

烟台市生态红线划定研究

彭琛琛¹, 蔡玉梅², 边振兴¹

(1. 沈阳农业大学 土地与环境学院, 辽宁 沈阳 100866; 2. 中国土地勘测规划院, 北京 100035)

摘要: 生态红线是中国生态环境保护制度的一项创新, 它不仅与中国的生态文明制度建设密切相关, 更关系到经济社会的可持续发展。以山东省烟台市为例, 就其沿海低山丘陵区的特点从生态功能重要性和生态敏感性 2 个方面构建评价体系, 进行生态保护重要性评价。在遥感影像处理平台与 Arc GIS 的支持下, 采用专家打分法确定权重, 运用空间叠置分析法对评价结果进行分析, 最终将烟台市划为生态红线与 3 个级别管控区, 其中生态功能重要性评价主要从水源涵养、土壤保持、洪水调蓄、碳固定与维持生物多样性等 5 个方面进行, 生态敏感性评价包括水土流失、土地沙化和海岸线侵蚀等 3 个方面。最终划定的生态红线面积为 3 432.49 km², 占全市总面积的 24.97%, 主要包括中部山地地区、南部地区与沿海地带。图 5 表 6 参 25

关键词: 生态学; 生态红线; 生态功能重要性评价; 生态敏感性评价; 空间叠置分析法

中图分类号: S718.5; X171.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2018)05-0818-11

Delineating an ecological red line in Yantai, Shandong Province

PENG Chenchen¹, CAI Yumei², BIAN Zhenxing¹

(1. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 100866, Liaoning, China;
2. Chinese Land Surveying and Planning Institute, Beijing 100035, China)

Abstract: The ecological red line, an innovation of China's ecological and environmental protection system that is not only closely related to the construction of an ecological civilization system for China, but is also related to the sustainable development of the economy and society, has been proposed with scholars conducting research on its delineation using different methods to carry out pilot work. This study was undertaken to define the ecological protection red line from the municipal point of view and to provide a reference for its demarcation in Yantai, Shandong Province. ENVI and Arc GIS were the main means to assess ecological protection in terms of ecological functions and ecological sensitivity in light of the coastal hilly region characteristics. An expert scoring method to determine weights and a spatial superposition analysis method were used to analyze the evaluation results. An index system for evaluating the importance of municipal ecological protection was established, as far as possible, to evaluate the importance of the ecological function from the standpoint of water conservation, soil conservation, flood water storage, climate regulation function, and biodiversity conservation function from the perspective of the quantity of natural resources, and to explore a technical method for demarcating the municipal ecological red line with Arc GIS as the main platform. Also, an ecological sensitivity assessment included soil erosion, land desertification, and shoreline erosion. Results divided Yantai as an ecological red line and three levels of control areas. The final ecological red line area was 3 432.49 km² accounting for 24.97% of the total city area, mainly includes the central mountainous region, the southern region and the coastal zone. The ecological importance and ecological sensitivity are high in these area. The method system established in this study has certain practicality and can provide reference for other regions. [Ch, 5 fig. 6 tab.

收稿日期: 2017-10-25; 修回日期: 2017-11-26

基金项目: 国家国际科技合作专项(2015DFA01370)

作者简介: 彭琛琛, 从事土地生态评价与景观规划研究。E-mail: m13137483336@163.com。通信作者: 蔡玉梅, 研究员, 博士, 从事国土规划与环境影响评价研究。E-mail: caiyumei@263.net

25 ref.]

Key words: ecology; ecological red line; assessment of ecological function significance; ecological sensitivity assessment; spatial overlay analysis

近年来,工业化和城镇化的快速发展以及人类对自然资源的不合理利用与开发,导致区域关键生态过程紊乱和生态完整性破损,自然生态系统的生态服务功能下降,资源环境形势日益严峻^[1]。生态红线是依据“保底线、顾发展”的基本原则,辨识生态价值较高、生态系统比较敏感及具有关键生态功能的区域,是实施分类管理和控制,有效保障重要生态区域,避免人为活动干扰的有效方法之一。生态红线的划定不仅关系着中国生态文明制度建设,更关系到整个经济社会的可持续发展。自生态红线提出以来,不同学者都对其概念内涵与具体划定进行了探索。生态保护红线是指在生态空间范围内具有特殊重要生态功能、必须强制性严格保护的区域,是保障和维护国家生态安全的底线和生命线,通常包括具有重要水源涵养、生物多样性维护、水土保持、防风固沙、海岸生态稳定等功能的生态功能重要区域,以及水土流失、土地沙化、石漠化、盐渍化等生态环境敏感脆弱区域。而就其划定方法,目前主要形成 3 种模式:①通过将生态要素叠加划定生态红线。如盛鸣^[2]在深圳市通过六大类生态要素的叠加划定基本生态控制线,实施刚性管控,禁止建设;俞龙生等^[3]将地形地貌、生物多样性、水源涵养、水土保持、湿地保育、土地利用 6 个方面要素叠加进而划定广州南沙新区生态保护红线。②结合生态网络规划划定红线。如王云才等^[4]结合生态网络规划对安徽省宣城市南漪湖地区进行了生态红线划定。③基于生态保护重要性评价的生态红线划定。如许妍等^[5]以湿地面积、生物资源量、历史遗迹与自然景观分布等指标划定渤海区域生态红线;2017 年 5 月发布的《生态保护红线划定指南》也确定了基于生态重要性评价划定生态红线的思路和技术方法,只是就如何在不同尺度和不同地域上具体确定功能类型与评价方法并未详细讨论。综合比较,第 1 种方法仅通过要素的单纯叠加,虽具有极强的操作性但忽略了各要素之间的关系。第 2 种方法注重区域生态系统完整性,但难以进行空间管控。第 3 种方法从土地利用出发侧重生态系统功能保护,相对于前两者容易落实到空间从而更好地满足国土空间管制的要求。烟台市位于山东半岛低山丘陵区,境内山峦起伏,地形复杂多变,对生产生活限制较多。另外,烟台市生态资源丰富,也是生产建设与自然环境冲突较大的地区,因此,划定生态红线对于实现烟台市的长久发展有着重要意义。本研究结合现有研究成果,以烟台市为例,针对其沿海低山丘陵区的特点进行生态红线划定方法研究,尝试建立具体的生态保护重要性评价体系并探索市级生态红线划定的技术方法,力图为中国市级尺度的生态红线划定提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

烟台市位于山东半岛中部,36°17'~38°24'N,119°33'~121°58'E,东临威海,西连潍坊,西南与青岛毗邻,北濒黄海、渤海,与大连隔海相望,陆地面积为 13 746.47 km²,总人口为 701.41 万人。气候属暖温带大陆性季风气候,年平均降水量为 651.90 mm,年平均气温为 11.8℃。地貌属于低山区,区域地形起伏和缓。境内主要河流为大沽夹河、辛安河和沁水河,向北注入黄海。近海自西向东分布有套子湾、芝罘湾和四十里湾等,海岸线总长 909 km,市内生态资源丰富。

长岛县位于胶东、辽东半岛之间,由 32 个岛屿和 8 700 km² 海域组成,全县土地总面积仅 57.27 km²。由于长岛县相关资料缺失且剔除该县对于烟台市全市的生态红线划定结果影响不大,因此本研究区域不包括长岛县。

1.2 数据来源

生态问题涉及多方面因素。本研究所用数据主要包括气象、土壤、遥感等(表 1),其中降水、气温、风速等气象数据来源于中国气象局的市级站点数据,在 Arc GIS 中进行 Kring 插值;土壤数据主要采用烟台市 1:10 万土壤图,土壤有机碳计算采用了南京土壤所提供的 1:100 万土壤数据;数字高程(DEM)数据、遥感影像都来源于地理空间数据云,植被覆盖度基于像元二分模型^[6]通过烟台市 2015 年遥感影像反演得到;MODIS·NDVI 主要用于计算研究区净初级生产力(P_{NP}),计算方法采用 CASA 模型^[7];

此外,还涉及到烟台市的土地利用现状图、《烟台市海岸带规划(2006–2020 年)》和《烟台市土地利用总体规划(2006–2020 年)》等资料。以上数据均在 Arc GIS 中进行矢量化并转化为栅格数据,统一到相同坐标系和投影系统中。因多元数据精度限制,研究以 200 m × 200 m 网格作为基本评价单元。

2 研究方法

本研究基于生态保护重要性评价进行生态红线划定,主要从生态功能重要性与生态敏感性 2 个方面展开评价,划定重点生态功能区与生态敏感区,进而划定生态红线区。重点生态功能区指生态系统十分重要,关系全国或区域生态安全,生态系统功能有所退化,需要在国土空间开发中限制进行大规模高强度工业化城镇化开发,以保持并提高生态产品供给能力的区域,主要类型包括水源涵养区、水土保持区、防风固沙区和生物多样性维护区等。生态敏感区指对外界干扰和环境变化具有特殊敏感性或潜在自然灾害影响,极易受到人为的不当开发活动影响而产生负面生态效应的区域。

国土承载着生产、生活、生态服务等多方面功能,生态红线主要针对生态调节功能。本研究的划定思路是首先对评价范围进行识别,剔除烟台市的建成区,并根据国家相关规定确定禁止开发区,将其直接划入生态红线,剩余区域全部划入评价范围;然后在评价范围内从重点生态功能评价与生态敏感性评价 2 个方面构建指标体系,进行生态保护重要性评价,将生态功能极重要区域划为重点生态功能生态红线,生态极敏感/脆弱区域划为生态敏感性/脆弱性生态红线;2 条红线按照等级划分规则进行综合叠置,并结合已确定的禁止开发区,得到最终的生态红线(图 1)。

2.1 生态功能重要性评价

烟台市位于山东半岛临海地带,生态资源丰富,牙山、崮山与昆嵛山等建有多个林场,且境内河网密布,沟壑纵横分布。此外,还分布着门楼水库、沐浴水库、王屋水库三大水库以及高陵水库、平山水库等多个中小水库及大面积的湿地沼泽。因此,本研究主要选取了水源涵养、水土保持、洪水调蓄、碳固定与生物多样性保护 5 项生态系统功能进行评价。

2.1.1 水源涵养功能重要性评价 生态系统水源涵养功能主要表现在截留降水、加强土壤水分渗透、控制水分蒸发、缓冲地表水径流等作用^[8]。本研究采用水量分解模型法进行评价,该方法基于区域内降水和蒸散,并结合地表植被进行修正。

$$W_Y = P - E_T - R \quad (1)$$

式(1)中: W_Y 为水源涵养量; P 为多年平均年降水量; E_T 为实际蒸散量; R 为地表径流量,根据不同植被类型的径流系数计算求得。采用自然裂点法将计算出的水源涵养量分为一般重要、比较重要、中度重要、高度重要、极重要 5 个等级。

2.1.2 水土保持功能重要性评价 水土保持服务功能是陆地生态系统的基本服务功能之一,在区域侵蚀控制以及生态安全的维持方面具有不可替代的作用^[9]。运用修正通用水土流失方程(RUSLE)来估算研究区潜在土壤侵蚀量和现实土壤侵蚀量,两者之差即为生态系统土壤保持量。

$$A_c = A_p - A = R \times K \times L \times S \times (1 - C \times P) \quad (2)$$

式(2)中: A_c 为土壤保持量; A_p 为潜在土壤侵蚀量; A 为实际土壤侵蚀量;降雨侵蚀力 R 基于月平均降水量和年平均降水量的 Wischmeier 公式计算^[10];土壤抗侵蚀性 K 选用 WILLIAMS 等^[11]在 EPIC 模型中对土壤侵蚀因子 K 的估算方法; L 因子采用 WISCHMEIER 等^[12]提出的坡长因子计算公式; S 因子采用 MECOOL 等^[13]的计算公式以及刘宝元等^[14]的陡坡计算公式;植被与经营因子 C 选用蔡崇法等^[15]建立的 C 因子值与植被覆盖度之间的回归方程计算;水土保持措施 P 主要根据蔡崇法等^[15]所提出的土地利用类型对 P 值的影响,确定不同土地利用类型的 P 值,赋值范围为 0~1(表 2),其中 0 代表不会发生土壤侵蚀

表 1 主要数据来源

Table 1 Sources of principal data

数据名	分辨率	数据源
降水、气温、风速	市级站点(10 个)	中国气象数据网
辐射	站点(1 个)	中国气象数据网
土壤数据	1:10 万	烟台市政府部门
遥感影像	30 m	地理空间数据云
SRTM 高程数据	90 m	地理空间数据云
MODIS·NDVI(MOD13Q1)	250 m	美国 NASA 网站
植被覆盖度	30 m	地理空间数据云
土地利用现状图	1:20 万	烟台市政府部门

说明:均为原始数据

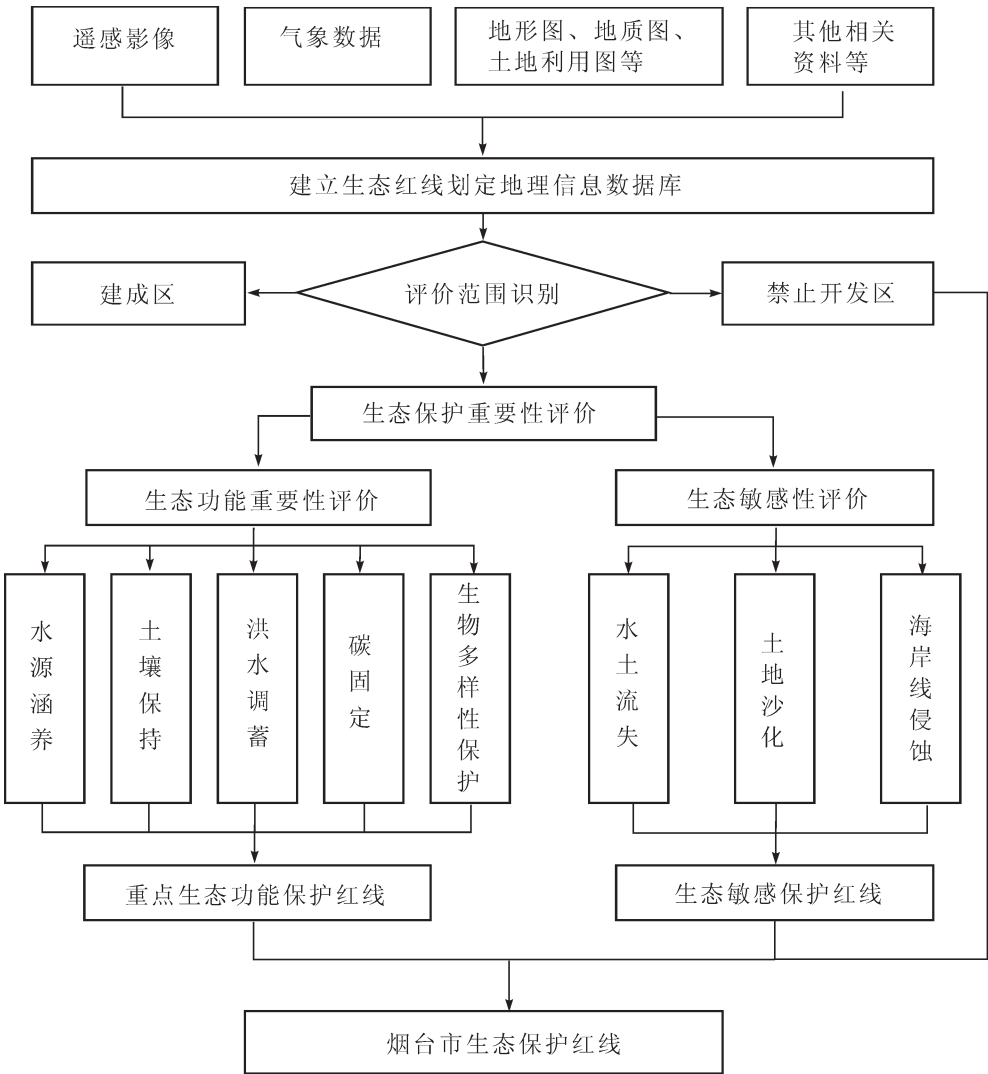


图 1 生态红线划定技术路线图

Figure 1 Ecological red line delineation technology roadmap

的地区，1 值代表没有采取任何水保措施的地区。同样采用自然裂点法将计算出的土壤保持量分为一般重要、比较重要、中度重要、高度重要、极重要 5 个等级。

2.1.3 洪水调蓄功能重要性评价 生态系统的洪水调蓄功能主要体现在对洪涝灾害的调节作用。湖泊是抵御湖区水系洪水灾害的天然屏障，水库则是现代防洪工程体系的重要组成部分^[16]。沼泽湿地因其土壤具有较强的蓄水和透水能力，不仅具有削减洪峰和均化洪水能力，还能借助湿地植被减缓洪水流速，延长泄洪时间，进而削弱对下游的影响^[17-18]。烟台市有 3 个特大水库(王屋水库、沐浴水库与门楼水库)，25 个中型水库，403 个小水库，2 万多个坑塘水面。但目前关于洪水调蓄功能的研究一般集中在大型湖泊与水库，对于小型水库和湿地沼泽的考虑较少。本研究主要以调蓄水量作为洪水调蓄功能的评价指标，参考饶恩明等^[16]和周婷婷^[19]的研究构建湖泊、水库、湿地沼泽调蓄功能评估模型。具体见下式：

$$C=\sum_{i=1}^nC_i=C_r+C_l+C_w; \tag{3}$$

表 2 水土保持措施因子赋值标准

Table 2 Criteria for assignment of soil and water conservation measures

土地利用类型	水土保持措施 <i>P</i>	土地利用类型	水土保持措施 <i>P</i>	土地利用类型	水土保持措施 <i>P</i>
有林地、灌木林地、风景名胜及特殊用地	1.00	建设用地	1.00	其他林地、园地	0.70
未利用地	1.00	居民点、水体	0	旱地、盐碱地	0.45
设施农用地	0.55	人工牧草地	0.20		

$$\ln C_r = 1.128 \ln A + 4.924; \quad (4)$$

$$C_r = 0.35 C_t; \quad (5)$$

$$C_w = SR。 \quad (6)$$

式(3)~(6)中: C_r 为湖泊洪水调蓄量; C_t 为水库防洪库容; C_w 为沼泽湿地、坑塘水面洪水调蓄量; A 为湖面面积(km^2); C_t 为水库总库容; S 为沼泽湿地的面积; R 为单位面积沼泽湿地的洪水调蓄量, 参考赵同谦等^[20]的研究推算为 $2.47 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。根据公式计算各区域的洪水调蓄量并采用自然裂点法将其分为一般重要、比较重要、中度重要、高度重要、极重要 5 个等级。

2.1.4 碳固定功能重要性评价 碳固定作为一项重要的生态系统服务, 对降低大气中二氧化碳等温室气体浓度, 减缓全球气候变化具有至关重要的作用^[21]。因此, 本研究以固碳量作为碳固定功能的评价指标。基于 InVEST 模型的碳储存模块思想在 Arc GIS 中进行碳固定重要性评价, 该模型中陆地生态系统的碳库被分为 5 个部分, 包括地上生物量(A), 地下生物量(B), 土壤碳库(S), 死亡有机物碳库(O)以及木材收获量(P)。木材收获量 C_{pnt} 通过下式进行计算:

$$C_{\text{pnt}} = C_x \times \sum_{i=0}^{\text{ru} \left(\frac{y-S_x}{F_x} \right)^{-1}} f[D_x; y-S_x-(i \times F_x)]。$$

其中: C_{pnt} 是地块 x 在 t 时间内的木材数量, C_x 表示在 1 个收获周期内从地块 x 中移除的碳, y 表示当前时间, s 计算的起始时间, F_x 为收获频率, i 为收获次数, D_x 为收获木材的半衰期, ru 表示对计算结果向上取整。模型中第五大碳库主要涉及木材衰减率、轮伐期等数据。由于目前的木材市场不尽完备, 木材衰减率等数据难以获得, 故本研究仅考虑基本碳库的碳储量^[22]。因此, 模型简化为下式:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}}; \quad (7)$$

$$C_{\text{so}} = \sum_{i=0}^n (1-\theta_i\%) \times P_i \times C_i \times T_i / 100。 \quad (8)$$

式(7)中: C_{total} 表示研究区总碳储存量; C_{above} , C_{below} , C_{soil} , C_{dead} 分别表示地上、地下、土壤、凋落物碳储存量; C_{so} 为土壤剖面有机碳密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$); θ_i 为第 i 层大于 2 mm 粒径的砂粒含量(%); P_i 为第 i 层土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); C_i 为第 i 层土壤有机碳质量分数($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); T_i 为第 i 层土层厚度(cm); n 为参与计算的土壤层次总数。森林以及草地(地上部分、地下部分以及凋落物)碳密度数据参考刘成杰^[23]和崔传祥等^[24]对于山东省及泗水县森林碳储量的实地采样。土壤有机碳主要采用中国科学院南京土壤研究所提供的 1:100 万土壤数据进行计算。采用自然裂点法将计算结果分为一般重要、比较重要、中度重要、高度重要、极重要 5 个等级。

2.1.5 生物多样性保护功能重要性评价 生物多样性保护功能是生态系统提供的最主要功能之一, 它对维持区域生态安全起着至关重要的作用。针对烟台市生物普查数据资料不足的情况, 本研究选取净初级生产力(P_{NP})定量指标作为生物多样性功能重要性评价方法。以生物多样性保护服务能力指数作为评价指标。公式为:

$$S_{\text{bio}} = P_{\text{NPmean}} \times F_{\text{pre}} \times F_{\text{tem}} \times (1 - F_{\text{alt}})。 \quad (9)$$

式(9)中: S_{bio} 为生物多样性保护服务能力指数; P_{NPmean} 为区域生态系统净初级生产力平均值, 采用 CASA 模型利用 MODIS 的 NDVI 数据进行计算; F_{pre} 为降水参数; F_{tem} 为气温参数; F_{alt} 为海拔参数, 都已归一到 0~1。采用自然裂点法将计算结果分为一般重要、比较重要、中度重要、高度重要、极重要 5 个等级并赋值。

2.1.6 生态功能重要性综合评价 单因素的生态功能重要性反映了研究区单项生态功能的重要性程度, 将其进行加权叠置后综合反映研究区的生态功能重要性等级。公式如下:

$$E = \sum_{i=0}^n \omega_i e_i。 \quad (10)$$

式(10)中: E 为研究区生态功能重要性指数; ω_i 为第 i 个生态功能的重要性等级数; e_i 为第 i 个生态功能的权重, 采用专家打分法对水源涵养功能、土壤保持功能、洪水调蓄功能、碳固定功能与维持生物多样性保护功能赋权重, 依次为 0.17, 0.35, 0.15, 0.10 和 0.23。利用 Arc GIS 中的栅格计算器进行加权

叠置，并采用自然裂点法将计算结果分为 5 个等级，得到烟台市生态功能重要性综合评价等级图。

2.2 生态敏感性评价

烟台市靠近海域，经常出现强降雨与大风天气，且临海岸线一带极易发生海水侵蚀等问题。因此，本研究主要从土地沙化、水土流失与海岸线侵蚀 3 个方面进行生态敏感性评价。

2.2.1 土地沙化敏感性评价 土地沙化是指在各种气候条件下，由于多种因素导致土地呈现沙(砾)物质为主要标志的土地退化过程^[25]。土地沙化敏感性主要与气候、植被与土壤类型有关。本研究选取干燥度、沙风天数、土壤质地和植被覆盖如表分级赋值(赋值标准见表 3)评估土地沙化敏感性。

$$D=\sqrt[4]{I_i\times W_i\times K_i\times C_i}。$$
 (11)

式(11)中： D 为评价区域土地沙化敏感性指数； I_i ， W_i ， K_i ， C_i 分别为评价区域干燥度指数、沙风天数、土壤质地和植被覆盖的敏感性等级值。

2.2.2 水土流失敏感性评价 水土流失敏感性评价是为了识别容易形成水土流失的区域，评价水土流失对人类活动的敏感程度。水土流失敏感性是自然因素所决定的生态系统对人为影响的反映敏感程度。因此选取降雨侵蚀力、土壤可蚀性、地形起伏度与植被覆盖度等自然因素分级赋值后(表 3)进行综合评价。

$$S=\sqrt[4]{R_i\times K_i\times L_{si}\times C_i}。$$
 (12)

式(12)中： S 为评价区域水土流失敏感性指数； R_i ， K_i ， L_{si} ， C_i 分别为评价区域降雨侵蚀力、土壤可蚀性、地形起伏度和植被覆盖的敏感性等级值。

表 3 生态敏感性评价指标分级标准表

Table 3 Classification standard of assessment indexs on ecological sensitivity

评价内容	评价指标	因子赋值标准				
		不敏感	比较敏感	中度敏感	高度敏感	极敏感
水土流失敏感性	降雨侵蚀力(R_i)	<25	25~<100	100~<400	400~<600	≥600
	土壤可蚀性(K_i)	石砾、砂	粗砂土、细砂土、黏土	面砂土、壤土	砂壤土、粉黏土、壤黏土	砂粉土、粉土
	地形起伏度(L_{si})	0~20	20~50	50~100	100~300	>300
	植被覆盖度(C_i)	>0.8	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	<0.2
土地沙化敏感性	干燥指数(I_i)	<1.0	1.0~1.5	1.5~4.0	4.0~16.0	>16.0
	风沙天数(W_i)	<5	5~10	10~20	20~30	>30
	土壤质地(K_i)	基岩	黏质	砾质	壤质	砂质
	植被覆盖度(C_i)	>0.8	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	<0.2
	分值	1	3	5	7	9

2.2.3 海岸线侵蚀敏感区确定 本研究主要根据烟台市发布的《烟台市海岸带规划(2006–2020 年)》，将烟台市以下地区海岸线划为侵蚀敏感区，包括：(1)东部岸段，(2)牟平区沿海防护林带，(3)牟平区沁水河入海口湿地，(4)辛安河河口湿地，(5)西部岸段，(6)徐福镇至蓬莱北沟镇的沿海防护林带，(7)莱州胶莱河至刁龙嘴一线的滩涂，(8)三山岛至刁龙嘴防沿海护林带，(9)招远防护林带，(10)南部岸段，(11)丁字湾内湿地，(12)纪疃河河口湿地，(13)辛安镇沿海防护林带，(14)留格庄镇防护林地及基岩岸线。

2.2.4 生态敏感性综合评价 单因素的敏感性反映了研究区单方面的敏感性程度，将其进行加权叠置后综合反映研究区的生态敏感性综合等级。公式如下：

$$S=\sum_{i=0}^n\omega_iS_i。$$
 (13)

式(13)中： S 为研究区生态敏感性指数； ω_i 为第 i 个生态敏感性等级数； S_i 为第 i 个生态敏感性权重。采用专家打分法对水土流失敏感性评价与土地沙化敏感性评价赋权重，分别为 0.65 和 0.35。利用栅格计算器将得到的各敏感性评价等级图进行加权叠置，并采用自然裂点法将计算结果分为 5 个等级，将确定的海岸线侵蚀敏感区直接赋以最高级与分级结果进行合并，得到烟台市生态敏感性综合评价等级图。

2.3 红线划定方法

根据上述评价结果，运用地理信息系统技术将生态功能重要性等级图与生态敏感性等级图进行叠加

分析,按表 4 确定生态保护重要性综合等级,将其中综合等级为Ⅳ的区域与识别的禁止开发区划为生态红线区,综合等级为Ⅲ的区域作为一级管控区,综合等级为Ⅱ的区域作为二级管控区,综合等级为Ⅰ的区域作为三级管控区。

表 4 生态保护重要性综合等级分级标准表

Table 4 Classification standard of comprehensive level on ecological protection importance

生态敏感性等级	生态功能重要性等级				
	一般重要	比较重要	中度重要	高度重要	极重要
不敏感	I	I	II	III	IV
轻度敏感	I	I	II	III	IV
中度敏感	II	II	II	III	IV
高度敏感	III	III	III	III	IV
极敏感	IV	IV	IV	IV	IV

3 结果分析

最终划定的生态红线由生态保护重要性综合等级为Ⅳ的区域与禁止开发区组成,其中禁止开发区域面积为 376.66 km²,约占烟台市总面积的 2.74%,包括昆嵛山各级保护区、地质公园、森林公园与水源保护地的核心地带(图 2)。

3.1 生态功能重要性红线

生态功能重要性单项评价与综合结果等级及面积如表 5 所示,最终划定的生态功能重要性红线区域面积为 1 807.66 km²,约占烟台市总面积的 13.15%,主要分布在栖霞市及周边山地,其次为牟平区与海阳市(图 3)。这些地区多为山地,地势较高,人迹较少,且分布着雷山林场、牙山林场、福山区林场等多个林场,植被保存较好,物种丰富,具有很强的土壤保持与生物多样性维护功能,其中水源涵养功能极重要区域主要分布在莱阳市与海阳市。该地区位于烟台市南部,有着充沛的降水,且域内分布着饮用水水源保护区,对全市的水源供给起着重要作用。土壤保持功能极重要区域主要分布在栖霞市,部分分布在牟平区与海阳市。这些地区多是海拔较高、坡度较陡的高山地带,如栖霞市的牙山、崮山与牟平区的昆嵛山等,这些地区建有多个林场,植物类型多样,植被覆盖度较高,土壤保持能力强。洪水调蓄功能极重要区域主要分布在招远市、莱阳市与海阳市。烟台市内王屋、沐浴与门楼三大水库与多个中小水库、沼泽湿地在洪水调蓄方面都起着非常重要的作用,其中莱阳、招远市水库分布密度较大,因此具有较强的水库调蓄功能。碳固定功能极重要区域主要分布在牟平区,其次为海阳市,招远、栖霞零星分布。本研究的碳固定功能以碳储量作为指标,它主要与植被类型和土壤类型有关,烟台市内农业发达,农业植被分布广泛,而农田生态系统中,因为植物吸收的碳会以二氧化碳的形式重新排放到大气中,不具备长期存储碳的能力,牟平区自然植被较多,故碳固定功能显著。生物多样性功能极重要区域主要分布在中部的山地地带与牟平区的昆嵛山地带。这些地区地势较高,人为活动较少,植被类型保存

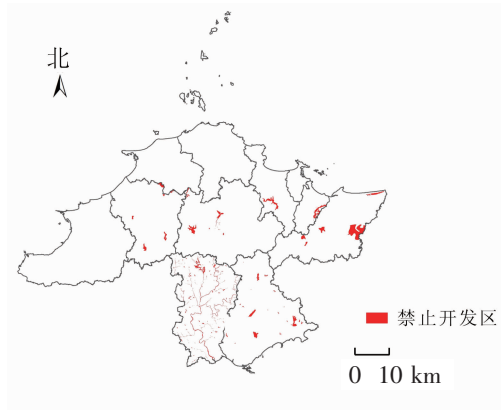


图 2 禁止开发区示意图

Figure 2 Distribution of prohibitive development area

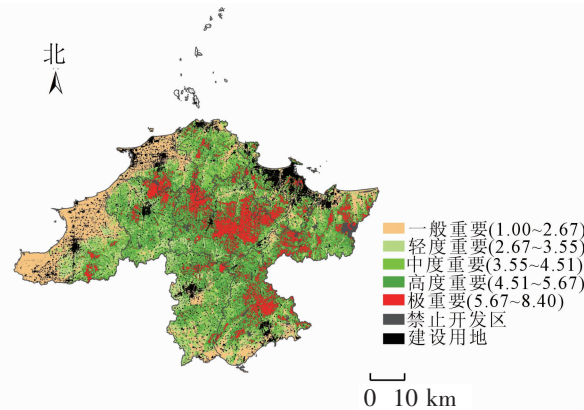


图 3 生态功能重要性评价示意图

Figure 3 Assessment of ecological function significance

较好，生态系统较为完整，有利于维护生物多样性。

表 5 生态功能重要性评价结果

Table 5 Assessment of ecological function significance						
生态功能重要性	水源涵养			土壤保持		
	水源涵养量/mm	面积/km ²	百分比/%	土壤保持量/m ³	面积/km ²	百分比/%
一般重要	(2.69~51.15]	2 956.00	21.50	(0.00~34.78]	6 334.62	46.08
比较重要	(51.15~83.72]	3 194.60	23.24	(34.78~99.39]	4 438.95	32.29
中度重要	(83.72~113.11]	3 593.23	26.14	(99.39~203.75]	1 475.95	10.74
高度重要	(113.11~141.71]	2 878.54	20.94	(203.75~372.71]	656.35	4.77
极重要	(141.71~205.26]	1 334.40	9.71	(372.71~1 267.21]	1 050.91	7.64
生态功能重要性	洪水调蓄			碳固定		
	洪水调蓄量/m ³	面积/km ²	百分比/%	碳储量/t	面积/km ²	百分比/%
一般重要	(5~175]	5 276.38	38.38	(0.00~33.39]	5 281.53	38.42
比较重要	(175~405]	3 782.88	27.52	(33.39~55.66]	4 391.97	31.95
中度重要	(405~735]	2 659.50	19.35	(55.66~69.57]	842.38	6.13
高度重要	(735~1 225]	1 417.61	10.31	(69.57~97.40]	2 139.22	15.56
极重要	(1 225~3 645]	820.40	5.97	(97.40~709.67]	1 301.67	9.47
生态功能重要性	生物多样性保护			生态功能重要性		
	生物多样性保护指数	面积/km ²	百分比/%	重要性总分	面积/km ²	百分比/%
一般重要	(0.00~4 542.92]	4 568.38	33.23	(1.00~2.68]	5 731.56	41.69
比较重要	(4 542.92~10 221.56]	3 869.35	28.15	(2.68~3.55]	3 805.62	27.68
中度重要	(10 221.56~16 873.68]	2 831.72	20.60	(3.55~4.51]	1 672.32	12.17
高度重要	(16 873.68~25 472.77]	1 595.19	11.60	(4.51~5.67]	935.90	6.81
极重要	(25 472.77~41 372.97]	1 092.13	7.94	(5.67~8.40]	1 807.66	13.15

3.2 生态敏感性红线

各生态敏感性单项评价与综合结果等级及面积如表 6 所示，最终划定的生态敏感性红线区域面积为 1 455.71 km²，约占烟台市总面积的 11.59%，主要分布在莱阳市、招远市与海阳市及莱州湾与丁字湾等海岸线地带(图 4)。这些地区被覆盖低且临近海域，受到强降水与强风速两大气候因素影响，生态环境极为脆弱，对人类活动的影响极为敏感，容易出现土地沙化与水土流失等各种生态问题。其中水土流失极敏感区域主要分布在莱阳市、海阳市与招远市。招远市地势起伏明显，植被覆盖较低，且土壤抗侵蚀性极差，因此容易发生水土流失。莱阳市与海阳市虽然地势较缓，但植被覆盖度较低，加上南部沿海降雨更为充沛，降雨侵蚀力强，因此也更容易发生水土流失。土地沙化极敏感区域主要分布在莱阳市、招远市以及蓬莱、龙口、海阳等市的沿海区域。土地沙化主要与土壤质地、风沙天数和植被有关，烟台作为一个沿海城市，冬春两季风速较大，近海区域更容易发生土地沙化，其中招远市与莱阳市因为土壤质地的原因分布范围更为广泛。

3.3 生态红线

生态红线区域面积为 3 432.49 km²，约占烟台市总面积的 24.97%，具体分布如图 5(比例尺为 1:800 万)。烟台市生态红线区域主要分布在高地势区，其中以栖霞市牙山、蓬莱艾山、招远和龙口市交界的山脉为主，其次为牟平区的昆嵛山、莱州的云峰山与海阳的招虎山。其他区域如莱阳市因植被覆盖度较低且土壤质地敏感红线分布范围广泛且零散，而莱州湾与丁字湾因海岸线侵蚀影响造成沿海地区大面积区域被划入红线，禁止开发。这些地区包括了国家级、省级、市级的保护区、森林公园、地质公园以及市内生态功能极重要、生态环境极敏感区域，有着丰富的生物资源，对于维护烟台市的生态安全、保障烟台市的持续发展有着至关重要的作用，需进行强制性保护，禁止开发建设活动。一级管控区面积为 2 574.71 km²，约占烟台市总面积的 18.73%，主要分布在海阳市与牟平区，分布较为零散。这部分区域虽没有红线区域关键，但在生态环境保护中同样发挥着重要的作用，可进行适度开发，严格控制开发规模和功能；二级管控区面积为 2 459.24 km²，约占烟台市总面积的 17.89%，适宜进行适度规模的开发建

表 6 生态敏感性评价结果

Table 6 Assessment of ecological sensitivity

生态敏感性	水土流失			土地沙化		
	敏感性分值	面积/km ²	百分比/%	敏感性分值	面积/km ²	百分比/%
一般敏感	(1.49~2.92]	3 705.75	26.96	(2.27~2.99]	3 027.24	22.02
比较敏感	(2.92~3.95]	4 426.11	32.20	(2.99~3.94]	2 799.72	20.37
中度敏感	(3.95~4.77]	2 958.66	21.52	(3.94~5.19]	2 691.31	19.58
高度敏感	(4.77~5.53]	1 331.62	9.69	(5.19~6.02]	3 552.41	25.84
极重要	(5.53~7.75]	1 397.20	10.16	(6.02~6.84]	1 753.13	12.75

生态敏感性	海岸线侵蚀敏感性			生态敏感性		
	敏感性分值	面积/km ²	百分比/%	敏感性总分	面积/km ²	百分比/%
一般敏感	0	13 512.98	98.93	(1.00~2.38]	4 071.11	28.62
比较敏感		0	0	(2.38~3.79]	2 600.25	18.92
中度敏感		0	0	(3.79~5.10]	2 876.09	20.92
高度敏感		0	0	(5.10~7.02]	2 798.19	20.36
极重要	9	233.49	1.07	(7.02~9.00]	1 455.71	11.59

设活动，但仍需根据区域内的环境质量状况确定合理的发展方向和管制规则；三级管控区面积为 5 349.75 km²，约占烟台市总面积的 38.91%，生态环境功能较弱，生态系统相对不敏感，可进行开发建设活动，但不能过度开发。

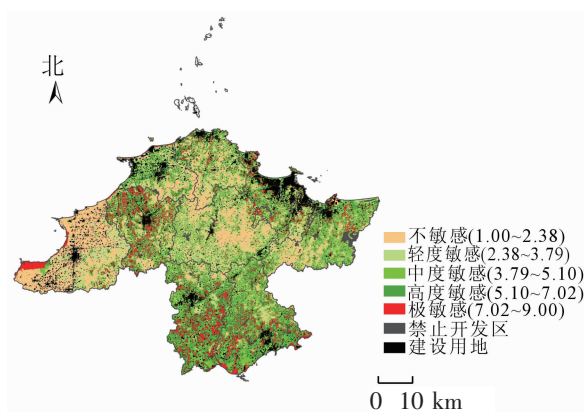


图 4 生态敏感性评价示意图

Figure 4 Assessment of ecological sensitivity

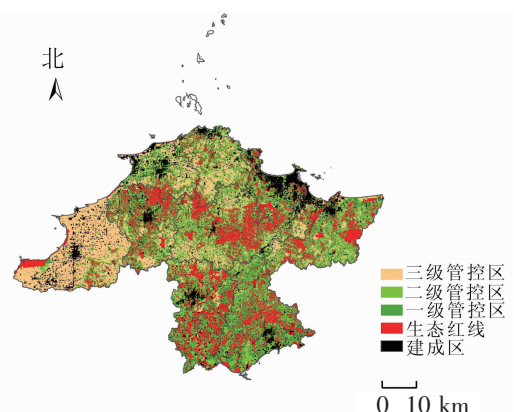


图 5 烟台市生态红线分布示意图

Figure 5 Ecological functional red line in Yantai

4 结论与讨论

本研究以烟台市为例，针对其位于沿海低山丘陵区的特点，基本采用定量分析方法从生态功能重要性与生态系统敏感性 2 个方面进行综合评价进而划定生态红线，探索了市级尺度生态红线划定的技术方法，为市级空间规划提供参考。烟台市生态红线主要分布在中部山地区域、南部地区与沿海地带。中部山地区域植被丰富，具有极强的生态功能，南部地区植被覆盖低且临近丁字湾，气候因素影响剧烈，生态系统易遭破坏，此外包括国家规定的保护区等。这些地区都是维护烟台市生态安全的关键，应受到严格保护。研究对其他地区的生态保护重要性等级也进行了划分，可为日后政府制定政策提供参考。

在划定过程中部分生态功能评价受到了数据不足的局限，且在进行综合评价时对各功能间的相互关系的研究还不够深入，生态红线的划定方法仍需进一步改善。此外，划定生态红线不可避免地基本农田红线、城市扩展边界发生冲突。本研究仅从生态保护角度出发，对于冲突的协调优化还未讨论，这将是日后研究的重点。

生态红线划定是一项涉及多学科的综合性工作，既需要生态学、规划学的理论基础，又需要遥感、地理信息系统等技术支撑。在基于生态保护重要性评价进行生态红线划定时，不同尺度、不同地区的指

标体系和划定方法上都存在差异, 对于不同地区如何根据其实际情况选取合适的功能类型与评价方法和指标将成为生态红线划定领域的研究方向。

5 参考文献

- [1] 林勇, 樊景凤, 温泉, 等. 生态红线划分的理论和技术[J]. 生态学报, 2016, **36**(5): 1244 – 1252.
LIN Yong, FAN Jingfeng, WEN Quan, *et al.* Primary exploration of ecological theories and technologies for delineation of ecological redline zones [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36**(5): 1244 – 1252.
- [2] 盛鸣. 从规划编制到政策设计: 深圳市基本生态控制线的实证研究与思考[J]. 城市规划学刊, 2010(7): 48 – 53.
SHENG Ming. From the planning formulation to policy design: empirical study and reflection on Shenzhen basic ecological control line [J]. *Urban Plan Forum*, 2010(7): 48 – 53.
- [3] 俞龙生, 李志琴, 梁志斌, 等. 广州南沙新区生态保护红线划分与管理框架[J]. 环境工程技术学报, 2014, **4**(5): 421 – 428.
YU Longsheng, LI Zhiqin, LIANG Zhibin, *et al.* Division and management framework of urban ecological protection red line: a case study in Nansha New District of Guangzhou City [J]. *J Environ Eng Technol*, 2014, **4**(5): 421 – 428.
- [4] 王云才, 吕东, 彭震伟, 等. 基于生态网络规划的生态红线划定研究: 以安徽省宣城市南漪湖地区为例[J]. 城市规划学刊, 2015(3): 28 – 35.
WANG Yuncai, LÜ Dong, PENG Zhenwei, *et al.* The demarcation of ecological red line based on ecological network planning: a case study of Nanyi Lake region in Anhui Province [J]. *Urban Plan Forum*, 2015(3): 28 – 35.
- [5] 许妍, 梁斌, 鲍晨光, 等. 渤海生态红线划定的指标体系与技术方法研究[J]. 海洋通报, 2013, **32**(4): 361 – 367.
XU Yan, LIANG Bin, BAO Chenguang, *et al.* Research on the index system and the technical methods of ecological red line division for the Bohai Sea [J]. *Marine Sci Bull*, 2013, **32**(4): 361 – 367.
- [6] 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. 资源科学, 2004, **26**(4): 153 – 159.
LI Miaomiao, WU Bingfang, YAN Changzhen, *et al.* Estimation of vegetation fraction in the upper basin of Miyun Reservoir by remote sensing [J]. *Resour Sci*, 2004, **26**(4): 153 – 159.
- [7] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力[J]. 植物生态学报, 2001, **25**(5): 603 – 608, 644.
PIAO Shilong, FANG Jingyun, GUO Qinghua. Application of CASA model to the estimation of Chinese terrestrial net primary productivity [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2001, **25**(5): 603 – 608, 644.
- [8] 王春菊, 汤小华. 基于 GIS 的水源涵养功能评价研究: 以福建省为例[J]. 安徽农业科学, 2007, **35**(28): 9090 – 9091.
WANG Chunju, TANG Xiaohua. Study on evaluating the water resource conservation function based on GIS technique [J]. *J Anhui Agric*, 2007, **35**(28): 9090 – 9091.
- [9] 饶恩明, 肖燚, 欧阳志云, 等. 海南岛生态系统土壤保持功能空间特征及影响因素[J]. 生态学报, 2013, **33**(3): 746 – 755.
RAO Enming, XIAO Yi, OUYANG Zhiyun, *et al.* Spatial characteristics of soil conservation service and its impact factors in Hainan Island [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(3): 746 – 755.
- [10] WISCHMEIER W H, MANNERING J V. Relation of soil properties to its erodibility [J]. *Pro Soil Sci Soc Am*, 1969, **33**(1): 131 – 137.
- [11] WISCHMEIER W H, SMITH D D. *Predicting Rainfall-Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains* [R]. [s. l.]: Agricultural Research Service, U. S. Department of Agriculture in Cooperation with Purdue Agricultural Experiment Station, 1965.
- [12] WISCHMEIER W H, SMITH D D. *Predicting Rainfall Erosion Losses* [R]. [s. l.]: Agricultural Research Service, U. S. Department of Agriculture in Cooperation with Purdue Agricultural Experiment Station, 1978.
- [13] MECOOL D K, BROWN L C, FOSTER G R, *et al.* Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation [J]. 1987, **30**(5): 1387 – 1396.
- [14] 刘宝元, 张科利, 焦菊英. 土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用[J]. 自然资源学报, 1999, **4**(4): 345 – 350.
LIU Baoyuan, ZHANG Keli, JIAO Juying. Soil erodibility and its use in soil erosion prediction model [J]. *J Nat Re-*

- sour, 1999, **4**(4): 345 – 350.
- [15] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, **14**(2): 19 – 24.
CAI Chongfa, DING Shuwen, SHI Zhihua, *et al.* Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed [J]. *J Soil Water Conserv*, 2000, **14**(2): 19 – 24.
- [16] 饶恩明, 肖燧, 欧阳志云. 中国湖库洪水调蓄功能评价[J]. 自然资源学报, 2014, **29**(8): 1356 – 1365.
RAO Enming, XIAO Yi, OUYANG Zhiyun. Assessment of flood regulation service of lakes and reservoirs in China [J]. *J Nat Resour*, 2014, **29**(8): 1356 – 1365.
- [17] 陈丹, 陈菁, 罗朝晖. 天然水资源价值评估的能值方法及应用[J]. 水利学报, 2006, **37**(10): 1188 – 1192.
CHEN Dan, CHEN Jing, LUO Zhaohui. Evaluation method of natural water resources based on energy theory and its application [J]. *J Hydraul Eng*, 2006, **37**(10): 1188 – 1192.
- [18] 车巧慧, 陶月赞, 周蜜, 等. 皮山河下游沙漠区洪水资源化成效分析[J]. 水资源保护, 2014, **30**(4): 57 – 60.
CHE Qiaohui, TAO Yuezan, ZHOU Mi, *et al.* Analysis of flood resources in desert area downstream of Pishan River [J]. *Water Resour Prot*, 2014, **30**(4): 57 – 60.
- [19] 周婷婷. 典型洪水调蓄区生态保护红线及其生态服务辐射效应研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2016.
ZHOU Tingting. *Research on Ecological Protection Red Line and Ecosystem Services Radiation Effect in Typical Flood Regulation and Storage Area* [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2016.
- [20] 赵同谦, 欧阳志云, 王效科, 等. 中国陆地地表水生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. 自然资源学报, 2003, **18**(4): 443 – 452.
ZHAO Tongqian, OUYANG Zhiyun, WANG Xiaoke, *et al.* Ecosystem services and their valuation of terrestrial surface water system in China [J]. *J Nat Resour*, 2003, **18**(4): 443 – 452.
- [21] 张云倩, 张晓祥, 陈振杰, 等. 基于 InVEST 模型的江苏海岸带生态系统碳储量时空变化研究[J]. 水土保持研究, 2016, **23**(3): 100 – 105, 111.
ZHANG Yunqian, ZHANG Xiaoxiang, CHEN Zhenjie, *et al.* Research on the spatiotemporal variation of carbon storage in coastal zone ecosystem of Jiangsu based on InVEST Model [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2016, **23**(3): 100 – 105, 111.
- [22] 黄卉. 基于 InVEST 模型的土地利用变化与碳储量研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2015.
HUANG Hui. *Research on Land Use/Land Cover Change and Carbon Storage based on InVEST Model* [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.
- [23] 刘成杰. 基于典型样地的山东省森林碳储量及碳密度研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
LIU Chengjie. *Forest Carbon Storage and Carbon Density in Shandong Province based on Typical Sample Plots* [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2014.
- [24] 崔传洋, 李建华, 冯燕, 等. 基于二类调查数据的县级森林碳储量及碳密度测算: 以山东省泗水县为例[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2017, **48**(2): 279 – 283.
CUI Chuanyang, LI Jianhua, FENG Yan, *et al.* Estimations on carbon storage and carbon density of forest resources based on the county forest management inventory: the case of Sishui County [J]. *J Shandong Agric Univ Nat Sci Ed*, 2017, **48**(2): 279 – 283.
- [25] 陈慧, 杜耘, 肖飞, 等. 汉江中游河谷平原植被指数时空变化及其与沙化土地动态的关联关系[J]. 长江流域资源与环境, 2013, **22**(9): 1221 – 1226.
CHEN Hui, DU Yun, XIAO Fei, *et al.* Relationship between temporal and spatial change of vegetation index and desertification land dynamic in the plain area of middle reaches of The Hanjiang River [J]. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2013, **22**(9): 1221 – 1226.