

基于光谱数据的祁连山不同生态区植被覆盖时空变化特征

潘冬荣^{1,2}, 韩天虎², 闫浩文^{1*}

1. 兰州交通大学测绘与地理信息学院, 甘肃 兰州 730070

2. 甘肃省草原技术推广总站, 甘肃 兰州 730010

摘要 时序光谱遥感植被指数是公认的监测植被覆盖变化的有效指标, 在大范围植被覆盖动态变化监测中发挥着重要作用。祁连山地处中国西部甘肃和青海两省交界处, 地理位置特殊, 对维持中国西部生态安全具有重要作用。随着全球气候变化, 祁连山区的气候也出现了不同程度的变化, 并且近些年来国家在祁连山实施了多项生态环境保护工程措施。针对祁连山不同生态区植被覆盖变化现状及未来趋势研究的不足, 基于1 km分辨率的SPOT-VGT-NDVI光谱数据, 运用数理统计法、空间叠置法分析了祁连山不同生态区植被覆盖时空格局、植被稳定性和未来演化趋势, 探寻出敏感区域, 为区域生态安全、生态工程建设提供理论基础, 进而为林草部门制定祁连山保护规划和植被恢复措施提供科学依据。研究结果表明: 1998年—2018年间祁连山植被NDVI呈波动上升趋势, 增速为 $0.32\% \cdot a^{-1}$; 柴达木盆地荒漠生态区和帕米尔—昆仑山—阿尔金山高寒荒漠草原生态区NDVI变化率较小, 仅为 $0.14\% \cdot a^{-1}$ 和 $0.27\% \cdot a^{-1}$, 而内蒙古高原中部草原化荒漠生态区和江河源区-甘南高寒草甸草原生态区的变化率较大, 分别为 $0.54\% \cdot a^{-1}$ 和 $0.57\% \cdot a^{-1}$ 。空间上, 祁连山植被NDVI呈现东南区域高, 西北区域低, 整体改善, 局部恶化的趋势, 恶化区域和改善区域面积分别占祁连山总面积的28.37%和40.76%; 分析发现祁连山植被较为稳定, 较高波动和高波动变化区域面积合计为 $0.22 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占1.20%; 未来呈良性发展趋势和恶性发展趋势的面积分别占祁连山总面积的42.82%和26.40%, 其中持续性恶化的面积占25.56%。祁连山-植被恶化区域主要为高海拔雪线附近的高寒草原和高寒荒漠、中东部城镇周围地区和河湖周围的植被脆弱区域, 国家应将此区域作为以后治理的重点区。

关键词 光谱数据; 植被覆盖; 时空变化; NDVI; 祁连山

中图分类号: P237

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)04-1192-07

引言

植被是陆地生态系统的主体, 对环境因子变化敏感, 其空间分布和生长变化状态是对相应地区各环境要素长期适应的结果, 在全球变化与陆地生态系统的研究中充当着“指示器”的作用^[1]。植被覆盖变化过程既反映了生态系统自身的变化, 又反映了自然因素和人类活动对生态系统的作用过程。区域植被覆盖变化监测是全球变化研究的热点内容, 对全球气候变化应对和环境保护政策制定具有重要意义^[2]。植被覆盖变化容易受到气候和人类活动的共同影响, 多年来, 由于人类不合理的开发利用, 陆地生态系统遭到了极大的破坏, 严重阻碍了社会、经济的可持续发展, 威胁着人类的生

存与发展。

祁连山是中国东部季风湿润区、西北内陆干旱区和青藏高原高寒区的交汇处, 其生态极度脆弱, 植被覆盖对气候及环境变化敏感, 极易受到气候变化和人类活动的影响^[3]。祁连山区植被稳定性的维持对中国西部生态安全具有至关重要的作用, 是国家“一带一路”规划顺利实施的重要保障。近年来, 受气候变化和人类活动的双重影响, 祁连山区的生态环境发生了极大的变化^[4], 引起了学者和政府部门的广泛关注。自1998年开始, 中国分批次启动了天然林资源保护、退牧还草、退耕还林和生态恶化土地治理等22个生态保护工程项目^[5], 祁连山是这些工程的重点区域。2016年中央环保督察组对甘肃省开展环境保护督察工作, 认为祁连山生态环境问题严重。之后, 甘青两省各部门在祁连山区开展了前所未有

收稿日期: 2021-08-13, 修订日期: 2021-10-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41930101), 甘肃农业财政项目(201647)资助

作者简介: 潘冬荣, 1989年生, 兰州交通大学博士研究生, 甘肃省草原技术推广总站高级畜牧师

e-mail: pandongrong@yeah.net

* 通讯作者 e-mail: yanhw@mail.lzjtu.cn

的生态恢复工程。

目前常用的遥感光谱 NDVI 主要有 GIMMS-NDVI, SPOT-VGT-NDVI 和 MODIS-NDVI^[6], Chen 利用 MODIS 和 NOAA 等遥感数据源研究了 2000 年—2017 年全球植被覆盖变化情况,发现在过去 18 年全球植被覆盖呈增加趋势,其中,中国和印度的贡献率最大。Fang 等利用 GIMMS 研究了中国植被变化趋势,认为中国植被活动在增强,西部地区植被增加尤其显著。金凯等利用 GIMMS-NDVI3g 数据对中国区域 1982 年—2015 年植被覆盖变化进行了研究,发现中国植被恢复明显,并且在中国接近 70% 的区域人类活动对植被变化的影响大于气候因素。王志伟等利用 GIMMS-NDVI 和 MODIS-NDVI 数据对青藏高原植被生长趋势进行了分析,发现青藏高原区植被显著增加,气温是影响植被增加的主要因素^[7]。赵舒怡研究发现华北不同生态区植被覆盖度变化速率有所不同。有学者研究发现祁连山中西部植被覆盖呈增加趋势、东部植被覆盖呈减小趋势,荒漠呈萎缩趋势而草地呈增加趋势。可见,植被覆盖变化因类型和所处的生态区有所不同,但现有的研究并未关注祁连山生态保护工程实施后不同生态区植被覆盖变化速率和未来趋势,为此,本研究利用 SPOT-VGT-NDVI 光谱数据分析了生态工程实施后祁连山不同生态区植被 NDVI 时空特征和动态变化规律,探寻植被覆盖变化的敏感区域,为区域生态安全、生态工程建设提供理论基础和技术支持,进而为林草部门制定祁连山保护规划和植被恢复提供科学依据。

1 实验部分

1.1 研究区域概况

祁连山位于亚欧大陆中部,是青藏高原东北部最大的边缘山系,东起乌鞘岭,西至当金山口,北邻河西走廊,南接柴达木盆地,东西长约 850 km,南北宽约 250~400 km;地势由西北向东南降低,由多条西北—东南走向的平行山脉和谷地组成,海拔在 2 100~4 500 m 之间,最高峰团结峰高达 5 826.8 m;水热条件差异大,年均温 0.6 °C,年降水 400~700 mm,自东向西呈增加趋势。河流以冰川融水和山区降水补给为主,主要有党河、北大河、大通河、湟水和河西走廊三

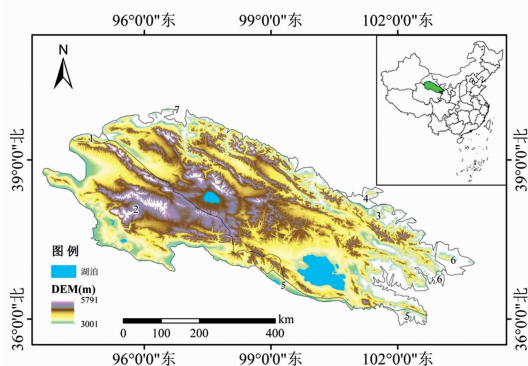


图 1 祁连山生态区划分

Fig. 1 The ecological regionalization of Qilian Mountains

的大内陆河:黑河、石羊河、疏勒河等;祁连山独特的地理环境和气候条件使得区内分布有乔木、灌木、草本等各种植被^[3]。根据生态系统类型和地理特征的差异,按照中国生态区的分类标准,可将祁连山划分为 7 个生态区(图 1),各生态区编号、面积及所占比例见表 1。

表 1 祁连山不同生态区面积及比例

Table 1 Area and proportion of different ecological zones in Qilian Mountains

生态区编号	生态区名称	面积 /km ²	所占比例 /%
1	帕米尔—昆仑山—阿尔金山高寒荒漠草原生态区	10.10	0.54
2	柴达木盆地荒漠生态区	530.70	28.18
3	祁连山森林与高寒草原生态区	1 256.42	66.71
4	内蒙古高原中部草原化荒漠生态区	17.35	0.92
5	江源区—甘南高寒草甸草原生态区	33.39	1.77
6	内蒙古高原中部—陇中荒漠草原生态区	35.34	1.88
7	内蒙古高原西部—北山山地荒漠生态区	0.002 5	/

1.2 光谱数据来源及预处理

考虑到生态工程对植被覆盖变化的影响,选择了与祁连山生态工程实施起始年份同期的 1998 年以来的基于连续时间序列的 SPOT-VGT-NDVI 卫星光谱遥感数据集作为数据源,数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>),通过几何校正和大气校正控制数据质量,然后对数据进行拼接、投影和裁剪等处理。数据空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 1 d,采用最大合成法排除云、大气等干扰,生成 1998 年—2018 年月度、年度植被指数。

1.3 方法

1.3.1 均值法

利用年最大合成值 NDVI_{max} 进行趋势分析制作 NDVI 年际变化图。将每月最大合成值 NDVI_{max} 数据按不同月份进行分类,求取平均值,制作 NDVI 月际变化图,分析 NDVI 随时间变化的特征。

1.3.2 趋势分析法

使用一元线性趋势线模型,逐像元拟合植被 NDVI_{max} 年际变化趋势,反演近 21 年祁连山区植被时空变化格局,植被 NDVI 年际变化趋势计算公式如式(1)

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \sum_{k=1}^n k \times \text{NDVI}_{\text{max}k} - \sum_{k=1}^n k \sum_{k=1}^n \text{NDVI}_{\text{max}k}}{n \sum_{k=1}^n k^2 - \left(\sum_{k=1}^n k \right)^2} \quad (1)$$

式(1)中: n 为监测年数; k 为年序列数; $\text{NDVI}_{\text{max}k}$ 为第 k 年的最大值; θ_{slope} 为变化斜率。

按照自然断点法^[8]将 NDVI 变化趋势在 ArcGIS 平台上进行重分类为 5 个等级,定义为:明显恶化,轻微恶化,基本不变,轻微改善,明显改善。

1.3.3 变异系数法

变异系数是标准差与平均数的比值, 表征观测值的变异程度。用变异系数表征每个像元 NDVI 值的时序变化情况。变异系数越大, 表明时序越不稳定; 反之, 则表明时序较为稳定。变异系数的计算公式如式(2)

$$C_v = \frac{\sigma}{\overline{\text{NDVI}}} \quad (2)$$

式(2)中: C_v 为变异系数; σ 为 NDVI 时间序列数据标准差; $\overline{\text{NDVI}}$ 为像元在 1998 年—2018 年间 NDVI 的平均值。

按照自然断点法^[8]将植被覆盖变异系数在 ArcGIS 平台上重分类为 5 类, 定义为: 低波动区域, 较低波动区域, 中波动区域, 较高波动区域和高波动区域。

1.3.4 叠置分析法

持续性分析—Hurst 指数法: 定义 NDVI 时间序列为 $\text{NDVI}_{(t)}$, 其中 $t=1, 2, \dots, n$, 对于任意正整数 $\tau \geq 1$, 该时间序列的均值序列为

$$\overline{\text{NDVI}}_{(\tau)} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} \text{NDVI}_{(i)} \quad (\tau = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

累积离差序列为

$$X_{(t,\tau)} = \sum_{i=1}^{\tau} (\text{NDVI}_{(i)} - \overline{\text{NDVI}}_{(\tau)}) \quad (4)$$

极差序列为

$$R(\tau) = \max X_{(t,\tau)} - \min X_{(t,\tau)} \quad (5)$$

$(1 \leq t \leq \tau; = 1, 2, \dots, n)$

标准差序列为

$$S_{(\tau)} = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (\text{NDVI}_{(i)} - \overline{\text{NDVI}}_{(\tau)})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$(\tau = 1, 2, \dots, n)$

计算 Hurst 指数为

$$\frac{R_{(\tau)}}{S_{(\tau)}} = (C\tau)^H \quad (7)$$

式(7)中: H 为 Hurst 指数; C 为比例参数。

对式(7)两边取对数, 在双对数坐标系 $(\ln \frac{R_{(\tau)}}{S_{(\tau)}}, \ln \tau)$ 中, 应用最小二乘法拟合得出的斜率即为 Hurst 指数。 $H=0.5$, 表示未来变化趋势与过去无相关性; $0 < H < 0.5$, 表示未来变化趋势与过去相反, 即反持续性, H 越小, 反持续性越强; $0.5 < H < 1$, 表示未来变化趋势与过去相同, 即持续性, H 越大, 持续性越强。

空间叠置分析法: 将 NDVI 空间变化趋势和持续性在 ArcGIS 平台上进行空间叠加, 将耦合的结果分为 8 类, 定义为: 反持续轻微恶化、反持续明显改善、反持续明显恶化、反持续轻微改善、持续明显恶化、持续轻微恶化、持续明显改善、持续轻微改善^[8]。

2 结果与讨论

2.1 时间变化特征

祁连山植被 NDVI 月均值变化如图 2 所示, 波峰出现在 7 月—8 月, 5 月—10 月的 NDVI 值分别为 0.16, 0.28, 0.37, 0.38, 0.30 和 0.20。NDVI 月最大值变化趋势与月均

值变化趋势相同。

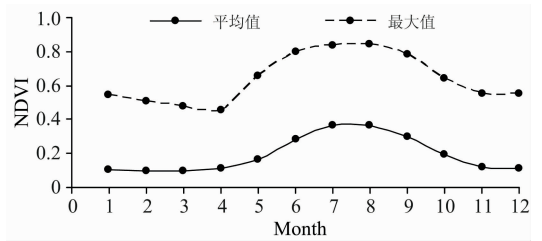


图 2 祁连山植被 NDVI 月变化

Fig. 2 Monthly variations of NDVI in the Qilian Mountains

祁连山 1998 年—2018 年均植被 NDVI 总体呈波动上升趋势, NDVI 值在 0.34~0.43 之间波动, 增速为 $0.32\% \cdot a^{-1}$ (图 3), 主要是近年来祁连山区降水量增加和 1998 年以来相关部门采取的退耕还林还草、天然林保护工程、草原减畜等保护工程措施^[5]综合作用的结果。

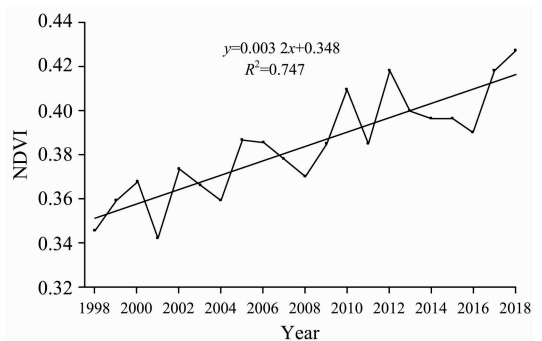


图 3 祁连山 1998 年—2018 年植被 NDVI 年变化趋势

Fig. 3 Annual variations trend of NDVI in the Qilian Mountains from 1998 to 2018

对祁连山不同生态区植被 NDVI 变化趋势进行统计发现: 柴达木盆地荒漠生态区和帕米尔—昆仑山—阿尔金山高寒荒漠草原生态区 NDVI 变化率较小, 仅为 $0.14\% \cdot a^{-1}$ 和 $0.27\% \cdot a^{-1}$, 而内蒙古高原中部草原化荒漠生态区和江河源区-甘南高寒草甸草原生态区的变化率较大, 分别为 $0.54\% \cdot a^{-1}$ 和 $0.57\% \cdot a^{-1}$ (表 2)。主要是因为荒漠生态区是在极度缺水的干旱区域形成的, 高寒荒漠草原生态区是温性荒漠向温性草原的过渡区, 分布的植物种主要为耐旱的小灌木和半灌木, 其对气候变化和人类保护措施响应不及草本植物, 因此, 其 NDVI 变化率较小。草原化荒漠生态区是温性草原向温性荒漠的过度地带, 在气候和保护措施适当的条件下可能发育为温性草原, 其中分布的针茅、长芒草等对水热条件响应敏感, 近年来降水量的增加使得草原化荒漠生态区植被覆盖变化率较大, 江河源区-甘南高寒草甸草原生态区植被 NDVI 变化率较大的原因主要为近年来实施的退牧还草、草原补奖等政策的实施减轻了放牧压力, 使得恶化草原发生正向演替, 植被覆盖度和生物量增加。

将 NDVI 等间距分为 5 个区间, 分别统计各 NDVI 区所占的面积比例 (图 4), 发现 21 年间高值区 ($0.8 \leq \text{NDVI} <$

1.0)所占面积比例增加(增速为 $54.4\% \cdot a^{-1}$), 低值区($0 < NDVI < 0.2$)所占面积比例减小(增速为 $-51.1\% \cdot a^{-1}$), 中值区($0.2 < NDVI < 0.8$)所占比例基本没有变化。这主要是因为祁连山西北部低植被覆盖区(红色覆盖区)从 1998 年的

表 2 祁连山不同生态区植被 NDVI 变化率
Table 2 Rates of NDVI variations in different regions in the Qilian Mountains

区域	变化率/(%·a ⁻¹)	区域	变化率/(%·a ⁻¹)
1	0.27	5	0.57
2	0.14	6	0.38
3	0.37	7	/
4	0.54		

43.18%降至 2018 年的 28.97%, 东南部高植被覆盖区(绿色覆盖区)从 0.12%增加至 12.31%, NDVI 在 0.2—0.8 的区域整体西移(图 5)。

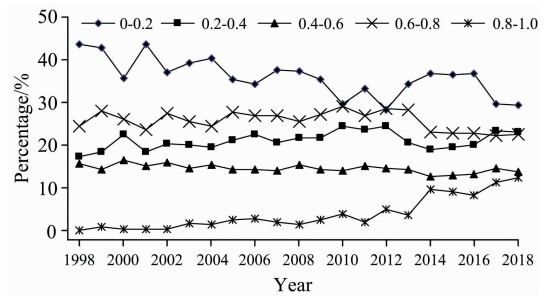


图 4 不同区间 NDVI 变化趋势

Fig. 4 Variation trends of NDVI in the Qilian Mountains

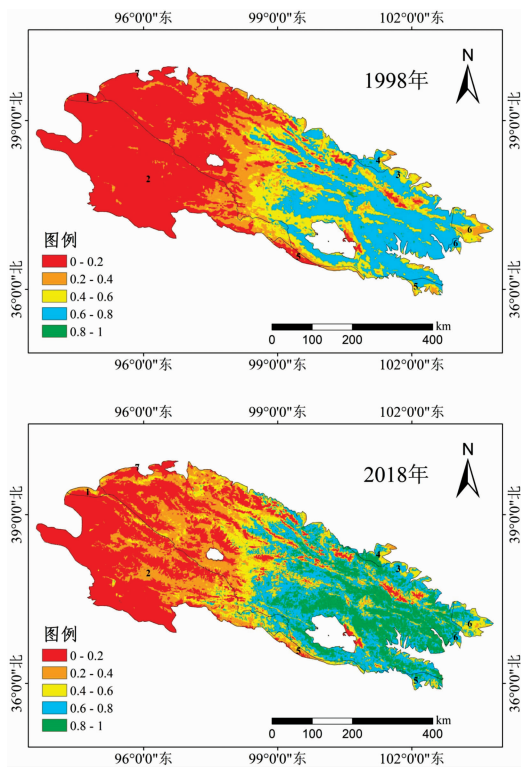
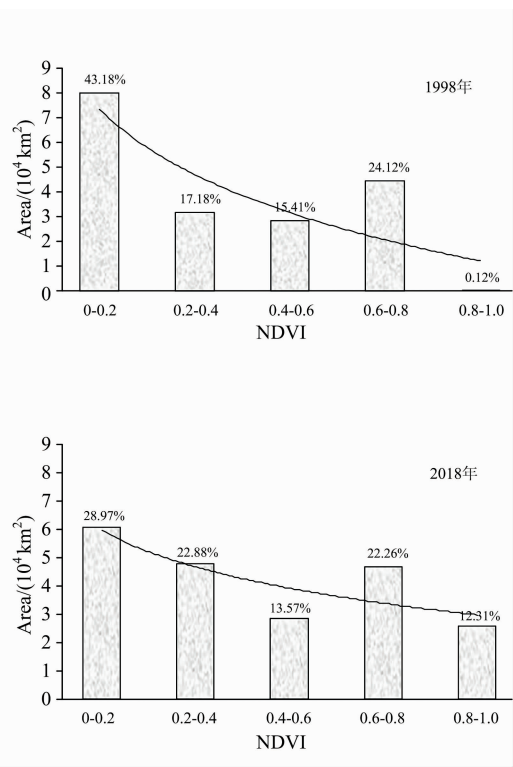


图 5 不同区间 NDVI 空间分布及所占比例

Fig. 5 Spatial distribution of NDVI



2.2 空间分布特征

逐像元统计 21 年间 NDVI 均值并绘制分布图(图 6)。总体来看祁连山植被 NDVI 偏低, 从东南向西北逐渐减小, 这主要是因为祁连山东部受海洋季风的影响, 中西部受西风影响, 水汽来源的不同导致祁连山降水量自东向西呈递减趋势, 造成植被覆盖东多西少。东部地区主要植被类型为森林、高寒草甸和典型草原; 中部地区主要植被类型为高寒草原和典型草原; 西部地区主要植被类型为荒漠草原^[9]。NDVI < 0.4 的面积占祁连山总面积的 56.34%, 主要分布在柴达木盆地荒漠生态区、帕米尔—昆仑山—阿尔金山高寒荒漠草原生态区的中西部、祁连山森林与高寒草原生态区以及江河源区-甘南高寒草甸草原生态区的西北部。其中, $0 < NDVI$

< 0.2 的面积为 $3.75 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占总面积的 35.76%, $0.2 \leq NDVI < 0.4$ 的面积为 $6.52 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占总面积的 20.59%。NDVI > 0.4 的面积占祁连山总面积的 43.66%, 主要分布在祁连山森林与高寒草原生态区、江河源区-甘南高寒草甸草原生态区的东南部、内蒙古高原中部草原化荒漠生态区以及内蒙古高原中部-陇中荒漠草原生态区。其中, $0.4 \leq NDVI < 0.6$ 的面积为 $2.63 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占总面积的 14.40%。 $0.6 \leq NDVI < 0.8$ 的面积为 $5.00 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占总面积的 27.40%。 $0.8 \leq NDVI < 1.0$ 的面积为 $0.34 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占总面积的 1.85%。

2.3 空间变化特征

祁连山植被 NDVI 变化斜率介于 $-0.035 \sim 0.045$ 之间,

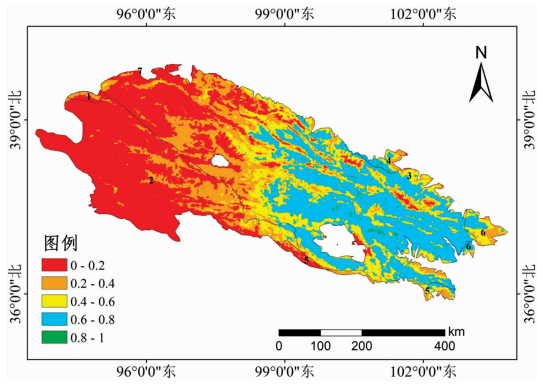


图 6 祁连山 NDVI 空间分布图

Fig. 6 Spatial distribution of NDVI in the Qilian Mountains

变化趋势分布图显示, 40.76%区域的植被呈改善(包括轻微改善和明显改善)趋势, 零散分布于除柴达木盆地荒漠生态区的各生态区(图 7)。这与桂娟^[9]等的研究结果一致, 主要原因可能为气候的暖湿化及人类的保护措施。28.37%区域的植被呈恶化(包括轻微退化和明显退化)趋势, 集中分布于柴达木盆地荒漠生态区西北部区域。零散分布的恶化区域可分为 3 部分, 分别为高海拔雪线附近的高寒草原和高寒荒漠、城镇周围以及河湖周围。水热条件的精确耦合以及人类的合理利用有助于植被恢复^[10], 雪线附近恶化可能是水热条件恶劣和野生动物增多综合作用的结果^[5], 城镇周围恶化是由于城镇经济的发展, 占用了部分林地、草地, 植被 NDVI 表现出恶化趋势^[11]。青海湖、哈拉湖和其他河岸、湖岸周围植被呈恶化趋势主要是因为 2004 年以来的降水量增加以及高温导致的高山积雪消融和冰川消融使得水位上升^[12], 湖岸线上升 5.52 km 淹没周围草地导致 NDVI 出现大幅下降^[13]。

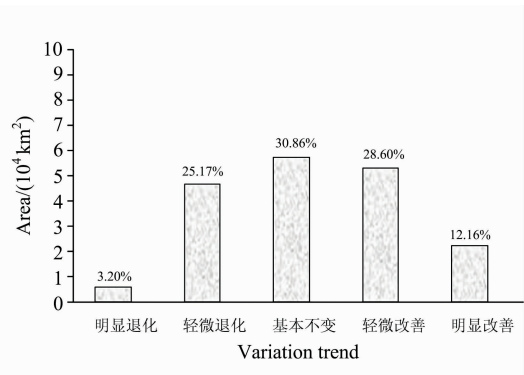
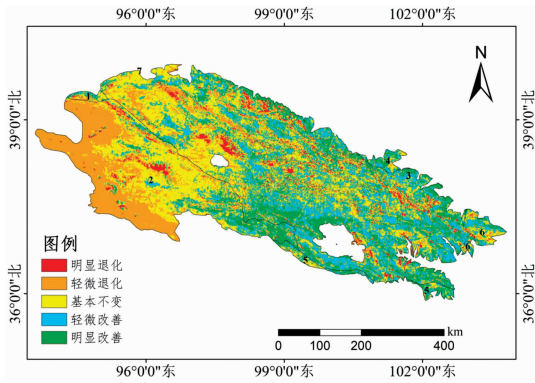


图 7 祁连山 1998 年—2018 年 NDVI 变化趋势空间分布及所占比例

Fig. 7 Spatial distribution trends of NDVI in the Qilian Mountains from 1998 to 2018

祁连山植被 NDVI 变异系数介于 0.018~3.98 之间, 总体表现为东南区域变化较小, 西北区域较大, 各生态区内没有明显的规律性(图 8)。统计发现, 低波动区域和较低波动区域主要分布在祁连山东部, 占祁连山总面积的 91.11%, 这些区域的植被类型为森林、高寒草甸、山地草甸、温性草原等, 植被结构稳定, 受到气候和人类活动影响较小, 因此波动较小。较高波动和高波动变化区域零散分布于祁连山西

部区域, 占 1.21%。结合 DEM 数据发现, 高波动区域是海拔为 4 500 m 以上的常年积雪区域周围的高寒荒漠和高寒草原区, 这些区域正是植被脆弱区, 也是植被恶化区域, 极易受到自然和人为因素的影响, 近年来国家虽然在祁连山区域实施了诸多的生态工程计划, 但这些区域海拔较高, 交通不便, 人类的围栏、补播等保护性措施较少^[5], 生态保护引起的野生动物增多是导致区域植被恶化的重要原因^[14], 此外,

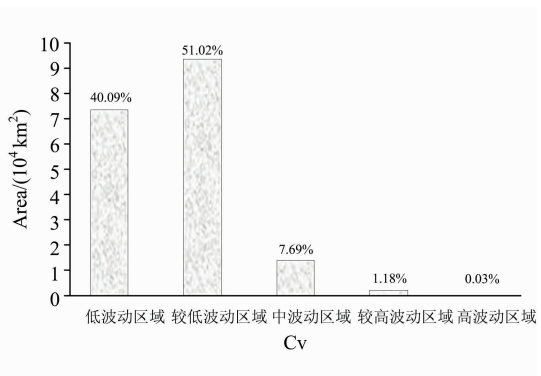
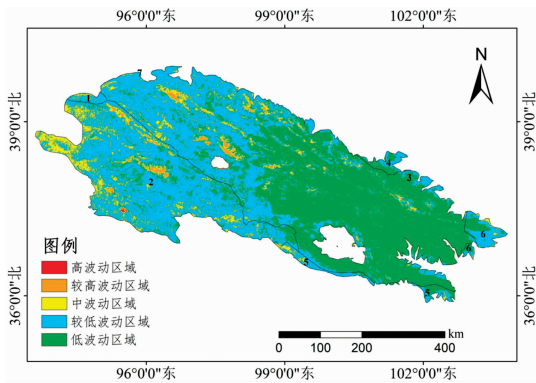


图 8 祁连山 1998 年—2018 年 NDVI 变异系数空间分布及所占比例

Fig. 8 Spatial distribution variation coefficients of NDVI in Qilian Mountains from 1998 to 2018

增温诱发的干旱也是引起高寒荒漠和高寒草原恶化的重要原因。针对此区域，国家应该实施严格的政策性禁牧制度，以达到植被恢复的目的。

2.4 未来演化趋势

基于 Hurst 指数值域，对祁连山 1998 年—2018 年 NDVI 变化的可持续性进行分析，并与植被覆盖变化趋势进行叠加分析(图 9)，发现植被覆盖反持续性变化的面积为 $1.31 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占祁连山总面积的 7.12%；大部分区域的植被覆盖变化趋势与过去相同，面积为 $16.02 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占祁连山总面积的 92.88%。

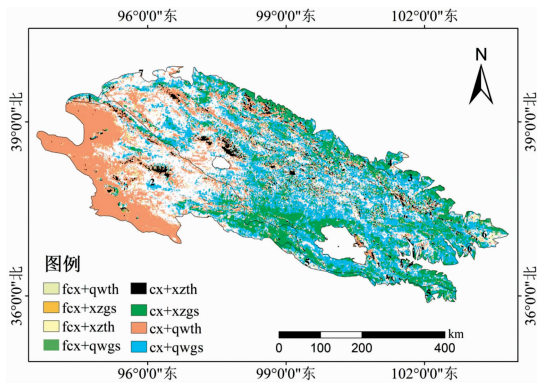


图 9 祁连山 NDVI 未来演化趋势空间分布

Fig. 9 Spatial distribution future evolution trends of NDVI in the Qilian Mountains

图例字母表示意义如下：

fcx+qwth：反持续轻微恶化；fcx+xzgs：反持续明显改善；fcx+xzth：反持续明显恶化；fcx+qwgs：反持续轻微改善；cx+xzth：持续明显恶化；cx+qwth：持续轻微恶化；cx+xzgs：持续明显改善；cx+qwgs：持续轻微改善。

对演化趋势进行统计分析(表 3)，发现未来植被覆盖呈良性发展趋势和恶性发展趋势的面积分别占祁连山总面积的 42.83%和 26.40%，其中持续性恶化的面积占 25.56%。

References

[1] ZHANG Min, CAO Chun-xiang, CHEN Wei(张敏, 曹春香, 陈伟). Scientia Silvae Sinicae(林业科学), 2019, 55(10): 27.
 [2] Tietjen B, Schlaepfer D R, Bradford J B, et al. Global Change Biology, 2017, 23(7): 2743.
 [3] ZHANG Fu-guang, ZENG Biao, YANG Tai-bao(张富广, 曾彪, 杨太保). Chinese Journal of Plant Ecology(植物生态学报), 2019, 43(4): 305.
 [4] QIN Lin, SONG Xiao-yu, FENG Xiang-hua(覃琳, 宋孝玉, 冯湘华). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2019, 35(11): 256.
 [5] TANG Jian, CAO Hui-qun, CHEN Jin(唐见, 曹慧群, 陈进). Acta Geographica Sinica(地理学报), 2019, 74(1): 76.
 [6] Zhang Yuan, Zhu Zaichun, Liu Zhuo, et al. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 224: 1.
 [7] WANG Zhi-wei, WU Xiao-dong, YUE Guang-xin, et al(王志伟, 吴晓冬, 岳广信, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(2): 471.
 [8] LI Jie, ZHANG Jun, LIU Chen-li, et al(李杰, 张军, 刘陈立, 等). Scientia Silvae Sinicae(林业科学), 2019, 55(8): 9.
 [9] GUI Juan, WANG Xu-feng, LI Zong-xing, et al(桂娟, 王旭峰, 李宗省, 等). Journal of Glaciology and Geocryology(冰川冻土), 2019, 41(5): 1.
 [10] PENG Wen-fu, ZHANG Dong-mei, LUO Yan-mei, et al(彭文甫, 张冬梅, 罗艳玫, 等). Acta Geographica Sinica(地理学报), 2019, 74(9): 1759.

表 3 祁连山 NDVI 演化趋势特征

Table 3 Evolution trend characteristics of NDVI in the Qilian Mountains

发展方向	演化趋势	面积 $\times 10^4 \text{ km}^2$	所占 比例/%
良性方向	持续性-轻微改善	5.10	27.83
	持续性-明显改善	2.26	12.35
	反持续性-明显恶化	0.01	0.04
	反持续性-轻微恶化	0.48	2.61
恶性方向	持续性-明显恶化	0.56	3.06
	持续性-轻微恶化	4.12	22.50
	反持续性-轻微改善	0.14	0.75
基本不变	反持续性-明显改善	0.02	0.09
	基本不变	5.64	30.77

3 结论

基于时序光谱遥感指数数据 SPOT-VGT-NDVI，分析了祁连山 1998 年—2018 年不同生态区植被覆盖时空变化特征，得出如下结论：

(1)祁连山植被 NDVI 变化呈波动上升趋势，平均增速为 $0.32\% \cdot \text{a}^{-1}$ 。

(2)祁连山不同生态区植被覆盖增速的不同是由植被类型对水热条件和保护措施响应的敏感性差异导致。

(3)祁连山植被呈整体改善，局部恶化趋势，恶化区域为雪线附近、城镇周围和湖岸周围，雪线附近恶化是由水热条件恶劣和野生动物增多所致，城镇周围恶化由城镇发展所致，湖岸周围恶化由湖岸线上升淹没周围草地所致。

(4)祁连山植被波动率较小，未来呈良性发展趋势和恶性发展趋势的面积分别占祁连山总面积的 42.83%和 26.40%，持续性恶化的面积占 25.56%，该区域应设定为未来保护的重点区域。

- [11] Jin Kai, Wang Fei, Li Pengfei. Sustainability, 2018, 10(1): 270.
- [12] FANG Jian-mei, MA Guo-qing, YU Xin-xiao, et al(方健梅, 马国清, 余新晓, 等). Journal of Soil and Water Conservation(水土保持学报), 2020, 34(3): 105.
- [13] QI Miao-miao, YAO Xiao-jun, LIU Shi-yin, et al(祁苗苗, 姚晓军, 刘时银, 等). Journal of Lake Sciences(湖泊科学), 2020, 32(2): 573.
- [14] ZHANG Yi-li, LI Lan-hui, DING Min-jun, et al(张懿锂, 李兰晖, 丁明军, 等). Chinese Journal of Nature(自然杂志), 2017, 39(3): 173.

Spatiotemporal Dynamics of Vegetation Coverage in Different Ecological Areas of the Qilian Mountains Based on Spectral Data

PAN Dong-rong^{1,2}, HAN Tian-hu², YAN Hao-wen^{1*}

1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

2. Gansu Grassland Technical Extension Station, Lanzhou 730010, China

Abstract Time series spectral remote sensing vegetation index is considered an effective index for monitoring vegetation coverage change and plays an important role in monitoring the dynamic change of vegetation coverage in a large area. Qilian Mountains, located at the junction of Gansu and Qinghai provinces, play an important role in maintaining ecological security in western China. In recent years, affected by global climate change, the climate in Qilian Mountains has changed to different degrees, and the state has implemented a series of environmental protection projects in the Qilian Mountains. Given the lack of research on the status and future trends of vegetation coverage in different ecological regions of Qilian Mountains, this research based on SPOT-VGT-NDVI spectral data with a resolution of 1km, used mathematical statistics and spatial superposition method to analyze the spatial and temporal patterns, vegetation stability and future evolution trend of vegetation coverage in different ecological regions of Qilian Mountains, and explored sensitive areas. It provides a theoretical basis for regional ecological security and ecological engineering construction, and further provides a scientific basis for forest and grassland departments to formulate Qilian Mountain protection planning and vegetation restoration measures. The results show that: From 1998 to 2018, vegetation NDVI in Qilian Mountains showed a fluctuating upward trend, with an increased rate of $0.32\% \cdot a^{-1}$. The NDVI variation rates in the desert ecological area of Qaidam Basin and the Alpine desert steppe ecological area of the Palmier-Kunlun Mountain and the Altun Mountains were relatively low, only $0.14\% \cdot a^{-1}$ and $0.27\% \cdot a^{-1}$, while the variation rates in the steppe desert ecological area of the central Inner Mongolia Plateau and the river source area of the Gannan alpine meadow steppe were relatively large, respectively $0.54\% \cdot a^{-1}$ and $0.57\% \cdot a^{-1}$. Spatially, the vegetation NDVI of the Qilian Mountains is high in the southeast and low in the northwest, with overall improvement and partial degradation. The areas of degraded and improved areas accounted for 28.37% and 40.76% of the total area of the Qilian Mountains, respectively. The vegetation in the Qilian Mountains is relatively stable. The areas with relatively high fluctuations and high fluctuations total $0.22 \times 10^4 \text{ km}^2$, accounting for 1.20%. In the future, areas with a benign development trend and a malignant development trend account for 42.82% and 26.40% of the total area of the Qilian Mountains, of which the area with continuous degradation accounts for 25.56%. The degraded areas mainly include the alpine steppe and alpine desert near the high altitude snow line and the fragile vegetation areas around the towns, rivers and lakes. The country should take this area as the key area of vegetation restoration.

Keywords Spectral data; Vegetation coverage; Spatiotemporal variation; NDVI; The Qilian Mountains

(Received Aug. 13, 2021; accepted Oct. 28, 2021)

* Corresponding author