中国东部大气温湿廓线特征及其对辐射 收支计算影响的分析*

孙 囡 陈逸伦 傅云飞

SUN Nan CHEN Yilun FU Yunfei

中国科学技术大学地球和空间科学学院,合肥,230026

School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China 2018-05-18 收稿, 2018-09-14 改回.

孙囡,陈逸伦,傅云飞. 2019. 中国东部大气温湿廓线特征及其对辐射收支计算影响的分析. 气象学报, 77(3):563-578 Sun Nan, Chen Yilun, Fu Yunfei. 2019. Characteristics of temperature and humidity profiles in eastern China and their impacts on radiation budget. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(3):563-578

Abstract The balance of the earth-atmosphere radiation budget is one of the decisive factors for climate. Temperature and humidity profiles have important influences on the radiation balance. Based on data collected at 74 sounding stations in eastern China from 1960 to 2008, temperature and absolute humidity profiles from the SBDART (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer) model are compared with that from the sounding stations. Besides, the observed sounding profiles are put into the SBDART model to calculate the effects of temperature and absolute humidity profiles on radiation fluxes under clear sky condition. Results indicate that the atmospheric temperature and absolute humidity profiles have obvious regional and seasonal characteristics. There are significant differences between total downward fluxes at the surface calculated from the SB-DART model and from observations at the sounding stations, especially in the winter in northeastern China and in the summer in central and eastern China and in the winter in southern China. The differences can reach up to $20-35 \text{ W/m}^2$ and the relative errors range from 2.01% to 3.18%. In the winter in northeastern China, in the winter in central and eastern China and in the summer and winter in southern China, the differences between total upward fluxes calculated from the default profiles in the model and from sounding profiles can reach up to 10-22 W/m² at the top of the atmosphere. And the relative errors range from 3. 67% to 8. 94%. The differences in the radiative heating rate between the model calculation and observations at sounding stations range from 0.03 K/d to 0.29 K/d. Our studies show that regional and seasonal characteristics of temperature and absolute humidity profiles from the SBDART model cannot realistically represent the conditions in eastern China. The establishment of a set of standard atmospheric profiles for eastern China can provide more accurate inputs for the simulation of radiation. Key words Eastern China, Radiation, Temperature and humidity profiles, Climate, Radiative transfer model

摘 要 辐射平衡是气候决定性因素之一,温湿廓线对辐射计算有重要影响。利用中国东部地区 1960—2008 年 74 个探空站 资料,将 SBDART(Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer) 辐射传输模式自带的大气温湿廓线和探空测得的 实际大气温湿廓线进行对比,并代入 SBDART 模式中,分别计算晴空条件下不同温湿廓线对辐射通量的影响。结果表明:(1) 中国东部地区的大气温湿廓线有明显的区域和季节特点;(2)模式地面向下辐射通量与实际相比有较明显差异,尤其是在东 北地区的冬季、中东部地区的夏季和华南地区的冬季,差值达 20—35 W/m²,相对误差达 2.01%—3.18%;(3)在东北地区的 冬季、中东部地区的冬季以及华南地区的夏、冬季,模式计算的大气顶向上辐射通量与实际相比差值达 10—22 W/m²,

^{*} 资助课题:国家重点研发计划项目(2017YFC1501402)、中央高校基本科研业务费专项资金。 作者简介:孙囡,主要从事大气物理学及探测遥感方面的研究。E-mail: nsun1994@mail.ustc.edu.cn 通信作者:傅云飞,主要从事卫星遥感及气候变化的研究。E-mail: fyf@ustc.edu.cn

相对误差可达 3.67%—8.94%;(4)模式与实际辐射加热率的差值在 0.03—0.29 K/d。研究表明,模式自带的大气温湿廓线 区域和季节划分并不够细致,不足以代表中国东部地区各个区域及季节的温湿特点。建立一套中国东部地区的大气标准廓 线可以为辐射模拟提供更准确的输入量。

关键词 中国东部,辐射,大气温湿廓线,气候,辐射传输模式 中图法分类号 P422

1 引 言

地气辐射平衡是气候决定性因素之一。一方 面,地气系统的辐射收支决定了长期的全球平均气 候状态;另一方面,太阳辐射能量和热辐射能量在大 气中的辐散、辐合,形成非绝热冷、热源,造成大气水 平和垂直层结的不稳定(石广玉,2007;卢鹏等, 2015)。发生在气候系统中的各种重要的反馈过程, 例如地面温度反馈、云-辐射相互作用、水汽反馈以 及化学-气候反馈等,均与辐射过程有着密不可分的 联系。此外,大气净辐射可以用来反演温度,为研究 长时间气候变化提供模拟依据。许多学者针对地气 辐射收支展开了研究,比如 Zhang 等(2003)提出相 关*k-*分布,有效地处理了重叠吸收带的辐射计算, 并将这种方法应用到气候模式中的辐射计算。

晴天,太阳辐射在向地面传输的过程中,受到大 气的衰减作用,衰减强、弱影响到达地面的太阳直接 辐射量。地面吸收了太阳短波辐射之后,向外发射 长波辐射,此外大气也会按其自身温度向外发射长 波辐射。长波辐射的强、弱主要取决于地面及其附 近大气的温度。沈钟平等(2009)曾对影响地面太阳 辐射及其谱分布的各种可能因子进行定量分析,试 验表明,水汽对地面近红外辐射的影响较大,而臭氧 对可见和紫外辐射的影响较大。盛裴轩等(2003)研 究表明,臭氧峰值分布在 25 km 高度,它对平流层 辐射加热起重要作用;沈钟平等(2009)认为,气溶胶 对地面太阳辐射的影响仅次于大气的吸收作用。此 外,太阳天顶角和地表反照率都会对地面接受到的 太阳辐射产生影响。在诸多影响地气辐射收支的大 气内部因子和外部因子中,大气温湿廓线对于地气 系统的辐射传输过程起至关重要的作用。根据基尔 霍夫辐射定律,物体的发射辐射取决于自身温度;由 干大气层结效应,气温随高度通常递减,因此不同高 度的大气发射辐射也随着高度的升高发生明显的变 化。

另外,大气中的水汽对辐射传输及地气辐射收

支也有着重要的作用。水汽主要集中在对流层,它 是大气中最活跃的成分,也是大气中唯一能发生固、 液、气三相变化的成分(顾钧禧等,1994;盛裴轩等, 2003;梁宏,2012),这是大气科学的基础。水汽是通 过吸收太阳短波辐射和地面长波辐射,进而影响地 面和大气的温度。Arking(1996)认为,气柱水汽含 量增加 6 mm,水汽对太阳短波辐射的吸收增加 1%; 而 Ramanathan 等(1997) 认为, 气柱水汽含量 增加 3 mm,水汽对太阳短波辐射的吸收才能增加 1%。沈钟平等(2009)研究发现,水汽对地面近红外 辐射的吸收非常强。在保持其他条件不变的情况 下,水汽柱浓度加倍后,到达地表的近红外辐射减少 17.63 W/m^2 ,相应的比例下降 1.67%。尹青等 (2011)认为水汽的变化对华东地区地面太阳总辐射 的长期变化有一定的影响;徐华(2013)认为相对湿 度升高对中国地区的太阳辐射有明显的削弱作用。

目前,温湿廓线的资料来源有再分析资料、卫星 遥感和探空观测 3 种。其中探空观测始于 20 世纪 50 年代后期,历史序列长、区域尺度上观测站点分 布密集、垂直分辨率高(郭艳君等,2008),与其他两 种资料来源相比,不需要后期的资料融合或者数据 反演,因此,没有后期的误差引入,可信度较高。许 多学者利用探空资料对大气温度和湿度做过研究 (陆渝蓉等,1984;王绍武等,1998;王颖等,2005; Free, et al, 2005;翟盘茂等,2006;Sun, et al, 2010; Bohlinger, et al, 2014; 郭艳君等,2014; Chang, et al, 2015,2018)。

辐射数据通常有两种方法获取:地面辐射站的 实地测量和模式计算。相比于地面辐射站的实地测 量,模式计算可以非常方便地控制变量,检验不同参 数对辐射的影响。随着与大气辐射传输有关的应用 需求的增长,目前,已发展了多种大气辐射传输模式 与算法,如Fu-Liou模式(Fu, et al, 1992)等。文中 使用的是 SBDART(Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer)辐射传输模式,它采 用离散坐标法计算发生在紫外线、可见光和红外波 段的所有重要辐射过程,其精度已经得到检验(Ricchiazzi,et al, 1998)。李秀镇等(2016)曾利用该模 式模拟了地面总辐射对输入参数的敏感性,发现在 光学厚度、单次散射反照率、不对称因子、水汽柱含 量和臭氧柱含量这5个参数中,地面总辐射对单次 散射反照率和水汽柱含量的变化最为敏感,当模式 中这2个因子缩小50%时,将分别造成地面总辐射 量增加56.99 W/m² 和减少25.45 W/m²。Michalsky等(2006)使用气溶胶光学参数、水汽和臭氧观 测数据,分别对6类辐射传输模式进行了评估,发现 观测与模拟的直接辐射最大误差可小于1%、散射 辐射误差小于1.9%。上述研究表明,模式模拟与 实际观测还是存在一定的差异,其中,大气水汽垂直 分布可能是造成这些差异的一个重要因素。

中国东部地区气候复杂,大气温湿特点独特,仅 用模式提供的平均中纬度或热带温湿廓线代替实际 大气温湿结构为模式提供输入参量,会造成模拟的 辐射参量偏离实际值。另外,在实际工作中,大气廓 线的实时获取也难以保证。因此,对特定区域需要 有代表性的大气温湿廓线,为辐射传输计算服务。 基于此,文中针对中国东部地区,首先利用探空站的 探空资料,研究了该地区大气温湿廓线的特点,然后 将探空站测得的实际大气温湿廓线和模式大气温湿 廓线进行了对比,找出它们的差异特点,最后将实际 大气的温湿廓线和模式自带温湿廓线作为模式的输 入参量,计算了晴空条件下两种廓线对辐射参量计 算的影响。

2 数据和方法

2.1 中国国家气象信息中心温湿廓线数据

使用的温湿廓线数据是由中国国家气象信息中 心发布的中国高空规定等压面定时值数据集,数据 集版本为 2.1。该数据集经过严格的数据补录和质 量控制,数据有较好的完整性和连续性(熊安元等, 2015)。它提供了中国 142 个高空气象观测站的数 据,其中东部地区的站点较多且分布均匀,选用 1960—2008 年位于东部地区 74 个站点的位势高 度、气压、温度和温度露点差资料(图 1)进行分析。

为了研究气候状况的区域特征,根据中国气候 带分布特征和地势阶梯状分布特征,将中国东部分 为3个区域(图1黑框所示)。自北向南依次是:东 北地区(NC;37°—50°N,110°—130°E)、中东部地区



Black solid dots denote radiosonde stations: black lines show boundaries between subregions)

 $(MEC; 24.5^{\circ}-37^{\circ}N, 105^{\circ}-123^{\circ}E)$ 、华南地区 $(SC; 19^{\circ}-24.5^{\circ}N, 105^{\circ}-120^{\circ}E)$ 。数据时间分辨率为一 日两次 $(00 \ n \ 12 \ rmm{trightarrow}{rmm}$ 。数据在垂直方向从地面至 5 hPa。许多学者曾将这套探空观测资料用于中国高空气候变化的研究(郭艳君等, 2008; 王荣英等, 2010;谢潇等, 2013)。为保证数据在垂直方向上的连续性,采用反距离权重插值方法,对数据 进行了大气垂直方向上的插值处理,将数据插值至 17 个气压层,从低到高依次为 1000、925、850、700、 600、500、400、300、250、200、150、100、70、50、30、20 和 10 hPa。由于在模式中水汽含量的单位为g/m³,因此,实际水汽含量的单位也要转换成g/m³。利用 探空资料中的温度和温度露点差计算出湿度,下文 所述的湿度均为绝对湿度,单位为g/m³。

2.2 模式介绍

SBDART 模式是美国加利福尼亚大学地球系 统计算学院的地球空间研究组开发的平面平行辐射 传输模式,用来计算 0.25—100 µm 的地球大气辐 射传输、研究大气辐射平衡的实用软件。它采用离 散坐标法计算发生在紫外线、可见光和红外波段的 所有重要辐射过程,用于解决晴空和有云情况下地 球的平面平行大气辐射传输的各种问题(Ricchiazzi,et al, 1998)。

SBDART 模式自带 6 种具有代表性的大气廓 线,模拟以下6种代表性大气廓线:热带大气、中纬 度夏季、中纬度冬季、副极地夏季、副极地冬季以及 美国 US62 标准大气。这些标准的大气廓线包含了 标准的温度、气压、绝对湿度和臭氧密度的垂直分 布,广泛地应用于大气科学研究。此外,用户还可以 建立自己的模式大气,通过选取控制参数,由用户自 己定义大气廓线或输入探空数据,以代替程序中的 大气廓线。SBDART 已被广泛应用于辐射能量的 相关研究(Achad, et al, 2013; Obregón, et al, 2015;赵静等, 2017; Chen, et al, 2018; Mao, et al, 2018; Vaquero-Martínez, et al, 2018)。文中改变的 参数是温度和湿度廓线,臭氧等其他廓线数据选取 了模式中的中纬度冬、夏季和热带大气标准廓线,用 模式中纬度冬、夏季的臭氧等廓线替代了东北地区 和中东部地区的探空臭氧廓线,用模式中热带大气 的臭氧等廓线替代了热带地区的探空臭氧廓线。为 便于使用模式定量模拟辐射强迫,所选取的大气顶 高度为 100 km, 在这个高度上, 气压非常低, 达到

10⁻⁴ hPa,水汽含量接近于 0。此外将太阳天顶角统 一设置为 0°,从而保证变量只有温湿廓线,臭氧等 其他廓线以及太阳天顶角等影响辐射的其他因子保 持不变。这样可以更准确地探究温湿廓线对模式辐 射计算的影响。

分别将模式自带的大气温湿廓线和实际探空测 得的大气温湿廓线数据输入模式,利用 SBDART 模式计算晴空条件下地面向下短波辐射通量和大气 顶向上长波辐射通量。地面向下短波辐射主要是太 阳引起的,大气顶向上长波辐射主要是地面和大气 引起的,此外,水汽主要参与了这两个过程,所以要 计算地面向下短波辐射通量和大气顶向上长波辐射 通量。

3 结果分析

3.1 模式温湿廓线及计算得到的相应辐射通量

从模式自带的温度廓线(图 2)来看,在模式中, 热带地区没有区分夏季和冬季。夏季,对流层下部, 热带地区的温度廓线略高于中纬度地区,两者相差 最大处在地表,约为 5.76℃。500—200 hPa 的高 度,两者温度廓线基本一致(图 2a)。在 100 hPa 的 高度处,两者温度相差最大,中纬度地区温度比热带 地区高 20.24℃。此外,夏季,热带地区在 100 hPa 的高度处,随着气压降低,温度由显著降低变为显著 升高,而中纬度地区在 200 hPa 的高度处,随着气压 降低,温度变化速率显著减小。冬季,热带和中纬度 的温度廓线的差异远大于夏季,差异最大值出现在 近地表和对流层上部,在近地表热带的温度比中纬 度高 27.61℃,在 100 hPa 的高度处,热带的温度比 中纬度低 20.92℃。此外,中纬度地区在 300 hPa 的高度处,随着气压降低,温度变化速率显著减小。

从模式自带的湿度廓线(图 3)来看,夏季中纬 度和热带地区湿度廓线差异较小,冬季较大。夏季 的 250 hPa 以上高度,中纬度和热带地区湿度廓线 基本重合,这一高度以下,两者的差异逐渐显现。 500 hPa 至近地面的高度两者差异增大,最大差异 出现在近地面,可达 4.84 g/m³,总体上该图表明大 气湿度在热带高于中纬度,符合已有的常识,但实际 上不同地点其差异应该有所不同;冬季 150 hPa 以 上高度,中纬度和热带地区湿度廓线基本吻合,此高 度至近地面两者差异逐渐增大,差异最大值也出现 在近地面,为 14.95 g/m³ 左右。此外,中纬度湿度 廓线在 300—200 hPa,存在一很薄的近似等湿度 层,估计是模式设计者设计的中纬度冬季对流层顶 的高度,这与图 2b 中的中纬度温度廓线的变化转折 高度基本一致。

此外,热带与中纬度湿度廓线的差异是冬季大

夏季小,这是由于夏季热带与中纬度的气团性质相 对差异小的缘故,而冬季中高纬度时常受到极区冷 空气活动的影响,因此,中纬度大气与热带大气湿度 差异大。

从利用模式自带的温湿廓线计算出的地面向下





(a. 夏季,b. 冬季)

Fig. 2 Mean temperature profiles from the SBDART model in the middle latitudes and the tropics (a. summer, b. winter)



图 3 SBDART 模式的中纬度和热带地区的平均湿度廓线 (a. 夏季,b. 冬季)



(a. summer, b. winter)

辐射通量(图 4)来看,中纬度和热带地区的地面向 下辐射通量具有相同的吸收峰,从 1.1—1.2 μm 吸 收峰可以看出,中纬度和热带地区辐射差异夏季较 小,冬季较大,且中纬度地区的地面向下辐射通量大 于热带地区。从利用模式自带的温湿廓线计算出的 大气顶向上辐射光谱(图 5)来看,中纬度和热带地 区辐射通量差异夏季较小,冬季较大,且热带的辐射 通量大于中纬度地区。



(a. 夏季,b. 冬季)

Fig. 4 Total downward fluxes at the surface calculated from the SBDART model (a. summer, b. winter)





Fig. 5 Total upward fluxes at the top of the atmosphere calculated from the SBDART model (a. summer, b. winter)

3.2 大气温湿廓线特征

分别对 1960—2008 年中国东部地区 3 个区域 探空站的各层气温求算术平均和标准差,得到各区 域各层夏、冬季平均温度廓线。图 6 为 SBDART 模 式自带温度廓线和利用探空数据计算的中国东部平 均温度廓线,其中图 6a、c 中 SBDART 模式大气廓 线为中纬度夏季,图 6b、d 中 SBDART 模式大气廓 线为中纬度冬季;SBDART 模式热带温度廓线只有 一条,没有区分夏季和冬季,因此,图 6e、f 中的 SB- DART 模式大气廓线是一样的。

从图 6 可以看出,各区域大气实际温度廓线总 体趋势一致,但各个区域的各季节有自己的特点。 从近地面到 100 hPa 的高度,各个区域的大气廓线 大都呈现出温度随着气压的降低而下降,在100 hPa 的高度处,温度变化率为 0,达到最低值,100— 10 hPa,温度随着气压的降低而递升。夏季(图 6a、 c、e),对流层(1000—100 hPa)气温随高度递减;平 均最低温度出现在对流层顶部(100 hPa),东北地区



最低温度为一59℃,这与王荣英等(2010)研究结果 一致。中东部地区约为一70℃,华南地区约为 -75 °C;100—20 hPa, 气温随气压的降低而递升。 东北地区冬季(图 6b)与夏季(图 6a)相比,地表的冬 季温度(-11.14℃)显著低于夏季温度(22.19℃), 相差 33.33℃;对流层冬季和夏季两个季节温度出 现最低值的气压层不同,夏季出现在 100 hPa,最低 温度为-56.47℃,而冬季出现在 250 hPa,最低温 度为-55.20℃,且冬季 250-100 hPa,温度变化幅 度很小,不超过 2℃。中东部地区冬季(图 6d)与夏 季(图 6c)相比,近地面冬季温度明显低于夏季,冬 季温度为 4.37℃,夏季温度为 25.46℃。100 hPa冬 季温度为-66.67℃,夏季温度为-71.55℃。此外, 对流层(1000-100 hPa)冬季温度递减率明显低于 夏季温度递减率。华南地区冬季(图 6f)与夏季(图 6e)相比,近地面至 700 hPa,夏季温度递减率明显 高于冬季。

从模式和实际温度的差值廓线(图 7)可以看 出,大气实际温度廓线与模式温度廓线总体变化趋 势一致,但在部分区域的部分高度出现了较明显的 差异。对流层的下部,华南地区和东北地区冬季,实 际温度廓线明显低于模式温度廓线,差距最大的地 方出现在近地面,分别达到了 13.11 和 9.68℃;中 东部地区夏季和冬季,实际温度高于模式温度,差距 分别为 5.07 和 5.82 $^{\circ}$ 。对流层顶部(100 hPa),中 东部地区的实际温度明显低于模式温度,最大值达 14.40 $^{\circ}$ 。平流层下部(30—10 hPa 高度处),除了 东北地区冬季和中东部地区冬季的实际温度高于模 式温度之外,其余地区的实际温度都显著低于模式 温度,最大差值可达 12.08 $^{\circ}$ 。

此外,各高度层的温度标准差均较小,说明这套 探空温度廓线资料与模式自带的温度廓线相比是有 效的,可以用来代表东部地区。

图 8 为利用 SBDART 模式自带湿度廓线与 1960—2008 年探空资料计算的中国东部平均湿度 廓线分布。图 9 为模式与实际湿度廓线的差值,从 图 8、9 可以看出,大气实际湿度廓线与模式湿度廓 线有较明显差异。近地面至 850 hPa 高度,夏季的 模式和实际湿度廓线的差异明显小于冬季。夏季, 东北地区、华南地区的模式和实际湿度廓线基本吻 合;中东部地区的实际湿度廓线明显大于模式湿度 廓线,差值为 4.35—5.43 g/m³。冬季,东北地区、 华南地区的模式湿度廓线明显大于实际湿度廓线, 东北地区的差值为 1.23—1.98 g/m³,华南地区的 差值为 4.08—9.35 g/m³,而中东部地区的湿度廓 线小于实际湿度廓线,差值为 0.99—1.40 g/m³。





Fig. 7 Profiles of differences between temperature from the SBDART model and

from observations at radiosonde stations

(a. summer, b. winter; northeastern China, NC; central and eastern China, MEC; southern China, SC)





Fig. 9 Profiles of differences between absolute humidity from the SBDART model and from radiosonde stations observations

(a. summer, b. winter; northeastern China, NC; central and eastern China, MEC; southern China, SC)

850—500 hPa,东北地区的夏季、中东部地区的 冬季和夏季、华南地区的夏季,实际湿度廓线大于模 式湿度廓线。差值为 0.17—3.02 g/m³;东北地区 的冬季、华南地区的冬季,实际湿度廓线小于模式湿 度廓线,差值为 0.15—0.98 g/m³。

3.3 大气温湿廓线对辐射的影响

3.3.1 大气温湿廓线对地面向下和大气顶向上辐射通量的影响

从中国东部实际地面向下辐射光谱和模式辐射 光谱分布(图 10)结合辐射光谱积分差值(表 1)可以 看出,各区域的地面向下辐射光谱分布较一致,具有 相同的吸收带。其中在 1.1—1.2 μ m,实际廓线与 模式廓线计算的辐射有明显差异。选取这个波段进 行放大分析可以看出,实际大气辐射通量与模式辐 射通量存在明显的差异,冬季实际辐射值与模式辐 射通量存在明显的差异,冬季实际辐射值与模式辐 射通量存在明显的差异,冬季实际辐射值与模式辐 射光谱基本吻合,辐射光谱积分差异只有 1.3 W/m², 相对误差 0.12%,这是由于在对流层中下部,模式 与实际湿度廓线基本一致(图 8a),水汽对太阳辐射 的吸收程度也相近;冬季,模式辐射量小于实际辐射 量,且两者差异较大,辐射差值达-33.70 W/m²,相 对误差 2.95%(表 1),这是由于在对流层中下部模 式湿度大于实际湿度,且差异较大,太阳在向地面辐 射的过程中,水汽越多,对太阳辐射的吸收程度越 大,到达地面的太阳辐射越少。在中东部地区,夏季 和冬季,模式与实际辐射通量有较明显差异,且为模 式辐射通量大于实际辐射通量,辐射差值分别为 20.8 和 7.8 W/m²,相对误差分别为 2.01% 和 0.71%(表 1)。华南地区夏季,模式辐射通量略大 于实际辐射通量,辐射差值为11.2 W/m²,相对误差 1.09%(表 1);冬季,模式辐射通量小于实际辐射通 量,且差异较大,辐射差值为-34.2 W/m²,相对误 差 3.18%(表 1),原因同东北部地区的冬季。

此外,还将国际上比较通用的全球 42 种大气廓 线 (Garand, et al, 2001)代入模式中,计算出地面向 下辐射通量与中国东部地区进行比较,找到了接近 中国东部的廓线(表1最后两列数据)。与东北地区 夏季相比,42 种大气廓线的相对误差范围为 0.35%—12.49%,与东北夏季最接近的是第 24 条 廓线,比 SBDART 模式廓线与东北夏季廓线的相 对误差大 0.24%。与东北地区冬季最接近的是第 10 条廓线,相对误差是 0.18%,比 SBDART 模式与 实际廓线的误差小 2.77%。42 条大气廓线与其他 几个区域的廓线的相对误差均小于 SBDART 模式 与实际廓线的相对误差,其中分别与中东部夏、冬季 最接近的大气廓线是第 18 和第 3 条,相对误差分别 为 0.35%和 0.24%。分别与华南地区夏、冬季最接近的大气廓线是第 25 和第 14 条,相对误差分别为 0.06%和 0.07%。

总体来看,利用模式温湿廓线计算的地面向下 辐射通量与利用探空数据计算出的结果有较明显差 异,尤其是在东北地区的冬季、中东部地区的夏季和 华南地区的冬季,差值达 20—35 W/m²。说明模式 廓线反演的辐射通量与实际廓线反演的辐射通量相 差较大。此外,从地面向下辐射通量的计算结果来 看,可以从全球 42 种大气廓线中找到与中国东部比 较吻合的廓线,能够一定程度地代表中国东部的温 湿廓线。

从中国东部实际大气顶向上辐射通量和模式辐射通量(图 11)结合辐射光谱积分差值(表 2)可以看出,各区域光谱分布形态比较一致,吸收带也比较相近。冬季,大气顶向上实际辐射通量与模式辐射通



Fig. 10 Total downward fluxes at the surface calculated from the model (blue solid lines) and from sounding stations observations (red dotted lines) in eastern China

(a, b. northeastern China, c, d. central and eastern China, e, f. southern China; a, c, e. summer, b, d, f. winter. The small panels in the right of individual plots are enlarged figures of irradiance in the $1.1-1.2 \mu m$ band)

表 1 中国东部地区利用模式标准廓线及全球 42 种大气廓线计算的 0.25—3 μm 地面向下辐射通量与实际辐射通量差值(太阳天顶角设置为 0°)

Table 1 Differences between total downward fluxes in the 0.25-3 μ m band at the surface calculated from the default profiles in the model, from the ensemble of 42 diverse profiles and from sounding stations

	辐射通量(W/m ²)		SBDART 辐射通量 差值(W/m ²)		SBDART 辐射通量 相对误差(%)		42 种廓线辐射通量 相对误差(%)	
	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季
东北地区	1054.5	1141.1	1.3	-33.7	0.12	2.95	0.35 (24)	0.18(10)
中东部地区	1035.0	1099.6	20.8	7.8	2.01	0.71	0.35 (18)	0.24 (3)
华南地区	1029.5	1074.9	11.2	-34.2	1.09	3.18	0.06 (25)	0.07 (14)

observations in eastern China (The solar zenith angle is set to 0°)

注:差值表示模式的值减去实际区域的值;最后两列数据括号里的数值为全球 42 种大气廓线与实际区域相比误差最小的廓线标号。



Fig. 11 Total upward fluxes at the top of the atmosphere calculated from the model (red dotted lines) and from sounding stations observations (blue solid lines) in eastern China

(a, b. northeastern China, c, d. central and eastern China, e, f. southern China; a, c, e. summer, b, d, f. winter)

量的差异明显大干夏季:东北地区夏季,模式与实际 辐射通量基本吻合,辐射光谱积分仅相差 5.09 W/m^2 ,相对误差 1.82%(图 11a)。长波辐射 主要是由对流层中下层的大气温度决定的,东北地 区夏季的对流层中下部的模式与实际温度廓线基本 吻合,模式与实际长波辐射通量也基本吻合;冬季,模 式大于实际辐射通量,光谱积分差值为 19.3 W/m^2 , 相对误差 8.94%(图 11b),这是由于在对流层下部, 模式温度明显高干实际温度,温度越高,地表及大气 射出的长波辐射越强,因而用模式温湿廓线计算出 的长波辐射值高于用实际温湿廓线计算的长波辐射 值。中东部地区夏季,模式与实际辐射通量吻合 (图 11c);冬季,模式小于实际辐射通量,且差值较 大,积分差值为-12.12 W/m²,相对误差4.90%(图 11d)。在华南地区,夏季,模式大于实际辐射通 量,积分差值为 10.39 W/m^2 ,相对误差 3.67% (图 11e);冬季,模式与实际辐射通量差异较大,差 值为 21.36 W/m^2 ,相对误差 7.84%(图 11f),这是 由于在华南地区的冬季,1000-500 hPa 的高度,各 气压层的实际温度明显低于模式温度,温度越低,地 面和大气的辐射强度越弱,从而大气顶接收的长波 辐射量就越小。

此外,将目前国际上比较常用的42条大气廓线 代入模式计算出大气顶向上辐射通量,与东部地区 进行比较,找到与东部地区相对误差最小的廓线(表 2 最后两列数据)。总体来说,42 条廓线与东部地区 相比,相对误差的变化范围颇大,最大误差为 30%—50%。但最接近东部地区的廓线与东部地区 的相对误差很小,在 0.24%—1.44%(表 2),与中东 部地区夏季最接近的是第 20 条廓线,其与中东部地 区的相对误差为 1.44%,比 SBDART 模式廓线与 中东部夏季廓线的相对误差大 0.42%。对于东北 地区夏、冬季来说,最接近的42条大气廓线分别是 第 27、37条,相对误差分别为 0.88%、0.40%,均小 于 SBDART 模式与东北地区的相对误差。与中东 部地区冬季、华南地区夏、冬季最接近的42种大气 **廓线分别是第**13、20、2条,相对误差分别是0.24%、 0.98%, 0.65%.

表 2 中国东部地区利用模式标准廓线及全球 42 种大气廓线计算的 0.25—25 μm 大气 顶向上辐射通量与实际辐射通量差值(太阳天顶角设置为 0°)

	at s	ounding stati	ons in easter	n China (The	solar zenith ang	gle is set to 0)	
	辐射通量(W/m ²)		SBDART 辐射通量 差值(W/m ²)		SBDART 辐射通量 相对误差(%)		42 种廓线辐射通量 相对误差(%)	
	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季
东北地区	279.89	215.79	5.09	19.30	1.82	8.94	0.88(27)	0.40(37)
中东部地区	282.11	247.21	2.87	-12.12	1.02	4.90	1.44(20)	0.24(13)
华南地区	283.38	272.41	10.39	21.36	3.67	7.84	0.98(20)	0.65(2)

Table 2 Differences between total upward fluxes in the 0. $25-25 \ \mu m$ band calculated from the default profiles in the model, from ensemble of 42 diverse profiles and from observed profiles

注:差值表示模式的值减去实际区域的值;最后两列数据括号里的数值为全球42种大气廓线与实际区域相比误差最小的廓线标号。

总体来看,利用模式温湿廓线计算的大气顶向 上辐射通量与利用探空数据计算出的结果有较明显 差异,尤其是在东北地区的冬季、中东部地区的冬季 以及华南地区的夏、冬季,差值达 10—22 W/m²。 如果使用模式自带的温湿廓线替代东部地区的温湿 廓线,将会对辐射计算结果造成 1.02%—8.94%的 误差。此外,全球 42 条大气廓线中的部分廓线与中 国东部地区的相对误差较小,在没有办法获取探空 数据的情况下,可以从全球 42 条大气廓线中选取特 定的廓线,一定程度上可以反映中国东部地区的大 气温湿情况。

3.3.2 大气温湿廓线对地面、大气顶净辐射通量和 大气辐射加热率的影响

为进一步分析大气温湿廓线对大气辐射加热率 的影响,计算了地表、大气顶的净辐射通量和辐射加 热(冷却)率(表 3)。从表 3 可以看出,对于地表净 辐射通量,东北地区的夏、冬季和中东部地区的冬 季,模式与实际的净辐射通量差值较小,为 0.57— 4.36 W/m²。中东部地区的夏季和华南地区的夏、 冬季,模式与实际的净辐射通量差值很大,为 12.37—17.84 W/m²,其中,华南地区的冬季,模式 比实际值大,剩下两个区域的夏季,模式均比实际值

表 3 中国东部地区地面净辐射通量、大气顶净辐射通量和辐射加热(冷却)率 与模式的差值(太阳天顶角设置为 0°)

Table 3 Differences in surface net radiation flux, zenith net radiation flux and radiative heating rate between observations and model calculations in eastern China (The solar zenith angle is set to 0°)

	地表净辐射差值(W/m ²)		大气顶净辐射差值(W/m ²)		辐射加热率差值(K/d)	
	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季
东北地区	-0.57	-3.73	-4.43	-18.58	-0.03	-0.13
中东部地区	-17.84	4.36	-2.27	12.80	0.13	0.07
华南地区	-14.70	12.37	-9.77	-20.89	0.04	-0.29

注:差值表示模式的值减去实际区域的值;净辐射通量=向上辐射通量↓-向下辐射通量桻。

小;对于大气顶净辐射来说,东北地区的夏季和中东 部地区的夏季,模式与实际的差值较少,为 2.27— 4.43 W/m²,对于剩下几个区域,模式和实际的差值 很大,为 9.77—20.89 W/m²,其中,中东部地区的 冬季模式值大于实际值,剩下的几个区域均为模式 值小于实际值。

对于大气辐射加热率来说,利用模式标准廓线 与实际探空廓线计算的辐射加热率的差值为0.03— 0.29 K/d,其中,差值较大的为华南地区的冬季 (0.29 K/d),中东部地区的夏季(0.13 K/d)和东北 地区的冬季(0.13 K/d)。王宏等(2007)利用辐射 传输模式,分别计算了沙尘气溶胶对沙漠和海洋大 气的辐射加热(冷却)率,研究表明,沙尘层对应的净 辐射加热率分别为 2.8 和 0.4 K/d。文中计算的模 式与实际辐射加热率的差值,占沙漠气溶胶对沙漠 的辐射加热率的 1.1%—10.6%,占对海洋大气的 辐射加热率的 7.5%-72.5%。由此可见,由于模 式廓线与实际廓线不一样,计算的净辐射加热率的 差值,最大可以达到气溶胶对海洋大气辐射加热率 的 72.5%,这说明在进行辐射计算的时候,除了要 考虑气溶胶的影响,还要考虑模式温湿廓线与实际 廓线的差异,补充一套东部地区的温湿廓线是非常 必要的。

4 结 论

将中国东部分为东北部地区、中东部地区和华 南地区 3 个区域,研究了这 3 个区域夏季和冬季的 温湿廓线特点,并将实际温湿廓线和模式自带的温 湿廓线进行对比。利用 SBDART 辐射传输模式, 分别计算出晴空条件下两种温湿廓线地面向下辐射 量和大气顶向上辐射量,并进行对比,主要结论如 下。

(1) 中国东部地区的大气温湿廓线有明显的区

域和季节特点,探空测得的温度廓线与模式温度廓 线相比有较明显的差异。在对流层的下部,模式温 度廓线与实际温度廓线相差较大,其中华南地区的 冬季和东北地区的冬季,实际温度比模式温度低,在 地表两者差值最大,分别达到 13.11 和 9.68℃。在 对流层顶部(100 hPa),中东部地区的实际温度明显 低于模式温度,最大差值达到 14.40℃。在平流层 下部(30-10 hPa 高度处),除了东北地区冬季和中 东部地区冬季的实际温度高于模式温度之外,其余 地区的实际温度都显著低于模式温度,最大差值可 达12.08℃。此外各高度层的温度标准差均较小, 说明这套探空温度廓线资料与模式自带的温度廓线 相比是有效的,可以用来代表东部地区。探空测得 的湿度廓线与模式湿度廓线相比,近地面至850 hPa 的高度,夏季的模式和实际湿度廓线的差异明显小 于冬季。夏季,中东部地区的实际湿度廓线明显大 于模式湿度廓线,差值为4.35-5.43 g/m³。冬季, 东北地区、华南地区的模式湿度廓线明显大于实际 湿度廓线,华南地区的差值达 4.08—9.35 g/m³,而 中东部地区的湿度廓线小于实际湿度廓线,差值为 0.99—1.40 g/m³。850—500 hPa,实际湿度廓线与 模式 湿 度 廓 线 的 差 值 为 0. 15—3. 02 g/m³。 500 hPa 以上水汽含量很少,实际湿度廓线和模式 湿度廓线数值差异也很小,为 10^{-5} —0.59 g/m³。

(2) 利用模式温湿廓线计算的地面向下辐射通 量和大气顶向上辐射通量与利用探空数据计算出的 结果有较明显差异。就地面向下辐射而言,1.1- $1.2 \mu m$,实际廓线与模式廓线计算的地面向下辐射 通量有明显差异。东北地区冬季,模式辐射量小于 实际辐射量,差值达 -33.70 W/m^2 ,相对误差 2.95%。中东部地区的夏季,模式与实际辐射差值 达 20.8 W/m²,相对误差2.01%。华南地区冬季, 模式辐射与实际辐射差值达 -34.2 W/m^2 ,相对误 差 3.18%。中国东部地区的 3 个区域有明显的区 域和季节特点,而模式自带的大气温湿廓线区域和 季节划分并不够细致,不足以代表东部地区各个区 域及季节的温湿特点。

就大气顶向上辐射而言,实际廓线与模式廓线 计算出的大气顶向上辐射通量有明显差异,且冬季 的差异比夏季大。尤其是在东北地区的冬季、中东 部地区的冬季以及华南地区的夏、冬季,差值达 $10-22 \text{ W/m}^2$ 。如果使用模式自带的温湿廓线替代 东部地区的温湿廓线,将会对大气顶向上长波辐射 计算结果造成1.02%—8.94%的误差。此外,冬季 模式辐射通量与实际辐射通量的差异明显大于夏 季,冬季的差值为-12.12-21.36 W/m²,相对误差 为 4.90%—8.94%,夏季的差值为 2.87—10.39 W/m²,相对误差为 1.02%—3.67%。

从地面向下辐射通量和大气顶向上辐射通量的 计算结果来看,全球 42 种大气廓线中的部分廓线与 中国东部探空廓线的相对误差较小,可以一定程度 反映中国东部的大气温湿情况。

就地面、大气顶净辐射通量而言,利用模式标准 廓线与实际探空廓线计算的净辐射差值还是比较明 显的。对于地表净辐射,中东部地区的夏季和华南 地区的夏季,利用模式标准廓线和探空廓线计算的 净辐射差值达到 15 W/m² 左右,而对于大气顶净辐 射,东北地区的冬季和华南地区的冬季,利用模式廓 线计算出的净辐射量比利用实际探空廓线计算的净 辐射量小 20 W/m² 左右。大气对辐射的加热率差 异也是很明显的,模式大气与实际探空廓线的辐射 加热率的差值为 0.03—0.29 K/d,最大出现在华南 地区的冬季,利用模式大气计算的辐射加热率明显 小于利用探空廓线计算得出的辐射加热率。说明模 式廓线与实际廓线的差别将对大气辐射加热率造成 不小的影响,补充一套东部地区的温湿廓线非常有 必要。

致 谢:感谢中国国家气象信息中心提供的探空资料。

参考文献

- 顾钧禧,章基嘉,巢纪平等. 1994. 大气科学辞典. 北京:北京气象 出版社,980pp. GuJX, ZhangJJ, ChaoJP, et al. 1994. Atmospheric Science Dictionary. Beijing: China Meteorological Press,980pp (in Chinese)
- 郭艳君,丁一汇. 2008. 近 50 年我国探空温度序列均一化及变化趋势. 应用气象学报,19(6): 646-654. Guo Y J, Ding Y H.

2008. Homogeneity and long-term trend analysis on radiosonde temperature time series in China during recent 50 years. J Appl Meteor Sci, 19(6): 646-654 (in Chinese)

- 郭艳君, 丁一汇. 2014. 1958—2005 年中国高空大气比湿变化. 大 气科学, 38(1): 1-12. Guo Y J, Ding Y H. 2014. Upper-air specific humidity change over China during 1958—2005. Atmos Sci, 38(1): 1-12 (in Chinese)
- 李秀镇,盛立芳,刘骞等. 2016. 基于 SBDART 辐射传输模式的晴 天地面总辐射模拟误差分析. 中国海洋大学学报,46(8): 13-18. Li X Z, Sheng L F, Liu Q, et al. 2016. Error in calculation of surface radiation based on SBDART radiative transfer model. Periodical Ocean Univ China, 46(8): 13-18 (in Chinese)
- 梁宏. 2012. 青藏高原大气水汽变化和对辐射影响的模拟[D]. 北 京:中国气象科学研究院, 171pp. Liang H. 2012. Variation of the atmospheric water vapor and its radiative effect simulations over the Tibetan Plateau[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 171pp (in Chinese)
- 卢鹏,张华,荆现文等. 2015. 长波区间太阳辐射对气候模拟的影响. 大气科学学报, 38(2): 175-183. Lu P, Zhang H, Jing X W, et al. 2015. Effect of solar radiation in longwave region on climate simulations. Trans Atmos Sci, 38(2): 175-183 (in Chinese)
- 陆渝蓉,高国栋. 1984. 我国大气中平均水汽含量与水分平衡的特征. 气象学报,42(3): 301-310. Lu Y R, Gao G D. 1984. The water vapour content and the water budget in the atmosphere over China. Acta Meteor Sinica, 42(3): 301-310 (in Chinese)
- 沈钟平,张华. 2009. 影响地面太阳辐射及其谱分布的因子分析.
 太阳能学报,30(10): 1389-1395. Shen Z P, Zhang H. 2009.
 Analysis on the factors affecting surface solar radiation and its spectral distribution. Acta Energ Sol Sinica, 30(10): 1389-1395 (in Chinese)
- 盛裴轩,毛节泰,李建国等. 2003. 大气物理学. 北京:北京大学出版社,551pp. Sheng P X, Mao J T, Li J G, et al. 2003. Atmospheric Physics. Beijing: Peking University Press,551pp (in Chinese)
- 石广玉. 2007. 大气辐射学. 北京:科学出版社,402pp. Shi G Y. 2007. Atmospheric Radiation. Beijing: Science Press, 402pp (in Chinese)
- 王宏,石广玉,王标等. 2007. 中国沙漠沙尘气溶胶对沙漠源区及 北太平洋地区大气辐射加热的影响.大气科学,31(3):515-526. Wang H, Shi G Y, Wang B, et al. 2007. The impacts of dust aerosol from Deserts of China on the radiative heating rate over desert sources and the north Pacific Region. Atmos Sci, 31 (3): 515-526 (in Chinese)
- 王荣英,周顺武,吴萍等. 2010. 近 30 a 华北地区高空气温时空演 变特征. 气象与环境科学, 33(4): 31-37. Wang R Y, Zhou S W, Wu P, et al. 2010. Temporal and spatial characteristic about upper temperature over the last 30 Years in North China. Meteor Environ Sci, 33(4): 31-37 (in Chinese)
- 王绍武,叶瑾琳,龚道溢等. 1998. 近百年中国年气温序列的建立. 应用气象学报,9(4): 392-401. Wang S W, Ye J L, Gong D Y, et al. 1998. Construction of mean annual temperature series

for the last one hundred years in China. Quart J Appl Meteor, 9 (4): 392-401 (in Chinese)

- 王颖,任国玉. 2005. 中国高空温度变化初步分析. 气候与环境研 究,10(4): 780-790. Wang Y, Ren G Y. 2005. Change in free atmospheric temperature over China during 1961-2004. Climatic Environ Res, 10(4): 780-790 (in Chinese)
- 谢潇, 祁莉, 何金海. 2013. 1980—2009 年中国东部上空温度变化 特征. 气候变化研究进展, 9(2): 102-109. Xie X, Qi L, He J H. 2013. An analysis on upper-air temperature over eastern China during 1980—2009. Adv Climate Change Res, 9(2): 102-109 (in Chinese)
- 熊安元,阮新,廖捷等. 2015. 中国地面和高空气候变化数据产品 研发技术. 北京: 气象出版社,17-34. Xiong A Y, Ruan X, Liao J, et al. 2015. Technology for the Development of Ground and High Altitude Climate Change Data Product in China. Beijing: China Meteorological Press, 17-34 (in Chinese)
- 徐华. 2013. 中国太阳辐射区域影响因子研究[D]. 青岛:中国海洋 大学, 61pp. Xu H. 2013. The study of impact factors of solar radiation in particular areas of China[D]. Qingdao: Ocean University of China, 61pp (in Chinese)
- 尹青,张华,何金海. 2011. 近 48 年华东地区地面太阳总辐射变化
 特征和影响因子分析. 大气与环境光学学报,6(1): 37-46. Yin
 Q, Zhang H, He J H. 2011. Long-term change of surface total solar radiation and influencing factors over east China in recent
 48 years. J Atmos Environ Opt, 6(1): 37-46 (in Chinese)
- 翟盘茂,郭艳君. 2006. 高空大气温度变化研究. 气候变化研究进展, 2(5): 228-232. Zhai P M, Guo Y J. 2006. A study of upper air temperature change. Adv Climate Change Res, 2(5): 228-232 (in Chinese)
- 赵静, 阎广建, 焦中虎等. 2017. SBDART 的参数化短波辐射传输 模型. 遥感学报, 21(6): 853-863. Zhao J, Yan G J, Jiao Z H, et al. 2017. Enhanced shortwave radiative transfer model based on SBDART. J Remote Sens, 21(6): 853-863 (in Chinese)
- Achad M, López M L, Palancar G G, et al. 2013. Retrieving the relative contribution of aerosol types from single particle analysis and radiation measurements and calculations: A comparison of two independent approaches. J Aerosol Sci, 64: 11-23
- Arking A. 1996. Absorption of solar energy in the atmosphere: Discrepancy between model and observations. Science, 273(5276): 779-782
- Bohlinger P, Sinnhuber B M, Ruhnke R, et al. 2014. Radiative and dynamical contributions to past and future Arctic stratospheric temperature trends. Atmos Chem Phys, 14(3): 1679-1688
- Chang L, Gao G P, Jin S G, et al. 2015. Calibration and evaluation of precipitable water vapor from MODIS infrared observations at night. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 53(5): 2612-

2620

- Chang L, Guo L X, Feng G P, et al. 2018. Comparison of the Arctic upper-air temperatures from radiosonde and radio occultation observations. Acta Oceanol Sinica, 37(1): 30-39
- Chen Y L, Fu Y F. 2018. Tropical echo-top height for precipitating clouds observed by multiple active instruments aboard satellites. Atmos Res, 199: 54-61
- Free M, Seidel D J. 2005. Causes of differing temperature trends in radiosonde upper air data sets. J Geophys Res, 110 (D7): D07101
- Fu Q, Liou K N. 1992. On the correlated k-distribution method for radiative transfer in nonhomogeneous atmospheres. J Atmos Sci, 49(22): 2139–2156
- Garand L, Turner D S, Larocque M, et al. 2001. Radiance and Jacobian intercomparison of radiative transfer models applied to HIRS and AMSU channels. J Geophys Res, 106(D20): 24017-24031
- Mao Q J, Huang C L, Zhang H X, et al. 2018. Aerosol optical properties and radiative effect under different weather conditions in Harbin, China. Infrared Phys Technol, 89: 304-314
- Michalsky J J, Anderson G P, Barnard J, et al. 2006. Shortwave radiative closure studies for clear skies during the Atmospheric Radiation Measurement 2003 Aerosol Intensive Observation Period. J Geophys Res, 111(D14): D14S90
- Obregón M A, Serrano A, Costa M J, et al. 2015. Validation of libRadtran and SBDART models under different aerosol conditions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 28: 012010
- Ramanathan V, Vogelmann A M. 1997. Greenhouse effect, atmospheric solar absorption and the Earth's radiation budget: From the Arrhenius-Langley era to the 1990s. Ambio, 26(1): 38-46
- Ricchiazzi P, Yang S R, Gautier C, et al. 1998. SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the Earth's atmosphere. Bull Am Meteor Soc, 79 (10): 2101-2114
- Sun B, Reale A, Seidel D J, et al. 2010. Comparing radiosonde and COSMIC atmospheric profile data to quantify differences among radiosonde types and the effects of imperfect collocation on comparison statistics. J Geophys Res, 115(D23): D23104
- Vaquero-Martínez J, Antón M, de Galisteo J P O, et al. 2018. Water vapor radiative effects on short-wave radiation in Spain. Atmos Res, 205: 18-25
- Zhang H, Nakajima T, Shi G Y, et al. 2003. An optimal approach to overlapping bands with correlated k distribution method and its application to radiative calculations. J Geophys Res, 108 (D20): 4641