

# 2021年夏季中国大陆涝渍灾害时空分布分析

李梦倩<sup>1</sup>, 房世波<sup>1,2</sup>, 朱永超<sup>3</sup>, 武英洁<sup>4</sup>, 曹云<sup>5</sup>, 卓文<sup>1</sup>, 俄有浩<sup>1</sup>

1. 中国气象科学研究院, 北京 100081;

2. 南京信息工程大学气象灾害预警协同创新中心, 南京 210044;

3. 中国气象局气象探测中心, 北京 100044;

4. 山东省气象信息中心, 济南 250031;

5. 国家气象中心, 北京 100081

**摘要:** 涝渍害是中国除干旱以外对农作物影响最严重的气象灾害, 涝渍害的发生和发展对人民的生命和财产安全以及农作物的生长发育产生巨大的影响。2021年7月至8月间, 中国北方多地降水达到历史观测极值, 而相应时期地面的涝渍害发生和发展状况及其时空特征并未得到有效研究。因此, 本研究首先利用中国大陆土壤水分站点日数据和被动微波遥感卫星SMAP反演土壤水分日产品获取中国高精度表层土壤湿度数据(0—10 cm); 随后, 结合田间持水量数据计算土壤表层相对含水量。在此基础上, 以连续10 d土壤相对含水量大于等于90%为标准, 分析中国大陆2021年7月1日—8月25日的涝渍害时空分布情况。结果表明: (1) 融合后的土壤水分产品较原始的SMAP微波土壤水分产品精度具有明显的提高; (2) 中国东北地区水稻田种植区的土壤相对含水量大于等于90%的最长持续天数均为56 d, 土壤的水分长期处于饱和状态, 说明了本文方法能够较为准确的反应出土壤涝渍害的情况; (3) 中国东北及华北地区受灾较为严重, 其中黑龙江的西部和河北、河南、山东发生的涝渍面积最大。中国大陆耕地部分受涝渍灾害区域占到总耕地面积的1/2左右, 重灾区面积为 $1.940 \times 10^5 \text{ km}^2$ ; (4) 黑龙江的西部及河北、河南、山东等地较往年降水偏多, 这与涝渍害受灾区基本吻合。

**关键词:** 涝渍害, 微波遥感, 土壤相对含水量, 降水, 时空分布

**引用格式:** 李梦倩, 房世波, 朱永超, 武英洁, 曹云, 卓文, 俄有浩. 2022. 2021年夏季中国大陆涝渍灾害时空分布分析. 遥感学报, 26(9): 1886–1894

Li M Q, Fang S B, Zhu Y C, Wu Y J, Cao Y, Zhuo W and E Y H. 2022. Spatial and temporal distributions of waterlogging disasters in the summer of 2021 in Mainland China and their possible impacts. National Remote Sensing Bulletin, 26(9): 1886–1894 [DOI: 10.11834/jrs.20221782]

## 1 引言

涝渍灾害是涝灾和渍害的统称, 是指土壤水分处于过湿、饱和或超饱和状态, 造成作物生长发育不良、产量下降的一种农业气象灾害(霍治国等, 2017), 涝渍害对中国农作物的影响仅次于旱灾。受大陆性季风气候的影响(李娟等, 2020; 孙启发等, 2021), 中国夏季降水较多, 尤其集中在七八月份, 由此导致的夏季涝渍害给中国的粮食生产和农作物的生长发育可产生巨大影响。

由于全球气候变暖, 中国一些区域的降水强

度和频次均呈增加趋势(翟盘茂和潘晓华, 2003; 刘小宁, 1999)。观测结果显示, 2021年中国北方夏季降水较往年明显偏多, 多地降水达到观测极值, 其中黑龙江西部、京津冀、山东北部、河南中北部降雨量较常年偏多1至2倍, 局部降雨强度特别大, 且时段集中(<https://t.ynet.cn/baijia/31234001.html>[2021-08-06])。通常, 由强降水引发的涝渍害的持续时间比降水持续时间更长。因此, 本文将针对2021年夏季涝渍害的时空分布情况进行详细的分析, 以便为涝渍害的防灾减灾提供科学依据。

收稿日期: 2021-11-30; 预印本: 2022-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 42075193); 风云卫星先行计划(编号: FY-APP-2021.0301, FY-APP2022.0303); 中国科学技术协会咨询团队(编号: 20220615ZZ08010034)

第一作者简介: 李梦倩, 研究方向为卫星遥感与农业气象。E-mail: 1207914744@qq.com

通信作者简介: 房世波, 研究方向为卫星遥感与农业气象。E-mail: fangshibo@cma.gov.cn

目前对于涝渍害的分析大多是基于降水数据,利用降水距平或距平百分率识别涝渍害(张葆蔚和万金红, 2013; Sekhon等, 2021; 王猛等, 2020),事实上,涝渍的发生与地形、土壤类型及排水条件等均有很大关系,单纯依据降水识别涝渍害存在很大的不确定性;基于陆面过程模式或者水文模型是识别洪涝或者涝渍另一种重要手段(钟兆站等, 1994; 钱龙等, 2013; 张爱民等, 2007; Azimi等, 2020),但此类方法精度受限于模型本身和参数的可获取性,难以反映相对平坦区域的涝渍害发生的时空分布。

遥感技术具有时效性强、空间覆盖范围广、一致性强等优势(黄诗峰, 2013)。国内外已有学者应用遥感数据对涝渍害进行分析(王景旭等, 2021),但大多是光学遥感利用水体的光谱特征反演土壤表面积水来分析涝渍灾害。然而,受云和雾的影响,很难在多云雨的涝渍害发生区域获取清晰的光学遥感影像(马建威等, 2017; Zhang等, 2016)。相比之下,微波遥感受大气得影响较小,具有全天候观测能力,且与土壤水分的物理关系更加直接,使用微波遥感能够更好的对涝渍害进行分析,微波遥感获得的土壤水分具有高时

间分辨率(李伯祥, 2020),但当前的精度最好的单一波段的微波SMAP反演土壤水分日产品与原位土壤水分数据的相关系数仅为0.6左右(Zhu等, 2019)。如何引入站点观测数据提升微波土壤水分产品精度,并将其应用于涝渍害评价是当前亟待解决的问题。

本文利用土壤水分站点观测数据和SMAP土壤水分数据融合得到的高精度土壤水分产品,对中国大陆2021年涝渍害较为严重的时期7月1日—8月25日的涝渍害时空分布进行分析。研究结果对当前农田的涝渍害监测和防灾减灾具有重要的意义。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

#### 2.1.1 地面观测

本项研究的地面观测包括以下3个方面:

(1) 地面土壤水数据为中国气象局自动土壤水分网地面观测数据(2075个站点)([http://data.cma.cn/\[2021-11-30\]](http://data.cma.cn/[2021-11-30])),站点分布如图1所示。

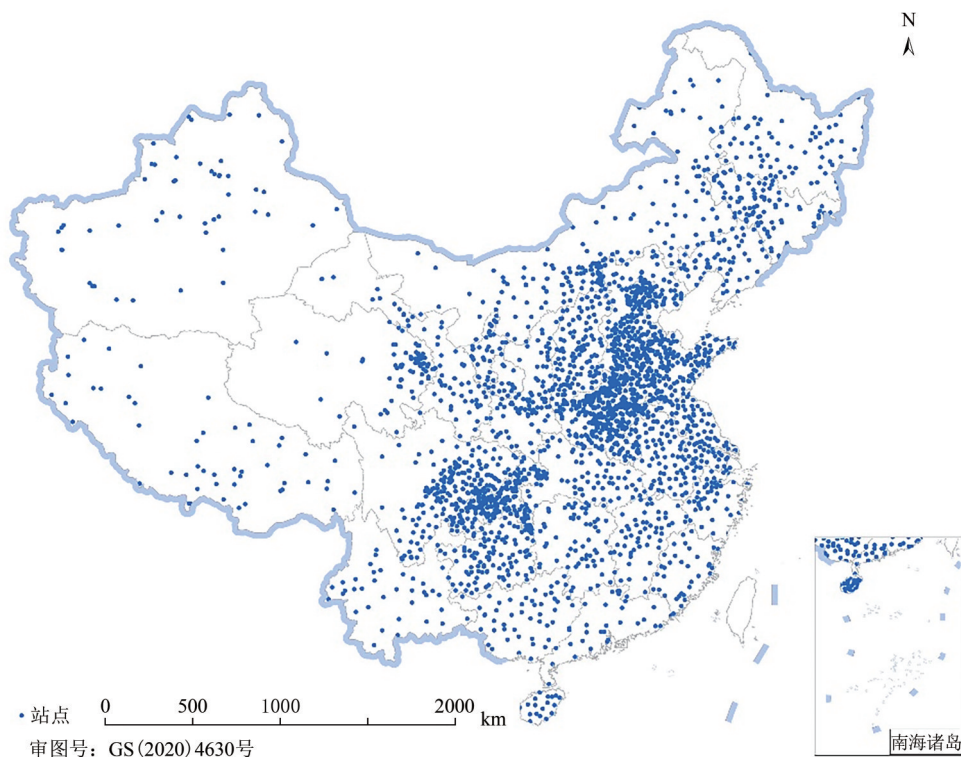


图1 站点分布图

Fig. 1 Site distribution

(2) 土壤田间持水量数据来自本课题组前期计算得到 (Wu 等, 2021), 用于后续土壤相对含水量的计算。

(3) 气象数据来自国家气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn>[2021-11-30]), 选取全国 2200 个记录完整的气象站点逐日降水数据, 进行统计分析。

### 2.1.2 遥感数据

遥感数据来源于被动微波遥感卫星 SMAP 反演土壤水分数据来自国家冰雪数据中心 (NSIDC) (<https://nsidc.org/data>[2021-11-30]) 的 2021 年 7 月 1 日—8 月 25 日 SMAP L3 级 9 km 土壤水分日产品。

### 2.1.3 辅助数据

除地面观测和遥感数据外, 本研究还选用了一些辅助数据如下:

(1) 中国东北地区水稻分布数据来自 Figshare 数据知识库 ([https://figshare.com/articles/figure/The\\_10\\_m\\_crop\\_type\\_maps\\_in\\_Northeast\\_China\\_during\\_2017-2019/13090442](https://figshare.com/articles/figure/The_10_m_crop_type_maps_in_Northeast_China_during_2017-2019/13090442) [2021-11-30]) 分享的 2017 年—2019 年中国东北地区 10 m 作物类型图。

(2) 耕地数据来自国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn/data/datadetails.html?dataguid=250075179225195&docid=1192>[2021-11-30]) 发布的中国 0.05° 土地覆盖产品 LandCover (1982 年—2018 年)。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 技术路线

本文利用土壤水分站点观测数据和 SMAP 土壤水分数据融合得到的高精度土壤水分产品, 结合土壤田间持水量计算得出表层土壤相对含水量。通过对比土壤相对湿度 90% 和 100% 以上的涝渍害区域与东北地区水稻田的分布重叠情况, 间接验证了以连续 10 d 土壤相对含水量大于等于 90% 为涝渍害标准可以较准确的反映涝渍害的实际分布; 我们分别利用土壤相对含水量和降水距平 (反距离权重法 (IDW) 空间插值 (解恒燕等, 2018)) 对中国大陆 2021 年涝渍害较为严重的时期 7 月 1 日—8 月 25 日的涝渍害时空分布进行分析, 技术路线图如下:

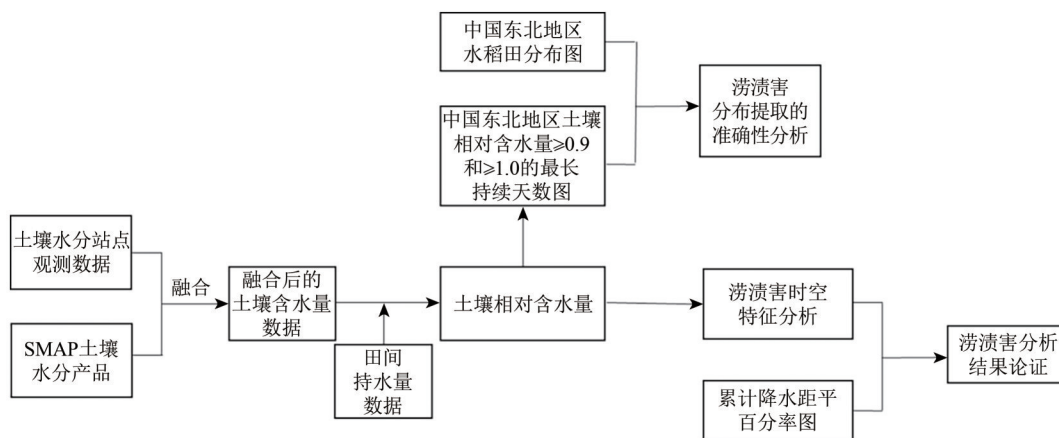


图2 涝渍灾害分析技术路线图

Fig. 2 Technical roadmap of waterlogging disaster analysis

### 2.2.2 高精度土壤相对含水量数据的获取

将中国大陆土壤水分站点日数据和被动微波遥感卫星 SMAP 反演土壤水分日产品融合得到的中国大陆的高精度表层土壤体积含水量数据 (0—10 cm), 结合融合后的土壤水分日数据集和田间持水量数据计算土壤表层相对含水量。

(1) 土壤水分日数据融合方法。选择最优插

值方法作为中国大陆土壤水分站点日数据和被动微波遥感卫星 SMAP 反演土壤水分日产品融合算法。每一个格点上的土壤水分融合结果  $A_k$  等于该点的初估值  $F_k$  加上该格点上观测值与初估值的偏差, 而这个偏差由一定范围内  $n$  个格点上已知的观测值  $O_i$  与初估值  $F_i$  的偏差加权估计得到:

$$A_k = F_k + \sum_{i=1}^n W_i (O_i - F_i)$$



式中， $k$ 为融合格点， $i$ 为“有效格点”， $F_i$ 表示 $i$ 点上初估值， $W_i$ 为权重系数，表示 $i$ 点上观测值与初估值的偏差在估计时分配的权重。

(2) 土壤水分融合产品精度验证方法。以地面站点为基准，利用交叉验证方法，评估融合产品较原始SMAP土壤水分的精度改进，每次利用90%站点融合，10%站点精度评估，循环10次。对融合后较原始SMAP微波土壤水分产品的平均相关系数和均方根误差分别进行对比。

(3) 土壤相对含水量(%)的计算。土壤相对含水量(%)=土壤含水量/田间持水量 $\times$ 100。

### 2.2.3 涝渍害监测方法准确性的间接验证

水稻在整个生育期除了水稻移栽后一周左右(中国东北水稻通常在每年的5月初移栽)的晒田期之外其他生育期全部在淹水状态。本研究是监测2021年7月1日—8月25日的淹水状态或土壤水近饱和状态，如果能准确的反演到水稻的长期淹水日数，就可以间接验证本方法可以反映涝渍害的土壤过湿状态。在本研究中通过对比东北地区土壤相对含水量大于等于90%和100%的最长持续天数与中国东北地区水稻田的分布重叠情况来间接验证方法的准确性。

### 2.2.4 涝渍害时空特征分析

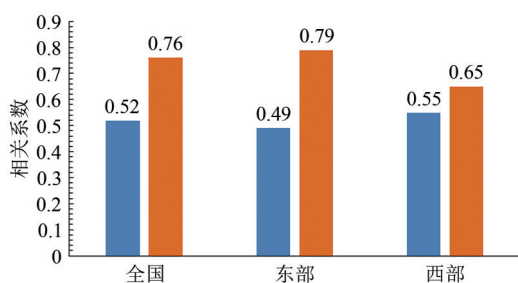
研究以连续10 d土壤相对含水量大于等于

90%作为农田涝渍害的标准，统计研究时间段内单次涝渍害最长持续天数及总涝渍害天数占研究期总天数的比值。结合中国耕地分布，分析涝渍害的时空分布，计算受灾面积。其中，单次涝渍害最长持续天数为统计时期内发生的所有涝渍害中持续日数最多的一次涝渍害的持续天数，且单次涝渍害最长持续时间大于等于40 d定义为重灾区。

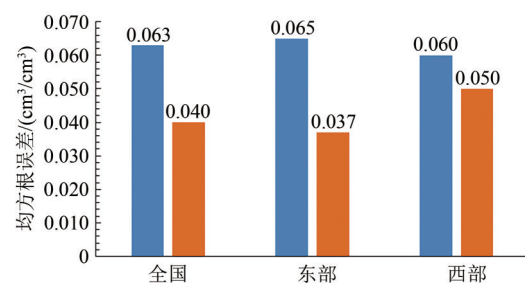
## 3 结果与分析

### 3.1 数据融合生产高精度全国土壤水分日产品数据集

通过全国2075个土壤水分自动站和SMAP微波土壤水分产品融合，生产了新的高精度土壤水分日产品数据集。以地面站点为基准，利用交叉验证方法，对融合产品的精度进行验证。图3结果表明，融合后较原始的SMAP微波土壤水分产品全国平均相关系数从0.52提升到0.76，均方根误差从 $0.063 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 降至 $0.04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ；西部地区(西藏，新疆，青海，甘肃，内蒙西部)站点少，相关系数从0.55提升至0.65，均方根误差从 $0.06 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 降至 $0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ；东部站点密集的省份(除西部以外其他省份)，相关系数从0.49提升至0.79，均方根误差从 $0.065 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 降至 $0.037 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。融合后的土壤水分产品精度较融合前具有明显的提高。



(a) 融合前后相关系数对比



(b) 融合前后均方根误差对比

(a) Comparison of correlation coefficients before and after fusion (b) Comparison of root mean square error before and after fusion

■ SMAP ■ 融合产品

图3 融合前后对比

Fig. 3 Comparison before and after fusion

### 3.2 涝渍害分布结果的准确性检验

图4分别为中国东北地区土壤相对含水量大于等于90%和大于等于100%的最长持续天数及中国东北地区的水稻分布图。由于水稻田的土壤相对含水量长期处于过湿或饱和状态，故土壤相对含

水量最长持续天数图中，水稻田区域必然是长期过湿或饱和的，即在整个研究时间段(56 d)内水稻田部分土壤相对含水量图中最长持续天数均为56 d。将图4(c)分别与图4(a)和图4(b)对比分析可以看出：图4(a)中水稻田大面积分布区

(红色圈内) 最长持续天数均达到了56 d; 图4 (b) 中水稻田大面积分布区 (红色圈内) 部分区域最长持续天数不能达到56 d。因此, 以连续10 d土

壤相对含水量大于等于90%为涝渍害标准可以较准确的反映出涝渍害的实际分布情况。

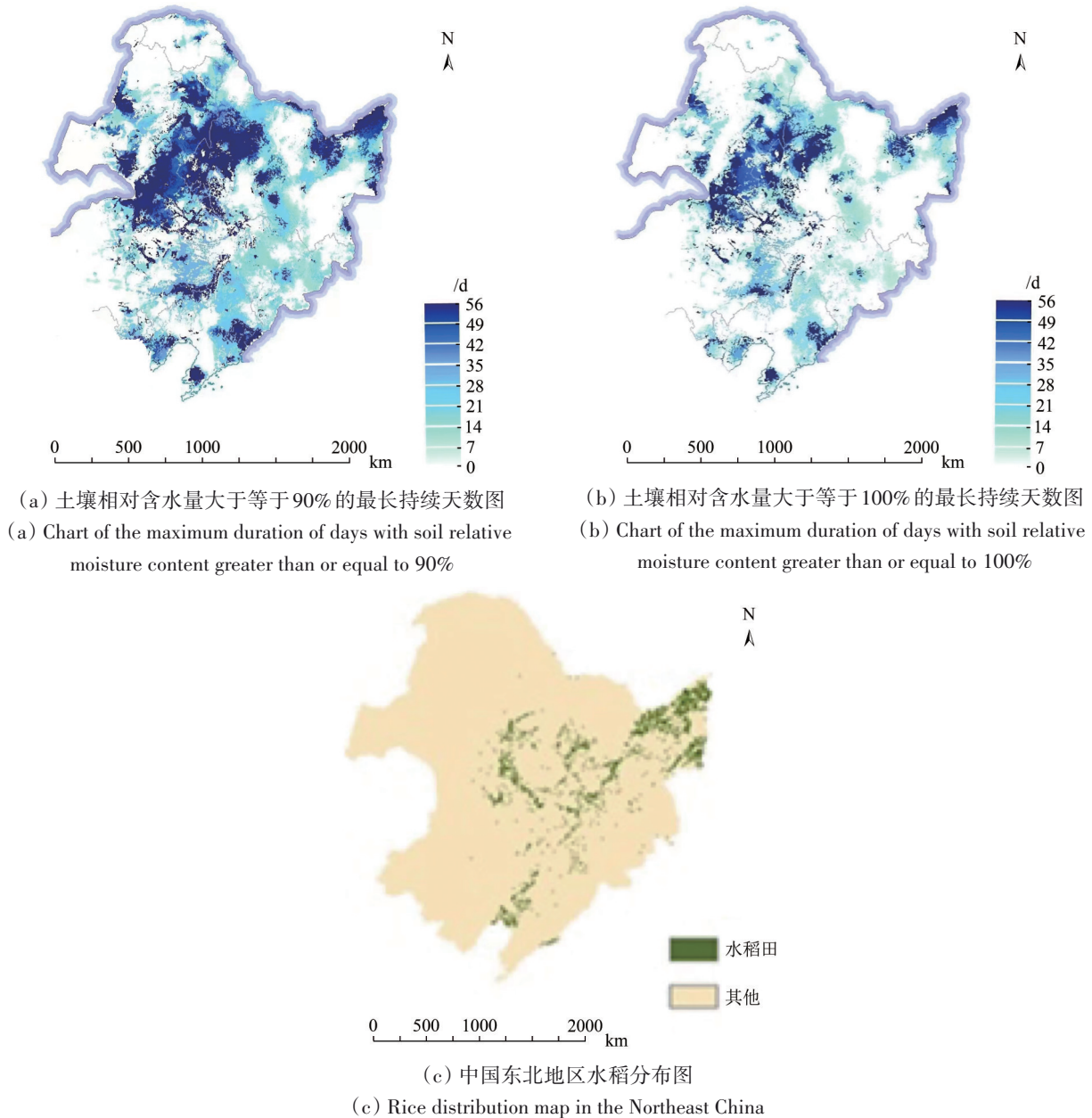


图4 中国东北地区土壤相对含水量大于等于90%和大于等于100%的最长持续天数与水稻分布对比论证  
Fig. 4 The maximum duration days of soil relative water content greater than or equal to 90% and greater than or equal to 100% in the Northeast China were compared with rice distribution

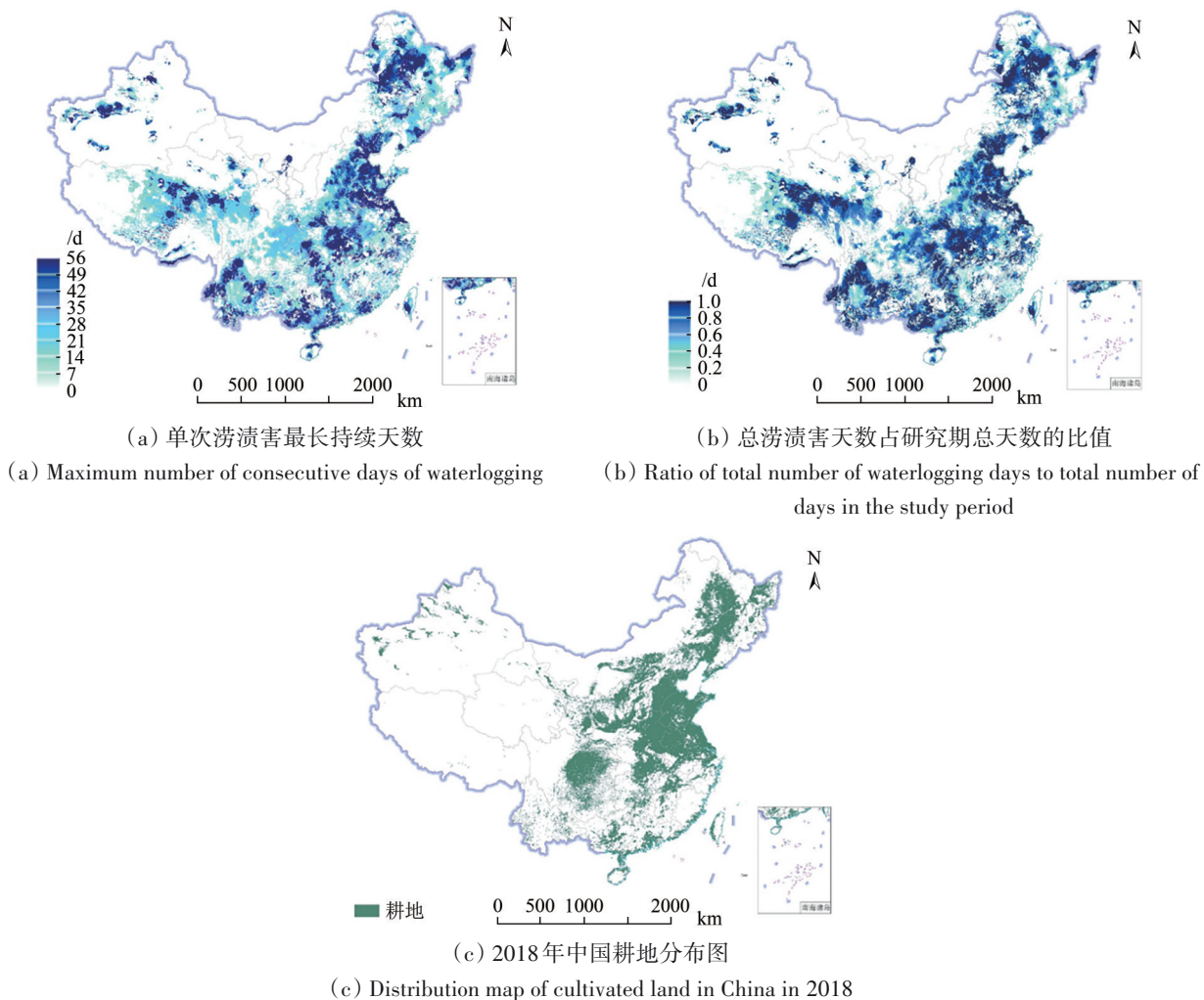
### 3.3 涝渍灾害时空特征分析

图5分别展示了研究时段内单次涝渍害最长持续天数、涝渍害天数占比和2018年中国耕地分布。由于本研究的涝渍害分析图中未剔除水体、湿地和水稻田部分,也未提取出耕地部分的涝渍区,故将结合耕地图与涝渍害分析图综合分析出耕地部分发生涝渍害的区域。结果得出,在研究时间

段内中国东北及华北地区涝渍灾害较为严重。对图5 (c) 进行统计分析得,中国耕地面积约19亿亩,耕地面积主要分布在东北、华北、长江中下游、珠江三角洲等平原,及广大的丘陵地区;发生涝渍灾害的区域集中分布在黑龙江的西部、河北、山东、河南、长江中下游、四川盆地、贵州、云南、广东、广西等地,其中黑龙江的西部、河

北以及河南、山东发生的涝渍面积最大，且部分区域单次涝渍害最长持续天数大于40 d，总涝渍

害天数占研究期总天数的比值在0.8以上，土壤基本长期处于饱和状态，涝渍害严重。



审图号:GS(2020)4630号

图5 涝渍害分析图

Fig. 5 Analysis diagram of waterlogging damage

对耕地部分的受灾区域进行统计分析得，2021年7月1日—8月25日耕地部分发生涝渍灾害的区域为 $6.213 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，占到耕地部分总面积的1/2左右，涝渍灾害大于40 d的区域为 $1.940 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。图6为受灾面积最大的4个省的面积统计图。由图6可以看出，山东省受灾最严重，受灾区面积为 $7.656 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，其中的重灾区面积为 $4.091 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

### 3.4 累积降水距平百分率与涝渍害分布

从图7 (b) 的2021年7月1日—8月25日累计降水距平百分率图中可以看出，在这期间我国的东北部、河北、河南、山东、长江中下游地区、云南以及新疆的西部降水较往年偏多，多地达到了

200%以上；由图7 (a) 可以看出2021年7月份河南地区累计降水距平百分率高达400%以上，受灾严重。这与图4发生涝渍害的区域基本吻合，这说明研究时间段内涝渍害的发生主要是由降水导致。

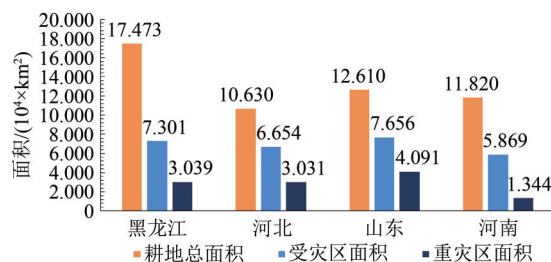
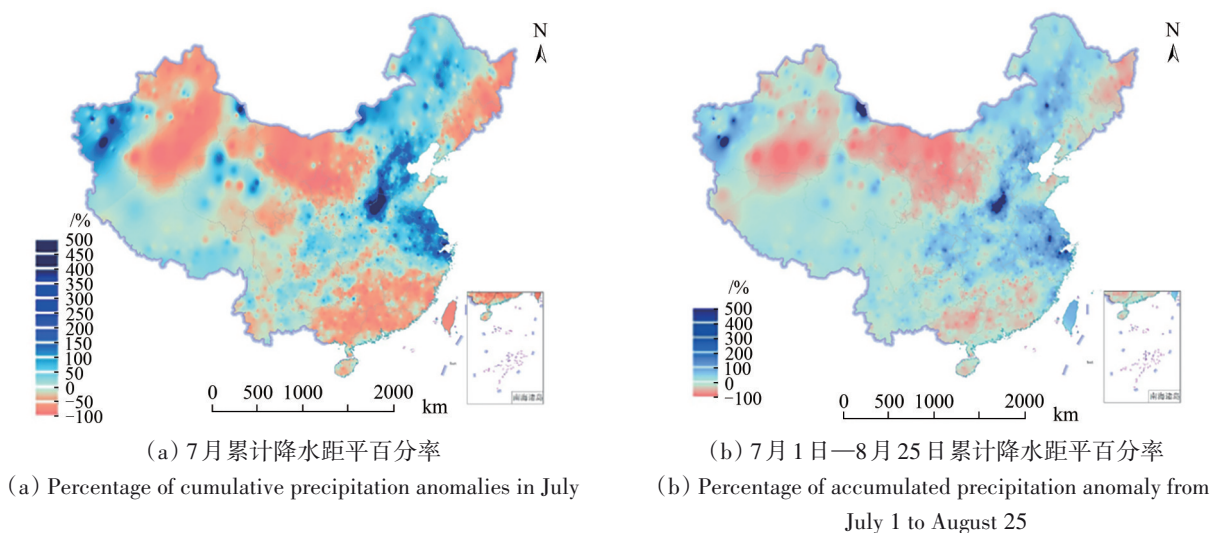


图6 部分省耕地部分受灾面积统计

Fig. 6 Statistics of affected area of cultivated land in some provinces





审图号:GS(2020)4630号

图7 累计降水距平百分率

Fig. 7 Percentage of accumulated precipitation anomaly

## 4 讨论

(1) 本案例利用中国大陆的高精度表层土壤体积含水量数据(0—10 cm),并结合田间持水量数据计算土壤表层相对含水量,进而判断涝渍灾害的发生情况。由于水稻田的土壤相对含水量长期处于饱和状态,中国的东北地区土壤相对含水量大于等于90%的最长持续天数与水稻田的分布对比分析可以看出,土壤相对含水量大于等于90%的最长持续天数图中水稻田大面积分布区最长持续天数均达到了56 d,长期处于过湿或饱和状态,这说明了此方法较为准确的反应出涝渍害的情况,证实了结果的可靠性,可用于对涝渍灾害的分析。

(2) 20世纪80年代以来,中国涝渍灾害呈上升趋势(霍治国等,2017)。因此本文依据单次涝渍灾害发生的持续时间、总涝渍害天数占研究期总天数的比值分析了中国2021年7月1日—8月25日涝渍灾害的发生区域及涝渍害程度,为涝渍害的防灾减灾提供科学依据。由于涝渍主要以耕地部分为主,但本研究未对耕地部分进行提取。因此,综合分析,2021年7月1日—8月25日单次涝渍害最长持续天数图、总涝渍害天数占研究期总天数的比值图及耕地分布图可以看出(图5),在研究时间段内中国发生涝渍灾害的区域集中在黑龙江的西部、河北、山东、河南、长江中下游、四川盆地、贵州、云南、广东、广西等地,

其中黑龙江的西部、河北以及河南、山东发生的涝渍面积最大,且部分区域单次涝渍害最长持续天数大于40 d,总涝渍害天数占研究期总天数的比值在0.8以上,土壤基本长期处于饱和状态,涝渍害严重。同时,本文通过对耕地部分发生涝渍害区域的数据分析得出,2021年7月1日—8月25日耕地部分发生涝渍灾害的区域为 $6.213 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,占到耕地部分总面积的1/2左右,其中,重灾区的面积为 $1.940 \times 10^5 \text{ km}^2$ ;山东省受灾最严重,受灾区面积为 $7.656 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,其中的重灾区面积为 $4.091 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。由于各地受灾面积还未得到官方统计数据,故本数据在后续研究中还有待验证。

(3) 涝渍害的发生是由大量降雨后未能及时排水而出现积水导致的,故降雨量的多少是产生涝渍灾害的主要原因之一。因此,对累积降水距平百分率图分析可得,受季风影响,2021年7月1日—8月25日中国东北部、河北、河南、山东、长江中下游地区、云南以及新疆的西部降水较往年偏多(图7),这与上述分析中涝渍灾害的发生区域基本吻合,进一步验证了本文对涝渍灾害区域分析结果的可信性。其中,从2021年7月份的累积降水距平百分率图中看出,河南地区累积降水距平百分率高达400%以上,受灾严重。

(4) 作物根系长期处于过湿或过饱和状态,会造成作物根系缺氧、光合作用减弱、抑制根系养分的吸收,进而导致作物叶绿素含量下降、生

育发育缓慢、产量降低。综合分析可以看出, 2021年夏季中国的东北及华北地区由于降水较多, 土壤长期处于过湿或饱和状态, 导致中国东北及华北地区夏玉米等农作物的生长发育以及产量等受到严重影响。

(5) 基于土壤水分融合数据产品对中国地区的涝渍灾害进行监测可以较好的分析涝渍灾害发生区域且与降水结果基本吻合。但通过遥感对涝渍灾害的研究大多是通过识别水体得出的, 监测结果中可能包含沼泽、湿地及灌溉农田等要素, 因此有待较为精确的分析提取。同时, 目前对于耕地部分是否产生涝渍害的标准并没有统一, 还需进一步检验论证。

## 5 结 论

本案例利用中国大陆的高精度表层土壤体积含水量融合日数据(0—10 cm), 结合田间持水量数据及水稻、耕地的分布, 对中国2021年7月1日—8月25日的涝渍害情况进行了监测分析, 并结合降水数据进行了论证。结果表明:(1)融合后的土壤水分产品精度较原始的SMAP微波土壤水分产品精度具有明显的提高;(2)研究时间段内土壤相对含水量均大于等于90%的区域包含水稻田部分, 说明了结果的可靠性;(3)研究时间段内我国发生涝渍灾害的区域集中分布在黑龙江的西部、河北、山东、河南、长江中下游、四川盆地、贵州、云南、广东、广西等地, 其中黑龙江的西部、河北以及河南、山东涝渍灾害最为严重。全国耕地部分受涝渍灾害区域占到总耕地面积的1/2左右, 重灾区面积为 $1.940 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。其中, 山东省受灾面积最大。(4)降水较多的地区与发生涝渍害的区域基本吻合, 证明了降水是本研究时间段内涝渍害发生的主要原因之一。

## 参考文献(References)

Azimi S, Dariane A B, Modanesi S, Bauer-Marschallinger B, Bindlish R, Wagner W and Massari C. 2020. Assimilation of Sentinel 1 and SMAP-based satellite soil moisture retrievals into SWAT hydrological model: the impact of satellite revisit time and product spatial resolution on flood simulations in small basins. *Journal of Hydrology*, 581: 124367 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124367]

Huang S F. 2013. Application of remote sensing technology in flood disaster monitoring and evaluation in China. *Disaster Reduction in China*, (24): 36-37 (黄诗峰. 2013. 遥感技术在我国洪涝灾害监测评估中的应用. *中国减灾*, (24): 36-37)

Huo Z G, Fan Y X, Yang J Y and Shang Y. 2017. Review on agricultural flood disaster in China. *Journal of Applied Meteorological Science*, 28(6): 641-653 (霍治国, 范雨娴, 杨建莹, 尚莹. 2017. 中国农业洪涝灾害研究进展. *应用气象学报*, 28(6): 641-653) [DOI: 10.11898/1001-7313.20170601]

Li B X. 2020. Soil Moisture Retrieval in Vegetation Covered Agricultural Areas Based on Optical and Microwave Remote Sensing Data. *Nanchang*: 95 (李伯祥. 2020. 基于光学与微波遥感数据的植被覆盖区农田土壤水分反演[D]. 南昌: 东华理工大学. 南昌: 95) [DOI:10.27145/d.cnki.ghddc.2020.000132]

Li J, Yan H P and Zhu Z W. 2020. Quantitative analysis of changes of summer extremes temperature and precipitation days over China with respect to the mean temperature increase. *Plateau Meteorology*, 39(3): 532-542 (李娟, 闫会平, 朱志伟. 2020. 中国夏季极端气温与降水事件日数随平均气温变化的定量分析. *高原气象*, 39(3): 532-542) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00042]

Liu X N. 1999. Climatic characteristics of extreme rainstorm events in China. *Journal of Catastrophology*, 14(1): 54-59 (刘小宁. 1999. 我国暴雨极端事件的气候变化特征. *灾害学*, 14(1): 54-59)

Ma J W, Sun Y Y, Chen D Q, Huang S F, Li X T, Cui Q and Yong X. 2017. Applications of GF-3 satellite in flood and landslide disasters emergency monitoring. *Spacecraft Engineering*, 26(6): 161-166 (马建威, 孙亚勇, 陈德清, 黄诗峰, 李小涛, 崔倩, 雍熙. 2017. 高分三号卫星在洪涝和滑坡灾害应急监测中的应用. *航天器工程*, 26(6): 161-166) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-8748.2017.06.026]

Qian L, Wang X G, Luo W B and Wu L. 2013. Experimental study on Morgan model under waterlogging stress. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 29(16): 92-101 (钱龙, 王修贵, 罗文兵, 吴琳. 2013. 涝渍胁迫条件下Morgan模型的试验研究. *农业工程学报*, 29(16): 92-101) [DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.16.012]

Sekhon H S, Setia R, Singh S P, Kingra P K and Ansari J. 2021. Spatio-temporal analysis of the relationship between climate variables and waterlogging using satellite remote sensing. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(14): 1306 [DOI: 10.1007/s12517-021-07653-8]

Sun Q F, Liang J C, Meng H W, Wang M, Huang L P and Shen C M. 2021. Temporal changes of coherent droughts and floods over Yunnan in rainy season during the past five and a half centuries. *Quaternary Sciences*, 41(2): 379-388 (孙启发, 梁家昌, 蒙红卫, 王敏, 黄林培, 沈才明. 2021. 云南近5个半世纪雨季同旱涝空间模态的时间变化. *第四纪研究*, 41(2): 379-388) [DOI: 10.11928/j.issn.1001-7410.2021.02.07]

Wang J X, Qiu S K, Wang Z, Wang C and Du J. 2021. Flood disaster monitoring based on water body extraction of GF-3 image in Zhengzhou. *Henan Science*, 39(10): 1701-1706 (王景旭, 邱士可, 王正, 王超, 杜军. 2021. 基于GF-3号遥感影像水体信息提取的郑州市洪涝灾害监测. *河南科学*, 39(10): 1701-1706) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-3918.2021.10.022]

Wang M, Gao G Q, Wang A J, Zhang L, Wan X J and Yuan L W. 2020. Relationship between the area suffered agricultural flood disaster and rainstorm in Tangshan. *Journal of Meteorology and Environment*, 36(3): 93-97 (王猛, 高桂芹, 王爱军, 张莉, 万绪江, 袁雷武. 2020. 唐山市农业洪涝灾害面积与暴雨关系分析. *气象与环境学报*, 36(3): 93-97) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-503X.2020.03.013]

Wu D, Li Z H, Zhu Y C, Li X, Wu Y J and Fang S B. 2021. A new agricultural drought index for monitoring the water stress of winter



- wheat. *Agricultural Water Management*, 244: 106599 [DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106599]
- Xie H Y, Zhang S Y, Hou S C and Zheng X. 2018. Comparison research on rainfall interpolation methods for small sample areas. *Research of Soil and Water Conservation*, 25(3): 117-121 (解恒燕, 张深远, 侯善策, 郑鑫. 2018. 降水量空间插值方法在小样本区域的比较研究. *水土保持研究*, 25(3): 117-121) [DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2018.03.017]
- Zhai P M and Pan X H. 2003. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century. *Acta Geographica Sinica*, 58(S1): 1-10 (翟盘茂, 潘晓华. 2003. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化. *地理学报*, 58(S1): 1-10) [DOI: 10.3321/j.issn:0375-5444.2003.z1.001]
- Zhang A M, Ma X Q, Yang T M, Sheng S X and Huang Y. 2007. The influence of drought and waterlogging disasters on crop yields in Anhui province. *Journal of Applied Meteorological Science*, 18(5): 619-626 (张爱民, 马晓群, 杨太明, 盛绍学, 黄勇. 2007. 安徽省旱涝灾害及其对农作物产量影响. *应用气象学报*, 18(5): 619-626) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-7313.2007.05.006]
- Zhang B W and Wan J H. 2013. Assessment and analysis of flood and water logging of China from 2003 to 2012. *China Water Resources*, (11): 35-37 (张葆蔚, 万金红. 2013. 2003 年—2012 年我国洪涝灾情评估与成因分析. *中国水利*, (11): 35-37) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2013.11.016]
- Zhang M M, Li Z, Tian B S, Zhou J M and Tang P P. 2016. The back-scattering characteristics of wetland vegetation and water-level changes detection using multi-mode SAR: a case study. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 45: 1-13 [DOI: 10.1016/j.jag.2015.10.001]
- Zhong Z Z, Zhao J B, Li K H and Yan Y H. 1994. The drought-waterlogging index or the join zone between Qinling Mountain and Huanghuai Plain. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 12(4): 105-112 (钟兆站, 赵聚宝, 李克煌, 阎育华. 1994. 试论秦岭—黄淮平原交界带的农田水分旱涝指标. *干旱地区农业研究*, 12(4): 105-112)
- Zhu Y C, Li X, Pearson S, Wu D L, Sun R J, Johnson S, Wheeler J and Fang S B. 2019. Evaluation of Fengyun-3C soil moisture products using *in-situ* data from the Chinese automatic soil moisture observation stations: a case study in Henan Province, China. *Water*, 11(2): 248 [DOI: 10.3390/w11020248]

## Spatial and temporal distributions of waterlogging disasters in the summer of 2021 in Mainland China and their possible impacts

LI Mengqian<sup>1</sup>, FANG Shibo<sup>1,2</sup>, ZHU Yongchao<sup>3</sup>, WU Yingjie<sup>4</sup>, CAO Yun<sup>5</sup>, ZHUO Wen<sup>1</sup>, E Youhao<sup>1</sup>

1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;

2. Collaborative Innovation Center for Meteorological Disaster Warning, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

3. Meteorological Observation Center, China Meteorological Administration, Beijing 100044, China;

4. Shandong Meteorological Information Center, Jinan 250031, China;

5. National Meteorological Center, Beijing 100081, China

**Abstract:** Waterlogging is the most serious meteorological disaster affecting crops in China besides drought. The occurrence of waterlogging has a great impact on the safety of people's life and properties and the growth and development of crops. From July to August 2021, the precipitation in many places in northern China reached the historical observation extreme value, while the occurrence and development of surface waterlogging in the corresponding period and its temporal and spatial characteristics have not been effectively studied. In this study, the high-precision soil water data (0—10 cm) obtained from the daily soil water data of the soil water stations in Mainland China and the soil water daily products retrieved from passive microwave remote sensing satellite SMAP were used to calculate the soil surface relative water content combined with the soil field capacity data. The soil's relative water content of greater than or equal to 90% for 10 consecutive days was taken as the standard. The spatial-temporal distribution of the waterlogging damage in Mainland China from July 1 to August 25 in 2021 was analyzed, and the results were comprehensively analyzed on the basis of the cultivated land distribution and precipitation data in Northeast China. The results show the following. (1) Compared with the original SMAP microwave soil moisture product, the accuracy of the fused soil moisture product is significantly improved. (2) The longest duration of soil relative water content greater than or equal to 90% in paddy fields in Northeast China was 56 days, indicating that the proposed method could accurately reflect the situation of relative soil water content. (3) Northeast and Northern China were severely affected, with the most extensive waterlogging in the west part of Heilongjiang Province and the entire area of the Hebei, Henan, and Shandong provinces. The arable area affected by waterlogging accounted for approximately half of the total arable land area in China, and the area of the worst-hit area was  $1.940 \times 10^5$  km<sup>2</sup>. (4) The west part of the Heilongjiang province and the Hebei, Henan, and Shandong provinces received more precipitation than in previous years, which is consistent with the waterlogging disaster areas.

**Key words:** waterlogged disaster, microwave remote sensing, relative soil water content, precipitation, spatial and temporal distribution

**Supported by** National Natural Science Foundation of China (No. 42075193); FengYun Research Plan (No. FY-APP-2021.0301, FY-APP-2022.0303); Consulting Team Project of China Association for Science and Technology (No. 20220615ZZ08010034)