

匍匐缠结牧草收割期茎秆生物力学特性试验*

赵春花^{1,2} 张锋伟² 韩正晟² 曹致中¹ 师尚礼¹

(1. 甘肃农业大学草业学院, 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学工学院, 兰州 730070)

【摘要】 以北方典型多年生豆科牧草小冠花的匍匐型和直立型两个新品系以及原始亲本绿宝石小冠花(半匍匐型,为对照品种)的收割期茎秆为研究对象,采用微机控制电子万能试验机和波钦诺克方法,测试了茎秆的主要生物力学特性。结果表明:直立型小冠花茎秆的抗拉强度最大(14.88~26.80 MPa);匍匐型、半匍匐型、直立型小冠花茎秆平均最大载荷力分别为88.88 N、152.70 N和187.10 N,鲜样纤维素平均质量分数分别为13.59%、13.87%、15.52%,木质素平均质量分数分别为4.47%、4.18%、3.95%,蛋白质平均质量分数分别为3.83%、4.55%、2.74%,并随含水率的降低(或生育期增长),纤维素、木质素、蛋白质的质量分数均增大。匍匐缠结牧草茎秆强度和刚度主要取决于纤维素、木质素的质量分数及其链接形式和排列方式。新品系直立型小冠花木质素/纤维素质量分数比值较匍匐、半匍匐型低,较易机械化收获。

关键词: 匍匐缠结牧草 茎秆 力学性能 化学成分 试验

中图分类号: S313; S54 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)06-0065-05

Stems Biomechanical Properties Experiment of Creeping Tangled Forage in Harvesting Period

Zhao Chunhua^{1,2} Zhang Fengwei² Han Zhengsheng² Cao Zhizhong¹ Shi Shangli¹

(1. Pratacultural College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2. Engineering College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract

Three kinds of stems in harvesting period, creeping type, erect crownvetch strain and half crawl type (*Coronilla varial.*) were chosen to perform the biomechanical nature of forage stems by the electronic testing machine CMT2502 and X. Н. Починук method. Results showed that the tensile strength of erect crownvetch strain stems were maximum (14.88~26.80 MPa). The average largest load of creeping type, half crawl type and erect crownvetch strain were 88.88 N, 152.70 N and 187.10 N, respectively; the cellulose contents of above stems were 13.59%, 13.87% and 15.52%, respectively; the lignin contents of above stems were 4.47%, 4.18% and 3.95%, respectively; the protein contents of above stems were 3.83%, 4.55% and 2.74%, respectively. The cellulose contents, lignin contents and protein contents increased with the reduction of moisture content. The strength and stiffness of creeping tangled forage stems mainly depended on the content, connection mode and alignment of cellulose and lignin. Erect crownvetch strain were easier to mechanized harvest than others because of its low ratio of lignin to cellulose.

Key words Creeping tangled forage, Stems, Mechanical properties, Chemical compositions, Experiment

收稿日期: 2009-12-02 修回日期: 2009-12-22

* 国家自然科学基金资助项目(50965001)、“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD04A04-01-9)、甘肃省科技支撑计划资助项目(0804GKCA051)和甘肃省科技成果转化项目(0910XCNA090)

作者简介: 赵春花,副教授,主要从事牧草生物力学和农业机械工程装备研究,E-mail: zhaoch@gsau.edu.cn

通讯作者: 曹致中,教授,博士生导师,主要从事牧草种质资源、育种及草产品加工研究,E-mail: caozz@gsau.edu.cn

引言

牧草小冠花适应性广,抗逆性强,耐旱、耐瘠薄,是理想的水土保持多年生草本植物^[1]。小冠花因枝条匍匐缠结,草层密集,目前采用人工收获,劳动强度大,效率低,已成为影响小冠花推广应用的主要制约因素。近年来,各种加工机具、配套工艺应运而生;对牧草物料加工特性的研究也有了较快的发展,为进一步设计开发新机具、新工艺提供了理论依据^[2-3]。研究牧草茎秆生物力学特性的意义为:①农业机械设计阶段考虑牧草的特性有利于确定机器的工作情况,减少研发成本与缩短研发周期^[4]。②有利于研究牧草的机械处理,如切断、压缩打捆、制草颗粒和草产品^[5]。③茎秆木质纤维的结构使其能够作为能源与工业原料,研究茎秆的力学性能成为必要^[6]。④随着遗传工程人为培育优质高产、抗逆牧草的发展,牧草茎秆的力学研究可为遗传工程改变牧草内部结构与机械性能指出明确目标^[7]。

国内外学者对小麦、水稻、玉米等主要粮食作物的抗倒伏和副产品的开发利用进行了大量的研究工作,并取得了很多成果^[8-10]。但将同一牧草不同品系的牧草茎秆的力学性能与其化学成分结合起来进行全面系统的研究还不多见。为了便于机械化收获,应用多次单株选择法,已从绿宝石小冠花中筛选出具有返青早、生长速度快、株型紧凑直立、分蘖数多、健壮无病、草产量高等特点的直立型新品系^[11]。本研究选用小冠花的匍匐型、半匍匐型和直立型收割期茎秆为研究材料,对其力学特性、主要化学成分进行测定,并进行相关性分析研究。

1 试验

1.1 茎秆力学性能试验

1.1.1 试验材料

于2009年5月28日在甘肃省景泰县兰化302农场(试验区)对生长多年的初花期绿宝石多变小冠花、匍匐型小冠花和直立型小冠花收割期茎秆进行随机采样,选取生长良好、无病虫害的新鲜植株,并尽量避免对茎秆的机械损伤,截取不同品种底部(地表30~150 mm区间)的茎秆为试验样本,选取测定的不同直径样本要保证其形态一致性,长度120 mm。试样采回后立即送到实验室于4℃保存,3种牧草各选150株,按茎秆直径大小分5组,每组由样本直径相近的30株植株组成,标距为50 mm。

1.1.2 试验方法

试验在甘肃农业大学材料力学实验室进行。试验设备采用深圳SANS公司制造的CMT2502型微

机控制电子万能试验机,该机最大试验力500 N。参考GB/T1040塑料和复合材料拉伸强度、拉伸模量和拉伸应力-应变关系的测定方法。试验开始前,用游标卡尺、分析天平测量试件的直径、壁厚、质量和含水率等基本参数。试验机配有内面粘有胶垫的两个夹头,为防止茎秆在夹具里滑移,试样两端部以牙托粉固定,即自制直径10 mm、深度12 mm的模具,将试样两端置入模具内,用以牙托水稀释的牙托粉向模具内浇铸,使试样固定于牙托粉内,干燥24 h后脱模。将试样两端装夹到试验机上、下夹头中间部位,且使茎秆和水平面保持垂直。载荷由载荷传感器传递,可测出茎秆被拉断时最大抗拉力。位移通过光电编码器传递,应变通过试验机的应变单元传递,将试样的参量输入计算机,以100 mm/min的速度对试样施加拉应力,选取不同直径样本要保证其形态一致性,长度相同且远远大于其直径。随载荷增加,断裂处不在茎秆两端时,抗拉试验结果即有效。

1.2 茎秆化学组分测定

1.2.1 试验材料

茎秆材料与力学性能试验相同。截取3种品系小冠花地表30~150 mm区间的茎秆各50株,每株取质量200 g。

1.2.2 试验方法

干物质或水分含量测定采用100~105℃干燥法。有机物或无机物(灰分)含量测定采用550~660℃高温炉灼烧法。纤维素和木质素含量采用范氏酸性洗涤剂洗涤法和72%硫酸溶解法测定。蛋白质含量测定采用凯氏半微量定氮法,仪器采用K9860型全自动凯氏定氮仪、普通干燥箱、SX25212型茂福炉等。

2 结果与分析

2.1 力学性能

牧草茎秆的力学特性影响牧草收获和加工过程中的切割力,如饲料作物切割时的拉伸强度、剪切强度、密度和摩擦等,其结构形态参数有长度、外径和壁厚^[12]。以10 mm/min的试验速度对试样施加拉伸测试,图1是绿宝石小冠花初花期茎秆拉伸应力-应变曲线。试件外径3.53 mm,壁厚0.78 mm。由图可见,茎秆在整个拉伸过程中,应力从零缓慢增加到 $\sigma_{\max} = 11.70$ MPa,应变达1.46%时发生断裂,断裂时拉力为77.98 N,应力与应变近似呈线性关系,材料服从虎克定律,其弹性模量 $E = 789.43$ MPa。

小冠花茎秆具有良好的弹性,断口发生在茎秆的横截面内。表1列出了收割期小冠花茎秆拉伸力

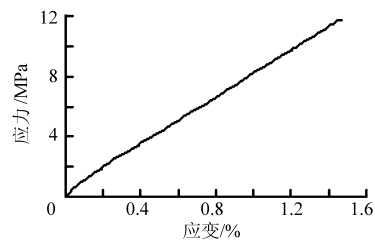


图 1 小冠花茎秆拉伸应力-应变曲线

Fig. 1 Tensile stress-strain curve of crownvetch stems

学性能试验统计结果。结果显示:3 种品系小冠花茎秆抗拉强度、弹性模量有差异。新品系直立型小冠花茎秆的最大拉力达 148.90 ~ 236.70 N,应力达 14.88 ~ 26.80 MPa,弹性模量 843.10 ~ 1 408.20 MPa,匍匐型、半匍匐型(绿宝石)、直立型小冠花茎秆平均最大载荷分别是 88.88 N、152.70 N 和187.10 N。

2.2 化学组分

牧草茎秆主要由纤维素、木质素、蛋白质、糖和

表 1 小冠花收割期茎秆拉伸试验结果

Tab.1 Pull test results of crownvetch stems in harvesting period

牧草品系	外径/mm	壁厚/mm	截面积/mm ²	最大载荷/N	应力/MPa	应变/%	弹性模量/MPa
匍匐型	2.61	0.72	4.28	81.76	19.13	1.71	1 114.90
	2.95	0.68	4.85	108.70	22.41	1.40	1 282.20
	2.98	0.83	5.61	64.28	11.47	0.64	996.00
	3.18	0.80	5.98	103.20	17.26	1.05	1 131.70
	4.20	0.82	8.71	86.45	9.93	1.83	417.00
均值	3.18 ± 0.64	0.77 ± 0.12	5.89 ± 2.53	88.88 ± 19.81	16.04 ± 6.37	1.33 ± 0.50	988.36 ± 494.42
半匍匐型	2.62	0.83	4.52	84.84	18.85	2.83	669.80
	3.53	0.78	6.67	77.98	11.70	1.46	789.43
	4.68	1.04	11.89	166.10	13.97	1.11	778.21
	4.81	0.91	11.03	197.48	17.84	3.48	500.30
	5.06	1.38	15.95	239.91	15.03	2.36	697.32
均值	4.12 ± 0.88	0.94 ± 0.06	9.63 ± 2.49	152.70 ± 15.66	15.96 ± 3.69	2.58 ± 0.84	652.72 ± 132.65
直立型	3.54	0.91	7.46	149.32	20.02	1.24	921.52
	3.74	1.08	9.03	148.90	16.53	1.59	843.10
	3.86	0.90	8.37	224.33	26.80	1.90	1408.20
	4.11	1.38	11.84	176.14	14.88	1.26	847.13
	4.62	1.36	13.93	236.70	16.99	0.53	1 209.70
均值	3.97 ± 0.65	1.12 ± 0.26	10.13 ± 3.81	187.10 ± 32.17	19.03 ± 7.77	1.30 ± 0.64	1 045.90 ± 362.33

脂肪等有机高分子材料组成^[13]。表 2 是小冠花初花期茎秆在鲜样、半干样、干样 3 种状态下主要化学组分的测定结果。鲜样测得匍匐型、半匍匐型、直立型小冠花茎秆平均含水率分别为 75.80%、76.03%、74.43%;半干样含水率分别为 49.17%、46.90%、48.13%;干样平均吸附水分别为 7.29%、7.83%、7.48%。由表可知纤维素是构成茎秆的主要化学成分,随含水率的降低(或生育期的变化),纤维素、木质素、蛋白质的质量分数均随之增高。小冠花品系不同,其化学组分有明显差异:直立型小冠花茎秆平均直径最大,其纤维素质量分数也大于半匍匐型和匍匐型;3 个品系随茎秆直径增大,蛋白质质量分数都有减小趋势(见图 2),纤维素质量分数有增大趋势,木质素质量分数基本不变(见表 2)。

2.3 力学性能与化学组分关系

2.3.1 纤维素

纤维素是植物细胞壁的主要成分,相当于茎秆的骨架物质^[14]。由表 1、2 用统计软件得图 3,小冠花初花期茎秆纤维素质量分数与应力的变化规律:

直立型纤维素平均质量分数最高(15.52%)、平均应力最大(19.03 MPa);3 种小冠花牧草茎秆的纤维素质量分数相差不大(13.30% ~ 16.24%),而抗拉强度差异较大(9.93 ~ 26.80 MPa),这揭示:植物茎秆的抗拉强度不仅与纤维素质量分数紧密相关,还与茎秆的纤维排列紧密、疏松程度、组织结构以及其他组成物质有关。因此,还应对茎秆进行形态解剖分析,以全面合理地解释不同植物或同一科属不同品系植物间茎秆的抗拉强度的差异。

2.3.2 木质素

木质素具有使细胞相连的作用,其填充于纤维素构架中以增强植物体的机械强度,能提供刚度并改善耐久性。木质素与纤维素结合紧密,其配合比和排列结构如同“钢筋混凝土”的作用决定着茎秆的强度和刚度,“木质素/纤维素”的含量比值不仅是反映植物残体分解的速率指标之一^[16],而且可能是引起茎秆抗拉强度变化的重要原因。图 4 是 3 种小冠花初花期茎秆木质素/纤维素质量分数比值与抗拉强度的变化规律,匍匐型小冠花茎秆木质素/纤

表 2 小冠花收割期茎秆纤维素、木质素、蛋白质质量分数

Tab.2 Contents of cellulose, lignin and protein of crownvetch stems in harvesting period											%
牧草品系	外径/mm	鲜样			半干样			干样			
		纤维素	木质素	蛋白质	纤维素	木质素	蛋白质	纤维素	木质素	蛋白质	
匍匐型	1.30 ~ 2.10	11.96	4.46	4.44	30.00	11.19	11.15	32.40	12.09	12.04	
	2.11 ~ 3.42	13.74	4.48	4.10	34.48	11.23	10.30	37.24	12.13	11.12	
	3.43 ~ 3.88	15.08	4.47	2.95	37.83	11.22	7.40	40.86	12.12	7.99	
均值		13.59	4.47	3.83	34.10	11.21	9.62	36.83	12.11	10.38	
半匍匐型	1.54 ~ 2.38	13.30	4.18	5.73	33.38	10.48	14.39	36.05	11.32	15.54	
	2.38 ~ 2.85	14.02	4.17	4.45	35.18	10.48	11.17	38.00	11.31	12.06	
	2.86 ~ 3.84	14.29	4.18	3.47	35.86	10.48	8.71	38.73	11.32	9.41	
均值		13.87	4.18	4.55	34.81	10.48	11.42	37.59	11.32	12.34	
直立型	1.90 ~ 3.09	14.79	3.95	2.82	36.14	9.64	6.29	39.03	10.42	6.79	
	3.10 ~ 4.19	16.24	3.95	2.66	39.71	9.65	5.93	42.88	10.42	6.40	
	4.20 ~ 5.80	15.78	3.95	2.50	38.57	9.64	5.58	41.66	10.42	6.03	
均值		15.52	3.95	2.74	37.93	9.65	6.11	40.96	10.42	6.60	

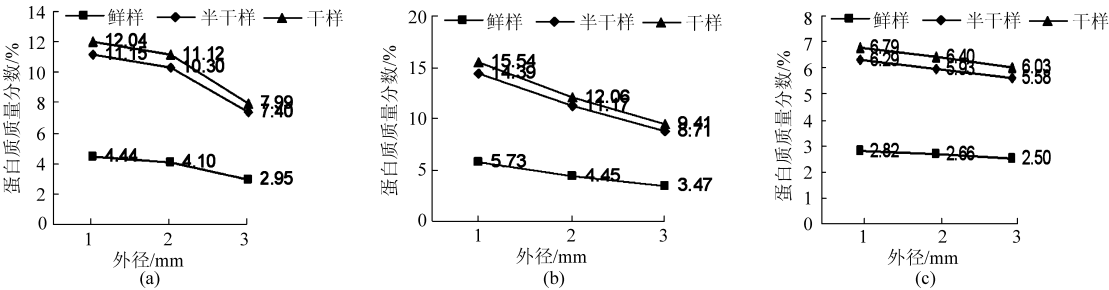


图 2 不同水分状态下小冠花茎秆外径与蛋白质质量分数关系曲线

Fig.2 Curves of the protein contents and diameters of crownvetch stems under different moisture conditions

(a) 匍匐型 (b) 半匍匐型 (c) 直立型

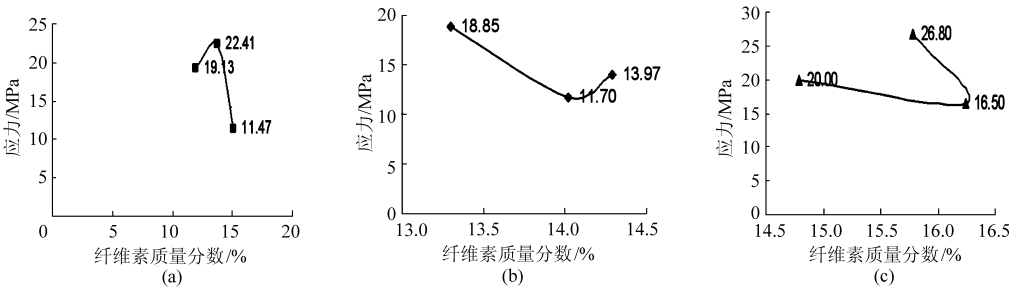


图 3 小冠花茎秆应力与纤维素质量分数关系曲线

Fig.3 Relationship between stress and cellulose of crownvetch stems

(a) 匍匐型 (b) 半匍匐型 (c) 直立型

纤维素质量分数比值最高,为 0.37,刚度及耐久性最强,而直立型茎秆木质素/纤维素质量分数比值最低,为 0.24,其强度最高(26.80 MPa),刚度及韧性较差。

3 结论

(1) 小冠花茎秆具有良好的弹性,是粘弹性材料;直立型小冠花收割期茎秆外径略大于匍匐、半匍匐型,其抗拉强度最大,拉力达 148.90 ~ 236.70 N,应力为 14.88 ~ 26.80 MPa,弹性模量为 843.10 ~

1 408.20 MPa。

(2) 小冠花茎秆抗拉强度不仅与纤维素质量分数紧密相关,还与茎秆的纤维排列紧密、疏松程度、组织结构以及其他组成物质有关。匍匐型、半匍匐型、直立型茎秆鲜样纤维素平均质量分数分别为 13.59%、13.87%、15.52%;木质素平均质量分数分别为 4.47%、4.18%、3.95%;蛋白质平均质量分数分别为 3.83%、4.55%、2.74%,并随含水率降低(或生育期的增长),3 种主要化学组分质量分数均

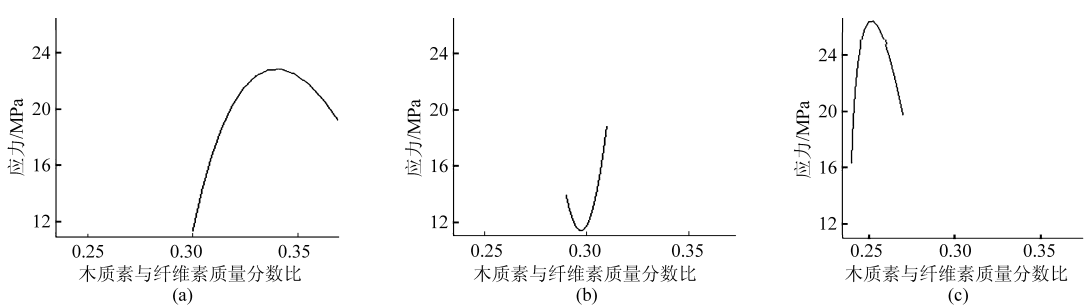


图 4 小冠花茎秆应力与木质素/纤维素质量分数比值关系曲线

Fig. 4 Relationship between stress and the ratio of lignin to cellulose of crownvetch stems

(a) 匍匐型 (b) 半匍匐型 (c) 直立型

增大;随茎秆直径增大,蛋白质质量分数有减小趋势,纤维素质量分数有增大趋势,木质素质量分数基本不变。

(3) 牧草茎秆的木质素与纤维素合理配比和良好的排列结构可增强茎秆机械强度和韧性。“木质素/纤维素”的含量比值可能是引起牧草茎秆强度

刚度变化的主要原因,也是影响牧草机械化收获品质的重要因素。直立型茎秆纤维素质量分数最高,抗拉强度也最大,茎秆木质素/纤维素含量比值最低,刚度及韧性较差,故培育的新品系直立型小冠花较匍匐型、半匍匐型易机械化收获,其适宜于大、中面积种植,机械化收获。

参 考 文 献

1 潘福平,郑瑞. 优良牧草多变小冠花引种试验[J]. 山西水土保持科技,2003(3):20~21.

2 苏工兵,刘俭英,王树才,等. 苧麻茎秆木质部力学性能试验[J]. 农业机械学报,2007,38(5):62~65.
Su Gongbing, Liu Jianying, Wang Shucai, et al. Study on mechanical properties of xylem of ramie stalk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(5): 62~65. (in Chinese)

3 刘庆庭,区颖刚,卿上乐. 农作物茎秆的力学特性研究进展[J]. 农业机械学报,2007,38(7):172~176.
Liu Qingting, Ou Yinggang, Qing Shangle. Study progress on mechanics properties of crop stalks[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(7): 172~176. (in Chinese)

4 Schulgasser K, Witztum A. On the strength of herbaceous vascular plant stems[J]. Annals of Botany,1997,80(1):35~44.

5 赵春花,张锋伟,曹致中. 豆禾牧草茎秆的力学特性试验研究[J]. 农业工程学报,2009,25(9):122~126.
Zhao Chunhua, Zhang Fengwei, Cao Zhizhong. Experiment on stalk mechanical properties of legume forage and grasses[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(9):122~126. (in Chinese)

6 Hirai Y, Inove E, Mori K. Application of a quasi-static stalk bending analysis to the dynamic response of rice and wheat stalks gathered by a combine harvester reel[J]. Biosystem Engineering, 2004, 88(3):281~294.

7 赵春花,韩正晟,王芬娥,等. 收割期牧草底部茎秆生物力学性能试验研究[J]. 农业机械学报,2010,41(4):85~89.
Zhao Chunhua, Han Zhengsheng, Wang Fen'e, et al. Experiment and research on biomechanical properties of bottom stems of forage in harvesting period[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4):85~89. (in Chinese)

8 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008,24(8):131~134. (in Chinese)

9 廖宜涛,廖庆喜,田波平. 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,2007,38(4):124~129.
Liao Yitao, Liao Qingxi, Tian Boping. Experimental research on the mechanical physical parameters of bottom stalk of the *Arundo donax* L. in harvesting period[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 38(4): 124~129. (in Chinese)

10 郭继俊,王芬娥,黄高宝,等. 小麦茎秆力学性能与化学组分试验[J]. 农业机械学报,2009,40(2):123~127.
Guo Weijun, Wang Fene, Huang Gaobao, et al. Experimental study on mechanical properties and chemical compositions of wheat stems[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(2):123~127. (in Chinese)

11 王敬龙. 直立型小冠花品系生态适应性及耐盐性评价[D]. 兰州:甘肃农业大学,2007.
Wang Jinglong. Estimation and studies on ecological adaptability and NaCl resistance of erect crownvetch strain [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University,2007. (in Chinese)

(in Chinese)

7 张淑娟,赵飞. 基于 Shapley 值的农机总动力组合预测方法[J]. 农业机械学报,2008,39(5):60~64.
Zhang Shujuan, Zhao Fei. Combinatorial forecast of agricultural machinery total power based on Shapley value[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(5):60~64. (in Chinese)

8 张国平. B-G 组合预测剖析[J]. 预测,1988(5):24~27.
Zhang Guoping. Anatomy of B-G combined forecasting[J]. Forecast,1988(5):24~27. (in Chinese)

9 单良,胡勇. 基于软件 EVIEWS,EXCEL,SPSS 的回归分析比较[J]. 统计与决策,2006(4):150~153.

10 鞠金艳,王金武. 黑龙江省农业机械化作业水平预测方法[J]. 农业工程学报,2009,25(5):83~88.
Ju Jinyan, Wang Jinwu. Prediction method for the operation level of agricultural mechanization in Heilongjiang province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2009,25(5):83~88. (in Chinese)

11 洪一前,张光明,金定. 基于 GM(1,1)模型的浙江省农机总动力预测分析[J]. 农机化研究,2008,30(1):42~44.
Hong Yiqian, Zhang Guangming, Jin Ding. Predict and analysis of agricultural machinery total power in Zhejiang province based on GM(1,1)[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008,30(1):42~44. (in Chinese)

12 李中才,黄晓东,刘冬梅. 黑龙江省农机总动力的组合预测研究[J]. 农机化研究,2002(5):23~24.

13 王吉权,赵玉林,马力. 组合预测方法研究及其在电力负荷预测中的应用[J]. 东北农业大学学报,2008,39(4):51~54.
Wang Jiquan, Zhao Yulin, Ma li. Research on combination forecasting method and application in electric power load forecasting[J]. Journal of Northeast Agricultural University,2008,39(4):51~54. (in Chinese)

14 陈丽能,谢永良. 基于 BP 神经网络的农机拥有量预测技术[J]. 农业机械学报,2001,32(1):118~121.

15 Singh A K, Panda S S, Pal S K, et al. Predicting drill wear using an artificial neural network[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol. ,2006,28(5~6):456~462.

16 Aminian F, Suarez E D. Forecasting economic data with neural networks[J]. Computational Economics,2006,28(1):71~88.

17 吴昌友. 神经网络的研究及应用[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2007.
Wu Changyou. The research and application on neural network [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2007. (in Chinese)

18 Maier H R, Dandy G C. The use of artificial neural networks for the prediction of water quality parameters[J]. Water Resour Res. ,1996,32(4):1 013~1 022.

(上接第 69 页)

12 高梦祥,郭康权,杨中平. 玉米秸秆的力学特性测试研究[J]. 农业机械学报, 2003,34(4):47~49.
Gao Mengxiang, Guo Kangquan, Yang Zhongping. Study on mechanical properties of cornstalk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003,34(4):47~49. (in Chinese)

13 马洪顺,张忠君,曹龙奎. 薇菜类蔬菜生物力学性质试验研究[J]. 农业工程学报,2004,20(5):74~77.
Ma Hongshun, Zhang Zhongjun, Cao Longkui. Experimental study on the biomechanical properties of some undeciduous like vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2004,20(5):74~77. (in Chinese)

14 Genet M, Stokes A, Salin F, et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots[J]. Plant Soil, 2005, 278(1~2): 1~9.