

## 作物籽粒蛋白质含量遥感监测预报研究进展\*

李振海<sup>1, 2</sup>, 杨贵军<sup>1, 2\*</sup>, 王纪华<sup>3</sup>, 徐新刚<sup>1, 2</sup>, 宋晓宇<sup>1, 2</sup>

(1. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097; 2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097;

3. 北京农业质量标准与检测技术研究中心, 北京 100097)

**摘要:**【目的】梳理目前作物籽粒蛋白质含量遥感监测预报研究进展, 掌握最新该方面的研究方法、技术等。为发展优质专用谷物并依据以蛋白质含量为主导的不同类型谷物分类收获和加工探明发展道路。【方法】通过收集国内外籽粒蛋白质含量遥感监测预测研究文献, 整理、分析及归纳当前研究内容, 综述前人研究等方法。【结果】概述了3种常规的作物籽粒蛋白质含量检测方法, 包括常规的室内分析化学法、近红外分析方法及遥感技术预测方法; 介绍了植物碳氮代谢过程与籽粒蛋白质含量形成机理以及作物籽粒蛋白质遥感预测的可行性; 然后归纳了4类作物籽粒蛋白质含量遥感监测预测等方法, 分别为基于‘遥感信息—籽粒蛋白质含量’模式的经验模型、基于‘遥感信息—农学参数—籽粒蛋白质含量’模式的定量模型、基于遥感数据和生态因子的籽粒蛋白质含量半机理模型、基于遥感信息和作物生长模型结合的机理解释模型, 并分别综述了这4类预测模型的国内外研究进展。【结论】明确了当前在籽粒蛋白质含量遥感预测中存在的问题及进一步解决的对策。

**关键词:** 作物; 籽粒蛋白质含量; 遥感; 监测预报

DOI: 10.12105/j.issn.1672-0423.20180105

## 0 引言

近年来, 随着我国作物总产量的增加和人民生活水平的不断提高, 在追求高产的同时, 对作物品质的关注也日益增加。以小麦为例, 中国是唯一小麦年总产量超过1亿t的国家, 2014年和2015年国内小麦年总产量分别达到1.26亿t和1.30亿t, 位居世界第一(国家统计局)。但是, 我国粮食却呈现出生产量、出口量、库存量“三量齐增”的问题, 优质小麦需求持续增长, 农业大而不强、多而不优的问题更加突出(中国粮油信息网)。中共中央、国务院印发的《2014年中央一号文件》和《2015年中央一号文件》中对粮食问题分别提出“在重视粮食数量的同时, 更加注重品质和质量安全”、“稳粮增

收稿日期: 2018-01-21

第一作者简介: 李振海(1989—), 男, 汉族, 山东东营人, 博士、助理研究员。研究方向: 农业遥感与信息技术, E-mail: lizh323@126.com

\* 通信作者简介: 杨贵军(1975—), 男, 汉族, 河北保定人, 博士、研究员, 北京农业信息技术研究中心遥感技术部主任。研究方向: 农业定量遥感, Email: yanggj@nrcita.org.cn

\* 项目基金: 国家自然科学基金项目“DSSAT模型结合遥感数据同化和气象预报的冬小麦品质预报机理研究”(41701375); 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目“多平台高光谱遥感信息融合的作物养分精准诊断决策”(61661136003); 国家重点研发计划“小麦品质卫星遥感监测与预测”(2016YFD0300603-5)

2018年2月

收、提质增效、创新驱动”的总体要求。2016年，中共中央、国务院在《关于深入推进农业供给侧结构性改革》着重提到“增加产量与提升品质”、“优化产业结构，着力推进农业提质增效”、“重点发展优质稻米和强筋弱筋小麦”、“实施优势特色农业提质增效行动计划”等一系列提高农业供给质量的发展要求。纵观国内小麦市场需求，一方面小麦生产已基本满足国内市场需求，且局部地区丰年有余；另一方面小麦生产的品种结构性矛盾突出，优质小麦供不应求并依赖国外进口。在国家标准（GB/T 1732—1998）中，（粗）蛋白质含量是谷物籽粒品质评价的一项关键指标，相比于国外谷物，中国的谷物粒蛋白质含量还不够稳定（国家标准网）。因此，发展优质专用谷物并依据以蛋白质含量为主导的不同类型谷物分类收获和加工是实现谷物产业化提质增效的必经之路。

## 1 作物籽粒蛋白质含量检测方法

传统的籽粒蛋白质含量检测主要采用常规的室内分析化学法，代表性的方法是凯氏定氮法和  $H_2SO_4-H_2O_2$  比色法。通过作物灌浆期或者成熟期选取一定的籽粒样品，主要对籽粒中的氮素含量进行测定，最后通过种子中氮素与蛋白质之间的换算系数（表1）计算得到籽粒蛋白质含量结果。分析化学方法耗时费力，且成本较高，破坏性的点状取样无法用于大面积籽粒蛋白质监测，并且多是在小麦成熟后才能检测，无法指导生产和实现蛋白质含量预报。20世纪80年代，随着光谱技术的发展，利用近红外分析方法进行谷物品质快速无损检测得到了广泛的应用。与传统生化分析不同，近红外分析方法只需要一系列待测籽粒样品，然后运用现代统计学的算法，建立近红外光谱参数与样品待测成分之间的校准曲线<sup>[1]</sup>。近红外分析方法因实现样品无损检测，相对快捷，成本较低等优势，已被世界谷物科技协会标准（ICC No.159 和 ICC No.202）和美国谷物化学协会标准（AAC-C No.39-00）列为世界公认标准<sup>[2]</sup>。但与室内生化分析法相同，都是点状取样，无法应用于大面积谷物籽粒蛋白质监测，并且都是在小麦成熟后才能检测，无法指导生产和实现蛋白质含量预报。

表1 种子中N与蛋白换算系数

Table 1 Conversion coefficient of Nitrogen and Protein in seed

种子	换算系数	种子	换算系数
麦、豆类	5.7	大豆	6.25
水稻	5.95	其他谷类	6.25
高粱	5.83		

遥感技术作为目前唯一能够在较大范围内实现快速瞬时获取空间连续地表信息的手段，对于发展高产高效和环境友好型现代农业的重要性已被普遍认可<sup>[3-5]</sup>。国内外基于氮素运转规律对小麦籽粒蛋白质形成过程实时监测预报进行了探索性研究和初步应用。

## 2 作物籽粒蛋白质形成及遥感预测机理

### 2.1 植物碳氮代谢过程与籽粒蛋白质含量形成机理

籽粒蛋白质含量是籽粒氮累计与籽粒碳累计综合作用的结果。植物吸收利用的氮素主要是铵态氮 ( $\text{NO}_3^-$ ) 和硝态氮 ( $\text{NH}_4^+$ )。植物吸收的  $\text{NO}_3^-$  首先在硝酸还原酶和亚硝酸还原酶的作用下还原为  $\text{NH}_4^+$ ，然后进行  $\text{NH}_4^+$  的代谢转运； $\text{NH}_4^+$  在根细胞中首先在谷氨酰胺合成酶、谷氨酸合成酶以及氨基酸转移酶的一系列作用下形成氨基酸，氨基酸在各种酶的作用下进一步合成植物所需要的蛋白质、核酸、核苷酸、色素和其他多种含氮化合物 (图 1)。作物籽粒中的蛋白质形成主要与开花期后氮素的运转有关，在籽粒氮素累计过程中，氮素的主要来源包括两部分：一部分是开花前存储于植株地上部器官的氮化物再转运，约占籽粒总氮量的 70%~80%；另一部分是开花后植株对土壤氮的再吸收，约占籽粒总氮量的 20%~30%<sup>[6-8]</sup>。

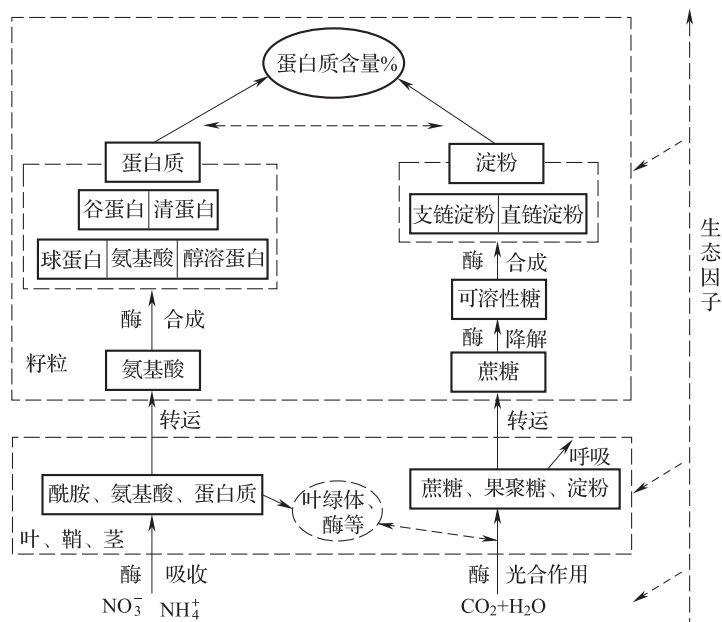


图 1 植物碳氮代谢过程与籽粒蛋白质含量形成机理

Fig.1 Mechanism of Carbon and Nitrogen metabolic process and formation of grain protein content in plant

植物碳水化合物的形成主要通过光合作用，在蔗糖磷酸合成酶等酶的催化下，将  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  合成蔗糖 (或其他形式的葡萄糖)，存储于叶片的液泡内，也可存储于茎鞘中。作物籽粒中的碳累计主要以淀粉累计为主，其主要来源同样包括两部分：大部分是开花后绿色器官光合作用制造并转运到籽粒中，小部分是开花前存储于植株中的非结构形态碳水化合物以蔗糖的形式向籽粒转运。在蔗糖降解酶的作用下，分解为可溶性糖，其中一部分在可溶性淀粉合成酶的催化下合成支链淀粉，另一部分在淀粉粒结合态淀粉合成酶的催化下合成直链淀粉<sup>[7]</sup>。

2018年2月

灌浆期间,由于籽粒蛋白质与淀粉的合成速率不一致,籽粒蛋白质含量总体表现为“高一低一高”的V字形动态变化趋势,即灌浆初期蛋白质含量较高;伴随着籽粒灌浆过程进行,光合产物向籽粒大量输入,淀粉的合成速率快于蛋白质合成速率,蛋白质含量很快下降;随着籽粒成熟,籽粒粒重增长缓慢,蛋白质含量有所回升<sup>[6]</sup>。

## 2.2 作物籽粒蛋白质含量遥感预测可行性

遥感技术是利用地物在不同波段具有不同的波谱特征进行地物识别,植物的反射率光谱曲线具有区别于其他地物的典型的光谱特征:在绿光波段550nm附近具有叶绿素的强反射峰;在红光波段670~680nm处则产生叶绿素的强吸收谷,反射率最低;随后在700~780nm处出现叶绿素在红波段的强吸收到近红外波段多次散射形成的高反射平台过渡波段,又称为植被反射率“红边”,具有指示植被营养、长势、水分、叶面积等的特征;近红外波段780~1350nm处出现高反射平台现象,是与叶片内部结构有关的光谱曲线特征。由于作物在不同生长阶段内其组分含量与群体结构的差异导致光谱曲线特征不同,因此利用植物反射率可以用于作物的长势及营养监测。根据2.1介绍,籽粒蛋白质形成与植物碳氮代谢的合成与转运密切相关,通过运用遥感技术监测作物长势及营养状况,从而实现作物蛋白质含量预测具有可行性<sup>[5-7]</sup>。

## 3 作物籽粒蛋白质含量遥感监测预报进展

当前,针对作物籽粒蛋白质含量遥感预测已经开展了一些研究工作,并构建了一系列的模型与方法,依据模型特点主要概括为以下4类。

### 3.1 基于‘遥感信息—籽粒蛋白质含量’模式的经验模型

该模式通过分析作物关键生育时期遥感信息(敏感波段、植被指数、红边参数等光谱特征)直接构建籽粒蛋白质含量的统计经验模型。Hansen等<sup>[9]</sup>和王纪华等<sup>[10]</sup>在前期的模型构建中通过选择与籽粒蛋白质含量敏感的波段进行模型构建。由于单一波段冠层反射率估测存在不确定性,后续的研究过程中基于植被指数或者光谱特征信息在不同生育时期构建了大量的籽粒蛋白质含量预测模型<sup>[11-16]</sup>。

在关键生育时期选择上,以开花期或者灌浆期构建的模型较多,基于不同植被指数或光谱参量构建了大量的籽粒蛋白质含量模型<sup>[12-14]</sup>。另外,Song等<sup>[15]</sup>研究分析利用冬小麦挑旗期QuickBird数据计算得到的GNDVI(Green normalized difference vegetation index)与籽粒蛋白质含量的相关性较高,并构建GNDVI模型进行籽粒蛋白质含量监测;薛利红等<sup>[17]</sup>和周冬琴等<sup>[18]</sup>分析表明利用水稻孕穗期的比值植被指数[Ratio vegetation index, RVI(1 480, 870)]、归一化植被指数[Normalized difference vegetation index, NDVI(1 480, 870)]和差值植被指数[Difference vegetation index, DVI(1 500, 950)]构建的籽粒蛋白质含量监测模型具有较好的精度;田永超等<sup>[19]</sup>研究表明利用小麦抽穗后期RVI(1 220, 710)进行籽粒蛋白质含量监测精度较高。Li等<sup>[20]</sup>和Xu等<sup>[21]</sup>通过多个生育时期的关键光谱特征信息实现基于多个生育时期的籽粒蛋白质含量监测。

从模型方法构建来看,模型的构建以线型回归方法(Linear regression, LR)较多。

Pettersson 等<sup>[11]</sup>和王大成等<sup>[22]</sup>通过多元线性回归 (Multiple linear regression, MLR) 方法分别实现大麦和冬小麦的遥感监测; Hansen 等<sup>[9]</sup>、Jin 等<sup>[16]</sup>、Li 等<sup>[20]</sup>和王妍等<sup>[23]</sup>尝试利用偏最小二乘算法 (Partial least squares, PLS) 进行籽粒蛋白质含量模型构建; 另外, Xu 等<sup>[21]</sup>采用最优组合法 (Optimal combination, OC) 实现冬小麦籽粒蛋白质含量监测。综上, 基于该模式的籽粒蛋白质预测模型研究较多, 操作简单且易实现, 虽然模型具有较好的相关性, 但机理性解释性不强, 在区域间及年际间扩展应用时, 容易产生较大的偏差。

### 3.2 基于‘遥感信息—农学参数—籽粒蛋白质含量’模式的定量模型

该模式主要根据遥感信息与关键生育时期农学参数的定量关系以及农学参数与籽粒蛋白质含量的定量关系, 建立‘遥感信息—农学参数—籽粒蛋白质含量’模式的籽粒蛋白质含量预测。Wang 等<sup>[24]</sup>、Xue 等<sup>[25]</sup>和李映雪等<sup>[26]</sup>通过建立叶片含氮量与籽粒蛋白质含量模型, 然后耦合较优光谱参量, 实现籽粒蛋白质预测。Huang 等<sup>[27]</sup>以植株总氮含量作为农学参数进行光谱特征与籽粒蛋白质含量的链接参数。陈鹏飞等<sup>[28]</sup>引入反映作物氮素营养状况的氮素营养指数 (Nitrogen nutrition index, NNI), 并基于遥感参数 -NNI- 籽粒蛋白质含量估测蛋白质含量。Lu 等<sup>[29]</sup>考虑混合光谱的因素, 针对穗层光谱及穗层氮素含量进行分析, 研究表明利用开花期穗层光谱—穗全氮含量—籽粒蛋白质含量之间耦合进行籽粒蛋白质模型构建, 效果较理想。肖春华等<sup>[30]</sup>根据不同叶层光谱特征参量与冠层氮素分布、籽粒蛋白质含量的定量关系, 建立了叶层比值植被指数梯度—叶层氮素含量梯度—籽粒蛋白质含量的反演模型。基于该模式的籽粒蛋白质预测模型分析了农学参数与籽粒蛋白质含量的定量关系, 机理性解释性较前者有所提高, 但构建的农学参数与籽粒蛋白质含量模型仅仅停留在线性模型构建, 而籽粒蛋白质是一个比较复杂的性状, 既受到品种本身遗传控制, 更受到环境条件的影响<sup>[31]</sup>。因此, 有必要综合考虑其他因素的影响, 实现籽粒蛋白质含量的综合预报。

### 3.3 基于遥感数据和生态因子的籽粒蛋白质含量半机理模型

针对籽粒蛋白质含量遥感预测年际扩展和空间转移差的问题, 研究者尝试对籽粒氮素运转原理进行模拟, 并且加入生态因子实现年际与空间差异的校正。Guasconi 等<sup>[32]</sup>和 Orlandini 等<sup>[33]</sup>研究表明降水量与蛋白质含量的关系为负相关, 而温度与籽粒蛋白质含量的关系为正相关, 利用气象数据与 NDVI 进行大面积籽粒蛋白质监测具有可行性。王大成等<sup>[22]</sup>综合利用遥感数据和生态因子构建籽粒蛋白质含量经验模型, 研究表明结合遥感数据和生态因子的监测结果比单独利用遥感数据或单独利用生态因子的精度高。李卫国等<sup>[34]</sup>结合小麦灌浆期间气候环境条件和土壤条件对籽粒蛋白质含量形成的影响机制, 建立基于 NDVI 和籽粒氮素累计生理生态过程的籽粒蛋白质含量预测模型。李振海等<sup>[35]</sup>通过分析籽粒氮素累积量的两个主要来源及其之间的比例关系, 重点抓住开花期前植株氮素累计量再转运这一主要来源, 构建氮素运转机理简化模型, 并且考虑温度影响因子对籽粒氮素运转的影响, 最后耦合叶片含氮量的遥感反演模型, 实现籽粒蛋白质含量预测。Pan 等<sup>[36]</sup>以灌浆初期为初始模拟时间, 根据碳氮代谢原理及外界因子 (包括环境因子、土壤因子和营养状况) 的影响进行以天为步长的蛋白质形成模拟, 模型未涉及与遥感数

2018年2月

据的耦合,但模型机理性较强,具有较好的借鉴性。该模式考虑氮素运转机理和生态因子对籽粒蛋白质含量的影响,有一定的机理性,年际扩展性和空间转移性有所改善,但该模式或者以线型回归模型的某一个自变量,或者某一段生育时期内某一个生态因子作为权重因子进行建模,模型的构建过于简单,考虑的生态因子也比较少,有必要对该项研究进行深一步的探索研究。

### 3.4 基于遥感信息和作物生长模型结合的机理解释模型

通过遥感信息和作物生长模型耦合的同化方法,调整模型模拟变量与遥感观测值的误差达到最小以调整作物模型的初始参数和状态变量,进而实现最终作物籽粒蛋白质含量的预测。Li等<sup>[37]</sup>尝试以植株氮素累积量(Plant nitrogen accumulation, PNA)作为状态变量,采用粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO)耦合遥感数据和DSSAT模型实现冬小麦籽粒蛋白质含量的预测。另外, Li等<sup>[38]</sup>在此基础上对比叶面积指数(Leaf area index, LAI)和PNA分别作为状态变量以及LAI+PNA作为状态变量进行籽粒蛋白质含量预测的研究,结果表明LAI+PNA作为状态变量具有更加的预测精度。该模式综合考虑籽粒蛋白质形成过程中各种生态因子的影响,具有较强的机理性,但该研究还处于初步探索阶段,研究者较少,采用的同化策略单一,并且还仅仅停留在田块尺度籽粒蛋白质含量预报研究,区域尺度同化方法进行籽粒蛋白质含量预报还有待于进一步尝试。

## 4 问题与展望

近年来,国内外针对作物籽粒蛋白质含量遥感监测的研究开展了多种方式的尝试并取得了一定的进展与成果,但是从籽粒蛋白质遥感监测预报的精度、时空扩展性、机理性及实用性角度来看,仍需要更深入的研究。总结存在的问题及对策如下。

### 4.1 预测模型的机理性有待加强

综述当前对籽粒蛋白质含量遥感预测模型,虽然研究者尝试着采用不同的方法实现作物籽粒蛋白质含量的预测,但是多数研究都是以经验模型为主,缺乏对籽粒氮素运转与籽粒蛋白质合成机理与遥感信息的深度融合。作物生长模型从作物氮素循环机理进行作物生长模拟,并尝试利用同化方法实现遥感信息与作物生长模型的耦合,是提高模型机理性的有效手段。Li等<sup>[37-38]</sup>在该方面已有相关研究,但有必要在同化方法、空间验证等方面开展进一步研究。

### 4.2 模型的时空扩展性及普适性有待进一步研究

当前开展的大量研究在研究区进行建模过程中,都达到了较好的精度,并且在进行本研究区域及同一年际验证时也具有较好的稳定性。但是在年际扩展与区域扩展过程中,模型的稳定性还是存在一定的偏差。另外,普适性的模型还未有相关报道。由于籽粒蛋白质含量是一个综合多种生态因子(环境、土壤、管理)和作物自身特点(遗传特性)共同作用的指标,因此,在仅仅以遥感数据或者某一种生态因子构建的籽粒蛋白质模型,具有地域依赖性。这也造成了年际扩展与区域扩展过程中,其他地区模型不适合的原因。

有必要综合多源数据（气象共享数据、组网土壤传感器数据、多源遥感数据）来构建集成籽粒蛋白质预报模型。

### 4.3 作物籽粒蛋白质含量预报系统及业务化

纵观当前的预报系统，基于遥感数据、气象数据等多种基础数据的产量预报系统、病虫害预报系统等都已有一定的研究，并实现业务化及实时发布。随着人们对作物品质的关注，有必要基于现有研究成果，构建作物籽粒蛋白质含量预报系统，实现作物籽粒蛋白质含量的实时及产中预报。为谷物分类收割、分级储存等提供准确及时的数据支撑。

### 参考文献

- [1] 贵华, 林平, 京立, 等. 8611 灰分型近红外谷物分析仪在小麦质量检验中的应用. 齐鲁粮食, 2010 (12): 34~35.
- [2] 李少昆, 谭海珍, 王克如, 等. 小麦籽粒蛋白质含量遥感监测研究进展. 农业工程学报, 2009, 25 (2): 302~307.
- [3] Xue L, Cao W, Luo W, et al. Monitoring Leaf Nitrogen Status in Rice with Canopy Spectral Reflectance. *Agronomy Journal*, 2004, 96 (1): 135~142.
- [4] Gianquinto G, Orsini F, Fecondini M, et al. A methodological approach for defining spectral indices for assessing tomato nitrogen status and yield. *European Journal of Agronomy*, 2011, 35 (3): 135~143.
- [5] 李振海. 基于遥感数据和气象预报数据的 DSSAT 模型冬小麦产量和品质预报. 浙江大学, 2016.
- [6] 于振文. 作物栽培学各论. 中国农业出版社, 2013.
- [7] 王纪华, 赵春江, 黄文江. 农业定量遥感基础与应用. 北京: 科学出版社, 2008.
- [8] 陆景陵. 植物营养学. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.
- [9] Hansen P M, Jorgensen J R, Thomsen A. Predicting grain yield and protein content in winter wheat and spring barley using repeated canopy reflectance measurements and partial least squares regression. *Journal of Agricultural Science-Cambridge*, 2002, 139 (1): 61~66.
- [10] 王纪华, 黄文江, 赵春江, 等. 利用光谱反射率估算叶片生化组分和籽粒品质指标研究. 遥感学报, 2003, 7 (4): 277~284.
- [11] Pettersson C G, Söderström M, Eckersten H. Canopy reflectance, thermal stress, and apparent soil electrical conductivity as predictors of within-field variability in grain yield and grain protein of malting barley. *Precision Agriculture*, 2006, 7 (5): 343~359.
- [12] Liu L, Wang J, Bao Y, et al. Predicting winter wheat condition, grain yield and protein content using multi-temporal EnviSat-ASAR and Landsat TM satellite images. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27 (4): 737~753.
- [13] Huang W, Song X, Lamb D W, et al. Estimation of winter wheat grain crude protein content from in situ reflectance and advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer image. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2008, 2 (1): 023530-023530-13.
- [14] 冯伟, 姚霞, 田永超, 等. 小麦籽粒蛋白质含量高光谱预测模型研究. 作物学报, 2007, 33 (12): 1935~1942.
- [15] Song X, Wang J, Huang W. Winter wheat growth and grain protein uniformity monitoring through remotely sensed data// Remote Sensing. *International Society for Optics and Photonics*, 2010: 78242G-78242G-8.
- [16] Jin X, Xu X, Feng H, et al. Estimation of Grain Protein Content in Winter Wheat by Using Three Methods with Hyperspectral Data. *International Journal of Agriculture & Biology*, 2014, 16 (3) .
- [17] 薛利红, 朱艳, 张宪, 等. 利用冠层反射光谱预测小麦籽粒品质指标的研究. 作物学报, 2004, 30 (10): 1036~1041.
- [18] 周冬琴, 朱艳, 姚霞, 等. 基于水稻冠层光谱特征构建粳型水稻籽粒蛋白质含量预测模型. 作物学报, 2007, 33 (8): 1219~1225.
- [19] 田永超, 朱艳, 曹卫星, 等. 利用冠层反射光谱和叶片 SPAD 值预测小麦籽粒蛋白质和淀粉的积累. 中国农业科学, 2004, 37 (6): 808~813.
- [20] Li C, Wang Q, Wang J, et al. Wheat Grain Protein Content Estimation Based on Multi-temporal Remote Sensing Data and Generalized Regression Neural Network//Computer and Computing Technologies in Agriculture V. Springer Berlin

2018年2月

- Heidelberg, 2011: 381~389.
- [ 21 ] Xu X, Yang X, Yang H, et al. Using hyperspectral measurements to estimate ratio of leaf carbon to nitrogen in winter wheat//Agro-geoinformatics (Agro-geoinformatics 2014), Third International Conference on. IEEE, 2014: 1~4.
- [ 22 ] 王大成, 张东彦, 李宇飞, 等. 结合 HJ1A/B 卫星数据和生态因子的籽粒品质监测. 红外与激光工程, 2013, 42 (3): 780~786.
- [ 23 ] 王妍, 徐新刚, 郭文善, 等. 基于氮素叶绿素关系的冬小麦籽粒蛋白质含量高光谱反演. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2013, 31 (6): 6~12.
- [ 24 ] Wang Z J, Wang J H, Liu L Y, et al. Prediction of grain protein content in winter wheat (Triticum aestivum L.) using plant pigment ratio (PPR). *Field Crops Research*, 2004, 90 (2): 311~321.
- [ 25 ] Xue L H, Cao W X, Yang L Z. Predicting Grain Yield and Protein Content in Winter Wheat at Different N Supply Levels Using Canopy Reflectance Spectra. *Pedosphere*, 2007, 17 (5): 646~653.
- [ 26 ] 李映雪, 朱艳, 田永超, 等. 小麦冠层反射光谱与籽粒蛋白质含量及相关品质指标的定量关系. 中国农业科学, 2005 (7): 1332~1338.
- [ 27 ] Huang W, Wang J, Liu L, et al. Study on grain quality forecasting method and indicators by using hyperspectral data in wheat//Fourth International Asia-Pacific Environmental Remote Sensing Symposium 2004: Remote Sensing of the Atmosphere, Ocean, Environment, and Space. International Society for Optics and Photonics, 2005: 291~300.
- [ 28 ] 陈鹏飞, 王吉顺, 潘鹏, 等. 基于氮素营养指数的冬小麦籽粒蛋白质含量遥感反演. 农业工程学报, 2011, 27 (9): 75~80.
- [ 29 ] Lu Y, Li S, Xie R, et al. Estimating wheat grain protein content from ground-based hyperspectral data using a improved detecting method//Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS' 05. Proceedings. 2005 IEEE International. IEEE, 2005, 3: 1871~1874.
- [ 30 ] 肖春华, 李少昆, 卢艳丽, 等. 基于冠层平行平面光谱特征的冬小麦籽粒蛋白质含量预测. 作物学报, 2007, 33 (9): 1468~1473.
- [ 31 ] 曹卫星, 姜东, 郭文善, 等. 小麦品质生理生态及调优技术. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [ 32 ] Guasconi F, Dalla M A, Grifoni D, et al. Influence of climate on durum wheat production and use of remote sensing and weather data to predict quality and quantity of harvests. *Italian Journal of Agrometeorology*, 2011, 16 (3): 21~28.
- [ 33 ] Orlandini S, Mancini M, Grifoni D, et al. Integration of meteo-climatic and remote sensing information for the analysis of durum wheat quality in Val d' Orcia (Italy). *Idojaras*, 2011, 115 (4): 233~245.
- [ 34 ] 李卫国, 王纪华, 赵春江, 等. 基于 NDVI 和氮素积累的冬小麦籽粒蛋白质含量预测模型. 遥感学报, 2008, 12 (3): 506~514.
- [ 35 ] 李振海, 徐新刚, 金秀良, 等. 基于氮素运转原理和 GRA-PLS 算法的冬小麦籽粒蛋白质含量遥感预测. 中国农业科学, 2014, 47 (19): 3780~3790.
- [ 36 ] Pan J, Zhu Y, Jiang D, et al. Modeling plant nitrogen uptake and grain nitrogen accumulation in wheat. *Field Crops Research*, 2006, 97 (2): 322~336.
- [ 37 ] Li Z, Jin X, Zhao C, et al. Estimating wheat yield and quality by coupling the DSSAT-CERES model and proximal remote sensing. *European Journal of Agronomy*, 2015, 71: 53~62.
- [ 38 ] Li Z, Wang J, Xu X, et al. Assimilation of Two Variables Derived from Hyperspectral Data into the DSSAT-CERES Model for Grain Yield and Quality Estimation. *Remote Sensing*, 2015, 7 (9): 12400~12418.



## Remote sensing of grain protein content in cereal: a review

Li Zhenhai<sup>1, 2</sup>, Yang Guijun<sup>1, 2\*</sup>, Wang Jihua<sup>3</sup>, Xu Xingang<sup>1, 2</sup>, Song Xiaoyu<sup>1, 2</sup>

(1. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097; 2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097; 3. Beijing Research Center for Agri-Food Testing and Farmland Monitoring, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097)

**Abstract:** [ **Purpose** ] Developing special and high-quality wheat is the only way to achieve quality-efficiency in wheat industrialization. Grain protein content ( GPC ) is an important factor for grain quality in wheat. Remote sensing technology with advantages of instantaneous and spatial continuity has become an effective approach to estimating crop quality across wide regions. [ **Method** ] In this study, GPC test methods, including lab analytical chemical method, near-infrared analytical method and remote sensed predicting method, were introduced first. [ **Result** ] The feasibility of GPC prediction by remote sensing was studied based on the nitrogen translocation theory, the mechanism of grain protein formation and relationship among canopy biophysical and biochemical parameters and spectral features. Remote sensing prediction of cereal GPC was emphatically reviewed from four inductive methods, including the remote sensing to GPC method ( RS-GPC ), the RS to agricultural variables then to GPC method ( RS-AgriVar-GPC ), Semi-physical method and physical method. [ **Conclusion** ] Finally, the difficulties of cereal GPC monitoring and predicting were analyzed, and the possible solutions were discussed.

**Keywords:** cereal; grain protein content; remote sensing; monitoring and forecasting