

基于 GIS 的变量施肥尺度效应模拟系统

潘瑜春, 薛绪掌, 陈立平, 赵春江

(国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100089)

摘要: 为从理论上研究变量施肥尺度效应提供可能, 解决单纯利用田间试验方法研究变量施肥尺度效应存在的研究周期长、费用大且几乎得不到系统完整的结果问题, 研究了变量施肥尺度效应模拟系统的设计、实现与应用。该模拟系统由数据管理、模型管理、模拟分析和决策分析四部分构成。系统通过随机数生成法或地统计分析法生成最小尺度条件下的土壤养分空间分布数据, 以此为基础, 采用 GIS、计算机模拟技术模拟不同尺度的养分空间分布, 并以肥料效应模型和产量模型计算不同尺度条件下的施肥量、产量和肥料利用效率, 最后通过曲线图、三色合成影像和 GIS 专题图实现形象直观地表达模拟结果。结果表明 GIS 空间分析和可视化技术及计算机模拟技术能在数据处理、分析和结果可视化方面为变量施肥理论提供有力的支持。

关键词: 地理信息系统; 变量施肥; 尺度效应; 模拟

中图分类号: S126

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2005)06-0077-05

潘瑜春, 薛绪掌, 陈立平, 等 基于 GIS 的变量施肥尺度效应模拟系统[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 77- 81.

Pan Yuchun, Xue Xuzhang, Chen Liping, et al Simulation system for the influence of management zone size on variable-rate fertilization[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(6): 77- 81. (in Chinese with English abstract)

0 引言

精准农业的一项重要内容是变量施肥, 也常常是精准农业技术体系研究的一个切入点, 是迄今学术界研究最多也是争议较多的一个领域^[1,2]。变量施肥一般通过网格取样和地统计学空间插值, 获得土壤养分的空间变异情况, 以此为基础将地块分成不同的变量管理单元, 并利用施肥模型按照每个单元的土壤养分水平和共同的产量目标计算各个单元的施肥量, 然后再进行变量施肥^[3]。目前, 对于变量施肥的效果研究基本上是基于田间试验的, 不但周期长、费用巨大, 而且都针对某一具体的试验区进行测土分析, 根据土壤养分空间变异确定变量施肥尺度, 因此得不到系统完整的变量施肥尺度效应的结果。如美国 Oklahoma 州立大学 J. M. LaRuffa 等人从 1993 年开始, 用了 9 年时间, 以冬小麦最高产量为目标, 研究最佳施肥尺度问题, 他们共设计了 4 个施肥尺度, 最终研究结果是施肥单元小于 53 51 m², 将会提高产量, 减少投入和合理施肥对环境的影响^[4], 显然其结果不具有普遍意义。利用计算机技术和地理信息系统(GIS)可以产生反映田间不同土壤养分状况的数据, 为研究者提供各种不同的“试验田”, 并能够结合施肥和产量模型模拟不同施肥尺度所产生结果, 因此, 建立基于组件 GIS 和计算机模拟技术的变量施肥模拟系统, 将为研究变量施肥理论提供基础。

1 系统结构设计

收稿日期: 2004-04-15 修订日期: 2005-02-23

基金项目: 国家 863 项目(2002AA 134073); 北京市优秀人才资金资助

作者简介: 潘瑜春(1971-), 男, 博士, 主要从事遥感与地理信息系统应用研究。北京 2449 信箱 265 箱 国家农业信息化工程技术研究中心, 100089

1.1 系统目标

本系统旨在解决在已知土壤养分空间分布的情况下, 精准农业变量施肥单元的合理选择问题, 即多大的施肥单元才能获得最佳的效益, 达到生态效益和经济效益的统一。该系统用于变量施肥尺度效应研究, 研究施肥量、产量和肥料利用效率随变量施肥单元大小变化的规律, 为精准农业变量施肥基础理论研究提供有效的工具; 也用于最佳变量施肥决策信息生成, 为田间精准实施决策提供技术支持。

1.2 系统总体结构

结合数据分析与功能需求分析, 以系统目标为指导进行系统结构设计, 该系统主要由数据管理、模型管理、模拟分析和决策分析 4 大模块组成, 如图 1 所示。

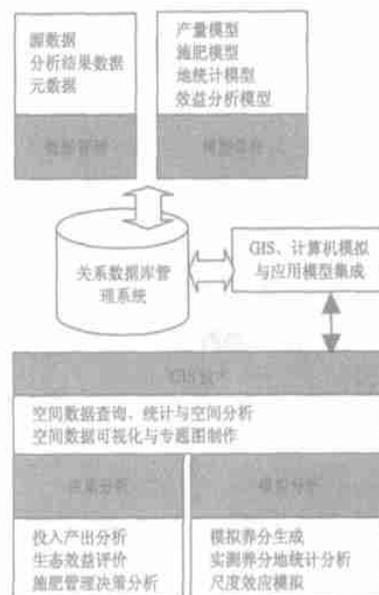


图 1 系统结构

Fig 1 Architecture of the system

空间数据、属性数据与模型都存储在关系数据库中,分别开发相应的数据库管理和模型库管理模块实现数据和模型的维护管理。其中数据包括:(1)源数据,如田间采样的养分数据、作物种植分布数据等;(2)分析结果数据,如施肥量分布、产量分布和肥料利用率分布等;(3)元数据,分为数据元数据、模型元数据及过程元数据,分别用于描述数据、模型及分析过程中的参数设置描述,其中数据和模型元数据维护分别由数据库管理和模型库管理模块实现,而分析过程元数据是在模拟分析和决策分析中自动生成和维护的。

在进行田间实际精准施肥决策分析时,模型将随着具体耕作环境的改变,其参数或模型本身将会不同;另一方面,在模拟分析中,经常会采取改变模型参数和模型类型(如将线性模型改为非线性模型)来获得不同条件下的尺度效应规律,以便获得准确的结果。因此灵活的模型管理是该系统的一个重要需求,也是系统灵活性的重要体现。如模型表达式修改、模型部分参数修改、新模型创建等。

GIS、计算机模拟与应用模型集成部分是系统的核心,模拟分析是决策分析的前提,通过模拟分析为决策分析提供数据基础,而GIS功能用于模拟分析和决策分析结果可视化、专题图制作,以便能够得到形象直观的分析信息,找出规律,服务于研究和决策。传统的GIS与专业应用模型等其他系统集成方式主要有存取中间文件、GIS二次语言开发、专业程序设计语言开发和动态数据交换等4种集成模式^[5]。因此传统集成模式在集成性差,并且开发困难。随着组件技术的不断成熟,组件技术为GIS软件与应用模型之间的无缝集成提供了理想的解决方案,本系统基于组件技术实现GIS功能、计算机模拟与应用模型之间的有机地结合。

1.3 系统实现数据流程

在尺度效应模拟分析研究中,首要问题是土壤养分数据的获取,以便为模拟提供数据源,然后根据数据源模拟计算生成不同施肥尺度条件下的施肥量、产量和肥料利用率,最后通过不同尺度下的模拟分析结果进行尺度效应分析研究,确定施肥的最佳尺度,生成相应尺度的施肥管理决策信息,具体流程如图2所示。

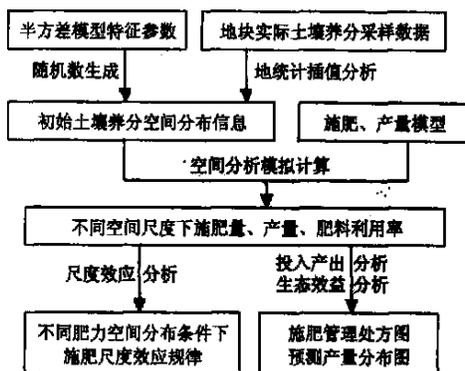


图2 尺度效应模拟分析数据流程

Fig 2 Flow chart for scale effect simulation analysis

图2中,初始土壤养分空间分布信息获取有两种方法:随机数生成和地统计插值。随机数生成法是根据描述土壤养分空间变异的半方差模型的主要参数:养分均值、方差和相关距,利用“Turning Band Method”方法^[7]产生一组随机数,并将其空间化表示。通过设定不同的参数,可以生成符合设定均值、方差、半方差模型的土壤养分空间分布数据,为变量施肥尺度效应研究提供不同的“试验田”,使研究结果更具有普遍意义和代表性。

在实际生产中,土壤养分数据可以通过均匀网格采样(或其他采样方法)获取,并根据采样点的半方差模型进行地统计空间插值生成特定分辨率的养分分布数据。本方法主要用于实际地块田间精准施肥决策处方的生成。

2 系统功能设计

本系统功能主要有数据管理、模型管理、基本GIS功能、模拟分析和决策分析功能。其中基本GIS功能分别与数据管理、模拟分析和决策分析紧密集成,不是一个单独的功能模块,功能包括地图视图操作(放大、缩小、平移、导航)、对象查询与统计、空间分析及专题图制作等。

2.1 数据管理

数据管理是系统的基础,如上所述,该系统数据主要包括源数据、分析结果数据和元数据。该模块主要实现数据的交换、数据编辑、数据组织管理、空间数据坐标转换。数据交换包括数据转入与导出,导入数据是作为模拟分析的源数据,可以是基于GPS的田间采样文本文件数据或主流GIS软件的文件格式。数据导出主要将施肥决策信息导出到变量施肥机,用于指导田间精准实施。

2.2 模型管理

模型管理主要实现模型的查询检索、模型创建与编辑、模型运行实现。模型实现利用相关应用,通过输入的模型元数据驱动模型运行体,完成专业应用模型的应用分析。

2.3 模拟与决策分析

模拟与决策分析是系统的核心,主要实现变量施肥尺度效应模拟的数据准备、模拟分析和决策处方生成等功能,包括土壤养分分布空间格网生成、根据半方差模型参数生成随机养分空间分布、土壤采样点空间插值(包括反距离加权IDW和普通Kriging插值)、不同空间尺度下施肥量、产量和肥料利用效率的模拟计算、尺度效应统计曲线图制作与回归拟合、投入产出计算分析、分析结果统计分析、统计专题图分析、基于三原色影像合成的变量施肥生态效益分析等。

模拟分析首先生成初始养分分布(即最小尺度条件下的养分数据),如果利用随机生成法,则需要输入土壤养分的均值、方差和相关距;如果利用实际采样点数据插值生成,则需要输入采样点文件(可以是符合系统标准的文本文件,也可以是ESRI的Shape文件),除此之外还需要输入生成矢量正方形网格的起始点坐标、最小

尺度的分辨率(网格边长)。其次不同尺度施肥效应模拟分析,需要输入模拟的尺度数、施肥模型、产量模型、目标产量(施肥模型中应用)、最高产量(产量模型中应用),输出信息包括各尺度施肥量、产量、增产量和肥料利用效率的空间分布数据,以及各尺度条件下的施肥量、产量和肥料利用效率的统计值。

3 系统实现与应用

3.1 系统实现

3.1.1 系统空间数据结构选择

GIS 数据结构有栅格和矢量两种,栅格结构数据容易实现不同数据层之间的叠加分析和模型运算,但一个数据层只能表示一种属性信息^[9]。另一方面,目前主流组件 GIS 平台一般不支持栅格数据的计算分析,因此不易于与应用模型集成实现。矢量结构数据便于面向现象的数据表示,因此一个数据层能够与多种属性进行关联,如一个斑块可以包含土壤 N、P、K 等多种土壤养分性质,但它不易于空间分析和模型计算。为解决这两种结构之间的矛盾,本系统采用模拟栅格数据(即基于矢量数据结构的正方形网格)进行养分数据的尺度转换和模拟计算,以及模拟结果的等级专题制作。

3.1.2 系统开发实现

本系统采用 VC++ 6.0 和 SuperMap 组件式 GIS 软件,遵循 COM/DCOM 标准,根据功能相关性开发相应 GIS 应用组件。

系统采用公式识别与模型库管理系统解决了应用模型与 GIS 系统的无缝集成,系统能够灵活的进行模型维护编辑管理,因此具有较大的灵活性和实用性。系统中的模型库管理模块是一个利用 VC++ 自主开发的基于公式识别技术的组件。

系统采用关系数据库管理空间数据和属性数据,确保空间数据、非空间数据和模型的一体化集成。用关系数据库管理空间数据主要有两种方式,即空间数据库引擎(SDE)中间件和完全由关系数据库管理系统实现。如 ESR I 的 ArcSDE 和超图公司的 SuperMap SDX 都是中间件的形式存在,主要定位于对空间数据的管理和应用;Oracle Spatial 即是完全由数据库管理的方式实现,实际上是在原来的数据库模型上进行了空间数据模型的扩展,定位于空间要素的存储和检索。空间数据引擎服务与应用程序与数据库进行空间数据交换,空间数据引擎中间件是目前应用系统的首选方式。本系统采用 SQL Server2000 关系数据库管理系统和 SuperMap SDX 空间数据引擎插件。

3.2 系统应用

以玉米氮肥变量施肥为例,利用系统进行了模拟。首先通过用“Turning Band Method”方法随机生成符合指定均值、方差和空间分布(反映空间自相关特性的半方差模型)的一组随机数据(共 104 个数),其中方差为 379.5,均值为 20.96,相关距为 200 m,产生的数据空间分布半方差模型符合指数模型:

$$Y(h) = c_0 + c(1 - e^{-\frac{h}{a}})$$

式中 c_0 ——nugget(块金值); c ——sill(基台值); $3a$ 为 range(相关距),称它们为半方差模型参数。通过本方法产生的数据 nugget 理论为 0。并按顺序将值赋给 100×100 的矢量网格生成最小尺度(100 尺度)的硝态氮含量分布,每个正方形网格的边长为 5 m。如图 3 所示。并以本组数据为基础,利用施氮模型和肥料效应模型计算了 100 个尺度的施肥量、产量和肥料利用效率。

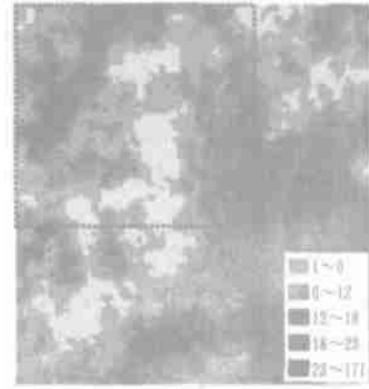


图 3 100 尺度时硝态氮分布(ppm)

Fig 3 Nitrogen distribution at the 100 scale (ppm)

其中施肥量是根据采用 North Dakota 的基于 0~60 cm 土壤硝态氮的玉米施氮模型^[8]计算得到:

$$N = 0.022474YG - 8.40042STN \quad (1)$$

式中 YG ——目标产量(本研究中取 $6750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); STN ——0~60 cm 土壤硝态氮含量, ppm; N ——纯氮施用量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 当 $N < 0$ 时, 取 $N = 0$ 。按此模型计算的施肥临界养分为 18.09 ppm, 即当 $STN > 18.09 \text{ ppm}$ 时就不用施肥。依据每一施肥单元的平均的土壤硝态氮水平计算施肥量,再依据各个地块的土壤养分和施肥量,依据下面的肥料效应模型^[8]计算玉米籽粒产量,并进一步分析肥料增产效益。

$$Y = (N + 8.40042STN) / 0.022474 \quad (2)$$

式中 Y ——理论产量,当 $Y >$ 潜力产量时,按潜力产量计,本研究中取 $6750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

三原色影像合成能很好地反映不同施肥尺度条件下的生态效益和经济效益状况,如图 4 是图 3 中红线所包含的区域的三原色合成结果,分别由增产量(红)、施肥量(绿)和土壤养分(兰)合成彩色影像。图 4 是以 34×34 均匀网格单元施肥的施肥结果。图 4 中 1 区(兰色区域)为土壤养分高值区,施肥量少或没有;2 区(黄色区域)为肥料利用率较高的区域,应该土壤养分低值均匀分布区;3 区(绿色区域)为有足够施肥量,但增产量较低,是土壤养分高值区与低值区过渡区域,是肥料利用率低的区域。需要指出的是,这里的三原色合成不是采用模拟栅格数据,而是真正的栅格数据结构的影像。

这里以最小施肥尺度下的施肥单元 S_{100} 作为增产量计算的基本单元,用以表示特定施肥尺度的实际增产量,具体步骤:

1) 通过叠加分析求出所有与 S_{100} 相交叠加的第 i 尺度下的施肥单元 S_i , 并求出相应叠加面积 S_{i1}, S_{i2}, \dots ;



图 4 基于 3 原色合成的变量施肥利用率分析
Fig. 4 Variable-rate fertilization use efficiency analysis based on RGB color combination

2) 根据产量模型, 通过 S_i 的施肥量和 S_{100} 的土壤养分含量计算每一 S_i 与 S_{100} 叠加部分的产量 Y_{i1}, Y_{i2}, \dots , 则 Y_{i1}, Y_{i2}, \dots 之和为第 i 施肥尺度下该 S_{100} 单元所能得到的产量 Y_{100} ;

3) 根据产量模型计算 S_{100} 在没有施肥情况下的产量 Y_{100} ;

4) 计算不同尺度下的增产量, 即

$$\Delta Y = Y_{100} - Y_{100}$$

5) 重复循环(1)~(4)完成特定施肥尺度 i 的产量的尺度转换。

根据同样方法可以计算不同尺度条件下的施肥量转换到以最小尺度单元为施肥单元的施肥量, 然后计算肥料增产效率:

计算每一 S_i 与 S_{100} 叠加部分的施肥量 F_{i1}, F_{i2}, \dots , 则 F_{i1}, F_{i2}, \dots 之和为第 i 施肥尺度下该 S_{100} 单元所获得的施肥量 F_{100} ;

计算 S_{100} 的肥料增产效率 $E_{100} = (Y_{100} - Y_{100}) \div (F_{100})$ 。

图 5 是由方差为 23.18、相关距为 200 m 生成的均值分别为 24.68、21.68、18.68、15.68、13.68、11.68、9.68 ppm 的土壤硝态氮数据所模拟结果制作的肥料增产效率与施肥单元面积关系曲线图。

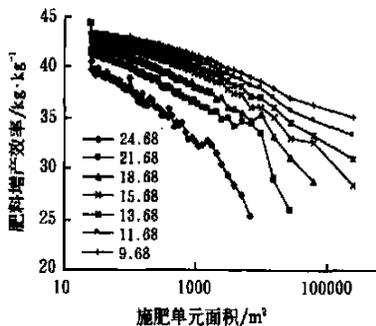


图 5 不同均值养分变量施肥尺度效应

Fig. 5 Variable-rate fertilization scale effect under different average nutrient contents

由图 5 可看出, 肥料增产效率随施肥单元面积减小而增加, 当土壤硝态氮平均含量为 21.68 ppm 时, 施肥

单元面积从 6944 m² 降到 25.5 m², 肥料增产效率从 25.38 kg/kg 增加到 39.2 kg/kg, 增加了 50% 以上, 因此变量施肥并不是省肥, 而是使施肥更合理, 提高了肥料利用率。随整个地块土壤硝态氮均值增加, 肥料增产效益下降, 以图 5 中施肥单元面积为 6944 m² 时为例, 当土壤硝态氮平均含量为 21.68 ppm 时, 肥料增产效率为 25.38 kg/kg, 而土壤硝态氮平均含量为 9.68 ppm 时, 肥料增产效率达 39.06 kg/kg, 显然整个地块土壤硝态氮均值越高, 不合理施肥、无效施肥的可能性越高。整块地土壤硝态氮的均值越高, 肥料增产效率与施肥单元面积关系曲线的斜率变化越大; 而整个地块土壤硝态氮含量的均值越低, 肥料增产效率随施肥单元面积的变化越平缓, 变幅也越小。同时我们也对不同方差、相关距下的施肥尺度效应进行了模拟, 得到了一些结果, 限于篇幅不再叙述。

需说明的是, 虽然本文模拟时采用的施肥模型是直接利用前人的研究成果, 没有对其进行修正, 但不会影响模拟结果, 只要用户给出的施肥模型和肥料效应模型是线性的, 其结论应该是一致的。

4 结 语

基于矢量网格叠加分析计算, 能够很好地解决土壤养分数据的尺度转换问题。利用计算机技术和 GIS 技术能够提供各种养分分布状况的试验地, 实现对不同施肥尺度所产生的结果进行模拟和可视化表达, 因此是支持精准农业变量施肥尺度效应研究有效工具, 并能够进一步综合经济效益和生态效益为田间作物变量管理提供可靠的处方。当然模拟方法模拟的是理想环境条件下的施肥尺度效应, 而在实际生产中影响作物生长的因素是复杂多样的, 因此将计算机模拟和田间试验相结合进行研究能够得出更可靠、更实际的结果。

[参 考 文 献]

[1] George Rehm. A multi-disciplinary evaluation of precision farming, A final progress report (Minnesota) for 2001 prepared for United Soybean Board[Z]. Downloaded from www.famresearch.com, 2002

[2] Akridge, Jay, and Linda Whipker. Precision agricultural services dealership survey results [Z]. Center for Agricultural Business, Purdue University, West Lafayette, N. 2001.

[3] 赵春江, 薛绪掌, 王秀, 等. 精准农业技术体系的研究进展与展望[J]. 农业工程学报, 2003, 4, 19(4): 7- 12

[4] Swinton SM, Lowenberg-DeBoer J. Evaluating the profitability of site-specific farming [J]. Journal of Production Agriculture, 1998: 439- 446

[5] 宋关福, 钟耳顺. 组件式地理信息系统研究与开发[J]. 中国图像图形学报, 1998, 3(5): 313- 317.

[6] 喻歌农, 周泳. 试论精确农业及我国行动对策[J]. 自然资源学报, 1999, 14(1): 69- 74

[7] Tompson AFB, Ababou R, Gelhar LW. Implementation of the three dimensional turning bands random field generator[J]. Water Resour Res, 1989, 25

- (10): 2227- 2243
- [8] Dahnke W C, Fanning C, Cattanach A. Fertilizing corn grain, popcorn, silage corn, and sweet corn [EB/OL]. [www. ext. nodak. edu/extpubs/plantsci/soilfert/sf722w. htm](http://www.ext.nodak.edu/extpubs/plantsci/soilfert/sf722w.htm). 1992
- [9] 黄杏元, 马劲松, 汤勤. 地理信息系统概论[M]. 北京: 高等教育出版社, 北京: 2001.

Simulation system for the influence of management zone size on variable-rate fertilization

Pan Yuchun, Xue Xuzhang, Chen Liping, Zhao Chunjiang

(National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100089, China)

Abstract: To greatly shorten study period, reduce cost and obtain systematic and completed results when studying the influence of management zone size on variable-rate fertilization, the simulation system, integrating geographical information system (GIS) with computer simulation and model based management system, was designed and developed for simulating the influence of management zone size on variable-rate fertilization. The system is composed of data management, model management, simulation analysis and decision analysis. On the basis of the minimum scale soil nutrient distribution generated randomly based on the given values of mean, standard deviation and related distance, or obtained by geostatistics analysis based on soil sampling data, the amount of fertilization, yield and fertilization use efficiency at different scales were calculated by related fertilizer models and yield models supported by geographical information system (GIS) and computer simulation, then the simulation result was intuitively visualized by curve graphics and RGB primitive colors synthesized image and thematic maps. Result shows that the spatial analysis and visualization technologies of GIS and the computer simulation technology will provide effective tools to process and analyze data and visualize the results for the study on variable-rate fertilization.

Key words: GIS; variable-rate fertilization; scale effect; simulation