

# 青海省近 10 年草地植被覆盖动态变化及其驱动因素分析

马昊翔<sup>1,2,3,4</sup>, 陈长成<sup>1,2,3,4</sup>, 宋英强<sup>1,2,3,4</sup>, 晔沙<sup>1,2,3,4</sup>, 胡月明<sup>1,2,3,4,5</sup>

(1. 华南农业大学 资源环境学院, 广州 510642; 2. 华南农业大学  
地理信息工程研究所, 广州 510642; 3. 国土资源部 建设用地再开发重点实验室, 广州 510642;  
4. 广东省土地利用与整治重点实验室, 广州 510642; 5. 青海大学 农牧学院, 西宁 810016)

**摘要:**草地是陆地生态系统的重要组成部分, 认清其植被覆盖变化规律对草地可持续发展和草地生态系统的恢复具有重要意义。基于 2005—2014 年增强型植被指数 (MODIS EVI) 数据和气象数据, 结合相关分析、残差趋势分析等方法, 分析了 10 年间青海省生长季草地植被覆盖变化规律, 以及气候因素和人类活动对其变化的影响。结果表明: (1) 10 年间青海省生长季草地 EVI 的年增长速率为 0.002 3, 整体呈波动增加趋势, 其中东部黄土高原区整体呈显著增加趋势, 其次是青南高原区、柴达木盆地, 环湖和祁连山区整体呈退化趋势。 (2) 青海省生长季草地 EVI 与温度和降水相关性显著, 与平均温度和累积降水量的偏相关总体呈正相关关系, 空间差异明显, 与温度的关系更为密切。 (3) 从驱动因素来看, 主要受气温驱动的区域有环湖和祁连山区 (Ⅲ级)、青南高原区 (Ⅳ级); 主要受降水驱动的区域有东部黄土高原区 (Ⅲ级和Ⅳ级); 主要受气温和降水驱动的区域有柴达木盆地 (Ⅱ级, Ⅲ级和Ⅳ级)、环湖和祁连山区 (Ⅰ级和Ⅳ级)、青南高原区 (Ⅱ级和Ⅲ级); 其他区域主要受非气候因子驱动。 (4) 人类活动对青海省草地植被生长总体上呈正影响, 尤其对于草地植被明显变化区域的生态系统建设和破坏起着主导的作用。

**关键词:** EVI; 气候因素; 人类活动; 青海省

**中图分类号:** Q948; TP79

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2018)06-0137-09

## Analysis of Vegetation Cover Change and Its Driving Factors over the Past Ten Years in Qinghai Province

MA Haoxiang<sup>1,2,3,4</sup>, CHEN Changcheng<sup>1,2,3,4</sup>, SONG Yingqiang<sup>1,2,3,4</sup>, YE Sha<sup>1,2,3,4</sup>, HU Yueming<sup>1,2,3,4,5</sup>

(1. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Institute of Geographic Information Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3. Key Laboratory of Construction Land improvement, Ministry of Land and Resources, Guangzhou 510642, China; 4. Guangdong Province Key Laboratory for Land Use and Consolidation, Guangzhou 510642, China; 5. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China)

**Abstract:** Grassland is an important part of terrestrial ecosystem. To recognize the law of vegetation change has important significance for sustainable development of grassland and restoration of grassland ecosystem. Based on the data of MODIS EVI and meteorological data from 2005 to 2014, we used correlation analysis and residual trend method to analyze the law of vegetation change of grassland in growing season, and the influence of climate factor and human activity on the change in ten years in Qinghai Province. The results showed that: (1) in ten years, the growth rate of grassland EVI in growing season was 0.002 3 per year in Qinghai Province, it had an fluctuating increasing trend as a whole; among them, the Loess Plateau in the eastern part had a significantly increasing trend, followed by southern Qinghai Plateau Area sub zone and the Qaidam Basin, Qinghai Lake—Qilianshan Mountain had a degradation trend; (2) grassland EVI in growing season in Qinghai Province had a significant relation with temperature and rainfall, had a positive partial correlation with temperature and rainfall as a whole, its spatial differences of were significant, and more closely related to temperature; (3) with respect to the driving factor, Qinghai Lake—Qilianshan Mountain (level three) and southern Qinghai Plateau area sub zone (level four) were mainly driven by temperature; the Loess Plateau in the eastern part (level three and level four) was mainly influenced by rainfall; the Qaidam

收稿日期: 2017-12-11

修回日期: 2018-01-08

资助项目: 国家重点研发计划项目“典型高寒草地退化和沙化时空格局”(2016YFC0501801)

第一作者: 马昊翔(1992—), 男, 广东佛山人, 硕士生, 研究方向为资源环境和遥感与地理信息系统。E-mail: 634025219@qq.com

通信作者: 胡月明(1964—), 男, 湖南安化人, 博士, 教授, 主要从事地理信息系统应用与土地资源管理研究。E-mail: yueminghugis@163.com

Basin (level two, level three and level four), Qinghai Lake—Qilian mountain (level one and level four) and southern Qinghai Plateau Area sub zone (level two and level three) were mainly driven by temperature and rainfall; Other areas mainly influenced by non-climate factors; (4) human activity had a positive effect on grassland vegetation growth in Qinghai Province, especially played major role in the construction and destruction of ecosystem in significant change area of grassland vegetation.

**Keywords:** EVI; climatic factor; human activity; Qinghai Province

草地是世界上分布最广泛的植被类型之一, 大约占据陆地面积 20%, 是陆地生态系统重要的组成部分<sup>[1]</sup>。作为生物循环系统中的重要角色, 草地为人类提供了重要的生态和社会服务, 包括净初级物质生产、碳蓄积与碳汇、调节气候、涵养水源、保持生物多样性等功能<sup>[2]</sup>。然而, 很多地区受全球气候变化和人类活动的干扰, 尤其是对气候变化敏感的高寒地区的草地生态系统已经呈现沙化退化趋势, 导致草地质量衰退, 生物多样性降低, 水土流失加剧, 生产力和服务功能下降等负面影响, 成为备受人类关注的环境生态问题之一<sup>[3-5]</sup>。近几十年来, 全球气候持续变暖, 人类活动范围不断扩大以及强度不断加剧<sup>[6]</sup>, 草地生态系统在气候变化和人类活动的共同影响下发生了显著变化, 其植被与两者之间的关系研究成为各国学者关注的焦点和核心<sup>[7-10]</sup>。

植被覆盖是监测草地植被变化的敏感性指标<sup>[11]</sup>, 从一定程度上可以衡量草地生态环境质量的状况。利用植被指数等遥感模型获取区域的植被信息, 是目前定量监测植被覆盖变化的有效手段, 其中增强型植被指数(EVI)是在归一化植被指数(NDVI)的基础上开发出来的, 除了继承归一化植被指数(NDVI)的优点, 还改善了其高植被区饱和, 大气影响校正不彻底和土壤背景等问题<sup>[12]</sup>, 提高了高生物区植被的敏感度, 降低了土壤背景和大气影响, 对植被变化的监测具有更高的灵敏性和优越性, 在草地退化监测、草地资源定量分析等研究中应用广泛<sup>[13]</sup>。目前, EVI 时间序列在草地植被变化的应用研究有很多<sup>[14-16]</sup>, 但主要集中在草地 EVI 与气候因素的响应关系, 对人类活动影响的关注较少, 且以定性描述分析为主, 难以定量地区分气候因素和人类活动对草地植被变化的影响, 从而限制了对草地植被覆盖变化的正确认识。

位于青藏高原东北部的青海省是我国高寒草地面积分布最广泛的地区之一, 也是中国五大牧区之一, 生态脆弱性强, 是气候变化和人类活动影响的敏感区域<sup>[17]</sup>, 草地沙化退化现象明显。因此, 本文以青海省为研究区, 提取 2005—2014 年增强型植被指数时间序列数据集, 融合温度和降水因素, 运用相关分析和残差趋势分析方法, 分析青海省草地植被覆盖时

空变化特征, 分离量化气候因素和人类活动对草地植被覆盖变化的影响, 为青海省草地植被恢复、生态建设和可持续发展提供科学依据。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

青海省位于中国西北地区, 青藏高原东北部, 地理坐标为  $89^{\circ}35'—103^{\circ}04'E$ ,  $31^{\circ}39'—39^{\circ}19'N$ 。全省东西长约 1 200 km, 南北宽约 800 km, 面积 72.23 万  $km^2$ 。青海地处亚欧大陆腹地, 地势西高东低, 平均海拔在 3 000 m 以上, 北部有祁连山, 昆仑山系和阿尼玛卿山横贯中部, 南部有唐古拉山, 构成青海地形地貌的基本骨架, 其中分布河谷、盆地、高原和山地, 形成祁连山地区、柴达木盆地和青南高原三大自然区域。境内河流众多, 是黄河、长江主要水系的发源地, 素有“中华水塔”和“江河源头”之称。青海省气候属于典型的大陆性高原气候, 特点以高寒干旱为主, 多风, 日照长, 雨量少, 平均温度为  $-5\sim 8.5^{\circ}C$ , 年均降水量为 50~550 mm。

青海省草地资源丰富, 是我国五大牧区之一, 全省天然草地面积约 4 053 万  $hm^2$ , 占全省土地面积的 56%, 居全国第 4, 其中可利用面积约占全省天然草地面积的 87%。草地类型主要分为 7 类, 包括温性草原类、温性荒漠类、高寒草原类、高寒草甸类、高寒荒漠类、低地草甸类、山地草甸类, 其中高寒草甸类面积最大、分布最广泛<sup>[18]</sup>。

### 1.2 数据来源

(1) 本文中的 EVI 时间序列是采用了美国国家航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提供 16 d 合成的 MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) 植被指数产品: MOD13Q1 (MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250 m SIN Grid), 空间分辨率为 250 m。获取了研究区内(地理范围覆盖全球正弦曲线投影系统中编号为 h25v05 和 h26v05 的两个轨道数据) 2005—2014 年共 10 a 的 EVI 产品数据集, 并利用 MRT 将覆盖研究区的两轨数据进行重投影和镶嵌处理, 投影转换为 Albers, 像素大小为  $250\text{ m}\times 250\text{ m}$ , 校正类型是

最邻近像元法。原始数据经过了一系列预处理来消除非植被的干扰。为了进一步地消除云和大气带来的噪声,本文进行了低通滤波处理,剔除噪声点,同时利用最大合成算法(maximum value composite, MVC)生成月最大 EVI 的时间序列数据集。根据已有的研究<sup>[7]</sup>,由于非生长季植被覆盖度差, EVI 数据易受到积雪和土壤反射等影响,因此选择 5—9 月作为草地的生长季,从 5—9 月的月最大 EVI 序列数据集中提取每一个像元的最大 EVI 值,构建 2005—2014 年最大 EVI 的时间序列(记为  $EVI_{max}$ )。

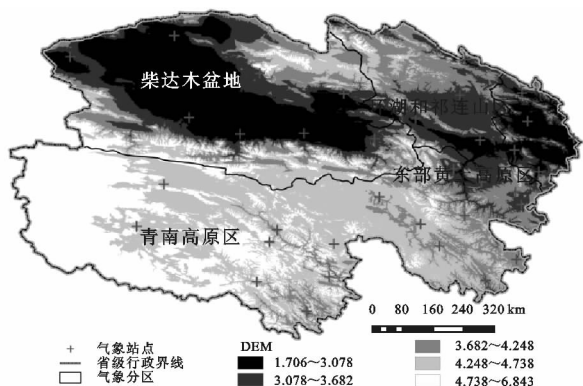


图1 研究区位置及气象站点分布

(2) 本文选取 2005—2014 年青海省区域内 37 个气象站点的月均温和月降水气象数据。该数据主要来源于中国国家气象局和中国气象数据网。气象数据与 EVI 植被指数同期,时间间隔单位为月。由于是在像元尺度上进行分析,因此需根据 37 个气象站点逐月的气象数据,对整个研究区的温度和降水进行空间插值,空间分辨率为 250 m。温度的插值采用基于经纬度和 DEM 回归<sup>[19]</sup>的方法进行插值,得到生长季(5—9 月)平均温度数据。降水的插值采用克里金插值,得到生长季(5—9 月)累积降水量数据。

(3) 土地利用数据来源于中国科学院资源环境数据中心,该数据采用土地利用变化遥感信息人机交互快速提取方法,解译分辨率为 100 m 的青海省的 Landsat 7 TM 数字影像,得到青海省草地覆盖数据。

(4) 青海省气象分区数据是参考中国的主要气候分区<sup>[17]</sup>,将青海省划分 4 个气候区,分别为青南高原区、东部黄土高原区、环青海湖—祁连山区和柴达木盆地。

## 2 研究方法

### 2.1 草地植被覆盖度变化分析

本文首先利用 2005 年和 2014 年土地利用数据中的草地覆盖数据作为掩膜提取青海省草地 EVI 像元。由于青海省植被数据存在不确定性,为了进一步消除非植被因素、裸地、稀疏植被和常绿林等影响<sup>[7]</sup>,在土地利

用数据的基础上,本文通过以下 4 个条件:(1) 2005 年和 2014 年土地利用数据中土地利用类型均为草地的像元;(2) 生长季(5—9 月)EVI 均值应大于 0.1;(3) 生长季(5—9 月)EVI 最大值应大于 0.15;(4) EVI 月最大值应出现在 7—9 月,进一步地筛选得到青海省生长季草地 EVI 像元。

为了分析草地 EVI 逐年的空间变化规律和时空格局演变,本文利用青海省 2005—2014 年草地 EVI 数据集,采用回归分析方法,在像元的基础上以最小二乘法拟合草地 EVI 和年份的线性回归系数,得到不同空间位置上植被绿度变化率,来反映草地 EVI 的变化方向和速率,其公式<sup>[20]</sup>为:

$$GRC = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times MEVI_i) - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n MEVI_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \sum_{i=1}^n i^2} \quad (1)$$

式中:GRC 是植被绿度变化率,其反映了研究区草地植被覆盖度的变化速率, $n$  是监测的时间序列长度; $n=10$ ; $i$  是年序号,取值范围为 1~10; $MEVI_i$  是第  $i$  年草地年最大 EVI 值。GRC 为正,则说明草地 EVI 在 10 年间呈增加趋势,反之则说明草地 EVI 在 10 年间呈降低趋势;GRC 的绝对值越大,说明草地 EVI 的变化幅度越大,反之说明草地 EVI 的变化幅度越小。

### 2.2 相关性分析

地理系统是一个多要素的复杂系统,一个要素的变化必然引起其他要素的变化,进行地理要素之间的相关分析就是为了揭示地理系统中各要素之间相互关系的密切程度。在多要素的地理系统中,当单独研究两个要素之间的相互关系的密切程度时,可利用偏相关系数来测定,显著性检验采用  $t$  检验;当研究几个要素同时与某一要素的相关关系的密切程度时,可利用复相关系数来测定,显著性检验采用 F 检验<sup>[21]</sup>。草地 EVI 与平均温度或累积降水量相关系数计算公式如下:

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

式中: $r$  为  $x, y$  两变量的相关性; $x_i$  为第  $i$  年草地 EVI; $y_i$  为第  $i$  年的平均温度或累积降水量; $\bar{x}$  为 2005—2014 年草地 EVI 平均值; $\bar{y}$  为 2005—2014 年温度的平均值或累积降水均值; $n$  为样本年数。

草地 EVI 与平均温度或累积降水量偏相关系数计算公式如下:

$$r_{et, r} = \frac{r_{et} - r_{er} \times r_{tr}}{\sqrt{(1 - r_{er}^2) \times (1 - r_{tr}^2)}} \quad (3)$$

$$r_{er, t} = \frac{r_{et} - r_{er} \times r_{tr}}{\sqrt{(1 - r_{et}^2) \times (1 - r_{tr}^2)}} \quad (4)$$

T 检验计算公式为:

$$t = \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \times \sqrt{n-m-1} \quad (5)$$

式中:  $r_{et}$ ,  $r_{er}$ ,  $r_{tr}$  分别为草地 EVI 与温度、草地 EVI 与降水、温度与降水的单相关系数;  $r_{et \cdot r}$  为草地 EVI 与温度的偏相关系数;  $r_{er \cdot t}$  为草地 EVI 与降水的偏相关系数;  $r$  为偏相关系数;  $n$  为样本数;  $m$  为自变量个数。

草地 EVI 与平均温度和累积降水量复相关系数计算公式如下:

$$r_{e \cdot tr} = \sqrt{1 - (1 - r_{et}^2) \times (1 - r_{er \cdot t}^2)} \quad (6)$$

F 检验计算公式为:

$$F = \frac{r}{1-r^2} \times \frac{n-m-1}{m} \quad (7)$$

式中:  $r_{e \cdot tr}$  为草地 EVI 与平均温度和累积降水量复相关系数;  $r_{et}$  为草地 EVI 与温度的单相关系数;  $r_{er \cdot t}$  为草地 EVI 与降水的偏相关系数;  $r$  为复相关系数;  $n$  为样本数;  $m$  为自变量个数。

### 2.3 基于 EVI 的残差趋势分析

残差趋势法是基于生态系统中净初级生产力和气候因素的相关关系进行分析的。在长时间序列的 NDVI 数据中,假设气候变化是唯一的驱动因素,采用基于像元的相关分析方法,检测 NDVI 的残差趋势,从而剔除气候因素的影响来分析人类活动导致的植被覆盖变化<sup>[22]</sup>。本文利用监测植被变化能力更优的 EVI 数据代替 NDVI 数据来进行残差趋势分析,主要分为以下两个步骤:

(1) 基于局部空间区域构建长时间序列 EVI 数据和气候因素的回归分析模型。本文采用平均气温和累积降水量两个气候因素进行回归分析,即对每个像元建立 EVI 与气温和累积降水量的响应关系,来模拟仅受气候变化影响下每个像元的年 EVI。但由于草地植被覆盖数据存在空间非平稳性,而且难以从历史数据中获取受人类活动影响较小的样点作为基准,本文假设在一定局部空间范围内,植被、气候、地形等自然条件是相似的,植被覆盖度与气温和降水具有相同的响应关系,该空间内与气温和降水相关系数较高且生物量最大的像元可以看作是受人类活动影响较小的样点。因此,本文以每一个像元为中心设立 5 km×5 km 邻域空间,即该邻域空间内植被、气候、地形等自然条件是相似的,搜索该邻域内相关系数大于 0.7 且 EVI<sub>max</sub> 最大的像元作为训练样点,构建 2005—2014 年气候因素和年 EVI<sub>max</sub> 的回归分析模型,分析气温和降水对 EVI 的综合影响,模拟该区域仅受气候变化影响下每个像元的年 EVI,其公式如下:

$$EVI_{\max}^{(5 \times 5)} = \lambda_1 T + \lambda_2 P + b \quad (8)$$

$$EVI_i^{\text{pre}} = \lambda_1 T_i + \lambda_2 P_i + b \quad (9)$$

式中:  $EVI_{\max}^{(5 \times 5)}$  为 5 km×5 km 的领域空间内训练样点的年最大 EVI 值;  $T$  为 5 km×5 km 的领域空间内训练样点的平均气温;  $P$  为 5 km×5 km 的领域空间内训练样点的累积降水量;  $\lambda_1$  为平均气温对应的多项式系数;  $\lambda_2$  为累积降水量对应的多项式系数;  $EVI_i^{\text{pre}}$  为 5 km×5 km 的领域空间内第  $i$  个像元的 EVI 模拟值;  $T_i$  为领域空间内第  $i$  个像元的平均气温;  $P_i$  为邻域空间内第  $i$  个像元的累积降水量。

(2) 残差的计算及变化趋势分析。本文结合遥感观测的 EVI<sub>max</sub> 与公式(9)中基于局部回归分析模型模拟的  $EVI_i^{\text{pre}}$ , 得到残差项,反映去除气候变化的人类活动对草地植被覆盖变化的影响,其公式如下:

$$\epsilon(i, t) = EVI_{(i, t)}^{\max} - EVI_{(i, t)}^{\text{pre}} \quad (10)$$

式中:  $\epsilon(i, t)$  为第  $i$  个像元  $t$  年的残差项;  $EVI_{(i, t)}^{\max}$  为第  $i$  个像元  $t$  年观测得到的实际年最大增强型植被指数;  $EVI_{(i, t)}^{\text{pre}}$  为第  $i$  个像元  $t$  年模拟的年最大增强型植被指数。

将每个像元的残差项按年序排列,以线性回归拟合其年际变化趋势,进行人类活动对草地植被覆盖变化影响的趋势分析,其公式如下:

$$\epsilon = at + c \quad (11)$$

式中:  $\epsilon$  为每个像元的 EVI 残差项;  $a$  为拟合趋势的斜率,如果  $a > 0$ ,则表明像元在去除气候变化的影响下,人类活动对草地植被覆盖变化有正面的影响,如果  $a < 0$ ,则表明像元在去除气候变化的影响下,人类活动对草地植被覆盖变化有负面的影响,如果  $a = 0$ ,则表明像元在去除气候变化的影响下,人类活动对草地植被覆盖变化的影响较小。

## 3 结果与分析

### 3.1 青海省生长季草地 EVI 时空变化特征

3.1.1 青海省生长季草地 EVI 时间变化特征 为了研究青海省生长季草地植被覆盖随时间变化的特征,取 2005—2014 年 EVI 数据中草地 EVI 平均值,代表当年的植被覆盖状况,得到 10 年间青海省不同区域生长季草地 EVI 时序变化图(图 2)。从图 2 中可以看出,青海省草地 EVI 值为 0.35~0.45,呈波动增加趋势,年增长速率为 0.002 3,增长趋势不明显( $R^2 = 0.3181$ ,  $p > 0.05$ )。

从不同气候分区来看,生长季草地 EVI 差异明显,其中东部黄土高原区草地 EVI 平均值明显高于其他地区,生长季草地 EVI 平均值为 0.441 2,说明东部黄土高原区草地植被覆盖比其他地区要好;青藏高原区和环湖及祁连山区生长季草地 EVI 平均值比

较接近,分别为 0.409 3,0.381 4;柴达木盆地生长季草地 EVI 平均值为 0.246 5,是所有地区中最低的,说明总体上柴达木盆地是青海省草地植被覆盖最低的地区。2005—2014 年青南高原区、东部黄土高原区和柴达木盆地生长季草地 EVI 均呈现增长趋势,环湖和祁连山区草地 EVI 呈现退化趋势。东部黄土高原区年变化速率为 0.005 3,达到了 0.01 的显著性水平,呈现显著增加趋势;青南高原区、柴达木盆地年变化速率均为 0.002 2,增加趋势不明显;环湖和祁连山区年变化速率为-0.001 4,退化趋势不明显。

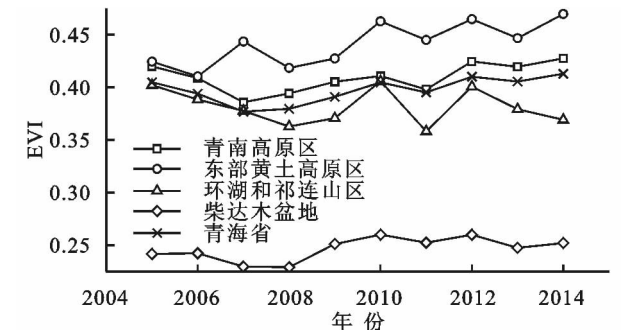


图 2 2005—2014 年青海省生长季草地 EVI 变化趋势

3.1.2 青海省生长季草地 EVI 空间变化特征 尽管在年际变化上青海省生长季草地 EVI 的变化趋势不明显,但却存在明显的空间差异。如图 3 所示,青海省生长季草地 EVI 的空间分布呈现东南部高,西北部低的分布特征。由东南至西北,平均 EVI 逐渐降低。其中青南高原区南部和东南部、环湖和祁连山区温度较低,具有良好的降水条件,适合高寒草甸类、高寒草原类的植被生长,具有较高的 EVI 值;东部黄土高原区多河谷,多盆地,气候适宜,但由于城镇密集,人口密度大,对草地植被的破坏较严重,因此 EVI 值较低;青南高原区北部和西部海拔较高,温度较低,柴达木盆地夏季降水较少,蒸发量大,不利于草地植被的生长,因此,这两个区域的 EVI 值最低。

利用像元统计的方法对 10 年间青海省 EVI 平均值进行分级统计分析,结果表明:草地低植被覆盖区(平均 EVI 值介于 0.15~0.35)占草地总面积的 40.38%;草地中植被覆盖区(平均 EVI 值介于 0.35~0.55)占草地总面积的 42.61%,其中 0.35~0.45 的区域占 20.93%,0.45~0.55 的区域占 21.68%;草地高植被覆盖区(平均 EVI 值大于 0.55)占 17.01%,其中 0.55~0.65 的区域占 13.46%,大于 0.65 的区域占 3.55%。

由于草地 EVI 平均值只能反映草地植被覆盖度的分布状况,因此,根据公式(1)计算每一个像元 10 年来的植被绿度变化率,进一步地分析青海省生长季草地 EVI 的空间变化。根据草地植被变化趋势的不同并参考自然断裂法<sup>[23]</sup>,将研究区内草地植被变化

情况划分为 5 种变化类型:明显改善(I 级,  $GRC \geq 0.005$ );轻微改善(II 级,  $0.002 < GRC < 0.005$ );基本不变(III 级,  $-0.002 \leq GRC \leq 0.002$ );轻微退化(IV 级,  $-0.005 < GRC < -0.002$ );明显退化(V 级,  $GRC \leq -0.005$ ),不同变化类型的统计情况见表 1。从表 1 可以看出,青海省生长季草地 EVI 整体上呈增加的趋势,但其变化趋势呈现明显的空间差异(图 4)。呈现增长趋势的区域比重为 41.53%,其中轻微改善区域(II 级)占整体草地面积的 23.44%,集中分布于青南高原区西北部、扎陵湖和鄂陵湖环湖区域,祁连山区北部,明显改善区域(I 级)占整体草地面积的 18.09%,集中分布于青南高原区的西南部和南部、海南洲、东部黄土高原区的河湟谷地,说明这些区域的草地 EVI 持续上升,植被状况有较大的改善;基本不变区域(III 级)比重最大为 33.76%,在各个区域均有分布,相对比较集中的区域为青南高原西部和南部、柴达木盆地和祁连山区南部,说明这些区域的 EVI 植被指数基本没有太大的变化,草地植被状况保持不变;呈现退化趋势的区域(IV 级和 V 级)比重为 24.71%,空间分布集中于阿尼玛卿山两侧、青海湖盆地、玛多县和称多县,说明这些区域的 EVI 植被指数呈现下降的趋势,青海省草地局部区域面临退化的风险。

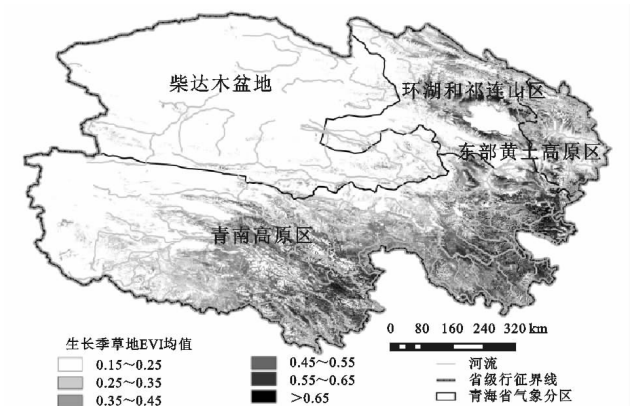


图 3 2005—2014 年青海省生长季草地 EVI 均值空间分布

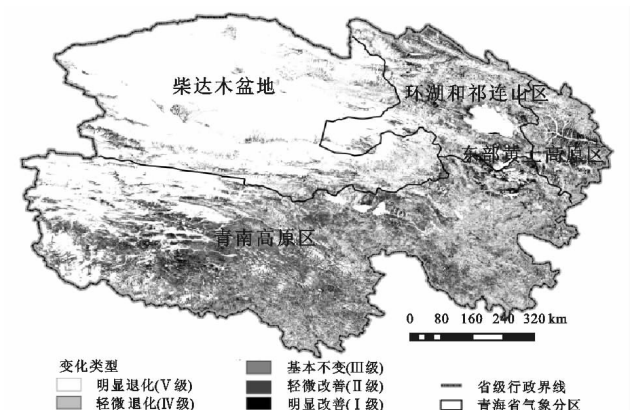


图 4 2005—2014 年青海省生长季草地 EVI 绿度变化程度

表 1 2005—2014 年青海省草地 EVI 均值变化类型

EVI 变化趋势	变化类型	像元个数	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
$GRC \leq -0.005$	明显退化(V级)	550184	34387	11.63
$-0.005 < GRC \leq -0.002$	轻微退化(Ⅳ级)	619235	38702	13.09
$-0.002 \leq GRC \leq 0.002$	基本不变(Ⅲ级)	1597441	99840	33.76
$0.002 < GRC \leq 0.005$	轻微改善(Ⅱ级)	1108974	49311	23.44
$GRC \geq 0.005$	明显改善(I级)	856179	53511	18.09

3.2 青海省生长季草地 EVI 对气候变化的响应关系

3.2.1 生长季草地 EVI 与气候因子的偏相关性分析 温度和降水青海省草地生长的主要限制因子,对草地植被覆盖的空间分布起着决定性的作用。通过计算 2005—2014 年青海省生长季草地 EVI 与同期的平均温度和累积降水量的复相关系数可知,其相关系数为 0.738,通过  $p < 0.05$  的显著性检验,表明青海省生长季草地 EVI 与温度和降水密切相关。

为了进一步分析温度和降水对生长季草地 EVI 影响的空间分布,本文采用偏相关分析方法逐像元的计算平均温度和累积降水量与草地 EVI 的偏相关系数,得到结果如图 5 所示,可以看出青海省生长季草地 EVI 与平均温度和累积降水量的关系是正相关和负相关并存。利用 ArcGIS 10.2 软件对区域内的像元进行统计,得到生长季草地 EVI 与平均温度的偏相关系数为  $-0.881\ 3 \sim 0.891\ 7$ ,生长季 EVI 与累积降水量的偏相关系数为  $-0.882\ 4 \sim 0.883\ 0$ ,空间差异明显。同时计算得到生长季草地 EVI 与平均温度、累积降水量的平均偏相关系数分别为 0.271 0, 0.137 3,表明总体上生长季草地 EVI 与平均温度和累积降水量都呈正相关关系。

研究区内生长季草地 EVI 与平均温度呈正相关关系的占全区的 72.02%,呈负相关关系的占 27.98%;与温度呈正相关关系的主要分布在青南高原区,环湖和祁连山区,其中 31.34%的像元通过显著性检验( $p < 0.05$ ),集中分布在青南高原西部、扎陵湖和鄂陵湖环湖区域、阿尼玛卿山东西侧、茶卡—共和盆地西部和祁连山区北部,说明这些地区的草地 EVI 随着温度的升高而

增大。这些地区属于青海省典型的高寒区和山地区,海拔较高,平均海拔在 4 500 m 以上,温度较低,平均温度在  $-2^{\circ}\text{C}$  以下,降水较为充沛,主要的草地植被类型为高寒草甸类和高寒草原类,对温度的敏感性较高。当温度升高,有利于冻土层的融化,促进草地植被的光合作用,有利于草地的生长。因此,在这些地区,热量是草地生长的主要限制因子,温度与生长季草地 EVI 呈明显的正相关关系。而与温度呈负相关关系的主要分布在柴达木盆地和东部黄土高原区,其中 7.15%的像元通过显著性检验( $p < 0.05$ ),集中分布在柴达木盆地东部、茶卡—盐湖环湖区域、沙珠玉河流域和河湟谷地,说明这些地区的草地生长随着温度的增加而退化。这是由于这些地区海拔较低,平均温度较高,降水相对稀少,主要的草地类型为温性草原类,当温度升高会使地表蒸发量进一步增加,加剧该地区水分的缺乏,从而抑制草地的生长。

研究区内生长季草地 EVI 与累积降水量呈正相关关系的占全区的 60.38%,呈负相关关系的占 39.62%。与降水呈正相关关系的主要分布在青南高原区、柴达木盆地和青海湖环湖区域,其中 24.67%的像元通过显著性检验( $p < 0.05$ ),集中分布在青南高原西部和北部,柴达木盆地东北部、青海湖西侧和沙珠玉河流域,说明这些地区降水与草地 EVI 呈明显的正相关关系,降水是草地生长主要限制性因素,原因是这些地区降水量相对高山区和北部高寒区较少,平均温度较高,蒸发量比较大,对降水的敏感性较高。与降水呈负相关关系的主要分布在环湖和祁连山区、青南高原区东北部,其中 11.55%的像元通过显著性检验( $p < 0.05$ ),集中分布在阿尼玛卿山区和祁连山区,说明这些地区降水与草地 EVI 呈明显的负相关关系,降水越多反而导致草地的退化。这可能是因为这些地区属于降水较为充沛的高寒山地区,降水量增多,云量增加,会导致太阳辐射减少,草地植被的光合作用减弱,导致草地生长受到制约。

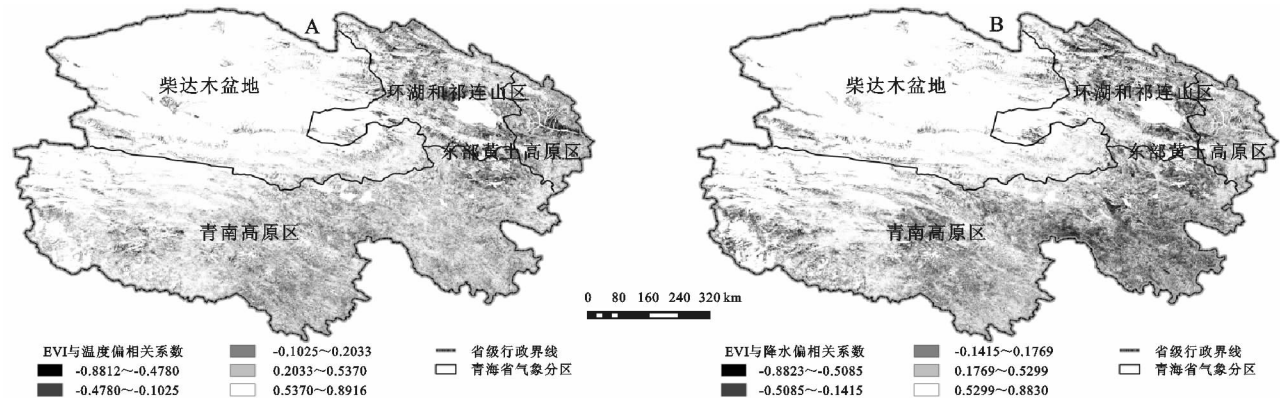


图 5 2005—2014 年青海省生长季草地 EVI 与温度、降水偏相关系数

3.2.2 不同变化类型生长季草地 EVI 与气候因子的驱动关系 由于青海省生长季草地 EVI 与气候因素的相关性存在明显的空间差异,因此本文进一步地探讨不同草地植被变化类型下草地 EVI 与气候因素的驱动关系,结果如表 2 所示。

柴达木盆地研究结果表明,基本不变区域(Ⅲ级)和轻微退化区域(Ⅳ级)生长季草地 EVI 与降水的偏相关和与温度、降水的复相关显著,与温度的偏相关不显著,主要受温度和降水共同驱动影响,降水的影响比较大;轻微改善区域(Ⅱ级)生长季草地 EVI 与温度、降水的复相关显著,主要受温度和降水共同驱动影响;明显退化区域(Ⅴ级)和明显改善区域(Ⅰ级)与温度、降水的偏相关和复相关均不显著,说明气候因素并不是主要的驱动因素。

东部黄土高原区研究结果表明,基本不变区域(Ⅲ级)和轻微退化区域(Ⅳ级)生长季草地 EVI 与降水偏相关显著,与温度的偏相关和与温度、降水的复相关不明显,主要受降水驱动;明显改善(Ⅰ级)、明显退化(Ⅴ级)和轻微退化区域(Ⅳ级)生长季草地 EVI 与温度、降水的偏相关和复相关均不明显,说明这些区域主要受非气候因子驱动。

环湖和祁连山区研究结果表明,明显改善(Ⅰ级)和轻微退化区域(Ⅳ级)生长季草地 EVI 与温度、降水的复相关显著,主要受温度、降水驱动,其中明显改善区域(Ⅰ级)和轻微退化区域(Ⅳ级)与降水的偏相关明显,受降水的影响较大;基本不变区域(Ⅲ级)生长季草地 EVI 与温度偏相关显著,与降水偏相关和与温度、降水的复相关不明显,主要受温度驱动;轻微改善区域(Ⅱ级)和明显退化区域(Ⅴ级)生长季草地 EVI 与温度、降水的偏相关和复相关均不明显,说明该区域主要受非气候因子驱动。

青南高原区研究结果表明,基本不变区域(Ⅲ级)和轻微改善区域(Ⅱ级)生长季草地 EVI 与温度、降水的复相关显著,说明这些区域主要受温度、降水驱动;轻微退化区域(Ⅳ级)生长季草地 EVI 与温度偏相关显著,与降水和与温度、降水的复相关不明显,说明该区域主要受气温驱动;明显改善区域(Ⅰ级)和明显退化区域(Ⅴ级)生长季草地 EVI 与温度、降水的偏相关和复相关均不明显,说明这些区域主要受非气候因子驱动。

值得注意的是,明显改善(Ⅰ级)和明显退化区域(Ⅴ级)生长季草地 EVI 均值基本上与温度、降水的相关性均不显著,可能的解释是这些区域主要是人类活动比较大的城市区和畜牧区,除了气候因素对草地生长的影响之外,人类活动对草地生态系统的扰动也

比较剧烈。因此为了进一步探讨人类活动对草地植被生长的影响,利用残差趋势法分析去除气候变化的人类活动对草地植被生长影响的空间分布。

### 3.3 青海省生长季草地 EVI 与人类活动的关系

本文基于局部回归的残差趋势法计算反映人类活动的残差趋势序列,得到 2005—2014 年青海省生长季草地 EVI 的残差趋势图(图 6)。残差趋势绝对值越大表明该区域草地生长受人类活动的干扰影响越大,其中人类活动对草地生长的影响主要有两种表现形式:一是残差趋势值为正且越大,表明人类活动对草地生长具有促进作用(如生态工程等),二是残差趋势值为负且越小,表明人类活动对草地生长具有破坏作用(如放牧、城市扩张和采矿等);残差趋势绝对值越小表明该区域草地生长受人类活动的干扰影响较小。

2005—2014 年青海省生长季草地 EVI 年平均残差趋势为 0.005 7,表明人类活动对青海省草地植被生长呈正影响。从图 6 中可以看出残差趋势绝对值大的区域集中在人口活动强度比较大的城镇区和放牧区。残差趋势呈显著增加的集中分布在青南高原区西南部、扎陵湖—鄂陵湖区域、海南洲和东部黄土高原区的河湟谷地区域,表明该区域草地植被生长不能仅仅用温度和降水的变化解释,很大程度上还受人类活动的影响,且人类活动对草地植被生长起了促进作用。残差趋势呈显著减少的集中分布在杂多县和治多县交界处、囊谦县、称多县、玛多县南部、阿尼玛卿山两侧区域、班玛县、久治县和青海湖区域,表明这些区域的草地 EVI 持续减少,草地正面临退化的风险,且主要是由人类活动引起的。

图 7 反映了不同变化类型下人类活动对草地 EVI 变化的影响差异,图中可知随着草地退化程度的降低或草地改善程度的增加,草地 EVI 残差趋势值呈显著降低或显著增加的趋势。明显退化区域草地 EVI 残差趋势值基本小于 0 且差异明显,说明在明显退化区域(Ⅴ级),人类活动对草地生长起着主要的破坏作用;同样的,明显改善区域草地 EVI 残差趋势值基本在 0 以上且差异明显,说明在明显改善区域(Ⅰ级),人类活动对草地生长起着主要的促进作用。此外通过比较图 4 和图 6 可以发现,青海省生长季草地 EVI 的变化趋势和人类活动的残差趋势在空间分布上十分相似,再通过表 2 的结果表明,明显退化和明显改善区域的生长季草地 EVI 与温度、降水的相关性均不明显,说明草地生长变化除了响应气候变化之外,很大程度上是受人类活动的影响,尤其是在草地植被明显变化的区域,人类活动是影响草地植被覆盖变化的主要限制因素。



表 2 不同变化类型生长季草地 EVI 均值与气候因子的偏相关系数及复相关系数

区域	变化类型	偏相关分析				复相关分析		驱动关系
		平均温度		累积降水量		复相关系数	相关性检验	
		偏相关系数	相关性检验	偏相关系数	相关性检验			
柴达木盆地	明显改善	-0.216	0.576	-0.301	0.432	0.303	0.715	非气候因子驱动
	轻微改善	0.594	0.092	0.617	0.008	0.774	0.041 *	气温、降水驱动
	基本不变	0.535	0.138	0.731	0.025 *	0.825	0.019 *	气温、降水驱动
	轻微退化	0.324	0.396	0.805	0.009 * *	0.811	0.023 *	气温、降水驱动
	明显退化	0.369	0.328	0.384	0.307	0.418	0.511	非气候因子驱动
东部黄土高原区	明显改善	-0.223	0.565	0.312	0.414	0.388	0.565	非气候因子驱动
	轻微改善	-0.535	0.137	0.656	0.055	0.672	0.122	非气候因子驱动
	基本不变	0.553	0.122	0.668	0.049 *	0.729	0.071	降水驱动
	轻微退化	0.124	0.751	0.729	0.026 *	0.73	0.07	降水驱动
	明显退化	0.482	0.189	0.211	0.586	0.526	0.321	非气候因子驱动
环湖和祁连山区	明显改善	0.714	0.031 *	0.451	0.223	0.854	0.012 *	气温、降水驱动
	轻微改善	0.62	0.075	0.282	0.462	0.627	0.174	非气候因子驱动
	基本不变	0.74	0.023 *	-0.347	0.361	0.754	0.053	气温驱动
	轻微退化	0.68	0.044 *	0.22	0.57	0.821	0.02 *	气温、降水驱动
	明显退化	0.502	0.168	0.31	0.416	0.594	0.218	非气候因子驱动
青南高原区	明显改善	0.371	0.325	0.336	0.376	0.410	0.525	非气候因子驱动
	轻微改善	0.766	0.016 *	0.457	0.217	0.769	0.043 *	气温、降水驱动
	基本不变	0.667	0.05 *	0.184	0.635	0.857	0.01 * *	气温、降水驱动
	轻微退化	0.726	0.027 *	0.299	0.435	0.734	0.067	气温驱动
	明显退化	0.327	0.391	0.162	0.677	0.372	0.593	非气候因子驱动

注：\* 表示通过 0.05 的置信度检验；\*\* 表示通过 0.01 的置信度检验。

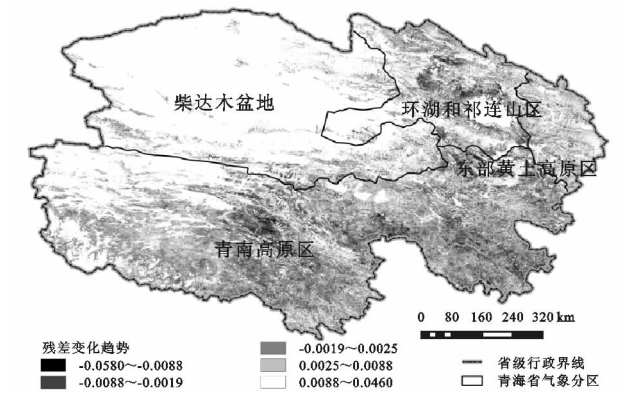


图 6 2005—2014 年青海省生长季草地 EVI 残差变化趋势

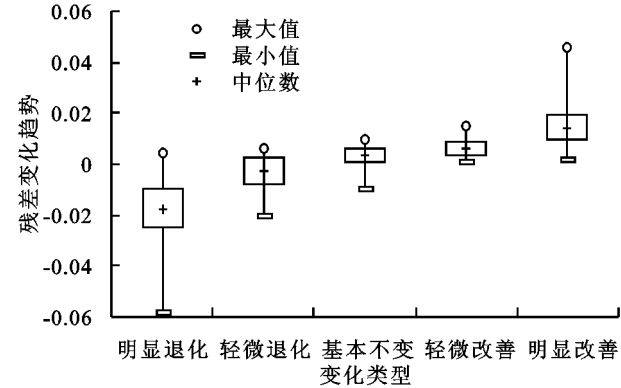


图 7 草地植被不同变化类型的残差变化趋势

4 讨论与结论

(1) 2005—2014 年青海省草地植被整体呈波动增加趋势,生长季草地 EVI 的年增长速率为 0.002 3,其

中东部黄土高原区整体呈显著增加趋势,青南高原区、柴达木盆地整体呈增加趋势,环湖和祁连山区整体呈退化趋势。青海省草地 EVI 呈东南部高,西北部低的分布特征,草地植被改善区域集中分布在青南高原区西部、海南洲和东部黄土高原区的河湟谷地、扎陵湖和鄂陵湖环湖区域,祁连山区北部,草地植被退化区域集中分布在阿尼玛卿山两侧、青海湖盆地、玛多县和称多县。

(2) 青海省生长季草地 EVI 与温度和降水密切相关,总体上与平均温度和累积降水量均呈正偏相关关系,31.34%的像元与温度呈显著正相关,集中分布在青南高原西部、扎陵湖和鄂陵湖环湖区域、阿尼玛卿山东西侧、茶卡—共和盆地西部和祁连山区北部;24.67%的像元与降水呈显著正相关,集中分布在青南高原西北部、柴达木盆地东北部、青海湖西侧和沙珠玉河流域。因此,温度和降水在一定程度上是草地植被生长的主要限制因素,且对于高寒地区的青海省来说,温度与 EVI 的关系更为密切。

(3) 青海省草地植被变化主要是气候变化与人类活动共同作用的结果。柴达木盆地(Ⅱ级、Ⅲ级和Ⅳ级区域)。环湖和祁连山区(Ⅰ级和Ⅳ级区域)、青南高原区(Ⅱ级和Ⅲ级区域)主要受气温和降水驱动;东部黄土高原区(Ⅲ级和Ⅳ级区域)主要受降水驱动;环湖和祁连山区(Ⅲ级区域)、青南高原区(Ⅳ级区域)主要受气温驱动;其他区域主要受非气候因子驱动,人类扰动对这些区域的草地植被覆盖变化影响较大。人类活动对青海省草地植



被的生长总体呈正影响,其中起着促进作用的区域集中分布在青南高原区西南部、扎陵湖—鄂陵湖区域、海南洲和东部黄土高原区的河湟谷地区域,起着破坏作用的集中分布在杂多县和治多县交界处、囊谦县、称多县、玛多县南部、阿尼玛卿山两侧区域、班玛县、久治县和青海湖区域。在草地植被明显变化的区域,人类活动对草地生态系统的建设和破坏起着主导作用。

青海省草地植被覆盖变化是气候和人类活动等因素共同耦合作用的结果。本文虽量化了人类活动对草地植被变化的影响,但仅把人类活动作为一个影响因子来考虑。而事实上,人类活动也是一个多因素共同影响的整体,在多因素影响下,其对草地植被变化存在建设和破坏两种不同的效应。一方面是建设效应<sup>[24]</sup>,如在青南高原区西部、扎陵湖—鄂陵湖区域,自2005年以来,国家批准启动三江源自然生态保护和建设,建立了索加—曲麻河保护区和扎陵湖—鄂陵湖保护区,实施了退耕退牧还草、生态移民等多项重大工程,有效地改善草地的植被覆盖状况。另一方面是破坏效应<sup>[25-26]</sup>,如在称多县、玛多县、阿尼玛卿山区域,海拔比较高,地形较为复杂,不利用生态工程建设的实施,人类的活动方式主要以放牧为主,超载放牧导致草地生态系统持续退化;在青海湖区域,近年来环湖旅游资源和矿产资源得到有效的开发,但同时也给青海湖环湖区域的草地生态环境带来了很大压力。因此,在更小尺度上进行实地调查研究,进一步细化反映人类活动的影响因素,量化各人为因素对青海省草地植被变化的相对影响仍有待深入地分析和探讨。

#### 参考文献:

- [1] Huyghe C. New utilizations for the grassland areas and the forage plants; what matters[J]. *Fourrages*, 2010, 134(203):213-219.
- [2] Ma W H, Fang J Y, Yang Y H, et al. Biomass carbon stocks and their changes in northern China's grasslands during 1982—2006 [J]. *Science China Life Sciences*, 2010, 53(7):841-850.
- [3] Ykhanbai H, Bulgan E, Beket U, et al. Reversing grassland degradation and improving herders' livelihoods in the Altai Mountains of Mongolia[J]. *Mountain Research & Development*, 2004, 24(2):96-100.
- [4] 刘纪远,徐新良,邵全琴. 近30年来青海三江源地区草地退化的时空特征[J]. *地理学报*, 2008, 63(4):364-376.
- [5] 郭敏杰,张亭亭,张建军,等. 1982—2006年黄土高原地区植被覆盖度对气候变化的响应[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(5):35-40, 48.
- [6] 秦大河, Thomas Stocker. IPCC第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10(1):1-6.
- [7] 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.
- [8] 张起鹏,王倩,张春花,等. 草地植被覆盖度变化及其驱动力:以甘南藏族自治州玛曲县为例[J]. *中国农业资源与区划*, 2014, 35(4):58-62.
- [9] 刘正佳,邵全琴. 三江源地区植被覆盖度变化及其与气候因子的关系[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(6):334-339.
- [10] 包刚,覃志豪,包玉海,等. 1982—2006年蒙古高原植被覆盖时空变化分析[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(3):918-927.
- [11] 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, 315.
- [12] 陈燕丽,罗永明,莫伟华,等. MODIS NDVI与MODIS EVI对气候因子响应差异[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(10):1802-1812.
- [13] 孙成明,孙政国,穆少杰,等. 基于MODIS的植被指数模型及其在草地生态系统中的应用[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(22):84-88.
- [14] 黄晓东,李霞,梁天刚. 北疆地区不同草地类型MODIS植被指数变化动态及其与气候因子的关系[J]. *兰州大学学报:自然科学版*, 2007, 43(3):42-47.
- [15] 胡英敏,高琼,兰玉芳,等. 太仆寺旗2000—2008年EVI对气候及土地利用变化的响应[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(7):1200-1213.
- [16] 韦惠兰,祁应军. 基于遥感监测的青藏高原草地退化及其人文驱动力分析[J]. *草业科学*, 2016, 33(12):2576-2586.
- [17] 张国胜,伏洋,杨琼,等. 青海省天然草地类型空间分布特征及气候分区[J]. *草业科学*, 2009, 26(1):23-29.
- [18] 卫亚星,王莉雯,石迎春,等. 青海省草地资源净初级生产力遥感监测[J]. *地理科学*, 2012, 32(5):621-627.
- [19] 潘耀忠,龚道溢,邓磊,等. 基于DEM的中国陆地多年平均温度插值方法[J]. *地理学报*, 2004, 59(3):366-374.
- [20] 刘芳,张红旗,董光龙. 伊犁河谷草地植被NDVI变化及其降水敏感性特征[J]. *资源科学*, 2014, 36(8):1724-1731.
- [21] 冯妍,何彬方,唐怀恒,等. 安徽省2000—2009年不同类型植被的变化及其与气温、降水的关系[J]. *生态学报*, 2012, 31(11):2926-2934.
- [22] Li A, Wu J, Huang J. Distinguishing between human-induced and climate-driven vegetation changes: a critical application of RESTREND in Inner Mongolia[J]. *Landscape Ecology*, 2012, 27(7):969-982.
- [23] 范瑛,李小雁,李广泳. 基于MODIS/EVI的内蒙古高原西部植被变化[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(6):1671-1677.
- [24] 刘宪锋,任志远,林志慧,等. 2000—2011年三江源区植被覆盖时空变化特征[J]. *地理学报*, 2013, 68(7):897-908.
- [25] 李辉霞,刘国华,傅伯杰. 基于NDVI的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究[J]. *生态学报*, 2011, 31(19):5495-5504.
- [26] 骆成凤,许长军,游浩妍,等. 2000—2010年青海湖流域草地退化状况时空分析[J]. *生态学报*, 2013, 33(14):4450-4459.