

近 40 年来南四湖湿地 NDVI 变化特征及其控制因子分析*

于泉洲^{1,4}, 梁春玲^{2**}, 张祖陆³

- (1: 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)
(2: 商丘师范学院环境与规划学院, 商丘 476000)
(3: 山东师范大学人口·资源与环境学院, 济南 250014)
(4: 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 利用 Landsat 系列卫星的 MSS、TM 和 ETM+ 遥感数据, 计算了研究区的归一化植被指数 (NDVI), 并以此为湿地植被活动的指标, 研究 1973—2011 年间该湿地植被变化特征及年内季节变化特征, 揭示植被活动在年内和年际变化的控制因子以及湿地植被对于气候变化、人类活动和极端干旱事件的响应特征。结果表明: (1) 近 40 年来南四湖湿地植被各个季节的变化特征不尽相同。春季 NDVI 呈现先降低后增加的特征, 主要先后受到研究区围垦、渔业养殖等人为活动和气候变化 (升温) 的影响; 夏季和冬季的 NDVI 呈现显著降低趋势, 主要受到围垦、渔业养殖等人类活动的影响; 秋季 NDVI 的变化不显著。 (2) 年内季节变化方面, 湿地植被面积和 NDVI 都呈现单峰的变化特征, 从春季开始增加, 在夏季末 (全年的第 202 和 205 d) 达到最大值, 然后开始下降, 到冬季降至最低。植被的年内季节变化特征主要受到月均温度的控制。 (3) 干旱在一定程度上不是湖泊湿地 NDVI 增加的限制因子。干旱导致湖泊水位下降, 滨湖滩地及湖底露出, 可能会促进湿地植被生长和植被面积的扩大, 使得湿地 NDVI 增加。

关键词: NDVI; 植被活动; 气候变化; 人类活动; 湿地; 南四湖

NDVI changes and control factors of the wetland in the Lake Nansi, Shandong Province, in the past 40 years

YU Quanzhou^{1,4}, LIANG Chunling² & ZHANG Zulu³

- (1: *Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, P. R. China*)
(2: *Department of Environment and Programming, Shangqiu Normal University, Shangqiu 476000, P. R. China*)
(3: *School of Population, Resources and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, P. R. China*)
(4: *University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China*)

Abstract: The normalized difference vegetation indexes (NDVI) of the wetland in Lake Nansi are calculated on the basis of MSS, TM and ETM + remote sensing data collected by the Landsat satellites. The activities of the wetland vegetations are deduced by these indexes. By studying the characteristics of seasonal vegetation activities of the wetland during 1973–2011, we revealed the control factors of intra-annual and inter-annual vegetation activities. Moreover, our study showed the response characteristics of wetland vegetation to climate changes, human activities and extreme drought events. The results can be summarized as follows: (1) The characteristics of the seasonal variation of wetland vegetation in Lake Nansi are not identical in the past 40 years. The NDVI in spring decreased first and then increased, which may be caused by the climate variation (temperature increase) and human activities such as reclamation and aquaculture in the study area; The NDVI in summer and winter present a significant decreasing trend due to the effects of human activities. However, the variation of the NDVI in autumn is comparatively small. (2) The NDVI and area of wetland vegetation all present single-peaked variation characteristics in term of seasonal variations in one year. They increase in spring and reach the maximum in late summer (the 202nd day and 205th day in the year), then decrease and reach the

* 教育部人文社会科学研究青年基金项目 (12YJCZH120) 资助。2013-06-17 收稿; 2013-09-08 收修改稿。于泉洲 (1983~), 男, 博士研究生; E-mail: yuquanzhou2008@126.com.

** 通信作者; E-mail: guliang1229@126.com.

lowest values in winter. (3) To certain degree, drought is not the limiting factor for *NDVI* increase. In fact, since drought results in the drawdown of water level of the lake, the beach and lake bottom are exposed. All these factors probably increase the *NDVI* by prompting the growth of vegetation and enlarging vegetation area in the wetland.

Keywords: *NDVI*; vegetation activity; climate change; anthropic disturbance; wetland; Lake Nansi

近几十年来全球变化不断加剧^[1],国内外有关陆地生态系统对全球变化响应与适应性研究也已开展^[2-6].湿地作为陆地生态系统重要的组成部分和全球生产力最高的生态系统之一,对于全球变化的响应同样十分敏感^[7-9].湿地植被通过光合作用固定大气中的 CO_2 ,自然状态下以凋落物的形式储存在湿地泥炭层中导致分解缓慢,因此具有很强的储碳固碳能力^[10-12],在调节全球碳平衡、减缓大气 CO_2 浓度上升以及维护全球气候稳定等方面具有重要作用^[9,13-15].

在气候变化和人类活动双重影响下,湿地植被的响应与适应是当前全球变化和陆地生态系统研究的重点之一.当前,对于陆地生态系统植被研究多借助于遥感数据源提供的植被指数产品,如 NOAA AVHRR、SPOT-4 Vegetation 及 MODIS 等^[16],植被指数不仅可以反映植被生长状况,而且在模拟陆地生态系统净初级生产力 (net primary productivity, NPP) 方面也具有重要作用.虽然植被指数产品具有较好的时间连续性,但往往空间分辨率较低^[17-18],对于区域尺度生态系统植被状态研究具有一定的局限性.因此当前国内外利用归一化植被指数 (*NDVI*) 等植被指数研究陆地生态系统植被变化特征,主要局限于全球尺度、国家尺度或大区域尺度上粗分辨率的趋势性或格局性的分析^[2-6,19-21],对于像南四湖湿地这样景观破碎化严重的小区域^[22],复杂生态系统植被季节和年际的变化特征及其控制因素还不是很清楚且研究较少.例如,在 Piao 等^[21]的研究中,由于遥感数据的空间分辨率较低,直接将南四湖湿地区域直接视作非植被区 ($NDVI < 0.1$),这对于国家尺度的格局研究可能是合适的,但对于研究该区域植被动态变化显然是不合适的.因此,基于高空间分辨率的遥感数据开展区域典型生态系统类型植被研究不仅对于阐明典型生态系统变化特征意义重大,而且对于大尺度植被研究也是有益补充. Landsat 系列卫星自 1972 年开始对地观测,是对地观测时间最长和空间分辨率较高的遥感数据源,为解决区域植被长时间变化研究提供了条件^[23-25].本文即以气候变化背景下受人类活动影响较大的南四湖湿地为典型区,利用 Landsat 遥感数据计算的 *NDVI* 作为植被活动的指标,揭示近 40 年来南四湖湿地植被的年际和季节变化特征及其控制因素,阐明湿地植被对于全球变化的响应特征,从而丰富陆地生态系统植被对全球变化响应特征的认识.

1 研究区概况

南四湖 ($34^{\circ}27' \sim 35^{\circ}20'N$, $116^{\circ}34' \sim 117^{\circ}21'E$) 位于山东省西南部,行政上隶属于济宁市微山县.南四湖为河迹洼地型湖泊^[26],自西北向东南由南阳、独山、昭阳和微山 4 个相连的湖泊组成,全湖南北长约 120 km,东西宽在 5 ~ 25 km 之间.南四湖不仅是中国十大淡水湖之一和南水北调东线工程主要的调蓄枢纽,也是山东省重要的生物宝库和水禽栖息地,在维护区域经济发展和生态平衡方面具有重要意义.南四湖呈浅碟形,平均水深在 1.5 m 左右,属湖泊湿地范畴.湿地内分布大量芦苇、荷、芡、眼子菜、金鱼藻等湿生、水生自然植被,也有部分林地、农田等人工植被分布.近年来,随着气候变化和人为活动的影响,南四湖生态环境变化显著^[27-29].

2 数据与研究方法

2.1 数据

从收集到的研究区 115 景 Landsat 数据中,逐一筛选掉有厚云、薄云覆盖面积占到研究区面积 5% 以上以及由于传感器故障产生条纹 (主要针对 MSS 数据) 的遥感影像,最终保留覆盖南四湖区域的 1973—2011 年的 Landsat 卫星的 MSS、TM 与 ETM+ 数据共 84 景,1970s 春、夏、秋、冬季分别有 2、4、1、4 景,1980s 春、夏、秋、冬季分别有 7、4、1、4 景,1990s 春、夏、秋、冬季分别有 0、4、5、5 景,2000 年后春、夏、秋、冬季分别有 11、12、16、4 景.收集了位于南四湖流域内的距离南四湖湿地较近的兖州气象观测站 1951—2012 年的气温、降水量逐年数据和逐月数据作为研究区的气象要素数据.另外收集了南四湖所在行政单位微山县 1970s 以来

的渔业产值数据作为湿地人类活动的替代指标。

2.2 研究方法

2.2.1 遥感数据与植被指数 由于现有的 AVHRR、MODIS 以及 SPOT 等的植被指数产品的空间分辨率较低,对于景观破碎化严重的南四湖湿地^[22],低空间分辨率的归一化植被指数(NDVI)数据很难准确反映植被变化的细节特征;而且最早的 AVHRR/NDVI 数据只能追溯到 1981 年,比 Landsat 卫星对地观测晚了近 10 年。故本研究使用 Landsat 遥感数据源。

NDVI 是基于植被叶绿素在 0.69 μm 处的强吸收,通过红光和近红外波段的组合实现对植被信息状态的表达^[30],能够较为准确地反映植被的覆盖程度、生长状况、生物量以及光合作用强度,因此常被直接或间接地用于研究植被活动^[2,6,19-21]。虽然近年来有研究指出 EVI(enhance vegetation index)通过引入蓝光波段信息,对于有高生物量植被区域具有更好的灵敏度,较之 NDVI 具有一定优势^[17-18],但是 EVI 的计算需要蓝光波段的信息,早期的 Landsat 数据(MSS)没有蓝光通道,难以计算 EVI。因此本研究使用 NDVI 进行植被变化特征分析,计算公式为:

$$NDVI = (R_{NIR} - R_{Red}) / (R_{NIR} + R_{Red}) \quad (1)$$

2.2.2 植被 NDVI 阈值 植被的 NDVI 阈值具有一定的时变性,但在辐射校正的情况下阈值具有相对稳定性^[31]。有研究将年平均 NDVI > 0.1 的像元算作植被区^[3,19],将 NDVI < 0.2152 认为是湖泊水面^[32]。也有研究将 NDVI < 0.2 视为裸土,NDVI > 0.2 才视为有植被^[33]。然而,通过研究不同季节研究区的 Landsat 影像与其对应 NDVI 发现,不同植被类型 NDVI 范围不同:目视判读可知,挺水和浮水植被(芦苇与荷田群落) NDVI 一般大于 0.55。沉水植被区的 NDVI 一般介于 0.42 ~ 0.55 之间,有枯黄植被或裸地等的混合像元的 NDVI 一般在 0.1 ~ 0.42 之间,纯净湖水像元的 NDVI 一般小于 0.1 且多为负值。综合南四湖湿地植被 NDVI 特征,选择 NDVI > 0.1 的像元计算湿地平均 NDVI,同时选择 NDVI > 0.42 的像元进行湿地绿色植被面积统计。

2.2.3 遥感数据处理 对收集到的 Landsat 影像进行逐一检查,去除坏条带和云覆盖明显影响的数据。由于使用的 Landsat 数据已做过几何校正,本研究直接对所有影像进行统一裁切获得感兴趣区,利用 MODTRAN 辐射传输模型对影像进行快速大气校正,然后利用公式(1)批量计算整个湿地每个影像像元的 NDVI 值,其中对于 MSS 数据选择 band2 和 band4,对于 TM 和 ETM+ 数据选择 band3 和 band4 进行波段运算。随后对湿地的 NDVI 影像逐个像元进行统计,计算湿地植被面积和湿地平均 NDVI。数据和图像处理在 ENVI 4.7 平台和 IDL7.1.2 编程环境下完成。

2.2.4 湿地 NDVI 变化特征及控制因素分析 由于 Landsat 卫星的重访周期为 18/16 d^[34]且时常有云干扰,造成数据在时序上 NDVI 数据分布频率不均匀,往往湿润年份数据较少而干旱年份数据较多。因此,为了合理研究湿地植被变化特征,将所有数据划归到 4 个季节,每个季节分别进行湿地植被 NDVI 均值的年际变化分析。根据南四湖当地气候特征,将每年的 2—4 月(儒略日(DOY):32 ~ 120 d)划分为春季,5—7 月(DOY:121 ~ 210 d)划分为夏季,8—10 月(DOY:211 ~ 300 d)划分为秋季,11—次年 1 月(DOY:301 ~ 365 d 以及 1 ~ 31 d)划分为冬季。对于植被在年内的变化特征分析,主要是考察湿地植被 NDVI 均值随着 DOY 的变化趋势。对于控制因子分析,主要考虑气候因素和人为活动因素在不同时间尺度上对湿地植被 NDVI 变化特征的控制机制。

渔业产值数据来源于文献[35-37],并按照微山县和济宁市的水产品总产值比例和水产品价格比例不变进行折算得到。对应渔业产值数据年份的夏季植被 NDVI 均值由当年或相近年份均值求得。具体计算为:如果有对应年份的夏季 NDVI 则直接利用,如果没有则选择该年份前后 1 年夏季 NDVI 做平均,如果前后一年夏季的 NDVI 也没有则选择前后 2 年的数据做平均。数据的统计分析和出图在 SigmaPlot 软件中完成。

3 结果分析与讨论

3.1 植被年际变化特征及控制因子分析

在 1970s 初到 2010s 初的近 40 年间,南四湖湿地植被 4 季平均 NDVI 表现出不同的时序变化特征(图 1)。其中,春季 NDVI 呈现先降后升的趋势;夏季和冬季 NDVI 呈现显著的下降趋势;而秋季 NDVI 变化不显著。

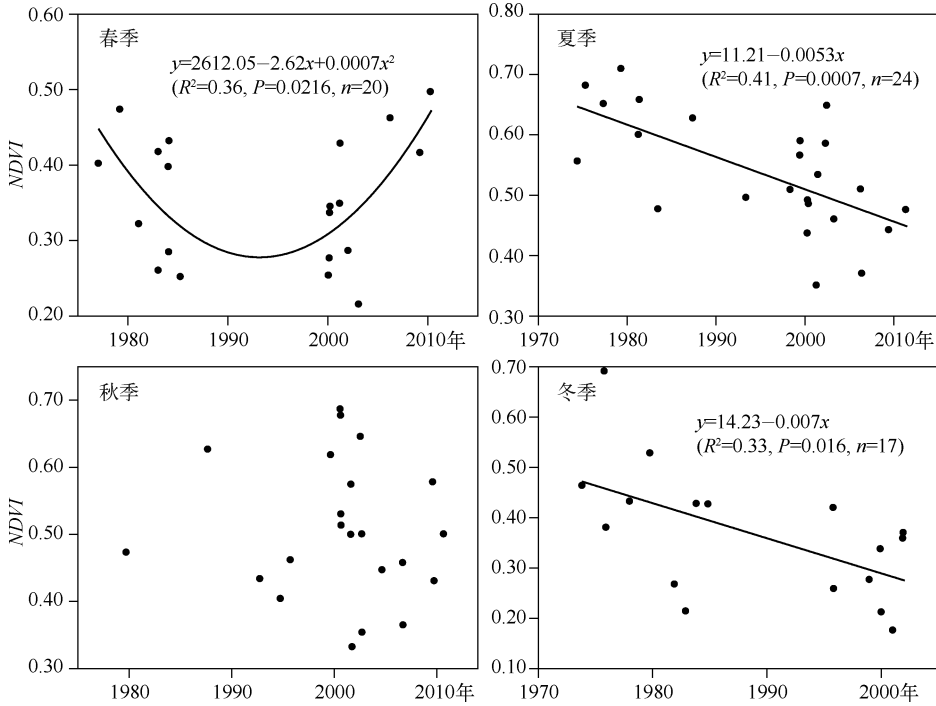


图 1 不同季节湿地植被 NDVI 年际变化特征

Fig. 1 NDVI inter-annual variation of different seasons

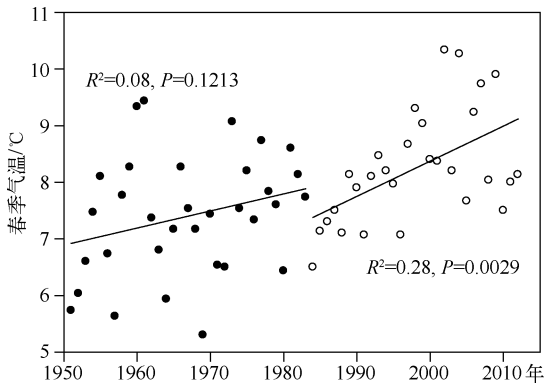


图 2 1951 年以来研究区春季气温变化趋势

Fig. 2 Spring air temperature variation since 1951 in the study area

春季是湿地植被平均 NDVI 变化较为显著的季节 ($P = 0.0216$) (图 1). 变化趋势分为 2 个阶段, 在 1990s 之前春季 NDVI 呈下降趋势, 而 1990s 之后呈现上升趋势. 许多研究表明^[2-6], 春季植被 NDVI 的增加是由气候变化导致春季温度升高引起的. 考察当地春季气温数据发现, 在 1980s 中期之前, 春季气温上升趋势不显著 ($P = 0.1213$), 1980s 中期之后春季气温才显著上升 ($P = 0.0029$) (图 2). 由于研究区内有少量的农田植被^[22], 且在 1970s 中期至 1980s 春季气温有下降的趋势, 种植的冬小麦等作物播种期的变动与该时期春季气温下降的叠加效应可能导致早期南四湖湿地 NDVI 的下降.

夏季湿地植被平均 NDVI 下降趋势最为明显 ($R^2 = 0.41, P = 0.0007$), NDVI 平均每年下降

0.0053 (图 1). 考察夏季的气温降水数据, 没有发现明显的变化趋势, 所以气象因子对夏季植被 NDVI 的下降没有明显影响. 主要的影响来自人为活动, 研究区居民在 1990s 开始发展人工养殖, 大规模毁苇毁荷、开挖鱼塘^[28], 在造成渔业增产的同时, 对自然植被干扰导致植被夏季平均 NDVI 下降. 分析发现渔业产值与植被夏季平均 NDVI 呈显著负相关 ($P = 0.0008$) (图 3), 进一步证明人为活动导致了夏季湿地植被 NDVI 的下降. 另外, 2002 年夏季 NDVI 有一个较高的点 (图 1), 这是因为当年极端干旱导致了南四湖近乎全湖干涸^[38], 潮湿而营养丰富的湖泊底泥可能导致植被疯长, 造成当年夏季湿地植被 NDVI 的显著增加, 这也反映

出对于湖泊型湿地,极端干旱事件在未引起植被水分胁迫时不仅不会降低植被NDVI反而会因为干旱导致湖泊水位下降引起植被的疯长和NDVI的增加。

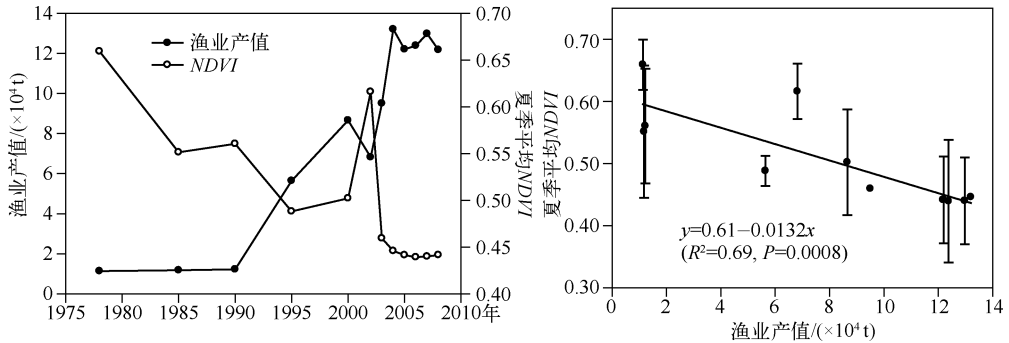


图3 1970s后期以来微山县渔业产值与对应年份湿地夏季平均NDVI变化

Fig. 3 Variation of Weishan County fish product and matching summer mean NDVI since the late 1970s

秋季湿地植被NDVI均值没有明显的变化趋势,这可能是由于研究前期的秋季NDVI均值数据过少,特别是1990s以前的数据较少,造成了统计上的不显著。另外,2002年前后的极端干旱事件导致了当时秋季NDVI的明显波动,可能干扰了较长时间尺度上秋季NDVI的变化趋势,使其变化不显著。从图1可以明显看出在2002年秋季前后NDVI的显著增加。从历年降水量距平值变化曲线(图4)来看,2002年是研究区降水最少的年份,而且之前的1999、2000和2001年降水也偏少,因此形成了多年连旱,并在2002年形成极端干旱事件。由于极端干旱事件在全球和区域尺度上都会降低陆地生态系统生产力^[39],甚至造成部分植被的死亡,因此可能干扰较长时间植被的变化特征。同时,有研究显示地表水的年际变异可能会导致湿地植被NDVI的年际变化特征不显著^[24]。

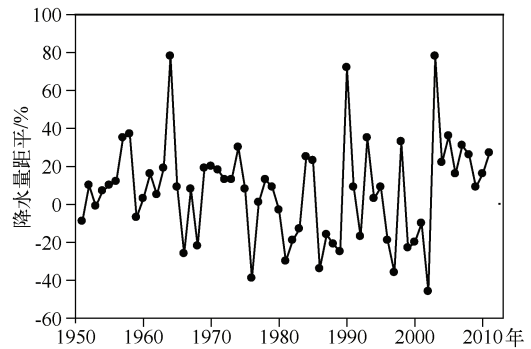


图4 1951年以来研究区年降水量距平值变化曲线

Fig. 4 Annual precipitation anomaly change curve since 1951 in study area

冬季植被NDVI均值下降较显著($P=0.016$),平均每年下降0.007。多年来研究区冬季气温有显著增加趋势($P=0.0001$),降水变化不显著,但是冬季气温明显低于植被生长的最适温度,抑制生物活性,造成冬季植被枯黄且NDVI很低。因此冬季均温对植被NDVI的变化影响不明显。影响冬季植被NDVI下降的因素可能是人为活动,冬季自然植被枯黄,但农业植被受种植和收获时间的影响,NDVI可能受到影响。另外,如同夏季植被NDVI的下降一样,湿地景观格局的变化也可能导致NDVI的下降。

3.2 植被季节变化特征及控制因子分析

将全部84景影像计算的湿地植被面积和湿地平均NDVI分别与儒略日(DOY)做散点图并进行曲线拟合(图5)。表明无论是湿地植被面积还是湿地平均NDVI都存在极显著的单峰型季节变化特征($P < 0.0001$),两变量都在春季开始上升,在夏季达到峰值,然后秋季又下降,在冬季降至最低。

通过对两条拟合的曲线方程求其一阶导数,并令其一阶导数等于零($y'=0$),可求得两变量在一年中达到最大值的儒略日。计算发现,湿地植被面积在每年的第202d达到最大,为656.56 km²,湿地平均NDVI在每年的第204或205d达到最大,为0.58。实际的数据并不像拟合曲线那样规律(图5),在冬、春季交替时期(DOY:1~50),植被面积和NDVI都存在较大的波动,这可能是由于该时期湿地内的农田植被特征变化造成

的;植被面积和平均 *NDVI* 在拟合曲线达到最大值前后存在两个高值区域,这可能是因为在曲线峰值时正值降水量最大的 7 月份,降水的增加导致湖泊水位上升淹没部分植被,继而导致曲线峰值处的实际 *NDVI* 低于前后两个时期.因此,实际的湿地植被面积最大值(980.97 km²)和湿地平均 *NDVI* 的最大值(0.71),都出现在曲线峰值之前的 5-6 月份.

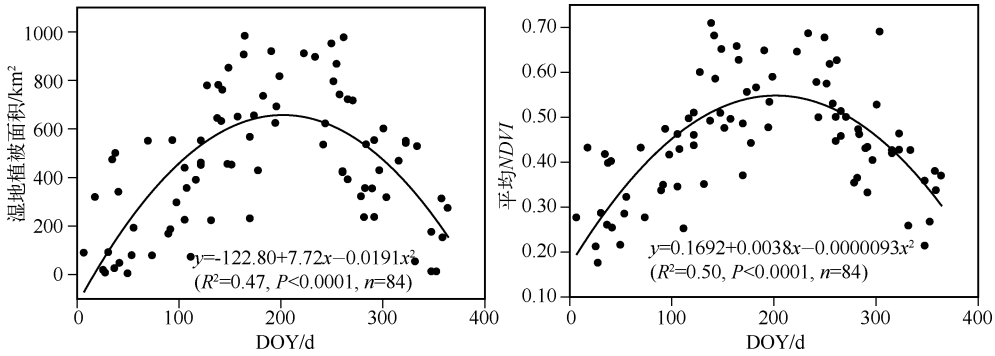


图 5 湿地植被面积和平均 *NDVI* 的季节变化特征

Fig. 5 Seasonal variation of wetland vegetation area and mean *NDVI*

湿地植被和 *NDVI* 的这一季节变化特征主要受到当地气象因子的控制.通过对研究区气温和降水的多年季节变化特征研究发现(图 6),研究区是雨热同期的气候特点,冬季气温低降水少,在夏季气温和降水都达到最大值.湿地植被面积与 *NDVI* 的年内季节变化特征与气温降水变化特征一致.通过将 84 个时间点的 *NDVI* 数据按照月份进行算术平均,并与对应月份的多年平均气温和降水数据进行拟合分析结果发现(图 7),*NDVI* 月均值与月均气温均值存在极显著的线性正相关关系($R^2 = 0.93, P < 0.0001$),且气温每升高 10℃ 湿地植被平均 *NDVI* 将增加 0.1.因为南四湖湿地位于中纬度温带地区,气温控制着植被的生理生态功能,是植被活动的季节性控制因子.月均降水量虽然也与 *NDVI* 月均值存在较好的相关性($R^2 = 0.90$),但由于湖泊湿地通常情况下水量充足,而且湖泊湿地的水源主要依赖于上游来水,因此月均降水量不是湿地植被面积和 *NDVI* 变化的控制因子.

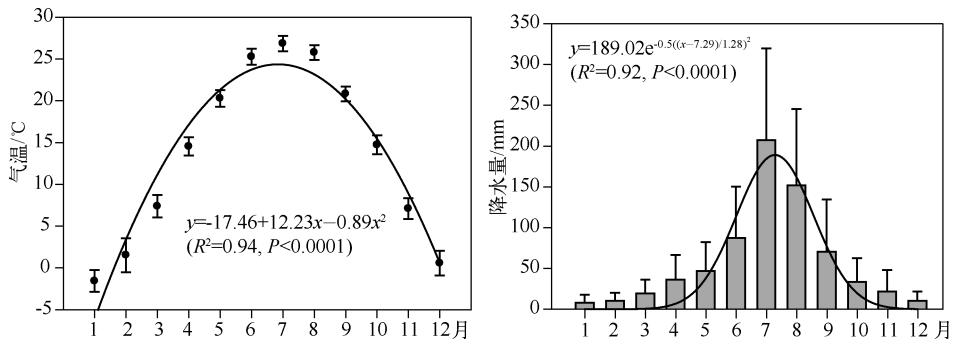


图 6 研究区月均气温与降水量季节变化特征

Fig. 6 Seasonal variation of monthly mean air temperature and precipitation in the study area

3.3 讨论

3.3.1 植被 *NDVI* 调控机制的时空尺度异质性 在不同的空间尺度上,生态系统植被变化特征及控制因素存在不同,表现出空间尺度上的异质性.在全球或国家尺度上,人类活动对于植被的变化往往不能起到主导作用,植被变化特征的主控因子往往是气温、降水等自然要素的综合调控,对于除湖泊湿地以外的生态系统类型往往在年际上表现为气温和降水越适宜植被 *NDVI* 就越高.尤其在春季,由于气候变化引起的春季气温增

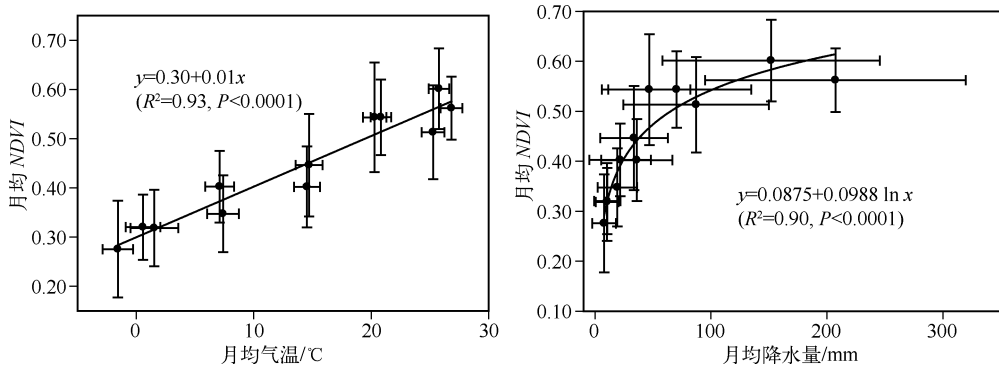


图 7 NDVI 月均值与月均气温、降水量的回归分析

Fig. 7 Regression analysis between monthly mean air temperature, precipitation and monthly mean NDVI

高造成植被的提前返青,引起春季 NDVI 的增加^[34,6]。

但对于类似南四湖湿地这样的景观尺度或小区域尺度的生态系统植被而言,人类活动因素是必须考虑的一个重要影响因子,与气温、降水等气候要素在不同时间尺度上各自发挥控制作用。在年际尺度上,不同季节的 NDVI 有不同的表现特征和控制机制,但以人类活动的影响为主。在年内季节尺度上,湿地植被 NDVI 则主要受气温等气候因子控制,表现为随气温的升高植被面积和 NDVI 呈现增加趋势。此外,南四湖湿地生态系统植被的变化(NDVI)还受到极端气候事件的影响,如极端干旱等。南四湖湿地植被变化特征及控制不同于大格局上的控制特征,这主要是南四湖湿地独特的地理环境特征和毁苇毁荷、围湖造塘的人类活动造成的。通过本研究并对比前人的研究,认为植被变化及控制机制存在空间尺度上的异质性,这可能是由于地理环境和人为扰动在不同空间尺度上的差异决定的。因此在大空间尺度上的研究结论用于小空间尺度研究时一定要考虑这种空间尺度上的影响。

3.3.2 研究的不确定性分析 遥感数据来自不同卫星的不同传感器(MSS、TM 和 ETM+),虽然同属 Landsat 卫星系列,但不同传感器之间存在一定差别,尤其 MSS 与 TM/ETM+ 之间的波段响应函数和空间分辨率存在一定差别^[34]。因此可能在数据处理和计算 NDVI 过程中会造成一定的影响。另外,由于卫星的重访周期和研究区上空云量的限制,获取的 Landsat 遥感数据的拍摄频率不稳定,有些年份数据多一点有些年份较少,这对时序变化分析也可能存在一定影响。

4 结论

本文利用 1973—2011 年近 40 年的 Landsat 卫星遥感数据,计算了南四湖湿地植被面积和平均 NDVI,研究了南四湖湿地不同季节植被活动的年际变化趋势和年内变化特征,并分析了这些变化的控制因子,得到以下结论:

1) 南四湖湿地植被平均 NDVI 在不同季节的年际变化趋势不同,控制因子也不尽相同。春季 NDVI 呈现先降后升的趋势,前期下降可能与这一时期春季气温波动和人为活动的叠加作用有关;后期的上升主要受春季气温增加的影响,1990s 之后湿地植被生长季有提前的趋势。而夏季和冬季 NDVI 都呈现显著的下降趋势,这与湿地日益增加的渔业养殖活动关系显著,其中夏季 NDVI 年均下降 0.0053。秋季 NDVI 的年际变化不明显。

2) 南四湖湿地植被面积和 NDVI 存在明显的季节变化特征。植被面积和 NDVI 都从春季开始增加,在夏季达到最大值(分别在每年的第 202 和 205 d),然后开始下降,到冬季降至最低。研究区气温对湿地植被 NDVI 的变化影响最为显著($P < 0.0001$),是植被活动在季节尺度上的主控因子。

3) 对于湖泊型湿地,干旱(降水量减少)不是植被生长(NDVI 的增加)的限制因素。湿地极端干旱事件导致湖泊水位下降,在一定程度上更适于植被生长并使植被面积扩大。南四湖 2002 年前后的极端干旱事件就是一个明显的例子,当年夏季的湿地植被面积和平均 NDVI 均高出常年。

4) 南四湖湿地具有自然特征和人为特征的双重属性,景观破碎化严重、植被变化特征复杂,利用高空间分辨率的遥感数据,结合自然与人文因素开展综合分析,对于弥补大尺度研究的不足十分必要。

致谢:感谢美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)提供大量的 Landsat 遥感数据;感谢中国气象科学数据共享服务平台提供研究区气象站点的年值和月值气象数据!

5 参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2007: The scientific basis. London: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Myneni RB, Keeling CD, Tucker CJ *et al.* Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 1997, **386**: 698-702.
- [3] 方精云,朴世龙,贺金生等. 近 20 年来中国植被活动在增强. 中国科学:C 辑:生命科学,2003,**33**(6): 554-565.
- [4] 朴世龙,方精云. 1982—1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异. 地理学报,2003,**58**(1): 119-125.
- [5] 杨元合,朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系. 植物生态学报,2006,**30**(1): 1-8.
- [6] Piao SL, Friedlingstein P, Ciais P *et al.* Growing season extension and its impact on terrestrial carbon cycle in the Northern Hemisphere over the last 2 decades. *Global Biogeochem Cycles*, 2007, **21**. doi.org/10.1029/2006GB002888.
- [7] 傅国斌,李克让. 全球变暖与湿地生态系统的研究进展. 地理研究,2001,(2): 120-128.
- [8] 陈宜瑜,吕宪国. 湿地功能与湿地科学的研究方向. 湿地科学,2003,**1**(1): 7-12.
- [9] Pauline M, Ross PA. Climate change and intertidal wetlands. *Biology*, 2013, **2**: 445-480.
- [10] 段晓男,王效科,尹 骏等. 湿地生态系统固碳潜力研究进展. 生态环境,2006,**15**(5): 1091-1095.
- [11] 郑姚闽,牛振国,宫 鹏等. 湿地碳计量方法及中国湿地有机碳库初步估计. 科学通报,2013,**58**(2): 170-180.
- [12] Duarte CM, Middelburg JJ, Caraco N. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. *Biogeosciences*, 2005, **2**: 1-8.
- [13] Scott D, Bridgham CA, Johnston JP *et al.* Potential feedbacks of northern wetlands on climate change. *Bioscience*, 1995, **45**(4): 262-274.
- [14] Kevin LE. Wetlands and global climate change: the role of wetland restoration in a changing world. *Wetlands Ecology and Management*, 2009, **17**: 71-84.
- [15] Virginia B, Jon K. Climate change: potential impacts and interactions in wetlands of the United States. *Journal of the American Water Resources Association*, 2000, **36**(2): 313-320.
- [16] Tucker CJ, Pinzon JE, Brown ME. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, **26**(20): 4485-4498.
- [17] 王正兴,刘 闯,Huete A. 植被指数研究进展:从 AVHRR_NDVI 到 MODIS_EVI. 生态学报,2003,**23**(5): 979-987.
- [18] Huete A, Didan K, Miura T *et al.* Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **83**:195-213.
- [19] Liu G, Liu HY, Yin Y. Global patterns of NDVI-indicated vegetation extremes and their sensitivity to climate extremes. *Environment Research Letters*, 2013, **8**: 1-11.
- [20] Piao SL, Fang JY, Zhou LM *et al.* Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Global Change Biology*, 2006, **12**: 672-685.
- [21] Piao SL, Fang JY, Chen AP. Seasonal dynamics of Terrestrial Net Primary Production in response to climate changes in China. *Acta Botanica Sinica*, 2003, **45**(3): 269-275.
- [22] 于泉洲,张祖陆,高 宾等. 基于 RS 和 FRAGSTATS 的南四湖湿地景观格局演变研究. 林业资源管理,2013,(1): 108-115.
- [23] Maria LC, Nicola Z, Stefania M *et al.* NDVI spatial pattern and the potential fragility of mixed forested areas in volcanic lake watersheds. *Forest Ecology and Management*, 2012, **285**:133-141.
- [24] Rebecca AB, David V, Teresa NH. Browning of the landscape of interior Alaska based on 1986 - 2009 Landsat sensor NDVI. *Canadian Journal of Forest Research*, 2012, **42**: 1371-1382.
- [25] Jamey HA, Keith TW, Bhushan G *et al.* Intercalibration and evaluation of Resource Sat-land Landsat-5 NDVI. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2011, **37**(2): 213-219.
- [26] 张祖陆,沈 吉,孙庆义等. 南四湖的形成及水环境演变. 海洋与湖沼,2002,**33**(3): 314-321.

- [27] 张祖陆, 辛良杰, 梁春玲. 近50年来南四湖湿地水文特征及其生态系统演化过程分析. *地理研究*, 2007, **26**(5): 957-959.
- [28] 于泉洲, 张祖陆, 吕建树等. 1987—2008年南四湖湿地植被碳储量时空变化特征. *生态环境学报*, 2012, **21**(9): 1527-1532.
- [29] 武周虎, 乔海涛, 付莎莎等. 南水北调东线工程对南四湖环境的影响及对策. *青岛理工大学学报*, 2006, **27**(1): 1-7.
- [30] Tucker CJ. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1979, **8**: 127-150.
- [31] Liu YB, Song P, Peng J *et al.* A physical explanation of the variation in threshold for delineating terrestrial water surfaces from multi-temporal images; effects of radiometric correction. *International Journal Remote Sensing*, 2012, **33**(18): 5862-5875.
- [32] 陈云, 戴锦芳. 基于遥感数据的太湖蓝藻水华信息识别方法. *湖泊科学*, 2008, **20**(2): 179-183.
- [33] Sobrino JA, Jiménez-Munoz JC, Paolini L. Land surface temperature retrieval from Landsat TM. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **90**: 434-440.
- [34] NASA (National Aeronautics and Space Administration). Landsat 7 Science Data Users Handbook, <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/>.
- [35] 济宁市统计局, 国家统计局济宁调查队. 崛起的新济宁——改革开放三十年发展成就: 统计图表. 内部资料, 2008.
- [36] 济宁市统计局, 国家统计局济宁调查队. 济宁统计手册2008. 内部资料, 2009: 96.
- [37] 微山县地方志编委会. 微山年鉴2003—2005: 渔业. 济南: 齐鲁书社, 2007.
- [38] 山东省水文水资源勘测局. 2001与2002年山东省水资源公报. 济南: 山东省水文水资源勘测局, 2004.
- [39] Zhao MS, Running SW. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science*, 2010, **329**: 940-943.