0254-6124/2022/42(6)-1129-08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

ZHANG Xuanyi. Simulation of Solar Ultraviolet Radiation Environment in Near Space and Analysis of Topographic Difference (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(6): 1129–1136. DOI:10.11728/cjss2022.06.211208128

临近空间太阳紫外辐射环境模拟与地区差异*

张轩谊

(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

(中国科学院大学 北京 100049)

(天基空间环境探测北京市重点实验室 北京 100190)

摘 要 太阳紫外辐射是临近空间能量输入的主要来源之一，对其在中层大气的辐射特性进行研究，是研究临近空间大气成分与密度变化、光化学反应以及动力学过程的重要基础。依托“鸿鹄”临近空间探测专项计划，利用 MODTRAN5 辐射传输模型及卫星实测数据，模拟并对比中国 11 个主要地形区上空临近空间（20～50 km）紫外辐射（200～400 nm）垂直分布和季节演变的异同，计算了臭氧含量、太阳天顶角和日地距离等关键因素对辐射强度的影响。结果表明，各地形区的辐射流量垂直分布廓线和年较差垂直分布廓线较为一致，在地理位置上毗邻的地区辐射特性及季节演变较为接近，但在太阳紫外的不同波段之间区别较大。研究成果为临近空间探测实验提供了数据支撑，为大气反演等相关领域提供参考。

关键词 临近空间，太阳紫外辐射，辐射传输，辐射透过率

中图分类号 P422.3+1

Simulation of Solar Ultraviolet Radiation Environment in Near Space and Analysis of Topographic Difference

ZHANG Xuanyi

(*National Space Science Center*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190)

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

(*Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration*, *Beijing* 100190)

Abstract Solar ultraviolet radiation is one of the main sources of energy input into near space. The study of its radiation characteristics in the mid-atmosphere is an important basis for the study of atmospheric composition and density changes, photochemical reactions and dynamic processes in near space. This paper is based on the special project of HH, using MODTRAN5 radiation transfer model and satel-

* 国家自然科学基金项目（41974211），中国科学院战略先导科学专项（XDA17010201）和北京市科技委培育项目（Z201100003520005）共同资助

2021-12-08 收到原稿，2022-06-13 收到修定稿

E-mail：zhangxuanyi17@mails.ucas.ac.cn

lite ozone data, the similarities and differences of the vertical distribution and seasonal evolution of ultraviolet radiation (200～400 nm) in the near space (20～50 km) over 11 major terrain areas in China were compared. The function between ozone content and radiation transmittance is calculated, and the influence of solar zenithal Angle and sun-earth distance on radiation intensity is analyzed. The results show that the vertical distribution profiles of radiative flux in each terrain area are consistent with the vertical distribution profiles of the annual difference, and the radiation characteristics and seasonal evolution in geographically adjacent regions are similar, but there are great differences between different bands of solar UV. The results provide data support for near-space exploration experiments, and provide reference for atmospheric inversion and other related fields.

Key words Near space, Solar ultraviolet radiation, Radiation transfer, Radiation transmittance

0 引言

随着航天技术的发展,在临近空间开展科学探测任务的需求快速增加。加强高空辐射环境研究,对于保障浮空器短期升降、长期驻留等问题具有重要意义。美国、日本、俄罗斯等都对临近空间开展了研究和实验。

美国已投入使用的项目包括美国导弹防御局的高空飞艇(HAA)、洛克希德·马丁公司的高空长航时飞艇(HALE-D)和谷歌的 Project Loon[1–4]。2018 年,依托于临近空间科学实验系统(简称鸿鹄专项),中国科学院承担了临近空间对太阳风暴响应特征观测研究的任务,于 2021－2023 年进行探测实验。该专项旨在增进人类对临近空间的了解,为解答相关热点科学问题提供关键探测数据,深度刻画临近空间天气与电磁辐射环境。在该实验中,本项目研制的太阳紫外光谱仪作为载荷之一,搭载于载荷舱中[5],利用高空气球在临近空间进行高分辨率太阳远紫外–紫外光谱探测。

Mei 等[6] 曾利用 SBDART 辐射传输模型对中国区海陆上空进行了太阳总辐射强度(250～4000 nm)和总紫外强度(250～400 nm)的模拟,其划分的区域并未包括青藏高原及其附近的柴达木盆地与塔里木盆地;国际上暂无对中国境内不同地形区的临近空间紫外辐射环境的相关研究。为了深入探索在中国不同地区开展探测实验的异同,获得临近空间辐射环境的先验数据,本文利用 MODTRAN5 辐射传输模型,结合卫星大气数据,将紫外辐射按波长分为 UVC(200～ 280 nm) , UVB(280～ 320 nm) 和 UVA(320～400 nm)三段,模拟了中国境内 11 个地形区上空 20～50 km高度范围的辐射强度时空变化,计算了臭氧含量、太阳天顶角和日地距离等关键因素对辐射强度的影响。相关研究成果为临近空间探测实验提供数据支撑和理论依据。

1 模型与数据

1.1 主要科学目标

任务的主要科学目标是:获得中国不同地形区上空临近空间紫外辐射环境的时空变化和异同。

1.2 辐射传输模型

MODTRAN5 由美国光谱科学公司(SSI)与空军研究实验室(AFRL)合作研发而成[7],是目前国际上较为前沿的大气辐射传输模型之一,其辐射传输计算的核心是大气“窄带模型”算法,使用内置的模型、探空仪及卫星数据,通过大气分子和气溶胶颗粒的垂直廓线进行建模[8]。模型利用离散坐标法(DISORT)求解辐射传输方程,将球形大气层分为若干不同厚度的均匀层,将散射相函数和辐射强度用勒让德多项式展开,用数值方法求解特征方程。

1.3 卫星数据

用于模拟实验的地外太阳光谱数据来自文献 [9],臭氧数据来自欧洲中尺度预报中心(ECMWF),CERA-SAT 再分析数据。数据选取 2016 年的逐日臭氧数据,将月平均结果作为模型的初始输入参数,能够较好地保持模拟结果的稳定性和参考性。

2 临近空间太阳紫外辐射模拟实验

2.1 区域划分

依据地形地势,划分出 11 个区域分别进行临近

空间紫外辐射环境模拟。吸收紫外辐射的因素以臭氧最为关键,衡量臭氧的影响主要有两个指标:臭氧的总量与垂直分布。从中外长期对于臭氧垂直分布的研究可知,臭氧层主要分布于 15～35 km 高度,其浓度峰值位于 25 km 左右,臭氧总量的变化基本上反映了临近空间的臭氧状态[10]。

图 1 为欧洲中尺度预报中心的臭氧含量分布数据,可见臭氧含量存在明显的纬向分布与季节变化,总体呈现为北高南低,冬春季高,夏秋季低,其原因是在低纬度地区平流层通过光化学作用产生的臭氧被经向环流输送到高纬度地区,而太阳辐射作为大气的主要热源引起经向环流的季节变化。

东北平原地势平坦,位于东亚大槽区,气压低,利于氧气的输送,因此存在显著的臭氧高值区。青藏高原地势高,大气环流中的低压槽接近青藏高原时被切断,而高压脊被强化,故此区域与东北平原相反,存在显著的臭氧低值区。青藏高原内的柴达木盆地、青藏高原外西北方向的塔里木盆地、东南方向的四川盆地因海拔骤降,其上空臭氧浓度提升,从图 1(c)(d)可见其明显轮廓。中国东部及南部的平原地区则体现为典型的北高南低式纬向分布,臭氧等值线与纬线基本平行。具体地区划分详见表 1,主要地形区划分如图 2 所示。

表 1　中国临近空间区域划分

Table 1　Region divisions of China near space

地势阶梯	编号	地形区	经纬范围
第一阶梯(平均高度大于 4 km)	1	青藏高原	80°E－100°E 30°N－40°N
	2	柴达木盆地	94°E－96°E 37°N－39°N
第二阶梯(平均高度 1～2 km)	3	塔里木盆地	80°E－90°E 39°N－40°N
	4	准噶尔盆地	84°E－86°E 44°N－46°N
	5	内蒙古高原	110°E－120°E 39°N－41°N
	6	黄土高原	105°E－110°E 34°N－36°N
	7	四川盆地	104°E－106°E 29°N－31°N
	8	云贵高原	100°E－110°E 24°N－28°N
第三阶梯(平均高度小于 500 m)	9	东北平原	120°E－135°E 40°N－53°N
	10	华北平原	115°E－120°E 33°N－40°N
	11	长江中下游平原	110°E－120°E 29°N－31°N

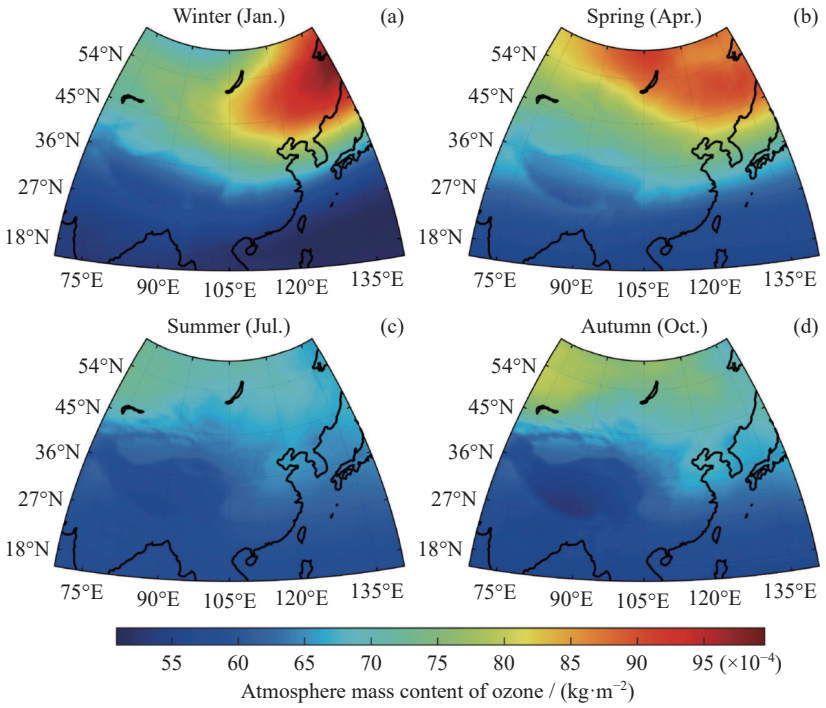

图 1　大气臭氧质量含量分布

Fig. 1　Atmosphere mass content of ozone

2.2 关键因素分析

在模拟实验之前，分析了关键输入参数的变化对输出结果的影响。当控制变量并进行敏感性实验时发现，20～50 km 临近空间紫外波段的辐射透过率受臭氧含量变化的影响最为显著，水气、地表反射率、气溶胶等参数的影响对其很微弱。针对臭氧对太阳辐射的吸收，将紫外分为三个波段：UVC(200～280 nm)，UVB(280～320 nm)和 UVA(320～400 nm)，通过设置其他吸收气体含量为零，利用辐射传输模型计算臭氧在不同高度沿光学路径的总量与透过率之间的函数关系，如图 3 所示，可知 20～50 km 是 UVB 及 UVC 波段从吸收到透过的过渡区域，UVA 波段因透过率较高，使用右侧 Y 轴便于对比。通过对未拟合的原始数据分析，发现 UVA 近似线性，UVB，UVC 近似指数，分别采用线性和指数函数对其进行拟合，臭氧的辐射平均透过率分别为

$$\tau_{O_3}^{UVA} = -0.05917x + 0.9999, \tag{1}$$

$$\tau_{O_3}^{UVA} = 0.453\,e^{-47.41x} + 0.5395\,e^{-3.362x}, \tag{2}$$

$$\tau_{O_3}^{UVA} = 0.6177\,e^{-192.2x} + 0.3636\,e^{-18.59x}. \tag{3}$$

其中，x 为沿光学路径的臭氧含量，单位为 atm-cm。

因地球轨道为椭圆形，实际到达大气层顶(100 km)的太阳辐射强度全年变化主要由日地距离决定[11]。利用辐射传输模型计算了地球位于近远日

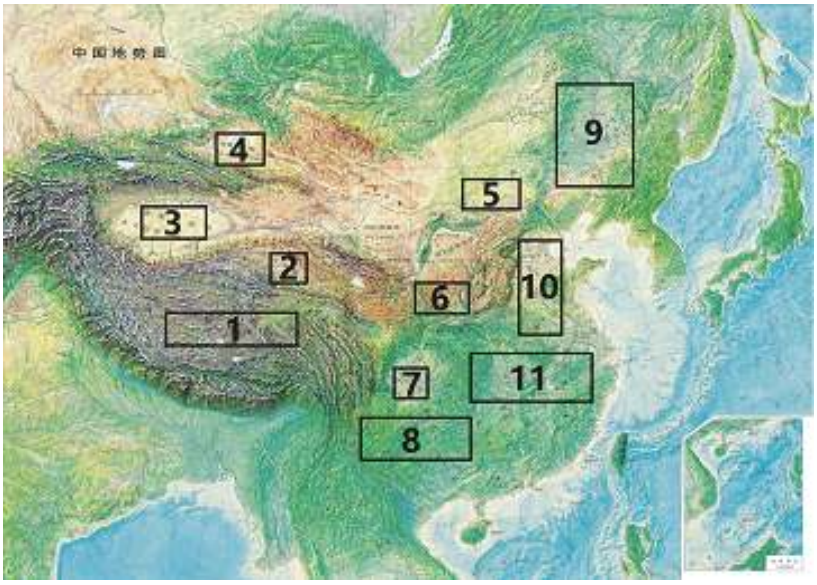

图 2 主要地形区划分（编号说明对应表 1）

Fig. 2 Main topographic area division (Number meanings correspond to Table 1)

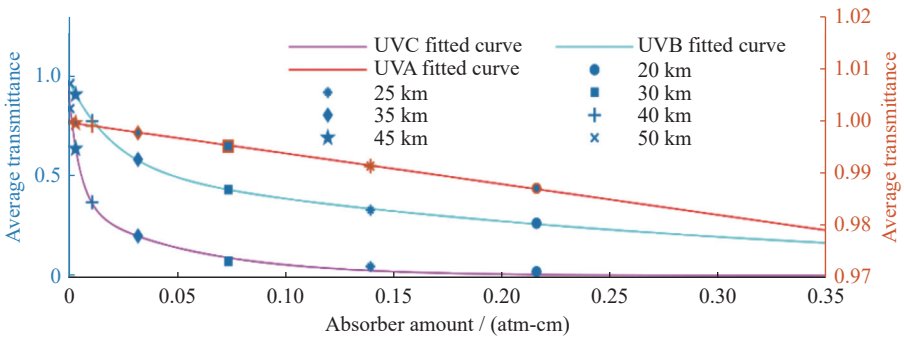

图 3 臭氧含量与透过率的函数关系（UVA 对应右侧坐标）

Fig. 3 Functional relationship between ozone content and transmittance (UVA corresponds to the right coordinate)

表 2　地球位于近日点与远日点的大气层顶紫外(200～400 nm)辐射流量

Table 2　Ultraviolet radiation flux (200～400 nm) at the top of the atmosphere when the Earth at perihelion and aphelion

地球位置	日期	辐射流量/(W·m^{-2})
近日点	1月5日	1.1677×10^{-6}
远日点	7月4日	1.0984×10^{-6}

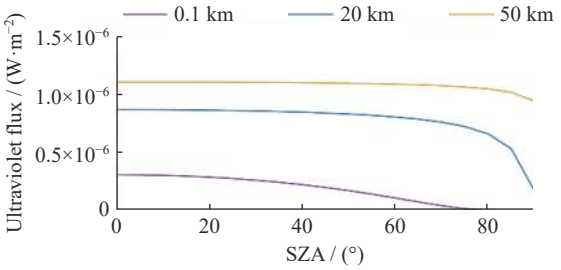

图 4　辐射流量(200～400 nm)随太阳天顶角的变化情况

Fig. 4　Variation of 200～400 nm radiation flux with Solar Zenith Angle (SZA)

点时大气层顶的紫外辐射流量(见表 2),发现近远日点辐射流量在平均日地距离附近波动±3.3%,此结果符合预期[11]。

当观测地位于北半球中纬度地区时,太阳天顶角(SZA)及观测高度是决定大气中辐射强度的主要因素。利用辐射传输模型计算了紫外辐射流量随 SZA 变化的情况,如图 4 所示,发现观测高度越低,受 SZA 的影响越大。在 0.1 km(地面)高度,当 SZA 大于 20°,辐射流量随 SZA 的增大而减小;在 20 km 高度,辐射流量在 SZA 大于 70°时出现明显下降;在 50 km 高度,辐射流量在 SZA 大于 80°时出现明显下降。

不同地区的平流层高度随时间与纬度而变化,影响着不同地区上空的温度、臭氧总量和大气廓线。对于臭氧总量,其影响已体现在卫星探测数据中;对于温度和大气廓线,如图 5 和图 6 所示,文中统一使用了 MODTRAN 提供的北半球中纬度地区夏季典型大气廓线,在模拟实验中这部分影响被去除。

3　结果与讨论

将地外太阳光谱、臭氧总量及分布等数据输入 MODTRAN5 辐射传输模型,其中太阳天顶角依照各

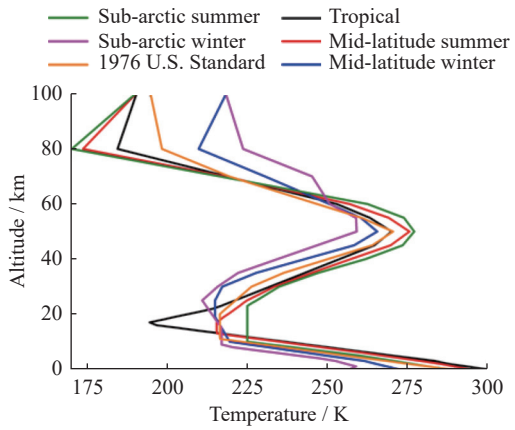

图 5　MODTRAN 大气模型中的温度廓线

Fig. 5　Temperature profiles of the MODTRAN model atmospheres

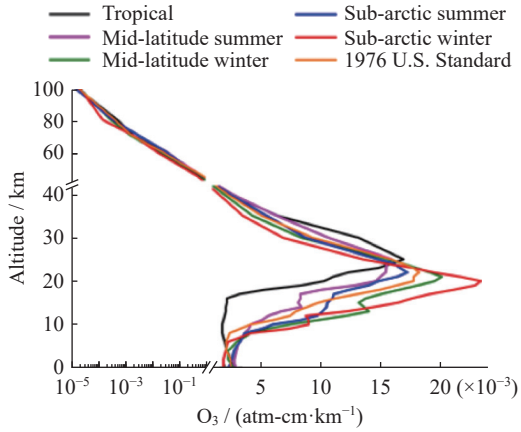

图 6　MODTRAN 大气模型中的臭氧廓线

Fig. 6　MODTRAN model atmosphere profiles for O_3

区域的平均纬度,计算正午最小 SZA 并输入模型中,对三个波段的辐射流量分别进行数值模拟。20 km 以上大气中水气及气溶胶颗粒极其稀少,与温度、压强和地表反照率等参数一起按照默认值设置。

3.1　临近空间紫外辐射垂直分布情况

对 11 个地形区上空的年平均紫外辐射流量进行了模拟,如图 7 所示,发现各区的辐射流量垂直变化趋势较为一致,但在不同波段有显著差别。

在所有高度和波段中,紫外辐射最弱地区为东北平原,最强地区为青藏高原和云贵高原,主要原因是东北平原位于臭氧高值区,青藏高原存在臭氧低值区,而云贵高原纬度较低且靠近赤道,臭氧含量较低。UVC 波段(见图 7a)的辐射流量在 50～40 km 变化较为平缓,自 40 km 开始急剧下降,30 km 以下

几乎被完全吸收；UVB 波段（见图 7b）体现为辐射流量随高度的升高而逐渐增大、各区流量差距逐渐缩小，变化较为平缓且无骤减特征；UVA 波段（见图 7c）在三个波段中的透过率最高，辐射流量最大，20～40 km 辐射流量随高度的增长而增长，40 km 以上增长十分缓慢。

3.2 临近空间紫外辐射时间演变分析

对不同月份 20～50 km 平均紫外辐射流量（200～400 nm）进行了模拟，如图 8 所示，地形地势影响其上空的大气环流与臭氧含量，故每个地形区上空

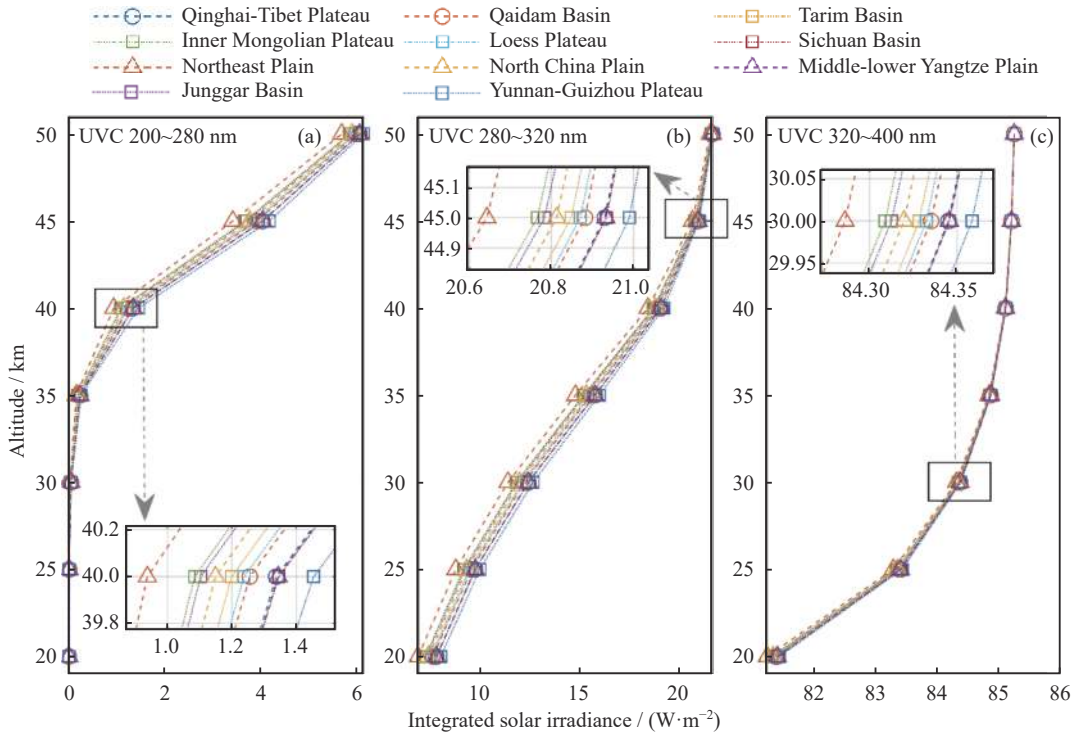

图 7 不同地形区年平均紫外辐射流量随高度变化情况

Fig. 7 Variation of the annual mean ultraviolet flux with altitude in different topographic areas

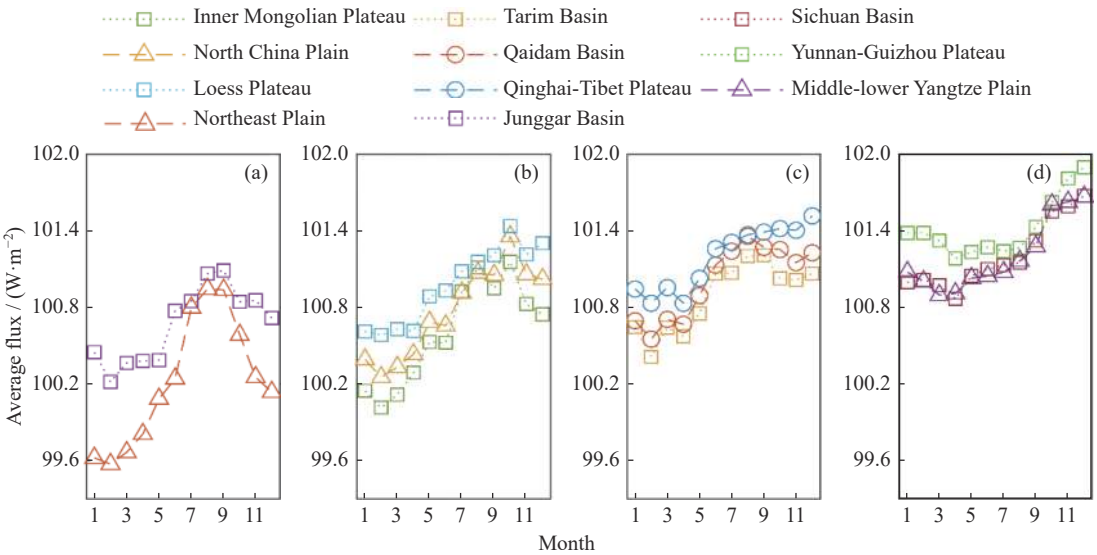

图 8 临近空间（20～50 km）平均紫外辐射流量（200～400 nm）随月份变化情况

Fig. 8 Monthly variation of the mean ultraviolet radiation flux (200～400 nm) in the near space (20～50 km)

的辐射流量随时间变化较为不同,依据其变化特征将11个地形区大致分为以下4类。

(1)东北平原和准噶尔盆地。一东一西,距离较远,但均位于北纬45°左右,紫外辐射流量在2月出现谷值,8—9月出现峰值。

(2)内蒙古高原、黄土高原和华北平原。三者相接,在纬度上位于中部地区,紫外辐射流量在2月出现谷值,其后流量递增且略有波动,10月出现峰值。

(3)青藏高原、柴达木盆地和塔里木盆地。三者相连,位于西部地区,紫外辐射流量在2月和4月出现双谷值,8—10月出现峰值。

(4)四川盆地、云贵高原和长江中下游平原。三者相连,位于东南部地区,紫外辐射流量在4月出现谷值,其后持续增长,最大值出现在12月。

3.3 临近空间紫外辐射年较差分析

年较差反映了临近空间紫外辐射受季节影响的程度,对各地区在20～50 km高度范围内的年较差进行了计算,如图9所示,发现各区年较差随高度变化趋势较为一致,但在不同波段有显著差别。

如图9(a)所示,在UVC波段,青藏高原、塔里木盆地的临近空间紫外辐射流量受季节影响较小,东北平原、华北平原及内蒙古高原受季节影响较大;30 km以下辐射几乎被完全吸收,受季节影响很小,45 km处年较差出现峰值,表示在此高度辐射受季节影响最大。

如图9(b)所示,在UVB波段,青藏高原、云贵高原的临近空间紫外辐射流量受季节影响较小,东北平原、华北平原及内蒙古高原受季节影响较大;20～30 km年较差缓慢增大,35 km以上因为吸收气体逐渐减少,辐射强度受季节的影响逐渐降低。

如图9(c)所示,在UVA波段,云贵高原、青藏高原、长江中下游地区受季节影响最小,东北平原受季节影响最大;此波段的年较差在三个波段中最小,说明辐射强度全年变化不大,随着高度的升高,季节对辐射强度的影响逐渐降低。

4 结论

基于欧洲中尺度预报中心再分析数据,将紫外辐

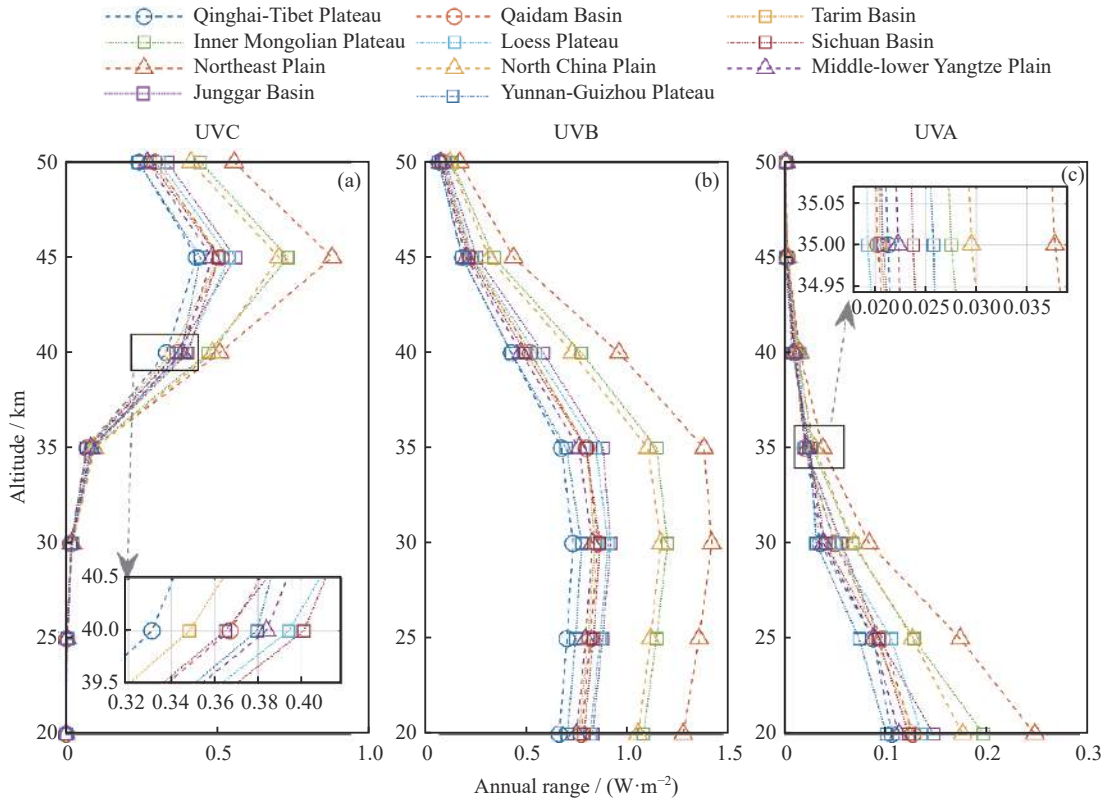

图9 不同地区紫外辐射年较差随高度变化情况

Fig. 9 Annual range of ultraviolet radiation in different regions with different altitude

射分为 UVA、UVB 和 UVC 三个波段进行数值模拟，计算了臭氧含量、太阳天顶角和日地距离等关键因素对辐射强度的影响。在此基础上，确定重要参数并输入 MODTRAN5 辐射传输模型，计算并讨论了中国 11 个主要地形区上空临近空间紫外辐射流量垂直分布和季节演变的异同。

对影响太阳紫外辐射强度的几个关键因素进行定量分析，发现 UVB 和 UVC 波段的透过率与臭氧含量的关系近似指数函数，UVA 波段近似线性函数；大气层顶的紫外辐射流量在一年内的变化主要由日地距离决定，近远日点辐射流量在平均日地距离附近波动±3.3%；紫外辐射流量随太阳天顶角的增大而减小，随观测高度的增大而增大。

对 20～50 km 高度的紫外辐射进行大气辐射传输模拟实验，发现紫外辐射流量随高度和季节而变化，各地区辐射流量垂直分布和年较差垂直分布廓线较为一致，在地理位置上毗邻的地区辐射特性及季节演变比较接近，不同波段之间区别较大。

三个波段的辐射强度差异体现在：UVC 波段辐射强度最低，在 45 km 以下，高度越低，年较差越小，受季节影响越小；UVB 的辐射强度稍高于 UVC，在 30 km 以上高度越高，年较差越小，在 30 km 以下因为臭氧的强吸收作用，辐射强度变化不大，受季节影响较小；UVA 波段透过率最高，辐射强度最大，年较差随高度升高而缓慢减小，说明其处于臭氧吸收窗口区，辐射流量的全年变化较小。

本文初步分析了中国不同地形区上空的临近空间太阳紫外辐射环境，为相关的临近空间探测实验提供数据支撑与理论依据。

参考文献

[1] YANG Bing, YANG Jian, LI Xiaojiang, *et al.* The operating environment of near-space and its effects on the airship[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2008, **25**(6): 555-557 (杨秉, 杨健, 李小将, 等. 临近空间飞艇运行环境及其影响[J]. 航天器环境工程, 2008, **25**(6): 555-557)

[2] CHEN Fenggui, CHEN Guangming, LIU Kehua. Analysis of near space environment and its effect[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2013, **10**(4): 71-75, 85 (陈凤贵, 陈光明, 刘克华. 临近空间环境及其影响分析[J]. 装备环境工程, 2013, **10**(4): 71-75, 85)

[3] GAO X Z, HOU Z X, GUO Z, *et al.* Energy management strategy for solar-powered high-altitude long-endurance aircraft[J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, **70**: 20-30

[4] LI Liliang, GUO Weimin, HE Jiafang. Current situation and development of foreign near space airship[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2008, **27**(2): 32-34, 48 (李利良, 郭伟民, 何家芳. 国外近空间飞艇的现状和发展[J]. 兵工自动化, 2008, **27**(2): 32-34, 48)

[5] WANG Z C, HUANG M, QIAN L L, *et al.* Near-earth space optical observation payload cabin design[J]. *Optik*, 2019, **185**: 138-145

[6] MEI Xiaodong, SUN Jilin, LI Zhengqiang, *et al.* Radiation environment study of near space in China area[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(3): 609-617 (梅笑冬, 孙即霖, 李正强, 等. 中国区临近空间太阳辐射环境研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, **36**(3): 609-617)

[7] BERK A, CONFORTI P, KENNETT R, *et al.* MODTRAN6: a major upgrade of the MODTRAN radiative transfer code[C]//Proceedings of SPIE, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XX. Baltimore: SPIE, 2014: 90880 H

[8] BERK A, CONFORTI P, HAWES F. An accelerated line-by-line option for MODTRAN combining on-the-fly generation of line center absorption within 0.1 cm-1 bins and pre-computed line tails[C]//Proceedings of SPIE, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XXI. Baltimore: SPIE, 2015: 947217

[9] CHANCE K, KURUCZ R L. An improved high-resolution solar reference spectrum for Earth's atmosphere measurements in the ultraviolet, visible, and near infrared[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2010, **111**(9): 1289-1295

[10] ANDREWS D G. An Introduction to Atmospheric Physics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010

[11] YANG Dongjun, FANG Wei, QIU Hong, *et al.* On-orbit data calibration of FY-3A solar irradiance monitor[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2010, **31**(5): 676-681 (杨东军, 方伟, 邱红, 等. 太阳辐射的在轨监测和定标[J]. 发光学报, 2010, **31**(5): 676-681)