

# 基于 RSEI 的地震区生态环境质量恢复研究

## ——以汶川县为例

潘洪义 李加安 张琴<sup>1</sup>

(四川师范大学 地理与资源科学学院/西南土地资源评价与

监测教育部重点实验室, 四川 成都 610068)

**【摘要】:** “5·12”地震对汶川县的生态环境造成了巨大破坏, 评价生态环境质量的恢复程度是汶川县灾后重建的一项重要基础工作。基于 TM 和 OLI 数据, 利用 ENVI 平台的主成分分析技术, 计算出研究区 3 个时期的遥感生态指数 (RSEI), 用于分析 2003~2017 年研究区的生态环境质量变化及恢复情况。结果表明: (1) 2003~2017 年, 汶川县的生态环境质量以中等及以上为主, 3 个时期中等及以上等级所占比例分别为 90.21%、82.01%、94.65%; (2) 3 个时期的 RSEI 指数的均值分别为 0.627、0.617、0.716, 生态环境质量经历了未恢复到恢复提升的过程, 且研究末期的生态环境质量超过研究初期。(3) 2003~2017 年, 汶川县生态环境质量中的较差、中、良这 3 个等级的面积转移明显, 差和优两个等级变化不大。T1 时间段, 中等和良等向较低等级转移; T2 时间段, 较差、中、良等均向较高等级转移; T3 时间段, 除优等以外, 其余等级均主要向较高等级转移。(4) 海拔 1498~4466m 和坡度 15°~63° 之间, 是生态环境质量恢复最明显的区域。

**【关键词】:** 生态环境质量 主成分分析 汶川县

**【中图分类号】:** X87 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)03-0745-13

生态环境质量是指生态环境的优劣程度, 是人类生存和发展的物质基础, 它反映了生态环境对人类生存及社会经济发展的适宜程度<sup>[1]</sup>。人类社会经济活动的开展, 大型自然灾害的发生, 都会对区域的生态环境产生巨大的影响。2008 年 5 月 12 日, 汶川县发生的 8.0 级大地震不仅造成了巨大的人员伤亡和财产损失, 还引发了大面积的滑坡、崩塌和泥石流等次生灾害, 导致了一系列生态环境问题, 生态系统和生物多样性受到严重破坏, 区域生态安全受到极大威胁<sup>[2~4]</sup>; 地震对灾区生态系统的破坏使得灾区生态环境长期处于危险状态<sup>[5]</sup>。

“5·12”大地震及其次生灾害极大的改变了地震区原有的地表覆被状况, 而以遥感手段监测区域生态环境质量已在生态环境领域广泛应用, 但其缺点也较为明显, 最典型的不足便是生态环境指标的选择比较单一<sup>[6]</sup>。因此, 以遥感数据为基础, 选取合适的、综合直观反映生态环境质量的自然指标, 评价地震前后地震区生态环境质量, 对地震区的生态环境恢复工作具有重要意义。基于此, 本文选用徐涵秋<sup>[7]</sup>提出的遥感生态指数 (RSEI), 选取热度、绿度、湿度、干度 4 个指标, 评价地震后研究区生态环境质量的恢复程度。与传统的遥感评价方法相比, 遥感生态指数的指标选取更全面, 指标的权重由指标对第一主成分的贡献率来决定, 因而具有较强的客观合理性。

**作者简介:** 潘洪义(1980~), 男, 副教授, 主要研究方向为土地利用与土地评价. E-mail: panhongyi80@163.com

**基金项目:** 国家自然科学基金(42071222); 教育部人文社会科学研究一般项目(18XJA630005)

国内外许多学者对生态环境质量恢复、以及地震区生态环境质量的变化及恢复作了相关研究。在生态环境质量恢复方面，国内学者对矿区<sup>[8~10]</sup>、水土流失区<sup>[11~13]</sup>、自然保护区<sup>[14~16]</sup>等生态脆弱区生态环境质量的变化、演变规律、机制等方面作了大量研究；国外学者从生态恢复与土壤微量元素<sup>[17]</sup>、生物菌落<sup>[18]</sup>、物种延续性<sup>[19]</sup>等的关系进行了相关研究。在地震区生态环境质量恢复方面，国内学者对地震区地震前后的植被覆盖度<sup>[20,21]</sup>的空间动态格局变化、土壤养分与土壤理化性质<sup>[22,23]</sup>的恢复率以及空间异质性、生态系统健康与生态系统服务功能<sup>[24,25]</sup>的差异及恢复情况进行了探讨；国外学者的研究多集中于分析地震对生物多样性<sup>[26~28]</sup>的破坏及震后的恢复情况。从遥感生态指数的应用来看，目前学者多以遥感生态指数探讨了水土流失区的生态环境变化<sup>[29,30]</sup>、不同城市规划用地类型引起的生态质量的差异<sup>[31,32]</sup>、城市生态环境变化对城市建设用地扩张的响应<sup>[33]</sup>等。从以往的研究来看，以遥感生态指数评价区域生态环境质量的研究区多以经济发达区为主，近两年对西北干旱区、国家自然保护区的研究逐渐增多，但对川西北高山高原地震区生态环境质量的恢复研究较为少见，且运用增强型建筑指数和增强型裸土指数提取遥感生态指数中的干度指标的研究更为鲜见。因此，本文以“5·12”地震的重灾区—汶川县为研究区域，以湿度、绿度、热度、增强型建筑指数和增强型裸土指数构建的干度四个指标构建遥感生态指数，分析汶川县地震前、地震后一年、地震后近10年生态环境质量的变化，评价“5·12”地震对汶川县的生态环境质量的破坏程度，以及分析地震后近10年来汶川县生态环境质量的恢复情况，以期对长江上游生态保护屏障的“共抓大保护不搞大开发战略”的顺利实施提供理论上研究思路和数据上的支撑。

## 1 研究区概况

汶川县隶属于四川省阿坝藏族自治州，位于青藏高原东部边缘、四川省西北部，居川西北高原和阿坝藏族羌族自治州东南部，位于 $30^{\circ}45' \sim 31^{\circ}43' \text{ N}$ 与 $102^{\circ}51' \sim 103^{\circ}44' \text{ E}$ 之间，东西宽84km，南北长105km，总面积4084km<sup>2</sup>，县城海拔1236m。南距省会成都146km，区位优势明显，交通便利。属于暖温带季风气候，年均温13.5℃，降水528.7~1332.2mm。辖威州、绵虎、映秀、漩口、水磨、卧龙、三江、耿达8镇，龙溪、克枯、雁门、银杏4乡。

地处青藏高原和四川盆地过渡地带的岷江上游地区的汶川县是“5·12”特大地震的重灾区，地震的发生导致汶川县的生态环境质量急剧下降，经过将近10年时间，生态环境质量发生了明显变化，因此，其整体变化规律与空间格局演变特征是值得关注的科学问题。



图1 研究区位置示意图

## 2 数据来源及影像处理

本研究选取汶川县三期季相相同、云量少的 Landsat5/8 遥感影像，成像具体时间分别为 2003 年 7 月 21、2009 年 6 月 3 日、2017 年 7 月 11 日，行列号为 130/38, 130/39。DEM 数据，用以提取研究区的坡度和海拔两个地形因子，数据均来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud>)。

利用 ENVI 软件对 3 个时期的 TM 影像和 OLI/TIRS 影像进行拼接、辐射定标与大气校正等预处理，然后再分别计算研究区 3 个时期的湿度、绿度、热度、干度，利用运用主成分分析方法集成 4 个指标，得出研究区遥感生态指数。若从影像拼接之后便裁剪研究区影像，则研究区边缘的某些数据会因裁剪出现一定的误差，再以这类数据进行后续的计算会导致误差的累积，降低数据的准确性。因此，为消除因多次裁剪而导致的误差累积，在计算出影像覆盖区域的遥感生态指数后，再对数据进行裁剪，获得研究区的遥感生态指数。

### 3 研究方法

#### 3.1 遥感生态指数分量指标的计算

通过主成分变换集成湿度、绿度、热度、干度四个指标，得到研究区的遥感生态指数，可对区域的生态环境质量进行实时动态监测。其中，分别用湿度指数、归一化植被指数、地表温度、增强型建筑指数和增强型裸地指数的平均值来代表区域的湿度、绿度、热度、干度 4 个指标，各指标具体算法如下。

##### (1) 湿度指标

缨帽变换是一种有效的数据压缩和去冗余技术，其亮度、绿度、湿度分量与地表物理参量有直接的关系<sup>[34]</sup>。湿度指标(Wet)由经过缨帽变换的湿度分量来代表，计算公式为：

$$Wet = b1\rho_{blue} + b2\rho_{green} + b3\rho_{red} + b4\rho_{NIR} + b5\rho_{SWIR1} + b6\rho_{SWIR2} \quad (1)$$

式中： $\rho_{blue}$ 、 $\rho_{green}$ 、 $\rho_{red}$ 、 $\rho_{NIR}$ 、 $\rho_{SWIR1}$ 、 $\rho_{SWIR2}$  在 TM 影像中分别对应第 1、2、3、4、5、7 波段的地表反射率，在 OLI/TIRS 影像中分别对应第 2、3、4、5、6、7 波段的地表反射率； $b1$ 、 $b2$ 、 $b3$ 、 $b4$ 、 $b5$ 、 $b6$  为系数，在 TM 影像中分别为 0.0315、0.2021、0.3102、0.1594、-0.6806 和 -0.6109<sup>[35]</sup>，在 OLI/TIRS 影像中分别为 0.1511、0.1973、0.3283、0.3407、-0.7117 和 -0.4559<sup>[36]</sup>。

##### (2) 绿度指标

归一化差值植被指数(NDVI)是应用最广泛的植被指数，它与植物生物量、叶面积指数以及植被覆盖度都有密切的关系<sup>[37]</sup>。因此，可用 NDVI 来代表绿度指标，计算公式为：

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

$\rho_{NIR}$ 、 $\rho_{red}$  分别表示各影像所对应的近红外波段和红波段的反射率。

##### (3) 热度指标

温度指标用地表温度 (LST) 来表示<sup>[38]</sup>, 计算公式为:

$$L_{6/10} = gain \times DN + bias \quad (3)$$

$$P_v = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI + NDVI_{soil}) \quad (4)$$

$$\varepsilon = 0.004P_v + 0.986 \quad (5)$$

$$\varepsilon_{surface} = 0.9625 + 0.0614 P_v - 0.0461 P_v^2 \quad (6)$$

$$\varepsilon_{building} = 0.9589 + 0.086 P_v - 0.0671 P_v^2 \quad (7)$$

$$B(LST) = [L_{6/10} - L_{\uparrow} - T \cdot (1 - \varepsilon) L_{\downarrow}] / T \cdot \varepsilon \quad (8)$$

$$LST = K_2 / \ln[k_1 / B(TS) + 1] - 273 \quad (9)$$

式中:  $L_{6/10}$  分别为 TM 影像和 OLI/TIRS 影像在第 6 或第 10 波段像元在传感器出的辐射值; DN 为像元灰度值; gain 为波段增益值, bias 为偏置值, 可以在遥感影像的有文件中获得;  $P_v$  为植被覆盖度,  $NDVI_{soil}$  为无植被覆盖区域的 NDVI 值, 取经验值 0.05,  $NDVI_{veg}$  为纯植被像元的 NDVI 值, 取经验值 0.7;  $\varepsilon$  为地表比辐射率,  $\varepsilon_{surface}$  和  $\varepsilon_{building}$  分别为自然表面和城镇区像元的比辐射率, 水体像元比辐射率取值为 0.995<sup>[39]</sup>;  $B(LST)$  为黑体辐射亮度值;  $L_{\uparrow}$ 、 $L_{\downarrow}$ 、 $T$  分别为大气向上、向下辐射亮度和热红外波段的透过率, 由美国国家航天局公布的网站查询而得 (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>);  $K_1$  和  $K_2$  为定标参数,  $B(TS)$  温度为  $T$  的黑体在热红外波段的辐射亮度。

#### (4) 干度指标

徐涵秋认为, 建筑和裸土的存在使得地面“干化”, 因而以建筑指数和裸土指数构建了干度指标 (NDBSI), 但该方法主要针对城市建筑用地信息的提取<sup>[40]</sup>, 不适用于有大量裸土环境的农村建筑用地的研究区。因此, 吴志杰<sup>[40]</sup>以 Landsat TM/ETM+ 图像为数据源, 构建了增强型建筑指数和增强型裸土指数, 以增强型建筑指数和增强型裸土指数构建干度指标, 该指数人为干预少, 可信度高, 提取精度可达 90% 以上, 适合于同时提取城市和农村建筑用地和裸地信息。计算公式为:

$$NDBSI = (EBSI + EIBI) / 2 \quad (10)$$

$$EBSI = (BSI - MNDWI) / (BSI + MNDWI) \quad (11)$$

$$EIBI = [NDBBI - (4EBSI + SAVI + MNDWI) / 6] / [NDBBI + (4EBSI + SAVI + MNDWI) / 6] \quad (12)$$

$$BSI = [(\rho_{SWIR1} + \rho_{red}) - (\rho_{NIR} + \rho_{blue})] / [(\rho_{SWIR1} + \rho_{red}) + (\rho_{NIR} + \rho_{blue})] \quad (13)$$

$$MNDWI = (\rho_{green} - \rho_{SWIR1}) / (\rho_{green} + \rho_{SWIR1}) \quad (14)$$

$$SAVI = (\rho_{NIR} - \rho_{red}) (1 + L) / (\rho_{NIR} + \rho_{red} + L) \quad (15)$$

$$NDBBI = [0.5\rho_{SWIR2} - (\rho_{NIR} + \rho_{green}) / 2] / [0.5\rho_{SWIR2} + (\rho_{NIR} + \rho_{green}) / 2] \quad (16)$$

式中： $\rho_{blue}$ 、 $\rho_{green}$ 、 $\rho_{red}$ 、 $\rho_{NIR}$ 、 $\rho_{SWIR1}$ 、 $\rho_{SWIR2}$  分别代表不同波段的反射率；NDBBI 为归一化差值裸地与建筑用地指数；SAVI 为土壤调节植被指数，L 取值为 0.5；MNDWI 为改进型归一化差值水体指数；BSI 为裸土指数；EBSI 为增强型裸土指数；EIBI 为增强型建筑指数；NDBSI 为干度。

3.2 遥感生态指数评价模型的构建

(1) 各分量指标的标准化处理

为了避免 4 个指标量纲不一致造成的计算误差，在计算遥感生态指数之前进行标准化处理。计算公式为：

$$NI_i = (I_i - I_{min}) / (I_{max} - I_{min}) \tag{17}$$

式中： $NI_i$  为标准化处理后的指标值； $I_i$  为对应指标在  $i$  像元处的值； $I_{max}$ 、 $I_{min}$  分别为该指标的最大和最小值。

(2) 计算遥感生态指数

将经过标准化处理 4 个遥感分量指标波段重新组合成一幅新的影像。借助 ENVI 软件的主成分分析模块进行主成分分析，该方法最大的优点是根据数据本身特征来确定权重，客观程度高<sup>[15]</sup>。计算公式如下：

$$RSEI = (RSEI_0 - RSEI_{0\_min}) / (RSEI_{0\_max} - RSEI_{0\_min}) \tag{18}$$

$$RSEI_0 = 1 - PC1 \tag{19}$$

式中： $RSEI$  为标准化处理后的遥感生态指数值，其取值范围在 [0, 1] 之间，数值越大，说明环境质量越好； $RSEI_0$  为  $i$  像元处的原始生态指数； $RSEI_{0\_max}$ 、 $RSEI_{0\_min}$  分别为原始生态指数最大、最小值； $PC1$  为第一主成分。

4 结果分析

4.1 各指标主成分分析结果

在计算出 3 个时期的 4 个指标和  $RSEI$  指数后，进一步分析其均值、标准差以及各指标对  $PC1$  载荷值的变化(表 1)。

表 1 2003~2017 年汶川县 4 个指标和  $RSEI$  指数统计值

| 年份   | 参量          | NDVI  | Wet   | LST    | NDBSI | RSEI  |
|------|-------------|-------|-------|--------|-------|-------|
| 2003 | 均值          | 0.786 | 0.338 | 0.627  | 0.452 | 0.627 |
|      | 标准差         | 0.174 | 0.063 | 0.175  | 0.129 | 0.127 |
|      | 对 $PC1$ 载荷值 | 0.542 | 0.880 | -0.087 | 0.761 |       |
| 2009 | 均值          | 0.718 | 0.397 | 0.649  | 0.489 | 0.617 |

|      |           |       |        |       |        |       |
|------|-----------|-------|--------|-------|--------|-------|
| 2017 | 标准差       | 0.201 | 0.160  | 0.211 | 0.180  | 0.163 |
|      | 对 PC1 载荷值 | 0.591 | -0.943 | 0.901 | -0.052 |       |
|      | 均值        | 0.768 | 0.389  | 0.786 | 0.689  | 0.716 |
|      | 标准差       | 0.170 | 0.053  | 0.140 | 0.150  | 0.146 |
|      | 对 PC1 载荷值 | 0.869 | 0.001  | 0.872 | 0.655  |       |

由表 1 可知, 2003~2017 年, 汶川县的 RSEI 指数的均值由 0.627 下降为 0.617, 再由 0.617 上升为 0.716, 说明该时期研究区的生态环境质量经历了未恢复到恢复提升的过程。从各指标对 PC1 载荷值来看, NDVI 对 PC1 载荷值始终为正值, 说明绿度对研究区的生态环境质量始终起正向作用。2003~2017 年, Wet 对 PC1 载荷值由 0.880 变为 0.001, 说明湿度对研究区的生态环境质量的正向作用越来越小; LST 对 PC1 载荷值由~0.087 变为 0.872, 说明温度对研究区的生态环境质量从负向作用变为正向作用; NDBSI 对 PC1 载荷值由 0.761 变为 0.655, 表明干度指标对研究区的生态环境质量的正向作用略微下降。

#### 4.2 汶川县 RSEI 指数时空分布格局

将归一化后的 RSEI 值以 0.2 为间距等距划分为 5 个等级, 0~0.2、0.2~0.4、0.4~0.6、0.6~0.8、0.8~1 分别对应差、较差、中、良、优 5 个等级<sup>[41]</sup>(表 2 和图 1)。

表 2 2003~2017 年汶川县生态环境质量情况

| 等级 | 2003                 |       | 2009                 |       | 2017                 |       |
|----|----------------------|-------|----------------------|-------|----------------------|-------|
|    | 面积(km <sup>2</sup> ) | 比例(%) | 面积(km <sup>2</sup> ) | 比例(%) | 面积(km <sup>2</sup> ) | 比例(%) |
| 差  | 23.67                | 0.58  | 9.39                 | 0.23  | 51.42                | 1.26  |
| 较差 | 375.85               | 9.21  | 724.77               | 17.76 | 166.91               | 4.09  |
| 中  | 573.78               | 14.06 | 860.67               | 21.09 | 464.82               | 11.39 |
| 良  | 3100.29              | 75.97 | 2198.81              | 53.88 | 2331.85              | 57.14 |
| 优  | 7.35                 | 0.18  | 287.30               | 7.04  | 1065.94              | 26.12 |

从 3 个时期来看, 生态环境质量等级为差的面积所占比例均小于 2%, 中等及以上是最主要的部分。具体而言, 2003~2009 年, 环境质量等级为良的部分变化最大, 所占比例由 2003 年的 75.97%下降到 53.88%, 下降幅度为 22.09%; 较差等级所占比例有所上升, 上升了 8.55%, 等级为良的部分主要下降为中等和较差等。2009~2017 年, 差、较差、中等等级所占比例均有所下降, 特别是较差等和中等, 下降幅度分别为 13.67%、9.7%; 优等所占比例上升幅度最大, 上升了 19.08%, 在这个时期, 研究区内的生态环境质量主要呈现出恢复和逐渐向好的趋势。

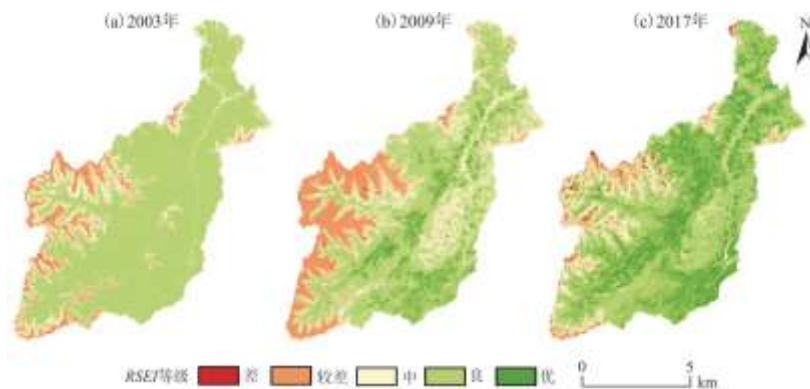


图 2 汶川县 2003~2017 年遥感生态指数分布

在计算出研究区 3 个时期遥感生态指数的基础之上，再将 3 个年份的遥感生态指数两两相减，据此，分析“5.12”地震后研究区生态环境质量的恢复情况(表 3 和图 2)。

表 3 汶川县 2003~2017 年生态环境质量变化

| 变化   | 2003~2009            |       | 2009~2017            |       | 2003~2017            |       |
|------|----------------------|-------|----------------------|-------|----------------------|-------|
|      | 面积(km <sup>2</sup> ) | 比例(%) | 面积(km <sup>2</sup> ) | 比例(%) | 面积(km <sup>2</sup> ) | 比例(%) |
| 未恢复  | 1659.58              | 40.67 | 313.55               | 7.68  | 323.76               | 7.93  |
| 已恢复  | 290.29               | 7.11  | 312.08               | 7.65  | 115.89               | 2.84  |
| 恢复提升 | 2131.07              | 52.22 | 3455.31              | 84.67 | 3641.28              | 89.23 |

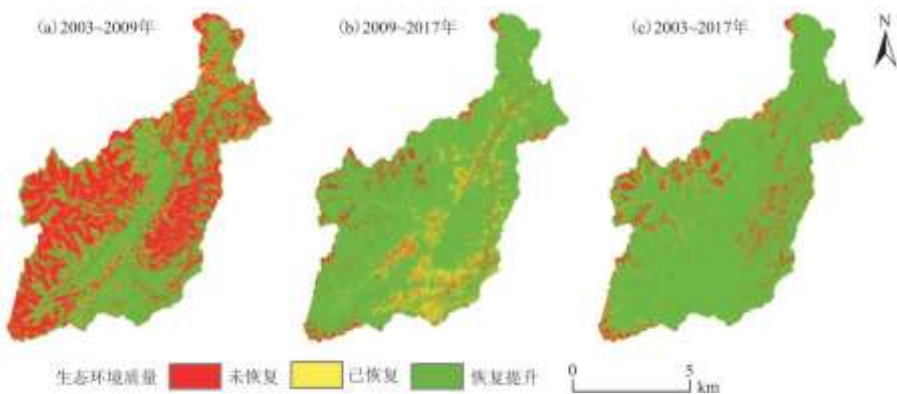


图 3 汶川县 2003~2017 年生态环境质量变化情况

具体而言，2003~2009 年，研究区生态环境质量未恢复的区域所占比例为 40.67%，主要分布在研究区西部高山地区、东部以及东北部城市建成区；生态环境质量已恢复的区域所占比例偏小，仅为 7.11%；生态环境质量恢复提升的区域所占比例为 52.22%，主要分布在研究区的城市建成区与高山区的过渡地带。2009~2017 年，研究区的生态环境质量以恢复提升为主，所占比例为



84.67%, 未恢复和已恢复的区域所占比例较小, 分别为 7.65%、7.68%, 说明该时期研究区的生态环境质量有所恢复提升。另外, 2017 年研究区的生态环境质量与 2003 年相比, 恢复提升的区域所占比例达 89.23%, 未恢复和已恢复的区域所占比例分别为 7.93%、2.84%, 说明地震后近 10 年来, 研究区的生态恢复十分明显, 甚至超过 2003 年的生态环境质量。

#### 4.3 汶川县 RSEI 指数转移情况分析

以往的研究多采用对研究区 RSEI 指数进行检测的方法来分析其变化的幅度大小, 但并不能明确表示各指数等级之间的转变。因此, 为了进一步分析研究区 3 个时期 RSEI 指数的变化情况, 本文借鉴土地利用转移矩阵的分析方法, 利用 ENVI 平台, 构建研究区 3 个时期的 RSEI 指数的转移矩阵, 具体分析其各等级指数的变化情况 (表 4)。

表 4 汶川县 2003~2017 年 RSEI 指数转移矩阵 (km<sup>2</sup>)

| 时间段 | 等级 | 差     | 较差     | 中      | 良       | 优      |
|-----|----|-------|--------|--------|---------|--------|
| T1  | 差  | 0.47  | 3.67   | 2.25   | 2.20    | 0.00   |
|     | 较差 | 18.78 | 315.67 | 276.14 | 117.07  | 0.64   |
|     | 中  | 2.31  | 31.76  | 226.28 | 556.69  | 2.30   |
|     | 良  | 2.08  | 24.36  | 67.53  | 2076.36 | 3.54   |
|     | 优  | 0.03  | 0.39   | 1.58   | 347.98  | 0.87   |
| T2  | 差  | 0.69  | 43.89  | 4.28   | 2.40    | 0.12   |
|     | 较差 | 1.63  | 149.98 | 9.16   | 2.44    | 0.09   |
|     | 中  | 3.00  | 319.33 | 130.25 | 18.45   | 0.66   |
|     | 良  | 3.38  | 187.99 | 682.09 | 1288.06 | 52.14  |
|     | 优  | 0.68  | 23.58  | 34.90  | 887.46  | 234.28 |
| T3  | 差  | 7.61  | 14.86  | 7.50   | 3.89    | 36.82  |
|     | 较差 | 14.12 | 57.49  | 18.68  | 3.71    | 28.80  |
|     | 中  | 15.64 | 62.74  | 210.89 | 45.66   | 95.93  |
|     | 良  | 11.13 | 24.64  | 213.59 | 1390.02 | 422.20 |
|     | 优  | 2.92  | 7.19   | 14.16  | 888.57  | 482.19 |

在 T1 时间段, 较差等级的面积转移较少, 中、良两个等级的面积转移最明显, 差和优两个等级的面积转移不大。较差等主要向较高等级转移, 转移面积为 56.51km<sup>2</sup>; 中等主要向较低等级转移, 转移面积为 278.39km<sup>2</sup>, 向较高等级转移的面积较少, 仅有 69.11km<sup>2</sup>; 良等有 675.96km<sup>2</sup> 向较低等级转移, 347.98km<sup>2</sup> 向较高等级转移。

在 T2 时段, 较差、中、良 3 个等级的面积转移最大, 其他两个等级的面积转移不明显。其中, 较差等向较高等级转移的面



积达 530.9km<sup>2</sup>, 转移量大; 中等的面积大部分发生转移, 向较高等级转移的面积为 716.99km<sup>2</sup>, 向较低等级转移的面积为 13.44km<sup>2</sup>; 良等向较高等级转移的面积为 887.46km<sup>2</sup>, 向较低等级转移的面积为 23.29km<sup>2</sup>。这一时期研究区的生态环境主要呈现出恢复的趋势。

在 T3 时段, 差、较差、中、良 4 个等级主要向较高等级转移, 优等等级向较低等级转移。其中, 良等向较高等级转移的面积最大, 达 888.57km<sup>2</sup>, 其次是中等, 转移面积为 227.75km<sup>2</sup>, 较差等向较高等级转移面积为 94.57km<sup>2</sup>, 差等向较高等级转移的面积最小, 仅有 43.81km<sup>2</sup>。优等主要向较低等级转移, 其中, 转移至良等的面积最大, 转移面积为 422.20km<sup>2</sup>, 向中等及以下等级转移的面积为 161.55km<sup>2</sup>。

4.4 汶川县 RSEI 的变化与地形特征的关系

坡度、海拔等地形因子与区域生态环境的变化有密切联系, 分析生态环境质量随坡度、海拔的变化对于掌控区域生态环境的动态变化有重要意义。在得到研究区 3 个时期 RSEI 指数变化情况的基础上, 再结合研究区的坡度和海拔数据, 分析研究区 RSEI 指数随坡度和海拔的变化情况。利用标准差分级法<sup>[42]</sup>, 对断点值采取四舍五入的方法, 将研究区海拔分为 5 级: 762~1498、1498~2487、1487~3477、3477~4466、4466~5971m; 将“二调”中对坡度等级的划分与标准差分级法相结合, 将研究区的坡度分为 8 个等级: 0°~2°、2°~6°、6°~15°、15°~25°、25°~39°、39°~51°、51°~63°、63°~90° (表 5、6)。

从表 5 来看, 2003~2009 年, 研究区生态环境质量未恢复区域的面积随海拔的上升先增加后减少, 主要集中在海拔 2487~4466m 之间, 面积共 1116.51km<sup>2</sup>, 所占比例为 27.36%; 已恢复区域的面积所占比例小, 主要集中在海拔 2487~3477m 之间; 恢复提升区域的面积主要集中在海拔 1498~3477m 之间, 总面积 1542.75km<sup>2</sup>, 所占比例 37.81%。

表 5 汶川县 RSEI 指数随海拔变化情况

| 海拔         | 2003~2009             |        |                       |        |                       |        |
|------------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|
|            | 未恢复                   |        | 已恢复                   |        | 恢复提升                  |        |
|            | 面积 (km <sup>2</sup> ) | 比例 (%) | 面积 (km <sup>2</sup> ) | 比例 (%) | 面积 (km <sup>2</sup> ) | 比例 (%) |
| 762~1498m  | 115.64                | 2.83   | 17.91                 | 0.44   | 154.29                | 3.78   |
| 1498~2487m | 299.42                | 7.34   | 51.22                 | 1.26   | 730.32                | 17.90  |
| 2487~3477m | 432.61                | 10.60  | 124.04                | 3.04   | 812.43                | 19.91  |
| 3477~4466m | 683.90                | 16.76  | 68.97                 | 1.69   | 280.58                | 6.88   |
| 4466~5971m | 128.01                | 3.14   | 28.15                 | 0.69   | 153.47                | 3.76   |
| 海拔         | 2009~2017 年           |        |                       |        |                       |        |
|            | 未恢复                   |        | 已恢复                   |        | 恢复提升                  |        |
|            | 面积 (km <sup>2</sup> ) | 比例 (%) | 面积 (km <sup>2</sup> ) | 比例 (%) | 面积 (km <sup>2</sup> ) | 比例 (%) |
| 762~1498m  | 38.85                 | 0.95   | 34.95                 | 0.86   | 214.05                | 5.25   |
| 1498~2487m | 102.82                | 2.52   | 205.84                | 5.04   | 772.26                | 18.92  |

|            |                      |       |                      |       |                      |       |
|------------|----------------------|-------|----------------------|-------|----------------------|-------|
| 2487~3477m | 16.65                | 0.41  | 32.79                | 0.80  | 1319.66              | 32.34 |
| 3477~4466m | 73.49                | 1.80  | 25.18                | 0.62  | 934.78               | 22.91 |
| 4466~5971m | 81.74                | 2.00  | 13.31                | 0.33  | 214.56               | 5.26  |
| 海拔         | 2003~2017 年          |       |                      |       |                      |       |
|            | 未恢复                  |       | 已恢复                  |       | 恢复提升                 |       |
|            | 面积(km <sup>2</sup> ) | 比例(%) | 面积(km <sup>2</sup> ) | 比例(%) | 面积(km <sup>2</sup> ) | 比例(%) |
| 762~1498m  | 36.82                | 0.90  | 9.67                 | 0.24  | 241.34               | 5.91  |
| 1498~2487m | 52.84                | 1.29  | 19.27                | 0.47  | 1008.85              | 24.72 |
| 2487~3477m | 45.25                | 1.11  | 16.00                | 0.39  | 1307.83              | 32.05 |
| 3477~4466m | 100.54               | 2.46  | 52.21                | 1.28  | 880.70               | 21.58 |
| 4466~5971m | 88.31                | 2.16  | 18.75                | 0.46  | 202.56               | 4.96  |

2009~2017 年,研究区生态环境质量恢复提升的区域是主要部分,所占比例为 84.67%,未恢复和已恢复的区域所占比例均较小,分别为 7.68%、7.65%。恢复提升部分的面积在海拔 762~3477m 之间持续增加,所占比例为 56.51%;在海拔 3477~5971m 之间持续减少,所占比例为 28.17%。总体而言,生态环境质量在海拔 1498~4466m 之间恢复提升的面积最大,共 2976.7km<sup>2</sup>,所占比例为 74.17%。

2003~2017 年,研究区生态环境质量未恢复和已恢复的区域所占比例均较小,分别为 7.93%、2.84%,恢复提升的区域集中在海拔 1498~4466m 之间,面积为 3197.38km<sup>2</sup>,所占比例为 78.35%。

从表 6 来看,3 个时间段研究区生态环境质量变化区域的面积均随坡度的上升先增加后减少,坡度 15°~63° 之间变化最明显,且以坡度 39° 为间断值,在坡度 39° 以下未恢复、已恢复、恢复提升的面积都持续增加,坡度 39° 以上未恢复、已恢复、恢复提升的面积均持续减少。由于坡度 39°~63° 之间的区域受人类活动干扰的程度较低,因此研究区生态环境质量在该坡度区间的变化主要受自然因素的影响,如年均温、年降水量的变化,对植被的生长具有较大的影响,生态环境质量也会受到相应的影响。

具体而言,在坡度 15°~63° 之间,2003~2009 年,研究区的生态环境质量未恢复、已恢复、恢复提升的面积分别为 1516.21、266.43、1948.45km<sup>2</sup>,所占比例分别为 37.15%、6.53%、47.75%;2009~2017 年,未恢复、已恢复、恢复提升的面积分别为 271.82、283、3176.27km<sup>2</sup>,所占比例分别为 6.66%、6.93%、77.83%。2003~2017 年,未恢复、已恢复、恢复提升的面积分别为 280.85、103.83、3346.4km<sup>2</sup>,所占比例分别为 6.88%、2.54%、82%。

表 6 汶川县 RSEI 随坡度变化情况

|    |           |     |      |
|----|-----------|-----|------|
| 坡度 | 2003~2009 |     |      |
|    | 未恢复       | 已恢复 | 恢复提升 |

|          | 面积(km <sup>2</sup> ) | 比例(%) | 面积(km <sup>2</sup> ) | 比例(%) | 面积(km <sup>2</sup> ) | 比例(%) |
|----------|----------------------|-------|----------------------|-------|----------------------|-------|
| 0° ~2°   | 2.56                 | 0.06  | 0.39                 | 0.01  | 3.10                 | 0.08  |
| 2° ~6°   | 18.97                | 0.46  | 3.06                 | 0.08  | 23.57                | 0.58  |
| 6° ~15°  | 102.73               | 2.52  | 18.69                | 0.46  | 147.52               | 3.61  |
| 15° ~25° | 258.62               | 6.34  | 49.69                | 1.22  | 409.45               | 10.03 |
| 25° ~39° | 646.87               | 15.85 | 122.41               | 3.00  | 954.45               | 23.38 |
| 39° ~51° | 471.61               | 11.56 | 76.57                | 1.88  | 496.92               | 12.18 |
| 51° ~63° | 139.11               | 3.41  | 17.75                | 0.43  | 87.79                | 2.15  |
| 63° ~90° | 19.11                | 0.47  | 1.71                 | 0.04  | 8.45                 | 0.21  |
| 坡度       | 2009~2017 年          |       |                      |       |                      |       |
|          | 未恢复                  |       | 已恢复                  |       | 恢复提升                 |       |
|          | 面积(km <sup>2</sup> ) | 比例(%) | 面积(km <sup>2</sup> ) | 比例(%) | 面积(km <sup>2</sup> ) | 比例(%) |
| 0° ~2°   | 1.06                 | 0.03  | 0.48                 | 0.01  | 4.51                 | 0.11  |
| 2° ~6°   | 7.36                 | 0.18  | 3.54                 | 0.09  | 34.71                | 0.85  |
| 6° ~15°  | 32.18                | 0.79  | 24.21                | 0.59  | 212.53               | 5.21  |
| 15° ~25° | 66.91                | 1.64  | 68.82                | 1.69  | 582.03               | 14.26 |
| 25° ~39° | 127.65               | 3.13  | 143.91               | 3.53  | 1452.00              | 35.58 |
| 39° ~51° | 63.79                | 1.56  | 61.63                | 1.51  | 919.69               | 22.54 |
| 51° ~63° | 13.46                | 0.33  | 8.64                 | 0.21  | 222.55               | 5.45  |
| 63° ~90° | 1.14                 | 0.03  | 0.85                 | 0.02  | 27.29                | 0.67  |
| 坡度       | 2003~2017 年          |       |                      |       |                      |       |
|          | 未恢复                  |       | 已恢复                  |       | 恢复提升                 |       |
|          | 面积(km <sup>2</sup> ) | 比例(%) | 面积(km <sup>2</sup> ) | 比例(%) | 面积(km <sup>2</sup> ) | 比例(%) |
| 0° ~2°   | 1.18                 | 0.03  | 0.23                 | 0.01  | 4.64                 | 0.11  |
| 2° ~6°   | 7.79                 | 0.19  | 1.69                 | 0.04  | 36.13                | 0.89  |
| 6° ~15°  | 29.51                | 0.72  | 8.86                 | 0.22  | 230.57               | 5.65  |
| 15° ~25° | 56.40                | 1.38  | 20.34                | 0.50  | 641.03               | 15.71 |
| 25° ~39° | 115.66               | 2.83  | 43.98                | 1.08  | 1563.93              | 38.32 |

|         |       |      |       |      |        |       |
|---------|-------|------|-------|------|--------|-------|
| 39°~51° | 80.63 | 1.98 | 30.07 | 0.74 | 934.40 | 22.90 |
| 51°~63° | 28.17 | 0.69 | 9.44  | 0.23 | 207.04 | 5.07  |
| 63°~90° | 4.43  | 0.11 | 1.29  | 0.03 | 23.55  | 0.58  |

## 5 结论

本文以汶川县 2003、2009、2017 年 3 期遥感影像为基础,选取温度、湿度、绿度、干度 4 个指标,并用主成分分析方法集成所选指标,得出研究区 3 个时期的遥感生态指数。结果表明:

(1)2003~2017 年,研究区的生态环境质量以中等及以上为主,差等和较差等所占比例小,生态环境质量经历了未恢复到恢复提升的过程。2003、2009、2017 年中等及以上等级所占比例分别为 90.21%、82.01%、94.65%,差等和较差所占比例分别为 9.79%、17.99%、5.35%。2003~2009、2009~2017、2003~2017 年研究区生态环境质量未恢复、已恢复、恢复提升的区域所占比例分别为 40.67%、7.11%、52.22%;7.68%、7.65%、84.67%;7.93%、2.84%、89.23%。3 个时期研究区的 RSEI 指数的均值分别为 0.627、0.617、0.716,表明研究末期的生态环境质量超过研究时段初期。

(2)2003~2017 年,研究区生态环境质量的较差、中、良 3 个等级的面积转移明显,差和优两个等级变化不大。2003~2009 年,较差等级主要向较高等级转移,转移面积为 56.51km<sup>2</sup>;中等等级向较低等级转移,转移面积为 278.39km<sup>2</sup>,向较高等级转移的面积为 69.11km<sup>2</sup>;良等等级有 675.96km<sup>2</sup>向较低等级转移,347.98km<sup>2</sup>向较高等级转移。2009~2017 年,较差等级有 530.9km<sup>2</sup>向较高等级转移;中等等级向较高等级转移的面积为 716.99km<sup>2</sup>,向较低等级转移的面积较少;良等等级向较高等级转移的面积为 887.46km<sup>2</sup>。2003~2017 年,良等向较高等级转移的面积最大,达到 888.57km<sup>2</sup>,中等次之,转移面积为 227.75km<sup>2</sup>,较差等向较高等级转移面积为 94.57km<sup>2</sup>,差等等级向较高等级转移的面积最小,仅有 43.81km<sup>2</sup>。

(3)海拔 1498~4466m、坡度 15°~63° 之间,研究区生态环境质量的变化最大。2003~2009 年,海拔 1498~4466m 之间生态环境质量未恢复和恢复提升的比例分别为 34.7%、44.68%;坡度 15°~63° 之间生态环境质量未恢复和恢复提升的比例分别为 37.15%、47.75%,生态环境质量恢复提升的比例略高于未恢复的比例。2009~2017 年,海拔 1498~4466m 之间生态环境质量未恢复和恢复提升的比例分别为 4.73%、74.17%;坡度 15°~63° 之间生态环境质量未恢复和恢复提升的比例分别为 6.66%、77.83%,生态环境质量以恢复提升为主。2003~2017 年,海拔 1498~4466m 之间生态环境质量未恢复和恢复提升的比例分别为 4.87%、78.35%;坡度 15°~63° 之间生态环境质量未恢复和恢复提升的比例分别为 6.88%、82%,生态环境质量以恢复提升为主。

## 6 讨论

(1)遥感生态指数以温度、湿度、绿度、干度四个指标为评价指标,以各指标对第一主成分的贡献率确定指标的权重,指标的选取和指标权重确定都更具合理性。分析研究区各指标对 PC1 的载荷值,发现绿度对 PC1 的载荷值始终为正,说明绿度对生态环境质量始终起正向作用,这与众多的研究结果<sup>[13,43]</sup>一致。温度对区域的生态环境质量起负向作用,但由于研究区选择的是川西北高山高原区,与低海拔的平原区不同,较高的温度有利于植被的生长和人类活动的开展,因此温度对其生态环境质量主要起正向作用,这又与其他学者的研究结果有所不同。一般而言,研究区不同时期的四个指标对 PC1 的载荷值要么一直为正,要么一直为负<sup>[7]</sup>,这是因为其选择的研究区域的地表起伏不大,地表状况较均一,因此不同时期的四个指标对 PC1 的载荷值较稳定。而本文以川西北高山高原区的汶川县为研究区,其地表起伏十分明显,且地震导致研究区的地表状况发生明显变化,加剧了研究区地表状况的复杂性,因此研究区的四个指标在不同时期对 PC1 的载荷值可能会在正负之间变化。

(2)特别需要说明的是,2003~2009 年,经过“5·12”地震后,研究区生态环境质量恢复提升的区域的面积所占比例大于

生态环境质量未恢复的区域,该结果与人们认为地震对研究区生态环境的破坏程度有所差异。这是由于研究区西部高山区生态环境的脆弱性较明显,同时东部城市建成区易受到地震的影响,因此地震对该部分区域的破坏程度较大。而西部高山区与城市建成区过渡带之间受人类活动干扰较少,加之 2003~2009 年内研究区年平均气温总体波动上升<sup>[44]</sup>、降水量增加趋势明显<sup>[45]</sup>,使得该区域植被的自然生长条件得到改善,因此该时期研究区仍然有大部分区域的生态环境质量呈现恢复提升的趋势。

(3)在分析生态环境质量变化的原因时,气温的上升和降水量的增加有利于植被的生长,因而能改善区域的生态环境质量,这一结论主要是来源于以往学者的研究成果,但本文并未运用定量的模型方法分析气温、降水的变化与区域生态环境质量变化之间的相关性,因此,运用严谨的数学方法,阐明气温、降水变化与区域生态环境质量变化之间的联系是未来的研究方向。

(4)以 RSEI 指数评价区域生态环境质量,目前多采用影像成像时间点的数据来近似替代研究区一定时期的地表状况。为了尽量消除误差,本文选用的影像成像季节大体相同,且数据云量较小,基本符合前人进行生态环境评价对遥感数据的要求。因此,就目前遥感数据源的可获性而言,只能采用研究区 3 个时间段某天的数据代表研究区某个时段的数据。但研究时点若不是一个时间段,其成像信息很大程度上受到成像前外界偶然因素的影响。因此,以多源遥感数据为基础,将研究区某些时点的影像合成为某时段的影像,以减少外界随机因素而导致的误差,是本文今后的重要研究方向。

#### 参考文献:

- [1]张春桂,李计英.基于 3S 技术的区域生态环境质量监测研究[J].自然资源学报,2010,25(12):2060-2071.
- [2]欧阳志云,徐卫华,王学志,等.汶川大地震对生态系统的影响[J].生态学报,2008,28(12):5801-5809.
- [3]徐新良,江东,庄大方,等.汶川地震灾害核心区生态环境影响评估[J].生态学报,2008,28(12):5899-5908.
- [4]王文杰,潘英姿,徐卫华,等.四川汶川地震对生态系统破坏及其生态影响分析[J].环境科学研究,2008,21(5):110-116.
- [5]王涛,马寅生,龙长兴,等.四川汶川地震断裂活动和次生地质灾害浅析[J].地质通报,2008,27(11):1913-1922.
- [6]杨江燕,吴田,潘肖燕,等.基于遥感生态指数的雄安新区生态质量评估[J].应用生态学报,2019,30(1):277-284.
- [7]徐涵秋.城市遥感生态指数的创建及其应[J].生态学报,2013,33(24):7853-7862.
- [8]聂小军,高爽,陈永亮,等.西北风积沙区采煤扰动下土壤侵蚀与养分演变特征[J].农业工程学报,2018,34(2):127-134.
- [9]赵菁菁,鲁明星,谷海红,等.基于植被覆盖度变化的矿区生态修复效果研究[J].矿业研究与开发,2018,38(10):115-118.
- [10]许佳,祝晓瞳,苑塏烨.额河源流采金矿区不同恢复措施对矿区物种多样性和地上生物量的影响[J].干旱区地理,2019,42(3):581-589.
- [11]史鹏韬,刘子琦,李开萍.贵州省水土流失时空变化特征[J].地球与环境,2019,47(5):586-593.
- [12]王晓瑞,隋雪艳,林晨,等.长江中下游低山丘陵区土地整治对区域水土流失变化的影响机制研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(4):893-902.

- 
- [13]杨凤海,宋佳佳,赵烨荣,等.东北黑土水土流失区生态环境遥感动态监测[J].环境科学研究,2018,31(9):1580-1587.
- [14]张明明,张黎俊,粟海军,等.草海国家级自然保护区景观格局变化与景观发展强度研究[J].生态与农村环境学报,2019,35(3):300-306.
- [15]占昕,潘文斌,郑鹏,等.闽江河口湿地自然保护区及其周边区域景观自然性评价[J].生态学报,2017,37(20):6895-6904.
- [16]陈礼清,孙泽平,李德文,等.川西亚高山植被恢复过程中的土壤和地被物水源涵养能力评价[J].长江流域资源与环境,2014,23(7):1048-1052.
- [17]COUIC E, GRIMALDI M, ALPHONSE V, et al. Mercury behaviour and C, N, and P biogeochemical cycles during ecological restoration processes of old mining sites in French Guiana[J]. Environmental Science: Processes and Impacts, 2018, 20(4).
- [18]YAN D, GELLIE N, MILLS J G, et al. A soil archaeal community responds to a decade of ecological restoration [J]. Restoration Ecology, 2019.
- [19]DROUINEAU H, CARTER C, RAMBONILAZA M, et al. River continuity restoration and diadromous fishes: Much more than an ecological issue[J]. Environmental Management, 2018, 61(4):1-16.
- [20]彭文甫,王广杰,徐新良,等.基于多时相 Landsat5/8 影像的岷江汶川-都江堰段植被覆盖动态监测[J].生态学报,2016,36(7):1975-1988.
- [21]熊俊楠,彭超,范春捆,等.基于 MODIS 时序数据的汶川地震灾区植被覆盖变化监测[J].应用基础与工程科学学报,2018,26(1):60-69.
- [22]吴建召,崔羽,贺静雯,等.震区生态治理初期植物、土壤的营养含量及叶片化学计量特征[J].北京林业大学学报,2019,41(2):41-52.
- [23]段晨松,韩燕,张远彬.不同恢复方式地震受损区的土壤理化性质的 Meta 分析[J].山地学报,2018,36(6):857-866.
- [24]朱捷缘,卢慧婷,王慧芳,等.汶川地震重灾区恢复期生态系统健康评价[J].生态学报,2018,38(24):9001-9011.
- [25]程婷婷,辜彬.“5·12”汶川地震中都江堰生态恢复[J].四川大学学报(自然科学版),2019,56(3):563-572.
- [26]MIURA O, KANAYA G, NAKAI S, et al. Ecological and genetic impact of the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami on intertidal mud snails[J]. Scientific Reports, 2017, 7:44375.
- [27]MUKAI Y, SUZUKI T, MAKINO W, et al. Ecological impacts of the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami on aquatic animals in rice paddies[J]. Limnology, 2014, 15(3):201-211.
- [28]BROWN B, YUNIATI W, AHMAD R, et al. Observations of Natural Recruitment and Human Attempts at Mangrove

---

Rehabilitation After Seismic (Tsunami and Earthquake) Events in Simeulue Island and Singkil Lagoon, Aceh, Indonesia [M]// Post-Tsunami Hazard. Springer International Publishing, 2015.

[29]张灿, 徐涵秋, 张好, 等. 南方红壤典型水土流失区植被覆盖度变化及其生态效应评估——以福建省长汀县为例[J]. 自然资源学报, 2015, 30(6):917-928.

[30]罗春, 刘辉, 戚陆越. 基于遥感指数的生态变化评估——以常宁市为例[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(4):145-150.

[31]刘智才, 徐涵秋, 林中立, 等. 不同城市规划用地类型的生态效应研究[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(10):1352-1359.

[32]方灿莹, 胡秀娟, 徐涵秋, 等. 不同城市规划的生态质量差异对比研究[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(8):1097-1107.

[33]约日古丽卡斯木, 孜比布拉·司马义, 王蕾, 等. 新疆博乐市生态环境变化对城市建设用地扩张的响应[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1):252-259.

[34]CRIST E P. A TM Tasseled Cap equivalent transformation for reflectance factor data[J]. Remote Sensing of Environment, 1985, 17(3):301-306.

[35]BAIG M H A, ZHANG L, SHUAI T, et al. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance[J]. Remote Sensing Letters, 2014, 5(5):423-431.

[36]施婷婷, 徐涵秋, 唐菲. 经济快速增长区建筑用地变化及其对生态质量的影响——以福建晋江为例[J]. 应用生态学报, 2017, 28(4):1317-1325..

[37]GOWAED S N, XUE Y, 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(23):225-242.

[38]丁凤, 徐涵秋. TM 热波段图像的地表温度反演算法与实验分析[J]. 地球信息科学, 2006(3):125-130.

[39]VALOR E, CASELLES V. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 57(3):167-184.

[40]吴志杰, 赵书河. 基于 TM 图像的“增强的指数型建筑用地指数”研究[J]. 国土资源遥感, 2012(2):50-55.

[41]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.

[42]隋刚, 郝兵元, 彭林. 利用高程标准差表达地形起伏程度的数据分析[J]. 太原理工大学学报, 2010, 41(4):381-384.

[43]王丽春, 焦黎, 来风兵, 等. 基于遥感生态指数的新疆玛纳斯湖湿地生态变化评价[J]. 生态学报, 2019, 39(8):2963-2972.

[44]龚雪梅. 岷江上游植被生产力变化及其与气候和人类活动的关系研究[D]. 成都: 成都信息工程大学, 2018.



---

[45]侯雨乐. 汶川县 1960-2015 年的降水量变化与 ENSO 事件研究[J]. 农业灾害研究, 2017, 7(1):10-12.