

# 1999—2018 年青海省土地退化 遥感监测及其驱动力分析

张博<sup>1</sup>, 周伟<sup>1,2</sup>, 张福存<sup>3</sup>

[1. 中国地质大学(北京) 土地科学技术学院, 北京 100083;

2. 自然资源部土地整治重点实验室, 北京 100035; 3. 西宁市测绘院, 青海 西宁 810001]

**摘要:** [目的] 分析青海省土地退化的动态变化趋势及主要影响因素, 为该省生态环境建设工程以及防治土地退化提供理论依据。[方法] 采用 ANUSPLIN 插值、趋势分析、Hurst 指数、残差分析等方法, 利用植被降水利用率(RUE)作为土地退化的监测指标。[结果] ①青海省 RUE 和归一化植被指数(NDVI)空间上主要分布为西北低, 东南高。西部主要 RUE 小于 0.004, 所占比例 40.77%, 西北部 NDVI 小于 0.75, 所占比例 38%。②青海省 1999—2006, 2006—2012, 2012—2018 年土地退化各所占比例 5.16%, 4.25%, 14.57%; 空间上主要从中部和西部往西北部偏移。③气温、日照时数、平均风速与 RUE 有明显的正相关, 所占比例 64%, 91% 和 73%, 通过显著性检验的所占比例 24%, 61%, 32%。人类活动对 RUE 负干扰所占比例为 55%。[结论] 青海省 1999—2018 年土地退化表现为先减少后增加, 持续性较弱, 导致青海省土地退化面积减少的影响因子主要有日照、平均风速和温度, 人类活动也是影响退化的一大因素。

**关键词:** 青海省; 土地退化; 趋势分析; Hurst 指数; 归一化植被指数(NDVI); ANUSPLIN

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)02-0120-09

中图分类号: P237, P941.73

**文献参数:** 张博, 周伟, 张福存. 1999—2018 年青海省土地退化遥感监测及其驱动力分析[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2):120-128. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.02.017; Zhang Bo, Zhou Wei, Zhang Fucun. Remote sensing monitoring and driving force analysis of land degradation in Qinghai Province from 1999 to 2018 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(2):120-128.

## Remote Sensing Monitoring and Driving Force Analysis of Land Degradation in Qinghai Province from 1999 to 2018

Zhang Bo<sup>1</sup>, Zhou Wei<sup>1,2</sup>, Zhang Fucun<sup>3</sup>

(1. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences,

Beijing 100083, China; 2. Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural

Resources, Beijing 100035, China; 3. Xining Surveying and Mapping Institute, Xining, Qinghai 810001, China)

**Abstract:** [Objective] The dynamic change trend and main influencing factors of land degradation in Qinghai Province was analyzed, in order to provide a theoretical basis for ecological environment construction projects and the prevention of land degradation. [Methods] ANUSPLIN interpolation, trend analysis, Hurst index and residual analysis were employed, and the rainfall use efficiency (RUE) was used as the indicator to monitor land degradation. [Results] ① The spatial distribution of RUE and normalized difference vegetation index (NDVI) in Qinghai Province was mainly lower in the northwest and higher in the southeast. The main RUE in the west was less than 0.004, accounting for 40.77%, and NDVI in the northwest was less than 0.75, accounting for 38%. ② Land degradation of Qinghai Province in 1999—2006, 2006—2012, and 2012—2018 accounted for 5.16%, 4.25%, and 14.57%, respectively, which was mainly shifted from the middle and west to the northwest. ③ Temperature, sunshine hours, and average wind speed were significantly positively correlated with RUE, accounting for 64%, 91%, and 73%, and 24%, 61% and 32% of them passed the

收稿日期: 2019-09-05

修回日期: 2019-11-18

资助项目: 国家重点研发计划项目“土地整治与农用地质量监测评价标准”(2017YFF0206801)

第一作者: 张博(1995—), 男(汉族), 甘肃省天水市人, 硕士研究生, 研究方向为土地退化和修复。Email: 2022824979@qq.com。

通讯作者: 周伟(1974—), 男(汉族), 甘肃省会宁县人, 教授, 博士生导师, 主要从事土地利用工程与资源环境遥感研究。Email: zhou@cugb.edu.cn。

significance test. The negative interference of human activities on RUE accounted for 55%. [Conclusion] Land degradation in Qinghai Province in 1999—2018 decreased initially and then increased, with a weak sustainability. The influencing factors leading to the reduction of land degradation area in Qinghai Province are mainly sunshine hours, average wind speed and temperature, and human activities were also a major factor affecting land degradation.

**Keywords:** Qinghai Province; land degradation; trend analysis; Hurst index; NDVI; ANUSPLIN

土地退化在干旱、半干旱和亚湿润区的表现形式主要为荒漠化,而它是严重威胁人类生存和发展的重大环境问题之一<sup>[1]</sup>,在 1977 年联合国召开荒漠化会议之后,“荒漠化”这种生态问题得到了世界的公认<sup>[2]</sup>。我国是受荒漠化危害较为严重的国家之一,荒漠化土地广泛分布于我国西部地区<sup>[3]</sup>。在荒漠化灾害损失的评估有很多结果,在 1997 年张玉、宁大同<sup>[4-5]</sup>估算中国荒漠化灾害经济损失约 540 亿元之后,又有卢琦、吴波<sup>[4]</sup>计算的我国荒漠化危害的直接经济损失约 642 亿元/a,荒漠化及其衍生危害造成的间接经济损失约 2889 亿元/a。可以看出,荒漠化导致的土地退化造成的危害很明显,对其研究具有很大的现实意义。而中国主要受到的影响主要表现在以下几个方面:①生态环境受破坏,威胁人类生存;②破坏国家交通、水利等基础设施;③破坏土地资源,农业产量减产;④生物多样性遗失等<sup>[6]</sup>。因而从西部地区着手,开展土地退化评价,对维护我国生态安全,保障社会经济发展具有重要的作用<sup>[7]</sup>。植被是一个很重要的土地构成因素,既可以代表土地资源的质量,又能够指示土地演替的方向<sup>[8]</sup>。目前多用植被指数作为分析荒漠化的指标,在一定程度上能够反映植被的生长状况及荒漠化的发展趋势,但不能反映植被质量的变化<sup>[9]</sup>。在国外研究中 LeHouérou<sup>[10]</sup>于 1984 年首先提出植被降水利用率(rain use efficiency, RUE)的概念。在数年后 Prince<sup>[11]</sup>将 RUE 应用于沙漠化评估,而且阐明了 RUE 用于反映荒漠化状况的理论基础<sup>[12]</sup>:在干旱地区,由于降水,土壤有效湿度和植被生产能力之间的相关性,年植被净初级生产力(NPP)主要由年降雨量决定,只有在降雨量超出正常水平时,其他因素(如养分和光照)才会影响 NPP,因此降雨可被用作潜在 NPP 的替代因子。且在研究中证实 RUE 是一个有效表征沙漠化发展态势的指标<sup>[13]</sup>。RUE 是在植被水分利用率(WUE)的基础上提出的概念,是植被净初级生产力(NPP)与降水量的比率<sup>[14]</sup>。但由于降水量等气象数据是站点数据,目前在荒漠化的研究中,多采用 ARCGIS 提供的普通克里格插值(ordinary kriging, OK),反距离加权插值(inverse distance weighted, IDW),协同克里格插值(cokriging, CK)等方法进行插值<sup>[15-17]</sup>。但这些插值方法多适用于

站点分布密度大、地势平坦区域,对于地形复杂且站点稀少的区域,这些插值精度往往不理想<sup>[18-21]</sup>。而以 ANUSPLIN 插值软件为代表的区域精细化方法在国内外得到了广泛的应用<sup>[22-23]</sup>。并且明确得出从统计学角度 ANUSPLIN 插值方法总体精度水平优于反距离加权插值法和克里格插值法使用全国 1 667 个站点进行气温插值<sup>[24]</sup>。另一方面,由于在 NPP 计算方法中参数较多,考虑到 NDVI 和 NPP 有一定相关,所以采用 NDVI 来代替 NPP 进行计算 RUE<sup>[6,15-16,25]</sup>。因此,本文采用以生长季植被 NDVI 数据代替 NPP,使用 ANUSPLIN 插值气象数据,计算 RUE 的值以及分析 RUE 的变化特征,用来反映土地退化的空间动态变化特征以及影响因子,旨在研究青海省地区土地退化的发生、发展过程,为其生态环境建设工程以及防治土地退化提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 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°35′—103°04′E,31°39′—39°19′N。全省东西长约 1 200 km,南北宽约 800 km,面积 7.22×10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>。青海省地处亚欧大陆内部,大部分海拔高程在 3 km 以上,西部海拔高,向东部倾斜,北有祁连山,中有昆仑山系和阿尼玛卿山,南有唐古拉山,各大山脉构成青海地貌的基本骨架。使得自然形成青南高原、祁连山地区、柴达木盆地 3 大自然区域,并在其中分布河谷、盆地、高原和山地。省内河流分布众多,是长江、黄河、澜沧江黑河等众多水系的发源地,享有“中华水塔”“江河源头”之称。气候属于大陆性高原气候。主要特点是高寒和干旱,降雨少,日照长,多风,平均气温-5~8.5℃,年均降水量为 50~550 mm。典型的气候条件和特殊的地貌环境以及人类的影响,使得青海省成为我国受沙漠化导致的土地退化影响最严重的地区之一<sup>[26]</sup>。日益严重的土地荒漠化已经成为严重制约青海省经济发展的重要因素<sup>[27]</sup>。而青海省的森林、湿地、草原等生态系统在涵养水源、防风固沙、水土保持、农田防护和应变全球气候变化各个方面发挥了至关重要的作用,是我国重要的生态屏障<sup>[28]</sup>。

## 1.2 数据来源

本文所使用的植被指数 (NDVI) 数据来自资源环境数据云平台, 是基于连续时间序列的 SPOT/VEGETATION NDVI 卫星遥感数据, 采用最大值合成法生成的 1998 年以来的月度 (1—12 月) 植被指数数据集。通过累加和裁剪获得青海省 5—9 月累积 NDVI。气象数据均来自中国气象数据网, 其中 1999 年和 2015—2018 年数据来自国家气象中心的中国地面国际交换站气象资料日值数据集 (V3.0), 该数据包含中国 166 个站点的气压, 气温, 降水量, 蒸发量, 相对湿度, 日照时数和 0 cm 地温要素的日值数据。2000—2014 年气象数据为包括 2000 个站点的气压、气温、降水量、蒸发量、相对湿度、日照时数和 0 cm 地温要素的月值数据。

## 1.3 气象数据的处理

气象数据是每个站点的每日的实测数据。本文使用 ANUSPLIN 专用气象数据插值软件进行插值, 该方法是由澳大利亚科学家 Hutchinson<sup>[22]</sup> 基于薄盘样条理论编写的处理气候数据曲面拟合的专用插值方法, 通过引入多个影响因子作为协变量, 根据最佳拟合效果自动确定模型系数, 且能同时进行多个表面的空间插值, 对于时间序列的气象数据空间插值非常适用<sup>[29]</sup>。薄盘光滑样条插值方法最早由 Wahba 于 1979 年提出, Hutchinson 在 1984 年对其进行改进以适用于大数据集。后来又由 Bates 将其扩展为局部薄盘光滑样条法<sup>[30-31]</sup>。局部薄盘光滑样条法在插值过程中利用最优的光滑参数实现逼真度和光滑度最佳平衡, 保证了精度可靠, 同时允许引入线性协变量子模型, 如海岸线距离、海拔等多个地理因子作为线性协变量。局部薄盘光滑样条的理论统计模型为:

$$Z_i = f(x_i) + b^T y_i + e_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中:  $Z_i$  为位于空间  $i$  点的因变量;  $f(x_i)$  为要估算关于  $x_i$  的未知光滑函数;  $x_i$  为独立变量;  $y_i$  为独立协变量;  $b$  为独立协变量的系数;  $e_i$  为随机误差。

## 1.4 研究方法

1.4.1 RUE 时间序列分析 利用 1999—2018 年生长季 (5—9 月) NDVI 累积数据代替植被净初级生产力并除以当年生长季降水量累积值, 计算得出研究区域的 1999—2018 年 RUE。计算公式为:

$$RUE = \frac{\sum_{i=5}^9 NDVI_i}{P_{5-9}} \quad (2)$$

式中: RUE 为年植被降水利用效率;  $NDVI_i$  为  $i$  月归一化植被指数;  $P_{5-9}$  为生长季累积降水量。

1.4.2 趋势分析 计算 20 a RUE 的 Sen 斜率以反

映其变化趋势。Sen 斜率是通过计算序列数据中数据对的斜率并取中位数以反映该序列数据变化趋势的分析方法, 可以不用考虑序列中数据的缺失以及异常值的干扰, 在时间趋势分析中具有明显的优势。具体计算公式为:

$$Q = \text{median} \quad (1 < i < j < n) \quad (3)$$

式中:  $Q$  为 Sen 斜率; median 为取中位数,  $Q$  大于 0, 表示序列呈上升趋势,  $Q$  小于 0, 表示序列呈下降的趋势<sup>[7]</sup>。

1.4.3 Mann-Kendall (M-K) 检验 用 Mann-Kendall 检验方法 (M-K 检验) 进行检验。M-K 检验是气象学和水文学中比较常用的检验时间序列趋势的方法之一<sup>[32]</sup>。M-K 检验能够剔除少数异常值, 样本不需要遵从一定的分布, 适于非正态分布的数据。

1.4.4 Hurst 指数 Hurst 指数<sup>[33]</sup> 是定量描述时间序列内长期依赖性的有效方法之一, 在水文、地球化学、气候、地质、地震等领域广泛运用。有以下规律:  $H=0.5$ , 是相对独立, 方差有限的随机序列;  $0.5 < H < 1$ , 表明该序列具有长期依赖性, 表现为持续性, 表明未来的变化趋势和过去的变化趋势一致, 当  $H$  越接近 1, 持续性越强;  $0 < H < 0.5$ , 表明该序列具有长期依赖性, 未来的变化趋势和过去的相反, 表现为反持续性,  $H$  越接近于 0, 反持续性越强。

本文采用常用的  $R/S$  分析法计算 Hurst 指数, 通过定义极差与标准差的比值为  $R/S$ , 将存在以下指数规律<sup>[34]</sup>:

$$R/S = (R/S) = (ct)^H \quad (4)$$

式中:  $R$  为极差序列;  $S$  为标准差序列;  $c$  为常数;  $t$  为时间序列长度。可根据实测资料在  $t$  与  $R/S$  的上双对数图上利用最小乘法求得 Hurst 指数<sup>[34]</sup>。

1.4.5 相关分析法 Person 相关系数是应用最为广泛的相关性系数, 用来衡量两个变量之间的线性相关程度, 计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中:  $x_i, y_i$  为两个变量的值;  $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  为两个变量的平均值;  $r$  为相关性系数,  $r > 0$  时, 两个变量呈正相关,  $r < 0$  时, 两个变量呈负相关,  $|r|$  越大, 表示相关性越强<sup>[9]</sup>。

1.4.6 残差分析 采用残差分析法可以实现气候要素和人类活动对植被生长影响的分离<sup>[35]</sup>。对遥感影像的每个栅格单元的 NDVI 与主要影响因素做回归分析, 从而得到每个像元的 NDVI 的预测值, 计算实测值和预测 NDVI 之间的残差, 用来衡量 20 a 来人类活动

对植被的影响,通过趋势分析法计算残差 NDVI 值的空间特征,及人类活动对植被生长的影响。

$$\epsilon_i = \text{NDVI}_i - \text{NDVI}'_i \quad (6)$$

式中: $\epsilon_i$  为第  $i$  年植被 NDVI 实测值与预测值之间的残差;  $\text{NDVI}_i$  为  $i$  年 NDVI 的真实值;  $\text{NDVI}'_i$  为第  $i$  年 NDVI 基于气候条件的预测值。当  $\epsilon > 0$ , 表示人类活动对植被生长正干扰; 当  $\epsilon < 0$  时, 表示负干扰; 当  $\epsilon = 0$  时, 表示干扰不明显<sup>[36]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 青海生长季 RUE 的空间分布格局

利用青海省 1999—2018 年各年生长季 RUE 值平均得出 20 a 年均 RUE 值,并将年均 RUE 值划分为 5 个等级(图 1),反映出青海省植被降水利用率的相对大小,其总体呈现西部低东部高,但在西北部值

有部分值比较高,从 20 a 生长季平均降水量分布图(图 1)分析,可能受到降水量空间分布趋势西部高东部低,西北部降水量分布较少的影响。生长季 RUE 小于 0.004 的占青海总面积的 40.77%, 主要分布在青海省的西部。根据青海省生长季平均 NDVI, 将 NDVI 划分为 5 个等级(图 1), 青海省西北部主要累积 NDVI 小于 0.75, 所占比例 38%, 对应 RUE 的值小于 0.004, 青海省东部和南部累积 NDVI 值比较高, 在 1.5 以上的所占比例 40%, 对应 RUE 的值在 0.008 以上。通过土地利用现状(见封 3 附图 4)可以看出, 西北地区主要以未利用土地和林草地为主。植被降水利用率较小的处在青海西部, 主要是未利用地集中, 土地退化比较严重, 植被降水利用率较大的主要处在青海东部和南部, 主要为林草地和耕地, 南部林草地集中, 水量较充分, 土地退化不明显。

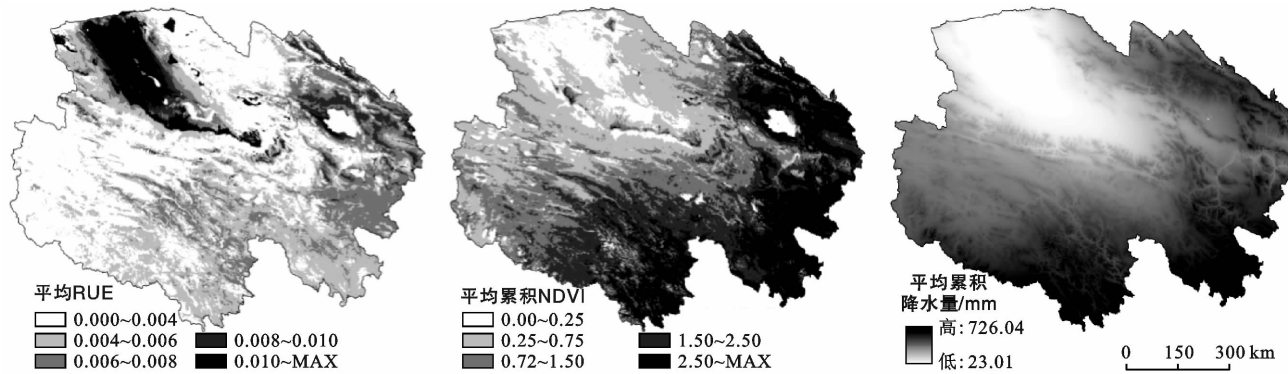


图 1 青海省 1999—2018 年生长季各项监测指标分布

### 2.2 青海生长季 RUE 的空间变化趋势

通过 Sen 趋势分析和 M-K 非参数检验,借助 ArcGIS 10.2 和 Matlab 软件,计算青海 1999—2018 年 RUE 的空间变化趋势,并且剔除掉在 20 a 间未发生变化的土地利用类型中水域的面积,根据置信区间和 sen 斜率来划分荒漠化等级,其中 sen 斜率大于 0 为改善地区,斜率小于 0 为退化地区,置信度水平划分为  $p < 0.01$  为极显著,  $0.01 < p < 0.05$  为显著,  $0.05 < p < 0.1$  为弱显著,  $p > 0.1$  为不显著地区。在退化地区(斜率小于 0)根据置信水平划分为显著退化( $p < 0.05$ ), 轻微退化( $0.05 < p < 0.1$ )。在改善地区(斜率大于 0)根据置信水平划分为显著改善( $p < 0.05$ ), 轻微改善( $0.05 < p < 0.1$ )。其他定义为稳定地区。

2.2.1 青海省 1999—2018 年分时间段土地退化空间分布状况 如图 2 以及表 1, 3 个时间段中的稳定和改善的比例均大于退化比例(轻微退化和显著退化), 1999—2006 年中退化比例为 5.16%, 退化主要分布在冷湖行委, 格尔木市, 曲麻莱县以及青海东部青海湖周边零散分布。2006—2012 年中比例为

4.25%, 相比 1999—2005 年有减少, 主要分布在茫崖行委和冷湖行委部分地区, 格尔木市, 囊谦县, 班玛县等零散分布。2012—2018 年中退化比例为 14.57%, 相比前面两个阶段均有增加的趋势, 分布比较集中, 主要分布在青海省北部的茫崖行委, 冷湖行委, 格尔木市以及都兰县和玛多县, 共和县有零散分布。在 1999—2018 年持续变化中, 退化比例占 24.94%。退化面积呈现增加趋势, 空间分布变化趋势主要从全省零散分布逐渐变化为集中在西北部和中部。从整体来看, 退化面积呈现增加趋势, 总体比例仍然为稳定和改善占优, 呈现在趋于稳定状态为主体, 退化面积逐渐增加。

表 1 青海省 1999—2018 年分阶段土地退化程度所占比例

退化程度	1999—2006 年	2006—2012 年	2012—2018 年
轻微退化	2.97	2.60	7.04
显著退化	2.19	1.65	7.53
稳定	94.80	95.24	81.81
轻微改善	0.02	0.29	2.35
显著改善	0.02	0.22	1.28

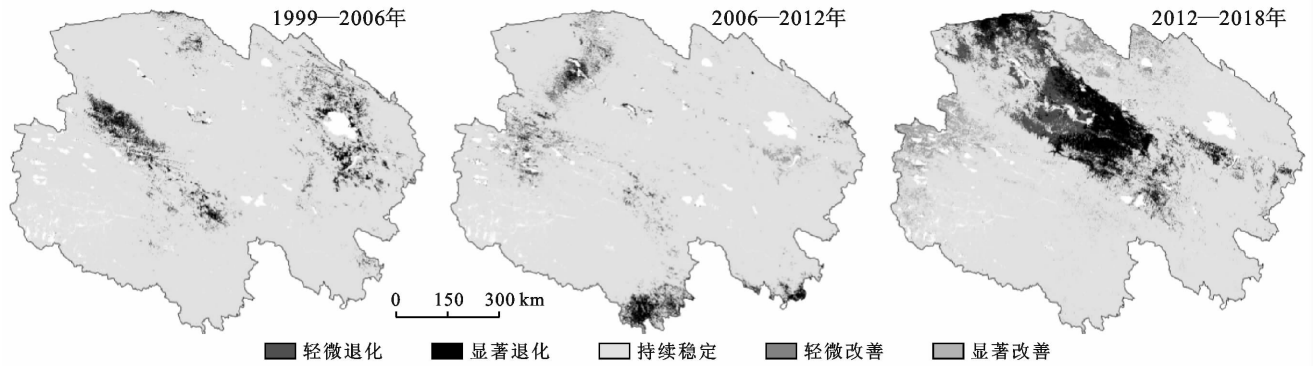


图 2 青海省 1999—2018 分时段土地退化程度分布情况

2.2.2 青海省 1999—2018 年各时段累计土地退化空间分布状况 以 1999 年 RUE 数据为基准, 计算 1999—2012 年和 1999—2018 年年荒漠化的空间分布情况(图 3)。如图 2—3 以及表 2 所示, 1999—2006 年荒漠化所占比例 5.16%, 1999—2012 年荒漠化所占比例 31.08%, 比 1999—2006 年增加 25.92%, 表明荒漠化在这段时间快速增加, 在空间分布中, 1999—2012 年荒漠化主要分布在北部的自治州直辖的冷湖行委、茫崖行委、大柴旦行委, 格尔木市以及东部的祁连县,

天峻县, 刚察县, 门源县, 海晏县, 湟源县, 湟中县, 共和县, 互助县, 以及南部的曲麻莱县, 玛多县, 杂多县, 玛沁县, 甘德县, 同德县, 泽库县, 河南蒙古族自治县等部分分布比较集中, 其余分布比较分散。1999—2018 年荒漠化所占比例 24.94%, 比 1999—2012 年降低了 6.14%, 主要荒漠化集中在青海西北部和中部。从整体看, 青海省荒漠化在 20 a 的持续变化中, 荒漠化的所占比例低于改善和稳定所占比例, 但从总体来看, 荒漠化比例有增加的趋势, 应该采取一定的治理措施。

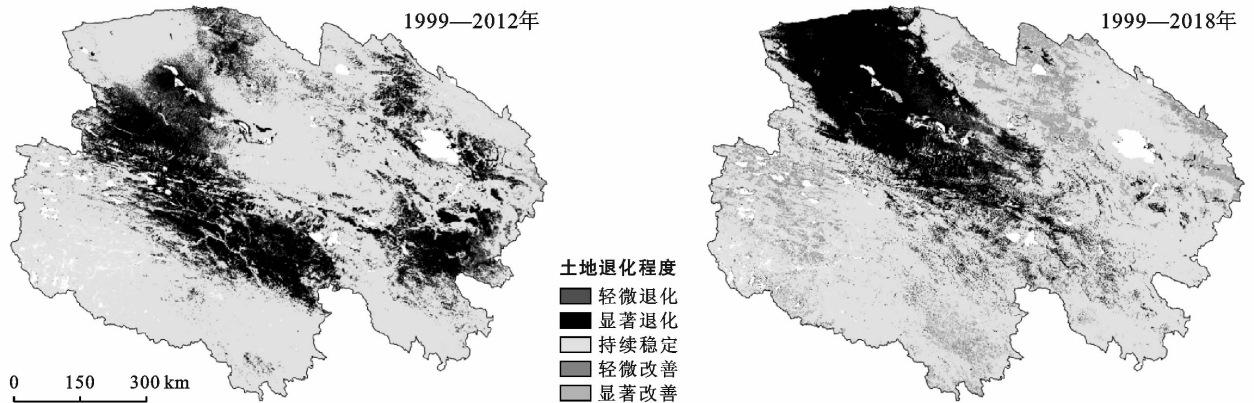


图 3 青海省 1999—2018 年各时段累计土地退化程度分布情况

表 2 以 1999 年为基准不同时间段荒漠化程度所占比例 %

退化程度	1999—2006 年	1999—2012 年	1999—2018 年
轻微退化	2.97	11.59	4.26
显著退化	2.19	19.50	20.68
稳定	94.80	68.68	67.17
轻微改善	0.02	0.11	4.56
显著改善	0.02	0.13	3.33

2.2.3 青海省 1999—2018 年土地退化情况以及未来变化趋势 根据 R/S 分析, 计算得出青海省 1999—2018 年 RUE 的 Hurst 指数, 全区平均值为 0.43, 低于临界值 0.5, 表明持续性较弱。将 Hurst 指数按照 0~0.45 定义为反持续逆向发展, 0.45~0.55 定义为波动, 0.55 以上定义为持续, 和 1999—2018 年

退化等级进行叠加, 得到未来变化趋势(图 4), 持续显著退化和持续轻微退化所占比例分别为 0.60% 和 0.24%, 主要分布在海西州的冷湖行委北部, 曲麻莱县格尔木市都兰县三地交界处零星分布。反持续稳定所占比例 33.35%, 主要分布在西部, 中部大部分地区, 这些表明, 在未来的变化中这些稳定的地区会产生变化, 走向不稳定, 可能趋向改善, 也可能趋向退化。反持续显著退化和轻微退化所占比例 13.97% 和 2.76%, 主要分布在西北部的茫崖行委, 冷湖行委部分地区, 中部的格尔木市, 都兰县少部分地区。这些表明在未来会由退化变为改善, 趋势良好。大部分地区保持稳定以及改善, 表明在未来的变化趋势中, 荒漠化趋势向改善方向发展。

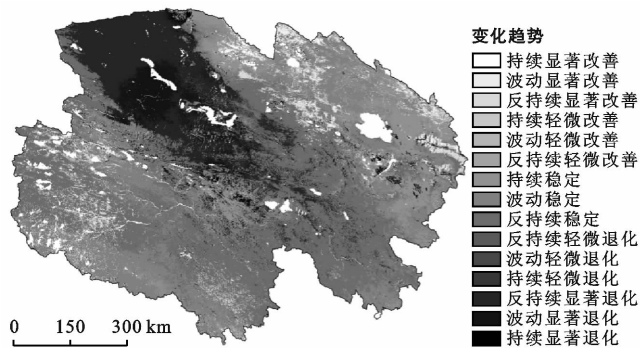


图 4 青海省 1999—2018 年 RUE 未来变化趋势

### 2.3 青海生长季植被 NDVI 和 RUE 变化的驱动力

2.3.1 与气象因子的相关性分析 本文主要选择生长季累积降水量,平均相对湿度,平均气温,累积日照时数,平均风速作为影响土地退化的潜在自然因子,为便于分析气象因子对土地退化的影响,将 NDVI 和影响因子也做相关性分析以作参考。通过 Matlab 编程计算各因子和植被 NDVI,RUE 的相关系数,根据系数的显著性检验表,在 0.05 的显著性水平下,相关性系数的临界值为 0.444,在 0.01 的显著性水平下,相关性系数的临界值为 0.561,根据临界值将相关性分为以下几种情况:正相关显著( $R > 0.561$ )、正相关较显著( $0.444 < R < 0.561$ )、正相关不显著( $0 < R < 0.444$ )、负相关不显著( $-0.444 < R < 0$ )、负相关较显著( $-0.561 < R < -0.444$ )、负相关显著( $R < -0.561$ )。

通过图 5 看出,与植被生长有显著性影响关系的气象因子主要是降水,温度和平均风速,其中降水和气温对植被的生长主要是正相关,其中降水和气温正相关比例占 68%和 69%,其中通过显著性检验的比例占 24%和 19%,表明一定的气温和降水对植被的生长有促进作用。风速的影响主要是负相关,所占比例 53%,通过显著性检验的所占比例 15%,说明风速对植被的生长有负作用。平均湿度和日照时数对植被的影响不太明显。

土地退化受到众多因素的影响,通过 RUE 和气象因子的相关性图(图 6)以及 NDVI 和气象因子的相关性图(图 5)可以看出,与土地退化与气象因子均有很强相关性,其中图 6 显示降水和 RUE 有很大的负相关,所占比例 97%,这与图 5 有很大的差异,也说明 RUE 能更好的表现土地退化的程度,平均湿度也与 RUE 有明显的负相关,所占比例 86%,其中 46%通过显著性检验,表明在部分地区降水和平均湿度越大,植被降水利用率反而越小。而气温日照时数和平均风速和 RUE 有明显的正相关,所占比例分别为 64%,91%和 73%,其中通过显著性检验的所占比例分别为 24%,61%和 32%,表明这 3 者的值越大,在部分地区植被降水利用率的值会越高,因此可以得出,在部分地区,这 3 者存在抑制土地退化的作用,而和图 5 得出的结论部分不同。

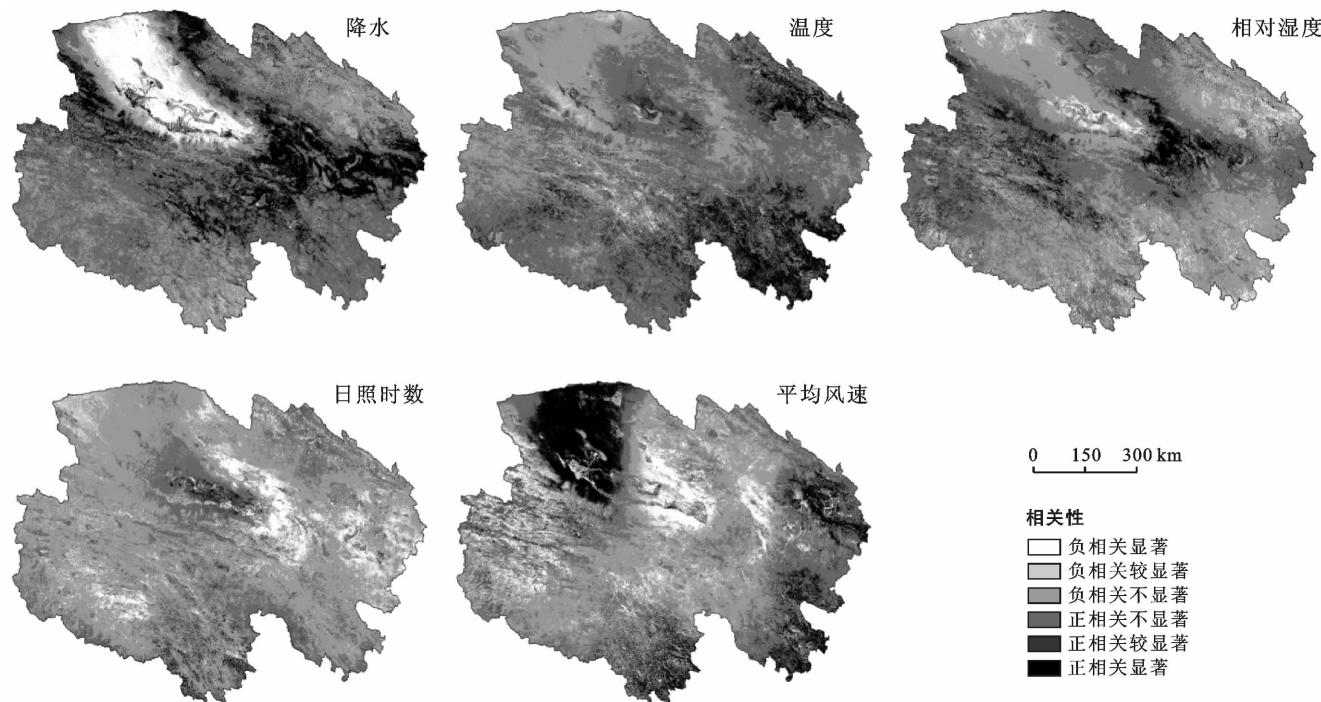


图 5 青海省 1999—2018 年生长季 NDVI 与气象因子的相关性

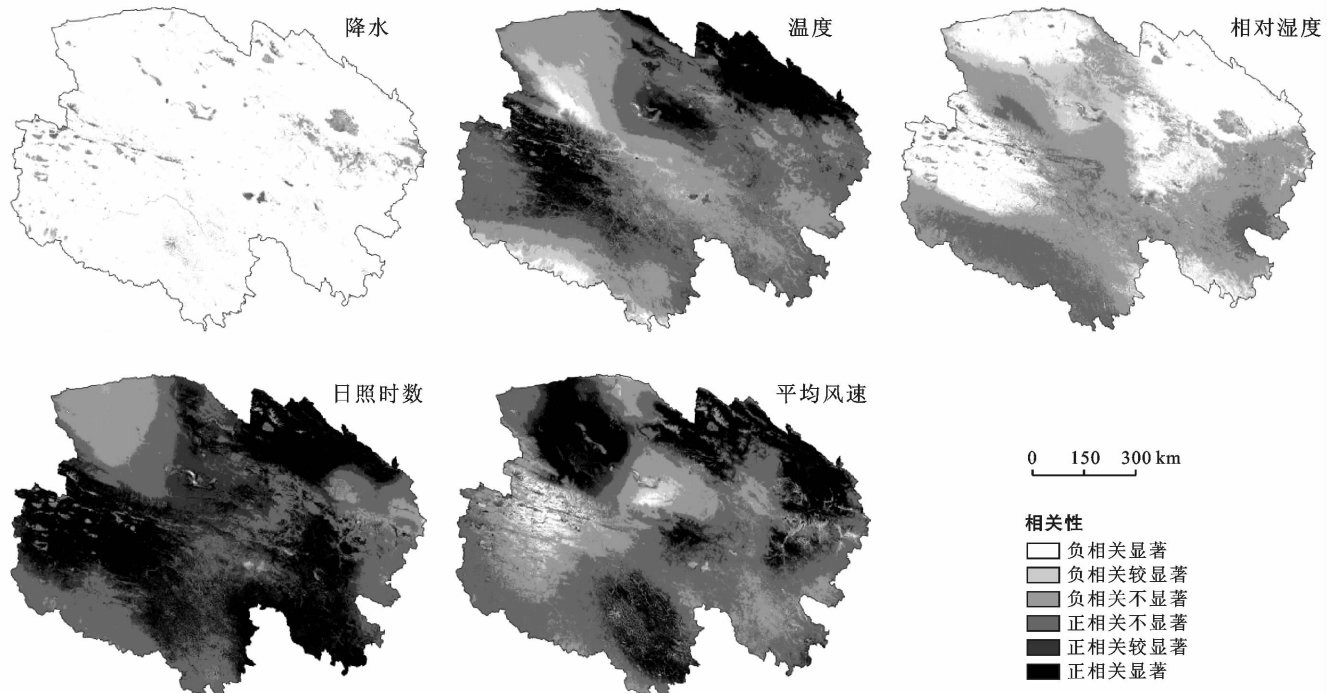


图 6 青海省 1999—2018 年生长季 RUE 与气象因子的相关性

2.3.2 人类活动影响 青海省位于青藏高原东侧,生态环境脆弱,气候变化能够很明显的引起植被的变化,但同时人类活动对植被和土地退化的影响也是不可忽视的因素。使用残差分析法计算人类活动对植被以及土地退化的影响。根据残差计算结果,使用自然间断点分级法,划分影响程度,最终划分为 5 类,残差结果小于零划分为两类:人类活动负干扰,人类活动弱负干扰;0 附近为人类活动干预不明显;残差大于零划分为两类:人类活动弱正干扰,人类活动正干扰。

通过上述分析发现,影响植被生长的主要因素是降水量和温度,因此使用生长季累积 NDVI 和降水量以及温度建立多元回归模型来计算人类活动对植被生长的影响。而对土地退化由主要相关性的是降水量和日照时数,因此选用降水量和日照时数和生长季累积植被降水利用率 RUE 建立多元回归模型,计算人类活动对土地退化的影响。计算结果如图 7 所示,从人类活动对植被生长的影响可以看出,人类活动对植被和弱负干扰主要在青海省中部和西北,该类所占比例 36%,主要分布在青海省西北部的茫崖行委、冷湖行委、格尔木市,中部的都兰县等地区。这些地区主要是人类活动弱负干扰,表明人类活动在这些地区导致了植被的退化,但是程度不太明显。负干扰所占比例 4%,该类在青海省均有分布,其中在青海省南部的囊谦县、杂多县、玉树县分布比较明显,在青海省中部和东部也有分布,这些地区是青海省城市地带、

表明一定的城市化进程占用了耕地等使得的植被有所减少,但从整体来看,青海省东部主要是人为活动正干扰,表明城市的发展过程中一定的城市绿化使得东部的植被有了一定的改善。从人类活动对 RUE 的影响来看(图 7),人类的影响主要是负干扰,所占比例 55%,均为弱负干扰,干扰不明显占 42%,其余为弱正干扰,表明人类的活动的干扰使得 RUE 降低,可能加剧土地退化,但是程度不太明显。主要分布在青海省中部,西部和西北部,这些地区也是土地退化主要分布的地区。通过图 7 也能看出,人类活动导致了植被的退化,而植被退化明显的西北部和中部也是土地退化的重点分部地区。

### 3 讨论

本文以青海省作为研究区,使用 1999—2018 年生长季 NDVI,DEM 等空间数据,以及气象数据等非空间数据,使用 ANUSPLIN 插值对气象数据进行处理,分析青海省土地退化的空间分布状况,以及动态变化趋势,使用 Hurst 指数描述青海省土地退化的未来变化趋势。使用相关性分析计算各影响因子和植被指数 NDVI 以及植被降水利用率 RUE 的相关性,分析影响植被和土地退化的主要影响因子。使用残差分析法分离气象因素和人类活动对植被和土地退化的影响程度,定量分析各影响因子对植被变化和土地退化的影响。



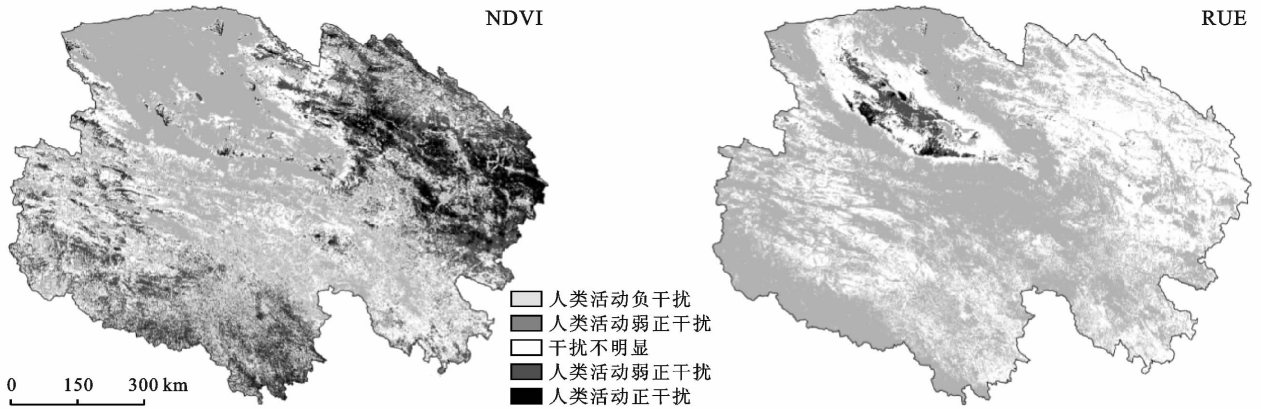


图 7 人类活动对生长季植被 NDVI 和 RUE 的影响

### 3.1 青海省生长季植被 NDVI 和植被降水利用率的空间分布格局

青海省植被降水利用率和植被 NDVI 空间上主要分布为西北低, 东南高, 逐渐从西北至东南增高, 这与部分在青海的植被 NDVI 的研究结果类似<sup>[37]</sup>。RUE 的值分布大体和 NDVI 的一致, 在东部值高, 西部值低, 但在西北部分地区, RUE 的值较高, 可能受到降水量比较低的影响, 该区域的值一部分较高。在 RUE 的计算中, 初次采用 ANUSPLIN 插值。

### 3.2 青海省生长季植被退化和土地退化的空间变化

青海省 1999—2018 年土地退化空间分布分时间段来看, 1999—2006 年退化比例为 5.16%, 2006—2012 年比例为 4.25%, 2012—2018 年比例为 14.57%, 土地退化呈现先减少再增加的趋势, 这可以通过吕爱锋等<sup>[26]</sup>得到的 2000—2012 年青海省发生荒漠化和沙化的退化面积整体呈下降趋势, 韩辉邦等<sup>[37]</sup>得到的 2004—2013 年期间, 青海省植被在气温和降水同时上升导致植被 NDVI 呈上升趋势得到验证。但在 2012—2018 年土地退化有上升趋势, 土地退化面积在 2012 年之后有了明显的增大。青海省 RUE 的全区 Hurst 指数小于 0.5, 表明土地退化的结果持续性不强, 青海省的退化情况会得到缓解, 趋于改善的方向, 这个结论也在前面文章得到验证<sup>[26]</sup>。

### 3.3 青海省生长季植被 NDVI 和 RUE 变化的驱动力

在影响植被 NDVI 的 RUE 的气象因素中, 气温和降水对植被有明显的促进作用, 呈现正相关, 而风速与植被生长呈现负相关, 对植被的生长有负作用。而 RUE 和气象因子也有很强的相关性, 其中 RUE 和降水以及平均湿度有很明显的负相关, 表明在部分地区降水和平均湿度越大, RUE 值越小。而日照时数和平均风速以及温度与 RUE 有明显的正相关, 这三者在部分地区则对土地退化有明显的抑制作用。通过残差分析分离气象因素和人类活动影响对植被

生长和土地退化的影响。结果表明, 人类活动对植被的影响在青海省西北部主要是负干扰导致植被的退化, 在东部主要为正干扰促进植被的改善。而人类活动对土地退化的干扰主要是西部和西北部为负干扰, 导致土地退化的加剧。

## 4 结论

(1) 青海省 RUE 在青海省西部和西北部未利地集中以及 NDVI 较低的地区值较低, 但受降水量的影响, 部分区域的值较高, 南部和东部林草地集中, NDVI 值较高地区, RUE 值也比较高。因此青海省 NDVI 和 RUE 的分布趋势大致相同, 主要在西北部较低, 东部和南部较高。

(2) 青海省 1999—2018 年土地退化表现为先减少后增加, 20 a 间整体退化面积呈增加趋势, 空间上主要呈现为从中部和西部往西北部靠拢。整体土地退化持续性较弱, 未来有改善的趋势。

(3) 导致青海省土地退化面积减少的影响因子主要有日照, 平均风速和温度, 人类活动也是影响退化的一大因素。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 孙建国, 王涛, 颜长珍. 气候变化和人类活动在榆林市荒漠化过程中的相对作用[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 625-630.
- [2] 张建香, 张多勇, 刘万锋, 等. 基于 ESAI 的黄土高原荒漠化风险评估[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 339-344, 353.
- [3] 边振. 基于遥感技术的荒漠化监测方法研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [4] 卢琦, 吴波. 中国荒漠化灾害评估及其经济价值核算[J]. 中国人口·资源与环境, 2002, 12(2): 31-35.
- [5] 张玉, 宁大同, Smil V. 中国荒漠化灾害的经济损失评估[J]. 中国人口·资源与环境, 1996, 6(1): 49-53.
- [6] 韦振锋, 任志远, 张翀, 等. 1999—2010 年陕甘宁黄土高原区荒漠化空间特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1230-



- 1236.
- [7] 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.
- [8] Sarkar S, Kafatos M. Interannual variability of vegetation over the Indian sub-continent and its relation to the different meteorological parameters [J]. *Discourse Processes*, 2004,90(2):268-280.
- [9] 赵卓文. 宁夏地区 2000—2014 年土地荒漠化遥感监测及驱动因子分析[D]. 江苏 徐州:江苏师范大学,2017.
- [10] Houerou H N L. Rain use efficiency: A unifying concept in arid-land ecology [J]. *Journal of Arid Environments*, 1984,7(3):213-247.
- [11] Prince S D, Colstoun E B D, Kravitz L L. Evidence from rain-use efficiency does not indicate extensive Sahelian desertification [J]. *Global Change Biology*, 1998,4(4):359-374.
- [12] Prince S D, Wessels K J, Tucker C J, et al. Desertification in the Sahel: A reinterpretation of a reinterpretation [J]. *Global Change Biology*, 2007,13(7):1308-1313.
- [13] Symeonakis E, Drake N. Monitoring desertification and land degradation over sub-Saharan Africa [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004,25(3):573-592.
- [14] 高志海,李增元,丁国栋,等. 基于植被降水利用效率的荒漠化遥感评价方法[J]. 中国水土保持科学,2005,3(2):37-41.
- [15] 马素洁,花蕊,张飞宇,等. 基于 RUE 和 NDVI 的三江源区草地生态评价[J]. 草原与草坪,2018,38(2):35-42.
- [16] 李春娥. 新疆土地荒漠化时空变化特征分析[J]. 测绘科学,2018,43(9):37-43.
- [17] 马昊翔,陈长成,宋英强,等. 青海省近 10 年草地植被覆盖动态变化及其驱动因素分析[J]. 水土保持研究,2018,25(6):137-145.
- [18] 刘正佳,于兴修,王丝丝,等. 薄盘光滑样条插值中三种协变量方法的降水量插值精度比较[J]. 地理科学进展,2012,31(1):56-62.
- [19] 刘志红, Tim R McVicar, Li L T, 等. 基于 ANUSPLIN 的时间序列气象要素空间插值[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2008,36(10):227-234.
- [20] 李月臣,何志明,刘春霞. 基于站点观测数据的气温空间化方法评述[J]. 地理科学进展,2014,33(8):1019-1028.
- [21] 谭剑波,李爱农,雷光斌. 青藏高原东南缘气象要素 Anusplin 和 Cokriging 空间插值对比分析[J]. 高原气象,2016,35(4):875-886.
- [22] Hutchinson M F. The Application of thin plate smoothing splines to continent-wide data assimilation [J]. *Data Assimilation Systems*, 1991,27:104-113.
- [23] Hijmans R J, Cameron S E, Parra J L, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas [J]. *International Journal of Climatology*, 2005,25(15):1965-1978.
- [24] 钱永兰,吕厚荃,张艳红. 基于 ANUSPLIN 软件的逐日气象要素插值方法应用与评估[J]. 气象与环境学报,2010,26(2):7-15.
- [25] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation [J]. *Journal of Arid Environments*, 2004,57(4):0-554.
- [26] 吕爱锋,周磊,朱文彬. 青海省土地荒漠化遥感动态监测[J]. 遥感技术与应用,2014,29(5):803-811.
- [27] 吴春芳. 青海省土地荒漠化现状、变化及治理对策[J]. 陕西林业科技,2014(4):85-89.
- [28] 苏晖,罗旭鹏. 青海省荒漠化土地现状及防治对策[J]. 北京农业,2016(4):153-155.
- [29] 贾洋,崔鹏. 高山区多时间尺度 Anusplin 气温插值精度对比分析[J]. 高原气象,2018,37(3):757-766.
- [30] Bates D M, Lindstrom M J, Wahba G, et al. GVCPC-routines for generalized cross validation [J]. *Communication in Statistics-Simulation and Computation*, 1987,16(1):263-297.
- [31] Axelthomas. 中国西南山区蒸散发能力的季节和空间变化(英文)[J]. 山地学报,2004,20(4):385-393.
- [32] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's Rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series [J]. *Journal of Hydrology*, 2002,259:254-271.
- [33] Hurst H E. Long term storage capacities of reservoirs [J]. *Trans American Society of Civil Engineers*, 1951,116(12):776-808.
- [34] 侯西勇,应兰兰,高猛,等. 1998—2008 年中国东部沿海植被覆盖变化特征[J]. 地理科学,2010,30(5):735-741.
- [35] 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.
- [36] 黄悦悦,杨东,冯磊. 2000—2016 年宁夏植被覆盖度的时空变化及其驱动力[J/OL]. 生态学杂志,1-12[2019-08-29]. <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.201908.016>.
- [37] 韩辉邦,马明国,马守存,等. 近 30 年青海省植被变化及其气候驱动因子分析[J]. 干旱区研究,2017,34(5):1164-1174.