

中国资源卫星绝对辐射校正场

王志民

摘要 概述了有关绝对辐射校正场的国内外发展状况, 分析了我国敦煌及青海湖两个辐射校正场的地理、地物、气象、大气和环境等特征的优点和不足, 并对今后在场地的运作中如何扬长避短提出了工作建议。

关键词 资源卫星 绝对辐射校正场

分类号 TP 701

GROUND TEST SITES FOR ABSOLUTE RADIOMETRIC CALIBRATION OF CHNIA RESOURCES SATELLITE

Wang Zhimin

(China Center for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100830)

Abstract Based on a great amount of available data, this paper deals with the development conditiations about the site of absolute radiometric calibration, analyses the characteristics of Dunhuang Site (for the calibration in visible and near_infrared wavelengths) and Qinghai Lake Site (for the calibration in thermal infrared wavelengths), they are mainly the characteristics of greography, ground surface features, meteorology, atmosphere, and environmental effects, etc.. Finally, it give some suggestions on how to exploit the fully favourable conditions and avoid unfavourable ones in the future works.

Key words Resources satellite The site for absolute radiometric calibration

1 辐射校正场的国内外发展概况

绝对辐射校正就是建立遥感器测量数字信号与对应的辐射能量之间的数量关系。对于一种遥感器来说, 绝对辐射校正就是确定一个灰度值(DN)对应多少辐射度值(L); 或者, 确定一个辐射度(L)对应多少灰度值(DN), 其数学表达式为:

$$L=A \cdot DN \quad \text{或者} \quad DN=B \cdot L$$

遥感卫星在发射前, 卫星研制单位已利用地面设备对遥感器进行了绝对辐射校正。然而遥感卫星在轨运行后, 由于元器件所处空间环境的改变和随卫星运行时间的增加而使光器件老化, 使灵敏度下降。例如, 1979年美国根据海色扫描仪(CZCS)的工作特性, 以海水作为绝对校正场, 重新对CZCS辐射特性进行了评价。根据船上和飞机上的测量结果发现, CZCS短波部分在4年后其灵敏度下降了25%; 1984年美国在白沙

试验场对Landsat-5进行大气辐射校正，发现卫星在轨运行600 d后，TM2、TM3、TM4波段的灵敏度分别变化了6.6%、2.0%和12.9%；SPOT卫星探测器也有同样的结果。所以，遥感卫星探测器在轨飞行标定是具有实用价值的。

美国和法国对Landsat和SPOT卫星采取三种绝对辐射校正方法是：①用太阳定标装置，即以太阳光为标准辐射源对探测器进行标定。由于利用太阳常数的估值误差和卫星姿态测定误差，很难估算出该系统的精度，所以，这种方法在Landsat上实际上没有用，而SPOT的HRV系统也由于其杂散光难以估计，这种方法也没有得到很好的使用；②用三个标准光源和一个黑体辐射器分别对Landsat TM传感器的可见光、近红外波段和热红外波段进行标定。这一方法的缺点是校正光路与卫星传感器在轨道上获取的遥感图像的光路完全不同，不能发现从地面至卫星入瞳处的光路上由宇宙尘埃造成的强散射光和干涉滤光片上凝聚的水汽而使滤光片的波长发生移动引起的误差。同时，星上的定标装置由于自身的老化效应，很难保证内定标系统标定结果的可靠性；③星外定标，即为辐射校正场方法。该方法在美国、法国等经济发达国家普遍应用，并取得了长足的发展，法国已发展到业务性运作阶段。由于该方法现已成熟并且精度较高，法国空间中心已表示今后的SPOT卫星将取消星上定标装置，而完全依靠地面辐射校正场的作用。

绝对辐射校正方法是80年代初由美国Arizona大学光学中心的P.N.Slater先生首先提出来的。该方法是以大面积的均匀地物为校正源，来实现在轨遥感卫星传感器的辐射校正。经过近十多年的研究，成功地对Landsat-TM、SPOT-HRV、NOAA和机载成像光谱仪实施了辐射校正，被国际遥感界认为是一种行之有效的方法。

美国NASA和亚利桑那(Arizona)大学在美国新墨西哥州的白沙(WSMR)和加利福尼亚州的爱德华空军基地的干湖床(EAFB)建立了辐射校正场，并已对多颗卫星进行了场地标定工作。法国在马塞市附近也建立了La crau辐射校正场，并开展了多次辐射校正工作。欧空局在非洲撒哈拉沙漠，日本与澳大利亚合作在澳大利亚北部沙漠地区建立了地面辐射校正场，通过星地同步观测，实现对卫星遥感仪器的定标。根据美、法公布的资料，目前用辐射校正场的方法对可见光和近红外波段的标正精度可达6~3%左右。除成功地对Landsat-4、5的TM，SPOT的HRV，NOAA-9、10、11的AVHRR，Nimbus-7的CZCS进行辐射校正外，目前正在进一步研究高分辨率成像光谱仪(AVIRIS)和中分辨率成像光谱仪(MODIS)的辐射校正，并对法国偏光照相机(POLDER)进行辐射校正。加拿大在北部大草原也开展卫星、飞机积雪同步观测，以便对卫星传感器作出客观评价。

我国根据美、法等国家多年开展遥感卫星探测器绝对辐射校正的经验和辐射校正场的选址条件，在国家计委、原国防科工委和原航天总公司领导的支持下，于1993年和1994年先后组织有关专家通过现场考察，确定甘肃省敦煌市西部党和洪积扇区为可见光和近红外波段的绝对辐射校正场，青海省的青海湖为热红外波段的绝对辐射校正场。

2 敦煌辐射校正场的优点和不足

2.1 敦煌辐射校正场的优点

(1)场地地域开阔，地形平坦。敦煌辐射校正场位于敦煌市西部35 km的党河洪积扇上，扇基位于鸣沙山北缘，扇缘北邻疏勒河的冲积平原。南北长约40 km，东西宽约60 km，其中

表1 SPOT波段敦煌场地面平均反射率*

参 数	XS ₁	XS ₂	XS ₃
n (测量次数)	201	201	104
ρ %(反射率)	20.1	23.1	25.7
σ %(标准偏差)	0.51	0.68	0.65
C _y (变化系数)	2.5	2.9	2.5

*测量日期：1996年8月28日地物类型均一部分的面积达40 km×30 km，地域十分开阔。地势南高北低，微向东倾斜。南北倾斜坡降仅有5‰，由西向东倾斜的坡降为2.5%，因此地形十分平坦，对绝对辐射校正工作十分有利。

(2)场地地物类型均一旦稳定。党河洪积扇上的沉积物为含砾砂土，系细砾的软戈壁。沉积物的空间分布与其他洪积扇一样，从扇基到扇缘分带性结构比较明显。沉积物砾石砾径变化为15 cm~2 cm。从扇基到扇缘颗粒由粗变细，地形由凹凸不平逐渐变为平坦。除南部和西部有少量稀疏植被分布外，其余地区基本上无植被分布，校正场的测量区选择在洪积扇前部的平坦地带，场地各种地物在各波段平均反射率见表1。

受蒸发量大于降雨量的影响，该场地地壳有薄层胶结物。胶结层厚2~5 cm，形成该地区的一个保护层，表层的砂砾一般不会被风经易吹动而搬走。这样，该区的地物类型不仅单一，而且较稳定，有利于绝对辐射校正测量。

(3)大气干洁无污染。据1992年、1993年、1995年和1996年的敦煌市大气监测资料(表2)，敦煌市的二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)和总悬浮微粒(TSP)三项指标均优于国家二级标准(《大气环境质量标准》，GB3095-82)。其中，SO₂和NO_x的年平均值达到国家一级标准。另外，与法国La crau场相比，敦煌场的气溶胶含量也比较低(表3)。

表2 敦煌市1992年，1993年，1995年，1996年大气监测统计表 单位：mg/nm³

监测项目	1992年平均 值	1993年平均 值	1995年平均 值	1996年平均 值	国家二级 标准	国家一级 标准
二氧化硫(SO ₂)	0.028	0.012	0.028	0.044	0.15	0.05
氮氧化物 (NO _x)	0.029	0.024	0.031	0.041	0.10	0.05
总悬浮微粒 (TSP)	0.21	0.25	0.202	0.358	0.30	0.15

表3 法国La crau场与敦煌场大气参量统计表

参量	法国场某年10月26日	敦煌场1996年8月29日
观测天底角(°)	2.0	24.10
观测方位角(°)	101.9	103.60
太阳天顶角(°)	53.1	32.50
太阳方位角(°)	166.7	157.70

水汽含量(g·cm ⁻²)	1.470	2.93
臭氧含量(cm·atm)	0.260	0.319
气溶胶光学厚度550 nm/670 nm	0.320	0.089

(4)晴天日多，光照条件好。敦煌地处内陆，四周受沙漠、戈壁包围，属于典型的大陆性气候。具有太阳辐射强，光照充足，降水量少，蒸发强烈，能见度较好的特点。据敦煌市气象站1984年～1993年实测资料的统计，敦煌年平均降水量仅有34.1 mm。年平均晴天日达(总云量<2)111.3 d。

(5)人文环境优越。敦煌莫高窟是世界文化遗产之一，在世界上享有崇高的声誉。敦煌市1979年被国务院命名为历史文化名城，1989年莫高窟被联合国列为重点文物保护单位。敦煌辐射校正场的建成，对国内外的科技界都有很大的吸引力。

2.2 敦煌辐射校正场的不足

(1)晴天日虽多，却比较集中在秋、冬两季(表4)。气象学上的晴天是指云量(包括高云和低云)<2，而辐射校正要求的天气标准是碧空无云。如果有云的条件下测量，而云正好又在测量区上空，辐射校正工作就不能进行；若在测区周围有云，由于云的散射也易造成天空漫射辐照度的各向异性突出，对反射率测量结果有影响。

表4 敦煌地区1984年～1993年平均晴日统计表

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	总 计
晴天日(d)	12.5	7.4	5.7	4.9	4.9	5.3	7.7	11.4	13.9	14.9	11.5	11.2	111.3

根据在敦煌考察的体会，捕捉完全碧空无云的天气是不太容易的，对于重复观测周期较长的资源卫星来，如果错过一次星地同步观测的机会，要等很长的时间才能弥补。而绝对辐射校正要求对地物重复观测多次，而且至少要有3次是成功的，这对于敦煌场来说，是比较困难的。并且，为监测卫星传感器变化所需要的一年两次星地同步观测，敦煌场也很难满足要求。

(2)地物虽均一，但地表面十分脆弱。敦煌场地表面有2～5 cm厚的微胶结合砾砂土层，其中砾石占50～80%，砂土占50～20%，局部有少量砾石。这一特殊的表层结构是由于长期在劲风的作用下形成的。而胶结层以下的含砾砂土层，其结构与表面有很大的差别，砂土占70%，砾石占30%，颜色也较深。在场地上用较重的步伐行走，就会破坏表面的胶结层，当汽车通过场地时会把表层下面的深色土壤翻转上来，从而改变场地的光谱特征，影响星地同步观测工作的测量精度。

(3)场地总悬浮微粒(TSP)的不稳定性，影响对大气光学厚度的测量。从表2看出，敦煌地区的TSP值有逐年增长的趋势，1996年的平均值还有超过国家二级标准的现象。这是因为该区易出现沙尘暴、浮尘和扬沙等灾害天气，使本区TSP值受到影响。据1992、1993、1995和1996年1号监测点(鸣沙山)TSP的测量结果，四年共320个瞬间样品TSP年平均值为0.27 mg/nm³，小于国家二级标准0.3 mg/nm³。在320个瞬间样中，TSP超标样品为38个，占12%。其超标量多数为一倍，少数为11～13倍(表5)。

表5 敦煌市鸣沙山大气中TSP超标样品分类统计表

超标倍数	1	2	3	4	5	10	11	13
超标样品数	25	4	3	2	1	1	1	1

百分比(%)	65	10	8	5	3	3	3	3
--------	----	----	---	---	---	---	---	---

在38个超标样品中，就有13个为晴天较多的第三季度样品，占超标样品的34%，这显然对观测不利。如果资源卫星星地同步观测瞬间的TSP超标，将影响大气光学厚度测量，尤其是影响气溶胶光学厚度的测量。

3 青海湖校正场的优点和不足

通过调研和分析认为，青海湖作为热红外波段的辐射校正场具有很多得天独厚的优势，对热红外波段的绝对辐射校正十分有利，但也存在一些不足。

3.1 青海湖场地的优势

(1)湖面开阔，面积大。青海湖是我国最大的内陆高原微咸水湖泊。最长处106 km，最宽处63 km，周长有360 km，湖面面积为4 635 km²，湖水总容积量达854.54亿方，如此大的水面对绝对辐射校正场的测试工作十分有利。

(2)湖水深度大，表面温度变化小。青海湖最大水深为28.7 m，平均水深为19.15 m。据水深资料，青海湖25 m水深线距岸仅有2.5~8 km，水深梯度为3~10 m/km，水深大于20 m的湖区面积为2 620 km²，占全湖面积的56.5%。热红外波段绝对辐射校正场的测量区选择在海心山至湖的南岸广调水面。据中国遥感卫星辐射校正场考察团1994年6月30日在青海湖海心山周围大约30 km×30 km的范围内实测水温，从青海湖东南岸码头至海心山，水表面温度变化<0.6℃，相邻两个测点(点距为2~3 km)水表面温度变化仅有0.1~0.2℃。如此宽阔的水面和微弱的水表面温度变化，能够满足热红外波段绝对辐射校正的需要。

(3)大气无污染。青海湖位于青藏高原东北隅，海拔高度为3 196 m，湖区周围除有少数居民点外，无大型工厂，虽然没有获取到有关质量的监测资料，但通过现场考察和观测，青海湖的大气是清洁无污染的，对绝对辐射校正无影响。

(4)青海湖中水生生物少。青海湖的浮游生物种类和数量少，浮游植被可见种类有35种，以硅藻为主；浮游动物可见种类有17种，以原生动物为主。浮游生物主要分布于湖面的西南部，东北部次之。垂直分布规律不明显，对绝对辐射校正影响不大。

(5)青海湖的湖流与湖浪。青海湖的湖流主要是围绕海心山形成的主体环流。局部地区有次一级的湖湾回流。主体环流主要是布哈河水自西而东注入及西北风的推压引起的，2 m水深处流速最大，向下递减。表层最大流速为7.7~5.5 cm/s。由于流速较小，对辐射测量的影响不大。青海湖的湖浪是由风力引起的，无风时水平如镜，风起时波涛起伏，风大浪高，浪的强度取决于风的能量。绝对辐射校正在大风条件下是不能进行的，所以，当湖浪较大时，辐射校正的观测工作也需停止。

3.2 青海湖校正场的不足

(1)大风日较多，晴天日较少。据青海省气象局提供的气象资料，1984~1993年青海湖平均年晴天日为56.9 d，而且晴天日较多的月份主要集中在11月、12月和翌年1月，对辐射校正观测十分不利(表6)；1984年~1993年平均大风日为51.9 d，是敦煌的5.9倍，这些条件均不利于辐射校正工作。

表6 青海湖地区1984~1993年平均年晴天日、大风日统计表

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年平均值
平均年晴天日(d)	9.4	4.3	2.5	2.4	1.2	1.3	1.8	3.2	3.0	7.8	10.6	9.4	56.9

平均年大风日 (d)	5.8	7.5	9.2	5.4	2.9	2.8	2.2	1.2	0.7	2.0	5.6	6.5	51.9
---------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------

表7 青海湖地区1984~1993年10月~翌年2月平均气温表

青海湖晴天最多月份	10	11	12	1	2
平均气温(°C)	1.7	-4.4	-8.3	-12.6	-8.9
最高气温(°C)	16.4	11.1	7.2	4.4	8.8
最低气温(°C)	-10.9	-7.5	-24.5	-26.9	-23.8

(2)冬季湖面冰封，气温酷冷。青海湖最冷月(1月)的平均气温为-10.4~-14.7℃，晴天日最多的为12月~翌年2月(表7)。

气温寒冷，湖面冰冻增加了辐射校正测量的难度(以水为标定表面研究的人多，以冰面为标定目标的研究人员甚少)。

4 对我国开展绝对辐射校正工作的建议

表8列出了美国、法国及我国敦煌辐射校正场的自然特征和气象参数。在学习美、法两国先进技术的同时，要注意与我国辐射校正场特征相结合，创造出适宜中国辐射校正场特征的运行方法和设备。

表8 敦煌辐射校正场与美、法两国辐射校正场的比较表

地点 特征	敦煌场	美国 White Sands	法国 La Crau
面积(km ²)	40×60	60×30	60
地表物质组成	戈壁(含砾砂土)	石膏沙	鹅卵石
纬 度	N40 ° 12 '	N32 ° 55 '	N43 ° 30 '
经 度	E94 ° 26 '	E106 ° 22 '	E4 ° 52 '
海拔高度(m)	1160	1196	20
平均气压(mb)	891.3	870.0	
年平均气温(°C)	8.7	13	
年平均相对湿度(%)	41	55	
气候类型	干燥大陆西风气候带	干燥大陆性气候	干燥地中海气候

4.1 对反射光谱区辐射校正场的工作建议

(1)充分发挥敦煌场地地域开阔平坦,地物类型均一的优势,选择适当的测量方法尽可能在减少测量数的情况下,保证测量精度,从而避开晴天日相对较少的弱点。

(2)保护好敦煌场表面胶结层,建议:①多设几个测量区,从而减少由于支架仪器,测量人员踩踏对胶结层的破坏;②改进测量区的采样方法,建议把测量仪放置在特制的“测量车”或可遥控的轻便小飞机上,这样即保护了地表面又提高了采样的质量。

(3)采取适当措施,争取在一年内实现二次重复观测。具体建议:①加强对测量方法和测量仪器的改造,实现测量遥控和自动化,快速捕捉有效测量日、快速测量,机动灵活地完成第二次测量任务;②另外择址测量。

(4)建议着手进行第二个辐射校正场的选址,其理由是:①就敦煌场目前情况看,很难实现每年除8、9、10月份最佳观测季节以外的第二次星地同步测量,需要选择第二个辐射校正场,来弥补敦煌场的不足;②从科学试验的角度来看,有必要采取多场测试、多种方法测试,以便进行相互验证,以获取最佳的测试结果。美国除白沙试验场外,在加利福尼亚爱德华空军基地还有一个干河床试验场。法国除本土的La Crau场外,也希望在异地有试验场;③敦煌场的TSP值有逐年增长的趋势,如果TSP值继续增加,也必须选择第二个辐射校正场。

4.2 对热红外光谱区辐射校正场的工作建议

(1)青海湖年平均晴天日较少,建议在目前以水体表面为标定表面方法的基础上,加强以冰面为标定表面的方法研究。

(2)改变传统的观测方法,加强远程遥测、遥感的测量方法研究,实现数据采集、数据传输的自动化。

(3)选择第二个热红外光谱区校正场,以补充青海湖校正场的不足。

(4)加强对青海湖小气候的研究。当青海湖不受外来天气系统影响时,表现出局地湖陆环流小气候的显著特征。因此,尽管每年7、8、9月份青海湖能满足全天总云量<2的晴天日较少,但由于小气候的影响有可能出现较多可以进行热红外绝对辐射校正工作日,这类天气现象虽然短暂,但如果出现在资源卫星过境时间,是非常难得而有用的。如果通过研究捕捉到这类天气出现的规律,将会增加青海湖的星地同步观测日。

作者简介: 王志民 男 1938年生,1963年毕业于北京地质学院,研究员,从事过航天、航空遥感应用研究,自1994年开始,主要从事遥感卫星传感器绝对辐射校正方法技术研究。

作者单位:中国资源卫星应用中心,北京 100830

参考文献

[1] 中国科学院兰州地质研究所等编著.青海湖综合考察报告.北京:科学出版社,1979

[2] 中国科学院兰州分院等编著.青海湖近代环境演化和预测.北京:科学出版社,1994

[3] 吴道纲,尹泳龙,王志民等.中国敦煌卫星辐射校正场场地辐射特性.国际物理

学会论文集, 1997, 151~160

收稿日期: 1999-07-09