

# 老化玉米种子在外源 NO 供体硝普钠作用下的萌发和生理反应

赵欣欣, 王 奇, 孙明春, 陈 云, 赖阳柳, 周晓英

(吉林农业大学农学院, 长春 130118)

**摘 要:** 以玉米品种先玉 335 和良玉 99 经高温高湿老化的种子为试材, 通过外源一氧化氮(NO)供体硝普钠(SNP)的不同浓度溶液浸种处理并进行发芽试验, 研究老化玉米种子的发芽、活力特性及萌发后幼苗的生理反应。结果表明, 老化玉米种子在一定的 SNP 浓度时, 两个品种均表现为生活力、发芽势、发芽指数、活力指数显著高于对照( $P < 0.05$ ), 其中当 SNP 浓度为 1.50 和 1.25 mmol/L 时以上各指标达最高; 当 SNP 浓度为 1.25 mmol/L 时, 老化玉米种子萌发后幼苗的 SOD、POD 和 CAT 等活性酶含量最高( $P < 0.05$ ), 其次是 1.00 mmol/L 处理。经 SNP 处理的老化种子提高了幼苗内的游离脯氨酸含量和可溶性糖含量, 但对 MDA 含量没有显著影响( $P < 0.05$ )。综合而言, SNP 浓度为 1.25 mmol/L 时, 老化玉米种子的萌发能力、活力及幼苗生理特性改善和提高效果最显著。

**关键词:** 玉米; 老化种子; NO; 生理指标

**中图分类号:** S513.01

**文献标识码:** A

## Response of Germination and Physiological of Maize Aging Seeds under the Influence of Exogenous Nitric Oxide Donor SNP

ZHAO Xin-xin, WANG Qi, SUN Ming-chun, CHEN Yun, LAI Yang-liu, ZHOU Xiao-ying

(College of Agriculture, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

**Abstract:** The seeds from maize varieties Xianyu335 and Liangyu99 aged with high temperature and high humidity selected as experimental materials, through soaked in different concentrations of SNP of exogenous Nitric Oxide donor and then germinated. The germination character, vigor character and physiology response of germinated seedlings about the aging seeds were studied. The results showed that, under the action of some SNP concentration, the viability, germination energy, germination percentage and vigor index of the two varieties were higher than the check, especially 1.50 mmol/L and 1.25 mmol/L ( $P < 0.05$ ). The contents of SOD, POD and CAT were the highest at the SNP concentration 1.25 mmol/L, the next was 1.00 mmol/L, and the content of proline and soluble sugar from the seedlings of the aging seeds were higher than the check but the content of MDA showed no significant influence ( $P \leq 0.05$ ). Therefore the germination ability, vigor and physiology character were significantly improved and enhanced under the SNP concentration 1.25 mmol/L.

**Key words:** Maize; Aging seed; Nitric Oxide; Physiology index

2013 年我国大量玉米种子积压<sup>[1]</sup>, 势必导致种子衰老和劣变即种子老化。生产实践已充分表明,

种子老化后会导致发芽率降低、幼苗长势差, 最终影响作物产量。因此, 有效激活老化种子, 使其正常发挥萌发能力和幼苗生长能力, 改善老化的不利影响, 对于节约种子、提高生产率具有重要意义。

一氧化氮(nitric oxide, NO)作为植物中重要的信号分子, 极不稳定, 短时间内可透过生物膜并扩散, 且不需与受体结合而发挥生理作用。NO 常用外源供体是硝普钠 SNP, 其进入细胞后产生 NO<sup>+</sup><sup>[2]</sup>。NO 可促进种子萌发<sup>[3]</sup>, 并在调节植物的生物和非生物胁迫方面起重要作用。很多研究已探索种子遭受各

收稿日期: 2014-07-07

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(31200231), 吉林省教育厅项目(200953)、吉林省科技厅自然基金项目(201215185)

作者简介: 赵欣欣(1974-), 女, 双辽人, 博士, 副教授, 主要从事种子生物学及表观遗传学研究。Tel: 13504467959  
E-mail: zxx130118@sina.com

种逆境胁迫如异常温度、盐、重金属、紫外线时NO所起的作用<sup>[4-13]</sup>,结果均表明,NO可以促进逆境胁迫下的种子萌发和幼苗生长,缓解逆境对植物生长发育造成的不利影响。目前,有关NO和种子所受老化“胁迫”下的萌发和幼苗生长的关系研究鲜见报道。本研究探讨老化玉米种子在外源NO供体硝普钠(SNP)作用下的萌发能力和生理反应,研究外源NO对老化玉米种子的活性作用,从而为有效利用老化种子、提高种子利用率提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

玉米品种先玉335和良玉99,均为当年收获种子。

### 1.2 试验处理

#### 1.2.1 老化处理

将种子放置于尼龙纱网袋,均匀平铺在种子老化箱(LH-150S)中,高温(45±1℃)、高湿(95%相对湿度)加速老化处理,保证种子能够充分接触潮湿水蒸气,老化72 h,室内晾干3~4 d后备用。

#### 1.2.2 SNP处理

硝普钠SNP( $\text{Na}_2[\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO}] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )作为外源NO供体,将SNP配制成0.25、0.5、0.75、1.0、1.25、1.5、1.75 mmol/L不同浓度的溶液,将老化种子在上述浓度SNP溶液分别浸泡12 h,以清水处理作为对照。

#### 1.2.3 发芽试验

将经不同浓度的SNP处理的老化种子进行发芽试验,3次重复,每重复50粒,以消毒细沙作为发芽床,光照培养箱中22℃~26℃变温培养7 d,前3 d用等量相应浸种浓度的SNP溶液喷洒发芽床,后4 d正常供水。每日记载发芽种子数量。

### 1.3 测定指标和方法

#### 1.3.1 发芽及活力指标

发芽终期测定幼苗鲜重、苗高、根长,计算发芽势、发芽率、发芽指数(GI)、活力指数(VI)等。

$GI = \sum G_t / D_t$ ,  $D_t$ :发芽日数,  $G_t$ :与  $D_t$  对应的每天发芽种子数;

$VI = GI \times S$ ,  $S$ :一定时期内正常幼苗单株平均重(g)。

#### 1.3.2 生理指标

将各浓度SNP处理的幼苗长至7 d时,选取幼苗叶片进行生理指标测定。超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定:以每分钟抑制氮蓝四唑(NBT)光还原50%为1个酶活力单位(U),酶活性以U/g表示<sup>[14]</sup>;过氧化物酶活性(POD)测定:愈创木酚显色法,以每分钟减少0.01个A值所需的酶量为1个活性单位(U),酶活

性以U/g表示;过氧化氢酶活性(CAT)测定:紫外吸光法,以每分钟减少0.01个A值所需的酶量为1个活性单位(U),酶活性以U/g表示;丙二醛(MDA)含量:硫代巴比妥酸(TBA)反应法,以 $\mu\text{mol/g}$ 表示;游离脯氨酸含量:茚三酮比色法测定,单位为 $\mu\text{g/g}$ ;可溶性糖含量:蒽酮法,单位为%。

### 1.4 数据统计分析

采用DPS 9.50数据处理系统进行统计。样本间的差异显著性用Duncan's检验。用Microsoft Excel 2003制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 SNP处理后老化种子的生活力、发芽和活力的变化

生活力是种胚的发芽能力或种子的潜在生命力,但是有生活力的种子未必都能长成正常的幼苗,这是同发芽率区别之处。各种浓度的SNP处理老化种子后,老化种子生活力均显著提高,激发种胚内已老化细胞重新恢复活性。对于先玉335,SNP浓度为1.25、1.50和1.00 mmol/L时老化种子的生活力最高,且3种浓度间无显著差异,SNP浓度1.25 mmol/L时可使老化种子生活力可提高26个百分点。对于良玉99,SNP浓度为1.25和1.00 mmol/L的生活力最高,为85%。

发芽势反映了种子的萌发速度,发芽势越高,种子发芽越快。从表1中可以看出,对于先玉335,除0.25 mmol/L浓度的SNP处理外,其他处理的发芽势都同对照存在显著的差异性( $P < 0.05$ ),其中SNP浓度为1.50 mmol/L时先玉335的发芽势最高;其次是1.25 mmol/L的SNP浓度,两种浓度间无显著的差异。对于良玉99,各浓度SNP处理过的种子发芽势都显著高于对照种子( $P < 0.05$ ),其中以1.50 mmol/L的浓度SNP处理后发芽势最高。

发芽率是种子发芽试验终期发芽能力的反应。先玉335的发芽率在1.25 mmol/L的SNP浓度时发芽率最高,其次是1.50 mmol/L的SNP浓度,二者均高于对照( $P < 0.05$ );SNP浓度为0.25和1.75 mmol/L时,先玉335的发芽率和对照没有显著差异。对于良玉99,浓度为1.50和1.25 mmol/L时分别为最高,且二者发芽率没有显著差异,表明良玉99老化种子的发芽率在两种浓度的SNP的作用下均得到显著提高( $P < 0.05$ )。

通常发芽指数越高,表明种子每天的发芽速度快,即种子活力高。在外源NO的作用下两个品种表现相同的趋势,即经SNP处理后均可显著提高老

化种子的发芽指数。先玉335的发芽指数在SNP浓度为1.25 mmol/L时达到最高值,显著高于未经SNP处理的老化种子,二者差值达37.82;其次为1.50 mmol/L的SNP溶液浓度。对于良玉99,发芽指

数的最高值是SNP浓度为1.50 mmol/L时,不仅显著高于对照处理,而且也显著高于其他SNP溶液浓度( $P < 0.05$ ),对于良玉99,SNP浓度为1.50 mmol/L时,对于提高种子的活力是最有效的浓度。

表1 老化玉米种子在外源NO作用下的发芽及活力

Table 1 The germination and vigor of maize aging seeds under the action of exogenous NO

SNP浓度 (mmol/L)	生活力(%)		发芽势(%)		发芽率(%)		发芽指数		活力指数	
	Viability		Germination energy		Germination percentage		Germination index		Vigor index	
SNP concentration	先玉335	良玉99	先玉335	良玉99	先玉335	良玉99	先玉335	良玉99	先玉335	良玉99
0.00(CK)	62 e	58 e	5 e	12 e	45 cd	47 e	13.75 e	18.31 f	10.83 f	13.72 f
0.25	68 d	64 d	11 e	22 d	52 c	59 c	19.41 d	26.27 e	15.39 e	20.76 e
0.50	80 b	76 b	9 e	21 d	64 b	64 bc	20.13 d	27.23 e	16.15 e	21.93 e
0.75	81 b	79 b	19 d	31 c	67 b	59 c	25.64 c	31.72 d	22.53 d	25.91 d
1.00	87 a	85 a	25 c	33 bc	67 b	61 c	31.25 b	33.69 cd	27.63 c	27.28 cd
1.25	88 a	85 a	51 a	39 ab	82 a	68 ab	51.57 a	40.09 b	46.52 a	33.93 b
1.50	86 a	78 b	55 a	45 a	77 a	71 a	50.84 a	46.65 a	42.38 b	37.64 a
1.75	72 c	72 c	34 b	41 a	42 d	53 d	29.12 bc	35.37 c	25.36 cd	28.51 c

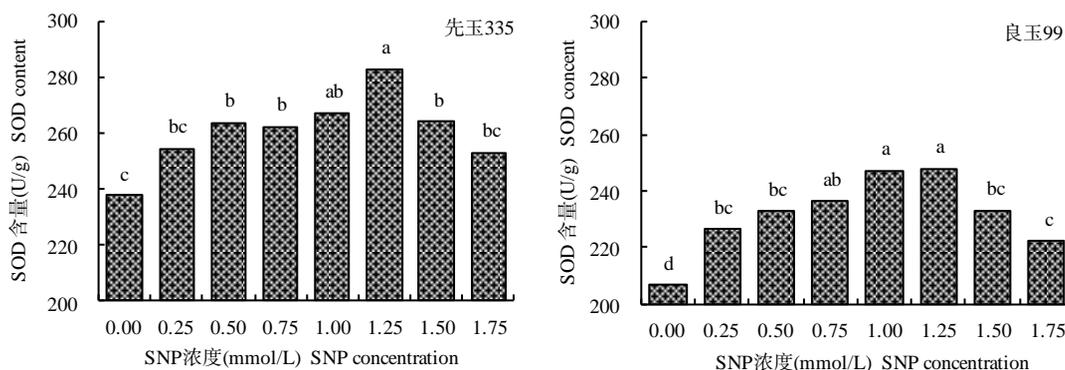
注:同列数值字母表示差异显著性( $P < 0.05$ )。

Note: Different letters within the same column indicated significant difference ( $P < 0.05$ ).

活力指数反应了发芽能力的同时,也和幼苗生长量有关,种子活力越高,幼苗更壮实、抵抗逆境能力越强。老化玉米种子先玉335的活力指数经过1.25 mmol/L的SNP处理后,显著高于对照及其他SNP浓度的处理,其他浓度的SNP溶液作用下也不同程度上提高了老化种子的活力指数( $P < 0.05$ )。各种不同的SNP浓度下,良玉99的活力指数也显著高于对照。因此,老化种子的活力在外源NO的作用下得到显著地恢复。

## 2.2 老化玉米种子在外源NO作用下萌发后幼苗SOD含量的变化

从图1中可知,经过不同浓度SNP处理后,对于先玉335,除了0.25和0.75 mmol/L外,其他浓度的SNP处理后,SOD值均显著高于对照,当SNP为1.25 mmol/L时,SOD值最高,为282.7 U/g;其次是浓度为1.00 mmol/L,二种浓度间没有显著的差异,说明经SNP处理后,老化种子萌发后的幼苗中SOD值都存在不同程度的增加。对于良玉99,各个浓度的SNP处理后SOD值均显著增加,最高值为SNP浓度是1.25和1.00 mmol/L,表明对于良玉99经过SNP处理后幼苗都表现出高于对照的SOD值。



注:图中字母表示不同浓度的SNP处理差异显著性( $P < 0.05$ )。下同。

Note: The letters within the same column indicated significant difference of different SNP concentration ( $P < 0.05$ ). The same below.

图1 不同SNP浓度处理后的玉米老化种子萌发后幼苗SOD含量

Fig.1 SOD content of maize seedling from aging seeds dealt with the different SNP concentrations

### 2.3 老化种子在外源NO作用下萌发后幼苗POD含量的变化

图2可以看出,先玉335在SNP浓度为1.25、1.0、1.50和0.75 mmol/L时,POD值均显著高于未经SNP处理的老化种子,其他处理的POD含量同对照无显著差异,其中SNP浓度为1.25 mmol/L时POD含

量为53.7 U/g,显著高于其他处理;其次是1.00、1.50 mmol/L。对于良玉99,POD含量除0.25、1.75 mmol/L外,其他浓度的SNP下POD含量均显著高于对照,1.25、1.00、0.75和1.50 mmol/L各浓度间的POD含量没有显著差异,表明一定浓度的SNP作用下可以提高玉米幼苗体内的POD含量。

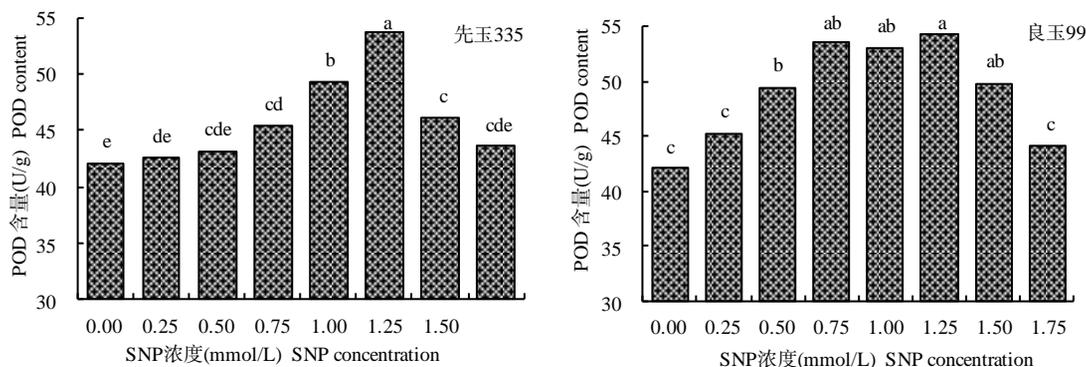


图2 不同SNP浓度处理后的玉米老化种子萌发后幼苗的POD含量

Fig.2 POD content of maize seedling from aging seeds dealt with the different SNP concentrations

### 2.4 老化种子在外源NO作用下萌发后幼苗CAT的变化

从图3中可以看出,先玉335老化种子在不同浓度的SNP作用下,浓度为0.25、0.50和1.75 mmol/L时和对照没有显著的差异;其他浓度处理间CAT含量均存在显著的差异,含量最高的是SNP浓度为1.25 mmol/L时,CAT含量为485.7 U/g,高出对照

75.4 U/g;其次是浓度为1.00和1.50 mmol/L,表明先玉335只有SNP的浓度达到一定时才能显著促进老化种子萌发的幼苗内CAT的合成。对于良玉99,所有浓度的SNP处理均显著提高了CAT的含量,最高值是SNP浓度为1.25 mmol/L时,为582.8 U/g,表明良玉99老化种子萌发后的幼苗内CAT合成比先玉335更敏感,少量的SNP就可以促进CAT的产生。

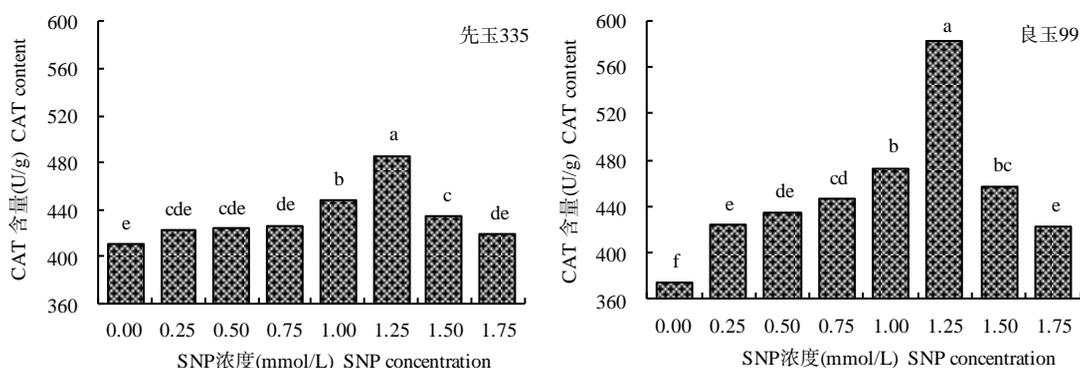


图3 不同SNP浓度处理后的玉米老化种子萌发后幼苗的CAT含量

Fig.3 CAT content of maize seedling from aging seeds dealt with the different SNP concentrations

### 2.5 老化种子在外源NO作用下萌发后幼苗丙二醛的变化

从图4中可以看出,先玉335的丙二醛含量虽然不同浓度的SNP处理下存在着差异,但通过统计学表明全部处理与对照均未出现显著性的差异。良玉99也有相似的结果产生,即在各种浓度的SNP作用下萌发的老化种子所形成幼苗丙二醛含量无显

著的差异,表明种子在老化胁迫下再萌发时外源NO的作用下未能导致MDA含量显著性的变化。

### 2.6 老化种子在外源NO作用下萌发后幼苗游离脯氨酸的变化

从图5可以看出,老化种子在外源NO作用下,先玉335的幼苗游离脯氨酸含量除SNP浓度为0.25和1.75 mmol/L外,其余SNP浓度均显著高于对照,

其中SNP浓度为1.25 mmol/L时游离脯氨酸含量最高,显著高于其他处理。良玉99的游离脯氨酸含量也表现出相似的结果,除1.75 mmol/L外,其余SNP

浓度处理,游离脯氨酸含量均比对照显著增加,最高值100.98  $\mu\text{g/g}$ ,比对照高出42.20  $\mu\text{g/g}$ 。

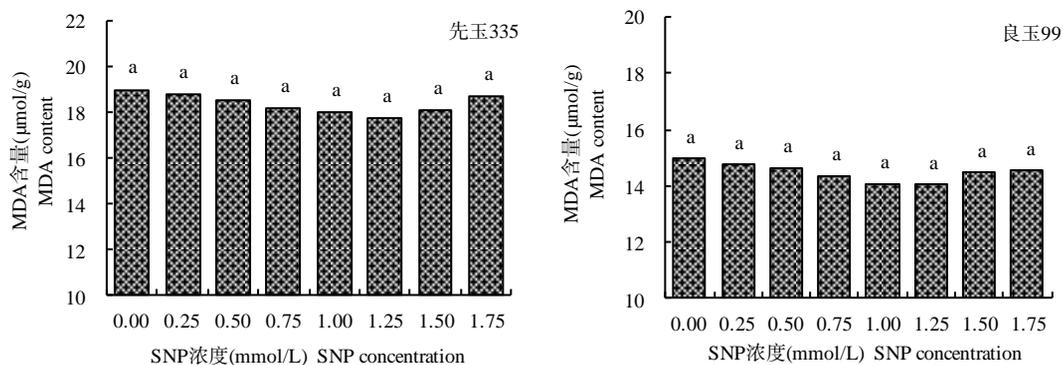


图4 不同SNP浓度处理后的玉米老化种子萌发后幼苗的MDA含量

Fig.4 MDA content of maize seedling from aging seeds dealt with the different SNP concentrations

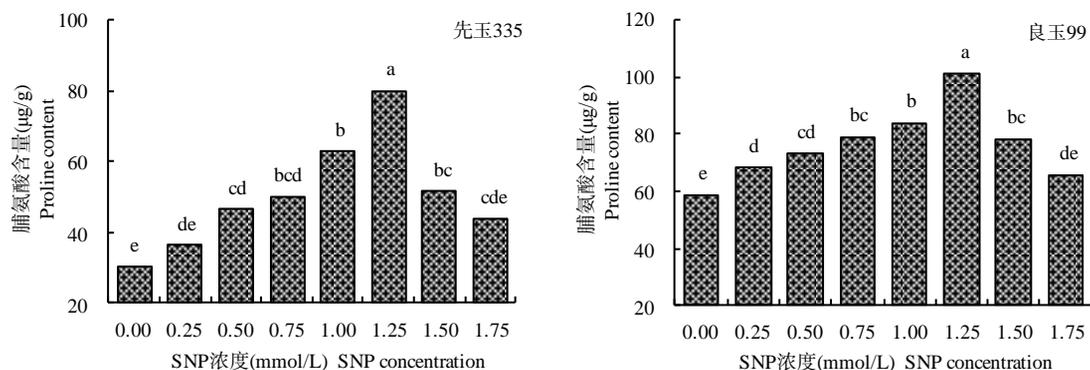


图5 不同SNP浓度处理后的玉米老化种子萌发后幼苗的脯氨酸含量

Fig.5 Proline content of maize seedling from aging seeds dealt with the different SNP concentrations

## 2.7 老化种子在外源NO作用下萌发后幼苗可溶性糖含量的变化

对于可溶性糖含量(图6),先玉335老化种子经SNP处理后幼苗内的可溶性糖含量在SNP浓度为1.25和1.00 mmol/L时显著高于对照;其他浓度尽管

比对照高,但没有差异显著性。良玉99同先玉335的结果相似,均为1.25和1.00 mmol/L两种浓度的SNP下可溶性糖含量与对照存在显著的差异,其他浓度下均未与对照存在显著的差异。

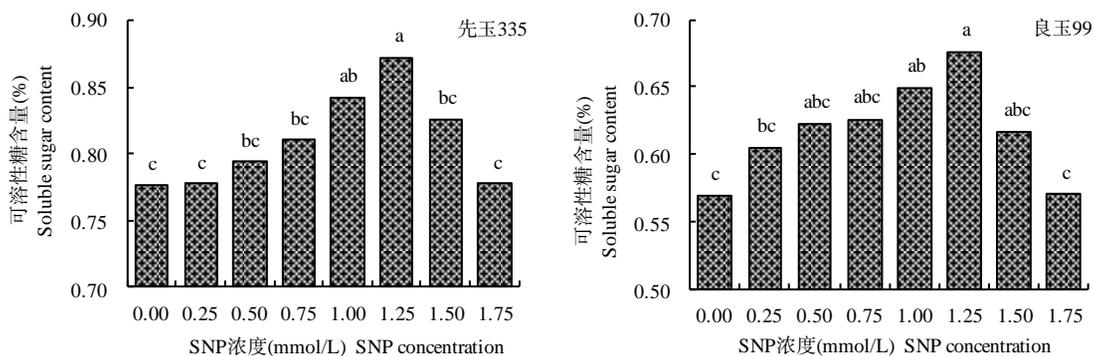


图6 不同SNP浓度处理后的玉米老化种子萌发后幼苗的可溶性糖含量

Fig.6 Soluble sugar content of maize seedling from aging seeds dealt with the different SNP concentrations

### 3 结论与讨论

在本试验条件下,外源NO可缓解种子老化“胁迫”,促进种子萌发,提高种子活力,增强幼苗内抗氧化能力。1.25 mmol/L的外源SNP浓度为最佳,其次是1.00 mmol/L。

生活力、发芽率和活力是种子的生命能力和活性的最基本反映,是决定优良品种发挥高产、优质的前提条件,若种子质量差,品种的优良特性无法体现。种子一旦老化,发芽能力和活力大幅下降<sup>[15,16]</sup>,且各种生理特性减弱。已有研究表明,适宜浓度SNP可有效促进玉米、小麦、花生等种子的萌发,调动种子生命活性<sup>[17]</sup>。本研究表明,经外源NO供体SNP处理后,老化玉米种子的发芽和活力指标得到显著提高,但不同浓度SNP间存在差异,证实外源NO处理可有效激发老化种子的生产潜能。

种子老化或衰老导致抗氧化系统能力下降,不能有效抑制活性氧簇,导致 $O_2^-$ 、 $H_2O_2$ 得到累积,加速细胞的衰老和解体<sup>[18]</sup>。SOD和POD具有植物清除体内多余的 $O_2^-$ 和 $H_2O_2$ 等活性氧的作用,减少活性氧积累,维持细胞膜结构完整。过氧化氢酶(CAT)则可促使 $H_2O_2$ 分解为分子氧和水,使细胞免遭 $H_2O_2$ 的毒害。研究发现,外源NO可提高SOD、POD、CAT等酶的生理活性并缓解冷胁迫的伤害<sup>[19]</sup>。本实验表明,外源NO可提高3种活性酶的活性,对于提高对于幼苗持续正常生长具有重要的生理作用,增强了玉米幼苗对自由基的清除能力,降低膜脂过氧化程度,从而减轻对细胞的伤害作用,这可能是外源NO(SNP)缓解老化胁迫促进种子萌发和幼苗生长的内在基础。有学者认为,SOD、CAT活性提高是由于NO作为信号分子提高相关编码基因的表达的结果<sup>[20]</sup>。MDA作为膜脂氧化的产物,陈银萍等<sup>[21]</sup>研究发现,SNP可以抑制水分胁迫下玉米幼苗叶片MDA含量的上升,本研究中在SNP作用下老化玉米种子萌发幼苗内MDA含量并无显著改变,其中原因有待研究。SNP处理盐胁迫下的水稻、辣椒等种子后脯氨酸含量增加,本研究SNP处理老化玉米种子也可提高幼苗中脯氨酸含量( $P<0.05$ ),这与他人在水稻和辣椒种子遭受盐胁迫的研究中也有相似结论<sup>[22]</sup>。有研究表明,NO是叶片衰老的负调节因子,且与乙烯的相互作用有关<sup>[23]</sup>。NO的对种子衰老的调控作用和机制,仍需更多验证。

#### 参考文献:

[1] 佟屏亚. 2013年中国种业要点评[J]. 中国种业, 2014(1): 15-17.

- Tong P Y. The comment on important things of China seed industry in 2013[J]. China Seed Industry, 2014(1): 15-17. (in Chinese)
- [2] Delledonne M, Xia Y J, Dixon R A. et al. Nitric oxide functions as a signal in plant disease resistance[J]. Nature, 1998, 394: 585-588.
- [3] Bai X G, Yang L M, Tian M H, et al. Nitric oxide enhances desiccation tolerance of recalcitrant antiaris toxicaria seeds via protein S-nitrosylation and carbonylation[J]. Plos One, 2011, 6(6): 20714.
- [4] Uchida A, Jagendorf A T, Hibino T, et al. Effects of hydrogen peroxide and nitric oxide on both salt and heat stress tolerance in rice[J]. Plant Sci., 2002, 163: 515-523.
- [5] 杨伟,陈发棣,陈素梅,等. 一氧化氮对高温胁迫下菊花生理特性的影响[J]. 南京农业大学学报, 2011, 34(1): 41-45.
- Yang W, Chen F D, Chen S M, et al. Effects of exogenous nitric oxide on physiological characteristics in chrysanthemum under heat stress[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2011, 34(1): 41-45. (in Chinese)
- [6] Bai X G, Yang L M, Yang Y Q, et al. Deciphering the protective role of nitric oxide against salt stress at the physiological and proteomic levels in maize[J]. J. Proteome Res., 2011, 10(10): 4349-4364.
- [7] Wang Y Q, Li L, Cui W T, et al. Hydrogen sulfide enhances alfalfa (*Medicago sativa*) tolerance against salinity during seed germination by nitric oxide pathway[J]. Plant and Soil, 2012, 351(1-2): 107-119.
- [8] 周万海,师尚礼,寇江涛. 一氧化氮对NaCl胁迫下苜蓿种子萌发的影响[J]. 核农学报, 2012, 26(4): 710-716.
- Zhou W H, Shi S L, Kou J T. Effect of nitric oxide on alfalfa seed germination under NaCl stress[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2012, 26(4): 710-716. (in Chinese)
- [9] 肖强,陈娟,吴飞华,等. 外源NO供体硝普钠(SNP)对盐胁迫下水稻幼苗中叶绿素和游离脯氨酸含量以及抗氧化酶的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(10): 1849-1853.
- Xiao Q, Chen J, Wu F H, et al. Effects of exogenous nitric oxide donor SNP on contents of chlorophyll and free proline, activity of antioxidative enzyme in rice seedlings under NaCl stress[J]. Acta Gonomica Sinica, 2008, 34(10): 1849-1853. (in Chinese)
- [10] 李翠芳,刘连涛,孙红春,等. 外源NO对NaCl胁迫下棉苗主要形态和相关生理性状的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(9): 1864-1872.
- Li C F, Liu L T, Sun H C, et al. Effects of exogenous nitric oxide on main growth and physiological characteristics of seedlings of cotton under NaCl stress[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(9): 1864-1872. (in Chinese)
- [11] 魏学玲,史如霞,贾凌云,等. 外源一氧化氮对铅胁迫下小麦种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 植物研究, 2011, 31(1): 34-39.
- Wei X L, Shi R X, Jia L Y, et al. Effects of exogenous nitric oxide on seed germination and physiological characteristics of wheat seedlings under lead stress[J]. Bulletin of Botanical Research, 2011, 31(1): 34-39. (in Chinese)
- [12] 陈秀兰,何俊瑜,任艳芳,等. 外源硝普钠对镉胁迫下水稻种子萌发和幼苗生理特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2012, 38(1): 136-139.
- Chen X L, He J Y, Ren Y F, et al. Effect of nitroprusside on seed germination and seedling physiological characteristics of rice under

- cadmium stress[J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2012, 38(1): 136-139. (in Chinese)
- [13] 刘福霞, 帖海龙, 高丽丽, 等. 外源NO对UV-B胁迫下小麦幼苗生长、活性氧组分和光合特性的影响[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(9): 43-50.
- Liu F X, Tie H L, Gao L L, et al. Effects of exogenous nitric oxide on seedling growth, reactive oxygen species and photosynthetic characteristic of wheat under UV-B stress[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(9): 43-50. (in Chinese)
- [14] 张治安, 陈展宇. *植物生理学实验技术*[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2012.
- [15] 渠云芳, 马金虎, 贺润平, 等. 高温老化对两个玉米品种种子活力发芽指标影响的研究[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(2): 156-159.
- Qu Y F, Ma J H, He R P, et al. Study on the high temperature ageing influence on germination, indexes of seeds of two varieties of maize[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(2): 156-159. (in Chinese)
- [16] 黄雪彦, 刘丕庆, 彭懿紫, 等. 不同加速老化条件下高油玉米单交种与普通玉米单交种种子活力的比较[J]. *玉米科学*, 2003, 11(增刊): 36-38.
- Huang X Y, Liu P Q, Peng Y Z, et al. Seed vigor comparisons of the high oil corn hybrids and the common corn hybrids under different accelerated aging conditions[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2003, 11(S): 36-38. (in Chinese)
- [17] 张秀玮, 董元杰, 邱现奎, 等. 外源NO对不同作物种子萌发、幼苗生长及抗氧化酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2): 397-404.
- Zhang X W, Dong Y J, Qiu X K, et al. Effects of exogenous nitric oxide on seed germination, seedling growth and antioxidant enzyme activities of several plant species[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(2): 397-404. (in Chinese)
- [18] 刘霞, 刘菲. 蓝萼香茶菜种子人工老化过程中生理生化特性的研究[J]. *种子*, 2012, 31(4): 27-30.
- Liu X, Liu F. Study on physiological and biochemical characteristics in seed artificial aging of *Rabdosia japonica*(Burm. f.) Hara[J]. *Seed*, 2012, 31(4): 27-30. (in Chinese)
- [19] 汤红玲, 李江, 陈惠萍. 外源一氧化氮对香蕉幼苗抗冷性的影响[J]. *西北植物学报*, 2010, 30(10): 2028-2033.
- Tang H L, Li J, Chen H P, et al. Effects of exogenous nitric oxide on chilling-resistance of banana seedlings[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2010, 30(10): 2028-2033. (in Chinese)
- [20] 刘维仲, 张润杰, 裴真明, 等. 一氧化氮在植物中的信号分子功能研究: 进展和展望[J]. *自然科学进展*, 2008, 18(1): 10-24.
- Liu W Z, Zhang R J, Pei Z M, et al. Study on signal molecular function of NO in plants[J]. *Progress in Natural Science*, 2008, 18(1): 10-24. (in Chinese)
- [21] 陈银萍, 陶玲, 杨莉, 等. 一氧化氮对水分胁迫下玉米种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. *广西植物*, 2010, 30(5): 672-677.
- Chen Y P, TAO L, Yang L, et al. Effects of nitric oxide on seed germination and physiological reaction of maize seedlings under water stress[J]. *Guihaia*, 2010, 30(5): 672-677. (in Chinese)
- [22] 雍山玉, 郁继华, 王燕燕, 等. 外源一氧化氮对盐胁迫下辣椒种子萌发和幼苗生理的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2007, 42(4): 51-55.
- Yong S Y, Yu J H, Wang Y Y, et al. Effects of exogenous nitric oxide on seed germination and seedling physiological characteristics of pepper under salt stress[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2007, 42(4): 51-55. (in Chinese)
- [23] Mishina T E, Lamb C, Zeier J. Expression of a nitric oxide degrading enzyme induces a senescence programme in *Arabidopsis*[J]. *Plant Cell Environ*, 2007, 30(1): 39-52.

(责任编辑:高阳)