doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.022

基于产量监测系统的小麦产量图生成与空间变异性分析

刘仁杰[1]　孙意凡[2]　张振乾[2]　张　漫[1]　杨　玮[2]　李民赞[1]

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为了准确获取冬小麦农田产量空间差异性信息,提升产量监测系统的采集精度与产量空间分布图的插值精度,采用研发的收获机产量实时监测系统,从绘制准确的产量空间分布图入手,对 2013—2015 年的小麦产量数据进行了插值及空间变异性分析,结果表明:阈值滤波的预处理方法可以有效剔除产量异常值,还原真实田间产量分布情况。通过 RMSE 对比得出,普通克里金(OK)方法绘制的试验地块产量空间分布图插值精度更高,最小值为 826.70 kg/hm^2,出现在 2013 年 OK 法指数模型中,搜索策略为椭圆形、最大相邻要素 5 个、最小相邻要素 3 个、1 个扇区。由半方差函数拟合曲线参数得出 3 年产量空间变异性信息及监测系统的最优采样间距,分别为 2013 年与 2014 年的产量空间变异完全来源于空间自相关,2013 年主要表现在 2 ~ 12 m 的中尺度范围,2014 年表现在 2 ~ 5 m 的中尺度范围;2015 年由随机因素引起的空间变异为 25%,表现在 2 m 以下的小尺度范围,空间自相关引起的变异为 75%,表现在 2 ~ 15 m 的中尺度范围;产量监测系统的采样间距应保持在 2 ~ 10 m,过小或过大将受到较大随机因素或插值精度降低的影响。

关键词: 小麦; 产量分布图; 空间变异性分析; 阈值滤波; 普通克里金; IDW 插值

中图分类号: S24　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)S0-0136-08

Wheat Yield Distribution Map Generation and Spatial Variability Analysis Based on Yield Monitoring System

LIU Renjie[1]　SUN Yifan[2]　ZHANG Zhenqian[2]　ZHANG Man[1]　YANG Wei[2]　LI Minzan[1]

(1. *Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing* 100083, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Obtaining yield distribution map of farmland and analyzing the spatial difference of plot yield are important foundations for implementing precision farming. In order to accurately collect the spatial difference of yield, and at the same time, the acquisition accuracy of yield monitor system and the interpolation accuracy of the output spatial distribution map are improved. The self-developed real-time monitoring system of harvester was used. Based on accurate yield spatial distribution map, spatial variability analysis was conducted on wheat yield data from 2013 to 2015. Firstly, the results showed that the pretreatment method of threshold filtering can effectively eliminate outliers and restore the real yield distribution. Secondly, by comparing the RMSE values, it was determined that spatial distribution map of experimental plot yields drawn by the ordinary Kriging (OK) had higher interpolation accuracy. The minimum value of 826.70 kg/hm^2 appeared in the index mode of OK method for 2013, search strategy was elliptical, the largest adjacent element was 5, the smallest adjacent element was 3 and 1 sector. Finally, the curve parameters of semi-variance function were used to obtain the spatial variability information of three seasons and optimal sampling interval of the system. The spatial variation of yield in 2013 and 2014 were entirely caused by spatial autocorrelation. And that of 2013 was mainly in the mesoscale range of 2 ~ 12 m, and that of 2014 was in the mesoscale range of 2 ~ 5 m. The spatial

收稿日期: 2019-04-25　修回日期: 2019-05-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700300-2016YFD0700304)和中国农业大学研究生实践教学基地建设项目(ZYXW037)

作者简介: 刘仁杰(1989—),男,博士生,主要从事联合收获机流量检测研究,E-mail: liurenjiecau@163.com

通信作者: 张漫(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事农业电气化与自动化研究,E-mail: cauzm@cau.edu.cn

variation caused by random factors in the 2015 was 25%, which was in the small scale range below 2 m. The spatial autocorrelation caused variation of 75%, which was in the mesoscale range of 2 ~ 15 m. The sampling interval of the system should be kept at 2 ~ 10 m. Too small or too large pitch was affected by large random factors or reduced interpolation accuracy. These results can be used to develop fine management decisions for farmland.

Key words: wheat; yield distribution map; spatial variability analysis; threshold filtering; ordinary Kriging; IDW

0　引言

获取农田产量空间分布图并进行小区产量空间差异性分析是实施精细农业的基础。通过产量分布图可以对田间投入和产出进行分析,达到收益最大化和环境保护的目的[1-2]。

空间分布图的绘制方法较多且各有利弊,主要以区域变量理论为基础,充分利用空间位置信息进行数据插值运算[3]。VAN ITTERSUM 等[4]运用插值方法绘制产量分布栅格图,并评价田间实际产量与田间产量潜力之间的差异。GERSTMANN 等[5]以德国 2011 年 8 个农业品种的 37 个相应阶段为例,采用地统计分析方法,对温带气候下作物物候期构建地质统计模型,结果表明,普通克里金(Ordinary Kriging, OK)方法和反距离加权(Inverse distance weighting, IDW)插值法的计算结果,其预测均方根误差明显低于其他方法。BRUSA 等[6]运用 ATP(Area-to-point)克里金法计算作物产量分布图的栅格大小,并结合土壤的区域特征建立产量预测模型,结果表明,区域的离散化可以使产量分布图更加精确。

我国在产量监测系统设计及空间数据分析方面虽起步较晚,但现阶段已有较多理论与实践成果。李新成[7]运用自主研发的产量监测系统,使用三角多项式插值方法,连续 3 年生成冬小麦产量空间分布图。杨维鸽[8]运用插值分析的方法,分析流域玉米产量在年内和年间的变化。LIU 等[9]对冲量式谷物流量传感器的预测模型通用性进行研究,并使用 IDW 插值法生成产量空间分布图。由前人的研究成果可以看出,克里金法与 IDW 插值法已广泛应用于空间数据的分析与处理,但是哪种方法更适合于生成产量空间分布成图尚无定论。

为了更加合理地运用各种插值方法进行产量分布图的生成及空间变异性分析,本研究使用基于冲量式传感器的谷物产量监测系统采集产量数据[9],对比不同插值方法对产量数据分析的精度,并运用变异函数曲线参数完成产量空间变异性的分析,为提高作物空间分布成图的效率和精度提供参考。

1　材料与方法

1.1　谷物产量实时监测系统

自主研发的产量实时监测系统基于冲击原理,集采集、处理、成图和远距离传输为一体[10-11],安装示意图如图 1 所示。该系统由冲量式谷物流量传感器、升运器转速传感器、数据采集 CAN 模块、GNSS 定位系统和显示终端等组成。当联合收获机开始正常收割作业时,经过脱粒、清选后的籽粒由升运器刮板向上输送至冲量式谷物流量传感器,通过传感器的感力板感知谷物流的冲量并转换为电压信号,经过放大、滤波后由 CAN 总线传输至谷物产量计量显示终端,完成数据的处理、计算、显示、保存与成图。系统为了计算地块产量和绘制产量分布图,在采集电压信号的同时,也采集收获机的实时位置,终端软件可以实时查看谷物的瞬时产量、总产量和收割面积等作业信息。

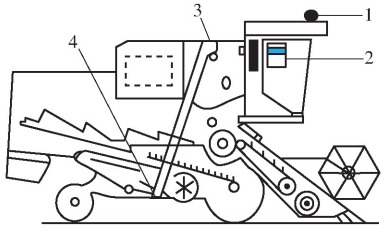


图 1　产量监测系统安装示意图

Fig. 1　Yield monitoring system installation diagram

1. GNSS 移动站　2. 谷物产量计量显示终端　3. 流量传感器　4. 升运器转速传感器

冲量式谷物流量传感器机械部分主要由感力板、敏感梁、外壳和支撑连接件等组成,如图 2 所示,其中敏感梁的上下表面贴有应变片。谷物流跟随升运器刮板的运动离散地撞击在传感器的感力板上,并引起弹性梁产生形变,从而通过应变电桥输出对应的电压值。感力板采用导流形状,其优点是改善谷物流运动轨迹,使得谷物流冲击较平稳。敏感梁和感力板之间采用刚性连接,这样既简化结构又可获得足够的谷物冲击力,且在谷物流较大时不会引起机械损坏。

1.2　试验条件

试验于 2013—2015 年在山东省桓台县小麦试

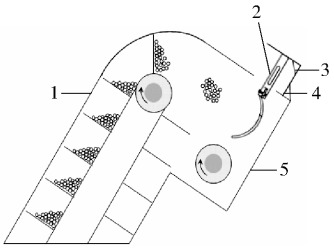


图 2 流量传感器结构图

Fig. 2 Flow sensor structure diagram

1. 升运器 2. 感力板与敏感梁 3. 外壳 4. 支撑连接件 5. 输粮螺旋输送器

验田开展,收割对象为冬小麦,收获机作业时均为满幅收割。试验在地块 F1、F2 内进行,其中 2013 年在 F1 地块,面积约为 0.24 hm^2,117°58′48.820″E、36°57′49.153″N;2014 年和 2015 年均在 F2 地块,面积约为 0.13 hm^2,位于 117°58′41.837″E、36°57′49.497″N。搭载产量监测系统的联合收获机为东方红 4LZ-2.5 型自走式谷物联合收获机,割幅为 2.36 m,升运器为刮板式,最大喂入量为 2.5 kg/s。

产量电压信号与 GNSS 位置信息的采样频率为 1 Hz。其中,2013 年收获的 F1 地块,每行的收割距离约为 120 m,共 8 行。2014 年和 2015 年收获的 F2 地块,产量数据较 F1 相对平整,每行的收割距离 165 m,共 5 行。

1.3 数据分析处理方法

本文主要围绕产量数据的异常点筛选与剔除、插值方法的选取和空间变异性分析展开研究,最终寻找一种适宜该地块且精度较高的插值方法绘制产量分布图,达到分析田间产量空间变异性的目的。

1.3.1 产量数据异常点筛选与剔除

联合收获机收割过程中,不可避免地要进行田间掉头、主动停车、田间卸粮等操作,这些情况容易造成产量数据异常点的出现,这些异常值占比不高,但对产量分布图的准确性有一定的影响。本文针对各个采样点产量数据进行异常点筛选,采用的方法为阈值滤波法[12-13],根据以往田间作业经验设置产量数据的上限值 9 000 kg/hm^2 和下限值 1 000 kg/hm^2[14-15]。将过失误差和田间作业过程中产生的大于上限值或小于下限值的产量数据筛选出来,并剔除,还原田间真实产量分布情况。

1.3.2 空间插值方法选取

对剔除异常点后的产量数据进行插值方法的选取与验证,保证产量空间分布图的准确度。根据对已有研究成果与产量数据特点的分析,选取 IDW 插值法和克里金法进行插值计算。

(1)搜索策略

所有的插值方法均需要制定搜索策略,包括搜索邻域形状、搜索邻域大小和搜索类型[16]。本文选取的 IDW 插值法,搜索邻域形状为圆形,克里金法根据实际数据情况可为椭圆形。搜索邻域大小设置为 3 种,分别为最大相邻要素 15、10、5 个,最小相邻要素 10、5、3 个。搜索类型设置为 4 种,分别为 1 个扇区、4 个扇区、4 个扇区且偏移 45°和 8 个扇区。使用当前主流的地理信息系统应用平台 ArcGIS 软件绘制田间产量空间分布图,运用软件的空间分析功能比对两种插值方法的精度。采用采样点产量真值与该点预测值的误差均方根(Root mean square error, RMSE)进行比较,所得的 RMSE 越小,说明该种插值分析方法越准确。

(2)IDW 插值法

IDW 插值法的每一个已知点的权值,是已知采样点到未知采样点之间距离的一个简单函数[17]。设已知采样点数据$\{z_1, z_2, \cdots, z_n\}$,未知采样点 s_0,则待插数值 $z^*(s_0)$ 为

$$z^*(s_0) = \sum z_i d_{0,i}^{-p} \Big/ \sum d_{0,i}^{-p} \tag{1}$$

式中 $d_{0,i}^{-p}$——未知采样点 s_0 到第 i 个已知采样点 z_i 的距离

p——距离权系数

随着 p 的增加,已知采样点对远离的未知采样点作用越小。

(3)克里金法

克里金方法的理论及结构分析基础建立在半方差函数上,包括普通克里金(OK)、指示克里金(Indicator Kriging, IK)和块克里金等计算方式,考虑到半方差函数可以描述采样点之间的空间关系及样点分布较集中的特征,本文选用 OK 法进行插值计算[18]。使用 OK 法前,需先对产量数据进行正态分布检验,通过检验后进行地统计学的半方差函数曲线的拟合,主要拟合过程如下:

对于观测的数据系列 $Z(x_i)(i=1,2,\cdots,n)$,样本半方差函数为

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i+h) - Z(x_i))^2 \tag{2}$$

式中 $\gamma(h)$——半方差函数

$N(h)$——被 h 分隔的数据对数量

$Z(x_i)$——点 x_i 处样本的测量值

$Z(x_i+h)$——点(x_i+h)处样本的测量值

h——样点间距离

拟合结果一般使用半方差函数曲线表示,曲线的相关参数主要有 3 个,分别为:块金值 C_0,表示由随机变量带来的空间变异程度;变程 a,表示采样数据间存在相关性的距离上限;总基台值 C_0+C,表示

总空间变异程度。当定量地描述区域数据的变化程度时，需为曲线匹配理论模型，本文选取的理论模型为球面模型、高斯模型和指数模型[19-21]。

采用 RMSE 来评价两种方法的插值精度，选取 RMSE 值较低的插值方法绘制产量空间分布图。

2　结果与分析

2.1　产量数据异常点筛选与剔除

针对 2013、2014、2015 年 3 年冬小麦自动测产系统的产量原始数据，根据前人的研究成果与往年地块实际种植经验，将 9 000 kg/hm^2 设置为上限值，1 000 kg/hm^2 设置为下限值，对筛选出的处理前与处理后的产量数据统计，见表 1（结果取整数）。

通过对产量数据处理前后对比可知，使用该方法剔除的异常点数低于总采样点数的 5%，且标准差与变异系数均有小幅下降，最大值与最小值较符合往年收获产量经验值。所以，该方法对产量原始数据的异常值筛选与剔除效果显著，所得结果符合田间产量数据分布要求。

表 1　产量数据处理前后描述统计

Tab. 1　Description statistics of yield data before and after processing

参数	原始数据			剔除异常点后数据		
	2013 年	2014 年	2015 年	2013 年	2014 年	2015 年
采样点数/个	407	667	920	391	636	879
产量平均值/(kg·hm^{-2})	5 151	5 977	6 802	5 331	5 669	6 614
产量标准差/(kg·hm^{-2})	2 364	2 094	1 450	2 234	1 878	1 246
产量最大值/(kg·hm^{-2})	8 919	9 994	9 933	8 919	8 972	8 997
产量最小值/(kg·hm^{-2})	546	620	163	1 283	1 566	2 328
变异系数	0. 46	0. 35	0. 21	0. 42	0. 33	0. 18

2.2　插值方法的选取

首先，为绘制田间产量空间分布图，将 GNSS 大地坐标转换为平面坐标；其次，运用 ArcGIS 软件的地统计分析模块（Geostatistical analyst）进行不同搜索策略的插值分析；最后，运用 RMSE 验证不同搜索策略下的插值精度，选出 RMSE 较小的插值方法绘制空间产量分布图。

运用 ArcGIS 软件内嵌的投影和变换工具进行 3 年产量数据的坐标转换，以 2015 年的原始产量分布数据为例，运算后的平面坐标如图 3 所示，以 GNSS 基站为原点的相对坐标值，X 轴为正东方向，Y 轴为正北方向。

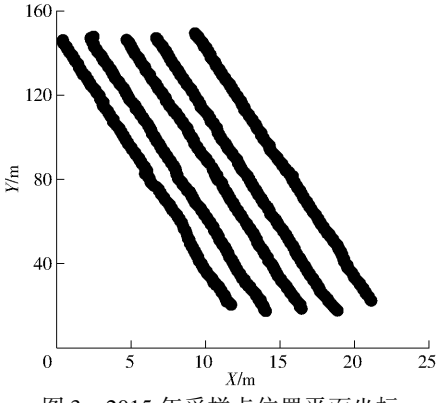


图 3　2015 年采样点位置平面坐标

Fig. 3　2015 sampling position plane coordinate map

2.2.1　IDW 插值法

以上述相对坐标为空间基准进行插值分析，参加插值法的采样点数为预处理后的所有采样点。本方法针对相同搜索形状为圆形、相同角度为 0°和相同邻域类型为标准工具，以及不同邻域大小、不同搜索类型和不同距离权系数 p 进行 IDW 插值法分析。距离权系数 p 分别选取 1、2 和 3，由于在不同搜索策略下的 IDW 插值计算结果较多，这里仅以搜索类型是 1 个扇区为例，如表 2 所示。

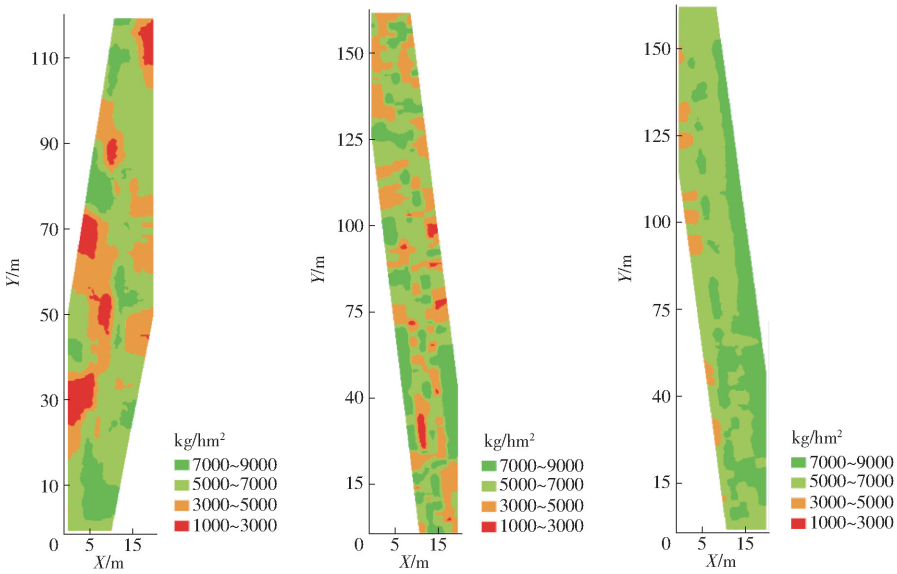
表 2　IDW 插值结果示例

Tab. 2　IDW interpolation result example

搜索类型	最大相邻要素数/个	最小相邻要素数/个	p	RMSE/(kg·hm^{-2}) 2013 年	2014 年	2015 年
1 个扇区	15	10	1	1 890. 04	1 680. 11	996. 95
			2	1 915. 85	1 506. 20	958. 40
			3	1 999. 05	1 414. 99	985. 34
	10	5	1	1 875. 52	1 617. 98	958. 11
			2	1 919. 09	1 471. 56	954. 56
			3	2 007. 06	1 416. 54	989. 80
	5	3	1	1 816. 56	1 482. 08	932. 00
			2	1 915. 81	1 420. 98	965. 23
			3	2 020. 10	1 406. 02	1 002. 18

从表 2 可得，2013 年的搜索策略在 1 个扇区、最大相邻要素 5 个、最小相邻要素 3 个、p = 1 时，预测均方根误差（RMSE）最小，为 1 816. 56 kg/hm^2，该 RMSE 相比于 2013 年的其他扇区也是最小值。另外两年的对比方法与 2013 年相同，2014 年的最小值为1 406. 02 kg/hm^2，出现在 1 个扇区、最大相邻要素 5 个、最小相邻要素 3 个、p = 3。2015 年的最小值为 932. 00 kg/hm^2，出现在 1 个扇区、最大相邻要素 5 个、最小相邻要素 3 个、p = 1。由上述分析可知，RMSE

在不同搜索策略下跨度较大,选取 RMSE 最小值的搜索策略绘制产量空间分布图,结果如图 4 所示。



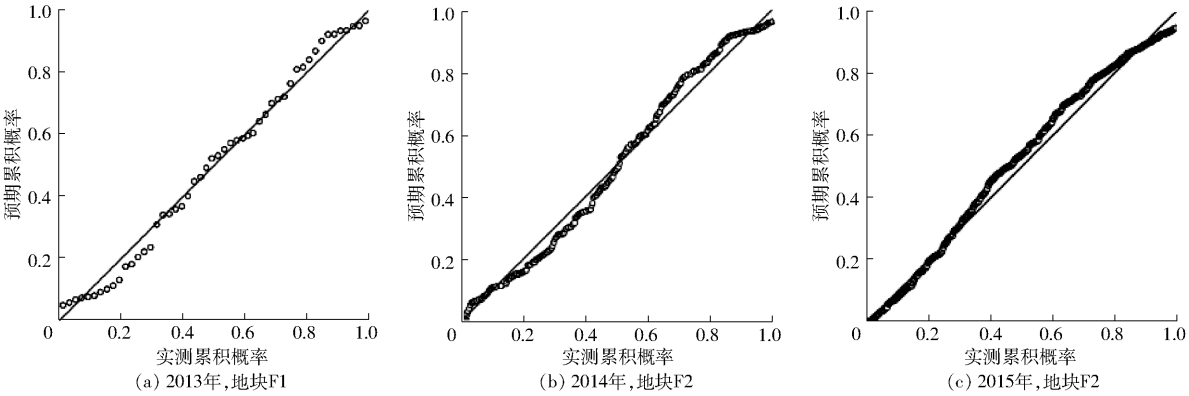
(a) 2013年,地块F1 (b) 2014年,地块F2 (c) 2015年,地块F2

图 4 3 年 IDW 产量空间分布图

Fig. 4 Three-season IDW yield spatial distribution maps

2.2.2 OK 法

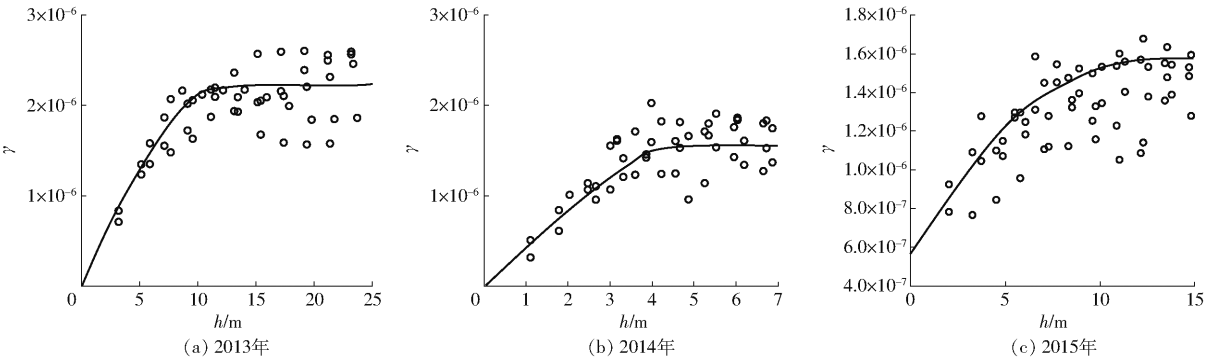
首先,针对 3 年产量的空间数据进行正态分布检验,采用的方法为 P - P 正态概率图法,利用 ArcGIS 软件中的探索数据工具生成 P - P 正态概率图,检验结果如图 5 所示。由图 5 可知,3 年的产量数据基本符合正态分布检验。其次,使用 ArcGIS 软件进行半方差函数拟合。本文设置块金值与基台值为系统匹配,模型类型选取常用的球面模型、高斯模型和指数模型;对于步长的设置,需根据经验选取适中的步长与步长数,使模型达到最佳拟合效果。以 3 年指数模型为例展示拟合结果,如图 6 所示,表 3 为 3 年产量数据拟合参数表。



(a) 2013年,地块F1 (b) 2014年,地块F2 (c) 2015年,地块F2

图 5 3 年产量的 P - P 正态概率图

Fig. 5 P - P normal probability maps of three seasons yield



(a) 2013年 (b) 2014年 (c) 2015年

图 6 3 年指数模型半方差函数拟合曲线

Fig. 6 Semi-variogram fitting curves of three-season index model

表 3　3 年产量数据半方差函数拟合参数

Tab. 3　Three-season yield semi-variation parameter

年份	模型类型	步长	步长数	块金值	基台值	$C_0/(C_0+C)$	变程/m
2013	球面模型	0.89	12	0	4.75×10^6	0	7.15
	高斯模型	0.68	12	3.49×10^6	4.57×10^6	0.76	5.41
	指数模型	1.48	12	0	4.99×10^6	0	11.82
2014	球面模型	0.47	12	4.96×10^5	3.52×10^6	0.14	3.78
	高斯模型	0.43	12	9.68×10^5	3.57×10^6	0.27	3.43
	指数模型	0.58	12	0	3.58×10^6	0	4.61
2015	球面模型	0.65	12	3.92×10^5	1.37×10^6	0.29	5.22
	高斯模型	0.58	12	5.22×10^5	1.39×10^6	0.38	4.65
	指数模型	1.28	12	4.49×10^5	1.74×10^6	0.25	10.20

由图 6 和表 3 的结果不足以判断模型的精度，需进行 RMSE 的计算。根据 IDW 的相关参数结果及 OK 法的特点，3 年产量空间分布图的搜索策略均选取最大相邻要素 5 个、最小相邻要素 3 个，可更好地表现出田间产量小区域的变化。表 4 为 2 种方法的 3 年产量运算 RMSE 结果。

表 4　IDW 与 OK 法 RMSE

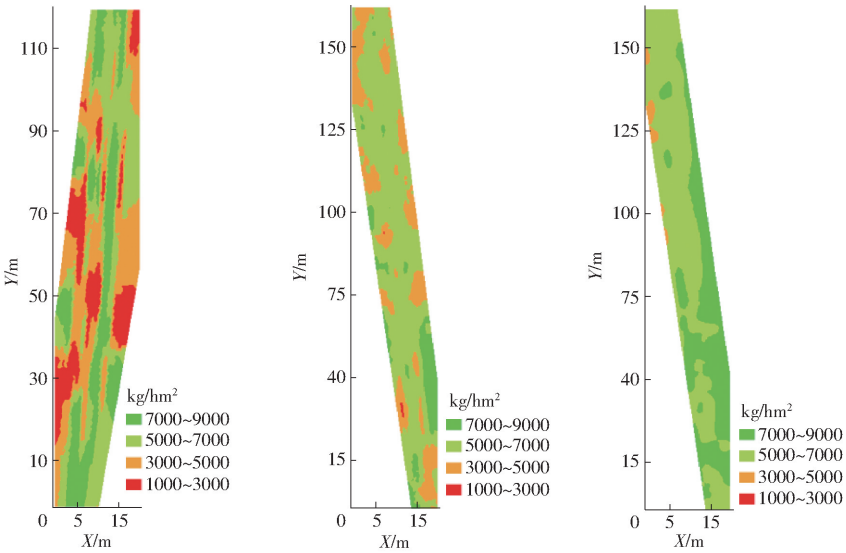
Tab. 4　RMSE value of IDW and OK

年份	插值法	最大相邻要素数/个	最小相邻要素数/个	扇区	p	RMSE/(kg·hm^{-2})
2013	IDW	5	3	1 个	1	1 816.56
	OK 球面模型	5	3	1 个		846.33
	OK 高斯模型	5	3	1 个		884.44
	OK 指数模型	5	3	1 个		826.70
2014	IDW	5	3	1 个	3	1 406.02
	OK 球面模型	5	3	4 个		1 382.25
	OK 高斯模型	5	3	4 个		1 378.07
	OK 指数模型	5	3	4 个		1 374.25
2015	IDW	5	3	1 个	1	932.00
	OK 球面模型	5	3	4 个且偏移 45°		931.64
	OK 高斯模型	5	3	4 个且偏移 45°		929.39
	OK 指数模型	5	3	4 个且偏移 45°		924.43

由表 4 可知，每年的 RMSE 最低值均出现在 OK 法指数模型中，且 OK 法的 RMSE 均小于 IDW 插值法。2013 年的两种插值法表现出较大差异，究其原因与田间停车、掉头和田间灌溉水渠造成采样点位置离散度较高有关，表明在离散度较高的情况下，OK 法的椭圆形搜索邻域与各向异性可更好地表现小区产量变化。2015 年两种方法表现出相近的趋势，这与田间产量值离散度低有关。因此，选取 OK 法指数模型绘制田间产量空间分布图准确度较高，如图 7 所示。

由图 4 和图 7 可知田间小区的产量差异，将 3 年产量分布图划分为相同的 4 类，分别为 1 000 ~ 3 000 kg/hm^{2}低产区；3 000 ~ 5 000 kg/hm^{2}中低产区；5 000 ~ 7 000 kg/hm^{2}中高产区；7 000 ~ 9 000 kg/hm^{2}高产区。由 2013 年可知，中低产区与低产区占据图中较大部分空间，而 2014、2015 年为中高产区与高产区占据大部分空间。对于低产区的产量偏低，分析 2013 年是由田间灌溉水渠、实际种植产量低和采样点分布较离散所引起。对于高产区的产量范围，考虑到田间实际种植情况和以往该田块种植经验，达到单产量 8 500 kg/hm^2 以上较难。综合图 7b 与图 7c 可以直观看出，产量有较大的提升，2015 年产量几乎趋于平稳且维持在高产区，这与田间精细管理密不可分，图 7a 相较于后两者低产区面积偏多，除去系统误差与过失误差的因素，需对田间作物进行精细化管理。

结合表 3 与 OK 法指数模型拟合的半方差函数曲线（图 6）对空间变异性进行详细分析。2013 年由于 $C_0/(C_0+C)$ 为 0，表明随机因素引起的空间变异为 0，其空间变异完全来自空间自相关，结合图 6a 的拟合曲线可得，样点从距离 h 最小为 2 m 处上升到 12 m 处趋于平稳，所以空间自相关变异影响主要表现在 2 ~ 12 m 的中尺度范围。结合图 6b 得出，2014 年的空间变异同样来源于空间自相关，判别方式与 2013 年相同，表现在 2 ~ 5 m 的中尺度范围。2015 年的 $C_0/(C_0+C)$ 为 0.25，表明由随机因素引



(a) 2013年,地块F1 (b) 2014年,地块F2 (c) 2015年,地块F2

图 7 3 年产量空间分布图

Fig. 7 Three-season yield spatial distribution maps

起的空间变异为 25%,结合图 6c 得出距离 h 在小于 2 m 时没有样点分布,所以随机因素引起的空间变异表现在 2 m 以下的小尺度范围,其余来源于空间自相关变异为 75%,表现在 2 ~ 15 m 的中尺度范围。而变程表示空间自相关性的最大值,对超过变程的采样点数据间的相关性会减弱,影响数据的插值精度,通过 3 年产量数据计算得出,变程在 10 m 左右,所以采样点间距应保持在 2 ~ 10 m 之间。

3 结论

(1)采用阈值滤波法,针对原始采样点产量分布数据进行异常点筛选与剔除。处理后的产量分布数据符合田间经验产量,产量的变异系数、极值和平均值均有小幅变化,证明该方法在保留原始小区产量差异性不变的基础上,可剔除由过失误差引起的产量浮动,还原真实田间产量分布情况。

(2)针对 IDW 插值法和 OK 法插值精度进行分析,结果表明,在该试验地块采取 OK 法作为产量空间分布图的插值方法准确度高,且采样点位置的离散度对插值计算影响较大。IDW 插值法由于受搜索邻域的限制,对产量数据本身的还原度较高,但该方法无法根据地理特点对不符合实际情况的产量波动加以重新插值,在 2014 年的产量图中表现最为明显。

(3)田间产量的空间变异性分析表明,产量监测系统在 1 Hz 采样频率下,产量数据采样点间距在 2 m 以下主要由随机因素引起的空间变异组成,所以系统的采样点间距应大于 2 m。变程在 10 m 左右,采样点间距应保持在 2 ~ 10 m 之间。

参 考 文 献

[1] 汪懋华. 精细农业[M]. 北京:中国农业大学出版社,2011.

[2] 李民赞. 农作物产量自动监测技术及关键设备[J]. 农业网络信息,2004(4):34 - 38.
LI Minzan. The technique of yield monitor and key equipment[J]. Agriculture Network Information, 2004(4):34 - 38. (in Chinese)

[3] 张漫. 农田谷物产量空间分布信息采集、处理与系统集成技术研究[D]. 北京:中国农业大学,2003.
ZHANG Man. Research on grain yield information collection, processing and system integration technology[D]. Beijing: China Agricultural University, 2003. (in Chinese)

[4] VAN ITTERSUM M K, CASSMAM K G, GRASSINI P, et al. Yielrd gap analysis with local to global relevance—a review[J]. Field Crops Res., 2013,143:4 - 17.

[5] GERSTMANN H, DOKTORD, GLABERC, et al. PHASE: a geostatistical model for the Kriging-based spatial predictionof crop phenology using public phenological and climatological observations[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016,127, 726 - 738.

[6] BRUSA D J, BOOGAARDB H, CECCARELLIB T, et al. Geostatistical disaggregation of polygon maps of average crop yields by area-to-point Kriging[J]. European Journal of Agronomy, 2018,97, 48 - 59.

[7] 李新成. 谷物联合收割机产量监测系统优化及远程数据系统开发[D]. 北京:中国农业大学,2015.
LI Xincheng. Optimizations of yield monitoring system for grain combine harvester and development on remote systems[D]. Beijing:China Agricultural University, 2015. (in Chinese)

[8] 杨维鸽. 典型黑土区土壤侵蚀对土壤质量和玉米产量的影响研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2016.
YANG Weige. Investigating the impacts of soil erosion on soil quality and corn yield in the typical black soil region[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)

[9] LIU Renjie, ZHANG Zhenqian, ZHANG Man, et al. Performance analysis and modelling of impact-based sensor in yield monitor system[C]//6th IFAC Conference on Bio-Robotics, 2018: 613 - 618.

[10] 王薄,李民赞,张成龙,等. 冲击式谷物流量传感器设计与性能试验[J]. 农业机械学报, 2009,40(增刊):52 - 56.
WANG Bo, LI Minzan, ZHANG Chenglong, et al. Development of grain flow sensor for yield monitor system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009, 40(Supp.):52 - 56. (in Chinese)

[11] 张振乾,刘仁杰,张漫,等. 基于移动终端的谷物产量实时监测平台设计[J]. 农业机械学报,2017, 48(增刊):35 - 39.
ZHANG Zhenqian, LIU Renjie, ZHANG Man, et al. Design of real-time monitoring platform for grain yield based on mobile terminal[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(Supp.):35 - 39. (in Chinese)

[12] 唐圣学,付滔,张雪辉. 基于小波自适应阈值滤波的 VMD 降噪方法[J]. 电测与仪表,2018,55(9):10 - 14.
TANG Shengxue, FU Tao, ZHANG Xuehui. Research of denoising method based on variational mode decomposition and wavelet adaptive threshold filter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(9):10 - 14. (in Chinese)

[13] 杨正益,刘博文,任山,等. 一种改进的形态-小波阈值降噪方法[J]. 计算机科学,2018,45(5):300 - 302,316.
YANG Zhengyi, LIU Bowen, REN Shan, et al. Improved morphological-wavelet threshold denoising method[J]. Computer Science, 2018, 45(5):300 - 302,316. (in Chinese)

[14] 李新成,李民赞,王锡九,等. 谷物联合收割机远程测产系统开发及降噪试验[J]. 农业工程学报,2014,30(2):1 - 8.
LI Xincheng, LI Minzan, WANG Xijiu, et al. Development and denoising test of grain combine with remote yield monitoring system[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(2):1 - 8. (in Chinese)

[15] 李新成,孙茂真,李民赞,等. 谷物联合收获机自动测产系统产量模型[J]. 农业机械学报,2015,46(7):91 - 96.
LI Xincheng, SUN Maozhen, LI Minzan, et al. Modeling algorithm for yield monitor dystem of gain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7):91 - 96. (in Chinese)

[16] 王桂林,向林川,孙帆. 粒子群优化协同克里金法在确定山地斜坡土层厚度中的应用[J]. 土木建筑与环境工程,2018, 40(6):60 - 66.
WANG Guilin, XIANG Linchuan, SUN Fan. Application of cooperative Kriging method based on particle swarm optimization in estimation slope soil thickness[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(6):60 - 66. (in Chinese)

[17] 王旭,刘仁杰,孙红,等. 冬小麦叶绿素含量空间分布成图方法与精度分析[J]. 农业机械学报,2017,48(增刊):92 - 97.
WANG Xu, LIU Renjie, SUN Hong, et al. Mapping method and accuracy analysis on spatial distribution of winter wheat chlorophyll content[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.):92 - 97. (in Chinese)

[18] 徐丹,刘昌华,蔡太义,等. 农田土壤有机质和全氮三维空间分布特征研究[J]. 农业机械学报,2015,46(12):157 - 163.
XU Dan, LIU Changhua, CAI Taiyi, et al. 3D spatial distribution characteristics of soil organic matter and total nitrogen in farmland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12):157 - 163. (in Chinese)

[19] BEVINGTON J, SCUDIERO E, TEATINI P, et al. Factorial Kriging analysis leverages soil physical properties and exhaustive data to predict distinguished zones of hydraulic properties[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 156: 426 - 438.

[20] MUHAMMED S E,MARCHANT BP, WEBSTER R, et al. Assessing sampling designs for determining fertilizer practice from yield data[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2017,135: 163 - 174.

[21] 刘刚. 支持精细农业实践的农田空间分布信息处理的方法与试验研究 [D]. 北京:中国农业大学,2001.
LIU Gang. Approaches for processing the field spatial data and practical study for precision agriculture[D]. Beijing: China Agricultural University, 2001. (in Chinese)