

变量施肥条件下冬小麦长势及品质变异遥感监测

宋晓宇^{1,2}, 王纪华^{1,3}, 黄文江¹, 阎广建², 常红³

(1. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097; 2. 北京师范大学地理学与遥感科学学院遥感与 GIS 研究中心, 北京 100875; 3. 北京农产品质量检测与农田环境监测技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 卫星遥感数据能够在作物生长期获取大范围“面状”地物光谱信息, 反映作物的长势变异情况, 以 2005—2006 年度国家精准农业研究示范基地冬小麦变量施肥试验为基础, 以高空间分辨率卫星遥感影像 Quickbird 为数据源, 结合地面获取的冬小麦品质、产量等数据, 研究冬小麦长势及品质的变异情况。研究表明, Quickbird 光谱参数能够反映冬小麦不同施肥处理小区的长势变异, 而冬小麦早期的空间长势变异与其最终产量、品质变异有着密切的关系; 冬小麦孕穗后期长势光谱信息与其产量有着很好的正相关关系, 而与其品质信息存在着显著的负相关关系, 其中 *OSAVI* 与产量的相关性达到 0.536、*GNDVI* 与冬小麦籽粒蛋白质及湿面筋含量的相关性分别达到了-0.531 和-0.535; 研究还发现, 不同植被指数所反映的作物长势存在一定差异, 反映冬小麦群体长势的植被参数和反映冬小麦叶绿素密度的植被指数在指示作物空间长势变异上有所不同。因此, 利用遥感影像监测作物长势及其品质空间变异在技术上是可行的。

关键词: 遥感, 生长, 作物, 冬小麦, Quickbird 遥感影像, 长势变异

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.09.028

中图分类号: TP79: S127

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-9-0155-08

宋晓宇, 王纪华, 黄文江, 等. 变量施肥条件下冬小麦长势及品质变异遥感监测[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 155—162.

Song Xiaoyu, Wang Jihua, Huang Wenjiang, et al. Monitoring spatial variance of winter wheat growth and grain quality under variable-rate fertilization conditions by remote sensing data[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(9): 155—162.(in Chinese with English abstract)

0 引言

变量施肥技术是精准农业的重要组成部分, 它的实施可以有效控制物质循环中养分的输入和输出, 防止农作物品质变坏及化肥对环境的污染和破坏, 提高肥料利用率, 降低生产成本, 减少多余肥料对环境的不良影响。由于遥感技术可以大范围、无损地动态监测地块内作物长势、植株营养状况并进行产量预测, 为地块内土壤或作物长势变异监测提供了有效途径, 一直被认为是变量施肥决策信息获取的重要技术手段。国外在 20 世纪 80 年代就开展利用遥感数据进行变量施肥指导研究。Bhatti 等使用了简单协同克立金方法将 TM 图像与实测的有机质、N 素水平相结合, 对大面积的土壤性质和作物产量进行了评价, 发现土壤有机质和冬小麦的产量具有显著的相关性^[1]。Boydell 等通过遥感影像估计的作物产量信息, 采用聚类分析的方法进行了管理分区的划分研究^[2]。Yang 用航空高光谱影像和联合收割机产量传感器获取的产量数据, 分别绘制了地块内作物产量的空间变异图,

二者具有很好的空间一致性^[3]。美国 Lukina 等提出的氮肥优化算法主要根据田间作物的归一化植被指数 (NDVI) 来预测潜在产量和当时作物的氮吸收, 并根据籽粒氮吸收量与植株氮吸收的差值来预测施氮量^[4]。密苏里州立大学的 Scharf 及其同事建立了基于航空照片的玉米追肥决策算法^[5]。英国 Wood 等在英国冬小麦高产栽培经验的基础上, 用冠层绿色面积指数 GAI 来指示变量施肥^[6]。国内宋晓宇等利用航空成像光谱 (PHI) 数据研究土壤供氮量及变量施肥对冬小麦长势的影响^[7], 研究表明利用航空遥感数据可以监测土壤基础养分差异及变量施肥对冬小麦长势的影响; 潘瑜春等开展了基于小麦长势遥感监测的土壤氮素累积估测研究, 研究结果表明追肥前的 NDVI 能够较好地估测小麦生育期内土壤碱解氮增量^[8]。鲍艳松等以航空影像、地面冠层光谱数据及同步观测的植被生化数据为基础, 探讨了冬小麦冠层氮素监测的遥感方法, 并生成了基于航空高光谱 OMIS 影像数据的变量施肥处方图^[9]。研究表明, 了解田间土壤养分与作物长势、品质的变异特性, 是实施田间精确施肥管理, 消除作物长势以及品质差异的基础, 而目前的相关研究中利用遥感技术监测作物长势及品质的变异情况的研究较少。国家农业信息化工程技术研究中心于 2005—2006 年度在国家精准农业研究示范基地开展了多种决策算法的变量施肥试验, 进行了基于多源数据的冬小麦变量施肥研究。本文以此为基础, 以高空间分辨率 Quickbird 遥感影像为数据源, 结合地面获取的土壤养分、冬小麦品质、产量等数据, 对不同的变量施肥决策下冬小麦长势

收稿日期: 2008-06-18 修订日期: 2009-08-25

基金项目: 北京市自然科学基金项目 (4092017); 北京市科技计划课题 (D07060500860701); 国家 863 项目 (2006AA10Z271, 2006AA120101, 2006AA10A308); 农业部行业科技项目 (200803037) 和 948 项目 (2006-G63 (4))

作者简介: 宋晓宇 (1973—), 女, 湖北远安人, 博士, 研究方向为遥感与地理信息系统在农业中的应用。北京市海淀区曙光花园中路 11 号, 100097。Email: songxy@nercita.org.cn

及品质的变异情况进行了评价,为利用遥感技术获取作物长势变异信息,进而有针对性地调控作物生长状况进而提高作物品质提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

基于多源数据的变量施肥决策试验于 2005—2006 年在国家精准农业研究示范基地进行,该基地位于北京市昌平区小汤山镇,地处北纬 40°10',东经 116°26'^[10]。试验选用主栽品种京冬 8 作为供试材料。播种时间为 2005 年 9 月 26 日,播种量为 330~345 kg/hm²。试验地土壤类型为潮土,土壤中硝态氮含量 3.00~15.04 mg/kg,全氮含量 0.94~0.98g/kg,有机质含量 0.153~0.158g/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 3 m×3 m,小区分布如图 1,每个小区之间有 1~2 m 的隔离带,所有小区的 4 个角点采用厘米级差分 GPS (Trimble RTK 5700) 进行定位。变量施肥于 2006 年 4 月 14 日进行,按各小区所用肥量,分别称量装袋,人工撒施。除氮肥不同外,其它管理条件完全相同,收获时间为 2006 年 6 月 20 日。

处理一:根据作物起身、拔节期的光谱测定值提取土壤调节植被指数 OSAVI (Optimization of soil-adjusted vegetation index),由 OSAVI 测定值确定各变量施肥小区的施肥量 (Y 处理) (共 20 个小区,分别记做: Y-01、Y-02、Y-03……Y-20),该施肥量算法以 Lukina 等的算法为基础,以冬小麦起身、拔节期 OSAVI 及计算当季的估产系数

及目标产量,然后由目标产量经过换算得到最终施肥量^[11]。

处理二:根据作物拔节期的不同叶位叶片的 SPAD 测定值,获得各变量施肥小区的施肥量 (S 处理) (共 20 个小区,分别记做: S-01、S-02、S-03……S-20),该算法利用拔节期冬小麦倒一及倒二叶片 SPAD 测量值计算目标产量,由目标产量计算冬小麦氮素需求量,经过换算后得到各小区最终施肥量^[12]。

处理三:根据冬小麦拔节期土壤养分含量及目标产量确定各变量施肥小区的施肥量 (T 处理) (共 20 个小区,分别记做: T-01、T-02、T-03……T-20),该算法在冬小麦拔节期 (2006 年 4 月 14 日),在每个小区取 0~0.3 m,2 点混合土壤,测定土壤硝态氮含量,根据测定值由 Nmin-Sollwert 法计算施肥量^[13]。

处理四:根据当地气象与土壤数据等运行 CERES-Wheat 模型获得目标产量,结合 OSAVI 确定各变量施肥小区的施肥量 (Z 处理) (共 20 个小区,分别记做: Z-01、Z-02、Z-03……Z-20)。该算法以 Lukina 算法为基础建立,结合 CERES-Wheat 模型所模拟的目标产量,和最终施肥量^[14]。

处理五:均一施肥处理,各小区的施肥量为所有变量施肥小区的平均施肥量 (CK 处理) (共 20 个小区,分别记为: CK-01、CK-02、CK-03……CK-20)。

处理六:不施肥处理,整个生育时期无氮肥施入 (W 处理) (共 20 个小区,分别记为: W-01、W-02、W-03……W-20)。



W-01	W-02	W-03	W-04	W-05	W-06	W-07	W-08	W-09	W-10	W-11	W-12	W-13	W-14	W-15	W-16	W-17	W-18	W-19	W-20
Z-01	Z-02	Z-03	Z-04	Z-05	Z-06	Z-07	Z-08	Z-09	Z-10	Z-11	Z-12	Z-13	Z-14	Z-15	Z-16	Z-17	Z-18	Z-19	Z-20
CK-01	CK-02	CK-03	CK-04	CK-05	CK-06	CK-07	CK-08	CK-09	CK-10	CK-11	CK-12	CK-13	CK-14	CK-15	CK-16	CK-17	CK-18	CK-19	CK-20
T-01	T-02	T-03	T-04	T-05	T-06	T-07	T-08	T-09	T-10	T-11	T-12	T-13	T-14	T-15	T-16	T-17	T-18	T-19	T-20
Y-01	Y-02	Y-03	Y-04	Y-05	Y-06	Y-07	Y-08	Y-09	Y-10	Y-11	Y-12	Y-13	Y-14	Y-15	Y-16	Y-17	Y-18	Y-19	Y-20
S-01	S-02	S-03	S-04	S-05	S-06	S-07	S-08	S-09	S-10	S-11	S-12	S-13	S-14	S-15	S-16	S-17	S-18	S-19	S-20

图 1 变量施肥试验田间小区分布图

Fig.1 Layout of experimental plot for variable-rate fertilization

1.2 数据获取

1.2.1 土壤养分数据获取

2006 年 6 月 24 日于小麦收获后,在所有管理小区内取土壤样品,取样方式为每一小区围绕中心点,取 3 个土样,混合后代表该区土壤养分数据,取样深度分别为 0~30 cm 和 30~60 cm。土壤硝态氮的测定采用酚二磺酸比色法,浸出液的 NO₃-N 用紫外分光光度法测定。土壤有效磷的测定是根据国标 GB12297-90,采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法,使用 0.5 mol/L NaHCO₃ 溶液浸提,用钼锑抗比色法测定。速效钾的测定,以中性 1 mol/L NH₄Ac 溶液为浸提剂时, NH₄⁺ 与土壤胶体表面的 K⁺ 进行交换,连同水溶性 K⁺ 一起进入溶液。浸出液中的

钾用原子吸收分光光度计测定。

1.2.2 冬小麦产量及品质参数获取

6 月 19 日在各小区内各选取 2 m² 面积的冬小麦收获至网袋中,风干后考种记录相应的穗数、穗粒数和千粒质量,最终对所有收获的小麦进行脱粒测产得到总产量;用近红外 (NIR) 谷物品质分析仪 (Instalab-610, Australia) 对冬小麦籽粒蛋白质含量、湿面筋含量及干面筋含量的进行测定,获取了所有小区冬小麦品质数据。

1.2.3 Quickbird 遥感影像获取与处理

于 5 月 2 日获取试验区 QuickBird 遥感影像一景,如图 1 所示,由于 2006 年试验区冬小麦变量施肥日期为 4 月 14 日,故影像获取时肥效已经充分发挥,小麦长势基

本上反映了施肥的情况,符合变量施肥效应研究的条件。

QuickBird 是一颗太阳同步卫星,2001年10月由美国 DigitalGlobe 公司发射,轨道高度 450 km,倾角 98°,重访周期 1~6 d;有全色和多光谱两个传感器,多光谱波段包括:蓝光波段(450~520 nm);绿光波段(520~600 nm);红光波段(630~690 nm)以及近红外波段(760~900 nm)。其全色波段传感器星下分辨率 0.61 m,多光谱波段传感器星下分辨率 2.4 m;辐照宽度以星上点轨迹为中心,左右各 272 km;成像模式单景 16.5 km×16.5 km;成像方式推扫式成像,可立体成像。

影像的大气矫正是采用经验线性法进行的。其中典型地物分别选取基地晒谷场作为亮目标,基地附近水域为暗目标,在卫星过境准同步测定地块中心的光谱反射率,并记录相应的 GPS 位置。图像的几何纠正利用地面高精度的 DGPS 控制点进行,纠正后,对研究区部分影像进行裁剪,并根据基地标志点对裁剪后的影像进行二次纠正,以确保几何纠正的精度在 1 个像元内。辐射纠正及几何纠正完成后,利用 0.6 m 分辨率全色波段段多光谱波段融合处理,融合后影像空间分辨率为 0.6 m,波段数为 4。

作物的植被指数和它们的生物量以及产量等是相关的,可定量的表示植被活力,越来越多的研究者利用植被指数来监测植物生长状态、植被营养状况以及植被空间分布密度等作物生长因子,如归一化植被指数 NDVI (normalized difference vegetation index) 与植被分布密度呈线性相关^[15-16]。但 NDVI 对于土壤背景的变化较为敏感,容易受土壤背景的影响,一些研究者已经指出用 NDVI 来描述氮素营养状况或作物长势变异存在缺陷,而优化土壤调节植被指数 OSAVI^[17] (optimized soil adjusted vegetation index) 是在土壤调节植被指数的基础上提出来的,它不但能够反映作物的长势情况,还可以很好的消除土壤背景对植被指数的干扰,目前正在被广泛的应用。此外,根据 Quickbird 波段设置,还提取了氮素反射指数 NRI^[18] (nitrogen reflectance index)、归一化叶绿素比值植被指数 NPCI^[19] (Normalized Pigment Chlorophyll Ratio Index)、绿度归一化植被指数 GNDVI^[20] (greenness-normalized difference vegetation index)、光谱结构不敏感植被指数 SIPI^[21] (structure insensitive pigment index)、植被衰老反射率指数 PSIR^[22] (plant senescence reflectance index) 等植被指数参与数据分析,其中、NRI 可以较好地反映植被冠层叶绿素密度^[23];而 NPCI、SIPI 以及 PSIR 与类胡萝卜素及叶绿素的比值有很好的正相关性,对植物叶片的衰老过程非常敏感^[24-25]。表 1 中分别列出了基于 Quickbird 的植被指数计算公式及其出处。

1.3 分析方法

在进行统计分析前,基于各小区 4 个角点 DGPS 位置信息生成小区矢量图,利用该矢量图在 ENVI 中进行不同小区光谱信息的提取,对于每个 3 m×3 m 小区,对应有 25 个 0.6 m 分辨率 Quickbird 像元,对这 25 个像元信息进行平均后作为该小区的光谱信息并计算了相关植被指数。针对所不同处理小区分别进行了冬小麦长势光谱

信息与产量、品质信息以及土壤残留氮素信息的统计分析,对比了不同处理小区早期光谱长势信息变异及后期产量、品质及土壤残留氮素的空间变异特性。

表 1 Quickbird 植被指数定义

植被指数	波段	定义	来源文献作者
NDVI	B3,B4	$NDVI = (R_4 - R_3)/(R_4 + R_3)$	Rouse, et al, (1974)
OSAVI	B3,B4	$OSAVI = (1 + 0.16)(R_4 - R_3)/(R_4 + R_3 + 0.16)$	Rondeaux, et al, (1996)
NRI	B2,B3	$NRI = (R_2 - R_3)/(R_2 + R_3)$	Schleicher, et al, (2001)
GNDVI	B2,B4	$GNDVI = (R_4 - R_2)/(R_4 + R_2)$	Gitelson, et al, (1996)
SIPI	B1,B3,B4	$SIPI = (R_4 - R_1)/(R_4 - R_3)$	Penuelas, et al, (1995)
PSIR	B1,B3,B4	$PSIR = (R_3 - R_1)/R_4$	Merzlyak, et al, (1999)
NPCI	B1,B3	$NPCI = (R_3 - R_1)/(R_3 + R_1)$	Penuelas, et al, (1994)

2 结果与分析

2.1 植被指数相关性及其敏感性分析

不同的植被指数之间,具有很高的相关性,对 120 个小区的植被指数进行了相关性分析的结果显示,NDVI 与 OSAVI、GNDVI、SIPI、NRI 都显著正相关,相关系数分别达到了 0.982、0.962、0.924 和 0.746,与 PSRI 和 NPCI 则显著负相关,相关系数分别为-0.932 和-0.735;此外,NDVI、OSAVI、NRI、GNDVI 和 SIPI 与 PSRI 及 NPCI 都为显著负相关,PSRI 与 SIPI 则为显著正相关关系,其相关系数为 0.925。

作物长势的差异主要体现在群体和活性两个指标上,群体指标主要反映在作物的田间密度及叶面积指数上,而活性指标则体现在作物冠层叶绿素含量上,不同的光谱信息对作物叶面积指数及叶绿素含量变化的敏感度不同,一般来说,近红外光谱对于作物的群体长势比较敏感,与植被叶面积指数的关系非常显著^[26-27],而蓝光,绿光及红光光谱则对植被的叶绿素及叶色素浓度敏感^[28]。对 120 个小区的所有植被指数进行了标准偏差的统计,结果显示不同植被指数对于作物长势差异的敏感性各不相同,其中 NDVI 的标准偏差最大,达到 0.045,这说明 NDVI 对于作物长势差异最为敏感;其次为 OSAVI 和 GNDVI,它们的标准偏差分别为 0.0369 和 0.0367;SIPI 和 PSRI 的标准偏差分别为 0.0279 和 0.0228,植被指数中标准偏差最小的是 NRI,标准偏差为 0.0167。

2.2 冬小麦长势光谱信息与品质、产量、施肥量及土壤残留氮的关系

小麦氮素营养差异会表现为作物田间叶面积指数及叶绿素含量的差异,冬小麦的长势受氮素营养的影响,其产量以及品质也都与氮素营养有关。5月2号冬小麦处于孕穗后期,植被覆盖度较高,土壤背景干扰较小,各小区的光谱信息能够很好的反映出作物的长势情况。对所有小区的冬小麦植被指数,与各小区产量、品质、施肥量进行了统计相关分析(表 2)。分析显示,小麦的长势光谱信息与小区施肥量有着密切的正相关关系,其中,植被指数 OSAVI 与小区施肥量的相关性最高,相关系数

达到 0.549, *SIPI*、*GNDVI* 和 *NDVI* 与施肥量的相关性也都达到显著; 小麦孕穗后期的光谱信息与其籽粒产量有着很好的相关性, 而冬小麦品质信息与孕穗后期光谱信息存在着显著的负相关关系, 如表中所示: *GNDVI* 与冬小麦籽粒蛋白质及湿面筋含量的相关性分别达到了 -0.531 和 -0.535; 而植被衰老反射率指数 *PSIR* 则与品质有着很高的正相关关系。

孕穗后期冬小麦的长势反映了拔节期变量施肥的效果, 施肥量高的小区冬小麦叶片叶绿素含量高, 冬小麦长势较好, 从 *Quickbird* 影像光谱上来看, 红外波段反射率偏高而蓝、绿、红波段反射率偏低, 因此 *NDVI*、*OSAVI*、*GNDVI* 与 *SIPI* 值也偏高, *PSIR* 值则偏低。施肥多的小区冬小麦在前期长势好, 光合作用强, 但后期氮素运转效率下降, 造成籽粒中淀粉含量增加, 蛋白质含量相对降

低, 因此施肥量多的小区虽然最终产量也较高; 但其小麦蛋白质含量、湿面筋含量及干面筋含量却相对较低, 但从整体来说, 产量的增长会使总体蛋白产量及淀粉产量增长。

通过分析作物长势与土壤中残留氮素之间的关系, 可以反映作物生长过程对氮素的吸收利用情况; 表 2 中列出了土壤中残留全氮及硝态氮与 5 月份冬小麦光谱信息之间的相关系数, 可以看出 0~30 cm 土壤全氮含量与作物长势有着比较明显的正相关性; 30~60 cm 土壤全氮与作物长势相关性低于 0~30 cm 土壤全氮; 0~30 cm 土壤硝态氮含量与作物长势相关性不明显, 30~60 cm 土壤硝态氮含量与作物长势相关性较强, 其中 *OSAVI*、*GNDVI*、*SIPI* 土壤硝态氮含量都达到了正相关, 这说氮肥施用较多的小区其土壤中残留的氮素也较多。

表 2 *Quickbird* 植被指数与冬小麦品质、产量、土壤残留氮素相关系数

Table 2 Correlation coefficients between *Quickbird* vegetation index and winter wheat quality parameters, yield and soil residual nitrogen

测定指标	植被指数						
	<i>NDVI</i>	<i>OSAVI</i>	<i>NRI</i>	<i>GNDVI</i>	<i>SIPI</i>	<i>PSRI</i>	<i>NPCI</i>
蛋白质/%	-0.477**	-0.519**	-0.222*	-0.531**	-0.478**	0.423**	0.279**
湿面筋/%	-0.481**	-0.530**	-0.210*	-0.535**	-0.501**	0.408**	0.249**
干面筋/%	-0.237**	-0.267**	-0.171	-0.229**	-0.234**	0.214*	0.140
施肥量/(kg·hm ⁻²)	0.433**	0.549**	0.057	0.525**	0.532**	-0.289**	-0.082
产量/(kg·hm ⁻²)	0.464**	0.536**	0.187*	0.513**	0.534**	-0.337**	-0.153
全氮含量(0~30 cm)/(g·kg ⁻¹)	0.322**	0.325**	0.164	0.343**	0.338**	-0.264**	-0.163
硝态氮(0~30 cm)/(mg·kg ⁻¹)	0.149	0.198*	-0.046	0.204*	0.225*	-0.065	0.050
全氮含量(30~60 cm)/(g·kg ⁻¹)	0.279**	0.273**	0.175	0.286**	0.251**	-0.259**	-0.217*
硝态氮(30~60 cm)/(mg·kg ⁻¹)	0.213	0.282**	-0.005	0.271**	0.302**	-0.105	0.033

注: **: $r(0.01, 120)=0.233$; *: $r(0.05, 120)=0.178$ 。

2.3 不同处理小区冬小麦长势光谱信息与品质、产量、施肥量的关系

在对数据进行整体分析的基础上, 针对各个不同处理小区, 进行了基于冬小麦长势信息和产量、品质、施肥量的分析, 研究结果显示, 除 *CK* 小区外, 其余小区冬小麦长势光谱信息与其品质、产量及施肥量之间的关系与整体情况相似, 冬小麦孕穗后期 *NDVI*、*OSAVI*、*NRI*、*GNDVI*、*SIPI* 与施肥量及产量为正相关, 与蛋白质含量、湿面筋含量及干面筋含量都为负相关, *PSRI*、*NPCI* 与施肥量及产量为负相关, 与蛋白质含量、湿面筋含量及干面筋含量都为正相关; 其中 *Z* 小区施肥量、产量与光谱信息的相关性达到显著, *Y* 小区蛋白质含量、干面筋含量、产量与光谱信息的相关性达到显著; *T* 小区及 *S* 小区冬小麦品质与光谱信息的相关性显著; *W* 小区为无施肥处理小区, 从分析结果来看, *W* 小区冬小麦孕穗后期长势光谱信息与其最终产量及品质均未达到显著; *CK* 小区是均一施肥小区, 从对该小区数据的分析结果来看, *CK* 小区冬小麦植被指与产量施肥量的关系均为达到显著, 而 *NDVI*、*OSAVI*、*NRI*、*GNDVI*、*SIPI* 与品质呈现出较弱的正相关关系, 而 *PSRI*、*NPCI* 与品质呈现出负相关关系。

2.4 不同处理区冬小麦长势差异分析

对 6 个不同处理小区的冬小麦植被指数分别进行统

计分析, 计算了每一小区的植被指数的变异系数, 对比不同施肥处理下的冬小麦长势差异情况, 分析结果如表 3 所示。从植被指数的均值大小来看, *Z* 小区 *NDVI*、*OSAVI*、*GNDVI*、*SIPI* 值都为最大, 其次为 *S* 小区和 *CK* 小区, 而 *W* 小区相关植被指数最小, 6 个处理区冬小麦长势的优劣顺序为: *Z*>*S*>*CK*>*T*>*Y*>*W*; *PSRI* 值则正好相反, *Z* 小区最小而 *W* 小区最大, 排序为 *W*>*Y*>*T*>*CK*>*S*>*Z*; 6 个小区 *NRI* 指数均值的排序为 *Z*>*CK*>*S*>*W*>*T*>*Y*, *NPCI* 为 *T*>*Y*>*W*>*S*>*CK*>*Z*。可以看出, 不同植被指数所反映的作物长势存在一定差异。小麦氮素营养差异主要表现为田间叶面积指数和叶绿素含量的差异^[29], 不同的光谱信息对作物叶面积指数及叶绿素含量变化的敏感度不同, 近红外波段反射率与叶面积指数密切相关, 随叶面积指数的变异变化幅度较大, 而蓝波段、绿波段、红波段反射率则受叶绿素吸收影响, 对叶绿素含量的变异比较敏感。故与 *Quickbird* 近红外波段 (*B4*) 相关的植被指数 *NDVI*、*OSAVI*、*GNDVI*、*SIPI* 能够反映作物的群体长势, 对于不同施肥处理区具有相同的长势变化趋势 *Z*>*S*>*CK*>*T*>*Y*>*W*; 植被指数 *NRI*、*NPCI* 分别由 *Quickbird* 绿波段 (*B2*)、红波段 (*B3*), 以及蓝波段 (*B1*)、红波段 (*B3*) 组成, 对冠层叶绿素密度比较敏感, 因此 *NRI* 与 *NPCI* 的变化则显示了不同处理区叶绿

素含量的差异, NRI 与 NPCI 参数存在显著负相关, 因此, 在反映不同处理区作物长势信息排序上二者基本相反, 其中 NRI 为 $Z > CK > S > W > T > Y$, 而 NPCI 为 $T > Y > W > S > CK > Z$ 。通过以上分析可以看出, 冬小麦孕穗后期作物群体长势较好的小区为 Z 小区, 长势最差的小区为 W 小区, 由于 NRI 与冬小麦冠层叶绿素密度存在显著负相关关系, 故叶绿素密度较高的处理区为 Y 小区和 T 小区。

从变异系数 (CV) 来看, NDVI、OSAVI、GNDVI 所反映的不同处理小区冬小麦长势变异大小的排序一致: $W > Y > Z > S > T > CK$, SIPI 为 $Y > Z > W > S > CK > T$; PSRI 为 $W > S > Z > Y > CK > T$; 可以看出, W 小

区和 Y 小区作物群体长势较弱而空间变异较大, CK 小区和 T 小区在冬小麦孕穗后期群体变异较小; NRI 变异情况为 $Y > T > S > W > CK > Z$; NPCI 为 $T > Y > W > S > CK > Z$; 从这两个植被指数来看, T 小区和 Y 小区叶绿素的变异较大而 CK 小区和 Z 小区的变异相对较小。

W 小区为不施肥区, CK 小区为均一施肥小区, 因此, W 小区和 CK 小区作物长势的变异可以认为是由于土壤养分空间变异引起的, 而 Z、Y、S、T 小区的作物长势变异则反映了土壤养分及变量施肥的综合作用; 从表 3 中可以看出, 在冬小麦孕穗后期, W 小区的长势均匀度最差而 CK 小区作物长势的均匀度要优于其他变量处理小区。

表 3 不同处理小区 Quickbird 植被指数统计分析

Table 3 Mean values and variation coefficients of Quickbird vegetation index for different management zones

植被指数	S 小区		Y 小区		T 小区		Z 小区		W 小区		CK 小区	
	均值	CV/%	均值	CV/%	均值	CV/%	均值	CV/%	均值	CV/%	均值	CV/%
NDVI	0.495	7.122	0.454	8.756	0.460	5.731	0.510	7.584	0.434	9.532	0.492	5.144
OSAVI	0.398	6.846	0.364	8.314	0.368	5.335	0.401	7.665	0.333	9.340	0.393	5.117
GNDVI	0.476	5.128	0.444	6.597	0.448	4.528	0.483	6.801	0.415	7.865	0.471	4.279
NRI	0.028	61.459	0.018	77.772	0.017	76.149	0.036	41.481	0.024	66.398	0.028	52.214
SIPI	0.619	3.259	0.594	4.497	0.601	2.220	0.621	3.982	0.573	3.930	0.616	2.731
PSRI	0.103	19.335	0.122	16.213	0.120	14.288	0.091	18.682	0.124	19.541	0.103	14.422
NPCI	0.178	12.508	0.192	9.542	0.194	10.298	0.162	11.508	0.184	12.826	0.177	11.165

注: CV——变异系数。

2.5 不同处理区冬小麦品质、产量变异分析

对不同小区冬小麦品质及产量变异情况进行了分析, 结果如表 4 所示; 不同处理小区冬小麦产量的高低排列顺序为 $Z > T > S > Y > CK > W$, 这与冬小麦孕穗后期长势优劣情况 ($Z > S > CK > T > Y > W$) 略有出入, 说明冬小麦孕穗后期长势基本能够反映其最终产量的高低; 就籽粒蛋白质含量来看, 不施肥小区 W 虽然平均产量最低, 但其籽粒蛋白质含量最高, 其余依次为 Y 小区、S 小区、T 小区、CK 小区, Z 小区蛋白质含量最低, 可见产量高的小区蛋白质含量则低, 这印证了前面 NDVI

等植被指数与蛋白质含量成反比的规律; 湿面筋含量与蛋白质含量排序类似, 但 CK 小区含量略高于 T 小区; 干面筋含量由高到低的顺序为: $W > S > T > Z > Y > CK$; 从变异系数来看, 产量变异最大的小区为 W 小区, 最低为 S 小区, $W > T > CK > Y > Z > S$; 蛋白质含量变异顺序为 $W > T > CK > Z > Y > S$; 湿面筋变异顺序为 $T > W > Z > CK > Y > S$; 干面筋变异顺序为 $Y > W > T > Z > S > CK$ 。不施肥小区 W 的冬小麦产量及品质的变异程度均较高, 均一施肥小区 CK 其产量品质变异程度居中, S 小区产量及品质均匀度最高。

表 4 不同处理小区冬小麦品质、产量数据统计分析

Table 4 Mean values and variation coefficients of wheat quality and yield data for different management zones

相关指标	S 小区		Y 小区		T 小区		Z 小区		W 小区		CK 小区	
	均值	CV/%	均值	CV/%	均值	CV/%	均值	CV/%	均值	CV/%	均值	CV/%
蛋白质/%	16.79	2.43	17.10	2.90	16.43	3.72	16.10	3.49	17.80	4.31	16.32	3.50
湿面筋/%	39.20	3.95	41.04	4.71	37.73	7.64	37.59	5.71	43.70	6.93	37.91	5.45
干面筋/%	12.22	5.88	12.00	7.30	12.14	6.30	12.04	6.09	12.41	6.47	11.31	5.01
产量/(kg·hm ⁻²)	5310.2	10.51	5227.6	16.33	5491.6	18.39	5657.5	14.96	2879.5	27.64	4977.6	16.65

2.6 不同处理区土壤残留氮含量分析

对不同小区土壤残留全氮和硝态氮含量进行了对比分析, 6 个不同处理小区土壤全氮含量差异不大, 其中 0~30 cm 全氮含量均为 1.1 g/kg; 而 30~60 cm 全氮含量多为 0.9 g/kg, 只有 W 处理小区为 0.8 g/kg; 不同处理小区硝态氮的残留量差异较大, 0~30 cm 硝态氮含量残留

最高为 S 处理小区 12.8 mg/kg, 最低为 W 处理小区, 其均值只有 3.72 mg/kg, 总体排序为 $S > T > CK > Y > Z > W$; 30~60 cm 土壤残留硝态氮含量最高为 S 小区 (17.20 mg/kg), 最低为 W 小区 (2.21 mg/kg) 其排序为 $S > Y > CK > T > Z > W$; 总体来说, Z 处理小区在所有施肥处理小区中生态效益最好, 其土壤硝态氮和土壤全氮残留

量都为最小, 而 S 处理小区生态效益最差。

3 结 论

本文利用 Quickbird 高分辨率卫星遥感影像对冬小麦进行了长势、产量及品质的空间变异研究, 结果表明, Quickbird 光谱参数能够反映冬小麦不同施肥处理小区的长势变异, 而冬小麦早期的空间长势变异与其最终产量、品质变异有着密切的关系; 研究还发现, 不同植被指数所反映的作物长势存在一定差异, 反映冬小麦群体长势的植被参数和反映冬小麦叶绿素密度的植被指数在指示作物空间长势变异上有所不同。

1) 冬小麦孕穗后期的长势光谱信息与小区施肥量有很密切的正相关关系, 其中, 反映冬小麦群体长势的植被指数 (NDVI、OSAVI、GNDVI、SIPI、PSRI) 与小区施肥量的相关性优于反映冬小麦叶绿素含量的植被指数 (NRI、NPCI)。

2) Quickbird 影像不同的植被指数之间, 具有很高的相关性; 不同植被指数对于孕穗后期冬小麦长势变异的敏感度不同, 其中, NDVI 对于作物长势差异最为敏感; 其次为 OSAVI 和 GNDVI, NRI 最低。

3) 冬小麦早期长势光谱信息与其产量及品质有着很好的相关性, 其中孕穗后期冬小麦光谱信息与冬小麦产量成正相关关系而与籽粒蛋白质含量及湿面筋含量存在着显著的负相关关系。

4) 冬小麦早期长势变异大、不施肥处理的 W 小区, 其最终产量及品质的变异程度也较高, 而早期长势变异较小、根据拔节期 SPAD 值变量施肥处理的 S 小区, 其最终产量及品质均匀度最高。

5) 从土壤残留氮素情况来看, 不施肥小区 W 土壤全氮及硝态氮含量最低, CERES-Wheat 模型结合 OSAVI 模型变量处理的 Z 小区 0~30 cm 及 30~60 cm 土壤硝态氮含量均低于对照区 CK 小区, 生态效益最好, S 小区土壤硝态氮残留量高, 生态效益最差。

[参 考 文 献]

- [1] Bhatti A U, Mulla D J, Frazier B E. Estimation of soil properties and wheat yields on complex erodes hills using eostatistics and thematic mapper images[J]. Remote Sens Environ, 1991, 37: 181-191.
- [2] Boydell B, A B McBrantney. Identifying potential within-field management zones from cotton yield estimates[J]. Int J V Stafford(ed.) Precision Agriculture, 1999, 1: 321-341.
- [3] Yang C, Everitt JH, Bradford JM, et al. Airborne hyperspectral imagery and yield monitor data for mapping cotton yield variability[J]. Precision Agriculture, 2004, 5(5): 445-461.
- [4] Lukina E V, Freeman K W. Nitrogen fertilization optimization algorithm based on in-season estimates of yields and plant nitrogen uptake[J]. Plant Nutrition, 2001, 24: 885-898.
- [5] Scharf P C, Lory J A. Calibrating corn color from aerial photographs to predict side-dress N need[J]. Agron J, 2001, 94: 397-404.
- [6] Wood G A, Welsh J P, Godwin R J, et al. Real-time measures of canopy size as a basis for spatially varying nitrogen applications to winter wheat sown at different seed rates[J]. Bio-systems Engineering, 2003, 84(4): 513-531.
- [7] 宋晓宇, 王纪华, 薛绪掌, 等. 利用航空成像光谱数据研究土壤供氮量及变量施肥对冬小麦长势影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 45-49.
Song Xiaoyu, Wang Jihua, Xue Xuzhang, et al. Assessment of the influence of soil nitrogen supplies and variable fertilization on winter wheat growth condition using airborne hyper-spectral image[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(4): 45-49. (in Chinese with English abstract)
- [8] 潘瑜春, 王纪华, 陆安祥, 等. 基于小麦长势遥感监测的土壤氮素累积估测研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 58-63.
Pan Yuchun, Wang Jihua, Lu Anxiang, et al. Estimation of soil nitrogen accumulation based on remotely sensed monitoring of winter wheat growth status[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 58-63. (in Chinese with English abstract)
- [9] 鲍艳松, 王纪华, 刘良云, 等. 不同尺度冬小麦氮素遥感监测方法及其应用研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 139-144.
Bao Yansong, Wang Jihua, Liu Liangyun, et al. Approach to estimation of winter wheat nitrogen by using remote sensing technology on diverse scale and its application[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 139-144. (in Chinese with English abstract)
- [10] 蒋阿宁, 黄文江, 赵春江, 等. 基于光谱指数的冬小麦变量施肥效应研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1907-1913.
Jiang Aning, Huang Wenjiang, Zhao Chunjiang, et al. Effects of variable nitrogen application based on characteristics of canopy light reflectance in wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(9): 1907-1913. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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效益分析[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(5): 469-473.
Liang Hongxia, Zhao Chunjiang, Huang Wenjiang, et al. The feasibility and benefit evaluate of variable nitrogen fertilization application on winter wheat based on canopies spectroscopy parameters[J]. 2005, 20(5): 469-473. (in Chinese with English abstract)
- [12] Hongxia Liang, Wenjiang Huang. Variable rate nitrogen application algorithm based on SPAD Measurements and its influence on winter wheat[C]. IGARSS'04, 20-24 Sept, 2004, (6): 4059-4062.
- [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, 2003: 83-97.
Chen Liping. Theoretical and Experimental Studies on Variable-rate Fertilization in Precision Farming[D]. Beijing: China Agricultural University, 2003: 83-97. (in Chinese with English abstract)

- [14] 蒋阿宁, 黄文江, 赵春江, 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 Aning, Huang Wenjiang, Zhao Chunjiang, et al. Effect of variable nitrogen application based on spectral index on winter wheat grain yield and economic benefits[J]. Journal of Triticeae Crops, 2007, 27(3): 518—522. (in Chinese with English abstract)
- [15] Rouse J W, Hass 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, 1974: 371.
- [16] Wanjura D F, Hatfield J L. Sensitivity of spectral vegetative indices to crop biomass[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1987, 30: 810—816.
- [17] Rondeaux G, Steven M, Baret F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 55(2): 95—107.
- [18] Schleicher T D, Bausch W C, Delgado J A, et al. Evaluation and refinement of the nitrogen reflectance index(NRI) for site-specific fertilizer management[R]//ASAE Annual International Meeting Report, St. Joseph, MI, USA, 2001.
- [19] Penuelas J, Gamon J A, Fredeen A L. et al. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves[J]. Remote Sens Environ, 1994, 48: 135—146.
- [20] Gitelson A A, Kaufman Y J, Merzlyak M N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS[J]. Remote Sens Environ, 1996, 58: 289—298.
- [21] Penuelas J, Baret F, Filella, I. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance[J]. Photosynthetica, 1995, 31: 221—230.
- [22] Merzlyak M N, Gitelson A A, Chivkunova O B, et al. Non-destructive optical detection of leaf senescence and fruit ripening[J]. Physiol. Plant, 1999, 106: 135—141.
- [23] 谭海珍, 李少昆, 王克如, 等. 基于成像光谱仪的冬小麦苗期冠层叶绿素密度监测[J]. 作物学报, 2008, 34(10): 1812—1817.
Tan Haizhen, Li Shaokun, Wang Keru, et al. Monitoring canopy chlorophyll density in seedlings of winter wheat using imaging spectrometer[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(10): 1812—1817. (in Chinese with English abstract)
- [24] Merzlyak M N, Solovchenko A E, Gitelson A A. Reflectance spectral features and non-destructive estimation of chlorophyll, carotenoid and anthocyanin content in apple fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2003, (27): 197—211.
- [25] 陈维君, 周启发, 黄敬峰. 用高光谱植被指数估算水稻乳熟后叶片和穗的色素含量[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(4): 434—439.
Chen Weijun, Zhou Qifa, Huang Jingfeng. Estimation pigment contents in leaves and panicles of rice after milky ripening by hyperspectral vegetation indices[J]. Chinese Journal Of Rice Science, 2006, 20(4): 434—439. (in Chinese with English abstract)
- [26] 薛利红, 曹卫星, 罗卫红, 等. 光谱植被指数与水稻叶面积指数相关性的研究[J]. 植物生态学报, 2004, 28(1): 47—52.
Xue Lihong, Cao Weixing, Luo Weihong, et al. Relationship between spectral vegetation indices and leaf area index[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(1): 47—52. (in Chinese with English abstract)
- [27] 张凯, 王润元, 王小平, 等. 黄土高原春小麦叶面积指数与高光谱植被指数相关分析[J]. 生态学杂志, 2008, 27(10): 1692—1697.
Zhang Kai, Wang Runyuan, Wang Xiaoping, et al. Correlations between leaf area index and hyperspectral vegetation index of spring wheat on loess plateau[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(10): 1692—1697. (in Chinese with English abstract)
- [28] 唐延林, 王纪华, 黄敬峰, 等. 水稻成熟过程中高光谱与叶绿素、类胡萝卜素的变化规律研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 167—173.
Tang Yanlin, Wang Jihua, Huang Jingfeng, et al. Variation law of hyperspectral data and chlorophyll and carotenoid for rice in mature process[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6): 167—173. (in Chinese with English abstract)
- [29] 鞠昌华, 田永超, 朱洪芬, 等. 基于 LISS4 数据的小麦氮素营养状况反演研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 150—154.
Ju Changhua, Tian Yongchao, Zhu Hongfen, et al. Inversion of wheat nitrogen status based on LISS4 data[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(11): 150—154. (in Chinese with English abstract)

Monitoring spatial variance of winter wheat growth and grain quality under variable-rate fertilization conditions by remote sensing data

Song Xiaoyu^{1,2}, Wang Jihua^{1,3}, Huang Wenjiang¹, Yan Guangjian², Chang Hong³

(1. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China;

2. College of Geography/Research Center for Remote Sensing and GIS, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Beijing Research Center for Agrifood Testing and Farmland Monitoring, Beijing 100097, China)

Abstract: Remote sensing images acquired by satellite-based sensors have the potential for monitoring crop growth

variation because they can provide an area global view for entire field within the crop growth season with scathelessness. This study aimed to use Quickbird image to evaluate the spatial variabilities of winter wheat growth and grain quality under different fertilization levels. The variable-rate fertilization experiment was carried out on National Experimental Station for Precision Agriculture during 2005–2006 the wheat growing season. The results indicated that the spectrum parameters of Quickbird image could reflect the spatial variabilities of winter wheat growth in different fertilization study areas. Meanwhile the spatial variabilities of wheat growth at early stage could reflect the variance of yield and grain quality. The wheat growth information at the booting stage had strong positive correlations with yield, and strong negative correlations with grain protein and wet gluten. The correlation coefficient between OSAVI (optimized soil adjusted vegetation index) and wheat yield was 0.536. It was -0.531 for GNDVI (greenness-normalized difference vegetation index) and grain protein content, and -0.535 for GNDVI and wet gluten, respectively. The study also indicated that diverse spectrum parameters had different sensitivities to the wheat growth spatial variance. So it is feasible to use remote sensing data to investigate the crop growth and quality spatial variance.

Key words: remote sensing, growth, crops, winter wheat, Quickbird imagery, spatial variance

欢迎订阅 2010 年《作物学报》

《作物学报》是中国科学技术协会主管、中国作物学会和中国农业科学院作物科学研究所共同主办、科学出版社出版的有关作物科学方面的学术期刊。前身可追溯到 1919 年创办的《中华农学会丛刊》。主要刊载农作物遗传育种、耕作栽培、生理生化、种质资源以及与作物生产有关的生物技术、生物数学等学科具基础理论或实践应用性的原始研究论文、专题评述和研究简报等。办刊宗旨是报道本领域最新研究动态和成果，为繁荣我国作物科学研究、促进国内外学术交流、加速中国农业现代化建设服务。读者对象是从事农作物科学研究的科技工作者、大专院校师生和具有同等水平的专业人士。

《作物学报》从 1999 年起连续 10 年获“国家自然科学基金重点学术期刊专项基金”的资助，2006—2009 年连续 4 年获“中国科协精品科技期刊工程项目（B 类）”资助。从 2002 年起连续 7 年被中国科技信息研究所授予“百种中国杰出学术期刊”称号。2005 年获“第三届国家

期刊奖提名奖”。据北京大学图书馆编著的《中文核心期刊要目总览（2008 年版）》登载，《作物学报》被列在“农学、农作物类核心期刊表”的首位。

《作物学报》为月刊，2010 年定价 50 元/册，全年 600 元。可通过全国各地邮局订阅，刊号：ISSN 0496-3490，CN 11-1809/S，邮发代号：82-336。也可向编辑部直接订购。

地址：北京市海淀区中关村南大街 12 号 中国农科院作物所 《作物学报》编辑部

邮编：100081

电话：010-82108548

传真：010-82105793

E-mail: xbwz@chinajournal.net.cn

网址：http://www.chinacrops.org/zwx