

DOI: 10.5846/stxb201711202068

温庆志 孙鹏 张强 刘嘉敏 史培军. 基于多源遥感数据的农业干旱监测模型构建及应用. 生态学报, 2019, 39(20): 7757–7770.

Wen Q Z, Sun P, Zhang Q, Liu J M, Shi P J. An integrated agricultural drought monitoring model based on multi-source remote sensing data: model development and application. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7757–7770.

基于多源遥感数据的农业干旱监测模型构建及应用

温庆志^{1,2} 孙 鹏^{1,2,3,*} 张 强^{3,4} 刘嘉敏^{1,2} 史培军^{3,4}

1 安徽师范大学地理与旅游学院, 芜湖 241002

2 安徽省水利部淮河水利委员会水利科学研究院, 水利水资源安徽省重点实验室, 蚌埠 233000

3 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

4 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875

摘要: 干旱监测问题是干旱灾害模拟与预警及旱灾防灾减灾的关键。基于 2001—2013 年淮河流域 40 个气象站资料、28 个土壤墒情站点和中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 多源遥感数据, 采用 SEN 趋势法和标准化降水蒸散指数 (SPEI) 等方法, 综合了大气—植被—土壤相互作用等多元成因, 构建了适用于淮河流域多源综合遥感干旱监测模型, 探讨淮河流域干旱时空规律。研究表明: (1) 基于多源数据构建综合干旱监测模型, 利用土壤墒情和典型年份干旱监测对综合干旱监测模型适用性进行评价, 通过了 $P < 0.01$ 的显著性检验, 构建的模型可综合反映出农业和气象干旱多源信息; (2) 淮河流域干旱面积和干旱频率大都集中在 4—5 月和 7—9 月, 9 月份受旱面积最大。河南省是淮河流域受旱频率最高, 其干旱面积占淮河流域多年平均干旱面积比重最大 (38%), 其次是安徽 (22%), 旱地受旱面积比重大于水田受旱面积比重; (3) 淮河流域 2、3 和 5 月干旱有显著减弱趋势; 而 1、4 和 6 月则有增强趋势。淮河流域小麦灌浆—成熟时期 (4—6 月) 缺水对小麦粮食产量影响显著, 综合淮河流域干旱趋势变化, 需强化淮河流域 4 月份小麦的干旱监测与旱灾预警。

关键词: 多源数据; 农业干旱; 气象干旱; 综合干旱监测模型; 淮河流域

An integrated agricultural drought monitoring model based on multi-source remote sensing data: model development and application

WEN Qingzhi^{1,2}, SUN Peng^{1,2,3,*}, ZHANG Qing^{3,4}, LIU Jiamin^{1,2}, SHI Peijun^{3,4}

1 School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China

2 Key Laboratory of Water Conservancy and Water Resources of Anhui Province, Water Resources Research Institute of Anhui Province and Huaihe River China, Bengbu 233000, China

3 State Key Laboratory of Surface Process and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

4 Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Drought monitoring is crucial for the early warning of drought hazards. In this study, an attempt to develop an Integrated Remote Sensing Drought Monitoring Index (IRSDI) was made, based on multi-source remote sensing data, with the aim of investigating drought conditions across the Huai River basin in both space and time. The IRSDI relied on: meteorological data recorded from 2003 to 2013 at 40 stations, soil moisture data recorded at 16 stations, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data obtained by linear trend detection, and on the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). The results of this study indicate that: (1) the proposed IRSDI is able to describe and monitor drought conditions well in both space and time; (2) droughts and high drought frequency occur in the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41601023); 国家杰出青年科学基金项目 (51425903); 地表过程与资源生态国家重点实验室开放基金资助项目 (2017-KF-04); 安徽省自然科学基金 (1808085QD117)

收稿日期: 2017-11-20; 网络出版日期: 2019-08-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sun68peng@163.com

<http://www.ecologica.cn>

periods April–May and July–September. In particular, September is the month during which the largest area is dominated by droughts. In particular, droughts affect Henan province, which accounts for 38% of the total drainage area of the Huai River basin, followed by Anhui province, which accounts for 22% of the total drainage area of the Huai River basin; (3) droughts tend to decrease during February, March and May, whereas they increase during January, April and June. Wheat grouting and ripening occur in the period from April to June. Thus, droughts in these months can seriously affect wheat production, and a more careful allocation of water resources and irrigation management should be performed during this period. Nevertheless, spring droughts and autumn–winter droughts should receive proper attention as well, in order to manage and reduce drought-induced losses.

Key Words: Multi-source remote sensing data; agricultural drought; meteorological drought; integrated drought monitoring model; Huai River basin

淮河流域是中国重要商品粮基地,以占全国 10% 的耕地面积生产全国近 20% 的粮食,平均每年向国家提供的商品粮约占全国商品粮的 1/4,为国家粮食安全提供了强有力的保障^[1–3]。而淮河上游区域“无降水旱、有降水涝、强降水洪”^[4]。在 1966、1978、1994、2001、2008 和 2010 年淮河流域大部分地区均发生了特大干旱,严重干旱发生 6 次;进入 21 世纪以来发生特大干旱 3 次,年均受旱面积 269.8 万 hm^2 ,成灾面积 140.8 万 hm^2 ,分别占全流域耕地面积的 21% 和 11%^[5],且随着经济社会的快速发展、需水量的不断增长,流域干旱灾害的发生频率和造成的损失呈加剧趋势。严重的干旱灾害不仅影响工业生产、城乡供水、人民生活和生态环境,给国民经济造成重大损失,同时还威胁着国家的粮食安全。

淮河流域干旱研究主要集中于干旱指数的适应性对比研究^[6–10],不同干旱指数在淮河流域不同省份的适用效果差异较大。另有研究开展淮河流域旱涝时空特征的分析,从极端降水、水气输送等方面开展淮河流域旱涝特征成因探讨^[2, 4, 11–12]。已有研究基于观测站点数据,而观测站点数量有限且分布不均,难以保障大范围适时有效的干旱监测^[13],基于多源数据的干旱监测可弥补已有研究的不足。国内外诸多研究基于土壤水分胁迫、植被生长状态和气象降水盈亏等因素,构建综合干旱监测模型以期准确反映研究区重大干旱过程^[14–17]。但对淮河流域的综合干旱监测研究并不多,与区域洪旱灾害研究的重大需求不相适应,因此,本文综合了大气–植被–土壤相互作用所涉多元成因,构建了适用于淮河流域的综合遥感干旱监测模型(Integrated remote sensing drought monitoring index),以探讨该区干旱时空特征及可能成因,为淮河流域防旱抗旱实践提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 数据

选用 2001 年 1 月—2013 年 12 月淮河流域 40 个气象站点逐日降水量、日均气温及风速等资料,站点位置如图 1 所示。缺失数据处理如下:如最大连续缺失数据小于 5 天,用相邻数据线性插补;如大于 5 天,用最大搜索半径为 400km 的相邻站点进行线性插补。气象数据由中国气象局国家气象信息中心提供。土壤墒情数据为 2001—2013 年 28 个站点旬尺度 10cm 和 20cm 数据,土壤墒情为土壤的湿度情况用土壤含水量占烘干土重的百分数表示,该数据由淮河水利委员会提供。另有 2003—2013 的 MODIS 地表反射数据(MOD09A1)、植被指数(MOD13A3)和地表温度(MOD11A2)等数据。MOD09A1 为 8 天合成的地表植被指数,分辨率为 0.5km;MOD13A3 为 16 天合成的地表植被指数,分辨率为 0.25km;MOD11A2 为每 8 天合成的地表温度,分辨率为 1km,采用分裂窗算法反演获得^[18]。2010 年淮河流域土地利用图,来自中科院地理科学与资源研究所的共享数据的 2010 年中国土地利用现状遥感监测数据(<http://www.resdc.cn/>)。

1.2 研究方法

1.2.1 标准化降水蒸散指数(SPEI)

Vicente-Serrano 等^[19]提出用 SPEI 指标来研究旱涝。该指标同时考虑降水(P)和潜在蒸散发(PET),其

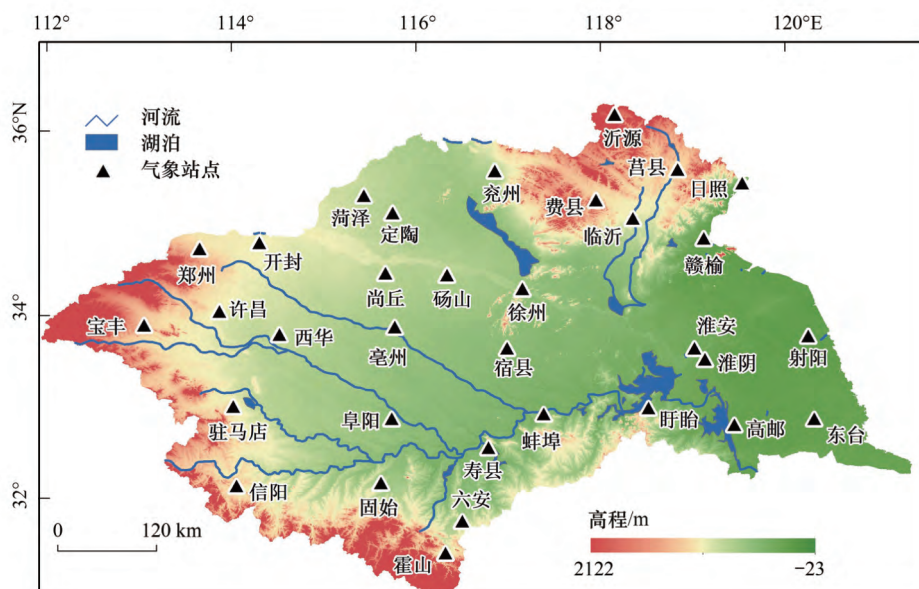


图1 淮河流域示意图

Fig.1 Location of meteorological station in the Huaihe River Basin

中潜在蒸散发指的是在水足够多的情况下所能产生的蒸发和蒸腾总量,采用彭曼公式计算。SPEI 计算方法原理是用降水量与蒸散量的差值偏离平均状态的程度来表征某地区的干旱的。

1.2.2 遥感干旱指数

目前,国内外学者利用地表作物反射光谱信息进行了大量研究,建立了数十种遥感干旱指数。总的来说,遥感干旱指数可分为4大类,分别为作物冠层温度、作物形态和绿度、土壤水分变化和植被水分变化^[20-24]。在现有的研究里,通常只选用一种遥感指数来监测区域干旱事件,从而导致了部分区域出现监测结果与实际情况不相符的情况^[25]。其主要原因在于,各遥感干旱监测指标具有不同的时空适用性。因此,对不同区域、不同作物生长阶段进行遥感干旱监测时,应该选取最适合的农业干旱监测指数,本研究从遥感干旱指数4大类分别选择一个与土壤墒情拟合最优的构建综合遥感干旱监测模型。

1.2.3 趋势分析

趋势度检验法广泛应用于气象及水文过程的非参数趋势分析方法,近年来也被应用于遥感时序数据趋势分析中^[26-27]。M-K 检验法对数据样本分布不做要求,特别适合于非正态分布的时序数据,此外其能够避免时间序列数据缺失对分析结果的影响,且能剔除异常值的干扰。对于有时间序列的综合干旱监测模型 $i=1, 2, 3, \dots, n$ SEN 趋势公式^[28]:

$$\beta = \text{MED}\left(\frac{S_j - S_i}{j - i}\right) \quad (1)$$

公式中 $1 < j < i < n$, MED 表示中位数 β 表示 SEN 趋势,为综合干旱指数增强或衰减程度 $\beta > 0$ 显示综合干旱指数有增加趋势,反之亦然。SEN 趋势显著性判断采用 M-K 法及测定各种变化趋势的起始位置。

2 淮河流域综合遥感干旱监测模型构建及适用性

2.1 16 种指数在淮河流域的分类和建模指数选取

结合李阿伦等^[29]分析了各层土壤水,得出 20cm 土层含水量最为稳定,是表征土壤墒情是良好指标;马瑞昆等^[30]研究表明在浅层地下供(20cm)水与作物的单株生物量、单株穗数和单株粒重的表现最好;刘荣花等^[31]在研究郑州冬小麦根系田间试验表明冬小麦根长密度主要集中在 0—50cm,占总根部的 57.7%,20cm 处于 0—50cm 的中间部位,研究 20cm 土壤墒情能够直观反映出土壤中作物吸收水分的多少,故选用 20cm 土壤

墒情作为本文的研究参考指标。

表 1 农业干旱遥感监测指标
Table 1 Agricultural drought monitoring index

指数分类 Indices categories	遥感指标 RS indices	指数分类 Indices categories	遥感指标 RS indices	指数分类 Indices categories	遥感指标 RS indices	指数分类 Indices categories	遥感指标 RS indices
作物冠层温度 Crop canopy temperature	温度条件指数 TCI	作物形态和绿度变化 Greenness rate of change	距平植被指数 AVI	土壤水分变化 Soil moisture variation	改进的垂直干旱指数 MPDI	作物冠层含水量 Crop canopy moisture content	全球植被水分指数 GVMI
	温度植被旱情指数 TVDI		增强植被指数 EVI		垂直干旱指数 PDI		地表水分指数 LSWI
	植被供水指数 VSWI		比值植被指数 RVI		可见光和短波红外干旱指数 VSDI		短波红外垂直失水指数 SIVWLI
	条件植被温度指数 VTCI		归一化植被指数 NDVI				水分胁迫指数 WSI
			条件植被指数 VCI				

TCI: temperature conditional index; TVDI: temperature vegetation drought index; VSWI: vegetation water supply index; VTCI: vegetation conditional temperature index; AVI: abnormally vegetation index; EVI: enhanced vegetation index; RVI: ratio vegetation index; NDVI: normalized difference vegetation index; VCI: vegetation conditional index; MPDI: modified perpendicular dryness index; PDI: perpendicular dryness index; VSDI: visible light and short-wave infrared drought index; GVMI: global vegetation moisture index; LSWI: land surface water index; SIVWLI: short-wave infrared vertical water loss index; WSI: water stress index; RS: remote sensing

图 2 表明 相关系数越大 ,置信度相对也越大 ,表示两者的相关关系越强 ,本文中依据遥感干旱指数的分类 ,从 4 大类中分别选择遥感干旱指数与 20cm 土壤墒情的置信度最大的作为本文的遥感干旱指数。由图 2 可知 ,遥感干旱指数的相关系数和显著性系数均较大 ,反映冠层温度变化的条件温度指数(TCI) 的置信度 0.991 是最大的、反映植被绿度变化的距平指数(AVI) 的置信度 0.995 是最大的 ,反映土壤水分变化的可见光和短波红外干旱指数(VSDI) 的置信度 0.994 是最大的 ,反映植被水分变化的全球植被水分指数(GVMI) 的置信度 0.99 是最大 ,因此本文选择上述干旱指数作为本文研究的遥感干旱指数。

2.2 综合遥感干旱监测模型的构建

综合国内外研究 ,农业干旱的定义是土壤水分供给无法满足作物水分的需求导致的作物水分亏缺 ,通常最先表现为降水减少导致的土壤墒情缺少 ,同时伴随着作物蒸腾的不断失水 ,最终作物体内水分无法满足正常的生理活动 ,表现为抑制作物生长 ,进而会出现农作物减产或者绝收 ,且干旱对农作物不同生育期的影响存在显著差异^[32-35]。

基于上述的研究表明 ,农业干旱过程由多种致灾因子决定 ,不但涉及到大气降水、植被生长状态和土壤水分胁迫等因素 ,而且还与蒸发 ,土壤有效持水量等因素有关系。单个指数对干旱反映存在着不足 ,致灾因子之间的耦合关系复杂 ,由于数据的局限性和干旱成因复杂性导致不能全面反映农业干旱与气象干旱、土壤干旱、蒸发之间的关系 ,因此为弥补数据自身的缺陷和完善干旱监测机理 ,干旱监测研究更加趋向于多源信息的综合方法研究。本文研究基于农业干旱指数的定义 ,选择能够反映冠层温度变化、植被绿度变化、土壤水分变化和植被水分变化的遥感数据构建综合遥感干旱监测模型 ,综合遥感干旱监测模型既能反映土壤水分的变化 ,又能反映农作物的水分亏缺状况 ,具体的模型构建和验证流程如图 3 所示。

本文从 16 种最常用的遥感指数中(表 1) ,通过相关性分析 ,筛选出反映冠层温度变化、植被绿度变化、土壤水分变化和植被水分变化的最优的遥感干旱指数分别是: 条件温度指数(TCI) 、距平指数(AVI) 、可见光和短波红外干旱指数(VSDI) 和全球植被水分指数(GVMI) 。选用土壤墒情作为农作物受旱的评价指标 ,但是淮

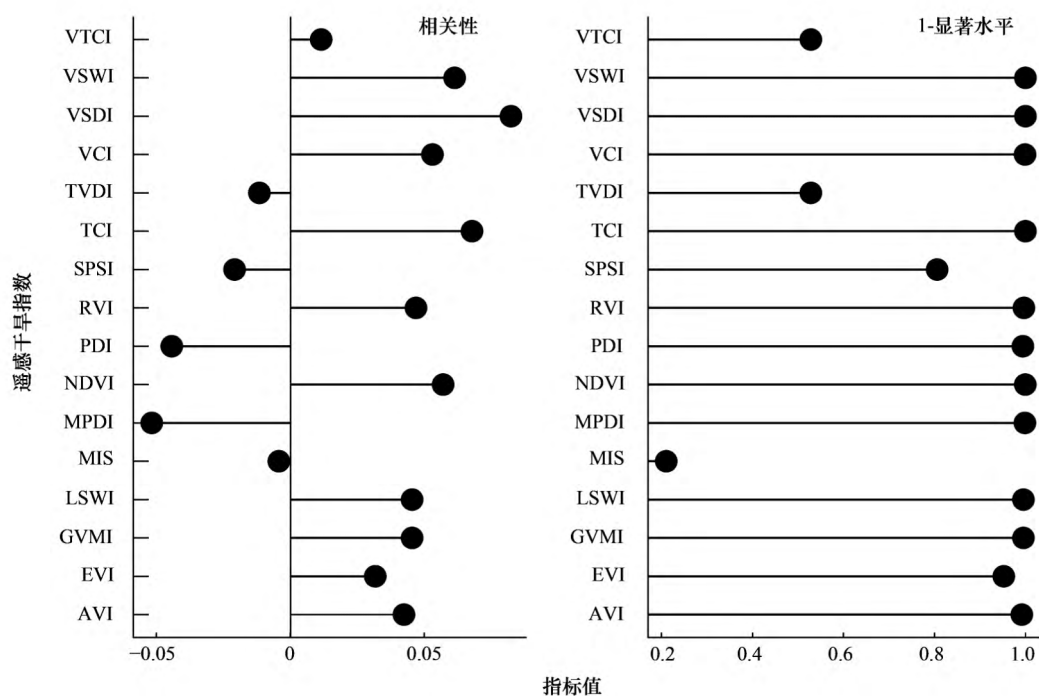


图 2 16 种遥感干旱指数和 20cm 土壤墒情相关系数

Fig.2 Correlation coefficient of sixteen Remote sensing drought index and 20cm soil moisture

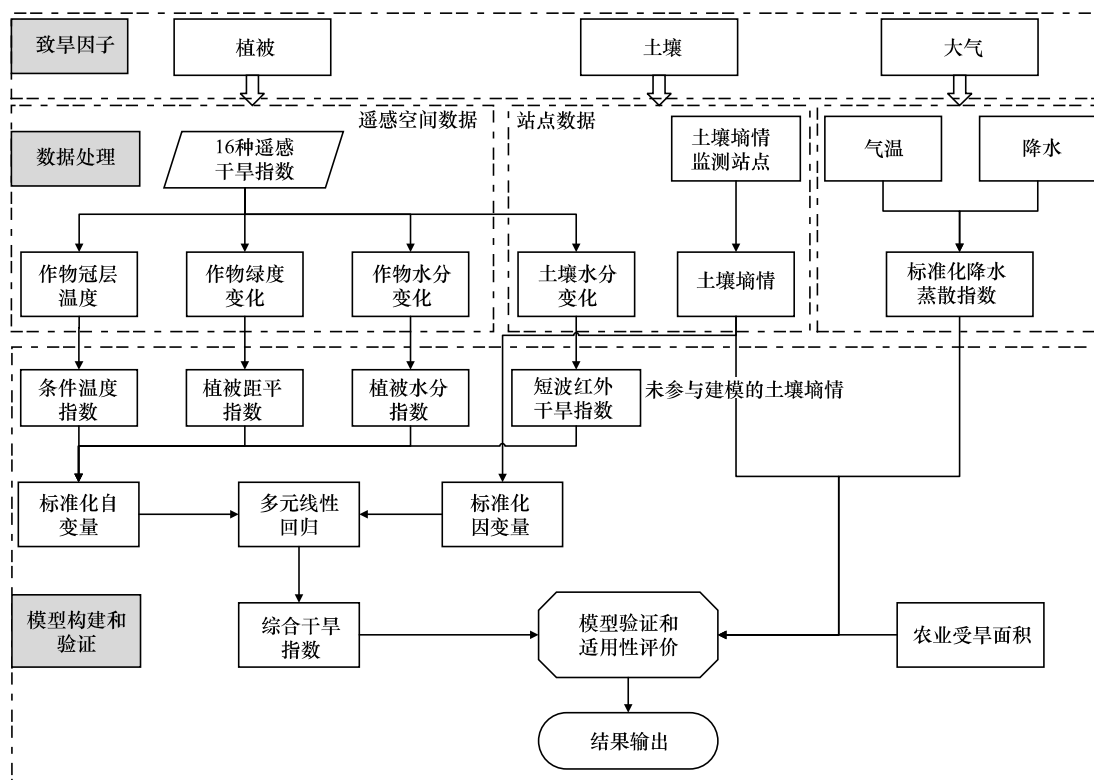


图 3 综合遥感干旱监测模型构建流程图

Fig.3 Integrated remote sensing drought monitoring index modeling developing

河流域土壤墒情站点数量有限,在空间尺度上缺点明显。因此,本研究选取 22 个农业站点的 20cm 土壤墒情数据作为因变量,将 2001—2013 年基于 MODIS 遥感数据计算的经标准化处理、异常值处理、残缺值处理后的 4 个最优的干旱指数(TCI、AVI、VSDI 和 GVMI)作为自变量。同时,考虑到不同农业干旱遥感指数在干旱发展过程和作物不同生长阶段的影响是不同的,因此本研究利用多元线性回归方法建立了月尺度的综合遥感干旱监测模型(IRSDI Integrated remote sensing drought monitoring index),建模过程同时考虑相关性系数、模型复杂性、拟合优度以及均方误差,建立并选取合适综合遥感干旱模型(表 2), P 值均小于 0.01。为了进一步验证构建模型的可行性,利用未参与建模的 6 个土壤墒情数据、标准化降水蒸散指数(SPEI)和与对应的像元的综合遥感干旱监测模型进行相关性分析,同时利用淮河流域山东、河南、安徽和江苏四个省份的实际受旱面积、成灾面积与对应像元的综合遥感干旱监测模型进行适用性验证,最终输出空间分辨率为 500* 500 的综合遥感干旱监测模型(IRSDI)的栅格结果。

图 4 是综合遥感干旱监测模型(IRSDI)与参与建模的 22 个农业站点的土壤墒情(SOIL)的拟合散点图,均通过了 $P<0.01$ 的显著性检验,能够非常好的反映农业干旱。综合遥感干旱监测模型(IRSDI)是依据土壤墒情而建立的模型,因此综合遥感干旱监测模型(IRSDI)的数值含义和单位跟土壤墒情是一致的。IRSDI 数值越大,表示土壤湿度越湿润;IRSDI 数值越小,表示土壤湿度越小就越干旱。

表 2 综合遥感干旱监测模型

Table 2 Integrated remote sensing drought monitoring index (IRSDI)

月份 Month	综合遥感干旱指数 IRSDI	P 值 P -value
1 月 January	$IRSDI = 96.3 + 42.7 \times vsdi - 21.7 \times avi - 1.6 \times tci + 28.8 \times gvmi$	$1.6e-10$
2 月 February	$IRSDI = 101.7 + 58.8 \times vsdi - 11.86 \times avi + 0.01 \times tci + 5.86 \times gvmi$	$1.4e-09$
3 月 March	$IRSDI = 85.2 + 31.329 \times vsdi - 20.8 \times avi + 9.5 \times tci + 9.286 \times gvmi$	$1.8e-08$
4 月 April	$IRSDI = 57.73 - 22.63 \times vsdi - 39.25 \times avi + 5.27 \times tci + 27.46 \times gvmi$	$1.4e-15$
5 月 May	$IRSDI = 127.39 + 157.2 \times vsdi + 22.94 \times avi + 1.02 \times tci - 58.93 \times gvmi$	$3.6e-08$
6 月 June	$IRSDI = 75.404 + 9.795 \times vsdi + 1.241 \times avi + 9.261 \times tci - 3.891 \times gvmi$	$1.4e-06$
7 月 July	$IRSDI = 93.147 + 46.428 \times vsdi - 1.335 \times avi + 9.102 \times tci - 5.467 \times gvmi$	$1.3e-16$
8 月 August	$IRSDI = 106.14 + 85.66 \times vsdi + 10.93 \times avi + 8.06 \times tci - 20.66 \times gvmi$	$1.2e-18$
9 月 September	$IRSDI = 111.43 + 99.674 \times vsdi - 31.776 \times avi + 6.245 \times tci - 25.943 \times gvmi$	$6.1e-07$
10 月 October	$IRSDI = 104.256 + 84.915 \times vsdi + 8.479 \times avi + 7.811 \times tci - 51.517 \times gvmi$	$2.0e-08$
11 月 November	$IRSDI = 105.294 + 79.5756 \times vsdi - 27.0585 \times avi + 0.3061 \times tci + 23.4115 \times gvmi$	$1.1e-07$
12 月 December	$IRSDI = 111.886 + 110.76 \times vsdi - 17.857 \times avi + 6.372 \times tci + 13.575 \times gvmi$	$2.6e-17$

2.3 淮河流域综合遥感干旱监测模型的适用性分析

2.3.1 综合遥感干旱监测模型与土壤墒情、标准化降水蒸散指数相关性分析

农田土壤墒情的预测既是农田水分平衡及土壤-植物-大气连续体水分转化研究的重点,也是表征农业干旱最好的一种监测手段^[36],Chen 等^[37]和 Xu 等^[25]的研究表明标准化蒸散指数(SPEI)适用于监测中国的气象干旱。为了验证综合遥感干旱监测模型在淮河流域的适用性,本研究在淮河流域随机的选择未参与建模的 6 个站点,站点均匀分布在淮河流域,对其土壤墒情数据、标准化降水蒸散指数与综合干旱指数进行相关性分析,结果显示均通过了 $P<0.01$ 的显著性检验。

2.3.2 综合遥感干旱监测模型受旱面积与统计年鉴受灾、成灾面积相关分析

为了验证综合遥感干旱监测模型和农业产量的关系,本文从安徽、河南、山东和江苏四省的统计年鉴中统计出了 2001—2013 年淮河流域中四个省的地级市的旱灾受灾和成灾面积,再根据综合遥感干旱监测模型统计出来的各省以及全流域的受旱面积。利用综合遥感干旱监测模型统计出的受旱面积分别和统计年鉴的旱灾成灾面积、受灾面积进行相关性分析(图 5)。从结果可以看出所有相关性均通过了 $P<0.01$ 的显著性检验, R^2 均大于 0.3。综合遥感干旱监测模型统计出来的受旱面积和统计年鉴的成灾面积的相关性高于受灾面积,这表明综合遥感干旱监测模型的干旱监测情况是能够很好监测出淮河流域的旱灾所造成的面积的,综合遥感

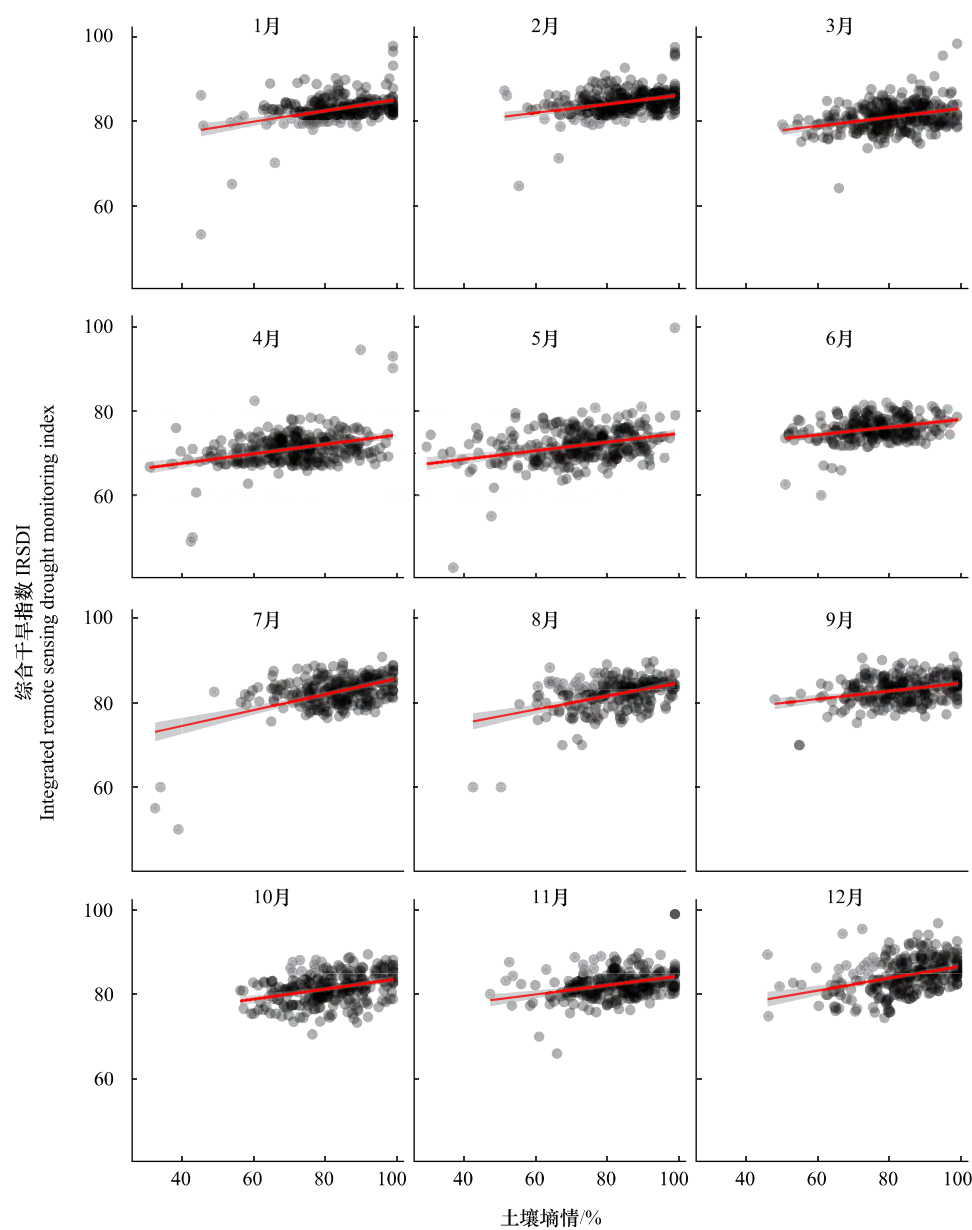


图 4 综合遥感干旱监测模型与建模站点 20cm 土壤墒情的散点图
Fig.4 Scatter plots of 20cm soil moisture and IRS-DI

干旱监测模型对农业干旱成灾面积相关关系要高于受灾面积,这也表明了综合遥感干旱监测模型能够更好的监测旱灾成灾面积,也可以准确的对淮河流域的干旱情况进行客观的评价。

表 3 综合遥感干旱监测模型干旱等级划分

Table 3 Classification scales of drought for IRS-DI

等级 Grade	综合遥感干旱指数范围 IRS-DI range	干旱程度 Degree of drought	等级 Grade	综合遥感干旱指数范围 IRS-DI range	干旱程度 Degree of drought
1 First	$100 > \text{IRS-DI} \geq 60$	湿润	4 Fourth	$40 > \text{IRS-DI} \geq 30$	中旱
2 Second	$60 > \text{IRS-DI} \geq 50$	正常	5 Fifth	$30 > \text{IRS-DI} \geq 0$	重旱
3 Third	$50 > \text{IRS-DI} \geq 40$	轻旱			

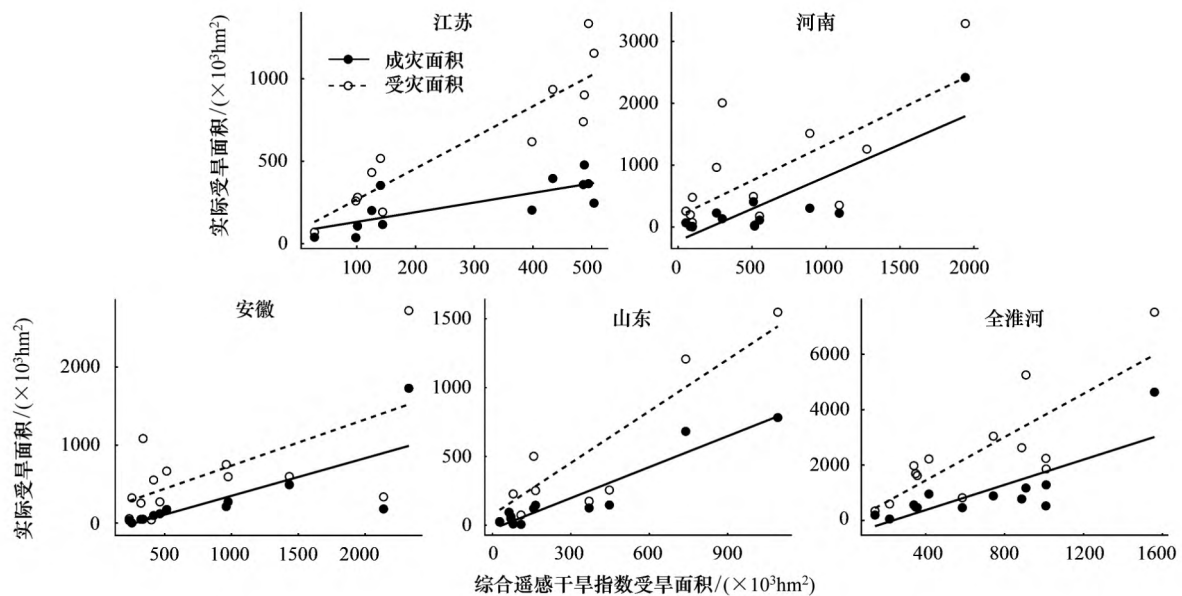


图5 综合遥感干旱监测模型受旱面积与统计年鉴旱灾受灾面积、成灾面积相关性示意图

Fig.5 Correlation of IRSDI's droughts area and statistical yearbook's damage area and disaster area in Huaihe River Basin

3 淮河流域干旱时空特征研究

3.1 淮河流域干旱统计特征

研究选用 2010 年淮河流域土地利用图(图 6),从中提取水田与旱地,二者面积之和作为淮河流域耕地面积,叠合淮河流域干旱面积图,最终得到淮河流域耕地干旱面积,水田干旱面积以及旱地干旱面积信息。利用 2003—2013 年淮河流域各省干旱面积与淮河流域面积的比值,得到图 7 各省干旱面积占淮河流域总面积的比重。图 7 是基于综合遥感干旱监测模型像元计算的淮河流域和各省的旱灾受灾面积占流域面积的比例变化趋势图,由图 7 知:大范围干旱主要发生在 4—10 月,其中 5 月、7—9 月受旱面积最大,平均受旱面积分别达 $8.1 \times 10^4 \text{ km}^2$, $5.8 \times 10^4 \text{ km}^2$, $6.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $10.7 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中 9 月份受旱面积最大。受旱面积最大的年份为 2003 年和 2011 年,平均受旱面积达 $6.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $5.2 \times 10^4 \text{ km}^2$, 历史资料表明 2003 和 2011 年淮河流域均曾发生过大旱,进一步验证了综合遥感干旱监测模型适用于淮河流域的干旱监测。据统计,淮河流域多年平均干旱面积占淮河流域面积比例达到 17%,从淮河流域的行政区划来看,淮河流域河南地区多年平均受旱面积占淮河流域河南地区面积的 20%,淮河流域安徽地区、山东地区和江苏地区多年平均受旱面积占淮河流域相应地区面积的 18%、17% 和 15%。另外,河南区域干旱面积占淮河流域多年平均干旱面积比重最大,达 38%;其次是安徽的 22%、江苏的 21% 和山东的 19%。因此,淮河流域河南区域是淮河流域受灾面积最大的地区,河南、安徽部分是淮河流域的小麦种植区,对于小麦生长来说,4—6 月为灌浆-成熟时期,该时期缺水对小麦粮食产量影响巨大,因此应该加强对这部分地区的干旱监测及预警。淮河流域山东、江苏、安徽和河南区域研究期内受旱面积变化与全淮河流域变化大致相同,江苏、安徽区域受旱面积最大的年份均为 2003 年和 2011 年,但山东区域受旱面积最大的年份为 2003 年和

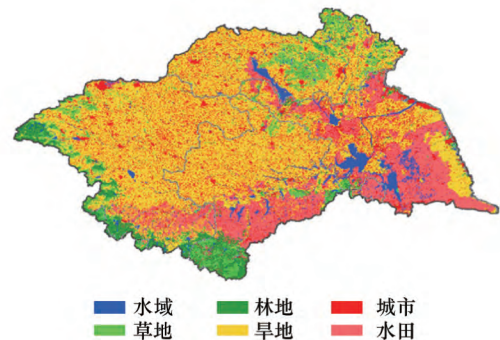


图6 淮河流域 2010 年土地利用图

Fig.6 The land use map of Huai River Basin in 2010

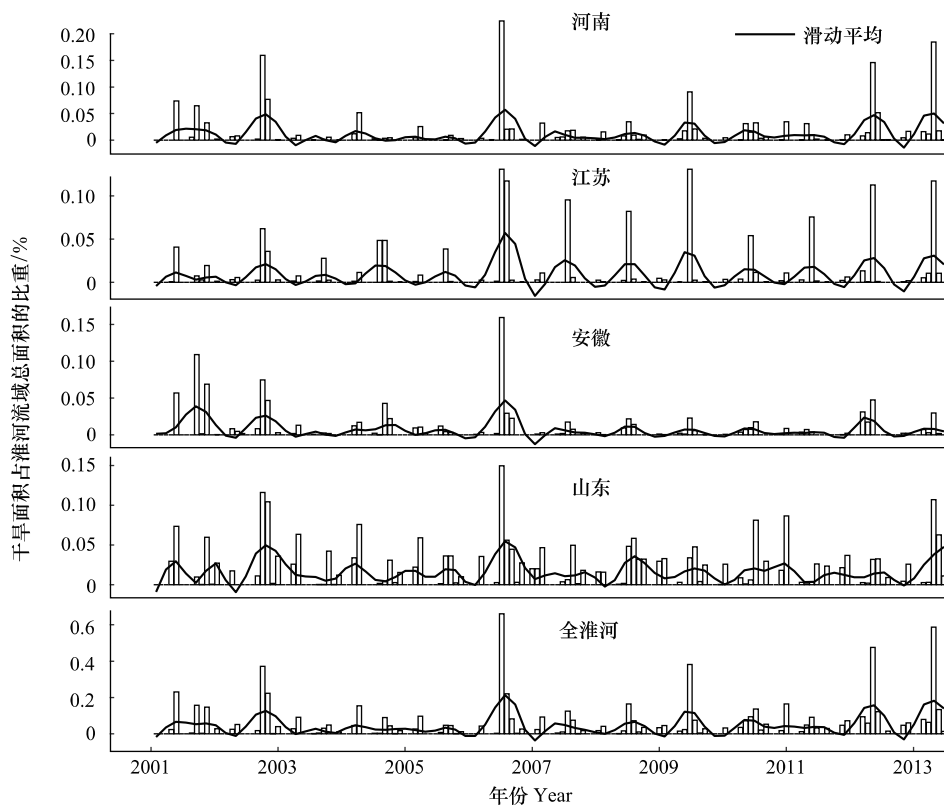


图 7 淮河流域干旱受灾面积变化趋势图

Fig.7 Trend of drought area in Huai River Basin

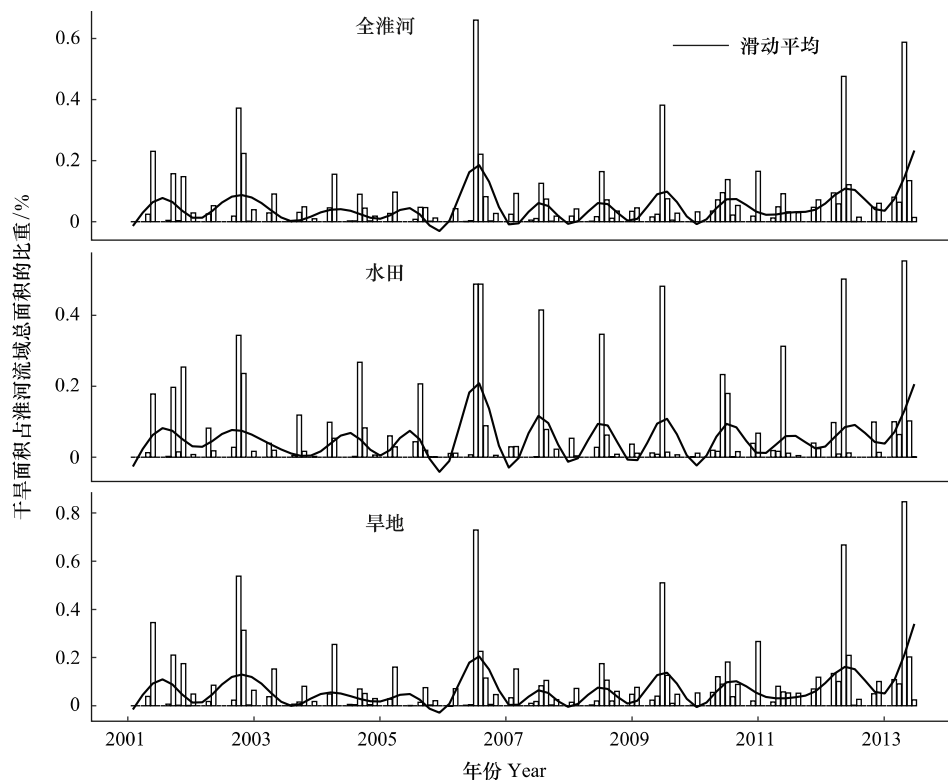


图 8 淮河流域耕地干旱面积变化趋势图

Fig.8 Trend of dimension of drought area in Huai River Basin

<http://www.ecologica.cn>

2005 年, 河南受旱面积最大的年份为 2003 年和 2010 年。从月份来看, 淮河流域四个区域受旱面积较大的月份均为 5 月、7—9 月, 其中山东、安徽、河南区域受旱面积最高的月份为 9 月, 5 月次之, 而江苏受旱面积最大的月份为 9 月, 8 月次之。

从图 8 可知, 淮河流域耕地、水田与旱地的干旱变化趋势基本一致, 同时也与分省的干旱变化趋势相同。其中 4—5 月、7—9 月受旱面积较大, 受旱面积较大的年份均为 2003 年、2006 年和 2010 年。但是淮河流域的旱地受旱面积比重大于水田受旱面积比重, 水田的干旱发生频率均低于 0.2, 而旱地的干旱发生频率最高达 0.8, 干旱发生频率超过 0.2 的有 7 次之多。

3.2 淮河流域干旱月尺度时空特征研究

图 9—图 11 是根据综合遥感干旱监测模型划分标准, 基于遥感数据像元统计分析, 得到的月尺度的不同干旱等级时空分布图。从月干旱频率来看, 4—5 月、7—9 月的受旱频率相对较高, 这与大范围干旱发生的月份相似。其中轻旱发生频率主要分布在淮河流域中部, 在 4—5 月、7—9 月发生频率最大(图 9)。中旱发生频率高的部分与轻旱相似, 但是范围和频率都有所减少(图 10)。重旱的发生频率主要集中在 4 月和 8—9 月(图 11), 与轻旱发生频率较高的月份相似, 但分布范围大体上随月份从中西部向中东部变化。而从淮河流域多年平均干旱频率及分布来看(图 12), 轻旱发生的频率明显高于中旱和重旱, 最高值为 0.59, 集中在河南、江苏部分、山东地区, 中旱发生的区域主要在江苏西部和河南西北部, 而淮河流域的重旱发生的频率明显低于轻旱和中旱, 重旱平均发生频率仅为 0.03。

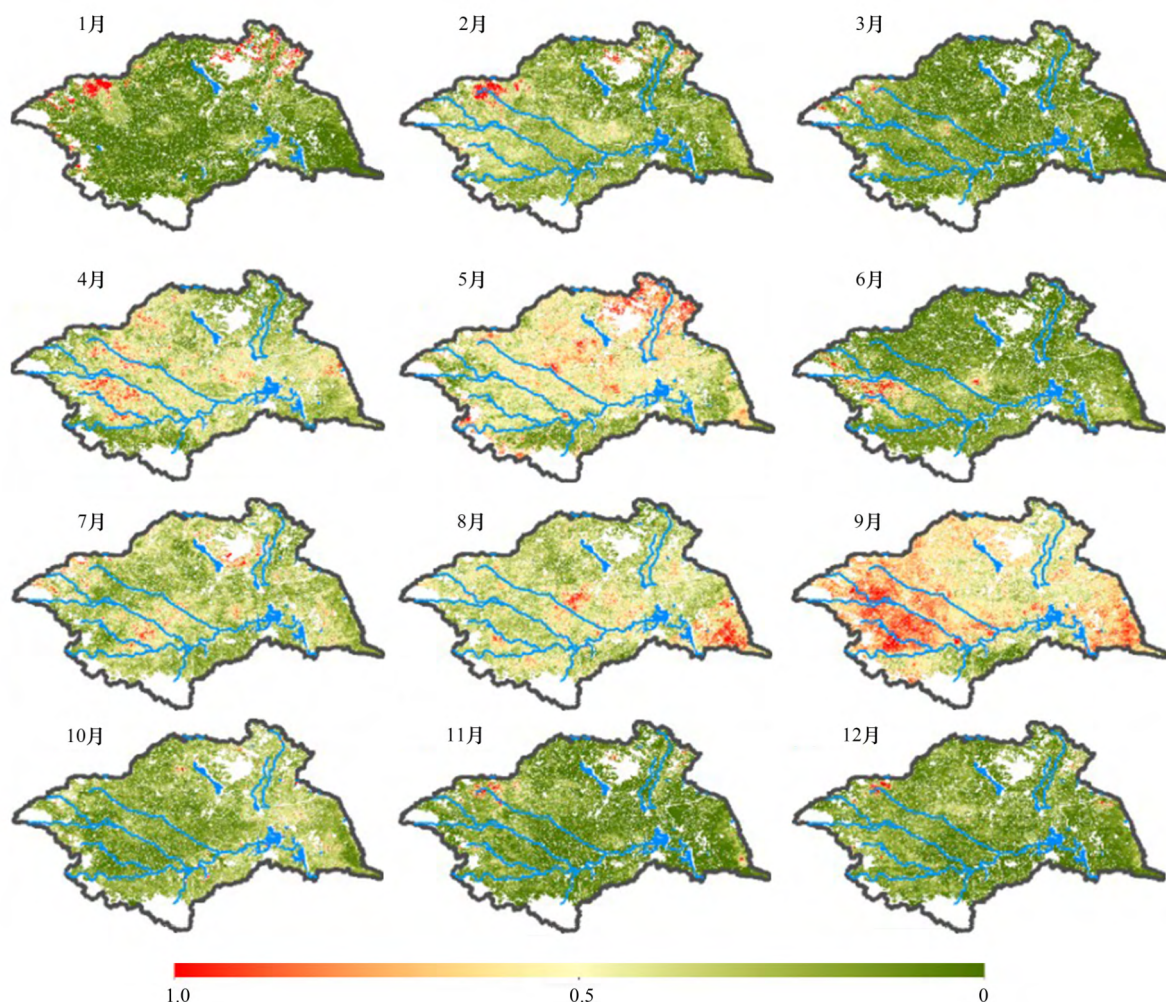


图 9 淮河流域 1—12 月轻旱频率

Fig.9 Frequency of mild drought in the Huaihe River Basin from January to December

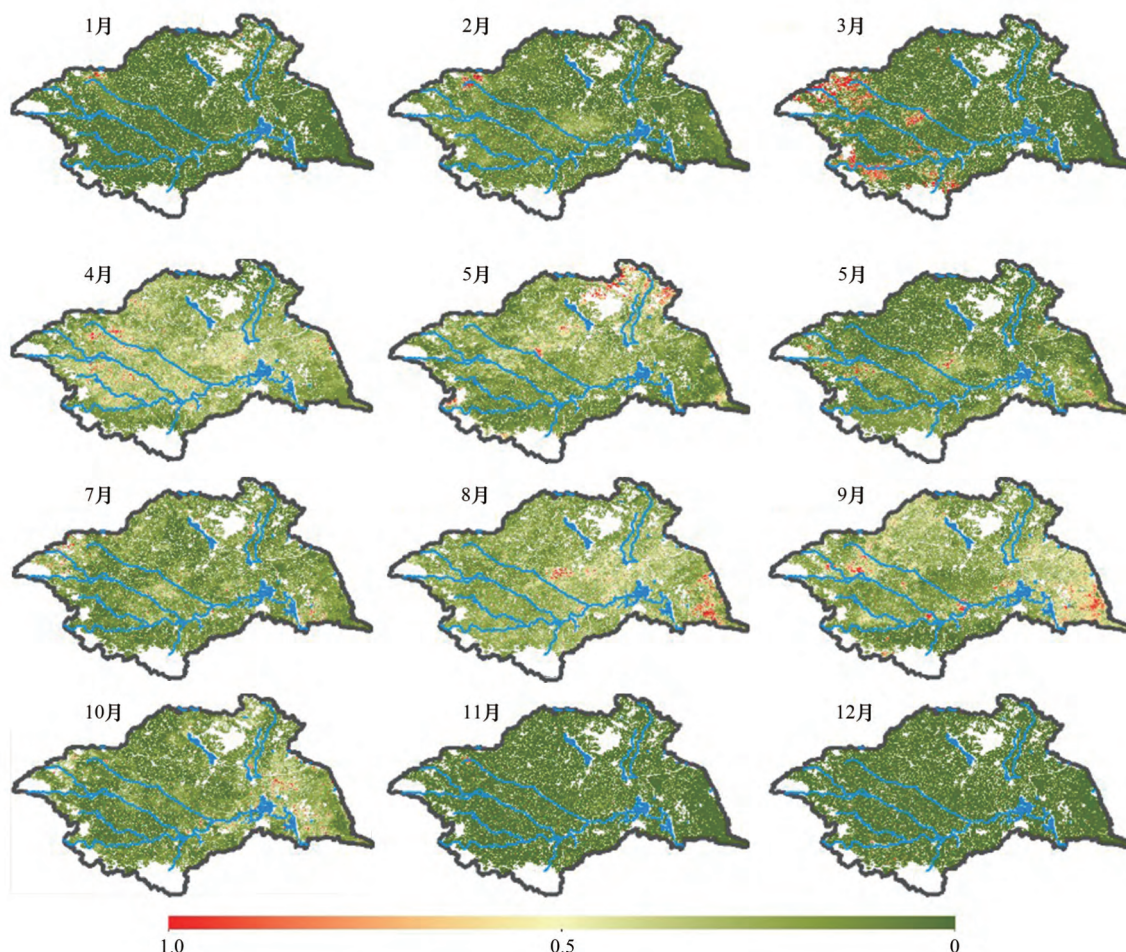


图 10 淮河流域 1—12 月中旱频率

Fig.10 Frequency of moderate drought in the Huaihe Basin from January to December

3.3 基于综合遥感干旱监测模型的淮河流域干旱时空特征分析

图 13 是在 90% 的显著性水平下的 Sen 趋势度图 结合《淮河流域农作物旱涝灾害损失精细化评估》^[38] 和图 13 淮河流域的主要作物为冬小麦、夏玉米和一季稻。冬小麦的生长期是在 10 月中旬到次年的 5 月下旬, 由图 13 可知 11—12 月和 3—7 月以负值为主, 3—4 月份是冬小麦的生长关键期(拔节至抽穗期) 这个时段干旱的加剧对冬小麦的产量影响较大, 从空间分布来看 3—7 月干旱的加剧主要集中在淮河流域的中西部, 这也与前面的淮河流域分省中安徽与河南干旱面积比重较高的原因之一。对于夏玉米来说, 生长期是 6 月到 9 月, 图 13 可知 6—7 月淮河流域中部和东部有大范围下降的区域, 夏玉米生长关键期为 7 月中旬到 8 月份, 并且夏季温度较高, 因此需要对夏玉米的生长关键期进行重点观测。水稻的生长期 5 月上旬到 10 月, 生长关键期为 7—8 月(拔节抽穗期)。从图 13 看出 7 月和 9 月在淮河流域的水稻种植区(南部和沿淮区域) 有下降的趋势, 干旱的强度将加剧, 在水稻的需水关键期重点监测沿淮地区。

4 结论

本研究基于气象数据、土壤墒情数据和遥感数据, 综合了大气-植物-土壤相互作用所涉及的多元成因, 构建了一个适用于淮河流域的综合遥感干旱监测模型, 探讨淮河流域干旱时空演变规律, 具体结论如下:

(1) 植被绿度变化、植物生长状态、冠层温度变化、作物水分变化等因子构建综合遥感干旱监测模型, 利用土壤墒情和典型年份以及统计年鉴中的旱灾成灾面积、受灾面积对综合遥感干旱监测模型的适用性进行评

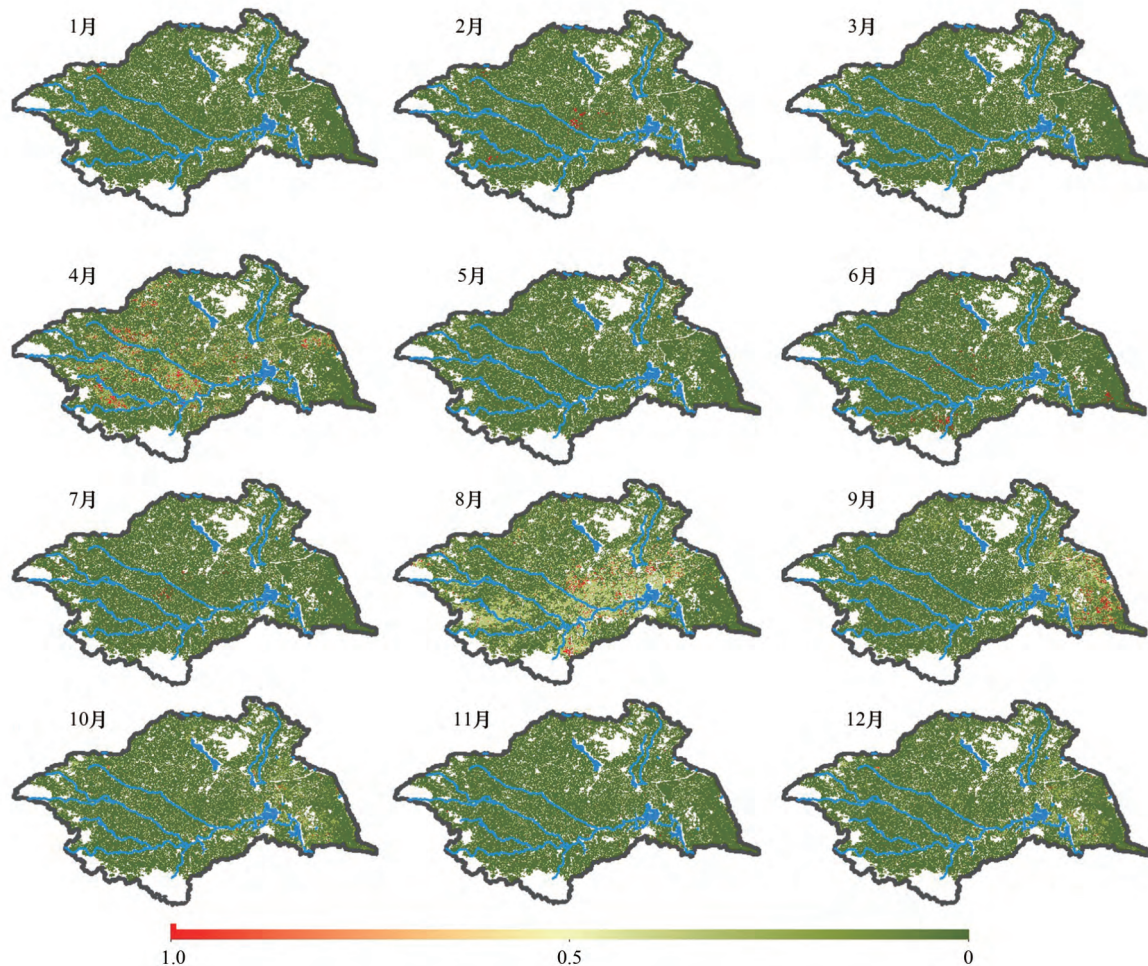


图 11 淮河流域 1—12 月重旱频率

Fig.11 Frequency of extreme drought in the Huaihe River Basin from January to December

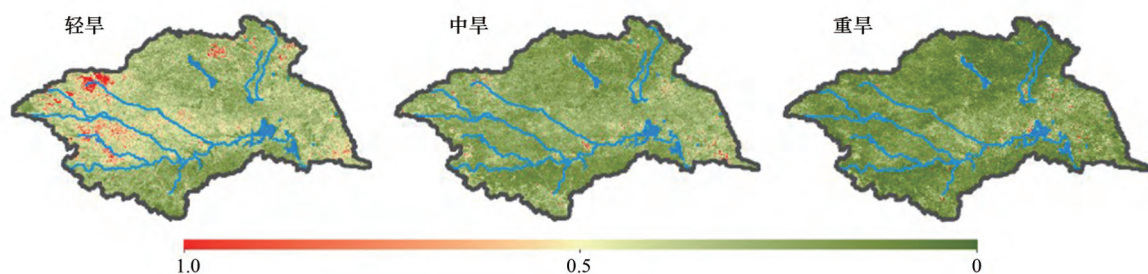


图 12 淮河流域干旱频率分布图

Fig.12 Frequency of drought in the Huaihe River Basin

价,通过了 $P<0.01$ 的显著性检验,可综合反映出农业和气象干旱的复合信息。

(2) 综合遥感干旱监测模型所呈现出来的干旱面积和干旱频率大都集中在 4—5 月和 7—9 月。淮河流域干旱面积和干旱频率大都集中在 4—5 月和 7—9 月,9 月份受旱面积最大。河南省是淮河流域受旱频率最高,其干旱面积占淮河流域多年平均干旱面积比重最大(38%),其次是安徽的 22%。淮河流域旱地和水田发生干旱频率与淮河流域整体一致,但是旱地发生干旱频率高于水田发生干旱频率,淮河流域的安徽、河南部分都是小麦种植区域,所以应该加强对这部分地区的干旱监测及预警。

<http://www.ecologica.cn>

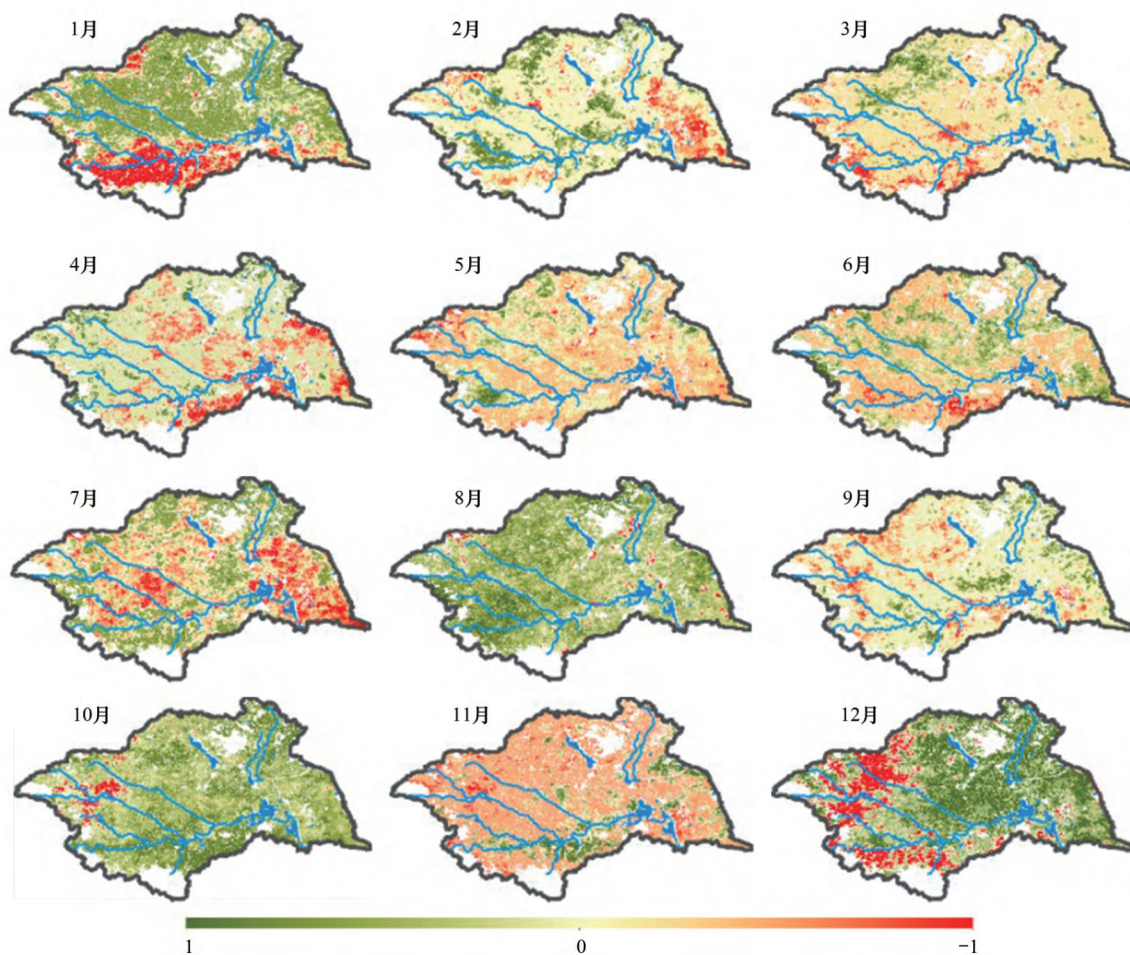


图 13 淮河流域 Sen 趋势度图

Fig.13 Sen's slope of the Huaihe River Basin

(3) 基于综合遥感干旱监测模型对淮河流域干旱演变分析得知, 淮河流域 2 月、3 月和 5 月干旱会有减弱趋势, 而 1 月、4 月和 6 月则有增强趋势。淮河流域小麦灌浆-成熟时期(4—6 月) 缺水对小麦粮食产量影响巨大, 结合淮河流域干旱趋势, 需加强 4 月份对淮河流域小麦的干旱监测。

参考文献(References):

- [1] Wang Y, Zhang Q, Singh V P. Spatiotemporal patterns of precipitation regimes in the Huai River basin, China, and possible relations with ENSO events. *Natural Hazards*, 2016, 82(3): 2167–2185.
- [2] 余敦先, 夏军, 张永勇, 杜鸿. 近 50 年来淮河流域极端降水的时空变化及统计特征. *地理学报*, 2011, 66(9): 1200–1210.
- [3] 杜云. 淮河流域农业干旱灾害风险评价研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [4] 刘可晶, 王文, 朱烨, 王慧敏. 淮河流域过去 60 年干旱趋势特征及其与极端降水的联系. *水利学报*, 2012, 43(10): 1179–1187.
- [5] 陈小凤, 李瑞, 胡军. 安徽省淮河流域旱灾成因分析及防治对策. *安徽农业科学*, 2013, 41(8): 3459–3462.
- [6] 谢五三, 王胜, 唐为安, 吴蓉, 戴娟. 干旱指数在淮河流域的适用性对比. *应用气象学报*, 2014, 25(2): 176–184.
- [7] 段莹, 王文, 蔡晓军. PDSI、SPEI 及 CI 指数在 2010/2011 年冬、春季江淮流域干旱过程的应用分析. *高原气象*, 2013, 32(4): 1126–1139.
- [8] 宋新山, 严登华, 王宇晖, 王苑. 基于 Markov 模型分析黄淮海东部地区 540 年来的旱涝演变特征. *水利学报*, 2013, 44(12): 1425–1432.
- [9] 杨传国, 陈喜, 张润润, 胡琪, 余钟波, 郝振纯, 林朝晖. 淮河流域近 500 年洪旱事件演变特征分析. *水科学进展*, 2014, 25(4): 503–510.
- [10] 郭冬冬, 郭树龙, 李彩霞, 周新国. 基于 SPI 的淮河流域旱涝时空分布特征研究. *灌溉排水学报*, 2014, 33(6): 117–121.

<http://www.ecologica.cn>

- [11] Zhang Q, Zheng Y J, Singh V P, Xiao M Z, Liu L. Entropy-based spatiotemporal patterns of precipitation regimes in the Huai River basin, China. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(5): 2335–2344.
- [12] Zhang Q, Wang Y, Singh V P, Gu X H, Kong D D, Xiao M Z. Impacts of ENSO and ENSO Modoki+A regimes on seasonal precipitation variations and possible underlying causes in the Huai River basin, China. *Journal of Hydrology*, 2016, 533: 308–319.
- [13] 刘宗元. 基于多源数据的西南地区综合干旱监测指数研究及其应用[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- [14] 杜灵通, 田庆久, 王磊, 黄彦, 南岭. 基于多源遥感数据的综合干旱监测模型构建. *农业工程学报*, 2014, 30(9): 126–132.
- [15] 李强子, 闫娜娜, 张飞飞, 常胜, 吴炳方. 2010 年春季西南地区干旱遥感监测及其影响评估. *地理学报*, 2010, 65(7): 771–780.
- [16] Shah R D, Mishra V. Development of an experimental near-real-time drought monitor for India. *Journal of Hydrometeorology*, 2015, 16(1): 327–345.
- [17] AghaKouchak A. A multivariate approach for persistence-based drought prediction: Application to the 2010–2011 East Africa drought. *Journal of Hydrology*, 2015, 526: 127–135.
- [18] Wan Z M, Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(4): 892–905.
- [19] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696–1718.
- [20] 牟伶俐. 农业旱情遥感监测指标的适应性与不确定性分析[D]. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2006.
- [21] Seo D J, Park C H, Park J H, Tateishi R. A search for the optimum combination of spatial resolution and vegetation indices // Proceedings of the IGARSS '98. Sensing and Managing the Environment. 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing. Symposium Proceedings. Seattle, WA, USA: IEEE, 1998: 1729–1731.
- [22] 陈维英, 肖乾广, 盛永伟. 距平植被指数在 1992 年特大干旱监测中的应用. *环境遥感*, 1994, 9(2): 106–112.
- [23] 刘良明. 基于 EOS MODIS 数据的遥感干旱预警模型研究[D]. 武汉: 武汉大学遥感信息工程学院, 2004.
- [24] 孙灏, 陈云浩, 孙洪泉. 典型农业干旱遥感监测指数的比较及分类体系. *农业工程学报*, 2012, 28(14): 147–154.
- [25] Xu K, Yang D W, Yang H B, Zhe L, Yue S. Spatio-temporal variation of drought in China during 1961–2012: a climatic perspective. *Journal of Hydrology*, 2015, 526: 253–264.
- [26] Jong R D, Bruin S D, Wit A D, Schaepman M E, Dent D. Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 692–702.
- [27] Alcaraz-Segura D, Liras E, Tabik S, Paruelo J, Cabello J. Evaluating the consistency of the 1982–1999 NDVI trends in the Iberian peninsula across four time-series derived from the AVHRR Sensor: LTDR, GIMMS, FASIR, and PAL-II. *Sensors*, 2010, 10(2): 1291–1314.
- [28] Hill M J, Donald G E. Estimating spatio-temporal patterns of agricultural productivity in fragmented landscapes using AVHRR NDVI time series. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(3): 367–384.
- [29] 李阿伦, 杨卫中, 卢娟. 区域墒情的空间分析方法与应用. *中国农学通报*, 2012, 28(21): 311–316.
- [30] 马瑞昆, 蹇家利, 贾秀领, 刘淑贞. 供水深度与冬小麦根系发育的关系. *干旱地区农业研究*, 1991, 3: 1–10.
- [31] 刘荣花, 朱自玺, 方文松, 邓天宏, 赵国强. 冬小麦根系分布规律. *生态学杂志*, 2008, 27(11): 2024–2027.
- [32] Panu U S, Sharma T C. Challenges in drought research: some perspectives and future directions Défis de la recherche sur les sécheresses: quelques perspectives et directions futures. *Hydrological Sciences Journal*, 2002, 47(S1): S19–S30.
- [33] Mannocchi F, Francesca T, Vergni L. Agricultural drought: indices, definition and analysis. IAHS-AISH Publication, 2004, 286: 246–254.
- [34] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 李双双, 刘焱序. 农业干旱监测研究进展与展望. *地理学报*, 2015, 70(11): 1835–1848.
- [35] Mishra A K, Singh V P. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 2010, 391(1/2): 202–216.
- [36] Hunt Jr E R, Rock B N. Detection of changes in leaf water content using Near- and Middle-Infrared Reflectances. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 30(1): 43–54.
- [37] Chen H P, Sun J Q. Changes in drought characteristics over China using the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 2015, 28(13): 5430–5447.
- [38] 马晓群, 马玉平, 葛道阔, 陈晓艺, 刘忠阳. 淮河流域农作物旱涝灾害损失精细化评估. 北京: 气象出版社, 2016: 62–63.