

基于无人机遥感的冬小麦追肥推荐模型建立

李新伟, 陶新宇, 陈小芳, 肖 新*

(安徽科技学院资源与环境学院, 安徽 凤阳 233100)

摘要:为提高小麦氮素精准、高效的管理能力,实现实时、便捷、精准的变量施肥。本文在无人机遥感进行冬小麦氮素营养诊断的基础上,依据光谱诊断施肥模型,建立冬小麦返青期、拔节期和抽穗期等关键生育期追肥推荐模型。研究表明:无人机影像获得的DVI与冬小麦关键生育时期氮素参数植株氮浓度相关性最好($R^2=0.8698$);冬小麦返青期、拔节期和抽穗期氮素诊断临界DVI值分别为0.594、0.784和0.807;冬小麦最高产量为11 364.3 kg/hm²,最佳产量为11 230.9 kg/hm²,总施氮量为272.9 kg/hm²,最佳经济施氮量264.1 kg/hm²,基于光谱诊断的追肥推荐模型分别为返青期 $y=-39.69x+23.58$ 、拔节期 $y=-129.97x+101.95$ 、抽穗期 $y=-159.79x+128.93$ 。诊断指标的建立为冬小麦基于光谱诊断的追肥模型奠定了基础,临界DVI值的确定为诊断冬小麦关键生育期是否补充氮肥提供依据,氮肥效应曲线建立和光谱诊断施肥模型选择实现了量化的追肥推荐。

关键词:冬小麦;营养诊断;追肥推荐模型

中图分类号:S127

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2021)04-0135-04

Design for Winter Wheat Top Dressing Recommendation Model Based on UAV Remote Sensing

LI Xinwei, TAO Xinyu, CHEN Xiaofang, XIAO Xin*

(College of Resource and Environment, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, China)

Abstract: In order to improve the management ability of wheat nitrogen accurately and efficiently, real-time, convenient and accurate variable rate fertilization was realized. Based on the nitrogen nutrition diagnosis of winter wheat by UAV remote sensing and the fertilization model of spectral diagnosis, the recommended fertilization models for key growth stages of winter wheat, such as green-turning stage, jointing stage and heading stage were established. The results showed that the DVI obtained from UAV images correlated best with plant nitrogen concentration ($R^2=0.8698$), and the critical DVI values of nitrogen diagnosis at turning green stage, jointing stage and heading stage of winter wheat were 0.594, 0.784 and 0.807, respectively. The highest and best yield of winter wheat was 11 364.3 kg/ha, the best yield was 11 230.9 kg/ha, and the total nitrogen application amount was 272.9 kg/ha, respectively. The optimum economic fertilization amount was 264.1 kg/ha. The recommended fertilizer application models based on spectral diagnosis were $y=-39.69x+23.58$ in the green-back stage, $y=-129.97x+101.95$ at jointing stage and $y=-159.79x+128.93$ at heading stage. The establishment of diagnostic indicators laid a foundation for the model of fertilizer top dressing based on spectral diagnosis. The critical DVI value did provide the basis for the diagnosis of whether nitrogen fertilizer was added in the key growth period of winter wheat. The establishment of the effect curve of nitrogen fertilizer and the selection of the application model of spectral diagnosis realized the quantitative recommendation of top dressing.

Key words: Winter wheat; Nutrition diagnosis; Top dressing recommendation model

收稿日期:2019-09-27

基金项目:安徽高校自然科学研究重点项目(KJ2016A173、KJ2019A0819);实验室开放课题发展基金项目(201903);大学生创新创业训练计划项目(S201910879072)

作者简介:李新伟(1987-),男,讲师,博士,主要从事精准农业和信息农业研究。

通讯作者:肖 新,男,博士,教授,E-mail: xiaox@ahstu.edu.cn

小麦是我国重要的三大粮食作物之一,小麦的稳产与高产对于保障国家粮食安全起着举足轻重的作用^[1]。而氮素是促进小麦有机氮化合物合成、增加同化物和光合作用必需的大量元素,也是形成籽粒产量的重要因子,所以氮素管理是小麦生产管理中最重要的一环之一^[2]。由于近二十年来测土配方施肥技术的普及,小麦的施肥管理水平有了较大提高,逐渐改变一刀切、一次性施肥的传统经验施肥方式,正向着多次、定性施肥方向发展^[3-4]。尽管如此,小麦生产上仍然存在施肥方式不科学,肥料效率低下,单位肥料生产率不高等问题^[5-7]。如何做到定量施肥、按需施肥是国内外学者研究小麦氮肥精准管理的热点。

随着农业信息技术的发展^[8],国内外学者从19世纪后期就开始研究科学定量的推荐施肥技术,建立在传统实验室化验、肥料窗口法、叶色卡片法、光谱反射法、高光谱遥感、卫星遥感法等氮素营养诊断的基础上进行科学氮肥管理方法先后应运而生^[9-11]。尤其是农业遥感技术的成熟,作物氮肥管理正由定性或半定量向精准变量方向发展,由传统实验室化验向便捷化监测方向发展^[12],实时、便捷、精准的施肥是小麦科学管理的重要手段。

目前,无人机行业快速兴起,传感器技术越来越

成熟,无人机遥感技术在农业领域被快速应用^[13-14]。本文利用无人机遥感在农作物生产管理上的机动灵活性、操作简单、成本低、时效性高和高空间分辨率等特点,在进行冬小麦氮素营养诊断的基础上,依据光谱诊断的施肥模型,建立冬小麦返青期、拔节期和抽穗期等关键生育期追肥推荐模型,实现冬小麦的氮素精准管理。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验区位于临泉县城关镇农业科学研究所农场麦-玉轮作试验区(32°25'25" N, 114°50'13" E)。本区域属大陆性暖温带半湿润季风气候区,年均温度 15.0 °C,年均降雨量 907 mm,无霜期 200 d,土壤为典型的砂姜黑土。

1.2 试验设计

试验区主栽品种为皖麦 38,小区面积为 10 m×5 m,采用播种量为 90~120 kg/hm² 的 10~12 cm 等行距机械化播种。10月中下旬播种,2月20日为返青期,3月15日为拔节期,4月22日为抽穗期,6月10日为收获期。2017~2018年,采用氮素单因素 120 kg/hm² 的梯度试验,3次重复,每个梯度设 3 个试验小区,45 个小区随机排列,磷、钾肥全部作为基肥施用。施肥处理详见表 1。

表 1 小区施肥方案

处理	总肥量			追肥量			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	基肥	返青期	拔节期	抽穗期
	分配比例			30%	20%	30%	20%
N ₀	0	225	180	0	0	0	0
N ₁	120	225	180	36	24	36	24
N ₂	240	225	180	72	48	72	48
N ₃	360	225	180	108	72	108	72
N ₄	480	225	180	144	96	144	96

1.3 数据获取

1.3.1 农学参数测量与获取:在小麦关键生育期(返青期 2月21日、拔节期 3月27日、抽穗期 4月25日)获取 45 个小区植株样品,每个时期获取植株样本 135 个,采样点直径 0.5 m,同时获取圆心的 GPS 坐标数据。通过常规实验室化验分析,采用收割法获取冬小麦植株;用烘干恒重法测定其干物质质量,并用统计学方法求出采样点的平均生物量;采用凯氏定氮法求出平均氮浓度。

1.3.2 无人机光谱数据获取:采用 eBee SQ 固定翼无人机采集数据。无人机主要参数:飞行高度

100~2000 m,飞控软件规划自主飞行,4 个独立波段(R、G、B、NIR),1 个 RGB 摄像头,相机分辨率(单色:120 万像素,RGB:1600 万像素),120 m 高度地面分辨率(单色:0.15 m,RGB:0.03 m)。将飞机与 eMtion Ag 软件连接并使用软件规划好无人机飞行参数(飞行航线、飞行高度等)。无人机在飞行过程中,多光谱传感器会根据图像的 40% 重叠度按照一定频率对地面的数据进行采集,本次研究采集的相片数共 382 张。

1.3.3 数据处理:使用 PIX4D Mapper PRO/AG 无人机处理软件对无人机影像数据预处理,使用

ENVI 5.1 对光谱数据提取。数据统计分析和绘图运用 Excel 2010、SPSS 11.0 和 Origin 9.1。

2 结果与分析

2.1 氮素营养诊断指标的优选

通过无人机影像提取 R、G、B、NIR 四个波段的反射率,计算归一化植被指数 NDVI 等 10 个典型植被指数值,并与反映小麦氮素营养状况的农学参数如叶片氮含量、叶片氮积累量和植株氮浓度等进行相关分析,以期得到最优冬小麦氮素营养诊断的指标。本文主要选取冬小麦拔节期的光谱指数与氮素参数进行相关关系分析,返青期和孕穗期不再赘述(三个生育期的植被指数与氮素参数规律基本一致)。从表 2 可以看出,10 种植被指数与小麦各氮素指标相关性不同,同一种植被

指数与小麦各氮素指标相关性也不同。10 种植被指数与植株氮浓度的整体相关性较好,叶片氮素积累量次之,叶片氮含量的最差,这是因为植株氮浓度包含小麦冠层的叶片氮含量和生物量的信息,综合反映小麦群体氮营养状况,这与刘昌华等^[15]研究结果基本一致。从 10 种植被指数与植株氮浓度的相关系数看,差值植被指数(DVI)与植株氮浓度的决定系数最大($R^2=0.8698$),DVI 与叶片氮含量、叶片氮积累量的相关性比其他 9 种植被指数整体上较好,这与查海涅^[16]研究结果基本一致。因此,本文选取 DVI 作为无人机遥感光谱诊断指标,植株氮浓度作为冬小麦关键生育期的农学参数诊断指标。氮素营养诊断指标的建立为冬小麦基于光谱诊断的追肥推荐模型奠定基础。

表 2 植被指数与小麦拔节期氮素参数的相关关系

植被指数	叶片氮含量(%)		植株氮浓度(g/m ²)		叶片氮积累量(g/m ²)	
	回归方程	决定系数	回归方程	决定系数	回归方程	决定系数
NDVI	$0.739e^{3.5981x}$	0.6340	$51.043x^{2.80}$	0.8255	$-0.037x+0.01$	0.7971
GNDVI	$134.21x^2-148.78x+46.33$	0.3968	$-25.80x^2+121.9x-38.31$	0.7968	$0.067x^2-0.048x-0.042$	0.6797
RVI	$0.003x^2+0.18x+3.84$	0.4934	$-0.056x^2+2.91x+5.74$	0.8106	$-0.0067\ln x+0.026$	0.7976
DVI	$13.33x^2+4.98x+2.96$	0.6844	$-185.48x^2+222.26x-23.83$	0.8698	$-0.01\ln x+0.049$	0.7658
SAVI	$0.038e^{2.4x}$	0.6340	$16.366x^{2.8}$	0.8255	$-0.025x+0.01$	0.7972
EVI	$0.0001x^2-0.0003x+7.33$	0.0467	$0.0013x^2-0.02x+28.75$	0.0046	$0.039e^{0.001x}$	0.0007
VARI	$24.43x^{0.787}$	0.6722	$98.99x^{0.805}$	0.8156	$-0.008\ln x+0.052$	0.7543
SIPI	$-733.43x^2+1281.5x-551.03$	0.2901	$-6002x^2+10423x-4482.8$	0.0461	$0.075e^{-0.724x}$	0.041
OSAVI	$0.379e^{3.1x}$	0.6343	$33.66x^{2.81}$	0.8255	$-0.032x+0.01$	0.7971
PSRI	$-1876.3x^2-420.4x-13.27$	0.5478	$-8613.1x^2-2000.7x-71.82$	0.2948	$-2.676x^2-0.614x+0.009$	0.3589

2.2 植被指数与冬小麦各关键生育时期施氮量和产量的关系

通过冬小麦返青期、拔节期和抽穗期累积氮肥施用量和产量统计数据与 DVI 相关关系分析,建立 DVI 与冬小麦关键生育时期施氮量及产量的回归模型。从表 3 可以看出,冬小麦累积氮肥施用量与 DVI 呈线性回归关系,两者的决定系数在三个关键生育期拔节期最高($R^2=0.8012$)、返青期最低($R^2=0.5732$)。这是由于返青期小麦覆盖度不高导致光谱反射率受土壤背景影响较大,拔节期小麦对氮肥需求敏感和水肥充足,而抽穗期充足或过量的氮肥积累使小麦吸收养分饱和。冬小麦三个生育时期的 DVI 值和产量之间表现为二次函数曲线的关系,以抽穗期的相关性最好($R^2=0.8882$),当 DVI 值高到一定程度时产量稍有下

降,这表明小麦吸收氮肥达到过饱和时会抑制有机氮化合物合成,导致产量下降。

冬小麦关键生育时期 DVI 与施肥量线性关系的建立,为追肥推荐模型确立提供必要的参数,DVI 与籽粒产量回归模型的建立,可结合下文中的最佳产量计算临界 DVI 值,为诊断冬小麦关键生育期是否补充氮肥提供依据。

2.3 氮肥效应曲线

通过冬小麦全生育期不同处理总施氮量与小麦籽粒产量的回归关系拟合,得到冬小麦的氮肥效应曲线,见图 1。从图 1 可以看出,总施氮量与小麦籽粒产量呈抛物线的变化趋势,总施氮量 0~300 kg/hm² 表现为随着施氮量的增加产量逐渐增加,而总施氮量 300~400 kg/hm² 表现为随着施氮量的增加产量逐渐下降,这表明小麦总施氮量

增加到 300 kg/hm²后,营养过剩反而会抑制产量的增加。

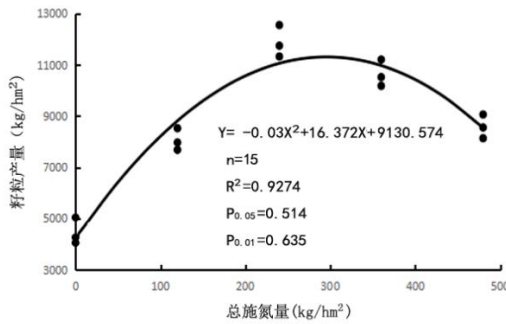


图1 冬小麦氮肥效应曲线

冬小麦氮肥效应曲线为: $y = -0.03x^2 + 16.372x + 9130.574$, 对此回归方程求极值, 可得冬小麦最高产量为 11 364.3 kg/hm², 对应的氮肥量 272.9 kg/hm² 是冬小麦总施氮量。

再结合边际产量, 对氮肥效应曲线求偏导可得, 可计算最佳经济施肥量 264.1 kg/hm², 最佳产量为 11 230.9 kg/hm², 具体计算如下:

$$16.372 + 2 \times (-0.031)X = Q_y / Q_x \dots\dots\dots (1)$$

式中 Q_y 为小麦商品价, 2.0 元/kg; Q_x 为氮肥商品价, 2.0 元/kg; X 为最佳经济施肥量。

利用最佳产量, 结合 DVI 与产量的回归模型, 可计算出临界 DVI 值, 见表 3。

表3 DVI 与施肥量、产量之间的回归模型

参数	生育时期		
	返青期	拔节期	抽穗期
DVI 与 模型	$Y_{LNA} = 29.31X_{DVI} - 14.07$	$Y_{LNA} = 54.752X_{DVI} - 37.718$	$Y_{LNA} = 54.752X_{DVI} - 37.718$
施肥量 R^2	0.5732	0.8012	0.7851
DVI 与 模型	$Y_{Yield} = -69268.7X_{DVI}^2 + 89969.3X_{DVI} - 17768$	$Y_{Yield} = -109512.3X_{DVI}^2 + 180090X_{DVI} - 62644$	$Y_{Yield} = -149794.5X_{DVI}^2 + 264451X_{DVI} - 104638$
产量 R^2	0.7671	0.7889	0.8882

注: 样本数 n=15

2.4 冬小麦关键生育期追肥推荐模型的建立

根据小麦关键生育时期的施氮总量与 DVI 值线性关系、最佳施肥量、最高施肥量可得基于 DVI 值的定量追肥模型。具体公式如下:

$$S_{DVI} = a + bQ_{con} \dots\dots\dots (2)$$

$$Q_d = Q_{opt} - Q_{con} \dots\dots\dots (3)$$

将式(2)代入式(3),

$$Q_d = Q_{opt} + a/b - S_{DVI}/b \dots\dots\dots (4)$$

式中 S_{DVI} 为无人机实测 DVI 值, Q_{opt} 为追肥总量, Q_d —冬小麦关键生育时期施肥量, a 、 b 分别为施氮量与 DVI 值回归曲线的截距和回归系数。将冬小麦全生育期总施氮量 272.9 kg/hm² 以及 a 、 b 值代入式(4), 结合临界 DVI 值, 即可获得以判断临界 DVI 值养分诊断的小麦各生育期的施肥模型, 见表 4。

表4 冬小麦推荐施肥模型

生育时期	临界 DVI 值	诊断模型
返青期	0.594	$y = -39.69x + 23.58$
拔节期	0.784	$y = -129.97x + 101.95$
抽穗期	0.807	$y = -159.79x + 128.93$

注: x 为冬小麦的 DVI 值; y 为尿素追施量 (kg/667 m²); 当 x 值小于临界 DVI 值时使用模型计算施肥量, 否则不需要施肥

3 结 论

3.1 基于无人机影像获得的 10 种典型植被指数, 可以对冬小麦关键生育时期进行氮素营养诊断。10 种典型植被指数与植株氮浓度的整体相关性较好, DVI 与拔节期小麦植株氮浓度的相关性最好 ($R^2 = 0.8698$)。因此, 本文选取无人机遥感光谱参数 DVI 作为诊断冬小麦返青期、拔节期和抽穗期的氮素营养状况。诊断指标的建立为冬小麦基于光谱诊断的追肥推荐模型奠定了基础。

3.2 通过 DVI 值和产量的回归分析, 再结合边际产量效应计算的最佳产量 11 230.9 kg/hm², 得到冬小麦返青期、拔节期和抽穗期临界 DVI 值分别为 0.594、0.784 和 0.807, 临界 DVI 值的确定为诊断冬小麦关键生育期是否补充氮肥提供依据。

3.3 冬小麦总施氮量与籽粒产量的回归关系表明小麦籽粒产量随施氮量的增加先增加后略有降低的趋势。根据冬小麦氮肥效应曲线的分析, 冬小麦最高产量为 11 364.3 kg/hm², 冬小麦总施氮量为 272.9 kg/hm², 可作为追肥总量的参考。

3.4 根据小麦关键生育时期的施氮总量与 DVI 值线性关系、最佳施肥量、最高施肥量可得基于 DVI 值的定量追肥模型: 返青期 (下转第 144 页)

- 分析—基于随机前沿生产函数模型[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2018(6): 62-68, 154.
- [5] 卓 乐, 曾福生. 农村基础设施对粮食全要素生产率的影响[J]. 农业技术经济, 2018(11): 92-101.
- [6] 陈 哲, 李知洪, 赵锦慧, 等. 长江经济带农业全要素生产率变动实证研究[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(20): 158-164.
- [7] 何泽军, 李 莹. 基于 DEA-Malmquist 指数法中国农业全要素生产率变化特征分析[J]. 河南农业大学学报, 2018, 52(5): 839-844.
- [8] 龙 岩, 李有明, 孔令仲, 等. 基于数据包络分析的突发水污染事件应急调控后评价研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(5): 154-158.
- [9] 赵继敏, 杨 波. 多目标导向下的北京城市空间结构绩效评价研究—基于“五位一体”的视角[J]. 生态经济, 2018, 34(7): 148-153.
- [10] 李 玲, 周玉玺. 基于 DEA-Malmquist 模型的中国粮食生产用水效率研究[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(11): 192-199.
- [11] 于冬瑶. 内蒙古农业全要素生产率的实证研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古财经大学, 2017.
- [12] 肖枝洪, 谭 荔. 基于熵权-灰色关联法的房地产项目风险评估分析[J]. 重庆理工大学学报(社会科学), 2017, 31(12): 31-37, 44.
- [13] 涂 琴, 李 红, 王新坤, 等. 基于灰色关联法的多喷头轻小型喷灌机组比选[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2014, 35(6): 656-662.
- [14] 梁增芳. 农业面源污染背景下三峡生态屏障区实施坡耕地治理项目的意义—以重庆市万州区为例[J]. 中国水土保持, 2018(3): 25-27.
- [15] 舒坤良, 杨 宁, 孙 旭, 等. 科技创新推进吉林省农业现代化的思路与对策[J]. 东北农业科学, 2018, 43(6): 44-48.
- [16] 张 捷. 经济增长率与劳动力素质提升研究—以无锡市为例[J]. 商场现代化, 2015(15): 281.
- [17] 高文书, 谢倩芸. 中国产业结构升级的人力资本需求研究[J]. 华中师范大学学报(人文社会科学版), 2017, 56(2): 41-50.
- [18] 李长春. 乡村振兴战略下农村劳动力就业困境及对策探讨—以重庆市长寿区为例[J]. 新西部, 2018(29): 20-21.
- [19] 徐晓红, 王洪丽, 刘文明, 等. 吉林省基层农业技术推广体系调查与改革思路[J]. 东北农业科学, 2016, 41(5): 102-106.
- [20] 温丽荣, 吴昊沚, 黄庆华. 基于 DEA-Malmquist 模型的重庆市农业生产效率实证研究[J]. 新疆农垦经济, 2015(11): 9-14.

(责任编辑: 王丝语)

(上接第 138 页)

$y = -39.69x + 23.58$, 拔节期 $y = -129.97x + 101.95$, 抽穗期 $y = -159.79x + 128.93$ 。

参考文献:

- [1] 李升东, 张卫峰, 王法宏, 等. 施氮量对小麦氮素利用的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(2): 223-230.
- [2] 巨晓棠, 谷保静. 氮素管理的指标[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 281-296.
- [3] 陈 满, 施印炎, 汪小岳, 等. 冬小麦双变量施肥控制策略研究[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(11): 58-62.
- [4] 宣毓龙, 庞庆阳, 刘 洋, 等. 高分子化合物对小麦出苗及生长的影响[J]. 东北农业科学, 2016, 41(2): 30-34.
- [5] 杨焕焕, 孙克刚, 张 琨, 等. 控释尿素在冬小麦上的一次性施肥研究[J]. 化肥工业, 2018, 45(6): 67-69.
- [6] Huang S, Miao Y, Zhao G, et al. Satellite remotesensing-based in-season diagnosis of rice nitrogen status in northeast China[J]. Remote Sensing, 2015, 7(8): 10646-10667.
- [7] Mountrakis G, Im J, Ogole C. Support vector machines in remote sensing: A review[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2011, 66(3): 247-259.
- [8] 陈娉婷, 官 波, 沈祥成, 等. 大数据时代开放式农业信息知识库构建研究[J]. 东北农业科学, 2018, 43(5): 60-64.
- [9] 葛佳琨, 刘淑霞. 数字农业的发展现状及展望[J]. 东北农业科学, 2017, 42(3): 58-62.
- [10] Chm X, Cui Z, Fam M, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514(7523): 486-489.
- [11] 李新伟, 吕 新, 张 泽, 等. 棉花氮素营养诊断与追肥推荐模型[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 209-214.
- [12] 郭 婷, 崔国贤, 丁莎莎, 等. 氮素营养诊断技术及其在麻类上的应用研究进展[J]. 中国麻业科学, 2011, 33(6): 313-318.
- [13] 田明璐, 班松涛, 常庆瑞, 等. 基于低空无人机成像光谱仪影像估算棉花叶面积指数[J]. 农业工程学报, 2016, 32(21): 102-108.
- [14] 马文玉. 基于 UAV 遥感的冬小麦氮素营养诊断[D]. 焦作: 河南理工大学, 2017.
- [15] 刘昌华, 马文玉, 陈志超, 等. 基于无人机遥感的冬小麦氮素营养诊断[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2018, 37(3): 45-53.
- [16] 查海涅. 基于卫星遥感的水稻生长监测与氮素营养诊断系统[D]. 滁州: 安徽科技学院, 2016.

(责任编辑: 王 昱)