

逆境下植物电信号研究现状与发展趋势

石景秀, 田芳明

(黑龙江八一农垦大学信息与电气工程学院, 黑龙江 大庆 163319)

摘要: 植物电信号是参与植物体内生理调控和传递信息的重要生理信号, 其变化是植物对外界环境刺激的快速响应, 而逆境刺激一旦超出植物承受范围, 便无法通过自身修复。因此, 通过对逆境下植物电信号变化进行深入研究, 可依据不同环境胁迫和激励植物电信号的综合分析建立相关模型, 以探究植物的最适生长环境特征。本文基于目前的相关研究文献资料, 对植物电信号及其对逆境反馈的研究现状进行了梳理归纳, 并在现有技术基础上对其发展趋势进行展望, 以期科研人员深入研究植物电信号提供参考, 进而为推动植物育种和高产优质种植业高质量发展提供科学依据。

关键词: 逆境; 植物电信号; 现状; 趋势

中图分类号: Q947

文献标志码: A

文章编号: 2097-2172(2023)02-0099-05

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2023.02.001

Current Situation and Development Trend of Plant Electrical Signal Application under Adversity

SHI Jingxiu, TIAN Fangming

(Faculty of Information and Electrical Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural Reclamation University, Daqing Heilongjiang 163319, China)

Abstract: Plant electrical signals are important physiological signals involved in physiological regulation and transmission of information in plants, the change of plant electrical signal is its rapid response to external environmental stimuli. Once an adversity stimulus is beyond its tolerance, it cannot be repaired by itself. To explore the characteristics of the optimal growth conditions of plants, through in-depth research on the changes of plant electrical signals under adversity, relevant models can be established based on the comprehensive analysis of different environmental stresses and incentive plant electrical signals. Therefore, this paper discusses the research status of plant electrical signals under adversity and looks forward to its development trend based on the existing technical basis, in order to provide references for researchers to study plant electrical signals in depth and to promote plant breeding and high-quality development of high-yield and high-quality planting.

Key words: Adversity; Plant electrical signal; Current situation; Trend

植物电信号是参与植物体内生理调控和传递信息的重要生理信号, 高等植物的生长发育及各种生理活动往往都伴随着植物电信号的产生。大量实验证明, 植物在整个生命周期里所有重要的生理活动都依赖于植物细胞唤起和传输电信号的能力^[1], 能够反应植物生长发育是否正常以及生长环境是否发生变化。逆境条件下, 植物的电生

理传递往往比植物显现出的症状更为迅速^[2], 因此, 研究逆境下植物的生理变化具有重要现实意义。如可以通过研究不同光照强度引起植物体内电信号的变化找到某些植物的最适光照强度; 通过对植物进行冷热刺激, 证明在热刺激下植物会产生热休克蛋白以保护细胞并对刺激产生的损伤进行自身修复; 对冷刺激下的电信号进行特征提

收稿日期: 2022-04-29; 修订日期: 2022-06-20

基金项目: 黑龙江省自然科学基金重点项目(ZD2019F002); 黑龙江省农垦总局科技计划项目(HKKYZD190801); 黑龙江八一农垦大学校内资助项目(XZR2016-10); 黑龙江八一农垦大学博士启动基金项目(XDB201814); 黑龙江八一农垦大学自然科学人才支持计划项目(ZRCPY202015)。

作者简介: 石景秀(1999—), 女, 黑龙江七台河人, 硕士, 主要从事植物电信号方面的研究工作。Email: roushun576@163.com。

通信作者: 田芳明(1979—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 主要从事农业信息化方面的研究工作。Email: byndtfm@163.com。

取,有助于选取耐冷植物;通过研究植物在受到机械损伤和生物损伤后的电信号变化,识别损伤类型等。由于植物电信号是植物受到外界刺激后的最初反应^[3],能够快速反馈植物各方面生理信息,且植物在受损初期可逆,因此对于植物电信号的研究有助于植物在逆境初期及时反馈信息,防止造成不可逆损伤。

1 植物电信号简介

1.1 植物电信号的发现

从植物电信号被发现至今,国内外研究者在植物电信号的检测、提取及分析上做了大量的实验。研究对象早期从敏感度高、叶片活动明显的植物如捕蝇草、跳舞草等,到后来植物特征明显的模式植物如水稻、玉米、小麦以及具有观赏价值类的植物如燕子掌等。植物电信号的类型从机械刺激产生动作电位到烧伤、盐刺激等产生变异电位以及局部电位^[4]。最早发现植物存在动作电位的学者是 Burdon Sanderson。1873年,他在受到机械刺激后的捕蝇草敏感毛上发现了其裂片细胞内的动作电位,且电位传递的速度与温度有关^[5]。Pickard^[6-7]在对豌豆进行机械刺激后发现其存在动作电位,后对利用冷热刺激以及机械损伤刺激等产生的动作电位进行研究,发现兴奋活动中电信号的产生和传递可以影响植物的生长发育、新陈代谢等各方面的生理活动,从而协调植物与外界环境变化的关系。Houwink^[8]对前人的实验进行总结,把刺激分为伤害性刺激和非伤害性刺激,并提出伤害性刺激会产生变异电位,非伤害性刺激则会产生动作电位的结论。大量研究人员研究了多种植物施加诸如强光、冷热刺激、化学物质、机械刺激以及电流等外界刺激,发现植物中均可以产生和传递植物电信号,这有利于研究在逆境下植物电信号对外界刺激的快速反馈。

1.2 植物电信号的产生

植物细胞的电学特性主要来自其膜的电化学特性,植物电信号的本质即离子的跨膜运动导致细胞极化程度的改变。自 Galvani 通过研究电对青蛙的影响奠定了电生理学的基础之后,研究者们便开始把目光放到植物电生理领域中^[9]。随着对植物电信号的研究不断深入,动物神经运动系统的大部分化学成分如乙酰胆碱均能在植物中被发

现。尽管这种类似神经的细胞器从未发展到与动物神经相同的复杂程度,但它形成了一个简单的神经网络,尤其在韧皮部细胞内能够实现长距离通信。Lautner 等^[10]的研究表明,不同的环境刺激能使活细胞产生特定反应,这些反应能将电信号传递到反应区域。与荷尔蒙等化学信号不同,电信号能够远距离快速传递信息。Lautner 等^[10]和 Formm 等^[11]提出,植物进化出电信号传输途径的原因很可能是为了对外界刺激做出快速反应,例如环境胁迫因素。通过对比动、植物细胞之间的异同,发现这种现象产生的根本原因可能与其对外界刺激信号的反应处理能力有关。Brenner 等^[12]指出,无论是在低等植物还是在高等植物体内,对于植物重要的生理活动如光合、呼吸作用以及授粉和筛管中的水分传导,电信号都起着促进作用。

1.3 植物电信号的基本特性

经过多年来的研究,证明植物电信号是一种与植物生命活动密切相关的具有非平稳性和非线性特点的时变随机信号,是一种微弱的低频信号,幅度在几微伏到几十毫伏。一般情况下,植物电信号的频率主要是在 5 Hz 以下^[13],其时变特点体现在它生长发育的过程中,如植物处于不同生长期或不同季节时,反应灵敏程度和产生的波形幅度不相同^[14]。Zawadzki 等^[15]和 Stankovic 等^[16]分别研究了向日葵的动作电位和变异电位,发现同一植物在不同时期,或不同植物在同一时期表现出的兴奋性水平是可变的。植物电信号的非平稳和非线性特征体现在植物电生理系统的输入(刺激)与输出(反应)之间的关系。同样的刺激产生的反应波形很难做到完全一致,但考察其有概率化的特征时又具有一致性^[17]。

植物电信号的类型主要可分为局部电位、动作电位、变异电位和系统电位^[13]。局部电位是细胞受外界刺激后去极化未达到阈电位的电位变化,只在植物局部产生。动作电位是由非损伤性刺激引起的,以恒定的振幅和速度运动^[18]。与局部电位不同的是,动作电位具全有或全无的特性,即当外界刺激达到一定阈值,随着刺激强度的增加,其振幅和形状不会改变^[11],且电位沿韧皮部传递,传递速度一般为几毫米每秒到几百毫米每秒。

变异电位是由伤害性刺激诱导产生的, 与动作电位的主要区别在于其更长、更延迟的再极化和范围的传播, 其会随刺激强度的变化而变化, 不会发生自我延续。

2 植物电信号对外界环境变化的反馈研究现状

植物在各个生长时期都会因面临不同的外界环境如光照、温度、机械损伤、病虫害、土壤和大气污染、营养不良等刺激导致损伤。在逆境初期, 植物可以通过自身生理反应抵抗之; 当损伤达到一定程度时, 伤害则不可逆。因此通过探究植物电信号反馈的信息, 可及时发现问题并采取相应补救措施。早期国外研究人员在诱导植物电信号时主要采用改变光照强度、温度、土壤含水率及直流电刺激和液压诱导等方法。国内对植物电信号研究相对较晚, 大多是通过改变光照强度、二氧化碳浓度、温度和电刺激等方式诱导植物电信号, 通过对不同环境胁迫和激励信号的综合分析建立模型, 以探究植物的最适生长环境特征。

2.1 光照强度对植物电信号的影响

光照在植物的生理过程中扮演着极其重要的角色, 光照的强弱和时长都会对植物的生长产生很大影响。若植物缺少光照, 则无法实现高效的光合作用, 而光照过强又会产生光抑制现象。梁文娟等^[19]分别在亚适温、弱光、亚适温和弱光胁迫下对黄瓜幼苗进行实验, 研究其不同情况下的光合作用现象, 结果表明在亚适温条件下黄瓜产生了光抑制。杨玉凯等^[20]利用不同光质对茄子幼苗叶片进行处理, 探究不同光质下叶片的光合特性以及叶绿素荧光参数, 研究表明 5R/5B 红蓝组合光对植物的光合作用有一定的促进作用。Wang 等^[21]研究了小麦叶片在光-暗周期诱导下的稳定周期电位变化, 并利用高斯朴素贝叶斯方法对处理后的数据进行分类, 即可区分出耐盐和盐敏感品种。另外, 这个方法同样可以检测出植物在幼苗期是否受到了非生物胁迫。综上所述, 通过研究不同强度光照下植物电信号的变化, 能够确定植物的最适光照强度, 有利于植物进行更高效的光合作用。

2.2 冷热刺激对植物电信号的影响

由于植物无时无刻都暴露在复杂的外界环境中, 挖掘冷热刺激条件下植物电信号反馈的生理

信息, 有助于选取耐热、耐冷植物并进行培植, 也可将其作为一种传感机制监测和防控极端天气^[13]。Lautner 等^[10]对杨树进行实验, 研究其在冷热刺激下的光合变化, 并阐述了植物电信号的传导机制及与光合作用之间存在的关系。Fromm 等^[11]利用微电极测量技术研究了杨树韧皮部的植物电信号特征, 结果表明冷热刺激下 K^+ 和 Ca^{2+} 都会产生流动变化。陆静霞等^[22]对碧玉植物进行热刺激, 将采集的植物电信号经过分析之后建立了高效的、泛化能力强的预测模型。Vladimir 等^[23]通过研究光合作用下豌豆的耐热性与局部电位电参数之间的关系, 认为局部电位会对其耐热性产生积极作用。

2.3 盐胁迫和干旱胁迫对植物电信号的影响

盐胁迫和干旱胁迫在植物生长过程中比较常见。长时间干旱胁迫会导致植物代谢紊乱, 若不能及时发现并解决, 细胞会产生自溶现象, 最终导致死亡。盐胁迫会扰乱细胞正常代谢, 使钾离子及有机物质大量外流, 从而导致细胞严重缺水。通过研究植物细胞在盐胁迫、干旱胁迫下的电位变化, 有助于选取耐盐耐旱植物。梁成^[24]研究了正常状态下与盐胁迫下的玉米幼苗电信号特征, 并提出了一种基于叶片电信号的作物耐盐性评价指标体系。贺瑞瑞^[25]在干旱胁迫、盐胁迫、盐碱胁迫下分别对玉米幼苗进行处理, 研究表明, 干旱胁迫会导致幼苗叶绿素含量下降, MDA 含量增多, 影响植物的正常生长。另外, 3 种胁迫均会抑制细胞群的电生理活动, 并对叶片的光合能力及呼吸代谢产生消极影响。他的研究为植物细胞在逆境下的状态及抗逆性的在位检测提供了基础。

2.4 病虫害胁迫对植物电信号的影响

早期, 国外研究人员经过大量实验证明了植物电生理参数对病、虫害胁迫下植物的检测作用。从植物电生理方面来看, 受到病、虫害胁迫的植物一般会展现出阻抗大、细胞电导率增大以及电容值降低等特点^[2]。Garuso 等^[26]对番茄主根进行镰刀菌枯萎病菌株的接种实验, 发现植物电阻变化速率和菌株的毒力程度相关, 且在菌株侵染成功但植物表面出现症状前番茄主根的内质网明显减少。杨利艳等^[27]研究了玉米在剪伤、粘虫取食

和烧伤刺激下的电信号变化,发现粘虫取食时植物电信号变化波形图与其他诱导方式差异明显,这一发现对监测粘虫侵蚀具有指导意义。

2.5 机械刺激对植物电信号的影响

植物生长过程中如遇极端天气或昆虫食草伤害等,均会产生一定程度的机械损伤。对于机械损伤下植物电信号的生理反馈,早在 20 世纪就有学者开始探究。Rhodes 等^[28]研究了受伤番茄与蛋白酶抑制剂系统合成之间的电信号通路,发现子叶创伤刺激与诱导系统蛋白酶抑制剂合成有关的电信号可能在筛管元件或伴随细胞复合物中传播。Miroslav 等^[29]对好望角毛毡苔在不同刺激(包括机械损伤、捕食以及创伤)下的电信号进行研究,发现 3 种不同的刺激方式会产生不同频率、幅度及持续时长的电信号。张传玉等^[30]利用对植物细胞无损的叶绿素成像技术研究香樟叶片在机械损伤情况下的信号传递,并对检测到的数据进行定量对比分析,发现香樟树可以通过不同强度的光合作用及将信号传递给周围叶片来适应不同程度的机械损伤。

3 小结与展望

由于植物电信号是植物对外界刺激的第一反应,在离子通道层面测量出的细胞电信号能及时反馈出大量植物生理变化信息。基于这些测量结果,通过挖掘信号数据潜在价值建立高效模型,并借此反映植物电信号变化特征和植物生理状态之间所存在的底层联系。如在智慧农业生产中,通过搭建封闭环境研究单一变量下植物电信号的参数特征并进行分析,结合植物自身生长规律推测其最适生长环境;或根据提取到的电信号特征对外部刺激进行分类,可将植物用作环境生物传感器。光合作用是植物非常重要的生理特性,研究植物在光合作用下的电信号对植物生长的影响也具有深刻意义。虽然植物电信号的采集提取、数据处理等技术在不断发展进步,但由于其本身低频、微弱等特点,在自然界环境干扰下仍不能精准提取到电信号。想要研究自然界中通过土壤进行的不同植物间的信号传递,及同一植物不同叶片间的信息传递等方面目前还存在一定困难,且由于现有采集设备存在成本高、体积大等缺点,难以投入实际生产应用当中。相信未来随着技术

的进步,能够研发出可以应用于农业生产中具有高精特性的植物电信号采集设备,让电信号成为植物与外界沟通的桥梁。通过对逆境下植物电信号更深入的研究,将能更好地利用其对植物的生长发育及外界刺激下的反应情况对植物及时进行监测与灾变防治。

参考文献:

- [1] 辛元明. 植物电信号在线检测装备的研究与应用[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020.
- [2] 游崇娟, 王建美, 田呈明. 植物病害检测领域的电生理学研究进展[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(1): 118-122; 53.
- [3] 郭建, 赵博光, 刘云飞, 等. 植物体内的电波传递[J]. 南京林业大学学报, 2000(3): 71-76.
- [4] 王子洋, 范利锋, 王永千, 等. 基于信号特征分析的植物体表电信号记录模式选择[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 137-143.
- [5] SANDERSON, J. B. Note on the Electrical Phenomena Which Accompany Irritation of the Leaf of *Dionaea muscipula* [J]. *Nature*, 1872, 21(139-147): 495-496.
- [6] PICKARD B G. Action potentials in higher plants[J]. *The Botanical Review*, 1973, 39(2): 172-201.
- [7] PICKARD B G. Action Potentials Resulting from Mechanical Stimulation of Pea Epicotyls[J]. *Planta*, 1971, 97(2): 106-115.
- [8] HOUWINK A L. The conduction of excitation in *Mimosa pudica*[J]. *Recueil des travaux botaniques neerlandais*, 1935, 32(1): 51-91.
- [9] KIPNIS N. Luigi Galvani and the debate on animal electricity, 1791-1800[J]. *Annals of science*, 1987, 44(2): 107-142.
- [10] LAUTNER S, GRAMS T E E, MATYSSEK R, et al. Characteristics of electrical signals in poplar and responses in photosynthesis [J]. *Plant Physiol*, 2005, 138(4): 2200-2209.
- [11] FROMM J, LAUTNER S. Electrical signals and their physiological significance in plants[J]. *Plant Cell & Environment*, 2010, 30(3): 249-257.
- [12] BRENNER E D, STAHLBERG R, MANCUSO S, et al. Plant neurobiology: an integrated view of plant signaling [J]. *Trends in Plant Science*, 2006, 11(8): 413-419.
- [13] 廖小玲, 周志斌, 叶大鹏, 等. 植物电信号的获取及分析方法研究现状[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2021, 50(3): 301-308.

- [14] 娄成后. 高等植物中根—冠的相互关系[J]. 生命科学, 1994 (5): 1-6.
- [15] ZAWADZKI T, DAVIES E, DZIUBINSKA H, et al. Characteristics of action potentials in *Helianthus annuus* [J]. *Physiologia Plantarum*, 2010, 83(4): 601-604.
- [16] STANKOVIC B, DAVIES E. Wounding evokes rapid changes in tissue deformation, electrical potential, transcription, and translation in tomato[J]. *Plant and Cell Physiology*, 1997, 39: 268-274.
- [17] 赵子恺. 试论植物微弱电信号研究[J]. 中国计量学院学报, 2002(3): 90-94.
- [18] BERTILHILLE. Ionic channels of excitable membranes [M]. Sunderland, Mass: Sinauer Associates, 1984.
- [19] 梁文娟, 王美玲, 艾希珍, 等. 黄瓜幼苗光合作用对亚适温弱光胁迫的适应性[J]. 农业工程学报, 2008 (8): 240-244.
- [20] 杨玉凯, 陈艺群, 林碧英, 等. 光质对茄子幼苗光合特性及叶绿素荧光参数的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2018, 47(6): 673-680.
- [21] WANG Z Y, QIN X H, LI J H, et al. Highly reproducible periodic electrical potential changes associated with salt tolerance in wheat plants[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2019, 160: 120-130.
- [22] 陆静霞, 於海明, 陈士进, 等. 基于植物电信号的环境因子预测模型[J]. 农业机械学报, 2013, 44 (11): 229-233.
- [23] VLADIMIR S, VLADIMIR G, SERGEY M, et al. High-Temperature Tolerance of Photosynthesis Can Be Linked to Local Electrical Responses in Leaves of Pea [J]. *Frontiers in Physiology*, 2017, 8: 763.
- [24] 梁成. 基于作物电信号的耐盐性活体评价方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2016.
- [25] 贺瑞瑞. 干旱和盐碱胁迫下玉米幼苗叶片光电信号的采集与分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [26] CARUSO F, TATTAR T, MOUNT M. Changes in electrical resistance in the early stages of Fusarium wilt of tomato[C]. *Proc. Am. Phytopathol. Soc*, 1974.
- [27] 杨利艳, 李琦, 王小娜. 粘虫取食玉米诱导的电信号变化分析[J]. 中国计量大学学报, 2018, 29(2): 218-222.
- [28] RHODES J D, WILDON T. The pathway for systemic electrical signal conduction in the wounded tomato plant [J]. *Planta*, 1996, 200(1): 50-57.
- [29] MIROSLAV, KRAUSKO, ZDENĚK, et al. The role of electrical and jasmonate signalling in the recognition of captured prey in the carnivorous sundew plant *Drosera capensis* [J]. *New Phytologist*, 2016, 213(4): 1818-1835.
- [30] 张传玉, 高海波. 应用叶绿素荧光技术研究香樟树机械损伤后生理变化[J]. 农村经济与科技, 2020, 31(6): 41-42.