

综合多源遥感信息的水稻纹枯病区域生境适宜性评价

田洋洋¹, 吴开华¹, 李惠紫¹, 沈艳艳¹, 邱晗潇¹, 翟婧², 张竞成¹

1. 杭州电子科技大学 自动化学院, 杭州 310018;

2. 宁波市农业技术推广总站, 宁波 315012

摘要: 作物病害的发生与其生境的适宜性关系密切, 目前病害生境监测和评价通常较为粗放, 主要依靠气象信息, 对田块间作物生长状态和环境条件等空间异质性因素缺乏精细的描述, 难以为病害的精准预测提供有效信息。本研究以水稻中发生面积较大的主要病害水稻纹枯病为研究对象, 通过在县域尺度开展多年份病害等级调查获得建模及验证样本, 综合运用光学、微波及热红外等多源遥感数据对病害关键生境因素进行监测, 关键生境因素主要包括寄主生长状态、稻田水层状态及稻田地表温度生境因素, 并在此基础上, 结合空间网格化分析和偏最小二乘(PLS)回归方法建立了病害生境适宜性评价模型。结果表明, 利用遥感信息能够有效表征病害相关生境因素, 同时, 基于多源遥感表征的生境因素建立的水稻纹枯病区域生境适宜性评价模型能够得到与实际病害调查空间分布趋势基本一致的结果, 模型对病情等级的拟合优度 R^2 为0.60—0.65, RMSE分别为0.72、0.56。基于多源遥感信息能够以空间连续的方式对寄主状态、环境条件等重要病害生境因素进行表征, 及实现病害生境适宜性的有效评价, 为病害预测、防控提供重要的参考和指导信息。

关键词: 水稻纹枯病, 生境, 遥感信息, 空间网格化, 评价模型

中图分类号: S43/TP7/P2

引用格式: 田洋洋, 吴开华, 李惠紫, 沈艳艳, 邱晗潇, 翟婧, 张竞成. 2024. 综合多源遥感信息的水稻纹枯病区域生境适宜性评价. 遥感学报, 28(10): 2469–2484

Tian Y Y, Wu K H, Li H Z, Shen Y Y, Qiu H X, Zhai J and Zhang J C. 2024. Method for evaluating habitat suitability of rice sheath blight at a regional scale based on multi-source remote sensing information. National Remote Sensing Bulletin, 28(10): 2469–2484 [DOI:10.11834/jrs.20233219]

1 引言

作物病虫害的发生对粮食安全有着严重的影响, 影响中国粮食总产约20% (刘万才等, 2016)。目前中国作物病虫害防治普遍存在农药施用过量的问题, 作物病害的发生与寄主生长状态、环境条件等生境关联紧密, 而生境条件由于栽培措施、田间小气候环境等差异呈现较大的空间异质性, 这也是病害在一定区域中的发生、流行呈现较复杂格局的主要原因 (黄文江等, 2015; Zhang等, 2019)。如能对病害生境适宜性进行有效评价, 就可以为病害预测和防控提供重要信息。目前, 作物病虫害生境评价主要以气象信息为主, 虽在一些局部区域能够达到较理想的评价效果, 但由于

难以对区域内不同地块间的寄主作物生长状态、环境条件等病害生境差异进行有效表征, 难以体现病害生境条件的局地差异, 一定程度上阻碍了病害精准预测和防控。近年来, 随着国内外的遥感卫星不断丰富且性能不断提高, 由卫星遥感数据构成的对地观测网络能有效监测寄主作物的分布、生长状态、环境因素等方面信息, 为作物病害生境监测提供了有效手段 (陈仲新等, 2016; 牛铮等, 2018)。在寄主作物分布监测方面, Li等 (2023) 结合 PlanetScope 和 Sentinel-2 数据利用随机森林方法, 实现了中国 10 m 分辨率的玉米和大豆种植分布面积监测, 总体精度达到 91.8±1.2%。Xu等 (2018) 和 Wang等 (2022) 利用 Landsat TM 8、MODIS、Sentinel-2 等多时相遥感影像实现大范围

收稿日期: 2023-06-26; 预印本: 2023-09-19

基金项目: 国家自然科学基金(编号:42071420); 宁波市重大科技任务攻关项目(编号:2021Z048); 浙江省科技计划项目“尖兵”“领雁”研发攻关计划(编号:2023C02018); 国家重点研发计划青年科学家项目(编号:2022YFD2000100)

第一作者简介: 田洋洋, 研究方向为农业遥感与植物病虫害遥感监测预警。E-mail: tyang215@163.com

通信作者简介: 张竞成, 研究方向为农业遥感, 植物病虫害遥感监测预警方法。E-mail: zhangjers@hdu.edu.cn

水稻和玉米的种植范围和生育期遥感提取。在作物生长状态监测方面, Yang等(2017)提出一种光学、微波影像结合的水稻生育期监测方法, 在包括不同稻作类型的区域中获得85%的监测精度。Clevers和Gitelson(2013)基于Sentinel-2影像的红边植被指数CIred-edge能够实现有效的作物氮素监测。在农田环境监测方面, 一些学者在较大尺度上通过对地表温度、土壤水分等参数进行遥感反演, 结合作物生长信息和气象信息尝试开展病虫害预测研究(Zhao等, 2022; Gbogbo等, 2022; Zhang等, 2019)。

此外, 部分研究显示, 生境信息的加入能够有效提升作物病虫害预测的效果。如Zhang等(2014)基于多时相环境星提取了作物生长因子, 结合气象因子建立了北京地区小麦白粉病预测模型, 模型精度达72.2%, 较单纯基于气象因子的模型精度有超过10%的显著提升。Yuan等(2017)发现在病害生境适宜性评价时, 通过加入Landsat TM 8等中高分辨率遥感信息, 能够有效反映同一气象条件下不同地块间的生境差异, 从而得到颗粒度更细、可靠性更高的生境适宜性评价结果。一些研究也发现遥感气象因子如LST的加入能够有效提升作物病虫害生境的表征能力(Da Silva等, 2015; Yuan等, 2017)。虽然目前基于遥感数据能够对多个作物病虫害生境因素进行提取、表征, 但将这些遥感数据表征的生境信息应用于作物病虫害生境适宜性评价的工作整体上仍比较缺乏, 特别是多源遥感信息在病虫害生境监测和评价方面的潜力亟待挖掘和验证。

水稻纹枯病作为水稻生产过程中的3大主要病害之一, 不论发生频率、发生面积还是造成的产量损失均居水稻各病害之首(刘万才等, 2016)。水稻纹枯病由立枯丝核菌(*Rhizoctonia solani*)感染引起, 是典型的土传病害。水稻纹枯病的发生与生境条件关系密切, 影响其发生和流行的主要生境因素包括: 水稻种植分布、种植密度、氮素水平等寄主因素, 以及温度、湿度和稻田水层状态等环境因素(彭绍裘等, 1986; Strand, 2000; Gilligan, 2008; 李鹏等, 2016)。目前, 鲜有研究尝试在大尺度对水稻纹枯病的生境因素进行监测和表征, 并建立生境适宜性评价模型。本研究综合运用光学、微波及热红外等多源遥感数据, 研究了水稻纹枯病生境因素的表征方法以及适宜

性评价方法, 主要内容包括: (1) 基于多源遥感数据提出水稻分布、生长状态、稻田水层状态、稻田地表温度等水稻纹枯病关键生境因素遥感监测方法; (2) 综合作物病害生境因素遥感监测结果, 结合空间网格化和PLS回归方法分析建立水稻纹枯病生境适宜性评价模型; (3) 基于区域尺度大范围地面调查数据的水稻纹枯病生境适宜性评价模型验证和评价。

2 材料及方法

2.1 研究区概况

本研究区位于江苏省扬州市(图1), 研究区域的经纬度范围为(119°14'E—119°30'E, 32°15'N—32°41'N), 海拔为3—12 m, 属于北亚热带湿润气候区。水稻为该区域主要种植作物, 区域内的水稻主要分早播(5月中旬—5月底)、晚播(6月初—6月中旬)两个播期。水稻纹枯病是该区域中常年发生的主要病害, 由于晚稻分蘖期至抽穗期常伴随较高的温湿度, 水稻纹枯病对研究区内晚稻危害较重, 因此选择该区域晚稻进行纹枯病生境适宜性研究。

2.2 水稻纹枯病地面调查数据

于2018年8月9日—8月10日、2019年8月19日—8月20日在研究区开展大范围田间调查, 收集早播、晚播水稻的种植分布定位参考数据及水稻纹枯病发生及病情等级数据, 调查数据空间分布如图1所示。2018年和2019年水稻纹枯病的病情等级调查样本点各为110个, 选择500 m×500 m的区域进行调查, 每个区域内调查4—7个点, 每个调查点选取水稻连续种植区域较大的地块进行, 地块面积不小于30 m×30 m。在地块中选择有代表性的位置采用五点法调查水稻纹枯病的发生和病情等级信息, 同时对每个调查田块进行拍照及田块中心GPS定位, 记录水稻生育期。病害调查方法在参考水稻纹枯病测报调查规范(GB/T 15791—2011)的基础上, 充分考虑野外调查的效率和可操作性, 以群体染病平均状态作为调查点的病情等级, 按以下规则判断: 全株无病记为0级(健康), 基部叶片叶鞘发病记为1级(轻度), 第3叶片以下各叶鞘或叶片发病记为2级(中度), 第2叶片以下各叶鞘或叶片发病记为3级(重度)。

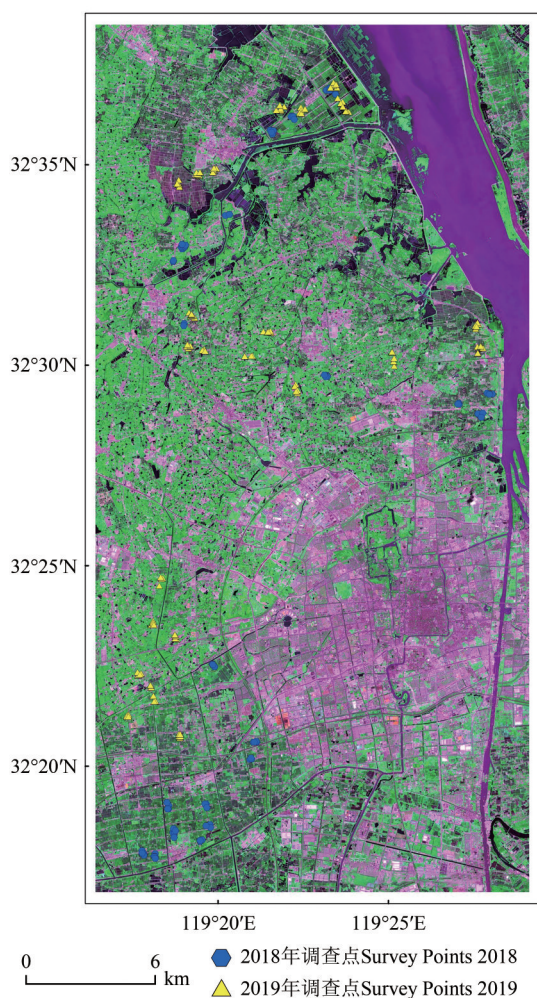


图1 研究区位置及水稻纹枯病调查样本点分布
Fig. 1 Location of the study area and the distribution of the rice sheath blight survey sample points

由于病害生境因素的影响存在一定尺度依赖特点，过大或过小的空间尺度都不利于体现生境影响（邬建国，2007）。研究区内的水稻普遍连片种植，经调查在约500 m×500 m范围内水稻种植时间、生育期和种植管理特点大体相似。此外，水稻纹枯病作为典型的土传病害，在适宜的环境下菌核随田间水流传播并侵染稻株，相互连接的水稻田块是病害流行的基底和生境，单独考察每个田块的病害发生情况不利于反映整体上的生境适宜性（李沛霖，2017）。本研究在考虑研究区水稻种植管理特点、稻田分布特点的基础上，结合植保经验和反复试验，将500 m×500 m的网格确定为水稻纹枯病生境监测和评价的基本单元，并将网格区域内所有调查点病情等级的均值定义为该区域的整体病情等级。

2.3 遥感影像数据获取及预处理

多源遥感影像数据主要包括：用于水稻种植

面积提取及水稻生长状态监测的Sentinel-2光学遥感影像；用于提取稻田水层状态的Sentinel-1微波遥感影像，及用于提取稻田地表温度的MODIS热红外地表温度产品。

Sentinel-2卫星的主要传感器是多光谱成像仪（MSI），其有13个波段，覆盖400—2400 nm。本文获取的Sentinel-2 L1C多光谱数据是经过几何精校正的正射影像，为消除大气散射和吸收等影响，在SNAP软件下进行辐射定标和大气校正等预处理。Sentinel-1卫星搭载C波段SAR传感器，本研究采用Sentinel-1干涉宽幅IW（Interferometric Wide swath）模式下的地距GRD（Ground Range Detected）影像数据，包含VV和VH两个极化通道数据。在SNAP软件下进行辐射校正、地形校正与地理编码、滤波等预处理。本文采用MODIS Terra星8 d合成地表温度LST（Land Surface Temperature）数据作为数据源，产品编号为MOD11A2，利用MRT（MODIS Reprojection Tool）将影像投影进行批处理转换，转换至与Sentinel-1、Sentinel-2影像相同的WGS-84椭球体UTM投影下。研究区使用的各类遥感数据详细信息如表1所示。

2.4 基于多时相光学遥感影像的晚稻面积提取

寄主分布区域提取是进一步利用遥感数据监测寄主生长状态、生育期、稻田水层状态及地表温度等因素的基础。考虑研究区中水稻纹枯病主要以晚稻为寄主，利用决策树方法提取晚稻面积。由于晚稻在单个时期容易与影像中的早稻及其他植被混淆，但水稻在多数生育期内田中有水覆盖，且有移栽过程，与其他植被或同期作物在物候上存在较明显差异，为遥感面积提取提供了有利条件，因此本研究主要利用晚稻移栽期（6月上旬）和分蘖期（7月中下旬）的Sentinel-2光谱时相特征构建影像分类决策树。

在决策树模型中，利用归一化植被指数NDVI（Normalized Difference Vegetation Index）反映地表植被覆盖状况，该指数对土壤与绿色植被具有显著差异的特性，本研究利用7月中旬的NDVI对水体、建筑物与绿色植被进行分类。考虑到早稻及其他绿色植被在6月上旬至7月中旬变化较小，而晚稻冠层变化较明显的特点，利用晚稻NDVI时相变化特征区分晚稻与其他绿色植被。

表 1 遥感数据信息表

Table 1 Remote sensing data information list for research

数据类型	分辨率	日期	来源
Sentinel-2 光学遥感影像 Sentinel-2 optical remote sensing image	波段 Band 2、3、4、8; 10 m	2018-06-06	欧洲航天局
	波段 Band 5、6、7、8A、11、12; 20 m	2018-07-18	ESA (European Space Agency)
	波段 Band 1、9、10; 60 m	2019-08-02	(https://scihub.copernicus.eu/)
Sentinel-1 微波遥感影像 Sentinel-1 microwave remote sensing image	距离向 Range; 5 m	2018-07-21	欧洲航天局
	方位向 Azimuth; 20 m	2019-07-22	ESA (European Space Agency)
			(https://scihub.copernicus.eu/)
MOD11A2 地表温度(LST)产品 MOD11A2 Land surface temperature product	1 km	2018-07-12	美国地质调查局 USGS (US Geological Survey)
		2018-07-20	
		2018-07-28	
		2018-08-05	
		2019-07-20	
		2019-07-28	
		2019-08-05	
		2019-08-13	

2.5 基于多源遥感影像的水稻纹枯病生境特征提取

水稻纹枯病的发生流行受寄主与环境条件的影响较大，主要包括寄主生长状态、稻田水层状态及稻田温度等因素。一些研究发现，寄主作物水稻的整体生长状态会影响其对纹枯病的敏感性(Bennett, 1984; Agrios, 2009; 黄文江 等, 2015)。其中，水稻生长状态利用光谱穗帽变换的绿色指数进行表征。穗帽变换通过线性变换、光谱空间旋转能够在去除各波段冗余信息的同时，将遥感影像光谱信息转变为与植被、土壤状态有重要指示意义的参数。本研究应用 Nedkov (2017) 提出的针对 Sentinel-2 影像的穗帽变换方法对研究区 Sentinel-2 影像进行处理和特征提取。

稻田水层管理亦与病害流行有关，稻田内水层状态与水稻冠层内部湿度关系密切，适时晾田则有助于抑制纹枯病的发展(Castilla 等, 1996; 李鹏 等, 2016; 张涛宏, 2019)。本研究利用水稻分蘖期的微波影像后向散射系数对稻田水层状态进行表征。微波影像具有不受气候条件影响的优势，并且通过测量土壤介电常数可以间接获取土壤含水量(Topp 等, 1980)。不同于传统的土壤含水量监测，考虑到病害生境表征条件的特殊性，本研究的目标是表征稻田水层状态。先前的研究利用 Sentinel-1 微波遥感影像成功监测了稻田水层的状态，监测精度达 81.72% (田洋洋, 2021)。此外，考虑到研究区内的水稻主要采用机插种植，

种植密度均匀度较高，7月下旬处于分蘖期的水稻植株高度差异不大，因此一般认为此时研究区水稻后向散射对总后向散射的贡献量大体相近，雷达后向散射强度的差异主要由水层状态决定(曹毅, 2021)。研究发现，低频雷达后向散射系数与地表土壤介电常数呈强正相关关系，土壤水分对土壤介电常数起主导作用，即土壤含水量越高，低频雷达波段的后向散射系数越高(孙亚勇, 2018; 唐巧林, 2023)。因此，本研究选用星载 C 波段 Sentinel-1 低频雷达的 VV、VH 极化后向散射系数来表征稻田水层状态。此外，考虑到微波影像相对噪声较大的特点，适于面向对象的分析模式，利用 eCognition 软件的影像多尺度分割功能，基于 Sentinel-2 光学影像的绿色波段、红色波段、红边波段、近红外波段及 NDVI 和 NDWI，对晚稻区域进行影像分割。经反复试验根据优选的分割参数(Scale: 60; Shape: 0.4; Compactness: 0.5)得到水稻地块边界，并以分割斑块为单元对 VV、VH 极化后向散射系数作均值化处理并用于表征稻田水层状态。

此外，温度是影响水稻纹枯病发生流行的关键环境因子(Strand, 2000)。相比气温，冠层温度能够更好地反映水稻田块间温度场变化，因此本研究中采用 MODIS 热红外地表温度产品提供空间连续的遥感生境因素表征。使用的 LST 数据时段为对病害侵染重要的水稻分蘖期至抽穗期，产品为连续 4 个时相的 LST 8 d 合成产品。

在上述多源遥感数据处理和特征提取基础上,利用ArcGIS10.0中的Fishnet功能应用500 m×500 m网格对各病害生境因素进行空间网格化处理,将各网格晚稻种植范围中的生境因素均值化,用于水稻纹枯病生境适宜性评价模型的输入。

2.6 基于PLS回归分析的水稻纹枯病遥感生境适宜性评价模型

鉴于PLS回归能够有效克服变量间共线性问题,本研究基于空间网格化的绿度指数、VV极化后向散射系数、VH极化后向散射系数、LST等多源遥感信息建立水稻纹枯病生境适宜性评价模型。考虑到经网格化分析后的样本数量有限($n=24$),

采用留一法(Leave-one-out cross validation)对模型进行评价,并对病害生境适宜性评价等级与实际病情等级的比率进行对比分析。此外,为探究研究区水稻纹枯病生境适宜性的空间分布格局,利用冷热点分析确定病害生境适宜性在空间上的高值聚集区(热点)和低值聚集区(冷点)。基于模型输出的水稻纹枯病生境适宜性评价结果图,运用ArcGIS10.0软件中的Getis-Ord Gi*工具进行冷热点分析,冷热点分布根据置信区间分为6个等级,分别在99%、95%和90%置信区间的冷点与热点分布(刘宥延等,2020)。水稻纹枯病生境适宜性评价的整体技术路线如图2所示。

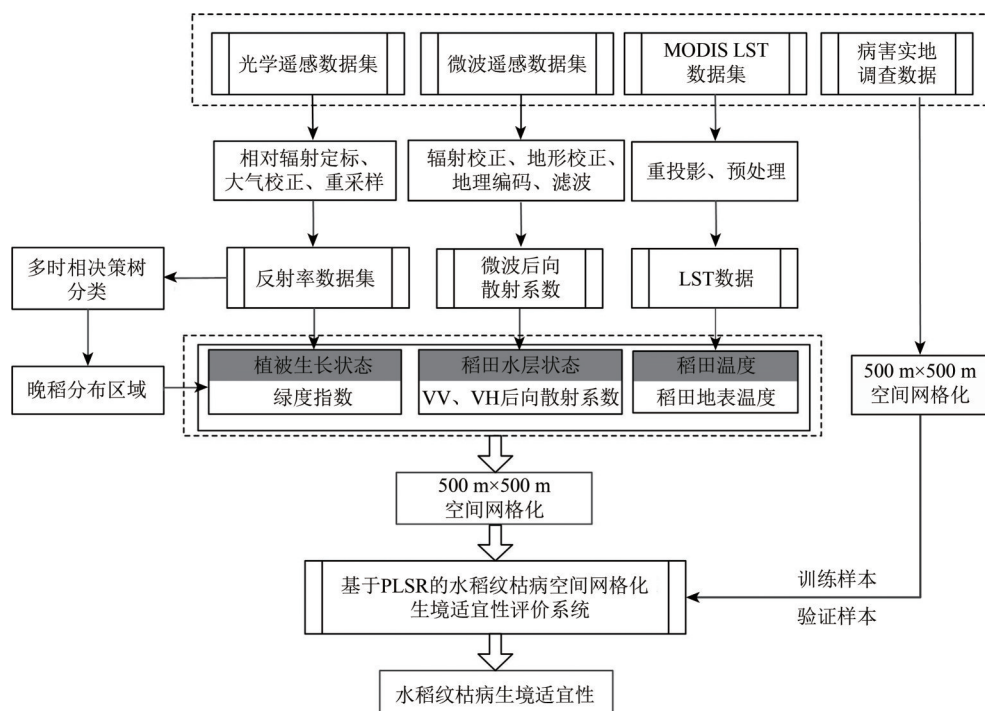


图2 论文整体技术路线图

Fig. 2 Technical workflow of this paper

3 结果分析与讨论

3.1 基于多时相遥感影像的晚稻面积提取结果分析

在研究区晚稻面积提取的决策树模型中,基于每种地物类型50个参考样点,通过统计分析确定分类阈值。NDVI及其时相变化在各类地物区分方面表现出很高的敏感性,尤适于区分作物与其他地物,因此根据NDVI及NDVI时相特征构建决策树模型。本研究借鉴相关文献及经验,利用

建筑物具有较低NDVI这一特点,参考研究区不同类型样本点NDVI统计值范围,将 $0 < \text{NDVI} \leq 0.18$ 设为建筑物分类标准(王润,2018)。根据经验将 $\text{NDVI} \leq 0$ 的区域划分为水体区域。此外,由于晚稻地块在移栽期(6月上旬)大体是封盖薄水层的土壤,绿色植被覆盖度较低,此时中稻处于分蘖期,地块已被水稻植株覆盖;而晚稻地块在分蘖期(7月中旬)基本被水稻植株覆盖,因此中稻在两个时相的影像差异不大,晚稻差异明显。这种差异在两个时相NDVI影像的直方图上亦能得到体现,相比晚稻移栽期的NDVI直方图,分蘖期

的NDVI直方图中高值部分占比显著增加，体现了水稻生长引起的变化（图3）。因此，晚稻在7月中旬的分蘖期NDVI值较6月上旬的移栽期显著上升，而中稻及其他植被的NDVI则无显著变化，这一特点可作为晚稻面积的提取依据。利用2018年

6月6日与7月18日 Sentinel-2影像分别提取 $NDVI_{Jun}$ 与 $NDVI_{Jul}$ ，根据晚稻在7月下旬与6月中旬NDVI显著变化的特点，将 $NDVI_{Jul}-NDVI_{Jun}>0.3$ 的区域划分为晚稻。

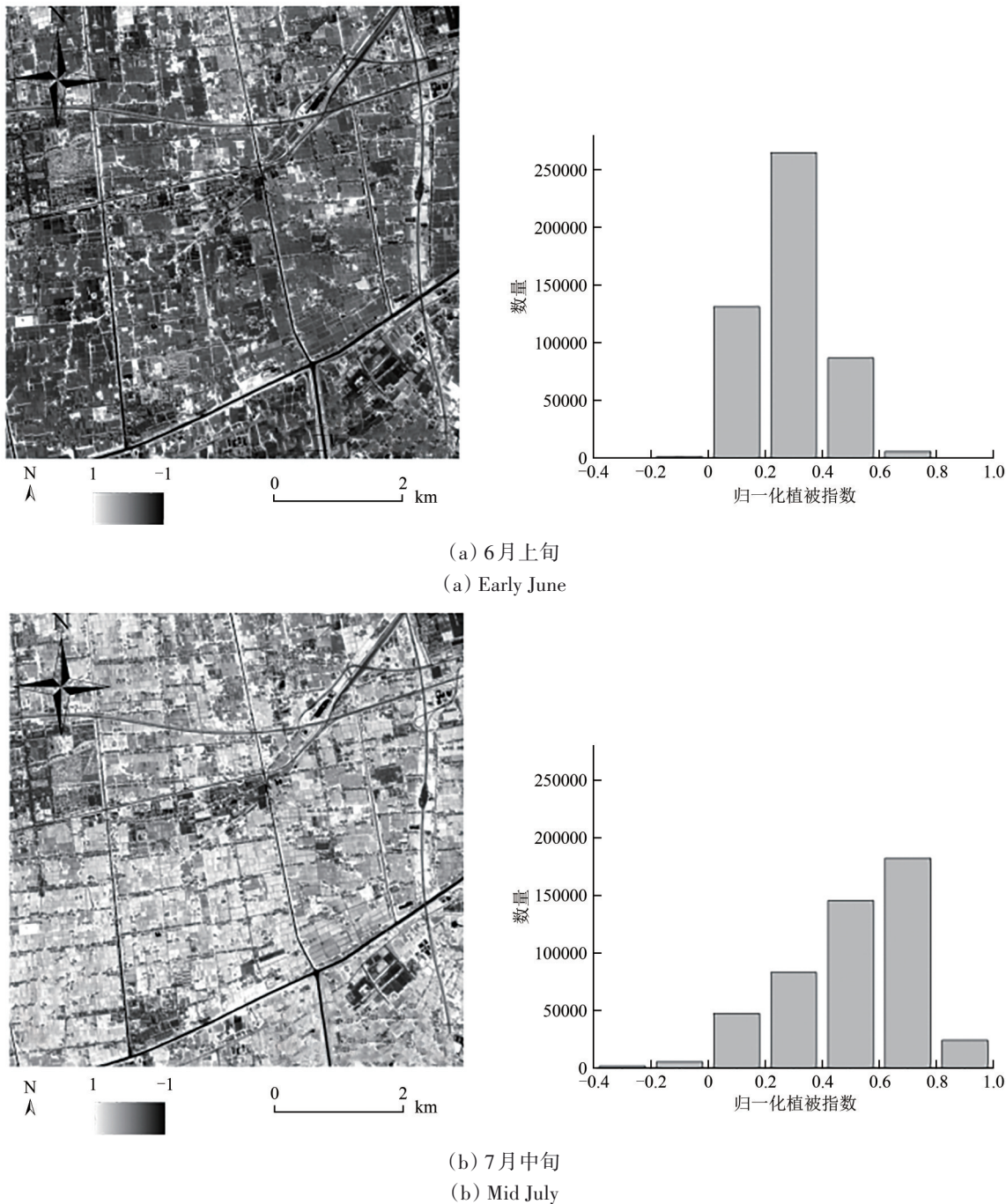


图3 研究区局部不同时相NDVI影像及直方图
Fig. 3 NDVI images and histograms of different time phases in some study area

最终构建的分类决策树及晚稻面积提取结果如图4所示，分类结果显示，晚稻是研究区内的主要作物，其中研究区北部种植面积较大且连片，

与该区实际的水稻种植分布相符，与地面样点对比分类精度达96%。

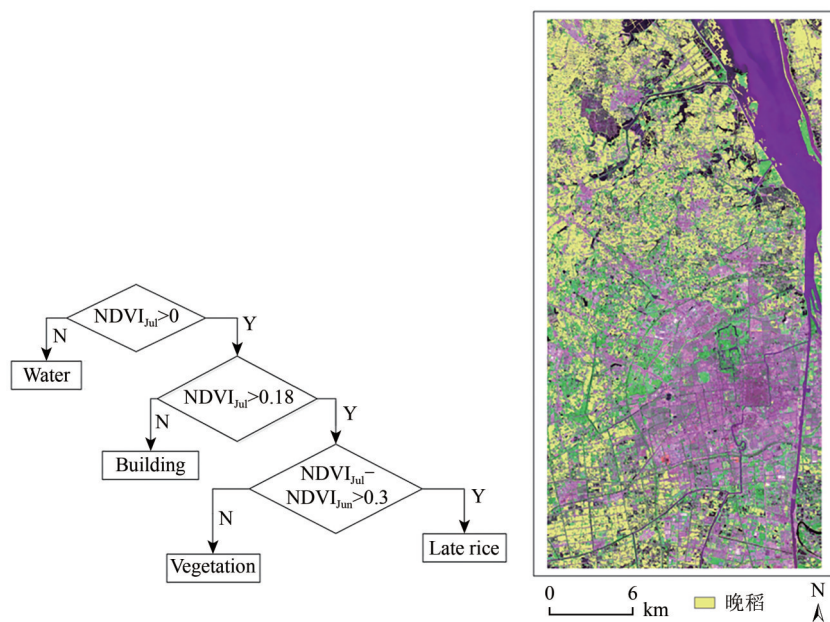


图4 研究区地物分类决策树及晚稻面积提取结果

Fig. 4 Classification decision tree and late rice area extraction results

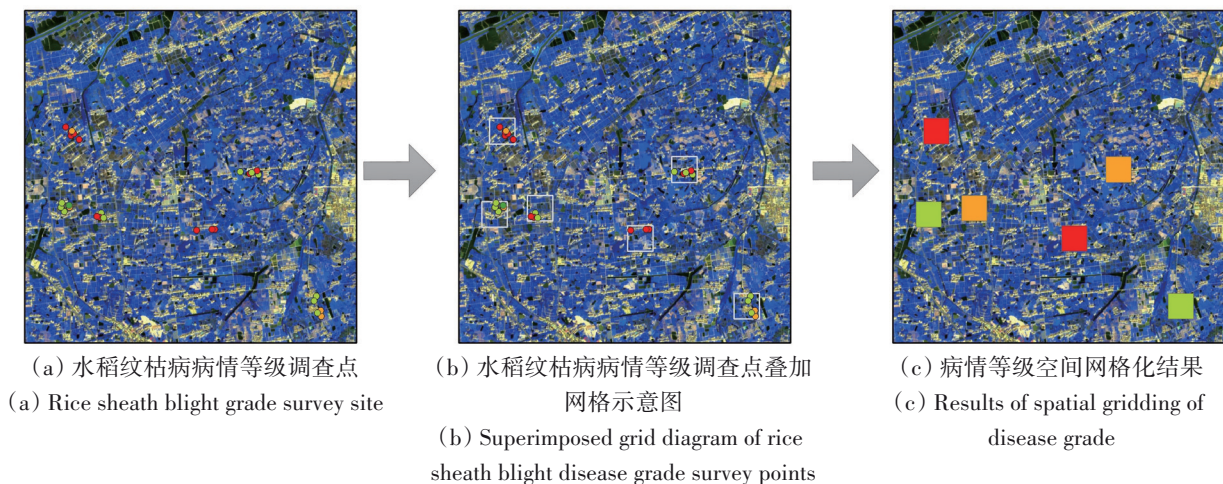
3.2 水稻纹枯病生境因素监测结果与分析

基于光学、微波和热红外遥感数据处理和分析的基础上,进行空间网格化处理,得到水稻生长状态、稻田水层状态、稻田地表温度等生境特征500 m×500 m的水稻纹枯病生境因素遥感监测结果(图5)。与像素尺度的病害生境特征相比,生境特征的网格化分析有利于在一个相对宏观的尺度下体现区域中寄主、环境等病害生境因素的差异。

稻田水层状态生境因素2018年和2019年空间分布如图6(a)—(d)所示,两年间后向散射系数的空间分布较为一致,其中2019年整体相对较低,研究区北部、中部地区田块的VV、VH后向散射系数相对较低。晚稻生长状态生境因素的2018年和2019年空间分布如图6(e)、图6(f)所示,两年

绿度指数空间分布较为一致,其中2019年整体相对较高,研究区中部地区田块的绿度指数相对较高。晚稻连续4个时相的田块地表温度生境因素2018年和2019年空间分布如图6(g)—6(n),两年间田块地表温度空间分布较为一致,其中南部和中部地区田块(靠近城市)的地表温度相对较高。

进一步根据地理坐标,对不同水稻纹枯病情等级下的各生境遥感因素进行统计分析,发现多个生境因素与病情等级间存在正向或负向的相关关系(图7)。其中,病情等级随VV极化值和VH极化值增大逐渐减轻,呈一定的负相关;病情等级随绿度指数增大逐渐加重,呈一定的正相关;在4个时相上,病情等级整体上随LST积温的增加逐渐上升。



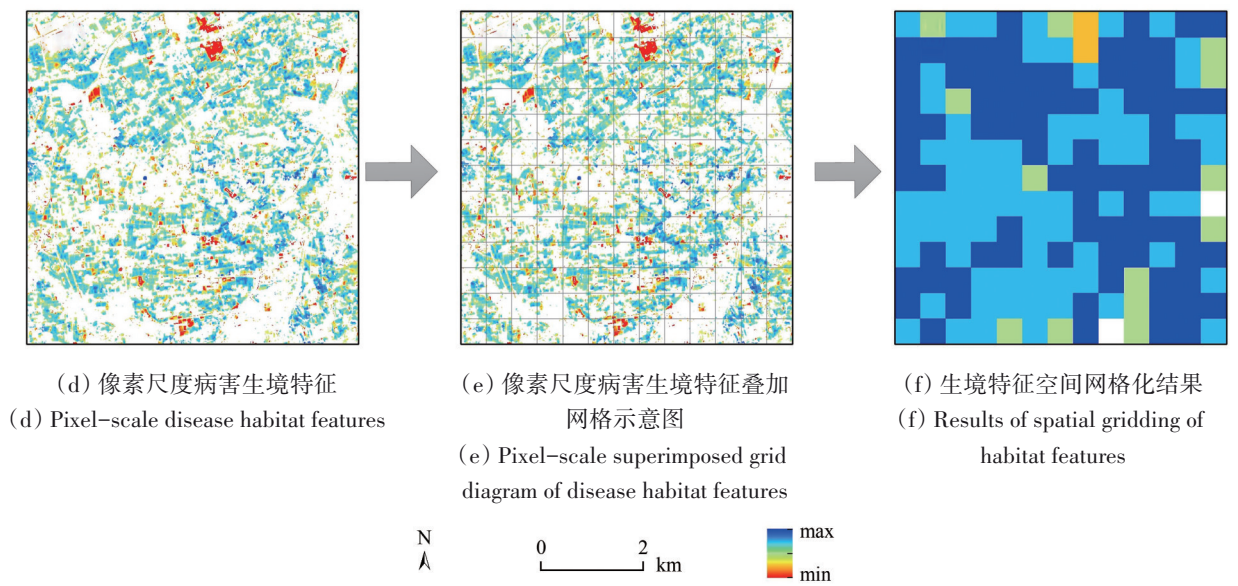
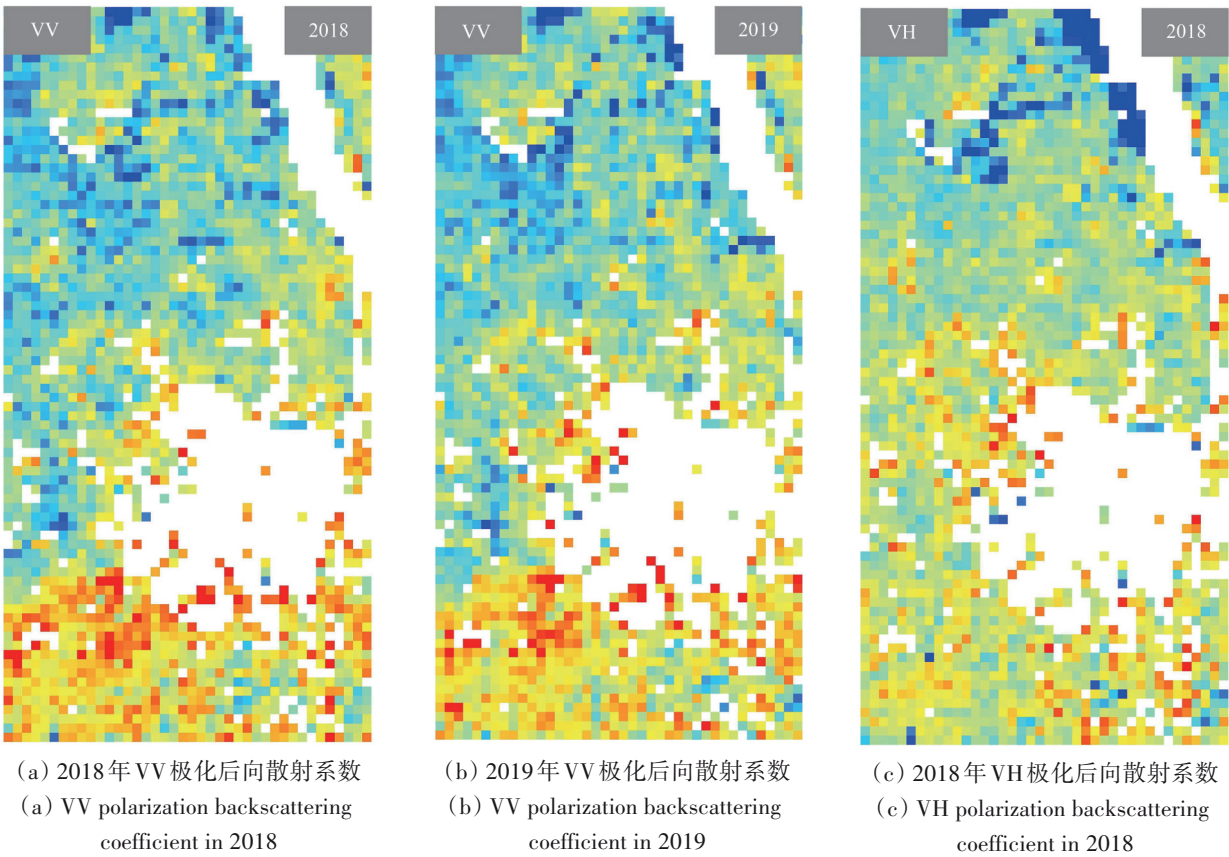
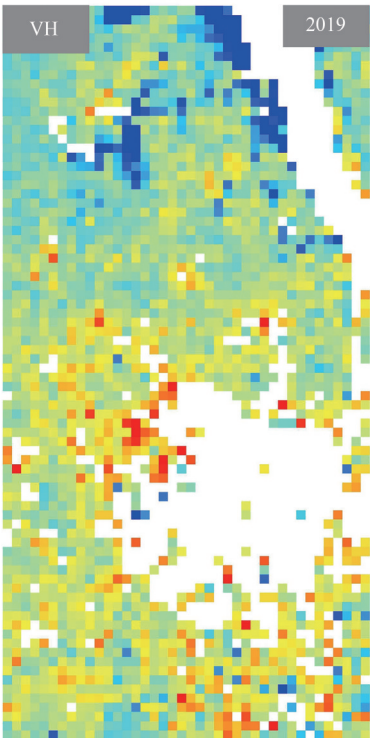


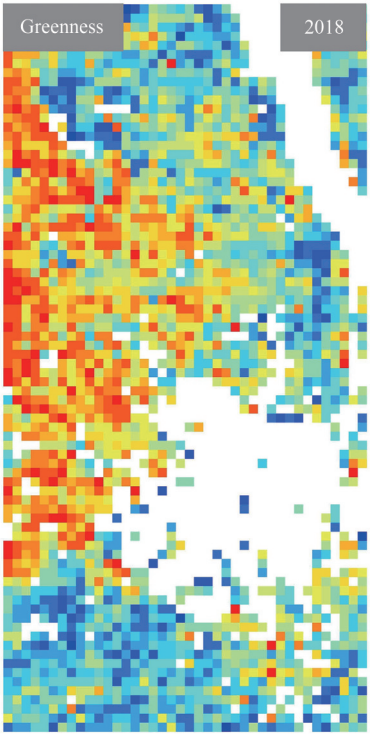
图5 水稻纹枯病情等级及生境遥感特征空间网格化分析示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the spatial gridding analysis of rice sheath blight disease grade and remote sensing features of habitat

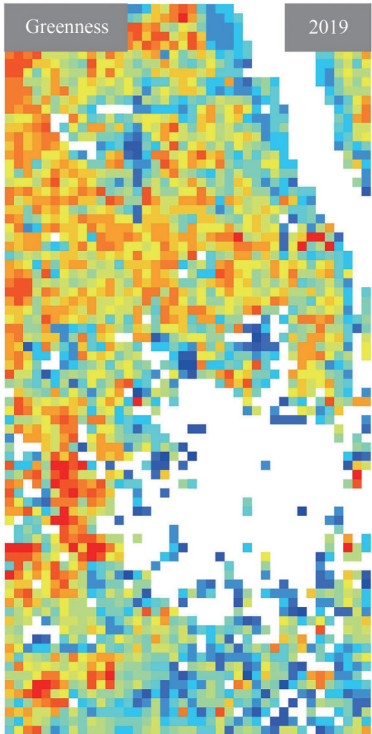




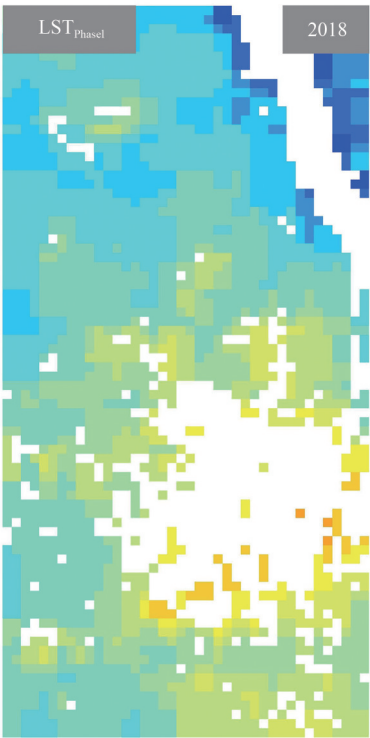
(d) 2019年VH极化后向散射系数
(d) VH polarization backscattering coefficient in 2019



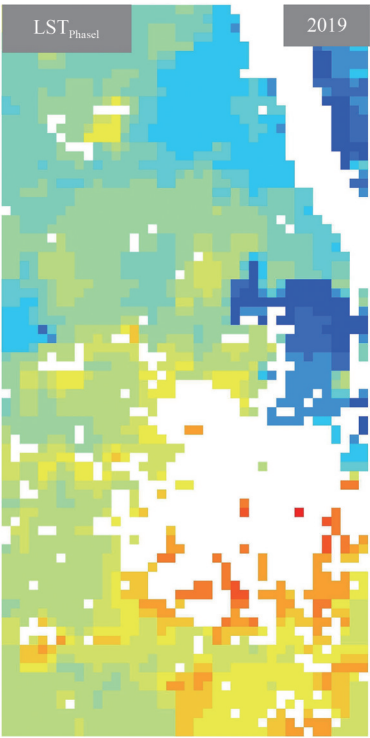
(e) 2018年绿度指数
(e) Greenness index in 2018



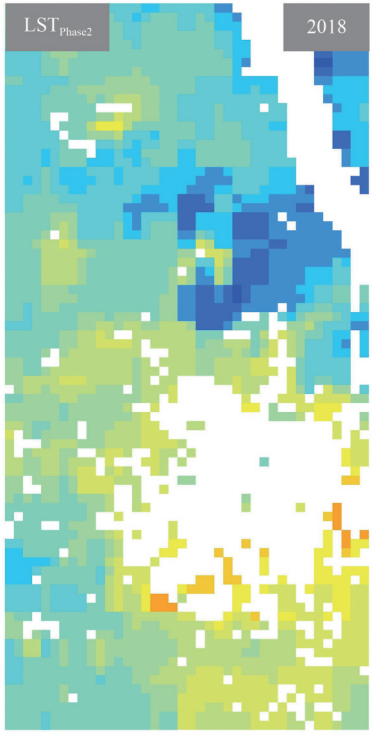
(f) 2019年绿度指数
(f) Greenness index in 2019



(g) 2018年时相1的田块地表温度
(g) LST of the field for phase 1 in 2018



(h) 2019年时相1的田块地表温度
(h) LST of the field for phase 1 in 2019



(i) 2018年时相2的田块地表温度
(i) LST of the field for phase 2 in 2018

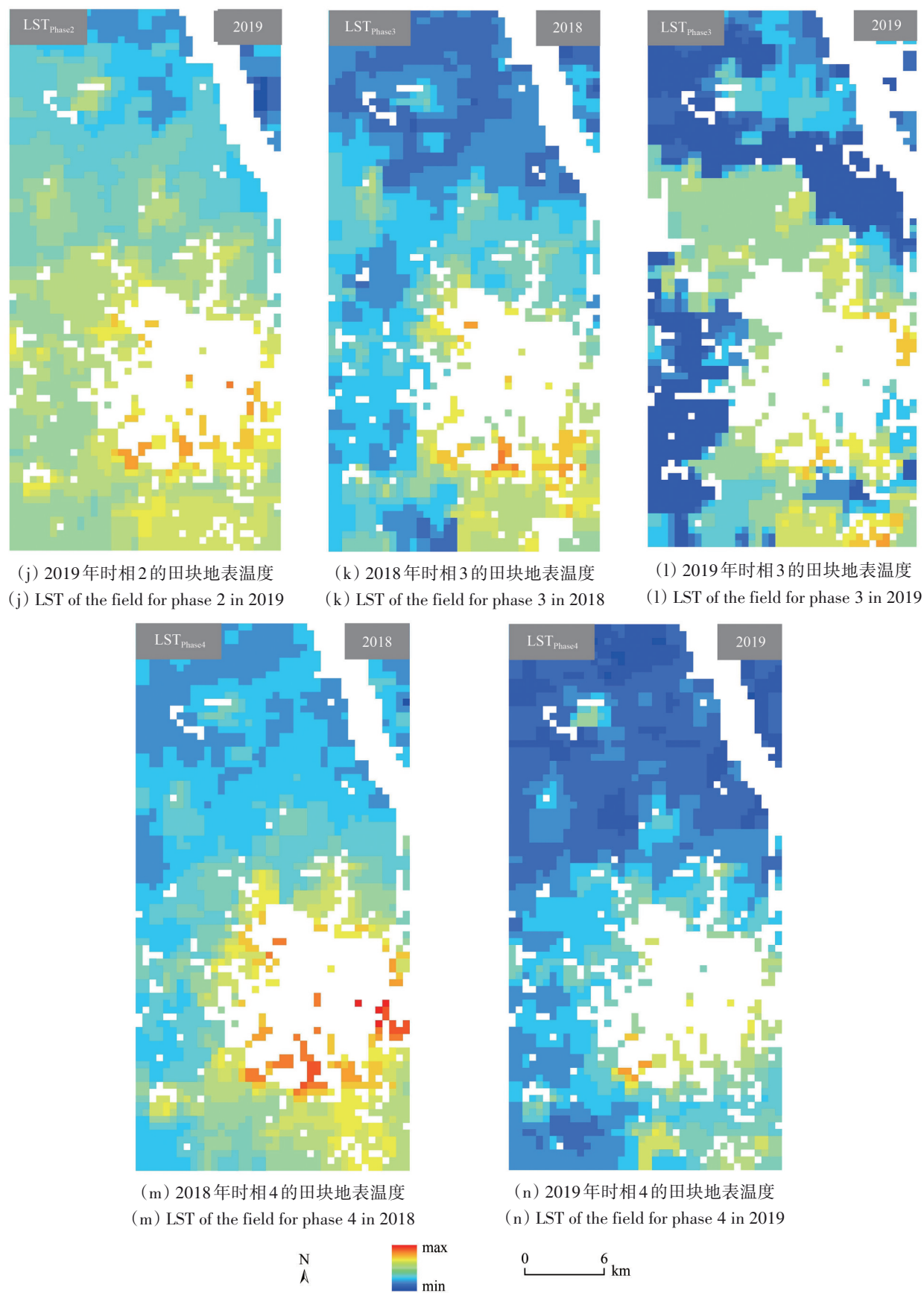


图6 基于网格尺度的晚稻病害生境特征
Fig. 6 Features of late rice disease habitat based on grid scale

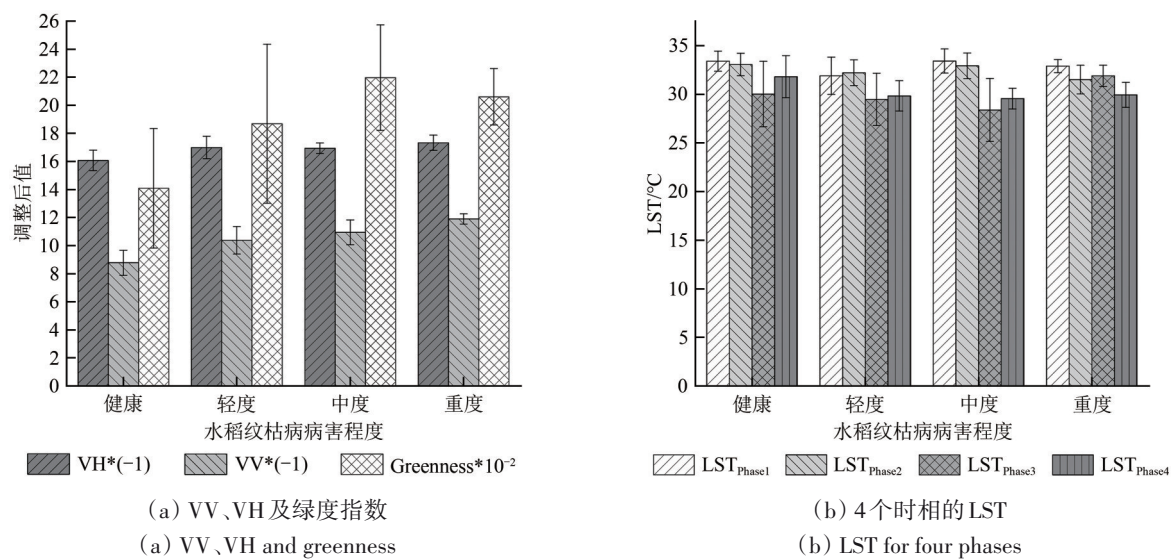


图7 不同病情等级下生境特征对比

Fig. 7 Comparison of habitat features under different disease grades

根据遥感生境因素与水稻纹枯病病情等级的相关性分析（表2），VV极化值与病情等级相关性最高，其次是绿度指数。水稻纹枯病在分蘖期间是否适时进行晾田处理对纹枯病的流行和发展具有重要影响，适时晾田可以增加田间通风透光，降低田间相对湿度，有效抑制病害蔓延，减少菌核漂移传播机会（Castilla等，1996；赖传雅和袁高庆，2008；张涛宏，2019）。而利用分蘖期间微波影像VV极化特征能够表征这一时期稻田水层状态，指示稻田中是否存在有利于扩散发展的生境条件，因此VV极化特征表现出了较强的敏感性。另一方面，绿度指数能够较好地响应寄主作物的

密度及N素等生长和营养状态（如在密度较大、N素较高的群体中绿度指数较高），因此表现出对病害的敏感性（黄文江等，2015）。除此之外，发现病情等级与LST_{Phase1}（该年从分蘖期开始的第一个时相）及LST_{Phase3}的敏感性相对较低，可能是由于病情等级响应多个生境因素，如寄主的生长状态、生育期、降雨、光照等因素，因此，LST的影响可能与其他因子综合后共同作用影响病害的发生流行，使其与病情等级之间未体现出直接的相关性（Guzman-Plazola等，2003；胡根生等，2017；Merle等，2020）。

表2 遥感生境因素与水稻纹枯病病情等级相关性分析结果

Table 2 Correlation analysis results between remote sensing habitat factors and disease grade of rice sheath blight							
	VH	VV	Greenness	LST _{Phase1}	LST _{Phase2}	LST _{Phase3}	LST _{Phase4}
病情等级	-0.454	-0.702	0.618	-0.308	-0.571	-0.254	-0.452
VH	1.000	0.628	-0.173	0.476	0.270	0.488	0.465
VV		1.000	-0.721	0.487	0.576	0.550	0.765
Greenness			1.000	-0.384	-0.539	-0.356	-0.493
LST _{Phase1}				1.000	0.428	0.826	0.783
LST _{Phase2}					1.000	0.424	0.579
LST _{Phase3}						1.000	0.662
LST _{Phase4}							1.000

3.3 基于遥感生境因素空间网格化病害生境适宜性评价结果与分析

基于多源遥感信息提取水稻分布区域的绿度指数、VV极化后向散射系数、VH极化后向散射

系数以及4个时相的LST病害相关生境特征，经网格化处理后，驱动构建的PLS模型得到研究区2018年、2019年病害生境适宜性评价结果。为确定生境适宜性评价结果的等级阈值，将评价结果

与实际病情等级对比并进行分段处理,得到了2018年和2019年的病害生境适宜性评价结果图(图8)。病害生境适宜性评价结果与实际病害发生情况总体吻合,两个年份实际病害发生分布和等级的 R^2 分别为0.65和0.60,呈现较高的一致性。从病害生境适宜性评价的空间分布图中可以看出,2018年和2019年的结果均呈现北部、南部病害适宜性较低,中部适宜性较高的格局,与病害实地调查情况高度一致。其中,2018年69%的区域生境适合水稻纹枯病发生,2019年94%的区域生境

适合水稻纹枯病发生,发病范围更大,发生等级更严重。为探究病害生境适宜性空间分布情况,依据2018年和2019年病害生境适宜性评价结果得到的冷热点分布图(图9)。2018的热点区主要分布在中北部,2019年的热点区主要分布在中部地区,表明这些区域病害生境适宜性较高;2018年的冷点区集中在东南部,2019年的冷点区主要分布在西南部,这些区域为病害生境不适宜区域。总体来说,病害生境适宜性的冷热点分布格局与病害在区域中发生的情况高度相符。

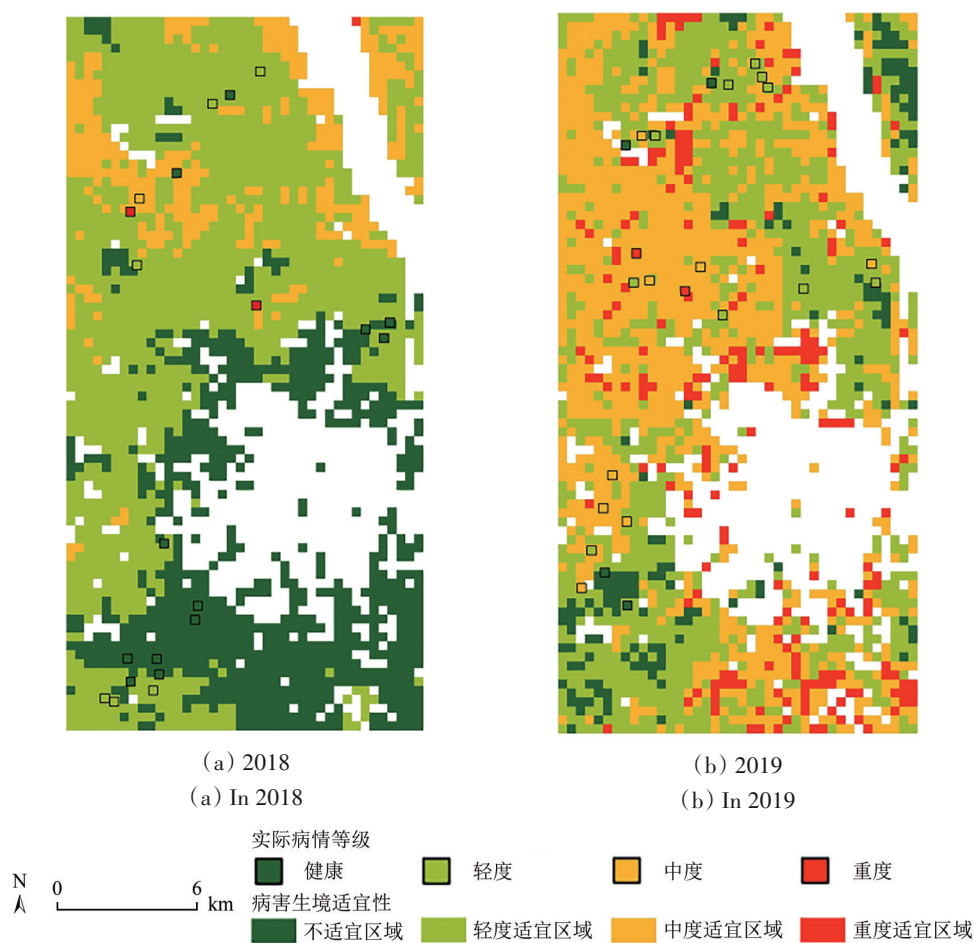


图8 水稻纹枯病生境适宜性评价结果及实际病情等级对比示意图

Fig. 8 Results of habitat suitability evaluation of rice sheath blight and comparison diagram of actual disease grade

为进一步对比水稻纹枯病生境适宜性评价结果与实际发病等级,对各病情等级下的不同生境适宜性程度的比率进行统计(图10)。结果显示,2018年、2019年生境适宜性评价结果与实际发病等级比率增长趋势相一致,其中在病情等级为“轻度”的样本中,“轻度适宜”的比率较“健康”的样本有所提升,分别为85.71%、52.27%;在病情等级为“中度”的样本中“中度适宜”的比率

相较“轻度”样本有大幅提升,分别为50.00%、68.75%,上升幅度达35.71%、27.84%;而在病情等级为“重度”的样本中,评价为“中度适宜”的比率进一步增加,在2018年达到75.00%,在2019年则升至87.50%。整体上,随病情等级的增加,病害生境适宜性程度及比率随之提高,在生境适宜性评价程度较高的区域,实际病害发病等级相对较重。

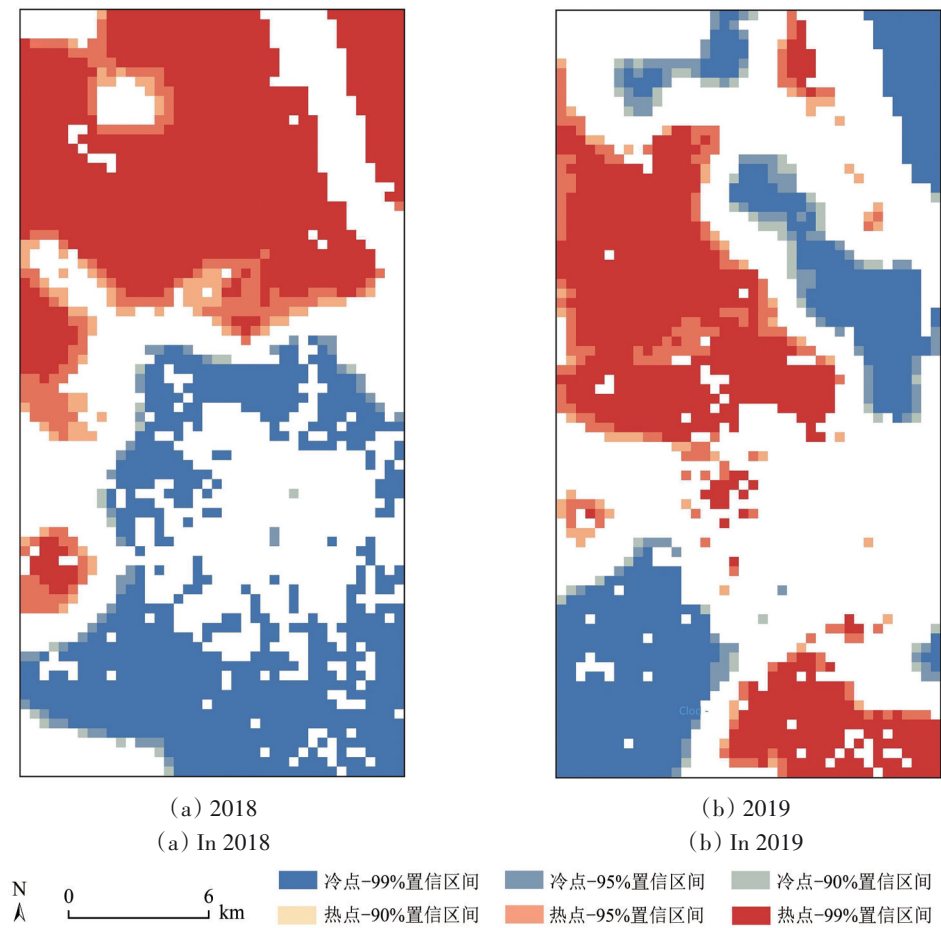


图9 水稻纹枯病生境适宜性冷热点分布图

Fig. 9 Cold and hot distribution map of rice sheath blight habitat suitability

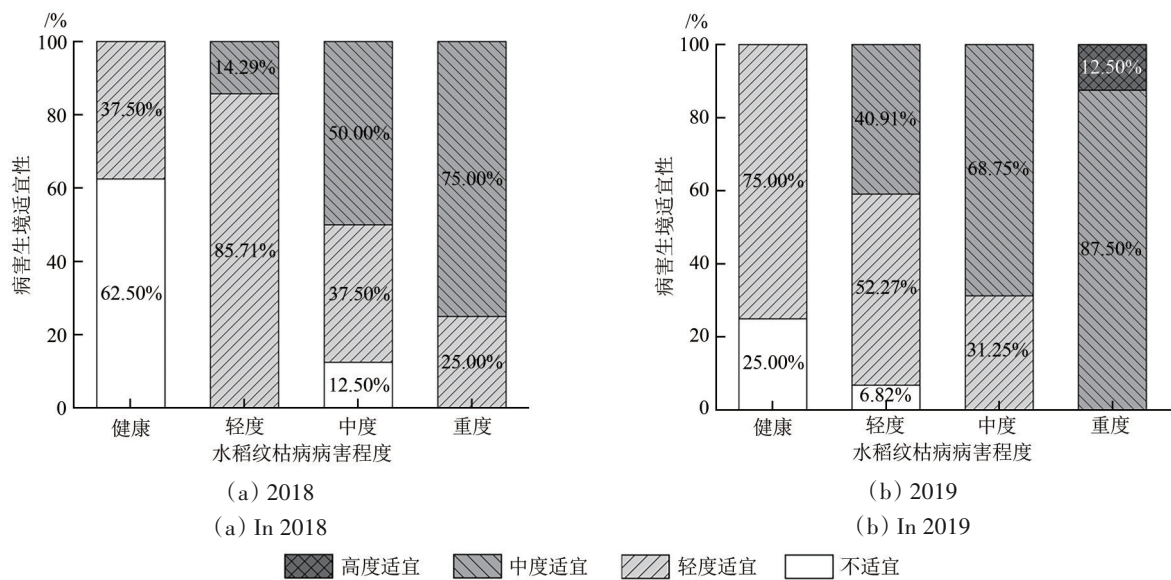


图10 不同病情等级的生境适宜性评价结果比率组成

Fig. 10 Ratio composition of habitat suitability evaluation results for different disease grades

通过上述分析，基于多源遥感数据表征的水稻纹枯病生境因素，包括寄主生长状态、稻田水层状态、稻田地表温度，能够有效评价水稻纹枯

病的生境适宜性。此外，为进一步探索综合了微波数据表征的稻田水层状态因素的模型与未包含该因素对病害生境适宜性评价效果的影响，尝试

仅利用寄主生长状态、稻田地表温度因素作为输入变量,建立了未考虑稻田水层状态的PLS模型。结果显示,缺少微波数据表征的稻田水层状态因素的模型 R^2 为0.47,明显低于包含稻田水层状态遥感监测因素的模型评价结果。这表明微波数据表征的稻田水层状态因素对生境适宜性模型的精度有显著提高的作用。微波数据源与光学数据存在较大差异,光学遥感主要基于可见光—近红外波段对植被长势相关信息具有较高的敏感性;而微波遥感具备穿透植被的能力,可探测水层状态因素,所荷载的信息能够有效对光学遥感和红外遥感观测数据反演的生境信息进行补充。微波数据所反映的水层状态在其他遥感、气象信息中未能得到有效体现,但这部分信息与病害发生存在密切关系。因此包含了微波信息的模型精度有较大幅度提升,并且综合多源遥感信息对于水稻纹枯病生境适宜性评价具有重要意义。因为水稻纹枯病生境涉及多方面,且稻田水层的有无对水稻纹枯病的发生起着重要作用,只利用某一方面的生境对病害生境适宜性进行评价具有一定局限性。

4 结 论

本研究探讨了通过多源遥感数据评价水稻纹枯病生境适宜性的可行性,首次将光学、微波、热红外等多种遥感观测数据综合应用于病害生境评价,结合多年份大范围病害实地调查数据,对寄主分布、寄主生长状态、稻田地表温度、稻田水层状态等病害生境因素进行了面状连续的表征和生境适宜性评价建模。研究表明,基于多源遥感数据能够实现对水稻纹枯病重要生境因素的有效表征,通过结合空间网格化分析和PLS回归方法,能够在区域尺度有效建立生境因素与病害潜在发生及等级间关系。

本研究提出的综合多源遥感数据的病害生境适宜性评价方法虽取得了较为理想的结果,但在病虫害生境评价研究方面仍有一些问题需要在后续的研究中继续深入:(1)目前病虫害生境适宜性评价研究和应用仍限于少数作物病虫害,本研究提出的生境适宜性评价方法应在更多大田或经济作物病虫害上进行检验和完善;(2)随着多种新型观测手段的不断发展和性能不断增强,病害生境因素监测的数据源可扩展至气象、遥感、地面传感网等多源数据。这些数据能够为病害生境

评价提供环境、寄主、病原等多个方面的关键信息,从而支持建立更全面综合的病害生境适宜性评价模型;(3)作物病害生境适宜性评价可以指示病害潜在的适宜发生范围,而基于植物病害流行动力学的数学模型能够描述病原侵入、繁殖及与寄主互作等病害流行机理过程。因此,如能将作物病害生境适宜性评价结果与机理性模型耦合,构建时空动态病害预测模型,对未来进行时空动态的区域尺度病害预测和防控具有重要意义。

参考文献(References)

- Agrios G N. 2009. Plant Pathology. Shen C Y, trans. 5th ed. Beijing: China Agricultural University Press (Agrios G N. 2009. 植物病理学. 沈崇尧, 译. 5版. 北京: 中国农业大学出版社)
- Bennett F G A. 1984. Resistance to powdery mildew in wheat: a review of its use in agriculture and breeding programmes. *Plant Pathology*, 33(3): 279-300 [DOI: 10.1111/j.1365-3059.1984.tb01324.x]
- Cao Y. 2021. Temporal and Spatial Characteristics of Surface Deformation and Soil Water in Coal Mining Area of Changhe River Basin on the Loess Plateau based on Microwave Remote Sensing. Taiyuan: Shanxi Agricultural University (曹毅. 2021. 基于微波遥感的黄土高原长河流域采煤区地表形变与土壤水时空特征. 太原: 山西农业大学) [DOI: 10.27285/d.cnki.gsxnu.2021.000815]
- Castilla N P, Leño R M, Elazhour F A, Teng P S and Savary S. 1996. Effects of plant contact, inoculation pattern, leaf wetness regime, and nitrogen supply on inoculum efficiency in rice sheath blight. *Journal of Phytopathology*, 144(4): 187-192 [DOI: 10.1111/j.1439-0434.1996.tb01512.x]
- Chen Z X, Ren J Q, Tang H J, Shi Y, Leng P, Liu J, Wang L M, Wu W B, Yao Y M and Hasiyuya. 2016. Progress and perspectives on agricultural remote sensing research and applications in China. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(5): 748-767 (陈仲新, 任建强, 唐华俊, 史云, 冷佩, 刘佳, 王利民, 吴文斌, 姚艳敏, 哈斯图亚. 2016. 农业遥感研究应用进展与展望. 遥感学报, 20(5): 748-767) [DOI: 10.11834/jrs.20166214]
- Clevers J G P W and Gitelson A A. 2013. Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23: 344-351 [DOI: 10.1016/j.jag.2012.10.008]
- Da Silva J R M, Damásio C V, Sousa A M O, Bugalho L, Pessanha L and Quaresma P. 2015. Agriculture pest and disease risk maps considering MSG satellite data and land surface temperature. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 38: 40-50 [DOI: 10.1016/j.jag.2014.12.016]
- Gbogbo A Y, Kouakou B K, Dabo-Niang S and Zoueu J T. 2022. Predictive model for airborne insect abundance intercepted by a continuous wave Scheimpflug lidar in relation to meteorological parameters. *Ecological Informatics*, 68: 101528 [DOI: 10.1016/j.ecoinf.2021.101528]
- Gilligan C A. 2008. Sustainable agriculture and plant diseases: an epi-

- demiological perspective. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492): 741-759 [DOI: 10.1098/rstb.2007.2181]
- Guzman-Plazola R A, Davis R M and Marois J J. 2003. Effects of relative humidity and high temperature on spore germination and development of tomato powdery mildew (*Leveillula taurica*). *Crop Protection*, 22(10): 1157-1168 [DOI: 10.1016/S0261-2194(03)00157-1]
- Hu G S, Wu W T, Luo J H, Huang W J, Liang D and Huang L S. 2017. Remote sensing monitoring of wheat aphids by combining HJ satellite images with least squares twin support vector machine model. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 43(2): 211-219 (胡根生, 吴问天, 罗菊花, 黄文江, 梁栋, 黄林生. 2017. 结合 HJ 卫星影像和最小二乘孪生支持向量机的小麦蚜虫遥感监测. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 43(2): 211-219) [DOI: 10.3785/j.issn.1008-9209.2016.08.021]
- Huang W J, Zhang J C, Luo J H, Zhao J L, Huang L S and Zhou X F. 2015. Remote Sensing Monitoring and Prediction of Crop Diseases and Pests. Beijing: Science Press (黄文江, 张竞成, 罗菊花, 赵晋陵, 黄林生, 周贤锋. 2015. 作物病虫害遥感监测与预测. 北京: 科学出版社)
- Lai C Y and Yuan G Q. 2008. *Agricultural Plant Pathology*. 2nd ed. Beijing: Science Press (赖传雅, 袁高庆. 2008. 农业植物病理学. 2版. 北京: 科学出版社)
- Li H J, Song X P, Hansen M C, Becker-Reshef I, Adusei B, Pickering J, Wang L, Wang L, Lin Z Y, Zalles V, Potapov P, Stehman S V and Justice C. 2023. Development of a 10-m resolution maize and soybean map over China: matching satellite-based crop classification with sample-based area estimation. *Remote Sensing of Environment*, 294: 113623 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113623]
- Li P, Ding L, Zhang J C and Mu J W. 2016. Effects of different cultivation and management measures on rice sheath blight. *Modernizing Agriculture*, (11): 1-2 (李鹏, 丁亮, 张金成, 穆娟微. 2016. 不同栽培管理措施对水稻纹枯病的影响. *现代化农业*, (11): 1-2) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-0254.2016.11.001]
- Li P L. 2017. Symptoms of transmission and prevention measures of rice sheath blight. *Agriculture and Technology*, 37(1): 25-26 (李沛霖. 2017. 水稻纹枯病的症状传播途径及防治措施. *农业与技术*, 37(1): 25-26) [DOI: 10.11974/nyyjs.20170132010]
- Liu W C, Liu Z D, Huang C, Lu M H, Liu J and Yang Q P. 2016. Statistics and analysis of crop yield losses caused by main diseases and insect pests in recent 10 years. *Plant Protection*, 42(5): 1-9, 46 (刘万才, 刘振东, 黄冲, 陆明红, 刘杰, 杨清坡. 2016. 近 10 年农作物主要病虫害发生危害情况的统计和分析. *植物保护*, 42(5): 1-9, 46) [DOI: 10.3969/j.issn.0529-1542.2016.05.001]
- Liu Y Y, Liu X Y, Zhang B and Li M Y. 2020. Spatial features analysis of water conservation function in the hilly areas of the Loess Plateau based on InVEST model. *Acta Ecologica Sinica*, 40(17): 6161-6170 (刘宥延, 刘兴元, 张博, 李妙莹. 2020. 基于 InVEST 模型的黄土高原丘陵区水源涵养功能空间特征分析. *生态学报*, 40(17): 6161-6170) [DOI: 10.5846/stxb201910102108]
- Merle I, Tixier P, de Melo Virginio Filho E, Cilas C and Avelino J. 2020. Forecast models of coffee leaf rust symptoms and signs based on identified microclimatic combinations in coffee-based agroforestry systems in Costa Rica. *Crop Protection*, 130: 105046 [DOI: 10.1016/j.cropro.2019.105046]
- Nedkov R. 2017. Orthogonal transformation of segmented images from the satellite sentinel-2. *Comptes Rendus de l'Académie Bulgare des Sciences*, 70(5): 687-692
- Niu Z, Li J H, Gao Z H, Gong E D, Zhang S M, Zhang J, Liu S, Ouyang X Y and Zhang R. 2018. Ecological environment monitoring for sustainable development goals in the Belt and Road region. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 22(4): 680-685 (牛铮, 李加洪, 高志海, 宫阿都, 张松梅, 张景, 刘爽, 欧阳晓莹, 张瑞. 2018. 《全球生态环境遥感监测年度报告》进展与展望. *遥感学报*, 22(4): 680-685) [DOI: 10.11834/jrs.20188060]
- Peng S Q, Zeng Z R and Zhang Z G. 1986. *Rice Sheath Blight and its Control*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press (彭绍裘, 曾昭瑞, 张志光. 1986. 水稻纹枯病及其防治. 上海: 上海科学技术出版社)
- Strand J F. 2000. Some agrometeorological aspects of pest and disease management for the 21st century. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103(1/2): 73-82 [DOI: 10.1016/S0168-1923(00)00119-2]
- Sun Y Y. 2018. Synergetic Inversion of Surface Soil Moisture based on C/L Band Active and Passive Microwave Remote Sensing. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research (孙亚勇. 2018. 基于 C 和 L 波段主被动微波遥感的土壤水分协同反演研究. 北京: 中国水利水电科学研究院)
- Tang Q L. 2023. Inversion of Soil Ecological Water of Hongyuan County in Western Sichuan Plateau Based on Optics and Microwave Remote Sensing Collaboration. Chengdu: Chengdu University of Technology (唐巧林. 2023. 川西高原红原县光学/微波协同植被土壤生态水遥感反演. 成都: 成都理工大学) [DOI: 10.26986/d.cnki.gcdlc.2021.000727]
- Tian Y Y. 2021. Habitat Suitability Evaluation of Rice Sheath Blight based on Multi-Source Satellite Remote Sensing Data. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University (田洋洋. 2021. 基于多源卫星遥感数据的水稻纹枯病生境适宜性评价研究. 杭州: 杭州电子科技大学) [DOI: 10.27075/d.cnki.ghzdc.2021.000747]
- Topp G C, Davis J L and Annan A P. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16(3): 574-582 [DOI: 10.1029/WR016i003p00574]
- Wang R. 2018. Research on Key Technologies of Remote Sensing Urban Land Monitoring at Regional Scale. Wuhan: China University of Geosciences (王润. 2018. 区域尺度城市土地遥感监测关键技术研究. 武汉: 中国地质大学)
- Wang Y Y, Fang S H, Zhao L L, Huang X X and Jiang X Q. 2022. Parcel-based summer maize mapping and phenology estimation combined using Sentinel-2 and time series Sentinel-1 data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 108: 102720 [DOI: 10.1016/j.jag.2022.102720]
- Wu J G. 2007. *Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy*. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press (邬建国. 2007. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级. 2版. 北京: 高等教育出版社)
- Xu X J, Ji X S, Jiang J L, Yao X, Tian Y C, Zhu Y, Cao W X, Cao Q, Yang H J, Shi Z K and Cheng T. 2018. Evaluation of one-class support vector classification for mapping the paddy rice planting area in Jiangsu province of China from Landsat 8 OLI imagery. *Remote Sensing*, 10(4): 546 [DOI: 10.3390/rs10040546]
- Yang Z, Shao Y, Li K, Liu Q B, Liu L and Brisco B. 2017. An improved scheme for rice phenology estimation based on time-series multispec-

- tral HJ-1A/B and polarimetric RADARSAT-2 data. Remote Sensing of Environment, 195: 184-201 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.04.016]
- Yuan L, Bao Z Y, Zhang H B, Zhang Y T and Liang X. 2017. Habitat monitoring to evaluate crop disease and pest distributions based on multi-source satellite remote sensing imagery. Optik, 145: 66-73 [DOI: 10.1016/j.ijleo.2017.06.071]
- Zhang J C, Huang Y B, Pu R L, Gonzalez-Moreno P, Yuan L, Wu K H and Huang W J. 2019. Monitoring plant diseases and pests through remote sensing technology: a review. Computers and Electronics in Agriculture, 165: 104943 [DOI: 10.1016/j.compag.2019.104943]
- Zhang J C, Pu R L, Yuan L, Wang J H, Huang W J and Yang G J. 2014. Monitoring powdery mildew of winter wheat by using moderate resolution multi-temporal satellite imagery. PLoS One, 9(4): e93107 [DOI: 10.1371/journal.pone.0093107]
- Zhang T H. 2019. Epidemic causes and comprehensive prevention and control measures of rice sheath blight. Rural Economy and Science-Technology, 30(20): 19, 20 (张涛宏. 2019. 水稻纹枯病流行原因及综合防控对策探讨. 农村经济与科技, 30(20): 19, 20) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-7103.2019.20.013]
- Zhao J L, Du S H and Huang L S. 2022. Monitoring wheat powdery mildew (*Blumeria graminis* f. sp. *tritici*) using multisource and multitemporal satellite images and support vector machine classifier. Smart Agriculture, 4(1): 17-28 [DOI: 10.12133/j. smartag. SA202202009]

Method for evaluating habitat suitability of rice sheath blight at a regional scale based on multi-source remote sensing information

TIAN Yangyang¹, WU Kaihua¹, LI Huizi¹, SHEN Yanyan¹, QIU Hanxiao¹,
ZHAI Jing², ZHANG Jingcheng¹

1. Hangzhou Dianzi University, College of Automation, Hangzhou 310018, China;

2. Ningbo Agricultural Technology Extension Station, Ningbo 315012, China

Abstract: Crop diseases have a severe impact on food security, and the excessive use of pesticides in crop disease prevention and control is a common issue. The evaluation of disease habitat suitability can provide important information for disease forecasting and control. The occurrence of crop diseases is closely associated with factors, such as the growth status of host and environmental conditions, while disease habitat conditions vary considerably due to cultivation practices and microclimate variations in the field. At present, disease habitat monitoring and evaluation are generally coarse, mainly relying on meteorological information and lacking detailed descriptions of spatially heterogeneous factors, such as crop growth status and environmental conditions among fields. In this study, Rice Sheath Blight (RSB), a major disease widespread in rice cultivation, was selected as the research object; the disease surveys were conducted at a county level in 2018 and 2019. Multisource remote sensing data, including optical, microwave, and thermal infrared images, were used for monitoring the key disease habitat factors. Multitemporal Sentinel-2 optical images were utilized to extract the planting area of the host crop, which solved the problem of confusing the host with other vegetation in single phase images; the growth status of host was indicated by the tasseled cap products of Sentinel-2 optical images; the status of water layer in rice field was extracted by combining Sentinel-1 microwave images and Sentinel-2 optical images, the optical image of rice region was segmented by object-oriented analysis method to obtain the rice plot boundary to eliminate the noise of microwave image; and the MODIS land surface temperature products were utilized to reflect the evapotranspiration and respiration status of rice plants. On the basis of these remote sensing habitat features of the RSB and a spatial gridding analysis, the habitat suitability evaluation model was established using the partial least squares regression method.

Validation results against the disease survey data showed that the remote sensing information can effectively characterize the disease habitat features. The R^2 of the habitat suitability evaluation model was 0.60—0.65, and the RMSE was 0.72 and 0.56, respectively, and the output of the model was consistent with the actual spatial pattern of the disease. In addition, the hot and cold spots of the disease habitat suitability map were highly consistent with the actual pattern of disease occurrence in the region. Moreover, the rate of habitat suitability under each disease grade was analyzed, and the results further confirmed the rationality of the evaluation. Therefore, this study demonstrates the feasibility of utilizing multisource remote sensing data in evaluating the disease habitat suitability. The disease habitat evaluation map can be integrated into some disease epidemic models to develop spatiotemporal dynamic disease forecasting models at a regional scale, and multisource data, such as meteorological data, remote sensing data, and ground sensor networks, can be incorporated to establish a more comprehensive habitat suitability evaluation model, which is expected to be beneficial for large-scale disease control.

Key words: rice sheath blight, habitat, remote sensing information, spatial gridding, evaluation model

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42071420); Key Science and Technology Project of Ningbo City (No. 2021Z048)