

DOI: 10.5846/stxb201803060436

曹艳萍, 秦奋, 庞营军, 赵芳, 黄金亭. 2002—2016 年华北平原植被生长状况及水文要素时空特征分析. 生态学报, 2019, 39(5): - .
Cao Y P, Qin F, Pang Y J, Zhao F, Huang J T. Spatiotemporal changes in vegetation and hydrological factors in the North China Plain from 2002 to 2016. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): - .

2002—2016 年华北平原植被生长状况及水文要素时空特征分析

曹艳萍¹, 秦 奋^{2,*}, 庞营军³, 赵 芳¹, 黄金亭¹

¹ 河南大学环境与规划学院, 开封 475004

² 黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 开封 475004

³ 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091

摘要: 基于 MODIS 增强型植被指数 (EVI) 资料, 结合降水、GRACE 重力卫星水储量 (TWS)、地下水、土壤水等资料, 分析华北平原植被 2002—2016 年间的生长状况及各水文要素时空分布特征。研究结果表明: (1) 2002—2016 年间华北平原植被呈好转趋势, 降水、水储量、土壤水、地下水等水文要素值呈减少趋势。(2) 黄淮平原区植被以农作物为主, 植被覆盖度呈增加趋势, 而降水、水储量、地下水、土壤水均呈减少趋势, 超采地下水灌溉农作物是短期内保障粮食安全的重要措施。(3) 燕山-太行山山麓平原区、冀鲁豫低洼平原区的城乡居民用地区域植被覆盖显著减少, 而降水增多, 水储量、土壤水、地下水减少, 人类活动对植被和水文要素贡献量大。(4) 山东丘陵农林区分布着林地和草地, 这些区域生长季的植被指数呈减少趋势, 与降水量减少呈正相关关系。在气候变化和人类活动影响的大背景下, 探讨不同生态环境的植被生长特征, 清楚植被对水文变化的响应机理, 可以消除影响植被生长的不利因素, 为制定合理用水制度提供理论依据。

关键词: 植被; 增强型植被指数; 降水; 水储量; 地下水; 土壤水

Spatiotemporal changes in vegetation and hydrological factors in the North China Plain from 2002 to 2016

CAO Yanping¹, QIN Fen^{2,*}, PANG Yingjun³, ZHAO Fang¹, HUANG Jinting¹

¹ The College of Environment and Planning of Henan University, Kaifeng 475004, China

² Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Region, Kaifeng 475004, China

³ Institute of Desertification Studies Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: In this study we investigated the spatial-temporal dynamics and trends of vegetation and its association with changes in various hydrological factors in the North China Plain between 2002 and 2016, by combining the MODIS enhanced vegetation index (EVI) with precipitation, GRACE gravity satellite terrestrial water storage (TWS), groundwater, and soil moisture. Our results showed that: (1) from 2002 to 2016, the vegetation of the North China Plain exhibited an increasing trend, whereas there was a decreasing trend in the hydrological factors (TWS, soil moisture, groundwater); (2) being mainly covered by crops, the vegetation in the Huanghuai plain area increased during the study period. However, precipitation, TWS, groundwater, and soil moisture all decreased. Over-exploitation of groundwater to irrigate crops is an important measure to ensure food security in the short term; (3) the contrasting trends in the decreasing vegetation coverage, TWS, soil moisture, and groundwater with increasing precipitation over the urban and rural residential

基金项目: 国家自然科学基金课题 (41701503); 河南大学地理学优势学科建设经费; 河南大学杰出人才特区支持计划特聘教授科研启动费; 河南大学引进博士科研启动基金项目 (B2015060)

收稿日期: 2018-03-05; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qinfun@126.com,

areas in the Yanshan-taihang mountains piedmont plain and Ji-lu-yu low lying plain may be a result of influences from intense human activities; (4) the natural forest and grassland ecosystems located in the Shandong hilly agroforestry region were positively correlated with precipitation during the study period, both showing decreasing trends. Results from this research will generate a better understanding of vegetation dynamics in different ecological environments and its response mechanisms to changes of different hydrological factors. This will guide the design of rational water-use strategies for a changing climate and increasing anthropological activities.

Key Words: vegetation; enhanced vegetation index; precipitation; terrestrial water storage; groundwater; soil moisture

陆地表面植被是监测全球气候变化的敏感指示器,是陆地地表生态系统的核心组成部分,也是链接大气、水体和土壤的纽带^[1]。气候和水分环境是植被生长状况的重要影响因素;而植被生长状态变化又将改变陆地地表下垫面属性,进一步影响气候调节、水土保持以及整个生态系统的稳定性^[2]。地表植被变化是气候变化、人类活动等多种因素共同作用的结果。因此,研究植被变化及其与气候、水文环境因子之间的关系可为应对气候和水环境变化提供重要的理论依据,也是有效预测生物圈对自然气候系统和人类活动反馈的前提。

降水、土壤水直接影区域植被生长。而当光照充足、降水有限时,地下水是土壤水补给的重要来源,因而地下水也会对生态系统产生一定的影响。Koirala 等^[3]利用一系列高分辨率数据对全球尺度上地下水和植被的关系做了研究,结果表明全球 2/3 的植被区的总初级生产力(GPP)至少在一个季节内与地下水位(WTD)有关;湿润地区的 GPP 和 WTD 主要呈负相关,干旱区主要呈正相关。

华北平原是中国重要的政治、经济、文化中心,也是重要的粮棉油生产基地^[4]。水资源短缺是该地区社会经济和农业持续发展的主要限制因素。近年来,随着工农业的发展,用水量急剧增加;同时降水量明显减少,造成了华北平原水资源匮乏,地表干枯;连年超采地下水,使地下水位持续下降,形成大面积地下水漏斗区。因此,迫切需要分析华北平原植被生长状况及水文要素时空动态变化特征。

对于大、中尺度研究区域,遥感方法是监测其植被变化的有效手段。植被指数是植被覆盖度、植被初级生产力等植被生态参数的重要指示器。研究表明,归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)是目前最为广泛应用的植被指数^[5]。但是由于 NDVI 算法本身并非线性,对于覆盖度较高的天然植被和农作物区域,NDVI 饱和现象比较严重,且土壤背景的干扰噪声也在一定程度上损害 NDVI 的空间一致性;增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)较好解决了 NDVI 的红光饱和、大气和土壤背景的干扰影响,更加适合高植被覆盖度的区域^[6]。

表 1 中列举一些基于不同植被指标在中国不同区域的相关研究。尽管基于遥感的植被状况相关研究逐渐增多,多数研究集中在气候或人类活动有关因素与植被变化之间的定量关系。探究气候变化且人口活动密集区域的植被生长状况及其与水文要素变化关系对于区域植被利用与保护有一定意义。本文分析华北平原 MODIS EVI 植被指数、关键水文要素的时空分布特征和变化趋势,重点探讨不同生态系统分区植被生长状况和水文要素的关系。

1 研究区域概况

华北平原是我国三大平原之一,主要农业区域之一;位于中国东部沿海,地跨 112.4°—122.7°E, 32.5°—40.6°N,北抵燕山山麓,南达大别山北侧,西依太行山-伏牛山,东邻渤海和黄海。研究区域总面积约 39.2 万 km²,除山东半岛为丘陵外,大部分地区为平原;土地利用类型多为耕地。

研究区属于温带大陆季风气候,年均气温 8—15℃,年均降水 500—900 mm。降水集中分布在 6—9 月份,四季变化明显,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。华北平原是以旱作为主的农业区,农作物以一年两熟为主,主要的粮食作物是冬小麦、夏玉米,主要经济作物是棉花和花生。华北平原人均水资源量仅为 456 m³/年,不足全国的 1/6。地表水时空分布不均,地下水已成为华北平原经济、社会、农业可持续发展的重要支柱。

表 1 基于遥感监测分析中国不同区域植被生长状况

Table 1 Vegetation growth in different regions of China by remote sensing vegetation index

区域 Region	数据与方法 Data and method	研究时段 Study period	重要结论 Key conclusion
中国 ^[2] China	AVHRR NDVI	1985—1990	1.植被指数较真实反映地表植被覆盖状况
青藏高原 ^[7] Tibet plateau	MODIS NDVI	2000—2016	1.青藏高原东南部植被状况好于西北部;2.年降水量与年最大合成 NDVI 呈较好正相关
黄土高原 ^[8] Loess plateau	GIMMS 和 SPOT VGT NDVI	1981—2006	1.1981—1989 年植被覆盖持续增加;1990—1998 年为相对稳定时期;1999—2001 年植被盖度迅速下降;2002—2006 年植被盖度迅速上升。2.降水是黄土高原植被变化的重要原因。3.农区 NDVI 不断上升
珠江流域 ^[9] Pearl river basin	MODIS EVI	2004—2013	1.美国国防气象卫星 (defense meteorological satellite program, DMSP)灯光变化与 EVI 变化的相关系数明显高于气温和降水;2.2004—2014 年期间珠江流域内年均 EVI 介于 0.33—0.38 之间
塔里木河流域 ^[10] Tarim river basin	MODIS NDVI	2000—2013	1.2000—2013 年,塔里木河流域植被生长季 NDVI 呈增加趋势,速率为 0.0008/a;2.平原区植被受降水和温度共同作用,山区植被变化的主要限制因子是温度;平原绿洲区植被变化的主要驱动力因子是人类活动
黄河流域 ^[11] Yellow river basin	MODIS NDVI	2000—2010	1.2000—2010 年黄河流域植被改善区域远远大于退化区域
京津冀城市群 ^[12] Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan regions	MODIS NDVI	2005—2015	1.2005—2015 年京津冀植被覆盖度呈上升趋势,速率为 0.0065/a。2.京津冀地区植被变化不显著区域以华北平原为中心展布,退化区域比重为 6.8%
华北平原 ^[13] North China plain	GIMMS NDVI 和 MODIS NDVI	1981—2013	1.1981—1994 年,华北平原植被覆盖度的平均增加趋势为 0.0018/a, 1994—2013 年的增加趋势为 0.0012/a。2.1981—2013 年间,华北平原年际植被覆盖度与年降水、年气温的偏相关系数分别为 0.018 和 0.006。3.人类活动不仅加速了区域植被覆盖度的降低,也加剧了降低速率的变快
华北地区 ^[14] North China	MODIS NDVI	2001—2013	1.2001—2013 年,华北平原植被覆盖主要呈上升趋势。2.华北地区植被覆盖与气候干旱程度的平均相关系数为 0.2

为探讨不同生态系统分区植被生长的变化特征,将研究区域已有自然分区按照地形和综合农业区划等分为 4 个子区域(图 1)^[15],分别为:燕山-太行山山麓平原区、冀鲁豫低洼平原区、黄淮平原区、山东丘陵农林区。山东丘陵农林区的植被以落叶阔叶林为主,其它 3 个子区域的植被以农作物为主,仅在太行山、燕山山麓边缘等生长灌丛、小片落叶阔叶林、乔木等植被。如图 1 所示,2002—2016 年间该区域 EVI 分布范围为 0—0.75,黄淮平原区、冀鲁豫低洼平原区中南部地区的植被生长最佳,燕山-太行山山麓平原区、冀鲁豫低洼平原区的北部和山东丘陵农林区的部分地区植被覆盖度较低。

2 数据与方法

2.1 MODIS EVI 数据

本文采用 2002—2016 年的 Terra MODIS 传感器的 0.05°空间分辨率的 L3 级逐月增强型植被指数 (MODIS/Terra Vegetation Indices Monthly L3 Global 0.05deg CMG),源于 NASA 陆地分布式数据档案中心 (Land Processes Distributed Active Archive Center,LPDAAC)。

EVI 的计算公式为:

$$EVI = G \times \frac{(\rho_{NIR} - \rho_R)}{(\rho_{NIR} + C_1 \times \rho_R - C_2 \times \rho_B + L)} \tag{1}$$

其中 G 为增益因子,L 为背景调整项,C₁和 C₂为拟合系数; ρ_B 、 ρ_R 、 ρ_{NIR} 分别为 MODIS 的蓝光、红光和近红外

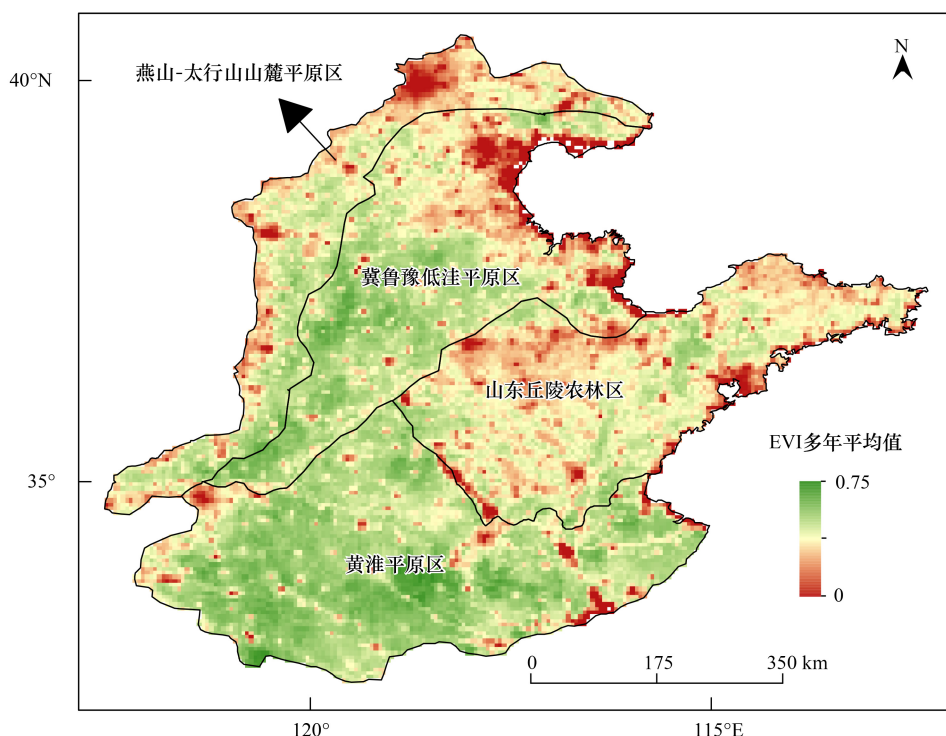


图1 华北平原增强型植被指数 (enhanced vegetation index, EVI) 在 2002—2016 年间多年均值空间分布

Fig.1 Spatial distribution of multi-year averaged enhanced vegetation index (EVI) from 2002 to 2016 over North China Plain

波段的光谱反射率。MODIS EVI 产品数据反演过程中, $G=2.5$, $L=1$, $C_1=6$, $C_2=7.5$ 。

基于月 EVI 数据, 根据国际通用的最大值合成法 (Maximum Value Composite, MVC) 得到研究区域 2002—2016 年的逐年 EVI 最大值序列图谱, 代表年内生长季的植被状态。此外, 基于最大值合成法思路, 根据公式 2 求研究区域逐格网的逐年 EVI 最小值序列图谱, 代表年内非生长季的植被状态。

$$EVI_i = \min(EVI_{i,j}) \quad (2)$$

式中, EVI_i 指 i ($i=2002-2016$) 年的 EVI 数据, $EVI_{i,j}$ 指 i 年的 j 月 ($j=1-12$) 的 EVI 数据。

2.2 GRACE 重力卫星数据

本文采用 GRACE CSR RL05 Mascon 水储量变化量数据, 时间分辨率为月, 空间分辨率为 0.5° 。该水储量变化量在垂直方向上是地下水、土壤水、地表水、冰雪水和生物含水量等五部分变化量的集成量^[16]。研究表明基于 Mascon 算法反演得到的水储量变化量精度更高^[17]。

本文基于 GRACE 水储量变化量和 Global Land Data Assimilation System (GLDAS) 的土壤水和雪水当量数据, 根据公式 3, 反演得到华北平原地下水数据集。Feng 等^[18]利用 GRACE 重力卫星反演 2003—2010 年间华北平原地下水, 研究时段内由于农业灌溉抽取地下水造成该地区地下水以 (2.2 ± 0.3) cm/a 的速率减少, 与地下水井实测数据相一致。

$$\Delta GW = TWSA - \Delta SM - \Delta SWE \quad (3)$$

式中, Δ 代表变化量, GW 是地下水, TWSA 是水储量变化量, SM 是土壤水, SWE 是雪水当量。

2.3 GLDAS 数据

本文采用最新版本 GLDAS-2.1 的 Noah 模型的输出变量, 包括 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 空间分辨率的月时间尺度的土壤水和雪水当量, 时间跨度为 2000.01—至今。数据获取后, 基于 ArcMap 平台进行投影 (WGS84 地理坐标系); 从规则格网数据集中裁剪出研究区域的栅格数据; 将 0.25° 数据进行重采样得到 0.5° 空间格网数据; 最后基于月土壤水和雪水当量, 分别求得其在 2002—2016 年间的月距平值, 即月值 (土壤水或雪水当量) 减去

2002—2016 年间所有月份的平均值。

2.4 降水数据

2002—2015 年间的降水数据来自中国区域高时空地面气象要素驱动数据集^[19]。该套数据覆盖整个中国,时间跨度为 1979—2015 年,时间分辨率为 3h,空间分辨率为 0.1°。从基金委国家地球系统科学数据平台—寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>)获取。

2016 年的降水数据采用 Global Precipitation Measurement(简称 GPM)最新的 3 级融合降水产品 IMERG(Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM),空间分辨率为 0.1°×0.1°,时间分辨率为月。从 NASA 降水测量计划网站(www.pmm.nasa.gov)获得。

2.5 一元线性回归法

本文采用一元线性回归法分析每个像元的植被和水文变量在 2002—2016 年间的变化趋势,计算公式为:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times Y_i) - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n Y_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (4)$$

式中, θ_{slope} 表示趋势线的斜率; n 表示年份, i 表示第 i 年 ($1 \leq i \leq n$), Y_i 表示第 i 年 Y 值, Y 表示植被指数、水文要素等变量。

关于时间序列趋势显著性检验的统计方法很多,本文采用非参数 Mann-Kendall 趋势检验方法(简称 MK 趋势检验法)^[20]进行趋势性检验。

2.6 植被与水文要素的相关关系

相关系数能够定量描述两个变量之间线性关系的紧密程度。对于两个要素 x 与 y , 如果它们的样本值分别为 x_i 与 y_i ($i=1, 2, \dots, n$), 则它们之间的相关系数被定义为:

$$r_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中, $r_{x,y}$ 为要素 x 与 y 的相关系数; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别表示两个要素样本值的平均值; x_i 为 EVI 数据, y_i 为水文要素数据, 如降水、水储量、土壤水和地下水。

3 结果与分析

3.1 华北平原 EVI 和水文要素年内分布特征

图 2 为华北平原 EVI、降水、水储量、土壤水、地下水月值的年内分布特征图, 由 2002—2016 年间月值求平均得到, 例如 1 月降水量, 为 2002—2016 年间 15 个 1 月份降水量的平均值。如图 2 所示华北平原降水集中分布在 6—9 月份; 7 月份为峰值, 高达 124.3 mm。植被指数 EVI 与降水年内分布基本一致, 相关系数高达 0.9。不同于降水的典型“单峰”年内分布特征, 华北平原 EVI 年内呈“双峰”分布特征, 于 5 月份, 8 月份分别达到峰值, 这一分布特征与华北平原的农作物生长季相匹配, 5 月份是冬小麦生长高峰期, 8 月份是夏玉米及其它非农作物生长峰值期。2002—2016 年间水储量大致呈典型单峰年内分布特征, 在丰水季(6—9 月份)水储量变化量处于年内峰值。由 EVI 年内分布特征发现, 研究区域 5 月份植被指数 EVI 处于次峰值, 但是 6 月份 EVI 处于明显低谷值; 水储量在 6 月份也处于严重亏损状态, 与该月份 EVI 的低谷状态相一致。6 月份上旬是小麦农作物收割期, 下旬是玉米等农作物播种期, 小麦农作物的收割造成植被覆盖降低, EVI 值减少。而 6 月份玉米等农作物的播种期后需要大面积灌溉, 抽取大量地下水满足农作物需求, 造成区域水储量、地下水的严重减少。区域年内月 EVI 与土壤水相关系数为 0.59, 二者的峰值时刻相一致(8 月份)。已有研究表明华北平原地下水是该区域水储量减少的主要因素^[18], 由图 2 可知, 地下水在 7 月份和 11 月份出现低谷值, 7 月

份的明显低谷值是华北平原夏季农作物需求大量地下水导致的,11 月份低谷值是由抽取地下水灌溉冬小麦造成的。整体上,华北平原植被生长和水文要素的年内分布特征具有极强的相关性。

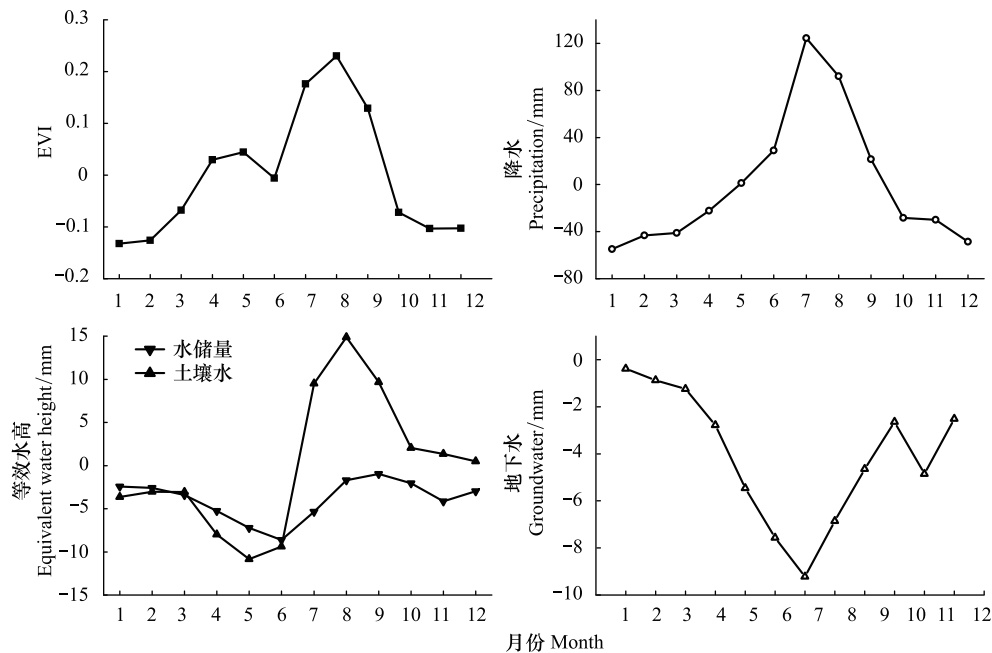


图2 华北平原 EVI、降水、水储量、土壤水、地下水的年内分布

Fig.2 Annual internal distribution of EVI, precipitation, water storage, soil moisture, groundwater of North China Plain

3.2 华北平原 EVI 和水文要素年际变化趋势空间分布特征

基于月 EVI 影像,根据最大值合成法和最小值合成法分别得到 2002—2016 年间的逐年 EVI 最大值和最小值空间分布图,利用一元线性回归法计算得到该时期华北平原 EVI 年最大值和年最小值的变化趋势空间分布图(图 3)。从空间格网变化速率的幅度可知,EVI 年最小值年变化速率的幅度($-0.01/a-0.01/a$)小于 EVI 年最大值变化速率的幅度($-0.02/a-0.02/a$),且二者变化趋势空间分布差异明显。研究区域 53%格网 EVI 年最大值的趋势分析值为正值,表明这些格网的 EVI 年最大值呈增长趋势;47%格网 EVI 年最大值趋势分析值为负值,表明这些格网的 EVI 年最大值呈减少趋势。研究区域 81%格网 EVI 年最小值的趋势分析值为正值,表明这些格网的 EVI 年最小值呈增长趋势;19%格网 EVI 年最小值趋势分析值为负值,表明这些格网的 EVI 年最小值呈减少趋势。对 EVI 年最大值和 EVI 年最小值的变化趋势分别进行 MK 显著性检验。整个华北平原 29%格网的 EVI 年最大值的年际变化通过显著性检验($P<0.1$);49%格网的 EVI 年最小值的年际变化通过显著性检验($P<0.1$)。从空间分布特征发现:EVI 年最大值显著变化格网($P<0.1$)集中分布在黄淮平原的南部地区,冀鲁豫低洼平原区北部,燕山-太行山山麓平原北部及山东丘陵农林区的东部;EVI 年最小值显著变化格网($P<0.1$)集中分布在黄淮平原区的中北部、西部及冀鲁豫低洼平原区中南部地区。

对图 3 变化趋势空间分布进行统计得整个华北平原及 4 个不同生态子区域的 EVI 年最大值和 EVI 年最小值在 2002—2016 年间的年际变化速率的平均值,见表 2。研究时段内,整个华北平原及其子区域的 EVI 年最大值年际变化趋势的区域格网平均值小于 EVI 年最小值年际变化趋势的区域格网平均值。华北平原的 EVI 年最大值呈微弱增长趋势,区域平均年际变化速率为 $0.001/10a$,除黄淮平原区呈增长趋势,其它 3 个子区域呈减弱趋势,其中燕山-太行山山麓平原区的 EVI 年最大值年际减少速率最大,值为 $-0.008/10a$,冀鲁豫低洼平原区次之,速率为 $-0.007/10a$,山东丘陵农林区 EVI 年最大值以 $-0.003/10a$ 的速率减少。华北平原 EVI 年最小值呈增长趋势,速率为 $0.017/10a$ 。4 个子区域的 EVI 年最小值亦呈增长趋势,其中黄淮平原区增长速率最大($0.024/10a$),冀鲁豫低洼平原区次之($0.018/10a$),山东丘陵农林区 EVI 年最小值变化速率最小

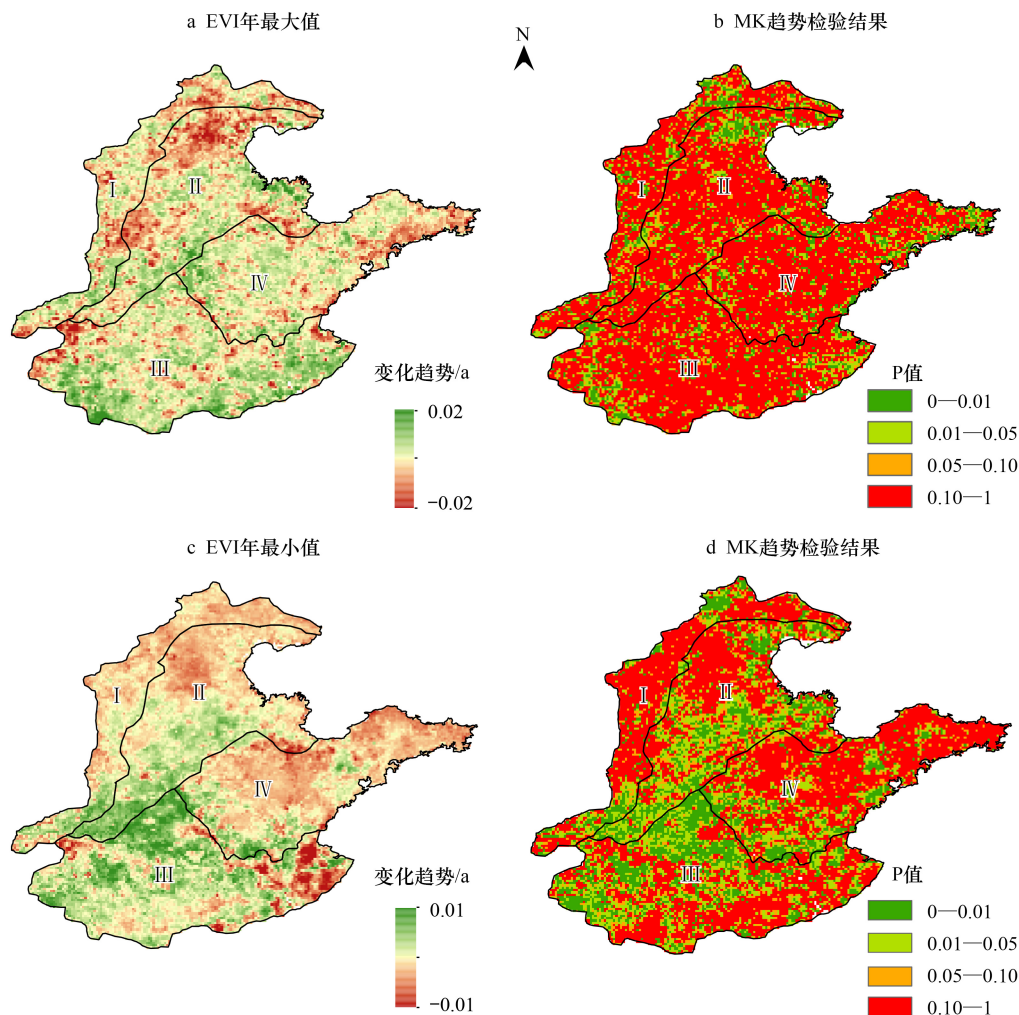


图3 华北平原 EVI 年最大值和年最小值的年际变化趋势和 MK 显著性检验空间分布图

Fig.3 Spatial distributions of annual trend and their significance test for the EVI annual maximum and EVI annual minimum of North China Plain

I: 燕山-太行山山麓平原区; II: 冀鲁豫低洼平原区; III: 黄淮平原区; IV: 山东丘陵农林区

(0.010/10a)。2002—2016 年间,黄淮平原区的 EVI 年最大值和年最小值均呈增长趋势,其它 3 个子区域 EVI 年最大值呈减少趋势,而 EVI 年最小值呈增长趋势。总之,华北平原非生长季植被状况好转,生长季的植被状况除黄淮平原区植被好转外,其它区域植被整体呈退化趋势。

由图 4 华北平原的降水、水储量变化量、土壤水及地下水的年际变化趋势空间分布图可知,2002—2016 年间,燕山-太行山山麓平原区和冀鲁豫低洼平原区降水呈增加趋势,山东丘陵农林区和黄淮平原区的降水呈减少趋势。整个研究区域的水储量变化量呈减少趋势,且减少速率由东向西逐渐递增,最小值达 -2.4 mm/a 。燕山-太行山山麓平原的中北部及山东丘陵农林区中部局部地区的土壤水呈微弱增加趋势;华北平原其它区域的土壤水呈减少趋势,且减少速率由北向南逐渐递增,黄淮平原区达到最大减少速率,为 -2 mm/a 。由图 4 地下水变化率空间分布图可知华北平原地下水呈减少趋势,中西部地区减少速率最大,为 -1.6 mm/a ;黄淮平原区南部 3 个格网和山东丘陵农林区近海地区的 1 个格网的地下水呈微弱增加(高达 0.25 mm/a),可忽略不计。

对图 4 变化趋势空间分布进行统计得整个华北平原及 4 个不同生态子区域的降水、水储量、土壤水、地下水在 2002—2016 年间的年际变化速率的平均值,见表 2。2002—2016 年间,华北平原降水以 -2.61 mm/a 的

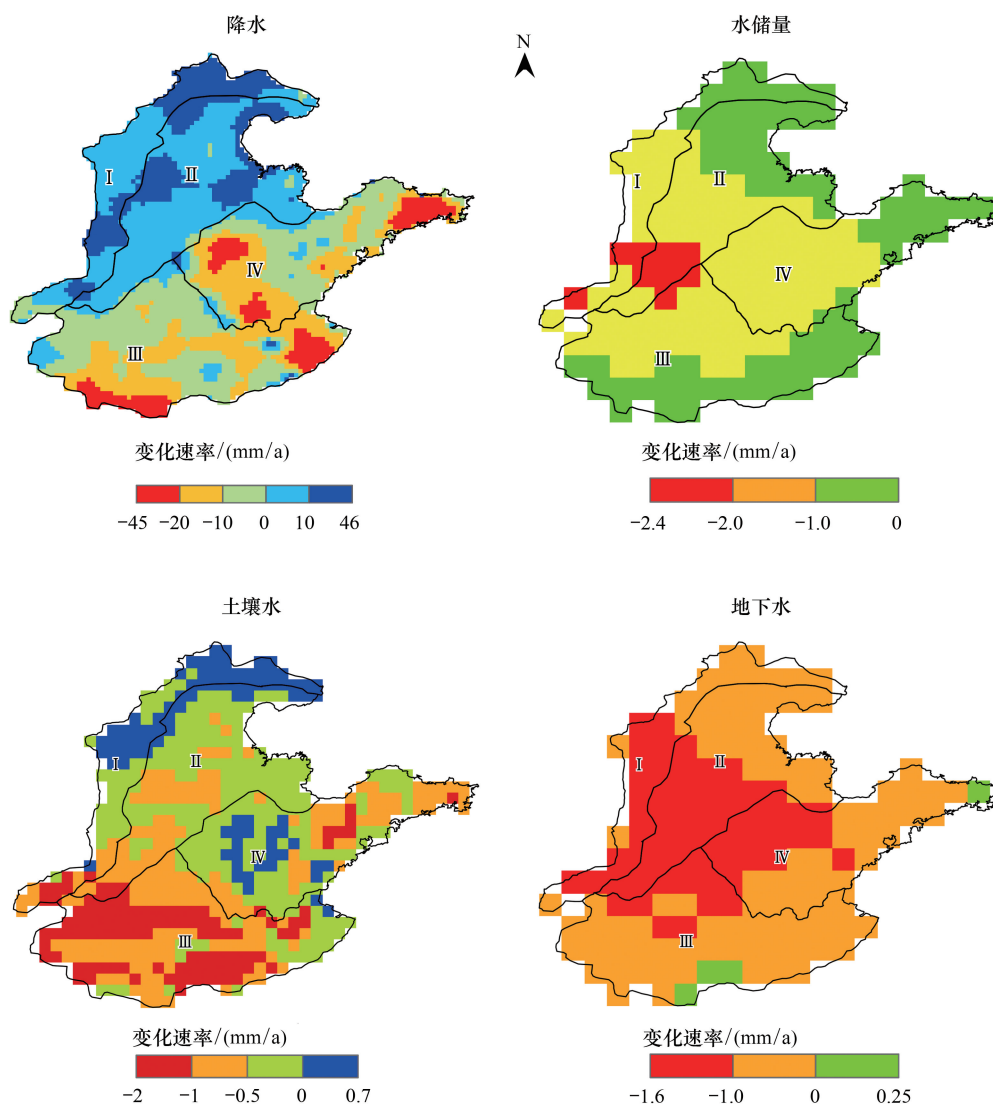


图4 华北平原的降水、水储量、土壤水、地下水在2002—2016年间年际变化趋势空间分布

Fig.4 MK trend spatial distribution of precipitation, water storage, soil moisture and groundwater over North China Plain during 2002—2016

速率减少;水储量、土壤水和地下水均以不同速率呈减少趋势。燕山-太行山山麓平原区和冀鲁豫低洼平原区的降水的增多与 EVI 年最小值的增多呈正相关;水储量、地下水、土壤水的减少趋势与 EVI 年最大值的减少呈正相关。黄淮平原区的降水、水储量、地下水和土壤水呈减少趋势,且土壤水减少速率是四个子区域中最大的,降水、水储量、地下水、土壤水的减少趋势与 EVI 年最大值和 EVI 年最小值的增大趋势呈负相关。山东丘陵农林区的降水减少速率较大,与该区域 EVI 年最大值的减少趋势呈正相关关系,与 EVI 年最小值的增长趋势呈负相关关系。

4 讨论

4.1 华北平原植被生长状况及与其他区域异同

表1展示了华北平原与其他地区(中国、青藏高原、黄土高原、黄河流域、珠江流域、塔里木河流域、京津冀冀地区)的植被生长状况。基于 MODIS NDVI 数据赵舒怡等^[14]发现2001—2013年间华北平原植被覆盖主要呈上升趋势。本文基于 MODIS EVI 年最大值发现2001—2013年间华北平原植被亦呈增长趋势(图5),与已有

研究结果相一致。不同区域或同一区域不同时段 的植被生长状况存在异同,且不同区域气候变 化和人类活动对地表植被变化的贡献量不同。 青藏高原植被覆盖主要受降水影响,黄土高原、 黄河流域、塔里木河流域、华北平原植被覆盖 变化受气候变化和人类活动共同作用,珠江流 域、京津冀城市群植被覆盖主要受人类活动影 响。

表 2 华北平原及不同生态子区域的降水、水储量、地下水、土壤水、EVI 年最大值和 EVI 年最小值在 2002—2016 年间的年变化速率
Table 2 Annual change rates of precipitation, water storage, groundwater, soil moisture, EVI annual maximum and EVI annual minimum over North China Plain and its different ecologic zones from 2002 to 2016

变量 Variables	华北平原 North China plain	燕山-太行山 山麓平原 Yanshan-taihang mountains piedmont plain	冀鲁豫低 洼平原区 Ji-lu-yu low lying plain	山东丘陵农林区 Shandong hilly agroforestry region	黄淮平原区 Huang-huai plain
降水 Precipitation/ (mm/a)	-2.61	8.73	7.23	-10.67	-9.80
水储量 Water storage/ (mm/a)	-1.19	-1.41	-1.29	-1.23	-1.07
地下水 Groundwater/ (mm/a)	-0.75	-0.96	-1.01	-0.85	-0.53
土壤水 Soil moisture/ (mm/a)	-0.53	-0.15	-0.43	-0.38	-0.93
EVI 年最大值 EVI annual maximum/ (/10a)	0.001	-0.008	-0.007	-0.001	0.013
EVI 年最小值 EVI annual minimum/ (/10a)	0.017	0.012	0.018	0.010	0.024

图 6 为华北平原土地利用分布图,主要包括耕地、草地、林地、水域、城乡工矿建筑用地、未利用地 6 个一级类型,其中耕地面积约占总面积的 72.4%,城乡、工矿、居民用地面积约为 15.6%,草地、林地、水域、未利用地的分布面积分别为 4.3%,3.5%,3.6%和 0.6%。耕地以旱地为主,面积占耕地总面积的 94.4%。黄淮平原区植被类型以农作物为主,生长季植被长势最佳,EVI 值最高(图 1);华北平原的林地和草地等自然植被占少部分,集中分布在山东丘陵农林区,该区域 EVI 指数低于黄淮平原区(图 1);燕山-太行山山麓平原区北部和冀鲁豫低洼平原区北部是城乡、工矿、居民用地集中分布区,该区域植被指数最低(图 1)。整体上,华北平原以农作物为主,植被指数分布呈典型季节分布规律,人类活动(例如灌溉、城市扩张等)直接影响植被生长状况。

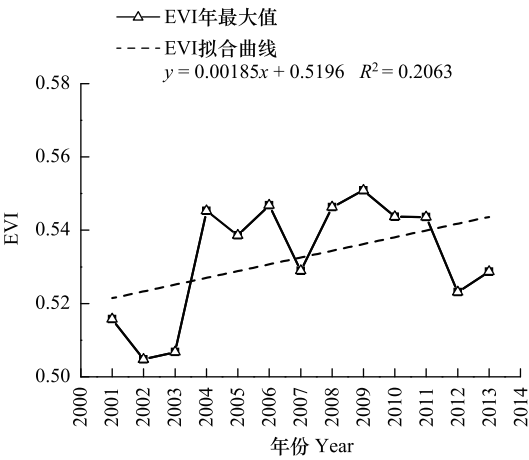


图 5 2001—2013 年华北平原植被指数 EVI 年最大值年际分布图
Fig.5 Interannual distribution of EVI annual maximum over North China Plain from 2001 to 2013

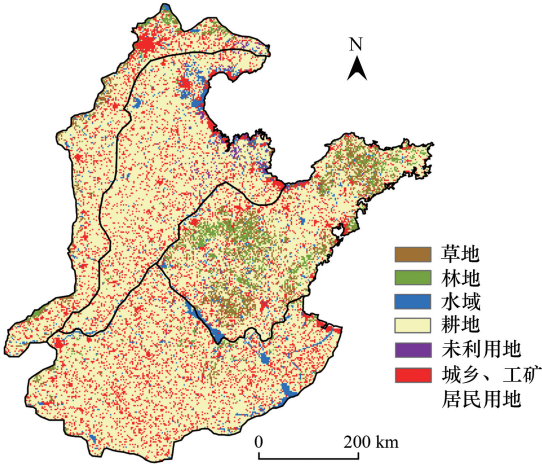


图 6 华北平原土地覆盖/土地利用分布图
Fig.6 Land cover/land use distribution of North China Plain

4.2 华北平原植被生长与水文要素相关性分析

EVI 年最大值和年最小值与降水、水储量、土壤水、地下水等水文要素多年时序数据之间的相关系数见表 3。2002—2016 年间,华北平原 EVI 年最大值与降水量、水储量、土壤水和地下水的相关系数均为正值,而 EVI 年最小值与各水文变量的相关系数均成负值,且后者绝对值大于前者的绝对值(表 3)。从相关性角度分析,

降水、水储量、土壤水、地下水的增多对 EVI 年最大值起正面作用,促使植被好转;而 EVI 年最小值的增长需要消耗更多水资源量。从相关系数数值上看,水储量、土壤水、地下水与 EVI 年最大值及 EVI 年最小值的相关系数明显大于降水,说明华北平原植被与水储量、土壤水和地下水的相关性更好,即水储量、地下水、土壤水能够更敏感地反映区域植被的动态变化。

表 3 EVI 年最大值和年最小值与降水、水储量、土壤水、地下水年时序数据的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between EVI annual maximum, EVI annual minimum and precipitation, water storage, soil moisture and groundwater

变量 Variables	降水 Precipitation	水储量 Water storage	土壤水 Soil moisture	地下水 Groundwater
EVI 最大值 EVI annual maximum	0.03	0.38	0.41	0.41
EVI 最小值 EVI annual minimum	-0.19	-0.62	-0.46	-0.56

基于年时序数据和多年平均值,计算得到各变量年距平值。图 7 为 EVI 年最大值、EVI 年最小值、降水、水储量、土壤水、地下水 2002—2016 年间的年距平值时序分布。依据降水多年时序分布特征将华北平原气候分为四个阶段(表 4),2002 年,降水距平值为 21 世纪以来的极小值,定义为枯年;2003—2008 年,多年平均降水距平值为 66.4 mm,为丰年;2009—2014 年,多年平均降水距平值为-48.7 mm,为枯年;2015—2016 年,平均降水距平值为 54.7 mm,为丰年。4 个阶段植被生长状况和水文要素的分布情况是:受 2002 年降水量极少影响,该年 EVI 年最大值、EVI 年最小值、水储量、土壤水和地下水等要素低于多年平均值;2003—2008 年丰水年,EVI 年最大值、水储量、土壤水、地下水等要素较 2002 年明显增多,且较多年平均状态高或者基本持平,EVI 年最小值较多年平均状态略微偏低;2009—2014 年枯水年,EVI 年最大值和 EVI 年最小值高于多年平均值,EVI 年最大值较相邻丰水年阶段偏低,同时区域水储量、土壤水和地下水较多年平均量偏低;2015—2016 年丰水年,EVI 年最小值多于多年平均值,而 EVI 年最大值、水储量、土壤水和地下水等低于多年平均值,且分别低于上一时段的植被和水文要素状态。

研究表明降水影响华北平原生长季和非生长季的植被状况,而植被生长状况还受人类活动(如地下水灌溉、城市扩张等)影响,并未与降水保持完全同步。这主要是因为华北平原的降水已不能满足其植被生长需求,为满足植被生长需求,需消耗水储量、土壤水和地下水。目前,华北平原的农业用水以抽取地下水灌溉为主。特别是冬小麦的大范围种植,在解决粮食安全问题的同时,也带来了地下水超采等问题。“为维持农作物生长消耗地下水”这一现象与本文结果“EVI 年最小值与水储量、土壤水、地下水呈负相关关系”相一致。

表 4 不同气候状态下植被和水文要素变化

Table 4 Changes in vegetation and hydrological factors under different climate conditions

变量 Variables	2002	2003—2008	2009—2014	2015—2016
降水 Precipitation/mm	-215.6	66.4	-48.7	54.7
EVI 年最大值 EVI annual maximum	-0.027	0.004	0.002	-0.006
EVI 年最小值 EVI annual minimum	-0.006	-0.005	0.001	0.014
水储量 Water storage/mm	-4.7	0.5	-5.1	-13.3
土壤水 Soil moisture/mm	-13.1	4.8	-0.5	-6.3
地下水 Groundwater/mm	-3.2	-0.8	-4.9	-12.3

5 结论

本文采用线性回归、Mann-Kendall 趋势检验、相关系数等方法,利用 2002—2016 年 MODIS EVI 植被指数及降水、水储量、地下水和土壤水等数据,分析华北平原植被生长状况和水文要素时空变化特征,探讨植被生长状况与水文变化量之间的相关关系,得到以下结论:

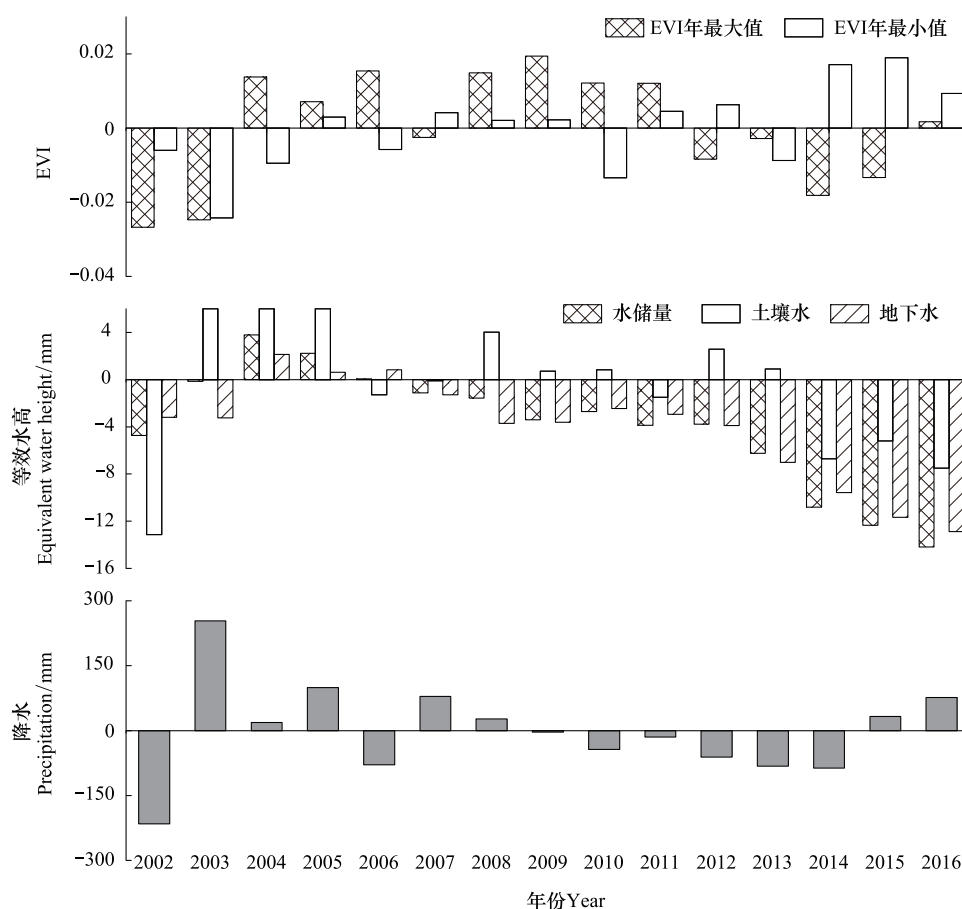


图7 EVI年最大值、EVI年最小值、降水、水储量、土壤水、地下水的年距平时序分布

Fig.7 Annual anomalies of annual maximum EVI, annual minimum EVI, precipitation, water storage, soil moisture and groundwater

(1) 2002—2016 年间, 华北平原的 EVI 年最大值呈微弱增加趋势, 速率为 $0.001/10a$; EVI 年最小值呈明显增长趋势, 速率为 $0.017/10a$; 区域降水、水储量、土壤水、地下水等水文要素值均呈减少趋势。

(2) 黄淮平原区 EVI 年最大值、EVI 年最小值呈增长趋势, 降水呈减少趋势; 燕山—太行山山麓平原区、冀鲁豫低洼平原区的 EVI 年最大值呈减少趋势, EVI 年最小值呈增长趋势, 降水呈增长趋势; 山东丘陵农林区 EVI 年最大值呈减少趋势, EVI 年最小值呈增长趋势, 降水呈减少趋势。4 个子区域的水储量、土壤水、地下水均以不同速率呈减少趋势。

(3) 华北平原植被生长状况受水文要素、人类活动(灌溉、土地利用)双重影响。降水影响华北平原生长季和非生长季的植被状况, 而植被生长状况由于还受人类活动影响, 并未与降水保持完全同步。生长季植被生长状况与水储量、土壤水、地下水呈正相关关系, 非生长季的植被生长状况与水储量、土壤水、地下水呈负相关关系。

华北平原水文要素变化十分重要, 它关系到区域内人类生存及社会经济发展。从近十年来华北平原植被生长状况时空特征变化可以看出, 华北平原植被生长依赖降水和地下水, 地下水在供给该地区植被生长中发挥了极为重要的作用, 但也存在较多问题。本区降水量远远无法满足植被生长需求, 很多地区依靠地下水维持植被生长, 而地下水消耗量大且更新慢, 对未来植被生长需求有一定的胁迫。在全球变暖的大背景下, 如果人类活动继续加强, 将会使华北平原水资源日趋减少, 对区域内生态环境、人类生存以及社会经济发展产生灾难性影响。因此, 在气候变化和人类活动影响的大背景下, 研究植被对水文变化的响应机理, 探讨不同生态环境的植被生长特征, 可以为制定合理地下水开采制度提供理论依据, 消除影响植被生长的不利因素, 对区域生态环境产生积极影响。下一步工作将定量计算出区域人类活动对华北平原水资源的消耗及植被生长状况的

贡献量,为制定合理有效的水资源管理制度、生态保护政策等提供理论依据。

参考文献(References):

- [1] Cornelissen J H C, van Bodegom P M, Aerts R, Callaghan T V, van Logtestijn R S P, Alatalo J, Chapin F S, Gerdol R, Gudmundsson J, Gwynn-Jones D, Hartley A E, Hik D S, Hofgaard A, Jónsdóttir I S, Karlsson S, Klein J A, Laundre J, Magnusson B, Michelsen A, Molau U, Onipchenko V G, Qested H M, Sandvik S M, Schmidt I K, Shaver G R, Solheim B, Soudzilovskaia N A, Stenström A, Tolvanen A, Totland Ø, Wada N, Welker J M, Zhao X Q, Team M O L. Global negative vegetation feedback to climate warming responses of leaf litter decomposition rates in cold biomes. *Ecology Letters*, 2007, 10(7): 619-627.
- [2] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 布和敖斯尔, 李兵. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于 NOAA 时间序列数据分析. *遥感学报*, 1998, 2(3): 204-210.
- [3] Koirala S, Jung M, Reichstein M, de Graaf I E M, Camps-Valls G, Ichii K, Papale D, Ráduly B, Schwalm C R, Tramontana G, Carvalhais N. Global distribution of groundwater-vegetation spatial covariation. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(9): 4134-4142.
- [4] Liu C M, Yu J J, Eloise K. Groundwater exploitation and its impact on the environment in the North China plain. *Water International*, 2001, 26(2): 265-272.
- [5] Yu F F, Price K P, Ellis J, Shi P J. Response of seasonal vegetation development to climatic variations in eastern central Asia. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87(1): 42-54.
- [6] Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez E P, Gao X, Ferreira L G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1/2): 195-213.
- [7] 卓嘎, 陈思荣, 周兵. 青藏高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应. *生态学报*, 2018, 38(9): 3208-3218.
- [8] 信忠保, 许炯心, 郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(11): 1504-1514.
- [9] 王行汉, 丛沛桐, 刘超群, 亢庆, 扶卿华, 赵敏, 王晓刚, 刘晓林. 2004-2013 年珠江流域植被变化及其胁迫分析. *生态学报*, 2017, 37(19): 6494-6503.
- [10] 罗敏, 古丽·加帕尔, 郭浩, 郭辉, 张鹏飞, 孟凡浩, 刘铁. 2000—2013 年塔里木河流域生长季 NDVI 时空变化特征及其影响因素分析. *自然资源学报*, 2017, 32(1): 50-63.
- [11] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 刘颖慧, 王文杰, 陶亮亮, 郑华, 刘孝富. 2000-2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化. *生态学报*, 2013, 33(24): 7798-7806.
- [12] 李卓, 孙然好, 张继超, 张翀. 京津冀城市群地区植被覆盖动态变化时空分析. *生态学报*, 2017, 37(22): 7418-7426.
- [13] 阿多, 赵文吉, 宫兆宁, 张敏, 范云豹. 1981—2013 华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响. *生态学报*, 2017, 37(2): 576-592.
- [14] 赵舒怡, 宫兆宁, 刘旭颖. 2001-2013 年华北地区植被覆盖度与干旱条件的相关分析. *地理学报*, 2015, 70(5): 717-729.
- [15] Wang Q F, Shi P J, Lei T J, Geng G P, Liu J H, Mo X Y, Li X H, Zhou H K, Wu J J. The alleviating trend of drought in the Huang-Huai-Hai Plain of China based on the daily SPEI. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(13): 3760-3769.
- [16] Cao Y P, Nan Z T, Cheng G D. GRACE Gravity satellite observations of terrestrial water storage changes for drought characterization in the arid land of northwestern China. *Remote Sensing*, 2015, 7(1): 1021-1047.
- [17] Save H, Bettadpur S, Tapley B D. High-resolution CSR GRACE RL05 mascons. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(10): 7547-7569.
- [18] Feng W, Zhong M, Lemoine J M, Biancale R, Hsu H T, Xia J. Evaluation of groundwater depletion in North China using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data and ground-based measurements. *Water Resources Research*, 2013, 49(4): 2110-2118.
- [19] Chen Y Y, Yang K, He J, Qin J, Shi J C, Du J Y, He Q. Improving land surface temperature modeling for dry land of China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D20): D20104.
- [20] 刘洋, 李诚志, 刘志辉, 邓兴耀. 1982-2013 年基于 GIMMS-NDVI 的新疆植被覆盖时空变化. *生态学报*, 2016, 36(19): 6198-6208.