

国 际 电 信 联 盟

ITU-R

国际电联无线电通信部门

ITU-R P.2145-0建议书
(08/2022)

**与计算气体衰减和
相关效应有关的数字地图**

P系列
无线电波传播



国际电信联盟

前言

无线电通信部门的职责是确保卫星业务等所有无线电通信业务合理、平等、有效、经济地使用无线电频谱，不受频率范围限制地开展研究并在此基础上通过建议书。

无线电通信部门的规则和政策职能由世界或区域无线电通信大会以及无线电通信全会在研究组的支持下履行。

知识产权政策（IPR）

ITU-R的IPR政策述于ITU-R第1号决议中所参引的《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系列建议书

（也可在线查询 <http://www.itu.int/publ/R-REC/zh>）

系列	标题
BO	卫星传送
BR	用于制作、存档和播出的录制；电视电影
BS	广播业务（声音）
BT	广播业务（电视）
F	固定业务
M	移动、无线电定位、业余和相关卫星业务
P	无线电波传播
RA	射电天文学
RS	遥感系统
S	卫星固定业务
SA	空间应用和气象学
SF	卫星固定业务和固定业务系统间的频率共用和协调
SM	频谱管理
SNG	卫星新闻采集
TF	时间信号和频率标准发射
V	词汇和相关问题

说明： 该ITU-R建议书的英文版本根据ITU-R第1号决议详述的程序予以批准。

电子出版
2023年，日内瓦

© 国际电联 2023

版权所有。未经国际电联书面许可，不得以任何手段复制本出版物的任何部分。

ITU-R P.2145-0建议书
与计算气体衰减和相关效应有关的数字地图
(ITU-R第201-7/3号课题)

(2022)

范围

本建议书提供预测地表总气压、地表温度、地表水蒸气密度和综合水蒸气含量¹的方法，用于计算气体衰减以及对地面和地球-空间路径的相关效应。

关键词

地表总气压、地表温度、地表水蒸气密度、综合水蒸气含量、威布尔概率分布、威布尔形状、威布尔比例、地球-空间路径

缩写词和首字母缩略语

ASCII 美国信息交换标准代码

CCDF 互补累积分布函数

ECMWF 欧洲中期天气预报中心

相关的ITU-R建议书和手册

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

《无线电气象学手册》

注 – 应使用最新修订版的建议书/手册。

¹ 综合水蒸气含量指的是从地球表面到大气层顶部的垂直柱中水蒸气的总量。综合水蒸气含量、总的水蒸气含量、总的柱状水蒸气、综合柱状水蒸气含量和总的柱状水蒸气含量等术语是同义的。

国际电联无线电通信大会，

考虑到

- a) 为了计算气体衰减和相关效应，需要地表总气压、地表温度、地表水蒸气密度和综合水蒸气含量统计数据；
- b) 欧洲中期天气预报中心（ECMWF）30年的全球第五代再分析数据可用于地表总气压、地表温度、地表水蒸气密度和综合水蒸气含量；以及
- c) 对30年的全球再分析数据进行了后处理，以提供地表总气压、地表温度、地表水蒸气密度和综合水蒸气含量的年度和月度统计数据，

建议

当无法获得更准确的当地地表总气压、地表温度、地表水蒸气密度或综合水蒸气含量统计数据时，附件中的信息应用于计算气体衰减以及对地面和地球－空间路径的相关效应。

附件

符号清单

$\overline{P_s}$	平均地表总气压
σ_{P_s}	地表气压的标准偏差
$P_s(p)$	地表总气压与超越概率的关系
$\overline{T_s}$	平均地表温度
σ_{T_s}	地表温度的标准偏差
$T_s(p)$	地表温度与超越概率的关系
$\overline{\rho_{w_s}}$	平均地表水蒸气密度
$\sigma_{\rho_{w_s}}$	地表水蒸气密度的标准偏差
$\rho_{w_s}(p)$	地表水蒸气密度与超越概率的关系
$\overline{V_s}$	平均综合水蒸气含量
σ_{V_s}	综合水蒸气含量的标准偏差
$V_s(p)$	综合水蒸气含量与超越概率的关系
$psch$	气压比例高度
$tsch$	温度比例高度
$vsch$	水蒸气比例高度

Z_{ground}	平均海平面以上的地表高度
k_{V_s}	综合水汽含量的威布尔形状参数
λ_{V_s}	综合水汽含量的威布尔比例参数
p	超越概率 (CCDF)
p_{above}	期望超越概率以上的超越概率
p_{below}	期望超越概率以下的超越概率
X_i	i^{th} 网格点处感兴趣参数的未缩放值
X_i'	期望高度上 i^{th} 网格点处感兴趣参数的值
X	期望高度上期望位置处感兴趣参数的值

1 年度和月度气象统计参数

全球地表总气压 P_s (单位: hPa)、地表温度 T_s (单位: K) 和地表水蒸气密度 ρ_{w_s} (单位: g/m^3) 的年度和月度统计数据数字地图是本建议书不可或缺的一个组成部分, 其特性如表1、表2和表3所示²。

全球综合水蒸气含量 V_s (单位: kg/m^2 或相当于 mm) 的年度和月度统计数据数字地图是本建议书不可或缺的一个组成部分, 其特性如表1和表4所示。

用威布尔分布近似的、全球综合水汽含量 V_s 的年度统计数据数字地图是本建议书不可或缺的一个组成部分, 其特性如表1和表5所示。

具体而言:

- 标题中带有“P”的地图文件包含平均地表总气压 \bar{P}_s 、地表总气压的标准偏差 σ_{P_s} 的值, 以及地表总气压与超越概率的关系 $P_s(p)$;
- 标题中带有“T”的地图文件包含平均地表温度 \bar{T}_s 、地表温度的标准偏差 σ_{T_s} 的值, 以及地表温度与超越概率的关系 $T_s(p)$;
- 标题中带有“RHO”的地图文件包含平均地表水蒸气密度 $\overline{\rho_{w_s}}$ 、地表水蒸气密度的标准偏差 $\sigma_{\rho_{w_s}}$ 的值, 以及地表水蒸气密度与超越概率的关系 $\rho_{w_s}(p)$;
- 标题中带有“V”的地图文件包含平均综合水蒸气含量 \bar{V}_s 、综合水蒸气含量的标准偏差 σ_{V_s} 的值, 以及综合水蒸气含量与超越概率的关系 $V_s(p)$;
- 标题中带有“PSCH”的地图文件包含地表总气压比例高度 $psch$ 的值;
- 标题中带有“TSCH”的地图文件包含地表温度比例高度 $tsch$ 的值;

² 地表温度被定义为地球表面以上2米处的空气温度。地表水蒸气密度的计算方法如下: a) 露点温度, 它定义为地球表面以上2米处的空气为达到饱和而必须冷却的温度, b) 地表总气压, 以及c) 地表温度。

- 标题中带有“VSCH”的地图文件包含地表水蒸气密度和综合水蒸气含量 $vsch$ 的值；
- 地图文件Z_ground.TXT包含平均海平面以上地表高度 Z_{ground} 的值；
- 标题中带有“kV”的地图文件包含综合水蒸气含量威布尔概率分布形状参数 k_{V_s} 的值；以及
- 标题中带有“lambdaV”的地图文件包含综合水蒸气含量威布尔概率分布比例参数 λ_{V_s} 的值。

表1
地图文件特性

参数	值
格式	ASCII
左上角纬度	-90° N
纬度增量	+0.25°
左上角经度	-180° E
经度增量	+0.25°
行数	721
列数	1 441
列分隔符	空格
行分隔符	Windows (CR LF)

表2

年度地表总气压、地表温度和地表水蒸气密度地图

参数	年度气压 (hPa)	年度温度 (K)	年度水蒸气密度 (g/m ³)
均值	P_mean.TXT	T_mean.TXT	RHO_mean.TXT
标准偏差	P_std.TXT	T_std.TXT	RHO_std.TXT
超越概率 (CCDF) ³	0.01%	P_001.TXT	RHO_001.TXT
	0.02%	P_002.TXT	RHO_002.TXT
	0.03%	P_003.TXT	RHO_003.TXT
	0.05%	P_005.TXT	RHO_005.TXT
	0.1%	P_01.TXT	RHO_01.TXT
	0.2%	P_02.TXT	RHO_02.TXT
	0.3%	P_03.TXT	RHO_03.TXT
	0.5%	P_05.TXT	RHO_05.TXT
	1%	P_1.TXT	RHO_1.TXT
	2%	P_2.TXT	RHO_2.TXT
	3%	P_3.TXT	RHO_3.TXT
	5%	P_5.TXT	RHO_5.TXT
	10%	P_10.TXT	RHO_10.TXT
	20%	P_20.TXT	RHO_20.TXT
	30%	P_30.TXT	RHO_30.TXT
	50%	P_50.TXT	RHO_50.TXT
	60%	P_60.TXT	RHO_60.TXT
	70%	P_70.TXT	RHO_70.TXT
80%	P_80.TXT	RHO_80.TXT	
90%	P_90.TXT	RHO_90.TXT	
95%	P_95.TXT	T_95.TXT	RHO_95.TXT
99%	P_99.TXT	T_99.TXT	RHO_99.TXT
比例高度	PSCH.TXT	TSCH.TXT	VSCH.TXT
地表高度	Z_ground.TXT		
文件名	P_Annual.zip	T_Annual.zip	RHO_Annual.zip
完整的产品文件名	年度: 第1部分		

³ 术语超越概率和互补累积分布函数 (CCDF) 是同义的。

表3

月度地表总气压、地表温度和地表水汽密度地图
(XX: 1月 = 01; 2月 = 02; ...; 11月 = 11; 12月 = 12)

参数	月度气压 (hPa)	月度温度 (K)	月度水蒸气密度 (g/m ³)
均值	P_mean.TXT	T_mean.TXT	RHO_mean.TXT
标准偏差	P_std.TXT	T_std.TXT	RHO_std.TXT
超越概率 (CCDF)	0.1%	P_01.TXT	RHO_01.TXT
	0.2%	P_02.TXT	RHO_02.TXT
	0.3%	P_03.TXT	RHO_03.TXT
	0.5%	P_05.TXT	RHO_05.TXT
	1%	P_1.TXT	RHO_1.TXT
	2%	P_2.TXT	RHO_2.TXT
	3%	P_3.TXT	RHO_3.TXT
	5%	P_5.TXT	RHO_5.TXT
	10%	P_10.TXT	RHO_10.TXT
	20%	P_20.TXT	RHO_20.TXT
	30%	P_30.TXT	RHO_30.TXT
	50%	P_50.TXT	RHO_50.TXT
	60%	P_60.TXT	RHO_60.TXT
	70%	P_70.TXT	RHO_70.TXT
	80%	P_80.TXT	RHO_80.TXT
	90%	P_90.TXT	RHO_90.TXT
95%	P_95.TXT	RHO_95.TXT	
99%	P_99.TXT	T_99.TXT	RHO_99.TXT
比例高度	PSCH.TXT	TSCH.TXT	VSCH.TXT
地表高度	Z_ground.TXT		
文件名	P_MonthXX.zip	T_MonthXX.zip	RHO_MonthXX.zip
完整的产品 文件名	01月: 第2部分 02月: 第3部分 03月: 第4部分 04月: 第5部分 05月: 第6部分 06月: 第7部分 07月: 第8部分 08月: 第9部分 09月: 第10部分 10月: 第11部分 11月: 第12部分 12月: 第13部分		

表4

年度和月度综合水蒸气含量地图
(XX: 1月 = 01; 2月 = 02; ...; 11月 = 11; 12月 = 12)

参数	年度综合水蒸气含量 (kg/m ² 或 mm)	月度综合水蒸气含量 (kg/m ² 或 mm)	
均值	V_mean.TXT	V_mean.TXT	
标准偏差	V_std.TXT	V_std.TXT	
超越概率 (CCDF)	0.01%	V_001.TXT	-
	0.02%	V_002.TXT	-
	0.03%	V_003.TXT	-
	0.05%	V_005.TXT	-
	0.1%	V_01.TXT	V_01.TXT
	0.2%	V_02.TXT	V_02.TXT
	0.3%	V_03.TXT	V_03.TXT
	0.5%	V_05.TXT	V_05.TXT
	1%	V_1.TXT	V_1.TXT
	2%	V_2.TXT	V_2.TXT
	3%	V_3.TXT	V_3.TXT
	5%	V_5.TXT	V_5.TXT
	10%	V_10.TXT	V_10.TXT
	20%	V_20.TXT	V_20.TXT
	30%	V_30.TXT	V_30.TXT
	50%	V_50.TXT	V_50.TXT
	60%	V_60.TXT	V_60.TXT
	70%	V_70.TXT	V_70.TXT
	80%	V_80.TXT	V_80.TXT
90%	V_90.TXT	V_90.TXT	
95%	V_95.TXT	V_95.TXT	
99%	V_99.TXT	V_99.TXT	
比例高度	VSCH.TXT	VSCH.TXT	
地表高度	Z_ground.TXT		
文件名	V_Annual.zip	V_MonthXX.zip	
完整的产品文件名	年度: <u>第1部分</u>	01月: <u>第2部分</u> 02月: <u>第3部分</u> 03月: <u>第4部分</u> 04月: <u>第5部分</u> 05月: <u>第6部分</u> 06月: <u>第7部分</u> 07月: <u>第8部分</u> 08月: <u>第9部分</u> 09月: <u>第10部分</u> 10月: <u>第11部分</u> 11月: <u>第12部分</u> 12月: <u>第13部分</u>	

表5

用威布尔分布近似的年度综合
水汽含量统计数据

参数	年度威布尔近似
威布尔比例	lambdaV.TXT
威布尔形状	kV.TXT
比例高度	VSCH.TXT
地表高度	Z_ground.TXT
文件名	Weibull_Annual.zip
完整的产品文件名	第14部分

2 插值

第2.1节提供了一种统计和空间插值方法，用于计算地球表面任何期望位置上年度和月度气压、温度、水蒸气密度和综合水蒸气含量与超越概率（CCDF）的关系。

第2.2节提供了一种统计和空间插值方法，用于计算地球表面任何期望位置上年度和月度气压、温度、水蒸气密度、综合水蒸气含量、威布尔综合水蒸气含量形状和比例参数的年度和月度均值与标准偏差。

2.1 空间和统计（CCDF）插值

地球表面任何期望位置上的年度或月度地表总气压统计数据 $P_s(p)$ 、地表温度统计数据 $T_s(p)$ 、地表水蒸气密度统计数据 $\rho_s(p)$ 或综合水蒸气含量统计数据 $V_s(p)$ ，以及综合数字地图超越概率范围内的超越概率（CCDF），可使用以下插值法来计算：

- 根据当地数据，或者如果当地数据不可用，根据ITU-R P.1511建议书，确定期望位置的平均海平面以上高度 alt ；
- 从有关年度统计数据的集合：0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 95 和 99%以及有关月度统计数据的集合：0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 95 和 99%，确定大于和小于期望超越概率 p 的两个超越概率 p_{above} and p_{below} ；
- 对4个周边网格点中的每一个（ $i = 1, 2, 3$ 和 4），以及对两个超越概率 p_{above} 和 p_{below} ，从适当的年度或月度 $P_s(p)$ 、 $T_s(p)$ 、 $\rho_{ws}(p)$ 或 $V_s(p)$ 地图，确定期望的感兴趣参数 X_i' ；
- 对4个周边网格点中的每一个（ $i = 1, 2, 3$ 和 4），从适当的年度或月度气压、温度或水蒸气比例高度地图，确定适当的比例高度 $psch_i$ 、 $tsch_i$ 或 $vsch_i$ ；
- 对4个周边网格点中的每一个（ $i = 1, 2, 3$ 和 4），确定地形高度 alt_i ，作为Z地面地图每个网格点处的 Z_{ground} 值；

- f) 对4个周边网格点中的每一个 ($i = 1, 2, 3$ 和 4)，以及对两个超越概率 p_{above} 和 p_{below} ，使用适用的关系式，通过缩放 X_i' ，确定期望高度 alt 上的 X_i ：

$$X_i = X_i' \cdot e^{-\frac{(alt-alt_i)}{psch_i}} \quad \text{对地表总气压 } P_s(p);$$

$$X_i = X_i' + tsch_i (alt - alt_i) \quad \text{对地表温度 } T_s(p);$$

$$X_i = X_i' \cdot e^{-\frac{(alt-alt_i)}{vsch_i}} \quad \text{对地表水蒸气密度 } \rho_{ws}(p); \text{ 或者}$$

$$X_i = X_i' \cdot e^{-\frac{(alt-alt_i)}{vsch_i}} \quad \text{对综合水蒸气含量 } V_s(p);$$

- g) 使用ITU-R P.1144建议书附件1中规定的双线性插值法，通过在4个周边网格点上对 X_i ($i = 1, 2, 3$ 和 4) 执行双线性插值，来确定期望位置上的 X_{above} 和 X_{below} 以及两个概率 p_{above} 和 p_{below} 。
- h) 在线性 X 对 $\log_{10} p$ 比例上，通过对 p 插值 X_{above} 和 X_{below} 对 p_{above} 和 p_{below} ，来确定期望位置上的感兴趣参数 X 和超越概率 p ，其中， $X = P_s(p)$ 、 $T_s(p)$ 、 $\rho_{ws}(p)$ 或 $V_s(p)$ 。

2.2 空间和统计（均值和标准偏差）插值

地球表面任何期望位置上的年度或月度地表总气压均值或标准偏差 \bar{P}_s 或 σ_{P_s} 、地表温度均值或标准偏差 \bar{T}_s 或 σ_{T_s} 、地表水蒸汽密度均值或标准偏差 $\bar{\rho}_{ws}$ 或 $\sigma_{\rho_{ws}}$ 、综合水蒸汽含量均值或标准偏差 \bar{V}_s 或 σ_{V_s} ，以及威布尔综合水蒸气含量形状或比例参数 k_{V_s} 或 λ_{V_s} ，可使用以下插值法来计算：

- 根据当地数据，或者如果当地数据不可用，根据ITU-R P.1511建议书，确定期望位置的平均海平面以上高度 alt ；
- 对4个周边网格点中的每一个 ($i = 1, 2, 3$ 和 4)，从适当的年度或月度地图，确定期望的感兴趣参数 X_i' ；
- 对4个周边网格点中的每一个 ($i = 1, 2, 3$ 和 4)，从适当的年度或月度气压、温度或水蒸气比例高度地图，确定适当的比例高度 $psch_i$ 、 $tsch_i$ 或 $vsch_i$ ；
- 对4个周边网格点中的每一个 ($i = 1, 2, 3$ 和 4)，确定地形高度 alt_i ，作为Z地面地图每个网格点处的 Z_{ground} 值；
- 对4个周边网格点中的每一个 ($i = 1, 2, 3$ 和 4)，使用适当的关系式，通过缩放 X_i' ，确定期望的高度 alt ；

$X_i = X_i' \cdot e^{-\frac{(alt-alt_i)}{psch_i}}$	对地表总气压 \bar{P}_s 或 σ_{P_s} ;
$X_i = X_i' + tsch_i (alt - alt_i)$	对地表温度 \bar{T}_s ;
$X_i = X_i'$	对地表温度 σ_{T_s} ;
$X_i = X_i' \cdot e^{-\frac{(alt-alt_i)}{vsch_i}}$	对地表水蒸气密度 $\overline{\rho_{w_s}}$ 或 $\sigma_{\rho_{w_s}}$;
$X_i = X_i' \cdot e^{-\frac{(alt-alt_i)}{vsch_i}}$	对综合水蒸气含量 \bar{V}_s 或 σ_{V_s} ;
$X_i = X_i' \cdot e^{-\frac{(alt-alt_i)}{vsch_i}}$	对综合水蒸气含量威布尔概率分布比例参数 λ_{V_s} ; 或者
$X_i = X_i'$	对综合水蒸气含量威布尔概率分布形状参数 k_{V_s} ;

- f) 使用ITU-R P.1144建议书附件1中规定的双线性插值法，通过在4个周边网格点上对 X_i ($i = 1, 2, 3$ 和 4) 执行双线性插值，来确定期望位置上的感兴趣参数 X ，其中，在期望位置上， $X = \bar{P}_s$ 或 σ_{P_s} ， \bar{T}_s 或 σ_{T_s} ， $\overline{\rho_{w_s}}$ 或 $\sigma_{\rho_{w_s}}$ ， \bar{V}_s 或 σ_{V_s} ， λ_{V_s} 或 k_{V_s} 。