

引用格式:Gao Xiaolong, Yan Haowen, Wang Guigang, *et al.* Approach to Remote Sensing Assessment of Ecological Changes of Land Creation in Lanzhou City[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(4): 1012-1020. [高小龙, 闫浩文, 王桂钢, 等. 兰州市削山造地区域生态变化遥感评价方法[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(4): 1012-1020.]
DOI:10.11873/j.issn.1004-0323.2022.4.1012

兰州市削山造地区域生态变化遥感评价方法

高小龙^{1,2,3,4}, 闫浩文^{1,2,3}, 王桂钢^{1,2,3}, 白建荣⁴

(1. 兰州交通大学测绘与地理信息学院, 甘肃 兰州 730070;
2. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心, 甘肃 兰州 730070;
3. 甘肃省地理国情监测工程实验室, 甘肃 兰州 730070;
4. 甘肃省地图院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:针对现有方法无法准确提取削山造地范围以及定量评价削山造地区域生态变化问题, 由此提出了基于三维地形变化的削山造地范围提取方法; 同时, 基于1991、2001、2009和2016年遥感影像, 以绿度、湿度、热度和干度指标构建遥感生态指数(Remote Sensing Ecological Index, RSEI), 对比分析4个时期生态质量时空变化。结果表明: RSEI不仅能够定量反映生态环境质量, 而且可以空间化可视化。1991—2016年, 兰州市周边削山造地工程面积不断增加, RSEI值由1991年的0.297上升至2016年的0.406, 兰州市生态环境质量整体呈上升趋势, 但是具有明显的空间差异。生态变差区域集中在兰州主城区北部山区、兰州新区东南部的削山造地工程范围, 削山造地工程致使建筑用地和裸土地激增, 植被覆盖度降低, 表明削山造地工程对区域生态环境质量有一定影响, 因此应该控制削山造地工程规模, 加强保护生态脆弱区域环境。

关键词:遥感生态指数; 削山造地; 地表覆盖

中图分类号:P237 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2022)04-1012-09

1 引言

随着城市扩张步伐加快, 兰州市对建设用地的需求越来越迫切, 而兰州市地处黄河河谷地带, 东西狭长而南北狭窄, 受制于地形限制, 兰州市只能将扩展空间的目光投向南北两山。20世纪90年代, 兰州市政府在九州地区通过削山造地工程将未利用的荒山改造为城市建设用地, 2012年国土资源部同意兰州市实施低丘缓坡沟壑等未利用地综合开发项目, 自此兰州市削山造地工程规模明显变大。削山造地工程多处于黄土高原沟壑区, 生态环境脆弱, 实施削山造地工程对地表覆盖和生态环境产生较大影响。目前国内外在削山造地区域还未进行

过基于遥感生态指数的生态环境质量评价, Li等^[1]在《NATURE》上发文, 号召专家和学者对削山造地工程引发的环境、生态和经济问题开展科学研究工作。当前生态文明建设在城市发展中成为“新常态”, 因此有必要利用遥感技术对兰州周边地区生态环境质量进行评价, 为西北干旱半干旱区大规模开发建设与生态保护提供一定参考。

2015年, 国家环境保护部对2006年发布的《生态环境状况评价技术规范》(Ecological Index, EI)进行了修订, 该规范主要基于土地分类数据评价生态环境状况^[2]。王宏伟等^[3]探讨了该规范在干旱区的适用性, 评价了伊犁河流域的生态质量; 王鹏等^[4]参

收稿日期: 2021-01-24; 修订日期: 2022-06-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0504203), 甘肃省自然资源科技项目资助。

作者简介: 高小龙(1989—), 男, 甘肃通渭人, 高级工程师, 主要从事遥感应用研究。E-mail: 381940392@qq.com

通讯作者: 闫浩文(1977—), 男, 甘肃民勤人, 教授, 主要从事地图自动综合和空间方向关系研究。E-mail: 58391794@qq.com

考规范基于时序分析法评价了汾河流域生态质量。分析发现该规范中作为指标数据的土地分类数据收集困难,指标无法空间可视化,而且指标权重人为设定。参考该规范指标设置,徐涵秋^[5]基于遥感技术构建了遥感生态指数(Remote Sensing Ecological Index, RSEI),定量评价了福州市的生态环境质量,该方法已经得到广泛应用。施婷婷等^[6]基于GF-2影像采用RSEI分析了建设工程对贵安新区生态环境质量的影响;程志峰等^[7]采用RSEI分析苏锡常城市群生态环境治理的时空变化特征及其驱动因素;温小乐等^[8]指出裸土地和建筑主要影响干度指标,平潭综合实验区的建设开发导致生态质量下降。徐涵秋^[9]发现RSEI与EI的计算结果具有较强的可比性,且RSEI作为量化指标具有空间可视化和数据易获取的优势,可以分析不同时期生态环境变化。

结合兰州周边自然环境、削山造地工程建设特点,对徐涵秋提出的RSEI中各评价指标的适用性进行分析,构建了适合研究区的遥感生态指数模型,并对1991—2016年兰州市周边地区的生态质量进行评价。在原RSEI干度指标^[5]图像中自然状态下的低植被覆盖区与受人类活动影响剧烈的建筑区的光谱差异不明显。而生物物理成分指数(Bio-physical Composition Index, BCI)^[10]综合了裸土地和建筑区的信息,可以更好地将兰州周边地区低覆盖度草地与人工堆掘地、建筑区进行区分,因此选用BCI作为干度指标^[10]。

2 研究区与数据

2.1 研究区概况

研究区涉及兰州主城区和兰州新区,地理位置位于 $103^{\circ}02' - 104^{\circ}03' E$, $35^{\circ}57' - 36^{\circ}47' N$ 之间,地处黄河上游、黄土高原与青藏高原交汇地区,海拔1 500—2 590 m之间(图1)。主城区南部山区突起于黄土高原之上,北部山区多属黄土梁,永登县的秦王川和西槽一带地势平坦,属于山间盆地。研究区属于黄土高原沟壑区,植被覆盖度低,水土流失严重。野外调查发现研究范围内集中大量削山造地工程,削山造地活动频繁,因此在该区域开展生态变化遥感评价对其他黄土高原城市生态环境遥感监测具有借鉴意义。

2.2 数据及预处理

(1)收集1991年、2001年、2009年和2016年1:1万基础测绘数字高程模型(DEM)和数字正射影像

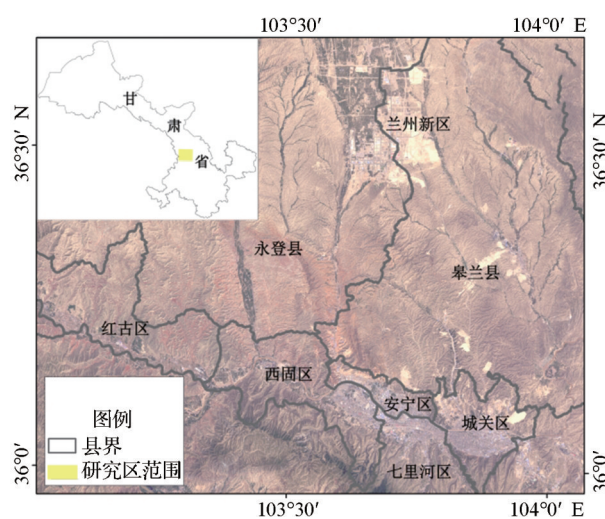


图1 研究区位置

Fig.1 Location of study area

(DOM), DOM分辨率0.5 m, DEM格网为5 m,将收集到的数据资料进行格式转换、投影坐标转换和地理配准等处理。

(2)使用Landsat卫星1991年6月(TM)、2001年7月(ETM)、2009年7月(TM)、2016年7月(OLI/TIRS)4个时期影像作为数据源(图2),4期影像时相基本一致。在ENVI下对4期影像进行配准和辐射定标,采用FLAASH工具进行大气校正,大气模型选择中纬度夏季标准大气模型(Mid-Latitude Summer)。

3 研究方法

研究流程图如图3所示。

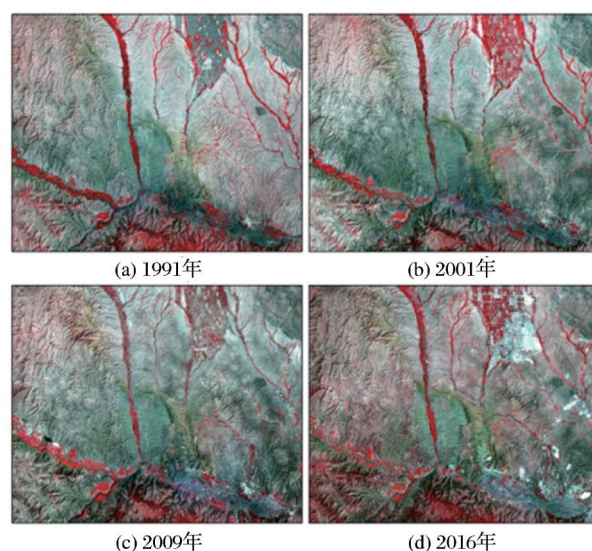


图2 兰州周边地区遥感影像

Fig.2 Remote sensing image in the surrounding area of Lanzhou

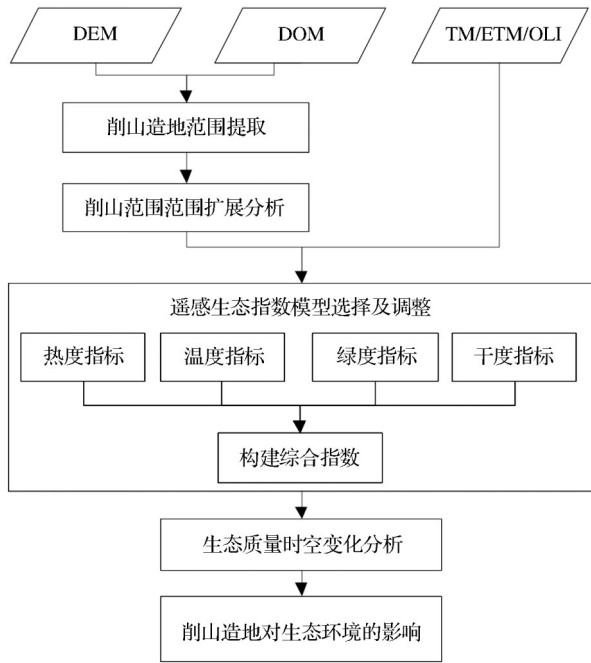


图3 研究流程图

Fig.3 Diagram of work flow

3.1 削山造地范围提取

削山造地范围指荒山表层地表受人类活动受到完全破坏的范围,提取标准就是产生高差或者影像变化,因此可以利用高精度“DEM+DOM”相结合的三维地形变化检测方法提取削山造地范围^[11]。首先计算DEM栅格差值,其表达式为: $\Delta\text{DEM} = \text{DEM}_{\text{后}} - \text{DEM}_{\text{前}}$ 。式中 $\text{DEM}_{\text{前}}$ 、 $\text{DEM}_{\text{后}}$ 表示前期、后期DEM。根据基础测绘1:10 000生产技术规程中规定山地区域DEM中误差为6.6 m,设定6.6 m作为高程变化指标,栅格差值在该阈值内为未变化区域,栅格差值超过该阈值范围的负值区域为挖方区,栅格差值超过该阈值范围的正值区域为填方区。然后对DEM栅格差值数据矢量化,得到削山造地挖、填方范围。最后依据影像纹理对削山造地范围进行修正。

3.2 削山造地范围扩张速率计算

削山造地范围扩展速率可用来衡量城市范围的扩展进程,计算公式如下:

$$V_{t \sim (t+n)} = (A_{t \sim (t+n)} - A_t) / n \quad (1)$$

其中: $V_{t \sim (t+n)}$ 为 $t \sim (t+n)$ 时段内的削山造地范围扩展速率; $A_{t \sim (t+n)}$ 为 $t \sim (t+n)$ 时的削山造地面积; A_t 为 t 时的削山造地面积^[12]。

3.3 遥感生态指数计算

RSEI由湿度、绿度、热度、干度构成,经过主成分分析法选取第一主成分构建RSEI来评价生态

质量。^[13]

(1)绿度指标。归一化植被指数(Normalized Differential Vegetation Index, NDVI)主要反映植被的生长状况,因此选用NDVI来代表绿度指标^[14]。其计算公式为:

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}}) / (\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{red}}) \quad (2)$$

其中: ρ_{red} 为红色波段反射率; ρ_{nir} 为近红外波段反射率。

(2)湿度指标。湿度分量(WETNESS)主要反映植被、土壤的湿度状况,因此选用通过缨帽变换得到WETNESS代表湿度指标^[15]。Landsat-5 TM、Landsat-7 ETM和Landsat-8 OLI传感器的湿度分量计算公式为:

$$\begin{cases} \text{WET}_{\text{TM}} = 0.0315\rho_{\text{blue}} + 0.2021\rho_{\text{green}} + 0.3102\rho_{\text{red}} \\ \quad + 0.1594\rho_{\text{nir}} - 0.6806\rho_{\text{swir1}} - 0.6109\rho_{\text{swir2}} \\ \text{WET}_{\text{ETM}} = 0.2626\rho_{\text{blue}} + 0.2141\rho_{\text{green}} + 0.0926\rho_{\text{red}} \\ \quad + 0.0656\rho_{\text{nir}} - 0.7629\rho_{\text{swir1}} - 0.5388\rho_{\text{swir2}} \\ \text{WET}_{\text{OLI}} = 0.1511\rho_{\text{blue}} + 0.1973\rho_{\text{green}} + 0.3283\rho_{\text{red}} \\ \quad + 0.3407\rho_{\text{nir}} - 0.7117\rho_{\text{swir1}} - 0.4559\rho_{\text{swir2}} \end{cases} \quad (3)$$

其中: ρ_{blue} 、 ρ_{green} 、 ρ_{red} 、 ρ_{nir} 、 ρ_{swir1} 、 ρ_{swir2} 分别为蓝、绿、红、近红外、短波红外1、短波红外2波段反射率。

(3)热度指标。地表温度(Land Surface Temperature, LST)就是地面温度,其与地表湿度、气温、光照强度和植被有关联,因此选用LST代表热度指标^[16]。经过辐射率纠正后的LST公式如下^[16]:

$$\text{LST} = T / [1 + (\lambda * T / \rho) * \ln \varepsilon] \quad (4)$$

式中:LST为地表温度;T为传感器处的亮度温度,具体见公式(5),单位为开氏度; $\lambda_{\text{TM/ETM+}} = 1.435 \mu\text{m}$, $\lambda_{\text{OLI}} = 10.9 \mu\text{m}$; $\rho = 0.01438 \text{ mK}$; ε 为地表比辐射率^[17],具体见公式(6)。

$$\begin{cases} L_{\lambda} = \text{Radiance_Gains} * \text{DN} + \text{Radiance_offsets} \\ T = K_2 / \ln(K_1 / L_{\lambda} + 1) \end{cases} \quad (5)$$

其中: L_{λ} 为传感器处接收到的辐射强度;Radiance_Gains和Radiance_offsets为波段辐射定标的增益和偏移量;DN为影像的灰度值; K_1 和 K_2 为预设常数。

$$\begin{cases} \text{NDVI} \leq 0, \varepsilon = 0.9925 \\ 0 < \text{NDVI} < 0.157, \varepsilon = 0.923 \\ 0.157 \leq \text{NDVI} \leq 0.727, \varepsilon = 1.0094 + 0.047 * \ln(\text{NDVI}) \\ \text{NDVI} > 0.727, \varepsilon = 0.99 \end{cases} \quad (6)$$

(4)干度指标。原RSEI模型中采用裸土指数(SI)和建筑指数(IBI)来指征干度指标,兰州地处干

旱半干旱地区,植被覆盖度低,削山造地工程使得裸土地和建筑面积激增。分析发现在干度指标图像中,无法区分低植被覆盖区、裸土地和建筑用地,而生物物理成分指数(BCI)^[10]可以有效抑制植被信息,其与城市不透水面丰度的相关性为0.8^[18],能更好地将兰州周边自然状态下的低覆盖度草地与受人类活动影响的人工堆掘地、建筑区进行区分,BCI计算公式如下:

$$BCI = [(H+L)/2 - V] / [(H+L)/2 + V] \quad (7)$$

其中:H、L、V分别为标准化处理后的缨帽变换亮度分量(TC1)、湿度分量(TC3)、绿度分量(TC2)。3个指标的标准化计算公式为:

$$\begin{cases} H = (TC1 - TC1_{\min}) / (TC1_{\max} - TC1_{\min}) \\ V = (TC2 - TC2_{\min}) / (TC2_{\max} - TC2_{\min}) \\ L = (TC3 - TC3_{\min}) / (TC3_{\max} - TC3_{\min}) \end{cases} \quad (8)$$

(5)标准化处理。4个指标的单位 and 取值范围都不一样,需要进行标准化处理,计算公式如下:

$$NI_i = \frac{(Indicator_i - Indicator_{\min})}{(Indicator_{\max} - Indicator_{\min})} \quad (9)$$

其中:NI_i为标准化处理后的指标值;Indicator_i为指标在像元i的值;Indicator_{min}为该指标的最小值;Indicator_{max}为该指标的最大值。

(6)综合指数的构建。主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)是一种广泛使用的线性降维数据分析方法,目的是提取数据的主要特征分量,利用主成分分析法确定绿度、湿度、热度、干度指标的权重,构建综合生态指数RSEI₀,RSEI₀经标准化处理,将数值范围拉伸到[0,1]之间,得到RSEI。RSEI值越接近1,生态质量越好,值越接近0,生态质量越差。

4 结果与分析

4.1 削山造地范围扩展分析

利用地形三维方法提取1991—2000、2001—2008、2009—2016年兰州周边地区削山造地工程范围(图4)。根据公式(1)计算1991—2000年、2001—2008年和2009—2016年削山造地范围扩展速率。结果表明,1991—2000年,削山造地工程面积增长9.7 km²,年均增长0.97 km²,增长趋势缓慢,主要集中在城关区北部九州开发区,呈单中心扩展模式;2001—2008年削山造地工程面积增长29.74 km²,年均增长2.94 km²,扩展速率逐步提高,主要集中在榆中县和平镇、安宁区北部、七里河区以及西固区的

南部山沟和九州开发区附近,呈多中心扩展模式;2009—2016年削山造地工程用地面积增长180.41 km²,年均增长30.07 km²,扩展速率大幅增长,空间分布广泛,主要集中在兰州新区的东南部地区、皋兰县城西部地区 and 兰州主城区的北部山区。建设的大型项目有兰州新区建设项目、碧桂园兰州新城、兰州生态文化创新城和西北物流谷小镇等。

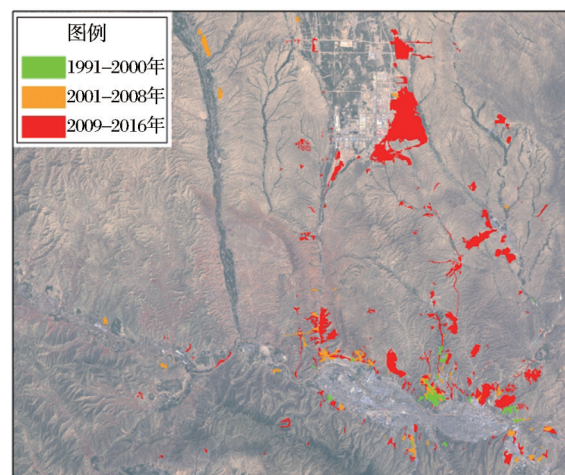


图4 兰州周边地区削山造地工程范围分布

Fig.4 Scope distribution of land creation project in Lanzhou surrounding area

重心转移的方向和距离可以反映削山造地范围时空差异,通过计算得到1991—2000年、2001—2008年、2009—2016年3个时段削山造地范围的标准差椭圆和重心(图5),发现不同时期削山造地范围重心呈现出不同变化,1991—2016年削山造地范围重心呈现出从南向北不断迁移的趋势,具体向北偏移16 km。

4.2 生态质量时空变化分析

计算4期遥感影像的生态指标,经标准化处理后进行图层合并,然后对新的图像进行主成分变换,得到4个指标的主成分变换矩阵(表1)。

从表1中可以看出第一主成分(PC1)具有以下特征:①1991年为75.66%,2001年为70.94%,2009年为66.18%,2016年为74.56%,其他特征分量贡献率都小于30%,4年的PC1贡献率都大于其他特征分量,表明PC1集中了4个指标的大部分特征。②PC1中4个年份的绿度指标、湿度指标、干度指标和热度指标系数平均值分别为0.489 2、0.463 4、-0.562 7、-0.443 9,各年PC1中4个指标值与上述平均值较为接近,进一步计算指标值的标准差,发现PC1中绿度、湿度指标系数的标准差小于其他特征

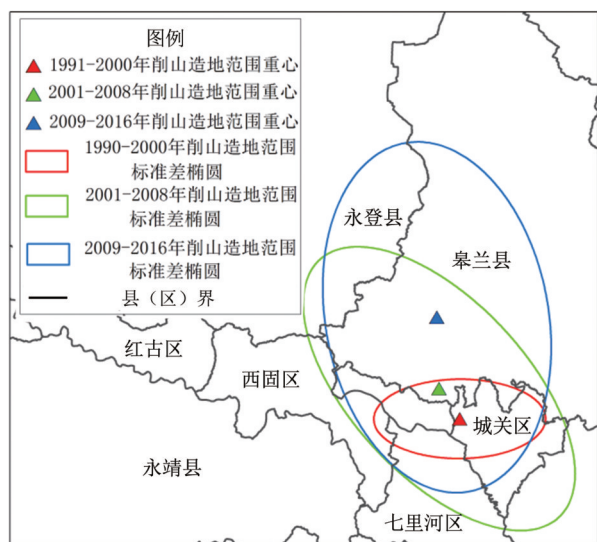


图 5 标准差椭圆和重心

Fig.5 Standard deviation elliptical and Meancenter

表 1 4 个指标的主成分分析

Table 1 Principal component analysis of four indicators

年份	指标	PC1	PC2	PC3	PC4
1991	绿度	0.46	0.43	0.19	0.75
	湿度	0.52	-0.63	0.56	-0.10
	热度	-0.57	0.23	0.79	0.02
	干度	-0.44	-0.60	-0.15	0.65
	特征值	0.0603	0.0124	0.0068	0.0002
	贡献率	75.66%	15.56%	8.53%	0.25%
2001	绿度	0.54	0.33	0.29	-0.72
	湿度	0.46	-0.70	0.50	0.22
	热度	-0.55	0.22	0.81	0.02
	干度	-0.45	-0.59	-0.13	-0.66
	特征值	0.0493	0.0129	0.0070	0.0003
	贡献率	70.94%	18.56%	10.07%	0.43%
2009	绿度	0.40	0.46	0.31	-0.73
	湿度	0.49	-0.53	0.66	0.21
	热度	-0.72	0.16	0.67	-0.01
	干度	-0.28	-0.69	-0.14	-0.65
	特征值	0.0366	0.0129	0.0055	0.0003
	贡献率	66.18%	23.33%	9.95%	0.54%
2016	绿度	0.55	0.28	-0.03	-0.79
	湿度	0.39	-0.45	0.80	0.08
	热度	-0.41	0.69	0.60	-0.06
	干度	-0.61	-0.50	0.08	-0.61
	特征值	0.0381	0.0079	0.0044	0.0007
	贡献率	74.56%	15.46%	8.61%	1.37%

分量。③PC1中绿度、湿度指标值始终为正值,表明绿度、湿度指标对生态起正效应;热度、干度指标值始终为负值,表明干度、热度指标对生态起负效应,其他3个特征分量中的指标值无规律可循。因此

PC1适合构建遥感生态指数^[9]。

计算得到1991、2001、2009、2016年RSEI影像(图6),统计4个年份单指标和RSEI均值(表2)。从表2中可以看出,1991年RESI值为0.297,在2001年经过小幅下降后一直上升,在2016年RESI值为0.406,表明兰州周边地区生态质量呈上升趋势。从单指标分析,对生态环境起正效应的NDVI、WETNESS总体呈上升趋势,对生态环境起负效应的LST、BCI总体呈下降趋势,4个指标的变化与RSEI反映结果一致,表明RSEI可以综合代表生态状况变化。从RSEI指数的标准差来看,其值在1991—2016年间未发生显著的变化,绿度、湿度、热度及干度等生态指标标准差的变化趋势与RSEI基本一致,表明兰州周边地区生态系统的稳定性较好。

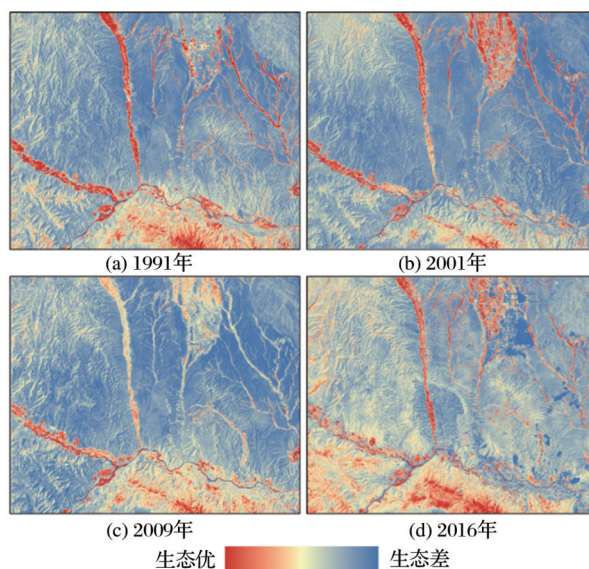


图 6 1991、2001、2009、2016 年 RSEI 影像图

Fig.6 The images of RSEI index in 1991, 2001, 2009, 2016

参考已有分级标准^[9],将RSEI影像按照优、良、中、较差和差5个等级进行划分,得到研究区4个年份生态等级面积和比例变化(表3)。结果表明,1991—2016年,研究区内差、较差等级面积占比由84%下降到64%,优、良等级的面积占比由1991年的7.52%上升到2016年的11.72%,表明生态质量改善。基于遥感变化差值检测方法,得到1991—2016年RSEI变化检测图(图7)及变化检测表(表4),综合1991、2001、2009、2016年遥感生态指数影像,可知以下特征:

(1) 1991—2016年生态等级变差的面积为565.79 km²,生态等级变好的区域面积为3 984.08 km²,

表 2 RSEI 均值

Table 2 Mean change of RSEI

年份	绿度/NDVI		湿度/WETNESS		热度/LST		干度/BCI		RSEI 指数	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
1991	0.428	0.125	0.307	0.154	0.682	0.156	0.517	0.127	0.297	0.187
2001	0.344	0.129	0.268	0.136	0.654	0.142	0.523	0.120	0.272	0.181
2009	0.435	0.097	0.276	0.121	0.695	0.148	0.482	0.096	0.309	0.160
2016	0.518	0.112	0.524	0.100	0.475	0.205	0.463	0.129	0.406	0.168

表 3 生态等级面积和比例变化

Table 3 The changes of ecological grade area and proportion

RSEI 分级	1991 年		2001 年		2009 年		2016 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
差(0—0.2)	3 700.64	51.76	3 765.64	52.67	2 934.73	41.05	1 408.30	19.70
较差(0.2—0.4)	2 284.62	31.96	2 306.46	32.26	2 817.12	39.41	3 175.56	44.42
中(0.4—0.6)	626.56	8.76	582.54	8.15	873.64	12.22	1 727.48	24.16
良(0.6—0.8)	302.31	4.23	272.94	3.82	356.26	4.98	584.16	8.17
优(0.8—1)	235.31	3.29	221.85	3.10	167.68	2.35	253.93	3.55

表 4 变化检测

Table 4 Change detection

类别	级差	级面积/km ²	类面积/km ²	比例/%
变差	-4	10.81	565.79	7.91
	-3	41.30		
	-2	106.01		
	-1	407.68		
不变	0	2 599.56	2 599.56	36.36
变好	1	3 273.16	3 984.08	55.73
	2	624.92		
	3	67.33		
	4	18.67		

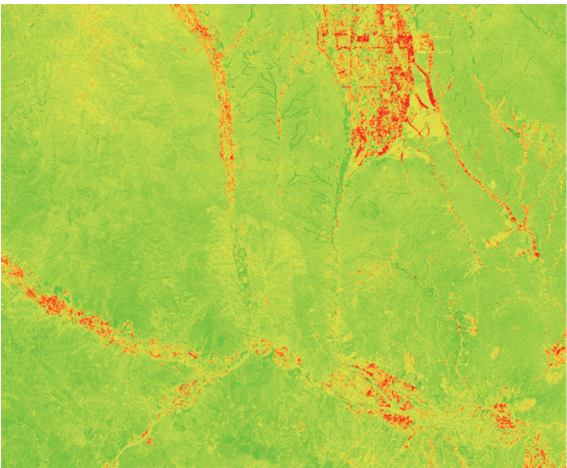


图 7 1991—2016 年 RSEI 变化检测图

Fig.7 Chang map of RSEI between 1991 and 2016

表明生态变好区域面积远大于生态变差区域。

(2)从空间格局上看,图 7 中代表生态变好的区

域为城区北部和南部山区、兰州新区北部秦王川地区、大砂沟两侧、碱沟北部以及山谷等地势低洼平坦的区域,以上地区植被覆盖状况较好,生态质量变好。从自然角度分析,2000 年后甘肃中部的黄河上游地区降水增加,而降水对植被改善具有一定作用^[19];从人为角度分析,一是 2000 年兰州市组织实施南北两山环境绿化工程,通过退耕还林、荒山造林,使得兰州南部和北部荒山植被变好^[20]。二是“引大入秦”工程建设改变了区域水资源利用格局,促使水浇地面积大幅增加^[21]。图 7 中代表生态变差的区域集中于兰州主城区、兰州新区、水秦路沿线以及主城区北部山区。其中兰州主城区、兰州新区的城市建设和河谷地区的耕地撂荒导致生态质量下降,其他区域大部分处于削山造地范围,削山造地工程改变了原有自然地貌,导致人工堆掘地和建筑用地面积显著增加,生态质量变差。

(3)从时间变化上看,1991—2000 年“引大入秦”工程开始调水,秦王川盆地生态质量明显改善。2001—2008 年生态质量整体变化不大,南北两山绿化工程建设启动,部分区域生态质量有所提高。2009—2016 年整体生态质量变好,但是受削山造地工程开工影响,生态质量变差区域增多,特别是兰州新区东南部生态明显恶化。

4.3 削山造地工程对生态环境的影响

计算 1991—2016 年兰州周边地区削山造地工程范围(图 4 所示范围)生态等级面积和比例表(表 5),可知生态质量主要生态等级由“较差”变为

“差”,“差”等级面积占比由 0.84% 陡增至 82.47%,“较差”等级面积占比由 75.71% 下降至 14.88%,“中等”、“良”和“优”等级面积占比明显下降,甚至在 2016 年削山造地范围生态等级为“优”的面积为零,这都表明削山造地工程使得生态质量下降。

为了进一步分析削山造地范围与其周边地区生态环境差异,选取削山造地范围和其 100 m 缓冲区为研究范围,选取与该时间节点相近的 2009 年和 2016 年为研究年份,计算植被覆盖度、地表温度及 RSEI 值(表 6)。结合实地调查可知,2009—2016 年,削山造地范围的植被覆盖度下降至 8.6%,地表温度基本稳定,RSEI 值减少 51%。缓冲区范围的植被覆盖度减少 2%,地表温度保持不变,RSEI 值

减少 24%。表明削山造地工程使得植被覆盖度降低,导致工程范围内生态环境造成恶化,并且对周边环境造成一定影响。

表 5 削山造地区生态等级面积和比例
Table 5 Ecological grade area and proportion of Land creation area

RSEI 分级	1991 年		2016 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
差 (0.0—0.2)	1.70	0.84	167.24	82.47
较差(0.2—0.4)	153.53	75.71	30.18	14.88
中等(0.4—0.6)	37.36	18.42	4.71	2.32
良 (0.6—0.8)	8.07	3.98	0.67	0.33
优 (0.8—1.0)	2.14	1.06	0.00	0.00

表 6 2009—2016 年削山造地范围及其缓冲区植被覆盖度、地表温度及 RSEI 值变化
Table 6 Change of FVC, LST and RSEI of Lanzhou Cut-off area from 2009 to 2016

区域	植被覆盖度/%		地表温度/°C		RSEI	
	2009 年	2016 年	2009 年	2016 年	2009 年	2016 年
2009—2016 年削山造地范围	23.1	14.5	35.9	35.9	0.247	0.121
2009—2016 年削山造地范围缓冲区	25.0	23.0	34.7	35.3	0.291	0.219

5 讨论与结论

本文基于高精度 DEM 和 DOM 数据确定削山造地范围,利用 NDVI、WETNESS、LST 和 BCI 构建适合研究区的 RSEI 模型,分别评价研究区和削山造地范围生态环境质量。得出以下结论:

(1)结合兰州周边环境特点,选取能够区分低覆盖度植被区与裸土地、建筑区的 BCI 代替原有 RSEI 中的干度指标,结果表明调整后的 RSEI 能较好地反映区域生态环境。从单指标来看,RSEI 与 NDVI、WETNESS 呈正相关,RSEI 与 LST、BCI 呈负相关,这与实际情况相符。调整后的 RSEI 集成 4 个指标,可以定量评价生态质量以及变化特征,因此比单指标评价更具有说服力。

(2)基于遥感差值变化检测方法,发现生态改善区域主要集中在研究区北部的秦王川盆地、兰州主城区的南北两山、大沙沟和碱沟两侧,这与南北山地绿化、削山造地工程复绿和“引大入秦”工程有关。生态恶化区域主要集中在兰州主城区北部和兰州新区东南部,这与兰州城市扩张和削山造地工程有关。表明 RSEI 可以反映兰州周边地区生态质量变化的空间差异。

(3)1991—2016 年,研究区 RSEI 值从 0.297 上升至 0.406,25 年间上升了 36.7%,差、较差等级的

面积比例由 1991 年的 83.72% 下降到 2016 年的 64.12%,优、良等级的面积占比由 1991 年的 7.52% 上升到 2016 年的 11.72%,表明兰州市生态环境质量向好发展,甘肃中部降水逐渐增加以及大力实施绿化工程等从一定程度上抵消了削山造地对生态环境的负面影响。

(4)削山造地范围 RSEI 从 0.229 下降到 0.105,结果表明大规模削山造地工程破坏了原有的生态环境,致使裸土地、建筑区面积激增,植被覆盖度降低,引起区域生态环境质量下降。因此,在城市快速发展的同时需要对削山造地工程规模加以控制。

参考文献 (References):

[1] Li P, Qian H, Wu J. Accelerate research on land creation[J]. Nature, 2014, 510(7503): 29-31. DOI:10.1038/510029a.

[2] Ministry of Ecology and Environment, HJ 192-2015, Technical Criterion for Ecosystem Status Evaluation [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2015.[生态环境部, HJ 192-2015, 生态环境状况评价技术规范[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2015.]

[3] Wang Hongwei, Zhang Xiaolei, Qiao Mu, et al. Assessment and dynamic analysis of the eco-environmental quality in the Ili River Basin based on GIS[J]. Arid Land Geography, 2008, 31(2): 215-221.[王宏伟, 张小雷, 乔木, 等. 基于 GIS 的伊犁

- 河流域生态环境质量评价与动态分析[J]. 干旱区地理, 2008, 31(2):215-221.]
- [4] Wang Peng, Wei Xin, Qiao Yuliang. Quality evaluation and time sequential analysis of eco-environment at multi-scales in Fen River Basin[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(6):798-807.[王鹏, 魏信, 乔玉良. 多尺度下汾河流域生态环境质量评价与时序分析[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(6):798-807.]
- [5] Xu Hanqiu. A remote sensing urban ecological index and its application[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24):7853-7862.[徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. 生态学报, 2013, 33(24):7853-7862.]
- [6] Shi Tingting, Xu Hanqiu, Sun Fengqin. Remote sensing based assessment of regional ecological changes triggered by a construction project[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(18):6826-6839.[施婷婷, 徐涵秋, 孙凤琴, 等. 建设项目引发的区域生态变化的遥感评估——以敖江流域为例[J]. 生态学报, 2019, 39(18):6826-6839.]
- [7] Cheng Zhifeng, He Qisheng. Remote sensing evaluation of the ecological environment of Su-Xi-Chang City group based on Remote Sensing Ecological Index (RSEI)[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(3):531-539.[程志峰, 何祺胜. 基于RSEI的苏锡常城市群生态环境遥感评价[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(3):531-539.]
- [8] Wen Xiaole, Lin Zhengfeng, Tang Fei. Remote sensing analysis of ecological change caused by construction of the new island city Pingtan Comprehensive Experimental Zone, Fujian province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(2):541-547.[温小乐, 林征峰, 唐菲. 新兴海岛型城市建设引发的生态变化的遥感分析——以福建平潭综合实验区为例[J]. 应用生态学报, 2015, 26(2):541-547.]
- [9] Xu Hanqiu. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J]. China Environmental Science, 2013, 33(5):889-897.[徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. 中国环境科学, 2013, 33(5):889-897.]
- [10] Deng C B, Wu C S. BCI: A biophysical composition index for remote sensing of urban environment[J]. Remote Sensing Environment of, 2012, 127(140):247-259. DOI: 10.1016/j.rse.2012.09.009
- [11] Liu Weihui, Yu Daijun, Li Hongzhou, *et al.* Research on 3D terrain quantitative change detection in Shendong Mining Area[J]. Geospatial Information, 2017, 15(12):22-24.[刘威辉, 余代俊, 李鸿洲, 等. 神东矿区三维地形定量变化检测研究[J]. 地理空间信息, 2017, 15(12):22-24.]
- [12] Gao Ning, Gai Yingchun, Song Xiaoyu. Study of urban expansion and driving factors in Xi'an city based on nighttime light data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(1):207-215.[高宁, 盖迎春, 宋晓渝. 基于夜间灯光数据的西安市城市扩张及驱动因素研究[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(1):207-215.]
- [13] Xu Hanqiu, Deng Wenhui. Rationality analysis of MRSEI and its difference with RSEI[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(1):1-7.[徐涵秋, 邓文慧. MRSEI指数的合理性分析及其与RSEI指数的区别[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(1):1-7.]
- [14] Goward S N, Xue Y K, Czajkowski K P. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements an exploration with the simplified simple biosphere model[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2/3):225-242. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00275-9.
- [15] Wang Shiyuan, Zhang Xuexia, Zhu Tong, *et al.* Assessment of ecological environment quality in the Changbai Mountain Nature Reserve based on remote sensing technology[J]. Progress in Geography, 2016, 35(10):1269-1278[王士远, 张学霞, 朱彤, 等. 长白山自然保护区生态环境质量的遥感评价[J]. 地理科学进展, 2016, 35(10):1269-1278.]
- [16] Li Yali, Wang Xiaoxin, Chen Yunzhi, *et al.* The correlation analysis of land surface temperature and fractional vegetation coverage in Fujian province[J]. Journal of Geo-Information Science, 2019, 21(3):445-454.[李娅丽, 汪小钦, 陈芸芝, 等. 福建省地表温度与植被覆盖度的相关性分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(3):445-454.]
- [17] Nichol J. Remote sensing of urban heat islands by day and night[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2005, 71(6):613-621. DOI:10.14358/PERS.71.5.613.
- [18] Xu Hanqiu, Wang Meiya. Remote sensing based retrieval of ground impervious surfaces[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5):1270-1289.[徐涵秋, 王美雅. 地表不透水面信息遥感的主要方法分析[J]. 遥感学报, 2016, 20(5):1270-1289.]
- [19] Ye Peilong, Zhang Qiang, Wang Ying, *et al.* Climate change in the upper Yellow River Basin and its impact on ecological vegetation and runoff from 1980 to 2018 s[J]. Trans Atmos Sci, 2020, 43(6):967-979.[叶培龙, 张强, 王莺, 等. 1980—2018年黄河上游气候变化及其对生态植被和径流量的影响[J]. 大气科学学报, 2020, 43(6):967-979.]
- [20] Duan Hanchen, Yan Changzhen, Ma Rulan, *et al.* Ecosystem construction effects in Southern and Northern Mountains of Lanzhou by remote sensing monitoring[J]. Journal of Desert Search, 2011, 31(2):456-463.[段翰晨, 颜长珍, 马如兰, 等.]

- 兰州市南北两山生态建设效应的遥感监测[J]. 中国沙漠, 2011, 31(2): 456-463.]
- [21] Liu Mengying, Jiang Fan, Liu Yong. Land use pattern changes over the last two decades in Qinqiangchuan area, Lanzhou, China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(11): 111-116.[刘梦莹, 江帆, 刘勇. 过去 20 年兰州新区秦王川地区土地利用景观格局变化[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(11): 111-116.]

Approach to Remote Sensing Assessment of Ecological Changes of Land Creation in Lanzhou City

Gao Xiaolong^{1,2,3,4}, Yan Haowen^{1,2,3}, Wang Guigang^{1,2,3}, Bai Jianrong⁴

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

2. National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China;

3. Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China;

4. Mapping Institution of Gansu province, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To solve the problem that the existing methods cannot accurately extract the land creation region and quantitatively assess the ecological change of the land creation region, This paper proposed a method to extract the land creation region based 3D terrain change. Based on the remote sensing images of 1991, 2001, 2009 and 2016, the Remote Sensing Ecological Index(RSEI) was established based on the indexes of greenness, humidity, heat and dryness. The results showed that RSEI can not only quantitatively reflect the quality of ecological environment, but also can be spatially visualized. From 1991 to 2016, the area of land creation region continued to increase. The RSEI increased from 0.297 in 1991 to 0.406 in 2016. The overall ecological environmental quality of Lanzhou was an upward trend, but it had obvious spatial difference. The ecological deterioration areas were concentrated in land creation region of the northern mountainous area of Lanzhou and the southeast of Lanzhou New Area. The land creation project resulted in the expansion of built-up land and bare land, and the decrease of vegetation coverage. It indicated that the land creation project has a certain impact on the regional quality of ecological environment. Therefore, we should control the scale of land creation project, and protect the environment of fragile ecological region.

Key words: Remote sensing ecological index; Land creation; Land cover