植物营养与肥料学报 2013,19(1):11-19
Plant Nutrition and Fertilizer Science doi: 10.11674/zwyf.2013.0102

# 不同施肥决策对冬小麦生长影响的高光谱监测及对比分析

崔 贝[1,2], 黄文江[1,3*], 杨武德[2], 宋晓宇[1], 陈立平[1], 冯美臣[2], 张东彦[1], 张竞成[1]

(1 北京农业信息技术研究中心,北京 100097; 2 山西农业大学农学院,山西太谷 030801; 3 中国科学院遥感与数字地球研究所,遥感科学国家重点实验室,数字地球重点实验室,北京 100094)

**摘要:** 为了明确不同变量施肥算法下的冬小麦冠层光谱特征,以及确定适宜我国气候条件的变量施肥算法,于2006年通过田间试验,分别测量了六种不同施肥决策下的冬小麦冠层光谱和产量,对这六种施肥算法进行了对比分析。结果表明,通过对施肥后冬小麦冠层光谱反射率、施肥前后反射率变化量以及不同时期的归一化植被指数的分析,得知不同施肥处理的冬小麦冠层光谱反射率存在差异,可以反映出冬小麦长势的强弱,其中基于光谱指数和作物生长模型相结合的算法(Z)进行施肥的冬小麦长势最佳。与均一施肥(W)和不施肥(CK)处理相比,变量施肥处理均显著提高小麦产量;除基于土壤养分变量施肥处理(T)外,产量变异系数明显降低,其中基于归一化SPAD值变量施肥处理(S)的变异系数最小。Z变量施肥算法综合效果最佳,S变量施肥算法在降低产量变异度方面效果最佳。拔节期施肥对开花期或灌浆初期小麦生长影响最大;并且这两时期的植被指数与产量的相关性也最好,尤其红边三角光谱指数(RTVI)最好(相关系数达到0.700),可见采用RTVI指数进行产量预测效果更优。

**关键词:** 冬小麦; 变量施肥; 反射率变化量; 对比分析

**中图分类号:** S127; S512.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2013)01-0011-09

# Monitoring influence of different fertilization decision treatments on winter wheat growth using hyperspectral spectrum and comparative analysis

CUI Bei[1,2], HUANG Wen-jiang[1,3*], YANG Wu-de[2], SONG Xiao-yu[1], CHEN Li-ping[1], FENG Mei-chen[2], ZHANG Dong-yan[1], ZHANG Jing-cheng[1]

*(1 Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2 College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China; 3 The State Key Laboratory of Remote Sensing Science/Laboratory of Digital Earth Sciences/Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)*

**Abstract:** In order to clarify the characteristics of canopy spectrum of winter wheat under the condition of different fertilizations, and to select the best variable fertilization algorithm, a field experiment was conducted in the year 2006 during winter wheat growth period. The indices of winter wheat including canopy spectrum and yields under six different fertilizer treatments were studied. The results show that through the analysis of the canopy spectral reflectance after the fertilization, variations of the reflectance before and after the fertilization, and the normalized difference vegetation index in different growth stages, there are some differences of canopy reflectance in winter wheat under different fertilizer treatments. The fertilization algorithm based on the spectral index and crop growth model (Z) is the best one. Compared with the uniform fertilization (W) and no fertilization (CK), the variable fertilizer treatments improve wheat yields significantly, the variation coefficients of yield are reduced, except the treatment based on soil nutrient (T), and the one of fertilization treatment based on the normalized SPAD value

**收稿日期:** 2012-01-21 **接受日期:** 2012-10-29

**基金项目:** 国家"973"项目(2011CB311806); 国家自然科学基金(41201326,31071324,41071228)项目资助。

**作者简介:** 崔贝(1985—),女,河北保定人,硕士研究生,主要从事遥感与信息技术在农业上应用方面的研究。E-mail: cuibei1214@163.com

* 通信作者 Tel: 010-82178169, E-mail: yellowstar0618@163.com

(S) is the smallest. The Z variable rate fertilization algorithm is the best in combined effect and the S variable fertilization algorithm is better in reducing yield variability. The effect of fertilization at the jointing stage on the wheat growth at the flowering or early filling stages is the biggest. A significantly correlation is observed between the vegetation indexes at the flowering or early filling stages and yield, especially Red-edge triangular vegetation index (RTVI) ($r=0.700$), so we can use RTVI index to predict grain yield of winter wheat.

**Key words:** winter wheat; variable-rate fertilizer application; reflectivity variation; comparative analysis

变量施肥是精准农业的重要组成部分,国内外对变量施肥研究比较多,应用的变量施肥算法也比较多。Koch 等[1]通过测得玉米田硝态氮和有机质含量,并结合 Mortvedt[2] 等提出的氮推荐算法进行变量施肥,结果表明变量施氮处理比均一施氮处理取得更好的经济效益。Wittry 等[3]通过测得土壤含磷量,对玉米-大豆轮作田进行了变量施磷和均一施磷的对比分析,指出变量施磷可以减少磷肥的施入量。薛绪掌等[4]通过实测土壤碱解氮含量和冬小麦产量,设计了变量施氮处方图进行变量施氮实验,并通过对产量、穗密度、穗粒数、千粒重、蛋白质、土壤残留氮对比分析综合评价了变量施氮的效果。王新忠等[5]基于大豆播前土壤速效氮、速效磷和速效钾含量制作了氮肥、磷肥和钾肥的施用处方图并进行变量施肥试验。美国俄克拉荷马州立大学 Lukina 等[6]提出了氮肥优化算法,该算法主要依据作物归一化植被指数 NDVI 预测作物当时氮吸收量和潜在产量,并根据产量与籽粒含氮量的关系确定总需氮量,然后通过总需氮量减去已吸氮量确定最终施氮量。密苏里大学的 Scharf 等[7]利用航空照片中充足施肥区的玉米绿度值与未施肥区的玉米绿度值的差异决定施肥量。Zebarth 等[8]研究表明使用 SPAD 可以初步筛选出哪些地块需要追肥,哪些地块不需要追肥。Zhao 等[9]以及蒋阿宁等[10]通过对拔节期冬小麦倒 1 叶和倒 2 叶 SPAD 值归一化得到 NDSPAD,并依据其构建了变量施肥算法。蒋阿宁等[11]提出将作物生长模型和遥感相结合应用于变量施肥研究具有重要的现实意义和应用价值。这些算法大致可归纳为以下四种:基于土壤养分变量施肥、基于遥感数据变量施肥、基于叶绿素含量变量施肥和基于作物生长模型变量施肥。不同的变量施肥算法效果不同,有的算法提高经济效益较明显,而有的算法提高生态效益较显著,而在实际生产中,要综合考虑各方面的效果,最优的施肥算法应该是综合效果最好的算法。在我国,精准变量施肥技术还处于摸索阶段,适合我国气候、地貌、作物品种等条件的变量施肥算法仍不明确,实时、无损监测施肥效果及作物长势技术还不成熟,因此,本文通过田间试验,以近地高光谱技术为手段,分析了不同施肥决策下冬小麦冠层光谱的反映特征,对比分析了不同施肥算法的效果,试图探索适合我国气候、地貌、品种等条件的最优施肥算法,以及实现一种实时、无损、动态监测作物长势的技术,建立适合我国农业体系的精准变量施肥技术体系。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

本研究于 2006 年在国家精准农业研究示范小汤山基地进行。基地位于北京市昌平区小汤山镇东北部,地处北纬 40°10′,东经 116°26′。冬小麦品种为京冬 8 号,于 2005 年 9 月 26 ~27 日播种,播种量为 330 ~ 345 kg/hm$^2$。试验区土壤类型为潮土,土壤中硝态氮含量 3.00 ~ 15.04 mg/kg,全氮含量 0.94 ~0.98 g/kg,有机质含量 15.3 ~15.8 g/kg,有效磷含量 2.20 ~ 21.18 mg/kg,速效钾含量 106.96 ~ 132.77 mg/kg。随机区组排列,小区面积为 3m × 3m,小区之间有 1m 隔离带。小麦播种时不施基肥,且在整个生育期内除施氮肥外未施其他肥料。2006 年 4 月 14 日进行变量施肥,按照算法计算出各小区施肥量,称量装袋,人工撒施。在小麦生长阶段,田间管理除氮肥管理不同外,其它管理完全相同,2006 年 6 月 20 日收获。

具体施肥算法如下:

处理一(CK 处理) 无肥处理,在冬小麦整个生长期内不施肥,共 20 个小区,小区编号为: CK-1、CK-2、CK-3……CK-20。

处理二(T 处理) 根据冬小麦拔节期土壤硝态氮含量及目标产量确定各变量施肥区的施肥量。在冬小麦拔节期测定 0—30 cm 土壤硝态氮含量,取两点混合土壤。设定 2001 年基地冬小麦产量的 1.4 倍为目标产量,结合土壤硝态氮含量测定值并依据 Nmin-Sollwert 法[12] 计算各变量施肥区的施肥量[13]。共 20 个小区,小区编号为 T-1、T-2、T-3……T-20。

处理三（Y 处理）以 Lukina 等[6]算法为基础，根据作物起身、拔节期的土壤调节植被指数（OSAVI）确定各变量施肥区的施肥量。具体思路是，根据冬小麦起身期和拔节期的土壤调节植被指数（OSAVI）得到当季估产系数，进而得到目标产量。冬小麦整个生育期需氮量由目标产量确定，已吸收氮量由冬小麦拔节期的 OSAVI 测定值确定，最后总需氮量与已吸收氮量相减得到实际施氮量[14]。共 20 个小区，小区编号为：Y-1、Y-2、Y-3……Y-20。

处理四（S 处理）根据作物拔节期的倒 1 和倒 2 叶的 SPAD 测定值确定各变量施肥区的施肥量。具体思路为，测得冬小麦拔节期倒一叶和倒二叶的 SPAD 值并归一化，根据归一化值确定冬小麦目标产量和已吸氮量，而总需氮量由目标产量确定，最终施氮量由总需氮量减去已吸氮量得到[15]。共 20 个小区，小区编号为：S-1、S-2、S-3……S-20。

处理五（Z 处理）以 Lukina 等[6]算法为基础，由 CERES-Wheat 模型结合土壤调节植被指数（OSAVI）测定值确定各变量施肥区的施肥量。具体思路为，根据当地气象数据、土壤数据等，由 CERES-Wheat 作物生长模型模拟出目标产量，并根据目标产量得到总需氮量，冬小麦拔节期的 OSAVI 测定值确定小麦已吸收氮量，最后根据总需氮量和已吸收氮量得到施氮量[16]。共 20 个小区，小区编号为：Z-1、Z-2、Z-3……Z-20。

处理六（W 处理）均一施肥处理，该处理各小区的施肥量为各变量施肥处理总施肥量的平均施肥量。共 20 个小区，小区编号为：W-1、W-2、W-3……W-20。

各处理的具体施肥量见表 1。

**表 1　各处理具体施肥量（kg/hm²）**

**Table 1　Fertilization rates of the treatments**

| T 处理 T-treatment | 施氮量 N rate | Y 处理 Y-treatment | 施氮量 N rate | S 处理 S-treatment | 施氮量 N rate | Z 处理 Z-treatment | 施氮量 N rate | W 处理 W-treatment | 施氮量 N rate |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T-01 | 141.39 | Y-01 | 145.09 | S-01 | 129.25 | Z-01 | 201.79 | W-01 | 149.11 |
| T-02 | 145.27 | Y-02 | 163.62 | S-02 | 131.73 | Z-02 | 152.38 | W-02 | 149.11 |
| T-03 | 158.23 | Y-03 | 164.18 | S-03 | 158.42 | Z-03 | 158.16 | W-03 | 149.11 |
| T-04 | 155.11 | Y-04 | 168.59 | S-04 | 162.82 | Z-04 | 158.40 | W-04 | 149.11 |
| T-05 | 157.19 | Y-05 | 164.91 | S-05 | 165.43 | Z-05 | 173.20 | W-05 | 149.11 |
| T-06 | 155.82 | Y-06 | 134.70 | S-06 | 159.42 | Z-06 | 150.48 | W-06 | 149.11 |
| T-07 | 123.41 | Y-07 | 147.26 | S-07 | 131.58 | Z-07 | 134.32 | W-07 | 149.11 |
| T-08 | 146.40 | Y-08 | 132.27 | S-08 | 161.15 | Z-08 | 89.18 | W-08 | 149.11 |
| T-09 | 134.01 | Y-09 | 164.70 | S-09 | 164.95 | Z-09 | 132.49 | W-09 | 149.11 |
| T-10 | 146.83 | Y-10 | 134.15 | S-10 | 161.28 | Z-10 | 153.17 | W-10 | 149.11 |
| T-11 | 154.96 | Y-11 | 132.27 | S-11 | 148.80 | Z-11 | 163.06 | W-11 | 149.11 |
| T-12 | 144.37 | Y-12 | 169.77 | S-12 | 163.94 | Z-12 | 171.99 | W-12 | 149.11 |
| T-13 | 149.38 | Y-13 | 145.33 | S-13 | 135.81 | Z-13 | 171.23 | W-13 | 149.11 |
| T-14 | 134.20 | Y-14 | 141.80 | S-14 | 135.08 | Z-14 | 118.24 | W-14 | 149.11 |
| T-15 | 150.09 | Y-15 | 143.03 | S-15 | 135.09 | Z-15 | 168.12 | W-15 | 149.11 |
| T-16 | 174.88 | Y-16 | 128.03 | S-16 | 163.59 | Z-16 | 162.62 | W-16 | 149.11 |
| T-17 | 150.57 | Y-17 | 138.97 | S-17 | 163.94 | Z-17 | 131.69 | W-17 | 149.11 |
| T-18 | 162.77 | Y-18 | 167.68 | S-18 | 135.39 | Z-18 | 161.93 | W-18 | 149.11 |
| T-19 | 138.36 | Y-19 | 146.26 | S-19 | 135.42 | Z-19 | 128.34 | W-19 | 149.11 |
| T-20 | 160.03 | Y-20 | 148.33 | S-20 | 139.28 | Z-20 | 100.90 | W-20 | 149.11 |

### 1.2 测定项目与方法

1.2.1 冬小麦冠层光谱反射率的测定　分别在冬小麦起身期、拔节期、挑旗期、抽穗期、开花期、灌浆初期、灌浆中期、成熟期测定所有处理的冠层光谱。小麦冠层光谱测量仪器为 ASD Fieldspec FR2500 光谱仪，该光谱仪的光谱范围为 350 ～2500 nm，采样间隔为1.4 nm（350 ～1000 nm 区间）和2 nm（1000 ～2500 nm 区间）。为了减少由光照条件变化引起的误差，所有冬小麦冠层光谱测量都在 10:00 ～14:00之间进行。测量时探头垂直向下，并始终保持距小麦冠层 1.3m，探头视场角为25°。每小区测量 20 次，并且在各小区测定前后均测量标准参考板，之后根据反射率和 DN 值转换公式（1）计算出目标物的反射率值，最后取平均值作为该小区的光谱反射值。

$$R_{目标} = \frac{DN_{目标}}{DN_{参考板}} \times R_{参考板} \quad (1)$$

式中：$R_{目标}$指目标物的反射率；$R_{参考板}$指所测参考板的反射率；$DN_{目标}$指目标物的 DN 值；$DN_{参考板}$指参考板的 DN 值。

1.2.2 冬小麦叶片 SPAD 值的测定　分别于冬小麦起身期、拔节期、挑旗期、抽穗期、开花期、灌浆初期、灌浆中期、成熟期测定各处理小区冬小麦叶片叶绿素含量。测量仪器为日本 MINOLTA 公司生产的 SPAD－502 型叶绿素仪。测定时均选取无损伤的健康倒一叶和倒二叶，测定其中间部位并避开叶脉。每小区倒一叶和倒二叶各测定 20 次，取其平均值。

1.2.3 冬小麦产量的测定　2006 年 6 月 19 日在各小区内选取 2 $m^2$ 面积的冬小麦收获至网袋中，风干后考种记录各小区的穗数、穗粒数和千粒重，最后对所有收获的小麦进行脱粒测产得到实际产量。

### 1.3 数据处理

1.3.1 光谱数据预处理　结合本研究的需要，考虑到 350 ～400 nm 波段有噪声，而在 1300 nm 以后由于水分强吸收而使光谱不连续，故选取 400 ～1300 nm 波段的反射率数据。同时为了消除光照的影响，对原始测量的光谱反射率数据进行归一化处理。利用 Yu 等[17] 提出的方法进行归一化处理，计算公式为：

$$R' = \frac{R}{\frac{1}{n}(\sum_{i=1}^{n} R)} \quad (2)$$

式中：R′为归一化后反射率；R 为原始测量反射率；n 为波段数，本文中所用波段为 400 ～1300 nm。

1.3.2 光谱参数选取　为了研究不同施肥处理对小麦生长的影响，本文中除选用被广泛应用和证明的植被指数外，还选用了 RTVI 指数（red-edge triangular vegetation index，红边三角光谱指数），该植被指数可以解决在高植被覆盖度下出现“饱和”状态的问题[18]。表 2 列出了本文中用到的植被指数。

1.3.3 数据处理软件　用 Excel 进行数据整理，SPSS11.5 进行多重分析和相关性分析，Origin8.0 作图，ArcGis 克里格插值。

**表 2　光谱特征参数的定义**

**Table 2　Definition of spectrum parameters**

| 缩写 Abbreviation | 定义 Definition | 公式 Formula | 参考文献 References |
|---|---|---|---|
| DVI | 差值植被指数 Difference vegetation index | $DVI = R_{750} - R_{682}$ | [19] |
| NDVI | 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index | $NDVI = (R_{800} - R_{670})/(R_{800} + R_{670})$ | [20] |
| OSAVI | 优化土壤调节植被指数 Optimized soil adjusted vegetation index | $OSAVI = 1.61(R_{800} - R_{670})/(R_{800} + R_{670} + 0.16)$ | [21] |
| WI | 水分指数 Water index | $WI = R_{900}/R_{970}$ | [22] |
| RTVI | 红边三角光谱指数 Red-edge triangular vegetation index | $RTVI = [100(R_{750} - R_{730}) - 10(R_{750} - R_{550})] \times Sqrt(R_{700}/R_{670})$ | [18] |

## 2　结果与分析

### 2.1　施肥处理对各处理冬小麦冠层光谱的影响分析

2.1.1 施肥后冬小麦冠层反射率变化分析　为了说明施肥对冬小麦长势的影响，对抽穗期冬小麦冠层反射率进行分析。计算公式如下：

$$R_a = R_i / R_{ck} \quad (3)$$

其中：$R_a$ 为抽穗期冬小麦冠层反射率相对变化量；$R_i$ 为各施肥处理下抽穗期冬小麦的冠层反射率；$R_{ck}$ 为不施肥处理（CK）抽穗期冬小麦冠层反射率。

简单的数值比能充分表现出两者之间的差异。从图 1 可以看出，追施氮肥后，与 CK 区相比，作物冠层反射率变化表现为可见光波段降低而近红外波段升高，在图 1 上表现为可见光波段小于 1 而近红外波段大于 1。可见光部分相对反射率变化量 $R_a$ 越小，说明冬小麦叶绿素含量越多，长势越好，近红外则相反。可见光波段 $R_a$ 从低到高顺序为 Z、S、Y 和 T，近红外波段正好相反。由此可推断，Z 处理冬小麦长势最好，其次为 S、Y 和 T。此外，不同施肥处理在可见光波段差异明显而近红外波段差异较小，可见光波段较为敏感。因此同一时期各施肥处理反射率与不施肥处理反射率的比值分析可以反映出小麦相对长势的好与差。

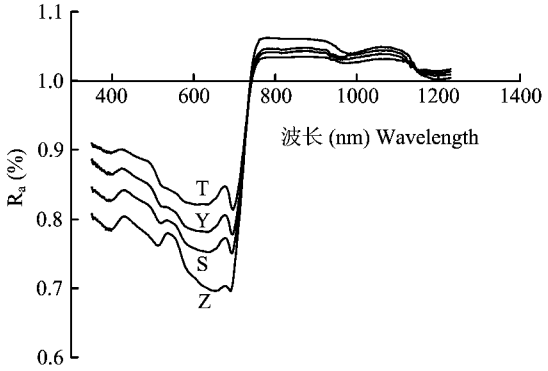


**图 1　施肥后各处理冬小麦冠层相对反射率变化情况**

**Fig. 1　The relative changes of the winter wheat canopy reflectance under different fertilization treatments after the fertilization**

2.1.2 施肥前后各处理反射率变化分析　为了对比不同施肥算法促进小麦生长的效果，本文利用不同处理区施肥前与施肥后冬小麦冠层光谱反射率数据进行分析。为了使各处理间反射率数据具有可比性并消除地力对冬小麦生长的影响，使用公式（4）对数据进行处理，计算公式为：

$$R_b = (R_{i后}/R_{i前})/(R_{ck后}/R_{ck前}) \quad (4)$$

其中：$R_b$ 为各施肥处理施肥前后冠层反射率相对变化量，$R_{i前}$、$R_{i后}$ 分别为各施肥处理施肥前、后反射率，$R_{ck前}$、$R_{ck后}$ 分别为施肥区施肥前、后所对应时期的 CK 区反射率。

图 2 显示，各曲线均是相对于 CK 处理而言，可见光波段曲线越低，表明较 CK 反射率降低越多，即施肥前后反射率变化越大，那么小麦在此期间增长的越多；近红外波段则相反。从图 2 还可以看出，施肥前后反射率变化最大的为 Z 处理，其次为 Y、S 和 T。可见光波段差异明显而近红外波段差异不明显，近红外波段不敏感。考虑到各施肥处理总施肥量一样，且在整个生育期内冬小麦没有发生病虫草害，那么造成这种差异的主要原因可认为是不同变量施肥算法引起的。因此，反射率变化的不同直接反映了施肥对小麦促进作用的不同。可见，按不同的变量施肥算法进行施肥对冬小麦生长的促进作用不同，其中按基于植被指数和作物生长模型相结合的变量施肥算法进行施肥最有利于小麦对氮素的吸收以及生长。

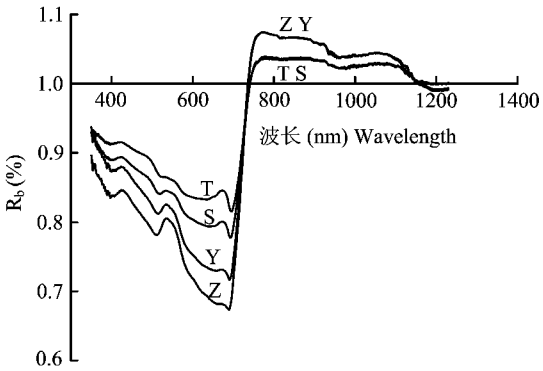


**图 2　各施肥处理施肥前后反射率的相对变化量**

**Fig. 2　The reflectance change values of wheat under different fertilization treatments before and after the fertilization**

2.1.3 冬小麦植被指数 NDVI 随主要生育期的变化　归一化植被指数 NDVI 是表征作物长势最常用的植被指数，因此在本文中以 NDVI 指数来表征冬小麦长势。图 3 为不同处理区冬小麦植被指数随主要生育期变化的趋势线。从中可看出，不同处理区的 NDVI 值的变化趋势一致，但 NDVI 值大小有区别。追施拔节肥后，冬小麦叶片叶绿素含量增多，长势较

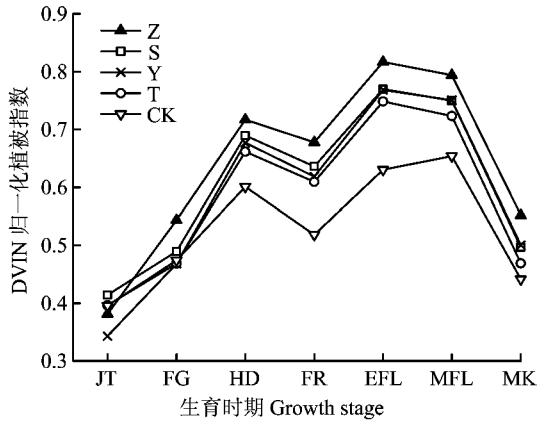


**图3 不同施肥条件下植被指数随主要生育期的变化情况**

**Fig. 3 The changes of vegetation indexes at main growth stage of winter wheat in different fertilization plots**

[注(Note): JT—拔节期 Jointing stage; FG—挑旗期 Flagging stage; HD—抽穗期 Heading stage; FR—开花期 Flowering stage; EFL—灌浆初期 Early filling stage; MFL—灌浆中期 Middle filling stage; MK—成熟期 Mature stage.]

好,因此在可见光波段反射率偏低而近红外波段反射率偏高,NDVI 值也偏高。从图 3 来看,最高的曲线为 Z 处理,最低的为 CK 处理,这一结果说明了依据作物生长模型和光谱指数相结合的算法进行施肥能够很好地调节小麦长势。

## 2.2 不同施肥处理区冬小麦产量对比分析

图 4 反映了六种不同施肥处理下冬小麦的产量,不施肥区(CK)产量最低,而 S、Y、T 和 Z 处理的产量明显高于不施肥处理(CK)和均一施肥区产量(W),其中 Z 处理区产量整体高于其他施肥处理区。对不同处理冬小麦产量的显著性分析(表 3)表明,W 和 CK 处理的产量与所有变量施肥处理(Y、S、T、Z)产量有显著差异,而不同变量施肥处理之间产量没有显著差异。可见变量施肥较均一施肥方法更能显著增加小麦产量,但不同变量施肥处理之间对提高产量的效果并不明显。

从图 5 可以看出,不施肥处理区(CK)产量变异系数最大,其次为 T、W、Y、Z、S。除 T 处理外,其他变量施肥区的产量变异度均低于均一施肥区(W),说明变量施肥处理提高了小麦产量的均一度。在这六种施肥处理中,基于归一化 SPAD 值变量施肥处理(S)的产量变异系数最低,可见该处理在降低产量变异度方面效果最佳。

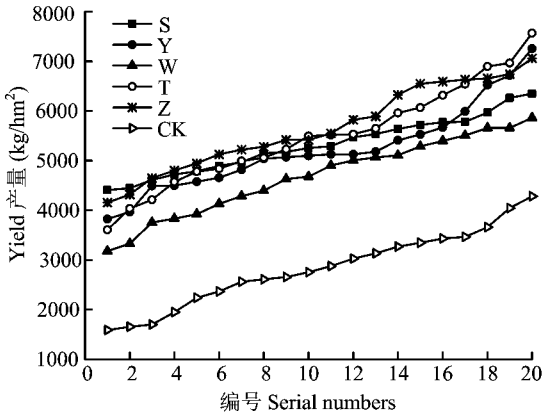


**图4 不同施肥处理区冬小麦产量图(产量从小到大排列)**

**Fig. 4 Yields of winter wheat in soil under the condition of different fertilizations (arrangement in ascending order of the yield)**

**表3 不同施肥处理冬小麦产量显著性分析**

**Table 3 Significant analysis of the grain yield of wheat in fields under different fertilization**

| 处理 Treatment | 样本数(No.) Numbers | 产量均值(kg/hm²) Mean of yield |
|---|---|---|
| Z | 20 | 5657.54 a |
| T | 20 | 5491.62 a |
| S | 20 | 5310.15 a |
| Y | 20 | 5227.61 a |
| W | 20 | 4678.91 b |
| CK | 20 | 2829.52 c |

注(Note): 同列数据后不同字母表示在 5% 水平差异显著 Values followed by different letters within a column mean significant at the 5% level.

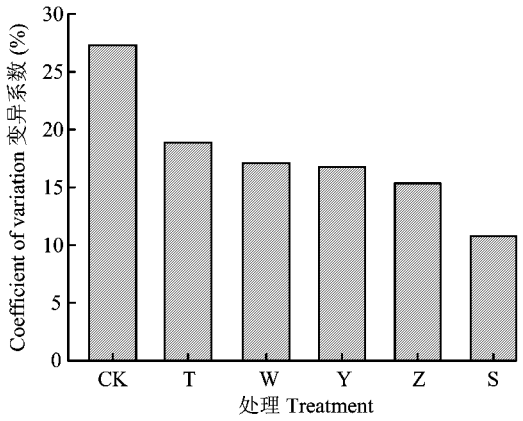


**图5 不同施肥处理区产量变异情况分析**

**Fig. 5 The variation coefficients of winter wheat yields under different fertilizations**

### 2.3 不同时期冬小麦光谱指数与追肥量相关性分析

根据冬小麦不同时期光谱指数与追肥量的相关性分析结果（表 4）可以看出，除在挑旗期和成熟期各植被指数与施肥量相关性不稳定外，在其它时期均与施肥量达到极显著相关，并且在冬小麦整个生育期内它们与施肥量的相关系数变化基本一致，即先增大后降低，在开花期或灌浆初期达到最大，说明拔节肥对这两时期的小麦生长影响最大。

**表 4　冬小麦不同时期光谱指数与施肥量的相关系数**

**Table 4　Correlation coefficients between vegetation indexes at different stages of winter wheat and quantity of the variable fertilization**

| 光谱指数 Spectrum index | 挑旗期 Flagging | 抽穗期 Heading | 开花期 Flowering | 灌浆初期 Early filling | 灌浆中期 Middle filling | 成熟期 Mature |
|---|---|---|---|---|---|---|
| DVI | 0.179* | 0.451** | 0.542** | 0.533** | 0.466** | 0.195* |
| NDVI | 0.191* | 0.487** | 0.575** | 0.558** | 0.546** | 0.270** |
| OSAVI | 0.192* | 0.488** | 0.575** | 0.558** | 0.544** | 0.270** |
| WI | 0.155 | 0.400** | 0.480** | 0.508** | 0.406** | 0.168 |
| RTVI | 0.306** | 0.593** | 0.629** | 0.604** | 0.569** | 0.409** |

注（Note）：* — 0.05 显著性水平 Significant at the 0.05 level；* * —0.01 极显著性水平 Significant at the 0.01 level. $n = 120$.

### 2.4 冬小麦不同时期光谱指数与产量的相关性分析

分别对冬小麦拔节期、挑旗期、抽穗期、开花期、灌浆初期、灌浆中期和成熟期的植被指数与小麦最终产量进行相关性分析，结果见表 5。除 DVI 指数在成熟期与产量无相关性外，各植被指数在不同生育时期均达到极显著相关。相关系数大体上呈现先增大后降低的趋势，分别在开花期或灌浆初期达到最大，其中 DVI、NDVI 和 OSAVI 的相关系数在开花期达到最大，分别为 0.626、0.651、0.651；WI 和 RTVI 在灌浆初期达到最大，分别为 0.649、0.700。因此，可选用开花期或灌浆初期植被指数进行产量预测。

另外，在这五个植被指数中，RTVI 指数表现最好，其在不同时期（除拔节期以外）与产量的相关系数都要比其它植被指数大，故用 RTVI 指数预测小麦产量要优于其它植被指数。

**表 5　冬小麦不同时期光谱指数与产量的相关系数**

**Table 5　Correlation coefficients between vegetation indexes at different stages of winter wheat and the yields**

| 光谱指数 Spectrum index | 拔节期 Jointing | 挑旗期 Flagging | 抽穗期 Heading | 开花期 Flowering | 灌浆初期 Early filling | 灌浆中期 Middle filling | 成熟期 Mature |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DVI | 0.276** | 0.366** | 0.570** | 0.626** | 0.606** | 0.497** | 0.176 |
| NDVI | 0.309** | 0.391** | 0.585** | 0.651** | 0.617** | 0.575** | 0.253** |
| OSAVI | 0.309** | 0.390** | 0.586** | 0.651** | 0.619** | 0.574** | 0.252** |
| WI | 0.245** | 0.325** | 0.573** | 0.606** | 0.649** | 0.548** | 0.277** |
| RTVI | 0.292** | 0.407** | 0.670** | 0.685** | 0.700** | 0.642** | 0.408** |

注（Note）：* — 0.05 显著性水平 Significant at the 0.05 level；* * — 0.01 极显著性水平 Significant at the 0.01 level. $n = 120$.

## 3 讨论

本文分析中基于光谱指数和作物生长模型的变量施肥算法要优于其他算法，这与蒋阿宁[23]得到的结果一致。该算法考虑了影响产量的多种因素，比如品种因素、气象因素、土壤因素等，能够更准确地模拟出冬小麦目标产量。但另一方面，精准农业对农田信息的依赖性强，而这些农田信息，比如土壤养分、水分、田间小气候等，无时无刻不在动态变化，且这些因素之间也有相互制约和促进作用，变量施肥

效果并不容易在一两年内甚至两三年内展现出来。同时薛利红等[24]也指出遥感数据来源不统一、作物生长的时空差异等原因导致研究结果不尽一致,并且变量施肥算法具有一定的区域性,在不同地区的表现是否相同有待考证。因此有必要对基于光谱指数和作物生长模型的变量施肥算法在时间和空间上的稳定性进一步验证和完善。

## 4 结论

本试验利用高光谱技术有效、快速、无损伤地对冬小麦长势进行动态监测以及进行不同变量施肥算法的评估。在不同施肥处理下,变量施肥可以显著改善小麦长势,提高产量,降低产量变异度,为精准农业的发展提供了方法和理论依据。研究结果表明:

1) 通过对施肥后冬小麦冠层光谱反射率、施肥前后反射率变化量以及不同时期的归一化植被指数的分析,可以清晰地反映出不同施肥处理之间冬小麦长势差异,可见利用光谱技术实现对冬小麦长势的动态、无损、实时监测是可行的。

2) 通过对冬小麦冠层光谱特征、产量及产量变异度分析,基于光谱指数和作物生长模型变量施肥方法综合效果最佳,基于归一化 SPAD 值变量施肥算法在调节产量均一度方面效果较好。

3) 除在挑旗期和成熟期,各植被指数与追肥量相关性不稳定外,其它时期均达到极显著相关,并且在冬小麦整个生育期内,相关系数变化基本一致,即先增大后降低,在开花期或灌浆初期达到最大,说明拔节肥对这两时期的小麦生长影响最大。

4) 不同生育时期冬小麦植被指数与最终产量的相关性分析表明,植被指数在开花期或灌浆初期与产量的相关性最强,其中 RTVI 指数表现最好,用 RTVI 指数预测小麦产量效果更优。

**参 考 文 献:**


[1] Koch B, Khosla R, Frasier W M *et al*. Economic feasibility of variable-rate nitrogen application utilizing site-specific management zones[J]. Agron. J., 2004, 96: 1572-1580.

[2] Mortvedt J J, Westfall D G, Davis J G. Fertilizing corn[EB/OL]. Available at http://www.ext.colostate.edu/pubs/crops/00538.html, verified 10 October 2012.

[3] Wittry D J, Mallarino A P. Comparison of uniform-and variable-rate phosphorus fertilization for corn-soybean rotations[J]. Agron. J., 2004, 96: 26-33.

[4] 薛绪掌, 陈立平, 孙治贵, 赵春江. 基于土壤肥力与目标产量的冬小麦变量施氮及其效果[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 59-62.
Xue X Z, Chen L P, Sun Z G, Zhao C J. Results of variable-rate nitrogen fertilization of winter wheat based on soil fertility and yield map[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2004, 20(3): 59-62.

[5] 王新忠, 王熙, 汪春, 等. 黑龙江垦区大豆变量施肥播种应用试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 143-146.
Wang X Z, Wang X, Wang C *et al*. Application test of soybean sowing by variable fertilization seeder in Heilongjiang reclamation areas[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2008, 24(5): 143-146.

[6] Lukina E V, Freeman K W, Wynn K J *et al*. Nitrogen fertilization optimization algorithm based on in-season estimates of yield and plant nitrogen uptake[J]. J. Plant Nutr., 2001, 24(6): 885-898.

[7] Scharf P C, Lory J A. Calibrating corn color from aerial photographs to predict sidedress nitrogen need[J]. Agron. J., 2002, 94: 397-404.

[8] Zebarth B J, Younie M, Paul J W, Bittman S. Evaluation of leaf chlorophyll index for making fertilizer nitrogen recommendations for silage corn in a high fertility environment[J]. Comm. Soil Sci. Plant Anal., 2002, 33(5&6): 665-684.

[9] Zhao C J, Jiang A N, Huang W J *et al*. Evaluation of variable-rate nitrogen recommendation of winter wheat based on SPAD chlorophyll meter measurement[J]. New Zeal. J. Agric. Res., 2007, 50(5): 735-741.

[10] 蒋阿宁, 黄文江, 刘克礼, 等. 利用叶绿素计进行冬小麦变量施肥及其效应研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 1092-1097.
Jiang A N, Huang W J, Liu K L *et al*. Study on chlorophyll meter-based variable rate fertilizer application and influence on winter wheat[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(6): 1092-1097.

[11] 蒋阿宁, 刘克礼, 赵春江, 等. 基于遥感数据和作物生长模型的小麦变量施肥研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2006, 21(6): 601-606.
Jiang A N, Liu K L, Zhao C J *et al*. Advance in wheat variable-rate nitrogen fertilization based on crop simulation models and remote sensing data[J]. Remote Sens. Technol. Appl., 2006, 21(6): 601-606.

[12] Liu X J, Ju X T, Zhang F S, Chen X P. Nitrogen recommendation for winter wheat using Nmin test and rapid plant tests in north China plain[J]. Comm. Soil Sci. Plant Anal., 2003, 34(17-18): 2539-2551.

[13] 陈立平. 精准农业变量施肥理论与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2003.
Chen L P. Theoretical and experimental studies on variable-rate fertilization in precision farming[D]. Beijing: PhD dissertation, China Agricultural University, 2003.

[14] 梁红霞, 赵春江, 黄文江, 等. 利用光谱指数进行冬小麦变量施肥的可行性及其效益评价[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(5): 469-473.

Liang H X, Zhao C J, Huang W J *et al*. The feasibility and benefit evaluate of variable nitrogen fertilization application on winter wheat based on canopies spectroscopy parameters [J]. Remote Sens. Technol. Appl., 2005, 20(5): 469-473.

[15] Liang H X, Huang W J, Liu L Y *et al*. Variable rate nitrogen application algorithm based on SPAD measurements and its influence on winter wheat[J]. IEEE T. Geosci. Remote, 2004, (6): 4059-4062.

[16] 蒋阿宁, 黄文江, 王纪华, 等. 基于高光谱响应与模拟模型的冬小麦变量追氮研究[J]. 麦类作物学报, 2007, 27(3): 518-522.
Jiang A N, Huang W J, Wang J H *et al*. Studies of variable nitrogen application in winter wheat based on spectral index and simulation models[J]. J. Tritic. Crops, 2007, 27(3): 518-522.

[17] Yu B, Ostland M, Gong P, Pu R. Penalized discriminant analysis of in situ hyperspectral data for conifer species recognition[J]. IEEE T. Geosci. Remote, 1999, 37(5): 2569-2577.

[18] 陈鹏飞, Tremblay N, 王纪华, 等. 估测作物冠层生物量的新植被指数的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(2): 512-517.
Chen P F, Tremblay N, Wang J H *et al*. New index for crop canopy fresh biomass estimation[J]. Spectrosc. Spect. Anal., 2010, 30(2): 512-517.

[19] Jordan C F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor[J]. Ecology, 1969, 50(4): 663-666.

[20] Rouse J W, Haas R H, Schell J A *et al*. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation[R]. NASA/GSFC, Type Ⅲ, Final Report. Greenbelt, MD, USA, 1974, 371.

[21] Rondeaux G, Steven M, Baret F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices[J]. Remote Sensing Environ., 1996, 55(2): 95-107.

[22] Penuelas J, Pinol J, Ogaya R, Filella I. Eatimation of plant water concentration by the reflectance water index WI(R900/R970)[J]. Int. J. Remote Sens., 1997, 18(13): 2869-2875.

[23] 蒋阿宁. 基于多源数据的冬小麦变量施肥研究[D]. 内蒙古:内蒙古农业大学硕士学位论文, 2007.
Jiang A N. Study on variable-rate fertilization in winter wheat based on multi-sources data[D]. Inner Mongolia: MS thesis, Inner Mongolia Agricultural University, 2007.

[24] 薛利红, 杨林章, 李刚华. 遥感技术在精确施肥管理中的应用进展[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 22-26.
Xue L H, Yang L Z, Li G H. Application progress of remote sensing in precision fertilization management[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2004, 20(5): 22-26.