

青海湖流域 NDVI 时空变化特征及其与气候之间的关系

方健梅^{1,2}, 马国青³, 余新晓^{1,2}, 贾国栋^{1,2}, 吴秀芹¹

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室,
北京 100083;3.国家林业和草原局世界银行贷款项目管理中心,北京 100714)

摘要: 作为陆地生态系统中的重要组成部分,植被的时空动态深刻影响生态结构和功能,深入了解植被时空演变特征及其与气候之间的关系,有助于提高对生态系统格局—过程—功能的认识,为生态保护和建设提供重要参考。基于 2000—2016 年 MODIS13Q1 NDVI 数据集,结合该区域及周边 14 个气象站的降水和平均气温数据,采用趋势分析法、突变检验法、IDW 空间插值法、偏相关分析法和 R/S 分析法等方法,分析了青海湖流域近 17 年的 NDVI 时空动态特征及其与气候因子间的关系。结果表明:(1)2000—2016 年青海湖流域 NDVI 总体上呈上升趋势,显著和极显著改善的区域占总面积的 40.18%。(2)NDVI 与年降水和平均气温呈正相关关系,但大部分区域呈不显著相关,NDVI 与年降水的相关性高于年平均气温。(3)流域 NDVI 未来演变为随机状态,占比为 65.07%,由改善转退化的区域占 26.73%,多分布在流域上游天峻县境内的多年冻土区。青海湖流域气候朝暖湿化方向发展,辅以生态建设工程的实施,2000—2016 年青海湖流域 NDVI 整体改善,由于青藏高原的典型性和特殊性,未来植被的发展趋势仍具有较大的随机性和异质性。

关键词: 时空变化; NDVI; 青海湖流域; 气候因子

中图分类号: K903; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)03-0105-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.03.017

Spatiotemporal Variation of NDVI in Qinghai Lake Basin and Its Relationship with Climatic Factors

FANG Jianmei^{1,2}, MA Guoqing³, YU Xinxiao^{1,2}, JIA Guodong^{1,2}, WU Xiuqin¹

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2.Key laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of Ministry of Education, Beijing 100083;
3.Management Center of World Bank Loan Project, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714)

Abstract: As a main component of terrestrial ecosystem, vegetation has a profound impact on ecological structure and function. The study of spatiotemporal variation of vegetation and its relationship with climatic factors are beneficial to understand pattern, process and function of ecosystem, and provide important references for ecological protection and construction. Based on MODIS13Q1 NDVI data set during 2000—2016, combined with the precipitation and average temperature data of 14 meteorological stations in and around basin, this paper used the trend analysis method, mutation test, IDW spatial interpolation method, partial correlation analysis and R/S analysis method, analyzed NDVI temporal and spatial dynamic characteristics and the relationship with climate factors for a total of 17 years in Qinghai Lake Basin. The results showed that: (1) NDVI in Qinghai Lake Basin generally showed an upward trend, with significant and extremely significant improvement areas accounting for 40.18% of the total area during 2000 to 2016. (2) NDVI was positively correlated with the annual precipitation and average temperature, but was not significantly correlated in most areas. The correlation between NDVI and annual precipitation was higher than annual average temperature. (3) The future evolution of NDVI in the basin was mostly random, accounting for 65.07%, and the area from improvement to degradation accounted for 26.73%, mostly distributed in the permafrost area in the county of Tianjun located in watersheds upstream. The climate in Qinghai Lake Basin is developing towards warm and humid, in addition, the implementation of ecological construction project, NDVI in the basin over-

收稿日期:2019-11-19

资助项目:国家科技支撑计划项目(2015BAD07B030201);科技创新服务能力建设—科研基地建设—林果业生态环境功能提升协同创新中心(211 协同创新中心)项目(CEFF-PXM2019_014207_000099);国家林业公益性行业科研专项(201404308);国家自然科学基金项目(41601279)

第一作者:方健梅(1987—),女,在读博士研究生,主要从事流域生态水文研究。E-mail:jmf46@163.com

通信作者:余新晓(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事生态水文与水土保持研究。E-mail:yuxinxiao121@126.com

all has been improved from 2000 to 2016. Due to the typicality and particularity of the Tibet Plateau, the future trend of vegetation still has randomness and heterogeneity.

Keywords: spatiotemporal variation; NDVI; Qinghai Lake Basin; climatic factors

青藏高原作为全球气候变化的敏感区和生态脆弱区,呈现不断变暖趋势^[1]已是不争的事实。气候变暖带来一系列生态环境问题,比如高原冰川线退缩、常年积雪融化、草场退化及自然灾害频繁等。植被是生态系统中联接土壤、大气和水分的自然纽带^[2],是全球气候变化的“指示器”。归一化植被指数 NDVI 是植被活动和生产力的最佳指示因子,是反映地表植被生长状况的重要信息源,在评价植被覆盖及植被生长活力时发挥重要作用,已被广泛应用于植被生产力估测、荒漠化监测、旱情监测和生态环境监测等方面^[3-7]。短期内植被覆盖的变化多是人类活动的结果,而长时间序列的植被覆盖变化更多是受气候变化的影响,青藏高原拥有独特且脆弱的生态系统,植被对气候和人为活动的响应更具敏感性和复杂性。

目前学者对青藏高原植被覆盖的研究主要包括植被覆盖的时空分布特征、影响因子分析及植被物候信息提取等^[8]。刘军会等^[9]利用构建生态模型的方法得出青藏高原植被呈现整体升高局部退化的变化趋势;陆晴等^[10]利用 GIMMS NDVI 和气象站历年观测记录,揭示青藏高原植被与温度和降水的相关关系具有地域差异性;Dong 等^[11]对 1982—2006 年青藏高原植被秋季物候进行了研究。青海湖流域地处青藏高原东北部,流域的植被演变特征能较直观地反映生态环境现状。有不少学者对青海湖流域的植被覆盖进行了研究,比如李广泳等^[12]和苏芬等^[13]分别对青海湖流域草地的物候时空变化特征及与气候变化的关系进行了研究,有关生长季植被发展趋势的结论不完全一致;倪向南等^[14]分析了青海湖流域 2001—2010 年植被覆盖时空变化特征,得出植被对气候因子的响应具有明显的空间异质性的结论。

综上所述,以往研究多集中在植被覆盖的变化与气候因子的相关分析,对植被演替的规律性和未来发展趋势预测缺少研究。本研究选取 2000—2016 年 MODIS13Q1 NDVI 遥感数据,运用趋势分析法、变异系数法、R/S 分析法及其他数理统计方法,探究青海湖流域 17 年来植被的时空动态演替规律,分析年 NDVI 与气候因子的关系,并对未来植被 NDVI 进行趋势预测,识别显著变化的区域,尤其是显著退化的区域,关注未来有明显退化趋势的区域,为青海湖流域乃至青藏高原生态保护与恢复提供科学参考,更好的维护该区域的生态安全。

1 研究方法数据来源

1.1 研究区概况

青海湖流域地处青藏高原东北部,东西南北分别是日月山、柴达木盆地、青海南山和大通山,地理坐标为 $97^{\circ}50' - 101^{\circ}20'E$, $36^{\circ}15' - 38^{\circ}20'N$ 。流域范围(图 1a)涉及青海省海西蒙古族藏族自治州的天峻县、海北藏族自治州的刚察县和海晏县以及海南藏族自治州的共和县。流域内地貌类型多样,山区面积占流域总面积的 $2/3$ 。流域地势西北高,东南低,海拔在 $3\,036 \sim 5\,298\text{ m}$,流域面积为 $29\,664\text{ km}^2$ (图 1b)。流域地处我国东部季风区、西南高寒区和西北干旱区的交汇地带,属典型的高原半干旱高寒气候,干旱、少雨、多风、太阳年辐射强、气温日差较大^[15]。流域内年均气温在 $-0.8 \sim 1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量为 $327 \sim 423\text{ mm}$,且时空分布不均,5—9 月降水量占全年降水量的 89.30% ,由东部和南部向西部和北部递减。

流域内的青海湖是中国最大的内陆湖泊,也是中国最大的咸水湖,湖面面积约占青海湖流域的 16% ,近年来青海湖湖面面积不断攀升,目前约为 $4\,583\text{ km}^2$ 。湖中有 2 处岛屿:海心山和三块石。流域内河网呈不对称分布,西北部河网密布,且径流量较大;东南部河网稀疏,且径流量较小。注入青海湖的主要河流有:布哈河、沙柳河、哈尔盖河、黑马河和倒淌河等。流域内主要植被类型为高寒草甸和高寒草原。

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 数据来源 本文选用的遥感数据是由美国对地观测计划 EOS/Terra 卫星携带的中分辨率成像光谱仪 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)所产生的数据产品——MOD13Q1250m 地表反射率 16 天合成产品,数据格式为 HDF—EOS,青海湖流域地理范围覆盖全球正弦曲线投影 SIN 系统中编号为 h25v05 和 h26v05 的 2 个影像分带。数据来自 EARTHDATA 平台(<https://search.earthdata.nasa.gov/>)。每年有 23 个时相,46 景影像,研究时段(2000—2016 年)共计 782 景。MOD13Q1 产品包含 3 个波段,蓝、红、近红外反射率 3 个波段的数据被采用,3 波段的中心分别为 $469, 645, 858\text{ nm}$ 。流域内及周边 14 个国家级气象站 2000—2016 年的降水和气温日数据。

1.2.2 数据预处理 用 MODIS Reprojection Tools(MRT)工具对遥感数据进行波段提取、批量拼接、投影转换和格式转换。提取 MOD13Q1 第 1 波段 ND-

VI 数据和第 5 波段 NIR(Near Infrared Reflectivity, 近红外反射率)数据。将 Sin 坐标转换为 WGS84/Geographic 坐标系统,将地理坐标投影转换为 Al-

bers Equal Area 投影,将影像格式由 HDF 转换为 TIFF 格式。进行影像裁剪,并用最大值合成法合成各月 NDVI,每年 NDVI 取各月 NDVI 平均值。

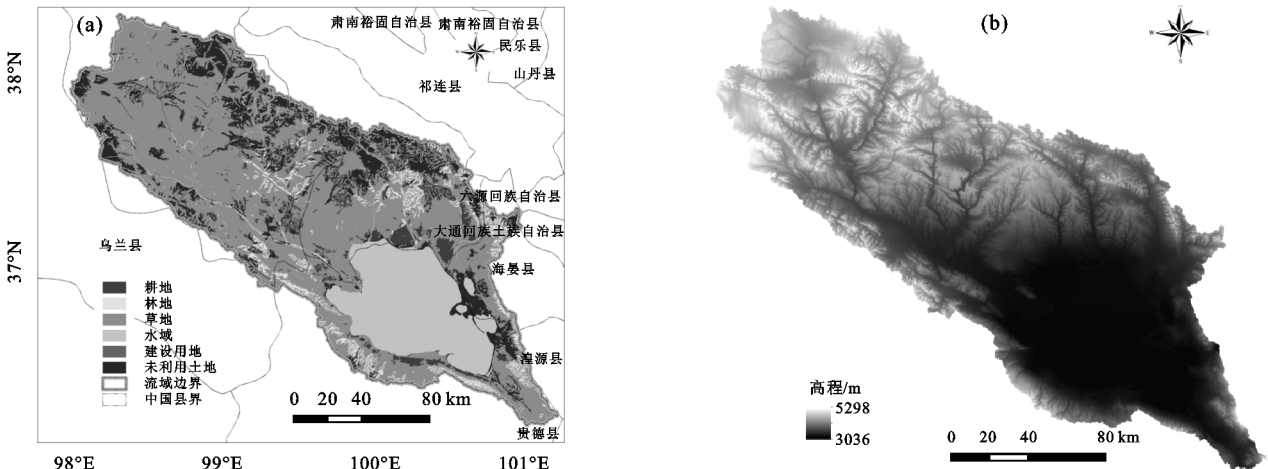


图 1 研究区位置及土地利用类型与高程

青海湖流域矢量边界数据来自寒区旱区科学数据中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn/>)。为了减少广阔湖水对 NDVI 提取的干扰,采取 NDVI 和 NIR 波段分别设定阈值的方法提取研究期内湖泊最小水域面积(时段:2004 年 3—4 月枯水季)^[16-17],经过多次阈值选择和实际核对,本研究将 NDVI 和 NIR 波段阈值均设定为 1 000,即:NDVI 和 NIR 波段值 < 1000^[18] 的像元认定为水面,提取湖面,面积为 4 277.38 km²,流域边界与湖边界相减得到的区域(25 386.63 km²)设为掩膜,对研究时段 NDVI 进行裁剪。在 ArcGIS 10.2 中进行异常值处理、转浮点型等处理,得到 NDVI 的真实值,取值范围[0~1]。

运用 14 个气象站点数据,统计流域年降水量及年平均气温,然后利用反距离加权插值法(IDW)进行空间插值,裁剪得出流域年降水量和年平均气温空间分布图,并重采样成与 NDVI 数据一致的空间分辨率(250 m)。

1.2.3 研究方法 (1)NDVI 突变点检验。Mann-Kendall 统计检验方法^[19-20]可对数据序列进行突变点检验^[21],具体方法为:

将数据序列 x 进行逆序排列,再按公式(3)进行计算,同时满足:

$$\begin{cases} UB_k = -UF_{k'} \\ k' = n + 1 - k \end{cases} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

如果 $UF_k > 0$,则表明数据序列为上升趋势;如果 $UF_k = 0$,则表明数据序列无变化趋势;如果 $UF_k < 0$,则表明数据序列为下降趋势。当 UF_k 曲线越过显著性临界值,则表明趋势变化显著。如果 UF_k 和 UB_k 2 个序列曲线在显著性临界值之间出现交点,该交点所对应的时间点就是突变点。

(2)NDVI 趋势分析。基于像元的一元线性回归分析可以模拟研究区域时空格局变化趋势^[22],本研究建立基于时间序列的年 NDVI 的一元线性方程,模拟 2000—2016 年各年份青海湖流域 NDVI 变化趋势,其优点是可以利用不同时段数据值的拟合消除异常因素对植被覆盖的影响^[23],计算公式为:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times \text{NDVI}_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (7)$$

式中:slope 为回归方程的斜率,若 $\text{slope} > 0$ 时,表示随时间变化 NDVI 有增加趋势,研究区域植被状况趋于变好发展趋势,反之则为变差趋势; n 为研究时段;NDVI_{*i*} 为第 i 年的 NDVI。

趋势的显著性采用 F 检验,用以检验变化趋势的可信程度,公式为:

$$F = U \times \frac{n-2}{Q} \quad (8)$$

式中: $U = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ 为误差平方和, $Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$ 为回归平方和; y_i 为第 i 年 NDVI 的像元值; \hat{y}_i 为其回归值; \bar{y}_i 为研究时段 NDVI 的平均值; n 为研究年数。

$$S_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_{ij} \quad (k = 2, 3, 4, \dots, n) \quad (1)$$

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad 1 \leq j \leq i \quad (2)$$

采用统计变量 UF_k ,将其定义为:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

式中:

$$E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (4)$$

$$\text{var}(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (5)$$

(3)偏相关分析。2 个变量间相关程度的大小可用简单相关系数来描述。公式为：

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})] (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (9)$$

式中： r_{xy} 为 x 、 y 2 个变量的相关系数； x_i 为第 i 年的 NDVI 栅格数值； y_i 为第 i 年的年降水量或年均气温； \bar{x} 、 \bar{y} 分别为研究时段内 NDVI 平均值和年降水量或年平均气温。

假设有 x 、 y 、 z 3 个变量，当 x 、 z 2 个变量同时与 y 变量相关时，可将第 y 变量的影响剔除，只分析 x 、 z 2 个变量的相关程度。偏相关系数计算公式为：

$$r_{xz,y} = \frac{r_{xz} - r_{xy}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xy}^2)(1-r_{yz}^2)}} \quad (10)$$

式中： $r_{xz,y}$ 为剔除变量 y 的影响后，变量 x 和 z 的偏相关系数， r_{xz} 、 r_{xy} 、 r_{yz} 分别是变量 x 和 z ，变量 x 和 y ，变量 y 和 z 的简单相关系数。

相关系数的显著性检验用 t 检验法。计算公式为：

$$t = \frac{r_{xy}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}} \sqrt{n-m-1} \quad (11)$$

式中： n 为样本数量； m 为自变量数量。

(4)NDVI 未来发展趋势预测。基于重标极差 (R/S)分析方法的 Hurst 指数最早是由英国科学家赫斯特在对尼罗河进行长期的水文观测时提出的^[24]。有研究^[25]表明，R/S 分析法和小波分析法估算的 Hurst 指数要比绝对值法、聚合方差法、周期图法等其他方法估算的结果更可靠，因此本文采用 R/S 分析法对 NDVI 演变趋势进行预测。其基本原理为：

NDVI 时间序列 $NDVI_i, i=1,2,3,4,\dots,n$ ，对于任意正整数 t ，定义该时间序列：

① 差分序列

$$\Delta NDVI_i = NDVI_i - NDVI_{i-1} \quad (12)$$

② 均值序列

$$\overline{\Delta NDVI(t)} = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t \Delta NDVI_i \quad (t=1,2,3,\dots,n) \quad (13)$$

③ 累计离差

$$X(h) = \sum_{i=1}^t (\Delta NDVI_i - \overline{\Delta NDVI(t)}) \quad (1 \leq h \leq t) \quad (14)$$

④ 极差

$$R(t) = \max_{1 \leq i \leq n} X(h) - \min_{1 \leq i \leq n} X(h) \quad (t=1,2,3,\dots,n) \quad (15)$$

⑤ 标准差

$$S(t) = \left[\frac{1}{t} \sum_{i=1}^t (\Delta NDVI_i - \overline{\Delta NDVI(t)})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$(t=1,2,3,\dots,n) \quad (16)$$

对于比值 $R(t)/S(t) \propto R/S$ ，若 $R/S \propto t^H$ ，则说明研究的时间序列存在 Hurst 现象， H 称为 Hurst 指数。在双对数坐标系 ($\ln i, \ln R/S$) 中，采用最小二乘法拟合式即可得到。

根据 Hurst 的大小可以判断 NDVI 时间序列的持续性。若 $H=0.5$ ，则说明 NDVI 时间序列为随机序列，不存在长期相关性；若 $0.5 < H < 1$ ，表明时间序列是一个持续性序列，具有长期相关的特征；若 $0 < H < 0.5$ ，表明 NDVI 时间序列具有反持续性，即具有负效应，表示未来的趋势与过去相反。 H 愈接近 1，持续性愈强。若 H 愈接近 0，反持续性愈强。

2 结果与分析

2.1 NDVI 时间变化

2000—2016 年间青海湖流域 NDVI 总体呈增长趋势 (图 2)，增长速率为 0.018/10 a ($R^2=0.46$)，与倪向南等^[14]的研究结论一致。流域 NDVI 值在 0.26~0.30 间波动，多年平均值为 0.28。对 NDVI 进行 MK 突变点检验 (图 3)，在 17 年时间内， UF_k 和 UB_k 均大于 0 表明 NDVI 呈增长趋势，且 UF_k 和 UB_k 在 0.05 置信区间内有多个交点，年 NDVI 的突变点可能在 2005 年和 2007 年。2000—2005 年 NDVI 波动幅度大，2007—2016 年 NDVI 增加趋势明显，且从 2010 年开始 $UF_k > 1.96$ ，表明 2010—2016 年 NDVI 显著增加。

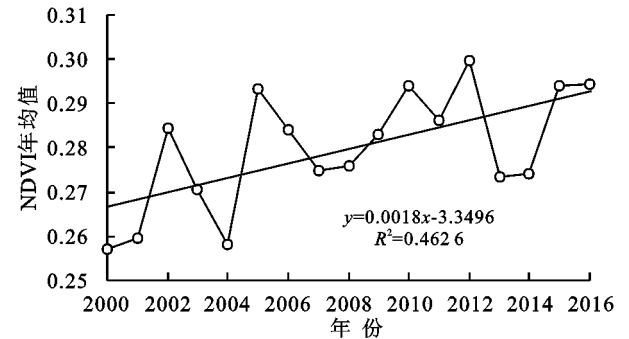


图 2 2000—2016 年青海湖流域年 NDVI 变化趋势

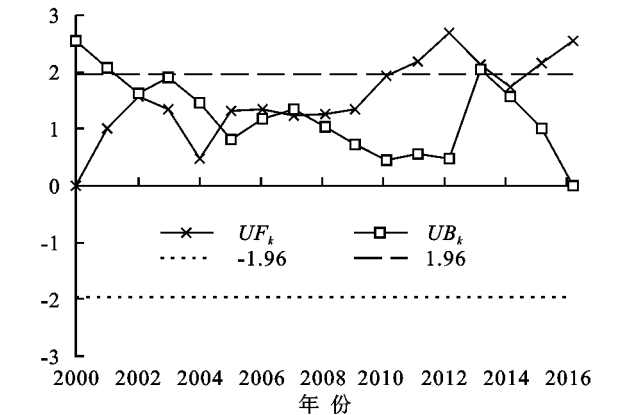


图 3 2000—2016 年青海湖流域年 NDVI M-K 突变点检验

2.2 NDVI 空间变化

为定量流域年 NDVI 空间变化趋势，运用趋势

分析法得出植被各个等级的像元个数,并根据显著性检验结果将变化趋势分为 6 个等级(表 1 和图 4)。仅从回归方程斜率的正负可知, $\text{slope}>0$ 的区域占总面积的 91.07%,流域 NDVI 整体增加。流域极显著和显著改善区域占 40.18%,其中,极显著改善(19.85%)的区域主要集中在天峻县西部和青海湖环湖区域;显著改善(20.33%)的区域多分布在于极显著改善区域的外围,且天峻县所占面积和比例高于其他县。极显著和显著退化区域占 1.13%,主要分布在河岸和湖岸周边,其原因是:2005 年以来,降雨和上游来水量不断增加,蒸发量减少,加之温度升高导致高山积雪、冰川消融起到水量补给作用,青海湖水位持续上升,仅 2005—2019 年 14 年间水位共上升 2.55 m,水位上涨,淹没周边的草地,导致 NDVI 出现大幅下降,尤其是沙岛、鸟岛湖岸及布哈河、沙柳河等河流两岸。流域内不显著变化(58.69%)的区域遍布流域,在流域的东北部更为集中,其中不显著改善(50.89%)的区域分布广,不显著退化(7.80%)的区域集中分布在刚察县沙柳河流域。

| 表 1 青海湖流域 NDVI 变化趋势的显著性统计结果 | | | | |
|-----------------------------|-----------------------------------|----------|------------------------|-----------|
| 变化程度 | 分级标准 | 像元 个数 | 面积/ km ² | 百分比/ % |
| 极显著改善 ** | $\text{slope}>0, P<0.01$ | 80623 | 5038.94 | 19.85 |
| 显著改善 * | $\text{slope}>0, 0.01\leq P<0.05$ | 82561 | 5160.06 | 20.33 |
| 不显著改善 | $\text{slope}>0, P\geq 0.05$ | 206689 | 12918.06 | 50.89 |
| 不显著退化 | $\text{slope}<0, P\geq 0.05$ | 31719 | 1982.44 | 7.80 |
| 显著退化 * | $\text{slope}<0, 0.01\leq P<0.05$ | 1390 | 86.88 | 0.34 |
| 极显著退化 ** | $\text{slope}<0, P<0.01$ | 3204 | 200.25 | 0.79 |

注: ** 表示 P 通过 0.01 置信度检验; * 表示 P 通过 0.05 置信度检验。

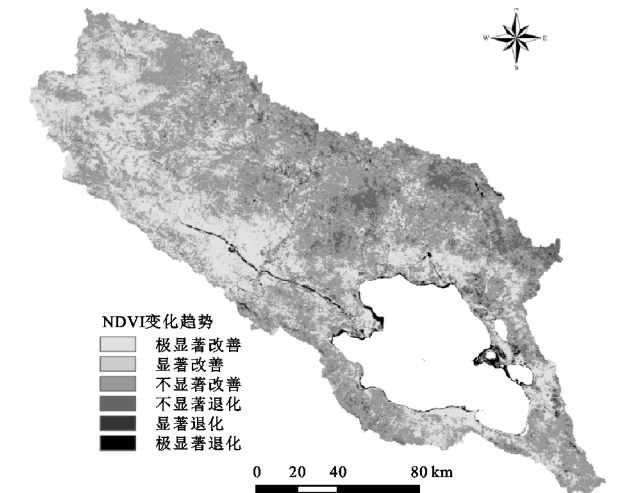


图 4 青海湖流域 2000—2016 年 NDVI 变化趋势空间分布

2.3 NDVI 与气温、降水的关系

2000—2016 年,流域年降水量和平均气温呈波动中极显著上升趋势($R^2=0.43, P<0.001; R^2=0.28, P<0.001$),增加速率分别为 5.21 mm/a 和 0.04 °C/a(图 5)。研究期内年降水量最大值为 437.36 mm(2016

年),最小值为 266.64 mm(2001 年),多年平均年降水量为 347.87 mm;年平均气温最大值为 2.93 °C(2016 年),最小值为 1.55 °C(2012 年),多年平均气温为 2.16 °C。总体来看,2000—2016 年间青海湖流域的降水量和气温均呈显著上升趋势。对 2000—2016 年流域年降水量和年平均温度进行 M—K 突变检验(图 6),在 17 年时间内,流域年降水的 UF_k 和 UB_k 大于 0,表明年降水一直呈上升趋势,且两曲线在置信度水平内($\alpha=0.05$)相交于 2003 年,即在 2003 年发生突变,且 UF_k 在 2004—2012 年和 2014—2016 年超出临界值,即在该时段内年降水上升趋势显著(图 6a)。年平均气温的 UF_k 和 UB_k 大于 0 表明流域年平均温度呈上升趋势,且在 0.05 置信区间内, UF_k 和 UB_k 从 2005 年后有多个交点,年平均气温波动较明显,但除了 2016 年外, UF_k 均未超出置信区间,表明突变不显著(图 6b)。仅从变化趋势来看,青海湖流域研究期内 NDVI 与年降水和平均气温均呈上升趋势。

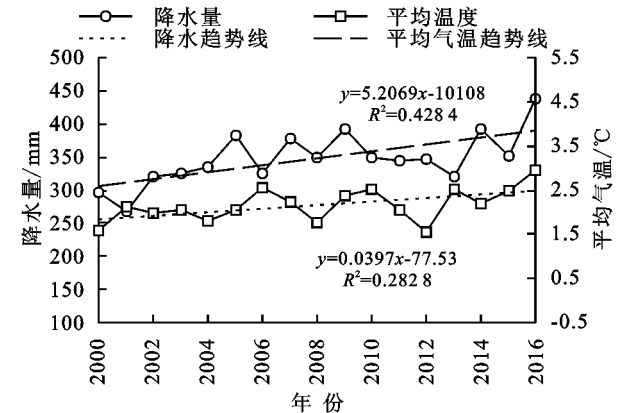


图 5 青海湖流域降水量和平均气温变化趋势

为了更准确地探明青海湖流域研究期内年 NDVI 与年降水和平均气温间的关系,本文对其进行逐像元相关分析和偏相关分析,结果见图 7。其中,图 7a 和图 7c 显示了 NDVI 与年降水的相关系数和偏相关系数的空间分布格局,结果表明青海湖流域 NDVI 与年降水的相关系数范围为 $-0.84\sim0.93$,偏相关系数范围为 $-0.74\sim0.85$,分化现象严重,空间差异性显著。NDVI 与年降水呈正相关的区域占青海湖流域总面积的 81.84%,分布在流域大部分区域,且在低海拔地区更为集中,这些区域制约植被生长的因子主要为水分,降水量的不断增加,有利于植被的生长,植被 NDVI 不断增加。NDVI 与年降水呈负相关的区域占青海湖流域总面积的 18.16%,主要分布在刚察县高海拔地区以及流域内河岸和湖岸两侧,对于高海拔地区而言,气温是限制植被生长的主导因子,降水的增加会导致温度下降,更不利于植被生长;而位于河岸和湖岸两侧的植被,水分较为充足,降水增多,超过植被生长所需水分的上限,会抑

制植被生长。图 7b 和图 7d 为 NDVI 与平均气温的相关系数和偏相关系数的空间分布格局,结果表明青海湖流域 NDVI 与年平均气温的相关系数范围为 $-0.81\sim 0.85$,偏相关系数范围为 $-0.70\sim 0.78$ 。NDVI 与年平均气温呈正相关的区域占流域总面积的 72.16%,气温的升高和降水的增加,使该区域的水热条件更有利于植

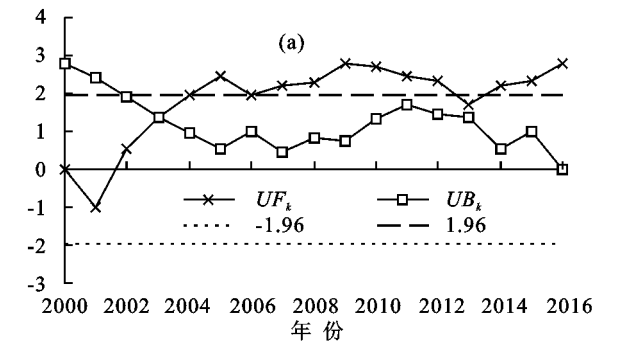


图 6 2000—2016 年降水量和平均气温 M-K 突变点检验

通过查阅 t 检验临界值表对 NDVI 与降水和平均气温的偏相关系数进行显著性显著性检验(图 8)。从图 8a 可知,NDVI 与年降水不显著相关的区域占总面积的 83.26%(其中,不显著正相关为 66.00%,不显著负相关为 17.26%),分布广泛。显著正相关(12.42%)和极显著正相关(4.31%)的区域集中分布在天峻县布哈河中游和共和县倒淌河流域。从图 8b 可知,NDVI 与年平均气温不显著相关的区域占流域总面积的 98.54%(其中:不显著正相关为 72.03%,不显著负相关为 26.51%),分布广泛。显著正相关(1.29%)和极显著正相关(0.17%)的区域集中分布在沙柳河流域上游边界的高海拔地带。流域 NDVI 与气候的相关关系具有空间异质性,与倪向南等^[14]研究一致,且刚察县的空间异质性比天峻县强。

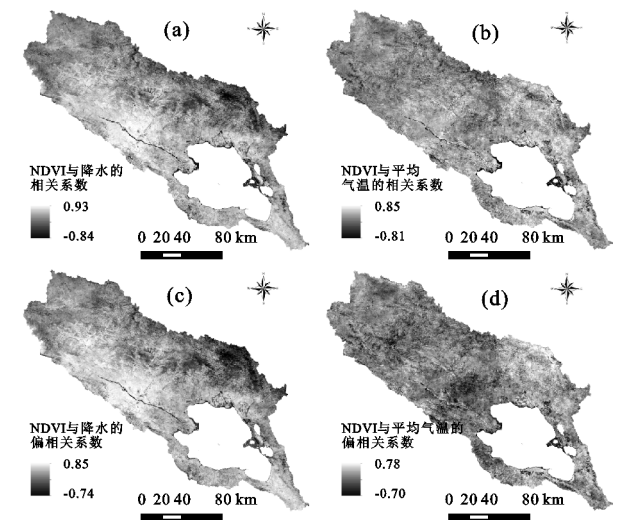
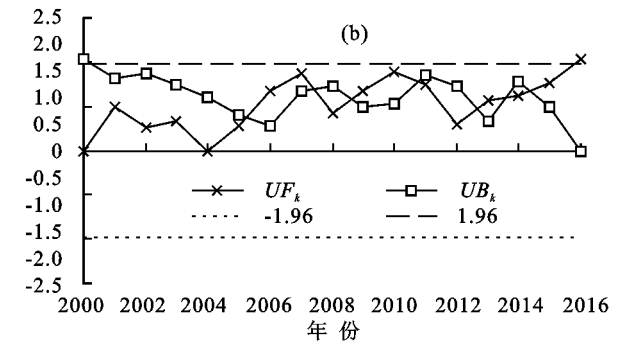


图 7 NDVI 与降水和平均气温的相关性空间分布

2.4 NDVI 演变趋势预测

采用 R/S 分析法对 NDVI 未来演变趋势进行预测(图 9a),参考刘焱序等^[26]的研究,运用 ArcGIS 的

被生长。NDVI 与年平均气温呈负相关的区域占流域总面积的 27.84%,主要分布在天峻县和共和县的部分区域,气温的升高导致蒸发量的增加,植被可利用水分减少,抑制植被生长。整体来看,青海湖流域年降水和平均气温与 NDVI 正相关性强,水热条件的改善对植被生长起到了促进作用。



重分类功能将 Hurst 指数分为 3 类: $H \geq 0.6$, $0.4 \leq H < 0.6$, $H \leq 0.4$,各范围代表含义见表 2。青海湖流域 NDVIHurst 指数范围为:0.14~0.96,均值为 0.45,随机变化区域占 65.07%,反向发展趋势强的区域(28.54%)要多于同向趋势(6.39%)。从图 9a 可知,持续性强的区域主要分布在刚察县和天峻县南部及共和县中部;反持续性强的区域主要分布在流域上游天峻县北部和海晏县西部。结果表明流域 NDVI 未来发展的随机性高,反向发展的区域多于同向。

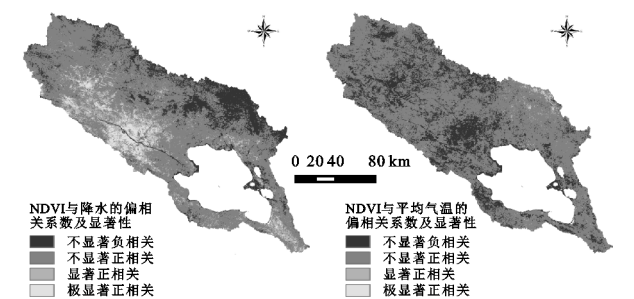


图 8 NDVI 与降水和平均气温的相关性及显著性分析

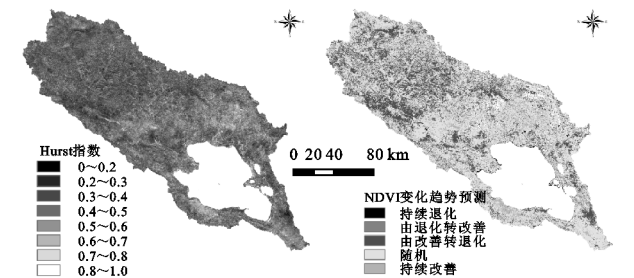


图 9 青海湖流域 2000—2016 年 NDVI Hurst 指数空间分布及变化趋势预测

为了进一步分析青海湖流域 NDVI 变化趋势的可持续性,参考李卓等^[27]的研究,将趋势分析与 R/S 分析结果进行叠加分析,对青海湖流域 NDVI 变化趋势进行了预测(图 9b)。从空间上看,随机变化的区域占大部分,持续改善的区域主要集中在共和县

黑马河镇环湖区及刚察县中部,占流域总面积的5.26%;持续退化的区域主要分布在河岸和湖岸以及刚察县,占1.14%;由改善转退化的区域占26.73%,主要分布在流域上游天峻县境内,大部分区域为多年冻土区;由退化转改善的区域主要分布在流域东部边缘地带及刚察县与天峻县交界地带,占1.81%。刚察县 NDVI 未来发展两极分化方向较其他区县严重,原因可能是:与其他区县相比,该县人口最为密集,耕地面积和放牧强度较大,植被易受到负面影响,且环湖面积大,开展生态环境建设工程力度大,部分区域植被恢复效果显著,易出现改善和退化的两极分化现象。

表 2 青海湖流域 NDVI Hurst 指数统计

| Hurst 指数 | 代表含义 | 百分比/% |
|----------|-------|-------|
| 0~0.4 | 反持续性强 | 28.54 |
| 0.4~0.6 | 随机 | 65.07 |
| 0.6~1.0 | 持续性强 | 6.39 |

表 3 青海湖流域 NDVI 变化趋势持续性预测结果统计

| 变化趋势 | 持续性 | 趋势预测 | 百分比/% |
|------|---------|--------|-------|
| >0 | >0.6 | 持续改善 | 5.26 |
| <0 | <0.4 | 由改善转退化 | 26.73 |
| >0 | <0.4 | 由退化转改善 | 1.81 |
| <0 | >0.6 | 持续退化 | 1.14 |
| >0 | 0.4~0.6 | 随机 | 59.35 |
| <0 | 0.4~0.6 | 随机 | 5.72 |
| 合计 | | | 100 |

3 讨论

总体上,青海湖流域整体植被显著改善的结果与欧亚大陆^[28]及青藏高原^[8]得出的趋势一致。本研究发现,NDVI、年降水和平均气温均呈上升趋势,NDVI 突变发生的时间为 2005 年和 2007 年,年降水的突变时间为 2003 年,年平均气温从 2005 年开始频繁突变。气候与植被趋势一致,突变的时间较为一致,这也印证了植被与年降水和年平均气温的紧密联系,且 NDVI 突变滞后于降水。植被状况的改善多是自然和人为等多种因素共同作用的结果^[28],研究结果表明,研究时段内青海湖流域年降水量和年平均气温的升高是促进流域 NDVI 呈现整体改善的原因之一,但气候变化不是唯一原因,从 1999 年开始实施的西部退耕还草、退牧还草工程和 2008 年开始的青海湖流域生态环境保护与综合治理项目等生态工程的实施,对植被的改善起到了重要的促进作用。因此,通过对 NDVI 变化趋势的分析及未来发展趋势的预测,重点关注有退化风险的区域,辅以适当的人工恢复措施,促使植被向改善的方向发展。

气候变化主导作用下冻土环境的变化会引起土壤水分的变化,对高寒草甸生态系统的影响深远^[29],

据袁玉梅^[30]的研究得知,青海湖地区年平均 0 cm 地温的增温率为 0.74 °C/10 a,增幅明显高于年平均气温,年平均最大冻土深度减少率为 11.7 cm/10 a,青海湖地区下垫面冻土环境已经发生不同程度的改变,随着最大冻土深度的减少,土壤结构和机械组成可能发生显著变化,进而影响高寒草甸植被生长。也有研究^[31]表明,不同类型冻土带,草地对冻土退化的响应是不同的,多年冻土的退化导致表层土壤的干燥和高寒草地的退化,在极端稳定和稳定的冻土地带,冻土变暖也可能有利于高寒草地的生长。本研究由改善转退化的区域主要分布在多年冻土带,季节性冻土带上的植被变化更具有多元化,未来应加强不同冻土带冻土退化对不同植被类型的不利影响和有利影响研究。

最早用于水文预测的 Hurst 指数,近年来广泛用于植被盖度及 NDVI 的趋势预测,由于植被的演变规律与水文因子存在差异,研究时段的选取、像元的精度和异常值的数量等原因会对结果产生影响。同时,用 16 天 MODIS 13Q1 数据合成年 NDVI 也可能掩盖其本身的一些特征,加上 NDVI 数据年限短,这都增加了研究结果的不确定性。

4 结论

(1)从时间上分析,2000—2016 年青海湖流域 NDVI 总体呈显著增长趋势($R^2=0.46$),增长速率为 0.018/10 a。流域年 NDVI 在 0.26~0.30 波动,多年平均值为 0.28。

(2)从空间上分析,流域 NDVI 极显著和显著改善的区域占 40.18%,主要集中在天峻县西部和青海湖环湖区域;由于降水增多,河流和湖泊水位上涨,淹没草地,导致该区域 NDVI 极显著和显著退化,占比为 1.13%;58.69%的区域呈现不显著变化。NDVI 总体上呈显著上升趋势,但空间呈现多元化发展趋势,这是气候和人为共同作用的结果。

(3)水热条件是青海湖流域植被生长的重要影响因素,但气温和降水对植被生长的作用过程是不同的。年降水和平均气温呈现在波动中显著上升的趋势,NDVI 与年降水和平均气温呈正相关关系,但大部分区域相关关系不显著,年降水与 NDVI 的相关性高于平均气温。

(4)青海湖流域 NDVI 未来发展趋势多为随机,占比为 65.07%;持续改善、持续退化和由退化转改善的区域占比分别为 5.26%,1.14%,1.81%;由改善转退化的区域占 26.73%,多分布在流域上游天峻县境内的多年冻土区。

(5)青海湖流域年降水和年平均气温显著升高,

气候朝暖湿化方向发展,有利于植被的生长,同时,青海湖流域生态环境保护与综合治理项目、退耕还草和退牧还草等生态工程的实施也有效改善了生态环境,植被 NDVI 增加。

参考文献:

- [1] 冯松,姚檀栋,江灏,等.青藏高原近 600 年的温度变化[J].高原气象,2001,20(1):105-108.
- [2] 王强,张勃,戴声佩,等.基于 GIMMSAVHRR NDVI 数据的三北防护林工程区植被覆盖动态变化[J].资源科学,2011,33(8):1613-1620.
- [3] 田庆久,闵祥军.植被指数研究进展[J].地球科学进展,1998,13(4):327-333.
- [4] 王娟,李宝林,余万里.近 30 年内蒙古自治区植被变化趋势及影响因素分析[J].干旱区资源与环境,2012,26(2):132-137.
- [5] 宋富强,邢开雄,刘阳,等.基于 MODIS/NDVI 的陕北地区植被动态监测与评价[J].生态学报,2011,31(2):354-363.
- [6] 殷贺,李正国,王仰麟,等.基于时间序列植被特征的内蒙古荒漠化评价[J].地理学报,2011,66(5):653-661.
- [7] 孙红雨,王长耀,牛铮,等.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[J].遥感学报,1998,2(3):204-210.
- [8] 卓嘎,陈思蓉,周兵.青藏高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应[J].生态学报,2018,38(9):3208-3218.
- [9] 刘军会,高吉喜,王文杰.青藏高原植被覆盖变化及其与气候变化的关系[J].山地学报,2013,31(2):234-242.
- [10] 陆晴,吴绍洪,赵东升.1982—2013 年青藏高原高寒草地覆盖变化及与气候之间的关系[J].地理科学,2017,37(2):292-300.
- [11] Dong M Y, Jiang Y, Zheng C T, et al. Trends in the thermal growing season throughout the Tibetan Plateau during 1960—2009[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 166/167:201-206.
- [12] 李广泳,李小雁,赵国琴,等.青海湖流域草地植被动态变化趋势下的物候时空特征[J].生态学报,2014,34(11):3038-3047.
- [13] 苏芬,刘宝康,张翠花,等.青海湖流域牧草物候期对气候变化的响应[J].青海草业,2018,27(4):12-18.
- [14] 倪向南,郭伟.2001—2010 年青海湖流域植被覆盖时空变化特征[J].地球环境学报,2013,4(4):1363-1370.
- [15] 中国科学院兰州分院,中国科学院西部资源环境研究中心.青海湖近代环境的演化和预测[M].北京:科学出版社,1994:69-149.
- [16] 李景刚,李纪人,黄诗峰,等.Terra/MODIS 时间序列数据在湖泊水域面积动态监测中的应用研究:以洞庭湖地区为例[J].自然资源学报,2009,24(5):923-934.
- [17] 李景刚,李纪人,黄诗峰,等.近 10 年来洞庭湖区水面面积变化遥感监测分析[J].中国水利水电科学研究院学报,2010,8(3):201-208.
- [18] 梁婕,蔡青,郭生练,等.基于 MODIS 的洞庭湖湿地面积对水文的响应[J].生态学报,2012,32(21):6628-6635.
- [19] Mann H B. Non-parametric test against trend[J]. Econometrika, 1945, 13:245-259.
- [20] Kendall M G. Rank correlation methods[M]. London: Charles Griffin, 1975:109-117.
- [21] 魏风英.现代气候统计诊断预测技术[M].北京:气象出版社,1999:82-88.
- [22] 杨强,王婷婷,陈昊,等.基于 MODIS EVI 数据的锡林郭勒盟植被覆盖度变化特征[J].农业工程学报,2015,31(22):191-198.
- [23] 严恩萍,林辉,党永峰,等.2000—2012 年京津风沙源治理区植被覆盖时空演变特征[J].生态学报,2014,34(17):5007-5020.
- [24] Hurst H. Long-term storage capacity of reservoirs[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1951, 116:770-799.
- [25] 江田汉,邓莲堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题:以在气候变化研究中的应用为例[J].地理科学,2004,24(2):177-182.
- [26] 刘焱序,王仰麟,彭建,等.耦合恢复力的林区土地生态适宜性评价:以吉林省汪清县为例[J].地理学报,2015,70(3):476-487.
- [27] 李卓,孙然好,张继超,等.京津冀城市群地区植被覆盖动态变化时空分析[J].生态学报,2017,37(22):7418-7426.
- [28] Edenhofer O, Seyboth K. Intergovernmental panel on climate change (IPCC) [J]. Encyclopedia of Energy, Natural Resource, and Environmental Economics, 2013, 1:48-56.
- [29] 王根绪,李元首,吴青柏,等.青藏高原冻土区冻土与植被的关系及其对高寒生态系统的影响[J]. 中国科学 (D 辑), 2006, 36(8):743-754.
- [30] 袁玉梅.近 30 年来青海湖地区气温、地温及冻土变化分析[J].青海气象,2016(2):20-22.
- [31] Yi S H, Zhou Z Y, Ren S L, et al. Effects of permafrost degradation on alpine grassland in a semi-arid basin on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Environmental Research Letters, 2011, 6(4):e045403.