

引用格式: Li Jie, Jia Kun, Zhang Ning, *et al.* Evaluation of Ecological Protection Importance in Qingdao based on Remote Sensing and Ecological Service Model[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(6): 1329-1338. [李杰, 贾坤, 张宁, 等. 基于遥感与生态服务模型的青岛市生态保护重要性评价[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(6): 1329-1338.]

DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.6.1329

基于遥感与生态服务模型的青岛市生态保护重要性评价

李杰^{1,2}, 贾坤^{1,2}, 张宁^{3,4}, 魏香琴⁵, 王冰^{1,2}

(1. 北京师范大学地理科学学部 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学北京市陆表遥感数据产品工程技术研究中心, 北京 100875;

3. 住房和城乡建设部遥感应用中心, 北京 100835;

4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

5. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101)

摘要:生态保护重要性评价是“双评价”的重要组成部分,是合理规划国土空间的重要依据。提出一种将遥感数据作为主要驱动数据,采用生态服务模型与生态敏感性指数相结合的生态保护重要性评价方法,定量评价了2018年青岛市陆域的生态保护等级。依据“双评价”标准,综合考虑区域内重要生态服务功能区、生态脆弱区和生态保护因子,划定青岛市生态保护重要性,并根据生态保护红线对评价结果进行验证和分析。结果表明:基于遥感与生态服务模型的生态保护重要性评价方法能够较好地评价区域生态保护重要性,青岛市生态保护重点区面积为1 125.57 km²,约占全市陆域面积的10.34%,主要分布在青岛市东部的崂山片区、西南部的胶南山区以及北部的大泽山片区等生态系统服务功能较为丰富且生态敏感性较高的部分地区。研究提出的生态保护重要性评价方法为“双评价”工作的开展提供了良好的技术支撑,评价结果对于科学合理地编制城市发展规划和建设生态文明城市具有重要的参考价值。

关键词:双评价;生态保护重要性;遥感数据;生态服务模型;青岛市

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2021)06-1329-10

1 引言

资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价(简称“双评价”)是国土空间规划的基础,是划定“三区三线”的重要理论依据^[1]。生态保护重要性评价作为“双评价”的重要组成部分,其评价结果对农业生产适宜性评价和城镇建设适宜性评价具有重要的指导意义,在地域功能优化分区过程中,均以生态优先为首要原则,农业生产与城镇建设均让位

于生态保护区域^[2]。生态保护评价遵循“生态保护红线只增不减”的基本原则,因此明确生态保护功能区的国土开发边界,精细化表达生态保护红线,为划定科学合理的“三区三线”,确定国土空间开发上限与生态环境利用底线,合理编制国土空间规划提供重要支撑^[3]。

生态保护是国土资源规划的核心,是维护生态安全的重要举措。近年来,随着城镇化的迅速发展,城市开发边界的不断扩张,生态空间逐渐被侵

收稿日期:2020-09-18;修订日期:2021-10-18

基金项目:国家自然科学基金项目(42171318),国家重点研发计划项目(2016YFB0501404)。

作者简介:李杰(1997-),女,山东济南人,硕士研究生,主要从事生态遥感研究。E-mail: lj081@mail.bnu.edu.cn

通讯作者:贾坤(1983-),男,河北唐山人,副教授,博士生导师,主要从事生态遥感研究。E-mail: jiakun@bnu.edu.cn

占,生态安全遭到严重威胁。因此,构建科学合理的国土空间规划格局,合理划分生态保护等级是社会经济可持续发展的重要基础和保障。

生态保护重要性评价分为两个方面,一方面是包括水源涵养、水土保持和生物多样性维护等功能的生态系统服务功能重要性评价,另一方面是水土流失、土地沙化、土地石漠化等生态环境脆弱性评价。在开展生态保护重要性评价的过程中,研究者大多采用模型评估法和净初级生产力(NPP)定量指标评估法。模型评估法主要是根据水量平衡方程、流失方程、修正风蚀方程以及物种分布模型分别计算水源涵养量、土壤保持量、防风固沙量以及物种对环境的依赖程度^[4-5]。如孙丽慧等^[6]开展了中山市生态保护评价,确定了中山市的生态保护红线范围,并对其生态系统服务价值和变化情况进行了评估和分析。模型评估法的准确度相对较高,但数据需求量较大,所需参数较多,模型建立相对复杂。NPP定量指标评估法是以NPP数据为主,并结合土壤属性因子、气候因子以及地形因子进行相关计算,主要包括水源涵养服务能力指数、水土保持服务能力指数、防风固沙服务能力指数和生物多样性服务能力指数^[7-8]。如韩青等^[9]根据NPP定量指标评估法,分析讨论了青岛市的生态服务功能重要性,并划定生态保护空间。NPP定量指标评估法操作较为简单,参数相对较少,但适用范围存在明显的地域性,且净初级生产力并不能系统客观地表达生态系统的服务功能,具有较高的不确定性和片面性。

近年来,国内外学者基于InVEST模型开展了多项生态功能评价。如Xu等^[10]利用InVEST、RUSLE和CASA模型对生态系统服务和生态脆弱性指标进行评估,建立了生态红线的统一框架和标准。李怡等^[11]基于InVEST模型对南方山地丘陵区进行生境质量评价,定量定性相结合对其生态安全格局进行有效性评价。刘娇等^[12]采用InVEST模型,结合气象、土壤和地形等数据评估了1990~2019年金沙江流域干热河谷区及不同土地利用类型的产水功能和水源涵养功能。Berta Aneseyee等^[13]利用InVEST模型评估了栖息地的适宜性,结果表明流域内的生境在持续退化。尽管InVEST模型在生态评估方面已经有了很好的应用,但是现有的研究缺乏基于InVEST模型的系统评估框架。

因此,研究提出将遥感数据与生态评价指标相

结合,以遥感数据作为主要驱动数据,采用生态服务模型(InVEST模型)和生态敏感性指数相结合的生态保护重要性评价方法,系统地实现对生态保护重要性的定量评价。该方法利用遥感数据生成植被覆盖度、叶面积指数、土地利用/覆被类型等一系列地表参数,充分发挥遥感技术在国土空间规划中时效性强、易获取和可操作性强的优势。同时,研究采用InVEST模型计算各生态服务功能重要性指标,该模型所需参数较少且容易获取、评估精度高且空间表达清晰、情景模拟预测功能强大且应用较为广泛,能够对生态系统服务功能进行统一评价,评价结果具有较好的一致性。研究在综合考虑生态系统服务功能重要性和生态脆弱性的基础上,建立青岛市生态保护等级,并对生态保护重要性进行评价分析,划定青岛市生态保护重点区和非重点区,为编制更加科学、合理的国土空间规划提供方法支撑和案例参考。

2 研究区及数据

2.1 研究区概况

青岛市位于山东半岛东南部,地理范围为119°30′~121°00′ E、35°35′~37°09′ N,总面积约11 282 km²,包括市南区、市北区、李沧区、城阳区、崂山区、即墨区和黄岛区7个市辖区以及胶州市、平度市和莱西市3个县级市共10个市区单元。青岛市南接黄海,北接烟台,西与潍坊和日照毗邻,环绕胶州湾,山海形胜,腹地广阔。

青岛是一个东高西低的沿海丘陵城市,其中山区占总面积的15.5%,有三大山脉,分别为崂山、大泽山和胶南山群,其中崂山海拔最高,约为1 132.7 m。青岛属温带季风气候,由于滨海的地理条件,受海洋环境的影响,具有明显的海洋气候,海雾天气较多且频繁。全年8月份气温最高,1月份气温最低,年平均降水量为662.1 mm,年平均风速为5.2 m/s。青岛市河流均为季风雨源河,多为独立山间河,按水系分为大沽河、北胶莱河和沿海河流,其中大沽河是青岛最大河流,流域面积较大,全长179.9 km。

截止2018年,青岛市常住人口为939.48万,国民生产总值为1 2001.52亿元。经济的快速发展使城市建设用地迅速扩张,导致生态用地急剧减少,生态安全受到严重威胁。近年来,青岛市高度重视生态文明建设,重视“三区空间”的划定,以提高土地资源可持续利用的水平。因此,选择青岛市进行

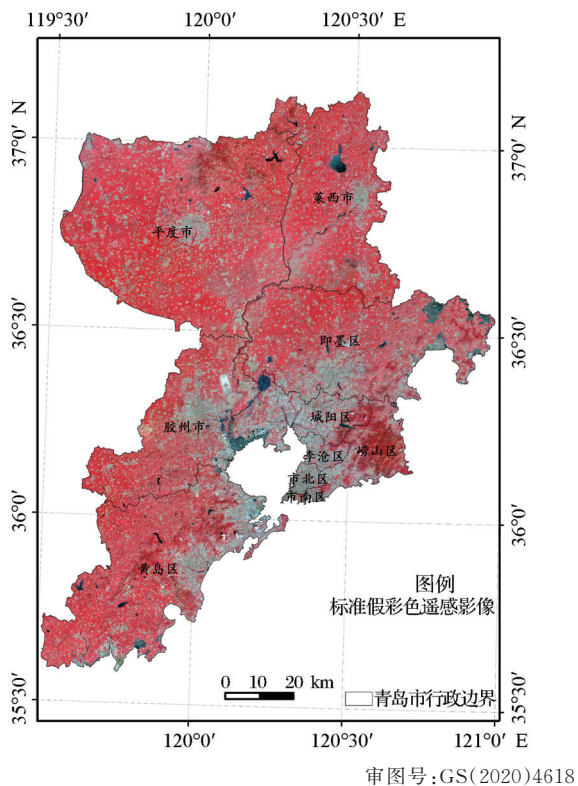


图 1 青岛市地理位置

Fig.1 Location of the research area

生态保护重要性评价研究具有一定代表性。

2.2 数据

研究主要采用美国国家环境信息中心 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) 2018 年 Landsat-8 遥感数据对 InVEST 模型中所需的重要参数进行了反演。Landsat 8 数据具有较高的时空分辨率,在进行植被参数及不透水面的提取时具有较高的精度。其中,基于 Landsat 8 地表反射率数据利用神经网络算法反演植被覆盖度和叶面积指数^[14],利用缨帽变换提取 Landsat 8 数据的各分量组成并结合生物物理成分指数(BCI)提取不透水面^[15],利用监督分类方法对 Landsat 8 数据进行土地利用类型的分类提取,研究提取的遥感参数参与 InVEST 模型中各类评价指标的计算。

除遥感数据外,本研究还需要 DEM、气象以及土壤属性数据驱动 InVEST 模型。DEM 数据来源于地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/>) 的 GDEM V2 30 m 空间分辨率数字高程产品;气象数据来源于美国国家海洋和大气管理局 (<https://www.noaa.gov/>) 的全球航空观测点,包括青岛市各观测站点的平均气温、降水量、风速和气压等,并利用 ArcGIS 软件对气象数据进行空间插值得到各气

象因子的空间分布,在 InVEST 模型中主要参与计算降水侵蚀力、潜在蒸散发以及区域的干燥度指数等评价因子;土壤属性数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>) 基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(v1.1)^[16],包括土壤砂粒、粉粒、粘粒以及有机质等百分比含量数据,在 InVEST 模型中主要参与计算土壤可蚀性和植被可利用水率等评价因子。

3 研究方法

研究主要分为生态系统服务功能评价、生态脆弱性评价、生态保护等级分级和生态保护重要性评价四大部分(图 2)。在生态系统服务功能评价中,利用 InVEST 模型建立水源涵养、水土保持和生物多样性维护功能重要性评价。在生态脆弱性评价中,利用水土流失方程和土地沙化敏感性指数分别建立水土流失敏感性和土地沙化敏感性评价。在生态保护等级分级中,根据“双评价”指南中的划分标准,基于生态服务功能重要性和生态脆弱性将生态保护等级分为极重要区、重要区和一般重要区。在生态保护重要性评价中,利用生态保护因子对生态保护等级进行修正,并结合生态保护红线进行结果验证,最终确定生态功能区的空间分布格局,划定生态保护重点区和非重点区。

3.1 InVEST 模型基本原理

InVEST 模型又称生态系统服务评估与权衡模型,是用于评估生态系统服务功能及其经济价值的模型,在生态功能区划、生态保护红线划定等资源环境评估中得到广泛应用。研究利用 InVEST 模型中针对陆地生态系统服务功能评估的产水量(Water Yield)、土壤保持(SDR)以及生境质量(Habitat Quality)等模块分别进行水源涵养功能重要性评价、水土保持功能重要性评价和生物多样性维护功能重要性评价。

3.1.1 产水量

InVEST 模型中产水量 *Yield* 的估算是基于 Budyko 水热耦合平衡假设来确定区域内每个栅格单元 *x* 的年产水量 *Yield(x)*,计算公式如下:

$$Yield(x) = \left[\left[1 + \left(\frac{P1(x)}{P(x)} \right)^w \right]^{\frac{1}{w}} - \frac{P1(x)}{P(x)} \right] \cdot P(x) \quad (1)$$

其中: *P1(x)* 表示潜在蒸散量,由年平均潜在蒸散发 (*ET₀*) 和每种土地利用类型的植物蒸散系数 (*Kc*) 计算得到,其中 *ET₀* 根据气象数据利用改进的 Harg-

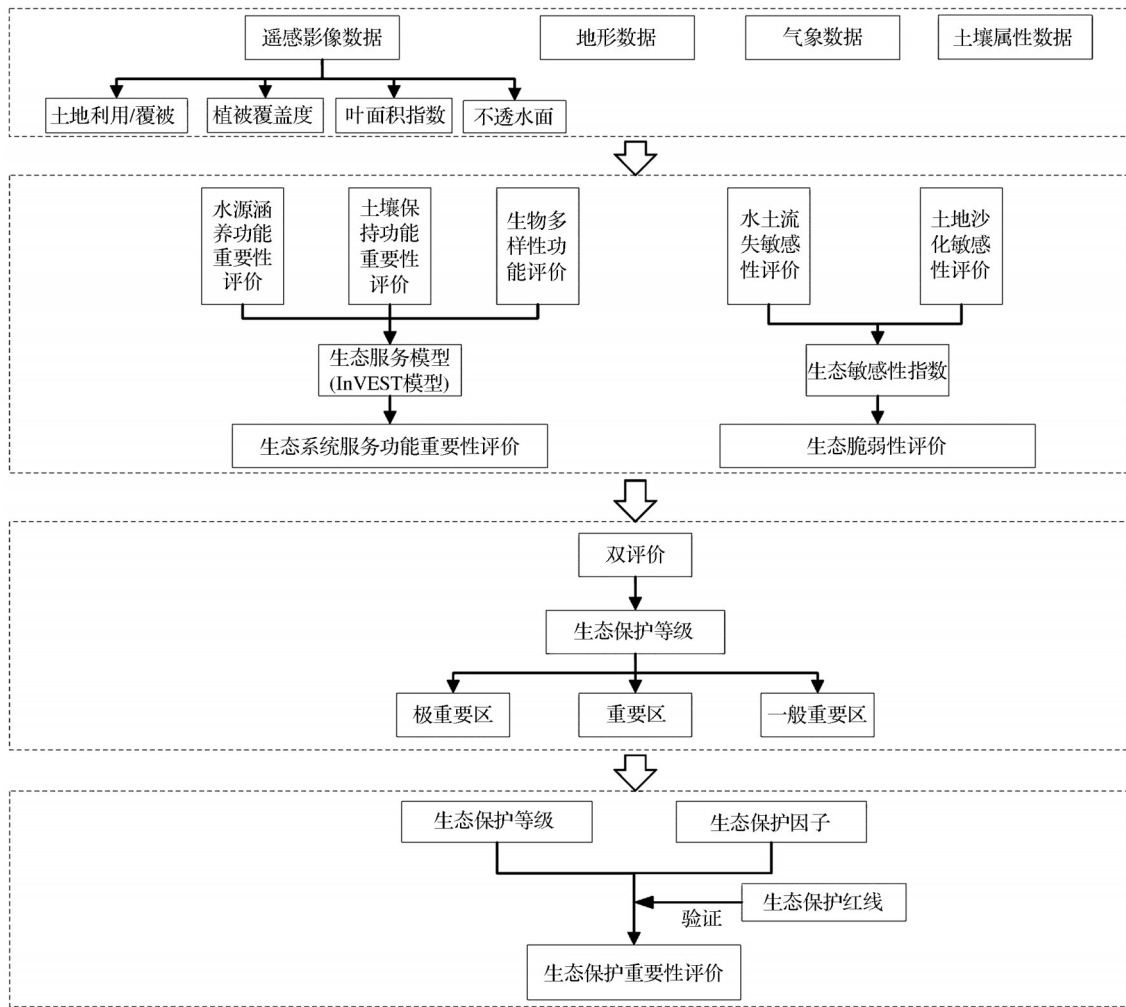


图 2 生态保护重要性评价技术路线

Fig.2 The flow chart of this study

reaves 模型计算获得^[17], K_c 由 Landsat 8 数据反演得到的叶面积指数和不透水面计算获得; $P(x)$ 表示栅格单元 x 的年降水量; w 表示自然气候-土壤性质的非物理参数, 根据降水量数据和土壤属性数据计算获得^[18]。

3.1.2 土壤保持量

InVEST 模型中的土壤保持量采用泥沙输移比例模型 (USLE) 计算区域内每个栅格单元土壤侵蚀泥沙量间接获得。该方法具体计算公式如下:

$$E_i = SE_i \sum_{j=1}^{i-1} USLE_j \prod_{k=j+1}^{i-1} (1 - SE_k) \quad (2)$$

$$RKLS_i = R_i \times K_i \times LS_i \quad (3)$$

$$USLE_i = R_i \times K_i \times LS_i \times C_i \times P_i \quad (4)$$

其中: E_i 是泥沙持留量; SE_i 为栅格 i 的泥沙持留率, 根据 InVEST 模型数据库中各土地利用类型确定; SE_k 为上坡栅格的泥沙持留量; $RKLS_i$ 表示栅格 i 的潜在土壤侵蚀量; $USLE_i$ 和 $USLE_j$ 分别表示栅格 i 的实际土壤侵蚀量和上坡栅格 j 的泥沙量; R_i 和 K_i

分别表示降水侵蚀力因子和土壤可侵蚀性因子, 其中 R_i 由降水量数据根据 Wischmeier 的月尺度计算模型获得, K_i 由土壤质地数据根据 Williams 等提出的 EPIC 模型计算得到^[19]; LS_i 表示坡度坡长因子, 在评估中用 DEM 数据计算的地形起伏度表示; C_i 和 P_i 分别表示植被覆盖作物管理因子和水土保持因子, 由 Landsat 8 数据监督分类得到的土地利用类型结合相关研究^[20-21]以及研究区内的实际情况确定。

3.1.3 生境质量

InVEST 模型中的生境质量是根据半饱和函数计算生境质量得分值并结合土地利用类型和生物多样性威胁因素数据生成生境质量分布图, 其计算公式为:

$$Q_{sj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{sj}^z}{D_{sj}^z + k^z} \right) \right] \quad (5)$$

其中: Q_{sj} 为类型 j 中的斑块组 x 的生境质量; H_j 为第 j 种景观类型的生境适宜性分值; z 和 k 分别为尺度

常数和半饱和常数; D_{sj} 为生境退化程度指数。由土地利用类型结合相关研究^[22-23]以及研究区实际情况计算得到。

3.2 生态保护重要性评价指标体系构建

3.2.1 水源涵养功能重要性评价

水源涵养功能评价依据水循环原理,利用InVEST模型计算的产水量,再利用地形和土壤参数数据对产水量结果进行修正获得水源涵养量,计算公式为:

$$WR = \min\left(1, \frac{249}{V}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times T}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{Ks}{300}\right) \times Yield \quad (6)$$

式中:WR为水源涵养量; Ks 为土壤饱和导水率,利用土壤质地及有机碳含量数据由Neuro Theta建模计算得出^[24]; V 和 T 分别为流速系数和地形指数,其值参考相关研究并结合研究区的实际情况确定^[25]; $Yield$ 为产水量值,由InVEST模型确定。

3.2.2 水土保持功能重要性评价

水土保持功能评价依据泥沙输移比原理,利用InVEST模型计算潜在土壤侵蚀量和实际土壤侵蚀量,再结合泥沙持留量计算得到土壤保持量,计算公式如下:

$$SEDRET_i = RKLS_i - USLE_i + E_i \quad (7)$$

其中: $SEDRET_i$ 表示栅格 i 的土壤保持量; $RKLS_i$ 、 $USLE_i$ 以及 E_i 由InVEST模型计算得出。

3.2.3 生物多样性功能重要性评价

生物多样性维护功能重要性评价根据InVEST模型计算的生境质量来反映区域生物多样性状况,生境质量得分值越高,区域内的生物多样性水平越高,生物多样性维护功能重要性也就越重要。

$$BD_{sj} = Q_{sj} \quad (8)$$

其中: BD_{sj} 表示生物多样性, Q_{sj} 表示生境质量值,由InVEST模型计算得出。

3.2.4 水土流失敏感性评价

水土流失敏感性评价依据通用水土流失方程基本原理,识别出容易形成水土流失的区域,定量评价水土流失对人类活动的敏感程度。具体评价公式如下:

$$SS_i = \sqrt[4]{R_i \times K_i \times LS_i \times C_i} \quad (9)$$

其中: 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,计算同上, K_i 为土壤可蚀性因子,计算同上, LS_i 为坡长坡度因子,由地形起伏度表示, C_i 为植被覆盖度因子,由Landsat 8遥感数据反演获得。

3.2.5 土地沙化敏感性评价

土地沙化敏感性是指由于人类活动引起土地沙化的可能性大小,具体评价公式如下:

$$D_i = \sqrt[4]{I_i \times W_i \times K_i \times C_i} \quad (10)$$

其中: D_i 为 i 评估区域土地沙化敏感性指数; I_i 为干燥度指数,由温度和降水量数据计算获得; W_i 为起沙风天数,根据生态保护红线划定的标准,选取气象数据中平均风速大于6 m/s的天数; K_i 为土壤质地,由土壤属性数据计算获得; C_i 为植被覆盖度,由Landsat 8遥感数据反演获得。

4 研究结果

4.1 生态系统服务功能重要性评价

研究采用Standard Deviation Method对水源涵养量、水土保持量以及生境质量进行等级划分,分为极重要区、重要区和一般重要区。根据研究区内的实际生态情况,在InVEST模型的基础上定量评价了水源涵养、水土保持和生物多样性维护功能的重要性,并取各项评价指标结果的最高等级作为生态系统服务功能重要性等级。具体的评价方法如下:

[生态系统服务功能重要性]=max([水源涵养功能重要性],[水土保持功能重要性],[生物多样性维护功能重要性])

青岛市生态系统服务功能重要性(图3)总体呈现东南部和西北部的山区较高,中部内陆平原地区较低的空间分布特征,且与海拔和坡度呈现明显的正相关,一般海拔高且坡度较高的区域,其生态系统服务功能重要性较高。由评价结果可知,极重要区域面积约为807.54 km²,约占研究区域总面积的7.34%,基本分布在海拔500 m以上且坡度10°以上的区域,主要位于崂山风景区、珠山风景区和大泽山风景区一带,其余呈点状零星分布在即墨区的周围。重要区面积约为7 749.74 km²,约占70.44%,基本围绕或者夹杂在研究区域的外围,且分布较为广泛,这部分区域可以为极重要区域的生态保持提供重要支撑。而一般重要区的面积约为2 443.93 km²,约占22.22%,主要分布在青岛胶州湾沿岸以及平度和莱西的中部等城市建成区内,该区域内的生态环境直接或间接地受人类活动影响较大,生态结构被破坏,生态平衡失调,生态系统的服务功能较低。

4.2 生态脆弱性评价

研究采用Standard Deviation Method对水土流失敏感性指数及土地沙化敏感性指数进行等级划

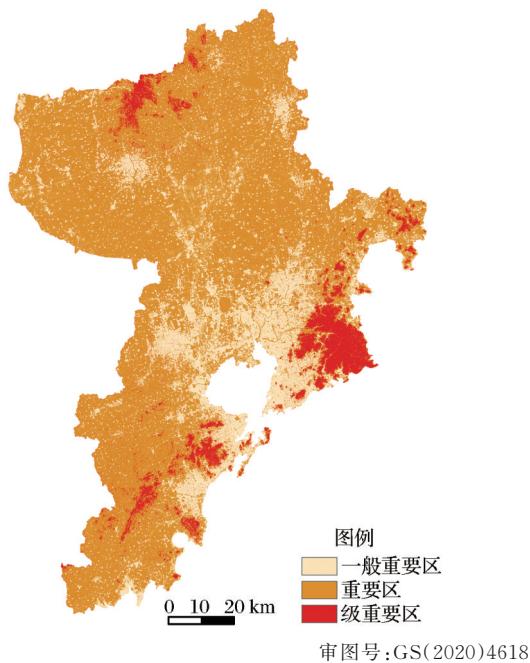


图3 生态系统服务功能重要性评价

Fig.3 Evaluation of the importance of ecosystem services

分,分为极敏感区、敏感区和一般敏感区。根据青岛市的生态环境状况选取水土流失脆弱性和土地沙化脆弱性两个较为典型的评价因子进行分析,取各项评价指标结果的最高等级作为生态脆弱性评价等级。具体的评价方法如下:

[生态脆弱性]=max([水土流失敏感性],[土地石漠化敏感性])

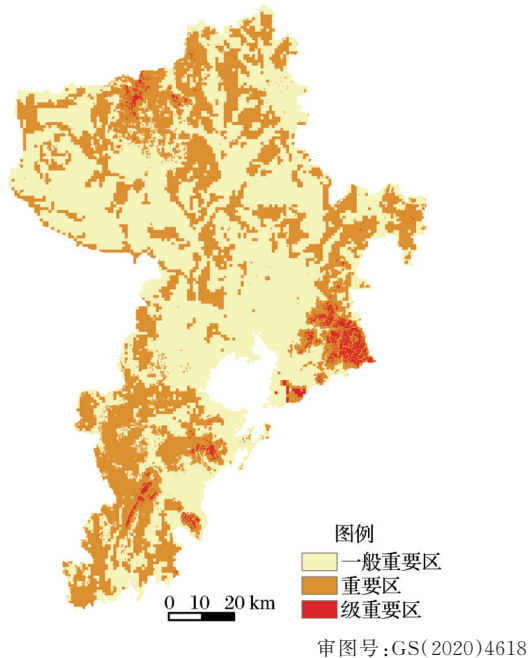


图4 生态脆弱性评价

Fig.4 Ecological vulnerability assessment

总体来看,青岛市的生态脆弱性(图4)处于较低的水平,分布规律大致为:地表径流量较大、地形起伏度较高以及极端气候条件较为多发的区域生态脆弱性较高;地形较为平坦且城市化水平较高的区域生态脆弱性较低。其中极脆弱区的面积为210.83 km²,约占研究区域总面积的1.94%,主要分布在崂山风景区,黄岛区的珠山景区、国家森林公园和旅游度假村以及北部平度和莱西交界处的大泽山景区周围,此类地区多为地形起伏度较大的山区,地形复杂,结构不稳,受人类活动的影响,土壤板结,地下水污染较为严重,积水、滑坡等环境问题较为突出,因此生态脆弱性相对较高。脆弱区的面积为4 249.79 km²,约占39.01%,主要分布在极脆弱区外围以及河流湖泊、自然保护区等生态区的周围。一般脆弱区的面积为6 432.55 km²,约占59.05%,基本分布在青岛市建成区周围,城市的绿化以及园林等相对突出,现代化建设程度较高,与自然生态环境相比,物种多样性减少,自我调节能力主要取决于社会经济水平、气象灾害及地质灾害的复原能力较高,因此其生态脆弱性与其他地区相比较低。

4.3 生态保护等级

根据“双评价”对生态保护重要性评价的划定标准,生态系统服务功能重要性和生态系统脆弱性评价两者集成得到生态保护重要性,进而识别生态保护极重要区、重要区和一般重要区。

取生态系统服务功能重要性和生态脆弱性评价结果的较高等级,作为生态保护重要性等级的初判结果。生态系统服务功能极重要区和生态极脆弱区加总确定为生态保护极重要区,其余重要区和脆弱区加总确定为生态保护重要区。具体评价方法如下:

[生态保护等级]=max([生态系统服务功能重要性],[生态脆弱性])

青岛市生态保护等级(图5)中极重要区和重要区的生态空间是保障生态安全水平的关键区域,两类用地面积之和为8 999.19 km²,占市域范围土地总面积的82.63%。该区域范围是集生物多样性保护、水源涵养和水土保持等不同层次生态用地的核心区域,需要实施严格的生态环境保护,并采取相应的土地用途管制措施,以提高生态系统的质量和稳定性,合理规划城市建设开发和农业生产布局,促进人与自然的可持续发展。

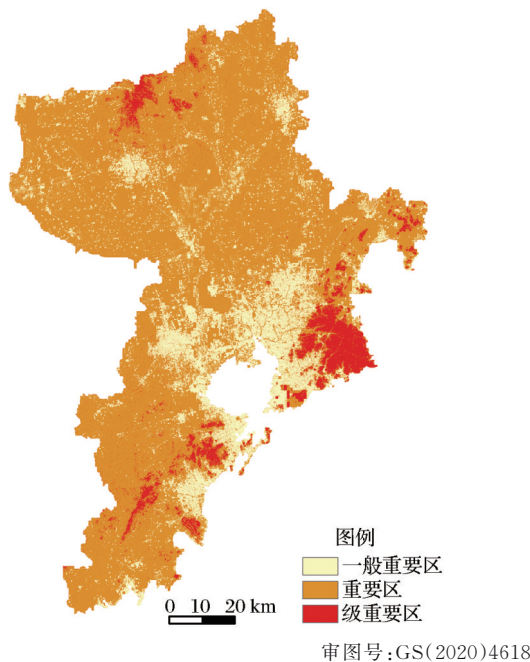


图 5 生态保护等级

Fig.5 Ecological protection level

4.4 生态保护重要性评价

生态保护红线是保障国家和区域生态空间安全的生命线,要充分发挥其应有的作用来科学合理地对生态保护重要性进行评价^[26]。基于RS和GIS技术,构建符合区域生态环境特点的生态保护红线划定方法,利用生态保护红线范围对评价结果进行

检核调整,使其精准化评价与可视化表达,对维护生态空间安全,建设生态文明城市具有重要意义^[27]。

根据“双评价”中只增不减的生态保护红线校验原则,将生态保护等级为极重要的区域初步划定为生态保护红线的管控范围,为了避免遗漏其他生态保护资源以及一些正在进行生态修复的区域,实验参考了山东省生态保护红线划定的范围^[28],对开展评价的地区,利用生态保护因子如河流、湖泊、自然保护区、湿地、国家森林公园等,对生态保护极重要区和重要区进行边界修正,将初步划定的生态保护极重要区与现有的生态保护管控边界进行校验(图6)。

2018年青岛市陆域生态保护红线面积为1104.39 km²,占国土面积9.78%,本次评价结果显示,青岛市陆域生态保护重点区的面积为1125.57 km²,占青岛市国土总面积的10.34%,保证了红线面积的不减少。由图6可知,生态保护重点区与现有的青岛市生态保护红线管控边界一致性较高,说明本研究生态保护重要性评价可以较好地识别生态保护重点区。

从各区生态保护重点区的面积分布来看(图7),黄岛区、崂山区和平度市的生态保护重点区面积较大,其中最大的是黄岛区,面积约306.04 km²,最小的是市南区,面积约为7.28 km²。从空间分布来看,

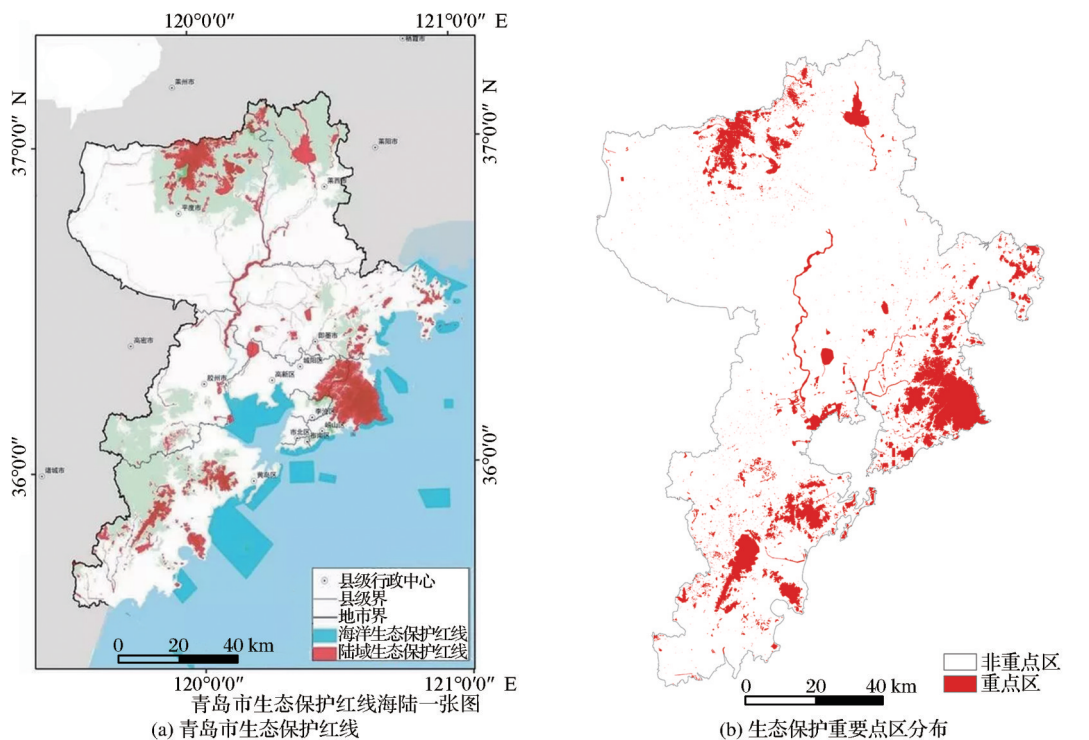


图 6 生态保护重要性评价结果验证

审图号:GS(2020)4618

Fig.6 Verification of the results

青岛市生态保护重点区主要集中分布在崂山片区、胶南山群的大珠山、小珠山等区域以及青岛市北部的大泽山片区。崂山作为青岛市的国家重点风景名胜,属暖温带落叶阔叶林区,木本植物、野生动物种类繁多,植被覆盖度较高,生物多样性相对丰富,生态系统的结构较为完整。胶南山群分布有大珠山、小珠山等山脉,地形起伏度较大,植被树种丰富度较高,土壤有机质含量较为丰富,生态系统的服务功能较好。大泽山风景区作为青岛的“后花园”,由众多的山脉汇集而成,山势较缓,地质构造较为复杂,基岩种类多样,植被覆盖度较高,生态系统的完备性处于较高水平。因此,本研究生态保护重要性评价结果符合青岛市生态保护的实际情况。

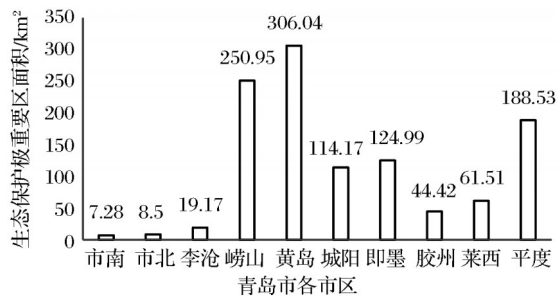


图7 生态保护重点区面积分区统计

Fig.7 Zonal statistics of the key areas

5 结论

本研究将遥感数据作为生态保护重要性评价的主要数据源,提出利用生态服务模型以及生态敏感性指数综合评价青岛市陆域生态保护重要性评价方法,并结合生态保护因子确定青岛市生态空间,得到结论如下:

(1)选取水源涵养、水土保持、生物多样性、水土流失以及土地沙化等评价指标对青岛市的生态服务功能重要性和生态脆弱性进行识别和评价,最终确定生态保护的3个等级,包括极重要区、重要区和一般重要区,分别占研究区域总面积的7.84%、71.38%和20.78%。

(2)根据生态保护极重要区的划定范围,通过叠加生态保护因子进行空间分析,最终确定青岛市生态保护重点区的面积为1 125.57 km²,占青岛市国土总面积的10.34%。从空间分布来看,主要集中在东南部的崂山片区、西南部的胶南山群以及北部的大泽山片区周围。

(3)实验提出的采用遥感数据作为主要驱动数

据源,结合生态服务模型以及生态敏感性指数的生态保护重要性评价方法解决了国土空间现状数据的数据精度和应用目标不统一的问题,提高了生态保护重要性评价结果的精度和准确性,为资源环境承载能力评价和国土空间开发适宜性评价提供良好的技术支撑。此外,本研究采用InVEST模型进行生态系统服务功能重要性评价,对于定量评价生态保护重要性提供了一种有效的研究方法,一定程度上可以为区域总体的生态规划提供方法参考。

总体来看,本研究在将遥感数据综合应用于生态保护重要性评价中,具有一定的理论和实践意义,但也存在进一步改善的空间。由于数据获取的局限性,今后可以基于地下水矿化度和地下水埋深等盐渍化敏感性数据对青岛市生态保护重点区范围进行进一步的核对校验,以确保生态保护重点区划定工作的科学性和合理性。另外,根据“双评价”中国土空间开发保护格局的划定标准开展农业生产适宜性评价和城镇建设适宜性评价,并结合本次生态保护重要性评价结果确定农业生产和城镇建设的最大合理规模和适宜空间,在此基础上进行综合的国土空间“双评价”,划定青岛市合理的“三区三线”是下一步研究的重点。

参考文献 (References):

- [1] Yan Shenghua, Huang Yuefei, Xiong Juan, *et al.* City and county land resource evaluation based on "Double Evaluation" — Taking Daye City as an example [J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2020(1): 43-47. [严圣华, 黄跃飞, 熊娟, 等. 基于“双评价”的市县土地资源评价——以大冶市为例 [J]. *国土与自然资源研究*, 2020(1): 43-47.]
- [2] Wang Yafei, Fan Jie, Zhou Kan. The optimization of territorial space and regional function based on the integration of "double evaluation" [J]. *Geographical Research*, 2019, 38(10): 2415-2429. [王亚飞, 樊杰, 周侃. 基于“双评价”集成的国土空间地域功能优化分区 [J]. *地理研究*, 2019, 38(10): 2415-2429.]
- [3] Ke Xinli, Cho Bangyong, Zheng Weiwei, *et al.* Multi-scenario simulation of urban-agricultural-ecological space delineation [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(3): 580-591. [柯新利, 肖邦勇, 郑伟伟, 等. 城镇—农业—生态空间划定的多情景模拟 [J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(3): 580-591.]
- [4] Stas M, Aerts R, Hendrickx M, *et al.* An evaluation of species distribution models to estimate tree diversity at genus level in a heterogeneous urban-rural landscape [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 198: 103770. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2020.103770.

- [5] Gallardo B, Castro-Diez P, Saldana-López A, *et al.* Integrating climate, water chemistry and propagule pressure indicators into aquatic species distribution models[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106060. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.106060.
- [6] Sun Lihui, Shu Chang, Liu Hao. Research on the Red Line of Ecological Protection and changes in ecosystem service value in Zhongshan City[J]. *Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition)*, 2020, 33(2): 226-234. [孙丽慧, 舒昶, 刘浩. 中山市生态保护红线划定及其生态系统服务价值变化研究[J]. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 2020, 33(2): 226-234.]
- [7] Liu Shiliang, Zhao Shuang, Cheng Fangyan, *et al.* Comparative study on two evaluation methods of ecosystem services at the city scale[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(9): 1315-1323. [刘世梁, 赵爽, 成方妍, 等. 市域尺度两种生态系统服务评价方法对比研究[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(9): 1315-1323.]
- [8] Lin Xueer, You Liping, Zhou Mengyao, *et al.* Comparison of county biodiversity importance evaluation models——taking Wuyishan City as an example[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2020, 26(1): 195-200. [林雪儿, 尤丽萍, 周梦遥, 等. 县域生物多样性重要性评估模型比较——以武夷山市为例[J]. *应用与环境生物学报*, 2020, 26(1): 195-200.]
- [9] Han Qing, Sun Zhongyuan, Sun Chengmiao, *et al.* The construction and application of a map of the status quo of land and space planning based on natural resources background——Taking Qingdao as an example[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(10): 2150-2162. [韩青, 孙中原, 孙成苗, 等. 基于自然资源本底的国土空间规划现状一张图构建及应用——以青岛市为例[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(10): 2150-2162.]
- [10] Xu X, Yang G, Tan Y. Identifying ecological red lines in China's Yangtze River Economic Belt: a regional approach[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 96: 635-646. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.09.052.
- [11] Li Yi, Zhao Xiaomin, Guo Xi, *et al.* Optimization of ecological red line in the hilly region of Southern China based on InVEST and MCR model[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(11): 2980-2994. [李怡, 赵小敏, 郭熙, 等. 基于InVEST和MCR模型的南方山地丘陵区生态保护红线优化[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(11): 2980-2994.]
- [12] Liu Jiao, Lang Xuedong, Su Jianrong, *et al.* Evaluation of water conservation function in the dry-hot valley area of Jinsha River Basin based on InVEST model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(20): 8099-8111. [刘娇, 郎学东, 苏建荣, 等. 基于InVEST模型的金沙江流域干热河谷区水源涵养功能评估[J]. *生态学报*, 2021, 41(20): 8099-8111.]
- [13] Berta Aneseyee A, Noszczyk T, Soromessa T, *et al.* The InVEST Habitat Quality Model associated with land use/cover changes: a qualitative case study of the winike watershed in the Omo-Gibe Basin, Southwest Ethiopia[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12, 1103. DOI: 10.3390/rs12071103
- [14] Jia K, Liang S, Gu X, *et al.* Fractional vegetation cover estimation algorithm for Chinese GF-1 wide field view data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 177: 184-191. DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.019.
- [15] Wang Liang, Meng Qingyan, Wu Jun, *et al.* Analysis of the spatial-temporal pattern of heat island intensity in major urban construction areas in Beijing from 2005 to 2014[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2015, 17(9): 1047-1054. [王靓, 孟庆岩, 吴俊, 等. 2005~2014年北京市主要城建设区热岛强度时空格局分析[J]. *地球信息科学学报*, 2015, 17(9): 1047-1054.]
- [16] Fischer G, Nachtergaele F, Prieler S, *et al.* Global agro-ecological zones assessment for agriculture (GAEZ 2008) [DB/OL]. IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy, 2008, 10.
- [17] Droogers P, Allen R G. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions[J]. *Irrigation and drainage systems*, 2002, 16(1): 33-45. DOI: 10.1023/A: 1015508322413.
- [18] Donohue R J, Roderick M L, McVicar T R. Roots, storms and soil pores: incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 436: 35-50. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.02.033.
- [19] He Shasha, Zhu Wenbo, Cui Yaoping, *et al.* Research on the characteristics of soil erosion in Qihe Basin of Taihang Mountains based on InVEST model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze River Basin*, 2019, 28(2): 426-439. [何莎莎, 朱文博, 崔耀平, 等. 基于InVEST模型的太行山淇河流域土壤侵蚀特征研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(2): 426-439.]
- [20] Renard K G. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M]. United States Government Printing, 1997.
- [21] Chang Chang, Wang Geng. Research on soil conservation function of Biliu River Basin based on InVEST model[J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2019(4): 8-10. [常畅, 王耕. 基于InVEST模型的碧流河流域土壤保持功能研究[J]. *国土与自然资源研究*, 2019(4): 8-10.]
- [22] Zhang Wenjing, Sun Xiaoyin, Shan Ruifeng. Research on land use changes in coastal areas of Shandong Peninsula and their impact on habitat quality based on InVEST model[J]. *Environmental Ecology*, 2019, 1(5): 15-23. [张文静, 孙小银, 单瑞峰. 基于InVEST模型研究山东半岛沿海地区土地利用变化及其对生境质量的影响[J]. *环境生态学*, 2019, 1(5): 15-23.]
- [23] Wang Zhiliang, Li Ying, Luo Jinming, *et al.* The evolution of the spatial and temporal pattern of habitat quality in the Nenjiang River Basin based on the InVEST model[J]. *Environmental Ecology*, 2020, 2(Z1): 19-26. [王治良, 李英, 罗金明, 等. 基于InVEST模型的嫩江流域生境质量时空格局演变[J]. *环境生态学*, 2020, 2(增刊1): 19-26.]

- [24] Minasny B, McBratney A B. Neurotheta, pedotransfer functions for predicting soil hydraulic properties for Australian soil [D]. Sydney. Australian Centre for Precision Agriculture, The University of Sydney, 2003.
- [25] Bao Yubin, Li Ting, Liu Hui, *et al.* Spatio-temporal changes of water conservation function in the Loess Plateau of Northern Shaanxi based on InVEST model [J]. *Geographical Research*, 2016, 35(4):664-676.[包玉斌,李婷,柳辉,等.基于InVEST模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J].*地理研究*,2016,35(4):664-676.]
- [26] Zhang Chuncai, Li Ye, Wang Xiangtao, *et al.* The method and practice of ecological protection red line delineation based on the county-level scale—Taking Da'an City, Jilin Province as an example[J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2020(1):70-74.[张春才,李叶,王祥涛,等.基于县级尺度的生态保护红线划定方法与实践——以吉林省大安市为例[J].*国土与自然资源研究*,2020(1):70-74.]
- [27] Tan Huaqing, Zhang Jinting. Research on the Red Line Delineation of Ecological Protection in Shenzhen [J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2020(3):27-30.[谭华清,张金亭.深圳市生态保护红线划定研究[J].*国土与自然资源研究*,2020(3):27-30.]
- [28] Wu Ke. Discussion on Ecological Protection Red Line Delineation and management and control measures under territorial and spatial planning: Taking Shandong Province as an example [J]. *East China Forest Manager*, 2020, 34(1):4-7.[吴可.国土空间规划下生态保护红线划定及管控措施探讨——以山东省为例[J].*华东森林经理*,2020,34(1):4-7.]

Evaluation of Ecological Protection Importance in Qingdao based on Remote Sensing and Ecological Service Model

Li Jie^{1,2}, Jia Kun^{1,2}, Zhang Ning^{3,4}, Wei Xiangqin⁵, Wang Bing^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2.Beijing Engineering Research Center for Global Land Remote Sensing Products, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3.Remote Sensing Application Center, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Beijing 100835, China;

4.Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

5.Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The importance assessment of ecological protection is an important component of the "double evaluation". It can reflect the importance of ecological functions in different environments in the region, and protect the ecological security of the district which includes the ecologically fragile areas and the key areas of ecological service functions. This paper proposes an ecological protection importance assessment method, which uses remote sensing data as the main driving data and combines ecological service model and ecological sensitivity index to quantitatively evaluate the ecological protection level in the whole land area of Qingdao. The method comprehensively considers the important ecological service function area, fragile area and protection factors, delineate the importance of ecological protection in Qingdao. The assessment results are verified according to the ecological protection red line. The results show that the proposed method is reliable for ecological protection importance assessment, and the area of Qingdao's key ecological protection is 1 125.57 km², accounting for 10.34 %, mainly distributed in the area where the ecological service functions are richer and the ecological sensitivity are more vulnerable, including Laoshan mountain region in the east, the Jiaonan mountain region in the southwest, and the Dazeshan region in the north. In this paper, remoting sensing data as the main driving data provides a good technology support for the "double evaluation", and the results have important reference for the scientific and rational compilation of urban development planning and construction of ecological civilization city.

Key words: Double evaluation; Ecological protection importance; Remote sensing; InVEST model; Qingdao