

成 威,王连喜,李 琪,等. 基于植被供水指数的河南 2012 年春季干旱监测[J]. 江苏农业科学,2018,46(24):315-320.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.24.083

基于植被供水指数的河南 2012 年春季干旱监测

成 威¹,王连喜²,李 琪³,刘 畅³,王 清³

(1. 江苏省农业气象重点实验室,江苏南京 210044; 2. 南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心,江苏南京 210044;
3. 江苏省农业气象重点实验室,江苏南京 210044)

摘要:干旱的发生是一个缓慢渐进的过程,可能出现在任何时间任何地域,每一次的干旱暴发,都在威胁着国家农业生产安全和人类的正常生活。以 2012 年河南的典型春旱为例,运用气象站观测数据和 MODIS 遥感数据,在植被供水指数的基础上监测旱情。结论如下:2012 年河南省春季降水距平百分率高达 -56.9%,为重旱;当水分成为限制因子时,地表温度(land surface temperature, LST)与 NDVI 呈负相关;2012 年河南春季植被供水指数(vegetation supply water index, VSWI)的变化趋势基本与降水量一致;VSWI 与小麦产量显示较强的相关性,VSWI 值较高的地区,单位面积小麦产量比河南省平均值要高出 26%;最后利用 VSWI 反演河南省干旱分布情况,能准确反映旱情,证明 VSWI 具有广泛的适用性和较强的现实指导意义。

关键词:植被供水指数(VSWI);干旱监测;遥感应用;NDVI;河南省

中图分类号: S161.6; S423 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)24-0315-06

干旱是指长期无降水或降水显著偏少,土壤水分亏缺,不能满足作物正常生长所需的水分,影响正常生长发育,最终导致产量下降甚至绝收的气候现象^[1]。干旱的发生是一个缓慢渐进的综合过程,可能出现在任何时间任何地域,受降水、蒸散、地形、灌溉、底墒、种植结构等多种因素综合影响^[2-3],具有影响范围广、持续时间长的特点^[4],是全球很多国家和地区的主要自然灾害之一,对我国农业生产影响也极大。据统计,我国每年受旱灾害面积高达 $2 \times 10^7 \text{ hm}^2$,直接造成粮食损失 100 多亿元^[5],是所有自然灾害造成粮食损失的一半以上^[6]。通过对西南地区干旱的研究,结果表明西南 4 个省份的干旱对水稻的影响显著^[7]。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)指出,未来几十年干旱呈增长趋势。随着社会经济的发展,干旱的频发所造成的损害和影响引起了国内外的广泛关注^[8]。因此,实时且准确地监测旱情对我国的农业生产发展具有重大意义。

目前国内外监测干旱的方法主要有 2 种:一是基于地面气象站数据的传统干旱监测方法;二是综合反映气象、农业、水文要素的干旱遥感监测方法^[9]。前者有:土壤含水量指标(常用土壤相对湿度 RSM)、降水指标(包括降水距平百分率 PA 和标准化降水指标 SPI)^[10]、Palmer 干旱指数^[11]、综合指数 CI^[12]等。这些方法是通过对不同地区不同站点气象数据的统计分析,计算出干旱指数,再对干旱指数分析来判断干旱

发生的时间、范围和程度。传统方法可以针对某一地点而获得较为准确的气象数据,但由于气象站空间分布的不均匀性和稀疏性,导致数据获取困难且难以做到大面积大范围的干旱研究。后者是遥感干旱监测。遥感监测方法大致可以分为 3 类。第一类是基于植被指数的,例如 AVI(距平植被指数)、VCI(植被状况指数)^[13]。但是由于植被指数易饱和以及滞后于土壤湿度和降水的变化等问题,给干旱的实时监测带来了一定困难。另一类是基于地表温度的,例如 TCI(温度条件指数)和 NDTI(归一化温度指数)。第三类是融合地表温度和植被指数的干旱指数。Price^[14]和 Carlson^[15]等发现如果植被覆盖范围从裸土到完全被植被覆盖的地面,土壤含水量从完全干旱到水分充足,植被指数和 LST 的融合结果是呈三角形形状的散点图。例如,TVDI(温度植被干旱指数法)^[16]、VTCI(条件温度植被指数)^[17]、VSWI(植被供水指数)^[18]和 WDI(水分亏缺指数)^[19]等被广泛运用于不同的时间尺度和空间尺度,简单的计算和较好的效果使干旱遥感监测方法得到世界各国研究者的关注,近几十年来取得了丰硕的成果。

河南省是我国的第一粮食生产大省。河南位于我国华中地区,气候为亚热带季风气候,在南北过渡带中,受季风影响大,降水季节分配不均,多集中在夏季,且降水的空间分布差异大,干旱灾害发生频率高^[20],其中,春旱是河南省干旱发生几率最高的干旱^[21],经研究发现春旱的发生频率随着全球气候变暖加剧而表现出增大的趋势,同时危害也是最严重的^[22]。河南省耕地面积约为 717.92 万 hm^2 ,主要种植的农作物是小麦和玉米,春季是小麦的生长旺盛期,干旱不仅影响小麦生长期的营养物质积累,还影响小麦的产量。干旱对农业的影响最深刻最直接,而作为农业大省的河南,当干旱发生时,不仅会导致粮食减产,严重的旱灾甚至会导致粮食颗粒无收,严重影响人们的社会生产与生活。因此,对春旱进行监测研究,实时动态地监测小麦生育生长期出现的旱情,有效地抗旱减灾,对河南省农业生产发展有着积极作用。

收稿日期:2018-05-11

基金项目:公益性行业(气象)科研专项(编号:GYHY201506001);中国气象局农业气象保障与应用技术重点开放实验室开放研究基金(编号:AMF201606)。

作者简介:成 威(1991—),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事农业气象研究。E-mail:1542666922@qq.com。

通信作者:王连喜,硕士,教授,主要从事农业气象与生态气象的教学和研究工作。E-mail:751411761@qq.com。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

河南位于 31°23' ~ 36°22'N, 110°21' ~ 116°39'E, 总面积 16.7 万 km², 耕地面积约为 717.92 万 hm²。地势西高东低, 北部、西部、南部有山脉, 东部和中部是平原。在南北过渡带中, 受季风影响大, 降水季节分配不均, 降水区域分布差异大, 气候为亚热带季风性气候。2012 年河南省降水量总体呈纬向分布, 自北向南逐渐增加, 降水量为 520 ~ 1 430 mm。以信阳市为最高, 大部分区域高于 1 000 mm, 年降水最少的为豫北区域, 不足 650 mm, 大部分区域降水量在 700 ~ 1 000 mm 之间。河南省是我国农业大省, 全省小麦总产量约占全国小麦总产量的 1/4, 小麦的发育生长期是第一年 10 月下旬至次年的 6 月上旬^[23], 其中春季是小麦营养生长和生殖生长的重要时期, 极易遭受干旱的胁迫。

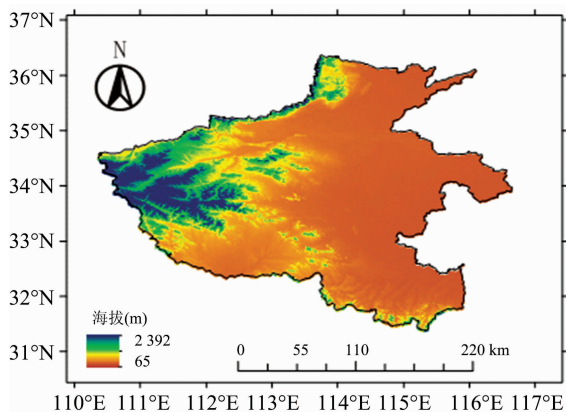


图1 河南省高程图

1.2 归一化植被指数 NDVI

植被体内叶绿素变化时其光谱特征也会随之发生变化, NDVI 就是通过光谱特征来反映植被生长发育状态的指数。而且 NDVI 是最简单可行的大范围干旱监测指数^[24], 相关研究表明 NDVI 对监测时空跨度较大的旱情有明显优势^[25]。其定义式为:

$$NDVI = \frac{\alpha_{VIR} - \alpha_{RED}}{\alpha_{VIR} + \alpha_{RED}} \quad (1)$$

α_{VIR} 是 MODIS 第 1 通道的红光波段 (580 ~ 680 nm) 的反射率, α_{RED} 是第 2 通道的近红外波段 (840 ~ 890 nm) 的反射率, 反射率可以通过下载 NASA 官网提供的 TERRA/MODIS 系列产品获取。

NDVI 的理论范围为 -1 ~ 1, 负值表示有云、水、雪等, 0 值表示有岩石、裸地等, 正值表示有植被覆盖, 与植被分布密度呈线性相关^[26]。NDVI 指数经研究对比发现更适用于监测植被覆盖率高、作物蒸散较强的地区^[24]。本研究采用 NASA 官网提供的 NDVI 产品 (MOD13A2), MOD13A2 是 16 d 合成的空间分辨率为 1 000 m、时间分辨率为 24 h 的归一化植被指数 NDVI 产品, 同样是用最大值合成法得到 16 d 的 NDVI 数据。在处理数据时, 2012 年 3 月 5 日至 6 月 8 日时段内的 NDVI 值先经过去负处理, 其中零值所占百分比不超过 5%, 说明河南省植被覆盖率很高。

1.3 陆地表面温度 LST

卫星遥感获得的 LST 产品综合反映了下垫面的温度, 裸土区域可称为土壤温度, 植被覆盖区域可称为植被冠层温度。当遭遇干旱时, 土壤含水量减少, 同时土壤热容量也减少, 接受太阳辐射后的增温幅度变大, 土壤温度上升。在有植被覆盖的区域, 遭遇干旱时, 植被供水不足, 植被关闭毛孔来减少体内水分散失, 同时气孔的关闭使植被体内热量散失减少, 导致植被冠面温度升高; 相反, 植被供水充足时, 植被毛孔不关闭, 热量散失增大, 植被冠面温度降低。LST 也是一个监测干旱的重要指标。本研究采用的地表温度数据是 NASA 网站上提供的陆地表面温度产品 MOD11A2, 它是将 8 d 内每天的空间分辨率为 1 000 m、时间分辨率为 24 h 的陆地表面温度产品通过算术平均法得到的。

1.4 植被供水指数 VSWI

VSWI 指数适用于植被覆盖多的地区, 重点反映作物受到干旱威胁的程度。其物理意义是: 当作物供水正常时, 卫星遥感获取的植被指数和作物冠层温度都保持在一定的范围内; 若遭遇干旱, 作物供水不足, 一是作物的生长受到影响, 二是作物的冠层温度将会升高, 卫星遥感获取的植被指数将降低。植被供水指数的定义式为:

$$VSWI = \frac{NDVI}{LST} \quad (2)$$

根据 VSWI 指数的定义, 一般来说, 下垫面是干燥裸土时, NDVI 降低, LST 升高; 下垫面是湿润裸土时, NDVI 升高, LST 降低; 下垫面是干燥植被时, NDVI 降低, LST 升高; 下垫面是干旱植被时, NDVI 降低, LST 升高; 尤其 VSWI 受 NDVI 的影响大^[27], 因为 VSWI 比较适用于植被覆盖好的下垫面。

当出现旱情或供水不足时, 植被生长受迫, NDVI 下降, LST 升高, VSWI 变小; 反之则 VSWI 增大。

1.5 数据来源与处理

采用 MODIS 遥感数据产品: 2012 年 3 月 5 日至 6 月 8 日的 MOD11A2 和 MOD13A2 数据 (数据来自 NASA 官网: <https://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/add.html>)。

另外, 本研究用到的地面气象站点的数据有河南省 15 个农气观测站点的 3 月 5 日至 6 月 8 日的降水数据, 同时还采用河南省气象局发布的农业气象旬报月报资料等。

本研究采用 MRT 和 ENVI 等软件对 MODIS 影像进行预处理, 其中用 MRT 对影像进行镶嵌, 投影转换为 WGS-84, Geographic 坐标系。由于下载的 NDVI (16 d) 和 LST (8 d) 产品的时间分辨率不一致, 所以用 ENVI 将 2 个 8 d 的 LST 数据合成 1 个 16 d 的 LST 数据, 从而使 LST 产品的时间分辨率与 NDVI 数据匹配。最后根据 VSWI 模型公式在 ENVI 中用 Bandmath 算出栅格数据。

2 结果与分析

本研究基于研究区域内 2012 年 3 月 5 日至 6 月 8 日的遥感影像, 运用 MODIS 数据中的 NDVI 和 LST 这 2 种植被指数并构建并计算出 VSWI, 结合河南省 15 个地面农业气象站的气象数据从以下 3 个方面进行分析: 一是分析 VSWI 与降水的变化趋势; 二是分析 VSWI 与小麦粮食产量的相关性; 三是用 VSWI 反演河南省春季干旱的分布情况, 分析旱情。

2.1 VSWI 与降水的相关性分析

2.1.1 降水距平百分率 降水指标能够从侧面反映一定时期内研究区的干旱发生程度,降水距平百分率指数能反映降水量偏离历史同期多年平均降水量的程度,降水距平百分率能够直观地反映降水异常引发的干旱^[28]。本研究采用的降水距平百分率评价标准来自《河南省抗旱应急预案》^[29]:规定年尺度下, $-30\% < \text{降水距平百分率} \leq -15\%$ 为轻度干旱, $-40\% < \text{降水距平百分率} \leq -30\%$ 为中度干旱, $-45\% < \text{降水距平百分率} \leq -40\%$ 为严重干旱,降水距平百分率 $\leq -45\%$ 为特大干旱。而在规定季尺度下: $-50\% < \text{降水距平百分率} \leq -25\%$ 为轻度干旱, $-70\% < \text{降水距平百分率} \leq -50\%$ 为中度干旱, $-80\% < \text{降水距平百分率} \leq -70\%$ 为严重干旱,降水距平百分率 $\leq -80\%$ 为特大干旱。

2.1.2 VSWI 与降水量的相关性分析 根据河南省气象局报告,2012 年河南省降水量总体呈纬向分布,自北向南逐渐增加,降水量为 520 ~ 1 430 mm。以信阳市为最高,大部分区域高于 1 000 mm,年降水最少的为豫北区域,不足 650 mm,大部分区域降水在 700 ~ 1 000 mm 之间。为了便于研究 VSWI 与降水量的相关性,从豫北、豫南、豫西、豫东和豫中分别选择安阳、信阳、三门峡、商丘、许昌 5 个典型地区的站点,分别将 2012 年 3 月 5 日至 6 月 8 日每 16 d 合成的 VSWI 与每 16 d

的累计降水量进行比较(3 月 5 日即 2012 年的第 65 天)。从图 2 可以看出,研究时段内 VSWI 的变化趋势与累计降水量基本一致,安阳在第 82 天降水量达到 2.9 mm,而 VSWI 指数也达到研究时间内的最高值,达到 0.001 7 左右,其后随着降水量的逐渐减少,VSWI 指数也呈现下降趋势,在第 81 天至 145 天两者的相关系数达到 0.425,表明安阳地区在研究时间段后期 VSWI 指数与降水量的变化趋势基本吻合;而在商丘,在第 97 天降水量达到 19 mm 左右,为研究时间内最高值,同时 VSWI 也达到研究时间内最高值,在 0.002 2 左右,随后由于降水量的急剧减少,VSWI 也呈现急剧下降的趋势,而商丘的 VSWI 指数与降水量的相关系数达到 0.68,表明商丘地区 VSWI 指数与降水量随时间的变化趋势吻合很好;而在许昌和三门峡,降水量与 VSWI 均呈现较符合的变化趋势,VSWI 指数与降水量的相关系数分别为 0.57 和 0.64;而在信阳,降水量与 VSWI 的变化趋势最为接近,从第 65 天开始,降水量逐步增加,而 VSWI 也在逐步增加,两者均在第 113 天达到最大值,随后降水量与 VSWI 有逐步降低,相关系数达到 0.67,表明了降水量与 VSWI 指数的变化趋势吻合得很好。综合可以看出,降水少时 VSWI 值较低,旱情严重;降水后 VSWI 值升高,旱情得到缓解。充沛的降水保证土壤供水充足,NDVI 值增高,LST 值下降,则 VSWI 增高,反之 VSWI 降低。

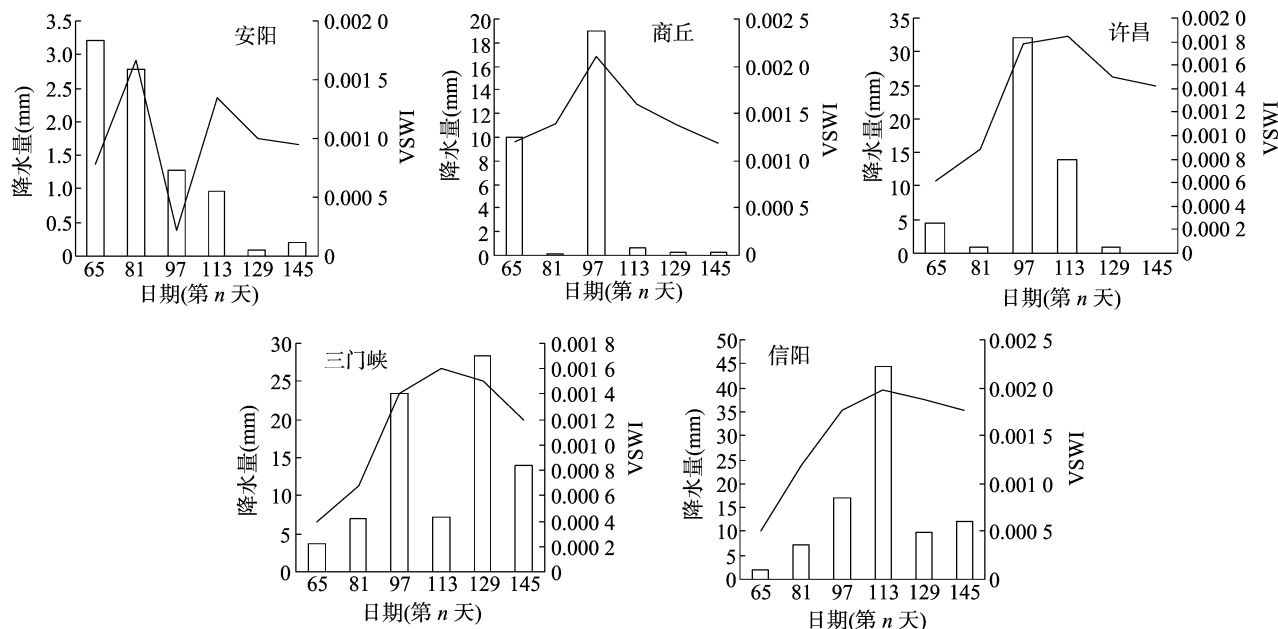


图2 2012年春季五个站点 VSWI 与对应时段累计降水量变化比较

2.2 VSWI 与粮食产量相关性分析

2012 年河南省各市的小麦产量数据来源于《河南统计年鉴 2013》。研究中合成了每 16 d 的 VSWI 图像 6 张,每张都用掩膜提取将河南省的 18 个市分割出来,并一一计算小麦种植区的 VSWI 平均值。最后将 VSWI 平均值与查统计年鉴得到的每个地市的小麦产量做相关性分析(表 1)。

小麦的生长发育期过程大致如下:2012 年 3 月 8—28 日是小麦的返青—拔节期;3 月 29 日至 5 月 8 日是拔节—抽穗期;5 月 9 日至 6 月 8 日是乳熟—成熟期。

从表 1 分析 VSWI 和粮食产量的相关性可看出,虽不是

所有指数都通过了 0.05 水平显著性检验,即使是在同一片地区,考虑到不同作物对干旱的耐受度是不同的,总体来说 VSWI 和粮食产量是表现为较强正相关关系的。

2011 年和 2012 年连续 2 年发生干旱,虽然 2012 年春季少降水,但是由于在冬季降水丰富,在土壤底墒的作用下帮助播后出苗^[30]。3 月,小麦正经历返青期转到拔节出苗期,正是小麦需水量大的时期,此时若遭受到干旱灾害的威胁,水分不足,影响小麦幼苗的生长。4 月 6—21 日,此期间河南省迎来了降水,土壤相对湿度值升高,一定程度上缓解了 3 月和 4 月初的旱情,促进了小麦的营养生长,VSWI 升高,该时间段

表 1 遥感干旱监测指数 VSWI 与粮食产量的相关性分析

监测时段	相关系数
03-05-03-20	0.801 **
03-21-04-05	0.671 **
04-06-04-21	0.353
04-22-05-07	0.469 *
05-08-05-23	0.469 *
05-24-06-08	0.178

注: * 和 ** 分别代表通过 0.05 和 0.01 水平显著性检验。样本数量为 18 个。

内 VSWI 与粮食产量中等程度相关。4 月下旬至 5 月下旬是小麦的拔节期晚期到抽穗期,降水量虽有小幅度减少,但仍比 3 月时降水量多,小麦进行正常的灌浆但可能后期灌浆不足,该时间段的 VSWI 与粮食产量呈现较强的正相关关系。5 月下旬至 6 月上旬,小麦成熟阶段,是需水的关键时期,若降水偏少且高温,可能出现小麦植株矮小、穗小、粒少的现象。

干旱对农作物的胁迫程度与干旱发生的季节以及持续时间长短和农作物自身品种和对干旱的适应能力有关,小麦不同生长时期的需水量也不同。干旱导致粮食减产主要是因为土壤水分亏缺,从而降低小麦的灌浆强度。干旱程度越重,灌浆强度下降幅度越大,正常灌浆时间减短^[31]。若在小麦的各个生长发育期都遭遇干旱,各个时期造成的减产不同,多个时期干旱造成的粮食减产往往大于单个时期干旱叠加的效果。

2.3 利用 VSWI 反演河南省干旱时空分布

动态监测可以及时地获取灾害的信息,植被供水指数 VSWI 可以清晰、真实地反映旱情的发生、发展和加重或减轻的过程。由于国家相关部门没有给出严格的基于植被供水指数的干旱等级划分标准,根据前人研究结果^[32-35],结合了研究区研究时段的 VSWI 数据,大致分为以下 4 个等级:VSWI 值在 0~0.000 5 为严重干旱,>0.000 5~0.000 8 为中度干旱,>0.000 8~0.001 2 为轻度干旱,>0.001 2~0.002 0 为适宜。在 2012 年 3 月 5 日至 6 月 8 日这 100 多天的天气情况可概括为持续少雨、大风、高温(来自河南省气象局农业气象周报),本研究在前面对降水量距百分率分析结果也表明了春季旱情的基本情况。本研究给出了 VSWI 对 2012 年河南省春季干旱监测的结果,将 2012 年 3 月 5 日至 6 月 8 日的每 16 d 的 VSWI 计算出来后,按照上述的干旱等级划分指标对图像进行密度分割和重分类后,重旱染红色,中旱染黄色,轻旱染淡绿色,适宜染深绿色(图 3)。结合配图探讨基于遥感数据对河南省春季旱情变化趋势的响应,以植被供水指数 VSWI 为例进行较为详细的分析与描述。

河南省春季旱情的变化趋势可以概述为:干旱发生→严重干旱→干旱减缓→干旱加重。如图 3 所示,3 月份月上旬,河南省北部、南部、西南部旱情已经暴发,由表 2 可得知达到严重干旱的地区面积大约占河南省的 43%,对比染深绿色的适宜程度的地区在图 3-a 中寥寥。然后随着时间的推移和降水的到来,到 3 月下旬,只有豫北、豫南、西南一部分地区还是严重干旱,其余地区旱情从原来的中旱和轻旱缓解到正常生长状态,南阳、平顶山、漯河、驻马店出现了大范围湿润状态。直至 4 月中旬,干旱加速蔓延,豫北和西南部的安阳、鹤壁、济源、三门峡仍是处于重旱中,豫西也由适宜降到轻旱。但是西

北部以及中南部干旱较为严重,其他地区都是中旱以及轻旱。4 月下旬,整个河南省的旱情大大得到了缓解,适宜地区大约占河南省的 40%,西北部干旱逐渐开始缓解,河南省大部分地区的旱情基本解除。5 月,河南省北部、西南部及南部地区仍有部分地区处于重旱中,如新乡、郑州和信阳的部分地区。而到 5 月下旬,全省旱情较之前加重了,轻旱及以上的面积达到 85%。到 6 月上旬,干旱席卷河南省,植被状况一直很好的商丘、许昌、漯河、周口等地区呈现大面积的干旱。

最后将每 16 d 合成的 6 个 VSWI 栅格数据在 ENVI 中作出平均值(图 4),来研究河南省春旱的整体情况。从图 4 可以看出,豫北、豫南、豫西一直受到干旱的胁迫,部分豫东和豫中的情况大体上保持湿润。计算了 18 个市的小麦单位面积产量(按播种面积计算),省单位面积产量为 6 057 kg/hm²,VSWI 情况较好的区域如焦作、商丘、周口、许昌,单位面积产量都超过了 7 000 kg/hm²,生产情况最好的是焦作市,单位面积产量为 7 666.934 kg/hm²,超出平均值 1 600 kg/hm²。

3 结论与展望

引用前人结果,基于降水距平百分率,说明河南省 2012 年春季出现降水异常,PA 为-56.9%,为重旱。本研究还分析了 VSWI 与降水量的关系,得出结论:研究时段内 VSWI 的变化趋势与累计降水量基本一致。

降水是影响土壤湿度的重要因素,土壤相对湿度与平均降水量的变化趋势基本一致^[32]。水分成为植被生长的限制因子时,当降水丰富时,满足植被生长的需水量,NDVI 增大,LST 减小;当降水不足时,植被生长状况不佳,NDVI 减小,LST 增大,总的来说,NDVI 与 LST 呈负相关。有学者指出,在用 NDVI 和 LST 进行干旱监测时,二者存在相反的变化趋势^[33],本研究得出的结论与之一致。

本研究针对性地研究 2012 年河南省典型的春旱,将 VSWI 进行市域分割,分别与对应地市的小麦产量进行相关性检验,显示较强的相关性。在小麦的不同生长时期遭受的干旱强度不同,各个时期造成的减产不同,多个时期干旱造成的粮食减产往往大于单个时期干旱叠加的效果。此外,本研究用 VSWI 和小麦产量做相关性研究,所用的 NDVI 图像是所有植被覆盖的,由于时间因素,并未提取出耕地像元,有待改进。

利用遥感影像数据构建干旱监测指数 VSWI,划分干旱等级,实际应用效果较好,可以利用 VSWI 指数监测河南省春季旱情。VSWI 值较高地区的单位面积小麦产量比河南省平均值要高出 26%。进行遥感检测时,下垫面的差异可导致结果存在差异,因此本研究给出的干旱等级也只是相对的。

NDVI 是最大值合成法合成的产品,LST 是算术平均法合成的产品,NDVI 取最大值时的时间和 LST 取平均值的时间尺度上不匹配,从而影响 VSWI,这也有产品自身的原因,查阅了大量文献,并没有发现更好的解决方法,希望以后在此方面有所改进。

河南省春季干旱频发,但针对河南春旱的监测研究很少,希望以后有更多针对春旱使用其他监测指数的研究出现。考虑到不同作物对干旱的耐受不同,以河南省小麦为例,针对某一区域的某种作物进行旱情检测,有必要划分农时和农区。

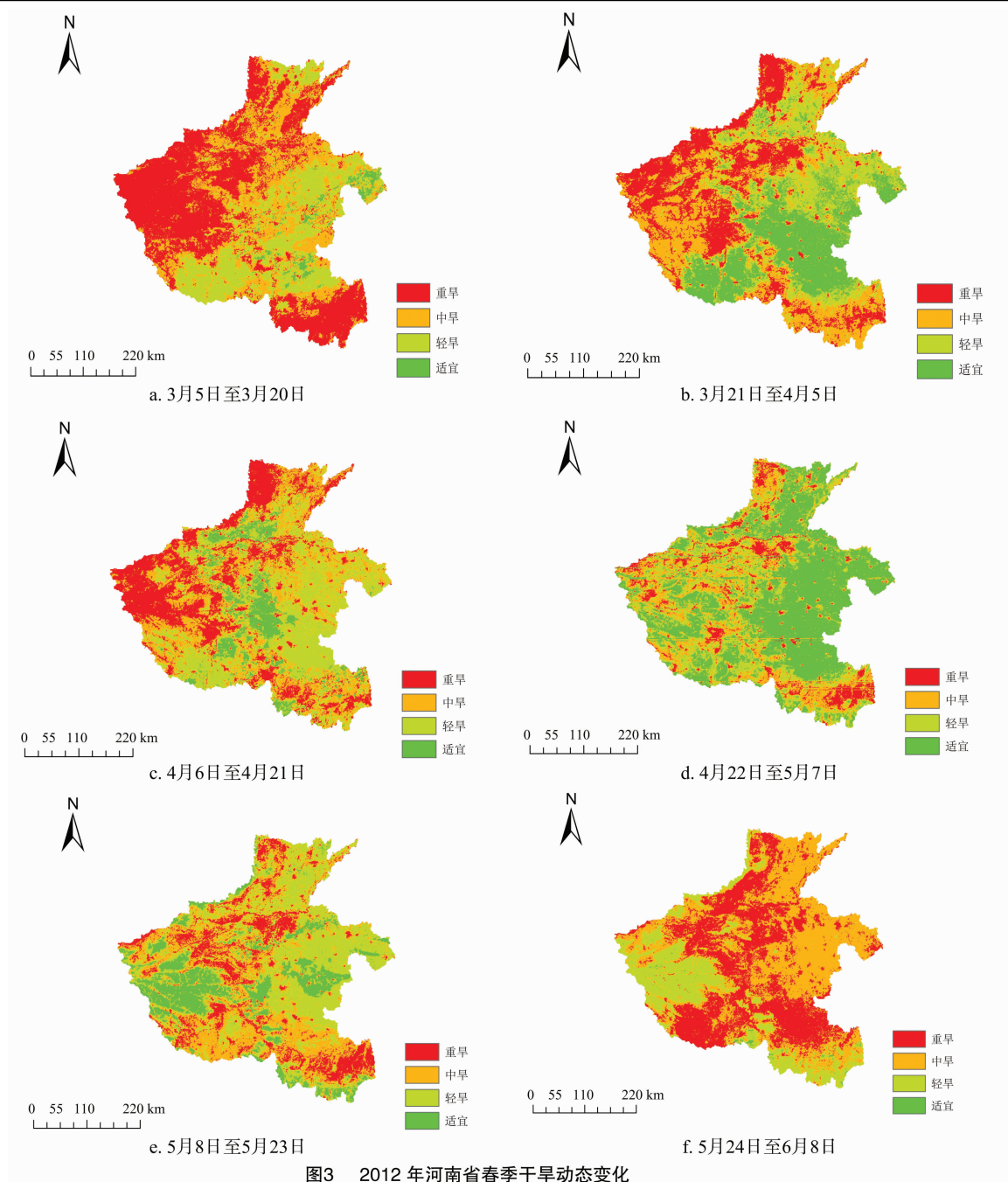


图3 2012 年河南省春季干旱动态变化

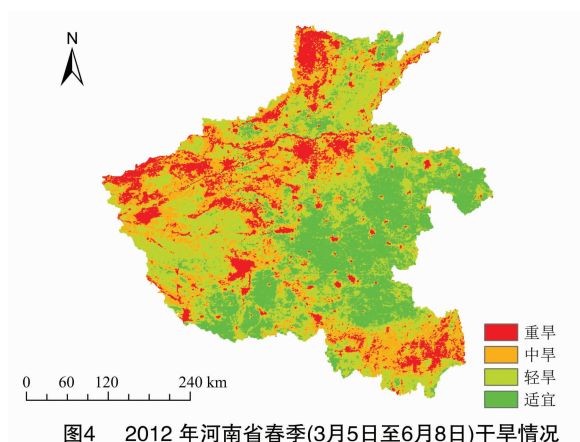


表2 2012 年南省春季干旱遥感监测统计数据

监测时段	不同干旱等级的像元百分比(%)			
	适宜	轻旱	中旱	重旱
03-05-03-20	1.75	22.718	32.43	43.10
03-21-04-05	20.24	23.88	30.30	25.59
04-06-04-21	7.39	32.97	33.60	26.05
04-22-05-07	40.27	28.49	22.02	9.23
05-08-05-23	14.53	35.48	33.39	16.60
05-24-06-08	0.26	18.54	45.30	35.90
春季	22.13	35.47	29.10	13.30

参考文献:

[1] 张景书. 干旱的定义及其逻辑分析[J]. 干旱地区农业研究,

- 1993(3):97-100.
- [2] Dutta D, Kundu A, Patel N R, et al. Assessment of agricultural drought in Rajasthan (India) using remote sensing derived Vegetation Condition Index (VCI) and Standardized Precipitation Index (SPI) [J]. *Egyptian Journal of Remote Sensing & Space Sciences*, 2015, 18(1):53-63.
 - [3] Li Z, Tan D, Cui Y, et al. Remote sensing drought monitoring under dense vegetation cover condition based on perpendicular drought Index [C]// *International Conference on Geoinformatics*. IEEE, 2009.
 - [4] 宋连春, 邓振镛, 董安祥, 等. 干旱[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 9-10.
 - [5] 张红卫, 陈怀亮, 张弘. 河南省春季降水与温度变化的时空分布——基于地理信息的分析[J]. *自然灾害学报*, 2012(1): 208, 467.
 - [6] 王劲松, 李耀辉, 王润元, 等. 我国气象干旱研究进展评述[J]. *干旱气象*, 2012, 30(4): 497-508.
 - [7] 李雅坤. 干旱对西南四省水稻生产影响的实证研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
 - [8] Stenberg T. Regional drought has a global impact[J]. *Nature*, 2011, 472(7342): 169.
 - [9] 陈鹏. 基于植被指数和地表温度的农业旱情监测适用性研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
 - [10] 邹旭恺, 任国玉, 张强. 基于综合气象干旱指数的中国干旱变化趋势研究[J]. *气候与环境研究*, 2010, 15(4): 371-378.
 - [11] Liu W T, Kogan F N. Monitoring regional drought using the Vegetation Condition Index [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(14): 2761-2782.
 - [12] Price J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1990, 28(5): 940-948.
 - [13] Carlson T N, Perry E M, Schmugge T J. Remote estimation of soil moisture availability and fractional vegetation cover for agricultural fields [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 1990, 52(1-2): 45-69.
 - [14] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2/3): 213-224.
 - [15] Wang P, Wan Z, Gong J, et al. Advances in drought monitoring by using remotely sensed normalized difference vegetation index and land surface temperature products [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(4): 527-533.
 - [16] Toby N. Carlson, Robert R. Gillies, Eileen M. Perry. A Method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover [J]. *Remote Sensing Reviews*, 1994, 9(1): 161-173.
 - [17] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, et al. Estimating crop water deficit using the relation between surface - air temperature and spectral vegetation index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 49(3): 246-263.
 - [18] 王富强, 王雷. 基于降水距平百分率的河南省干旱特征分析 [J]. *中国农村水利水电*, 2014(12): 84-88.
 - [19] 朱业玉, 程炳岩, 王记芳. 河南旱涝灾害的演变特征分析 [J]. *灾害学*, 2006, 21(3): 93-97.
 - [20] 邓天宏. 河南省农田土壤水分变化规律及动态预报研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2005.
 - [21] 王建博, 王蕾彬. 基于植被供水指数的山东省 2013 年春季旱情监测 [J]. *山东农业科学*, 2015(7): 111-116.
 - [22] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 农业干旱监测研究进展与展望 [J]. *地理学报*, 2015, 70(11): 1835-1848.
 - [23] 宋扬, 房世波, 卫亚星. 农业干旱遥感监测指数及其适用性研究进展 [J]. *科技导报*, 2016(5).
 - [24] 丁艳梅, 张继贤, 王坚, 等. 基于 TM 数据的植被覆盖度反演 [J]. *测绘科学*, 2006, 31(1): 43-45.
 - [25] 李华朋, 张树清, 高自强, 等. MODIS 植被指数监测农业干旱的适宜性评价 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(3): 756-761.
 - [26] Anderson M C, Norman J M, Mecikalski J R, et al. A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental United States based on thermal remote sensing: 1. Model formulation [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(112): 311-368.
 - [27] 河南省水利科学研究院. 河南省抗旱应急预案 [Z]. 郑州: 河南省防汛抗旱指挥部办公室, 2011.
 - [28] 李旭升, 金龙江, 孟龙江. 小麦丰歉与自然降水关系的分析 [J]. *农村实用科技信息*, 2007(2): 9-9.
 - [29] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 不同发育期干旱对冬小麦灌浆和产量影响的模拟 [J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(9): 1158-1165.
 - [30] 肖国杰, 李国春, 赵丽华, 等. 植被供水指数法在辽西干旱监测中的应用 [J]. *农业网络信息*, 2006(4): 106-107.
 - [31] 杨丽萍, 杨晓华, 张存厚. 植被供水指数法在内蒙古干旱监测中的应用 [J]. *内蒙古农业科技*, 2008(1): 58-59.
 - [32] Jiang Y, Tao H, Liu W, et al. A study of drought monitoring in Loess Plateau, China based on FY-3A/MERSI data [C]// *Eighth International Symposium on Multispectral Image Processing and Pattern Recognition*. International Society for Optics and Photonics, 2013: 909-927.
 - [33] Park S, Feddema J J, Egbert S L. Impacts of hydrologic soil properties on drought detection with MODIS thermal data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(1): 53-62.
 - [34] 张秀芝, 吴迅英, 何金海. 中国土壤湿度的垂直变化特征 [J]. *气象学报*, 2004, 62(1): 51-61.
 - [35] Karnieli A, Panov N, Goldberg A, et al. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: merits and limitations [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(3): 618-633.