

城市化背景下区域湿地生态安全多尺度综合评价

郝敬锋, 刘红玉, 胡和兵, 安 静

(江苏省环境演变与生态建设重点实验室, 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210046)

[摘要] 湿地生态安全评价不仅从生态系统内部进行健康评价, 更注重生态系统在一个综合的人类生存环境之下的可持续发展问题, 其影响因素具有多样性、复杂性。本文从城市湖泊湿地生态系统本身、集水区尺度及功能区三个空间尺度及 2008 年至 2009 年生态安全度季节性变化, 综合对南京市仙林大学城内 10 个湖泊湿地进行生态安全评价。结果表明: ① 研究区内城市湖泊湿地生态安全指数分布在 0.70~0.98, 总体状况良好; ② 季节性变化较为显著 ($P \leq 0.01$), 主要表现为春 (2008 年 3~5 月)、冬 (2008 年 12 月~2009 年 2 月) 季节生态安全指数较高, 而夏 (2008 年 6~8 月)、秋 (2008 年 9~11 月) 季节较低; ③ 不同功能区内各湖泊湿地生态安全差异性主要表现为半自然的生态农业区生态安全指数较高为 0.93, 而科教园区及商业服务区生态安全指数差别不大, 不同功能区湖泊湿地生态安全季节性变化主要表现为科教园区及商业服务区在 2008 年春季到冬季先降低后升高, 而生态农业区除了在夏季略有升高之外, 春、秋、冬季节较稳定。

[关键词] 城市湿地, 生态安全, 功能区, 多尺度, 南京市

[中图分类号] P96 X21 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4616(2011)01-0119-06

Assessment of Urban Wetland Ecological Security at Differing Scales

Hao Jingfeng, Liu Hongyu, Hu Hebing, An Jing

(Jiangsu Key Lab of Environment Change and Ecology Construction, School of Geography Science,
Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract Assessment of wetland ecological security is not only concerned with its ecosystem health but should be paid more attention on the problems about the sustainable development of the ecosystem itself. The factors that affect the wetland ecological security are diversity and complicated, and we assessed the small lake wetland in the urbanization areas at three differing scales: ecosystem scale, catchment scale and function scale. Results showed that: ① The ecological security indexes of urban shallow pond wetland were good, from 0.70 to 0.98; ② Quarterly variation of the different wetlands was significantly ($P \leq 0.01$). The value of the ecosystem security was higher in spring and winter but it declined in summer and autumn; ③ Different function areas of the wetland ecosystem security were distinguishing. The function of the business and services land and the educational land were similar, and their indexes were 0.77 and 0.76 respectively, while the indexes of the cultivated land were higher (0.93). Quarterly variations of the differing functions were distinguishing among three function areas. The indexes in business and services land and the educational land declined in summer and then increased from autumn to winter but it just went higher in summer while were steady in other three seasons in the cultivated land.

Key words urban wetland, ecosystem security, functional area, differing scales, Nanjing City

自国际应用系统分析研究所 (IASA) 于 1989 年首次提出生态安全 (ecological security) 的概念以来, 国内外学者对于区域生态安全的研究空前活跃起来^[1]。与生态系统健康研究所不同的是生态安全的研究不仅从生态系统本身的健康与可持续发展进行诊断, 生态安全更是具有某种先验性的针对自然资源的利用与从人类生存环境辨识的角度来分析与评价自然或半自然的生态系统^[2]。因此这就要求对于区域生态安

收稿日期: 2010-10-09

基金项目: 国家自然科学基金 (41071119)、青蓝工程 (184080H10240)、江苏省 2010 年度研究生科研创新计划 (CX10B_388Z)、南京师范大学优秀博士论文培育项目 (2010b0038)。

通讯联系人: 刘红玉, 教授, 博士生导师, 研究方向: 湿地景观变化与生物多样性。E-mail: liuhongyu@njnu.edu.cn

全的评价不仅从生态系统健康本身方面出发,更应该结合生态系统对社会服务功能,以及所能承受外界系统压力程度等方面对区域生态系统进行综合评价.目前国内外对于区域生态安全评价方法多种多样,如 Watanabe 等应用 CASM 生态动力学模型,对日本諏访湖生态系统安全度进行评价^[3];毛峰等从太湖水质的外界压力、服务功能及健康状况三个方面对太湖进行了生态安全评价^[4];姚晰等以 DSR(驱动力-状态-响应)指标体系概念模型为基础对湖南洛塔屋檐洞水库进行生态安全综合评价^[5];高吉喜等在 PSR(压力-状态-响应)概念模型的基础上建立大量指标体系对流域生态安全进行评价,同时提出流域生态评价应注重多尺度的评价^[6].纵观各种评价方法主要是通过建立大量指标体系评价、回归模型、概念模型等方法对区域生态系统进行评价.但是在综合考虑社会经济因素、外界压力因素与研究区域结合时,各指标难以精确量化,所以导致模型模拟过程中不确定性及模拟精度成为生态安全评价的瓶颈,而大量指标体系对评价对象的关联度也有待进一步探讨.而对于空间上相互隔离、生境高度破碎化的城市湖泊湿地而言,采用传统的生态安全评价方法存在一定缺陷:一方面传统生态安全评价主要针对生态安全的静态的现状评价,缺乏时间动态方面的评价^[7,8];另外城市湿地位于城市高强度人类活动区域,其影响因素多、生态系统演变比较复杂,客观上需要从多尺度^[9]对城市湖泊湿地进行生态安全评价;同时区域内不同的地理位置、不同功能区及集水区小流域内土地利用类型、土地利用结构等状况对城市湖泊湿地影响差异很大,而采用多尺度的生态安全评价能较好地解决点与面的结合.综合考虑城市湖泊湿地生态系统发育状况,选取城市湿地水质指标来反映生态系统尺度的安全水平;而集水区作为城市湖泊湿地天然汇水小流域,周围土地利用类型及格局对湖泊湿地中物质循环及能量流动起着重要作用.功能区尺度主要是反映人类活动影响性质及影响强度.因此本研究从生态系统尺度、集水区尺度、功能区尺度及时间尺度多时空尺度对南京市仙林大学城典型城市湿地进行生态安全综合评价,为保护与合理开发利用城市湿地提供科学依据.

1 研究范围

南京仙林大学城位于江苏省南京市仙林新市区仙鹤片区(图 1),西至宁芜铁路,东至公路二环,北至宁镇公路,南以灵山山脉为界,面积约为 24 km²,是仙林新市区的重要组成部分,南京仙林大学城主要职能为高等教育功能及居住功能,还有部分半自然的农业弃垦区,是以高等院校和居民住宅区有机融合的综合社区.至 2007 年底,南京仙林大学城入驻院校 15 所,在校生突破 12 万人,地区总人口接近 17 万.在大学城建设过程中,整个地区由原来的农业用地逐渐改变成科教用地、住宅用地及商业服务用地,城市化进程显著.在城市化进程中,城市湖泊湿地并未受到重视,往往被填埋、改造或者成为垃圾堆积场,使城市湖泊湿地不仅丧失了其原有功能,而且成为蚊蝇、寄生虫滋生之地.本文通过选取快速城市化区域典型湖泊湿地进行多尺度生态安全评价来考察在城市化进程中各湖泊湿地发挥与维持其各项功能的能力,为城市可持续性发展提供理论指导.

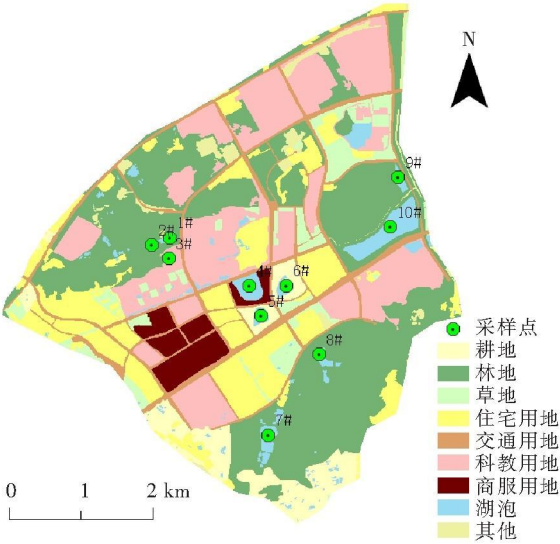


图 1 采样点位置及研究区域概况
Fig.1 Sample locations and study area

2 研究方法

本研究从评价对象的生态系统、所在集水区小流域及功能区进行动态生态安全评价,分别得出生态系统尺度安全指数、集水区尺度安全指数及功能区尺度安全指数,最后通过对三个指数综合评价得到城市湖泊湿地生态安全综合指数.

2.1 城市湖泊湿地评价指标体系的建立

水质作为制约湿地形成与发育的重要因素,其在维持湿地生态系统本身功能及指示湿地生态系统受

外界压力状况时发挥着重要作用, 因此在生态系统尺度上主要选取湿地水质指标作为评价指标. 湿地水质指标主要考虑水体的营养状况、反映有机污染状况及溶解无机离子状况. 因此本研究选取总氮 (TN)、氨氮 (NH₃-N)、总磷 (TP) 作为营养盐指标, 选择溶解氧 (DO)、化学耗氧量 (COD_{Mn}) 反映水体有机污染水平, 而电导率 (Cond) 及总溶解固体 (TDS) 主要反映水体中无机离子状况. 通过 2008 年 3 月份到 2009 年 2 月份为期 1 年对仙林大学城内 10 个典型湖泊湿地进行野外采样, 并结合实验室数据分析, 以每个季节 3 个月份水质指标的加和平均值来代替该季节湖泊湿地水质状况.

集水区尺度城市湖泊湿地的生态安全评价主要是反映城市湖泊湿地对所在小流域的服务功能及流域内土地利用结构对湖泊湿地所产生的压力. 评价指标主要包括: 集水区面积、土地利用类型、土地利用结构、水量. 集水区面积对降水有着重分配过程, 面积大小直接影响降雨对城市湖泊湿地水体补给情况, 因此集水区面积是评价指标体系中不可缺少的指标之一. 而不同土地利用类型、土地空间分配格局在雨水径流过程中造成的土壤养分流失有所差异, 因此在评价过程中选取土地利用类型及空间分配格局等指标来反应城市湖泊湿地在集水区流域尺度上的压力强度. 研究区内土地利用类型主要有耕地、林地、草地、住宅用地、交通用地、科教用地、商服用地、湖泊及其他, 选取经典景观空间格局指数: 斑块密度、均匀度指数、多样性指数及蔓延度指数来描述土地利用结构状况.

功能区尺度的生态安全评价主要反映城市湖泊湿地在维持该功能区的主要生态功能, 所有这种多功能景观的可持续发展为人类提供诸多服务功能^[10]. 由于研究区域较小且不是以行政单元为界, 所以社会经济指标数据不易获得, 因此综合考虑最终评价对象为城市湖泊湿地和功能区内各指标的可获得性, 功能区尺度生态评价指标选取: 人口密度、道路密度、不透层面积比例. 本区域主要是仙林大学城区域, 道路密度可充分反映市民可达性及人类对湖泊湿地压力; 区域的发展程度一般使用不透层面积比例^[11]表达.

表 1 城市湖泊湿地生态安全评价指标体系

Table 1 Indexes of the ecosystem security in urban wetland

尺度 (权重)	指标	最小值	最大值	平均值	变异系数	权重
生态系统尺度 (0.63)	总氮 / (mg/L)	0.28	2.15	0.67	0.54	0.09
	氨氮 / (mg/L)	0.02	1.78	0.13	2.11	0.09
	总磷 / (mg/L)	0.01	0.32	0.06	1.03	0.09
	高锰酸盐指数 / (mg/L)	5.43	11.17	7.85	0.19	0.09
	溶解氧 / (mg/L)	0.43	11.28	6.31	0.41	0.09
	电导率 / (μs/cm)	140.00	486.33	279.87	0.27	0.09
	总溶解固体 / (mg/L)	0.18	0.35	0.25	0.17	0.09
集水区尺度 (0.18)	集水区面积 / ha	1.84	78.53	32.34	0.77	0.04
	水量 / (1000 m ³)	19.23	819.90	337.61	0.77	0.02
	斑块密度 / (个 / km ²)	0.12	3.80	0.94	1.18	0.02
	均匀度指数	0.19	0.92	0.66	0.30	0.04
	多样性指数	0.14	0.74	0.52	0.30	0.03
	蔓延度指数 %	52.65	86.00	66.63	0.14	0.03
功能区尺度 (0.19)	功能区面积 / ha	307.79	1056.62	798.85	0.53	0.05
	人口密度 / (人 / km ²)	1104.66	5225.35	3227.46	0.64	0.05
	道路密度 / (个 / km ²)	1.74	8.77	4.42	0.80	0.04
	不透层面积 %	47.80	91.60	65.50	0.34	0.05

2.2 评价方法确定

采用加权平均计算各尺度生态安全指数后, 进一步加权处理得到多尺度下城市湖泊湿地生态安全综合评价结果:

$$S = \sum_{i=1}^n W_i X_i, \tag{1}$$

式中 S 为生态安全指数, W_i 为权重, X_i 为评价指标标准化值, 算法为选取该指标时间序列最优值归一化为 1, 其余值以其与最佳值的比值或者是比值的倒数作为归一化后的值. 权重采用熵值法来确定, 由各指标值构成的判断矩阵来确定指标权重的熵值更具有客观性^[12]. 首先构建 n 个样本 m 个指标的判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times m}$, 采用功效系数法^[13 14] 将判断矩阵归一化处理, 得到归一化判断矩阵 B , B 中元素的表达式为 $B = (b_{ij})_{n \times m}$: 包括正效指标 (2) 及负效指标 (3), 评价指标的熵值计算见公式 (4)、(5), 最后由计算出来的熵

值 H_i 通过公式 (6) 得到各指标权重, 然后通过公式 (1) 得到不同尺度下生态安全指数 S

$$d(x_{ij}) = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})},$$

(2)

$$d(x_{ij}) = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})},$$

(3)

$$H_i = -\frac{1}{\ln n} \left(\sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \right),$$

(4)

$$f_{ij} = \frac{1 + b_{ij}}{\sum_{i=1}^n (1 + b_{ij})},$$

(5)

$$W_i = \frac{1 - H_i}{m - \sum_{i=1}^m H_i}.$$

(6)

3 结果与讨论

3.1 生态系统尺度城市湖泊湿地生态安全

运用熵权法对仙林大学城内 10 个湖泊湿地选取 9 个评价指标进行生态系统尺度上不同季节生态安全评价, 评价结果见图 2 从图中可以看出, 在生态系统尺度上各湖泊湿地生态安全指数均在 0.55 以上, 平均分布在 0.75 左右. 通过方差分析, 在显著性水平 $P = 0.001$ 时季节性变化显著. 总体变化趋势为从 2008 年春季 (3~5 月) 到冬季 (12~2 月), 生态安全指数总体为上升趋势, 由于每个湖泊湿地受外界影响因素不同, 变化趋势有所差异. 季节性变化趋势大体可分为三种: (1) 从 2008 年春季到冬季生态安全指数持续升高, 如 2#、7#、8# 样点. (2) 从 2008 年春季到夏季生态安全指数呈降低趋势, 而到秋冬季则持续升高, 这类有 3#、5#、6# 样点. (3) 夏秋季节生态安全指数持续降低, 而到冬季生态安全指数又呈上升趋势, 如 4#、9# 及 10# 样点.

3.2 集水区及功能区尺度生态安全评价

3.2.1 集水区尺度生态安全评价结果

由于集水区及功能区相对比较稳定, 较短时间尺度影响并不明显, 因此在集水区及功能区尺度上并没有进行时间动态方面的评价. 首先通过 fragsats3.3 景观生态学软件对研究区内 10 个集水区小流域面积、斑块数密度、相对均匀度指数、多样性指数、蔓延度指数进行计算, 结合该小流域水量等 6 个指标对各个小流域进行生态安全评价.

从图 3 可以看出在集水区尺度上, 2#、3# 样点生态安全指数较低分别为 0.23 及 0.30 主要是因为两者水域面积较小且周围科教用地面积较大; 1#、4# 及 7# 样点生态安全指数差异不大, 均在 0.4 左右; 9#、10# 样点生态安全指数较高, 分别为 0.79 及 0.73 5#、6# 及 8# 样点生态安全指数分别在 0.60~0.67 之间.

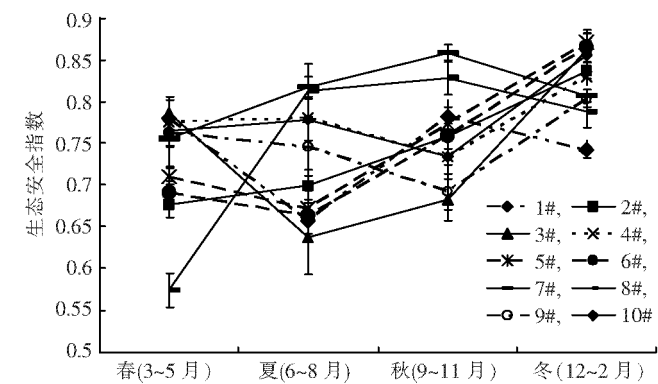


图 2 生态系统尺度生态安全度季节性变化

Fig.2 Quarterly variation of the indexes of the ecosystem security at ecosystem scale

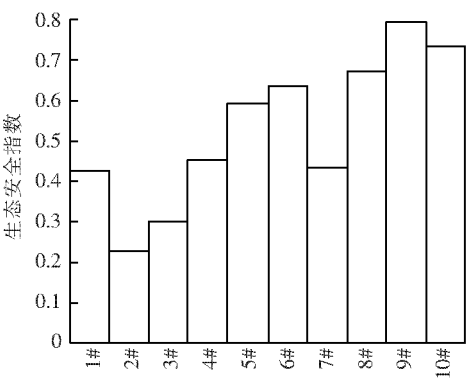


图 3 集水区尺度生态安全指数

Fig.3 Indexes of the ecosystem security of the urban wetland at catchment scal

3.2.2 功能区尺度生态安全评价结果

在功能区尺度上选取的评价指标主要围绕区域内湖泊湿地生态安全的影响因素, 因此本文主要选取区域面积、人口密度、道路密度及不透层面积比例三个指标来进行功能区尺度的生态安全评价。根据研究区功能性质, 本研究主要把城市湖泊湿地所在功能区分成三类, 分别为科教园区、商业服务区及生态农业区(图 4)。

三个功能区尺度上生态安全指数分别为科教园区(0.71)、商业服务区(0.31)、生态农业区(0.99)。从图 4 可以看出, 商业服务区面积较小, 但是其道路却比较集中, 而科教园区与生态农业区面积较大, 道路密度较小, 这是造成商业服务区生态安全指数较低的原因。

3.3 城市湖泊湿地生态安全综合评价结果

通过生态系统尺度、集水区尺度及功能区尺度三个空间尺度, 及一年内季节性变化这一时间尺度对研究区内 10 个典型的湖泊湿地进行生态安全综合评价。评价结果见图 5 从图 5 可以看出 10 个湖泊湿地生态安全指数差异明显, 每个湖泊湿地的平均值基本在 0.70 以上, 从数值评价结果来看, 评价数值基本处于两种水平: 7#、8#、9# 及 10# 样点较高, 平均值达到 0.90 以上; 其余各湖泊湿地生态安全指数彼此差异不大, 从图 4 中可以看出生态安全指数较高的湖泊湿地都处于生态农业区内, 而科教园区及商业服务区内的湖泊湿地生态安全指数季节性变化趋势相似。从季节性变化来看, 从 2008 年春季(3~5 月)到冬季(2009 年 12~2 月)变化趋势基本上是春冬季节生态安全指数较高, 而夏秋生态安全指数较低。这与生态系统尺度上生态安全指数变化趋势应该是一致的, 因为在生态系统尺度的生态安全评价权重最大, 也是整个评价的核心。8# 在春季生态安全指数较低, 而到夏秋季节持续升高, 这主要是因为 2007 年 11 月之前受到周围生活污水的影响, 而当年 11 月份竣工的污水改道工程使得该区水质有所改善。

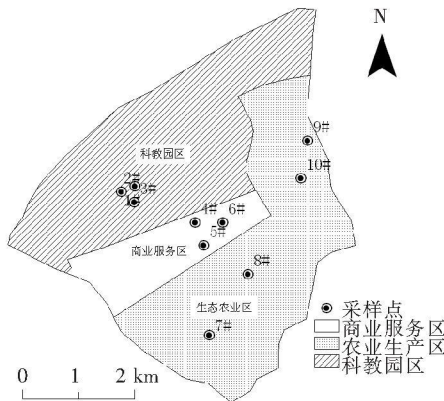


图 4 功能区划分

Fig.4 Different functional areas

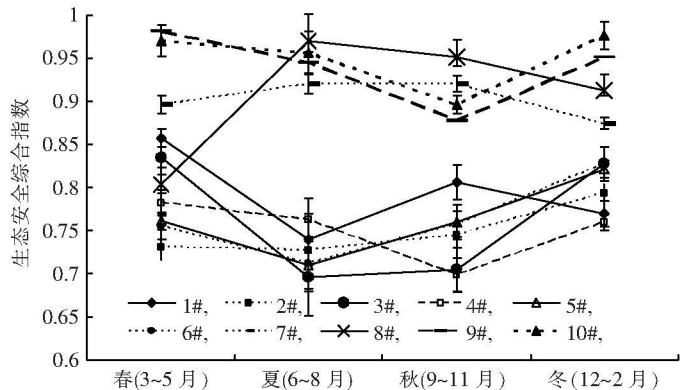


图 5 三种尺度下城市湖泊湿地生态安全季节性变化

Fig.5 Quarterly variation of the indexes of the ecosystem security at three differing scales

在夏秋季节特别是夏季雨水较多, 研究期间区域内总降水量为 1044mm, 其中夏季降雨量占到全年的 52.5%, 而城市暴雨径流影响成为威胁到城市湖泊湿地生态安全的主要因素^[11]。Titus S Seilheimer 等在研究城市化地区水质状况时结果也表明在 6~8 月份大部分水质指标较差^[15]。Wiley 等人也得出近年来雨水中的氨氮浓度有所上升^[16]。为了揭示这一变化规律, 本研究在考虑湖泊湿地周围景观结构、土地利用类型的基础上, 对 2008 年 6 月份一次降水(降水量为 2mm)进行了数据监测分析, 发现此次降水中总氮、氨氮、总磷分别是所有研究湖泊湿地水质平均值的 2.89、4.62 及 1.24 倍, 因此可以推测导致夏秋季城市湖泊湿地生态安全指数较高的主要因素是降水中的污染物质及来自城市雨水径流的影响。

4 结论

从不同尺度对城市湖泊湿地进行生态安全评价可以全面地对城市湖泊湿地进行生态安全定位, 评价结果具有综合性、客观性。同时湖泊湿地生态安全度对于不同季节的响应状况及变化规律更能体现城市湿地健康状况。评价结果对城市水资源合理开发与保护起到指导作用。通过熵权法对各个湖泊湿地进行生态

安全评价结果未进一步分级, 主要是因为目前对生态安全等级的确定往往从计算结果中进行重分类^[17], 主观性较强, 而生态安全影响因素较多, 并且从生态安全指数可以更深层次地分析其系统及外部压力状况. 从评价结果来看, 作为城市化进程起步阶段的南京仙林大学城湖泡湿地生态安全指数较高. 生态安全指数差异在空间上主要表现为半自然状态的农业生产区生态安全指数普遍优于科教园区及商业服务区, 而在时间尺度上主要表现为夏、秋季节生态安全指数普遍低于春、冬季节. 鉴于时间尺度上数据周期较短, 本研究主要是依据现有的数据进行时间尺度上的评价, 没有对区域湖泡湿地进行时间预警评价, 因此在以后的研究过程中应搜集大量基础数据并建立相关模型对城市湖泡湿地生态安全进行预警评价.

[参考文献]

- [1] 任志远, 张艳芳. 土地利用变化与生态安全评价 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 18
- [2] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念与研究方法 [J]. 应用生态学报, 2002, 13(3): 354-358
- [3] Watanai Naitoa, Keri ichi M iyanob. Application of an ecosystem model for aquatic ecological risk assessment of chemicals for a Japanese lake [J]. Water Research, 2002(36): 1-14
- [4] 毛锋, 李晓阳, 张安地, 等. 湖库生态安全综合评估的方法探析 [J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2009, 45(2): 327-332
- [5] 姚昕, 夏日元, 唐建生, 等. 湖南洛塔屋檐洞水库生态安全指标体系及综合评判 [J]. 地下水, 2006, 28(6): 15-18
- [6] Gao Jiki, Zhang Xianghui, Jiang Yun, et al. Key issues on watershed ecological security assessment [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(2): 251-261.
- [7] 刘红, 王慧, 刘康. 我国生态安全评价方法研究述评 [J]. 环境保护, 2005(8): 34-37
- [8] 施晓清, 赵景柱, 欧阳志云. 城市生态安全及其动态评价方法 [J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3237-3243
- [9] 彭少麟, 郝艳茹, 陆宏芳. 生态安全的涵义与尺度 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2004, 43(6): 27-31
- [10] Felix Kienast, Janine Bolliger, Marion Potschin, et al. Assessing landscape functions with broad-scale environmental data: Insights gained from a prototype development for Europe [J]. Environmental Management, 2009, 44(6): 1099-1120
- [11] Michael A Mallin, Virginia L. Johnson, Scott H. Ensign. Comparative impacts of storm water runoff on water quality of an urban, a suburban, and a rural stream [J]. Environ Monit Assess, 2009, 159(1/4): 475-491.
- [12] 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
- [13] Ma Huipun, Liu Ling, Chen Tao. Water security assessment in Haihe River Basin using principal component analysis based on Kendall [J]. Environ Monit Assess, 2009, 163(1/4): 539-544.
- [14] 秦寿康. 综合评价原理与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 13-14
- [15] Titus S Seilheimer, Anhua Wei, Patricia Chow-Fraser, et al. Impact of urbanization on the water quality, fish habitat and fish community of a Lake Ontario marsh, Frenchman's Bay [J]. Urban Ecosyst, 2007, 10(3): 299-319.
- [16] Willey J D, Kieber R J, Avery G B. Changing chemical composition of precipitation in Wilmington, North Carolina U. S. A.: Implications for the continental U. S. A. [J]. Environmental Science Technology, 2006, 40(18): 5675-5680.
- [17] 王耕, 吴伟. 基于 GIS 的西辽河流域生态安全空间分异特征 [J]. 环境科学, 2005, 26(5): 28-33

[责任编辑: 丁 蓉]