

史晓亮,陈 冲,尚 雨,等. 淮河流域植被净初级生产力与干旱的相关性分析[J]. 江苏农业科学,2020,48(3):255-261.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.03.046

# 淮河流域植被净初级生产力与干旱的相关性分析

史晓亮,陈 冲,尚 雨,张 娜

(西安科技大学测绘科学与技术学院,陕西西安 710054)

**摘要:**基于 CASA(Carnegie-Ames-Stanford approach)模型估算 2001—2016 年淮河流域植被净初级生产力,分析其时空变化特征,并结合降水距平百分率,探讨干旱对植被净初级生产力(net primary productivity,NPP)的影响。结果表明,2001—2016 年淮河流域年均 NPP 值呈现递减趋势,递减速率为  $-2.22 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ ;淮河流域年均 NPP 值空间分布差异明显,表现为河南南部和安徽南部地区植被 NPP 减少明显,而处于增长趋势的区域主要位于山东省和江苏省大部分地区;随着干旱影响范围的增加,淮河流域年均植被 NPP 呈降低趋势。干旱与植被 NPP 呈正相关的区域占整个流域总面积的 93.1%,两者呈明显正相关的地区横穿山东省中部和安徽省东北部。综合研究结果可知,淮河流域干旱对植被净初级生产力影响明显。

**关键词:**净初级生产力(NPP);气象干旱;MODIS NDVI;CASA 模型;淮河流域;相关性

**中图分类号:** TP79;S127 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)03-0255-07

植被净初级生产力(net primary productivity,NPP)是指植物在单位时间、单位面积上由光合作用产生的有机物质总量除去自养呼吸后的剩余部分,是生产者用于生长、发育、繁殖的能量值,也是生态系统中其他生物成员生存和繁衍的物质基础。NPP 不仅可以反映植物固定和转化光合产物的效率,也是评价陆地生态系统可持续发展的重要因子<sup>[1]</sup>,通常将其作为评估生态系统质量的主要指标。

干旱是指某地区在一定时期内的降水量与蒸发量不平衡,造成区域内水分减少并短缺的现象<sup>[2]</sup>。目前,在气候变化和人类活动的双重影响下,世界范围内的干旱总体呈现出频发、多发、连发和并发态势。干旱程度不仅直接影响植被的光合作用效果,也可通过其他干扰形式间接对生态系统结构和功能产生影响<sup>[3]</sup>,是植被净初级生产力的重要影响因素之一。赵志平等研究表明,我国西南地区受干旱影响,植被净初级生产力下降,造成的碳损失约占我国总碳汇的 7.91%<sup>[4]</sup>。Lei 等基于标准化降水指数(SPI)和生物地球化学模型(BIOME-BGC)研究干旱对内蒙古草原 NPP 的影响,发现草

地 NPP 异常情况和干旱程度存在较强的相关关系<sup>[5]</sup>。赵林等研究表明,湖北省气象干旱使森林植被净初级生产力显著下降<sup>[6]</sup>。杨思遥等基于标准化降水蒸散指数(SPEI)研究华北地区植被变化与干旱指数多尺度的响应,发现干旱对植被生长变化影响明显<sup>[7]</sup>。刘世梁等研究表明,干旱对云南省植被覆盖变化影响较明显,在不同季节的相关性程度不同,其中冬季两者间的相关性最强<sup>[8]</sup>。张艳芳等研究发现,黄河源区干旱程度的下降可以促进植被覆盖的增加<sup>[9]</sup>。因此,准确评价典型区域干旱特征及其对植被净初级生产力的影响,能够直观地揭示气候和环境条件变化对陆地生态系统变化的影响程度,对干旱的综合应对和生态环境可持续发展具有重要意义<sup>[7]</sup>。

淮河流域地处中国东亚季风区,历史上旱灾频繁,具有典型的气象水文灾害代表性<sup>[10]</sup>。但目前有关淮河流域干旱对植被净初级生产力的影响研究鲜有报道。因此,本研究综合利用长时间序列 MODIS NDVI 遥感影像和气象数据,基于 CASA(Carnegie-Ames-Stanford approach)模型估算淮河流域 2001—2016 年植被 NPP,分析 NPP 的时空分布特征;并选择降水距平百分率作为干旱指标,分析流域干旱年际变化和空间趋势变化特征,进而探讨近 16 年来干旱对植被 NPP 的影响,以期为淮河流域生态环境保护和可持续发展提供科学参考。

收稿日期:2018-11-20

基金项目:国家自然科学基金(编号:51409204)。

作者简介:史晓亮(1985—),男,陕西宝鸡人,博士,副教授,主要从事资源环境遥感研究。E-mail:s\_xiaoliang@126.com。

通信作者:陈 冲,硕士研究生,主要从事遥感与地理信息系统应用研究。E-mail:1224732710@qq.com。

## 1 研究区概况

淮河流域地处我国东部,地理位置位于  $30^{\circ}55' \sim 36^{\circ}36'N$ ,  $111^{\circ}55' \sim 121^{\circ}25'E$ 。行政区涉及安徽、江苏、河南、湖北、山东 5 省,总面积约 27 万  $km^2$ ,其中淮河水系约 19 万  $km^2$ ,沂沭泗水系约 8 万  $km^2$ 。

淮河流域兼具南北方气候的部分特征,北部属暖温带半湿润区,南部为亚热带季风气候。流域年均气温  $11 \sim 16^{\circ}C$ ,由北向南递增。多年平均降水量约为 883 mm,主要集中在汛期(6—9 月),占全年降水量的 50% ~ 80%,空间上大致呈现由南向北递减、同纬度山区大于平原分布状况。流域自然植被分布呈现明显的地带性,淮南丘陵地区和淮阳山脉南部多为亚热带性的落叶阔叶林,并夹杂有天然生长的常绿阔叶植物,平原地带以耕作植被为主。淮河流域特殊的气候特征,导致流域内旱灾频发,多为春旱或冬春连旱,且近年来部分地区干旱面积呈现出波动性增加的趋势。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源与预处理

本研究所采用的植被指数来源于美国国家航空航天局(NASA)的 MODIS NDVI 数据(<https://modis.gsfc.nasa.gov/>),选择时间序列为 2001—2016 年的 MOD13A3 最大月合成数据,空间分辨率为 1 km。使用 MRT(MODIS reprojection tools)工具完成对数据的镶嵌、投影和格式转换等预处理,并利用淮河流域边界数据,对影像进行掩膜处理,最终获取淮河流域 2001—2016 年的 MODIS NDVI 栅格数据集。

气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>),共收集了淮河流域 30 个标准气象站点 2001—2016 年的月均气温、降水和逐日日照时数资料(图 1)。太阳辐射基于逐日日照时数估算得到<sup>[11]</sup>。基于 ArcGIS 的空间分析模块,采用反距离权重法(IDW)对处理后的气象数据进行空间插值,获取与 NDVI 数据投影相同、像元大小

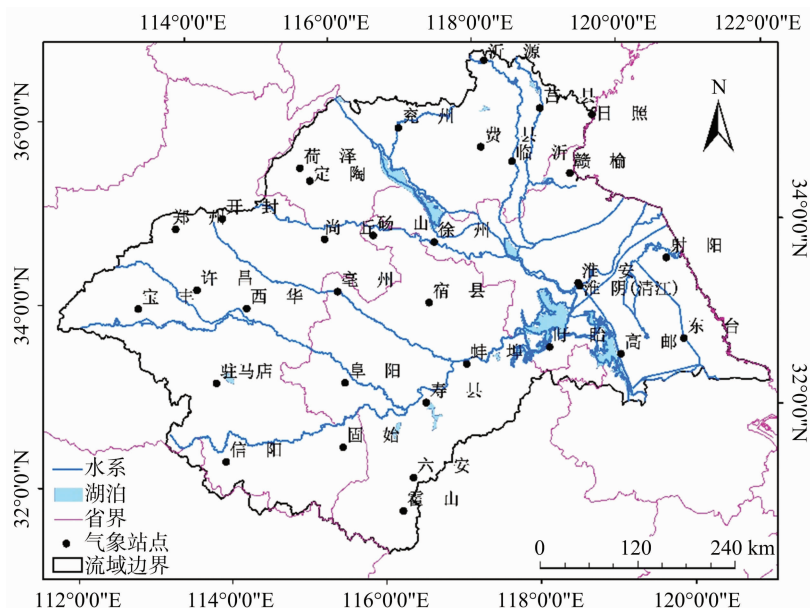


图1 淮河流域的位置和气象站点分布

一致的逐月太阳辐射、降水量和平均气温栅格数据。

### 2.2 研究方法

**2.2.1 NPP 估算模型** 本研究采用 CASA 模型对淮河流域植被净初级生产力(NPP)进行估算。该模型主要由植被吸收的光合有效辐射(APAR)和光能利用率( $\varepsilon$ )2 个参数确定。计算公式如下<sup>[12]</sup>:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t). \quad (1)$$

式中: $x$  表示像元所在空间位置, $t$  表示时间(月),

$APAR(x, t)$  表示像元  $x$  在  $t$  月吸收的光合有效辐射( $MJ/m^2$ ),主要取决于太阳总辐射和植被自身的特征; $\varepsilon(x, t)$  表示像元  $x$  在  $t$  月的实际光能利用率( $g\ C/MJ$ )。植被吸收的光合有效辐射(APAR)计算公式如下:

$$APAR = 0.5 \times SOL(x, t) \times FPAR(x, t). \quad (2)$$

式中:常数 0.5 表示植被可利用的太阳有效辐射(波长为  $0.37 \sim 0.71\ \mu m$ ) 占太阳总辐射的比例;

$SOL(x, t)$  表示像元  $x$  在  $t$  月的太阳总辐射量 ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ );  $FPAR(x, t)$  表示植被层对入射光合有效辐射的吸收比例, 其计算公式如下:

$$FPAR(x, t) = \min\left[\frac{SR - SR_{\min}}{SR_{\max} - SR_{\min}}, 0.95\right]。 \quad (3)$$

式中:  $SR_{\min}$  取值为 1.08;  $SR_{\max}$  的大小与植被类型有关(表 1);  $SR(x, t)$  则由 NDVI 数据计算得到:

$$SR(x, t) = \left[\frac{1 + NDVI(x, t)}{1 - NDVI(x, t)}\right]。 \quad (4)$$

光能利用率是植物通过光合作用固定太阳能, 将所截获的能量转化为有机物干物质的效率, 主要受气温和降水的影响, 计算公式如下<sup>[12]</sup>:

$$\varepsilon(x, t) = T_{\varepsilon 1}(x, t) \times T_{\varepsilon 2}(x, t) \times W_{\varepsilon}(x, t) \times \varepsilon_{\max}。 \quad (5)$$

式中:  $T_{\varepsilon 1}(x, t)$ 、 $T_{\varepsilon 2}(x, t)$  分别表示高温、低温对植物光能利用率的胁迫作用系数;  $W_{\varepsilon}(x, t)$  表示水分胁迫对植被光能利用率的影响系数;  $\varepsilon_{\max}$  表示理想状态下植被的最大光能利用率。本研究参考朱文泉等的研究结果<sup>[12-13]</sup>确定  $SR_{\max}$ 、 $\varepsilon_{\max}$  的取值(表 1)。

表 1 各植被类型在理想条件下的  $SR_{\max}$ 、 $\varepsilon_{\max}$  参数

植被类型	$SR_{\max}$	$\varepsilon_{\max}$
常绿针叶林	4.67	0.389
落叶阔叶林	6.63	0.692
灌丛	4.49	0.429
耕地	4.46	0.542
草地	4.46	0.542
其他	4.46	0.542

2.2.2 干旱评价指标 降水距平百分率可以反映区域某时段降水与常年同期平均状态的偏离程度, 本研究选择将其作为干旱评价指标来表示干旱的发生程度。计算公式如下<sup>[14]</sup>:

$$Pa = \frac{p - \bar{p}}{\bar{p}} \times 100\%。 \quad (6)$$

式中:  $Pa$  为降水距平百分率(%);  $p$  为某一特定年某一时段(如月、季度)的降水量;  $\bar{p}$  为某时段同期气候平均降水量。本研究采用年尺度降水距平百分率作为干旱等级标准(表 2)。

2.2.3 数据分析方法 在像元尺度利用一元线性回归方法分析淮河流域 NPP 的变化趋势, 计算公式如下<sup>[16]</sup>:

$$Slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times NPP_i) - (\sum_{i=1}^n i) (\sum_{i=1}^n NPP_i)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}。 \quad (7)$$

表 2 降水距平百分率干旱等级标准<sup>[15]</sup>

等级	干旱程度	年尺度降水距平百分率 (%)
1	无旱	$-15 < Pa$
2	轻旱	$-30 < Pa \leq -15$
3	中旱	$-40 < Pa \leq -30$
4	重旱	$-45 < Pa \leq -40$
5	特旱	$Pa \leq -45$

式中:  $i$  为年序号;  $n$  表示年份, 此处为 16;  $NPP_i$  为第  $i$  年的 NPP 值。当  $Slope > 0$  时, 表明随 NPP 呈增加趋势; 反之, 则表示下降。

此外, 基于像元尺度对淮河流域 NPP 与降水距平百分率进行了相关分析, 采用相关系数反映流域 NPP 对于干旱的响应特征, 计算公式如下<sup>[17]</sup>:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}。 \quad (8)$$

式中:  $R$  为两变量的相关系数;  $x_i$  为第  $i$  年的植被净初级生产力;  $Y_i$  为第  $i$  年的降水距平百分率。

### 3 结果与分析

#### 3.1 NPP 反演精度验证

由于植被净初级生产力的估算受到诸多因素的限制, 导致流域尺度 NPP 模拟结果与实际值之间存在一定的差距。对于区域尺度植被 NPP 的精度评价一般采用 2 种方法: 一是与实测数据对比, 二是与其他模型的估算结果进行对比。由于实测数据难以获取, 本研究将淮河流域植被 NPP 估算结果与其他不同模型模拟值及部分实测数据进行对比, 判断其可靠性。由表 3 可见, 本研究估算的各种植被类型的 NPP 年均估算值均在实测范围之内, 且与其他模型反映的趋势较为一致, 虽有稍许偏差, 但考虑到数据获取的时空差异, 可以认为本研究估算的植被 NPP 基本可靠。

#### 3.2 淮河流域 NPP 时空变化特征

3.2.1 年际变化 从图 2 可见, 2001—2016 年淮河流域 NPP 年际波动较大, 整体呈递减趋势, 递减速率为  $-2.22 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ 。其中, 2001—2009 年间淮河流域 NPP 呈波动性增长, 并在 2009 年达到 16 年间最大值, 为  $561.48 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ , 高于多年均值 ( $454.40 \text{ g C}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$ ) 23.6%; 而 2009—2010 年 NPP 值骤降, 并持续下降至 2011 年, 达到 16 年间最小值, 即  $225.06 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ , 低于多年均值 50.5%; 2011—2012 年的 NPP 值增长迅速, 达到

表 3 NPP 年均估算值与实测值的比较

方法	不同植被类型 NPP 年均估算值与实测值[ g C/(m <sup>2</sup> ·年) ]					时期	区域
	常绿针叶林	落叶阔叶林	灌丛	草地	耕地		
本研究	371	547	385	371	464	2001—2016 年	淮河流域
CASA 模型 <sup>[12]</sup>	354	304	283	—	216	1997 年	全国
生态系统过程机理性模型(CEVSA) <sup>[18]</sup>	486	624	—	348	606	1981—1998 年	中国大陆
实测值	179 ~ 806 <sup>[12]</sup> , 160 ~ 1 500 <sup>[19]</sup>	114 ~ 1 669 <sup>[12]</sup> , 250 ~ 2 500 <sup>[19]</sup>	4 ~ 1 200 <sup>[19]</sup>	100 ~ 727 <sup>[19]</sup>	239 ~ 760 <sup>[12]</sup>	—	中国大陆

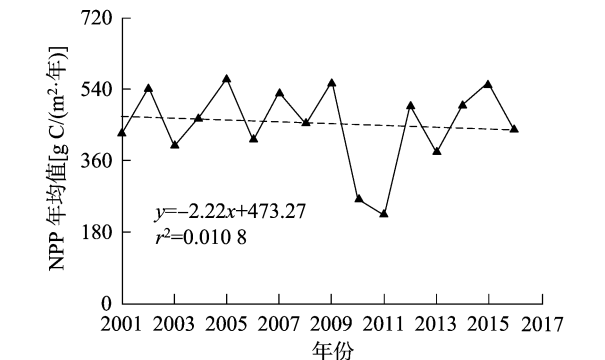


图2 2001—2016年淮河流域年 NPP 变化趋势

279.42 g C/(m<sup>2</sup>·年), 同比其他年份的年均变化值为最大。

3.2.2 空间分布特征 从图 3 可以看出,2001—2016 年淮河流域年均 NPP 受到气候、地形、植被类型和人类活动等多种因素的综合影响,流域内 NPP 空间分布差异明显,总体为平原高、山地低。平均 NPP 在 200.0 g C/(m<sup>2</sup>·年) 及以下的区域主要分布在江苏省南部及部分东北部、安徽省中部和河南北部部分区域,约占整个淮河流域面积的 2.3%。而平均 NPP 为 >540.0 ~ 844.9 g C/(m<sup>2</sup>·年) 的区域主要分布于安徽省南部、河南省北部,在其他区域也有零星分布,部分沿长江、淮河方向发散,其面积仅占流域总面积的 6.1% 左右。

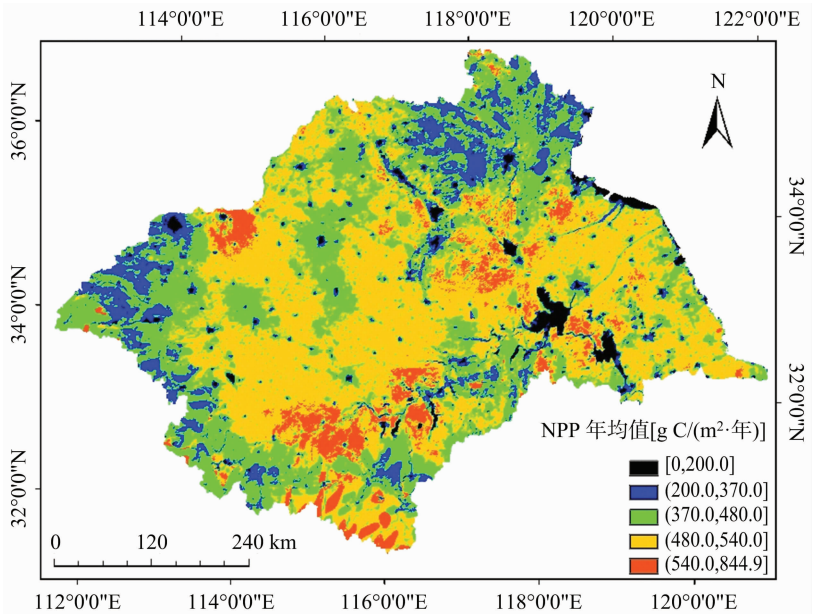


图3 2001—2016年淮河流域年均 NPP 空间分布特征

3.2.3 变化趋势的空间分布 本研究进一步采用一元线性回归方法分析了 2001—2016 年淮河流域 NPP 的变化趋势。由图 4 可以看出,近 16 年来淮河流域 NPP 在空间上发生了不同程度的变化。NPP 呈减小趋势的区域约占流域总面积的 60.5%,其中明显减小的区域主要集中在河南省北部、安徽省与

河南省东南部的交界处,约占退化区域的 3.5%;而 NPP 呈增加趋势的区域主要集中在山东省、江苏省、河南省中部及南部和安徽省的北部及西部,约占淮河流域总面积的 39.5%,其中增加趋势明显的区域主要位于山东省北部和中部部分地区,约占流域总面积的 1.1%。这些地区主要是淮河流域的水



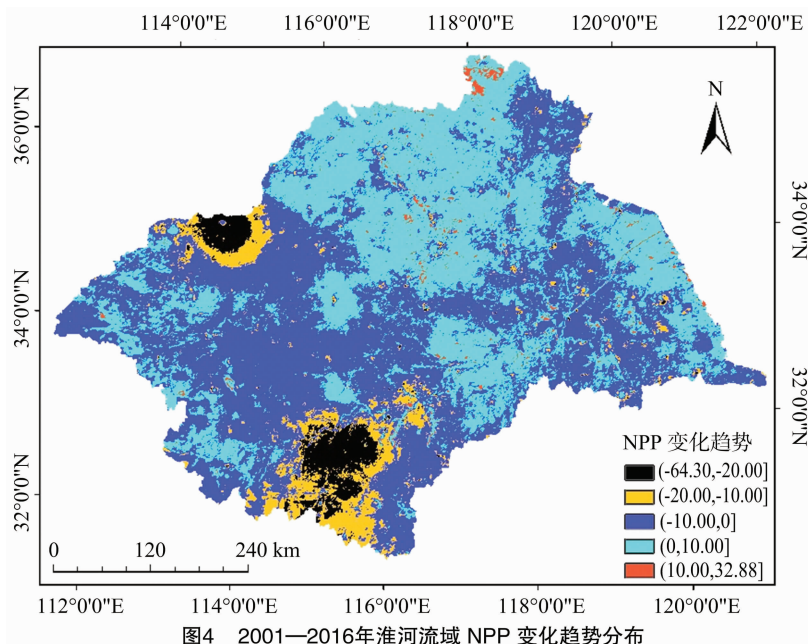


图4 2001—2016年淮河流域 NPP 变化趋势分布

系分布集中区,包括淮河、洪泽湖、高邮湖三大水源和涡河、颍河、沙河 3 个支流。

### 3.3 淮河流域干旱变化特征

**3.3.1 干旱影响范围年际变化特征** 利用降水距平百分率计算淮河流域 2001—2016 年历年干旱率,以此反映流域干旱影响范围的年际变化特征。从图 5 可以看出,16 年间淮河流域干旱率年际变化较大,平均干旱率约为 29%,2001—2002 年、2013—2014 年连续出现大面积干旱;16 年间干旱面积覆盖率达到 80% 以上的有 3 年,其中 2011 年流域内干旱面积覆盖率最大,为 86.1%;2013 年次之,为 85.1%;2014 年为 80.7%;2001 年和 2002 年的干旱面积覆盖率较大,分别为 69.0%、61.1%。从年际变化过程来看,淮河流域 2001—2010 年干旱发生范围呈波动减小趋势;在此之后,研究区干旱范围又呈波动增大的趋势。总体上,淮河流域干旱影响范围呈现一定增加趋势,旱情不断加剧。

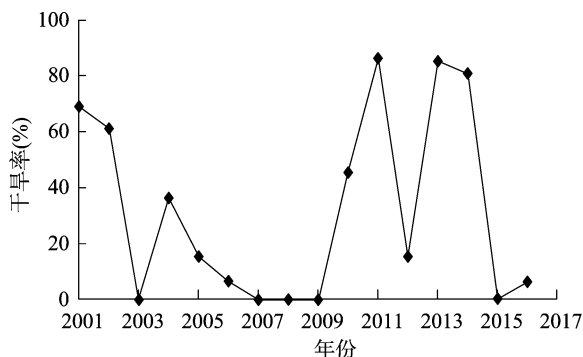


图5 2001—2016年淮河流域干旱率变化特征

**3.3.2 干旱空间分布特征** 本研究进一步分析了 2001—2016 年淮河流域各气象站点干旱发生情况,以反映干旱的空间分布特征。从表 4 可以看出,气象站点发生干旱的平均频率为 25.55%,其中发生特大干旱、严重干旱、中度干旱、轻度干旱的平均频率分别为 1.8%、1.6%、6.8%、15.4%;日照、开封发生干旱的频率最高(37.5%),定陶、费县、信阳、射阳、寿县、固始、高邮发生干旱的频率最低(18.8%)。根据不同干旱等级出现的频数分析得出:特大干旱易发地区为沂源、定陶、兖州、费县、郑州、信阳、寿县,频率均为 6.3%;严重干旱易发地区为莒县、开封、固始、射阳、淮安、盱眙,频率均为 6.3%;中度干旱易发地区为定陶、日照、驻马店、盱眙、射阳、固始、蚌埠、高邮、东台,频率均为 12.5%;轻度干旱频数最高的地区为开封,频率为 31.3%,兖州、日照、许昌、宝丰、商丘、赣榆、淮安次之,频率均为 25.0%。

### 3.4 淮河流域干旱与 NPP 间的相关性分析

结合 2001—2016 年淮河流域 NPP 与干旱影响范围的年际变化情况可以得出,研究区干旱率在 60% 以上的年份 NPP 均值约为  $393.1 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ ,干旱率在 20% ~ 40% 之间的年份 NPP 均值约为  $474.7 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ ,而干旱率低于 20% 的年际 NPP 均值约为  $493.0 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ 。结果表明淮河流域干旱率越高,影响范围越大,植被 NPP 越小。随着干旱程度的加剧,植被 NPP 随之降低。

本研究进一步利用逐像元的相关分析方法,计

表 4 2001—2016 年淮河流域各气象站点干旱情况

站点	全部干旱		特大干旱		严重干旱		中度干旱		轻度干旱	
	频数	频率(%)	频数	频率(%)	频数	频率(%)	频数	频率(%)	频数	频率(%)
沂源	5	31.3	1	6.3	0	0	1	6.3	3	18.8
定陶	3	18.8	1	6.3	0	0	2	12.5	0	0
兖州	5	31.3	1	6.3	0	0	0	0	4	25.0
费县	3	18.8	1	6.3	0	0	1	6.3	1	6.3
莒县	4	25.0	0	0	1	6.3	1	6.3	2	12.5
日照	6	37.5	0	0	0	0	2	12.5	4	25.0
郑州	4	25.0	1	6.3	0	0	1	6.3	2	12.5
许昌	5	31.3	0	0	0	0	1	6.3	4	25.0
开封	6	37.5	0	0	1	6.3	0	0	5	31.3
宝丰	4	25.0	0	0	0	0	0	0	4	25.0
西华	2	12.5	0	0	0	0	0	0	2	12.5
驻马店	5	31.3	0	0	0	0	2	12.5	3	18.8
信阳	3	18.8	1	6.3	0	0	1	6.3	1	6.3
商丘	4	25.0	0	0	0	0	0	0	4	25.0
徐州	4	25.0	0	0	0	0	1	6.3	3	18.8
赣榆	4	25.0	0	0	0	0	0	0	4	25.0
盱眙	4	25.0	0	0	1	6.3	2	12.5	1	6.3
淮安	5	31.3	0	0	1	6.3	0	0	4	25.0
射阳	3	18.8	0	0	1	6.3	2	12.5	0	0
固始	3	18.8	0	0	1	6.3	2	12.5	0	0
寿县	3	18.8	1	6.3	0	0	1	6.3	1	6.3
蚌埠	5	31.3	0	0	0	0	2	12.5	3	18.8
高邮	3	18.8	0	0	0	0	2	12.5	1	6.3
东台	5	31.3	0	0	0	0	2	12.5	3	18.8

算 2001—2016 年淮河流域 NPP 与降水距平百分率的相关系数,从而在空间尺度分析干旱对植被 NPP 的影响。从图 6 可以看出,干旱与 NPP 正相关的区域占整个流域总面积的 93.1%,表明在流域大部分地区,随着降水距平百分率减小,干旱程度加剧,植被 NPP 将会有所降低,因此,干旱将会对流域植被

NPP 产生影响。其中正相关系数在 0.50 以上和处于 >0.30~0.50 之间的区域主要集中在江苏省中部和安徽省东部及部分南部地区,<0.30 及以下的地区主要集中在山东省、安徽省、河南省西南部;而负相关的区域仅占流域面积的 6.9%,其中负相关系数处于 >-0.30~0 之间的区域主要分布在河南

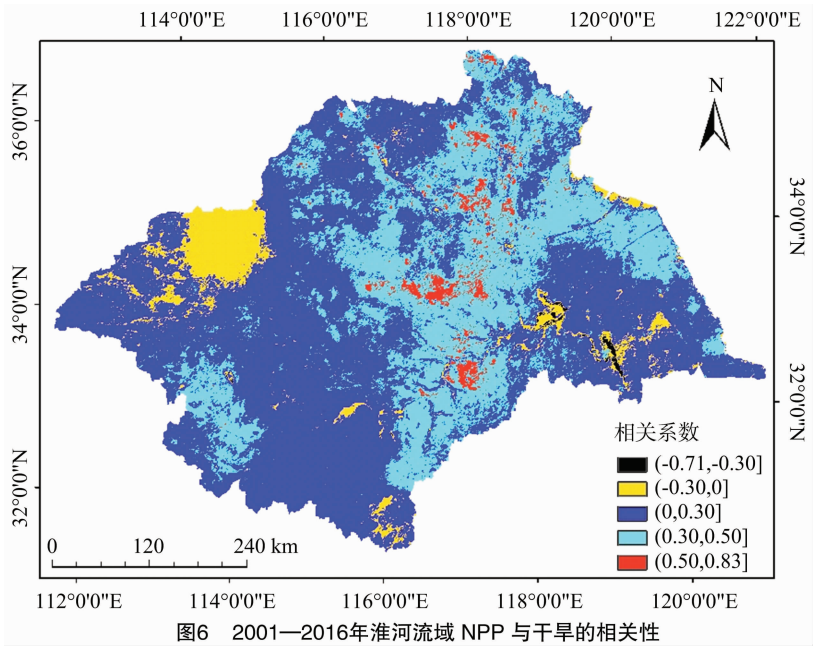


图6 2001—2016年淮河流域 NPP 与干旱的相关性

省北部、安徽省南部部分地区、江苏省南部和北部边界处部分地区,在  $-0.71 \sim -0.30$  之间的负相关性较强地区位于江苏省南部极少部分地区。结合图 4 可以看出,处于正相关的地区,植被的净初级生产力大部分处于增长趋势;而负相关地区的植被净初级生产力大部分处于退化趋势。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

通过对 2001—2016 年淮河流域的 NPP 时空特征和降水距平百分率的相关性分析发现,干旱强度和干旱范围均对流域内植被净初级生产力有明显影响,但由于植被和气候之间的相关因素较多,且降水对植被生长的影响存在不同程度的时间滞后性。前期的气候状况对植被生长具有累积效应,并且植被对气候因子的响应有明显的空间差异性<sup>[20]</sup>。因此,有必要对植被的滞后效应进行讨论,应选取合适的滞后时间进一步深化气候—植被之间的理解和其他方面的研究。

此外,本研究结合降水距平百分率,从年尺度上对植被的净初级生产力进行估算分析,尚未综合考虑其他因素的影响,主要包括气温、太阳辐射、植被类型、植被的空间分布等对流域内 NPP 的综合作用。如何在自然灾害和恶劣环境下识别不同因子对不同类型植被生长情况的影响程度,对研究区域的生态文明建设更具指导意义。

### 4.2 结论

本研究利用 2001—2016 年长时间序列遥感和气象数据,在基于 CASA 模型估算淮河流域 NPP 的基础上,分析了淮河流域 NPP 的时空变化特征,以及与干旱的相关性。取得以下结论:(1)淮河流域 2001—2016 年均 NPP 为  $454.40 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ ,整体 NPP 值呈现波动性递减趋势,递减速率为  $-2.22 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ 。(2)流域内 NPP 分布空间差异较大,呈现高低相间的特点。从植被 NPP 变化趋势的空间分布来看,淮河流域内呈现退化趋势的区域占 60.5%,3.5% 的区域明显退化;NPP 增加的区域占总面积的 39.5%。淮河流域的植被生长状况呈现整体在退化,局部地区有所改善的特征。(3)随着干旱程度加剧,淮河流域植被 NPP 呈降低趋势。在像元尺度干旱与植被 NPP 的相关性研究同样表明,正相关的区域占整个流域总面积的 93.1%,淮河流域干旱对植被净初级生产力影响明显。

## 参考文献:

- [1]周夏飞,朱文泉,马国霞,等. 稀土矿开采导致的植被净初级生产力损失遥感评估——以江西省赣州市为例[J]. 遥感技术与应用,2016,31(2):307–315.
- [2]《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [3]田汉勤,徐小锋,宋霞. 干旱对陆地生态系统生产力的影响[J]. 植物生态学报,2007,31(2):231–241.
- [4]赵志平,吴晓蕾,李果,等. 2009—2011 年我国西南地区干旱程度及其对植被净初级生产力的影响[J]. 生态学报,2015,35(2):350–360.
- [5]Lei T J, Wu J J, Li X H, et al. A new framework for evaluating the impacts of drought on net primary productivity of grassland [J]. Science of the total environment, 2015, 536: 161–172.
- [6]赵林,徐春雪,刘学莹,等. 干旱对湖北省森林植被净初级生产力的影响[J]. 长江流域资源环境, 2014, 23(11): 1595–1602.
- [7]杨思遥,孟丹,李小娟,等. 华北地区 2001—2014 年植被变化对 SPEI 气象干旱指数多尺度的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 1028–1039.
- [8]刘世梁,田镭钰,尹艺洁,等. 云南省植被 NDVI 时间变化特征及其对干旱的响应[J]. 生态学报, 2016, 36(15): 4699–4707.
- [9]张艳芳,吴春玲,张宏运,等. 黄河源区植被指数与干旱指数时空变化特征[J]. 山地学报, 2017, 35(2): 142–150.
- [10]杨传国,陈喜,张润润,等. 淮河流域近 500 年洪旱事件演变特征分析[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 503–510.
- [11]童成立,张文菊,汤阳,等. 逐日太阳辐射的模拟计算[J]. 中国农业气象, 2005, 26(3): 165–169.
- [12]朱文泉,潘耀忠,张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413–424.
- [13]朱文泉,潘耀忠,何浩,等. 中国典型植被最大光能利用率模拟[J]. 科学通报, 2006, 51(6): 700–706.
- [14]陈少勇,郭俊瑞,吴超. 基于降水量距平百分率的中国西南和华南地区的冬旱特征[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(1): 23–31.
- [15]国家气候中心. 气象干旱等级:GB/T 20481—2017[S]. 北京:中国标准出版社, 2017.
- [16]张禹舜,贾文雄,赵一飞,等. 基于 CASA 模型研究祁连山地区植被净初级生产力的时空变化[J]. 西北植物学报, 2014, 34(10): 2085–2091.
- [17]穆少杰,李建龙,周伟,等. 2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3752–3764.
- [18]陶波,李克让,邵雪梅,等. 中国陆地净初级生产力时空特征模拟[J]. 地理学报, 2003, 58(3): 372–380.
- [19]Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. Science, 2003, 300(5625): 1560–1563.
- [20]严建武,陈报章,房世峰,等. 植被指数对旱灾的响应研究——以中国西南地区 2009—2010 年特大干旱为例[J]. 遥感学报, 2012, 16(4): 720–737.