

# 基于温湿度与遥感植被指数的冬小麦赤霉病估测

李卫国<sup>1</sup>, 黄文江<sup>2</sup>, 董莹莹<sup>2</sup>, 陈 华<sup>1</sup>, 王晶晶<sup>1</sup>, 单 婕<sup>1</sup>

(1. 江苏省农业科学院农业信息研究所, 南京 210014; 2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094)

**摘 要:** 为明晰江淮区域大田冬小麦赤霉病的发生特征, 建立冬小麦赤霉病遥感估测模型, 该文分析了冬小麦赤霉病病情指数与气候因素(不同时间尺度日均气温和日均空气相对湿度)、生长参数(生物量、叶面积指数和叶片叶绿素含量)和光谱信息(NDVI、RVI 和 DVI)之间的互作关系。结果表明: 1) 不同时间尺度日均气温之间存在较好相关性, 5 日均气温与冬小麦赤霉病病情指数间的相关系数最大为 0.77。与日均气温相类似, 不同时间尺度日均空气相对湿度之间也存在不同程度的相关性, 5 日均空气相对湿度与赤霉病病情指数间的相关性最大, 其相关性高于 5 日均气温。2) 冬小麦生物量、叶面积指数和叶片叶绿素含量与赤霉病病情指数之间均呈线性正相关关系, 且均达到显著水平, 说明冬小麦群体密度大、郁闭程度高以及长势过旺是赤霉病易发的主要农学诱因。3) 遥感植被指数 NDVI(normalized difference vegetation index)、RVI(ratio vegetation index)和 DVI(difference vegetation index)分别与冬小麦叶面积指数、生物量和叶片叶绿素含量之间有较好相关性, 可以利用 NDVI、RVI 和 DVI 分别替换叶面积指数、生物量和叶片叶绿素含量参与建模。4) 综合 5 日均气温、5 日均空气相对湿度、NDVI、RVI 和 DVI 5 个敏感因子, 构建基于温湿度与遥感植被指数的冬小麦赤霉病病情指数估测模型, 模型的估测值与实测值较为一致, RMSE 为 5.3%, 相对误差为 9.54%。说明本研究所建立的估测模型可以实现对冬小麦始花期赤霉病的有效估测, 该研究可为江淮区域冬小麦生产中防病减灾的信息获取提供方法参考。

**关键词:** 病害; 评估; 温度; 冬小麦赤霉病; 光谱信息; 相对湿度; 生长参数; 江淮区域

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.23.026

中图分类号: S127

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-23-0203-08

李卫国, 黄文江, 董莹莹, 陈 华, 王晶晶, 单 婕. 基于温湿度与遥感植被指数的冬小麦赤霉病估测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 203-210. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.23.026 http://www.tcsae.org

Li Weiguo, Huang Wenjiang, Dong Yingying, Chen Hua, Wang Jingjing, Shan Jie. Estimation on winter wheat scab based on combination of temperature, humidity and remote sensing vegetation index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(23): 203-210. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.23.026 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

遥感技术具有宏观、快速、准确等优点, 可以对作物长势及病害状况进行无损监测, 经过多年发展, 其良好的时效性与可行性已得到证实。早在 20 世纪初 Taubenhaus 等<sup>[1]</sup>利用航空遥感开展作物病害识别研究, Tolers 等<sup>[2]</sup>用红外航空相片探测了冬小麦条锈病, Lorenzen 等<sup>[3]</sup>认为近红外波段与大麦白粉病病情严重度有较高相关性。Riedell 等<sup>[4]</sup>研究了受麦蚜虫和麦二叉蚜胁迫的冬小麦叶片光谱特征。Devadas 等<sup>[5]</sup>利用多种植被指数对冬小麦叶锈病进行识别与监测。国内开始研究较晚些, 如 Zhao 等<sup>[6]</sup>在分析冬小麦条锈病光谱特征的基础上提出条锈病胁迫指数, 实现对冬小麦条锈病的有效监测。刘良云等<sup>[7]</sup>利用航空 PHI 数据监测了冬小麦条锈病病害程度与范围。蔡成静等<sup>[8]</sup>发现在 930 nm 处冬小麦条锈病病情指数与冠层光谱反射率存在较好相关性。上述研究表明, 冬小麦受到病害胁迫后在可见光、近红外波段会出现一些与未患病作物相区别的光谱特征, 而这些

特征为病害的光谱检测提供了理论依据。此外, 健康、发病及处于潜伏期的冬小麦植株光谱反射率存在显著差异, 一些病情指数与冠层光谱反射率间也存在较好定量关系。如蒋金豹等<sup>[9]</sup>认为能够在症状出现前 12 天识别出健康冬小麦与条锈病害冬小麦。王纪华等<sup>[10]</sup>利用荧光光谱有效探测了冬小麦条锈病的严重度。黄文江<sup>[11]</sup>利用多时相 PHI(push-broom hyper spectral imager)遥感数据实现对冬小麦多生育期条锈病严重度的有效监测等。对冬小麦病害进行早期监测预报, 及时进行科学防治, 是提高冬小麦产量, 减少农田经济损失的关键。

江淮区域是中国重要的冬小麦商品粮种植基地之一。由于受季风影响明显, 夏季降水时空分布不均, 光热多变, 再加上冬小麦种植密度过大(如撒播), 极易出现赤霉病等病害。由于冬小麦生长的气候、环境、栽培措施等异同, 病害又具有发生快、危害重、范围广的特点, 给区域大田冬小麦病害及时监测与信息获取造成很大难度。前人研究多数集中在对冬小麦叶锈病、白粉病的光谱识别与监测上<sup>[11-13]</sup>, 而对于大田冬小麦赤霉病遥感监测预报研究则鲜有报道。本研究在借鉴前人研究成果的基础上, 基于区域冬小麦赤霉病发生的生理生态规律及其与气候环境间的系统关系, 通过分析温湿度、生长参数和光谱信息与冬小麦赤霉病病情指数之间的互作关系, 筛选与赤霉病发病关系较为紧密的主要气候、农学、

收稿日期: 2017-08-01 修订日期: 2017-11-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171336); 江苏省重点研究计划(BE2016730); 中科院数字地球重点实验室开放基金项目(2016LDE007)

作者简介: 李卫国, 研究员, 主要从事作物灾害遥感监测研究。

Email: jaaslwg@126.com

光谱影响因子(或参数指标),并基于主要影响因子建立冬小麦赤霉病病情指数遥感估测模型,初步实现对研究区域冬小麦赤霉病的有效估测,旨在为江淮区域大田冬小麦生产中防灾减灾的信息获取提供方法参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区选择与样点建立

2012年和2014年在位居江淮区域的江苏省连云港市东海县、淮安市涟水县、南通市泰兴市和盐城市大丰区布置冬小麦赤霉病遥感监测试验。利用GPS建立观测样点90个,其中东海县和涟水县每县每年各10个,泰兴市每年为12个,大丰区每年为13个,观测样点空间间隔约2~3 km。每个观测样点在冬小麦集中连片、面积在300 m×300 m冬小麦种植区域中间位置确定田块,田块面积约60 m×60 m。冬小麦供试品种为当地主栽品种,田块无喷施农药,肥水管理同一般大田。

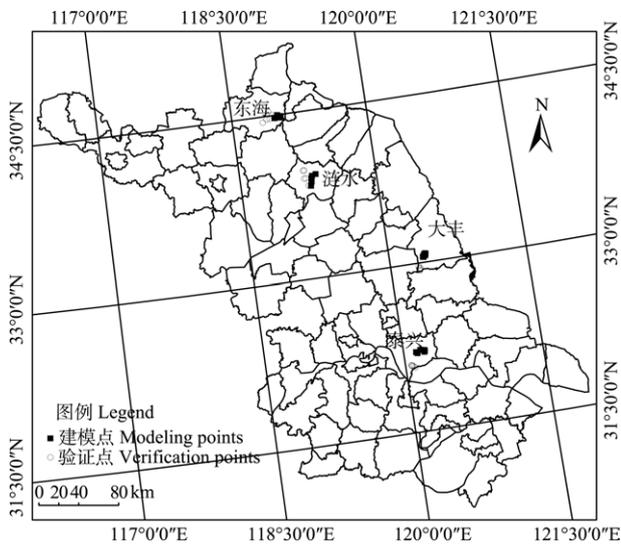


图1 江苏省行政边界和试验样点分布概况

Fig.1 Distribution of test sample points in Jiangsu province

### 1.2 试验调查与数据采集

冬小麦始花期(指大田中3%~5%冬小麦出现扬花的时期)是防治冬小麦赤霉病的关键时期。冬小麦始花期观测样点,采用五点梅花法取样,每个采集点间隔10 m左右,五点数据求取平均值。采集点均利用冠层多光谱仪(GreenSeeker)测量冬小麦的光谱信息(包括红光波段反射率、近红外波段反射率及其相关植被指数),调查赤霉病病情,数取茎蘖数(每平方米样框内),同步取样并分析计算冬小麦叶面积指数、生物量和叶片叶绿素含量等生长参数信息。气象数据为日均气温和空气相对湿度,由当地气象部门提供。冬小麦花后25 d左右(乳熟末期)同样点、同方法继续调查赤霉病发病情况并获取相关数据。当地县级农业技术人员协助试验调查取样与数据获取。

#### 1) 气象数据处理

为研究1、3、5、7和10 d不同时间尺度(5个处理)平均温度(°C)对冬小麦赤霉病发生的影响作用,需要

对气象部门提供的冬小麦生长期平均(单日平均)气温数据进行处理。冬小麦始花期日均气温(1 d, °C)为始花当天的日均气温;(3 d, °C)为始花前3天(含始花当天)平均气温的平均值;(5 d, °C)、(7 d, °C)和(10 d, °C)同(3 d, °C)含义。

同样研究1、3、5、7和10 d不同时间尺度(5个处理)日均空气相对湿度(%)对冬小麦赤霉病发生的影响作用,需对日均(单日平均)空气相对湿度数据进行处理。处理或计算方法与日均温度类似,分别得到冬小麦始花期日均(1 d)、3日均(3 d)、5日均(5 d)、7日均(7 d)和10日均(10 d)空气相对湿度数据。

#### 2) 农学参数测定

冬小麦叶面积指数利用作物冠层分析仪(sunscan)在大田各梅花样点测定5次,求取平均值作为单个梅花样点的叶面积指数。叶片叶绿素含量利用叶绿素仪(SPAD502)在大田各梅花样点测定10张叶片,取均值作为单个梅花样点的叶片叶绿素含量。生物量(植株)样品在大田各梅花样点随机取10个茎蘖装编号袋,置室内烘干称取质量作为单个梅花样点的10个茎蘖的生物量质量。植株鲜样烘干方法:先在105 °C烘箱杀青30 min,然后在75 °C烘干48 h以上,直至质量恒定,随即称量质量为生物量质量。利用单个茎蘖的质量和1 m<sup>2</sup>内的茎蘖数进行换算得到每公顷的生物量质量(kg/hm<sup>2</sup>)

$$\text{生物量质量} = \frac{\text{烘干茎蘖质量}(\text{g})}{10(\text{个})} \times \frac{\text{样框茎蘖数}(\text{个})}{1(\text{m}^2)} \times \frac{\text{kg}}{1000(\text{g})} \times \frac{10000(\text{m}^2)}{\text{hm}^2} \quad (1)$$

#### 3) 植被指数计算

本研究选用的光谱信息(植被指数)有NDVI(normalized difference vegetation index)、RVI(ratio vegetation index)和DVI(difference vegetation index)3个,而利用GreenSeeker冠层多光谱仪测量的冬小麦光谱信息为红光波段反射率( $R_{red}$ )和近红外波段反射率( $R_{nir}$ ),因此植被指数需要转换或计算。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{NDVI} = \frac{R_{nir} - R_{red}}{R_{nir} + R_{red}} \\ \text{RVI} = \frac{R_{nir}}{R_{red}} \\ \text{DVI} = R_{nir} - R_{red} \end{array} \right. \quad (2)$$

#### 4) 病情指数计算

病情指数也称发病指数,是根据一定数目的植株或植株器官各病级(把植株或植株某一器官感染病害的轻重程度划分为等级称为病级)核计其发病株(器官)数所得平均发病程度的数值。参照GB/T 15796-2011标准计算冬小麦病情指数。其中,病级(也称为严重度)定义为出现穗腐症状(或由秆腐引起的白穗症状)的病小穗数占全部小穗的比例,可将其划分为5级:0级:无病;1级:病小穗数占全部小穗的25%以下;2级:病小穗数占全部小穗的25%~50%;3级:病小穗数占全部小穗的50%~75%;4级:病小穗数占全部小穗的75%以上。

根据病情严重度计算赤霉病的病情指数。赤霉病取样调查同上（农学参数）采用 5 点梅花法，每点 10 株，共查 50 株。

$$\text{赤霉病病情指数} = \frac{\sum(\text{各病级发病株数} \times \text{各病级代表值})}{\text{调查总株数} \times \text{最高病级代表值}} \times 100\% \quad (3)$$

1.3 数据处理

在研究区域 90 个观测样点中，选择 60 个观测样点的冬小麦始花期生长参数、光谱数据和气候数据用于分析建模。其他 30 个观测样点的冬小麦始花期的生长参数、光谱数据和气候数据用于模型检验，观测样点包括 2012 年东海县、大丰区和泰兴市各 5 个，2014 年涟水县、泰兴市和大丰区各 5 个。由于冬小麦始花期赤霉病发病特征不明显，较难调查与计量，故本研究采用冬小麦花后 25 d 左右（乳熟末期）赤霉病病情数据进行分析建模与模型验证。建模样点日均气温 15.8~26.3 °C，日均空气相对湿度 39%~87%，红光反射率 0.041~0.112，近红外反射率 0.321 6~0.486 8，病情指数 11.9%~31.8%；验证样点日均气温 17.1~25.1 °C，日均空气相对湿度 47%~76%，红光反射率 0.042~0.099 5，近红外反射率 0.321 7~0.507 2，病情指数 11.2%~32.1%。

2 结果与分析

2.1 不同时间尺度气温与冬小麦赤霉病间的特征关系

表 1 为不同时间尺度日均气温与冬小麦赤霉病病情指数间的相关系数。不同时间尺度日均气温与冬小麦赤霉病病情指数间的相关系数不尽相同，而且不同时间尺度日均气温之间也存在一定程度的相关性，有的时间尺度日均气温之间相关性达到极显著水平，如 3 日均气温与 5 日均气温间的相关系数为 0.93，5 日均气温与 7 日均气温和 10 日均气温间的相关系数分别为 0.96 和 0.91，7 日均气温与 10 日均气温间相关性最高，其相关系数高达 0.97。依托不同时间尺度日均气温间的高度相关性，可以进行多时间尺度日均气温间的相互转换或估算。

表 1 不同时间尺度日均气温与冬小麦赤霉病病情指数间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between average temperature of different time scale and disease index of wheat scab

数据 Data	病情指数 Disease index	日均气温 Daily average temperature	3 日均气温 Average temp. of 3 days	5 日均气温 Average temp. of 5 days	7 日均气温 Average temp. of 7 days
日均气温	0.11	1			
3 日均气温	0.75**	0.41*	1		
5 日均气温	0.77**	0.25	0.93**	1	
7 日均气温	0.72**	0.18	0.83**	0.96**	1
10 日均气温	0.62**	0.31	0.80**	0.91**	0.97**

注：\*显著 (P<0.05)，\*\*极显著 (P<0.01)，下同。  
Note: \* represents significant (P<0.05); \*\* represents highly significant (P<0.01). The same below.

冬小麦赤霉病病情指数与不同时间尺度日均气温间的相关性高低依次为 5 日均气温>3 日均气温>7 日均气温>10 日均气温>单日均气温，与 5 日均气温间的相关系数最大为 0.77，与单日均（始花当天）气温间的相关系数最小，为 0.109 1。因此，可以确定 5 日均气温为冬小麦赤霉病发生最敏感气温影响因子，本文将选择 5 日均气温作为模型（气候）参量之一用以构建冬小麦赤霉病病情指数遥感估测模型。

2.2 不同时间尺度空气相对湿度与冬小麦赤霉病间的特征关系

冬小麦赤霉病的发生对湿度较为敏感，在潮湿和半潮湿冬小麦种植区，尤其是在气候湿润多雨的温带麦区经常性的大面积重度发生。本节选择空气相对湿度（%）为研究对象，分析不同时间尺度日均空气相对湿度与冬小麦赤霉病发生的趋势特征与关联性。表 2 为不同时间尺度日均空气相对湿度与冬小麦赤霉病病情指数间的相关系数。

从表 2 可以看出，不同时间尺度日均空气相对湿度之间存在不同程度大小的关联性，短时间尺度日均空气相对湿度与长时间尺度日均空气相对湿度之间的相关性较弱，如单日均空气相对湿度与 10 日、7 日和 5 日均空气相对湿度间的相关系数偏小，3 日日均空气相对湿度与 10 日和 7 日均空气相对湿度间的相关系数较小。长时间尺度日均空气相对湿度间和相邻时间尺度日均空气相对湿度间的关联性显著，如 7 日均空气相对湿度和 10 日均空气相对湿度、5 日均空气相对湿度和 7 日均空气相对湿度以及 3 日均空气相对湿度和 5 日均空气湿度的相关系数均达到 0.9 以上。依据不同时间尺度日均空气相对湿度间的高度相关性，可以进行多时间尺度日均空气相对湿度间的相互转换或估算。

表 2 不同时间尺度日均空气相对湿度与冬小麦赤霉病病情指数间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between average air humidity of different time scale and disease index of wheat scab

数据 Data	病情指数 Disease index	日均相对湿度 Daily average air humidity	3 日均相对湿度 Average air humidity of 3 days	5 日均相对湿度 Average air humidity of 5 days	7 日均相对湿度 Average air humidity of 7 days
日均相对湿度	0.47*	1			
3 日均相对湿度	0.75**	0.79**	1		
5 日均相对湿度	0.78**	0.60**	0.91**	1	
7 日均相对湿度	0.69**	0.44*	0.77**	0.91**	1
10 日均相对湿度	0.63**	0.36	0.70**	0.83**	0.93**

不同时间尺度日均空气相对湿度与冬小麦赤霉病病情指数间相关程度不尽相同。冬小麦赤霉病病情指数与 5 日均空气相对湿度间的相关性最大，相关系数为 0.78。因此，确定 5 日均空气相对湿度为冬小麦赤霉病发生最

敏感气候湿度影响因子,文中将选择5日均空气相对湿度作为模型(气候)参量之一用以构建冬小麦赤霉病病情指数遥感估测模型。

### 2.3 冬小麦长势与赤霉病间的特征关系

表征冬小麦长势的农学参数较多,如有冬小麦叶面积指数(LAI)、生物量、叶绿素含量以及群体茎蘖数等,结合课题组前期研究积累并参照前人研究结果,本文仅选择前3个重要且常用的农学参数进行研究。

图2为冬小麦始花期不同生长参数与赤霉病病情指数间的特征关系图。从图2a可以看出,研究区域样点冬小麦始花期LAI在4.3~5.9之间,多数集中在4.7~5.8之间,不同试验样点间差异明显,有部分试验样点间LAI差异达到极显著水平( $P<0.01$ )。LAI的差异悬殊性表现除与冬小麦品种基因型有关外,也与研究区域采用混合播种(机条播和人工撒播)方式有较大关系。LAI是反映冬小麦群体郁闭程度大小的重要生长参数指标,始花期LAI增加过大,植株通风透光变差,群体内温湿度升高,容易导致病菌滋生和病害发生。图2b中,研究区域冬小麦始花期生物量(干质量)在8270~13330 kg/hm<sup>2</sup>之间,多数在9200~13000 kg/hm<sup>2</sup>之间,试验样点间存在明显差异。冬小麦生物量是反映群体种植密度大小的重要生长参数指标,始花期生物量过大,不仅养分损耗明显,而且由于植株间无序营养竞争,会出现大量弱株瘦株,群体抵抗病菌的能力减弱,大大增加感病几率。试验样点的叶片叶绿素含量在37.2%~62.3%之间,多数样点叶片叶绿素含量在44%~62%之间,变幅较大,差异明显。叶片叶绿素含量是反映群体植株营养丰缺的重要生长参数指标,也是间接反映氮肥施用高低的参照性指标。植株营养偏高,不但不利于群体内营养均衡,也会使群体生长过旺产生郁闭,衰弱植株的抗病能力。

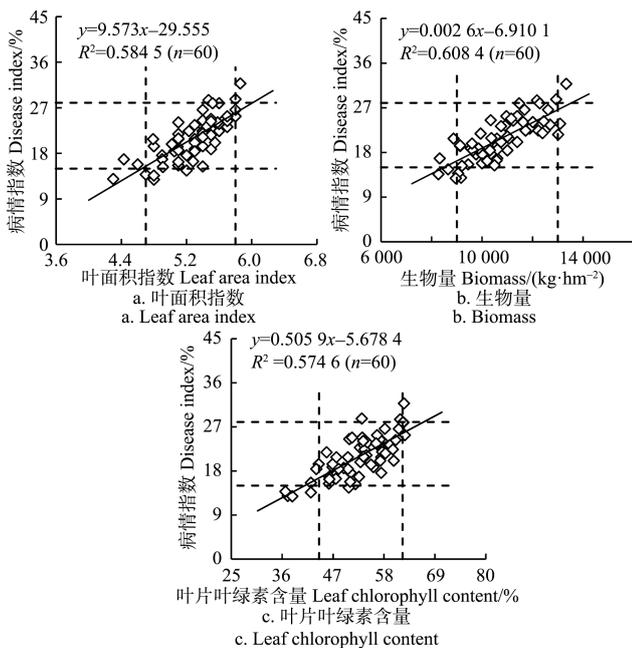


图2 冬小麦叶面积指数、生物量和叶绿素含量与赤霉病病情指数的关系

Fig.2 Relationship between leaf area index, biomass and leaf chlorophyll content and disease index of scab in winter wheat

综观图2,可以看出冬小麦叶面积指数、生物量(kg/hm<sup>2</sup>)和叶片叶绿素含量(%)与赤霉病病情指数间的关联性较为相似,均呈现线性正相关关系,按相关性大小依次为生物量>冬小麦叶面积指数(LAI)>叶片叶绿素含量,线性拟合关系的决定系数分别为0.6084、0.5845和0.5746,相关系数分别为0.78、0.76和0.758均达到显著正相关水平( $P<0.01$ ),说明冬小麦群体密度大、郁闭程度高以及生长过旺是赤霉病易发的主要农学诱因。本文将选择冬小麦LAI、生物量和叶片叶绿素含量作为模型(农学)参量用以构建冬小麦赤霉病病情指数遥感估测模型。

### 2.4 冬小麦生长参数与遥感光谱指标间的特征关系

冬小麦叶面积指数(LAI)、生物量和叶片叶绿素含量是判断冬小麦长势良莠的重要指标和依据。为实现不同冬小麦生长参数与遥感光谱指标之间的合理转换或定量反演,分析了冬小麦LAI、生物量和叶片叶绿素含量与遥感光谱指标间的相互关系(表3),遥感光谱指标有5个,包括NIR(近红外波段)反射率、RED(红光波段)反射率、NDVI(归一化差值植被指数)、RVI(比值植被指数)和DVI(差值植被指数)。

表3 冬小麦的不同生长参数与遥感光谱指标之间的相关系数  
Table 3 Correlation coefficients between growth parameters and remote sensing spectral indices of winter wheat

数据 Data	LAI	生物量 Biomass	叶绿素含量 Leaf chlorophyll content	NIR 反射 率 Near infrared reflectance	RED 反射 率 Red reflectance	NDVI	RVI
生物量	0.77**	1					
叶绿素含量	0.63**	0.63**	1				
NIR 反射率	0.69**	0.65**	0.68**	1			
RED 反射率	-0.77**	-0.77**	-0.66**	-0.44*	1		
NDVI	0.85**	0.83**	0.77**	0.70**	-0.94**	1	
RVI	0.83**	0.86**	0.74**	0.67**	-0.93**	0.97**	1
DVI	0.82**	0.78**	0.78**	0.95**	-0.69**	0.89**	0.85**

由表3看出,冬小麦始花期五个遥感光谱指标相互之间的相关系数大小有所不同,最小值为-0.44,最大值为0.97,说明不同遥感光谱指标间的相关性高低不一。NIR反射率和RED反射率之间的相关性稍低,呈负相关关系,该结果符合冬小麦生长的光谱反射机理与特征。当冬小麦长势好时,对红光吸收增强,其反射率会降低,近红外波段的反射率相应增强;当冬小麦长势差时,对红光吸收减弱,其反射率会增加,近红外波段的反射率相应降低,这一内在性的光谱反射特征规律正是当前进行冬小麦生长遥感监测的主要科学依据。NIR反射率与三个植被指数间呈正相关性,相关系数均 $\geq 0.67$ ,其中,与DVI的相关性最好,相关系数为0.95。RED反射率与三个植被指数间成负相关关系,与NDVI的相关性最好,相关系数为-0.94。三个植被指数间存在较好正相关关系,三者间的相关系数均 $\geq 0.85$ ,NDVI与RVI之间

的相关系数最大，其值为 0.97。依据不同遥感光谱指标间的高度相关性，可以进行多遥感光谱指标值的相互转换或估算，弥补遥感光谱指标提取的不足。

另外，冬小麦始花期 LAI、生物量和叶片叶绿素含量之间存在不同程度的相关性，三者间的相关系数均  $\geq 0.63$ ，LAI 与生物量之间的相关系数最大，其值为 0.771 5，间接反映了冬小麦光合转运源与库间的相互协调均衡性。

表 3 中，除 RED 反射率与不同冬小麦生长参数呈现负相关关系以外，NIR 反射率、NDVI、RVI 以及 DVI 与不同冬小麦生长参数之间均呈现正相关关系。NDVI 与冬小麦 LAI 之间相关性最好，二者间的相关系数为 0.85；RVI 与冬小麦生物量的相关性最好，其相关系数为 0.86；DVI 与冬小麦叶片叶绿素含量间的相关性较好，其相关系数为 0.77。因此，本文选择 NDVI、RVI 和 DVI 分别作为冬小麦 LAI、生物量和叶片叶绿素含量替换（或反演）的模型（光谱）参量用以构建冬小麦赤霉病病情指数遥感估测模型。

### 2.5 冬小麦赤霉病病情指数遥感估测模型建立与验证

根据 2.4 分析，基于冬小麦生长参数与遥感光谱植被指数间的高度相关性，可以利用 NDVI、RVI 和 DVI 三个遥感植被指数分别替换冬小麦 LAI、生物量和叶片叶绿素含量三个生长参数进行建模。结合 2.1 节~2.3 节分析，本节将选择 5 日均气温、5 日均空气相对湿度、NDVI、RVI 和 DVI 五个敏感因子作为自变量，冬小麦赤霉病病情指数作为因变量，构建基于气候因素与光谱信息协同的赤霉病病情指数遥感估测模型（winter wheat scab remote sensing estimating model, WSRSEM），以实现区域尺度冬小麦始花期赤霉病病情指数的遥感估测。

$$\text{WHDI}_i = A \times \text{TEM}_i + B \times \text{WET}_i + C \times \text{NDVI}_i + D \times \text{RVI}_i + E \times \text{DVI}_i + F \quad (4)$$

式中 WHDI<sub>i</sub> (Disease index of winter wheat head blight, %) 为估测的像元尺度冬小麦始花期赤霉病病情指数，TEM<sub>i</sub> (°C) 为像元尺度的 5 日均气温，WET<sub>i</sub> (%) 为像元尺度的 5 日均空气相对湿度，NDVI<sub>i</sub> 为像元尺度的归一化差值植被指数，RVI<sub>i</sub> 为像元尺度的比值植被指数，DVI<sub>i</sub> 为像元尺度的差值植被指数。A、B、C、D、E 和 F 均为模型参数，值分别为 0.571、0.157、-32.22、1.314、20.239 和 6.522。

图 3 是冬小麦始花期赤霉病病情指数实测值与估测值之间的关系图，可以看出，研究区域验证样点冬小麦始花期赤霉病病情指数在 11.2%~30.1% 之间，多数样点集中在 16.7%~26.9% 之间，样点间差异非常明显。2012 年和 2014 年是该研究区域冬小麦赤霉病发病较重的年份，对冬小麦产量造成较大影响，曾引起各级政府部门和学术界的高度关注，本研究团队也因此获得非常重要的冬小麦病害试验数据。图 3 中病情指数实测值与估测值较为一致，决定系数为 0.755，除个别样点间误差较大外，多数样点较为均匀集中在 1:1 关系线（图 3 中虚线）附近，RMSE (root mean square error) 为 5.3%。相对误差为 9.54%。说明本研究构建的基于气候因素与光谱信息

协同的冬小麦赤霉病病情指数遥感估测模型，有较好估测精度，可以实现县级区域冬小麦始花期赤霉病的有效估测。

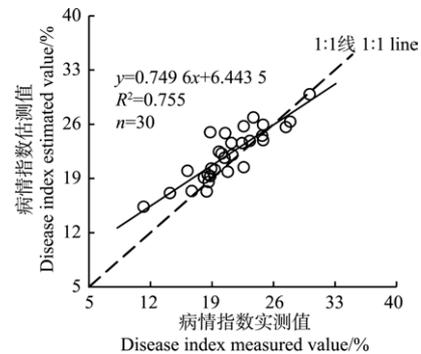


图 3 冬小麦赤霉病病情指数实测值与估测值的比较  
Fig.3 Comparison of measured value and estimated value of winter wheat scab disease index

### 3 讨论

从学科专业研发（或行业领域）的角度看，现有的冬小麦病害信息化测报方法大致可归纳为 3 种类型。第一类是基于气象因素汇集的病害信息化测报方法（简称气象方法）<sup>[14,15]</sup>，第二类是基于农学参数汇集的病害信息化测报方法（简称农学方法）<sup>[16-17]</sup>，第三类是基于光谱信息汇集的病害信息化测报方法（简称遥感方法）<sup>[8,13,18,19]</sup>。气象方法较多关注了气候因素变化与冬小麦病害病发的影响作用，农学方法则是汇集较多的农学参数信息来判断冬小麦的病发情况，遥感方法是利用光谱信息指标进行冬小麦病情估算，各有利弊。因此，综合这三类方法的优势特点进行冬小麦病害信息化测报模式研究，利于提高冬小麦病害遥感测报模型的机理性与普适性。

目前对于冬小麦叶锈病和白粉病<sup>[20-24]</sup>遥感监测研究较多，而对于赤霉病的监测研究较少<sup>[19,25,26]</sup>。冬小麦赤霉病的发生除与农田温度、湿度等气候因素有较大关系外，偏施氮肥、种植密度大以及田间郁闭也是其易发的主要农学诱因。本文仅选择主要气候因素（日均气温和日均空气相对湿度）、农学参数（生物量、叶面积指数和叶片叶绿素含量）以及与相关的光谱信息（NIR 反射率、RED 反射率、NDVI、RVI 和 DVI）进行分析研究，其他影响因素如降雨、光照以及病菌数等尚需进一步研究。在前人研究中主要阐述了单日均气温、单日均空气相对湿度对冬小麦赤霉病的影响作用<sup>[17,25,29]</sup>。本研究在分析多时间尺度（1 d、3 d、5 d、7 d 和 10 d）日均气温和空气相对湿度与冬小麦赤霉病病情指数间相互关系的基础上，进一步明晰了 5 日均气温和 5 日均空气相对湿度对冬小麦赤霉病发生的重要影响作用，是对前人研究结论的较好补充与完善。

本研究选择对冬小麦始花期赤霉病进行遥感估测研究，因为始花期是江淮区域进行冬小麦赤霉病防治的关键时期，生产上有“见花打药”的防治策略。适时提供冬小麦始花期赤霉病估测信息给县级植保部门和种粮大

户,有助于辅助用药措施,实现减灾增产的目的。另外,由于获取多样点冬小麦大田日均气温和空气相对湿度需要较多人工和费用,文中选用气象站观测的日均气温和空气相对湿度来表征气候条件对田间冬小麦赤霉病的影响作用,若利用冬小麦大田实际气候数据会更利于对冬小麦赤霉病的有效估测。

#### 4 结 论

本研究在借鉴前人研究成果的基础上,基于江淮区域冬小麦赤霉病发生的生理生态规律及其与气候环境间的系统关系,通过分析不同时间尺度气候因素(日均气温和日均空气相对湿度)、生长参数(生物量、叶面积指数和叶片叶绿素含量)和光谱信息(NIR反射率、RED反射率、NDVI、RVI和DVI)与冬小麦赤霉病病情指数之间的互作关系,得出结论如下:

1) 依托不同时间尺度日均气温和日均空气相对湿度各自间的高度相关性,可以分别进行多时间尺度日均气温和日均空气相对湿度数据间的相互转换或估算。5日均气温和5日均空气相对湿度与冬小麦赤霉病病情指数间的相关性较好,说明在温湿度因素中5日均气温和5日均空气相对湿度对冬小麦赤霉病发生影响作用明显。

2) 冬小麦生物量、叶面积指数和叶片叶绿素含量与赤霉病病情指数之间存在明显正相关关系,说明冬小麦群体密度大、郁闭程度高以及长势过旺是赤霉病易发的主要农学原因。可以利用植被指数NDVI和RVI和DVI分别替换LAI、生物量和叶片叶绿素含量参与建模。

3) 综合5日均气温、5日均空气相对湿度、NDVI、RVI和DVI五个主要影响因子建立了冬小麦赤霉病病情指数遥感估测模型,不仅有较好解释性,也有较高估测精度,RMSE(root mean square error)为5.3%。相对误差为9.54%,能实现对江淮区域冬小麦赤霉病的有效估测。

#### [参 考 文 献]

- [1] Taubenhuis J J, Ezekiel W N, Neblette C B. Airplane photography in the study of cotton root[J]. *Phytopathology*, 1929, 19: 1025—1029.
- [2] Tolers R W, Smith B D, Harlan J C. Use of aerial color infrared photography in the study of cotton root rot[J]. *Plant Disease*, 1981, 65(1): 24—31.
- [3] Lorenzen B, Jensen A. Changes in leaf spectral properties induced in barley by cereal powdery mildew[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 27 (2): 201—209.
- [4] Riedell W E, ckmer T M. Leaf reflectance spectra of cereal aphid-damaged wheat[J]. *Crop Science*, 1999, 39(9): 1835—1840.
- [5] Devadas R, Lamb D W, Simpfendorfer S, et al. Evaluating ten spectral vegetation indices for identifying rust infection in individual wheat leaves[J]. *Precision Agriculture*, 2009, 10(6): 459—470.
- [6] Zhao C J, Huang M Y, Huang W J, et al. Analysis of winter wheat stripe rust characteristic spectrum and establishing of inversion models[J]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2004, 6(7): 4318—4320.
- [7] 刘良云, 黄文江, 王纪华, 等. 利用多时相航空高光谱图像数据监测冬小麦条锈病[J]. *遥感学报*, 2004, 8(3): 276—282.  
Liu Liangyun, Huang Wenjiang, Wang Jihua, et al. Monitoring stripe rust disease of winter wheat using multi-temporal hyperspectral airborne data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(3): 276—282. (in Chinese with English abstract)
- [8] 蔡成静, 王海光, 安虎, 等. 小麦条锈病高光谱遥感监测技术研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 33: 31—36.  
Cai Chengjing, Wang Haiguang, An Hu, et al. Remote sensing research on monitoring technology of wheat stripe rust[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2005, 33: 31—36. (in Chinese with English abstract)
- [9] 蒋金豹, 陈云浩, 黄文江, 等. 冬小麦条锈病严重度高光谱遥感反演模型研究[J]. *南京农业大学学报*, 2007, 30(3): 63—67.  
Jiang Jinbao, Chen Yunhao, Huang Wenjiang, et al. Study on hyperspectral remote sensing retrieval models about winter wheat stripe rust severity[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2007, 30(3): 63—67. (in Chinese with English abstract)
- [10] 王纪华, 赵春江, 黄文江, 等. 农业定量遥感基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [11] 黄文江. 作物病害遥感监测机理与应用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2009.
- [12] Zhang J C, Pu R L, Yuan L, et al. Integrating remotely sensed and meteorological observations to forecast wheat powdery mildew at a regional scale[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(11): 4328—4339.
- [13] Cao X R, Luo Y, Zhou Y L, et al. Detection of powdery mildew in two winter wheat cultivars using canopy hyperspectral reflectance[J]. *Crop Protection*, 2013, 45: 124—131.
- [14] 李小龙, 秦丰, 赵龙莲, 等. 近红外光谱技术的小麦条锈病严重度分级识别[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(2): 367—371.  
Li Xiaolong, Qin Feng, Zhao Longlian, et al. Identification and classification of disease severity of wheat stripe rust using near infrared spectroscopy technology[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(2): 367—371. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘伟昌, 王君, 陈怀亮, 等. 河南省小麦病虫害气象预测预报模型研究[J]. *气象与环境科学*, 2008, 31(3): 29—31.  
Liu Weichang, Wang Jun, Chen Huailiang, et al. Study on

- meteorological forecast model for wheat diseases and pests in Henan province[J]. *Meteorology and Environmental Science*, 2008, 31(3): 29—31. (in Chinese with English abstract)
- [16] 司丽丽, 姚树然, 闫峰. 基于 Fisher 判别准则的河北省小麦白粉病气象条件中期预报模型[J]. *气象与环境科学*, 2013, 34(3): 338—341.  
Si Lili, Yao Shuran, Yan Feng. Mid-term prediction on meteorological factors for wheat powdery mildew (*blumeria graminis*) in Hebei province based on fisher criterion[J]. *Meteorology and Environmental Science*, 2013, 34(3): 338—341. (in Chinese with English abstract)
- [17] 闫征远, 范洁茹, 刘伟, 等. 基于田间空气中病菌孢子浓度的小麦白粉病病情估计模型研究[J]. *植物病理学报*, 2017, 47(2): 253—261.  
Yan Zhengyuan, Fan Jieru, Liu Wei, et al. Models of disease index estimation of wheat powdery mildew based on the concentrations of *blumeria graminis* f. sp. *tritici* conidia in the fields[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2017, 47(2): 253—261. (in Chinese with English abstract)
- [18] 刁春友, 朱叶芹, 于淦军, 等. 农作物主要病虫害预测预报与防治[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2006.
- [19] 王静, 景元书, 黄文江, 等. 冬小麦条锈病严重度不同估算方法对比研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(6): 1649—1653.  
Wang Jing, Jing Yuanshu, Huang Wenjiang, et al. Comparative research on estimating the severity of yellow rust in winter wheat[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(6): 1649—1653. (in Chinese with English abstract)
- [20] 李卫国. 农作物遥感监测方法与应用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2013.
- [21] 马慧琴, 黄文江, 景元书. 遥感与气象数据结合预测小麦灌浆期白粉病[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(9): 165—172.  
Ma Huiqin, Huang Wenjiang, Jing Yuanshu. Wheat powdery mildew forecasting in filling stage based on remote sensing and meteorological data[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(9): 165—172. (in Chinese with English abstract)
- [22] Yuan L, Huang Y B, Loraamm R W, et al. Spectral analysis of winter wheat leaves for detection and differentiation of diseases and insects[J]. *Field Crops Research*, 2014, 156: 199—207.
- [23] 庄东英. 利用多源遥感监测冬小麦长势与白粉病害的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2013.  
Zhuang Dongying. Monitoring of Winter Wheat Growth and Powdery Mildew by Multi-source Remote Sensing[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [24] 沈文颖, 李映雪, 冯伟, 等. 基于因子分析-BP 神经网络的小麦叶片白粉病反演模型[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(22): 183—190.  
Shen Wenyong, Li Yingxue, Feng Wei, et al. Inversion model for severity of powdery mildew in wheat leaves based on factor analysis-BP neural network[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(22): 183—190. (in Chinese with English abstract)
- [25] 卫黎光, 蒋金豹, 杨贵军, 等. 模拟多光谱卫星传感器数据的冬小麦白粉病遥感监测[J]. *麦类作物学报*, 2014, 34(12): 1699—1705.  
Wei Liguang, Jiang Jinbao, Yang Guijun, et al. Remote sensing monitoring powdery mildew of winter wheat using simulated data of multi spectral satellite sensor[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(12): 1699—1705. (in Chinese with English abstract)
- [26] 金正婷. 利用卫星遥感估测冬小麦长势与赤霉病害的研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.  
Jin Zhengting. Study on Estimating Winter Wheat Growth and Scab Using Satellite Remote Sensing[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [27] Silva J R M D, Damásio C V, Sousa A M O, et al. Agriculture pest and disease risk maps considering MSG satellite data and land surface temperature[J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2015, 38: 40—50
- [28] 程顺和, 张勇, 别同德, 等. 中国小麦赤霉病的危害及抗性遗传改良[J]. *江苏农业学报*, 2012, 28: 938—942.  
Cheng Shunhe, Zhang Yong, Bie Tongde, et al. Damage of wheat *Fusarium* head blight (FHB) epidemics and genetic improvement of wheat for scab resistance in China[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 28: 938—942. (in Chinese with English abstract)
- [29] 刘易科, 佟汉文, 朱展望, 等. 小麦赤霉病抗性机理研究进展[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(8): 1476—1488.  
Liu Yike, Tong Hanwen, Zhu Zhanwang, et al. Progress in research on mechanism of resistance to *Fusarium* head blight in wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(8): 1476—1488. (in Chinese with English abstract)
- [30] 张旭晖, 高苹, 居为民, 等. 小麦赤霉病气象条件适宜程度等级预报[J]. *气象科学*, 2009, 29(4): 552—556.  
Zhang Xuhui, Gao Ping, Ju Weimin, et al. Prediction of the adaptability category of meteorological conditons for wheat head blight[J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2009, 29(4): 552—556. (in Chinese with English abstract)
- [31] 陈永明, 林付根, 赵阳, 等. 论江苏东部麦区赤霉病流行成因与监控对策[J]. *农学学报*, 2015, 5(5): 33—38.  
Chen Yongming, Lin Fugen, Zhao Yang, et al. The population reasons and control measures of wheat scab in the east of Jiangsu[J]. *Journal of Agriculture*, 2015, 5(5): 33—38. (in Chinese with English abstract)

## Estimation on winter wheat scab based on combination of temperature, humidity and remote sensing vegetation index

Li Weiguo<sup>1</sup>, Huang Wenjiang<sup>2</sup>, Dong Yingying<sup>2</sup>, Chen Hua<sup>1</sup>, Wang Jingjing<sup>1</sup>, Shan Jie<sup>1</sup>

(1. *Institute of Agricultural Information, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China;*

2. *Institute of remote sensing and digital earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*)

**Abstract:** Scab is one of the main diseases of winter wheat in Yangtze-Huaihe River region in China, whose monitoring and forecasting timely in large area will help to adjust the pesticide spraying measures reasonably and realize the purpose of reducing disaster and increasing yield. In this study, we carried out remote monitoring tests of winter wheat scab in 4 counties (Donghai, Lianshui, Taixing and Dafeng) of Jiangsu Province in Yangtze-Huaihe River region, analyzed the interaction and relationship between winter wheat scab characteristics, climatic factors, growth parameters and spectral information, selected major scab's sensitive factors, and established the remote sensing estimation model of winter wheat scab disease index based on interactions between spectral information and climatic factors. The results showed that: 1) There is a good correlation between the daily mean temperatures in different time scales, of which the correlation between the daily mean temperature of 7 days and the daily mean temperature of 10 days is the highest, and the correlation coefficient is 0.966 5. The correlation coefficient between the daily mean temperature of 5 days and the winter wheat scab disease index is the largest, which is 0.772 6, indicating that the daily average temperature of 5 days in different time scales has the most obvious effect on the occurrence of scab in winter wheat. 2) Similar to the daily mean temperature, there are different degrees of correlation between the daily mean relative humidity at different time scales. The correlation coefficient is the largest between daily mean relative air humidity of 7 days and daily mean relative air humidity of 10 days, and its value is 0.933 7. The daily mean relative air humidity of 5 days has the highest correlation with winter wheat scab disease index, and its correlation coefficient is 0.784 2, higher than the daily mean temperature of 5 days, which shows that the daily mean relative air humidity of 5 days has a higher influence on winter wheat scab than the daily mean temperature of 5 days. 3) There is a positive linear correlation between winter wheat biomass, leaf area index (LAI) and leaf chlorophyll content and scab disease index, and the  $r$  values of the linear trend fitting are 0.608 4, 0.584 5 and 0.574 6, respectively, which reach the significant level, and indicate the large population density, high canopy density and over vigorous growth of winter wheat are the main incentive for scab. 4) Remote sensing vegetation index such as NDVI (normalized difference vegetation index), RVI (ratio vegetation index) and DVI (difference vegetation index) has a good correlation with winter wheat LAI, biomass and leaf chlorophyll content respectively, and their correlation coefficients are 0.851 6, 0.854 9 and 0.772 7 respectively. NDVI, RVI and DVI can be used to replace LAI, biomass and leaf chlorophyll content to participate in modeling. 5) Combining 5 sensitive factors i.e. NDVI, RVI, DVI, mean daily temperature of 5 days and average daily relative humidity of 5 days, we establish the remote sensing estimation model of winter wheat scab disease index based on interactions between spectral information and climatic factors. The estimated value of the model is consistent with the measured value, root mean square error (RMSE) is 5.3%, and the estimation accuracy is 90.46%. It shows that the estimation model in this study can effectively estimate winter wheat scab in Yangtze-Huaihe River region in China.

**Keywords:** diseases; estimation; temperature; winter wheat scab; spectral information; relative humidity; growth parameters; Yangtze-Huaihe river region