

江苏省农学会团体标准

《水稻蛋白质含量无人机光谱遥感监测技术规程》

(征求意见稿) 编制说明

一、目的意义

简述行业（或产业）发展现状（标准制定的背景），制定该团体标准的必要性和可行性，预期经济、社会、生态、安全等效益分析。

随着农业数字化转型加速，水稻产业亟需高效精准的智能技术支持品质提升与品种选育。无人机光谱技术融合遥感与人工智能，可实现对水稻生长参数、品质性状及抗逆性的无损动态监测，为精准农业和遗传育种提供革命性工具。然而，国内缺乏统一技术标准，导致数据采集规范、算法模型及品种评价体系差异显著，制约技术规模化推广与跨区域协作。制定《水稻蛋白质含量无人机光谱遥感监测技术规程》，旨在建立标准化操作体系，解决行业技术应用碎片化、数据可比性不足等关键问题，推动技术成果产业化应用。

当前水稻品质监测主要依赖传统人工方式，存在效率低、覆盖面有限等瓶颈；而种业振兴与粮食安全战略对优质品种选育的时效性和精准性提出更高要求。本标准的制定具备坚实技术基础：国内科研机构已积累丰富的高光谱水稻表型研究经验，相关算法模型持续优化；轻量化高光谱设备及无人机平台的国产化进程显著降低了技术应用门槛；多地试点实践验证了该技术在缩短育种周期、提升监测精度方面的有效性。

本规程旨在建立基于无人机高光谱技术的标准化解决方案，通过规范田间光谱数据采集、蛋白质含量反演模型构建及品种筛选决策流程，实现两大核心目标：

（1）利用高光谱成像技术捕获水稻冠层光谱特征，结合机器学习算法建立非破坏性监测体系，将复杂耗时的实验室检测转化为高效田间原位评估；（2）为水稻育种提供快速筛查工具，加速高蛋白优质品种选育进程；同时支撑农业生产精准管理，优化水肥调控与收获决策，服务稻米品质分级与价值提升。

本标准的实施将产生多维度效益：经济效益方面，显著降低监测成本，提升

种质资源筛选效率，增强优质稻米市场竞争力；社会效益方面，为基层农业技术推广提供标准化工具，促进产学研协同与专业人才培养；生态效益方面，通过精准农艺管理减少化肥农药施用，优化水资源配置；安全效益方面，强化对病虫害及环境胁迫的早期预警能力，保障粮食安全生产。通过构建“技术研发-标准应用-产业升级”的闭环体系，本标准将为推动水稻种业创新和农业高质量发展提供重要技术规范支撑。本标准的推广将显著驱动产业转型升级：在育种领域，实现育种材料蛋白质含量的无损筛查，大幅缩短优质食味稻选育周期；在生产领域，通过生育期蛋白质动态监测指导科学管理，降低资源投入成本，强化江苏地区水稻品牌竞争力。此外，规程为稻谷收储优质优价机制提供客观依据，促进产业链各环节协同增效。

二、任务来源

本团队承担了江苏省重点研发计划（现代农业）“太湖稻优异基因资源高通量智能化精准鉴定技术与平台构建(BE2022335)”的任务“太湖稻重要性状智能化精准鉴定技术及表型组构建”，旨在明确江苏省主栽水稻品种间蛋白质含量性状差异及其与无人机光谱信息的关系，筛选出具有高蛋白质水稻品种。

根据2025年2月19日江苏省农学会下达的《关于征集2025年江苏省农学会团体标准（第二批）立项公告（苏农学字[2025]34号）》，批准《水稻蛋白质含量无人机光谱遥感监测技术规程》立项。

三、起草单位和起草人员信息及分工

本文件起草单位为扬州大学、靖江市农业科学技术推广中心、苏州市农业科学院。

起草人员信息及分工如下表所示：

姓名	单位	职称	分工
孙成明	扬州大学	教授	起草文件
孙乾	扬州大学	讲师	修改完善
陆桂清	靖江市农业科学技术推广中心	高级农艺师	试验示范
严长杰	扬州大学	教授	技术论证
刘涛	扬州大学	教授	试验示范

乔中英	苏州市农业科学院	研究员	修改完善
杨宜豪	扬州大学	副教授	试验示范

四、编制过程（需根据标准制定程序各阶段的进展不断补充，直到报批为止）

（一）资料收集

成立标准制定小组，保证人员稳定，明确分工，分清责任。起草小组全面收集了现有农业无人机遥感、光谱成像技术、水稻蛋白质含量监测以及水稻品种识别、分类及筛选方法等方面的相关文献资料。通过对现有资料的全面分析，了解国内外相关研究进展和技术现状，初步搭起标准体系框架。

（二）实地调研

起草小组对江苏省多个水稻种植基地、农业科研院所及技术推广单位进行了实地考察，全面了解目前水稻的栽培技术和模式，分析各地区水稻种植的经济效益、区域特点以及技术创新点等，并与水稻种植大户、专业合作社技术负责人、育种专家以及农业技术推广人员等就本标准的实践可行性进行了深入交流与沟通。

（三）试验验证

起草小组在资料收集与实地调研的基础上，精心设计并开展了专项试验验证工作。试验的目标在于系统性地优化无人机光谱遥感技术应用于水稻蛋白质含量监测与品种筛选的关键参数与模型变量。

（四）技术论证

起草小组进一步遴选代表性科研基地与规模化农场作为本标准技术示范基地，严格按标准草案要求，统一开展无人机光谱数据采集、处理及模型应用全流程操作，确保技术规范落地执行。实时监测并记录核心环节技术指标监测与验证，基于示范周期数据，形成技术实施评估报告，重点量化其经济效益、技术效益、社会效益。

（五）草拟文本

在上述工作基础上，起草小组起草了本标准文本，并对其不断完善。

（六）征求意见

面向社会广泛征求意见，邀请领域专家进行标准的技术审查。根据社会和专

家意见，修改、完善本标准文本。

五、主要内容及技术指标确立依据（重点内容）

简述标准的主要内容以及重要技术内容（或要求）确定的依据，包括理论依据、数据依据、试验验证依据或实践依据等。

（一）主要内容

本标准针对江苏省水稻品质育种中蛋白质含量传统检测方法效率低、破坏性强、难以实现品种大规模快速筛选的产业瓶颈，系统规范了基于无人机光谱遥感技术的水稻籽粒蛋白质含量无损监测与品种筛选全流程。核心内容包括：

（1）光谱数据采集规范：明确无人机飞行参数（高度、速度、光照条件）、传感器校准要求及冠层图像采集时段；

（2）植被指数构建：筛选与水稻蛋白质含量强相关的敏感波段组合，建立植被指数；

（3）蛋白质含量估测模型：开发基于机器学习算法的水稻蛋白质定量反演模型；

（4）品种筛选阈值：依据优质稻品种蛋白质含量区间，制定分级评价方法。

（二）技术指标确立依据

（1）理论依据

水稻籽粒蛋白质含量与冠层光谱反射率呈显著相关，说明籽粒蛋白质含量在冠层光谱中具有特异性响应。在 419–510nm 和 610–709nm 波段范围内，籽粒蛋白质含量与光谱反射率呈现负相关，在 623–706nm 范围内呈现极显著负相关，在 684nm 处达到最大值 ($r=-0.754$)。在 726–943nm 范围内呈现正相关，在 730–939nm 范围内呈现极显著正相关，在 755nm 处达到最大值 ($r=0.901$)。红光波段(623–706 nm)为叶绿素吸收峰，近红外波段(730–939 nm)反映水稻冠层结构，二者组合可表征蛋白质积累潜力。据此确立以红光波段-近红外波段组合植被指数为核心参数，选择对籽粒品质敏感的植被指数。

水稻籽粒蛋白质含量与叶片冠层光谱反射率相关性曲线

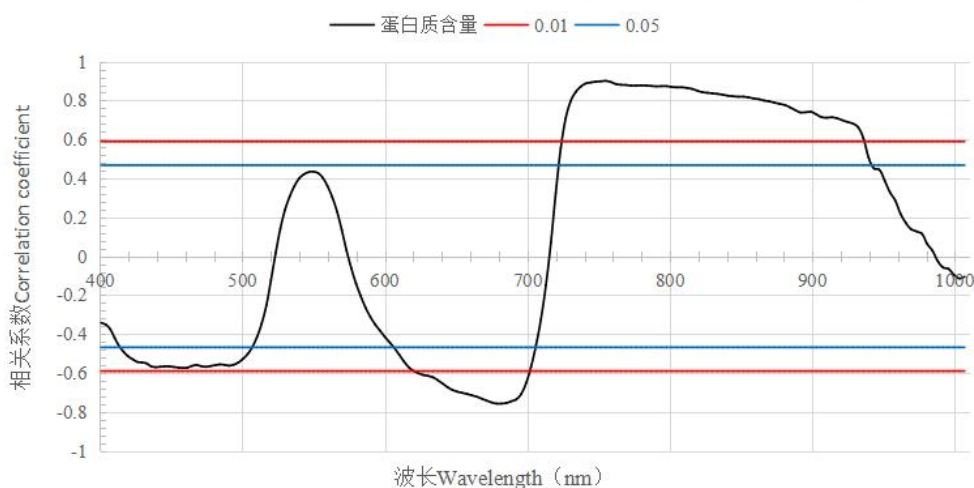


图 1 水稻蛋白质含量与原始冠层光谱的相关性曲线

高维光谱数据需通过特征降维解决共线性问题，采用构建植被指数的方法降低高光谱数据的光谱维度，筛选对籽粒品质敏感的植被指数。为了提高模型的估测精度，选取相关系数绝对值相对较大的前 4 种植被指数进行籽粒蛋白质含量模型构建，分别是 VOG2、MSAVI、DVI 和 TVI。

表 1 水稻蛋白质含量与植被指数的相关性分析

编号	植被指数	相关系数	编号	植被指数	相关系数
1	TCARI	0.684**	8	RVI	0.727**
2	VOG2	-0.847**	9	NDVI	0.727**
3	EVI	0.749**	10	DVI	0.768**
4	OSAVI	0.748**	11	RDVI	0.758**
5	MSAVI	0.761**	12	TVI	0.766**
6	GNDVI	0.466	13	MSR	0.728**
7	PSRI	-0.660**	14	SAVI	0.758**

注：**表示在 0.01 水平（双尾），相关性显著；*表示在 0.05 水平（双尾），相关性显著。

(2) 数据依据

依托 2022 和 2023 年在江苏省扬州市扬州大学蒋王试验基地和江苏省镇江市新民洲扬大农学院特色稻米研发与绿色生产示范基地大规模水稻田间试验。

试验 1: 2022 年 5 月 24 日在育秧田播种进行育秧，于 2022 年 6 月 23 日进行大田移栽，每穴 3 株，小区面积 $3 \times 3 = 9\text{m}^2$ ，每个小区种植 10 行，行距 30 厘米

左右，共 16 个小区。

表 2 水稻试验 1 供试品种信息

编号	品种	密度 (万株·hm ⁻²)	氮肥施用量 (kg·hm ⁻²)	编号	品种	密度 (万株·hm ⁻²)	氮肥施用量 (kg·hm ⁻²)
1	扬农稻 1 号	300	0	9	Y 两优 900	300	0
2	扬农稻 1 号	300	120	10	Y 两优 900	300	120
3	扬农稻 1 号	300	240	11	Y 两优 900	300	240
4	扬农稻 1 号	300	360	12	Y 两优 900	300	360
5	绣占 15	300	0	13	扬稻 6 号	300	0
6	绣占 15	300	120	14	扬稻 6 号	300	120
7	绣占 15	300	240	15	扬稻 6 号	300	240
8	绣占 15	300	360	16	扬稻 6 号	300	360

试验 2: 2023 年 5 月 21 日在育秧田播种进行育秧，于 2023 年 6 月 20 日进行大田移栽，每穴 2 株，小区面积 $2 \times 1.5 = 3\text{m}^2$ ，每个小区种植 10 行，行距 30 厘米左右，每个品种设 1 个小区，共 60 个小区。

表 3 水稻试验 2 供试品种信息

编号	品种	密度 (万株·hm ⁻²)	氮肥施用量 (kg·hm ⁻²)	编号	品种	密度 (万株·hm ⁻²)	氮肥施用量 (kg·hm ⁻²)
1	台 0206	50	60	31	武陵粳 1 号	50	60
2	台湾 65	50	60	32	盐稻 10 号	50	60
3	台湾 30	50	60	33	南粳 9108	50	60
4	台湾 50	50	60	34	泗稻 17 号	50	60
5	农垦 58	50	60	35	金香玉 1 号	50	60
6	盐丰 47	50	60	36	南粳 46	50	60
7	当粳 8 号	50	60	37	武香粳 9 号	50	60
8	皖稻 64	50	60	38	广陵香糯	50	60
9	中种香糯	50	60	39	武运粳 7 号	50	60
10	中研稻 881	50	60	40	广陵优粳	50	60
11	武育粳 3 号	50	60	41	宁粳 1 号	50	60

12	连嘉粳 1 号	50	60	42	南粳 44	50	60
13	连粳 7 号	50	60	43	武运粳 30	50	60
14	盐粳 2 号	50	60	44	宁香粳 9 号	50	60
15	镇稻 88	50	60	45	香血稻 515	50	60
16	华粳 5 号	50	60	46	武粳 15	50	60
17	淮优粳 2 号	50	60	47	武香粳 14	50	60
18	华粳 6 号	50	60	48	镇糯 19	50	60
19	连粳 4 号	50	60	49	苏御糯	50	60
20	淮稻 11 号	50	60	50	秀水 123	50	60
21	连粳 6 号	50	60	51	沪软 1212	50	60
22	南粳 5718	50	60	52	上师大 19 号	50	60
23	苏秀 867	50	60	53	秀水 110	50	60
24	徐稻 3 号	50	60	54	秀水 114	50	60
25	淮稻 5 号	50	60	55	嘉禾 218	50	60
26	泗稻 301	50	60	56	秀水 134	50	60
27	MG7200	50	60	57	嘉 58	50	60
28	盐稻 83006	50	60	58	长农粳 1 号	50	60
29	淮稻 13 号	50	60	59	苏香粳 100	50	60
30	南粳 45	50	60	60	香软玉	50	60

水稻籽粒蛋白质含量测定：将组织样品按照组织质量(g):提取液体积(mL)为 1:5~10 的比例，称取约 0.1g 组织，加入 1mL 提取液，冰浴匀浆，10000rpm，4℃ 离心 10min，取上清，即待测液。测定操作：可见分光光度计/酶标仪预热 30min，调节波长到 562nm，蒸馏水调零；工作液置于 60℃ 水浴预热 30min。采用科铭 BCA 法蛋白试剂盒来测定试验中得到的样品粉末中可溶性蛋白质含量。

无人机高光谱图像获取：利用无人机进行高光谱图像获取，搭载机载高光谱相机，可获取 400-1000nm 波段的高光谱图像。利用自带的软件进行航点规划，测量当天需要天气晴朗无云，并且光线适宜。时间段在上午十点左右，以保证太阳光照的充足和稳定，拍摄角度与地面垂直，飞行高度为 50m，风力一般不超过四级，以保证飞行的稳定性和后续图像拼接效果。在水稻拔节期、孕穗期、抽穗

期、灌浆期进行田间无人机图像获取。获取的无人机图像均为 JPG 格式。准备好提前制作的灰度梯度板依次排开，在无人机航拍结束后，使用高光谱相机采集灰度梯度板光谱，获取灰度梯度板光谱数据，后续用于拼接图像的辐射校正。

(3) 试验验证依据

基于逐步多元线性回归的蛋白质含量模型构建与验证：

利用数据集中 56 个样本作为训练集构建水稻籽粒蛋白质含量三次函数估测模型，结果如图 2 所示。基于 VOG2 的籽粒蛋白质含量估测模型的精度 $R^2=0.7472$ ，回归方程为：

$$y = 48178x^3 + 9675.6x^2 + 545.45x + 12.553$$

式中：

y——籽粒蛋白质含量，

x——VOG2 的数值。

基于 MSAVI 的籽粒蛋白质含量估测模型的精度 $R^2=0.6235$ ，回归方程为：

$$y = -309.47x^3 + 528.11x^2 - 251.56x + 39.589$$

式中：

y——籽粒蛋白质含量，

x——MSAVI 的数值。

基于 DVI 的籽粒蛋白质含量估测模型的精度 $R^2=0.6655$ ，回归方程为：

$$y = 2988.4x^3 - 1722.2x^2 + 329.08x - 17.843$$

式中：

y——籽粒蛋白质含量，

x——DVI 的数值。

基于 TVI 的籽粒蛋白质含量估测模型的精度 $R^2=0.6315$ 回归方程为：

$$y = -0.0018x^3 + 0.1649x^2 - 3.1598x + 20.263$$

式中：

y——籽粒蛋白质含量，

x——TVI 的数值。

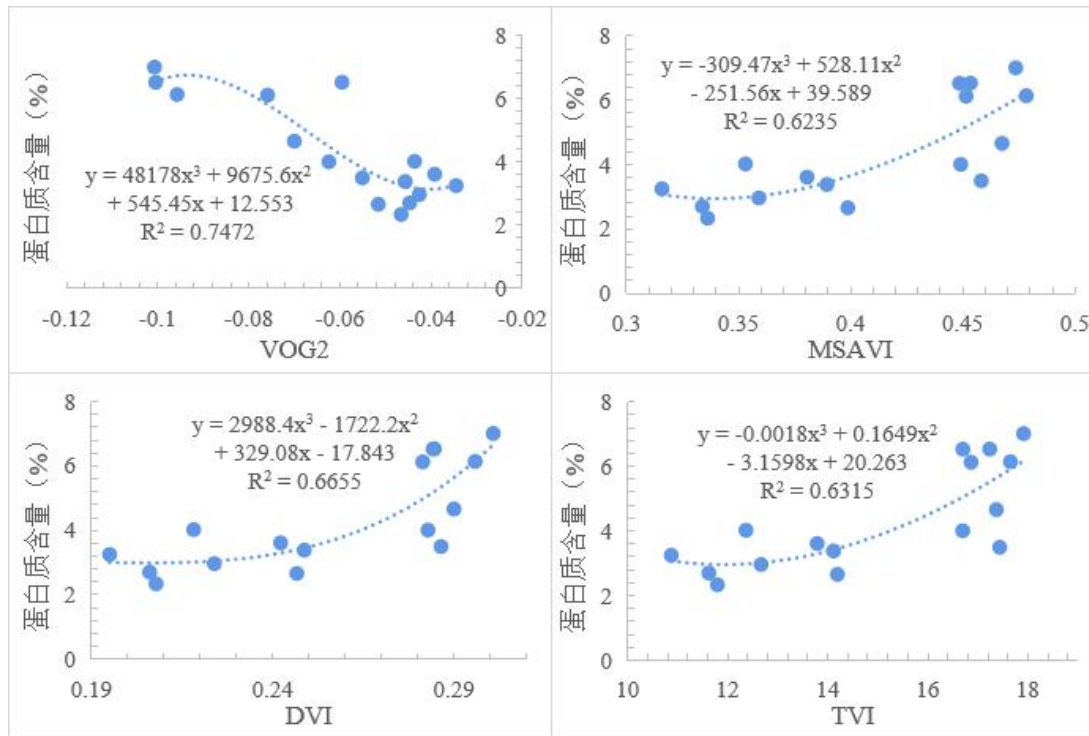


图 2 基于逐步多元线性回归估测籽粒蛋白质含量的模型

将数据集中余下的 20 个样本数据作为测试集对水稻籽粒蛋白质含量估测模型进行验证。基于 VOG2 的籽粒蛋白质含量模型验证的 R^2 为 0.7178，RMSE 为 1.0325%；基于 MSAVI 的籽粒蛋白质含量模型验证的 R^2 为 0.6187，RMSE 为 1.2459%；基于 DVI 的籽粒蛋白质含量模型验证的 R^2 为 0.6528，RMSE 为 1.1474%；基于 TVI 的籽粒蛋白质含量模型验证的 R^2 为 0.6266，RMSE 为 1.0844%。

基于 BP 神经网络的蛋白质含量模型构建与验证：

将植被指数中与籽粒蛋白质含量呈极显著相关的 VOG2、MSAVI、DVI、TVI 四种植被指数作为输入层的神经元，将籽粒蛋白质含量作为输出层的 1 个神经元，经过同样的方法得出结果如图 3 所示，训练集数据的 R^2 为 0.95163，RMSE 为 0.34926%；测试集数据的 R^2 为 0.96193，RMSE 为 0.28121%，说明基于植被指数构建的 BP 神经网络估测籽粒蛋白质含量模型的精度较高，稳定性好。

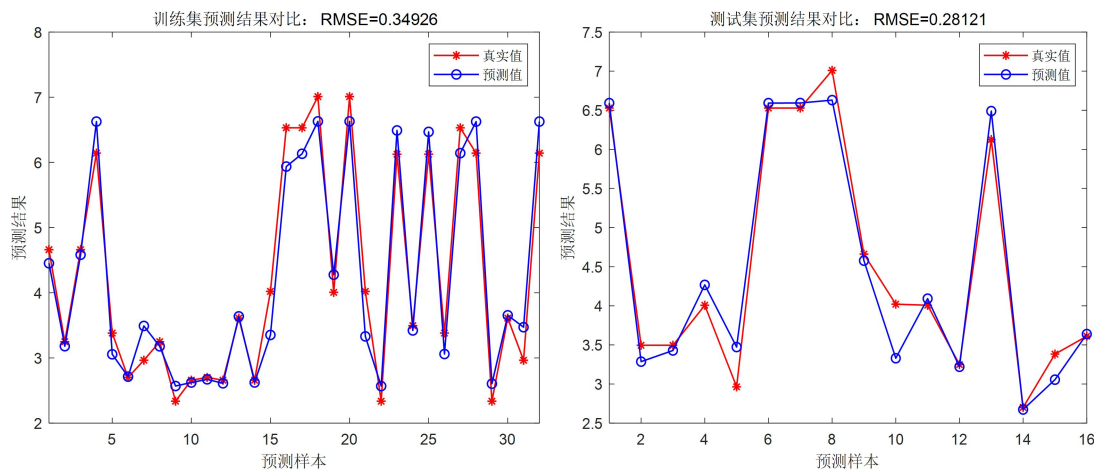


图3 基于BP神经网络估测籽粒蛋白质含量的模型

基于籽粒蛋白质含量模型的水稻品种筛选：

利用精度较高的BP神经网络估测蛋白质含量模型，以蛋白质含量>7%的阈值筛选了试验2中的60个水稻品种。共鉴定出16个高蛋白质含量水稻品种，如表4所示。华粳5号水稻蛋白质含量最高，为10.25%；盐丰47、徐稻3号和南粳5718的蛋白质含量也相对较高，分别为9.84%、9.36%和9.14%；香血稻515的蛋白质含量为7.01%。

表4 基于BP神经网络的籽粒蛋白质含量模型的水稻品种筛选

编号	品种	蛋白质含量(%)	编号	品种	蛋白质含量(%)
1	华粳5号	10.25	9	连嘉粳1号	7.71
2	盐丰47	9.84	10	盐粳2号	7.29
3	徐稻3号	9.36	11	宁香粳9号	7.27
4	南粳5718	9.14	12	秀水110	7.22
5	台湾50	7.95	13	淮优粳2号	7.19
6	苏香粳100	7.91	14	农垦58	7.16
7	南粳9108	7.79	15	苏秀867	7.12
8	皖稻64	7.78	16	香血稻515	7.01

六、与现行相关法律法规和标准的关系

本文件编制遵循“先进性、科学性、实用性、规范性”的原则，按照《中华人民共和国标准化法》和《江苏省农学会团体标准管理办法（试行）》等有关法律、法规制定。本文件涉及的肥料和农药等投入品种使用，完全符合国家有关技

术标准和有关法律法规的规定。具体环节与数据，依照目前国内外先进的理论与技术作指导，多次实践验证得出的优秀结果，并参照各地成功经验，反复修改而成。与现行法律法规、标准没有冲突关系。

七、实施推广建议

本文件适用于江苏省稻麦轮作区水稻生产。建议加强宣传贯彻力度，鼓励社会监督执行。标准颁布后，及时转发至各级农业推广部门、种植企业及生产单位和个人，做好标准的宣传工作，使种植户了解标准，自觉地执行标准。

八、团体标准涉及专利的说明

本标准不涉及专利。

九、重大分歧意见的处理过程和依据

本标准起草过程中无重大分歧。

团体标准《水稻蛋白质含量无人机光谱遥感监测技术规程》编制组

2026年4月29日