

低剂量 X 射线系统动力学机理分析及 对大麦发芽的影响

Effect of low dose X ray on barley germination and
analysis of system dynamics mechanism

董琛¹ WANG Wei² 张艺¹ 张志勇¹

DONG Chen¹ WANG Wei² ZHANG Yi¹ ZHANG Zhi-yong¹

(1. 山东体育学院体育社会科学学院运动营养与智慧配餐实验室, 山东 济南 250102;

2. 德国慕尼黑大学人类科学中心, 德国 慕尼黑 280539)

(1. Shandong Sport University, School of Sport Social Science, Sport Nutrition and Intelligent
Cooking Laboratory, Jinan, Shandong 250102, China; 2. Human Science Center,
Ludwig-Maximilians-Universität, Munich 280539, Germany)

摘要:建立了 X 射线强度与大麦种子发芽关系的系统动力学模型, 阐释并确证了 X 射线对发芽大麦的影响和变化机理。研究发现, X 射线对大麦种子发芽阶段的芽长、根长、生物量产生抑制作用, 接受剂量为 1 059.65 $\mu\text{Sv/s}$, 试验组 I 在 3 d 后淀粉、蛋白质和脂肪含量分别比对照组延迟增加了 19.8%, 31.6%, 33.3%, 可溶性膳食纤维降低了 41.8%, 且变化程度与 X 射线强度呈正相关, 但 X 射线对发芽率没有显著影响。

关键词: X 射线; 大麦; 发芽; 仿真; 生物量

Abstract: In this study, barley germination test was carried out in an apparatus that could simulate low-dose X ray environment, and the quality parameters of barley were detected to analyze the relationship between the radiation dose received by barley seeds and the germination process of barley. The study found that the X ray of barley seed germination stage of bud length, root length and biomass to produce inhibition, accept the dose of 1 059.65 $\mu\text{Sv/s}$ experimental I starch, protein and fat in 3 days delay. which compared with the control group increased 19.8%, 31.6% and 33.3%, respectively and the soluble dietary fiber was reduced by 41.8%. The degree of change was positively related to the intensity of X ray, but X ray effect on germination rate were not significantly. The effect and mechanism of X ray on germinated food were explained and confirmed.

Keywords: X ray; barley; germination; simulation; biomass

基金项目: 山东省高等学校青年创新人才引育计划(编号:72); 国家社会科学基金重点项目(编号:18ATY002)

作者简介: 董琛(1986—), 男, 山东体育学院讲师, 博士。

E-mail: dongchen@sdpei.edu.cn

收稿日期: 2020-08-24

随着经济社会的飞速发展, 人类活动造成的环境物理性污染已成为继化学性污染之后不可忽视的人为污染, 尤其在食品加工领域^[1-2], 相关设备电离辐射污染日益加重且因剂量不高易被忽视^[3]。当低剂量电离辐射作用于生物体时, 细胞、组织和器官等都会产生相应的反应^[4], 并引发一连串的生物效应, 导致食品品质、成分的变化^[5]。

大麦是中国重要的粮食作物, 含有量多质好的蛋白质、氨基酸, 且膳食纤维、矿物质含量丰富, 营养价值极高, 在食用、饲用、酿造、药用等多领域具有优势^[6-7]。近年来, 现代芽类食品日益涌现^[8], 发芽大麦有效赖氨酸含量升高, 适口性增加^[9], 在肠道内还可以发挥高保水功能, 增加短链脂肪酸吸收, 防止便秘^[10]。但是, 因为种子发芽时对环境条件要求较高, 经常受到辐射、温湿度、水分及人类活动的干扰^[11]。

种子发芽对环境的响应可以认为是其本身贮存的营养物质用于幼株变成独立自氧组织的过程, 低剂量电离辐射是影响大麦种子发芽的重要因素之一^[12], 其作用于有机体会对细胞产生损伤^[13]。而针对电离辐射, 细胞也会立即启动一系列的生化途径, 促进细胞的存活, 同时保持遗传完整性^[14]。这种损伤效应主要取决于细胞生长、增殖和更新的速度, 一般来说, 分裂速度快、细胞周期短的不断增殖的细胞易受损伤^[15]。而处于稳定状态的细胞和正常情况下没有或很少有分裂的, 或者只有在特殊刺激条件下才发生修复增殖的细胞则具有抗辐射能力^[16]。研究^[17]指出, 电离辐射对种子发芽的影响取决于辐射类型、辐射剂量、植物种类及发育阶段等, 然而其是否对大麦种子发芽产生食品品质成分的影响还有待论证。

试验拟利用目前已发展相对成熟的等离子体理论和方法^[18],根据其物质漂移多物理场模型和等离子体化学反应建立的电离辐射的时空分布模型^[19],在装置的几何构型、控制方程和边界条件的基础上,通过仿真试验和有限元分析与计算得到各培养位置上所受的精确辐射强度;根据大麦发芽的食品加工原理、试验现象和相关假设,运用系统动力学方法建立电离辐射强度与大麦发芽动态之间精确的数学模型,通过计算机仿真实验验证模型的有效性,并通过生理生化参数和计算机仿真两方面对空间电离辐射对大麦种子发芽影响的机理进行阐释,旨在为提升现代芽类食品加工水平提供依据。

1 材料与方 法

1.1 样品材料与处理

大麦 (*Hordeum vulgare* L.) 种子: 无菌水中浸泡 10 h, 然后置于底部有湿润滤纸的培养皿中发芽, 每皿 50 粒, 培养皿用锡箔纸遮光处理, 于电离辐射模拟培养箱内培养 3 d。

试验建立的低剂量电离辐射模拟培养平台(LDIRES)能够有效地模拟低剂量电离辐射(LDIR)环境, 培养皿呈六边形排列(见图 1), 可以使大麦在生长过程中受到强度不同的电离辐射照射。培养过程中, 保持温度 23 °C, 压强 100 kPa, 相对湿度保持 30%~70%。低功率小型 X 光管(TUB00083-2 型, 德国 Moxtek 公司)为辐照光源, 最大管电流 200 μA, 最大管电压 50 kV, 最大输出功率 4 W, 靶材钨靶。去除准直器后, X 射线发射角为 60°。

1.2 大麦种子培养皿上所受 LDIR 的精确剂量

在 LDIRES 内空气等离子体控制方程、边界条件和装置的几何构型的基础上, 利用 COMSOL Multiphysics 仿真计算平台对控制方程进行求解^[20]。LDIRES 内部空间任意一点的 LDIR 强度定义为 n_e/n_e , 按式(1)进行求解。

$$I(t) = \iiint_D \frac{n_e(t, x, y, z)}{n_e(t, x, y, z)} dx dy dz, \quad (1)$$

式中:

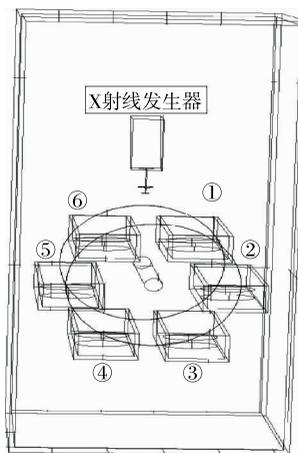
D ——大麦种子所在培养皿底部的空间曲面;

I ——单位时间大麦种子培养皿底部所接受到的总的 LDIR 强度(见表 1), μSv/s;

n_e ——电子的能量密度, J/m²;

n_e ——电子的数量密度。

n_e 、 n_e 均为标量场, 是时空的函数, 可分别表示为 $n_e(t, x, y, z)$ 和 $n_e(t, x, y, z)$, 其中 t 表示时间, (x, y, z) 表示 3D 空间。



①、⑥设为试验组 I, ②、⑤设为试验组 II, ③、④设为试验组 III

图 1 低剂量电离辐射的几何构型

Figure 1 LDIRES prototype (A) and its 3D geometric configuration

1.3 形态测定

根据位置定义, 种子表面 5 mm 以上凸起为种子的根和芽, 用直尺、游标卡尺测定其芽长、根长等, 测定时随机取样。

1.4 营养成分的测定

1.4.1 蛋白质含量 采用考马斯亮蓝比色法^[21]。

1.4.2 脂肪含量 按 GB/T 5512—2008 中的索氏抽提法执行。

1.4.3 淀粉含量 按 GB/T 5009.9—2008 中的酸式水解法执行。

1.4.4 可溶性膳食纤维含量 按 GB/T 5009.88—2008 中的酶质量法执行。

1.5 建模与仿真

利用物质漂移多物理场模型和等离子体化学反应建立电离辐射的时空分布模型, 在装置的几何构型、控制方程和边界条件的基础上, 通过仿真试验和有限元分析与计算各培养位置上所受的精确辐射强度。根据大麦发芽的生态学原理、试验现象和相关假设^[22], 运用系统动力学方法建立电离辐射强度与大麦发芽动态之间精确的数学模型, 并通过计算机仿真实验验证模型的有效性。

1.6 数据统计

所有试验重复 3 次, 结果用平均值±标准差表示, 运用 SPSS 软件的单因素方差分析(ANOVA)进行显著性分析($P \leq 0.05$)。

表 1 LDIRES 内不同位置处大麦培养皿所受的 LDIR 强度

Table 1 LDIR intensities of barley petri dishes at different locations in LDIRES μSv/s

位置	右上 ①	右中 ②	右下 ③	左下 ④	左中 ⑤	左上 ⑥
LDIR 强度	1 059.65	828.30	645.86	645.86	828.30	1 059.65

2 结果与分析

2.1 低剂量 X 射线对大麦种子发芽的影响

由图 2 可知,不同辐射强度的大麦发芽种子在形态上具有明显差异,接收电离辐射最强的 I 组其生长受到抑制最明显;辐射 3 d 后,各试验组与对照组的大麦种子发芽率无明显差异。试验组 I 的芽长、根长受到的抑制最大,辐射 3 d 后其芽长比对照组短 30~33 mm,受辐射最小的试验组 3 的芽长比对照组短 3~5 mm。辐射 3 d 后试验组 1 的根长为对照组的 20%~22%。

由图 3 可知,电离辐射对大麦种子吸水活力以及生长发育有影响,辐射 3 d 后接收最大电离辐射的试验组 I 的生物量是对照组的 48%~50%。种子发芽被辐射后,某些生物效应可能存在潜伏期,其表现性状可能不会立即表现出来,这种潜伏期可能会依据物种的不同而有所不同,从几分钟到几年不等^[23],其主要取决于电离辐射剂量和种子本身的抗辐射能力^[24]。发芽种子细胞中,果胶是一种电离辐射敏感物质,其通过自身降解实现对电离辐射的预警和信号指示^[24]。电离辐射导致的细胞壁降解在宏观上是肉眼可见的,可能也是由于中间片层果胶物质的降解导致了组织软化,同时增加了细胞孔隙,利于细

胞吸水,有时对于难发芽物种种子起促进发芽作用^[23]。种子发芽后,新长出的根与芽快速生长,分生组织活跃,电离辐射对分裂能力强的细胞具有更加明显的抑制作用。根、芽由于生长次序和位置的不同对电离辐射的敏感度也不同^[25],与试验结果类似,第 1 天各组种子根、芽的生长无明显差异,之后由于新根、新芽的生长而具有明显差异。

2.2 低剂量 X 射线对大麦种子发芽后品质的影响

由图 4 可知,随着大麦种子吸水发芽,各样品的淀粉质量分数逐渐降低,辐射第 3 天降至 50%~60%。辐射第 1 天各样品的淀粉质量分数无显著性差异,随着样品接收电离辐射强度的增强,淀粉质量分数的差异幅度逐渐上升。类似的,蛋白质质量分数和脂肪质量分数也随种子的发育而逐渐降低,辐射第 1 天均无显著性差异。蛋白质质量分数的差异发生在辐射第 2 天,脂肪质量分数的显著性差异发生在辐射第 3 天。接收电离辐射的样品在第 3 天蛋白质质量分数和脂肪质量分数均与对照组有显著性差异,且试验组 I 的差异性最大。可溶性膳食纤维质量分数随种子的发芽逐渐升高,但接收电离辐射种子的升高程度远不及对照组,各试验组在辐射第 1,2,3 天均与对照组有明显差异。

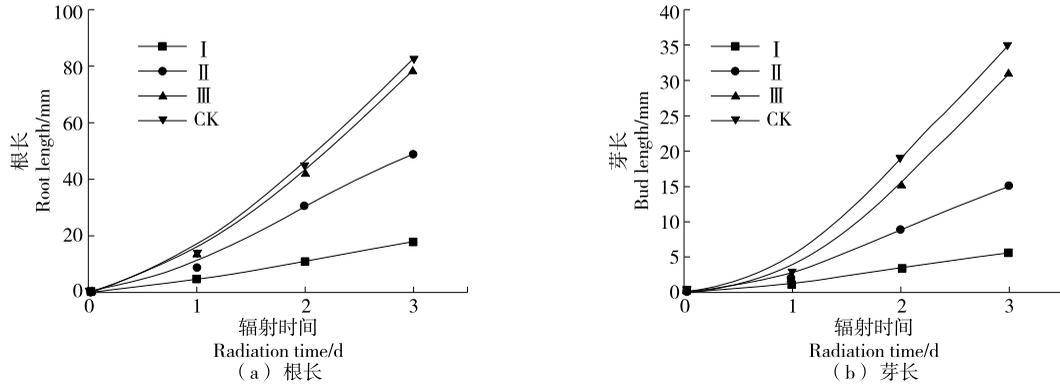


图 2 电离辐射时间对大麦种子根长、芽长的影响
Figure 2 Effects of ionizing radiation on shoot length and root length of barley seeds

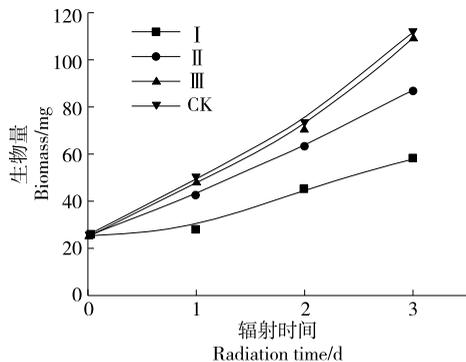


图 3 电离辐射时间对大麦种子生物量的影响
Figure 3 Effects of ionizing radiation on biomass of barley seeds

2.3 种子发芽环境的控制方程

2.3.1 发芽环境的电子密度和电子能量分布方程 试验采用物质迁移—扩散方程描述电子密度和电子能量在 LDIREs 内部的分布,由于 LDIREs 是封闭运行,因此可以认为装置内空气基本不流动,忽略空气对流对电子密度和电子能量分布的影响。根据经典的等离子体理论,LDIREs 内部的电子密度和电子能量分布的耦合控制方程为:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_e = R_e, \tag{2}$$

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_e + E \cdot \Gamma_e = R_e, \tag{3}$$

$$\Gamma_e = -n_e(\mu_e \cdot E) - D_e \cdot \nabla n_e, \tag{4}$$

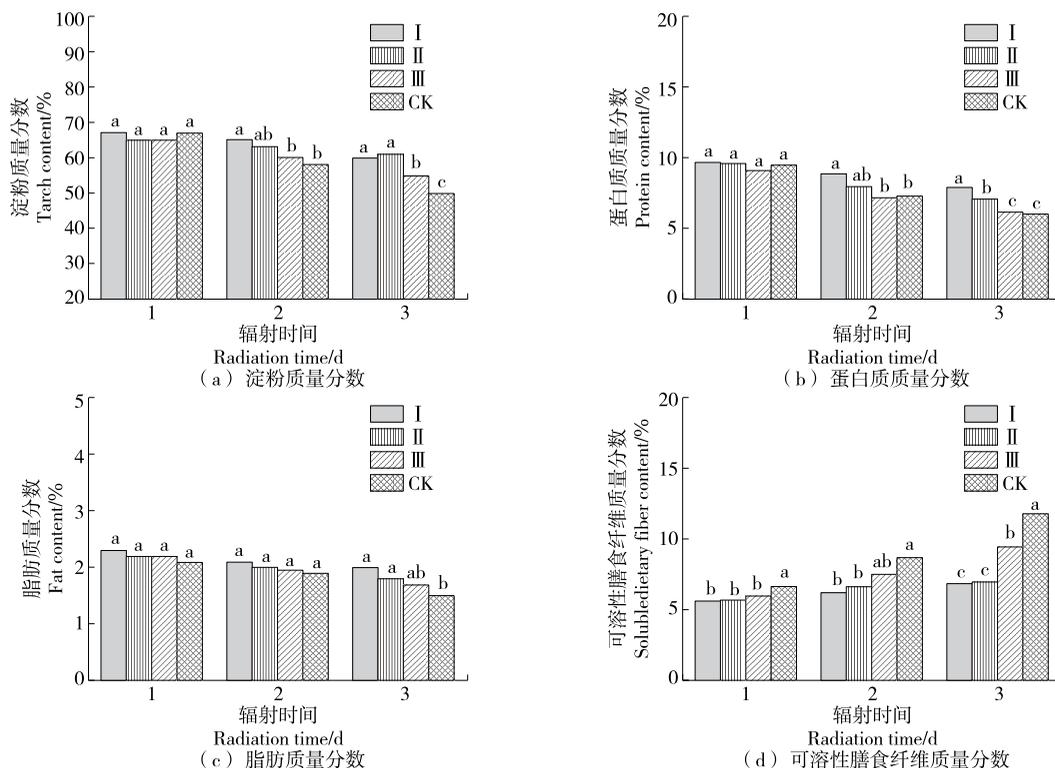


图 4 电离辐射时间对营养成分的影响

Figure 4 Effects of ionizing radiation on nutrient compone of barley seeds

$$\Gamma_\epsilon = -n_\epsilon (\mu_\epsilon \cdot E) - D_\epsilon \cdot \nabla n_\epsilon, \quad (5)$$

式中:

n_ϵ, n_ϵ ——电子密度和电子能量密度;

E ——电场强度, N/C;

$\Gamma_\epsilon, \Gamma_\epsilon$ ——电子通量和能量通量;

D_ϵ, D_ϵ ——电子密度和电子能量的扩散系数;

$\mu_\epsilon, \mu_\epsilon$ ——电子密度和电子能量的迁移系数。

式(2)、式(3)中 R_ϵ 和 R_ϵ 表示源项, 由等离子体化学动力学速率方程所确定。

$$R_\epsilon = \sum_j k_j x_j N_n n_\epsilon, \quad (6)$$

式中:

x_j ——第 j 个化学反应中生成物的摩尔分数;

N_n ——中性介质的密度, m^{-3} 。

电子能量的损耗等于所有因与金属内非弹性壁碰撞导致的电子能量损失之和。

$$R_\epsilon = \sum_j k_j x_j N_n n_\epsilon \Delta \epsilon_j, \quad (7)$$

式中:

$\Delta \epsilon_j$ ——第 j 次非弹性壁碰导致的能量损失, eV。

在 LDIREs 内部空间由 O_2 和 Ar 构成的等离子体中, 存在 15 种物质和 62 个等离子体化学反应, 而在 LDIREs 金属内壁上存在 10 个等离子体反应。

根据频域法拉第方程计算模拟电离辐射装置内部 X 射线诱导产生的空间高频电场分布。

$$\begin{cases} (j\omega\sigma - \omega^2\epsilon_0\epsilon_r)A + \nabla \times (\mu_0^{-1}\mu_r^{-1}B) - \sigma\nabla \times B = J_e, \\ B = \nabla \times A \end{cases} \quad (8)$$

式中:

ω ——角频率, rad/s;

σ ——空气电导率;

A, B ——磁矢势和磁通密度, T;

ϵ_0, ϵ_r ——真空和空气的介电常数;

μ_0, μ_r ——真空和空气的导磁系数。

2.3.2 种子发芽环境等离子体边界条件

(1) LDIREs 金属内壁的边界条件: 在 LDIREs 金属内壁的平均自由程内, 电子的得失来自 2 个方面, ① 由于电子的随机热运动而被金属内壁吸收, ② 由于空气中的阳离子与金属内壁发生碰撞可能会释放电子。

因此, 在 LDIREs 的金属内壁存在以下关于电子的数量和能量通量边界条件:

$$-n \cdot \Gamma_\epsilon = \frac{1-r}{1+r} \left[\frac{n_\epsilon}{2} v_T + n_\epsilon (\mu_\epsilon \cdot E) \cdot n \right], \quad (9)$$

$$-n \cdot \Gamma_\epsilon = \frac{1-r}{1+r} \left[\frac{5n_\epsilon}{6} v_T + n_\epsilon (\mu_\epsilon \cdot E) \cdot n \right], \quad (10)$$

式中:

r, n ——LDIREs 金属内壁的反射系数和壁面上的单位法向矢量;

v_T ——热速度, m/s。

(2) 大麦种子培养皿处的边界条件:由于培养皿及大麦种子均可视作绝缘体,因此等离子体在此处的边界条件为:

$$\begin{cases} n \cdot \Gamma_e = 0 \\ n \cdot \Gamma_e = 0 \end{cases} \quad (11)$$

2.4 大麦种子萌发过程对 LDIR 变化的动态响应

基于大麦种子在萌发过程中的质量守恒原则,大麦种子的鲜重(x)可以看作由 5 部分构成:种子中胚的质量(m),种子内胚乳的质量(s)、含水量(w)、 O_2 的质量($[O_2]$)和 CO_2 的质量($[CO_2]$),即:

$$x = m + s + w + [O_2] + [CO_2]. \quad (12)$$

在大麦种子萌发过程中,存在

$$s + w + [O_2] \xrightarrow{\text{同化吸收}} m + [CO_2]. \quad (13)$$

试验将胚的生长过程看作是种子萌发的动力学原因,因为此过程如果不存在,种子内部的其他物质将不会发生任何变化,所以可以认为种子内部所有的非生命物质——胚乳、水分、 O_2 和 CO_2 数量的变化速率均与胚的生长速率密切相关,都可在胚生长速率的基础上经过校正获得。因此确定胚的生长速率是描述种子萌发动力学过程的核心。

试验中可以认为在 LDIREs 中水分和 O_2 是供应充足的,种子的萌发过程只受胚乳含量的限制,因此采用 Monod 方程的形式描述胚的生长过程:

$$\frac{dm}{dt} = \mu(I) m \left(\frac{s}{K+s} \right), \quad (14)$$

式中:

K ——大麦胚生长对胚乳依赖的半饱和常数, 116.93 mg;

μ ——胚的比生长速率。

μ 与 LDIR 的强度(I)之间存在函数关系,即 I 越大, μ 越小,二者呈负相关。利用 Hill 函数表示 I 对 μ 的不利影响:

$$\mu = \mu_0 \frac{\delta^n}{\delta^n + I^n}. \quad (15)$$

因此,

$$\frac{dm}{dt} = \mu_0 \frac{\delta^n}{\delta^n + I^n} m \left(\frac{s}{K+s} \right), \quad (16)$$

式中:

μ_0 ——无 LDIR 时胚的比生长速率, 0.98 d^{-1} ;

δ ——试验常数, $568 \mu\text{Sv/s}$;

n ——试验常数, 1.4。

I 的大小已根据装置的几何构型、边界条件求解 Plasma 方程,以及有限元分析与计算获得。

在种子的胚生长过程中,一定会伴随着对所贮存胚乳的消耗,可以认为消耗速率近似与胚的生长速率呈正比,即:

$$\frac{ds}{dt} = -\alpha \frac{dm}{dt} = -\alpha \mu_0 \frac{\delta^n}{\delta^n + I^n} m \left(\frac{s}{K+s} \right), \quad (17)$$

式中:

α ——萌发过程中胚对胚乳的消耗系数, 0.84(即每生长 1 mg 的胚需要消耗 0.84 mg 的胚乳)。

此外,在胚生长过程中,一定会伴随着从外界环境吸收水分进入种子内部,试验表明吸收水分的速率与胚的生长速率呈正相关,即:

$$\frac{dw}{dt} = \beta(m) \frac{dm}{dt}, \quad (18)$$

式中:

β ——种子在萌发过程中的吸水系数。

试验表明,随着胚的生长,吸水系数随胚的增大呈指数趋势递减,可以用以下模型进行表示:

$$\beta = \beta_0 e^{-\epsilon/\sqrt{m}}, \quad (19)$$

式中:

β_0 ——种子在萌发开始时对外界水分的吸收系数, 15.8;

ϵ ——试验常数, 0.35。

ϵ 反映了种子在萌发过程中对水分的利用效率,不同植物的种子其取值不同。 ϵ 越大,对水分的利用效率越高,反之越低。因此大麦种子在萌发过程中对水分的吸收速率为:

$$\frac{dw}{dt} = \beta(m) \frac{dm}{dt} = \beta_0 e^{-\epsilon/\sqrt{m}} \mu_0 \frac{\delta^n}{\delta^n + I^n} m \left(\frac{s}{K+s} \right). \quad (20)$$

同理,种子的胚生长过程中,一定伴随着从外界环境吸收 O_2 进入种子内部,其吸收速率与胚的生长速率呈正比,可表示为:

$$\frac{d[O_2]}{dt} = \gamma \frac{dm}{dt} = \gamma \mu_0 \frac{\delta^n}{\delta^n + I^n} m \left(\frac{s}{K+s} \right), \quad (21)$$

式中:

γ ——种子在萌发过程中对外界 O_2 的吸收系数, 8.2。

故在种子胚生长过程中释放 CO_2 的速率为:

$$\frac{d[CO_2]}{dt} = -R - \frac{d[O_2]}{dt} = -R - \gamma \mu_0 \frac{\delta^n}{\delta^n + I^n} m \left(\frac{s}{K+s} \right), \quad (22)$$

式中:

R ——大麦种子的呼吸熵, 0.85。

式(12)~式(22)即为大麦种子鲜重(x)对 LDIR 强度变化响应的动力学模型,其具体仿真模型如图 5 所示。

在 MatLab/Simulink 平台上对此动力学模型进行仿真试验,结果如图 6 所示。由图 6 可知,试验模型有效地模拟了大麦种子的萌发过程对 LDIR 强度变化的响应,精确地建立了二者之间的本构关系,对认识 LDIR 环境下植物种子的萌发动态具有较高的理论价值。

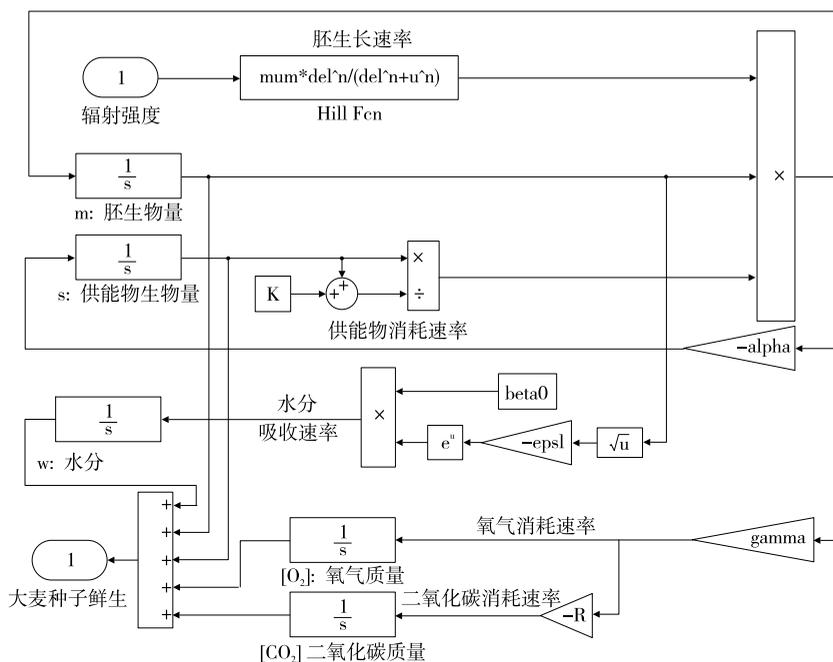


图 5 大麦种子萌发对 LDIR 变化响应的仿真模型

Figure 5 Simulation model of barley seed germination response to LDIR intensity variation

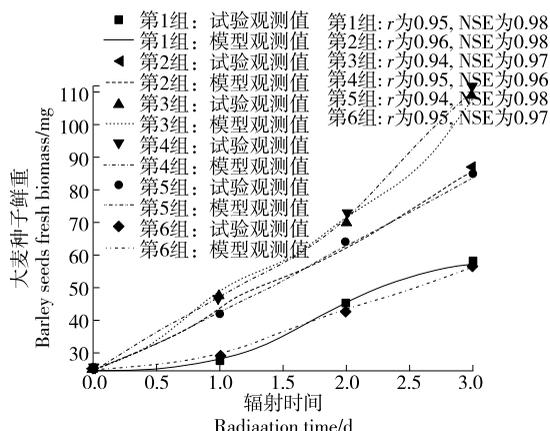


图 6 不同强度 LDIR 下大麦种子萌发的动态过程验证

Figure 6 Model validation of kinetic model of barley seed germination response to LDIR intensity variation

3 结论

为了探究电离辐射与大麦发芽之间的关系,利用物质漂移多物理场模型和等离子体化学反应建立了电离辐射的时空分布模型,在装置的几何构型、控制方程和边界条件的基础上,通过仿真试验和有限元分析与计算得到了各培养位置上所受到的精确辐射强度,并运用系统动力学方法建立了电离辐射强度与大麦发芽动态之间精确的数学模型,通过计算机仿真实验验证了模型的有效性。结果表明,低剂量 X 射线可抑制大麦种子根长、芽长和生物量的增加,降低种子对淀粉、蛋白质和脂肪三大营养物

的利用效率,降低可溶性膳食纤维的转化率。试验仅对常见食用大麦进行了较为深入的低剂量 X 射线影响分析,后续需进一步扩展研究芽类食物范围,提升现代芽类食品加工水平。

参考文献

- [1] REAL A, SUNDELL-BERGMAN S, KNOWLES J F, et al. Effects of ionising radiation exposure on plants, fish and mammals: Relevant data for environmental radiation protection[J]. Journal of Radiological Protection, 2004, 24(4A): 123-137.
- [2] KOKSEL H. γ 射线对大麦制麦特性和麦芽质量的影响[J]. 大麦与谷类科学, 1999, 1(2): 45-48.
- [3] 曹毅, 谢文. 电离辐射的生物效应及健康影响[J]. 科技导报, 2018, 36(15): 48-53.
- [4] 左丽丽, 任婷婷, 勾文哲, 等. 狗枣猕猴桃压缩饼干醇提物的抗辐射功能研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(4): 179-185.
- [5] GERAS S, CHURYUKIN R, VOLKOVA P. Radiation exposure of barley seeds can modify the early stages of plants' development [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2017, 17(7): 71-83.
- [6] 曹文, 叶晓汀, 谢静. 大麦营养品质及加工研究进展[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(2): 64-68.
- [7] 张振国, 董建军, 孙军勇. 未发芽大麦替代麦芽酿造啤酒及其麦香改善研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(15): 181-186.
- [8] 李俊, 卢扬, 赵刚. 苦荞芽苗茶饮料发酵前后营养、风味及抗氧化活性的变化[J]. 食品与机械, 2019, 35(7): 187-192.

- [9] 张端莉, 桂余, 方国珊. 大麦在发芽过程中营养物质的变化及其营养评价[J]. 食品科学, 2014, 35(1): 229-233.
- [10] 朱丽丽, 赵长新, 苏红旭. 大麦和麦芽中酚类物质与抗氧化力关系的研究[J]. 食品科技, 2013, 38(8): 154-158.
- [11] MERGEN F, JOHANSEN T. Effect of ionizing radiation on seed germination and seedling growth of *Pinus Rigida* (mill)[J]. Radiation Botany, 1964, 4(4): 417-427.
- [12] 张凤英, 包海柱, 刘志萍. 钴⁶⁰γ射线对大麦种子的辐射效应[J]. 大麦与谷类科学, 2010, 4(4): 13-15.
- [13] 闵锐. 低剂量/低剂量率电离辐射生物效应[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2014, 32(6): 1-9.
- [14] LI L, STORY M, LEGERSKI R J. Cellular responses to ionizing radiation damage[J]. International Journal of Radiation Oncology Biology Physics, 2001, 49(4): 1 157-1 162.
- [15] ARENA C, MICCO V, MAIO A. Growth alteration and leaf biochemical responses in *Phaseolus vulgaris* exposed to different doses of ionising radiation [J]. Plant Biology, 2014, 1(6): 194-202.
- [16] SUZUKI K, KODAMA S, WATANABE M. Extremely low-dose ionizing radiation causes activation of mitogen-activated protein kinase pathway and enhances proliferation of normal human diploid cells[J]. Cancer Research, 2001, 61(14): 5 396-5 401.
- [17] MOCCO V, DURANTE M, PIGNALSA D. Effects of sparsely and densely ionizing radiation on plants[J]. Radiation and Environmental Biophysics, 2011, 50(1): 1-19.
- [18] SUN Yi, HU Da-wei, LI Liang, et al. Influence mechanism of low-dose ionizing radiation on *Escherichia coli* DH5α population based on plasma theory and system dynamics simulation [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2016, 15(1): 185-192.
- [19] MANDA K, KAVANAGH J, BUTTLER D, et al. Low dose effects of ionizing radiation on normal tissue stem cells[J]. Mutation Research/Reviews in Mutation Research, 2014, 76(1): 6-14.
- [20] 姚文龙, 平雪良, 胡大华. 高压脉冲电场同轴处理室的仿真优化[J]. 食品与机械, 2015, 31(3): 82-86.
- [21] BRADLFORD M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72(1): 248-254.
- [22] MARIE A, ESNAULT F, LEGUE C. Ionizing radiation: Advances in plant response[J]. Environmental and Experimental Botany, 2010, 68(3): 231-237.
- [23] ERNEST C. HAMMOND J, KEVIN B, et al. Germination, growth rates, and electron microscope analysis of tomato seeds flown on the LDEF[J]. Radiation Measurements, 1996, 26(6): 851-861.
- [24] KOVACS K. Effect of gamma and UV-B/C radiation on plant cells[J]. Micron, 2002, 33(2): 199-210.
- [25] MORRIS P. Integrative plant anatomy [J]. New Phytologist, 2001, 152(2): 178-187.

(上接第14页)

3 结论

从内蒙古地区家庭自制的酸菜中分离得到了一株乳酸菌,经生理生化鉴定和16S rDNA序列同源性分析,该菌株被鉴定为植物乳杆菌;抑菌试验表明,该菌株的代谢产物对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌均有良好的抑制效果;菌株在适宜条件下培养8 h后进入对数生长期和产酸的主要时期。试验仅探讨了分离菌株的抑菌效果,关于抑菌物质成分与其生物学性质的相关研究,以及具体的作用机理有待进一步阐释。

参考文献

- [1] 刘巧, 罗强, 张明, 等. 利用16S rDNA分析不同地区传统发酵泡菜的细菌多样性[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(22): 91-97.
- [2] 宝冠媛. 酸马奶中产抑菌活性物质乳酸菌的筛选、鉴定及抑菌物质特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015: 1-4.
- [3] GAO Zhen-hong, DALIRI B E, WANG Jun, et al. Inhibitory effect of lactic acid bacteria on foodborne pathogens: A review[J]. Journal of Food Protection, 2019, 82(3): 441-453.
- [4] 张和平. 自然发酵乳制品中乳酸菌的生物多样性[J]. 生命科学, 2015, 27(7): 837-846.
- [5] 云月英, 许铭, 王文龙, 等. 自然发酵肉制品中乳酸菌的筛选[J]. 肉类研究, 2017, 31(6): 19-23.
- [6] 高兆建, 黄亮浩, 丁飞鸿, 等. 源自泡菜的植物乳杆菌产新型广谱抑菌细菌素的特性分析[J/OL]. 食品科学. (2020-04-27) [2020-12-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20200427.1437.006.html>.
- [7] 尹乐斌, 张臣飞, 孙菁, 等. 一株产细菌素乳酸菌的分离、鉴定及生物学特性研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(3): 12-15, 64.
- [8] 马长路, 焦梦丽, 罗红霞, 等. 传统东北酸菜中乳杆菌的分离鉴定及其降胆固醇特性研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(21): 209-213.
- [9] 孙杰, 姜杰, 冯彬斌, 等. 一株产细菌素乳酸菌的筛选及其细菌素特性研究[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(9): 48-52.
- [10] 武昌俊, 戴陈伟, 蔡标, 等. 一株安徽传统酸奶中产抑菌物质的乳酸菌的筛选与鉴定[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(17): 5 779-5 785.
- [11] 刘绒梅, 田圆圆, 耿琦, 等. 四川稻城传统干酪中乳酸菌的分离鉴定及功能研究[J]. 中国测试, 2017, 43(12): 58-62.
- [12] 吴燕, 伏二伟, 桑学财, 等. 传统浆水中乳酸菌的筛选及抑菌性能分析[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(22): 42-48.
- [13] 王小娜, 宋达峰, 顾青. 产细菌素乳酸菌的鉴定及其特性研究[J]. 中国食品学报, 2011, 11(3): 181-186.
- [14] 刘晓蓉, 范瑞, 朱美娟. 产类细菌素乳酸菌筛选及类细菌素的特性[J]. 中国乳品工业, 2009, 37(6): 8-12.