

气象员初级读物

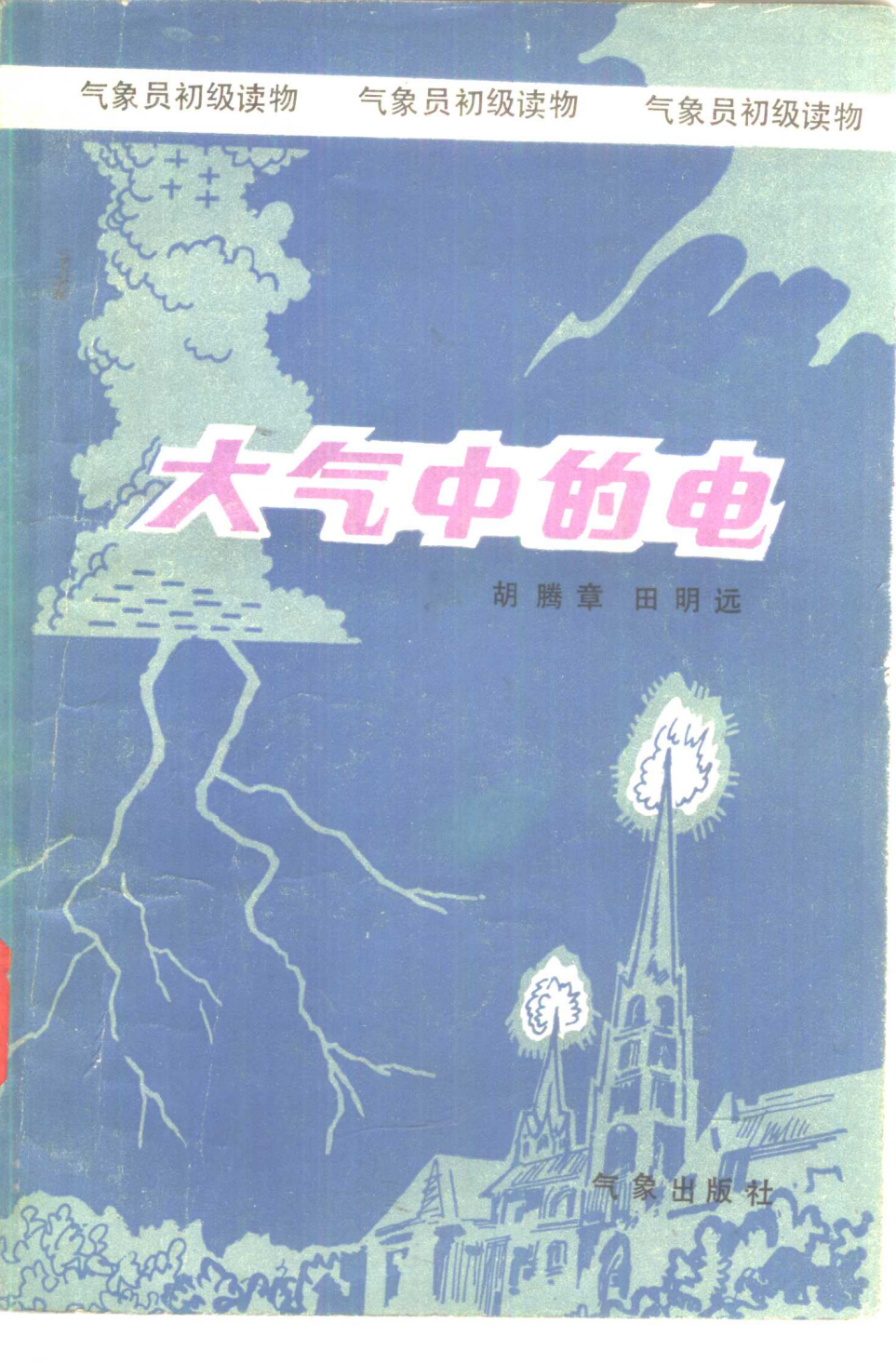
气象员初级读物

气象员初级读物

大气中的电

胡 腾 章 田 明 远

气象出版社



大气中的电

胡腾章 田明远 编著

气象出版社

内 容 简 介

这本小册子深入浅出地介绍了大气中电的基本知识。内容包括大气电场的一般认识,雷电是怎样产生的,对雷电的探测研究,高层大气的电现象,以及避雷的一般认识。

本书可供广大气象台站科技人员、中专气象专业的师生、中学地理教师阅读。

大 气 中 的 电

胡 腾 章 田 明 远 编 著

*

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

北京印刷一厂印刷 新华书店北京发行所发行

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 3.5 字数: 69 千字

1983年3月第一版 1983年3月第一次印刷

印数: 1—5,500 统一书号: 13194·0109

定价: 0.34 元

目 录

前 言	(1)
第一章 大气电场的基本知识	(3)
第一节 大气有轻微的导电性	(3)
第二节 晴天大气电场的特征	(12)
第三节 雷暴和闪电造成的电场变化	(20)
第二章 雷电是怎样产生的	(28)
第一节 雷雨云的结构	(28)
第二节 闪电的产生过程	(38)
第三节 雷鸣的产生过程	(49)
第四节 云起电的主要机制	(51)
第五节 大气与地球之间的电量输送	(55)
第三章 怎样对雷电进行探测研究	(59)
第一节 雷电探测仪的设计原理	(60)
第二节 地面探测方法	(65)
第三节 升空探测方法	(74)
第四节 利用雷达和卫星探测雷电	(75)
第五节 闪电的实验室研究	(77)
第六节 雷暴的预报	(78)
第七节 冰雹云的识别	(82)
第四章 高层大气中的电现象	(89)
第一节 电离层的结构	(89)
第二节 高层大气电离的原因	(93)
第三节 极光	(95)

第五章 雷电的预防和利用	(100)
第一节 雷击和避雷常识	(100)
第二节 雷电的人工影响	(104)
第三节 雷电的利用	(106)
主要参考书	(109)

前 言

闪电雷鸣是自然界里最为雄伟壮观的景色之一。雷电以及经常伴随它而来的狂风暴雨，往往给人类的生命财产和生产活动造成严重危害。因此，人类早就对于雷电现象极为关注，一直在探索它的奥秘并寻找避免雷害的方法。

人类对于雷电的认识，经历了从迷信、宗教到科学研究的漫长道路。十八世纪以前，宗教利用了雷电这种具有巨大威力的自然现象和人类由于没有认清它的自然本质而产生的恐惧心理，把雷电描绘成“雷公”、“电母”或者“上帝的意志”，用它来惩戒“罪人”和“异教徒”。文学艺术也在描绘雷电。文学家、艺术家们从雷鸣电闪的壮丽景色中吸取丰富的艺术营养，激发他们的想象力和创作灵感。在文艺作品中，雷电的形象是多么激动人心啊！科学家们对雷电却不那么感情激动，但非常注意研究它们。他们总结了一套观测、研究雷电现象的独特方法。用丰富的观测事实和实验资料去揭示雷电现象的自然本质，并从理论上阐明雷电的结构以及它发生发展的物理过程。

自从雷电研究的先驱者、著名的美国科学家本杰明·富兰克林于1752年进行了举世闻名的“风筝实验”，首次揭示了雷电的电学本质以来，二百多年间，这一科学领域吸引了无数科学家和科学工作者的注意力。他们从未间断过对于大气中的电现象，特别是雷电现象的探测研究。俄国科学家李赫曼还为了观测闪电现象而献出了生命。所有这些坚持不懈的努力在今天已经结出了丰硕的果实。如今，我们对于雷电的本质、结构和物理过程，已经有了相当深刻的认识，并且还可以在实验室里用

人工方法再现出自然界的闪电过程,这无疑是一个巨大的进步。然而,人类并不以此为满足,我们还在进行着更为广泛深入的研究,以便彻底认识雷电现象的自然本质,并进而驾驭雷电,利用它那巨大的功率来为人类造福。

这本小册子将向广大读者简要地介绍在大气电、尤其是雷电的科学研究方面已经取得的某些成果。在第一章里,读者可以获得有关大气电场的特征及其形成原因的一般知识。第二章介绍雷雨云的结构、闪电雷鸣的物理过程以及云起电的原因等。第三章讲的是探测和研究雷电的一些方法和仪器,同时也介绍一些预报雷暴和识别冰雹云的常用方法。第四章讲的是高层大气中的电现象,主要是电离层和极光这两种比较常见的现象。第五章讲述一些避雷常识以及人们控制和利用雷电的一些尝试。如果读者能从这本小册子中获得一些有益的知识,从而丰富和加深对于雷电现象的认识,我们将感到幸慰。

由于作者的科学知识和写作能力所限,书中的谬误和不当之处在所难免。因此,我们衷心希望广大读者提出批评和指正。

编者 1982.5

第一章 大气电场的基本知识

在大气中经常发生的雷电现象，早就引起了人们广泛的注意。1752年，著名的美国科学家富兰克林进行了举世闻名的“风筝实验”，初步揭开了雷电的秘密。后来，经过许多科学家的观测、实验和研究，证明了在地球周围的大气层中存在着电场。科学家们还发现不但在雷电活动时存在着大气电场，就是在晴好天气下，大气电场也不消失，仍然维持着一定的强度。如今，利用各种测量大气电场参数的仪器，成功地获得了在晴好天气和雷电活动时，大气电场特征的许多资料。对于在不同的天气条件下，大气电场的特征和活动规律，已经有了一个概括性的了解；大气电场产生的原因也逐步得到了科学的解释。

第一节 大气有轻微的导电性

大家知道，如果没有导致气体电离的因素存在，气体分子通常是不带电的，呈中性。也就是说，应当把大气看成是一个绝缘体。

然而，早在十八世纪末叶，科学家们就已经发现，大气并不是真正的绝缘体。我们可以做一个简单的实验来演示大气具有导电性：把一个与地球完全绝缘的带电体放到大气中，我们就会发现，这个带电体会逐渐失去它所带的电荷。这是由于在大气中含有许多带电的质点。我们把这些带电质点叫做离子。正是由于在大气中含有这些离子，空气才具有导电的能力。

1. 大气的电离状态

我们已经知道，大气是由多种气体分子混合而成的气体。

如果有足够大的能量使得气体分子外围的价电子脱离原子核的束缚力，那末，原来呈中性的空气分子就会失去一些电子而变成阳离子。而分离出去的电子，在正常压力下，又会立即与周围能量水平较高的中性分子相结合而变成阴离子。这样，原来的中性空气分子就产生出一对离子，它们各有一个分子的大小，并且带有一个基本电荷。这种由于气体分子失去或得到电子而变成的离子，称为“小离子”或“正常离子”。

此外，在空气中，总是悬浮着大量的、比空气分子大得多的各种质点，小离子也会与这些质点相碰撞而把自己所带的电荷传递给它们。于是，得到了电荷的质点就变成离子，而失去电荷的小离子则恢复到中性分子状态。由这些质点变成的离子都比小离子大得多，其中大的叫做“大离子”或“重离子”，中等的则叫做“中离子”。

表 1 列举了分子和各种离子的尺度，并且举出云(雾)滴、雨滴的大小与之比较。

表 1 各种离子的尺度

名 称	尺度范围 (厘米)
分 子	10^{-8}
小离子	$10^{-8} \sim 10^{-7}$
中离子	10^{-6}
大离子	10^{-5}
云(雾)滴	$10^{-4} \sim 10^{-3}$
雨 滴	$10^{-2} \sim 10^{-1}$
光学显微镜能见的极限	5×10^{-5}

由于导致气体电离的因素是经常存在的，所以在大气中总是包含有各种大小的离子。它们的质量虽然可能不同，但一般都只带有一个基本电荷，只有少数大离子可能带有几个基本电

荷。由于这些离子的经常存在，大气总是保持着一定的电离状态而呈现轻微的导电性。

2. 大气的电离剂

我们把导致大气中产生离子并保持电离状态的因素叫做大气的电离剂。

大气的电离剂主要有三种：地壳中的放射性元素、大气中的放射性元素和来自太空中的宇宙射线。这三种电离剂是经常存在并引起大气电离的。对于高层大气而言，太阳辐射中的紫外线部分，也是一种重要的电离剂。由于稠密的大气层对于太阳紫外线辐射起着阻挡作用，使得它很难穿透到大气的低层，因此，对于低层大气的电离来说，紫外线的贡献极小。此外，还有一些因时因地而异或者只是偶尔起作用的次要电离剂，如闪电放电、燃烧（火山爆发、森林失火）、水的分散（瀑布或海浪等）、尘暴、雪暴等等化学的和机械的起电效应以及光电效应；都可以引起大气电离。

现在，让我们比较详细地谈谈三种主要的大气电离剂以及它们在导致大气电离方面的贡献。

大家知道，在地壳中蕴藏着丰富的化学元素。其中有一些（例如铀、镭、钍等）元素，在没有任何外来因素作用时，也会不断地释放出特别的射线，这种元素叫做放射性元素。现在已经弄清楚了，各种放射性元素所放射出来的射线，一般分为三种： α 射线、 β 射线和 γ 射线。

α 射线是由质量数为4，带有两个正电荷的氦原子核粒子组成的。 α 射线的速度大约为光速的0.05~0.1倍，其能量是三种射线中最小的。 α 射线遇到固体和液体就被强烈地吸收，用普通的纸张就可以完全挡住它。在标准压力下， α 射线在空气中将逐渐减速，其行程为3~9厘米。

α 射线虽然可以使空气在 α 粒子的行程内,形成190000~250000对离子。平均每厘米行程的空气中产生30000~40000万对离子。然而在通常情况下, α 粒子很少能够射出地壳而到达空气中,所以它在大气电离中作用不大。

放射性元素放射出的另一种射线是 β 射线,这是一种带有一个负电荷的电子流。 β 射线的速度比 α 射线大得多,接近于光速。 β 射线具有比 α 射线更大的穿透能力,它能穿过几毫米厚的金属层(当然,它的强度将大为减弱)。在空气中, β 射线可以传播几米远的距离。在其行程中,它产生出25000对离子,平均每厘米行程产生约20~25对离子。

当放射性元素衰变时,在释放出 α 和 β 粒子的同时,有时还释放出叫做 γ 射线的电磁辐射。 γ 射线实际上是光量子流,其速度等于光速。它具有最大的穿透能力,可以透过几厘米厚的金属层。 γ 射线在厚度为1厘米的铅层或13厘米的水层中,被吸收一半。在空气中, γ 射线可以辐射几公里远的距离,在此行程内,它可以激发出30000对离子。但在每厘米行程中只产生1.5对离子。

由此可见,在地壳中的放射性元素中, β 射线和 γ 射线是近地层大气的重要电离剂。其电离能力随高度升高而减小情况也有些差异。如果我们用 I 表示它们引起空气分子电离的能力。那末,假定说在地面上, β 射线的电离能力为 $1I$,则到10米高处,已减小到 $0.1I$;而 γ 射线在地面上有 $3I$ 的电离能力,到150米高度上还有 $1.5I$,到1公里高处才减小到 $0.3I$ 。

由 β 、 γ 两种射线电离了的空气分子(小离子),可以被气流带到各处,使得空气中包含有一定数目的离子。

在中低层大气的电离中起主要作用的,还是包含在空气中的放射性物质,它们是一些放射性气体及其蜕变产物。这些放

射性物质，一部分是随地气从土壤中进入空气的；一部分则是工业(特别是原子能工业)生产向空气中排放的放射性污染物。这些放射性污染物随着垂直气流和水平气流向各处输送。它们的半衰期愈长，被输送的则愈高愈远。例如镭射线(氡 Rn ，半衰期3.825天)，可以被输送到4~5公里的高空，在中低层大气的电离活动中起着主导作用。

对整层大气都起着电离剂作用的，是宇宙射线。这些来自宇宙空间的“天外来客”，带有极高的能量。目前已经知道，从宇宙空间来到地球大气层中的第一级宇宙质点，约带有 10^{18} 电子伏特能量级的高能质子。这些高能质子进入大气层后，既能引起空气分子电离，也可以击破原子核，将电子、质子、中子、介子等释放出来。这些被释放出来的所谓次级宇宙质点，仍然是一些带有极高能量的高能粒子，也可以充当大气电离剂的角色。

由于宇宙射线具有极高的能量，因此，它甚至可以穿透整层大气而到达地面。在其行程中，到处都在产生电离作用。

宇宙射线的电离本领随高度升高而增强。例如，在4公里高度上，它的电离本领约为在地面的7倍；而到12~15公里高处，则为地面的150倍了。再往上，宇宙射线所产生的离子数目又随高度升高而减少。我们来看看，为什么会出现这样的变化情况。

宇宙射线是自上而下地穿过大气层。因此，在较高的高空，它的电离能力应当比较低处来得大一些。但是，由宇宙射线所产生的离子数，不但与它的强度有关，还与大气的密度有很大关系。在15公里以上的高空，大气已经变得十分稀薄，尽管宇宙射线的强度要比下层大，但可供它电离的分子数已经大为减少，所以产生出的离子数也就减少了。图1描绘了宇宙射线的

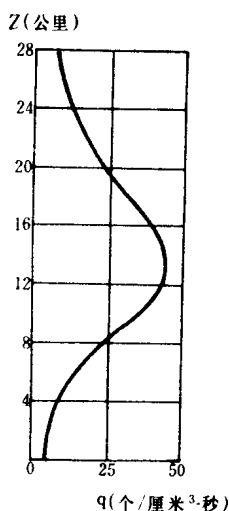


图 1 由宇宙射线所引起的
电离速率随高度的变化

电离能力随高度的变化情况。在该图中,电离能力是用离子产生速率 q (个/厘米³·秒)来表示的。

上面已经讲过,宇宙射线基本上是高能质子流,因此,它是带电的。当第一级宇宙射线进入地球大气层后,由于地球磁场的作用,它应当发生偏转。观测表明,宇宙射线到达地面时,它所产生的电离作用随纬度而发生变化:赤道处的电离作用为 $1.5I$;随纬度升高,电离作用也增大,在纬度 $40^\circ \sim 50^\circ$ 处达到极大值,为 $1.9I$;在更高的纬度上,宇宙射线的电离能力就变化不大了。

宇宙射线的强度随时间的变化很小,但它可以随大气压力的变化而变化。不过,这一变化也不大。因为就某个地区而言,大气压力只有千分之几到百分之几的变化,所以宇宙射线强度随气压的变化也只有百分之几。

表 2 列举了以上几种射线的电离能力。

表 2 空气中所产生的离子数(个/厘米³·秒)

电离剂	放射性元素的射线		宇宙射线	合 计
	土壤中的	空气中的		
大 陆	1.0	1.6	1.5~1.8	10.1~10.4
海 洋	~	~	1.5~1.8	1.5~1.8

3. 大气的电离平衡

如果在大气中只有电离作用存在,那么,大气中的离子数

就会无限制地增加，而大气本身也就变成良好的导体了。然而，事实并不如此。在大气中，实际上只存在着一定数目的离子而维持轻度的电离状态。这是什么原因呢？

原来，在大气中既存在着产生离子的电离过程，也存在着使离子消失的复合过程。复合过程主要是带有相反电荷的离子互相碰撞(吸引)时，中和掉各自所带的电荷而变成中性分子的过程。在电离与复合这两种相互制约的过程作用下，大气的电离会达到一种动态平衡，这就是大气的电离平衡。

我们先来讨论只有小离子参与的过程。设在单位时间、单位体积中，有 q 对离子生成，而在这同一体积中，本来就有 n_+ 个阳离子和 n_- 个阴离子。由于发生了复合作用，这时，应当有 $\alpha n_+ n_-$ 个离子复合（其中 α 是复合系数，它随气体的密度，分子温度和结构而变化。在 1 个大气压和常温条件下，由实验得出，干洁空气中离子的复合系数 $\alpha = 1.6 \cdot 10^{-6}$ 厘米³/秒），而在这段时间和这个体积内，离子数的变化为：

$$\frac{dn_+}{dt} = \frac{dn_-}{dt} = q - \alpha n_+ n_- \quad (1.1)$$

为了计算方便，我们取 $n = n_+ = n_-$ （这与实际情况差别不大），则

$$\frac{dn}{dt} = q - \alpha n^2 \quad (1.2)$$

以后我们将会看到，实际上 $n_+ \neq n_-$ ，但只要令 $k = \frac{n_+}{n_-}$ ，方程(1.2)的形式仍然不变。因此，我们把方程(1.2)作为我们讨论电离平衡问题的基本方程。

我们讨论所谓常定问题，即 $\frac{dn}{dt} = 0$ 。这时有

$$q - \alpha n^2 = 0 \quad (1.3)$$

这表明电离与复合两种过程处于动态平衡之中。在常定情况下，离子数 n 可以计算出来：

$$n = \sqrt{\frac{q}{\alpha}} \quad (1.4)$$

其中， α 为已知。因此，只要测出电离速率 q ，即可计算出 n 值来。

在大气电学中，经常使用的一个物理量是小离子的寿命 τ ，也就是小离子由生成到复合的平均时间间隔。在 τ 时间内，正好以速率 q 而产生出 n 个离子，于是

$$n = q \cdot \tau \quad (1.5)$$

从而得到

$$\tau = \frac{n}{q} = \frac{1}{\alpha n} \quad (1.6)$$

科学家们在不同的海洋上空和陆地上空，对 n 进行了多次测量。结果发现，各处的数值大体上相同，约等于 500 个/厘米³。在 (1.6) 式中代入 α ， n 之值，可以求得

$$\tau = \frac{1}{500 \times 1.6 \times 10^{-6}} = 1250 \text{ (秒)}$$

以上的简单计算表明，在只有小离子参与的过程中，在常定状态下，小离子的寿命大约为 21 分钟。也就是说，小离子自产生时刻起，平均经历约 21 分钟之后就因复合而消失了。

实际上，在大气中并不是只有小离子存在，还有带不同符号的大离子以及不带电荷的中性质点。不仅带相反符号电荷的小离子复合可能导致它消失，还由于小离子与悬浮于空气中的中性质点相结合而变成大离子，以及大离子的复合，而使小离子消失。在这种情况下，大气中的小离子浓度变化，就要用比

较复杂的方程式来进行计算了。

设在单位容积的空气中 n_+ 个小阳离子, n_- 个小阴离子; N_+ 个大阳离子, N_- 个大阴离子, 此外还有 N_0 个中性质点。小离子的产生速率仍然是 q 。这时, 小离子浓度的变化率满足如下方程式

$$\left. \begin{aligned} \frac{dn_+}{dt} &= q - \alpha n_+ n_- - \alpha' n_+ N_- - \alpha'' n_+ N_0 \\ \frac{dn_-}{dt} &= q - \alpha n_+ n_- - \alpha' n_- N_+ - \alpha'' n_- N_0 \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

其中, α 仍为小离子的复合系数, α' 是与小离子同大离子碰撞而消失的速率有关的系数, α'' 是与小离子同中性质点相结合而变成大离子的速率有关的系数。

要严格求解方程 (1.7) 是比较困难的。我们仍然讨论比较简单情况。作为一种近似, 取 $n_+ = n_- = n$; 而令 $N = N_+ + N_- + N_0$, 表示单位容积的空气中所包含的带电及不带电的大质点总数。再进一步, 仍然只讨论常定情况, 即 $\frac{dn_+}{dt} = \frac{dn_-}{dt} = 0$ 。于是, 方程 (1.7) 变为

$$q - \alpha n^2 - \beta n N = 0 \quad (1.8)$$

式中的 β 是表示小离子消失速率的系数, 叫做“离子消失常数”, 其值大约为 2×10^{-6} 厘米³/秒。

考虑到 (1.6) 式, 在这种情况下, 小离子的寿命 τ' 确定于如下公式

$$\tau' = \frac{1}{\alpha n + \beta N} \quad (1.9)$$

如果空气中带电及不带电的大质点的总浓度 $N = 1000$ 个/厘米³, 在公式 (1.9) 中代入已知的 α 、 n 、 β 值, 则可以计算出

$$\tau' = \frac{1}{500 \times 1.6 \times 10^{-6} + 1000 \times 2 \times 10^{-6}} = 357 \text{ (秒)}$$

这说明，当空气中同时含有大、小离子以及中性质点时，小离子的寿命只有6分钟左右，比只有小离子存在时的寿命短得多。而大离子的寿命要比小离子长好多倍，可达1小时以上。

第二节 晴天大气电场的特征

大家都有一个经验，在晴好天气下，无论收听广播还是收看电视，我们都不会感到有什么“天电干扰”，似乎在这种情况下，大气就没有电场了。其实，只要我们用一种叫做地面电场仪的仪器做一次简单的测量就会发现，就是在晴天，大气也是存在着电场的。

1. 晴天大气电场等位面的特征

在电学中，经常使用等位面来表征电场的特点。等位面是相对于某一个参考面（例如电位等于零的面）具有相同电位的点所组成的曲面。等位面的疏密程度很直观地描绘了电位梯度的大小。等位面疏的地方，电位梯度就小；等位面密的地方，电位梯度就大。这跟天气图分析中的等位势面非常相似。

在晴好天气下，在空旷而平坦的地面上空，大气电场的等位面是近似地平行于地面的一族曲面。如果遇到地面突出物体（如建筑物、树林等），则等位面就会“绕过”这些物体而发生弯曲；遇到空中的飞行器（飞机、气球等），也会如此。在这些地面或空中的“障碍物”上空的一定范围内，大气电场的等位面来得密集一起。当地形起伏时，等位面也会跟着起伏。在图2上，示意性地描绘了在晴好天气下，地面上空大气电场等位面的分布情况。

从图2可以看出，在低空，大气电场的等位面绕过了突出