

# 冬小麦精准追肥机专家决策系统\*

陈满<sup>1</sup> 施印炎<sup>1</sup> 汪小岳<sup>1,2</sup> 孙国祥<sup>1,2</sup> 李雪<sup>1</sup>

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 江苏省现代设施农业技术与装备工程实验室, 南京 210031)

**摘要:** 为了实现小麦生长过程中的实时变量追肥,研究了光谱数据处理策略及目标追肥量的计算模型,开发了基于近地光谱探测技术的实时变量追肥专家决策系统,结合小麦冠层归一化植被指数(NDVI)、追肥机实际行进速度和肥料反馈量,双通道独立控制施肥机构的转速和开度,从而实时调整追肥量,实现精准变量追肥。试验结果表明,专家决策系统的控制精度达到90%以上,可以满足精准追肥的要求;拔节期,变量追肥比定量均匀施肥增施氮肥28 kg/hm<sup>2</sup>左右;变量施肥有利于改善小麦群体结构,降低产量差异性。

**关键词:** 冬小麦 变量追肥 专家决策系统 实时控制 归一化植被指数

**中图分类号:** S127; S147.32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)07-0017-06

## Expert Decision System of Precision Fertilizer for Winter Wheat

Chen Man<sup>1</sup> Shi Yinyan<sup>1</sup> Wang Xiaochan<sup>1,2</sup> Sun Guoxiang<sup>1,2</sup> Li Xue<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. Jiangsu Province Engineering Laboratory for Modern Facilities Agricultural Technology and Equipment, Nanjing 210031, China)

**Abstract:** In order to achieve real-time variable dressing in wheat jointing stage, spectral data processing strategy and expected fertilizer quantity calculation model were studied. The variable rate fertilization expert decision system was developed based on crop canopy real-time spectral information (Normalized differential vegetation index, NDVI). Combined with NDVI information, actual traveling speed of dressing machine and feedback amount of fertilizer, the dual-channel independently controlled the speed and the opening of institutions to real-time adjust the amount of fertilization. The comparative experiments of ratio fertilization and traditional fertilization for winter wheat with different base fertilizer rates in Jiangsu Huanghai Farm were carried out. In order to improve the efficiency of expert decision system, the optimal data processing strategy was analyzed. Results showed that the best data processing frequency of the expert decision system was 1 Hz. Using more fertilizers was beneficial to promote the winter wheat individual growth, but it was not conducive to the structure of the group. The variation coefficient of NDVI in control area was the largest, as high as 11.32%. Variable fertilizer could effectively reduce the variation coefficient of NDVI, decreased by up to 3.57% and the average of 1.46%. The fertilization precision can reach above 90%. Variable rate fertilizer applied more nitrogen (28 kg/hm<sup>2</sup>) than quantitative fertilization. Variable rate fertilization would help to improve wheat population structure and reduce the yield differences. Therefore, the expert decision system was favorable, and could achieve precise fertilization in the precision agriculture.

**Key words:** Winter wheat Variable rate fertilization Expert decision system Real-time control Normalized differential vegetation index

收稿日期: 2014-10-08 修回日期: 2014-11-11

\*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2013BAD08B04-8)和江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(KYLX\_0518)

作者简介: 陈满, 博士生, 主要从事检测技术及自动化装置研究, E-mail: chm\_world@163.com

通讯作者: 汪小岳, 教授, 博士生导师, 主要从事农业生物环境模拟与控制等研究, E-mail: wangxiaochan@njau.edu.cn

## 引言

氮是影响小麦生长发育最为活跃的因素,合理施用氮肥有利于提高小麦的产量和品质<sup>[1-2]</sup>。然而,目前我国氮肥施用多停留在经验施肥水平上,投入量逐年增加,利用率却仅为30%~50%,远低于发达国家的50%~80%<sup>[3]</sup>,氮肥的增产增质特性并未得到充分发挥,反而造成肥料的浪费和环境污染,在一些区域已出现水体污染、土壤板结等问题<sup>[4]</sup>。因此,实施科学的变量氮肥管理是农业可持续发展的必要措施和亟待解决的问题<sup>[5]</sup>。

国外较早开展有关变量施氮的研究和应用<sup>[6-8]</sup>,现已达到较高水平,并有商品化的集成设备供应市场<sup>[9]</sup>。国内在这一方面的研究起步较晚,现主要集中在测土配方变量施氮的作业控制<sup>[10-11]</sup>、定位与处方图分析<sup>[12-13]</sup>、管理决策系统<sup>[14-15]</sup>等方面,而较少涉及基于实时控制的精准追氮技术研究。因此,针对我国小麦追氮存在的问题及作业工况,根据光谱系统监测小麦冠层的归一化植被指数(NDVI),依托冬小麦精准追氮专家决策系统计算出目标追肥量,研究设计了冬小麦变量追肥机械<sup>[16]</sup>,为了提高该机械的性能,本文研究设计其相配套的专家决策系统,结合追肥机实时行进速度和肥料反馈量,实时控制排肥轴电机转速和排肥器开度,实现小区域尿素的按需施用,达到精准变量追肥的目标。

## 1 光谱采集与小麦群体分布

### 1.1 小麦种植模式与光谱采集

选取黄河流域与长江流域之间,北纬34°13'~34°22'、东经119°48'~119°58'的江苏省黄海农场二分厂地块,该地属于亚热带海洋性季风暖湿气候带,土壤属盐土类,均为粘壤土,土壤养分含量低。在黄海农场建立系统的应用示范,具有一定规模和代表性。

目前,黄海农场基本形成一年两熟耕作制度,农作物以稻麦轮作为主,基本实现全程机械化生产。小麦主要采用机械化条播,行距17~20 cm,施用尿素(225 kg/hm<sup>2</sup>)和磷酸氢二铵(150 kg/hm<sup>2</sup>)作为底肥,拔节期机械化追施氮肥(尿素,300 kg/hm<sup>2</sup>)。

根据小麦种植拔节期广泛追施氮肥的特点,采用传统和变量追肥两种方式,进行追氮对比试验。试验区规划如图1所示,划分为5个作业区,重复3次,分别为空白对照区CK(CK-0、CK-1、CK-2)、施用1/3当地常规底肥区FA(FA-0、FA-1、FA-2)、施用2/3当地常规底肥区FB(FB-0、FB-1、FB-2)、施用当地常规底肥区FC(FC-0、FC-1、

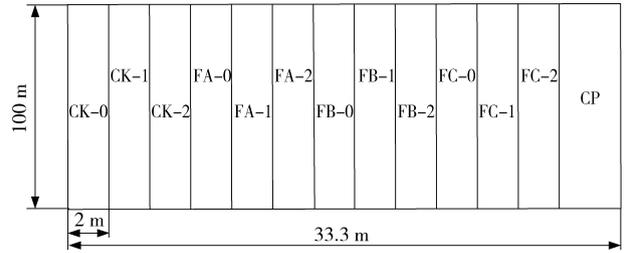


图1 试验地块规划示意图

Fig. 1 Schematic of test plots planning

FC-2)以及传统作业区CP。传统方式拔节期均匀增施尿素300 kg/hm<sup>2</sup>。变量施肥方式则利用安装在横向距离拖拉机前鼻翼1.2 m、纵向距离作物冠层0.8 m处的固定装置上6个光谱传感器(美国Trimble公司的Model 500 GreenSeeker Sensor)监测小麦冠层的归一化植被指数,再由专家决策系统实时计算出目标施肥量,进而实时控制各电动机转速和排肥器有效开度调整施肥量。光谱系统的采样频率 $f$ 为0.7~33.3 Hz。结合项目组研制的变量追肥机的特点,确定光谱系统的采样频率为2 Hz。

对3月7日光谱系统采样的原始数据进行统计分析,结果如图2所示。统计结果表明:试验地块小麦拔节期冠层的NDVI呈不均匀分布,变异系数CV大。NDVI是群体结构的一个重要指标,由图可知试验区小麦未形成合理的群体结构。施用当地传统标准底肥的地块,NDVI的均值最高,高达0.546,个体长势最优,然而其变异性也最大,高达11.46%,群体结构也最差;无底肥施用的地块,NDVI最低,低至0.467,个体长势较差,而其变异性相对较小,但仍在8.22%以上,群体结构也较差。因此,小麦个体长势和群体结构均存在空间差异性,传统均匀追肥存在不合理性,无法实现氮肥的按需供给,易造成氮肥的浪费和环境污染,科学地精准变量施肥的研究迫在眉睫。

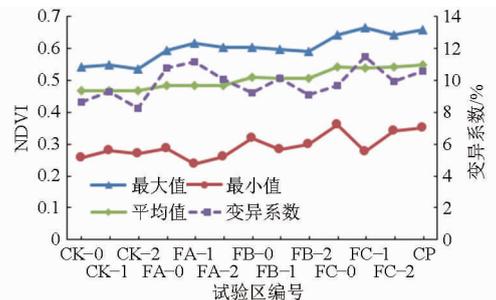


图2 光谱数据(NDVI)的统计特征

Fig. 2 Statistical characteristics of NDVI

### 1.2 群体均匀度与决策系统采样频率分析

追肥作业时,追肥机以4.5 km/h左右的速度行进,光谱监测系统的采样频率 $f$ 为2 Hz,追肥作业时可以获得大量的光谱数据,从而更精确客观地反映

田间小麦的群体结构。但海量的数据处理,必然对决策系统的硬件和软件设计提出更高的要求。在不改变小麦群体结构均匀度和变异系数的前提下,选取最优的系统采样频率  $f_s$ ,可以减少系统的数据处理量,提高系统性能。小麦群体结构均匀度采用克里斯琴森均匀度系数衡量,即

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

其中  $\bar{w} = \sum_{i=1}^n w_i / n$

式中  $\bar{w}$ ——样本均值

$n$ ——光谱分析得到的 NDVI 个数

$w_i$ ——第  $i$  个 NDVI

设定抽样频率  $f_s$  分别为 2、1、0.5、0.25、0.125 Hz 分析光谱系统的样本数据,由克里斯琴森均匀度系数计算不同  $f_s$  下小麦群体结构均匀度并统计变异系数,如表 1 所示。结果表明:调整  $f_s$  对样本均匀度影响不大,其稳定保持在 90% ~ 96% 之间;但对变异系数 CV 产生重大影响,最大值为 13.85% (0.25 Hz, FB-0),最小值为 4.81% (0.125 Hz, FB-2),最大差值为 8.35% (FB-2),最小差值为 1.91% (FC-2)。因此,  $f_s$  的选择是否合理对专家决策系统至关重要。

表 1 群体结构分布均匀度与采样频率的关系

Tab. 1 Relationship between uniformity and sampling frequency

%

采样频率 $f_s$ /Hz	测试项	试验区域											
		CK-0	CK-1	CK-2	FA-0	FA-1	FA-2	FB-0	FB-1	FB-2	FC-0	FC-1	FC-2
2	CV	8.60	9.26	8.22	10.76	11.15	10.01	9.20	10.11	9.06	9.68	11.46	9.88
	$C_{uc}$	93.84	93.32	94.17	92.10	92.00	92.89	93.17	92.57	93.35	92.56	91.67	92.64
1	CV	7.93	8.48	7.93	11.16	11.39	10.24	10.74	11.73	10.71	9.97	10.10	9.46
	$C_{uc}$	93.97	93.41	94.30	91.65	91.86	92.74	92.23	91.59	92.23	92.60	92.48	93.17
0.5	CV	8.37	10.06	8.60	13.13	12.17	11.69	11.17	10.76	10.35	9.45	9.66	9.11
	$C_{uc}$	94.05	91.93	93.41	90.58	92.46	92.52	92.13	92.86	92.82	92.86	92.68	93.08
0.25	CV	9.75	11.88	10.21	11.32	7.62	7.97	13.85	13.56	13.16	10.54	9.99	9.92
	$C_{uc}$	92.94	90.48	92.20	90.89	94.43	93.43	90.49	91.41	91.11	91.97	92.32	92.14
0.125	CV	6.11	5.91	5.84	11.43	8.05	7.98	5.95	5.91	4.81	7.63	9.14	8.01
	$C_{uc}$	95.34	95.31	95.32	91.28	94.24	94.01	95.30	95.87	96.05	94.12	92.98	93.55

各处理小区的样本均匀度和变异系数的统计分析如图 3 所示,结果表明:相对于其他频率,当  $f_s$  设定为 1 Hz 时,样本容量减少一半,而样本的均匀度

和变异系数与原始数据的差别最小。因此,本决策系统的  $f_s$  设定为 1 Hz,这样在满足试验要求的情况下,能最优化地实现系统功能。

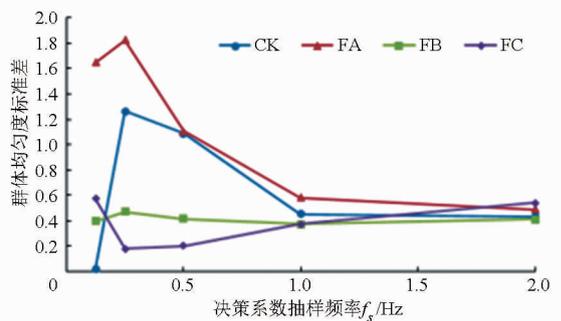
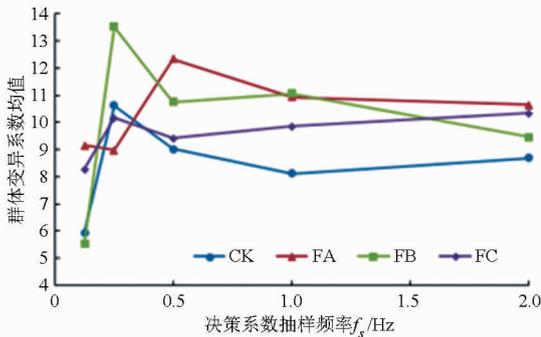


图 3 均匀度与变异系数的统计特征

Fig. 3 Statistical characteristics of uniformity and CV

## 2 精准追氮专家决策系统

### 2.1 变量追肥决策

追肥算法是变量追肥决策系统的核心部分,本系统利用改进的氮肥优化算法计算小麦目标追氮量<sup>[17-19]</sup>,具体计算方法如下:

(1) 氮肥需要量  $R$  计算公式(单位  $\text{kg}/\text{hm}^2$ )为

$$R = 23.9 \frac{Y_{PN} - Y_{P0}}{0.45\eta} \quad (2)$$

式中  $Y_{P0}$ ——没有追施氮肥的农田潜在产量  
 $Y_{PN}$ ——追施氮肥后农田的潜在产量  
 $\eta$ ——与氮肥利用率有关的常数,取值范围为 0.5 ~ 0.7,系统使用推荐值 0.6  
 23.9 为小麦的含氮量;0.45 是尿素的含氮量。

(2) 没有追施氮肥的农田潜在产量  $Y_{P0}$  的估算 (单位  $t/hm^2$ )

$$Y_{P0} = 0.359e^{324.4M_{INSEY}} \quad (3)$$

式中  $M_{INSEY}$ ——当季估产系数

(3) 当季估产系数  $M_{INSEY}$  的计算式为

$$M_{INSEY} = \frac{I_{NDVI-FieldRate}}{D_{above0}} \quad (4)$$

式中,  $D_{above0}$  为从播种到光谱测定之日平均气温稳定高于  $0^\circ C$  的天数。由于变量追肥试验是在江苏黄海农场进行, 根据该季的气象资料显示, 从 11 月 1 日到 3 月 7 日平均气温稳定高于零度的时间<sup>[17-18]</sup> 为 82 d。  $I_{NDVI-FieldRate}$  为 3 月 7 日那天利用光谱监测系统测定的试验区小麦冠层的 NDVI, 并且当  $I_{NDVI-FieldRate}$  值小于 0.25 时,  $R$  为 0。

(4) 追施氮肥后农田潜在产量  $Y_{PN}$  的计算 (单位  $t/hm^2$ )

Raun 等<sup>[18]</sup> 介绍的算法中  $Y_{PN}$  是一个变量, 它与氮素富有的试验区小麦冠层的 NDVI 有关, 其表述为

$$Y_{PN} = \begin{cases} Y_{P0} K_{NDVI} & (I_{NDVI-FieldRate} \geq 0.25; Y_{P0} K_{NDVI} \leq Y_{Pmax}) \\ Y_{Pmax} & (Y_{P0} K_{NDVI} \geq Y_{Pmax}) \end{cases} \quad (5)$$

其中  $K_{NDVI} = I_{NDVI-NRich} / I_{NDVI-FieldRate}$

式中  $K_{NDVI}$ ——光谱响应指数

$Y_{Pmax}$ ——极限产量

$I_{NDVI-NRich}$ ——氮素富有区小麦冠层的 NDVI

由于小麦实际生产中无法设置氮素富有区, 因此以黄海农场普遍种植的淮麦 19 的平均产量表示

追氮后试验区的潜在产量, 取  $Y_{PN}$  为  $6.73 t/hm^2$ 。

(5) 根据排肥器的排量调节机构的响应特性将期望追肥量划分为 11 个等级, 如图 4 所示, NDVI 低于 0.25 和高于 0.75 的区域追肥量为 0, NDVI 在 0.25 和 0.75 之间的间隔按 0.5 划分为一个等级 (例如 (0.25, 0.3] 为一个等级, 此等级的追肥量将由 NDVI 为 0.3 确定), 依此规则进行变量追肥。

## 2.2 变量追肥调控系统

小麦群体结构存在明显差异和精准按需供肥具有突出优势是变量追肥研究的出发点和依据。在变量追肥机的车载 WQT\_T8060\_104 组态型多功能一体机上装载追肥决策系统, 车载多功能一体机通过光谱监测系统获得追肥机所处位置小麦冠层的 NDVI, 同时通过速度传感器和位移传感器获得排肥器的实时排量, 以及通过霍尔传感器获得追肥机的行进速度, 并存储各信息, 如图 5 所示。决策系统计算出所处位置期望追肥量, 并对比由各传感器反馈的实际追肥量, 智能地控制直流电动机和步进电动机, 从而调整追肥量, 实现变量追肥。

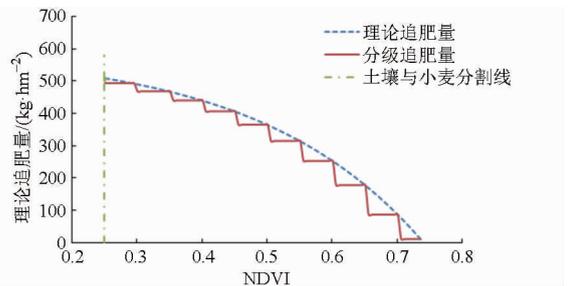


图 4 理论追肥量与 NDVI 的关系

Fig. 4 Relationship between fertilizing amount and NDVI

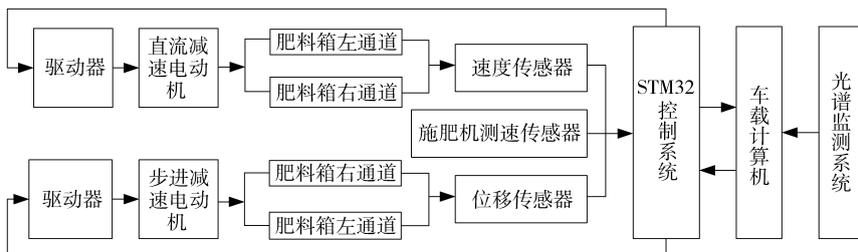


图 5 变量追肥原理图

Fig. 5 Schematic diagram of variable rate fertilization

## 2.3 软件流程图

系统程序采用模块化结构设计, 主要由主程序模块及相应子程序模块组成, 如图 6 所示。主程序主要完成系统上电自检、初始化、子程序调用等, 为系统工作做好准备。子程序模块包括: SD 卡模块、GPS 模块、光谱模块、测速模块、直流电动机 PWM 控制模块、步进电动机循环运行模块、输入/输出/显示模块等。系统主程序工作过程为: 追肥机在田间作业时, 系统实时调用 GPS 位置信息, 确定当前位

置; 实时调用光谱信息, 确定当前 NDVI; 当系统确定执行追肥作业, 光谱模块的 NDVI 输入控制器, 计算出期望追肥量, 测速传感器模块的车速、电动机转速和位移传感器排肥器有效开度同时反馈输入控制器, 监测实际追肥量; 由决策卡确定开度优先还是转速优先的追肥策略, 控制直流电动机或者步进电动机工作, 实施追肥作业; 显示模块实时监测当前 GPS 信息、行进速度、电动机转速、排肥器开度及追肥量等信息; 追肥判断模块实时检测当前追肥作业是否

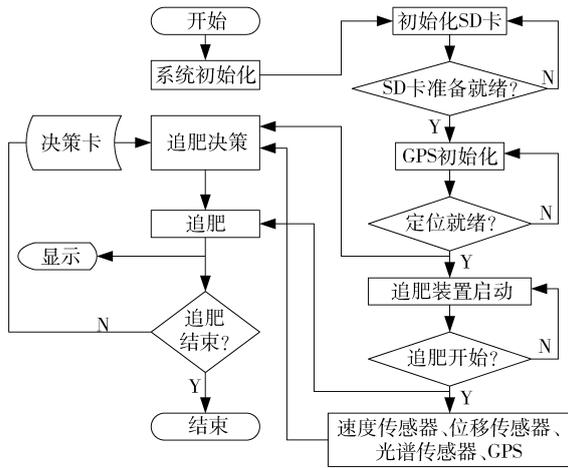


图6 控制系统主程序设计流程图

Fig.6 Main program flow diagram of control system

结束,如未结束则继续以上工作循环。

### 3 试验与结果分析

相关试验在江苏省黄海农场二分厂进行,试验田面积为 0.33 hm<sup>2</sup>,试验区作业规划如图 1 所示。2013 年 11 月 1 日试验田统一播种小麦,品种为淮麦 19,并施用相应的底肥,成分为尿素和二酰氨混合肥。2014 年 3 月 7 日对该试验田分区域进行追肥试验,通过称量施肥前后肥箱内的肥料差值,得到各区域的实际追肥量。2014 年 3 月 28 日利用 GreenSeeker 再次测量试验小区小麦冠层的光谱信息,分析追肥对群体结构差异性的影响。2014 年 6 月 6 日小麦成熟期分别在各小区收获 5 m<sup>2</sup>,重复 3 次,脱粒测产。

#### 3.1 群体结构差异性分析

图 7 为 3 月 28 日测量得到的小麦冠层 NDVI

的统计图。统计结果表明:试验区小麦冠层的 NDVI 仍然呈现不均匀分布,但相比 3 月 7 日变异系数却呈现区域性改变。在所有试验区中,空白对照小区,NDVI 的均值最低,仅有 0.671,而变异系数却最大,高达 11.32%,增加了 3%;常规作业区,NDVI 的均值为 0.803,变异系数为 10.21%,仅降低了 0.33%;精准追肥区,NDVI 的变异系数明显降低,最高降幅为 3.57%,平均减小 1.46%。这说明根据拔节期小麦冠层的 NDVI 对小麦实施精准变量追氮后小区内的生长差异性减小。因此,利用该方式进行小麦追氮是可行的,有利于改善小麦的群体结构。

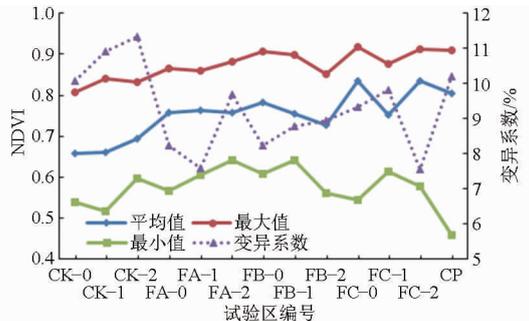


图7 NDVI的统计特征(3月28日)

Fig.7 Statistical characteristics of NDVI (03-28)

#### 3.2 追肥量数据分析

追肥量数据如表 2 所示,结果表明:追肥系统控制精度达到 90% 以上,能够达到精准追肥的要求;由追肥决策系统计算得到的理论追肥量,随着底肥施用量的减少而增大;变量追肥的施用量要略大于当地传统的定量均匀追肥(300 kg/hm<sup>2</sup>),增施氮肥 28 kg/hm<sup>2</sup>左右;但是该变量追肥决策系统在小麦生产中仅增施拔节肥,而传统作业还增施返青肥等。

表 2 田间试验数据

Tab.2 Field experiment data

试验小区编号	肥料类型	施肥面积/m <sup>2</sup>	理论追肥量/kg	实际追肥量/kg	误差/kg	控制误差/%
FA	尿素	600	22.0	23.6	1.6	7.27
FB	尿素	600	20.2	21.9	1.7	8.42
FC	尿素	600	18.9	20.0	1.1	5.82

#### 3.3 产量分析

表 3 对各试验小区的小麦产量进行了比较,从表中可以看到,精准追肥小区产量的变异系数明显小于空白对照区和常规管理区;精准追肥小区的小麦群体结构优,产量趋于均衡,而传统作业区小麦群体结构差,产量的变异性较大;精准追肥区的产量略

表 3 产量统计

Tab.3 Yield statistics

参数	CK	FA	FB	FC	CP
采样均产量/kg	3.01	3.06	3.16	3.51	3.56
变异系数/%	15.2	9.10	8.69	7.31	11.3
产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	6 000.6	6 125.3	6 312.5	7 000.2	7 125.1

低于常规管理区,但产量仍能达到 7 000.2 kg/hm<sup>2</sup>,基本实现小麦的高产;随着底肥施用量的增加,小麦产量也相应提高。

### 4 结论

(1) 实现了小麦冠层 NDVI 采集与相应追肥量的计算、实时控制追肥机构变量追肥等功能,拔节期变量追肥比定量施肥增施氮肥 28 kg/hm<sup>2</sup>左右,追肥决策系统控制精度达到 90% 以上。

(2) 变量追氮有效改善了小麦的群体结构,精准变量追肥作业区追肥后小麦群体变异系数均值为 8.68%,低于常规作业区的 10.21%;精准变量追肥

产量的变异性小,低于10%,产量略低于常规管理区,但仍达到7000.2 kg/hm<sup>2</sup>,基本实现小麦的高产。

统的性能,分析了决策系统的最佳数据处理频率,最终选择处理频率为1 Hz,既降低了系统数量处理量,又可以客观反映小麦群体结构特点。

(3) 为了减少决策系统的数据处理量,提高系

### 参 考 文 献

- 张杰,王备战,冯晓,等. 氮肥调控对冬小麦干物质质量、产量和氮素利用效率的影响[J]. 麦类作物学报,2014,34(4):516-520.  
Zhang Jie, Wang Beizhan, Feng Xiao, et al. Effect of nitrogen fertilizer management on the dry matter quantity, yield and N utilization in winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops,2014,34(4):516-520. (in Chinese)
- 胡卫丽,王永华,李刘霞,等. 氮密调控对两种穗型冬小麦品种茎秆干物质积累与转运的影响[J]. 麦类作物学报,2014,34(6):808-815.  
Hu Weili, Wang Yonghua, Li Liuxia, et al. Effect of nitrogen and plant density on dry matter accumulation and translocation in main stem and tillers of two spike-types of winter wheat varieties[J]. Journal of Triticeae Crops,2014,34(6):808-815. (in Chinese)
- 张睿. 智能型变量施肥关键技术研究[D]. 北京:中国农业科学研究院,2011.
- 孙国祥,陈满,汪小昆,等. 变量施肥机关键技术研究现状分析[J]. 江苏农业科学,2014,42(2):333-339.
- 张涛,赵洁. 变量施肥技术体系的研究进展[J]. 农机化研究,2010,32(7):233-236.  
Zhang Tao, Zhao Jie. Research progress of technology system of variable-rate fertilization[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(7): 233-236. (in Chinese)
- Maleki M R, Mouazen A M, Ramon H, et al. Optimisation of soil VIS-NIR sensor-based variable rate application system of soil phosphorus[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 94(1): 239-250.
- Aguilera E, Lassaletta L, Sanz-Cobena A, et al. The potential of organic fertilizers and water management to reduce N<sub>2</sub>O emissions in Mediterranean climate cropping systems. A review[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 164: 32-52.
- Basso B, Ritchie J T, Cammarano D, et al. A strategic and tactical management approach to select optimal N fertilizer rates for wheat in a spatially variable field[J]. European Journal of Agronomy, 2011, 35(4): 215-222.
- 段洁利,李君,卢玉华. 变量施肥机械研究现状与发展对策[J]. 农机化研究,2011,33(5):245-248.  
Duan Jieli, Li Jun, Lu Yuhua. Research status and development countermeasure of variable rate fertilization machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2011,33(5):245-248. (in Chinese)
- 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 Liguo, 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)
- 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,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)
- 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)
- 马晓蕾,范广博,李永玉,等. 精准施肥决策模型与数据库系统[J]. 农业机械学报,2011,42(5):193-197.  
Ma Xiaolei, Fan Guangbo, Li Yongyu, et al. Establishment of precision fertilization decision-making model and database system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 193-197. (in Chinese)
- 苑严伟,李树君,方宪法,等. 氮磷钾配比施肥决策支持系统[J]. 农业机械学报,2013,44(8):240-244.  
Yuan Yanwei, Li Shujun, Fang Xianfa, et al. Decision support of N, P and K ratio fertilization[J]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 240-244. (in Chinese)
- 陈满,施印炎,汪小昆,等. 基于光谱探测的小麦精准追肥机设计与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(5):26-32.  
Chen Man, Shi Yinyan, Wang Xiaochan, et al. Design and experiment of variable rate fertilizer applicator based on crop canopy spectral reflectance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(5):26-32. (in Chinese)
- 杨玮,王秀,马伟,等. 基于近地光谱探测技术的冬小麦变量施肥[J]. 吉林大学学报:工学版,2007,37(6):1455-1459.  
Yang Wei, Wang xiu, Ma Wei, et al. Variable-rate fertilizing for winter wheat based on canopy spectral reflectance[J]. Journal of Jilin University:Engineering and Technology Edition,2007,37(6):1455-1459. (in Chinese)
- 薛忠财,高辉远,柳洁,等. 利用光谱反射技术监测不同地力和施肥条件下小麦生长和产量的变化[J]. 麦类作物学报,2011,31(2):324-330.  
Xue Zhongcai, Gao Huiyuan, Liu Jie, et al. Monitoring growth and grain yield of wheat in fields with different soil fertility levels and different fertilizer application using spectral reflectance technique[J]. Journal of Triticeae Crops, 2011, 31(2): 324-330. (in Chinese)
- Raun W R, Soil J B, Stone M L, et al. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization[J]. Soil Science and Plant Analysis, 2005, 36(19-20):2759-2781.