

基于土地利用与景观格局的生态保护红线 生态系统健康评价方法 ——以南京市为例

燕守广^{1,2}, 李辉¹, 李海东¹, 张银龙²

(1. 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042; 2. 南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037)

摘要: 生态保护红线是生态功能极其重要或生态环境极为敏感/脆弱的区域, 是生态保护的核心区域。以南京市生态保护红线为研究对象, 基于2000年、2005年、2010年和2015年四期土地利用/覆被和遥感影像等数据资料, 对生态保护红线的生态系统健康进行了评价。结果显示: (1) 2015年南京市生态保护红线内不同类型土地利用面积由大到小依次为: 林地、耕地、水域、人工表面、湿地和草地, 其中林地面积最大并逐年增长, 耕地面积逐年减少; (2) 2000—2015年南京市生态保护红线生态系统健康指数平均值为53.83, 生态保护红线的生态系统健康指数处于亚健康水平, 并呈现缓慢增长的趋势; (3) 陆域生态系统, 特别是森林植被覆盖度较大的区域, 生态系统健康指数较高, 相反, 水域生态系统的生态系统健康指数相对较低。

关键词: 生态保护红线; 生态系统健康评价; 土地利用; 景观格局; 生态系统服务; 人类胁迫

生态系统健康是生态系统稳定和可持续发展的根本特征, 是生态系统管理的重要内容^[1,2]。健康的生态系统具有维持其组织结构、自我调节和对胁迫恢复的能力^[3,4]。生态系统健康不仅表现在生态学意义上, 还表现在其所提供的生态系统服务功能及维持人类社会的福祉上^[5]。开展生态系统健康评价要更多地关注健康状态的动态趋势, 预测未来发展情景, 以便及时采取措施, 维护生态安全^[6]。

区域生态系统健康评价一直是宏观生态学与地理学方法应用的优势领域^[7]。通过对区域生态系统健康水平的诊断, 提出生态系统管理方案, 可以促进生态系统结构和功能的发展, 改善区域生态环境, 实现生态系统的可持续发展。然而, 由于生态系统的复杂性, 很难建立统一的指标体系来评价所有的生态系统。在生态系统健康评价方法上, Costanza^[8]基于生态系统的可持续能力提出了描述系统状态的三个指标: 活力 (Vigor)、组织结构 (Organization) 和恢复力 (Resilience)。Rapport等^[9]发展了生态系统健康的测量方法及公式, 并计算出生态系统健康的程度。近年来, 基于以上研究成果, 在生态系统的活力、组织结构与恢复力指数上的改进不断涌现^[10]。例如, 郭秀锐等^[11]和陈克龙等^[12]在活力、组织力和恢复力基础上, 增加生态系统服务功能和人群健康状况构建城市健康评价指标体系, 开展了城市生态系统健康评价; 何新等^[13]基于“压力—状态—响应”模型和“活力—组织—弹力—功能”理论, 评价了北京市平谷区土地生态系统健康状况;

收稿日期: 2019-03-04; 修订日期: 2019-06-19

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (GYZX190101); 国家重点研发计划项目 (2018YFD1100104)

作者简介: 燕守广 (1975-), 男, 江苏沛县人, 硕士, 副研究员, 研究方向为区域生态安全。E-mail: ysg@nies.org

通讯作者: 张银龙 (1963-), 男, 浙江绍兴人, 博士, 教授, 研究方向为环境生态学。E-mail: ecoenvylz@163.com

沙宏杰等^[14]通过耦合 TOPSIS 模型和 VOR 生态系统健康度量模型对江苏中部海岸新洋港至川东海岸段进行了应用评价；袁毛宁等^[10]将贡献力纳入评价指标，评价了广州市的生态系统健康状况；黄秋森等^[15]引入生态健康度和 VOR 模型将生态系统健康指标作为资源环境承载力评价的准则层，提出了基于弹簧模型的生态型地区资源环境承载力评价方法和社会经济数据离散化方法。

目前，在区域生态系统健康评价中，多以城市、省（市、县）域、流域等复合生态系统评价为主，而针对具有重要生态功能的自然生态系统评价较少。本文以南京市划定的生态保护红线为研究区域，基于土地利用/覆被和遥感影像等数据资料，通过构建生态系统健康评价指标，对以自然生态系统为主的生态保护红线进行评价，以为研究生态保护红线的生态安全、实施生态系统管理和有效保护提供参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

南京市位于长江下游地区，濒江近海，行政区域总面积为 6587 km²。其地貌属于宁镇丘陵地区，丘陵和岗地占 57.3%，低山占全市土地总面积的 3.5%，平原、洼地及河流湖泊占 39.2%。年平均温度 16 ℃，多年平均降雨量在 1100 mm 左右。南京市地处北亚热带季风气候区，具有落叶阔叶与常绿阔叶混交林的地带性植被，动植物资源丰富、种类繁多，生态系统类型多样。南京的森林生态系统沿境内的山地和丘陵分布，以江宁、溧水、浦口居多；湿地生态系统除长江之外，主要分布在高淳和溧水。

依据 2015 年土地利用遥感解译数据，南京市共有耕地 3202.7 km²，林地 851.4 km²，水域 781.5 km²，湿地 45.4 km²，草地 8.4 km²，其余为建设用地。从土地利用结构来看，耕地面积占比最大，占全市土地总面积的 48.6%，其次为建设用地。根据土地利用多年变化情况，南京市林地面积不断增加，耕地面积逐年减少，水域面积变化不大，特别是随着社会经济的迅速发展和人口的不断增长，建设用地不断扩张。

1.2 南京市生态保护红线

2013 年江苏省率先在全国划定生态保护红线（图 1），其中南京市生态保护红线共包含 12 种类型，总面积为 1553.63 km²，占南京市国土面积的 23.59%，其中，一级管控区面积为 424.31 km²，二级管控区面积为

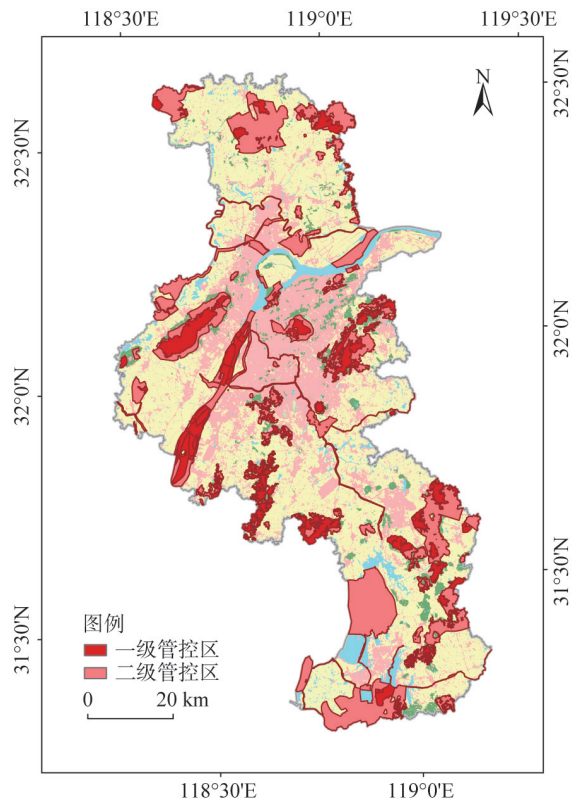


图 1 南京市生态保护红线分布
Fig. 1 Distribution of eco-redline in Nanjing

1129.32 km²，分别占生态保护红线总面积的27.31%和72.69%。

1.3 生态系统健康评价方法

从生态系统本身来讲，活力、组织和恢复力是反映生态系统健康的最基本内容。但生态系统健康的内涵也是相对的，从人类的角度来看，生态系统健康不仅仅是生态系统的可持续，还要能够更好地发挥其生态服务功能，促进人类的生产与可持续发展。包括维持生态系统服务和管理的选择、减少投入、对相邻系统的危害和人类健康影响等也逐步加入到生态系统健康评价的内容^[2,11]。

从近年来的研究成果来看，生态系统服务作为衡量生态系统健康的重要指标近年来已被逐步认同。生态系统服务功能的维持成为评价生态系统健康的一个重要原则^[16]。与此同时，从生态系统的观点出发，一个健康的生态系统是稳定和可持续的，在时间上能够维持它的组织结构和自我调节，并能维持对胁迫的恢复能力^[17]。因此，人类胁迫也是反映生态系统健康的重要因素。

综合上述研究成果，本文以活力、组织结构、恢复力、生态系统服务与人类胁迫等五个层面，构建生态保护红线的生态系统健康评价模型（表1）。在指标选择上，充分考虑指标体系的完备性，并避免指标之间的重复。活力层面，选择净初级生产力和生物丰度两个指标；组织结构层面，选择植被覆盖度、景观多样性、景观优势度和景观破碎度

表1 南京市生态保护红线生态系统健康评价指标

Table 1 Ecosystem health evaluation index of eco-redline in Nanjing

目标层	准则层	指标层	指标计算方法	权重
生态系统健康评价	活力	净初级生产力	采用CASA模型，计算公式为： $NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t)$	0.2344
		生物丰度	生物丰度指数= $A_{bio} \times (0.35 \times \text{林地} + 0.21 \times \text{草地} + 0.28 \times \text{水域湿地} + 0.11 \times \text{耕地} + 0.04 \times \text{建设用地} + 0.01 \times \text{未利用地}) / \text{区域面积}$ 。其中， A_{bio} 为生物丰度指数的归一化系数	0.1406
	组织结构	植被覆盖度	$F_v = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$	0.0536
		景观多样性	$SHDI = -\sum_{i=1}^k P_i \times \ln(P_i)$	0.0354
		景观优势度	$D = H_{max} + \sum_{i=1}^k P_i \times \ln(P_i)$	0.0091
		景观破碎度	$C = \frac{\sum n_i}{A}$	0.0241
	恢复力	生态弹性度	采用不同土地覆被/利用类型对生态恢复力的贡献和作用，分别赋以不同级别的生态弹性值，然后根据各类土地覆被类型，综合计算区域的生态系统恢复力 ^[18]	0.1458
	生态系统服务	生态系统服务价值	采用当量因子法，计算不同类型生态系统单位面积的生态系统服务价值，计算公式为： $ESV = \sum A_i \times VC_i$	0.1458
	人类胁迫	土地利用程度综合指数	$La = 100 \times \sum_{i=1}^n A_i \times C_i$	0.1215
		生态保护红线空间协调度	通过对生态保护红线保护需求和建设开发现状进行等级划分，建立互斥分类矩阵，计算生态保护红线空间的协调度	0.0868

四个指标；恢复力层面，选择生态系统弹性值作为生态系统的恢复力指标；生态系统服务层面，采用生态系统服务价值评价结果值作为生态系统服务指标；人类胁迫层面，选择土地利用程度综合指数和生态保护红线空间协调度两个指标。

在评价方法上，本文采用综合指数评价法评价生态保护红线的生态系统健康指数。评价模型为：

$$E = \sum_{i=1}^n Z_i \times W_i$$

式中： E 为生态保护红线的生态系统健康指数； Z_i 为第 i 个评价指标归一化后的值； W_i 为第 i 个评价指标的权重。

1.4 数据来源与处理

1.4.1 遥感数据

本文选用的遥感影像数据包括陆地卫星 Landsat-5 TM (Thematic Mapper)、Landsat-7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper plus)，以及 Landsat-8 OLI (Operational Land Imager) 和 TIRS (Thermal Infrared Sensor) 传感器影像。研究区卫星轨道号 120038，分辨率为 30 m×30 m，投影坐标系为 UTM，地理坐标系为 WGS84，累计获取影像数据 28 景，为了研究方便，其中云层覆盖度较大月份的影像，由相邻年份同月份影像替代。

1.4.2 气象数据

反演地表温度的气象数据基于南京市周边 4 个气象站（南京、浦口、六合、溧水）和 1 个辐射站。气象数据包括 2000—2015 年的月平均气温、月降水和月太阳总辐射，数据来源为中国气象科学数据共享服务网。为与遥感影像数据和土地利用/覆被数据叠加运算，采用克里金插值法将获取的各站点原始数据插值为栅格数据，将插值数据的分辨率、投影坐标系和地理坐标系与遥感数据等保持一致。

1.4.3 土地利用/覆被数据

土地利用/覆被数据来自 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年的 Landsat TM/ETM 和 HJ CCD 遥感数据，空间分辨率为 30 m，分类精度达 86% 以上。

1.5 指标权重与评价等级划分

1.5.1 指标权重的计算

采用层次分析法 (AHP) 计算南京市生态保护红线生态系统健康评价指标的权重。利用 YAAHP 软件构建评价模型。

1.5.2 生态系统健康等级划分

目前，生态系统健康评价领域尚无统一的生态系统健康尺度及划分标准，对此，综合前人研究成果，并根据南京市生态保护红线实际，结合专家建议，将生态保护红线生态系统健康等级划分为三级（表 2）。

表 2 生态系统健康评价等级

Table 2 Levels of ecosystem health index

生态系统健康等级	分级标准	健康状态
I	≥ 60	健康
II	[30~60)	亚健康
III	< 30	不健康

2 结果分析

2.1 土地利用与景观格局变化

2015 年南京市生态保护红线内不同类型土地利用面积由大到小依次为：林地 511.74 km²、耕地 456.96 km²、水域 432.58 km²、人工表面 118.0 km²、湿地 32.79 km²、草

地 1.56 km²。2000 年以来，生态保护红线内的林地面积持续增加，而耕地面积逐年减少。2015 年林地面积显著增加，已超过耕地成为生态保护红线内面积最大的生态系统类型。而水域面积总体比较稳定，在生态保护红线中的占比变化不大，湿地和草地的面积都很小。人工表面的占比也逐年增加，到 2015 年已达 118 km²，占比 7.6%。生态保护红线内的综合土地利用动态度持续增加，而土地利用程度综合指数则呈现逐渐下降的趋势。

自 2000 年以来，生态保护红线的香农多样性指数呈现持续增加的趋势，由 1.22 增加到 2015 年的 1.29，景观优势度则由 0.39 逐步下降到 0.32，表明南京市生态保护红线的土地利用斑块类型增加，斑块类型在景观中呈均衡化趋势分布。景观的异质化程度呈上升趋势，说明部分区域人类活动干扰在增大，自然生态环境的净化和维系能力下降^[9]。景观的破碎度 2005 年虽略有上升，但基本呈减小趋势，反映出从整体景观格局上，生态保护红线的景观斑块数量在减少，土地利用类型由分散逐渐走向整合，这有利于生态功能的有效发挥。

2.2 生态系统健康指数

2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年南京市生态保护红线生态系统健康指数平均值分别为 53.25、53.90、53.37 和 54.80，表明整个生态保护红线生态系统健康指数处于亚健康等级，并且生态系统健康指数基本呈现上升的趋势（图 2）。其中，亚健康等级所占面积比例最大，平均值为 54.46%；健康等级的面积比例平均值为 31.55%；生态系统健康指数为不健康的面积占比最小，占比平均值为 11.11%。与此同时，处于健康状态的生态保护红线能够保持较为稳定的状态，变化不明显，处于亚健康的生态保护红线面积比例有较为明显的下降态势，而处于不健康的生态保护红线面积比例则表现出上升趋势。由此可以看出，生态保护红线内生态环境状况较好的区域长期以来受到外界的干扰较小，基本能够保持稳定的状态，而生态环境较差的区域受到影响的范围在扩展。这也表明：一方面局部区域受到的影响范围在增加，另一方面，这种干扰和作用的强度在减小。

对比各行政区生态保护红线生态系统健康指数发现：南京市各行政区生态保护红线生态系统健康指数平均值在 38~66 区间内，各行政区的生态系统健康状况不同（图 3）。根据评价结果：六合区生态保护红线生态系统健康指数最低，2000 年、2005 年、2010 年

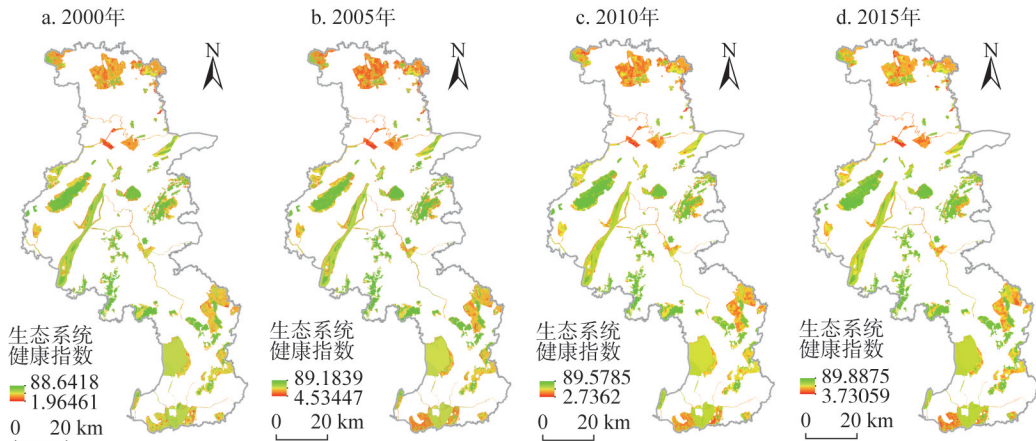


图2 南京市生态保护红线健康评价指数

Fig. 2 Ecosystem health index of eco-redline in Nanjing

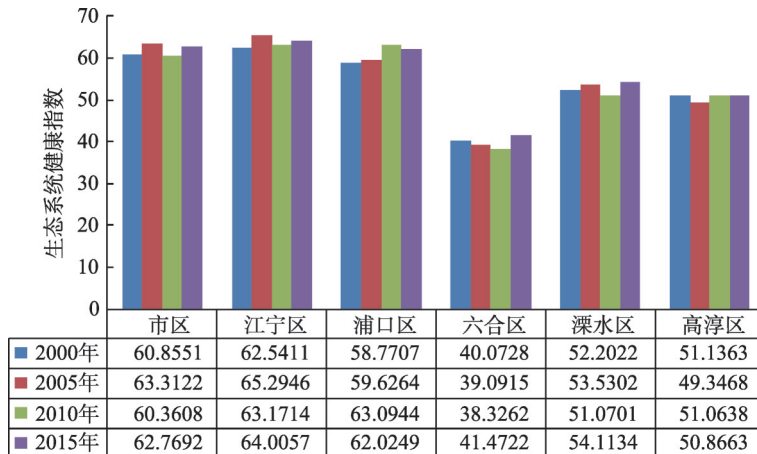


图3 南京市各区生态保护红线生态系统健康指数

Fig. 3 Ecosystem health indexes of eco-redline in different administrative regions

和2015年生态系统健康指数平均值分别为40.07、39.09、38.33、41.47；而江宁区生态保护红线生态系统健康指数最高，依次为60.86、63.31、60.36、62.77。市区和浦口区生态保护红线生态系统健康指数相对较高，而溧水区和高淳区生态保护红线生态系统健康指数则相对较低。根据各行政区评价结果，位于市区的生态保护红线虽然受到城市开发建设威胁的可能性较大，但这并不表示一定会对生态保护红线内生态系统的健康产生更大的影响。因此，只要管控好开发建设等人类活动的负面影响，建立良好的保护和监管机制，生态保护红线就能够得到有效的保护。

从时间变化上看：2000—2015年，除高淳区以外，各行政区生态保护红线生态系统健康指数整体上是增加的，特别是浦口区增加的幅度较大，由2000年的58.77增长到2015年的62.02。但也应看到，在这期间，各行政区生态保护红线生态系统健康指数并不是稳步增加的，而是出现明显的波动，这也充分说明生态保护红线的生态环境状况并不稳定，很容易受到外部环境的干扰。

根据生态系统健康指数统计，各类型生态保护红线生态系统健康指数良好，平均值为53.37，均达到了亚健康以上水平（图4）。特别是森林公园的生态系统健康指数最高，呈现不断上升的趋势，2000—2015年的四期生态系统健康指数分别为60.53、61.74、63.94、66.25，四个时期的平均值为63.12，达到健康水平。自然保护区自2000年以来生态系统健康指数均保持在57.18~57.78之间，变化不大，且十分稳定，表明自然保护区总体生态系统健康指数较高，生态环境较好，能够受到较好的保护，且人类活动干扰较小。饮用水水源保护区、重要水源涵养区、洪水调蓄区和清水通道维护区的得分虽然都能达到亚健康水平，但得分相对较低。

陆域生态系统，特别是森林植被覆盖度较大的区域，生态系统健康指数表现较好；相反，生态系统类型为水域或含有水体较多的生态保护红线生态系统健康指数表现相对差一些，充分反映出南京市水域生态系统和水环境问题相比之下较为突出。特别是近年来由于城市化进程加快，城市规模的不断扩大，水环境安全越来越需要警惕。

从变化趋势上看，12种生态红线类型中，森林公园、饮用水水源保护区、重要水源

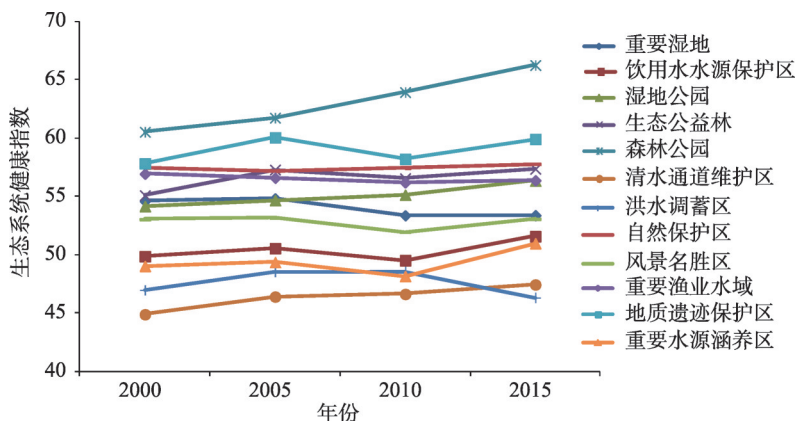


图4 不同类型生态保护红线生态系统健康指数变化趋势

Fig. 4 Change trend of ecosystem health index in different types of eco-redline

涵养区、生态公益林、湿地公园、地质遗迹保护区、清水通道维护区、自然保护区和风景名胜區等9种生态保护红线生态系统健康指数均呈现出不同程度的增长趋势。其中，森林公园呈现大幅增长，而自然保护区和风景名胜區增长并不明显。重要湿地、洪水调蓄区和重要渔业水域三种生态保护红线生态系统健康指数呈现下滑趋势。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 南京市生态保护红线内不同类型土地利用面积由大到小依次为：林地、耕地、水域、人工表面、湿地和草地。生态保护红线内林地面积持续增加，而耕地面积逐年减少，其他土地利用类型变化很小。

(2) 2000年、2005年、2010年和2015年南京市生态保护红线生态系统健康指数平均值分别为53.25、53.90、53.37和54.80，处于亚健康等级，基本呈现上升趋势。其中健康、亚健康和亚健康等级的生态保护红线平均占比分别为31.55%、54.46%和11.11%。各类型生态保护红线生态系统健康指数平均值为53.37，其中森林公园的生态系统健康指数最高。陆域生态系统的健康指数较高，而水域生态系统的健康指数较低。

(3) 南京市生态保护红线生态系统健康状况总体较好，并呈现不断向好的趋势。但在类型和区域上存在较为明显的差异。比如，从类型上看，森林公园和自然保护区等森林植被分布较高、保护和管理较为严格的陆域生态系统，生态系统健康状况保持较好，而生态保护红线内生态系统类型为水域或含有水体较多的区域，生态系统健康指数相对较低。由此可见，相较于林地、草地等陆域生态系统，河流、湖泊等水域生态系统是影响南京市生态安全的重要因素。

3.2 讨论

(1) 按照生态学理论，生态系统必需结构完整、生态过程稳定，维持良好的健康水平，生态功能才能正常发挥，生态安全才能得到保障^[20-23]，而维护生态安全的关键因素是确保生态系统维持在健康的水平。

区域生态系统健康是在时间上具有维持其空间结构与生态过程、自我调节与更新能

力和对胁迫的恢复能力,并能保障生态系统服务功能的持续、良好供给。在区域生态系统健康评价中,利用评价模型进行生态系统健康评价,其实质是对区域复合系统的健康评价,而非以自然生态系统为核心的健康评价,在相当程度上远离了区域生态系统健康评价的“生态”主旨^[24]。考虑到本文评价的生态保护红线是生态空间的关键区域,以自然生态系统为主,体现出生态系统的原生性、自然性和功能性等特点,其健康程度主要表现在生态系统能够持续而稳定的发展。鉴于此,本文基于生态系统健康最基本的活力、组织结构、恢复力三个指标,增加了生态系统服务和人类胁迫量个指标,构建了生态保护红线的生态系统健康评价指标体系,更多的是从自然生态系统的角度进行评价。

(2) 生态保护红线是近年才提出的新概念,是生态保护最重要、最核心的部分,是保障和维护区域生态安全的最小空间,是生态系统存续、保护关键物种、维持生态系统服务功能的最低要求,具有不可替代性和不可复制性^[25,26]。因此,开展生态保护红线的生态系统健康评价,对于维持生态平衡、提升生态功能、改善环境质量、维护生物多样性等具有极其重要的意义。

生态保护红线划定并严格保护的核心目标是保障区域的生态安全,实现对区域生态环境问题的有效控制和持续改善。因此,生态保护红线是按照禁止开发区进行保护和管理的,严格保护是红线划定后最重要的管控原则。但在已划定的生态保护红线内,存在部分采矿和建设用地等非生态用地,导致生态保护红线的破碎化、不连续等问题,并对生态系统健康造成严重影响。如何处理生态保护红线内的非生态用地,保持生态系统的完整性和连续性是保护好生态红线的关键。为此,应针对生态保护红线内的非生态用地和破碎化问题,开展调查与评估,制定非生态用地的退出机制和生态补偿措施。同时,以生态保护红线为核心,探讨不同类型区的生态过程—功能—格局的内在联系,构建基于生态红线的生态安全格局框架体系,保护、恢复和重建国土及区域尺度上关键生态系统的完整性,以及重要生态服务功能的可持续性^[27]。

参考文献(References):

- [1] 马克明,孔红梅,关文彬,等. 生态系统健康评价:方法与方向. 生态学报, 2001, 21(12): 2106-2116. [MA K M, KONG H M, GUAN W B, et al. Ecosystem health assessment: Methods and directions. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2106-2116.]
- [2] 肖风劲,欧阳华. 生态系统健康及其评价指标和方法. 自然资源学报, 2002, 17(2): 203-209. [XIAO F J, OUYANG H. Ecosystem health and its evolution indicator and method. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(2): 203-209.]
- [3] 任海, 邬建国, 彭少麟. 生态系统健康的评估. 热带地理, 2000, 20(4): 310-316. [REN H, WU J G, PENG S L. Evaluation and monitoring of ecosystem health. *Tropical Geography*, 2000, 20(4): 310-316.]
- [4] 李强, 李武艳, 赵焯, 等. 农村生态系统健康的基本内涵及评价体系探索. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1604-1608. [LI Q, LI W Y, ZHAO Y, et al. Exploration on the basic connotation and evaluation system of rural ecosystem health. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(4): 1604-1608.]
- [5] MEYER J L. Stream health: Incorporating the human dimension to advance stream ecology. *Journal of the North American Benthological Society*, 1997, 16(2): 439-447.
- [6] SU M R, FATH B D, YANG Z F. Urban ecosystem health assessment: A review. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(12): 2425-2434.
- [7] 刘焱序, 彭建, 汪安, 等. 生态系统健康研究进展. 生态学报, 2015, 35(18): 5920-5930. [LIU Y X, PENG J, WANG A, et al. New research progress and trends in ecosystem health. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(18): 5920-5930.]
- [8] COSTANZA R. Toward an operational definition of ecosystem health. In: COSTANZA R, NORTON B G, HASKELL B

- D, eds. *Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management*. Washinton D C: Island Press, 1992: 239-256.
- [9] RAPPORT D J, CONSTANZA R, MCMICHAELD A J. Assessing ecosystem health. *Trends in Ecology & Evolution*, 1998, 13: 397-402.
- [10] 袁毛宁, 刘焱序, 王曼, 等. 基于“活力—组织力—恢复力—贡献力”框架的广州市生态系统健康评估. *生态学杂志*, 2019, 38(4): 1249-1257. [YUAN M N, LIU Y X, WANG M, et al. Ecosystem health assessment based on the framework of vigor, organization, resilience and contribution in Guangzhou city. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(4): 1249-1257.]
- [11] 郭秀锐, 杨居荣, 毛显强. 城市生态系统健康评价初探. *中国环境科学*, 2002, 22(6): 525-529. [GUO X R, YANG J R, MAO X Q. Primary studies on urban ecosystem health assessment. *China Environmental Science*, 2002, 22(6): 525-529.]
- [12] 陈克龙, 苏茂新, 李双成, 等. 西宁市城市生态系统健康评价. *地理研究*, 2010, 29(2): 214-222. [CHEN K L, SU M X, LI S C, et al. The health assessment of the urban ecosystem of Xining city. *Geographical Research*, 2010, 29(2): 214-222.]
- [13] 何新, 姜广辉, 张瑞娟, 等. 基于PSR模型的土地生态系统健康时空变化分析: 以北京市平谷区为例. *自然资源学报*, 2015, 30(12): 2057-2068. [HE X, JIANG G H, ZHANG R J, et al. Temporal and spatial variation of land ecosystem health based on the Pressure-State-Response model: A case study of Pinggu district, Beijing. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(12): 2057-2068.]
- [14] 沙宏杰, 张东, 施顺杰, 等. 基于耦合模型和遥感技术的江苏中部海岸带生态系统健康评价. *生态学报*, 2018, 38(19): 7102-7112. [SHA H J, ZHANG D, SHI S J, et al. Ecosystem health assessment of coastal zone in central Jiangsu province based on coupling model and remote sensing technology. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(19): 7102-7112.]
- [15] 黄秋森, 赵岩, 许新宜, 等. 基于弹簧模型的资源环境承载力评价及应用: 以内蒙古自治区陈巴尔虎旗为例. *自然资源学报*, 2018, 33(1): 173-184. [HUANG Q S, ZHAO Y, XU X Y, et al. Evaluation of resources and environmental carrying capacity based on Spring model: Taking Chen Barag Banner in Inner Mongolia as an example. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(1): 173-184.]
- [16] REN H, WU J G, PENG S L. Evaluation and monitoring of ecosystem health. *Tropical Geography*, 2000, 20(4): 310-316.
- [17] 傅伯杰, 刘世梁, 马克明. 生态系统综合评价的内容与方法. *生态学报*, 2001, 21(11): 1885-1892. [FU B J, LIU S L, MA K M. The contents and methods of integrated ecosystem assessment (IEA). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(11): 1885-1892.]
- [18] 刘明华, 董贵华. RS和GIS支持下的秦皇岛地区生态系统健康评价. *地理研究*, 2006, 25(5): 930-938. [LIU M H, DONG G H. Ecosystem health assessment and driving force analysis in Qinhuangdao area based on RS & GIS. *Geographical Research*, 2006, 25(5): 930-938.]
- [19] 史培军, 潘耀忠, 陈晋, 等. 深圳市土地利用覆盖变化与生态环境安全分析. *自然资源学报*, 1999, 14(4): 293-299. [SHI P J, PAN Y Z, CHEN J, et al. Land use/cover change and environmental security in Shenzhen region. *Journal of Natural Resources*, 1999, 14(4): 293-299.]
- [20] DATOR J. From resource scarcity to ecological security: Exploring new limits to growth. *Technological Forecasting and Social Change*, 2006, 73(8): 1051-1056.
- [21] RAPPORT D J, BOHM G, BUCKINGHAM D, et al. Ecosystem health: The concept, the ISEH, and the important tasks ahead. *Ecosystem Health*, 1999, 5(2): 82-90.
- [22] SCHAEFFER D J, HENRICKS E E, KERSTER H W. Ecosystem health: I. Measuring ecosystem health. *Environmental Management*, 1988, 12(4): 445-455.
- [23] COSTANZA R. Ecosystem health and ecological engineering. *Ecological Engineering*, 2012, 45: 24-29.
- [24] 彭建, 王仰麟, 吴健生, 等. 区域生态系统健康评价: 研究方法与发展. *生态学报*, 2007, 27(11): 4877-4885. [PENG J, WANG Y L, WU J S, et al. Evaluation for regional ecosystem health: Methodology and research progress. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4877-4885.]
- [25] 高吉喜, 邹长新, 郑好. 推进生态保护红线落地保障生态文明制度建设. *环境保护*, 2015, 43(11): 26-29. [GAO J X, ZOU C X, ZHENG H. To promote the ecological protection red line and guarantee the construction of ecological civili-

zation system. *Environmental Protection*, 2015, 43(11): 26-29.]

- [26] 邹长新, 王丽霞, 刘军会. 论生态保护红线的类型划分与管控. *生物多样性*, 2015, 23(6): 716-724. [ZOU C X, WANG L X, LIU J H. Classification and management of ecological protection redlines in China. *Biodiversity Science*, 2015, 23(6): 716-724.]
- [27] 徐德琳, 邹长新, 徐梦佳, 等. 基于生态保护红线的生态安全格局构建. *生物多样性*, 2015, 23(6): 740-746. [XU D L, ZOU C X, XU M J, et al. Ecological security pattern construction based on ecological protection redlines. *Biodiversity Science*, 2015, 23(6): 740-746.]

Ecosystem health assessment method of eco-redline based on land use and landscape pattern in Nanjing

YAN Shou-guang^{1,2}, LI Hui¹, LI Hai-dong¹, ZHANG Yin-long²

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

2. College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Ecological conservation redline (eco-redline), the region with special and important ecological functions in the ecological space, must be strictly protected. According to the theory of ecology, only in a well-structured and healthy ecosystem, can the ecological function be brought into full play and the ecological security be guaranteed. Therefore, the ecosystem health of eco-redline is the basis of maintaining regional ecological security. Based on the data of land use/cover and remote sensing images in years of 2000, 2005, 2010 and 2015, this paper evaluated the ecosystem health of the eco-redline in Nanjing from five aspects: vigor, organization, resilience, ecosystem service function and anthropogenic stress. The results show that: (1) The areas of forest land, farmland, water bodies, construction land, wetland and grassland in eco-redline in the study area were 511.74 km², 456.96 km², 432.58 km², 118.0 km², 32.79 km² and 1.56 km², respectively. The area of forest land continued to increase, while that of farmland decreased gradually. (2) From 2000 to 2015, the average ecosystem health index of eco-redline in Nanjing was 53.83, above the sub-health level, and showing a slow growth trend. (3) The ecosystem health index of terrestrial ecosystem was higher, especially in the areas with large forest vegetation coverage, compared with aquatic ecosystem.

Keywords: ecological conservation redline; ecosystem health assessment; land use; landscape pattern; ecosystem service; anthropogenic stress