

# GA<sub>3</sub> 处理对流动沙丘先锋植物沙米 (*Agriophyllum squarrosum*) 种子萌发的影响

魏林源, 马全林\*, 张晓娟, 张德魁, 樊宝丽, 陈芳, 胡小柯

(甘肃省治沙研究所/甘肃省荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室培育基地, 甘肃 武威 733000)

**摘要:**作为一种重要的植物生长调节激素,GA<sub>3</sub> 在植物生长发育过程中起着重要作用。为探索破除沙米种子休眠的方法,研究了不同区域、不同年份沙米种子萌发对 GA<sub>3</sub> 处理的响应。结果表明:1)不同区域沙米种子在 GA<sub>3</sub> 作用下,沙坡头种子的发芽率、发芽势最高,高达 100%,民勤种子的发芽率最低,最高仅为 44%;在各处理中,GA<sub>3</sub>最佳浓度梯度为 1.5~2.0 g·mL<sup>-1</sup>,在此处理下的种子发芽率高达 100%;2)不同年份的沙米种子在 GA<sub>3</sub> 作用下其发芽率、发芽势表现为 2006 年>2005 年>2004 年>1997 年,表明种子寿命会随着时间的增加而下降;3)在不同浓度 GA<sub>3</sub> 处理下,不同区域或不同年份间种子发芽率差异显著( $p<0.05$ )。表明 GA<sub>3</sub> 可以破除沙米种子的休眠,对种子的萌发具有显著促进作用。

**关键词:**GA<sub>3</sub>; 沙米; 种子萌发; 发芽率

中图分类号:Q945.34

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2016)01-0107-07

Effect of GA<sub>3</sub> Treatment on the Germination of *Agriophyllum squarrosum*,  
A Pioneering Species on the Mobile Sand Dunes

WEI Lin-yuan, MA Quan-lin\*, ZHANG Xiao-juan, ZHANG De-kui, FAN Bao-li, CHEN Fang, HU Xiao-ke

(Gansu Desert Control Research Institute/State Key Laboratory of Desertification and  
Aeolian Sand Disaster Combating, Wuwei, Gansu 733000, China)

**Abstract:** As a key plant growth regulator, GA<sub>3</sub> plays important roles in the process of plant growth and development. In order to explore the way of breaking the seed dormancy of *Agriophyllum squarrosum*, this paper studied the germination responses of the seeds collected from different regions and time to GA<sub>3</sub> treatment. The results showed that, 1) among the seeds collected from different regions, those from Shapotou demonstrated the highest germination rate and potential after GA<sub>3</sub> treatment, as high as 100%, while those from Minqin exhibited the lowest germination rate, only 44%. The best concentration gradient of GA<sub>3</sub> was 1.5~2 g·mL<sup>-1</sup>, by which the germination rate reached almost 100%. 2) Among the seeds collected from different time, the germination rate and potential were in the order of 1997<2004<2005<2006, indicating that the life expectancy of the seeds decreased with time. 3) Significant differences ( $p<0.05$ ) in germination rate and potential were observed among the seeds from different regions or different time under different concentrations of GA<sub>3</sub> treatment, indicating that GA<sub>3</sub> could break the dormancy of *A. squarrosum* seeds and benefit its germination.

**Key words:** GA<sub>3</sub>; *Agriophyllum squarrosum*; seed germination; germination rate

种子是植物特有的繁殖器官,受环境影响,种子较营养器官小得多,具有很大的稳定性<sup>[1-2]</sup>。种子萌

收稿日期:2015-05-08 修回日期:2015-10-09

基金项目:国家自然科学基金(31270754)。

作者简介:魏林源,女,助理工程师,研究方向:荒漠化防治。E-mail:ybhwy@126.com

\*通信作者:马全林,男,研究员,研究方向:荒漠植物与荒漠植被恢复。E-mail:mql@gdscri.com

发是植物生活史中实现种群更新和物种延续的关键环节之一<sup>[3]</sup>。而种子萌发和幼苗的建植是植物在整个生活史中最为脆弱的阶段,萌发时间和出苗的生活史特征都会影响到物种的成功建植<sup>[4]</sup>。GA<sub>3</sub>被认为是一类重要的植物生长调节激素,是种子萌发的主要促进剂,它可以破除种子的休眠,软化种胚周围的组织,克服种皮机械限制,促进种胚的生长,提高种子的活力<sup>[5-9]</sup>。GA<sub>3</sub>最显著的生理效应就是促进植物的生长发育,主要是通过细胞数目的增加和细胞的生长来完成<sup>[10]</sup>。

沙米(*Agriophyllum squarrosum*)属藜科(Che-  
nopodiaceae)沙蓬属 1 年生草本植物,生长于流动沙丘、半固定沙地、沙丘间低地,广泛分布于我国西北、华北和东北各省的沙漠地带,具有耐干旱、抗盐碱、耐贫瘠、耐风蚀沙埋等特性,有较强的适应能力,是沙质地表植被演替的先锋植物<sup>[11]</sup>。沙米种子还是一种天然的功能性食品,它富含粗蛋白、苏氨酸等人体必需氨基酸和镁、钾、锌等矿物质元素,有助于促进消化,有健脾胃等功效<sup>[11-13]</sup>。沙米的唯一繁殖方式是种子繁殖,在干旱高温的沙丘中繁衍,对沙漠一年生植物中植物群落幼苗的补充具有极其重要的作用<sup>[14-17]</sup>。国内外相关研究主要针对沙米的生态学、营养成分、种子特征和含水量等方面<sup>[18-21]</sup>,有关沙米种子在光照和温度、不同环境条件、沙埋、盐和干旱胁迫等方面的萌发,以及不同区域沙米种子的生物学特性及种子的特征已有报道<sup>[20,22-27]</sup>,但有关激素 GA<sub>3</sub> 诱导下以及不同种源、不同年代沙米种子萌发方面的相关研究鲜见报道。在种子休眠和萌发过程中,激素扮演着非常重要的角色,可以调节一系列蛋白质、酶的代谢,从而调控种子的休眠和萌发<sup>[28]</sup>,种子萌发特性不仅受植物的生态型决定,也与种子的储藏条件有关<sup>[29-30]</sup>。

通过人工控制条件,采取不同浓度 GA<sub>3</sub> 浸种的方法,对不同生态区域、不同年份的沙米种子进行了相关萌发研究,试图寻找破除沙米种子休眠、促进其萌发的方法,以期干旱、半干旱地区先锋植物沙米的种质资源、贮藏和利用,以及植被的恢复和繁殖方面提供科学依据。

## 2 材料与方 法

### 2.1 种子采集及区域概况

供试生态区域的沙米种子,分别于 2013 年秋季采自甘肃民勤(38°34'N、102°58'E,海拔 1 378 m)、宁夏沙坡头(37°27'N、104°57'E,海拔 1 250 m)、敦煌(39°53'N、92°13'E,海拔 1 138 m)和内蒙古奈曼

旗(42°55'N、120°42'E,海拔 1 358 m)的流动沙丘。不同年份的沙米种子收集于民勤,收集年份分别为 1997、2004、2005、2006 年。4 个生态区域中,民勤、沙坡头多年平均降水量分别为 115.8、180.2 mm,属于干旱区;敦煌多年平均降水量分别为 43.3 mm,属于极端干旱区;奈曼旗多年平均降水量 366.0 mm,属于半干旱区。采集种子均在室温条件下风干保存,试验选取健壮饱满、无损伤和无虫害的沙米种子作为试验材料,全部试验均于室内人工控制条件下进行。

### 2.2 研究方法

2.2.1 GA<sub>3</sub> 处理对不同生态区域沙米种子萌发的影响 选用奈曼、敦煌、沙坡头及民勤 4 生态区域的沙米种子,用 5% 的次氯酸钠溶液消毒灭菌 5~10 min 后,用蒸馏水冲洗干净,晾干,再将种子置于铺有 2 层滤纸的培养皿(9 cm)中,每皿放置种子 30 粒。试验设 GA<sub>3</sub> 浓度为 0、0.125、0.25、0.50、0.75、1.00 g·L<sup>-1</sup> 和 1.50 g·L<sup>-1</sup> 的 7 个处理,每个处理设 5 个重复,在 25℃ 全黑暗条件下浸种 24 h 后进行萌发试验。

2.2.2 GA<sub>3</sub> 处理对不同年份沙米种子的萌发 选用民勤 1997、2004、2005、2006 年 4 个年份的种子,用 5% 的次氯酸钠溶液消毒灭菌 5~10 min,之后采用 GA<sub>3</sub> 浓度为 0、0.125、0.25、0.50、0.75、1.00 g·L<sup>-1</sup> 和 2.00 g·L<sup>-1</sup> 的 7 个处理,在 25℃ 全黑暗条件下浸种 24 h,每个年份设置 5 个重复,置于铺有 2 层滤纸的培养皿(9 cm)中,每皿放置 30 粒种子。

2.2.3 种子萌发测定 种子萌发以胚根的出现为标志,每天定时统计 1 次种子发芽数,萌发末期连续 3 d 萌发粒数不变,萌发结束。萌发第 8 天统计 1 次胚芽长度。

$$\text{发芽率}(G_R) = SN_1 / SN_0 \times 100\%$$

式中,SN<sub>1</sub> 为供试种子发芽粒数,SN<sub>0</sub> 为供试种子总粒数;

$$\text{发芽势}(G_p) = SN_m / SN_0 \times 100\%$$

式中,SN<sub>m</sub> 为种子发芽达到最高峰时种子发芽粒数(一般以最初 1/3 天数内发芽种子数计)。

### 2.3 数据分析方法

数据采用 Excel 和 SPSS18.0 软件进行数据分析和图表绘制,用 Duncan 检验法进行多重比较,分析差异显著性。

## 3 结果与分析

### 3.1 GA<sub>3</sub> 处理对不同生态区域沙米种子萌发进程及差异性分析

试验结果表明,GA<sub>3</sub> 处理对沙米种子萌发具有促进作用,适宜的 GA<sub>3</sub> 浓度会促进沙米种子的萌发,缩短萌发周期。由图 1 可知,沙坡头种子在试验

第 3 天时萌发到高峰期,第 5 天时部分浓度 GA<sub>3</sub> 处理下的种子萌发已结束,发芽率高达 100%,在 0.50~2.00 g·L<sup>-1</sup>GA<sub>3</sub> 浓度处理下的最终发芽率均达 100%,是对照种子萌发的 4.69 倍;奈曼种子在第 6 天时萌发到高峰期,在 1.50~2.00 g·L<sup>-1</sup>GA<sub>3</sub> 处理下的最终发芽率为 94%~92%,是对照种子萌发的 2.94~2.88 倍;民勤和敦煌种子在第

11~13 天时种子萌发才达高峰期,民勤和敦煌种子在 2.00 g·L<sup>-1</sup>GA<sub>3</sub> 处理下发芽率高于其他处理,发芽率为 44%~88%,是对照的 13.2~44 倍。

由图 2 可以看出,4 生态区域中,沙坡头种子的发芽势高于其他区域,奈曼次之,民勤、敦煌 2 生态区域种子的发芽势相对较低。

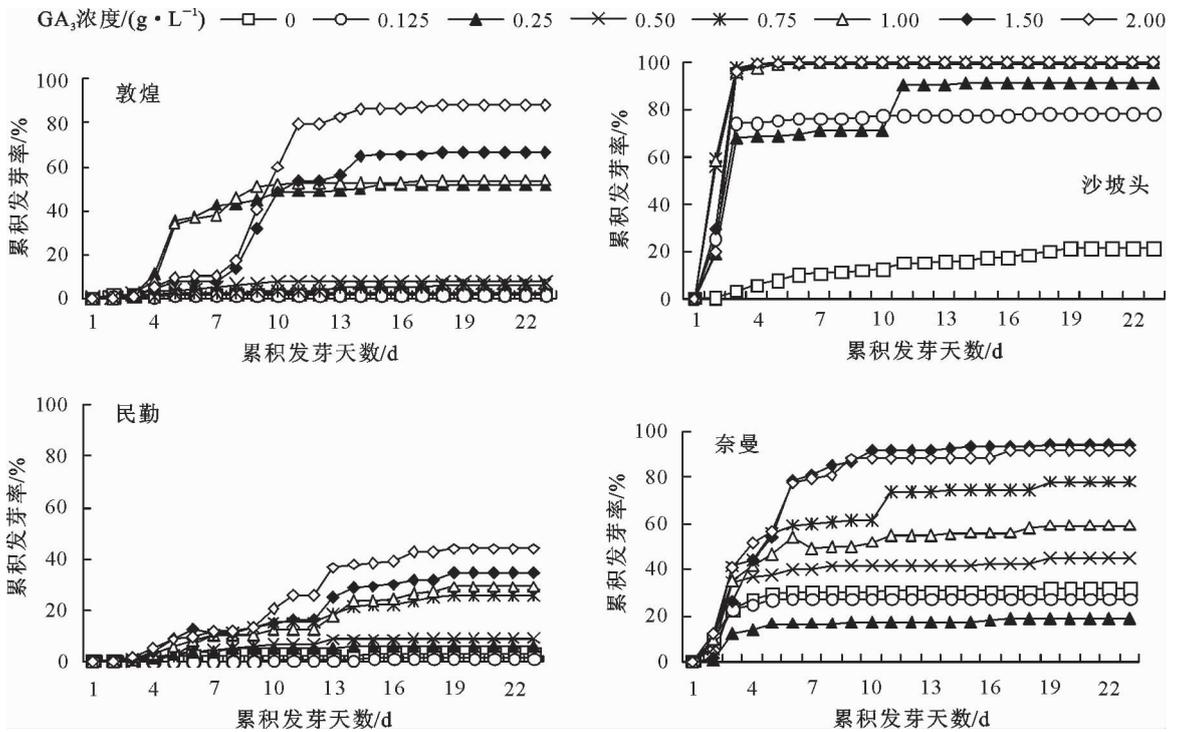


图 1 GA<sub>3</sub> 作用下沙米不同种源种子萌发进程

Fig. 1 Germination processes of *A. squarrosum* seeds collected from different regions with GA<sub>3</sub> treatment

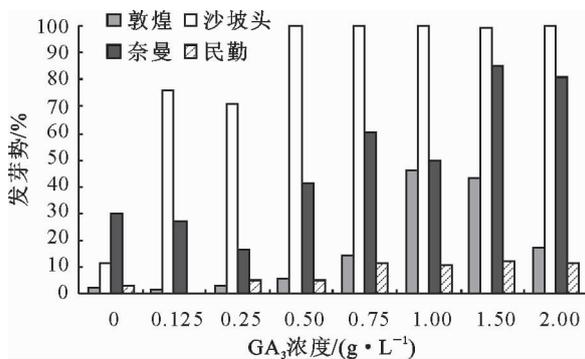


图 2 GA<sub>3</sub> 处理下不同生态区域沙米种子的发芽势变化

Fig. 2 Germination potential of *A. squarrosum* seeds collected from different regions with GA<sub>3</sub> treatment

由表 1 可以看出,随着 GA<sub>3</sub> 浓度的增加,各区域间与各处理间种子萌发差异显著。在对照水平下,奈曼与其他区域间种子萌发差异显著,在 0.125 g·L<sup>-1</sup>水平下,沙坡头与其他区域间种子萌发差异显著( $p < 0.05$ ),在 0.25 g·L<sup>-1</sup>水平下,沙坡头与敦煌种子萌发差异显著,在 0.50、1.00 g·L<sup>-1</sup>水平

下沙坡头与奈曼 2 区域间种子萌发差异显著,在 0.75、1.50~2.00 g·L<sup>-1</sup>水平下,沙坡头与奈曼 2 区域间种子萌发差异不显著,敦煌、民勤 2 区域间种子萌发差异显著;同一区域不同处理间随着 GA<sub>3</sub> 浓度的升高存在不同程度的差异。GA<sub>3</sub> 浓度的高低对沙米种子的萌发促进程度不同,适宜的 GA<sub>3</sub> 浓度有利于破除沙米种子的休眠促进其萌发,缩短萌发周期。

4 生态区域在 GA<sub>3</sub> 处理下,总体变化趋势:随着 GA<sub>3</sub> 浓度的增加,沙米种子的发芽率随之增加,以 2.00 g·L<sup>-1</sup>的浓度处理下的种子发芽率最高,1.50 g·L<sup>-1</sup>的处理次之。因此,适宜的 GA<sub>3</sub> 浓度可以有效地提高沙米种子的发芽率,缩短萌发周期。在 4 个生态区域中,以沙坡头种子的发芽率、发芽势最高,奈曼次之,且 4 个生态区域间沙米种子萌发差异显著,因此可以认为沙米种子存在不同生态型的种子。

### 3.2 GA<sub>3</sub> 处理对民勤不同年份沙米种子的萌发进程及其差异性分析

GA<sub>3</sub> 具有打破种子休眠的作用,可以使贮存物

质分解,供给幼苗生长需要<sup>[3]</sup>。由图 3 可以看出,1997 年的沙米种子在试验第 16 天时达到萌发高峰期,在  $1.00 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{GA}_3$  浓度处理下发芽率最高,为 36.67%,是对照种子萌发的 3.44 倍;2004 年的沙米种子在试验第 9~11 天时,萌发到高峰期,在  $1.50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{GA}_3$  浓度处理下的发芽率最高,为 83.33%,是对照种子萌发的 41.67 倍;2005—2006 年的沙米种子在试验第 10 天时达到萌发高峰期,  $\text{GA}_3$  处理浓度以  $1.50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  下的发芽率最高,分别为 80.67%、74%,是对照种子萌发的 15.86、10.08 倍。

由表 2 可以看出,随着  $\text{GA}_3$  浓度的增加,不同年份间沙米种子与各处理间种子萌发差异显著。在对照、 $0.50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  水平下,不同年份的种子萌发差异不显著,在  $0.125$ 、 $0.25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  水平下,2004 年和 2005 年间种子萌发差异不显著,与另外 2 个年份间

种子萌发差异显著,在  $0.75 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  水平下,1997 年种子萌发与 2004 年的种子萌发差异显著,与其他 2 个年份间种子萌发差异不显著,在  $1.00 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  水平下,2005、2006 年的种子萌发与其他年份间的种子萌发差异显著,在  $1.50 \sim 2.00 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  水平下,1997 年的种子萌发与其他年份间的种子萌发差异显著;同一年份不同浓度处理间,随着浓度的增加差异显著。因此,不同年份间的种子在  $\text{GA}_3$  浸种催芽处理后沙米种子的发芽率、发芽势不同,2006 年的种子发芽率、发芽势均高于其他年份间的种子。

不同年份沙米种子在  $\text{GA}_3$  浓度处理下,总体变化趋势:2006 年 > 2005 年 > 2004 年 > 1997 年,不同年份间,以 2006 年的沙米种子在  $1.00 \sim 2.00 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{GA}_3$  浓度处理下的发芽率最高;各年份间沙米种子的萌发差异显著,说明种子的贮藏方式、贮藏温度、贮藏时间的长短都将会影响种子的活力。

表 1 不同  $\text{GA}_3$  浓度处理下沙米种子 4 个生态区域间发芽率的差异性

Table 1 Differences in germination rate among the seeds from different regions with  $\text{GA}_3$  treatment

$\text{GA}_3$ 浓度梯度/ $(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	敦煌	沙坡头	奈曼	民勤
0	$2.00 \pm 0.82\text{aA}$	$25.33 \pm 6.11\text{aB}$	$38.0 \pm 1.33\text{bC}$	$3.33 \pm 2.58\text{aA}$
0.125	$1.33 \pm 0.82\text{aA}$	$75.33 \pm 1.33\text{bC}$	$26.67 \pm 2.79\text{aB}$	$1.33 \pm 1.33\text{aA}$
0.25	$55.33 \pm 14.20\text{bB}$	$88.67 \pm 2.91\text{cC}$	$22.67 \pm 3.23\text{aA}$	$8.66 \pm 2.26\text{aA}$
0.50	$6.00 \pm 1.25\text{aA}$	$100 \pm 0\text{dC}$	$38.67 \pm 6.96\text{bB}$	$9.33 \pm 2.67\text{aA}$
0.75	$7.33 \pm 13.62\text{aA}$	$100 \pm 0\text{dD}$	$82.00 \pm 6.29\text{dC}$	$31.33 \pm 6.80\text{bB}$
1.00	$43.33 \pm 13.62\text{bA}$	$100 \pm 0\text{dB}$	$55.33 \pm 6.88\text{cA}$	$28.00 \pm 5.63\text{bA}$
1.50	$60.00 \pm 10.33\text{bB}$	$99.33 \pm 0.67\text{dC}$	$94.00 \pm 1.94\text{dC}$	$38.00 \pm 3.89\text{bcA}$
2.00	$90.66 \pm 1.94\text{cB}$	$100 \pm 0\text{dB}$	$92.66 \pm 2.67\text{dB}$	$43.33 \pm 4.47\text{cA}$

注:表中不同小写字母 a、b、c、d 表示同列平均值显著差异 ( $p < 0.05$ ),不同大写字母 A、B、C、D 表示同行平均值显著差异 ( $p < 0.05$ )。下同。

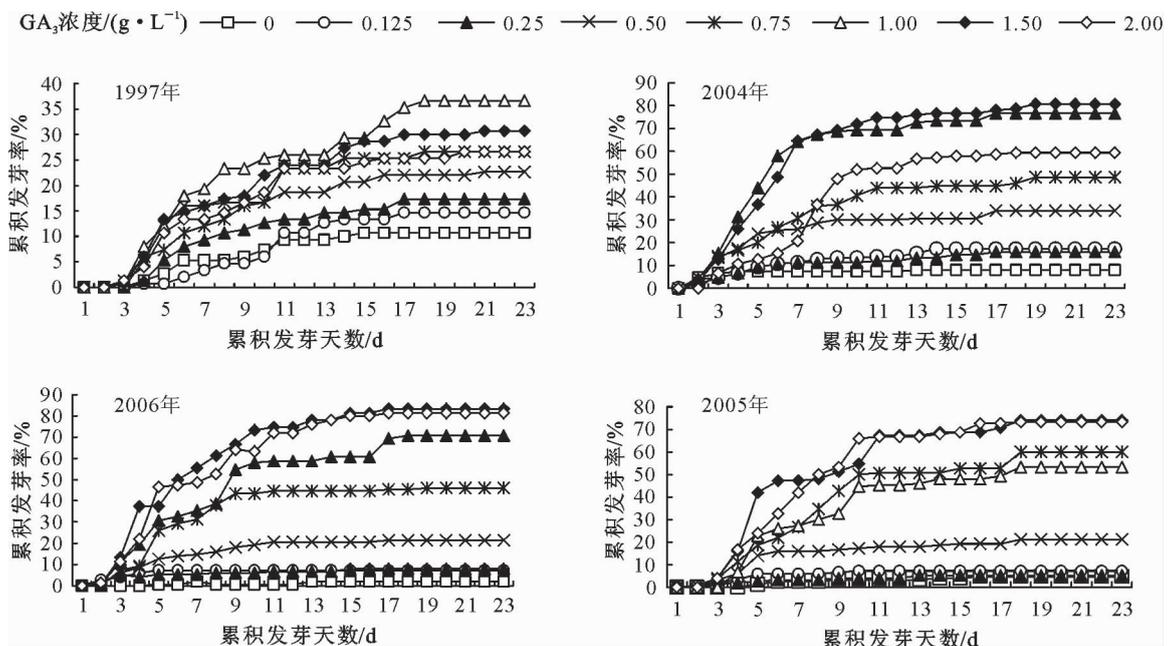


图 3  $\text{GA}_3$  作用下沙米不同年份种子萌发进程

Fig. 3 Germination processes of *A. squarrosus* seeds collected from different time with  $\text{GA}_3$  treatment

表2 不同浓度 GA<sub>3</sub> 处理对民勤不同年份沙米种子的发芽率的差异性Table 2 Differences in germination rate among the seeds from different time with GA<sub>3</sub> treatment

浓度/(g·L <sup>-1</sup> )	1997	2004	2005	2006
0	10.00±2.79aA	3.33±0.0aA	8.67±1.70aA	3.33±1.49aA
0.125	16.66±4.22abB	8.0±2.26aA	16.0±3.71aA	9.33±3.40aB
0.25	19.33±3.40abcB	5.33±1.7aA	13.33±2.58aA	11.33±4.16aAB
0.50	18.00±3.43abcA	18±3.59bA	33.33±3.49bA	18.67±6.20aA
0.75	28.00±2.26bcA	63.33±2.79cB	44.67±9.70bAB	60.00±15.53bAB
1.00	28.00±6.96bcA	56.66±2.11cB	70.0±3.80cC	76.69±4.22bcC
1.50	30.00±3.50cA	74.67±5.01dB	77.33±6.87cB	80.00±2.98bcB
2.00	24.67±3.27bcA	71.33±4.78dB	70.67±6.78cB	81.33±5.63cB

## 4 讨论

种子萌发受自身因素和外部生态环境因素等的干扰,其发芽率对作物生长状况有直接的影响,尤其荒漠植物种子的萌发更是一个复杂的过程,荒漠植物种子在长期的进化过程中演化出了对严酷生境相适应的萌发对策<sup>[31]</sup>,沙米是沙质地表植被演替的先锋植物,其种子存在一定的休眠,种子繁殖又是它唯一的繁殖方式,而 GA<sub>3</sub> 可以促进内源物和生长素的合成,从而破除沙米种子的休眠,促进种子的萌发,这与高春智、赵婵璞<sup>[32-33]</sup>等的研究一致。所以在种植沙米时,需要考虑打破种子的休眠状态,从而有效地提高沙米种子的发芽率,同时,必须保证种子萌发所需的水分条件,使种子正常萌发。

在4生态区域中,沙米种子在 GA<sub>3</sub> 作用下差异显著,沙坡头的种子发芽率、发芽势最高,这与4个生态区域的干旱程度以及年际降水量有关,因此可以认为沙米种子萌发适应对策受区域生态条件的影响,这与马全林<sup>[21]</sup>、韩向东<sup>[27]</sup>等的研究一致。GA<sub>3</sub> 浓度 1.50~2.00 g·L<sup>-1</sup>时发芽率最高,研究指出只有在一定浓度范围内 GA<sub>3</sub> 才可以有效促进沙米种子的萌发,缩短萌发周期,这与张檀<sup>[34]</sup>等的研究一致。GA<sub>3</sub> 作用发挥的大小与沙米种子的储存时间有直接的关系,1997年的沙米种子发芽率、发芽势显著低于2006年的沙米种子,这与种子的储藏时间、温度、方式以及年际降雨量、种子含水率等方面有关,此结果与马全林<sup>[21]</sup>、刘有军<sup>[35]</sup>等的研究一致。

沙米是典型沙生植物,可以适应较强的风沙环境<sup>[36-37]</sup>,也是荒漠中的优良固沙植物和牧草,沙米种子还是一种天然的功能性食品。随着气候变化,土地严重沙化、过度放牧、肆意滥采,导致野生资源几近耗尽。因此,需要实现沙米人工栽培或促进自然沙米种群发展,利用种子进行植被恢复或者人工种植沙米时,首先要破除种子休眠,提高种子发芽率,GA<sub>3</sub> 可以作为破除种子休眠的优选激素,同时提供足够的水分,以供应种子萌发,充分发挥其先锋植物

的作用,从而使沙米对流沙生境表现出良好适应能力。

## 5 结论

GA<sub>3</sub> 对4生态区域的沙米种子均有不同程度的促进作用,沙坡头种子的发芽率、发芽势最高,奈曼次之,民勤种子的发芽势最低。GA<sub>3</sub> 浓度梯度以 2.00 g·L<sup>-1</sup> 的浓度处理下种子萌发率最高,1.50 g·L<sup>-1</sup> 的处理次之,适宜的 GA<sub>3</sub> 浓度对沙米种子的萌发具有显著促进作用。4生态区域间沙米种子的萌发差异性显著。

GA<sub>3</sub> 作用下民勤不同年份沙米种子的发芽率不同,2006种子的发芽势较高,1997年种子的发芽势最低,各年份间沙米种子的萌发差异性显著。

## 参考文献:

- [1] WHEELER M L, GUILLES R P. Population structure, genetic diversity, and morphological variation in *Hans coartort* Dougl[J]. Can. J. For. Res., 1982, 12:595-606.
- [2] 齐凯,安晓亮,叶世河.沙米生长特性调查[J].内蒙古林业科技,2010,36(1):17-21.
- [3] 李艳,李思锋,王庆,等.光温和赤霉素对跳舞草种子萌发的影响[J].西北植物学报,2009,29(12):2558-2563.  
LI Y, LI S F, WANG Q. Effect of light temperature and GA<sub>3</sub> on the germination of *Codariocalyx motorius* seeds[J]. Acta Bot. Boréal.-Occident. Sin., 2009, 29(12):2558-2563. (in Chinese)
- [4] VANGE V, HEUCH I, VANDVIK V. Do seed mass and family affect germination and juvenile performance in *Knautia arvensis*, a study using failure-time methods[J]. Acta Oecologica, 2004, 25:169-178.
- [5] 辞海编辑委员会.辞海(下)[M].上海:上海辞书出版社,1979.
- [6] 任文明,刘雪峰,倪春梅.毛乌素沙漠天然沙米营养成分的分析[J].内蒙古农业大学学报,2005,26(2):88-90.  
REN W M, LIU X F, NI C M. An analyse on nutritional composition of natural *Agriophyllum squarrosum* of Maowusu desert [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2005, 26(2):88-90. (in Chinese)
- [7] 张建农,赵继荣,李计红.沙米种子营养成分的测定与分析[J].草业科学,2006,23(3):77-79.

- ZHANG J N, ZHAO J R, LI J H. Determination and analysis of seed nutrients of *Agriophyllum squarrosum* [J]. Pratacultural Science, 2006, 23(3): 77-79. (in Chinese)
- [8] 王宗灵, 王刚, 施捌筠, 等. 沙米种子萌发对策[J]. 中国沙漠, 1996, 16(Supp. 1): 15-19.
- [9] REES M. Seed dormancy[M]//Crawley M J, ed. Plant Ecology. Oxford: Blackwell Science, 1997. 214-238.
- [10] WHITE T A, CAMPBELL B D, KEMP P D. Laboratory screening of the juvenile responses of grassland species to warm temperature pulses and water deficits to predict invasiveness[J]. Functional Ecology, 2001, 45: 103-112.
- [11] TOBE K, ZHANG I P, MASA K. Seed germination and seedling emergence of three annuals growing on desert sand dunes in China[J]. Annals of Botany, 2005, 95(4): 649-659.
- [12] 杨荣超, 张海军, 王倩, 等. 植物激素对种子休眠和萌发调控机理的研究进展[J]. 草地学报, 2012, 20(1): 1-9.
- YANG R C, ZHANG H J, WANG Q, et al. Plant hormones on seed dormancy and germination of the research progress of regulation mechanism[J]. Journal of Grassland, 2012, 20(1): 1-9. (in Chinese)
- [13] 刘永庆, 罗泽民. 赤霉素与脱落酸对番茄种子萌发中细胞周期的调控[J]. 植物学报, 1995, 37(4): 274-282.
- LIU Y Q, LUO Z M. GA and ABA regulation on the cell cycle in germination of tomato seeds[J]. Acta Botanica Sinica, 1995, 37(4): 274-282. (in Chinese)
- [14] 左天觉. 烟草的生产、生理和生物化学[M]. 朱尊权, 译. 上海: 上海远东出版社, 1993.
- [15] 钟希琼, 王惠珍. 高等植物赤霉素生物合成及其调节研究进展[J]. 植物学通报, 2001, 18(3): 303-307.
- ZHONG X Q, WANG H Z. Progress on GA biosynthesis and regulation in higher plants[J]. Chinese bulletin of Botany, 2001, 18(3): 303-307. (in Chinese)
- [16] STEBER C. De-repression of seed germination by GA signaling[J]. Seed Reference, 2007, 20: 248-264.
- [17] YAMAGUCHI S, KAMIYA Y. Gibberellins and light stimulated seed germination[J]. J. Plant Growth Regul., 2002, 20: 369-376.
- [18] 杨塞, 肖层林. 赤霉素的生物合成及促进水稻茎伸长机理研究进展[J]. 作物研究, 2004(5): 317-320.
- [19] ZHENG Y R, GAO Y, PING A, et al. Germination characteristics of *Agriophyllum squarrosum* [J]. Canadian Journal of Botany, 2004, 82(11): 1662-1670.
- [20] 王丽, 闫德仁, 孟显波. 沙米种子萌发特性探讨[J]. 内蒙古林业科技, 2009, 35(1): 27-29.
- WANG L, YAN D R, MENG X B. Characteristics of seed germination of *Agriophyllum squarrosum* [J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science & Technology, 2009, 35(1): 27-29. (in Chinese)
- [21] 马全林, 张德魁, 陈芳, 等. 流动沙丘先锋植物沙米的种子特征研究[J]. 种子, 2008, 27(11): 72-76.
- MA Q L, ZHANG D K, CHEN F. Study on seed characters of *Agriophyllum squarrosum*, a pioneer plant on mobile sand-dune[J]. Seed, 2008, 27(11): 72-76. (in Chinese)
- [22] BAI W M, BAN X M, LI L H. Effects of *Agriophyllum squarrosum* seed banks on its colonization in a moving sand dune in hunshandake sand land of China[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 59: 151-157.
- [23] 王康英, 王黎虹, 刘慧霞, 等. 温度和光照对沙米种子萌发特性的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2014(2): 109-111.
- WANG K Y, WANG L H, LIU H X. Effect of temperature and light on seed germination characteristics of *Agriophyllum squarrosum* [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2014(2): 109-111. (in Chinese)
- [24] 崔建垣, 李玉霖, 赵哈林, 等. 不同环境条件对沙米种子萌发的影响[J]. 西北植物学报, 2009, 29(5): 996-1000.
- CUI J Y, LI Y L, ZHAO H L. Effects of temperature, water potential and burial depth on germination of *Agriophyllum squarrosum* [J]. Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin., 2009, 29(5): 996-1000. (in Chinese)
- [25] 陈文, 马瑞君, 王桔红, 等. 盐和 PEG 胁迫对沙米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(4): 113-119.
- CHEN W, MA R J, WANG J H. Effect of salt and drought simulated by PEG on seed germination and seedling growth of *Agriophyllum squarrosum* [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(4): 113-119. (in Chinese)
- [26] 赵丽娅, 赵锦慧, 李锋瑞. 沙埋对几种沙生植物种子萌发和幼苗的影响[J]. 湖北大学学报: 自然科学版, 2006, 28(2): 192-194.
- ZHAO L Y, ZHAO J H, LI F R. Effects of sand-burying on seed germination and seedling of several psammophytes species[J]. Journal of Hubei University: Natural Science, 2006, 28(2): 192-194. (in Chinese)
- [27] 韩向东. 固沙先锋植物沙米的生物学特征研究[J]. 甘肃林业科技, 2007, 32(4): 3-8.
- HAN X D. Study on biological characters of *Agriophyllum squarrosum*, a pioneer plant for sand control[J]. Journal of Gansu Forestry Science and Technology, 2007, 32(4): 3-8. (in Chinese)
- [28] 魏林源, 马彦军, 马全林, 等. 流动沙丘先锋植物沙米种子萌发影响因素[J]. 中国农学通报, 2015, 31(7): 18-22.
- WEI L Y, MA Y J, MA Q L. Influence factors analysis of *Agriophyllum squarrosum* germination of mobile sand dunes pioneer plant[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(7): 18-22. (in Chinese)
- [29] SMITH S E, RILEY E, TISS J L, et al. Geographical variation in predictive seedling emergence in a perennial desert grass[J]. Journal of Ecology, 2000, 88: 139-149.
- [30] GUTTERMAN Y. Seed germination in desert plants[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1993.
- [31] 张勇, 薛林贵, 高天鹏, 等. 荒漠植物种子萌发研究进展[J]. 中国沙漠, 2005, 25(1): 106-112.
- ZHANG Y, XUE L G, GAO T P. Research advance on seed germination of desert plants[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(1): 106-112. (in Chinese)
- [32] 高春智, 何炎红, 田有亮, 等. 不同浓度赤霉素浸种对樟子松种子萌发的影响[J]. 内蒙古农业大学学报, 2012, 33(3): 67-72.
- GAO C Z, HE Y H, TIAN Y L, et al. Effect of different concentration of gibberellin on the seed germination of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2012, 33(3): 67-72. (in Chinese)

- [33] 赵婵璞,刘冬云,王卫军. 蹄叶橐吾种子萌发特性的研究[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(2): 121-124.  
ZHAO C P, LIU D Y, WANG W J. Germination characteristics of *Ligularia fischeri* seeds[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(2): 121-124. (in Chinese)
- [34] 张檀,郑瑞杰,梅立新,等. 长柄扁桃种子萌发特性的研究[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(4): 73-76.  
ZHANG T, ZHENG R J, MEI L X. Germination characteristics of the seeds of the *Amygdalus pedunculata* Pall[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(4): 73-76. (in Chinese)
- [35] 刘有军,纪永福,李得禄. 储藏方式对碟果虫实种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 草业科学, 2014, 31(10): 1908-1914.  
LIU Y J, JI Y F, LI D L. Effects of different storage methods on germination and seedling growth of *Corispermum patelliforme* seeds[J]. Pratacultural Science, 2014, 31(10): 1908-1914. (in Chinese)
- [36] 常学礼,刘颖茹,杨持. 裸沙斑块生境岛对沙米 *Agriophyllum squarrosum* 种群影响的研究[J]. 内蒙古大学学报:自然科学版, 2000, 31(2): 228-232.  
CHANG X L, LIU Y R, YANG C. Study on influence upon *Agriophyllum squarrosum* Population by the niche island of nude sandy patches[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Neimongol, 2000, 31(2): 228-232. (in Chinese)
- [37] 张继义,赵哈林,崔建垣,等. 科尔沁沙地流动沙丘沙米群落生物量特征及其防风固沙作用[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 152-154.  
ZHANG J Y, ZHAO H L, CUI J H. Biomass of *Agriophyllum squarrosum* community and its function on mobile sand dune in Horqin sandy land[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(3): 152-154. (in Chinese)
- (上接第 47 页)
- [19] 杨智杰,陈光水,谢锦升,等. 杉木、木荷纯林及其混交林凋落物量和碳归还量[J]. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2235-2240.  
YANG Z J, CHEN G S, XIE J S, et al. Litter fall production and carbon return in *Cunninghamia lanceolata*, *Schima superba*, and their mixed plantations[J]. Journal of Applied Ecology, 2010, 21(9): 2235-2240. (in Chinese)
- [20] 孔维静,郑征. 四川省茂县四种人工林凋落物研究[J]. 中南林学院学报, 2004, 24(4): 27-31.  
KONG W J, ZHENG Z. Litter fall of four Man-made forests in Maoxian, Sichuan[J]. Journal of Central South Forestry University, 2004, 24(4): 27-31. (in Chinese)
- [21] 樊后保,苏兵强. 杉木人工林生态系统的生物地球化学循环 I: 养分归还动态[J]. 应用与环境生物学报, 2000, 6(2): 127-132.  
FAN H B, SU B Q. Biogeochemical cycle within ecosystem of Chinese fir plantations I: Dynamics of nitrogen deposition [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2000, 6(2): 127-132. (in Chinese)
- [22] 高玉春,高人,杨智杰,等. 杉木中龄林和老龄林凋落物数量、组成及动态比较[J]. 亚热带资源与环境学报, 2010, 5(2): 39-45.  
GAO Y C, GAO R, YANG Z J, et al. Litterfall in two forests of middle-aged and old-growth Chinese fir: amount, composition and seasonal dynamics [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2010, 5(2): 39-45. (in Chinese)
- [23] 田大伦,宁晓波. 不同龄组马尾松林凋落物量及养分归还量研究[J]. 中南林学院学报, 1995, 15(2): 163-169.  
TIAN D L, NING X B. Studies of the amount of litter and nutrient restitution in different age of classes *Pinus massoniana* plantation[J]. Journal of Central South Forestry University, 1995, 15(2): 163-169. (in Chinese)
- [24] 尉海东,马祥庆. 不同发育阶段马尾松人工林生态系统碳储量研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2007, 35(1): 171-174.  
WEI H D, MA X Q. Study on the carbon storage and distribution of *Pinus massoniana* Lamb. plantation ecosystem at different growing stages [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2007, 35(1): 171-174. (in Chinese)
- [25] 杨会侠,汪思龙,范冰,等. 不同林龄马尾松人工林年凋落量与养分归还动态[J]. 生态学杂志, 2010, 29(12): 2334-2340.  
YANG H Y, WANG S L, FAN B, et al. Dynamics of annual litter mass and nutrient return of different age masson pine plantations[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(12): 2334-2340. (in Chinese)
- [26] 瑞瑞玲,丁贵杰,王胤. 不同密度马尾松人工林凋落物及养分归还量的年变化特征[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2006, 30(5): 83-86.  
YAO R L, DING G J, WANG Y. The annual variation feature of litter and nutrient restitution in different density *Pinus massoniana* plantation [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2006, 30(5): 83-86. (in Chinese)
- [27] 葛晓改,肖文发,曾立雄,等. 不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 852-862.  
GE X G, XIAO W F, ZENG L X, et al. Study on litterfall, nutrient content and nutrient return of *Pinus massoniana* plantation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(3): 852-862. (in Chinese)
- [28] 张驰,张林,李鹏,等. 亚热带常绿阔叶林凋落物生产及季节动态对模拟氮沉降增加的响应[J]. 生态学杂志, 2014, 33(5): 1205-1210.  
ZHANG C, ZHANG L, LI P, et al. Response of litter production and its seasonality to increased nitrogen deposition in a subtropical evergreen broad-leaved forest [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(5): 1205-1210. (in Chinese)
- [29] 李洁冰,闫文德,马秀红. 亚热带樟树林凋落物量及其养分动态特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(5): 223-228.  
LI J B, YAN W D, MA X H. Litterfall production and nutrient dynamics of *Cinnamomum camphora* in subtropical region [J]. Journal of Central South University of Forestry, 2011, 31(5): 223-228. (in Chinese)