基于最小费用距离的土地整治生态网络构建

路 晓[1], 王金满[1,2], 李新凤[1], 冯 宇[1]

〔1. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083; 2. 国土资源部 土地整治重点实验室, 北京 100035〕

摘 要: [目的] 构建土地整治生态网络体系,强化生态涵养功能,为减轻县域土地整治对生态环境的负面影响提供技术支撑。[方法] 基于最小费用距离模型,利用 ArcGIS 软件的 Cost Path 模块生成最小路径,构建"节点—廊道—基质"为一体的生态网络结构;并运用 Fragstats 4.2 景观格局分析和 ArcGIS 缓冲区分析,对生态网络景观格局指数和土地利用结构进行了分析。[结果] (1) 通过选定生态系统服务价值功能大的节点作为关键节点进行重点建设,充分发挥了园林的绿肺功能; (2) 通过加强廊道和基质建设,增加了景观连接度,实现了景观功能优化; (3) 通过生态连通度优化,改善了现存生态网络斑块的数量和质量,提高了生物物种多样性。[结论] 基于最小费用距离模型,通过景观格局指数分析将各种景观斑块整合成一个相对完整、稳定且连续的生态网络,使区域生态景观空间布局更加合理,可为县域土地整治生态网络构建提供理论依据和技术支撑。

关键词: 土地整治; 生态网络; 最小费用距离模型

文献标识码: B **文章编号**: 1000-288X(2017)04-0143-07 **中图分类号**: F301

文献参数: 路晓, 王金满, 李新凤, 等. 基于最小费用距离的土地整治生态网络构建[J]. 水土保持通报, 2017,37(4):143-149. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.024; Lu Xiao, Wang Jinman, Li Xinfeng, et al. Ecological network construction of county land consolidation and rehabilitation based on least cost distance model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017,37(4):143-149. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.024

Ecological Network Construction of County Land Consolidation and Rehabilitation Based on Least Cost Distance Model

LU Xiao[1], WANG Jinman[1,2], LI Xinfeng[1], FENG Yu[1]

〔1. *School of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing* 100083, *China*; 2. *Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Land and Resources, Beijing* 100035, *China*〕

Abstract: [Objective] In order to reduce the negative impact of land consolidation on the ecological environment, and to strengthen the ecological conservation function of county land, this paper constructed an ecological network system. [Methods] The path cost module of ArcGIS software was used to generate the least path and to construct the network structure of the "node corridor matrix". Moreover, Fragstats 4.2 landscape pattern analysis and ArcGIS buffer analysis were used to analyze the ecological network index of landscape pattern and land use structure. [Results] (1) The results showed that constructing the key nodes with high ecosystem service value function can exhibit the green lung function of the garden completely. (2) Strengthening the construction of corridor and matrix can increase the landscape connectivity and can realize the optimization of the landscape function. (3) Based on the optimization of ecological connectivity, the number and quality of the existing ecological network patch can be improved significantly, and the diversity of biological species can be increased markedly. [Conclusion] The path cost module was used to integrate landscape patches into a relatively complete, stable and continuous ecological network that can make the

收稿日期:2016-12-23 **修回日期**:2017-03-31

资助项目:国土资源部公益性行业科研专项"北方村庄压煤山丘区抗塌陷农田综合整治技术研究"(201411007-04)

第一作者:路晓(1991—),女(汉族),河南省范县人,硕士研究生,研究方向为土地整治与生态重建。E-mail:luxiao002016@163.com。

通讯作者:王金满(1979—),男(汉族),内蒙古自治区赤峰市人,博士,教授,博士生导师,主要从事土地整理复垦与生态恢复方面的研究。E-mail:wangjinman2002@163.com。

ecological landscape spatial distribution in the area more reasonable, which can provide theoretical basis and technical support for ecological network construction of land remediation.

Keywords: land consolidation and rehabilitation; ecological network; the least cost distance model

快速城市化在产生巨大经济效益的同时加剧了景观破碎度,干扰了正常的景观生态过程和生态调控能力,导致生态服务功能降低。土地整治是新时期增加耕地面积,提高粮食产量的重要手段,然而土地整治通过生物及工程措施改变了土地利用空间结构和土地覆被状况,对景观多样性和空间格局产生了影响[1]。加之目前土地整治的一大目标就是通过生物生境修复实现生态网络建设,提升水土安全,保护生物多样性,提高乡村生态服务功能和景观价值,并促进乡村休闲旅游发展[2]。因此,在土地整治过程中构建生态网络、加强景观生态建设,成为土地整治健康持续发展的迫切需求,也是促进土地整治从以耕地数量为主向耕地数量、质量和景观生态保护并重转变的有效途径[3]。生态网络是由各种类型的生态功能区、生态廊道和生态节点形成的生物种群间互利共生的复合网络。它是基于系统学原理的生态要素相互作用的规划构建,通过生成节点、廊道和踏脚石连接破碎的生境,提高景观连通度,促进绿地斑块间的基因交流和物种迁移的多途径生态恢复方式[4]。这种复合网络结构保证了物质、能量、信息在各斑块之间的流通,可使物种从不适宜地区迁移到适宜地区[5],同时个别廊道或斑块的消失也不会改变区域生态系统的整体功能[6]。然而针对土地整治过程中出现的生态环境恶化等问题,已有研究中采取的整治措施往往局限于植树种草、护坡治理等单项工程,而未能从整体角度出发,构建生态网络,发挥整体功能最大化的特点,致使出现"财力物力投入大,而效果不佳"的局面。因此,构建生态网络成为加强土地整治生态环境保护的有效途径。目前大量学者对景观生态网络的构建进行了研究。基于生物空间运动潜在趋势与景观格局改变之间的关系,Knaapen 等[7]提出了用最小费用距离模型作为景观格局优化的依据,它能够很好地揭示景观格局与生态过程和功能的关系,为景观格局优化提供一定的理论基础。岳德鹏等[8]与魏伟等[9]针对北京西北地区和石羊河流域,在 GIS 和 RS 支持下,依据累积费用距离理论构建源地、生态廊道和生态节点等景观组分来加强生态网络的空间联系,并提出了景观优化方案。刘杰等[10]运用最小费用距离模型对区域景观格局进行优化,同时针对节点、源地和廊道进行了细部规划与设计。目前最小费用距离模型在景观格局优化方面的研究较为成熟,但在土地整治中应用最小费用距离模型的研究较少,故本文将最小费用距离模型引入土地整治生态网络问题的研究,通过设定节点,将其作为生态源,计算最小费用距离和方向,生成最小费用路径,构建生态廊道,并将理论廊道与实际廊道对比分析,提出景观格局优化策略,以期为县域土地整治生态网络构建提供理论依据和技术支撑。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

选择北京市平谷区为研究区域,位于北纬 40°02′—40°22′,东经 116°55′21″—117°24′07″,该区南北约38.5 km,东西约 40.25 km,现状土地总面积 948.35 km^2,地处北京东部,是北京市远郊区县之一。平谷区属暖温带大陆性季风气候,四季分明;北、东、南 3 面环山,地形上东北高西南低,且平原区约占全区面积的 30%;土壤主要有棕壤、褐土、潮土 3 个土类,其中褐土和潮土占全区面积的 98.4%;是独立的山间盆地水文地质单元区,其水系不受市工业发达地区工业污染的影响,尤以储量丰富的地下水资源更为出色,水质优良。平谷区生态环境存在较多隐忧,正确处理好土地利用与生态保护的关系难度较大。一方面,自上而下的发展定位要求严格进行土地生态保护,加强退耕还林工作,经济发展、生态建设、耕地占补平衡之间的矛盾比较突出。另一方面,农村基础设施和人居环境质量差,沟路林渠破损严重,乡村河流生态功能缺失。因此,平谷区需要强化土地整治生态涵养以及景观建设的内涵,既要提高土地综合生产能力、改善生态环境,还要提高生态景观服务功能,挖掘城乡景观的美学价值和文化价值。

1.2 数据来源及处理

以研究区 2014 年 Spot 遥感影像为基础数据,利用 ENVI 4.6 软件对遥感影像进行了图像校正等预处理,然后采用监督分类法进行图像解译,并使用 Confusion Matrix 等工具通过设置混淆矩阵参数,结合野外实地调研,不断地对解译结果进行修改和校正,最终获得解译精度满足研究区景观分析精度要求的土地利用现状图。最后利用 ArcGIS 10.2 软件获得研究区耕地、林地、园地、水域、其他草地、裸岩石砾地和建设用地 7 种景观分布图如附图 4 所示。

2　研究方法

2.1　最小费用距离模型

最小距离模型是以景观生态学和保护生态学等理论为基础,通过考虑景观的地理学信息和生物体的行为特征,反映景观格局和水平生态过程,在土地整治生态网络构建过程中,选用最小费用距离模型可以通过不同土地利用类型对不同物种的生境适宜性大小构建阻力面,再利用 ArcGIS 生成潜在生态廊道,可以较为科学地确定生态廊道的位置和格局。最小费用距离是指从源经过不同阻力的景观所耗费的费用或者克服阻力所做的功。其计算是通过景观单元的成本因子修正直线距离,即通过确定物质、能量等在空间流动所需的耗费系数来计算每个单元与源点单元之间的距离最短、成本最低的最小费用距离。费用距离的分析都需要源点和费用分布图,其目的是为计算每一个基本像元通过一个费用表面到最近源的最小累积费用距离,常采用基于节点/链接的像元表示法进行计算[11],即像元的中心称为节点,每个节点被多条链连接,每条链接都具有一定的抗阻,其取决于链接所联系的单元的费用值与运动的方向。通过某一费用表面到源的累积费用距离计算公式为:

$$A=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}(c_i+c_{i+1}) \quad (1)$$

$$A=\frac{\sqrt{2}}{2}\sum_{i=1}^{n}(c_i+c_{i+1}) \quad (2)$$

式中:C_i——第 i 个像元的费用值;C_{i+1}——沿运动方向上第 $i+1$ 个像元的费用值;n——像元总数;A——指通过某一费用表面到源的累积费用距离;当通过某一费用表面沿着像元的垂直或者水平方向运动时采用公式(1)计算;当通过某一费用表面沿着像元的对角线方向运动时采用公式(2)计算。

累积费用距离可反映生态源运动的空间趋势[10]。物种在迁移扩散时,不同景观要素或土地利用类型会对该运动产生一定的阻力,物种在克服这一阻力所做的功即为最小累积费用距离[12]。

2.2　土地整治生态网络构建

2.2.1　*阻力值的确定*　景观阻力是指物种在不同景观单元之间迁移的难易程度,一般斑块生境适宜性越高,物种迁移的景观阻力越小。本研究根据生态系统服务价值强度来确定景观阻力的大小,各景观类型生态系统服务价值参考 Costanza 等[13]、陈仲新等[14]的研究,由于市场失效和生态系统功能与服务的复杂性,对以上生态系统服务价值的评估结果有较多的异议,且单位面积生态系统的服务功能价值不仅取决于生物量,而且取决于其在空间的位置。因此,本文依据谢高地的利用意愿价值调查评估法根据中国实际情况对生态系统服务价值进行调整,建立的中国不同陆地生态系统单位面积生态服务价值(表 1)[15-16]。根据表中各景观类型生态系统服务价值的相对差异并结合研究区土地整治现状,将景观阻力值划定在 0～100 之间,对区域不同土地利用类型的景观阻力进行赋值[10]。研究区水域单位面积生态系统服务价值功能最高,阻力最小,阻力值设为 10;建设用地单位面积生态服务功能最低,阻力最大,阻力值设为 100,其他景观类型阻力值的范围 10～100(表 2)。在景观类型阻力值确定的基础上,采用 ArcGIS 10.2 软件生成景观阻力面如附图 5 所示。

表 1　2007 年中国各土地类型单位面积生态服务价值　　元/(hm² · a)

土地利用类型	食物生产	原材料生产	气体调节	水文调节	废物处理	保持土壤	维持生物多样性	娱乐文化	总计
农 田	449.10	175.15	323.35	435.63	345.81	624.25	660.18	76.35	3 547.89
林 地	148.20	1 338.32	1 940.11	1 827.84	1 836.82	772.45	1 805.38	934.13	12 628.69
草 地	193.11	161.68	673.65	700.60	682.63	592.81	1 005.98	390.72	5 241.00
河流湖泊	238.02	157.19	229.04	925.15	8 429.61	6 669.14	184.13	1 994.00	20 366.69
湿 地	161.68	107.78	1 082.33	6 085.31	6 035.90	6 467.04	893.71	2 106.28	24 597.21
荒 漠	8.98	17.96	26.95	58.38	31.44	116.77	76.35	107.78	624.25

2.2.2　*节点的确定*　节点是物质、能量甚至功能服务的源头和汇集处,在景观功能网络中,节点可以是具体的景观斑块或类似功能斑块的中心。本文选取生态系统服务价值和斑块密度均较高的水域、林地与园地,并按生态系统服务价值强度大小划分为 3 级生态节点,实现了提高生态网络中斑块聚集程度的目的。在此基础上,采用 ArcGIS 10.2 软件提取一定规模的水域、林地和园地斑块作为生态节点,并将不同的节点看作不同的生态源。由于不同面积的生态斑块,发挥的生态效能也不一样[17],一般来说,面积大的斑块服务半径也相对较大,大型植被斑块在涵养水源、维持物种数量与健康、规避干扰等方面作用更大。

根据面积较大、数量适当且尽量遍布区域的原则，提取研究区内斑块作为生态源。由于区内水域斑块较少，仅选取对区域有重要作用的斑块作为一级节点；而区域内林地斑块和园地斑块数量庞大，在选取斑块时要求斑块面积应为最大斑块面积的1/2以上。因此，最终确定将大于300 hm^2 的1个水域斑块作为一级节点，大于60 hm^2 的10个林地斑块作为二级节点，大于65 hm^2 的6个园地斑块作为三级节点，使相互之间的联系更紧密，更有助于生物物种在生态廊道及网络中扩散与迁移，提高生态系统功能。

表2 平谷区景观类型阻力值确定

景观类型	面积/hm^2	所占比例/%	阻力值	景观类型	面积/hm^2	所占比例/%	阻力值
水域	3 944.26	4.16	10	其他草地	6 140.67	6.48	70
林地	34 932.92	36.34	20	裸岩石砾地	1 597.52	1.68	80
园地	23 844.05	25.15	30	建设用地	16 196.70	17.08	100
耕地	11 861.09	12.51	40				

2.2.3 *廊道的生成* 生态廊道可以将各生境斑块连接在一起，从而减少景观破碎化对生物多样性的影响。本文利用表2土地利用景观阻力值得到附图5所示的平谷区景观类型阻力面。区域中高阻力区主要分布在南部和西南部，是建设用地、交通用地和裸岩分布最为密集的类型区，对生物物种扩散的阻隔作用明显，因此必须在生态网络规划中加以改善，以增加生境斑块间的连接度水平。同时，改善其植被组成结构和增加物种多样性，对于改善与优化生态网络结构非常重要。低阻力区主要集中在研究区北部，以绿地、农田和河流为主，是研究区内生态系统最为完整、生态环境质量最好的区域，承担着区域水源涵养、生态屏障和生物多样性保护的重要作用。生态廊道的生成主要是通过计算源与目标之间的最小累积费用值来获取。本文选取不同等级生态节点作为源，借助ArcGIS 10.2软件地理信息系统空间分析工具中的Cost Distance模块生成累积费用距离分布图(图1)。然后采用Cost Back Link模块计算最小费用方向，基于累积费用距离和最小费用方向，利用Cost Path追踪目的单元和源点之间的路径并提取最小费用路径，将生成的最小费用路径作为生态网络的生态廊道，并将生成的理论廊道与研究区实际廊道相叠加。多数廊道与道路河流分布一致，穿越廊道的景观阻力较低，廊道构建成本也较小，故选取本区关键道路与河流作为本区主要生态廊道，符合生态网络结构分布特征。

2.2.4 *基质的确定* 基质是景观镶嵌内的背景生态系统或土地利用类型，是景观中最广泛连通的部分，其通透性对生态网络的连接度有重要的影响。本研究将住宅区、商业区、工业区和农业区确定为生态网络中的基质。住宅区主要通过建立绿地系统维护小区绿化，实现生态网络连接；商业区与工业区主要通过建立景观廊道实现区域生态建设；而农业区作为重要的生态区域，自身具备改善生态环境的能力，在生态网络构建中需重点考虑。

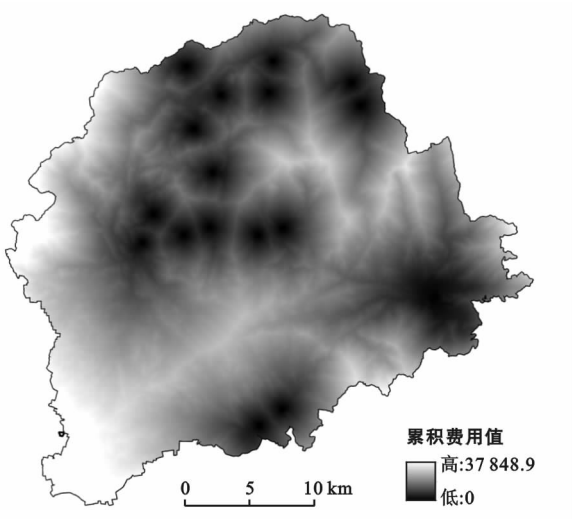


图1 平谷区景观累积费用距离分布

2.3 土地整治生态网络分析与优化

2.3.1 *生境斑块景观格局分析* 本文采用Fragstats 4.2景观格局分析软件计算景观格局指数。景观格局指数是指能够高度浓缩景观格局信息，反映其结构组成和空间配置等特征的简单定量指标[18]。通过景观格局指数分析可以揭示生态网络斑块结构变化的特征和机制以及对区域生态系统的影响。根据本研究区域的特点，本文选择斑块数(NP)，斑块密度(PD)，斑块类型面积(CA)，斑块面积比例(PLAND)，最大斑块指数(LPI)，面积加权平均斑块面积(AREA_AM)，多样性指数(SHDI)，斑块多度(PR)，斑块连接度(COHESION)等景观格局指数。平谷区绿地斑块景观指数详见表3，通过景观格局指数分析生态网络的空间连通性，并依据连通状况对生态网络进行优化。

2.3.2　生态廊道土地利用结构分析　最小累积费用模型生成的生态廊道缺乏实际建设需要的宽度特征,在发挥其生态服务价值和保护生物多样性方面有一定的局限性。随着廊道宽度的增加,环境异质性增强,进而造成物种多样性的增加,但宽度对物种数量的影响效应存在不一致性。因此本文依据张红旗等[19]的研究结果,以生态网络结构为基础,通过缓冲区空间分析,分别得到以 5,10,20,30,60,100,200,400 和 600 m 为廊道宽度的各缓冲区内生态用地、生态生产用地、生产生态用地和生活生产用地的面积比例(表 4)。将廊道宽度大于临界值的廊道提取出来,并剔除经过同一生境斑块而造成的冗余廊道,得到研究区最佳廊道宽度值,从而提高生态网络的整体质量,进而实现对生态网络优化。

表 3　平谷区现状绿地斑块景观指数　　hm^2

土地利用类型	斑块数	斑块密度	斑块面积	面积比例	最大斑块指数	斑块面积加权平均	多样性指数	斑块多度	斑块连接度
水域	517.00	0.55	3 973.12	4.19	0.50	78.55			0.23
林地	475.00	0.50	34 931.20	36.84	19.47	10 526.65			0.33
园地	573.00	0.60	23 749.12	25.05	10.65	5 283.30			0.34
耕地	361.00	0.38	11 886.08	12.54	2.23	867.73			0.58
其他草地	302.00	0.32	6 080.00	6.41	0.55	127.33			0.43
裸岩石砾地	388.00	0.41	1 646.08	1.74	0.05	9.42			0.16
建设用地	672.00	0.71	12 544.00	13.23	2.84	677.13			0.24
合计或平均	3 288.00	3.47	94 809.60	100	36.29	17 570.11	1.62	7.00	

表 4　不同廊道宽度内土地利用功能类型面积比例　　%

土地利用功能类型	廊道宽度/m								
	5	10	20	30	60	100	200	400	600
生态用地(水域+林地)	19.36	19.31	19.28	19.28	19.45	19.58	19.93	20.97	22.13
生态生产用地(其他草地+林地)	17.26	17.23	17.22	17.29	17.54	17.66	17.93	19.17	20.47
生产生态用地(耕地+园地)	38.09	38.15	38.33	38.41	38.50	38.72	39.14	38.94	38.22
生活生产用地(建设用地+裸岩)	25.30	25.30	25.17	25.02	24.52	24.03	22.99	20.91	19.17

3　基于生态网络的土地整治生态环境建设及优化

3.1　关键节点建设

景观格局指数中的斑块连接度可较好地识别出生态网络中的核心斑块,形成物种保护的适宜生境。本文选取的生态节点主要为生态服务价值大、面积也大的水域、林地与园地斑块,因此在土地整治生态环境建设过程中需要有针对性的进行关键节点的建设。本文结合平谷区土地利用规划,实地勘察分析植被组成、绿地布局等因素,利用 GIS 查询功能,选取斑块面积大于 5 hm^2 的主要水域作为一级节点,面积 2～5 hm^2 的主要林地作为二级节点,参考生态服务价值(表 1)和景观格局分析结果(表 3),选取斑块面积 1～2 hm^2 的主要园地作为三级节点,得到研究区基于景观格局指数的一级节点 1 个,二级节点 10 个,三级节点 6 个,有助于生物种在生态廊道及网络中扩散与迁移,提高生态系统功能。

3.1.1　一级节点　一级节点为水域斑块。自然河流、人工水渠、水库等共同构成了平谷区水域系统,主要河流有洵河、洳河(原错河)和金鸡河,主要水库有海子水库、黄松峪水库和西峪水库,作为北京市重要的供水源地,是建设的重点,也是本区今后发展建设的首要任务。

3.1.2　二级节点　二级节点为林地斑块,主要位于中北部地区和东部地区。在土地整治生态环境建设过程中应采用乔、灌、草立体配置模式对二级节点进行建设,以充分发挥林地净化空气、含蓄水源、保持水土的生态功能,实现生态环境保护。同时,结合新农村和小城镇加强城镇绿地系统建设,以改善城镇生态环境。平谷区境内的四座楼保护区,是北京市级自然保护区,要严格划分核心区、缓冲区与外围区,实施严格的管理措施。

3.1.3　三级节点　三级节点为园地斑块,主要分布在北部地区,在南部地区主要沿道路成带状分布。园地应发挥其自身的生态阻隔及景观功能,在土地整治过程中可采取一系列具体措施,实现生态网络连接。首先,在园地斑块之间建造植物篱或农田防护林带,

营造动物栖息地，以加强生态联系，保护多样性；其次，建造园地生态化道路和沟渠，通过恢复灌草防止水土流失，起到减少道路和沟渠的阻隔效应。

3.2 生态廊道建设

生境廊道优化是提高生境连通性、保护生物多样性的重要保障。根据生态廊道缓冲区分析结果（表4），研究区内生态网络主要构成要素为生产生态用地，且随着廊道变宽，其面积不断减少，说明此生态网络结构良好。此外，通过对生态廊道不同缓冲距离的分析可以看出，在较窄廊道宽度（如20 m）下，生态用地和生态生产用地均呈现减少趋势，达到30 m及以上时面积不断增加。但生产生态用地在廊道宽度小于200 m时面积逐渐增加，达到200 m及以上后不断减少，明显降低了生态廊道的整体质量，且由于生态廊道大多为人类活动影响较弱的地区，说明平谷区适宜构建100 m以内的道路生态廊道和30～100 m的水系廊道。

河流廊道生态功能最重要的2个影响指标是连续性和宽度，河流两边应该保持足够宽度的植被带，以控制来自两岸的污染物质，并为物种提供足够的生境和通道。因此，在河流廊道建设过程中将两侧的林网宽度设置为30～100 m，同时道路两侧的林网设为100 m以下。高风险区增加缓冲带建设可以降低面源污染负荷，因此可在河流与农田之间增设缓冲带，种植重金属吸附作用强的植被，减轻重金属污染[20]。由于平谷区中北部地区实际道路与河流廊道较少，且孤立的生态廊道无法实现生态流的连续，因此在土地整治生态环境建设过程中，需要根据生成的廊道位置通过建设防风林带等方式增设廊道。此外，平谷区中、北部廊道存在不连续问题，需要建设片林或小块绿地等方式来增设踏脚石，以增加物种在斑块间的运动，使生态网络结构更加连续、稳定。

3.3 基质优化

在基质建设中，要避免生态服务功能较强的景观组分和低功能组分直接相邻，造成生态环境的恶性循环[9]。通过分析土地利用生态服务价值（表1）和景观格局指数（表3）可知，生态服务大小顺序为：河流＞林地＞草地＞农田，其斑块连接度大小顺序为：耕地＞草地＞园地＞林地＞建设用地＞水域。为避免住宅区、商业区、工业区等生态功能较弱的基质与周边景观功能在空间格局上的直接冲突，需在邻接地带配置草地、园地和农田等景观组分，这些组分对建筑群、道路等高阻力景观一定的缓冲作用，有助于生态功能的维持和协调[8]。另外，鉴于生态网络的连通性和美观性，可在农村居民点和农田之间种植绿化隔离带，进行乔—灌—草—花合理搭配，既有利于提高生态服务工程，又具有较好的观赏性。

3.4 连通性优化

生态网络格局可以通过生态用地的斑块个数、斑块密度、破碎度和斑块聚集度等指数来反映。在土地整治生态网络重建过程中，生态廊道的变更会阻隔区域内主要景观生态单元之间的能量和信息交流，且阻力值越大的地方生态连通性越弱。因此可通过土地整治建设用地复垦、零散田块合并、田间道路修整和硬质地面减少等方式增强景观生态网络的连通性。通过分析研究区景观格局指数（表3）可以看出，其绿地多样性指数为1.62，斑块多度为7.00，表明平谷区生态网络结构较丰富；由斑块密度可以看出各地类斑块分布较分散。而从斑块数、面积加权平均斑块面积可以看出，平谷区内景观破碎度较大，斑块分布比较分散。由表2可知，各地类斑块中林地和园地占主导地位，控制着整个生态网络的景观功能。平谷区分布着较多的农田和村庄，建有苗圃地、果园等基地，向城区提供绿化所需的植物材料。从斑块连接度可以看出斑块类型中生产绿地分布最聚集，说明其生态网络的空间连通性程度最高，而水域的斑块连接度相对较低，因此应在生态网络规划中加强水域的景观连通性。在研究区斑块面积比例和最大斑块指数中，林地和园地是优势景观类型，而耕地、水域、建设用地等斑块面积比例很小，应该促进生态网络规划的均衡布局，引导景观结构优化布局，实现道路等建设用地和绿地空间资源的有序配置，从而改善现存生态网络斑块的数量和质量。

4 讨论与结论

（1）基于最小费用距离模型，构建“节点—廊道—基质”为一体的生态网络结构，可有效维护土地生态系统的整体性，增加生态系统的稳定性，为构建县域土地整治生态网络提供理论依据和技术支撑。

（2）平谷区“节点—廊道—基质”一体的土地整治生态网络构建方案为：选取1个水域斑块作为一级节点，10个林地斑块作为二级节点和6个园地斑块作为三级节点；通过利用现有廊道，增设廊道和踏脚石进行生态廊道建设；增加基质的通透性，实现生态网络连接。

（3）通过实施工程和生物措施加强土地整治生态环境建设及优化。首先，强化关键生态节点建设，加强区内水域重点监测与保护，严格管理自然保护区，充分发挥农田的绿肺功能。其次，建设重点生态廊道，在区内建设道路与河流林网系统，并增设踏脚

石,增加景观连接度。最后,加强基质建设,在住宅区、商业区等建立绿地系统和景观廊道,实现景观功能优化。

(4) 与传统分析方法相比,通过应用景观格局指数、最小费用距离模型、廊道宽度等多种方法构建区域生态网络,可更好地反映斑块水平、景观水平、网络结构特征和生态过程需求,为定量化评价县域生态系统合理性提供依据,然而目前的生态廊道宽度适宜性分析研究和应用尚处于尝试阶段,需要更多的案例进一步丰富和完善。

[参 考 文 献]

[1] 刘纪远,邵全琴,延晓冬,等. 土地利用变化对全球气候影响的研究进展与方法初探[J]. 地球科学进展,2011,26(10):1015-1022.

[2] 郧文聚,宇振荣. 土地整治加强生态景观建设理论、方法和技术应用对策[J]. 中国土地科学,2011,25(6):4-9.

[3] 王军,李正,白中科,等. 喀斯特地区土地整理景观生态规划与设计[J]. 地理科学进展,2011,30(7):906-911.

[4] Opdam P, Wascher D. Climate change meets habitat fragmentation: Linking landscape and biogeographical scale levels in research and conservation[J]. Biological Conservation, 2004,117(3):285-297.

[5] Thomas C D, Cameron A, Green R E, et al. Extinction risk from climate change[J]. Nature, 2004,427(6970):145-148.

[6] Opdam P, Steingröver E, Rooij S V. Ecological networks: A spatial concept for multi-actor planning of sustainable landscapes[J]. Landscape and Urban Planning, 2006,75(3/(4):322-332.

[7] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning[J]. Landscape and Urban Planning, 1992,23(1):1-16.

[8] 岳德鹏,王计平,刘永兵,等. GIS 与 RS 技术支持下的北京西北地区景观格局优化[J],地理学报,2007,62(11):1223-1231.

[9] 魏伟,赵军,王旭峰. GIS,RS 支持下的石羊河流域景观利用优化研究[J]. 地理科学,2009,29(5):750-754.

[10] 刘杰,叶晶,杨婉,等. 基于 GIS 的滇池流域景观格局优化[J]. 自然资源学报,2012,27(5):801-808.

[11] 陈利顶,傅伯杰,赵文武. "源""汇"景观理论及其生态学意义[J]. 生态学报,2006,26(5):1444-1449.

[12] 李纪宏,刘雪华. 基于最小费用距离模型的自然保护区功能分区[J]. 自然资源学报,2006,21(2):217-224.

[13] Costanza R, Arge R, Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997,6630(387):253-260.

[14] 陈仲新,张新时. 中国生态系统效益的价值[J]. 科学通报,2000,45(1):17-22.

[15] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报,2003,18(2):189-196.

[16] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报,2008,23(5):911-919.

[17] Herzele A V, Wiedemann T. A monitoring tool for the provision of accessible and attractive urban green spaces [J]. Landscape and Urban Planning, 2003,63(2):109-126.

[18] 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.

[19] 张红旗,许尔琪,朱会义. 中国"三生用地"分类及其空间格局[J]. 资源科学,2015,37(7):1332-1338.

[20] 潘影,刘云慧,王静,等. 基于 CLUE-S 模型的密云县面源污染控制景观安全格局分析[J],生态学报,2011,31(2):529-537.