

GIS 支持下的变量施肥尺度效应模拟研究

潘瑜春 薛绪掌 陈立平 赵春江 王 秀

(国家农业信息化工程技术研究中心 北京 100089)

摘 要 以玉米 N 肥变量施肥为例, 采用 GIS 技术对不同土壤肥力水平下的变量施肥尺度对施肥量、产量和肥料增产效率的影响进行模拟计算和可视化表达。首先用“Turning Band Method”方法随机生成符合指定均值、方差和空间分布(半方差模型)的一组表示最小施肥单元的土壤养分数据, 每组 10^4 个数据, 对每组数据进行了 100 个等级尺度单元的相关效应计算和分析。模拟结果表明:(1) 随着变量施肥单元面积减小, 平均单位面积的施肥量增加或保持不变, 产量一般增加, 总的肥料增产效率也提高;(2) 施肥临界养分过渡带的变量施肥合理性和产量受尺度影响较大, 土壤肥力较高时, 空间变异小, 变量施肥尺度效应不明显。

关键词 GIS; 变量施肥; 尺度效应; 模拟

中图分类号 S15; S36

精准农业中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, 是迄今研究最多也是争议较多的一个领域^[1, 2]。早在 1996 年, 美国 Minnesota 大学对甜菜实施变量施肥, 认为变量施肥使每公顷节省 N 肥 15.52 kg, 收益平均每公顷增加 358.32 美元^[3]。美国 Oklahoma 州立大学 LaRuffa JM 等人从 1993 年开始, 以冬小麦最高产量为目标, 研究最佳施肥尺度问题, 设计了 0.84, 3.34, 13.38 和 53.51 m² 共 4 个施肥尺度, 研究结果表明在施肥单元 < 53.51 m² 时, 施肥单元减小, 产量将会提高, 投入和合理施肥对环境的影响减少^[4]。目前, 认为变量施肥节省肥料的文章很多, 证明变量施肥增产作用的可靠性的试验结果则比较缺乏^[5]。也有研究表明在大田作物如小麦、玉米、棉花上, 变量施肥的效果不是很确定^[6]。这些研究都是基于田间试验的, 不但研究周期长, 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。

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, 为我们提供各种不同的“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的结果, 因此计算机技术和 GIS 的发展为从理论上研究变量施肥尺度效应提供了可能。本文以玉米 N 肥变量施肥为例, 基于

GIS 技术模拟计算了不同土壤 NO₃⁻-N 均值水平下, 变量施肥尺度对农田施肥量、产量和肥料增产效率的影响, 旨在土壤养分空间分布已知的情况下, 为精准农业变量施肥单元大小的合理选择问题提供有益的参考。

1 材料与方法

1.1 问题提出

假设有一个 500m×500m 的地块, 并按 5m×5m 的格网采样获得了该地块 0~60cm 深的土壤 NO₃⁻-N 含量分布情况; 如果在这块地上种植玉米, 并将整个地块划分为若干均匀大小地块进行变量施肥, 那么多大的地块能够取得最佳的效益?

1.2 实现方法与流程

为解决以上问题, 首先需要通过获得的土壤 NO₃⁻-N 含量分布数据计算转换到特定施肥尺度下的土壤 NO₃⁻-N 含量分布, 依据施肥模型计算该施肥尺度下施肥量(施肥处方图), 然后通过施肥量和土壤养分计算最终产量、肥料增产效率。最后考察不同施肥单元面积下的平均施肥量、产量和肥料增产效率, 分析施肥单元面积对平均施肥量、产量和肥料增产效率的影响。

在本研究中, 施肥尺度大小用研究区域长宽的等分数表示, 尺度越小, 等分数越大, 施肥单元面积越小。如施肥尺度为 100 (为本研究中的最小施

肥尺度),表示将 500m×500m 的地块长和宽都进行 100 等份构成的格网(5m×5m 地块,即在该大小的地块进行均匀施肥),施肥尺度为 99,表示 99 等份(即分成 99×99 个单元),依此类推。

1.3 土壤 NO_3^- -N 数据获取方法

在实际生产中,土壤养分数据可以通过均匀网格采样获取,也可以通过采样数据的内插生成更细的养分分布数据。施肥单元面积与变量施肥效果的关系,要受到土壤养分特点以及空间变异特征的影响。描述土壤养分空间变异的数学参数主要有养分均值、方差和相关距。本研究通过用“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 10^4 个数)^[7]。产生的数据空间分布半方差模型符合指数模型^[8]:

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

式中, c_0 为 nugget (块金值), c 为 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 理论值为 0。

然后通过起始点坐标生成 100 行×100 列的格网,将该组随机数据按顺序赋值生成该 500m×500m 地块 0~60 cm 深的土壤 NO_3^- -N 含量空间数据,用于施肥尺度效应计算的初始养分数据。

1.4 不同施肥尺度的土壤 NO_3^- -N 含量计算

本试验是基于国家精准农业示范基地的农田条件进行模拟研究,该实验基地位于北京市昌平区小汤山镇东北部,边界范围为北纬 $40^\circ 10' 31'' \sim 40^\circ 11' 18''$,东经 $116^\circ 26' 18'' \sim 116^\circ 27' 5''$ 。年平均气温在 11.8,年平均降雨量 584.2mm。本区属于燕山山脉北麓山前洪积冲积平原。历史上地下水位高,现在地下水位 10 m 左右,区内的成土母质以洪积冲积物为主,冲积物土体深厚,由于人类活动较早,开垦耕地的历史悠久,形成一定的堆垫层,土壤质地为中壤,属褐潮土。整个基地土壤剖面普遍呈石灰性反应。0~20 cm 表层土的有机质含量 19.2 g/kg,全 N 含量 1.0 g/kg,有效 P 含量为 15.6 mg/kg,速效 K 含量为 102.5 mg/kg,常年玉米平均产量为 6750 kg/hm²。

本研究所模拟的最小施肥尺度是 100,即将区域分为 10^4 个均匀网格,每个网格表示 5m×5m 地块;最大施肥尺度为 1,即整个区域按统一的施肥量操作。当计算的第 i ($1 \leq i \leq 100$) 施肥尺度的土壤

NO_3^- -N 含量时,则生成 i^2 个边长为 $500 \times i^{-1}$ m 的正方形施肥单元格网,假设每个施肥单元为 S_i ,则通过 S_i 与最小尺度的格网叠加分析,依次可以求出第 i 尺度各施肥单元的土壤 NO_3^- -N 含量,生成第 i 尺度的土壤 NO_3^- -N 含量分布数据。每一施肥单元的具体计算方法如图 1 所示。

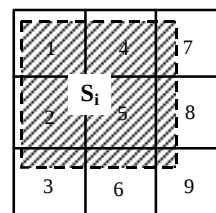


图 1 特定尺度施肥单元土壤 NO_3^- -N 含量计算方法
Fig. 1 Method for calculating soil nutrient at specific scale

图 1 中,实线构成最小施肥单元的格网 S_{100} ,阴影正方形 S_i 为第 i 尺度下所要计算的某一施肥单元,假设 S_i 与最小施肥单元格网中的 n 个网格单元有面积叠加,则 S_i 的 NO_3^- -N 含量 N_i 为:

$$N_i = \left(\sum_{j=1}^n N_j^{100} \times A_j^{100} \right) \times A^{-1}$$

式中, N_j^{100} 为与 S_i 叠加的第 j 个 S_{100} 的土壤 NO_3^- -N 含量, A_j^{100} 为 S_i 与该最小尺度施肥单元重叠的面积, A 为 S_i 的面积,即为 $25 \times i^{-2}$ hm²。

1.5 不同施肥尺度的施肥量计算

依据 North Dakota State University 的模型,施肥量是土壤养分和目标产量的函数,即:

$$N = 0.022474 YG - 8.40042 STN$$

式中, YG 为目标产量, STN 为 0~60cm 土壤 NO_3^- -N 含量, N 为纯 N 施用量 (kg/hm²)。目标产量是指最终想要达到的产量,可以根据历史产量数据获得,也可以通过多因子分析评价分析取得;整个地块的目标产量可以不一致,也可以是同一目标产量。根据第 i 尺度施肥单元下每一网格单元 S_i 的土壤 NO_3^- -N 含量和目标产量(本研究中取 6750 kg/hm²)可以计算出特定施肥单元所需的施肥量,当施肥量计算结果 < 0 时表示土壤养分充足,不需要施用肥料,因此则取值为 0。

1.6 不同施肥尺度的产量计算

产量模型为:

$$Y = (N + 8.40042 STN) / 0.022474$$

式中, STN 和 N 同施肥量模型。然而产量是有极限的,极限产量更能体现变量施肥对生态环境和经济效益的影响,如果土壤中肥力足够使作物达到极限

产量,就不需要施肥,否则造成肥料浪费。当 $Y >$ 极限产量时,产量按极限产量计,本研究中取极限产量为 6750 kg/hm^2 。施肥单元 S_i 的产量 Y_i 是最小施肥尺度网格中所有与 S_i 相交单元的重叠区域所获得的产量之和,即:

$$Y_i = \sum_{j=1}^n Y_j^{100} \times A_j^{100} \times A^{-1}$$

式中 Y_j^{100} 为第 j 个 S_{100} 与 S_i 叠加部分的产量,由上述产量模型计算得到,其中 STN 为该 S_{100} 的 NO_3^- -N含量, N 为 S_i 的施肥量,当该产量计算值大于极限产量时,按极限产量计算。

1.7 不同施肥尺度的肥料增产效率计算

肥料增产效率通过施用肥料的增产量来表达,即施肥单元内增产量与施肥量的比值。这里以最小施肥尺度下的施肥单元 S_{100} 为肥料增产效率计算的基本单元,用以表示特定施肥尺度的实际施肥量和增产量,因此肥料增产效率计算中的关键是将不同施肥尺度下所获得的增产量和施肥量转换到最小尺度单元 S_{100} 中。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 $S_{i1}, S_{i2}, \dots$;

(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_{i100} ;

(3) 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_{i100} ;

(4) 根据产量模型计算 S_{100} 在没有施肥情况下的产量 Y'_{100} ;

(5) 计算 S_{100} 的肥料增产效率 $E_{100} = (Y_{100} - Y'_{100}) \times (F_{100})^{-1}$;

(6) 重复循环(1)~(5),完成特定施肥尺度 i 的产量及施肥量的尺度转换,并完成肥料增产效益计算。

2 结果分析

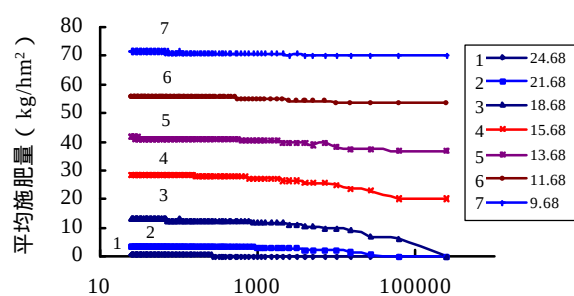
2.1 变量施肥尺度效应模拟实现结果分析

采用GIS技术,通过基于矢量网格叠加分析计算,很好地解决土壤施肥量、作物产量和肥料利用率的尺度转换问题,同时也为变量施肥尺度效应提供形象直观的可视化效果,因此成为支持精准农业变量施肥尺度效应研究的有效工具。通过计算机模

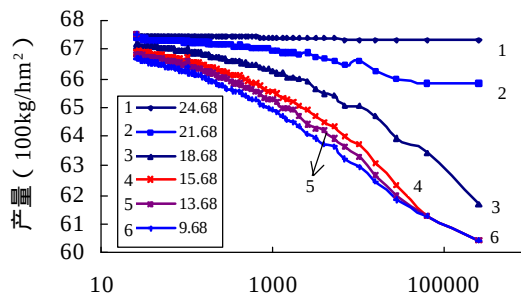
拟技术可以随机生成系统的、覆盖不同情况的大量田间养分分布数据,因此可以提供各种不同的“试验田”,为从理论上研究变量施肥尺度效应提供了可能。

2.2 变量施肥尺度效应结果分析

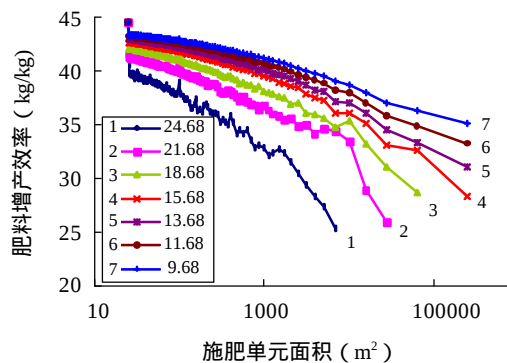
虽然随着生成随机数的均值、方差和相关距不同,其施肥尺度效应有些差别,但其结果还是有一些共同特征。图2是用方差为23.18、相关距为200m生成的均值分别为24.68、21.68、18.68、15.68、11.68、9.68 mg/kg的土壤 NO_3^- -N数据所模拟的结果(施肥临界养分分为18.09 mg/kg)。



a 均值不同时施肥尺度与平均施肥量关系



b 均值不同时施肥尺度与产量关系



c 均值不同时施肥尺度与肥料增产效率关系

图2 不同均值养分变量施肥尺度效应

Fig. 2 Scale effect on variable rate fertilization under different average nutrient content

图 2a 是不同土壤 NO_3^- -N 均值下, 平均施肥量与施肥单元面积之间关系。当均值为 9.68 mg/kg 时, 不同尺度下各个施肥单元的土壤养分大多低于施肥临界养分, 在这种情形下, 平均施肥量随施肥单元面积的减小而增大, 但是变化很小, 最大尺度和最小尺度仅相差 0.0015 kg/hm^2 。均值为 24.68 mg/kg 的情况是整个地块的土壤养分均高于施肥临界养分时的情况, 平均施肥量恒为 0。均值为 18.68 mg/kg 的情况在现实中比前两种情况较为普遍, 是整个地块的平均养分高于施肥临界养分, 而部分地点的养分含量低于施肥临界养分, 在这种情况下, 以整个地块为施肥单元时, 施肥量为 0, 随施肥单元面积的减小, 平均施肥量增加, 到最小的施肥单元面积时, 施肥量达到 10 kg/hm^2 。均值为 15.68 mg/kg 的情况在现实中最为普遍, 整个地块的平均养分含量低于施肥临界点, 在这种情况下, 平均施肥量随施肥单元面积的减小而增加。总的来看, 随施肥单元面积的减小, 平均施肥量或保持恒定, 或随之增加, 没有随之降低的情况, 也就是说, 变量施肥与常规的测土施肥相比, 施肥量不会降低, 只会持平或增加。

图 2b 为不同土壤 NO_3^- -N 均值下, 玉米籽粒产量随施肥单元面积的变化情况。当土壤 NO_3^- -N 含量较高时, 不需要施肥或施肥量很小, 产量不随或基本不随施肥单元面积变化, 也就是说, 土壤肥力较高时, 变量施肥的增产效果很小, 变量施肥的必要性不大; 随土壤 NO_3^- -N 含量降低, 产量随施肥单元面积的变化趋于明显, 从最大尺度到最小尺度的产量变幅趋于增加。值得注意的是, 当土壤 NO_3^- -N 的均值较小时 (如均值为 9.6 mg/kg), 由上述分析得知施肥量受施肥单元面积影响较小, 而产量则与施肥单元大小有很深的依赖关系, 随着施肥单元面积的增大, 产量降低非常明显。显然, 前边的施肥量与施肥单元大小的独立性只是一种表象, 随着施肥单元面积的减小, 施肥量的分布更趋于合理。随着土壤 NO_3^- -N 均值的增加, 产量增加, 但这种土壤 NO_3^- -N 浓度不同所导致的产量差异随着施肥单元面积降低, 迅速减小。

图 2c 为不同土壤 NO_3^- -N 均值时的肥料增产效率与施肥单元面积关系曲线。由图 2c 可看出, 肥料增产效率随施肥单元面积减小而增加, 当土壤 NO_3^- -N 平均含量为 21.68 mg/kg 时, 施肥单元面积从 6944 m^2 降到 25.5 m^2 , 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。随整地块土壤 NO_3^- -N 均值增加, 肥料增产效益下降, 以图 2c 中施肥单元面积为 6944 m^2 时为例, 当土壤 NO_3^- -N 平均含量为 21.68 mg/kg 时, 肥料增产效率为 25.38 kg/kg , 而土壤 NO_3^- -N 平均含量为 9.68 mg/kg 时, 肥料增产效率达 39.06 kg/kg , 显然整个地块土壤 NO_3^- -N 均值越高, 不合理施肥、无效施肥的可能性越高。整块地土壤 NO_3^- -N 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 NO_3^- -N 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。

2.3 变量施肥尺度效应空间特征分析

利用所计算的不同施肥尺度的平均施肥量、产量和肥料增产效率分别制作不同施肥尺度下的产量分布、施肥量差异分布, 并根据空间分布考察了变量施肥尺度效应的空间特征。图 3 是其中的一组 100 尺度原始 NO_3^- -N 分布图, 图 4、5 是以该组数据计算生成的产量、施肥量差异的分布图。

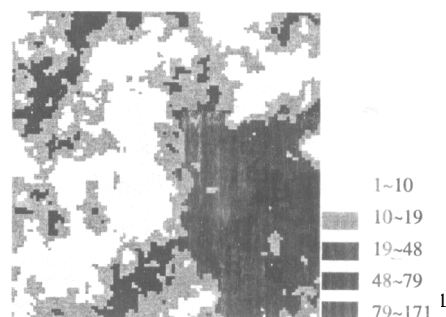


图 3 100 尺度时 NO_3^- -N 分布 (mg/kg)

Fig. 3 Nitrogen distribution at the 100 scale (mg/kg)

单从施肥量角度看, 最小施肥尺度的施肥量是按玉米所需的养分确定的, 是最合理的。通过尺度转换可以计算出特定施肥尺度与最小施肥尺度之间的施肥量差, 这种以最小施肥尺度为单元的施肥量可以反映该尺度施肥合理程度 (多施或少施) 及其空间分布, 如图 4 所示。由图 4 可以看出, 随着施肥单元面积 (尺度) 增大, 不合理施肥越明显, 施肥量变异增大, 图中施肥量差异变化区间由 90 尺度的 $[-30, 26]$ 扩大到 34 尺度的 $[-68, 53]$, 而且施肥不合理单元分布在 NO_3^- -N 含量变化较大的区域, 尤其是处于施肥临界养分过渡带。施肥差为 0 的区域分布在具有大范围连续分布的 NO_3^- -N 含量高于临界

含量 (18.09 mg/kg) 的区域。 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 均值较低时, 在空间变异大的地块进行大尺度施肥更容易产生不合理施肥, 同时若地块具有较多分散分布的高于施肥临界含量单元, 大尺度施肥将更多地减少施肥量。

由图 5 可以看出, 随着施肥单元面积 (尺度) 增大, 低产量单元增多, 产量空间变异增强, 而且低产区与图 4 中 < 0 的分布区一致, 也就是说该区域与最小施肥尺度相比, 没有施用足够的 N 肥, 造成产量偏低。同时可以看出随着施肥尺度增大, 产量的空间变异性增大, 一般在最小施肥尺度状态下,

产量达到最高, 产量空间变异也最小。值得注意的是产量并不是随施肥尺度减小而均匀增长, 而是开始增长快速, 达到一定单元大小后其增长开始减缓, 施肥量也有同样的增长趋势 (如图 2 所示)。从经济效益角度来说, 发生这种转变的等级单元可以作为最佳施肥单元的参考点。土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 均值低于施肥临界含量时, 区域空间变异小, 尤其是高于施肥临界养分含量单元很少或没有时, 变量施肥效果不明显, 也就是说没有必要进行变量施肥。

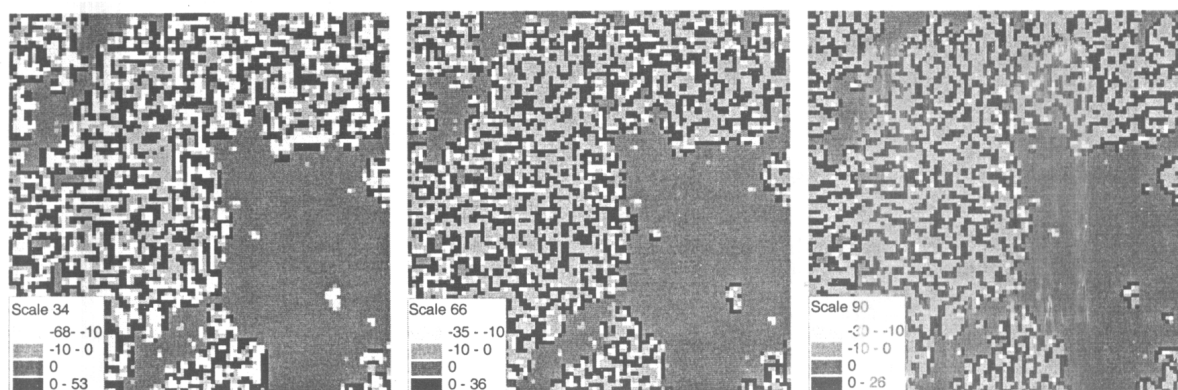


图 4 施肥量差分布 (单位: kg/hm^2)

Fig. 4 Variable rate fertilization margin between certain scale and the 100scale (kg/hm^2)

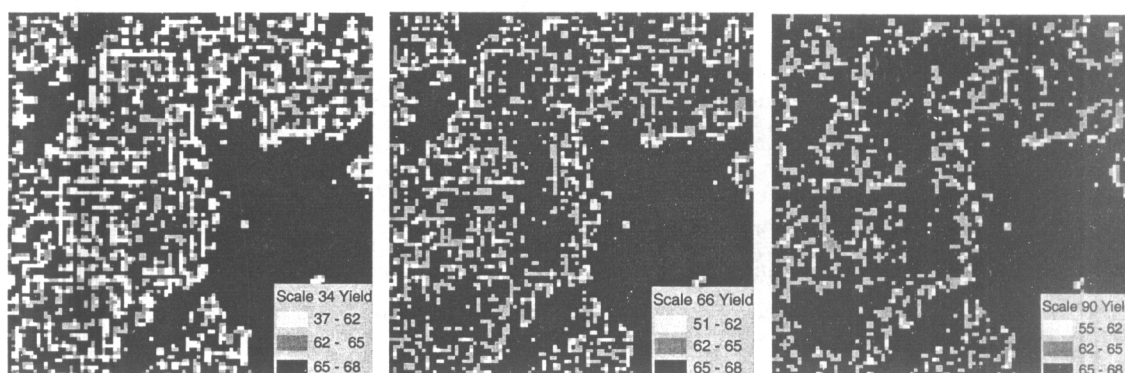


图 5 不同施肥尺度的产量分布 (100kg/hm^2)

Fig. 5 Yield distribution at different scales (100kg/hm^2)

图 4 中施肥量差 ≤ 0 的区域不可能增产, 谈不上肥料增产效率。一般施肥量差越大, 肥料增产效率越低, 因此从空间分布上看, 肥料利用率低的区域分布在施肥临界养分过渡带的低养分含量侧, 趋向低养分区, 肥料利用率越高; 而在此过渡带的高

养分含量侧, 则由于缺少施肥而表现为低产区。

3 结论与讨论

本文研究结果表明:

(1) 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。

(2)随着施肥单元面积减小,平均单位面积施肥量不会减少,而是增加或保持不变,平均产量和总的肥料增产效率提高。土壤肥力分布较高,空间变异较小,尤其是肥力超过施肥临界值时,变量施肥的意义不大。

(3)土壤肥力及其空间变异对最佳施肥尺度选择影响较大,土壤肥力水平较低时,在空间变异大的地块进行大尺度施肥更容易产生不合理施肥单元,且分布在土壤养分含量变化较大的区域,尤其是处于施肥临界养分过渡带。

本文主要研究了不同土壤养分均值条件下,变量施肥的尺度效应,在不同土壤养分方差和不同空间相关尺度下,施肥单元面积对施肥量、产量和肥料增产效率的影响有待进一步研究。

参考文献

1 Http://www. farmresearch. com, George Rehm. A Multi-

Disciplinary evaluation of precision farming, A final progress report (Minnesota) for 2001, prepared for United Soybean Board. 2002

2 区美美, 王建武. 土壤空间变异研究进展. 土壤, 2003, 35(1): 30 ~ 33

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

4 LaRuffa JM, Raun WR, Phillips SB. Optimum field element size for maximum yields in winter wheat using variable nitrogen rates. Journal of Plant Nutrient, 2001, 24: 313 ~ 325

5 Swinton SM, Lowenberg-DeBoer J. Evaluating the profitability of site-specific farming. Journal of Production Agriculture, 1998, 439 ~ 446

6 刘世洪. 精准农业的发展现状. 农业科技通讯, 1999, 10: 1 ~ 5

7 Tompson AFB, Ababou R, Gelhar LW. Implementation of the three dimensional turning bands random field generator. Water Resour. Res., 1989, 25(10): 2227 ~ 2243

8 Edward H, Isaaks R, Mohan Srivastava. An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press, 1989, 373 ~ 375

USING GIS TO STUDY INFLUENCE OF MANAGEMENT ZONE SIZE ON VARIABLE-RATE FERTILIZATION

PAN Yu-chun XUE Xu-zhang CHEN Li-ping ZHAO Chun-jiang WANG Xiu

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

Abstract In this study, the authors use GIS to simulate the influence of management zone size on variable-rate fertilization in soil with different soil nitrate levels. Field distribution dataset series of soil nitrate concentration in 500m×500m field were generated based on given mean, standard deviation and related distance. Each dataset is composed of nitrate concentration values at 10^4 cells, each being 5m×5m in size. The amount of fertilizer used and yield of field unit from scale 100 to 1 were then calculated based on the generated soil nitrate distribution. The results show that when the size of a management zone decreases, precise fertilization will increase or maintain, instead of decreasing, the fertilization rate, and yield and nitrogen use efficiency will also increase. As the size of a management zone has much influence on reasonability for variant rate fertilization and yield in fertilization critical nutrient transitional areas, spatial variation becomes less and the scale effect on variable rate fertilization less significant when soil fertility is higher.

Key words GIS, Variable-rate fertilization, Management zone, Influence