
基于植被状态指数的 干旱化特征及气候驱动因素分析 ——以江苏省为例

刘世杰¹ 苏舒¹ 梁亮^{2*} 童小华¹

(1. 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092;

2. 江苏师范大学测绘学院, 江苏 徐州 221116)

【摘要】干旱是危害最大的自然灾害之一, 给农业生产及地区经济造成了巨大的损失。以AVHRR和MODIS遥感数据集所计算的植被状态指数(Vegetation Condition Index, VCI)为监测指标, 研究江苏省干旱的时空变化特征, 并结合江苏省气象站1982~2010年的实测气象资料, 分析降水量、气温、相对湿度和日照时数这四个气候因子的变化趋势及其对干旱化的影响, 不仅能够定量地描述植被干旱的空间变化, 还可以反映长期气候对其起到的正反作用。研究结果表明: 江苏省近30年的年均VCI值呈上升趋势, 区域整体旱情有所缓解; 四个气候因子中, 年均温度逐渐升高, 年均降水量基本保持不变, 年均相对湿度和日照时数则呈下降趋势, 其中气温和相对湿度与VCI的相关性达极显著水平, 是影响江苏省旱情的主要因素。

【关键词】植被状态指数; 干旱变化; 气候因子; 相关性分析

【中图分类号】Q948

【文献标识码】A

【文章编号】1004-8227(2016)12-1927-07

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201612017

干旱是全球最严重的自然灾害之一, 波及范围广, 持续时间长, 给农业生产与国民经济造成了巨大损失^[1]。采用科学的方法进行干旱监测, 分析干旱的变化特点及其主要气候驱动因子, 对干旱防治具有重要意义。目前, 国内外研究者在干旱监测方面已取得了一系列的成果, 如王遵亲等^[2]利用近50a的740个气候站点资料分析得出, 1980年以后, 我国的平均气温呈现上升趋势, 但平均年降水量却有所减少; 包云轩等^[3]通过计算江苏省54个气象站历年的CI指数值指出, 江苏省各地发生干旱的频率为北高南低, 且四季中冬旱发生频率高, 夏旱发生频率低, 秋旱南北差异不明显; 沈良芳^[4]则建立适用于江苏全省的PDSI指数对

收稿日期:2016-04-15; **修回日期:**2016-07-13

基金项目:国家重大科学研究计划(2012CB957704) [National Key Basic Research Program of China (2012CB957704)]; 国家自然科学基金(41401473) [National Natural Science Foundation of China (41401473)]; 中央高校基本科研业务费专项资金资助 [Fundamental Research Funds for the Central Universities]

作者简介:刘世杰(1982~), 男, 讲师, 博士, 主要研究方为高分辨率遥感的理论、方法及应用. Email: liusjtj@tongji.edu.cn

***通讯作者** Email: liangliang198119@163.com

江苏省干旱特征及其影响因子进行详细分析得出, 江苏省旱涝年际变化较大, 且持续时间一般在两年以上。除上述基于气象站点数据的干旱监测方法外, 近年来, 因其在尺度与空间连续性等方面的优势, 基于植被指数的遥感干旱监测方法逐渐成为干旱研究的热点和前沿^[5, 6]。常用的干旱监测指数包括归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、温度植被干旱指数(Temperature Vegetation Drought Index, TVDI)、植被状态指数(Vegetation Condition Index, VCI)等^[7-9]。其中 Kogan^[10, 11]提出的植被状态指数(VCI)具有明确的物理意义, 能很好地反映干旱情况, 且计算较为简便, 容易获得长时间的历史数据, 系进行长时间序列的干旱监测的优选指数^[12, 13]。虽然已有学者通过相关指数来研究干旱变化, 但未曾结合 VCI 研究影响干旱化的具体因素, 本文将根据长时间序列的 AVHRR 和 MODIS 遥感数据集计算的植被状态指数作为表征干旱的指标, 分析江苏省 1982~2010 年干旱化的时空分布, 并结合气象站点监测数据, 研究各气候因子对干旱化的影响, 为江苏省抗旱减灾提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

江苏省地处中国大陆东部沿海地区, 人口稠密, 经济发达, 其农业发展在我国有着举足轻重的地位, 素有“鱼米之乡”的美称。江苏东临黄海, 处长江、淮河下游, 海洋对江苏的气候有着显著的影响。因其独特的地理位置和各种气候条件的影响, 江苏省四季气候分明、雨量适中, 但季风显著、气象灾害多发。根据气候差异、地貌特征以及社会经济发展不平衡等因素, 本文将江苏省划分为 3 个部分来分别研究: (1) 苏南: 苏州、无锡、南京、常州和镇江; (2) 苏中: 扬州、泰州和南通; (3) 苏北: 宿迁、淮安、徐州、连云港和盐城。下图 1 为江苏省区域图, 苏南、苏中和苏北 3 个部分的分布状况如图所示^[14]。



图1 研究区地理位置和气象站点分布图

Fig.1 Location of Study Area and Meteorological Site Map

1.2 研究数据

1.2.1 气象数据获取

1982~2010年江苏省13个地面气象站点的降水量、气温、相对湿度、日照时数的观测数据由国家气象信息中心获取，站点分布情况如图1所示。在实际应用时，已对所用资料进行严格地审核和筛选，并将其中有错误或者缺漏的信息进行删除和插补。接下来，根据各站点逐日的观测数据，计算出每月的平均值，并在此基础上获得各气象指标的年均值。依据气象要素在空间上的自相关性，采用克里金插值方法完成江苏省年降水量、气温、相对湿度和日照时数的空间插值，以获取更加准确的各类数值。

1.2.2 VCI获取

本文研究采用的NDVI数据中，1982~2000年使用NOAA-AVHRR数据的第1、2波段，计算公式如下：

$$NDVI = \frac{Ch2 - Ch1}{Ch2 + Ch1} \quad (1)$$

式中：Ch1和Ch2分别为第1波段(0.55 $\mu m \sim 0.68 \mu m$)和第2波段(0.725 $\mu m \sim 1.1 \mu m$)的值。原始影像已通过辐射校正和几何校正处理，将不同时相的影像进行配准，然后根据上述公式计算每旬的NDVI值，再采用最大值合成法(MVC)^[15]将每月三旬的NDVI数据合成为每月的NDVI数据集，该方法在一定程度上可以去除云和大气的干扰。

2001~2010年的NDVI数据来源于MODIS产品MOD13C2的分辨率为5.6 km的月平均植被指数。

根据上述方法获取的NDVI可用来计算VCI。Kogan^[10]定义VCI的计算公式如下：

$$VCI = \frac{NDVI_i - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \times 100 \quad (2)$$

式中：NDVI_{max}为所研究年限内第i时段像素NDVI的最大值，NDVI_{min}则为最小值；NDVI_i为某一年第i时段某一像素的NDVI值；分母NDVI_{max} - NDVI_{min}在一定意义上代表了NDVI的最大变化范围，反映了当地植被的生态环境；分子NDVI_i - NDVI_{min}在一定意义上代表了某一特定年的第i时期的当地气象信息。VCI越小，表示该时段的NDVI越接近NDVI_{min}，作物长势越差。由每月的VCI值进一步计算得到年均VCI值，用来表征每一年的总体干旱状况。其中，1994年和2000年的数据有缺失，将这两年排除，只研究剩下27年的干旱情况。

1.3 研究方法

1.3.1 1982~2010年干旱化分布和气候变化趋势分析

为研究干旱化空间分布的变化趋势特征，本文运用趋势线方法来分析1982~2010年江苏省干旱化分布情况，趋势率的计算公式如下^[16]：

$$\theta_{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times X_i) - \left(\sum_{i=1}^n i \right) \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)}{n \times \left(\sum_{i=1}^n i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (3)$$

式中：n为检测时间段的年数；i为1982~2010年的时间序列号，本文中研究的i=1~27；X_i为第i年的研究因子的值； θ_{slope} 为趋势线的斜率。

1.3.2 VCI指数与各气候因子的相关性分析

相关关系是揭示事物之间统计关系强弱程度的一种有效的方法，其表现形式一般有图形和数值两种方式。相关系数法可以依据计算出的数值精确地表达出某两个变量之间是否具有线性相关性以及其相关性的强弱程度，本文采用Pearson简单相关系数方法，其数学定义^[17]如下：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中：n为样本数； x_i 和 y_i 分别为两因子的样本值； $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别表示2个因子样本值的平均值；r为相关系数，值介于[-1, 1]区间内。r>0表示x和y存在正的线性相关关系，反之则为负的线性相关关系，且相关系数的绝对值越大，说明该像元处两因子的相关性越强。

然而，根据相关资料表明：相关系数未必就是两事物之间线性相关性强弱的真实反映，常常表现出某种夸大的趋势。因此，在某些情况下，仅仅采用相关系数法来评价事物之间的相关性显然是不够精确的。本文将采用偏相关分析的方法，通过偏相关系数来分析两个变量之间的线性相关性，以需要控制其他变量的线性影响为前提条件。若要分析变量x和y之间的净相关程度，则应先控制好z的相关影响，x和y之间的一阶偏相关系数定义如下^[18]：

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)}} \quad (5)$$

式中： r_{xy} 、 r_{xz} 、 r_{yz} 分别代表x和y之间的相关系数、x和z之间的相关系数以及y和z之间的相关系数。

2 结果与分析

2.1 江苏省1982~2010年VCI及气象因子的变化趋势

2.1.1 干旱化趋势分析

用于表征干旱指标的VCI值大致分布如图2(A)，由趋势线得出近30年的VCI值呈波动上升趋势，说明植被的整体长势越来越好。图2(B)为基于VCI计算得到的趋势率分布图，江苏全省大面积为绿色覆盖，表明区域整体干旱化有减弱趋势，与上述折线图相吻合。不难看出，苏州市部分地区趋势率小于0，表明VCI变化呈下降趋势，植被生长状况变差；然而苏北大部分地区趋势率大于0，植被长势越来越好。结合相关的资料研究分析：苏北地区近些年来一直注重于生态修复，在荒山上植树造林，植被覆盖度逐年提高，大面积的绿色植被使得干旱程度有所减弱；然而处于经济高度发达的苏南地区，近30年来一直注重经济迅速发展却在某些程度上忽略了环境和绿化的保护，重工业的不断发展必然会导致生态环境逐步恶化。苏南地区城市化率高，建设用地比率大^[19]，再加上植树造林的意识越来越弱，追求经济发展的欲望越来越强，这便使得苏南地区的VCI不断下滑，干旱情况加重。

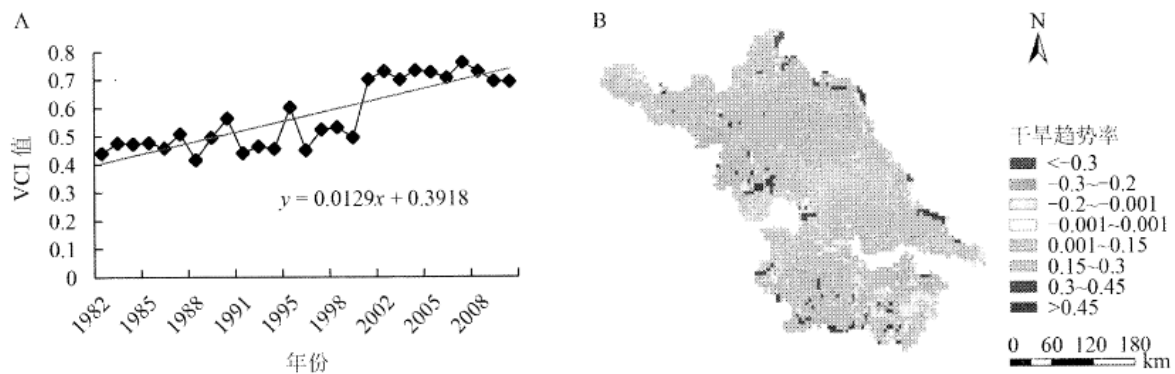


图2 1982~2010年江苏省植被状态指数折线图(A)与趋势倾向率空间分布(B)

Fig.2 Line Chart of Vegetation Condition Index (A) and Its Trend Rate (B) in Jiangsu Province from 1982 to 2010

2.1.2 各气象因子的变化趋势分析

图3(A)为1982~2010年江苏省年均降水量的折线图，图中可以看出1991年的年均降水量最高，据相关资料表明，在1991年夏季期间，江淮流域发生了特大洪水，江苏省大面积区域遭受到洪涝灾害^[20]。虽然年均降水量呈现波动趋势，但自2007年以后，年均降水量逐年减少。图3(B)为年均降水量趋势率分布图，有南到北，趋势率值不断增加，其中苏中和苏北地区的趋势率大于0，表明降水量变化呈趋势上升，而苏南地区的趋势率值却小于0，说明苏南近些年的降水量不断减少。

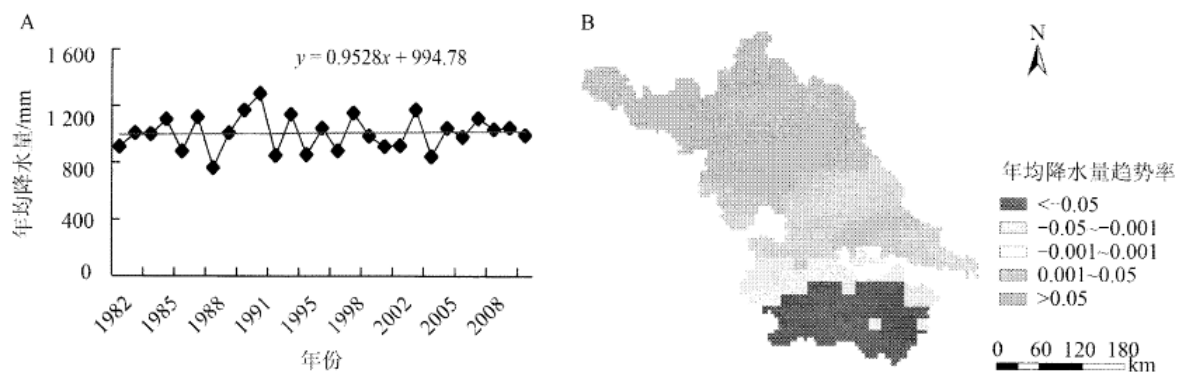


图3 1982~2010年江苏省年均降水量折线图(A)与趋势倾向率空间分布(B)

Fig.3 Line Chart of Annual Average Precipitation (A) and Its Trend Rate (B) in Jiangsu Province from 1982 to 2010

图4(A)为1982~2010年江苏省年均相对湿度折线图，大体呈下降趋势，表明气候越来越干燥。图4(B)为年均相对湿度趋势率分布图，由南到北，趋势率值不断增加，但整个江苏省区域年均相对湿度的趋势率值全部小于0，表明近30a来江苏省的湿度变化呈下降趋势。

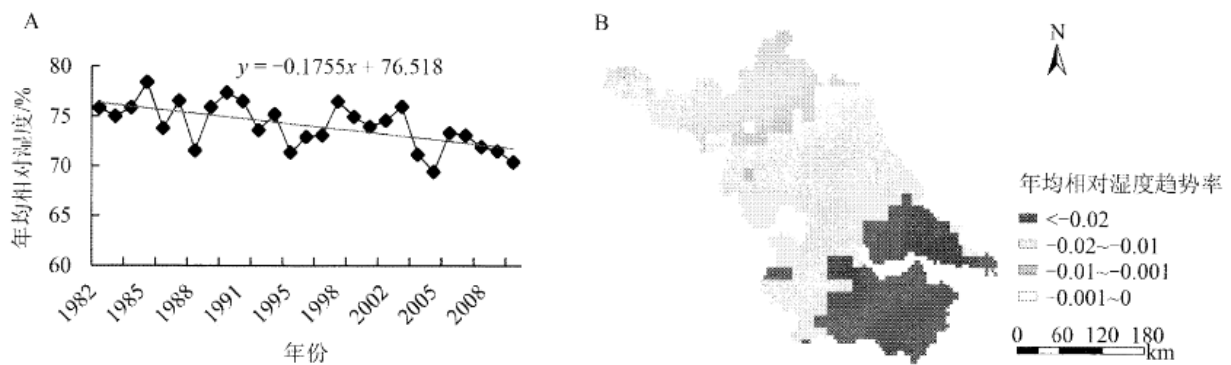


图4 1982~2010年江苏省年均相对湿度折线图(A)与趋势倾向率空间分布(B)

Fig.4 Line Chart of Annual Average Relative Humidity (A) and Its Trend Rate (B) in Jiangsu Province from 1982 to 2010

图5(A)为1982~2010年江苏省年均气温折线图,整体呈上升趋势,与全球气候变暖情况相吻合。由图5(B)年均温度趋势率分布图得出,年均气温趋势率由苏北向苏南逐渐升高,说明苏南地区的温度变化趋势上升很快,而苏北地区的温度变化趋势相对较慢,苏中地区则适中。但近30 a年均气温的趋势率值均大于0,从趋势率图也可以明显看出江苏省的气温在逐年升高。

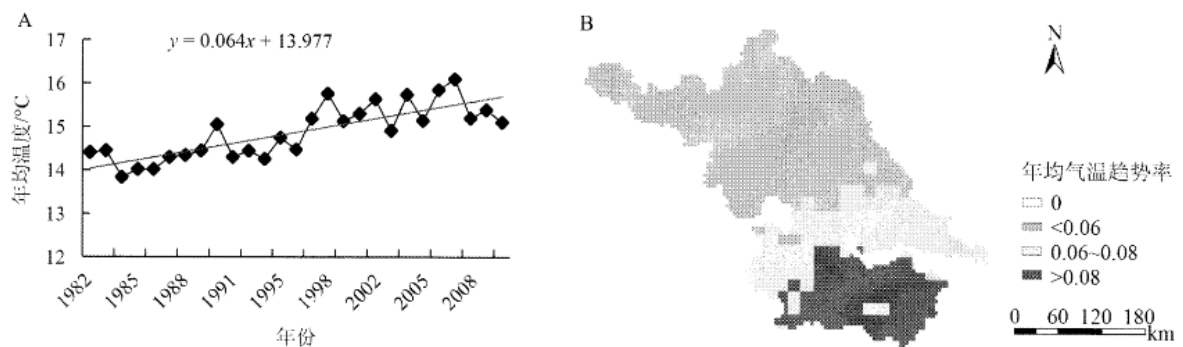


图5 1982~2010年江苏省年均温度折线图(A)与趋势倾向率空间分布(B)

Fig.5 Line Chart of Annual Average Air Temperature (A) and Its Trend Rate (B) in Jiangsu Province from 1982 to 2010

图6(A)为1982~2010年江苏省年均日照时数折线图,近30a的年均日照时数呈波动下降趋势。根据相关研究,日照时数主要受云量的影响,近年来城市大气污染越来越严重,从而导致云量和气溶胶增多,使得大气对太阳光的反射及吸收作用增强,太阳的辐射量减弱,日照时数减少^[21]。图6(B)为年均日照时数趋势率分布图,江苏省年均日照时数的趋势率值全部小于0,表明其变化趋势一直在降低。苏中、苏北地区的日照时数变化快,苏南相对慢些。

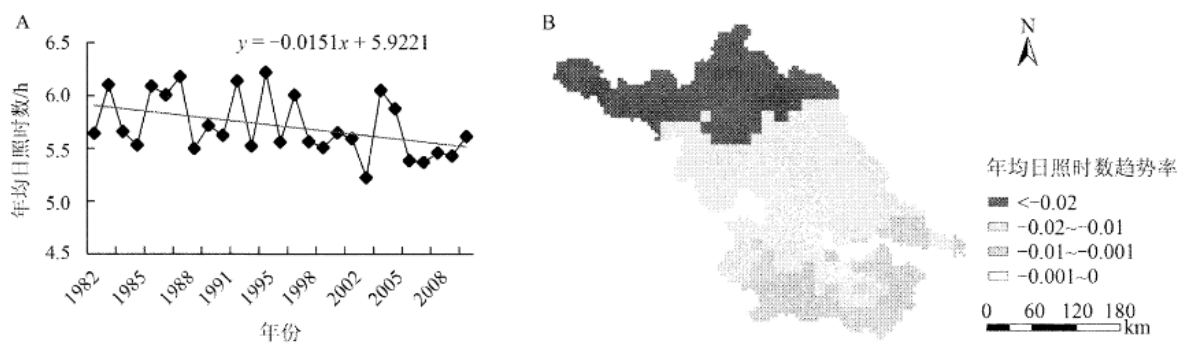


图6 1982~2010年江苏省年均日照时数折线图(A)与趋势倾向率空间分布(B)

Fig.6 Line Chart of Annual Average Sunshine Duration (A) and Its Trend Rate (B) in Jiangsu Province from 1982 to 2010

2.2 江苏省干旱与气候因子的相关性

仅研究各气候因子的变化趋势并不能反映出江苏省的干旱情况,要将其与相关指标联系起来研究影响江苏省干旱化的驱动因素。VCI与各气候因子的相关系数如表1所示,VCI与相对湿度和温度均在0.01水平上显著相关,相关系数分别为-0.492和0.798。但VCI与降水量、日照时数的相关性很小。

偏相关系数在对其他影响因子的控制下去衡量某两个变量之间的线性相关性,通过对比偏相关系数与相关系数的差别,从而确定这两个变量之间的内在线性相关性会更加真实可靠。表1中的偏相关系数普遍低于相关系数,这说明江苏省气候因素的关系比较复杂,干旱化受多个气候因子的共同影响,单个因子不能从根本上决定本地区的干旱情况,这也与先前相关学者针对江苏省的研究结果一致^[22, 23]。由表可知,VCI与相对湿度和温度的偏相关系数分别为-0.472和0.681,对干旱化影响最大的仍是温度,相对湿度对干旱化的影响明显降低,降水量和日照时数对干旱化的影响较小。我们通常认为,降水量对干旱化有较大的影响,随着降水量的增加,干旱程度会随之降低,但从本文的研究结果可知,降水量对江苏省的干旱化趋势没有多大影响,其可能原因是江苏省多为人工灌溉区域,较完善的水利系统消弱了降水对于干旱化的影响。另外,江苏在地理上跨越南北,气候、植被也同时具有南方和北方的特征。梁亮等^[8]人的相关研究中分析指出,在南方地区,温度是干旱化的主要影响因子,而北方地区,温度、相对湿度和日照时数都对干旱化有影响。根据本文的研究可得,江苏省干旱化受相对湿度、温度和日照时数等气候因子的共同影响,这与梁亮等^[8]的研究结果相吻合。

表1 江苏省VCI与各气候因子的相关性

Tab.1 Correlation between VCI and Meteorological Factors in Jiangsu Province

	VCI与降水量	VCI与相对湿度	VCI与温度	VCI与日照时数
相关系数	0.011	-0.492**	0.798**	-0.336
偏相关系数	0.124	-0.472*	0.681**	-0.262

注: *表示在0.05水平上显著相关; **表示在0.01水平上显著相关。

3 结论与讨论

本文利用长时间序列的VCI数据分析江苏省的时空变化特征,并利用地面气象站点数据分析气候变化趋势及其对干旱化的影响,有助于我们从宏观尺度上认识江苏省旱情的时空变化规律以及干旱的气候驱动机制。主要结论如下:

(1)江苏省近30 a的植被状态指数值呈上升趋势,说明区域整体干旱化有减弱趋势,植被长势越来越好。

(2)近30 a来,江苏省年均温度呈上升趋势,年均相对湿度和日照时数呈下降趋势,而年均降水量则趋于平缓,且苏南地区的温度和相对湿度变化大于苏北地区。

(3)江苏省干旱化受相对湿度、温度和日照时数等气候因子的共同影响,其中温度对干旱化的影响最大,其次是相对湿度,位于东部沿海的江苏地区,炎热的天气往往伴随着降雨,因而显示VCI与气温呈正相关关系。

(4)气候是影响植被状态指数的重要因素,然而非气候因素也不容忽视。已有相关研究指出,频繁人类的活动,如城市扩张、交通设施建设也会破坏植被的生长^[24],本文分析表明,城市化水平较高的苏南小部分地区VCI下降较快,很可能与这一原因有关。但受研究资料限制,本文仅分析了降水、温度等自然因素对VCI的影响,在下一步的研究中,将进一步结合自然因素与人类活动来分析江苏省干旱的驱动机制。

参考文献:

- [1]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.
- [2]王遵娅,丁一汇,何金海,等.近50年来中国气候变化特征的再分析[J].气象学报,2004,62(2):228-236.
- [3]包云轩,孟翠丽,申双和,等.基于CI指数的江苏省近50年干旱的时空分布规律[J].地理学报,2011,66(5):599-608.
- [4]沈良芳.江苏省干旱特征及其影响因子的研究[D].南京:南京信息工程大学硕士学位论文,2007.
- [5]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[J].环境遥感,1994,9(2):106-112.
- [6]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.
- [7]LI Z, ZHOU T, ZHAO X, et al. Diverse spatiotemporal responses in vegetation growth to droughts in China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(1): 55.
- [8]LIANG L, ZHAO S H, QIN Z H, et al. Drought change trend using MODIS TVDI and its relationship with climate factors in China from 2001 to 2010[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(7):1501-1508.
- [9]管晓丹,郭 锐,黄建平,等.植被状态指数监测西北干旱的适用性分析[J].高原气象,2008,27(5):1046-1053.
- [10]KOGAN F N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas[J]. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(8): 1405-1419.
- [11]KOGAN F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection[J]. Advances in Space Research, 1995, 15(11): 91-100.
- [12]UNGANAI L S, KOGAN F N. Drought monitoring and corn yield estimation in Southern Africa from AVHRR data[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 63(3): 219-232.

-
- [13]蔡 斌, 陆文杰, 郑新江. 气象卫星条件植被指数监测土壤状况[J]. 国土资源遥感, 1995, 7(4): 45 - 50.
- [14]杨 强, 王 涛. 1976 - 2006年江苏省气温和降水量的时空变化特征[J]. 生物灾害科学, 2014, 37(4): 281 - 287.
- [15]HOLBEN B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1986, 7(11): 1417 - 1434.
- [16]马明国, 王 建, 王雪梅. 基于遥感的植被年际变化及其与气候关系研究进展[J]. 遥感学报, 2006, 10(3): 421 - 431.
- [17]刘少华, 严登华, 史晓亮, 等. 中国植被NDVI与气候因子的年际变化及相关性研究[J]. 干旱区地理, 2014, 37(3): 480 - 489.
- [18]薛 薇. SPSS统计分析方法及应用[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2013: 175 - 182.
- [19]宋言奇. 高速城市化视域下的苏南地区生态安全一体化[J]. 城市发展研究, 2007, 14(4): 59 - 63, 108.
- [20]陈家其. 从1991年江淮流域特大洪涝灾害论协调人地关系问题[J]. 地理学与国土研究, 1991, 7(4): 33 - 37.
- [21]邵振艳, 周 涛, 史培军, 等. 大气污染对中国重点城市地面总辐射影响的时空特征[J]. 高原气象, 2009, 28(5): 1105 - 1114.
- [22]曹 磊, 谢 飞, 吴颖超, 等. 江苏省NDVI时空变化特征及其与气候因子的关系[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 151 - 154.
- [23]徐 勇, 奚砚涛. 江苏省植被覆盖动态变化及其与气候因子的关系[J]. 水土保持通报, 2015, 35(4): 195 - 201.
- [24]韦振锋, 王德光, 张 翀, 等. 1999 - 2010年中国西北地区植被覆盖对气候变化和人类活动的响应[J]. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1665 - 1670.