

冬小麦叶绿素含量空间分布成图方法与精度分析

王旭¹ 刘仁杰² 孙红¹ 李民赞^{1,2} 杨玮¹ 曹如月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. 中国农业大学农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 作物叶绿素含量能够反映作物的生长情况, 建立大田叶绿素空间分布模型能够直观地表现田间作物长势情况, 为开发车载式作物长势空间分布分析系统提供技术支撑, 进行了基于地统计学的冬小麦叶绿素含量空间分布成图方法及精度分析。首先, 采集了 67 个样区中心点叶绿素含量和 GPS 信息, 基于地统计学理论讨论了利用稀疏样本点数据建立高精度空间分布图的可行性。随机划分建模集和验证集, 基于建模样本分别使用反距离插值法 (IDW) 和普通克里金插值法 (OK) 绘制了冬小麦叶绿素含量田间分布图, 然后对验证集数据进行分析, 比较了 2 种方法的检测精度, 并讨论了实验过程中可能存在的误差源。2 种插值方法拟合的预测数据与验证数据均存在正相关关系, 基于 IDW 插值与验证数据相关系数为 0.722, 协方差为 1.361; 基于 OK 插值与验证集数据相关系数为 0.517, 协方差为 0.798。结果表明, IDW 插值分析方法更适用于采样点分布不均且距离较近的稀疏样本点空间分布成图。

关键词: 冬小麦; 叶绿素含量; 长势分布; 插值分析; 空间模型; 地统计学

中图分类号: S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)S0-0092-06

Mapping Method and Accuracy Analysis on Spatial Distribution of Winter Wheat Chlorophyll Content

WANG Xu¹ LIU Renjie² SUN Hong¹ LI Minzan^{1,2} YANG Wei¹ CAO Ruyue¹

(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, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The chlorophyll content of crop could indicate the growth status of crop and the spatial model of the chlorophyll content in the field could help to make the decision on the field management. In order to develop a spatial distribution mapping system of winter wheat's growth parameter, the research was conducted to find a method to establish the model with high accuracy and sparse sample data points. The chlorophyll content and the GPS data were measured in the field. The 67 samples were involved and divided into the calibration and validation samples randomly. Firstly, according to the calibration data, the distribution maps of chlorophyll content were drawn by using inverse distance weighting (IDW) method and ordinary Kriging (OK) method respectively. The fitting data could be extracted at the same GPS position where the validation data located. And then, the accuracy analysis was discussed between the fitting data and the measured validation data. The results show that there is a positive correlation between them based on both IDW and OK map. However, compared with the OK method, the correlation coefficient between IDW fitting and validation data is higher with r is 0.722 and covariance is 1.361. The possible reason caused error in the research was also discussed. It could help to improve the mapping accuracy when the sampling points are unevenly distributed and closed to each other.

Key words: winter wheat; chlorophyll content; growth distribution diagram; interpolation analysis; spatial model; geo-statistics

收稿日期: 2017-07-16 修回日期: 2017-11-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200600-2016YFD0200602)、国家自然科学基金项目(31501219)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017TC029)

作者简介: 王旭(1994—),男,硕士生,主要从事农业信息化技术研究,E-mail: wangxu2016@cau.edu.cn

通信作者: 李民赞(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事精细农业系统与农业信息化技术研究,E-mail: limz@cau.edu.cn

引言

叶绿素含量与植被的光合能力、发育阶段以及氮素状况有较好的相关性,是氮胁迫、光合作用能力和植被发育阶段的指示器^[1-4]。农业生产中,作物生长态势具有群体特征,即在一定的空间范围内的整体分布情况,如何快速地获取作物的群体特征,了解和掌握作物长势的空间分布情况,进而制定有效的精准管理策略是精细农业研究和实施的热点问题^[5]。与高光谱遥感手段监测大面积植被的叶绿素时相变化应用相比,我国小地块多样性农田生产模式比重较大,且农机作业条件下对小地块叶绿素诊断和精准化管理的需求更为迫切^[6]。因此,若能获得高精度的区域地块作物的叶绿素分布图,辅助判断作物总体长势,可以为田间生产决策提供依据,具有重要意义。

地统计学是以具有空间分布特点的区域化变量为基础的研究空间变异与空间结构的学科,GIS是对空间数据进行搜集、存储、显示及分析的一门技术,可为农业作物种类、养分含量、作业决策的精细化分布特性统计提供支持,也是“精细农业”实践的关键技术之一^[7]。在农田作物-土壤-环境体系的数据时空分布分析中均发挥了重要的作用。

针对作物长势,李树强等^[8]应用了反距离加权插值法和克里金法,构建了玉米的群体长势空间分析系统。OSHUNSANYA等^[9]利用反距离加权插值方法绘制了农田土壤特性图,并将结果重分类建立农田土壤管理办法。杨子清等^[10]采用克里金法对土壤养分有机质和全钾养分进行空间插值分析,经过交叉验证表明:有机质和全钾的插值结果平均误差分别为-0.09和0.00,均方根误差分别为16.42和2.68。宿宁^[11]利用反距离加权插值方法对农田产量数据进行分析,生成了可以直观清晰反映作物产量空间分布情况的产量空间分布图。陈义强等^[12]以地统计学为研究工具,建立了基于地统计学的农业田间试验地选择新方法。马亚斌等^[13]采用地统计分析探索了冬小麦生长期土壤溶液中硝态氮和铵态氮在时间序列上的变化特征,并用普通克里金插值法获取硝态氮和铵态氮空间分布图。

综上所述,应用地统计学对农业不同的对象和数据特点进行分析时,合理的选择插值方法、改进并进行验证,是提高田间数据分布分析精度的重要环节^[14]。农作物长势参数检测研究中,通常采用定点采样方式进行,通过有限的采样点数据来分析农田区域面积数据分布。利用稀疏观测数据与田间地块边界和分布等有限数据源,通过空间数据的内插方

法研究,可为建立高精度作物长势空间模型提供技术支持^[15]。

本文针对大田冬小麦作物田间叶绿素分布情况进行空间分布建模。在采样样本点分布不均且距离较近的情况下定点采集叶绿素含量指标,并通过对比分析不同空间插值方法确定适于叶绿素诊断的最优空间数据插值方法,以期为基于车载式作物长势空间分布分析系统的大田作物长势分析和管理提供依据。

1 材料和方法

1.1 数据采集

实验在北京市昌平区小汤山镇国家精准农业示范基地进行,实验区为200 m×30 m标准实验田,共计67个采样区。实验数据采集时间为2016年4月28日10:00—14:00。测试当日天气晴。采用PSION TEKLOGIX公司生产的WORKABOUT PRO系列手持式GPS仪器,准确定位数据采集位置,定位精度3~5 m。设计随机非均匀分布采样,相邻2点间隔距离最远不超过10 m,形成稀疏数据源。

1.2 叶绿素含量测定

对67个样区内的冬小麦冠层叶片进行采样,采用Spectrum 752型紫外可见分光光度计测定叶绿素含量,选取冬小麦叶片中部,除去主茎后剪碎称取0.4 g,用体积分数99%的丙酮和无水乙醇以体积比2:1混合,取混合液25 mL,再将称取的0.4 g叶片样品放入混合液避光浸泡24 h。为加速叶绿素提取,在浸泡过程中每6 h摇动一次混合液。浸泡完成后萃取液用分光光度计分别测定645、663 nm处的吸光度,计算叶绿素含量,计算公式为

$$C_a = 12.72A_{663} - 2.59A_{645} \quad (1)$$

$$C_b = 22.88A_{645} - 4.67A_{663} \quad (2)$$

$$C_t = C_a + C_b \quad (3)$$

式中 A_{645} 、 A_{663} ——645 nm 和 663 nm 波长处吸光度

C_a ——叶绿素 a 含量,mg/L

C_b ——叶绿素 b 含量,mg/L

C_t ——叶绿素总含量,mg/L

1.3 数据处理方法

针对GPS位置数据和对应位置的叶绿素含量数据进行分析,数据处理流程如图1所示。经过采样点数据匹配后,划分建模集和验证数据集,应用不同插值方法绘制叶绿素田间分布图,并利用验证数据集讨论其插值精度。

数据集划分采用RS(Random sampling)方法,训练集组成方法简单,适于不需要进行数据挑选的情况^[16]。空间插值方法分别采用反距离加权插值法和

克里金插值法,并调用 ArcGIS 10.2 工具箱实现。

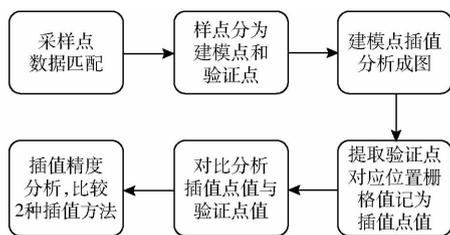


图1 数据分析流程图

Fig.1 Flow chart of data analysis

1.3.1 反距离加权插值法

反距离加权插值 (Inverse distance weighting, IDW) 又称为距离倒数乘方法, 是一个加权平均插值法, 可以进行确切插值分析或者平滑插值分析。随着网格结点距离的增加, 由方次参数控制权重系数下降。对于一个较大的方次, 较近的数据点被给定一个较高的权重份额, 对于一个较小的方次, 权重比较均匀地分配给各数据点。未知待插值点的值的计算公式为

$$\hat{Z}(X_0, Y_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i, Y_i) \quad (4)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{d_i} \quad (5)$$

其中 d_i ——距离 λ_i ——反距离权重
 $Z(X_i, Y_i)$ ——已知点 (X_i, Y_i) 处的值
 $\hat{Z}(X_0, Y_0)$ ——未知点 (X_0, Y_0) 处的值

1.3.2 克里金插值法

克里金插值法 (Ordinary Kriging, OK) 又称空间自协方差最佳插值法, 是以变异函数理论和结构分析为基础, 在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计的一种方法。

它首先考虑的是空间属性在空间位置上的变异分布, 确定对一个待插点值有影响的距离范围, 然后用此范围内的采样点来估计待插点的属性值。该方法考虑了样本点的形状、大小和空间方位, 与未知样点的相互空间关系, 以及变异函数提供的结构信息之后, 对未知样点进行线性无偏最优估计。公式为

$$\hat{Z}(X_0, Y_0) = \sum_{i=1}^n \lambda'_i Z(X_i, Y_i) \quad (6)$$

式中 λ'_i ——待定权重系数

1.3.3 提取分析

“提取分析”工具可用于根据像元的属性或其空间位置从栅格中提取像元的子集。也可以获取特定位置的像元值作为点要素类中的属性或表。

为了得到与验证集进行对比的叶绿素含量预测属性值数据, 实验对叶绿素含量插值分布图作提取

分析。具体做法是: 在由分析点进行插值分析所得的栅格图像中对应的验证集坐标位置提取栅格值, 记录该值并作为与验证集叶绿素含量作对比的预测数据。

2 结果和分析

2.1 数据统计分析

叶绿素含量范围为 40.7 ~ 49.5 mg/L, 平均值为 46.0 mg/L, 标准偏差为 1.768 mg/L, 其中叶绿素含量主要在 43.4 ~ 48.0 mg/L。

先将样本点匹配上其位置数据对应的叶绿素含量数据, 采用 RS 方法, 对 67 个样本点进行建模集和验证集划分, 选取 39 个样本点作为建模集, 进行插值分析成图, 剩余 28 个样本点作为验证集。划分数据样本之后的统计特征如表 1 所示。

表 1 叶绿素含量的描述统计

Tab.1 Descriptive statistic of chlorophyll content

样本类别	样本数	最大值/ (mg·L ⁻¹)	最小值/ (mg·L ⁻¹)	平均值/ (mg·L ⁻¹)	标准差/ (mg·L ⁻¹)
总样本	67	49.5	40.7	46.0	1.768
建模集	39	49.5	40.7	46.0	1.897
验证集	28	48.3	41.5	45.9	1.615

2.2 基于插值分析的分布图结果

基于建模样本分别使用 IDW 插值法和 OK 插值法绘制冬小麦叶绿素含量田间分布图。

对实验田范围的叶绿素含量进行 IDW 插值分析, 如图 2a 所示, 叶绿素最高值为 49.5 mg/L, 最低值为 40.7 mg/L, 标准差为 1.22 mg/L。由 IDW 插值分析方法绘制的大田冬小麦叶绿素含量分布图, 可以看出田间冬小麦生长态势存在明显差异。由图 2b 可知, IDW 插值分析绘制的处方图成图效果平滑性较好, 分布情况符合正态分布。

对实验田范围的叶绿素含量进行 OK 插值分析, 结果如图 3a 所示。显示叶绿素含量最高值为 48.0 mg/L, 最低值为 43.6 mg/L, 标准差为 1.14 mg/L。

由图 3a 可知, OK 插值法绘制的大田冬小麦叶绿素含量分布情况与由 IDW 插值法绘制的分布图在敏感位置处表现出的叶绿素含量情况基本相符。但由图 3b 可以看出 2 种插值方法的区别, OK 插值分析绘制的处方图成图效果明显为块状, 栅格值不完全符合正态分布。

2.3 验证点精度分析

验证基于插值的大田冬小麦叶绿素分布图精度, 首先对在插值分析图中对验证集的位置点进行栅格值的提取, 然后对验证集的数值和插值点处提取的栅格点值进行相关性分析。

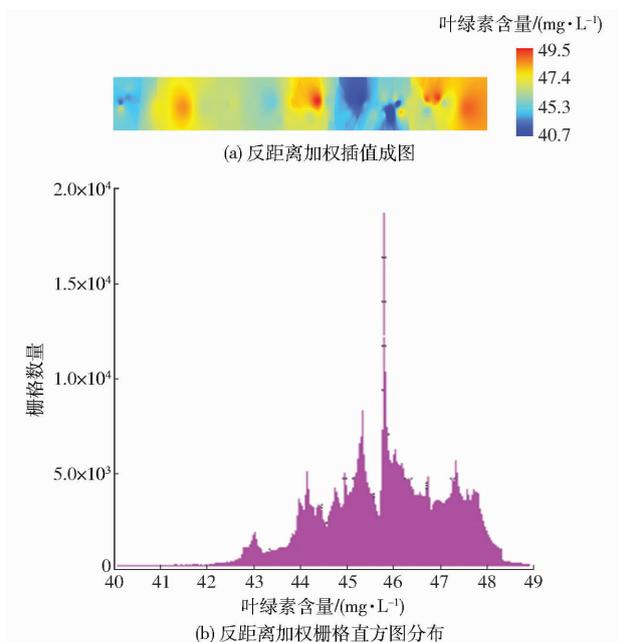


图2 IDW插值分布图绘制结果

Fig. 2 IDW interpolation map rendering results

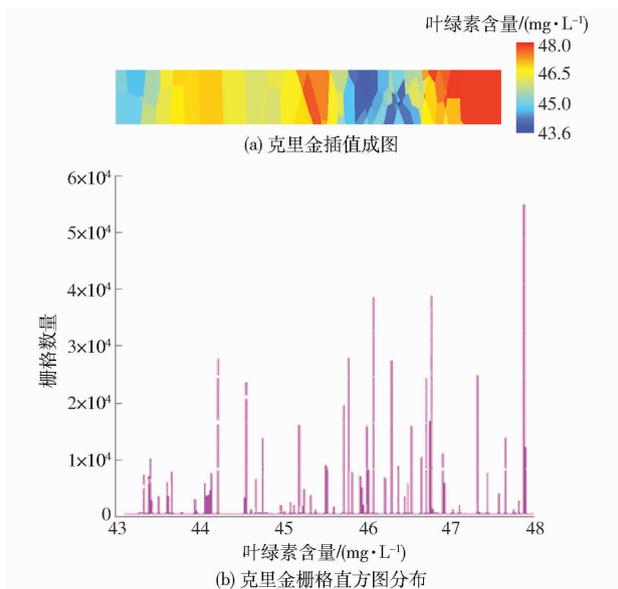


图3 克里金插值分布图绘制结果

Fig. 3 Ordinary Kriging interpolation map rendering results

对插值分析之后所得的栅格图像,进行提取分析,即对栅格图像验证点位置进行CT属性值提取。记采用IDW插值分析提取的CT属性值为CT(IDW),单位mg/L。记采用OK插值分析提取的CT属性值为CT(OK),单位mg/L。

分析插值数据与验证数据二者之间的相关关系,分别绘制相关性分析散点图如图4和图5所示。IDW插值分析结果与验证点位置属性实测值的相关系数为0.722,协方差为1.361;OK插值分析结果与验证点位置属性实测值的相关系数为0.517,协方差为0.798。研究结果表明,通过2种插值分析方法得到预测点位置属性值与对应实际点位置属性

值之间存在较高的正相关关系。且通过IDW法插值分析得到的相关系数优于通过OK方法插值分析得到的预测点数据。

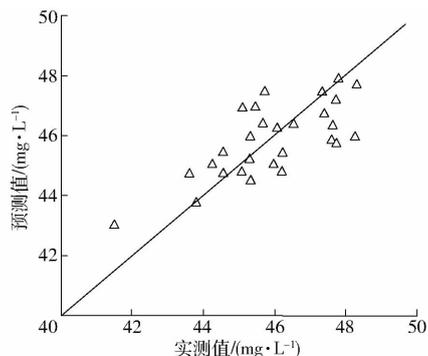


图4 反距离加权相关性趋势

Fig. 4 IDW correlation and trend

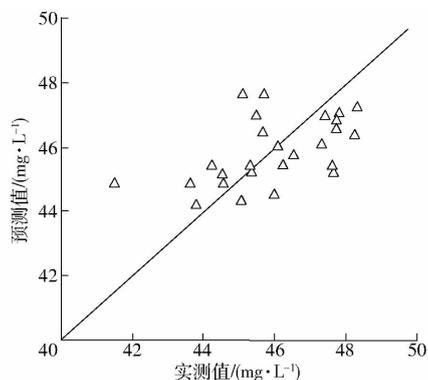


图5 普通克里金相关性趋势

Fig. 5 OK correlation and trend

2.4 讨论

通过提取分布不均且距离较近实验点的叶绿素含量值,利用地统计学中的插值分析方法对农田整体作物长势情况进行空间建模,比较了IDW插值法和OK插值法拟合叶绿素含量分布图的精度(分别为0.722和0.517)。对可能存在的影响精度的误差源分析结果表明,误差主要由大田实验观测获取数据的过程以及后续处理分析过程所导致。

关于田间采样样区规划,邝继双等^[17]利用过滤方法防止属性值过高和过低的粗大误差数据点参与插值分析,以提高分布图精度,说明样区异常点剔除的重要性。而在田间采样实验方案中,采集叶绿素含量数据应尽力规避明显存在粗大误差可能的采样区,如有踩踏的采样区等,进而保证采集数据的代表性和一致性。

关于数据定位匹配,张星炜等^[18]研究发现进行GPS静态绝对定位时,观测误差会逐渐稳定在一个较小的范围内,并且随着观测时间的延长,观测值会变得更加精确;而短时动态测定会导致定位数据漂移和不稳定。因此,本研究采用手持式GPS测量仪,针对近距离样本进行位置坐标数据采集,一方面

会受到 GPS 测量仪的精度误差的影响;另一方面易受测量时间短而导致的数据误差。因此建议适当延长观测时间,让数据波动稳定在一个较小范围时才进行读数,尽力缩小由仪器带来的系统误差。

关于叶绿素提取及光谱分析推断过程中产生的系统误差,唐银凤^[19]的研究指出了叶绿素含量测定中的玻璃器皿和仪器误差,并提出了 Arnon 计算公式误差,得出了采用校正后的 Arnon 公式计算的叶绿素浓度值具有更高的精度。本实验测定方法采用了其研究的改进方法,因此,实验使用的叶绿素含量数据可靠,对模型影响可以忽略。

实验中采用了 2 种地统计学中常用的插值分析方法:IDW 插值方法和 OK 插值方法。刘光孟等^[20]研究指出 IDW 法各点的插值误差变化趋势各不相同,但权重的幂数越大,权值越小,整体的单位权中误差也越大,从而整体精度越差。朱宗申^[21]研究指出减小观测误差或初估值误差、恰当

减小观测空间间距、以及选取分布合理的观测资料,有利提高分析精度。因此,下一步可以通过改进插值方法,并优化分析参数,减小参数选取带来的精度偏差。

3 结论

(1)利用 IDW 插值法和 OK 插值法绘制冬小麦叶绿素含量田间分布图时,2 种插值方法拟合预测数据与验证数据均存在正相关关系,IDW 插值与验证数据相关系数为 0.722,协方差为 1.361;OK 插值与验证集数据相关系数为 0.517,协方差为 0.798。IDW 插值结果优于 OK 插值结果。

(2)分析了空间分布成图误差源,建议通过样区合理规划和异常区域数据剔除保证数据源一致性,通过 GPS 数据观测时间和距离精度方面结合提高定位精度,进一步通过改进插值方法和优化参数提高空间模型精度。

参 考 文 献

- 1 孙红,李民赞,张彦娥,等.玉米生长期叶片叶绿素含量检测研究[J].光谱学与光谱分析,2010,30(9):2488-2492. SUN Hong, LI Minzan, ZHANG Yane, et al. Detection of corn chlorophyll content using canopy spectral reflectance [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(9):2488-2492. (in Chinese)
- 2 薛利红,曹卫星,罗卫红,等.小麦叶片氮素状况与光谱特性的相关性研究[J].植物生态学报,2004,28(2):172-177. XUE Lihong, CAO Weixing, LUO Weihong, et al. Correlation between leaf nitrogen status and canopy spectral characteristics in wheat[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(2):172-177. (in Chinese)
- 3 李修华,李民赞,崔笛.基于光谱学原理的无损式作物冠层分析仪[J].农业机械学报,2009,40(增刊):252-255. LI Xiuhua, LI Minzan, CUI Di. Non-destructive crop canopy analyzer based on spectral principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.):252-255. (in Chinese)
- 4 钟振江,李民赞,孙红,等.作物营养智能检测仪设计与试验[J/OL].农业机械学报,2013,44(增刊2):215-219. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.asas?flag=1&file_no=2013s240&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.040. ZHONG Zhenjiang, LI Minzan, SUN Hong, et al. Development and application of a smart apparatus for detecting crop nutrition [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.2):215-219. (in Chinese)
- 5 刘国顺,常栋,叶协锋,等.基于GIS的缓坡烟田土壤养分空间变异研究[J].生态学报,2013,33(8):2586-2595. LIU Guoshun, CHANG Dong, YE Xiefeng, et al. Spatial variability characteristics of soil nutrients in tobacco fields of gentle slope based on GIS[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(8):2586-2595. (in Chinese)
- 6 宋开山,张柏,王宗明,等.大豆叶绿素含量高光谱反演模型研究[J].农业工程学报,2006,22(8):16-21. SONG Kaishan, ZHANG Bai, WANG Zongming, et al. Inverse model for estimating soybean chlorophyll on centration using in-situ collected canopy hyperspectral data[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(8):16-21. (in Chinese)
- 7 龙亮,谢高地,冷允法.基于GIS的精准农业信息流分析方法研究[J].资源科学,2003,25(6):89-95. LONG Liang, XIE Gaodi, LENG Yunfa. Information flow and interpolation methods of GIS for precision agriculture[J]. Resources Science, 2003, 25(6):89-95. (in Chinese)
- 8 李树强,孙红,张彦娥,等.作物长势信息空间分析系统设计[J/OL].农业机械学报,2013,44(11):234-240. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.asas?flag=1&file_no=20131140&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.040. LI Shuqiang, SUN Hong, ZHANG Yan'e, et al. Development of crop growth spatial analysis system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11):234-240. (in Chinese)
- 9 OSHUNSANAYA S O, OLUWASEMIRE K O, TAIWO O J. Use of GIS to delineate site-specific management zone for precision agriculture[J]. Soil Science and Plant Analysis, 2017, 48(5):565-575.
- 10 杨子清,陈平留,刘健,等.基于Kriging法的森林土壤养分空间插值[J].福建农林大学学报:自然版,2012,41(3):296-300. YANG Ziqing, CHEN Pingliu, LIU Jian, et al. Spatial interpolation of forest soil nutrients based on Kriging method [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition, 2012, 41(3):296-300. (in Chinese)
- 11 宿宁.精准农业变量施肥控制技术研究[D].合肥:中国科学技术大学,2016.

- SU Ning. Research on variable rate fertilization control technology in precision agriculture[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016. (in Chinese)
- 12 陈义强, 刘国顺, 习红昂. 基于地统计学的农业田间试验地选择及评价方法[J]. 江西农业大学学报, 2013, 35(2): 419-426.
CHEN Yiqiang, LIU Guoshun, XI Hongang. Selection and evaluation method for agriculture experiment field based on geostatistics[J]. Acta Agriculture Universitatis Jiangxiensis, 2013, 35(2):419-426. (in Chinese)
- 13 马亚斌, 宋晓宇, 杨贵军, 等. 冬小麦生育期内土壤氮素的时空变异[J]. 中国农业科学, 2015, 48(20):4086-4099.
MA Yabin, SONG Xiaoyu, YANG Guijun, et al. Temporal and spatial variation of soil nitrogen within growth stage of winter wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(20):4086-4099. (in Chinese)
- 14 朱求安, 张万昌, 余钧辉. 基 GIS 的空间插值方法研[J]. 江西师范大学学报:自然版, 2004, 28(2):183-188.
ZHU Qian, ZHANG Wanchang, YU Junhui. The spatial interpolations in GIS[J]. Journal of Jiangxi Normal University: Natural Science, 2004, 28(2):183-188. (in Chinese)
- 15 李新, 程国栋, 卢玲. 空间内插方法比较[J]. 地球科学进展, 2000, 15(3):260-265.
LI Xin, CHENG Guodong, LU Ling. Comparison of spatial interpolation methods[J]. Advance in Earth Sciences, 2000, 15(3): 260-265. (in Chinese)
- 16 展晓日, 朱向荣, 史新元, 等. SPXY 样本划分法及蒙特卡罗交叉验证结合近红外光谱用于橘叶中橙皮苷的含量测定 [J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(4):964-968.
ZHAN Xiaori, ZHU Xiangrong, SHI Xinyuan, et al. Determination of hesperidin in tangerine leaf by near-infrared spectroscopy with spxy algorithm for sample subset partitioning and Monte Carlo cross validation[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(4):964-968. (in Chinese)
- 17 邝继双, 张漫. 产量分布图生成系统的研究[J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(4):9-13.
KUANG Jishuang, ZHANG Man. Study on a yield map generating system[J]. Journal of China Agricultural University, 2003, 8(4):9-13. (in Chinese)
- 18 张星炜, 查勇. GPS 单点定位误差分析[J]. 南京师范大学学报:自然科学版, 2006, 29(3):122-126.
ZHANG Xingwei, ZHA Yong. Analysis to the error of GPS location of single site[J]. Journal of Nanjing Normal University: Natural Science, 2006, 29(3):122-126. (in Chinese)
- 19 唐银凤. 叶绿素含量测定中的误差分析[J]. 南京理工大学学报, 1997, 21(2):130-132.
TANG Yinfen. Error analysis in measuring chlorophyll content[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 1997, 21(2):130-132. (in Chinese)
- 20 刘光孟, 汪云甲, 王允. 反距离权重插值因子对插值误差影响分析[J]. 中国科技论文在线, 2010, 5(11):879-884.
LIU Guangmeng, WANG Yunjia, WANG Yun. Impact of inverse distance weighted interpolation factors on interpolation error [J]. Science Paper Online, 2010, 5(11):879-884. (in Chinese)
- 21 朱宗申. 影响统计插值分析误差的若干因素分析[J]. 气象学报, 1992, 50(2):167-180.
ZHU Zongshen. Effect of some factors on the analysis error of statistica interpolation[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1992, 50(2): 167-180. (in Chinese)

~~~~~  
(上接第 85 页)

- 12 SHENDRYK I, BROICH M, TULBURE M G, et al. Bottom-up delineation of individual trees from full-waveform airborne laser scans in a structurally complex eucalypt forest[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 173:69-83.
- 13 XU B, JIANG W, SHAN J, et al. Investigation on the weighted RANSAC approaches for building roof plane segmentation from LiDAR point clouds[J]. Remote Sensing, 2016, 8(1):5.
- 14 CHANG J. Segmentation-based filtering and object-based feature extraction from airborne LiDAR point cloud data [J]. Dissertation Abstracts International, 2011, 73(1):169-176.
- 15 李孟迪, 蒋胜平, 王红平. 基于随机抽样一致性算法的稳健点云平面拟合方法[J]. 测绘科学, 2015, 40(1):102-106.  
LI Mengdi, JIANG Shengping, WANG Hongping, et al. A RANSAC-based stable plane fitting method of point clouds[J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40(1):102-106. (in Chinese)
- 16 AXELSSON P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models [C] // International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing, 2000.
- 17 FISCHLE M A, BOLLES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[M]. ACM, 1981: 381-395.
- 18 周春霖, 朱合华, 李晓军. 随机抽样一致性平面拟合及其应用研究[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(7):177-179.  
ZHOU Chunlin, ZHU Hehua, LI Xiaojun. Research and application of robust plane fitting algorithm with RANSAC [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(7):177-179. (in Chinese)
- 19 官云兰, 程效军, 施贵刚. 一种稳健的点云数据平面拟合方法[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2008, 36(7):981-984.  
GUAN Yunlan, CHENG Xiaojun, SHI Guigang. A robust method for fitting a plane to point clouds [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(7):981-984. (in Chinese)
- 20 胡德勇, 邓磊. 遥感图像处理原理和方法[M]. 北京: 测绘出版社, 2014:164-168.