植物营养与肥料学报 2014,20(3):726-736
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0326

基于施肥处方的烤烟变量施肥机设计及应用

张云贵[1], 邱建军[1], 李志宏[1*], 蒋 卫[2],
李 强[3], 王 刚[4], 刘青丽[1], 夏 昊[1], 梁永江[2], 丁 伟[2], 张长华[2]
(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2 贵州省烟草公司遵义市公司, 遵义 563000;
3 北京东方优国途科技有限公司, 北京 100088; 4 中国烟叶公司, 北京 100055)

摘要: 采用土壤网格采样法研究了贵州省烟草公司遵义乐山科技园内土壤的变异状况,提出了相对应的肥料变量处方。以小型手扶拖拉机为施肥机载体,组装了变量施肥机具,并对其自动实施和施肥效果进行了田间验证,形成了完整的变量施肥技术体系和施肥机。试验结果表明,烤烟变量施肥较农户习惯施肥可节省肥料 4.6%; 提高烤烟的整齐度,变量施肥烤烟株高的变异系数下降 29.6%,上等烟率和下等烟率同步减少,而中等烟率增加 13.05%; 增加农户收益,变量施肥产值较农户习惯施肥增加 4310.65 元/hm^2。变量施肥对提高肥料资源效率、农民增收具有重要意义。

关键词: 变量施肥机; 精准农业; 烟草
中图分类号: **文献标识码**: A **文章编号**: 1008-505X(2014)03-0726-11

Design and testify of a sell-manufactured fertilization machine for tobacco variable fertilization based on soil nutrient variation

ZHANG Yun-gui[1], QIU Jian-jun[1], LI Zhi-hong[1*], JIANG Wei[2], LI Qiang[3],
WANG Gang[4], LIU Qing-li[1], XIA Hao[1], LIANG Yong-jiang[2], DING Wei[2], ZHANG Chang-hua[2]
(*1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2 Zunyi Tobacco Company of Guizhou Province, Zunyi, 563000, China; 3 Beijing Oriental Youguotu Technology Co. Ltd, Beijing 100088, China; China Tobacco Leaf Company, Beijing 100055, China*)

Abstract: Using small manual tractor as the carrier, a automatic fertilization machine with necessary parts and softwares was designed and manufactured. Its availability and the yield and economic profit obtained through variable fertilization were testified in tobacco at Leshan Tobacco Hi-tech Park in Zunyi City, Guizhou Province. The soil nutrient variation was studied by sampling soils in grid, and fertilizer application rates of N, P and K prescription were made and automatic implementation of variable fertilization rate was achieved using the small machine. The results show that variable fertilization rate can save 4.6% of fertilizer amount compared to even fertilization, the variation in tobacco plant heights decline 29.6%, improving the uniformity of flue-cured tobacco. The proportion of the first-grade and low-grade commercial flue-cured tobacco was all decreased, and middle-grade was increased by 13.05%. Through variable fertilization, the farmers' profit can increase 4310.65 yuan/ha compared with even fertilization. In conclusion, the variable fertilization machine is effective and practical in decreasing labor and fertilizer input, and increases the fertilizer resource efficiency and farmers' income.
Key words: variable fertilization machine; precision agriculture; tobacco

收稿日期: 2013-06-17 **接受日期**: 2013-09-23
基金项目: 中国烟草总公司科技重点项目(110200902062); 贵州省烟草公司遵义市公司科技项目(2011-02)资助。
作者简介: 张云贵(1967—), 男, 湖南汉寿人, 副研究员, 主要从事养分管理研究。E-mail: zhangyungui@caas.cn
* 通信作者 E-mail: lizhihong@caas.cn

变量施肥,即把适当的肥料品种和肥料用量投入到正确的位置,是提高肥料利用效率,降低农田环境污染风险的有效方法之一[1]。变量施肥作为精准农业的标志性技术,上世纪七十年代最早出现在美国的明尼苏达州立大学,之后逐渐在北美、欧洲、澳洲已经得到大面积应用,如美国中西部典型的农业州北达科他州(North Dakota)有 22.7% 的种植业农场应用精准农业技术[2-3],2011 年,澳大利亚有 20% 的农场主采用变量施肥技术,施肥变化幅度达到 11%～35%[4-5]。我国开展变量施肥技术研究的时间和法国基本同期,北京农业信息技术研究中心和中国农科院土壤肥料研究所共同研制了大型变量施肥机(型号：2F-VT1)[6],吉林大学生物与农业工程学院研制玉米变量施肥机并在玉米上进行变量施肥的增产效应的试验研究[7],中国农业大学、上海交通大学、吉林农业大学等也进行了相关研究。一般来说,精准农业技术包括 GPS、产量监测、遥感、土壤采样策略、变量应用,农业生产过程中应用到其中一项技术就可以认定为开始使用精准农业技术。但是,我国变量施肥研究成果多以单项技术为主,自主研发的变量施肥机基本没有形成商品,变量施肥应用面积非常少。考虑变量施肥机知识产权附加值高、前期成本投入高,不利于在收益不高的粮食作物上首先应用，本研究选择经济价值相对较高的烤烟作为技术承载作物。

我国烤烟种植区域地块零碎,不适合大型机具作业,本研究选择小型手扶拖拉机为施肥机载体,研制了一种具有全部自主知识产权的变量施肥机,包括硬件和软件；通过田间网格采样、土壤变异分析、处方生成、变量施肥机具自动实施、效果评价等完整的变量施肥技术体系实施过程,讨论变量施肥技术在我国实施的可能性。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

遵义烤烟是我国中间香型烤烟的典型代表,遵义县常年种植烤烟 1 万公顷,地貌以娄山山脉和南北向娄山支脉为骨架,与沟谷盆地等自然组合形成形态各异的地貌。亚热带季风气候,年均气温 15.3℃,年均降水量 1061.4 mm,年平均蒸发量 1150 mm,年均日照 1084.6 h,无霜期 270 d,年平均相对湿度在 79.9%,终年温凉湿润,冬无严寒,夏无酷暑,气候宜人。试验地位于乐山镇,地势平坦,面积 33.25 hm^2,经度范围 106°40′21.7″～106°40′55.0″,纬度范围 27°38′12.6″～27°38′35.6″,海拔高度 904～916 m,平均海拔 907 m。

1.2　土样采集和测试

2010 年 3 月 13～14 日进行土壤样品采集,使用差分 GIS 预设 50 × 50 m 网格点导航定位(图 1a),土壤样品采集方法为 5 点梅花采样法,即以网格定位点为中心点,在 2 m 范围内正方形 4 个角点,四分法保留 1 kg 鲜土作为测试土壤样。测试项目包括 pH、有机质、硝态氮、铵态氮、速效磷、速效钾,测试方法参照文献[8]。

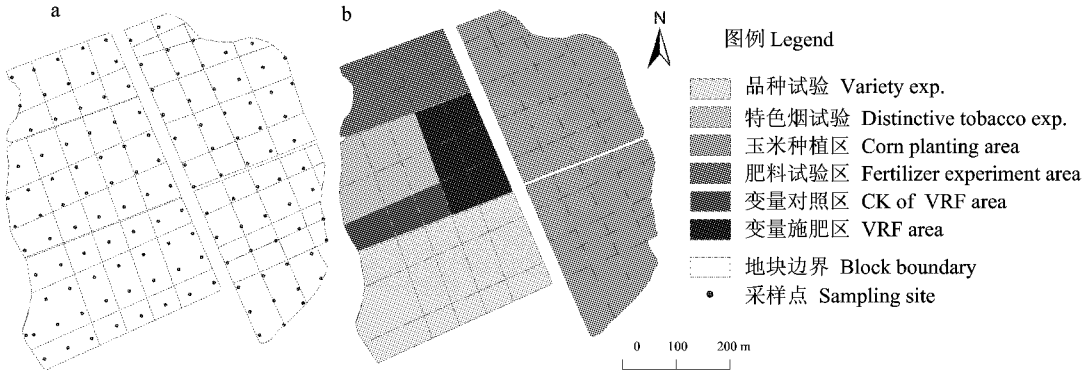

图 1　试验地土壤网格样点位和土地利用图

Fig.1　Grid soil samples and landuse map in experimental field

1.3　养分推荐量计算依据

根据贵州省植烟土壤养分丰缺指标[9-10],对试验土壤样品的有机质、无机氮、有效磷、速效钾和 pH 值进行评价。遵义县烤烟常年烟叶产量水平为 2250～2700 kg/hm^2,结合近年来烤烟肥料田间试验,在本研究中确定土壤养分分级及养分用量推荐指标体系(表 1)。

表1 土壤养分分级及肥料用量推荐

Table 1 Classification of the soil nutrient status and fertilizer recommendation

无机氮 Mineral N (mg/kg)	施氮量 N fertilizer rate (kg/hm²)	有效磷 Avail. P (mg/kg)	施磷量 P fertilizer rate (kg/hm²)	速效钾 Avail. K (mg/kg)	施钾量 K fertilizer rate (kg/hm²)
< 10	112.5	< 10	90	< 80	255
10～20	105	10～20	75	80～110	240
20～40	97.5	20～40	60	110～150	225
40～60	90	40～60	45	150～220	180
≥ 60	75	≥ 60	30	220～350	150
				≥ 350	120

1.4 田间管理

供试烤烟品种为南江3号,种植密度16500 plant/hm²。变量施肥和对照地块施肥均采用当地烤烟专用肥;变量施肥养分总量根据土壤变异计算,磷肥全部作为基肥施用,氮和钾基肥、追肥比例为6∶4,基肥配方为9-11-24,于移栽前条施,由变量施肥机完成,变量施肥处方图见图8。追肥配方为15-0-30,钾肥不足部分由硫酸钾补充,于移栽后20天人工环施,变量施肥机施肥地块和对照地块见图1b,变量施肥机实施面积2.43 hm²,对照面积1.20 hm²,对照为农户常规人工施肥。其他栽培管理措施和当地习惯相同。

1.5 数据处理

试验数据采用Excel 2010进行整理,使用SAS 6.12进行显著性检验和正态分布检验,使用GS⁺ 9.0软件进行地统计分析,使用ArcGIS 9.3进行养分插值和作图。

2 结果与分析

2.1 烤烟变量施肥机研制

2.1.1 烤烟变量施肥机概念模型 基于处方的烤烟变量施肥机包含两个执行模块,一是施肥处方生成模块,一是施肥处方执行模块(图2),二者通过USB进行信息交换。施肥处方生成模块是一套软件系统,依据土壤测试值、施肥模型、地块边界地图自动生成烤烟施肥处方,以数据包方式通过优盘复制给施肥处方执行模块。施肥处方执行模块包括硬件系统和控制软件系统,硬件系统的核心部件有控制器、GPS芯片、速度传感器、排肥器和肥料斗等机加工部件;控制软件系统主要用于各种硬件的驱动、状态监听、个性参数调整、施肥处方执行。

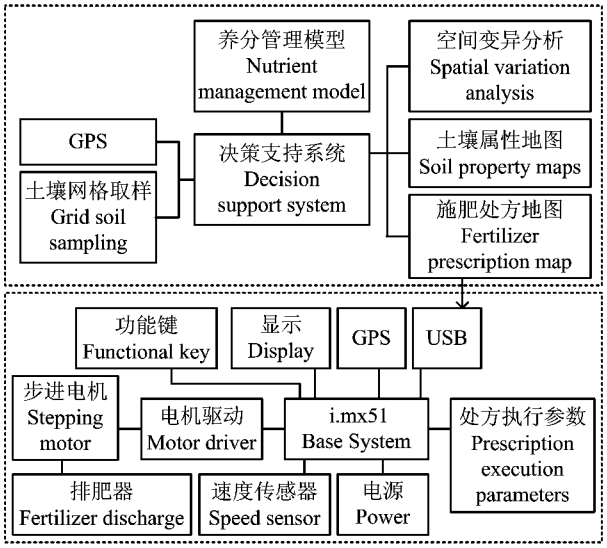

图2 烤烟变量施肥概念模型

Fig. 2 The concept model of Flue-cured tobacco variable rate fertilizer applicator

2.1.2 变量施肥处方生成模型 处方生成是变量施肥的关键环节,根据土壤测试数据、边界地图、施肥模型自动计算实施地块任意位置的肥料投入量,以空间数据的方式供施肥机控制系统软件调用。主要包括:施肥模型管理模块、地图操作模块、空间数据插值模块、空间数据投影转换模块、文件管理模块。处方生成软件不包含任何施肥模型参数、地图文件和土壤测试数据,施肥模型以参数文件方式存在,施肥模型、数据(包括空间地图和土壤测试数据)、软件三者独立。

处方生成主要包括四个过程(图3),一是由土壤测试数据的经纬度信息生产矢量地图数据文件,并进行Albert投影转换将空间位置单位转化为米;

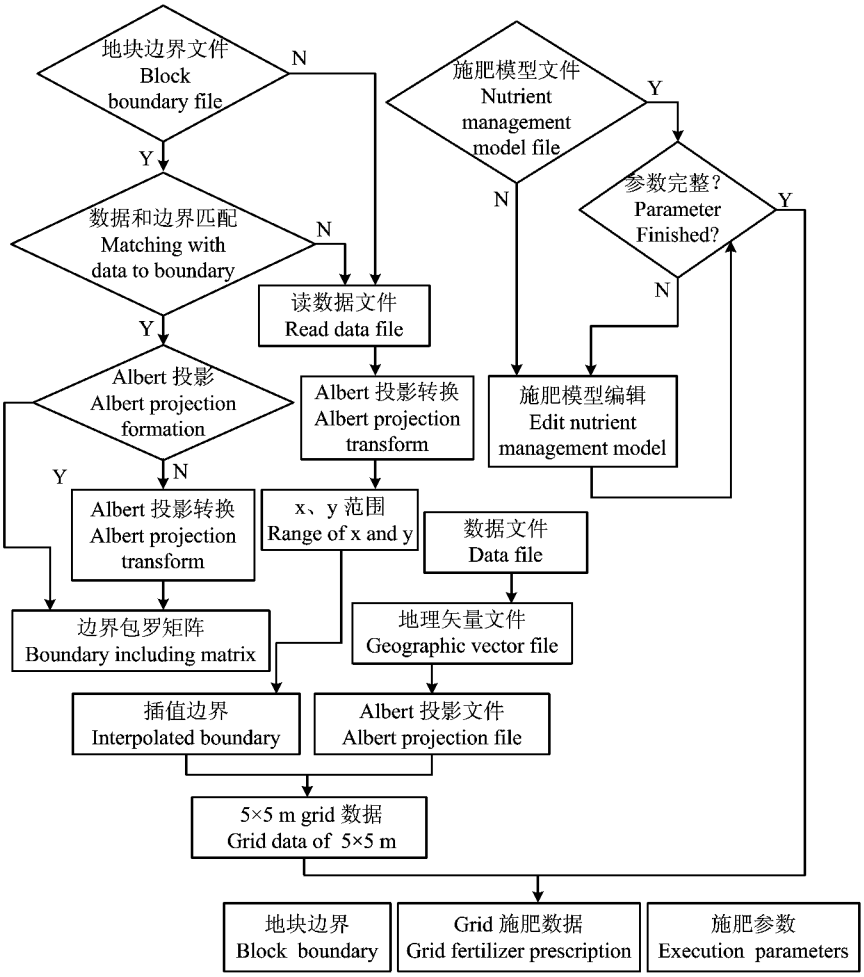

图 3　烤烟变量施肥机处方生产概念模型

Fig. 3　The prescription concept model of Flue-cured tobacco variable rate fertilizer applicator

二是检查地块边界文件和土壤测试数据矢量地图是否匹配,如果匹配失败尝试对地块边界文件进行投影转换,生成空间数据的插值边界；三是根据插值边界和土壤测试数据的矢量地图插值生成一定距离的网格数据,每个网格格点生成一套土壤养分数据；四是依据建立的施肥模型和格点土壤养分数据计算每个格点的肥料投入量。

2.1.3　变量施肥机控制系统软件概念模型　控制系统软件(图 4)的主要功能是驱动 GPS、速度传感器和步进电机 3 个部件,监听上述 3 个部件的运行状态,依据施肥处方和部件状态实时调整步进电机的速度以实施变量肥料投入。实际运行过程中,农机的行进速度和农机档位、农机手习惯相关,测试表明同一个农机手的行进速度相对偏差小于 5%,稳定运行 2 个小时以后记录的行进速度作为默认速度对肥料投入的偏差小于 5%,所以控制系统软件在监听到速度传感器为非正常状态会及时报警,同时允许施肥机继续工作。GPS 芯片和天线出现故障的概率极低,但是,如地震等极端情况出现时,GPS 信号不正常,此时,控制系统软件会对部件状态进行报警,也允许施肥机继续工作,此时肥料投入量为默认的平均水平施肥量。

2.1.4　变量施肥机的核心部件和关键参数

硬件环境

中央处理单元(CPU)：飞思卡尔的 i.MX51 为主芯片,主频 1.2G；

GPS 芯片：瑞士 U-Blox 公司生产的 Ublox AG,位置误差小于 10 米；

速度传感器：JL-0203NA-OC；

步进电机：深圳雷赛公司生产的 110 系列；

排肥器：排肥器作为施肥机的核心部件,要求不漏肥、防堵、防锈、转速和排肥量线性相关。市场供应的化肥造粒不匀、结块，导致星轮状排肥装置出现堵死现象,可用性差,本研究采用图 5 结构的

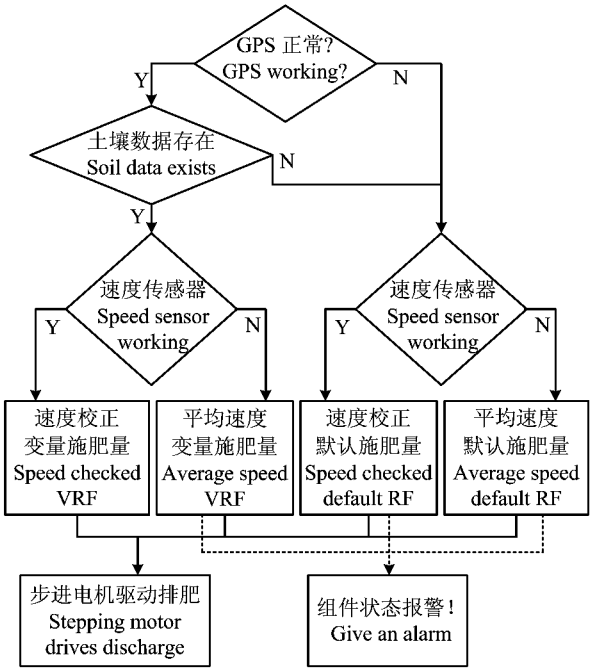

图4 烤烟变量施肥机控制系统软件概念模型

Fig. 4 The control software concept model of Flue-cured tobacco variable rate fertilizer applicator

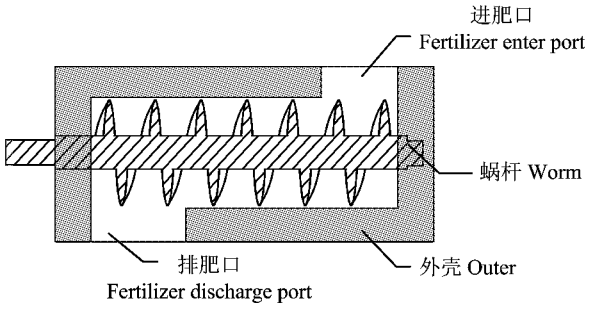

图5 烤烟变量施肥机排肥装置示意图

Fig. 5 Fertilizer discharge of Flue-cured tobacco variable rate fertilizer applicator

排肥器。该排肥装置的排肥精度如图6,数据测试在田间实际施肥过程中完成,实际排肥量和模拟公式计算的理论排肥量相对误差小于0.5%。

图6为实测的排肥量和电机转速的关系曲线,用于获取排肥器的特征参数a和b,排肥量用体积表示。肥料密度不同,相同转速在单位时间内排肥的体积相同,而排肥质量(重量)不同。变量施肥机工作过程中,需要由处方施肥量确定电机转速,不能由图6推算,此时电机的转速和肥料用量、农机行进速度、施肥行距、肥料密度等因素相关,可采用公式(1)计算。

步进电机转速(v)与排肥量的关系:

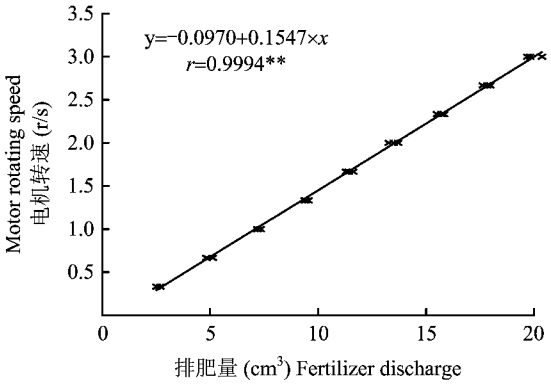

图6 排肥量和电机转速的关系

Fig. 6 Relation of fertilizer discharge and motor rotating speed

$$v = a + \frac{b \times W \times V \times h}{10 \times \rho} \quad (1)$$

其中:

a、b—排肥轴特征参数,表征转速和排肥量(体积)之间的关系;

W—肥料用量,单位为 kg/hm²;

V—行进速度,单位为 m/s;

h—行距,即两条相邻肥料垄之间的距离,单位为 m;

ρ—肥料密度,单位为 g/cm³。

软件环境

处方生成软件开发环境:Microsoft Studio 2008 C#;依赖环境 DotNet Framework 3.5 和 Microsoft Office 2003 或以上版本;GIS 相关模块使用 C# 自主开发;

控制系统软件开发环境:硬件驱动使用 C 语言开发;应用层软件使用 Android 2.3.4 操作系统下 java 开发。

2.2 烤烟变量施肥机应用

2.2.1 土壤养分变异及施肥处方 网格采样采集土壤样品133个,其中,有效磷去掉一个极端值(82.3 mg/kg,超过平均值 + 3 × 标准差,且为孤值),常规统计分析见表2。从含量变化范围来看,有机质的变化范围为14.8 ~ 62.8 g/kg,无机氮、有效磷和速效钾养分含量变化范围分别为3.2 ~ 45.4、2.7 ~ 23.7 和 20.4 ~ 80.9 mg/kg,pH 值的变化范围为6.04 ~ 7.47。从均值来看,有机质的均值为32.9 g/kg,无机氮、有效磷和速效钾均值分别为15.5、8.9 和 44.7 mg/kg,pH 值均值为6.96。5种指标的变异系数范围为4.7% ~ 50.5%,pH 值变异系数小

于 10%,属轻度变异,其他 4 种指标都位于 10%～100%之间,属于中等变异[11],且变异系数无机氮 > 有效磷 > 有机质 > 速效钾 > pH 值,其中无机氮、有效磷的变异强度比较大,无机氮的变异系数达到 50.5%,这可能与施肥不均匀等因素有关。分布检验表明,pH 值、有机质、速效钾 3 种养分要素符合或接近正态分布,无机氮和有效磷经过对数转换后符合正态分布,满足半方差分析条件。

表 2　土壤养分含量和 pH 值描述性统计

Table 2　Descriptive statistics of soil nutrients and pH value

变量 Variable	pH	有机质 OM (g/kg)	有效氮 Avail. N (mg/kg)	有效磷 Avail. P (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)
平均值 Mean	6.96	32.9	15.5	8.9	44.7
最小值 Min	6.04	14.8	3.2	2.7	20.4
最大值 Max	7.47	62.8	45.4	23.7	80.9
标准差 STDV	0.32	11.2	7.8	7.9	12.2
变异系数 CV (%)	4.7	34.0	50.5	41.6	27.4
分布 Distribution	△	△	□	□	△

注(Note)：△—正态分布 Normal distribution；□—对数转换后正态分布 Normal distribution after logarithmic transformation.

图 7 是土壤养分和 pH 值半方差分析图。土壤养分的空间变异是由结构性因素和随机性因素共同作用的结果,块金值(C_0)表示随机部分的空间异质性,基台值(C_0+C)表示系统总变异。土壤养分的空间自相关程度可以根据块金值(C_0)与基台值(C_0+C)的比值大小进行划分,当 $C_0/(C_0+C)<25\%$ 时,说明变量具有强烈的空间相关性,表明要素的空间变异主要受结构性因素的影响；当 $C_0/(C_0+C)$ 位于 25%～75% 之间时,具有中等强度的自相关性,表明除了结构性因素之外随机性因素对要素的空间变异有明显的影响；$C_0/(C_0+C)>75\%$ 说明空间自相关性微弱,变异主要由随机变异组成,不适合采用空间插值的方法进行空间预测[12]。根据图 7 中参数 pH 值、有机质、有效磷的 $C_0/(C_0+C)$ 值小于 25%,表现出强度空间自相关,说明这 3 种要素的空间变异是由土壤母质、土壤类型、地形等结构性因素作用的结果,其中,有效磷含量低,表明该农田历年种植作物过程中磷肥投入少,有效磷主要来源于土壤磷矿化,导致其变异主要来源于土壤结构性因素。无机氮和速效钾的 $C_0/(C_0+C)$ 值均介于 25%～75% 之间,表现出中等强度的空间自相关,说明这 2 种养分的空间变异是由母质、土壤类型、地形等结构性因素和随机性因素如施肥、耕作措施、种植制度等因素共同作用的结果。

变程反映土壤的结构性,变程值内的土壤性质是空间相关的；变程值范围以外的土壤性质是空间独立的。根据半方差理论,球状模型和线性有基台模型的变程为模型参数 A_0,指数模型和高斯模型的变程为模型参数 A_0 的 3 倍。土壤 pH 值和硝态氮是球状模型,变程分别为 174.3 米和 68.3 米,硝态氮的变程最小；有机质、有效磷、速效钾和无机氮是指数模型,变程分别为 354.3 米、426.0 米、330.6 米和 1050.6 米。其中,无机氮由铵态氮和硝态氮组成,移动性较强,变化比较快,不太可能出现较大的变程,结构分析表现为中度空间相关,但图 7 中无机氮并不是典型的指数图形,这可能和铵态氮结构性不好相关。烤烟养分管理的重点是氮素管理,过量的氮素肥料投入会导致上部烟叶烟碱含量过高,烟叶质量差,氮素投入不够又会严重影响产量。氮素养分管理过程中,如果采用硝态氮(旱地)作为氮素养分管理的依据,土壤样品采集的网格密度不能小于 70 米；采用无机氮作为氮素养分管理的依据时,虽然能够增大网格采样密度,其可靠性需要进一步试验证实。

土壤有机质、无机氮、有效磷和速效钾的分布符合正态分布或经过对数转换后符合正态分布,达到中等强度以上的空间自相关,可以进行最优内插,图 8 是土壤养分的空间分布图。虽然 pH 值也满足上述要求,没有列出 pH 值的空间分布图,一方面是 pH 值的变异系数非常小,另一方面 pH 值在烤烟生

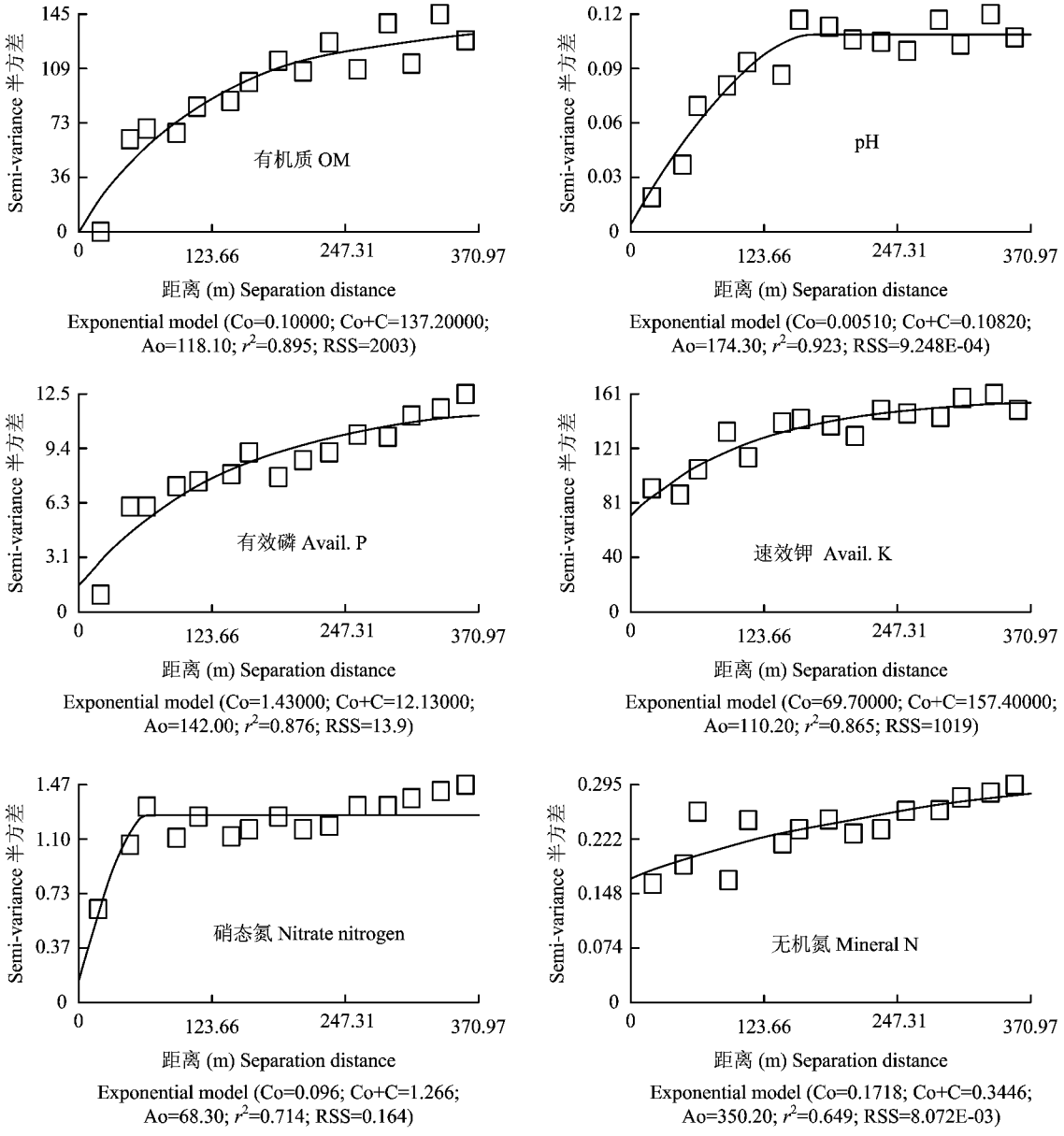

图7 土壤养分和pH值半方差分析图

Fig.7 Semivariograms for soil nutrients and pH value

长的适宜范围[10]。试验地在土壤采样之前归农户各家所有,种植作物主要是玉米,农户钾肥投入少,土壤速效钾含量(图8d)处于极低水平[9-10],养分管理过程中,钾素养分给予最高的推荐量。土壤有效磷含量(图8c)和速效钾含量近似,处于中等偏低水平[9-10],除试验地东南角部位含量稍高外,整体含量不高。土壤无机氮含量(图8b)处于中等或中等偏低水平,西南和东北部位含量稍高,中部含量较低,有比较清晰的空间分布区域特征。土壤有机质含量(图8a)东部高西部适中,针对烤烟种植,有机质含量过高和过低均不利于烤烟生产[9-10],有机质含量超过30 g/kg,土壤氮素矿化量过高,烟叶氮来源于土壤矿化氮的比例过高,烟碱含量过高,烟叶品质差[13]; 有机质含量过低,土壤结构差,保水保肥性差,也影响烤烟的产量和质量; 试验地东部土壤有机质偏高,对生产优质烤烟有影响。

本研究设计的变量施肥机只能针对一种肥料进行变量控制,实施过程中以氮素养分作为肥料推荐的依据,一方面是试验地块氮素养分的空间变异比磷、钾都大,且氮素对烤烟产量和质量的影响也最大; 另一方面根据图8c中有效磷含量小于10 mg/kg的面积占83.5%,图8d中速效钾含量均小

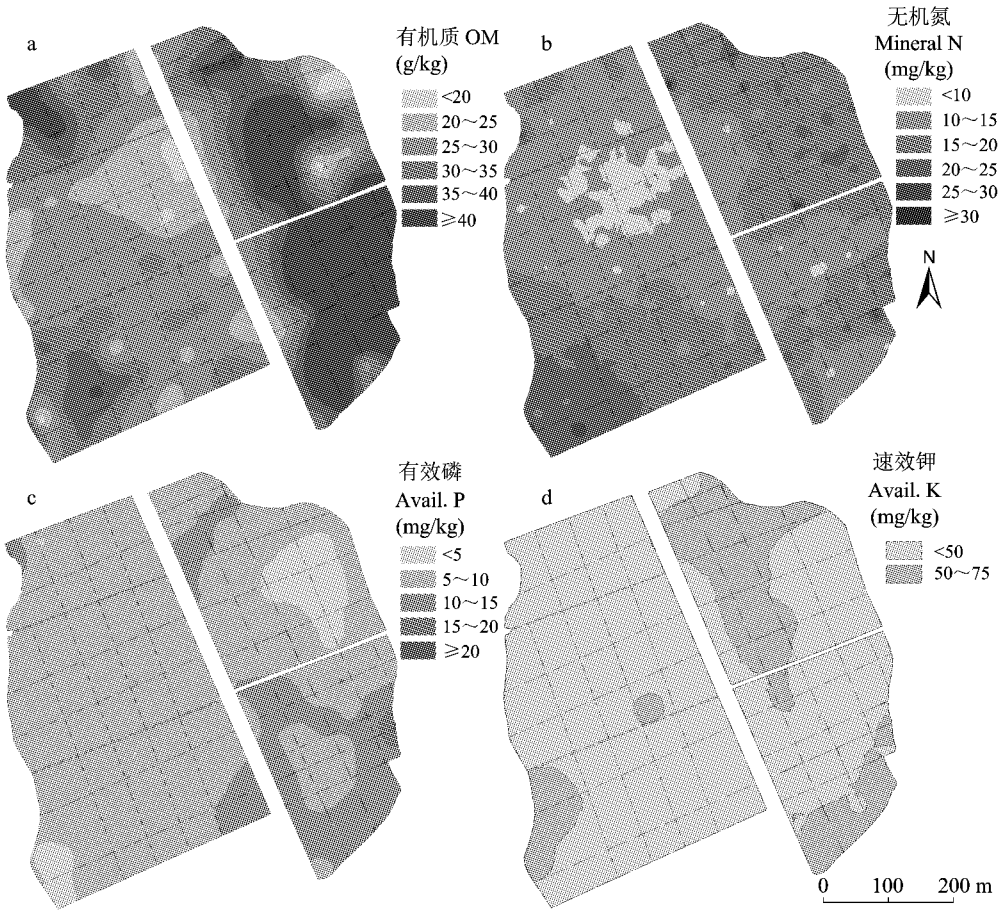

图 8　土壤养分空间分布图

Fig. 8　Spatial distribution of soil nutrients

于 80 mg/kg,土壤磷和钾养分含量低,均处于高量推荐水平。图 9 是以土壤无机氮、表 1 养分推荐指标体系、基肥配方 9-11-24 为依据制作的变量施肥处方图。

变量施肥机养分投入与推荐量比较,氮素养分相同,磷素和钾素养分投入比推荐量分别少 0.5 kg/hm^2、9.9 kg/hm^2,变量施肥实际养分投入与推荐量基本相当。变量施肥地块最终养分投入与农户常规施肥比较节省肥料 4.6%,试验地块土壤养分含量低,肥料投入过低导致减产风险较高。

2.2.2 变量施肥的烤烟生育性状　表 3 为变量施肥区和对照区分别均匀布置 20 个监测点生育期性状调查表,调查时间为烤烟圆顶期。

变量施肥机根据土壤养分含量高低准确投入养分,且肥料出口有旋耕和起垄装置,保证了肥料分布在烤烟根系生长区域,肥料分布的土层深度为 8～15 cm,变量施肥的根系壮实,重量 121.9 g,而对照根系重只有 104.3 g,变量施肥根系重量相对增加

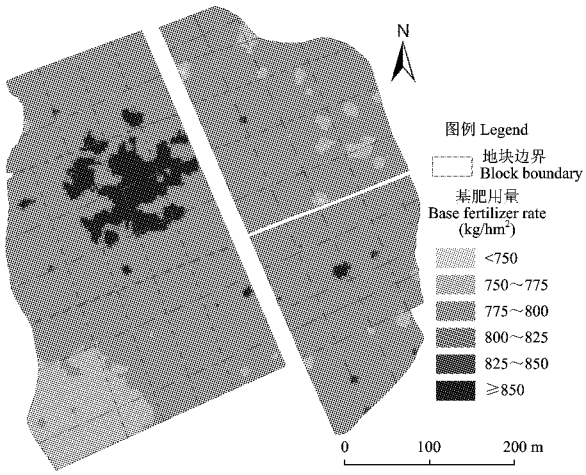

图 9　变量施肥处方图

Fig. 9　Prescription map of variable fertilizer rates

14.4%。表 3 数据表明: 变量施肥的烤烟株高显著高于对照,且变量施肥烤烟株高的变异系数为 0.038, 对照株高的变异系数 0.054,变量施肥烤烟

株高变异系数降低了29.6%,变量施肥的烤烟长势更加整齐。变量施肥的烤烟更加壮实的另一个表现是茎围增加,变量施肥和对照的烤烟茎围分别是12.5 cm和11.0 cm,茎围增加11.9%,且变量施肥烤烟茎围的变异系数小于对照,变量施肥烤烟茎围的大小更加接近。变量施肥相对农户习惯施肥,烤烟生长的整齐度好,烤烟长势略旺于农户习惯施肥。

表3 应用变量施肥机的烤烟生育性状表

Table 3 Flue-cured tobacco growth of applying variable rate fertilizer applicator

处理 Treat.	项目 Item	株高 Plant height (cm)	茎围 Stem girth (cm)	叶数 Leaf number	中部叶 Middle leaf		顶叶 Top leaf	
					长(cm) Length	宽(cm) Width	长(cm) Length	宽(cm) Width
变量施肥处理 Variable fert.	平均 Mean	129.8 a	12.5 a	26.65 a	79.5 a	36.8 a	61.4 a	23.5 a
	标准差 STDV	4.890	0.454	1.309	13.155	3.322	4.847	3.362
	变异系数 CV	0.038	0.036	0.049	0.166	0.090	0.079	0.143
对照 CK	平均 Mean	125.7 b	11.0 b	26.10 a	73.9 a	36.6 a	51.7 b	23.4 a
	标准差 STDV	6.783	0.568	1.021	4.445	6.573	6.473	5.413
	变异系数 CV	0.054	0.051	0.039	0.060	0.180	0.125	0.231

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达到5%显著水平 Values followed by different letters mean values significant different between treatments at 5% level.

2.2.3 变量施肥的烤烟产量和质量 变量施肥机实施地块和对照地块单独烘烤、分级、计算产量,表4为试验产质量表,其中,上、中、下等烟率是把烤烟烟叶分为42级后根据每级产量整理出来的。

表4 应用变量施肥机的烤烟产质量表

Table 4 Flue-cured tobacco yield and quality using variable fertilizer applicator

项目 Item	处理 Treatment	对照 CK	增减 Difference
产量 Yield (kg/hm^2)	2451.65	2255.18	196.47
产值 Value (yuan/hm^2)	45721.78	41435.33	4286.45
单价 Unit price (yuan/kg)	18.65	18.37	0.28
上等烟率 First-grade tobacco (%)	35.5	40.8	-5.3
中等烟率 Midlle-grade tobacco (%)	52.2	39.1	13.1
下等烟率 Low-grade tobacco (%)	12.3	20.1	-7.80

在相同株高的情况下,烤烟中部叶(最大叶)面积越大,植株光合作用的面积越大,光能利用率就越高;在株高不同的情况下,中部叶面积和株高的比值越高,植株的光能利用率越高。根据表4,变量施肥处理和对照的中部叶面积(本文直接使用最大叶长和宽的乘积)和株高的比值分别为22.55和21.51,变量施肥处理有更高的光能利用率,这和变量施肥烤烟产量高于对照产量的数据一致。

变量施肥烤烟长势整齐,长势最好的烟叶和长势最差的烟叶比例同步减少,表4数据表明,变量施肥处理烤烟中等烟率为52.2%,比对照中等烟率39.1%增加了13.1%;同时,变量施肥处理的上等烟率和下等烟率均比对照低,这和变量施肥处理烤烟长势整齐相关,长势较差的植株少,长势好的植株光合作用的边际效率少,上等烟的比率减少。中等烟率比例增加是烤烟烟叶单价提高的原因,也是变量施肥产值高于对照4286.45 yuan/hm^{2}的重要原因。

3 讨论

3.1 基于处方变量施肥机的效益

本研究通过变量施肥机研制和应用证实变量施肥可以提高烤烟的产量和均价,产生良好的经济效益。本研究设计的变量施肥机是在烤烟起垄机的基础上附加变量施肥单元,能够节省施肥的人工成本,常规人工施肥效率是 0.2 hm^2/d,人工施肥成本 300 yuan/hm^2,同时节省肥料 4.6%,折合 124.2 yuan/hm^2。采用变量施肥技术需要增加土壤样品测试成本,本研究采用 50 m × 50 m 网格采样,每项土壤样品测试费用为 100 yuan,相当于 400 yuan/hm^2。由于产量增加和品质改善,产值增加 4286.45 yuan/hm^2,变量施肥机在烤烟上应用增加的综合效益为 4310.65 yuan/hm^2。变量施肥机工作效率 14.25 h/hm^2,一台变量施肥机单个烤烟移栽季施肥面积 7 hm^2,单台变量施肥机累积节本增效达到 30174.55 元,具有较强的推广应用价值。

3.2 变量施肥机的发展趋势

根据变量施肥的实现方式,可以分为基于处方的变量施肥机和基于传感器的变量施肥机,目前,根据前期制作的处方自动控制施肥仍然是主流,限制传感器实时获取数据进行决策而后自动施肥的关键是传感器技术本身,尚缺乏有效获取土壤养分等信息的可靠传感器,甚至有些光学传感器也仅仅用于施肥处方生成,尽管如此,基于传感器的变量施肥依然代表该技术发展的方向。

从高新技术应用的角度,变量施肥技术对 GPS 的应用会更加深入。通常变量施肥的土壤网格采样密度大于 50 m × 50 m,而普通 GPS 的精度在 10 m 以内,差分 GPS 的精度可提高到 1 m 以内,土壤采样位置误差远大于变量施肥机的施肥位置误差。尽管如此,GPS 的精度会进一步提高,变量施肥机的自动导航不仅可节省油料消耗,提高变量施肥机的工作效率,也可以使肥料投放的位置更加准确,有效提高肥料利用效率和耕地生产效率；同时,农机的测速问题始终是技术难题,传统的五轮测速由于不同耕地条件滑移不同,很难获取到农机的真实速度,而雷达测速要求速度大于 18 km/h,农机工作速度在 5 km/h 以内,考虑农机操作以直线运动为主,高精度 GPS 可解决农机测速问题。

现阶段限制变量施肥机应用的一个重要原因是土壤养分数据获取成本高,遥感数据、作物长势和产量数据、土壤理化的历史数据等多种数据获取、解译、管理并用于施肥处方生成,将有效降低变量施肥技术应用的运行成本[14]。同时,自主研发并拥有全部知识产权的变量施肥机在经济作物上应用,通过节约肥料、劳动力成本,增加农产品效益来获取收益,成本回收期可控制在 2 年以内,变量施肥机的购置成本不会成为该技术应用的限制因子。

4 结论

变量施肥机以小型手扶拖拉机为载体,根据土壤测试数据、边界地图、施肥模型自动计算实施的地块任意位置的肥料投入量,以空间数据的方式供施肥机控制系统软件在施肥实践中是可行的。

使用变量施肥机实施自动变量施肥,可节省肥料 4.6%；提高烤烟的整齐度；上等烟率和下等烟率同步减少,中等烟率增加 13.1%；农户收益平均增加 30174.55 yuan/hm^2,具有较强的推广应用价值。

参 考 文 献：

[1] Hermann A. Precision farming—the environmental challenge[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, (30): 31-43.

[2] Wikipedia. Precision agriculture [EB/OL]. http://en.wikipedia.org/wiki/Precision_agriculture. 2013, 6.

[3] Ganesh C B, John F N and David C R. Energy savings by adopting precision agriculture in rural USA[J]. Energy, Sustainability and Society, 2012, (2): 22-26.

[4] Anon. Preface: Use of precision agriculture by the Australian grains industry[J]. Crop and Pasture Science, 2009, 60: 795-798.

[5] Robertson M J, Llewellyn R S *et al*. Adoption of variable rate fertiliser application in the Australian grains industry: status, issues and prospects[J]. Precision Agriculture, 2012, (13): 181-199.

[6] 北京农业信息技术研究中心. 变量施肥机[EB/OL]. http://www.nercita.org.cn/index/products/detail.aspx?productid=53.2014,5.

[7] 于合龙, 陈桂芬, 赵兰坡等. 吉林省黑土区玉米精准施肥技术研究与应用[J]. 吉林农业大学学报, 2008, 30(5): 753-759, 768.
Yu H L, Chen G F, Zhao L P *et al*. Study and application of maize precision fertilization technology in black soil of Jilin province[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2008, 30(5): 753-759, 768.

[8] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis(Third edition)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[9] 陈江华, 刘建利, 李志宏. 中国植烟土壤及烟草养分综合管理[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

Cheng J H, Liu J L, Li Z H. China tobacco planting soil and tobacco integrated nutrient management[M]. Beijing: Science Press, 2008.

[10] 冯勇刚，石俊雄. 贵州烟草平衡施肥研究[M]. 贵阳：贵州科技出版社，2008.
Feng Y G, Shi J X. Study on balanced fertilization of tobacco in Guizhou[M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 2008.

[11] 雷志栋，杨诗秀，许志荣，等. 土壤特性空间变异性初步研究[J]. 水利学报，1985，9(9)：10-21.
Lei Z D, Yang S X, Xu Z R *et al*. Preliminary investigation of the spatial variability of soil properties[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, 9(9): 10-21.

[12] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M *et al*. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. Soil Science Society of American Journal, 1994, 58: 1501-1511.

[13] 刘青丽，石俊雄，张云贵，等. 应用^{15}N示踪研究不同有机物对烤烟氮素营养及品质的影响[J]. 中国农业科学，2010，43(22)：4642-4651.
Liu Q L, Shi J X, Zhang Y G *et al*. The effects of various organic matters on the nitrogen nutrition of flue-cured tobacco and its quality by ^{15}N[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(22): 4642-4651.

[14] Yeong S T, Mark B. Factors influencing the adoption of precision agricultural technologies: a review for policy implications[J]. Precision Agriculture, 2012(13): 713-730.