

# 石头口门水库饮用水水源地生态风险评价

孙立强<sup>1,2</sup>, 田卫<sup>1</sup>, 俞穆清<sup>1</sup>, 马广庆<sup>1</sup>, 顾斌<sup>1</sup>, 徐宁<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

**摘要:**以石头口门水库水源地为研究区域,将生态风险评价引入水库水源地评价中,从自然条件和人为干扰状况出发,根据生态风险评价框架和层次分析思想建立石头口门水库水源地生态风险评价指标体系。在研究区历史资料考证和野外考察的基础上,筛选出点源污染、面源污染及干旱作为风险源。结果表明,石头口门水库水源地的生态风险分布具有明显的空间差异性。研究还发现,对石头口门水库水源地生态风险值贡献较大的因子为 N 元素和 P 元素,二者的权重分别为 0.224 7 和 0.195 4。研究结果可为环境管理和生态风险决策提供数量化的理论依据和数据支持。

**关键词:**石头口门水库;生态风险评价;水源地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)01-0211-04

中图分类号: X144

## Ecological Risk Assessment for Drinking Water Source Land of Shitoukoumen Reservoir

SUN Li-qiang<sup>1,2</sup>, TIAN Wei<sup>1</sup>, YU Mu-qing<sup>1</sup>, MA Guang-qing<sup>1</sup>, GU Bin<sup>1</sup>, XU Ning<sup>1</sup>

(1. *Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130012, China*; 2. *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** By developing an evaluation index system and applying of analytic hierarchy process(AHP) comprehensive evaluation, an ecological risk assessment of the ecosystems in the Shitoukoumen Reservoir basin was carried out with considerations of natural conditions and human disturbance of the study area. Based on historical documents and field survey, three factors including point source pollution, non-point source pollution and drought were selected as risk sources. The results show that ecological risks of the basin displayed substantial spatial variability. The key ecological risk sources were total nitrogen and phosphorus in the water, with weight coefficients of 0.224 7 and 0.194 5, respectively. The results of this study provided quantitatively a theoretic basis and data support for the environmental management and ecological risk decision-making.

**Keywords:** Shitoukoumen Reservoir; ecological risk assessment; water source

生态风险评价(ecological risk assessment, ERA)是指定量地确定环境危害对人类负效应之概率及其强度的过程,是伴随着环境管理目标和环境观念的转变而逐渐兴起并得到发展的一个新的研究领域<sup>[1]</sup>。目前,生态风险评价在我国还处于起步阶段,但国内已经有许多学者开始研究并运用生态风险评价,如钱迎倩、李国旗、殷浩文等对生态风险评价概念的阐述<sup>[2-4]</sup>,马德毅、石璇、张曼胤等研究了微量元素或重金属的生态风险<sup>[5-8]</sup>,张学林、付在毅等对农业和湿地区域生态风险评价进行了研究<sup>[9-10]</sup>,但对水库水源地生态风险评价的研究尚未见报道。本文以石头口门水库为例,按照生态风险评价的基本理论框架和方法体系<sup>[11]</sup>,对水库水源地生态风险评价进行初步探讨。水库水

源地生态风险评价包括风险源分析、暴露与危害性分析以及风险综合评价等几个部分。

石头口门水库是长春市主要水源之一,是该市工业、农业和人民群众生产、生活的重要保障。然而多年来,由于大量的农药、化肥、污水流入库区内,造成水库水质污染严重,严重制约着城市的发展。本文引入生态风险评价方法,对石头口门水库生态风险进行评价,对石头口门水库的环境保护以及风险管理具有重要的理论价值与现实意义。

## 1 研究区概况

石头口门水库位于松嫩平原腹地,为松花江(吉林省境内)主要支流饮马河中游的大型控制性水利枢

收稿日期:2010-05-06

修回日期:2010-06-12

资助项目:“973”国家重点基础研究发展规划项目“湿地生态系统服务功能形成机理与区域效应”(2009CB421103);中国科学院知识创新工程重要方向项目“三江平原农业开发与湿地保育的水资源可持续利用”(KZCX2-YW-Q06-03)

作者简介:孙立强(1984—),男(汉族),山东省临沂市人,在读硕士,主要从事区域生态环境评价研究。E-mail:sunliqiang16888@163.com。

通信作者:田卫(1962—),男(汉族),吉林省吉林市人,研究员,主要从事环境影响评价与规划研究。E-mail:tw5542268@163.com。

纽工程,水库汇水区(125°22′—126°31′ E, 42°59′—44°3′ N)位于吉林省中部低山丘陵区 and 台地地带,总面积 4944 km<sup>2</sup>,属中温带半湿润大陆性季风气候区,年均气温 5.3 ℃,年降水量 369.9~667.9 mm。降水多集中在 6—9 月份,占全年降水量的 80%,时空分布不均匀。自 1977 年开始,石头口门水库承担了部分长春市供水任务,到目前,日平均向长春市城区供水 8.0×10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>,占长春市全部城市用水的 80%。

注入水库的主要河流有饮马河干流及其支流岔路河和双阳河。本次评价将石头口门水库水源地分为 4 个大的研究区域:饮马河上游、岔路河、双阳河和石头口门水库库区。

## 2 水源地生态风险评价

### 2.1 受体分析

2.1.1 受体 生态风险的受体即风险承受者,在风险评价时指生态系统中可能受到来自风险源干扰的不利作用的组成部分<sup>[12]</sup>。它可能是生物体,也可能是非生物体,通常是生态系统中对外部风险压力最敏感的因子。对石头口门水库进行生态风险评价时选择水生生态系统作为生态风险评价的受体。

2.1.2 评价终点 生态终点是指在具有不确定性风险源作用下,风险受体可能受到的危害,以及由此而发生的系统结构和功能的变化。对于水库水源地生态系统而言,可能的生态终点包括水库功能受到损伤或受到威胁,水质下降而失去饮用功能,生物种群数量变化,湿地功能退化、消失,生态系统功能损伤,水库的营养级发生变化,生物种群数量变化等。本文将水质变化作为评价终点。

### 2.2 风险源分析

生态风险源大体可以归纳为自然的和人为的两大类:自然生态风险源是指区域性的气象、水文、地质等方面的自然灾害。研究区的自然灾害包括洪涝、干旱、地震等。人为生态风险源是指导致危害或严重干扰生态系统的人为活动,如工业污水、旅游、水土流失等。对以上风险源逐一分析其对受体的干扰和危害,根据历史资料考证其发生的概率、强度及范围,忽略那些强度小、发生范围不大、对水生生态系统影响较为轻微的次要风险源,从而确定了干旱、点源污染、面源污染为该区主要的生态风险源。

2.2.1 点源污染 近年来,在石头口门水库饮用水水源地保护区范围内出现了近水居民生活垃圾、城镇生活污水、工矿企业对水源地的污染的问题,对水源造成了直接的污染,造成石头口门水库水污染日趋严重。仅就城镇生活污水而言,每年产生 5 584 t COD,

1 057 t 总氮。据唐艳凌<sup>[13]</sup>统计,双阳河是流域内城镇生活污染物产生和排放的主要来源,其污染物排放量占整个流域的 46.9%,其次是饮马河流域,占总排放量的 30.5%(见表 1)。

表 1 城镇生活污染源污染物排放量 t/a

项目	COD <sub>cr</sub>	氨氮	总氮	总磷
库区	317	48	496	36
岔路河	946	144	179	13
双阳河	2 620	398	322	24
饮马河	1 701	258	60	4
总计	5 584	848	1 057	78

注:表中数据由文献<sup>[13]</sup>整理而得。

2.2.2 面源污染 面污染源,是指在较大范围内,溶解性或固体污染物在降雨径流等作用下,通过地表或地下径流进入受纳水体造成的污染。面源污染是造成水体水质功能降低和水体富营养化的主要因素。根据石头口门水库流域污染源特征,确定其面源污染分为水土流失、农村生活污水、农田径流、城市径流以及畜禽养殖 5 部分。

土地利用变化引起的水土流失是水源流域水质变化的重要因素。张素梅等<sup>[14]</sup>研究发现,土地利用变化对该区域面源污染的影响非常显著,其中农田、林地和居民点对面源污染负荷影响较大,面积的微小变化都会引起污染负荷的较大变化。

据唐艳凌<sup>[13]</sup>统计,该流域每年生活污水产生量为 2.03×10<sup>7</sup> t/a,其中氨氮 1.02 t/a,总磷 112 t/a。因农田径流产生的氨氮为 10 983 t/a,总磷 1 056 t/a,面源污染较为严重,其年污染物排放量见表 2。

表 2 面源污染物排放量 t/a

项目	COD <sub>cr</sub>	氨氮	总氮	总磷
库区	1 016.88	1 347.80	2 273.40	254.74
岔路河	2 147.39	2 183.14	3 076.58	289.80
双阳河	17 648.91	6 736.00	11 937.12	1 130.52
饮马河	5 543.29	4 984.50	8 713.30	799.69
合计	26 356.47	15 251.44	26 000.40	2 474.75

注:表中数据由文献<sup>[13]</sup>整理而得。

2.2.3 干旱 石头口门水库流域的水源补给主要来自流域内的降雨,降水量对其水质的影响也是一个关键因素。表 3 列出了 1966—2005 年间石头口门水库流域干旱灾害风险发生的频次和频率<sup>[15]</sup>。

### 2.3 暴露及危害分析

暴露分析是研究风险源在评价区域中的分布、流动及其与风险受体之间的接触暴露关系<sup>[16]</sup>。各风险

源对水源地的胁迫作用主要通过水质变化趋势、富营养化等形式表现出来。由表 4 可以看出,从 1997—2005 年,本研究区域水质有变差的趋势。根据长春市环境质量报告书分析,石头口门水库流域水质已成中营养化状态,形势不容乐观。

表 4 研究区地表水质评价结果<sup>[16]</sup>

项目	1997 年	1998 年	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年
饮马河	II	III	II	III	II	II	II	III	III
岔路河	II	II	III	III	II	II	II	III	III
石头口门水库	II	II	II	II	III	II	III	III	III
双阳河	—	—	—	III	III	IV	V	IV	III

2.4 生态风险评价指标

由于目前生态风险评价缺乏统一的标准,本研究在参考大量国内外文献的基础上,确定石头口门水库的生态风险评价指数采用自然灾害指数、生态指数、生态脆弱度指数和污染指数(N 污染指数、P 污染指数、COD 污染指数)<sup>[18-20]</sup>。

2.4.1 生态指数 生态指数反映各斑块的生态完整性、生态重要性及自然性的大小,包括物种重要性、生物多样性等方面。本文主要选用原生动物的生物多样性指数。生物多样性指数  $D$ :应用 Margalef 多样性指数公式进行计算:

$$D = (S - 1) / \ln N \quad (1)$$

式中:  $S$ ——原生动物种数;  $N$ ——原生动物种丰度(个/10 ml)。

2.4.2 生态脆弱性指数 生态脆弱度指数反映了不同斑块的敏感度。抵抗力弱,则脆弱度高。它由 2 个变量敏感性和恢复力确定,是两者之间的关系函数<sup>[21]</sup>。目前还没有准确、公认的脆弱度指标可借鉴应用,本文考虑了地形地貌和水文条件等指标。

2.4.3 灾害指数 某一灾害指数可定义为其概率与权值之积,即:

$$D = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n D_{ij} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n P_{ij} \cdot W_{ij} \quad (2)$$

$(i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$

式中:  $D$ ——灾害指数;  $m$ ——灾害类型个数;  $n$ ——某种灾害的级数( $n=1, 2, 3$ );  $P$ ——第  $j$  种灾害第  $n$  级风险发生的概率;  $W$ ——第  $j$  种灾害第  $n$  级风险的权值。

由于在本文中只考虑了干旱灾害(即  $m=1$ ), 因此上式可表示为:

$$D = \sum_{i=1}^n D_i = \sum_{i=1}^n P_i \cdot W_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

2.4.4 污染指数 污染指数用 N, P 污染指数和 COD 指数来表示, N, P 污染指数反映了研究区域的

表 3 石头口门水库干旱灾害风险发生的概率及强度

时期	历时	干旱总频次	频率/%	特大干旱	
				频次	频率/%
1966—2005	40	16	40	5	8

注:表中数据由文献[14]整理而得。

富营养化状况, COD 指数反映了研究区域化学污染的风险程度。污染指数用下式表示:

$$P_i = C_i / C_{oi} \quad (4)$$

式中:  $C_i$ ——污染物的实测浓度;  $C_{oi}$ ——污染物的标准浓度(石头口门水库流域采取 II 类水体标准)。

2.4.5 风险源的综合权重 根据所选择的生态风险评价指数(见图 1), 结合层次分析法(AHP 法), 通过专家判别打分对其进行加权, 可确定石头口门水库流域生态风险评价指数的干旱指数、生物多样性指数、脆弱性指数、N 污染指数、P 污染指数、COD 污染指数权重分别为 0.165 9, 0.137 2, 0.126 3, 0.224 7, 0.195 4, 0.151 4。

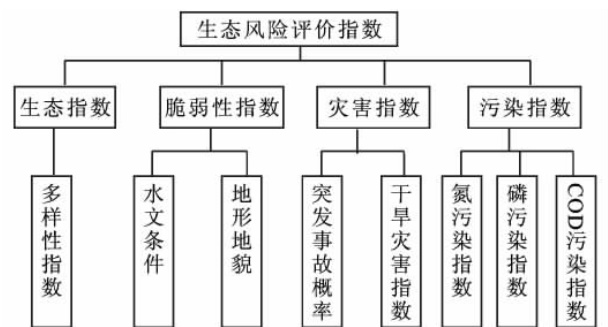


图 1 石头口门水库水源地生态风险评价指数

3 结果与讨论

将各区域的各项生态风险指数按权值进行加权, 可得出最终的石头口门水库水源地生态风险评价结果(表 5)。由表 5 可知, 双阳河的风险值最高, 为 0.386; 其次为岔路河(0.240); 饮马河为 0.188; 石头口门水库的风险值最低, 为 0.185。作为直接饮用水水源地, 石头口门水库库区的生态风险值低于其它 3 条河流。

石头口门水库库区物种多样性指数为最高, 说明其目前的生态结构较为合理, 因此应注重对石头口门

水库库区的保护以维持生态环境的可持续发展。但其污染指数较高,尤其是 P 污染指数,表明库区 P 元素超标较严重,水质呈富营养化状态,与长春市环境质量报告书的分析结论一致。

双阳河脆弱性较大,说明该区域较易受到外界的干扰,因此在对双阳河进行各项人为活动时充分考虑其敏感性,尽可能降低对其生态系统的破坏。同时双阳河污染指数也较大,主要为 N、P 污染指数较高,其原因为双阳河接纳了长春市双阳区大量的工业和生活污水,超出了水环境的自净能力。饮马河脆弱性指数最小,说明其抵御外界干扰能力较强,但污染指数较高,说明水土流失带来大量的营养元素,造成营养元素严重超标。

从以上分析可以看出,大量污染物进入石头口门水库流域,已造成水质的逐年下降和富营养化程度的增加。从各风险源来看,石头口门水库流域生态系统的最大制约因素是污染物特别是磷的排入,具体来说该区域的氮污染并不十分严重,COD 污染也非特别高,磷污染才是石头口门水库水源地生态系统受损的最大污染源,应予以重视。

表 5 石头口门水库水源地生态风险评价结果

生态风险评价 指数类型		石头口门 水库库区	饮马河	岔路河	双阳河
生态指数	多样性指数	1.410	1.140	1.020	0.990
	脆弱性指数	0.200	0.150	0.260	0.280
	灾害指数	0.080	0.080	0.080	0.080
	氮污染指数	1.030	1.210	0.900	16.440
污染指数	磷污染指数	4.550	4.320	4.660	4.560
	COD 污染指数	1.120	0.890	1.430	2.700
归一加权		0.185	0.188	0.240	0.386

## 4 结论

本文根据目前国内外较为认可的生态风险评价过程,即风险源分析、受体分析、暴露分析、危害分析及风险评价,对石头口门水库水源地的生态风险进行了初步的探讨。将石头口门水库水源地分为 4 个研究区域,通过风险源识别,确定干旱、点源污染、面源污染为其风险源。通过暴露、危害分析,运用基于因子权重的相对风险评价方法进行综合评价,得出不同区域的生态风险值,识别出对生态风险贡献较大的因子。结果表明,双阳河的生态风险值最高,为 0.386;岔路河的风险值为 0.240;饮马河风险值为 0.188;石头口门水库库区的风险值较小,为 0.185。

研究还发现,对石头口门水库水源地生态风险值贡献较大的因子为 N 元素和 P 元素,二者的权重分

别为 0.224 7 和 0.195 4。污染物是最主要的风险贡献源,应予以重点监控。

### [参 考 文 献]

- [1] 许学工,林辉平,付在毅. 黄河三角洲湿地区域生态风险评价[J]. 北京大学学报:自然科学版, 2001,37(1):111-120.
- [2] 钱迎倩,田彦,魏伟. 转基因植物的生态风险评价[J]. 植物生态学报, 1998,22(4):289-299.
- [3] 李国旗,安树青. 生态风险研究述评[J]. 生态学杂志, 1999,18(4):57-64.
- [4] 殷浩文. 水环境生态风险评价程序[J]. 上海环境科学, 1995,14(11):11-14.
- [5] 马德毅,王菊英. 中国主要河流沉积物污染及潜在生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2003,23(5):521-525.
- [6] 石璇,杨宇,徐福留,等. 天津地区地表水中多环芳烃的生态风险[J]. 环境科学学报, 2004,24(4):619-624.
- [7] 张曼胤,崔丽娟,盛连喜,等. 衡水湖湿地底泥重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 湿地科学, 2007,12:362-369.
- [8] 付川,潘杰,牟新利,等. 长江(万州段)沉积物中重金属污染生态风险评价[J]. 长江流域资源与环境, 2007(3):236-239.
- [9] 张学林,王金达. 区域农业景观生态风险评价初步构想[J]. 地球科学进展, 2000,15(6):712-716.
- [10] 付在毅,许学工,林辉平. 辽河三角洲湿地区域生态风险评价[J]. 生态学报, 2001,21(3):365-373.
- [11] Suter II G W. Ecological Risk Assessment[M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993:1-13.
- [12] Mcdaniels T. Characterizing perception of ecological risk[J]. Risk Anal., 1995,15(5):575-588.
- [13] 唐艳俊. 石头口门水库流域非点源污染研究[D]. 长春:中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2009.
- [14] 张素梅,王宗明,张柏,等. 石头口门水库流域土地利用/覆被变化对非点源污染负荷的影响[J]. 生态科学, 2009,28(1):66-72.
- [15] 辛光,张薇. 长春地区干旱规律分析[J]. 吉林水利, 2008(6):19-22.
- [16] Liou P J. Measurement methods for human exposure analysis [J]. Environmental Health Perspectives Supplements, 1995,103(3):35-43.
- [17] 李海杰. 吉林省双阳水库汇水区农业非点源污染研究[D]. 长春:吉林大学, 2007.
- [18] 郭先华,崔胜辉. 城市水源地生态风险评价环境科学研究[J]. 环境科学研究, 2009(6):688-694.
- [19] 王春梅,王金达,刘景双,等. 东北地区森林资源生态风险评价研究[J]. 应用生态学报, 2003(6):863-866.
- [20] 邹亚荣,张增祥,周全斌,等. GIS 支持下的江西省水土流失生态环境风险评价[J]. 水土保持通报, 2002,22(2):48-50.
- [21] 程建龙,陆兆华,范英宏. 露天煤矿区生态风险评价方法[J]. 生态学报, 2004(12):2945-2950.