

DOI: 10.5846/stxb201411122241

孙一鸣, 刘红玉, 李玉凤, 蔡春晓, 李玉玲. 基于 HGM 模型的城市湿地水环境功能评估——以南京仙林典型湿地为例. 生态学报, 2016, 36(10):

Sun Y M, Liu H Y, Li Y F, Cai C X, Li Y L. Assessment of water environment functions in urban wetlands by using the hydrogeomorphic model: A case study of Nanjing Xianlin. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(10): - .

基于 HGM 模型的城市湿地水环境功能评估 ——以南京仙林典型湿地为例

孙一鸣, 刘红玉*, 李玉凤, 蔡春晓, 李玉玲

南京师范大学地理科学学院, 南京 210046

摘要:我国正处于快速城市化发展过程中,许多湿地被改造利用成为城市湿地。如何科学评估城市湿地功能及其改变程度,是科学认识城市湿地的重要内容。本研究基于水文地貌法(HGM),通过选取区域受城市化影响小、生态系统结构与功能接近于自然湿地的湿地作为参考湿地,利用遥感和 GIS 的手段以及野外实地调查方法,从湿地水环境功能角度,对南京仙林区域内典型城市湿地的水环境特征与功能进行评估。结果表明:(1)城市湿地水环境功能明显降低,其蓄水功能、净水功能、水文调节功能明显低于参考湿地;(2)受城市化景观复杂性影响,城市湿地水环境功能的改变程度呈现个性化特征,纪家边、采月湖和西湖西这三个湿地可以作为城市化过程中湿地改造的典范。这一结论可为城市化区域内湿地的合理开发利用以及湿地的保护、恢复提供科学依据。

关键词:城市湿地水环境;参考湿地;HGM 功能评估模型;南京仙林

Assessment of water environment functions in urban wetlands by using the hydrogeomorphic model: A case study of Nanjing Xianlin

SUN Yiming, LIU Hongyu*, LI Yufeng, CAI Chunxiao, LI Yuling

College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

Abstract: Wetlands have the richest biodiversity on the Earth's ecological landscape and are one of the most important environments inhabited by humans; they are one of the world's three major ecosystems (the other two are forests and oceans). Wetlands are regarded as "the Earth's filtration system". China is in the process of rapid urbanization, and many wetlands have been transformed into urban wetlands. Urban wetlands are often the product of urbanized process, which plays an important role in the transformation and migration of pollutants, surface water storage, improving urban water quality and adjusting urban microclimate. Therefore, urban wetlands are widely used in urban ecological construction. Because the urbanized process has a significant impact on the structure and catchment of wetland, the ecological functions of wetlands have changed dramatically. Evaluation of an urban wetland's ecological functions is important to scientifically understand urban wetlands and reasonably utilize and protect urban wetlands. Reference wetlands are specific wetland sites within a region, and they are less disturbed and close to natural wetlands. Taking the typical wetlands in Xian Lin Nanjing as examples, we selected appropriate reference wetlands to evaluate the characteristics and functions of the water environment in urban wetlands by using the hydrogeomorphic method. We used RS (Remote Sensing)、GIS (Geographic Information System) and field investigation to develop a functional index and model for the wetlands. The results showed that: Compared

基金项目:国家自然科学基金项目(41401205);江苏省自然科学基金项目(BK20140921);江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心;江苏优势学科建设工程资助

收稿日期:2014-11-12; 网络出版日期:2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuhongyu@njnu.edu.cn

with reference wetlands, the seasonal water level changes of urban wetlands have no regularity. The average annual water quality indicators for the reference wetlands mainly remained at Class II water quality standards, and those for the urban wetlands mainly remained at Class IV water quality standards. The water environment functions of the urban wetlands showed obvious degradation due to urbanization. The WEFI (Water Environment Function Index) score for the urban wetlands declined by 24%. In the sub-index of WEFI, the FCI (Functional Capacity Index) score of the water storage function for the urban wetlands declined by 22%, the FCI score of the water purification function declined by 33%, and the FCI score of the hydrological adjustment function declined by 17%. In addition, the water environment functions of different urban wetlands showed obvious differences because of the impact of the complex urbanized landscape. The quality of water environment functions of Ji jianbian Wetland is the best, followed by those of Cai yuehu Wetland and Xi huxi Wetland. There has been some degradation of water environment functions in Gui shanju Wetland and Nanyou Wetland. The quality of water environment functions of Nancai Wetland was the worst. Therefore, we can conclude that Ji jianbian Wetland, Cai yuehu Wetland and Xi huxi Wetland, which have good water environment functions, can be regarded as models for reforming wetlands during urbanization. By revealing the differences in water environment functions between the six urban wetlands, not only can we provide a scientific basis for wetland resource conservation and scientific management of urban wetlands but also achieve social, economic, and sustainable development in the city.

Key Words: water environment of urban wetland; reference wetland; Hydrogeomorphic functional assessment model; Xianlin Nanjing

城市湿地是指城市区域之内的浅水湖沼和人工池塘等具有人工半人工性质的生态系统^[1-2],在城市污染物的迁移转化、蓄水和改善城市水质、调节城市微气候等方面发挥着重要作用^[2-4],因此被广泛应用于城市生态建设之中。然而,城市湿地往往是城市化影响下的产物,是对原有湿地进行改造和利用的结果。由于城市建设需要,城市化不仅改变了原有湿地生态系统结构,而且改变了湿地周边景观环境^[5],其结果必然对湿地生态系统功能产生重要影响。如何科学认识与评估城市湿地功能及其变化程度,对科学利用与保护湿地,指导城市规划与建设显得尤为重要。

湿地功能评估是对某一目标湿地内的物理、化学和生物学过程进行研究,评估其是否运转正常^[6]。发达国家对于这方面的研究走在前面,美国发展了一系列用于评估自然湿地、恢复重建湿地以及人工湿地功能的方法。这些方法各具优缺点,主要包括:专家意见法(Expert Opinion)^[7],这种方法简单、快捷,但只能定性的描述不能量化,因而精度不高;生境评估规程(Habitat Evaluation Procedures)^[8],该方法仅能反应湿地承载某种物种的能力而不能反应湿地的全面功能;湿地评价技术(Wetland Evaluation Technique)^[9],该方法只能预测湿地在景观里所处的位置下发挥某项特定功能的可能性,不能对湿地功能做出定量评价;湿地快速评价法(Rapid Assessment of Wetlands)^[10],该方法只能说明湿地是否具有某项功能,不能定量表示功能的大小;虚拟参照湿地法(Virtual Reference Wetlands)^[11],该方法重复性好、简单易行,但是不能比较物种的丰度。以上这些方法都侧重的是从湿地生态系统内部评估湿地功能,没有考虑到周边景观复杂性对湿地功能的影响。鉴于此 Brinson 和 Smith 建立了水文地貌法(hydrogeomorphic method)^[12-13],用于评估不同水文条件与地貌部位的湿地生态系统功能。该方法不仅考虑生态系统尺度下湿地的结构特征,而且考虑周边景观尺度环境影响。其主要特点是选取区域内合适的湿地作为参考湿地,并以此为标准建立评估模型,测度待评价湿地功能^[14],因而可以快速的评价被改造湿地相对于参考湿地功能上的变化程度。水文地貌法从过去强调位于不同地貌部位的湿地到逐渐注重湿地周边的景观环境影响,有利于从对比角度揭示不同景观环境下湿地功能上的差异性,已被广泛用于各种类型湿地功能评估研究之中。城市湿地往往是被人为改造利用的湿地类型,生态系统结构较为简单,又常常处于复杂的城市环境中,其生态系统功能易于发生改变,水文地貌评估的思路与方法值得借鉴^[14-15]。然而,城市湿地周边景观要素结构与格局复杂多样,建立城市湿地水文地貌评估方法,科学评

估城市湿地生态系统功能的影响因素与变化程度,具有重要理论与现实意义。

本文以南京仙林新市区为研究区域,选取湿地生态系统功能中的水环境功能为代表,建立城市湿地水环境 HGM 评价指标与模型,对湿地地表蓄水功能、净水功能以及水文调节功能进行评估,揭示城市化影响下湿地水环境的特征与变化,为城市湿地的保护、规划和管理提供科学依据。

1 研究区域

本研究以快速城市化的南京仙林新市区为案例区域。该区域(32.059°N-32.147°N,118.867°E-119.013°E)位于南京东北部,紫金山东麓,面积大约为 84.59km²。自 2003 年以来,南京市对该区进行城市化拓展,土地利用发生巨大变化,建筑用地等人工景观类型不断增加,绿地、湿地、林地等自然景观类型不断减少。区域城市化导致大量湿地丧失,许多湿地被改造利用成为高校、商业区、高档住宅区域内重要景观类型^[16-19]。但同时也有少量湿地残留下来,这些湿地可以作为原来湿地的代表。

2 数据来源与研究方法

根据水文地貌法(HGM)特点,一方面需要提取湿地水文集水单元(集水区)边界与其单元内土地利用信息,以便分析景观要素影响;另一方面需要选取标准湿地为参考湿地,选取典型湿地为待评估湿地,进行评估指标确定与模型建立。

2.1 湿地集水区景观信息提取

为了反映城市化影响下周边景观要素对湿地水环境功能的影响,需要确定湿地集水区域。首先,利用南京市 5m 分辨率数字高程模型(DEM)和 ArcGIS9.3 软件对不同地形地貌部位的湿地集水区界线进行提取。对于地势较为平坦的湿地集水区,根据区域实际情况,如道路及排水渠系对集水区边界进行修正。集水区内土地利用信息提取是利用 Google 地图遥感影像数据,经过校正和目视解译获得。参照全国土地利用分类方法,将区域内土地利用类型划分为湿地、林地、草地、建设用地、农业用地以及未利用地。

2.2 湿地选择

水文地貌法(HGM)需要选择两种湿地类型。一种是选择区域内具有代表性的自然或接近自然的湿地作为参考湿地^[12,20],其代表原有湿地应有的结构与功能特征。根据实地考察与水环境监测,选择:大浦塘(DPT)、西横山(XHS)、大成东(DCD)、大成南(DCN)四块湿地作为参考湿地。这四块湿地受到城市化以及人类活动的影响较小,周围土地利用比较单一,以林地、草地等自然景观类型为主。另一种选择被城市化过程改造的湿地作为城市湿地代表,选择:桂山咀(GSZ)、采月湖(CYH)、西湖西(XHX)、纪家边(JJB)、南邮(NY)、南财(NC)六块湿地。这六块湿地受城市化影响改变明显,周围土地利用结构较为复杂;其中,采月湖、纪家边、南邮和南财湿地是高校内的校园湿地,桂山咀是城市路网中的湿地,西湖西是位于湿地公园周边的湿地。

表 1 两种类型湿地集水区土地利用状况

Table 1 Status of land use in two types of wetland catchment area

类型 Type	统计值 Statistic	湿地 Wetland	林地 Woodland	草地 Grassland	农业用地 Agricultural land	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land
参考湿地 Reference wetland	比例/%	11.87	38.10	12.20	18.80	16.56	2.47
城市湿地 Urban wetland	比例/%	10.36	11.99	28.26	14.47	32.87	2.05

2.3 建立湿地 HGM 功能评价模型

本文主要从蓄水功能、净水功能以及水文调节功能三个方面反映城市湿地水环境功能。根据湿地水环境功能主要影响要素分析,选取具有代表性的 11 个功能评价变量,建立单项湿地水环境功能评价模型^[21](表 2),以及综合功能评价模型 $WEFI = (F1 + F2 + F3) / 3$ 。这 11 个变量是建立功能评价模型表达方式的基础,其中

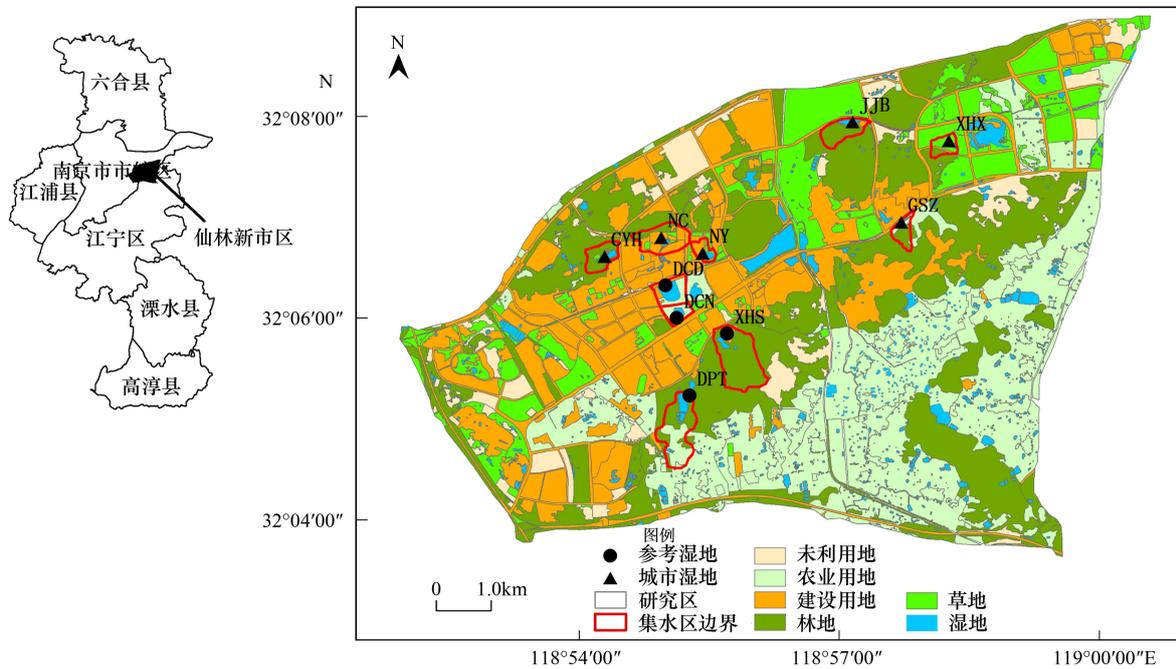


图1 研究区示意图以及湿地集水区

Fig.1 Schematic of the study area and the wetland catchments

每个变量代表不同的湿地特征而且每个变量都是由一个或多个数据组成^[22]。对于每项评估功能每块湿地样点会有一个功能性涵容指数(Functional Capacity Index, FCI)^[12],从功能涵容指数(FCI)可以看出待评价的城市湿地相对于参考湿地功能上的变化。其中变量经过标准化之后再运用于评价模型中,从而使 FCI 的分数范围都在 0-1 之间,具有可比性。

表2 功能评价模型用到的变量的缩写和说明

Table 2 Abbreviations and descriptions of the variables used in the functional assessment models

变量 Variable	定义 Definition	水环境功能评价模型 Water environment functional assessment model
V_{wd}	湿地水深	F_1 : 蓄水功能
V_{wlc}	湿地水位变化	$F_1 = 0.30 \times V_{wd} + 0.14 \times V_{wlc} + 0.43 \times V_{wa} + 0.08 \times V_{wsa} + 0.05 \times V_{div}$
V_{wa}	湿地面积	F_2 : 净水功能
V_{wsa}	集水区面积	
V_{pwsa}	湿地占集水区面积比例	$F_2 = (F_{2TP} + F_{2TN} + F_{2COD}) / 3$
V_{div}	景观多样性	$F_{2TP} = 0.56 \times V_{TP} + 0.26 \times V_{wa} + 0.07 \times V_{div} + 0.11 \times V_{wvc}$
V_{con}	景观连接度	$F_{2TN} = 0.56 \times V_{TN} + 0.26 \times V_{wa} + 0.07 \times V_{div} + 0.11 \times V_{wvc}$
V_{TP}	水质总磷指标的浓度	$F_{2COD} = 0.56 \times V_{COD} + 0.26 \times V_{wa} + 0.07 \times V_{div} + 0.11 \times V_{wvc}$
V_{TN}	水质总氮指标的浓度	F_3 : 水文调节功能
V_{COD}	水质高锰酸盐指数的浓度	
V_{wvc}	湿地植被盖度	$F_3 = 0.4 \times V_{wa} + 0.14 \times V_{wlc} + 0.26 \times V_{wd} + 0.04 \times V_{pwsa} + 0.08 \times V_{con} + 0.08 \times V_{div}$

对于反映湿地水环境的蓄水功能、净水功能以及水文调节功能,从 11 个代表性的变量中选取对这三项水环境功能具有重要影响的 5 个或 6 个变量进行组合,这些不同变量的共同作用会决定某一项功能,从而建立单项功能指标的评价模型。其中蓄水功能主要由湿地水深、水位变化、湿地面积、集水区面积以及景观多样性决定。净水功能主要由湿地水深、景观多样性、水质指标浓度、湿地植被盖度决定;而净水功能根据水质指标差异性分为净化磷、氮、化学需氧量这三个子功能。水文调节功能主要由湿地面积、景观多样性、湿地水深、湿地水位变化、湿地占集水区面积比例、景观连接度决定。各个功能评价模型中每个变量的权重是通过层次分

析法确定。

根据各功能评价模型公式可以求出湿地水环境功能指数的结果,参照国内外的各种综合指数的分组方法,对综合评价进行评判标准的确定^[23-24](表 3)。

表 3 湿地水环境功能评价标准

Table 3 Criterion of functional evaluation of wetland water environment

功能评估值 Value of function evaluation	>0.70	0.45—0.70	0.35—0.45	0.25—0.35	<0.25
评价标准 Criterion of evaluation	优异	较好	一般	较差	很差

2.4 湿地水环境数据来源及处理方法

从 2010 年 5 月份至 2011 年 3 月份对研究区内 10 块湿地进行每月一次的监测,每块湿地内用 500ml 聚乙烯瓶平行采集 3 个表层水样,通过野外现场结合实验室分析的方法得到水质监测数据。城市湿地水质状况主要受到周围人类活动及土地利用的影响,相关研究表明氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、总氮(TN)、总磷(TP)以及高锰酸盐指数(COD_{Mn})这四个指标能够反映湿地周围环境的主要污染物对湿地的水质的影响^[25-27]。所以,本研究选取这四个化学指标来反映研究区湿地的水质状况,其中高锰酸盐指数采用酸性高锰酸钾消解法、氨氮采用水杨酸分光光度法、总氮采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法、总磷采用钼锑抗分光光度法,每个样品设置 3 个平行,取其平均值。水位是反映湿地水文条件的重要指标,通过树立标杆对湿地每月的水位变化进行连续监测;水深的监测则是每月在树立标杆处向水塘中心(0°)、偏左(-15°)、偏右约($+15^\circ$)方向同时保证水平距离为 3.5 米的情况下进行铅垂法测量,取最大值。

湿地内植被数据主要是在生长季节(5 月、8 月、11 月)对这 10 块湿地内的水生植被类型和植被盖度进行调查得到。具体方法是通过在湿生植物与陆生植物之间建立样线,对湿生植物(水域内及岸边湿生植物)进行植物类型及盖度进行测量。其中盖度是植物地上部分垂直投影面积占样地面积的百分比,即投影盖度^[28]。

3 结果与分析

3.1 水环境功能评价模型的建立过程

3.1.1 水环境功能评价变量

表 4 是湿地中各项功能评价的变量值, V_{wd} 、 V_{wlc} 、 V_{TP} 、 V_{TN} 、 V_{COD} 、 V_{wvc} 是通过采样调查和实验得到, V_{wa} 、 V_{wsa} 、 V_{pwsa} 、 V_{div} 、 V_{con} 是利用景观生态学计算方法得到。其中 V_{TP} 、 V_{TN} 、 V_{COD} 表示总氮、总磷、高锰酸盐指数年平均均值; V_{div} 所代表的景观多样性通过香浓多样性指数(SHDI)求得; V_{con} 所代表的景观连通性通过连接度指数(CONHESION)求得。

表 4 水环境功能评价变量值

Table 4 The functional assessment variables of water environment

湿地 Wetland	V_{wd}/cm	V_{wlc}/cm	$V_{\text{wa}}/\text{hm}^2$	$V_{\text{wsa}}/\text{hm}^2$	$V_{\text{pwsa}}/\%$	V_{div}	V_{con}	$V_{\text{TP}}/(\text{mg/L})$	$V_{\text{TN}}/(\text{mg/L})$	$V_{\text{COD}}/(\text{mg/L})$	V_{wvc}
大浦塘	124.5	4.67	6.92	84.60	8.18	2.68	98.54	0.12	0.55	6.46	水花生 3%, 狐尾藻 4%, 芦苇 1%
西横山	122.5	11.67	0.45	69.37	0.66	1.85	99.20	0.08	0.37	4.79	水花生 10%, 芦苇 1%
大成东	151.9	0.43	6.68	19.47	34.29	1.74	98.79	0.07	0.52	5.13	\
大成南	134.5	4.67	3.69	14.67	25.19	2.11	98.79	0.07	0.61	6.09	水花生 5%
南邮	73	3.67	0.72	31.25	2.30	2.26	98.86	0.37	1.02	6.08	\
南财	105	-3.33	1.01	24.50	4.13	2.40	98.45	0.60	4.69	12.83	\
桂山咀	118.5	-16.8	0.35	18.79	1.89	0.94	99.41	0.37	4.47	5.36	\
西湖西	134	-17.3	0.56	4.71	11.92	1.12	99.68	0.13	1.97	6.38	水花生 40%, 狐尾藻 5%, 芦苇 5%
纪家边	170	13.33	2.29	13.88	16.49	1.94	99.22	0.31	1.43	5.50	菱 5%, 狐尾藻 3%, 香蒲 1%
采月湖	132	3.67	2.25	18.34	0.12	1.07	98.54	0.08	2.24	4.37	水花生 40%, 芦苇 10%

由于各项变量数据的性质、量纲不同,首先要进行量化处理^[29]。对于变量指标值越大,各水环境功能 FCI 分数越大的情况,可采用公式(1.1),反之则采用公式(1.2)来计算。

$$r_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1.1) \quad r_{ij} = \frac{X_{\max} - X_{ij}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1.2)$$

式中: X_{ij} 为实测值, r_{ij} 为标准化后的数值, X_{\max} 、 X_{\min} 为最大值、最小值。

按照公式对各变量指标进行标准化处理。而变量 V_{wvc} 代表的植被盖度标准化则根据之前对此区域研究结果来确定分值依据^[30],各富营养化指标对湿地植被盖度响应特征主要表现为无植物覆盖及植被覆盖较高湿地富营养状况较高,而对于有少量植被覆盖或较少植被覆盖水平湿地富营养化指标相对较低。因此规定植被盖度的标准化植被覆盖 1%—10%最优为 1,11%—60%良好 0.75,超过 60%较差为 0.5,无植被覆盖为 0.25。

表 5 水环境功能评价变量值标准化

Table 5 Standardization of the functional assessment variables of water environment

湿地 Wetland	V_{wd}/cm	V_{wlc}/cm	V_{wa}/hm^2	V_{wsa}/hm^2	$V_{pwsa}/\%$	V_{div}	V_{con}	$V_{TP}/$ (mg/L)	$V_{TN}/$ (mg/L)	$V_{COD}/$ (mg/L)	V_{wvc}
大浦塘	0.53	0.25	1.00	1.00	0.24	0.00	0.07	0.90	0.96	0.75	1.00
西横山	0.51	0.67	0.02	0.81	0.02	0.48	0.61	0.98	1.00	0.95	0.75
大成东	0.81	0.00	0.96	0.18	1.00	0.54	0.27	1.00	0.97	0.91	0.25
大成南	0.63	0.25	0.51	0.12	0.73	0.32	0.27	1.00	0.95	0.80	1.00
南邮	0.00	0.19	0.06	0.33	0.06	0.24	0.33	0.43	0.85	0.80	0.25
南财	0.33	0.17	0.10	0.25	0.12	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25
桂山咀	0.47	0.97	0.00	0.18	0.05	1.00	0.78	0.44	0.05	0.88	0.25
西湖西	0.63	1.00	0.03	0.00	0.35	0.90	1.00	0.89	0.63	0.76	0.75
纪家边	1.00	0.76	0.29	0.11	0.48	0.42	0.62	0.54	0.75	0.87	1.00
采月湖	0.61	0.19	0.29	0.17	0.00	0.92	0.07	0.98	0.57	1.00	0.75

3.1.2 水环境功能评价模型

水环境功能评价模型通过功能评价变量建立,而每个模型中变量的权重则通过层次分析法(AHP)进行确定。首先建立 AHP 的判断矩阵,为得到客观性、综合性结果,缩小人为因素造成的误差,通过 5 名专家对各评价指标变量的重要程度进行判断,构建判断矩阵。具体为:构建最高层判断矩阵,以蓄水功能为目标层,分别来判断变量 V_{wa} 、 V_{wsa} 、 V_{div} 、 V_{wd} 、 V_{wlc} 对于蓄水功能的重要性,如表 6。判断重要程度时分为 9 个等级,其中 1 为影响相同、3 为影响稍强、5 为影响更强、7 为影响明显地强、9 为影响绝对地强,而 2、4、6、8 的影响则在上述两个相邻等级之间。

表 6 目标层判断矩阵

Table 6 Target layer judgment matrix

目标层矩阵 A Target layer matrix	V_{wa}	V_{wd}	V_{div}	V_{wlc}	V_{wsa}
V_{wa}	1	2	7	3	5
V_{wd}	1/2	1	5	3	4
V_{div}	1/7	1/5	1	1/3	1/2
V_{wlc}	1/3	1/3	3	1	2
V_{wsa}	1/5	1/4	2	1/2	1

在完成目标层的判断矩阵构建后,对判断矩阵的特征向量、最大特征根值(λ_{\max})进行计算。然后是对判断矩阵的一致性检验,计算一致性检验指标 CI。当 CI=0 时,表示判断矩阵具有完全一致性;反之,CI 越大判断矩阵不一致性程度就越严重。一般通过与随机一致性指标 RI 的比值进行比较,其比值记为 CR(一致性比例),如果小于 0.10 则认为判断矩阵具有令人满意的一致性。对于随机一致性 RI 指标见表 7。

表 7 平均随机一致性指标

Table 7 Average random consistency index

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
R1	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

最终通过计算得出 CR 为 0.017 小于 0.10, 满足一致性检验, 即所求各评价变量的权重为 (0.43, 0.30, 0.05, 0.14, 0.08), 最终所求的蓄水功能评价模型 $F_1 = 0.30 \times V_{wd} + 0.14 \times V_{wlc} + 0.43 \times V_{wa} + 0.08 \times V_{wsu} + 0.05 \times V_{div}$ 。同理建立净水功能以及水文调节功能的评价模型, 计算得出 CR 分别为 0.045、0.021, 均小于 0.10, 满足一致性检验, 最终得出的净水功能评价模型 F_2 和水文调节功能评价模型 F_3 见表 2。

3.2 城市湿地水环境基本特征分析

3.2.1 湿地水文特征

水深和水位波动对反映湿地水文特征具有直接性和敏感性。从水深特征来看, 参考湿地平均水深为 133.4cm, 城市湿地的 6 个湿地平均水深为 122cm, 说明参考湿地较城市湿地蓄水能力更强。从水位波动来看(图 2、图 3), 参考湿地水位波动变化比较规律, 春夏季水位呈上升趋势, 其中夏季平均水位在基础水位以上 20cm 左右; 秋冬季水位呈下降趋势, 冬季平均水位在基础水位以下 10cm 左右。相比之下, 城市湿地水位波动变化不规律, 各湿地水位出现不同的变化趋势, 说明城市化影响下湿地水文调节功能比较紊乱。

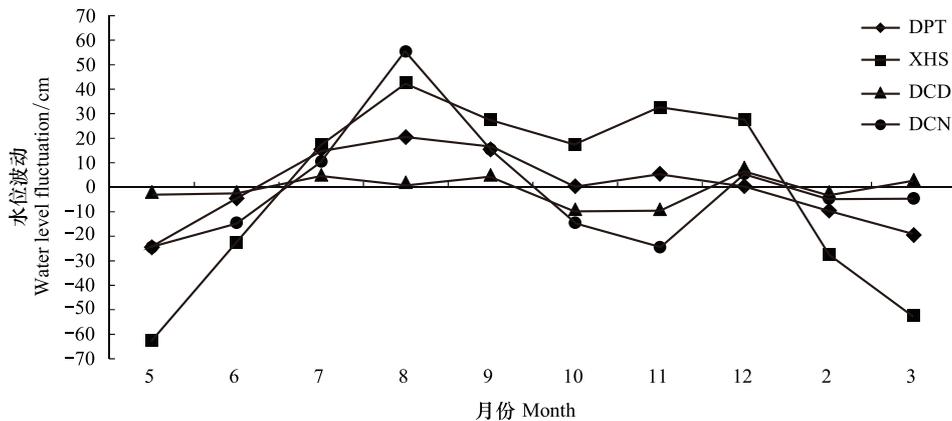


图 2 考湿地水位波动变化规律

Fig.2 he seasonal variation of reference wetland water level

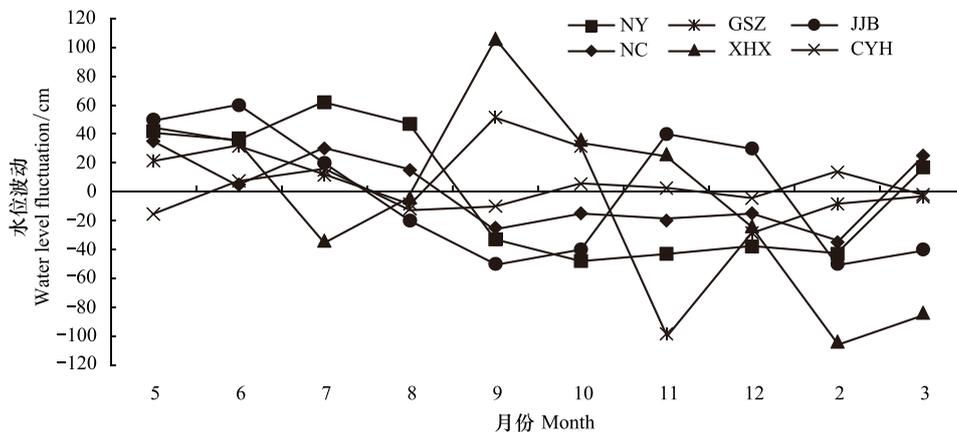


图 3 市湿地水位波动变化规律

Fig.3 he seasonal variation of urban wetland water level

大浦塘 (DPT)、西横山 (XHS)、大成东 (DCD)、大成南 (DCN)、桂山咀 (GSZ)、采月湖 (CYH)、西湖西 (XHX)、纪家边 (JJB)、南邮 (NY)、南财 (NC)

3.2.2 湿地水质特征

表8结果显示:参考湿地水质总体较好,而每块城市湿地水质都很差。根据地表水环境质量标准(GB3838-2002),参考湿地年均各项水质指标基本维持在地表水Ⅱ类水水质标准,其中氨氮平均值为0.08mg/L,达到Ⅰ类水水质标准水平;总磷平均浓度0.09 mg/L,达到Ⅱ类水水质标准;总氮、高锰酸盐指数平均浓度0.51 mg/L、5.62 mg/L,处于ⅠⅡ类水平左右。相比之下,城市湿地年平均各水质指标基本处于地表水Ⅳ类水水质标准之上,其中氨氮平均浓度1.24 mg/L、高锰酸盐指数平均浓度6.75 mg/L,均达到Ⅳ类水平,总氮、总磷指标平均浓度2.63 mg/L、0.31 mg/L,均达到Ⅴ类水水质标准。

表8 湿地集水区水质分异特征(mg/L)

Table 8 Water quality differentiation characteristics of wetland catchment

水质指标 Water quality index	TP		TN		NH ₃ -N		COD _{MN}	
	平均值 Mean	标准差 SD	平均值 Mean	标准差 SD	平均值 Mean	标准差 SD	平均值 Mean	标准差 SD
大浦塘	0.12	0.12	0.55	0.27	0.09	0.07	6.46	1.31
西横山	0.08	0.03	0.37	0.20	0.06	0.02	4.79	1.55
大成东	0.07	0.03	0.52	0.26	0.05	0.03	5.13	1.82
大成南	0.07	0.05	0.61	0.37	0.11	0.09	6.09	1.78
参考湿地 Reference wetland	0.09	0.06	0.51	0.28	0.08	0.05	5.62	1.61
南邮	0.37	0.25	1.02	0.89	0.74	1.20	6.08	3.27
南财	0.60	0.31	4.69	4.01	4.09	3.84	12.83	3.57
桂山咀	0.37	0.60	4.47	5.89	1.87	3.48	5.36	4.08
西湖西	0.13	0.08	1.97	2.78	0.11	0.08	6.38	1.49
纪家边	0.31	0.22	1.43	2.93	0.11	0.09	5.50	2.82
采月湖	0.08	0.03	2.24	2.69	0.51	1.04	4.37	1.48
城市湿地 Urban wetland	0.31	0.25	2.63	3.20	1.24	1.62	6.75	2.78

3.3 湿地水环境功能评估

根据水环境功能评价模型以及标准化结果,得到各个湿地的功能涵容指数 FCI 和水环境综合功能指数 WEFI(表9)。从表9可以看出,参考湿地各项水环境功能的得分较高,可取其各项功能平均值作为参考标准。

表9 不同湿地水环境功能的差异

Table 9 Functional differences of water environment between different wetlands

功能指标 Functional index	蓄水功能(F ₁) 净水功能(F ₂)		F _{2TP}	F _{2TN}	F _{2COD}	水文调节 功能(F ₃) Hydrological adjustment	水环境综合 功能指数 Water environment function index
	Water storage	Water purification					
大浦塘	0.70	0.86	0.88	0.91	0.79	0.59	0.72
西横山	0.34	0.67	0.67	0.68	0.65	0.32	0.44
大成东	0.70	0.85	0.87	0.86	0.83	0.70	0.75
大成东	0.47	0.78	0.83	0.79	0.71	0.48	0.58
参考湿地 Reference wetland	0.55	0.79	0.81	0.81	0.74	0.52	0.62
南邮	0.09	0.45	0.30	0.54	0.51	0.10	0.21
南财	0.19	0.06	0.06	0.06	0.06	0.17	0.14
桂山咀	0.34	0.35	0.34	0.13	0.59	0.40	0.37
西湖西	0.39	0.58	0.65	0.51	0.58	0.48	0.48
纪家边	0.56	0.62	0.52	0.64	0.70	0.59	0.59
采月湖	0.39	0.70	0.77	0.54	0.78	0.38	0.49
城市湿地 Urban wetland	0.33	0.46	0.44	0.40	0.54	0.35	0.38

表 9 表明,受城市化影响,城市湿地水环境综合功能指数 WEFI 值相对于参考湿地下降了 24%,处于“一般”等级。城市湿地水环境各项功能指标 FCI 值都有不同程度的下降。其中,净水功能下降了 33%,蓄水功能下降了 22%,水文调节功能下降了 17%。并且,各个城市湿地水环境功能变化规律性不明显。南财和南邮湿地水环境功能处于“很差”级别,分别下降了 48%、41%;桂山咀湿地水环境功能处于“一般”级别,下降了 25%。西湖西、采月湖以及纪家边湿地的水环境功能处于“较好”级别,其中西湖西、采月湖湿地水环境功能分别下降了 14%和 15%,而纪家边湿地水环境功能则近于参考湿地,只下降了 3%;西湖西、采月湖以及纪家边湿地 WEFI 值为 0.48、0.49、0.59,甚至高于参考湿地中西横山湿地的指数值 0.44,说明其水环境功能保持得较好,可以作为城市化过程中湿地改造的典范。

从单项水环境功能指标来看,每块城市湿地之间存在着较大差异性。蓄水功能方面,纪家边湿地最优,采月湖、西湖西和桂山咀湿地也比较好,而南邮和南财湿地蓄水功能最差,和参考湿地相比分别下降了 46%、36%;水文调节功能中也有相同的变化趋势,纪家边湿地水文调节功能处于“较好”级别,而南邮和南财湿地和参考湿地相比分别下降了 42%、35%,处于“很差”级别。主要原因是南财和南邮湿地集水区面积较大,湿地面积却很小;湿地水深较浅,并且水位变化比较小,从而使得其蓄水功能以及水文调节功能很差。

湿地净水功能中,采月湖和纪家边湿地表现最优,其次是西湖西、南邮和桂山咀,而南财湿地净水功能最差,和参考湿地相比下降了 73%。净水功能 3 个子功能中,采月湖湿地净化磷的功能最好,西湖西和纪家边湿地净化磷的功能也比较好,其次是桂山咀和南邮湿地,而南财湿地净化磷的功能最差,与参考湿地相比下降了 75%;净化氮的功能方面,纪家边湿地最好,其次是采月湖、西湖西和南邮湿地,而桂山咀和南财湿地与参考湿地相比分别下降了 68%、75%;净化化学需氧量的功能方面,采月湖和纪家边湿地最好,桂山咀、西湖西和南邮湿地净化化学需氧量的功能也比较好,而南财湿地最差,与参考湿地相比下降了 68%。南财湿地的净水功能及其子功能在城市湿地中都属最差,主要在于其湿地面积较小净水能力有限,而且其湿地表层水的水质较差;湿地内为开阔水域无植被覆盖,对于汇入湿地的水缺乏应有的净化作用。

城市湿地水环境功能之间的差异性不仅受到湿地生态系统内部变量指标的影响,也受到周围景观变量指标差异性的影响。蓄水功能方面,南财和南邮湿地周围以建筑用地为主,不透水用地面积增加不利于湿地对水流进行汇集;南财和南邮湿地的多样性指数 2.40、2.26,在城市湿地中指数值最大(表 4),而蓄水功能最差,说明较高的景观多样性对湿地蓄水功能有着不利影响。同样,净水功能中南财湿地的景观多样性指数最大,而其净水功能最差,说明湿地周围较复杂的景观格局使得净水功能变差。水文调节功能中功能最差的南邮和南财湿地,其景观多样性指数值最大并且景观连接度指数值较低,说明复杂多样的景观类型以及较低的景观连通性不利于湿地水文调节功能的发挥。所以在城市湿地的改造过程中不仅要关注湿地生态系统结构的特征,也要关注周围景观类型及其景观格局对湿地的影响。

4 结论

城市湿地是城市区域重要的生态系统和景观类型,在维持城市生态环境可持续发展方面具有不可替代的作用。如何科学认识与评估城市湿地功能对于城市湿地的保护和管理具有重要的指导意义。本研究借鉴水文地貌法(HGM)思路与方法,构建城市湿地水环境功能模型,评估城市湿地水环境功能特征与变化程度,得出基本结论如下:

(1)参考湿地水位波动变化比较规律,而城市湿地的水位波动变化没有规律性;参考湿地比城市湿地有着更深的水位和较好的水质。参考湿地水质指标基本维持在地表水Ⅱ类水水质标准,而城市湿地水质指标处于地表水Ⅳ类水平之上。

(2)城市化影响下,城市湿地的水环境功能明显下降。相对于参考湿地,城市湿地水环境功能下降了 24%。其中净水功能下降了 33%,蓄水功能下降了 22%,水文调节功能下降了 17%。

(3)城市湿地水环境功能差异明显,表现出个性化特征,反映了城市化影响的复杂性。但有些湿地,如纪

家边、采月湖和西湖西湿地水环境功能处于“较好”水平,是由于城市化建设中对湿地面积、水文条件和周边景观要素配置较为科学,可以作为城市化过程中湿地改造的典范。

参考文献 (References):

- [1] 孙广友,王海霞,于少鹏. 城市湿地研究进展. 地理科学进展, 2004, 23(5): 94-100.
- [2] 王建华,吕宪国. 城市湿地概念和功能及中国城市湿地保护. 生态学杂志, 2007, 26(4): 555-560.
- [3] 潮洛蒙,李小凌,俞孔坚. 城市湿地的生态功能. 城市问题, 2003(3): 9-12.
- [4] 宋艳曦,余世孝,李楠,李勇. 深圳快速城市化过程中的景观类型转化动态. 应用生态学报, 2007, 18(4): 788-794.
- [5] 刘红玉,李玉凤,曹晓,郝敬峰,胡俊纳,郑囡. 我国湿地景观研究现状、存在的问题与发展方向. 地理学报, 2009, 64(11): 1394-1401.
- [6] 吕宪国. 湿地生态系统保护与管理. 北京: 化学工业出版社, 2004: 97-99.
- [7] Kent D M. Applied Wetlands Science and Technology. 2nd ed. Washington DC: CRC Press, 2000: 100-110.
- [8] US Fish and Wildlife Service. Habitat Evaluation Procedures (HEP) ESM 102. Washington DC: U.S. Fish and Wildlife Service, 1980.
- [9] Adamus P R, Clairain J E, Smith R D. Wetland Evaluation Technique (WET). Vicksburg: US Army Engineer, Waterways Experiment Station, 1987.
- [10] Martha A S, Eric D S, Joshua N C. A practical guide for the development of a wetland assessment method; the California experience. Journal of the American Water Resources Association, 2007, 42(1): 157-175.
- [11] Kent D M, Schwegler B R. Virtual reference wetlands for assessing wildlife. Florida Scientist, 1999, 623-624: 222-234.
- [12] Smith R D, Noble C V, Berkowitz J F. Hydrogeomorphic (HGM) Approach to Assessing Wetland Functions: Guidelines for Developing Guidebooks (Version 2). Vicksburg: US Army Engineer Waterways Experiment Station, 2013.
- [13] Brinson M M. A Hydrogeomorphic Classification for Wetlands. Vicksburg: US Army Engineer Waterways Experiment Station, 1993.
- [14] Gebo N A, Brooks R P. Hydrogeomorphic (HGM) Assessments of Mitigation Sites Compared to Natural Reference Wetlands in Pennsylvania. WETLANDS, 2012, 32(2): 321-331.
- [15] Hoeltje S M, Cole C A. Comparison of function of created wetlands of two age classes in central Pennsylvania. Environmental Management, 2009, 43(4): 597-608.
- [16] 胡和兵,刘红玉,郝敬峰,安静. 南京市九乡河流域土地利用程度空间异质性分析. 地球信息科学学报, 2012, 14(5): 627-634.
- [17] 胡俊纳,刘红玉,郝敬峰. 城市景观多功能区湿地水质分异及其人类影响. 生态学杂志, 2010, 29(7): 1409-1413.
- [18] 安静,刘红玉,郝敬峰,胡和兵. 快速城市化对南京东郊景观结构与格局的影响. 生态学杂志, 2012, 31(2): 421-425.
- [19] 曾辉,高启辉,陈雪,李贵才. 深圳市 1988—2007 年间湿地景观动态变化及成因分析. 生态学报, 2010, 30(10): 2706-2714.
- [20] Brinson M M, Rheinhardt R D. The role of reference wetlands in functional assessment and mitigation. Ecological Applications, 1996, 6(1): 69-76.
- [21] Hoeltje S M, Cole C A. Losing Function Through Wetland Mitigation in Central Pennsylvania, USA. Environmental Management, 2007, 39(3): 385-402.
- [22] Dvoretz D, Bidwell J, Davis C, DuBois C. Assessing natural and anthropogenic variability in wetland structure for two hydrogeomorphic riverine wetland subclasses. Environmental Management, 2013, 52(4): 1009-1022.
- [23] 李玉凤,刘红玉,孙贤斌,朱丽娟. 基于水文地貌分类的滨海湿地生态功能评价—以盐城滨海湿地为例. 生态学报, 2010, 30(7): 1718-1724.
- [24] 谢花林. 乡村景观功能评价. 生态学报, 2004, 24(9): 1988-1993.
- [25] 蔡春晓,刘红玉,李玉凤,王聪,侯明行. 南京仙林新市区土地利用结构与格局对湿地水环境氮、磷影响研究. 环境科学, 2014, 35(8): 2920-2927.
- [26] 胡和兵,刘红玉,郝敬峰,安静. 南京市九乡河流域景观格局空间分异对河流水质的影响. 环境科学, 2012, 33(3): 794-801.
- [27] 郝敬峰,刘红玉,胡俊纳,李玉凤,郑囡. 城市湿地小流域尺度景观空间分异及其对水体质量的影响—以南京市紫金山东郊典型湿地为例. 生态学报, 2010, 30(15): 4154-4161.
- [28] 宋永昌. 植被生态学. 上海: 华东师范大学出版社, 2001: 40-41.
- [29] 高志强,刘纪远,庄大方. 中国土地资源生态环境质量状况分析. 自然资源学报, 1999, 14(1): 93-96.
- [30] 郝敬峰. 城市化区域景观多功能特征与湿地水环境效应研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2012.