



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113592201 B

(45) 授权公告日 2023.06.20

(21) 申请号 202111013108.0

G06Q 50/02 (2012.01)

(22) 申请日 2021.08.31

G06F 18/24 (2023.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 113592201 A

(56) 对比文件

CN 110063158 A, 2019.07.30

CN 108898499 A, 2018.11.27

CN 113218887 A, 2021.08.06

CN 110909933 A, 2020.03.24

US 2012137941 A1, 2012.06.07

(43) 申请公布日 2021.11.02

(73) 专利权人 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所

地址 100081 北京市海淀区中关村南大街12号

武永峰.晚霜冻胁迫后冬小麦株高降低及其与籽粒产量关系.《中国农业科学》.2018,全文.

别得进.农业旱灾脆弱性研究综述.《北京师范大学学报》.2015,全文.

朱虹晖.基于多因子关联的冬小麦晚霜冻害分析—以河南省为例.《中国农业气象》.2018,全文.

(72) 发明人 武永峰

审查员 王克

(74) 专利代理机构 北京康盛知识产权代理有限公司 11331

专利代理师 李欣芮

权利要求书2页 说明书6页 附图2页

(51) Int. Cl.

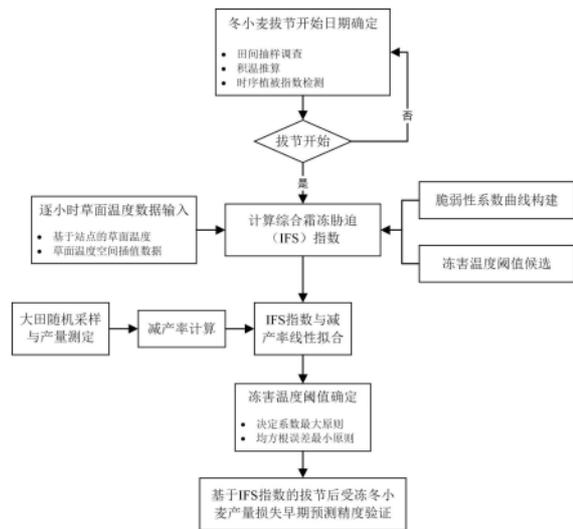
G06Q 10/04 (2023.01)

(54) 发明名称

一种拔节后受冻冬小麦产量损失早期预测方法

(57) 摘要

本发明涉及一种拔节后受冻冬小麦产量损失早期预测方法,主要步骤为:确定冬小麦拔节开始日期d<sub>j</sub>;在所述冬小麦拔节开始日期开始观测麦田逐小时草面温度T<sub>t</sub>;根据冻害对冬小麦不同发育阶段的影响构建脆弱性系数VC曲线,所述脆弱性系数VC随冬小麦发育进程整体上呈上升趋势;根据以往观测数据,预选冻害温度阈值T<sub>h</sub>;构建综合霜冻胁迫指数IFS;通过设定不同所述温度阈值T<sub>h</sub>以计算所述IFS指数,利用所述IFS指数和受冻冬小麦的减产率进行拟合,依据二者间模型的决定系数和均方根误差来确定合适的冻害温度阈值T<sub>h</sub>。该方法不仅适用于拔节后受冻冬小麦产量损失的早期预测目的,而且预测精度显著提升,适用性强、推广应用价值高。



1. 一种拔节后受冻冬小麦产量损失早期预测方法,其特征在于,包括以下步骤:

确定冬小麦拔节开始日期 $d_j$ ;

在所述冬小麦拔节开始日期开始观测麦田逐小时草面温度 $T_t$ ;

根据冻害对冬小麦不同发育阶段的影响构建脆弱性系数VC曲线,所述脆弱性系数VC随冬小麦发育进程整体上呈分段式线性上升,第1时段从小花原基分化开始直至药隔形成期前1日,所述脆弱性系数从0.1升至0.4;第2时段为药隔形成前1日内,所述脆弱性系数从0.4升至0.7;第3时段从药隔形成期至四分体形成期,所述脆弱性系数从0.7升至1.0;第4时段在四分体形成期后,所述脆弱性系数为1.0;

根据以往观测数据,预选冻害温度阈值 $T_h$ ;

构建综合霜冻胁迫指数IFS:

$$IFS = \sum_{i=d_j}^{d_a} (FDD_i \times VC_i)$$

$$FDD_i = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} FD_t$$

$$FD_t = \begin{cases} 0 & T_t > T_h \\ T_h - T_t & T_t \leq T_h \end{cases}$$

其中, $FD_t$ 为逐小时霜冻度日(单位: $h^\circ C$ ), $FDD_i$ 为第i个降温过程中逐小时霜冻度日 $FD_t$ 的全天平均值(单位: $d^\circ C$ ), $T_t$ 为第i个降温过程中第t小时的最低草面温度( $^\circ C$ ), $T_h$ 为冻害温度阈值( $^\circ C$ ), $VC_i$ 为第i个降温过程中冬小麦的脆弱性系数(无量纲,介于0.1-1.0之间), $d_j$ 和 $d_a$ 分别表示冬小麦拔节开始日期和开花期;

通过设定不同所述温度阈值 $T_h$ 以计算所述IFS指数,利用所述IFS指数和受冻冬小麦的减产率进行拟合,依据二者间模型的决定系数和均方根误差来确定合适的冻害温度阈值 $T_h$ ;

基于IFS指数预测的减产率与实测减产率对比进行精度验证。

2. 根据权利要求1所述的拔节后受冻冬小麦产量损失早期预测方法,其特征在于,所述冬小麦拔节开始日期 $d_j$ 由如下方法之一确定:

田间抽样调查,定期观察并记录植株生长情况,一旦发现节间露出地面1.5-2.0cm,则认为拔节开始;在某一地区空间区域内,如果超过半数的抽样点小麦均进入拔节,则认为该地区冬小麦拔节开始,对应日期为所述拔节开始日期;

基于积温的推算,将冬小麦返青至拔节所需有效积温的多年观测平均或经验值,作为判断冬小麦是否进入拔节的依据,利用气象观测台站记录的逐日平均气温,计算返青至拔节的有效积温,如果该有效积温达到或超过经验值,则认为拔节开始,对应日期为所述拔节开始日期;

基于植被指数检测,在冬小麦整个生育期内植被指数时序曲线上,将植被指数在春季由低值平缓区快速升高时对应的时序特征点,作为判断冬小麦是否进入拔节的依据,利用时序曲线函数模拟方法计算每个时序点上的曲率变化率,如果该点曲率变化率达到极大值,则认为拔节开始,对应日期为所述拔节开始日期。

3. 根据权利要求1所述的拔节后受冻冬小麦产量损失早期预测方法,其特征在于,所述麦田逐小时草面温度 $T_t$ 为气象站点观测到的逐小时草面温度数据,或将所述气象站点观测到的逐小时草面温度数据进行空间插值而生成逐小时草面温度空间分布数据。

4. 根据权利要求3所述的拔节后受冻冬小麦产量损失早期预测方法,其特征在于,所述空间插值方法采用样条函数方法。

5. 根据权利要求1所述的拔节后受冻冬小麦产量损失早期预测方法,其特征在于,所述合适的冻害温度阈值 $T_h$ 确定方法为:

测定所述的受冻冬小麦产量减产率;

设定所述冻害温度阈值 $T_h$ 的若干候选值为 $-6^{\circ}\text{C}$ 、 $-5^{\circ}\text{C}$ 、 $-4^{\circ}\text{C}$ 、 $-3^{\circ}\text{C}$ 、 $-2^{\circ}\text{C}$ 、 $-1^{\circ}\text{C}$ 和 $0^{\circ}\text{C}$ ,分别计算每个采样点上所述候选值对应的所述IFS指数;

将所述IFS指数和所述减产率进行线性拟合,计算不同所述冻害温度阈值 $T_h$ 条件下二者线性模型的决定系数 $R^2$ 和均方根误差RMSE,依据所述 $R^2$ 最大和所述RMSE最小的原则来确定所述冻害温度阈值 $T_h$ 。

6. 根据权利要求5所述的拔节后受冻冬小麦产量损失早期预测方法,其特征在于,所述受冻冬小麦产量减产率测定方法为:

对照产量 $Y_n$ 测定,通过田间抽样调查的办法,在研究区晚霜冻害事件发生年份,逐样点框定1米 $\times$ 1米的采样范围,并将全部茎蘖收割、装袋且带回实验室凉晒干;针对每个样点,统计全部所述茎蘖数量,以作为正常生长条件下冬小麦的穗数 $EN_n$ ;挑选出全部正常穗,统计其粒数和粒重,进而计算穗粒数和千粒重,以作为正常生长条件下冬小麦的穗粒数 $GNPE_n$ 和千粒重 $TGW_n$ ;根据公式 $EN_n \times GNPE_n \times TGW_n$ ,计算得出正常生长条件下冬小麦的产量 $Y_n$ ,作为所述对照产量;

实际产量 $Y_f$ 测定,统计全部茎蘖的籽粒重,作为所述实际产量 $Y_f$ ;

利用公式 $(Y_n - Y_f) / Y_n \times 100\%$ ,计算得出所述受冻冬小麦产量减产率。

7. 根据权利要求5所述的拔节后受冻冬小麦产量损失早期预测方法,其特征在于,所述受冻冬小麦产量减产率测定方法为:

基于多年测定的冬小麦产量数据,将实际产量分解为趋势产量、气象产量和随机产量3个部分,所述随机产量因其影响小而忽略不计,将所述趋势产量作为正常产量,所述实际产量和所述趋势产量之差计算所述受冻冬小麦产量减产率。

8. 根据权利要求1所述的拔节后受冻冬小麦产量损失早期预测方法,其特征在于,针对某一地区区域内的所述受冻冬小麦,采用基于面向对象分类、深度学习等方法的遥感分类技术,提取出冬小麦空间分布信息,屏蔽非小麦信息。

## 一种拔节后受冻冬小麦产量损失早期预测方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于小麦产量预测技术领域,特别涉及一种拔节后受冻冬小麦产量损失早期预测方法。

### 背景技术

[0002] 黄淮冬麦区是中国小麦重要产区,大部分属黄淮平原,地势平坦,春季寒流入侵频繁,可对拔节后冬小麦幼穗造成显著伤害,进而导致产量损失。大田小麦遭受晚霜冻害的症状通常在冻后5至10天内显现,随冻害程度加重,叶片枯黄、幼穗萎蔫趋势愈发明显。鉴于冬小麦在冻后仍须较长时间(至少1个多月)才成熟,因而为实施各种补救措施或管理战略(如粮食宏观调控)等提供了契机,这就要求在短期内对冬小麦减产风险及空间分布做出早期预测,这是确保各类措施精准和高效实施的前提。因此,早期预测应将关注点放在冻害症状显现之前,这对冻后管理具有重要指导价值。

[0003] 当前,可用于对拔节后受冻冬小麦产量损失进行早期预测的技术手段主要是田间调查、气象观测和遥感手段。田间调查手段通过考察幼穗冻害来评估产量损失,精度较高,但是仅限于田块内的产量损失预测,针对大范围空间区域的产量损失早期预测而言,该手段耗时且工作量巨大。遥感手段主要依靠逐日时相的地表温度(LST)或植被指数(如NDVI)数据。由于冻害通常发生于0至7点之间,与卫星在当地过境时间并不一致,且LST的遥感反演精度受下垫面影响而不确定性较大,因而基于LST数据的方法适用性较差。常见遥感方法是依据冻后植被指数随时间变化规律以构建冻害遥感指标,进而评估冬小麦实际冻害和预测产量损失。此类方法未从冬小麦冠层光谱响应冻害机制的角度来挖掘敏感的遥感指数,而是直接将植被指数作为可响应冻害的遥感指数,由于植被指数响应冻害具有时间滞后性,在冻害症状显现前的敏感性相对较差,会影响其预测精度。与遥感手段相比,气象手段评估冻害的时效性更强、数据精度和稳定性更高,因而在晚霜冻害评估中应用广泛。气象手段主要依靠气象观测台站记录的百叶箱温度数据,通过集成低温强度和其持续时长,来构建霜冻害胁迫指标。实际上,除了低温强度和持续时长外,冬小麦发育进程是另一个影响冻害的关键因子,但现有指标未能将发育进程因子集成进来。而且,由于受下垫面环境等的影响,百叶箱温度在判定冻害时的稳定性相对较差。可见,当前方法由于指标建设方面的不足,存在着预测精度较低的问题。为此,本发明立足于拔节后冻害影响机制、以及产量损失机制等的研究基础,考虑加入发育进程和草面温度,全新构建对冻害最敏感的指数,进而解决产量损失早期预测精度较低的问题。

### 发明内容

[0004] 本发明提供一种受冻冬小麦产量损失预测方法,用于解决受冻冬小麦产量损失早期预测精度较低的技术问题。

[0005] 本发明的实施例内容如下:

[0006] 一种拔节后受冻冬小麦产量损失早期预测方法,包括以下步骤:

[0007] 确定冬小麦拔节开始日期 $d_j$ ;在冬小麦拔节开始日期开始观测麦田逐小时草面温度 $T_t$ ;根据冻害对冬小麦不同发育阶段的影响构建脆弱性系数VC曲线,脆弱性系数VC随冬小麦发育进程整体上呈上升趋势;根据以往观测数据,预选冻害温度阈值 $T_h$ ;

[0008] 构建综合霜冻胁迫指数IFS:

$$[0009] \quad IFS = \sum_{i=d_j}^{d_a} (FDD_i \times VC_i)$$

$$[0010] \quad FDD_i = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} FD_t$$

$$[0011] \quad FD_t = \begin{cases} 0 & T_t > T_h \\ T_h - T_t & T_t \leq T_h \end{cases}$$

[0012] 其中, $FD_t$ 为逐小时霜冻度日(单位: $h^\circ C$ ), $FDD_i$ 为第i个降温过程中逐小时霜冻度日 $FD_t$ 的全天平均值(单位: $d^\circ C$ ), $T_t$ 为第i个降温过程中第t小时的最低草面温度( $^\circ C$ ), $T_h$ 为冻害温度阈值( $^\circ C$ ), $VC_i$ 为第i个降温过程中冬小麦的脆弱性系数(无量纲,介于0.1—1.0之间), $d_j$ 和 $d_a$ 分别表示冬小麦拔节开始日期和开花期;

[0013] 通过设定不同温度阈值 $T_h$ 以计算IFS指数,利用IFS指数和受冻冬小麦的减产率进行拟合,依据二者间模型的决定系数和均方根误差来确定合适的冻害温度阈值 $T_h$ ;基于IFS指数预测的减产率与实测减产率对比进行精度验证。

[0014] 进一步地,冬小麦拔节开始日期 $d_j$ 由如下方法之一确定:

[0015] 田间抽样调查,定期观察并记录植株生长情况,一旦发现节间露出地面1.5—2.0cm,则认为拔节开始;在较大范围空间区域内,如果超过半数的抽样点小麦均进入拔节,则认为该地区冬小麦拔节开始,对应日期为拔节开始日期;

[0016] 基于积温的推算,将冬小麦返青至拔节所需有效积温的多年观测平均或经验值,作为判断冬小麦是否进入拔节的依据,利用气象观测台站记录的逐日平均气温,计算返青至拔节的有效积温,如果该有效积温达到或超过经验值,则认为拔节开始,对应日期为拔节开始日期;

[0017] 基于植被指数检测,在冬小麦整个生育期内植被指数时序曲线上,将植被指数在春季由低值平缓区快速升高时对应的时序特征点,作为判断冬小麦是否进入拔节的依据,利用时序曲线函数模拟方法计算每个时序点上的曲率变化率,如果该点曲率变化率达到极大值,则认为拔节开始,对应日期为所述拔节开始日期。

[0018] 进一步地,麦田逐小时草面温度 $T_t$ 为气象站点观测到的逐小时草面温度数据,或将气象站点观测到的逐小时草面温度数据进行空间插值而生成逐小时草面温度空间分布数据。空间插值方法可采用样条函数方法。

[0019] 进一步地,脆弱性系数VC曲线呈4段式上升;第1时段从小花原基分化开始直至药隔形成期前1日;第2时段为药隔形成前1日内;第3时段从药隔形成期至四分体形成期;第4时段在四分体形成期后。

[0020] 进一步地,脆弱性系数VC曲线呈线性上升,其中,第1时段中所述脆弱性系数从0.1升至0.4;第2时段中所述脆弱性系数从0.4升至0.7;第3时段中所述脆弱性系数从0.7升至1.0;第4时段中所述脆弱性系数为1.0。

[0021] 进一步地,合适的冻害温度阈值 $T_h$ 确定方法为如下步骤:

[0022] 测定所述的受冻冬小麦产量减产率；

[0023] 设定所述冻害温度阈值 $T_h$ 的若干候选值为 $-6^{\circ}\text{C}$ 、 $-5^{\circ}\text{C}$ 、 $-4^{\circ}\text{C}$ 、 $-3^{\circ}\text{C}$ 、 $-2^{\circ}\text{C}$ 、 $-1^{\circ}\text{C}$ 和 $0^{\circ}\text{C}$ ，分别计算每个采样点上所述候选值对应的所述IFS指数；

[0024] 将所述IFS指数和所述减产率进行线性拟合，计算不同所述冻害温度阈值 $T_h$ 条件下二者线性模型的决定系数 $R^2$ 和均方根误差RMSE，依据所述 $R^2$ 最大和所述RMSE最小的原则来确定所述冻害温度阈值 $T_h$ 。

[0025] 进一步地，受冻冬小麦产量减产率测定方法为：

[0026] 对照产量 $Y_n$ 测定，通过田间抽样调查的办法，在研究区晚霜冻害事件发生年份，逐样点框定1米×1米的采样范围，并将全部茎蘖收割、装袋且带回实验室凉晒干；针对每个样点，统计全部茎蘖数量，以作为正常生长条件下冬小麦的穗数 $EN_n$ ；挑选出全部正常穗，统计其粒数和粒重，进而计算穗粒数和千粒重，以作为正常生长条件下冬小麦的穗粒数 $GNPE_n$ 和千粒重 $TGW_n$ ；根据公式 $EN_n \times GNPE_n \times TGW_n$ ，计算得出正常生长条件下冬小麦的产量 $Y_n$ ，作为所述对照产量；实际产量 $Y_f$ 测定，统计全部茎蘖的籽粒重，作为所述实际产量 $Y_f$ ；利用公式 $(Y_n - Y_f) / Y_n \times 100\%$ ，计算得出所述受冻冬小麦产量减产率。

[0027] 进一步地，受冻冬小麦产量减产率测定方法也可以为：

[0028] 基于多年测定的冬小麦产量数据，将实际产量分解为趋势产量、气象产量和随机产量3个部分，随机产量因其影响小而忽略不计，将趋势产量作为正常产量，计算实际产量和趋势产量之差，可以得到受冻冬小麦产量减产率。

[0029] 进一步地，针对空间大范围区域内的受冻冬小麦，采用基于面向对象分类、深度学习等方法的遥感分类技术，可提取出冬小麦空间分布信息，屏蔽非小麦信息。

[0030] 本发明提出拔节后受冻冬小麦产量损失早期预测方法，不仅适用于拔节后受冻冬小麦产量损失的早期预测目的，而且预测精度显著提升，仅需输入逐小时草面温度数据即可，指标和模型的区域适用性和推广应用价值较高。

## 附图说明

[0031] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案，下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动性的前提下，还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0032] 图1拔节后受冻冬小麦产量损失早期预测技术体系示意图；

[0033] 图2综合霜冻胁迫指数构建示意图；

[0034] 图3脆弱性系数随幼穗分化进程的变化；

[0035] 图4利用不同冻害温度阈值计算的累积霜冻度日 $AFDD_1$ 、 $AFDD_2$ 和IFS指数及其与减产率线性拟合模型的精度；

[0036] 图5基于IFS指数预测的减产率与实测减产率的散点关系。

## 具体实施方式

[0037] 下面将结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例，而不是全部的实施例。基于

本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有作出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0038] 根据本发明的实施例,提供了一种受冻冬小麦产量损失早期预测方法,图1为所述拔节后受冻冬小麦产量损失早期预测技术体系示意图,包括以下步骤:

[0039] 确定冬小麦拔节开始日期 $d_j$ ;在冬小麦拔节开始日期开始观测麦田逐小时草面温度 $T_t$ ;根据冻害对冬小麦不同发育阶段的影响构建脆弱性系数VC曲线,脆弱性系数VC随冬小麦发育进程整体上呈上升趋势;根据以往观测数据,预选冻害温度阈值 $T_h$ ;

[0040] 构建综合霜冻胁迫指数IFS:本发明提出构建基于低温、低温持续时长以及发育进程综合影响的晚霜冻害胁迫指标。该指标的通用表达式如下,

[0041]  $IFS = f(LT, DU, DP)$

[0042] 其中,IFS表示综合霜冻胁迫(integrated frost stress, IFS)指数,LT表示晚霜冻害事件中低于冻害温度阈值的温度,简称“低温”;DU表示低温持续时长;DP表示冬小麦发育进程; $f$ 表示一种通用函数式。

[0043] IFS的量化公式为:

[0044]  $IFS = \sum_{i=d_j}^{d_a} (FDD_i \times VC_i)$

[0045]  $FDD_i = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} FD_t$

[0046]  $FD_t = \begin{cases} 0 & T_t > T_h \\ T_h - T_t & T_t \leq T_h \end{cases}$

[0047] 其中, $FD_t$ 为逐小时霜冻度日(单位: $h^\circ C$ ), $FDD_i$ 为第 $i$ 个降温过程中逐小时霜冻度日 $FD_t$ 的全天平均值(单位: $d^\circ C$ ), $T_t$ 为第 $i$ 个降温过程中第 $t$ 小时的最低草面温度( $^\circ C$ ), $T_h$ 为冻害温度阈值( $^\circ C$ ), $VC_i$ 为第 $i$ 个降温过程中冬小麦的脆弱性系数(无量纲,介于0.1—1.0之间), $d_j$ 和 $d_a$ 分别表示冬小麦拔节开始日期和开花期;

[0048] 通过设定不同温度阈值 $T_h$ 以计算IFS指数,利用IFS指数和受冻冬小麦的减产率进行拟合,依据二者间模型的决定系数和均方根误差来确定合适的冻害温度阈值 $T_h$ ;

[0049] 将各参数带入模型,对基于IFS指数预测的减产率与实测减产率对比进行精度验证。

[0050] 图2是综合霜冻胁迫指数构建示意图。晚霜冻害事件的定义须考虑三个条件:一是冬小麦生育时期,二是晚霜冻害发生时段,三是温度阈值。在此,将晚霜冻害定义为发生在冬小麦拔节至开花期之间(大致处于春季3-5月份)的一种气象灾害。既然每日降温过程总是介于13:00至次日12:00之间,且晚霜冻害事件通常发生在春季夜晚,因此将每日降温过程作为一次晚霜冻害事件的发生时段。在这个时段内,一旦温度降至冻害温度阈值以下(即低温出现),则一次晚霜冻害事件被认为开始发生;直至该时段内低温不再被检测到为止,则认为本次晚霜冻害事件结束。横坐标表示冬小麦拔节后日序(主刻度表示日,副刻度表示小时);红色曲线表示逐小时草面温度,其值(单位: $^\circ C$ )如左侧纵坐标所示;水平方向的黄色虚线表示冻害温度阈值;低温(低于冻害温度阈值)的出现,意味着晚霜冻害事件发生,灰色柱状图即代表了一次晚霜冻害事件。

[0051] 在本发明的一优选实施例中,冬小麦拔节开始日期 $d_j$ 由如下方法之一确定:

[0052] 田间抽样调查,定期观察并记录植株生长情况,一旦发现节间露出地面1.5—2.0cm,则认为拔节开始;在较大范围空间区域内,如果超过半数的抽样点小麦均进入拔节,则认为该地区冬小麦拔节开始,对应日期为拔节开始日期;

[0053] 基于积温的推算,将冬小麦返青至拔节所需有效积温的多年观测平均或经验值,作为判断冬小麦是否进入拔节的依据,利用气象观测台站记录的逐日平均气温,计算返青至拔节的有效积温,如果该有效积温达到或超过经验值,则认为拔节开始,对应日期为拔节开始日期;

[0054] 基于植被指数检测,在冬小麦整个生育期内植被指数时序曲线上,将植被指数在春季由低值平缓区快速升高时对应的时序特征点,作为判断冬小麦是否进入拔节的依据,利用时序曲线函数模拟方法计算每个时序点上的曲率变化率,如果该点曲率变化率达到极大值,则认为拔节开始,对应日期为所述拔节开始日期。

[0055] 在本发明的一优选实施例中,麦田逐小时草面温度 $T_t$ 为气象站点观测到的逐小时草面温度数据,或将气象站点观测到的逐小时草面温度数据进行空间插值而生成逐小时草面温度空间分布数据。空间插值方法可采用样条函数方法。

[0056] 在本发明的一优选实施例中,脆弱性系数VC曲线呈4段式上升;图3是脆弱性系数随幼穗分化进程的变化图,第1时段从小花原基分化(图中原点符号)开始直至药隔形成期(图中方形符号)前1日;第2时段为药隔形成前1日内;第3时段从药隔形成期至四分体形成期(图中三角形符号);第4时段在四分体形成期后。图中对脆弱性系数VC变化及取值进行进一步优选,曲线呈线性上升,其中,第1时段中所述脆弱性系数从0.1升至0.4;第2时段中所述脆弱性系数从0.4升至0.7;第3时段中所述脆弱性系数从0.7升至1.0;第4时段中所述脆弱性系数为1.0。

[0057] 在本发明的一优选实施例中,合适的冻害温度阈值 $T_h$ 确定方法为如下步骤:

[0058] 测定所述的受冻冬小麦产量减产率;

[0059] 设定所述冻害温度阈值 $T_h$ 的若干候选值为 $-6^{\circ}\text{C}$ 、 $-5^{\circ}\text{C}$ 、 $-4^{\circ}\text{C}$ 、 $-3^{\circ}\text{C}$ 、 $-2^{\circ}\text{C}$ 、 $-1^{\circ}\text{C}$ 和 $0^{\circ}\text{C}$ ,分别计算每个采样点上所述候选值对应的所述IFS指数;

[0060] 将所述IFS指数和所述减产率进行线性拟合,计算不同所述冻害温度阈值 $T_h$ 条件下二者线性模型的决定系数 $R^2$ 和均方根误差RMSE,依据所述 $R^2$ 最大和所述RMSE最小的原则来确定所述冻害温度阈值 $T_h$ 。

[0061] 在本发明的一优选实施例中,受冻冬小麦产量减产率测定方法为:对照产量 $Y_n$ 测定,通过田间抽样调查的办法,在研究区晚霜冻害事件发生年份,逐样点框定1米×1米的采样范围,并将全部茎蘖收割、装袋且带回实验室凉晒干;针对每个样点,统计全部茎蘖数量,以作为正常生长条件下冬小麦的穗数 $EN_n$ ;挑选出全部正常穗,统计其粒数和粒重,进而计算穗粒数和千粒重,以作为正常生长条件下冬小麦的穗粒数 $GNPE_n$ 和千粒重 $TGW_n$ ;根据公式 $EN_n \times GNPE_n \times TGW_n$ ,计算得出正常生长条件下冬小麦的产量 $Y_n$ ,作为所述对照产量;实际产量 $Y_f$ 测定,统计全部茎蘖的籽粒重,作为所述实际产量 $Y_f$ ;利用公式 $(Y_n - Y_f) / Y_n \times 100\%$ ,计算得出所述受冻冬小麦产量减产率。

[0062] 在本发明的一优选实施例中,受冻冬小麦产量减产率测定方法也可以为:基于多年测定的冬小麦产量数据,将实际产量分解为趋势产量、气象产量和随机产量3个部分,随机产量因其影响小而忽略不计,将趋势产量作为正常产量,计算实际产量和趋势产量之差,

可以得到受冻冬小麦产量减产率。

[0063] 在本发明的一优选实施例中,针对空间大范围区域内的受冻冬小麦,采用基于面向对象分类、深度学习等方法的遥感分类技术,可提取出冬小麦空间分布信息,屏蔽非小麦信息。

[0064] 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

[0065] 下面结合一具体实例来说明本发明的应用。以河南省商丘地区2015至2019年冬小麦拔节后霜冻害事件为例,各年份均于冬小麦成熟后,在研究区内开展随机采样、产量测定和减产率计算工作,所采样点数量各年分别为42、27、32、43和19个,总计达163个。

[0066] 经田间定期抽样调查和记录,得知2015至2019年商丘地区冬小麦分别于3月24日、3月18日、3月19日、3月20日和3月20日进入拔节。

[0067] 获得商丘及其周边地区27个气象观测台站记录的逐小时草面温度数据,对拔节开始后的台站草面温度数据按逐小时进行空间插值,生成时空连续(时间分辨率:逐小时;空间分辨率:1km)的草面温度图像。在该图像上提取所有采样点对应的草面温度值,并将草面温度值输入综合霜冻胁迫(IFSD)指数、累积霜冻度日AFDD<sub>1</sub>指数和AFDD<sub>2</sub>指数的计算公式中,分别计算-6、-5、-4、-3、-2、-1和0℃冻害温度阈值条件下的IFSD、AFDD<sub>1</sub>和AFDD<sub>2</sub>指数值。

[0068] AFDD<sub>1</sub>和AFDD<sub>2</sub>的计算公式如下,

$$[0069] \quad AFDD_1 = \sum_{i=ds}^{de} MAX(T_h - T_{min,i}, 0)$$

$$[0070] \quad AFDD_2 = \sum_{i=ds}^{de} FDD_i$$

[0071] 分别构建2015-2018年IFSD、AFDD<sub>1</sub>、AFDD<sub>2</sub>与减产率之间的线性拟合模型,并计算不同冻害温度阈值下的线性模型决定系数(R<sup>2</sup>)和均方根误差(RMSE),如图4所示。根据R<sup>2</sup>最大和RMSE最小原则,最终确定IFSD指数的冻害温度阈值为-3℃。不论冻害温度阈值候选值大小,IFSD指数总是比AFDD<sub>1</sub>、AFDD<sub>2</sub>有更高的R<sup>2</sup>和更低的RMSE。可见,IFSD指数表现出比AFDD<sub>1</sub>和AFDD<sub>2</sub>指数更优的产量损失早期预测精度。AFDD<sub>1</sub>和AFDD<sub>2</sub>指数使用的是逐日最低百叶箱气温,缺乏发育进程对冻害影响的考虑,基于百叶箱气温的冻害阈值设定并不准确(在平流型霜冻、辐射型霜冻和混合型霜冻条件下,同一阈值对应的冻害程度明显不同),预测精度相对较低。

[0072] 如图5所示为基于IFSD指数预测的减产率与实测减产率的散点关系,图中利用2019年减产率数据,对基于-3℃阈值的IFSD指数的预测精度进行验证,发现其早期预测减产率的决定系数为0.463,达到0.015显著性水平,拟合线非常接近1:1线。

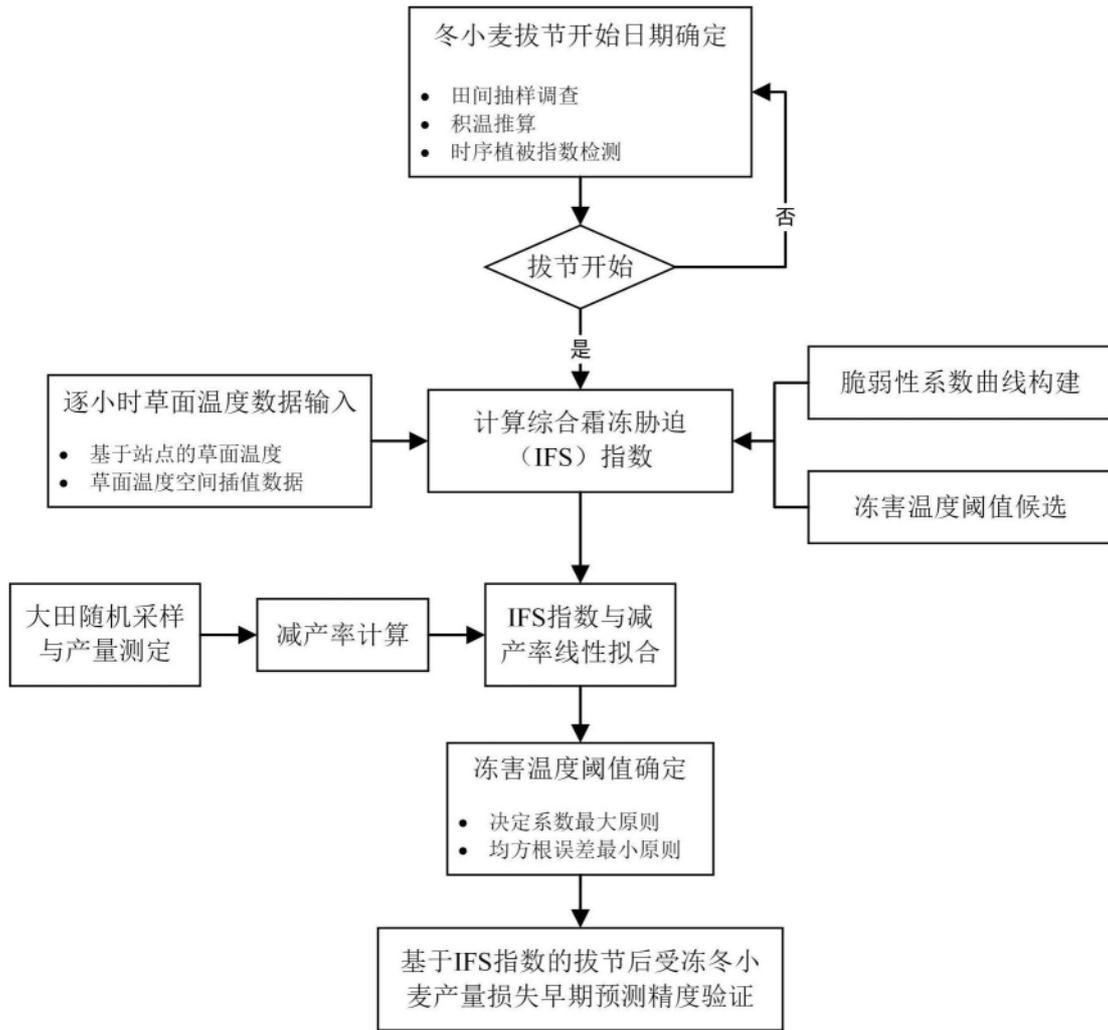


图1

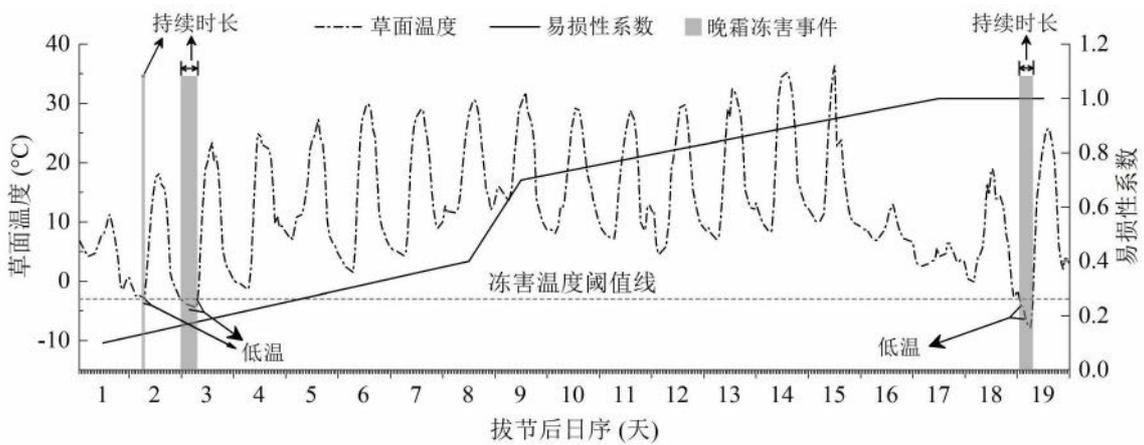


图2

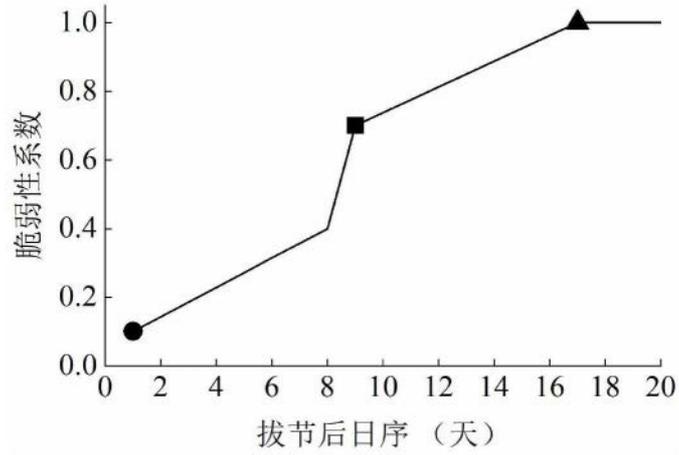


图3

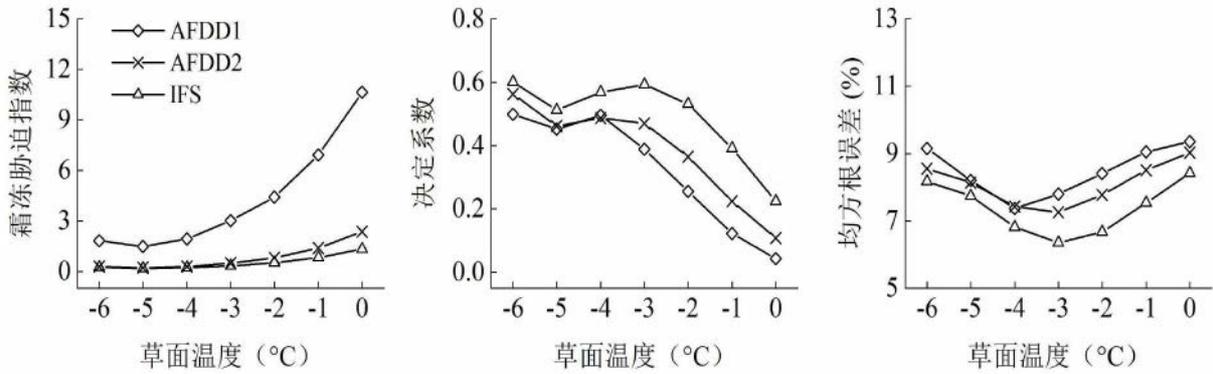


图4

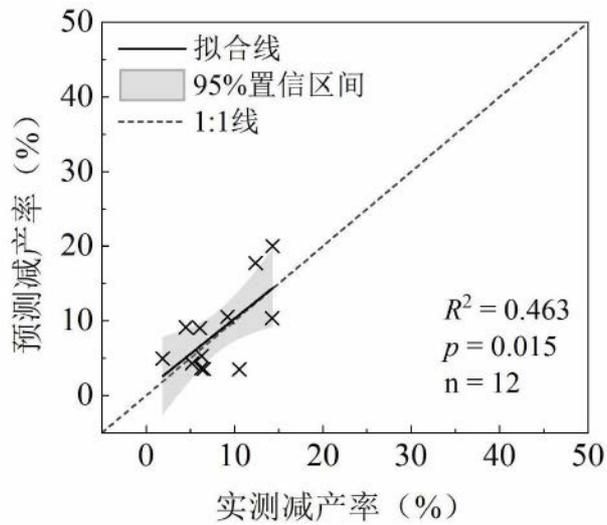


图5