

# 增氧浸种条件下寒地稻种萌发耗氧规律试验研究

刘少东<sup>1</sup>, 汪春<sup>2,3\*</sup>, 衣淑娟<sup>2</sup>

(1. 黑龙江八一农垦大学土木水利学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 黑龙江 大庆 163319; 3. 中国热带农业科学院南亚热带作物研究所, 广东 湛江 524091)

**摘要:** 浸种是寒地水稻生产的重要环节, 通过人工措施为稻种提供适宜的水分、温度和氧气环境可促进种子萌发, 其效果关系到秧苗质量和水稻产量。微孔曝气增氧是实现气—液两相氧传质的有效方法, 为获得寒地水稻浸种期间氧气环境对种子萌发的影响及种子需氧规律, 对寒地水稻品种东农 426 在浸种期间进行不同频次的微气泡增氧试验, 测取其浸种水的氧气消耗规律并对比种子发芽率。试验结果表明: 微气泡增氧浸种可显著提高种子发芽率, 发芽率随增氧频次增加而提高。从氧气消耗总体规律来看, 在浸种 0~12 h 种子不消耗氧气, 12~25 h 耗氧速度较慢, 至 25 h 溶解氧消耗速度开始加快, 此后耗氧速度随浸种时长呈加速态势, 浸种完成时耗氧速度达到最高。不同增氧频次在 1~6 d 溶解氧消耗速度一致, 7~9 d 溶解氧消耗速度随频次加快。此外, 对比分析浸种水氧气消耗规律与清水溶解氧变动规律, 曝气增氧会产生超饱和溶解氧, 但在浸种过程中可不予考虑。

**关键词:** 增氧; 浸种; 寒地水稻; 萌发; 氧气消耗

中图分类号: S511

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2020)04-0027-06

## Experimental Study on the Law of Oxygen Consumption of Rice Seed Germination in Cold Region under Aerated Oxygen Soaking Conditions

LIU Shaodong<sup>1</sup>, WANG Chun<sup>2,3\*</sup>, YI Shujuan<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Water Conservancy, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319; 2. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319; 3. South Subtropical Crops Research Institute, CATAS, Zhanjiang 524091, China)

**Abstract:** Soaking seeds plays an important role in rice production in cold regions. Providing suitable water, temperature and oxygen environment for rice seeds through artificial measures can promote seed germination. Its effect is related to seedling quality and rice yield. Microporous aeration is an effective method to realize gas-liquid two-phase oxygen mass transfer. In order to obtain the effect of oxygen environment on seed germination and the law of seed oxygen demand during rice seed soaking in cold region, the experiment of microbubble aeration with different frequencies was carried out on rice variety Dongnong 426 in cold region during seed soaking, and the law of oxygen consumption in seed soaking water was measured and the seed germination rate was compared. The results showed that seed germination rate was significantly increased by microbubble aeration soaking, and the germination rate increased with the increase of aeration frequency. According to the general law of oxygen consumption, seeds do not consume oxygen in 0~12 h of seed soaking, but slow in 12~25 h, dissolved oxygen consumption begins to accelerate at 25 h. After that, the oxygen consumption rate accelerated with the soaking time, and reaches the highest at the completion of seed soaking. Dissolved oxygen consumption rate was the same in 1~6 days with different increasing frequency, and increased with frequency in 7~9 days. In addition, the law of oxygen consumption in soaking water and the law of dissolved oxygen variation in clear water were compared and analyzed. The supersaturated dissolved

收稿日期: 2019-04-09

**基金项目:** 国家科技支撑计划课题(2014BAD06B01); 黑龙江省农垦总局推广示范项目(2019HKQNJTG0017); 黑龙江八一农垦大学农业机械化工程重点实验室开放课题(2017-2018); 黑龙江八一农垦大学校内培育课题资助计划(XZR2015-04); 黑龙江八一农垦大学“三纵三横”项目(TDJH201803)

**作者简介:** 刘少东(1980-), 男, 讲师, 博士, 主要从事水稻全程机械化生产及农业水土资源高效利用的研究。

**通讯作者:** 汪春, 男, 博士, 教授, E-mail: wangchun1963@126.com

oxygen could be produced by aeration, but it could not be considered in the process of seed soaking.

**Key words:** Oxygen enrichment; Seed soaking; Cold rice; Germination; Oxygen consumption

东北地区是我国最大的粳稻产区,由于其位于高纬度地区,水稻生长期短,在人工环境下浸种育秧是延长水稻生长期的主要手段,秧苗质量是水稻生产取得高产的重要保障<sup>[1-3]</sup>。秧苗素质与浸种、催芽环节关系密切<sup>[4]</sup>。含水量低于14%时水稻种子处于生理休眠状态,浸种催芽是为稻种萌发提供适宜的环境条件,使种子获得发芽所需的水分并去除发芽抑制物质<sup>[5]</sup>。在萌发过程中,种子生理活动主要是物质转化和呼吸作用,这些生理活动受水势、氧气和温度条件的限制<sup>[6]</sup>。

黑龙江地区水稻一般采用水浸式浸种,浸种时间达10天左右,长时间浸泡会使稻种萌发氧气条件较差,影响催芽效果。因此浸种期间对稻种增氧极为关键。省内水稻零散种植户一般采用传统浸种催芽技术,以人工作业方式对浸种催芽过程中的温度和水分条件进行简易控制,浸种催芽效果较差<sup>[7]</sup>。而在农业生产机械化较高的黑龙江垦区,广泛采用水浸式智能控温浸种催芽设施,实现了对种箱内水温的精准控制,在浸种箱换水过程进行自然增氧,省时省种省人工,水稻产量也可得到提高<sup>[8]</sup>。但是,智能化程度较高的浸种催芽装置对浸种环节氧气的控制仍限于“以水调气”,囿于换水次数及水体自然流动增氧效率,对稻种的供氧效果有限,长时间浸种易导致种子萌动后缺氧而引起发芽率降低。与生产实践情况相一致,水稻浸种技术的科研工作也侧重水温控制及配套自动控制系统<sup>[9-11]</sup>,针对浸种过程中稻种耗氧规律及浸种增氧技术的相关研究较少。

微孔曝气增氧装置通过利用空气压缩机、输气管道和微孔扩散器在水体产生微气泡,使空气中的氧在高氧分压作用下溶于水中,可有效提高水体中的溶解氧含量<sup>[12]</sup>。该项技术在污水处理和水产养殖领域得到广泛应用<sup>[13-14]</sup>。

本文采用微孔曝气方法对水稻浸种水进行微气泡增氧处理,试验分析不同增氧频率对稻种发芽率的影响,获得水稻种子萌发氧气消耗规律,并由此给出寒区水稻浸种增氧建议,为解决当前浸种催芽环节供氧不足问题和提高稻种发芽质量提供借鉴和参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 时间与地点

试验于2018年3月在黑龙江八一农垦大学水稻生态育秧实验室进行,温控装置可控制室内气温。

### 1.2 供试材料

稻种选用东农426,稻种初始含水量10.3%。仪器设备有:溶氧量测定仪(雷磁JPSJ-605)、1 000 mL玻璃烧杯、恒温水浴和微孔增氧泵。

### 1.3 试验内容与方法

黑龙江省水稻水浸式浸种水温及时长已形成固定模式,一般为水稻种子浸入10~12℃的水中8~10天<sup>[15]</sup>,此处仅以增氧频率为控制变量设定四种处理,各处理参数如表1所示。组合1为对照组,仅在种子放入前曝气增氧,此后全程不增氧。

表1 增氧浸种试验参数表

组号	增氧频次 (次/天)	稻种数量 (粒)	水量 (mL)	时间间隔 (h)
1	0	1 000	1 000	-
2	1	1 000	1 000	24
3	2	1 000	1 000	12
4	3	1 000	1 000	8

具体方法是玻璃烧杯内装入1 000 mL清水,在恒温水浴锅内增温并保持11℃恒温状态并放入经盐水浸泡选出的稻种1 000粒(约25 g),浸种9 d。增氧方法是将微孔增氧泵扩散器放入烧杯底部进行曝气增氧,单次增氧时长10 min(预实验表明,曝气10 min内可使烧杯内水溶氧量达到峰值)。每2 h记录浸种水溶氧量数值。浸种达9 d时,取出种子放入培养皿中发芽并测定发芽率。每种处理重复6次。

此外,为剔除浸种过程中水中氧气的自然变动造成的溶氧量变动,需测定曝气后清水溶氧量变化规律。玻璃烧杯加入1 000 mL清水后置于恒温水浴锅,水浴锅将烧杯内水增温至11℃后,打开增氧泵曝气增氧10 min。记录初始值溶氧量后,每隔2 h测定烧杯内水的溶氧量。各组试验重复3次,取均值用于分析。

## 2 试验结果

### 2.1 稻种发芽率

稻种发芽率试验数据如表2所示。

单因素重复试验进行方差分析的前提条件

表2 稻种发芽率

组号	时间间隔	试验发芽率(%)					
		1	2	3	4	5	6
1	-	76.3	68.6	72.2	75.4	70.2	71.7
2	24 h	84.9	82.1	81.7	80.5	84.4	82.3
3	12 h	90.4	85.7	87.6	88.1	89.6	86.2
4	8 h	91.5	89.2	91.5	90.3	90.7	91.9

是:(1)各样本组内观察值相互独立且符合正态分布;(2)各样本组内观察值总体方差相等,即方差齐性。采用SPSS软件对各组发芽率数据分别进行正态性检验和方差齐性检验如表3和表4所示。

表3中各组数据 sig. 值均大于 0.05。表4中 sig. 值大于 0.05。由此可知,各组合发芽率数据均符合正态分布,且方差齐性。因此,可对发芽率结果进行方差分析。

方差分析结果如表5所示。

表3 发芽率的 S-W 正态性检验

	S-W 统计量	df	Sig.
1	0.946	6	0.712
2	0.923	6	0.528
3	0.951	6	0.750
4	0.920	6	0.504

表4 方差齐性检验

	Levene 统计量	df1	df2	Sig.
	2.179	3	20	0.122

表5 发芽率方差分析结果

差异源	SS	df	MS	F	Sig.
组间	1185.62	3	395.21	98.70	0.000
组内	80.08	20	4.00		
总计	1265.70	23			

表5表明,显著性水平小于 0.05,本试验中四个试验组合发芽率间存在显著性差异。对各组合发芽率进行 LSD 多重比较,结果如表6所示。

LSD 多重比较结果显示,各组合两两之间均

表6 发芽率 LSD 多重比较结果

序号	增氧处理	均值(%)	0.05
1	间隔 8 h	90.85	a
2	间隔 12 h	87.93	b
3	间隔 24 h	82.65	c
4	不增氧	72.40	d

存在显著性差异。即相对于不增氧处理,增氧处理发芽率增加显著。在上述选定的频次水平中,随增氧频次增加,种子发芽率显著增加。

各组合发芽率均值随增氧频次变化曲线如图1所示。

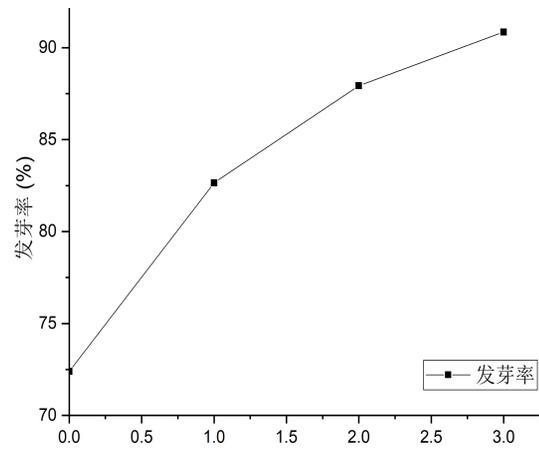


图1 发芽率随溶氧量变化曲线

显然,随增氧频次的增加,发芽率总体上升。但曲线斜率变化表明,发芽率增长幅度有放缓的趋势。

## 2.2 浸种过程氧气消耗规律

### 2.2.1 不增氧条件下氧气消耗规律

不增氧情况下浸种水溶氧量变化如图2所示,浸种水溶氧量初始值为 11.75 mg/L,浸种至 30 h 左右,溶氧量下降并维持在 0.20 mg/L 左右,后文中称此值为下限平衡状态。为便于对比分析,绘制浸种水 40 h 内的溶氧量与清水 40 h 溶氧量变化曲线(图3)。

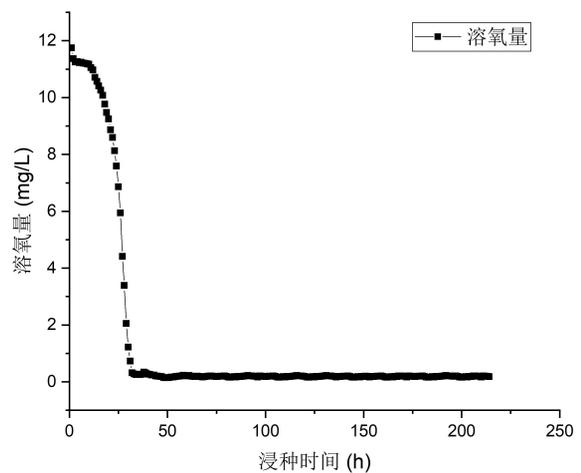


图2 不增氧浸种水溶氧量变化曲线

由图3可以看出,曝气后浸种水溶氧量达到峰值,种子放入后溶氧量略有下降,持续时间 2 h。在 2~12 h 时间段内,溶氧量保持在较高值。其

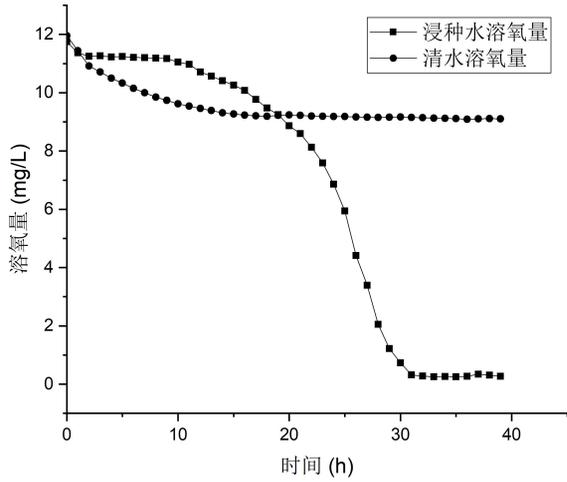


图3 40 h内浸种水与清水溶氧量对比

后,水中溶氧量开始缓慢下降。从25 h开始,溶氧量开始快速下降阶段。30 h左右,溶氧量达到下限平衡状态阶段,水中一直溶氧量0.20 mg/L左右。

清水曝气后溶氧量达到峰值11.95 mg/L,其后溶氧量开始逸散,逸散速度先快后慢,最快逸散速度为每小时0.52 mg/L。14 h后溶氧量降至9.10 mg/L左右后维持不变。这是因为曝气过程中,气泡扩散上浮引起烧杯内水和气的强烈混掺翻滚,使水中溶氧量超过该温度和气压下的氧饱和浓度,出现“过饱和现象”<sup>[16]</sup>。曝气停止后,水中的过饱和溶解氧会向空气中逸散,直至气液相间氧传质达到动态平衡,此时溶氧量即为水的饱和溶氧量。图3中清水溶氧量曲线体现了这一变化过程。

### 2.2.2 增氧条件下浸种水耗氧规律

图4至图6分别为增氧次数1次/天、2次/天和3次/天浸种水溶氧量变化规律。综合图2、图4、图5和图6可以看到:

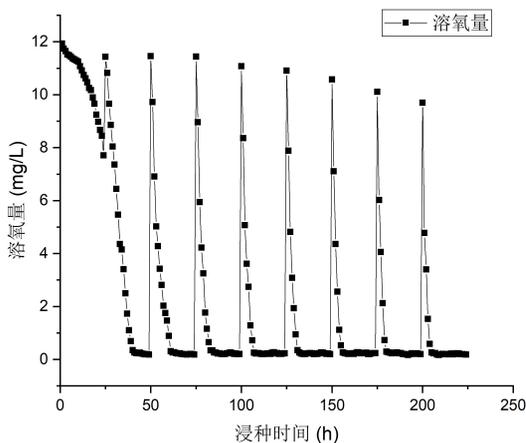


图4 1次/天增氧浸种水溶氧量变化

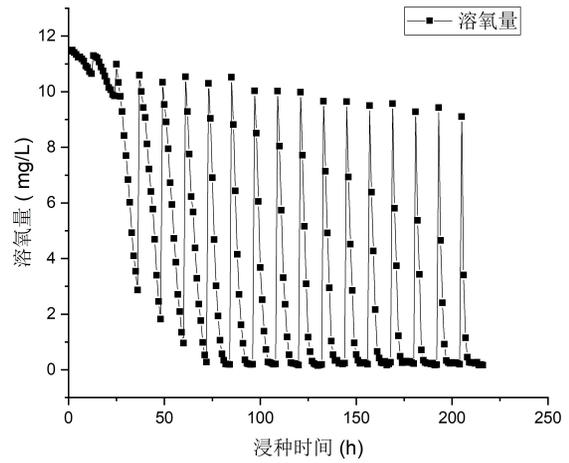


图5 2次/天增氧浸种水溶氧量变化

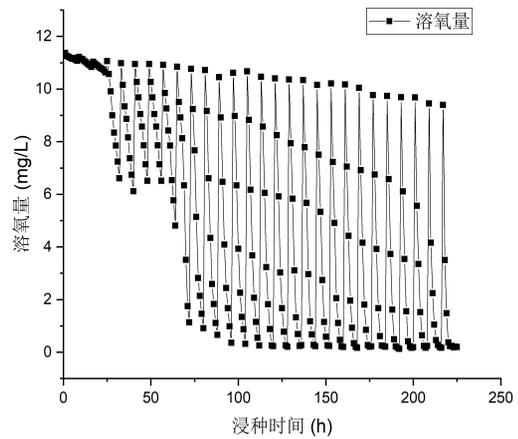


图6 3次/天增氧浸种水溶氧量变化

(1)浸种水溶氧量在曝气后达到峰值,其后溶氧量开始下降。浸种期各天溶氧量峰值随浸种时长变化规律如图7所示,为便于对比,对增氧频次为2次/天和3次/天的溶氧量峰值取其日内平均值。

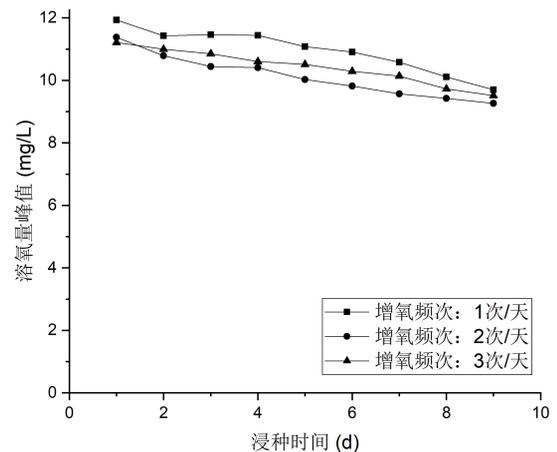


图7 浸种期溶氧量峰值变化规律

图7中曲线表明,不同增氧频次条件下,随着

浸种时长的增加,溶氧量峰值均呈下降趋势。其原因可能是水溶氧能力受溶质影响。种子吸胀萌动过程中会有大量的溶质渗漏,随水中溶质含量增加,浸种水溶氧能力逐渐下降。

(2)氧气消耗速度与溶氧量值相关,溶氧量值高则消耗速度快。从图4至图6中浸种24 h后各次增氧后的溶氧量下降规律来看,曝气后溶氧量较高时,溶氧量几乎呈线性下降。当溶氧量降至1 mg/L后,溶氧量下降斜率变缓,曲线尾部在后期出现了明显的“倒角”现象。1 d时间内,溶氧量水平较高,没有这一现象。

(3)在浸种0~24 h内容氧量下降较慢,后期溶解氧消耗速度逐步加快。

以图4为例,在1次/天增氧频次条件下,浸种第一天水中氧气消耗较慢,经过24 h溶氧量从11.93 mg/L下降至7.47 mg/L。浸种第二天水中氧气消耗速度明显加快,曝气后溶氧量为11.43 mg/L,经16 h后溶氧量降至下限平衡状态。其后各天溶氧量由曝气后初值降至下限平衡状态耗时逐渐减小。

以氧气消耗曲线割线斜率近似表示本文试验条件下浸种水氧气消耗速率。计算公式为:

$$K = \frac{C_1 - C_2}{\Delta t} \dots\dots\dots(1)$$

式中:K-氧气消耗曲线近似割线斜率;C<sub>1</sub>-曝气后溶氧量初始值;C<sub>2</sub>-溶氧量终值;Δt-溶氧量降至1 mg/L的用时。

为使各增氧时段K值具有可比性,且考虑到溶氧量降至1 mg/L后曲线斜率明显变缓,因此,式(1)中割线两点的初始点取峰值点,割线终点取1 mg/L点,溶氧量未降至1 mg/L的以实际值计。Δt为上述两点间时间差,溶氧量数据时间间隔为2 h,对非整数的时间用内插法确定。为方便比

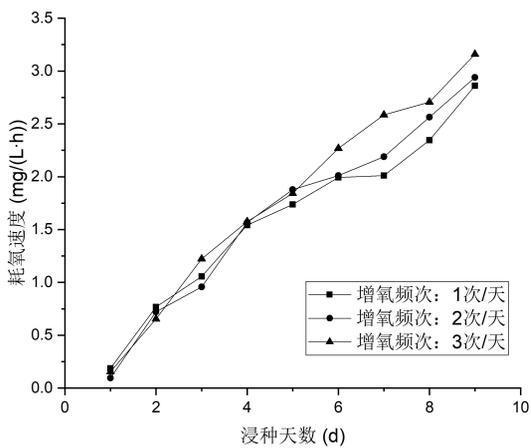


图8 氧气消耗速度曲线

较,将1~9天内频次为2次/天和3次/天各次增氧后耗氧速率取平均值分析。

氧气消耗速度随时间变化如图8所示。从曲线变化趋势可以看出,随浸种天数增加,浸种水溶解氧消耗速度逐步加快。不同增氧频次条件下,浸种早期(1~6 d)各天耗氧速度无明显差异,后期(7~9 d)增氧频次较高时溶解氧消耗较多。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 增氧浸种对种子发芽率的影响

增氧浸种处理对寒地水稻种子萌发具有促进作用,增氧频次对水稻种子发芽率影响显著。作物种子内积累的营养物质主要包括淀粉、蛋白质和脂肪。萌发过程中,稻种内淀粉的降解与转化是种子内物质转化的重要环节,为种子萌发提供能量。淀粉的降解需要大量淀粉代谢酶类的参与,包括α-淀粉酶、β-淀粉酶等。α-淀粉酶对水稻种子胚乳中淀粉的动员机理已得到充分证实<sup>[17]</sup>。增氧处理的超级稻种子萌发阶段淀粉酶活性显著增强,且淀粉酶活性与增氧频次正相关,增氧处理后种子发芽速率、发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数等各项指标明显增强<sup>[18]</sup>。这与本文发芽率试验结果一致。

#### 3.2 过饱和溶解氧对浸种的影响分析

无论是浸种水还是清水,曝气过程中会在水中产生大量悬浮微气泡,气泡中的氧气未溶于水中,但可被溶氧仪检测到。曝气停止后,微气泡会缓慢上浮至水面消散,同时超饱和氧开始逸散,表现为溶氧量值下降。然而,图3中加入种子后浸种水溶氧量在与清水同步略为下降后维持在高位,而清水溶氧量值逐渐下降直至达到饱和溶氧量。其原因可能是微气泡逸散过程不受种子影响,随着气泡逸散,浸种水与清水溶氧量同步下降。气泡散尽后,水稻糙米与种皮间隙及颖壳稃毛蓄存、粘附着一定数量的气泡,气液间浓度梯度差足够大时,向水中进行氧传质,从而出现浸种水溶氧量高于清水溶氧量情况。

水稻种子在浸种0~12 h时间段耗氧较慢,或耗氧量小于蓄粘气泡补氧量,故该阶段可不需考虑过饱和溶解氧的耗散作用。而在浸种3~9 d期间,溶解氧消耗速度远大于清水过饱和溶解氧最快逸散速度,故此阶段溶解氧逸散损失可忽略不计。故在水稻浸种期间可不考虑曝气过饱和氧的逸散损失。

#### 3.3 浸种水溶解氧消耗速度

吸胀阶段种子新陈代谢和呼吸作用较为微弱,浸种水中溶氧量下降较小。种子萌动阶段后期,呼吸作用逐渐加强。破胸后种子进入发芽阶段,呼吸作用进一步增强<sup>[19]</sup>。本试验中各频次增氧条件下,不同浸种期溶解氧消耗速度不同,随浸种时间增长溶解氧消耗速度均呈现逐渐加快趋势印证了这一过程。浸种0~12 h时段浸种水溶解氧几无消耗,该阶段对应快速吸水阶段。日本晴稻种胚组织在吸水后的12 h快速吸水到饱满状态<sup>[15]</sup>,与本文结论一致。

12~25 h溶解氧消耗速度较慢,25 h后溶解氧消耗量快速增加。可以推测该时段水稻种子呼吸作用开始由弱转强。此后直至浸种期满,溶氧量消耗速度随浸种时长处于增长状态,该时段对应种子萌动阶段。浸种期满种子即将进入发芽阶段,此时种子胚根和胚芽开始突破芽鞘,此时浸种水氧气消耗达到浸种阶段最高。从不同增氧频次的耗氧速度对比来看,三个增氧频次在浸种1~6 d氧气消耗速度几乎一致。在浸种7~9 d,增氧频次越高,溶解氧消耗速度越快。稻种会在萌发后期大量合成 $\alpha$ -淀粉酶<sup>[20]</sup>,从而促进种内淀粉降解,使得呼吸耗氧进一步增强。试验表明超级稻浸种期间机械增氧频次越高,种子中 $\alpha$ -淀粉酶活性越强<sup>[16]</sup>。由此可以说明,增加增氧频次会增强 $\alpha$ -淀粉酶活性,并在浸种后期加速种子氧气消耗。因此,在水稻浸种的生产实践中,可在浸种不同时期根据稻种实际耗氧规律设定不同的增氧频率。

## 4 结 论

4.1 对寒地水稻品种东农426进行增氧浸种试验,与对照相比,增氧浸种可有效促进种子萌发和提高水稻发芽率,且种子发芽率随增氧频次增加而提高。在本试验选定的增氧水平范围内,增氧频次对种子发芽率具有显著影响。

4.2 曝气增氧会在水中产生超饱和溶解氧,在浸种早期,浸种水中超饱和氧消耗慢于清水超饱和氧逸散速度。浸种中后期氧气消耗速度远大于正常逸散速度。故在浸种期间可不考虑超饱和氧逸散问题。

4.3 从氧气消耗速度来看,对于试验水稻品种,0~12 h浸种水溶解氧几无消耗,12~25 h溶解氧消耗较慢,25 h溶解氧消耗速度开始加快,此后耗氧速度随浸种时长呈加速态势,至浸种完成时耗氧速度达到最高。0~6 d浸种期,不同频次增氧耗氧

速度相近,浸种后期7~9 d随增氧频次较高的浸种水溶解氧消耗速度较快。可在浸种实践中根据稻种耗氧规律设定不同的增氧频率或强度。

## 参考文献:

- [1] 闫景凤.水稻芽种生产关键技术研究[D].长春:吉林大学,2014.
- [2] 柳洪良,韩云哲,程正海,等.吉林省中东部稻区水稻抗冷、高产栽培技术规程[J].东北农业科学,2017,42(2):44-48.
- [3] 李彦利,严光彬,贾玉敏,等.2006年、2007年气温对吉林省水稻生长的影响[J].吉林农业科学,2010,35(1):9-11.
- [4] Ashraf M, Foolad M R. Pre-sowing seed treatment—a shotgun approach to improve germination, plant growth, and crop yield under saline and non-saline conditions[J]. AdvAgron, 2005, 88: 223-271.
- [5] 北野順一,中山幸則,松井未来生,など.低温期育苗における水稻種子の発芽に及ぼす浸種水温の影響[J].日本作物学会紀事,2010,79(3):275-283.
- [6] Eric Lichtfouse. Sustainable Agriculture Reviews [M]. Dordrecht: Springer, 2009: 159.
- [7] 韩 霞,李佐同,于立河,等.水稻浸种催芽技术的研究现状及发展趋势[J].农机化研究,2012,34(5):245-248.
- [8] 程守全.水稻应用智能设备浸种催芽与普通催芽对比试验分析[J].北方水稻,2013,43(5):28-30.
- [9] 陶桂香,衣淑娟,李佐同,等.水浸控温式水稻种子浸种催芽设备温度场分析[J].农业机械学报,2011,42(10):90-94.
- [10] 罗 斌,潘大宇,高 权,等.基于物联网技术的寒地水稻程控催芽系统设计与试验[J].农业工程学报,2018,34(12):180-185.
- [11] 周修理,张庆宇,于 嵩,等.水稻浸种催芽水温控制系统设计[J].农机化研究,2015,37(12):124-129.
- [12] 陈红瑞.微孔管道增氧对渔业水质的影响[D].太原:山西大学,2011.
- [13] 吴媛媛,周小红,施汉昌,等.污水厂微孔曝气系统工况下充氧性能测试与分析[J].环境科学,2013,34(1):194-197.
- [14] 顾海涛,王逸清.池塘水深与通气量对微孔曝气增氧性能的影响[J].渔业现代化,2015,42(5):29-32.
- [15] 王永生,李存军,陈 静,等.黑龙江省水稻智能化浸种催芽技术的应用评价研究[J].中国农机化学报,2016,37(10):195-199.
- [16] 杜开开.水体中过饱和和溶解气体释放因素探究[D].上海:上海海洋大学,2017.
- [17] 韩 超.水稻种子萌发的蛋白质组学研究[D].武汉:中国科学院研究生院(武汉植物园),2014.
- [18] 熊元基.不同加氧处理对超级稻种子萌发及幼苗农艺性状的影响[D].长沙:湖南农业大学,2014.
- [19] 郑安俭,王州飞,张红生.作物种子萌发生理与遗传研究进展[J].江苏农业学报,2017,33(1):218-223.
- [20] 程昕昕.水稻种子萌发期物质利用相关性状 QTL 定位[D].南京:南京农业大学,2014.

(责任编辑:刘洪霞)