

DOI: 10.13382/j.jemi.B2002951

空气负离子测量仪校准方法研究*

罗昶 杨安良 丁妙增 黄鹏良 葛永华 章焕

(浙江省大气探测技术保障中心 杭州 310018)

摘要:为解决空气负离子测量仪器校准问题,在简要分析空气负离子测量仪工作原理的基础上,提出了仪器量值溯源途径和校准设备的研制方法,并对研制的负离子发生装置和标准负离子测量仪进行了试验验证。验证结果表明,负离子发生装置产生的负离子场具有负离子浓度连续可调、稳定性好、响应速度快、离子粒径小的特点。标准负离子测量仪相对误差不超过 $\pm 5\%$,标准装置测量不确定度为6%,可用于空气负离子测量仪的校准和测试。利用负离子发生装置和标准离子测量仪组成的校准装置,对两种不同的负离子测量仪进行了校准试验,对测得的测量误差进行了分析,验证了校准方法的科学合理性和可行性。

关键词:校准方法;负离子监测仪;测量误差;试验验证

中图分类号:TN06 文献标识码:A 国家标准学科分类代码:410.55

Research on calibration method of air negative ion measurement

Luo Chang Yang Anliang Ding Miaozeng Huang Pengliang Ge Yonghua Zhang Huan

(Zhejiang Atmospheric Sounding Technical Support Center, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to solve the calibration problem of air negative ion measuring instruments, based on the working principle of air negative ion monitor, a method for tracing the source values of instruments and a method of developing the calibration equipment are proposed. The developed negative ion generator and standard negative anion measuring instrument are tested and verified. The verification results show that the anion field produced by the anion generator has the characteristics of continuously adjustable anion concentration, good stability, fast response speed and small particle size, the relative error of the standard negative ion measuring instrument is not more than $\pm 5\%$, and the measurement uncertainty of the standard device is 6%, which can be used for the calibration and test of the negative ion measuring instrument. Using a calibration device composed of the negative ion generating device and the standard ion measuring instrument, a calibration test is performed on two different negative ion measuring instruments, and the measurement errors are analyzed to verify the scientific rationality and feasibility of the calibration method.

Keywords: calibration method; air negative ion monitor; measurement error; test validation

0 引言

空气负离子测量仪是用于测量空气中负离子浓度的专用仪器。我国发布了GB/T 18809—2002《空气离子测量仪器通用规范》,日本发布了JIS-B9929—2006 Standard for Measuring Methods of Airborne Ion Density(空气中的离子密度测量方法),为研制和生产空气负离子测量仪器提供了标准依据。然而,国内外至今尚未建立负离子测量

仪器的量值溯源体系,未开展标准化的校准工作,以致难以确认仪器测量结果的准确性和可靠性。有学者在空气负离子分布特征和影响因子的研究中,特别是环境风速、温湿度等气象因子对负离子浓度的影响,往往会因测量数据不同而得出相反结论^[1-5]。近几年,有学者提出了基于离子迁移率、质谱仪的负离子检测方法^[6-8],以提高空气负离子测量的准确性。显然,测量仪器选择得当与否以及测量数据的准确与否,对空气负离子的研究有重要影响。开展负离子测量设备的校准工作,对确保负离子

收稿日期:2020-02-12 Received Date: 2020-02-12

* 基金项目:华东区域气象科技协同创新基金合作项目(QYHZ201806)资助

测量的准确性,以及负离子监测和评估具有重要意义。

假设存在恒定负离子浓度的空气,则可用于校准负离子测量仪。但以目前的科技水平,产生一个可计量至单个负离子的空气十分困难。另外,由于空气负离子生命周期短^[9-10],负离子浓度也无法保持长时间恒定。仪器测得的负离子浓度无法溯源至单位体积内空气中的负离子个数。测量误差是测量仪器的主要计量特性。对于负离子测量误差,当前最有效的方法是在一个负离子浓度均匀稳定的负离子场(负离子源)中用准确度高的标准负离子测量仪与被校仪器进行比较。因此,对负离子测量仪进行校准,关键在用于校准的标准装置的研制,主要包括能稳定可控的负离子发生装置和标准负离子测量仪。

本文根据负离子发生器的离子基本特性和扩散规律,研制了负离子浓度大小可控的负离子发生装置,为进行负离子测量仪校准提供稳定负离子源。根据负离子测量仪的工作原理,本文将标准负离子测量仪分成离子收集器和微电流计两部分,分别溯源至物理尺寸、电压、气体流量和电流,以达到量值溯源要求(其中,离子收集器按日本标准 JIS-B 9929-2006 制作了大小两种口径,微电流计使用了精度达 1% 的高精度皮安表)。为验证负离子仪器的校准可行性,本文按量值比较法开展了不同型号的负离子测量仪校准试验。

1 量值溯源

1.1 测量原理

目前常用的负离子测量方法为电容式测量法^[10],空气负离子测量仪主要由离子收集器(包括极化板或极化圆筒、收集板或收集棒、极化电源、吸气风机等组成)、微电流测量模块(也可通过电位差计测量电流)、数据处理模块等组成,其主要工作原理如图 1 所示。空气以稳定流速通过一个具有恒定电场的固定空间,空气中的负离子在电场作用下发生迁移并落在收集板(棒)上形成电流,根据电流大小计算出采集空气中的负离子个数。

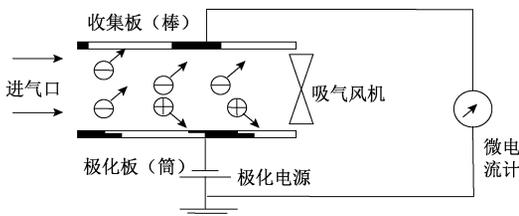


图 1 空气负离子测量仪工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of air negative ion monitor

由于单个负离子的电荷量已知(约为 1.6×10^{-19} C),

可以根据电流大小和空气流量计算出负离子浓度^[11-13],计算公式为:

$$N = \frac{I}{qM} \quad (1)$$

式中: N 为负离子浓度; I 为测得的电流; q 为基本电荷量(约为 1.6×10^{-19} C); M 为收集空气流量。从式(1)可知,负离子浓度误差主要来源于空气流量测量误差和电流测量。

1.2 溯源方法

由于空气负离子测量仪尚无负离子浓度计量溯源途径,其准确度无法验证,无法得到准确度高的标准负离子测量仪。但根据测量原理,可将负离子测量仪的组成部分单独进行溯源(表 1)。

表 1 负离子测量仪量值溯源

Table 1 Quantity traceability of negative ion measuring instrument

组件	测量参数	溯源量
离子收集器结构尺寸	长度	m
离子收集器极化电压	电压值	V
离子收集器空气流量	气体流量	m ³ /s
微电流计	电流	A

按照 GB/T 18809—2002 或日本国家标准(JIS B 9929:2006 Standard for Measuring Methods of Airborne Ion Density),在离子收集器结构尺寸和极化电压符合标准的情况下,根据空气流量误差和电流测量误差可计算出负离子浓度测量误差。空气负离子测量仪标称允许误差一般为 $\pm 15\% \sim \pm 20\%$ ^[11-12],因此可选择相对测量误差小于标称允许误差的负离子测量仪作为校准用标准负离子测量仪。

以标准负离子测量仪作为校准用标准器(参考标准)时,需要一个稳定的负离子源用于量值比较(量值传递)。

2 校准设备研制

2.1 负离子源

目前,存在多种人工产生负离子的方式,如放射线、紫外线、水压撞击、电晕放电、电气石、光触媒等,均可以达到获得空气负离子的目的^[14-15],其中电晕放电法能产生高含量的气态负离子,此方式产生的负离子越来越多地被用于治疗疾病、人体保健和空气净化等^[16-17]。本文使用电晕放电法的负离子发生器作为高浓度负离子产生源。

虽然负离子发生器能够持续产生高浓度负离子,但

这些负离子在空间分布极其不均匀,且易受环境温度、湿度和风速等影响,不能保持恒定^[18],难以用于负离子测量仪的校准。为解决这一问题,本文在恒温恒湿环境下,利用风洞产生恒定风速,使试验区负离子浓度处于相对稳定状态。试验区负离子浓度大小可通过在风洞压缩段增加离子吸收和释放装置(利用格栅式离子采集器^[19]来吸收离子并接地释放)进行控制。负离子发生装置结构如图2所示,离子试验区空间为1 000 mm×600 mm×600 mm。

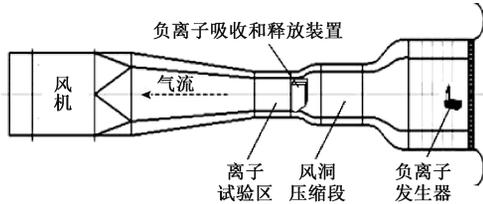


图2 负离子发生装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of negative ion generator

2.2 标准负离子测量仪

校准用的标准负离子测量仪由标准离子收集器和微电流计二部分组成,如图3所示。标准离子收集器参照日本标准^[12]及相关文献^[20-21]制作,流量误差优于±5%。微电流计选用数字式皮(飞)安表(B2983A型),测量精度1%。



图3 离子收集器和微电流计

Fig.3 Ioncollector and micro galvanometer

根据日本标准 JIS B 9929 : 2006 Standard for measuring methods of airborne ion density 制作了不同口径的离子收集器,相关参数如表2所示。

表2 离子收集器技术参数

Table 2 Technical parameters of ion collector

离子收集器类型	大口径	小口径
外筒内径/cm	4.8	1.8
收集棒外径/cm	3.2	0.8
收集棒长度/cm	22.6	7.5
空气流量/(mL·min ⁻¹)	50	24.5
极化电压/V	5.6	18
极限迁移率/(cm ² /V·s)	0.4	0.5

注:极限迁移率^[12,20]可通过结构参数和极化电压确定

离子收集器剖面图如图4所示。

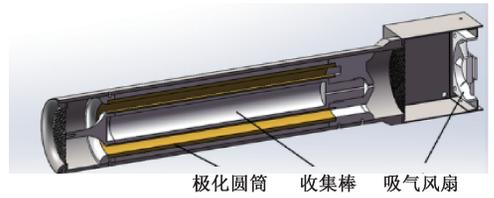


图4 大口径离子收集器剖面示意图

Fig.4 Sectional diagram of large diameter ioncollector

微电流计测得的电流根据式(1)可换算出负离子浓度。根据空气流量,大口径离子收集器换算结果为:

$$N = \frac{I}{1.6 \times 10^{-19} \times 50 \times \frac{10^3}{60}} = 7.5 \times 10^{15} I \quad (2)$$

在制作负离子收集器时,极化板(筒)和收集板(棒)应高度绝缘,当负离子浓度为0时,其测得的电流换算成负离子浓度时应小于100 ions/cm³并基本保持恒定(该值可作为零位)。实测大口径离子收集器的零位为30 ions/cm³。同理,小口径离子收集器的换算结果为:

$$N = \frac{I}{1.6 \times 10^{-19} \times 24.5 \times \frac{10^3}{60}} = 15.3 \times 10^{15} I \quad (3)$$

其零位约为70 ions/cm³。

3 试验结果分析

3.1 试验环境条件设置

为确保试验结果的准确可靠并具有良好的重复性,环境条件设置如下:1)恒温恒湿,空气温度(20±1)℃,相对湿度(60±5)%;2)空气洁净度5级(日本标准 JIS B 9929:2006);3)无电磁干扰和静电。

3.2 校准设备性能测试

1) 负离子发生装置

选用IM806型负离子测量仪作为试验设备。将负离子测量仪置于负离子发生装置试验区中心,负离子发生器试验区风速控制在0.4 m/s左右并保持恒定,试验场景如图5所示。

(1)开启负离子发生器后,调节负离子吸收和释放装置,设定各试验点负离子浓度为37 000、24 000、10 000、2 500、1 000、500 ions/cm³,正反行程试验。负离子浓度达到设定值后,每5 s读取1次负离子浓度值,读取时间不少于10 min。负离子浓度变化情况如图6所示。

从图6可看出,各试验点负离子浓度基本保持恒定,并具有很好的重复性。从一个试验点调整到下一个试验



图 5 负离子发生装置试验场景

Fig. 5 Test scenario of negative ion generator

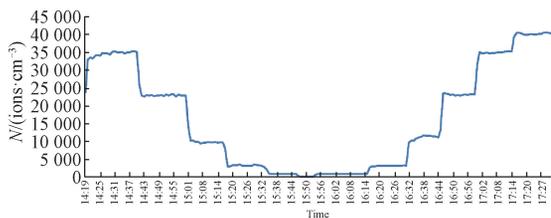


图 6 试验区负离子浓度实时变化

Fig. 6 Real time change diagram of negative ion concentration in test area

点时,响应时间快速。以各试验点稳定期间(10 min)的负离子浓度相对标准偏差作为稳定性时,除 500 ions/cm³ 试验点外,稳定性均不大于 4%。

(2) 对于负离子发生装置发生的负离子不同粒径分布情况,可设定负离子浓度并稳定在 3.5×10⁴ ions/cm³, 使用 COM3400 负离子测量仪测量不同离子迁移率的离子占有率,测量结果如图 7 所示。

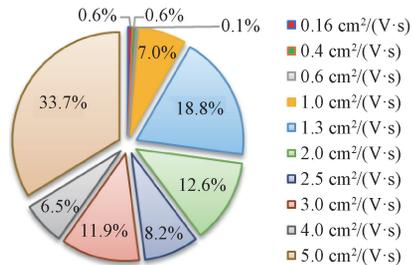


图 7 不同离子迁移率的离子占有率

Fig. 7 Ion occupancy of different ion mobility

从图 7 可看出,在室内空气质量良好的情况下,使用电晕放电法产生的负离子,其离子迁移率为 1.0 cm²/(V·s) 及以上的负离子占有率超过 98%,以小粒径负离子为主。

(3) 根据离子传播规律,负离子扩散与风速有关^[18]。负离子发生装置试验区的负离子浓度与风速大小呈一定

的指数关系。设置试验区风速使其稳定在相应风速点上测量负离子浓度值,其结果如图 8 所示。

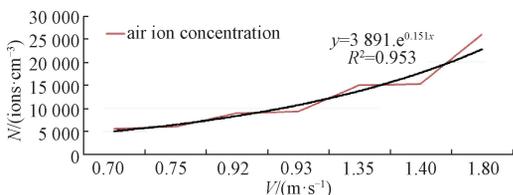


图 8 风速对负离子扩散的影响

Fig. 8 The influence of wind speed on the diffusion of negative ions

从图 8 可看出,风速大小的变化影响试验区离子浓度大小,从而影响稳定性。因此,当试验区风速有良好的稳定性和均匀性时,负离子的生成和消亡将保持动态平衡,使负离子浓度基本恒定。

2) 标准离子收集器

按表 2 制作大小口径离子收集器,利用负离子发生装置产生的稳定负离子源进行试验。

将大口径和小口径收集器置于负离子发生器试验区中心同一截面上,进气口同向并垂直于试验区风场流向,大小口径收集器与各自皮安表联接并预热。开启负离子发生器,试验区风速控制在 0.4 m/s。

设置试验区负离子浓度,稳定 1 min 后每 6 s 记录大小口径收集器的输出电流,并按式(2)和(3)计算出负离子浓度值。记录 1 min 测量数据后调整至下一个负离子浓度值测量。以各试验点 10 次/min 测得的负离子浓度的算术平均值作为测量结果,比较情况如表 3 所示。

表 3 大小口径离子收集器收集离子比较

Table 3 Comparison of ion collection by ion collectors of different sizes

序号	大口径/ (ions·cm ⁻³)	小口径/ (ions·cm ⁻³)	差值/ (ions·cm ⁻³)	相对偏差/%
1	486	463	23	5
2	1 025	1 044	-19	-2
3	2 713	2 828	-115	-4
4	8 175	7 800	375	5
5	15 011	14 250	761	5
6	45 282	45 980	-698	-2

大口径离子收集器因流量大,收集的负离子多,形成的电流比小口径收集器大。对于本次试验,根据式(1),大小口径收集器测得的负离子浓度最大相差 5%(包含了皮安表 1%的精度误差和流量误差),说明了大小口径收集器具有良好的测量一致性,制作标准负离子测量仪具有很好的可行性。

3) 校准试验

试验环境温度 21.2 °C ~ 21.5 °C,相对湿度为

64.4%~65.5%。负离子发生装置试验区空气流速为0.4 m/s。

将离子收集器和被校仪器的空气取样口处于负离子发生装置试验区同一截面上并处于中心点附近,仪器的进风口与试验区风速垂直。仪器安装后不影响试验区流场的稳定性。仪器预热30 min并调零后开始测量。调整负离子发生装置使试验区负离子浓度处于相应测量点,负离子浓度稳定1 min后,读取参考标准和被校仪器示值(每分钟等间隔读取,共读取12对数)。

以大口径离子收集器和微电流计作为参考标准,被校仪器为IM806型空气离子测量仪,测量误差校准结果如图9所示。

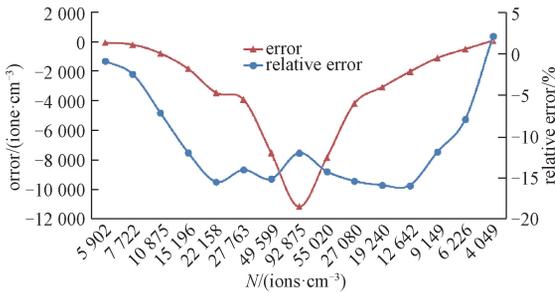


图9 测量误差校准结果(大口径离子收集器作标准)

Fig. 9 Calibration result of measurement error with large diameter ion collector as standard

以小口径离子收集器和微电流计作为参考标准,被校仪器为COM3400型空气离子测量仪,比较结果如图10所示。

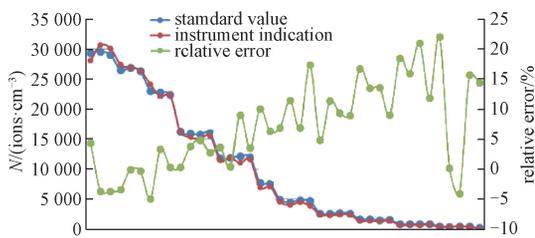


图10 测量误差校准结果(小口径离子收集器作标准)

Fig. 10 Calibration result of measurement error with small diameter ion collector as standard

从校准结果得到如下结论。

(1)通过正反行程比较测量(图9),在相同测量点有较好的重复性。

(2)在相同负离子浓度下,小口径离子收集器因流量较小,测得的电流就小。从图10可看出,在较低负离子浓度下,其测量误差增大,这与弱小电流测量误差情况相符。

(3)最大相对测量偏差基本不超过 $\pm 15\%$ (部分点达到了22%),与仪器技术指标基本相符。

(4)对于校准结果的测量不确定度,根据此次试验方法,主要由参考标准器误差和测量重复性引入。试验用参考标准最大相对偏差为 $\pm 5\%$,测量重复性以12次重复测量的相对标准偏差表示(各试验点均小于4%),则根据JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》,此次校准结果的测量不确定度约为6%($k=2$),小于被标校仪器测量误差($\pm 15\% \sim \pm 20\%$)绝对值的1/2,基本符合量值传递要求。

4 结论

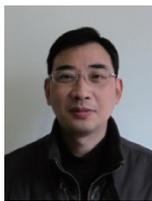
根据空气负离子测量仪的工作原理,分析了空气负离子测量仪器量值溯源问题,研究发现可将空气负离子浓度溯源至空气流量、电流、电压及长度等物理量。为此,依据国内外相关标准和研究成果制作大小不同口径的离子收集器,并利用高精度微电流计测量负离子形成的电流,制作并验证了高精度负离子测量仪,解决了校准没有参考计量标准器的技术难题。为开展不同负离子浓度的示值校准,研究了空气负离子分布和扩散规律,基于风洞制作了稳定可调的负离子发生装置。利用高精度负离子测量仪和负离子发生装置组成校准设备,为采用量值比较法校准负离子测量仪器提供了技术基础。为使校准活动准确可靠,可进一步研究校准设备的测量性能及校准结果的测量不确定度,为开展校准活动提供科学合理的校准方法提供基础。

参考文献

- [1] 熊丽君,韩少华,唐浩,等. 空气负离子研究进展及影响因素分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2011(3): 184-186.
XIONG L J, HAN SH H, TANG H, et al. The research progress and influencing factors of aero-anion[J]. China Population, Resources and Environment, 2011(3): 184-186.
- [2] 王淑娟,王芳,郭俊刚,等. 森林空气负离子及其主要影响因子的研究进展[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2008, 29(1): 243-247.
WANG SH J, WANG F, GUO J G, et al. A review: Negative air ions and its main influence factors in forest areas [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2008, 29(1): 243-247.
- [3] 王薇,余庄. 中国城市环境中空气负离子研究进展[J]. 生态环境学报, 2013, 22(4): 705-711.
WANG W, YU ZH. Research progress on negative air ions in urban environment in China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(4): 705-711.
- [4] 叶彩华,王晓云,郭文利. 空气中负离子浓度与气象条件关系初探[J]. 气象科技, 2000, 28(4): 51-52.

- YE C H, WANG X Y, GUO W L. A preliminary study on the relationship between air negative ion concentration and meteorological conditions[J]. Meteorological Science and Technology, 2000, 28(4):51-52.
- [5] 黄世成,徐春阳,周嘉陵.城市 and 森林空气负离子浓度与气象环境关系的通径分析[J].气象,2012,38(11):1417-1422.
- HUANG S CH, XU CH Y, ZHOU J L. Path analysis on negative air ion concentration and the meteorological environment in urban and forest zones [J]. Meteorological Monthly, 2012,38(11):1417-1422.
- [6] 韩佳佳,陶宗明,张辉.一种基于迁移率分析的空气负离子浓度检测方法[J].气象科技,2019,47(5):747-751.
- HAN J J, TAO Z M, ZHANG H. A method for detecting negative air ion concentration based on mobility analysis[J]. Meteorological Science and Technology, 2019, 47(5):747-751.
- [7] 邢高娃,李宇,林金明.空气负离子产生方法及其检测技术的研究进展[J].分析试验室,2019,38(1):117-123.
- XING G W, LI Y, LIN J M. Recent advances in generation and detection of gaseous negative ions[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2019, 38(1):117-123.
- [8] WAGNER R, MANNINENH E, FRANCHIN A, et al. On the accuracy of ion measurements using a Neutral cluster and air ion spectrometer [J]. Boreal Environment Research, 2016(21):230-241.
- [9] 林金明,宋冠群,赵利霞.环境、健康与负氧离子[M].北京:化学工业出版社,2006.
- LIN J M, SONG G Q, ZHAO L X. Environment, Health and Negative Oxygen Ions [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [10] 李文昭.空气离子测量系统的研究与设计[D].保定:河北大学,2013.
- LI W ZH. Research and Design of Air Ion Measurement System[D]. Baoding: Hebei University, 2013.
- [11] GB/T 18809-2002.空气离子测量仪器通用规范[S]. GB/T 18809-2002. General specification for air ion measuring instruments[S].
- [12] JIS B 9929: 2006. Standard for measuring methods of airborne ion density[S].
- [13] 李伟,陆勇,李书严,等.空气负离子自动测量系统的研制[J].仪器仪表学报,2008,29(8):474-478.
- LI W, LU Y, LI SH Y, et al. The development of automatic air negative ion observation instrument [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(8):474-478.
- [14] 文吉槐,雷才,张迎,等.空气负离子发生器及负离子发生材料简介[J].化学教学,2015(1):92-95.
- WEN J H, LEI C, ZHANG Y, et al. Brief Introduction of Air Negative Ion Generator and Negative Ion Generating Material [J]. Education in Chemistry, 2015(1):92-95.
- [15] 武桂兰,于锡香,朱有华,等.人工空气负离子浓度及其应用的观察[J].中国康复,1987,2(1):28-30.
- WU G L, YU X X, ZHU Y H, et al. Observation of artificial air anion concentration and its application [J]. Chinese Journal of Rehabilitation, 1987,2(1):28-30.
- [16] 余若彬,张波.负离子技术与装置[J].企业技术开发,2012,31(4,7):113-115.
- YU R B, ZHANG B. Negative ion technology with the device [J]. Technological Development of Enterprise, 2012,31(4,7):113-115.
- [17] 邢高娃,李宇,林金明.空气负离子产生方法及其检测技术的研究进展[J].分析试验室,2019,38(1):112-118.
- XING G W, LI Y, LIN J M. Recent advances in generation and detection of gaseous negative ions [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2019, 38(1):112-118.
- [18] 农钢,钮式如.负离子发生器的离子扩散规律及影响因素的实验研究[J].环境与健康杂志,1987,4(4):8-11.
- NONG G, NIU SH R. Experimental study on ion diffusion law and influencing factors of negative ion generator [J]. Journal of Environment and Health, 1987(4):8-11.
- [19] JC/T 1016-2006.材料负离子发生量的测试方法[S]. JC/T1016-2006. Testing method of material negative ion generation[S].
- [20] 行鸿彦,周慧萍.负氧离子收集器的分析及设计[J].电子测量与仪器学报,2016,30(4):621-627.
- XING H Y, ZHOU H P. Analysis and design of negative oxygen ion collector [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016,30(4):621-627.
- [21] FLALA P, STEINBAUER M, BARTUSEK K, et al. Experiments with accuracy of air ion field measurement [J]. 2007,3(8):276-279.

作者简介



罗昶,本科,现为浙江省大气探测技术保障中心高级工程师,主要从事气象仪器技术和计量检测研究、信号检测与处理。

E-mail:594258409@qq.com

Luo Chang B. Sc. degree, senior engineer of Zhejiang Atmospheric Sounding Technical Support Center. His main research interests include meteorological instrument technology, measurement detection research and signal detection and processing.