

小麦多年产量空间变异与空间关联分析*

陈云坪¹ 王 秀² 马 伟² 赵春江²

(1. 电子科技大学自动化工程学院, 成都 611731; 2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

【摘要】 利用全局空间统计方法 Moran’s I 和局部空间统计方法 LISA 研究了小汤山国家精准农业基地 2001 ~ 2006 年小麦产量及两种气候模式下产量的空间变异和空间关联。研究结果表明,不同年份产量及气候模式下均存在极显著的空间自相关;全局和局部空间自相关分析表明,试验地块的东北部、西部和南部区域存在极显著的空间自相关,但东北部和西部区域在不同的气候模式下产量变化幅度较大,而南部区域产量趋于稳定。

关键词: 小麦产量 空间相关性 自相关

中图分类号: S11⁺4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)10-0180-05

Spatial Autocorrelation Analysis of Wheat Yield over Five Years

Chen Yunping¹ Wang Xiu² Ma Wei² Zhao Chunjiang²

(1. School of Automation, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China

2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract

Spatial correlation of wheat yield and yield pattern changes under two weather scenarios had been analyzed using Moran’s I and LISA. The results indicated there were most significant spatial autocorrelations among different yield patterns. Statistically, wheat yields were highly spatially correlated in cold years. With global and local spatial statistics, LISA map of yield differences in two weather patterns, stable and unstable yield areas were identified. Most significant spatial autocorrelations had been found in the northeast, west and south region. The northeast and west region of the field tended to be unstable, while the south region tended to be stable between different weather patterns.

Key words Wheat yield, Spatial correlation, Autocorrelation

引言

由于作物产量是一个综合性指标,它一方面反映土壤养分的本底差异以及作物肥料利用率不同,另一方面也反映作物生长的各种环境差异,同时其信息量较大,获取方法简便易行。因此,基于作物产量图的施肥方式被认为是真正意义上的精准施肥^[1-3]。

国外开展相关研究较早,已有不少学者从事产量的时空变异研究^[4]。目前的研究主要通过地统计和内插的方法研究产量空间变异性^[5-6],时间变

异性的研究则往往采用对历年空间分布图的比较分析、传统统计方法、时间变异系数的计算与比较等方法。但由于作物产量的时间变异远大于空间变异^[7],因此,对时间变异性进行研究的要求更为迫切。

本文基于平均气温的差异将多年产量分成不同的气候模式,采用空间全局关联和局部关联的方法研究多年小麦产量的空间变异性,考察在不同气候模式下小麦空间变异趋势,确定田块内产量随时间保持稳定低产、稳定高产和不稳定的区域,其结果有助于指导精准农业变量施肥。

收稿日期: 2010-01-27 修回日期: 2010-03-09

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA10A308)、“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2008BADA0B06)和四川省科技支撑项目(2008SZ0147)

作者简介: 陈云坪,讲师,博士,主要从事精准农业及地统计学研究, E-mail: chenyp@uestc.edu.cn

1 材料与方法

1.1 产量数据的获取

试验区位于国家精准农业研究示范基地,为一块多年种植小麦的自然地块,面积约 8.4 hm²。该地块在 2001 ~ 2006 年间一直采用常规的统一管理模 式,没有进行过变量施肥试验,产量的 高低主要是由 地块自身生产潜力的空间变异所致,因此该地块是研究土壤肥力空间变异的理想用地。收获时,利用 CASE IH2366 谷物联合收获机 AFS 测产系统获得产量数据(2003 年产量数据由于收获机机械故障未能获取)。

1.2 全局和局部空间关联

全局空间关联(global spatial association)用于描述区域单元某种现象的整体分布状况,以判断该现象在空间是否存在聚集性。Moran's I 是常用的检验统计量,其计算公式为^[8-10]

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_i - \bar{X}) (X_j - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}}$$

式中 I ——Moran's I 值
 n ——观察值的个数
 X_i, X_j ——属性值在区域单元 i, j 上的观察值
 $\bar{X}$ ——所有观察值的平均数
 W_{ij} ——空间权重矩阵的元素

Moran's I 指数的值域为 $[-1, 1]$,Moran's I 值大于零,说明全局空间自相关是正相关,小于零为负相关,其绝对值越大,说明相关程度越大。

全局空间自相关指数,只能说明研究范围中某种现象的整体分布状态及关联程度,但不能说明属性相似聚集区的空间分布位置。Anselin (1995) 提出了空间自相关的区域型指标(local indicators of spatial association,简称 LISA),即局部 Moran's I 统计量。对于任一空间单元 i ,局部 Moran's I 值的计算公式^[11]为

$$I_i = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} (X_i - \bar{X}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_j - \bar{X})$$

当 I_i 为正时,区域 i 的空间关联可能有如下两种情况:属性值高于均值的空间单元被属性值高于均值的邻域所包围(“高-高”关联),或者是属性值低于均值的空间单元被属性值低于均值的领域所包围(“低-低”关联)。若 I_i 为负,区域 i 的空间关联可能也有两种情况:属性值高于均值的空间单元被属性值低于均值的邻域所包围(“高-低”关联),或者

是属性值低于均值的空间单元被属性值高于均值的邻域所包围(“低-高”关联)。如果 I_i 值接近于零,说明区域 i 与其邻域不存在空间关联,即该区域的空间分布呈现随机分布状态。

2 数据预处理

2.1 填充时间误差分析

每次收获机开始收获时,谷物流量和谷物含水率都有一个逐步增加达到相对稳定状态的过程,这一过程经历的时间称为填充时间(filling time)^[12-13]。在填充时间内所记录的产量数据是无效的,这些数据称为填充时间误差数据。通过对谷物流量与谷物含水率填充时间的研究,可以掌握其产生与变化规律,从而达到识别与补偿填充时间误差的目的。图 1 为割台放下后,谷物流变化曲线,取 6 条收割带(P1 ~ P6)。

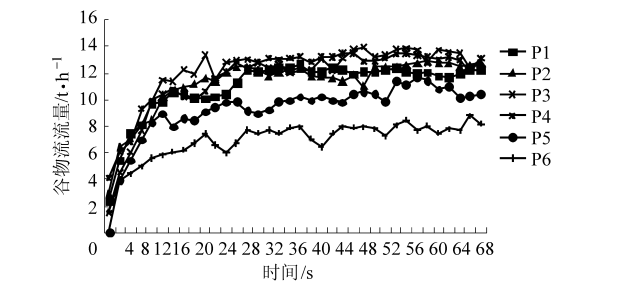


图 1 割台放下后小麦谷物流流量变化曲线
Fig. 1 Grain flow curves of wheat after the cutter lay down

对 6 条曲线进行拟合的公式为
$$y = a + b(1 - \exp(-x/c)) \tag{1}$$

拟合结果如表 1 所示。

表 1 填充时间拟合结果		
Tab.1 Fitting results		
收割带	填充时间 c/s	调整决定系数
P1	7.7	0.948
P2	7.6	0.951
P3	6.6	0.951
P4	10.3	0.950
P5	6.6	0.907
P6	10.5	0.886
平均数	8.2	

由表 1 可见,使用式(1)对填充时间进行拟合,拟合后调整决定系数均在 0.9 左右,且绝大多数高于 0.9,拟合程度很高,根据计算结果,以平均时间 8.2 s 作为填充时间。

2.2 过滤结果

采用 Yield Editor 产量处理软件进行综合误差

处理,以 8.2 s 谷物流填充时间,平均数 ± 3 倍标准差的范围对产量数据进行过滤,共删除数据点 980 个,占原数据的 21%。与过滤前相比,过滤后平均数变化不大,但标准差和变异系数都有极显著降低,尤其是变异系数由过滤前的 32.3%降低到 14.8%,减小了数据的变异程度。结合平均数基本不变的结果,说明过滤的过程删除原始数据中的极大值和极小值,使数据分布趋于集中。

3 结果与分析

光、温、水是作物生长的三要素,由于北京地区小麦的起身、拔节、孕穗期主要集中在 4 月上旬到 5 月上旬,因此,4 月份的水、温条件对小麦产量具有非常重要的影响。从气象资料分析,2004、2005 年 4 月份平均温度高于历年同期平均温度;2001、2002 及 2006 年 4 月份平均温度则低于历年同期平均温度。从降水量来看,除 2006 年降水明显偏低以外,各年 4 月降水量接近历年平均降水量。由各年产量与 4 月份平均温度关系图(图 2)可见,产量与 4 月份平均温度变化趋势较为一致,这一现象可能有助于研究产量的时间变异。

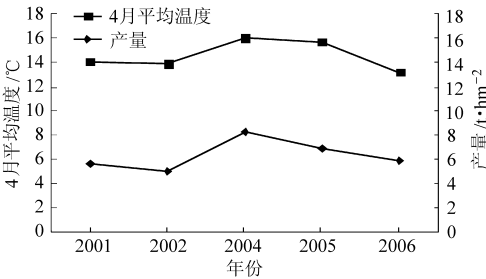


图 2 4 月份平均温度与产量关系曲线
Fig. 2 Relationship of yield and average temperature of April

3.1 年份间产量相关性分析

由 5 年的产量可知,2 个高温年份(2004、2005)产量均高于低温年份(2001、2002、2006)。对各年份的产量作简单相关分析,结果表明,虽然 2001、2002、2004 年之间存在极显著的相关关系,但其余各年份之间则不存在显著的相关关系。陈立平通过比较两年的产量数据认为不同年份之间产量的相关程度不高^[14]。Wollenhaupt 也指出作物产量的时间变异远大于空间变异,占总变异的 67%,而空间变异仅达到 10%^[15]。

为了对各年的产量进行比较,首先采用 Blackmore 的方法对各年份的产量进行标准化^[16]

$$Y_i = 100(y_i/\bar{y}) \tag{2}$$

式中 y_i ——点 i 处的实际产量
 $\bar{y}$ ——田块的平均产量

Y_i ——点 i 处的标准产量

按照当年 4 月份温度与多年同期平均温度的比较,将 5 年中高于平均温度和低于平均温度分为较高温年份和较低温年份 2 类,并在这 2 种气候类型下探讨大田小麦空间变异情况。由于 2004 年和 2005 年 4 月份温度均高于历年平均温度,因此,计算两年平均产量,由求得的平均数代表高温年份的小麦产量。采用式(2)对各年产量进行标准化。则高温年份的产量可表示为

$$Y'_{\text{high}} = (Y'_{2004} + Y'_{2005})/2$$

式中 Y'_{high} ——高温年份的标准产量, Y'_{2004}

Y'_{2004} 、 Y'_{2005} ——2004 年和 2005 年的标准产量
同理,低温年份的标准产量可表示为

$$Y'_{\text{low}} = (Y'_{2001} + Y'_{2002} + Y'_{2006})/3$$

式中, Y'_{low} 、 Y'_{2001} 、 Y'_{2002} 、 Y'_{2006} 分别为低温年份、2001 年、2002 年、2006 年标准产量。以高温年份和低温年份标准产量之间的差值来对不同温度年份的产量差异进行比较,该差值表示为

$$Y_{\text{DIF}} = Y'_{\text{high}} - Y'_{\text{low}}$$

3.2 小麦产量全局空间自相关分析

为对不同产量表达形式的空间关联进行比较,对实际产量、标准化产量、标准化产量差等几种产量表达形式分别计算 Moran's I 值,其结果如表 2 所示。

表 2 Rook 权重矩阵下不同产量的全局 Moran's I
Tab. 2 Global correlation of different variables with Rook's weight matrix

参数	I 值	Z 值	概率
Y_{2001}	0.690 9	16.61	<0.001
Y_{2002}	0.548 1	13.20	<0.001
Y_{2004}	0.365 6	8.90	<0.001
Y_{2005}	0.534 5	12.88	<0.001
Y_{2006}	0.710 3	17.07	<0.001
Y'_{2001}	0.690 8	16.61	<0.001
Y'_{2002}	0.548 1	13.20	<0.001
Y'_{2004}	0.365 4	8.89	<0.001
Y'_{2005}	0.534 2	12.87	<0.001
Y'_{2006}	0.710 9	17.08	<0.001
Y'_{low}	0.653 0	15.83	<0.001
Y'_{high}	0.573 1	13.78	<0.001
Y_{DIF}	0.465 8	9.26	<0.001

$$\text{注: } Z = [I - E(I)] / \sqrt{\text{Var}(I)}$$

从表 2 可知,尽管所有产量的 Moran's I 值均达到了极显著水平,但 2004 年的 Moran's I 值最低,说明 2004 年小麦产量空间关联最小。对比 5 年的温度变化可以发现,当 4 月平均温度较低时, Moran's I

值较高;而当 4 月平均温度较高时,Moran's I 值较低,两者之间有显著负相关。即随着 4 月份平均温度的升高,小麦产量之间的空间自相关程度降低。

3.3 小麦产量的局部空间自相关分析

如前所述,利用 LISA 进行局部统计能够验证局部空间聚类,如果 LISA 值为正,则表明存在空间聚类。表 3 列出了低温年份产量 Y'_{low} 的 LISA 值最大和最小的 10 个点的样点位置和概率大小。由表可见,10 个最大的 LISA 值在统计上均达到了极显著水平 (<0.01),说明 10 个样点处产量均存在极显著的空间聚集现象。从图 3 可以看出,在低温年份,试验地块的东北、西南和南部分别存在 3 个最受关注地区(hot spots),其他区域则没有显著性变化,在这些区域小麦产量在不同温度年份趋于稳定。

表 3 低温年份产量局部空间关联

Tab.3 Measures of local spatial correlation with cold year

样点位置	LISA	概率	样点位置	LISA	概率
297	-0.014 3	0.500	253	3.207 1	0.002
106	0.005 0	0.494	272	2.454 4	0.002
175	0.000 3	0.494	254	3.442 6	0.002
8	-0.001 4	0.489	266	3.711 2	0.002
204	-0.007 2	0.486	274	2.164 2	0.002
61	-0.005 1	0.486	36	1.853 1	0.002
25	0.001 4	0.484	55	4.283 3	0.002
139	-0.000 1	0.482	251	1.750 4	0.002
26	0.007 5	0.482	75	4.562 1	0.002
151	-0.003 2	0.482	260	4.773 8	0.002

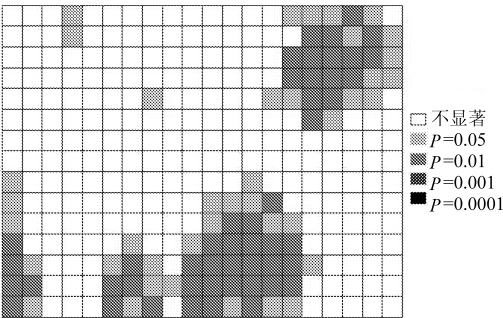


图 3 低温年份标准产量 LISA 显著性图

Fig.3 LISA map of averaged standardized yields in cold year

不同气候模式下产量变化的情况可由高温年份标准产量和低温年份标准产量的差值局部空间关联得到。图 4 是产量差值的 LISA 图。从图中可见,在试验地的东北角、东部边缘两种不同气候模式下小麦的产量存在显著的差异。其中,高-高代表该区域

的产量在高温年份显著的高于低温年份的产量,而低-低则代表该区域的产量在两个不同的温度条件下保持稳定。因此,东北角和东部边缘高-高区域在高温年份和低温年份应该采取不同的管理措施;而地块南部低-低区域由于在不同温度条件下产量变化不大,则可以采取同样的管理措施。

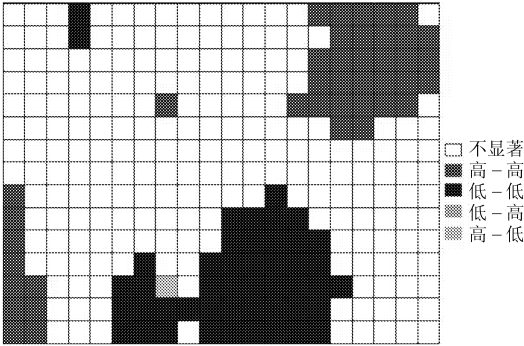


图 4 不同气候年份产量差值 LISA 图

Fig.4 Significance of standardized yield difference between the hot year and the cold

4 结论

- (1)由于联合收获机 CASE IH2366 谷物测产系统 AFS 已经对滞后时间进行了自动处理,因此,产量数据的后处理主要应考虑流量与含水率的填充时间。其中,通过对流量方程进行拟合,得到流量的填充时间为 8.2 s。过滤后,产量数据的变异系数为 14.8%,远小于过滤前的 32.3%,变异程度减小,数据质量得到改善。
- (2)温度和水分是小麦生长的重要条件,研究表明,在充分灌溉的条件下,试验期间降水量对小麦产量没有明显的影响。但在试验区小麦产量随着 4 月份平均温度的升高而增加,随着 4 月份平均温度的降低而减少,存在一定的正相关关系,这一现象可能有助于研究产量的时间变异,但由于试验时间较短,该结论尚待进一步验证。
- (3)小麦不同年份间产量之间未发现有规律的变化,不同年份产量间不一定存在显著的相关关系。因此,目前来看,利用历史产量对来年产量进行预测尚有相当大的难度。
- (4)全局空间统计方法 Moran's I 能够有效地描述小麦产量的全局空间相关性,而局部空间统计方法 LISA 则能有效地反映某一地点产量受周边产量影响的情况。分析结果表明:在不同的气候模式下,产量的空间自相关程度虽然有所不同,但均存在极显著的空间自相关。局部空间自相关分析表明,试验地东北角和东部边缘区域是最受关注地区(hot spots),在不同气候模式下应该采取不同的管理措施。

参 考 文 献

- 1 Reyns P, Missotten B, Ramon H, et al. A review of combine sensors for precision farming[J]. Precision Agriculture, 2002, 3(2): 169 ~ 182.
- 2 谢高地, 陈沈斌. 环境的控件连续变异与精准农业[M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- 3 陈树人, 胡鹏, 胡均万, 等. 谷物产量分布图生成系统的开发研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 182 ~ 184.
Chen Shuren, Hu Peng, Hu Junwan, et al. Research and development of one grain yield map generating system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(8): 182 ~ 184. (in Chinese)
- 4 许红卫. 田间土壤养分与作物产量的时空变异及其相关性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
Xu Hongwei. Spatial and temporal within-field variability of soil nutrients, crop yield, crop nutrients and their correlation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- 5 Luticken R, Koch W, Bill R. The potential of yield map and soil survey data in low cost site specific farming strategies[C]// Proceedings of Precision Agriculture'97, 1997.
- 6 陈树人, 肖伟中, 朱云开, 等. 土壤养分和小麦产量空间变异性与相关性分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(10): 140 ~ 143.
Chen Shuren, Xiao Weizhong, Zhu Yunkai, et al. Spatial variability and correlation of soil nutrient and wheat yield[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 140 ~ 143. (in Chinese)
- 7 Wollenhaupt N C, Mulla D J, Gotway Crowford C A. Soil sampling and interpolation techniques for mapping spatial variability of soil properties[C]. ASA-CSSA-SSA, 1997.
- 8 Cliff A D, Ord J K. Spatial processes: models & applications[M]. London: Taylor & Francis, 1981.
- 9 Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics[J]. Geographical Analysis, 1992, 24(3): 189 ~ 206.
- 10 Getis A, Ord J K. Local spatial statistics: an overview[M]// John Longley, Michael Batty. Spatial Analysis: Modeling in a GIS Environment, Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 1996: 261 ~ 277.
- 11 Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA[J]. Geographical Analysis, 1995, 27(2): 93 ~ 115.
- 12 Moore M. An investigation into the accuracy of yield maps and their subsequent use in crop management[D]. Cranfield: Cranfield University, 1998.
- 13 张漫, 邝继双. 谷物联合收割机测产数据中的误差分析与处理[J]. 农业工程学报, 2003, 19(3): 144 ~ 148.
Zhang Man, Kuang Jishuang. Error analysis and process of yield data collected by yield monitoring system of corn combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(3): 144 ~ 148. (in Chinese)
- 14 陈立平. 精准农业变量施肥理论与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003.
Chen Liping. Theoretical and experimental studies on variable-rate fertilization in precision farming[D]. Beijing: China Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- 15 Wollenhaupt N C, D J Mulla Gotway Crowford C. A soil sampling and interpolation techniques for mapping spatial variability of soil properties[C]. ASA-CSSA-SSA, 1997.
- 16 Blackmore S. The interpretation of trend from multiple yield map[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 26(1): 37 ~ 51.

(上接第 173 页)

- 7 李居泽, 金晶立. 缩短真空吸附动作时间的途径[J]. 沈阳工业大学学报, 1994, 16(1): 38 ~ 42.
Li Juzhe, Jin Jingli. Methods of reducing the vac-sorb actuation time[J]. Journal of Shenyang Polytechnic University, 1994, 16(1): 38 ~ 42. (in Chinese)
- 8 孙军. 真空发生器在工业自动化中的应用[J]. 机械设计与制造, 1998(1): 32 ~ 33.
- 9 姚朝晖, 何枫, 陈远. 真空发生器系统吸附响应时间的确定[J]. 真空科学与技术, 2002, 22(3): 198 ~ 201.
Yao Zhaohui, He Feng, Chen Yuan. Calculation of adsorption responding time of vacuum ejector system[J]. Vacuum Science and Technology, 2002, 22(3): 198 ~ 201. (in Chinese)
- 10 滕燕, 李小宁, 华健. 快速响应低耗气真空节能系统研究[J]. 液压与气动, 2007(1): 10 ~ 12.
Teng Yan, Li Xiaoning, Hua Jian. Research on the twin-nozzle vacuum system with short response time and low air consumption[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2007(1): 10 ~ 12. (in Chinese)