

快速城市化地区湿地水环境质量健康评价 ——以南京市仙林大学城为例

胡俊纳, 刘红玉, 郝敬峰

(南京师范大学环境演变与生态建设重点实验室, 江苏 南京 210046)

[摘要] 选取南京市仙林大学城 14 个城市湿地为研究对象, 运用遥感、GIS 软件提取出各个湿地小流域的土地利用现状相关数据, 并对其水质进行了为期 1 年的监测. 利用模糊综合评判法, 对每个月各个湿地的水质健康度进行评价. 研究结果表明: 这 14 个城市湿地, 多数湿地水质处于健康状态, 即健康度 $C > 0.65$ 且具有年内维持平衡的能力, 但也都存在水质不健康月份; 湿地水质健康度和土地利用程度呈明显的负相关关系. 因此, 合理管理和开发城市湿地, 控制污染, 优化和调整湿地小流域内土地利用方式和结构, 是快速城市化地区亟待解决的问题.

[关键词] 城市湿地, 水质健康度, 土地利用, 快速城市化地区, 南京市

[中图分类号] X21 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4616(2010)02-0115-05

Evaluation of Wetland Water Quality Health in Areas of Rapid Urbanization

——A Case Study of Xianlin University Town, Nanjing China

Hu Junna, Liu Hongyu, Hao Jingfeng

(Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract The samples of water quality of one-year in 14 wetlands were surveyed in the Xianlin university town in Nanjing city. Land use data of various wetlands were extracted using Remote Sensing and GIS software. The fuzzy comprehensive evaluation method was used to evaluate the health of water quality of each month. The results show: The water quality of majority wetlands is healthy which have the ability to maintain balance and $C > 0.65$, but there is the month of unhealthy water quality in every wetland. There is apparent negative correlation between the health of wetland water quality and the extent of land use. Therefore, the urgent issues in rapid urbanization area were rational management and development of urban wetlands, pollution control, optimization and adjustment the land use patterns and structure of the small watershed of wetlands.

Key words urban wetlands, health of water quality, land use, areas of rapid urbanization, Nanjing city

湿地是水体系统和陆地系统相互作用的结果. 对于城市湿地生态系统, 其水环境是所有湿地生态系统受人为干扰因素最大的, 同样也是水质环境最差的湿地生态系统. 城市湿地水环境状况不仅影响湿地生态系统本身的结构和功能, 而且直接影响城市生态环境整体景观质量和生态文明程度, 从而对城市社会、经济和生态功能产生重要影响.

目前, 我国城市湿地水环境质量已经成为制约城市生态环境质量的瓶颈因素^[1]. 尤其在城市化快速发展的长江中下游地区, 城市湿地面临水质污染的严重威胁^[2]. 我国从 20 世纪末期, 湿地健康研究逐渐得到重视, 并且在生态系统尺度的湿地水质研究方面取得重要成果^[3-8]. 也有少数研究立足于景观尺度, 但

收稿日期: 2009-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(40871084)、“青蓝工程”(184080H10240).

通讯联系人: 刘红玉, 教授, 博士生导师, 研究方向: 景观生态学、湿地生态学. E-mail: liuhongyu@njnu.edu.cn

该方面研究主要通过建立综合评价指标体系形式,对湿地生态、社会经济等方面的健康水平进行综合评价^[9]. 本文从生态系统过程角度,针对湿地水环境质量,开展景观尺度的水质研究,为城市湿地保护与合理利用提供科学依据.

1 研究区域概况

南京处于北亚热带季风湿润气候区,位于北纬 $31^{\circ}14''$ 至 $32^{\circ}37''$,东经 $118^{\circ}22''$ 至 $119^{\circ}14''$. 四季分明,雨量充沛,年降水量达 1 034 mm. 湿地是人类文明的摇篮,对城市而言,湿地具有不可替代的多重生态功能,是城市规划布局的内容和对象. 南京仙林大学城是以发展教育和高新技术产业为主的新市区,始建于 2002 年. 区内四周以丘陵环抱,内部平原以大学高校园区、商业开发小区为主,还包括零散分布的湖泊和九乡河等小水系. 该区未开发之前,是以牧业为主的农牧区,区内湖泊众多,是典型的江南湿地分布区域. 目前,仙林大学城南至沪宁高速公路、北至宁镇公路、西至绕城公路、东至七乡河,规划总用地面积 80 km^2 ,人口达 20 万左右,是快速城市化区域的典型代表.

2 研究方法

2.1 样点设置与监测

依据研究区特点,选择了区内 14 个湖泊湿地为代表,对其进行水质动态监测. 监测点空间分布见图 1. 各样地水质监测时间从 2008 年 4 月开始,到 2009 年 3 月结束,采样频率为每月 1 次,水样采集的是湿地中地表水.

实验器皿采用聚乙烯瓶,采集的水样加入缓冲剂(浓度 98% 的 H_2SO_4) 1~2 滴后带回实验室 $2\sim 5^{\circ}\text{C}$ 冷藏,防止微生物等改变水质,并在 1 周内检测. 综合考虑到数据的完整性和进行水质评价关键指标,本文选择了氨氮、硝氮、总氮、总磷、电导率及溶解氧 6 项指标,其中,氨氮、硝氮、总氮等用 SKLAR 水质连续分析仪测得,电导率和溶解氧用 YS 556MPS 多参数水质测量仪现场测得,重复 3 次,取平均值.

2.2 数据分析方法

水资源质量是多因素影响的反映,水资源系统中污染物质之间存在复杂关系,各种污染物质对水资源质量影响不一,水质分级标准难以统一,对水体质量的综合评价存在模糊性. 模糊数学是处理现实世界中客观存在的模糊现象的一种精确的数学方法. 模糊综合评价就是根据给出的评价标准和实测值,经过模糊变换,对评价对象给出总的评价的一种方法. 因此采用模糊综合评价法对研究区域湿地水质进行评价比较合适^[10],其评价模型为:

$$E = WOR,$$

式中 E 为评价指数, W 为综合评价各个指标的熵权矩阵, O 为合成算子, R 为各评价指标对各级标准的隶属度矩阵. 计算步骤如下:

- (1) 确定评价因子集、评价集.
评价因子集为水体各监测指标,记为 $U = \{\text{氨氮, 硝氮, 总氮, 总磷, 溶解氧, 电导率}\}$.
以地表水环境质量标准 (GB3838 - 2002) I ~ V 为标准,构成各指标 I ~ V 级健康标准值评价集 $S = \{\text{I, II, III, IV, V}\}$.
- (2) 确定单指标的相对隶属度矩阵 R .
相对隶属度是指在有限的论域中的不同决策之间作优劣比较,与论域外的决策无关^[4 11]. 利用相对隶属度这一特性,建立了各个健康评价指标相对各个健康等级程度的隶属度矩阵 $R^{[5]}$:

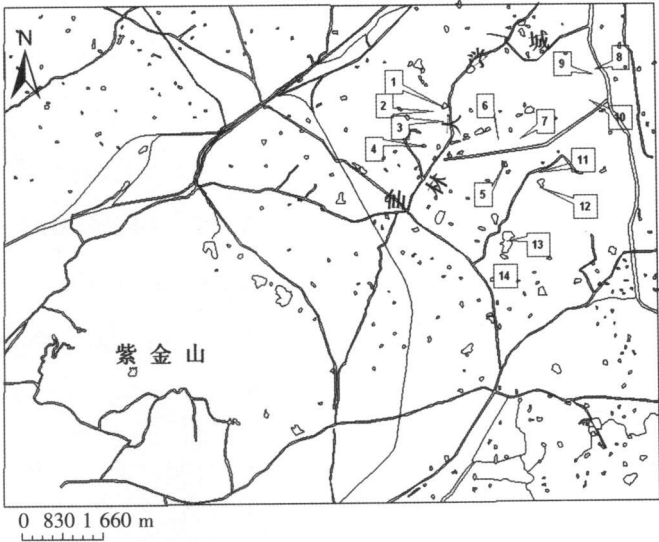


图 1 研究地区及采样点分布示意图
Fig.1 Study area and sampling sites

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} & R_{15} & R_{16} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & R_{24} & R_{25} & R_{26} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & R_{34} & R_{35} & R_{36} \\ R_{41} & R_{42} & R_{43} & R_{44} & R_{45} & R_{46} \\ R_{51} & R_{52} & R_{53} & R_{54} & R_{55} & R_{56} \\ R_{61} & R_{62} & R_{63} & R_{64} & R_{65} & R_{66} \end{bmatrix},$$

其中 R_{ij} 为第 i 指标对第 j 级健康标准的隶属度, R_{ij} 的计算对正向指标 (指标值越大, 健康程度越高) 和负向指标 (指标值越小, 健康程度越高) 有所不同, 其计算方法 (以第 y 项指标值 X_y 为例, $y = 1, 2, \dots, 5$, $S_{y,j}$ 为第 y 项指标的第 j 级健康标准值) 如下:

A 类指标:

- ① 当 $X_y > S_{y,1}$ 时, $R_{y,1} = 1, R_{y,2} = \dots = R_{y,5} = 0$
- ② 当 $S_{y,j} \geq X_y \geq S_{y,j+1}$ 时,

$$R_{y,j+1} = \frac{S_{y,j} - X_y}{S_{y,j} - S_{y,j+1}}, R_{y,j} = 1 - R_{y,j+1} \quad (j = 1, 2, 3, 4)$$

而对其它健康标准的隶属度均为 0

- ③ 当 $X_y < S_{y,5}$ 时, $R_{y,5} = 1, R_{y,1} = \dots = R_{y,4} = 0$

B 类指标:

- ① 当 $X_y < S_{y,1}$ 时, $R_{y,1} = 1, R_{y,2} = \dots = R_{y,5} = 0$
- ② 当 $S_{y,j} \leq X_y \leq S_{y,j+1}$ 时,

$$R_{y,j+1} = \frac{X_y - S_{y,j}}{S_{y,j+1} - S_{y,j}}, R_{y,j} = 1 - R_{y,j+1} \quad (j = 1, 2, 3, 4)$$

而对其它健康标准的隶属度均为 0

- ③ 当 $X_y > S_{y,5}$ 时, $R_{y,5} = 1, R_{y,1} = \dots = R_{y,4} = 0$

(3) 熵权法确定权重系数.

在多指标评价问题中, 权重的确定是重点也是难点^[4]. 用信息熵评价所得信息的有序度以及效率, 可以较大幅度地消除各指标权重计算的人为干扰, 现被许多学者用来作为多元综合评价中权重的确定方法^[4, 10, 12]. 根据熵权法得出评价指标权重集 $W = \{0.16, 0.24, 0.12, 0.11, 0.15, 0.22\}$.

(4) 模糊综合评价与归一化处理.

将矩阵 R 和矩阵 W 进行模糊关系合成, 算子“ \circ ”采用加权平均型, 最终得到模糊综合评价结果向量

$$E = WOR = (e_1, e_2, e_3, e_4, e_5),$$

其中, $e_j = \sum (W_j \cdot R_{ij}) = (W_1 \cdot R_{1j}) + (W_2 \cdot R_{2j}) + (W_3 \cdot R_{3j}) + (W_4 \cdot R_{4j}) + (W_5 \cdot R_{5j}) + (W_6 \cdot R_{6j})$.

因为 E 是一个向量, 不是一个点值. 为了便于进一步评价, 再对每个评语等级 e_j 打一个分数 c_j . 这样综合评价结果 A 的总评分为^[2]:

$$C = \sum_{j=1}^5 e_j c_j$$

其中, $(C_1, C_2, C_3, C_4, C_5) = (1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2)$, 结果见表 1

2.3 湿地周边土地利用程度

利用高分率 spot 遥感影像 (2006 年 10 月, 分辨率为 1 m) 为数据源, 对每块监测湿地所在的小流域土地利用状况进行遥感解译, 结合野外调查校正, 并利用 GIS 技术, 获得各湿地小流域土地利用类型信息. 以此为基础, 分析土地利用与湿地水环境质量关系. 根据研究区的特点, 依据自然系统和人文系统之间的物质、能量交流方向和强度, 将不同土地利用分成 4 种不同利用程度的等级类型: ① 土地自然力未利用类 (A_1). 基本上很少进行经济利用活动, 土地的利用程度接近于零. ② 土地自然力再生利用类 (A_2). 人地系统之间开始发生初级的物质与能量交流, 主要从自然系统流向人文系统. 天然林地、天然牧草地和天然水

域均属此类. ③土地自然力与经济力交互作用类 (A_3). 人地之间发展为持续的、双向的物质、能量交换方式. 耕地、园地、苗圃、人工草地和鱼池均属此类. ④土地非自然生产力利用类 (A_4). 原有的自然平衡由于人文系统的影响而发生彻底变化. 这类土地主要有城镇用地、农村居民点及工矿用地、交通用地及水工建筑等. 上述 4 种土地利用同时并存于特定区域, 用定量化的指标表示为^[13]:

$$A = \sum_{i=1}^n A_i \times (S_i / S), \quad (i = 1, 2, 3, 4)$$

其中 A 为土地利用程度指数; A_i 为第 i 级土地分级指数, 从 A_1 到 A_4 分别取值为 0、8、25、100; S_i 为第 i 类土地面积; S 为区域土地总面积. 计算结果见表 1.

表 1 各样点湿地水质健康度和土地利用程度指数
Table 1 Index of land use and health of wetland water quality of sampling points

样点	健康度总评分 C													土地利用程度指数 A
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	均值	
1	0.55	0.74	0.72	0.84	0.61	0.77	0.83	0.85	0.85	0.88	0.80	0.87	0.78	16.54
2	0.73	0.65	0.71	0.60	0.50	0.73	0.85	0.83	0.92	0.73	0.71	0.82	0.73	13.00
3	0.59	0.87	0.76	0.79	0.71	0.67	0.80	0.79	0.79	0.93	0.77	0.87	0.78	40.00
4	0.64	0.47	0.55	0.85	0.53	0.29	0.46	0.60	0.38	0.40	0.46	0.51	0.51	82.94
5	0.56	0.69	0.55	0.82	0.69	0.71	0.83	0.78	0.84	0.88	0.57	0.55	0.71	28.07
6	0.67	0.77	0.86	0.74	0.70	0.77	0.74	0.78	0.90	0.94	0.89	0.82	0.80	28.04
7	0.63	0.80	0.80	0.88	0.72	0.79	0.85	0.88	0.92	0.93	0.86	0.67	0.81	8.00
8	0.59	0.73	0.83	0.78	0.78	0.80	0.84	0.91	0.87	0.92	0.85	0.65	0.80	6.39
9	0.49	0.68	0.58	0.66	0.69	0.72	0.79	0.71	0.73	0.69	0.46	0.50	0.64	4.28
10	0.29	0.45	0.52	0.56	0.57	0.60	0.61	0.81	0.81	0.78	0.65	0.75	0.62	30.43
11	0.57	0.48	0.74	0.41	0.41	0.59	0.68	0.58	—	—	0.63	0.49	0.56	6.98
12	0.63	0.80	0.86	0.83	0.74	0.72	0.77	0.83	0.90	0.92	0.82	0.67	0.79	12.91
13	0.56	0.84	0.82	0.78	0.69	0.73	0.81	0.86	0.83	0.93	0.86	0.64	0.78	12.80
14	0.72	0.82	0.71	0.74	0.71	0.77	0.82	0.84	0.87	0.88	0.87	0.77	0.79	14.99

注: “—”代表未采集到水样. $C > 0.65$ 代表健康; $0.55 \leq C \leq 0.65$ 代表临界状态; $C < 0.55$ 代表不健康^[7].

3 结果分析

3.1 城市湿地水质综合评价结果

根据模糊评价结果, 14个湿地的水质均值处于健康状态 ($C > 0.65$) 的约占 71%, 处于临界状态 ($0.55 \leq C \leq 0.65$) 的占 21%, 处于不健康状态 ($C < 0.55$) 的占 8%. 评价一个湿地水质是否处于健康状态, 首先要看其水质级别, 其次看其在 1 年内能否自动维持平衡. 以 1 年为周期, 管理得当的人工和半人工湿地, 以及受人类影响较小的自然湿地, 其水质基本能自动维持平衡, 并且水质健康度较高, 如 1、2、3、6、7、8、10、12、13、14 号; 受点源污染和非点源污染严重的湿地, 不但水质健康度下降, 而且维持平衡的能力几近丧失, 如 4、5、9、11 号.

从动态角度来看 (见图 2), 14 个湿地中, 水质存在至少 1 个月份处于临界及不健康状态 ($C \leq 0.65$) 的有 12 个, 占 86%; 比例最高的是 4 号湿地, 有 11 个月份的水质总评分 $C \leq 0.65$. 综合表 1 和图 2, 虽多数湿地水质处于健康状态, 并且具有年内维持健康水平的能力, 但是大多数湿地 (占 86%) 都存在不健康月份, 甚至占据 1 年中大部分时段, 如 4、10 和 11 号湿地, 不健康月份个数分别为 11 个、8 个和 9 个. 显然, 水质不健康月份越多, 维持健康水平的能力越差.

3.2 土地利用程度与湿地水体质量的关系

由图 3 可知, 湿地水质健康度和土地利用程度呈明显的负相关关系. 如水质状况最差的 4 号湿地, 其土地利用程度也最高. 即城市用地面积越大, 水质越差. 4 号土地利用程度指数最高 (82.94), 其水质健康度也最低 (0.51), 表明该湿地处于不健康状态并且水质继续恶化. 5、10、11 号湿地也证实了水质健康度和土地利用程度之间负相关关系的存在.

4 结论

受人类活动和土地利用影响, 城市湿地不仅面积小, 而且分布零散, 因此易于遭受污染影响. 尤其是土

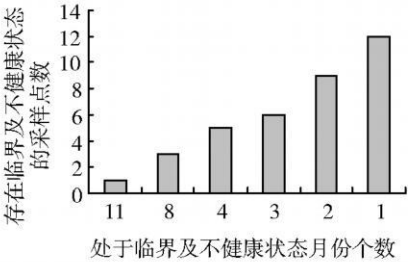


图 2 $C \leq 0.65$ 月份及样点数统计

Fig.2 The statistics on the number of month and sample of $C \leq 0.65$

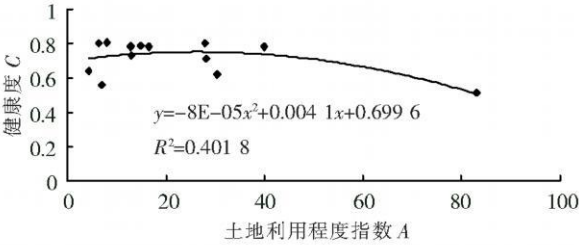


图 3 健康度与土地利用程度指数的关系

Fig.3 Relationship between the degree of health and the index of land use

地利用程度往往通过沉积物和化学物质的汇集影响湿地水质. 本文对南京市仙林大学城内的 14 个湿地水质进行研究, 得出以下基本结论:

- (1) 模糊数学避免了以往水质分级不连续的缺点, 以及单因子极值评价的片面性, 使评价结果更接近客观实际. 采用地表水环境质量标准本身确定各个评价因子的隶属函数, 方法简便, 结果可信度高.
- (2) 从年均来看, 快速城市化发展区域, 多数湿地水质处于健康状态 (约占 71%), 并且具有年内维持健康水平的能力; 少数湿地水质健康度处于临界和不健康状态 (约占 29%), 并且逐渐丧失维持健康水平的能力. 从动态角度来看, 约 86% 的湿地的水质都存在至少 1 个不健康的月份.
- (3) 小流域尺度内, 湿地水质健康度和土地利用程度呈明显的负相关关系, 因此通过调整湿地周边土地利用类型、结构和程度, 可以有效控制城市非点源污染问题.

[参考文献]

[1] 王凤昆, 刘海音, 张明娟. 南京市主要城市湿地的公众评价 [J]. 湿地科学与管理, 2008, 4(1): 59-62

[2] 崔保山, 杨志峰. 湿地学 [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2006

[3] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康研究进展 [J]. 生态学杂志, 2001, 20(3): 31-36

[4] 许文杰, 许士国. 湖泊生态系统健康评价的熵权综合健康指数法 [J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 125-127.

[5] 张凤玲, 刘静玲, 杨志峰. 城市河湖生态系统健康评价——以北京市“六海”为例 [J]. 生态学报, 2005, 25(1): 3 019-3 027.

[6] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体系 I . 理论 [J]. 生态学报, 2002, 22(7): 1 005-1 011.

[7] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体系 II . 方法与案例 [J]. 生态学报, 2002, 22(8): 1 231-1 239

[8] 赵臻彦, 徐福留, 詹巍, 等. 湖泊生态系统健康定量评价方法 [J]. 生态学报, 2005, 25(6): 1 466-1 474

[9] 曹宇, 欧阳华, 肖笃宁. 额济纳天然绿洲景观健康评价 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(6): 1 117-1 121.

[10] 周文华, 王如松. 基于熵权的北京城市生态系统健康模糊综合评价 [J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3 244-3 251.

[11] 李俊然, 陈利顶, 郭旭东, 等. 土地利用结构对非点源污染的影响 [J]. 中国环境科学, 2000, 20(6): 506-510

[12] 胡晓辉, 黄民生, 林李月. 福州市城市生态系统健康动态评价 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2008, 3(2): 74-80

[13] 王爱民, 刘加林, 缪磊磊, 等. 人地关系研究中的土地利用特征指标分析——以兰州市为例 [J]. 经济地理, 1999, 19(1): 62-66

[责任编辑: 丁 蓉]