

参赛密码 \_\_\_\_\_  
(由组委会填写)

# 全国第八届研究生数学建模竞赛



## 题 目 小麦发育后期茎秆抗倒性的数学模型

### 摘 要:

针对小麦发育后期倒伏问题，建立了抗倒伏模型并分析各品种小麦的抗倒伏能力，引入了灰色关联分析模型得到小麦抗倒伏指数与外部形态参数的关联度，建立理想株型模型并用遗传算法求解出理想株型结构，由小麦受麦穗自重和风载作用的抗倒伏力学模型求得各品种小麦发生茎倒的临界力和临界风速。

对于问题一：根据小麦抗倒指数与茎秆鲜重、重心高度和机械强度的关系，建立茎秆抗倒伏指数公式，结合已知数据求解出各年品种小麦的抗倒伏指数。对于 2007 年和 2011 年，利用已知数据求出抗倒伏指数各相关量并代入茎秆抗倒伏指数公式求解；对于 2008 年，由于数据缺失较严重，参考 2011 年数据采用最小二乘拟合法建立小麦茎秆鲜重与干重的关系，求出各品种小麦茎秆鲜重，利用重心计算公式计算出各品种小麦茎秆重心高度值，再建立机械强度与茎秆形态参数的多元线性回归关系，进而求解出各品种小麦的抗倒伏指数。以 2007 年为例，求得矮抗 58、新麦 208、周麦 18 的抗倒伏指数分别为： $\lambda_1 = 0.7330$ ， $\lambda_2 = 1.2019$ ， $\lambda_3 = 0.9658$ （结果详见表 1、表 2、表 3）。

对于问题二：考虑到茎秆抗倒伏指数与茎秆外部形态各参数间存在复杂关系，建立了灰色关联度分析模型。以矮抗 58 和周麦 18 为例分析小麦抗倒伏指数与茎秆各节间长、各节茎粗、各节壁厚、重心高度、穗长、穗重等因素的关联度（详见表 7、表 8）。对抗倒伏指数的相关因素进行相关性分析，各因素间相关性结果详见表 9。结合关联度和相关性分析结果，得出 2008 年国信 1 号与智 9998 品种小麦发生倒伏而其他品种小麦未发生倒伏的原因是：各节间长度和小麦重心高度普遍偏高，机械强度值较小。以矮抗 58 为例，抗倒指数与各指标关联度如下表所示：

$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	$r_5$	$r_6$	$r_7$	$r_8$	$r_9$	$r_{10}$
0.427	0.900	0.456	0.703	0.509	0.549	0.506	0.699	0.502	0.499
$r_{11}$	$r_{12}$	$r_{13}$	$r_{14}$	$r_{15}$	$r_{16}$	$r_{17}$	$r_{18}$	$r_{19}$	
0.707	0.474	0.425	0.833	0.437	0.745	0.481	0.421	0.455	

对于问题三：以小麦抗倒伏指数为研究对象，结合抗倒伏指数与茎秆外部形态各参数的关联度关系，建立理想株型结构模型。对于机械强度未知的情况，利用机械强度与茎秆外部形态某些参数的多元线性回归关系进行求出。采用遗传算法对模型进行求解，得到各穗重情况下理想株型结构（结果详见表 11）。

对于问题四：将小麦茎秆简化成刚性等直杆，利用力学理论对小麦茎秆进行受力情况分析。当考虑小麦茎秆仅受麦穗自重作用时，建立了自重作用力学模型 I；当考虑小麦茎秆仅受风载作用时，建立了风载作用力学模型 II；当考虑小麦茎秆同时受麦穗自重和风载作用时，建立了自重和风载综合作用力学模型 III。

对于问题五：先求出 2007 年各品种小麦茎秆总长度、茎秆粗度、茎秆壁厚、茎秆鲜重和最大挠度。然后应用问题四中自重作用力学模型 I 进行求解，求得矮抗 58、新麦 208、周麦 18 这三个小麦品种发生茎倒的临界力分别为： $P_{cr1} = 0.0074N$ ,  $P_{cr2} = 0.0056N$ ,  $P_{cr3} = 0.0052N$ 。再应用问题四中风载作用力学模型 II 进行求解，求得矮抗 58、新麦 208、周麦 18 发生茎倒的临界力分别为： $q_1 = 0.023N$ ,  $q_2 = 0.0068N$ ,  $q_3 = 0.0076N$ 。根据临界力与风速的关系，解得临界风速分别为： $v_1 = 20.34m/s$ ,  $v_2 = 10.81m/s$ ,  $v_3 = 10.71m/s$ 。

对于问题六：对各模型及结果进行分析，并对几个文中未考虑但值得考虑的问题进行探讨，并给出了相关完善建议，最后针对小麦抗倒伏问题的后续研究给出了一些指导和建议。

**关键词：** 多元线性回归 灰色关联分析 遗传算法 有限元分析

## 一、问题的提出与重述

### 1.1 问题的提出

小麦高产、超高产的研究始终是小麦育种家关注的热点问题。随着产量的增加，小麦的单茎穗重不断增加，但穗重的增加同时使茎秆的符合增大，导致小麦容易倒伏。倒伏不但会造成小麦减产，而且影响小麦的籽粒品质。因此要实现小麦高产优质的跨越，就必须解决或尽量减少小麦的倒伏问题。

### 1.2 问题的重述

小麦倒伏是制约小麦高产和优质的主要因素之一，从形式上可分为根倒和茎倒，一般都发生在小麦发育后期。在生产实际中，茎倒最为普遍，尤其是发生时间较早的茎倒，往往造成大幅度的减产。茎倒的原因是茎秆与穗的自重和风载作用的迭加超过了小麦茎秆的承受能力。解决到付问题的方法之一就是针对不同的产量，寻找小麦抗倒伏能力最佳的茎秆性状(包括株高、茎长、各节茎外径、壁厚、茎秆自重、穗长、穗重等)。通过物理力学类比研究小麦抗倒伏性是一个新方向，题目中的附件里收集了一批各个品种小麦的茎秆性状、产量、倒伏情况的数据，就已有数据，需要解决的问题有：

问题一：依据有些论文中判断茎秆抗倒性的抗倒伏指数公式：

$$\text{茎秆抗倒伏指数} = \text{茎秆鲜重} \times \text{茎秆重心高度} / \text{茎秆机械强度}$$

对提供的数据，建立各品种小麦的茎秆抗倒指数公式。对于缺乏有关参数的年份，可进行合理的假设，如通过已知数据求茎秆机械强度与茎秆粗厚的关系。

问题二：研究抗倒伏指数与茎秆外部形态特征之间的关系。即给出抗倒伏指数与株高、穗长、各节间长、节间长度比、各节壁厚、穗重、鲜重等茎秆性状在最易引起倒伏期的相关性指标。判断小麦茎秆性状的各个因素之间是否有相关性，并对 2008 年国信 1 号与智 9998 品种的小麦都发生倒伏，其他品种没有发生倒伏的原因给出判断。

问题三：探讨单穗重分别是 1.19g, 2.06g, 2.46g, 2.56g, 2.75g, 2.92g 时小麦的理想株型结构。

问题四：将茎秆按钢/弹性材料处理，研究小麦茎秆在麦穗自重和风载作用下应力的基本规律，引用、修改附件三文献中力学公式或自己另行推导，建立小麦茎秆抗倒伏的数学模型。

问题五：应用问题四力学模型中的抗弯刚度 EI，麦穗自重下和风载作用下的公式对 2007 年腊熟期各品种数据进行计算，有些参数可依据需要作某些假设。因腊熟期小麦叶片、叶鞘多已脱落，可设风力仅对单穗穗头起作用，暂时忽略风力对小麦茎秆作用。试计算在 2007 年数据中腊熟期各品种的抗倒伏风俗(取小数后两位)

问题六：总结所建模型及分析结果，提出值得考虑的问题。同时为 2012 年制定完整的实验方案及数据分析方法，并给小麦育种家在育种实践中提出合理的建议。

## 二、 模型假设

- 1、假设 2007 年测量数据中所给单穗鲜重即为茎秆鲜重。
- 2、假设小麦某一节的重心位于该节的中间位置。
- 3、假设不同品种小麦的茎秆机械强度与茎秆粗厚的关系是一致的。
- 4、假设 2008 年所给测量数据为小麦成熟期时的值。
- 5、假设各品种小麦生长环境相同，生长过程中不受其它因素影响。
- 6、假设小麦的理想株型茎秆节数为 5 节。
- 7、假设对小麦倒伏形式只考虑茎倒，不考虑根倒，并且小麦的茎倒发生在基部第二节中间。
- 8、假设小麦的临界挠度即为原来垂直，弯折后变水平的小麦弯折长度作为临界挠度。
- 9、假设弹性测定值和弹性模量值为线性关系。

## 三、 符号说明

符号	符号说明
$\lambda$	茎秆抗倒伏指数
$m_{FW}$	茎秆鲜重 ( $g$ )
$H_{SCG}$	茎秆重心高度 ( $mm$ )
$y_i$	基部第 $i$ 节茎秆重心高度 ( $mm$ )
$S_{MS}$	茎秆机械强度 ( $Kg$ )
$L_i$	基部第 $i$ 节茎秆长度 ( $mm$ )
$D_i$	茎秆粗度 ( $mm$ )
$q_{cr}$	临界状态时茎秆单位长度的自重 ( $N/cm$ )
$p_{cr}$	临界状态时的穗重 ( $N$ )
$E$	茎秆弹性模量 ( $KPa$ )
$I$	茎秆截面惯性矩 ( $mm^4$ )
$W$	试样抗弯截面系数 ( $mm^3$ )
$M$	最大弯矩 ( $N \cdot mm$ )
$v$	风速 ( $m/s$ )
$w$	风压 ( $kN/m^2$ )
$A$	穗头迎风面积 ( $cm^2$ )

## 四、 问题分析

对于问题一：要求对提供的数据，建立各品种小麦的茎秆抗倒伏指数公式。在已知各数据的条件下，可以依据如下公式求出各品种小麦抗倒伏指数：

$$\text{茎秆抗倒伏指数} = \text{茎秆鲜重} \times \text{茎秆重心高度} / \text{茎秆机械强度}$$

对于 2007 年测量数据，数据中各品种小麦的与抗倒伏指数相关的三个指标均为已知量，可以直接根据该公式求出各品种小麦的抗倒伏指数。

对于 2011 年的数据，测量数据 1 中穗下第四节数据即对应测量数据 2 中的基部第二节数据，将数据 2 中的基部第二节的拉力值作为茎秆机械强度值，将数据 2 中茎秆鲜重和穗重求和即为茎秆总鲜重，再根据茎秆抗倒伏指数公式，结合已知数据即可求出各品种小麦的抗倒伏指数。

对于 2008 年的测量数据，没有直接给出茎秆鲜重、茎秆重心高度和机械强度值，需要通过对数据进行处理来获得。由于已知数据中只有各节茎秆的干重值，茎秆鲜重值未知，因此可根据 2011 年数据采用最小二乘拟合法建立小麦茎秆鲜重与干重的关系，并将此关系应用到 2008 年数据中，进而求出各品种小麦茎秆鲜重。再利用重心计算公式结合小麦茎秆各节长度及质量计算出各品种小麦茎秆重心高度值。由于机械强度也是未知的，因此需建立机械强度与茎秆形态参数的多元线性回归关系，再根据 2008 年茎秆形态参数的值求出接卸强度的值。求出茎秆鲜重、茎秆重心高度和茎秆机械强度后，代入茎秆抗倒伏指数公式，进而求解出各品种小麦的抗倒伏指数，然后对求解结果进行分析。

对于问题二：要求研究抗倒伏指数与茎秆外部形态特征之间的关系，判断小麦茎秆性状的各个因素之间是否有相关性，并就 2008 年国信 1 号与智 9998 两个品种发生倒伏的原因进行分析。考虑到数据信息的规律性并不明显，且外部形态特征的参数个数繁多。因此本文欲采用灰色关联分析模型对抗倒伏指数与各形态特征参数的关联度进行分析。选用抗倒伏指数与基部向上五节的各节间长和壁厚及节间粗、茎秆鲜重、穗长和穗重等共 19 个茎秆外部形态特征参数进行关联度分析，得到小麦抗倒伏指数与各指标之间的关联度，进而可分析得到影响茎秆抗倒伏指数的一些主要形态特征参数。对于选取的 19 个茎秆外部形态特征参数，可用相关性分析的方法分析出其相互之间的相关性。根据关联度和相关性分析的结果，可以得出影响抗倒伏指数的主要参数因素。在分析 2008 年国信 1 号与智 9998 两个品种小麦发生倒伏而其它品种未倒伏原因时，将影响它们抗倒伏指数的几项主要因素进行对比分析，根据它们的不同点分析出上述两品种倒伏而其他品种未发生倒伏的原因。

对于问题三：要求对给出的不同单穗重的小麦理想株型进行探讨。理想株型结构主要指小麦抗倒伏能力最佳的茎秆性状的定量标准，即抗倒伏指数最小时对应的各茎秆性状参数。在小麦抗倒伏指数公式中，主要因素有机械强度、茎秆鲜重和茎秆重心高度(含穗)。根据对问题二的解答结果的分析，得到影响抗倒伏指数的主要参数因素，建立机械强度与几个主要影响因素的线性回归关系。再根据回归分析结果，以抗倒伏指数最小为目标，建立理想株型模型。由于问题属于优化问题，因此可以采用遗传算法对模型进行求解，从而得到各穗重情况下理想株型结构，然后对理想株型结构特点进行分析。

对于问题四：要求建立小麦茎秆在麦穗自重和风载作用下的抗倒伏数学模型。将小麦茎秆简化成刚性等直杆，利用力学理论对小麦茎秆进行受力情况分

析。因此，根据受力分析情况，分别对应于仅考虑麦穗自重、仅考虑风载作用、同时考虑麦穗自重与风载作用建立相应模型。当考虑小麦茎秆仅受麦穗自重作用时，建立自重作用抗倒伏力学模型 I；当考虑小麦茎秆仅受风载作用时，建立风载作用抗倒伏力学模型 II；当考虑小麦茎秆同时受麦穗自重和风载作用时，建立自重和风载综合作用抗倒伏力学模型 III。

对于问题五：要求根据问题四中建立的模型，对 2007 年腊熟期各品种数据进行计算，及对问题四中的模型 I 和模型 II 在 2007 年数据的基础上进行求解。先分析求解模型 I 和模型 II 需要根据已知数据求解的各项参数，并对各参数进行求解。将各参数代入模型 I 中，可求解出仅考虑小麦茎秆受麦穗自重时，各品种小麦发生茎倒的临界力；将各参数代入模型 II 中，可求解出仅考虑小麦茎秆受风载时，各品种小麦发生茎倒的临界力和临界风速。

对于问题六：要求对所建立的模型进行分析总结，根据分析结果提出一些值得考虑的问题，并对后续研究作出相关建议。在分析总结时，可以针对具体模型以及其求解结果分析对模型作出评价，并对模型中未曾考虑到的方面提出补充完善的意见。在对 2012 年制定实验方案时，可在 2011 年试验的试验方法基础上，针对 2011 年试验方案中存在的试验器材、试验步骤、试验程序等方面的不足之处和应该注意到的问题作出相应改进与补充。在对小麦育种实践中的建议方面，建议小麦育种专家应注意从如小麦茎秆外部形态特征、穗重、机械强度等方面因素考虑选育抗倒伏能力强、抗病性好、产量高等优良小麦品种作为育种对象。

## 五、问题一：茎秆抗倒伏指数求解

### 5.1 数据特点分析

题目中分别给出了 2007 年、2008 年和 2011 年的数据，由于信息搜集人员不同，记录数据的方式也不同。原始数据文件中一般包含以下内容：小麦品种(*WV*)，数据记录时间(*DRT*)，小麦各节长度(*L*)和茎秆径粗(*SW*)，鲜重(*FW*)，壁厚(*WT*)，机械强度(*MS*)和重心高度(*HCG*)。

在问题一中，要求求出各品种小麦的茎秆抗倒伏指数，对于题中已明确给出参数数据的年份，可以直接求解；对于未明确给出参数数据或数据缺失的年份，则需对数据进行处理后再进行求解。以 2008 年数据为例，数据中既无年份说明，亦无重心高度和机械强度值，需要通过另外两年的数据对 2008 年的数据进行合理的补充。

经过对题中所给出的大量数据的分析，可以得到以下的数据特点：

(1)数据量大。由于小麦品种的多样性及农作物生长的多样性，记录数据时并不是只对某一品种的某一株进行测量，而是对多个品种多株小麦并且在多个时间段进行测量并记录。

(2)数据部分丢失。数据中三个年份中的小麦品种、记录时间、小麦生长期特性等的记录各不相同，有些年份中数据缺失，需要进行合理假设，根据其他已知数据进行回归分析或均值化处理，得到不同数据之间的关系，进而推导或计算出缺失部分数据。

### 5.2 2007 年各品种小麦抗倒伏指数模型的建立与求解

#### 5.2.1 模型的建立

由分析可知：茎秆抗倒伏指数公式：

$$\lambda = \frac{m_{FW} H_{SCG}}{S_{MS}}$$

其中，茎秆鲜重  $m_{FW}$  单位为  $kg$ ，茎秆重心高度  $H_{SCG}$  单位为  $cm$ ，茎秆机械强度  $S_{MS}$  为  $kg$ ，则茎秆抗倒伏指数  $\lambda$  的单位为  $cm$ 。由上式所求的茎秆抗倒伏指数越小，表示该品种的抗倒伏能力越强；反之，抗倒伏能力越差，越容易倒伏。

综上所述，得到抗倒伏指数的模型为：

$$\lambda = \frac{m_{FW} H_{SCG}}{S_{MS}}$$

### 5.2.2 模型的求解

小麦由幼苗长大为成熟的作物，其大小和形状是逐渐变化的。在幼苗期，风吹易弯，但不易倒。到了成熟期，由于自身的穗重及风雨的作用，有些小麦就会发生倒伏。在问题一中，暂时只分析小麦自身的重力原因和成熟期的小麦。

选取 2007 年数据中，播种日期为 2006 年 10 月 25 日的小麦进行分析求解。其中，单穗鲜重即为公式中的茎秆鲜重。由于 2007 年的数据中已经对模型中的各个指标均给出具体值，故而可以直接代值进行计算。在 *matlab* 中编程求解，可得到各品种小麦抗倒伏指数，具体计算结果详表见附录一附表 1。

根据样本结果，取其均值，可得到各品种小麦抗倒伏指数如下表 1 所示：

表 1 各品种小麦抗倒伏指数

品种	矮抗 58	新麦 208	周麦 18
抗倒伏指数( $cm$ )	0.7330	1.2019	0.9658

### 5.2.3 结果分析

根据结果绘制出各品种小麦的茎秆抗倒伏指数变化趋势图如下图 1 所示：

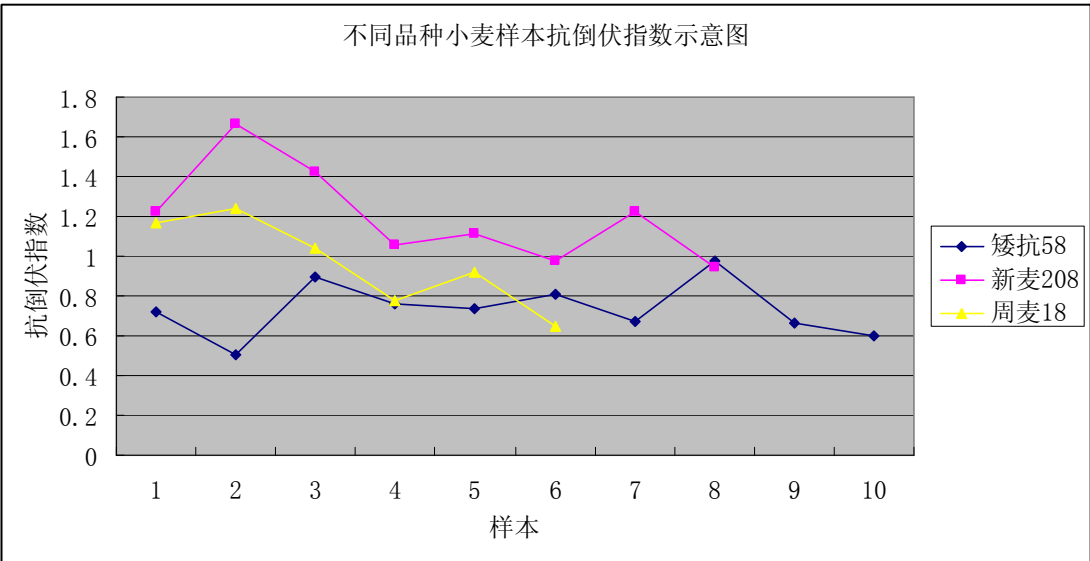


图 1 不同品种小麦样本抗倒伏指数示意图

本文以抗倒伏指数的大小来衡量小麦抗倒伏能力的强弱。从不同小麦品种之间的抗倒伏指数来看，矮抗 58 的抗倒伏指数最小，为 0.7330；新麦 208 的抗倒伏指数最大，为 1.2019。则这 3 个品种小麦的抗倒伏能力由强到弱排列为：矮抗 58 > 周麦 18 > 新麦 208

### 5.3 2011 年各品种小麦抗倒伏指数模型的建立与求解

#### 5.3.1 模型的建立

在 5.2.2 节中已说明仅对小麦成熟期(大约在 5 月 25 日左右)进行分析，而在 2011 年的测量数据 1 中，有些数据是在 5 月 6 日左右进行记录的，根据以往数据记录，这个时间段的数据约为小麦灌浆期，参考意义不大。故在此选用测量数据 2 中的数据，对各品种小麦的抗倒伏指数进行分析，由于数据 2 中每种小麦在某个时间段内只有一组数据，在此假设该组数据即为统计的平均值。

由附件 2 中小麦的茎秆结构可知，穗下第四节即为基部第二节。在 2011 年所记录的数据中，数据 1 中郑麦 2093 给出部分穗下第四节的拉力，这里的拉力即为茎秆机械强度。同理，在数据 2 中给出的基部第二节拉力  $F$ ，即为茎秆机械强度  $S_{MS}$ 。

茎秆鲜重指的是单茎小麦的重量，包括了穗头和茎秆，故数据 2 中穗鲜重与单茎鲜重之和即为茎秆鲜重，即  $m_{FW} = m_1 + m_2 = \sum m_i$ ，其中  $m_i$  代表第  $i$  部分鲜重。

综上所述，得到抗倒伏指数模型为：

$$\lambda = \frac{H_{SCG} \sum m_i}{F}$$

#### 5.3.2 模型的求解

在 *matlab* 中编程求解，可得到各品种小麦抗倒伏指数如下表 2 所示：

表 2 各品种小麦抗倒伏指数

小麦品种	抗倒伏指数(cm)	小麦品种	抗倒伏指数(cm)
周麦 18	0.6809	郑麦 9023	1.1187
矮抗 58	0.5088	平安 6 号	1.1588
温麦 6 号	1.2778	豫麦 18	1.0171
周麦 22	1.7167		

#### 5.3.3 结果分析

从表 2 中可看出，周麦 18 和矮抗 58 的抗倒伏指数明显小于其他品种，抗倒伏能力高；周麦 22 的抗倒伏指数最大，为 1.7167，为矮抗 58 的抗倒伏指数的三倍有余，在这 7 种小麦中最易发生倒伏。通过表 2 可知，这 7 个品种小麦的抗倒伏能力由强到弱排序为：矮抗 58 > 周麦 18 > 豫麦 18 > 郑麦 9023 > 平安



6 号 > 温麦 6 号 > 周麦 22。

## 5.5 2008 年各品种小麦抗倒伏指数模型的建立与求解

### 5.5.1 模型的建立

由分析可知，茎秆抗倒伏指数公式：

$$\lambda = \frac{m_{FW} H_{SCG}}{S_{MS}}$$

由于题目所给数据中并没有直接给出该指数公式中茎秆鲜重、茎秆重心高度和机械强度的值，故首先需要对各参数进行分析求解。

#### 1、数据处理

##### (1)测量时间的确定

由于 2008 年数据中没有指明测量日期，根据 5.2 节中的分析，在此给出假设 4，设 2008 年的数据为小麦成熟期的测量记录。同时，对比 2007 年及 2011 年同品种的小麦，亦可看出此数据与另外两年成熟时期的小麦茎秆长度及厚度较为一致，可见假设 4 是合理的。

##### (2)缺失部分的补充

因为数据给出的各品种小麦茎秆的壁厚和各节重量为均值，而样本小麦各节长度和茎秆外径大部分均给出了详细值，有一小部分数据缺失。对于缺失的部分，则以样本小麦在该节的平均值为测量数据进行补充。

#### 2、茎秆鲜重的计算

由于给出的样本小麦各节重量数据并没有明确说明是干重或是鲜重，通过对 2007 年及 2011 年相关数据中分析可知，2008 年测量数据中所给重量值为干重。故在此需要通过已知数据找出小麦茎秆鲜重与干重之间的关系。2007 年的数据中并未涉及干重，故不予考虑；2011 年的数据中则详细给出了同种小麦的鲜重与干重的值。

本文采用最小二乘拟合法建立小麦鲜重与干重的关系式。首先在 EXCEL 中画出 2011 年各品种小麦鲜重与干重的走势图如下图 2 所示：

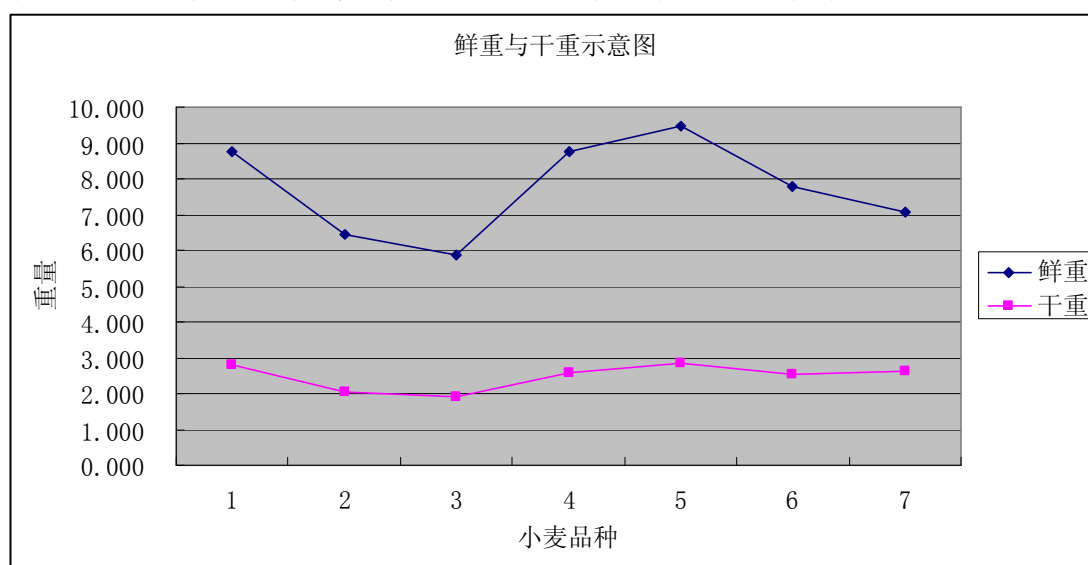


图 2 各品种小麦鲜重与干重变化示意图

从图 2 中可看出，鲜重的变化趋势与干重变化趋势大致相同，不妨设鲜重

与干重线性相关。设：

$$y = ax + b$$

其中， $a, b$  是两个未知参数。用最小二乘法来估计模型中未知参数  $a, b$ 。根据统计，共有 7 组独立的观测值： $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_7, y_7)$ ，记  $J(a, b) = \sum_{i=1}^7 \delta_i^2 = \sum_{i=1}^7 (a_i x_i + b_i)^2$ ，称  $J(a, b)$  为偏离真是直线的偏差平方和。最小二乘法就是选择  $a, b$  的估计使得  $J(a, b)$  最小。

在 *matlab* 中编程求得小麦茎秆鲜重与干重的拟合关系式，并画出其关系图如下图 3 所示：

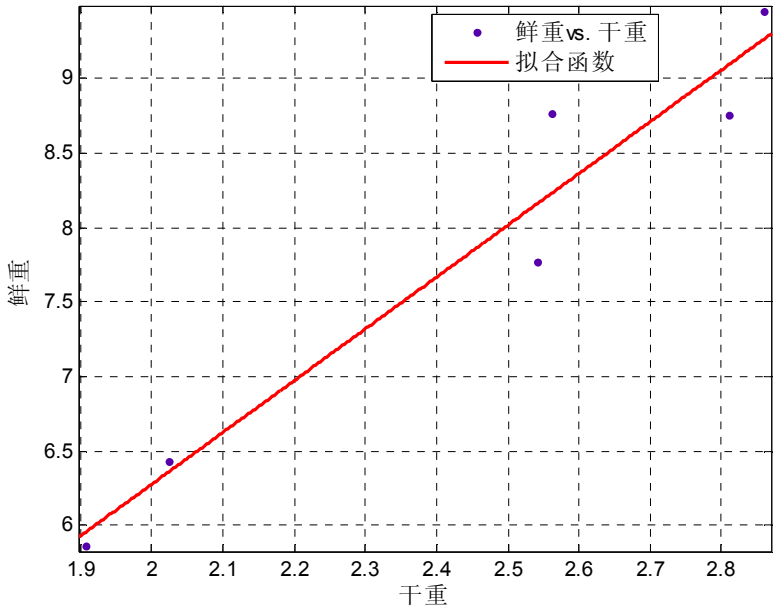


图 3 小麦鲜重—干重拟合图

通过计算可得：

$$a = 3.477, b = -0.6804$$

在 95% 的置信度下， $a$  的置信区间为：(2.265, 4.689)； $b$  的置信区间为：(-3.682, 2.322)，均方误差为：0.3889。

综上所述，得到小麦茎秆鲜重和干重的关系式为：

$$y = 3.477x - 0.6804$$

由此关系式可得到 2008 年各小麦品种茎秆鲜重值如下表所示：

表 3 各品种小麦茎秆鲜重

品种	矮抗 58	周麦 18	国信	智 9998	联丰 85	TM
茎秆鲜重(g)	11.1301	12.0715	9.2204	9.5507	11.6160	16.1170

### 3、茎秆重心高度的计算

由于数据中并未给出小麦茎秆重心高度，需要根据重心计算公式进行计算。

重心计算公式<sup>[3]</sup>如下:

设物体由若干部分组成, 其第*i*部分重为 $P_i$ , 重心为 $(x_i, y_i, z_i)$ , 可得物体的重心为:

$$x_c = \frac{\sum P_i x_i}{\sum P_i}, y_c = \frac{\sum P_i y_i}{\sum P_i}, z_c = \frac{\sum P_i z_i}{\sum P_i}$$

在本文中, 将小麦茎秆简化如下图 4 所示:

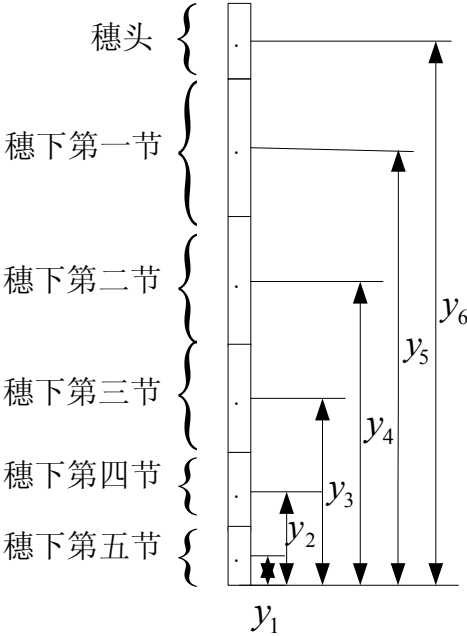


图 4 小麦茎秆示意图

从图 4 中可看出, 只需对茎秆的高度进行求解即可, 故只需对  $y$  值进行计算。首先根据数据中样本小麦各节长度均值及假设 2, 确定图 4 中  $y_i$  的值。再由数据中所给小麦茎秆各部分质量  $P_i$ , 代入公式:

$$y_c = \frac{\sum P_i y_i}{\sum P_i}$$

即可求出各品种小麦茎秆重心高度如下表所示:

表 4 各品种小麦重心高度

品种	矮抗 58	周麦 18	国信	智 9998	联丰 85	TM
重心高度(cm)	49.8819	53.8956	59.6287	55.6844	53.0313	55.9453

#### 4、机械强度的计算

由于题目所给的 2008 年数据中没有机械强度的值, 通过题中所给已知数据可知, 机械强度与茎秆外形(长度, 粗度, 穗重等)之间存在一定关系, 因此, 可建立多元线性回归模型:

$$\begin{cases} y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_m x_m + \varepsilon \\ \varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \end{cases}$$

设现得到  $n$  个独立观测数据  $(y_i, x_{i1}, \dots, x_{im}), i = 1, 2, \dots, n, n > m$ ，由上式得：

$$\begin{cases} y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_m x_{im} + \varepsilon_i \\ \varepsilon_i \sim N(0, \delta^2), i = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

$$\text{记: } X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \varepsilon = [\varepsilon_1 \quad \dots \quad \varepsilon_n]^T, \beta = [\beta_0 \quad \beta_1 \quad \dots \quad \beta_m]^T$$

则上式表为：

$$\begin{cases} Y = X\beta + \varepsilon \\ \varepsilon \sim N(0, \delta^2) \end{cases}$$

根据上述理论知识，结合 2007 年所给数据，建立机械强度与小麦基部第二节至基部第五节茎秆杆粗和小麦茎秆鲜重之间的多元线性回归关系，其中  $x_1, x_2, x_3, x_4$  分别表示基部第二节、基部第三节、基部第四节和基部第五节茎秆杆粗， $x_5$  表示小麦茎秆鲜重。在 *matlab* 中编程求得各参数值，得到回归方程为：

$$y = -0.2931 + 2.2121x_1 - 1.005x_2 - 2.1774x_3 + 3.0755x_4 + 0.07x_5$$

$S = [0.8376 \quad 4.1255 \quad 0.0973 \quad 0.0070]$ ，即  $R^2 = 0.8376$ ，显然  $R > 0.9$ ； $F = 4.1255, p = 0.0973 > 0.05$ ，说明回归方程并不十分显著。下面进行进一步的检验—残差分析。作残差图如下图 5 所示：

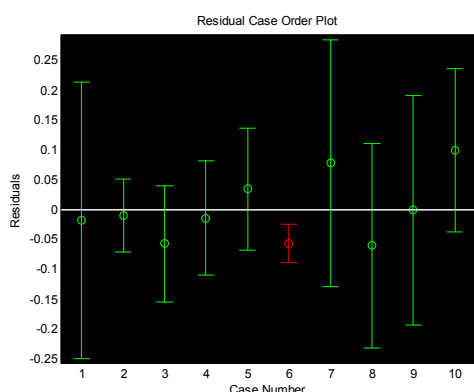


图 5 残差检验

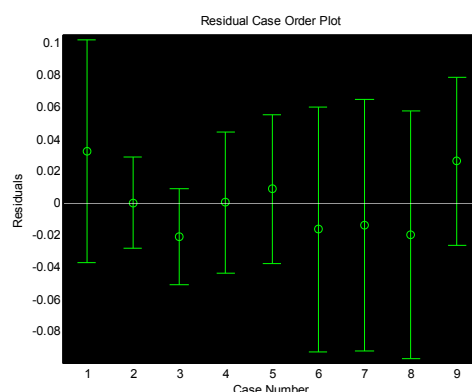


图 6 修正后的残差图

从图 5 中可看出，除第 6 个点外，其余数据的残差离零点均较近，且残差置信区间均包含零点，这说明回归模型与实际观测数据吻合得较好。

现在将第 6 个观测数据视为异常数据剔除掉，然后再进行计算。

综上所述，得到修正后的回归方程为：

$$y = -0.3709 - 1.6706x_1 + 4.9611x_2 + 2.1250x_3 - 0.2553x_4 - 0.0672x_5$$

$S = [0.9813 \quad 31.4602 \quad 0.0085 \quad 0.001]$ ，即  $R^2 = 0.9813$ ，显然  $R > 0.9$ ； $F = 31.4602, p = 0.0085 < 0.05$ ，说明回归方程是非常显著的。作得残差图如上图 6 所示，结果比前面要好，没有异常点，说明回归方程对这 9 个数据拟合效果很好，可以使用。

综上所述，得到抗倒伏指数的模型为：

$$\lambda = \frac{m_{FW} H_{SCG}}{S_{MS}}$$

$$s.t \begin{cases} m_{FW} = ax + b = 3.477x - 0.6804 \\ H_{SCG} = y_C = \frac{\sum_{i=1}^5 P_i y_i}{\sum_{i=1}^5 P_i} \\ S_{MS} = b_0 + \sum_{i=1}^5 b_i x_i \end{cases}$$

根据上述回归方程，将 2008 年数据代入计算，在 matlab 中编程进行求解，得到各品种小麦的机械强度如下表所示：

表 5 各品种小麦机械强度

品种	矮抗 58	周麦 18	国信	智 9998	联丰 85	TM
机械强度(kg)	1.4863	1.3349	1.3788	1.0607	1.4082	2.6509

#### 5.4.5 计算结果

结合上述结果，将所求得的茎秆鲜重、茎秆重心高度以及机械强度带入公式进行计算，在 matlab 中编程求解，可得到最终各品种小麦抗倒伏指数如下表 3 所示：

表 6 各品种小麦抗倒伏指数

品种	矮抗 58	周麦 18	国信	智 9998	联丰 85	TM
抗倒伏指数(cm)	0.3735	0.4874	0.3987	0.5014	0.4375	0.3401

#### 5.4.6 结果分析

从表 6 中可看出，TM 品种小麦的抗倒伏指数最小，为 0.3401；智 9998 品种小麦的抗倒伏指数最大，为 0.5014. 通过抗倒伏指数公式可知，抗倒伏指数越小，小麦越不容易发生倒伏。则这 6 个品种小麦的抗倒伏能力由强到弱的排列为：TM > 矮抗 58 > 国信 > 联丰 85 > 周麦 18 > 智 9998

## 六、 问题二：灰色关联度分析与相关性模型

### 6.1 模型的选用

在问题二中，要求对小麦茎秆抗倒伏指数与株高、穗长、各节间长、节间长度比、各节壁厚、穗重、鲜重等茎秆性状在最易引起倒伏期的相关性指标。分析小麦茎秆外部形态特征与倒伏指数的相关性时，应结合实际情况选用合适

的数学模型。

灰色系统是指既含有已知的又含有未知的或不确定信息的系统。由于在本题中，小麦的各个指标数据杂乱且缺失严重，因此对于小麦外部形态与抗倒伏指数之间具有“灰色”特征，拟采用灰色理论对小麦茎秆外部形态特征对抗倒伏指数的影响程度进行分析。

灰色关联度分析<sup>[2]</sup>主要是对态势发展变化的分析，也就是对系统动态发展过程的量化分析。它根据因素之间发展态势的相似或相异程度来衡量因素间接近的程度，实质上就是比较数据到曲线几何形状的接近程度，一般来说，几何形状越接近，变化趋势也就越接近，关联度就越大，其可从众多因素中提炼出影响系统的主要因素、主要特征和因素间对系统差别的影响。由于关联分析是按发展趋势作分析，因而对样本量的大小没有太高的要求，分析时也不需要典型的分布规律，而且分析结果一般与定性分析相吻合，因而具有广泛的实用性。

按照灰色关联理论要求，将小麦的抗倒伏指数和小麦的外部形态特征指标(株高、穗长、各节间长、节间长度比、各节壁厚、穗重、鲜重等)视为一个灰色系统，每个特征指标作为该系统的一个因素，研究各指标对小麦抗倒伏指数的影响。关联度大的表明对倒伏指数影响大，反之表明对倒伏指数影响小。

## 6.2 模型 I：灰色关联度模型建立与求解

### 6.2.1 数据变换

为保证建模的质量与系统分析的正确结果，对收集来的原始数据必须进行数据变换和处理，使其消除量纲并具有可比性。

设有序列

$$x = (x(1), x(2), \dots, x(20))$$

其中各节间长：从基部算起，依次向上 5 节间长，记为： $x_{15}, x_{12}, x_9, x_6, x_3$ ，单位用  $cm$  表示；

各节间粗：从基部算起，依次向上 5 节间粗，记为： $x_{16}, x_{13}, x_{10}, x_7, x_4$ ，单位用  $cm$  表示；

各节壁厚：从基部算起，依次向上 5 节壁厚，记为： $x_{17}, x_{14}, x_{11}, x_8, x_5$ ，单位用  $cm$  表示；

抗倒指数  $x_1$ ，单位用  $kg$  表示；重心高度  $x_2$ ，单位用  $cm$  表示；茎秆鲜重  $x_{18}$ ，单位用  $g$  表示；穗长  $x_{19}$ ，单位用  $cm$  表示；穗重  $x_{20}$ ，单位用  $g$  表示。

则称映射

$$\begin{aligned} f: x &\rightarrow y \\ f(x(k)) &= y(k), k = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

为序列  $x$  到序列  $y$  的数据变换。

本文采用区间值化变换，当

$$f(x(k)) = \frac{x(k) - \min_k x(k)}{\max_k x(k) - \min_k x(k)} = y(k)$$

则称  $f$  是区间值化变换。

### 6.2.2 模型 I 的建立

选取参考数列

$$x_0 = \{x_0(k) | k = 1, 2, 3\} = (x_0(1), x_0(2), x_0(3))$$

其中  $k$  表示年代。有 12 个比较数列

$$x_i = \{x_i(k) | k = 1, 2, 3\} = (x_i(1), x_i(2), x_i(3)), i = 1, 2, \dots, 12$$

则称

$$\xi_i(k) = \frac{\min_s \min_t |x_0(t) - x_s(t)| + \rho \max_s \max_t |x_0(t) - x_s(t)|}{|x_0(t) - x_s(t)| + \rho \max_s \max_t |x_0(t) - x_s(t)|}$$

为比较数列  $x_i$  对参考数列  $x_0$  在  $k$  时刻的关联系数，其中  $\rho \in [0, 1]$  为分辨系数。称上述式子中  $\min_s \min_t |x_0(t) - x_s(t)|$ 、 $\rho \max_s \max_t |x_0(t) - x_s(t)|$  分别为两级最小差及两级最大差。

一般来讲，分辨系数  $\rho$  越大，分辨率越大； $\rho$  越小，分辨率越小。一般取  $\rho = 0.5$ 。

上式中定义的关联系数是描述比较数列与参考数列在某时刻关联程度的一种指标，由于各个时刻都有一个关联度，因此信息显得过于分散，不便于比较，为此给出定义：

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k)$$

其中， $n = 3$ ，式中  $r_i$  为数列  $x_i$  对参考数列  $x_0$  的关联度。

从这个式子中不难看出，关联度把各个时刻的关联系数集中为一个平均值，即把过于分散的信息集中处理。利用关联度的这个概念，可以对各种问题进行因素分析。

综上所述，得到灰色关联分析模型：

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k)$$

### 6.2.3 模型 I 的求解

采用上述灰色关联分析模型对矮抗 58 抗倒指数与各指标的关联度进行相关分析，使用 *matlab* 编程求解得到结果如下表 7 所示：

表 7 矮抗 58 抗倒指数与各指标关联度计算结果

$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	$r_5$	$r_6$	$r_7$	$r_8$	$r_9$	$r_{10}$
0.427	0.900	0.456	0.703	0.509	0.549	0.506	0.699	0.502	0.499
$r_{11}$	$r_{12}$	$r_{13}$	$r_{14}$	$r_{15}$	$r_{16}$	$r_{17}$	$r_{18}$	$r_{19}$	
0.707	0.474	0.425	0.833	0.437	0.745	0.481	0.421	0.455	

采用上述灰色关联分析模型对周麦 18 抗倒指数与各指标的关联度进行相关分析，得到结果如下表 8 所示：

表 8 周麦 18 抗倒指数与各指标关联度计算结果

$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	$r_5$	$r_6$	$r_7$	$r_8$	$r_9$	$r_{10}$
0.418	0.972	0.417	0.615	0.814	0.432	0.348	0.784	0.476	0.436
$r_{11}$	$r_{12}$	$r_{13}$	$r_{14}$	$r_{15}$	$r_{16}$	$r_{17}$	$r_{18}$	$r_{19}$	
0.785	0.411	0.438	0.651	0.441	0.763	0.498	0.429	0.429	

## 6.2.4 模型 I 结果分析

从以上两个品种小麦的抗倒指数与各指标关联度结果可看出：

(1) 对于矮抗 58:  $r_2 = 0.900$ ；对于周麦 18:  $r_2 = 0.972$ ，与其他指标相比均为最大，表明基部第一节长度的大小对抗倒指数的影响最大。

(2) 对于矮抗 58:  $r_{14} = 0.833$  仅次于  $r_2$ ，表明基部第二节粗度对抗倒指数的影响较大；对于周麦 18:  $r_5 = 0.814$  仅次于  $r_2$ ，表明基部第五节粗度对抗倒指数的影响较大。

(3) 重心高度和茎秆鲜重等其它指标与抗倒伏指数的相关系数则相对较小，对抗倒伏指数的影响也相对较小。

## 6.3 模型 II：相关性分析模型的建立与求解

### 6.3.1 模型 II 的建立

由协方差方程  $Cov(X, Y) = E\{[X - E(X)][Y - E(Y)]\}$  可知其相关系数：

$$\rho = \frac{Cov(X, Y)}{\sqrt{D(X)}\sqrt{D(Y)}}$$

其中  $X = Y = [x(1), \dots, x(20)]$ ：

式中：各节间长：从基部算起，依次向上 5 节间长，记为： $x_{15}, x_{12}, x_9, x_6, x_3$ ，单位用  $cm$  表示；

各节间粗：从基部算起，依次向上 5 节间粗，记为： $x_{16}, x_{13}, x_{10}, x_7, x_4$ ，单位用  $cm$  表示；

各节壁厚：从基部算起，依次向上 5 节壁厚，记为： $x_{17}, x_{14}, x_{11}, x_8, x_5$ ，单位用  $cm$  表示；

抗倒指数  $x_1$ ，单位用  $kg$  表示；重心高度  $x_2$ ，单位用  $cm$  表示；茎秆鲜重  $x_{18}$ ，单位用  $g$  表示；穗长  $x_{19}$ ，单位用  $cm$  表示；穗重  $x_{20}$ ，单位用  $g$  表示。

综上所述，得到相关性分析模型为：

$$\rho = \frac{Cov(X, X)}{D(X)}$$

### 6.3.1 模型 II 的求解

对小麦茎秆各性状的测量数据进行相关分析，使用 *matlab* 编程求解，结果见下表 9。



表 9 小麦茎秆各性状的相关系数<sup>4)</sup>

$x_1^{4)}$	$x_2^{4)}$	$x_3^{4)}$	$x_4^{4)}$	$x_5^{4)}$	$x_6^{4)}$	$x_7^{4)}$	$x_8^{4)}$	$x_9^{4)}$	$x_{10}^{4)}$	$x_{11}^{4)}$	$x_{12}^{4)}$	$x_{13}^{4)}$	$x_{14}^{4)}$	$x_{15}^{4)}$	$x_{16}^{4)}$	$x_{17}^{4)}$	$x_{18}^{4)}$	$x_{19}^{4)}$	$x_{20}^{4)}$
$x_1^{4)}$	1.000	-0.677	0.973	-0.999	0.680	-0.982	-0.963	-0.172	0.661	-0.925	-0.200	0.697	-0.923	-0.695	0.849	-0.695	0.705	-0.725	-0.458
$x_2^{4)}$		1.000	-0.490	0.705	0.079	0.804	0.850	0.841	0.105	0.906	0.856	0.055	0.908	1.000	-0.964	1.000	-0.999	0.901	0.964
$x_3^{4)}$			1.000	-0.964	0.830	-0.912	-0.876	0.059	0.815	-0.813	0.031	0.843	-0.810	-0.511	0.705	-0.511	0.523	-0.064	-0.242
$x_4^{4)}$				1.000	-0.652	0.989	0.973	0.210	-0.631	0.939	0.238	-0.669	0.937	0.722	-0.869	0.722	-0.732	0.329	0.492
$x_5^{4)}$					1.000	-0.530	-0.458	0.605	1.000	-0.351	0.582	1.000	-0.346	0.055	0.191	0.054	-0.040	0.502	0.340
$x_6^{4)}$						1.000	0.997	0.355	-0.507	0.980	0.381	-0.549	0.979	0.818	-0.934	0.818	-0.826	0.467	0.618
$x_7^{4)}$							1.000	0.431	-0.434	0.993	0.456	-0.479	0.992	0.863	-0.960	0.863	-0.870	0.538	0.680
$x_8^{4)}$								1.000	0.626	0.533	1.000	0.586	0.538	0.828	-0.666	0.828	-0.820	0.992	0.954
$x_9^{4)}$									1.000	-0.326	0.603	0.999	-0.321	0.081	0.165	0.081	-0.067	0.525	0.364
$x_{10}^{4)}$										1.000	0.557	-0.373	1.000	0.916	-0.986	0.916	-0.922	0.633	0.761
$x_{11}^{4)}$											1.000	0.563	0.562	0.844	-0.687	0.843	-0.836	0.995	0.962
$x_{12}^{4)}$												1.000	-0.368	0.032	0.213	0.031	-0.017	0.482	-0.011
$x_{13}^{4)}$													1.000	0.918	-0.987	0.918	-0.924	0.637	0.765
$x_{14}^{4)}$														1.000	-0.970	1.000	-1.000	0.999	0.958
$x_{15}^{4)}$															1.000	-0.970	0.973	-0.753	-0.859
$x_{16}^{4)}$																1.000	-1.000	0.999	0.958
$x_{17}^{4)}$																	1.000	-1.000	-0.953
$x_{18}^{4)}$																		1.000	0.871
$x_{19}^{4)}$																			1.000
$x_{20}^{4)}$																			

### 6.3.2 模型 II 结果分析

由附表 2 中数据可看出, 在小麦茎秆外部形态特征中, 除了壁厚、穗长、节间粗等三个因素对间长较少相关, 穗长和节间两个因素对壁厚较少相关外, 其余因素间的相关性错综复杂, 大部分达到了显著水平; 其中, 茎秆各节间长、各节壁厚、穗长、穗重等四个因素与小麦重心高度的相关系数超过 0.9, 达极显著水平。由此可见, 茎秆的各性状关系十分复杂, 共同影响着茎秆的性能和抗折力。

#### (1) 重心高度与若干性状的相关性

相关分析结果(表 9)表明, 重心高度与茎秆第一、五节间长( $x_3, x_{15}$ )和第五节壁厚( $x_{17}$ )呈负相关, 说明茎秆第一、五节间越长, 第五节壁越厚, 重心高度越小; 除与第三、四节茎秆间长相关性较小外, 与其余性状均达到极显著正相关。

重心高度与茎秆鲜重、穗长、穗鲜重呈极显著正相关, 其相关系数分别达 0.901, 0.988, 0.964, 说明小麦质量越大, 麦穗越长, 重心高度越大。

#### (2) 穗部性状与若干性状的相关性

每穗粒数和粒重是小麦产量的两个极重要因素, 相关分析结果(表 9)表明, 穗长与茎秆各节粗均呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.751, 0.883, 0.932, 0.934, 0.999; 穗重与茎秆各节粗亦均呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.492, 0.680, 0.761, 0.765, 0.958 根据生物学知识可知, 由于中上部茎秆的下皮层组织细胞叶绿体可进行光合作用制造有机物, 在小麦生育后期, 茎秆光合作用对籽粒产量的贡献大, 特别是灌浆期, 与穗部接近且光合作用强的中上部茎秆的粗度与穗重有极显著的正相关, 茎秆各节的间长与穗重呈极显著正相关, 这与许多学者研究的结果一致<sup>[5,6]</sup>。

### 6.4 各品种小麦倒伏原因对比分析

对 2008 年国信 1 号与智 9998 品种发生倒伏而其它品种没有发生倒伏的原因, 通过上述分析及计算, 从以下三个方面给出判断:

#### (1) 从抗倒伏指数来看

由抗倒伏指数公式

$$\lambda = \frac{m_{FW} H_{SCG}}{S_{MS}}$$

可知, 抗倒伏指数越大, 小麦越容易发生倒伏。由问题一中对 2008 年各品种小麦抗倒伏指数的计算结果(见上表 6)可知, 国信 1 号的抗倒伏指数  $\lambda_{gx} = 0.3987$ , 智 9998 的抗倒伏指数  $\lambda_{z998} = 0.5014$ 。与 2008 年所记录的其它品种小麦相比,  $\lambda_{z998}$  的值最大, 相比较而言智 9998 最易发生倒伏;  $\lambda_{gx}$  的值偏大, 故国信 1 号也容易发生倒伏;  $\lambda_{TM} = 0.3401$  最小, 故 TM 最不易发生倒伏。

#### (2) 从抗倒伏指数与茎秆外部形态特征的关联度来看

由上述灰色关联分析模型的结果(见表 7 表 8)及分析可知, 小麦茎秆基部第一节长度对抗倒伏指数的影响最大, 其余节间长对抗倒伏指数也呈显著相关。

对 2008 年国信 1 号和智 9998 品种小麦各节间长在成熟期的数据进行整理, 计算出这两种样品小麦从基部算起各节间长的均值, 以其它品种小麦作为参照, 同时也计算出其它四种小麦从基部算起各节间长的均值, 如下表 10 所示:

表 10 样品小麦基部各节间长均值

品种	第五节长	第四节长	第三节长	第二节长	第一节长
国信 1 号	31.37	19.12	11.24	7.03	6.16
智 9998	25.62	15.63	10.58	7.67	6.9
周 18	25.20	15.89	8.99	6.31	4.14
联丰 85	25.27	13.32	8.42	7.09	6.03
矮抗 58	22.43	15.42	8.57	7.41	4.4
TM	29.04	15.7	11.61	8.41	5.77

为便于观察,按照表格中小麦品种顺序在 excel 中画出各节间直方图如下图所示:

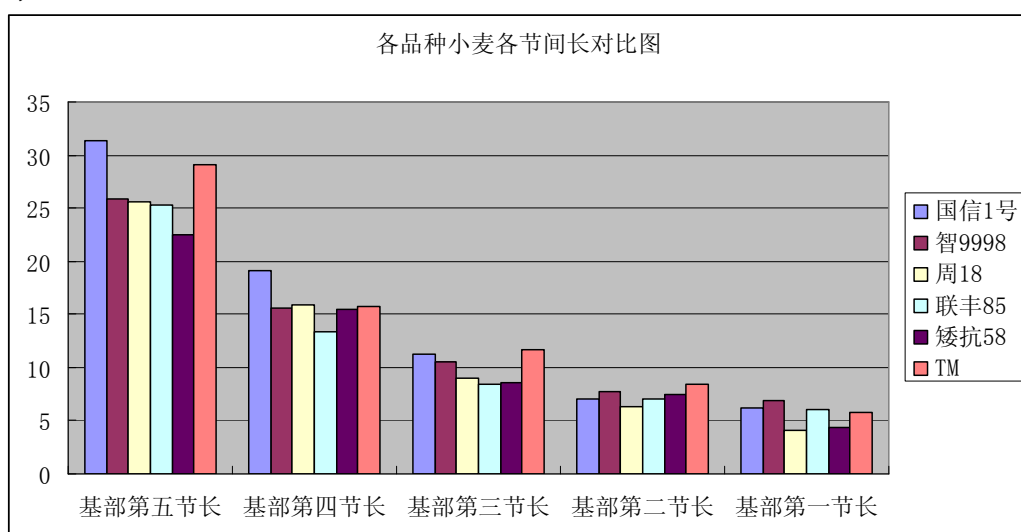


图 7 样品小麦节间长对比示意图

从上图中可清晰看出, 国信 1 号各节间长比其它品种小麦的各节间长都要大; 而智 9998 除比 TM 各节长略小以外, 比其它品种的各节间长均大一些。事实证明, 株长较小的品种, 由于植株较矮小, 不易发生倒伏, 与上述结论一致。

### (3) 从小麦植株各性状相关性来看

根据各性状之间相关系数 (见上表 9) 及分析可知, 小麦茎秆各节间长与小麦茎秆重心高度的相关系数超过 0.9, 达到极显著水平。

下图 8 分别表示出了各样品小麦重心高度的走势:

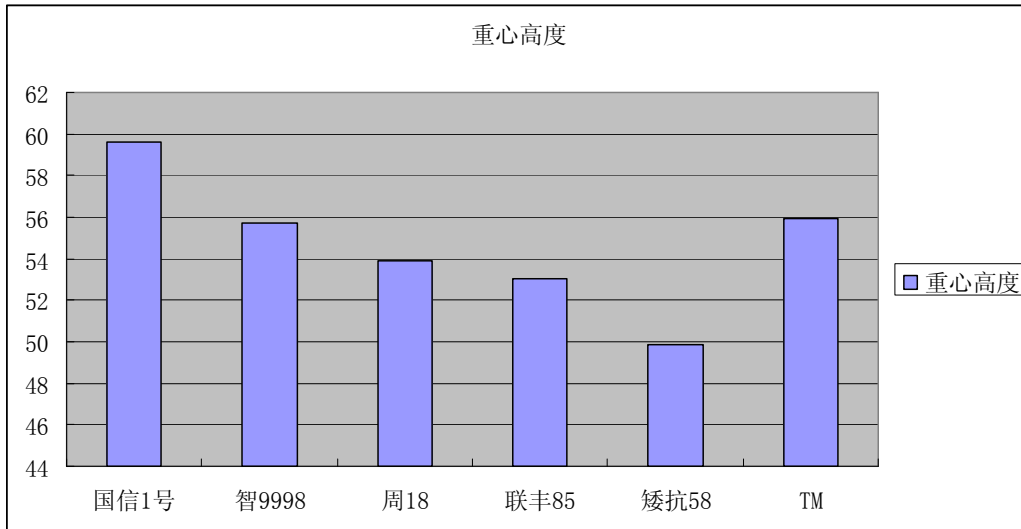


图 8 样品小麦重心高度对比示意图

从图 8 中可以看出,除智 9998 的重心高度小于 TM 外,国信 1 号和智 9998 的重心高度均大于其它品种小麦的重心高度。结合 5.4.4 节机械强度结果, TM 茎秆各节长度和重心高度虽然都比较大,但是由于 TM 的机械强度为这六种小麦中最强,几乎是国信 1 号和智 9998 两倍有余,故 TM 茎秆最耐重力压迫,即最不易发生倒伏。

综上所述,无论从小麦茎秆各节长度或者小麦重心高度来看,国信 1 号和智 9998 的值均大于其它品种,且机械强度值都较小。以上这三点即为国信 1 号和智 9998 品种的小麦都发生倒伏而其它品种小麦没有发生倒伏的原因。

## 七、 问题三：理想株型结构模型

### 7.1 模型建立前的准备

#### 7.1.1 参数准备

各节间长：从穗下算起,依次向下 5 节间长,记为： $x_1, x_3, x_5, x_7, x_9$ , 单位用  $cm$  表示。

各节间粗：从穗下算起,依次向下 5 节间粗,记为： $x_2, x_4, x_6, x_8, x_{10}$ , 单位用  $cm$  表示。

单穗鲜重记为  $x_{11}$ , 单位用  $g$  表示。

#### 7.1.2 机械强度与各参数的线性回归分析

从上述分析可知,机械强度与茎秆外形之间存在一定关系,根据 5.4.4 节中的多元回归模型,结合附件中所给数据,建立机械强度与穗下第一至五节间长和间粗以及单穗鲜重等 11 个量的线性回归关系如下所示:

$$\begin{cases} S = b_0 + b_1 x_1 + \cdots + b_{11} x_{11} + \varepsilon \\ \varepsilon \sim N(0, \delta^2) \end{cases}$$

设现得到  $n$  个独立观测数据  $(y_i, x_{i1}, \dots, x_{i11}), i = 1, 2, \dots, n, n > 11$ , 由上式得:

$$\begin{cases} S_i = b_0 + b_1 x_{i1} + \cdots + b_{11} x_{i11} + \varepsilon_i \\ \varepsilon_i \sim N(0, \delta^2), i = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

通过 *matlab* 编程求解得到各参数值，得到回归方程，进行残差修正，最后得到修正后的回归方程为：

$$y = -4.4841 + 0.472x_1 + 0.3868x_2 + 0.109x_3 + 0.1096x_4 + 0.023x_5 - 0.4557x_6 + 0.0864x_7 + 0.2131x_8 - 0.1363x_9 + 0.3435x_{10} + 0.3166x_{11}$$

$S = [0.9999 \quad 1389.6 \quad 0.0209 \quad 0.0000567]$ ，即  $R^2 = 0.9999$ ，显然  $R > 0.9$ ； $F = 1389.6, p = 0.0209 < 0.05$ ，说明回归方程是非常显著，这 9 个数据拟合效果很好，可以使用。

## 7.2 模型的建立

### 7.2.1 确定目标函数

小麦理想株型结构主要指小麦抗倒伏能力最佳的茎秆性状的定量标准。根据上述分析，小麦抗倒伏能力可由抗倒伏指数体现，且抗倒伏指数越小，植株越不易发生倒伏，故而得到目标函数为：

$$\lambda = \frac{m_{FW} H_{SCG}}{S_{MS}}$$

### 7.2.2 确定约束条件

(1)对于茎秆鲜重，设其为  $x_{12}$ ，茎秆鲜重的变化范围应在题中所给数据的范围之内，根据附件中的数据，找出小麦茎秆鲜重的最大最小值，即：

$$\min m_{FW} < x_{12} < \max m_{FW}$$

其中， $\min m_{FW} = 4.63, \max m_{FW} = 10.50$ 。

(2)对于茎秆重心高度，设其为  $x_{13}$ 。茎秆重心的位置不可能高于株高，根据附件中的数据，找出小麦茎秆重心的最大最小值，即：

$$\min H_{SCG} < x_{12} < \max H_{SCG}$$

其中， $\min H_{SCG} = 28.25, \max H_{SCG} = 55.50$ 。

(3)对于机械强度，根据 7.1.2 节中建立的多元回归模型，可得到机械强度与小麦茎秆各指标之间的线性关系，即：

$$S_{MS} = b_0 + \sum_{i=1}^{11} b_i x_i$$

(4)从附件中数据可得到小麦茎秆各节间长的范围，即

$$\min L_i < x_i < \max L_i, i = 1, 3, 5, 7, 9$$

其中， $x_1 \in [18.1, 27], x_3 \in [10.1, 16.4], x_5 \in [6.2, 14.55], x_7 \in [5.28, 7.70], x_9 \in [1.39, 7.15]$ 。

(5)从附件中数据可得到小麦茎秆各节间粗的范围，即

$$\min W_i < x_i < \max W_i, i = 2, 4, 6, 8, 10$$

其中  $x_2 \in [0.193, 0.338], x_4 \in [0.232, 0.446], x_6 \in [0.243, 0.43]$ ，

$x_8 \in [0.238, 0.445], x_{10} \in [0.284, 0.474]$ 。

(6)题目要求探讨穗重分别是 1.19g,2.06g,2.46g,2.56g,2.75g,2.92g 时的小麦理想株型，即：

$$x_{11} = [1.19, 2.06, 2.46, 2.56, 2.75, 2.92]$$

综上所述，得到问题三的最优化模型为：

$$\min \lambda = \frac{m_{FW} H_{SCG}}{b_0 + \sum_{i=1}^{11} b_i x_i}$$

$$s.t. \begin{cases} \min m_{FW} < x_{12} < \max m_{FW} \\ \min H_{SCG} < x_{12} < \max H_{SCG} \\ \min L_i < x_i < \max L_i, i = 1, 3, 5, 7, 9 \\ \min W_i < x_i < \max W_i, i = 2, 4, 6, 8, 10 \\ x_{11} = [1.19, 2.06, 2.46, 2.56, 2.75, 2.92] \end{cases}$$

### 7.3 模型的求解

由上述分析可知，该问题属于优化求解问题，可以采用遗传算法进行求解。设初始种群  $X = [x_1, x_2, \dots, x_{13}]$ ，选取最大迭代次数  $T = 100$ ，交叉概率  $P_c = 0.9$ ，变异概率  $P_m = 0.1$ ，代沟  $GAP = 0.7$ ，其算法过程如下：

**Step1:** 随机产生初始化种群  $X_0 = [x_1, \dots, x_{13}]$ ；

**Step2:** 计算种群父本个体的适应度函数；

**Step3:** 根据个体的适应度函数，采用二元锦标赛法选择出优良的个体，并保留下来；

**Step4:** 使用单点交叉方法和非一致性变异得到子代；

**Step5:** 将父代种群与得到的子代进行合并，并采用精英保留策略，得到 N 个优秀的种群个体；

**Step6:** 计算子代个体的适应度函数。

**Step7:** 是否满足最大迭代次数，若满足就输出结果，若不满足就进入 **Step3**。该算法的流程图如下所示：

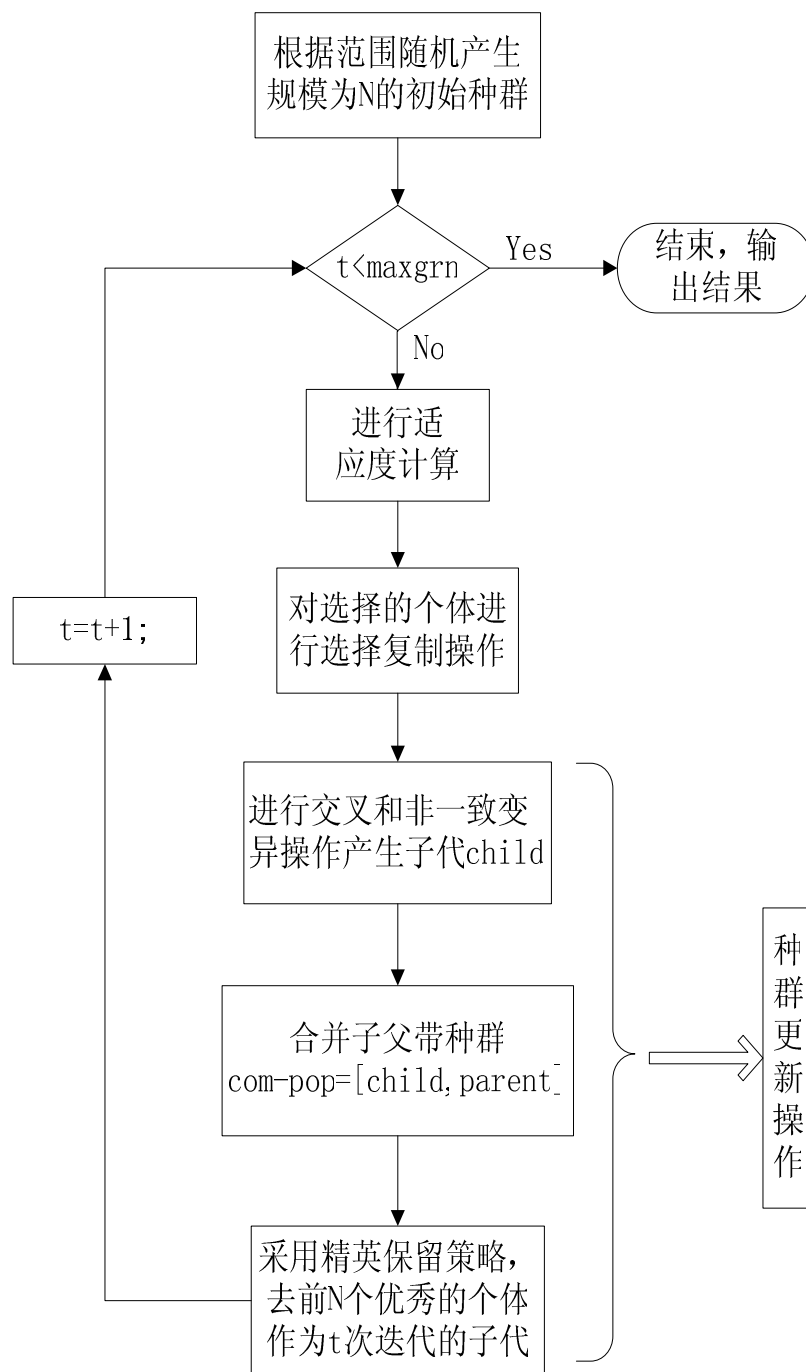


图 8 遗传算法流程图

根据上述步骤及流程图，在 *matlab* 中编程求解(程序见附录),得到这六种穗重下的理想株型结构数据如下表 11 所示：

表 11 不同穗重下小麦的理想株型结构数据

穗重 性状	1.190g	2.060g	2.460g	2.560g	2.750g	2.920g
$x_1$	22.178	18.624	18.420	18.448	18.637	19.262
$x_2$	0.324	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340
$x_3$	15.645	16.400	16.376	16.291	16.320	16.400
$x_4$	0.332	0.450	0.432	0.450	0.450	0.450
$x_5$	13.762	6.200	6.216	6.200	6.200	6.200
$x_6$	0.411	0.420	0.396	0.372	0.420	0.405
$x_7$	6.199	5.280	5.280	5.280	5.280	5.280
$x_8$	0.445	0.272	0.270	0.270	0.276	0.270
$x_9$	6.243	6.896	6.955	7.150	7.134	7.013
$x_{10}$	0.358	0.426	0.441	0.469	0.470	0.450
$x_{11}$	1.190	2.060	2.460	2.560	2.750	2.920
$x_{12}$	9.663	10.500	5.003	4.630	9.584	7.565
$x_{13}$	44.102	43.608	42.134	42.436	38.789	34.192

## 7.4 结果分析

从表 11 中可看出，不同穗重下小麦理想株型具有如下特点：

(1)不同穗重下，随着穗重的增加，茎秆重心高度呈减小趋势。

(2)同种穗重下，穗下第一节至穗下第四节的茎秆长度呈逐节减小趋势。这与实际中小麦的生长形态相同。

(3)不同穗重下，同株小麦穗下第五节的茎秆长度稍长于穗下第四节。由假设 6 可知，小麦的理想株型茎秆呈 5 节形态，即理想株型的小麦茎秆基部第二节长度小于基部第一节。目前已有学者从小麦茎秆的力学性质出发，对小麦的抗倒伏性能进行了研究，并得出有价值的结论：基部节间状况与抗倒伏性的相关性大小为基部第二节间>基部第一节间<sup>[7]</sup>。这一结论与模型求解出来的结果相符。

## 八、 问题四模型的建立

### 8.1 力学分析

将小麦茎秆简化成刚性等直杆，对其进行力学分析如下：

根据材料力学<sup>[8]</sup>知识，茎秆截面惯性矩  $I$  有如下公式：

$$I = \frac{\pi}{64} [D^4 - (D - 2t)^4]$$

其中， $y$  代表弯曲挠度 (mm)， $D$  代表茎秆外径 (mm)， $t$  代表茎秆壁



厚( $mm$ )， $I$ 代表茎秆截面惯性矩( $mm^4$ )。

**抗弯刚度：**常用弹性模量与惯性矩的乘积 $EI$ 来表示。根据上述公式，有：

$$EI = \frac{Pl^3}{48y}$$

其中， $E$ 代表茎秆弹性模量( $GPa$ )， $P$ 代表载荷( $N$ )， $l$ 代表跨度( $mm$ )。

$EI$ 越大，梁轴线变形后的曲率越小。

**抗弯强度：**材料弯曲至破坏时所能承受的最大弯曲正应力 $\sigma$ ：

$$\sigma = \frac{M}{W}, M = \frac{PL}{4}, W = \frac{\pi}{32D} [D^4 - (D-2t)^4]$$

其中， $M$ 代表最大弯矩( $N \cdot mm$ )， $W$ 代表试样抗弯截面系数( $mm^3$ )。

## 8.2 模型的建立

针对问题四，分别从重力作用、风载作用、重力和风载同时作用三个方面，建立如下三个模型：

### (1) 问题四模型 I：自重力学模型的建立

令  $q_{cr}$  为临界状态时茎秆单位长度的自重， $p_{cr}$  为临界状态时的穗重。茎秆在临界力  $q_{cr}$ ， $p_{cr}$  作用下，在微弯状态下处于不稳定平衡。根据材料力学<sup>[9]</sup> 知识可知其挠曲线近似方程为：

$$y = \frac{\delta}{2L^3} (3Lx^2 - x^3)$$

其中， $\delta$  代表位移参数( $mm$ )，表示茎秆顶端处的水平位移( $mm$ )， $L$  代表茎秆的高度( $mm$ )， $x$  代表截面位置( $mm$ )， $v$  代表挠度( $mm$ )，表示  $x$  截面处的水平位移。

茎秆势能

$$\Psi = \frac{3EI\delta^2}{2L^3} - \frac{3}{16}q_{cr}\delta^2 = \frac{9\delta^2}{8L^6} \left( \frac{4}{3}L^2h^3 - Lh^4 + \frac{1}{5}h^5 \right) p_{cr}$$

其中  $h$  代表穗位高。

由势能驻值原理  $\frac{\partial \Psi}{\partial \delta} = 0$  可得：

$$q_{cr} + \frac{6p_{cr}}{L^6} \left( \frac{4}{3}L^2h^3 - Lh^4 + \frac{1}{5}h^5 \right) = \frac{8EI}{L^3}$$

令  $a = \frac{h}{L}$ ，则上式化简可得临界力的表达式为：

$$p_{cr} = \frac{8EI - q_{cr}L^3}{6a^3 \left( \frac{4}{3} - a + \frac{1}{5}a^2 \right) L^2}$$

当小麦茎秆的承受力超过茎秆临界力时，就会发生倒伏。

综上所述，得到自重力学模型为：

$$p_{cr} = \frac{8EI - q_{cr}L^3}{6a^3 \left( \frac{4}{3} - a + \frac{1}{5}a^2 \right) L^2}$$

## (2) 问题四模型 II：风载力学模型的建立

茎秆在临界力  $q_{cr}$  作用下处于不稳定状态，其挠曲线近似方程可按下式来表达<sup>[10]</sup>：

挠曲线近似

$$\sigma = \frac{M}{W}, y = a_l \left( 1 - \cos \frac{\pi x}{2l} \right)$$

其中， $a_l$  代表距固定端距离  $l$  处的挠度， $x$  代表作用力矩度顶端的距离。

由最小势能原理  $\delta\Psi = 0$  可得：

弯曲变形能

$$U = \frac{EI}{2} \int_0^l \left( \frac{d^2 v}{dx^2} \right)^2 dx = \frac{EI}{2} a_l^2 \left( \frac{\pi}{2l} \right)^2 \int_0^l \frac{\pi x}{2l} dx = \frac{EI\pi^4 a_l^2}{64l^3}$$

外力势能

$$V = qa_l, (x = l)$$

总势能

$$\Psi = U - V = \frac{EI\pi^4 a_l}{64l^3} - qa_l$$

即

$$\frac{\partial \Psi}{\partial a_l} = \frac{EI\pi^4 a_l}{32l^3} - q = 0$$

故小麦发生弯折时的临界力

$$q = \frac{EI\pi^4 a_l}{32L^3} = \frac{\pi^5 Ea_l}{2048L^3} [D^4 - (D - 2t)^4]$$

当风载作用于小麦使得小麦茎秆弯折时，小麦就会发生倒伏。

综上所述，得到风载力学模型为：

$$q = \frac{\pi^5 Ea_l}{2048L^3} [D^4 - (D - 2t)^4]$$

## (3) 问题四模型 III：重力和风载综合力学模型的建立

模型 III 为同时考虑麦穗自重和风载作用的抗倒伏模型。

同时考虑麦穗自重和风载作用，将小麦茎秆看做顶部受轴向压力的等直细长杆，并作受力分析如下图 9 所示：

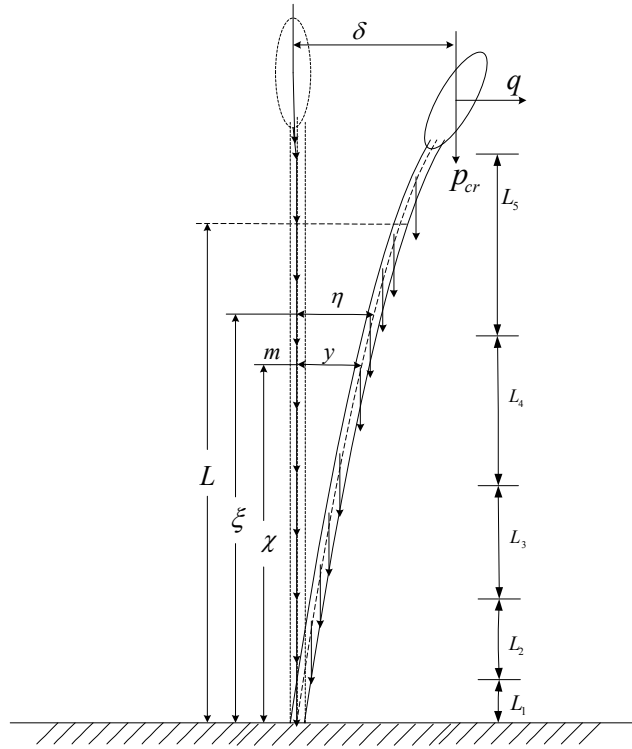


图9 小麦茎秆简化图形及受力分析

原本位于垂直位置的小麦茎秆，由于受到风力的作用，穗头位置发生改变，茎秆发生弯曲变形。当重力与风力的合力达到小麦茎秆能够承受的临界值时，小麦就会发生弯折现象从而倒伏。

由以上受力分析可知，小麦同时受到自身重力和风载的作用，因此二者同时作用发生弯折的临界力为二者单独作用临界力的合力值。仅考虑自身重力时的临界力为：

$$p_{cr} = \frac{8EI - q_{cr}L^3}{6a^3 \left( \frac{4}{3} - a + \frac{1}{5}a^2 \right) L^2}$$

仅考虑风载作用时的临界力为：

$$q = \frac{EI\pi^4 a_l}{32L^3}$$

则有二者合力  $F$  为：

$$F = \sqrt{p_{cr}^2 + q^2}$$

综上所述，得到重力与风载作用合力模型为：

$$F = \sqrt{p_{cr}^2 + q^2}$$

### 8.3 仿真模拟及分析

对麦株茎秆从以上三个模型进行应力仿真模拟，所需麦株模型物理参数如下表 12 所示：

表 12 麦株模型仿真结构参数

植株节数 (自下而上)	长度 mm	截面直径 mm			自重 g	弹性模量 <i>Gpa</i>
		D1	D2	D3		
第一节	40	1.8	2.2	2.3	10	1.35
第二节	70	1.7	2.15	2.5		1.319
第三节	110	1.7	2.15	2.4		1.134
第四节	170	1.6	1.85	2.0		1.168
第五节	240	1.6	1.8	1.9		1.1233
穗长	80				1.19、2.06、 2.46、2.56、 2.92	
穗头迎风面积	$A = a + bm_{FW}$ , $a = 0.4841, b = 0.2238 (cm)$					

使用 ANSYS 软件中梁单元建立小麦茎秆及麦穗的有限元模型<sup>[12]</sup>。小麦秆径为 5 节结构，考虑小麦自重。风载仅加载在穗头位置，麦秆最下节与地面全约束。其有限元模型及载荷如下图 10、11、12。

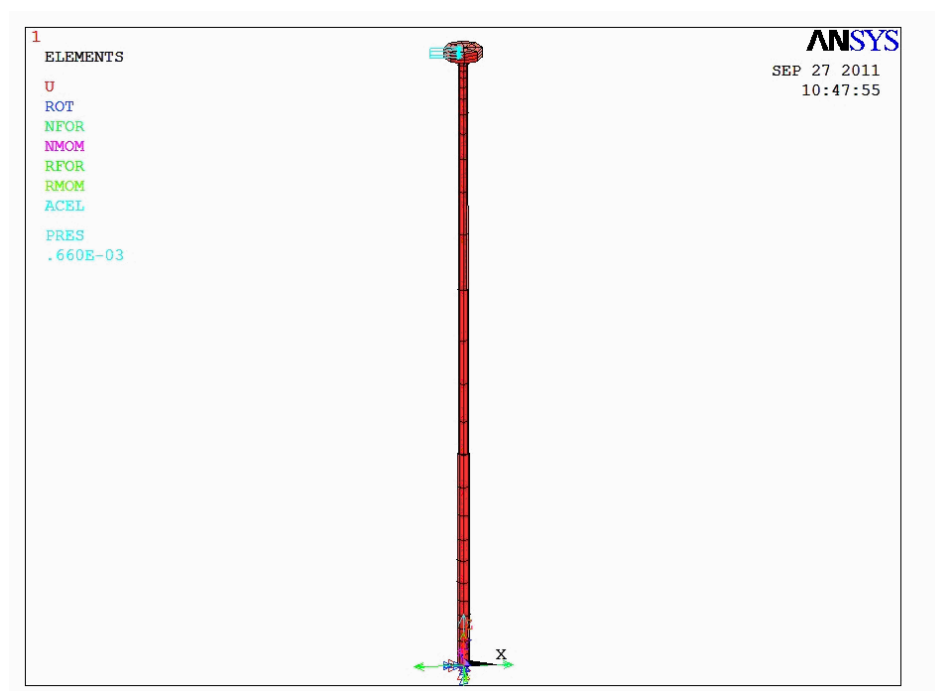


图 10 在重力作用下应力变化情况

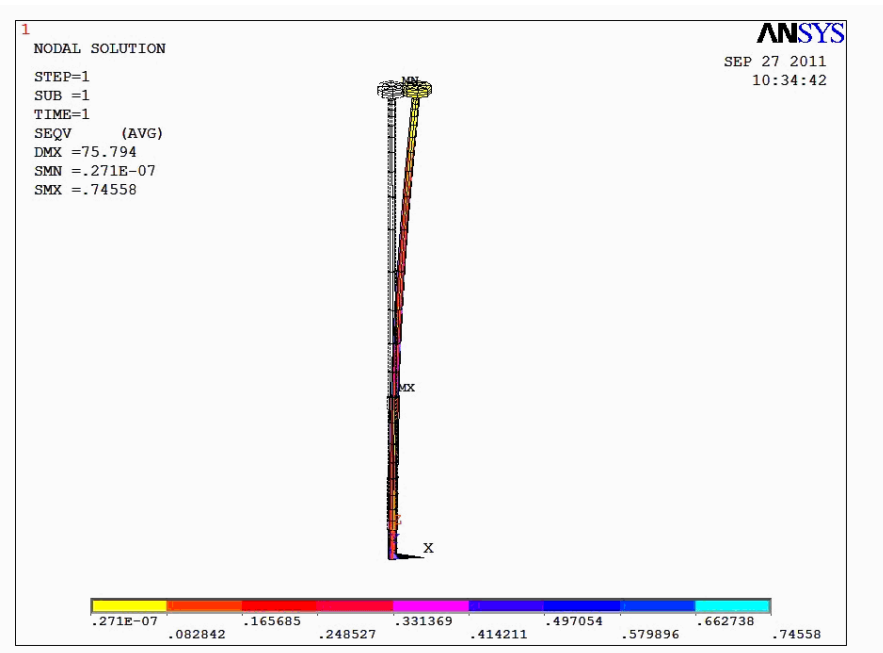


图 11 在风载作用下应力变化情况

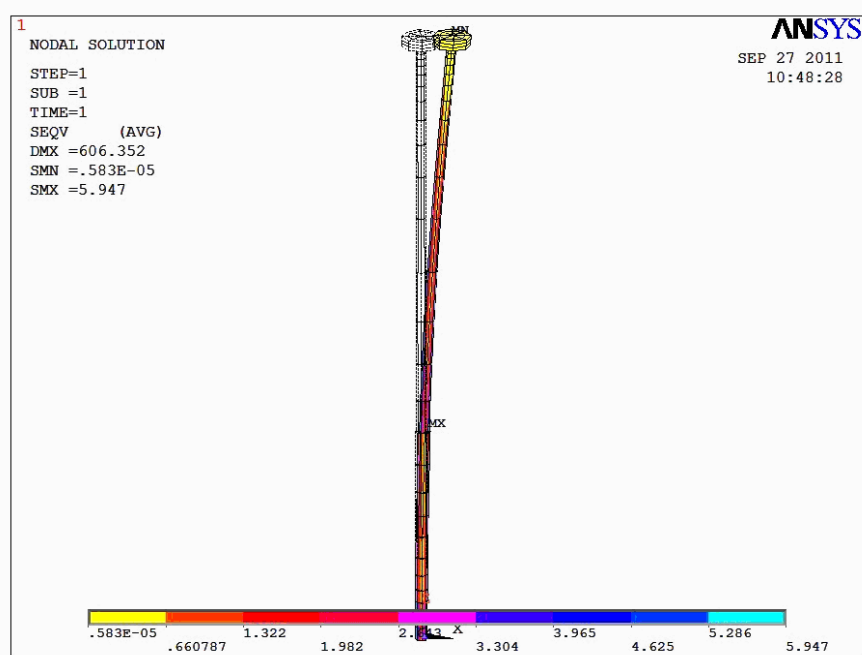


图 12 在重力和风载合力作用下应力变化情况

从应力图中得出，小麦杆的应力集中在基部第一节、基部第二节，即倒伏的主要折断位置。若折断部位在基部第一节，即为根倒；若折断部位在基部第二节，则为茎倒。

## 九、 问题五的解答

### 9.1 数据整理

通过上述问题四的模型可知，求解时涉及到以下变量：茎秆总长度( $L$ )，茎秆粗度（即为外径 $D$ ），茎秆壁厚( $t$ )，茎秆鲜重（不含穗）( $q$ )和距固定端距离 $l$ 处的挠度( $a_l$ )。

作为计算临界风力， $a_l$ 变成了临界挠度，也就是破坏其稳定即弯折时的挠度。因小麦的临界挠度难以确定，现给出假设 8，将原本垂直，弯折后变水平的小麦弯折长度当为临界挠度。由假设 7 可知， $a_l$ 的计算公式为：

$$a_l = L - L_1 - \frac{1}{2}L_2$$

其余变量可由题中所给 2007 年腊熟期各品种数据计算得出。整理后，得到如下表 12 所示各变量值：

表 12 各品种小麦变量均值

变 量 品 种	茎秆总长 ( $L/mm$ )	茎秆粗度 ( $D/mm$ )	茎秆壁厚 ( $t/mm$ )	茎秆鲜重 ( $q/g$ )	最大挠度 ( $a_l/mm$ )
矮抗 58	583.5	2.76	0.52	5.72	441
新麦 208	699.09	2.458	0.3	5.56	583.7
周麦 18	732.5	2.426	0.4	5.72	624.45

### 9.2 重力模型求解

由 8.2 节模型 I 可得麦穗自重下临界力的计算公式为：

$$p_{cr} = \frac{8EI - q_{cr}L^3}{6a^3\left(\frac{4}{3} - a + \frac{1}{5}a^2\right)L^2}$$

使用 *matlab* 编程求解，得到结果如下表 13 所示：

表 13 重力模型求解结果(单位：N)

品种	矮抗 58	新麦 208	周麦 18
临界力 $p_{cr}$ (N)	0.0074	0.0056	0.0052

重力求解结果分析：由表 13 可看出，矮抗 58 的临界力最大，最不容易发生弯折，说明矮抗 58 的抗倒伏能力最强，不易发生倒伏。另外两种小麦的抗倒伏能力较弱。

### 9.2 风载模型求解

(1)根据假设 9，设弹性测定值和弹性模量为线性关系。由弹性测定值的最小值 0.761 对应弹性模量值的最小值 355，弹性测定值的最大值 0.988 对应弹性

模量值的最大值 1443，可得到弹性测定值和弹性模量的线性关系如下：

$$E = 4793T - 3292$$

其中， $T$  代表弹性测量值。

(2) 由附件 2 中的风压的贝努利公式，可以得到风压与风速的关系如下：

$$w = \frac{1}{2} \rho v^2 = \frac{\gamma}{29} v^2 = \frac{v^2}{1630} (kN/m^2)$$

其中  $w$  为风压， $v$  为风速， $\rho = 1.25 kg/m^3$  为标准的空气密度， $\gamma = 0.012018 kN/m^3$  为空气单位体积的重力， $g = 9.8 m/s^2$  为重力加速度。

在腊熟期，小麦穗头迎风面积与穗重有一定关系。可假定单穗鲜重与穗头迎风面积的关系为：

$$A = a + b m_{FW}$$

其中  $a, b$  为转换系数，且  $a = 0.4841, b = 0.2238$ ； $A$  代表穗头迎风面积，单位为  $cm^2$ 。

由风载与风压及迎风面积的关系式：

$$P = wA$$

此时载荷只由风载作用下的应力构成，即  $P = q$ 。故可得到风载作用最大应力下风速的表达式为：

$$v = \sqrt{\frac{2q}{\rho A}}$$

由 8.2 节中的模型 II，可得到风载作用下植株弯折时的最大力  $q$  计算公式如下：

$$q = \frac{EI\pi^4 a_l}{32L^3}$$

综上所述，所求指标公式为：

$$\begin{cases} q = \frac{EI\pi^4 a_l}{32L^3} \\ v = \sqrt{\frac{2q}{\rho A}} \end{cases}$$

使用 *matlab* 编程求解，得到结果如下表 14 所示：

表 14 风载求解结果

品种	矮抗 58	新麦 208	周麦 18
最大应力(N)	0.0230	0.0068	0.0076
临界风速(m/s)	20.34	10.81	10.71

风载模型结果分析：从表 14 中可看出，三种小麦中矮抗 58 的弯折力最大，对应的临界风速为  $20.34 m/s$ ，最多能够承受 8 级风力，说明矮抗 58 的抗倒伏能力最强，不易发生倒伏。另外两种小麦的应力远小于矮抗 58，抗倒伏能力较弱。新麦 208 对应的临界风速为  $10.81 m/s$ ，最多能够承受 6 级风力；周麦 18 对应的临界风速为  $10.71 m/s$ ，最多能够承受 5 级风力。

## 十、 问题六的解答

### 10.1 值得考虑的问题

(1)从表可以看出,矮抗 58 的抗倒伏能力一直处于较强地位,而在 2008 年的样品小麦中, TM 的抗倒伏能力大于矮抗 58. 通过分析对比这两种小麦的茎秆特性可知, TM 的茎秆各节间长度均大于矮抗 58 的各节间长度,这与前文中关于小麦茎秆特性的相关性分析结果似有违背。但从机械强度来看, TM 的机械强度远远大于矮抗 58, 这是 TM 的抗倒伏能力最强的主要原因。近年来,关于小麦的高产、超高产研究中,不仅仅从小麦植株的抗倒伏方面进行,也需要从提高小麦自身茎秆性状方面进行。这便涉及到小麦的理想株型结构。一般认为,理想株型应有良好的透光性、遮光性和抗旱保水性,能适应小麦生长的各个生育阶段<sup>[11]</sup>。本文中对理想株型的探讨是从小麦抗倒伏能力所涉及的茎秆结构方面进行的,如果条件允许,亦可加上上述三个因素共同探讨。

(2)小麦的茎秆性状包括株高、穗长、各节间长、节间长度比、各节壁厚、穗重、鲜重等。已有学者对机械强度与小麦的抗倒伏特性的关系进行了研究<sup>[10]</sup>,结果表明,小麦茎秆机械强度对茎秆抗倒伏指数的直接影响最大,机械强度越大,抗倒伏能力越强。可见,将机械强度与小麦茎秆性状的相关性进行探讨也有一定的必要,可作为小麦抗倒伏能力判断的一个依据。

(3)计算麦秆重心时,建立了一个简化的理想重心模型,没有考虑到麦穗的实际生长情况。麦穗在生长过程中,几乎都会发生一定程度弯曲,故采用此模型计算出的茎秆重心结果必然比实际情况大。

(4)在研究小麦茎秆在麦穗自重和风载作用下应力的基本规律时,特别是当仅考虑风载作用时,仅考虑小麦穗头的受风面积,而忽略了小麦茎秆部分,建立的是一个理想模型。事实上,在实际中,小麦的受风面积不可能只有麦穗部分,还有麦叶、麦秆等,同样也会受到风力的作用。欲得到更加符合实际的理想株型,就应该考虑到这些因素的影响。

### 10.2 实验方案的制定

#### 一、试验田的选择

1、试验田肥瘦度要尽量一致。由于需要对多种小麦同时进行试验,需要保证小麦播种时的初始条件尽可能一致。

2、试验田位置的选取要适当。试验田应尽量避免数目和较高的建筑物,以免荫蔽造成误差。试验田也不宜设在易受牲畜损害的地点

#### 二、小麦品种的划分

按照文中的求解结果,将各品种小麦分为三种类型:强抗型,中抗型和弱抗型。

#### 三、试验记录

将小麦分别按照上述划分类型等距分别种植在三块试验田中,每十株麦苗作为一个数据记录,按照如下表格每隔半月进行一次记录。



表 15 试验方案示例记录表

性状 品种		茎秆高度	第一节			.....	第五节			鲜重		倒伏率
			长	粗	壁厚		长	粗	壁厚	秆重	穗重	
矮抗 58	1	40	6	0.3	0.05	.....	22	0.1	0.04	4	2	0.1%
	...											
	10	40	6	0.3	0.05	.....	22	0.1	0.04	4	2	0.2%
...						.....				...	...	...
新麦 208	1	40	6	0.3	0.05	.....	22	0.1	0.03	4	3	0.3%
	...											
	10	40	6	0.3	0.05	.....	22	0.1	0.04	4	2	0.1%

#### 四、数据分析方法

由于田间试验结果得到的资料一般都比较庞杂，因此必须进行去劣存精，去伪存真、由表及里的整理和分析工作，才能得到正确的结论。

接下来按照试验设计的简繁顺序介绍分析法：

1、大区对比试验结果的分析：总共有三个大区：强抗区，中抗区，弱抗区。将每个大区实际产值折合亩产，再将各个处理的亩产相互之间进行对比，排出产量位次。对每个大区总的倒伏率进行统计并排序。

2、小区对比试验结果的分析：对于每一个大区，按小麦品种分为几个小区。通过记录的数据，按照倒伏率进行排序。

3、间比法试验结果的分析：即对于同一个品种，两个对照之间间隔几个处理小区，在分析时每个处理的平均产量不能像对比法那样直接与邻近对照相比，故每个处理都分别与最邻近的两个对照平均倒伏率相比

#### 10.3 对育种实践的建议

(1)加强推广优良高效的麦系植株，对某些缺失的品种加强合理培育，已便可以提高其性能指标等。

(2)加强新资源的发掘与利用研究，拓宽遗传基础。对优良品种小麦进行性状结构进行深入研究，开发出更高抗伏性能的麦系，

(3)加强高新技术和传统育种技术的结合，提高育种效率。采用克隆、基因、杂交等培育新的品种，，从而将传统的“经验型育种”逐步向定向高效的“精确育种”发展，不断提升育成品种的科技含量，提高育种效率

(4)加强麦株各性能指标同时发展。不仅要麦株抗伏性能强，同时还要提高产量，抗病性、抗虫性也有所加强。

(5)注意外界因素对麦株的影响。要对产量高易倒伏的植株进行择地培育，尽量选择少风多山的地方种植。

## 十一、 模型的评价、改进及推广

### 11.1 模型的评价

优点：

(1)对问题一进行求解时，对于题中未明确给出明确值的参量，采用最小二乘拟合多元线性回归算法分别进行计算，计算结果令人满意。

(2)使用灰色关联度模型对抗倒伏指数与小麦茎秆外部形态特征的相关性进行分析，得到的结果与实际情况吻合较好。

(3)使用遗传优化工具箱对理想株型的构造进行计算，结果精确度高，运算速度快。

(4)使用 ANSYS 软件对小麦茎秆的受力情况进行仿真模拟，能够较直观且准确地反映小麦茎秆应力分布，结果与实际情况吻合程度较好。

缺点：

(1)对数据缺失部分的补充不够完全，选择的数据处理方式不一定符合实际情况，计算得到的结果有一定的偏差。

(2)在研究抗倒伏能力时，并未考虑茎秆性状特征以外的因素，如天气因素，土壤营养条件等

### 11.2 模型的改进

(1)小麦茎秆抗倒伏指数模型的确立是基于小麦茎秆鲜重，茎秆重心高度以及机械强度建立的，在实际应用中，可针对具体情况进行优化或改进。

(2)在探讨小麦的理想株型时，应考虑到自然因素对小麦生长的影响，如良好的透光性、遮光性和抗旱保水性等。

### 11.3 模型的推广

根据对水稻、高粱、油菜等其它农作物的力学分析，可知它们的受力情况与小麦类似，因此文中建立各模型同样适合于其它种类如水稻等农作物抗倒伏性的研究。

## 十二、 小麦茎秆抗倒伏性研究报告

提高小麦产量的研究始终是农业生产领域关注的热点问题。随着小麦产量的增加，小麦的单茎穗重不断增加。但穗重的增加同时使茎秆的负荷增大，导致小麦容易倒伏。倒伏不但造成小麦减产，而且影响小麦的籽粒品质。因此，要实现小麦高产优质的跨越，就必须解决或尽量减少小麦的倒伏问题。本文针对小麦发生茎倒问题的以下几个方面展开研究：

### (1)小麦抗倒伏指数公式

根据不同品种小麦已知数据特点，运用均值法、回归分析法等方法分别求出各品种小麦的茎秆鲜重、茎秆重心高度、茎秆机械强度，再针对不同数据情况建立不同的小麦茎秆抗倒伏指数公式，并计算出与各品种小麦对应的抗倒伏指数。以 2007 年为例，求得矮抗 58、新麦 208、周麦 18 的抗倒伏能力为：矮抗 58>周麦 18>新麦 208。

### (2)抗倒伏指数与茎秆性状的关联度分析

对原始数据采用区间值化变换,建立灰色关联度分析模型,求解得到小麦抗倒伏指数与茎秆各节间长、各节茎粗、各节壁厚、重心高度、穗长、穗重等茎秆性状的关联度。

### **(3)茎秆性状各因素之间的相关性**

分析原始数据,建立相关性分析模型,运用 matlab 编程得到茎秆性状个因素之间的相关性,并对相关性较大的各因素关系进行分析。

### **(4)理想株型结构**

根据茎秆抗倒伏性指数与茎秆性状关联度分析结果和茎秆性状因素之间相关性,以最小抗倒伏指数为目标,建立理想植株最优化模型,并采用遗传算法求解出对应不同穗重的理想株型结构。

### **(5)麦穗自重和风载作用下的茎倒临界力**

考虑到当考虑小麦茎秆仅受麦穗自重、仅受风载、同时受麦穗自重和风载作用时分别建立了自重作用力学模型 I、风载作用力学模型 II;自重和风载综合作用力学模型 III。并通过对模型 I、II 的求解计算出对应于 2007 年腊熟期各品种发生茎倒的临界力。

### **(6)小麦茎倒临界风速**

根据风载作用特点,建立风速与风载关系模型,结合对(5)中模型 II 求解的临界力,求出各品种小麦发生茎倒的临界风速,进而可得出各品种小麦可抗的最大风级。

**研究前景:**根据对水稻、高粱、油菜等其它农作物的力学分析,可知它们的受力情况与小麦类似,因此文中建立各模型同样适合于其它种类如水稻等农作物抗倒伏性的研究。研究农作物理想植株模型,结合对遗传规律的研究,对于农作物抗倒伏品种和高产品种的育种研究工作具有重要意义。

## **参考文献**

- [1] 袁志华,冯宝萍,赵安庆等,作物茎秆抗倒伏的力学分析及综合评价探讨,农业工程学报.
- [2] 袁红梅,小麦茎秆生物力学性能试验与抗倒伏力学评价分析,山西农业大学,2005,p30-33.
- [3] 哈尔滨工业大学理论力学教研室,理论力学(I),高等教育出版社,2005.
- [4] 余泽高,李志新,严波,小麦茎秆机械强度与若干性状的相关性研究,湖北农业科学,2003,p11-12.
- [5] 钱祖香,小麦品种收获指数与其他多种形状相关性的研究[J],湖北农学院学报,1989(2):p9-17.
- [6] 郭天财,贺德先,小麦植株性状与穗粒重关系的研究进展[J],麦类文摘,1995,15(3):p1-4.
- [7] 李豪圣,刘爱峰等,不同栽培条件下对冬小麦基部茎秆形态特征的影响[J],学者农业科技,2008(8):p126-127.
- [8] 刘鸿文,材料力学(第三版上册),高等教育出版社,1999,p60-173.
- [9] 孙训芳等,材料力学(下册),高等教育出版社,1987,p238-256.
- [10] 王勇,李晴祺,小麦品种抗倒性评价方法的研究,华北农学报,1995,10(3):p84-88.

- [11] 刘兆晔, 于经川等, 小麦理想株型的探讨, 中国农学通报, 2010,26(8):p137-141.
- [12] 胡婷, 焦群英等, 小麦茎秆的抗弯复合材料力学模型, 应用力学学报, 2007, Vol.24 No.1,p279-283