

中华人民共和国国家军用标准

FL 1200

GJB 1655A—2024

代替 GJB 1655—1993

对流层电波折射修正大气模式

Atmospheric models for tropospheric radio refraction correction

2025—01—07 发布

2025—03—01 实施



中央军委装备发展部 颁布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 引用文件	1
3 术语和定义	1
4 大气折射率剖面预测方法	1
5 大气折射率	1
5.1 折射率计算	1
5.2 高度计算	3
6 大气折射率剖面模式	4
6.1 线性模式	4
6.2 指数模式	4
6.3 分段模式	4
6.4 Hopfield 模式	5
7 参考大气剖面模式	6
7.1 全球平均大气模式	6
7.2 低纬度地区参考大气模式	7
7.3 中纬度地区参考大气模式	8
7.4 高纬度地区参考大气模式	10
8 应用说明	11
附录 A (资料性附录) 对流层地面气象参数、折射率及海平面折射率统计均值	12
附录 B (资料性附录) 中国区域指数模式的指数衰减系数统计均值	20
附录 C (资料性附录) 近地面 1km 折射率梯度统计均值	21
附录 D (资料性附录) 中国区域近地面 1km 至海拔 9km 的指数衰减系数统计均值	23
附录 E (资料性附录) 中国区域海拔 9km 以上高度的指数衰减系数统计均值	24

前 言

本标准代替 GJB 1655—1993《对流层电波折射修正大气模式》。

本标准与 GJB 1655—1993 相比，主要变化如下：

- a) 修改了对流层电波大气折射率、饱和水汽压和水汽压的计算公式；
- b) 删除了 0.1km 线性模式及相关内容；
- c) 增加了压高公式、Hopfield(霍普菲尔德)模式和参考大气剖面模式；
- d) 增加了对流层电波折射修正大气模式相关的全球统计结果。

本标准的附录 A、附录 B、附录 C、附录 D、附录 E 是资料性附录。

本标准由中国电子科技集团有限公司提出。

本标准起草单位：中国电子科技集团公司第二十二研究所、北京跟踪与通信技术研究所。

本标准主要起草人：陈祥明、赵振维、朱庆林、林乐科、刘玉梅、董翔、李建儒、孙方、慈颖、薛鲲鹏。

GJB 1655 于 1993 年首次发布。

对流层电波折射修正大气模式

1 范围

本标准规定了 0km~60km 高度范围内(含对流层和平流层)电波大气折射误差修正的平均大气模式以及与模式相关的参量。

本标准适用于无线电测量系统和无线电通信系统中对流层平均大气折射误差的修正及预测。

2 引用文件

下列文件中的有关条款通过引用而成为本标准的条款。凡注日期或版次的引用文件,其后的任何修改单(不包括勘误的内容)或修订版本都不适用于本标准,但提倡使用本标准的各方探讨使用其最新版本的可能性。凡不注日期或版次的引用文件,其最新版本适用于本标准。

GB/T 14733.9—2008 电信术语 无线电波传播

3 术语和定义

GB/T 14733.9—2008 确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1 大气模式 atmospheric model

描述大气参数剖面的数学公式或数据。

3.2 大气折射率 atmospheric refractivity

大气折射指数 n 减 1 之差的一百万倍,通常用 N 表示,即: $N = (n - 1) \times 10^6$ 。

注:折射指数 n 为真空中电波传播速度与所考虑的介质中的电波传播速度的比值。

3.3 大气折射率剖面 atmospheric refractivity profile

大气折射率随高度的分布。

4 大气折射率剖面预测方法

计算对流层指定高度处的折射率,大致分以下三种情况:

- 如果已知当地上空的实测气象参数(大气压强、大气温度、湿度)剖面,则利用公式(1)换算得到实测折射率剖面,具体参考第 5 章;实测气象参数剖面最大高度(常规气象探空最大高度一般在 30km 左右)以下指定高度处的折射率可用插值方法计算,实测气象参数剖面最大高度至 60km 高度范围内指定高度处的折射率可用指数模式或分段模式中海拔 9km 至 60km 高度范围的模式计算,具体参考 6.2 或 6.3;
- 如果仅已知地面实测气象参数数据,根据需求选择大气模式,计算 60km 高度以下指定高度处的折射率,模式中的折射率初值用地面实测气象参数换算得到,具体参考第 5~7 章;
- 如果未知实测气象参数数据,根据需求选择大气模式,计算 60km 高度以下指定高度处的折射率,模式中的折射率初值可用折射率初值的统计均值或利用气象参数统计均值换算得到,具体参考第 5~7 章。

5 大气折射率

5.1 折射率计算

如果已知实测大气压强、大气温度和水汽压,可用公式(1)计算得到实测大气折射率。

$$N = 77.6 \frac{P}{T} - 5.6 \frac{e_w}{T} + 3.75 \times 10^5 \frac{e_w}{T^2} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

N ——大气折射率, N—unit;

P ——大气压强, hPa;

T ——大气热力学温度, K;

e_w ——水汽压, hPa。

其中, 大气热力学温度 T 可用公式(2)由大气摄氏温度换算得到。

$$T = t + 273.15 \dots\dots\dots (2)$$

式中:

t ——大气摄氏温度, °C。

其中, 水汽压 e_w 的计算分以下三种情况:

a) 当已知湿度参数为相对湿度时, 水汽压 e_w 由公式(3)计算。

$$e_w = e_s \cdot RH/100 \dots\dots\dots (3)$$

式中:

e_s ——饱和水汽压, hPa;

RH ——相对湿度, %。

其中, 饱和水汽压 e_s 由公式(4)计算。

$$e_s = EF \cdot a \cdot \exp \left[\frac{(b-t/c)t}{d+t} \right] \dots\dots\dots (4)$$

式中:

EF ——增强因子;

a 、 b 、 c 、 d ——统计系数;

t ——大气摄氏温度, °C。

其中, 增强因子 EF 的取值分以下两种情况:

1) 当下垫面为水时(即: 平液面), 增强因子 EF 由公式(5)计算。

$$EF = 1 + 10^{-4} [7.2 + P \cdot (0.00320 + 5.9 \times 10^{-6} t^2)] \dots\dots\dots (5)$$

式中:

P ——大气压强, hPa;

t ——大气摄氏温度, °C。

2) 当下垫面为冰时(即: 平冰面), 增强因子 EF 由公式(6)计算。

$$EF = 1 + 10^{-4} [2.2 + P \cdot (0.00382 + 6.4 \times 10^{-6} t^2)] \dots\dots\dots (6)$$

式中:

P ——大气压强, hPa;

t ——大气摄氏温度, °C。

其中, 统计系数 a 、 b 、 c 、 d 的取值见表 1。

表1 系数 a 、 b 、 c 和 d 的取值

统计系数	水(−40℃~50℃)	冰(−80℃~0℃)
a	6.1121	6.1115
b	18.678	23.036
c	234.5	333.7
d	257.14	279.82

注：若无法确定水汽以水还是冰的形式存在，当 $t \geq 0^\circ\text{C}$ 时，按水(平液面)处理；当 $t < 0^\circ\text{C}$ 时，按冰(平冰面)处理。

b) 当已知湿度参数为露点温度时，水汽压 e_w 由公式(7)计算。

$$e_w = EF \cdot a \cdot \exp \left[\frac{(b - t_d/c)t_d}{d + t_d} \right] \dots\dots\dots (7)$$

式中：

EF ——增强因子，取值同公式(5)和公式(6)；

a 、 b 、 c 、 d ——统计系数，取值同表1；

t_d ——大气露点温度， $^\circ\text{C}$ 。

c) 当已知湿度参数为水汽密度时，水汽压 e_w 由公式(8)计算。

$$e_w = \rho_w T / 216.7 \dots\dots\dots (8)$$

式中：

ρ_w ——水汽密度， g/m^3 ；

T ——大气热力学温度， K 。

全球表面大气压强、大气热力学温度、水汽压的统计均值等值线图，50%时间被超过的水汽密度分布图，以及中国区域和全球区域地面折射率、海平面折射率的统计均值等值线图，参见附录A。

5.2 高度计算

如果实测气象参数剖面中不含高度数据，可利用公式(9)计算相邻两气压层的厚度，各气压层的位势高度可由相邻两气压层的厚度从下到上累加得到(即：压高公式)。

$$\Delta H = \frac{R_d}{g_m} \bar{T} \left(1 + 0.378 \frac{\bar{e}_w}{\bar{P}} \right) \ln \frac{P_i}{P_{i+1}} \dots\dots\dots (9)$$

式中：

ΔH ——两气压层间厚度， m ；

R_d ——干空气比气体常数， $R_d = 287.054 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ；

g_m ——重力加速度， m/s^2 ；

\bar{T} ——两气压层的平均大气热力学温度， K ；

\bar{e}_w ——两气压层的平均水汽压， hPa ；

\bar{P} ——两气压层的平均大气压强， hPa ；

P_i ——下层气压值， hPa ；

P_{i+1} ——上层气压值， hPa 。

其中，重力加速度 g_m 可由公式(10)计算得到。

$$g_m = 9.784 [1 - 0.00266 \cos(2\varphi) - 0.00028 h_0] \dots\dots\dots (10)$$

式中:

- φ ——地理纬度, (°);
- h_0 ——地面海拔高度, km。

6 大气折射率剖面模式

6.1 线性模式

大气折射率剖面线性模式由公式(11)给出。

$$N(h) = N_0 - \Delta N(h - h_0) \dots\dots\dots (11)$$

式中:

- $N(h)$ —— h 高度上的折射率, N—unit;
- N_0 ——地面折射率, N—unit;
- ΔN ——折射率随高度的变化梯度, N—unit/km;
- h ——指定海拔高度, km;
- h_0 ——地面海拔高度, km。

其中, 折射率随高度的变化梯度 ΔN , 可由实测折射率剖面利用最小二乘法拟合得到。

6.2 指数模式

大气折射率剖面指数模式由公式(12)给出。

$$N(h) = N_0 \exp[-c_a(h - h_0)] \dots\dots\dots (12)$$

式中:

- $N(h)$ —— h 高度上的折射率, N—unit;
- N_0 ——地面折射率, N—unit;
- c_a ——指数衰减系数, 1/km;
- h ——指定海拔高度, km;
- h_0 ——地面海拔高度, km。

其中, 指数衰减系数 c_a 可由实测折射率剖面利用最小二乘拟合得到。

中国区域 c_a 的统计均值为 0.1404/km, 中国区域 c_a 的统计均值等值线图参见附录 B。

全球区域 c_a 的统计均值为 0.1361/km。

工程上, 若已知地面折射率, 可用指数模式归算得到海平面折射率; 中国区域归算的海平面折射率统计均值为 338.5N—units, 全球区域归算的海平面折射率统计均值为 315N—units。

6.3 分段模式

大气折射率剖面分段模式由公式(13)给出。

$$N(h) = \begin{cases} N_0 - \Delta N_1(h - h_0) & h_0 \leq h \leq h_0 + 1\text{km} \\ N_1 \exp[-c_1(h - h_0 - 1)] & h_0 + 1\text{km} < h \leq 9\text{km} \dots\dots\dots (13) \\ N_9 \exp[-c_9(h - 9)] & 9\text{km} < h \leq 60\text{km} \end{cases}$$

式中:

- $N(h)$ —— h 高度上的折射率, N—unit;
- N_0 ——地面折射率, N—unit;
- ΔN_1 ——近地 1km 高度范围内的折射率梯度, N—unit/km;
- h ——指定海拔高度, km;
- h_0 ——地面海拔高度, km;
- N_1 ——近地 1km 高度处的折射率, N—unit;

c_1 ——近地 1km 至海拔 9km 高度范围内的指数衰减系数, 1/km;

N_9 ——海拔 9km 高度处的折射率, N-unit;

c_9 ——海拔 9km 至 60km 高度范围内的指数衰减系数, 1/km。

其中, 近地 1km 高度范围内的折射率梯度 ΔN_1 , 可由近地 1km 高度范围内的实测折射率剖面利用最小二乘法拟合得到。

中国区域 ΔN_1 的统计均值为 39.4N-unit/km, 中国区域 ΔN_1 的统计均值等值线图参见附录 C.1。

标准大气条件下 ΔN_1 的值为 40N-unit/km, 全球区域 ΔN_1 的统计均值等值线图参见附录 C.2。

其中, 近地 1km 至海拔 9km 高度范围内的指数衰减系数 c_1 , 可由近地 1km 至海拔 9km 高度范围内的实测折射率剖面利用最小二乘法拟合得到。

中国区域 c_1 的统计均值为 0.1258/km, 中国区域 c_1 的统计均值的等值线图参见附录 D。

全球区域 c_1 可由公式 (14) 计算。

$$c_1 = \frac{1}{8-h_0} \ln \frac{N_1}{N_9} \dots\dots\dots (14)$$

式中:

h_1 ——地面海拔高度, km;

N_1 ——近地 1km 高度处的折射率, N-unit;

N_9 ——海拔 9km 高度处的折射率, N-unit, 全球区域 N_9 的统计均值为 105N-unit, 中国区域 N_9 的统计均值为 105.6N-unit。

其中, 海拔 9km 至 60km 高度范围内的指数衰减系数 c_9 , 可由海拔 9km 至 60km 高度范围内的实测折射率剖面利用最小二乘法拟合得到。

中国区域 c_9 的统计均值为 0.1434/km, 中国区域 c_9 的统计均值等值线图参见附录 E。

标准大气条件下 c_9 的统计均值为 0.1424/km。

6.4 Hopfield 模式

大气折射率剖面 Hopfield 模式由公式 (15) 给出。

$$\begin{cases} N(h) = N_d(h) + N_w(h) \\ N_i(h) = N_{i0} \left(\frac{H_i - h}{H_i - h_0} \right)^4 & h \leq H_i \quad i = d, w \dots\dots\dots (15) \\ N_i(h) = 0 & h > H_i \quad i = d, w \end{cases}$$

式中:

$N(h)$ —— h 高度上的折射率, N-unit;

$N_d(h)$ ——指定海拔高度上的折射率静力项, N-unit, 近似等于公式 (1) 中第一项;

$N_w(h)$ ——指定海拔高度上的折射率非静力项, N-unit, 近似等于公式 (1) 中第二、三项;

$N_i(h)$ —— h 高度上的折射率静力项 ($i=d$) 或折射率非静力项 ($i=w$), N-unit;

N_{i0} ——地面折射率静力项 ($i=d$) 或地面折射率非静力项 ($i=w$), N-unit;

H_i ——静力项等效高度 ($i=d$) 或非静力项等效高度 ($i=w$), km;

h ——指定海拔高度, km;

h_0 ——地面海拔高度, km。

其中, 静力项等效高度 h_d 可由公式 (16) 计算得到, 非静力项等效高度 $H_w=11$ km。

$$H_d = 40.136 + 0.14872 t_0 \dots\dots\dots (16)$$

式中:

t_0 ——地面大气摄氏温度, °C。

7 参考大气剖面模式

7.1 全球平均大气模式

全球年度平均大气热力学温度、大气压强、水汽密度模式分别为:

a) 大气热力学温度

参考标准大气模式将 0km~60km 高度范围间的大气分为六层, 每个高度分层内大气热力学温度由公式 (17) 计算。

$$T(Z) = T_i + \beta_i(Z - Z_i) \dots\dots\dots (17)$$

式中:

$T(Z)$ —— Z 高度处的大气热力学温度, K;

T_i —— Z_i 高度处的大气热力学温度, K, 取 $T_0 = 288.15\text{K}$;

β_i ——对应高度分层内的大气温度变化梯度, K/km;

Z ——位势高度, km;

Z_i ——对应高度分层的起始位势高度, km。

其中, 六个高度分层内大气温度随高度的变化梯度 β_i 取值见表 2。

表 2 六个高度分层内大气温度随高度的变化梯度

高度分层	高度分层起始位势高度 Z_i km	大气温度随高度的变化梯度 β_i K/km
1	0	-6.5
2	11	0.0
3	20	+1.0
4	32	+2.8
5	47	0.0
6	51	-2.8

位势高度与海拔高度可用公式 (18) 进行换算。

$$Z = \frac{6356.766h}{6356.766 + h} \dots\dots\dots (18)$$

式中:

Z ——位势高度, km;

h ——海拔高度, km。

b) 大气压强

根据大气温度随高度的变化梯度是否等于 0, 分两种情况计算大气压强:

1) 当大气温度随高度的变化梯度 $\beta_i \neq 0$ 时, 参考标准大气的大气压强用公式 (19) 计算。

$$P(Z) = P_i \left[\frac{T_i}{T_i + \beta_i(Z - Z_i)} \right]^{34.163/\beta_i} \dots\dots\dots (19)$$

式中:

$P(Z)$ —— Z 高度处的大气压强, hPa, 取 $P_0 = 1013.25\text{hPa}$;

- P_i —— Z_i 高度处的大气压强, hPa;
- T_i —— Z_i 高度处的大气热力学温度, K;
- β_i ——对应高度区间内的大气温度变化梯度, K/km;
- Z ——位势高度, km;
- Z_i ——对应高度区间的起始位势高度, km。

2) 当大气温度随高度的变化梯度 $\beta_i=0$ 时, 参考标准大气的大气压强用公式(20)计算。

$$P(Z) = P_i \exp\left[\frac{-34.163(Z - Z_i)}{T_i}\right] \dots\dots\dots (20)$$

式中:

- $P(Z)$ —— Z 高度处的大气压强, hPa;
- P_i —— Z_i 高度处的大气压强, hPa;
- Z ——位势高度, km;
- Z_i ——对应高度区间的起始位势高度, km;
- T_i —— Z_i 高度处的大气热力学温度, K。

c) 水汽密度

参考标准大气的水汽密度用公式(21)计算。

$$\rho(h) = \rho_0 \exp(-h/H_s) \dots\dots\dots (21)$$

式中:

- $\rho(h)$ —— h 高度处的水汽密度, g/m^3 ;
- ρ_0 ——起始高度处的水汽密度, g/m^3 , 取 $\rho_0 = 7.5g/m^3$;
- h ——海拔高度, km;
- H_s ——水汽密度标高, km, 取 $H_s = 2km$ 。

7.2 低纬度地区参考大气模式

低纬度地区(纬度小于 15°)年度平均大气热力学温度、大气压强和水汽密度模式分别由公式(22)、公式(23)和公式(24)给出。

a) 大气热力学温度

$$T(h) = \begin{cases} 300.4222 - 6.3533h + 0.005886h^2 & 0km \leq h < 17km \\ 194 + 2.533(h - 17) & 17km \leq h < 47km \\ 270 & 47km \leq h < 52km \\ 270 - 3.0714(h - 52) & 52km \leq h \leq 60km \end{cases} \dots\dots\dots (22)$$

式中:

- $T(h)$ —— h 高度处的大气热力学温度, K;
- h ——海拔高度, km。

b) 大气压强

$$P(h) = \begin{cases} 1012.0306 - 109.0338h + 3.6316h^2 & 0km \leq h \leq 10km \\ P_{10} \exp[-0.147(h - 10)] & 10km < h \leq 60km \end{cases} \dots\dots\dots (23)$$

式中:

- $P(h)$ —— h 高度处的大气压强, hPa;
- h ——海拔高度, km;

P_{10} ——10km 高度处的大气压强, hPa。

c) 水汽密度

$$\rho(h) = \begin{cases} 19.6542\exp(-0.2313h - 0.1122h^2 + 0.01351h^3 - 0.0005923h^4) & 0\text{km} \leq h \leq 15\text{km} \\ 0 & 15\text{km} < h \leq 60\text{km} \end{cases} \dots\dots (24)$$

式中:

$\rho(h)$ —— h 高度处的水汽密度, g/m^3 ;

h ——海拔高度, km。

7.3 中纬度地区参考大气模式

7.3.1 夏季中纬度地区

中纬度地区夏季参考大气模式如下:

a) 纬度为 45° 的地区, 夏季平均大气热力学温度、大气压强和水汽密度模式分别由公式(25)、公式(26)和公式(27)给出。

1) 大气热力学温度

$$T(h) = \begin{cases} 294.9838 - 5.2159h - 0.07109h^2 & 0\text{km} \leq h < 13\text{km} \\ 215.15 & 13\text{km} \leq h < 17\text{km} \\ 215.15 \exp[0.008128(h - 17)] & 17\text{km} \leq h < 47\text{km} \dots\dots\dots (25) \\ 275 & 47\text{km} \leq h < 53\text{km} \\ 275 + 111.57755[1 - \exp[0.0237(h - 53)]] & 53\text{km} \leq h \leq 60\text{km} \end{cases}$$

式中:

$T(h)$ —— h 高度处的大气热力学温度, K;

h ——海拔高度, km。

2) 大气压强

$$P(h) = \begin{cases} 1012.8186 - 111.5569h + 3.8646h^2 & 0\text{km} \leq h \leq 10\text{km} \dots\dots\dots (26) \\ P_{10} \exp[-0.147(h - 10)] & 10\text{km} < h \leq 60\text{km} \end{cases}$$

式中:

$P(h)$ —— h 高度处的大气压强, hPa;

h ——海拔高度, km;

P_{10} ——10km 高度处的大气压强, hPa。

3) 水汽密度

$$\rho(h) = \begin{cases} 14.3542\exp(-0.4174h - 0.02290h^2 + 0.001007h^3) & 0\text{km} \leq h \leq 15\text{km} \dots\dots\dots (27) \\ 0 & 15\text{km} < h \leq 60\text{km} \end{cases}$$

式中:

$\rho(h)$ —— h 高度处的水汽密度, g/m^3 ;

h ——海拔高度, km。

b) 纬度在 $15^\circ \sim 45^\circ$ 范围的地区, 夏季平均大气热力学温度、大气压强和水汽密度, 利用低纬度地区参考大气模式(具体见 7.2)与纬度为 45° 地区夏季参考大气模式, 由公式(28)线性插值得到。

$$M_{15 \sim 45} = \frac{M_{45} - M_{15}}{30}(\varphi - 15) \dots\dots\dots (28)$$

式中:

- $M_{15\sim 45}$ ——纬度在 $15^\circ \sim 45^\circ$ 范围的地区的平均大气热力学温度、大气压强或水汽密度;
- M_{45} ——利用纬度为 45° 地区的参考大气模式计算的大气热力学温度、大气压强或水汽密度;
- M_{15} ——利用低纬度地区参考大气模式计算的大气热力学温度、大气压强或水汽密度;
- φ ——地理纬度, ($^\circ$)。

- c) 纬度在 $45^\circ \sim 60^\circ$ 范围的地区, 夏季平均大气热力学温度、大气压强和水汽密度, 利用纬度为 45° 地区夏季参考大气模式和高纬度地区夏季参考大气模式(具体见 7.4.1), 由公式(29)线性插值得到。

$$M_{45\sim 60} = \frac{M_{60} - M_{45}}{15}(\varphi - 45) \dots\dots\dots (29)$$

式中:

- $M_{45\sim 60}$ ——纬度在 $45^\circ \sim 60^\circ$ 范围的地区的平均大气热力学温度、大气压强或水汽密度;
- M_{60} ——利用高纬度地区参考大气模式计算的大气热力学温度、大气压强或水汽密度;
- M_{45} ——利用纬度为 45° 地区的参考大气模式计算的大气热力学温度、大气压强或水汽密度;
- φ ——地理纬度, ($^\circ$)。

7.3.2 冬季中纬度地区

中纬度地区冬季参考大气模式如下:

- a) 纬度为 45° 的地区, 冬季平均大气热力学温度、大气压强和水汽密度模式分别由公式(30)、公式(31)和公式(32)给出。

- 1) 大气热力学温度

$$T(h) = \begin{cases} 272.7241 - 3.6217h - 0.1759h^2 & 0\text{km} \leq h < 10\text{km} \\ 218 & 10\text{km} \leq h < 33\text{km} \\ 218 + 3.3571(h - 33) & 33\text{km} \leq h < 47\text{km} \dots\dots\dots (30) \\ 265 & 47\text{km} \leq h < 53\text{km} \\ 265 - 2.0370(h - 53) & 53\text{km} \leq h \leq 60\text{km} \end{cases}$$

式中:

- $T(h)$ —— h 高度处的大气热力学温度, K;
- h ——海拔高度, km。

- 2) 大气压强

$$P(h) = \begin{cases} 1018.8627 - 124.2954h + 4.8307h^2 & 0\text{km} \leq h \leq 10\text{km} \dots\dots\dots (31) \\ P_{10} \exp[-0.147(h - 10)] & 10\text{km} < h \leq 60\text{km} \end{cases}$$

式中:

- $P(h)$ —— h 高度处的大气压强, hPa;
- h ——海拔高度, km;
- P_{10} ——10km 高度处的大气压强, hPa。

- 3) 水汽密度

$$\rho(h) = \begin{cases} 3.4742 \exp[-0.2697h - 0.03604h^2 + 0.0004489h^3] & 0\text{km} \leq h \leq 10\text{km} \dots\dots\dots (32) \\ 0 & 10\text{km} < h \leq 60\text{km} \end{cases}$$

式中:

$\rho(h)$ —— h 高度处的水汽密度, g/m^3 ;
 h ——海拔高度, km 。

- b) 纬度在 $15^\circ \sim 45^\circ$ 范围的地区, 冬季平均大气热力学温度、大气压强和水汽密度, 利用低纬度地区参考大气模式(具体见 7.2)与纬度为 45° 地区冬季参考大气模式, 由公式(28)线性插值得到。
- c) 纬度在 $45^\circ \sim 60^\circ$ 范围的地区, 冬季平均大气热力学温度、大气压强和水汽密度, 利用纬度为 45° 地区冬季参考大气模式和高纬度地区冬季参考大气模式(具体见 7.4.2), 由公式(29)线性插值得到。

7.4 高纬度地区参考大气模式

7.4.1 夏季高纬度地区

高纬度地区(纬度大于 60°)夏季平均大气热力学温度、大气压强和水汽密度模式分别由公式(33)、公式(34)和公式(35)给出。

- a) 大气热力学温度

$$T(h) = \begin{cases} 286.8374 - 4.7805h - 0.1402h^2 & 0\text{km} \leq h < 10\text{km} \\ 225 & 10\text{km} \leq h < 23\text{km} \\ 225 \exp[0.008317(h - 23)] & 23\text{km} \leq h < 48\text{km} \dots\dots\dots (33) \\ 277 & 48\text{km} \leq h < 53\text{km} \\ 277 - 4.0769(h - 53) & 53\text{km} \leq h \leq 60\text{km} \end{cases}$$

式中:

$T(h)$ —— h 高度处的大气热力学温度, K ;
 h ——海拔高度, km 。

- b) 大气压强

$$P(h) = \begin{cases} 1008.0278 - 113.2494h + 3.9408h^2 & 0\text{km} \leq h \leq 10\text{km} \dots\dots\dots (34) \\ P_{10} \exp[-0.140(h - 10)] & 10\text{km} < h \leq 60\text{km} \end{cases}$$

式中:

$P(h)$ —— h 高度处的大气压强, hPa ;
 h ——海拔高度, km ;
 P_{10} —— 10km 高度处的大气压强, hPa 。

- c) 水汽密度

$$\rho(h) = \begin{cases} 8.988 \exp[-0.3614h - 0.005402h^2 - 0.001955h^3] & 0\text{km} \leq h \leq 15\text{km} \dots\dots\dots (35) \\ 0 & 15\text{km} < h \leq 60\text{km} \end{cases}$$

式中:

$\rho(h)$ —— h 高度处的水汽密度, g/m^3 ;
 h ——海拔高度, km 。

7.4.2 冬季高纬度地区

高纬度地区(纬度大于 60°)冬季平均大气热力学温度、大气压强和水汽密度模式分别由公式(36)、公式(37)和公式(38)给出。

- a) 大气热力学温度

$$T(h) = \begin{cases} 257.4345 + 2.3474h - 1.5479h^2 + 0.08473h^3 & 0\text{km} \leq h < 8.5\text{km} \\ 217.5 & 8.5\text{km} \leq h < 30\text{km} \\ 217.5 + 2.125(h - 30) & 30\text{km} \leq h < 50\text{km} \dots\dots\dots (36) \\ 260 & 50\text{km} \leq h < 54\text{km} \\ 260 - 1.667(h - 54) & 54\text{km} \leq h \leq 60\text{km} \end{cases}$$

式中:

$T(h)$ —— h 高度处的大气热力学温度, K;

h ——海拔高度, km。

b) 大气压强

$$P(h) = \begin{cases} 1010.8828 - 122.2411h + 4.554h^2 & 0\text{km} \leq h \leq 10\text{km} \dots\dots\dots (37) \\ P_{10} \exp[-0.147(h - 10)] & 10\text{km} < h \leq 60\text{km} \end{cases}$$

式中:

$P(h)$ —— h 高度处的大气压强, hPa;

h ——海拔高度, km;

P_{10} ——10km 高度处的大气压强, hPa。

c) 水汽密度

$$\rho(h) = \begin{cases} 1.2319 \exp[0.07481h - 0.0981h^2 + 0.00281h^3] & 0\text{km} \leq h \leq 10\text{km} \dots\dots\dots (38) \\ 0 & 10\text{km} < h \leq 60\text{km} \end{cases}$$

式中:

$\rho(h)$ —— h 高度处的水汽密度, g/m^3 ;

h ——海拔高度, km。

8 应用说明

对流层电波折射修正各大气模式应用说明:

- 线性模式一般用于计算近地面 1km 高度范围内的对流层大气折射率;
- 指数模式可计算 60km 高度以下范围内的对流层大气折射率剖面, 对流层大气折射误差计算时, 常假设对流层大气折射率随高度呈负指数分布;
- 分段模式可计算 60km 高度以下范围内的对流层大气折射率剖面, 该模式考虑了地表对近地 1km 高度范围内对流层大气折射率的影响以及 9km 以上高度区域对流层大气折射率分布的稳定性, 预测精度较高;
- Hopfield 模式假设等效高度以下大气温度随高度线性递减, 虽然对流层顶高度以上该假设不成立, 且等效高度以上对流层大气折射率等于 0 也与实际不尽相符, 但统计结果表明, 以上假设对对流层顶高度以上对流层大气折射率剖面预测精度的影响较小; 另外, Hopfield 模式静力项等效高度计算公式考虑了地面气温的影响, 提高了该模式的预测精度;
- 作为对流层大气折射率剖面模式的一种有效补充, 对流层参考大气剖面模式可用于多测量体制的对流层大气折射误差修正, 亦可为其他对流层大气传播效应评估、计算提供参考。

附录 A
(资料性附录)
对流层地面气象参数、折射率及海平面折射率统计均值

全球表面大气压强统计均值等值线图参见图 A.1，全球表面大气热力学温度统计均值等值线图参见图 A.2，全球表面水汽压统计均值等值线图参见图 A.3，全球表面 50% 时间被超过的水汽密度分布图参见图 A.4，中国区域地面折射率统计均值等值线图参见图 A.5，全球区域表面折射率统计均值等值线图参见图 A.6，中国区域海平面折射率年平均值等值线图参见图 A.7，全球区域海平面折射率统计均值等值线图参见图 A.8。

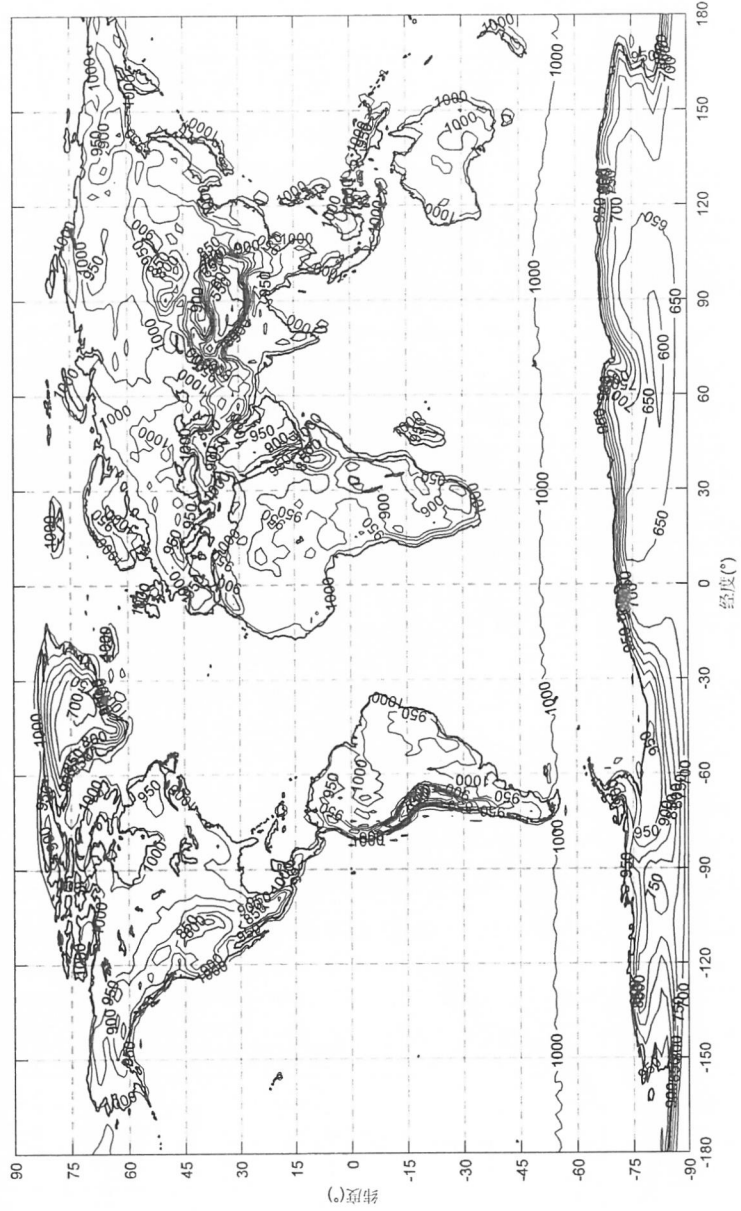


图 A.1 全球表面大气压强统计均值等值线图 (hPa)

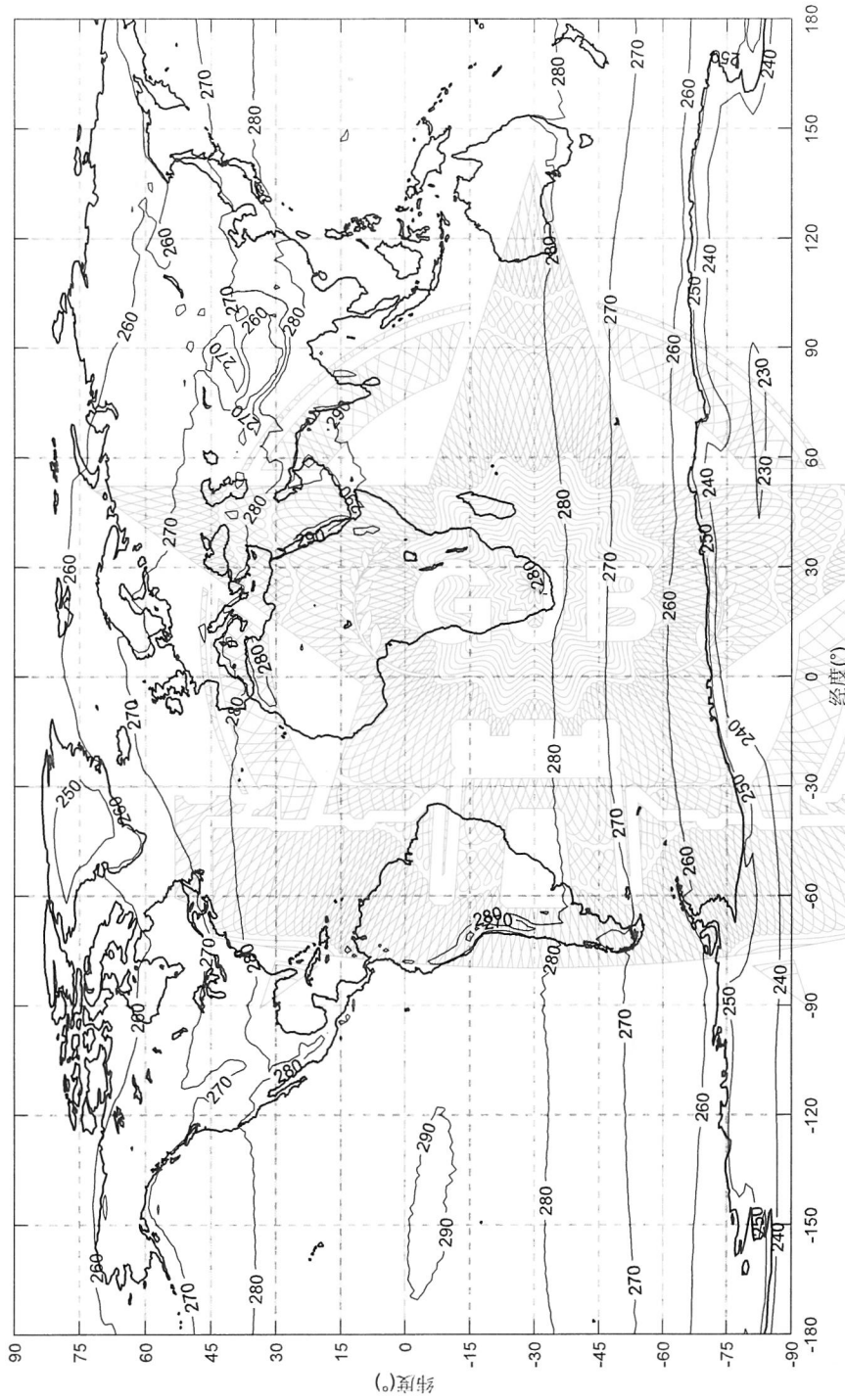


图 A.2 全球表面大气热力学温度统计均值等值线图 (K)

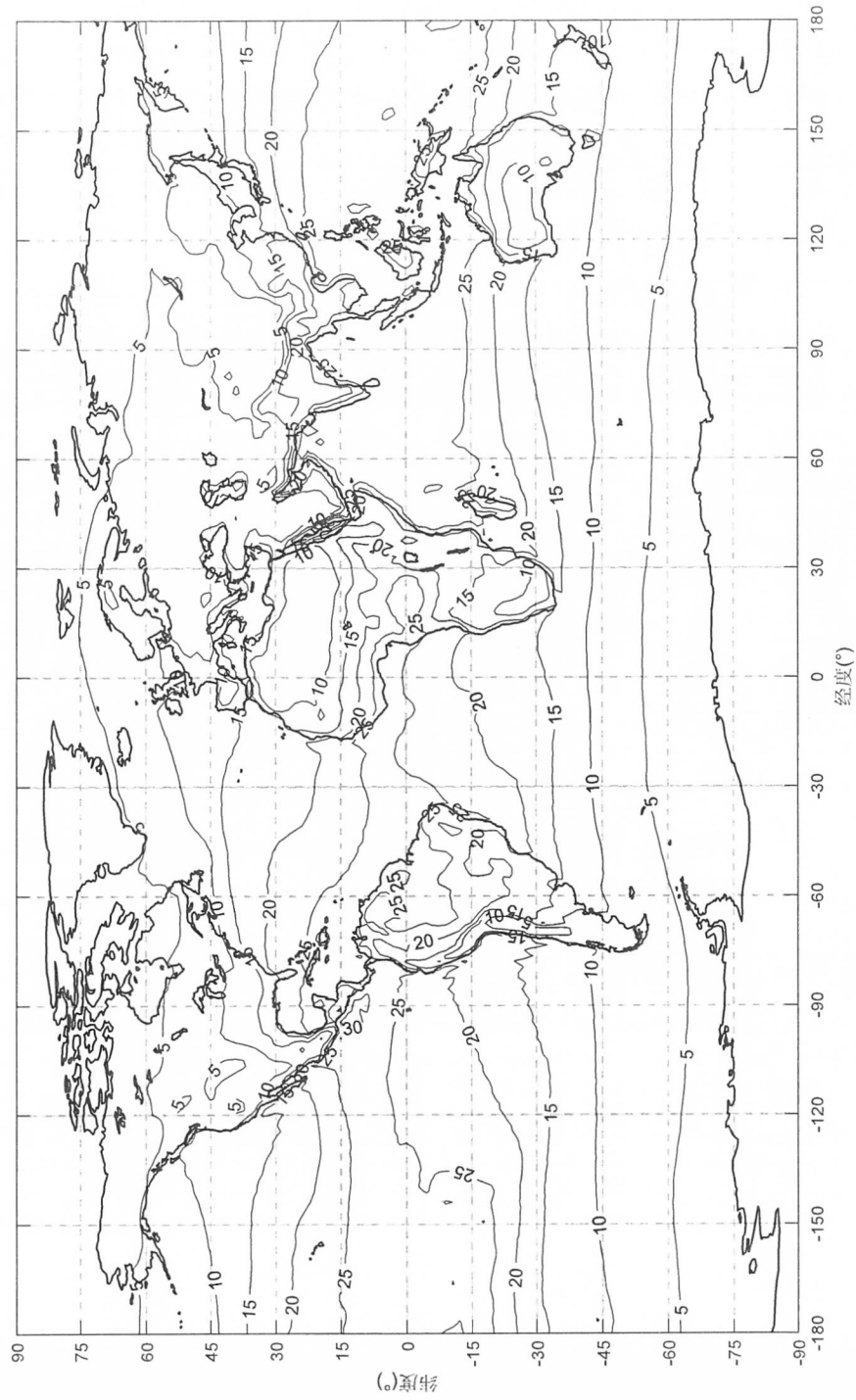


图 A.3 全球表面水汽压统计均值等值线图 (hPa)

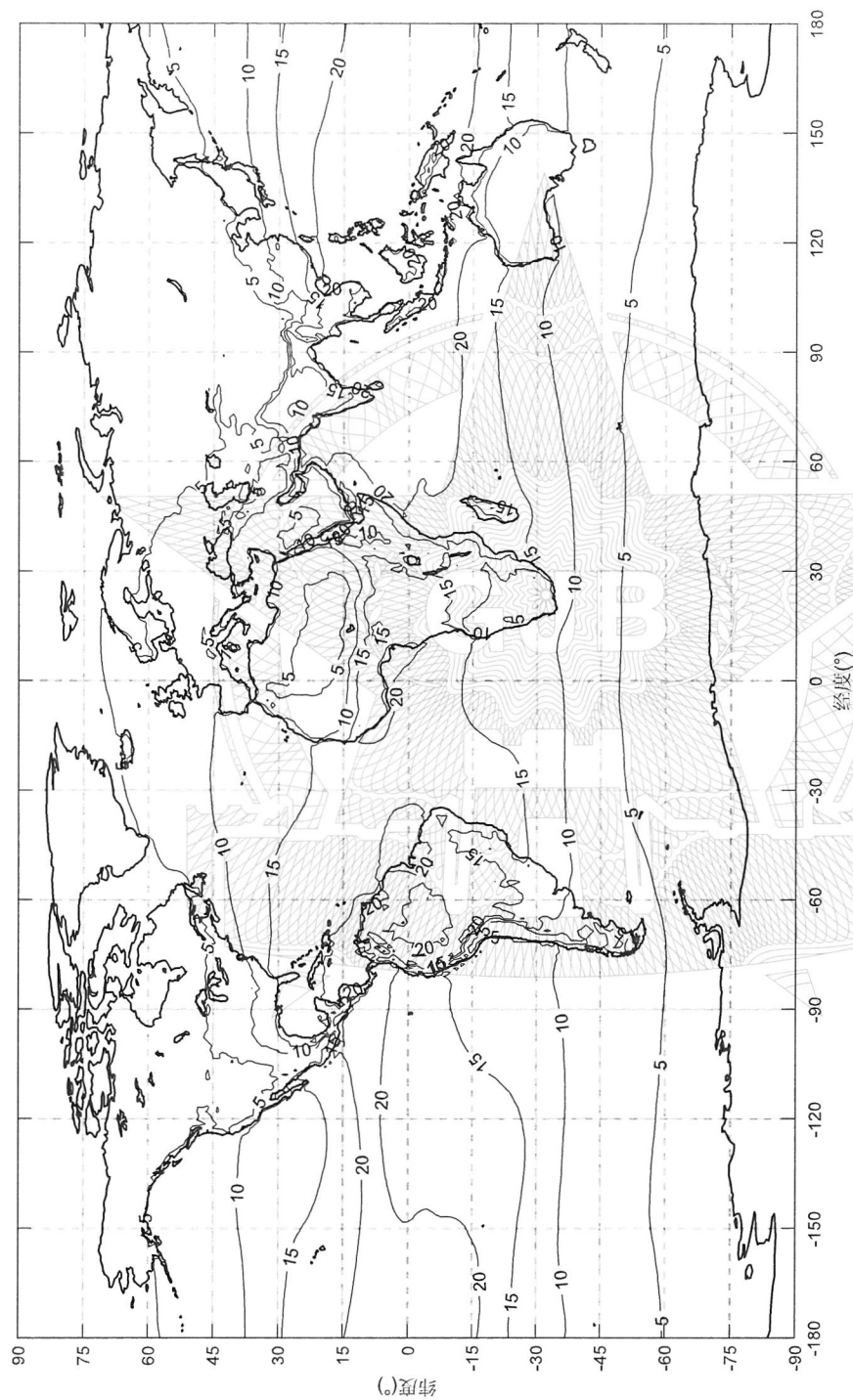


图 A.4 全球表面 50% 时间被超过的水汽密度分布图 (g/m^3)

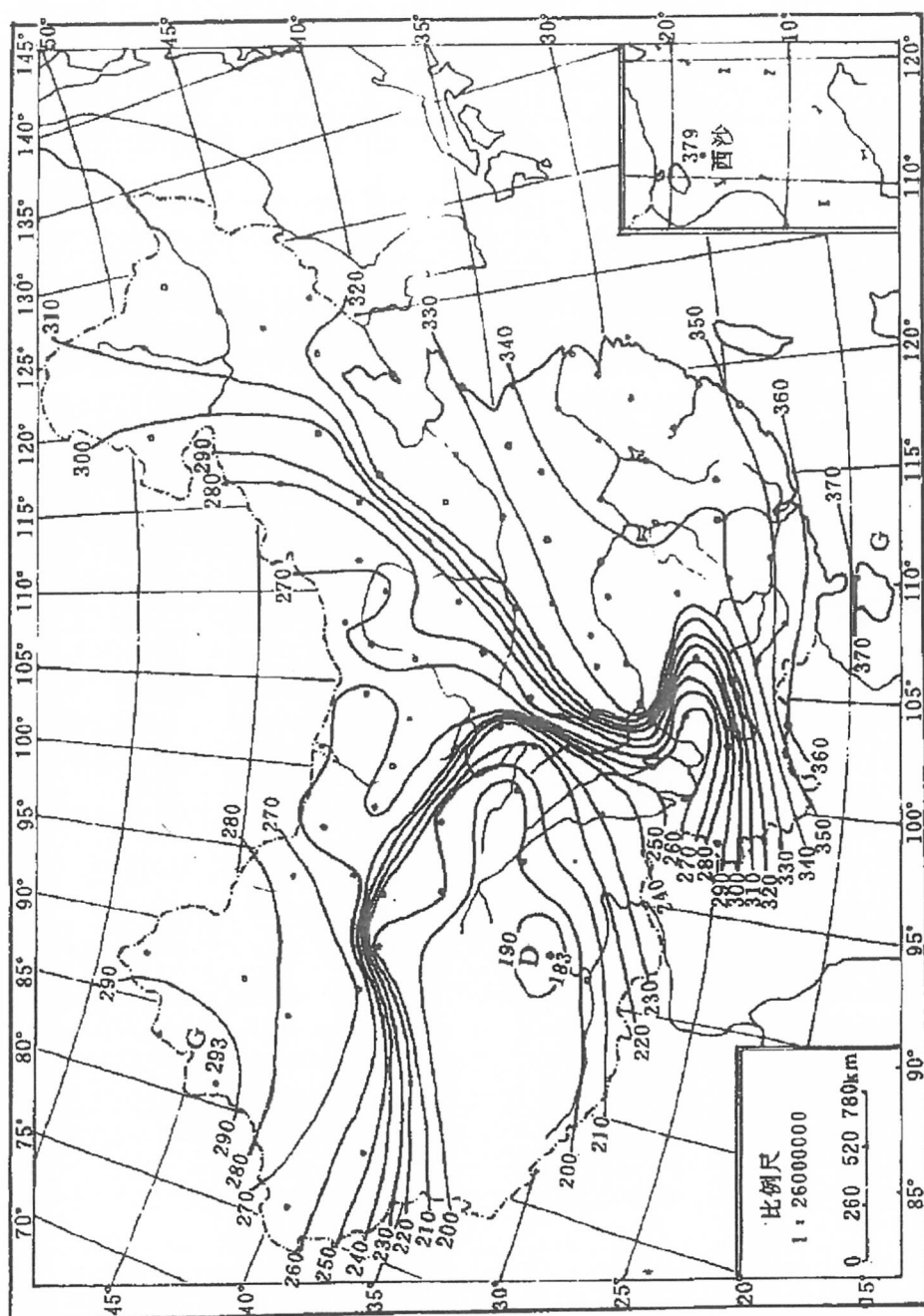


图 A.5 中国区域地面折射率统计均值等值线图(N-unit)

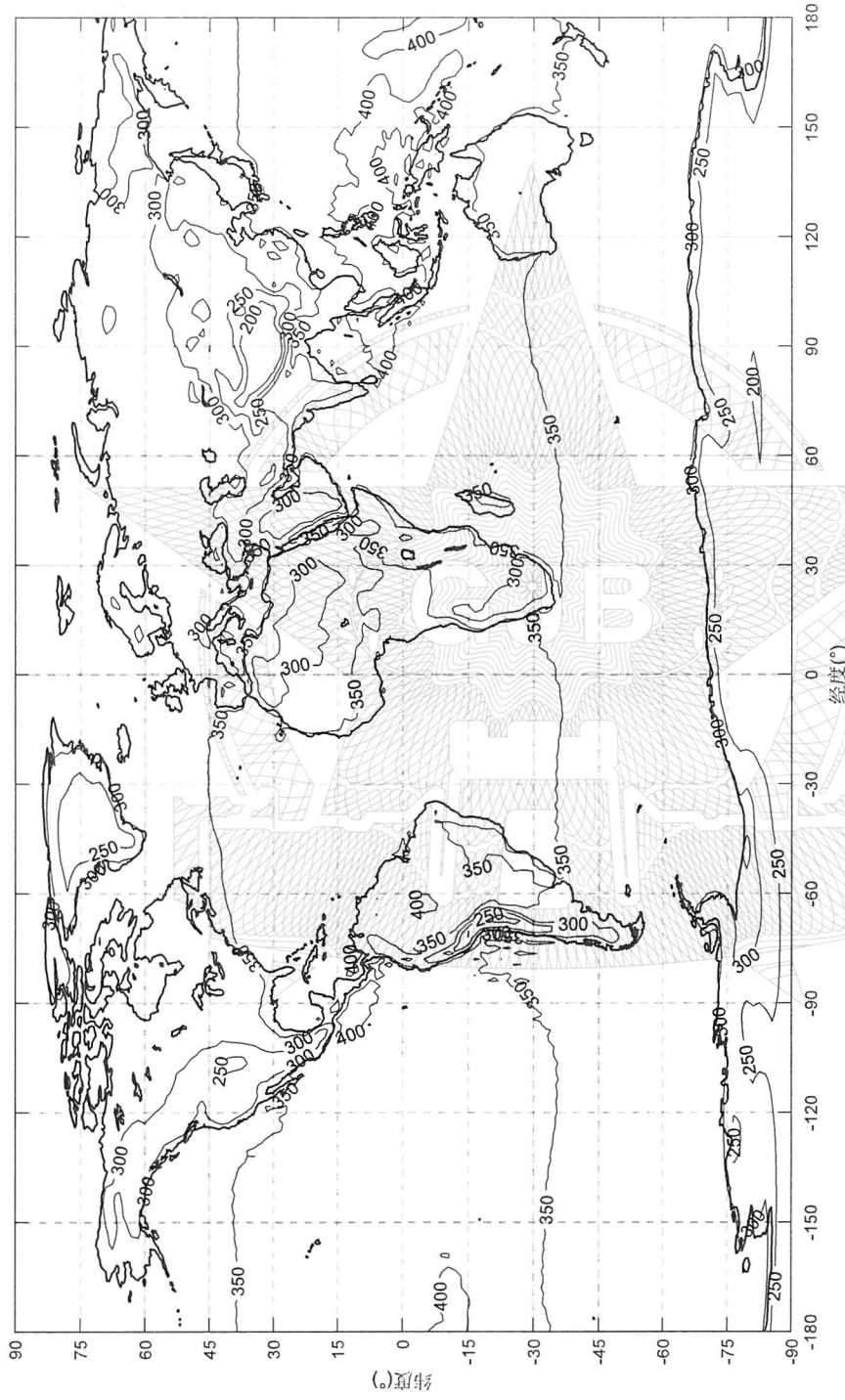


图 A.6 全球表面折射率统计均值等值线图 (N-unit)

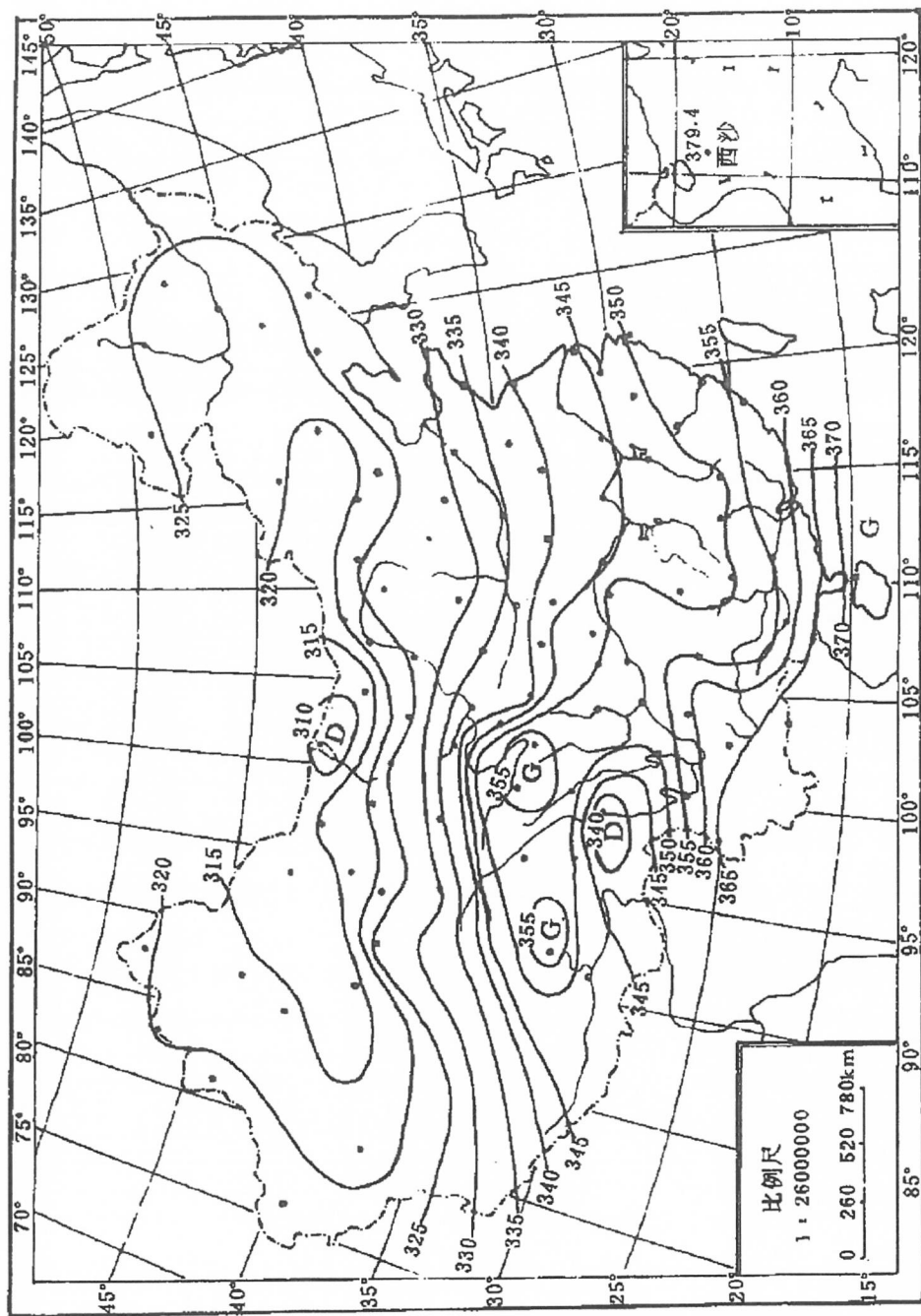


图 A.7 中国区域海平面折射率年平均等值线图 (N-unit)

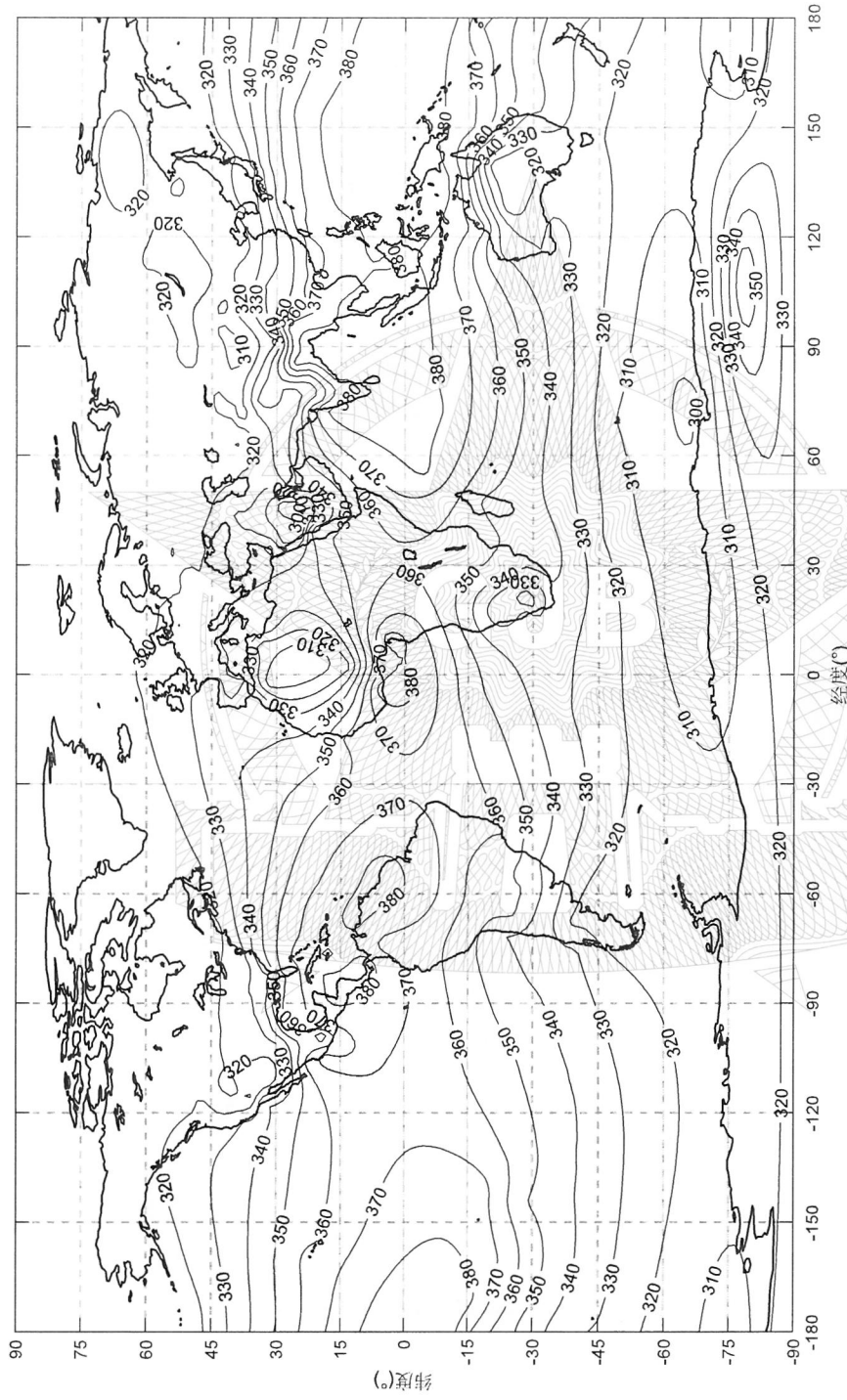


图 A.8 全球海平面折射率年中值等值线图 (N-unit)

附录 B
(资料性附录)
中国区域指数模式的指数衰减系数统计均值

中国区域指数模式的指数衰减系数统计均值图参见图 B.1。

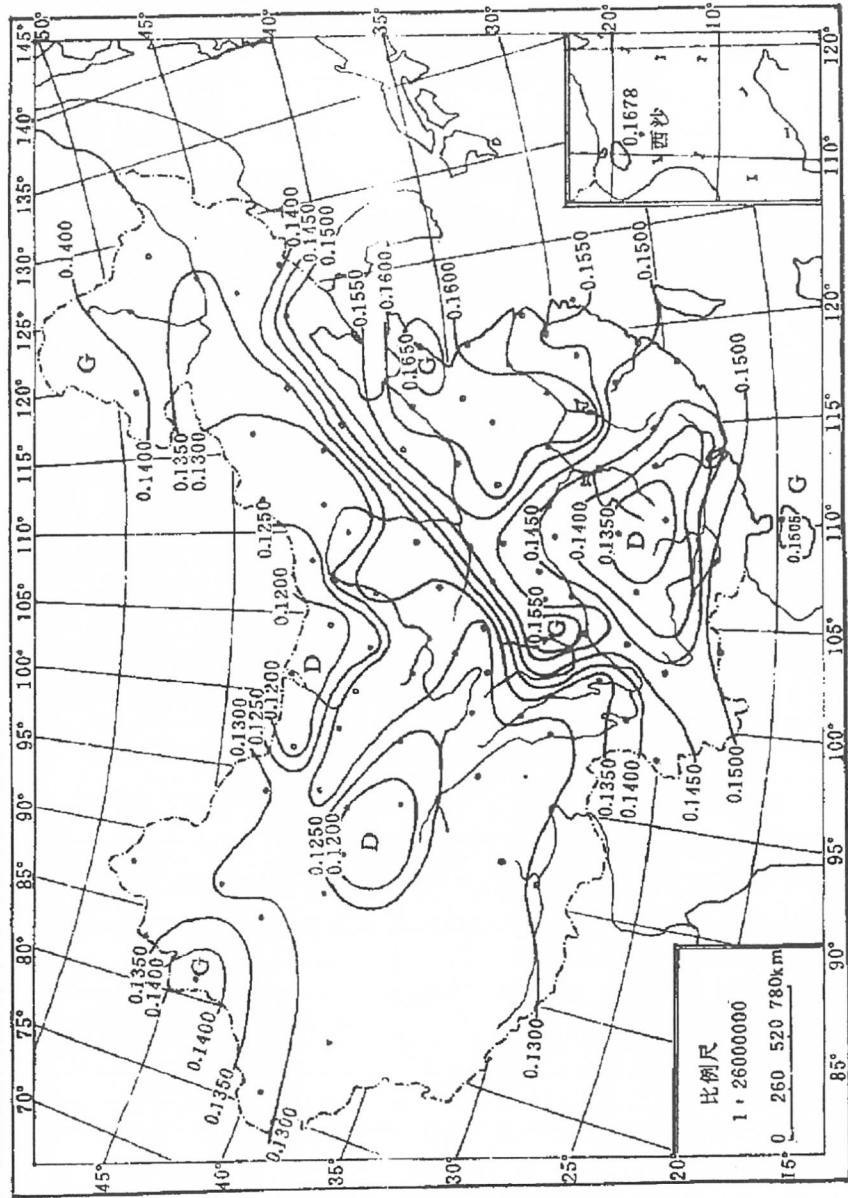


图 B.1 中国区域指数模式的指数衰减系数统计均值等值线图 (1/km)

附录 C
(资料性附录)
近地面 1km 折射率梯度统计均值

中国区域近地面 1km 折射率梯度统计均值等值线图参见图 C.1，全球区域近地面 1km 折射率梯度年中等值线图见图 C.2。

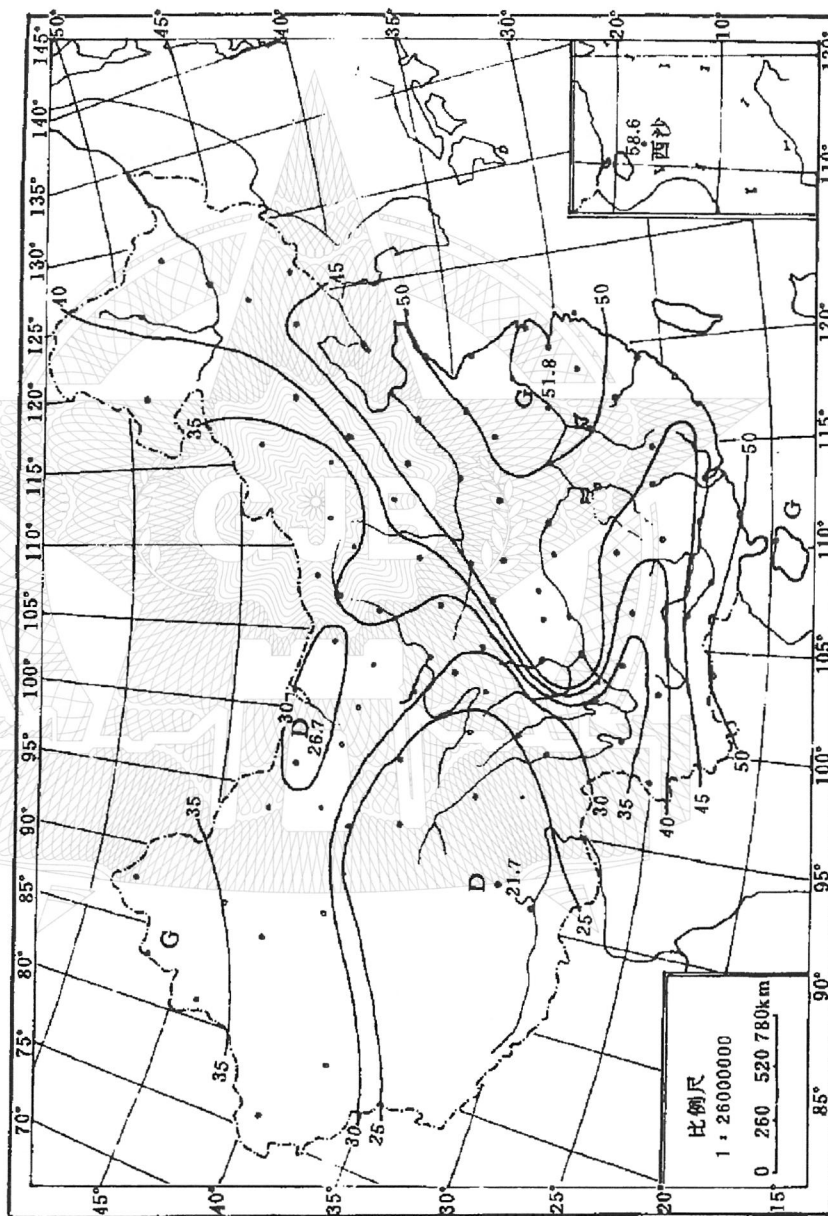


图 C.1 中国区域近地面 1km 折射率梯度统计均值等值线图 (N-unit/km)

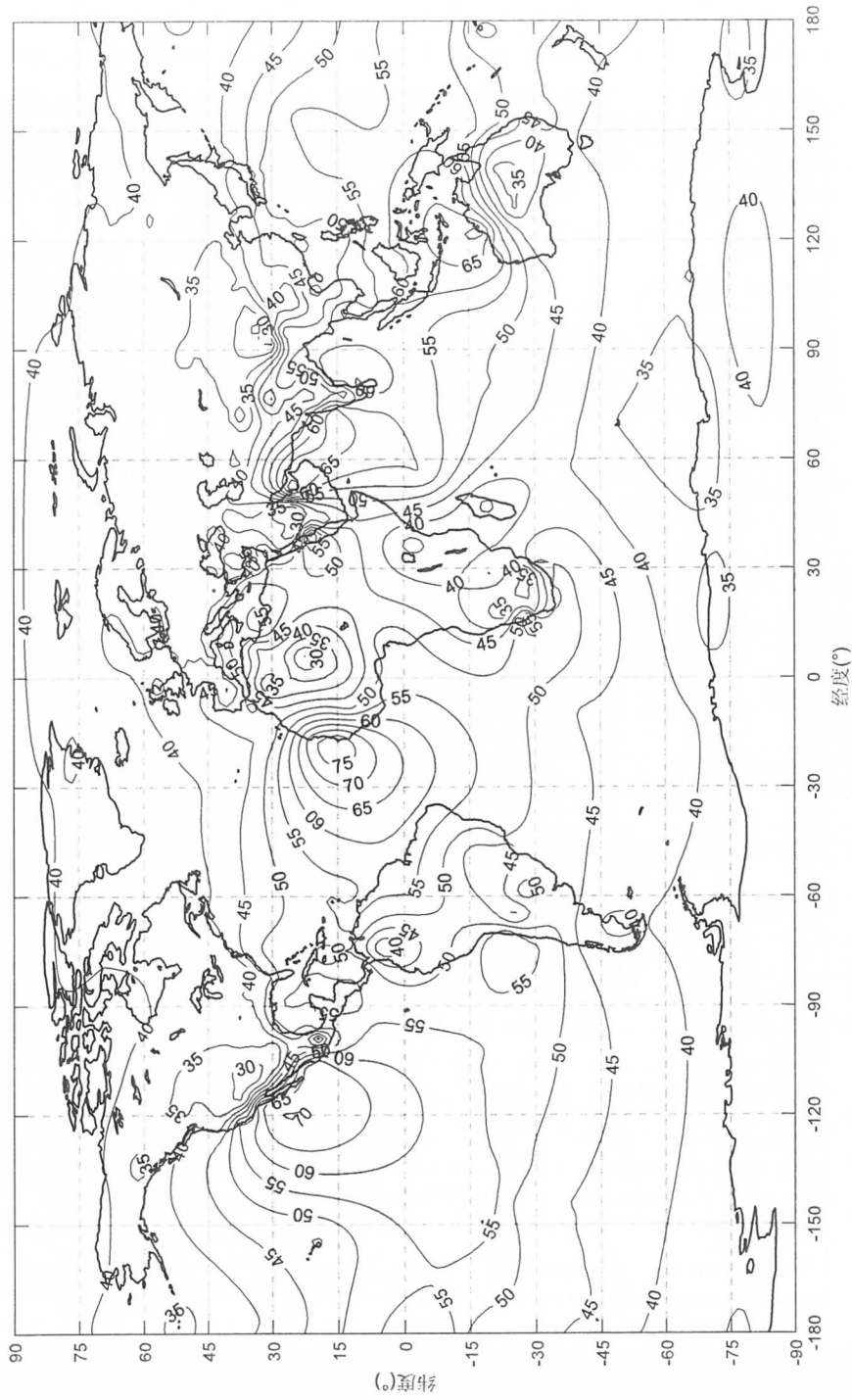


图 C.2 全球近地 1km 折射率梯度年中值等值线图 (N-unit/km)

附录 D
(资料性附录)
中国区域近地面 1km 至海拔 9km 的指数衰减系数统计均值

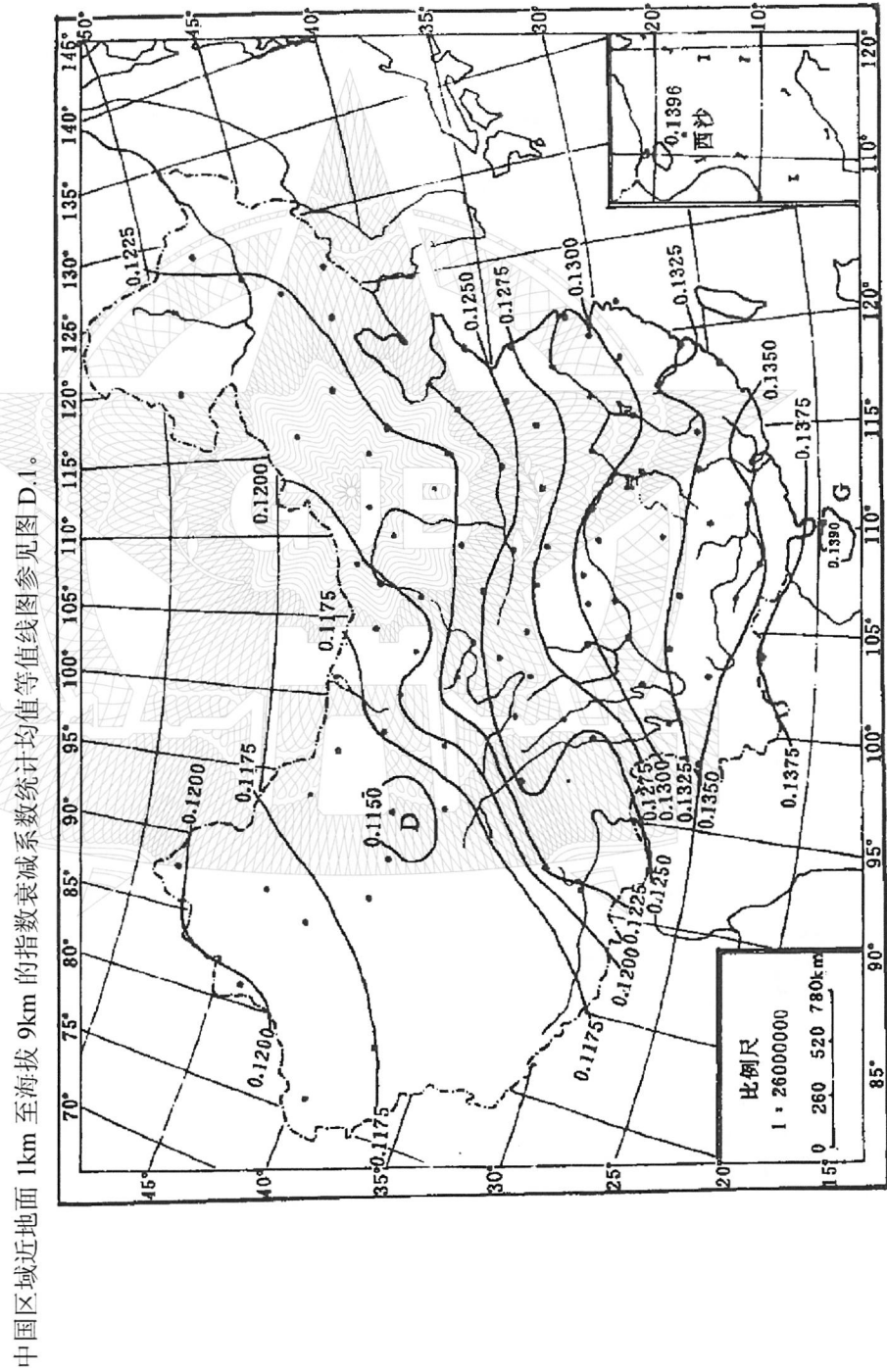


图 D.1 中国区域近地面 1km 至海拔 9km 的指数衰减系数统计均值等值线图 (1/km)

附录 E
(资料性附录)
中国区域海拔 9km 以上高度的指数衰减系数统计均值

中国区域海拔 9km 以上高度的指数衰减系数统计均值等值线图参见图 E.1。

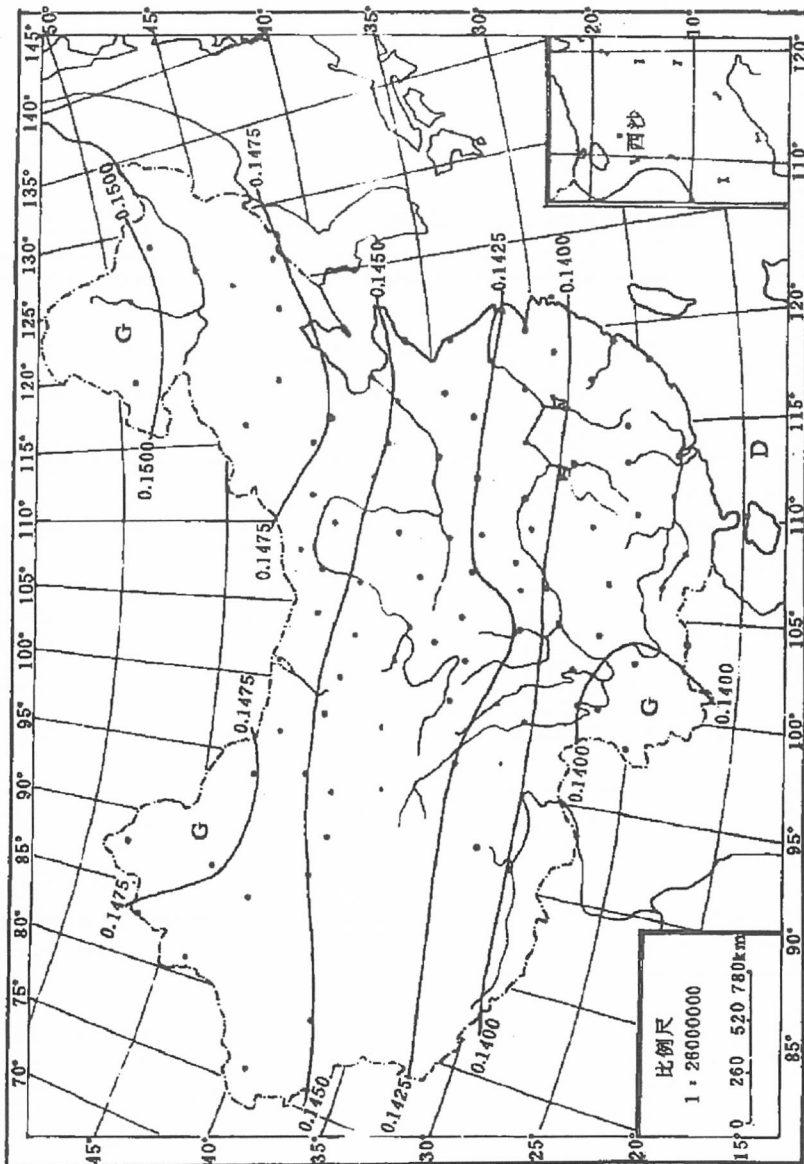


图 E.1 中国区域海拔 9km 以上高度的指数衰减系数统计均值等值线图 (1/km)

中华人民共和国
国家军用标准
对流层电波折射修正大气模式
GJB 1655A—2024

*

国家军用标准出版发行部出版
(北京东外京顺路7号)
国家军用标准出版发行部印刷车间印刷
国家军用标准出版发行部发行
版权专有 不得翻印

*

开本 880×1230 1/16 印张 2 字数 59 千字
2025年2月第1版 2025年2月第1次印刷

*

军标出字第 16638 号