

国 际 电 信 联 盟

**ITU-R**

国际电联无线电通信部门

**ITU-R P.453-13建议书**  
(12/2017)

**无线电折射率：公式和  
折射率数据**

**P系列  
无线电波传播**



ITU 国际电信联盟

## 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）

ITU-R的知识产权政策在ITU-R第1号决议附件1引用的“ITU-T/ITU-R/ISO/IEC共同专利政策”中做了说明。专利持有者提交专利和许可声明的表格可从<http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>获得，该网址也提供了“ITU-T/ITU-R/ISO/IEC共同专利政策实施指南”以及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/en>）

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、业余及相关卫星业务
<b>P</b>	<b>无线电波传播</b>
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	时间信号和频率标准发射
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  
2018年，日内瓦

© 国际电联 2018

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.453-13建议书

## 无线电折射率：公式和折射率数据

(ITU-R第201/3号课题)

(1970-1986-1990-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2003-2012-2015-2016-2017年)

## 范围

ITU-R P.453建议书提供估测无线电折射率及其在全球各个方位的特点的方法；描述表面及垂直分布特点；并提供了表示折射率参数分布及其统计变化的全球地图。

## 关键词

无线电折射率、表面、垂直分布、折射参数、统计变化

国际电联无线电通信全会，

考虑到

- a) 必须使用单一的公式来计算大气折射率；
- b) 需要全球折射率和折射率梯度方面的参考数据；
- c) 必须用数学方法来表示折射率梯度的统计分布，

建议

- 1 大气无线电折射率 $n$ 应通过附件1给出的公式计算；
- 2 应采用附件1世界航线图和全球数值地图中给出的折射率数值，除非有更可靠的本地数据；
- 3 应采用附件1给出的方法计算折射率梯度的统计分布；
- 4 如果温度和相对湿度无本地数据，则应采用附件1第2.2节描述的超过全年50%数值的地表无线折射率湿项全球数值地图（参见图3）。

## 附件1

## 1 无线电折射率公式

大气无线电折射率 $n$ 可用下列公式计算:

$$n = 1 + N \times 10^{-6} \quad (1)$$

其中无线电折射率 $N$ 为:

$$N = 77.6 \frac{P_d}{T} + 72 \frac{e}{T} + 3.75 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (\text{N-units}) \quad (2)$$

无线电折射率干项 $N_{dry}$ 为:

$$N_{dry} = 77.6 \frac{P_d}{T} \quad (3)$$

无线电折射率湿项 $N_{wet}$ 为:

$$N_{wet} = 72 \frac{e}{T} + 3.75 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (4)$$

其中:

$P_d$ : 干燥大气压力 (hPa)

$P$ : 总气压 (hPa)

$e$ : 水蒸气压力 (hPa)

$T$ : 绝对温度 (K)

并且

$$P = P_d + e \quad (5)$$

鉴于  $P_d = P - e$ , 等式(2)还可表述为:

$$N = 77.6 \frac{P}{T} - 5.6 \frac{e}{T} + 3.75 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (6)$$

等式(6)可近似地表述为下列方程式, 但精确度有所降低:

$$N = \frac{77.6}{T} \left( P + 4810 \frac{e}{T} \right) \quad (7)$$

对于 $-50^{\circ}\text{C}$ 至 $+40^{\circ}\text{C}$ 的温度范围, 等式(7)得到的 $N$ 的值在由等式(2)得到的值的0.02%内。对于温度、压力和水蒸气压力的典型分布情况, 见ITU-R P.835建议书。

为便于参照, 水蒸气压力 $e$ 和相对湿度由下列等式给出:

$$e = \frac{H \cdot e_s}{100} \quad (8)$$

其中:

$$e_s = EF \cdot a \cdot \exp \left[ \frac{\left( b - \frac{t}{d} \right) \cdot t}{t + c} \right] \quad (9)$$

且:

$$EF_{water} = 1 + 10^{-4} \left[ 7.2 + P \cdot \left( 0.00320 + 5.9 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 \right) \right]$$

$$EF_{ice} = 1 + 10^{-4} \left[ 2.2 + P \cdot \left( 0.00382 + 6.4 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 \right) \right]$$

其中:

$t$ : 温度 (°C)

$P$ : 总气压 (hPa)

$H$ : 相对湿度 (%)

$e_s$ : 温度  $t$  (°C) 情况下的饱和水蒸气压力 (hPa), 且系数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为:

水

$$a = 6.1121$$

$$b = 18.678$$

$$c = 257.14$$

$$d = 234.5$$

(有效范围-40°至+50°)

冰

$$a = 6.1115$$

$$b = 23.036$$

$$c = 279.82$$

$$d = 333.7$$

(有效范围-80°至0°)

其中  $P$  定义为总气压, 可采用干燥大气压力, 其预测精度上的损失可以忽略不计。

通过水蒸气密度, 采用以下等式获取水蒸气压力  $e$ :

$$e = \frac{\rho T}{216.7} \quad \text{hPa} \quad (10)$$

其中单位为  $\text{g/m}^3$ 。代表值由 ITU-R P.836 建议书给出。

## 2 表面折射率与高度的关系

### 2.1 折射率与高度的函数关系

折射率  $n$  与高度  $h$  之间的长期平均相关由以下指数律表述:

$$n(h) = 1 + N_0 \times 10^{-6} \times \exp(-h/h_0) \quad (11)$$

其中:

$N_0$ : 外推至海平面的大气折射率平均值

$h_0$ : 标尺高度 (km)。



不同气候条件下的 $N_0$ 和 $h_0$ 可通过统计方式确定。为便于参照，全球平均高度折射率可定义为：

$$N_0 = 315$$

$$h_0 = 7.35 \text{ km}$$

这些数值仅适用于地面路径。

该参考分布可用于通过 $N_0$ 计算地球表面折射率 $N_s$ ：

$$N_s = N_0 \exp(-h_s/h_0) \quad (12)$$

其中：

$h_s$ ：地球表面海拔高度（km）。

不过，有必要注意的是，图1和图2中的曲线是利用 $h_0$ 等于9.5 km条件获取的。图1和图2来自约1 000座地面站为期5年（1955-1959年）的数据（图1和图2无数值形式）。

对于地球-卫星路径，任意高度的折射率可通过以上等式(1)、(2)和(10)以及ITU-R P.835建议书附件1给出的参数的适当值来获得。由此获得的折射率然后可用于穿透大气的射线路径的数值建模。

（请注意，等式(12)中的指数曲线也可用于近地球表面折射率梯度以及视轴角度的快速和大致预测，如ITU-R P.834建议书第4.3节所述。）

## 2.2 表面折射率湿项

平均每年和每月分别在0.1、0.2、0.3、0.5、1、2、3、5、10、20、30、50、60、70、80、90、95和99%的时间超出的表面折射率湿项 $N_{wet}$  (ppm)的年度值和月度值为本建议书的组成部分，在R-Rec. P.453-13-201712-I!!!ZIP-E.zip中以数字地图形式提供。

数据是经度 $-180^\circ$ 至 $180^\circ$ 以及纬度 $-90^\circ$ 至 $90^\circ$ 的数据，经纬度的分辨率均为 $0.75^\circ$ 。地球表面所需位置的表面折射率湿项可通过下列插值方法得出：

- a) 从0.1、0.2、0.3、0.5、1、2、3、5、10、20、30、50、60、70、80、90、95和99%的数据集中确定高于和低于所需概率 $p$ 的两个概率 $p_{above}$ 和 $p_{below}$ ；
- b) 对于两个概率 $p_{above}$ 和 $p_{below}$ ，确定最近的四个栅格点的表面折射率湿项 $N_{wet1}$ 、 $N_{wet2}$ 、 $N_{wet3}$ 和 $N_{wet4}$ ；
- c) 通过四个栅格点的四个表面折射率湿项值 $N_{wet1}$ 、 $N_{wet2}$ 、 $N_{wet3}$ 和 $N_{wet4}$ 的双线性插值确定概率 $p_{above}$ 和 $p_{below}$ 时的表面折射率湿项 $N_{wetabove}$ 和 $N_{wetbelow}$ ，如ITU-R P.1144建议书所述；
- d) 通过在相对于 $\log p$ 的线性 $N_{wet}$ 规模上相对于 $p_{above}$ 和 $p_{below}$ 的 $N_{wetabove}$ 和 $N_{wetbelow}$ 与 $p$ 的插值确定所需概率 $p$ 时的表面折射率湿项 $N_{wet}$ 。

月度和年度表面折射率湿项的推导利用了欧洲中程天气预报中心（ECMWF）36年（1979-2014年）的ERA-Interim数据。

为便于参照，图3给出了超过平均年份的表面折射率湿项平均值（50%）。

图1  
M<sub>0</sub>月平均值：二月

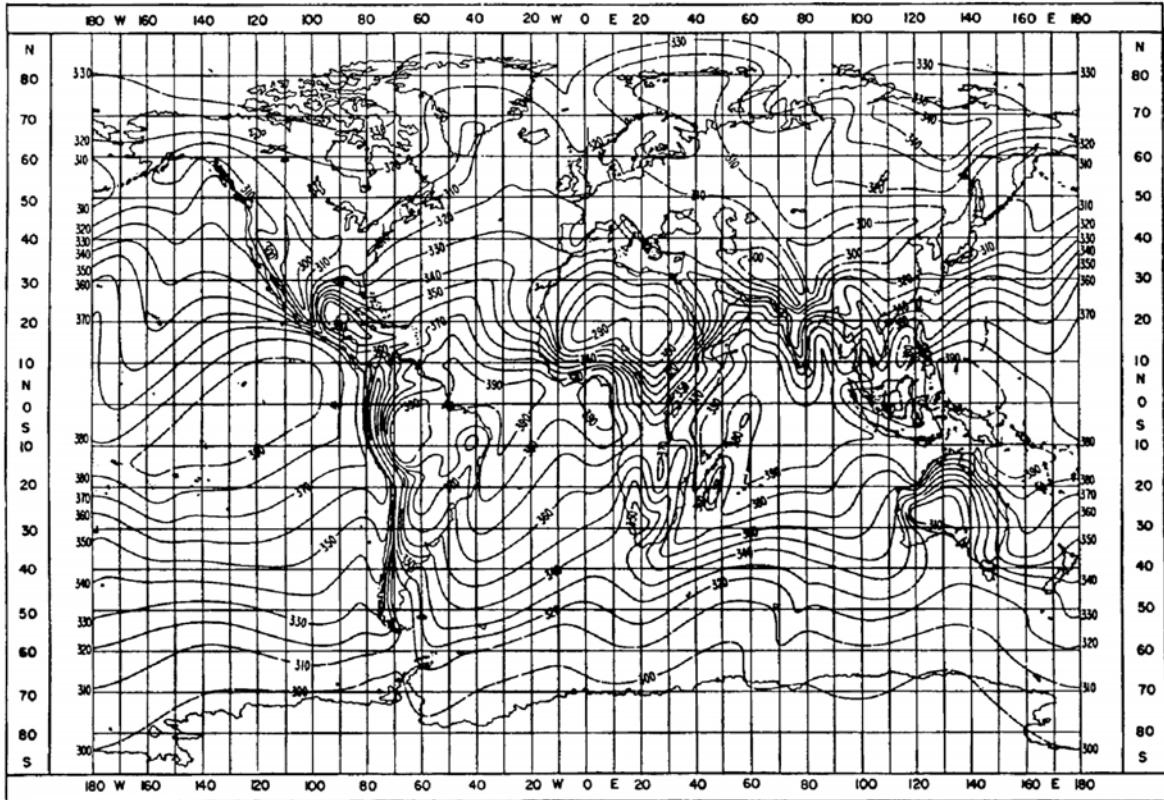
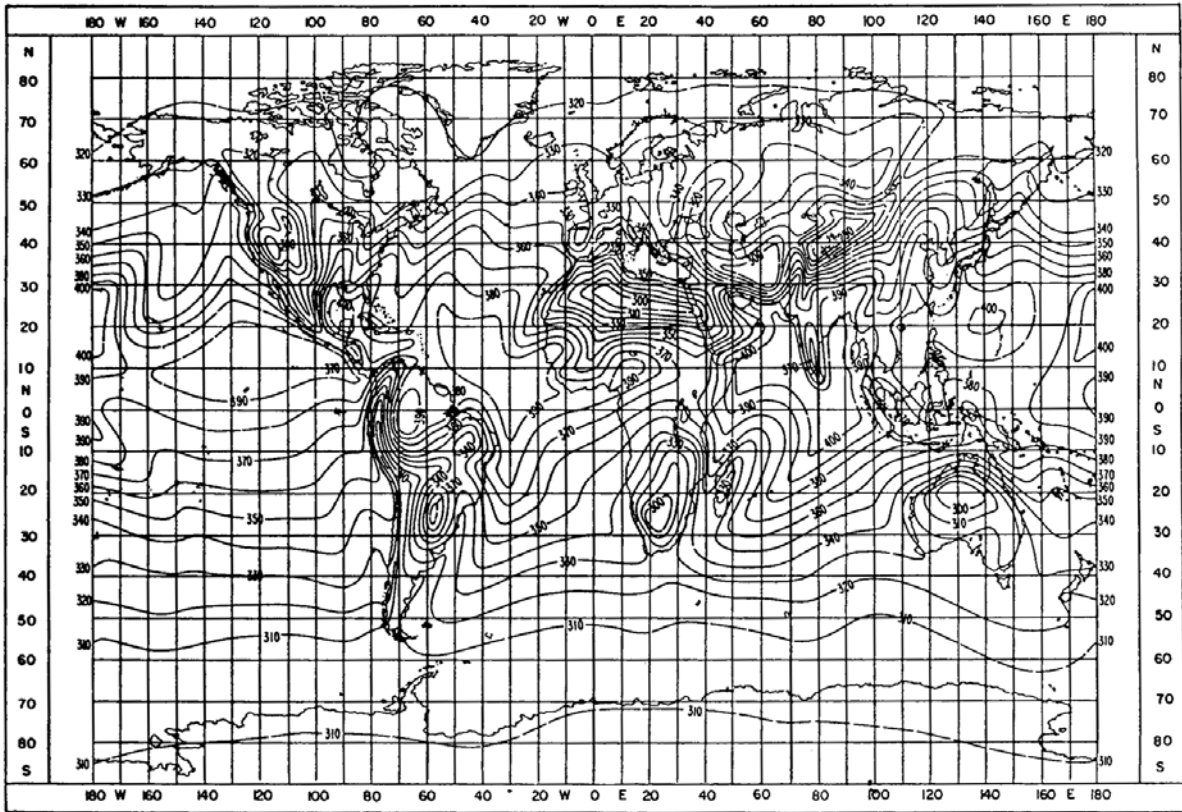
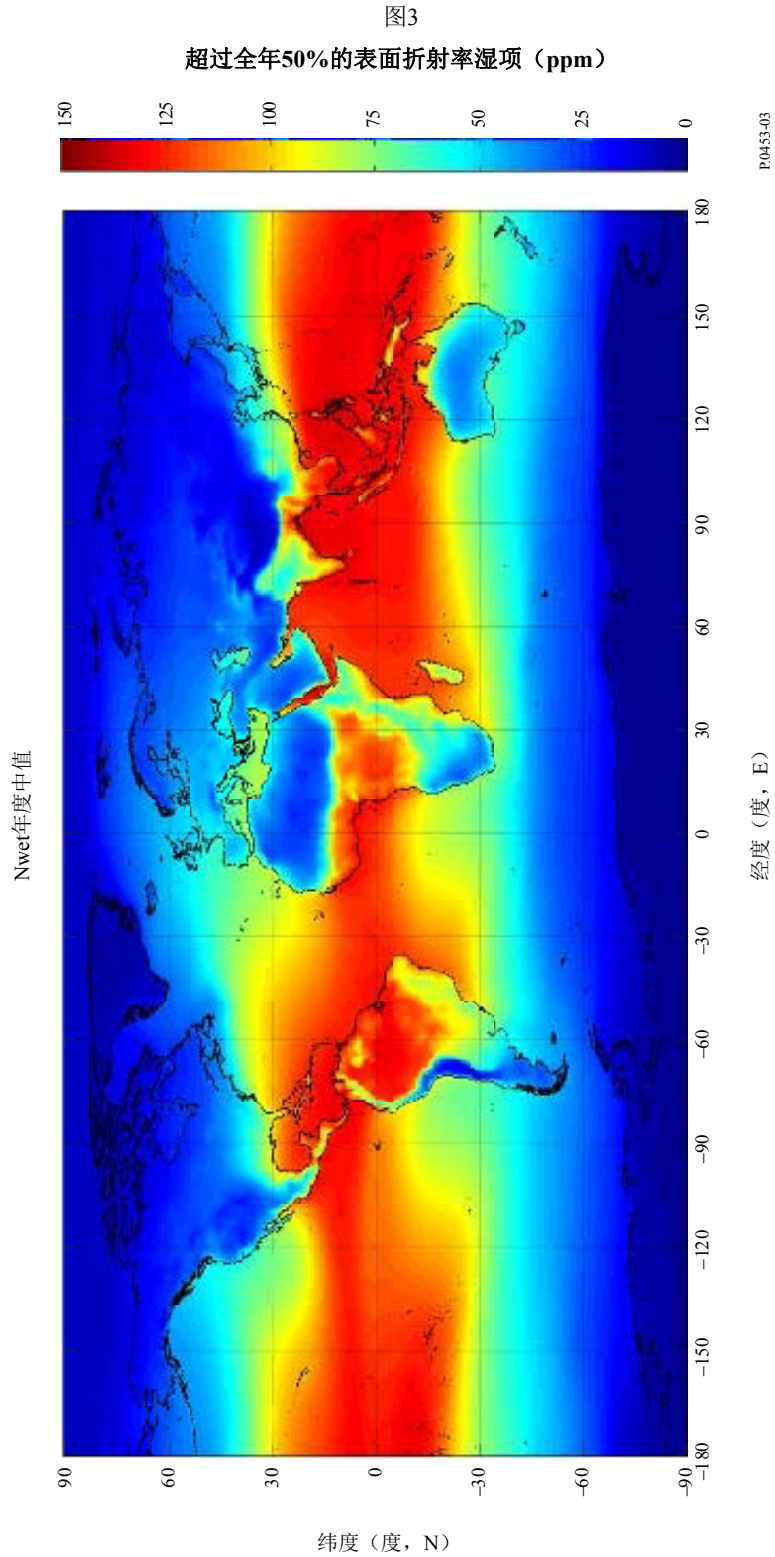


图2  
M月平均值：八月







### 3 垂直折射率梯度

大气最底层无线电折射率垂直统计梯度对于预测路径净空和传播相关效应参数（如穿越地平线路径传导，表面反射以及地面视距链路多径衰落和失真）来说非常重要。

### 3.1 大气层第一公里情况

图4至图7显示了无线电折射率在一个距离表面1公里的层上的月平均降低等值线（即垂直梯度）。无线电折射率变化 $\Delta N$ 由下列等式计算：

$$\Delta N = N_s - N_1 \quad (13)$$

其中 $N_1$ 是距地表高度1 km的无线电折射率。各 $\Delta N$ 值并未按某一参考表面简化。图4至图7推导自99个无线电探空仪所在位置为期5年（1955-1959年）的数据集合。（图4至图7不存在数值形式。）

此外，平均每年0.1、0.2、0.5、1、2、5、10、20、30、40、50、60、70、80、90、95、98、99、99.5、99.8、99.9%的时间超出的 $\Delta N$ 的年度值是本建议书不可分割的组成部分，并以数字地图的形式在增补中提供。平均每月0.1、0.2、0.5、1、2、5、10、20、30、40、50、60、70、80、90、95、98、99、99.5、99.8、99.9%的时间超过的 $\Delta N$ 的月度值是本建议书不可分割的组成部分，并以数字地图的形式在增补中提供。

### 3.2 大气最底层情况

距地球表面100 m的最底层折射率梯度统计被用于估测导管和多径情况发生的概率。在不存在更可靠本地数据情况下，图8至图11各图给出了从99个无线电探空仪所在位置为期5年（1955-1959年）的数据推导出的全球此类统计的数据情况。（图8至图11不存在数值形式。）

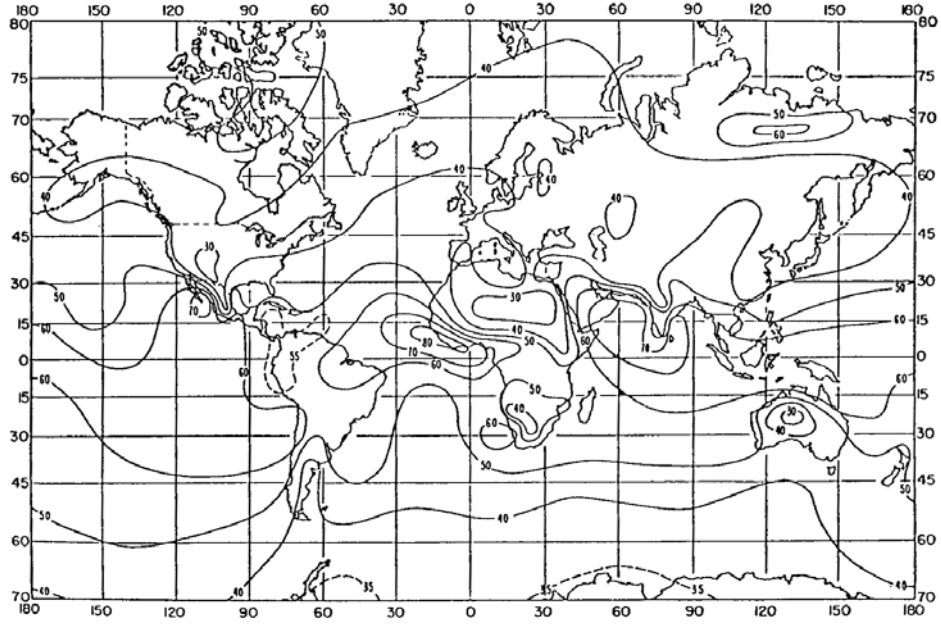
此外，下列参数是本建议书不可分割的组成部分，并以数字地图的形式在增补中提供：

- 平均每年0.1、0.2、0.5、1、2、5、10、20、30、40、50、60、70、80、90、95、98、99、99.5、99.8、99.9%的时间超出的地球表面以上最低的65米层的折射率梯度 $\Delta N_{65m}$ 年度值。
- 平均每月0.1、0.2、0.5、1、2、5、10、20、30、40、50、60、70、80、90、95、98、99、99.5、99.8、99.9%的时间超出的地球表面以上最低的65米层的折射率梯度 $\Delta N_{65m}$ 月度值。
- 100米以上折射率梯度 $\Delta N$ 低于 $-100$  N-unit/km的年度和月度次数的百分比（%）。

数据范围在经度方面从 $0^\circ$ 至 $360^\circ$ ，在纬度方面从 $+90^\circ$ 至 $-90^\circ$ 。从不同于网格点的位置看，在该位置的折射率湿项可通过执行双线性插值从四个最近的网格点值中推导出，如ITU-R P.1144建议书所述。

图4

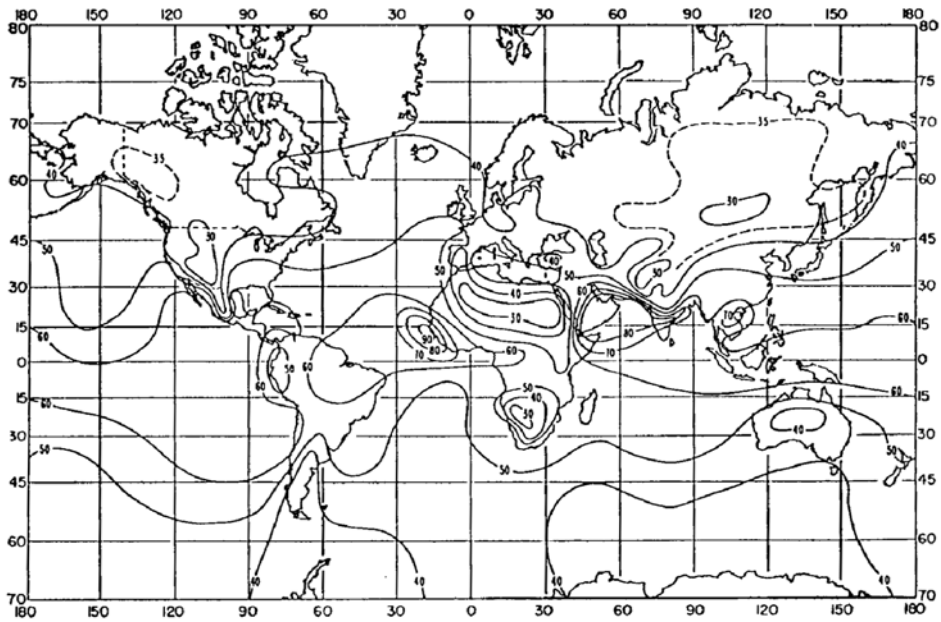
$\Delta N$ 月平均值：二月



P.0453-04

图5

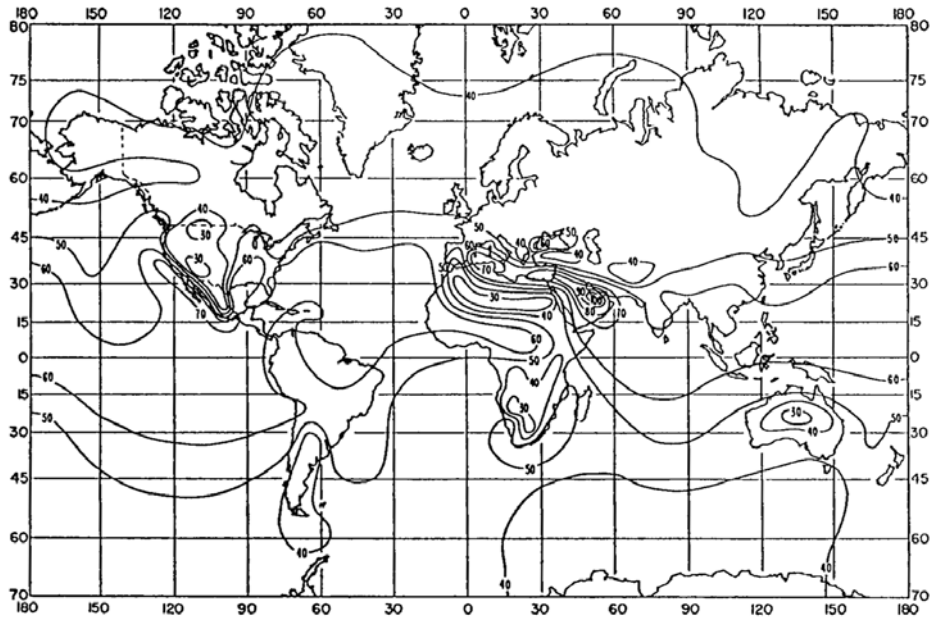
$\Delta N$ 月平均值：五月



P.0453-05

图6

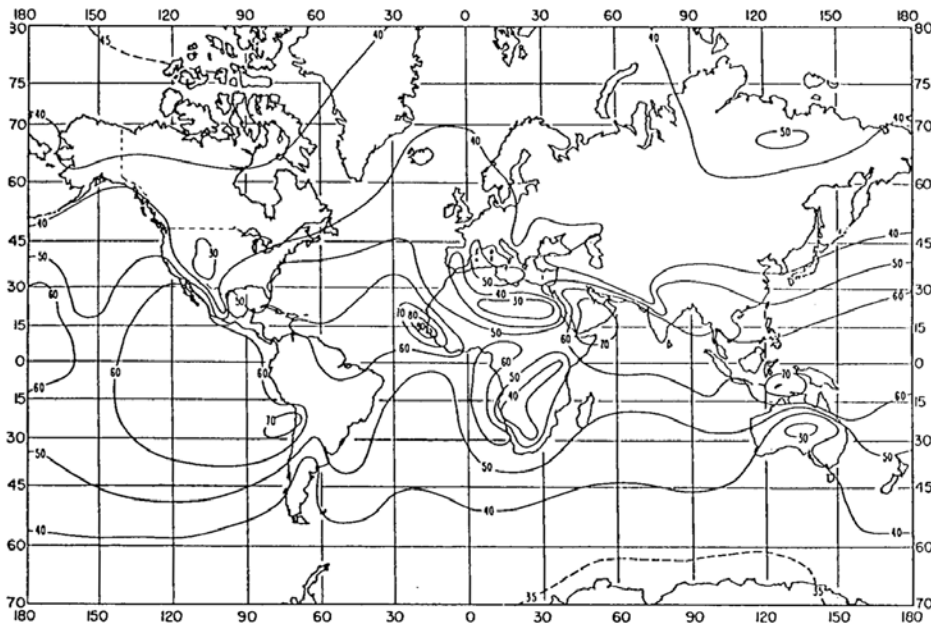
$\Delta N$ 月平均值：八月



P.0453-06

图7

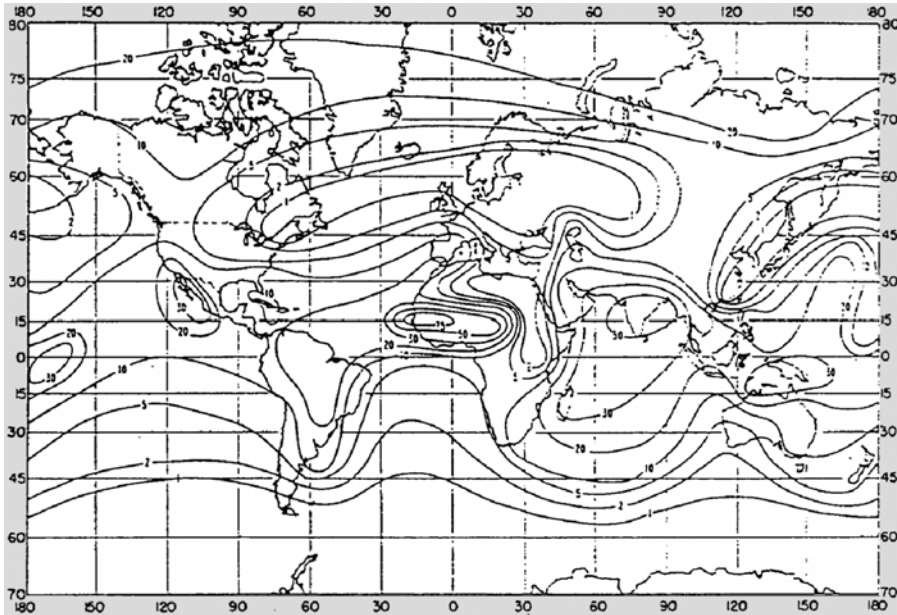
$\Delta N$ 月平均值：十一月



P.0453-07

图8

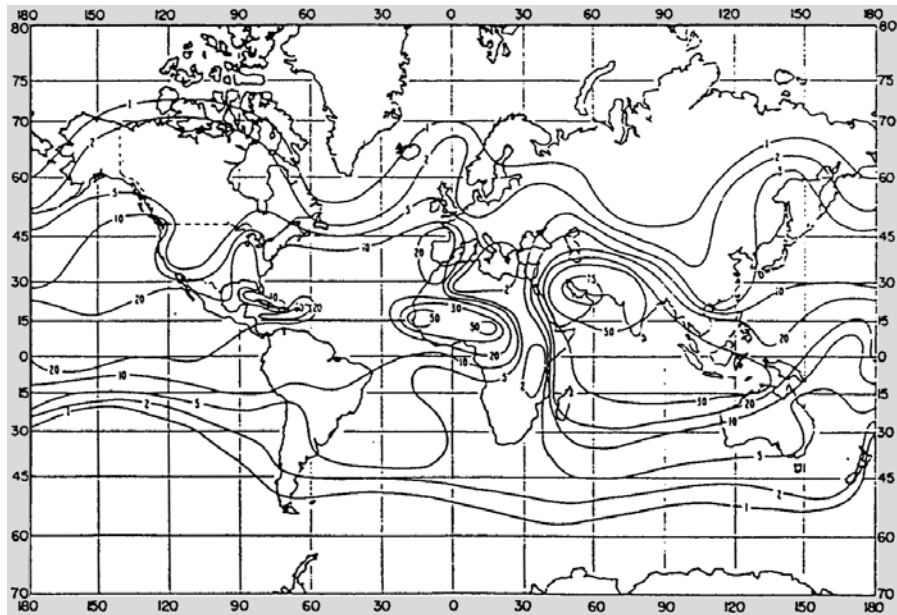
时间梯度百分比 $\leq -100$  (N- units/km) : 二月



P.0453-08

图9

时间梯度百分比 $\leq -100$  (N- units/km) : 五月

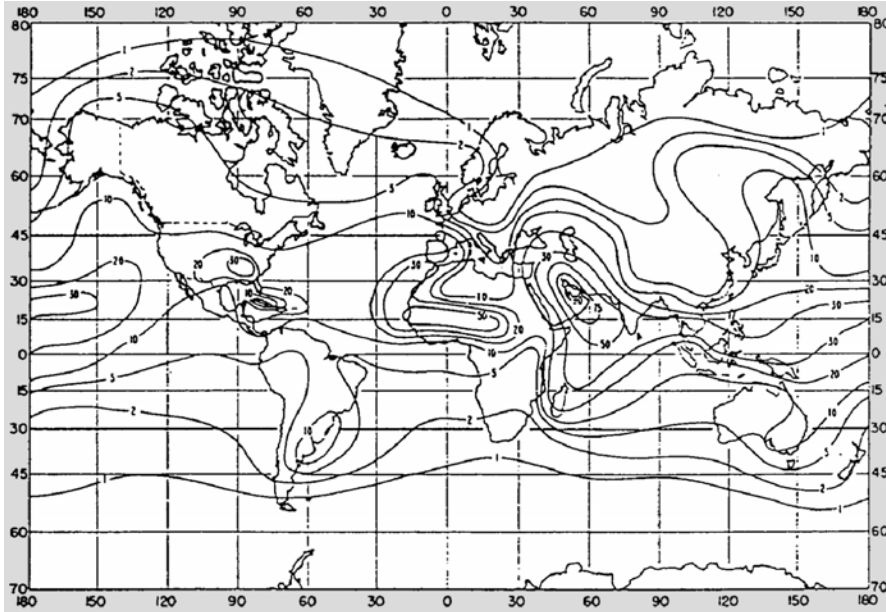


P.0453-09



图10

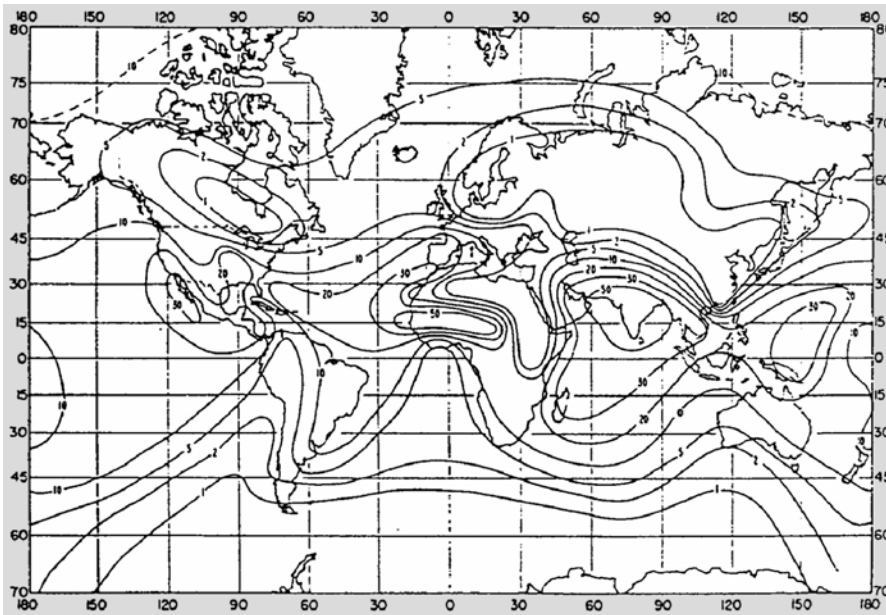
时间梯度百分比 $\leq -100$  (N- units/km) : 八月



P.0453-10

图11

时间梯度百分比 $\leq -100$  (N- units/km) : 十一月



P.0453-11

#### 4 折射率梯度统计分布

通过折射率梯度均值 $Med$ 和地面相应地点的折射率值 $N_s$ ，可以预测近地球表面在大气层最低100 m处的折射率梯度统计分布。

折射率梯度分布均值 $Med$ 可通过概率 $P_0$ 计算出，折射率梯度小于或等于 $D_n$ ，采用下列等式：

$$Med = \frac{D_n + k_1}{(1/P_0 - 1)^{1/E_0}} - k_1 \quad (14)$$

其中：

$$E_0 = \log_{10}(|D_n|);$$

$$k_1 = 30。$$

等式(14)对 $-300 \text{ N-units/km} \leq D_n \leq -40 \text{ N-units/km}$ 范围内有效。如果对应于任一给定的折射率梯度 $D_n$ 值的这一概率 $P_0$ 值在需研究位置不可知，则有可能从图8至图11的世界地图中推导出 $P_0$ ，其中在这些图中给出了折射率梯度在大气层最低100 m处小于或等于 $-100 \text{ N-units/km}$ 的时间百分比。

如果不存在可靠的本地数据，则 $N_s$ 可以从图1和2的全球海平面折射率 $N_0$ 曲线图以及等式(12)中推导出。

当 $D_n \leq Med$ 时， $D_n$ 的累积概率 $P_1$ 可从下列等式推导出：

$$P_1 = \frac{1}{1 + \left[ \left( \frac{|D_n - Med|}{B} + k_2 \right) k_3 \right]^{E_1}} \quad (15)$$

其中：

$$B = \left| \frac{0.3 Med - N_s + 210}{2} \right|$$

$$E_1 = \log_{10}(F + 1)$$

$$F = \frac{2 \times |D_n - Med|}{\left( \frac{B}{67} \right)^{6.5} + 1}$$

$$k_2 = \frac{1.6B}{120}$$

$$k_3 = \frac{120}{B}$$

等式(15)的有效范围为 $Med > 120 \text{ N-units/km}$ 以及 $-300 \text{ N-units/km} < D_n < 50 \text{ N-units/km}$ 。

对于 $D_n > Med$ ,  $D_n$ 的累积概率 $P_2$ 可由下列等式计算:

$$P_2 = 1 - \frac{1}{1 + \left[ \left( \frac{|D_n - Med|}{B} + k_2 \right) k_4 \right]^{E_1}} \quad (16)$$

其中:

$$B = \left| \frac{0.3 Med - N_s + 210}{2} \right|$$

$$E_1 = \log_{10}(F + 1)$$

$$F = \frac{2 \times |D_n - Med|}{\left( \frac{B}{67} \right)^{6.5} + 1}$$

$$k_4 = \left[ \frac{100}{B} \right]^{2.4}$$

等式(16)有效范围为 $Med > -120$  N-units/km以及 $-300$  N-units/km  $< D_n < 50$  N-units/km。

## 5 表面导管和架空导管

大气导管可能导致较深的缓慢衰落, 较强的信号提升, 以及地面视距链路多径衰落, 并可能造成对穿地平线路径较强的干扰。因此有必要介绍导管的形式及其结构。本节给出来自661个站点声纳观测的20年数据(19767-1996)推导出的统计结果。

已修改折射率形式表述的导管定义为:

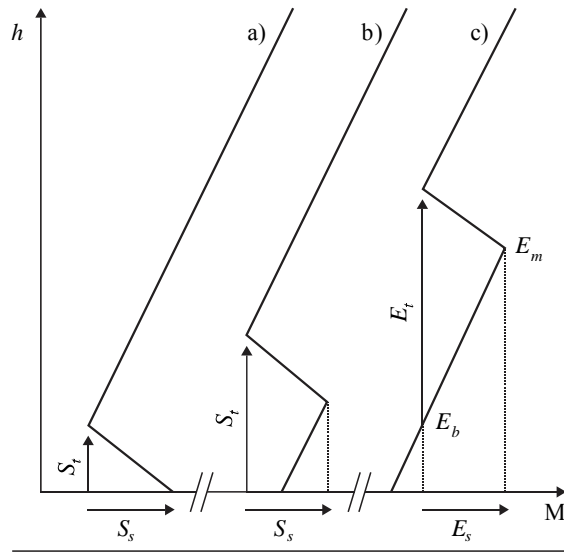
$$M(h) = N(h) + 157h \quad (\text{M-units}) \quad (17)$$

其中 $h$  (km)是高度。

图12显示了以地面高度为函数的修改折射率以及导管类型的定义。导管可能有三种类型: 表面型、架空表面型以及架空导管。由于架空表面型导管的情形远少于表面导管情形, 因此在统计时将这两类情况合并为一种类别, 即表面导管。表面导管特征参数为其强度,  $S_s$  (M-units)或 $E_s$  (M-units), 及其厚度 $S_t$  (m)或 $E_t$  (m)。另用两个额外参数表示架空导管: 即导管基本高度 $E_b$  (m)和 $E_m$  (m), 导管内高度最大值 $M$ 。

图12

描述a) 表面 b) 架空表面和c) 架空导管的参数的定义



P.0453-12

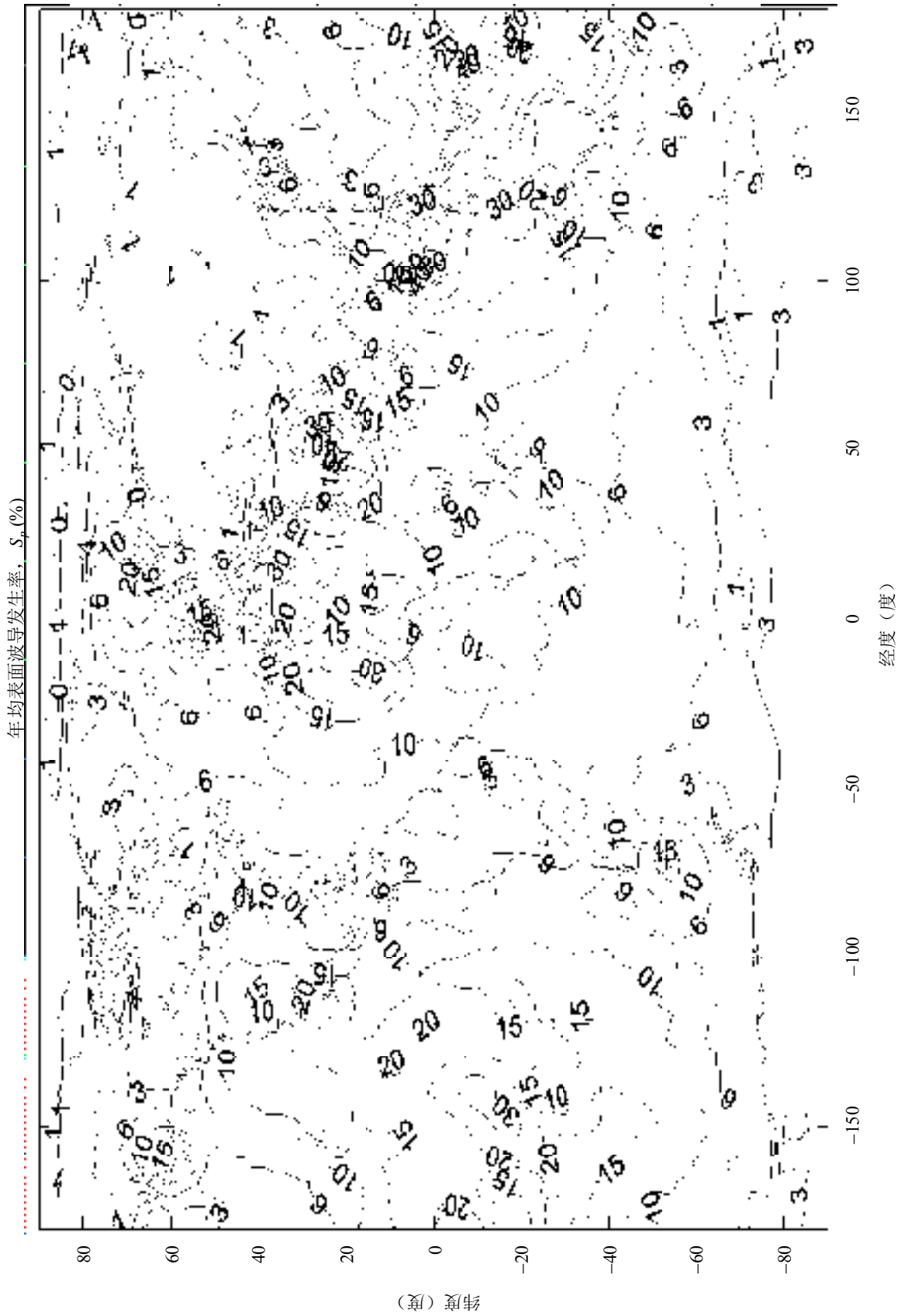
为便于参照，图13至图20给出了图题中提及的数据文件内的数据。表面导管和架空表面导管在统计时已合并统计，原因是架空表面导管情况非常少。

数据范围在经度方面从 $0^\circ$ 至 $360^\circ$ ，在纬度方面从 $+90^\circ$ 至 $-90^\circ$ 。从不同于网格点的位置看，在该位置的折射率湿项可通过执行双线性内插从四个最近的网格点值中推导出。

数据文件可从无线电通信局（BR）获取。

图13

文件名: S\_OCCURRENCE.TXT

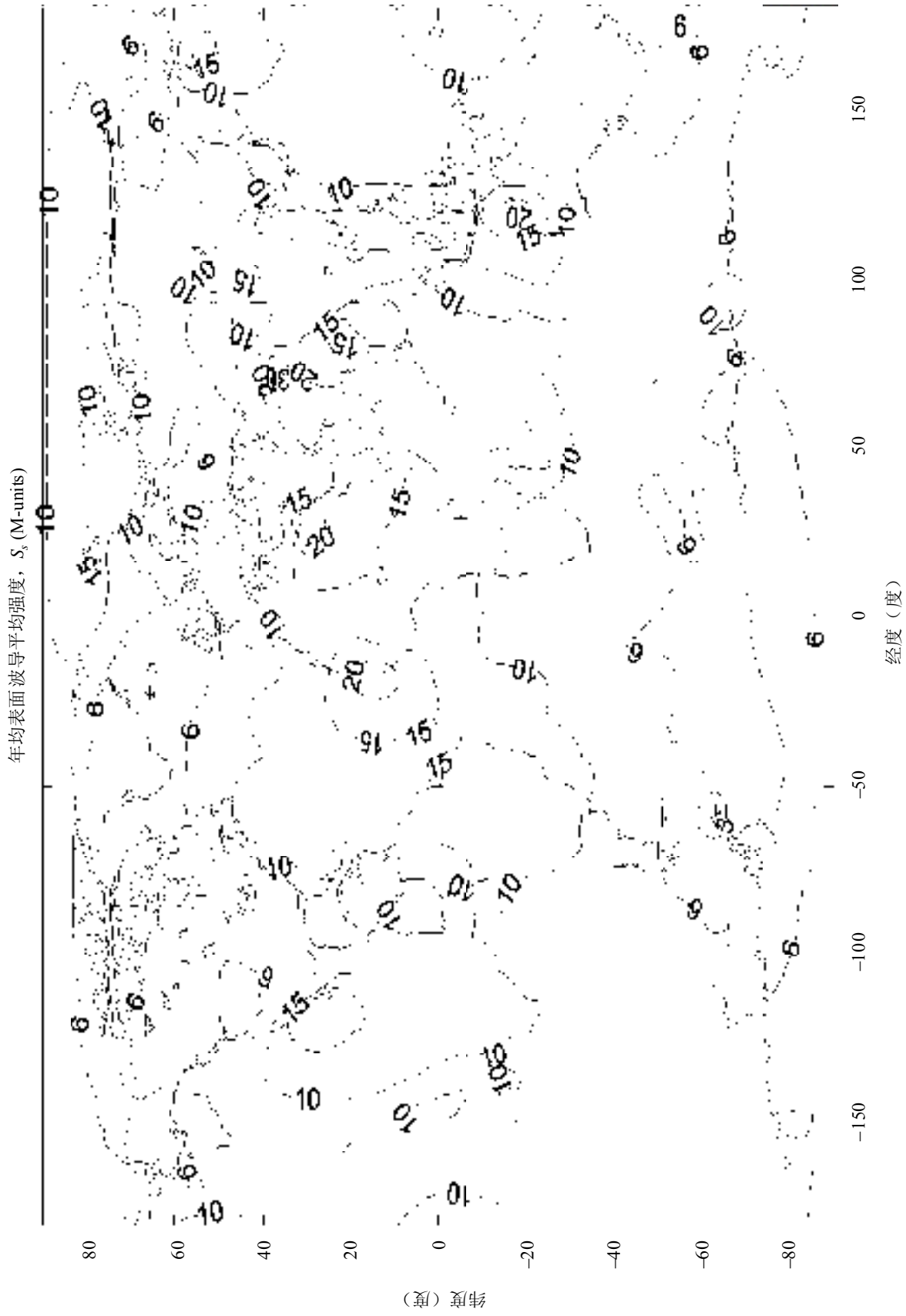


P.0453-13



图14

文件名: S\_STRENGTH.TXT



P.0453-14

图15

文件名: S\_THICKNESS.TXT

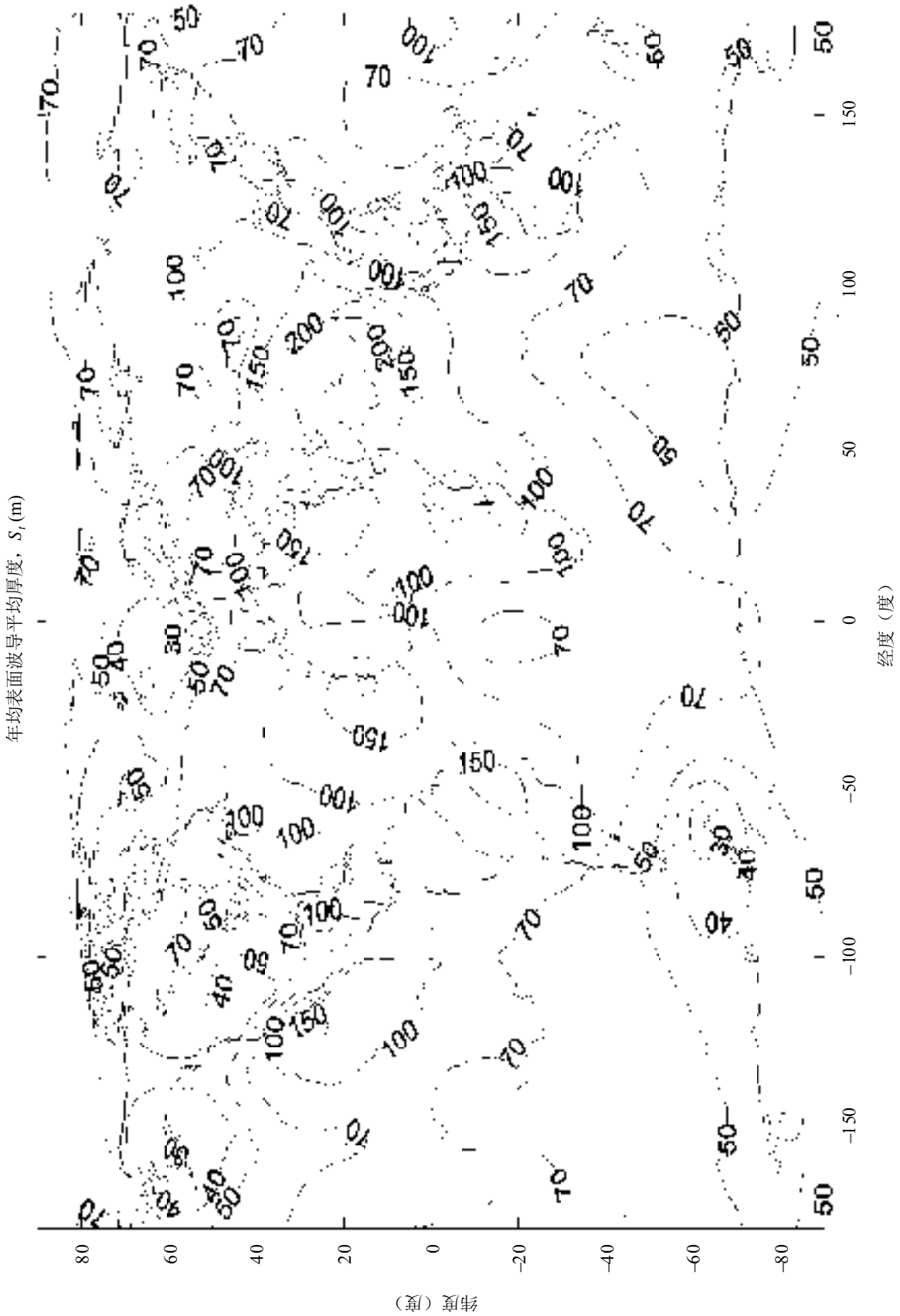
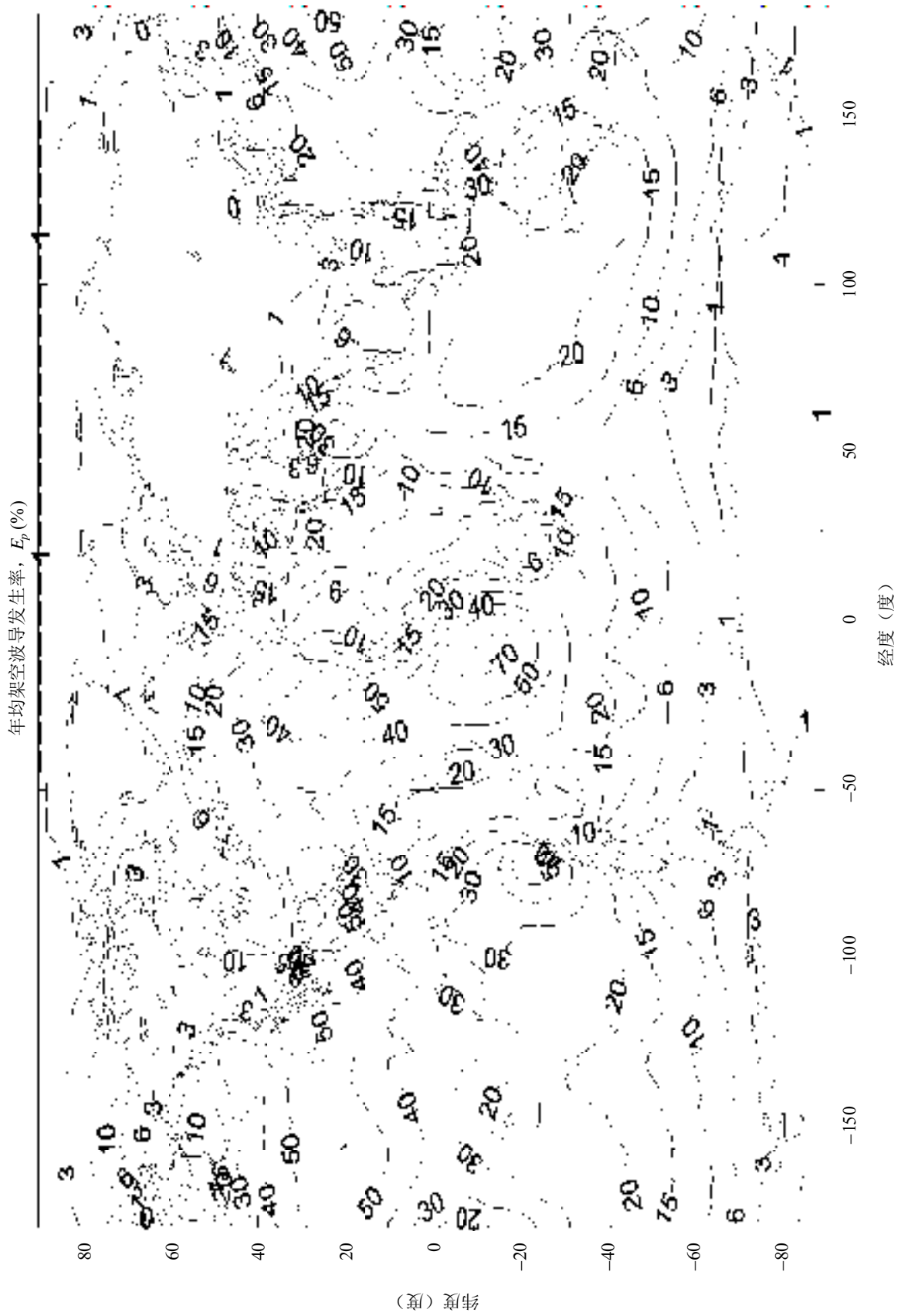


图16

文件名: E\_OCCURRENCE.TXT



P0453-16

图17

文件名: E\_STRENGTH.TXT

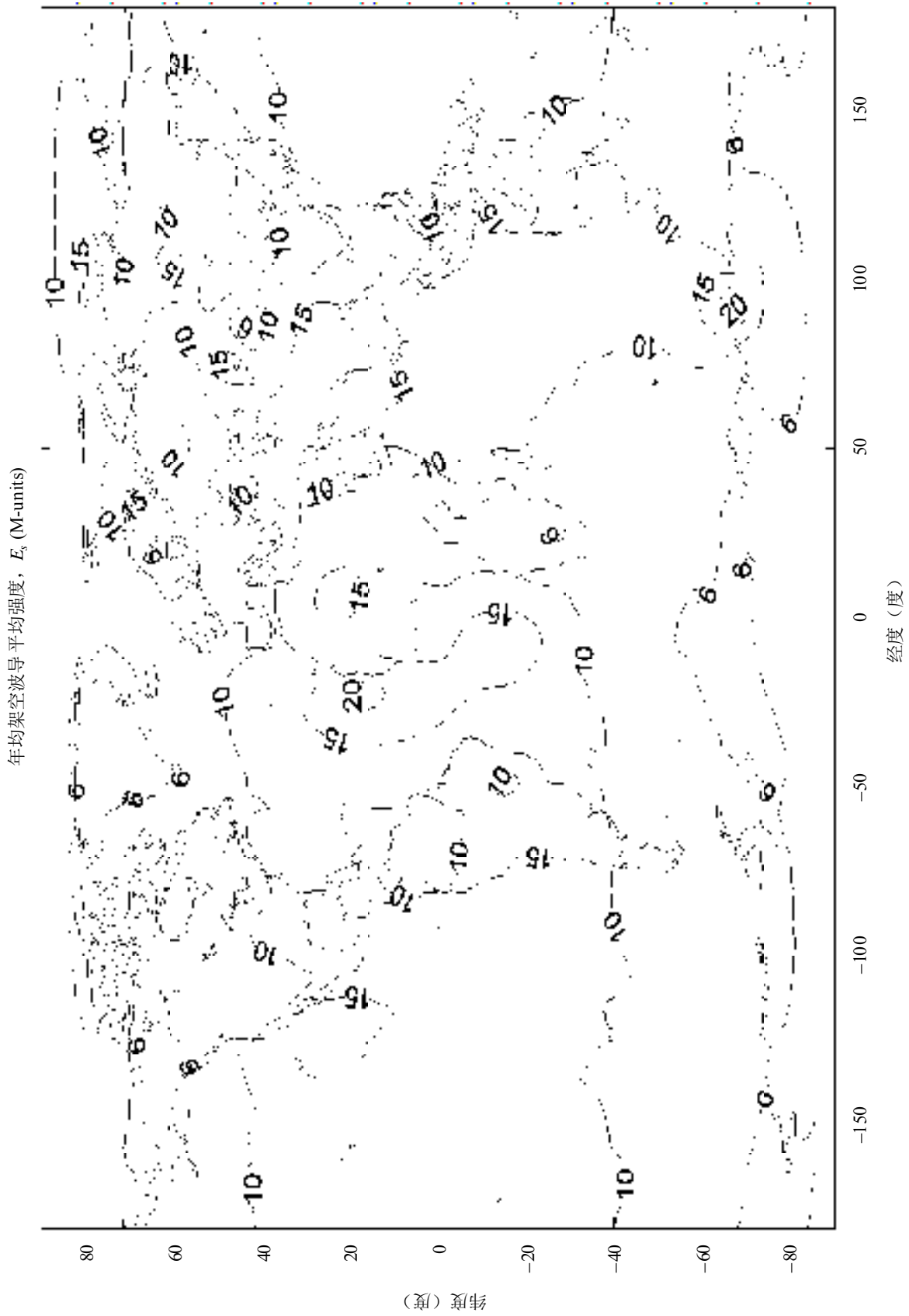
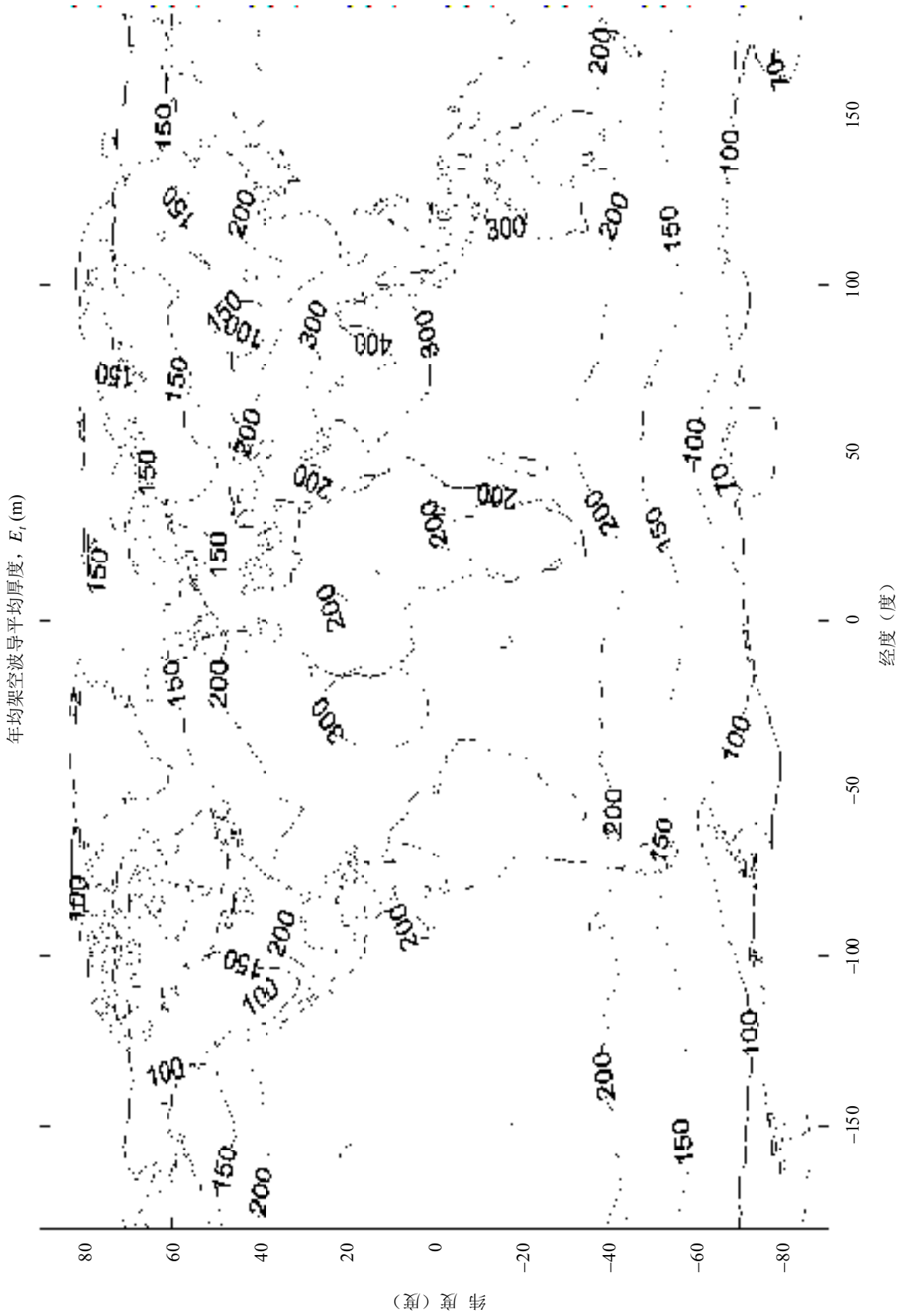


图18

文件名: E\_THICKNESS.TXT



P.0453-18



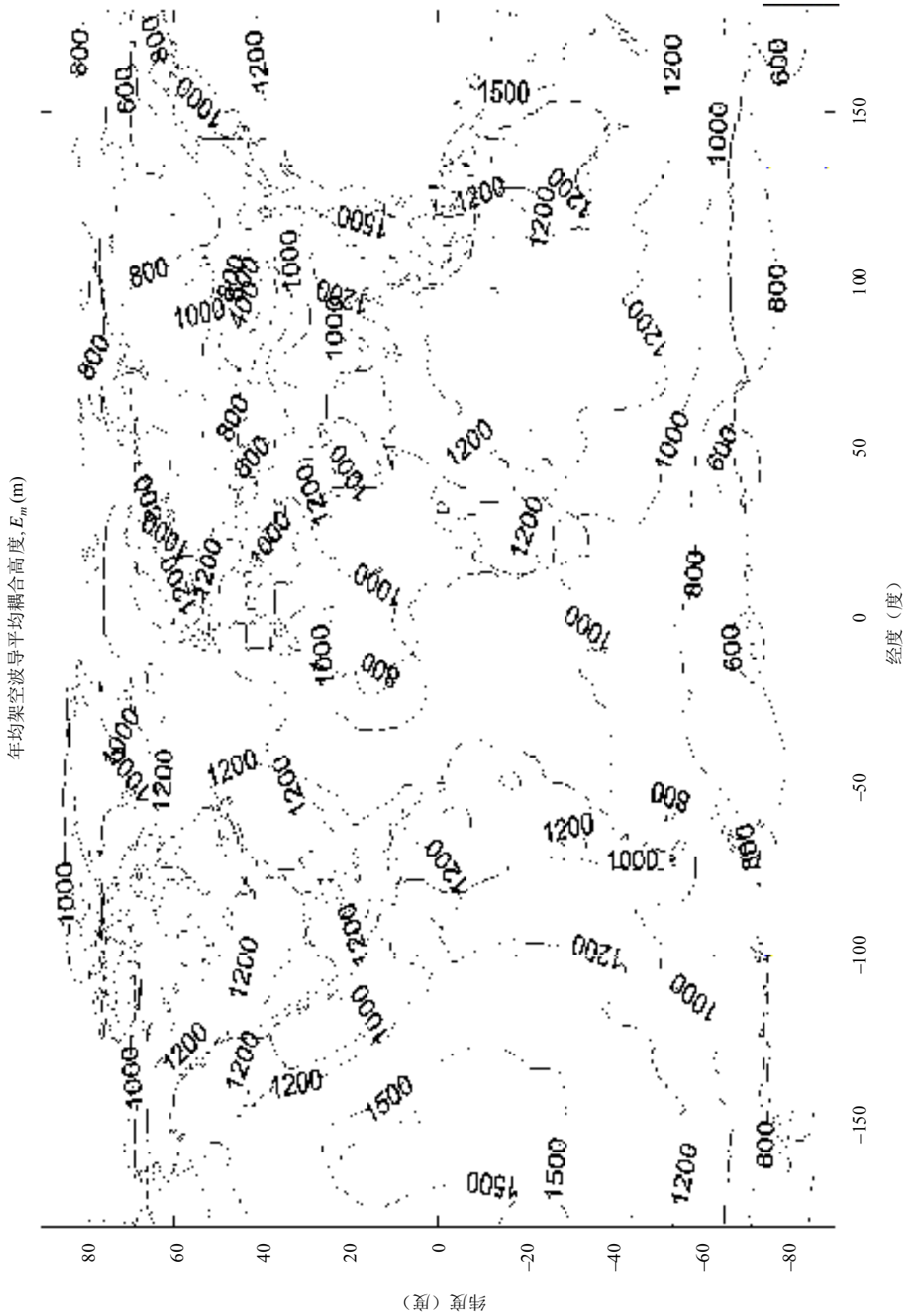
图19

文件名: E\_BASE.TXT



图20

文件名: E\_MAX\_M.TXT



P.0453-20