

牧场土壤含水率与坚实度空间变异与相关性分析^{*}

程强¹ 孙宇瑞¹ 林剑辉² 曾庆猛¹ Schulze Lammers P³ Schellberg J⁴

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学工学院, 北京 100083;

3. 波恩大学农业工程系, 德国波恩 53115; 4. 波恩大学作物科学与资源保护研究所, 德国波恩 53115)

【摘要】 利用土壤水分/圆锥指数复合测量装置,应用精细农作技术体系网格定点测量与GPS定位,在一块面积约1.27 hm²的草地上获取了土壤含水率与坚实度空间分布基础数据,并针对采样过程中出现的数据缺失,用偏最小二乘法对数据进行修补。然后运用克里格插值法进行数字化成图,并在此基础上分别对含水率与坚实度的空间变异性及两者的相关性做了分析。

关键词: 牧场草地 土壤 含水率 坚实度 空间变异 相关性

中图分类号: S155.4⁺7; S151.9⁺2

文献标识码: A

Determining Spatial Variability of Water Content and Hardness in Pastureland

Cheng Qiang¹ Sun Yurui¹ Lin Jianhui² Zeng Qingmeng¹ Schulze Lammers P³ Schellberg J⁴

(1. College of Information and Electronic Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3. Department of Agricultural Engineering, University Bonn, Bonn 53115, Germany

4. Institute of Crop Science and Resource Conservation, University Bonn, Bonn 53115, Germany)

Abstract

As an extension in precision agriculture, it utilizes various high techniques to manage soil and water resources in pasture environment. However, the pastureland, which is different from arable field, does not allow the on-the-go survey with multi-sensor system because of the physical destruction in the field. This study used an innovated dual-sensor penetrometer together with a GPS receiver to collect the information of soil water content and hardness in a pastureland (1.27 hm²). To present the distribution of both parameters in field-scale, firstly, partial least squares (PLS) was employed to mend the set of raw data due to over-hard, and then Kriging interpolating method was used for digital mapping. Moreover, the spatial variability of each parameter associated with the correlation between water content and hardness was preliminary investigated.

Key words Pastureland, Soil, Moisture, Soil hardness, Spatial variability, Correlation

引言

土壤含水率与坚实度是影响牧草生长的两个重要参数。草地含水率既取决于当地年均降雨量,也与草地局部凹凸不平程度密切相关^[1]。坚实度是

反映土壤压实程度的物理参数,已有的研究结果表明它与放牧强度(牲畜踩踏频度)具有正相关性^[2]。含水率与坚实度的空间分布彼此存在着复杂的相互影响^[3],压实影响着表层雨水的入渗,而含水率会显著改变土壤对外力压迫的支撑强度。对于牧场草

收稿日期: 2008-05-01 修回日期: 2008-06-20

^{*} 国家自然科学基金资助项目(30800665)、国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA10Z205)和中德“精细农业中的先进传感科学与技术”合作小组专项资助(GZ494)

作者简介: 程强,硕士生,主要从事面向精细农业的信息采集与解译研究,E-mail: davidcheng_1025@163.com

通讯作者: 孙宇瑞,教授,博士生导师,主要从事智能检测与信号处理研究,E-mail: pal@cau.edu.cn

地使用传统的环刀法在不同深度下大面积采样是不现实的,也不可能应用车载行进方法进行连续测量,因为这些方法都会对草地生长环境造成物理性破坏损伤。圆锥指数是为了定量刻画坚实度、强度或机械耕作阻力等土壤力学性质,建立于一种特定测量方法之上的专业性能指标。具体地说,它是指柱塞或锥体以恒定速率插入土壤过程中与瞬时、垂直压力相当的、单位面积上所受土壤阻力。本文借助于一种自行研制的土壤水分/圆锥指数复合测量装置,采用网格定点测量与GPS定位,首先获取土壤含水率与坚实度空间分布基础数据,针对采样过程中出现的数据缺失,提出用偏最小二乘法(PLS)对数据进行修补。利用ArcGIS 9.2中的Geostatistical Analyst进行统计分析,对测量区域分层进行克里格插值(Kriging),绘制出不同深度下两参数各自的空间趋势图,在此基础上分别对含水率与坚实度的空间变异性及两者间相关性作解析与讨论。

1 试验环境与测量方法

试验地点位于德国北威州北部山区(Eifel, Rengen)波恩大学农学院草地试验站,海拔475 m,北纬 $50^{\circ}14'$,东经 $6^{\circ}49'$ 。该试验站成立于1930年,自1996年起以生态农场形式管理,严禁施洒任何化学肥料。牧场草地植被包括:绒毛草、黑麦草、草地早熟禾、鸭茅、白三叶草、红三叶草、大车前草等。年均降雨量811 mm,常年平均温度为 6.9°C 。试验设备为自行研制的土壤水分/圆锥指数复合测量系统^[4~5],其实物见图1。该装置是在美国农业工程师协会推荐技术标准(ASAE标准)的常规圆锥指数仪基础上,又在圆锥部位嵌入一个土壤水分传感器。因此,该装置可同步、实时测量土壤剖面含水率与纵向行进阻力。圆锥杆直径10.8 mm,借助

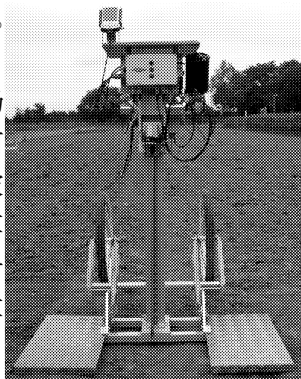


图1 土壤水分/圆锥指数复合测量仪
Fig. 1 Dual-sensor penetrometer used for measuring water content and hardness

于直流电动机驱动,恒定行进速率3 cm/s,最大行进深度70 cm,力学传感器测量范围为0~1 000 N。

试验草地的区域与采样点的设置如图2所示,区域面积约 1.27 hm^2 ,在平面图上呈“菜刀”形状,草地内部按 $7\text{ m}\times 14\text{ m}$ 设置采样网格,共有190个采样点。所有采样点均由GPS定位,采样过程每点测量3次,测量数据存入PDA中。

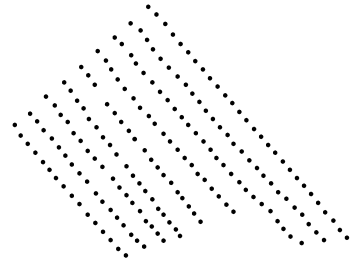


图2 试验草地的区域与采样点布设示意图
Fig. 2 Sampling points arrangement of the experimental grassland

2 数据处理

2.1 深度分层与原始有效数据

为了分层刻画试验草地土壤含水率与坚实度空间变异分布,对测量数据按5 cm深度间隔进行分层处理,在70 cm深度范围内共可分为14层。由于水分传感器两电极完全进入土壤后才能获得可靠的水分信息,因此0~5 cm的表层土壤测量数据应排除。

试验中发现,随着圆锥行进深度的增加,其所受阻力超过最大测量值1 000 N的概率也随之增加,即并非所有采样点的最大测量深度都可达70 cm。各层有效的基础网格数据个数如表1所示。

2.2 基于PLS的数据修补

随着测量深度增加各层基础数据数量逐渐减少,将不同程度影响到数字化成图的准确性。因此应当尽可能对缺失的基础网格数据进行合理修补,使修补后的数据网格最大限度地逼近真实数据网格。分析每个采样点剖面数据发现含水率与圆锥指数各自随深度变化的纵向相关性是很高的。表2与表3给出了5~35 cm深度范围内6个物理分层之间有效数据的互相关程度。例如,相邻层之间的相关性较强,而随着深度上的距离增加,相关性减弱。如果使用常规最小二乘回归方法预测,数据之间的

表1 各层有效的基础网格数据个数

Tab. 1 Number of the available raw-net data in each layer

深度层/cm	0~5	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30	30~35
采样点数	190	190	187	179	151	122	104
深度层/cm	35~40	40~45	45~50	50~55	55~60	60~65	65~70
采样点数	81	65	55	46	39	21	14

多重相关性难以合理兼顾,无法达到最优估计。而偏最小二乘回归方法正适合处理这类问题^[6],因此本研究采用该方法对缺失的基础网格数据进行修补。

表2 5~35 cm 深度范围内各层含水率有效数据的相关性

Tab.2 Correlation of available data of water content at each depth of 5~35 cm

深度层 /cm	深度层/cm					
	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30	30~35
5~10	1	0.653 3	0.638 1	0.703 7	0.629 7	0.580 8
10~15		1	0.863 3	0.724 1	0.693 8	0.697 0
15~20			1	0.784 5	0.670 0	0.666 5
20~25				1	0.866 0	0.796 0
25~30					1	0.845 7
30~35						1

表3 5~35 cm 深度范围内各层圆锥指数有效数据的相关性

Tab.3 Correlation of available data of cone index at each depth of 5~35 cm

深度层 /cm	深度层/cm					
	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30	30~35
5~10	1	0.737 6	0.551 2	0.528 1	0.563 2	0.522 1
10~15		1	0.664 5	0.488 5	0.472 9	0.373 4
15~20			1	0.678 1	0.590 2	0.508 9
20~25				1	0.842 9	0.648 3
25~30					1	0.787 8
30~35						1

设待修补数据处于第 n 层,该层有效的基础网格数据总数为 m ;将 m 个数据作为因变量,它们所对应的第 1 层到 $n-1$ 层的基础网格数据作为自变量,建立回归方程

$$\mathbf{X}_n = [\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_{n-1}, \mathbf{E}][\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]^T \quad (1)$$

式中 \mathbf{X}_n ——第 n 层 m 个有效基础网格数据组成的 $m \times 1$ 矩阵

$[\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_{n-1}, \mathbf{E}]$ —— m 个数据点所对应的 $1 \sim (n-1)$ 层的基础网格数据组成的 $m \times (n-1)$ 矩阵

\mathbf{E} —— m 个 1 组成的 $m \times 1$ 矩阵

$[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]^T$ ——待求的 $n \times 1$ 回归系数矩阵

运用偏最小二乘回归法(PLS)得到回归系数,建立预测方程

$$\mathbf{X}_{n,i}^* = [X_{1,i}, X_{2,i}, \dots, X_{n-1,i}, 1][\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]^T \quad (2)$$

式中 $\mathbf{X}_{n,i}^*$ ——第 n 层第 i 个预测值

$X_{1,i}, X_{2,i}, \dots, X_{n-1,i}$ ——第 i 个预测值所对应 $1 \sim (n-1)$ 层的基础网格数据

由表 1 知,35 cm 深度以下各层有效基础网格数据量不足总量的一半,信息缺失严重,建立预测方程得到的预测值与实测值误差较大,故只能按舍去处理。相比之下 5~20 cm 范围内的基础网格数据缺失较少,故可借助 PLS 方法对 4(20~25 cm)、5(25~30 cm)、6(30~35 cm)3 个分层的基础网格数据进行修补。

设第 n 层缺失数据总数为 N ,利用 PLS 得到 3 组回归系数,建立预测方程:

含水率数据预测方程为

$$\begin{bmatrix} W_{4,i}^* \\ W_{5,i}^* \\ W_{6,i}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3793 & 0.2883 & 0.3043 & 0 & 0 & 0 & -0.8591 \\ 0.0669 & -0.0037 & 0.1564 & 0.6394 & 0 & 0 & 3.2606 \\ -0.0279 & 0.0714 & 0.0120 & 0.1880 & 0.3544 & 0 & 8.7153 \end{bmatrix} \cdot [W_{1,i}, W_{2,i}, W_{3,i}, W_{4,i}, W_{5,i}, W_{6,i}, 1]^T \quad (3)$$

式中 $W_{n,i}^*$ ——第 n 层第 i 个缺失的水分数据预测值($n=4,5,6; i=1,2, \dots, N$)

$W_{m,i}$ ——该缺失数据对应的第 m 层($m=1,2, \dots, n-1$)已知水分数据

坚实度数据预测方程为

$$\begin{bmatrix} C_{4,i}^* \\ C_{5,i}^* \\ C_{6,i}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1315 & 0.1048 & 0.7449 & 0 & 0 & 0 & 50.5888 \\ 0.0616 & 0.0197 & 0.1623 & 0.8547 & 0 & 0 & -9.6302 \\ 0.4580 & -0.0110 & -0.0872 & 0.1344 & 0.7687 & 0 & 8.6938 \end{bmatrix} \cdot [C_{1,i}, C_{2,i}, C_{3,i}, C_{4,i}, C_{5,i}, C_{6,i}, 1]^T \quad (4)$$

式中 $C_{n,i}^*$ ——第 n 层第 i 个缺失的坚实度数据预测值($n=4,5,6; i=1,2, \dots, N$)

$C_{m,i}$ ——该缺失数据对应的第 m 层($m=1,2, \dots, n-1$)已知坚实度数据

为了验证预测方程(3)、(4)的预测精度,将预测值与实测值进行比较,得到两者相对误差的最大值与最小值,如表 4 所示。由此可看出,利用 PLS 得到的回归系数对缺失数据进行修补,预测误差较小。

表 4 PLS 后预测值与实测值的相对误差

Tab.4 Relative errors between predicted and measured values using PLS %

深度/cm	预测含水率		预测坚实度	
	最小相对误差	最大相对误差	最小相对误差	最大相对误差
20~25	0.026	10.723	0.332	23.547
25~30	0.016	7.782	0.124	28.589
30~35	0.070	12.378	0.095	23.885

3 试验结果与讨论

3.1 各层土壤含水率与坚实度分布趋势

图 3 与图 4 分别给出了经克里格插值后得到的 5~35 cm 深度范围内土壤含水率与坚实度分布趋势。图 5 给出了试验草地的高程与等高线分布,反映了整个草地的地表轮廓。结合图 3、图 4 观察,含水率与坚实度的整体分布存在一定的相关性:含水

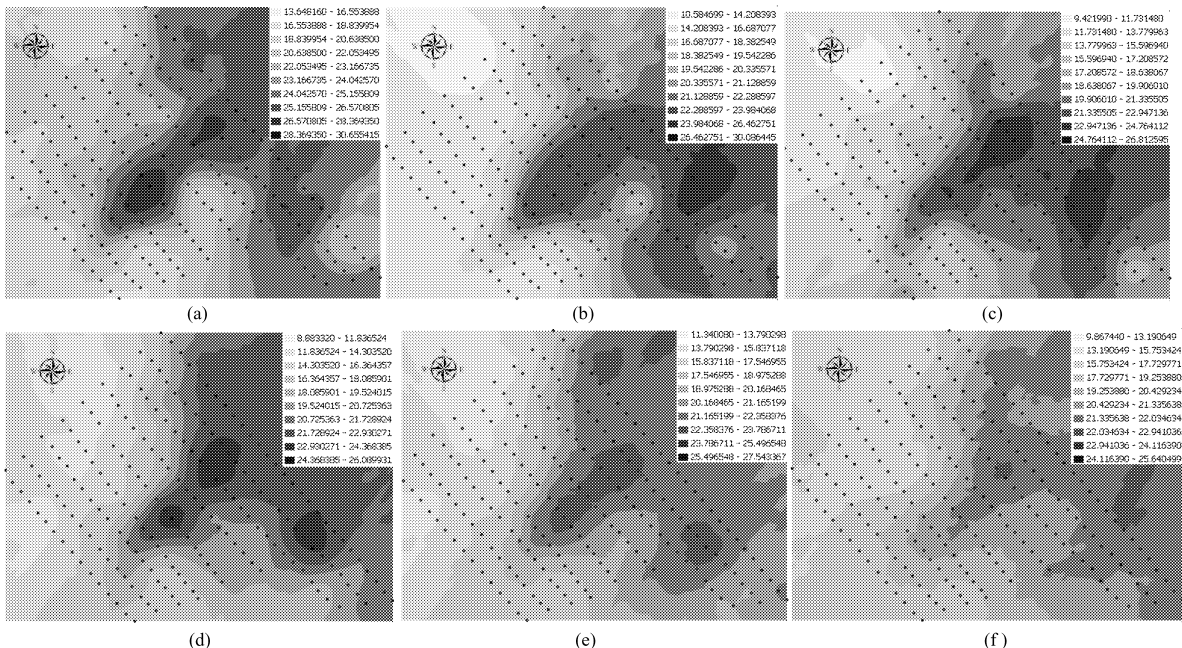


图 3 5~35 cm 深度范围内各层土壤含水率分布图

Fig. 3 Digital mappings of soil water content at each depth of 5~35 cm

(a) 5~10 cm (b) 10~15 cm (c) 15~20 cm (d) 20~25 cm (e) 25~30 cm (f) 30~35 cm

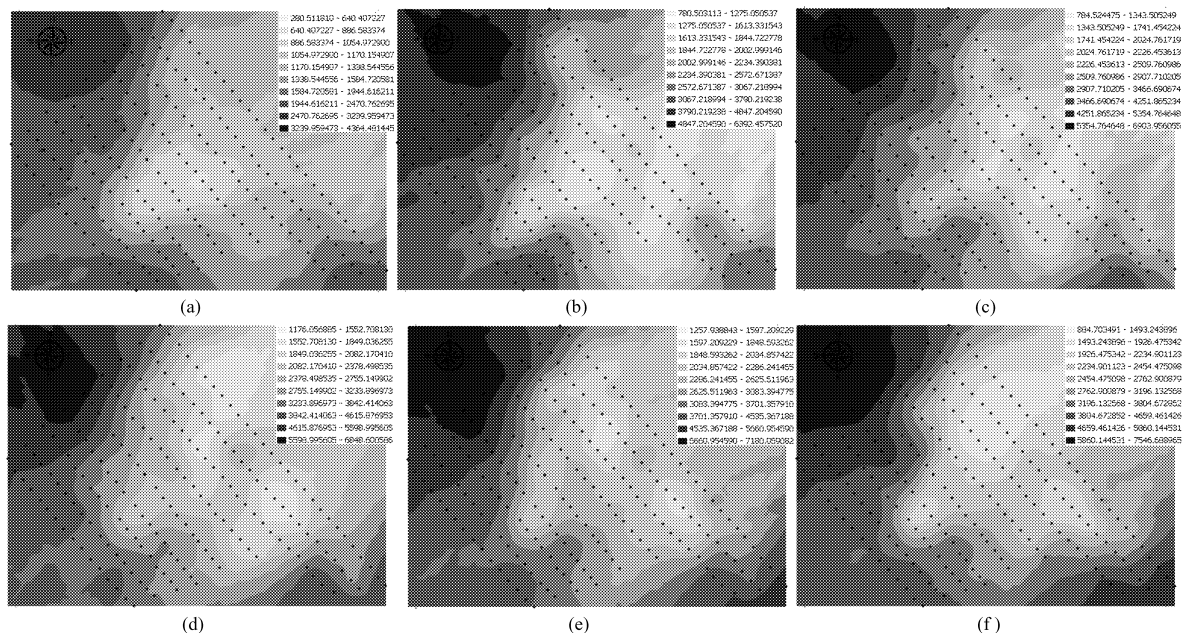


图 4 5~35 cm 深度范围内各层土壤圆锥指数(kPa)分布图

Fig. 4 Digital mappings of soil cone index at each depth of 5~35 cm

(a) 5~10 cm (b) 10~15 cm (c) 15~20 cm (d) 20~25 cm (e) 25~30 cm (f) 30~35 cm

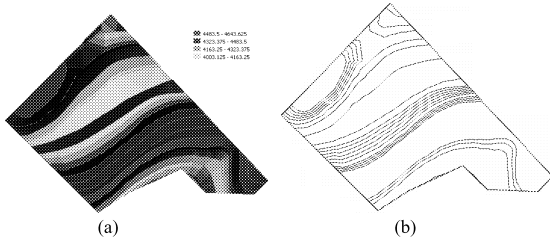


图5 高程与等高线图

Fig.5 Altitude and contour within experimental area

(a) 高程 (b) 等高线

率较高的地方坚实度较低,尤其在试验草地中心区域更为明显。再由图3与图5对比可看出,位于等高线较密的陡坡处含水率较小,而位于陡坡旁的缓坡处含水率较大。特别是从图3中能看出其分布有一个明显的梯度分界线,事实上它正是试验草地陡坡与缓坡的地理分界线,与高程变化趋向基本吻合。因此,含水率的实际分布不仅与坚实度有关,受地形的影响也较大。

此外,表5给出的各层含水率数据统计结果表明:在5~20 cm的3个分层,含水率均值随深度增加逐渐降低;大于20 cm后各层含水率均值趋于稳定,标准差逐渐变小,分布也趋于均匀,这可能是由于地表蒸发和作物蒸腾量较大,深层受影响较小。

表5 含水率数据统计结果

Tab.5 Statistical results of soil water content

深度/cm	平均值/%	标准差/%
5~10	24.140	2.728 8
10~15	20.693	3.512 2
15~20	19.239	3.803 9
20~25	20.123	3.456 3
25~30	20.631	3.297 1
30~35	20.532	2.841 9

表6给出的坚实度统计结果表明:试验草地土壤坚实程度总体上随着深度变化既有增加,又有明显变异,这可能是由于下层土壤长期受上层土壤重力作用的影响,土壤压实逐渐增强的缘故,而变异明显与地下石块密度有关。

表6 圆锥指数数据统计结果

Tab.6 Statistical results of soil cone index

深度/cm	平均值/kPa	标准差/kPa
5~10	1 468.375	595.998
10~15	2 377.510	1 036.440
15~20	2 649.558	985.083
20~25	2 656.780	1 066.343
25~30	2 697.799	1 135.889
30~35	2 857.259	1 328.191

3.2 土壤含水率与坚实度的相关性

含水率与坚实度的回归分析如图6所示,从图中可以看出两者为负相关。根据Ayers等^[3]在实验室环境下含水率与坚实度的相关性结论,当土壤含水率达到某一临界值(约10%)时,坚实度出现极大值。而图6很清晰地反映了含水率对坚实度的客观影响。

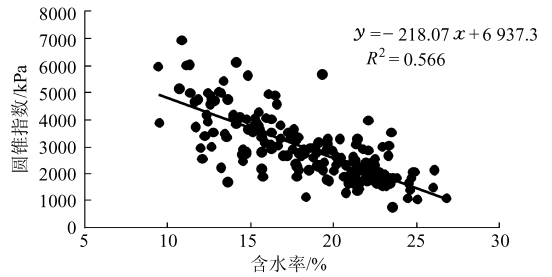


图6 15~20 cm深度范围内含水率与圆锥指数回归分析

Fig.6 Regression analysis of soil water content and cone index at the depth of 15~20 cm

4 结束语

应用自行研制的土壤水分/坚实度复合测量装置,对天然牧场环境下的土壤物理参数进行了测量,针对因土壤坚实度过高导致数据缺失的问题,借助于偏最小二乘回归方法对基础网格数据进行了修补,进而运用克里格插值绘制了5~35 cm深度范围内含水率与坚实度的空间特征分布图。在此基础上,结合试验草地的地表特征初步解析了含水率的空间变异性及其与坚实度的相互关系。研究表明:含水率的实际分布不仅与压实程度相关,还与地表凹凸不平程度有关;当土壤含水率超过某一临界值(约10%),含水率与坚实度呈现一种负相关关系。

参 考 文 献

1 李笑吟,毕华兴,张志,等. 晋西黄土区坡面尺度地形因子对土壤水分状况的影响[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(4): 51~56.
 Li Xiaoyin, Bi Huaxing, Zhang Zhi, et al. Impact of terrain factors on soil moisture in slopes of western Shanxi Province in loess area[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(4): 51~56. (in Chinese)

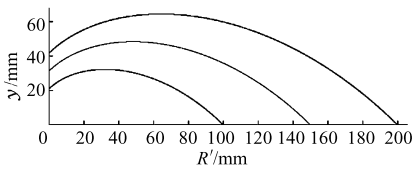


图9 拨穗杆曲线

Fig.9 Forming curves of corn-rod

4 结束语

采用独立的拨禾轮和拨穗轮,并改变拨茎杆偏心方向和拨穗轮的安装位置,增加了拨禾带的宽度,

增强了拨禾杆对茎秆的导入能力,进一步提高了对不同行距玉米的适应性。

通过茎秆喂入过程的运动学仿真,得出了茎秆运动轨迹与机组行驶速度、拨禾杆安装偏心距、拨禾轮转速的相互关系,为割台的结构设计以及运动参数的优化提供了理论依据。

拨穗杆的形状直接影响其运穗效果。在确定拨穗杆的作用半径之后,依据拨穗杆的曲线方程进行设计,对于确保果穗输送平稳、流畅、不发生堵塞,具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 胡伟. 中国玉米收获机械化发展研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- 2 陈志, 韩增德, 颜华, 等. 不分行玉米收获机分禾器适应性试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1): 50~52.
Chen Zhi, Han Zengde, Yan Hua, et al. Orthogonal validation experiment on crop divider of corn-harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 50~52. (in Chinese)
- 3 郝付平, 陈志. 国内外玉米收获机械研究现状及思考[J]. 农机化研究, 2007(10): 206~208.
Hao Fuping, Chen Zhi. Actuality of domestic and foreign corn harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(10): 206~208. (in Chinese)
- 4 Hanna H M, Kohl K D, Haden David A. Machine losses from conventional versus narrow row corn harvest[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2002, 18(4): 405~409.
- 5 贺俊林, 佟金, 陈志, 等. 指形拨禾轮分禾机构的虚拟样机设计与运动仿真[J]. 农业机械学报, 2007, 38(6): 53~56.
He Junlin, Tong Jin, Chen Zhi, et al. Virtual design and kinematic simulation for feed-in mechanism with finger rotor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(6): 53~56. (in Chinese)
- 6 于润伟. MATLAB 基础与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

(上接第 107 页)

- 2 戎郁萍, 韩建国, 王培, 等. 放牧强度对草地土壤理化性质的影响[J]. 中国草地, 2001, 23(4): 41~47.
Rong Yuping, Han Jianguo, Wang Pei, et al. The effects of grazing intensity on soil physics and chemical properties[J]. Grassland of China, 2001, 23(4): 41~47. (in Chinese)
- 3 Ayers P D, Perumpral J V. Moisture and density effect on cone index[J]. Transactions of ASAE, 1982, 25(5): 1 169~1 172.
- 4 Sun Yurui, Peter Schulze Lammers, Ma Daokun. Evaluation of a combined penetrometer for simultaneous measurement of penetration resistance and soil water content[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2004, 167(6): 745~751.
- 5 林剑辉, 孙宇瑞, 马道坤. 同步获取土壤介电与力学参数的实验系统[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 147~150.
Lin Jianhui, Sun Yurui, Ma Daokun. Experimental system for simultaneous collection of soil dielectric and mechanic parameters[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(5): 147~150. (in Chinese)
- 6 王惠文. 偏最小二乘回归方法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.