomenon is determined by the pixel distortion, the location of the sub-satellite point and the pixel size at the sub-satellite point. If a geostationary meteorological satellite is positioned at 105°E with a 2-km sub-satellite resolution, its convective-scale-appropriate observing domain may cover almost the entire China..

Keywords: pixel distortion, convective-scale-appropriate observing domain, geostationary meteorological satellite

0 引言

静止气象卫星成像仪的扫描方式类似于跨轨扫描辐射计。成像仪工作时, 扫描镜的旋转受两个电机控制。首先, 扫描镜在控制南北向的电机带动下旋转到最北位置, 再由控制东西向的电机带动完成一次东西向扫描。然后扫描镜在控制南北向的电机带动下向南旋转一点点, 再由控制东西向的电机带动完成一次东西向扫描。如此重复, 直至完成整个大圆盘扫描^[1]。扫描镜的瞬时几何视场 (instantaneous geometry field of view, IGFOV) 呈现在卫星云图上就是像素点。不同的像素点 (或扫描镜IGFOV) 所对应的地球表面上的区域大小是不同的。星下点像素对应的区域面积最小, 其他位置的像素点对应的区域面积都大于星下点。像素点面积和形状随地面位置的变化被称为“像素扭曲”^[2]。国内外卫星气象学研究者对像素扭曲的关注较少。文献[1]和[2]提出了一维像素扭曲指数的计

算方法, 没有考虑二维下的像素扭曲情形, 因而不具有明显的实用价值。本文研究了二维下的像素扭曲, 并基于像素扭曲探讨了静止卫星成像仪星下点位置和水平分辨率对探测对流尺度天气现象能力的影响。

1 像素扭曲的计算

如果我们在卫星与地球之间“放置”高空透视投影^[3]平面 (图1), 就可以将像素扭曲拆成两步, 第一步是卫星在扫描投影平面时造成的扭曲, 第二步是地球表面进行高空透视投影时造成的扭曲, 而后者占主导作用, 证明如下:

在图1中, 首先作如下定义: 地球半径为 R , 卫星高度 (SO) 与 R 的比为 η (静止气象卫星为定值6.6111), 地球上任意一点 P 与星下点 S_0 的球面距离为 μ , 投影 L 与 S_0 的距离为 ρ , 扫描角 $\angle PSS_0$ 为 f , $\angle POS_0$ 为 α 。同时定义符号:

$$k_{m,n} = \frac{\partial m}{\partial n}, \quad K_{m,n}(\alpha) = \frac{k_{m,n}(\alpha)}{k_{m,n}(0)}. \quad (1)$$

那么 $K_{\rho,f}$, 和 $K_{\mu,\rho}$ 就分别是卫星扫描投影平面的扭曲指数和高空透视投影的扭曲指数, $K_{\mu,f} = K_{\rho,f} \cdot K_{\mu,\rho}$ 为总扭曲指数。

收稿日期: 2017年1月4日; 修回日期: 2017年5月8日

第一作者: 诸葛小勇 (1986—), Email: xzhu@nju.edu.cn

通信作者: 邹晓蕾 (1960—), Email: xzou1@umd.edu

资助信息: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (41505086)

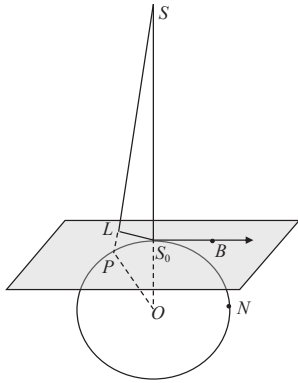


图1 高空透视投影示意图 (投影平面垂直于卫星S与地球中心O的连线, 并与地球表面相切于星下点 S_0 ; 地球表面上一点P最终投影在投影平面上的L点)

Fig. 1 An illustration of aerial perspective projection(The projection plane is perpendicular to the line connecting the satellite S and the earth center O, and tangent to the sub-satellite point S_0 . A point P on the earth surface is finally projected to the point L on the projection plane)

由三角关系有:

$$\tan f = \frac{R \sin \alpha}{\eta R - R \cos \alpha} = \frac{\sin \alpha}{\eta - \cos \alpha}, \quad (2)$$

以及

$$\rho = (\eta - 1) R \tan f. \quad (3)$$

因而可得:

$$k_{\rho, f}(\alpha) = \frac{\partial \rho}{\partial f} = (1 + \tan^2 f)(\eta - 1) R = \frac{(\eta^2 - 2\eta \cos \alpha + 1)(\eta - 1)}{(\eta - \cos \alpha)^2} R, \quad (4)$$

$$K_{\rho, f}(\alpha) = \frac{k_{\rho, f}(\alpha)}{k_{\rho, f}(0)} = \frac{(\eta^2 - 2\eta \cos \alpha + 1)}{(\eta - \cos \alpha)^2}; \quad (5)$$

以及

$$k_{\mu, \rho}(\alpha) = \frac{\partial \mu}{\partial \rho} = \frac{\partial(R\alpha)}{\partial((\eta - 1)R \sin \alpha)} = \frac{(\eta - \cos \alpha)^2}{(\eta - 1)(\eta \cos \alpha - 1)}, \quad (6)$$

$$K_{\mu, \rho}(\alpha) = \frac{k_{\mu, \rho}(\alpha)}{k_{\mu, \rho}(0)} = \frac{(\eta - \cos \alpha)^2}{(\eta - 1)(\eta \cos \alpha - 1)}. \quad (7)$$

当P与 S_0 重合时, α 的值最小; 当P位于两极地区时, α 的值最大。分别绘制 $K_{\rho, f}$ 、 $K_{\mu, \rho}$ 随 α 的变化曲线(图2), 可以看到, $K_{\rho, f}$ 的变化幅度不足3%, 但 $K_{\mu, \rho}$ 的变化很剧烈。由此证明静止气象卫星图像上的像素扭曲主要是由高空透视投影引起, 静止气象卫星在扫描投影平面时造成的扭曲可以忽略。

定义 $\Delta\lambda$ 为某一点与静止气象卫星星下点的经度差, ϕ 为该点纬度, 由某一点的经纬度($\Delta\lambda, \phi$)计算其在

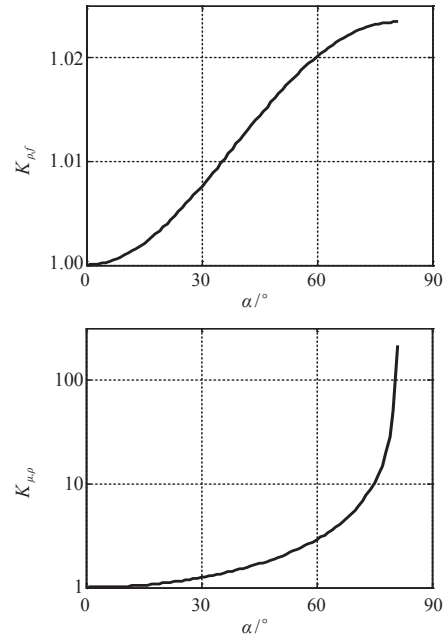


图2 $K_{\rho, f}$ 、 $K_{\mu, \rho}$ 随 α 的变化曲线
Fig. 2 Variation of $K_{\rho, f}$ and $K_{\mu, \rho}$ with respect to α

高空透视投影平面上的极坐标(ρ, θ)或者直角坐标(x, y)非常简单。在图1中, 若地球的北极点为N, 其在高空透视投影平面上的投影为B, 显然, $\angle LS_0B$ 即为 θ 。根据球面三角公式, 有:

$$\sin \phi = \sin \alpha \cos \theta, \quad \cos \alpha = \cos \Delta\lambda \cdot \cos \phi, \quad (8)$$

$$\sin \Delta\lambda \cos \phi = \sin \alpha \sin \theta.$$

利用式(8)可以求出 θ 。而由式(2), (3)和(8)可计算求出 ρ 。进而, $x = \rho \sin \theta, y = \rho \cos \theta$ 。

因为不需要考虑静止气象卫星在扫描投影平面时造成的扭曲, 由某一点的经纬度($\Delta\lambda, \phi$)计算该点在静止卫星云图上的列和行, 只需要将 x 和 y 除以星下点分辨率即可。表1列出了中日两国已经发射的静止气象卫星成像仪红外通道IGFOV和星下点水平分辨率(静止卫星成像仪的可见光和红外通道分辨率一般

表1 中日两国静止卫星成像仪红外通道IGFOV和星下点水平分辨率

		Table 1 IGFOV and sub-satellite horizontal resolutions of infrared channels for the Chinese and Japanese geostationary imagers		
		S-VISSR		AGRI
中国	成像仪名称	FY-2A/B	FY-2C~G	FY-4A
	搭载卫星			
	IGFOV/ μrad	160	140	112
	星下点分辨率/km	5.76	5	4
日本	成像仪名称	VISSR	MTSAT imager	AHI
	搭载卫星	GMS-1~5	MTSAT-1R/2	Himawari-8/9
	IGFOV/ μrad	140	112	56
	星下点分辨率/km	5	4	2

注: 数据来源<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/home>。

不一致；下文若不特别说明，都特指红外通道）。早期的FY-2A和FY-2B搭载的展宽可见光和红外自旋扫描辐射仪（stretched-visible and infrared spin scan radiometer, S-VISSR）的IGFOV为160 μrad ，对应星下点分辨率为5.76 km。从FY-2C一直到FY-2G，其搭载的S-VISSR的IGFOV为140 μrad ，对应星下点分辨率为5 km。FY-4A搭载的高级对地静止辐射成像仪（advanced geostationary radiation imager, AGRI）和日本多功能传输卫星MTSAT-1R和2成像仪的IGFOV提高到112 μrad ，转换成星下点分辨率就是4 km。日本的Hamawari-8搭载的高级成像仪（advanced hamawari imager, AHI），IGFOV为56 μrad ，相应的星下点分辨率可达2 km。

图3展示了根据上述公式计算的AGRI/FY-4A在星下点、卫星所在经圈、赤道圈及其他经纬度上像素所对应的区域。可以看到，卫星云图上像素对应的区域在星下点为正方形，在卫星所在经圈和赤道圈上为矩形，在其他经纬度上为平行四边形。显然从正方形到矩形是“拉伸”过程，而由正方形或矩形到平行四边形是“倾斜”过程。为此，把像素扭曲分解为拉伸和倾斜两部分。像素对应区域的经向（纬向）水平尺度相对于星下点的变化值定义为经向（纬向）拉伸。平行四边形中较小的角的余弦定义为倾斜度，显然矩

形的倾斜度为0。这三个变量可以用数学公式表示。若某一点 $(\Delta\lambda, \phi)$ 附近纬向距离有 $\partial\gamma = R \cos \phi \cdot \partial\Delta\lambda$ 的变化（经向距离的变化为0），造成卫星云图坐标产生 ∂x_1 和 ∂y_1 的变化，那么纬向拉伸其实就是 $(\Delta\lambda, \phi)$ 处与星下点处 $\frac{\cos \phi \cdot \partial\Delta\lambda}{\sqrt{\partial x_1^2 + \partial y_1^2}}$ 的比值。类似的，若某一点 $(\Delta\lambda, \phi)$ 附近经向距离有 $\partial\gamma = R \partial\phi$ 的变化（纬向距离的变化为0），造成卫星云图坐标产生 ∂x_2 和 ∂y_2 的变化，那么经向拉伸其实就是 $(\Delta\lambda, \phi)$ 处与星下点处 $\frac{\partial\phi}{\sqrt{\partial x_2^2 + \partial y_2^2}}$ 的比值。倾斜度等于 $\left| \frac{\partial x_1 \partial x_2 + \partial y_1 \partial y_2}{\sqrt{\partial x_1^2 + \partial y_1^2} \sqrt{\partial x_2^2 + \partial y_2^2}} \right|$ 。图4是根据此关系计算出的各位置上的纬向拉伸、经向拉伸和倾斜度。可以看到，纬向拉伸的等值线近似与经线平行，在与星下点的经度差绝对值为 30° 的经线上，纬向拉伸大约为1.2；而在与星下点经度差为 40° 的经线上，纬向拉伸大约为1.5。经向拉伸的等值线形状与双曲线类似，同一纬圈上，越接近星下点经度的经向拉伸越小。星下点所在经圈上，经向拉伸为1.2和1.5的点所在纬度分别大约为 30° 和 40° 。倾斜度的等值线为四角星形，卫星所在经圈和赤道圈上倾斜度为0。与星下点经度（纬度）差绝对值小于 30° 的区域倾斜度都小于0.5。

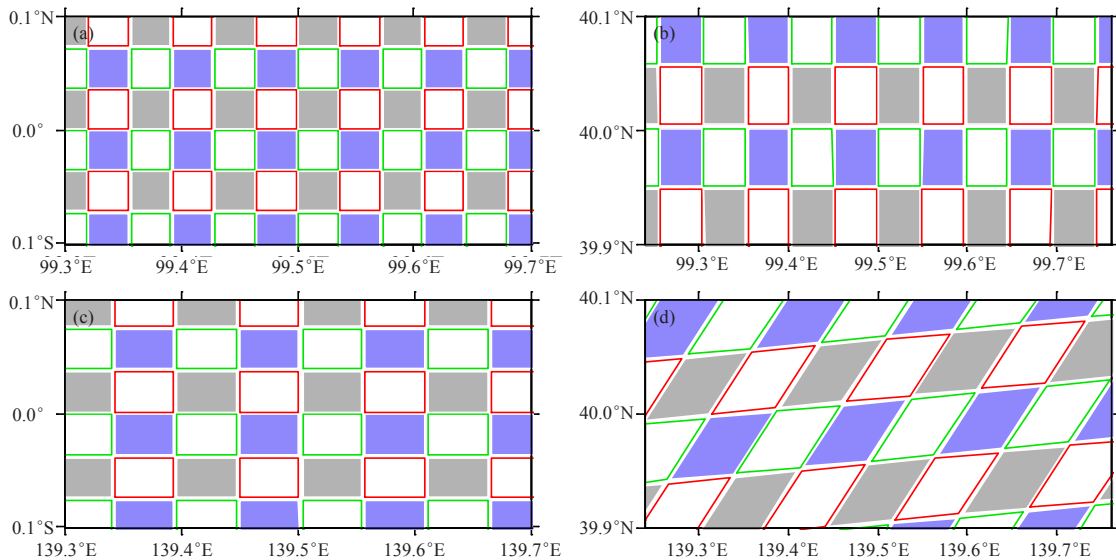


图3 根据高空透视投影方程计算的在 (a: $0^\circ, 99.5^\circ\text{E}$) (b: $40^\circ\text{N}, 99.5^\circ\text{E}$) (c: $0^\circ, 139.5^\circ\text{E}$) 和 (d: $40^\circ\text{N}, 139.5^\circ\text{E}$) 附近时，AGRI/FY-4A像素对应的地面区域（同一扫描线上相邻的两个视场由灰色块与红框表示，另一扫描线上相邻的两个视场由蓝色块及绿框表示，FY-4A星下点位于 99.5°E ）

Fig. 3 Areas on the ground corresponded to AGRI/FY-4A pixels near (a: $0^\circ, 99.5^\circ\text{E}$), (b: $40^\circ\text{N}, 99.5^\circ\text{E}$), (c: $0^\circ, 139.5^\circ\text{E}$) and (d: $40^\circ\text{N}, 139.5^\circ\text{E}$) calculated according to the equations of aerial perspective projection (The footprints of two adjacent pixels are indicated in gray shaded and red lines, respectively, along the odd-numbered scan lines, and the two adjacent pixels are indicated in blue shaded and green lines along even-numbered scan lines. FY-4A is located at 99.5°E)

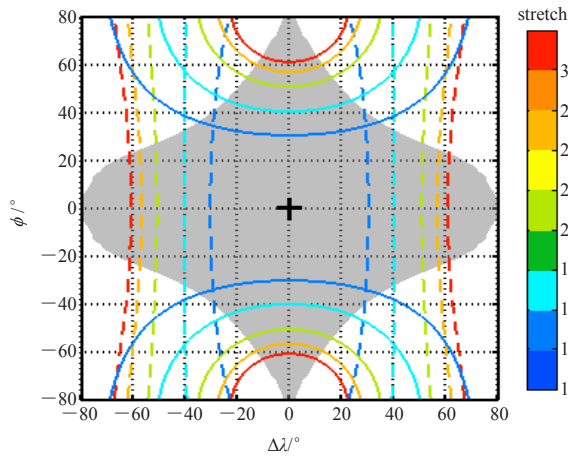


图4 根据高空透视投影方程计算的各位置上纬向拉伸（等值线，虚线）、经向拉伸（等值线，实线）以及倾斜度小于0.5的区域（阴影）（加号代表静止气象卫星星下点的位置，该位置的东经和经向拉伸皆为1，倾斜度为0）
Fig. 4 The zonal stretch (contour lines, dashed lines) and meridional stretch (contour lines, solid lines) for every place and the area with tilt degree less than 0.5 (shading) calculated according to the equations of aerial perspective projection (The cross indicates sub-satellite point where the zonal and meridional stretches are equal to 1 and the tilt degree is 0)

2 应用

经向或纬向水平分辨率是星下点水平分辨率与经向或纬向拉伸值的乘积。获悉每一点的水平分辨率对于研究对流的精细结构非常重要。以穿透性对流顶（overshooting top）^[4]为例，根据文献[5]的统计，穿透性对流顶的最大直径为12 km，这意味着<6 km的水平分辨率才能保证多数穿透性对流顶被正确识别^[6]。另外，像素的倾斜度也不能大，否则会对穿透性对流顶的形状和走向产生错误估计。目前尚无文献讨论像素倾斜度对对流的影响。这里经验性地将倾斜度的阈值定为60°（此时的像素倾斜率为0.5）。

衡量某一星载仪器的对流探测能力，可以考察其有效对流观测范围的大小。这里，将有效对流观测范围定义为水平分辨率<6 km且像素倾斜率<0.5的区域。图5展示了当前在业务工作的中日静止卫星成像仪的有效对流观测范围。可以看到，中国的S-VISSR/FY-2E和S-VISSR/FY2G在30°S—30°N的区域拥有<6 km的分辨率，在中国的华北和东北区域，这两个成像仪对小尺度对流的观测能力比较弱。相比之下，AGRI/FY-4A有效对流观测范围稍微大一些，可延伸除东北和西北之外的中国大部分地区。AHI/Himawari-8的有效对流观测范围最大。但由于位置偏东，AHI/Himawari-8只对整个中国东部区域（包括中

国的东北）有比较精细的观测。若在105°E赤道上空布置一个拥有2 km星下点分辨率的静止卫星成像仪，则几乎整个中国区域都可以被有效覆盖，实现精细观测（图6）。这个目标应该能在不久的将来实现。虽然中国第二代静止气象卫星试验星FY-4A和FY-4B搭载的AGRI星下点分辨率仍维持在4 km，但中国第二代静止气象卫星的业务星（如FY-4C）搭载的AGRI有望达到2 km^[7]。

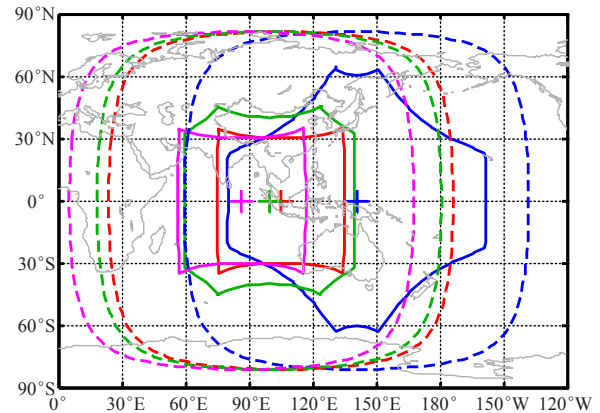


图5 当前在业务工作的中日静止卫星成像仪的最大理论覆盖范围（虚线）和有效对流观测范围（实线）（AHI/Himawari-8（蓝色），S-VISSR/FY-2G（红色），AGRI/FY-4A（绿色），S-VISSR/FY-2E（紫红色））
Fig. 5 The theoretical maximum coverage (dashed lines) and convective-scale-appropriate observing domain (solid lines) for the Chinese and Japanese geostationary imagers currently in operation (AHI/Himawari-8 (blue), S-VISSR/FY-2G (red), AGRI/FY-4A (green), and S-VISSR/FY-2E (magenta))

图7是2011年8月31日19时（UTC）的实例，展示了S-VISSR/FY-2E与MTSAT-2 imager因为有效对流观测范围差异导致的10.8 μm通道观测的差别。当时FY-2E和MTSAT-2分别定位在104.5°E和145°E。图7a和b是位于台湾岛以南洋面上的对流系统，在FY-2E和MTSAT-2云图上（局地水平分辨率都低于6 km）差别较小。它们都呈鞋状，具有三个突起的云顶（亮温低值区）。图7c和d是位于渤海湾附近的对流系统，在FY-2E（局地水平分辨率大于6 km）和MTSAT-2（局地水平分辨率低于6 km）云图上表现出明显的差别。MTSAT-2探测到的云顶多“斑点”，表明云顶的局地亮温变化剧烈，可能有多处发生了穿透性对流，FY-2E区分不了细微的局地亮温梯度，因此观测到的云顶比较平整。还有一个明显区别是南侧的V形缺口，MTSAT-2观测到的是呈西北—东南走向，而FY-2E观测到的是呈东北—西南走向，跟像素倾斜方向一致。

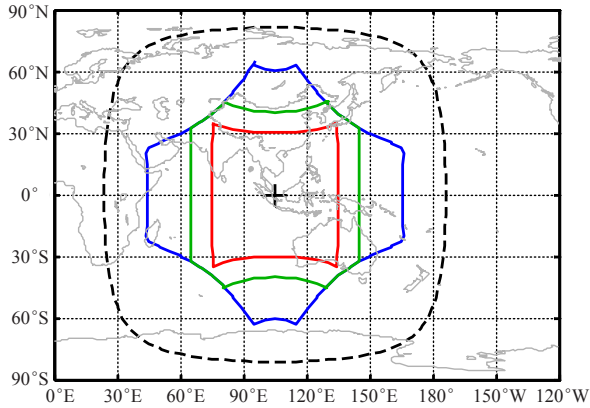


图6 星下点在105°E的静止卫星成像仪的最大理论覆盖范围(虚线)以及在星下点分辨率为5 km(红色)、4 km(绿色)和2 km(蓝色)时的有效对流观测范围(实线)
 Fig. 6 The theoretical maximum coverage (dashed lines) and convective-scale-appropriate observing domain (solid lines) by a geostationary imager located at 105°E when sub-satellite horizontal resolutions are 5 km (red), 4 km (blue) and 2 km (blue), respectively

3 结论

1) 像素扭曲通常可以“分解”成两步: 第一步是静止气象卫星在扫描“高空透视投影平面”时造成的扭曲; 第二步是地球表面进行高空透视投影时造成的扭曲。本文通过严格的推导证明了静止气象卫星图像上的像素扭曲主要由第二步引起, 由此简化了像素扭曲的计算过程。

2) 像素扭曲可以进一步分解为像素拉伸和像素倾斜。像素拉伸决定气象卫星成像仪在中高能能探测的最小对流尺度, 像素倾斜影响对对流形状的正确判断。

3) 有效对流观测范围可定义为水平分辨率 < 6 km 且像素倾斜率 < 0.5 的区域。日本的静止气象卫星成像仪的有效对流观测范围大于中国静止气象卫星成像仪。AHI/Himawari-8 对中国东部区域有很好的观测。若中国能在 105°E 赤道上空布置一个具有 2 km 星下点分辨率的静止卫星成像仪, 则该成像仪的有效对流观测范围可以覆盖几乎整个中国区域。

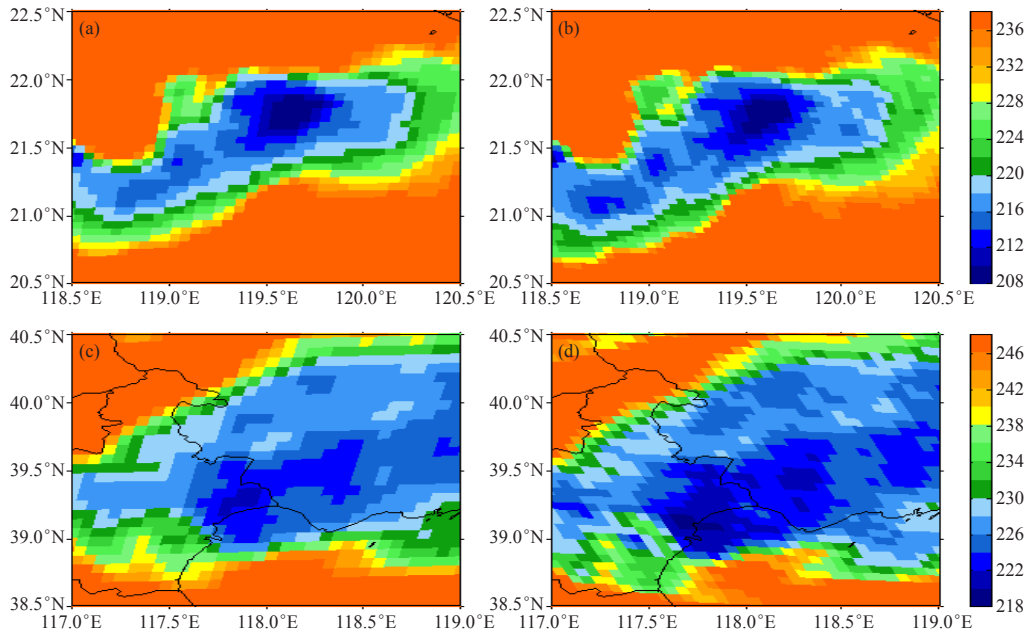


图7 FY-2E (a, c) 和 MTSAT-2 (b, d) 的 10.8 μm 通道在 2011 年 8 月 31 日 19 时 (UTC) 的观测亮温 (当时 FY-2E 和 MTSAT-1R 分别定位在 104.5°E 和 145°E)

Fig. 7 The observed brightness temperatures of 10.8-μm channel of FY-2E (a, c) and MTSAT-2 (b, d) at 1900 UTC on August 31, 2011 (FY-2E and MTSAT-1R were located at 104.5°E and 145°E, respectively)

参考文献

[1] 达成, 邹晓蕾. GOES 成像仪资料简介. 气象科技进展, 2014, 4(4): 52-61.
 [2] Capderou M. Satellites: Orbits and Missions. France: Springer-Verlag, 2005.
 [3] Pearson F. Map Projection: Theory and Applications. France, 1990: 384.
 [4] Bedka K, Brunner J, Dworak R, et al. Objective satellite-based overshooting top detection using infrared window channel brightness temperature gradients. J Appl Meteor Climatol, 2010, 49: 181-202.
 [5] Brunner J, Ackerman S, Bachmeier A, et al. A quantitative analysis of the enhanced-V feature in relation to severe weather. Wea Forecasting, 2007, 22: 853-872.
 [6] Bedka K, Dworak R, Brunner J, et al. Validation of satellite-based objective overshooting cloud-top detection methods using CloudSat cloud profiling radar observations. J Appl Meteor Climatol, 2012, 51: 1811-1822.
 [7] 张鹏, 郭强, 陈博洋, 等. 我国风云四号气象卫星与日本 Himawari-8/9 卫星比较分析. 气象科技进展, 2016, 6(1): 72-75.