

ITU-R P.835-7 建议书

(08/2024)

P 系列：无线电波传播

参考大气

前言

无线电通信部门的作用是确保所有无线电通信业务，包括卫星业务，合理、公平、有效和经济地使用无线电频谱，并开展没有频率范围限制的研究，在此基础上通过建议书。

无线电通信部门制定规章制度和政策的职能由世界和区域无线电通信大会以及无线电通信全会完成，并得到各研究组的支持。

知识产权政策（IPR）

国际电联无线电通信部门（ITU-R）的 IPR 政策述于 ITU-R 第 1 号决议所参引的《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC 的通用专利政策》。专利持有人用于提交专利声明和许可声明的表格可从 <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/zh> 获得，在此处也可获取《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC 的通用专利政策实施指南》和 ITU-R 专利信息数据库。

ITU-R建议书系列	
（可同时在以下网址获得： http://www.itu.int/publ/R-REC/zh ）	
系列	标题
BO	卫星传输
BR	用于制作、存档和播放的记录；用于电视的胶片
BS	广播业务（声音）
BT	广播业务（电视）
F	固定业务
M	移动、无线电测定、业余无线电以及相关卫星业务
P	无线电波传播
RA	射电天文
RS	遥感系统
S	卫星固定业务
SA	空间应用和气象
SF	卫星固定和固定业务系统之间频率共用和协调
SM	频谱管理
SNG	卫星新闻采集
TF	时间信号和标准频率发射
V	词汇和相关课题

注：本ITU-R建议书英文版已按ITU-R第1号决议规定的程序批准。

电子出版物
2024年，日内瓦

© 国际电联 2024

版权所有。未经国际电联书面许可，不得以任何手段翻印本出版物的任何部分。

ITU-R P.835-7建议书

参考大气

(1992-1994-1997-1999-2005-2012-2017-2024年)

范围

ITU-R P.835建议书提供了用于计算气体衰减和对地面以及地对空路径产生相关影响的参考大气。

关键字

总压力、气压、温度、水蒸气密度

缩写词/首字母缩略语

ASCII 美国标准信息交换代码
ECMWF 欧洲中期天气预报中心
ERA5 ECMWF第五代再分析产品
a.m.s.l. 高于平均海平面的高度

相关的ITU-R建议书和手册

无线电气象学手册（2013年版）

ITU-R P.528建议书
ITU-R P.530建议书
ITU-R P.618建议书
ITU-R P.619建议书
ITU-R P.676建议书
ITU-R P.836建议书
ITU-R P.1144建议书
ITU-R P.1510建议书
ITU-R P.1511建议书
ITU-R P.1853建议书
ITU-R P.2001建议书
ITU-R P.2041建议书
ITU-R P.2145建议书

注 – 应使用最新修订版的建议书/手册。

符号清单

H 高于平均海平面的位势高度
 Z 高于平均海平面的几何高度

P	总（气压）压力
T	温度
ρ	水蒸气密度
e	水蒸气分压

国际电联无线电通信全会，

考虑到

- a) 需要用于计算地面和地对空路径上各种大气传播参数的参考大气；
- b) 数值天气预报系统在其时间和空间分辨率范围内提供大气参数的年平均和月度垂直分布，

建议

- 1 当需要大气参数的单一全球垂直分布时，应使用附件1中的ITU-R参考大气确定温度、总（大气）压力和水蒸气密度与几何高度的关系；
- 2 当需要作为纬度函数的平均季节数据时，应使用附件2中的季节性参考大气确定温度、总（大气）压力和水蒸气密度与几何高度的关系；
- 3 当需要特定位置的参考数据时，应使用附件3中从数值天气预报推导出的温度、总气压和水蒸气密度与几何高度关系的全球平均分布。

附件1

1 ITU-R参考大气

以下ITU-R参考大气提供了简单的参考总气压、温度和水蒸气密度分布与从平均海平面到平均海平面以上100公里处的几何高度之间的关系。

1.1 温度和压力

ITU-R参考大气的总（大气）压力和温度源自1976年的美国标准大气。1976年美国标准大气是大气温度和总气压的理想化稳态假设垂直分布，基本可代表全年的中纬度条件。大气温度和压力分布以两种高度¹形式定义：1) 从0公里至84.852公里'的位势高度（ H ），和2) 从86公里至100公里的几何高度（ Z ）。1976年美国标准大气采用的位势高度 H （公里）与几何高度 Z （公里）之间的转换公式为：

$$H = \frac{6\,356.766Z}{6\,356.766 + Z} \quad (1a)$$

和

¹ 公里'是位势高度的单位，公里是几何高度的单位。

$$Z = \frac{6\,356.766H}{6\,356.766 - H} \quad (1b)$$

其中，84.852公里'的位势高度对应86公里的几何高度。由于各种P系列建议书（例如ITU-R P.676建议书附件1）使用几何高度，因此可通过将几何高度 Z 转换为对应的位势高度 H ，并计算对应位势高度 H 处的温度和压力，来计算几何高度为 $Z \leq 86$ 公里处的温度和压力。

在第一高度方案中，位势高度公里'处的温度 T （K）为：

$$T(H) = 288.15 - 6.5 H \quad \text{对于 } 0 \leq H \leq 11 \quad (2a)$$

$$T(H) = 216.65 \quad \text{对于 } 11 < H \leq 20 \quad (2b)$$

$$T(H) = 216.65 + (H-20) \quad \text{对于 } 20 < H \leq 32 \quad (2c)$$

$$T(H) = 228.65 + 2.8 (H-32) \quad \text{对于 } 32 < H \leq 47 \quad (2d)$$

$$T(H) = 270.65 \quad \text{对于 } 47 < H \leq 51 \quad (2e)$$

$$T(H) = 270.65 - 2.8 (H-51) \quad \text{对于 } 51 < H \leq 71 \quad (2f)$$

$$T(H) = 214.65 - 2.0 (H-71) \quad \text{对于 } 71 < H \leq 84.852 \quad (2g)$$

位势高度 H （公里'）处的压力 P （hPa）：

$$P(H) = 1\,013.25 \left[\frac{288.15}{288.15 - 6.5 H} \right]^{-34.1632/6.5} \quad \text{对于 } 0 \leq H \leq 11 \quad (3a)$$

$$P(H) = 226.3226 \exp[-34.1632 (H - 11)/216.65] \quad \text{对于 } 11 < H \leq 20 \quad (3b)$$

$$P(H) = 54.74980 \left[\frac{216.65}{216.65 + (H-20)} \right]^{34.1632} \quad \text{对于 } 20 < H \leq 32 \quad (3c)$$

$$P(H) = 8.680422 \left[\frac{228.65}{228.65 + 2.8 (H-32)} \right]^{34.1632/2.8} \quad \text{对于 } 32 < H \leq 47 \quad (3d)$$

$$P(H) = 1.109106 \exp[-34.1632 (H - 47)/270.65] \quad \text{对于 } 47 < H \leq 51 \quad (3e)$$

$$P(H) = 0.6694167 \left[\frac{270.65}{270.65 - 2.8 (H-51)} \right]^{-34.1632/2.8} \quad \text{对于 } 51 < H \leq 71 \quad (3f)$$

$$P(H) = 0.03956649 \left[\frac{214.65}{214.65 - 2.0 (H-71)} \right]^{-34.1632/2.0} \quad \text{对于 } 71 < H \leq 84.852 \quad (3g)$$

在第二高度区域中，几何高度 Z （公里）处的温度 T （K）为：

$$T(Z) = 186.8673 \quad \text{对于 } 86 \leq Z \leq 91 \quad (4a)$$

$$T(Z) = 263.1905 - 76.3232 \left[1 - \left(\frac{Z-91}{19.9429} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{对于 } 91 < Z \leq 100 \quad (4b)$$

且几何高度 Z （公里）处的压力 P （hPa）为：

$$P(Z) = \exp(a_0 + a_1 Z + a_2 Z^2 + a_3 Z^3 + a_4 Z^4) \quad \text{对于 } 86 \leq Z \leq 100 \quad (5)$$

式中：

$$a_0 = 95.571\,899$$

$$a_1 = -4.011\,801$$

$$a_2 = 6.424\,731 \times 10^{-2}$$

$$a_3 = -4.789\,660 \times 10^{-4}$$

$$a_4 = 1.340\,543 \times 10^{-6}$$

作为参考，温度和压力与几何高度的关系分别参见图1和图2。

图1
温度与几何高度

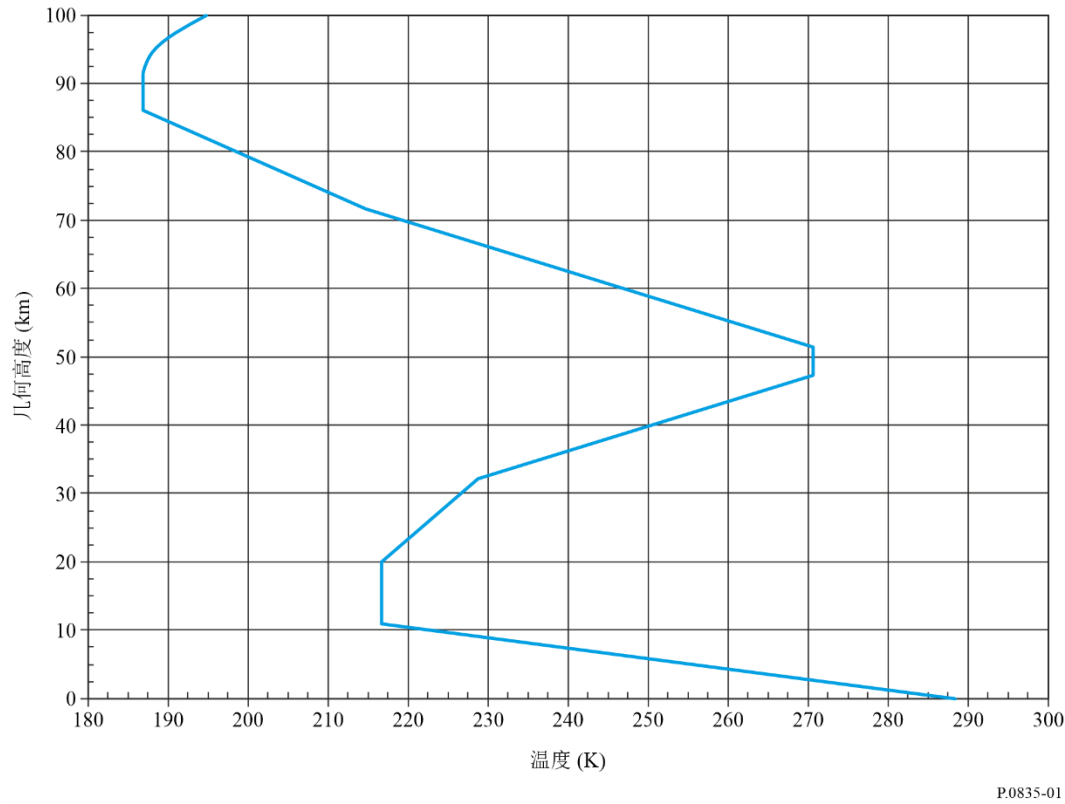
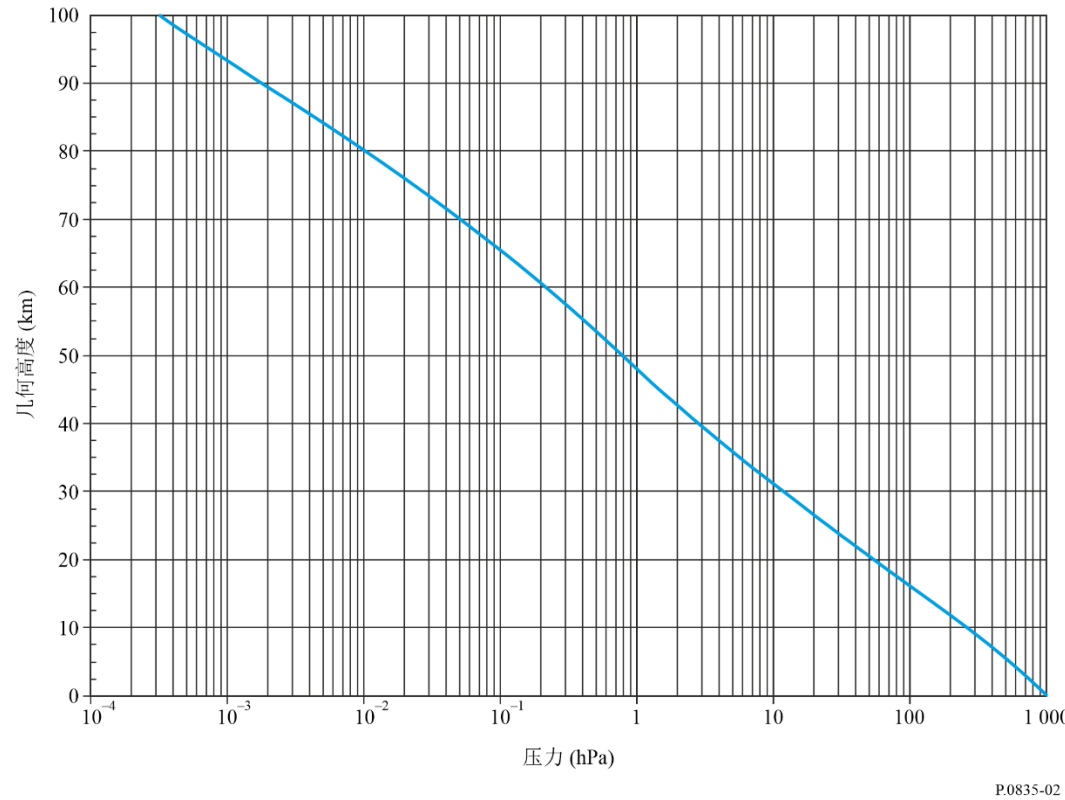


图2
总压力与几何高度的关系



1.2 水蒸气密度

在缺少可靠本地数据的情况下，大气中的水蒸气密度 ρ 与几何高度的关系可通过以下负指数分布得出近似值：

$$\rho(Z) = 7.5 \exp(-Z/2) \quad \text{g/m}^3 \quad (6)$$

随着几何高度的增加呈指数下降，直至混合比 $e(Z)/P(Z) = 2 \times 10^{-6}$ 和水蒸气分压 $e(Z)$ 为：

$$e(Z) = \frac{\rho(Z)T(Z)}{216.7} \quad \text{hPa} \quad (7)$$

则高于该几何高度的水汽密度为：

$$\rho(Z) = 2 \times 10^{-6} \frac{P(Z) 216.7}{T(Z)} \quad \text{g/m}^3 \quad (8)$$

附件2

1 季节性参考大气

以下各节针对北半球低纬度（15° N）、中纬度（45°N）和高纬度（60°N）提供了简单季节性参考大气。低纬度参考大气是为所有四个季节定义的；中纬度和高纬度的参考大气为夏季和冬季定义。

其他纬度的参考分布可推导如下：

- 对于 $0^\circ\text{N} \leq \text{纬度} \leq 15^\circ\text{N}$ 的情况，所有季节都应使用低纬度的年参考大气值。
- 对于 $15^\circ\text{N} < \text{纬度} < 45^\circ\text{N}$ 的情况，夏季和冬季应通过将低纬度年度参考大气和适当的中纬度季节性参考大气，以线性插值的方式融入感兴趣的纬度，以获得相应的参考大气值。
- 对于 $45^\circ\text{N} \leq \text{纬度} < 60^\circ\text{N}$ 的情况，夏季和冬季应通过线性插值的方式，融入适当的季节性中纬度和高纬度参考大气，以获得相应的参考大气值。
- 对于 $\geq \text{纬度} 60^\circ\text{N}$ 的情况，夏季和冬季应使用适当的季节性高纬度参考大气值。

虽然这些季节性参考大气值是专门针对北半球纬度得出的，但亦可能适用于相应的南半球纬度。

1.1 低纬度地区年参考大气

对于低纬度地区（15° N），以下分布图可用于所有的四个季节。

几何高度 Z （公里）处的温度 T （K）由下式给出：

$$T(Z) = 300.4222 - 6.3533 Z + 0.005 886 Z^2 \quad \text{对于 } 0 \leq Z < 17 \quad (9a)$$

$$T(Z) = 194 + 2.533 (Z - 17) \quad \text{对于 } 17 \leq Z < 47 \quad (9b)$$

$$T(Z) = 270 \quad \text{对于 } 47 \leq Z < 52 \quad (9c)$$

$$T(Z) = 270 - 3.0714 (Z - 52) \quad \text{对于 } 52 \leq Z < 80 \quad (9d)$$

$$T(Z) = 184 \quad \text{对于 } 80 \leq Z \leq 100 \quad (9e)$$

且几何高度 Z （公里）处的总气压 P （hPa）由下式给出：

$$P(Z) = 1012.0306 - 109.0338 Z + 3.6316 Z^2 \quad \text{对于 } 0 \leq Z \leq 10 \quad (10a)$$

$$P(Z) = P_{10} \exp[-0.147 (Z - 10)] \quad \text{对于 } 10 < Z \leq 72 \quad (10b)$$

$$P(Z) = P_{72} \exp[-0.165 (Z - 72)] \quad \text{对于 } 72 < Z \leq 100 \quad (10c)$$

其中 P_{10} 和 P_{72} 分别为10公里和72公里处的总压力。

几何高度 Z （公里）处的水蒸气密度 ρ （g/m³）由下式给出：

$$\rho(Z) = 19.6542 \exp[-0.2313 Z - 0.1122 Z^2 + 0.01351 Z^3 - 0.0005923 Z^4] \quad \text{对于 } 0 \leq Z \leq 15 \quad (11a)$$

$$\rho(Z) = 0 \quad \text{对于 } Z > 15 \quad (11b)$$

1.2 中纬度参考大气

对于中纬度（45° N），夏季和冬季可使用以下分布。

1.2.1 夏季中纬度地区

几何高度 Z （公里）处的温度 T （K）由下式给出：

$$T(Z) = 294.9838 - 5.2159 Z - 0.07109 Z^2 \quad \text{对于 } 0 \leq Z < 13 \quad (12a)$$

$$T(Z) = 215.15 \quad \text{对于 } 13 \leq Z < 17 \quad (12b)$$

$$T(Z) = 215.15 \exp[0.008128 (Z - 17)] \quad \text{对于 } 17 \leq Z < 47 \quad (12c)$$

$$T(Z) = 275 \quad \text{对于 } 47 \leq Z < 53 \quad (12d)$$

$$T(Z) = 275 + 111.57755\{1 - \exp[0.0237 (Z - 53)]\} \quad \text{对于 } 53 \leq Z < 80 \quad (12e)$$

$$T(Z) = 175 \quad \text{对于 } 80 \leq Z \leq 100 \quad (12f)$$

且几何高度 Z （公里）处的总气压 P （hPa）由下式给出：

$$P(Z) = 1012.8186 - 111.5569 Z + 3.8646 Z^2 \quad \text{对于 } 0 \leq Z \leq 10 \quad (13a)$$

$$P(Z) = P_{10} \exp[-0.147 (Z - 10)] \quad \text{对于 } 10 < Z \leq 72 \quad (13b)$$

$$P(Z) = P_{72} \exp[-0.165 (Z - 72)] \quad \text{对于 } 72 < Z \leq 100 \quad (13c)$$

其中 P_{10} 和 P_{72} 分别为10公里和72公里处的总压力。

几何高度 Z （公里）处的水蒸气密度 ρ （g/m³）由下式给出：

$$\rho(Z) = 14.3542 \exp[-0.4174 Z - 0.02290 Z^2 + 0.001007 Z^3] \quad \text{对于 } 0 \leq Z \leq 15 \quad (14a)$$

$$\rho(Z) = 0 \quad \text{对于 } Z > 15 \quad (14b)$$

1.2.2 冬季中纬度地区

几何高度 Z （公里）处的温度 T （K）由下式给出：

$$T(Z) = 272.7241 - 3.6217 Z - 0.1759 Z^2 \quad \text{对于 } 0 \leq Z < 10 \quad (15a)$$

$$T(Z) = 218 \quad \text{对于 } 10 \leq Z < 33 \quad (15b)$$

$$T(Z) = 218 + 3.3571 (Z - 33) \quad \text{对于 } 33 \leq Z < 47 \quad (15c)$$

$$T(Z) = 265 \quad \text{对于 } 47 \leq Z < 53 \quad (15d)$$

$$T(Z) = 265 - 2.0370 (Z - 53) \quad \text{对于 } 53 \leq Z < 80 \quad (15e)$$

$$T(Z) = 210 \quad \text{对于 } 80 \leq Z \leq 100 \quad (15f)$$

几何高度 Z （公里）处的总气压 P （hPa）由下式给出：

$$P(Z) = 1018.8627 - 124.2954 Z + 4.8307 Z^2 \quad \text{对于 } 0 \leq Z \leq 10 \quad (16a)$$

$$P(Z) = P_{10} \exp[-0.147 (Z - 10)] \quad \text{对于 } 10 < Z \leq 72 \quad (16b)$$

$$P(Z) = P_{72} \exp[-0.155 (Z - 72)] \quad \text{对于 } 72 < Z \leq 100 \quad (16c)$$

其中 P_{10} 和 P_{72} 分别为10公里和72公里处的总压力。

几何高度 Z （公里）处的水蒸气密度 ρ （g/m³）由下式给出：

$$\rho(Z) = 3.4742 \exp[-0.2697 Z - 0.03604 Z^2 + 0.0004489 Z^3] \quad \text{对于 } 0 \leq Z \leq 10 \quad (17a)$$

$$\rho(Z) = 0 \quad \text{对于 } Z > 10 \quad (17b)$$

1.3 高纬度地区参考大气

对于高纬度地区（60° N），夏季和冬季可使用以下分布。

1.3.1 夏季高纬度

几何高度 Z （公里）处的温度 T （K）由下式给出：

$$T(Z) = 286.8374 - 4.7805 Z - 0.1402 Z^2 \quad \text{对于 } 0 \leq Z < 10 \quad (18a)$$

$$T(Z) = 225 \quad \text{对于 } 10 \leq Z < 23 \quad (18b)$$

$$T(Z) = 225 \exp[0.008317 (Z - 23)] \quad \text{对于 } 23 \leq Z < 48 \quad (18c)$$

$$T(Z) = 277 \quad \text{对于 } 48 \leq Z < 53 \quad (18d)$$

$$T(Z) = 277 - 4.0769 (Z - 53) \quad \text{对于 } 53 \leq Z < 79 \quad (18e)$$

$$T(Z) = 171 \quad \text{对于 } 79 \leq Z \leq 100 \quad (18f)$$

几何高度 Z （公里）处的总气压 P （hPa）由下式给出：

$$P(Z) = 1008.0278 - 113.2494 Z + 3.9408 Z^2 \quad \text{对于 } 0 \leq Z \leq 10 \quad (19a)$$

$$P(Z) = P_{10} \exp[-0.140 (Z - 10)] \quad \text{对于 } 10 < Z \leq 72 \quad (19b)$$

$$P(Z) = P_{72} \exp[-0.165 (Z - 72)] \quad \text{对于 } 72 < Z \leq 100 \quad (19c)$$

其中 P_{10} 和 P_{72} 分别为10公里和72公里处的总压力。

几何高度 Z （公里）处的水蒸气密度 ρ （g/m³）由下式给出：

$$\rho(Z) = 8.988 \exp[-0.3614 Z - 0.005402 Z^2 - 0.001955 Z^3] \quad \text{对于 } 0 \leq Z \leq 15 \quad (20a)$$

$$\rho(Z) = 0 \quad \text{对于 } Z > 15 \quad (20b)$$

1.3.2 冬季高纬度地区

几何高度 Z （公里）处的温度 T （K）由下式给出：

$$T(Z) = 257.4345 + 2.3474 Z - 1.5479 Z^2 + 0.08473 Z^3 \quad \text{对于 } 0 \leq Z < 8.5 \quad (21a)$$

$$T(Z) = 217.5 \quad \text{对于 } 8.5 \leq Z < 30 \quad (21b)$$

$$T(Z) = 217.5 + 2.125 (Z - 30) \quad \text{对于 } 30 \leq Z < 50 \quad (21c)$$

$T(Z) = 260$

对于 $50 \leq Z < 54$

(21d)

$T(Z) = 260 - 1.667 (Z - 54)$

对于 $54 \leq Z \leq 100$

(21e)

几何高度 Z （公里）处的总气压 P （hPa）由下式给出：

$P(Z) = 1010.8828 - 122.2411 Z + 4.554 Z^2$

对于 $0 \leq Z \leq 10$

(22a)

$P(Z) = P_{10} \exp[-0.147 (Z - 10)]$

对于 $10 < Z \leq 72$

(22b)

$P(Z) = P_{72} \exp[-0.150 (Z - 72)]$

对于 $72 < Z \leq 100$

(22c)

其中 P_{10} 和 P_{72} 分别为10公里和72公里处的总压力。

几何高度 Z （公里）处的水蒸气密度 ρ （g/m³）由下式给出：

$\rho(Z) = 1.2319 \exp[0.07481 Z - 0.0981 Z^2 + 0.00281 Z^3]$

对于 $0 \leq Z \leq 10$

(23a)

$\rho(Z) = 0$

对于 $Z > 10$

(23b)

附件3

1 全球平均年度和平均月度垂直分布

本附件包含通过ECMWF ERA5模型数据，在平均30年内（1991-2020年）内得出的，海平面平均值以上138个高度的总（大气）气压、温度和水蒸气密度的年均和月均垂直分布。

这些垂直分布是本建议书不可分割的组成部分，并以数字地图的形式提供，分别为对应一年中每个月份的第1至第12部分以及年度周期的第13部分。每个部分包含一个zip文件，其中包含四个地图文件（P.bin、T.bin、WV.bin和适用期内的Z.bin）。P.bin包含压力分布情况，T.bin包含温度分布信息，WV.bin包含水蒸气密度分布信息，Z.bin包含高于平均海平面的几何高度分布信息。每个地图文件的特征如表1所示。

表1
地图文件的特征

参数	值
格式	IEEE 754
字节排序	低位优先
精度	单个（4字节/值）
字节总数	573 506 472
纬度范围	-90° N 至 90°N
纬度增量	+0.25°
经度范围	-180° E 至 180° E
经度增量	+0.25°
纬度网格点的数量	721
经度网格点的数量	1 441
高度的个数	138

表1（完）

参数	值
总压力单位	hPa
温度单位	K
水蒸气密度单位	g/m^3
高度单位	公里, a.m.s.l.

每个参数作为一个3维矩阵参数 (*ilevel*、*ilat*、*ilon*) 存储, 其中假定索引从1开始, $ilevel = 1, 2, \dots, 138$; $ilat = 1, 2, \dots, 721$; 且 $ilon = 1, 2, \dots, 1\,441$ 。对于任何网格点 (*Latitude_degN*, *Longitude_degE*) 和高度 (*ilevel*) 处的总 (大气) 压力 (*P*)、温度 (*T*)、水蒸气密度 (*WV*) 或平均海平面以上的几何高度 (*Z*) 值, 四个字节中的第一个字节的字节号为 *ipos*, 其中 *ipos* 的范围从 *ipos* =1到 *ipos* =573 506 469。

$$ipos = \{ilevel - 1 + (ilat - 1) \times 138 + (ilon - 1) \times 138 \times 721\} \times 4 + 1 \quad (24)$$

式中:

$$ilat = (Latitude_degN + 90)/0.25 + 1 \quad (25)$$

$$ilon = (Longitude_degE + 180)/0.25 + 1 \quad (26)$$

$$ilevel = (1, 2, 3, \dots, 138) \quad (27)$$

每个网格点有 138 个压力、温度和水蒸气密度水平, 其中 (*ilevel*, *ilat*, *ilon*), *T*(*ilevel*, *ilat*, *ilon*) 和 *WV*(*ilevel*, *ilat*, *ilon*) 是总气压、温度和平均海平面以上高度的水蒸气密度值 *Z*(*ilevel*, *ilat*, *ilon*)。 *Z*(138, *ilat*, *ilon*) 是平均在海平面以上的地表 ERA5 高度², 且 *Z*(1, *ilat*, *ilon*) 是相关网格点处高于平均海平面的最大高度。 *Z*(138, *ilat*, *ilon*) 可能不同于 ITU-R P.1511 建议书中的地形高度, 后者是通过综合高分辨率卫星雷达高度和本地高度数据确定的。

² 平均海平面以上的地表 ERA5 几何高度, 是通过将地表单位质量的 ERA5 重力势能 (m^2/s^2) 除以重力加速度 (9.80665 m/s^2), 并将所得地表位势高度转换为地表几何高度获得的。