

南极红外巡天望远镜红外背景辐射抑制方法

卢海平^{1,2} 袁祥岩^{1,2} 张凯元^{1,2,3}

(¹ 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042
² 中国科学院天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042; ³ 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 南极 Dome A 被认为是地球上最为优秀的天文测光、观测台址,尤其在红外波段。为了充分利用 Dome A 的独特天文观测优势条件以及满足系外行星观测需求和为我国未来南极更大口径望远镜的研制提供经验,提出建造 1 m 可见/红外巡天望远镜。通过掩星法探测系外行星,至少需要万分之五的测光精度,必须很好地抑制或降低系统光机结构的自身辐射。以南极 1 m 可见/红外巡天望远镜为例,进行南极红外望远镜杂散光抑制方法方面的探讨。由于该望远镜采用一次直接成像光学系统,光学结构简单,但无法设置冷光阑,红外背景辐射抑制效率较低。在光学系统设计上把次镜设置为孔径光阑进行优化设计,再详细介绍主镜遮光罩,次镜遮光罩,以及杜瓦瓶内冷光阑的独特设计,通过模拟仿真,自身辐射在像面上的辐照度为 $6.8 \times 10^{-10} \text{ W/m}^2$,为天空背景辐射在像面上的照度五分之一以下,满足天文观测三分之一要求。

关键词 光学设计;南极巡天望远镜;红外望远镜;杂散光;背景辐射

中图分类号 TN215 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1122002

Infrared Background Radiation Removing Design and Simulation of Antarctic Survey Telescope

Lu Haiping^{1,2} Yuan Xiangyan^{1,2} Zhang Kaiyuan^{1,2,3}

¹ National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics and Technology,
Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China
² Key Laboratory of Astronomical Optics and Technology, Chinese Academy of Sciences,
Nanjing, Jiangsu 210042, China
³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Antarctic Dome A is considered to be the most outstanding astronomical photometry and observation site on earth, particularly in the infrared. To take full advantage of the unique advantages for astronomical observation, meet the needs of exoplanet observations and provide experience for the future development of larger antarctic telescopes, the construction of 1 m visible/infrared survey telescope is proposed. By occultation method to detect exoplanets, it should achieve five ten thousandths of photometric accuracy by reducing background radiation, suppressing the self-radiation of telescope is very important. Take 1 m visible/infrared sky survey telescope as an example, the method of suppression of self-radiation is discussed. One meter antarctic visible/infrared survey telescope adopt a direct, simple optical system, but can not be set the cold pupil, suppressing stray light is less efficient. By optimizing the design of the optical system, setting the secondary mirror as aperture, the unique design of the Dewar, secondary baffle and main baffles, the background radiation on imaging surface is $6.8 \times 10^{-10} \text{ W/m}^2$. Through simulation, which is one-fifth of the sky background radiation, the background radiation suppression meets the requirements of astronomical observations.

Key words optical design; antarctic survey telescope; infrared telescope; stray light; background radiation

OCIS codes 220.4830; 080.3620; 110.3080; 290.6815

收稿日期: 2014-05-20; **收到修改稿日期**: 2014-06-17

基金项目: 国家 973 计划(2013CB834901)、国家自然科学基金(11190011)、中国科学院天文光学技术重点实验室开放课题基金(K01)

作者简介: 卢海平(1984—),男,博士,助理研究员,主要从事南极天文光学技术、天文仪器、光学系统设计以及红外光学系统等方面的研究。E-mail: hplu@niaot.ac.cn

1 引言

在南极 Dome A, 由于其独特的优势: 近地层高度低、寒冷干燥、尘埃少、大气透明度高; 视宁度极佳; 可连续 3~4 个月无间断观测。光学望远镜比安放在地球上的其他地方效率至少提高 2~4 倍。因此, Dome A 被天文学家们一致认为将是地球上最好的天文台址^[1]。2005 年中国南极科考队到达 Dome A 获得的气象数据显示 Dome A 或许是地面望远镜最好的台址。2008 年, 南极天文中心在 Dome A 安装了 4 台小望远镜 (CSTAR, 中国之星) 获得了巨大的天文数据及成果^[2-3]。南极巡天望远镜 AST3 将充分利用 Dome A 的台址优势实现获得更多的天文数据为未来南极大口径望远镜的研制及建造积累经验及技术基础^[4-5]。由于南极 Dome A 年平均气温低达零下 57 °C。到现在为止, 地球上观测到的最低气温为摄氏零下 83 °C, 极低的大气温度, 将使得大气自身辐射降低, 红外观测时, 背景低, 有利于提高天文观测的探测深度。

系外行星科学是目前国际上的热点前沿问题。通过观测行星的掩星现象, 能够搜寻行星并且拟合行星的大小和轨道倾角等参数。红外 (IR) 波段对应的是温度较低的辐射, 行星自身的辐射将在系统中占更多的比例, 因此次掩也将更加明显。为了充分利用 Dome A 的独特天文观测优势条件、满足时域天文观测和系外行星观测需求, 我国未来将在南极建造更大口径红外望远镜。望远镜的测光精度是天文望远镜的关键指标之一, 而杂散光将严重地影响测光精度, 红外背景辐射是红外光学系统杂散光能量中的重要部分, 其抑制方法也是红外光学系统设计中重点研究的方面^[6-8]。

对于大口径天文巡天望远镜来说, 望远镜焦距较长, 视场较大, 中继系统光学元件较大, 如果设计成具有中继系统的望远镜, 则透射光学元件尺寸在 100 mm 左右, 但是, 大尺寸的红外透射材料较难获得, 并且成本较高^[9-11]。因此, 该望远镜采用 R-C 加改正镜、一次直接成像光学系统, 结构简单, 光路短, 但由于不能够实现冷光阑的匹配, 如果不采取其他特殊措施, 红外背景辐射抑制效果较差。本文将以南极 1 m 可见/红外巡天望远镜为模型, 进行红外背景辐射抑制方法的探索。讨论主镜遮光罩, 次镜遮光罩, 以及杜瓦瓶内冷光阑的独特设计, 通过模拟仿真, 系统实现较好的自身辐射抑制效果, 能够满足红外天文观测要求。

2 南极 1 m 可见/红外巡天望远镜光学系统

南极 1 m 可见/红外巡天望远镜采用 R-C 加改正镜的光学系统, 星光入射到 1 m 主镜上, 反射到副镜, 副镜放大后反射至主镜中孔后面, 经分光镜分束, 反射光 (1~5 μm) 进入红外相机, 透射光 (0.45~1 μm) 进入光学相机, 像质在 0.55 μm 波段以上达到衍射极限。近红外光路中有一块改正镜, 材料 CaF₂; 可见光光路焦面前也设计了一块改正镜, 材料熔石英。为了尽量减少系统自身辐射的影响, 将孔径光阑设置在次镜上, 抑制了主镜周围的辐射。光学系统光路如图 1 所示。

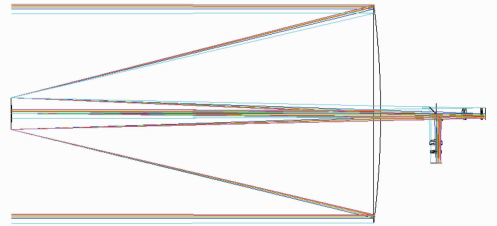


图 1 南极 1 m 可见/红外巡天望远镜光学系统结构
Fig. 1 Optical structure of 1 m antarctic visible/IR survey telescope

南极 1 m 可见/红外巡天望远镜主要光学技术指标: 主镜口径为 1 m; 系统焦距为 6195 mm; 系统 F 数为 6.45; 主镜 F 数为 1.8; 视场为 12', 波长为 0.45~1 μm ; 1~5 μm ; 总长为 1760 mm。

3 背景辐射抑制设计

在考虑红外杂散光抑制时, 需要尽量减少望远镜系统自身辐射到达探测器上的能量。由于南极 1 m 可见/红外巡天望远镜不是二次成像系统、无法实现系统出瞳与冷光阑的匹配, 系统较难实现对背景辐射较好的抑制效果, 因此需要通过对次镜遮光罩、主镜遮光罩, 冷光阑的独特设计来满足红外背景辐射抑制要求^[12]。

3.1 次镜遮光罩设计

次镜遮光罩面向及背向探测两个面均采用高度抛光, 面向探测器表面镀工作波段反射膜层, 背向探测器表面涂镀高吸收黑色涂层, 主要是降低发射率, 减少次镜遮光罩吸收的热沉, 减少自身辐射, 从而次镜遮光罩直接辐射到探测器的能量能够有效降低。并且在面向探测的表面设计成一定曲率的表面, 使得望远镜其他部分的自身辐射不能够通过次镜遮光罩表面的反射直接到达探测器表面, 探测器所接收

的辐射大部分主要来自于杜瓦瓶,使得本来探测器通过挡光环可以“看”到的元件,通过合适曲率的挡光环变得不可见,能够有效地减少关键面的数量。根据像面和杜瓦瓶窗口的物像对应关系,选择次镜遮光罩的最佳曲率半径为 1700 mm,如图 2 所示,只有杜瓦瓶内的辐射才可以通次镜遮光罩的反射直接到达像面。

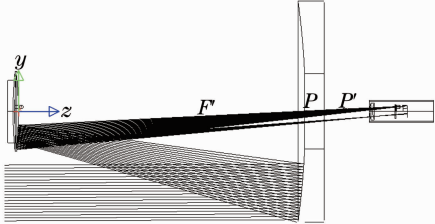


图 2 次镜遮光罩光线反追图

Fig. 2 Picture of ray trace of second baffle from the detector

3.2 冷光栏设计

考虑到系统对红外背景辐射的抑制要求,以及南极特殊条件下系统功率的限制以及制冷方式的局限性,将探测器的杜瓦瓶设计成两阶结构。探测器和滤光片之间作为一阶,改正镜和滤光片之间作为二阶,改正镜作为杜瓦瓶窗口。一阶采用圆筒形结构,二阶采用圆锥形结构。

探测器杜瓦瓶冷光栏结构设计结果如图 3 所示,冷光栏能够很好地抑制来自外部的杂散光。

3.3 主镜遮光罩设计

为了减少主镜遮光罩的自身辐射直接到达探测器,采用在主镜遮光罩内加入挡光环,挡光环设计成一定曲率,并且高度抛光,可以有效地降低挡光环的发射率,降低挡光环的自身辐射,挡光环背向探测器

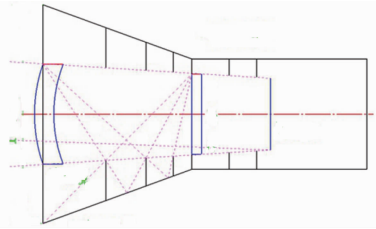


图 3 冷光栏设计

Fig. 3 Design of cold baffles

表面采用高吸收率黑色涂层,挡光环面向探测器表面镀超宽带反射膜层。

根据像面和杜瓦瓶窗口的物像对应关系,依次设计挡光环曲率,挡光环设计结果如图 4 所示,挡光环的曲率分别为 480,670,870 mm 可以很好地满足要求。

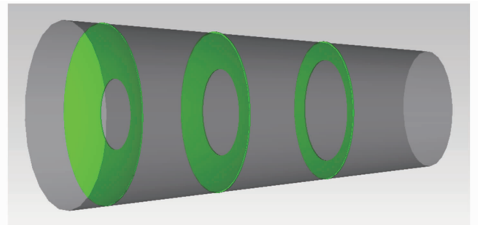


图 4 主镜遮光罩结构

Fig. 4 Structure of main baffles

4 背景辐射抑制仿真分析及讨论

4.1 南极 1 m 可见/红外巡天望远镜实体模型

在杂散光分析软件 Tracepro 中,1 m 南极可见/红外巡天望远镜系统的简化模型如图 5 所示,光学系统由主镜和次镜以及改正镜和滤光片组成,机械结构部分主要分为主镜遮光罩,次镜遮光罩和杜瓦瓶及冷光栏结构。

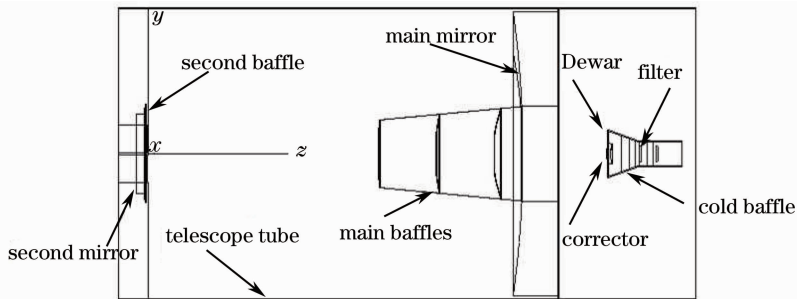


图 5 1 m 南极可见/红外巡天望远镜模型

Fig. 5 Model of 1 m antarctic visible/IR survey telescope

4.2 光机系统结构的表面属性

在 Tracepro 软件,进行模拟仿真之前,必须准确地设置元件表面的光学特性。镜面除了反射、透射、吸收一部分能量外,还将散射一部分能量,主要

是由于镜面粗糙度及镜面污染引起。粗糙度均方根值远小于入射光波长的光滑干净镜面,镜面散射可采用修正的三次 Harvey 散射模型描述,该散射模型可表示为^[13-14]

$$F_{\text{BDF}}(\theta, \theta_0) = b_0 \left[1 + \left(\frac{\sin \theta - \sin \theta_0}{L} \right)^2 \right]^{s/2}, \quad (1)$$

式中 θ, θ_0 为散射角和反射角, b_0 为常数, s 为倾斜因子, $s = -1.5$, L 为翻转角, $L = 0.001$ 。

为了消杂散辐射,需要在基底上涂吸收涂层,所有机械构件为铝基。系统模型结构内部表面涂消光涂层均采用双向反射分布系数(BRDF)的模型,该散射模型可表示为^[15]

$$F_{\text{BRDF}}(|\beta - \beta_0|) = \frac{A}{B + |\beta - \beta_0|^g}, \quad (2)$$

表 1 元件的光学特性参数

Table 1 Optical parameter of element

Element	Absorbing rate	Reflective rate	Transmissivity	F_{BRDF}	A	B	g	Emissivity
Mirror	0.01975	0.98	0	2.5×10^{-4}	7×10^{-6}	1×10^{-5}	2	0.0075
Lens	0.01	0.04	0.95	1.3×10^{-4}	3×10^{-5}	1.5×10^{-2}	2	0.0075
Black paint	0.97	0	0	0.03	0.019	1	0	0.98
Reflective coating	0.019	0.98	0	0.001	2.7×10^{-5}	1×10^{-5}	2	0.02

4.3 分析结果及讨论

由于南极 Dome A 年平均气温低达零下 57 °C, 将各光机元件的温度设置为 -70 °C, 杜瓦瓶内各光机元件的温度为 -100 °C。追迹的 K_{dark} 波长范围为 2.27~2.45 μm , 系统所有光机组件表面自发辐射达到像面上的能量辐照图如图 6 所示。

式中 β 为表面散射的出射方向, β_0 为表面镜面反射的出射方向, A, B, g 为需要拟合的参数。

机械构件的自发辐射为灰色朗伯辐射形式。发射率是指物体辐射红外能量的能力^[13-14]。发射率定义为该波长的一个微小波长间隔内, 真实物体的辐射能量与同温下的黑体的辐射能量之比^[18-20]。模型采用的所有元件的光学特性参数如表 1 所示。

孔径光阑设置在次镜上进行光学系统优化以及对主镜遮光罩、次镜遮光罩和杜瓦瓶内冷光阑进行独特设计, 系统实现了较好的系统自身辐射抑制效果。次镜遮光罩、主镜遮光罩以及杜瓦瓶内冷光阑的尺寸及位置设计均满足系统对外部杂散光源抑制的设计原理, 因此系统也可以实现对外部杂散光源的抑制。

5 结 论

简单介绍了南极 1 m 可见/红外巡天望远镜光学系统, 由于该系统为一次成像 R-C 加改正镜系统, 无法设计冷光阑, 因而对红外波段红外背景辐射抑制能力较差, 介绍主镜遮光罩、次镜遮光罩以及杜瓦瓶内冷光阑的独特设计, 通过模拟分析可知, 红外背景辐射在像面上的照度为天空背景在像面上的辐照度的五分之一, 该系统能够满足天文观测三分之一要求, 可以充分利用南极 Dome A 的独特天文观测优势。系统去除了中继光学系统, 缩短了系统光路及降低了系统复杂性, 降低了成本, 增加系统的可靠性, 为在南极装调减少了工作量。所采用的红外背景辐射抑制方法也将适用于南极巡天望远镜 AST3 第三台红外望远镜的设计和研制, 以及适用于更大口径南极红外巡天望远镜的红外背景辐射抑制设计。

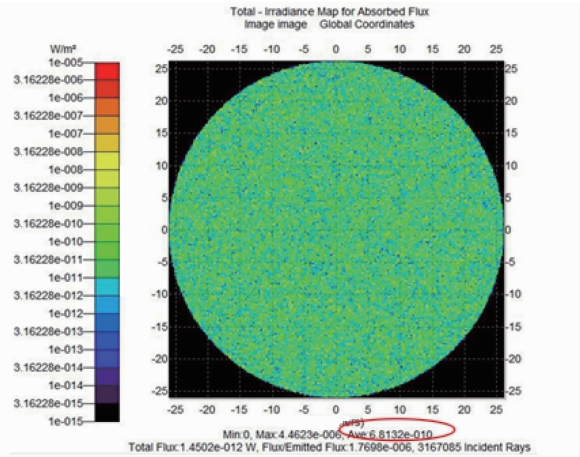


图 6 背景辐射像面照度图

Fig. 6 Irradiance map for image from background radiation

从图 5 可知系统所有光机组件表面自发辐射在像面平均辐照度为 $6.8 \times 10^{-10} \text{ W/m}^2$ 。在南极 Dome A, 由于其极低环境温度, 天空背景辐射也非常低, 在 K_{dark} 波段亮度为 $2.13 \times 10^{-7} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ ^[21]。由此可以计算天空背景辐射在像面上的辐照度为 $3.6 \times 10^{-9} \text{ W/m}^2$ 。可知望远镜系统自身辐射在像面上的辐照度远远小于天空背景辐射在像面上的照度, 为其五分之一以下, 满足天文观测要求。所以, 通过将

参 考 文 献

1 X Yuan, X Cui, G Liu, *et al.*. Chinese small telescope array (CSTAR) for antarctic dome a [C]. SPIE, 2008, 7012: 70124G.
2 Liu Genrong, Yuan Xiangyan. The optical system of castar [J].

- Acra Astronomica Sinica, 2009, 50(2): 224–232.
- 刘根荣, 袁祥岩. 首架南极天文望远镜 CSTAR 的光学系统[J]. 天文学报, 2009, 50(2): 224–232.
- 3 Xuefei Gong, Lirong Xia, Ru Zhang. Design and analysis of cushioning packing box for Chinese small telescope a ray [C]. SPIE, 2008, 7018: 701848.
- 4 Xiangqun Cui, Xiangyan Yuan, Xuefei Gong. Antarctic schmidt telescopes (AST3) for Dome A [C]. SPIE, 2008: 70122D.
- 5 Xiangyan Yuan, Xiangqun Cui, Xuefei Gong. Progress of antarctic schmidt telescopes (AST3) for Dome A [C]. SPIE, 2010: 77331V.
- 6 Peng Qi, Chen Hongbin, Wang Jihong, *et al.*. Analysis of resolving power of telescopes for non-Kolmogorov turbulence [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0113002.
- 彭起, 陈洪斌, 王继红, 等. 非科尔莫戈罗夫湍流下望远镜的分辨力分析[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0113002.
- 7 Lü Bo, Liu Weiqi, Zhang Daliang, *et al.*. Optical system design of sensor for space rendezvous and docking [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1216003.
- 吕博, 刘伟奇, 张大亮, 等. 空间交会对接探测器光学系统设计[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1216003.
- 8 Wei Xiaoxiao, Xu Feng, Yu Jianjun. Design of space coaxial field-bias three-mirror optical system with high resolution [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0416002.
- 韦晓孝, 许峰, 余建军. 高分辨率空间同轴偏视场三反光学系统设计[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0416002.
- 9 Qu Hemeng, Zhang Xin, Zhang Jinzhen. Design of compact athermalizing uncooled infrared optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0522003.
- 曲贺盟, 张新, 张继真. 紧凑型无热化非制冷红外光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0522003.
- 10 Li Yan, Liu Jianfeng. Research on integrative suppression of internal and external stray light in infrared optical remote sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0928002.
- 李岩, 刘剑峰. 红外光学遥感器内杂散光和外杂散光的综合抑制研究[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0928002.
- 11 Li Yan, Zhang Bao, Hong Yongfeng. Design of large zoom ratio middle wavelength infrared zoom optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0422005.
- 李岩, 张葆, 洪永丰. 大变倍比中波红外变焦光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422005.
- 12 P R Gillingham. An optical design for an antarctic 2 m telescope with a near IR imager [J]. Pub Ast Soc Aust, 2002, 19(3): 301–305.
- 13 Li Xiaoping, Sha Shengchun, Hu Tingliang. Suppression of stray light of long focal length off-axis three mirror optical system [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(11): 2603–2608.
- 李晓平, 沙晟春, 胡亭亮. 长焦距离轴三反光学系统杂散光的抑制[J]. 光学精密工程, 2011, 19(11): 2603–2608.
- 14 Yan Changxiang, Xu Jie, Peng Yan. Stray light suppression of three mirror off axis space optical telescope [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(2): 290–292.
- 颜昌翔, 许杰, 彭岩. 离轴三反空间光学望远系统的杂散光抑制[J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 290–292.
- 15 Zhong Xing, Zhang Lei, Jin Guang. Stray light removing of reflective optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 316–317.
- 钟兴, 张雷, 金光. 反射光学系统杂散光的消除[J]. 红外激光工程, 2008, 37(2): 316–317.
- 16 Chen Yonghe, Fu Yutian, Shen Xuemin. Stray radiation analysis caused by interior heat radiation in infrared optical systems [J]. Infrared Technology, 2006, 32(z1): 73–79.
- 陈永和, 傅雨田, 沈学民. 红外光学系统内部构件热辐射分析[J]. 光学技术, 2006, 32(z1): 73–79.
- 17 Zhou Jun. Research on Stray Light of The Infrared Detection System [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. 26–33.
- 周军. 红外目标探测系统的杂散辐射研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013. 26–33.
- 18 Huang Qiang, Niu Xinhua, Shen Xuemin. Stray radiation analysis caused by interior heat radiation in infrared optical systems [J]. Infrared Technology, 2006, 28(6): 348–352.
- 黄强, 钮新华, 沈学民. 红外光学系统内部热辐射引起的杂散辐射分析[J]. 红外技术, 2006, 28(6): 348–352.
- 19 Sun Chuang, Xia Xinlin. Suppression of infrared stray radiation in space optical system [J]. Infrared Technology, 2007, 29(6): 337–340.
- 孙创, 夏新林. 空间光学系统的红外杂散辐射抑制特性[J]. 红外技术, 2007, 29(6): 337–340.
- 20 Niu Jinxing, Zhou Renkui, Liu Zhaohui, *et al.*. Analysis of stray light caused by thermal radiation of infrared detection system [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2267–2271.
- 牛金星, 周仁魁, 刘朝晖, 等. 红外探测系统自身热辐射杂散光的分析[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2267–2271.
- 21 Michael C B Ashley. The near-IR and mid-IR sky background at the south pole [C]. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 1998, 141: 285–288.

栏目编辑: 韩峰