DOI: 10.5846/stxb202104261102

汪东川,陈星,孙志超,辛燕,王海庆,柴华,王鸿艺.格尔木长时间序列遥感生态指数变化监测.生态学报,2022,42(14):5922-5933. Wang D C, Chen X, Sun Z C, Xin Y, Wang H Q, Chai H, Wang H Y.Monitoring of changes in the ecological index of long-time sequence Remote Sensing in Golmud, Qinghai Province.Acta Ecologica Sinica,2022,42(14):5922-5933.

格尔木长时间序列遥感生态指数变化监测

汪东川^{1,2},陈 星^{1,*},孙志超³,辛 燕¹,王海庆¹,柴 华¹,王鸿艺¹

1天津城建大学地质与测绘学院,天津 300384

2 天津城建大学/天津市土木建筑结构防护与加固重点实验室,天津 300384

3 天津绿茵景观生态建设股份有限公司,天津 300384

摘要:格尔木作为青藏高原重要的交通枢纽城市,其生态环境的可持续发展关系到该地区的经济繁荣与社会稳定。利用长时间 序列的研究在节点选择方面缺少指向性,通常采用等间隔划分的方法来确定研究时间节点。基于此,通过 Google Earth Engine (GEE)平台计算了格尔木近 30 年(1990—2019 年)的遥感生态指数(RSEI),并使用非参数统计方法——Mann-Kendall 突变检 验,科学的确定研究的时间节点,再进一步分析格尔木生态环境时空变化并探讨其影响因素。研究表明:(1) RSEI 可以有效地 评价格尔木生态环境质量,30 年间 RSEI 均值从 0.38 下降至 0.33,生态环境整体呈退化趋势;(2)由突变检验确定 1990、2001、 2006、2015、2019 年为研究的时间节点。各年份 RSEI 以较差为主,占总面积的 45%以上,主要分布在柴达木盆地北部。RSEI 等 级变化以下降为主,2001 年下降最为明显,2015 年有所减缓;(3)受气候与人类活动不同程度的影响,格尔木 RSEI 变化趋势以 下降为主,占区域总面积的 89.73%,广泛分布在柴达木地区和唐古拉山地区,受气候因素影响较大;而变化趋势上升的仅占 3. 24%,主要分布在格尔木人类活动密集的市区、乡镇以及柴达木盆地成矿带,受人类活动影响较大。

关键词:遥感生态指数;长时间序列;Google Earth Engine;Mann-Kendall 突变检测;时空变化

Monitoring of changes in the ecological index of long-time sequence Remote Sensing in Golmud, Qinghai Province

WANG Dongchuan^{1,2}, CHEN Xing^{1,*}, SUN Zhichao³, XIN Yan¹, WANG Haiqing¹, CHAI Hua¹, WANG Hongyi¹

1 School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China

2 Tianjin Key Laboratory of Civil Structure Protection and Reinforcement, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China

3 Tianjin LVYIN Landscape and Ecology Construction Co., Ltd., Tianjin 300384, China

Abstract: As an important transportation hub city in the Qinghai – Tibet Plateau, Golmud's sustainable and healthy development of the ecological environments is closely related to the local economic prosperity and social stability of the related regions. Most studies on ecological change monitoring with long-time sequence remote sensing imageries often ignore the directivity in the selection of key time nodes among the long time series, and they usually take methods such as equal interval partition to select time nodes. Based on the above situation, we first calculated the 30 year sequence data of Remote Sensing Ecological Index (RSEI) of the city of Golmud on the Google Earth Engine (GEE) platform and we scientifically defined the time nodes of the study area by a nonparametric statistical method, the Mann-Kendall mutation test method, and then further analyzed the temporal and spatial variation characteristics of the ecological environment in the city of Golmud and in the end discussions were carried out to find out the main influencing driving factors. The results showed that, (1)

收稿日期:2021-04-26; 网络出版日期:2022-03-23

基金项目:第二次青藏高原科学考察(2019QZKK0608);城市功能单元的遥感智能识别技术研究(41971310)

^{*} 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 1244262143@ qq. com

the index of RSEI could be used to effectively evaluate the quality of ecological environments in the city of Golmud and similar areas. The average value of RSEI in the past 30 years was gradually changed from 0.38 to 0.33, and the overall changing trend of ecological environment was degradation; (2) through the Mann-Kendall mutation test, the year nodes of 1990, 2001, 2006, 2015 and 2019 were selected as the final time nodes of the study area. For the above five time nodes, the grades of the index of RSEI are mainly in the state of poor, accounting for more than 45% of the total area of Golmud, and the regions with the state of poor were mainly distributed in the northern part of the Qaidam Basin. The changing trend of the grade of the RSEI index was mainly decreased during the whole time series, which was most obvious in the time node of 2001 and the changing trend began to slow down in 2015; (3) affected by the climate and human activities at different degrees, the changing trend of the RSEI index in Golmud was mainly decreasing, which accounted for 89.73% of the total area, and which was widely distributed in the Qaidam and Tanggula Mountains areas, was greatly affected by climate factors; While areas with increasing trend took only 3.24% of the total area. The areas with increasing changing trend of the RSEI index were mainly distributed in the urban and town areas with intensive human activities in the city of Golmud, and the metallogenic belt of Qaidam Basin, which were greatly affected by human activities.

Key Words: remote sensing ecological index; time series; Google Earth Engine; Mann-Kendall mutation test; spatial-temporal change

资源型城市依托资源产业的开发而兴建,由于资源的不可再生性,过度开发在带来社会贡献与经济效益 的同时对生态环境造成破坏^[1],监测生态环境质量分布与变化对生态环境保护有重要作用。生态系统为人 类生产生活提供了重要的物质基础^[2],也影响着居民的身心健康、社会的文明进步、人才的吸引和经济发展 的长期稳定性^[3]。对生态环境进行准确、快速的评价与分析,能为城市环境治理与绿色发展提供可靠的科学 依据^[4]。

遥感技术的发展使长时序对地观测研究得以实现^[5-7],利用多时相遥感数据获取土地利用类型或地表覆 盖因子等信息,对地表动态变化特征进行量化表达,快速、准确、多尺度的分析变化规律。在长时间序列遥感 的实际应用中,学者常选择 3—10 年相同间隔年份进行分析^[8],时间选择缺少指向性,容易遗漏发生重要变化 的年份。有研究通过观察多年数据规律进行人为分段^[9]或基于梯度下降法自动分段拟合划分断点位置^[10], 利用主观判断或数学统计分析方法选取特征时间节点,对长时间序列进行分段。本研究引用 Mann-Kendall 突变检验法对格尔木 RESI 均值进行非线性检验,根据突变点对长时间序列数据分段。

目前利用遥感数据研究生态环境多通过地表覆盖类型^[8]或植被覆盖指数^[11]、不透水面指标^[14]、地表温 度^[12]、地表湿度^[13]等生态指标来表示或量化生态环境的优劣情况^[15]。然而生态环境是一个综合动态系统, 单一因子无法全面反映其变化,因此如何构建综合评价指标是监测生态环境质量研究的重要问题。近年来, 有研究者计算多种指数均值^[16]或以面积权重法构建综合模型^[17],也有利用变异系数法^[18]、层次分析法^[19]等 地学统计方法构建综合模型,但结果往往受人为主观因素影响。2013年徐涵秋^[20]综合多方面生态因子提出 新型遥感生态指数(Remote Sensing Ecological Index,RSEI),以主成分分析法综合绿度、湿度、热度和干度4个 指标,根据各指标对主分量的贡献值确定权重,综合、客观的定量评价生态环境状况。近年来,利用 RSEI 对 不同空间尺度的生态环境进行监测与评价的研究证明 RSEI 具有可扩展性、可视化和可比性^[21-23]。由于 RSEI 指标选取全面,在长时间序列研究中数据量多,处理工作重复繁琐。谷歌地球引擎(Google Earth Engine,GEE)强大的数据运算功能可以批量、快速的处理影像数据集^[24],因此使用 GEE 云平台预处理并计算 各项指标,不仅提高了效率,还可以进行最小云量筛选以获取质量最优的影像进行研究^[10,25]。

格尔木拥有丰富的矿产资源,以资源开采为主的人类活动造成生态环境严重破坏。近年来,学者们对格尔木地区的生态环境进行了各方面的研究^[26-27],但对格尔木全区综合生态指数的研究较为少见。本文以格尔木为研究区,通过 GEE 计算 1990—2019 年遥感生态指数,进一步分析格尔木生态环境时空变化并探讨其

影响因素。

1 研究区概况、数据来源

1.1 研究区概况

格尔木地处青藏高原,位于青海省西部,是青藏高原的第三大城市,由柴达木盆地中南部和唐古拉山镇两 块互不相连的区域组成,唐古拉山区域内有一级河流长江源头沱沱河(图1)。随着全球气候变化与人类活动 的影响,区内土地荒漠化日益严重,生态系统脆弱敏感。受地质构造作用,格尔木拥有众多矿产资源,对矿产 资源的粗犷式开采加剧了资源的破坏和环境的恶化^[28]。格尔木是新疆、甘肃、四川、西藏、青海五省(自治 区)的中心枢纽地带,是青海省两个国家级交通枢纽站之一^[29],该地区生态环境可持续发展关系到青藏地区 的经济繁荣和社会稳定。



Fig.1 The location of the study area

1.2 数据来源及预处理

研究区矢量数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)。遥感数据利用 GEE 平台编程(JavaScript API)在线调用经过辐射校正、大气校正的 Landsat 5/8 地表反射数据集,对 6—9 月 影像进行云量筛选,镶嵌合成格尔木近 30 年(1990—2019 年)最小云量影像。通过归一化水体指数 (Normalized Difference Water Index, NDWI)阈值法对水体掩膜处理,以减少水域对湿度指标的影响^[30]。在 GEE 平台进行波段运算,得到各年份绿度、干度、热度与湿度四种指数,通过主成分分析得到遥感生态指数 (RSEI),再利用 ArcGIS 与 MATLAB 等软件进行统计分析,本文技术路线(图 2)。

2 研究方法

2.1 指数计算

根据徐涵秋提出的遥感生态指数(RSEI)^[20],选择归一化差值植被指数(Normalized Difference Vegetation



图 2 技术路线

Fig.2 Methodological workflow

GEE:谷歌地球引擎 Google earth engine; RSEI:遥感生态指数 Remote Sensing Ecological Index

Index,NDVI)表示绿度指标,反映区域内植被生长情况及其分布密度^[11];建筑指数(Index-based Built-up Index,IBI)与土壤指数(Soil Index,SI)求均值得到干度指标(Normalized Difference Soil Index,NDSI),反映土地 荒漠化与城镇化光谱响应^[31];单窗算法反演得到地表温度(Land Surface Temperature,LST)表示热度指标^[32],反映不透水面热平衡^[33];缨帽变化计算湿度指标(Wet),通过土壤含水量反映土地退化情况^[34-35]。各因子 计算公式见表 1:

指标 Indicators	计算方法 Calculation methods	参考文献 References
绿度 NDVI	$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{red})}{(\rho_{NIR} + \rho_{red})}$	[11]
干度 NDSI	$SI = \frac{(\rho_{sr1} + \rho_{red}) - (\rho_{blue} + \rho_{NIR})}{(\rho_{sr1} + \rho_{red}) + (\rho_{blue} + \rho_{NIR})}$ $IBI = \frac{2\rho_{srl} / (\rho_{sr1} + \rho_{NIR}) - [\rho_{NIR} / (\rho_{red} + \rho_{NIR}) + \rho_{green} / (\rho_{sr1} + \rho_{green})]}{2\rho_{srl} / (\rho_{sr1} + \rho_{NIR}) + [\rho_{NIR} / (\rho_{red} + \rho_{NIR}) + \rho_{green} / (\rho_{sr1} + \rho_{green})]}$ $NDSI = (SI + IBI) / 2$	[31]
热度 LST	$LST = T / [1 + (\lambda T / \rho) \times \ln \varepsilon] - 273.15$	[32]
湿度 Wet	$Wet_{TM5} = 0.0315\rho_{blue} + 0.2021\rho_{green} + 0.3102\rho_{red} + 0.1594\rho_{NIR} - 0.6806\rho_{sr1} - 0.6109\rho_{sr2}$ $Wet_{OL17/8} = 0.1511\rho_{blue} + 0.1973\rho_{green} + 0.3283\rho_{red} + 0.3407\rho_{NIR} - 0.7117\rho_{sr1} - 0.4559\rho_{sr2}$	[34]

表 1 指标计算方法 Table 1 Calculation methods of indicators

NDVI:归一化差值植被指数 Normalized difference vegetation index; NDSI:归一化土壤指数 Normalized difference soil index; *SI*:裸土指数 Soil index; IBI:建筑用地指数 Index-based built-up index; LST:地表温度 Land surface temperature; ρ_i :对应波段(red、blue、green 分别为红、蓝、绿色波段; NIR 为近红外波段, srl 、sr2 分别为短波红外 1、2 波段)地表反射率, *T*:热辐射强度转化的亮度温度, λ :热红外波段中心波长; ρ :常数, ε :地表 辐射率

由于各指标在数值单位和大小上有差异,因此要进行标准化处理^[20],再通过主成分分析计算初始遥感生态指数(RSEI₀)。标准化公式如下:

$$N = \frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \tag{1}$$

式中, N 表示标准化后的指标值, I 表示该指标在某像元的值, I_{min}为该指标的最小值, I_{max}为该指标的最大值。 基于主成分分析法计算初始遥感生态指数(RSEI₀): $RSEI_0 = 1 - PC1[f(NDVI, NDSI, LST, Wet)]$

式中,PC1为第一主成分;*f*是对各指标进行标准化处理。同样为便于指标的度量和比较也要对RSEI。进行归一化处理,得到遥感生态指数(RSEI),值越大表示生态质量越好,反之生态质量越差。

2.2 生态指数动态变化分析

2.2.1 Mann-Kendall 突变检验

Mann-Kendall 突变检验广泛应用于水文序列数据与气象站点数据,是常用的非参数统计方法,不受异常 值干扰^[36]。区域遥感生态指数均值常用来判断区域生态总体变化趋势,因此本研究对格尔木 30 年遥感生态 指数均值序列进行非参数检验,以获取生态环境突变点对长时间序列数据进行分段研究。

在 Mann-Kendall 检验中,对长度为 n 的时间序列 $R(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 构造秩序列 S_k :

$$S_{k} = \sum_{i=1}^{k} r_{i} \qquad (k = 2, 3, ..., n)$$
(3)

式中, k = 1时, $S_1 = 0$, r_i 表示第i个样本 $x_i > x_j (1 \le j \le i)$ 的累积量, $r_i = \begin{cases} 1 x_i \ge x_j \\ 0 x_i < x_j \end{cases}$ $j = 1, 2, \dots, i, x_i$ 表示

第i个样本的 RSEI 均值。

假定时间序列随机独立的情况下,定义标准化统计量 UF_k:

$$UF_{k} = \frac{S_{k} - E(S_{k})}{\sqrt{\operatorname{var}(S_{k})}} \qquad (k = 1, 2, \dots, n)$$
(4)

式中, $E(S_k)$ 与 var (S_k) 为 S_k 的期望和方差。

再构建逆时间序列,计算统计量定义为 UB_k ,满足 $UB_k = -UF_k$ 。当 $UF_k > 0$ 时,序列为上升趋势; $UF_k < 0$, 序列为下降趋势, $UF_k \setminus UB_k$ 在置信水平上有交点,则该时刻为发生突变时间^[37]。

2.2.2 变化轨迹法

变化轨迹法利用代码完整的表征时间维度的变化过程^[37],有利于深入探讨某一属性动态变化规律,在土 地利用变化的研究中有十分广泛的应用^[38]。本研究基于遥感生态指数等级,引用变化轨迹法对格尔木 RSEI 变化轨迹进行可视化。对变化轨迹编码计算公式进行简化:

$$T_{i} = \sum_{i=1}^{n} 10^{n-i} x_{i}$$
(5)

式中, *T_i* 为变化轨迹代码,研究节点共有 *n* 个, *x_i* 为第 *i* 个节点对应的 RSEI 等级代码(1 为差、2 为较差、3 为中等、4 为良、5 为优);从左至右,变化轨迹编码首位数字为初始年份 RSEI 等级,第二位数字为第二节点年份 RSEI 等级,之后以此类推。

2.2.3 Sen+Mann-Kendall 趋势分析

Sen+Mann-Kendall 显著性趋势检验是长时间序列趋势判断的重要方法^[39],由于 Sen 氏趋势分析本身不能判断序列趋势的显著性,可以通过 Mann-Kendall 检验 Sen 氏趋势分析结果实现显著性分析。Sen 氏趋势分 析通过计算时间序列的中值,能较好的消除异常值的干扰,计算公式如下^[40]:

$$Q_{\text{RSEI}} = \text{mean} \, \frac{\text{RSEI}_j - \text{RSEI}_i}{j - i} \tag{6}$$

式中, Q_{RSEI} 表示时间序列数据趋势的变化;mean 为取中值函数;1 < i < j < n, RSEI_i、RSEI_j分别为i,j时间序列的 RSEI 值。根据格尔木 RSEI 分布特征,当 $Q_{RSEI} > 0.0005$ 时趋势上升,当 $|Q_{RSEI}| \le 0.0005$ 时趋势稳定不变,当 $Q_{RSEI} < -0.0005$ 时趋势下降。

Mann-Kendall 检验统计量 S 的计算过程如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \operatorname{sign}(\operatorname{RSEI}_{j} - \operatorname{RSEI}_{i})$$
(7)

http://www.ecologica.cn

(2)

$$\operatorname{sign}(\operatorname{RSEI}_{j}-\operatorname{RSEI}_{i}) = \begin{cases} +1 \operatorname{RSEI}_{j}-\operatorname{RSEI}_{i} > 0\\ 0 \operatorname{RSEI}_{j}-\operatorname{RSEI}_{i} = 0\\ -1 \operatorname{RSEI}_{i}-\operatorname{RSEI}_{i} < 0 \end{cases}$$
(8)

当 n ≥ 10 时, S 近似服从标准正态分布,使用检验统计量 Z 进行趋势检验:

$$Z = \begin{cases} S - 1/\sqrt{\operatorname{var}(s)} S > 0 \\ 0S = 0 \\ S + 1/\sqrt{\operatorname{var}(s)} S < 0 \end{cases}$$
(9)

其中 var 表示方差。采用显著性水平 α = 0.05 进行显著性检验,即 $|Z| \ge 1.96$ 时发生显著变化, |Z| < 1.96 时发生不显著变化。

3 结果与分析

3.1 生态环境整体分析

根据格尔木 RSEI 主成分分析结果(表 2)可知:(1)第一主成分(PC1)平均贡献率达到 73%以上,说明 PC1 集中了 4 个指标的大部分特征信息,能够表示区域内生态环境情况。(2)绿度与湿度的载荷值为正,干 度与热度的载荷值为负。符合绿度和湿度越高,地表植被覆盖越高,土壤水分越充足,生态环境质量越好;干 度和热度越高,土壤沙化、岩石裸露等问题越严重的自然特征^[41]。(3)对比 PC1 载荷值的变化,LST 的绝对值 远大于其他指标,且 NDSI 与 LST 载荷值的绝对值之和始终大于 NDVI 与 Wet 之和,说明格尔木土地荒漠化与 不透水面热平衡对生态环境的破坏作用大于植被和土壤湿度的优化作用。综上所述,RSEI 指数可以综合反 应格尔木生境质量。

			Table 2	Principal o	component analysis	s results (Loading and	l contributio	n to PC1)		
年份 Year	热度 LST	干度 NDSI	绿度 NDVI	湿度 Wet	贡献率/% Contribution	年份 Year	热度 LST	干度 NDSI	绿度 NDVI	湿度 Wet	贡献率/% Contribution
1990	-0.91	-0.33	0.05	0.25	73.20	2005	-0.93	-0.30	0.06	0.22	75.31
1991	-0.89	-0.36	0.09	0.25	71.55	2006	-0.95	-0.25	0.06	0.17	76.34
1992	-0.89	-0.38	0.02	0.26	69.57	2007	-0.94	-0.26	0.05	0.22	77.31
1993	-0.89	-0.36	0.05	0.27	72.09	2008	-0.94	-0.25	0.04	0.24	75.55
1994	-0.89	-0.36	0.05	0.27	72.09	2009	-0.92	-0.27	0.06	0.27	74.85
1995	-0.81	-0.51	0.02	0.28	66.03	2010	-0.8	-0.47	0.04	0.28	60.08
1996	-0.88	-0.42	0.08	0.23	64.87	2011	-0.92	-0.29	0.02	0.25	75.22
1997	-0.94	-0.28	0.09	0.18	73.58	2012	-0.92	-0.29	0.02	0.25	75.22
1998	-0.91	-0.36	0.06	0.19	69.67	2013	-0.92	-0.25	0.14	0.25	71.83
1999	-0.90	-0.35	0.07	0.26	66.65	2014	-0.95	-0.2	0.13	0.21	78.25
2000	-0.94	-0.26	0.11	0.18	71.74	2015	-0.95	-0.23	0.09	0.22	75.13
2001	-0.94	-0.25	0.01	0.22	73.58	2016	-0.94	-0.22	0.18	0.18	75.42
2002	-0.96	-0.22	0.09	0.16	78.88	2017	-0.96	-0.21	0.11	0.17	76.41
2003	-0.99	-0.29	0.08	0.15	84.67	2018	-0.94	-0.22	0.14	0.21	72.46
2004	-0.92	-0.30	0.05	0.24	72.42	2019	-0.93	-0.24	0.11	0.24	73.82

表 2 主成分分析结果(第一主成分的载荷和贡献率)

图 3 为 1990—2019 年各指标及 RSEI 均值变化情况, RSEI 在 0.31 与 0.43 之间波动变化, RSEI 由 0.38 下降至 0.33, 整体降低 13%。从单一指标来看绿度变化保持平稳, 湿度明显下降 30%, 干度下降 17%, 而热度上升 12%。综合可知各指标对格尔木 RSEI 的影响呈下降趋势, 这与格尔木市 RSEI 变化趋势相一致。

3.2 格尔木市遥感生态指数突变分析

对 1990—2019 年的 RSEI 均值进行 Mann-Kendall 突变检验,结果如图 4。UF, 曲线从 2001 年之后持续低



Fig.3 The mean value changes of the remote sensing ecological index and RESI

于 0,表明格尔木生态质量从 2001 年开始有变差趋势; UF_k 曲线与 UB_k 曲线在 2006 年存在有效突变点,且统 计量小于 0; UF_k 曲线在 2015 年之后超出显著性水平。这与年均 RSEI 变化趋势基本相同,因此根据突变分 析的结果,本研究决定以 1990、2001、2006、2015、2019 年为时间节点,对格尔木长时间序列数据进行分段。

对 RSEI 进行等级划分,并统计各生态等级占比(图 5)。由图可知:等级为优的区域所占比例较为稳定, 且主要集中在区内冰川积雪地带;等级为良好的部分占比较少,从 1990 年的 2.60%降至 2019 年的 1.50%,主 要位于唐古拉山区域,从均匀分布到只集中在唐古拉山地区西北部,中部的分布明显减少;中等级的区域主要 分布在柴达木盆地南部山区和唐古拉山区域,在 2001 年大幅度减少后占比基本稳定;格尔木 RSEI 等级以较 差为主,分别达到 48.96%、46.91%、49.07%、59.04%和 45.72%;而生态环境等级差的区域主要分布在柴达木 盆地北部,1990 年仅占 12.27%,之后基本稳定在 25%上下浮动。

http://www.ecologica.cn

通过变化轨迹法得到轨迹代码,表示 RSEI 等级变 化过程。RSEI 等级未发生变化的区域占格尔木总面积 的 61.94%,其中稳定不变的轨迹占总面积的 35.93%。 根据轨迹代码面积,保留发生变化的前 15 种轨迹代码, 占格尔木总面积的 30.26%(图 6)。其中 RSEI 等级向 好发展的区域仅占总面积的 3.55%,主要为较差转为中 等,其分布范围在柴达木盆地区域南部和唐古拉山地区 东北部。RSEI 等级降低的区域占总面积的 27.25%,其 中 2001 年发生变化后保持稳定的区域占 14.41%,结合 等级变化百分比(表 3),说明格尔木 RSEI 等级在 2001 年下降最为明显;由较差转向差的区域占 13.50%,主要 分布在柴达木地区北部;由中等转为较差的区域占



图 4 RSEI 突变检验(1990—2019)

Fig.4 RSEI mutation test (1990-2019)



图 5 RSEI 等级分布(1990—2019) Fig.5 Distribution of RSEI (1990—2019)

http://www.ecologica.cn

13.19%,主要分布在唐古拉山地区。根据相关研究,格尔木平均年气温在研究时段内有增长趋势[42],导致冰 川融化速度加快,并且降水量上升。短期内河流径流量增加,周边植被覆盖增加,长期发展导致冻土地区植被 退化,荒漠化加重,生境质量下降^[43]。工业发展对环境的污染也不可忽视,但结合表 3 结论, RSEI 在 2015 年 之后下降幅度有所减缓,说明格尔木城市发展在改善区域生态环境工作中做出了积极的贡献。

Table 3 Percentage change in RSEI level						
	1990—2001 年	2001—2006年	2006—2015 年	2015—2019 年		
变好 Improved	4.57	12.73	9.54	18.90		
不变 No change	63.29	70.59	76.80	72.39		
变差 Degraded	32.14	16.68	13.66	8.71		

表 3 RSEI 等级变化百分比/%





图 6 RSEI 等级变化轨迹

Fig.6 The change trajectory of RSEI

空间位置上的轨迹代码表示该位置在研究时序内 RSEI 等级的变化轨迹,其中每个数字表示 RSEI 的不同等级代码(1为差,2为较差,3为 中等、4为良、5为优);轨迹编码5位数字从左向右以此表示1990、2001、2006、2015、2019年5个时间节点的生态环境质量

3.3 格尔木市遥感生态指数趋势分析

通过 Sen+Mann-Kendall 趋势分析良好的反映了 1990—2019 年格尔木 RSEI 变化趋势的空间分布特征。 表4统计可知,格尔木生态环境质量以下降为主,占区域总面积的89.73%,上升区域仅占3.24%,稳定不变即 没有发生显著变化的区域为7.03%。

		Table 4 S	tatistics of RSI	EI change from 19	990 to 2019		
Q _{RSEI}	$\mid Z \mid$	变化状况 Changing situation	占比/% Percentage	Q _{RSEI}		变化状况 Changing situation	占比/% Percentage
>0.0005	≥1.96	显著上升	0.29	<-0.0005	<1.96	不显著下降	43.05
>0.0005	<1.96	不显著上升	2.95	<-0.0005	≥1.96	显著下降	46.68
-0.0005 - 0.0005	<1.96	稳定不变	7.03				

表 4	1990—2019 年 RSEI 变化状况统计

 Q_{RSEI} :时间序列数据趋势的变化

根据图 7 变化趋势分布特点选择典型区域,对其变化原因展开讨论。格尔木 RSEI 显著上升区域仅有 0.29%。近年来国家加快柴达木循环经济试验区建设,对格尔木老工业基地进行高新技术改造,促进产业绿 色发展,这一措施减缓了工业发展对地表温度的影响,区域热度指标有所下降。另一方面,三北防护林工程、 退耕还林、防沙治沙等项目的加速发展对土地荒漠化治理已有成效,干度指标下降。在城市内部推进林草间 作治理、建设农田网格防护林等措施在显著提高区域植被覆盖度的同时也降低了土壤蒸散量[4],使绿度与湿 度指标同时上升。因此格尔木市区及乌图美仁乡 RSEI 主要受人类活动的积极影响显著上升。RSEI 不显著 上升区域占 2.95%。玛曲乡位于可可西里自然保护区,根据李睿等^[45]的研究,这一地区气温升高、降水量增 加使气候向暖湿化转变,有利于植被生长,区域绿度指标上升明显。而人类活动,如牧业生产和青藏公路、铁 路修建等,对该地区土地景观也有一定影响,但整体影响较弱,干度指标微弱下降。在气候变化与人类活动的 共同影响下该区域 RSEI 呈不显著上升。大灶火沟位于东昆仑造山成矿带,主要以黑色及有色金属冶炼产业 发展为主,2005年国务院批复建立柴达木地区循环经济试验区[46],促进资源高效、循环利用实现区域可持续 发展,有利于热度指标下降,对 RSEI 有积极影响,使得该区域 RSEI 不显著上升。RSEI 不显著下降区域占 43.05%。唐古拉山镇处于长江源头沱沱河流域,气候暖湿化使得植被覆盖逐步改善,减缓草地退化趋势,但 绿度指标依然在下降。加之该地区土壤保持功能较差,降雨量增加也加剧了这一区域的土壤侵蚀[47],导致干 度指标上升,因此气候变化是唐古拉山镇 RSEI 不显著下降的主要原因。RSEI 显著下降区域占 46.68%。近 年来,察尔汗盐湖工业区发展迅速,并提出了一系列环保措施,但盐田开采面积增大影响植被生长^[48],不可避 免地导致绿度下降。柴达木盆地区域近 30 年降雨量变化不明显,但降水日数略有增加,年平均温度有升高趋 势,导致蒸发量增加,土地沙漠化面积增加,整体干度上升^[49]。在气候与人类活动共同的负面影响下造成了 察尔汗盐湖工业区 RSEI 显著下降。因气候变暖,格拉丹东冰川地区导致冰川消融增加^[50],易引发山洪等地 质灾害,植被受到严重破坏,绿度下降。气候变暖导致次生灾害,使该地区 RSEI 显著下降。



Fig.7 Trends change of RSEI (1990–2019)

4 结论

本研究基于长时间序列遥感影像,构建格尔木市 1990—2019 年遥感生态指数(RSEI)。通过检测突变点

对时间序列数据进行分段研究,结合趋势分析对格尔木生态环境进行时空可视化分析,主要结论包括:

(1)1990—2019年间,各数据的第一主成份(PC1)贡献率平均值达到 73%以上,绿度与湿度指标对生态 环境有积极影响,干度与热度指标有消极影响,与自然环境特征一致,且热度指标对 RSEI 的影响最大,载荷 值关系与 RSEI 均值变化趋势相一致,说明 RSEI 可以综合评价格尔木生态环境质量。30年间格尔木 RSEI 均 值从 0.38 下降至 0.33,表明格尔木生态环境整体有退化趋势。

(2)根据突变检验结果,以1990、2001、2006、2015、2019年为节点对格尔木长时间序列数据分段研究。将 RSEI划分为5个等级,发现格尔木遥感生态指数等级分布以较差为主,占总面积的45%以上,主要分布在柴 达木盆地北部地区。1990—2019年格尔木 RSEI等级未发生变化的区域占61.94%,发生变化的轨迹中以等 级下降为主,其中2001年下降最为明显,而2015年之后下降幅度有所减缓。

(3)受不同程度的气候与人类活动影响,格尔木遥感生态指数变化以下降为主。显著上升区域集中分布 在人类活动密集的格尔木市区及乡镇所在地;不显著上升区域分布于唐古拉山中部玛曲乡及柴达木盆地南部 成矿带;不显著下降区域大面积分布在唐古拉山镇以及柴达木盆地南部地区;显著下降区域主要分布在柴达 木北部盐湖工业区与唐古拉山南部冰川地带。

参考文献(References):

- [1] 于翠英,朝克图.资源型城市生态承载力基本问题探究.生态经济,2013,(6):160-163.
- [2] 彭建,党威雄,刘焱序,宗敏丽,胡晓旭.景观生态风险评价研究进展与展望.地理学报,2015,70(4):664-677.
- [3] Atasoy M. Monitoring the urban green spaces and landscape fragmentation using remote sensing: a case study in Osmaniye, Turkey. Environmental Monitoring and Assessment, 2018, 190(12): 713.
- [4] Jiang F, Zhang Y Q, Li J Y, Sun Z Y. Research on remote sensing ecological environmental assessment method optimized by regional scale. Environmental Science and Pollution Research, 2021. DOI: 10.1007/s11356-021-15262-x.
- [5] 邬亚娟,刘廷玺,童新,罗艳云,段利民,王冠丽.基于长时间序列 landsat 数据的科尔沁沙地土地利用演变分析.生态学报,2020,40 (23):8672-8682.
- [6] 李军, 桑潇, 张成业, 赵伟, 刘新华, 王宏鹏, 王金阳, 李佳瑶, 杨颖. 资源型城市长时间序列土壤含水量变化分析——以锡林浩特市为例. 测绘通报, 2021, (7): 17-22, 38-38.
- [7] Khare S, Drolet G, Sylvain J D, Paré M C, Rossi S. Assessment of spatio-temporal patterns of black spruce bud phenology across Quebec based on MODIS-NDVI time series and field observations. Remote Sensing, 2019, 11(23): 2745.
- [8] 璩路路,刘彦随,周扬,李裕瑞.罗霄山区生态用地时空演变及其生态系统服务功能的响应——以井冈山为例.生态学报,2019,39 (10):3468-3481.
- [9] 夏四友, 赵媛, 许昕, 文琦, 宋永永, 崔盼盼. 1997—2016年中国农业碳排放率的时空动态与驱动因素. 生态学报, 2019, 39(21): 7854-7865.
- [10] 王渊,赵宇豪,吴健生.基于 Google Earth Engine 云计算的城市群生态质量长时序动态监测——以粤港澳大湾区为例.生态学报,2020, 40(23):8461-8473.
- [11] Song C Q, Huang B, You S C. Comparison of three time-series NDVI reconstruction methods based on TIMESAT//International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Munich: IEEE, 2012: 2225-2228.
- [12] Willis K S. Remote sensing change detection for ecological monitoring in United States protected areas. Biological Conservation, 2015, 182: 233-242.
- [13] Ye L P, Fang L C, Shi Z H, Deng L, Tan W F. Spatio-temporal dynamics of soil moisture driven by 'Grain for Green' program on the Loess Plateau, China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 269: 204-214.
- [14] Cai B W, Wang S G, Wang L, Shao Z F. Extraction of urban impervious surface from high-resolution remote sensing imagery based on deep learning. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(9): 1420-1429.
- [15] 宋林林, 袁磊, 郭超. 2005—2017 年快速城市化背景下洱海流域不透水表面时空格局分析. 科学技术与工程, 2019, 19(21): 336-343.
- [16] 王振华,马海州,周笃珺,沙占江. Rs 和 Gis 支持下的自然生态环境评价——以南水北调雅砻江工程区为例. 盐湖研究, 2007, 15(1): 1-4.
- [17] Williams M, Longstaff B, Buchanan C, Llansó R, Dennison W. Development and evaluation of a spatially-explicit index of Chesapeake Bay health.
 Marine Pollution Bulletin, 2009, 59(1/3): 14-25.
- [18] 李洁,黄岩,刘昭贤,欧德品,谭琨.基于高分辨率遥感影像的徐州市区生态环境质量评估.现代测绘,2020,43(1):36-39.
- [19] 汪翡翠, 汪东川, 张利辉, 刘金雅, 胡炳旭, 孙志超, 陈俊合. 京津冀城市群土地利用生态风险的时空变化分析. 生态学报, 2018, 38 (12): 4307-4316.

5932

- [20] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用. 生态学报, 2013, 33(24): 7853-7862.
- [21] Yue H, Liu Y, Li Y, Lu Y. Eco-environmental quality assessment in China's 35 major cities based on remote sensing ecological index. IEEE Access, 2019, 7: 51295-51311.
- [22] 张亚球,姜放,纪梦达,姜海山,王子彦.基于遥感指数的区县级生态环境评价.干旱区研究,2020,37(6):1598-1605.
- [23] Hu X S, Xu H Q. A new remote sensing index for assessing the spatial heterogeneity in urban ecological quality: a case from Fuzhou City, China. Ecological Indicators, 2018, 89: 11-21.
- [24] 桑潇,张成业,李军,朱守杰,邢江河,王金阳,王兴娟,李佳瑶,杨颖.煤炭开采背景下的伊金霍洛旗土地利用变化强度分析.自然资源遥感,2021,33(3):148-155.
- [25] Xiong Y, Xu W H, Lu N, Huang S D, Wu C, Wang L G, Dai F, Kou W L. Assessment of spatial-temporal changes of ecological environment quality based on RSEI and GEE: a case study in Erhai Lake Basin, Yunnan province, China. Ecological Indicators, 2021, 125: 107518.
- [26] 张绪财,金晓媚,朱晓倩,张京.格尔木河流域植被指数时空分布及其影响因素研究.现代地质,2019,33(2):461-468.
- [27] 张京,金晓娟,张绪财,朱晓倩.格尔木河流域土壤湿度时空变化及其影响因素研究.水文地质工程地质,2019,46(2):66-73,91-91.
- [28] 杨显华,孙小飞,黄洁,田立,许鹏.青海木里煤矿区荒漠化的驱动因素及防治对策.中国地质灾害与防治学报,2018,29(1):78-84.
- [29] 张国庆. 格尔木, 因工程而生而兴. 国家电网, 2011, (12): 31-32.
- [30] 陈炜, 黄慧萍, 田亦陈, 杜云艳. 基于 Google Earth Engine 平台的三江源地区生态环境质量动态监测与分析. 地球信息科学学报, 2019, 21(9): 1382-1391.
- [31] Polykretis C, Grillakis M G, Alexakis D D. Exploring the impact of various spectral indices on land cover change detection using change vector analysis: a case study of Crete Island, Greece. Remote Sensing, 2020, 12(2): 319.
- [32] Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. Remote Sensing of Environment, 2004, 90 (4): 434-440.
- [33] 徐涵秋,林中立,潘卫华.单通道算法地表温度反演的若干问题讨论——以 Landsat 系列数据为例. 武汉大学学报:信息科学版, 2015, 40(4):487-492.
- [34] Huang C Q, Wylie B K, Yang L M, Homer C, Zylstra G. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(8); 1741-1748.
- [35] Baig M H A, Zhang L F, Shuai T, Tong Q X. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. Remote Sensing Letters, 2014, 5(5): 423-431.
- [36] 张涵丹, 卫伟, 薛萐. 基于 R/S 分析和 Mann-Kendall 检验的定西市气温降水变化特征. 水土保持研究, 2015, 22(6): 183-189.
- [37] Hu C H, Zhang L, Wu Q, Soomro S E H, Jian S Q. Response of LUCC on runoff generation process in Middle Yellow River Basin: the Gushanchuan Basin. Water, 2020, 12(5): 1237.
- [38] Wang D C, Gong J H, Chen L D, Zhang L H, Song Y Q, Yue Y J. Comparative analysis of land use/cover change trajectories and their driving forces in two small watersheds in the western Loess Plateau of China. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013, 21: 241-252.
- [39] Sun B, Zhou Q M. Expressing the spatio-temporal pattern of farmland change in arid lands using landscape metrics. Journal of Arid Environments, 2016, 124; 118-127.
- [40] 赵维清,李经纬,褚琳,王天巍,李朝霞,蔡崇法.近10年湖北省植被指数时空变化特征及其驱动力.生态学报,2019,39(20): 7722-7736.
- [41] Qureshi S, Alavipanah S K, Konyushkova M, Mijani N, Fathololomi S, Firozjaei M K, Homaee M, Hamzeh S, Kakroodi A A. A remotely sensed assessment of surface ecological change over the gomishan wetland, Iran. Remote Sensing, 2020, 12(18): 2989.
- [42] 王发科, 雷玉红, 曾国云, 都占良, 颜亮东. 格尔木地区气温和降水变化对气候生产潜力的影响. 现代农业科技, 2020, (14): 192-193, 196-196.
- [43] 张瑞江. 青藏高原冰川演变与生态地质环境响应. 中国地质调查, 2016, 3(2): 46-50.
- [44] 姚玉龙,刘普幸,陈丽丽. 基于遥感影像的合肥市热岛效应时空变化特征及成因. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3351-3359.
- [45] 李睿, 朵海瑞, 史林鹭, 周延, 焦盛武, 秋培扎西, 雷光春. 可可西里 1970—2013 年气候变化特征及其对景观格局的影响. 北京林业大学 学报, 2015, 37(12): 59-68.
- [46] 杜文艳, 杜文静. 循环经济地方配套立法研究——以柴达木国家循环经济试验区为例. 理论学刊, 2010, (10): 87-91.
- [47] 蒋冲, 王德旺, 罗上华, 李岱青, 张林波, 高艳妮. 三江源区生态系统状况变化及其成因. 环境科学研究, 2017, 30(1): 10-19.
- [48] 吴双桂, 韩廷芳, 都占良. 近 57 年格尔木市气候变化特征. 青海环境, 2019, 29(2): 72-76.
- [49] 杨显华,徐肖,肖礼晓,田立,郝利娜,许鹏.察尔汗盐湖演变趋势及驱动力分析.国土资源遥感,2020,32(1):130-137.
- [50] 李晨毓, 井哲帆, 何晓波. 1986—2015 年长江源各拉丹冬地区冰川变化遥感监测研究. 冰川冻土, 2021, 43(2): 405-416.