

引用格式:陈婷,夏军,邹磊,等.白洋淀流域NDVI时空演变及其对气候变化的响应[J].2021,43(6):1248-1259.[Chen T, Xia J, Zou L, et al. Spatiotemporal variations of NDVI of different vegetation types in the Baiyangdian Basin under the background of climate change[J]. Resources Science, 2021, 43(6): 1248-1259.] DOI: 10.18402/resci.2021.06.15

白洋淀流域NDVI时空演变及其对气候变化的响应

陈婷¹,夏军^{1,2},邹磊²,闫强³

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,武汉 430072;2. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室,北京 100101;3. 中国地质科学院矿产资源研究所全球矿产资源战略研究中心,北京 100037)

摘要:了解植被覆盖的动态变化及其对气候变化的响应,对区域生态环境的保护和建设具有重要意义。基于SPOT/VEGETATION NDVI数据,本文采用Sen+Mann-Kendall、波动性分析和相关性分析等多元统计方法,探究了2001—2018年间白洋淀流域全区和不同植被类型区NDVI时空演变特征及其对气候变化响应的差异性。结果表明:①2001—2018年白洋淀流域NDVI以0.0031/a的速率增长,显著增长($P<0.05$)的区域面积比例为53.79%;针叶林、阔叶林、灌丛、草原、草丛和草甸NDVI呈显著增长($P<0.05$),沼泽和栽培植物NDVI增长趋势不显著。②全流域NDVI总体波动性较小,67.81%的区域NDVI为显著低波动性($P<0.05$);除草原和草甸外,其余植被类型NDVI为显著低波动性的面积比例均超过50%。③除沼泽和栽培植物外,其余各植被类型NDVI对降水的响应较为一致,呈现显著正相关($P<0.05$);气温在流域尺度和不同植被类型区内对NDVI的影响均不显著。本文结果对于理解气候变化对植被生长的作用机理和开展区域生态环境保护及治理有一定意义。

关键词:植被类型;NDVI;气候变化;波动性分析;相关性分析;白洋淀流域

DOI: 10.18402/resci.2021.06.15

1 引言

地表植被是地球生态系统的关键组成部分,对全球的能量平衡、生物化学循环和水循环等均具有重要影响^[1-4]。植被对生态环境变化极其敏感,被认为是监测生态环境变化的综合指示器^[5]。植被的年际和年内波动变化,对全球的物质循环以及能量流动影响显著^[6,7]。植被覆盖类型的动态变化,会影响植被的光合作用和呼吸作用,进而通过地表-大气之间热量交换影响区域内气候系统的稳定性^[8,9]。同时,气候变化对于植被的生长具有显著影响,如降水增多可以改善土壤水分条件,进而促进植被生长^[10];气温升高则有可能加剧区域蒸散发,进而抑制北方缺水地区耐寒植被的生长^[11]。随着气候变化的加剧,全球范围内植被覆盖将受到不同程度的影

响^[12,13]。因此,了解气候变化背景下植被覆盖的时空演变特征对区域生态环境保护及综合治理具有重要意义^[14,15]。

为量化植被覆盖的动态变化,研究者们发展了各种反映植被覆盖特征的指数,其中基于卫星遥感技术的归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)的应用最为广泛^[16]。NDVI与植被覆盖度呈正相关关系^[17],与叶绿素密度、植被生产力等呈线性关系^[18],因此它可以准确直观地反映植被的生长态势^[19,20],定量反映植被生物量、植被覆盖度及植被物候等信息^[21]。常用的NDVI数据集有SPOT/VEGETATION NDVI、NOAA-AVHRR NDVI和MODIS NDVI,其中SPOT/VEGETATION NDVI由于空间分辨率高而被广泛使用。

收稿日期:2020-08-27;修订日期:2020-12-01

基金项目:美丽中国生态文明建设科技工程专项(XDA23040304);地质矿产调查评价项目(DD20190652)。

作者简介:陈婷,女,江苏盐城人,硕士研究生,研究方向为流域水文。E-mail: Chenting123@whu.edu.cn

通讯作者:邹磊,男,河南三门峡人,助理研究员,主要从事流域水文模拟研究。E-mail: zoulei@igsrr.ac.cn

2021年6月

目前国内基于NDVI对植被覆盖与气候变化的研究较多^[22]。已有研究表明,中国各地植被覆盖时空变化趋势及对气候变化的响应并不一致。如高红波等^[23]利用基于像元的地理加权回归方法,探究了中国NDVI及其动态特征对气候变化响应的空间格局,发现不同区域影响植被覆盖的主导气候因素不同;王静等^[24]利用Sen+Mann-Kendall检验和时滞偏相关等方法,对川陕地区生长季NDVI与气候因子的关系进行深入探讨,发现降水量相较于气温对陕西地区植被生长的影响更大,而限制四川地区植被生长的主要因素是气温。同时,气候对植被覆盖的影响也会随季节变化出现差异。如Pang等^[25]利用GIMMS NDVI3g数据探究1982—2012年青藏高原地区生长季植被变化趋势以及对气候变化的响应,发现月度NDVI及季度NDVI均与相应的月均温及季度均温呈正相关,但降雨在不同季节对NDVI的作用并不一致;刘家福等^[26]基于MODIS NDVI和GIMMS NDVI数据集及一元线性回归模型对1982—2016年东北黑土地NDVI动态及其对气候变化的响应进行研究,结果表明区域植被的生长在气温、降水量的共同作用下,呈现出明显季节差异。

上述研究在基于NDVI探究植被覆盖的时空变化特征和与气候因子的相互作用关系时,主要是在像元尺度上进行计算并分析NDVI在空间上的连续变化特征,但未进一步辨识不同植被类型NDVI对气候变化的响应差异;或是将区域NDVI在空间上看作一个整体,分析全区NDVI总体的时间变化趋势,未考虑NDVI的空间动态变化特征。由于区域内植被类型的多样性、分布的不连续性及不同类型植被对外界环境响应的差异性^[27],气候变化对植被覆盖的影响变得尤为复杂^[28,29]。因此,需要进一步明晰流域尺度及不同植被覆盖类型区NDVI变化及其对气候变化响应的差异,对于理解不同类型植被与气候变化的相互作用关系具有重要意义。白洋淀流域位于雄安新区上游,作为新区的重要生态源地,其植被覆盖状况对新区的环境质量及生态健康具有重要影响^[30,31],而目前关于白洋淀流域植被覆盖变化及其影响因素的研究相对较少。本文以基于连续时间序列的SPOT/VEGETATION NDVI数据反映植被覆盖状况,结合中国100万植被类型空间

分布数据以及国家基本气象站点逐日观测数据,利用Sen+Mann-Kendall趋势分析、波动分析和相关性分析等方法,综合分析了白洋淀流域全区及不同植被类型NDVI的时空变化特点,并进一步探究了气候因子对不同植被类型NDVI的影响特点,以期较全面地揭示变化环境下不同植被类型的演变规律与驱动机制。本文结果可为白洋淀流域乃至雄安新区的生态环境保护及综合治理,应对气候变化和促进社会经济可持续发展等提供科学决策依据。

2 研究区概况

白洋淀流域(图1a)位于华北平原,流域面积3120 km²,其中河北省占81.04%,山西省和北京市分别占11.85%和7.11%。白洋淀流域地势自西北向东南递减,形成了山区(丘陵)、平原和洼淀三大地貌单元。其中白洋淀是华北平原最大的天然湖泊,也是雄安新区境内最重要的生态水体之一。白洋淀流域属暖温带大陆性季风气候区,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。流域年平均气温7.3~12.7℃,气温自东南向西北递减;年平均降水约为640 mm,80%集中于7、8、9月,降水年内年际变化较大。受人类活动影响,流域内的主要土地利用类型为耕地。白洋淀流域共有针叶林、阔叶林、灌丛、草原、草丛、草甸、沼泽和栽培植物8种植被类型,其中最主要的是栽培植物和草丛,这两种植物的覆盖面积之和超过全区面积的85%(图1b)。

3 数据和方法

3.1 数据来源

本文利用中国国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>)提供的气象资料,选取流域内22个气象站点2001—2018年逐日降水和逐日平均气温数据进行研究,流域图及站点分布图如图1所示。考虑到数据序列的连续性,本文对降水及气温数据进行缺失数据插补,并基于反距离加权平均方法将降水及气温数据插值成分辨率为1 km的栅格数据。

NDVI数据和植被类型数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)。2001—2018年的月度NDVI空间分布数据集是基于连续时间序列的SPOT/VEGETATION NDVI卫星遥感数据,由最大值合成法合成而来,其空间分辨率

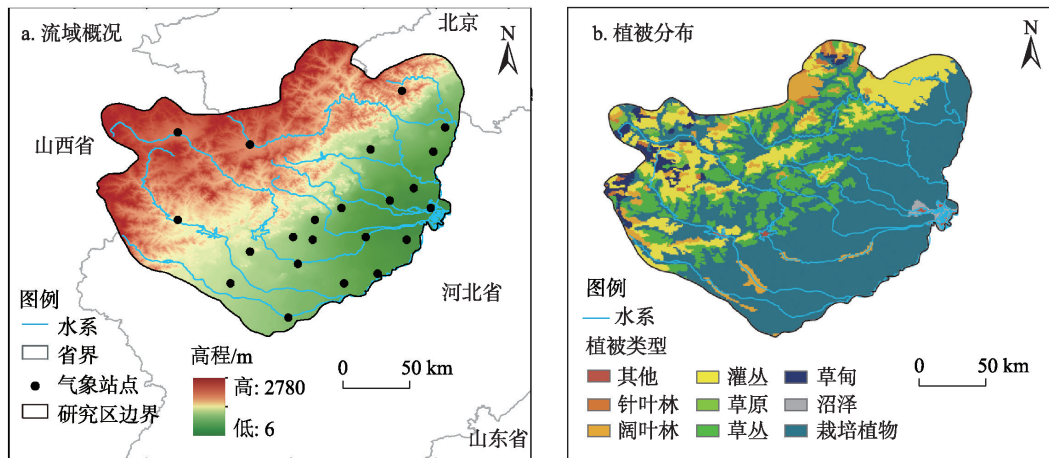


图1 2001—2018年白洋淀流域概况(a)及植被分布状况(b)

Figure 1 Location (a) and vegetation distribution (b) of the Baiyangdian Basin, 2001-2018

为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ [32]。白洋淀流域生长季为每年4—9月 [33], 本文选取4—9月的NDVI数据均值作为评价指标进行研究。植被类型数据由《1:1000000中国植被图集》数字化生成, 其分辨率为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 。

3.2 研究方法

3.3.1 趋势分析及检验

研究表明, 将Theil-Sen平均趋势估计和Mann-Kendall(MK)检验方法结合, 在探索植被变化趋势方面结果稳健, 并且对于估计较短系列数据的趋势尤其有效 [34-36]。Theil-Sen平均趋势估计方法的计算公式为:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), i < j \quad (1)$$

式中: x_i 和 x_j 分别为变量 x 第 i 年和 j 年的序列值。当 $\beta < 0$ 时, 表示序列呈下降趋势; 当 $\beta > 0$ 时, 表示序列呈上升趋势。变化趋势是否显著用MK方法进行检验, 其公式为:

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}}, & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (3)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: S 为检验统计量; Z_{MK} 为标准化后的MK检验统计量; n 为序列长度。

Z_{MK} 为标准正态分布, 结合不同置信度水平 ($P < 0.05$ 及 $P < 0.01$) 的 Z_{MK} 值和 β 值, 将序列的变化趋势分为7个等级, 分别为: ①基本无变化 ($\beta = 0$), ②极显著减少 ($\beta < 0, |Z_{MK}| > 2.58$), ③显著减少 ($\beta < 0, 1.96 < |Z_{MK}| \leq 2.58$), ④不显著减少 ($\beta < 0, |Z_{MK}| \leq 1.96$), ⑤不显著增加 ($\beta > 0, |Z_{MK}| \leq 1.96$), ⑥显著增加 ($\beta > 0, 1.96 < |Z_{MK}| \leq 2.58$), ⑦极显著增加 ($\beta > 0, |Z_{MK}| > 2.58$)。

3.3.2 波动性分析

标准差反映了序列距平均值的离散程度, 因而常常被用来度量数据的波动性或多样性 [37]。对于NDVI序列而言, 标准差越小, 表明NDVI的波动性越小。标准差的计算公式为:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (NDVI_i - \overline{NDVI})^2} \quad (5)$$

式中: SD 为标准差; $NDVI_i$ 为第 i 年的NDVI值; \overline{NDVI} 为多年平均NDVI值。

为了评价植被的波动性, 利用自然断点法, 将 SD 分为5类, 分别为: 极高 ($SD > 0.092$), 高 ($0.063 < SD \leq 0.092$), 中 ($0.049 < SD \leq 0.063$), 低 ($0.038 < SD \leq 0.049$), 极低 ($SD \leq 0.038$)。

序列的具体波动值用序列线性回归方程的残差绝对值表示, 序列波动性的时间变化趋势用

2021年6月

Theil-Sen 中值斜率表示,并利用 MK 方法检验其显著性。其计算公式为:

$$\begin{cases} e_i = |\hat{y}_i - y_i| \\ \hat{y}_i = a + bt_{0i} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中: i 表示年份; e_i 为序列的残差绝对值; \hat{y}_i 为计算的线性回归序列值; y_i 为原始变量序列值; a 和 b 分别为用最小二乘法估计的线性回归常数和线性回归系数; t_{0i} 为回归自变量序列值。

3.3.3 相关性分析

偏相关系数的计算分为两步,首先是计算简单相关系数,然后在简单相关系数的基础上计算偏相关系数。其计算步骤如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)}} \quad (8)$$

式中: \bar{x} 、 \bar{y} 分别指变量 x 、 y 的序列均值; r_{xy} 、 r_{xz} 和 r_{yz} 分别代表变量 x 和 y 、变量 x 和 z 以及变量 y 和 z 的简单相关系数; $r_{xy,z}$ 表示将变量 z 的影响视为常量时,变量 x 和 y 的偏相关系数。因此, $r_{xy,z} > 0$ 表示将变量 z 的影响视为常量时,变量 x 和变量 y 正相关;否则,呈现负相关;相关系数绝对值的取值范围为 $[0, 1]$,且越接近 1 表示相关性越强。相关系数的显著性用 t 检验进行判断,统计量 t 的计算公式为:

$$t = \frac{r_{xy,z}}{\sqrt{1 - r_{xy,z}^2}} \sqrt{p - q - 1} \quad (9)$$

式中: p 为样本数; q 为自变量个数。根据不同置信度水平 ($P < 0.05$ 及 $P < 0.01$),将相关性分为不显著正(负)相关、显著正(负)相关和强显著正(负)相关性。

4 结果与分析

4.1 NDVI 时空变化特征

4.1.1 NDVI 空间分布特征

各像元多年平均 NDVI 及不同植被类型面积比例如图 2 和表 1 所示。白洋淀流域 NDVI 呈现东北部和南部高、西北部低的分布规律;结合图 1b 可知,NDVI 的空间分布与植被类型的空间分布有关。流域上游东部和西部 NDVI 分布有明显不同,年均 NDVI 高值对应的植被类型为针叶林和阔叶林(0.78 和 0.79),主要分布在流域上游东部,分别占流域面积的 0.90% 和 5.89%;年均 NDVI 低值对应的植被类型为草原和草甸(0.68 和 0.70),主要分布在流域上游西部,分别占流域面积的 1.19% 和 2.83%。流域中游植被类型种类较多,但 NDVI 值较低。流域下游主要为栽培植物,NDVI 值总体较高,但分布并不连续,这可能与栽培植物类型或下游人类土地利用有关。

4.1.2 NDVI 时空变化趋势

区域年均 NDVI 的变化趋势如图 3 所示。白洋淀流域 NDVI 总体呈现上升趋势,增长率约为 0.0031/a。区域 NDVI 的变化大致经历了 3 个阶段:

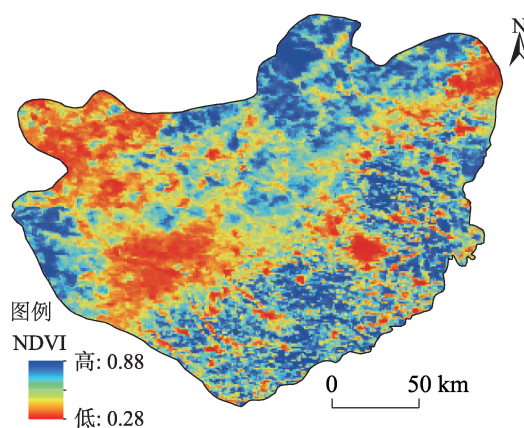


图 2 2001—2018 年白洋淀流域 NDVI 空间分布

Figure 2 Spatial distribution of NDVI in the Baiyangdian Basin, 2001-2018

表 1 2001—2018 年白洋淀流域各植被类型平均 NDVI 及面积比例

Table 1 Average NDVI and areal ratio of different vegetation types in the Baiyangdian Basin, 2001-2018

| 植被类型 | 针叶林 | 阔叶林 | 灌丛 | 草原 | 草丛 | 草甸 | 沼泽 | 栽培植物 | 其他 |
|--------|------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|
| NDVI | 0.78 | 0.79 | 0.76 | 0.68 | 0.75 | 0.70 | 0.76 | 0.75 | 0.71 |
| 面积比例/% | 0.90 | 5.89 | 1.74 | 1.19 | 17.61 | 2.83 | 0.77 | 68.68 | 0.38 |

2001—2002年为快速增长阶段,增长率约为4.67%;
2003—2015年为波动增长阶段,增长率约为5.89%;
2015—2018年为稳定增长阶段,增长率约为1.60%。

利用Sen和MK检验相结合的方法对空间上每

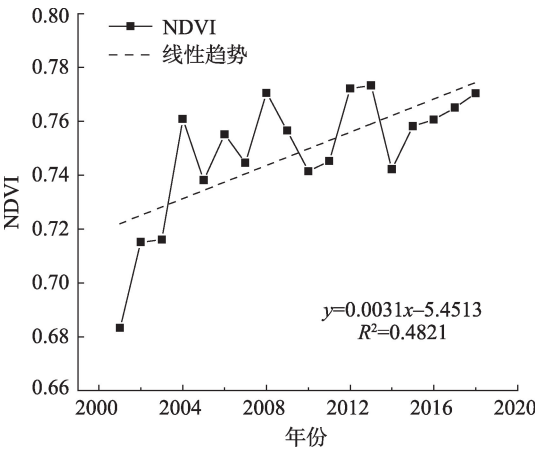


图3 2001—2018年白洋淀流域NDVI变化及线性趋势

Figure 3 Variations in annual NDVI values and linear trend in the Baiyangdian Basin, 2000-2018

个像元及各植被类型NDVI的变化趋势进行检验(图4),并对结果进行统计(表2)。白洋淀流域NDVI总体增加趋势显著($P<0.05$),其中极显著增加面积比例为42.79%,主要分布在流域上游;NDVI呈显著或极显著减少趋势的区域主要分布在流域下游,其面积比例为6.20%;上游NDVI增长趋势明显超过下游,且NDVI变化趋势的空间分布与地形分布具有一致性。

对比不同植被类型NDVI变化趋势可知,针叶林NDVI全部呈现增加趋势,且极显著增加的面积比例达到84.97%;阔叶林、灌丛、草原、草丛和草甸的NDVI变化趋势接近,均主要呈现增加趋势,且极显著增加面积均超过60%;沼泽和栽培植物NDVI呈显著或极显著增加趋势的面积比例明显少于其余几种植被类型(29.20%和37.58%),呈显著或极显著减少趋势的面积比例在各种植被类型中相对较高(12.70%和9.42%)。结果表明,除沼泽和栽培植

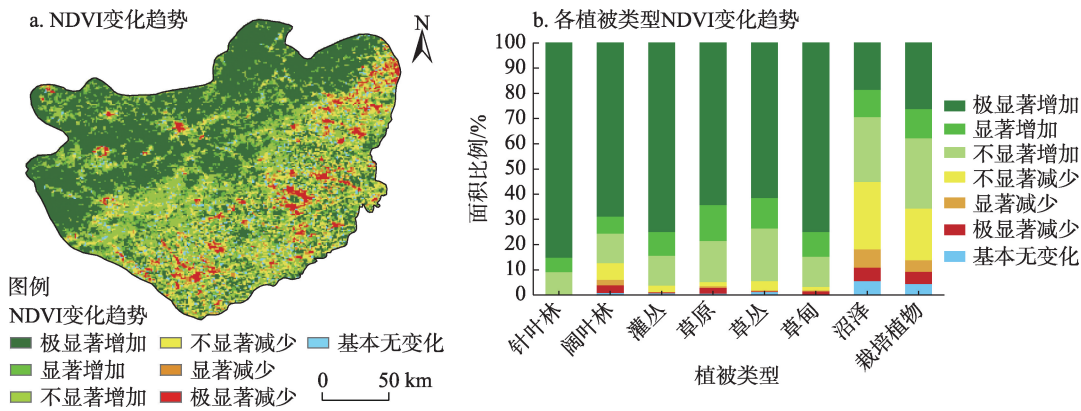


图4 2001—2018年白洋淀流域NDVI变化趋势(a)及不同植被类型显著性统计(b)

Figure 4 Spatial variation of NDVI (a) and significance level of different vegetation types (b) in the Baiyangdian Basin, 2000-2018

表2 2001—2018年白洋淀流域NDVI不同变化等级面积百分比

Table 2 Percentage area of different NDVI variation levels in the Baiyangdian Basin, 2000-2018 (%)

| 变化趋势 | 植被类型 | | | | | | | | 全区 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 针叶林 | 阔叶林 | 灌丛 | 草原 | 草丛 | 草甸 | 沼泽 | 栽培植物 | |
| 基本无变化 | 0.00 | 0.96 | 0.94 | 0.82 | 1.38 | 0.43 | 5.71 | 4.61 | 3.21 |
| 极显著减少 | 0.00 | 3.09 | 0.27 | 2.27 | 0.25 | 1.22 | 5.40 | 4.82 | 3.20 |
| 显著减少 | 0.00 | 2.13 | 0.14 | 0.62 | 0.34 | 0.43 | 7.30 | 4.60 | 3.00 |
| 不显著减少 | 0.00 | 6.76 | 2.53 | 1.65 | 3.76 | 1.39 | 26.67 | 20.51 | 13.82 |
| 不显著增加 | 9.25 | 11.60 | 11.92 | 16.29 | 20.92 | 11.90 | 25.71 | 27.88 | 22.99 |
| 显著增加 | 5.78 | 6.80 | 9.39 | 14.23 | 12.04 | 9.82 | 10.79 | 11.56 | 11.00 |
| 极显著增加 | 84.97 | 68.66 | 74.81 | 64.12 | 61.31 | 74.80 | 18.41 | 26.02 | 42.79 |

2021年6月

物外,其余6种植被类型NDVI均呈现非常显著的增加趋势。

4.2 NDVI波动性分析

4.2.1 NDVI波动性的空间格局

NDVI波动性的空间分布及像元统计如图5a和表3所示。2001—2018年,白洋淀流域NDVI的标准差为0.015~0.279。流域NDVI波动性总体较低,其中,低波动性区域主要分布在流域上游,极低波动性区域主要分布在流域下游,分别约占流域面积的1/3;中等波动性区域占全区面积的23.37%,主要镶嵌分布在低波动性区域内;高波动性区域主要分布在流域西北部,面积比例为8.81%;极高波动性区域面积比例极低(0.01%),分布在下游少部分地区。结合图2和图4可知,白洋淀流域下游NDVI较大且较稳定;流域西北部NDVI值较小,但是增长趋势和波动性较大,说明该地区NDVI增长趋势的波动性较为剧烈;全区NDVI呈现稳定增长趋势。

对比各植被类型NDVI波动性可知(图5b),草原和草甸NDVI波动性高于其余植被类型,其波动

性为高和极高的比例超过32%;其余植被类型NDVI波动性均相对较低,其中阔叶林、沼泽和栽培植物NDVI波动性为低和极低的比例超过70%,针叶林、灌丛和草丛NDVI波动性为低和极低的比例也均超过50%。结合NDVI变化趋势分析结果可知,草原和草甸NDVI的增长趋势的波动性相对其他类型植被较剧烈,沼泽和栽培植物NDVI值较为稳定。

4.2.2 NDVI波动性的时间变化趋势

白洋淀流域及各植被类型NDVI波动性的时间变化趋势(以下简称波动趋势)如图6和表4所示,2001—2018年,流域NDVI的波动趋势整体不显著(图6a)。波动趋势呈显著和极显著减少的区域主要分布在流域北部及中部部分区域,面积比例约为6%,说明白洋淀流域NDVI的波动变化逐渐趋于十分稳定的状态;波动趋势呈显著和极显著增加的区域面积比例约为3.4%,分布较为分散,说明流域内仅有极少部分地区NDVI的波动变化趋势呈现加剧的状态。

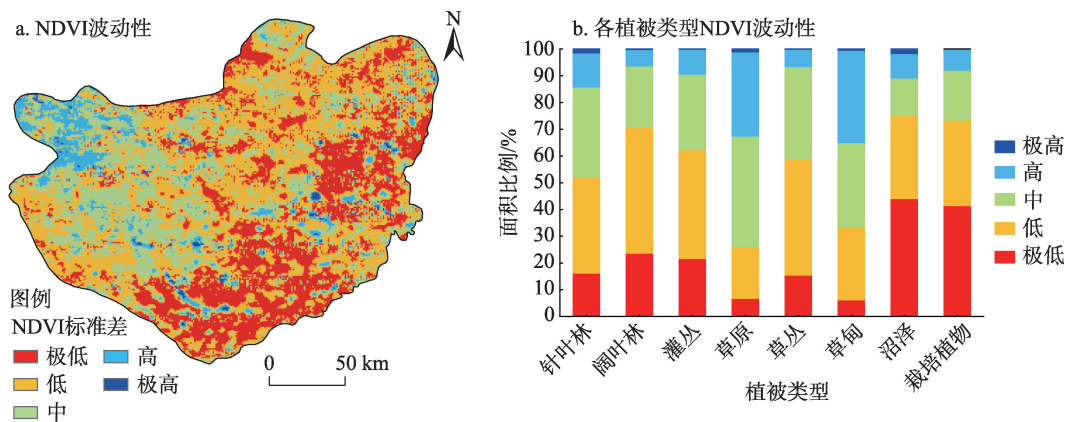


图5 2001—2018年白洋淀流域NDVI波动性分布(a)及不同植被类型显著性统计(b)

Figure 5 Spatial fluctuation of NDVI (a) and significance level of different vegetation types (b) in the Baiyangdian Basin, 2001-2018

表3 2001—2018年白洋淀流域NDVI不同波动等级面积百分比

Table 3 Percentage area of different NDVI fluctuation levels in the Baiyangdian Basin, 2001-2018

(%)

| 波动性 | 植被类型 | | | | | | | | 全区 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 针叶林 | 阔叶林 | 灌丛 | 草原 | 草丛 | 草甸 | 沼泽 | 栽培植物 | |
| 极低 | 16.18 | 23.74 | 21.71 | 6.76 | 15.60 | 6.27 | 44.08 | 41.52 | 32.19 |
| 低 | 35.84 | 47.27 | 40.60 | 19.26 | 43.58 | 27.35 | 31.25 | 31.97 | 35.62 |
| 中 | 33.82 | 22.68 | 28.24 | 41.39 | 34.32 | 31.45 | 13.82 | 18.63 | 23.37 |
| 高 | 12.72 | 6.10 | 9.38 | 31.56 | 6.43 | 34.49 | 9.21 | 7.87 | 8.81 |
| 极高 | 1.45 | 0.21 | 0.07 | 1.02 | 0.07 | 0.44 | 1.64 | 0.02 | 0.01 |

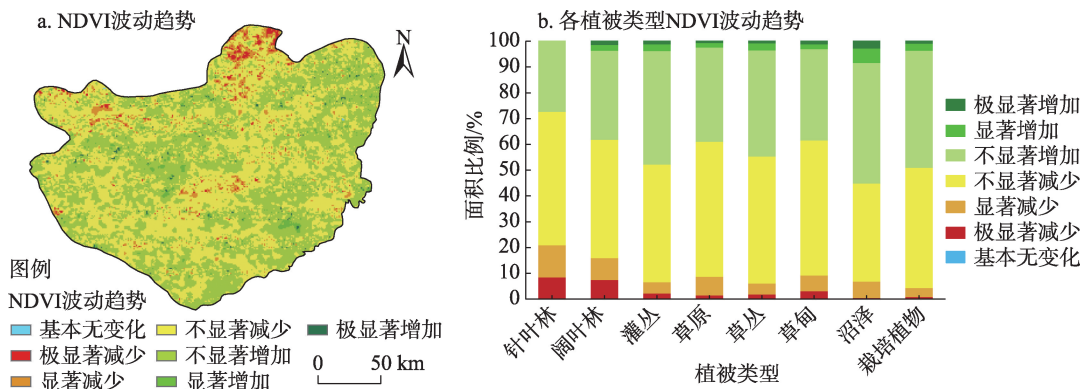


图6 2001—2018年白洋淀流域NDVI波动趋势分布(a)及不同植被类型显著性统计(b)

Figure 6 Spatial fluctuation trend of NDVI (a) and significance level of different vegetation types (b) in the Baiyangdian Basin, 2001-2018

表4 2001—2018年白洋淀流域NDVI不同波动趋势等级面积百分比

Table 4 Percentage area of different NDVI fluctuation trend levels in the Baiyangdian Basin, 2001-2018 (%)

| 波动趋势 | 植被类型 | | | | | | | | 全区 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 针叶林 | 阔叶林 | 灌丛 | 草原 | 草甸 | 沼泽 | 栽培植物 | | |
| 基本无变化 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.02 | 0.02 |
| 极显著减少 | 8.67 | 7.60 | 2.47 | 1.65 | 2.07 | 3.21 | 0.63 | 0.99 | 1.83 |
| 显著减少 | 12.43 | 8.56 | 4.24 | 7.22 | 4.26 | 6.17 | 6.35 | 3.53 | 4.19 |
| 不显著减少 | 51.73 | 45.91 | 45.74 | 52.37 | 49.25 | 52.39 | 38.10 | 46.56 | 46.95 |
| 不显著增加 | 27.17 | 34.47 | 44.00 | 36.49 | 41.06 | 35.36 | 46.67 | 45.49 | 43.58 |
| 显著增加 | 0.00 | 2.30 | 2.58 | 1.86 | 2.79 | 1.91 | 5.71 | 2.74 | 2.69 |
| 极显著增加 | 0.00 | 1.17 | 0.97 | 0.41 | 0.57 | 0.96 | 2.54 | 0.67 | 0.75 |

不同植被类型NDVI波动趋势相近(图6b)。针叶林和阔叶林NDVI波动趋势呈显著和极显著下降的区域面积比例略大,分别为21.10%和16.16%;沼泽NDVI的波动趋势呈显著和极显著增加的面积比例较其他几种植被类型较大,为8.25%,但是其总体的波动趋势并不显著。总体而言,白洋淀流域各植被类型NDVI的波动趋势不显著。

4.3 气候变化对NDVI的影响

本文选取降水(年降水总量)和气温(年平均气温)作为气候变化的影响因素,进一步探究气候变化对不同植被类型NDVI的影响。由图7可知,白洋淀流域2001—2018年降水量呈较为明显的增长趋势,增长率约为7.70 mm/a;气温呈微弱的下降趋势,变化率约为-0.01 °C/a。2001—2018年流域及各植被类型NDVI与气候因子的相关关系如图8和表5所示。NDVI与降水的偏相关系数在-0.62~0.86之间,区域均值为0.37。大部分区域NDVI与

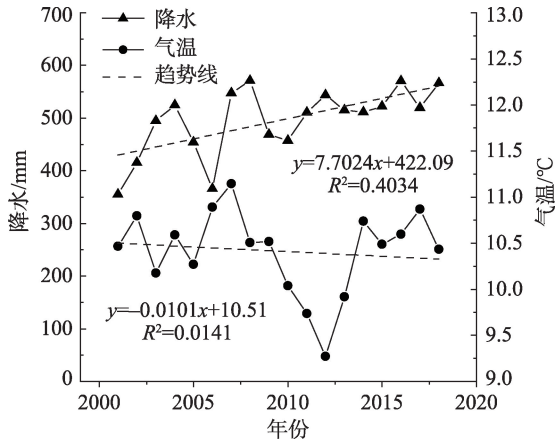


图7 2001—2018年白洋淀流域降水气温趋势图

Figure 7 Trends of precipitation and temperature in the Baiyangdian Basin, 2001-2018

降水具有正相关关系,呈显著和强显著正相关的区域面积比例为42.94%。针叶林NDVI和降水呈显著或强显著正相关的面积比例最大,为90.46%,说明降水对针叶林的影响最大;阔叶林、灌丛、草原、

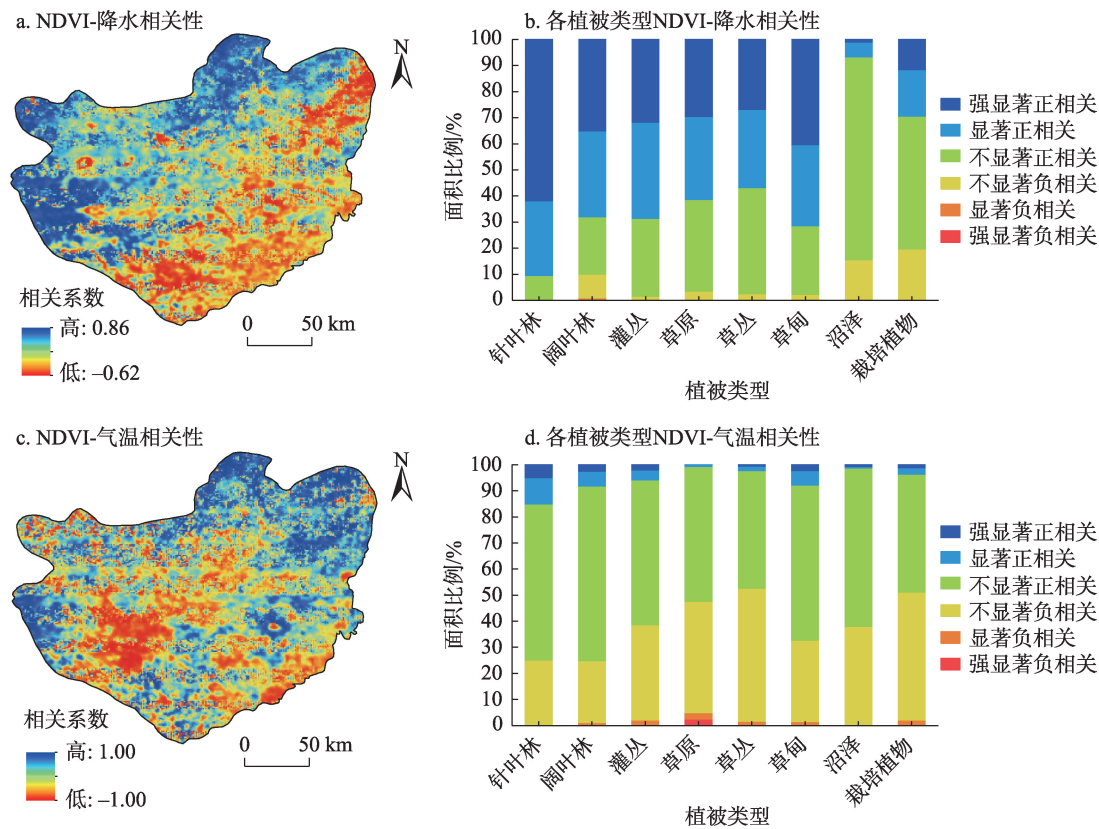


图8 2001—2018年白洋淀流域NDVI与降水(a)、气温(c)的偏相关性及其不同植被类型显著性统计(b)、(d)

Figure 8 Partial correlation coefficients of NDVI and precipitation (a), temperature (c) and significance level of different vegetation types (b) and (d) in the Baiyangdian Basin, 2001-2018

表5 2001—2018年白洋淀流域NDVI与降水、气温不同偏相关性等级面积百分比

Table 5 Percentage area of different partial correlation levels between NDVI and precipitation and temperature in the Baiyangdian Basin from 2001-2018 in the Baiyangdian Basin, 2001-2018 (%)

| 气候因子 | 相关性 | 植被类型 | | | | | | | | 全区 |
|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 针叶林 | 阔叶林 | 灌丛 | 草原 | 草丛 | 草甸 | 沼泽 | 栽培植物 | |
| 降水 | 强显著负相关 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.02 |
| | 显著负相关 | 0.00 | 0.96 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.51 | 0.35 |
| | 不显著负相关 | 0.00 | 9.14 | 1.61 | 3.51 | 2.54 | 2.35 | 15.56 | 19.27 | 12.79 |
| | 不显著正相关 | 9.54 | 21.95 | 29.83 | 35.26 | 40.77 | 26.32 | 77.78 | 50.83 | 43.89 |
| | 显著正相关 | 28.61 | 32.93 | 36.89 | 31.75 | 29.92 | 31.02 | 5.71 | 17.77 | 23.67 |
| | 强显著正相关 | 61.85 | 34.97 | 31.65 | 29.48 | 26.77 | 40.31 | 0.95 | 11.59 | 19.27 |
| 气温 | 强显著负相关 | 0.00 | 0.33 | 0.46 | 2.47 | 0.45 | 0.43 | 0.00 | 0.41 | 0.43 |
| | 显著负相关 | 0.29 | 0.83 | 1.71 | 2.47 | 1.28 | 1.13 | 0.00 | 1.70 | 1.57 |
| | 不显著负相关 | 24.86 | 23.66 | 36.46 | 42.68 | 50.89 | 31.19 | 38.10 | 49.09 | 45.40 |
| | 不显著正相关 | 59.83 | 66.99 | 55.62 | 51.75 | 45.11 | 59.51 | 60.63 | 45.27 | 48.56 |
| | 显著正相关 | 10.12 | 5.72 | 3.71 | 0.62 | 1.69 | 5.47 | 0.63 | 2.36 | 2.72 |
| | 强显著正相关 | 4.91 | 2.46 | 2.04 | 0.00 | 0.57 | 2.26 | 0.63 | 1.18 | 1.32 |

草丛和草甸NDVI与降水呈显著或强显著正相关的区域面积比例也均超过55%,说明降水对多数植被具有较为显著的影响;沼泽和栽培植物NDVI与降水主要呈现不显著正相关关系,说明降水对这两种植被类型NDVI影响并不大。NDVI与气温的偏相关系数介于-1.00~1.00之间,区域均值为0.02;全区

及各植被类型NDVI与气温的相关性不显著,说明气温对该地区NDVI影响不大。结合降水和气温的变化趋势可知,当地逐渐变湿的气候条件将更有利于植被的生长。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文采用Sen+Mann-Kendall、波动性分析和相关性分析等方法分析了2001—2018年间白洋淀流域及不同植被类型NDVI时空演变规律及对气候变化的响应,主要结论如下:

(1)白洋淀流域NDVI的空间分布不均,呈现东北部、南部高,西北部低的空间分布规律。2001—2018年NDVI总体呈增加趋势,增长率约0.0031/a,其中增加趋势显著的面积比例超过50%;除沼泽和栽培植物外,其余各植被类型NDVI的增加趋势显著,表明当地植被覆盖总体呈增长趋势。

(2)白洋淀流域及各植被类型NDVI波动性总体较低,且波动性的时间变化趋势不显著,表明当地植被覆盖的增长趋势总体比较稳定,没有出现剧烈的波动变化情况。沼泽和栽培植物NDVI的变化趋势、波动性和波动性的时间变化趋势均不显著,表明这两者的NDVI几乎没有出现明显变化。

(3)降水与多数植被类型NDVI主要呈现显著的正相关关系,而气温与各植被类型NDVI的相关性较弱,表明降水是影响白洋淀流域植被生长的主要气候因子,且降水对针叶林的影响最大。降水与沼泽和栽培植物NDVI的相关关系与其他植被类型明显不同,表明这两种植被主要受其他因素的影响。

5.2 讨论

由前文可知,降水增多导致白洋淀流域大部分植被类型NDVI呈显著增长趋势。白洋淀流域属于温带大陆性季风气候,植被生长季的热量相对充足,但是降水的年内分配严重不均。植被自每年的3月底或4月初开始生长,生长过程的前半期需要有大量的水分供应以保证植被进行光合作用。白洋淀流域春季多风干燥,降水集中在7、8、9月,降水与植被生长周期不匹配^[38];同时,有研究表明,白洋淀流域上游山区1960—2013年发生多次干旱^[39]。因

此水分是影响当地植被生长的主要限制因素,降水增多有利于植被的生长。然而,除气候因素外,地形、土壤等也会对植被覆盖产生影响,这还有待下一步的深入研究。

降水对沼泽和栽培植物NDVI的影响与其他植被类型有明显不同。结合以往研究,当地的农业以灌溉为主^[40],合理有效的灌溉措施保证了栽培植物的生长;而沼泽植物的生长则得利于政府实施的大量生态补水工程^[41]。由此可见,人类活动会在一定程度上影响植被的生长,降低植物生长对自然因子的依赖程度。但是关于如何定量描述人类活动的影响依然存在困难^[42]。在今后的研究中,将结合土地利用、地方政策、生态工程报告等数据和资料,利用残差分析、面板数据模型等方法,客观定量地分析排除其他因素作用下的人类活动对植被生长的影响。

参考文献(References):

- [1] Akinyemi F O, Kgomo M O. Vegetation dynamics in African drylands: An assessment based on the Vegetation Degradation Index in an agro-pastoral region of Botswana[J]. *Regional Environmental Change*, 2019, 19(7): 2027–2039.
- [2] Cheng L L, Zhang Y, Sun H Y. Vegetation cover change and relative contributions of associated driving factors in the ecological conservation and development zone of Beijing, China[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2020, 29(1): 53–65.
- [3] 阿荣, 毕其格, 董振华. 基于MODIS/NDVI的锡林郭勒草原植被变化及其归因[J]. *资源科学*, 2019, 41(7): 1374–1386. [A R, Bi Q G, Dong Z H. Change of grassland vegetation and driving factors based on MODIS / NDVI in Xilingol, China[J]. *Resources Science*, 2019, 41(7): 1374–1386.]
- [4] Fang W, Huang S Z, Huang Q, et al. Probabilistic assessment of remote sensing-based terrestrial vegetation vulnerability to drought stress of the Loess Plateau in China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, DOI: 10.1016/j.rse.2019.111290
- [5] 张志强, 刘欢, 左其亭, 等. 2000–2019年黄河流域植被覆盖度时空变化[J]. *资源科学*, 2021, 43(4): 849–858. [Zhang Z Q, Liu H, Zuo Q T, et al. Spatiotemporal change of fractional vegetation cover in the Yellow River Basin during 2000–2019[J]. *Resources Science*, 2021, 43(4): 849–858.]
- [6] 易浪, 任志远, 张翀, 等. 黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系[J]. *资源科学*, 2014, 36(1): 166–174. [Yi L, Ren Z Y,

2021年6月

- Zhang C, et al. Vegetation cover, climate and human activities on the Loess Plateau[J]. *Resources Science*, 2014, 36(1): 166–174.]
- [7] Sun W Y, Song X Y, Mu X M, et al. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 209: 87–99.
- [8] 苟娇娇, 王飞, 金凯, 等. 黄土高原植被恢复引发区域气温下降[J]. *生态学报*, 2018, 38(11): 3970–3978. [Gou J J, Wang F, Jin K, et al. Cooling effect induced by vegetation restoration on the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(11): 3970–3978.]
- [9] 赵卓文, 张连蓬, 李行, 等. 基于MOD13Q1数据的宁夏生长季植被动态监测[J]. *地理科学进展*, 2017, 36(6): 741–752. [Zhao Z W, Zhang L P, Li X, et al. Monitoring vegetation dynamics during the growing season in Ningxia based on MOD13Q1 data[J]. *Progress in Geography*, 2017, 36(6): 741–752.]
- [10] 袁倩颖, 马彩虹, 文琦, 等. 六盘山贫困区生长季植被覆盖变化及其对水热条件的响应[J]. *国土资源遥感*, 2021, 33(2): 220–227. [Yuan Q Y, Ma C H, Wen Q, et al. Vegetation cover change and its response to water and heat conditions in the growing season in Liupanshan poverty-stricken area[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2021, 33(2): 220–227.]
- [11] Zhou L M, Tucker C J, Kaufmann R K, et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2001, 106: 20069–20084.
- [12] de Jong R, de Bruin S, de Wit A, et al. Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 692–702.
- [13] Piao S L, Nan H J, Huntingford C, et al. Evidence for a weakening relationship between interannual temperature variability and northern vegetation activity[J]. *Nature Communications*, 2014, 5 (1): 5018.
- [14] 陆晴, 刘根林, 闫冰, 等. 气候变暖背景下中亚地区极端降水事件变化及其对植被覆盖的影响[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(4): 226–235. [Lu Q, Liu G L, Yan B, et al. Variation of extreme precipitation events and their impacts on vegetation coverage in central Asia under climate warming[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(4): 226–235.]
- [15] 孙锐, 陈少辉, 苏红波. 2000–2016年黄土高原不同土地覆盖类型植被NDVI时空变化[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(8): 1248–1258. [Sun R, Chen S H, Su H B. Spatiotemporal variations of NDVI of different land cover types on the Loess Plateau from 2000 to 2016[J]. *Progress in Geography*, 2019, 38(8): 1248–1258.]
- [16] Cheng L L, Zhang Y, Sun H Y. Vegetation cover change and relative contributions of associated driving factors in the Ecological Conservation and Development Zone of Beijing, China[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2020, 29(1): 53–65.
- [17] 毛转梅, 陈劲松, 彭尔瑞, 等. 甘肃省植被覆盖时空变化趋势研究[J]. *江西农业学报*, 2020, 32(3): 125–130. [Mao Z M, Chen J S, Peng E R, et al. Study on spatial and temporal variation trend of vegetation cover in Gansu Province[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2020, 32(3): 125–130.]
- [18] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982–2015年中国气候变化和人类活动对植被NDVI变化的影响[J]. *地理学报*, 2020, 75(5): 961–974. [Jin K, Wang F, Han J Q, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982–2015[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(5): 961–974.]
- [19] 万红莲, 王静. 多尺度下宝鸡地区干旱动态格局演变及其与植被覆盖的关系[J]. *生态学报*, 2018, 38(19): 6941–6952. [Wan H L, Wang J. Study of dynamic pattern evolution of drought and its correlation with vegetation cover in Baoji area on multi-scale[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(19): 6941–6952.]
- [20] 张辰华, 李书恒, 白红英, 等. 太白山地区7月NDVI多尺度周期变化及其对气候因子的响应[J]. *资源科学*, 2019, 41(11): 2131–2143. [Zhang C H, Li S H, Bai H Y, et al. Multi-scale periodic variation of NDVI in July and its response to climatic factors in the Taibai Mountain area[J]. *Resources Science*, 2019, 41(11): 2131–2143.]
- [21] Liu Z Z, Wang H, Li N, et al. Spatial and temporal characteristics and driving forces of vegetation changes in the Huaihe River Basin from 2003 to 2018[J]. *Sustainability*, 2020, 12(6): 2198–2198.
- [22] 何航, 张勃, 侯启, 等. 1982–2015年中国北方归一化植被指数(NDVI)变化特征及对气候变化的响应[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(1): 70–80. [He H, Zhang B, Hou Q, et al. Variation characteristic of NDVI and its response to climate change in Northern China from 1982 to 2015[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(1): 70–80.]
- [23] 高江波, 焦珂伟, 吴绍洪. 1982–2013年中国植被NDVI空间异质性的气候影响分析[J]. *地理学报*, 2019, 74(3): 534–543. [Gao J B, Jiao K W, Wu S H. Revealing the climatic impacts on spatial heterogeneity of NDVI in China during 1982–2013[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 534–543.]
- [24] 王静, 万红莲, 姚顺波. 生长季川陕不同地带植被覆盖对气候变化的时空响应[J]. *生态学报*, 2019, 39(14): 5218–5231. [Wang J, Wan H L, Yao S B. Spatial and temporal response of vegetation cover to climate change in different zones of Sichuan-Shaanxi area during growing season[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(14): 5218–5231.]
- [25] Pang G J, Wang X J, Yang M X. Using the NDVI to identify variations in, and responses of, vegetation to climate change on the Tibetan Plateau from 1982 to 2012[J]. *Quaternary International*, 2017, 444: 87–96.
- [26] 刘家福, 马帅, 李帅, 等. 1982–2016年东北黑土区植被NDVI动

- 态及其对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(21): 7647–7657. [Liu J F, Ma S, Li S, et al. Changes in vegetation NDVI from 1982 to 2016 and its responses to climate change in the black-soil area of Northeast China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(21): 7647–7657.]
- [27] 刘静, 温仲明, 刚成诚. 黄土高原不同植被覆盖类型 NDVI 对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 678–691. [Liu J, Wen Z M, Gang C C. Normalized difference vegetation index of different vegetation cover types and its responses to climate change in the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(2): 678–691.]
- [28] 高黎明, 张乐乐. 青海湖流域植被盖度时空变化研究[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(9): 1318–1329. [Gao L M, Zhang L L. Spatiotemporal dynamics of the vegetation coverage in Qinghai Lake Basin[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2019, 21(9): 1318–1329.]
- [29] 李茂华, 都金康, 李皖彤, 等. 1982–2015 年全球植被变化及其与温度和降水的关系[J]. 地理科学, 2020, 40(5): 823–832. [Li M H, Du J K, Li W T, et al. Global vegetation change and its relationship with precipitation and temperature based on GLASS-LAI in 1982–2015[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(5): 823–832.]
- [30] 杨苗, 龚家国, 赵勇, 等. 白洋淀区域景观格局动态变化及趋势分析[J]. 生态学报, 2020, 40(20): 7165–7174. [Yang M, Gong J G, Zhao Y, et al. Analysis of dynamic changes and trends in the landscape pattern of the Baiyangdian Region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(20): 1–10.]
- [31] 温静, 黄大庄. 白洋淀流域景观结构和格局时空变化规律及其与地形因子关系[J]. 河北农业大学学报, 2020, 43(3): 86–95. [Wen J, Huang D Z. Spatio-temporal variation rules of landscape structure and pattern and their relationship with topographic factors in Baiyangdian Basin[J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2020, 43(3): 86–95.]
- [32] 徐新良. 中国月度植被指数(NDVI)空间分布数据集[DB/OL]. (2018–06–06) [2020–7–20]. <https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=257>. [Xu X L. Spatial Distribution Data Set of China Monthly Vegetation Index (NDVI)[DB/OL]. (2018–06–06) [2020–07–20]. <https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=257>.]
- [33] 刘红兵. 近 30 年中国北方 13 省植被生长季变化分析[D]. 兰州: 西北师范大学, 2016. [Liu H B. Analysis of Vegetation Growing Season Changes in 13 Provinces of Northern China in Recent 30 Years[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2016.]
- [34] Cao R, Jiang W G, Yuan L H, et al. Inter-annual variations in vegetation and their response to climatic factors in the upper catchments of the Yellow River from 2000 to 2010[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(6): 963–979.
- [35] Fuller D O, Wang Y. Recent trends in satellite vegetation index observations indicate decreasing vegetation biomass in the Southeastern Saline Everglades Wetlands[J]. *Wetlands*, 2014, 34: 67–77.
- [36] 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 等. 2000–2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. 地理学报, 2015, 70(5): 705–716. [Liu X F, Pan Y Z, Zhu X F, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage in Qinling–Daba Mountains in relation to environment factors[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(5): 705–716.]
- [37] Li S S, Yang S N, Liu X F, et al. NDVI-Based analysis on the influence of climate change and human activities on vegetation restoration in the Shaanxi–Gansu–Ningxia Region, central China[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(9): 11163–11182.
- [38] 蒋丽伟, 张家琦, 赵一臣, 等. 北京山区典型林分生长季叶面积指数动态变化[J]. 林业资源管理, 2019, (2): 132–136. [Jiang L W, Zhang J Q, Zhao Y C, et al. Dynamic change of leaf area index in the growing season of typical forests in Beijing mountainous area[J]. *Forest Resources Management*, 2019, (2): 132–136.]
- [39] 尹军. 流域干旱还原理论与方法研究: 以白洋淀流域为例[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017. [Yin J. Research Drought Reduction Theory and Method in Basin: With Baiyangdian River Basin as the Case Study[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017.]
- [40] Kang S C, Eltahir E A B. North China Plain threatened by deadly heatwaves due to climate change and irrigation[J]. *Nature Communications*, 2018, DOI: 10.1038/s41467-018-05252-y.
- [41] 杨薇, 孙立鑫, 王烜, 等. 生态补水驱动下白洋淀生态系统服务演变趋势[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1077–1084. [Yang W, Sun L X, Wang X, et al. Changes in ecosystem services in Baiyangdian Lake driven by environmental flow releases[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(5): 1077–1084.]
- [42] 赵鹏, 陈桃, 王茜, 等. 气候变化和人类活动对新疆草地生态系统 NPP 影响的定量分析[J]. 中国科学院大学学报, 2020, 37(1): 51–62. [Zhao P, Chen T, Wang Q, et al. Quantitative analysis of the impact of climate change and human activities on grassland ecosystem NPP in Xinjiang[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 37(1): 51–62.]

Spatiotemporal variations of NDVI of different vegetation types in the Baiyangdian Basin under the background of climate change

CHEN Ting¹, XIA Jun^{1,2}, ZOU Lei², YAN Qiang³

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources

Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. Center for Strategic Research on Global Mineral Resources, Institute of Mineral

Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract: Understanding the dynamic changes of vegetation cover and its response to climate change is of great significance for the protection and construction of regional ecological environments. Based on the SPOT/VEGETATION NDVI data, the spatiotemporal variation characteristics of NDVI and its response to climate change between 2001-2018 in the whole area as well as in different types of vegetation cover zones of the Baiyangdian Basin were analyzed by using Sen+Mann-Kendall trend analysis, fluctuation analysis, and correlation analysis. The results indicate that: (1) From 2001 to 2018, vegetation NDVI in the whole region showed an increasing trend, with an increase rate of 0.0031/a, and 53.79% area passed the significance test ($P<0.05$). The NDVI of coniferous forests, broad-leaved forests, bushland, grassland, and meadows showed an obvious increasing trend ($P<0.05$), but the NDVI of swamp and cultivated land did not show obvious change. (2) The fluctuation of vegetation NDVI in the whole region was low. The fluctuation of NDVI was significantly low in 67.81% area of the region ($P<0.05$). Except in grassland and meadows, significantly low fluctuation was observed at over 50% of the area in all other vegetation types. (3) There was a weak correlation between NDVI and temperature. Except for swamp and cultivated land, the response of NDVI to precipitation was more consistent for the remaining vegetation types, with a significant positive correlation ($P<0.05$). The effect of temperature on NDVI was not significant at the watershed scale and in different vegetation types. The results of this study have certain significance for understanding the mechanism of impact of climate change on vegetation growth and for regional ecological environment protection and governance.

Key words: vegetation types; NDVI; climate change; fluctuation analysis; correlation analysis; Baiyangdian Basin