

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.041

氮磷钾配比施肥决策支持系统*

苑严伟 李树君 方宪法 伟利国 刘阳春

(中国农业机械化科学研究院土壤植物机器系统技术国家重点实验室,北京 100083)

摘要:为了解决传统施肥模式下化肥利用率低、氮磷钾施用量不合理等问题,研究了土壤取样策略及碱解氮、速效磷、速效钾等速效养分分布图生成方法,开发了基于作业处方图的变量配比施肥作业决策系统,结合GPS信息,分别控制氮、磷、钾3种肥料独立施肥机构的电动机转速,实现尿素、磷酸二铵和硫酸钾的按需施用。选取黑龙江红星农场5-2号地块,进行了大豆和玉米传统作业与配比施肥作业对比试验。结果表明,与传统作业模式相比,变量配比施肥在节省15%肥料的情况下,大豆增产2.33%,玉米增产9.32%。

关键词: 精准农业 配比施肥 处方图 决策支持系统 对比试验

中图分类号: S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)08-0240-05

Decision Support System of N, P and K Ratio Fertilization

Yuan Yanwei Li Shujun Fang Xianfa Wei Ligu Liu Yangchun

(State Key Laboratory of Soil-Plant-Machine System Technology, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the low utilization and unsuitable ratio of N, P and K in traditional fertilization, soil sample strategy and distribution maps of available nitrogen, phosphorus and potassium were studied. The variable rate fertilization decision support system was developed based on distribution maps. Combined with GPS information, the motor speed of independent fertilizer for N, P and K were controlled to make urea, diammonium phosphate and potassium sulfate be used as needed. The comparative experiment of traditional fertilization and ratio fertilization for corn and soybean in No. 5-2 plots of Heilongjiang Hongxing Farm was carried out. Results showed that, with ratio fertilization method, the yield of soybean and corn increased by 2.33% and 9.32% respectively in case of saving fertilizer of 15%.

Key words: Precision agriculture Ratio fertilization Map Decision support system Comparative experiment

引言

我国传统的肥料施用方式较粗放,将多种肥料混合一次完成施肥作业,化肥平均施用量已达434.3 kg/hm²,利用率仅为30%~35%,而美国平均施用量小于150 kg/hm²,利用率达到50%~60%。化肥利用率不高不仅造成经济上的巨大损失,而且

带来严重的地下水污染^[1~2]。常规施肥方式往往造成某些营养成分过剩,而其他营养成分缺失。精准施肥是根据土壤养分含量,实施按需变量施肥,可大大提高肥料利用率、减少肥料的浪费及对环境的不良影响。试验表明,相同产量条件下,精准施肥可使农资投入成本降低15%~20%,化肥施用量减少20%~30%^[3~4],经济、社会和生态效益显著。

收稿日期:2012-06-27 修回日期:2012-08-20

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA101902)、国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2012CB723704)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B06)和北京市科技新星计划资助项目(Z12110502512069)

作者简介:苑严伟,高级工程师,主要从事农业智能化装备研究,E-mail:yyw215@163.com

通讯作者:李树君,研究员,博士生导师,主要从事农业机械化工程研究,E-mail:lisj@caams.org.cn

变量施肥在国外已经有较多的研究和应用^[5-10]。我国在变量施肥机变量作业控制^[11-14]、定位与位置分析^[15-17]、信息采集等方面,都开展了较多研究。本文针对我国施肥存在的问题及农业生产实际,根据土壤养分测量结果制作土壤速效 N、P、K 分布图,研究变量配比决策支持系统,开发基于处方图的精准施肥控制系统,结合施肥机上安装的 GPS 接收机,控制各个肥箱的排肥轴电动机转速,实现尿素、磷酸二铵和硫酸钾的按需施用。

1 土壤取样策略与养分分布

1.1 作物种植模式与土壤取样

选取位于小兴安岭南麓、北纬 48°02' ~ 48°17'、东经 126°47' ~ 127°15' 的黑龙江省红星农场 5-2 号地块,属大陆性季风气候区,土壤属草甸黑土,黑土层厚度 0.3 ~ 0.5 m。在红星农场建立系统的应用示范,有一定规模和代表性。

红星农场大豆和玉米的种植模式是垄作,垄宽 1.1 m,切面呈等腰梯形,垄台宽 0.8 m,垄沟宽 0.3 m。单条垄上种植大豆共 4 行,行距分别为 0.2、0.4 和 0.2 m。单条垄上种植玉米 2 行,行距 0.6 m。

根据东北广泛种植的大豆和玉米作物垄作的特点,采用常规方法和变量施肥方法,进行施肥对比试验。在播种前的裸地上取样,取样点选在垄带上。结合本论文研制的变量施肥播种机特点,每隔 10 条垄选一条取样,每个垄带上,间隔 10 m 取 1 个土样,即按照 11 m × 10 m 的栅格,在栅格几何中心取样,采样深度为 0 ~ 0.20 m,共取 176 个样品。

为考察土壤养分分布的均匀性及采样密度对产量影响,选取其中一条垄带,间隔 1 m 取一个土样,即按照 1.1 m × 1 m 的栅格共取 20 个样品。

混合充分后,分别用国标法和快速测量法检测其中的碱解氮、速效磷、速效钾等养分的含量。具体养分数据,标记在对应的坐标点上,对原始数据进行统计分析,结果如表 1 所示。

表 1 土壤养分数据的统计特征

Tab. 1 Statistical characteristics of soil nutrient

养分类型	最小值 /mg·kg ⁻¹	最大值 /mg·kg ⁻¹	平均值 /mg·kg ⁻¹	变异系数 /%
碱解氮	217.88	470.37	388.47	11.95
速效磷	5.98	47.53	26.15	24.08
速效钾	102.97	367.89	264.52	17.61

从表 1 数据来看,试验地块养分分布很不均匀,变异系数大,肥力高的采样点,养分含量超过了高量指标;肥力低的采样点,养分含量较低。

1.2 土壤养分均匀度与采样密度分析

土壤养分分布均匀度采用克里斯琴森均匀度系数

$$C_{uc} = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |w_i - \bar{w}|}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{其中 } \bar{w} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{n} \quad (2)$$

式中 C_{uc} ——克里斯琴森均匀度系数, %
 n ——数据分析采用土壤样品的数量
 w_i ——第 i 个土壤样品的养分含量

分别抽取不同采样密度的土壤养分数据,由式(1)和(2)计算不同采样密度的土壤养分分布均匀度,结果如表 2 所示。

表 2 土壤养分分布均匀度与采样密度关系

Tab. 2 Relationship between uniformity and sampling density of soil nutrient distribution %

采样密度/m × m	碱解氮	速效磷	速效钾
110 × 100	84.11	77.88	83.95
55 × 50	86.85	80.71	85.49
22 × 20	89.23	82.46	88.21
11 × 10	92.04	87.49	90.86
5.5 × 5	93.20	88.90	92.42
1.1 × 1	94.09	90.81	92.61

从表 2 数据看出,当采样密度小于 11 m × 10 m 后,与更密的采样密度相比,土壤碱解氮数据稳定在 92% ~ 95% 区间内,速效磷数据稳定在 87% ~ 91% 区间内,速效钾数据稳定在 90% ~ 93% 区间内,养分分布均匀度差异减小,养分分布均匀度较为接近,本试验选用采样密度 11 m × 10 m。

由于采集到的土壤养分数据和坐标点都是离散的,要得到田块内连续的土壤速效氮磷钾需求量,需进行空间内插。IDW 法假设每个采样点有一个局部影响,此影响随着采样点到要素距离的增大而减少,距要素较近的点具有相对较大的权重,多用于地统计学分析。IDW 法可表示为

$$Z(x_0) = \frac{Z(x_i)}{\sum_{i=1}^n \frac{D_i^p}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i^p}}} \quad (3)$$

式中 $Z(x_0)$ —— x_0 点处土壤养分估计量
 $Z(x_i)$ ——第 i 个土壤样品养分含量
 p ——距离的幂,取 $p = 2$

D_i ——第 i 个采样点与待估计点之间的距离
 根据采样点土壤养分含量以及插值得到土壤养分分布图。

2 氮、磷、钾变量施肥决策支持系统

2.1 变量施肥决策

大豆是需肥较多的作物之一,每生产 100 kg 大豆籽实及其相应的茎叶荚壳等,需吸收纯氮(N) 8.2 kg(含生物固氮)、磷(P_2O_5) 1.5 kg、钾(K_2O) 3.2 kg。

玉米生长需要从土壤中吸收多种矿质营养元素,其中以氮素最多,钾次之,磷居第 3 位。每生产 100 kg 籽粒需从土壤中吸收纯氮 2.5 kg、 P_2O_5 1.2 kg、 K_2O 2.0 kg。

一般氮肥的平均利用率在 30% ~ 40% 之间,磷肥在 10% ~ 25% 之间,钾肥在 40% ~ 60% 之间;土壤有效养分校正系数为无肥区每公顷作物吸收的养分量乘以 100%;一般情况下土壤有效养分校正系数分别是碱解氮在 0.3 ~ 0.7 之间,有效磷在 0.4 ~ 0.5 之间;速效钾在 0.5 ~ 0.85 之间。大豆施肥量的计算方法为

$$U_N = \frac{V_N S - 0.15 w_s \mu_N}{w_f \eta_{Nf}} \quad (4)$$

式中 U_N ——施肥量 S ——目标产量

V_N ——作物单位产量养分吸收量

w_s ——土壤速效养分测试值

μ_N ——有效养分校正系数

w_f ——肥料中养分含量

η_{Nf} ——肥料利用率

其中肥料利用率取最大值和最小值的算术平均值。根据式(4)分别计算在不同作业点处土壤碱解氮、速效磷和速效钾的需求量。根据尿素、磷酸二铵及硝酸钾 3 种肥料中速效养分含量,得出配比施肥指导处方,生成大豆和玉米变量配比施肥处方图。本试验选择同一地块进行大豆和玉米的种植试验。精准农业变量配比施肥模式种植的玉米和大豆为相邻地块,位置关系如图 1 所示。

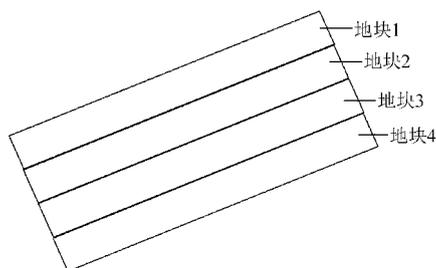


图 1 试验地块位置示意图

Fig. 1 Schematic of test plots location

地块 1 按常规模式种植玉米,地块 2 按精准农业变量配比施肥模式种植玉米,地块 3 按精准农业变量配比施肥模式种植大豆,地块 4 按常规模式种

植大豆。同时进行播种施肥试验,精准农业变量配比施肥模式种植的地块 2 和地块 3,生成了同一张作业处方图,如图 2 所示。

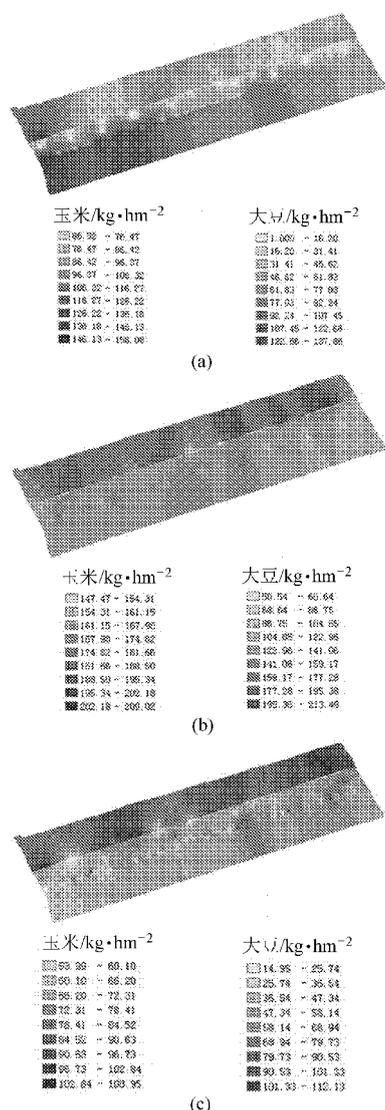


图 2 变量配比施肥处方图

Fig. 2 Map of variable ratio fertilization

(a) 氮 (b) 磷 (c) 钾

2.2 变量施肥反馈控制系统

土壤养分存在明显的变异是变量施肥研究的出发点和依据。在变量播种施肥机的车载计算机上装载作业区域的数字地图和施肥作业处方图,车载计算机通过 GPS 系统获得播种机所在位置的实时坐标,同时通过安装在播种机上的质量信号采集装置获得 3 对肥箱的质量信息,通过霍尔传感器获得播种机的行走速度,并送入车载计算机,如图 3 所示。

车载计算机通过 GPS 系统获得播种机所在位置的实时坐标,在施肥决策支持系统指导处方图中找到所在位置期望的尿素、磷酸二铵和硫酸钾的施肥量,传输到排种轴控制电动机及排肥轴控制电动机,实现变量播种和变量施肥。

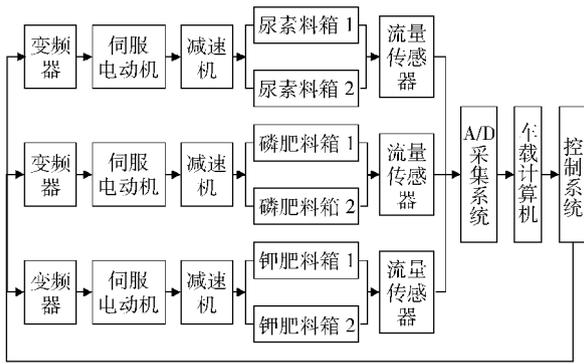


图 3 3 对肥箱及控制系统图

Fig. 3 Three pairs of fertilizer boxes and control system

控制系统采用 PID 反馈控制方法实现施肥量精准控制。采用伺服电动机作为执行机构,并选配速比为 50 的减速机用于驱动排种轴,将控制信号送于伺服电动机驱动器,调节排种轴转速,从而改变播种间距。选配速比为 40 的减速机驱动排肥轴,将施肥作业处方图和 GPS 信息送于施肥伺服电动机驱动器,调节排肥轴的转速,从而实现变量施肥作业。

3 试验与结果分析

3.1 施肥量数据对比

2011 年 4 月 28 日~2011 年 5 月 1 日,进行了大豆和玉米的播种施肥试验。播种前已在起垄后的裸地上采集了土壤样品,并进行了速效养分的化验。试验用土地面积共 33 hm²。选择其中的一半,按土壤养分所需进行配比施肥,另外一半按常规模式种植,其他试验条件、作物品种、气候、灌溉、田间管理等均按相同的方法。图 4 为播种施肥作业现场图。

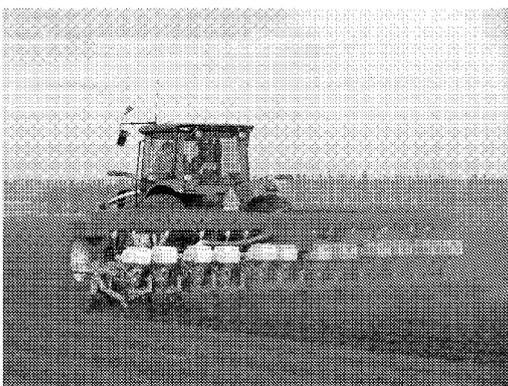


图 4 作业现场图

Fig. 4 Working pictures

按照本文所提的配比施肥的方法种植大豆面积 10.23 hm²,施用尿素 603.7 kg,磷酸二铵 1 535.8 kg,硫酸钾 672.4 kg;种植玉米面积 3.78 hm²,施用尿素 133.5 kg,磷酸二铵 565.8 kg,硫酸钾 371.4 kg。

按照常规种植模式种植大豆和玉米各 10 hm²

左右。通常大豆施肥量为尿素 120 kg/hm²,磷酸二铵 135 kg/hm²,硫酸钾 60 kg/hm²,玉米施肥量为尿素 50 kg/hm²,磷酸二铵 150 kg/hm²,硫酸钾 100 kg/hm²。实际施肥量数据对比如表 3 所示。

表 3 常规施肥与配比施肥量对比

Tab. 3 Fertilizing amount comparison of conventional fertilization and map fertilization

作物类别	肥料类别	常规施肥量/kg·hm ⁻²	配比施肥量/kg·hm ⁻²	配比与常规施肥量的比值
大豆	尿素	122.71	59.01	0.48
	磷酸二铵	138.13	150.13	1.09
	硫酸钾	61.44	65.73	1.07
玉米	尿素	53.75	35.32	0.66
	磷酸二铵	152.59	149.68	0.98
	硫酸钾	103.87	98.25	0.95

从表 3 可以看出,精准农业测土配比施肥方法对大豆磷酸二铵和硫酸钾的总体施肥量稍高于常规施肥量,但尿素的施用量基本节省一半。对玉米,各类肥料施用量均小于常规作业的肥料施用量。

3.2 产量与种植模式关系分析

为研究变量处方施肥对作物生长和产量的影响,分别对常规种植区域及变量处方施肥区域种植的大豆和玉米进行采样,区域为垄上(垄宽 1.1 m)1 m 长的矩形。对大豆和玉米分别随机选取 20 个采样区域进行,测量总质量、株数、豆荚数、玉米穗数、千粒质量等参数,求多个采样区域参数的平均值,得到玉米和大豆平均参数如表 4 所示。

表 4 取样区域内大豆和玉米参数

Tab. 4 Parameters of corn and soybean in sample area

作物种类	参数	常规施肥	配比施肥	配比与常规施肥的比值
大豆	株数	31	30	0.97
	豆荚数	620	607	0.98
	千粒质量/kg	0.181	0.189	1.04
	总质量/kg	0.23	0.25	1.09
玉米	株数	18	16	0.89
	玉米穗数	21	18	0.86
	千粒质量/kg	0.028	0.030	1.07
	总质量/kg	1.92	2.07	1.08

本试验选取的地块 1、地块 2、地块 3 和地块 4,具有同样的土质、作物品种、气候条件,种植的大豆和玉米,除施肥方式不同外,其他试验条件如灌溉、除草、喷药等田间管理均按相同的方法进行。具体产量数据如表 5 所示。

从表 4 和表 5 可以看出,与常规种植相比,在肥料施用量减少的情况下,精准农业按处方配比施肥种植的大豆,总产量大于常规种植的大豆。精准农业种植的玉米,总产量也大于常规种植的玉米。

表5 常规施肥与配比施肥产量对比

Tab.5 Yield comparison of conventional fertilization and map fertilization

作物类别	常规施肥产量 /kg·hm ⁻²	配比施肥产量 /kg·hm ⁻²	配比与常规施肥 增产比例/%
大豆	1 997.9	2 045.9	2.33
玉米	8 905.2	9 735.2	9.32

常规模式种植的玉米,出现多处倒伏现象,影响了整体产量。主要是由于钾肥分布不均,局部区域缺钾引起的。证明了按需施肥的必要性。

4 结论

(1)实现了土壤养分采集与作业处方图生成、根据处方图配比施肥等,精准农业测土配比施肥,磷酸二铵和硫酸钾的总体施肥量稍高于常规施肥量,但尿素的施用量基本节省一半。

(2)2011年试验按处方配比施肥种植的大豆增产2.33%,种植的玉米增产9.32%。

(3)配比施肥能够防止局部区域营养缺失,避免了因缺钾倒伏造成的减产。

参 考 文 献

- Lukina E V, Freeman K W, Wynn K J, et al. Nitrogen fertilization optimization algorithm based on in-season estimates of yield and plant nitrogen uptake[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2001, 24(6): 885 ~ 898.
- 苑严伟,张小超,吴才聪,等. 玉米免耕播种施肥机精准作业监控系统[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(8): 222 ~ 226.
Yuan Yanwei, Zhang Xiaochao, Wu Caicong, et al. Precision control system of no-till complanter [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(8): 222 ~ 226. (in Chinese)
- 陈劲憬,高丽红,曹之富. 施肥对设施土壤及作物生育的影响研究进展[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(增刊2): 16 ~ 21.
Chen Jinjing, Gao Lihong, Cao Zhifu. Present situation of the effect of fertilization measures on protected soil and crop [J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(Supp. 2): 16 ~ 21. (in Chinese)
- 孙先良. 科学配比施肥保护生态环境[J]. *大氮肥*, 2002, 25(4): 239 ~ 243.
Sun Xianliang. Scientific fertilizer compounding and fertilizer application to protect environment ecosystem [J]. *Large Scale Nitrogenous Fertilizer Industry*, 2002, 25(4): 239 ~ 243. (in Chinese)
- Fulton J P, Shearer S A, Stombaugh T S. Simulation of fixed and variable-rate application of granular materials[J]. *Transactions of the ASAE*, 2003, 46(5): 1 311 ~ 1 321.
- John P Fulton, Scott A Shearer, Steven F Higgins, et al. Comparison of VRT granular applicators[C]//2004 ASAE/CSAE Annual International Meeting, ASAE Paper 041113, 2004.
- Farooque A A, Zaman Q U, Schumann A W, et al. Delineating management zones for site specific fertilization in wild blueberry fields [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2012, 28(1): 57 ~ 70.
- Shoab R Saleem, Qamar Uz Zaman, Arnold W Schumann, et al. Impact of variable rate fertilization on ground water contamination in wild blueberry cropping system [C]//2011 ASABE Annual International Meeting, ASABE Paper 1110631, 2011.
- Geetika Dilawari, Randal K Taylor, John B Solie, et al. Nozzles for variable rate fertilizer application[C]//2008 ASABE Annual International Meeting, ASABE Paper 083732, 2008.
- Zhang Shuhui, Lan Yubin, Li Wei, et al. Variable rate fertilization for maize and its effects based on the site-specific soil fertility and yield [C]//2007 ASABE Annual Meeting, ASAC Paper 071066, 2007.
- 刘阳春,张小超,伟利国,等. 一种变量施肥技术的实现及其台架试验[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(9): 159 ~ 162.
Liu Yangchun, Zhang Xiaochao, Wei Liguang, et al. Design and experiment of a variable rate fertilization control system [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(9): 159 ~ 162. (in Chinese)
- 孙立民,王福林. 变量播种施肥技术研究[J]. *东北农业大学学报*, 2009, 40(3): 115 ~ 120.
Sun Limin, Wang Fulin. Research on variable rate seeding and fertilization technology [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2009, 40(3): 115 ~ 120. (in Chinese)
- 梁春英,衣淑娟,王熙,等. 变量施肥控制系统 PID 控制策略[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(7): 157 ~ 162.
Liang Chunying, Yi Shujuan, Wang Xi, et al. PID control strategy of the variable rate fertilization control system [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(7): 157 ~ 162. (in Chinese)
- 孟志军,赵春江,刘卉,等. 基于处方图的变量施肥作业系统设计与实现[J]. *江苏大学学报:自然科学版*, 2009, 30(4): 338 ~ 342.
Meng Zhijun, Zhao Chunjiang, Liu Hui, et al. Development and performance assessment of map-based variable rate granule application system [J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2009, 30(4): 338 ~ 342. (in Chinese)
- 于英杰,张书慧,齐江涛,等. 变量施肥机在不规则田块的定位方法[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(2): 158 ~ 161.
Yu Yingjie, Zhang Shuhui, Qi Jiangtao, et al. Positioning method of variable rate applicators in irregular field [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(2): 158 ~ 161. (in Chinese)

平面内温度有所差异,但在同一水平高度的温度场分布比较均匀,与图 5 温室内截面温度分布模拟云图吻合。

4 结论

(1) 建立了试验温室在冬季夜间供暖条件下的室内热环境模拟 CFD 模型,并对室内温度场分布进行了数值模拟。所得模拟结果与试验值吻合较好,各监测点误差均小于 3℃,除近壁面测点以外其余

各点相对误差均在 8% 以内,计算均方根误差为 0.66℃。说明所建立的 CFD 模型及其边界条件是有效的。

(2) 通过对整个试验温室进行热环境模拟,预测了温室内部空气的温度场分布。模拟结果表明:采用该热风供热系统可有效提高室内温度,植物生长区域温度范围是 12~17℃,且植物生长区域温度分布均匀,无较大梯度变化,所设计的温室风机盘管热风供热系统具有一定的实际应用价值。

参 考 文 献

- 1 Boulard T, Wang S. Experimental and numerical study on the heterogeneity of crop transpiration in a plastic tunnel[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 34(1~3): 173~190.
- 2 Kacira M, Sase S, Okushima L. Optimization of vent configuration by evaluating greenhouse and plant canopy ventilation rates under wind induced ventilation[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(6): 2 059~2 067.
- 3 童莉,张政,陈忠购,等. 机械通风条件下连栋温室速度场和温度场的 CFD 数值模拟[J]. 中国农业大学学报,2003,8(6): 33~37.
Tong Li, Zhang Zheng, Chen Zhonggou, et al. Simulation of mechanical ventilation for Huabei-type multispan plastic greenhouse [J]. Journal of China Agricultural University, 2003, 8(6):33~37. (in Chinese)
- 4 陈教料,胥芳,张立彬,等. 基于 CFD 技术的玻璃温室加热环境数值模拟[J]. 农业机械学报,2008,39(8):114~118.
Chen Jiaoliao, Xu Fang, Zhang Libin, et al. CFD-based simulation of the temperature distribution in glass greenhouse with forced-air heater[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(8):114~118. (in Chinese)
- 5 朱文见. 冬季供暖条件下连栋温室夜间热环境的 CFD 模拟[D]. 北京:中国农业大学,2005.
Zhu Wenjian. CFD simulation of the heat environment of multi-span greenhouse at night in winter under heating[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 6 陈教料,胥芳,张立彬,等. 基于热平衡模型的温室地表水源热泵系统供暖设计与试验[J]. 农业工程学报,2010,27(11): 227~231.
Chen Jiaoliao, Xu Fang, Zhang Libin, et al. Design and experiment of surface water-source heat pump system for greenhouse heating based on thermal balance model[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 227~231. (in Chinese)
- 7 Boulard T, Wang S. Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 100(1):25~34.
- 8 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001.
- 9 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004:120~124.
- 10 姚晔,连之伟,周湘江. 风机盘管换热器动态换热模型及计算机仿真[J]. 上海交通大学学报,2004,38(2):316~320.
Yao Ye, Lian Zhiwei, Zhou Xiangjiang. Dynamic model and simulation of fan-coil heat exchanger[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(2): 316~320. (in Chinese)
- 11 尹应德,张冷,兰丽,等. 风机盘管的模拟、调节和节能分析[J]. 制冷与空调,2005,5(1):41~45.
Yin Yingde, Zhang Ling, Lan Li, et al. Stable simulation, adjustment and energy-conservation analysis of the fan coil[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2005, 5(1): 41~45. (in Chinese)

(上接第 244 页)

- 16 孟志军,赵春江,付卫强,等. 变量施肥处方图识别与位置滞后修正方法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 204~209.
Meng Zhijun, Zhao Chunjiang, Fu Weiqiang, et al. Prescription map identification and position lag calibration method for variable rate application of fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 204~209. (in Chinese)
- 17 齐江涛,张书慧,于英杰,等. 基于蓝牙技术的变量施肥机速度采集系统设计[J]. 农业机械学报,2009, 40(12): 200~204.
Qi Jiangtao, Zhang Shuhui, Yu Yingjie, et al. Development of a ground speed collecting system for the variable rate fertilizer machine based on bluetooth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12):200~204. (in Chinese)
- 18 苑严伟,张小超,吴才聪,等. 平移式喷灌机同步行走控制雨量分布仿真[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(5):603~608.
Yuan Yanwei, Zhang Xiaochao, Wu Caicong, et al. Simulation of water spraying lateral distribution in synchronously controlled moving linear move irrigators[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(5):603~608. (in Chinese)