

DOI: 10.5846/stxb201803130495

王云,潘竞虎.基于生态系统服务价值重构的干旱内陆河流域生态安全格局优化——以张掖市甘州区为例.生态学报,2019,39(10): - .

Wang Y, Pan J H. Establishment of ecological security patterns based on ecosystem services value reconstruction in an arid inland basin: A case study of the Ganzhou District, Zhangye City, Gansu Province. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): - .

基于生态系统服务价值重构的干旱内陆河流域生态安全格局优化 ——以张掖市甘州区为例

王 云,潘竞虎*

西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

摘要:干旱区内陆河流域的生态环境极为脆弱,生态系统的微小变化也可能给流域生态安全带来巨大影响。甘州区位于干旱内陆河流域,生态问题突出,重视生态系统自身安全、构建合理的生态安全格局是保障该地区生态安全的有效措施。通过当量因子法估算 2000、2005、2010 年甘州区生态系统服务的静态价值,在充分考虑各项生态系统服务功能变化率及空间集聚程度对功能发挥影响的基础上,采用生态系统服务优先指数和空间丰富度指数,对甘州区 2010 年生态系统服务静态价值的估算结果进行动态重构。利用重构后的生态系统服务价值构建了甘州区 3 种不同安全水平情景下的生态安全格局。结果表明:1)甘州区生态系统服务价值总量逐步上升,各项服务多年变化率差异不大。2)重构后生态系统服务价值量为 1438.21—390993 元/hm²,大部分地区为中低值。3)低、中、高安全水平生态安全格局中,生态源地面积分别为 155.75 km², 191.25 km² 和 224.5 km²。基于生态系统服务价值构建的生态安全格局是立足于生态系统服务现状提出的规划策略,可为区域生态保护规划和生态文明建设提供重要依据。

关键词:生态系统服务价值;动态重构;生态源地;生态安全格局;甘州区

Establishment of ecological security patterns based on ecosystem services value reconstruction in an arid inland basin: A case study of the Ganzhou District, Zhangye City, Gansu Province

WANG Yun, PAN Jinghu*

College of Geography and Environmental Science of Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

Abstract: With increasing populations and acceleration of urbanization, there is increasing worldwide concern about the importance of ecological security. Ecological security is premised on ecosystem services provided by ecosystems to humans. The construction of ecological security patterns is an effective measure to maintain normal ecosystem function and safeguard ecological security. Ganzhou District is located in an arid inland basin and the ecological security is a prominent problem. The traditional approach to construct the ecological security pattern can be divided into three steps: determining ecological security sources, building ecological resistance surface, and identifying key ecological corridors. The first step of determining ecological security sources is accurately identifying the ecosystem service value (ESV). Presently, most local studies have used the ESV unit area of Chinese terrestrial ecosystems to estimate the ESV. However, ecological systems are dynamic rather than static. Therefore, this cannot reflect the differences between kinds of ecosystem services, change rate of

基金项目:国家自然科学基金项目(41661025);西北师范大学青年教师科研能力提升计划(NWNU-LKQN-16-7)

收稿日期:2018-03-13; **网络出版日期:**2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: panjh_nwnu@nwnu.edu.cn

ESV, or degree of spatial agglomeration. However, to effectively protect the fast decreasing service, the influence of the spatial agglomeration of ecosystem services on the recognition of ecological sources by affecting their functions should be considered. Hence, a static ESV was reconstructed by changing the ESV rate to measure the priority of protected ecosystem services and using the key ecosystem service indicators to quantify the degree of spatial aggregation. Using the ESV unit area method for Chinese terrestrial ecosystems, the static ESV in the Ganzhou District in 2000, 2005, and 2010 was calculated. Taking into account the changing rate of ESV and degree of spatial agglomeration influence on their functioning, the priority and spatial richness indexes were used to reconstruct the ESV in 2010. Using the spatial distribution of the reconstructed ESV for ecological source identification, the area with high value ecosystem services was selected as the source of high, medium, and low security levels. Then, ecological corridors could be identified according to the minimum cumulative resistance (MCR) model. Ecological corridors convey the transfer of ecological flow, ecological processes, and ecological functions in a region. Ecological corridors connect scattered ecological sources to constitute an ecological safety net. Therefore, ecological security patterns of different levels can be constructed. The results showed that (1) the total static ESV increased annually during 2000~2010, among which the values of soil formation and protection and waste treatment were the largest. In addition, there were no obvious differences among the changing rate of ESV; (2) the reconstructed ESV in 2000, 2005, and 2010 ranged from 1438.21 to 390993 yuan hm^{-2} , whereas most regions were dominated by low and middle values; (3) the area of low, middle, and high levels of ecological source were 155.75, 191.25, and 224.50 km^2 , respectively. With the improvement of the ecological security level, the degree of integration of ecological sources has gradually increased, and the resistance and resilience against ecological stress have increased. Ecological security patterns could be used as a planning strategy based on the present situation of ecosystem services. They provide an important basis for urban environments to build an environment-friendly society.

Key Words: ecosystem services static value; dynamic reconfiguration; ecological source; ecological security pattern; Ganzhou District

在推进现代化的过程中,生态安全问题日益突出,已成为世界各国关注的焦点^[1]。党的“十九大”将生态文明建设提升为“千年大计”,提出要“实施重要生态系统保护和修复重大工程,优化生态安全屏障体系,构建生态廊道和生物多样性保护网络,提升生态系统质量和稳定性”。广义的生态安全强调生态系统的健康、完整性和可持续性自身安全的关键^[2];狭义的生态安全则强调生态系统向人类提供完善的生态系统服务功能^[2]。构建生态安全格局是维持生态系统正常发挥服务功能、保障生态安全、调节经济发展与生态环境矛盾的有效措施。生态安全格局是通过排除干扰以及空间格局规划和管理,保护重要生态功能区,发挥区域生态系统环境本底优势,整合区域内各项生态系统服务功能,实现生态系统结构功能的健康、完整性以及生态过程稳定性的空间格局^[3]。生态安全格局由区域中的重要生态源地及生态系统服务流动沟通的生态廊道共同构成^[4],生态安全格局的构建就是以保障生态系统功能及服务充分发挥为目的,通过将区域内节点、斑块、廊道、网络等关键要素优化配置,最大程度减少人类活动对环境的负面影响的规划设计活动^[5]。

国外对生态安全格局的研究始于 20 世纪 90 年代末,学者尝试以景观生态学视角研究生态系统结构和过程,提出了生态安全格局(ecological security pattern)的概念,如 Yu^[6]认为生态安全格局是指对景观内生态过程有较好支撑作用的景观特定构型和有少数具有生态意义的景观要素。国外的生态安全格局建设多以生态网络(Ecological Network)或绿色基础设施(Green Infrastructure)的形式出现,而在国内,城市增长边界与生态控制线是生态安全格局研究的热点^[7]。从研究内容上看,涉及景观生态安全格局构建^[5]、土地利用生态安全格局优化^[8]、城市生态安全格局规划^[9]、区域生态安全格局构建^[10]等;从研究尺度看,市域^[11]、省域^[12]、区域^[13]、全国^[14]等尺度都有涉及;从研究对象上看,生态敏感区域备受关注,如快速城市化区域^[15]、干旱区^[16]、湿地^[17]、地质灾害频发区等^[18];从研究方法看,主要利用景观格局指数、多准则数量优化法、情景分析法等开

展研究。综合来看,目前生态安全格局构建研究广泛采取了“选取生态源地—最小累计阻力模型建立阻力面—构建生态安全格局”的方法框架,在选取源地时,大多直接提取自然类景区、大面积的水体和林地等重要生态用地作为源地,或者多指标下对斑块重要性分级叠加后进行评估^[19],较少有根据生态系统服务价值量识别源地的案例。生态系统服务是生态系统向人类提供惠益的方式,是生态安全的前提条件,除此之外,核算服务价值量还可用来衡量人类福利,减少人类因短期经济利益破坏生态系统的行为,从而实现生态安全。国内至今尚无统一的生态系统价值评估体系,大多数学者选择谢高地^[19]在 Costanza^[20]研究基础上构建的适用于中国的当量因子法,该方法直接基于各土地利用类型下的单位面积生态系统当量因子进行核算,虽简便易算,但实际上,生态系统服务随着生态系统外部形态、内部结构的变化而变化,即具有“空间性”而不是“静态式”^[21];各项生态系统服务价值量变化率存在差异,若把各项生态系统服务对人类社会提供的福祉视为同样重要,会导致价值损失较快的服务类型得不到足够的重视;各项生态系统服务也不是单独发挥作用,而是相互交织在一起,受空间集聚性的影响^[15]。因此,迫切需要构建优先指数反映生态系统服务损失程度,利用 GIS 时空分析手段的优势进行空间制图等方法对当量因子法进行调整。

地处黑河中游的甘州区是中国西北地区的重要生态屏障。随着人口的增加和城市化进程的加快,以祁连山生态破坏为代表的生态问题日益受到关注。本文以甘州区为对象,采用当量因子法估算其 2000、2005、2010 年生态系统服务的静态价值;以各生态服务类型价值多年变化率构建优先指数,以空间聚集程度构建空间丰富度指数,对 2010 年甘州区生态系统服务价值进行动态重构。利用重构后的结果进行生态源地和生态廊道识别,构建不同安全水平下的生态安全格局,为区域生态文明建设提供科学参考。

1 研究地区与数据来源

1.1 研究区概况

张掖市甘州区地处甘肃省河西走廊腹地,位于 38°32'—39°24'N,100°6'—100°52'E 之间(图 1)。其地北部以合黎山、龙首山为界与内蒙古相隔,中部为由南向北倾斜的张掖盆地,南部与祁连山相倚,境内黑河贯穿,形成张掖绿洲。属温带大陆性气候,全年平均日照时数 2931—3085 h 之间,无霜期 138 天,年平均降水量 113—312 mm,蒸发量 2047 mm,光照充足,主要耕作土壤为绿洲灌淤土,属于典型的干旱内陆河流域地区。全区总面积 3686 km²,总人口 51.79 万(2017 年),是张掖市的经济、文化、政治中心。

1.2 数据来源

本文使用的 2000、2005、2010 年社会经济数据来源于《甘肃农村年鉴》;水源地保护区分布图(1:25 万)和甘州区旅游景点重要性分布图(1:25 万)取自甘肃省张掖市人民政府门户网站(<http://www.zhangye.gov.cn/>);数字高程模型(分辨率为 90 m)、土壤栅格图(1:100 万)获取自土地覆被数据库(<http://glcf.umd.edu/date/srtm>)和联合国粮食及农业组织网站(<http://www.fao.org/>)。2000、2005、2010 年土地利用数据由当年 7—8 月环境卫星的 CCD 影像(空间分辨率为 30 m)解译而来。结合甘州区社会经济发展的实际情况,根据土地的用途、利用方式和覆盖特征等因素作为土地利用的分类依据,一级分为草地、耕地、林地、水域、沼泽、未利用地、建设用地 7 类,二级分为 18 类。研究中按二级地类统计,一级地类汇总。遵循先宏观后微观、先整体后局部、先大类后小类、先易后难的解译顺序,采用多要素、分主次和逐步判别的人工解译,实地验证综合判读精度在 85%以上,Kappa 系数 0.72。其中,未利用地二级地类包括裸岩石砾地、裸土、沙地 3 种类型。由于建设用地对生态功能贡献很小,将其提供的生态系统服务价值设为 0,其余 6 类土地利用类型分别对应“中国陆地生态系统单位面积服务价值当量”^[20]中的草地、农田、森林、水体、湿地以及荒漠 6 种生态系统类型。

2 研究方法

2.1 生态系统服务静态价值估算

千年生态系统评估(MA)将生态系统服务分为 11 种服务功能,本文采用谢高地等^[20]提出的适合中国实

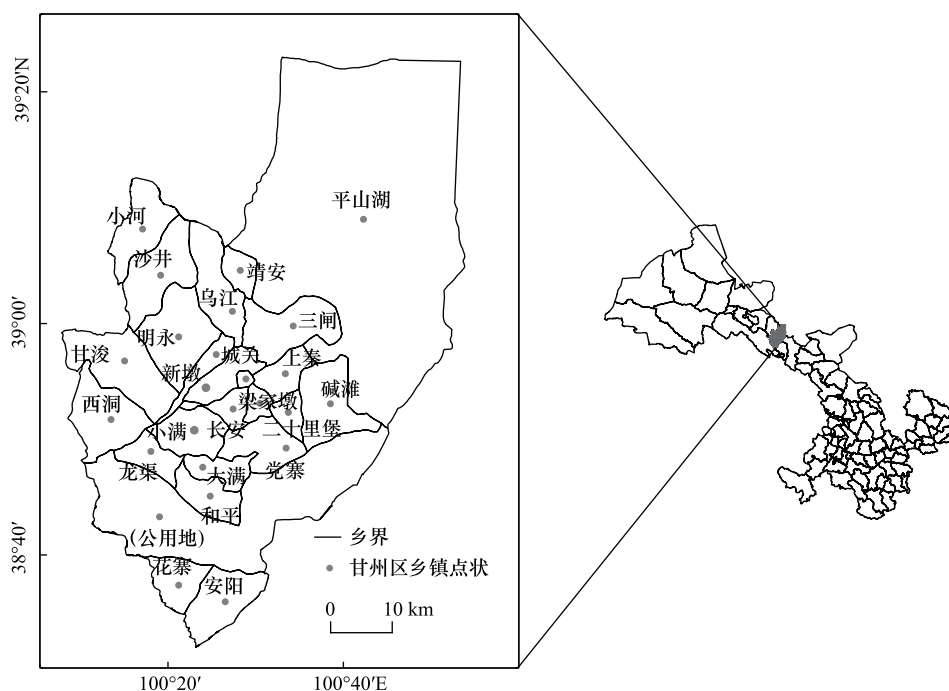


图1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

际的基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值,该标准已被国内学者广泛采用,并在各种尺度、不同区域进行了修正。由于甘州区拥有除海洋以外的几乎所有地貌类型,又是张掖市的政治、经济、文化中心,人类活动强烈,故本文将所有9项生态系统服务纳入测算,以求全面反映区域生态系统服务的各项价值。为与现行土地利用分类衔接,并探讨包含戈壁、沙地等备受争议的未利用地类型的生态功能,本文仍以各年份甘州区土地利用数据为基础。最终,本文兼顾生态与社会成分,选取了气体调节、气候调节、水源涵养、土壤形成与保护、废物处理、生物多样性维持、食物生产、原材料生产、休闲娱乐等9种重要的生态系统服务,估算其静态价值。

采用当量因子法对2000、2005、2010年甘州区生态系统服务静态价值进行估算,并初步分析各项生态系统服务价值变化率及影响变化率的原因。从《甘肃农村年鉴》中获取2000、2005、2010年粮食作物种植面积(hm^2)及粮食作物总产值(元)数据,得到各年份单位面积粮食作物的产值(元/ hm^2)。依据谢高地^[20]等人的研究,把1个标准生态系统生态服务价值当量因子定义为当年单位面积农田粮食产量经济价值的1/7,即单位农田自然粮食经济价值,再根据“中国陆地生态系统单位面积生态服务价值当量表”,得到研究区各年各土地利用类型9项生态系统服务的价值系数表。

为验证生态服务价值随时间的变化对于生态服务功能价值系数的依赖程度,将各项生态系统服务价值系数分别上调50%,计算出敏感指数(CS)。若 $CS > 1$,则生态系统服务价值(ESV)相对于生态系统服务价值系数(VC)是富有弹性的;若 $CS < 1$,ESV则被认为是缺乏弹性的,比值越大,表明生态服务功能价值指数的准确性越关键。计算公式为^[22]:

$$CS = \left| \frac{(ESV_j - ESV_i) / ESV_i}{(VC_{jk} - VC_{ik}) / VC_{ik}} \right| \quad (1)$$

式中, ESV_i 、 ESV_j 为调整前后的生态系统服务价值; VC_{ik} 、 VC_{jk} 分别为第 k 类土地利用类型调整前后的生态系统服务价值系数。

由2000、2005、2010年甘州区土地利用数据统计各土地利用类型面积,与研究区生态价值系数表对应,计算出单项生态系统服务价值,进而得到甘州区各年生态系统服务总价值。公式为:

$$ESV = \sum A_k \times VC_k \tag{2}$$

式中, ESV 为生态系统服务静态价值(元); A_k 为第 k 类土地利用类型面积(hm^2); VC_k 为生态服务价值系数($\text{元 hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)。

2.2 生态系统服务动态价值重构

以上基于单位面积价值当量因子的估算方法仅仅是一种静态的评估方法,忽略了生态系统动态、复杂的特征,不能很好地反映各生态系统类型服务价值变化率、空间集聚程度等的差异。价值动态重构是考虑到生态系统的动态性,用服务价值多年平均变化率来衡量各项生态系统服务的优先顺序,用各项生态系统服务关键表征指标来量化其空间集聚程度,对生态系统服务静态价值进行校正的一种方法。为对服务价值损失速度快的生态系统类型进行针对性的保护,同时考虑到空间集聚程度对生态系统服务功能发挥的影响,本文以 2010 年为例,对甘州区生态系统服务静态价值估算结果进行动态重构^[15]。

2.2.1 生态系统服务优先指数构建

生态系统功能的退化直接威胁着研究区生态安全和居民的健康,因此对退化速度较快的生态系统功能应予以足够的重视^[16]。用每项生态系统服务价值的多年平均变化率来表示对该项服务进行针对性保护的迫切程度,服务价值损失越多的生态系统类型优先级别越高。为保证进行重构时各项生态系统服务价值总量不变,对上文计算得到的多年平均变化率进行平均值为 1 的转换,将结果作为优先指数对 2010 年甘州区生态服务价值进行校正。公式为^[15]:

$$\beta_i = \frac{v_i}{\bar{v}} \tag{3}$$

式中, β_i 为第 i 项生态系统服务优先指数; v_i 为第 i 项生态系统服务价值多年平均变化率; $\bar{v}$ 为各项生态系统服务价值多年平均变化率的平均值。

2.2.2 生态系统服务空间丰富度指数构建

考虑到基础数据精度不同,为最大限度保留数据信息,本文将研究区等精度划分为 500 m×500 m 的网格,以每一个网格为基本单位计算生态系统服务空间丰富度。参考吴健生等的研究^[23],将各项生态系统服务类型关键指标(表 1)量化,具体如下:

表 1 甘州区生态系统服务关键性指标及其量化方法
Table 1 Key ecosystem services indicators and their quantification in the Ganzhou District

生态系统服务 Ecosystem services	关键指标 Key indicators	数据源 Data source
水源涵养 Water conservation	水源保护区	水源保护区划图(1:25 万)
废物处理 Waste treatment	年平均模拟径流量	数字高程模型(分辨率为 90 m)
气体调节 Gas regulation	综合碳储量	土地利用数据(分辨率为 30 m)
气候调节 Climate regulation	综合碳储量	土地利用数据(分辨率为 30 m)
土壤形成与保护 Soil formation and erosion control	土壤保持力	数字高程模型(分辨率为 90 m); 土地利用数据(分辨率为 30 m)
生物多样性保护 Biodiversity conservation	生境质量	土地利用数据(分辨率为 30 m)
粮食生产 Grain production	土壤有机质含量	土壤栅格图(1:100 万)
原材料 Raw material	森林面积比例	土地利用数据(分辨率为 30 m)
娱乐文化 Entertainment culture	旅游文化中心分级	甘州区旅游景点重要性分布图(1:25 万)

(1)水源涵养。水源保护区和饮用水水源地被直接认为是水源涵养功能被利用的极重要区域。根据《张掖市人民政府关于加强甘州区滨河集中式饮用水水源地保护的決定》公布的饮用水水源地保护区坐标点,在 ArcGIS 中划出饮用水源保护区范围。将水源地保护区、饮用保护区范围赋值为 1,其余地区赋值为 0,制成等精度栅格图。

(2) 废物处理。地表径流能够调节水质、净化污染。用 ArcGIS 中水文分析工具对精度为 90 m 的数字高程模型进行处理。

(3) 气体调节与气候调节。这两项服务主要依赖碳固定过程,因此都以综合碳储量作为关键指标。参考韩晋榕^[24]整理的我国碳密度相关参数,用 InVEST 模型的 Carbon 功能进行计算。

(4) 土壤形成与保护。本文采用修正后的土壤侵蚀方程 RUSLE,裸地土壤侵蚀因子(RKLS)与有管理措施和植被覆盖的土壤侵蚀量(USLE)的差,即为土壤保持力(RUSLE)。USLE = $R \times K \times L \times S \times C \times P$, RKLS = $R \times K \times L \times S$ 。R 为降雨侵蚀力因子,由于研究区面积较小,降雨量差异不大,因此 R 取常数 1; K 为土壤可侵蚀因子; L 为坡长坡度因子; C 为覆盖与管理因子; P 为水土保持措施因子。

(5) 生物多样性保护。生境质量影响着生物多样性,而生物多样性的损失会影响生态系统服务功能^[25]。参考吴季秋^[26]的研究,借助 InVEST 模型的 HabitatQuality 功能进行计算。

(6) 粮食生产。本文中以土壤肥力表征生态建设成本。土壤有机质含量越高,生态成本建设所需成本越小。从中国土壤数据库中获取甘州区土壤有机质含量数据,并等精度制成栅格数据。

(7) 原材料。森林为人类提供生产生活所需要的原材料^[27]。将土地利用类型为林地的区域赋值为 1,其他区域赋值为 0,制成等精度栅格图。

(8) 娱乐文化。获取甘州区内郊野森林公园、大型城市公园、重要公共服务中心、重要文化活动中心坐标点,分别赋值为 1、0.7、0.5、0.3^[15],通过 ArcGIS 的 IDW 插值生成旅游景点重要性分布图。

量化完成后对结果进行 0—1 标准化处理,值越大则各项服务空间丰富度越高。公式为:

$$R_i = \frac{C_{ki}}{C_i} (k = 1, 2, 3 \cdots n) \quad (4)$$

式中, R_i 为第 i 项服务在第 k 个栅格中的空间丰富度指数; C_{ki} 为第 i 项服务在第 k 个栅格中的空间聚集程度; C_i 为第 i 项服务的平均空间聚集值。n 为栅格数量。

完成上述过程后,将各项生态系统服务价值总量按照其优先指数进行调整,并结合研究区总面积,得到校正后的单位面积价值量。再根据空间聚集度对平均单位面积价值量进行空间丰富度指数调整,得到重构后的单项生态系统服务价值空间分布。将各个图层叠加,得到动态重构后的甘州区 2010 年生态系统服务总价值^[15]。公式为:

$$ESV = \sum_{i=1}^9 \left(\sum_{k=1}^n R_{ki} \times \frac{\beta_i ESV_i}{A} \right) \quad (5)$$

式中, A 为研究区面积; ESV 为重构后的生态系统服务总价值; ESV_i 为第 i 项生态系统服务静态值。

2.3 生态安全格局构建

生态安全格局对维护生态系统结构健康、控制生态过程起着关键性作用^[16]。本文在对甘州区进行生态系统服务价值重构的基础上,采用景观生态的源汇理论,利用冷热点分析工具识别高、中、低三个安全等级的生态源地,结合最小积累阻力(MCR)模型,计算出各安全等级源地对应的生态廊道,源地与廊道结合共构建出 3 种安全水平的生态安全格局。

2.3.1 生态源地识别

生态系统服务价值越大的地区,生态系统服务功能越强,因此选取生态服务价值较高的地区作为生态源地。借助 ArcGIS-Spatial Statistics 中 Getis-Ord Gi* 工具对甘州区生态服务价值空间重构结果进行冷热点分析,分别提取置信度为 99%、95%、90% 热点的区域作为低、中、高 3 个安全水平等级的生态源地备选区^[15]。由于生态源地需要具备一定的规模才能发挥作用^[25],根据甘州区实际情况,将备选区剔除面积小于 0.3 km² 的斑块作为生态源地。

2.3.2 生态廊道识别

生态廊道是生态系统中能量流动、物种迁移等的通道,可增强“源”间的联系和防护功能。以生态系统服

务价值的倒数建立阻力面,价值越大,阻力越小。通过 ArcGIS 中 cost distance 功能获得不同安全等级源地对应的积累消耗距离表面,再借助空间分析中 Hydrology 工具对其进行填洼、流向、汇流累积量处理,反复确定阈值,获得源地间生态功能流运行的最小消耗路径。对所得栅格数据矢量化,输出一条平滑的曲线,即为生态廊道的空间位置^[27]。

3 结果分析

3.1 生态系统服务静态价值估算结果及分析

3.1.1 生态系统服务静态价值估算

甘州区 2000 年、2005 年、2010 年单位农田自然粮食经济价值分别为 454.87、869.62、1555.15 元/hm²,以此得到适用于研究区的生态价值系数表(以 2010 年为例,表 2)。系数表与各土地利用类型面积相乘,得到各项生态系统服务价值(图 2)。

表 2 2010 年甘州区各土地利用类型单位面积生态价值系数

Table 2 Ecosystem service value (ESV) coefficients per unit area of different land-use and land-cover change types in the Ganzhou District in 2010 /(yuan hm⁻²)

土地利用类型 Land use type	草地 Grassland	耕地 Cultivated Land	林地 Woodland	水域 Water area	沼泽 Swamp	未利用地 Unutilized land
对应生态系统类型 Corresponding ecosystem types	草地 Grassland	农田 Farmland	森林 Forest	水体 Water body	湿地 Wetland	荒漠 Desert
水源涵养 Water conservation	1244.12	933.09	4976.48	31693.96	24104.83	46.65
废物处理 Waste treatment	2037.25	2550.45	2037.25	28272.63	28272.63	15.55
气体调节 Gas regulation	1244.12	777.58	5443.03	0.00	2799.27	0.00
气候调节 Climate regulation	1399.64	1384.08	4198.91	715.37	26593.07	0.00
土壤形成与保护 Soil formation and erosion control	3032.54	2270.52	6065.09	15.55	2659.31	31.10
生物多样性保护 Biodiversity conservation	1695.11	1104.16	5069.79	3872.32	3887.88	528.75
粮食生产 Grain production	466.55	1555.15	155.52	155.52	466.55	15.55
原材料 Raw material	77.76	155.52	4043.39	15.55	108.86	0.00
娱乐文化 Entertainment culture	62.21	15.55	1990.59	6749.35	8631.08	15.55

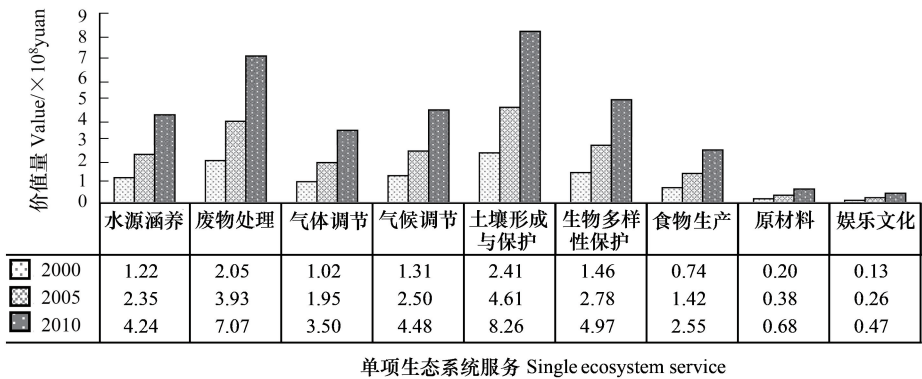


图 2 2000、2005、2010 年甘州区单项生态系统服务价值

Fig.2 Ecosystem service values (ESVs) in the Ganzhou District in 2000,2005 and 2010

甘州区 2000、2005、2010 年的价值总量为 10.54、20.17、36.22 亿元,价值总量持续增长。就单项生态系统服务价值来看,土壤形成与保护的生态系统服务价值最高,约占当年价值总量的 22.9%;其次是废物处理生态

系统服务价值,约占当年价值总量的 19.5%;水源涵养、气体调节、气候调节、生物多样性保护 4 项价值较相近;娱乐文化的价值量最低,约占当年价值总量的 1.3%。增长量最多的单项生态服务类型是土壤形成与保护,2000—2010 年共增长了 5.85 亿元,约占所有服务类型总增长量的 22.8%;其次是废物处理,10 年间增长了 5.02 亿元,约占总增长量的 19.4%;单项增长量最少的是原材料和娱乐文化,分别增长了 0.48、0.34 亿元,共占总增长量的 3.2%。

对价值系数表进行敏感性分析结果证明 ESV 相对于 VC 缺乏弹性(表 3),生态系统服务价值结果可靠。

表 3 敏感性分析结果

Table 3 Results of sensitive coefficient

	森林 Forest	草地 Grassland	农田 Farmland	水体 Water body	湿地 Wetland	荒漠 Desert
弹性系数 Coefficient of sensitivity	0.09	0.53	0.34	0.03	0.02	0.01

从 2000 年、2005 年、2010 年各项生态系统服务价值变化率(图 3)中可发现,每项服务价值量都在稳步上升。从 2000—2005 年价值量增长率来看,虽然娱乐文化增长量仅为 0.13 亿元,但增长率最大;其次是水源涵养,增长率为 92.62%;最小的服务类型是原材料,增长率为 90%;其余六项生态系统服务类型中增长率相差较小,均在 90.41%—91.89%之间。2005—2010 年各项生态系统服务类型增长率总体略有下降,增长最慢的是生物多样性,增长率为 78.78%;增长最快的服务类型是娱乐文化,增长率为 80.77%。多年平均变化率较稳定,除娱乐文化为 26.15%外,其余均维持在 24.5%左右。

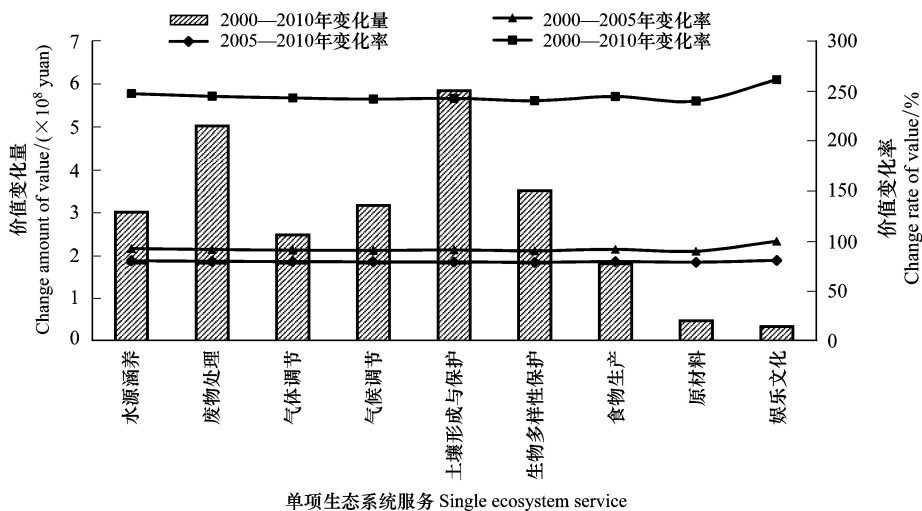


图 3 2000、2005、2010 年甘州区单项生态系统服务价值变化率及变化量

Fig.3 Change rate and amount of ecosystem service values (ESVs) in the Ganzhou District in 2000, 2005 and 2010

3.1.2 静态价值量估算结果分析

生态系统服务价值的变化与土地利用和土地覆被变化息息相关^[12],生态系统服务价值较低的土地利用类型和生态系统服务价值较高的土地利用类型相互转换会引起总价值量的变化。本文对 2000—2010 年甘州区土地利用类型建立转移矩阵(表 4),分析土地利用类型变化对甘州区生态系统服务价值总量的影响。

从甘州区 2000—2010 年土地利用面积转移状况来看,研究区土地利用转移总面积为 4480.93 hm²,占甘州区总面积的 1%。从 2000 年各土地利用类型转出情况来看,最显著的是未利用地的转出,共转出 2283 hm²,占转移总面积的 50.9%,其中 1091.93 hm²转移为耕地,占该土地类型总转出面积的 48.7%,564.43 hm²转为草地,411.60 hm²转为建设用地,分别占该类型总转出面积的 25%、18%。其次是耕地,共转出 1143.09 hm²,其中 83.4%转为建设用地。草地的转出面积也较多,为 892.34 hm²,其中 90.4%转为耕地。林地、水域转出面积较

少,分别为 122.40、40.1 hm²。建设用地、沼泽几乎无转出。从转入 2010 年的土地利用类型组成来看,共有 2028.28 hm²转为耕地,占当年耕地总面积的 2%,其中 54%来自未利用地,40%来自草地;另外 1378.24 hm²转为建设用地,占当年建设用地总面积的 9%,其中 69%来自耕地,30%来自未利用地;还有 626.55 hm²转为草地;林地、水域、未利用地、沼泽调入面积较少。

表 4 甘州区 2000—2010 年土地利用面积转移
Table 4 Land-use and land-cover change transfer area in the Ganzhou District from 2000 to 2010

	2010 年							
	林地 Woodland	草地 Grassland	耕地 Cultivated land	水域 Water area	未利用地 Unutilized land	建设用地 Construction land	沼泽 Swamp	总计 Total
2000 年 林地 Woodland	9226.58	0	116.73	0	1.27	4.40	0	9348.98
草地 Grassland	23.27	168505.00	806.71	10.48	42.63	9.24	0	169397.34
耕地 Cultivated Land	8.26	59.45	109407.00	50.72	53.51	952.99	18.16	110550.09
水域 Water area	0	2.67	12.91	1228.74	22.72	0	1.80	1268.84
未利用地 Unutilized land	81.94	564.43	1091.93	133.10	61238.60	411.60	0	63521.60
建设用地 Construction land	0	0	0	0	0	13860.20	0	13860.20
沼泽 Swamp	0	0	0	0	0	0	605.84	605.84
总计 Total	9340.05	169131.55	111435.28	1423.04	61358.72	15238.44	625.80	368552.89

根据以上分析,2000—2010 年间甘州区土地转移较少,这与当地政府严格管控建设用地面积、保护耕地与湿地、适度开发未利用地的政策有关。由于生态服务价值较高的土地利用类型(林地、耕地、湿地)保护较好,建设用地扩张规模较小,甘州区生态系统服务价值总量逐步上升且多年变化率平稳。

3.2 生态系统服务动态价值重构

3.2.1 生态系统服务优先指数

由甘州区生态系统服务优先指数计算结果(表 5)可知,优先指数最高的是娱乐文化,其余各项生态系统服务价值变化率相差较小,均在 0.98—1.01 之间。

表 5 甘州区生态系统服务优先指数
Table 5 Ecosystem services priority index in the Ganzhou District

	水源涵养 Water conservation	废物处理 Waste treatment	气体调节 Gas regulation	气候调节 Climate control	土壤形成 与保护 Soil formation and erosion control	生物多样性 保护 Biological diversity	食物生产 Food supply	原材料 Raw materials	娱乐文化 Recreation and culture	平均值 Average
变化率 Change rate /%	24.75	24.49	24.31	24.20	24.27	24.04	24.46	24.00	26.15	24.52
优先指数 Priority index	1.01	1.00	0.99	0.99	0.99	0.98	1.00	0.98	1.07	1.00

3.2.2 生态系统服务价值重构

从空间重构后的生态系统服务价值分布(图 4)来看,甘州区生态系统服务价值量为 1438.21—390993 元/hm²,价值服务量较高的地区面积较小。从生态系统服务价值的空间分布来看,高价值区主要集中在黑河干流、黑河湿地保护区、集中式饮用水源地区等区域,这些地区水资源相对丰富,开发力度较小,生态适应性较高;中值地区分布在平山湖乡东大山自然保护区、小河乡、沙井镇、明永乡、乌江镇等乡镇,主要集中在人口密集的中部绿洲区,该区域自然条件优越,土壤肥沃,农业发达,但由于经济高速发展,土地利用粗放、土地退化、水资源供不应求等生态问题频发;甘州区平山湖乡、南部安阳滩和石岗墩滩的公用地均为低值区,此部分区域多为戈壁荒滩,土地经济密度低。

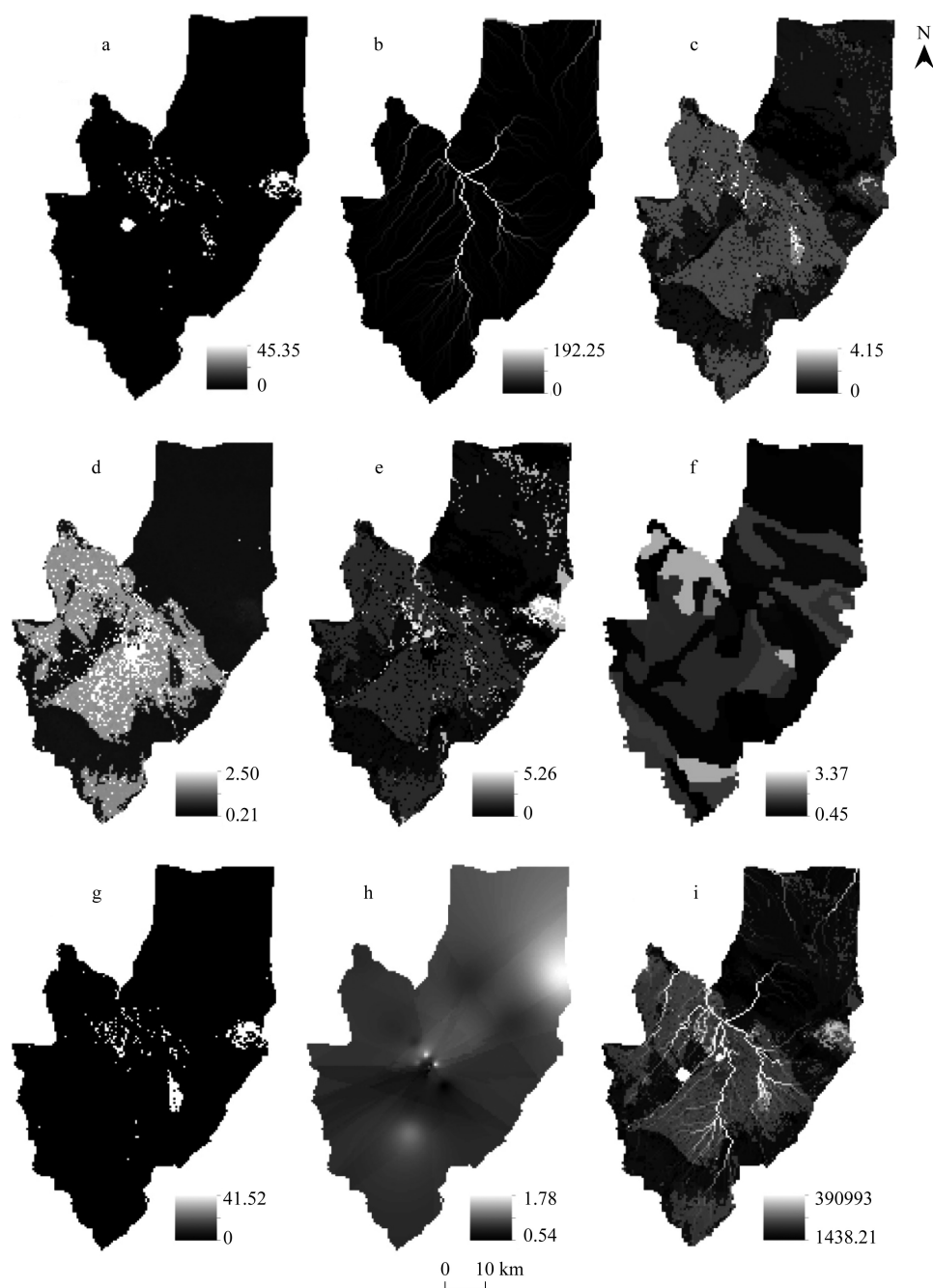


图 4 2010 年甘州区生态系统服务及价值空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of ecosystem services and their values in the Ganzhou District, 2010

a. 饮用水源地 a. Water source conservation areas; b. 年平均径流量 b. Simulations of the mean annual river runoff; c. 综合碳储量 c. Carbon storage; d. 土壤保持力 d. Soil erosion control; e. 生境质量 e. Habitat quality; f. 土壤有机质含量 f. Soil organic matter content; g. 森林面积比例 g. Forest area proportions; h. 旅游文化中心分级 h. Classification of recreational areas; i. 服务价值量 i. Ecosystem service values/(yuan hm^{-2})

甘州区位于干旱内陆,水资源非常宝贵,不仅集中于绿洲区的人类生产生活需水量较大,位于荒漠区的植被也需要地下水补给生存,生产生活用水、生态用水矛盾突出。其次受水资源、地形影响,甘州区土地利用空间分布差异较大,绿洲区农业发达、人口密度大,荒滩戈壁区环境恶劣、人口较少,为满足日益增长的需求,人类不合理灌溉农田、盲目开荒,极大地破坏了生态环境,生态环境脆弱性加剧。这也说明甘州区生态系统服务价值虽然逐年升高,但整体生态环境一般,生态弹性差。

3.3 基于生态系统服务价值的区域生态安全格局

将冷热点识别重构后得 2010 年甘州区生态系统服务价值空间分布结果,按置信程度提取高、中、低 3 个安全水平生态源地备选区,面积除去小于 0.3 km^2 的斑块后,得到 3 个安全水平的生态源地(图 5)。再通过 MCR 模型得到对应生态廊道,构建出 3 个安全水平的甘州区生态安全格局(图 6)。

从甘州区生态安全格局构建结果中可看出,甘州区生态源地斑块数量较多,但斑块破碎程度高,且空间分布不均,多集中于中部,北部和南部仅有零星分布。甘州区低安全水平生态安全格局中源地斑块有 18 块,总面积约为 155.75 km^2 ,占研究区总面积的 4.2%。源地对应黑河干流、湿地保护区、水源地保护区、祁连山-东大山天然林资源保护区,是需要严格管控的基础性生态用地,也是保障甘州区生态系统服务正常发挥作用的关键性格局。中安全水平生态安全格局中生态源地斑块有 14 块,面积约为 191.25 km^2 ,约占研究区总面积的 5.2%,在低安全生态源地基础上,源地面积增加 35.5 km^2 ,斑块数略有减少,黑河干流周围斑块面积增大,整合度提高。高安全水平生态安全格局中生态源地斑块有 17 块,总面积约为 224.5 km^2 ,占该区总面积的 6.1%,与中安全水平格局相比,源地面积扩大 33.25 km^2 ,说明生态源地整合度逐步增加,对抗生态胁迫的抵抗能力和恢复力有所提高。生态廊道分为两部分,一部分主要沿河流展开,连通性较好,另一部分向生态阻力较高的北部滩延伸。

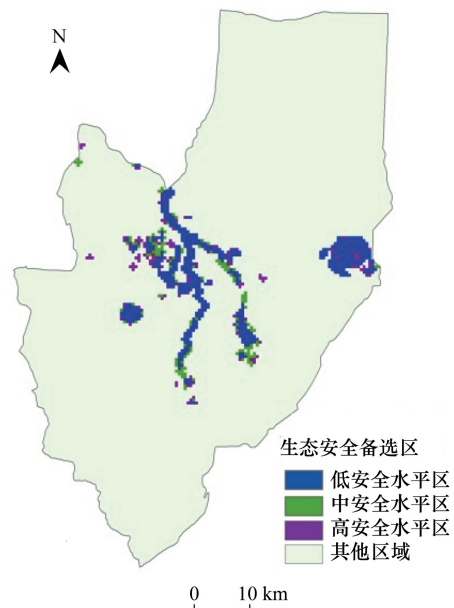


图 5 甘州区生态源地备选区

Fig.5 Alternative areas of ecological sources in the Ganzhou District

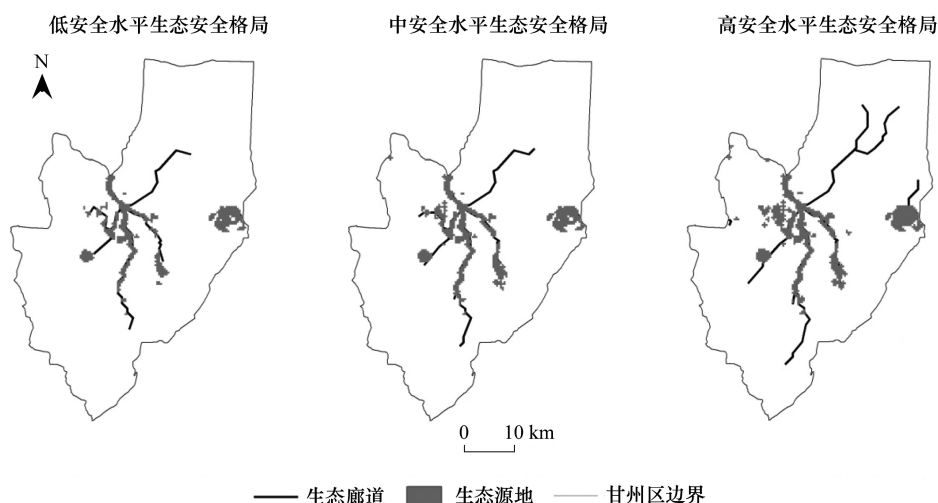


图 6 甘州区生态安全格局构建结果

Fig.6 Ecological security pattern of the three levels in the Ganzhou District

生态安全格局是立足于生态系统服务现状提出的规划策略,在建设和开发过程中具有较高的参考价值。基于以上分析,甘州区在构建良好的生态安全格局时,应因地制宜,结合土地利用类型进行生态改善,北部及南部植被稀疏区域应注意加强防护林建设,在不破坏生态的前提下,合理开发利用荒地,建设生态廊道将其与生态源地连接起来,提高区域整体连接度和生态源地衔接性;在中部绿洲区等高安全区应遵循严格保护耕地

和基本农田的原则,以环境承载力为基础,提高水土资源利用效率,加大生态斑块建设,提高生态安全稳定性,逐步建立起“南养水源,中绿耕地,北抵风沙”的生态安全格局。

4 讨论

生态系统为人类提供了食物、淡水及其他工农业生产原料等多种人类赖以生存和发展的产品,生态系统服务功能的退化甚至丧失不仅影响人类的安全与健康,更关乎区域甚至全球的生态安全。生态系统服务的量化可为判断生态系统服务功能强弱提供依据。本文利用当量因子法对生态系统服务价值进行估算,同时考虑到生态系统的动态性,以优先指数和空间丰富度指数对静态估算结果进行重构;由 2000—2010 年各项生态系统服务价值变化率可了解 11 年来每项服务的损失或增加程度,从而判断该项服务在进行生态建设时的优先程度;对各项生态系统服务进行栅格叠加,计算其空间聚集程度,打破将各服务在同一种土地利用类型中一视同仁的局限。经过动态重构后的服务价值量反映了区域内生态系统功能强弱的空间差异性,以此识别生态源地,构建的生态安全格局在空间上更为精准。甘州区地处河西走廊的“蜂腰”地带,黑河流域中游,生态地位十分重要。生态安全体系构建要围绕祁连山水源涵养林区、绿洲农田防护林区、城市景观林区、湿地保护区及荒漠生态区 5 大生态屏障开展,提升森林、湿地、绿洲和荒漠四大生态系统的的服务价值。将祁连山水源涵养区、黑河湿地自然保护区作为生态安全屏障体系建设的中心线,按照“南北封育、中间改造、周边退耕”的空间布局,建立生态廊道,将祁连山林区、黑河湿地、绿洲农田防护林区、沙生植被 4 大分区有机联系,形成多层次、有序化生态系统稳定的安全格局。

本研究与常规干旱内陆河流域生态安全格局研究的最大不同之处就在于改进了利用当量因子法估算生态系统服务的传统方法,以重构后具有动态性、空间性、直观性的生态系统服务价值,选择服务功能强大的生态源地及连通性良好的生态廊道,共同构成一个连续完整的生态安全屏障体系,为干旱内陆河流域城市开发和规划生态环境布局提供了参考。甘州区位于黑河流域中游,湿地面积较大,湿地具有调节径流、维护生态安全、调节气候、保护生物多样性、降解污染等诸多功能。湿地种类较多,但受限于数据源分辨率和分类精度的影响,文中将河流等永久性湿地及池塘、水库等人工湿地划为“中国陆地生态系统单位面积生态服务价值当量表”中的水域生态系统,仅选取沼泽湿地作为湿地生态系统,实际上略为低估了湿地生态系统在甘州区生态安全中发挥的作用。受数据可获取性和技术限制,一些重要的社会经济数据难以空间化。娱乐文化服务计算中文化中心重要性赋值、生态源地识别中安全等级识别的赋值等存在一定的主观性。此外,本文参考相关研究成果确定了生态廊道空间分布,对于关键生态节点等其他组分的研究较浅。廊道宽度直接影响其生态功能的发挥,如何确定最佳的生态廊道宽度,也是下一步需要重点研究的方向。

参考文献 (References):

- [1] 刘洋, 蒙吉军, 朱利凯. 区域生态安全格局研究进展. 生态学报, 2010, 30(24): 6980-6989.
- [2] 崔胜辉, 洪华生, 黄云凤, 薛雄志. 生态安全研究进展. 生态学报, 2005, 25(4): 861-868.
- [3] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 关文彬. 区域生态安全格局: 概念与理论基础. 生态学报, 2004, 24(4): 761-768.
- [4] 王丽霞, 邹长新, 王燕, 林乃峰. 现代生态保护理念在生态保护中的应用. 生态与农村环境学报, 2017, 33(10): 865-871.
- [5] 王洁, 李锋, 钱谊, 殷春雪. 基于生态服务的城乡景观生态安全格局的构建. 环境科学与技术, 2012, 35(11): 199-205.
- [6] Yu K J. Security patterns and surface model in landscape ecological planning. Landscape and Urban Planning, 1996, 36(1): 1-17.
- [7] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 吴健生. 区域生态安全格局构建研究进展与展望. 地理研究, 2017, 36(3): 407-419.
- [8] 蒙吉军, 燕群, 向芸芸. 鄂尔多斯土地利用生态安全格局优化及方案评价. 中国沙漠, 2014, 34(2): 590-596.
- [9] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 杨 旸, 李贵才. 基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮市生态安全格局构建. 地理研究, 2017, 36(3): 471-484.
- [10] 康相武, 刘雪华. 北京顺义区域生态安全格局构建. 干旱区资源与环境, 2009, 23(10): 71-78.
- [11] 吴健生, 张理卿, 彭建, 冯喆, 刘洪萌, 赫胜彬. 深圳市景观生态安全格局源地综合识别. 生态学报, 2013, 33(13): 4125-4133.
- [12] 杨姗姗, 邹长新, 沈渭寿, 沈润平, 徐德琳. 基于生态红线划分的生态安全格局构建——以江西省为例. 生态学报, 2016, 35(1):

250-258.

- [13] 喻锋, 李晓兵, 王宏. 生态安全条件下土地利用格局优化——以皇甫川流域为例. 生态学报, 2014, 34(12): 3198-3210.
- [14] 俞孔坚, 李海龙, 李迪华, 乔青, 奚雪松. 国土尺度生态安全格局. 生态学报, 2009, 29(4): 5163-5175.
- [15] 吴健生, 岳新欣, 秦维. 基于生态系统服务价值重构的生态安全格局构建——以重庆两江新区为例. 地理研究, 2017, 36(3): 429-440.
- [16] 蒙吉军, 王晓东, 周朕. 干旱区景观格局综合优化: 黑河中游案例. 北京大学学报: 自然科学版, 2017, 53(3): 451-461.
- [17] 孙贤斌, 刘红玉. 基于生态功能评价的湿地景观格局优化及其效应——以江苏盐城海滨湿地为例. 生态学报, 2010, 30(5): 1157-1166.
- [18] 彭建, 郭小楠, 胡熠娜, 刘焱序. 基于地质灾害敏感性的山地生态安全格局构建——以云南省玉溪市为例. 应用生态学报, 2017, 28(2): 627-635.
- [19] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [20] Costanza R, D'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [21] 李双成, 刘金龙, 张才玉, 赵志强. 生态系统服务研究动态及地理学研究范式. 地理学报, 2011, 66(12): 1618-1630.
- [22] 岳书平, 张树文, 闫业超. 东北样带土地利用变化对生态服务价值的影响. 地理学报, 2007, 62(8): 879-886.
- [23] 吴健生, 钟晓红, 彭建, 秦维. 基于生态系统服务簇的小尺度区域生态用地功能分类——以重庆两江新区为例. 生态学报, 2015, 35(11): 3808-3816.
- [24] 韩晋榕. 基于 InVEST 模型的城市扩张对碳储量的影响分析[D]. 长春: 东北师范大学, 2013.
- [25] Balvanera P, Pfisterer A B, Buchmann N, He J S, Nakashizuka T, Raffaelli D, Schmid B. Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecology Letters*, 2006, 9(10): 1146-1156.
- [26] 吴季秋. 基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的海南八门湾海湾生态综合评价[D]. 海口: 海南大学, 2012.
- [27] 李光辉. 吉林省森林生态效益评估及其生态补偿研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.