

基于加权 Voronoi 图的北京市湿地功能分区研究

苗李莉^{1,2}, 蒋卫国^{3*}, 万 圆^{1,2}, 何 湜^{1,3}, 陈云浩^{1,2}

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学资源学院, 北京 100875;
3. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要: 湿地功能分区是城市湿地生态系统健康恢复、管理改善, 以及资源可持续利用的重要前提。本文以北京湿地为例, 利用客观赋权的主成分分析法对湿地生态服务功能进行综合评价; 并结合空间分析中的 Voronoi 图空间分区方法, 通过利用牛顿-断裂点模型确定属性权重的主要步骤, 构建基于加权 Voronoi 图的城市湿地功能分区模型, 开展“自下而上”量化的北京湿地功能分区研究。结果表明: (1) 北京湿地功能综合评价中, 密云水库湿地的功能综合值最大, 表明该湿地生态服务功能作用最重要。 (2) 北京湿地功能分区分为三级框架, 其中包括4个一级核心湿地功能区、15个二级核心湿地功能区、43个三级核心湿地单元。 (3) 湿地资源功能价值量与湿地斑块空间关系的相结合, 实现了属性和空间双重距离约束的湿地功能分区, 促进了湿地生态系统服务价值评估在决策管理中的深入应用, 为城市湿地功能区划提供技术支持。

关键词: 北京; 湿地; 功能价值; Voronoi 图; 功能分区

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2013.00554

1 引言

城市湿地是城市生态系统重要的组成部分。其在维护区域生态平衡和稳定环境功能中具有巨大作用, 在复杂的城市复合生态系统中有着重要的、不可或缺的地位。为了满足生态系统健康恢复、生态系统管理改善, 以及生态系统资源持续利用的战略新需求, 作为生态系统管理的重要手段, 开展科学合理的生态功能区划, 已成为世界各国走向可持续发展所面临的关键挑战之一^[1]。

湿地生态服务功能的评价是湿地功能区划的基础。尤其是以价值评价为代表的研究已在国内外取得了大量的研究成果^[2-4]。但是, 目前大多数评估结果都仅仅是被当作一个政策参考, 或者纯粹就只是一种学术行为^[5]。湿地生态系统服务功能价值评估的最终目的是应用到政策、计划和规划的各个层次; 这一工作在具体实施过程中却存在空白^[6]。因此, 在新的社会经济发展形势下, 促进湿地生态系统服务价值评估在决策管理中的应用, 是湿地生

态系统服务功能应用研究的迫切需求^[6]。

目前, 3S 空间信息技术已成为湿地资源信息化和科学化管理的一种主要手段。在湿地功能区划方面, Michael 等利用 GIS 和系统聚类分析方法, 对南非的一个湿地公园内的珊瑚礁地区等, 进行了生态敏感性分区研究^[7-8]。但从区划过程上看, 大多停留在较低层次分析阶段, 其空间管理决策功能发挥的不够; 因此, 进一步提升湿地资源量化评价水平、提高湿地空间管理效率是当前亟待解决的问题。

本文根据湿地功能价值量, 利用客观赋权的综合评价方法-主成分分析方法进行湿地功能的综合评价; 利用空间分析中 Voronoi 图的空间分区方法, 通过牛顿-断裂点模型确定属性权重的主要步骤, 构建加权 Voronoi 图的城市湿地功能分区模型, 开展了北京城市湿地的功能分区研究。

2 研究区域及数据源

北京位于华北大平原的西北部, 总面积约为

收稿日期: 2013-01-21; 修回日期: 2013-04-26.

基金项目: 林业公益性行业科研专项(201204201); 国家科技支撑计划课题(2012BAH32B03); 北京市科技计划项目(D08040600580801)。

作者简介: 苗李莉(1977-), 女, 博士生, 研究方向为湿地生态环境遥感与地理信息。E-mail: miaolili@mail.bnu.edu.cn

*通讯作者: 蒋卫国(1976-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为资源环境遥感。E-mail: jiangweiguo@bnu.edu.cn

1.6万 km²,地理坐标为东经115°25′~117°35′,北纬39°28′~41°05′,全市东西宽160km,南北长176km,地形西北高,东南低,山地与平原之间界线分明;气候为典型的暖温带半湿润大陆性季风气候。北京湿地资源类型丰富且分布广泛,河流湿地、水库湿地、公园湿地、水塘等自然湿地和人工湿地,构成了北京独特的湿地生态景观。境内大小河流共200余条,分属于海河流域的五大水系即永定河、北运河、潮白河、大清河和蓟运河(图1)。根据2007年北京湿地普查数据,全市湿地总面积5.1万 hm²,占全

市总面积的3.13%,其中,以人工湿地类型为主,约占全市湿地面积的85%左右。

研究所用数据源包括空间和属性数据。空间数据为基础地理数据;属性数据为根据已有北京湿地资源功能价值测算的成果^[4,20],得到北京湿地生态服务功能的指标因子含有的12个单项服务功能(蓄水调节、水源供给、文化遗产、大气调节、气候调节、水质净化、旅游休憩、生物产品、土壤侵蚀、地下水补给、滞尘价值、生物多样性)及其相应的功能价值量。

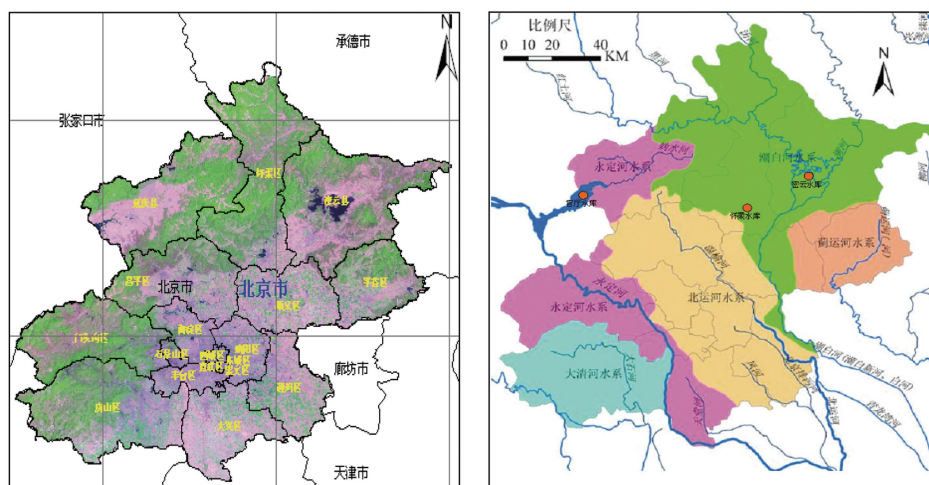


图1 研究区

Fig.1 Map of the study area

3 基于加权Voronoi图的北京湿地功能分区分析

3.1 湿地生态服务功能综合评价

湿地功能评价构建湿地生态服务功能评价指标体系,选用反映湿地调节、供给、文化,以及支持4个类型功能影响因素的指标因子。湿地功能单项的各类评价指标涉及湿地相关的自然条件和人文因素的诸多方面,各指标获取数据过程中所反映的信息很可能存在重复,另外,指标个数多,样本分布的空间维度较分散,会影响结果精度,从而影响对湿地功能认识的准确性。所以,利用主成分分析方法对湿地功能单项评价的指标进行降维分析,得到表征湿地功能的主成分即综合指标^[9]。根据得到的主成分及其相关贡献率因素进行城市湿地功能的综合评价。

3.2 基于加权Voronoi图的功能分区

3.2.1 分区边界的获得

Voronoi图是一种空间剖分方法,常规Voronoi

图中,一个多边形内的任意一点到其发生元的距离均小于到其他发生元的距离。加权Voronoi图是常规理论的升华,打破了常规Voronoi图把空间目标都视为等规模的概念,将空间目标的规模(中心性强度)大小纳入了Voronoi图模型的变量中,进一步完善和扩展了Voronoi图理论。

发生元为点集的倍增加权Voronoi图是常用的扩展形式和生成方法。倍增加权Voronoi图定义的距离是权重距离, P 为点集,设 $P_i (i=1,2,\dots,n)$ 为二维欧氏空间上的 n 个点, $\omega_i (i=1,2,\dots,n)$ 是给定的 n 个正实数,倍增的加权Voronoi图,是在发生点集的扩散速度与权重成比例情况下形成的,得到倍增加权Voronoi图的公式定义为^[10-11]:

$$V_n(P_i, \omega_i) = \bigcap_{j \neq i} \left\{ P \left| \frac{d(P, P_i)}{\omega_i} < \frac{d(P, P_j)}{\omega_j} \right. \right\} (i=1, 2, \dots, n)$$

3.2.2 属性权重的确定

城市地理学中的空间相互作用论由物理学引入,最初用来解释人口的流动,近年来,用于描述地

理空间的要素流动现象,被广泛应用到区域划分和城镇体系规划^[12-13]。城市湿地为城市系统中的一部分,尽管湿地之间的能量交换不像城市之间通过道路等明显的因素进行物质和能量之间的相互作用。但是,从系统论的观点,湿地是一个半开放半封闭的系统。一方面,湿地是一个较独立的生态系统,它有其自身的形成发展和演化规律。另一方面,湿地又不完全独立,它在许多方面依赖于相邻的地面景观,其生态功能通过各种自然物质的运动为媒介(居民、地下水等)作扩散,与它们发生物质和能量交换,并影响邻近系统的活动^[14]。湿地功能是通过发生在湿地物理、生物、化学组分之间的一般或特征化的相互作用和转化过程完成的,它可以提供满足和维持人类生存和发展的条件和过程^[15]。湿地的生态服务功能是湿地自身功能过程的外现形式。因此,在进行本文研究时,将空间相互作用论的相关模型引入城市湿地的分析中,来体现湿地功能各要素之间的作用关系,具有十分重要的意义。

空间相互作用理论包括一系列模型,可用于结节区域划分的是点与点之间无约束的相互作用模型^[16]。根据牛顿万有引力模型结合断裂点模型的原理^[17],假设有两个空间对象 A 、 B , 设两个湿地斑块的规模分别为 p_a 、 p_b , 等值线上某点的规模为 p_0 , 该点到 A 、 B 的距离分别为 d_{a0} 、 d_{b0} , 则 A 、 B 对该点的引力模型分别为: $F_{a0} = k \frac{p_a p_0}{d_{a0}^r}$; $F_{b0} = k \frac{p_b p_0}{d_{b0}^r}$; 对等值线上的任意一点有 $F_{a0} = F_{b0}$, 得到

$$\frac{p_a}{(\sqrt{(x-x_a)^2 + (y-y_a)^2})^r} = \frac{p_b}{(\sqrt{(x-x_b)^2 + (y-y_b)^2})^r}; \text{取 } r=2,$$

经过整理得到

$$(p_a - p_b)x^2 + (p_a - p_b)y^2 + 2(p_b x_a - p_a x_b)x + 2(p_b y_a - p_a y_b)y + p_a(x_b^2 + y_b^2) - p_b(x_a^2 + y_a^2) = 0$$

由此,从数学形态上,当两个湿地斑块功能规模不同时,其吸引范围的分界线是一个圆。同时,经典断裂点理论计算的断裂点也在这个圆弧上,是这个圆与 AB 的交点。这就表明两个湿地斑块吸引范围的分界线是唯一确定的,要么是直线,要么是圆弧。当平面区域内湿地斑块点较多时,根据发生元为点的倍增加权 Voronoi 图的几何性质知,所有湿地斑块点的吸引范围在要么构成常规 Voronoi 图,要么构成加权 Voronoi 图。并且每个发生元的扩张速度是中心性强度值的平方根^[18];每个发生点

的权重是其中心性强度值的平方根^[19]。这为城市湿地功能分区的 Voronoi 图的矢量生成提供了算法基础。

3.2.3 分区方法的分析

根据 2007 年统计的北京湿地普查结果,北京有规模不等的湿地斑块大约有 1900 个左右。但湿地斑块因其面积、生态质量以及分布位置等因素的不同,其湿地的生态服务功能的重要性相差较大,例如,有的湿地斑块的功能综合值可能比较高,其位于某些湿地功能规模特别大的较近范围(例如,北京密云水库附近的湿地),也不作为重要湿地斑块;因此,研究中排出部分湿地功能价值量较小、集中分布中的一部分、或者较小规模的湿地斑块。分析得到北京湿地中的 43 个核心湿地斑块作为研究对象。

核心湿地斑块的 12 个指标数据利用 SPSS 软件进行主成分分析,得到北京地区 43 个核心湿地斑块的功能综合评价价值,其中,密云水库湿地的功能综合值最大,表明该湿地生态服务功能作用最重要;以湿地功能的综合作为湿地功能规模,得到湿地斑块作为湿地点时,功能影响速度是其功能综合价值的平方根,其倍增加权 Voronoi 图生成的权重是相应湿地功能综合评价价值的平方根。根据研究的方法过程,以各核心湿地斑块的几何中心点为顶点,得到北京湿地功能空间作用区域的分区结果(图 2(a))。并与常规加权 Voronoi 图的空间分区结果进行比较分析(图 2(b))。

(1)以湿地功能综合评价价值作为湿地功能影响的权重,利用倍增加权 Voronoi 图,进行湿地功能空间分区的研究。北京湿地功能空间分区中(图 2(b)),密云水库的功能区几乎覆盖北京地区,这是因为其湿地功能综合评价价值最大。然而,这也导致了附近潮河下游和沙厂水库湿地的功能区范围严重缩小。另外,斋堂水库的功能规模虽小于白河的相应值,但仍表现为斋堂水库的功能区较白河的功能区面积大;主要原因是:白河在位置上距离功能规模强大的密云水库较近,还要与其相邻的湿地,进行空间范围的竞争;而斋堂水库周围缺乏功能规模更大的湿地,不得不使其成为该单元的核心湿地,功能区也随之较大。因此,该加权 Voronoi 图分区结果在一定程度上能够展示湿地功能的现实情况。但是该方法的权重获取属于直接指定的,其应用领域的合理性值得商榷。

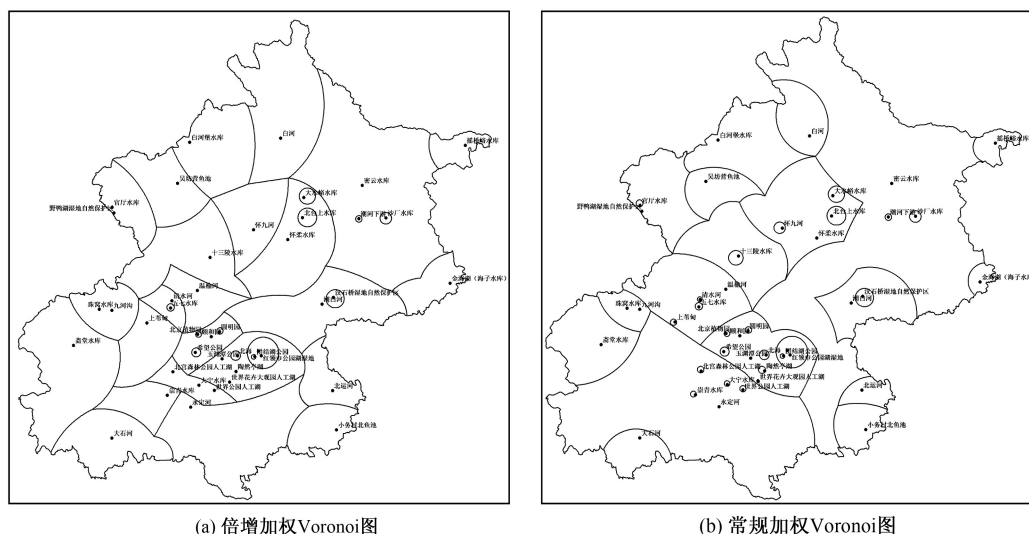


图2 北京地区43个核心湿地功能的空间分区

Fig.2 The spatial zoning of 43 core wetland patches in Beijing

(2)城市湿地生态服务功能作为自然与城市社会经济综合的产物,具有独特的运动规律。基于倍增加权Voronoi图空间分区模型的构建过程,既考虑到湿地生态学的理论,又考虑到城市地理学的中心地理论,综合牛顿模型及空间分析的Voronoi图方法,系统地分析了确定权重与定量获得分区边界的两个关键步骤。因此,该方法更有研究领域的学科针对性,避免了盲目性。北京湿地功能空间分区中(图2(a)),功能规模较大的湿地功能区的范围相比常规加重的结果表现有明显缩小的趋势,这种情况对功能规模越大的湿地功能区范围影响越明显,例如,密云水库的范围;另一面,功能规模较小的湿地功能区其范围的变化较小,但是,有的湿地功能区却有增大的趋势,这是因为其周围附近原来“强势”的湿地功能区减少所致的。

经过比较分析,两种加权Voronoi图的方法都能够用于湿地功能空间分区的研究;但是,北京湿地功能分区结果显示,常规加权Voronoi图中出现

“飞地”和“环带”的现象较严重,例如,图2(b)中,密云水库的功能区范围绕过潮白河功能区,到达了北运河下游地区。另外,考虑到该研究对象所属领域-城市体系的特点,因此得出,基于倍增加权Voronoi图的分区方法更适合北京湿地功能的分区。

3.3 湿地功能区的划分与结果分析

城市湿地生态功能区划为有利于湿地管理的易操作性,分区过程考虑到研究区尺度的大小,进行了不同等级框架的分区。以北京核心湿地功能综合评价结果为基础,结合湿地斑块的空间分布特征,利用系统聚类分析方法,将北京地区43个核心湿地斑块分为3个等级(图3)。

根据城市地理学的中心地理论知,若某些湿地斑块是核心湿地,其相应的功能影响范围则为湿地功能区;该区内若还存在低级别的湿地,则还要加上那些低级别的湿地功能区,整体构成城市湿地功能的分区。以北京湿地为例(图3),基于倍增加权

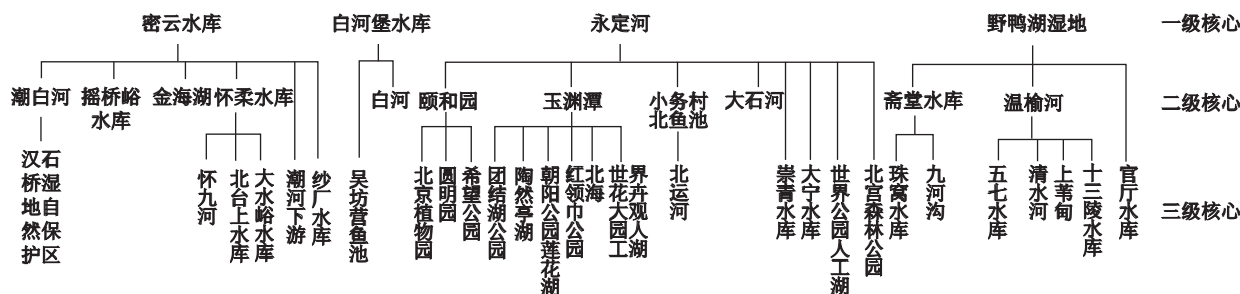


图3 北京核心湿地空间层次组织图

Fig.3 The spatial hierarchical organization of core wetland patches in Beijing

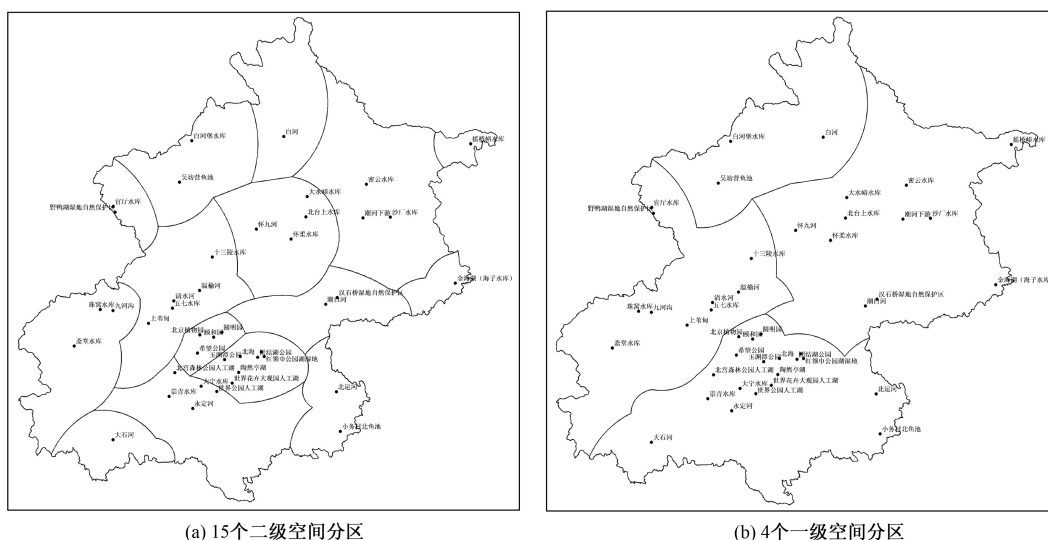


图4 北京核心湿地功能分区结果

Fig.4 The function zoning of core wetland in Beijing

Voronoi 图的分区结果(图2(a)),依据二级核心湿地合并其相应的功能区,得到城市湿地功能的15个二级空间分区(图4(a));依据一级核心湿地合并其相应的功能区,得到北京湿地功能的4个一级空间分区(图4(b))。

4 结论

(1)城市湿地系统分析论、城市地理学中心地理理论与空间分析方法的结合,模拟了城市中湿地斑块的功能辐射传导的客观机理,并用来表征城市湿地斑块中功能要素之间空间联系的强弱,定量化的实现了不同规模湿地的功能影响范围的划分。

(2)以北京湿地为例,根据湿地功能价值量,利用客观赋权的主成分分析法进行湿地生态服务功能的综合评价;从空间分析角度,耦合湿地生态系统论与城市地理学理论体系,以核心湿地斑块作为独立经济客体,通过牛顿-断裂点模型的权重确定与综合定量方法的分区边界获得两个关键步骤,构建了基于倍增加权 Voronoi 图的城市湿地功能分区模型,开展“自下而上”定量化的北京湿地功能分区。但在实际操作中,区域核心湿地功能的空间影响范围是复杂的,其划分界线也不是十分明确和绝对的,往往是交错复杂的;这是由于湿地功能影响范围的确定不仅仅受湿地斑块所在区域功能综合的影响,还与湿地赋存的地形地貌、湿地自然保护区,以及生态廊道等自然和人文影响因素密切相关。因此,在实际区划应用中,还应结合具体情况对现有功能分区的边界予以人工调整。

参考文献:

- [1] 蔡佳亮,殷贺,黄艺.生态功能区划理论研究进展[J].生态学报,2010,30(11):3018-3027.
- [2] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997(387):253-260.
- [3] Zhu L, Xiao Y F, Jing L L, *et al.* Evaluating social service value of wetlands in Beijing based on remote sensing and GIS[C]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2010 IEEE International, 378-381.
- [4] 陈云浩,蒋卫国,赵文吉,等.基于多源信息的北京城市湿地价值评价与功能分区[M].北京:科学出版社,2012.
- [5] 张伟,张宏业,张义丰.生态系统服务功能价值核算与地理学综合研究[J].地理科学进展,2009,28(3):465-470.
- [6] 李文华,张彪,谢高地.中国生态系统服务研究的回顾与展望[J].自然资源学报,2009,24(1):1-10.
- [7] Schleyer M H, Celliers L. Modelling reef zonation in the Greater St Lucia Wetland Park, South Africa[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005(63): 373-384.
- [8] 侯鹏.基于遥感和GIS的北京湿地生态调节功能与分区研究[D].北京:北京师范大学,2010.
- [9] Simone B, Federico M P, Silvia F, *et al.* Gramatica Correlations and complement arities in data and methods through Principal Components Analysis (PCA) applied to the results of the SP In-Eco-Project[J]. *Atmospheric Environment*, 2008,42(6):1249-1260.
- [10] M Gahegana, Lee I. Data structures and algorithms to support interactive spatial analysis using dynamic Voronoi diagrams[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2000,24(6):509-537.
- [11] 王新生,李全,郭庆胜,等.Voronoi 图的扩展、生成及其应

- 用于界定城市空间影响范围[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2002, 36(1): 107-111.
- [12] Openshaw S, Veneris Y. Numerical experiments with central place theory and spatial interaction modelling[J]. *Environment & Planning A*, 2003, 35(8): 1389-1403.
- [13] 顾朝林, 庞海峰. 基于重力模型的中国城市体系空间联系与层域划分[J]. 地理研究, 2008, 27(1): 1-12.
- [14] 杨永兴. 国际湿地科学研究的主要特点、进展与展望. 地理科学进展[J], 2002, 21(2): 111-120.
- [15] 童春富, 陆健健, 何文珊, 等. 湿地功能及生态经济价值评估研究[J]. 生态经济, 2002, 11(11): 31-33.
- [16] 吴殿廷, 朱青. 区域定量划分方法的初步研究[J]. 北京师范大学学报, 2003, 39(3): 412-416.
- [17] 许学强, 周一星, 宁越敏. 城市地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [18] 李圣权, 胡鹏, 闫卫阳. 基于加权 Voronoi 图的城市影响范围划分[J]. 武汉大学学报, 2004, 37(1): 94-97.
- [19] 闫卫阳, 秦耀辰, 郭庆胜, 等. 城市断裂点理论的验证、扩展及应用[J]. 人文地理, 2004, 19(2): 12-16.
- [20] 黄玲梅. 北京湿地的生态系统服务功能定位[D]. 北京: 北京师范大学, 2010.

Beijing Urban Wetland Function Zoning Based on the Weighted Voronoi Diagram

MIAO Lili^{1,2}, JIANG Weiguo^{3*}, WAN Yuan^{1,2}, HE Shi^{1,3} and CHEN Yunhao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Earth Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. College of Resources, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: It was an important precondition for wetland ecosystem health recovery, management improvements, and the sustainable use of resources to carry out an accurate and reasonable urban wetland function zoning. Taking Beijing wetlands as an example, according to the result of the wetlands ecological service functional value evaluation, the method of principal component analysis was used in comprehensive evaluation of urban wetland ecological service functions. Then the space partitioning method of weighted Voronoi diagram was applied, through the main steps of the attribute weights being determined by using Newton-Breaking point model, to build urban wetlands function zoning model based on weighted Voronoi diagram. Based on the method, the typical wetlands patches were selected in the research of a “bottom-up” quantitative Beijing wetland function zoning. The results showed that: firstly, the wetland ecosystem service function of north wetland groups was very important, especially the Miyun Reservoir wetlands comprehensive value indicating the most important role of the wetland ecosystem services in Beijing. Secondly, Beijing wetland function zoning showed a three hierarchical framework, which included 4 wetland functional zones for the first level, 15 wetland functional zones for the second level, and 43 wetland functional important units for the third level in the homogeneous plane space. At last, the function magnitude of value on wetland resources was combined with the spatial relationship in wetland patches, in order to implement wetland function zoning by a double distance constraint on both attribute and space. This research not only promoted the in-depth application on value assessment of wetland ecosystem services in the decision-making management, but also provided technical supports to the urban wetland function zoning, and met the needs of urban wetlands management as well.

Key words: Beijing wetland; function value; Voronoi diagram; function zoning

*Corresponding author: JIANG Weiguo, E-mail: jiangweiguo@bnu.edu.cn