

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2018. 06. 02

长江江苏段饮用水水源地生态风险评价

方国华,袁 婷,林榕杰

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:运用压力-状态-响应模型,通过主成分分析法构建包括农药化肥施用强度、植被覆盖率、环保投资占 GDP 比例、水土流失率、水环境自净能力和土壤侵蚀强度等 6 个指标的饮用水水源地生态风险评价指标体系。采用层次分析法和专家咨询相结合确定指标权重,构建长江江苏段生态风险评价模型。以长江江浦-浦口水源地为例,利用遥感软件及地理信息系统(RS/GIS)量化生态风险评价的指标,计算得到江浦-浦口水源地生态风险值为 0.3657,处于较低风险度范围。

关键词:RS/GIS;饮用水水源地;生态风险评价;长江江苏段

中图分类号:TV213.4 文献标志码:A 文章编号:1004 - 6933(2018)06 - 0012 - 05

Ecological risk assessment of drinking water source in Jiangsu section of Yangtze River

FANG Guohua, YUAN Ting, LIN Rongjie

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the pressure-state-response (PSR) model and principal component analysis, the ecological risk assessment index system of drinking water source area was constructed, which included 6 indexes, such as pesticide fertilizer application intensity, vegetation coverage, environmental protection investment proportion to GDP, soil erosion rate, water environment self-purification capacity and soil erosion intensity. In order to construct the ecological risk assessment model of Jiangsu section of the Yangtze River, analytic hierarchy process (AHP) and expert consultation were used to determine the index weight. Taking Jiangpu-Pukou water source area of the Yangtze River as an example, using remote sensing software and geographic information system (RS/GIS) to quantify the indexes of ecological risk assessment, the ecological risk value of Jiangpu-Pukou water source area was calculated to be 0.3657, which was a lower risk degree.

Key words: RS/GIS; drinking water source area; ecological risk assessment; Jiangsu section of Yangtze River

饮用水水源地是城市生存和发展的重要基础,与人民的生命安全和健康水平息息相关。随着社会经济的高速发展,水资源开发利用程度不断加大,水体污染日益严重,城市供水安全面临严峻的挑战,饮用水水源地安全是社会经济稳定有序发展的有力保障。水源地生态风险评价作为水源地安全保障的重要环节,其目的在于掌握水源地生态系统的基本状况、识别生态风险源、定量评价水源地生态状况,从而有效

规避外部胁迫对水源地生态的不利影响,为饮用水水源地的综合整治和决策提供科学依据^[1-2]。

针对生态数据较难获取的特点,近年来通过遥感(RS)和地理信息系统(GIS)相结合来量化处理生态指标的方法得到较为广泛的应用^[3-5]。通过 RS/GIS 能够获取精确的地理空间数据,借助高效的空間数据处理技术,能够快速地实现区域的生态质量评价,提高评价的精度和效率,并使评价结果可视化^[6]。

基金项目:江苏省水利科技项目(2015056)
作者简介:方国华(1964—),女,教授,博士,主要从事水资源规划、水利水电系统规划与优化调度等研究。E-mail:hhufgh@163.com

本文运用压力-状态-响应模型,通过主成分分析法筛选指标,在考虑专家意见的基础上,采用层次分析法确定指标权重,综合考虑国内外生态保护状况和区划特征确定指标风险度划分,采用分级量化方法实现评价指标值统一化,构建生态风险评价模型,并运用 RS/GIS 技术对生态风险评价指标赋值,计算水源地生态风险值,分析水源地生态评价结果,验证评价体系适用性。

1 评价指标体系构建

1.1 评价指标的选取

压力-状态-响应模型常用于资源利用和环境质量评估,其中压力(驱动力)指标体现人类活动对环境造成的破坏和负面作用,状态指标体现环境及生态系统的状态和变化,响应指标体现人类应对压力和缓解负面影响所采取的对策^[7-8]。该模型适用于建立结构复杂、影响因素众多的指标体系。

综合考虑长江江苏段水源地生态环境现状,参考生态风险评价相关研究成果,从自然条件、农业开发、生物、植被、土壤条件、水体自净力及环保举措等方面初步选取 17 个指标来构建水源地生态风险评价指标体系,包括降雨量、气温、人均耕地、工业活动污染和农药化肥使用强度等压力指标,植被覆盖率、物种多样性、水土流失率、土壤侵蚀强度等状态指标,水环境自净能力、退耕还林率、水土流失治理率等响应指标^[9-12]。采用主成分分析法进行指标优选,收集整理长江江苏段 23 个饮用水水源地的生态指标数据,运用 MTALAB 软件实现主成分分析计算,优选出 6 个全面反映长江江苏段水源地生态风险且彼此之间互不相关的评价指标:农药化肥施用强度、植被覆盖率、环保投资占 GDP 比例、水土流失率、水环境自净能力和土壤侵蚀强度^[13]。

农药化肥使用强度即水源地周边陆域范围内单位耕地面积所使用的农药化肥量,其值越大越易造成严重的面源污染问题,危及水源地水质。植被覆盖率即植被覆盖面积占研究区陆域缓冲区的比例,是衡量水源地生态风险的重要指标,其值较低会导致地表径流增大,易引发水土流失,造成水源地周边生态环境恶化。环保投资占 GDP 比例体现管理机构对于水源地周边环境保护及污染治理力度,研究表明当其值达到 1%~1.5% 时,才能基本控制环境污染,提高到 2%~3% 时,才能改善环境质量。水土流失率,即水源地研究区内水土流失面积与土地总面积的比值,水土流失造成土壤剥蚀,易造成水体富营养化,严重影响水资源的开发利用,对水源地陆域范围内生态造成

严重破坏。环境自净能力主要取决于区域内水环境的总量,当环境受到污染时,在物理、生物与化学作用下,环境可以逐步消除污染达到自然净化,选用水源地保护区陆域范围内年产水模数^[14]作为计算自净能力等级的特征量,计算公式为

$$M = 4lgR_m \tag{1}$$

式中: M 为水环境自净能力等级; R_m 为研究区多年平均年产水模数。

土壤侵蚀强度是衡量水土流失强度的指标,它反映了单位时间内单位面积上的土壤在人类活动及自然作用下的土壤侵蚀量。本文采用水源地 20 km 缓冲区内范围内的 DEM、遥感影像、降雨数据、土壤等数据,通过 GIS、ENVI 遥感软件处理得到水源地陆域土壤侵蚀各侵蚀因子栅格分布,根据修正通用土壤流失方程,利用各因子栅格叠加计算得到土壤侵蚀强度分布。

$$A = RKL_sCP \tag{2}$$

式中: A 为土壤侵蚀强度; R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; L_s 为坡长坡度因子; C 为地表植被覆盖与管理因子; P 为水土保持措施因子。

1.2 评价指标权重的确定

在充分考虑专家意见的基础上,采用层次分析法确定评价指标权重,既避免了过于主观,又能保证决策者意愿导向的准确表达。采用 1~9 标度对指标相对重要程度赋值,从而构造比较判断矩阵 X ,元素 X_{ij} 表示第 i 行因素 X_i 相对于第 j 列因素 X_j 的重要程度,1~9 标度的具体含义见表 1。

表 1 标度的含义

标度	含义
1	X_i 与 X_j 一样重要
3	X_i 与 X_j 相比稍微重要
5	X_i 与 X_j 相比重要
7	X_i 与 X_j 相比重要得多
9	X_i 与 X_j 相比极端重要
2, 4, 6, 8	介于以上相邻奇数判断之间的重要程度
倒数	若 X_i 与 X_j 相比的重要性为 X_{ij} , 那么 X_j 与 X_i 相比的重要性则为 $1/X_{ij}$

邀请 10 位经验丰富的专家学者对指标间的相对重要性程度进行讨论,构建长江江苏段水源地生态风险评价的比较判断矩阵 V (式(3)),计算判断矩阵的最大特征值为 6.275,一致性检验指标为 0.0437,满足一致性检验要求。进而求得农药化肥施用强度、植被覆盖率、环保投资占 GDP 比例、水土流失率、水环境自净能力、土壤侵蚀强度的相对权重分别为 0.0665、0.2193、0.0393、0.1331、0.2956、0.2461。

$$V = \begin{bmatrix} 1 & 1/4 & 3 & 1/3 & 1/4 & 1/4 \\ 4 & 1 & 5 & 2 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 1/5 & 1 & 1/4 & 1/5 & 1/5 \\ 3 & 1/2 & 4 & 1 & 1/3 & 1/2 \\ 4 & 1 & 5 & 3 & 1 & 2 \\ 4 & 2 & 5 & 2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

1.3 生态风险值的计算

由于各个生态指标量纲不同,不能直接计算其生态环境风险值,通过统一化计算消除指标间不同量纲的影响:

$$I_i = \frac{C_i - C_{ik}}{C_{ik+1} - C_{ik}} + I_{ik} \quad (4)$$

式中: I_i 为指标*i*的风险值; C_{ik} 为指标*i*的*k*级数值; C_{ik+1} 为指标*i*的*k*+1级数值; I_{ik} 为指标*i*的*k*级指数值。植被覆盖率、环保投资占比和水环境自净能力3个指标为数值越高生态风险越低,所以计算公式与其他指标的指数计算公式相反。

生态风险值由各指标的风险值加权计算得到:

$$R_e = \sum_{i=1}^n W_i I_i \quad (5)$$

式中: R_e 为水源地生态风险值; W_i 为各生态指标权重; n 为指标数。

1.4 风险度划分

根据水源地特征将水源地生态风险评价标准分为5个等级,即低、较低、一般、较高、高,具体划分标准和含义见表2。通过换算以及长江江苏段水源地历史资料纵向对比和国内其他饮用水水源地资料横向对比,得到不同生态风险等级对应的指标值范围见表3。

2 实例研究

2.1 江浦-浦口水源地概况

江浦-浦口饮用水水源地位于长江南京河段干

流浦口区城南河河口处,现为浦口区重要供水水源地,目前建有江浦水厂和浦口水厂。江浦水厂取水能力10万m³/d,供水人口约32万人,供水面积380km²;浦口水厂供水人口42万人。

2.2 江浦-浦口水源地生态风险评价

基于遥感卫星影像和统计年鉴数据,运用RS/GIS技术对水源地20km陆域缓冲区进行目视解译、空间插值、植被参数提取以及栅格计算等操作,提取相关数据,对各生态风险指标值赋值。

a. 农药化肥使用强度。据2016年南京市统计年鉴,2015年末农作物总播种面积为31.688万hm²,农药化肥施用量为7.45万t,农药化肥使用强度为235.1kg/hm²,低于全国平均施用强度,属于较低施用水平,判断其对应低风险度。

b. 植被覆盖率。选取2013—2016年的7—9月3期遥感影像,运用ENVI及GIS进行土地利用目视解译(图1),裁剪并提取水源地保护区外20km缓冲区内的植被覆盖面积,得出植被覆盖率为50.11%,根据植被盖度划分标准,属于植被中覆盖,

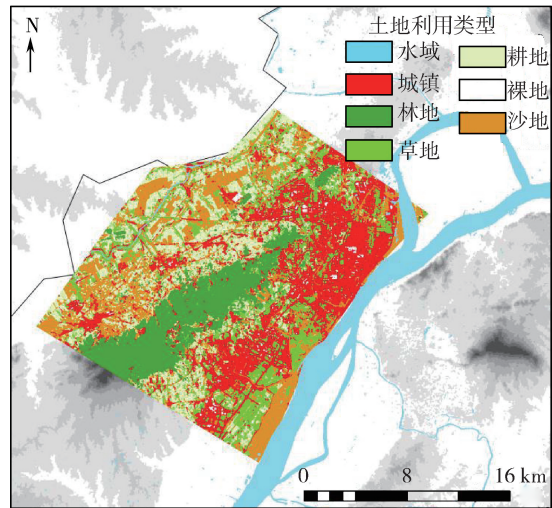


图1 江浦-浦口水源地土地利用分类

表2 风险度等级划分及含义

等级划分	评价等级	风险值范围	含 义
I	低风险度	(0,0.2]	风险因子对水源地影响非常低,带来的影响可以忽略不计
II	较低风险度	(0.2,0.4]	风险因子对水源地影响较低,造成的损失在可接受范围内
III	一般风险度	(0.4,0.6]	风险因子对水源地影响一般,可通过一定的风险控制措施将风险水平降低在可接受范围内
IV	较高风险度	(0.6,0.8]	风险因子对水源地影响较高,一旦风险发生,对社会、经济、环境产生较大影响
V	高风险度	(0.8,1]	风险因子对水源地影响非常大,一旦风险发生,对社会、经济、环境产生严重影响,造成巨大损失

表3 不同生态风险等级对应的指标值范围

风险等级	农药化肥使用 强度/(kg·hm ⁻²)	植被覆盖率/%	环保投资占 GDP比例/%	水土流失率/%	水环境自净 能力等级	土壤侵蚀强度/ (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)
I	(0,450]	[60,100)	[2.5,5.0)	[0,8)	>8	(0,300]
II	(450,650]	[45,60)	[2.0,2.5)	(8,10]	(6,8]	(300,500]
III	(650,750]	[30,45)	[1.5,2.0)	(10,30]	(4,6]	(500,2500]
IV	(750,850]	[10,30)	[0.5,1.5)	(30,40]	(2,4]	(2500,3000]
V	(850,1500)	(0,10)	(0,0.5)	(40,50)	(0,2]	(3000,5000]

能够较好的涵养水源,减少水土流失程度,判断其对应较低风险度。

c. 环保投资占 GDP 比例。据 2016 年南京市统计年鉴,2015 年 GDP 为 9 720. 77 亿元,其中环保支出 31. 57 亿元,占 GDP 总量的 0. 33%,南京市环保投入占比偏低,资金不足将会影响环保治理力度以及完成程度,对于水源地环保措施的落实造成一定的影响,判断其对应高风险度。

d. 水土流失率。据 2013 年江苏省水土保持通报,南京市水土流失面积为 612 km²,水土流失率为 9. 29%,总体流失程度一般,而水源地周边多为城镇与植被用地,水土流失对于水源地影响较小,判断其对应较低风险度。

e. 水环境自净能力。据 2015 年南京市统计年鉴及水资源公报,计算南京市浦口区产水模数为 65. 37 万 m³/km²,得出水环境自净能力等级为 7. 26,表明水源地周边水环境自净能力较强,水源地具有较强纳污能力,判断其对应较低风险度。

f. 土壤侵蚀强度。根据浦口-江浦水源地 20 km 缓冲区范围内的 DEM 高程数据、遥感影像数据、降雨数据、土壤数据,通过 GIS、ENVI 软件处理得到水源地陆域土壤侵蚀强度分布见图 2。由式(2)计算得平均土壤侵蚀强度为 724. 31 t/(hm²·a),根据土壤侵蚀分类分级标准并结合水源地周边特征,判断其土壤侵蚀强度为轻度侵蚀,对应一般风险度。

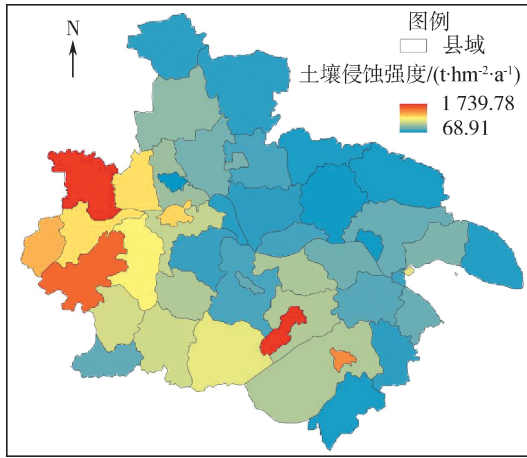


图 2 研究区土壤侵蚀强度分布

根据前文计算方法得到长江江浦-浦口水源地生态环境风险值为 0. 365 7,对应较低风险度。江浦-浦口水源地保护区外 20 km 缓冲区范围内植被中度覆盖,水土流失范围少,土壤侵蚀为轻度侵蚀,总体生态环境保持较好。但水源地周边开发程度高,多为住宅区,居民生产生活对水源地水质产生一定的不利影响。同时,环保投资力度不足,增加了环境保护以及污染治理的难度,不利于饮用水环境的

维护和进一步改善。

3 结 论

a. 根据长江江苏段水源地生态环境现状及特点,选定农药化肥施用强度、植被覆盖率、环保投资占 GDP 比例、水土流失率、水环境自净能力和土壤侵蚀强度等 6 个生态风险评价指标,构建了长江江苏段水源地生态风险评价模型。

b. 选取江浦-浦口水源地进行实例研究,计算得到其生态风险值为 0. 365 7,属于较低风险度等级。研究区内植被中度覆盖,水土流失范围少,土壤侵蚀为轻度侵蚀,总体生态环境保持较好,但水源地周边开发程度高,环保投资力度不足,不利于饮用水环境的维护和进一步改善。

参考文献:

- [1] 郑金秀. 我国饮用水水源地生态评价现状及发展探讨 [C]//中国原水论坛专辑. 北京:中国水利学会,2010: 361-365.
- [2] 郭先华. 城市水源地生态风险评价及水质安全管理 [D]. 贵阳:贵州大学,2008.
- [3] 王耕,王利,吴伟. 基于 GIS 的辽河干流饮用水源地生态安全演变趋势[J]. 应用生态学报,2007,18(11): 2548-2553. (WANG Geng, WANG Li, WU Wei. Ecological security evolvement trend of drinking water areas along Liaohe River [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2007,18(11):2548-2553. (in Chinese))
- [4] 廖晓玉. 遥感与 GIS 支持下的饮用水水源地生态环境评价分析[C]//中国水利学会 2015 学术年会论文集: 上册. 北京:中国水利学会,2015:317-324.
- [5] 王静雅,何政伟,于欢. GIS 与层次分析法相结合的生态环境综合评价研究:以渝西地区为例[J]. 生态环境学报,2011,20(增刊 2):1268-1272. (WANG Jingya, HE Zhengwei, YU Huan. Combination of GIS and AHP comprehensive assessment evaluation of the eco-logical environment;a case study in Western Chongqing [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20 (Sup2): 1268-1272. (in Chinese))
- [6] 朱红云,杨桂山,董雅文. 江苏长江干流饮用水源地生态安全评价与保护研究[J]. 资源科学,2004(6):90-96. (ZHU Hongyun,YANG Guishan,DONG Yawen. Protection and evaluation of ecological Security of source areas of drinking water along Yangtze River in Jiangsu Province [J]. Resources Science,2004(6):90-96. (in Chinese))
- [7] 高兴国,王磊,齐代华,等. 基于 PSR 模型的湿地生态安全评价:以大山包湿地为例[J]. 湖南师范大学自然科学学报,2013,36(1):86-90. (GAO Xingguo, WANG Lei,QI Daihua, et al. Eco-security evaluation of wetland based on PSR model; taking Dashanbao Wetlang as an

- example [J]. Journal of Natural Science of Human Normal University, 2013, 36(1): 86-90. (in Chinese))
- [8] 王繁玮, 陈星, 朱琰, 等. 基于 PSR 的城市水生态安全评价体系研究: 以“五水共治”治水模式下的临海市为例[J]. 水资源保护, 2016, 32(2): 82-86. (WANG Yiwei, CHEN Xing, ZHU Yan, et al. Study of urban aquatic ecological security evaluation system based on PSR model: a case study in Linhai City under mode of co-governance on five water categories[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2): 82-86. (in Chinese))
- [9] 郝光玲, 王烜, 罗阳, 等. 基于改进的综合评价模型的北京市水资源短缺风险评价[J]. 水资源保护, 2017, 33(6): 27-31. (HAO Guangling, WANG Xuan, LUO Yang, et al. Assessment of water shortage risk in Beijing based on improved comprehensive evaluation model[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(6): 27-31. (in Chinese))
- [10] 于凤存, 方国华. 饮用水水源地综合预警指标体系构建的研究[J]. 中国农村水利水电, 2011(8): 93-95. (YU Fengcun, FANG Guohua. Research on comprehensive early-warning index system of drinking water area[J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(8): 93-95. (in Chinese))
- [11] 何贝贝, 李绍飞, 朱习爱. 天津市水环境安全评价及其指标体系研究[J]. 水资源保护, 2016, 32(1): 125-129. (HE Beibei, LI Shaofei, ZHU Xi'ai. Study on water environment security evaluation and index system in Tianjin City[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(1): 125-129. (in Chinese))
- [12] 于凤存, 方国华, 肖秋英. 集中式饮用水水源地安全预警系统框架的研建[J]. 灾害学, 2008(4): 21-24. (YU Fengcun, FANG Guohua, XIAO Qiuying. Safety warning system for water source area of centralized drinking water[J]. Journal of Catastrophology, 2008(4): 21-24. (in Chinese))
- [13] 杨竹. 基于 AHP-模糊评价法的水源涵养生态环境评价[D]. 北京: 中国地质大学, 2016.
- [14] 冯利华, 骆高远. 区域水环境自净能力的定量评价[J]. 环境保护科学, 2002, 28(5): 23-24. (FENG Lihua, LUO Gaoyuan. Quantitative evaluation on self-purification of water environment of area[J]. Environmental Protection Science, 2002, 28(5): 23-24. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-12-01 编辑: 王 芳)

(上接第 11 页)

- [81] LEE H J, KIM H E, LEE C. Combination of cupric ion with hydroxylamine and hydrogen peroxide for the control of bacterial biofilms on ro membranes [J]. Water Research, 2017, 110: 83-90.
- [82] ZHU X, ELIMELECH M. Colloidal fouling of reverse osmosis membranes: measurements and fouling mechanisms[J]. Environmental Science & Technology, 1997, 31(12): 3654-3662.
- [83] KOMLENIC R. Rethinking the causes of membrane biofouling[J]. Filtration & Separation, 2010, 47(5): 26-28.
- [84] KHAMBHATY Y, PLUMB J. Characterization of bacterial population associated with a brackish water desalination membrane[J]. Desalination, 2011, 269(1): 35-40.
- [85] BAE H, JEONG D, KIM H, et al. Dynamic shift in community structures of biofilm-forming bacteria by the pre-treatment systems of seawater reverse osmosis processes[J]. Desalination, 2014, 343: 17-25.
- [86] TAN Y J, SUN L J, LI B T, et al. Fouling characteristics and fouling control of reverse osmosis membranes for desalination of dyeing wastewater with high chemical oxygen demand[J]. Desalination, 2017, 419: 1-7.
- [87] LEE J, JUNG J Y, KIM S, et al. Selection of the most problematic biofoulant in fouled RO membrane and the seawater intake to develop biosensors for membrane biofouling[J]. Desalination, 2009, 247(1): 125-136.
- [88] WU B, SUWARNO S R, TAN H S, et al. Gravity-driven microfiltration pretreatment for reverse osmosis (RO) seawater desalination: microbial community characterization and RO performance[J]. Desalination, 2017, 418: 1-8.
- [89] AYACHE C, MANES C, PIDOU M, et al. Microbial community analysis of fouled reverse osmosis membranes used in water recycling[J]. Water Research, 2013, 47(10): 3291-3299.
- [90] MIYOSHI T, TSUYUHARA T, OGYU R, et al. Seasonal variation in membrane fouling in membrane bioreactors (MBRs) treating municipal wastewater [J]. Water Research, 2009, 43(20): 5109-5118.
- [91] ZHENG L, YU D, WANG G, et al. Characteristics and formation mechanism of membrane fouling in a full-scale RO wastewater reclamation process: Membrane autopsy and fouling characterization [J]. Journal of Membrane Science, 2018, 563: 843-856.
- [92] MALAEB L, AYOUB G M. Reverse osmosis technology for water treatment: state of the art review[J]. Desalination, 2011, 267(1): 1-8.
- [93] 宋恩民, 杨曦, 王峰. 浅析 RO 预处理系统的设计要点[J]. 山东煤炭科技, 2007(5): 53-54. (SONG Enming, YANG Xi, WANG Feng. Analysis of design points of RO pretreatment system [J]. Shandong Coal Science and Technology, 2007(5): 53-54. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-01-26 编辑: 熊水斌)