

· 研究报告 ·

脉冲电场作用对植物释放负离子与气孔特征的关系

吴仁焯^{1,2}, 孙缘芬¹, 郑金贵^{1,2*}, 邓传远³, 叶大鹏⁴, 王晴水¹

¹福建省特种作物育种与利用工程技术研究中心, 福州 350002; ²福建农林大学, 作物科学学院, 作物遗传育种与综合利用教育部重点实验室, 福州 350002; ³福建农林大学园林学院, 福州 350002; ⁴福建农林大学机电工程学院, 福州 350002

摘要 植物在自然状态下释放负离子的能力很弱, 施加脉冲电场可激发其释放能力。在密闭的玻璃箱中, 研究紫背竹芋 (*Stromanthe sanguinea*)、绒叶肖竹芋 (*Calathea zebrina*) 和朱顶红 (*Hippeastrum rutilum*) 在常态、脉冲电场和光照刺激下释放负离子的浓度, 并观察叶片气孔特征, 结果表明: (1) 不同参数脉冲电场对植物释放负离子的能力影响不同, 每种植物均具有高效释放负离子的最佳脉冲电场, 紫背竹芋为 $A_3B_3C_3$ ($A_3, U=1.5 \times 10^4 \text{ V}; B_3, T=1.5 \text{ s}; C_3, \tau=65 \text{ ms}$); 绒叶肖竹芋为 $A_3B_4C_1$ ($A_3, U=1.5 \times 10^4 \text{ V}; B_4, T=2.0 \text{ s}; C_1, \tau=5 \text{ ms}$); 朱顶红为 $A_4B_4C_1$ ($A_4, U=2.0 \times 10^4 \text{ V}; B_4, T=2.0 \text{ s}; C_1, \tau=5 \text{ ms}$)。 (2) 植物体上所储存的电压越大, 其释放负离子的能力越强。 (3) 脉冲电场作用时, 植物释放负离子的能力与光照度呈正相关; 无电场刺激时两者差异不显著 ($P>0.05$)。 (4) 植物释放负离子的能力与叶片气孔特征关系密切, 脉冲电场作用下叶片气孔的开合度和气孔密度越大, 其释放能力越强。

关键词 负离子, 电刺激法, 脉冲电场, 光照度, 气孔

吴仁焯, 孙缘芬, 郑金贵, 邓传远, 叶大鹏, 王晴水 (2017). 脉冲电场作用对植物释放负离子与气孔特征的关系. 植物学报 52, 744–755.

负离子的生物学效应及其对环境的生态效应已日益受到人们的关注 (Krueger, 1962, 1972, 1985; Krueger and Reed, 1976)。其作为衡量空气质量的一个重要指标, 具有预防疾病和增强人体免疫力的功效, 呼吸富含负离子的空气, 能提高人体的舒适度 (Griffin and Kornbluh, 1962; Krueger and Reed, 1976; Kosenko et al., 1997; Kondrashove et al., 2000)。许多学者对负离子的生物学效应进行过研究, 如负离子可调节大脑皮层的功能, 促进氧的吸收和利用 (孙继良等, 2010), 降低直肠的温度 (Wakamura et al., 2004); 缓解高强度室内工作的压力, 消除疲劳 (Nakane et al., 2002) 等。反之, 在缺乏负离子的空气中工作或生活, 人体的功能可能会出现紊乱 (Krueger, 1985; Wu et al., 2011)。故负离子常被誉为空气中的“维生素” (李安伯, 1983, 2001; 李安伯和张振军, 1996)。负离子主要以 $\text{O}_2^-(\text{H}_2\text{O})_n$ 和 $(\text{OH})^-(\text{H}_2\text{O})_n$ 两种形式存在 (Griffin and Kornbluh, 1962; Wang and Li, 2009; 吴仁焯等, 2015)。自然界中的负离子大部分来自宇宙射线和雷电等对大气分子的电离作用、水

的喷筒电效应、树冠与枝叶的尖端放电, 及植物光合作用形成的光电效应促使空气电离。自然状态下, 空气通过空气电离与离子复合两个过程使空气中的离子保持动态平衡 (Wang and Li, 2009; Wu et al., 2011)。

负离子浓度随着环境的变化而呈现差异。例如, 在窗户紧闭的室内, 负离子的浓度均值可低至 $500 \text{ ion}\cdot\text{cm}^{-3}$; 在污染空气中, 负离子的浓度甚至可降为 0, 远低于清新空气的标准 (负离子浓度为 $1\ 500 \text{ ion}\cdot\text{cm}^{-3}$)。而在室外绿地、林区、瀑布和公园等植被丰富区, 负离子浓度均值可达 $3\ 000 \text{ ion}\cdot\text{cm}^{-3}$ 以上 (李安伯, 2001; 吴楚材等, 2001; 吴仁焯等, 2014b)。原因在于植物的光合作用促使空气发生电离, 进而增加了负离子的浓度 (吴楚材和钟林生, 1998; 曾曙才等, 2007; 刘新等, 2011)。同时, 负离子浓度受环境气象因素的影响较大, 温度、湿度、风、空气中的颗粒物和辐射等都影响负离子浓度的时空差异 (秦俊等, 2008; 黄向华等, 2013; 王成等, 2014; 王薇, 2014; 王晓磊和王成, 2014)。总之, 室外环境中负离子的浓

收稿日期: 2016-12-06; 接受日期: 2017-05-04

基金项目: 国家自然科学基金 (No.31500207)、国家科技支撑计划 (No.2013BAD01B05) 和福建农林大学科技发展金计划 (No.KF2015076)

* 通讯作者。E-mail: jingui.zheng@hotmail.com

度远高于室内环境, 然而大部分人群在室内工作和活动的时间较长, 几乎占全天24小时的80%–90%, 这使得他们无法享受到大自然环境中富含植物源负离子的清新空气(王艳英等, 2014; 吴仁焯等, 2014a), 显然, 提高室内环境的负离子浓度十分重要。

目前, 对负离子的研究主要侧重于植物群落释放负离子及其动态分布特征(邵海荣和贺庆棠, 2000; 秦俊等, 2008; 鲍风宇等, 2013; 陈雷等, 2015), 环境中负离子浓度与气象因子的关系(穆丹和梁英辉, 2009; 石彦军等, 2010; 黄向华等, 2013), 城市绿地及景区不同植被的负离子浓度与空气质量评价(李少宁等, 2010; Wu et al., 2011; 张凯旋和张建华, 2013; Liang et al., 2014; 任洪昌等, 2014; 关蓓蓓等, 2016), 及负离子的生态效益评价(钟林生等, 1998; 范亚民等, 2005; 董莎莎等, 2013)等方面。对植物释放负离子的机理则未见报道。吴仁焯等(2011b)研究了植物在自然状态下产生负离子的能力, 指出自然状态下植物释放负离子的能力均很弱, 单株植物释放负离子的浓度均值最大不超过 $300 \text{ ion}\cdot\text{cm}^{-3}$, 能够引起的生物学和生态效应极为有限。另有研究表明, 高压脉冲(Tikhonov et al., 2002, 2004; 吴仁焯等, 2014b, 2015; 张万超等, 2015, 2016)和强光照度(Wang and Li, 2009)可显著提高植物释放负离子的能力, 推测植物释放负离子源自植物的生理变化过程而非物理变化过程。

为了研究脉冲电场和光照刺激对植物释放负离子的影响, 以及植物叶片气孔数量特征的变化与植物释放负离子能力之间的关系, 我们选取合果芋(*Syngonium podophyllum*)、百合(*Lilium brownii* var. *viridulum*)和剑麻(*Agave sisalana*)等10种常见、易于种植且具有观赏价值的植物为研究对象, 探索施加不同参数的脉冲电场和不同强度的光照刺激时植物释放负离子的能力, 及脉冲电场作用下, 植物释放负离子的能力与植物叶片气孔特征变化的关系, 以期寻找到提高植物释放负离子能力的最佳方法。

1 材料与方法

1.1 植物材料

为研究叶片形状以及植株形态对植物释放负离子的影响, 我们选取合果芋(*Syngonium podophyllum*

Schott)、百合(*Lilium brownii* var. *viridulum* Baker)、剑麻(*Agave sisalana* Perr. ex Engelm.)、紫背竹芋(*Stromanthe sanguinea* Sond.)、朱蕉(*Cordyline fruticosa* (L.) A.Cheval.)、绒叶肖竹芋(*Calathea zebryna* (Sims) Lindl.)、朱顶红(*Hippeastrum rutilum* (Ker-Gawl.) Herb.)、大鳞巢蕨(*Neottopteris antiqua* (Makino) Masamune)、虎耳草(*Saxifraga stolonifera* Curt.)和八角金盘(*Fatsia japonica* (Thunb.) Decne. et Planch) 10种植物(表1)为研究对象。供试植物均购于福建漳州百花村花卉交易市场, 每种植物选取外形和长势一致的植株3棵, 作为实验的3次重复。所有植物均种植在塑料花盆(外口径23 cm, 高19 cm, 底15 cm)中, 采取统一的水肥管理和养护方法。

1.2 负离子浓度的测定

实验于2016年6–8月进行, 选择该段时间的晴天, 采用厚度为4 mm玻璃制成的规格为80 cm×80 cm×80 cm的可密封式玻璃室, 在其一个侧面截取104 mm×104 mm的小窗口, 窗口大小与DLY-4G-232型空气离子测量仪的进风口相匹配, 未测量时用玻璃挡板封闭窗口(图1)。调节盆栽植物中心, 使其与玻璃箱的中心重叠, 以保持空气离子测量仪进气口的中心与株顶处于同一水平。负离子浓度使用DLY-4G-232型空气离子测量仪测定, 每秒读取1个数据, 并通过RS-232接口传输至电脑, 连续读取有效时间150秒, 取150个数据的平均值作为该植株释放负离子的浓度值, 将3组重复的负离子浓度平均值作为该种植物在该状态下释放的负离子浓度值。

自然状态下植物释放负离子浓度的测量实验设置2个对照组, 即盆土(无植物)和空白组(无土壤且无植物)。测量前先将植物放入玻璃室中静置15分钟, 以消除玻璃室中原有负离子浓度的影响。每小时测量1次, 全天共测定24次, 将3次重复的负离子浓度均值作为自然状态下该植物在该时段释放的负离子浓度值, 24个时段的负离子浓度均值作为该植物在自然状态下释放负离子的浓度值。

脉冲电场作用下植物释放负离子浓度的测量实验设置1个对照组, 即土壤(无植物)。采用福建农林大学研制的电脉冲刺激仪进行测定, 该仪器平均脉冲输出电压 $U=0.8\times 10^4\text{--}2.0\times 10^4 \text{ V}$, 脉冲间隔 $T=0.5\text{--}2.0 \text{ s}$, 脉冲宽度 $\tau=5\text{--}90 \text{ ms}$ 。为研究施加不同强度脉冲

表1 供试植物名录

Table 1 Tested plants species

Code	Plants	Age (month)	Plant height× Grown breadth (cm)
P1	<i>Syngonium podophyllum</i>	14	20×20
P2	<i>Lilium brownii</i> var. <i>viridulum</i>	13	70×20
P3	<i>Agave sisalana</i>	24	45×30
P4	<i>Stromanthe sanguinea</i>	12	30×30
P5	<i>Cordyline fruticosa</i>	14	60×50
P6	<i>Calathea zebrina</i>	12	40×45
P7	<i>Hippeastrum rutilum</i>	13	60×40
P8	<i>Neottopteris antiqua</i>	14	40×40
P9	<i>Saxifraga stolonifera</i>	12	30×30
P10	<i>Fatsia japonica</i>	12	50×40

P1: 合果芋; P2: 百合; P3: 剑麻; P4: 紫背竹芋; P5: 朱蕉; P6: 绒叶肖竹芋; P7: 朱顶红; P8: 大鳞巢蕨; P9: 虎耳草; P10: 八角金盘

P1: *Syngonium podophyllum*; P2: *Lilium brownii* var. *viridulum*; P3: *Agave sisalana*; P4: *Stromanthe sanguinea*; P5: *Cordyline fruticosa*; P6: *Calathea zebrina*; P7: *Hippeastrum rutilum*; P8: *Neottopteris antiqua*; P9: *Saxifraga stolonifera*; P10: *Fatsia japonica*

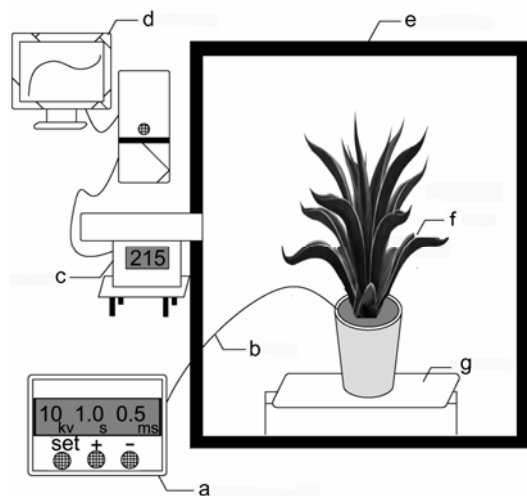


图1 密闭玻璃室内测量植物释放负离子浓度示意图

a: 高压脉冲刺激仪; b: 脉冲探针; c: 空气离子测量仪; d: 电脑; e: 密闭玻璃室; f: 植物; g: 可调式绝缘平台

Figure 1 Schematic of detecting negative air ions concentration by plant in a sealed chamber

a: High-voltage pulsed generator; b: Pulse probe; c: Air ions detector; d: Computer; e: Glass chamber; f: Plant; g: Adjustable insulation platform

表2 正交实验设计表

Table 2 Factors and levels for orthogonal test

Level	Factors		
	A (10^3 V)	B (s)	C (ms)
1	8	0.5	5
2	10	1.0	35
3	15	1.5	65
4	20	2.0	90

A: 脉冲电压; B: 脉冲间隔; C: 脉冲宽度

A: Pulsed voltage; B: Pulsed interval; C: Pulsed width

电场对植物释放负离子能力的影响, 采用3因素(脉冲电压A、脉冲间隔B和脉冲宽度C) 4水平(表2)的正交设计实验, 共设置16个处理, 每个处理3个重复。测量前将脉冲刺激仪的探针在离株茎外围5 cm处埋入土壤(深5 cm), 之后施加脉冲电场刺激。3次重复的负离子浓度均值作为该脉冲电场作用下该植物释放负离子的浓度值。

1.3 脉冲电场作用时植物体电压分析

为探究植物体电压与释放负离子能力之间的关系, 我们设置了3个实验组, 即对照组(CK)、实验A组和B组, 各设3次重复。对照组(CK): 对植物根际土壤施加最佳脉冲电场刺激, 用PINTEK HVP-40高压测量笔连接TDO1000/2000数字储存示波器, 读取植物体上的电压数值, 同时检测负离子浓度。实验A组: 最佳脉冲电场作用时, 导线连接植物体与物理地(大地); 实验B组: 最佳脉冲电场作用时, 导线连接植物体与地线, 同时均检测植物体电压和负离子的浓度。

1.4 脉冲电场和光照度作用下植物释放负离子分析

实验在Hipoint 740FHC光照培养箱中进行, 光照度的测量和校准采用Hipoint HR-350光谱分析仪(测量范围为0–100 000 lx, 测量波长为360–760 nm)。实验设置对照组(不施加脉冲电场作用)和刺激组(对每个供试植物施加最佳脉冲电场刺激)。每实验组设置6个处理(光照度水平), 即0、500、1 500、3 000、6 000和12 000 lx, 每个处理3次重复。研究常态和最佳脉冲电场刺激下, 光照度变化对植物释放负离子能力的影响。

1.5 植物叶表皮气孔分析

为研究植物释放负离子与植物叶片气孔数量特征的关系, 实验设置1个对照组(CK)和2个处理组。对照组: 对自然状态下生长的植物进行采样; 实验组: 对植物施加最佳脉冲电场刺激, 持续600秒后进行采样, 同时检测负离子的浓度值。取样部位为叶片靠近中脉两侧约0.3–0.5 cm处, 将供试材料切成3–5 cm²正方形小块, 于FAA溶液中固定24小时, 60.0°C水浴40分钟后, 用30%–40%次氯酸钠浸泡24小时, 之后换用蒸馏水, 撕取叶片的上下表皮, 用0.5%固绿染色, 制成临时切片(张亚冰等, 2008), 在OPTEC (DV320)光学显微镜下观察并拍照。叶表皮的观察在叶脉间区域进

行, 数量特征统计取10个视野进行分析。光学显微镜20x镜下观察气孔数量, 40x镜下测量植物叶片表皮气孔的长、宽和面积。在观察气孔数量特征时, 测定200个数值后取平均值, 气孔长宽比按对应值计算后求200个数值的平均值。

2 结果与讨论

2.1 常态下植物释放负离子浓度的日变化

由图2可知, 自然状态下10种植物在全天各时段释放负离子浓度的均值都很低。空白对照(CK)和盆土(P0)的负离子浓度在全天各时段的变化较为平稳。其中,

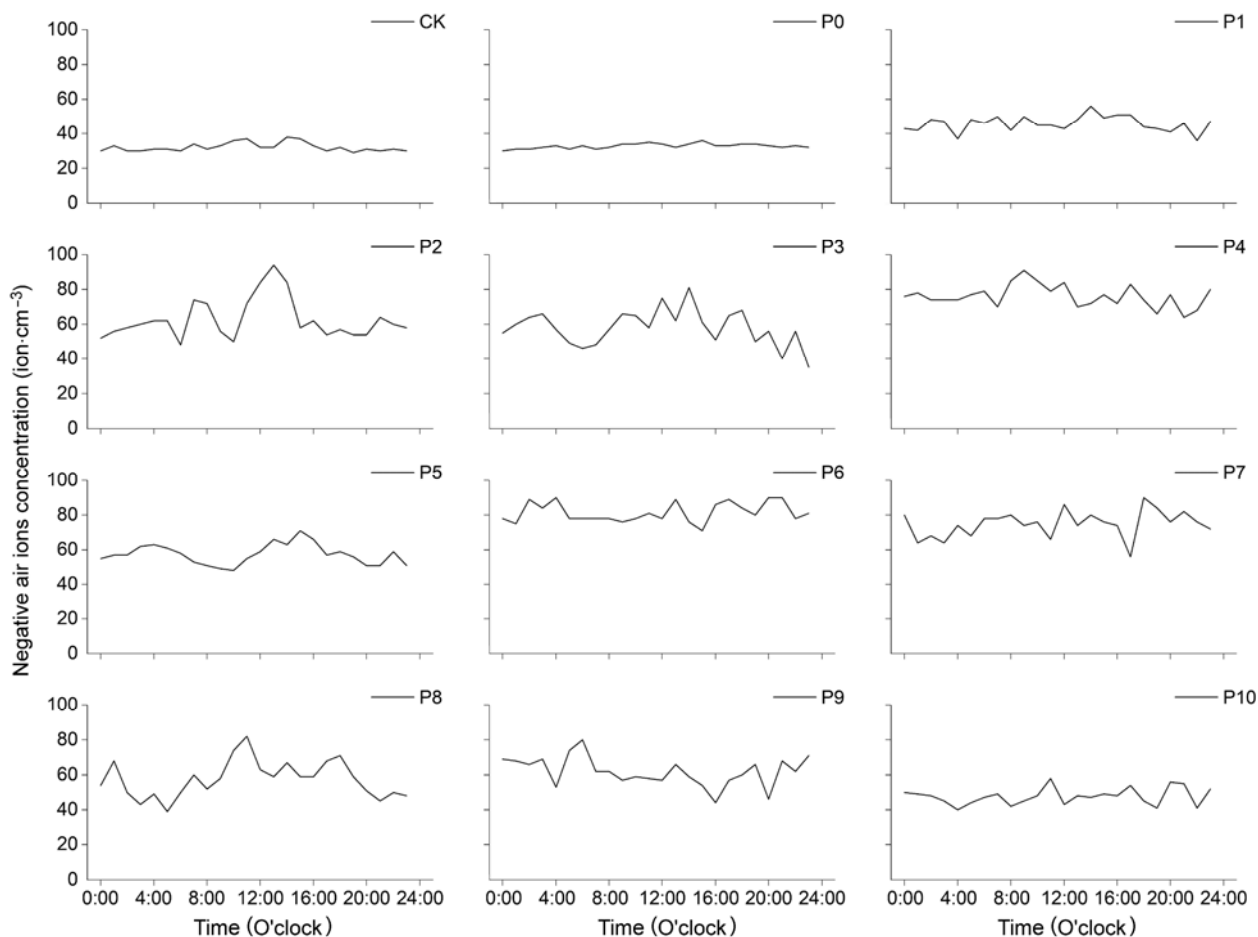


图2 自然状态下植物24小时释放负离子浓度的变化趋势

CK: 空白对照; P0: 盆土; P1–P10同表1。

Figure 2 The changes in negative air ions concentration over 24 h for plant varieties under normal condition

CK: P0 soil without plant; P0: Soil; P1–P10 see Table 1.

空白对照全天的负离子浓度最小值为 $29 \text{ ion}\cdot\text{cm}^{-3}$, 最大值为 $38 \text{ ion}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。从全天释放负离子浓度的最大值来看, 百合在14:00释放的负离子浓度值最大, 为 $94 \text{ ion}\cdot\text{cm}^{-3}$, 是空白对照负离子浓度最大值的2.5倍; 剑麻在23:00释放能力最小, 为 $35 \text{ ion}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。以全天释放负离子浓度的均值分析, 绒叶肖竹芋释放负离子的浓度均值最大, 为 $81 \text{ ion}\cdot\text{cm}^{-3}$; 紫背竹芋位居第2, 数值为 $76 \text{ ion}\cdot\text{cm}^{-3}$; 朱顶红为 $75 \text{ ion}\cdot\text{cm}^{-3}$, 位列第3; 合果芋最小, 为 $46 \text{ ion}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。尽管10种植物释放负离子浓度的均值间存在显著差异($P<0.05$), 但各植物释放负离子浓度值的绝对差异非常小。从白天均值和夜间均值的分析结果可以看出, 除绒叶肖竹芋和虎耳草外, 其余植物释放负离子的浓度均值白天时段(7:00AM–7:00PM)均高于夜间时段(7:00PM–7:00AM)(表3), 其中以大鳞巢蕨最为明显, 相对增幅为25%。

2.2 植物释放负离子最佳参数组合的脉冲电场

不同强度的脉冲电场对盆土释放负离子的作用很小($36\text{--}140 \text{ ion}\cdot\text{cm}^{-3}$), 处理间均无显著差异(表4)。紫背竹芋在不同强度脉冲电场作用下, 释放负离子的能力存在差异, 浓度均值为 $452\ 644\text{--}1\ 730\ 800 \text{ ion}\cdot\text{cm}^{-3}$ (表4)。 $A_3B_3C_3$ 处理下的负离子浓度均值最高, 是常态下释放能力(未刺激)的22 773.7倍。负离子浓度最低的处理为 $A_1B_1C_1$, 浓度均值为 $452\ 644 \text{ ion}\cdot\text{cm}^{-3}$, 是

其常态下释放能力的5 955.8倍。方差分析表明, 紫背竹芋高效释放负离子的最优处理为 $A_3B_3C_3$ 。在该强度脉冲电场作用下, 其释放负离子能力的倍增效应最为显著。

绒叶肖竹芋释放负离子的浓度均值为 $85\text{--}262 \text{ ion}\cdot\text{cm}^{-3}$ (表4), 以 $A_3B_4C_1$ 处理下负离子的释放能力最强, 是其常态下释放能力的3.2倍。而以 $A_2B_3C_1$ 作用下的释放能力最弱, 仅为 $85 \text{ ion}\cdot\text{cm}^{-3}$, 与自然状态下的释放能力($81 \text{ ion}\cdot\text{cm}^{-3}$)相近。尽管各处理绒叶肖竹芋释放负离子的能力不同, 但各处理间均无显著差异。方差分析表明, 仅脉冲电压对其释放负离子的能力存在显著影响($P<0.05$)。验证性实验表明, $A_3B_4C_1$ 为绒叶肖竹芋高效释放负离子最佳脉冲电场的组合参数。

朱顶红释放负离子的浓度均值为 $8\ 559\text{--}330\ 356 \text{ ion}\cdot\text{cm}^{-3}$ (表4), 以 $A_4B_2C_1$ 作用下的释放能力最强, 是其常态下的4 404.7倍, 与其它各处理均呈显著差异($P<0.05$)。释放负离子能力最小的是 $A_1B_3C_4$, 为 $8\ 559 \text{ ion}\cdot\text{cm}^{-3}$, 是其常态下的114.1倍。方差分析表明, 脉冲电压、脉冲间隔和脉冲宽度均对其释放负离子的浓度具有显著的影响($P<0.05$)。验证性实验表明, $A_4B_4C_4$ 是其高效释放负离子的最佳脉冲电场组合参数, 浓度均值为 $330\ 356 \text{ ion}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

与自然状态下各植物释放负离子的能力相比, 施

表3 自然状态下植物24小时释放负离子浓度的分析($\text{ion}\cdot\text{cm}^{-3}$)

Table 3 Analysis of negative air ions concentration generated by plants among 24 h in natural conditions ($\text{ion}\cdot\text{cm}^{-3}$)

Code	24 h mini-mum	24 h maxi-mum	24 h mean	Daytime mean	Nighttime mean	Max/Min	(Day mean–night mean)/Night mean	Day mean/Night mean
CK	29	38	32 k	34	31	1.31	0.10	1.1
P0	30	36	33 j	34	32	1.2	0.06	1.06
P1	36	56	46 i	48	44	1.56	0.09	1.09
P2	48	94	63 d	68	57	1.96	0.19	1.19
P3	35	81	58 f	63	53	2.31	0.19	1.19
P4	64	91	76 b	79	74	1.42	0.07	1.07
P5	48	71	57 g	58	57	1.48	0.02	1.02
P6	71	90	81 a	80	83	1.27	–0.04	0.96
P7	56	90	75 c	76	74	1.61	0.03	1.03
P8	39	82	57 g	64	51	2.1	0.25	1.25
P9	44	80	62 e	58	66	1.82	–0.12	0.88
P10	40	58	48 h	48	47	1.45	0.02	1.02

P1–P10同表1。CK和P0同图2。同列数字后不同小写字母表示各品种间差异显著($P<0.05$)。

P1–P10 see Table 1. CK and P0 see Figure 2. Different lowercase letters in the same column meant significant differences at the $P<0.05$ level.

表4 不同参数的脉冲电场刺激下植物释放负离子浓度的分析(平均值±标准差)**Table 4** Analysis of negative air ions concentration generated by plants upon different combinational parameters of pulsed electrical stimulation (means±SD)

Treatment	Factors			Average of negative air ions concentration (ion·cm ⁻³)			
	A	B	C	P0	P4	P6	P7
A ₁ B ₁ C ₁	8	0.5	5	36±3 a	452644±21866 n	91±6 a	8605±983 f
A ₁ B ₂ C ₃	8	1.0	65	38±2 a	471667±21881 n	92±8 a	9581±948 f
A ₁ B ₃ C ₄	8	1.5	90	39±2 a	535311±25007 l	94±5 a	8559±874 f
A ₁ B ₄ C ₂	8	2.0	35	44±2 a	494667±27146 m	98±8 a	8832±543 f
A ₂ B ₁ C ₄	10	0.5	90	39±2 a	795822±53569 k	95±9 a	20200±1478 f
A ₂ B ₂ C ₂	10	1.0	35	38±2 a	822267±54244 j	88±8 a	22473±1381 f
A ₂ B ₃ C ₁	10	1.5	5	37±3 a	813022±50909 jk	85±7 a	23236±2467 f
A ₂ B ₄ C ₃	10	2.0	65	41±3 a	872734±55664 i	91±4 a	21801±1643 f
A ₃ B ₁ C ₂	15	0.5	35	105±2 a	1564444±119680 d	226±20 a	181311±20261 e
A ₃ B ₂ C ₄	15	1.0	90	107±2 a	1628244±191548 c	250±40 a	218444±33270 c
A ₃ B ₃ C ₃	15	1.5	65	109±3 a	1730800±195344 a	233±16 a	191867±32167 de
A ₃ B ₄ C ₁	15	2.0	5	107±2 a	1670933±187634 b	262±28 a	208067±34590 cd
A ₄ B ₁ C ₃	20	0.5	65	130±2 a	1186667±103135 f	170±39 a	301933±30237 b
A ₄ B ₂ C ₁	20	1.0	5	129±5 a	1264000±117184 e	179±18 a	330356±30322 a
A ₄ B ₃ C ₂	20	1.5	35	134±3 a	1136800±83461 g	215±33 a	322644±29865 ab
A ₄ B ₄ C ₄	20	2.0	90	140±4 a	1038133±83109 h	164±51 a	318156±36925 ab

P0: 盆土。P4、P6和P7同表1。A、B和C同表2。同列不同小写字母表示在不同参数的脉冲电场作用下同一品种间差异显著($P<0.05$)。P0: Soil. P4, P6 and P7 see Table 1. A, B and C see Table 2. Different lowercase letters in the same column meant significant differences at the $P<0.05$ level.

加不同强度的脉冲电场, 植物释放负离子的浓度有不同程度的提高。除绒叶肖竹芋外, 紫背竹芋和朱顶红释放负离子的能力在不同强度脉冲电场作用下均存在显著差异($P<0.05$) (表4)。

2.3 释放负离子能力与植物体电压的关系

表5显示, 同一植物体上储存的电压与其释放负离子的能力呈正相关。紫背竹芋、绒叶肖竹芋和朱顶红对照组的负离子浓度均值都高于处理A和B组。除绒叶肖竹芋的负离子浓度在3个处理间无显著差异外($P>0.05$), 紫背竹芋和朱顶红在处理A、B两组的浓度值与对照组相比均差异显著($P<0.05$)。

3种植物对照组的电压与输入电压(最佳参数组合的脉冲电压)相比都有不同程度的衰减, 其中以朱顶红的电压衰减量最大, 减少了78.4%, 负离子浓度为362 000 ion·cm⁻³。绒叶肖竹芋和朱顶红分别减少65.8%和63.3%, 负离子浓度分别为1 757 467和260 ion·cm⁻³。尽管绒叶肖竹芋植物体上的电压为三者中最高, 但其释放负离子的能力却最小。从处理组A的结果可以看出, 3种植物体上的电压衰减量与CK相比

存在显著差异($P<0.05$); 紫背竹芋植物体电压与输入电压相比减少了88.1%, 负离子浓度比CK减少了99.9%; 绒叶肖竹芋和朱顶红的植物体电压分别减少了90.4%和95.5%, 负离子浓度分别减少41.5%和99.8%。处理B组中, 3种植物的植物体电压进一步衰减, 释放负离子的能力接近自然状态下的水平(表5)。

2.4 释放负离子能力与光照度的关系

由表6可知, 不施加脉冲电场作用时, 土壤释放负离子的能力在各光照度下变幅很小, 其释放负离子的浓度均值为35–43 ion·cm⁻³。3种植物释放负离子的能力随光照度的增加呈上升趋势, 尽管绝对变幅很小, 但各处理间均存在显著差异($P<0.05$)(表6)。在脉冲电场作用下, 土壤和3种植物释放负离子的能力与常态下相比均有显著提高($P<0.05$), 且随着光照度的增加, 植物释放负离子的能力呈升高趋势。其中以朱顶红的增幅最小, 在12 000 lx光照度下其释放负离子的浓度为黑暗状态下的1.5倍; 以绒叶肖竹芋的增幅最大, 其释放负离子的能力是0 lx下的2.0倍, 但释放负离子的浓度均值很小, 最大值仅为310 ion·cm⁻³。除

表5 植物体电压与释放负离子浓度的关系(平均值±标准差)**Table 5** Analysis between voltage of plants and negative air ions concentration (means±SD)

Treatment	<i>Calathea insignis</i>		<i>Calathea zebrina</i>		<i>Hippeastrum rutilum</i>	
	Voltage (10 ³ V)	NAIC (ion·cm ⁻³)	Voltage (10 ³ V)	NAIC (ion·cm ⁻³)	Voltage (10 ³ V)	NAIC (ion·cm ⁻³)
CK	5.13±0.33 a	1757467±218808 a	5.50±0.14 a	260±33 a	4.32±0.11 a	362000±35957 a
A	1.78±0.10 b	2119±88 b	1.44±0.26 b	152±11 a	0.91±0.06 b	706±29 b
B	0.51±0.03 c	89±6 b	0.66±0.04 c	85±6 a	0.50±0.06 c	77±5 b

CK: 对植物根际土壤施加最佳脉冲电场(紫背竹芋: $U=15\times 10^3$ V, $T=1.5$ s, $\tau=65$ ms; 绒叶肖竹芋: $U=15\times 10^3$ V, $T=2.0$ s, $\tau=5$ ms; 朱顶红: $U=20\times 10^3$ V, $T=2.0$ s, $\tau=90$ ms); A: 施加最佳脉冲电场时, 通过导线将植物体与物理地(大地)连接的状态; B: 施加最佳脉冲电场时, 通过导线将植物体与地线连接的状态。NAIC: 负离子浓度。同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

CK (control group) refers to the condition when pulsed electrical field with optimal combinational parameters is applied to the rhizosphere soil (*Calathea insignis*: $U=15\times 10^3$ V, $T=1.5$ s, $\tau=65$ ms; *Calathea zebrina*: $U=15\times 10^3$ V, $T=2.0$ s, $\tau=5$ ms; *Hippeastrum rutilum*: $U=20\times 10^3$ V, $T=2.0$ s, $\tau=90$ ms); Treatment A refers to the condition where optimal combinational parameters of pulsed electrical field are applied to the plant, and a wire is used to connect the plant to the physical ground (earth); Treatment B refers to the condition where optimal combinational parameters of pulsed electrical field are applied to the plant, and a wire is used to connect the plant to the ground. NAIC: Negative air ions concentration. Different lowercase letters in the same column meant significant differences among various treatments in the same species at the $P<0.05$ level.

表6 脉冲电场作用对植物不同光照度下释放负离子浓度的分析(平均值±标准差)**Table 6** The negative air ion concentration of plants under pulsed electrical field stimulation in different light intensity (means±SD)

Light intensity (lx)	Negative air ions concentration (ion·cm ⁻³)							
	Soil		<i>Calathea insignis</i>		<i>Calathea zebrina</i>		<i>Hippeastrum rutilum</i>	
	CK	S	CK	S	CK	S	CK	S
0	35±2 c	127±3 a	53±2 e	824400±88904 e	76±2 e	156±16 a	66±2 e	202067±24109 c
500	36±2 c	136±2 a	69±3 d	1726200±186594 d	80±4 d	275±28 a	69±3 d	298289±36482 b
1500	37±3 bc	138±2 a	79±2 c	1769911±191872 c	83±3 c	284±28 a	77±2 c	308156±36967 b
3000	37±3 bc	135±2 a	81±3 c	1831378±198645 b	80±3 d	297±30 a	79±5 c	328644±39232 a
6000	43±2 a	140±2 a	90±3 b	1813622±197187 b	106±3 b	296±30 a	93±3 b	328200±38992 a
12000	39±3 b	139±3 a	138±4 a	1895200±205601 a	128±3 a	310±31 a	134±3 a	308156±36967 b

CK: 不施加脉冲电场作用; S: 对植物施加最佳脉冲电场刺激。同列不同小写字母表示同种植物在不同光照处理下差异显著($P<0.05$)。

CK: Without stimulation; S: Electrostimulation. Different lowercase letters in the same column meant significant differences within the same species using different light intensities at the $P<0.05$ level.

土壤和绒叶肖竹芋外, 紫背竹芋和朱顶红在不同的光照度刺激下释放负离子的浓度均存在显著差异($P<0.05$)。在光照度为3 000–6 000 lx时, 3种植物释放负离子的能力均差异不显著。

2.5 释放负离子能力与气孔数量特征的关系

紫背竹芋在最佳脉冲电场作用下, 其气孔形态由常态下的紧闭变为开启状态(图3A, B)。与对照相比, 电场作用下的叶片气孔长度增加了65.9%, 宽度增加了67.1%, 均差异显著($P<0.05$); 气孔周长比对照组增加了66.0%, 面积增大了175.5%, 且差异显著($P<0.05$);

而气孔密度比对照组降低了11.0%, 释放负离子的能力为对照组的21 760.0倍, 具显著性差异($P<0.05$) (表7)。

最佳脉冲电场作用下, 绒叶肖竹芋的气孔形态与对照的变化较为一致, 开合度呈增大趋势(图3C, D)。叶表皮气孔的长度与对照相比增加了55.4%, 宽度增加了209.4%, 且两者均差异显著($P<0.05$); 气孔面积为对照组的3.8倍(表7; 图3C, D), 气孔密度在电场刺激前后无显著差异($P>0.05$), 释放负离子的浓度均值为对照组的3.4倍, 两者差异不显著($P>0.05$)。朱顶红的气孔形态与对照组相比开张状态明显(图3E, F),

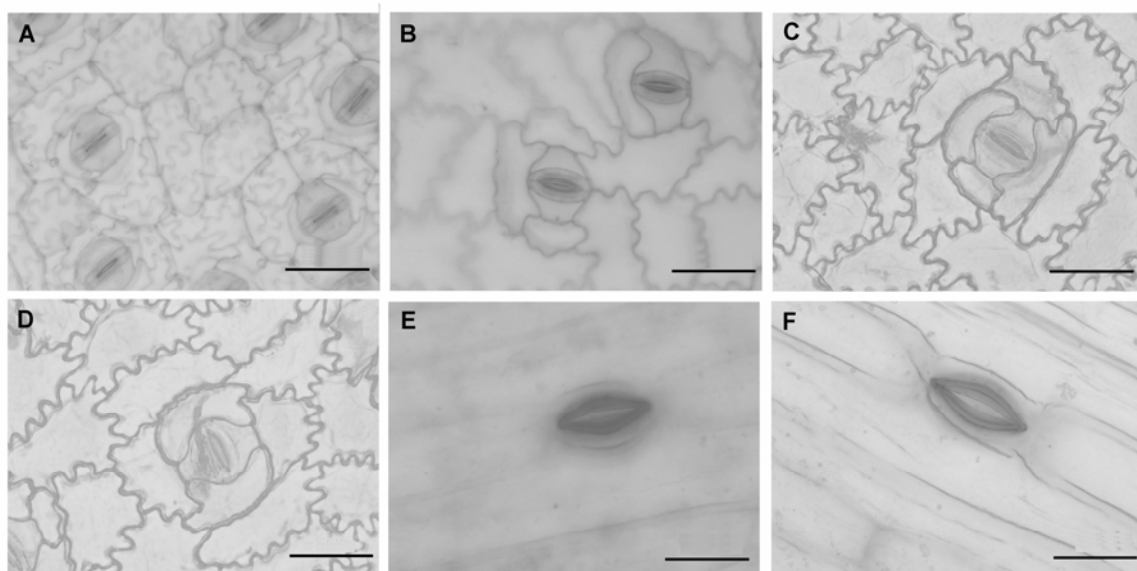


图3 最佳脉冲电场作用下3种植物叶表皮气孔形态特征的显微观察(40倍物镜下3种植物的气孔特征)

(A), (B) 紫背竹芋在常态和施加脉冲电场刺激下的气孔特征; (C), (D) 绒叶肖竹芋在常态和施加脉冲电场刺激下的气孔特征; (E), (F) 朱顶红在常态和施加脉冲电场刺激下的气孔特征。Bars=50 μm

Figure 3 The stomatal shape feature of three plant species under the stimulation of high voltage pulsed electrical field with optimal combinational parameters (The shape feature of three plant species were observed under 40 \times objectives)

(A), (B) The stomatal feature of *Stromanthe sanguinea* under normal and electrostimulation conditions, separately; (C), (D) The stomatal feature of *Calathea zebrina* under normal and electrostimulation conditions, separately; (E), (F) The stomatal feature of *Hippeastrum rutilum* under normal and electrostimulation conditions, separately. Bars=50 μm

表7 最佳参数脉冲电场刺激下植物气孔数量特征和释放负离子的浓度(平均值 \pm 标准差)

Table 7 The negative air ions concentration and stomata quantitative feature of plants under high voltage pulsed electrical field stimulation (means \pm SD)

Plants	Treatment	Length (μm)	Width (μm)	Length/width	Perimeter	Area (μm^2)	Stomatal density ($\cdot\text{mm}^{-2}$)	Negative air ions concentration ($\text{ion}\cdot\text{cm}^{-3}$)
P4	CK	9.7 \pm 2.47 b	1.58 \pm 0.49 b	6.84 \pm 3.26 a	21.2 \pm 4.92 b	11.98 \pm 4.64 b	250.88 \pm 31.25 a	80 \pm 2 b
	S	16.09 \pm 2.81a	2.64 \pm 0.84 ab	6.89 \pm 3.11 a	35.19 \pm 5.52 a	33.01 \pm 11.27 a	223.16 \pm 45.6 b	1740800 \pm 195562 a
P6	CK	12.79 \pm 2.96 b	1.38 \pm 0.4 b	9.93 \pm 3.42 a	27.16 \pm 6 b	14 \pm 5.47 b	84.28 \pm 21.45 a	83 \pm 3 a
	S	19.87 \pm 2.84 a	4.27 \pm 1 a	4.94 \pm 1.49 b	44.62 \pm 5.85 a	66.77 \pm 18.54 a	87.48 \pm 19.28 a	284 \pm 29 a
P7	CK	28.07 \pm 4.77 b	3.84 \pm 0.41 a	7.38 \pm 1.43 ab	60.52 \pm 9.58 b	84.77 \pm 17.88 b	51.14 \pm 4.66 a	72 \pm 2 b
	S	33.75 \pm 2.6 a	3.45 \pm 0.78 a	10.46 \pm 3.62 a	71.43 \pm 5.56 a	91.93 \pm 23.81 a	54.22 \pm 4.06 a	338156 \pm 36967 a

CK: 不施加脉冲电场刺激; S: 施加最佳参数的脉冲电场刺激。P4、P6和P7同表1。同列不同小写字母表示同种植物在不同的光照处理下差异显著($P<0.5$)。

CK: Without stimulation; S: Electrostimulation. P4, P6 and P7 see Table 1. Different lowercase letters in the same column meant significant differences among the same species in different treatment conditions at the $P<0.05$ level.

叶表皮气孔的长度增加了20.2%, 差异显著($P<0.05$); 叶片气孔宽度比对照组缩小了10.2%; 气孔面积增加了8.4%, 且差异显著($P<0.05$); 释放负离子的能力是对照组的4 696.6倍, 两者呈显著性差异($P<0.05$)。

2.6 讨论

负离子因具有改善空气质量和有利于人体健康等作用, 常被誉为空气中的“维生素”和“生长素”, 备

受人们的关注。目前,对植物释放负离子的研究主要集中在植物群落和室内环境单株植物两个领域。自然状态下,植物释放负离子的能力均很弱。吴仁焯等(2011b)对自然状态下能够释放负离子的种质资源进行了调查,发现所研究的68种植物,释放负离子浓度均值最高的仅为 $73 \text{ ion}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。本研究也得出了相似的结果,即常态下植物释放负离子浓度值远低于宜居室内的标准值($1\ 500 \text{ ion}\cdot\text{cm}^{-3}$) (李安伯, 2001),因此无法满足人们对健康的需求。但对植物施加脉冲电场刺激时,其释放负离子的能力可大幅提高。吴仁焯等(2015)对蟹爪兰(*Zygocactus truncatus*), Tikhonov等(2004)对中华芦荟(*Aloe vera var. chinensis*)施加脉冲电场刺激,发现其释放负离子的能力与常态相比均显著提高。刁岗和杨运经(2008)以及杨运经等(2009, 2011)也进一步验证了该现象。本研究发现,对植物施加不同强度的脉冲电场刺激,其释放负离子的能力存在较大差异,其中紫背竹芋在最佳脉冲电场 $A_3B_3C_3$ 作用下释放负离子的能力是最低处理 $A_1B_1C_1$ 的3.8倍。在不同参数脉冲电场作用下植物释放负离子的能力不同,要使植物释放负离子的能力显著提高,需给植物施加足够强的脉冲电场。但另一方面,如果电场强度过大,会造成植物细胞的不可修复性损伤(刁岗和杨运经, 2008; 杨运经等, 2011)。在最佳脉冲电场作用下,植物释放负离子的能力最强,施加低于或高于此最佳脉冲电场,其释放负离子的能力均有不同程度的降低,原因可能在于低频电场生物学效应具有“阈值”与“功率窗”的特性(刁岗和杨运经, 2008)。每种植物都有适合其本身高效释放负离子的最佳脉冲电场,在这种强度和频率的电场刺激下,植物生长状态良好,释放负离子的能力显著提高且其本身也未受到损伤。

同时,本研究发现,绒叶肖竹芋在各强度脉冲电场作用下,释放负离子的浓度均值变化幅度很小。有研究表明,植物本身具有特定的电位特征频率,如果施加的脉冲电场适宜,则会与植物电场共振进而提高释放负离子的能力(刁岗和杨运经, 2008; 杨运经等, 2009, 2011)。因此,我们推测可能施加的脉冲电场频率与绒叶肖竹芋固有的电位频率不符,未使其发生电场共振,从而使释放负离子的倍增效应不明显。

对3种植物施加最佳脉冲电场作用的研究结果表明,植物体上的电压值与释放负离子的能力呈正相关,即植物体所储存的电压越高,其释放负离子的能

力越强。以紫背竹芋为例,当植物体电压由 $5.13\times 10^3 \text{ V}$ 降为 $0.51\times 10^3 \text{ V}$ 时,其释放负离子的能力接近自然状态下的水平($89 \text{ ion}\cdot\text{cm}^{-3}$)。我们认为储存在植物体上的电压相当于施加给植物体的“能量”,这个能量需达到激发该植物生物学效应具有的“阈值”或“功率窗”,即该脉冲电压正是打开植物释放负离子通道所必需的“能量”。

与脉冲电场作用对植物释放负离子的影响相似,光照在一定程度上也可提高植物释放负离子的能力,光照度是影响植物群落释放负离子能力的主要因素之一(刘新等, 2011)。Wang和Li(2009)对芦荟等植物进行光照刺激,发现芦荟对光照的响应最敏感,随着光照度的增加,其释放负离子的浓度均值显著升高。本研究中的3种植物在不施加脉冲电场刺激时对光照响应不太敏感,随着光照度的增强其释放负离子的浓度均值均呈上升趋势,但绝对增幅很小,原因在于不同植物在自然状态下释放负离子的浓度存在差异,且对光照的反应也不同。当施加最佳脉冲电场时,3种植物在不同光照度下释放负离子的能力均出现激增效应,原因可能是光照激发了植物叶片表层的光电效应,使大量自由离子从植物体逃逸而产生负离子。另外,本研究还发现,3种植物在最佳脉冲电场作用下,光照度为3 000和6 000 lx时释放的负离子浓度无显著差异($P>0.05$);而当光照度小于3 000 lx或大于6 000 lx时,释放的负离子浓度均值均差异显著($P<0.05$)。我们认为这两个强度的光照所提供植物体的“能量”可能位于同一级别,与3 000 lx的光照度相比,6 000 lx的光照度还未能激活植物体更高一阶的负离子释放能力。

脉冲电场作用后,植物叶片气孔的数量特征与自然状态下相比均有不同程度的差异,3种植物的叶片气孔面积在脉冲电场刺激后均呈增加趋势。以紫背竹芋为例,在施加脉冲电场前后,其气孔面积分别为 11.98 和 $33.01 \mu\text{m}^2$,释放负离子的能力提高了21 759.0倍。此外,气孔密度也是影响植物释放负离子的一个重要因素,3种植物中以紫背竹芋的气孔密度最大,脉冲电场作用下释放负离子的能力最强,原因可能在于叶片气孔是植物释放负离子的一个主要通道。张万超等(2016)对银冠(*Cotyledon orbiculata var. oblonga*)等3种仙人掌科植物的研究表明,刺尖的数量和气孔均是植物释放负离子的通道。刁岗和杨运经

(2008)提出了植物通过气孔蒸腾放电释放负离子的假说。我们的实验结果在一定程度上证实了气孔作为植物释放负离子重要通道的假说,气孔可能通过蒸腾放电,聚集在植物叶片上的阴离子通过植物叶片的气孔蒸腾释放出来而形成负离子。同时本研究发现,绒叶肖竹芋的气孔面积比对照提高了3.8倍,而负离子的释放量却很低,仅为 $284 \text{ ion}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。这可能与不同植物对脉冲电场刺激的承受能力不同和气孔类型有关,实验中所施加的脉冲电场强度可能未达到绒叶肖竹芋释放负离子所需“功率窗”的阈值,尽管气孔面积有所增加,但所施加的“能量”未能使释放负离子的通道完全打开。因此,如何提高植物气孔的开张度,并保证所施加的脉冲电场强度在提高植物释放负离子能力的同时又不对植物造成损伤,是植物释放负离子研究工作的首要问题。

本文从植物释放负离子的最佳脉冲电场,植物体上的电压、光照度及植物叶片气孔特征等方面,初步分析了其与植物释放负离子能力间的关系,其中以脉冲电场的影响最为显著。在自然状态下植物释放负离子的能力很弱,施加脉冲电场后其能力显著增强,且植物具有高效释放负离子的最佳脉冲电场。在该最佳脉冲电场作用下,随着光照度的增加植物释放负离子的能力呈上升趋势。此外,植物释放负离子的能力与其携带的电压呈正相关,电压越大,植物释放负离子的能力越强;另外,植物释放负离子的能力也受叶片气孔面积和气孔密度等特征,及其它外界因素(温度、湿度和气压等)和植物本身特性的影响。因此,在后续工作中,我们希望能将以上几个因素综合起来进行更为系统的研究。

参考文献

鲍风宇, 秦永胜, 李荣桓, 周金星, 杨军 (2013). 北京市5种典型城市绿化植物的生态保健功能分析. 中国农学通报 **29**(22), 26–35.

陈雷, 孙冰, 谭广文, 李子华, 陈勇, 黄应锋, 廖绍波 (2015). 广州城市绿地植物群落空气负离子特征研究. 西北林学院学报 **30**, 227–232.

董莎莎, 胡梦婷, 姚玉婷, 刘鹤, 蒋文伟 (2013). 青山湖不同植物群落空气负离子效应评价. 中国园艺文摘 **29**(12), 65–66.

范亚民, 何平, 李建龙, 沈守云 (2005). 城市不同植被配置类

型空气负离子效应评价. 生态学杂志 **24**, 883–886.

关蓓蓓, 郑思俊, 崔心红, 张帅, 何小丽, 朱义 (2016). 崇明岛不同生态用地空气负离子分布规律研究. 西北林学院学报 **31**, 280–285.

黄向华, 王健, 曾宏达, 陈光水, 钟羨芳 (2013). 城市空气负离子浓度时空分布及其影响因素综述. 应用生态学报 **24**, 1761–1768.

李安伯 (1983). 空气离子生物学效应研究的进展. 西安医学院学报 **4**, 103–108.

李安伯 (2001). 空气离子实验与临床研究新进展. 中华理疗杂志 **24**(2), 118–119.

李安伯, 张振军 (1996). 室内空气质量洁净与否的宏观评价法. 中国卫生工程学 **5**, 25–26.

李少宁, 王燕, 张玉平, 潘青华, 金万梅, 白金 (2010). 北京典型园林植物区空气负离子分布特征研究. 北京林业大学学报 **32**, 130–135.

刘新, 吴林豪, 张浩, 王祥荣 (2011). 城市绿地植物群落空气负离子浓度及影响要素研究. 复旦学报(自然科学版) **50**, 206–212.

穆丹, 梁英辉 (2009). 佳木斯绿地空气负离子浓度及其与气象因子的关系. 应用生态学报 **20**, 2038–2041.

秦俊, 王丽勉, 高凯, 胡永红, 王玉勤, 由文辉 (2008). 植物群落对空气负离子浓度影响的研究. 华中农业大学学报 **27**, 303–308.

任洪昌, 闵庆文, 王维奇, 王纯, 张永勋 (2014). 福州鼓山茶园不同生境空气负离子浓度及其影响因子. 城市环境与城市生态 **27**, 1–6.

邵海荣, 贺庆棠 (2000). 森林与空气负离子. 世界林业研究 **13**(5), 19–23.

石彦军, 余树全, 郑庆林 (2010). 6种植物群落夏季空气负离子动态及其与气象因子的关系. 浙江林学院学报 **27**, 185–189.

孙继良, 么志红, 何宝华 (2010). 低强度运动匹配负离子对老年高血压患者的影响. 广州医药 **41**, 19–20.

王成, 郭二果, 郗光发 (2014). 北京西山典型城市森林内 $\text{PM}_{2.5}$ 动态变化规律. 生态学报 **34**, 5650–5658.

王薇 (2014). 空气负离子浓度分布特征及其与环境因子的关系. 生态环境学报 **23**, 979–984.

王晓磊, 王成 (2014). 城市森林调控空气颗粒物功能研究进展. 生态学报 **34**, 1910–1921.

王艳英, 邓传远, 郑金贵, 辛贵亮, 吴仁焯 (2014). 植物源负离子发生器室内应用的研究. 广州大学学报(自然科学版) **13**, 29–37.

- 吴楚材, 郑群明, 钟林生 (2001). 森林游憩区空气负离子水平的研究. *林业科学* **37**(5), 75–81.
- 吴楚材, 钟林生 (1998). 马尾松纯林分因子对空气负离子浓度影响的研究. *中南林学院学报* **18**, 70–73.
- 吴仁焯, 邓传远, 王彬, 黄德冰, 林丽, 黄建民, 郑金贵 (2011a). 具备释放负离子功能室内植物的种质资源研究. *中国农学通报* **27**(8), 91–97.
- 吴仁焯, 邓传远, 辛桂亮, 翁海勇, 杨志坚, 朱帖俊容, 郑金贵 (2014a). 植物释放负离子对室内空气质量影响分析. *安徽农业科学* **42**, 9491–9494.
- 吴仁焯, 邓传远, 杨志坚, 翁海勇, 朱帖俊容, 郑金贵 (2015). 脉冲电场作用对植物释放负离子的影响. *应用生态学报* **26**, 419–424.
- 吴仁焯, 黄德冰, 郭梨锦, 林丽, 黄建民, 邓传远 (2011b). 具备释放负离子功能室内植物的种质资源研究 II. 常态下室内植物负离子的释放. *亚热带农业研究* **7**, 1–6.
- 吴仁焯, 郑金贵, 程祖铎, 朱贵金, 阮皓然, 翁海勇 (2014b). 水稻植株释放负离子研究. *福建农林大学学报(自然科学版)* **43**, 512–517.
- 习岗, 杨运经 (2008). 电磁场对生物体系的非热效应及其作用机理. *大学物理* **27**(11), 50–52, 63.
- 杨运经, 习岗, 刘轲, 张晓辉 (2011). 应用负高压脉冲技术提高植物空气净化能力的探讨. *高电压技术* **37**, 190–197.
- 杨运经, 习岗, 张社奇 (2009). 脉冲电场介导的植物空气负离子发射的倍增效应及其意义. *大学物理* **28**(12), 39–42.
- 曾曙才, 苏志尧, 陈北光 (2007). 广州绿地空气负离子水平及其影响因子. *生态学杂志* **26**, 1049–1053.
- 张凯旋, 张建华 (2013). 上海环城林带保健功能评价及其机制. *生态学报* **33**, 4189–4198.
- 张万超, 郑金贵, 黄龙飞, 时顺锋, 吴仁焯, 邓传远 (2015). 常态下仙人掌科植物负离子释放量的比较及其与刺数量的关系. *福建农林大学学报(自然科学版)* **44**, 402–407.
- 张万超, 郑俊鸣, 丁旭玲, 彭东辉, 吴仁焯, 邓传远, 郑金贵 (2016). 3种仙人掌科植物负离子释放量与释放通道的相关性研究. *热带作物学报* **37**, 1298–1305.
- 张亚冰, 王秀云, 洪亚平 (2008). 植物叶表皮制片方法改进. *安徽农业科学* **36**, 12683, 12689.
- 钟林生, 吴楚材, 肖笃宁 (1998). 森林旅游资源评价中的空气负离子研究. *生态学杂志* **17**, 56–60.
- Griffin JE, Kornbluh IH (1962). Ionization of the air. *Int J Biometeorol* **6**, 29–32.
- Kondrashova MN, Grigorenko EV, Tikhonov AN, Sirota TV, Temnov AV, Stavrovskaja IG, Kosyakova NI, Lange NV, Tikhonov VP (2000). The primary physico-chemical mechanism for the beneficial biological/medical effects of negative air ions. *IEEE Trans Plasma Sci* **28**, 230–237.
- Kosenko EA, Kaminsky YG, Stavrovskaya IG, Sirota TV, Kondrashova MN (1997). The stimulatory effect of negative air ions and hydrogen peroxide on the activity of superoxide dismutase. *FEBS Lett* **410**, 309–312.
- Krueger AP (1962). Air ions and physiological function. *J Gen Physiol* **45**, 233–241.
- Krueger AP (1972). Are air ions biologically significant? A review of a controversial subject. *Int J Biometeorol* **16**, 313–322.
- Krueger AP (1985). The biological effects of air ions. *Int J Biometeorol* **29**, 205–206.
- Krueger AP, Reed EJ (1976). Biological impact of small air ions. *Science* **193**, 1209–1213.
- Liang H, Chen XS, Yin JG, Da LJ (2014). The spatial-temporal pattern and influencing factors of negative air ions in urban forests, Shanghai, China. *J For Res* **25**, 847–856.
- Nakane H, Asami O, Yamada Y, Ohira H (2002). Effect of negative air ions on computer operation, anxiety and Salivary chromogranin A-like immunoreactivity. *Int J Psychophysiol* **46**, 85–89.
- Tikhonov VP, Tsvetkov VD, Litvinova EG, Sirota TV, Kondrashova MN (2002). Generation of negative air ions by wheat seedlings in a high voltage electrization of soil. *Biofizika* **47**, 130–134.
- Tikhonov VP, Tsvetkov VD, Litvinova EG, Sirota TV, Kondrashova MN (2004). Generation of negative air ions by plants upon pulsed electrical stimulation applied to soil. *Russ J Plant Physiol* **51**, 414–419.
- Wakamura T, Sato M, Sato A, Dohi T, Ozaki K, Asou N, Hagata S, Tokura H (2004). A preliminary study on influence of negative air ions generated from pajamas on core body temperature and salivary IgA during night sleep. *Int J Occup Med Environ Health* **17**, 295–298.
- Wang J, Li SH (2009). Changes in negative air ions concentration under different light intensities and development of a model to relate light intensity to directional change. *J Environ Manage* **90**, 2746–2754.
- Wu CF, Lai CH, Chu HJ, Lin WJ (2011). Evaluating and mapping of spatial air ion quality patterns in a residential garden using a geostatistic method. *Int J Environ Res Public Health* **8**, 2304–2319.

Relationship Between Negative Air Ion Generation by Plants and Stomatal Characteristics Under Stimulation of Pulsed Electrical Field

Renye Wu^{1,2}, Yuanfen Sun¹, Jingui Zheng^{1,2*}, Chuanyuan Deng³, Dapeng Ye⁴, Qingshui Wang¹

¹Fujian Engineering Technology Research Center of Breeding and Utilization for Special Crops, Fuzhou 350002, China;

²Key Laboratory of Ministry of Education for Genetics, Breeding and Multiple Utilization of Crop, College of Crop Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; ³College of Landscape Architecture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; ⁴College of Mechanical and Electronic Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

Abstract Under normal conditions, the capacity of plants to generate negative air ions (NAIs) is very weak. However, stimulation of a pulsed electrical field can result in substantial improvement of the ability for NAI generation. We examined NAI generation in *Stromanthe sanguinea*, *Calathea zebrina*, and *Hippeastrum rutilum* in glass chambers under the natural state and under pulsed electrical field and light stimulation and analyzed the shape of stomata. We found variation in NAI generation by plants due to the different combined parameters of the pulsed electrical field. Each plant has its own optimal pulsed electrical field with a combination of parameters for efficient NAI generation: *S. sanguinea* with A₃B₃C₃ (A₃, U=1.5×10⁴ V; B₃, T=1.5 s; C₃, τ=65 ms), *C. zebrina* with A₃B₄C₁ (A₃, U=1.5×10⁴ V; B₄, T=2.0 s; C₁, τ=5 ms) and *H. rutilum* with A₄B₄C₁ (A₄, U=2.0×10⁴ V; B₄, T=2.0 s; C₁, τ=5 ms). With the application of a pulsed electrical field to plants, the higher the voltage, the greater the capacity for NAI generation. With enhanced light intensity, the ability to generate NAI significantly increased with application of a pulsed electrical field. Without the pulsed electrical field, despite the slightly increased NAI concentration with increasing light intensity, NAI concentration did not differ (*P*>0.05). Finally, NAI generation was closely related to the characteristics of leaf stomata. Furthermore, a greater degree of stomatal opening and stomatal density was associated with stronger capacity to generate NAI.

Key words negative air ions, electrostimulation, pulsed electrical field, light intensity, stomata

Wu RY, Sun YF, Zheng JG, Deng CY, Ye DP, Wang QS (2017). Relationship between negative air ion generation by plants and stomatal characteristics under stimulation of pulsed electrical field. *Chin Bull Bot* **52**, 744–755.

* Author for correspondence. E-mail: jingui.zheng@hotmail.com

(责任编辑: 孙冬花)