

退耕还林背景下泸水市生态环境质量遥感动态变化

李益敏^{1,2}, 王东驰¹, 袁 静¹, 刘心知¹

(1.云南大学 地球科学学院, 昆明 650500; 2.云南省高校国产高分卫星遥感地质工程研究中心, 昆明 650500)

摘 要:为了深入了解退耕还林工程实施背景下的生态环境质量时空变化规律,基于 2001—2018 年 Landsat TM/OLI 遥感影像,选用遥感生态指数评价模型(RSEI),开展泸水市生态环境质量动态变化研究,并在此基础上分析了生态环境质量变化与退耕还林工程的相互关系。结果表明:(1) 2001 年、2006 年、2013 年、2018 年泸水市 RSEI 均值分别为 0.750、0.759、0.667、0.683,生态环境质量总体波动下降。分级处理后,当地生态环境质量由“较差”、“中”、“良”等级主导,占比之和达 97%以上。(2) 泸水市生态环境质量空间分布与高山峡谷的地形特征吻合,怒江两岸 RSEI 等级区域表现出东西对称性。在变化上,怒江水系河谷地带生态环境显著恶化,中高山地区则有所改善,叠加人类活动空间分布发现人类活动是导致当地生态环境质量整体下降的重要原因。(3) 泸水市退耕还林工程效果显著,2001—2018 年耕地减少了 24%,其中又有 64.74%坡度大于 25°。两轮退耕还林工程期间的各乡镇退耕还林率与 RSEI 变化的相关性较高,相关系数分别达到 0.767、0.817,表明退耕还林对当地生态环境产生着积极影响。

关键词:生态环境质量; 退耕还林工程; RSEI; 主成分分析

中图分类号:TP79; X171.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)04-0266-09

Remote Sensing Evaluation of Ecological Environment Quality in Lushui City Under the Influence of the Conversion of Cropland to Forest Project

LI Yimin^{1,2}, WANG Dongchi¹, YUAN Jing¹, LIU Xinzhi¹

(1.School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China; 2.Research Center of Domestic High-Resolution Satellite Remote Sensing Geological Engineering, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to understand the spatial and temporal variation of ecological environment quality in the context of the implementation of the fallow forestry project, based on Landsat TM/OLI remote sensing images from 2001 to 2018, the Remote Sensing Ecological Index (RSEI) was selected to carry out a study on the dynamic changes of ecological environment quality in Lushui City, and to analyze the interrelationship between ecological environment quality changes and the Conversion of Cropland to Forest Project on this basis. The results show that: (1) The RSEI values of Lushui City in 2001, 2006, 2013 and 2018 were 0.750, 0.759, 0.667 and 0.683, respectively; the overall quality of the ecological environment showed the downward trend in fluctuations; after the graded treatment, the ecological environment quality was dominated by ‘poor’, ‘medium’ and ‘good’ grades, which accounted for more than 97% of the total; (2) the spatial distribution of ecological environmental quality in Lushui City was coincident with the topographical features of the alpine canyon; The RSEI grade areas on both sides of the Nujiang River exhibited east-west symmetry; in terms of changes, the ecological environment in the valley of the Nujiang River system has deteriorated significantly, while the middle-high mountain areas have improved; after superimposing the spatial distribution of human activities, human activities were found to be the important cause of the overall decline in the quality of the local ecological environment; (3) Lushui City’s Conversion of Cropland to Forest Project had achieved remarkable results, with a 24% reduction in farmland between 2001 and 2018, of which another 64.74%

收稿日期:2020-07-08

修回日期:2020-08-05

资助项目:国家自然科学基金(41161070);云南省科技惠民计划项目(2013CA014);云南省科技厅—云南大学联合基金重点项目(2019FY003017)

第一作者:李益敏(1965—),女(白族),云南昆明人,学士,教授,主要从事 3S 技术在山地环境与地质灾害中的应用研究。E-mail:648119611@qq.com

通信作者:王东驰(1994—),男,陕西西安人,硕士,研究方向为 3S 技术在山地环境与土地利用的应用。E-mail:1014421591@qq.com

had slopes greater than 25° . The cumulative change in the areas of Conversion of Cropland to Forest Project and the changes in RSEI were highly correlated with correlation coefficients of 0.767 and 0.833. It is shown that the Conversion of Cropland to Forest Project has a positive impact on the local ecological environment.

Keywords: ecological environment quality; Conversion of Cropland to Forest Project; RSEI; principal component analysis

生态环境是人类生存的基本保障和社会发展的物质基础,但随着改革开放后我国加速的人口扩张和工业化进程,在带来经济高速发展的同时也导致了水土流失、土地荒漠化、生物多样性减少等严重的生态环境问题^[1]。为了应对这些日益突出的生态环境问题,我国进入 21 世纪后逐渐开始推行退耕还林这一重大生态恢复工程。经过 20 a 的实施历程,这一工程已经对各地生态环境质量的恢复产生了积极的影响。在步入 21 世纪第 3 个 10 a 的起点,快速、有效地评价区域生态环境质量现状并监测其变化过程具有突出的意义。同时,借助生态环境质量评价结果,对退耕还林工程的实施效果进行评估和检验,也可为该工程的进一步实施及调整提供理论支撑与指导。

评价某一区域的生态环境质量通常采用建立评价指标体系、选择综合评价模型等方法^[2]。但目前指标选取尚没有统一的标准,学者们主要结合研究区特点选取合理的评价指标开展分析。如 Marull 等^[3]从自然环境、生物环境及功能适宜性方面考虑,选取综合植被敏感性指数、基质稳固性指数等影响因子,评估大都市地区的生态环境质量状况;周华荣等^[4]基于农业、自然、人为环境压力 3 个指标子系统,对新疆全省的生态环境质量进行评价,并划分出空间分布等级。近年来,随着遥感技术的进步,评价生态环境质量的方法得以不断改进,一些学者开始基于 PSR(压力—环境—响应)模型^[5]、生态足迹^[6]、层次分析法^[7]等方法,对区域生态环境状况进行综合评价。这些研究对了解区域生态环境质量动态变化情况提供了新的科学依据。徐涵秋^[8]在前人基础上创建的遥感生态指数(RSEI, remote sensing ecological index)就是其中的代表。RSEI 完全基于遥感信息,权重根据各指标对各主成分的贡献率确定,克服了人为因素的干扰,从而能够较好地反映生态环境质量状况及其时空分异情况,已在城市^[9]、水土流失区^[10]、自然保护区^[11]、农牧交错区^[1]、矿区^[12]等多种地区得到广泛应用。对退耕还林的研究来说,利用 RSEI 作为评价参考,避免了数据统计的局限性,也可分析退耕还林工程对实施地区生态环境变化的影响,更有利于深入分析退耕还林工程的生态效果。

泸水市地处“三江并流”世界自然遗产地的核心区,生态区位十分重要。但复杂的高山峡谷地貌,加上多变的气候,造成人类对土地的利用十分困难,陡坡垦殖、过度砍伐、粗放建设等现象普遍,从而导致植被退化、水土流失、地质灾害等生态问题频出,对当地的生态环境造成了严峻压力^[13]。另一方面,退耕还林工程以及其他生态恢复工程的实施也在一定程度上改善着当地的生态环境,破坏和保护之间的博弈影响着新世纪泸水市生态环境质量的变化。本研究将以 Landsat TM/OLI 影像为数据源,选用遥感生态指数(RSEI),对泸水市 2001—2018 年的生态环境质量时空变化情况进行评价分析。然后结合退耕还林数据,开展生态环境质量与退耕还林的相互关系分析,揭示退耕还林工程实施背景下的生态环境质量时空变化规律,为类似地区的生态环境保护和相关生态恢复工程的实施优化提供科学依据。

1 研究区概况

泸水市地处云南省怒江州南部($99^{\circ}34'—99^{\circ}09'E$, $25^{\circ}33'—26^{\circ}32'N$),面积 $3\,203.04\text{ km}^2$,辖 6 镇 3 乡,2018 年末总人口 18.9 万人。全市整体地势北高南低,地处横断山脉高山峡谷区南端,最高海拔 $4\,162.1\text{ m}$,最低海拔 728.5 m ,境内高峰林立、沟壑纵横,碧罗雪山与高黎贡山夹怒江由北向南纵贯全境,呈现“两山夹一江”的格局。受特殊的地形地貌和印度洋热带季风的综合作用,泸水市从河谷至山巅的立体气候明显,纵跨亚热带、温带和寒带 3 种气候带,整体具有年温差小,日温差大,干湿季分明,四季不明显的气候特点,年均气温 21°C ,最热月均温 24.7°C ,最冷月均温 9.1°C ,极端日最高气温 40.3°C ,极端日最低气温 -10.2°C ;年均降雨量 $1\,199.1\text{ mm}$,年均蒸发量 $1\,420.2\text{ mm}$,无霜期 279 d;年平均风速 1.1 m/s ,风向多为南风;年均日照时数 $1\,576.8\text{ h}$ 。

泸水全市处于“三江并流”世界自然遗产区的核心地带,森林覆盖率达到 74%,成为滇西北生态战略地位重要的关键区域。但特殊且重要的自然禀赋极大地限制了当地的农业生产,使得耕地多分布在高山陡坡地区,55%以上的耕地为 25° 以上的坡耕地,产出低且破坏生态环境。因此,泸水市根据国家战略安

排在 2002 年和 2014 年分别启动实施了两轮退耕还林工程,截至 2018 年累计完成约 53 km²退耕面积。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与预处理

研究选用地 理 空 间 数 据 云 (<http://www.gscloud.cn/>) 提供的 Landsat TM/OLI 影像作为主要数据源,具体数据信息见表 1,数据质量较好。根

表 1 遥感影像数据信息

参数	2001 年 11 月	2006 年 10 月	2013 年 11 月	2018 年 11 月
轨道号	132/42	132/42	132/42	132/42
传感器类型	TM	TM	OLI	OLI
空间分辨率/m	30	30	30	30
波段	1,2,3,4,5,6,7,8	1,2,3,4,5,6,7,8	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10
云覆盖率/%	<3	<3	<3	<3

本研究用到的其他数据还包括:泸水市行政边界,获取自国家基础地理信息中心数据库;退耕还林统计资料,获取自泸水市林业局和统计年鉴;2001 年和 2018 年土地利用矢量数据,由 Landsat 遥感影像通过支持向量机法监督分类得到,两个年份分类精度分别为 95.50%,92.68%,Kappa 系数分别为 0.83,0.79,满足研究精度要求;坡度信息提取自 30 m 分辨率的 GDEM V2 数字高程数据。

2.2 研究方法

2.2.1 遥感生态指数评价指标 遥感生态指数 (RSEI)对国家环保部颁布的 EI 指数进行了修正,由 绿 度、湿 度、干 度 和 热 度 这 4 种 与 人 类 息 息 相 关、可 由 人 类 直 观 感 受 来 判 断 生 态 环 境 优 劣、易 于 直 接 从 遥 感 影 像 中 获 取 的 最 重 要 指 标 构 成^[8],具 有 数 据 易 获 取、评 价 范 围 受 限 小、指 标 权 重 不 受 人 为 干 扰 等 优 势。本 研 究 利 用 归 一 化 植 被 指 数 (NDVI)、湿 度 分 量 (WET)、干 度 指 数 (NDSI)和 地 表 温 度 (LST)分 别 代 表 绿 度、湿 度、干 度、热 度 4 个 指 标,共 同 构 建 遥 感 生 态 指 数,即:

$$RSEI=PCA[f(NDVI,WET,NDSI,LST)] \quad (1)$$

(1) 绿度指标。植被是指示区域生态环境质量的最敏感因子^[11],归一化植被指数(NDVI)与植物的叶面积指数、覆盖度以及生物量密切相关,是应用最为广泛的植被指数之一^[14],通常作为绿度指标用来监测区域植被生长状况和生态环境的变化。计算公式为:

$$NDVI=(N-R)/(N+R) \quad (2)$$

式中: N 为 Landsat TM/OLI 数据的近红外波段; R 为红色波段。

(2) 湿度指标。湿度分量反映了水体、土壤和植被的含水情况,与区域生态环境状况密切相关。因

据需要在 ENVI 5.3 和 ArcGIS 10.5 平台下分别对各时期的遥感影像进行如下预处理:(1) 对原始遥感影像进行辐射定标,并对各期影像的可见光、近红外、热红外波段进行大气校正^[14-15];(2) 使用二次多项式和最近邻像元法配准各时期遥感影像,将均方根误差控制 0.5 个像元内;(3) 统一遥感影像和行政边界投影;(4) 使用泸水市行政边界对影像进行裁切和提取。

此,以湿度分量代表湿度指标。不同 Landsat 的传感器对应的湿度分量表达式不尽相同^[16-17],ETM,TM,OLI 分别对应的表达式为:

$$WET(ETM)=0.1509B_1+0.1973B_2+0.3279B_3+0.3406B_4-0.7112B_5-0.4572B_7$$

$$WET(TM)=0.0315B_1+0.2021B_2+0.3102B_3+0.1594B_4-0.6806B_5-0.6109B_7$$

$$WET(OLI)=0.1511B_1+0.1972B_2+0.3283B_3+0.3407B_4-0.7117B_5-0.4559B_7$$

(3)

式中: B_1,B_2,B_3,B_4,B_5,B_7 分别为各传感器的蓝、绿、红、近红外、短波红外 1、短波红外 2 波段的反射率。

(3) 干度指标。土壤过度干化会严重危害区域生态环境^[18],需在评价中考虑干度的影响。造成区域地表“干化”的一般除了裸土,还包括相当一部分建筑用地。因此,本研究同时选用裸土指数(SI)和建筑指数(IBI)合成的干度指数(NDSI)作为干度指标来代表土壤干化程度,NDSI 计算公式如下:

$$NDSI=(SI+IBI)/2 \quad (4)$$

$$SI=[(B_5+B_3)-(B_4+B_1)]/[(B_5+B_3)+(B_4+B_1)] \quad (5)$$

$$IBI=\frac{2B_5/(B_5+B_4)-[B_4/(B_4+B_3)+B_2/(B_2+B_5)]}{2B_5/(B_5+B_4)+[B_4/(B_4+B_3)+B_2/(B_2+B_5)]} \quad (6)$$

式中: B_1,B_2,B_3,B_4,B_5 分别为 TM 和 OLI 传感器中蓝、绿、红、近红外、短波红外 1 波段的反射率。

(4) 热度指标。热度指标用地表温度来表示,它是地物热红外辐射的定量表达。反演地表温度对监测地表温度变化所带来的区域生态环境改变有重要意义。本研究采用辐射传输方程法^[19]反演地表温度。计算公式为:

$$L_\lambda=[\epsilon B(T_s)+(1-\epsilon)L_\downarrow]\tau+L_\uparrow \quad (7)$$

$$B(T_s)=[L_\lambda-L_\uparrow-\tau(1-\epsilon)L_\downarrow]/(\tau\epsilon) \quad (8)$$

式中: L_λ 为热红外辐射亮度值; L_\uparrow 为大气向上辐射亮度; L_\downarrow 为大气向下辐射亮度; τ 为大气在热红外波

段的透过率; ϵ 为地表比辐射率; $B(T_s)$ 为温度为 T 的黑体在热红外波段的辐射亮度; T_s 为地表温度。

根据普朗克公式的反函数,可求得地表真实温度 LST:

$$LST=K_2/\ln(\frac{K_1}{B(T_s)}+1)$$

(9)

式中: K_1 和 K_2 为定标系数。对于 TM Band6, $K_1=607.76\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\mu\text{m}\cdot\text{sr})$; $K_2=1260.56\text{ K}$; 对于 TIRS Band10, $K_1=774.885\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\mu\text{m}\cdot\text{sr})$; $K_2=1321.079\text{ K}$ 。

根据经验公式^[20-21] 计算地表比辐射率 ϵ , 当 $0\leq NDVI\leq 0.157$ 时, ϵ 为 0.92; 当 $NDVI<0$ 或 $NDVI\geq 0.727$ 时, ϵ 为 1; 当 $0.157<NDVI<0.727$ 时, ϵ 计算公式如下:

$$\epsilon=1.009+0.047\ln(NDVI)$$

(10)

2.2.2 遥感生态指数构建 根据以上 4 个指标的计算结果,分别进行标准化处理,转为无量纲指标,避免因指标间单位的不同而造成最终结果权重失衡。标准化处理公式如下:

$$NI=(I-I_{\min})/(I_{\max}-I_{\min})$$

(11)

式中:NI 为标准化后的指标值; I 为该指标的数值大小; I_{\max} 和 I_{\min} 分别为该指标的最大值和最小值。

将标准化后的 4 个指标通过 ENVI 软件合成由波段组成的新影像,输入主成分分析模块进行 PCA 处理,生成互不相关的输出波段,而结果主要信息集中到了第一主成分中(PC1)^[22]。利用第一主成分结果可以构建出原始的遥感生态指数 $RSEI_0$, 公式为:

$$RSEI_0=PCA[f(NDVI,WET,NDSI,LST)]$$

(12)

式中:PCA 代表主成分分析。对 $RSEI_0$ 使用公式(11) 对进行归一化处理,得到最终的 RSEI。RSEI 值介于 $[0,1]$;RSEI 越大,代表生态环境越好;反之,代表生态环境越差^[11]。RSEI 指数不适宜具有较大范围水域的区域,但本研究区内水体以怒江干流为主,占研究区面积比例不到 0.5%,因此不需将水体单独进行掩膜提取。

3 结果与分析

3.1 泸水市生态环境质量评价分析

3.1.1 生态环境质量时间变化分析 泸水市遥感生态指数计算结果表明(表 2—3,图 1),4 个年份 RSEI 均值分别为 0.750,0.759,0.667,0.683,整体表现为波动下降特征,在 2001—2006 年与 2013—2018 年两个时期有小幅上升。以上结果表明 2001—2018 年泸水市生态环境质量总体呈现波动变差的趋势。

从 4 个指标的均值和载荷值来看,绿色、湿度对

生态环境变好起着正向作用,而干度、热度相反。泸水市绿色指标在 2001—2018 年持续下降,湿度、干度、热度在研究期内不断波动,没有明显的变化趋势,但在 2001—2006 年和 2013—2018 年两个时段,湿度有明显的增加,绿色减少有限,而干度和热度有所下降,所以这两个时段的生态环境质量有所改善。

表 2 泸水市各指标主成分分析结果

年份	指标	第一主成分	第二主成分	第三主成分	第四主成分
2001	绿色	0.6621	0.41731	0.59669	0.6017
	湿度	0.3055	-0.24736	0.66452	0.0133
	干度	-0.0325	-0.51343	-0.02004	0.7200
	热度	-0.6051	0.57126	0.34529	-0.2082
	特征值	0.05341	0.00644	0.00067	0.00003
	贡献率/%	88.21	10.64	1.10	0.05
2006	绿色	0.6603	0.29694	0.51702	0.4174
	湿度	0.3182	-0.14302	-0.38302	0.3296
	干度	-0.0437	-0.58720	0.06038	0.7346
	热度	-0.6365	0.67639	-0.17421	-0.0219
	特征值	0.07924	0.00683	0.00045	0.00010
	贡献率/%	91.48	7.89	0.52	0.11
2013	绿色	0.6512	0.35276	0.57532	0.3186
	湿度	0.2506	-0.20639	-0.23827	0.4917
	干度	-0.0382	-0.43694	0.75863	0.6799
	热度	-0.7430	0.73820	0.72883	0.0127
	特征值	0.03872	0.00814	0.00073	0.00005
	贡献率/%	81.28	17.09	1.53	0.10
2018	绿色	0.6349	0.31817	-0.13427	-0.0473
	湿度	0.2902	-0.16607	-0.31202	0.7102
	干度	-0.0410	-0.46192	0.03531	0.4015
	热度	-0.7150	0.77190	0.10237	0.2723
	特征值	0.03746	0.00289	0.00031	0.00007
	贡献率/%	91.97	7.10	0.76	0.17

表 3 泸水市各年份 4 个指标及 RSEI 均值

年份	绿色	湿度	干度	热度	RSEI
2001	0.4934	0.6378	0.4768	0.2511	0.750
2006	0.4919	0.7818	0.4514	0.2363	0.759
2013	0.4890	0.6669	0.5571	0.3334	0.667
2018	0.4884	0.7842	0.4827	0.2186	0.683

为更好地分析 RSEI 的分布情况,参考《生态环境状况评价技术规范》,将研究区的 RSEI 划分为差、较差、中等、良、优这 5 个等级,分别对应 RSEI 的范围为 $[0,0.2)$, $[0.2,0.4)$, $[0.4,0.6)$, $[0.6,0.8)$, $[0.8,1.0]$,并制作生态环境等级分布变化图和面积与比例统计表(图 2,表 4),直观显示 4 个时相中 RSEI 各等级变化情况。

从表 4 可以看出,泸水市生态环境质量由“较差”、“中”、“良”等级主导,3 个等级占比之和达 97%以上。RSEI 中等及以下等级所占比例之和在 2001 年、2006 年、2013 年、2018 年分别为 66.20%,66.49%,72.67%,67.23%,呈波动上升趋势;良及以上等级所占比例 2001

年、2006 年、2013 年、2018 年分别为 33.80%，33.51%，27.33%，32.77%，在 2001—2013 年逐渐下降，2013 年以后有一定上升。RSEI 各等级呈现这样的变化趋

势也印证了 2001—2018 年期间泸水市的生态环境质量总体上在逐渐恶化，但在 2001—2006 年和 2013—2018 年两个时段又有所反弹好转的情况。

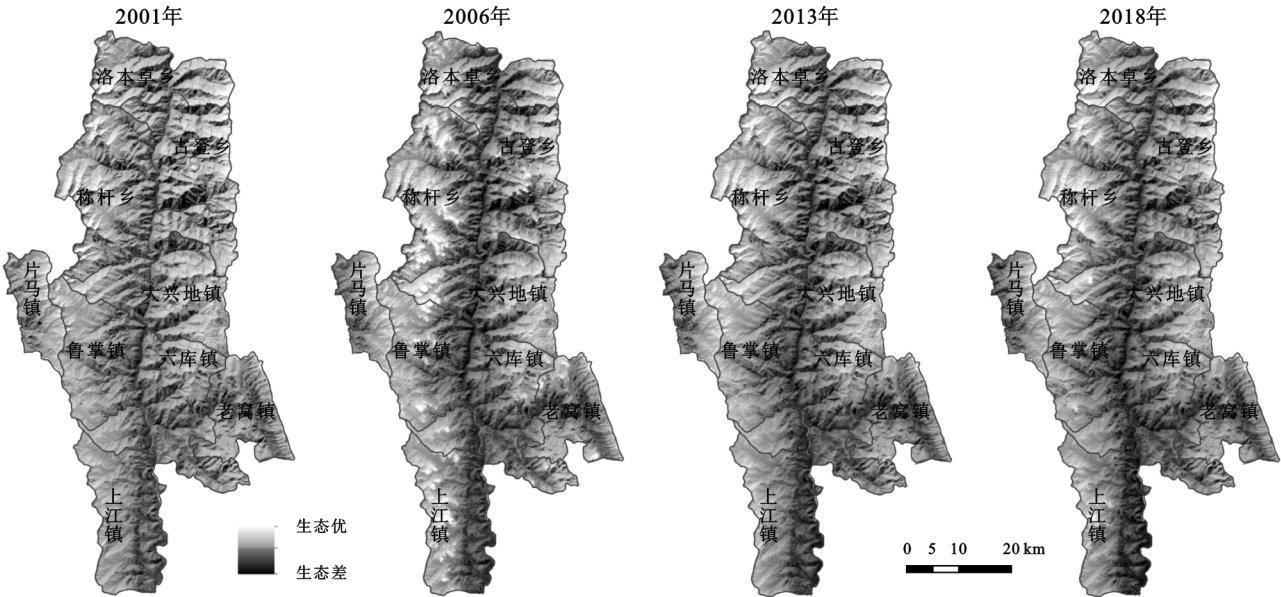


图 1 泸水市 RSEI 分布变化

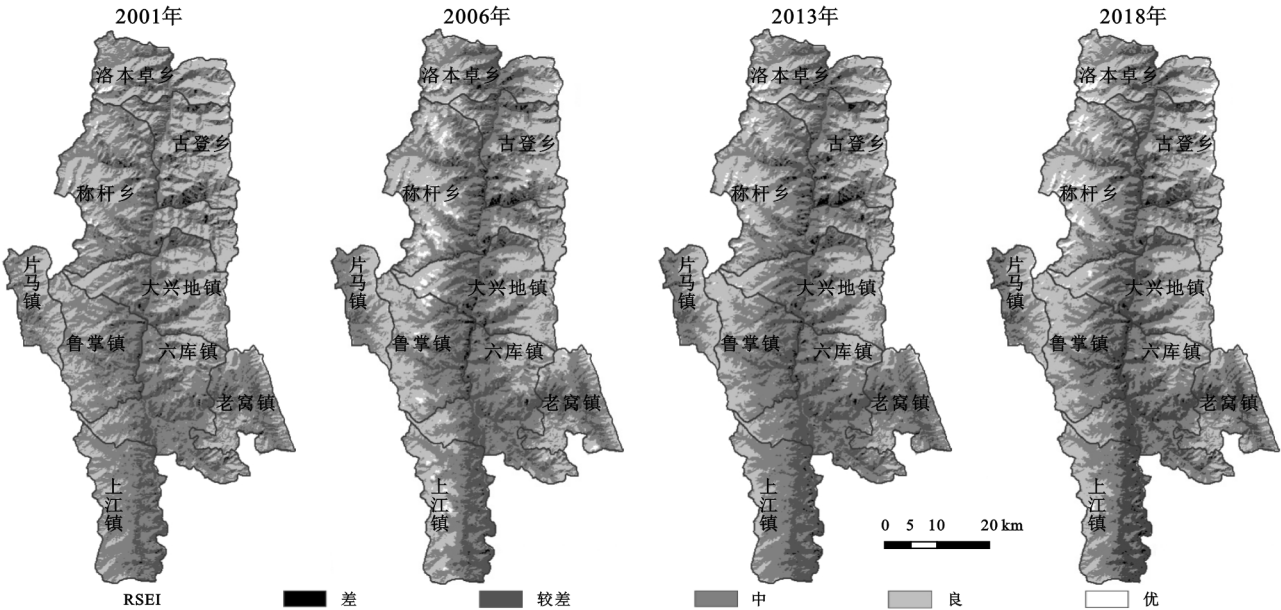


图 2 泸水市生态环境等级分布变化

表 4 泸水市生态环境各等级面积与比例

年份	项目	差	较差	中等	良	优
		[0.0,0.2)	[0.2,0.4)	[0.4,0.6)	[0.6,0.8)	[0.8,1.0]
2001	面积/km ²	16.98	565.66	1537.78	1067.25	15.37
	比例/%	0.53	17.66	48.01	33.32	0.48
2006	面积/km ²	30.43	676.48	1422.79	1027.86	45.48
	比例/%	0.95	21.12	44.42	32.09	1.42
2013	面积/km ²	37.15	738.94	1551.55	850.73	24.67
	比例/%	1.16	23.07	48.44	26.56	0.77
2018	面积/km ²	18.58	652.46	1482.37	1001.91	47.72
	比例/%	0.58	20.37	46.28	31.28	1.49

3.1.2 生态环境质量空间分布变化分析 如图 2 所示，总体来看，泸水市生态环境质量表现出明显的南北向狭长型分布特征。怒江作为纵向穿越泸水市的分界中线，其东西两岸的生态环境质量等级区域表现出较为明显的对称性，越靠近怒江，分布等级就越低，这与高山峡谷的地貌特征相吻合。

从各质量等级分布来看，差和较差等级主要聚集于怒江水系河谷两岸及周围缓坡地带，在怒江州府驻地的六库镇市区、古登乡佑雅村一腊斯底村一带、上江镇境内的小型坝区等区域有小范围集聚。这些地区人类活动密集，建设用地扩张迅速，是全市主

要的城镇聚集地和耕地分布区域,而在称杆乡与古登乡境内则存在大片地表裸露、水土流失严重、生态环境恶劣的未利用地和低覆盖度草地,影响了区域整体的生态环境。2001 年较差区域已基本覆盖全市怒江水系河谷地区,之后河谷地区生态环境质量的恶化面积与程度逐渐加深,至 2018 年更是辐射影响到周边一定范围。

生态环境质量等级中及以上的区域主要分布在泸水市境内碧罗雪山与高黎贡山一带的中高山地区。优等级区域多聚集在泸水市西北部称杆乡和洛本卓乡境内,这些区域以林地为主要地类,山高林密,居民点少,基本未受到人类活动侵扰。2001 年以后,生态环境质量等级为良的区域有连片趋势,中等级区域变化不大,但也有不少靠近河谷的区域逐渐从中等级转为较差等级。

3.1.3 生态环境质量变化成因分析 泸水市地处怒江流域核心地区之一,根据樊辉等^[23]的研究,整个怒江流域在近几十年中,年均气温升高趋势显著、年均降水

变化不显著,总体可能会对当地生态环境产生负面影响。生态环境质量变化除了与气候变化有关外,人为因素也会产生直接影响,进一步发掘泸水市生态环境质量变化的驱动原因,特别是与人类活动的关系。将泸水市 2001 年和 2018 年的生态环境质量等级分布图进行叠加,用前期的 RSEI 等级减去后期的 RSEI 等级,等级差值为负、0、正,依次代表生态环境变差、不变和变好,得到泸水市 2001—2018 年生态环境质量变化分布图。统计后,泸水市 2001—2018 年生态环境质量变差、不变、变好的比例分别为 9.71%,77.12%,13.17%。

由于泸水市交通运输、工程建设、生活居住、农业耕作等人类活动主要集中在海拔 2 000 m 以下区域,因此,将泸水市分为人类活动区(海拔≤2 000 m)和自然生态区(海拔>2 000 m),分别统计两类区域中 RSEI 等级的分布和变化情况(表 5)。最后再将生态环境质量变化分布图与 2 000 m 高程分界线叠加,得到图 3,可以直观分析泸水市生态环境质量变化区域在人类活动区和自然生态区的分布情况。

表 5 泸水市生态环境等级分布分区统计 km²

年 份	人类活动区(海拔≤2000 m)					自然生态区(海拔>2000 m)				
	差	较差	中	良	优	差	较差	中	良	优
2001	7.98	349.98	529.24	90.97	0.05	11.68	222.02	1079.43	782.63	10.58
2006	23.49	468.15	478.32	8.16	0.05	5.81	183.31	892.08	981.55	43.58
2012	25.25	503.38	436.49	12.86	0.23	10.41	208.34	1057.95	806.67	22.96
2018	13.81	473.71	469.59	21.05	0.05	3.98	154.73	958.07	943.63	45.90

根据表 5 可知,在泸水市人类活动区,RSEI 差和较差等级的范围在 2001—2012 年呈扩大趋势,中和良等级则有明显缩小,到 2018 年虽有所反弹,但相比 2001 年,生态环境质量已有显著恶化;在自然生态区内,RSEI 差和较差等级的面积呈波动减少的趋势,良和优等级的面积为波动增加趋势,整体上在 18 a 中表现出生态环境质量变好的态势。再分析图 3,泸水市生态环境质量变好的区域主要分布在怒江西部高黎贡山和东部碧罗雪山的中高山地区,纵贯泸水南北,这里是高黎贡山国家自然保护区的核心区域;变差区域主要聚集在怒江水系河谷地带,较多分布在中部的鲁掌镇、大兴地镇和南部的六库镇和上江镇。再结合 2 000 m 高程分界线,可明显发现人类活动区与自然生态区的生态环境质量变化趋势截然不同。泸水市生态环境质量恶化的区域绝大部分位于人类活动区范围内,而生态环境质量改善的区域则主要分布在海拔 2 000 m 以上的自然生态区。

人类活动区和自然生态区呈现出不同的生态环境质量分布变化特征,说明泸水市在 2001—2018 年中生态环境质量的下降主要是受 2 000 m 以下人类活动区的生态环境质量恶化所致,而 2 000 m 以上地

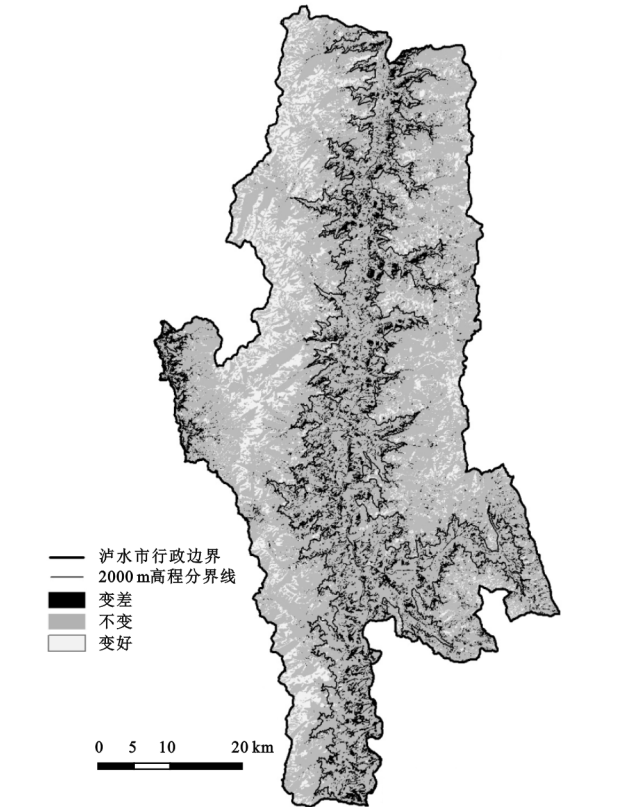


图 3 泸水市 2001—2018 年生态环境质量变化与人类活动的关系

区受人类干扰减少,加上合理的保护,使这一区域的生态环境质量反而有一定提高。进入 21 世纪后,退耕还林、陡坡地生态治理等一系列生态恢复工程陆续在泸水市启动,经过近 20 a 的实施,2 000 m 以上高山地区的人类活动明显减少,陡坡耕地、草地、未利用地的植被逐渐恢复,森林覆盖率不断提升。但人类活动在 2 000 m 以上地区的退出,就不得不向着低海拔地区逐渐聚集,加上经济社会各方面建设的快速推进,加剧了 2 000 m 以下河谷和低山地区生态环境的恶化。特别 1 500 m 以下的河谷生态恶化区以 5.57% 的国土面积集中分布了泸水市近 70% 的人口,加上不合理的土地利用方式,已成为全市生态环境最恶劣的地区。以上分析在一定程度上说明了生态环境质量对人类活动反应的敏感性,人类对环境的快速改造会对生态环境产生显著的负面影响。

3.2 泸水市生态环境质量变化与退耕还林工程的关系分析

云南省是实施退耕还林工程的重要省份^[24],选取泸水市在 2002 年和 2014 年分别实施了两轮退耕还林工程,对当地地表环境产生着直接影响,是研究期内生态环境质量变化的重要影响因素之一。为了科学评估泸水市退耕还林工程实施效果,揭示退耕还林工程与生态环境质量变化的关系,首先统计分析耕地在坡度梯度的面积变化情况,评价泸水市 2001—2018 年退耕还林工程的效果;再进一步计算 2001—2006 年和 2013—2018 年两个退耕还林实施期中各乡镇退耕还林率,分乡镇与对应 RSEI 变化值进行拟合,评价泸水市生态环境质量变化与退耕还林工程的相关性大小。

3.2.1 退耕还林工程实施效果 根据退耕还林工程主要针对 25° 以上的坡耕地这一特点,分析泸水市退耕还林工程坡度分布及变化特征,以评价退耕还林工程的实施效果。考虑到高山峡谷地区坡度陡,低坡度地区面积积极小的地形特征,参考相关论文^[25],将坡度分为五级:1 级(0°~8°),2 级(8°~15°),3 级(15°~25°),4 级(25°~35°),5 级(>35°),分别统计 2001—

2018 年各级耕地面积变化情况(图 4)。

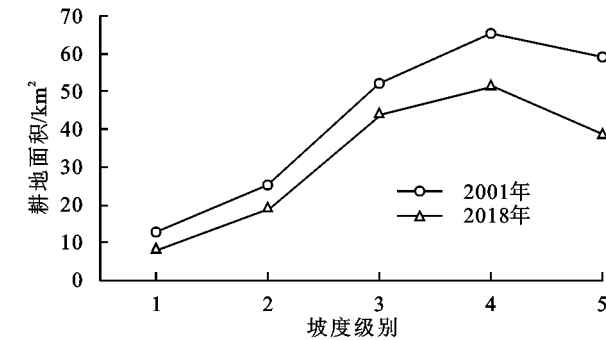


图 4 泸水市耕地在坡度梯度上的分布变化

从图 4 可以看出,在小于 35° 的坡度区间,泸水市耕地面积随坡度等级的升高而逐渐增加,大于 35° 后又有所降低。坡度大于 25° 的耕地占到耕地总面积的 55% 以上,坡度小于 8° 的耕地只占到 5% 左右。以上统计说明泸水市陡坡耕种现象十分普遍,低质量的坡耕地成为全市主要的耕地资源。大量陡坡地区被开垦为耕地后,植被覆盖度降低,会导致水土流失加重、地质灾害易发,严重威胁着当地的生态环境。对比 2001 年和 2018 年耕地在坡度梯度上的分布变化,不难发现各坡度等级的耕地面积均有不同程度的下降,特别是坡度大于 25° 的耕地面积减少尤为明显,占总减少面积的 64.74%。而在所有减少的耕地中有 75.49% 转变为林地,说明泸水市的耕地在 18 a 中发生这样的变化与退耕还林工程密不可分。以上统计都证明了泸水市退耕还林工程的效果显著,基本达到了工程实施的预期目标。得到退耕还林的耕地在转为林地和草地后,会对局部地区乃至怒江州的生态环境质量产生积极影响。

3.2.2 生态环境质量变化与退耕还林面积的相关性

对 2001—2006 年和 2013—2018 年两个时段的泸水市各乡镇累计退耕还林面积进行统计,然后依据公式(13),求出每期各乡镇退耕还林率(表 6)。

$$S=(N/K) \times 100 \% \tag{13}$$

式中: S 是某期该乡镇退耕还林率; N 为某期该乡镇退耕还林面积; K 是该乡镇土地总面积。

表 6 泸水市各乡镇累积退耕还林面积、退耕还林率和 RSEI 变化

时间段	乡镇	六库镇	片马镇	鲁掌镇	上江镇	老窝镇	称杆乡	古登乡	大兴地镇	洛本卓乡
2001—2006 年	累计退耕还林面积/hm ²	2260.32	136.75	1354.64	1224.38	599.39	1541.87	1106.36	1349.68	406.7
	退耕还林率/%	5.12	0.86	3.99	3.49	2.54	2.62	3.39	3.51	1.55
	RSEI 变化	0.005438	0.003186	0.007296	0.011499	-0.00034	0.004328	0.003232	0.003637	-0.00539
2013—2018 年	累计退耕还林面积/hm ²	2259.17	420.09	776.82	412.4	777.87	1362.97	1894.34	1223.23	885.38
	退耕还林率/%	5.12	2.65	2.29	1.18	3.29	2.32	5.80	3.18	3.27
	RSEI 变化	0.016938	-0.00277	0.007197	0.008930	0.013589	0.012789	0.016894	0.010302	0.015111

分别将各乡镇统计结果序列与对应区域的 RSEI 期内差值在 SPSS 26 统计软件中进行斯皮尔曼相关

性分析,结果见图 5。2001—2006 年,退耕还林率与遥感生态指数 RSEI 变化在 0.05 级别显著性水平下,

相关系数为 0.767,为强相关;2013—2018 年,退耕还林率与遥感生态指数 RSEI 变化在 0.01 级别显著性水平下,相关系数为 0.817,为强相关。可见,泸水市

退耕还林率与生态环境质量变化的相关性较高,也说明退耕还林工程对实施地区的生态环境质量有着积极影响。

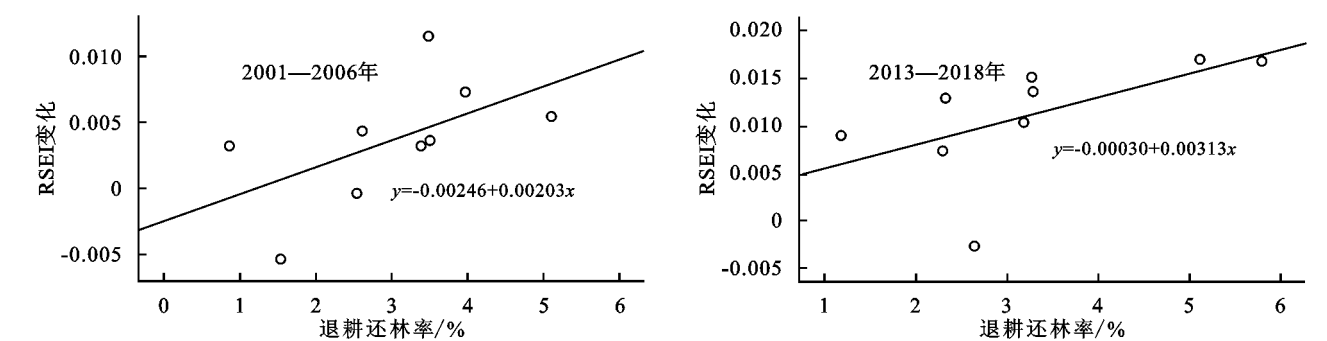


图 5 泸水市 RSEI 变化和各乡镇退耕还林率关系

4 结论与讨论

(1) 从时间变化上看,泸水市 2001 年、2006 年、2013 年、2018 年 RSEI 均值分别为 0.750、0.759、0.667、0.683,总体呈小幅波动下降趋势。生态环境质量良及以上等级所占比例分别为 33.80%、33.51%、27.33%、32.77%。泸水市 2001—2018 年期间的生态环境质量总体上逐渐恶化,但在 2001—2006 年和 2013—2018 年两个时间区间又有所反弹好转。

(2) 从空间分布上看,泸水市生态环境质量呈现明显的南北向狭长型分布特征,且怒江东西两岸的生态环境质量等级区域表现出一定的对称性,这与其高山峡谷的地貌特征吻合。分析生态环境质量变化成因后发现,泸水市总体生态环境质量的恶化除了与怒江流域气候的变化有一定关系外,更与 2 000 m 以下区域人类活动的活跃和干扰密切相关,说明了生态环境质量对人类活动反应的敏感性。

(3) 退耕还林工程的实施,对工程实施期内泸水市的生态环境产生着积极影响。统计分析发现,泸水市退耕还林工程效果显著,大量坡耕地得到退耕。在 2001—2006 年和 2013—2018 年两轮退耕还林工程主要实施期内的相关性分析中,生态环境质量变化也与退耕还林工程有较高的相关性。

进入 21 世纪后,泸水市响应国家发展战略方针,重点开展了退耕还林工程,并配合天然林保护、陡坡地生态治理、自然保护区建设、林业改造等其他生态恢复工程,主要修复了怒江流域生态脆弱区、生态重要区的生态环境。各项生态恢复工程互为配合、多头并进,有助于调节气候环境、增加植被覆盖度、优化利用林业资源、遏制水土流失和自然灾害,提升生态系统稳定性和生态服务功能,促进形成有效的国土生态安全体系。

但是从本研究的生态环境质量变化分析不难发现,泸水市退耕还林工程及其他生态恢复工程对生态环境的恢复效果依然有限,绿度等指标在 18 a 中依然呈小幅下降趋势,且 2 000 m 以下人类活动活跃地区的生态环境变化形势也不容乐观。今后应扩大生态环境保护的范围,并加大投入,将保护工作的重心向 2 000 m 以下人类活跃地区倾斜,制定出针对性的生态修复方案。同时,也应及时调整经济社会发展方式,保护与减少破坏并行,通过优化资源利用模式,降低对生态环境的破坏。

由于在数据、技术等方面的限制,本研究会存在一些不足之处,如遥感影像时相无法完全一致、影像分辨率不高、影像中山体光照阴影的存在等问题都会对 RSEI 结果产生影响。此外,虽然对生态环境质量变化的成因进行了一定分析,但对气候、人类活动等因素的驱动内因未有深入的探讨,因此也将进一步加深这方面的研究。

参考文献:

- [1] 张晓东,刘湘南,赵志鹏,等.农牧交错区生态环境质量遥感动态监测:以宁夏盐池为例[J].干旱区地理,2017,40(5):1070-1078.
- [2] 姚尧,王世新,周艺,等.生态环境状况指数模型在全国生态环境质量评价中的应用[J].遥感信息,2012,27(3):93-98.
- [3] Marull J, Pino J, Mallarach J M, et al. A land suitability index for strategic environmental assessment in metropolitan areas [J]. Landscape and Urban Planning, 2007,81(3):200-212.
- [4] 周华荣,潘伯荣,海热提·涂尔逊.新疆生态环境现状综合评价研究[J].干旱区地理,2001,24(1):23-29.
- [5] 郭恒亮,刘如意,赫晓慧,等.基于 PSR 模型的南水北调中线主干渠沿线区域生态环境评价[J].南水北调与水利科技,2017,15(4):65-70,135.

- [6] 秦静,白中科,周伟.基于生态足迹与生态服务价值的区域生态环境动态评价[J].中国人口·资源与环境,2016,26(5):244-247.
- [7] 潘洋,巩合德,董李勤,等.基于层次分析法的广西金秀地区生态环境质量综合评价[J].西南林业大学学报:自然科学,2017,37(3):74-80.
- [8] 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.
- [9] 农兰萍,王金亮.基于 RSEI 模型的昆明市生态环境质量动态监测[J].生态学杂志,2020,39(6):2042-2050.
- [10] 李粉玲,常庆瑞,申健,等.黄土高原沟壑区生态环境状况遥感动态监测:以陕西省富县为例[J].应用生态学报,2015,26(12):3811-3817.
- [11] 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.
- [12] 吴志杰,王猛猛,陈绍杰,等.基于遥感生态指数的永定矿区生态变化监测与评价[J].生态科学,2016,35(5):200-207.
- [13] 鲍华姝,丁扬,李益敏.高山峡谷区生态修复模式探究:以怒江州泸水县为例[J].林业资源管理,2015(5):103-109.
- [14] Goward 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(2/3):225-242.
- [15] 宋军伟,张友静,李鑫川,等.基于 GF-1 与 Landsat-8 影像的土地覆盖分类比较[J].地理科学进展,2016,35(2):255-263.
- [16] Crist E P. A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data[J]. Remote Sensing of Environment,1985,17(3):301-306.
- [17] Baig M H A, Zhang L F, Shuai T, et al. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat8 at-satellite reflectance [J]. Remote Sensing Letters, 2014,5(5):423-431.
- [18] 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.
- [19] 王法漂,何晓宇,方泽兴,等.基于长时间序列遥感数据的阿伯德尔国家公园生态环境质量评价[J].地球信息科学学报,2019,21(9):1479-1489.
- [20] Bhandari A K, Kumar A, Singh G K. Improved feature extraction scheme for satellite images using NDVI and NDWI technique based on DWT and SVD[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015,8(9):6949-6966.
- [21] 覃志豪,李文娟,徐斌,等.陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计[J].国土资源遥感,2004,16(3):28-32.
- [22] 潘明慧,袁轶男,王亚蕾.基于 RSEI 的福州旗山国家森林公园生态环境质量变化研究[J].山东农业大学学报:自然科学版,2020,51(1):57-63.
- [23] 樊辉,何大明.怒江流域气候特征及其变化趋势[J].地理学报,2012,67(5):621-630.
- [24] 王婷,欧晓昆,张志明,等.退耕还林工程影响下农林生态系统生态交错带的宽度测定[J].云南大学学报:自然科学版,2012,34(5):604-612.
- [25] 李益敏,谢亚亚,蒋德明,等.怒江州斜坡地质灾害孕灾环境因素敏感性研究[J].水土保持研究,2018,25(5):300-305.

~~~~~  
(上接第 265 页)

- [32] 曹雨田,闫冬梅,张丽,等.基于 QuickBird 卫星数据的土地利用分类规则集研究[J].地理与地理信息科学,2011,27(6):28-31.
- [33] 邸向红,侯西勇,吴莉.中国海岸带土地利用遥感分类系统研究[J].资源科学,2014,36(3):463-472.
- [34] 陈述彭,岳天祥,励惠国.地学信息图谱研究及其应用[J].地理研究,2000,19(4):337-342.
- [35] Tian Y C, Yin K, Lu D S, et al. Examining Land Use and Land Cover Spatiotemporal Change and Driving Forces in Beijing from 1978 to 2010[J]. Remote Sensing, 2014,6(11):10593-10611.
- [36] 左丽君,徐进勇,张增祥,等.渤海海岸带地区土地利用时空演变及景观格局响应[J].遥感学报,2011,15(3):604-620.
- [37] 郭丽英,王道龙,王介勇.中国沿海地区耕地变化及其成因分析[J].中国农业资源与区划,2012,33(1):6-10.
- [38] 吴文挺,田波,周云轩,等.中国海岸带围垦遥感分析[J].生态学报,2016,36(16):5007-5016.