

基于 MSISE-90 研究高海拔宇宙线观测站处的大气深度廓线模型*

祝凤荣^{1)2)3)†} 柳靖¹⁾ 夏君集¹⁾ 张丰¹⁾ 刘虎¹⁾

1) (西南交通大学物理科学与技术学院, 成都 611756)

2) (西藏大学理学院, 拉萨 850000)

3) (天府宇宙线研究中心, 成都 610213)

(2024 年 5 月 12 日收到; 2024 年 6 月 24 日收到修改稿)

高海拔宇宙线观测站 (LHAASO) 位于四川省稻城县海子山, 它的广角切伦科夫望远镜阵 (WFCTA) 主要是通过观测广延大气簇射过程中产生的切伦科夫光信号对宇宙线进行研究. WFCTA 的标定、模拟和重建都和大气深度有关, 目前使用的大气深度模型是美国标准大气深度廓线模型. 本研究中将美国标准大气深度廓线模型与卫星 TIMED 搭载的红外辐射计 SABER 记录到的 LHAASO 处 14—50 km 处的大气深度廓线进行比较, 同时也与 LHAASO 处地面气象站记录的大气深度进行比较, 美国标准大气模型的大气深度均偏小. MSISE-90 大气模型描述了地球大气中从地面到热层的中性温度和密度, 进一步研究发现 MSISE-90 大气模型与 TIMED/SABER 和 LHAASO 处地面标准气象站记录的大气深度的一致性较好. 根据 MSISE-90 大气模型计算得到 LHAASO 处的大气深度均值廓线在 1 月最低, 其次是 2 月、3 月、4 月、11 月和 12 月, 这也是 WFCTA 运行的最佳观测月份. 4 月份的大气边界层最高, 其大气深度存在约 2% 的日变化. 利用美国标准大气模型的函数形式, 拟合每月的 4.4—100 km 处的大气深度廓线, 得到了 LHAASO 处的每月的大气深度廓线模型, 并比较了 30° 天顶角入射的 100 TeV 的宇宙线质子在 MSISE-90 大气模型和美国标准大气模型中产生的切伦科夫光的横分布的差异, 二者最大差异约可以达到 20%.

关键词: MSISE-90 大气模型, 大气深度廓线, 高海拔宇宙线观测站, 切伦科夫光

PACS: 92.60.hv, 96.50.sd

DOI: 10.7498/aps.73.20240679

1 引言

高海拔宇宙线观测站 (large high altitude air shower observatory, LHAASO, 29.36°N, 100.14°E) 位于青藏高原东部的海子山, 是十四五期间前瞻引领型的国家重大科技基础设施^[1]. 主要用来进行 TeV 和 PeV 能区的宇宙线物理和伽马射线天文研究. LHAASO 是一个复合探测器阵列, 主要由水切伦科夫探测器阵列 (WCDA)、平方公里阵列

(KM2A) 和广角切伦科夫望远镜阵列 (WFCTA) 组成^[2]. 利用其半阵列的数据, LHAASO 国际合作组发现宇宙中的超高能光子和银河系的超高能加速器源, 开启了超高能伽马天文新时代^[3,4].

LHAASO 的 WFCTA 由 18 台望远镜组成, 每台望远镜的视场是 $16^\circ \times 16^\circ$, 可工作在切伦科夫光模式或荧光模式, 关于 WFCTA 更详细的介绍可见文献^[5,6]. 另外开发了 6 套激光标定和大气监测系统对其进行标定同时对望远镜视场内的大气进行监测^[7–14]. WFCTA 的主要物理目标是借助其

* 国家重点研发计划 (批准号: 2018YFA0404201) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhufu@home.swjtu.edu.cn

所独有的可移动特性、通过阶段性阵列布局调整、联合 KM2A 和 WCDA, 多参数、分能段精确测量 10 TeV 至 EeV 的宇宙线成分能谱, 搭建空间实验和极高能宇宙线大型设施之间的桥梁, 完成连续一致的宇宙线能谱测量^[5]. 在 WFCTA 运行的第一和第二阶段, 主要用来观测由 10 TeV—PeV 宇宙线诱发的广延大气簇射中产生的切伦科夫光. 在第三个阶段, WFCTA 将移动到 LHAASO 的 KM2A 阵列外, 观测由更高能量的宇宙线诱发的广延大气簇射中产生的荧光.

大气主要由空气分子和气溶胶组成. 这些成分的变化会影响广延大气簇射中切伦科夫光或荧光信号的强度, 从而影响原初宇宙线能量的重建以及广延大气簇射发展到极大时对应的大气深度 (表示为 $X_{\max}$) 的确定. 此外, 空气分子在切伦科夫光或荧光从产生处传播至望远镜反射镜处的过程中会发生散射, 而气溶胶的光学厚度也会对切伦科夫光或荧光产生衰减作用. 因此, 大气的变化会导致相关传输系数的变化, 从而引起原初宇宙线能量重建和大气簇射最大时的 $X_{\max}$ 测量出现系统误差. 综上所述, 地面上的荧光实验或大气切伦科夫实验都需要对大气进行持续监测.

相比于大气的温度、湿度等状态变量, 大气的密度对大气中的广延大气簇射的发展起主要作用, 控制着簇射中次级粒子的相互作用和衰变过程, 因此主要是大气的密度对广延大气簇射中切伦科夫光或者荧光的产生和传输产生主要影响. 在进行原初宇宙线广延大气簇射的模拟和重建过程中, 通常使用 CORSIKA 软件进行^[15]. 一个特定海拔高度处的垂直大气深度廓线是模拟和重建广延大气簇射的一个重要因素, 特别是对于荧光或切伦科夫探测器技术. 大气深度是指单位面积上所有空气分子的总质量, 大气深度分为垂直大气深度和倾斜大气深度, 其中垂直大气深度是从地面垂直向上穿过大气层的路径长度, 反映了大气层在垂直方向上的厚度; 倾斜大气深度是沿相对于垂直方向的某个倾斜角度穿过大气层的路径长度. 垂直大气深度的定义为

$$X(h) = \int_h^{+\infty} \rho(\xi) d\xi, \quad (1)$$

倾斜大气深度为

$$X_{\text{slant}}(h) = \frac{X(h)}{\cos(\theta)}, \quad (2)$$

这里 $X(h)$ 表示垂直大气深度, $X_{\text{slant}}(h)$ 表示倾斜大气深度, h 是海拔高度, ρ 是大气密度, θ 是天顶角. 因此, 由于大气温度、湿度等状态变量的变化, 垂直大气深度廓线随时间也一直在进行变化. 垂直大气深度在海平面上约为 1036 g/cm^2 .

近年来, 开发了许多大气深度廓线的模型, 用于广延大气簇射的模拟和重建. 地面粒子探测器阵列的研究中经常使用的是美国标准大气模型^[16]. 基于在欧洲中纬度不同地理位置的测量, 该模型提供了温度分布和压力作为高度的函数, 把海拔 112 km 作为大气的顶层, 从海平面到大气顶层共分为 5 层. 在其中较低的 4 层中, 大气密度遵循指数分布, 导致大气深度 $X(h)$ 和高度 h 之间的关系为

$$X(h) = a_i + b_i \exp\left(-\frac{h_i}{c_i}\right). \quad (3)$$

在第 5 层, 大气深度随高度线性减少:

$$X(h) = a_i - b_i \cdot \frac{h_i}{c_i}. \quad (4)$$

然而, 这个静态模型被证明和盐湖城以及门多萨大气的实际状态差别较大^[17]. 冬天盐湖城的大气深度和美国标准大气的月平均值差值可以达到 20 g/cm^2 . 而且, 大气深度的日变化与季节性变化一样大^[17]. 为了更好地建立大气深度模型, Pierre Auger 天文台发射了无线电探空仪, 建立了每个月的大气深度模型^[18], 该模型的特点是与美国标准大气模型具有相似的分层结构. 后来由于无线电探空仪的成本太高, 通过和同时期的基于全球通化系统 (global data assimilation system, GDAS) 的大气深度廓线模型相比较, 发现利用 GDAS 数据构建的大气深度廓线模型在能量的重建和 $X_{\max}$ 的重建方面都具有更高的精度^[19]. 但是 GDAS 的数据模型只适用于大气 26 km 以下, 这是其不足的地方. 其他实验如 HiRes, HESS, Veritas, AGASA, CTA 都对大气进行监测研究^[20–24]. 在 30 km 以下的美国标准大气模型实际上与我国 45°N 的实际大气十分接近.

在 LHAASO 站点, 定量评估 LHAASO-WFCTA 视场中的大气深度廓线非常重要, 然而截止到目前还没有专门的大气深度廓线的监测计划. 但是 2014 年, 在 LHAASO 站点安装了一个标准气象站, 并监测了地表的大气压强、温度、相对湿度

等大气状态变量. 本文首先介绍大气的监测对切伦科夫技术和荧光技术的重要性, 美国标准大气模型的不足及目前在实验技术中应用的大气深度廓线模型, 第 2 节介绍卫星 SABER 对 LHAASO 处的 14 km 以上的大气深度廓线测量; 第 3 节介绍实验和 MSISE-90 大气模型的垂直大气深度比较 [25,26]; 第 4 节详细描述每月垂直大气深度廓线模型及其切伦科夫光产生的差别; 第 5 节是总结和讨论.

2 基于 TIMED/SABER 和当地气象站进行的大气深度的观测研究

TIMED (the thermosphere ionosphere mesosphere energetics and dynamics) 卫星是美国宇航局于 2001 年 7 月发射的. 它的轨道高度约 625 km, 轨道倾角为 74.1° , 轨道周期为 1.6 h. TIMED 每天运行约 15 个轨道, 地方时覆盖每天集中在 2 个时间点上, 每天进动 12 min, 因此每 60 天完成一次地球的全覆盖范围观测 [27]. SABER (sounding of the atmosphere using broadband emission radiometry) 是 10 通道红外辐射计, 在卫星沿轨道飞行过程中采用临边测量 CO_2 的红外辐射信号, 反演生成低平流层到低热层的大气参量如温度、密度、气压等的垂直廓线. SABER 每天可收集 1000 多根廓线数据, 垂直分辨率为 2 km, 水平分辨率约为 400 km [28]. 本文使用的是 SABER 从 2003 年—2018 年的 1.07 版本的数据, 该版本温度数据已经做过许多比较和验证, 并广泛应用于科学研究中, 数据可信 [28]. 在中纬度 30° 地区, 温度测量误差为 0.8 K, 此外考虑到 110 km 以上大气密度较小, 但误差较大, 本文只利用了 14—110 km 之间的探测数据. 在青藏高原东北部的格尔木 (94.54°E , 36.25°N), 利用地面 MARMOT 激光雷达对 50—90 km 大气结构的测量结果和 TIMED/SABER 符合得很好 [29]. 因此, 利用 SABER 观测来估计 LHAASO 上空的 14—100 km 的大气深度廓线, 也是合理的. 根据 LHAASO 的地理位置, 从 2003 年—2018 年, SABER 共有 28 天观测到 LHAASO 所在处的大气结构. 图 1 是从 14 km 处到 50 km 范围内的平均大气深度廓线, 误差棒是 28 天数据观测到的数据的统计误差. 黑点对应的美国标准大气模型对应的大气深度廓线, 因此在

LHAASO 处, 美国标准大气模型得到的大气深度都偏小.

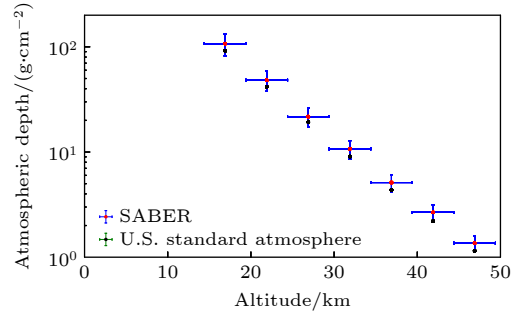


图 1 LHAASO 上空 14—50 km 垂直大气深度廓线. 黑点表示由美国标准大气模型得到, 红点表示由 SABER 得到
Fig. 1. Vertical atmospheric depth profiles over LHAASO by U.S. standard atmospheric model and SABER as a function of altitude.

为了研究 LHAASO 处大气深度的变化, 分析了从 2020 年 1 月至 2020 年 12 月 LHAASO 站点处地面气象站观测的大气压强数据, 该数据每 5 min 记录一次. 大气压强除以相应的重力加速度即为此处的大气深度, 如图 2 所示. 由于突然停电等因素, 错误的数据已被剔除. 大气深度存在小时、天及季节尺度上的变化. 2020 年大气深度的平均值为 $(607.02 \pm 0.3) \text{ g/cm}^2$, 最大为 616.75 g/cm^2 , 最小为 598.50 g/cm^2 .

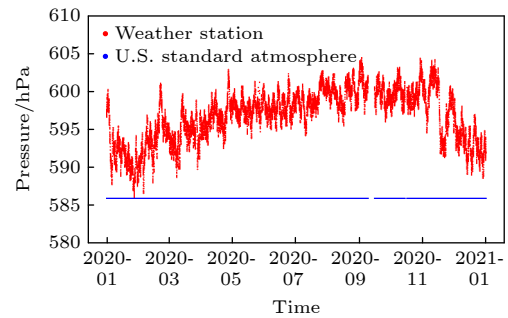


图 2 LHAASO 地面处大气深度的变化, 蓝色是美国标准大气模型的计算结果, 红色是地面标准气象站的观测数据
Fig. 2. Variation of surface atmospheric depth at LHAASO, the blue is the calculation of the standard atmospheric model of the United States, and the red is the observation data of the standard weather station on the ground.

所有的这些值都大于基于美国标准大气模型计算得到的大气深度 597.98 g/cm^2 . 因此, 与空间观测和 LHAASO 处海拔观测进行比较, 美国标准大气模型的大气深度都偏小. 如果将美国标准大气模型应用于 LHAASO 站点 WFCTA 的标定、模拟和重建, 将会产生比较大的偏差.

3 基于 MSISE-90 大气密度模型的大气深度廓线

3.1 MSISE-90 大气密度模型

MSIS (mass spectrometer and incoherent scatter radar models) 是经验大气模型, 自 1977 年以来一直在改进. 它们是由美国海军实验室开发的 MSIS-77^[30], MSIS-86^[31], MSISE-90 和 NRLMSISE-00^[26,32]. MSISE-90 模型描述了地球大气中从地面到热层的中性温度和密度. 为提高低高度大气密度计算精度, 1987 年, Hedin 等^[30] 基于 MSIS-86 模式^[31], 利用不相干散射雷达和卫星质谱仪测量资料, 在半经验公式的基础上进行拟合处理后提出了 MSISE-90 大气密度模型. 在 72.5 km 以下 MSISE-90 模型主要是基于 MAP 手册内的纬度带平均温度和气压的列表值^[33], 这一做法也被由国际空间研究委员会 (COSPAR, committee on space research) 开发和维护的 CIRA86 大气模型引用^[34]. 在 20 km 之下还考虑了美国国家气象中 (NMC) 的平均温度和气压数据. 此外, 还考虑了 1947 年—1972 年的皮托管、坠落球和手榴弹发射器火箭测量数据. 而在 72.5 km 之上 MSISE-90 模型与改进的 MSIS-86 模型基本相同, 只是补充了新的不相干散射观测资料. 在总的大气质量密度方面, NRLMSISE-00 经验大气模型与 MSISE-90 在统计上是一致的, 由于 MSISE-90 模型使用起来更方便, 本研究中使用 MSISE-90 模型. 与美国标准大气模型比较, 这个模型最突出的优点是能够描述大气密度在时间和空间上的变化. 在这个模型中地理经度、纬度、海拔和时间作为输入变量, 大气总的质量密度是输出变量之一. 本文选择 1 h 时间间隔抽样的总的大气质量密度数据进行研究.

3.2 MSISE-90 大气模型和本地测量观测的比较

为了验证 MSISE-90 模型是否适用于 LHAASO, 将 MSISE-90 模型得到的大气深度与本地的测量进行比较.

3.2.1 MSISE-90 模型与 SABER 测量比较

对应 SABER 所用的数据所在的天时间信息, 挑选出 MSISE-90 模型的大气密度廓线并计算出其大气深度廓线. 图 3 显示了海拔 14—50 km

之间, SABER 测量的大气深度减去 MSISE-90 模型的大气深度的差值廓线. 从海拔 14—15 km 处, SABER 的测量值稍微大于 MSISE-90, 其余海拔处 SABER 的测量值小于 MSISE-90, 在海拔近 20 km 处差异最大值, 大约 1.5 g/cm^2 . 30 km 以上差异接近稳定, 小于 $0.021.5 \text{ g/cm}^2$. 因此, MSISE-90 的大气深度可用于评估 LHAASO 在一定时间内平均的大气深度廓线.

3.2.2 MSISE-90 模型与 LHAASO 处气象站观测比较

对于 2018 年 1—12 月每小时间隔抽样的 LHAASO 地面气象站记录的大气深度, 剔除了由

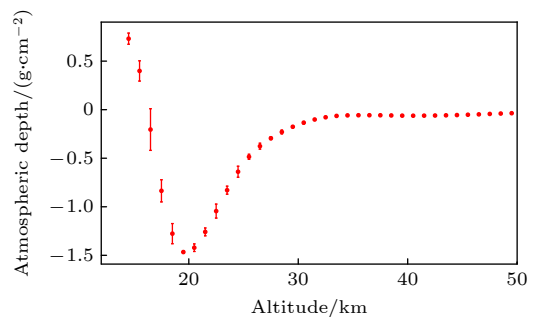


图 3 SABER 和 MSISE-90 模型在 29 天内得出的平均大气深度廓线的比较. y 轴表示 SABER 的大气深度廓线减去与 MSISE-90 模型对应的大气深度的差值

Fig. 3. Comparison of the mean atmospheric depth profile derived from SABER and MSISE-90 model in 29 days. The y -axis represents for the difference of the mean atmospheric depth profile from SABER minus that from MSISE-90 model.

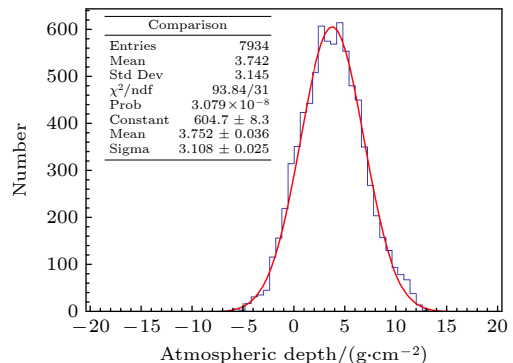


图 4 MSISE-90 模型的大气深度减去气象站数据的大气深度的分布, MSISE-90 的大气深度与地面标准气象站的记录非常一致, 平均值为 $(3.752 \pm 0.036) \text{ g/cm}^2$, 可能是两个大气深度之间的系统性差异

Fig. 4. Distribution of atmospheric depth with MSISE-90 model minus weather station data. The atmospheric depth of MSISE-90 is very consistent with records from standard weather stations on the ground, with an average of $(3.752 \pm 0.036) \text{ g·cm}^{-2}$. It could be a systematic difference between the two atmospheric depths.

于突然断电、仪器维修等而导致的错误数据后,共得到 7934 次大气深度数值. 利用 MSISE-90 模型计算出同时期内 LHAASO 位置处 4410 m 高的大气深度,二者比较的分布如图 4 蓝色线所示. 该分布的平均值是 3.741 g/cm^2 , 标准差为 3.140 g/cm^2 , (红色曲线是拟合的高斯函数 P), 详细的参数数字是 604.7 ± 8.3 , 3.752 ± 0.036 , 3.108 ± 0.025 , 如图 4 所示, 因此二者符合比较好.

4 LHAASO 处每月的垂直大气深度廓线模型

4.1 MSISE-90 模型每日和每月大气深度廓线的变化

为了了解在一个月不同天的垂直大气廓线的变化, 利用 MSISE-90 大气密度模型, 选择了从 4.4 km 到 100 km, 步长为 0.1 km 的大气密度计算出垂直大气深度廓线, 图 5 显示的是 2018 年 4 月每天零点时垂直大气深度廓线, 归一化为 2018 年 4 月 1 日的数据. 不同的颜色代表不同的日期. 4 月被选中是因为与 LHAASO 站点一年内的其他月份相比, 4 月份的每日大气边界高度差异最大. 由于膝区宇宙线能量的 EAS (extensive air shower) 大多产生在 40 km 以下, 这里仍然选择 50 km 以下的垂直大气深度显示. 在一个月不同天的垂直大气深度在 LHAASO 处的海拔差异最大, 可达约 $(5 \pm 0.036) \text{ g/cm}^2$. 20 km 以上, 差别接近于零.

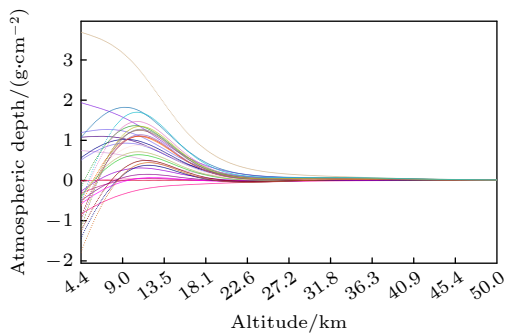


图 5 2018 年 4 月份每天 0 点时刻 4.4—50 km 的垂直大气深度廓线

Fig. 5. Vertical atmospheric depth profile from 4.4 km through 50 km at zero o'clock each day in April 2018.

在海拔 40 km 以上, 一年内每月大气深度平均值基本相同, 主要是因为随着海拔的升高大气密度越来越小. 总的来说, 从 4.4 km 至 50 km, 8 月份的平均大气深度最大, 随后逐渐变小的月份是

7 月、9 月、6 月和 10 月, 如图 6 所示. 不同的颜色表示不同月份的大气深度廓线与年平均的差异. 比较有趣的是这 5 个月温度偏高, 也是 LHAASO 的雨季, 大气深度大于年平均值. 一年中其他月份的大气深度也小, 可能与气温有关. 在 1 月份, 大气深度的月平均值降至最低水平, 在其他几个月内更小, 包括 2 月、3 月、4 月、11 月和 12 月, 这也是 WFCTA 运行的最佳观测月份. 月平均之间的差异在海拔 10 km 左右达到最大, 约为 10 g/cm^2 . 这可能与位于对流层的顶部有关.

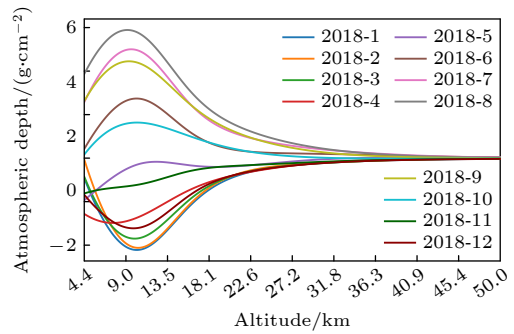


图 6 2018 年每月的相对于年均值的垂直大气深度廓线

Fig. 6. Distribution of monthly mean atmospheric depth minus the annual average.

4.2 LHAASO 处每月的大气深度廓线模型

LHAASO 在晴朗的夜晚运行, 选用从晚上 8:00 到第二天早上 6:00 的平均的大气深度, 空间上每 0.1 km 抽样的 MSISE-90 模型的大气密度廓线数据, 以获得每月的大气深度廓线数据. 然后使用美国标准大气深度廓线模型的函数形式进行拟合, 对应的海拔区间及拟合的参数如表 1 所列.

4.3 基于每月 MSISE-90 大气深度廓线模型的切伦科夫光的横向分布比较

为了研究不同月度大气深度模型产生的切伦科夫光的不同, 使用 CORSIKA 软件产生切伦科夫光. 本文使用 CORSIKA Version-7.7410 版本软件包 [15] 模拟 EAS, 高能强相互作用模型采用 QGSJet-II-04, 低能强相互作用模型采用 GHEISHA, 电磁相互作用模型采用 EGS4, 原初成分为质子 (proton), 原初粒子能量为 100 TeV, 天顶角固定为 30° , 方位角在 0° — 360° 内均匀投点, 观测平面选 4400 m 的海拔高度. 次级粒子的截断动能设为 1 MeV, 选取的截断动能低于 CORSIKA

表 1 大气深度模型参数
Table 1. Atmospheric depth model parameters.

Month	Layer i	Altitude h/km	$a_i/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$	$b_i/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$	$c_i/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$
Jan	1	4.4—10	-88.67664	1153.38932	885318.24144
	2	10—40	0.1503	1368.33236	635083.57589
	3	40—70	0.00097	594.27741	759999.94129
	4	70—100	-0.00086	1907.62483	667666.97913
Feb	1	4.4—10	-87.39177	1154.47929	881758.5079
	2	10—40	0.15609	1367.33681	635285.9599
	3	40—70	0.00027	576.34076	764858.0621
	4	70—100	-0.00085	2045.36876	663026.919
Mar	1	4.4—10	-87.84831	1151.6271	885628.7299
	2	10—40	0.11315	1369.10268	635555.228
	3	40—70	-0.00049	553.3669	771529.8036
	4	70—100	-0.00091	2209.83224	658731.9146
Apr	1	4.4—10	-90.25622	1145.51995	897003.8093
	2	10—40	0.06234	1373.1308	635903.6963
	3	40—70	-0.00116	539.40289	776888.0464
	4	70—100	-0.00097	2423.60087	654760.7167
May	1	4.4—10	-94.01004	1143.16428	911761.1959
	2	10—40	0.03596	1381.07511	636947.2602
	3	40—70	-0.00132	549.94468	776854.1294
	4	70—100	-0.00106	2661.49827	651353.7108
Jun	1	4.4—10	-97.91433	1146.13178	925652.5235
	2	10—40	0.01816	1390.15178	639198.5601
	3	40—70	-0.00087	583.28466	771416.4869
	4	70—100	-0.00114	2874.15677	648179.0992
Jul	1	4.4—10	-100.06562	1148.64061	933675.7634
	2	10—40	-0.02423	1392.20555	641946.5067
	3	40—70	-0.00005	618.18009	764300.351
	4	70—100	-0.00111	2927.94379	646356.8679
Aug	1	4.4—10	-100.35386	1151.17543	934589.3083
	2	10—40	-0.09651	1391.26844	643717.7458
	3	40—70	0.00089	636.09755	759237.935
	4	70—100	-0.00106	2753.18923	647878.0245
Sep	1	4.4—10	-98.98887	1149.90531	929337.2904
	2	10—40	-0.15062	1386.23148	643237.0362
	3	40—70	0.0016	629.96089	757639.8883
	4	70—100	-0.00097	2427.85445	653170.7765
Oct	1	4.4—10	-96.77554	1147.98637	919739.3653
	2	10—40	-0.13485	1381.02577	640744.2671
	3	40—70	0.0019	614.52746	757915.0523
	4	70—100	-0.00091	2107.53654	660753.9717
Nov	1	4.4—10	-94.08387	1147.66351	907591.9124
	2	10—40	-0.04465	1376.11079	637729.8644
	3	40—70	-0.00183	604.50776	758089.8866
	4	70—100	-0.00088	1903.76056	667277.3079
Dec	1	4.4—10	-91.25224	1150.55845	895114.7529
	2	10—40	0.07201	1372.32941	635695.0018
	3	40—70	0.0015	601.61656	758134.5887
	4	70—100	-0.00089	1844.46114	669845.4268

手册中的默认值,以存储更多的次级粒子,同时在选定的截断动能以下的次级粒子对总的横向分布的贡献很小^[35].切伦科夫光的波长设为 200—700 nm,切伦科夫光子的采集区域选取与簇射轴垂直距离(表示为 R_p)为 $r = 500$ m 的圆形区域.模拟中使用了 13 种不同的大气深度廓线模型,每种模型分别产生 1000 个事例,为了尽可能地模拟实际情况,加入了大气吸收模式^[36].

图 7 展示了在 4400 m 高度观测到的簇射中,不同大气模型对切伦科夫光横向分布密度的影响. MSISE-90 模型与美国标准大气模型相比,从图 7 可以看出,越靠近芯位,切伦科夫光池效应越明显,不同模型的切伦科夫光密度差异越大,美国标准大气模型产生的结果整体高出 MSISE-90 月度模型结果,最大约高出 20%.目前 CORSIKA 软件中模拟产生切伦科夫光默认的是美国标准大气模型^[16],这会导致实验数据在能量和方向及芯位重建的误差增大.

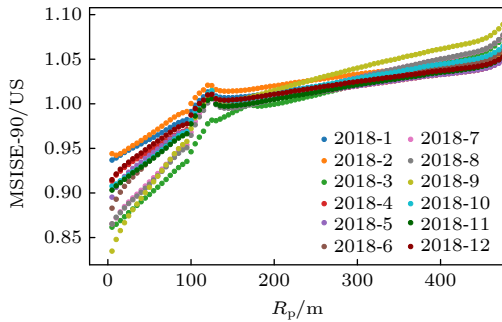


图 7 每月大气深度模型与美国标准大气模型产生的切伦科夫光的横向分布的比值随 R_p 的变化. y 轴表示切伦科夫光密度比值, x 轴表示到簇射轴的距离

Fig. 7. Variation of Cherenkov light ratio with R_p in monthly atmospheric depth models versus US standard atmosphere. The y -axis represents the ratio of Cherenkov light density, and the x -axis represents the distance to the shower axis.

5 结 论

本文首先比较了 TIMED/SABER 在 LHAASO 处的大气深度廓线观测和美国标准大气模型的大气深度,发现美国标准大气模型的值偏小. LHAASO 处的地面气象站观测的大气深度也高于美国标准大气模型的大气深度值.进一步分析了基于 MSISE-90 的大气深度与 TIMED/SABER 观测的一致性. MSISE-90 模型的大气深度整体比 LHAASO 地面气象站的数据大,二者偏差的均值

为 (3.752 ± 0.036) g/cm²,所以 MSISE-90 模型与地面标准气象站的观测也是一致的. MSISE-90 模型的垂直大气深度廓线存在月变化,得出了 12 个月的大气深度廓线模型.应用于天顶角 30°, 100 TeV 的质子宇宙线,产生的切伦科夫光横向分布密度与美国标准大气模型存在差别,最高约 20%.为宇宙线观测的标定、模拟和数据重建精度的提高提供了基础.

参考文献

- [1] He H H 2018 *Radiation Detection Technology and Methods* **2** 1
- [2] Cao Z, Chen M J, Chen S Z, Hu H B, Liu C, Liu Y, Ma L L, Ma X H, Sheng X D, Wu H R, Xiao G, Yao Z G, Yin L Q, Zha M, Zhang S S 2019 *Acta Astronomica Sinica* **60** 3 (in Chinese) [曹臻, 陈明君, 陈松战, 胡红波, 刘成, 刘烨, 马玲玲, 马欣华, 盛祥东, 吴含荣, 肖刚, 姚志国, 尹丽巧, 查敏, 张寿山 2019 *天文学报* **60** 3]
- [3] LHAASO Collaboration 2021 *Science* **373** 425
- [4] LHAASO Collaboration 2021 *Nature* **594** 33
- [5] LHAASO Collaboration 2022 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **1021** 165824
- [6] LHAASO Collaboration 2021 *Eur. Phys. J. C* **81** 657
- [7] Xie N, Liu H, Hu Y, Long W J, Jia H Y, Zhu F R, Chen Q H 2019 *36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019)*, Madison, USA, July 24–August 1, 2019 498
- [8] Sun Q N 2021 *37th International Cosmic Ray Conference (ICRC2021)*, Berlin, Germany, July 12–23, 2021 272
- [9] Chen L, Li X, Ge L S, Liu H, Sun Q N, Wang Y, Xia J J, Zhu F R, Zhang Y 2021 *37th International Cosmic Ray Conference (ICRC2021)*, Berlin, Germany, July 12–23, 2021 269
- [10] Li X, Chen L, Geng L S, Liu H, Sun Q N, Wang Y, Xia J J, Zhu F R, Zhang Y 2022 *Astronomical Research & Technology* **19** 244 (in Chinese) [李新, 陈龙, 耿利斯, 刘虎, 孙秦宁, 王阳, 夏君集, 祝凤荣, 张勇 2022 *天文研究与技术* **19** 244]
- [11] Sun Q N, Jin M, Xia J J, Liu J, Min Z, Zhu F R, Chen L, Wang Y, Liu Y, Zhang Y 2023 *38th International Cosmic Ray Conference (ICRC2023)*, Nagoya, Japan, July 26–August 3, 2023 498
- [12] Sun Q N, Wang Y, Chen L, Zhang Y, Zhu F R 2023 *38th International Cosmic Ray Conference (ICRC2023)*, Nagoya, Japan, July 26–August 3, 2023 496
- [13] Sun Q N, Min Z, Liu H, Zhu F R, Zhang S S, Long C, Wang Y 2023 *38th International Cosmic Ray Conference (ICRC2023)*, Nagoya, Japan, July 26–August 3, 2023 494
- [14] Liu J, Tang X F, Xia J J, Zhu F R 2024 *Plateau and Mountain Meteorology Research* **44** 1674 (in Chinese) [柳靖, 唐晓凡, 夏君集, 祝凤荣 2024 *高原山地气象研究* **44** 1674]
- [15] Heck D, Knapp J, Capdevielle J N, Schatz G, Thouw T 1998 *Corsika: A monte carlo code to simulate extensive air showers (Wissenschaftliche Berichte, FZKA-6019)* pp1–54
- [16] National Geophysical Data Center 1976 *Planetary and Space Science* **40** 553
- [17] Wilczyńska B, Góra D, Homola P, Pełkala J, Risse M, Wilczyński H 2006 *Astropart. Phys.* **25** 106
- [18] Keilhauer B, Will M, Pierre Auger Collaboration 2012 *Eur. Phys. J. Plus* **127** 96

- [19] Pierre Auger Collaboration 2012 *Astropart. Phys.* **35** 591
- [20] HiRes Collaboration 2001 *Proceedings of the 27th International Cosmic Ray Conference*, Hamburg, Germany, August 7–15, 2001 653
- [21] HESS Collaboration 2003 *Proceedings of the 28th International Cosmic Ray Conference*, Tsukuba, Japan, July 31–August 7, 2003 2879
- [22] The Veritas Collaboration 2008 *VERITAS Collaboration Contributions to the 31st International Cosmic Ray Conference*, Lodz, Poland, July, 2008
- [23] The Telescope Array Collaboration 2001 *27th International Cosmic Ray Conference (ICRC2001)*, Hamburg, Germany, August 7–15, 2001 663
- [24] Schmuckermaier F, Gaug M, Fruck C, Moralejo A, Hahn A, Dominis Prester D, Dorner D, Font L, Mićanović S, Mirzoyan R, Paneque D, Pavletić L, Sitarek J, Will M 2023 *Astron. Astrophys.* **673** 25
- [25] Hedin A, Res J G 1991 *J. Geophys. Res.* **96** 1159
- [26] NASA CCMC MSIS Vitmo Model [2024-03-27]
- [27] Cheng X, Xiao C Y, Hu X, Yang J F 2018 *SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica* **48** 79 (in Chinese) [程旋, 肖存英, 胡雄, 杨钧烽 2018 中国科学: 物理学力学 天文学 **48** 79]
- [28] Gong X Y, Hu X, Wu X C, Xiao C Y 2013 *Chin. J. Geophys.* **56** 2152 (in Chinese) [宫晓艳, 胡雄, 吴小成, 肖存英 2013 地球物理学报 **56** 2152]
- [29] Dai Y R, Pan W L, Qiao S, Hu X, Yan Z A, Ban C 2020 *Chinese Journal of Space Science* **40** 207
- [30] Hedin A E, Salah J E, Evans J V, Reber C A, Newton G P, Spencer N W, Kayser D C, Alcayde D, Bauer P, Cogger L, McClure J P 1977 *J. Geophys. Res.* **82** 2139
- [31] Hedin A E 1987 *J. Geophys. Res.* **92** 4649
- [32] Picone J M, Hedin A E, Drob D P, Aikin A C 2002 *J. Geophys. Res.* **107** 1468
- [33] Labitzke K, Barnett J J, Edwards B 1985 *Handbook MAP* **16**
- [34] Fleming E L, Chandra S, Barnett J, Corney M 1990 *Adv. Space Res.* **10** 11
- [35] Zhang F, Liu H, Zhu F R 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 472 (in Chinese) [张丰, 刘虎, 祝凤荣 2022 物理学报 **71** 472]
- [36] Liu J R, Wu H X, Liu Q, Ji Y J, Xu R, Zhang F, Liu H 2024 *Universe* **10** 100

Study of atmospheric depth profiles at large high altitude air shower observatory using MSISE-90 model*

Zhu Feng-Rong^{1)2)3)†} Liu Jing¹⁾ Xia Jun-Ji¹⁾ Zhang Feng¹⁾ Liu Hu¹⁾

1) (*School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China*)

2) (*School of Science, Xizang University, Lhasa 850000, China*)

3) (*Tianfu Cosmic Ray Research Center, Chengdu 610213, China*)

(Received 12 May 2024; revised manuscript received 24 June 2024)

Abstract

High altitude cosmic ray observatory (LHAASO) is located at Haizi Mountain in Daocheng county, Sichuan province, China. Its wide field of view Cherenkov telescope array (WFCTA) is primarily used to study cosmic rays through observing the Cherenkov light signals produced during extensive air showers. Calibration, simulation, and reconstruction of WFCTA are all related to atmospheric depth. The atmospheric depth model currently used is the US standard atmosphere depth profile model. In this study, the US standard atmosphere depth profile model is compared with the atmospheric depth profile recorded by the infrared radiometer SABER carried by the satellite TIMED at LHAASO from 14 km to 50 km, and also with the atmospheric depth recorded by the ground meteorological station at LHAASO. The atmospheric depth obtained from the US standard atmosphere model is consistently smaller. The MSISE-90 atmospheric model describes the neutral temperature and density from the Earth's surface to the thermosphere. Further research shows good consistency between the MSISE-90 atmospheric model and the atmospheric depth recorded by TIMED/SABER and the ground standard meteorological station at LHAASO. According to the MSISE-90 atmospheric model, the average atmospheric depth profile at LHAASO is lowest in January, followed sequentially by February, March, April, November, and December, which are also the optimal observation months for WFCTA operation. The atmospheric boundary layer is highest in April, with the diurnal variation of atmospheric depth being about 2%. Using the functional form of the US standard atmosphere model, the monthly atmospheric depth profile of the LHAASO site is obtained by fitting an atmospheric depth profile of 4.4 to 100 km per month. And the comparison between the lateral distribution of the Cherenkov photons produced by 100 TeV cosmic-ray protons incident at a zenith angle of 30° in the MSISE-90 atmospheric model and that in the US standard atmosphere model shows that their maximum difference reaches about 20%.

Keywords: the MSISE-90 atmospheric model, atmospheric depth profiles, large high altitude air shower observatory, Cherenkov photon

PACS: 92.60.lv, 96.50.sd

DOI: [10.7498/aps.73.20240679](https://doi.org/10.7498/aps.73.20240679)

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2018YFA0404201).

† Corresponding author. E-mail: zhufu@home.swjtu.edu.cn



基于MSISE-90研究高海拔宇宙线观测站处的大气深度廓线模型

祝凤荣 柳靖 夏君集 张丰 刘虎

Study of atmospheric depth profiles at large high altitude air shower observatory using MSISE-90 model

Zhu Feng-Rong Liu Jing Xia Jun-Ji Zhang Feng Liu Hu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 169201 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240679

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240679>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高海拔宇宙线观测实验中scaler模式的模拟研究

Simulation study of scaler mode at large high altitude air shower observatory

物理学报. 2021, 70(19): 199301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210632>

雷暴电场对LHAASO观测面宇宙线次级光子的影响

Effects of thunderstorms electric field on secondary photons of cosmic ray at large high altitude air shower observatory

物理学报. 2024, 73(12): 129201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240341>

膝区宇宙线广延大气簇射次级成分的特征

Properties of secondary components in extensive air shower of cosmic rays in knee energy region

物理学报. 2022, 71(24): 249601 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221556>

基于大气廓线合成背景的目标气云透过率反演

Inversion method of target gas cloud transmittance based on atmospheric profile synthesis background

物理学报. 2023, 72(3): 033201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221670>

大气光学湍流模式研究: 廓线模式

Study of profile model by atmospheric optical turbulence model

物理学报. 2023, 72(6): 069201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221985>

机器学习在宇宙线粒子鉴别中的应用

Application of machine learning in cosmic ray particle identification

物理学报. 2023, 72(14): 140202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230334>