

不同生长期小麦茎秆力学性质与形态特性的相关性

梁 莉, 郭玉明*

(山西农业大学工程技术学院, 太谷 030801)

摘 要: 为了研究小麦茎秆生物力学性质指标与小麦优种特性的相关性, 以正在优种选育过程中的 4 个北方小麦品种为研究对象, 试验测定了开花期、乳熟期和蜡熟期茎秆基部第二节间的惯性矩、拉伸强度、弯曲强度、剪切强度、弹性模量、抗弯刚度等生物力学指标及小麦形态、生理特性指标值; 应用 SAS 软件进行相关性分析, 筛选出了开花期主要生物力学评价指标为弯曲强度, 乳熟期为抗弯刚度。并且确定了与相应生物力学相关度较大的形态、生理特性指标, 开花期为: 外径、茎秆干质量、株高、节间距、含水率、壁厚、穗质量; 乳熟期为穗质量、外径、株高、叶鞘高、茎秆干质量。并且随着生长期的不同, 相关度也不同, 尤其是与含水率的相关度逐渐减小。该研究为建立生物力学指标评价体系提供了选择依据。

关键词: 小麦茎秆; 生物力学性质; 形态特性; 相关性分析

中图分类号: Q66

文献标识码: B

文章编号: 1002-6819(2008)-8-0131-04

梁 莉, 郭玉明. 不同生长期小麦茎秆力学性质与形态特性的相关性[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 131—134.

Liang Li, Guo Yuming. Relationship between stalk biomechanical properties and morphological traits of wheat at different growth stages[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 131—134. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

随着工程技术在农业生产中的广泛应用和不断深入, 促进了农业工程基础领域的迅速发展。在农作物优种选育和农业物料加工等领域中许多基础性的问题需要运用生物力学理论和试验方法进行分析研究, 因此近年来农业生物力学有了长足的进展。其中作物茎秆生物力学性质的研究方兴未艾, 主要集中在小麦茎秆生物力学性质试验研究^[1,2]、小麦茎秆抗倒伏性研究^[3-5]、荷载对茎秆变形的影响及动力响应, 以及其他作物(如玉米、高粱、大豆、谷子)茎秆生物力学性质与抗倒伏性研究^[6-12]; 还有较多研究集中在试验测定茎秆生物力学性质为相关加工机械设计提供设计参数方面^[13,14]。近期人们又注意到茎秆材料的生物力学性质可表达茎秆作物生长发育中的物性形态, 研究生物力学性质可揭示其内在本质和解释生长培育过程的相关机理^[15-17], 并可利用生物力学性质指标来评价作物茎秆的优劣, 为优种筛选提供支持, 这种工程物理方法已被农学家认识并在实践中应用。但在研究探索中发现, 应用生物力学方法评价作物茎秆并指导农艺, 需要进一步研究茎秆材料生物力学性质与作物形态、生理指标间的相关关系, 以便在作物优种筛选过程中采取相应农艺措施, 实现调控作物形态、生理指标, 实现改善生物力学性质之目的。小麦在茎秆类作物中中性状典型, 倒伏影响又较其他作物大, 不同生长期倒伏都有可能发生, 因此本文针对性地全面研究了不同生长期小麦茎秆生物力学性质与形态、生理指标的相关关系, 为建立实用的生物力学评价体系奠定基础。

1 试验材料与方法

1.1 试验样本采集及制备

从山西农业大学试验田中选取正在进行优种选育的 4 个小麦品种, 分别是大穗型“山农 9-1”、半矮秆型“山农 9801”、

高秆品种“山农 129”以及中高秆型“山农 91003”, 其播期均为 2006-09-27, 播量为 45×10^5 苗/hm²。

采样时期为: 开花期、乳熟期、蜡熟期。每个测试品种不同生长期均按区随机选取主茎(不采集分蘖支茎秆)。将采集的小麦茎秆按品种分类装袋后放入冰箱中冷藏(不超过 24 h)。测取株高、叶鞘高度、茎秆鲜质量、叶鞘鲜质量、穗长、穗质量、含水率、节间距、外径、壁厚等形态与生理指标, 选取基部以上各节间作为试样进行试验分析, 测试方法按固体材料力学性能试验标准进行。

1.2 试验方法

试验在 SANS-CMT6104 微机控制电子万能材料试验机上进行, 选用精度达 5% 的 200N 传感器, 选取各品种小麦主茎 18 根分 3 组分别进行拉伸、弯曲、剪切试验。进行拉伸试验时由于小麦茎秆是空心薄壁圆柱杆, 两端不易被试验机夹头夹持, 为此本试验探索了一种小麦茎秆拉伸试样夹持方法(将尺寸相当的细铁丝插入两端, 并在夹具中间放入纱纸以防打滑)。拉伸试验、弯曲试验加载速率设定为 10 mm/min, 剪切试验为 100 mm/min。

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

每个测试指标的观测值为 6 个, 表 1、2 中所列为试验数据均值。

2.2 小麦茎秆生物力学性质与形态、生理指标的相关性分析

运用 SAS 软件按小麦不同品种不同生长期对所测剪切强度、弯曲强度、弹性模量、抗弯刚度、拉伸强度等生物力学性能指标与株高(x_1)、叶鞘高(x_2)、节间距(x_3)、外径(x_4)、壁厚(x_5)、穗长(x_6)、茎秆干质量(x_7)、含水率(x_8)、穗质量(x_9)等形态、生理指标分别进行相关性分析, 得到偏相关系数 r 及显著性检验结果, 如表 3 所示。

根据偏相关系数 ($|r| > 0.5$) 选出小麦各生长期与多数形态特性指标都相关的生物力学性质指标作为该生长期评价茎秆的力学指标。开花期为弯曲强度; 乳熟期为抗弯刚度; 而蜡熟期形态特性指标与生物力学性质相关系数较前两期明显减小, 因此难以用该生长期的力学性质指标或形态指标进行评价。在此基础上确定与开花期小麦茎秆弯曲强度相关度较大 ($|r| > 0.5$) 的形态指标依次为: 外径、茎秆干质量、株高、节间距、含水率、壁厚、穗质量; 与乳熟期抗弯刚度相关度较大 ($|r| > 0.5$)

收稿日期: 2008-01-15 修订日期: 2008-06-16

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20060113002)

作者简介: 梁 莉 (1982—), 女, 博士生, 山西临汾人, 研究方向: 农业生物力学与物料机械特性。太谷 山西农业大学工程技术学院, 030801。

Email: liangli_alice@163.com

*通讯作者: 郭玉明 (1954—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业生物力学与物料机械特性方面的研究。太谷 山西农业大学工程技术学院, 030801。Email: guoyuming99@sina.com

的形态指标依次为：穗质量、外径、株高、叶鞘高、茎秆干质量。将所确定的力学指标作为因变量，形态指标作为自变量进行全模型线性回归分析，获得线性回归模型，结果列于表 4—6 中。

表 1 不同生长期小麦茎秆生理、形态指标测试数据均值
Table 1 Means of tested morphology values of wheat in different growth stages

品种	生长期	株高 x_1/mm	叶鞘高 x_2/mm	节间距 x_3/mm	外径 x_4/mm	壁厚 x_5/mm	穗长 x_6/mm	茎秆干质量 x_7/g	含水率 $x_8/\%$	穗质量 x_9/g	小穗数	穗粒数	穗粒重 $/\text{g}$
山农 9-1	开花期	677.33	521.77	136.33	4.21	0.84	100.69	3.08	72.2	1.90	—	—	—
	乳熟期	719.06	578.22	90.06	4.11	0.80	101.06	1.37	62.8	4.08	19	43	2.57
	蜡熟期	725.11	544.02	100.21	4.51	0.62	94.61	0.68	27.5	2.52	13	37	1.56
山农 9801	开花期	674.78	574.39	94.76	4.01	0.73	72.17	2.40	73.6	1.98	—	—	—
	乳熟期	640.28	532.33	86.46	3.92	0.61	75.00	1.12	62.6	3.26	17	44	2.27
	蜡熟期	636.89	581.67	106.71	4.06	0.48	65.11	0.08	12.4	1.62	17	34	1.21
山农 129	开花期	841.72	692.67	120.05	3.44	0.65	82.33	2.60	72.75	1.16	—	—	—
	乳熟期	850.50	706.61	123.75	3.48	0.58	82.44	1.46	72.2	2.27	15	26	1.41
	蜡熟期	863.17	694.94	111.81	3.61	0.62	133.4	2.03	64.3	3.69	17	37	2.87
山农 91003	开花期	822.17	659.61	129.02	4.39	0.63	72.89	2.86	74.3	1.25	—	—	—
	乳熟期	792.00	673.94	122.26	4.44	0.59	73.83	1.69	73	2.98	18	42	2.00
	蜡熟期	851.83	723.06	134.04	4.36	0.51	67.44	0.89	46.2	2.38	16	37	1.87

表 2 不同生长期小麦茎秆（基部第二节间）生物力学性质指标试验均值
Table 2 Means of biomechanical properties at basal second internodes of wheat in different growth stages

品种	生长期	截面惯性矩 \bar{I}/mm^4	弯曲强度 $\bar{\sigma}_w/\text{MPa}$	弹性模量 \bar{E}/MPa	抗弯刚度 $\bar{EI}/\text{N}\cdot\text{mm}^2$	拉伸强度 $\bar{\sigma}_t/\text{MPa}$	剪切强度 $\bar{\tau}_b/\text{MPa}$
山农 9-1	开花期	14.90	9.72	679.11	9274.65	27.02	6.55
	乳熟期	14.19	16.50	1166.78	16538.79	24.63	7.54
	蜡熟期	16.62	6.93	485.92	8247.26	28.38	7.56
山农 9801	开花期	8.38	11.08	997.31	8060.33	20.38	6.46
	乳熟期	10.10	12.61	1311.16	11770.57	27.26	6.28
	蜡熟期	8.32	6.60	582.74	4853.81	18.81	5.49
山农 129	开花期	9.32	15.95	1499.02	13175.27	31.48	8.97
	乳熟期	6.43	14.02	1577.23	9904.31	27.52	6.57
	蜡熟期	6.44	19.80	2212.61	14846.16	34.44	6.5/
山农 91003	开花期	12.38	5.41	408.47	5033.01	22.31	7.25
	乳熟期	14.56	7.64	592.84	7829.05	23.79	4.72
	蜡熟期	11.79	5.53	408.36	4135.83	21.10	8.32

表 3 不同生长期小麦生物力学性质指标与形态、生理指标的偏相关系数及显著性检验
Table 3 Partial correlation coefficients and significance test between biomechanical and morphological properties of wheat stalk at three growth stages

生长期	力学指标	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
开花期	剪切强度	0.12432	-0.36628	0.19454	-0.29023	-0.43128	0.06531	0.24654	0.01746	-0.40953
	P 值	0.6464	0.1629	0.4703	0.2755	0.0953	0.8101	0.3401	0.9488	0.1152
	拉伸强度	-0.01843	0.04300	-0.02725	-0.34038	-0.57804	0.08187	0.06002	-0.08985	-0.00132
	P 值	0.946	0.8744	0.9202	0.1970	0.019	0.7631	0.8252	0.7407	0.9961
	弯曲强度	-0.67256	-0.12432	0.65888	-0.90622	0.61667	0.08926	0.81593	-0.6206	-0.61142
	P 值	0.006	0.6589	0.0076	<0.0001	0.0143	0.7517	0.0002	0.0136	0.0154
	弹性模量	-0.57148	-0.22183	0.60737	-0.91782	0.47117	0.05019	0.76708	-0.5539	-0.5459
	P 值	0.026	0.4268	0.0163	<0.0001	0.0763	0.859	0.0008	0.0322	0.0353
	抗弯刚度	-0.50825	-0.09878	0.47169	-0.47307	0.66629	-0.04166	0.73126	-0.4895	-0.44215
	P 值	0.0531	0.7262	0.0759	0.0749	0.0067	0.8828	0.0019	0.064	0.0989
乳熟期	剪切强度	0.19859	0.00659	-0.09857	-0.66282	-0.22327	-0.25552	0.46433	-0.51626	0.31281
	P 值	0.4609	0.9807	0.7165	0.0051	0.4059	0.3395	0.07	0.0406	0.2381
	拉伸强度	-0.09708	-0.03531	0.26996	-0.58769	-0.47933	-0.0506	0.17585	0.00604	0.19989
	P 值	0.7206	0.8967	0.3119	0.0167	0.0603	0.8524	0.5148	0.9823	0.4579
	弯曲强度	-0.19524	0.41063	-0.58493	-0.85569	-0.12292	-0.26239	0.66741	-0.46581	0.71137
	P 值	0.4687	0.1141	0.0173	<0.0001	0.6502	0.3262	0.0047	0.069	0.002
	弹性模量	-0.50783	0.42801	-0.34899	-0.87701	-0.22251	0.2904	0.56057	0.37426	0.59588
	P 值	0.0446	0.0981	0.1852	<0.0001	0.4075	0.2752	0.0239	0.1533	0.0149
	抗弯刚度	-0.60117	0.58768	-0.4082	-0.63445	0.13765	0.19647	0.57319	0.02834	0.68203
	P 值	0.0138	0.0167	0.1165	0.0083	0.6112	0.4658	0.0203	0.917	0.0036

转下页

接上页

生长期	变量	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
蜡熟期	剪切强度	0.07529	0.03742	0.2732	-0.5621	-0.57526	0.40933	0.08209	-0.22279	0.2539
	P 值	0.7817	0.8906	0.3059	0.8362	0.0197	0.1154	0.7625	0.4069	0.3427
	拉伸强度	-0.32486	0.39027	0.23762	-0.32865	-0.62146	0.45052	-0.28413	0.29454	0.4527
	P 值	0.2196	0.1351	0.3755	0.2139	0.0102	0.0799	0.2862	0.2681	0.0783
	弯曲强度	0.18766	0.19105	-0.1054	-0.24392	-0.32439	0.26815	0.62305	-0.08797	-0.17864
	P 值	0.04864	0.4785	0.6976	0.3626	0.2203	0.3153	0.0099	0.746	0.508
	弹性模量	-0.31036	0.26421	-0.12256	-0.38093	-0.38268	0.34015	0.58918	0.1069	-0.13084
	P 值	0.242	0.3227	0.6511	0.1455	0.1435	0.1974	0.0163	0.6936	0.6291
	抗弯刚度	-0.376	0.18624	0.08745	0.19611	-0.00123	0.19834	0.6384	0.00358	-0.12304
	P 值	0.1512	0.4898	0.7474	0.4667	0.9964	0.4615	0.0078	0.9895	0.6499

注： P 值指显著性检验概率。

表 4 全模型线性回归的方差分析
Table 4 Overall linear regression variance results

模 型	自由度	平方和	均方	F	$P_r > F$	R^2
弯曲强度（开花期）	7	494.68862	70.66980	23.06	<0.0001	0.9150
抗弯刚度（乳熟期）	5	566158343	113231669	18.32	<0.0001	0.8359

表 5 小麦开花期全模型线性回归的参数估计和 t 检验结果
Table 5 Overall linear regression parameter estimates and t -test results at flowering stage of wheat

	截距	x_1	x_3	x_4	x_5	x_7	x_8	x_9
参数估计	330.06968	-0.05796	0.24193	-9.17201	13.99374	13.48778	-402.61809	-10.16415
$P_r > t $	0.0007	0.0019	0.0023	<0.0001	0.0069	<0.0001	0.0016	0.0067

注：表中 $P_r > |t|$ 指 t 检验概率值。

表 6 小麦乳熟期全模型线性回归的参数估计和 t 检验结果
Table 6 Overall linear regression parameter estimates and t -test results at milk stage of wheat

	截距	x_1	x_2	x_4	x_7	x_9
参数估计	29126	-62.61766	49.35901	-9367.36871	17354	6071.60364
$P_r > t $	0.0010	0.0196	0.1096	0.0003	0.0008	<0.0001

3 结论与讨论

对上述不同品种、不同生长期的小麦茎秆进行了生物力学性质试验研究，获得了小麦基部第二节间茎秆材料的剪切强度、弯曲强度、拉伸强度等生物力学性质指标，并研究了所测取的小麦形态、生理等农艺指标与茎秆生物力学性质的相关关系。主要结论如下：

1) 从分析结果看：茎秆材料各生物力学性质指标与小麦形态、生理指标有不同的相关度，不同品种、不同生长期各性能指标也不同。反映出不同植物品种生物材料力学性质有较大差异。

2) 小麦茎秆含水率随着生长期在不断变化，含水率与各生物力学性能指标相关度呈逐渐减小趋势。

3) 在相关性分析的基础上，筛选出不同生长期主要生物力学评价指标，并在此基础上确定了各生长期与相应力学指标相关度较大的形态特性指标，采用全模型线性回归方法，获得了小麦茎秆生物力学性质指标与小麦形态、生理指标间的线性回归模型。经检验模型均显著，可对相应指标进行预测。

总之，应用生物力学性能指标评价作物茎秆并以此进行优种筛选是农业工程技术基础的应用领域之一，采用物理方法和途径指导作物优种选育，在了解机理方面与化学及农艺方法比较，有着明显的优势，可提供严密的理性分析结论。本文以小麦为研究对象对不同生长期生物力学性质指标与作物形态特性指标之间的关系进行了全面的探索。采用的研究方法和获得的相关结论是建立作物茎秆力学评价体系及优选评价方法等内容

的重要部分。

[参 考 文 献]

- [1] Dogherty'O MJ. A study of the physical and mechanical properties of wheat straw[J]. Agri Engng Res, 1995, 62: 133—142.
- [2] 袁红梅, 郭玉明, 李红波. 小麦茎秆弯折力学性能的试验研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2005, 25(2): 173—176.
- [3] Sterling M, Baker C J, Berry P M, et al. An experimental investigation of the lodging of wheat[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, 119: 149—165.
- [4] 董 琦, 王爱萍, 梁素明. 小麦基部茎节形态结构特征与抗倒性的研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2003, (3): 188—191.
- [5] 王 勇, 李朝恒. 小麦品种抗倒性的研究进展[J]. 山东农业大学学报, 1996, 27(4): 503—508.
- [6] 赵安庆, 袁志华. 玉米茎秆抗倒伏的力学机制研究[J]. 生物数学学报, 2003, 18(3): 311—313.
- [7] 孙守钧, 曹秀云, 侯秀英, 等. 高粱抗倒机理的研究[J]. 辽宁农业科学, 1999, (1): 1—4.
- [8] Whitehead F H. Experimental studies of the effect of wind on plant growth and anatomy II. Helianthus annuus[J]. New Phytologist, 1962, 61: 59—62.
- [9] Baker C J. The Development of a Theoretical Model for the Windthrow of plants[J]. J Theor Biol, 1995, 175: 355—372.
- [10] Saunderson S E T, England A H, Baker C J. A dynamic model of the behavior of sitka spruce in high winds[J]. J Theor Biol, 1999, 200: 245—259.
- [11] Hanns-Christof S, Olga S. Oscillation frequencies of tapered plant stems[J]. American Journal of Botany, 2002, 89(1): 1—11.
- [12] 梁 莉, 郭玉明. 作物茎秆生物力学性质与形态特性相关性研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 1—6.

- [13] 苏工兵, 刘俭英, 王树才, 等. 苎麻茎秆木质部力学性能试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(5): 62—65.
- [14] 廖宜涛, 廖庆喜, 田波平, 等. 收割期芦竹底部茎秆机械物理特性参数的试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 124—129.
- [15] 段传人, 王伯初, 王凭青. 水稻茎秆的结构及其性能的相关性[J]. 重庆大学学报, 2003, 26(11): 38—40.
- [16] 郭玉明, 袁红梅, 阴 妍, 等. 茎秆作物抗倒伏生物力学评价研究及关联分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 14—18.
- [17] 郭玉明, 袁红梅, 李红波. 小麦抗倒伏特性的生物力学评价分析[M]. 杜庆华. 力学与工程应用 (第 11 卷): 中国林业出版社, 2006: 84—87.

Relationship between stalk biomechanical properties and morphological traits of wheat at different growth stages

Liang Li, Guo Yuming^{*}

(College of Engineering Technology, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstracts: Four kinds of fine variety winter wheat in northern China were chosen to perform the experiments in order to study the biomechanical properties and optimal traits of winter wheat. The biomechanical properties (such as cross sectional moment of inertia, tensile strength, bending strength, shear strength, Young's modulus and bending rigidity) and morphological traits of basal second internodes were measured at three growth stages of wheat, which were flowering stage, milk stage and dough stage. The relationship between the stalk biomechanical properties and the morphological traits of wheat were analyzed by Statistics Analysis System. It can be concluded that the main biomechanical evaluation index is bending strength at the flowering stage and is bending rigidity at the milk stage. It is also determined what morphological traits are more relative to the corresponding mechanical properties. At the flowering stage they are outside diameter, dry mass of stalk, plant height, internode distance, water content, stem wall thickness and ear mass. At the milk stage they are ear mass, outside diameter, leaf sheath height and dry mass of stalk. The partial correlation coefficients between them are different with the growth of wheat. Especially the correlation degrees between mechanical properties and water content are decreased gradually. The conclusions are the foundation to select evaluation indices for building biomechanical evaluation system.

Key words: wheat stalk; biomechanical property; morphological trait; correlation analysis