

基于小麦长势遥感监测的土壤氮素累积估测研究

潘瑜春, 王纪华, 陆安祥, 陆 洲

(国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

摘 要: 农田长时间被植被所覆盖给遥感直接监测农田土壤养分及其动态带来巨大难度。由于不同的土壤条件和施肥量会在一定程度上引起作物长势的差异, 并最终反映在作物冠层光谱反射率的差异, 因此, 通过遥感监测作物长势动态实现农田土壤养分与环境质量将是遥感监测土壤质量的一个重要方法。该文利用追肥前后两期高光谱航空影像提取反映小麦长势状况的归一化植被指数 $NDVI$, 并结合小麦种植前后的土壤采样数据, 分析了追肥前后 $NDVI$ 及其增量与小麦种植前后土壤碱解氮增量之间的关系。研究结果表明: 与追肥前后 $NDVI$ 绝对增量相比, 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, 追肥前后 $NDVI$ 绝对增量与追肥前的 $NDVI$ 的比值是估测小麦生育期内土壤碱解氮增量的最好指标, 而追肥后的 $NDVI$ 与土壤碱解氮增量之间没有显著的相关关系, 不能用于土壤碱解氮增量的估测。

关键词: 氮素累积增量; 碱解氮增量; $NDVI$; 遥感

中图分类号: S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)9-0058-06

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)

0 引 言

传统的作物栽培管理一般在地块内采用均一施肥方式, 但是同一农田地块内的土壤质地和土壤肥力等条件存在明显的空间变异, 因此均一施肥往往导致地块内部出现局部区域施肥过量, 土壤养分积累, 可能成为农业面源污染的污染源, 而另一些区域施肥不足, 不能满足作物生长需要, 导致土壤养分入不敷出, 引起地力下降。因此, 及时监测农田地块内的土壤养分累积动态将有助于控制农田面源污染和地力耗竭。传统的土壤采样测试方法投入大, 且时效性差, 遥感技术的发展为土壤养分及动态监测提供新的技术手段。Baumgardner 和 Al-Abbas 最早进行了土壤有机质与航空遥感影像的可见光、近红外波段之间的关系的试验, 结果表明土壤有机质含量可用可见光或近红外区间波段的光反射率的直线或曲线模型来估测^[1,2]; Garey 和 Chen 也分别利用遥感影像的土壤线进行土壤有机质含量的制图, Garey 还用该结果指导土壤特性采样^[3,4]; Dalai 用近红外光谱法预测了澳大利亚土壤的水分、有机碳和总氮, 预测的土壤有机质含量变幅在 0~ 2.6 的范围内, 而在有机质含量较高或较低的情况下, 近红外法预测值存在偏

差^[5]。徐永明等利用土壤光谱各吸收带的特征参数与总氮含量进行逐步回归运算, 确定与氮元素关系比较密切的几个吸收带, 结果表明, 土壤的反射率光谱与氮元素含量之间存在比较明显的相关性, 可见光/近红外反射光谱具有快速估算土壤中氮元素含量的潜力^[6]。然而, 农田往往为植被所覆盖, 土壤裸露的时间很短, 影响遥感在农田土壤养分监测评价方面的应用。另一方面, 国内外学者在遥感监测作物长势、营养状况取得了巨大成果, Lydia 研究了不同施氮水平下冬小麦生物量、叶面积指数、叶绿素 A 等冠层参数与植被指数之间的关系, 结果表明基于简单比值的累积植被指数是产量估测的最好指标^[8]; Michael 研究了利用近红外、红、绿、蓝等波段值及其光谱指数监测冬小麦行密度的可能性, 结果表明利用近红外波段估测的行密度, 并指导氮肥施用, 可以显著提高冬小麦氮肥施用的利用率^[9,10]。Huang 和 Zhao 等先后研究了基于小麦冠层光谱的作物叶片的生理生化参量和籽粒品质指标等参量反演和监测的敏感波段和特征遥感参量^[11-13]。Liu 融合多时相 EnviSat-ASAR 雷达影像和 TM 影像预测冬小麦长势、产量和蛋白质含量^[14]。另外, 许多学者进行了不同施氮水平条件下的作物冠层光谱特征及其作物氮胁迫监测研究^[15-20]。但将作物长势监测与不同施氮水平条件下的光谱特征及其作物氮胁迫监测的研究成果相结合, 解决土壤养分及其动态监测评价问题的研究却基本没有。

由于不同的土壤条件和施肥量会在一定程度上引起作物长势的差异, 并最终反映在作物冠层光谱反射率

收稿日期: 2006-09-18 修订日期: 2007-01-23

基金项目: 农业部 948 项目“国外先进农业信息技术引进与创新”(2006-G63); 北京市自然科学基金重点项目(4061002)

作者简介: 潘瑜春(1971-), 男, 安徽歙县人, 副研究员, 博士, 主要从事空间信息技术应用研究。北京 国家农业信息化工程技术研究中心, 100097。Email: Panyec@nercita.org.cn

的差异,使得利用植被光谱特征间接监测土壤特性和施肥状况成为可能。本文以小麦追肥前后相隔两周的两个时相高光谱遥感航空影像提取小麦长势,结合小麦种植前后的土壤采样数据,研究均一施氮地块内的NDVI与土壤碱解氮增量之间的关系,以便通过小麦长势监测实现均一施肥条件下的农田地块内部氮素累积监测评价,进而为农田肥力监测及农田面源污染遥感监测提供依据。

1 监测原理

在种植作物条件下,土壤氮素累积动态可以用作物某一生育时段内土壤氮素累积增量($\Delta N_{\text{Nitrogen}}$)来描述, $\Delta N_{\text{Nitrogen}}$ 主要受土壤速效氮增量(ΔN)和土壤供氮转换率(ρ)影响,其关系可以用下式表达

$$\Delta N_{\text{Nitrogen}} = \Delta N / \rho \quad (1)$$

土壤速效氮增量(ΔN)是补给量与消耗量之差,其中补给量主要由施肥(底肥和追肥)和土壤供氮转换两部分构成,可以称为土壤初始速效氮含量,而消耗量包括小麦生长消耗和其他方式的流失。土壤供氮转换率(ρ)与土壤物理性状密切相关,对于地块内部土壤物理性状相对一致,土壤供氮转换能力和流失强度也基本一致,因此土壤速效氮增量在一定程度上反映了土壤氮素累积增量;另一方面,由于地块是均一管理,底肥施用量相同,因此,土壤初始速效氮含量差异主要体现在土壤速效氮含量差异方面,底肥、追肥和小麦生长消耗量是影响土壤中速效氮素动态消长的主要因子。在正常田间状态下小麦生长消耗的比例较为稳定,因此,可以通过监测小麦种植前后土壤速效氮增量间接监测土壤氮素累积增量。

小麦生长耗氮量包括追肥前和追肥后生物量生长所需的吸氮量,耗氮量的不同引起小麦长势的差异。土壤速效氮含量差异引起的小麦长势差异最终反映在小麦冠层光谱反射率的差异上,这使得通过遥感监测小麦长势实现小麦种植前后土壤速效氮增量成为可能。归一化植被指数(NDVI)是最广泛使用的一种植被指数,它与植被生物量、叶面积指数和光有效辐射等因素有关^[7],是植物生长状态及植被空间分布密度的最佳指示因子,因此本文采用NDVI作为小麦长势监测的指标,土壤速效氮指标采用土壤碱解氮含量。

2 试验设计及数据获取与处理

2.1 试验设计

试验在位于北京昌平小汤山镇东北部的小汤山国家精准农业示范基地进行。基地地处北纬40°10'31"~40°11'18",东经116°26'10"~116°27'05",基地内地势平

坦,试验地块土壤质地为壤土,冬小麦品种为京冬8号,2000年10月4日播种,施用225 kg/hm²磷酸二铵做基肥,管理采用常规均一管理方式;2001年4月7日,试验区追施尿素75 kg/hm²,施用方法为均一施肥。本研究中试验地块的碱解氮含量位于60~90 mg/kg之间,根据全国第二次土壤普查的土壤养分分级标准,该试验地块属于中等偏下水平。

2.2 数据获取与处理

1) 地块土壤基础养分数据获取与处理

第一次土壤养分采样在2000年9月30日(冬小麦播种前)进行,第二次采样在2001年9月26日(当季冬小麦收割后)进行,两次均采用规则格网取土样,用DGPS记录格网中心点的经纬度坐标,采样间隔分别为20 m×20 m和40 m×40 m,每个采样点由5个土钻取0~30 cm深度的土复合而成,钻土位置分布于半径小于1 m的同心圆内。土样经自然风干、过筛后进行实验室养分的测定。每个样品测定项目包括土壤碱解氮、速效磷、速效钾等,测定方法见农业化学常规分析方法^[21]。由于2001年6月小麦收割结束后到9月26日采样这段时间没有播种其他作物,因此两次采样间的土壤养分变化能够反映当季冬小麦生产引起的土壤养分变化状况。

对土壤碱解氮含量使用半方差函数进行拟合,并进行交叉检验(Cross-Validation)选择最优模型类型和参数。在拟合半方差模型时,由于在大分离距离下的测量资料代表样本采样地边沿的方差结构,而不能反映样本主流的方差结构,因此在半方差函数拟合时只用采样点距离步长 $|h| \leq L/2$ (L 为采样点间最大距离)的样本半方差函数值来拟合模型^[22]。2000年土壤碱解氮步长(Lag)设为26 m,2001年步长设为30 m。采用普通克里金插值法(Ordinary Kriging)将矢量的采样点插为连续的土壤碱解氮空间分布图,并转换为分辨率为3 m的土壤碱解氮空间分布栅格数据,小麦种植前后的碱解氮增量 ΔN 提取表达式如下:

$$\Delta N = N_{2001} - N_{2000} \quad (2)$$

式中 N_{2001} ——种植一茬后小麦的土壤碱解氮(即由2001年采样并插值生成的碱解氮空间分布栅格数据);
 N_{2000} ——小麦种植前的土壤碱解氮(即由2000年采样并插值生成的碱解氮空间分布栅格数据)。

2) 高光谱成像数据获取

分别在2001年4月11日(冬小麦起身期)和4月26日(冬小麦拔节期)生长期间进行了航空高光谱成像光谱数据获取。传感器为中科院上海技物所研制的实用模块化成像光谱仪(Operative Modular Imaging Spectrometer, OMIS-I型),可见光/近红外波段光谱分

分辨率为 10 nm, 机下点空间分辨率为 3 m。获取的高光谱影像经辐射校正、反射率转换和几何校正后, 生成 3 m 分辨率的影像。利用遥感影像数据提取的归一化植被指数 (NDVI) 指标监测小麦长势, 即

$$NDVI = (\rho_{784-794nm} - \rho_{670-680nm}) / (\rho_{784-794nm} + \rho_{670-680nm}) \tag{3}$$

式中 $\rho_{784-794nm}$ ——近红外波段的反射率, 中心波长为 789 nm; $\rho_{670-680nm}$ ——红光波段的反射率, 中心波长为 675 nm。

基于拔节期和起身期提取的 NDVI 差值反映小麦在该时段的小麦生长量, 若将该时段 ΔT 作为一个时间单位, 则该时段的 NDVI 差值可以反映小麦在该时段的相对长速, 因此本研究中将 NDVI 差值定义为小麦长速, 即:

$$\Delta NDVI = (NDVI_{426} - NDVI_{411}) / \Delta T \tag{4}$$

式中 $\Delta NDVI$ ——小麦长速; $NDVI_{426}$ ——追肥两周后(拔节期的 4 月 26 日)的 NDVI; $NDVI_{411}$ ——追肥前(起身期的 4 月 11 日)的 NDVI; ΔT 的值为 1。

为了综合追肥前后小麦长势信息, 本研究采用 $R_{-} \Delta NDVI_1$ 和 $R_{-} \Delta NDVI_2$ 两个反映小麦相对长速

的指标, 其表达式如(6)和(7), 其中 $SumNDVI$ 定义为小麦 NDVI 累积量。

$$SumNDVI = NDVI_{411} + NDVI_{426} \tag{5}$$

$$R_{-} \Delta NDVI_1 = \Delta NDVI / NDVI_{411} \tag{6}$$

$$R_{-} \Delta NDVI_2 = \Delta NDVI / SumNDVI \tag{7}$$

3) 分析样点数据提取

将 N_{2000} 、 ΔN 、 $NDVI_{411}$ 、 $NDVI_{426}$ 、 $\Delta NDVI$ 、 $R_{-} \Delta NDVI_1$ 和 $R_{-} \Delta NDVI_2$ 的栅格数据进行叠加合成生成一个具有 7 个波段的影像, 在地块内部随机选择 194 个样点, 提取各样点的上述 7 个指标值。

3 结果与分析

3.1 土壤初始碱解氮与追肥前后 NDVI

土壤养分在小麦整个生育期发挥重要作用, 土壤初始碱解氮含量 (N_{2000}) 与追肥前 NDVI ($NDVI_{411}$) 的相关系数达到 0.28 的极显著水平, 反映了小麦生长前期对土壤初始氮素的依赖和二者的同步性。但土壤初始碱解氮含量与追肥后 NDVI ($NDVI_{426}$) 的相关系数下降到 0.16 的显著水平(见表 1), 表明土壤初始碱解氮含量对追肥后小麦长势的影响明显减弱。

表 1 采样点各项指标间相关系数
Table 1 Correlation coefficient among sample parameters

指 标	N_{2000}	$NDVI_{411}$	$NDVI_{426}$	$\Delta NDVI$	$R_{-} \Delta NDVI_1$	$R_{-} \Delta NDVI_2$
$NDVI_{411}$	0.28**	1.00				
$NDVI_{426}$	0.16*	0.58**	1.00			
$\Delta NDVI$	-0.23**	-0.80**	0.04	1.00		
$R_{-} \Delta NDVI_1$	-0.23**	-0.94**	-0.31**	0.93**	1.00	
$R_{-} \Delta NDVI_2$	-0.43**	-0.95**	-0.23**	0.95**	0.99	1.00
ΔN (一次曲线)	-0.69**	-0.10	-0.16*	0.01	-0.03	-0.04
ΔN (二次曲线)	0.76**	0.48**	-0.16*	0.42**	0.53**	0.50**

注: * 表示 5% 的显著水平, ** 表示 1% 显著水平; 样本数 n= 194。

3.2 土壤碱解氮增量与追肥前后 NDVI 关系

$NDVI_{411}$ 和 $NDVI_{426}$ 分别表示追肥前后两个时点上的小麦“长势”状况。由表 1 看出, 追肥前的小麦长势 $NDVI_{411}$ 与种植小麦前后的碱解氮增量 ΔN 之间不存在显著的线性相关, 即通过追肥前的小麦长势, 利用线性模型不能估测种植前后土壤中碱解氮增量。进一步分析 $NDVI_{411}$ 与 ΔN 相关关系发现: ΔN 总体上随着 $NDVI_{411}$ 由小到大变化呈现先增大后降低(图 1a) 的变化趋势, 两者的二次多项式相关系数 0.48, 达到极显著水平。追肥后小麦长势 $NDVI_{426}$ 与土壤中碱解氮增量 ΔN 之间的线性和二次曲线多项式的相关系数均未达到极显著水平(图 1b)。

对比分析追肥前后小麦 NDVI 的统计特征值(表 2), 发现 NDVI 的变异系数从追肥前的 12.91 降低到

4.37, 均值从 0.42 上升到 0.76, 变化区间从 0.25 降低到 0.19, 这说明追肥的效果对于促进均匀生长特别是长势较弱的小麦群体加快生长作用比较明显。追肥前小麦 NDVI 均值达到 0.42, 说明该地块在小麦追肥前的整体长势偏旺, 土壤供氮量整体上能够满足需要; 另一方面, 追肥前长势较差的小麦群体从追肥前到追肥后生物量增加较快, 而且该地块没有限制性因子, 说明追肥前小麦长势较弱是由于局部地块缺氮引起的。另外, 本试验地块内即使是追肥前长势较弱的植株群体也属长势正常范围的; 而追肥前长势较好的区域基础供氮正常, 植株群体过大, 植株吸氮量很大。因此, 追肥前长势相对较差和较好的区域土壤碱解氮增量也相对较小, 而对于长势中等的小麦植株群体由于长势属于正常范围, 追肥后土壤碱解氮超出小麦生长的需氮量, 因此后期碱

解氮残留量多, 表现为土壤碱解氮增量相对较高, 这样引起 ΔN 总体上是随着 $NDVI_{411}$ 由小到大变化呈现先增大后降低的趋势。因此通过对比分析追肥前后 $NDVI$

值情况可以很好地估测小麦生产期间土壤碱解氮增量状况, 但相比之下, 追肥前小麦长势状况($NDVI$) 能更好地反映土壤碱解氮增量。

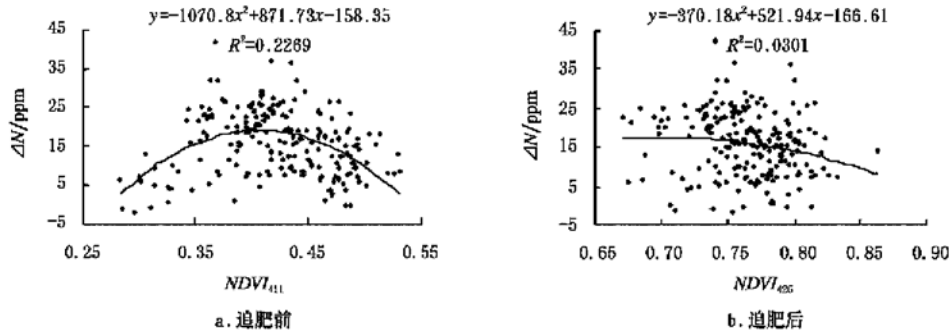


图1 追肥前后小麦长势与土壤碱解氮增量关系

Fig. 1 Relationships between wheat growth status and increment of soil available nitrogen for pre-fertilization and post-fertilization

表2 追肥前后 $NDVI$ 统计描述

Table 2 Statistic characters change of $NDVI$ after fertilization

指标	平均	标准误差	众数	标准差	变异系数	峰度	偏度	最小值	最大值
追肥前	0.42	0.0039	0.47	0.05	12.91	-0.38	-0.31	0.28	0.53
追肥后	0.76	0.0024	0.78	0.03	4.37	0.24	-0.39	0.67	0.86

3.3 土壤碱解氮增量与追肥前后 $NDVI$ 变化量关系

$\Delta NDVI$ 是反映 $NDVI_{411}$ 至 $NDVI_{426}$ 时段内小麦“长速”的指标。虽然从表1看, 小麦追肥前后 $NDVI$ 变化量与土壤碱解氮增量之间不存在明显的线性相关性, 但其二次多项式的相关系数达到0.42。如图2a所示, 小麦生育期内土壤碱解氮增量 ΔN 随着 $\Delta NDVI$ 的增大呈现先增大后降低的趋势。通过分析追肥前长势($NDVI_{411}$) 与长速($\Delta NDVI$) 之间的关系可见, 小麦 $NDVI_{411}$ 与 $\Delta NDVI$ 之间呈显著负相关关系(表1)。这

是因为小麦追肥前长势与长速之间的显著负相关关系, 长速相对较慢的小麦由于追肥而生长较快, $\Delta NDVI$ 就大, 因而追肥后残留而导致的 ΔN 也较少, 因此小麦长速处于较慢的区域中的土壤碱解氮增量将随着小麦长速由慢到快而呈增加趋势; 而在小麦长速较快的区域中的土壤碱解氮增量将随着小麦长速增快而呈降低趋势, 因为原来长速较好的小麦由于追肥而生长相对较慢, $\Delta NDVI$ 就小, 因而追肥后残留而导致的 ΔN 也较多。

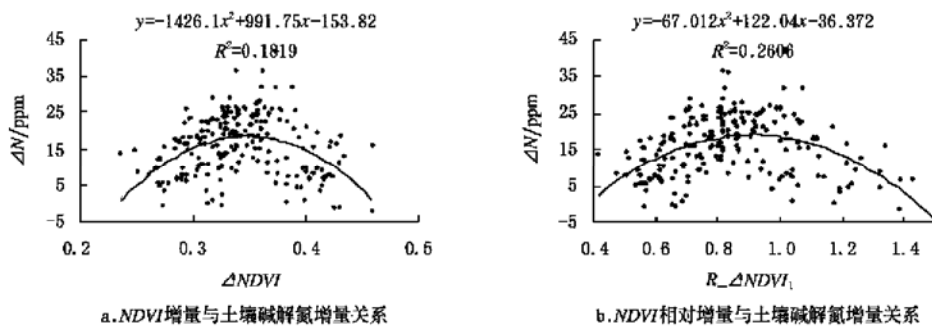


图2 小麦长速与土壤碱解氮增量关系

Fig. 2 Relationships between growth rate and increment of soil alkali-hydrolysable nitrogen

小麦长速 $\Delta NDVI$ 反映的是小麦在追肥后的长势的绝对增量, 同样的长速由于小麦在追肥前的长势差

异, 比如A、B两个样点在追肥前后小麦 $NDVI$ 分别增加了0.35和0.3, 但样点A在追肥前的长势 $NDVI$ 为

0.3, 而样点 B 追肥前长势 $NDVI$ 为 0.5, 显然满足样点 B 小麦生长所需的碱解氮量要比样点 A 多, 因此小麦长势不能准确反映小麦追肥前后小麦总的吸氮量, 为此, 本文引入相对长势指标, 以便减小追肥后长势的影响。根据公式(6) 和公式(7) 关于相对长势的计算方法可知, 相对长势与长势之间呈正相关关系, 它与土壤碱解氮增量之间的关系将与长势 $\Delta NDVI$ 有着同样的趋势, 如图 2b 所示, 很明显它比长势有着更好的相关性, 因此采用相对长势指标将能更好的反映土壤碱解氮增量 ΔN 的状况。另外, 从表 1 可以看出相对长势 $R_{\Delta NDVI_1}$ 和 $R_{\Delta NDVI_2}$ 与土壤碱解氮增量的相关关系都比长势 $\Delta NDVI$ 有明显提高, 但基于追肥前小麦长势($NDVI_{411}$) 的相对长势 $R_{\Delta NDVI_1}$ 比基于追肥前后小麦 $NDVI$ 累积量($SumNDVI$) 的小麦相对长势 $R_{\Delta NDVI_2}$ 指标更能反映土壤碱解氮增量状况, 这是因为追肥前小麦长势对土壤碱解氮增量具有较大的贡献率。同样, $SumNDVI$ 不能很好的反映土壤中碱解氮增量, 这是因为土壤碱解氮增量 ΔN 与 $\Delta NDVI$ 及追肥前的 $NDVI$ 两者有着较好的相关性, 而且 $SumNDVI$ 也不能反映 $NDVI$ 增量情况, 同时也削弱了追肥前 $NDVI$ 与土壤碱解氮增量之间的相关关系。因此, 利用基于 $NDVI_{411}$ 的 $NDVI$ 相对长势 ($R_{\Delta NDVI_1}$) 比基于 $SumNDVI$ 的相对长势 ($R_{\Delta NDVI_2}$) 能更好地估测小麦生育期内土壤碱解氮增量。

4 结论与讨论

1) 利用追肥前获取的遥感影像提取的 $NDVI$ 能够初步估测小麦生育期内土壤碱解氮增量的空间分布, 而追肥后的 $NDVI$ 与土壤碱解氮增量之间没有显著的相关关系。一般小麦长势中等的区域很有可能是土壤碱解氮增量较高的区域, 长势很好的区域碱解氮增量一般比较少, 若没有其他小麦生长的限制性因子存在, 长势较差的区域碱解氮增量一般也较少。

2) 与追肥前后 $NDVI$ 绝对增量相比, 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, 追肥前后 $NDVI$ 绝对增量与追肥前的 $NDVI$ 的比值是估测小麦生育期内土壤碱解氮增量的最好指标, 这说明利用多时相 $NDVI$ 将能够获得更好的估测结果。

中国传统的田间管理方式基本上是均一管理方式, 因此通过遥感监测作物长势动态估测均一管理条件下地块内部的作物生育期内的氮素累积空间分布, 进而进行生产管理对农田环境的影响估测与评价, 并结合包括作物品种、播种日期等生产管理 GIS 数据实现农田面源污染等农田环境质量监测, 这将成为遥感农业应用的

一个重要方向。在小麦生产管理中, 根据土壤基础肥力状况, 适时控制小麦群体长势将有助于小麦对土壤氮素的吸收, 提高农田地块施用肥料的利用率, 减小对农田环境的污染。

由于土壤营养因子的复杂性, 利用作物长势间接估测土壤氮素累积具有一定的不确定性, 需要针对不同的土壤类型和种植模式进行进一步的研究, 以探讨减小误差的方法。还应当指出的是, 目前在土壤速效氮评价方面, 存在着多种指标并存的情况, 但各指标与作物生长的关系没有本质的不同, 因此通过监测小麦长势估测评价其他速效氮素养分的动态变化应该是可行的, 对此还需要验证。

[参 考 文 献]

- [1] Al-Abbas A H, Swain P H, Baumgardner M F. Relating soil organic matter and clay content to the multi-spectral radiance[J]. Soil Sci, 1972, 114: 477- 485.
- [2] Baumgardner M F, Kristoff S J, Johannsen C J, et al. The effect of organic matter on multi-spectral properties of soils[J]. Proc Indiana Acad Sci, 1970, 79: 413- 422.
- [3] Chen F, Kissell D E, West L T, et al. Field-scale mapping of surface soil organic carbon using remotely sensed imagery[J]. Soil Sci Soc Am J, 2000, 64: 746- 753.
- [4] Garey A. Fox, George J. Sabbagh. Estimation of soil organic matter from red and near-infrared remotely sensed data using a soil line Euclidean Distance Technique[J]. Soil Sci Soc Am J, 2002, 66: 1922- 1929.
- [5] Dalai R C, Henry R J. Simultaneous determination of moisture, organic carbon and total nitrogen by near infrared reflectance spectroscopy[J]. Soil Sci Soc Am J, 1986, 50: 120- 123.
- [6] 徐永明, 蔺启忠, 黄秀华, 等. 利用可见光/近红外反射光谱估算土壤总氮含量的实验研究[J]. 地理与地理信息科学, 2005, 21(1): 19- 22.
- [7] Ruimy A, Saugier B. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data[J]. Journal of Geographical Research, 1994, 99(3): 5263- 5283.
- [8] Lydia Serrano, Iolanda Filella, Josep Penuelas. Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies[J]. Crop Sci, 2000, 40: 723- 731.
- [9] Michael Flowers, Randall Weisz, Ronnie Heiniger. Remote sensing of winter wheat tiller density for early nitrogen application decisions[J]. Agron J, 2001, 93: 783 - 789.
- [10] Michael Flowers, Randall Weisz, Ronnie Heiniger, et al. Field validation of a remote sensing technique for early nitrogen application decisions in wheat [J]. Agron J,

- 2003, 95: 167– 176.
- [11] Wenjiang Huang, Jihua Wang, Zhijie Wang, et al. Inversion of foliar biochemical parameters at various physiological stages and grain quality indicators of winter wheat with canopy reflectance[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(12): 2409– 2419.
- [12] Chunjiang Zhao, Liangyun Liu, Jihua Wang, et al. Predicting grain protein content of winter wheat using remote sensing data based on nitrogen status and water stress[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2005, 7(1): 1– 9.
- [13] Chunjiang Zhao, Jihua Wang, Liangyun Liu, et al. Relationship of 2100– 2300nm spectral characteristics of wheat canopy to leaf area index and leaf N as affected by leaf water content[J]. *Pedosphere*, 2006, 16(3): 333– 338.
- [14] Liangyun Liu, Jihua Wang, Yansong Bao, et al. Predicting winter wheat condition, grain yield and protein content using Multi-temporal EnviSat-ASAR and Landsat TM satellite images [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(4): 737– 753.
- [15] 赵春江, 黄文江, 王纪华. 不同品种、肥水条件下冬小麦光谱红边参数研究[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(8): 980– 987.
- [16] 程一松, 胡春胜, 郝二波, 等. 氮素胁迫下的冬小麦高光谱特征提取与分析[J]. *资源科学*, 2003, 25(1): 86– 93.
- [17] 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.
- [18] 唐延林, 王人潮, 黄敬峰, 等. 不同供氮水平下水稻高光谱及其红边特征研究[J]. *遥感学报*, 2004, 8(2): 185– 192.
- [19] 任红艳, 潘剑君, 张佳宝. 不同施氮水平下的小麦冠层光谱特征及产量分析[J]. *土壤通报*, 2005, 36(1): 26– 29.
- [20] 李映雪, 朱 艳, 曹卫星. 不同施氮条件下小麦冠层的高光谱和多光谱反射特征[J]. *麦类作物学报*, 2006, 26(2): 103– 108.
- [21] 中国土壤学会化学专业委员会编. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [22] 张仁铎. 空间变异理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

Estimation of soil nitrogen accumulation based on remotely-sensed monitoring of winter-wheat growth status

Pan Yuchun, Wang Jihua, Lu Anxiang, Lu Zhou

(National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100089, China)

Abstract: Covered by vegetation results in the difficulty to monitor soil nutrition and its accumulation of farmland during crop's growing season by remote sensing, however, crop's growth status and growing speed directly reflect the soil fertility and fertilization, so it is a feasible method for monitoring soil nutrition and its accumulation of farmland based on remotely-sensed monitoring of crop's growth status. Two temporal *NDVI* were derived from hyper-spectral imageries collected at reviving stage and elongation stage, and two temporal grid-sampling data were interpolated to raster soil nutrition data using Ordinary Kriging analysis. The first soil sampling was processed before seeding, and another was after harvest time. It analyzed the correlation among remote sensing parameters. that is. *NDVI* (Normalized Different Vegetation Index). the absolute increment of *NDVI* around fertilization ($\Delta NDVI$), the ratio of $\Delta NDVI$ to *NDVI* obtained pre-fertilization ($R_{\Delta NDVI_1}$), and the ratio of $\Delta NDVI$ to the summery of *NDVI* around fertilization ($R_{\Delta NDVI_2}$), and the increment of alkali-hydrolysable nitrogen in soil (ΔN) during winter wheat growing season. Results show that, compared with $\Delta NDVI$, *NDVI* obtained before fertilization can well estimate the increment of alkali-hydrolysable nitrogen in soil, and $R_{\Delta NDVI_1}$ is the best index for estimating nitrogen accumulation during crops growth period, while *NDVI* obtained after fertilization is the worst.

Key words: increment of alkali-hydrolysable nitrogen; nitrogen accumulation; *NDVI*; remote sensing