

· 技术方法 ·

## 电场作用条件与作物种子生长的相关性

包斯琴高娃<sup>1</sup>, 马占新<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>内蒙古工业大学理学院, 呼和浩特 010051; <sup>2</sup>内蒙古大学数学科学学院, 呼和浩特 010021

**摘要** 在综合评价电场强度及处理时间对作物生物效应影响时, 如何确定生物效应指标之间的权重一直是困扰生物信息综合评价的核心问题。比如叶绿素增长 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的价值相当于多少厘米根长的增加, 这是一个难以回答的问题。同时, 通过指标加权合成的方法获得综合评价的结果也存在信息丢失的缺陷。针对电场条件对作物生物效应的影响, 利用数据包络分析的基本思想, 给出了用于综合评价电场强度及处理时间对作物生物效应影响的非参数综合分析和相应的数学模型, 该方法不仅可以克服上述缺点, 而且还为分析不同外部条件对作物综合生物效应的影响程度提供了一种有效的分析工具。应用该方法综合评价了不同电场强度和不同处理时间对小麦(*Triticum aestivum*)种子幼苗株高和根长的影响。结果表明: 不同电场强度和不同处理时间对小麦幼苗生长产生不同影响, 在 $0.5\text{--}6.0 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 场强范围内, 随电场强度增加, 生理指标呈现振荡性变化, 当处理时间为5分钟时,  $1.0$ 和 $2.0 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 场强为最佳处理条件; 处理时间为10分钟时,  $2.5 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 场强为最佳处理条件。

**关键词** 综合评价, 数据包络分析, 电场, 幼苗生长, 小麦种子

包斯琴高娃, 马占新 (2010). 电场作用条件与作物种子生长的相关性. 植物学报 45, 384–391.

自从Murr(1963)发现模拟电场能够影响野茅的生长以来, 有关高压电场对生物效应影响的研究备受关注, 并取得了许多重要进展(那日和冯璐, 2003)。特别值得关注的是, 高压电场在促进种子萌发和影响作物生长方面效果明显(Murr, 1965; Sidaway and Asprey, 1966; Li, 1989; Stenz, 1993; 王莘等, 1997; 李桂双等, 2003)。国内科研工作者先后用电场处理了20多个不同品种的种子, 分析了电场对种子萌发、种子活力、生理生化过程、幼苗生长、植株生育性状及产量和质量的影响(杨体强等, 2000; 习岗和李伟昌, 2001; 康敏和余登苑, 2001; 白亚乡和胡玉才, 2003; 侯建华等, 2003; 杨生等, 2004; 袁德正等, 2006), 但这些研究都遇到了同样的难题。即在生物信息综合分析中各指标的权重确定异常困难。比如 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 叶绿素究竟与几厘米根长的重要性相当, 这是一个难以回答的问题。即使这2个指标的权重可以确定, 然而当这2个指标被合成1个指标时, 叶绿素和根长的个性信息也会丢失。因此, 如何采用非参数评估技术与

方法来解决上述问题成为本研究的焦点。传统数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)有效前沿面分析方法(马占新, 2002; Cooper et al., 2004a, 2004b)可以不必事先确定指标的权重, 但它只能分析投入和产出之间的相对效率(Charnes et al., 1978, 1985; Färe and Grosskopf, 1985; Seiford and Thrall, 1990), 无法分析被处理单元与标准条件下的样本单元的比较问题。因此, 本研究针对数据平均化处理方法存在无法考虑观察对象个性差异、指标权重确定困难等弱点, 给出了一种多指标生物信息非参数综合分析方法及其相应的数学模型。该方法通过被处理单元与标准条件下的样本单元构成的有效前沿面的比较, 来度量被处理条件的有效性程度, 找出导致被处理单元无效的指标和影响程度。同时, 还能通过对被评价单元的分类分析找到更多的关于指标和综合分析结果的关系。最后, 应用该方法分析了不同处理时间和不同电场强度对小麦(*Triticum aestivum*)种子的综合影响。

收稿日期: 2009-09-28; 接受日期: 2010-03-07

基金项目: 国家自然科学基金( No.70501012, No.70961005)和内蒙古自治区自然科学基金(No.20080404MS1010)

\* 通讯作者。E-mail: em\_mazhanxin@imu.edu.cn

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

本实验的高压电场装置主要是由高压电源(内蒙古大学物理系高压静电实验室自行研制)、控制台、正负2个电极板组成。2个电极板由长70 cm、宽50 cm、厚0.3 cm的光滑矩形铝板组成,上下极板间距5 cm。

实验时将样品平放到下极板上(图1),通过控制台来调节输出电压从而调节电场强度(这里所用的是均匀电场,电场强度=电压/极间距离)。

### 1.2 实验材料及培养测量方法

选用内蒙古蒙丰种业公司提供的永良4号小麦(*Triticum aestivum* L. 'Yongliang 4')种子进行实验。挑选大小均一、籽粒饱满的种子,分成25组,其中1组为对照组,6×100粒,其余24组分别用不同的电场强度进行处理,每组3个重复,每个重复3×100粒。电场强度 $E_n=0.5 \times n(\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1})$ ,  $n=1, 2, \dots, 12$ ,其中对照组记为 $E_0$ 。处理时间为5分钟和10分钟。按国家标准GB5520-85的有关规定在ST-01型生化培养箱中进行发芽实验。将前3天内每天发芽的种子移入规格统一的花盆(盆中装有等量石英砂)中培育。花盆置于有日光灯照射的培养架上,每天定时定量浇水。环境温度度为20–25°C。

选9日龄幼苗为检测对象,从每盆中随机选取20株幼苗,用直尺测量其株高(即根上部分)H(cm)及根长L(cm)。

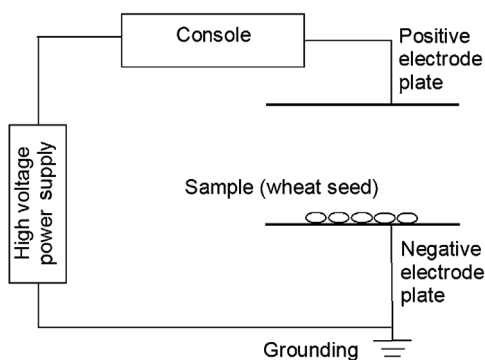


图1 实验装置

Figure 1 Equipment of the experiment

## 2 结果与讨论

### 2.1 生物信息非参数综合分析方法(MIBI-T)及数学模型

假设当实验者测试某类外加条件对生物体的综合影响时,选择了 $m$ 个表示作用成效的观察指标进行测量,并且希望这些指标越大越好。

假设实验者已经测得标准状态下的 $n_0$ 个单元的指标数据为 $Y_j^0 = (y_{1j}^{(0)}, y_{2j}^{(0)}, \dots, y_{mj}^{(0)})^T, j=1, 2, \dots, n_0$ 。然后,选择 $n$ 组条件作用于该类样本单元,其中第 $k$ 组条件下共选择了 $n_k$ 个单元,并且已经测得第 $k$ 种条件下第 $j$ 个单元的指标数据为 $Y_j^{(k)} = (y_{1j}^{(k)}, y_{2j}^{(k)}, \dots, y_{mj}^{(k)})^T, j=1, 2, \dots, n_k$ 。那么,分析每组条件的有效性的常规方法是将每组数据进行平均,合成一个数据,然后再对每组条件下的平均数据进行比较。如图2显示120粒小麦种子在自然条件下的根长和株高的数值,它们的平均值分别为17.28和14.37 cm,应用数据平均化处理方法只能从120个数据信息中获得1个二维数据,而其它数据的信息均被丢失。但从图1可以看出,小麦的生长存在较大的个性差异。因此,针对数据平均化处理方法存在无法考虑观察对象个性差异、指标权重确定困难等弱点,给出了下面的用于多指标生物信息非参数综合分析方法及其相应的数学模型。

#### 2.1.1 个体单元的有效性测度方法

从图2可以看出,小麦的生长存在个性差异。其中曲线 $l_r$ 是120粒种子幼苗的株高和根长的外包络线,该

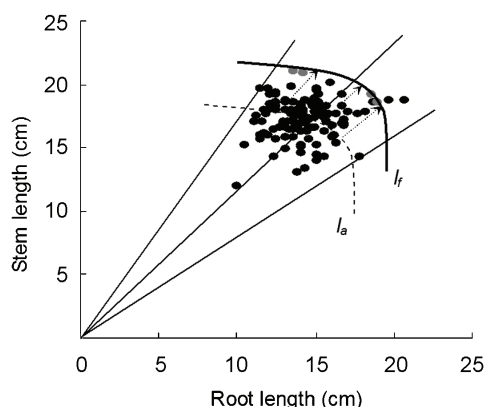


图2 120粒小麦种子在自然条件下的生长情况

Figure 2 The growth situation of 120 grains of wheat seeds under natural condition

线上的点都是生长比较有效的幼苗。线外侧的2个幼苗点作为异常状态,进行修正后可不予考虑。以这些点为参考对象,就可以评价其它幼苗的生长状况。由于每个幼苗都存在个性差异,因此,采用图2中箭头指定的方向对各幼苗进行比较。如果一个幼苗的株高和根长值优于 $I_r$ 上的对应值,则认为该幼苗的生长是有效的,否则认为该幼苗的生长无效。同时可以按射线方向来测度该幼苗的有效性程度。因此,按照上述构想可以给出多指标生物信息有效性测度的数学模型如下:

(MIBI-T)

$$\left\{ \begin{array}{l} V_r^{(k)} = \max \theta_r^{(k)} \\ \text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^{n_0} y_{ij}^{(0)} \lambda_j^{(k)} - s_{ir}^{(k)} = \theta_r^{(k)} y_{ir}^{(k)}, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{j=1}^{n_0} \lambda_j = 1 \\ s_{ir}^{(k)} \geq 0, \lambda_j^{(k)} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n_0 \end{array} \right.$$

如果 $V_r^{(k)}=1$ ,  $S_{ir}^{(k)}=(S_{1r}^{(k)}, \dots, S_{mr}^{(k)})=0$ ,则表示第 $k$ 组的第 $r$ 个单元的生物信息与标准条件下的优秀单元处于同等地位,这时有效性的测度值 $h_r^{(k)}=(V_r^{(k)})^{-1}=1$ ,该单元位于包络面 $I_r$ 上。

如果 $V_r^{(k)}<1$ ,则表示第 $k$ 组的第 $r$ 个单元的生物信息比标准条件下的优秀单元更优秀,有效性的测度值 $h_r^{(k)}=(V_r^{(k)})^{-1}$ ,此时该单元位于包络面 $I_r$ 的外侧。

如果 $V_r^{(k)}>1$ ,或 $V_r^{(k)}=1$ 且 $S_{ir}^{(k)}\neq 0$ ,则表示第 $k$ 组的第 $r$ 个单元的生物信息与标准条件下的优秀单元相比是无效的。有效性的测度值 $h_r^{(k)}=(V_r^{(k)})^{-1}$ ,这时该单元位于包络面 $I_r$ 的内侧。

该指标反映的是处理组1个幼苗的评价指标值可以达到或超过标准条件(对照组)下优秀幼苗的程度。

若第 $k$ 组的第 $r$ 个单元的生物信息是无效的,则可以证明它对应的标准组的外包络面上的有效值为 $(\theta_r^{(k)} y_{1r}^{(k)} + s_{1r}^{(k)}, \dots, \theta_r^{(k)} y_{mr}^{(k)} + s_{mr}^{(k)})$ ,因此可以应用公式: $y_{ir}^{(k)} / (\theta_r^{(k)} y_{ir}^{(k)} + s_{ir}^{(k)})$ 来考察该单元第 $i$ 个指标的有效性程度。

### 2.1.2 处理组与对照组单元的比较和分析方法

通过上述分析方法可以构造多指标生物信息及作用条件有效性的综合分析公式。

标准条件下生物体测评信息的平均有效性测度

值 $H^{(0)}$ 计算公式如下:

$$H^{(0)} = \frac{1}{n_0} \sum_{r=1}^{n_0} h_r^{(0)} \quad (1)$$

该指标反映了在自然状态下生物体综合指标有效性的平均水平。

作用条件 $k$ 下的生物体测评信息的平均有效性测度值 $H^{(k)}$ 计算公式如下:

$$H^{(k)} = \frac{1}{n_k} \sum_{r=1}^{n_k} h_r^{(k)} \quad (2)$$

该指标反映了在作用条件 $k$ 下,生物体综合指标有效性的平均水平。它反映外加电场对小麦种子影响体现在其幼苗综合指标上的平均水平。

作用条件 $k$ 的有效性测度值 $W^{(k)}$ 计算公式如下:

$$W^{(k)} = (H^{(k)} / H^{(0)}) - 1 \quad (3)$$

从平均意义上看,如果 $W^{(k)}>0$ ,说明作用条件 $k$ 产生了积极作用;如果 $W^{(k)}=0$ ,说明作用条件 $k$ 没有产生作用;如果 $W^{(k)}<0$ ,说明作用条件 $k$ 产生了消极作用。 $W^{(k)}$ 值越大,条件 $k$ 的促进作用越明显,相反, $W^{(k)}$ 值越小,条件 $k$ 的不利作用越大。这一测度指标为确定有效电场强度提供了一定的参考依据。

在作用条件 $k$ 的作用下,测试单元的优秀率 $T^{(k)}$ 计算公式如下:

$$T^{(k)} = \{ \{ h_r^{(k)} | h_r^{(k)} \geq 1, r = 1, 2, \dots, n_j \} \} / n_r \quad (4)$$

该指标反映处理组幼苗中达到或超过标准条件(对照组)下优秀幼苗的比率。这一测度指标为如何选择合适的电场条件来提高优秀单元比率提供了分析方法。

在作用条件 $k$ 的作用下,测试单元的合格率 $P^{(k)}$ 计算公式如下:

$$P^{(k)} = \{ \{ h_r^{(k)} | h_r^{(k)} \geq H^{(0)}, r = 1, 2, \dots, n_j \} \} / n_r \quad (5)$$

该指标反映了处理组中达到或超过标准条件(对照组)的平均水平的幼苗比率。这一测度指标为如何选择合适的电场作用条件来提高合格单元的比率提供了一定的参考依据。

用三象限分析法,根据标准组单元数据的外包络面 $I_r$ 和平均包络面 $I_a$ 可以将整个空间分成3个部分。如果测试单元的有效性测度值 $h_r^{(k)} \geq 1$ ,则属于第1区域(即优秀区),这时该单元位于包络面 $I_r$ 上或 $I_r$ 外侧。如果测试单元的有效性测度值 $H^{(0)} \leq h_r^{(k)} < 1$ ,则属于第2区

域(即一般区), 这时该单元位于包络面 $l_i$ 的内侧, 平均包络面 $l_a$ 的外侧。如果测试单元的有效性测度值 $h_r^{(k)} < H^{(0)}$ , 则属于第3区域(即较差区), 这时该单元位于平均包络面 $l_a$ 内侧。

另外, 还可以进一步综合分析测试单元的测试指标及相对有效值的分布情况(表1)。

## 2.2 电场处理下小麦种子形态指标的有效性

为了便于分析和比较, 本研究选取株高( $y_1$ )和根长( $y_2$ )2个指标进行分析, 通过对25组1 620个样本数据采用MIBI-T模型进行计算得到每个植物幼苗对应的有效值。

根据获得的各组测试单元的有效性的测度值, 应用公式(1)–(5)可以得到一组数据(表2)。由表2中的数据可以得到4个图形(图3A–D)。

### 2.2.1 不同电场强度下的小麦幼苗生长的平均有效性

由图3A可知, 对照组的平均有效值为0.826。小麦种子经过不同电场强度和不同时间的处理后, 其幼苗生长的平均有效性有不同程度的变化。处理时间为5分钟的各场强平均有效值的变化明显好于处理时间为10分钟的各场强平均有效值的变化, 只有在场强为

0.5和5.0  $\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时, 处理时间为5分钟的小麦幼苗生长的平均有效值小于在此场强下处理时间为10分钟的处理组, 其余各场强下处理时间为5分钟均好于处理时间为10分钟。处理时间为5分钟、场强为1.0和2.0  $\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时, 小麦幼苗生长的平均有效值达到最佳, 即此场强对小麦幼苗生长具有明显的促进作用。处理时间为10分钟、场强为2.5和6.0  $\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时, 小麦幼苗生长的平均有效值变化相对较为明显, 场强为1.5、3.5和4.5  $\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时小麦幼苗生长的平均有效值接近对照组, 即促进效果不明显。

从图3A可以看出, 电场强度对小麦幼苗生长的平均影响次序为:

处理时间为5分钟:  $1.0 > 2.0 > 6.0 > 4.0 > 4.5 > 2.5 > 1.5 > 5.0 > 3.0 > 3.5 > 0.5 > 5.5 > 0.0$  (对照组)(单位均为 $\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ )。

处理时间为10分钟:  $6.0 > 2.5 > 5.0 > 1.0、4.0、5.5 > 0.5 > 2.0 > 3.0 > 4.5 > 1.5 > 3.5 > 0.0$  (对照组)(单位均为 $\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ )。

上述信息为选择合适的电场作用条件以促进作物生长的平均水平, 提高农业生产的平均产量提供了一定的参考依据。在上述处理条件中, 处理时间为5分钟、场强为1.0  $\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 是最佳处理条件。

表1 多指标生物信息及作用条件有效性的综合分析

Table 1 The comprehensive analysis for multi-index biological information and function condition's effectiveness

Function condition	$A_0$	$A_1$	$A_2$	...	$A_n$
Average effective value of units	$H^{(0)}$	$H^{(1)}$	$H^{(2)}$	...	$H^{(n)}$
Function condition's effective value	0	$W^{(1)}$	$W^{(2)}$	...	$W^{(n)}$
Excellent rate of units	$T^{(0)}$	$T^{(1)}$	$T^{(2)}$	...	$T^{(n)}$
Qualified rate of units	$P^{(0)}$	$P^{(1)}$	$P^{(2)}$	...	$P^{(n)}$

表2 多指标生物信息及作用条件有效性的综合分析

Table 2 The comprehensive analysis of multi-index biological information and function condition's effectiveness

Electric field intensity ( $\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ )		0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
Average effective value of units	5 min	0.826	0.853	0.964	0.898	0.946	0.901	0.865	0.862	0.916	0.910	0.872	0.844	0.920
	10 min	0.826	0.860	0.863	0.841	0.857	0.875	0.854	0.832	0.863	0.843	0.869	0.863	0.880
Function conditions' effective value	5 min	0.000	0.033	0.167	0.087	0.145	0.092	0.048	0.044	0.109	0.103	0.056	0.023	0.114
	10 min	0.000	0.042	0.045	0.019	0.038	0.059	0.034	0.008	0.045	0.021	0.052	0.040	0.066
Excellent rate of units(%)	5 min	1.7	3.3	38.3	15.0	26.7	15.0	6.7	8.3	11.7	15.0	10.0	8.3	23.3
	10 min	1.7	0.0	1.7	1.7	3.3	0.0	0.0	1.7	1.7	0.0	3.3	1.7	1.7
Qualified rate of units(%)	5 min	52.5	65.0	90.0	73.3	90.0	80.0	68.3	71.7	86.7	85.0	66.7	61.7	83.3
	10 min	52.5	75.0	71.7	55.0	66.7	86.7	70.0	60.0	76.7	56.7	73.3	65.0	86.7

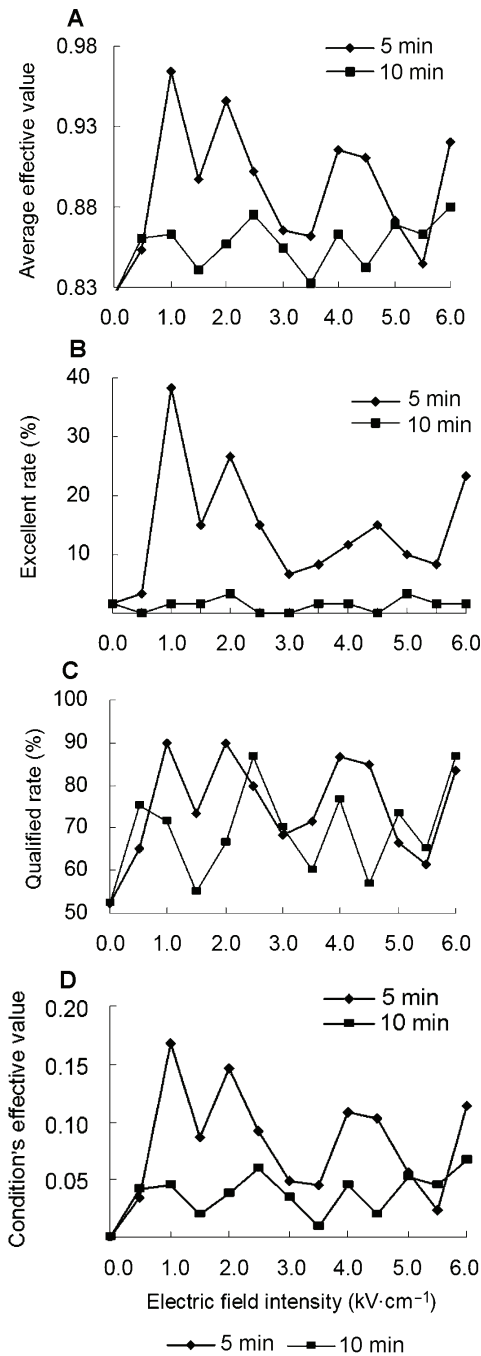


图3 小麦幼苗生长的平均有效性曲线(A)、优秀率曲线(B)、合格率曲线(C)及电场条件对小麦种子影响的有效性曲线(D)

Figure 3 The average effectiveness curve (A), the excellent rate's curve (B), the qualified rate's curve (C) of wheat seedling and the effectiveness curve of effects of electric field condition on wheat seeds (D)

### 2.2.2 不同电场强度下小麦幼苗生长的优秀率

由图3B可知, 对照组小麦幼苗生长的优秀率为1.7%。处理时间为5分钟的各场强下优秀率的变化明显好于处理时间为10分钟的各场强下优秀率的变化。与对照组相比, 处理时间为5分钟、场强为1.0 kV·cm<sup>-1</sup>的条件下小麦幼苗生长的优秀率达到最好, 即此场强下达到或超出对照组优秀单元水平的幼苗个数最多。场强为2.0 kV·cm<sup>-1</sup>次之。处理时间为10分钟的各场强下优秀率都接近对照组的优秀率, 即这些处理条件对优秀率的影响并不显著。以上数据为选择合适的电场作用条件来选种育种提供了一定的参考依据。

### 2.2.3 不同电场强度下小麦幼苗生长的合格率

由图3C可知, 对照组小麦幼苗生长的合格率为52.5%, 即对照组中好于平均包络线I<sub>a</sub>上点的幼苗个数的比率为52.5%。处理时间为5分钟、场强为1.0和2.0 kV·cm<sup>-1</sup>时, 小麦幼苗生长的合格率同时达到最高, 即此场强下达到或超出平均包络线I<sub>a</sub>的幼苗个数最多。处理时间为10分钟、场强为2.5和6.0 kV·cm<sup>-1</sup>时, 小麦幼苗生长的合格率同时达到最高值, 但其值小于上述2个条件(处理时间为5分钟、场强为1.0和2.0 kV·cm<sup>-1</sup>)。以上结果为选择合适的电场作用条件来提高种子合格率提供了一定的参考依据。

### 2.2.4 电场条件对小麦种子影响的有效性

由图3D可知小麦幼苗生长的作用条件有效值。从平均意义上看, 处理时间为5分钟, 各处理组对小麦幼苗生长产生了不同程度的促进作用, 即当W<sup>(k)</sup>>0, W<sup>(k)</sup>值越大, 电场强度k的促进作用越明显; 场强为1.0 kV·cm<sup>-1</sup>时达到最佳。处理时间为10分钟, 各处理组对小麦幼苗生长也产生了不同程度的促进作用, 只是不如处理时间为5分钟各场强显著。以上结果为确定有效电场强度提供了一定的参考依据。

总之, 从上述研究结果可以看出: 处理时间为5分钟、场强为1.0 kV·cm<sup>-1</sup>时, 几个方面的有效性均达到最佳, 说明此场强对小麦种子产生的影响最为明显。从处理时间来说, 处理5分钟比处理10分钟效果更为明显。从处理场强来说, 随着场强的增加各指标呈振荡式变化。其具体作用机理有待进一步研究。

### 2.3 不同电场处理小麦种子的三象限分析法

应用三象限分析法可以获得标准条件下测试点的分布状况。标准条件(即未加电场)下, 120粒小麦种子的生长情况如图2所示。根据2.1.1节所述的有效性测度方法得出此120粒小麦种子幼苗株高和根长的平均中心在 $I_a$ 的附近。

应用三象限分析法可以获得在施加不同电场作用条件下的测试点的分布状况(图4)。

图4A显示种子幼苗株高、根长基本没有变化, 即此场强对种子生长影响不显著。处理时间为5分钟时, 除图4A和图4L外, 其它场强下幼苗株高和根长的平均中心逐渐顺时针移动, 即电场对根长的影响较为显著。除了图4A外, 种子幼苗株高和根长超出曲线 $I_f$ 的外包络线的相对较多, 3个区域内均有单元的有效性测度值, 即场强对小麦种子幼苗的影响显著。而处理时间为10分钟时, 各场强下幼苗形态指标的中心移动

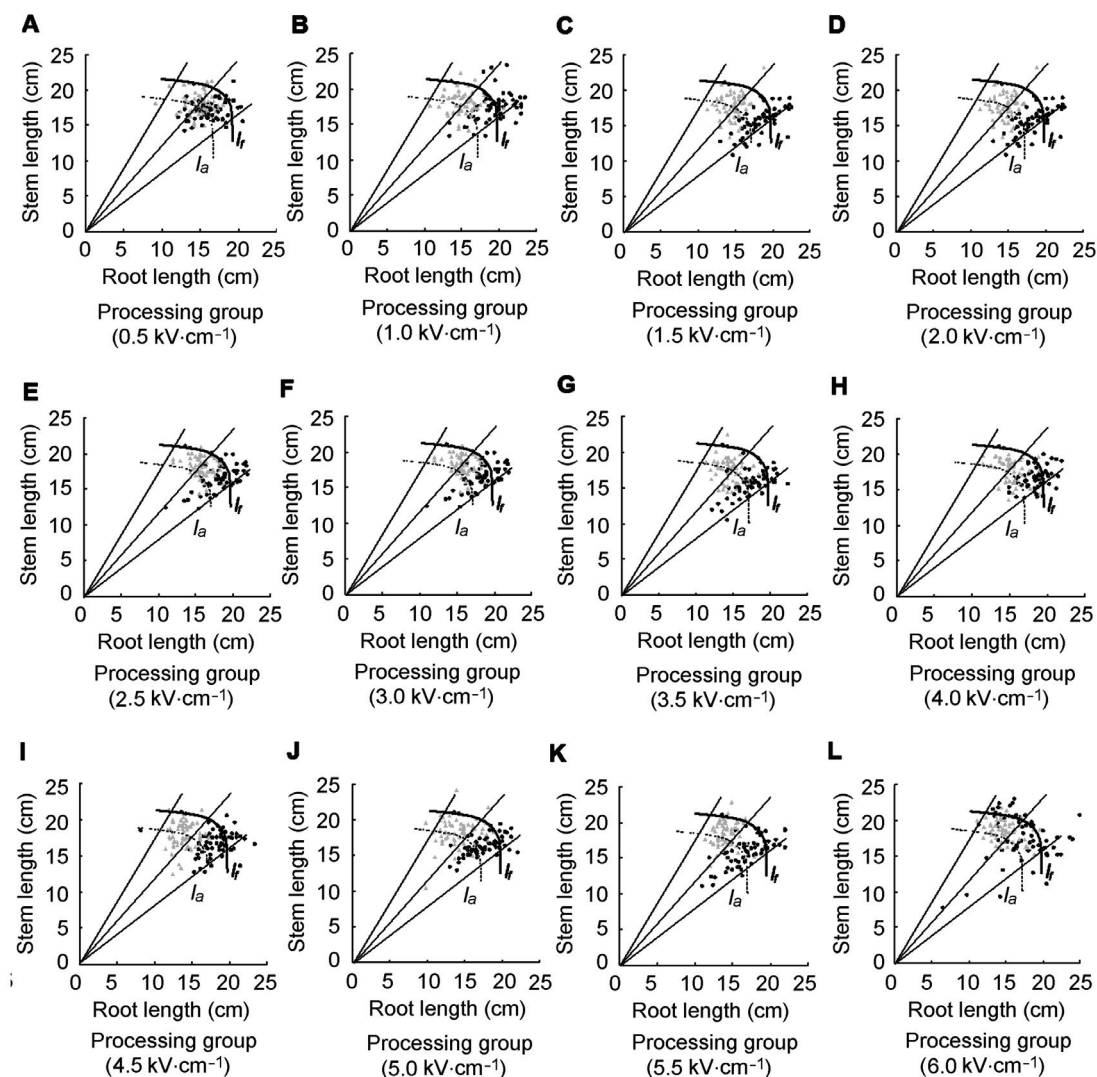


图4 各场强下小麦幼苗株高和根长的二维图

深色点为处理时间5分钟, 浅色点为处理时间10分钟

Figure 4 The growth situation of wheat seedlings under different processing conditions (electric field and time)

Dark dot for processing time of 5 min, and light dot for processing time of 10 min

不明显,即各场强中超出曲线 $I$ 的外包络线的点较少,单元的有效性测度值在一般区和较差区域内,场强对小麦种子幼苗的株高和根长影响不显著。场强为 $6.0 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时,小麦幼苗株高和根长的个体位置变得发散,此场强的特殊性应从微观角度进行深入研究。

上述研究结果表明,电场强度和对应的处理时间对小麦幼苗生长过程能够产生不同程度的影响。在多数条件下,小麦幼苗生长的平均有效性有不同程度的提高,特别是在某些电场条件下小麦幼苗生长的平均有效性具有明显的提高。这表明应用电场处理种子的方法来改善作物生长、提高作物品质是可行的。同时,应用数据包络分析方法评价电场强度对作物生物效应的影响不仅可以全面反映电场强度对作物生物效应影响的相对有效性,而且还能揭示在不同电场强度下每个幼苗形态指标与对照组之间的内在关系。

## 2.4 讨论

从上述应用实例可以看出,本文提出的多指标生物信息非参数综合分析方法(MIBI-T)具有一些独特的优点。首先,MIBI-T方法可以充分反映作用条件对生物体影响的个性差异。其次,处理组与对照组之间的比较不再局限于平均值之间的比较(侯建华等,2003),而是由对照组构成的有效面和处理组的每个数据进行比较。此方法为分析作用条件与生物效应影响有效性之间的关系提供了有效的分析工具。应用该方法可以揭示在不同作用条件下每个单元指标与对照组之间的内在关系。最后,MIBI-T方法克服了确定各指标权重的困难,而且方法简单,理论完备。这些都是单项指标分析所不能达到的。它为选择有效处理条件、全面提高生物体品质以及获得最佳处理条件提供了可行的依据,为提高生物信息技术生产能力,促进生物信息技术的普及和推广具有积极的意义。另外,MIBI-T方法具有通用性,它可应用于物理、化学、医药等领域,为分析实验条件对作用对象的综合影响提供了一种全新的视角和有效的分析工具。

## 参考文献

白亚乡,胡玉才(2003). 高压静电场对农作物种子生物学效应原发机制的探讨. 农业工程学报 **19**, 49–51.  
侯建华,杨体强,吕剑刚,杨丽君,邓一兵(2003). 电场处理

油葵种子后对其萌发期抗旱性的影响. 生物物理学报 **19**, 193–197.  
康敏,余登苑(2001). 滚筒式静电选种机的增产效应研究. 农业工程学报 **17**, 92–96.  
李桂双,白成科,段俊,彭长连,翁克难,刘曙东(2003). 静水高压处理对水稻植株生理特性的影响. 高压物理学报 **17**, 122–128.  
马占新(2002). 数据包络分析方法的研究进展. 系统工程与电子技术 **24**, 42–46.  
那日,冯璐(2003). 我国静电生物学效应机理研究新进展. 物理 **32**, 87–93.  
王莘,李肃华,闵伟红,刘亚娟,王德辉(1997). 高压静电场对月见草种子萌发期的生物学效应. 生物物理学报 **13**, 665–670.  
习岗,李伟昌(2001). 现代农业和生物学中的物理学. 北京:科学出版社. pp.175–178.  
杨生,那日,杨体强(2004). 电场处理对柠条种子萌发生长及酶活性的影响. 中国草地 **26**, 78–81.  
杨体强,侯建华,苏恩光,那日,郭维生(2000). 电场对油葵种子苗期干旱胁迫后生长的影响. 生物物理学报 **16**, 780–784.  
袁德正,杨体强,韩国栋(2006). 电场处理对羊柴种子萌发及幼苗生长的影响. 中国草地 **28**, 78–80.  
Charnes A, Cooper WW, Rhodes E (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *Eur J Oper Res* **2**, 429–444.  
Charnes A, Cooper WW, Golany B, Seiford L, Stutz J (1985). Foundations of data envelopment analysis for pareto-koopmans efficient empirical production functions. *J Econom* **30**, 91–107.  
Cooper WW, Seiford LM, Zhu J (2004a). Handbook on Data Envelopment Analysis. Boston: Kluwer Academic Publishers.  
Cooper WW, Seiford LM, Thanassoulis E, Zanakis SH (2004b). DEA and its uses in different countries. *Eur J Oper Res* **154**, 337–344.  
Färe R, Grosskopf S (1985). A nonparametric cost approach to scale efficiency. *J Econom* **87**, 594–604.  
Li R (1989). Modern Electrostatics. Beijing: International Academic Publishers. pp. 137–139.  
Murr LE (1963). Plant growth response in a simulated electric field—environment. *Nature* **200**, 490–491.  
Murr LE (1965). Plant growth response in an electrokinetic field. *Nature* **207**, 1177–1178.  
Seiford LM, Thrall RM (1990). Recent development in DEA.

The mathematical programming approach to frontier analysis. *J Econom* **46**, 7–38.  
**Sidaway GH, Asprey GF** (1966). Influence of electrostatic

fields on seed germination. *Nature* **211**, 303–303.  
**Stenz H** (1993). Electrotopism of maize (*Zea mays* L.) roots: facts and arti-facts. *Plant Physiol* **101**, 1107–1111.

## Correlation Between Crop Seed Growth and Electric Field Condition

Siqingaowa Bao<sup>1</sup>, Zhanxin Ma<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>*School of Science, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;* <sup>2</sup>*School of Mathematical Science, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China*

**Abstract** When evaluating the comprehensive effect of processing time and electric field intensity on crops, the core issue of how to determine the index weights has confounded the comprehensive evaluation of biological information. It is difficult to determine the equivalence of  $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  chlorophyll to centimeters of root length. As well, comprehensive evaluation by a weighting sum method may lose some information. Therefore, to determine the comprehensive effects of the electric field condition on crops, we use the basic idea of data envelopment analysis to propose a non-parametric comprehensive analysis method and a corresponding mathematical model for evaluating the comprehensive effects of processing time and electric field intensity on crop growth. This method can overcome above shortcomings and provides an effective tool to analyze the degree of influence of external conditions on biological effects. Finally, we use this method to analyze the comprehensive effects of different electric field intensity and processing time on seedling height and root length of wheat. Different electric field strength and processing time has variable influence on seedling growth, and the change in indexes of biological effects is vibration with increasing electric field from  $0.5$  to  $6.0 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ . With processing time of 5 min, the best processing condition is field strength  $1.0$  and  $2.0 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ . With processing time 10 min, the best processing condition is field strength  $2.5 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ .

**Key words** comprehensive evaluation, data envelopment analysis, electric field, seedling growth, wheat seed

**Bao S, Ma ZX** (2010). Correlation between crop seed growth and electric field condition. *Chin Bull Bot* **45**, 384–391.

---

\* Author for correspondence. E-mail: em\_mazhanxin@imu.edu.cn