

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.028

包头市层级生态网络构建方法研究

王戈¹ 于强¹ YANG Di² 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. 佛罗里达大学地理系, 盖恩斯维尔 32611)

摘要: 以包头市为研究区,结合不同生态价值生境斑块的层级性,构建层级网络提取模型框架,选用合适的图论网络测度指标评价层级生态网络。结果表明:基于层级网络提取模型构建的包头市层级生态网络,所提取的第1、2、3层对应的潜在生态源地数量为8、31、123,第1、2、3层对应的潜在廊道数量为8、35、151,并确定对应的第1、2、3层生态节点数为7、28、47;计算 α 、 β 、 γ 指数,评价层次生态网络结构,随生态源地与廊道数量增加,网络中可供物质流动的回路增多,生态源地的平均连通度变好。针对半干旱区构建的层级生态网络,能够为包头市生态建设提供理论指导,对半干旱城市生态规划具有重要参考价值。

关键词: 包头市; 层级; 生态网络; 最小累积阻力模型

中图分类号: P9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)09-0235-08

Construction Method of Hierarchical Ecological Network in Baotou City

WANG Ge¹ YU Qiang¹ YANG Di² ZHANG Qibin¹ YUE Depeng¹ LIU Jianhua¹

(1. Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Department of Geography, University of Florida, Gainesville 32611, USA)

Abstract: Ecological land patches with greater ecological service value are an important guarantee for maintaining regional ecological security in the semi-arid areas of Northwest China. Eco-service plaques with small ecological service values rely on large plaques. In the natural state, plaques of different sizes have a distinct hierarchical nature. A hierarchical network extraction model framework was constructed with Baotou City as the research area, combining with the hierarchical nature of different ecological value habitat patches. The hierarchical ecological network was evaluated by selecting appropriate graph theory network measurement indicators. The results showed that the hierarchical ecological network was constructed based on the hierarchical network extraction model, so the number of the first, second and third layers of ecological sources was 8, 31 and 123, and the number of potential corridors on the first, second and third floors was 8, 35 and 151, and the corresponding number of the first, second, and third layers of ecological nodes was 7, 28 and 47; the α , β , γ indexes were calculated to evaluate the hierarchical network structure, with the increase of the low-level source and the number of corridors, the more loops available for material flow in a low-level network was, the lower-level ecological networks were better than the higher-level average connectivity. The hierarchical ecological network constructed for semi-arid areas can provide theoretical guidance for the ecological construction of Baotou City and had important reference value for semi-arid urban ecological planning.

Key words: Baotou City; hierarchy; ecological network; minimum cumulative resistance model

0 引言

我国城市化与工业化进程不断加快,导致生境斑块趋于破碎、景观连通性变差、生物多样性快速下

降等一系列生态问题^[1],加速了生态退化,严重影响区域景观生态安全^[2]。

在西北半干旱区,资源分布严重不均,人工与自然生态用地成为维持脆弱生态环境的重要保障^[3]。

收稿日期: 2019-02-18 修回日期: 2019-03-29
基金项目: 国家自然科学基金项目(41371189)和“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD16B00)
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: 岳德鹏(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事景观生态学和土地评价研究,E-mail: yuedepeng@126.com

根据景观生态功能的大小对生态用地进行层级划分^[4],每层网络通过廊道连接生境斑块,构成半干旱区的层级生态网络。这种层级生态网络具有复杂的空间结构和复杂的层级间的影响关系^[5],具有多层次性、无序性、动态性等特征。

层次性研究广泛应用于地理网络中^[6],层次性特征可以抽象为网络中节点的差异性,将网络中的节点划分成不同等级,并构建相应的覆盖图,通过层次化算法挖掘网络内部层次特征,将一些重要节点从某一层次提取出来构建上一层网络^[7]。本文研究的层级网络是具有空间与生态属性的空间生态层级网络^[8]。在西北半干旱区,生态环境脆弱,重要生态节点遭破坏极易引发层次生态网络的级联失效^[9],导致整个生态网络崩溃,大尺度多层次生态网络的构建可以保证区域生态安全。最小累积阻力模型的应用较多:张蕾等^[10]采用小累积阻力模型,并基于景观生态学构建鞍山市生态网络;王玉莹等^[11]利用最小累积阻力模型识别缓冲区和生态廊道,构建苏南地区生态网络。

包头市地处内陆,气候为典型温带大陆性气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,地势起伏,生态环境较为脆弱,面临较高的水土流失与土地荒漠化风险^[12]。近 10 年来,城市化进程导致包头市草地、林地、湿地等生态景观遭到破坏,生境破碎景观生态安全遭到威胁^[13]。鉴于此,以景观生态学理论为指导,以包头市全域为研究对象,在遥感和 GIS 技术的

支持下,基于最小累积阻力模型探寻最小成本路径,提取包头市层级生态网络的骨架廊道。以实现层次空间生态网络的构建,为包头市生态建设提供理论依据与支撑。

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,109°13′~111°26′E,40°13′~42°44′N,面积 27 768 km²,如图 1 所示。包头市深处内陆,气候为典型的温带干旱、半干旱大陆性气候,冬季寒冷干燥、夏季炎热多雨,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^[14-15]。包头市可利用地表水总量为 9×10⁸ m³,地下水补给量为 8.6×10⁹ m³。黄河流经包头境内 214 km,水面宽 130~458 m,最大流量 6 400 m³/s,年平均径流量为 2.60×10¹¹ m³,是包头市主要用水来源^[16]。包头市海拔为 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%^[17]。干旱的气候条件与起伏的地貌特征使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^[18]。

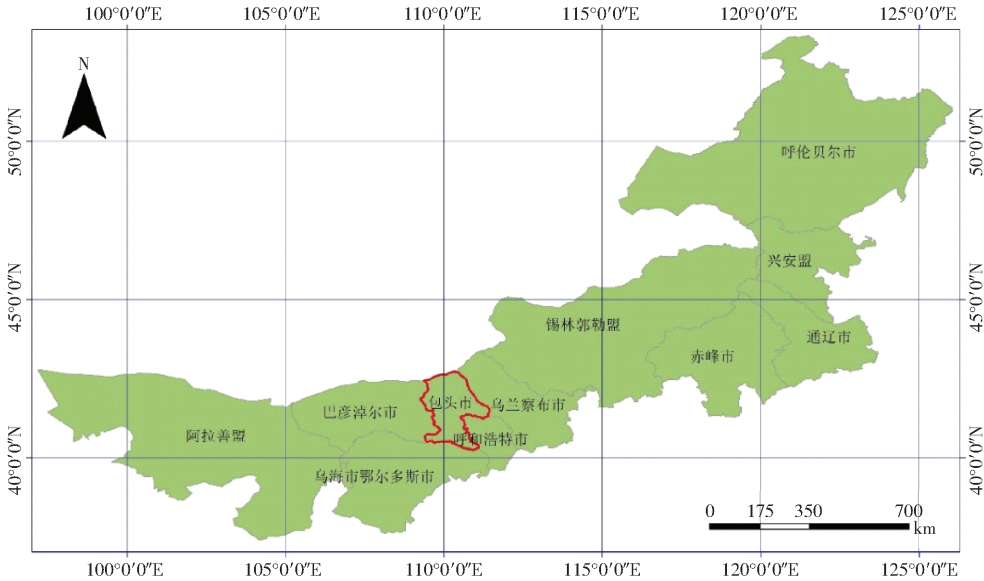


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of study area

1.2 数据来源与处理

本文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 的地面高程数据(DEM)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》;DEM 数据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 层级生态网络提取模型

1.3.1 生态源地节点提取

生态源地是具有重要生态服务价值和生态敏感性较高的用地,在空间分布上具有一定的聚集性^[19]。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 NDVI 和 MNDWI 值。引入能值理论,分别利用 NDVI 和 MNDWI 值来描述林地、草地和水体生态用地的特征,计算每个生态用地的面积,根据两方面来构建能量因子 Q_j ,其值越大代表生态源地斑块的生态能量越大,并计算所有生态斑块的能量因子 Q_j ,并结合景观生态功能的大小对生态用地进行层级划分。生态源地 j 的能量因子 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} ——第 j 块生态用地斑块的第 r 个归一化指数

本研究中选择两种归一化指数描述生态用地,故 r 分别取值 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 生态廊道提取

基本累积阻力面模型仅考虑了生态源地、距离和基面阻力系数 3 方面因素^[20]。在实际情况中,生态源地的面积以及源地类型会影响源地的生态能量大小。将生态源地、源地的层级性、源地间距离、基面阻力系数 4 方面因素考虑到其中,故可以得到修正最小累积阻力模型,公式为

$$V_{MCRQ} = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} R_i Q_j \tag{2}$$

式中 V_{MCRQ} ——修正后的最小累积阻力面值
 $f_{\min}$ ——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 ——土地单元 i 运动过程的阻力系数^[21]

根据包头市的实际情况,坡度越平缓、植被盖度越高、距水体越近,生态能量流动越畅通,并结合土地利用类型,农田与建筑建设用地是生态能量流动的刚性障碍。故考虑从地形坡度、植被覆盖、水文分布、土地覆盖 4 方面建立生态阻力评价体系。各个因子对于当前生态网络的维持与发展都有贡献,故

各个因子具有相同的权重。按照表 1 将各项生态阻力划分为 5 个等级,分别用 1、3、5、7、9 来表示阻力,利用 ArcGIS 软件制作各个单因子的评价结果,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的计算^[22],由于计算量较大,故利用 Python 脚本语言编写程序完成该计算。通过对计算生成的累积阻力面进行叠加分析,计算各个栅格单元的最小值,最终得到每层生态网络对应的最小生态累积阻力面。基于最小累积阻力面,利用 ArcGIS 软件中的 cost-path 模块完成层级生态廊道提取。

表 1 阻力评价体系
Tab.1 Resistance evaluation system

一级因子	二级因子	等级	阻力
地形因子	DEM/m	0 ~ 1 000	1
		1 000 ~ 1 300	3
		1 300 ~ 1 500	5
		1 500 ~ 1 700	7
		> 1 700	9
植被覆盖	NDVI	< 0	9
		0 ~ 0. 2	7
		0. 2 ~ 0. 33	5
		0. 33 ~ 0. 6	3
		> 0. 6	1
水文分布	MNDWI	- 0. 998 ~ - 0. 6	9
		- 0. 6 ~ - 0. 4	7
		- 0. 4 ~ 0	5
		0 ~ 0. 5	3
		0. 999	1
土地覆盖	土地利用类型	建制镇、村庄、城市、交通用地、公路用地、沙地、裸地、机场	9
		采矿用地、设施农用地、水工建筑用地、风景名胜及特殊用地	7
		天然牧草地、水浇地、盐碱地、旱地	5
		沟渠、河流、河滩地	3
		有林地、人工草地、其他草地、坑塘水面、林带、果园、水库水面、湖泊水面、湖泊湿地、灌木林地	1

1.4 层级生态网络结构评价指标

通过图论的网络测度指标可以评价一个生态网络的连接性和复杂性^[23],网络结构分析可以有效探究生态网络内部结构,通常采用 α 、 β 、 γ 等网络结构指数来反映网络的闭合度水平和连接度水平^[24]。 α 指数用于描述网络中可能出现的回路程度,值越大说明该网络的物质循环和流通越流畅; β 指数指网络中每个节点的评鉴连线数,可以度量网络的复杂性; γ 指数可以反映网络的连接程度^[25],公式为

$$\alpha = \frac{l - v + 1}{2v - 5}$$

(3)

$$\beta = \frac{l}{v}$$

(4)

$$\gamma = \frac{l}{I_{\max}} = \frac{l}{3(v - 2)}$$

(5)

式中 l ——廊道数 v ——节点数
 $I_{\max}$ ——生态网络中可能连接的最大廊道数

2 结果与分析

2.1 层级生态源地提取

提取全域内所有草地、灌木林地、有林地共 37 765 块,湖泊、河流等水体景观共 1 893 块,计算生态斑块的能量因子 Q_i ,选取能量因子值大于 1 的生态斑块共 784 个。统计 784 个生态斑块的能量因子值(图 2),生态斑块的能量因子值较高的斑块较少,低能量因子值的斑块占多数,能量因子值最高为 50,能量因子值为 30 ~ 50 有 7 个,大多数生态斑块的能量因子值落在 0.01 ~ 10 之间。

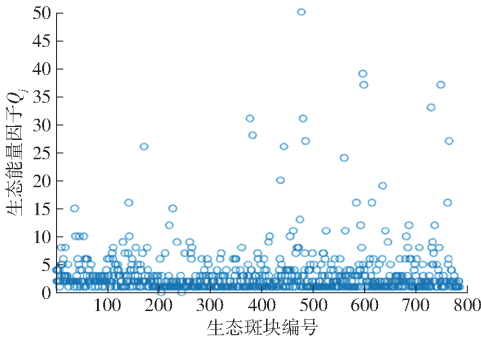


图 2 生态斑块能量因子值统计图

Fig. 2 Ecological plaque energy factor value statistics

将生态斑块以 0.01、0.04、0.15 的比例来筛选作为 1、2、3 层生态源地,结果如图 3 所示。根据各生态斑块的能量因子,对源地进行等级划分,共分为

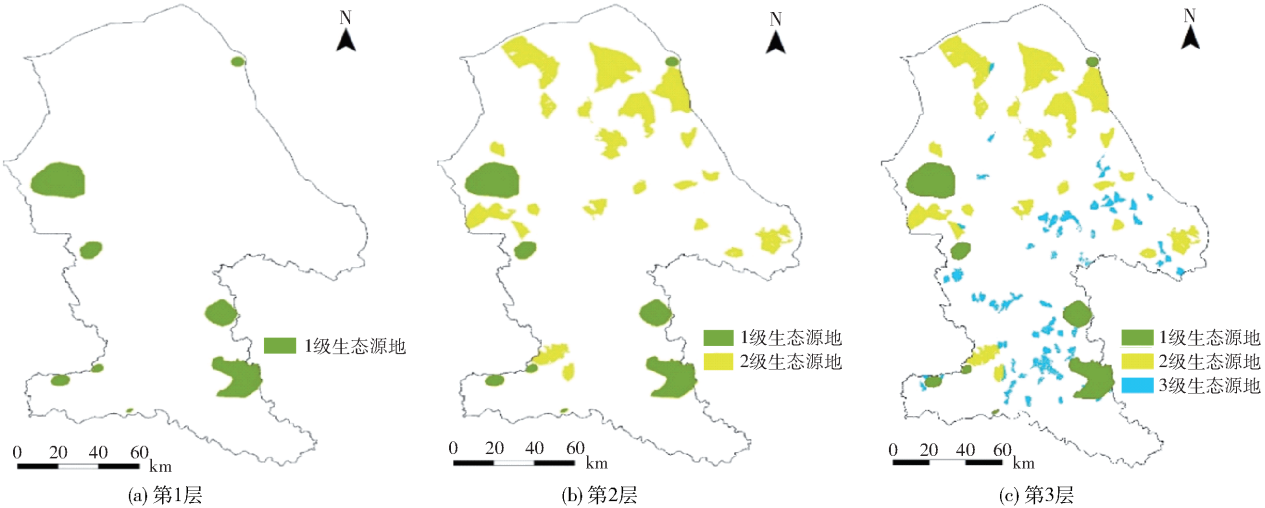


图 3 第 1、2、3 层生态源地

Fig. 3 The first, second and third layers of ecological sources

3 个等级,第 1 级源地能量因子值较高,生态服务价值大,共有 8 个,主要分布在腾格淖尔自然保护区、巴音杭盖自然保护区、红花敖包自然保护区、春坤山自然保护区、九峰山自然保护区、石门风景区、梅力更自然保护区、南海子湿地自然保护区附近。第 2 级生态源地在北部聚集分布,主要分布在查干淖尔苏木、查干哈达苏木、大苏吉乡、忽鸡沟乡等。第 3 级生态源地面积较小,集中分布在东部和南部,主要分布在新建乡、下湿壕乡、塔尔浑河等地。第 1 级源地随机分布,面积稍小,第 2 等级源地在大尺度上集中分布于包头市北部,第 3 级源地在大尺度上均匀分布在中部和南部,在小尺度上聚集分布。

2.2 层级生态廊道与生态节点的提取与分析

2.2.1 阻力面构建

包头市由中部山岳地带、北部高原草地和南部平原 3 部分组成,中间高、南北低、西高东低、南部较为平坦,DEM 最低值为 872 m。包头市中部有阴山山脉的大青山、乌拉山,DEM 最高值为 2 313 m,包头市 DEM 图如图 4 所示。

利用包头市 2016 年夏季的多光谱遥感影像提取研究区域的 NDVI 和 MNDWI(图 5),NDVI 最小值 -1,最大值 1,南部耕地区域和中部阴山林地景观的 NDVI 值较大。研究区 MNDWI 最小值为 -1,最大值为 1,水体呈现高亮显示,比较明显的是位于研究区南部的黄河、中部的艾不盖河和塔尔浑河、北部的腾格淖尔湖和开令河等。

包头市南部和中部阴山北侧农田密集(图 6),建筑建设用地主要分布在包头市城区附近,农田与建筑建设用地是包头市生态用地扩张的刚性限制。全境内草地景观为主要景观类型,林地景观主要分布在阴山山脉,水体景观主要分布在南部黄河及北部腾格淖尔保护区附近和艾不盖河、哈德门沟、昆都

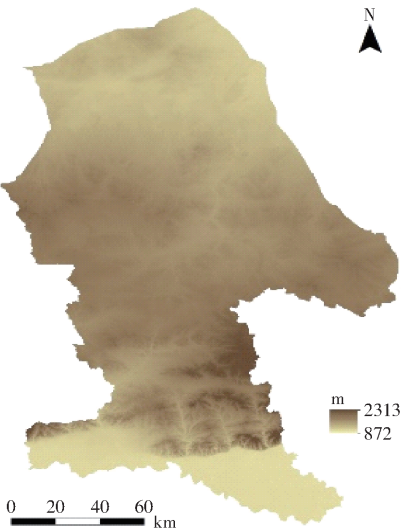


图 4 包头市 DEM 图

Fig. 4 DEM map of Baotou City

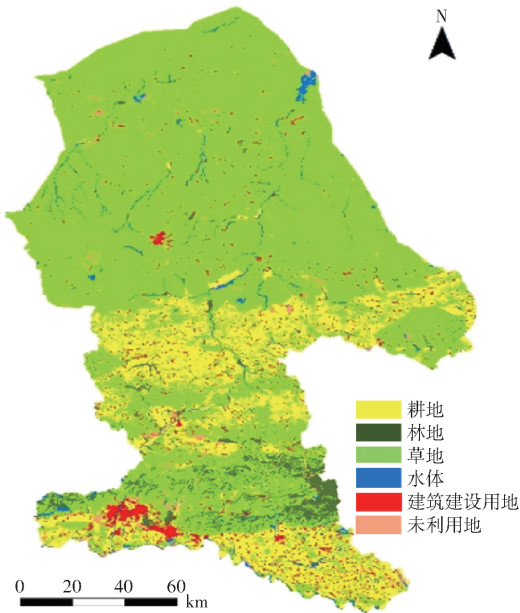


图 6 包头市土地利用图

Fig. 6 Land use map of Baotou City

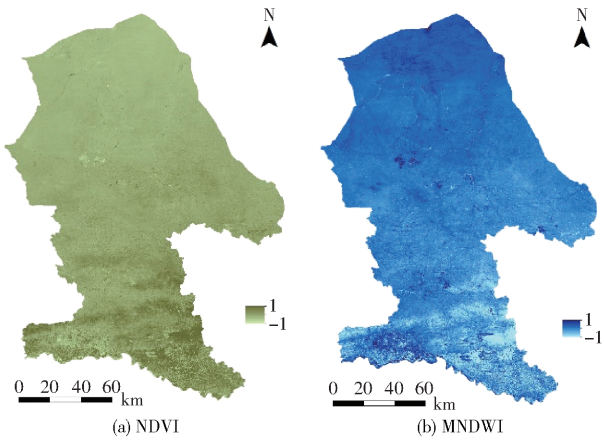


图 5 包头市 NDVI、MNDWI 图

Fig. 5 NDVI and MNDWI maps of Baotou City

仑河等。

考虑阻力因子进行 3 层生态阻力面模拟,并叠加生成最小累积生态阻力面(图 7),3 层生态源地

内部的阻力为 0。第 1 层生态源地的最小累积阻力最小为 0,最大为 2 408 730。第 2 层生态源地的最小累积阻力最小为 0,最大为 772 071。第 3 层生态源地的最小累积阻力最小为 0,最大为 719 061。城区及耕地地区外围阻力均较大,形成明显的累积阻力山脊线。第 1 层生态源地数量较少,源地间距离较大,导致其累积生态阻力较高。由于第 2 和 3 层生态源地中生态斑块数量增加,相邻源地间的距离变短,导致累积阻力明显降低。

2.2.2 生态廊道提取

基于 3 层生态源地及其最小累积阻力面,利用 ArcGIS 中 cost - path 模块,在研究区域内第 1 层生态源地共提取出 8 条潜在生态廊道,如图 8a 所示。最短的生态廊道为 1 km,最长的生态廊道为 340 km。

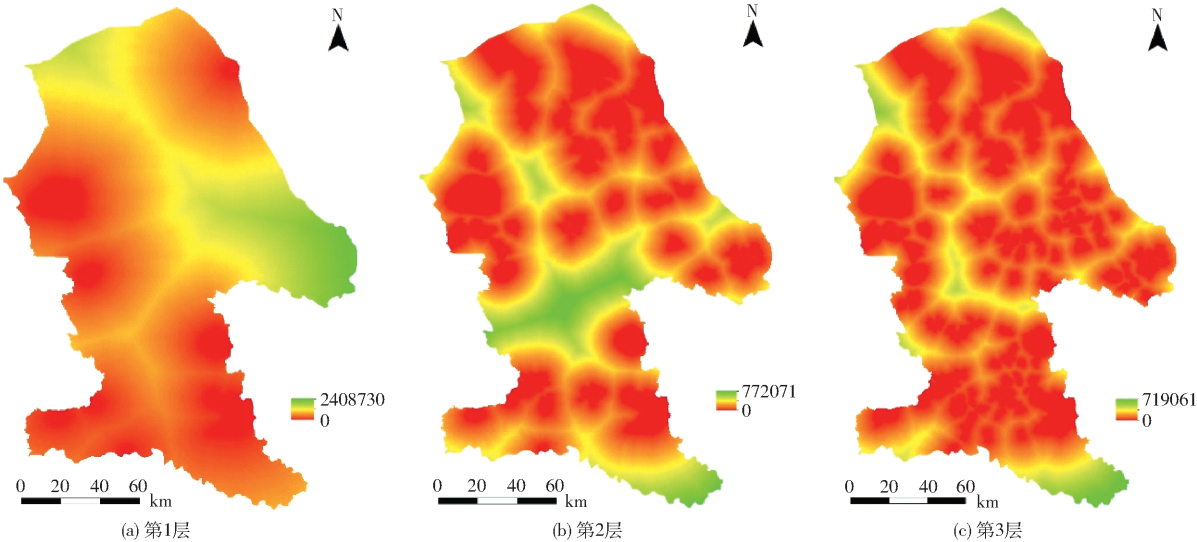


图 7 第 1、2、3 层生态源地最小累积阻力面

Fig. 7 The first, second and third layers minimum cumulative resistance surface

第 1 层生态廊道主要分布在红泥井乡、卜塔亥乡和大城西乡附近。由于中部农田密集,导致中部潜在生态廊道密度较低。第 1 层生态廊道平均距离较长

且较为脆弱,若遭到破坏会导致高层级生态源地间能量流动与物质交换受阻,严重影响层级生态网络的连通性。

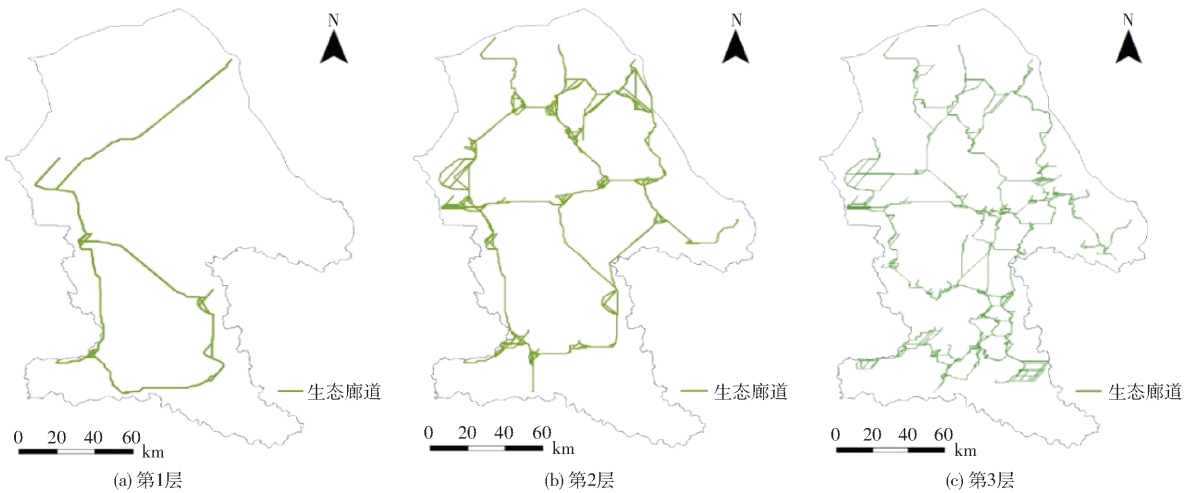


图 8 第 1、2、3 层潜在生态廊道

Fig. 8 Potential ecological corridor

第 2 层生态源地共提取出 35 条生态廊道,如图 8b 所示。最短的生态廊道为 1 km,最长的潜在生态廊道为 143 km。第 2 层潜在生态廊道主要分布在红泥井乡、卜塔亥乡和查干淖尔苏木附近。由于第 2 层生态源地增加了生态斑块,潜在廊道数量和密度增加,网络结构更加复杂。第 3 层生态源地共提取出 151 条生态廊道,如图 8c 所示。最短的生态廊道为 1 km,最长的潜在生态廊道为 139 km,潜在生态廊道主要分布在西斗铺镇、银号乡、五当召镇和塔尔浑河附近。由于第 3 层生态源地中部和南部生态源地数量增加,导致潜在生态廊道数量增加且生态廊道密度重心向南移动。第 3 层生态廊道平均距离较短,在遭到破坏后仅会影响局部生态能量流动与物质交换,重要性低于第 1 级与第 2 级生态廊道。所提取的 3 层生态廊道在空间上构成多层次的

生态网络骨架,在实际生态建设中应加强层次廊道附近生态建设,在空间大尺度与局部小尺度上来保证不同层级生态源地的能量流动与物质交换,从而维护区域生态稳定。

2.2.3 生态节点提取

层级生态廊道与对应最小累积阻力面山脊线交点的位置确定为生态节点,是层级生态网络中最薄弱且至关重要的点。第 1 层生态节点共有 7 个,主要分布在珠日和苏木、百灵淖尔乡、西斗铺镇和大西城乡附近,如图 9a 所示。第 1 层生态节点重要性最高,若遭到破坏,会导致空间大尺度上重要生态源地间能量传递受阻,景观连接性变差,极易引发层级网络的级联失效。第 2 层生态网络廊道数量显著增加,导致生态节点数量增加至 28 个,节点重心向北移动,主要分布在查干哈达苏木、希拉穆仁镇和石宝

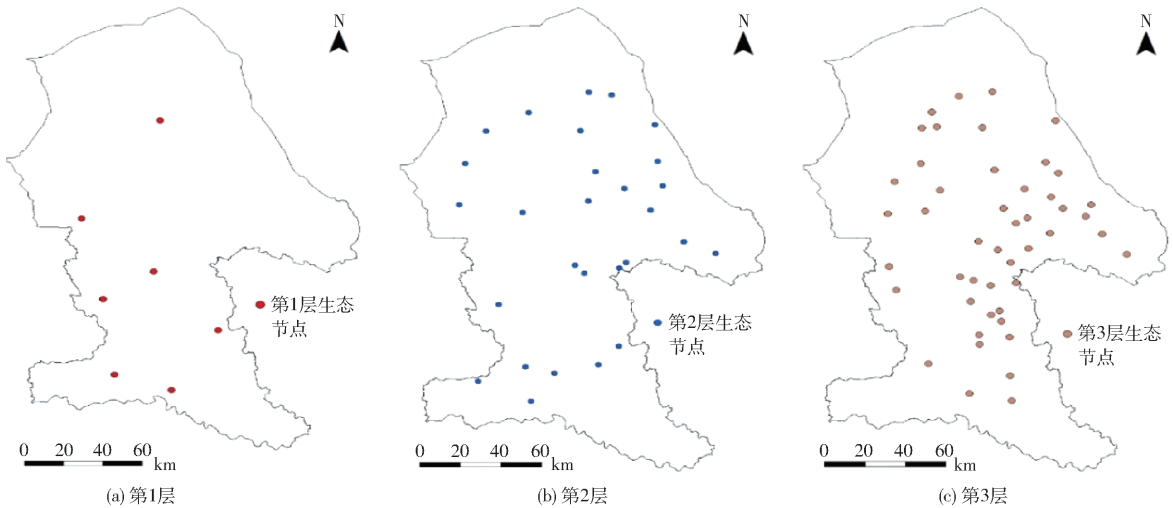


图 9 第 1、2、3 层级生态节点

Fig. 9 The first, second and third layers potential ecological nodes

镇附近,如图9b所示。第3层生态网络共有47个生态节点,在东部分布较为集中,如图9c所示。第3层生态节点若少量被破坏,会影响局部层级生态网络的连通性,对层级网络整体影响不大。在实际生态建设中,针对不同层级生态节点重要性不同进行不同规模的生态建设,在保证区域生态稳定的前提下,实现资源的最有效利用。

2.3 分层生态网络构建

最终得到研究区域的层级生态网络如图10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-面相互交织的层次空间生态网络。

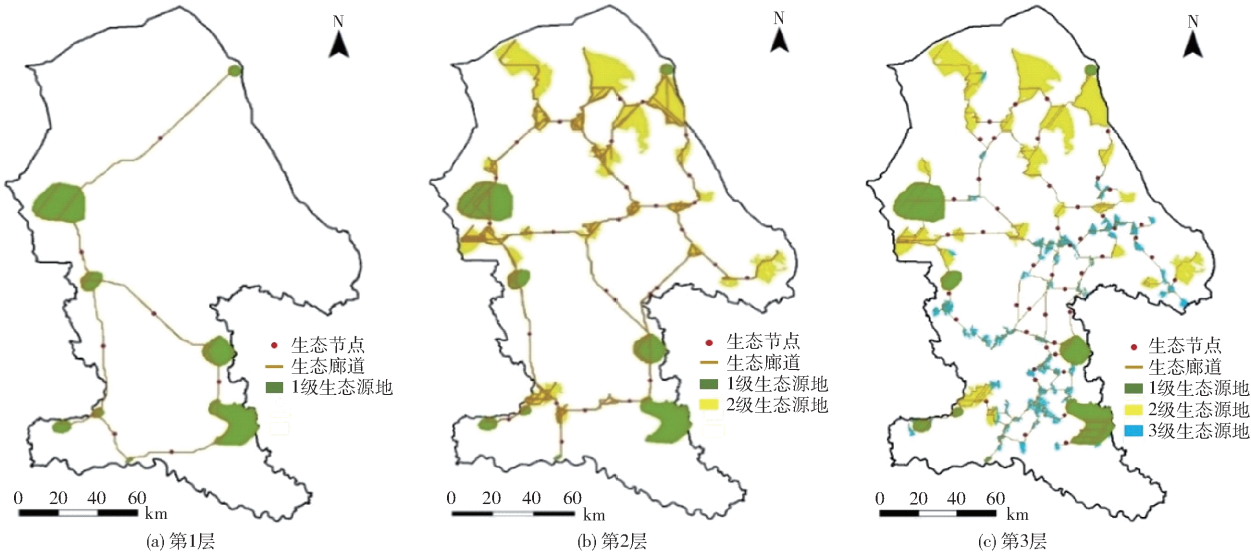


图10 第1、2、3层潜在生态网络

Fig. 10 The first, second and third layers potential ecological network

2.4 层级生态网络结构评价分析

基于对生态网络结构分析,可以得到第1、2、3层生态网络的指数分别为0.09、0.01、0.12,表明随着第1、2、3层生态网络中生态源地数量增加,网络中潜在生态廊道数量增加,网络中可供物质流动的回路越来越多。第1、2、3层生态网络的 β 指数分别为1、1.13、1.23,第1层生态网络为单一回路,网络结构简单。第2层与第3层网络随着生态廊道数量增加,生态源地的平均连通度变好。第1、2、3层生态网络的 γ 指数分别为0.44、0.40、0.42,第2层和第3层网络中连通性高的源地比例较少,导致第2层和第3层生态网络 γ 指数小于第1层生态网络。

3 结论

(1)提取包头市全域内所有草地、灌木林地、有林地共37765块,湖泊、河流等水体景观共1893

块。选取能量因子值大于1的生态斑块共784个,并以0.01、0.04、0.15的比例筛选作为1、2、3层生态源地。

(2)根据包头市的实际情况,建立生态阻力的评价体系。构建各层生态源地的累积阻力面,提取层次生态廊道与生态节点。在市域尺度上构成了分层的点-线-面相互交织的潜在生态网络。第1层由8个潜在生态源地、8条潜在生态廊道和7个生态节点构成,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。

(3)通过计算 α 、 β 、 γ 指数,对层级生态网络结构进行评价,随着生态源地与生态廊道数量增加,网络中可供物质流动的回路越多,生态源地的平均连通度越好。第2层和第3层网络中连通性高的源地比例较少。

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, 2008, 28(4):1711-1719.
KONG Fanhua, YIN Haiwei. Developing green space ecological networks in Jinan City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4):1711-1719. (in Chinese)

[2] 刘滨谊,王鹏. 绿地生态网络规划的发展历程与中国研究前沿[J]. 中国园林, 2010,26(3):1-5.

- LIU Binyi, WANG Peng. Green space ecological network planning: evolution and research frontier in China [J]. Chinese Landscape Architecture, 2010, 26(3):1-5. (in Chinese)
- [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. (in Chinese)
- [4] 王海珍, 张利权. 基于 GIS、景观格局和网络分析法的厦门本岛生态网络规划[J]. 植物生态学报, 2005, 29(1):144-152.
- WANG Haizhen, ZHANG Liquan. A GIS, landscape pattern and network analysis based planning of ecological networks for Xiamen Island [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2005, 29(1):144-152. (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, 18(6):37-43.
- HU Daosheng, ZONG Yueguang, XU Wenwen. Research on the construction of landscape ecological security pattern in the new urban region development based on ecology network analysis[J]. Urban Studies, 2011, 18(6):37-43. (in Chinese)
- [6] 傅强, 宋军, 毛锋, 等. 青岛市湿地生态网络评价与构建[J]. 生态学报, 2012, 32(12):3670-3680.
- FU Qiang, SONG Jun, MAO Feng, et al. Evaluation and construction of wetland ecological network in Qingdao City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(12):3670-3680. (in Chinese)
- [7] 韩博平. 生态网络分析的研究进展[J]. 生态学杂志, 1993, 12(6):41-45.
- HAN Boping. Progresses on the Analysis of Econetwork[J]. Chinese Journal of Ecology, 1993, 12(6):41-45. (in Chinese)
- [8] 李中才, 徐俊艳, 吴昌友, 等. 生态网络分析方法研究综述[J]. 生态学报, 2011, 31(18):5396-5405.
- LI Zhongcai, XU Junyan, WU Changyou, et al. A review of studies using ecological network analysis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(18):5396-5405. (in Chinese)
- [9] 史娜娜, 韩煜, 王琦, 等. 青海省保护地生态网络构建与优化[J]. 生态学杂志, 2018, 37(6):1910-1916.
- SHI Nana, HAN Yu, WANG Qi, et al. Construction and optimization of ecological network for protected areas in Qinghai Province [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(6):1910-1916. (in Chinese)
- [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. (in Chinese)
- [11] 王玉莹, 金晓斌, 沈春竹, 等. 东部发达区生态安全格局构建——以苏南地区为例[J]. 生态学报, 2019, 39(7):2298-2310.
- WANG Yuying, JIN Xiaobin, SHEN Chunzhu, et al. Establishment of an ecological security pattern in the eastern developed regions: a case study of the Sunan District [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7):2298-2310. (in Chinese)
- [12] 宁小莉. 基于层次分析法的包头市城市生态环境质量评价指标体系构建[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(4):1997-1998, 2052.
- NING Xiaoli. Construction of evaluation index system of urban ecological environment quality in Baotou city based on analytic hierarchy process [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(4):1997-1998, 2052. (in Chinese)
- [13] 程莉, 宁小莉. 包头市生态城市建设中社会进步指标评价[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(11):12-16.
- CHENG Li, NING Xiaoli. The assessment of social progress index in the eco-city construction for Baotou [J]. Resources and Environment in Arid Areas, 2014, 28(11):12-16. (in Chinese)
- [14] 代小, 李百岁. 基于 PSR 模型的包头市生态安全评价分析[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2010, 39(3):280-285.
- DAI Xiao, LI Bai. Assessment of ecological security of Baotou based on PSR model [J]. Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition), 2010, 39(3):280-285. (in Chinese)
- [15] 宁小莉. 包头市城市生态环境质量评价[J]. 阴山学刊(自然科学版), 2009, 23(1):43-46.
- NING Xiaoli. Evaluation on the urban ecological environment in Baotou City [J]. Yinshan Academic Journal(Natural Science Edition), 2009, 23(1):43-46. (in Chinese)
- [16] 邵景力, 崔亚莉, 李慈君. 包头市地下水-地表水联合调度多目标管理模型[J]. 资源科学, 2003, 25(4):49-55.
- SHAO Jingli, CUI Yali, LI Cijun. Comprehensive multi-objective management model for conjunctive use of ground and surface water in Baotou City, China[J]. Resources Science, 2003, 25(4):49-55. (in Chinese)
- [17] 刘忠梅, 赵明, 刘润民, 等. 包头市水资源承载力分析及持续利用研究[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2005, 34(2):223-227.
- LIU Zhongmei, ZHAO Ming, LIU Runmin, et al. Analysis of carrying capacity and sustainable use of water resources in Baotou City of Inner Mongolia [J]. Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition), 2005, 34(2):223-227. (in Chinese)
- [18] 刘君, 郭华良, 刘福亮, 等. 包头地区大气降水变化特征浅析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(5):157-162.
- LIU Jun, GUO Hualiang, LIU Fuliang, et al. A brief analysis of the characteristics of atmospheric precipitation change in Baotou Area [J]. Resources and Environment in Arid Areas, 2013, 27(5):157-162. (in Chinese)

data and terrestrial measurements for a Norway spruce[J]. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2016, 44(1): 313 – 323.

[15] STRAUB C, TIAN J, SEITZ R. Assessment of Cartosat – 1 and WorldView – 2 stereo imagery in combination with a LiDAR – DTM for timber volume estimation in a highly structured forest in Germany [J]. *Forestry*, 2013, 86(4): 463 – 473.

[16] 王海宾,彭道黎,范应龙,等. 基于辅助信息的森林蓄积量空间模拟[J/OL]. *农业机械学报*,2016,47(6):283 – 289. WANG Haibin, PENG Daoli, FAN Yinglong, et al. Spatial modeling of forest stock volume based on auxiliary information[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2016,47(6):283 – 289. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160637&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.037. (in Chinese)

[17] MCROBERTS R E, NÆSSET E, GOBAKKEN T. Inference for lidar-assisted estimation of forest growing stock volume [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 128:268 – 275.

[18] 王少杰,邓华锋,向玮,等. 基于混合模型的油松林分蓄积量预测模型的建立[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*,2018,46(2):29 – 38,46. WANG Shaojie, DENG Huafeng, XIANG Wei, et al. Establishment of predicting models for *Pinus tabulaeformis* stands volume based on mixed models[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2018,46(2):29 – 38,46. (in Chinese)

[19] 王金池,邓华锋,冉啟香,等. 基于哑变量的云南松蓄积生长模型[J]. *福建林学院学报*,2017,37(4):453 – 458. WANG Jinchi, DENG Huafeng, RAN Qixiang, et al. The volume growth model of *Pinus yunnanensis* based on dummy variables[J]. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2017,37(4):453 – 458. (in Chinese)

[20] URBANO E, MACHADO S D A, FIGUEIREDO F A, et al. Modeling of the stand volume for secondary species in native bracinga forests in the metropolitan region of Curitiba, Parana, Brazil [J]. *BOSQUE*, 2018, 39(2): 227 – 237.

[21] 徐伟恒. 手持式超站测树仪研制及功能测试研究[D]. 北京:北京林业大学,2014. XU Weiheng. Study on handheld tree measurement smart station manufacture and function test[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2014. (in Chinese)

(上接第 242 页)

[19] 陆宏芳,沈善瑞,陈洁,等. 生态经济系统的一种整合评价方法:能值理论与分析方法[J]. *生态环境学报*, 2005, 14(1):121 – 126. LU Hongfang, SHEN Shanrui, CHEN Jie, et al. A synthesis evaluation method of economical-ecosystem: emergy theory and analysis method [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2005, 14(1): 121 – 126. (in Chinese)

[20] 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*, 2010,30(2):421 – 428. LIU Xiaofu, SHU Jianmin, ZHANG Linbo. Research on applying minimal cumulative resistance model in urban land ecological suitability assessment: as an example of Xiamen City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(2):421 – 428. (in Chinese)

[21] 马世发,艾彬. 基于地理模型与优化的城市扩张与优化的城市扩张与生态保护二元空间协调优化[J]. *生态学报*, 2015,35(17):5874 – 5883. MA Shifa, AI Bin. Coupling geographical simulation and spatial optimization for harmonious pattern analysis by considering urban sprawling and ecological conservation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015,35(17):5874 – 5883. (in Chinese)

[22] 谢慧玮,周年兴,关键. 江苏省自然遗产地生态网络构建与优化[J]. *生态学报*,2014,34(22):6692 – 6700. XIE Huiwei,ZHOU Nianxing,GUAN Jian. The construction and optimization of ecological networks based on natural heritage sites in Jiangsu Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014,34(22):6692 – 6700. (in Chinese)

[23] VOLKOVA V V, CRISTINA L, ZHAO L, et al. Mathematical model of plasmid-mediated resistance to ceftiofur in commensal enteric escherichia coli of cattle[J]. *PLOS ONE*, 2012, 7(5):e36738.

[24] MANOJ K, SUSHILA D, PRIYANKA S, et al. Structure based in silico analysis of quinolone resistance in clinical isolates of salmonella typhi from india[J]. *PLOS ONE*, 2015, 10(5):e0126560.

[25] 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. (in Chinese)