

基于多维空间变异分析的精确农业作业单元自适应决策

杨敏华^{1,2}, 陈立平¹, 孟志军¹, 王 秀¹, 赵春江¹

(北京农业信息技术研究中心; 21 湖南武陵大学)

摘 要: 针对精确农业技术体系中最佳农艺作业单元大小, 该文提出了一种用纵、横探测法推求土壤特性空间变异、作物长势空间变异以及前茬作物产量空间变异等多维空间变异指数, 进而按一定农学原则决定最佳农艺作业单元尺寸的自适应解决方案。结果表明, 用该算法确定的农艺作业单元尺寸进行变量施肥, 平衡效果良好率在 90% 以上。该算法的另一特点是, 对矢量和栅格数据具有同样的适用性, 较易在矢栅混合型 GIS 上实现。

关键词: 精准农业; 多维空间变异; 农艺作业单元

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 100226819(2002)0220149204

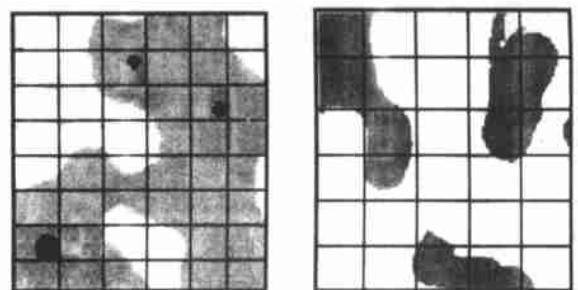
精确农业是一套基于空间信息管理和变异分析的现代农业操作系统。精确农业的核心思想就是根据土壤性状和作物生长状况的空间差异, 调节对作物的投入, 即一方面对耕地和作物进行定量的实时诊断, 充分了解大田生产力的空间变异; 另一方面则以平衡地力、提高产量为前提, 实施定位、定量的精确田间管理, 从而实现高效利用各类农业资源和改善环境这一可持续发展目标。

以遥感(RS)、地理信息系统(GIS)和全球定位系统(GPS)为代表的现代空间信息技术的发展和不断完善, 使得精确农业的思想得以逐步实现, 并很快在世界范围内得到广泛关注。中国在 20 世纪 90 年代后期开始了对精确农业的关注和适当引入。由国家发展计划委员会立项实施的“引进、消化、开发和推广”的精确农业示范工程已在北京昌平小汤山正式启动, 开始了适合中国国情的精确农业技术体系的探索与研究。本文探讨的问题是在现代信息技术支撑下, 大面积实施精确农业技术措施时, 不同条件下如何确定合适的最小田间作业单元? 我们知道, 在 DGPS 引导下能实现平方米级单元面积的作业精度; 农艺处方单元愈小, 对大田生产力空间差异的调节就愈精确。但是, 过小的处方单元会成几何级数地增大数据处理与存储容量。此外, 田间作业中通过自控频繁地调节作业机械的输出量, 也会增加机械磨损和设计难度。由此可见, 针对不同的土壤性状、作物长势及营养状况等多维空间变异, 选择经济合理的农艺处方单元大小是十分必要的。

1 空间变异与农艺处方单元

确定经济合理的农艺处方单元尺寸大小的依据是土壤性状、作物长势及营养状况等多维要素的空间变异。

图 1 所示为形状、大小相同, 但土壤肥力及其空间差异有别的两个地块。图 1a 为土壤肥力空间差异较大的情形, 为调整和平衡这种业已存在的空间差异, 变量机械作业时, 将地块划分为 48 个农艺处方单元, 实施变量施肥; 图 1b 为土壤肥力空间差异较小的情形, 变量机械作业时, 将地块划分为 30 个农艺处方单元便可实现调整和平衡空间差异的目的了。可见, 确定农艺处方单元尺寸大小的基本原则为: 地力要素的空间变异愈大, 农艺处方单元应愈小, 反之, 各要素的空间变异愈小, 农艺处方单元面积则应增大。



a 空间变异较大的情形 b 空间变异较小的情形

图 1 空间变异大小与农艺处方单元尺寸

Fig 1 Relationship between the spatial variability and the size of farming unit

2 空间变异指数与农艺处方单元尺寸算法

2.1 空间变异表达的农学适应性

我们称农艺处方决策系统对各要素变异范围的量化分级要求为空间变异表达的农学适应性。一般

收稿日期: 2001211227 修订日期: 2002202230

基金项目: 国家发展计划委员会资助项目(A 00300100584)

作者简介: 杨敏华, 副教授, 北京农业信息技术研究中心, 100089。

情况下,在农学意义范围内将土壤肥力诸要素和作物长势、营养状况、病虫害发生程度等划分为 3~5 个量化级别。通常,这种量化级差与定性描述时的“上、中、下”和“优、良、一般、较差、差”有着对应关系。因此,对土壤肥力和作物生长状况进行空间变异分析时,均依据这一要求实现各要素的空间变异表达。

2.1.2 空间变异指数的定义及其算法

依据各要素空间变异愈大,农艺处方单元愈小,空间变异愈小,农艺处方单元愈大这一基本原则,同时顾及地块在纵横两个方向的变异程度可能相差较大等因素,本文定义纵横两个方向的空间变异指数及其算法如下:

1) 在地块两侧定义一条南北方向的变异探测线(图 2a);

2) 在由西向东按适当步距的“探测”过程中,探测线长度 d_z 始终动态地与地块南北向等长;

3) 探测步距 $\$$ 建议值为变量机械的作业宽度;

4) 设地块的东西向宽度 D_{WE} 与探测步距 $\$$ 的比值: $D_{WE}:\$$ 为纵向探测次数 N_z ;

N_z 次探测中每次探测线穿越等值线的次数为 m_i ,则逐次纵向搜索的空间变异指数为

$$E_i = d_{zi} \cdot \bar{m}_{zi}$$

式中 d_{zi} ——与相对应的探测线长度。

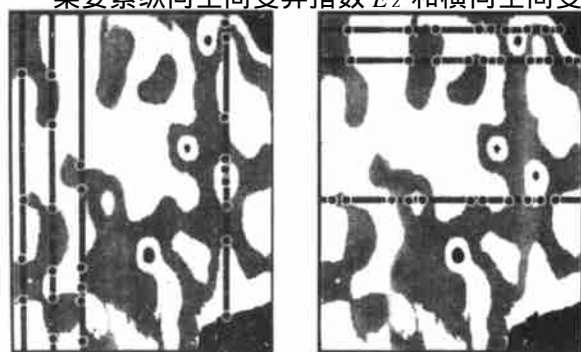
最后得,整地块第 j 个要素变异最大处的纵向空间变异指数

$$E_{zj} = M \text{ IN } \{E_0, E_1, \dots, E_i, \dots, E_{Nz}\} \quad (1)$$

类似地,改变探测线为东西向(图 2b),探测行进方向为由北向南,则有整地块第 j 个要素变异最大处的横向空间变异指数为

$$E_{Hj} = M \text{ IN } \{E_0, E_1, \dots, E_i, \dots, E_{Nz}\} \quad (2)$$

某要素纵向空间变异指数 E_z 和横向空间变异



a1 各探测线纵向穿越等值线次数 b1 探测线横向穿越等值线次数

图 2 用探测法分别确定纵、横向空间变异指数

Fig 2 Detemining the vertical & horizontal indexes of spatial variability with the detecting method

指数 E_H ,可形象地理解为最小纵向等值线平均间距和最小横向等值线平均间距,而等值线间隔(值差)恰好就是具有农学意义的一个量化变异级差。

3 基于多维空间变异分析的农艺处方单元自适应决策

对于具有 m 个参考要素(如,碱解氮、全氮、速效磷、速效钾、产量等)的情形,由式(1)和式(2)所得各要素的纵向空间变异指数 E_{Hj} 和横向空间变异指数可表为 m 维向量

$$E_z = \{E_{z0}, E_{z1}, E_{z2}, \dots, E_{zj}, \dots, E_{zm}\} \quad (3)$$

$$E_H = \{E_{H0}, E_{H1}, E_{H2}, \dots, E_{Hj}, \dots, E_{Hm}\} \quad (4)$$

上述两式中, E_z 和 E_H 分别反映了农田地块 m 个要素在纵横两个方向的变异程度。

此外,可根据各要素在决定农艺处方单元大小中的农学作用,构造权向量为

$$P = \{p_0, p_1, \dots, p_j, \dots, p_m\} \quad (5)$$

式中 $\sum_{j=0}^m p_j = 1$

为方便数据管理和农田操作,一般将农艺处方单元形状规定为矩形。根据 m 维向量 E_z 和 P 的实际意义,可得矩形农艺处方单元竖边长

$$S_z = E_z \cdot P^T \quad (6)$$

可得矩形农艺处方单元横边长

$$S_H = E_H \cdot P^T \quad (7)$$

通常情况下,当农艺处方单元竖边长 S_z 和横边长 S_H 之差不超过 40%,即满足条件

$$0.16 (S_z - S_H) \leq 0.14 \quad (8)$$

时,可将农艺处方单元形状调整为正方形,边长

$$S = \text{int}[(S_z + S_H) / 2] \quad (9)$$

即,正方形农艺处方单元边长等于原矩形边长均值的取整值。

实际操作中,宜将正方形农艺处方单元边长 S 调整为与农机具作业宽度的整数倍最接近值。

4 应用实例

4.1.1 试验样地基本情况

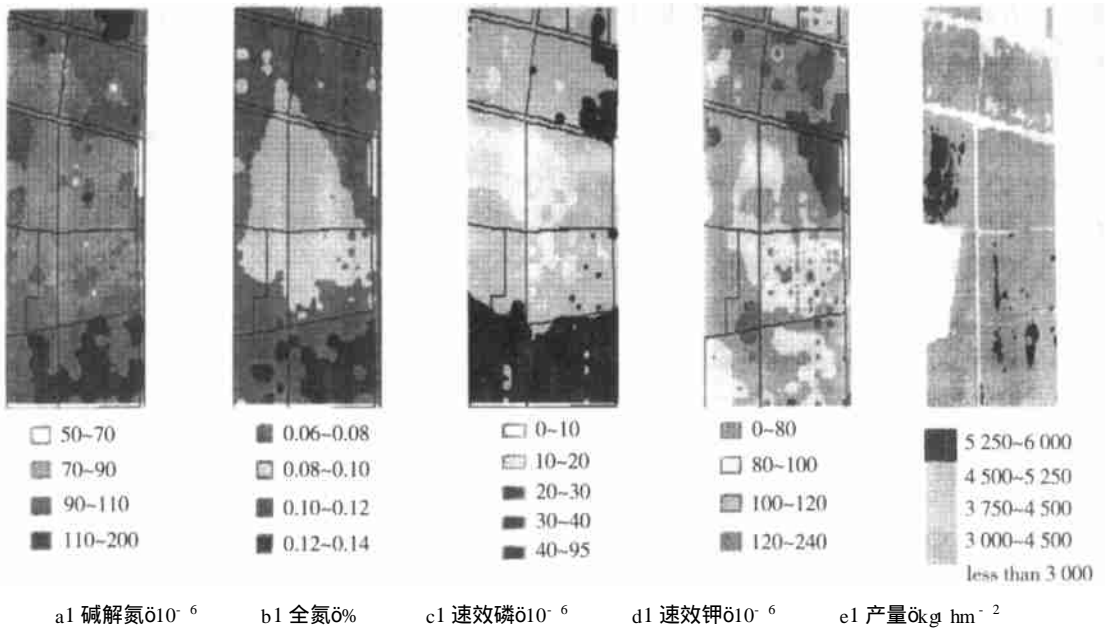
2000 年 9 月,在北京小汤山精确农业示范基地内一号地按 40 m × 40 m 间隔进行土壤采样,共 308 个采样点所得土壤特性碱解氮、速效磷、速效钾、全氮的变异幅度如表 1。2001 年 6 月,利用从美国 CASE 公司引进的自动计产联合收割机所得产量数据也一并列入表 1。

表 1 2000 年 9 月 1 号地块土壤特性与产量变异幅度

Table 1 Variance range of soil characteristics and crop yield of No. 1 plot in the research base

要素名称	最小值	最大值
碱解氮 $\delta \times 10^{-6}$	50100	197156
速效磷 $\delta \times 10^{-6}$	11312	901785
速效钾 $\delta \times 10^{-6}$	161630	2311900
全氮 $\delta\%$	01069	01135
前茬产量 $\delta \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	2 970	5 970

依照农艺处方专家系统对参与决策信息的量化



a1 碱解氮 $\delta 10^{-6}$ b1 全氮 $\delta\%$ c1 速效磷 $\delta 10^{-6}$ d1 速效钾 $\delta 10^{-6}$ e1 产量 $\delta \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

图 3 土壤-作物五要素(维)空间变异的农学适应性表达

Fig 3 Agronomy expression of spatial variability to the 5 factors (dimension) of soil and crop

1) 选定 2000 年 9 月土壤采样分析所得碱解氮、全氮、速效磷、速效钾数据和 2001 年 6 月所得产量数据, 作为决定农艺处方单元大小的参考要素, 数据变异范围如表 1 所示;

2) 对入选的 5 个要素进行空间插值, 均按 5 个级差用等值线表示各要素的空间变异程度, 如图 1 所示;

3) 用探测法分别获取各要素的纵向空间变异指数 E_z 和横向空间变异指数 E_H 。图 2(碱解氮空间变异分布)中, 分别保留了纵向搜索和横向搜索探测的 2 个不同状态。图中左侧纵向探测线为第 i 次探测所得穿越等值线次数 $m_i = 16$ 的情况; 右侧纵向探测线为穿越等值线次数最多, 即 $m_{z,max} = 19$ 的情况; 上侧横向探测线为第 i 次探测所得穿图 2 碱解氮变异指数探测图越等值线次数 $m_i = 7$ 的情况; 下侧横向探测线为穿越等值线次数最多, 即 $m_{H,max} = 10$ 的情况。入选的 5 个要素(碱解氮、全氮、速效磷、速效钾数据和产量)纵向探测穿越等值线次数最多的 M_z

分级要求, 对上述各要素层进行空间插值后, 按 5 个数量等级给出其空间变异分布, 如图 3 所示。

图 3 所示一号地种植面积为 $(440 \text{ m} \times 900 \text{ m}) 3916 \text{ hm}^2$ 。可见, 地块内各要素在局部区域的空间变异较大。

412 农艺处方单元尺寸决策实例

如图 3 所示, 选择反映土壤性状的速效氮、速效磷、速效钾、全氮 4 种要素和反映前季(茬)作物产量状况的空间变异, 说明上述自适应农艺处方单元决策过程。

和横向探测穿越等值线次数最多的 M_H 为:

$$M_z = \{19, 15, 20, 25, 31\};$$

$$M_H = \{10, 8, 10, 13, 25\}$$

小汤山示范基地一号地有效种植区为一规则矩形地块, 长宽分别为 900 m 和 440 m。

于是有, 纵向空间变异指数和横向空间变异指数分别为

$$E_z = \{4714, 6010, 4510, 3610, 2910\}$$

$$E_H = \{4410, 5510, 4410, 3318, 2110\}$$

4) 农艺处方单元尺寸计算。依据 5 个入选要素的农学意义与作用, 权向量取值规定为

$$P = \{0125, 011, 012, 0115, 013\}$$

依据式(6), 有矩形农艺处方单元竖边长

$$S_z = E_z \cdot P^T = 4714 \times 0125 + 6010 \times 011 + 4510 \times 012 + 3610 \times 0115 + 2910 \times 013 = 4018 \text{ m}$$

依据式(7), 有矩形农艺处方单元横边长

$$S_H = E_H \cdot P^T = 4410 \times 0125 + 5510 \times 011 + 4410 \times 012 + 3318 \times 0115 + 2110 \times 013 = 3617 \text{ m}$$

由于 $S_z \oslash S_H = 4018 \oslash 3617 = 1111$, 满足式(8)所给条件, 故可将农艺处方单元形状调整为正方形, 边长

$$S = \text{int}[(S_z + S_H) \oslash 2] = \text{int}[(4018 + 3617) \oslash 2] = 39 \text{ m}$$

实际操作中, 如果变量机械的作业宽度为 6 m, 则最后的农艺处方单元边长 S 可调整为 36 m 或 42 m。

5 结论与讨论

本文所给算法, 对精确农业技术体系中自动确定最佳农艺处方单元大小这一基本问题, 以多维空间变异分析为依据, 给出了一个合理且简便实用的解决方法。该方法较好地体现了大田生产力空间差异愈大, 农艺处方单元愈小; 大田生产力空间差异愈小, 农艺处方单元愈大这一基本原则, 实现了农艺处方单元形状和大小随地块不同而自动做出适应性变化。一般情况下, 该算法给出的农艺处方单元形状为正方形, 但当纵横两个方向空间变异差别较大时, 给出的农艺处方单元形状则为长方形。

在小汤山示范基地一号地实例中, 用 $36 \text{ m} \times 36 \text{ m}$ 大小的农艺处方单元格网, 对局部差异表现为最大的产量空间差异分布(图 3e)进行模拟平衡施肥, 结果发现: 在 305 个农艺处方单元格中, 同时涵盖两根等值线的单元格数为 29 个, 仅占 9.15%。如果认为同时涵盖两根等值线的情形为单元格内基底差异已超过一个数量级差, 用某个农艺处方难以达到平衡施肥效果的话, 那么, 这种“效果较差”的作业单元数也不足 10%。换句话说, 在小汤山示范基地一号地内, 用 $36 \text{ m} \times 36 \text{ m}$ 大小的农艺处方单元进行变量施肥, 平衡效果良好率在 90% 以上。由此可见, 本文提出的基于多维空间变异分析的自适应农艺处方单元策略达到了预期效果, 具有很好的实用价值。

Strategy of Adaptive Precision Agriculture Unit Based on the Analysis of Multidimensional Spatial Variability

Yang Minhua^{1,2}, Chen Liping¹, Meng Zhijun¹, Wang Xiu¹, Zhao Chunjiang¹

(11 Beijing Agricultural Information Technology Research Center, Beijing 100089, China;

21 Hunan Wuling University, Zhangjiajie 427000, China)

Abstract Aimed at suitable size of farming unit in the system of Precision Agriculture, this paper presents a detecting method in two directions to get the vertical & horizontal indexes of the multidimensional spatial variability of soil chara, crop growing status and the previous yield, and then to determine the size of farming unit adaptively, according to the agronomy principles. The result show that the fertilization equilibratory effect of favorable rate is greater than 90%, when we use the variable rate of farming unit size determined by this method. Another characteristic of this arithmetic is that it is easily applicable for both of vector and grid data format of GIS.

Key words: precision agriculture; multidimensional spatial variability; farming unit

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

该方法仅为实现农艺处方单元自适应决策途径之一, 仍有许多值得进一步研究和改进的地方, 如各要素空间差异表达的农学适应性评价、各要素在决定农艺处方单元大小中的权重等, 均有待完善和逐步修正。

致谢 中国农业大学精细农业研究中心的刘刚博士、邝继双博士、张曼博士和刘卉、孙要夺硕士等在土壤采样 GPS 定位和产量数据获取中付出了艰辛劳动; 北京农业信息技术研究中心的王纪华博士和黄文江、杨信庭硕士等在土样化验分析中做了大量工作, 一并在致致谢。

[参 考 文 献]

- [1] Agterberg F P. In spatial statistics and models[C]. Edited by G L Gaile and C J Willmott (Reidel, Dordrecht, the Netherlands, 1984), . 147.
- [2] Froment M A, Chalmers A G, Peel S, et al. In: proceedings of the 3rd international conference on precision agriculture[C]. Edited by P C Robert, R H Rust and W E Larson (ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, 1996), 227.
- [3] McBratney A B, Pringle M J. In precision agriculture '97, volume 1: spatial variability in soil and crop[C]. Edited by J. V. Stafford (BDS Scientific Publishers, Oxford, 1997), 3.
- [4] Dampney P M R, Froment M A, Dawson C J. In precision agriculture [A] 1997, Volume 1: Spatial Variability in Soil and Crop [C]. Edited by J. V. Stafford (BDS Scientific Publishers, Oxford, 1997), 87.
- [5] Frogbrook Z L. In precision agriculture [C] 1999, edited by J. V. Stafford (Sheffield Academic Press, Sheffield, 1999), 71.