doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.034

基于 ArcGIS Engine 的土壤氮肥空间分布成图系统

兰　红　杨　玮　李民赞　周　鹏
(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)

摘要: 为直观反映土壤中氮肥的分布情况,并为变量施肥决策提供技术支持,开发了氮肥空间分布成图系统。系统基于.NET 平台,使用 C#语言编写,利用 ArcGIS Engine 实现数据文件类型转换、插值分析、栅格图层渲染等 GIS 功能。利用近红外光谱技术获得土壤光谱数据,通过 Python 构建 BP 神经网络回归模型,实现氮素含量预测。利用 C#命令行的方式实现 C#对 Python 模型的调用。配合车载式土壤参数传感器采集的数据对系统进行了测试,结果表明:该系统能够根据光谱数据估算出采集点对应的氮素含量,并结合采集点的地理坐标,分别使用反距离加权插值算法和趋势面插值算法生成氮肥空间分布图,为制定相应的变量施肥决策提供理论依据。

关键词: 氮肥空间分布; 变量施肥; 插值分析; ArcGIS Engine; Python
中图分类号: S126　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)S0-0221-07

Soil Nitrogen Spatial Distribution Mapping System Based on ArcGIS Engine

LAN Hong　YANG Wei　LI Minzan　ZHOU Peng
(*Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research*, *Ministry of Education*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Nitrogen in the soil is a key element in crop growth. The development of nitrogen spatial distribution mapping system not only reflects the distribution of nitrogen in the soil intuitively, but also provides technical support for variable fertilization decisions. Based on the .NET platform, written in C#, the GIS functions such as data file type conversion, interpolation analysis and raster layer rendering were realized by ArcGIS Engine, and based on soil spectral data obtained by near-infrared spectroscopy, the system made by Python can predict the N values through a BP neural network regression model. The integration of ArcGIS Engine and Python was achieved by adopting C# command line. The system was tested with the fifty-four soil samples which were collected by the vehicle-mounted soil parameter sensor. The results showed that the system can estimate the nitrogen content corresponding to the soil sample based on the spectral data. Both inverse distance weighted and trend surface interpolation can generate the nitrogen spatial distribution map combined with the geographical coordinates of the collection points. The IDW interpolation correlation coefficient reached 0.753 which satisfied the precision requirements. And through the IDW spatial distribution map, the place where nitrogen was concentrated can be identified obviously. Through the TS spatial distribution map, the whole trend of nitrogen distribution can be mastered. In summary, the spatial distribution maps made by system can provide a theoretical basis for the formulation of corresponding variable fertilization decisions.

Key words: nitrogen spatial distribution; variable fertilization; interpolation analysis; ArcGIS Engine; Python

0　引言

田间作物生长需要的养分主要来自于土壤,土壤中氮素含量直接影响作物植株的生长状况[1-2]。了解土壤的氮素分布信息,合理进行施肥,对避免因土壤供氮不足引起农作物产量和品质下降、过量施

收稿日期: 2019-04-20　修回日期: 2019-05-18
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0201500-2017YFD0201501)和中国农业大学基本科研业务经费资金项目(2019TC049)
作者简介: 兰红(1994—),女,硕士生,主要从事电子技术在农业中的应用研究,E-mail: 1336773554@qq.com
通信作者: 杨玮(1981—),女,副教授,博士生导师,主要从事精细农业系统集成研究,E-mail: cauyw@cau.edu.cn

肥导致地下水硝态氮积累等有着重要意义[3]。近年来,近红外光谱技术在获取土壤养分信息方面得到了广泛应用,许多研究构建了利用近红外光谱检测土壤氮素含量的模型,并且达到了较高的精度[4-6]。相比传统的化学分析方法,利用模型进行氮素含量估计快速、便捷、低成本,为精细农业的高效管理提供了技术支持。

精细农业要求在较精细的空间尺度上获取农田作物生产有关的空间、属性、时间等基本特征,并利用合适的方法对数据进行处理,转变为易于理解和利用的可视化空间分布图形信息[7]。而农田信息的基本特征也是 GIS 数据库的 3 种基本数据成分,利用 GIS 对农田属性与农田时空属性进行分析处理,从而实现对农田更加有效、精确和科学的管理[8-9]。ArcGIS Engine 是用于开发嵌入式 GIS 的组件库和工具,其功能强大,能够用于开发新的 GIS 应用软件,在用户开发的软件中可作为 GIS 插件使用。ArcGIS Engine 既可以用于地图绘制,也可以用于数据处理等更为复杂的 GIS 应用[10-11]。

李国强等[12]基于. NET 平台,将 GIS 和夏玉米生长监测模型耦合与集成,建立氮肥精确管理系统,系统测试表明,与传统施肥区相比,变量施肥区植株氮积累量提高 2.67%,平均产量提高 67.53 kg/hm^2。李忠武等[13]利用 ArcGIS Engine 组件,使用 COM 技术,将模型与地理信息系统集成,设计并实现了水稻生产潜力动态预测系统,对农业资源管理起到重要作用。姜小刚等[14]利用近红外光谱仪采集的土壤光谱数据和用化学方法测定的养分含量真值建立数学模型,使用 ArcGIS 软件中的克里金插值法进行插值分析,得出采样区的土壤养分空间分布图,为生产肥料的实际施用提供参考。WERE 等[15]利用支持向量机、人工神经网络和随机森林 3 种算法分别建模,对土壤中的有机质含量进行预测,并将数据整合到 GIS 数据库中,使用普通克里金插值方法进行插值分析,得出插值分布图,证明将土壤环境数据和随机成分纳入地理信息统计方法中,可以有效地进行精细农业管理,并减少预测错误。

综上可知,将 GIS 组件库应用于农田数据处理系统的开发中可实现对农业信息的有效管理。但是大部分空间分布成图系统基于的土壤养分数据,需先通过化学方法测得,成本高且过程繁琐。部分系统虽然实现了氮素预测模型与 GIS 的耦合,但是调用的模型几乎都是线性模型。而经实验验证,在相同的建模样本输入下,BPNN 非线性模型的预测精度普遍优于线性模型的预测精度[16]。Python 相比 Matlab 而言,具有开源、免费、执行效率高和可移植性强等优势,但通过集成 Python 非线性模型与 GIS 实现土壤养分分布图的系统并不多见。因此,利用 Python 构建神经网络非线性模型,并实现与 GIS 的集成,可以在氮素含量未知时免去化学方法的繁琐步骤,快速预测出精确度较高的氮素值,同时兼容数据已经包含氮素含量的情况,可直接利用成图模块进行成图操作,满足便捷、高效地生成氮肥空间分布图的需求。

本文以土壤氮素为研究对象,基于. NET 平台,使用 C#语言,通过利用 C#命令行的方式调用. py 文件,将氮素含量估算模型与 ArcGIS Engine 组件相结合,分别利用反距离加权插值算法和趋势面插值算法进行插值分析,并对栅格图层进行渲染,直接利用光谱数据,实现快速高效绘制氮肥含量分布图的功能,为相应地块的变量施肥决策提供理论依据。

1 系统设计

1.1 系统平台

在 Windows 10 操作系统下,以 VS 2012 为开发平台,搭建了基于 ArcGIS License Manager 10.2 + ArcObjects SDK for Microsoft . NET Framework 10.2 + ArcGIS Engine 10.2 的 GIS 组件二次开发环境。基于 Python 3.5,使用 Pycharm 编写 BP 神经网络模型,利用 C#命令行的方法调用. py 文件,实现对 ArcGIS Engine 组件和 Python 文件的集成。

1.2 系统结构设计

土壤氮肥空间分布成图系统的功能主要划分为数据文件管理、氮素含量计算、数据类型转换、插值分析成图和系统维护 5 个模块。系统的总体功能结构如图 1 所示。

(1)数据文件管理模块:光谱仪获取采样点土壤氮素的反射信息,一般保存为 Excel 文件。系统的数据文件管理模块实现了 Excel 文件的读取,支持. xlsx 和. xls 两种格式,数据的加载为氮素含量的计算做准备。

(2)氮素含量计算模块:该模块实现了 C#对 Python 的调用。利用 Python 搭建好的 BP 神经网络回归模型,对氮素含量进行估计,同时将计算结果保存,写入原始 Excel 文件。

(3)数据类型转换模块:实现了利用包含氮素值的 Excel 文件生成矢量数据 shape 文件的功能。并统计文件中采样点的数量,根据不同的地理位置坐标显示散点图,创建点图层。

(4)插值分析成图模块:该模块实现了利用反距离加权插值算法和趋势面插值算法两种不同的插值方法实现插值分析的功能。插值分析之后对栅格

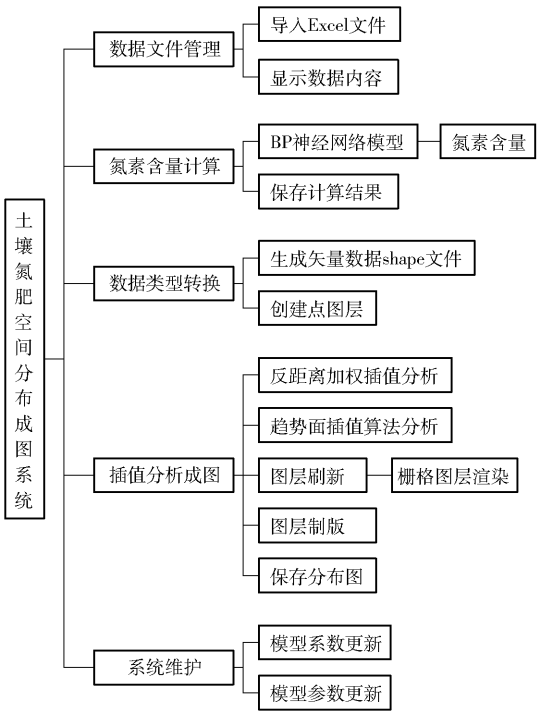

图 1　土壤氮肥空间分布成图系统功能结构

Fig. 1　Function structure diagram of soil nitrogen spatial distribution mapping system

图层进行渲染形成颜色分明的直观分布图。增加了图层制版,添加了比例尺、指北针和图例等地图整饰元素。可以将生成的制版导出保存。

(5)系统维护模块:该模块主要涉及后续的系统改进和维护。氮素含量估算使用的数学模型可以利用后期采集的实验数据不断地进行改进和更新,提高模型的精度,保证系统的健壮性和有效性。

2　系统功能实现

2.1　基于 Python 的氮素含量计算模型算法实现

2.1.1　BP 神经网络算法

BP 神经网络是利用非线性可微函数进行权值训练的反向传播网络。根据 BP 神经网络的定义,对于任何在闭区间内的一个连续函数都可以用单隐层的 BP 网络逼近,因而一个 3 层 BP 网络可以完成任意的 n 维到 m 维的映射[17]。虽然多元线性回归、偏最小二乘回归等线性模型经验证可以得到较高的精度,但是如果样本集中存在异常值,很容易对模型精度产生影响,而神经网络则能规避这个风险[18]。图 2 为一个典型的 BP 神经网络结构图。

2.1.2　Python 实现

(1)对光谱数据进行预处理

建模所使用的数据为实验室已有的光谱数据。原始光谱数据包含 72 个土壤样本在 800 ~ 2 500 nm 范围内的吸光度和利用化学方法测得的真实土壤样本含氮量。利用四点差分计算方法[19]得到一阶微分光谱,即

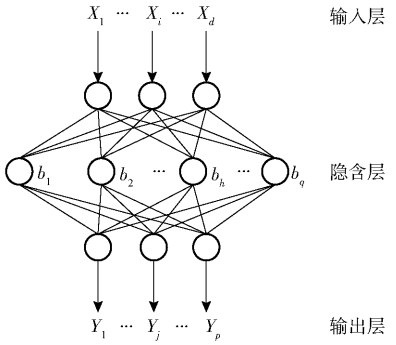

图 2　BP 神经网络结构图

Fig. 2　Structure diagram of BP neural network

$$f(x)' = \frac{1}{6h}(-11)x_i + 18x_{i-1} - 9x_{i-2} + 2x_{i-3} \quad (1)$$

式中　x_i——波长 i 处的原始光谱反射率

h——差分时的步长

$f(x)'$——波长 i 处的微分光谱反射率

利用微分光谱数据与测得的氮素含量进行相关性分析,分别在不同区域选取相关系数绝对值较高的极值点作为敏感波段。因此选取了 990、1 053、1 182、1 233、1 445、1 571、2 221 nm 7 个敏感波段。

(2)神经网络回归建模

选取 54 个样本进行建模,18 个样本作为验证集,采用 3 层 BP 神经网络进行建模,将选取的 7 个敏感波段作为神经网络的输入变量进行回归建模,构建了 7 - 15 - 1 的神经网络结构。训练目标为 0.001,学习率为 0.05,激活函数为 sigmoid。

使用 Pycharm 编写模型,调用第三方库 matplotlib. pyplot,实现 Python 数据可视化。对通过模型得到的预测值和测定值进行相关性分析,结果如图 3 所示。

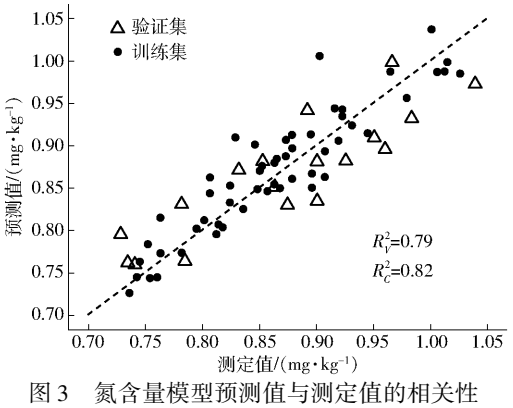

图 3　氮含量模型预测值与测定值的相关性

Fig. 3　Correlation between predicted values of model and actual values

(3)模型评价

模型预测性能的评价标准通常有均方根误差(RMSE)、验证集均方根误差(RMSEP)、训练集均方根误差(RMSEC)、相关系数(R)、决定系数(R^2)及

相对分析误差(RPD)。R 和 R^2 越接近 1,说明预测值和测定值的相关性越强,模型的预测效果越好。当 RPD 大于 2.5 时,模型具有极好的预测能力;当 RPD 为[2, 2.5]时,模型可作近似定量计算;当 RPD 小于 2 时,模型精度一般,不建议使用[20],以此来评价模型的可用性。

本文建立的 BP 神经网络模型,训练集决定系数 R_C^2 为 0.82,模型验证集决定系数 R_V^2 为 0.79,训练集均方根误差 RMSEC 为 0.032 mg/kg,验证集均方根误差 RMSEP 为 0.033 mg/kg,相对分析误差 RPD 为 2.05。从训练集和验证集的均方根误差可以看出,模型具有较好的稳定性。根据决定系数和相对分析误差的计算结果,可以认为模型基本满足精度要求,因此该 BP 神经网络模型可以应用在系统中作定量计算来估计氮素的含量。

2.2 ArcGIS Engine 和 Python 的集成

2.2.1 .py 文件调用

Python 建模中需要用到一些第三方库,如果使用 COM 组件 IronPython 来进行 C#对 Python 文件的调用,会提示找不到相关模块的错误,综合多方资料比较来看,最终选择利用命令行的方式来实现该功能。

本文 C#程序调用 Python 文件,开发环境基于 Python 3.5,安装 pyInstaller,将原始.py 文件打包成.exe文件,因为是命令行的方式,所以需自行传入参数,调用过程如图 4 所示。

2.2.2 BP 神经网络模型调用

在含有 ArcGIS Engine 的 VS 程序中创建新的窗体,用作实现氮素含量计算功能的窗口。将经过编译测试的 BP_neural_network.py 文件利用 pyInstaller 打包成 BP_neural_network.exe文件,并添加到 debug 文件下,该.py文件包含写好的 BPNeuralNetwork 类,类中有训练函数 train 和反向传播更新权值函数 back_propagatede 等方法,编辑代码实现对 Python 文件中类的调用,将读取的表中数据保存为数组,作为函数的参数进行传递,完成氮素含量计算功能和 ArcGIS Engine 与 Python 的集成。

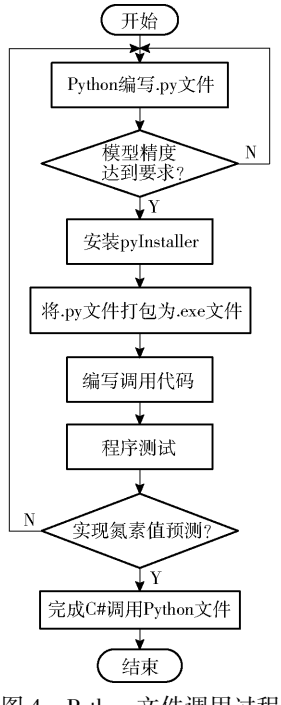

图 4 Python 文件调用过程

Fig. 4 Process of Python file calling

2.3 基于 ArcGIS Engine 的 GIS 功能实现

2.3.1 插值算法

(1)反距离加权插值(Inverse distance weighted, IDW)是基于相近相似的原理:即两个物体离得近,它们的性质就越相似,反之,离得越远则相似性越小。以插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均,离插值点越近的样本点赋予的权重越大。IDW 插值的一般步骤[21]为:首先计算未知点到所有点的距离,然后计算每个点的权重,最后计算未知点的值。每个点的权重和未知点的值计算公式为

$$\mu_i = \frac{\frac{1}{d_i}}{\sum_{i=0}^{n}\frac{1}{d_i}} \tag{2}$$

$$\hat{Z}(X_o, Y_o) = \sum_{i=1}^{n}\mu_i Z(X_i, Y_i) \tag{3}$$

式中 d_i——距离

μ_i——反距离权重

$Z(X_i, Y_i)$——已知点(X_i, Y_i)处的值

$\hat{Z}(X_o, Y_o)$——未知点(X_o, Y_o)处的值

(2)趋势面(Trend surface, TS)插值算法可以表现渐进趋势的平滑表面,对于边缘处的异常值尤为敏感。趋势面插值用多项式表示的线或面按最小二乘法原理对数据点进行拟合,并用于估算其他值的点、线和面。多项式的选择取决于数据是一维还是二维。

线性或一阶次趋势面的数学模拟模型(二维)为

$$Z_{X,Y} = b_0 + b_1 x + b_2 y \tag{4}$$

二次趋势面的数学模拟模型(二维)为

$$Z_{X,Y} = b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 x^2 + b_4 xy + b_5 y^2 \tag{5}$$

三次趋势面的数学模拟模型(二维)为

$$Z_{X,Y} = b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 x^2 + b_4 xy + b_5 y^2 + b_6 x^3 + b_7 x^2 y + b_8 xy^2 + b_9 y^2 \tag{6}$$

式中 $Z_{X,Y}$——x 和 y 的函数

b_i——由控制点计算得到的常数,$i = 1, 2, \cdots, 9$

趋势面拟合程度的检验,同多元回归分析一样

可以用 F 分布进行检验。

2.3.2　氮肥空间分布图生成

(1)Excel 文件转换为 shape 文件

shape 文件是 GIS 中最常用的矢量数据格式，其中包含了空间信息和属性信息。空间信息主要是空间位置，不包括空间关系。属性信息包括经纬度和高程 Z 属性。

ArcGIS Engine 中不能利用 Excel 文件直接在 axMapControl 控件中生成图层，所以需要将其先转换为 shape 文件。编写 CreateShapeFile 方法，依赖 IGemoetryDefEdit 接口，将几何属性 HasZ_2 设置为 true，声明图层中含有高程字段，创建包含基本属性的 shape 文件。读取 Excel 文件的内容，编写 addPoint 方法，依赖 IPoint 接口，把经度赋给 X 属性，纬度赋给 Y 属性，氮素值赋给 Z 属性，利用 IZAware 接口，将 ZAware 设置为 true，表示点的高程值存在。最后将生成的 shape 文件添加到 axMapControl 控件的图层中。

(2)插值分析成图

利用 Shape. Z 属性进行插值计算。编写 CreateRaster 方法，进行反距离加权插值和趋势面插值，生成不同的栅格数据集，分别调用库函数 CreateFromRaster 生成栅格图层，将生成的图层添加到 axMapControl 控件中。未经过渲染的栅格图层为黑白色调，为了便于分析和美观，对栅格图层进行了分级渲染。最后利用 axPageLayoutControl 控件实现图层制版，添加了图例、指北针和比例尺等元素。基于分布图保存和打印的需求，设置了保存的功能，将分布图保存为 pdf 文件，为变量施肥决策提供理论依据。

3　系统测试

3.1　测试环境

土壤氮肥空间分布成图系统用来配合车载式土壤参数传感器的使用。车载系统平台的近红外光谱传感器获取采样点在 7 个波长下的吸收度数据，GPS 位置信息通过车载 GPS 获取，利用串口传输数据。测试数据采集地点在中国农业大学上庄实验站，位于北京市海淀区，东经 116. 189 396 5°，北纬 40. 141 112 8°。对 54 个采样点进行了光谱数据采集和 GPS 数据采集，信息通过车载计算机录入，生成 Excel 文件，使用成图系统对文件进行信息提取和分析，最终生成氮肥空间分布图。

3.2　数据加载和氮素含量计算测试

系统主界面如图 5 所示。主界面包含了文件加载功能，并提供了帮助信息按钮，对系统功能操作做了说明。



图 5　系统主界面

Fig. 5　System main interface

文件载入系统后，对文件内容进行读取，在氮素含量计算模块中对读取的数据进行分析使用，计算出每个采样点对应的氮素含量，并写入原始 Excel 文件中，写入完成后系统会提示信息已写入。模块的运行效果如图 6 所示。

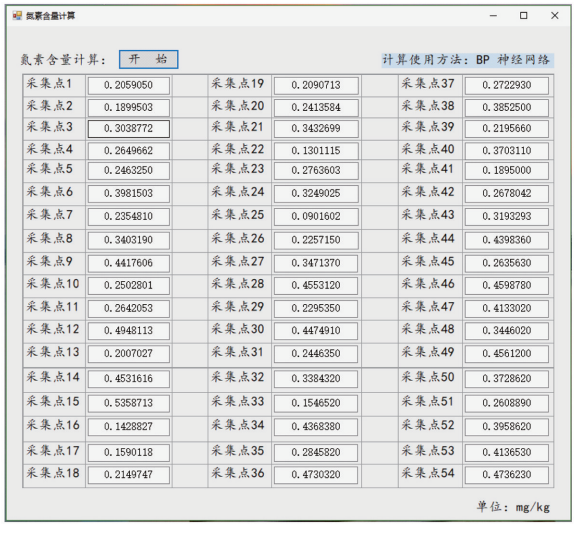

图 6　氮素含量计算模块

Fig. 6　Module of nitrogen content calculation

3.3　数据类型转换测试

选择已经写入氮素数据的 Excel 文件，在弹出的 shape 文件保存对话框里设置 shape 文件的名称和保存路径，系统根据读取的 Excel 文件内容向 shape 图层添加点元素，每个点元素的 Z 值为对应采样点的氮素值。axMapControl 控件中根据每个点的地理位置信息显示采样点的分布图，为了便于比较两种插值方法的插值结果，使用了两套成图控件组成了一个界面，采样点分布图如图 7 所示。

3.4　插值分析成图测试

点击“进行插值分析”按钮，系统生成栅格图层，自动对栅格图层进行分级渲染，通过渲染后的图层能明显看出氮肥含量分布，制版栏与成图栏的地



图 7 采样点分布图

Fig. 7 Map of sample point distribution

图同步,显示与地图栏相同的分布图。制版栏对地图进行了整饰,点击“保存分布图”按钮可以将分布图保存。界面左侧为使用反距离加权插值算法插值后经过渲染和整饰的图,右侧为使用趋势面插值法插值后经过渲染和整饰的图,测试结果如图 8 所示。

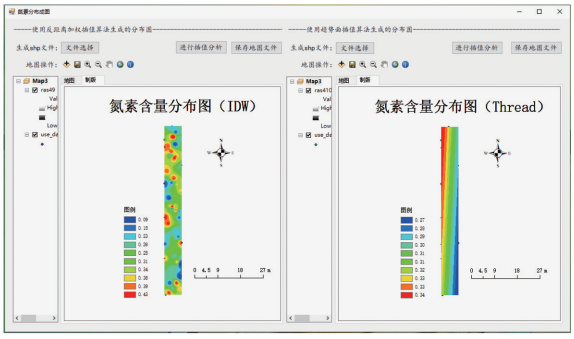

图 8 两种插值算法生成的分布图

Fig. 8 Distribution map generated by two interpolation algorithm distributions

从图 8 可以看出,该实验地的氮肥分布不均匀。左侧的反距离加权算法因其基于相近相似原理的算法特点,生成的分布图将空间分布中氮肥含量集中的地方更加明显地表现出来,虽然出现了部分“牛眼”现象,但整体跟右侧趋势面插值法生成的分布图相比差异不大;趋势面插值算法本身作为不精确的一种插值算法,在创建平滑表面的时候,生成的表面不通过各原始点,对整个表面执行的是最佳拟合[22]。所以,通过趋势面插值法生成的分布图可以直观看出氮肥的分布梯度,其中西北部的氮肥含量较多,从西北至东南氮肥含量逐渐降低,从而为宏观把握施肥决策提供依据。

通过对反距离加权算法的分布图进行栅格值的提取,计算氮含量插值结果与原始值之间的相关系数,绘制相关性分析散点图,如图 9 所示。

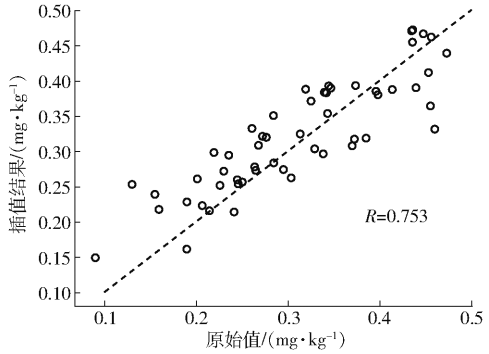

图 9 插值结果与原始值的相关性

Fig. 9 Correlation between interpolation results and original nitrogen values

结果表明,反距离加权算法的插值结果与原始氮素值的相关系数 R 为 0.753,基本满足精度需求。趋势面插值法虽然是一种不精确的算法,但是其生成的氮肥空间分布图可以从整体上把握氮肥的分布情况,和反距离加权算法生成的分布图都对氮肥分布的研究具有较强的参考价值。

4 结论

(1)开发了土壤氮肥空间分布成图系统,针对车载式土壤参数传感器平台的数据特点,设计了数据文件管理和氮素含量计算模块,实现了直接利用光谱数据估算采样点氮素含量的功能。同时结合 ArcGIS Engine 组件进行二次开发,生成了氮肥空间分布图。经过实际使用证明,系统的各功能工作状态良好,生成的分布图能为农业变量施肥决策提供重要参考。但系统并未添加生成施肥处方的功能,不能及时给予用户具体的施肥建议,下一步将对系统进行功能拓展。

(2)系统利用两种插值方法进行了分布图的插值分析,都取得了较好的插值效果。每种插值方法依据各自算法特点生成的分布图都较好地实现了对氮肥空间分布图可视化分析的需求,为土地的差异化管理提供了多样化的数据支持。基于系统精确度和分布图种类的需求,今后将对算法精度的提高做进一步研究,并尝试利用其他插值算法生成不同的分布图。同时,尽量减少样本采集时的误差,以生成可信度更高的氮肥含量分布图,从而为变量施肥决策提供更有效的理论支撑。

参 考 文 献

[1] 张瑶,李民赞,郑立华,等. 基于近红外光谱分析的土壤分层氮素含量预测[J]. 农业工程学报,2015,31(9):121 - 126.
ZHANG Yao, LI Minzan, ZHENG Lihua, et al. Prediction of soil total nitrogen content in different layers based on near infrared spectral analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 121 - 126. (in Chinese)

[2] 张娟娟,田永超,姚霞,等. 基于近红外光谱的土壤全氮含量估算模型[J]. 农业工程学报,2012,28(12):183 - 188.

ZHANG Juanjuan, TIAN Yongchao, YAO Xia, et al. Estimating model of soil total nitrogen content based on near-infrared[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(12): 183 - 188. (in Chinese)

[3] 陈颂超,冯来磊,李硕,等. 基于局部加权回归的土壤全氮含量可见-近红外光谱反演[J]. 土壤学报,2015,52(2):312 - 320.
CHEN Songchao, FENG Lailei, LI Shuo, et al. VIS - NIR spectral inversion for prediction of soil total nitrogen content in laboratory based on locally weigthted regession[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(2): 312 - 320. (in Chinese)

[4] 安晓飞,李民赞,郑立华,等. 土壤水分对近红外光谱实时检测土壤全氮的影响研究[J]. 光谱学与光谱分析,2013,33(3):677 - 681.
AN Xiaofei, LI Minzan, ZHENG Lihua, et al. Effect of soil moisture on prediction of soil total nitrogen using NIR spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(3): 677 - 681. (in Chinese)

[5] BARTHES B G, DIDIER B, EDMOND H, et al. Determining the distributions of soil carbon and nitrogen in particle size fractions using near-infrared reflectance spectrum of bulk soil samples[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40(6): 1533 - 1537.

[6] CHANG C W, LAIRD D A, MAUSBACH M J, et al. Near-infrared reflectance spectroscopy-principal components regression analyses of soil properties[J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(2): 480 - 490.

[7] 汪懋华. 精细农业的实践与农业科技创新[J]. 中国软科学,1999(4):21 - 25.
WANG Maohua. The practice of precision agriculture and the technology innovation of agricultural science[J]. Soft Science of China, 1999(4): 21 - 25. (in Chinese)

[8] 郑立华,李民赞,冀荣华,等. 基于 GIS 的农田土壤水分状况管理模型及应用[J]. 农业工程学报,2009,25(增刊2):13 - 17.
ZHENG Lihua, LI Minzan, JI Ronghua, et al. Development of soil moisture management models based on GIS for farmland and its application[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(Supp. 2): 13 - 17. (in Chinese)

[9] 李树强,孙红,张彦娥,等. 作物长势信息空间分析系统设计[J]. 农业机械学报,2013,44(11):234 - 240.
LI Shuqiang, SUN Hong, ZHANG Yan'e, et al. Development of crop growth spatial analysis system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 234 - 240. (in Chinese)

[10] 徐路铮,郭思逸. 基于 ArcGIS Engine 的空间信息项目一体化管理系统的研究[J]. 地矿测绘,2018,34(3):20 - 22.
XU Luzheng, GUO Siyi. Research on integrated management system of spatial information project based on ArcGIS Engine[J]. Surveying and Mapping of Geology and Mineral Resources, 2018, 34(3): 20 - 22. (in Chinese)

[11] 黄晶. 基于 ArcGIS 的室内地图数据处理及交付系统的设计与实现[D]. 北京:北京邮电大学,2016.
HUANG Jing. Design and implementation of indoor map data processing and delivery system based on ArcGIS[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2016. (in Chinese)

[12] 李国强,王猛,胡峰,等. 基于 GIS 的夏玉米氮肥精确管理系统设计与实现[J]. 贵州农业科学,2016,44(2):186 - 189.
LI Guoqiang, WANG Meng, HU Feng, et al. Design and implement of GIS-based precision nitrogen management system in summer maize [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2016, 44(2): 186 - 189. (in Chinese)

[13] 李忠武, 任平, 王振兴,等. 基于 ArcGIS Engine 的水稻生产潜力预测系统的设计与实现[J]. 湖南大学学报(自科版),2011,38(11):76 - 81.
LI Zhongwu, REN Ping, WANG Zhenxing, et al. Design and realization of rice productivity potential forecast system based on ArcGIS Engine [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2011, 38(11): 76 - 81. (in Chinese)

[14] 姜小刚,王海阳,郝勇,等. 基于 ArcGIS 和 Vis - NIR 脐橙园土壤养分含量分布图预测研究[J]. 光谱学与光谱分析,2016,36(增刊1):128 - 129.
JANG Xiaogang, WANG Haiyang, HAO Yong, et al. Prediction of navel orange orchard soil nutrient distribution based on ArcGIS and Vis - NIR[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(Supp. 1): 128 - 129. (in Chinese)

[15] WERE K, BUI D T, DICK Ø B, et al. A comparative assessment of support vector regression, artificial neural networks, and random forests for predicting and mapping soil organic carbon stocks across an Afromontane landscape [J]. Ecological Indicators, 2015, 52: 394 - 403.

[16] MOUAZEN A M, KUANG B, DE BAERDEMAEKER J, et al. Comparison among principal component, partial least squares and back propagation neural network analyses for accuracy of measurement of selected soil properties with visible and near infrared spectroscopy[J]. Geoderma, 2010, 158(1 - 2): 23 - 31.

[17] 郑立华,李民赞,潘娈,等. 基于近红外光谱技术的土壤参数 BP 神经网络预测[J]. 光谱学与光谱分析,2008,28(5):1160 - 1164.
ZHENG Lihua, LI Minzan, PAN Luan, et al. Estimation of soil organic matter and soil total nitrogen based on NIR spectroscopy and BP neural work[J]. Spectroscopy and Spectral Aanlysis, 2008, 28(5): 1160 - 1164. (in Chinese)

[18] 李燕,孙秀云,王俊德. 人工神经网络法测定五组分红外光谱体系[J]. 光谱学与光谱分析,2000,20(6):773 - 776.
LI Yan, SUN Xiuyun, WANG Junde. Determination of five compounent infrared spectra system with artificial neural network [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2000, 20(6): 773 - 776. (in Chinese)

[19] 李民赞,韩东海,王秀. 光谱分析技术及其应用[M]. 北京:科学出版社,2006.

[20] VOHLAND M, MICHEL K, LUDWING B. Use of near-infrared spectroscopy to distinguish carbon and nitrogen originating from char and forest-floor material in soils: usefulness of a genetic algorithm[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2011, 174(5): 695 - 701.

[21] 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)

[22] 臧辰龙. 基于中国区域的气温和降水量的插值方法研究[D]. 泰安:山东农业大学,2014.
ZANG Chenlong. Research temperature and precipitation interpolation methods of China[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2014. (in Chinese)