一种基于迁移率分析的空气负离子浓度检测方法

韩佳佳 陶宗明* 张辉

(中国人民解放军陆军炮兵防空兵学院基础部物理教研室,合肥 230031)

摘要 空气负离子浓度是判断空气质量好坏的重要标准。传统的空气负离子浓度检测仪通过电容式离子收集器测量负离子在收集板两端形成的电流,根据测量电流与空气负离子浓度的关系进行计算。采用传统方法设计的空气负离子浓度检测仪只能测量有限几种半径的空气负离子浓度,并且在测量大半径的空气负离子浓度时存在一定的系统误差。为满足空气负离子浓度高精度检测的应用需求,通过模拟分析不同半径的空气负离子在收集器中的运动轨迹,提出了一种基于迁移率分析的空气负离子浓度检测方法,给出了相应的电路系统和设计参数,分析论证了系统设计的合理性。该方法将电流检测与数值计算相结合,能够精确测定空气中不同半径的负离子浓度,在环境监测与评价领域有重要的应用价值。

关键词 空气质量;空气负离子浓度;迁移率;离子半径

中图分类号: P412 **DOI**: 10.19517/j.1671-6345.20180477 **文献标识码**: A

引言

空气负离子(Negative Air Ions, NAI)是带负电荷的单个气体分子和轻离子团的总称[1]。由于空气负离子能够使生物体内的自由基无毒化与细胞活化,因此对生长发育有良好的促进作用[2],被认为是一种有益人类健康的大气现象[3-7]。空气负离子浓度是指 1 mL 空气中的负离子个数(个/cm^3),是判断空气质量好坏的重要标准。世界卫生组织规定清新空气中负离子的浓度为 1000~1500 个/cm^3[8]。

空气负离子是由空气分子在外力(辐射、受热、强电场等)作用下失去的自由电子与其它中性分子结合形成的。由于不同中性分子与自由电子结合能力不同,空气负离子有多种存在形式。研究表明空气负离子主要由 $O_2^-(H_2O)_k$ 和 $OH^-(H_2O)_k$ 等原子团组成[9],此外存在少量的 $O_3^-(H_2O)_k$、$CO_3^-(H_2O)_k$、$SO_3^-(H_2O)_k$ 和 $SO_4^-(H_2O)_k$ 等离子,它们之间能够相互转换[9-10]。

空气负离子的物理性质可以用离子带电量和离子半径描述。空气负离子通常只带一个负电荷,只有较大的负离子才可能携带一个以上的电荷。离子半径表征了空气负离子的大小,其变化范围主要在 10^{-5}~10^{-8} cm。根据离子半径的大小,空气负离子分为小离子、中离子和大离子。半径不同的负离子在人们的生产生活中有着不同作用[11],中离子和大离子能够部分沉降空气中的污染物质,而小离子能够通过肺部呼吸进入人体,在生长发育和防治疾病等方面起着积极作用[12]。

常用的离子浓度测量方法主要有 Langmuir 探针法和电容式测量法[13]。Langmuir 探针法通过向探针尖端施加电压,在离子中形成电流,根据 *I-V* 曲线得到离子浓度。但该方法只适用于低气压及真空条件下的离子浓度测量[14],无法测量空气中的负离子浓度。电容式测量法主要采用电容式收集器收集离子电荷,通过检测电流计算出离子浓度。Beckett 首先采用 Wesix 平行板式离子收集器探测空气负离子浓度[15],Gerdien 采用同轴圆柱形电容器进行空气离子浓度探测[16]。电容式测量法是目前大部分空气负离子探测仪采用的测量方法,但测量范围较小,精度不高。本文对空气负离子在电容式检测

国家自然科学基金项目(41475025)资助

作者简介:韩佳佳,男,1985 年生,硕士,讲师,从事物理教学与大气科学研究,Email:hjaza_f@163.com

收稿日期:2018 年 8 月 23 日;定稿日期:2019 年 6 月 12 日

* 通信作者,Email:zmtao@aiofm.ac.cn

仪电场中的运动进行了研究，确定了检测仪中系统误差的来源，并基于对负离子迁移率与检测仪参数的分析，将电流检测与数值计算结合，提出了一种新型的空气负离子检测方法。最后给出了系统的设计方案和具体电路，论证了该方法的可行性与合理性。

1 空气负离子在电场中的运动分析

一种采用电容式测量法的空气负离子检测仪如图 1 所示：空气以恒定的风速通过离子收集器两端由采集板组成的平板式电容器，在两端施加电压时，空气中的负离子形成回路电流，通过检测电流换算出空气负离子浓度[11]。

图 1 空气负离子浓度检测仪 AIC-2M

在空气负离子浓度检测仪中，离子迁移率(ion mobility)定义为空气离子在单位电场强度产生的静电力的作用下，在空气中匀速运动时的速度值。离子迁移率是分辨离子半径大小的重要参数，假设空气离子在电场强度为 E 的电场中运动的速度为 V，则离子迁移率 k 表示为：

$$k = \frac{V}{E} \tag{1}$$

对于不同种类的空气离子，离子迁移率取决于离子半径和空气参数。空气离子在电场中匀速运动时，受到电场力与空气阻力的作用，根据式(1)和平衡关系[17]，可以得到：

$$k = \frac{e[1 + c_1 \frac{l}{r} + c_2 \frac{l}{r}\exp(-c_3 \frac{l}{r})]}{6\pi\eta r} \tag{2}$$

其中，e，r，l，η 分别表示离子所带电荷，离子半径，空气分子平均自由程与空气粘滞系数。c_1，c_2，c_3 为常系数。可以看出，在空气的粘滞系数和分子平均自由程等物理性质不变的情况下，离子迁移率是离子半径的单值函数。因此通过测量一定迁移率的负离子浓度能够得到对应半径的空气负离子浓度。不同迁移率的空气离子对应的离子半径如表 1 所示。

表 1 大气离子的分类[17]

类别	迁移率 k/(cm² · V · s⁻¹)	半径 r/(10^{-8}cm)
气体离子	$k \geqslant 1.0$	$r \leqslant 6.6$
小离子	$1.0 > k \geqslant 10^{-2}$	$6.6 < r \leqslant 78$
中离子	$10^{-2} > k \geqslant 10^{-3}$	$78 < r \leqslant 250$
大离子	$10^{-3} > k \geqslant 2.5\times10^{-3}$	$250 < r \leqslant 570$
特大离子	$k < 2.5\times10^{-4}$	$r > 570$

传统的电容式空气负离子浓度检测仪[18-19]原理如图 2 所示。空气负离子在吸气机的作用下以取样空气流量 Q 进入收集器后，一方面沿水平方向运动，速度为吸气机的抽气速率 V_x，一方面受到收集器中电场的作用沿竖直方向运动，速度为 V_y。假设收集器极板的长度为 L，间距为 d，两极板之间的电压为 U，收集器内任意一点的场强为：

$$E = U/d \tag{3}$$

假设某种空气负离子的迁移率为 k，根据迁移率的定义式(1)，在竖直方向电场的作用下，离子沿电场方向的速度：

$$V_y = kE \tag{4}$$

空气负离子在收集器中的合运动是水平方向和竖直方向运动的叠加。如果进入收集器测量范围内的负离子刚好能够被全部收集，那么从下极板边缘处进入收集器的该离子在离开测量区域时应恰好运动到上极板，即沿电场方向到达上极板的时间与沿水平方向离开测量区域的时间相等：

$$d/V_y = L/V_x \tag{5}$$

在离子收集器两极板的尺寸和水平方向空气流速 V_x 已知的情况下，如果空气负离子经过收集器能够全部到达上极板，则其沿电场方向的速度必须大于 V_y。根据迁移率的定义，在收集器形成的电场中，速度 V_y 对应的迁移率 k_b 为：

$$k_b = V_y/E = d^2V_x/(LU) \tag{6}$$

式中，k_b 为极限迁移率(limit mobility)，是能够全部到达极板的空气负离子迁移率的极小值。可知，极

限迁移率由离子收集器的尺寸、水平方向空气流速 V_x 和极板间的电压 U 决定,与离子半径无关。

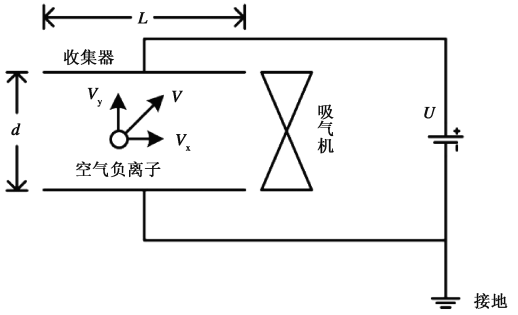

图 2　电容式空气负离子浓度检测仪原理

迁移率大于极限迁移率的负离子运动轨迹如图 3a所示,由于沿竖直方向运动的速度较快,这部分负离子能够全部到达上极板形成电流。迁移率小于极限迁移率的空气负离子运动轨迹如图 3c 所示,由于沿竖直方向运动速度较慢,一部分能够到达上极板形成电流。因此,回路中探测到的电流是不同迁移率的离子到达极板形成的电流之和。传统的空气负离子检测仪[8,19]在设计中认为探测电流中仅由迁移率大于极限迁移率的空气负离子形成[19],导致测量结果存在一定的系统误差。

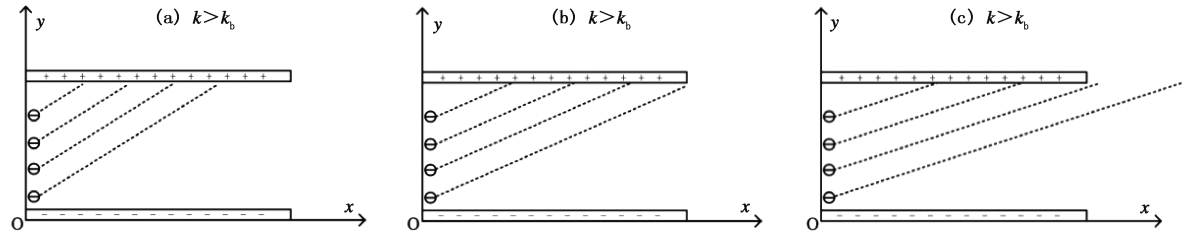

图 3　空气负离子运动轨迹:(a)迁移率大于极限迁移率,(b)迁移率等于极限迁移率,(c)迁移率小于极限迁移率

2　基于迁移率分析的空气负离子浓度检测仪设计

传统的空气负离子检测仪只能测量离子迁移率为 1.0 和 0.4($cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$)附近有限几档的空气负离子浓度[8,19]。由上面的分析可知,采用传统方法在测量大离子浓度时,中小离子也全部到达极板形成电流,对大离子的浓度测量结果造成了干扰;同理,在测量小离子浓度时,部分大离子也能够到达极板形成电流,对小离子的浓度测量也造成影响,导致测量值比实际值偏高。为了减小不同半径空气负离子测量时的相互干扰,准确测定不同半径的空气负离子浓度,提高测量精度,提出了一种基于迁移率分析的空气负离子浓度测量方法,其原理如图 4 所示。

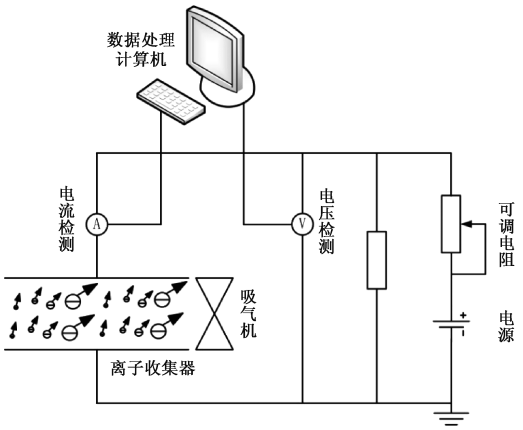

图 4　空气负离子浓度检测仪原理

该空气负离子浓度检测仪系统主要由电源,可调电阻,吸气机,离子收集器,电压检测装置,电流检测装置和数据处理计算机组成。测量开始前,首先将空气负离子按尺度谱离散为离子半径为 $r_1, r_2, r_3, \cdots, r_N$ 的负离子,对应的浓度分别为 $n_1, n_2, n_3, \cdots, n_N$。半径为 r_i 的空气负离子单独全部到达极板产生的电流 I_{i0}[19] 为:

$$I_{i0} = qn_iQ \tag{7}$$

上式中 q 为基本电荷电量,Q 为离子收集器的取样空气流量。当通过可调电阻依次向离子收集器两端施加 N 个不同电压 $U_1, U_2, U_3, \cdots, U_N$ 时,回路中测得的电流分别为 $I_1, I_2, I_3, \cdots, I_N$。

根据式(6),在收集器两端施加不同电压时,可以计算出对应的空气负离子极限迁移率 $k_{1b}, k_{2b}, k_{3b} \cdots k_{Nb}$。从图 3 可知,不同迁移率的空气负离子进入收集器后,最终到达上极板的数目占总数目的百分比不同。假设离子收集器两端电压为 U_i 时,半径为 r_j 的空气负离子进入收集器后最终能够到达上极

板的数目占总数目的百分比为 η_{ij}。如果其离子迁移率 k_j 大于极限迁移率 $k_{j\mathrm{b}}$，则能够全部到达上极板，$\eta_{ij}=1$。如果其离子迁移率 k_j 小于极限迁移率 $k_{j\mathrm{b}}$，只有一部分能够到达上极板，最终能够到达上极板的数目占总数目的百分比 η_{ij} 计算方法如下：

根据式(1)，迁移率为 k_j 的离子经过电压 U_i 收集器时，离子沿竖直电场方向产生的速度 $V_{y_{ij}}$ 为：

$$V_{y_{ij}}=\frac{U_i}{d}k_j \tag{8}$$

在通过收集器的迁移率为 k_j 的负离子中，能够到达上极板的空气负离子的百分比为：

$$\eta_{ij}=\begin{cases}1 & k_j\geqslant k_{j\mathrm{b}}\\ \dfrac{V_{y_{ij}}}{V_{\mathrm{x}}}\dfrac{L}{d}=\dfrac{U_ik_jL}{V_{\mathrm{x}}d^2} & k_j<k_{j\mathrm{b}}\end{cases} \tag{9}$$

其中，U_i 为收集器两端的电压，V_{x} 为气流速度，L 是收集器极板的长度，d 为收集器两极板间距。

由于空气负离子由半径分别为 $r_1,r_2,r_3,\cdots,r_N$ 的负离子构成，因此在收集器两端施加电压 U_i 时，回路中测得的电流 I_i 为不同半径的负离子到达上极板时产生的电流 $\eta_{i1}I_{10},\eta_{i2}I_{20},\eta_{i3}I_{30},\cdots,\eta_{iN}I_{N0}$ 之和：

$$I_i=\eta_{i1}I_{10}+\eta_{i2}I_{20}+\eta_{i3}I_{30}+\cdots+\eta_{iN}I_{N0} \tag{10}$$

将式(7)代入：

$$I_i=qQ(\eta_{i1}n_1+\eta_{i2}n_2+\eta_{i3}n_3+\cdots+\eta_{iN}n_N) \tag{11}$$

因此，N 个电压对应的电流为：

$$I_1=qQ(\eta_{11}n_1+\eta_{12}n_2+\eta_{13}n_3+\cdots+\eta_{1N}n_N) \tag{12}$$

$$I_2=qQ(\eta_{21}n_1+\eta_{22}n_2+\eta_{23}n_3+\cdots+\eta_{2N}n_N) \tag{13}$$

$$I_3=qQ(\eta_{31}n_1+\eta_{32}n_2+\eta_{33}n_3+\cdots+\eta_{3N}n_N) \tag{14}$$

$$\cdots\cdots$$

$$I_N=qQ(\eta_{N1}n_1+\eta_{N2}n_2+\eta_{N3}n_3+\cdots+\eta_{NN}n_N) \tag{15}$$

将式(12)～(15)写成矩阵形式：

$$\frac{\boldsymbol{I}}{qQ}=\boldsymbol{H\Phi} \tag{16}$$

其中，系数矩阵 $\boldsymbol{H}$：

$$\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}\eta_{11} & \eta_{12} & \eta_{13} & \cdots & \eta_{1N}\\ \eta_{21} & \eta_{22} & \eta_{23} & \cdots & \eta_{2N}\\ \eta_{31} & \eta_{32} & \eta_{33} & \cdots & \eta_{3N}\\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots\\ \eta_{N1} & \eta_{N2} & \eta_{N3} & \cdots & \eta_{NN}\end{bmatrix} \tag{17}$$

回路中测得的检测电流 $\boldsymbol{I}$：

$$\boldsymbol{I}=\begin{bmatrix}I_1\\ I_2\\ I_3\\ \vdots\\ I_N\end{bmatrix} \tag{18}$$

不同半径的空气负离子浓度 $\boldsymbol{\Phi}$：

$$\boldsymbol{\Phi}=\begin{bmatrix}n_1\\ n_2\\ n_3\\ \vdots\\ n_N\end{bmatrix} \tag{19}$$

将式(9)得到的 η_{ij} 代入系数矩阵式(17)，并利用数值方法求出系数矩阵 $\boldsymbol{H}$ 的逆矩阵 $\boldsymbol{H}^{-1}$，根据检测电流 $\boldsymbol{I}$，最终计算得到空气中不同半径的负离子浓度 $\boldsymbol{\Phi}$：

$$\boldsymbol{\Phi}=\frac{\boldsymbol{H}^{-1}\boldsymbol{I}}{qQ} \tag{20}$$

式中，取样空气流量 Q 是指标准状态下的空气流量，如果温度和压力值发生变化，会给空气流量的测量带来较大误差，此时必须进行温度和压力订正[20]。

通过数值方法，现在计算机可以求解 N 从 1000～10000 阶的矩阵。根据关系式(18)～(20)，通过连续改变电压，测量电流，该检测方法可实现空气负离子浓度的高精度测量。

根据空气负离子测量仪结构设计通用规范[21-22]，基于以上检测方法的空气负离子测量仪的主要设计参数如表 2 所示。

表 2 空气负离子测量仪设计参数

项目	设计参数
检测范围	L 档：0－9.99×10⁴ 个/cm³
	H 档：10⁵－9.99×10⁸ 个/cm³
离子粒径测量范围	1～100 nm
离子粒径分辨率	1 nm
取样空气流量	4.05×10⁴ cm³/s
响应时间常数	0.5 h
工作环境	温度：－20～＋40℃
	湿度：0～100%
观测频次	1 次/h
工作电压	220 V(交流)
外形尺寸	30 cm×15 cm×15 cm

3 结论

本文提出了一种基于迁移率分析的空气负离子浓度检测方法。与传统方法相比，该方法将电流检测与数值计算相结合，不仅可以精确测定不同半径的空气负离子浓度，而且能够避免不同半径空气负离子测量时的相互干扰。该检测方法不仅为分析空气中负离子浓度和尺度谱分布的变化提供了研究手段，也为开展大气环境监测和评价工作提供了重要的参考依据。

参考文献

[1] LY/T2586－2016 空气负(氧)离子浓度观测技术规范[S].

[2] 马云慧.空气负离子应用研究新进展[J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版)2010,30(1):42-51,64.

[3] Inbar O, Rotstein A, Dlin R A, et al. The effects of negative air ions on various physiological functions during work in a hot environment [J]. International Journal of Biometeorology, 1982, 26(2): 153-163.

[4] Iwama H. Negative air ions created by water shearing improve eryth-rocyte deformability and aerobic metabolism [J]. Indoor Air, 2014, 14(4): 293-297.

[5] 石强.森林环境中空气负离子浓度分级标准[J].中国环境科学, 2002,22(4):320-323.

[6] Sirota T V, Safronova V G, Amelina A G, et al. Effect of negative air ions on respiratory organs and blood [J]. Biofizika, 2008, 53(5): 886-893.

[7] 毛成忠,于乃莲,杜佳乐,等. 典型城市区与森林区空气负氧离子特征比较分析[J].气象科技,2014,42(6): 1083-1089.

[8] 尹淑娴,朱达洪,陈玲,等. 东莞市植物园空气负离子浓度变化特征[J]. 气象水文海洋仪器,2012,(2):33-36.

[9] Nagato K, Matsui Y, Takahiro M, et al. An analysis of the evolution of negative ions produced by a corona ionizer in air[J]. International Journal of Mass Spectrometry, 2006, 248: 142-147.

[10] Luts A, Parts T E, Laakso L, et al. Some air electricity phenomena caused by waterfalls: Correlative study of the spectra [J]. Atmospheric Research, 2009, 91(2): 229-237.

[11] 周慧萍. 空气负氧离子浓度检测方法及其系统设计[D]. 南京:南京信息工程大学,2016.

[12] Fiala P, Steinbauer M, Barlusek K, et al. The effect of non-homogenous parts into materials [J]. Piers Online, 2007, 3(5): 1245-1249.

[13] 孙健,白敏冬,毛程奇,等. 单极性带电粒子浓度测试方法的研究[J]. 物理学报,2007,56 (7):3972-3976.

[14] 陈卓,何威,蒲以康. 电子回旋共振氩等离子体中亚稳态粒子数密度及电子温度的测量[J]. 物理学报, 2005, 54(5): 2153-2157.

[15] Beckett J C. Air ionization as an environment factor [J]. Electrical Engineering, 1954, 73(4): 161-165.

[16] Aplin K L, Harrison R G. A computer-controlled Gerdien atmospheric ion counter [J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(8):3037-3041.

[17] 孙景群. 大气电学基础[M]. 北京:气象出版社,1987:27-30.

[18] Kubâsek R, Roubal Z, Szabó Z, et al. The measurement of air ions spectrum using the aspiration method [C]// Tunisia: 2009 3rd International Conference on Signals, Circuits and System (SCS), 2009: 1-4.

[19] 李伟,王经业,陆勇,等. 大气负离子自动测报仪的研制[J].气象科技, 2008, 36(6):834-836.

[20] 芦满涛. 气体体积流量测量中温度和压力修正的必要性[J]. 冶金自动化, 2008, 32(4): 43-46.

[21] GB/T 18809—2002 空气离子测量仪通用规范[S].

[22] 张明,李敏,莫月琴. 空气负离子观测仪的封装结构设计及仿真[J].气象科技,2015,43(4):582-586.

A Method for Detecting Negative Air Ion Concentration Based on Mobility Analysis

Han Jiajia　Tao Zongming　Zhang Hui

(PLA Army Academy of Artillery and Air Defense, Hefei 230031)

Abstract: Negative air ion concentration is an important criterion for judging air quality. The traditional negative air ion concentration detector measures the current formed at the two ends of the collector plate by a capacitive ion collector, and calculates the concentration by the relationship between the measured current and the negative ion concentration. The negative air ion concentration detector designed by this method can only measure the concentration of a limited number of radius, and there is a certain systematic error in measuring the concentration of a large radius. In order to meet the requirement of high precision detection of negative air ion concentration, a method of detecting negative air ion concentration based on mobility analysis is proposed by simulating and analyzing the trajectories of air ions with different radius in the collector. The corresponding circuit system and design parameters are given, and the rationality of the system design is analyzed and demonstrated. This method combines current detection with numerical calculation, and can accurately measure the concentration of negative ions with different radius in the air. It has important application value in the field of environmental monitoring and assessment.

Keywords: air quality; negative ion concentration; ion mobility; ionic radius