

# 乙烯利对作物抗倒伏性的影响研究进展

吕孝敏, 胡训霞, 张萍, 王泽港\* (扬州大学生物科学与技术学院, 江苏扬州 225009)

**摘要** 倒伏一直是影响作物高产稳产的关键因素。植物生长调节剂乙烯利应用于作物抗倒伏性已被广泛研究报道。从茎秆形态学特征和化学成分2个方面综述了乙烯利对作物茎秆抗倒伏性的影响,旨在为将乙烯利应用于大田作物,提高其抗倒伏性提供理论依据和新的研究思路。

**关键词** 作物; 乙烯利; 抗倒伏性; 研究进展

**中图分类号** S482.8 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)15-005-04

## Research Progress of the Effects of Ethephon on Crop Lodging Resistance

LU Xiao-min, HU Xun-xia, ZHANG Ping, WANG Ze-gang\* (College of Bioscience and Biotechnology, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009)

**Abstract** Lodging is always one of the key factors affecting crop yield. Ethephon, as a plant growth regulator, has attracted wide attention on its effect on crop lodging resistance. In this research, the research progress of ethephon on the crop stem lodging resistance in both morphological characteristics and chemical component was reviewed, which provided theoretical foundation for ethephon application in field crops and inspired new research idea for further research in crop lodging resistance.

**Key words** Crop; Ethephon; Lodging resistance; Research progress

倒伏是指植物茎秆在外力作用下自然直立状态发生永久性改变的一种复杂自然现象,大多数作物在农业生产过程中普遍存在<sup>[1]</sup>。作物倒伏后,叶片的空间分布秩序及叶片组织遭到破坏,光截获率大大降低,同时茎秆的疏导系统遭到破坏,影响了水和养分的吸收以及光合产物的输送,使作物结实率显著降低,严重时甚至绝产,此外倒伏的发生也增加了收割难度与成本<sup>[2-4]</sup>。

根据作物倒伏发生的部位,主要分为根倒伏与茎倒伏2种。根倒伏是指植株自地表处与根一起发生的全株性倒伏,主要由根系发育不良所引起。茎倒伏是指植株基部节间或中间组织发生弯折或折断所引起的倒伏,主要是由外界自然因素所引起的<sup>[5-7]</sup>。水分、养分及光合产物的输送由于茎秆倒伏而被破坏,产量损失相对于根倒伏更为严重,且此类倒伏更易发生,因此茎秆倒伏是作物倒伏研究的重中之重<sup>[7-8]</sup>。目前,除从抗倒伏作物品种的选用及田间管理的加强以外<sup>[9-10]</sup>,植物生长调节剂常被用来改善作物的抗倒伏性。

植物生长调节剂中有一类能够降低芽伸长率,这类化合物在植物生长调节剂中占有重要地位,通常被命名为生长延缓剂<sup>[11]</sup>。生长延缓剂在植物抗倒伏研究中被广泛使用,如多效唑、稀效唑、矮壮素、蛋氨酸、抗倒胺、乙烯利、助壮素、立丰灵等,均具有显著矮化植株、提高抗倒伏能力的作用<sup>[12-13]</sup>。

乙烯利的化学名称为2-氯乙基磷酸,是用化学方法合成的植物生长调节剂,为白色针状结晶,在空气中极易潮湿降解,易溶于水,乙烯利本身在pH小于3.5的水溶液中极为稳定,当pH大于4.0时便降解释放出乙烯<sup>[14]</sup>。1901年,

Neljubow最早发现乙烯在高等植物体内的生物学作用,它能够引起幼苗的横向生长,抑制伸长和径向膨胀(三重反应)。此外,乙烯还参与许多植物生长过程,例如促进或抑制植物细胞生长,诱导植株开花,加快植物组织和器官衰老,促进果实成熟及叶片与果实脱落<sup>[15]</sup>。

乙烯利作为植物生长延缓剂,在作物抗倒伏研究中被广泛使用,其谷类作物中的作用尤为显著,尤其是大麦,能够显著抑制茎秆伸长,降低倒伏率<sup>[16]</sup>。笔者从茎秆形态特征及化学成分2个方面综述了乙烯利对作物抗倒伏性的影响,以期为今后的作物抗倒伏研究提供新思路。

## 1 乙烯利对茎秆形态学特征的影响

### 1.1 乙烯利对株高及节间长度的影响

株高是衡量植株抗倒伏能力的重要指标<sup>[17]</sup>。株高与倒伏指数呈显著遗传正相关,降低株高能显著提高植株的抗倒伏能力<sup>[18-21]</sup>。Chandiposha等<sup>[22]</sup>在53 333与80 000株/hm<sup>2</sup>2个种植密度下研究了0.56与0.86 L/hm<sup>2</sup>2种施用量乙烯利处理后玉米的生长状况,结果表明2种植植密度下株高都显著降低,主要由于1、2、3节间的节间长度缩短,从而导致植株整体高度降低,进而降低倒伏比例。Shekoofa和Emam研究表明2种植植密度下2种施用量的乙烯利处理株高都有所降低,减少了节间长度,且主要体现在1、2、3节间上。随着乙烯利施用量的增加,株高降低更为明显<sup>[23-24]</sup>。此外,不同时期其他施用量的乙烯利处理的玉米植株株高降低,节间长度缩短,除1、2、3节间外,4、5节间也有不同程度缩短,且随着乙烯利剂量的增加,抑制效果更加显著<sup>[25-30]</sup>。

在水稻分蘖末期及扬花期使用乙烯利能显著降低水稻株高,1、2、3节间的节间长度均低于对照清水处理,且随着乙烯利浓度的提高,节间生长抑制效果更为明显<sup>[31-32]</sup>。

在麦类作物中,Ramburan等<sup>[33]</sup>使用600 g/hm<sup>2</sup>的乙烯利处理大麦,分3个处理(茎秆伸长期使用、旗叶期使用、伸长期与旗叶期均使用),结果表明茎秆伸长期使用,株高不显

**基金项目** 淮南市农业科学研究院横向委托项目(132050113)。

**作者简介** 吕孝敏(1991-),女,江苏句容人,硕士研究生,研究方向:植物逆境生物学。\* 通讯作者,副教授,博士,硕士生导师,从事生物物理学与植物逆境生理学方面的研究。

**收稿日期** 2016-04-15

著降低,然而旗叶期使用或2期均使用,株高明显降低,倒伏比例相应下降。Ramburan等<sup>[34]</sup>使用600 g/hm<sup>2</sup>的乙烯利处理小麦,同样分3个处理(分蘖期使用、茎秆伸长期使用、旗叶期使用),结果表明分蘖期使用乙烯利处理的小麦株高未得到显著变化,而茎秆伸长期、旗叶期使用乙烯利处理的小麦株高显著降低。这说明株高的降低取决于中后期乙烯利的应用,尤其是旗叶期使用效果最为明显,同时最上节间长度呈现出降低趋势,从而影响了整体株高。另外一些研究表明,即旗叶出现时使用乙烯利能够显著降低株高,且浓度越高,抑制效果越明显<sup>[35-36,38]</sup>。小麦旗叶期使用乙烯利(480 g/hm<sup>2</sup>),株高降低10.2%,第三节间长度和花梗长度分别降低8.6%和14.2%,株高的降低主要由于花梗和中间节间的缩短<sup>[37]</sup>。燕麦拔节期喷施10%的乙烯利,株高和倒四节间长显著降低<sup>[39]</sup>。

作物上应用乙烯利能够显著降低植株株高,且株高的降低主要取决于植株上部节间的缩短,尤其是1、2、3节间,乙烯利使用时期应为植株生长的中后期,且乙烯利浓度越大,抑制效果越明显,节间缩短,株高降低,倒伏率也随之下降。

**1.2 乙烯利对节间干重的影响** 抗倒高产的品种应有较重的秸秆<sup>[37]</sup>。大量研究表明,植株茎秆的抗倒指数与单位节间长度贮藏的干物质呈显著正相关,随着单位节间长度的干物重增加,抗倒指数随之增加,倒伏比例随之降低<sup>[40-43]</sup>。

Shekoofa等<sup>[36]</sup>在旗叶叶舌刚出现时使用0.28 kg/hm<sup>2</sup>乙烯利处理小麦,结果表明在开花期经乙烯利处理的植株较对照具有更大的干物重。叶德练等<sup>[44]</sup>使用180 g/hm<sup>2</sup>的乙烯利处理玉米,结果表明喷施乙烯利后成熟期第9节间的单位节间干重显著增加,节间抗折力得到增强,抗倒伏能力相应提高。Ye等<sup>[45]</sup>研究表明使用乙烯利减少了第9节间干物重,同时缩短了节间长度,导致每单位节间长度的干物重增加,从而提高了抗折力。节间干物重增加或单位节间长度干物重增加均能提高作物的抗倒伏能力,节间干物重尤其是单位节间长度干物重是衡量作物抗倒伏能力的重要指标<sup>[37]</sup>,较重的秸秆可以更好地抵御外界自然环境的不确定因素,从而更有利于植株的后期生长,提高抗倒能力。

**1.3 乙烯利对茎秆直径和茎秆壁厚的影响** 茎秆直径与抗倒伏能力有关,茎秆直径也是衡量作物抗倒伏能力的重要指标<sup>[46]</sup>。Tripathi等<sup>[37]</sup>研究表明抗倒高产的品种各节间具有茎秆直径大与壁厚的特征。

研究表明,作物抗倒伏性的影响因素,除株高与节间长度发生变化外,玉米节间直径增加,尤其是基部节间直径,进一步研究表明上部节间1、2、3节间直径也有所增加<sup>[23-24]</sup>。Chandiposha等<sup>[22]</sup>的研究结果也证实了这一现象。300 kg/hm<sup>2</sup>氮水平下,Tripathi等<sup>[37]</sup>使用480 g/hm<sup>2</sup>乙烯利处理12种基因型小麦,第二、第三节间直径分别增加2.7%和3.9%,且第三节间直径最大,第一、第二、第三节间及花梗的茎秆壁厚分别增加4.3%、6.3%、8.1%和3.6%。其他研究者使用不同浓度的乙烯利在不同时期处理玉米,结果呈现出相同的趋势,即乙烯利处理后茎粗均有所增加,抗倒伏能力

得到提高<sup>[26,29-30]</sup>。乙烯利处理能增加茎秆直径及节间茎秆壁厚,从而提高植株的抗倒伏能力。

## 2 乙烯利对茎秆化学成分的影响

**2.1 乙烯利对可溶性糖含量的影响** 可溶性糖和淀粉作为茎秆中储存的非结构性碳水化合物,对茎秆强度的维持起重要作用。研究表明,可溶性糖与茎秆抗倒伏性呈显著相关,抗倒伏品种秸秆中一般都具有较高的可溶性糖含量<sup>[47]</sup>。茎秆基部节间的可溶性糖含量和淀粉含量与茎秆抗倒伏指数呈显著或极显著正相关关系<sup>[48-49]</sup>。作物自齐穗期后,茎秆中储存的干物质会向穗部转移,茎秆抗折力下降,倒伏指数上升,抗倒伏能力强的品种后期茎秆干物质向外输送量低于积累量,茎秆积累了大量的干物质,抗倒能力提高<sup>[49]</sup>。

田晓东等<sup>[50-51]</sup>使用85%的乙烯利处理玉米品种先玉335及金海5号,结果表明乙烯利处理后2个品种的玉米基部节间可溶性糖含量均有所增加,其中先玉335的可溶性糖含量增加了30.2%,并且2次处理含量高于1次处理含量,金海5号也表现出同样的变化趋势。朱占华<sup>[52]</sup>研究表明乙烯利处理后小麦茎秆可溶性总糖含量高于对照组,可溶性总糖的输出量小于积累量,导致茎秆积累更多的可溶性糖。乙烯利处理能影响茎秆干物质的再分配,从而增加作物茎秆的可溶性糖含量,可溶性糖能够提高节间充实度,增加厚壁组织细胞壁及表皮硅质层的厚度,从而增强茎秆强度,提高抗倒伏能力<sup>[53]</sup>。

**2.2 乙烯利对木质素、纤维素及半纤维素含量的影响** 纤维素和木质素对于茎秆强度至关重要<sup>[46]</sup>。植物细胞壁的主要成分是纤维素和果胶<sup>[54]</sup>。除纤维素外,半纤维素也是构成细胞壁的重要成分之一。木质素是沉积于植物细胞壁中的芳香类化合物<sup>[55]</sup>。细胞壁内填充和附加木质素,能增强细胞壁的硬度,从而使细胞群的机械强度增加。因此,植物组织的机械强度与纤维素、木质素含量密切相关,与半纤维素含量有一定的关联。已有研究表明,提高茎秆单位体积的纤维素和木质素含量,进而提高植株茎秆的细胞强度和茎秆的机械强度,从而提高抗倒伏能力<sup>[55-57]</sup>。

在小麦拔节期、始穗期及齐穗期施用乙烯利能增加茎秆中木质素、纤维素含量,从而提高提高茎秆的抗折力<sup>[52,58]</sup>。玉米上使用乙烯利后茎秆基部节间纤维素含量亦明显增加<sup>[50-51]</sup>。也有研究表明,乙烯利处理后茎秆纤维素、木质素和半纤维素含量减少。

研究表明,使用180 g/hm<sup>2</sup>乙烯利处理玉米品种郑单958,2011年第9节间半纤维素含量在11叶期和14叶期均增加,且在收获期半纤维素和纤维素含量均增加,2012年第9节间半纤维素和纤维素含量在14叶期、收获时期均得到提高,但纤维素和半纤维素含量与抗倒伏性呈现出显著不相关关系。2013年,乙烯利对第9节间纤维素、半纤维素和木质素含量没有显著影响,但抗倒伏性与纤维素、半纤维素及木质素含量均呈现出正相关关系<sup>[44-45,59]</sup>。

叶德练等<sup>[59]</sup>研究表明玉米施用180 g/hm<sup>2</sup>乙烯利,2011年第9节间半纤维素含量和纤维素含量在11叶期、13叶期

显著增加,但在吐丝期和成熟期却显著降低,对木质素含量的影响不大。2012年,各时期的半纤维素含量均增加,但11叶期及13叶期纤维素含量增加,吐丝期及成熟期下降,木质素含量在各时期均有所降低,其中13叶期和吐丝期存在显著差异,而在成熟期却呈现出显著关系。节间抗折力在2011年与半纤维素、纤维素、木质素含量呈现出负相关关系,但未达到显著水平,而2012年与半纤维素含量呈现出不显著的正相关关系,与纤维素和木质素含量呈现出不显著的负相关关系。此时,乙烯利提高茎秆抗倒伏性的能力并非通过增加节间半纤维素、纤维素及木质素含量,而是通过降低纤维素及木质素含量来达到的。Tripathi等<sup>[60]</sup>在旗叶期使用乙烯利处理后小麦基部节间的纤维素和木质素含量分别下降了8.81%和5.56%,但抗折力却有所提高。

通过增加茎秆节间半纤维素、纤维素及木质素含量,增强茎秆细胞的机械强度,可以提高其抗倒伏能力。然而,茎秆抗折力的提高还可以通过降低茎秆纤维素和木质素含量,提高茎秆的柔韧性,进而提高其抗折力,最终提高其抗倒伏能力,降低倒伏率。茎秆在抗倒伏性方面表现出不同的变化,其原因有待进一步研究。

**2.3 乙烯利对矿质元素含量的影响** 矿质元素与作物茎秆的抗倒伏能力也有密切的关系。其中最重要的是硅和钾。植物厚壁细胞木质化和硅质化都需要硅和钾的参与<sup>[61-62]</sup>。研究表明,钾含量随着作物的成熟在节间中不断积累呈现出积淀现象,钾可以促进茎秆中蔗糖、淀粉、纤维素、木质素含量的增加,增强茎秆机械强度,从而减少倒伏发生率<sup>[63-64]</sup>。Tripathi等<sup>[60]</sup>研究乙烯利处理后小麦茎秆第二节间的钾含量增加了9.6%。田晓东等<sup>[50-51]</sup>研究发现乙烯利处理后先玉335基部节间的钾含量显著高于对照31.0%,金海5号也有相同的变化。杨长明等<sup>[65]</sup>研究发现,与钾相比,茎秆抗折力与硅含量关系更为密切,硅含量对茎秆形态和物理特征的影响更为深远。硅储存在叶片、叶鞘和茎秆的表皮和微管组织中的硅化细胞中,可以提高细胞壁的强度和硬度<sup>[66]</sup>。研究表明,施用硅肥能够增强基部节间的粗度和壁厚,增强茎秆抗压强度,从而降低倒伏发生率<sup>[67-69]</sup>。因此,增加硅和钾含量,可以提高抗倒伏能力。此外,也有研究者对茎秆中其他矿质元素含量与倒伏指数的关系进行了研究,结果表明基部节间的倒伏指数与茎秆中镁、锰、铁含量呈正相关,而与锌、钙、铜呈负相关,降低镁、锰和铁含量及提高锌、钙和铜含量对于提高茎秆抗折力有一定的作用<sup>[49]</sup>。

**2.4 乙烯利对茎秆内源激素含量的影响** 植物茎秆的伸长生长受多种激素的互作协调。前人研究发现,深水稻节间生长速率主要由内源激素赤霉素(GA)与脱落酸(ABA)的比值决定。乙烯促进节间伸长生长是通过调节GA与ABA的动态平衡,乙烯先促进ABA水平的下降,从而引起节间组织对GA水平应答机制的增强。ABA与GA相互作用,ABA抑制水下节间的伸长,而GA解除这种抑制,同时GA促进细胞分裂和细胞伸长<sup>[70-72]</sup>。乙烯与生长素(IAA)调节茎秆的伸长生长,乙烯通过抑制IAA从上往下的极性运输来抑制整株植

株的茎秆生长,从而影响IAA的新陈代谢<sup>[73]</sup>。IAA与GA之间的相互作用促进植物茎秆的伸长,IAA不仅能够促进节间生理活性GA的合成,同时抑制生理活性GA的降解,从而能够持续不断地合成GA,维持一定的GA含量,以此来满足植物节间伸长生长的需求<sup>[74]</sup>。

卫晓铁等<sup>[75]</sup>在玉米拔节期使用200 mg/L乙烯利处理玉米自交系品种,结果表明所有品种的节间生长素(IAA)含量均极显著降低,脱落酸(ABA)含量显著增高。仅有4个品种的GA<sub>4</sub>含量呈现出显著或极显著下降趋势,然而赤霉素(GA<sub>4</sub>)与脱落酸(ABA)比值在几乎所有品种中呈现出显著或极显著下降趋势。IAA、ABA和GA<sub>4</sub>的表达变化与节间长度缩短性状相一致,说明此3种激素的表达是影响节间伸生长的关键因素。卫晓铁等<sup>[76]</sup>同时在玉米拔节期使用200 mg/L乙烯利处理玉米自交系品种及其相应亲本品种,结果表明乙烯利处理降低了基部伸长节间生长素(IAA)和赤霉素(GA<sub>4</sub>)含量,提高了脱落酸(ABA)含量。

乙烯利处理后,节间ABA水平提高,导致节间植物组织对GA水平应答降低<sup>[70-71]</sup>,引起GA含量降低,GA与ABA比值随之降低,节间伸长生长受到抑制。此外,IAA含量降低,从另一层面减少了GA含量的合成,对GA降解的抑制也随之减弱,GA含量得到进一步降低,从而影响了节间组织的细胞分裂和伸长生长。

### 3 展望

乙烯利在作物的抗倒伏生产中发挥着重要作用。作物经乙烯利处理后能显著降低株高,主要表现在降低节间长度,尤其是上部节间长度,且随着乙烯利浓度的增加或后期使用,其应用效果更明显,同时能够提高茎秆干物重或单位节间干物重,并能够增加茎秆直径及茎秆壁厚,这些变化使得作物具有较低的重心、较重及较粗的节间,使得作物茎秆抗折力进一步提升,从而增强其抗倒伏能力。经乙烯利处理后,茎秆化学组成也发生变化,显著提高了茎秆可溶性糖含量,提高或降低木质素、纤维素、半纤维素含量,增加矿质元素钾和硅含量,改变植物体内激素含量比例,从而提高茎秆抗折力,进而提高抗倒伏能力。

然而,在乙烯利的应用过程中仍存在着一些问题,如木质素和纤维素含量存在矛盾的研究成果,半纤维素含量在不同年份与倒伏性分别呈现出负相关或正相关关系,这可能与试验所使用的材料有关,且在田间种植情况下存在许多不确定的环境因素,无法保证处理后的生长条件完全一致,导致最终结果出现相反的结论。与木质素与纤维素相比,半纤维素稳定性较差,更容易降解,因此可能在不同年限呈现出不一样结果。

乙烯利处理虽然增强了作物的抗倒伏力,降低了倒伏率,但也影响了作物的产量。研究表明,大麦和小麦旗叶期使用或茎秆伸长期与旗叶期同时使用乙烯利,产量显著下降,其主要原因是穗粒数的减少<sup>[33-34,38]</sup>;喷施乙烯利后玉米产量下降,表现为单株产量下降,且随着乙烯利浓度的增加,产量下降越来越明显<sup>[26-28]</sup>;水稻分蘖末期、扬花后7 d各施

用40%乙烯利900和3000 mL/hm<sup>2</sup>,水稻结实率和千粒重均下降,减产幅度达4.1%<sup>[31]</sup>。但也有研究表明,使用乙烯利能够提高作物产量。水稻分蘖末期、扬花后7d各施用40%乙烯利450和1500 mL/hm<sup>2</sup>实现了显著增产效果,增产幅度达到7.9%<sup>[31]</sup>。小麦和玉米上使用乙烯利,也能提高产量,表现为株粒数、生殖穗的增加及倒伏的减少,或者穗粒数虽减少但百粒重却有所增加,最终导致产量增加<sup>[22,30,35-36]</sup>。乙烯利对产量的影响目前尚无一定论,这可能与乙烯利使用的浓度、时期及种植密度有关。因此,在保证倒伏率降低的情况下,如何提高产量是亟需解决的生产问题。

目前已有研究者对乙烯利应用于作物茎秆倒伏的分子机理进行了研究,结果发现乙烯利引起的差异表达基因主要分为6大类:信号转导、抗性相关、能量与代谢相关、转录因子相关、未知功能蛋白及未知基因<sup>[77]</sup>。乙烯利通过调节众多基因的表达来调控植株的生长,如调控谷胱甘肽S-转移酶、天冬氨酸蛋白激酶和生长素诱导蛋白,还通过调控乙烯合成关键基因ACS(Aminocyclopropane carboxylic acid(ACC) synthase)与ACO(ACC Oxidase)、木葡聚糖内糖基转移酶/水解酶基因、扩展蛋白基因家族和纤维素合成酶基因家族的表达来缩短茎秆节间长度<sup>[59,77]</sup>。然而,乙烯利引起的众多差异表达基因在作物茎秆倒伏中的分子机理还有待进一步研究,并为基因工程技术应用于改良作物的抗倒性提供理论基础。

#### 参考文献

- [1] YANG H C, WU L Q, HAN X F, et al. Effects of different nitrogen fertilizer levels on lodging and yield of rice[J]. *Agricultural science&technology*, 2012, 13(7): 1456-1459.
- [2] 赵黎明, 顾春梅, 陈淑洁, 等. 水稻倒伏研究及其影响因素分析[J]. *北方水稻*, 2009, 39(4): 66-70.
- [3] 王峰. 小麦倒伏的成因及对策[J]. *现代农业科技*, 2010(10): 91-94.
- [4] 王恒亮, 吴仁海, 朱昆, 等. 玉米倒伏成因与控制措施研究进展[J]. *河南农业科学*, 2011, 40(10): 1-5.
- [5] 宋朝玉, 张继余, 张清霞, 等. 玉米倒伏的类型、原因及预防、治理措施[J]. *作物杂志*, 2006(1): 36-38.
- [6] 王敬昌, 陈洁. 小麦倒伏原因与应对措施[J]. *农技服务*, 2009, 26(9): 32-32.
- [7] 艾治勇, 马国辉. 水稻倒伏研究现状[J]. *作物研究*, 2004(5): 334-338.
- [8] 王文颖, 李彦生, 周印富. 玉米倒伏及其影响因素(综述)[J]. *河北农业职业技术学院学报*, 1998, 12(3): 59-63.
- [9] 丰光, 黄长玲, 邢锦丰. 玉米抗倒伏的研究进展[J]. *作物杂志*, 2008(4): 12-14.
- [10] 游晴如, 马宏敏, 杨东, 等. 水稻倒伏性研究进展[J]. *安徽农学通报*, 2007, 13(6): 84-86.
- [11] RADEMACHER W. Plant growth regulators: Backgrounds and uses in plant production[J]. *Journal of plant growth regulation*, 2015, 34(4): 845-872.
- [12] 赵黎明, 萧长亮, 顾春梅, 等. 植物生长调节剂在水稻倒伏上的研究进展[J]. *北方水稻*, 2009, 39(3): 114-117.
- [13] 龙继锐, 马国辉, 许文艳, 等. 植物生长延缓剂立丰灵对杂交中稻抗倒性与产量的影响[J]. *杂交水稻*, 2011, 26(1): 56-60.
- [14] 谢汉忠, 李君, 吴丰魁, 等. 乙烯利对番茄品质影响及安全性分析[J]. *农业科技通讯*, 2012(11): 88-90.
- [15] 尚政, 张宇, 王萌, 等. 40%乙烯利水剂催熟对香蕉品质的影响[J]. *热带农业科学*, 2014, 34(6): 48-53.
- [16] FOSTER K R, TAYLOR J S. Response of barley to ethephon: Effects of rate, nitrogen, and irrigation[J]. *Crop science*, 1993, 33(1): 123-131.
- [17] TAKAYUKI K, KEN I. Identification and functional analysis of a locus for improvement of lodging resistance in rice[J]. *Plant physiology*, 2004, 134(2): 676-683.
- [18] 杨惠杰, 杨仁崔, 李义珍, 等. 水稻茎秆性状与抗倒性的关系[J]. *福建农业学报*, 2000, 15(2): 1-7.
- [19] 姚金保, 任丽娟, 张平平, 等. 小麦品种茎秆抗倒特性分析[J]. *江苏农业科学*, 2011, 39(2): 140-142.
- [20] 王永学, 张张辉, 刘宗华. 玉米抗倒伏性状的配合力效应及通径分析[J]. *河南农业大学学报*, 2011, 45(1): 1-6.
- [21] 孙守钧, 裴忠有, 曹秀云, 等. 高粱抗倒的形态特征和解剖结构研究[J]. *内蒙古民族大学学报*, 1999, 9(1): 5-11.
- [22] CHANDIPOSHA M, CHIVENDE F. Effect of ethephon and planting density on lodged plant percentage and crop yield in maize (*Zea mays* L.) [J]. *African journal of plant science*, 2014, 8(2): 113-117.
- [23] SHEKOOFA A, EMAM Y. Maize (*Zea mays* L.) growth and yield response to ethephon application under water stress conditions[J]. *Iran agricultural research*, 2006, 24(2): 39-52.
- [24] SHEKOOFA A, EMAM Y. Plant growth regulator (ethephon) alters maize (*Zea mays* L.) growth, water use and grain yield under water stress[J]. *Journal of agronomy*, 2008, 7(1): 41-48.
- [25] KARIMI A, AMIRNIA R, TAJBAKSH M, et al. Effect of plant growth inducers on morpho-physiological traits of corn (*Zea mays* L.) [J]. *Life science journal*, 2012, 9(3): 1683-1688.
- [26] 聂乐兴, 姜兴印, 吴淑华, 等. 四种植物生长调节剂对高产玉米生理效应及产量影响[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2010, 41(2): 216-220.
- [27] 高波, 周亚冬, 李冬梅, 等. 乙烯利对春玉米生长发育及产量的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2009, 40(1): 13-17.
- [28] 张子学, 朱仕燕, 李文阳, 等. 化控剂-乙烯利对玉米植株主要性状和产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(3): 209-213.
- [29] 顾大路, 王伟中, 徐建明, 等. 植物生长调节剂在玉米上的应用效果研究[J]. *安徽农业科学*, 2003, 31(6): 1086-1088.
- [30] 张吉旺, 胡昌浩, 王空军, 等. 植物生长调节剂在玉米上的初步应用研究[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2003, 34(3): 343-346.
- [31] 孙万纯, 吴建中, 仇广灿, 等. 乙烯利等生长调节剂在直播水稻上的应用效果研究[J]. *安徽农学通报*, 2011, 17(4): 70-72.
- [32] 顾大路, 王伟中, 王红军, 等. 乙烯利在水稻中后期应用的效果研究[J]. *江苏农业科学*, 2003(5): 26-28.
- [33] RAMBURAN S, GREENFIELD P. Use of ethephon and chlormequat chloride to manage plant height and lodging of irrigated barley (cv. puma) when high rates of N-fertiliser are applied[J]. *South African journal of plant & soil*, 2007, 24(4): 181-187.
- [34] RAMBURAN S, GREENFIELD P. The effects of chlormequat chloride and ethephon on agronomic and quality characteristics of south african irrigated wheat [J]. *South African journal of plant & soil*, 2007, 24(2): 106-113.
- [35] PAVLISTA A D, HERGERT G W, BALTENSPERGER D D, et al. Reducing height and lodging of winter wheat[J]. *Crop management*, 2010, 9(1): 1-7.
- [36] SHEKOOFA A, EMAM Y. Effects of nitrogen fertilization and plant growth regulators (PGRs) on yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) cv. Shiraz. [J]. *Journal of agricultural science & technology*, 2008, 10(2): 101-108.
- [37] TRIPATHI S C, SAYRE K D, KAUL J N, et al. Growth and morphology of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) culms and their association with lodging: Effects of genotypes, N levels and ethephon[J]. *Field crops research*, 2003, 84(3): 271-290.
- [38] TRIPATHI S C, SAYRE K D, KAUL J N, et al. Lodging behavior and yield potential of spring wheat (*Triticum aestivum* L.): Effects of ethephon and genotypes[J]. *Field crops research*, 2004, 87(2/3): 207-220.
- [39] 龚建军, 赵桂琴, 马雪琴. 矮壮素与乙烯利对燕麦株高、产量及其构成因素的调节作用[J]. *草业科学*, 2008, 25(5): 74-77.
- [40] 董明辉, 张洪程, 戴其根, 等. 不同粳稻品种倒伏指数及其相关农艺性状的比较[J]. *吉林农业大学学报*, 2003, 25(2): 120-123.
- [41] ISLAM M S, PENG S, VISPERAS R M, et al. Lodging-related morphological traits of hybrid rice in a tropical irrigated ecosystem [J]. *Field crops research*, 2007, 101(2): 240-248.
- [42] 黄金堂. 二棱大麦茎秆性状与抗倒性关系的研究[J]. *麦类作物学报*, 2004, 24(3): 49-52.
- [43] 姚金保, 张平平, 任丽娟, 等. 小麦抗倒指数遗传及其与茎秆特性的相关分析[J]. *作物学报*, 2011, 37(3): 452-458.
- [44] 叶德练, 王庆燕, 张钰石, 等. 乙烯利和氮肥对玉米基部节间性状和抗折力的调控研究[J]. *中国农业大学学报*, 2015, 20(6): 1-8.
- [45] YE D L, ZHANG Y S, AL-KAISI M M, et al. Ethephon improved stalk strength associated with summer maize adaptations to environments differing in nitrogen availability in the north China plain [J]. *Journal of agricultural science*, 2015, 1: 1-18.
- [46] KASHIWAGI T, TOGAWA E, HIROTSU N, et al. Improvement of lodging resistance with QTLs for stem diameter in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Theoretical & applied genetics*, 2008, 117(5): 749-757.
- [47] ZHANG F Z, JIN Z X, MA G H, et al. Relationship between lodging res-

- sistance and chemical contents in culms and sheaths of japonica rice during grain filling[J]. *Rice science*, 2010, 17(4): 311–318.
- [48] 李红娇, 张喜娟, 李伟娟, 等. 超高产粳稻品种抗倒伏性的初步研究[J]. *北方水稻*, 2008, 38(2): 24–27.
- [49] 杨世民, 谢力, 郑顺林, 等. 氮肥水平和栽插密度对杂交稻茎秆理化特性与抗倒伏性的影响[J]. *作物学报*, 2009, 35(1): 93–103.
- [50] 田晓东, 边大红, 蔡丽君, 等. 高密度条件下化学调控对夏玉米抗茎倒伏能力的影响[J]. *华北农学报*, 2014, 29(S1): 249–254.
- [51] 田晓东. 乙烯利对夏玉米抗倒伏能力的影响研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2014: 23–27.
- [52] 朱占华. 植物生长调节剂对小麦茎秆抗倒伏能力及其产量和品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2011: 62–63.
- [53] 刘立军, 袁莉民, 王志琴, 等. 早种水稻倒伏生理原因分析与对策的初步研究[J]. *中国水稻科学*, 2002, 16(3): 225–230.
- [54] 宋东亮, 沈君辉, 李来庚. 高等植物细胞壁中纤维素的合成[J]. *植物生理学报*, 2008, 44(4): 791–796.
- [55] 郭玉华, 朱四光, 张龙步. 不同栽培条件对水稻茎秆生化成分的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2003, 34(2): 89–91.
- [56] 魏凤珍, 李金才, 王成雨, 等. 氮肥运筹模式对小麦茎秆抗倒伏性能的影响[J]. *作物学报*, 2008, 34(6): 1080–1085.
- [57] 马延华, 王庆祥. 玉米茎秆性状与抗倒伏关系研究进展[J]. *作物杂志*, 2012(2): 10–15.
- [58] 文廷刚. 植物生长调节剂对小麦抗倒伏能力、产量和品质的影响及其生理机理[D]. 南京: 南京农业大学, 2012: 22.
- [59] 叶德练. 乙烯利和氮肥运筹对玉米氮素吸收利用和基部节间生长的调控研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015: 44–57.
- [60] TRIPATHI S C, SAYRE K D, KAUL J N. Fibre analysis of wheat genotypes and its association with lodging: Effects of nitrogen levels and ethephon[J]. *Cereal research communications*, 2003, 31(3): 429–436.
- [61] 张丰转, 金正勋, 马国辉, 等. 灌浆成熟期粳稻抗倒伏性和茎鞘化学成分含量的动态变化[J]. *中国水稻科学*, 2010, 24(3): 264–270.
- [62] 杨长明, 杨林章, 颜廷梅, 等. 不同养分和水分管理模式对水稻抗倒伏能力的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(4): 646–650.
- [63] 马国辉, 邓启云. 超级杂交稻抗倒生理与形态机能研究—I. 培矮 64S/E32 与汕优 63 植株钾、硅和纤维素含量差异[J]. *湖南农业大学学报 (自然科学版)*, 2000, 26(5): 329–331.
- [64] 王爱英. 钾素对水稻生理功能的影响浅析[J]. *山西化工*, 2005, 25(1): 35–36.
- [65] 杨长明, 杨林章, 颜廷梅, 等. 不同养分和水分管理模式对水稻抗倒伏能力的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(4): 646–650.
- [66] JIAN F M, YAMAJI N. Silicon uptake and accumulation in higher plants[J]. *Trends in plant science*, 2006, 11(8): 392–397.
- [67] 张月玲, 王宜伦, 谭金芳, 等. 氮肥配施对夏玉米抗倒性和产量的影响[J]. *玉米科学*, 2012, 20(4): 122–125.
- [68] 王志春. 不同施肥水平对小麦生产的效应探讨[J]. *江苏农业科学*, 2007(6): 293–295.
- [69] 周青, 潘国庆, 施作家. 硅肥对小麦群体质量和产量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2001(3): 47–52.
- [70] HOFFMANNBENNING S, KENDE H. On the role of abscisic acid and gibberellin in the regulation of growth in rice[J]. *Plant physiology*, 1992, 99(3): 1156–1161.
- [71] KENDE H, VAN D K E, CHO H T. Deep water rice: A model plant to study stem elongation[J]. *Plant Physiology*, 1998, 118(4): 1105–1110.
- [72] RZEWUSKI G, SAUTER M. Ethylene biosynthesis and signaling in rice[J]. *Plant science*, 2008, 175(1/2): 32–42.
- [73] KOCH B L, MOORE T C. On ethylene and stem elongation in green pea seedlings[J]. *Plant physiology*, 1990, 93(4): 1663–1664.
- [74] 叶梅荣, 朱昌华, 甘立军, 等. 激素间相互作用对植物茎伸长生长的调控综述[J]. *中国农学通报*, 2007, 23(4): 228–231.
- [75] 卫晓轶, 张明才, 张燕, 等. 乙烯利对不同基因型玉米节间伸长和内源激素的影响[J]. *农药学报*, 2011, 13(5): 475–479.
- [76] 卫晓轶, 张明才, 李召虎, 等. 不同基因型玉米对乙烯利调控反应敏感性的差异[J]. *作物学报*, 2011, 37(10): 1819–1827.
- [77] 霍秀爱. 乙烯利诱导玉米节间缩短的分子遗传机制研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2014: 26–31.

(上接第 4 页)

少了平衡时间。通过 Scatchard 模型来评价 MIP 的吸附特性, 比较了红霉素分子印迹聚合物在其结构类似物以及食品中常见抗生素中的印迹效果, 显示出此方法制备的聚合物对红霉素有较好的特异性吸附能力。该研究建立了一种在实际样品中快速检测残留红霉素的方法, 该方法结合分子印迹聚合物的富集特异性以及紫外光谱检测快速高效的特点, 在牛奶和鸡蛋的实际食品样品检测中得到了较好的检测效果, 在红霉素检测相关研究中有重要意义, 具有广阔的应用前景。

## 参考文献

- [1] 张志刚. 动物性食品中兽药残留的原因分析及对策[J]. *现代农业科技*, 2008(13): 300–301.
- [2] 何方洋, 郝日沫, 万宇平, 等. 红霉素药物残留检测技术的研究进展[J]. *四川畜牧兽医*, 2010, 37(3): 31–33.
- [3] LEAL C, CODONY R, COMPAÑÓ R, et al. Determination of macrolide antibiotics by liquid chromatography[J]. *Journal of chromatography A*, 2001, 910(2): 285–290.
- [4] YANG Y Z, LIU X G, XU B S. Recent advances in molecular imprinting technology: Current status, challenges and highlighted applications[J]. *Chemical Society reviews*, 2011, 40(5): 2922–2942.
- [5] UEKAMA K, HIRAYAMA F, IRIE T. Cheminform abstract: Cyclodextrin drug carrier systems[J]. *Cheminform*, 1998, 29(39): 2045–2076.
- [6] BRESLOW R, DONG S D. Cheminform abstract: Biomimetic reactions catalyzed by cyclodextrins and their derivatives[J]. *Chemical reviews*, 1998, 98(5): 1997–2012.
- [7] HAN X, ZHONG Q, YUE D, et al. Separation of enantiomers of isochromene derivatives by HPLC using cyclodextrin-based stationary phases[J]. *Chromatographia*, 2005, 61(5): 205–211.
- [8] 陈慧, 王琴孙. 环糊精类高效液相色谱固定相的研究进展[J]. *色谱*, 1999(6): 533–538.
- [9] GATTUSO G, NEPOGODIEV S A, STODDART J F. Synthetic cyclic oligosaccharides[J]. *Chemical reviews*, 1998, 98(5): 1919–1958.
- [10] GIOVANNOLI C, ANFOSSI L, BIAGIOLI F, et al. Solid phase extraction of penicillins from milk by using sacrificial silica beads as a support for a molecular imprint[J]. *Microchimica acta*, 2013, 180(15/16): 1371–1377.
- [11] TANG W J, ZHAO T, ZHOU C H, et al. Preparation of hollow molecular imprinting polymer for determination of ofloxacin in milk[J]. *Analytical methods*, 2014, 6(10): 3309–3315.
- [12] SUN X, WANG J, LI Y, et al. Novel dummy molecularly imprinted polymers for matrix solid-phase dispersion extraction of eight fluorquinolones from fish samples[J]. *Journal of chromatography A*, 2014, 1359(15): 1–7.
- [13] JI S, ZHANG F, XI L, et al. Synthesis of molecularly imprinted polymer sorbents and application for the determination of aminoglycosides antibiotics in honey[J]. *Journal of chromatography A*, 2013, 1313(19): 113–118.
- [14] Song S, Wu A, Shi X, et al. Development and application of molecularly imprinted polymers as solid-phase sorbents for erythromycin extraction[J]. *Analytical & bioanalytical chemistry*, 2013, 3(8): 42–68.
- [15] LI H, GONG G L, CHEN S. Preparation and evaluation of molecular imprinted polymers of erythromycin[J]. *Key engineering materials*, 2012, 561(3): 1009–1015.
- [16] SERENA A, SELIM B, KARSTEN H, et al. Solid-phase synthesis of molecularly imprinted nanoparticles for protein recognition[J]. *Chemical communications*, 2013, 49(60): 6746–6748.