

基于MODIS地表温度与气象数据的东北春玉米低温冷害监测

黄然^{1,2}, 黄健熙², 张超², 郭春明³, 庄立伟⁴, 吴开华¹,
张竞成¹, 张垚¹

1. 杭州电子科技大学 人工智能学院, 杭州 310018;

2. 中国农业大学 土地科学与技术学院, 北京 100083;

3. 吉林省气象科学研究所, 长春 130062;

4. 国家气象中心, 北京 100081

摘要: 低温冷害是影响东北玉米生长发育及产量形成的主要气象灾害。以东北地区为研究区, 利用2003年—2015年的MODIS陆地表面温度LST (Land Surface Temperature) 数据产品、植被指数VI (Vegetation Index) 数据产品与气象站点观测的日平均气温数据, 构建以LST、VI和太阳赤纬(Ds)为自变量的日平均气温估算模型; 结合时空数据融合方法, 完成覆盖研究区的逐日的1 km空间分辨率的日平均气温数据集, 逐年计算 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温; 结合玉米障碍型低温冷害指标和延迟型冷害指标, 开展研究区2003年—2015年研究区玉米低温冷害遥感监测。监测结果显示, 本研究区在2003年、2005年、2006年、2009年和2011年遭受大范围的延迟型低温冷害, 与相关文献和农业农村部种植业司玉米单产数据分析对比结果表明, 玉米障碍型低温冷害和延迟型低温冷害遥感监测结果与实际相符。

关键词: 遥感, MODIS, 陆地表面温度, 数据融合, 低温冷害, 春玉米

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 黄然, 黄健熙, 张超, 郭春明, 庄立伟, 吴开华, 张竞成, 张垚. 2024. 基于MODIS地表温度与气象数据的东北春玉米低温冷害监测. 遥感学报, 28(10): 2500–2512

Huang R, Huang J X, Zhang C, Guo C M, Zhuang L W, Wu K H, Zhang J C and Zhang Y. 2024. Monitoring chilling damage of corn in the Northeast China based on MODIS LST and meteorological data. National Remote Sensing Bulletin, 28(10): 2500–2512 [DOI:10.11834/jrs.20211045]

1 引言

东北地区是玉米和水稻等喜温作物种植最北边界, 加上盲目选择生育期长的品种以提高单产, 容易导致作物低温冷害。低温冷害是喜温作物受到的 0°C 以上的低温影响而直接引起花器官受损或者导致生育延迟而减产的低温灾害 (崔读昌, 1999)。

根据危害机理和出现的危害症状, 一般将低温冷害分为延迟型低温冷害、障碍型低温冷害和混合型低温冷害。以玉米种植为例: 延迟型低温冷害是由于玉米生长季内温度持续偏低、积温偏

少, 作物生长缓慢、发育延迟, 不能完成正常的灌浆过程, 导致百粒重下降而减产; 障碍型低温冷害是在生殖生长期, 由于温度低于玉米生殖生长下限温度, 引起花粉发育不良或者授粉、受精过程受损而导致玉米减产; 混合型低温冷害则是指在玉米生长季内, 同时出现延迟型低温冷害和障碍型低温冷害, 导致玉米生长缓慢、生育期延迟、百粒重下降, 而且花粉发育不良或者授粉、受精过程受损而导致减产。

玉米低温冷害研究根据尺度大小可以分为单点尺度和区域尺度两类。单点上的低温冷害监测主要依靠气象站观测数据或田间实验。张德荣

收稿日期: 2021-01-28; 预印本: 2021-08-16

基金项目: 浙江省自然科学基金 (编号: LQ21D010006)

第一作者简介: 黄然, 研究方向为农业遥感、农业灾害遥感监测。E-mail: ran_huang@hdu.edu.cn

通信作者简介: 黄健熙, 研究方向为遥感与作物模型数据同化的农业应用、农业灾害遥感监测与预警等。E-mail: jxhuang@cau.edu.cn

(1993)以人工控制温度的方法,对不同生育期玉米给予不同低温处理,研究了低温对玉米生长发育及产量等的影响;王春乙(2008, 2010)利用气象数据对玉米低温冷害的致灾因素、影响机理进行了系统的分析,并开展低温冷害对玉米生理过程影响的试验;高素华(2003)利用东北三省多年气象资料分析玉米延迟型低温冷害在不同生育期发生的频率,结果表明,如果玉米出苗期、七叶期、抽雄期、成熟期延迟5 d,则低温冷害发生的可能性分别为75%、89%、92%和100%;郭建平(2003)根据不同玉米生育期的适宜温度、上限温度和下限温度,建立了具有生物学意义的玉米低温冷害热量指标;马树庆等(2006)用玉米观测资料,确定东北玉米各生长生育期出现的时间和积温指标。中国气象局(2013)建立气象行业标准《北方春玉米冷害评估技术规范》用于规范东北、华北北部和西北等地区的春玉米低温冷害,该标准指出可利用出苗—七叶、出苗—抽雄和出苗—乳熟期的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温距平值来评估玉米低温冷害发生的可能性,可利用当年5—9月的月平均气温之和的距平值来判定冷害强度。

利用气象站点数据进行低温冷害机理研究与预防服务,具有数据时间序列长、精度高等优点,且可具体分析低温冷害的危害机理、发生发展规律,制定低温冷害危害指标,但难以获得区域范围内低温冷害的时空分布特征。基于卫星遥感数据和GIS技术的低温冷害监测方法则可以获得区域的空间数据。郭晓丽等(2009)和何燕等(2012)利用经度、纬度、海拔高度等基础地理信息数据进行1 km网格空间分析推算低温冷害的发生、程度和范围;李帅等(2013)利用气象点日平均气温和生育期资料,结合站点经度、纬度、海拔高度进行逐步回归分析,建立黑龙江省1 km $\times$ 1 km网格的玉米低温冷害危险性评估指标;檀艳静(2014)利用气象数据、地表反射率数据反演的LAI和高程等数据驱动遥感作物模型,开展低温冷害和产量的模拟研究;赵哲文(2018)利用AMSR和MODIS LST等遥感数据和气象数据,基于综合赋权法、时序分析、决策树模型、气温估算和作物模型模拟等方法,对陕甘宁三省(区)玉米低温冷害展开遥感监测与损失评估。

由此可见,玉米低温冷害研究主要基于农学机理实验和历史数据统计分析。在进行区域玉米低温冷害监测评估时,主要采用地理信息系统和地

统计方法通过气温空间插值,其次,基于时空遥感数据融合的气温进行水稻低温冷害监测的研究较多,但玉米低温冷害遥感监测研究较少。因此,本研究拟利用2003年—2015年研究区气象站点观测数据、多平台卫星遥感数据和时空数据融合方法建立逐日、1 km空间分辨率的研究区日平均气温数据集,结合玉米障碍型低温冷害和延迟性低温冷害指标,监测研究区玉米低温冷害受灾情况。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

研究区包括黑龙江省、吉林省、辽宁省和内蒙古东北部(呼伦贝尔市、通辽市、赤峰市、兴安盟),位于 38°N — 54°N , 115°E — 35°E ,总面积 $1.24\times 10^6\text{ km}^2$ 。研究区内的松嫩平原、辽河平原和三江平原土地肥沃,水热条件好,是中国重要的商品粮生产基地,种植制度为一年一熟,主要种植玉米、水稻、高粱、大豆和小麦等作物。

2.2 数据来源

MODIS为搭载在TERRA卫星和AQUA卫星上的光学传感器,有36个可见光和红外波段,主要用于获取海洋、大气、陆地等参数反演和应用(Xiong等, 2006)。

因为TERRA卫星和AQUA卫星一天经过同一地点两次,其中TERRA卫星在每日地方时上午10:30时和下午22:30时过境,AQUA卫星在每日地方时下午13:30时和凌晨1:30时过境;所以基于TERRA卫星的MODIS LST产品MOD11A1可提供上午10:30和晚上10:30的陆地表面温度(LST_{TM} 、 LST_{TN}),基于AQUA卫星的MODIS LST产品MYD11A1可提供下午1:30和凌晨1:30的陆地表面温度(LST_{AD} 、 LST_{AN})数据。MOD11A1和MYD11A1都附有质量评估数据QC(Quality Control),QC值为0表示该像元LST的数据质量为优。本文仅使用优质像元的LST数据参与计算。

在可见光波段,由于绿色植被的叶绿素、胡萝卜素、花青素等色素吸收太阳辐射,使得可见光波段的反射率很低;而在近红外波段,绿色植物吸收很少,其反射率很高。因此,常常利用这种特征构建植被指数,以反映作物的生长发育状况,反演作物生物量、叶面积指数、色素含量、氮素含量,进行产量预报(黄敬峰等, 2013;王

人潮和黄敬峰, 2002; 严泰来和王鹏新, 2008)。

Huete等(1997, 2002)根据MODIS波段特征, 设计了增强型植被指数EVI (Enhances Vegetation Index), 以降低大气和土壤背景的影响。增强型植被指数计算公式如下:

$$EVI = 2.5 \times \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + 6.0\rho_{RED} - 7.5\rho_{BLUE} + 1} \quad (1)$$

式中, ρ_{NIR} 为近红外波段; ρ_{RED} 为红光波段; ρ_{BLUE} 为蓝光波段。

MOD13A2和MYD13A2为利用MODIS数据计算EVI值, 再采用最大值合成法以消除云、大气等影响, 形成16 d的植被指数产品, 空间分辨率为1 km。

本研究使用的MODIS数据产品主要包陆地表面温度数据产品 (MOD11A1和MYD11A1)、植被指数数据产品 (MOD13A2和MYD13A2) 和土地覆盖数据产品 (MCD12Q1) (Wan和Li, 2010)。

2.3 气象观测数据

气象数据包括研究区2003年—2015年234个国家地面气象站观测的日平均气温和玉米生育期数据。按照气象站点的经纬度坐标, 将气象站分2003年—2013年2/3的气象站点 (156个) 观测数据用于建立日平均气温估算模型, 剩余数据包括2003年—2013年78个气象站点观测数据和2014年—2015年所有气象站点观测数据用于日平均气温估算模型的精度验证。

3 研究方法

太阳辐射短波辐射穿过大气, 在经过大气吸收、散射后达到地球表面, 地球吸收太阳短波辐射, 即太阳短波辐射同时对地球和大气具有加热作用, 选择太阳赤纬 (D_s) 作为表征太阳短波辐射季节变化的因子。由于植被覆盖能影响陆地表面对太阳辐射的吸收、陆地表面的长波辐射, 并通过蒸散影响地面能量平衡, 从而影响陆地表面温度与日平均气温的关系, 因此在利用多元回归建立日平均气温遥感估算模型中, 除了LST和 D_s 外, 还常常利用植被指数VI (Vegetation Index) 作为自变量。

3.1 太阳赤纬计算

地球围绕太阳公转, 形成春夏秋冬季节变化, 这是由于不同时间太阳直射地球表面位置不同引起的, 太阳直射点不同导致地球表面接收的太阳

辐射不同, 从而影响气温和地温。 D_s 在冬至时的 -23.442° 。与夏至时的 23.442° 之间变化, 在春分或者秋分时处于 0° 。本文采用Bourges (1985) 提出的 D_s 计算公式如下:

$$D_s = 23.45 \sin \left(360^\circ \times \frac{284 + t}{365} \right) \quad (2)$$

式中, t 为一年当中的第 t 天, 从每年1月1日开始。

3.2 Savitzky-Golay 滤波

植被指数的变化可以反映出玉米生长过程, 其季节变化曲线是连续且平滑的。MOD13A2和MYD13A2的EVI数据产品已经采用最大值合成法处理消除云、大气等影响, 但还会有噪声影响, 需要进一步进行降噪和平滑处理, 形成逐日1 km空间分辨率的EVI数据序列。本研究采用Savitzky-Golay (S-G) 滤波器 (Savitzky和Golay, 1964), 该滤波器是一种简化的最小二乘法拟合卷积, 用来平滑连续的数据, 计算公式如下:

$$VI_{S-G,j} = \frac{\sum_{i=-K}^K C_i VI_{o,j+i}}{L} \quad (3)$$

式中, $VI_{S-G,j}$ 为EVI计算值; $VI_{o,j+i}$ 为原始的EVI值; K 为滤波窗口宽度的一半, $L=2K+1$, 为滤波器的长度; C_i 是S-G滤波器的系数, 根据不同的数据特征通过特定次数的多项式确定, 多项式的次数通常设为2—4, 多项式的次数过低会带来偏差, 而过高可能会出现过拟合。 K 和 C_i 是S-G滤波的两个关键参数, 本研究取 $K=2$ 的2次多项式, 经过S-G滤波处理, 消除EVI的噪声值并且保留了EVI上包络线。

3.3 日平均气温遥感估算模型构建

太阳短波辐射是地球表层能量的主要来源, 地球表面通过吸收太阳辐射, 导致地球表面温度上升, 而地表植被覆盖又会影响地球表面对太阳短波辐射的吸收, 从而影响气温, 因此, 选择反映太阳辐射的 D_s 、卫星反演的LST、反映地表植被覆盖的EVI作为自变量, 以日平均温度 (AT_{mean}) 为因变量, 建立日平均气温估算模型。受云影响并不是每一天每个像元都有卫星数据, 因此仅保留QC=0的LST。再根据AQUA和TERRA MODIS白天和晚上的陆地表面温度 (LST_{AD} 、 LST_{AN} 、 LST_{TD} 、 LST_{TN}) 分别确定对应的 AT_{mean} 、EVI和 D_s 数据。气温受到太阳辐射和地表覆盖的影响, 而且都与遥感反演的LST有密切的相关关系, 因此分析研究区

实测的日平均气温和与LST、EVI及Ds的相关性,建立日平均气温多元回归模型,计算公式如下:

$$AT_{mean,i} = a \times LST_i + b \times EVI + c \times Ds + \varepsilon \quad (4)$$

式中, $AT_{mean,i}$ 代表日平均气温, i 代表不同平台和不同观测时间获取的LST数据, 分别为Aqua卫星凌晨1:30 (AN) 与下午13:30 (AD) 和Terra卫星上午10:30 (TD) 与夜间22:30 (TN); a 、 b 和 c 是多元回归模型的系数, ε 是随机误差。

对于建立的模型或者数据融合影像, 不同指标进行评价, 采用的评价指标主要有决定系数 R^2 (Coefficient of Determination)、偏差 (Bias) 和均方根误差 RMSE (Root Mean Square Error), 其计算公式如下:

$$R^2 = \left(\frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}} \right)^2 \quad (5)$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \right)} \quad (7)$$

式中, x_i 为自变量, y_i 为因变量, $\hat{y}_i$ 为估算值, RMSE 表征估算值与实测值之间差异的平均距离, RMSE 越小, 说明估算值与实测值的平均距离越小, 模型估算精度或者数据融合精度越高; R^2 越接近于1, 表示模型中所使用的自变量对因变量 AT_{mean} 的解释越好; Bias 表示模拟值是否存在系统性偏高或偏低, 当 Bias 为负时, 表示与实测值相比, 模拟值偏低; 当 Bias 为正时, 表示与实测值相比, 模拟值偏高; Bias 越接近0, 表示模拟值与

实测值越接近, 精度越高。

3.4 时空数据融合

TERRA 和 AQUA 卫星搭载的 MODIS 传感器反演的 LST 数据, 白天和晚上的4种数据产品, 优质像元百分率都低于50%。TERRA、AQUA 双星运行, 每天每颗卫星白天和晚上各可生产一次 LST 数据产品, 过境时间不同, 云雨的空间位置由于空气运动的影响, 在不同时次的影响范围不同, 因此, 不同时次的数据有一定的互补性; 考虑到气温日变化, 不能将 TERRA 和 AQUA 卫星4次数据直接进行融合使用。由于日平均气温与当天任意时次的瞬时气温显著相关, 因此可以利用 TERRA 和 AQUA 白天和晚上的 LST、EVI 和 Ds 数据与气象站点观测的日平均气温数据, 构建4个日平均气温估算模型, 再根据4个模型的精度进行数据融合, 提高日平均气温数据的空间覆盖百分率。

根据前期研究结果 (Huang 等, 2015), 以待估算像元为中心, 以待插补影像前一天 ($t-1$)、后一天 ($t+1$)、前第二天 ($t-2$)、后第二天 ($t+2$)、前第三天 ($t-3$)、后第三天 ($t+3$)、前第四天 ($t-4$)、后第四天 ($t+4$) 的日平均气温数据为参考影像, 选择 33×33 像元窗口进行计算。

4 结果与分析

4.1 日平均气温遥感估算模型构建及精度验证

基于式 (4), 以2003年—2013年建模站点提供的站点 AT_{mean} 为因变量, Ds 和 MODIS EVI 数据产品和各平台、不同过境时间的 LST 数据产品 (LST_{AD} 、 LST_{AN} 、 LST_{TD} 和 LST_{TN}) 分别构建日平均气温估算模型 ($AT_{mean,AD}$ 、 $AT_{mean,AN}$ 、 $AT_{mean,TD}$ 和 $AT_{mean,TN}$) (表1)。

表1 基于多元线性回归日平均气温遥感估算模型

Table 1 Estimation models of daily mean air temperature using LST, EVI and Ds as predictors

模型 Model	决定系数 R^2	均方根误差/ $^{\circ}\text{C}$ RMSE	偏差 Bias	显著性检验 Sig	样本量 N
$AT_{mean,AD} = 0.593LST_{AD} + 21.291EVI + 0.023Ds - 7.156$	0.866	2.93	0.0026	0.00 **	33578
$AT_{mean,AN} = 0.848LST_{AN} - 1.092EVI + 0.108Ds + 8.420$	0.927	2.61	-0.0020	0.00 **	49725
$AT_{mean,TD} = 0.634LST_{TD} + 20.267EVI + 0.015Ds - 6.698$	0.865	2.88	-0.0015	0.00 **	39672
$AT_{mean,TN} = 0.873LST_{TN} - 2.823EVI + 0.098Ds + 7.283$	0.935	2.54	0.0031	0.00 **	58169

注: **表示通过0.01极显著性检验。

4个日平均气温估算模型的 R^2 均高于0.86, RMSE 小于 3°C 。 $AT_{mean,TN}$ 精度最高, 其 R^2 和 RMSE 分别为0.935和 2.54°C 。通过比较不同时相 LST 的

模型可以发现, 以晚上 LST 等为自变量的 $AT_{mean,AN}$ 和 $AT_{mean,TN}$ 的精度高于以白天 LST 等为自变量的 $AT_{mean,AD}$ 和 $AT_{mean,TD}$, 如 $AT_{mean,AN}$ 的 R^2 和 RMSE 分别

为0.927和2.61℃而 $AT_{mean,AD}$ 的 R^2 为0.866、RMSE为2.93℃。

表2和表3分别为利用2003年—2013年验证站点的实测数据以及2014年和2015年所有站点实测数据进行的日平均气温遥感估算模型精度检验结果。两类验证数据均表明模型精度最高的是 $AT_{mean,TN}$ ，其 R^2 和RMSE分别为0.9295和2.65℃。

表2 利用2003年—2013年验证站点数据的日平均气温遥感估算模型精度检验

Table 2 Validation of daily mean air temperature of validation set from 2003 to 2013			
模型	相关系数	均方根误差/℃	样本量
$AT_{mean,TN}$	0.9338	2.66	26612
$AT_{mean,TD}$	0.8517	2.97	17105
$AT_{mean,AN}$	0.9289	2.65	20210
$AT_{mean,AD}$	0.8529	2.98	15024

表3 利用2014年和2015年所有站点数据的日平均气温遥感估算模型精度检验

Table 3 Validation of daily mean air temperature of validation set from 2014 to 2015			
模型	相关系数	均方根误差/℃	样本量
$AT_{mean,TN}$	0.9295	2.65	14832
$AT_{mean,TD}$	0.8842	2.71	10045
$AT_{mean,AN}$	0.9293	2.61	12257
$AT_{mean,AD}$	0.8771	2.82	8452

图1和图2分别为利用2003年—2013年验证站点观测数据、2014年和2015年所有站点的观测数据与利用多元回归模型估算的日平均气温的散点图，由图可知，数据点都分布在1:1线附近，表明遥感估算模型具有较高的预测精度。

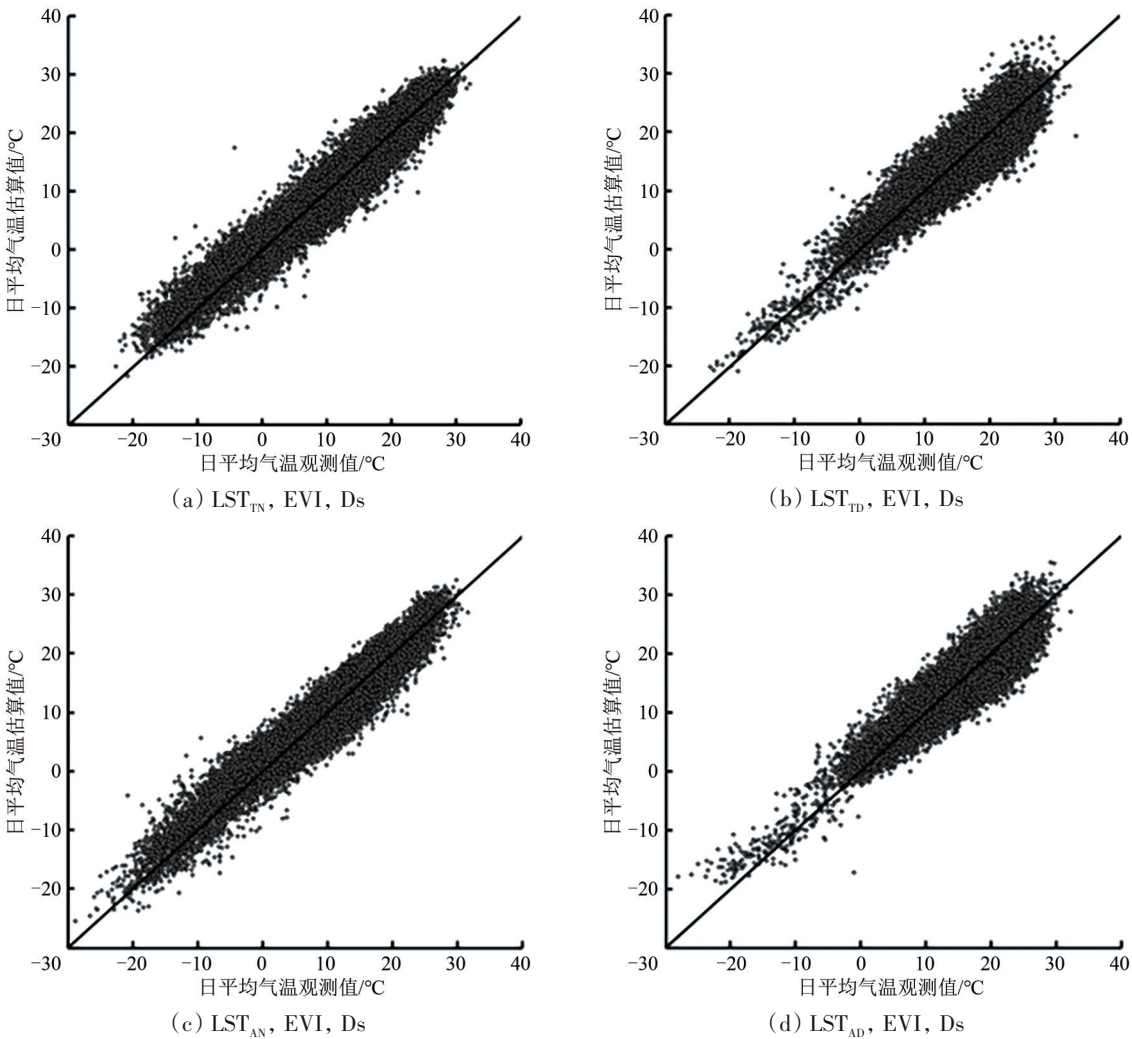


图1 2003年—2013年验证站点实测日平均气温与遥感估算日平均气温散点图
Fig. 1 The scatterplots of the measured and estimated daily mean air temperature of validation set from 2003 to 2013

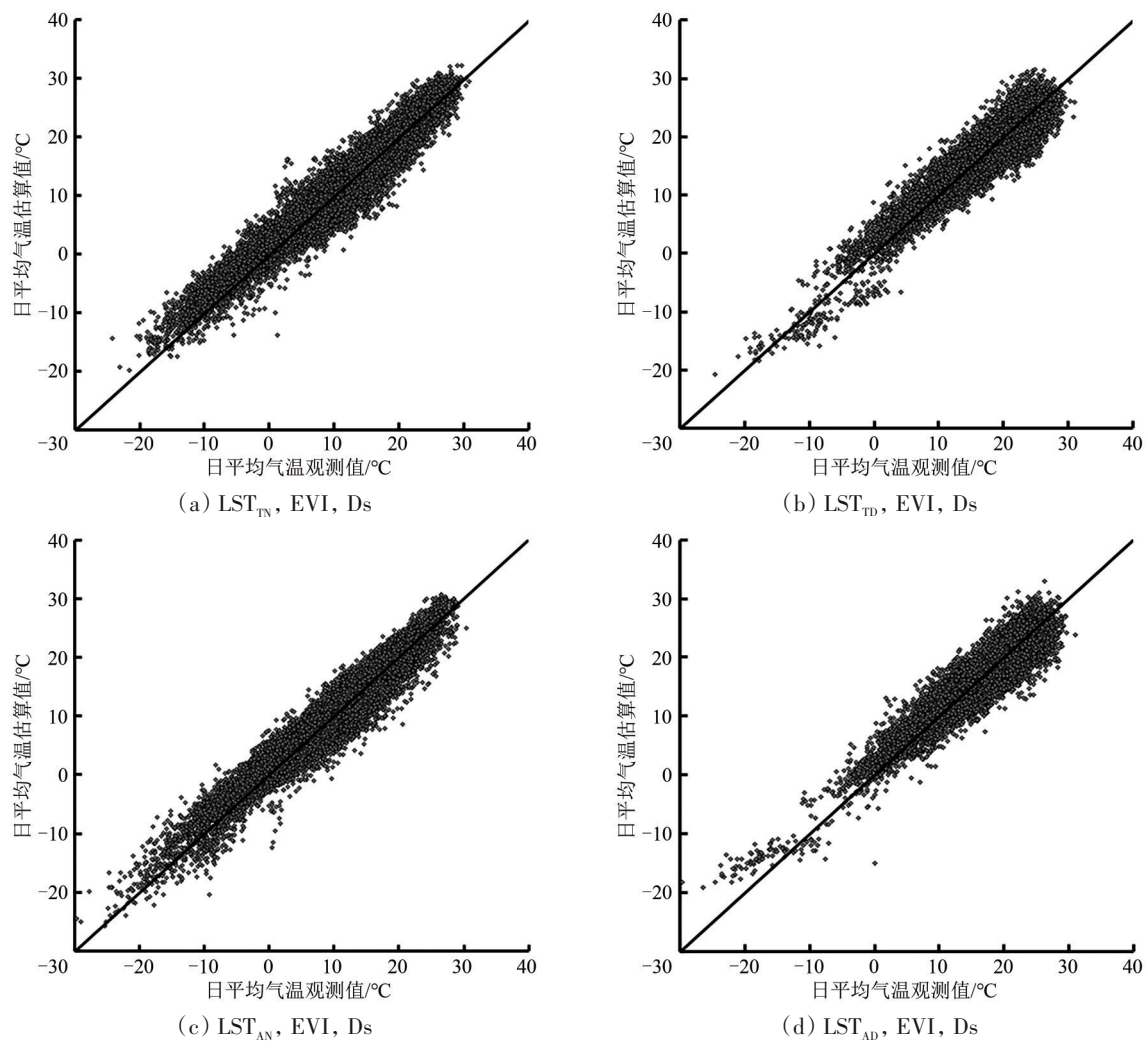


图2 2014年和2015年所有站点实测日平均气温与遥感估算日平均气温散点图

Fig. 2 The scatterplots of the measured and estimated daily mean air temperature of validation set from 2014 to 2015

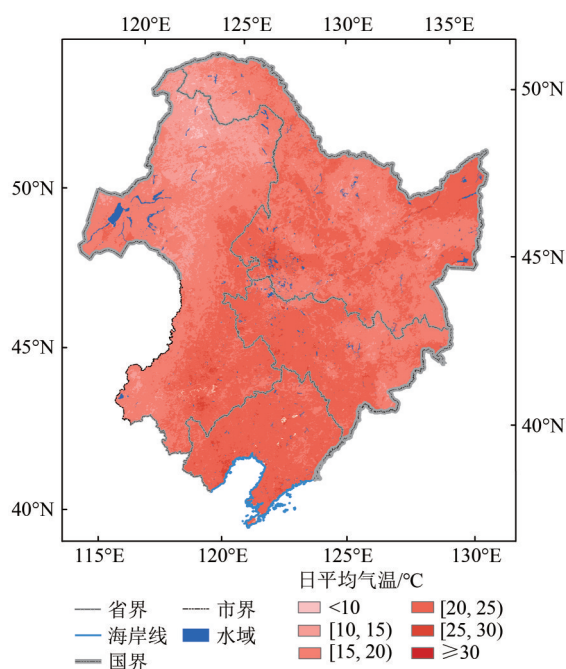
4.2 基于时空数据融合的逐日全覆盖日平均气温数据集构建

受云雨影响, TERRA 和 AQUA 卫星获取的优质像元值有限, 因此, 利用 MODIS LST 及辅助数据估算的日平均气温有空缺像元。由表 2 和表 3 可知以 $AT_{mean, TN}$ 模型精度最高, 2003 年—2013 年验证站点和 2014 年—2015 年所有站点数据的 R^2 分别为 0.9338 和 0.9295, 而 RMSE 分别为 2.66°C 和 2.65°C ; 其次为 $AT_{mean, AN}$ 模型; 再次为 $AT_{mean, TD}$ 模型; 最后为 $AT_{mean, AD}$ 模型。因此, 本研究选择利用 $AT_{mean, TN}$ 模型估算的研究区日平均气温为底图, 即只要利用从每天的 4 幅日平均气温影像图逐像元进行搜索, 如果某一个像元有利用 $AT_{mean, TN}$ 模型估算的数据, 就不再搜索其它影像数据, 否则进行下一次搜索。当某一个像元没有以 $AT_{mean, TN}$ 模型估算的日平均气温数据时, 再搜索利用 $AT_{mean, AN}$ 模型估算的

日平均气温数据, 否则, 就赋给底图相应像元, 作为该像元日平均气温数据值。以此类推, 逐步叠加 $AT_{mean, TD}$ 模型估算的日平均气温和 $AT_{mean, AD}$ 模型估算的日平均气温, 获得融合影像。

经过第一步数据融合后的日平均气温优质像元空间覆盖率提高到 37%, 但是还有 63% 没有日平均气温数据, 还需要利用日平均气温的时空变化特征, 进行第二步数据融合, 以获得全覆盖、逐日、1 km 空间分辨率的日平均气温数据集, 结果见图 3。可见经过不同传感器不同时次卫星数据估算的日平均气温数据融合、日平均气温时空数据融合, 可以获得全覆盖逐日 1 km 分辨率的日平均气温数据。

图 4 为融合后的日平均气温和实测值比较, 294428 对实测值和估算值均匀分布在 1:1 线两侧。



京审字(2024) G第1185号

图3 遥感估算的日平均气温时空融合结果(2014年8月11日)

Fig. 3 Spatiotemporal fusion results of estimated daily mean temperature on August 11, 2014

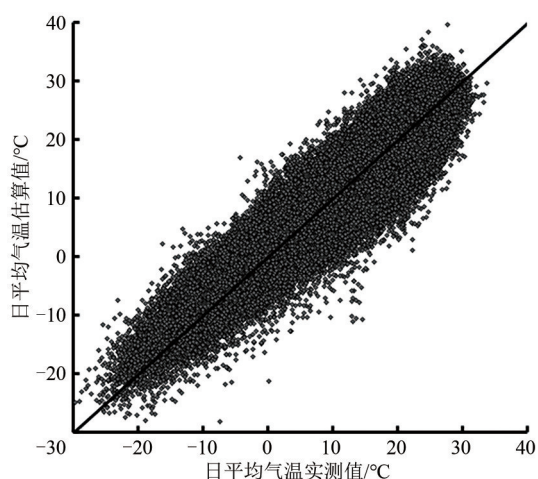


图4 基于时空融合的日平均气温估算精度验证

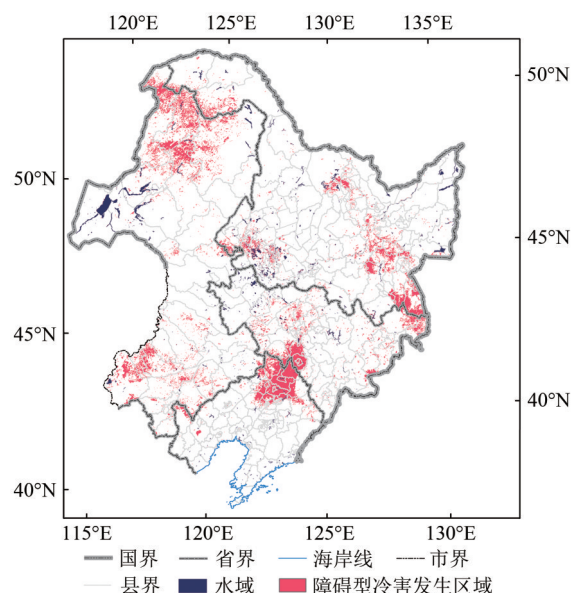
Fig. 4 The scatterplots of the measured and estimated daily mean air temperature based on spatiotemporal data fusion method

4.3 玉米障碍型低温冷害遥感监测

玉米障碍型冷害主要发生在玉米抽雄、开花、吐丝、灌浆、乳熟到成熟,其判断指标为抽雄期连续3 d日平均气温 $\leq 18^{\circ}\text{C}$,灌浆乳熟期连续3 d日平均气温 $\leq 16^{\circ}\text{C}$ (毛留喜和魏丽, 2015)。研究区玉米抽雄最早开始于7月14日,而成熟期最晚结束于9月27日,因此,利用经过数据融合得到的高时空分辨率日平均气温,结合玉米障碍型低温

冷害指标,逐像元搜索7月14日—9月27日的日平均气温,将连续3 d低于 18°C 或者 16°C 确定为可能发生障碍型低温冷害区域。

利用经过数据融合得到的高时空分辨率日平均气温,结合玉米障碍型低温冷害指标,逐像元搜索7月14日—9月27日的日平均气温,将连续3 d低于 18°C 或者 16°C 确定为可能发生障碍型低温冷害区域。图5为2003年7月23—25日研究区障碍型低温冷害遥感监测结果。此时玉米正处在抽穗开花期,遭受日平均气温低于 18°C 的障碍型低温冷害,将会影响玉米的花粉发育不良、授粉、受精而影响玉米产量。



京审字(2024) G第1185号

图5 2003年7月23日到25日玉米抽雄期障碍型积温冷害空间分布图

Fig. 5 Distribution of sterile-type chilling damage in tasseling stage of corn from July 23 to 25, 2003

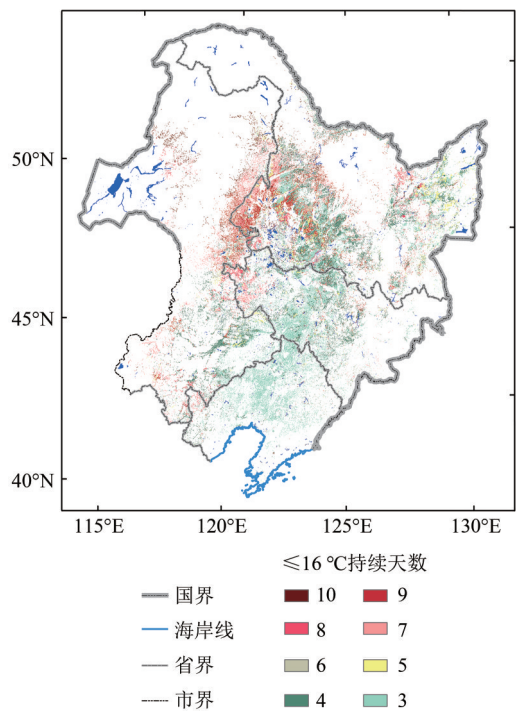
图6为2006年9月1日开始的玉米障碍型低温冷害遥感监测结果,此次低温过程持续时间长,降温幅度大,大部分地区持续时间都在3 d以上,部分地区达到10 d,内蒙古东部和黑龙江省部分地区降温 12°C 以上,仅黑龙江省的农作物受灾面积就达到 $2.68 \times 10^5 \text{ hm}^2$ (中国气象局, 2007)。此次低温冷害中,黑龙江省的富裕、海伦、龙江、嘉荫和尚志,内蒙古的扎兰屯等地区低于 16°C 的持续时间均较长,与气象站点观测的日平均气温结果吻合(图7)。据《中国气象灾害年鉴》记载:2006年9月上旬末至中旬初,研究区受强冷空气

影响, 出现大范围强降温天气过程, 内蒙古东部和黑龙江省部分地区日平均气温下降8—12℃, 作物遭受低温冷害(中国气象局, 2007), 本文的冷害监测结果与记载一致。

4.4 玉米延迟型低温冷害遥感监测

与障碍型低温冷害不同, 延迟型低温冷害的特点是温度偏低持续时间长, 根据郭建平和马树庆(2009)和马树庆等(2006)确定的玉米延迟型低温冷害指标: $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温距平值在 -70 — -120°Cd 时为一般低温冷害年, 低于 -120°Cd 为严重冷害年, 确定2003年—2015年研究区的延迟型低温冷害情况。可利用高时空分辨率的日平均气温数据计算研究区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温, 然后根据玉米延迟型低温冷害指标, 探讨玉米延迟型低温冷害遥感监测可行性。

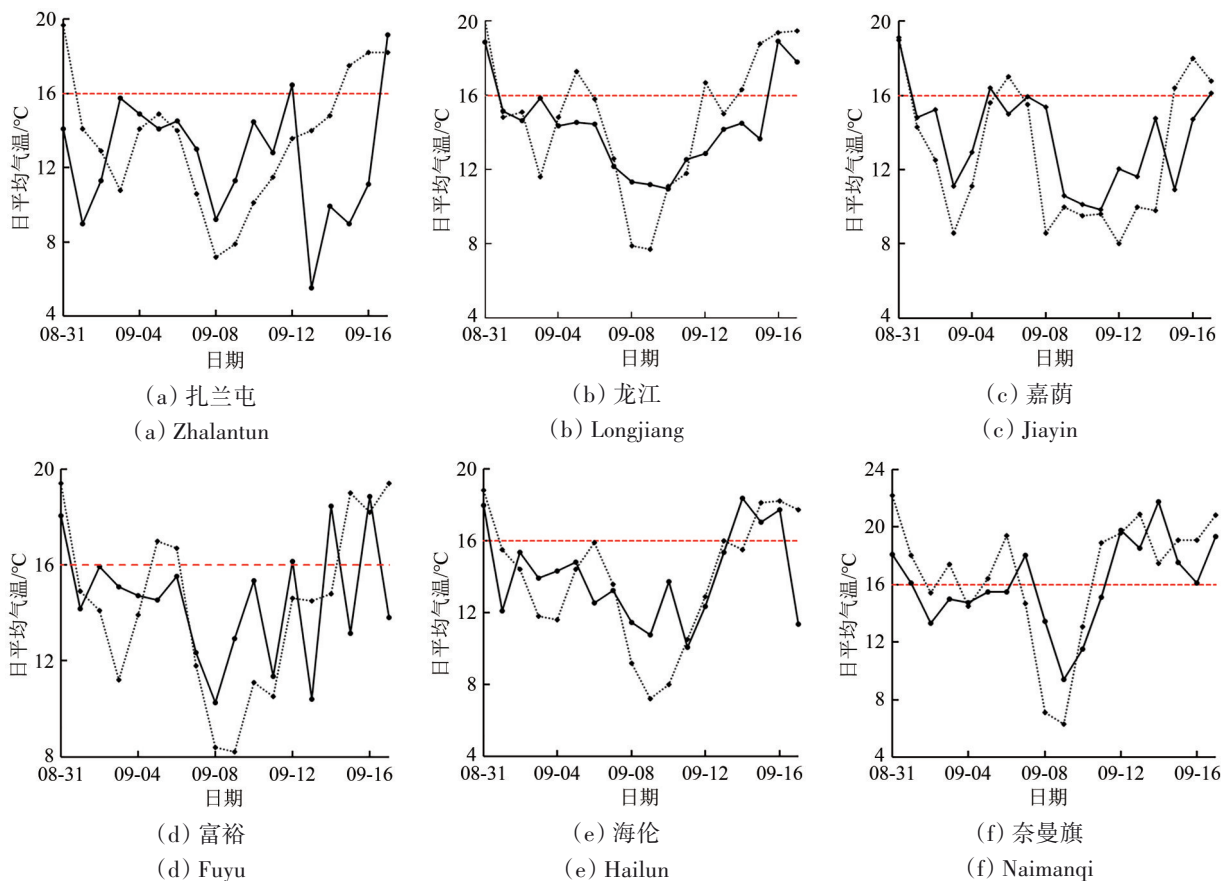
利用遥感估算模型和时空数据融合方法估算的日平均气温, 在此基础上计算的研究区2003年—2015年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温。图8为研究区各个气象站实测与遥感估算的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温散点图, 实测值与估算值均匀分布在1:1线附近, 表明遥感估算的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温与实测值接近。



京审字(2024) G第1185号

图6 2006年9月玉米乳熟期障碍型积温冷害分布图

Fig. 6 Distribution of sterile-type chilling damage in milk maturity stage of corn in September 2006



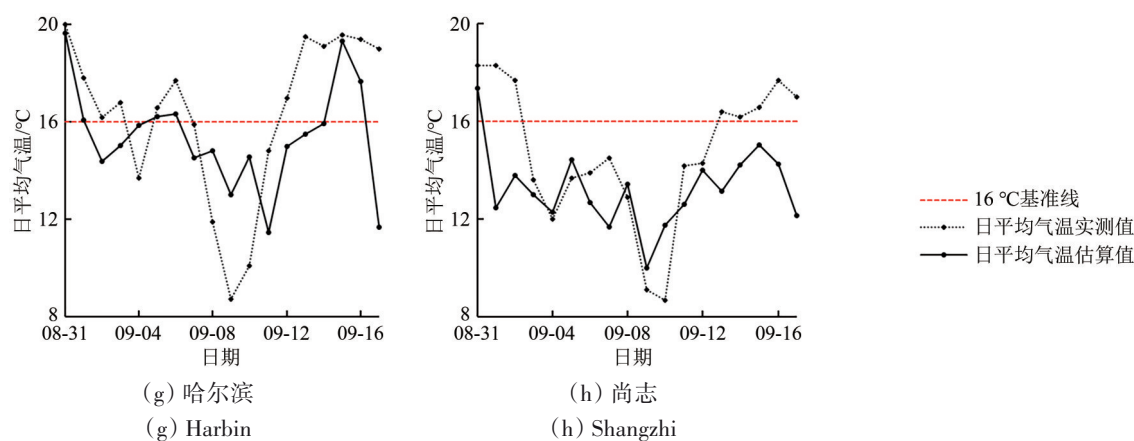


Fig. 7 Validation of monitoring of the sterile-type chilling damage at milk stage of corn in 2006

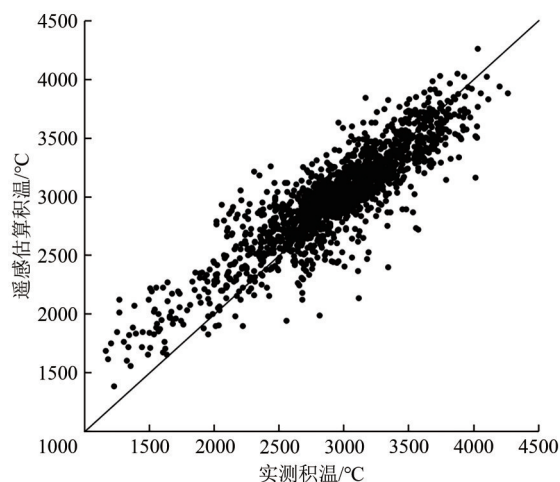


Fig. 8 Scatter plots of measured and accumulated temperature anomaly greater than or equal to $10\text{ }^{\circ}\text{C}$

图9为利用2003年—2015年遥感估算的 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温,由图9可知,研究区内 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温由南向北递减,呈现纬度地带性,但受大兴安岭和蒙古高原地形影响,也呈现出海拔高度地带性,大兴安岭地区 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温低于 $1900\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。辽宁省和内蒙古赤峰、通辽的热量条件最好,大部分地区 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温高于 $3200\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$,可以种植中晚熟玉米品种(杨镇等,2007;刘志娟等,2010)。吉林省除了长白山区以外,绝大部分地区 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温高于 $2900\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$,可以选择适合当地的晚熟玉米品种;黑龙江省 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温从南部松嫩平原和三江平原 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温高于 $2700\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 的第一积温带,到北部 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温 $1900\text{—}2100\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 的第五积温带和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温 $\leq 1900\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 的第六积温带都有分布,应该选择适宜当地积温条件的早、中、晚熟玉米品种,减少玉米低温冷害损失。

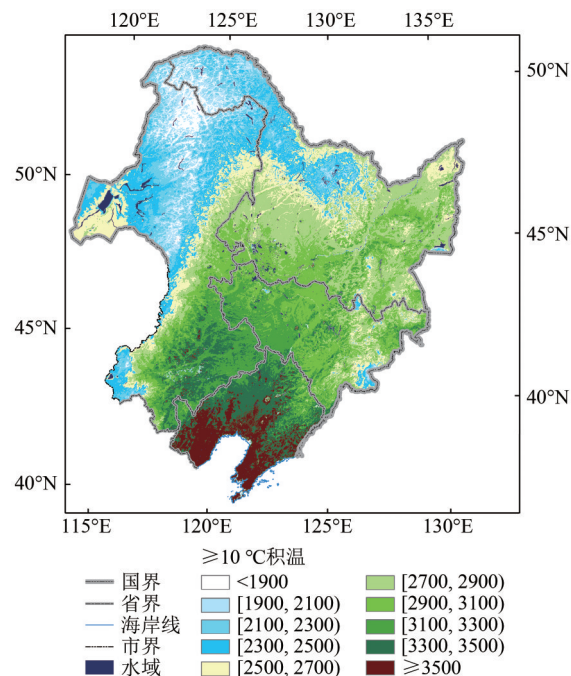


Fig. 9 Distribution of the accumulated temperature anomaly greater than or equal to $10\text{ }^{\circ}\text{C}$

以图9遥感估算的研究区多年平均 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温为标准,计算2003年—2015年 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温距平值。结果表明,研究区2003年、2005年、2006年、2009年和2012年遭受大范围的延迟型低温冷害(图10),2014年—2015年则是热量条件比较好的年份,与相关文献结果一致。中国气象局(2006)记载,2005年5月黑龙江省和吉林省出现低温阴雨时段,导致早播的种子出现烂牙或粉种现象,2006年6—7月份出现阶段性低温寡照天气,尤其是6月份降水较多(中国气象局,2007)。2009年6月1日到7月20日,黑龙江省和吉林省持续低温

多雨, 这期间黑龙江省的平均气温只有 18.2°C , 吉林省的平均气温只有 19.0°C , 分别比多年平均值偏低 1.8°C 和 1.4°C , 出现罕见延迟性冷害 (中国气象局, 2009); 郭建平和马树庆 (2009) 和马树庆等 (2006) 利用气象站的观测资料分析结果表

明, 2009年黑龙江出现了历史罕见的延迟型低温冷害, 2009年6月1日到7月25日, 黑龙江省 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温比历年偏少, 为 $400\text{--}1500^{\circ}\text{Cd}$, 比近 10 年偏少, 为 $1000\text{--}2000^{\circ}\text{Cd}$ 。

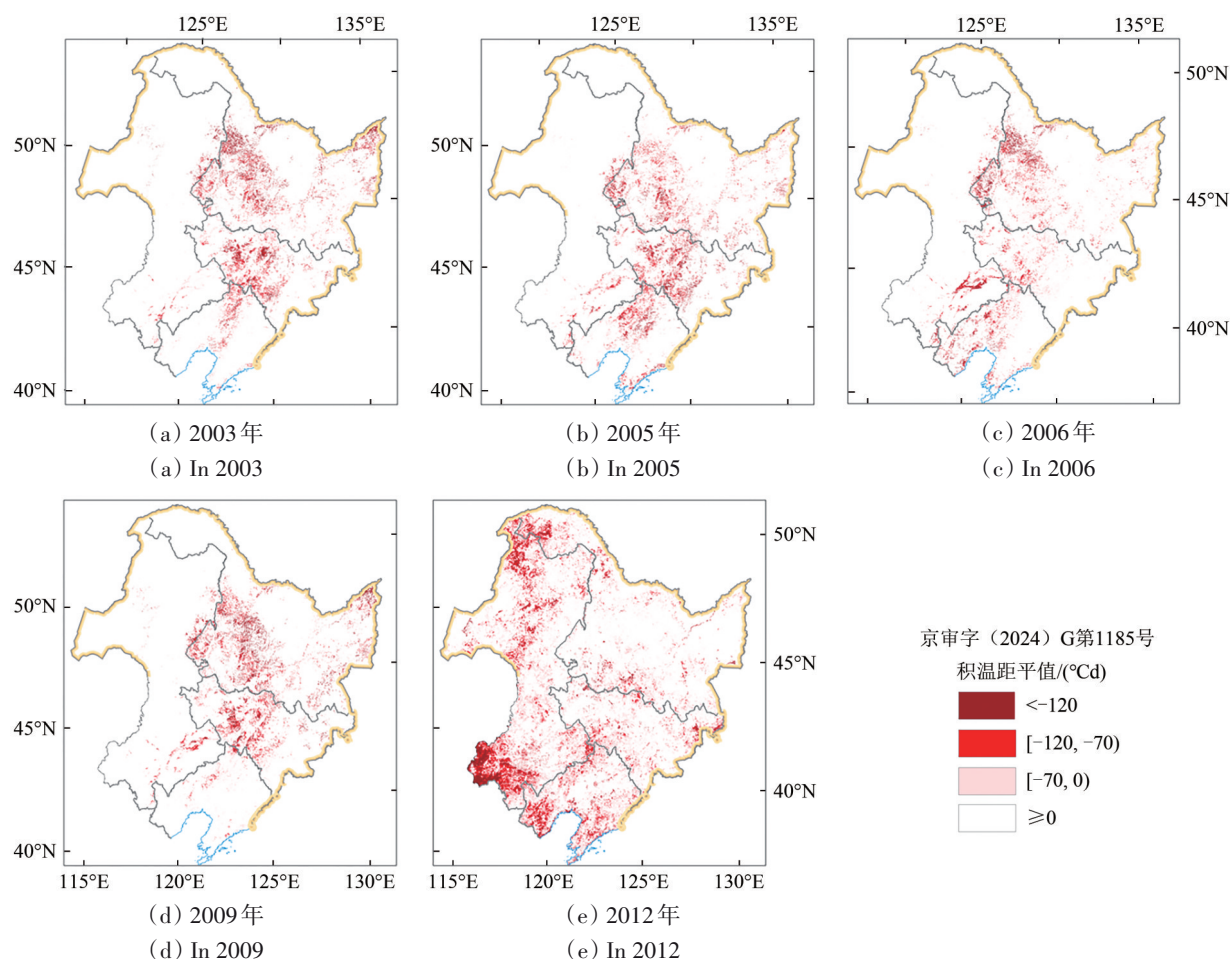


图 10 基于 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温距平的研究区玉米延迟型低温冷害空间分布图

Fig. 10 Distribution of the growth-delaying type cold damage of corn based on accumulated temperature anomaly more than 10°C

除了上述对整个研究区影响比较大的年份外, 黑龙江省在 2004 年和 2013 年遭受不同程度的延迟型低温冷害危害, 其中 2004 年低温冷害主要发生在 6 月上旬, 影响黑河、伊春和大兴安岭地区。内蒙古自治区东部在 2010 年和 2013 年也出现了玉米延迟型低温冷害。

5 结 论

利用气象站日平均气温观测资料和卫星遥感数据及其它辅助数据, 并根据气温时空变化规律和时空数据融合方法, 构建的 2003 年—2015 年逐日、空间全覆盖、 1 km 分辨率的日平均气温数据

集, 研究结果表明, 该数据集可用于玉米低温冷害遥感监测。

结合玉米低温冷害监测指标, 研究区在 2003 年、2005 年、2006 年、2009 年和 2011 年遭受大范围的延迟型低温冷害, 该结果与历年统计数据记录结果一致。统计年鉴显示 2002 年黑龙江省玉米单产为 4683.6 kg/hm^2 , 2003 年减产到 4045.65 kg/hm^2 , 减产 13.6% , 2009 年玉米单产只有 4788.3 kg/hm^2 , 比 2008 年的 5069.6 kg/hm^2 减产 5.9% ; 吉林省 2009 年全省玉米单产为 6120.6 kg/hm^2 , 比 2008 年的 7127.4 kg/hm^2 减产 16.4% ; 辽宁省 2005 年和 2006 年的玉米单产分别为 6334.8 kg/hm^2 和 6109.05 kg/hm^2 ,

分别比2004年的玉米单产6753.15 kg/hm²减少6.6%和10.5%。与相关文献和农业部种植业司玉米单产数据分析对比表明,玉米障碍型低温冷害和延迟型低温冷害遥感监测结果与实际情况相符。

本研究建立的日平均气温估算模型中,精度最高的模型为AT_{mean, TN},其RMSE为2.65 °C。这是因为本研究所使用的光学遥感受云雨天气影响较大,虽然在日平均气温模型构建过程中仅使用优质像元,但2003年—2015年研究区域的大部分MODIS LST像元的优质像元占比小于60%,这会给出日平均气温估算引入不确定性。为进一步提高模型精度,未来可以通过引入全天候成像的微波遥感数据反演的LST和高时间分辨率的静止卫星数据来提高日平均气温估算精度。同时,MODIS LST产品的空间分辨率为1 km,是由植被、水体、裸土及人造地表等不同地物类型组成的混合像元的温度,之后的研究里可以分下垫面类型、分季节建立日均气温估算模型,或利用更高空间分辨率的LST。

未来,通过多源数据融合方法、混合像元分解法和其他机器学习方法等可进一步构建更高精度的LST数据集和AT数据集,最终将提高玉米低温冷害监测精度,为灾前预防和灾后定损提供数据支撑。

参考文献(References)

- Bourges B. 1985. Improvement in solar declination computation. *Solar Energy*, 35(4): 367-369 [DOI: 10.1016/0038-092X(85)90144-6]
- China Meteorological Administration. 2006. Yearbook of Meteorological Disasters in China (2005). Beijing: China Meteorological Press (中国气象局. 2006. 中国气象灾害年鉴(2005). 北京: 气象出版社)
- China Meteorological Administration. 2007. Yearbook of Meteorological Disasters in China (2007). Beijing: China Meteorological Press (中国气象局. 2007. 中国气象灾害年鉴(2007). 北京: 气象出版社)
- China Meteorological Administration. 2009. Yearbook of Meteorological Disasters in China (2009). Beijing: China Meteorological Press (中国气象局. 2009. 中国气象灾害年鉴(2009). 北京: 气象出版社)
- China Meteorological Administration. 2013. QX/T 167-2012 Technical specification for assessment of cold damage to spring maize in North China. Beijing: China Meteorological Press (中国气象局. 2013. QX/T 167-2012 北方春玉米冷害评估技术规范. 北京: 中国气象出版社)
- Cui D C. 1999. Frost, freezing and chilling damage. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 20(1): 58-59 (崔读昌. 1999. 关于冻害、寒害、冷害和霜冻. 中国农业气象, 20(1): 58-59)
- Gao S H. 2003. Dynamic monitoring of growth-delaying type cold damage for corn. *Journal of Natural Disasters*, 12(2): 117-121 (高素华. 2003. 玉米延迟型低温冷害的动态监测. 自然灾害学报, 12(2): 117-121) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-4574.2003.02.021]
- Guo J P and Ma S Q. 2009. Theory and Practice of Crop Chilling Damage Monitoring and Prediction. Beijing: China Meteorological Press (郭建平, 马树庆. 2009. 农作物低温冷害监测预测理论和实践. 北京: 气象出版社)
- Guo J P, Tian Z H and Zhang J J. 2003. Forecasting models of heat index for corn in northeast china. *Journal of Applied Meteorological Science*, 14(5): 626-633 (郭建平, 田志会, 张涓涓. 2003. 东北地区玉米热量指数的预测模型研究. 应用气象学报, 14(5): 626-633) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-7313.2003.05.013]
- Guo X L, Wang L G, Qiu J J, Li J H, Zhu B Q, Xiao J X and Gao M F. 2009. An analysis of cold damage on rice in northeast china based on GIS. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 31(3): 494-498 (郭晓丽, 王立刚, 邱建军, 李金华, 祝必琴, 肖金香, 高懋芳. 2009. 基于GIS的东北地区水稻低温冷害区划研究. 江西农业大学学报, 31(3): 494-498) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-2286.2009.03.021]
- He Y, Li Z, Xu S H, Wang Y, Ou Z R and Li Y H. 2012. Application of GIS in the monitoring and early warning of cold damage to rice in Guangxi. *Journal of Catastrophology*, 27(1): 68-72 (何燕, 李政, 徐世宏, 王莹, 欧钊荣, 李玉红. 2012. GIS在水稻“寒露风”冷害监测预警中的应用. 灾害学, 27(1): 68-72) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2012.01.014]
- Huang J F, Wang X Z and Wang F M. 2013. Uncertainty in Paddy Rice Remote Sensing. Hangzhou: Zhejiang University Press (黄敬峰, 王秀珍, 王福民. 2013. 水稻卫星遥感不确定性研究. 杭州: 浙江大学出版社)
- Huang R, Zhang C, Huang J X, Zhu D H, Wang L M and Liu J. 2015. Mapping of daily mean air temperature in agricultural regions using daytime and nighttime land surface temperatures derived from TERRA and AQUA MODIS data. *Remote Sensing*, 7(7): 8728-8756 [DOI: 10.3390/rs70708728]
- Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez E P, Gao X and Ferreira L G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1/2): 195-213 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2]
- Huete A R, Liu H Q, Batchily K and van Leeuwen W. 1997. A comparison of vegetation indices over a global set of tm images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59(3): 440-451 [DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00112-5]
- Li S, Wang L L, Chen L, Jiang L X, Zhang H J and Qin X. 2013. The comprehensive risk evaluation model of chilling injury to maize in Heilongjiang province. *Journal of Natural Resources*, 28(4): 635-645 (李帅, 王晾晾, 陈莉, 姜丽霞, 张洪杰, 覃雪. 2013. 黑龙江省玉米低温冷害风险综合评估模型研究. 自然资源学报, 28(4):

- 635-645) [DOI: 10.11849/zrzyxb.2013.04.010]
- Liu Z J, Yang X G, Wang W F, Zhao J F, Zhang H L, Chen F. 2010. The possible effects of global warming on cropping systems in China IV. The possible impact of future climatic warming on the northern limits of spring maize in three provinces of Northeast China (刘志娟, 杨晓光, 王文峰, 赵俊芳, 张海林, 陈阜. 2010 全球气候变暖对中国种植制度可能影响iv. 未来气候变暖对东北三省春玉米种植北界的可能影响[J]. 中国农业科学, 43(11): 2280-2291) [DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2010.11.011.]
- Ma S Q, Liu Y Y and Wang Q. 2006. Dynamic prediction and evaluation method of maize chilling damage. Chinese Journal Of Applied Ecology, 17(10): 1905-1910 (马树庆, 刘玉英, 王琪. 2006. 玉米低温冷害动态评估和预测方法. 应用生态学报, 17(10): 1905-1910)
- Mao L X and Wei L. 2015. Bulk crop meteorological service manual. Beijing: China Meteorological Press (毛留喜, 魏丽. 2015. 大宗作物气象服务手册. 北京: 气象出版社)
- Savitzky A and Golay M J E. 1964. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. Analytical Chemistry, 36(8): 1627-1639. [DOI: 10.1021/ac60214a047]
- Tan Y J. 2014. Study on the Yield of Maize and Chilling Damage in Northeast China Based on Remote Sensing Crop Model. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences (檀艳静. 2014. 基于遥感作物模型的东北玉米产量和低温冷害模拟研究. 北京: 中国气象科学研究院)
- Wan Z M and Li Z L. 2010. MODIS land surface temperature and emissivity//Ramachandran B, Justice C, Abrams M, eds. Land Remote Sensing and Global Environmental Change. New York: Springer: 563-577 [DOI: 10.1007/978-1-4419-6749-7_25]
- Wang C Y. 2008. Research on low temperature and cold damage of crops in Northeast China. Beijing: China Meteorological Press (王春乙. 2008. 东北地区农作物低温冷害研究. 北京: 气象出版社)
- Wang C Y. 2010. Research on major agrometeorological disasters in China. Beijing: China Meteorological Press (王春乙. 2010. 中国重大农业气象灾害研究. 北京: 气象出版社)
- Wang R C and Huang J F. 2002. Rice yield estimation using remote sensing data. Beijing: China Agriculture Press (王人潮, 黄敬峰. 2002. 水稻遥感估产. 北京: 中国农业出版社)
- Xiong X, Che N and Barnes W L. 2006. Terra MODIS on-orbit spectral characterization and performance. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44(8): 2198-2206 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.872083]
- Yan T L and Wang P X. 2008. Technology of remote sensing and agriculture application. Beijing: China Agricultural University Press (严泰来, 王鹏新. 2008. 遥感技术与农业应用. 北京: 中国农业大学出版社)
- Yang Z, Cai Z, Jing X Q, Zhang S H. 2007. Maize in northeast region of China. Beijing: China Agriculture Press (杨镇, 才卓, 景希强, 张世煌. 2007. 东北玉米. 北京: 中国农业出版社)
- Zhang D R. 1993. Test report on chilling damage of Maize. Chinese Journal of Agrometeorology, 14(5): 32-34 (张德荣. 1993. 玉米低温冷害试验报告. 中国农业气象, 14(5): 32-34)
- Zhao Z W. 2018. Risk Assessment, Remote Sensing Monitoring, and Loss Assessment of Cold Damage on Maize in Shaanxi, Gansu and Ningxia Provinces. Hangzhou: Zhejiang University (赵哲文. 2018. 陕甘宁三省(区)玉米低温冷害风险评估、遥感监测与损失评估研究. 杭州: 浙江大学)

Monitoring chilling damage of corn in the Northeast China based on MODIS LST and meteorological data

HUANG Ran^{1,2}, HUANG Jianxi², ZHANG Chao², GUO Chunming³, ZHUANG Liwei⁴,
WU Kaihua¹, ZHANG Jingcheng¹, ZHANG Yao¹

1. School of Artificial Intelligence, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, 310018, China;

2. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

3. Institute of Meteorological Sciences of Jilin Province, Changchun, Changchun 130062, China;

4. National Meteorological Center, Beijing 100081, China

Abstract: Corn has become one of the most important crops in China at present. The study area in this work, which includes Jilin Province, Liaoning Province, Heilongjiang Province, and the four eastern cities of Inner Mongolia Autonomous Region (Hulun Buir, Tongliao, Chifeng, and Xing'an League), is the most important corn production area. The area is also located at the northern limit of corn planting area. Notably, the temporal and spatial distribution of chilling damage is highly important to increase yield and quality. This study aims to integrate MODIS and meteorological data for monitoring corn chilling damage in Northeast China. The algorithm was computed in two steps. In the first step, the remote sensing estimation model of air temperature were established. In the second step, the sterile-type chilling damage and delayed-type chilling damage on corn were monitored based on the full coverage daily mean air temperature and the corn chilling damage indicator. Satellite data, including LST, EVI, and quality control data derived from TERRA/AQUA -MODIS, and ground-

based data, including daily mean air temperature and phenological data observed by 234 meteorological stations, from 2003 to 2015 were collected for data analysis, image processing, and mapping.

The remote sensing estimation model of air temperature was established by multi-variated linear regression using the MODIS LST, EVI, and solar declination of cloud-free pixels as independent variables, and daily mean air temperature observed by meteorological stations was used as a dependent variable. The meteorological stations were divided into two parts according to the coordinates. Daily mean air temperature measured by two thirds of station (156) from 2003 to 2013 was used to establish the daily average temperature estimation model, and the remaining data including the observations of 78 meteorological stations from 2003 to 2013 and the observation data of all stations in 2014 and 2015 were used to validate the model. The MODIS EVI production is the composited production on the 16th day. The S-G filter with max was used to achieve daily EVI. The air temperature of cloud-free pixels was calculated with estimated models using TERRA and AQUA daytime and nighttime data, respectively. Then, the TERRA and AQUA daytime and nighttime derived daily mean air temperature data were merged based on the R^2 and RMSE to increase spatial cloud-free data. The validation results show that the models using TERRA or AQUA night LST data as predictors outperform those using daytime LST as predictors. A framework was proposed for the air temperature data fusion. The data fusion framework is based on the fact that the MODIS TERRA and AQUA can provide daytime and nighttime LST and that the merge of these data can increase spatial coverage. The daily mean air temperature dataset covering the whole study area with a spatial resolution of 1 km from 2003 to 2015 was completed based on the retrieval models and the data fusion framework.

This study provided a remote sensing monitoring method of sterile-type chilling damage and delayed-type chilling damage on corn. Low daily mean air temperature and its last days are the corn sterile-type chilling damage indicator. Corn sterile-type chilling damage was identified by integrating the corn chilling damage indicator and the daily mean air temperature dataset. The results showed corn sterile-type chilling damage in 2003, 2006, and 2012. These findings are consistent with the meteorological observation. This research can be used to monitor the process of corn sterile-type chilling damage, take abatement measures to mitigate corn sterile-type chilling damage, and reduce disaster losses. On the basis of the full coverage daily mean air temperature dataset, the accumulated temperature of ≥ 10 °C from 2003 to 2015 was calculated. The indicators of delayed-type chilling damage on corn also revealed that the study area suffered from widespread delayed-type chilling damage in 2003, 2005, 2006, 2009, and 2011. Compared with the observation of meteorological stations, the results of this research match the actual situation.

Key words: remote sensing, MODIS, land surface temperature, data fusion, chilling damage, corn

Supported by Zhejiang Provincial Natural Science Foundation (No. LQ21D010006)