

外源一氧化氮对七叶一枝花种子萌发的影响

李梅香, 李海明, 宋发军, 张丽, 张蕊, 孟艳艳*

(中南民族大学生命科学学院, 生物技术国家民委重点实验室, 武陵山区特色资源植物种质保护与利用湖北省重点实验室, 湖北武汉 430074)

摘要 [目的]探究外源一氧化氮(NO)处理对七叶一枝花种子萌发及其相关生理指标的影响。[方法]检测了不同浓度硝普钠(NO供体)对七叶一枝花种子萌发的促进效果,并在此基础上,探讨了最适浓度硝普钠处理后七叶一枝花种子萌发过程中淀粉、可溶性蛋白以及可溶性糖等含量的变化情况。[结果]100 $\mu\text{mol/L}$ 硝普钠促进七叶一枝花种子的萌发效果最为明显;与对照相比,不同时间段下硝普钠处理组种子中,NO含量在45~90 d显著高于对照组;可溶性糖含量总体上高于对照,且在15~45 d有显著差异;淀粉含量在15~45 d显著低于对照组; β 淀粉酶活力在萌发早期显著高于对照组,且总淀粉酶活力的变化与 β 淀粉酶活力变化趋势一致;可溶性蛋白含量分析中,处理组与对照组无显著差异,都有随萌发推进而呈现下降的趋势。[结论]100 $\mu\text{mol/L}$ 硝普钠促进七叶一枝花种子的萌发可能是通过提高种子萌发早期淀粉酶的活性,促进淀粉的水解和可溶性糖的产生,以及提高萌发期间种子内源NO的含量而实现。

关键词 七叶一枝花;一氧化氮;种子萌发;影响

中图分类号 S567.23 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)05-0058-04

Effects of Exogenous Nitric Oxide on the Seed Germination of *Paris polyphylla* var. *chinesis*

LI Mei-xiang, LI Hai-ming, SONG Fa-jun et al (Key Laboratory of Biotechnology of the State Ethnic Affairs Commission, Hubei Provincial Key Laboratory for Protection and Application of Special Plant Germplasm in Wuling Area of China, College of Life Sciences, South-Central University for Nationalities, Wuhan, Hubei 430074)

Abstract [Objective] The research aimed to study the effects of exogenous nitric oxide(NO) on the germination and the related physiological indices of seeds in *Paris polyphylla*. [Method] The effects of different concentration of sodium nitroprusside (NO donor) on seed germination in *Paris polyphylla* was detected. And on the basis of this, the changes of starch, soluble protein and soluble sugar in the process of seed germination of *Paris polyphylla* were tested by the optimal concentration of sodium nitroprusside. [Result] The effect of 100 $\mu\text{mol/L}$ sodium nitroprusside on seed germination was the most obvious. Comparison with the control, in the nitroprusside group under different time periods, NO content in 45-90 d was significantly higher than the control group; The soluble sugars content were higher than that in the control, and there was a significant difference between 15 and 45 days. Starch content was significantly lower than that in the control group in 15-45 days. The activity of β -amylase in the early stage of germination was significantly higher than that in the control group, and the change of total amylase activity was in accordance with the change trend of amylase activity. Soluble protein content analysis, the treatment group and the control group had no significant difference, on the whole showed a downward trend with the germination and progress. [Conclusion] 100 $\mu\text{mol/L}$ sodium nitroprusside promoting germination effect of *Paris polyphylla* may be achieved by increasing the activity of amylase in the early stage of seed germination, promoting the hydrolysis of starch and producing the soluble sugar, and improving the contents of endogenous NO during germination.

Key words *Paris polyphylla* var. *chinesis*; Nitric oxide; Seed germination; Effect

七叶一枝花(*Paris polyphylla* var. *chinesis*)又名重台草、草河车等,是百合科重楼属多年生草本植物^[1],其根茎具有止血化痰、抑菌、镇痛、抗细胞毒素、抵制肿瘤和免疫调节等作用^[2]。因此,七叶一枝花可作为云南白药、宫血宁片、三七血伤宁胶囊、止痛抗癌丸和抗病毒冲剂等多种中成药的重要原料^[3]。目前,七叶一枝花主要来自于野生资源,但其根茎生长十分缓慢,逐年大量采挖使野生七叶一枝花资源面临枯竭的危险,人工栽培已经势在必行^[4]。七叶一枝花的人工繁育包括根茎繁育和种子繁育^[5],其中种子繁育具有繁殖系数大、生产成本低等优点,但也存在休眠水平高、自然萌发率低、“二次发育”等生理后熟现象^[6]。因此,人工打破种子休眠期、缩短种子的萌发周期并提高发芽率是实现利用种子大量繁育七叶一枝花的关键。

一氧化氮(NO)在种子的萌发过程中起重要作用,其常用的供体为硝普钠(sodium nitroprusside, SNP)。SNP分子中的亚硝基基团在植物体内半胱氨酸、谷胱甘肽或其他2SH类

化合物的存在作用下,或通过细胞色素P450/NADPH系统的催化,会逐步分解释放出NO^[7]。有研究表明,外源SNP处理后能显著提高黄连种子的发芽率及其活性^[8]。章玉平等^[9]研究发现SNP处理对凤仙花、千日红、孔雀草的萌发有调控作用,还有黑麦的种子在SNP处理的情况下,其萌发进程也显著缩短^[10]。然而,NO对七叶一枝花等重楼属植物种子的萌发影响鲜见报道。因此,笔者通过对不同浓度的SNP溶液(50~150 $\mu\text{mol/L}$)处理下种子的萌发情况进行观察,并在此基础上分析最适SNP浓度处理后七叶一枝花种子萌发过程中NO含量、淀粉、可溶性糖、可溶性蛋白以及 α 、 β 、总淀粉酶的活力变化,探索外源NO对七叶一枝花种子萌发的生理生化影响,为实现人工快繁和深入研究重楼种子萌发的内在机制提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料 所用材料为2016年秋季采集于武陵山区试验田的3年生七叶一枝花的成熟种子。种子采收后,去除颖壳和外种皮,室温晾干后装入透气袋,置于4℃冰箱处理备用。

1.2 浸种处理 挑选籽粒健康、饱满的七叶一枝花种子,先用清水泡2 d,使种子吸涨发白,然后将处理后的种子分别置于不同浓度的SNP溶液(50、80、100、120、150 $\mu\text{mol/L}$),以清水处理作为对照组。此外为了考察SNP的促萌效果,还增加

基金项目 “十二五”国家863计划课题(2013AA102601-01);中南民族大学基本科研业务费专项(YCZW151116)。

作者简介 李梅香(1996—),女,苗族,湖北恩施人,本科生,专业:生物育种。*通讯作者,讲师,博士,从事药用植物的分子育种等研究。

收稿日期 2017-12-07

了黄珍等^[11]研究发现的促萌效果较好的 GA_3 (500 mg/L) 溶液也作为参照。所有种子置于 25 °C 恒温条件下浸种 48 h。

1.3 萌发培养 浸种结束后,分别将各处理组的种子先用清水洗 5 遍,然后用 75% 乙醇消毒 30~40 s, 无菌水冲洗后再用 0.1% 的升汞消毒 10~12 min, 最后用无菌水冲洗干净。随后将种子转移至铺有 3 层无菌滤纸的培养皿中进行暗培养,每皿 150 粒,每个处理重复 3 次,培养温度 (19 ± 2) °C, 湿度 70%。

1.4 取样 培养期间定时补充水分以确保种子处于湿润状态,并分别于培养的第 0、15、30、45、60、75、90 天观察种子的萌发形态,统计萌发率,同时分别取样 150 粒,贮存于 -80 °C 冰箱用于生理生化指标的测定。

1.5 生理指标测定 该研究用的试剂盒有植物淀粉含量试剂盒、植物可溶性糖含量试剂盒、植物淀粉酶含量试剂盒、植物 NO 含量试剂盒、植物可溶性蛋白含量试剂盒,均采购于苏州科铭生物技术有限公司,分别用以测定重楼种子内淀粉含量、可溶性糖含量、 α 淀粉酶和 β 淀粉酶活力、NO 含量以及可溶性蛋白含量。所有步骤均按说明书进行操作。不同萌发阶段的各个生理生化指标重复测定 3 次。

1.6 数据统计及分析 利用 Microsoft Excel 2010、Sigma Stat 等软件进行数据统计、作图和分析。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 SNP 处理下种子的萌发状态 由图 1 可知,100 $\mu\text{mol/L}$ SNP 处理的七叶一枝花种子萌发速度最快。萌

发培养的第 30 天已有胚根突破种皮,比 CK (清水处理) 的萌发时间 (第 60 天) 要早 30 d 左右,同时比 500 mg/L GA_3 处理组 (第 45 天萌发) 也提前了 15 d 左右。种子萌发培养的第 45 天开始,随着培养时间的延长,尽管其他处理组的种子也陆续有萌发现象,但是 100 $\mu\text{mol/L}$ SNP 处理条件下,其胚根的生长状况明显优于其他试验组。

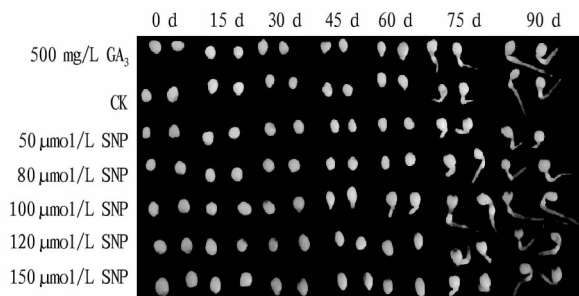


图 1 不同处理组种子萌发进程中的形态变化

Fig. 1 Morphological changes in seed germination process of different treatment groups

2.2 不同浓度 SNP 处理下种子的萌发率 从表 1 可以看出,100 $\mu\text{mol/L}$ SNP 溶液处理下,萌发培养的第 30 天,七叶一枝花种子的萌发率为 3.67%,其余处理组均为 0。第 45 天开始,500 mg/L GA_3 、80 和 120 $\mu\text{mol/L}$ SNP 3 个处理组中,也有种子开始萌发,但其萌发率均低于 7.00%,而 100 $\mu\text{mol/L}$ SNP 处理组中,其萌发率高达 15.00%,显著高于 CK (0) 和 500 mg/L GA_3 (6.67%) 处理组。萌发第 60 天,100 $\mu\text{mol/L}$ SNP 处理组

表 1 不同处理组中的七叶一枝花种子萌发率

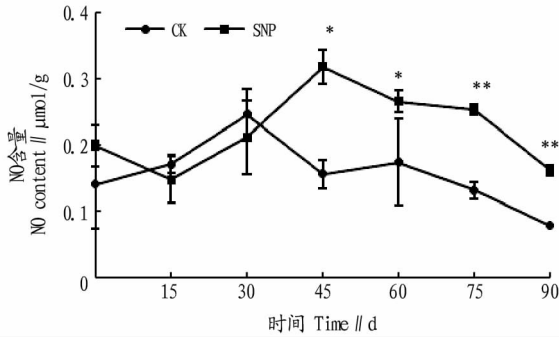
Table 1 The germination rate of different treatment groups in *Paris polyphylla* seeds

处理组 Treatment group	第 15 天 The fifteenth day	第 30 天 The thirtieth day	第 45 天 The forty-fifth day	第 60 天 The sixtieth day	第 75 天 The seventy-fifth day	第 90 天 The ninety days
CK	0	0	0	22.50	42.50	80.83
500 mg/L GA_3	0	0	6.67	45.83	70.83	88.33
50 $\mu\text{mol/L}$ SNP	0	0	0	17.50	36.67	76.67
80 $\mu\text{mol/L}$ SNP	0	0	2.50	25.83	41.67	82.50
100 $\mu\text{mol/L}$ SNP	0	3.67	15.00	51.67	90.00	93.33
120 $\mu\text{mol/L}$ SNP	0	0	2.50	38.33	50.00	85.00
150 $\mu\text{mol/L}$ SNP	0	0	0	15.83	37.50	77.50

中,已经有超过 50% 的种子萌发;萌发第 75 天时,100 $\mu\text{mol/L}$ SNP 处理组的种子萌发率已经达到 90.00%,远远高于其他试验组。此外,80 和 120 $\mu\text{mol/L}$ SNP 处理后的种子萌发时间早于 CK,且同时期 120 $\mu\text{mol/L}$ SNP 处理组种子的萌发率高于 CK;80 $\mu\text{mol/L}$ SNP 处理组种子只在 75 d 的萌发率略低于 CK,其他时间内,其萌发率均高于对照组。表明 80 和 120 $\mu\text{mol/L}$ SNP 对七叶一枝花种子的萌发也具有一定的促进作用。而 50 和 150 $\mu\text{mol/L}$ SNP 处理组中,不同时期种子萌发率均低于 CK,表明外源 NO 浓度过高或者过低均抑制七叶一枝花种子的萌发。结合图 1 和表 1 的结果可知,100 $\mu\text{mol/L}$ SNP 溶液处理后,对七叶一枝花种子的萌发促进效果最好,因此该研究后续试验中主要探讨了 100 $\mu\text{mol/L}$ SNP 处理组中相关生理指标的变化。

2.3 NO 含量的变化 从图 2 可看出,SNP 组中 NO 含量随着种子萌发率的提高而逐渐增高,在第 45 天时达到峰值 (0.318 $\mu\text{mol/g}$),随后 NO 的含量呈现逐渐降低的趋势,直到第 90 天。对照组中 NO 含量变化趋势与 SNP 处理组类似,都有先升高后降低的趋势。与对照相比,SNP 处理组的 NO 含量在整个萌发期间基本上都高于对照,其中种子萌发的 45~90 d,NO 含量均显著或极显著高于对照组。

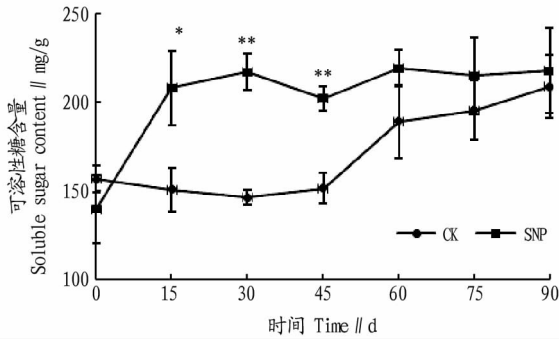
2.4 可溶性糖的含量变化 由图 3 可知,SNP 处理组中,种子内的可溶性糖含量在萌发的第 15 天显著升高,随后趋于平稳的变化趋势,而 CK 组中种子的可溶性糖水平直到第 60 天才出现显著升高的趋势,其最大值出现在萌发的第 90 天 (209.119 mg/g)。萌发前期 (第 15~45 天),SNP 处理组中种子的可溶性糖含量显著或极显著高于对照组。



注: * 表示差异显著 ($P < 0.05$); ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)
 Note: * indicates significant difference ($P < 0.05$); ** indicates extremely significant difference ($P < 0.01$)

图2 种子萌发进程中 NO 含量的变化

Fig.2 Changes of NO content during seed germination



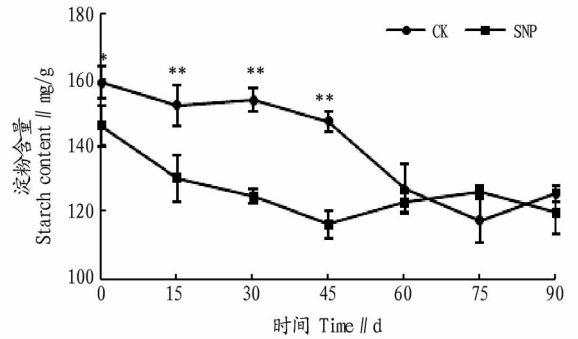
注: * 表示差异显著 ($P < 0.05$); ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)
 Note: * indicates significant difference ($P < 0.05$); ** indicates extremely significant difference ($P < 0.01$)

图3 种子萌发进程中可溶性糖含量的变化

Fig.3 Changes of soluble sugar content during seed germination

2.5 淀粉含量的变化 由图4可知,100 μmol/L SNP处理组的种子在萌发第0~45天,其淀粉含量迅速下降,而同时期的对照组种子中淀粉含量显著或极显著高于处理组。萌发培养的第60~90天,SNP处理组种子的淀粉含量不再呈

下降趋势,其含量水平趋于平稳。对照组中,淀粉含量在萌发的第60天开始迅速下降,萌发培养的后期SNP处理组与对照组的淀粉含量无显著差异。

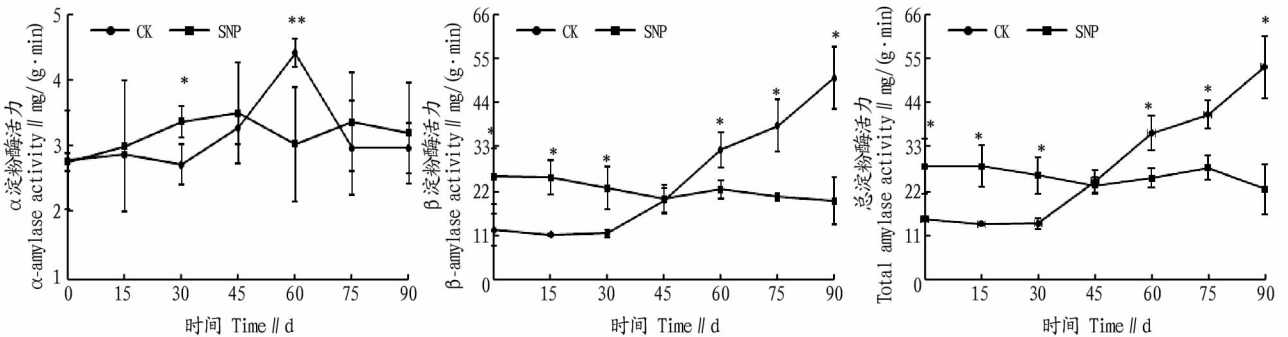


注: * 表示差异显著 ($P < 0.05$); ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)
 Note: * indicates significant difference ($P < 0.05$); ** indicates extremely significant difference ($P < 0.01$)

图4 种子萌发进程中淀粉含量的变化

Fig.4 Changes of starch content during seed germination

2.6 淀粉酶活力的变化 由图5可知,整个萌发期间α淀粉酶活力变化中,除了萌发第30天和第60天对照组的淀粉酶活力和100 μmol/L SNP处理组差异显著外,其余各时期中,对照组和处理组的α淀粉酶活力差别都不明显。100 μmol/L SNP处理组的β淀粉酶活力,在萌发前期(0~30 d)显著高于对照组,随后略有下降,处理组内不同时期的β淀粉酶整体变化趋势不大;对照组中的β淀粉酶则呈现出前期变化不大(0~30 d),后期(45~90 d)逐渐升高的趋势,并且在萌发的第60~90天其含量显著高于SNP处理组。100 μmol/L SNP处理组的总淀粉酶活力,在萌发前期(0~30 d)显著高于对照组,随后略有下降,但是整体变化的趋势不明显;对照组中的总淀粉酶则呈现前期变化不大(0~30 d),后期(45~90 d)逐渐升高的趋势,并且在萌发的第60~90天其含量显著高于SNP处理组。由图5b和图5c对比观察得知,β淀粉酶的变化趋势与总淀粉酶的变化趋势类似。



注: * 表示差异显著 ($P < 0.05$); ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)

Note: * indicates significant difference ($P < 0.05$); ** indicates extremely significant difference ($P < 0.01$)

图5 种子萌发进程中淀粉酶活力的变化

Fig.5 Changes of amylase activity during seed germination

2.7 可溶性蛋白含量的变化 由图6可知,SNP处理后,种子在萌发过程中可溶性蛋白含量随着处理时间的延长而下降,其中最高值出现在第0天(58.043 mg/g),第15天含量迅速降低,而第15~90天可溶性蛋白含量变化较平稳。对照

组的种子可溶性蛋白含量变化趋势与SNP处理组类似,最高值也出现在第0天(60.392 mg/g),第15~90天变化较为平稳。在整个萌发期间,SNP处理组和对照组的可溶性蛋白含量差异不明显。

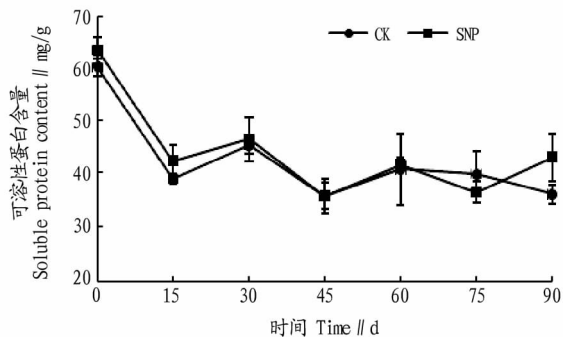


图6 种子萌发进程中可溶性蛋白含量的变化

Fig. 6 Changes of soluble protein content during seed germination

3 结论与讨论

一氧化氮是植物体内广泛存在的内源调节分子,目前人们已经发现它对植物呼吸作用、光形态建成^[12]、种子萌发^[13]、根和叶片的生长发育^[14]、气孔运动^[15]各种胁迫的响应以及预防反应等生理过程都有一定的作用^[16]。该研究表明,不同浓度(50~150 μmol/L) SNP 对七叶一枝花种子的萌发产生了不同的影响,其中 100 μmol/L SNP 溶液处理后,可以显著提高七叶一枝花种子的萌发率,缩短七叶一枝花种子的发芽周期,而浓度过高(150 μmol/L)或过低(50 μmol/L)的 SNP 则降低七叶一枝花种子的萌发率。

该研究表明,SNP 处理组种子在第 45~90 天种子快速萌发阶段,处理组的 NO 含量迅速升高且显著高于对照组,暗示着外源 NO 处理后,可以显著增加种子内的 NO 含量,而种子内源 NO 含量的升高,是否会使得种子萌发的抑制物质如 ABA 激素等的含量降低^[17],从而使得种子萌发率升高,有待进一步深入研究。

种子萌发过程中,淀粉在淀粉酶的作用下分解为小分子糖,为萌发提供营养。淀粉酶主要包括 α 淀粉酶和 β 淀粉酶,其中 α 淀粉酶能够将淀粉降解成约 6 个葡萄糖单位的还原性糊精,然后再分解为麦芽糖和葡萄糖^[18]。而 β 淀粉酶可使淀粉转化为麦芽糖^[19]。该研究表明,SNP 处理组和对照组种子内 α 淀粉酶在整个萌发期差异不大,而处理组的 β 淀粉酶在种子萌发前期(第 0~30 天)显著高于对照组,后期(第 60~90 天)变化平稳,而对对照组的 β 淀粉酶则在萌发后期(第 60~90 天)才逐渐升高;总淀粉酶的变化趋势与 β 淀粉酶的变化趋势类似。该研究结果暗示,β 淀粉酶能快速响应外源 NO 的诱导,而 α 淀粉酶则不受外源 NO 的诱导,这与小麦中的研究结果相似^[20]。此外,该研究结果发现,种子内 β 淀粉酶的显著升高和各自淀粉含量的降低以及种子开始萌发的时间节点密切吻合,暗示该酶活性的升高是淀粉水解和促进萌发的一个关键因素。

该研究还发现 SNP 处理后,七叶一枝花种子的可溶性糖含量总体上高于对照,并且在第 15~45 天差异达到显著水平,表明 SNP 在种子萌发初期加速了淀粉分解为可溶性糖的速率,为种子的快速萌发提供可利用的营养物质。随着种子的萌发,以及胚乳中的淀粉被不断分解,可溶性糖的含量不

再显著增加,其变化较小;此外胚根突破种皮后,可溶性糖的增长速率变缓慢,这可能是由于在种子进入萌发阶段后,种子的呼吸作用增强,利用可溶性糖的速率增加。与此相对应的是,SNP 处理后种子萌发早期(0~45 d)淀粉的含量也显著低于对照组,而对对照组的淀粉分解的速率是在 45 d 以后才大幅度增加,此过程表明外源 NO 处理,可以在种子萌发期间通过提高种子胚乳内 β 淀粉酶的活性促使淀粉水解为麦芽糖等可溶性糖而促进种子的萌发。

该试验中,种子可溶性蛋白含量测定的研究结果表明,SNP 处理组和对照组中可溶性蛋白含量均为逐渐降低的趋势,但是不同处理组间差异都不明显,这与莴苣种子萌发过程后,SNP 处理后可溶性蛋白的变化趋势类似^[21]。该结果暗示,尽管淀粉酶类的可溶性蛋白在不同处理组之间有显著变化,但是总的可溶性蛋白并未受到 SNP 的影响。种子萌发过程中涉及到的一系列生理活动,包括呼吸加强、营养物质动员、贮藏 mRNA 的利用等,无一例外的涉及到大量相关蛋白质的调动和功能执行^[22]。因此,SNP 处理后促进种子萌发的过程中,还有哪些蛋白受到诱导或调控,有待于进一步研究。

参考文献

- [1] 张翔宇,唐映军,周茂娣,等. 珍稀药用植物重楼研究进展[J]. 现代中药研究与实践,2014(1):78-83.
- [2] OKAZAKI T. Studies on Actinomycetes isolated from plant leaves[J]. Annu Rep Sankyo Res Lab,1995,47:97-106.
- [3] 黄宏健,孔松芝. 利用中药重楼内生菌解决其药用资源紧缺的研究前景[J]. 热带林业,2011,39(1):13-16.
- [4] 杨斌,李绍平,严世武,等. 滇重楼资源现状及可持续利用研究[J]. 中药材,2012,35(10):1698-1700.
- [5] 陈翠,康平德,杨丽云,等. 云南重楼种苗繁育技术[J]. 中国现代中药,2010,12(2):23-24,28.
- [6] ZHOU L G, WU J Y, WANG S L. Low-temperature stratification strategies and growth regulators for rapid induction of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* seed germination[J]. Plant growth regulation,2003,41(2):179-183.
- [7] 刘开力,韩航如,徐颖洁,等. 外源一氧化氮对盐胁迫下水稻根部脂质过氧化物的缓解作用[J]. 中国水稻科学,2005,19(4):333-337.
- [8] 张春平,何平,胡世俊,等. 外源 NO 供体硝普钠(SNP)对盐胁迫下黄连种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 安徽农业通报,2014,20(23):10-14,145.
- [9] 章玉平,黄碧任. 外源 NO 供体硝普钠浸种对 3 种草花种子萌发的影响[J]. 安徽农业科学,2008,36(20):8460-8461.
- [10] 刘建新,王鑫,雷蕊霞. 外源一氧化氮供体 SNP 对黑麦草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 生态学杂志,2007,26(3):393-398.
- [11] 黄珍,罗忠,张鹏,等. GA₃ 对重楼种子萌发过程中生理指标的影响[J]. 时珍国医国药,2016,27(8):1993-1996.
- [12] 齐连东,刘世琦. 光质对植物光形态建成、品质及延缓衰老的影响[C]//王秀峰,李宪利. 园艺学进展(第七辑):中国园艺学会第七届青年学术讨论会论文集. 北京:中国农业出版社,2006.
- [13] 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.
- [14] 李灵芝,郭荣,李海平,等. 不同氮浓度对温室番茄生长发育和叶片光谱特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(4):965-969.
- [15] SOKOLOVSKI S, HILLS A, GAY R, et al. Protein phosphorylation is a prerequisite for intracellular Ca²⁺ release and ion channel control by nitric oxide and abscisic acid in guard cells[J]. The plant journal,2005,43(4):520-529.
- [16] 周永斌,殷有,苏宝玲,等. 外源一氧化氮供体对几种植物种子的萌发和幼苗生长的影响[J]. 植物生理学通讯,2005,41(3):316-318.
- [17] 雍山玉. 外源一氧化氮(NO)对盐胁迫下辣椒种子萌发和幼苗生理特性的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学,2007.
- [18] WHAN A, DIELEN A S, MIEG J, et al. Engineering α-amylase levels in wheat grain suggests a highly sophisticated level of carbohydrate regulation during development[J]. Journal of experimental botany,2014,65(18):5443-5457.

较高。西安市作为陕西省的省会城市,经济增长迅速而且资源利用比其余各市更加合理,所以西安市与其余 4 市差距较大。第二阶段,2011 年西安市进入一般安全状态,其余 4 市进入弱安全状态。经济可行性指数增长明显,EI 值均达到 0.2 以上。非社会可接受性指数增加,除了铜川和宝鸡略有波动,在出现一系列环境问题后,注重经济发展的质量,使得资源环境合理性指数加大。第三阶段,2014 年经济可行性指数和生态环境合理性指数均快速增加,EI 值整体增加到 0.4~0.6,NREI 值快速下降,NSI 值增加,各市之间的差距加大,西安市由于省会条件的优越性,铜川在最近几年赶超渭南。从关中平原 5 市整体土地生态安全状态来看,由不安全状态到弱安全状态,再到一般安全状态,安全水平不断提高。

2.2.2 土地生态安全趋势分析。从总体趋势看,西安市与铜川市、宝鸡市、咸阳市、渭南市之间存在较大差距。西安市 2008—2014 年由不安全转变到一般安全趋势,2014 年经济可行性指数和非社会可接受性指数达到较高值,非资源环境合理性指数减小到 0.118 0。随着经济快速发展,生态环境承载压力加大,居民生活适宜度下降。铜川、宝鸡和咸阳市由不安全转变到弱安全趋势,EI 值都有所增加,NSI 值波动减小,NREI 值减小。这 3 个城市相比较西安市,经济发展较慢,社会可接受性和生态环境合理性提高。渭南市一直处于不安全趋势,整体水平略低于其他 4 个城市,所以与其他 4 市差距不断加大。

3 结论与讨论

(1) 对于土地生态安全评价,三角模型不仅能够客观地反映其状态,而且能够清晰地反映其总体变化趋势。

(2) 2008—2014 年,关中 5 市经济可行性指数不断提高,非社会可接受性指数升高,除了宝鸡市和咸阳市的 NSI 值略有浮动,非资源环境合理性指数逐渐降低。总体表明关中 5 市经济可行性指数和资源环境合理性指数稳步提升,社会可接受性指数逆向发展。

(3) 总体上关中平原 5 市土地生态安全趋势向较好的方向发展,西安市由弱安全状态转向一般安全状态。其余 4 市由不安全状态转向弱安全状态,呈现出 2 种类型的变化趋势。

(4) 区域内部发展不均衡加剧,西安市与其余 4 市差距加大,5 市的社会可接受性指数日趋均衡,资源环境合理性指数和经济可行性指数在 5 个市之间差异显著。

(5) 针对研究结果,结合关中平原五市实际情况,在以后

的发展中,注重经济发展与生态效益相结合。西安市作为省会城市,人口密度不断增加,因此在发展经济的同时注重社会基础设施的建设,提升社会可接受度。渭南市提高经济发展的速度,实现经济和环境协调发展,缩小与其余各市的差距。区域内部之间可以相互促进,平衡人口分布,经济上相互交流带动,实现区域内协调发展。土地生态安全随着社会经济的发展不断变化,该研究仅从 3 个时间断面进行评价,在后续研究中应该在时间尺度上深入研究,为区域经济可持续发展提供科学参考。

参考文献

- [1] 黄木易,何翔. 基于云模型与熵权法的安徽省土地生态安全评价研究[J]. 土壤,2016,48(5):1049-1054.
- [2] 余健,房莉,仓定帮,等. 熵权模糊物元模型在土地生态安全评价中的应用[J]. 农业工程学报,2012,28(5):260-266.
- [3] 李昊,李世平,银敏华. 中国土地生态安全研究进展与展望[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(9):50-56.
- [4] XU F L,ZHAO S S,RICHARD W D,et al. A triangle model for evaluating the sustainability status and trends of economic development[J]. Ecological modeling,2006,195(3/4):327-337.
- [5] 马泉,任晓娟. 基于生态价值优先的土地适宜性评价:以银川市七子连湖湿地公园为例[J]. 安徽农业科学,2016,44(3):239-242,262.
- [6] 谢花林. 土地利用生态安全格局研究进展[J]. 生态学报,2008,28(12):6305-6310.
- [7] 张锐,郑华伟,刘友兆. 基于 PSR 模型的耕地生态安全物元分析评价[J]. 生态学报,2013,33(16):5090-5100.
- [8] 张松男,雷国平,李秀霞,等. 基于 P-S-R 模型的城市生态安全模糊物元评价:以吉林省四平市为例[J]. 水土保持研究,2013,20(2):170-175.
- [9] 裴婷婷,陈英,赵亚南,等. 基于 P-S-R 模型的白银市土地生态安全评价[J]. 中国农学通报,2014,30(2):215-221.
- [10] 杜忠潮,韩申山. 基于主成分分析的土地生态安全评价实证研究:以陕西省 10 个省辖市为例[J]. 水土保持通报,2009,29(6):198-202.
- [11] 王月英,王雯. 关中城市群县域层面经济紧凑度分析[J]. 城市发展研究,2016,23(8):22-28.
- [12] 陕西省统计局. 陕西统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2009.
- [13] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2009.
- [14] 黄辉玲,罗文斌,吴次芳,等. 基于物元分析的土地生态评价[J]. 农业工程学报,2010,26(3):316-322.
- [15] 李佳,雷国平,崔明哲,等. 基于三角模型的矿业城市土地利用可持续性评价[J]. 水土保持研究,2012,19(5):196-201.
- [16] WANG R S,HU D,LI F,et al. Integrative ecological management for regional urbanization [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2010: 111-119.
- [17] 石建华,喻理飞,孙保平. 陕北地区退耕还林生态健康评价分析研究:以吴起县为例[J]. 水土保持学报,2015,29(6):332-336.
- [18] 罗文斌,吴次芳,吴一洲. 城市土地生态水平物元分析评价:以山东省滨州市为例[J]. 生态学报,2009,29(7):3818-3827.
- [19] 张小虎,牛海鹏,郭增长. 基于三角模型的城市土地生态安全区域差异分析:以河南省为例[J]. 自然灾害学报,2014,23(2):21-30.
- [20] 李明月,赖笑娟. 基于 BP 神经网络方法的城市土地生态安全评价:以广州市为例[J]. 经济地理,2011,31(2):289-293.
- [21] 杨北宁,张凤芝,苏国兴. 一氧化氮对莒苣种子萌发过程中部分物质代谢的影响[J]. 江苏农业学报,2013,29(2):394-398.
- [22] GALLARDO K,JOB C,GROOT S P C,et al. Proteomics of *Arabidopsis* seed germination. A comparative study of wild-type and gibberellin-deficient seeds[J]. Plant physiology,2002,129(2):823-837.

(上接第 61 页)

- [19] YAMASAKI Y. β -amylase in germinating millet seeds[J]. Phytochemistry,2003,64(5):935-939.
- [20] 孙永刚,凌腾芳,王家杰,等. 外源一氧化氮供体硝普钠对小麦种子萌发早期 β -淀粉酶及其亚细胞分布的影响[J]. 作物学报,2008,34(9):1608-1614.