doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.028

基于复杂网络分析法的层级生态网络结构研究

王　戈[1]　于　强[1]　YANG Di[2]　张启斌[1]　岳德鹏[1]　刘建华[1]

(1.北京林业大学精准林业北京市重点实验室,北京 100083;2.弗罗里达大学地理系,盖恩斯维尔 FL 32611)

摘要:以西北典型半干旱城市包头市为研究区,运用复杂网络的评价指标对包头市复杂层级网络的拓扑结构与空间鲁棒性进行评价,提取了第 1、2、3 级生态源地和第 1、2、3 层生态廊道,并识别了重要生态节点,构建了包头市层级生态网络。结果表明:第 1、2、3 层生态源地数量分别为 8、31、123,生态廊道数量分别为 8、35、151,重要生态节点数量分别为 7、28、47。通过拓扑结构与空间鲁棒性分析可知:第 1 层生态网络连通度最低,核数为 2,结构简单但重要性最高,其稳定性影响整个层级生态网络的稳定;第 2 层生态网络由于增加连通性较低的生态节点,可增加小尺度的生态稳定性,但对大尺度层级生态网络稳定性提升没有明显作用;第 3 层生态网络核数为 4,生态网络连通性最高且结构复杂。在第 1、2、3 层网络恶意攻击比随机攻击的破坏性均更强。第 2、3 层生态网络中源地节点数量较多,但低等级源地比例高,对增强网络的抗打击能力与恢复能力效果不明显。

关键词:包头市;层级生态网络;复杂网络分析方法;拓扑结构;结构鲁棒性

中图分类号:P9　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2019)07-0258-09

Hierarchical Ecological Network Structure Based on Complex Network Analysis

WANG Ge[1]　YU Qiang[1]　YANG Di[2]　ZHANG Qibin[1]　YUE Depeng[1]　LIU Jianhua[1]

(1. *Beijing Key Laboratory of Precision Forestry*, *Beijing Forestry University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Department of Geography*, *University of Florida*, *Gainesville FL* 32611, *USA*)

Abstract: Baotou is a typical semi-arid city in Northwest China. The hierarchical ecological network model was used to construct the hierarchical ecological network of Baotou City. Based on the complex network theory, the static characteristic index and spatial robustness index were calculated, and the topological structure of the complex hierarchical ecological network was analyzed. The results showed that the first, second and third ecological sources and the first, second and third ecological corridors were extracted by using the hierarchical ecological network model, and the important ecological nodes were identified. The number of ecological sources in the first, second and third layers was 8, 31 and 123, the number of ecological corridors was 8, 35 and 151, and the number of important ecological nodes was 7, 28 and 47, respectively. The first layer of ecological network had the lowest connectivity and two cores. Its structure was simple but its importance was the highest. The stability of the first layer of ecological network affected the stability of the whole region's hierarchical ecological network. The second layer of ecological network can increase the small-scale ecological stability by increasing the ecological nodes with low connectivity, and had no obvious effect on the stability improvement of the large-scale ecological network. The third layer had four cores, and the highest connectivity structure of the ecological network was complex. Malicious attacks were more destructive than random attacks. The number of source nodes in the second layer and the third layer ecological network was large, but the proportion of low-level source sites was high, and the anti-attack ability and recovery ability of the network were not obviously enhanced.

Key words: Baotou City; hierarchical ecological network; complex network analysis method; topology; structural robustness

收稿日期:2019-03-31　修回日期:2019-05-25

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(BLX201806)和中国博士后科学基金面上项目(2018M641218)

作者简介:王戈(1995—),男,博士生,主要从事 3S 技术在生态环境中的应用研究,E-mail:18734243466@163.com

通信作者:于强(1987—),男,讲师,博士,主要从事 3S 技术在生态环境中的应用研究,E-mail:yuqiang@bjfu.edu.cn

0　引言

高强度土地开发与土地利用方式的快速城市化进程已成为 20 世纪以来人类社会发展最显著特征[1]，资源环境过度利用与开发导致区域生态环境趋于恶化，严重影响区域景观格局与可持续发展[2]。尤其在西北半干旱区，伴随着人口增长，自然景观被人工景观代替，生境破碎，景观连通性变差，出现生物多样性加速下降等一系列问题[3]。基于先前层次生态网络构建方法研究，构建多层级空间生态网络是维持西北半干旱区生态安全的重要保障[4]。在层级生态网络中，低层级生态源地稳定依靠高层级生态源地，高层级生态源地对于维持层级生态网络稳定具有极其重要的意义[5]。高层级生态源地遭到破坏，易影响周围低层级生态源地，以至于影响低层级生态网络稳定，引发层级网络的级联失效，导致整个网络崩溃[6]。这种层级网络具有复杂的空间结构，层级之间具有复杂的影响关系，是典型的复杂系统，具有层次性、无序性与动态性等特征[7]。

复杂网络的研究方法已经被广泛应用到社交网络、专家网络、航空网络、交通网络等领域[8]。复杂网络的抽象方法可以将复杂系统简化为节点与边相连的集合，节点代表复杂系统的基本单元，边表示基本单元间的作用关系。结合景观生态学理论，可以理解为区域内生态廊道和生态节点两种景观格局要素所组成的复杂网络，结构、功能以及两者之间的联系一直是网络科学以及景观生态学的一个研究重点[9]。我国西北半干旱区具有生物多样性低、景观破碎、生态环境脆弱的特征，所构建的多层级生态网络具有多层生态网络，高层级生态网路是整个层级网络的“核心”，可以维持整个区域生态安全稳定性。低层级生态网络中存在的低层级生态源地，在小尺度上起到提升生态质量作用。层级生态网络在大尺度维持区域生态安全，并在小尺度上提升生态质量，形成完整的层级生态网络，从而全面保证区域生态安全。

本研究的复杂网络是具有层级性的复杂空间生态网络，并具有生态属性。层级复杂网络结构分析是网络优化的基础[10]，网络结构分析包括：网络节点度分析、节点与整个网络聚类系数分析、网络关联性分析、节点介数分析、网络连通性分析[11]。本文将复杂网络分析方法用于探究层级网络的空间拓扑结构[12]，选取典型西北半干旱城市包头市作为研究区，对包头市层级生态网络结构进行分析，并选取适合空间层级生态网络的鲁棒性评价指标对层级生态网络的结构鲁棒性进行分析。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

包头市位于内蒙古自治区西部，面积 27 768 km^2，东经 109° 13′ ~ 111° 26′，北纬 40° 13′ ~ 42° 44′（图 1）。包头市深处内陆，为典型的温带干旱、半干旱大陆性气候，冬季寒冷干燥、夏季炎热多雨[13]，年平均气温 2.0 ~ 7.7℃，年均降水量 175 ~ 400 mm，年均蒸发量为 2 100 ~ 2 700 mm。可利用地表水总量为 9×10^8 m^3，地下水补给量为 8.6×10^9 m^3。黄河流经包头境内 214 km，水面宽 130 ~ 458 m，最大流量 6 400 m^3/s，年平均径流量为 260×10^9 m^3，是包头市主要用水来源[14]。研究区海拔 976 ~ 2 317 m，地势中间高南北低，北部丘陵、中部山地、南部平原分别占土地面积的 14.49%、75.51% 和 10%[15]。干旱的气候条件与起伏的地貌特征使得包头市生态环境较为脆弱，面临较高的水土流失与土地沙漠化、荒漠化风险。近年来，包头市城市建设规模扩张迅速，房地产开发项目、工业园区等建设项目不断涌现，导致草地、林地、湿地等生态用地遭到占用与破坏，生态风险有所升高[11]。

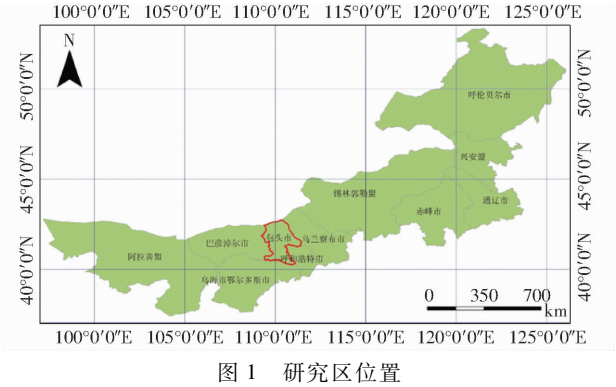


图 1　研究区位置

Fig. 1　Location of study area

1.2　数据来源与处理

选取包头市夏季且少云的 Landsat OLI 影像（2018 年）为研究素材，空间分辨率 30 m DEM 等作为辅助数据。利用 ENVI 软件对影像进行波段合成、图像增强和几何校正处理，选择最大似然监督分类法对遥感影像进行目视解译，提取包头市的景观类型信息，使用 ArcMap 软件进行细碎斑块处理，运用叠加分析工具进行空间数据分析，最终 ArcInfo 环境下完成拓扑和改错处理。自然保护区分布数据来自《包头市土地利用总体规划》；地面高程数据（DEM）来自地理空间数据云；根据研究需要，从遥感影像中提取的景观类型通过实地验证确保其精度。

1.3 层级生态网络构建

1.3.1 层级生态源地节点提取

根据研究区景观格局分布数据,提取林地、草地、水体生态用地,将生态用地划分为绿色和蓝色生态用地。利用 ArcGIS 的分区统计工具,分别统计每个生态斑块所对应的植被指数(NDVI)和改进的归一化差异水体指数(MNDWI)值。计算所有生态斑块的能量因子 Q_j,并结合景观生态功能对生态用地进行层级划分[16]。能量因子 Q_j 计算公式为

$$Q_j = A_j N_{jr} \tag{1}$$

式中 A_j——第 j 块生态用地斑块面积,km^2

N_{jr}为第 j 块生态用地斑块的第 r 个归一化指数,本文选择两种归一化指数描述生态用地,故 r 分别取 1 和 2,N_{j1}为第 j 块生态用地的 NDVI 平均值,N_{j2}为第 j 块生态用地的 MNDWI 平均值。

1.3.2 层级生态廊道提取

将生态源地、源地能量等级、源地间距离、基面阻力系数 4 方面因素考虑到模型中,得到修正层级生态廊道提取模型[17],公式为

$$V_{MCR}Q_j = f_{\min} \sum^{i=m,j=n} D_{ij}R_iQ_j \tag{2}$$

式中 $V_{MCR}Q_j$——最小累积阻力面值

$f_{\min}$——一个土地单元的累积阻力最小值

D_{ij}——从生态源地 j 到土地单元 i 空间距离

R_i——用地单元 i 运动过程的阻力系数[18]

Q_j 越大代表生态源地斑块的生态能量越大[19]。

根据包头市的实际情况,考虑从地形坡度、植被覆盖、水文分布、土地覆盖共 4 方面建立生态阻力的评价体系。进行叠加栅格计算得到生态阻力基面的综合评价结果。利用 ArcGIS 软件中的 cost-distance 模块完成层次生态源地的累积阻力面值的计算[20],最终得到每层生态网络对应的最小生态累积阻力面值。利用 ArcGIS 软件中的 cost-path 模块完成层级生态廊道提取。

1.4 复杂网络模型

利用 ArcGIS 软件中空间关系建模等功能,把分层生态源地分别抽象成 N_i 个节点($i=1,2,3$),E_i 条边构成包头市层级生态网络。利用空间统计中的工具把网络转换成表,再将表转换为 Pajek 能识别的 .net 格式的网络数据。

1.4.1 网络基本静态统计特征

1.4.1.1 度及度分布

生态节点度是与该生态节点相连廊道数量,节点度越大表明该生态节点重要性较高。网络平均度是网络中每个生态节点度平均值[21],计算公式为

$$k = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} k_i' \tag{3}$$

式中 k——网络平均度

N——节点总数

k_i'——生态节点度

在复杂生态网络中,节点的度在统计学上服从一定分布函数,生态节点度分布 $p(k)$代表在一个生态网络中,度为 k 的生态节点占比,度分布函数 $p(k)$是节点度为 k 的节点被抽到的概率。

1.4.1.2 平均路径长度

对网络中任意两个节点最短路径边数求和后,对其取平均值,得到复杂生态网络平均路径长度[22],计算公式为

$$L = \frac{1}{C_N^2}\sum D_{ij} \quad (1 \leqslant i \leqslant j \leqslant N) \tag{4}$$

1.4.1.3 聚类系数

聚类系数 C_i 定义为节点 v_i 的 k_i 个邻居节点之间实际存在边数 E_i 和总可能边数 $C_{k_i}^2$比值[23],其计算公式为

$$C_i = \frac{E_i}{C_{k_i}^2} \tag{5}$$

平均聚类系数 C 为所有生态节点聚类系数平均值,公式为

$$C = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} C_i \tag{6}$$

复杂生态网络平均聚类系数为 0 ~ 1,$C=0$ 表明所有节点没有任何边连接;$C=1$ 表明网络中任意两节点均直接相连;C 值越大,表明生态网络中节点联系越紧密,聚集系数越大的网络小世界特性越强,反之越弱。

1.4.2 生态网络的关联性

1.4.2.1 基于 Pearson 相关系数的度-度相关性

实际生态网络度与度之间存在相关性,网络中度大的节点连接概率高,表明该生态网络是度-度正相关生态网络,即同配生态网络[24],反之为异配生态网络。一个生态网络度的 Pearson 相关系数 r 计算公式为

$$r = \frac{M^{-1}\sum k_ik_j - \left[M^{-1}\sum \frac{1}{2}(k_i + k_j)\right]^2}{M^{-1}\sum \frac{1}{2}(k_i^2 + k_j^2) - \left[M^{-1}\sum \frac{1}{2}(k_i + k_j)\right]^2} \quad (e_{ij} \in E) \tag{7}$$

式中 k_i、k_j——连接生态廊道 e_{ij}两生态节点 v_i 和 v_j 的度

M——网络中生态廊道总数

E——所有生态廊道集合

1.4.2.2　聚类系数分布及聚-度相关性

聚类系数分布函数 $P(C)$ 代表在复杂网络中任意选择一个节点，其聚类系数为 C 的概率。一个生态网络的聚类系数和度之间也存在一定内在联系，即聚-度相关性。聚-度相关性计算中主要是局部聚类系数 $C(k)$ 与 k 之间的关系。

1.4.3　生态网络的节点介数

生态网络节点介数是生态网络中任意的两个生态节点之间最短生态廊道路径所通过的生态节点数量，生态节点介数可以用来反映生态网络中生态节点的重要性[25]。生态节点介数 B_i 计算公式为

$$B_i = \sum \frac{n_{jl}(i)}{n_{jl}} \quad (1 \leqslant j \leqslant l \leqslant N,\ j \neq i \neq l) \quad (8)$$

式中　n_{jl}——生态节点 v_j 和 v_l 之间的最短生态廊道数量

$n_{jl}(i)$——生态节点 v_j 和 v_l 之间最短生态廊道路径经过生态节点 v_i 数量

1.4.4　生态网络的连通性

1.4.4.1　生态网络核数

生态网络核数是指不断去掉度小于 k 生态节点和其相互连接的生态廊道，最终剩余的联通子图中生态节点数目[26]。如果一个生态节点属于 k 核，但是不属于 $k+1$ 核，这个生态节点的核数为 k，该生态网络的核数同样为 k。通过 k 核统计分析，复杂网络逐渐趋于核心的区域，越位于中心的核，连通性越强[27]。

1.4.4.2　节点的连通度

网络节点的连通度主要反映了生态网络连通程度。连通复杂网络 G 的连通度 $k(G)$ 定义为

$$k(G) = \min\{|S|: S \subseteq V(G), \omega(G-S) \geqslant 2\} \quad (9)$$

式中　V——生态网络 G 的生态节点组合

S——V 的真子集

$\omega(G-S)$——从生态网络 G 中删除生态节点集 S 后得到的子图的联通分支数

生态节点联通度就是指使 G 不联通或者平凡图（只有一个生态节点没有边的生态网络）所必须删除掉最少生态节点数量。对于不联通生态网络，定义 $k(G)=0$；若 G 为 N 个生态节点完全生态网络[28]，则有 $k(G)=N-1$。

1.5　**分层生态网络鲁棒性**

生态网络是维持区域生态环境稳定的重要保障，完整的空间结构能保证其发挥出正常功能。生态网络结构鲁棒性是用来衡量生态网络在遭受到外界干扰破坏时，维持其正常结构和功能的能力，即潜在生态网络抵抗能力，与之相对应的就是潜在生态网络恢复能力[29]。在其空间结构遭到破坏后，潜在生态网络能够恢复的能力是恢复鲁棒性。结构鲁棒性公式为

$$R = \frac{c}{N' - N_r} \quad (10)$$

式中　N'——初始潜在生态网络的节点数

N_r——从生态网络中去除的节点数

c——当节点被去除后生态网络中最大连通子网络中的生态节点数量

针对生态节点和生态廊道，恢复鲁棒性计算公式分别为

$$D = 1 - \frac{N_r - N_d}{N'} \quad (11)$$

$$E = 1 - \frac{M_r - M_e}{M'} \quad (12)$$

式中　D——节点恢复鲁棒性指标

E——边恢复鲁棒性指标

N_d——通过某种策略恢复节点数

M'——初始网络中边的数量

M_r——从网络中去除的边数

M_e——通过某种策略恢复的边数量

通过构建实际生态网络表示节点关系的邻接矩阵来评价生态网络的结构鲁棒性，制作无向无权生态网络拓扑图，并对网络进行随机攻击和恶意攻击[30]。随机攻击即从网络中随机去除若干个节点，恶意攻击即从潜在生态网络中，同时去除度最大的 N_r 个节点及其对应边。

2　结果与分析

2.1　层级生态网络构建

研究区域层级生态网络如图 2 所示，第 1 层生态网络由 8 个潜在生态源地、8 条潜在生态廊道和 7 个生态节点构成。第 2 层生态网络由 31 个潜在生态源地、35 条潜在生态廊道和 28 个生态节点组成。第 3 层生态网络由 123 个潜在生态源地、151 条潜在生态廊道和 47 个生态节点组成。通过对包头市全域内生态网络进行分层研究，构建 1、2、3 层生态网络，有利于保障包头市生态环境安全。在市域尺度上构成了分层的点-线-面相互交织的层级空间生态网络。

2.2　层级生态网络拓扑结构分析

2.2.1　第 1 层生态网络

所提取的第 1 层生态网络共有 15 个节点，网络的平均度为 2，第 1 层生态网络的度分布如图 3 所示。度最大为 3，最小为 1，度为 1 和 3 的节点分别有 2 个，度为 2 的生态节点数量最多，共有 11 个。

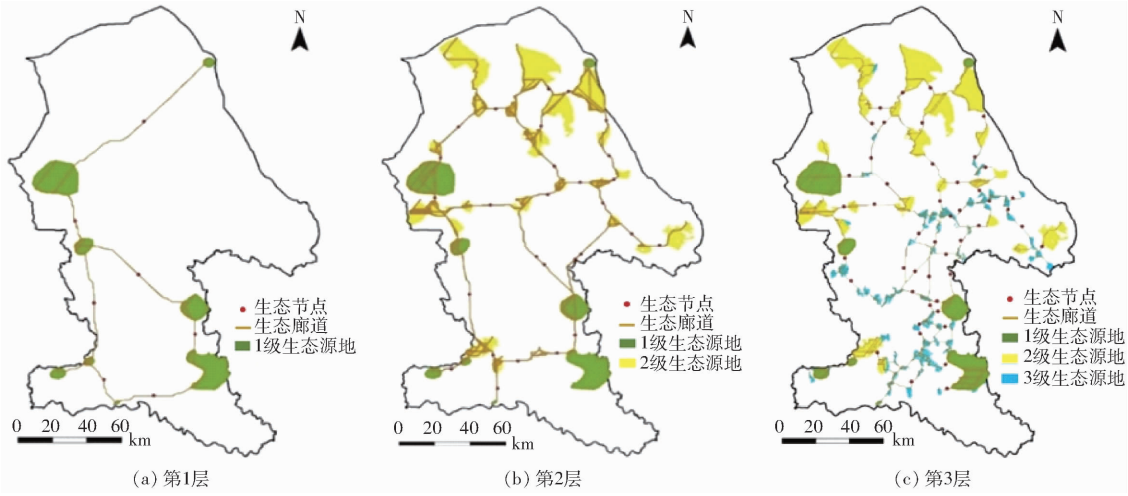


图 2 潜在生态网络

Fig. 2 Potential ecological networks

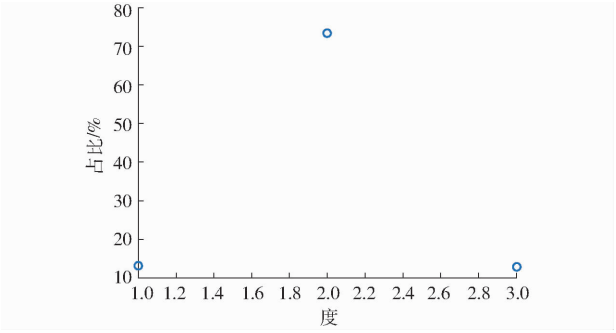


图 3 第 1 层生态网络度分布

Fig. 3 Ecological network distribution of the first layer

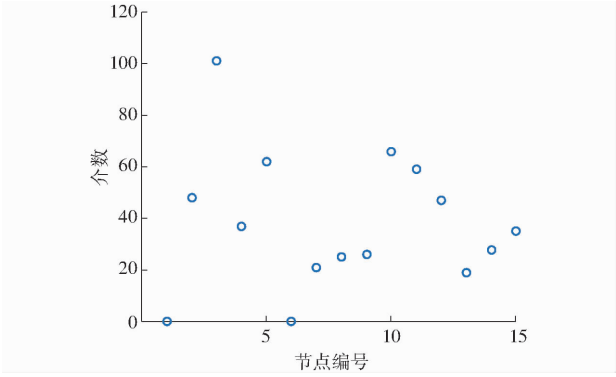


图 4 第 1 层生态网络介数分布

Fig. 4 Ecological network mediator distribution of the first layer

在包头市第 1 层级生态网络中,生态节点与生态节点之间具有相关性。同样,度与度之间也存在一定相关性。计算得第 1 层潜在生态网络的度-度相关系数为 -0.339 3,该生态网络负相关,即异配网络。在第 1 层生态网络中度大的节点倾向与度小节点相连。

通过计算该网络生态节点介数并绘制散点图(图 4),有两个生态节点的介数为 0,编号为 1 和 6。介数最高为 101,编号为 3,分布在红花敖包保护区附近。介数小于 100 的节点共有 12 个,编号 10、11、12 的生态节点并非生态源地且生态能量较低,但在网络中具有较高的介数。

计算得第 1 层生态网络各节点核数均为 2,得到该网络核数为 2。对该网络节点连通性进行计算,得该网络所有节点连通性均为 14,表明该网络节点连通性较低,网络结构简单,结构稳定性较差。

2.2.2 第 2 层生态网络

第 2 层潜在生态网络共有 60 个节点,网络平均度为 2.166 7,网络节点度分布如图 5 所示。该生态网络完全连通,不存在度为 0 的节点。生态节点的度最大值为 4,最小值为 1,数量最多的生态节点度为 2,共有 40 个。

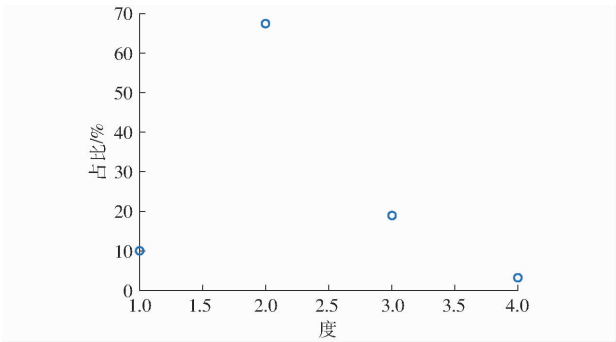


图 5 第 2 层生态网络度分布

Fig. 5 Ecological network distribution of the second layer

包头市第 2 层生态网络度-度相关系数为 -0.180,较第 1 层生态网络度-度相关系数降低,异配特性减弱,第 2 层生态网络节点分布较第 1 层潜在生态网络更加均匀。

计算第 2 层生态网络节点介数并绘制散点图(图 6),有 7 个生态节点介数为 0,介数小于 1 000 的节点共有 45 个,介数大于 1 000 的共有 8 个,其中编号 14、17、18、19、27、28 为生态源地节点,节点的度较高,在网络起到能量循环与物质交换枢纽的作用。编号 40、54 的生态网络节点大于 1 000 并且两

端连接均为介数大于 1 000 的生态源地节点，是第 2 层生态网络中最薄弱且最重要的生态节点，分布在下湿壕乡和都荣敖包苏木附近。

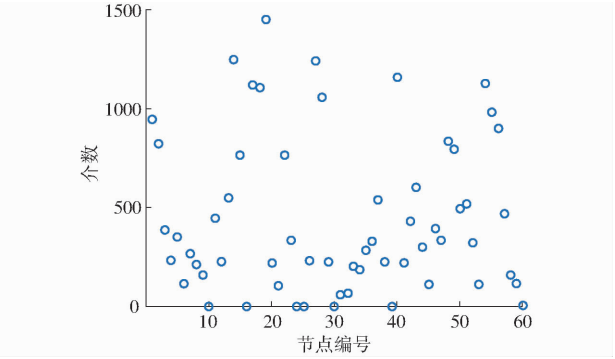


图 6　第 2 层生态网络介数分布

Fig. 6　Ecological network mediator distribution of the second layer

计算得第 2 层生态网络各节点核数均为 2，得到该网络核数为 2。对该网络节点连通性进行计算，得该网络所有节点连通性均为 59。由于在第 2 层网络中生态节点数量增加，导致生态网络节点连接性变好，整个网络连通性变好。

2.2.3　第 3 层生态网络

第 3 层生态网络共有 180 个节点，网络平均度为 2.549 5，第 3 层生态网络度分布如图 7 所示。度最大为 12，生态节点编号为 120，分布在九峰山自然保护区附近。度为 2 的生态节点数量最多，共有 98 个。度为 1 的生态节点有 17 个，第 3 层潜在生态网络整体散点分布既不是典型的幂律分布，也不是 Poisson 分布，但是幂律分布特征更为明显，Poisson 分布特征不明显，表明该潜在生态网络无标度性特征要强于均匀性特征。

第 3 层潜在生态网络的平均聚类系数为 0.111 1，该网络的小世界特性不明显。该潜在生态网络节点的聚类系数分布如图 8 所示，聚类系数为 0 节点有 142 个，占该网络节点总数 78%，这些节点与其他节点不具有集群特点。有 10 个节点的聚类系数为 1，这些节点有明显集群特征。表明第 3 层潜在生态网络有明显非均匀性，生态网络结构不稳定性较大。

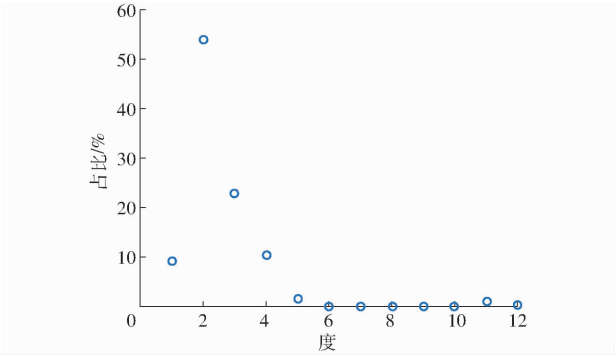


图 7　第 3 层生态网络度分布

Fig. 7　Ecological network distribution of the third layer

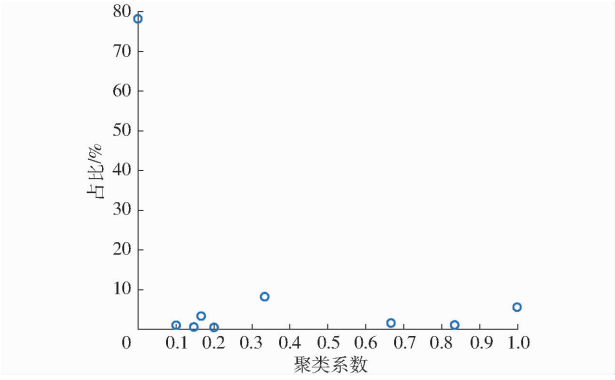


图 8　第 3 层生态网络聚类系数分布

Fig. 8　Ecological network clustering coefficient of the third layer

所提取的第 3 层潜在生态网络的度-度相关性为 0.162 4，该生态网络是正相关，即同配网络。表明网络中度大的节点趋向和度大的节点相连。第 3 层生态网络的聚-度相关性散点和双对数分布如图 9 所示，随着生态节点度增加，节点聚类系数先增加后减少，该网络度小节点聚集特性较为明显，度大节点分布较分散。

计算第 3 层生态网络节点介数并绘制散点图（图 10），有 28 个生态节点的介数为 0，介数小于 8 000 的节点共有 159 个，介数大于 8 000 的共有 5 个，编号为 62、70、79、110 的节点距离较近，位于塔尔浑河附近，形成了一个较大的生态节点组团。生

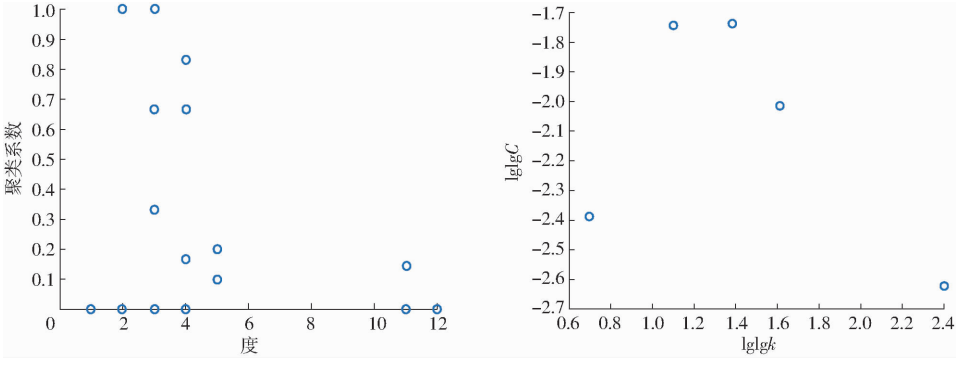


图 9　第 3 层生态网络的聚-度相关性散点和双对数分布

Fig. 9　Poly-degree correlation scatter and double logarithmic distribution of the third layer ecological network

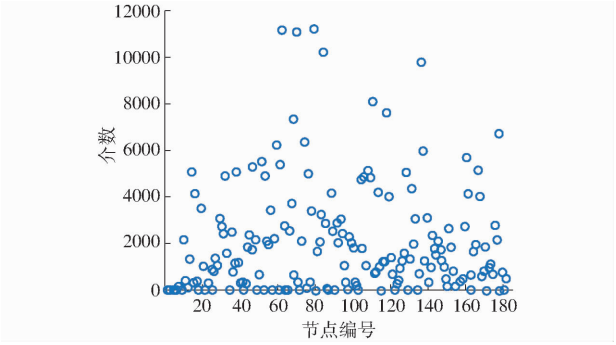


图 10 第 3 层生态网络介数分布

Fig. 10 Ecological network mediator distribution of the third layer

态节点 136 位于石宝镇附近,为非生态源地节点,由于两端连接介数较大的生态源地节点,是第 3 层生态网络中薄弱但十分重要的生态节点。

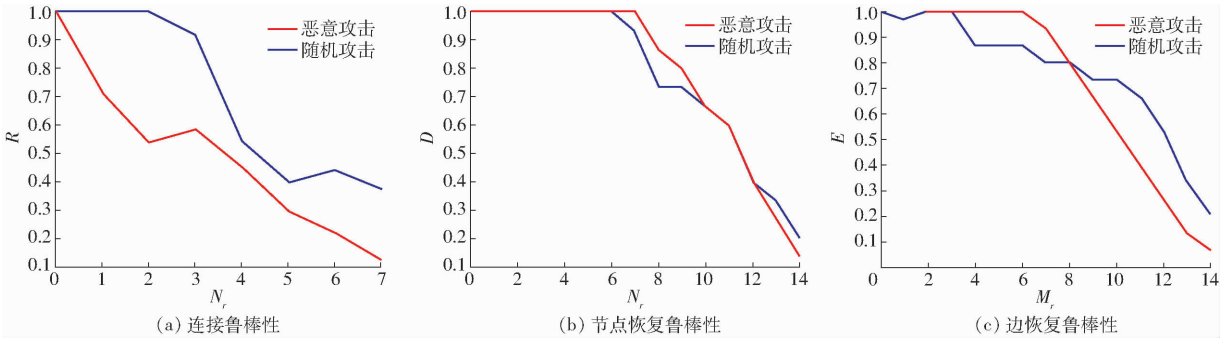
所提取的第 3 层生态网络中核数为 2 的生态节点最多,达 176 个。核数为 4 的生态节点有 5 个,核数最高值为 12,共有 2 个节点。对该网络的节点连通性进行计算,得该网络所有节点的连通性均为 180。相比第 1 层和第 2 层生态网络,第 3 层生态网络节点连接性变好,使整个网络的连通性变好。

2.3 层级生态网络鲁棒性分析

第 1 层生态网络初始连接鲁棒性为 1(图 11),任意打击该层级网络中 2 个节点,网络的连接鲁棒性仍然为 1,随着节点打击规模增加,连接能力下降迅速(图 11a)。除去第 9 个生态节点时,网络的连接鲁棒性低于 0.1。在恶意攻击下随着节点打击规模增加,连接鲁棒性下降迅速,除去第 8 个节点后连接鲁棒性低于 0.1,生态网络连接能力极差,可见恶意攻击对第 1 层生态网络的连通能力破坏十分明显。网络节点恢复鲁棒性如图 11b 所示,在恶意攻击和随机攻击下,当去除两个节点时网络完全可以恢复。随着破坏节点数目增加,两种攻击下节点恢复鲁棒性均呈下降趋势,当攻击除去超过 15 个节点时,恶意攻击和随机攻击下丢失节点得不到恢复。对边恢复鲁棒性进行分析,恶意攻击和随即攻击下的边恢复鲁棒性均呈现下降趋势。随机攻击下边恢复鲁棒性曲线为凸曲线,当除去边数大于 6 时,随机攻击下的边恢复鲁棒性优于恶意攻击。在恶意攻击下,当除去 6 条边时网络结构可以恢复。恶意攻击下随着边去除数目增加,边恢复鲁棒性下降呈现一定的“涌现”现象,对网络结构破坏非常显著。

第 2 层生态网络鲁棒性如图 12 所示,其初始连接鲁棒性为 1,在随机攻击下,对 2 个节点进行随机打击,网络连接鲁棒性仍然为 1,随节点打击规模增加,除去 2 ~ 25 个节点时,网络连接能力下降迅速。在恶意打击下,在除去第 2 个重要节点后网络连接鲁棒性下降显著,当除去第 15 个节点时,网络的连接鲁棒性低于 0.1,生态网络的连接能力极差。在恶意打击和随机打击下,当除去的节点为 17 个时,网络可以完全恢复。去除 17 ~ 60 个节点时,恶意攻击和随机攻击时网络节点恢复鲁棒性均呈下降趋势,当除去 55 个节点后恶意攻击和随机攻击下丢失节点得不到恢复。网络的边恢复鲁棒性如图 12c 所示,除去 5 条边时,网络可以完全恢复。随着破坏边的数目增加,随机攻击下的边恢复鲁棒性均呈下降趋势,当攻击除去超过 57 条边时,随机攻击下去掉的边不能恢复。在恶意攻击下,当除去的边超过 28 条,边恢复鲁棒性下降更加迅速。

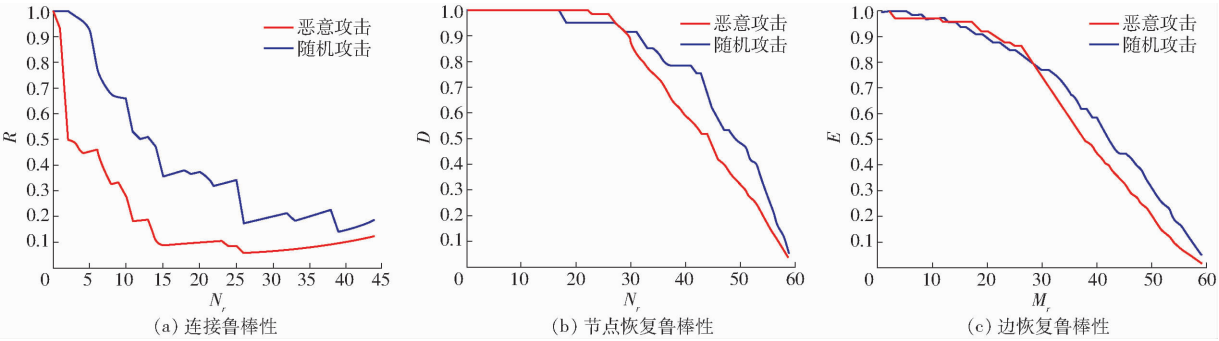
第 3 层生态网络鲁棒性如图 13 所示,其初始连接鲁棒性为 1,在随机攻击和恶意攻击下,随着节点打击规模增加,连接能力呈下降趋势,在恶意攻击除去第 10 个节点和随机攻击除去第 20 个节点时网络的连接鲁棒性出现一定“涌现”现象。在恶意攻击除去第 62 个节点和随机攻击除去第 80 个节点时,网络连接鲁棒性低于 0.1,网络连接性极差。网络节点恢复鲁棒性如图 12b 所示,在恶意攻击和随机攻击下,当去除 20 个节点时,网络完全可以恢复。破坏节点数目增加,两种攻击下节点恢复鲁棒性均呈下降趋势,当攻击除去超过 170 个节点时,恶意攻击和随机攻击下丢失的节点得不到恢复。对边恢复鲁棒性进行分析(图 13c),恶意攻击和随机攻击下的边恢复鲁棒性均呈现下降趋势。除去 13 条边时,



(a) 连接鲁棒性 (b) 节点恢复鲁棒性 (c) 边恢复鲁棒性

图 11 第 1 层生态网络结构鲁棒性

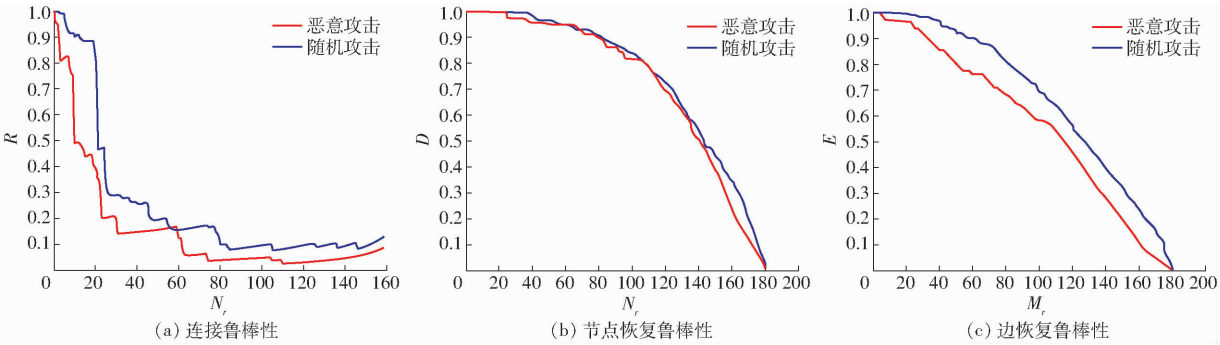
Fig. 11 The first layer ecological network structure robustness



(a) 连接鲁棒性　(b) 节点恢复鲁棒性　(c) 边恢复鲁棒性

图 12　第 2 层生态网络结构鲁棒性

Fig. 12　The second layer ecological network structure robustness



(a) 连接鲁棒性　(b) 节点恢复鲁棒性　(c) 边恢复鲁棒性

图 13　第 3 层生态网络结构鲁棒性

Fig. 13　The third layer ecological network structure robustness

网结可以完全恢复。随机攻击下的边恢复鲁棒性曲线为凸曲线，随机攻击下的边恢复鲁棒性优于恶意攻击。

3　结论

(1)根据包头市实际情况，在市域尺度上构建了点-线-面相互交织的层级生态网络。第 1 层由 8 个潜在生态源地、8 条潜在生态廊道和 7 个节点构成，第 2 层由 31 个潜在生态源地、35 条潜在生态廊道和 28 个生态节点组成，第 3 层由 123 个潜在生态源地、151 条潜在生态廊道和 47 个生态节点组成。

(2)基于复杂网络中拓扑结构分析指标，分析提取第 1、2、3 层生态网络的拓扑性质。第 1 层网络平均度为 2，度-度相关系数为 -0.339 3，该层网络核数为 2。第 2 层生态网络平均度为 2.166 7，度-度相关性为 -0.180，该网络核数为 2，网络连通性为 59。第 3 层生态网络平均度为 2.549 5，网络聚类系数为 0.111 1，度-度相关性为 0.162 4，核数为 4，网络连通性为 180。第 1 层网络连通性最低，结构简单但重要性最高，影响整个区域内层级生态网络稳定。第 3 层生态网络连通性最高且结构复杂，可在小尺度上维护生境稳定。

(3)对层级生态网络进行结构鲁棒性分析。第 1、2、3 层生态网络的初始连接鲁棒性均为 1，连接鲁棒性分别在除去 9、15、20 个生态节点时，连接鲁棒性明显下降。节点恢复鲁棒性分别在除去 2、17、20 个生态节点时，网络可以完全恢复。边恢复鲁棒性分别在除去 6、5、13 条边时，网络可以完全恢复。第 2、3 层生态网络中，低等级源地比例较高。由于高层级源地节点稳定性较高，可维持区域大尺度生态网络稳定。低层级源地可以提升小尺度生态安全，但对增强网络抗打击破坏能力与恢复能力效果不明显。

参　考　文　献

[1] 孔繁花，尹海伟. 济南城市绿地生态网络构建[J]. 生态学报，2007，28(4)：1711 - 1719.
KONG Fanhua，YIN Haiwei. Construction of urban green space ecological network in Ji'nan[J]. Chinese Journal of Ecology，2007，28(4)：1711 - 1719. (in Chinese)

[2] 王云才. 上海市城市景观生态网络连接度评价[J]. 地理研究，2009，28(2)：284 - 292.
WANG Yuncai. Evaluation of the connectivity of urban landscape ecological network in Shanghai[J]. Geographical Research，2009，28(2)：284 - 292. (in Chinese)

[3] 王云才，刘悦来. 城市景观生态网络规划的空间模式应用探讨[J]. 长江流域资源与环境，2009(9)：819 - 824.
WANG Yuncai，LIU Yuelai. Discussion on the application of spatial pattern of urban landscape ecological network planning[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin，2009(9)：819 - 824. (in Chinese)

[4] 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. Construction of the ecological network of the central and western cities of Bazhong based on MSPA and minimum path method[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015,35(19):6425 - 6434. (in Chinese)

[5] 胡道生, 宗跃光, 许文雯. 城市新区景观生态安全格局构建——基于生态网络分析的研究[J]. 城市发展研究, 2011(6):37 - 43.
HU Daosheng, ZONG Yueguang, XU Wenwen. Construction of landscape ecological security pattern in urban new district—based on ecological network analysis[J]. Urban Development Research, 2011(6):37 - 43. (in Chinese)

[6] DUAN Z, CHEN G, HUANG L. Complex network synchronizability: analysis and control[J]. Physical Review E, 2007, 76(5):056103.

[7] MIGUÉNS J I L, MENDES J F F. Travel and tourism: into a complex network[J]. Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications, 2008, 387(12):2963 - 2971.

[8] HOLANDA A D J, PISA I T, KINOUCHI O, et al. Thesaurus as a complex network[J]. Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications, 2003, 344(3):530 - 536.

[9] RUBINOV M, SPORNS O. Complex network measures of brain connectivity: uses and interpretations[J]. Neuroimage, 2010, 52(3):1059 - 1069.

[10] BROUN P. Transcriptional control of flavonoid biosynthesis: a complex network of conserved regulators involved in multiple aspects of differentiation in Arabidopsis[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2005, 8(3):272 - 279.

[11] NAWRATH C. Unraveling the complex network of cuticular structure and function[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2006, 9(3):281 - 287.

[12] SPORNS O. The human connectome: a complex network [J]. Ann N Y AcadSci, 2012, 136(Supp.):109 - 125.

[13] MOTTER A E, ZHOU C, KURTHS J. Enhancing complex-network synchronization[J]. Vaccine, 2004:13282 - 13286.

[14] RONG J, FELTUS F A, WAGHMARE V N, et al. Meta-analysis of polyploid cotton QTL shows unequal contributions of subgenomes to a complex network of genes and gene clusters implicated in lint fiber development[J]. Genetics, 2007, 176(4):2577 - 2588.

[15] COLOMBO E, ALCALAY M, PELICCI P G. Nucleophosmin and its complex network: a possible therapeutic target in hematological diseases[J]. Oncogene, 2011, 30(23):2595 - 2609.

[16] 刘孝富, 舒俭民, 张林波. 最小累积阻力模型在城市土地生态适宜性评价中的应用——以厦门为例[J]. 生态学报, 2008, 30(2):421 - 428.
LIU Xiaofu, SHU Jianmin, ZHANG Linbo. Research on applying minimum cumulative resistance model in urban land ecological suitability evaluation: as an example of Xiamen city [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 30(2):421 - 428. (in Chinese)

[17] 王瑶, 宫辉力, 李小娟. 基于最小累计阻力模型的景观通达性分析[J]. 地理空间信息, 2007, 5(4):45 - 47.
WANG Yao, GONG Huili, LI Xiaojuan. Landscape accessibility analysis based on minimum cumulative resistance model[J]. Geospatial Information, 2007, 5(4): 45 - 47. (in Chinese)

[18] 潘竟虎, 刘晓. 基于空间主成分和最小累积阻力模型的内陆河景观生态安全评价与格局优化——以张掖市甘州区为例[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10):3126 - 3136.
PAN Jinghu, LIU Xiao. Ecological security assessment and pattern optimization of inland river landscape based on spatial principal component and least cumulative drag model: a case study of Ganzhou District, Zhangye City[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(10): 3126 - 3136. (in Chinese)

[19] 李晶, 蒙吉军, 毛熙彦. 基于最小累积阻力模型的农牧交错带土地利用生态安全格局构建——以鄂尔多斯市准格尔旗为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2013, 49(4):707 - 715.
LI Jing, MENG Jijun, MAO Xiyan. Construction of ecological security pattern of land use in the farming-pastoral ecotone based on the model of minimum cumulative resistance—taking Zhungeer Banner of Erdos City as an example[J]. Journal of Peking University(Natural Science), 2013, 49(4): 707 - 715. (in Chinese)

[20] 钟式玉, 吴箐, 李宇, 等. 基于最小累积阻力模型的城镇土地空间重构——以广州市新塘镇为例[J]. 应用生态学报, 2012, 23(11):3173 - 3179.
ZHONG Shiyu, WU Qing, LI Yu, et al. Urban land spatial reconstruction based on minimum cumulative resistance model—a case study of Xintang Town, Guangzhou City[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(11): 3173 - 3179. (in Chinese)

[21] 周涛, 柏文洁, 汪秉宏,等. 复杂网络研究概述[J]. 物理, 2016, 34(1):653 - 662.
ZHOU Tao, BAI Wenjie, WANG Binghong, et al. Overview of complex network research[J]. Physics, 2016, 34(1):653 - 662. (in Chinese)

[22] 杨博, 刘大有, 金弟, 等. 复杂网络聚类方法[J]. 软件学报, 2009, 20(1):54 - 66.
YANG Bo, LIU Dayou, JIN Di, et al. Complex network clustering method[J]. Journal of Software, 2009, 20(1): 54 - 66. (in Chinese)

[23] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.

(下转第 312 页)

Agricultural Bulletin, 2011,27(15): 16 – 25. (in Chinese)

[30] SINGH B, SINGH B P, COWIE A L. Characterization and evaluation of biochar for their application as a soil amendment[J]. Soil Research,2010, 48(7): 516 – 525.

[31] SCHMIDT M W, NOACK A G. Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications, and current challenges[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2000, 14(3): 777 – 793.

[32] BRUUN S, EL-ZAHERY T, JENSEN L. Carbon sequestration with biochar-stability and effect on decomposition of soil organic matter[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2009.

[33] GLASER B, LEHMANN J, ZECH W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal review[J]. Biology and Fertility of Soils,2002, 35(4): 219 – 230.

[34] LIANG B, LEHMANN J, SOHI S P, et al. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil[J]. Organic Geochemistry, 2010, 41(2):206 – 213.

[35] LEHMANN J, PEREIRA DA SILVA J, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. Plant and Soil, 2003, 249(2): 343 – 357.

[36] VAN ZWIETEN L, KIMBER S, MORRIS S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of paper mill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. Plant and Soil,2010, 327(1): 235 – 246.

[37] YANAI Y, TOYOTA K, OKAZAKI M. Effects of charcoal addition on N_2O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments[J]. Soil Science & Plant Nutrition,2007,53(2): 181 – 188.

[38] 魏永霞,刘志凯,冯鼎锐,等. 生物炭对草甸黑土物理性质及雨后水分动态变化的影响[J/OL]. 农业机械学报,2016, 47(8):201 – 207.
WEI Yongxia, LIU Zhikai, FENG Dingrui, et al. Influences of biochar on physical properties of meadow black soil and dynamic changes of soil water after individual rainfall[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 201 – 207. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160825&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.025. (in Chinese)

(上接第 266 页)

[24] 解当, 汪小帆. 复杂网络中的社团结构分析算法研究综述[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2005, 2(3):1 – 12.
XIE Wei, WANG Xiaofan. A review of research on community structure analysis algorithms in complex networks[J]. Journal of Complex Systems and Complexity, 2005, 2(3): 1 – 12. (in Chinese)

[25] 谭跃进, 吴俊, 邓宏钟. 复杂网络中节点重要度评估的节点收缩方法[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(11):79 – 83.
TAN Yuejin, WU Jun, DENG Hongzhong. Node shrinkage method for node importance evaluation in complex networks[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2006, 26(11): 79 – 83. (in Chinese)

[26] 吴俊, 谭跃进. 复杂网络抗毁性测度研究[J]. 系统工程学报, 2005, 20(2):128 – 131.
WU Jun, TAN Yuejin. Research on the invulnerability measurement of complex networks[J]. Journal of Systems Engineering, 2005, 20(2): 128 – 131. (in Chinese)

[27] 汪小帆, 刘亚冰. 复杂网络中的社团结构算法综述[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(5):537 – 543.
WANG Xiaofan, LIU Yabing. A survey of community structure algorithms in complex networks[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(5): 537 – 543. (in Chinese)

[28] 陈关荣. 复杂网络及其新近研究进展简介[J]. 力学进展, 2008, 38(6):653 – 662.
CHEN Guanrong. A brief introduction to complex networks and its recent research progress[J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(6):653 – 662. (in Chinese)

[29] 朱永宏, 刘建. 复杂网络鲁棒性研究探讨[J]. 科技资讯, 2012(32):6.
ZHU Yonghong, LIU Jian. Research on robustness of complex networks[J]. Science and Technology Information, 2012(32): 6. (in Chinese)

[30] 郭本华. 复杂网络鲁棒性的一种基本参数[J]. 安顺学院学报, 2011, 13(5):123 – 125.
GUO Benhua. A basic parameter for robustness of complex networks[J]. Journal of Anshun University, 2011, 13(5): 123 – 125. (in Chinese)