

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.02.011

基于综合重要度评价的生态空间网络关键节点识别

莫振淳, 傅丽华, 彭耀辉, 谢美

(湖南工业大学 城市与环境学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 借助 Pajek 软件, 利用已有的数据提取生态空间网络拓扑模型, 进行节点综合重要度评价, 以评价结果为依据对生态空间网络关键节点进行识别, 将识别结果与文献 [9] 的研究结果作对比分析。研究表明: 节点综合重要度评价提升了识别生态空间网络关键节点的全面性和细致性; 关键节点不仅在网络结构中具有较高的中心度, 且通常位于生态系统服务价值较高的生态源区域。生态空间网络关键节点的识别探究, 对提高生态规划关键区域保护的针对性、维持生态空间网络稳定及保障生态功能有着积极作用。

关键词: 综合重要度; 生态空间网络; 关键节点

中图分类号: P901

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)02-0064-06

Identification of Ecological Space Network Key Nodes Based on a Comprehensive Importance Evaluation

MO Zhenchun, FU Lihua, PENG Yaohui, XIE Mei

(College of Urban and Environmental Sciences, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: An ecological space network topology model can be extracted from the current data by using Pajek software, followed by an importance evaluation of the comprehensive key nodes. On the basis of the evaluation results, the identification of the ecological space network key nodes can be achieved, with a comparison made between the recognition results and the documented results, with the key nodes having greater centrality in the network structure, as well as a consistent location in the ecologically-sourced areas of high ecosystem service value. Researches on the identification of key nodes in the ecological network play a positive role in the process of improving the pertinence of the key areas of ecological planning, maintaining the stability of the ecological network and ensuring the operation of ecological functions.

Keywords: comprehensive importance evaluation; ecological space network; key node

0 引言

随着城镇化进程的加快, 一些重要的生态廊道被隔断, 生物栖息地被蚕食, 生态节点功能丧失, 导致生态空间网络稳定性降低, 直接影响生态系统

功能的发挥, 使生态安全格局受到胁迫。生态空间网络通过廊道、节点将核心斑块连接起来, 实现生态系统的物质和能量流动^[1-2]。生态节点是生态空间网络的重要组成部分, 是维持生态空间网络稳定和

收稿日期: 2017-05-18

作者简介: 莫振淳 (1993-), 女, 广西南丹人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为景观与生态设计,

E-mail: 721692388@qq.com

通信作者: 傅丽华 (1971-), 女, 湖南永州人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事景观生态与土地利用方面的研究,

E-mail: lihuaf88@163.com

生态系统运转的关键。现有研究多通过最小路径法生成生态空间网络廊道, 将廊道交汇处定为生态节点, 并未对节点重要性作进一步分析^[3-4]。对于节点重要性评价倾向于运用单一的节点中心度指标或由主观判断得出, 并未考虑节点自身的生态学意义, 缺乏一定的合理性^[5-8]。

本文借助 Pajek 4.09 软件, 在张远景等^[9]研究的生态空间网络图上, 进行拓扑网络模型提取, 选取点度、中介度、紧密度、特征向量度以及节点生态系统服务功能等级值等指标, 对生态空间网络节点重要性进行综合评价, 进而识别出该区域生态空间网络的关键节点, 并通过实际案例的研究结果来验证方法的准确性。

1 相关概念

1.1 生态节点

生态节点(也称歇脚石)是指在生态网络中连接相邻生态斑块并对生态流运行起关键作用的点, 在一定景观介质表面上, 生态节点为廊道的相交点或转折点。生态节点的建设将有效地提高区域景观整体的连通程度, 促进生态功能的健康循环^[5]。

1.2 景观中心度

景观中心度的概念源于图论及景观生态学理论的整合, 是关于节点在生态空间网络中心性位置的测度。景观中心度反映了节点在生态网络结构中的位置或优势的差异, 为揭示复杂的网络结构关系提供了一种直观数量化的表达方式^[10]。通过对生态空间网络中的“斑块”“节点”“廊道”等景观要素的中心度分析, 解决生态空间网络结构中关键要素的识别与定位, 从而为生态空间网络的构建与保护提供更为明确的依据。

2 节点重要度评价指标及模型

不同的节点中心度可以反映节点在网络中的重要程度, 但节点中心度并不含生态学意义。因此, 本文在研究中引入节点生态系统服务功能指标, 通过节点中心度以及节点生态系统服务功能等级, 综合判定生态空间网络的关键节点。

2.1 节点中心度

根据生态空间网络特点, 节点中心度的相关指标可以反映网络要素在网络组织中的整体结构特征^[11-12]。节点中心度衡量指标通常选用紧密度、中介度、点度和特征向量度等, 用于揭示网络中具有连接桥作用的节点, 从而发现网络连接中的关键点或脆弱点。

1) 点度。点度是指网络结构中节点*i*相连的边数。节点点度越高, 表明该节点可供调用的生态资源量越多, 生态物种通过该节点进行转移、传播的可能性越大。节点*i*的点度表达式为

$$K_i = \sum_{j \in N} e_{ij}, \quad (1)$$

式中: 节点*j*为网络中与节点*i*相邻的任意节点;

e_{ij} 为节点*i*与*j*之间边的数量。

2) 紧密度。紧密度指网络中节点*i*到其他所有点最短距离的总和^[13]。它主要反映网络中特定节点与其他节点间的功能联系程度, 其值越大说明节点间功能联系度越高。当生态空间网络中大多数节点具有较高的紧密度时, 表明有机体或生态过程在网络中更易扩散。节点*i*的紧密度表达式为

$$C_i = \sum_{t \in N} d_{it}, \quad (2)$$

式中 d_{it} 为节点*i*到网络中任意节点*t*的最短距离。

3) 中介度。中介度是指网络中所有节点对的最短路径中, 经过节点*i*的路径数量与所有最短路径数量的比。中介度值越大, 表示该节点参与网络中生态信息传播程度越高, 经过该点的生态流的比例越大。若中介度较大的节点缺失, 将有可能导致生态信息传播效率大幅降低, 严重时可能致使整个网络瘫痪。节点*i*的中介度表达式为

$$D_i = \sum_{s \neq t \in N} \frac{g_{st}}{g_{st}}, \quad (3)$$

式中: g_{st} 为任意两节点*s*与*t*的最短路径的数量; g_i 为任意两节点*s*与*t*的最短路径中通过节点*i*的数量。

4) 特征向量度。特征向量来源于数学的一个基本概念, 在景观生态学中可理解为若一个节点*i*与其他节点联系越多, 且与其联系的节点越是处于中心位置时, 则节点*i*的特征向量度越大。特征向量度的大小不仅代表节点重要程度, 同时还表明该节点对生态功能发挥的影响力大小。本研究将借助 Pajek 4.09 软件对节点的特征向量度进行计算。

2.2 节点生态系统服务功能等级

生态系统服务价值可用来度量生态系统的生态服务产出^[14]。区域生态系统服务价值的大小, 在一定程度上反映了相应节点在网络中的重要程度。本文通过节点所处区域的生态系统服务价值大小来确定节点生态系统服务功能等级, 节点所处区域的生态系统服务价值越高, 则表示该节点生态系统服务功能等级越高。

2.3 节点综合重要度评价模型

生态空间网络关键节点的识别应同时考虑节点

中心度的大小及节点生态系统服务功能的强弱。因此,本研究采用节点综合重要度指标来评价节点在生态空间网络中的重要程度,借此判定生态空间网络的关键节点。综合重要度评价模型定义为

$$Q_i = \alpha K_i + \beta C_i + \gamma D_i + \lambda H_i + \mu E_i, \quad (4)$$

式中: Q_i 为节点 i 的综合重要度;

H_i 为节点 i 的特征向量度;

E_i 为节点 i 的生态系统服务功能等级值;

α 、 β 、 γ 、 λ 、 μ 分别为各项指标的权重值。

3 实证研究

3.1 数据来源与处理

运用 Pajek 4.09 软件,从张远景等^[9]的研究数据(见图1)中提取拓扑网络模型,即对已有的生态空间网络图进行网络模型提取。将哈尔滨市生态空间网络的24个生态节点及31条生态廊道的数据文件导入 Pajek,通过 Draw 命令得到拓扑网络模型,如图2所示。

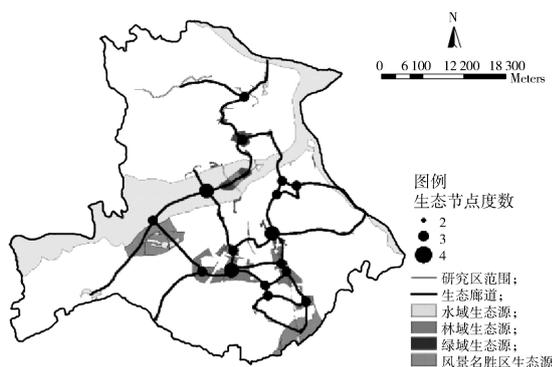


图1 哈尔滨市生态空间网络图

Fig. 1 Network diagram of the ecological space network in Harbin

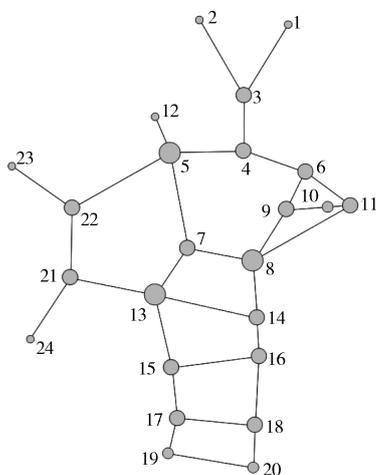


图2 拓扑网络模型提取结果

Fig. 2 Extraction results of the topology network model

3.2 节点综合重要度指标与权重计算

首先,计算出生态空间网络节点的点度、紧密度、中介度、特征向量度、节点生态系统服务功能等级。其次,运用熵权法对选取的5个指标进行权重计算。接着,运用节点综合重要度评价模型,计算得出节点综合重要度,通过节点综合重要度识别出生态空间网络的关键节点。最后,将本文的研究结果与张远景等关于哈尔滨市生态空间网络节点评价的结果^[9]进行对比分析。

3.2.1 节点中心度计算

运用 Pajek 4.09 软件中的 Network>Create Vector>Centrality 命令下的 Degree、Closeness、Betweenness、Hubs-Authorities,分别计算网络节点的点度、紧密度、中介度和特征向量度,结果如表1所示。

表1 网络节点的点度、紧密度、中介度、特征向量度计算结果

Table 1 Calculation results of the node degree, compactness, betweenness centrality and eigenvector degree of network nodes

节点标号	点度	紧密度	中介度	特征向量度
1	1	0.20	0.00	0.396
2	1	0.20	0.00	0.367
3	3	0.25	0.17	0.349
4	3	0.32	0.29	0.307
5	4	0.35	0.33	0.274
6	3	0.29	0.11	0.260
7	3	0.38	0.25	0.260
8	4	0.34	0.24	0.206
9	3	0.30	0.08	0.195
10	2	0.24	0.00	0.188
11	3	0.30	0.08	0.171
12	1	0.26	0.00	0.156
13	4	0.37	0.33	0.154
14	3	0.33	0.20	0.146
15	3	0.31	0.20	0.134
16	3	0.28	0.15	0.075
17	3	0.25	0.11	0.072
18	3	0.24	0.09	0.070
19	2	0.21	0.01	0.066
20	2	0.20	0.01	0.065
21	3	0.32	0.15	0.046
22	3	0.32	0.14	0.016
23	1	0.24	0.00	0.007
24	1	0.24	0.00	0.007

3.2.2 节点生态系统服务功能等级计算

参考已有研究^[15-17],依据区域的生态系统服务功能价值,运用 Delphi 法对不同生态系统节点的服务功能进行等级赋值,等级值由大到小分别为4,3,2,1,数值越高,表明服务功能越强。各节点生态系统服务功能等级结果如表2所示。

表 2 节点生态系统服务功能等级

Table 2 Node ecosystem service function levels

节点标号	所处区域	生态系统服务功能等级值
1, 2, 3, 5, 6, 9, 10, 11, 22, 23	林地	4
7, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 24	水域	3
20	风景名胜區	2
4, 8	绿地	1

3.2.3 指标权重计算

熵权法是一种较为客观的赋权方法, 主要根据各指标对决策所贡献的有效信息量来决定指标的权重。参照贾艳红等^[18]所采用的方法对各指标权重进行计算, 结果如表 3 所示。

表 3 节点重要度评价指标的权重值

Table 3 Weight values of node importance evaluation indexes

评价指标	点度	紧密度	中介度	特征向量度	节点生态系统服务功能等级
权重值	0.203	0.205	0.190	0.197	0.204

3.3 关键节点识别

3.3.1 节点综合重要度评价

将节点的点度、紧密度、中介度、特征向量度和节点生态系统服务功能等级值等指标标准化后, 根据表 3 的权重值按公式 (4) 进行加权计算, 最后经标准化处理后得出节点综合重要度, 如表 4 所示。

表 4 节点综合重要度评价结果

Table 4 Results of node comprehensive importance evaluation

节点标号	点度	紧密度	中介度	特征向量度	生态服务功能等级值	综合重要度
1	-1.625	-1.482	-1.109	1.965	-0.236	-0.506
2	-1.625	-1.482	-1.109	1.718	-0.236	-0.555
3	0.428	-0.565	0.430	1.564	-0.236	0.313
4	0.428	0.718	1.516	1.204	-2.499	0.250
5	1.454	1.268	1.878	0.922	-0.236	1.047
6	0.428	0.168	-0.113	0.803	-0.236	0.210
7	0.428	1.819	1.154	0.803	0.896	1.021
8	1.454	1.085	1.064	0.341	-2.499	0.277
9	0.428	0.352	-0.385	0.247	-0.236	0.086
10	-0.599	-0.749	-1.109	0.187	-0.236	-0.497
11	0.428	0.352	-0.385	0.042	-0.236	0.046
12	-1.625	-0.382	-1.109	-0.087	-0.236	-0.685
13	1.454	1.635	1.878	-0.104	0.896	1.151
14	0.428	0.902	0.702	-0.172	0.896	0.554
15	0.428	0.535	0.702	-0.275	0.896	0.459
16	0.428	-0.015	0.249	-0.779	0.896	0.160
17	0.428	-0.565	-0.113	-0.805	0.896	-0.026
18	0.428	-0.749	-0.294	-0.822	0.896	-0.102
19	-0.599	-1.299	-1.018	-0.856	0.896	-0.568
20	-0.599	-1.482	-1.018	-0.865	-1.367	-1.069
21	0.428	0.718	0.249	-1.027	0.896	0.262
22	0.428	0.718	0.158	-1.284	-0.236	-0.037
23	-1.625	-0.749	-1.109	-1.361	-0.236	-1.011
24	-1.625	-0.749	-1.109	-1.361	0.896	-0.780

通过节点综合重要度, 判断出生态空间网络的关键节点。

3.3.2 节点重要度等级划分

运用 K-means 分层聚类分析法, 将节点综合重要度进行等级划分, 结果如表 5 所示。

表 5 节点综合重要度分层聚类结果

Table 5 Hierarchical clustering results of node comprehensive importance

等级	最终聚类中心	节点数量
1	-0.708 9	8
2	-0.006 6	5
3	0.310 6	8
4	1.073 0	3

根据分层聚类结果, 将综合重要度按大到小分为 4 个等级 (见表 6), 等级越高代表重要度越高。

表 6 节点重要度等级划分

Table 6 Gradation of node importance evaluation

节点序号	综合重要度	等级	重要性描述
13	1.151		
5	1.047	四级	高
7	1.021		
14	0.554		
15	0.459		
3	0.313		
8	0.277	三级	一般
21	0.262		
4	0.250		
6	0.210		
16	0.160		
9	0.086		
11	0.046		
17	-0.026	二级	一般
22	-0.037		
18	-0.102		
10	-0.497		
1	-0.506		
2	-0.555		
19	-0.568	一级	低
12	-0.685		
24	-0.780		
23	-1.011		
20	-1.069		

3.3.3 网络关键节点分析

从表 6 可以看出, 该生态空间网络节点中, 重要性高的节点数量较少, 仅占全部网络节点数的 1/8; 重要性一般的节点数量较多, 约为网络节点总数的一半; 而重要性低的节点数量则介于两者之间。

从生态空间网络结构上看, 重要性高的节点均位于网络的中心位置, 不仅有多条廊道从该节点通过, 且与较多重要功能节点有着紧密的联系。从生态功能上看, 重要性高的节点均位于生态系统服务价值较高

的区域,在生态空间网络中担负着重要的生态信息传播功能。

因此,重要性高的节点应是生态空间网络的关键节点,针对这类节点的保护有助于提高区域生态保护的针对性,有利于维持生态空间网络的稳定,保证区域生态功能的发挥。

3.4 两种分析结果比较

将张远景等^[9]关于哈尔滨市生态空间网络节点重要性评价结果与本文的综合重要度评价结果进行对比分析,结果如表7所示。

表7 两种分析结果比较

Table 7 Comparison between two analytical results

本文研究结果		文献[9]研究结果	
节点序号	重要度等级	节点序号	重要度等级
13	4	13	4
5	4	5	4
7	4	8	4
14	3	14	3
15	3	15	3
3	3	3	3
8	3	18	3
21	3	21	3
4	3	4	3
6	3	6	3
16	3	16	3
9	2	9	3
11	2	11	3
17	2	17	3
22	2	22	3
18	2	7	3
10	1	10	2
19	1	19	2
20	1	20	2
1	1	1	1
12	1	12	1
24	1	24	1
23	1	23	1
2	1	2	1

从表7可以看出,重要度等级排序出现差异的节点为7,8,10,18,19,20。产生该差异的原因主要是由于本文所采用的研究方法不仅考虑了节点的点度,同时也注意了节点在网络结构中起到的其他作用,以及节点所具有的生态系统服务功能的差异,较为全面地考虑了节点在网络中的重要性。

对比出现差异的节点可以发现,本文所采用的研究方法更接近区域实际情况。例如,对比节点7与节点8,虽然两者均处于网络结构的中心位置,且节点中心度指标大小相近,但由于节点7处于林地生态源区,而节点8处于绿地生态源区,节点7在整个生态空间网络中应承担着更为重要的生态功能。因此,

节点7的重要度等级应高于节点8的重要度等级。

而对比相同重要度等级的节点,本文所采用的方法得出的结果更为细致,即根据节点综合重要度,可以在同一重要度等级中识别出更为关键的节点。

综合以上分析,本文所采用的方法得出的结果,相对而言能较全面地说明节点在生态空间网络中的重要性,且所得数据更为精确。

4 结语

本研究在评价节点重要度时,特别考虑了节点自身的生态系统服务功能大小,通过综合重要度评价模型,对生态空间网络关键节点进行了识别,并运用对比分析对本文研究结果进行了验证。结果显示生态空间网络关键点可通过节点综合重要度评价模型进行识别,且与采用单一点度指标进行节点重要度评价相比,评价结果更为全面、科学。但研究并未考虑生态空间网络中其他构成要素对网络的影响,且节点生态系统服务功能等级值的计算较为粗略。在后续研究中应重点考虑不同区域的生态系统服务价值的差异性,并进一步考虑网络中其他构成要素的影响。

参考文献:

- [1] JONGMAN R H G. Nature Conservation Planning in Europe: Developing Ecological Networks[J]. *Landscape and Urban Planning*, 1995, 32(3): 169-183.
- [2] 傅伯杰,陈利顶,马克明,等.景观生态学原理及应用[M].2版.北京:科学出版社,2011:79-86.
FU Bojie, CHEN Liding, MA Keming, et al. *Landscape Ecology: Principles and Applications*[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2011: 79-86.
- [3] 许峰,尹海伟,孔繁花,等.基于MSPA与最小路径方法的巴中西部新城生态网络构建[J].*生态学报*, 2015, 35(19): 6425-6434.
XU Feng, YIN Haiwei, KONG Fanhua, et al. *Developing Ecological Networks Based on MSPA and the Least-Cost Path Method: A Case Study in Bazhong Western New District*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(19): 6425-6434.
- [4] 刘晓芬.平潭岛生态功能网络构建研究[D].福州:福建师范大学,2012.
LIU Xiaofen. *Research on the Construction of Urban Ecological Function Network in Pingtan Island*[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2012.
- [5] 许文雯,孙翔,朱晓东,等.基于生态网络分析的南京主城区重要生态斑块识别[J].*生态学报*, 2012, 32(4): 1264-1272.

- XU Wenwen, SUN Xiang, ZHU Xiaodong, et al. Recognition of Important Ecological Nodes Based on Ecological Networks Analysis: A Case Study of Urban District of Nanjing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(4): 1264–1272.
- [6] 陈剑阳, 尹海伟, 孔繁花, 等. 环太湖复合型生态网络构建[J]. *生态学报*, 2015, 35(9): 3113–3123.
CHEN Jianyang, YIN Haiwei, KONG Fanhua, et al. The Complex Eco-Network Development Around Taihu Lake, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(9): 3113–3123.
- [7] 尹海伟, 孔繁花, 祁毅, 等. 湖南省城市群生态网络构建与优化[J]. *生态学报*, 2011, 31(10): 2863–2874.
YIN Haiwei, KONG Fanhua, QI Yi, et al. Developing and Optimizing Ecological Networks in Urban Agglomeration of Hunan Province China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(10): 2863–2874.
- [8] 张小飞, 王仰麟, 李正国, 等. 区域尺度生态功能网络构建: 以中国台湾岛为例[J]. *地理科学进展*, 2007, 26(3): 18–28.
ZHANG Xiaofei, WANG Yanglin, LI Zhengguo, et al. Construction of Ecological Function Network in Regional Scale: A Case Study in Taiwan Island[J]. *Progress in Geography*, 2007, 26(3): 18–28.
- [9] 张远景, 柳清, 刘海礁. 城市生态用地空间连接度评价: 以哈尔滨为例[J]. *城市发展研究*, 2015, 22(9): 15–22.
ZHANG Yuanjing, LIU Qing, LIU Haijiao. The Space Connectivity Evaluation of the Urban Ecological Land: Taking Harbin as an Example[J]. *Urban Studies*, 2015, 22(9): 15–22.
- [10] 张蕾, 苏里, 汪景宽, 等. 基于景观生态学的鞍山市生态网络构建[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(5): 1337–1343.
ZHANG Lei, SU Li, WANG Jingkuan, et al. Establishment of Ecological Network Based on Landscape Ecology in Anshan[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(5): 1337–1343.
- [11] ESTRADA E, ÖRJAN B. Using Network Centrality Measures to Manage Landscape Connectivity[J]. *Ecological Applications*, 2008, 18(7): 1810–1825.
- [12] BORGATTI S P. Centrality and Network Flow[J]. *Social Networks*, 2005, 27(1): 55–71.
- [13] NEWMAN M E J. A Measure of Betweenness Centrality Based on Random Walks[J]. *Social Networks*, 2005, 27(1): 39–54.
- [14] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. *资源科学*, 2015, 37(9): 1740–1746.
XIE Gaodi, ZHANG Caixia, ZHANG Changshun, et al. The Value of Ecosystem Services in China[J]. *Resources Science*, 2015, 37(9): 1740–1746.
- [15] 赵小汎. 土地利用生态服务价值指标体系评估结果比较研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(1): 98–105.
ZHAO Xiaofan. Comparison on Evaluation Result and Index System of Ecosystem Service Values Based on Land Use[J]. *Resources Environment Yangtze Basin*, 2016, 25(1): 98–105.
- [16] 胡喜生, 洪伟, 吴承祯. 土地生态系统服务功能价值动态估算模型的改进与应用: 以福州市为例[J]. *资源科学*, 2013, 35(1): 30–41.
HU Xisheng, HONG Wei, WU Chengzhen. An Improved Dynamic Evaluation Model and Land Ecosystem Service Values for Fuzhou City[J]. *Resources Science*, 2013, 35(1): 30–41.
- [17] 高丹, 常琳娜, 周嘉. 基于生态系统服务功能价值理论的土地利用总体规划环境影响评价研究: 以哈尔滨市为例[J]. *国土与自然资源研究*, 2013(4): 43–46.
GAO Dan, CHANG Linna, ZHOU Jia. Environmental Impact Assessment of Land Use Planning in Harbin City Based on Ecosystem Services Value Theory[J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2013(4): 43–46.
- [18] 贾艳红, 赵军, 南忠仁, 等. 基于熵权法的草原生态安全评价: 以甘肃牧区为例[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(8): 1003–1008.
JIA Yanhong, ZHAO Jun, NAN Zhongren, et al. Ecological Safety Assessment of Grassland Based on Entropy-Right Method: A Case Study of Gansu Pastoral[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(8): 1003–1008.

(责任编辑: 邓光辉)