

高美古观测站大气消光系数测定的初步结果*

胡 波^{1,2†}

(1 中国科学院国家天文台 / 云南天文台 昆明 650011)

(2 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 大气消光系数的测定是天文观测台站一项很重要和基础的工作. 介绍了利用新建的 2.4 m 望远镜在高美古观测站开展的消光系数测定等定标工作的初步结果. 利用 2009 年 4~5 月对 Landolt 标准星场的 2 次测光观测, 分别给出了 UBVRI 5 个波段的消光系数. 此外, 对该站点大气消光的成分情况进行了探讨. 给出的结果与数年前高美古观测站选址时得到的大气消光系数基本一致, 并与其它一些知名天文观测台站的消光数据进行了比较.

关键词 大气效应, 技术: 测光, 方法: 数据分析

中图分类号: P 126; **文献标识码:** A

1 引言

大气消光是一类基本的光学现象, 其原因是地球大气层会对天体辐射产生反射和吸收等影响, 使天体的辐射强度减弱, 波长发生改变. 在进行光学波段的地基天文观测时, 必须考虑这种地球大气带来的影响. 通过长期的监测及分析, 统计出观测站点在不同光学波段的消光情况, 是进行地基光学观测的基础工作之一.

若我们将大气层近似看作由许多平面层组成, 考虑简单的单色辐射流量密度 F_λ , 根据 Bouguer 理论, 它经过路径元 dr 后, 辐射流量密度减弱量 dF_λ 可表示为

$$dF_\lambda = -\alpha_\lambda F_\lambda dr, \quad (1)$$

通过积分等相关计算, 可得到大气内外单色星等差

$$m - m_0 = kM(z), \quad (2)$$

其中 $M(z)$ 为大气质量, 在平面平行模型中 $M(z)$ 和天顶距 z 有关, 表示为 $M(z) = \sec z$. 在球面模型中更精确的修正式^[1] 为

$$M(z) = \sec z - 0.0018167(\sec z - 1) - 0.002875(\sec z - 1)^2 - 0.0008083(\sec z - 1)^3, \quad (3)$$

2010-02-03 收到原稿, 2010-04-14 收到修改稿

* 国家自然科学基金项目 (10533050) 资助

† hubble@ynao.ac.cn

k 为 Bouguer 消光系数, 它可表示为如下线性关系:

$$k = k' + k''C, \quad (4)$$

上式中 C 为观测色指数, k' 称为主消光系数或一次消光系数, k'' 称为二次消光系数, k'' 与观测波段有关, 是比 k' 小很多的小量, 通常可略去不计, 只针对一次消光系数进行消光改正.

对于不同的探测系统, 因其观测使用的望远镜、滤光片及探测器的响应不尽相同, 因此所探测得到的星等值 m_0 也将各异. 每个天文观测站使用的望远镜及其滤光片、探测器的光谱响应的各异性将导致它们获得不同的测光结果. 为了方便比较和统一归化, 必须建立与某些国际标准测光系统的转化公式, 将所用观测系统归化到标准系统以便于比较分析.

2 观测和数据处理

高美古观测站是我国西南部新建的天文观测基地, 它在丽江市郊外的高原上, 海拔 3 200 m, 大气视宁度良好, 晴天率高. 这里坐落着我国新建的 2.4 m 光学望远镜, 经过几年的调试, 2.4 m 望远镜的观测工作已经展开, 目前该望远镜装配有 1 套 Bessel 滤光片, CCD 终端对应的天区覆盖约为 $5' \times 5'$. 对该站点进行消光情况的监测和对 2.4 m 望远镜的星等系统进行归化是天文实测的一项基础性定标工作.

我们用于消光和系统归化的标准星来自 Landolt 标准星场, 该星场在约 $5' \times 5'$ 的视场内大都能包含数个红、蓝星对, 且提供了对光学范围内 UBVR_I 5 波段的长期观测, 数据可靠性大, 标准星星等范围大都在 11~16 等之间, 也适合于 2.4 m 望远镜的 CCD 观测. 根据观测季节的恒星位置, 我们选择了一批 Landolt 星场的标准星, 它们的证认图及相关参数分别见图 1¹ 及表 1^[2] (表 1 分别给出了所观测 Landolt 标准星的赤经、赤纬、V 波段星等、各种色指数以及光谱型).

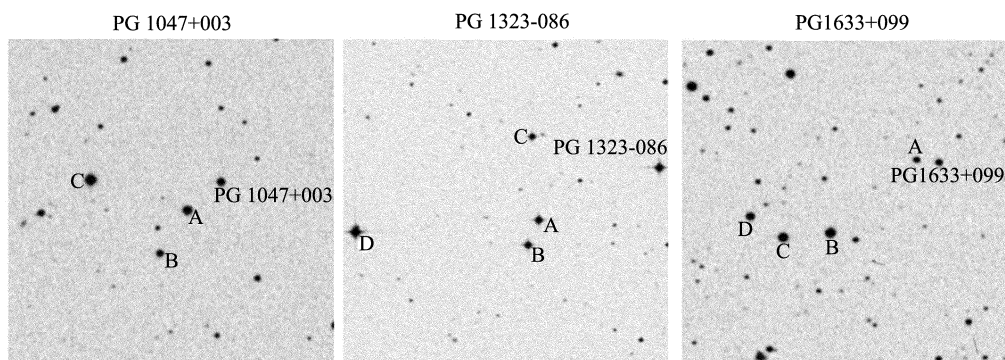


图 1 观测星场证认图

Fig. 1 Identification chart of stellar fields

¹<http://www.noao.edu/wiyn/queue/images/tableA.html>

表 1 观测标准星及相关参数

Table 1 Observational standard stars and corresponding parameters

Name	RA(h m s)	DEC($^{\circ}$ ' ")	V	B-V	U-B	V-R	R-I	Spectral type
PG1047+003	10:50:03	-00:00:32	13.474	-0.290	-1.121	-0.132	-0.162	sdB
PG1047+003A	10:50:06	-00:01:08	13.512	0.688	0.168	0.422	0.418	G5V
PG1047+003B	10:50:09	-00:02:00	14.751	0.679	0.172	0.391	0.371	G5V
PG1047+003C	10:50:18	-00:00:23	12.453	0.607	-0.019	0.378	0.358	G2V
PG1323-086	13:25:39	-08:49:16	13.481	-0.144	-0.644	-0.048	-0.079	sdB-O
PG1323-086A	13:25:49	-08:50:22	13.591	0.395	-0.006	0.249	0.252	F3V
PG1323-086B	13:25:50	-08:51:53	13.406	0.773	0.276	0.420	0.407	G8V
PG1323-086C	13:25:50	-08:48:37	14.003	0.715	0.256	0.390	0.363	G7V
PG1633+099	16:35:24	+09:47:50	14.397	-0.192	-0.974	-0.093	-0.116	sdB
PG1633+099A	16:35:26	+09:47:53	15.256	0.873	0.320	0.505	0.511	G7III
PG1633+099B	16:35:34	+09:46:22	12.969	1.081	1.007	0.590	0.502	K0III
PG1633+099C	16:35:38	+09:46:16	13.229	1.134	1.138	0.618	0.523	K2III
PG1633+099D	16:35:40	+09:46:43	13.691	0.535	-0.025	0.324	0.327	G0V

Note: J2000.0 is taken as the coordinate epoch here.

2009年4月19日和5月19日,我们在高美古观测站利用2.4 m望远镜对表1中的Landolt标准星都进行了整夜观测,从标准星升起距天顶约 60° 时开始拍摄,下落到离开天顶 60° 时停止拍摄,在整观测夜对这些星场每隔1个多小时拍摄1次,使得大气质量有较完整的覆盖,这两个观测夜的天气都较稳定.图2为这两次观测的星场恒星点扩散函数(point spread function, PSF)测量图.

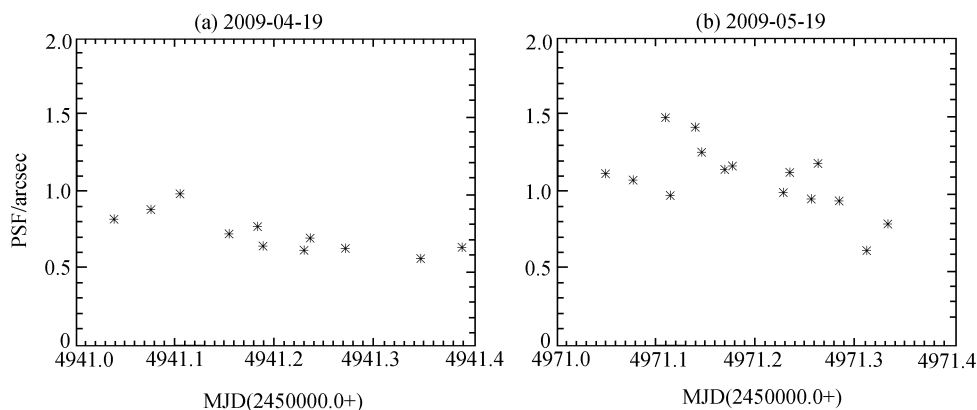


图 2 观测星场的点扩散函数测量图

Fig. 2 Measured PSF (point spread function) of the observational stellar fields

获得观测数据后,利用IRAF软件包来进行测光数据处理,通过扣除观测图像的本底和暗流、做平场改正等预处理以及图像的半高全宽值和标准偏差的估测来设定测光孔径

的数值大小, 同时设定仪器星等零点为 25 mag, 再通过自动测光可生成包含有每颗标准星的观测时间、观测星等及星等误差等信息的文件. 表 2 为我们得到的两次观测数据, 其中包括了在不同大气质量下的 UBVRI 5 波段的观测星等. 最后, 通过将消光系数与星等系统归化方程的合并式

$$m_0 = m - k'_m M(z) - k''_m CM(z) + \varepsilon_m C + \xi_m \quad (5)$$

应用于 UBVRI 5 波段中进行联合求解. 其中 m_0 、 m 分别为所选标准系统的星等和观测星等, k'_m 和 k''_m 分别为一阶和二阶的消光系数, ε_m 和 ξ_m 为系统的归化系数. 我们编写了相关 IDL 程序利用最小二乘法进行联合求解, 得到 UBVRI 各单色波段的一阶和二阶消光系数以及与 Landolt 标准星等系统的归化系数, 见表 3 和表 4, 其中 k' 、 k'' 、 ε 和 ξ 分别为 UBVRI 各波段的一阶和二阶消光系数、归化色指数项及星等零点差.

表 2 2009 年 4 月 19 日及 5 月 19 日的观测数据

Table 2 Observational data on Apr. 19th 2009 and May 19th 2009

Name	Airmass	U	B	V	R	I
PG1047+003	1.120	10.079	9.099	10.275	10.372	11.087
PG1047+003A	1.120	12.072	10.001	10.398	9.908	9.951
PG1047+003B	1.120	13.403	11.230	11.620	11.169	11.284
PG1047+003C	1.120	10.794	8.807	9.271	8.826	8.936
PG1047+003	1.741	10.436	9.332	10.480	10.533	11.262
PG1047+003A	1.741	12.404	10.242	10.584	10.068	10.115
PG1047+003B	1.741	13.712	11.458	11.815	11.333	11.443
PG1047+003C	1.741	11.121	9.039	9.459	8.987	9.103
PG1047+003	1.332	10.241	9.194	10.411	10.481	11.262
PG1047+003A	1.332	12.240	10.127	10.501	10.018	10.104
PG1047+003B	1.332	13.545	11.348	11.728	11.279	11.438
PG1047+003C	1.332	11.082	9.054	9.486	9.042	9.188
PG1633+099	1.361	11.323	9.740	10.081	10.098	10.711
PG1633+099A	1.361	14.273	11.557	11.014	10.432	10.332
PG1633+099B	1.361	12.831	9.445	8.743	8.073	7.966
PG1633+099C	1.361	13.225	9.727	8.981	8.288	8.151
PG1633+099D	1.361	12.070	9.658	9.404	9.006	9.111
PG1323-086	1.242	10.562	8.853	9.159	9.140	9.702
PG1323-086A	1.242	11.798	9.466	9.327	8.996	9.193
PG1323-086B	1.242	12.266	9.558	9.135	8.630	8.643
PG1323-086C	1.242	12.773	10.103	9.726	9.255	9.318
PG1323-086	1.306	10.613	9.015	9.726	9.163	9.938
PG1323-086A	1.306	12.004	9.773	9.536	9.157	9.575
PG1323-086B	1.306	12.307	9.724	9.203	8.652	8.883
PG1323-086C	1.306	12.834	10.267	9.804	9.278	9.562
PG1633+099	1.058	11.201	9.678	10.046	10.072	10.697
PG1633+099A	1.058	14.155	11.481	10.967	10.400	10.312
PG1633+099B	1.058	12.726	9.389	8.710	8.046	7.951
PG1633+099C	1.058	13.111	9.668	8.945	8.258	8.133
PG1633+099D	1.058	11.937	9.599	9.371	8.977	9.097
PG1323-086	2.008	10.977	9.096	9.324	9.269	9.797

表 2 续
Table 2 (continued)

Name	Airmass	U	B	V	R	I
PG1323-086A	2.008	12.328	9.843	9.640	9.283	9.423
PG1323-086B	2.008	12.658	9.787	9.288	8.750	8.748
PG1323-086C	2.008	13.182	10.333	9.882	9.378	9.437
PG1633+099	1.061	11.206	9.680	10.053	10.075	10.688
PG1633+099A	1.061	14.127	11.482	10.972	10.397	10.310
PG1633+099B	1.061	12.711	9.391	8.723	8.050	7.949
PG1633+099C	1.061	13.110	9.676	8.960	8.264	8.133
PG1633+099D	1.061	11.936	9.604	9.377	8.982	9.094
PG1323-086	1.647	10.803	8.995	9.252	9.212	9.755
PG1323-086A	1.647	12.260	9.853	9.656	9.307	9.475
PG1323-086B	1.647	12.486	9.695	9.216	8.697	8.713
PG1323-086C	1.647	13.009	10.240	9.813	9.319	9.396

表 3 2009 年 4 月 19 日观测结果

Table 3 Observational results on Apr. 19th 2009

Band	k'	k''	ε	ξ
U	0.591 ± 0.023	-0.065 ± 0.024	0.209 ± 0.013	2.866 ± 0.018
B	0.340 ± 0.022	0.010 ± 0.004	0.109 ± 0.012	4.478 ± 0.008
V	0.242 ± 0.025	-0.045 ± 0.004	-0.059 ± 0.010	3.402 ± 0.006
R	0.161 ± 0.020	-0.032 ± 0.008	-0.084 ± 0.022	3.360 ± 0.008
I	0.106 ± 0.018	-0.050 ± 0.009	0.041 ± 0.021	2.718 ± 0.015

表 4 2009 年 5 月 19 日观测结果

Table 4 Observational results on May 19th 2009

Band	k'	k''	ε	ξ
U	0.560 ± 0.023	0.061 ± 0.004	0.354 ± 0.011	2.823 ± 0.008
B	0.336 ± 0.021	0.012 ± 0.003	0.140 ± 0.005	4.851 ± 0.007
V	0.198 ± 0.024	-0.015 ± 0.004	-0.074 ± 0.005	4.555 ± 0.005
R	0.142 ± 0.021	-0.067 ± 0.005	-0.069 ± 0.008	4.509 ± 0.003
I	0.093 ± 0.020	0.023 ± 0.006	0.009 ± 0.006	3.920 ± 0.006

3 结果和分析

3.1 2.4 m 望远镜星等归化方程

在第 2 节获得两观测夜的消光系数与转化系数的过程中, 作为对观测有效性的评估, 我们对这两夜各波段的每颗观测星的背景、背景偏差值、星等误差以及 Bouguer 消光系数进行了统计分析, 将这些数据的残差值大于平均残差值 3~5 倍的点视为坏点, 通过比较发现 5 月 19 日的天气稳定性更好, 表明该夜的观测数据结果会更有效, 故我们将此作

为所得到的初步结果. 图 3 为该观测夜在各波段的 Bouguer 消光系数拟合图, 可以看出大气质量与大气内外各个单色星等差呈现较好的线性关系, 图 4 为 2.4 m 望远镜星等系统与 Landolt 标准星等系统在各个色指数下的转换图. 以上两图中线性拟合都是采用最小二乘法拟合得到的.

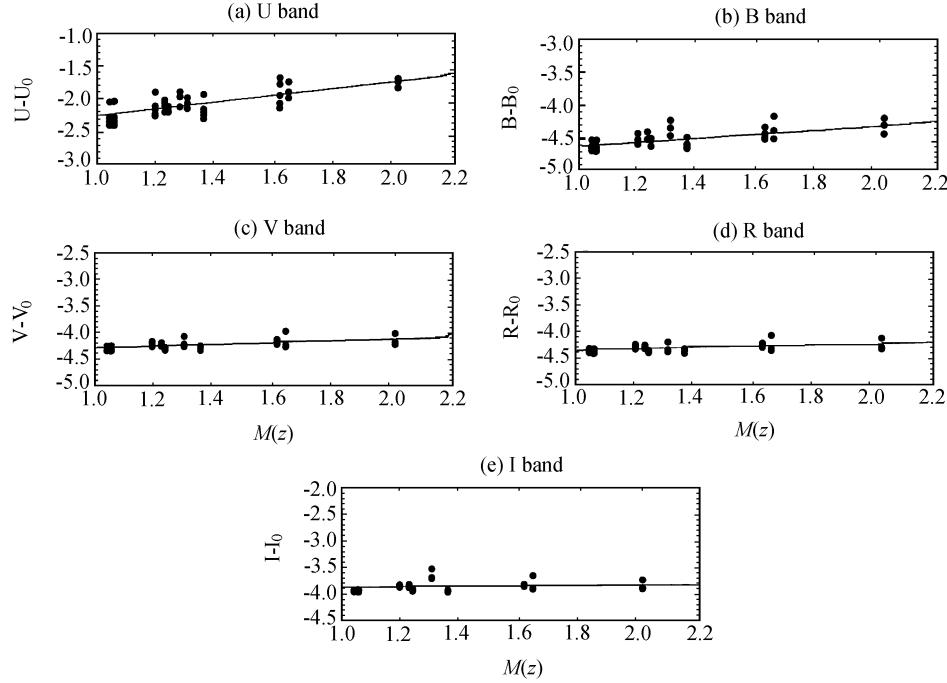


图 3 UBVR I 5 波段 Bouguer 消光系数拟合图

Fig. 3 Fitted panels of Bouguer extinction coefficients of UBVR I 5 bands

我们根据 2009 年 5 月 19 日的消光值, 求得 Landolt 标准星等系统与 2.4 m 观测系统的转化公式, 为如下两组:

$$\begin{cases} U = u_0 + (0.354 \pm 0.011)(U - B) + 2.823 \pm 0.008 \\ B = b_0 + (0.140 \pm 0.005)(B - V) + 4.851 \pm 0.007 \\ V = v_0 - (0.074 \pm 0.005)(B - V) + 4.555 \pm 0.005 \\ R = r_0 - (0.069 \pm 0.008)(V - R) + 4.509 \pm 0.003 \\ I = i_0 + (0.009 \pm 0.006)(R - I) + 3.920 \pm 0.006 \end{cases}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} (U - B) = (1.336 \pm 0.025)(u - b)_0 - 2.829 \pm 0.057 \\ (B - V) = (1.007 \pm 0.011)(b - v)_0 + 0.363 \pm 0.006 \\ (V - R) = (1.202 \pm 0.021)(v - r)_0 - 0.018 \pm 0.008 \\ (R - I) = (0.790 \pm 0.005)(r - i)_0 + 0.426 \pm 0.002 \end{cases}. \quad (7)$$

以上两组方程分别包含了关于各个波段星等和各种色指数的归化系数, 依据上述方程, 我们即可根据实测得到的星等, 转化为 Londolt 标准星等系统的星等值, 相当于得到了向标准系统归化的标尺, 从而完成地基天文实测中一项必备的工作环节.

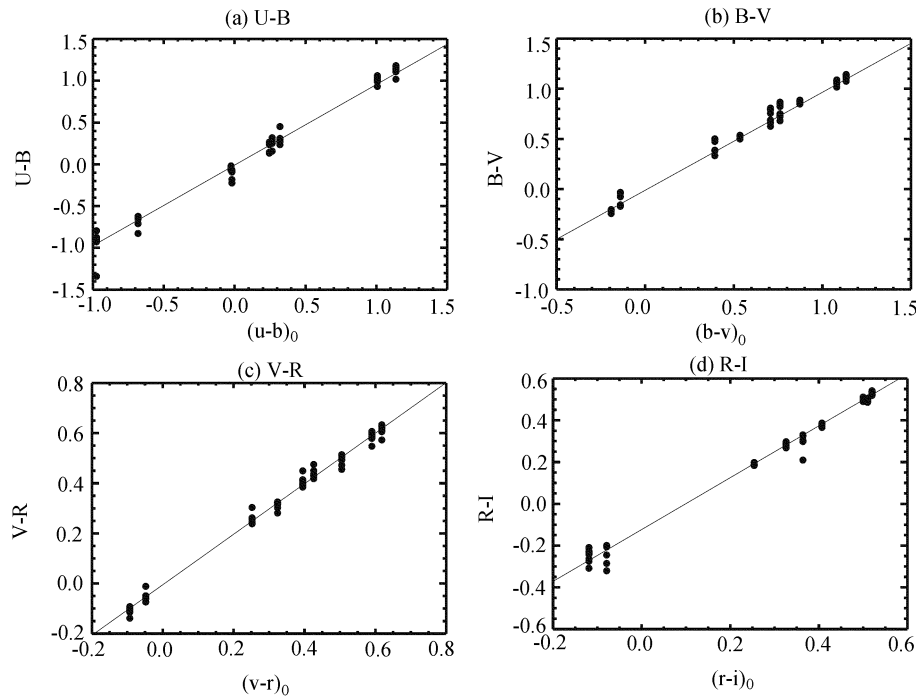


图 4 关于 (U-B)、(B-V)、(V-R) 及 (R-I) 的星等系统色指数归化图

Fig. 4 Transformation panels of color indexes for (U-B), (B-V), (V-R) and (R-I)

3.2 与一些台址消光系数的比较

1996 年高美古站点选址时, 张周生等^[3]用光电测光法测定了 B、V 两个波段的大气消光系数, 所用的望远镜为口径 35 cm 的赤道式反射望远镜, 用较差测光方法测得 B、V 两波段的一阶消光系数分别为 0.299 ± 0.016 和 0.150 ± 0.018 , 而我们得到的相应值为 0.336 ± 0.021 和 0.198 ± 0.024 . 我们得到的消光值略有上升, 可能是季节不同或观测次数太少等原因造成的, 但大体上还是比较接近的.

同时, 我们将得到的初步结果与世界上一些天文观测站点 (La Palma 天文台^[4]、San Pedro Mártir (SPM) 天文台^[5]、Siding Spring 天文台^[6]、印度国家天文台^[7]及国家天文台兴隆观测站^[8]) 给出的消光系数值进行了比较. 如图 5 所示, 可以看出云南天文台高美古观测站和这些站点的消光状况基本上是相同的.

3.3 悬浮颗粒散射成分的拟合

影响大气消光一般有以下 3 种成分: 大气的瑞利散射、臭氧分子的吸收以及悬浮颗粒的散射^[9], 分别表示为 A_{Ray} 、 A_{OZ} 和 A_{Aer} , 则有

$$A = A_{\text{Ray}} + A_{\text{OZ}} + A_{\text{Aer}}, \quad (8)$$

这 3 种成分的影响程度是不同的, 其中瑞利散射对消光的影响最大, 它在同一地区随气候和季节的变化较小, 只与当地的海拔高度 (大气压强) 有关, 瑞利散射成分和入射光波长 λ 的 4 次方成反比^[10]. 分子吸收通常被称为大气吸收, 主要是臭氧层和大气中水蒸汽的吸收^[11], 其中水蒸汽吸收只发生在某些很窄的特定波段, 而在大多宽波段内可以忽略. 而臭氧成分与海拔高度的关系不是很紧密, 故只根据波长就能大体求出该波段范围内这一消光影响成分^[12]. 除以上两种消光影响成分, 悬浮颗粒的散射是一个随季节变化很明显的量, 它可简单表示为指数形式^[9]:

$$A_{\text{Aer}}(\lambda) = a\lambda^{-\alpha}. \quad (9)$$

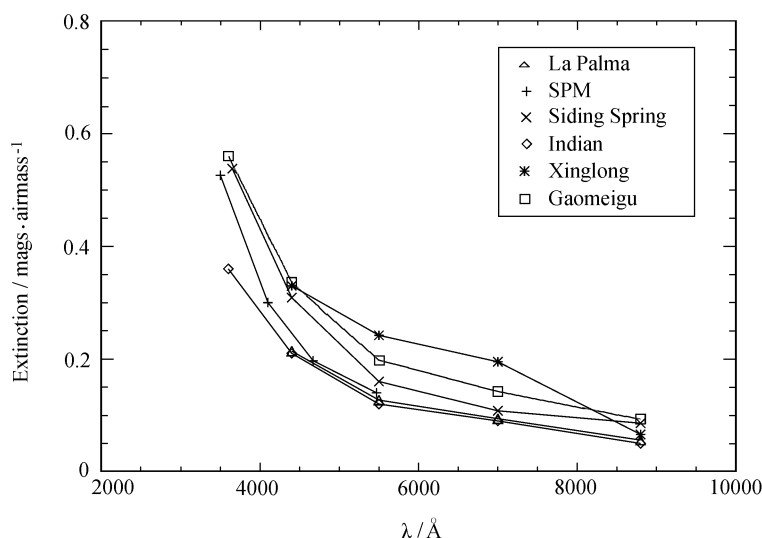


图 5 与世界上各天文观测站点的消光情况比较图. 三角: La Palma 天文台; 加号: San Pedro Mártir (SPM) 天文台; 交叉号: Siding Spring 天文台; 菱形: 印度国家天文台; 星号: 国家天文台兴隆观测站; 正方形: 云南天文台高美古观测站

Fig. 5 Comparison of the measured atmospheric extinction at Gaomeigu Observing Station with those at some other observatories in the world. La Palma Observatory (triangle); San Pedro Mártir (SPM) Observatory (plus); Siding Spring Observatory (cross); Indian Astronomical Observatory (rhombus); Xinglong Observing Station of National Astronomical Observatories (star); Gaomeigu Observing Station of Yunnan Observatory (square)

我们依据 5 月 19 日观测的 UBVRI 5 波段的消光值, 分别作为在有效波长 3 650 Å、4 400 Å、5 500 Å、7 000 Å 和 8 800 Å 处的大气总消光值, 并求得在上述波长处的大气瑞利散射及臭氧分子吸收的消光成分, 再从总消光值中减去这两成分, 作为在这些波长处悬浮颗粒散射的消光值 A_{Aer} . 对波长和 A_{Aer} 取对数, 通过最小二乘拟合求解, 得到

$$A_{\text{Aer}}(\lambda) = 0.025\lambda^{-0.809}. \quad (10)$$

将上式得到的消光值与观测值进行了比较, 如图 6 所示, 标识 Rayleigh、Ozone 和 Aerosols 的曲线分别为我们给出的关于瑞利散射、分子吸收以及悬浮颗粒散射的消光理

论值, 标识 Sum 的曲线为 3 个消光成分理论值的总和, 三角符号表示在 UBVR_I 5 波段的有效波长处的观测消光值. 可以看到, 该模型与观测符合得比较好, 同时也说明我们给出的应用于悬浮颗粒散射成分的简单指数模型是较合理的.

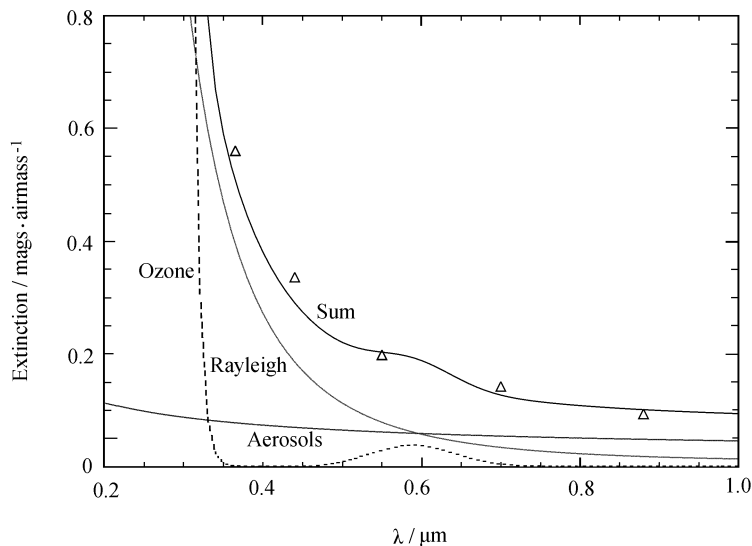


图 6 依据简单指数模型的悬浮颗粒消光成分得到的大气消光与观测值的比较

Fig. 6 Comparison of the atmospheric extinction obtained based on the aerosol component of the simple exponential model with the observational data

4 结论

通过利用高美古观测站 2.4 m 望远镜对 Landolt 星表几个星场的 2 次测光观测, 得到一系列 Landolt 标准星在不同大气质量下 UBVR_I 5 波段的测光星等, 再将这些观测数据进行最小二乘拟合, 得到这 2 次观测求出的消光系数, 以及 2.4 m 望远镜的测光系统与 Landolt 系统的星等归化方程. 我们将求得的消光系数与世界上一些观测站给出的消光系数进行了比较, 它们在数值上是相近的. 结合大气消光的 3 种影响成分的说明, 通过建立简单的指数模型, 我们得到了在 2009 年 5 月中旬消光成分中悬浮颗粒散射的简单表达式, 并将此模型的拟合值与观测值进行了比较, 两者是比较接近的.

致谢 感谢高美古观测站的观测人员. 感谢云南天文台单红光博士在测光数据处理中的指导. 另在数据处理过程中使用了 IRAF 软件包, 一并致以谢意.

参 考 文 献

- [1] Hiltner W A. *Astronomical Techniques*. Chicago: University of Chicago Press, 1962
- [2] Landolt A U. *AJ*, 1992, 104: 340

- [3] 张周生, 陈培生, 周吉光. 云南天文台台刊, 1996, S1: 97
- [4] King D L. La Palma Technical Note 31, 1985
- [5] Parrao L, Schuster W J. RMxAC, 2003, 19: 81
- [6] Sung H, Bessell M S. PASA, 2000, 17: 244
- [7] Stalin C S, Hegde D K, Sahu P S, et al. AJ, 2008, 36: 111
- [8] Zhou A Y, Jiang X J, Zhang Y P. RAA, 2009, 9: 349
- [9] Hayes D S, Latham D W. ApJ, 1975, 197: 593
- [10] Penndorf R. Air Force Cambridge Res. Lab, 1954, Geophys. Res. Paper No.25
- [11] Allen C W. MNRAS, 1963, 125: 529
- [12] Kumar B, Sagar R, Rautela B S, et al. BASI, 2000, 28: 675

Preliminary Results of the Measurement of Atmospheric Extinction Coefficient at Gaomeigu Observing Station

HU Bo^{1,2}

(1 *National Astronomical Observatories/Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences,
Kunming 650011*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

ABSTRACT The measurement of the atmospheric extinction coefficient is one of the important and fundamental measurements for astronomical observatories. By using the newly built 2.4 m telescope at Gaomeigu Observing Station of Yunnan Observatory, the calibration works, such as the measurement of the atmospheric extinction coefficient, are carried out and their preliminary results are presented. By observing the Landolt standard stellar fields during April and May 2009, the atmospheric extinction coefficients of UBVRI five bands at two nights are given. In addition, the components which contribute to the atmospheric extinction coefficients of this site are discussed. The measured extinction coefficients are found to be broadly consistent with the previous results obtained in the site selection some years ago. And they are also compared with the values of the other well-known observing stations worldwide.

Key words atmospheric effects, techniques: photometric, methods: data analysis