

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.07.024

基于植物电信号的小麦苗期等渗干旱胁迫与盐胁迫辨识

李进海^{1,2} 李 洋^{1,3} RICARDO Ferraz de Oliveira⁴ 姚杰鹏^{1,3} 黄 岚^{1,3} 王忠义^{1,2}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083;

2. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

3. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083;

4. 圣保罗大学路易斯·德奎罗兹农业学院, 皮拉西卡巴 3538709)

摘要: 针对早期干旱胁迫与盐胁迫在植物处于逆境时难以区分的问题, 提出一种基于光诱导植物电信号的干旱胁迫与盐胁迫辨识方法。使用光/暗循环刺激获取了小麦幼苗在正常状态以及等渗干旱胁迫与盐胁迫下的植物叶表面电位, 并利用一对一分类策略的支持向量机(One-versus-one support vector machine, OVOSVM)对获取的植物电信号样本进行分类。三折交叉验证结果显示: 对正常状态与干旱胁迫下小麦幼苗叶表面电位进行二分类, 分类准确率达到100%; 对正常状态与盐胁迫下小麦幼苗叶表面电位进行二分类, 准确率为94.44%; 进行三分类时准确率达到96.30%; 对等渗干旱胁迫与盐胁迫下获取的小麦叶表面电位进行二分类, 分类准确率为100%。研究表明, 植物电信号作为一种辨识逆境胁迫的方法, 可对等渗条件下早期干旱胁迫与盐胁迫进行准确区分。

关键词: 小麦幼苗叶表面电位; 光诱导植物电信号; 等渗干旱胁迫与盐胁迫; 支持向量机

中图分类号: Q64; S24 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)07-0231-06

OSID:



Identification of Isotonic Drought Stress and Salt Stress in Wheat Seedling Based on Plant Electric Signal

LI Jinhai^{1,2} LI Yang^{1,3} RICARDO Ferraz de Oliveira⁴ YAO Jiepeng^{1,3} HUANG Lan^{1,3} WANG Zhongyi^{1,2}

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology (Beijing), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China

4. Luiz de Queiroz College of Agriculture (ESALQ), University of São Paulo, Piracicaba 3538709, Brazil)

Abstract: In order to solve the problem that drought stress and salt stress are difficult to distinguish in the early stage when plants are under stress, a method was proposed to identify drought stress and salt stress based on light-induced plant electrical signals. The illumination/darkness cycle stimulation was used to obtain the surface potentials of wheat seedlings under normal conditions, as well as under isotonic drought and salt stress. One-versus-one support vector machine (OVOSVM) was used to classify the obtained plant electrical signals. The results of 3-fold cross validation showed that the two-class classification of wheat seedling leaf surface potential under normal and drought stress had an accuracy of 100%, and the two-class classification of leaf surface potential under normal and salt stress had an accuracy of 94.44%. The accuracy of three-class classifications reached 96.30%. Under the conditions of isotonic drought stress and salt stress, the classification accuracy of wheat seedling leaf surface potential was 100%. The results showed that plant electrical signals can be used as a method to identify adversity stress, and can accurately identify early drought stress and salt stress under isotonic conditions.

Key words: leaf surface potentials of wheat seedlings; light-induced plant electrical signals; isotonic drought stress and salt stress; support vector machine

收稿日期: 2021-04-26 修回日期: 2021-05-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(61571443)

作者简介: 李进海(1988—),男,博士生,主要从事生物系统感测与智能装备研究,E-mail: lijinhai@cau.edu.cn

通信作者: 王忠义(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事生物系统感测与智能装备研究,E-mail: wzyhl@cau.edu.cn

0 引言

干旱胁迫与盐胁迫是植物在生长发育过程中两种常见的非生物胁迫,是导致作物减产的重要原因,严重威胁着粮食安全^[1-2]。干旱造成的高渗透胁迫会导致植物细胞脱水、胞内膨压降低,从而破坏植物体内的水分平衡。长时间的干旱胁迫会进一步产生次级胁迫,导致植物代谢发生紊乱,使细胞膜的选择透性发生改变、无机盐离子与各类小分子外渗^[3-5]。如果不能及时缓解干旱,则细胞会发生自溶,甚至在质膜和液泡膜上产生机械破裂,最终导致植物死亡。盐胁迫又被称为盐害,是由于土壤中盐分过多而产生的一种常见逆境胁迫,可分为原初盐害和次生盐害^[1]。原初盐害破坏植物细胞质膜的选择透性,扰乱细胞正常代谢,使大量的 K^+ 和有机溶质外流,同时大量毒害离子进入胞质,产生离子毒害;次生盐害则进一步导致细胞水分亏缺,产生生理干旱,从而抑制作物生长^[6-8]。干旱胁迫与盐胁迫都属于逆境胁迫,如果逆境胁迫在作物感知的早期阶段能被及时解除,则胁迫产生的伤害是可逆的,若胁迫继续持续,则对植物细胞的膜系统产生不可逆的伤害,导致作物减产,甚至绝收。因此,在逆境胁迫的早期,准确辨识胁迫、进而采取相应的补救措施对保障作物的生长至关重要。由于干旱胁迫与盐胁迫均会引发渗透胁迫,使植物不能获得充足的水分,导致植物茎叶出现萎蔫等相似的形态变化,这种变化除了采用生理生化方法外,很难用直观的方法进行区分^[9-10]。因此有必要探索一种简单有效的干旱胁迫与盐胁迫辨识方法。

鉴于此,本文结合支持向量机在小样本下良好的分类推广能力^[11-14],提出一种基于植物电信号的干旱胁迫与盐胁迫辨识方法,以期在胁迫出现的早期实现对这 2 种胁迫的准确辨识,降低干旱胁迫与盐胁迫对农作物产量和品质的影响。

1 材料与方法

1.1 材料选择与培养

实验样品采用京 411 品种的小麦(中国农业大学农学院提供)。挑选颗粒饱满的小麦种子浸入 0.5% 次氯酸钠溶液中消毒 30 min,随后用去离子水冲洗干净。将处理后的小麦种子放入去离子水中,并在暗处浸种 12 h。挑选萌发一致的种子置于带有发芽纸的培养皿中,以 10 mL 去离子水浸湿发芽纸,随后放入人工气候培养箱中培养。光照/黑暗(光/暗)周期为 14 h/10 h,温度 25℃,相对湿度 60%。每日添加去离子水,防止发芽纸干涸,4~5 d 后可将

小麦幼苗用于实验。

1.2 等渗干旱胁迫与盐胁迫处理

本文使用甘露醇溶液和 NaCl 溶液处理小麦幼苗根部,用以模拟植物在生长过程中遇到的干旱胁迫和盐胁迫。选择长势相近的幼苗分为 3 组,分别设置为对照组、甘露醇(MAN)胁迫(干旱胁迫)组和 NaCl 胁迫(盐胁迫)组。为了使小麦幼苗呈现相近的萎蔫状态,配置渗透势相同的甘露醇(324 mmol/L, -1.49 MPa)和 NaCl 溶液(300 mmol/L, -1.49 MPa)。甘露醇溶液的渗透势计算公式^[15]为

$$\Psi_{MAN} = -0.0078C_{MAN}T - 2.275C_{MAN}$$

式中 Ψ_{MAN} ——甘露醇溶液的渗透势,MPa

C_{MAN} ——甘露醇溶液的摩尔浓度, mol/L

T ——开氏温度, 25℃ 时为 298.13 K

NaCl 溶液的渗透势按照范托夫公式计算

$$\Psi_{NaCl} = 10^{-6}C_{NaCl}RT$$

式中 Ψ_{NaCl} ——NaCl 溶液的渗透势,MPa

C_{NaCl} ——NaCl 溶液的摩尔浓度, mol/L

R ——理想气体常数, 8.314 J/(K·mol)

由于 NaCl 在溶液中会完全电离成 Na^+ 和 Cl^- , 所以 NaCl 溶液的渗透势为 2 倍的 Ψ_{NaCl} 。将培养好的小麦幼苗置于 10 mL 的小烧杯中,每只烧杯加入 5 mL 的甘露醇或 NaCl 溶液胁迫小麦根部 12 h,对照组则继续使用去离子水培养。对照组设置的目的是为了验证电信号是否能够辨识胁迫。

1.3 植物电信号采集

植物电信号的采集采用文献[16-17]中的方法,通过光/暗循环刺激产生稳定的叶表面电位,前期研究将这种电位称为光诱导生物电发生(Light-induced bioelectrogenesis, LIB)^[18-19]。图 1a 为植物电信号测量盒。测量盒分为相互独立的 4 室,在嵌有 Ag/AgCl 电极(图 1a 中 Ei)的盒盖与盒底分别加入琼脂凝胶用作叶表面电位的记录电极。记录电极的制备方法为:用磁力搅拌器搅拌并加热琼脂溶液(50 mL;0.5% 琼脂和 10 mmol/L KCl),直到琼脂溶液沸腾。随后分别在每个独立室的盒盖与盒底加入 15 mL 沸腾后的琼脂溶液,盒盖与盒底处的 Ag/AgCl 电极完全浸入琼脂溶液中。当琼脂溶液凝固为琼脂凝胶后,即完成了记录电极的制备。埋入式 Ag/AgCl 电极连接信号采集系统(RM6240BD 型,成都仪器厂),记录电极(Ei+)和参比电极(Ei-)则分别连接到采集系统探头的输入端和接地端。由于植物电信号属于微弱信号,需要在探头与采集系统间连接高输入阻抗放大器(SWF-1B 型,成都仪器厂)才能有效测量。使用卤钨灯(MHAA-100W 型, MORITEX, 日本)作为刺激光源,光源放置在法拉第

屏蔽网外。鹅颈式光纤(A08400型, MORITEX, 日本)穿过屏蔽网, 光纤的一端位于记录电极上方10 cm处。该方法可同时采集4株小麦幼苗的叶表面电位。光/暗刺激的循环周期为20 min(光、暗各10 min), 光通量密度为 $240 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。由于植物电信号相较于动物信号而言属于慢变信号, 因此采用直流模式采集^[20]。图1b为不同胁迫模式下采集到的单周期小麦叶表面电位, 用于干旱胁迫与盐胁迫的早期识别。

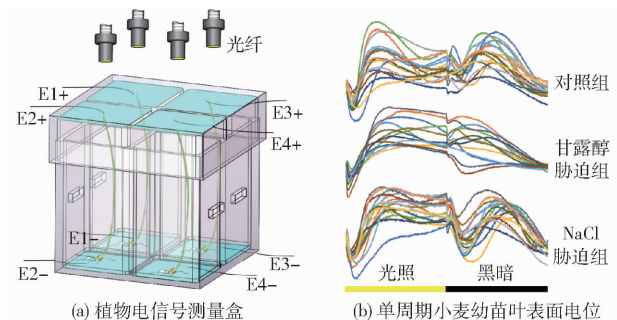


图1 采集光/暗循环刺激下小麦幼苗的叶表面电位

Fig. 1 Leaf surface potential of wheat seedlings under illumination/darkness cycle stimulation

2 数据处理与方法实现

2.1 波形选择

光/暗循环刺激产生的植物叶表面电位在波形上具有很好的重复性, 但在刺激开始的早期, 波形的规律性变化尚不十分明显, 需要经过2~3个完整周期后才能达到稳定, 因此本文选取第4个完整的光/暗周期的波形用于等渗条件下的干旱胁迫与盐胁迫的识别(图2)。

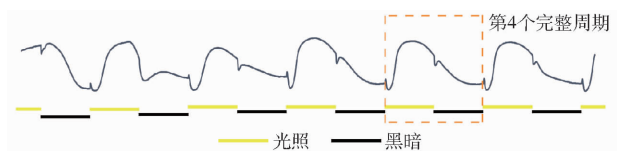


图2 叶表面电位的选取

Fig. 2 Selection of leaf surface potential

2.2 数据预处理

数据提取时, 间隔2 s取一点, 20 min共计588个点(计时器存在误差, 实际时间略短于20 min)。由于参考电位、接触电位和植株个体差异的影响, 不同样本表面电位的基线值并不相同, 因此在分类前需要对采集的数据进行去基线处理, 同时为了使分类模型加速收敛, 分别对每个样本数据进行归一化处理。归一化公式为

$$X_{\text{new}} = \frac{X - \bar{X}}{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}} \quad (1)$$

式中 X_{new} ——归一化值

X ——原始信号幅值

\bar{X} ——原始信号平均幅值

X_{max} ——原始信号最大幅值

X_{min} ——原始信号最小幅值

每个信号样本包含588数据点, 每个数据点作为一个特征。

2.3 基于一对一分类策略的支持向量机

SVM算法最初被广泛应用于二值分类问题, 后被推广到有 M 个类的分类问题。处理 M 类分类问题时, 需要构造一系列多类分类机。OVOSVM即是在每2个类之间都构造一个二类分类SVM^[21-22]。对于一个 M 类多分类问题, 可得

$$\begin{cases} \min_{\omega^{ij}, b^{ij}, \xi^{ij}} \frac{1}{2} (\omega^{ij})^T \omega^{ij} + C \sum_t \xi_t^{ij} (\omega^{ij})^T \\ \text{s. t.} \begin{cases} (\omega^{ij})^T \phi(x_t) + b^{ij} \geq 1 - \xi_t^{ij} \\ (y_t = i, \xi_t^{ij} \geq 0) \\ (\omega^{ij})^T \phi(x_t) + b^{ij} \leq -1 + \xi_t^{ij} \\ (y_t = j, \xi_t^{ij} \geq 0) \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中 t ——第 i 类和第 j 类数据并集中样本的索引

ϕ ——输入空间到特征空间的非线性映射

C ——惩罚参数

ω ——分类超平面法方向

b ——偏置

ξ ——引入的松弛变量

x_t ——第 t 个样本

对于第 i 类和第 j 类数据, $i, j \in \{1, 2, \dots, M\}$, $i < j$, 需要训练 $M(M-1)/2$ 个二分类分类器, 然后使用投票策略(voting strategy)进行分类, 每个二分类分类器从初始多分类训练集中收集其中2个类别的所有样本, 对新数据进行预测。所有 $M(M-1)/2$ 个二分类分类器被应用于一个未知样本, 若第1个分类器认为未知样本是第1类, 则票数“+1”, 第2个分类器未知样本也是第1类就再“+1”, 以此类推, 得到最多“+1”预测的类别会成为最终的多分类预测结果。

3 结果与讨论

3.1 光/暗刺激诱导的植物叶表面电位及其特征

光/暗循环刺激下出现的植物叶表面电位在幅值上的波动, 是叶片与记录电极接触处的群体细胞(叶肉细胞、表皮细胞和保卫细胞)膜电位在时空变化时叠加的结果, 而非单一某种细胞的单独作用。因此, 光/暗诱导叶表面电位的波形形状不同于强光刺激下任一类型细胞膜电位的变化, 其波形幅值低于光刺激下单个叶肉细胞产生的膜电位的振幅^[23]。

这可能是由于在相同的光照条件下,不同种类细胞表现出不同的极化状态或极化幅度造成的。叶肉细胞和表皮细胞的质膜在强光刺激下去极化,而保卫细胞的质膜则表现为超极化,这使得群体细胞膜变化的叠加态在时空变化时的幅值存在相互抵消的情况。光诱导产生的植物叶表面电位的波形与幅值主要与光通量密度、光质和光/暗周期 3 个因素有关^[24]。光通量密度主要影响波形的幅度,在一定范围内光通量密度与幅值成正比,光通量密度越大,波形的峰峰值越大,但当光通量密度达到一定数值时,波形不再有明显变化。对于小麦,220 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 左右的光通量密度即可使波形的变化幅度趋于稳定。光诱导植物叶表面电位与光质密切相关,其对绿光的敏感性最低,而蓝光诱导的波形变化则接近全光谱时的波形,由于蓝光对叶肉细胞的刺激性最强^[25-26],因此在光诱导产生的植物叶表面电位中,叶肉细胞对电位变化的贡献度最大。光/暗周期的长短设置对波形的变化趋势影响很大,光/暗周期选择的依据是有足够的时长使电位变化趋于恒定。如图 3 所示,不同胁迫下,以 10 min/10 min 为周期的光/暗循环刺激均可使波形达到峰值后进入相对稳定的变化状态。但不同胁迫下光诱导植物电信号的峰值幅度以及波形进入峰值的所需时间不同(表 1),这些差异化的特征,可以用于辨识不同类型的胁迫。在此基础上,为了提高分类的准确性,每个波形样本的所有数据点均作为特征点。

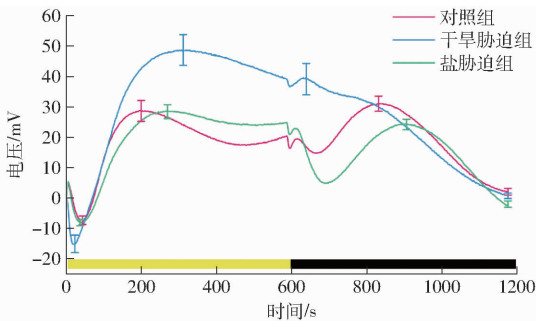


图 3 不同胁迫下获取的光诱导叶表面电位

Fig. 3 Light-induced leaf surface potential obtained under different stresses

3.2 多维特征的 OVOSVM 分类

采用多分类支持向量机对正常条件下的样本以及等渗干旱胁迫和盐胁迫条件下的样本进行分类,随机划分样本的训练集与测试集,对所建立的模型,采取网格搜索法对惩罚因子 C 与高斯核 γ 进行参数选择。为了进一步得到最优参数,实验均采用三折交叉验证。另外,在投票之前先对正常样本与干旱胁迫样本、正常样本与盐胁迫样本、干旱胁迫样本与盐胁迫样本分别做出预测,用以验证植物叶表面

表 1 不同胁迫下光诱导叶表面电位的峰值及达到峰值所需时间

Tab. 1 Peak value of light-induced leaf surface potential and time required to reach peak value under different stresses

参数	实验组别	光照阶段	黑暗阶段
峰值/mV	对照组	28.62 ± 3.46	30.99 ± 2.49
	干旱胁迫组	48.71 ± 5.04	39.08 ± 5.16
	盐胁迫组	28.39 ± 2.27	24.16 ± 1.73
达到峰值所需时间/s	对照组	200 ± 6.41	244 ± 10.74
	干旱胁迫组	312 ± 29.19	52 ± 28.90
	盐胁迫组	270 ± 8.73	318 ± 11.19

注:统计数据均为平均值 ± 标准差。

电位是否可以用于胁迫辨识,随后对 3 种样本进行投票预测。最后经过网格搜索,得到最优参数。实验结果如表 2 所示。

表 2 分类结果

Tab. 2 Classification results

参数	正常状态 与干旱胁迫	正常状态 与盐胁迫	干旱胁迫 与盐胁迫	正常状态、干旱 胁迫与盐胁迫
样本数/株	16、13	16、16	13、16	16、13、16
分类准确率/%	100	94.44	100	96.30

本课题组曾采用以提取主成分作为特征,选择波形参数等方法对电信号进行分类,但因为无法利用波形的细节信息导致分类效果受到影响^[16];也曾利用一维卷积神经网络自动提取波性特征用于分类^[17],这类深度学习的方法需要较多的样本。因此,以整个波形数据点作为特征进行分类。使用 OVOSVM 对原始数据进行分类,每个点为一个特征,共计 588 个特征。3 种不同条件下采集的样本数据在三折交叉验证后分类准确率为 96.30%,网格搜索得到的最优参数 C 为 16, γ 为 4,标准差为 ± 0.0593 。正常状态与干旱胁迫以及干旱胁迫与盐胁迫二分类的准确率均达到 100%,正常状态与盐胁迫二分类的准确率为 94.44%。分类结果表明植物电信号可以用于辨识胁迫,并且可以实现对早期等渗干旱胁迫与盐胁迫的辨识。

3.3 光诱导叶表面电位辨识等渗干旱胁迫与盐胁迫的机制

植物在外界刺激下会产生电信号,这种信号是植物对外界刺激的最初响应,携带着生理变化产生的信息^[27-29]。干旱胁迫与盐胁迫均会产生渗透胁迫,可以影响细胞膜的离子交换过程,但由于胁迫类型不同,影响离子交换的方式也存在巨大差异。干旱胁迫主要导致大量的无机盐离子外流,而盐胁迫则会破坏植物细胞内的 Na^+/K^+ 平衡, K^+ 大量外流的同时伴随着大量的 Na^+ 和 Cl^- 等毒害离子进入细

胞。逆境胁迫导致的细胞在离子交换上的差异,必然会使细胞膜电位产生不同的变化。叶表面电位为测试电极与叶片接触处群体细胞膜电位在空间上的叠加,胁迫导致的膜电位变化,宏观上表现为植物对光响应时的敏感性出现差异^[23]。相较于膜电位的获取困难,叶表面电位获取相对简单,因此可以通过获取叶表面电位的方法达到辨识早期干旱胁迫与盐胁迫的目的。这种差异在逆境胁迫的早期阶段就可以得到验证,既不需要对形态表型进行长期评估,也不需要使用复杂的生理生化方法进行测量。即使是对于干旱胁迫与盐胁迫这种可导致植物外观形态上出现相似变化的逆境胁迫,辨识的效果也很明显。

4 结论

(1)提出了一种基于植物电信号的逆境胁迫辨识方法,该方法可在不使用生理生化方法验证的前提下准确辨识胁迫,方法简单有效。

(2)通过光/暗诱导获取的稳定植物叶表面电位,结合支持向量机在小样本下良好的分类推广能力,实现了等渗条件下干旱胁迫与盐胁迫的辨识,本研究可为作物的抗逆与育种研究提供一种新的手段。

(3)植物电信号携带丰富的生理信息,是植物与外界环境信息交流的重要途径,本研究作为植物电信号实际应用范例,可进一步促进植物电信号解译工作的开展。

参 考 文 献

- [1] ZHU J K. Abiotic stress signaling and responses in plants[J]. *Cell*, 2016, 167(2): 313–324.
- [2] 杨淑华, 巩志忠, 郭岩, 等. 中国植物应答环境变化研究的过去与未来[J]. *中国科学: 生命科学*, 2019, 49(11): 1457–1478. YANG Shuhua, GONG Zhizhong, GUO Yan, et al. Studies on plant responses to environmental change in China: the past and the future[J]. *Scientia Sinica (Vita)*, 2019, 49(11): 1457–1478. (in Chinese)
- [3] FAROOQ M, HUSSAIN M, WAHID A, et al. Drought stress in plants: an overview[M] // AROCA R. *Plant responses to drought stress*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012: 1–33.
- [4] HU H, XIONG L. Genetic engineering and breeding of drought-resistant crops[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2014, 65: 715–741.
- [5] JALEEL C A, MANIVANNAN P, WAHID A, et al. Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition[J]. *International Journal of Agriculture & Biology*, 2009, 11(1): 100–105.
- [6] RUIZ K B, BIONDI S, MARTÍNEZ E A, et al. Quinoa—a model crop for understanding salt-tolerance mechanisms in halophytes[J]. *Plant Biosystems—An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 2016, 150(2): 357–371.
- [7] WU H, SHABALA L, AZZARELL E, et al. Na⁺ extrusion from the cytosol and tissue-specific Na⁺ sequestration in roots confer differential salt stress tolerance between durum and bread wheat[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2018, 69(16): 3987–4001.
- [8] PERCEY W J, SHABALA L, BREADMORE M C, et al. Ion transport in broad bean leaf mesophyll under saline conditions[J]. *Planta*, 2014, 240(4): 729–743.
- [9] YUAN F, YANG H, XUE Y, et al. OSCA1 mediates osmotic-stress-evoked Ca²⁺ increases vital for osmosensing in Arabidopsis[J]. *Nature*, 2014, 514(7522): 367–371.
- [10] DONG H, BAI L, ZHANG Y, et al. Modulation of guard cell turgor and drought tolerance by a peroxisomal acetate-malate shunt[J]. *Molecular Plant*, 2018, 11(10): 1278–1291.
- [11] 权龙哲, 祝荣欣, 雷涛, 等. 基于KL变换与LS-SVM的玉米品种识别方法[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(4): 168–172. QUAN Longzhe, ZHU Rongxin, LEI Pu, et al. Recognition method of maize cultivars based on KL transform and LS-SVM[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(4): 168–172. (in Chinese)
- [12] 何东健, 乔永亮, 李攀, 等. 基于SVM-DS多特征融合的杂草识别[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(2): 182–187. HE Dongjian, QIAO Yongliang, LI Pan, et al. Weed recognition based on SVM-DS multi-feature fusion[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(2): 182–187. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130234&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.034. (in Chinese)
- [13] 李鑫星, 董保平, 杨铭松, 等. 基于SVM核机器学习的三文鱼新鲜度检测系统[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(5): 376–384. LI Xinxing, DONG Baoping, YANG Mingsong, et al. Detection system of salmon freshness based on SVM kernel-based machine learning[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(5): 376–384. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190543&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.043. (in Chinese)
- [14] 杨丽丽, 张大卫, 罗君, 等. 基于SVM和AdaBoost的棉叶螨危害等级识别[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(2): 14–20. YANG Lili, ZHANG Dawei, LUO Jun, et al. Automatic recognition for cotton spider mites damage level based on SVM and AdaBoost[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(2): 14–20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190202&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.002. (in Chinese)
- [15] MICHEL B E, WIGGINS O K, OUTLAW W H. A guide to establishing water potential of aqueous two-phase solutions (polyethylene glycol plus dextran) by amendment with mannitol[J]. *Plant physiology*, 1983, 72(1): 60–65.
- [16] 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(1): 120 – 130.
- [17] QIN X H, WANG Z Y, YAO J P, et al. Using a one-dimensional convolutional neural network with a conditional generative adversarial network to classify plant electrical signals[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 174: 105464.
- [18] SHABALA S, NEWMAN I. Light-induced changes in hydrogen, calcium, potassium, and chloride ion fluxes and concentrations from the mesophyll and epidermal tissues of bean leaves. Understanding the ionic basis of light-induced bioelectrogenesis[J]. *Plant Physiology*, 1999, 119(3): 1115 – 1124.
- [19] LI J, YUE Y, WANG Z, et al. Illumination/darkness-induced changes in leaf surface potential linked with kinetics of ion fluxes[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 1407.
- [20] 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.
- WANG Ziyang, FAN Lifeng, WANG Yongqian, et al. Selection of recording pattern of plant surface electrical signal based on analysis of electrical characteristics[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(5): 137 – 143. (in Chinese)
- [21] HSU C W, LIN C J. A comparison of methods for multiclass support vector machines[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2002, 13(2): 415 – 425.
- [22] LIU Y, BI J W, FAN Z P. A method for multi-class sentiment classification based on an improved one-vs-one (OVO) strategy and the support vector machine (SVM) algorithm[J]. *Information Sciences*, 2017, 394: 38 – 52.
- [23] TREBACZ K, ZAWADZKI T. Light-triggered action potentials in the liverwort *Conocephalum conicum* [J]. *Physiologia Plantarum*, 1985, 64(4): 482 – 486.
- [24] 王子洋. 植物电信号检测方法研究及其在作物耐盐性识别中的应用[D]. 北京: 中国农业大学, 2019.
- WANG Ziyang. Research of plant electrical signal detection method and its application in salt tolerance identification in crops [D]. Beijing: China Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [25] STOELZLE S, KAGAWA T, WADA M, et al. Blue light activates calcium-permeable channels in *Arabidopsis* mesophyll cells via the phototropin signaling pathway[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2003, 100(3): 1456 – 1461.
- [26] MARTEN I, DEEKEN R, HEDRICH R, et al. Light-induced modification of plant plasma membrane ion transport[J]. *Plant Biology*, 2010, 12: 64 – 79.
- [27] HUANG L, WANG Z Y, ZHAO L L, et al. Electrical signal measurement in plants using blind source separation with independent component analysis[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010, 71: S54 – S59.
- [28] MAFFEI M E, MITHÖFER A, BOLAND W. Before gene expression: early events in plant-insect interaction[J]. *Trends in Plant Science*, 2007, 12(7): 310 – 316.
- [29] LI J H, FAN L F, ZHAO D J, et al. Plant electrical signals: a multidisciplinary challenge[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2021, 261: 153418.

(上接第 260 页)

- [28] 杜娅丹, 张倩, 崔冰晶, 等. 加气灌溉水氮互作对温室芹菜地 N_2O 排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(16): 127 – 134.
- DU Yadan, ZHANG Qian, CUI Bingjing, et al. Effects of water and nitrogen coupling on soil N_2O emission characteristics of greenhouse celery field under aerated irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(16): 127 – 134. (in Chinese)
- [29] 杜世宇, 薛飞, 吴汉卿, 等. 水氮耦合对设施土壤温室气体排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(2): 476 – 484.
- DU Shiyu, XUE Fei, WU Hanqing, et al. Interactive effect of irrigation and nitrogen fertilization on greenhouse gas emissions from greenhouse soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(2): 476 – 484. (in Chinese)
- [30] WRAGE N, VELTHOF G L, VAN BEUSICHEM M L, et al. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(12 – 13): 1723 – 1732.
- [31] 王国栋, 褚贵新, 刘瑜, 等. 干旱绿洲长期微咸地下水灌溉对棉田土壤微生物量影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(11): 44 – 48.
- WANG Guodong, CHU Guixin, LIU Yu, et al. Effects of long-term irrigation with brackish groundwater on soil microbial biomass in cotton field in arid oasis[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(11): 44 – 48. (in Chinese)
- [32] WANG Y, YANG P, REN S, et al. CO_2 and N_2O emissions from spring maize soil under alternate irrigation between saline water and groundwater in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(15): 2669.
- [33] 张前前, 王飞, 刘涛, 等. 微咸水滴灌对土壤酶活性、 CO_2 通量及有机碳降解的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(9): 2743 – 2750.
- ZHANG Qianqian, WANG Fei, LIU Tao, et al. Effects of brackish water irrigation on soil enzyme activity, soil CO_2 flux and organic matter decomposition[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(9): 2743 – 2750. (in Chinese)
- [34] ZENG W, XU C, WU J, et al. Effect of salinity on soil respiration and nitrogen dynamics[J]. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 2013, 20(3): 519 – 530.
- [35] CHENG Y, CAI Z, CHANG S X, et al. Effects of soil pH and salt on N_2O production in adjacent forest and grassland soils in central Alberta, Canada[J]. *Journal of Soil and Sediments*, 2013, 13(5): 863 – 868.
- [36] HEINCKE M, KAUPENJOHANN M. Effects of soil solution on the dynamics of N_2O emissions: a review[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, 55(2): 133 – 157.
- [37] MENYAILO O V, STEPANOV A L, UMAROW M M. The transformation of nitrous oxide by denitrifying bacteria in solonchaks[J]. *Eurasian Soil Science*, 1997, 30(2): 178 – 180.