

黄河三角洲 NDVI 时空演化特征及其驱动因素*

安乐生^{1,2} 赵全升³ 周葆华¹ 刘贯群²

(1. 安庆师范大学资源环境学院 安庆 246133; 2. 中国海洋大学环境工程系 青岛 266100; 3. 青岛大学环境科学系 青岛 266071)

摘要 为了解黄河三角洲地区植被盖度的时空动态,在利用遥感资料分析归一化植被指数(NDVI)空间分布格局及其年际变化规律的基础上,进一步探讨了影响 NDVI 时空变化的自然和人为因素。结果显示,黄河三角洲地区 2002、2006、2008、2013 年 10 月的 NDVI 均值分别为-0.04、0.06、0.10、0.16, NDVI>0 的区域面积分别约 1253、1733、1742、2175 km²(分别占区域总面积的 43.67%、60.01%、66.82%、81.77%)。在时间动态上,区域 NDVI 总体呈逐渐增加的良性发展态势,黄河入海口地区尤为突出;在空间格局上,NDVI 可分为高植被覆盖区(NDVI>0.4)、中等植被覆盖区(NDVI 为 0.1—0.4)和稀疏植被覆盖区(NDVI<0.1),且按离海远近在区域内分别呈现斜“Y”、斑块和条带状。地形高度、地下水和土壤水盐条件(尤其是潜水氯离子浓度,二者之间 $R=0.737$)等环境因素影响 NDVI 整体空间分布格局,区域降水和气温等气候条件造成 NDVI 年际动态变化,而黄河下游生态调度对过水区域特别是河口地区 NDVI 良性变化具有显著的促进作用。黄河三角洲地区应持续加强生态环境保护与修复,提高植被盖度及其综合效益。

关键词 归一化植被指数(NDVI); 植被; 调水调沙; 生态调度; 黄河三角洲

中图分类号 X87 **doi:** 10.11693/hyh20161100241

植被既是陆地生态系统的主体,也是人类重要的环境资源和物质资源。它具有截留降雨、减少雨滴击溅、减缓地表径流、保土固土等功能,是土壤侵蚀与水土流失的主要监测因子,在地球的能量转化和物质循环中起着特殊而重要的作用(张宝庆等, 2011; 赵丽红等, 2016)。植被覆盖度是衡量地表植被状况的一个重要指标,也是影响土壤侵蚀与水土流失的主要因子,对于区域环境变化和监测研究具有重要意义(马志勇等, 2007)。植被覆盖度的测量可分为地面测量(田间尺度)和遥感估算(区域尺度)两种方法。目前已经发展了植被指数法(North, 2002; Liu *et al.*, 2016)、经验模型法(Van De voorde *et al.*, 2008)、像元分解模型法(Johnson *et al.*, 2012; 李恒凯等, 2014)等很多基于遥感反演手段的植被覆盖度估算方法(沈芳等, 2006; 程红芳等, 2008; 周葆华等, 2014; 赵丽红等, 2016),其中最为常见也较为实用的是利用归一化

植被指数(NDVI)近似估算植被覆盖度。

当前, NDVI 研究侧重于植被覆盖时空演变遥感监测与分析,以及生物量估算、区域蒸散发、土壤水分反演等领域,偏好探讨 NDVI 与气候因子之间的相互关系,而在环境因子和人为因素对其影响方面研究较为欠缺(李明杰等, 2011; 张景华等, 2015; 田义超等, 2016)。近年来,黄河流域(刘绿柳等, 2006)包括黄河三角洲地区(李明杰等, 2011)NDVI 时空动态及其与降水、温度、径流之间的关系偶见讨论,但对 NDVI 时空变化的自然和人为影响因素分析仍然有限。黄河三角洲地理位置独特,自然条件特殊,生态环境敏感脆弱。该地区地下水浅埋,且盐分含量很高(阴离子中 Cl^- 占比很高),对土壤盐渍化及植被生长发育具有重要影响(安乐生等, 2015)。此外,区域还受到黄河下游调水调沙及生态补水等人为活动影响。因此,本研究拟在分析 NDVI 空间分布及其动态变化规律的基

* 中国地质调查局地质调查项目, 1212010611402 号; 安徽省高校自然科学研究重点项目, KJ2016A424 号。安乐生, 副教授, E-mail: als00316@163.com

收稿日期: 2016-11-05, 收修改稿日期: 2016-11-05

基础上,侧重于多重驱动因素的关键作用行为探讨。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河三角洲是我国三大河口三角洲之一,位于渤海湾南岸和莱州湾西岸,可分为古黄河三角洲和现代黄河三角洲两部分。现代黄河三角洲是指 1855 年黄河改道入渤海后淤积形成的、以宁海为顶点,东起淄脉沟,西至徒骇河,向海伸展到 16m 等深线附近的扇形堆积体。研究区属小清河以北黄泛平原区,地势低平,海拔高度低于 15m,地面坡降为 1/8000—1/12000。区内地下水位埋深普遍较浅,一般为 0.5—2.0m,岗地与河滩高地较深,坡地次之,洼地与滨海

低地最浅(大部分小于 1.0m)。潜水 Cl^- 、 Na^+ 和总溶解性固体(TDS)含量很高,而 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 和 K^+ 含量很低(安乐生等, 2011; 丁喜桂等, 2014)。

研究区东、北以海岸线为界,西、南分别延伸至黄河三角洲北部自然保护区(1976 年以前引洪的黄河故道)西端和东部自然保护区(黄河入海口)的南端($118^\circ34'—119^\circ15'E$, $37^\circ36'—38^\circ09'N$),总面积约 2719.8km^2 ,其中 1855 年以后的现代黄河三角洲占 86.5%,见图 1(a)。黄河三角洲自然保护区由东、北两部分组成,总面积约 1530.0km^2 。保护区共有种子植物 42 科、390 多种,以禾本科、豆科、菊科、藜科居多,植被覆盖率约为 55%,其中典型植被翅碱蓬、芦苇和柽柳分布较广。

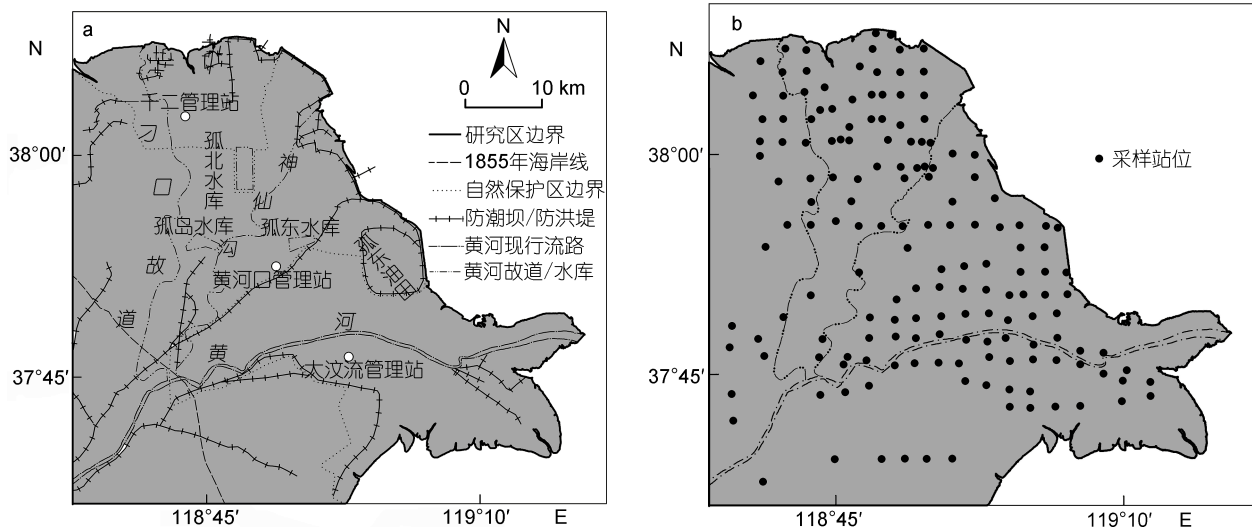


图 1 研究区及采样布置示意

Fig.1 Sampling stations in the study area

1.2 研究方法

本研究遥感资料选用“对地观测数据共享计划”中 LANDSAT 系列影像数据共 4 景,成像时间分别为 2002 年 10 月 15 日、2006 年 10 月 2 日、2008 年 10 月 7 日及 2013 年 10 月 5 日。环境数据主要是 2006—2010 年黄河三角洲滨海湿地综合地质调查与评价项目 151 个采样站位的潜水氯离子质量浓度 [$c(\text{Cl}^-)$] 和表层土壤氯离子含量 [$w(\text{Cl}^-)$] (考虑 Cl^- 在土壤和潜水中含量或浓度很高,且对植物生长具有较强的抑制胁迫作用),见图 1(b)。背景数据主要包括研究区 DEM 数据(来源于 2000 年 2 月美国地质调查局 SRTM 地形高程数据)、相关时段区域(东营市)水文气象统计数据、黄河水利委员会(黄委)发布的黄河下游调水调沙与生态补水资料等。

以 4 幅遥感影像作为植被空间分布与植被覆盖动态研究的基础数据,根据野外调查及该地区植被研究的既有成果,阐明区域 NDVI 时空分布状况。通过 ENVI 4.8 软件提取上述 4 景影像的 NDVI,之后将其导入 ArcGIS 10.2 软件中生成 NDVI 分级分布图,同时利用 SPSS 17.0 软件制作重采样后(将 Cellsize 由原来的 30m 调整为 1000m,从而减小图像的栅格数,便于后续统计分析)的 NDVI 频数分布图,再结合地形高度、表层土壤 $w(\text{Cl}^-)$ 和潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 空间分布及有关水文气象资料等,探讨区域 NDVI 变化的时空特征及其驱动因素。其中地形分布利用 SRTM 数据由 MICRODEM 软件生成。表层土壤 $w(\text{Cl}^-)$ 和潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 空间分布借助 ArcGIS 10.2 软件地统计模块,在数据检验的基础上,采用 Ordinary Kriging 方法分别对二

者进行线性无偏插值后获得。

2 结果分析

2.1 NDVI 空间分布特征

结合野外调查, 由图 2(a—d)可以看出, $NDVI \leq 0$ 的区域为非植被分布区, $NDVI > 0$ 的区域为植被分布区。近海地带特别是东南和东北部光滩和虾蟹池 NDVI 很低, 鲜有植被分布。其中, $NDVI < -0.1$ 的区域主要是库塘、盐田、虾蟹池; $NDVI$ 在 $-0.1 \sim 0$ 之间的区域主要是潮滩和裸地。黄河现行河道和刁口故道两侧地区植被覆盖程度较高、长势总体较好, $NDVI$ 普遍在 0.2 以上, 离河道越近 $NDVI$ 越高, 显著表明黄河河道、故道水系(淡水)促进植被发育生长。譬如东部自然保护区中部(大汶流管理站附近)、黄河现行流路与刁口故道交汇区、孤岛水库西侧等典型区域 $NDVI$ 一般超过 0.4, 局部地区 $NDVI$ 在 0.5 以上, 这些区域主要是一些优质玉米地和芦苇荡(黄河三角洲地区发育有大片天然的芦苇荡, 荡内芦苇生长密集, 苇叶阔大、厚实, 导致植被覆盖率很高)。

从空间格局来看, 黄河三角洲地区 $NDVI$ 可分为高、中、低值区。其中, 高值区 $NDVI > 0.4$, 为高植被覆盖区, 分布在黄河现行河道和刁口故道两侧区域, 距河道或故道约 1.0—7.5km, 整体呈斜“Y”形状展布; 低值区 $NDVI < 0.1$, 为稀疏植被覆盖区, 主要是海岸带的沿岸陆地部分, 沿海岸线向陆地延伸约 5.0—10.0km, 沿海岸线呈条带状分布; 中值区 $NDVI$ 在 0.1 至 0.4 之间, 为中等植被覆盖区, 主要以 3 大斑块分布于黄河现行流路(或刁口故道)与海岸带之间的过渡区域, 具体包括: 刁口故道西侧区(渤海农场—寨家屋子地区)、神仙沟两侧区域(孤岛水库—孤北水库—孤东水库—黄河口管理站地区)和大汶流管理站西南部地区。

2.2 NDVI 年际动态变化规律

图 2(a—d)是遥感影像提取 $NDVI$ 的运算结果。2002、2006、2008、2013 年 10 月研究区 $NDVI$ 计算结果分别为 $-0.60 \sim -0.61$ 、 $-0.44 \sim -0.50$ 、 $-0.65 \sim -0.71$ 、 $-0.32 \sim -0.64$ 。2002 年, 研究区有近 50% 区域的 $NDVI < 0$, 在黄河现行河道和刁口故道附近 $NDVI$ 高值像元分布较少, 甚至出现无植被覆盖区, 导致河道与故道两侧 $NDVI$ 斜“Y”形展布规律不明显, 说明该年度植物生长发育形势较差, 区域植被覆盖率偏低。2006、2008、2013 年 $NDVI$ 低值区面积逐渐减小, 而中、高值区面积在扩展。2008 年较 2006 年高值像元明显增多, 致使黄河现行河道和刁口故道两

侧区域 $NDVI$ 斜“Y”形分布态势完全呈现。在黄河入海口地区, 上述年份 $NDVI > 0$ 的区域逐年增加, 且 $NDVI$ 值逐年上升, 以 2013 年最为明显, 反映出河口地区植物分布范围不断扩大, 植被覆盖度增大, 生态环境持续改善。

图 2(e—h)是在图 2(a—d)的基础上, 对栅格数据重采样(Cellsize 由 30m 变为 1000m)后的 $NDVI$ 频数分布, 可以清晰地看出, 研究区各年份 10 月 $NDVI$ 均近似服从正态分布, 2002、2006、2008、2013 年 10 月区域 $NDVI$ 均值分别为 -0.04 、 0.06 、 0.10 、 0.16 , 各年份 $NDVI > 0$ 的面积分别约为 1253、1733、1742、2175 km² (由大于零的栅格个数乘以重采样后的栅格像元大小确定), 占区域总面积的百分比分别是 43.67%、60.01%、66.82%、81.77%。上述统计结果显示, 2002 至 2013 年, 研究区 $NDVI > 0$ 的栅格数随年份明显增加, 栅格单元属性($NDVI$)的频数分布变量均值近似由 0 向 0.2 移动, 频率分布曲线形状渐趋正态, 表明黄河三角洲地区 $NDVI$ 总体呈增加的态势, 区域植被覆盖状况明显增加, 尤其是滨海地区天然植被的恢复面积扩大, 总体长势好转。

2.3 影响 $NDVI$ 时空分布的主要因素

2.3.1 环境因素影响 $NDVI$ 整体空间分布格局植被生长主要受制于气候条件和水盐等环境因素。在同一尺度范围下, 气候因子的空间变异通常较环境因子弱。显然, 黄河三角洲地区水位、水分、盐分等水盐环境条件与离海远近有很大关系, 加之黄河淡水补给, 海陆两相作用、河海两相交汇导致水盐因子产生更为显著的空间变异(安乐生等, 2011)。由图 3 可知, 地形高度、表层土壤 $w(Cl^-)$ 和潜水 $c(Cl^-)$ 在空间分布上具有一定的方向性, 即由内陆(东部自然保护区西端)到海岸线, 地形高度由 12—14m 逐渐降至 0—2m, 而表层土壤 $w(Cl^-)$ 由低于 1.0g/kg 增至超过 10.0g/kg, 潜水 $c(Cl^-)$ 则从小于 2.0g/L 较快升至 25.0g/L 以上, 这一高度或浓度分布特征与 $NDVI$ 高、中、低值区分布匹配较好。此外, 从黄河现行流路或刁口故道向滨海地区观察可以发现, 地形缓降、表层土壤 $w(Cl^-)$ 和潜水 $c(Cl^-)$ 渐增的趋势在此方向上也较为清晰, 这一分布趋势也恰与黄河现行河道和刁口故道两侧区域 $NDVI$ 呈斜“Y”形分布态势吻合。

结合 151 个采样站位 $NDVI$ 与地形高度、表层土壤 $w(Cl^-)$ 和潜水 $c(Cl^-)$ 的相关性分析可知, $NDVI$ 与地形高度呈正相关, 相关系数(R)为 0.33; 与表层土壤 $w(Cl^-)$ 和潜水 $c(Cl^-)$ 均呈负相关, R 分别为 0.740 和

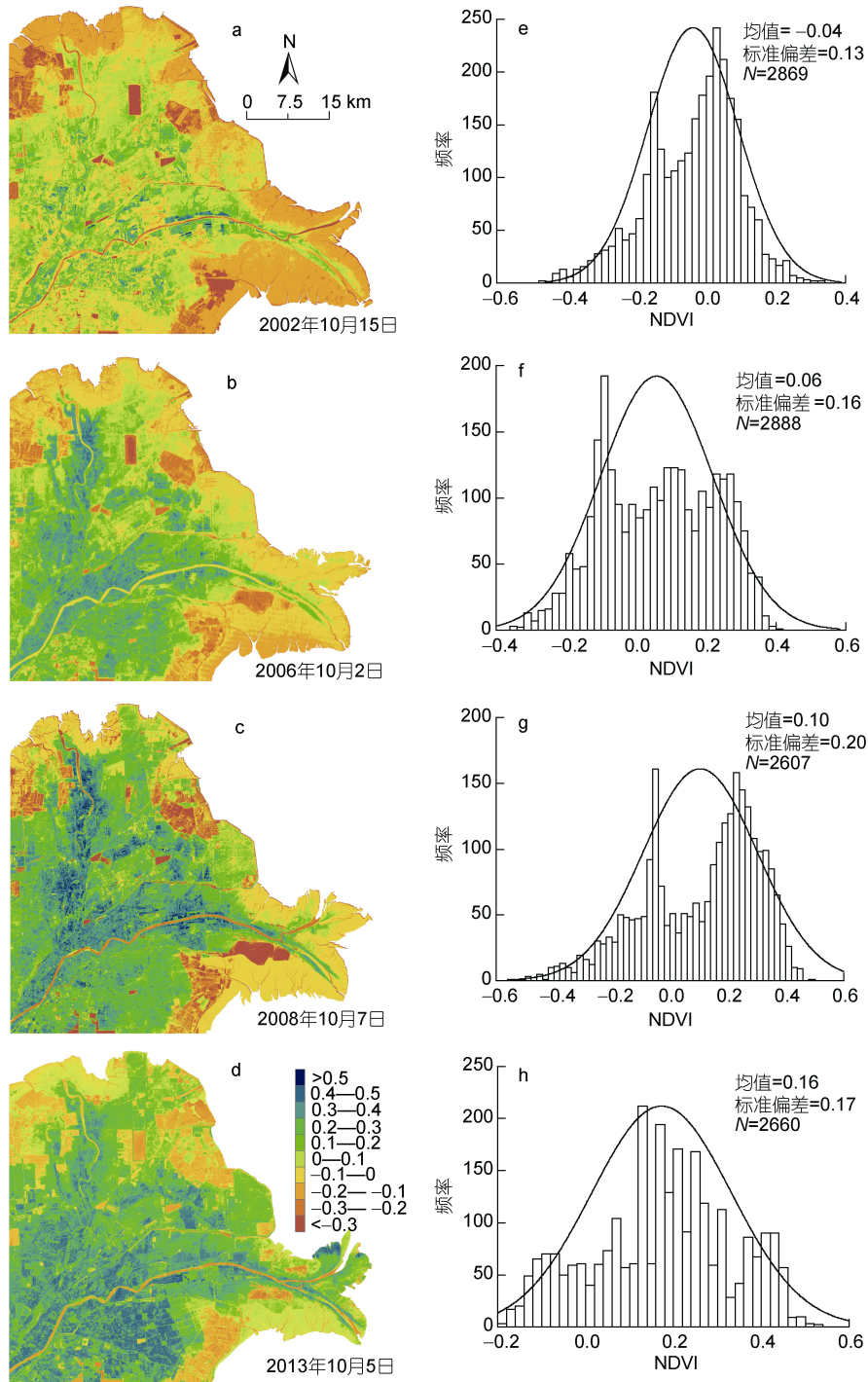


图2 不同年份黄河三角洲地区 NDVI 及其频率分布

Fig.2 NDVI and its frequency of the Huanghe (Yellow) River Delta in different years

0.737, NDVI 与表层土壤 $w(\text{Cl}^-)$ 和潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 相关性较好。事实上, 地形因素对植被的影响, 主要通过影响地下水位、潜水与土壤中盐分迁移等因素实现, 也就是说, 地形高度的植被效应, 一定程度上可归到水盐因子当中。考虑到黄河三角洲地区地下水埋深普遍较浅, 地下水位、土壤水分含量空间变异相对于水土

环境中盐分含量较弱。又因表层土壤 $w(\text{Cl}^-)$ 和潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 间 R 为 0.643, 表明潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 对土壤 $w(\text{Cl}^-)$ 影响显著, 潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 一定程度上控制着土壤 $w(\text{Cl}^-)$ 的空间分布与变异(安乐生等, 2015), 进而影响到植被的分布生长。可见, 地形高度、表层土壤 $w(\text{Cl}^-)$ 和潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 等环境因素综合作用影响区域 NDVI 空间分布

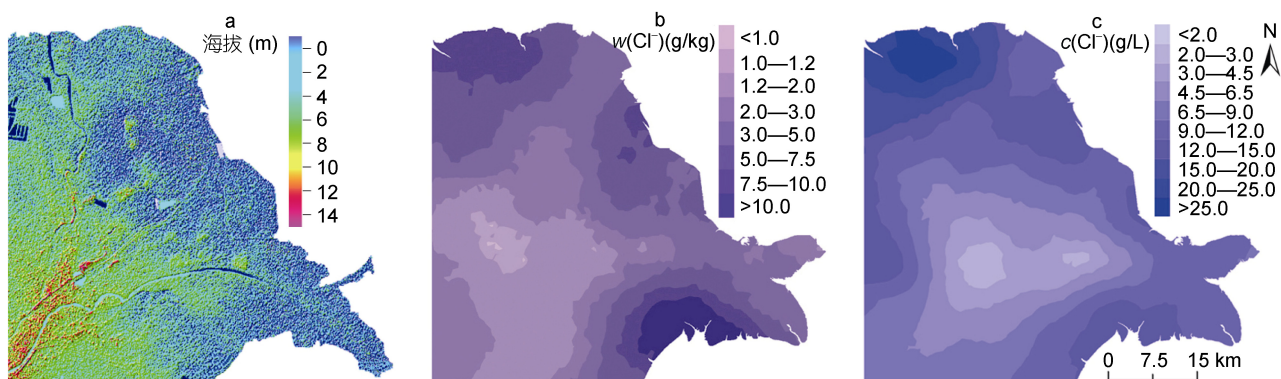


图3 地形高度、表层土壤 $w(\text{Cl}^-)$ 和潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 空间分布(地形高度由美国地质调查局 2000 年 2 月 SRTM 数据生成)

Fig.3 The spatial distribution of terrain elevation, $w(\text{Cl}^-)$ of surface soil layer, and $c(\text{Cl}^-)$ of phreatic water

格局,尤其是潜水 $c(\text{Cl}^-)$ 的关键控制作用更为明显。

2.3.2 气候条件造成 NDVI 年际动态变化 研究区主要位于东营市的垦利县和刁口区,该地区降水和气温等相关数据可借鉴东营市水文气象资料。1997—2002 年,黄河流域连年干旱少雨。其中,东营市 1997 年遭受了自 1916 年以来的特大夏旱,6、7 月份全市平均降水量仅 54.6mm,为历史同期水平的 21.0%;2002 年东营市降水量为 356.1mm,较常年偏少 37.6%(少 214.6mm)。2003 年以后降水逐渐恢复至常年水平,2003—2013 年东营市年均降水量为 556.4mm。区域降水由稀少转为正常,显然有利于植被的生长,并导致 NDVI 数据增大。1997—2013 年,该地区年均气温变化稳定,年均气温平均值为 13.6°C。各年份年均气温围绕均值上下波动,幅度在 0.5°C 以内。其中,最低气温出现在 2003 年为 13.2°C,一定程度上受 2003 年降雨量(782.3mm)较大影响。显然,气温的起伏波动影响地表和潜水蒸发,势必对植被生长产生影响。

李明杰等(2011)认为黄河三角洲地区 NDVI 与降水、气温均有较高的相关系数, R 分别为 0.63、0.81,在

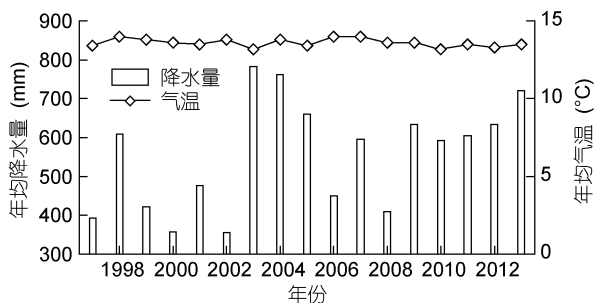


图4 1997—2013 年东营市各年份年均降水量与气温变化

Fig.4 Changes of annual precipitation and air temperature in Dongying city during 1997—2013

考虑植被生长发育与降水、温度延迟特性的情况下,并以延迟 1 个月的数据为参考, R 分别可达到 0.75、0.89。可见,气温和降水综合作用于植被生长发育,二者的年际动态变化也会引起植被覆盖度和 NDVI 数据的波动。此外,雨水除补充植物生长所需的水分外,在黄河三角洲这一特定地区,雨水径流还有冲刷淋溶土壤盐分的重要作用。结合 1997—2013 年降水前期少、后期渐多并趋于正常的显著变化,可以认为在研究时间内,降水对该区域 NDVI 在年际上呈现良性变化具有重要影响。

2.3.3 生态调度人为影响过水区域 NDVI 分布 前已述及,黄河现行河道和刁口故道两侧区域 NDVI 呈斜“Y”形分布,植被长势较好。从图 2(a—d)可进一步看出,无论较干旱的 2002 年,还是降雨量已有缓和的 2006、2008、2013 年,黄河现行流路和故道两侧 NDVI 明显高于其他地区,说明黄河及其故道对维护区域生态系统健康具有重要作用,尤其是生态脆弱、环境敏感的河口三角洲湿地。事实上,在上世纪 90 年代,黄河水资源供需矛盾突出,出现年年断流,导致尾间三角洲生态系统受到持续破坏。为实现黄河功能性不断流,加强流域生态环境管理和生态风险管控,1998 年黄河水利委员会(黄委)对黄河流域水资源实施统一管理调度。

2002—2009 年,黄委连续实施了 9 次汛前黄河调水调沙(历时 133d)。2008 年,结合第 8 次调水调沙,黄委首次有计划地开展了对黄河河口三角洲的生态调水。2008、2009 年分别向河口三角洲 15 万亩湿地人工补水量分别为 1355.6、1507.7 万 m^3 ,生态补水后,东部自然保护区核心区湿地水深平均增幅分别为 0.3、0.4m,保护区低覆盖(30%以下)植被面积 2009 年较 2008 年增加了 89%(见表 1),河口地区湿地面积逐

表 1 2008—2010 年黄河三角洲河口湿地生态补水及成效

Tab.1 Ecological water replenishment and effectiveness onto the Huanghe (Yellow) River Delta wetland in 2008—2010

年份	补水过程		补水效果		
	补水时间	补水总量	新增水面面积	地下水位抬升	植被覆盖
2008 年	历时 11 天 (6 月 24 日至 7 月 4 日)	1356 万 m ³	河口三角洲湿地新增 2.2km ² 水面, 增加入海口附近水面面积 12.3km ²	距河岸 4km 范围内, 地下水位抬高幅度在 0.02—0.65m	东部保护区有植被 227.82km ² , 其中高(70%以上)、中(30%—70%)、低(30%以下)植被覆盖分别为 79.77、137.68、10.45km ²
2009 年	历时 10 天 (6 月 24 日至 7 月 3 日)	1508 万 m ³	增加湿地核心区水面面积 34.8km ² , 增加入海口附近水面 29.1km ²	距河岸 4km 范围内, 地下水位平均抬高 0.15m	东部保护区有植被 200.34km ² , 其中高、中、低植被覆盖分别为 57.42、44.75、98.17km ²
2010 年	历时 14 天 (6 月 23 日至 7 月 6 日)	5648 万 m ³ , 其中向刁口河调水 3608 万 m ³	现行流路增加水面面积 19.4km ² ; 刁口故道增加水面面积 11.8km ²	沿现行流路 4km 范围内地下水位抬升 0.15—0.62m; 刁口河过水沿岸 1.1km 范围内地下水位得以抬升, 其中 550m 范围内较明显	东部保护区有植被 203.46km ² , 其中高、中、低植被覆盖分别为 103.29、67.74、32.43km ²

渐增加, 指示性植被芦苇在发芽和生长旺盛期的生态用水得以保障, 区域生态环境不断改善(李国英等, 2011)。2010 年, 黄委在继续实施汛前调水调沙及向河口三角洲生态调水的同时, 适时开展了刁口河流路恢复过水试验工程, 向刁口故道调水 3608 万 m³。刁口河实现全线过水, 河道过水面积达到 23.3km², 自然保护区进水 800 万 m³, 面积达 13.4km²。刁口故道生态补水基本上遏制了故道植被逆向演替趋势, 受损的敏感生境和湿地植被结构得到修复。

可见, 持续开展的黄河下游生态调度对过水区域特别是河口地区植物正常生长、湿地植被恢复及其顺向演替、NDVI 良性变化等有显著的促进作用。河口补水的环境效益和生态恢复效果, 将因调水的较长期实施和生态系统趋变因素影响演替的延迟性, 而逐步得到显现和发展。

3 结论

(1) 黄河三角洲地区 2002、2006、2008、2013 年 10 月的 NDVI 范围分别为-0.60—0.61、-0.44—0.50、0.65—0.71、-0.32—0.64, 均值分别为-0.04、0.06、0.10、0.16, NDVI>0 的面积分别约为 1253、1733、1742、2175km², 分别占区域总面积的 43.67%、60.01%、66.82%、81.77%。区域 NDVI 总体呈逐渐增加的态势, 表明区域植被覆盖增加, 尤其是滨海地区天然植被的恢复面积逐渐扩大, 总体长势好转。

(2) 在空间格局上, 近海地带特别是东南和东北部光滩和虾蟹池 NDVI 很低, 鲜有植被分布; 黄河现

行河道和刁口故道两侧地区植被覆盖程度较高、长势总体较好。该地区 NDVI 可分为高、中、低值区, 分别对应高植被覆盖区(NDVI>0.4)、中等植被覆盖区(NDVI 为 0.1—0.4)和稀疏植被覆盖区(NDVI<0.1), 且按离海远近, 在区域范围内分别呈现斜“Y”、斑块和条带状布置。

(3) 地形高度、地下水和土壤水盐条件(尤其是潜水氯离子浓度)等环境因素影响 NDVI 整体空间分布格局, 区域降水和气温等气候条件造成 NDVI 年际动态变化, 而持续开展的黄河下游生态调度对过水区域特别是河口地区 NDVI 良性变化具有显著的促进作用。

参 考 文 献

- 丁喜桂, 叶思源, 赵广明等, 2014. 黄河三角洲滨海湿地演化及其对碳与营养成分的扣留. 海洋与湖沼, 45(1): 94—102
- 马志勇, 沈涛, 张军海等, 2007. 基于植被覆盖度的植被变化分析. 测绘通报, (3): 45—48
- 田义超, 梁铭忠, 2016. 北部湾沿海地区植被覆盖对气温和降水的旬响应特征. 自然资源学报, 31(3): 488—502
- 刘绿柳, 肖风劲, 2006. 黄河流域植被 NDVI 与温度、降水关系的时空变化. 生态杂志, 25(5): 477—481, 502
- 安乐生, 周葆华, 赵全升等, 2015. 黄河三角洲土壤氯离子空间变异特征及其控制因素. 地理科学, 35(3): 358—364
- 安乐生, 赵全升, 叶思源等, 2011. 黄河三角洲地下水关键水盐因子及其植被效应. 水科学进展, 22(5): 689—695
- 李国英, 盛连喜, 2011. 黄河调水调沙的模式及其效果. 中国科学: 技术科学, 41(6): 826—832
- 李明杰, 侯西勇, 应兰兰等, 2011. 近十年黄河三角洲 NDVI 时空动态及其对气温和降水的响应特征. 资源科学, 33(2): 322—327
- 李恒凯, 刘小生, 李博等, 2014. 红壤区植被覆盖变化及与地貌因子关系——以赣南地区为例. 地理科学, 34(1):

103—109

- 沈芳, 周云轩, 张杰等, 2006. 九段沙湿地植被时空遥感监测与分析. 海洋与湖沼, 37(6): 498—504
- 张宝庆, 吴普特, 赵西宁, 2011. 近 30a 黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析. 农业工程学报, 27(4): 287—293
- 张景华, 封志明, 姜鲁光等, 2015. 澜沧江流域植被 NDVI 与气候因子的相关性分析. 自然资源学报, 30(9): 1425—1435
- 周葆华, 尹剑, 金宝石等, 2014. 30 年来武昌湖湿地退化过程与原因. 地理学报, 69(11): 1697—1706
- 赵丽红, 王屏, 欧阳勋志等, 2016. 南昌市植被覆盖度时空演变及其对非气候因素的响应. 生态学报, 36(12): 3723—3733
- 程红芳, 章文波, 陈锋, 2008. 植被覆盖度遥感估算方法研究进展. 国土资源遥感, (1): 13—18

- Johnson B, Tateishi R, Kobayashi T, 2012. Remote sensing of fractional green vegetation cover using spatially-interpolated endmembers. Remote Sensing, 4(9): 2619—2634
- Liu X F, Zhu X F, Pan Y Z *et al*, 2016. Vegetation dynamics in Qinling-Daba Mountains in relation to climate factors between 2000 and 2014. Journal of Geographical Sciences, 26(1): 45—58
- North P R J, 2002. Estimation of f_{APAR} , LAI, and vegetation fractional cover from ATSR-2 imagery. Remote Sensing of Environment, 80(1): 114—121
- Van De Voorde T, Vlaeminck J, Canters F, 2008. Comparing different approaches for mapping urban vegetation cover from landsat ETM+ data: a case study on Brussels. Sensors, 8(6): 3880—3902

TEMPORAL AND SPATIAL VARIATION CHARACTERISTICS OF NDVI AND ITS DRIVING FACTORS IN THE HUANGHE (YELLOW) RIVER DELTA

AN Le-Sheng^{1,2}, ZHAO Quan-Sheng³, ZHOU Bao-Hua¹, LIU Guan-Qun²

(1. School of Resources and Environment, Anqing Normal University, Anqing 246133, China; 2. Department of Environmental Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Department of Environmental Science, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract To understand the temporal and spatial dynamics of vegetation coverage in the Huanghe (Yellow) River Delta, the spatial distribution pattern of normalized difference vegetation index (NDVI) and its interannual variation were analyzed based on remote sensing data, and the natural and human factors that affect the spatial and temporal changes of NDVI were discussed. The results show that the average NDVI of the area in October 2002, 2006, 2008, 2013 increased from -0.04, 0.06, 0.10, to 0.16, respectively, showing a good trend of green coverage. The areas of NDVI > 0 has been increasing from 1 253, 1 733, 1 742, to 2175 km² (accounting for 43.67%, 60.01%, 66.82% and 81.77% of the total area), respectively. Overall, NDVI reflects a good development in time and in space (especially the river estuary). NDVI could be divided into high (NDVI > 4.0), medium (NDVI between 0.1—4.0), and sparse (NDVI < 0.1) vegetation patterns, showing oblique Y-shaped, patch, and strip zones, respectively, depending on the distance from the sea. The terrain height, groundwater, soil, and water-salt conditions (such as the concentration of chlorine ion in groundwater) affect the overall spatial distribution pattern of NDVI. The NDVI changed dynamically with the changes in precipitation and air temperature. Meanwhile, artificial involvement by water allocation in the lower reaches of the river promoted significantly with a good effect on the NDVI in the region, especially in the estuary area. Therefore, we shall continue to strengthen the protection and restoration of the ecological environment and to promote the improvement of vegetation coverage for comprehensive benefits to the study areas.

Key words normalized difference vegetation index (NDVI); vegetation; water and sediment regulation; ecological regulation; the Huanghe (Yellow) River Delta