

doi : 10. 16473/j. cnki. xblykx1972. 2020. 02. 021

基于 GIS 的宁夏中部干旱带生态安全空间格局的评价*

王重玲¹, 程淑杰¹, 王林伶², 朱志玲³

(1. 银川能源学院 土木建筑学院, 宁夏 银川 750105; 2. 宁夏社会科学院 经济研究所, 宁夏 银川 750021;
3. 宁夏大学 资源环境学院, 宁夏 银川 750021)

摘要: 生态安全是影响区域可持续发展的重要因素, 通过构建生态安全评价模型, 利用 ERDAS 遥感影像处理软件获取 2017 年 9 月宁夏中部干旱带 LUC 数据, Fragstat 景观软件获取景观格局指数, 借助 ARCGIS 空间数据处理系统中的空间分析、叠加与重分类等功能对研究结果进行空间分类处理, 对宁夏中部干旱带生态安全空间格局进行评价。结果表明: (1) 宁夏中部干旱带的生态安全指数在 12.15-85.76 之间, 安全状态跨度大、结构复杂。生态高度安全区面积最小, 占研究区总面积的 7.50%; 生态较高安全区面积次之, 占研究区总面积的 11.64%; 而生态一般安全区、生态临界安全区和不安全区分别占 27.58%、28.99% 和 24.29%, 区域空间差异较大; (2) 宁夏中部干旱带的生态安全空间格局受地表水资源分布的限制, 表现为沿红寺堡灌区、固海灌区、盐环定扬水灌区及清水河两侧呈带状分布, 其安全度由里至外逐渐降低; (3) 研究结果对区域土地资源可持续利用、生态移民工程、生态环境建设等提供科学依据。

关键词: 宁夏中部; 空间格局; 生态安全指数; 土地利用与覆被变化

中图分类号: P 208; X 826 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-8246 (2020) 02-0147-07

GIS-based Spatial Pattern of Ecological Security in the Central Arid Zone of Ningxia

WANG Chong-ling¹, CHENG Shu-jie¹, WANG Lin-ling², ZHU Zhi-ling³

(1. College of Civil Engineering, Yinchuan University of Energy, Yinchuan Ningxia 750105, P. R. China;
2. Institute of Economy, Ningxia Academy of Social Sciences, Yinchuan Ningxia 750021, P. R. China;
3. College of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan Ningxia 750000, P. R. China)

Abstract: Ecological safety is one of the important factors which affecting the regional sustainable development. This paper got LUC data in September 2017 of the central arid zone in Ningxia by using ERDAS remote sensing image processing software, and got landscape pattern index by Fragstas software. With the help of ARCGIS's function such as spatial analysis, spatial data processing system of superposition and reclassification to processing the result of spatial reclassification, using the method of expert consultation to amend the final ultima reclassification in accordance with the actual situation of the research area, thus enabling the visual of ecological safety state of 30 * 30 grid unit in the research area. Subsequently, we studied and analyzed the ecological complete state and spatial distribution pattern of the study area. The results showed that: (1) The ecological safety degree of the study area was not high in general, and the ecological security index was 12.15-85.76. The most ecological security zone was the least with only 7.05% of the study area. The high ecological security zone was accounted for 11.64%, the normal ecological security zone with 27.58%, the critical ecological security zone with 28.99%, the unsafe ecological security

* 收稿日期: 2019-10-09

基金项目: 宁夏社科规划项目 (18NXCRK01), 银川能源学院科学研究项目 (2018-KY-J-05), 宁夏优秀人才支持计划 (TJGC2019006) 资助。

第一作者简介: 王重玲 (1987-), 女, 助理研究员, 硕士, 主要从事区域与可持续发展研究。E-mail: bailing121214@163.com

通讯作者简介: 朱志玲 (1969-), 女, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事城市与区域发展规划研究。E-mail: Zhuzhixd@163.com

zone with 24.29% ;(2)The ecological security pattern of the study area was determined by surface water resources of Hong Sibao irrigation area, Guhai irrigation area, Yan Huanding pumping irrigating area and Qing Shui river, manifested in a belt-along distribution models with the ecological security degree is lower from inside to outside ;(3) The study results are close to the regional reality ,it could provide scientific evidence for ecological migration project ,the ecological environment developments and land use planning for regional sustainable development.

Key words: central Ningxia ; spatial pattern ; dnviromental security index (HEI) ; LUCC

随着城市化进程的加快和世界人口不断增长,在世界范围内出现了诸如资源过度消耗、生境破坏和退化、空气、水资源及土壤污染等日趋加重的生态环境问题,对区域生态安全和可持续发展产生了极大的阻碍^[1-2],因此,生态安全问题成为各国必须共同面对并亟需解决的重点问题。在国外,对生态安全问题的研究较早,最早可追溯到19世纪70年代^[3],用生态环境安全的概念来描述区域生态环境。到20世纪80年代,美国学者和相关机构对于生态安全给出了比较客观准确的概念,即生态安全是指人类的基本生活环境基本不受来自自然、社会等威胁的一种状态^[4],此概念已被越来越多的学者们接受。综合分析近年相关研究成果,可以看出,国外对于生态安全的研究注重于对概念的全面理解,在此基础上综合如水资源、食品质量安全问题等,其研究是伴随生态健康和生态风险评价而建立起来,注重大尺度空间范围的全局研究^[5-6]。在国内,对于生态安全的研究开始于20世纪90年代,虽起步较晚但发展较快,已成为全国的热点与重点研究问题。中国共产党的十八大报告首次将生态安全格局优化提升到战略高度^[7]。国内对于生态安全的研究近年来取得了较多成果:党小虎等^[8]运用生态足迹的方法定量分析了典型生态脆弱区黄土高原1995-2010年间生态足迹和生态承载力的空间变化;刘时栋等^[9]利用核密度估算法、ARCGIS空间插值法及灰色预警模型对新疆土地利用生态安全进行了探索性测度与分析;张秋霞等^[10]基于P-S-R和E-E-E-S框架,构建耕地生态安全预警指标体系,运用改进物元可拓模型及障碍度模型分析了新郑市土地生态安全等级与生态安全障碍因子;彭建等^[11]运用雄安新区VIIRS/DNB夜间灯光数据,基于最小累积阻力模型和现状生态安全格局,提出了生态安全格局优化的策略;黄木易等^[12]通过ARCGIS构建生态阻力面,运用空间数据探索分析法、最小累积阻力模型和重力模型对大别山核心区生态安全格局异质性进行分析并提出优化措施;程淑杰等^[13]以RS和GIS技术为基础,通

过构建生态安全的“隐患-状态-免疫”框架指标体系,利用熵权法和综合指数法分析了宁夏中部干旱带土地利用生态安全动态变化。通过典型研究成果总结得出,国内对于生态安全的研究主要表现在以下4个方面:(1)生态安全评价指标体系的研究^[14-16];(2)生态安全评价方法的研究^[17-18];(3)生态安全时空格局状态分析^[19-20];(4)生态安全的驱动因素分析^[21-22]。从生态功能区划的角度看,目前对限制开发生态区生态安全的研究较少^[13,15]。因此,本文主要以宁夏中部干旱带LUCC数据为基础,结合影响区域生态安全的自然因素和人为因素,利用Fragstat景观软件,结合GIS软件空间分析功能^[23],SPSS统计分析软件和专家咨询法,通过构建区域生态安全评价模型,分析宁夏中部干旱带生态安全水平状态、空间分布格局及存在的可能问题,为生态环境建设和土地利用发展提供相应的参考。

1 研究区的自然概况

宁夏中部干旱带(104°17'-107°39'E, 36°54'-38°23'N),位于宁夏中部地区多年平均降水量在200-400mm之间的区域^[15]。由于该区域范围广阔,考虑各种限制因素,选取具有典型代表的盐池县、红寺堡区、同心县和海原县作为研究区域,共41个乡镇,土地面积为20141.40km²。该区域的平均海拔1100-1600m,处于毛乌素沙地和腾格里沙漠的边缘,为典型荒漠草原带。地形南高北低东高西低,南部以黄土丘陵沟壑区为主,北部丘陵台地沟壑纵横、梁峁起伏、地形支离破碎。土地利用类型主要以耕地(旱地)和草地为主,植被覆盖度低(图1)。2018年,宁夏中部干旱带总人口为10.90×10⁵人,平均城市化水平为37.38%,耕地面积为4458.70km²,占22.14%;草地面积为9236.91km²,占45.86%;林地面积为2669.41km²,占13.25%;水域面积为207.85km²,占1.03%。

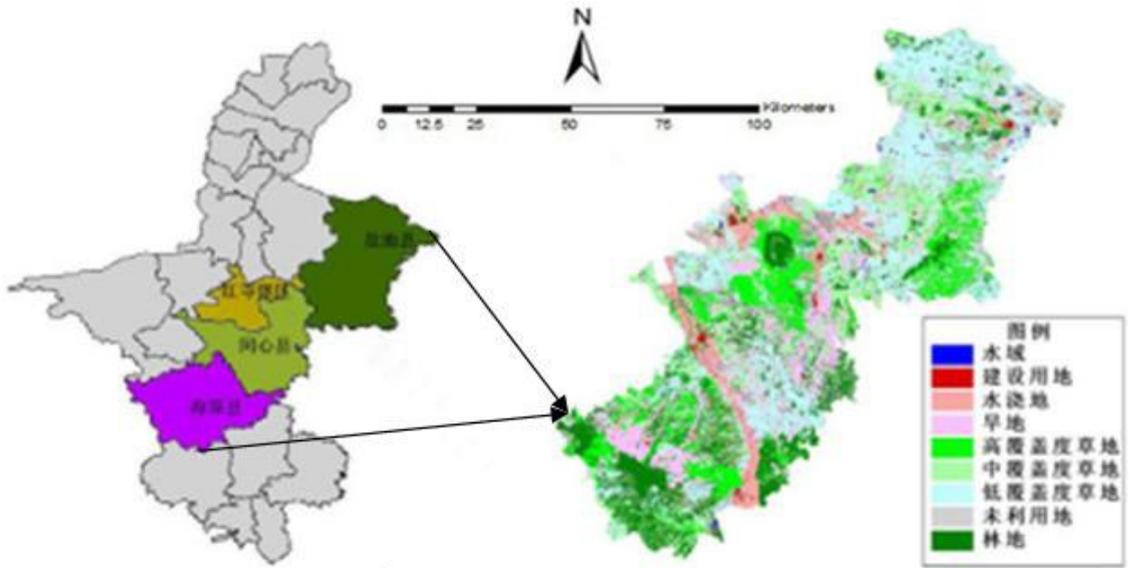


图 1 宁夏中部干旱带区位与土地利用现状

Fig. 1 Diagram of the central arid zone location and the land utilization in Ningxia

2 指标体系与评价模型

2.1 指标含义及计算方法

2.1.1 地形条件指数

地形条件指数 (TCI)，参考曲家媛^[24]、程淑杰等^[25]的方法，其计算公式为， $TCI = \log \left[\left(\frac{G}{\bar{G}} + 1 \right) \times \left(\frac{P}{\bar{P}} + 1 \right) \right]$ ①。式中：TCI 为地形条件指数，G 与 \bar{G} 分别为单一栅格单元的高程值和研究区平均高程值；P 与 \bar{P} 分别为单一栅格单元的坡度值和研究区平均坡度值。

2.1.2 景观结构指数

景观结构指数 (STI) 参照邬建国^[26]、石斌^[27]的研究方法，计算公式表示为， $STI = 1 - (\lambda_{CI} \times CI_k + \lambda_{SI} \times SI_k)^{AK} / A$ ②。式中：CI_k 为景观破碎度；SI_k 为景观分离度；λ_{CI} 和 λ_{SI} 分别为景观破碎度和景观分离度的权重。结合区域实际，综合分析景观生态学中各指标因子对生态环境的贡献，λ_{CI} 和 λ_{SI} 分别取 0.6 和 0.4。

2.1.3 人为干扰指数

人为干扰指数 (HAI)^[24,26]。计算公式为， $HAI = \sum_{i=1}^N \frac{A_i P_i}{T_A} \times 100\%$ ③。式中，N 为景观类型的数量，此处 N 为 6；A_i 为第 i 种景观类型的面积；P_i 为第 i 种景观类型所反映的人为影响参数；T_A 为区域景观

的总面积。

通过人为影响强度参数可以反映不同景观组分人类参与、管理、改造的强度属性，本文参考曲家媛、石斌^[24,27]的研究，经过修正得到研究区土地利用人为影响参数 (表 1)。

表 1 各类型土地利用人为影响参数

Tab. 1 All kinds of land use parameter

景观类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
参数	0.55	0.19	0.23	0.12	0.9	0

2.1.4 水文指数 (WRI)

结合相关研究成果^[14,25]，考虑研究区区域实际，将降水量、水域面积及库井灌区面积作为影响水文指数的重要参数，计算公式为， $WRI = \alpha P + \beta W_a + \chi P_f$ ④。式中，WRI 为水文指数，α、β、χ 分别为研究区年均降水量、水域面积和库井灌区面积的权重，根据区域实际结合咨询专家打分取得，取 α 为 0.2，β 为 0.1，χ 为 0.7。为消除单位和量纲，P、W_a 和 P_f 分别为宁夏中部干旱带年均降水量、水域面积和库井灌区面积的标准化值。

2.2 生态安全评价模型

生态安全指数 (HEI)^[6] 计算公式为， $HEI = \alpha TCI + \beta STI + \delta HAI + \varepsilon WRI$ ⑤。式中，HEI 为宁夏中部干旱带生态安全状态指数，其值在 0-100 之间；TCI、STI、HAI 和 WRI 分别为标准化后的地形条件

指数、景观结构指数、人为干扰指数和水文指数值； α 、 β 、 δ 和 ε 分别为地形条件指数、景观结构指数、人为干扰指数及水文指数的权重，通过咨询专家打分取得。

3 结果与分析

根据研究区生态安全指数的大小，借鉴相关研究^[13]将生态安全度指数（HEI）划分为5个等级，生态安全指数越高，区域生态安全状态越好。生态安全空间格局分为生态高度安全区、生态较高安全区、生态一般安全区、生态临界安全区和生态不安

全区（表2），并对其特征描述，根据计算结果，以乡镇为基本单位，探讨研究区生态安全分布格局。

3.1 生态安全指数分析

生态安全指数反映区域生态系统的安全程度和可持续发展状态，在地形条件指数、景观结构指数、人为干扰指数、水文指数4个生态安全因子基础上，通过采用ARCGIS空间叠置、矢栅转换与重分类等方法，采用生态安全指数模型对研究区生态安全进行量化分析，得到宁夏中部干旱带生态安全指数分布和空间格局（图2）。

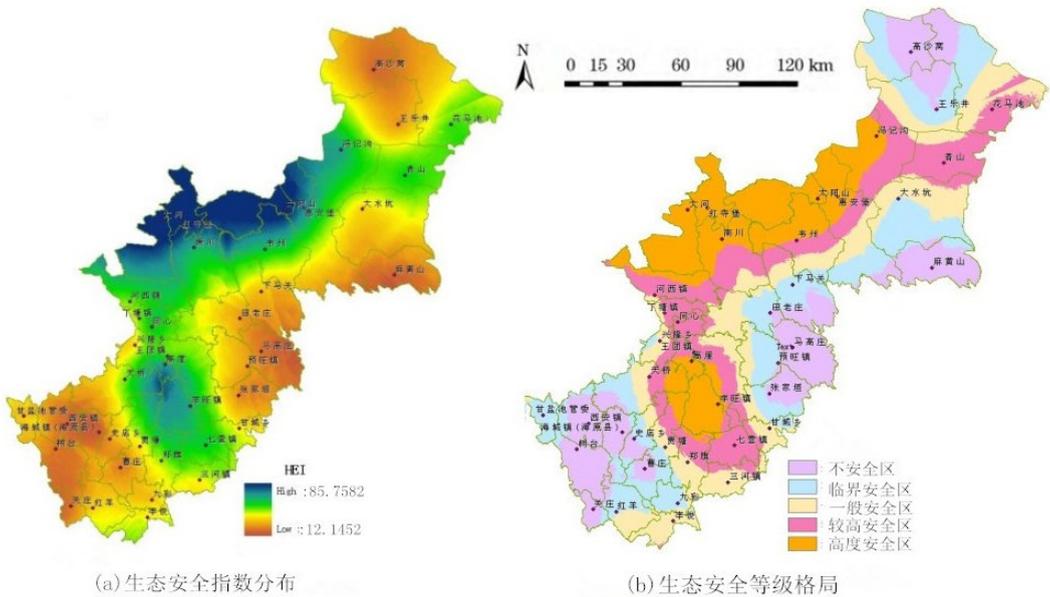


图2 宁夏中部干旱带生态安全状态指数与分布格局

Fig. 2 Ecological safety state index and distribution pattern of the central arid zone in Ningxia

由图2（a）可知，研究区生态安全指数介于12.15–85.76之间，高指数区域主要集中在红寺堡灌区和固海扬黄灌区的石峡口水库库区。生态高度安全区、较高安全区、一般安全区、临界安全区与不安全区分别占研究区总面积的7.5%、11.64%、27.58%、28.99%和24.29%；生态安全临界值为40，生态安全指数低于40的为临界安全区和不安全区，占研究区总面积的53.28%（表2）。通过添加趋势线分析（图3），研究区未来生态较高安全区和一般安全区面积将有所增加，临界安全区和不安全区面积将有所下降，这充分反映了退耕还林（还草）、库井灌区建设、生态移民等工程对区域生态安全的贡献。

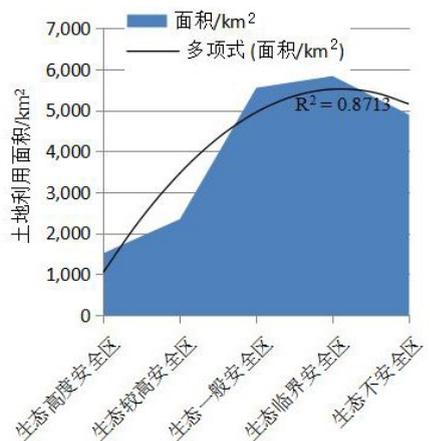


图3 不同生态安全等级土地利用面积

Fig. 3 The land use areas of different ecological state

表2 宁夏中部干旱带的生态安全等级划分

Tab. 2 Results of ecological safety rating to the central arid zone in Ningxia

HEI	评价等级与占比	特征描述
$80 \leq HEI < 100$	生态高度安全区 (7.5%)	土地生态环境基本未受到干扰和破坏,生态系统结构完整,功能较强,植被覆盖度高,生态问题不显著。
$60 \leq HEI < 80$	生态较高安全区 (11.64%)	土地生态环境受到干扰,生态系统结构较完整,功能较好,土地利用功能较多,生态问题不显著。
$40 \leq HEI < 60$	生态一般安全区 (27.58%)	土地生态环境受到较少破坏,生态系统结构有恶化趋势,但尚能维持基本功能,受到干扰后易恶化,生态问题较显著。
$20 \leq HEI < 40$	生态临界安全区 (28.99%)	土地生态环境受到较大破坏,生态系统结构恶化较大,功能不全,受到干扰后恢复困难,生态问题较大。
$HEI < 20$	生态不安全区 (24.29%)	土地生态环境受到很大破坏,生态系统结构残缺不全,功能低下,受到干扰后恢复和重建困难,表现为有大量生态移民迁出。

3.2 生态安全格局分析

3.2.1 生态高度安全区

生态高度安全区主要分布在红寺堡灌区、固海灌区和盐环定扬水灌区,包括除南川乡南部以外的所有红寺堡区域、盐池县惠安堡北部、冯记沟西北部、同心县韦州镇北部及海原县东北部高崖乡及李旺镇等,总面积1 511.18km²,占研究区面积7.50%。该区域水资源丰富,水域面积广阔,土地利用方式主要表现为水浇地和高覆盖度草地,生态环境良好,系统结构稳定,功能齐全,在人居环境方面也表现为高度适宜居住区,近年来吸引大规模的生态移民不断迁入。在区域生态安全保护方面,应以实施乡村振兴战略为基础,做好移民区及乡村环境整治工作,发展绿色产业和低碳产业,以促进区域生态安全可持续发展水平。

3.2.2 生态较高安全区

主要分布在固海灌区两侧、红寺堡灌区南部及盐环定扬水灌区东部区域,包括海原县七营镇及郑旗乡、贾唐镇、官桥乡、三河镇东北部;同心县韦州镇中部、高崖乡、王团镇、兴隆乡北部、河西镇中南部及兴隆乡中东部;红寺堡区南川乡南部;盐池县惠安堡中部、冯记沟镇东部、青山乡大部及花马池镇南部,总面积2 344.49km²,占研究区面积11.64%。该区域大部分为县域内生态移民迁入区,其中盐池县花马池镇为重点迁入区。生态移民工程在一定程度上使区域生态环境受到一定干扰,但退耕还林(还草)及生态环境治理工程^[28]使该区域内的生态环境有较大改善,生态系统结构较完整、功能较齐全,生态问题尚未凸出,需要注意生态移民迁入区环境保护工作,禁止大面积开发建设活动。

3.2.3 生态一般安全区

主要分布在清水河支流及扬黄灌区支渠,包括海原县李俊乡、红羊乡、三河镇、郑旗乡南部、贾唐镇、史庙乡、官桥镇中部;同心县甘城乡东部、张家垣乡西部、韦州镇和下马关镇中北部及豫旺镇和田老庄乡西部;红寺堡区南川乡南部少数区域及盐池县惠安堡镇中南部、大水坑镇中北部、青山乡北部、花马池镇北部及王乐井乡西部及南部区域,其总面积为5 552.44km²,占研究区面积27.58%。该区域覆盖丘陵、山地及台地,地形条件复杂,地势南高北低,植被以中覆盖度的草地为主,耕地中水浇地稍多于旱地,区域生态环境受到一定干扰,生态问题较凸出,应加强生态环境保护力度,维护好生态移民迁出区的环境建设,优化农业生产条件,推进生态环境良性发展。

3.2.4 生态临界安全区

主要分布在海原县甘盐池管委、九彩乡大部分区域、红羊乡西北部、曹庄南部、史店乡和官桥乡中部;同心县甘城乡东北部、张家垣乡中部、豫旺镇与田老庄乡东部、下马关镇中南部;盐池县惠安堡镇南部、大水坑镇中南部及花马池镇、高沙窝镇、王乐井乡中部地区,总面积5 839.66km²,占研究区面积28.99%。该区域地貌类型主要以山地和丘陵为主,气候干旱,昼夜温差较大,土地利用主要表现为低覆盖度的草地和旱地,生态环境破坏较大,生态系统结构恶化较大,生态问题较严重。但光热和土地资源相对较丰富,因此,一方面应大力发展农业生产,走农业脱贫之路;另一方面应加强生态建设,恢复植被,提升生态系统服务功能。

3.2.5 生态不安全区

主要分布在海原县关庄乡、树台乡、海城镇、

西安镇及史庙乡西南部、曹庄西北部；同心县马高庄乡、张家垣乡东北部、下马关镇南部；盐池县高沙窝镇东部、花马池镇西北部、王乐井乡北部、惠安堡镇南部及麻黄山乡大部地区，总面积 4 893.23km²，占研究区面积 24.29%。该区域地貌类型以山地和丘陵为主，北部大部为干旱风沙区，土地沙漠化问题凸出，沙尘暴危害较严重；中部地区包括盐池县麻黄山乡丘陵区、同心县东南部山地区，土地利用类型以低覆盖度的草地和旱地为主，生态环境脆弱；南部地区位于南华山和西华山两山之间的川谷地区，地形支离破碎，水资源短缺。区域生态环境受干扰大，生态系统结构不完整，功能不全，生态环境在受到破坏时难以恢复，城市化水平低，为人口密度极稀区和稀少区，也是生态移民迁出区。因此，应继续有序推进生态移民搬迁工作，促进农业人口城镇化，大力进行生态恢复和重建工作，完善生态系统结构，提高生态服务功能。

4 结论与讨论

4.1 结论

整体上，本研究区的生态安全状态不高，区域差异明显，表现为：

(1) 生态安全指数范围在 12.15–85.76 之间。研究区整体上属于生态脆弱区，开发强度小，自然灾害危险性较大或极大^[29]，生态安全度不高，高度安全区和较高安全区面积仅占 19.14%，临界安全区面积和不安全区高达 53.28%。

(2) 除盐池县高沙窝镇、王乐井乡等部分乡镇外，研究区生态安全总体上沿清水河、固海灌区、红寺堡灌区、盐环定灌区等平原地区向四周辐射降低，每种类型的生态安全区都表现为带状分布，生态安全度由南向北逐渐升高。

(3) 研究区未来生态安全将趋于好转，表现为较高生态安全区和一般生态安全区面积有所增加，临界生态安全区和不安全区的面积将会减少，区域生态系统服务功能将不断提高。

4.2 讨论

(1) 本研究选取 4 个反映区域生态安全的一级指标和 9 个二级指标，以 Fragstat 景观软件分析为基础，利用 ARCGIS 空间技术平台，结合 SPSS 统计分析软件和专家咨询法，以 30m×30m 为基本栅格单元，计算分析研究区生态安全指数分布状态及整体空间格局。研究结果基本符合区域现状。

(2) 对生态安全的评价与研究具有一定的区域特色，评价模型与指标的选取会对评价结果产生一定的误差。本文以区域实际为基础，结合已有学者研究对影响生态安全的水文指数和人为干扰指数进行了修正，并结合专家咨询对评价指标权重消除客观影响，从而使研究结果更贴近实际，为区域生态移民工程和生态环境建设提供科学依据，同时对促进区域可持续发展战略提供参考。但因为数据可获取性的限制，在评价指标选取上可能存在一定的不足和缺陷，因此，需要在后续的研究中进一步探讨和改善。

参考文献：

[1] 刘秀丽, 郭丕斌, 张勃, 等. 采煤与脆弱生态复合区生态安全评价—以山西为例[J]. 干旱区研究, 2018, 35(3): 677–685.

[2] 叶鑫, 邹长新, 刘国华, 等. 生态安全格局研究的主要内容与进展[J]. 生态学报, 2018, 38(10): 3383–3387.

[3] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容[J]. 应用生态学报, 2002, 13(3): 354–358.

[4] Myers N. Environment and Security[J]. Foreign Policy, 1989, 20(74): 23–41.

[5] 刘超贤. 基于 RS 与 GIS 技术的丹江口库区土地生态安全变化及影响因素研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.

[6] 熊建华. 土地生态安全评价研究回顾、难点与思考[J]. 地理与地理信息科学, 2018, 34(6): 72–76.

[7] 樊杰. 我国国土空间开发保护格局优化配置理论创新与“十三五”规划的应对策略[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(1): 1–12.

[8] 党小虎, 吴彦斌, 刘国彬, 等. 生态建设 15 年黄土高原生态足迹时空变化[J]. 地理研究, 2018, 37(4): 761–771.

[9] 刘时栋, 徐丽萍, 张婕. 新疆土地生态安全时空变化[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 1–4.

[10] 张秋霞, 张合兵, 刘文锴. 新郑市耕地生态安全动态预警研究[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 256–259.

[11] 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 等. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略[J]. 地理学报, 2018, 73(4): 701–705.

[12] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 等. 基于 MCR 模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化[J]. 自然资源学报, 2019, 34(4): 771–784.

[13] 程淑杰, 王重玲, 王婷. 基于 GIS 的宁夏中部干旱带土地利用生态安全动态评价[J]. 水土保持研究, 2017, 24(4): 342–346.

[14] 周迎雪. 基于 TOPSIS–BRF 模型的土地生态安全评价及预测—以山东省烟台市为例[D]. 泰安: 山东农业大学,

2017.

[15]贾科利,张俊华.生态脆弱区土地利用时空格局变化分析—以宁夏中部干旱带为例[J].干旱地区农业研究,2011,29(3):98-102.

[16]胡志仁,龚建周,李天翔,等.珠江三角洲城市群生态安全评价及态势分析[J].生态环境学报,2018,7(2):304-312.

[17]李昊,李世平,银敏华.中国土地生态安全研究进展与展望[J].干旱区资源与环境,2016,30(9):50-56.

[18]李杨帆,林静玉,孙翔.城市区域生态风险预警方法及其在景观生态安全格局调控中的应用[J].2017,36(3):485-488.

[19]刘海龙,谢亚林,贾文毓,等.山西省生态安全综合评价及时空演化[J].经济地理,2018,38(5):161-165.

[20]王新芸,瓦哈甫·哈力克,王芳,等.城镇化视角下的中国生态安全空间分布及其影响因素[J].江苏农业科学,2018,46(7):276-282.

[21]王燕辉,陈卓,曹禹,等.河北省近20年耕地生态安全动态变化及阻力分析[J].水土保持研究,2017,24(1):194-197.

[22]李洁,赵锐锋,梁丹,等.兰州市城市土地生态安全评价与时空动态研究[J].地域研究开发,2018,37(2):151-155.

[23]徐建华.地理建模方法[M].北京:科学出版社,2010.

[24]曲家媛.基于P-S-R模型的延边州生态安全评价研究[D].长春:东北师范大学,2010.

[25]程淑杰,朱志玲,白林波.基于GIS的人居环境生态适宜性评价——以宁夏中部干旱带为例[J].干旱区研究,2015,32(1):176-183.

[26]邬建国.景观生态学格局、过程、尺度与等级[M].北京:高等教育出版社,2000.

[27]石斌.基于GIS和RS的兰州新区生态安全评价[D].兰州:甘肃农业大学,2012.

[28]郑琪琪,杜灵通,宫菲,等.基于GF-1遥感影像的宁夏盐池柠条人工林景观特征研究[J].西南林业大学学报(自然科学版),2019,39(1):152-159.

[29]米文宝.西北地区国土主体功能区划研究[M].北京:中国环境科学出版社,2010.

(编辑:胡光辉)