

低空无人机影像分辨率对冬小麦氮浓度反演的影响

贾丹^{1,2} 陈鹏飞^{1,3}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023)

摘要: 针对目前基于无人机遥感进行作物氮素营养诊断中缺乏规范化的标准来指导无人机应用过程中数据获取与处理的问题, 开展了不同分辨率、低空无人机影像对冬小麦植株氮浓度反演影响的研究。在小麦生长的灌浆期, 通过设置 15、30、50、80 m 共 4 种无人机飞行高度, 获取了不同分辨率下的无人机多光谱影像, 并开展地面试验, 采集冬小麦植株氮浓度信息。基于这些数据, 提取了不同分辨率下影像的光谱信息和纹理特征, 并分别建立光谱信息、纹理特征和光谱信息 + 纹理特征等反演植株氮浓度的模型。对不同情景下的模型估测效果进行比较, 结果表明, 影像分辨率在 1.00 ~ 5.69 cm 之间变化时, 影像光谱信息对小麦植株氮浓度反演影响不大, 各情景下建模结果和验证结果差异较小; 随着影像分辨率的降低, 影像纹理特征对小麦植株氮浓度反演的效果变差; 影像光谱信息 + 纹理特征信息对小麦植株氮浓度反演效果整体随着影像分辨率的提高呈增加趋势, 且其反演结果优于单一光谱特征或单一纹理特征的反演效果。

关键词: 冬小麦; 氮浓度反演; 影像分辨率; 光谱信息; 纹理特征

中图分类号: S127; S512.1⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)07-0164-06

OSID:



Effect of Low-altitude UAV Image Resolution on Inversion of Winter Wheat Nitrogen Concentration

JIA Dan^{1,2} CHEN Pengfei^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographical Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2. Chinese Academy of Sciences University, Beijing 100049, China

3. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

Abstract: In view of the lack of standardized standards in the diagnosis of crop nitrogen nutrition based on UAV remote sensing to guide the data acquisition and processing in the application of drone, low-altitude UAV images with different resolutions were used to invert the nitrogen concentration of winter wheat plants. The research on the impact would provide a reference for the formulation of relevant standards and specifications in the acquisition of UAV images. To this end, a winter wheat water and nitrogen coupling experiment was conducted to obtain wheat plants with different nitrogen nutritional status. During the filling period of wheat growth, multi-spectral images of UAV with different resolutions were obtained by setting different flying heights of drones such as 15 m, 30 m, 50 m and 80 m, and ground experiments were conducted to collect nitrogen concentration information of winter wheat plants. Based on these data, the spectral information and texture features of the images at various resolutions were extracted, and models for inverting the nitrogen concentration of plants were established, such as spectral information, texture features, and spectral information + texture features, respectively. By comparing the estimated effects of the models in different scenarios, the results showed that when the image resolution was changed between 1.00 cm and 5.69 cm, the spectral information of the image had little effect on the inversion of the nitrogen concentration of the wheat plant. The difference of modeling results and verification results in each scenario was small; the effect of image texture feature on the inversion of

收稿日期: 2019-11-05 修回日期: 2019-12-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD02015、2017YFD0201501-05)和国家自然科学基金项目(41871344)

作者简介: 贾丹(1996—), 女, 博士生, 主要从事地图学与地理信息系统和农业遥感研究, E-mail: jiad.18s@igsrr.ac.cn

通信作者: 陈鹏飞(1982—), 男, 副研究员, 主要从事农作物遥感和资源环境遥感研究, E-mail: pengfeichen@igsrr.ac.cn

wheat plant nitrogen concentration became worse as the image resolution was decreased; the image spectrum information + texture feature information on the inversion effect of wheat plant nitrogen concentration as a whole was increased with the increase of image resolution, and its inversion result was better than the inversion effect of a single spectral feature or a single texture feature.

Key words: winter wheat; nitrogen concentration inversion; image resolution; spectral information; texture feature

0 引言

氮素是作物生长发育必不可少的营养元素,对作物的光合能力、同化过程等产生重要作用^[1],植株缺氮会同时表现在外部形态和内部代谢,因此可以通过作物的生理生化参数来反映其氮素营养状况。遥感技术可用于反演作物的生理生化参数,进而可对其进行氮素营养诊断^[2-4]。目前,常用的遥感技术包括卫星遥感、载人机遥感、无人机遥感和地基遥感^[5-6]。相对于其他遥感平台,无人机遥感具有成本低^[7]、能获取高空间分辨率影像、适合田块尺度观测等优势^[8],是精准农业管理中的重要技术手段^[9]。

目前,已有不少基于无人机遥感进行作物氮素营养诊断的研究。文献[10]基于无人机遥感建立氮营养指数,对冬小麦进行氮素诊断;文献[11]基于无人机高光谱影像,通过构建诊断氮素的光谱指数反演了水稻叶片氮浓度信息;文献[12]结合无人机高光谱影像和氮素辐射传输模型,采用查找表的方法估算了冬小麦的冠层氮浓度。这些研究很好地推动了无人机技术在作物氮素营养诊断中的应用,但也存在一定的缺陷:仅利用影像的光谱信息进行作物参数反演忽略了低空无人机影像具有超高分辨率的特征,超高分辨率的影像不但含有光谱信息,还有丰富的纹理信息。纹理特征作为作物的固有属性,不易受到外界影响,反映图像灰度性质及其空间关系,扩大了原始影像亮度的空间信息辨识度,能够在一定程度上解决光谱信息反演存在的饱和问题,提升参数的反演精度^[13-14]。目前,结合光谱和纹理信息进行作物氮素营养诊断的研究报道较少。文献[15]比较了无人机影像光谱特征、纹理特征、光谱特征+纹理特征等3种不同情景对冬小麦生物量反演精度的影响,结果表明,光谱特征+纹理特征的精度优于单一纹理特征,单一纹理特征的精度又优于单一光谱特征;文献[16]研究表明,影像光谱特征+纹理特征对棉花植株氮浓度的反演精度要远优于单一光谱特征的反演。但是,影像纹理特征非常依赖于影像分辨率,上述文献并未探讨这种纹理特征究竟在何种分辨率下有效。目前,已有研究的无人机飞行高度为8~550 m^[17-19](多集中于100 m

以下),对应影像分辨率为1~20 cm,对无人机飞行高度及对应影像分辨率的选择上存在一定的随意性,缺乏统一标准规范指导,给基于无人机的作物参数反演模型技术的推广带来困难^[9]。因此,探讨不同分辨率影像对作物氮素营养诊断效果的影响,对于制定标准化影像获取规范具有重要意义。

本文通过设计冬小麦水、氮耦合试验,在获取不同氮素营养状态下小麦植株的基础上,探讨不同分辨率无人机影像光谱特征与纹理特征变化对冬小麦植株氮浓度反演的影响,为无人机遥感氮素营养诊断、飞行高度与影像分辨率的选择提供理论依据,以支撑相关标准化技术规程的制定。

1 材料与方法

1.1 田间试验

田间试验为水、氮耦合试验,布设于中国科学院禹城农业综合试验站内(东经116°34'13",北纬36°50'0")。小麦品种为“维麦8号”,试验设计2个水分处理,5个氮肥处理。2个水分处理为裂区分布,每个水分处理下设不同氮肥处理。氮肥处理为5处理,3重复,呈随机分布。各处理与重复的空间分布见图1,共32个小区,小区尺寸为10 m×5 m。其中,水分处理分别为90 mm灌溉量和60 mm灌溉量;氮肥处理分别为不施肥(T1)、15 000 kg/hm² 厩肥(T2)、15 000 kg/hm² 厩肥+100 kg/hm² 氮肥(T3)、15 000 kg/hm² 厩肥+200 kg/hm² 氮肥(T4)、15 000 kg/hm² 厩肥+300 kg/hm² 氮肥(T5)。各小区除水、氮外,其他处理措施相同。

90 mm灌溉量				60 mm灌溉量			
T2	T5	T4	T1	T3	T2	T4	T5
T1	T4	T3	T5	T2	T5	T1	T4
T4	T3	T5	T2	T1	T3	T2	T5
T1	T5	T2	T3	T4	T1	T5	T3

图1 小区布设空间分布图

Fig. 1 Layout of field experiment

1.2 数据获取

在冬小麦的灌浆期进行数据采集,包括无人机数据和地面农学参数。

1.2.1 无人机数据获取

无人机影像基于3DR Solo型四旋翼无人机

(3DR, 美国), 搭载 RedEdge M 型多光谱传感器 (MicaSense, 美国) 获得。RedEdge M 型多光谱传感器包含有蓝光波段 (中心波长 475 nm)、绿光波段 (中心波长 560 nm)、红光波段 (中心波长 668 nm)、红边波段 (中心波长 717 nm) 和近红外波段 (中心波长 840 nm) 等 5 个波段信息。无人机飞行时间为 12:00—14:00, 天空晴朗无云时进行。设置 4 个飞行高度, 分别为 15、30、50、80 m, 对应地面分辨率约为 1.00、2.06、3.49、5.69 cm。飞行时, 航向和旁向重叠率设为 75%。相机先采用触发拍摄模式, 在飞行前拍摄白板, 然后再设定为自动拍摄模式, 用于在无人机飞行过程中进行拍摄。Pix4D ag (Pix4D, 瑞士) 软件用来进行无人机影像拼接。在此过程中, 白板信息被用来将影像 DN 值转换为反射率。另外, 基于厘米级误差的 Trimble GEO 7X 型 (美国) 差分 GPS 采集的高精度地面样点数据对影像做几何精校正。本研究使用无人机及获取的 1 景影像如图 2 所示。

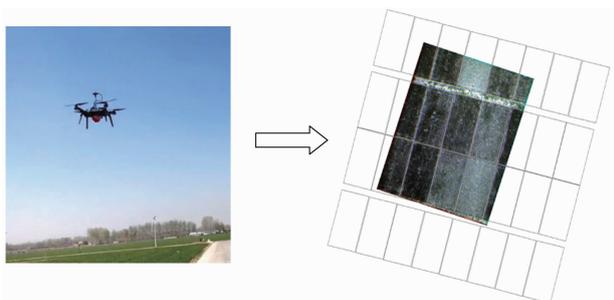


图 2 无人机平台及获取的 1 景影像 (飞行高度 30 m, 空间分辨率 2.06 cm)

Fig. 2 UAV platform and an acquired image (flight altitude was 30 m, spatial resolution was 2.06 cm)

1.2.2 地面农学参数获取

在每个小区, 选择长势较均匀区域作为采样区。首先, 在采样区中心区域, 齐地割取 4 行 40 cm 的小麦植株, 剪去根、茎、叶分离后放入干燥箱干燥至恒质量; 然后, 称取各部分干质量, 并将干茎、叶分别粉碎, 利用 vario micro cube 型元素分析仪 (Elementer, 德国), 采用 Dumas 燃烧法测定其含氮量; 最后, 根据各部分干质量, 换算为植株氮浓度 (%)。

1.3 数据分析方法

首先, 利用归一化差值植被指数 (Normalized difference vegetation index, NDVI), 采用决策树分类, 提取不同分辨率影像下的小麦信息, 以去除土壤背景; 然后, 基于剔除土壤背景后的影像, 提取冬小麦植株的光谱信息和纹理特征信息; 最后, 以 4 个飞行高度作为不同情景, 探讨不同情景下光谱信息、纹理特征、光谱信息 + 纹理特征等反演植株氮浓度的效果。其中, 光谱反射率提取自各小区

所有像元的平均光谱, 然后基于光谱反射率, 计算以归一化植被指数为构型的各光谱指数 NDVIs^[20]; 比值植被指数 RVI^[21]、增强植被指数 EVI^[22]、三角植被指数 TVI^[23]、土壤调整植被指数 OSAVI^[24]、修改三角植被指数 MTVI2^[25]、红边模型 R-M^[26]、绿波段比值植被指数 RVI_{green}^[27] 等, 上述植被指数作为影像光谱信息; 纹理特征通过研究灰度的空间相关特性来定量分析^[28], 本研究使用的纹理特征参数包含从灰度共生矩阵计算的均值、方差、同质性、对比度和能量值^[29], 5 个光谱波段共有 25 个参数; 主成分回归分析法是遥感反演植被参数时常用的建模方法^[30], 本研究应用它来建立植株氮浓度的反演模型。建模时, 将获得的冬小麦 32 个样本随机分为两组。1 组包含 24 个样本作为建模样本; 另一组包含 8 个样本作为检验样本。各情景下的建模, 依赖于相同的建模样本和检验样本。在构建主成分反演植株氮浓度模型时, 选择特征值大于 1 的信息的前 n 个主成分变量来建立模型^[31], 用预测决定系数 (Coefficient of determination, R^2)、预测标准误差 (Root mean square error, RMSE) 和相对预测标准误差来评价模型的精度。

2 结果与分析

2.1 不同分辨率下光谱信息对小麦植株氮浓度反演的影响

不同分辨率下光谱信息对小麦植株氮浓度反演的结果如表 1 所示。从表中可以看出, 在分辨率 1.00 ~ 5.69 cm 之间, 光谱信息反演植株氮浓度的效果未表现出趋势性变化, 彼此间的差异也不大。建模时, R^2 在 0.633 1 ~ 0.655 9 之间变化, RMSE 在 0.153 9% ~ 0.154 2% 之间变化; 验证时, R^2 在 0.774 1 ~ 0.814 0 之间变化, RMSE 在 0.136 5% ~ 0.136 9% 之间变化。说明影像在此分辨率之间变化时, 所带来的光谱信息变化对植株氮浓度反演影响不显著。

表 1 基于不同分辨率影像光谱信息对小麦植株氮浓度的反演结果

Tab.1 Prediction results of plant nitrogen concentration based on spectral information from different resolution images

飞行高度/m	影像分辨率/cm	建模		验证	
		R^2	RMSE/%	R^2	RMSE/%
15	1.00	0.650 2	0.154 0	0.794 9	0.136 7
30	2.06	0.633 1	0.154 1	0.785 0	0.136 8
50	3.49	0.633 9	0.154 2	0.774 1	0.136 9
80	5.69	0.655 9	0.153 9	0.814 0	0.136 5

2.2 不同分辨率下纹理特征对小麦植株氮浓度反演的影响

不同分辨率下纹理特征对小麦植株氮浓度反演的结果如表2所示。从表中可以看出,在分辨率1.00~5.69 cm之间,纹理特征建模效果呈下降趋势, R^2 从0.684 0递减到0.646 9, RMSE从0.139 5%递增到0.143 9%;模型验证效果同样呈现出下降趋势, R^2 从0.849 7递减到0.796 5, RMSE从0.127 4%递增到0.158 4%。以上结果表明,影像分辨率在1.00~5.59 cm之间变化时,随着飞行高度的增加,纹理特征在逐步消失,对植株氮浓度的反演效果在不断变差。所有测试分辨率中,飞行高度为15 m对应空间分辨率为1.00 cm时,模型的反演效果最佳。

表2 基于不同分辨率影像纹理特征对植株氮浓度的反演结果

Tab.2 Prediction results of plant nitrogen concentration based on texture feature from different resolution images

飞行高度/m	影像分辨率/cm	建模		验证	
		R^2	RMSE/%	R^2	RMSE/%
15	1.00	0.684 0	0.139 5	0.849 7	0.127 4
30	2.06	0.663 4	0.140 5	0.818 5	0.149 6
50	3.49	0.658 2	0.141 6	0.801 4	0.156 4
80	5.69	0.646 9	0.143 9	0.796 5	0.158 4

2.3 不同分辨率下光谱信息+纹理特征对小麦植株氮浓度反演的影响

不同分辨率下光谱信息+纹理特征对植株氮浓度反演的结果如表3所示。从表中可以看出,在分辨率1.00~5.69 cm之间,光谱信息+纹理特征建模效果整体上呈下降趋势, R^2 从0.788 7递减到0.675 5, RMSE从0.114 0%递增到0.141 3%;模型验证效果与建模效果相同, R^2 从0.876 1递减到0.802 3, RMSE从0.138 2%递增到0.156 1%。飞行高度为15 m、空间分辨率在1.00 cm时,模型的反演效果最佳。另外,与单一光谱信息、纹理特征建模结果相比,光谱信息+纹理特征构建的模型在建模

表3 不同分辨率下光谱信息+纹理特征对植株氮浓度反演结果

Tab.3 Prediction results of plant nitrogen concentration based on combining spectral information and texture feature from different resolution images

飞行高度/m	影像分辨率/cm	建模		验证	
		R^2	RMSE/%	R^2	RMSE/%
15	1.00	0.788 7	0.114 0	0.876 1	0.138 2
30	2.06	0.708 5	0.134 0	0.835 7	0.143 6
50	3.49	0.675 5	0.141 3	0.802 3	0.156 1
80	5.69	0.683 4	0.139 6	0.824 2	0.147 2

和验证时的整体精度有所提升。

3 讨论

文献[4]利用无人机搭载多光谱相机获取冬小麦冠层多光谱影像,基于植被指数法估测冬小麦生育前期(Feekes 4~7)植株氮浓度的 R^2 为0.56,估测其生育后期植株氮浓度的 R^2 为0.78;基于无人机获取的冬小麦多光谱影像,文献[10]利用植被指数对小麦植株氮浓度进行反演,模型的 R^2 为0.73;文献[14]基于人工神经网络法、多元线性回归法,利用无人机高光谱影像数据反演小麦叶片氮浓度模型的 R^2 在0.57~0.97, RMSE在0.152%~0.279%;与以上的研究结果相比,本研究的结果在合理范围之内。

从叶片尺度上来说,植物缺氮表现为叶片边缘发黄,整片叶子黄绿相间,叶子变黄比例随植株缺氮程度的增加而增大;从冠层尺度上来说,植物缺氮表现为从下部往上部叶片逐渐表现为缺氮症状,因此从上方俯视看冠层,随着植株缺氮症状的加剧,冠层颜色的对比度逐渐加大,这些都属于纹理特征。灌浆期,冬小麦叶片长度在3.00~10.00 cm。另外,冬小麦播种行距为20.00 cm,因此冠层大小也在此范围内。据此,理论上只有分辨率优于10 cm的影像才能辨识出这种纹理特征。本研究设计了4种飞行高度场景,对应影像分辨率分别为1.00、2.06、3.49、5.69 cm。在不同场景下,本研究利用光谱信息、纹理特征以及光谱信息+纹理特征分别对冬小麦氮浓度进行反演的结果表明:光谱+纹理模型反演效果优于单一光谱、单一纹理模型反演结果。此结果与文献[15]利用植被指数反演生物量时得出光谱、纹理融合指标精度高于单一光谱、纹理指标,以及文献[16]在对棉花植株氮浓度反演时得出光谱+纹理特征反演效果好于单一光谱信息建模效果的相关结论一致。在探究不同飞行高度反演冬小麦氮素营养状况时,文献[32]的研究表明,与55 m飞行高度相比,8~16 m飞行高度获得影像的光谱信息更适合进行小麦茎基部硝酸盐浓度反演,进而对小麦氮素营养诊断,但未给出对应的影像分辨率。往往不同传感器在相同高度上其影像分辨率不同,因此其结果很难推广。与其相比,本研究在设计场景时明确了影像分辨率信息,并且增加了对纹理信息的分析。结果表明在1.00~5.69 cm之间,光谱信息对植株氮浓度反演效果影响不大,但纹理信息会随着分辨率的变低逐渐变弱,反演效果趋于变差。影像分辨率在1.00 cm时,纹理特征表现最明显,此时模型反演植株氮浓度效果最好。说明高分辨率影

像会带来丰富的纹理信息,提高植株氮浓度反演精度。但是,获取高分辨率影像,对于同种传感器来说就需要采用低的飞行高度,这样在获取影像时,效率就会变低。因此,在作物氮素营养诊断时,需要根据实际需求,同时考虑精度要求和效率需求来选择飞行高度与对应影像分辨率。

本研究只针对灌浆期小麦的植株氮浓度反演开展了相关研究,今后应采集更为广泛的样品,对小麦其他生育期的植株氮浓度反演情况进行验证研究。

4 结束语

基于低空无人机搭载多光谱传感器,通过设置不同的无人机飞行高度,研究分析了不同分辨率影

像对冬小麦植株氮浓度反演的影响。结果表明,影像分辨率在 1.00 ~ 5.69 cm 之间变化时,影像光谱信息对小麦植株氮浓度反演影响不大,各情景下建模结果和验证结果差异较小;随着影像分辨率的降低,影像纹理特征对小麦植株氮浓度反演的效果变差;影像光谱信息 + 纹理特征信息对小麦植株氮浓度反演效果整体随着分辨率的提高呈增加趋势,且其反演结果优于单一光谱特征或单一纹理特征的反演效果。总体而言,影像分辨率在 1.00 ~ 5.69 cm 之间变化时,分辨率越高,纹理特征越丰富,基于纹理特征和光谱信息反演植株氮浓度的效果越好。但在现实中获取无人机影像进行应用时,还需要综合考虑无人机影像获取效率,根据具体需求寻找精度和效率的平衡点。

参 考 文 献

- [1] 武维华. 植物生理学[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 91.
- [2] 张玲, 陈新平, 贾良良. 基于无人机可见光遥感的夏玉米氮素营养动态诊断参数研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 261 - 269.
ZHANG Ling, CHEN Xinping, JIA Liangliang. Study on nitrogen nutrition dynamic diagnostic parameters of summer maize based on visible light remote sensing[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2018, 24(1): 261 - 269. (in Chinese)
- [3] 宋丽娟, 叶万军, 关亮任, 等. 基于文献计量分析我国无人机氮素营养诊断研究现状[J]. 黑龙江农业科学, 2019(1): 136 - 139.
SONG Lijuan, YE Wanjun, GUAN Xianren, et al. Research on nitrogen nutrition diagnosis of UAVs in China based on bibliometric analysis[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2019(1): 136 - 139. (in Chinese)
- [4] 马文玉. 基于 UAV 遥感的冬小麦氮素营养诊断[D]. 焦作: 河南理工大学, 2017.
MA Wenyu. Nitrogen nutrition diagnosis of winter wheat based on UAV remote sensing[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2017. (in Chinese)
- [5] 赵春江. 农业遥感研究与应用进展[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 277 - 293.
ZHAO Chunjiang. The development of agricultural remote sensing research and application[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 277 - 293. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141241&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.041. (in Chinese)
- [6] 李德仁, 李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(5): 505 - 513, 540.
LI Deren, LI Ming. Research progress and application prospect of UAV remote sensing system[J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2014, 39(5): 505 - 513, 540. (in Chinese)
- [7] 张帅. 基于无人机低空遥感的农田信息采集与处理研究[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(13): 149 - 151.
ZHANG Shuai. Research on farmland information collection and processing based on UAV low-altitude remote sensing[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 25(13): 149 - 151. (in Chinese)
- [8] 刘建刚, 赵春江, 杨贵军, 等. 无人机遥感解析田间作物表型信息研究进展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 98 - 106.
LIU Jiangan, ZHAO Chunjiang, YANG Guijun, et al. Research on remote sensing analysis of field crop phenotypic information by UAV[J]. Transactions of the CASE, 2016, 32(24): 98 - 106. (in Chinese)
- [9] 陈鹏飞. 无人机在农业中的应用现状与展望[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2018, 44(4): 399 - 406.
CHEN Pengfei. Application status and prospect of UAV in agriculture[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2018, 44(4): 399 - 406. (in Chinese)
- [10] 刘昌华, 马文玉, 陈志超, 等. 基于无人机遥感的冬小麦氮素营养诊断[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2018, 37(3): 45 - 53.
LIU Changhua, MA Wenyu, CHEN Zhichao, et al. Nutrient nutrition diagnosis of winter wheat based on remote sensing of unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science), 2018, 37(3): 45 - 53. (in Chinese)
- [11] 秦占飞, 常庆瑞, 谢宝妮, 等. 基于无人机高光谱影像的引黄灌溉水稻叶片全氮含量估测[J]. 农业工程学报, 2016, 32(23): 77 - 85.
QIN Zhanfei, CHANG Qingrui, XIE Baoni, et al. Rice leaf nitrogen content estimation based on hyperspectral imagery of UAV in Yellow River diversion irrigation district[J]. Transactions of the CASE, 2016, 32(23): 77 - 85. (in Chinese)
- [12] LI Z, LI Z, FAIRBAIRN D, et al. Multi-LUTs method for canopy nitrogen density estimation in winter wheat by field and UAV hyperspectral[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 174 - 182.

- [13] 王昆,张晓丽,王珊,等. 鹫峰地区 QuickBird 影像纹理特征与生物量估测关系初探[J]. 地理与地理信息科学,2013,9(3):52-55.
WANG Kun, ZHANG Xiaoli, WANG Shan, et al. Study on the relationship between texture of QuickBird image and biomass estimation in area of Jiufeng[J]. Geography and GeoInformation Science,2013,29(3):52-55. (in Chinese)
- [14] 刘广东. 基于 TM 影像植被指数和纹理特征的对比关系研究[D]. 重庆:重庆师范大学,2010.
LIU Guangdong. Study on the contrast relationships between NDVI and texture features based on TM image [D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2010. (in Chinese)
- [15] 刘畅,杨贵军,李振海,等. 融合无人机光谱信息与纹理信息的冬小麦生物量估测[J]. 中国农业科学,2018,51(16):3060-3073.
LIU Chang, YANG Guijun, LI Zhenhai, et al. Estimation of winter wheat biomass based on spectral information and texture information of UAV[J]. Scientia Agricultura Sinica,2018,51(16):3060-3073. (in Chinese)
- [16] 陈鹏飞,梁飞. 基于低空无人机影像光谱和纹理特征的棉花氮素营养诊断研究[J]. 中国农业科学,2019,52(13):2220-2229.
CHEN Pengfei, LIANG Fei. Study on nitrogen nutrition diagnosis of cotton based on spectral and texture characteristics of low altitude UAV[J]. Scientia Agricultura Sinica,2019,52(13):2220-2229. (in Chinese)
- [17] ZHANG Dongyan, ZHOU Xingen, ZHANG Jian, et al. Detection of rice sheath blight using an unmanned aerial system with high-resolution color and multispectral imaging[J]. PloS One,2018,13(5):8-11
- [18] LIU H, ZHU H, WANG P. Quantitative modelling for leaf nitrogen content of winter wheat using UAV-based hyperspectral data [J]. International Journal of Remote Sensing,2017,38(8-10):2117-2134.
- [19] KAKERU W, WEI G, KEIGO A, et al. High-throughput phenotyping of sorghum plant height using an unmanned aerial vehicle and its application to genomic prediction modeling[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8:421.
- [20] ROUSE J W, HAAS R W, SCHELL J A, et al. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation[R]. NASA/GSFCT Type III Final Report, USA: NASA, 1974.
- [21] PEARSON R L, MILLER L D. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the Shortgrass Prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado[C]//Proceedings of the Eighth International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor, Michigan, USA, 1972: 1357-1381.
- [22] HUETE A, JUSTICE C, LIU H. Development of vegetation and soil indices for MODIS - EOS[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 49(3): 224-234.
- [23] BROGE N H, LEBLANC E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 76(2): 156-172.
- [24] RONDEAUX G, STEVEN M, BARET F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices [J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 55(2): 95-107.
- [25] HABOUDANE D, MILLER J R, PATTEY E, et al. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 90(3): 337-352.
- [26] GITELSON A A, VIÑA A, CIGANDA V, et al. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(8): 93-114.
- [27] XUE L H, CAO W X, LUO W H, et al. Monitoring leaf nitrogen status in rice with canopy spectral reflectance[J]. Agronomy Journal, 2004, 96(1): 135-142.
- [28] 刘丽,匡纲要. 图像纹理特征提取方法综述[J]. 中国图象图形学报,2009,14(4):622-635.
LIU Li, KUANG Gangyao. Overview of image textural feature extraction methods[J]. Journal of Image and Graphics,2009,14(4):622-635. (in Chinese)
- [29] 谢士琴,赵天忠,王威,等. 结合影像纹理、光谱与地形特征的森林结构参数反演[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(4):125-134.
XIE Shiqin, ZHAO Tianzhong, WANG Wei, et al. Inversion of forest structure parameters based on image texture, spectral and topographic features[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(4):125-134. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170416&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.016. (in Chinese)
- [30] 宋博文. 基于主成分分析的叶片光谱模拟与参数反演[D]. 西安:西安科技大学,2018.
SONG Bowen. Leaf spectral simulation and parameter inversion based on principal component analysis [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [31] 刘凯,王双,高仪,等. 基于主成分分析筛选核桃种子最佳浸种时间[J]. 湖北农业科学,2019,58(15):72-76.
LIU Kai, WANG Shuang, GAO Yi, et al. Screening the best soaking time of walnut seeds based on principal component analysis[J]. Hubei Agricultural Sciences,2019,58(15):72-76. (in Chinese)
- [32] 李红军,李佳珍,雷玉平,等. 无人机搭载数码相机航拍进行小麦、玉米氮素营养诊断研究[J]. 中国生态农业学报,2017,25(12):1832-1841.
LI Hongjun, LI Jiazhen, LEI Yuping, et al. Study on nitrogen nutrition diagnosis of wheat and maize with UAV aerial camera [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2017,25(12):1832-1841. (in Chinese)