

DOI: 10.5846/stxb201905311143

顾羊羊, 徐梦佳, 杨悦, 黄贤峰, 邹长新, 叶鑫. 喀斯特石漠化区生态保护红线划定——以贵州省威宁县为例. 生态学报, 2021, 41(9): 3462-3474.
Gu Y Y, Xu M J, Yang Y, Huang X F, Zou C X, Ye X. Delineation of ecological conservation redline in karst rocky desertification areas: A case study of Weining County, Guizhou Province. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3462-3474.

喀斯特石漠化区生态保护红线划定 ——以贵州省威宁县为例

顾羊羊¹, 徐梦佳¹, 杨悦¹, 黄贤峰², 邹长新¹, 叶鑫^{1,*}

¹ 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042

² 贵州省环境科学研究设计院, 贵阳 550081

摘要:科学划定喀斯特石漠化区生态保护红线,对于维护区域生态安全,促进经济社会可持续发展具有重要意义。选择水源涵养、水土保持、生物多样性维护 3 种生态系统服务功能以及水土流失、石漠化 2 种生态环境敏感性指标,构建喀斯特石漠化区生态保护红线划定方法。以贵州省威宁县为例,结合第二次全国土地调查数据和相关规划等数据,划定生态保护红线,并从生态用地、植被覆盖度与人类扰动指数三个方面评价划定效果。结果表明:(1)威宁县生态系统综合服务功能以极重要为主,占研究区总面积的 40.57%。生态环境综合敏感性以敏感为主,占总面积的 67.86%。优化调整后生态保护红线面积 1496.13 km²,占全县面积的 23.75%,红线内生态用地面积占比高于非生态用地面积占比 20%以上。(2)近些年贵州省退耕还林、岩溶地区石漠化综合治理和草海自然保护区生态修复等工程的实施,威宁县植被覆盖显著增加,红线内 NDVI 基本不变区、轻微改善区和明显改善区面积占比达到 88.42%,红线范围内植被覆盖呈增加趋势。(3)红线内人类扰动指数低于红线外人类扰动指数,雪山镇、麻乍镇需控制红线范围内人类扰动,确保生态用地性质不改变,加强生态保护和监管。威宁县生态保护红线划定研究可为其他石漠化地区红线划定及划定效果评价提供参考。

关键词:喀斯特石漠化区;生态保护红线;划定效果;MODIS-NDVI;人类扰动指数

Delineation of ecological conservation redline in karst rocky desertification areas: A case study of Weining County, Guizhou Province

GU Yangyang¹, XU Mengjia¹, YANG Yue¹, HUANG Xianfeng², ZOU Changxin¹, YE Xin^{1,*}

¹ Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China

² Guizhou Institute of Environmental Sciences Research and Design, Guiyang 550081, China

Abstract: It's of great significance to scientifically delineate the ecological conservation redline (ECR) in karst rocky desertification areas for maintaining regionally ecological security, promoting sustainable economic and social development. Three kinds of ecosystem services such as water retention, soil conservation, and biodiversity conservation, as well as two kinds of ecological environment sensitivity indicators (soil loss and rocky desertification) were selected to construct an ECR delineation method for karst rocky desertification areas. Taking the karst rocky desertification area in Weining County of Guizhou Province as an example, combined with the Second National Land Survey data and related planning data, ECR was delineated. We analyzed the evaluation effect from three aspects: ecological land use, vegetation coverage and anthropogenic disturbance index (ADL). Results showed that the comprehensive ecosystem service function was extremely important, accounting for 40.57% of the research area. The comprehensive sensitivity level indicated that the ecological environment

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0502106, 2017YFC0506606);生态环境部部门预算项目“生态保护红线监管”

收稿日期:2019-05-31; **网络出版日期:**2021-03-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yexin@nies.org

was sensitive, accounting for 67.86%. Finally, the area of optimized ECR in Weining County was determined to be 1496.13 km², accounting for 23.75%. The proportion of ecological land in the ECR is 20% higher than that of non-ecological land. In recent years, the implementation of the project of Grain for Green in Guizhou Province, the comprehensive control project of rocky desertification in the karst area of Weining County and the ecological restoration project in Caohai Nature Reserve, vegetation coverage increased significantly. The proportion of normalized difference vegetation index (NDVI) basic constant zone, slightly improved zone and obviously improved zone in the ECR reached 88.42%. It showed that the vegetation coverage is increasing in the ECR. The ADI in the ECR was much lower than the ADI outside the ECR. Xueshan Town and Mazha Town of Weining County need to control the ADI in the ECR, ensure that the property of ecological land within the ECR does not change, and strengthen ecological protection and supervision. The delineation of the ECR in Weining County can provide reference for the delineation and evaluation of the ECR in other rocky desertification areas.

Key Words: karst rocky desertification area; ecological conservation redline; delineation effect; MODIS-NDVI; anthropogenic disturbance index

为应对日益突出的生态环境问题,中国政府先后建立了自然保护区、森林公园、湿地公园等各类自然保护区并对生态系统保护取得一定成效,但目前尚有部分生态系统脆弱区和生态环境敏感区未得到有效保护^[1]。因此,我国学者高吉喜提出“生态保护红线”的概念,强调对重要生态服务功能保护区、生态环境敏感区、生物多样性保育区进行系统保护,以确保国家生态安全^[2-3]。2017年,中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《关于划定并严守生态保护红线的若干意见》,明确指出要划定并严守生态保护红线。同年,原环境保护部发布了《生态保护红线划定指南》(以下简称《指南》),该指南系统阐述生态保护红线的划定原则、划定技术流程和管控要求等,为国家生态保护红线划定提供理论指导和技术支撑。2018年2月,国务院批准了京津冀3省(市)、长江经济带11省(市)和宁夏回族自治区共15省(市、区)生态保护红线划定方案,北京市等15个省份共划定生态保护红线面积约61万km²,占15省份国土总面积约25%^[4]。

近些年国内众多学者从生态保护红线的概念内涵^[5-6]、划定技术方法^[7-9]、管控办法^[10-11]等多个方面开展研究。生态保护红线是最为严格的生态空间,既能保障生态服务供给,又能维护人居环境安全^[5]。作为我国环境保护的重要制度创新,生态保护红线是提高生态系统服务的有效手段,对维护国家或区域生态安全及可持续发展具有战略意义^[12]。在划定方法方面,Bai等基于生态系统服务构建红线评估框架划定上海市生态保护红线,并分析不同情景模式下生态红线保护成效^[13]。Xu等通过构建区域评估方法识别长江经济带生态红线^[7]。刘军会等^[8]从区域层面划定京津冀地区生态保护红线。总体来说,现有划定方法以科学评估为主,较少涉及红线边界精准界定,导致评价结果难以落地^[9]。在划定尺度方面,以往研究主要集中在省级^[8,14]、流域^[7,15]和市级^[16-17]尺度,针对喀斯特石漠化区县域层面划定技术研究不多。在划定效果评价方面,已有研究主要侧重生态用地^[18-19]、生态资产价值^[20]和植被净初级生产力^[8]等内容,而对于红线范围内人类扰动以及不同分区划定结果对比相关成果较少。

我国西南喀斯特地区岩溶面积占国土面积的5.35%,人口密度是全国平均人口密度的1.5倍,耕地贫瘠且旱涝不保收^[21];加上长期不合理的土地利用方式,导致水土流失和植被退化,使得石漠化现象得以形成与发展^[22]。石漠化会引起水土流失加剧、土壤肥力下降、生物多样性降低等生态问题,同时加剧人口贫困、经济与科技文化落后等社会经济问题,已经成为制约我国西南喀斯特地区社会经济发展的关键因素^[23-24]。因此,根据生态保护红线划定原则和要求,本研究将石漠化敏感性指标作为生态环境敏感性的评估重点,划定喀斯特石漠化区生态保护红线。

本研究以典型石漠化区威宁县为例,采用地理信息技术与遥感技术,定量评估生态系统服务功能与生态环境敏感性,并结合第二次全国土地调查数据和相关规划等数据,划定生态保护红线。选取生态用地、植被覆盖度与人类扰动指数三个指标,评价生态保护红线划定效果,为喀斯特石漠化区生态环境监管提供决策支持。

1 研究区概况

威宁县地处贵州省西北部(103°36′—104°45′E, 26°36′—27°26′N),北、西、南三面分别与云南省接壤(图 1),是贵州省面积最大、海拔最高的县,同时也是全国喀斯特地区扶贫开发综合治理试点县。国土面积 6298 km²,辖 39 个乡镇(街道),平均海拔 2200 m。亚热带季风性湿润气候,年日照时数 1812 h,年降雨量 926 mm,夏季平均气温 18 ℃。森林植被类型以常绿针叶林和落叶杂灌木为主,河流总长度达 1031.1 km,河网密度达 16.4 km/km²。威宁县具有草海国家级自然保护区、锁黄仓国家湿地公园、草海国家重要湿地等各类保护地,同时位于桂黔滇喀斯特石漠化防治生态功能区,属于典型的喀斯特地貌,全县岩溶面积 4400 km²,石漠化面积 1103.91 km²,其中中度以上石漠化面积占石漠化总面积的 30.54%^[25]。

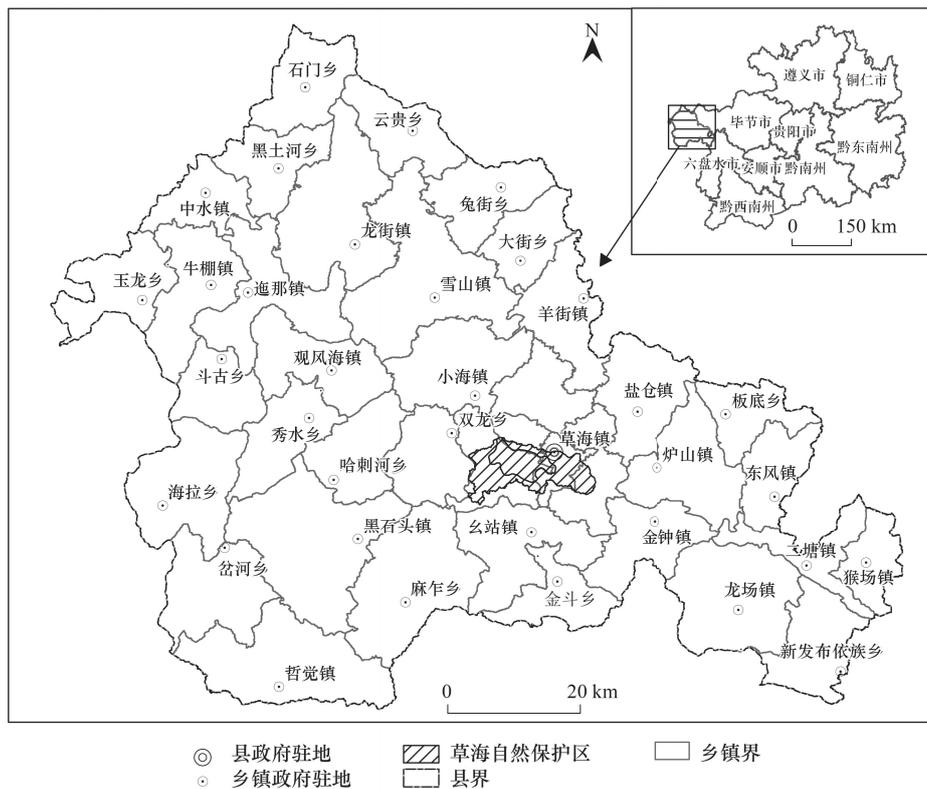


图 1 威宁县区位图

Fig.1 Location of the Weining County

2 研究方法

2.1 研究技术路线

喀斯特石漠化区生态保护红线划定研究技术路线如图 2 所示:①识别区域重点生态系统服务功能和生态环境敏感性特征,将水源涵养服务功能、水土保持服务功能和生物多样性维护功能纳入生态功能重要性评估,将水土流失敏感性和石漠化敏感性纳入生态环境敏感性评估。结合禁止开发区与其他各类保护地数据,将生态功能重要区与极重要区、生态环境敏感区与极敏感区的结果进行空间叠加,初步划定生态保护红线。②根据第二次全国土地调查数据,按照王丽霞等^[9]提出的生态保护红线边界优化方法,并结合威宁县相关部门规划等数据,优化调整生态保护红线。③最后从生态用地、植被覆盖度和人类扰动指数三个方面评估生态保护红线划定效果。

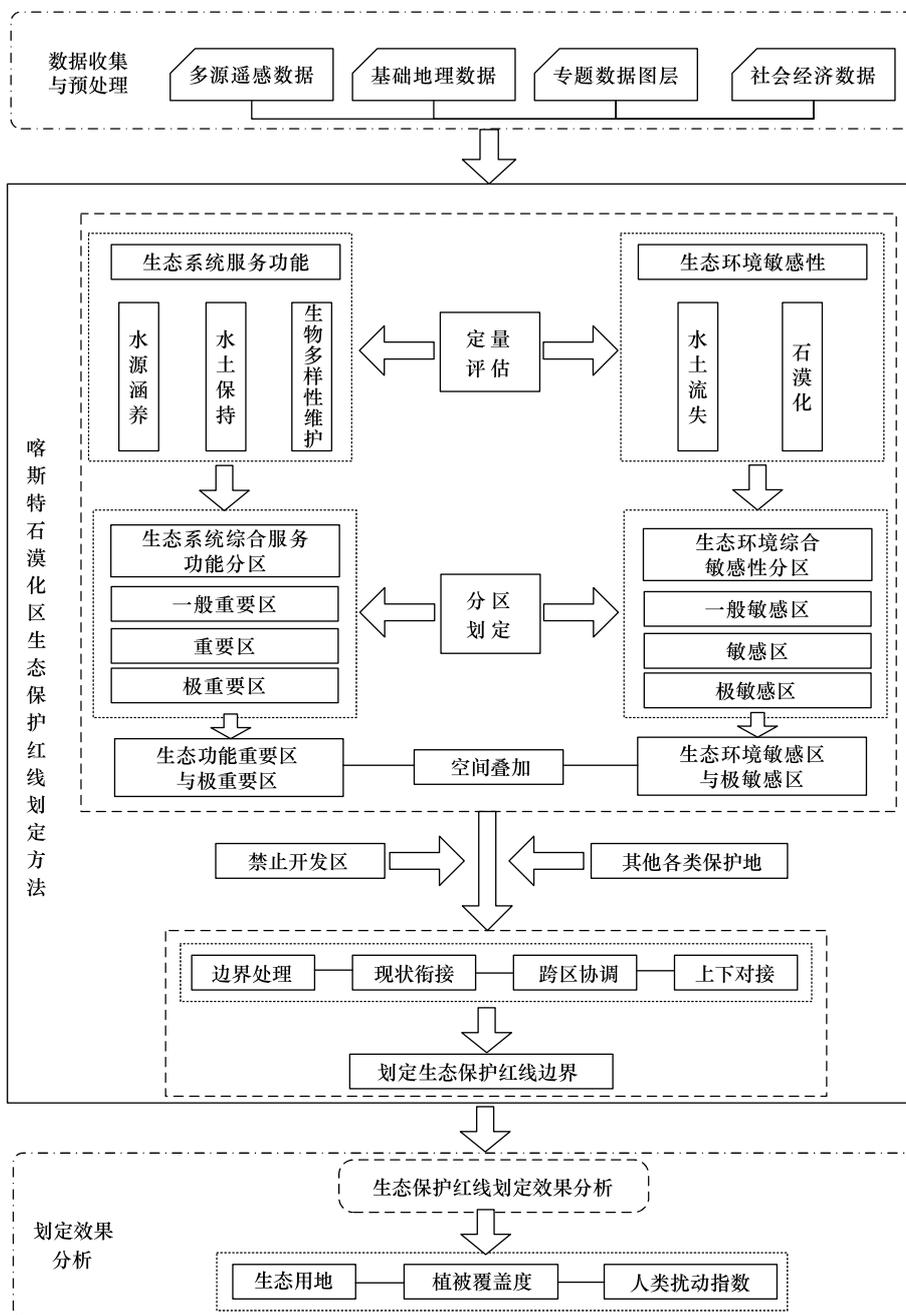


图 2 喀斯特石漠化区生态保护红线划定研究技术路线图

Fig.2 Technology roadmap of ecological conservation redline delineation research in the karst rocky desertification area

2.2 评估方法

2.2.1 水源涵养功能评价方法

水源涵养功能是水生态系统与其他生态系统间通过水文作用的综合表现^[26]。威宁县不仅位于大娄山水源涵养与生物多样性维护重要区,而且包含云贵水源涵养、石门-秀水水源涵养生态功能小区,两个生态功能小区面积 1596.44 km²,占全县面积 25.35%。将水源涵养量作为生态系统水源涵养功能评估指标,采用水量平衡方程来计算水源涵养量^[8],计算公式为:

$$TQ = \sum_{i=1}^j (P_i - SR_i - ET_i) \times A_i \times 10^3$$

式中, TQ 为总水源涵养量(m^3), P_i 为降雨量(mm), SR_i 为地表径流量(mm), ET_i 为蒸散发量(mm), A_i 为 i 类生态系统面积(km^2), i 为研究区第 i 类生态系统类型, j 为研究区生态系统类型数。

2.2.2 水土保持功能评价方法

水土保持功能是指为减少由于水量冲击而造成的土壤侵蚀, 森林、草地等生态系统通过其自身结构与功能发挥调节的作用^[27]。威宁县位于桂黔滇喀斯特石漠化防治生态功能区, 地处亚热带季风湿润气候区, 岩溶环境为主, 易发生土壤侵蚀。采用修正通用水土流失方程(The Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE) 的评估水土保持服务功能^[28], 公式如下:

$$A_c = A_p - A_r = R \times K \times L \times S \times (1 - C)$$

式中, A_c 为水土保持量($t \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$); A_p 为潜在土壤侵蚀量($t \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$); A_r 为实际土壤侵蚀量($t \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$); R 为降雨侵蚀力因子($MJ \text{ mm} \text{ hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$); K 为土壤可蚀性因子($t \text{ hm}^2 \text{ h} \text{ hm}^{-2} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$); L 表示坡长因子, S 表示坡度因子, C 为植被覆盖因子, 无量纲。

2.2.3 生物多样性维护功能评价方法

生物多样性维护功能是生态系统最重要的功能之一, 其在维护基因、物种、生态系统多样性方面发挥的巨大作用^[29]。横河-牛栏江生物多样性保护、草海高原湿地生物多样性保护和玄姑-玉舍-系矸高原生物多样性保护生态功能小区位于威宁县境内面积 2503.68 km^2 , 占全县面积 39.75% 。采用 NPP 定量指标法评估生物多样性维护功能^[30], 计算公式为:

$$S_{\text{bio}} = NPP_{\text{mean}} \times F_{\text{pre}} \times F_{\text{tem}} \times (1 - F_{\text{alt}})$$

式中, S_{bio} 为生物多样性维护服务能力指数, NPP_{mean} 为多年植被净初级生产力平均值(gC/m^2), F_{pre} 为多年平均降水量(mm), F_{tem} 为多年平均气温($^{\circ}C$), F_{alt} 为海拔因子(m), 各因子均需进行 0—1 归一化处理。

2.2.4 水土流失敏感性评价方法

水土流失敏感区是指对外界干扰和环境变化反应敏感, 易于发生水土流失的区域。西南喀斯特土壤保持重要区生态系统脆弱, 水土流失敏感性程度高, 土壤一旦流失, 生态恢复重建难度大。另外该区域毁林毁草开荒导致植被覆盖度低、水土流失严重。根据通用水土流失方程基本原理评估水土流失敏感性^[8], 计算公式如下:

$$SS_i = \sqrt[4]{R_i \times K_i \times LS_i \times C_i}$$

式中, SS_i 为 i 空间单元水土流失敏感性指数, R_i 为降雨侵蚀力因子($MJ \text{ mm} \text{ hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$), K_i 为土壤可蚀性因子($t \text{ hm}^2 \text{ h} \text{ hm}^{-2} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), LS_i 为坡长坡度因子, C_i 为地表植被覆盖因子, LS_i 因子与 C_i 因子均为无量纲。

2.2.5 石漠化敏感性评价方法

石漠化敏感性评估是为了识别区域易发生石漠化的生态环境脆弱或敏感区。威宁县位于桂黔滇喀斯特石漠化防治生态功能区, 威宁-赫章高原分水岭石漠化防治亚区。同时迤那一大街石漠化敏感、双龙-小海-金钟口石漠化敏感、炉山-二塘石漠化敏感生态功能小区均位于威宁县境内。根据石漠化形成机理, 选取碳酸岩出露面积百分比、地形坡度、植被覆盖度因子构建石漠化敏感性评价指标体系^[17]。计算公式如下:

$$S_i = \sqrt[3]{D_i \times P_i \times C_i}$$

式中, S_i 为 i 评估区域石漠化敏感性指数, D_i 为 i 评估区域碳酸岩出露面积百分比, P_i 为 i 评估区域地形坡度, C_i 为 i 评估区域植被覆盖度。

2.3 生态系统综合人类扰动指数

根据赵国松^[31]、吴琳娜^[32]等人提出的生态系统综合人类扰动指数方法, 将未利用地的人类扰动分级指数设为 0, 林地、草地、湿地的人类扰动分级指数为 1, 耕地的人类扰动指数为 2, 建设用地的人类扰动分级指数为 3, 用加权求和方法计算区域生态系统综合人类扰动指数(Anthropogenic disturbance index, ADI), 计算公式如下:

$$ADI = \left(\sum_{i=0}^3 B_i \times E_i \right) / 3 / \sum_{i=0}^3 E_i$$

式中, ADI 为生态系统综合人类扰动指数(简称人类扰动指数), B_i 为第 i 级生态系统人类扰动分级指数, E_i 为第 i 级生态系统面积所占百分比。人类扰动指数越高, 对生态系统的威胁程度越大, 反之则越低。

2.4 数据来源及预处理

威宁县生态系统类型数据来源于 2015 年全国生态状况变化遥感调查评估成果, 空间分辨率 30 m。气象站点统计数据来源于中国气象科学数据共享服务网站 (<http://data.cma.cn/>), 主要包括降雨量、气温、总太阳辐射等因子。蒸散发数据来源于国家生态系统观测研究网络科技资源服务系统网站 (<http://www.cnern.org.cn/>), 空间分辨率 1 km。数字地形高程数据来源于地理空间数据云网站 (<http://www.gscloud.cn/>), 空间分辨率 30 m。土壤数据来源于中国 1:100 万土壤数据库 (<http://westdc.westgis.ac.cn>)。植被净初级生产力 (net primary productivity, NPP) 数据为 2015 年 MODIS17 A3 产品数据, 归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 数据为 2000—2015 年 MODIS13 Q1 产品数据, 均来源于美国国家航空航天局网站 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)。2000—2015 年土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>)。本研究以 2015 年作为基准年划定威宁县生态保护红线, 以上数据均通过 ArcGIS 10.6 软件进行重采样或空间插值为 250 m 空间分辨率。

2.5 评价分级标准

将不同类型生态系统服务功能栅格图导入 Matlab 2014 软件, 进行归一化计算并按像元值从高到底排序, 计算累加服务功能。按照《指南》标准, 把累加服务功能值占该类型生态系统服务总值的 50% 和 80% 作为对应阈值, 将生态系统服务类型划分为极重要区、重要区、一般重要区, 并分别赋值 3、2、1。生态环境敏感性评价分级标准方法相同。

2.6 综合评价

针对水源涵养、水土保持、生物多样性维护功能的评价分级, 采取析取运算方法对生态系统综合服务功能进行评价^[17], 计算公式为:

$$ESC = \text{Max}\{ES_w, ES_s, ES_b\}$$

式中, ESC 代表生态系统综合服务功能重要性评价结果, ES_w 代表水源涵养功能重要性评价结果, ES_s 代表水土保持功能重要性评价结果, ES_b 代表生物多样性维护功能重要性评价结果。生态环境综合敏感性评价方法相同。

3 结果与分析

3.1 生态保护红线初步划定

结合 ArcGIS 软件, 将威宁县水源涵养功能、水土保持功能、生物多样性维护功能评价分级结果进行析取分析, 得到生态系统综合服务功能评价结果(图 3 和表 1)。结果表明生态系统服务功能重要性分类中一般重要区面积 1635 km², 占全县面积 25.96%, 主要分布在研究区中部, 地势平缓, 是人类开发建设活动的主要分布区域。重要区面积 2108.19 km², 占全县面积 33.47%, 主要分布在研究区中部四周, 该区域雪山镇、黑石头镇是未来中心镇, 乡镇开发建设的重点区域。极重要区面积 2554.81 km², 占全县面积 40.57%, 主要分布在研究区的东南部、西南部以及西北部, 该区域降水多, 地貌类型以峰林峰丛为主, 林、灌、草植被生态系统较为丰富, 对维护黔西北高原岩溶区、牛栏江—横江流域生态安全具有重要作用。同时, 将威宁县水土流失敏感性、石漠化敏感性评价分级结果进行析取分析, 得到生态环境综合敏感性评价结果(图 3 和表 1)。结果表明研究区以敏感类型为主, 面积约 4273.31 km², 占全县面积 67.85%, 敏感区在研究区广泛分布。极敏感区面积 1934.81 km², 占全县面积 30.72%, 其中石漠化极敏感区占比为 72.36%, 主要分布在研究区东部炉山镇—二塘镇和西部岔河乡—石门乡等森林覆盖率低、土壤侵蚀强、水土流失严重的岩溶山地区域。

表 1 威宁县生态评价面积及占比统计表

Table 1 Area and proportion of the ecological evaluation in Weining County

| 生态系统综合服务功能评价结果 Evaluation results of comprehensive ecosystem service | | | 生态环境综合敏感性评价结果 Evaluation results of comprehensive ecological sensitivity | | |
|---|----------------------------|---------------------------|---|----------------------------|---------------------------|
| 评价分级 Assessment grading | 面积 Area/km ² | 面积占比 Area proportion/% | 评价分级 Assessment grading | 面积 Area/km ² | 面积占比 Area proportion/% |
| 一般重要区 General important zone | 1635.00 | 25.96 | 一般敏感区 General sensitive zone | 89.88 | 1.43 |
| 重要区 Important zone | 2108.19 | 33.47 | 敏感区 Sensitive zone | 4273.31 | 67.85 |
| 极重要区 Extremely important zone | 2554.81 | 40.57 | 极敏感区 Extremely sensitive zone | 1934.81 | 30.72 |

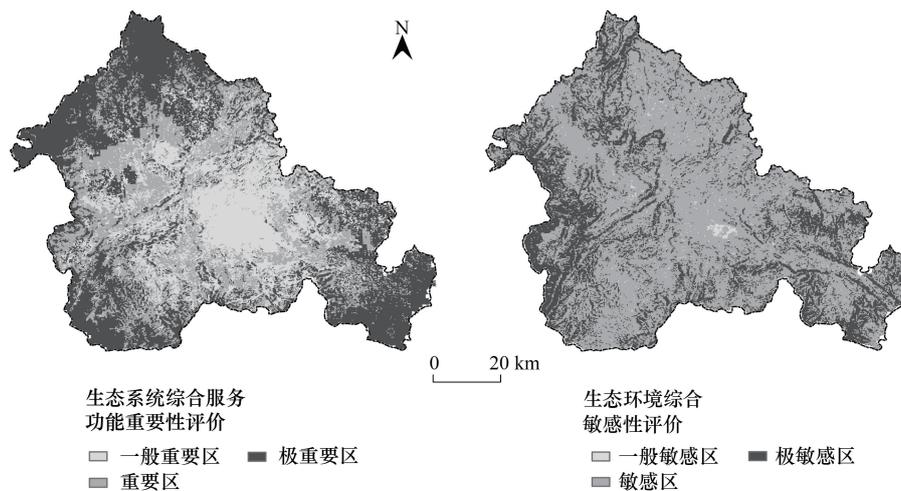


图 3 生态系统综合服务功能评价结果与生态环境综合敏感性评价结果

Fig.3 Evaluation results of comprehensive ecosystem service and comprehensive ecological sensitivity

为使得生态评价结果精准落地,需要准确界定生态保护红线边界范围。首先将生态系统综合服务功能分级评价结果与生态环境综合敏感性评价分级结果进行空间叠加,提取 Value 值大于 3 的范围作为综合评估结果,其次对综合评估结果(占全县国土面积的 54.72%)像元斑块进行融合及聚合处理。接着结合第二次全国土地调查数据进行边界细化调整,并剔除面积大于 5 亩的农田,然后对结果数据进行融合处理,去除 1.5 km² 以下未融合的独立破碎斑块,减小生态保护红线分布的破碎化程度。最后叠加禁止开发区和其他各类保护地,得到威宁县红线初步结果,面积 1710.56 km²,占全县国土面积的 29.61%。

3.2 生态保护红线优化调整

威宁县生态保护红线优化调整需与已有规划进行协调:(1)与土地利用规划、城乡建设规划协调,自然资源部门和住建部门建议生态保护红线应考虑与《威宁县土地利用总体规划(2006—2020年)调整方案》、《威宁县县城总体规划(2018—2035年)》的衔接,与生态保护红线斑块存在重叠的区域,兼顾发展需求与红线斑块的完整性,适当预留发展空间;(2)与交通路网规划协调,交通部门建议应考虑 G7611、S102 等现状道路以及纳入国家或省级“十三五”规划,且明确项目选址或线路走向的规划道路;(3)与矿产资源规划协调,通过与《贵州省矿产资源总体规划(2016—2020年)》和《毕节市矿产资源总体规划(2016—2020)》衔接,对于重要矿产资源分布与生态保护红线重叠的区域,结合矿产资源的采矿权、规模、类型、开采时间以及生态保护红线斑块的完整性等进行综合考虑;(4)与旅游发展规划协调,旅游部门建议考虑《贵州省“十三五”旅游业发展规划》和《威宁县县城总体规划(2018—2035)》,旅游基础设施建设,可根据是否明确布局落位或选线走向,根据环境影响评价法科学评估后,确定是否可建设或划入生态保护红线列入正面清单,对其建设进行约束;(5)与林业发展规划协调,林业部门建议考虑《贵州省“十三五”林业发展规划》和《毕节市“十三五”林业生态建设规

划》,生态保护红线初步划定结果需与商品林和经济林充分衔接。与相关规划协调后,威宁县生态保护红线面积 1497.22 km²,占全县面积的 23.77%。随着边界的扣除,生态保护红线产生较多破碎斑块,对后期生态保护红线勘界定标、生态保护红线监管以及生态补偿造成巨大困难。通过对照影像地图以及野外调研后,在不影响整体比例情况下,将细小斑块扣除,处理后威宁县生态保护红线面积 1496.13 km²,占全县面积的23.75% (图 4,本结果为阶段性成果)。

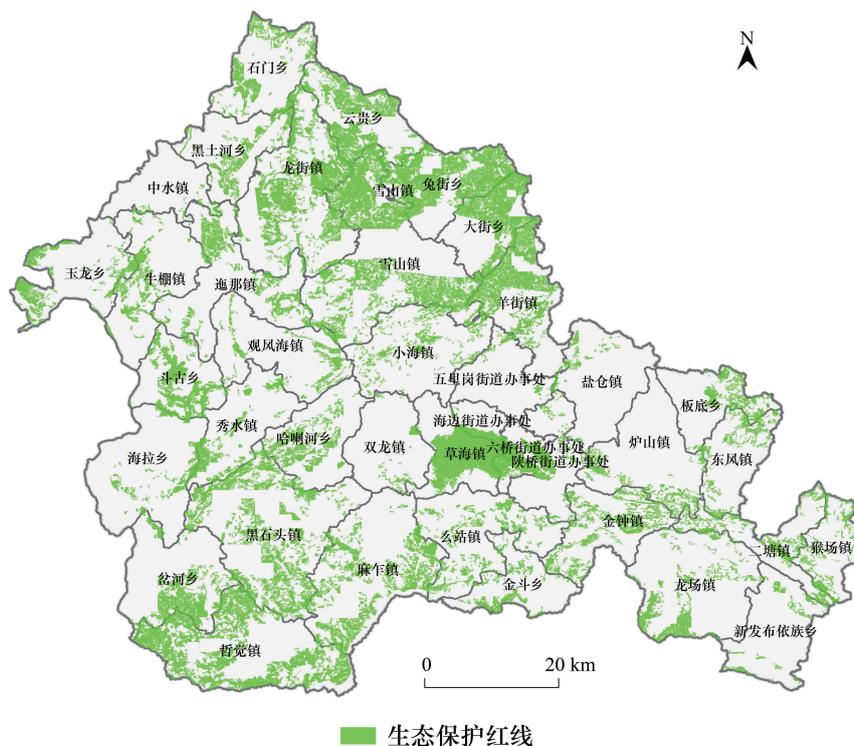


图 4 威宁县生态保护红线划定结果

Fig.4 Delineation results of ecological conservation redline in Weining County

3.3 生态保护红线划定效果评价

3.3.1 生态用地划定结果分析

根据第二次全国土地调查数据,将威宁县有林地、灌木林地等 14 个土地利用类型作为生态用地进行统计,对城市、村庄、水田、旱地等 20 个土地利用类型作为非生态用地进行统计。统计结果表明威宁县生态用地面积 2838.48 km²,占全县总面积的 45.07%。红线内生态用地面积 895.70 km²,占红线面积的 60.54%。红线内非生态用地面积 583.87 km²,占红线面积的 39.46% (图 5)。根据第一次全国地理国情普查数据,将威宁县地表覆盖三级分类进行合并,将乔木林、灌木林、乔灌混合林、天然草地、人工草地、水面等 11 个地表覆盖二级类作为生态用地进行统计,将水田、旱地、果园、茶园等非生态用地进行统计。统计结果表明威宁县生态用地面积 3181.16 km²,占全县国土面积的 50.51%。红线内生态用地面积 1066.81 km²,占红线面积的71.30%。红线内非生态用地面积 429.32 km²,占红线面积的 28.70%,红线内生态用地面积占比高于非生态用地面积占比 (图 5)。

3.3.2 植被覆盖度划定效果评价

2015 年威宁县红线内 NDVI 年均值 0.78,红线外 NDVI 年均值 0.77,草海自然保护区 NDVI 年均值 0.64 (图 6)。2000—2015 年不同分区 NDVI 均值呈现波动增加趋势,16 年间威宁县红线内 NDVI 年均值>威宁县 NDVI>红线外 NDVI 年均值>草海自然保护区 NDVI 年均值。近些年贵州全省退耕还林、岩溶地区石漠化综合治理和草海自然保护区生态修复等工程的实施,威宁县植被覆盖显著增加。

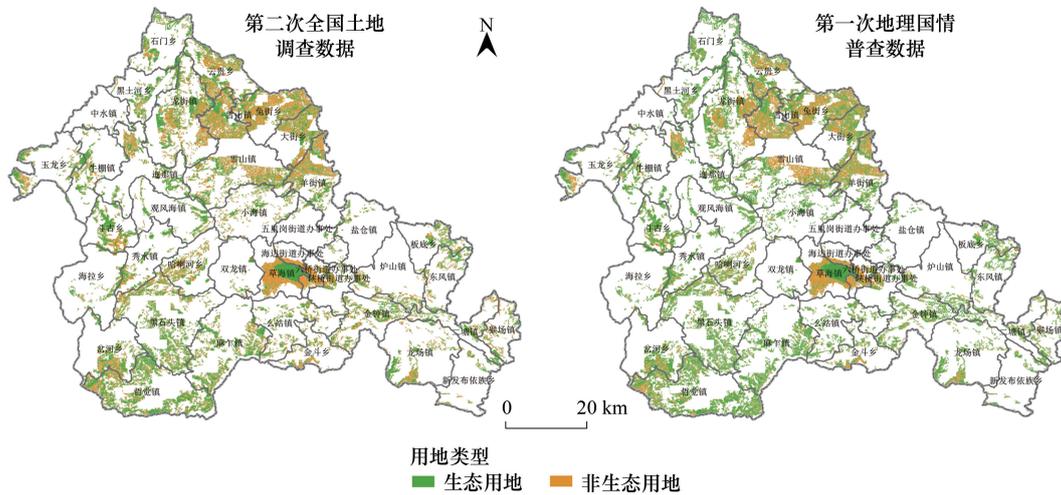


图 5 威宁县红线内生态用地与非生态用地空间分布

Fig.5 Spatial distribution of ecological and non-ecological land in ecological conservation redline in Weining County

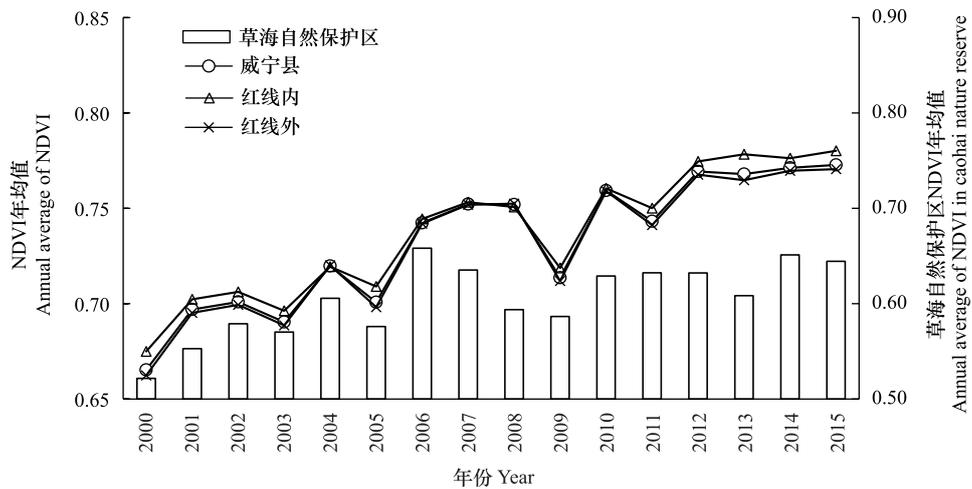


图 6 2000—2015 年威宁县 NDVI 变化

Fig.6 Changes of NDVI in Weining County from 2000 to 2015

为评价红线划定范围内植被覆盖变化规律,采用一元线性回归模拟逐个像元的 NDVI 年际变化趋势^[33]。当斜率 $S > 0$ 时,表明植被覆盖呈现增加趋势; $S < 0$ 时,表明植被覆盖呈现下降趋势。参照已有资料,根据 S 的变化范围,定义严重退化、轻微退化、基本不变、轻微改善和明显改善 5 个变化区间(图 7)。

从表 2 可以看出,在威宁县红线范围内,植被严重退化区面积只有 5.25 km²,占红线面积的 0.36%。红线内植被轻微改善区和明显改善区面积共 738.69 km²,占红线面积的 50.45%;红线外植被严重退化区和轻微退化区面积共 692.25 km²,占红线外面积的 14.54%,而红线外植被轻微改善区和明显改善区面积占红线外面积 48.39%;其中,草海自然保护区植被严重退化区和轻微退化区面积共 29.94 km²,占保护区面积的30.8%,同时保护区有 48.04%的区域植被呈现轻微改善和明显改善趋势。由于历史原因草海国家级自然保护区里面存在原始城镇以及大面积水域湿地,导致草海 NDVI 年均值低于红线内 NDVI 年均值。红线内 NDVI 基本不变区、轻微改善区和明显改善区面积占比达到 88.42%,生态保护红线划定范围内植被覆盖呈增加趋势。

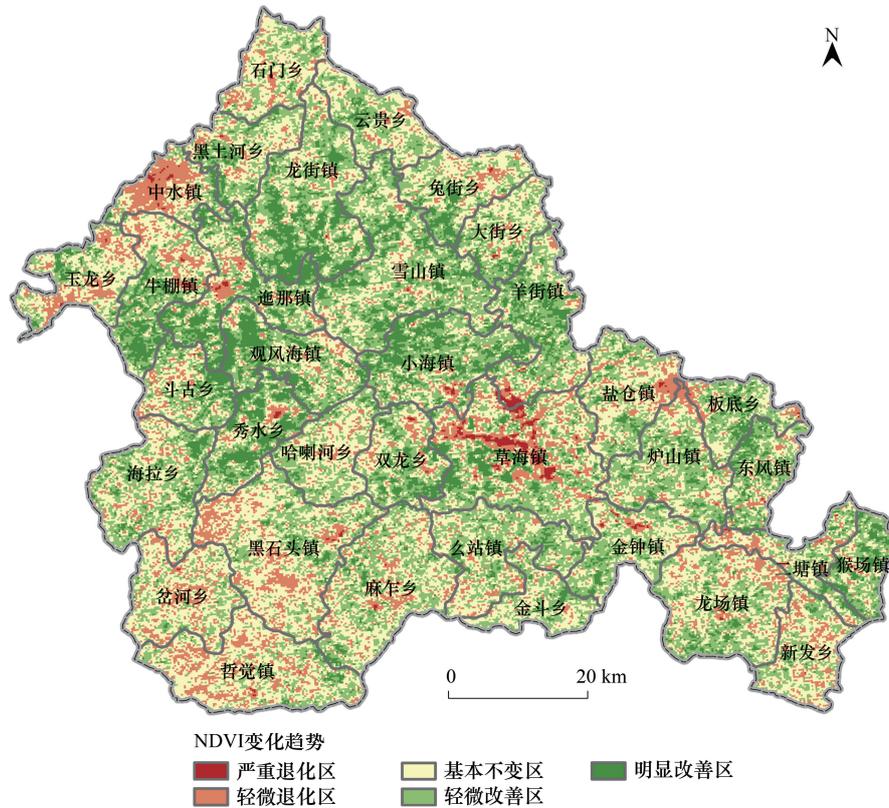


图7 2000—2015年威宁县NDVI变化趋势分区

Fig.7 Division of NDVI change trend in Weining County from 2000 to 2015

表2 威宁县NDVI分区变化统计

Table 2 Change statistics of NDVI zone in Weining county

| 分区 Zone | 威宁县 Weining county | | 红线内 Inside the redline | | 红线外 Outside the redline | | 草海保护区 Caohai Nature Reserve | |
|----------------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| | 面积 Area/km ² | 面积占比 Area proportion/% | 面积 Area/km ² | 面积占比 Area proportion/% | 面积 Area/km ² | 面积占比 Area proportion/% | 面积 Area/km ² | 面积占比 Area proportion/% |
| 严重退化区 Severely degraded zone | 37.56 | 0.60 | 5.25 | 0.36 | 32.56 | 0.68 | 6.38 | 6.56 |
| 轻微退化区 Slightly degraded zone | 822.13 | 13.20 | 164.19 | 11.21 | 659.69 | 13.86 | 23.56 | 24.24 |
| 基本不变区 Basic constant zone | 2317.50 | 37.21 | 555.88 | 37.97 | 1764.31 | 37.06 | 20.56 | 21.16 |
| 轻微改善区 Slightly improved zone | 2227.69 | 35.77 | 542.00 | 37.02 | 1676.44 | 35.21 | 24.38 | 25.08 |
| 明显改善区 Obviously improved zone | 823.25 | 13.22 | 196.69 | 13.43 | 627.69 | 13.18 | 22.31 | 22.96 |

3.3.3 人类扰动划定效果评价

2000—2015年威宁县不同分区人类扰动指数如图8所示。2015年威宁县红线内人类扰动指数230.23,红线外人类扰动指数250.06,红线内人类扰动指数低于红线外人类扰动指数。2000—2015年威宁县不同分区人类扰动指数呈现波动增加趋势,16年间威宁县红线外人类扰动指数>威宁县人类扰动指数>草海自然保护区人类扰动指数>红线内人类扰动指数,生态保护红线内人类扰动较少。2010—2015年草海自然保护区人类扰动指数呈现减少趋势,近些年威宁县实施“退城还湖、退村还湖、退耕还湖、造林涵湖”等生态工程,拆除

保护区范围内建设用地,实施退耕还湿和造林绿化工程,增加湿地面积,控制人为活动,改善生态功能。

2000—2015 年威宁县人类扰动指数时空变化如图 9 所示。2015 年红线内人类扰动指数较大的是雪山镇和哲觉镇,分别为 5.47 和 4.21,人类扰动指数较小的是中水镇 0.12。从 2000 年到 2015 年,红线内人类扰动增加较大的是雪山镇和麻乍镇,分别增加了 0.23 和 0.15。雪山镇红线面积最大 131.24 km²,近些年发展烤烟业和种草养畜产业,16 年间红线范围内有 18.92 km²的林地转耕地和 12.67 km²草地转为耕地,人类扰动增加。红线内人类扰动减少较小的是哲觉镇和黑石头镇,分别减少了 0.12 和 0.09。哲觉镇和黑石头镇红线面积较大,分别为 115.46 km² 和 101.17 km²,仅次于雪山镇和草海镇,但人类扰动变化稳定。结合各乡镇红线面积和人类扰动指数变化趋势,威宁县雪山镇、麻乍镇和么站镇需要控制红线范围内人类扰动,加强生态保护和监管,维护区域生态安全。

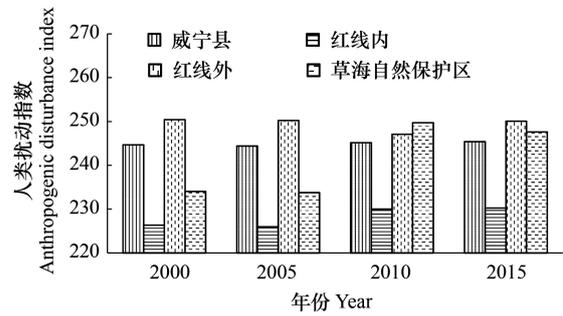


图 8 2000—2015 年威宁县不同分区人类扰动指数变化
Fig.8 Changes of anthropogenic disturbance index in different zones of Weining County from 2000 to 2015

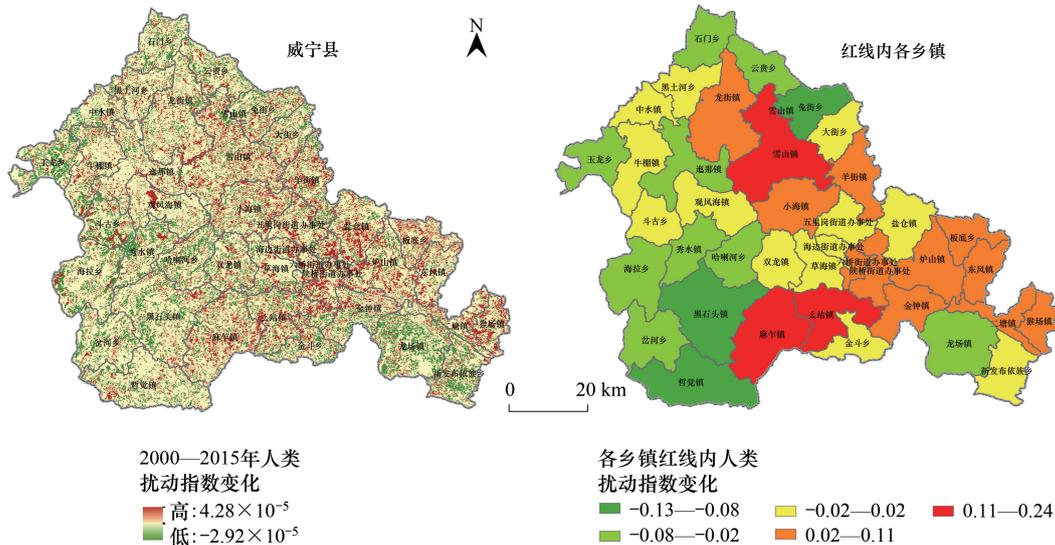


图 9 2000—2015 年人类扰动指数变化
Fig.9 Changes of anthropogenic disturbance index in Weining County from 2000 to 2015

4 结论与讨论

4.1 结论

本文通过构建县域尺度喀斯特石漠化地区生态保护红线划定方法,划定威宁县生态保护红线,并从生态用地、植被覆盖度与人类扰动指数三个方面评价划定效果。结论如下:

(1)威宁县生态系统综合服务功能重要性类型以极重要为主,占研究区总面积的 40.57%。生态环境综合敏感性类型以敏感为主,占总面积的 67.86%。优化调整后生态保护红线面积 1496.13 km²,占全县面积的 23.75%。

(2)红线内生态用地面积占比高于非生态用地占比 20%以上,红线内 NDVI 年均值大于红线外 NDVI 年均值。近些年贵州全省退耕还林、岩溶地区石漠化综合治理和草海自然保护区生态修复等工程的实施,威宁

县植被覆盖显著增加。16年间红线内NDVI基本不变区、轻微改善区和明显改善区面积占比达到88.42%,红线划定范围内植被覆盖呈增加趋势。

(3)2000—2015年红线内人类扰动指数低于红线外人类扰动指数,草海自然保护区退村还湖、退耕还湿等生态修复工程的实施,人类扰动指数呈现减少趋势。16年间威宁县雪山镇、麻乍镇红线划定范围内存在大量林地、草地转耕地,需要控制红线区人类扰动,加强生态保护和监管,维护区域生态安全。

4.2 讨论

(1)《指南》中生物多样性维护功能评价方法主要包括NPP法和物种分布模型法,NPP法由于所需参数较少,计算简单得到广泛应用。但NPP法无法覆盖全部生物多样性重要区域,并且受农作物高NPP影响^[30]。本研究通过NPP法识别威宁县生物多样性维护功能,发现生物多样性极重要区和重要区分布范围覆盖《贵州省生态功能区划(修编)》中横河-牛栏江生物多样性保护、玄姑-玉舍-糸囉高原生物多样性保护生态功能小区。在生态保护红线划定过程中模型评估参数设置参考相关学者的研究成果^[34],若能在威宁县进行相关指标的实地采集与验证,评估结果将更加科学可靠。

(2)生态保护红线的划定需统筹考虑“自上而下”演绎评价和“自下而上”归纳协调这两个方面,提升红线边界划定的科学性^[8]。本研究在县域尺度,使用高分辨率遥感影像和第二次土地利用调查数据,按照王丽霞等^[9]提出的生态保护红线边界优化方法,实现生态保护红线数据由低分辨率向高分辨率转换,提高红线边界精度。同时县域生态保护红线的划定,在充分考虑当地发展目标以及利益相关者需求的情况下,能够有效检验或优化区域或省级层面划定结果,达到减少红线内矛盾冲突,解决交叉重叠问题,为后期红线的精准落地以及科学管理提供有力支撑。

(3)保护成效评价应围绕“生态功能不降低、保护面积不减少、用地性质不改变”的管控目标^[11],以生态系统类型和生态系统服务功能为主要内容,构建评估框架与指标体系,采用定性与定量相结合的方法,从生态保护红线内外、实施前后生态状况变化的角度进行评估^[35]。威宁县红线内生态用地大于非生态用地,划定的生态空间涵盖大部分生态用地,红线区需禁止建设破坏生态功能和生态环境的工程项目,确保自然生态用地不被占用,同时加强人类活动监管,减少人类扰动。

参考文献(References):

- [1] Lü Y H, Fu B J, Wei W, Yu X B, Sun R H. Major ecosystems in China: dynamics and challenges for sustainable management. *Environmental Management*, 2011, 48(1): 13-27.
- [2] 高吉喜, 邹长新, 杨兆平, 马建军. 划定生态红线保障生态安全. *中国环境报*, 2012-10-18(002).
- [3] Gao J X. How China will protect one-quarter of its land. *Nature*, 2019, 569: 457.
- [4] Gao J X, Wang Y, Zou C X, Xu D L, Lin N F, Wang L X, Zhang K. China's ecological conservation redline: a solution for future nature conservation. *Ambio*, 2020, 49(9): 1519-1529.
- [5] 高吉喜, 邹长新, 陈圣宾. 论生态红线的概念、内涵与类型划分. *中国生态文明*, 2013, (1): 46-48.
- [6] 高吉喜. 国家生态保护红线体系建设构想. *环境保护*, 2014, 42(2): 18-21.
- [7] Xu X B, Yang G S, Tan Y. Identifying ecological red lines in China's Yangtze River Economic Belt: a regional approach. *Ecological Indicators*, 2019, 96: 635-646.
- [8] 刘军会, 马苏, 高吉喜, 邹长新, 王晶晶, 刘志强, 王丽霞. 区域尺度生态保护红线划定——以京津冀地区为例. *中国环境科学*, 2018, 38(7): 2652-2657.
- [9] 王丽霞, 邹长新, 王燕, 林乃峰, 吴丹, 姜宏, 徐德琳. 基于GIS识别生态保护红线边界的方法——以北京市昌平区为例. *生态学报*, 2017, 37(18): 6176-6185.
- [10] 邹长新, 林乃峰, 徐梦佳. 论生态保护红线制度实施中的重点问题. *环境保护*, 2017, 45(23): 36-39.
- [11] 高吉喜, 鞠昌华, 邹长新. 构建严格的生态保护红线管控制度体系. *中国环境管理*, 2017, 9(1): 14-17.
- [12] 郑华, 欧阳志云. 生态红线的实践与思考. *中国科学院院刊*, 2014, 29(4): 457-461, 448-448.
- [13] Bai Y, Wong C P, Jiang B, Hughes A C, Wang M, Wang Q. Developing China's Ecological Redline Policy using ecosystem services assessments for land use planning. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3034.

- [14] 燕守广, 林乃峰, 沈渭寿. 江苏省生态红线区域划分与保护. 生态与农村环境学报, 2014, 30(3): 294-299.
- [15] 杨世凡, 安裕伦, 王培彬, 马良瑞, 胡锋, 孙泉忠. 贵州赤水河流域生态红线区划分研究. 长江流域资源与环境, 2015, 24(8): 1405-1411.
- [16] 吴健生, 黄乔, 曹祺文. 深圳市基本生态控制线划定对生态系统服务价值的影响. 生态学报, 2018, 38(11): 3756-3765.
- [17] 熊善高, 秦昌波, 于雷, 路路, 关杨, 万军, 李新. 基于生态系统服务功能和生态敏感性的生态空间划定研究——以南宁市为例. 生态学报, 2018, 38(22): 7899-7911.
- [18] 杨渺, 方自力, 谢强, 王蒙, 王萍. 城镇化过程中生态功能红线划定的生态服务效益快速评价——以成都市温江区为例. 长江流域资源与环境, 2015, 24(S1): 1-8.
- [19] 范学忠, 李玉辉, 角媛梅. 昆明市生态红线区非生态用地转变前后生态效益分析. 水土保持研究, 2008, 15(4): 179-183, 188-188.
- [20] 王燕, 高吉喜, 邹长新, 王丽霞, 吴丹, 徐德琳, 徐梦佳, 林乃峰. 生态保护红线划定及其生态资产变化研究. 中国环境科学, 2017, 37(6): 2369-2376.
- [21] 杜文鹏, 闫慧敏, 甄霖, 胡云锋. 西南岩溶地区石漠化综合治理研究. 生态学报, 2019, 39(16): 5798-5808.
- [22] 王克林, 岳跃民, 陈洪松, 吴协保, 肖峻, 祁向坤, 张伟, 杜虎. 喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应. 生态学报, 2019, 39(20): 7432-7440.
- [23] Zhang M Y, Wang K L, Liu H Y, Zhang C H, Yue Y M, Qi X K. Effect of ecological engineering projects on ecosystem services in a karst region: a case study of northwest Guangxi, China. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 183: 831-842.
- [24] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, Horion S, Wang K L, Keersmaecker W D, Tian F, Schurgers G, Xiao X M, Luo Y Q, Chen C, Myneni R, Shi Z, Chen H S, Fensholt R. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering. *Nature Sustainability*, 2018, 1(1): 44-50.
- [25] 耿继斌. 石漠化现状与对策研究——以威宁县为例. 林业建设, 2011, 27(4): 27-31.
- [26] 吴丹, 邵全琴, 刘纪远. 江西泰和县森林生态系统水源涵养功能评估. 地理科学进展, 2012, 31(3): 330-336.
- [27] 李晶, 任志远. 基于 GIS 的陕北黄土高原土地生态系统水土保持价值评价. 中国农业科学, 2007, 40(12): 2796-2803.
- [28] Qiao X N, Gu Y Y, Zou C X, Xu D L, Wang L, Ye X, Yang Y, Huang X F. Temporal variation and spatial scale dependency of the trade-offs and synergies among multiple ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 218-229.
- [29] Qiao X N, Gu Y Y, Zou C X, Wang L, Luo J H, Huang X F. Trade-offs and synergies of ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China. *Chinese Geographical Science*, 2018, 28(1): 86-99.
- [30] 马孟泉, 张慧, 高吉喜, 鞠昌华, 王延松, 刘德天. 生物多样性维护生态保护红线划定方法对比. 生态学报, 2019, 39(19): 6959-6965.
- [31] 赵国松, 刘纪远, 匡文慧, 欧阳志云. 1990-2010 年中国土地利用变化对生物多样性保护重点区域的扰动. 地理学报, 2014, 69(11): 1640-1650.
- [32] 吴琳娜, 杨胜天, 刘晓燕, 罗娅, 周旭, 赵海根. 1976 年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应. 地理学报, 2014, 69(1): 54-63.
- [33] 乔旭宁, 顾羊羊, 邹长新, 黄贤峰, 胡涛. 基于夜间灯光数据的太湖流域城镇扩张对净初级生产力的影响. 生态学报, 2018, 38(16): 5883-5893.
- [34] 谢雅婷, 周忠发, 闫利会, 牛颖超, 王厉. 贵州省石漠化敏感区生态红线空间分异与管控措施研究. 长江流域资源与环境, 2017, 26(4): 624-630.
- [35] 侯鹏, 王桥, 杨旻, 李静, 翟俊, 蔡明勇. 生态保护红线成效评估框架与指标方法. 地理研究, 2018, 37(10): 1927-1937.