

内蒙古乌梁素海入湖水水质超标风险率分析

李 兴¹, 勾芒芒², 王 勇¹

(1.内蒙古师范大学 内蒙古节水农业工程研究中心, 呼和浩特 010022; 2.内蒙古自治区水利科学研究院, 呼和浩特 010020)

摘 要:以内蒙古乌梁素海入流水体为研究对象,考虑湖泊水质的随机性和灰色不确定性,以灰色概率统计理论为基础,引入灰色-随机风险率方法,通过计算并分析 2006 年、2007 年和 2008 年入湖断面各水质参数存在的超标风险性,反映不同水质参数的污染强度和污染历时的变化过程。结果表明,入湖水体总氮总磷浓度超标风险率呈现逐年上升的趋势;总氮浓度超过 V 类标准值的上限风险率达 96.4%,下限风险率达 87.7%;总磷浓度超过 V 类标准值的上限风险率达 96.2%,下限风险率达 86.9%;BOD₅ 浓度超过 V 类标准值的平均风险率达 55%;COD 浓度超过 V 类标准值的平均风险率达 85%。乌梁素海入湖水体污染程度已十分严重,源头水污染防治已刻不容缓。

关键词:入湖水水质;灰色-随机方法;超标风险率;乌梁素海

中图分类号:X820.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)08-1638-07

Analysis on the Exceeding the Risk Ratio of Mouth Water Quality for Wuliangsuhai Lake in Inner Mongolia

LI Xing¹, GOU Mang-mang², WANG Yong¹

(1.Inner Mongolia Engineering Research Center for Water-saving Agriculture, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China;

2.Institute of Water Conservancy Science Inner Mongolia Municipality, Hohhot 010020, China)

Abstract: With the development of society and economy it is widely believed that water environmental pollution has seriously affected our daily life. Mouth water body of Wuliangsuhai Lake in Inner Mongolia is taken as the research object in this study. To considering randomness and gray uncertainty of lake water quality based on the theory of grey probability and statistics by introducing grey-stochastic risk method, over standard risk of each water quality into water section is been calculated and analyzed from 2006 to 2008 to reflect the change process of intensity and duration of pollution on different water quality parameters. The results showed that in this research four water quality indicators have exceeded V class standard of surface water quality assessment. Under the controlled of class III and V risk rate of the various water quality almost close to 100% and the gray is almost 0. Exceeding the risk ratio of TN and TP concentrations present the rising trend year by year. The upper limit risk rate value of exceeding class V standard on TN concentrations reach 96.4%, and lower limit risk rate value reach 87.7%. The upper limit risk rate value of exceeding class V standard on TP concentrations reach 96.2%, and lower limit risk rate value reach 86.9%. Average risk rate value of exceeding class V standard on BOD₅ concentrations reach 55%. Average risk rate value of exceeding class V standard on COD concentrations reach 85%. Inflow water body in Wuliangsuhai Lake is suffering from severe eutrophication, organic matter, salinization, and other complex pollution. So it is high time that we took some measures to control source of water pollution which is an essential problem.

Keywords: mouth water quality; grey-stochastic method; exceeding the risk ratio; Wuliangsuhai Lake

乌梁素海位于内蒙古自治区西部乌拉特前旗境内,是由黄河改道而形成的河迹湖,也是黄河流域最大的湖泊。乌梁素海不仅具有水生动植物、渔业、鸟类

和旅游业等重要资源,同时,也是调节黄河内蒙古段枯水期、洪水期的补给库和蓄洪库,对于维系黄河水系生态平衡,保护物种的多样性起着举足轻重的作用。乌梁素海是河套灌排系统的重要组成部分,接纳了河套地区 95%左右的农田排水,还承纳各级排水渠道的生活污水和工业废水。目前,乌梁素海处于黄苔暴发频繁,生态恶化严重,生物多样性退化的危险阶段^[1-3],这不仅影响湖泊流域生态功能的发挥,并直接

收稿日期:2010-12-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51069009);教育部科学技术研究重点项目(210044);内蒙古师范大学博士科研基金

作者简介:李 兴(1981—),男,内蒙古兴安盟人,博士,讲师,主要从事水污染控制与资源化研究。E-mail:lixingmm@yahoo.com.cn

威胁着黄河中下游的供水安全^[4]。因此,监测、评价、控制入湖污染负荷对治理和修复乌梁素海具有深远的战略意义。

1 材料和方法

1.1 样品的采集

水体样品于2006年、2007年、2008年连续3年的5月至10月采自乌梁素海入湖口断面处,因实验室设在入湖口处,可立即运回实验室化验分析。

1.2 测试方法

水样检测指标包括总氮、总磷、COD和BOD₅,其中总氮、总磷、COD使用不同的化学药品和德国WTW公司生产的PhotoLab S12光电比色计联合测定。BOD₅使用HANNA Instruments的HI99724微电脑生化耗氧量测定仪测定。

1.3 研究方法

使用灰色系统法在评价水质时,往往未作风险性评价,而概率统计方法虽考虑了不确定性的影响,但忽略了随机不确定性中隐含的灰色不确定性。灰色-随机风险率方法能够弥补以上不足,目前,该方法主要应用于市场产品的销售、水库坝坡风险分析、河流水质风险、优化混合系统库存以及方法本身改进方面的研究^[5-7],应用于湖泊水质风险评价尚未报道。因为水质评价受随机性因素和灰色不确定性因素的影响,所以考虑水污染状况时应从污染强度和污染历时2个方面分析,对于某种水体污染物质浓度的一系列监测数值,由于它随时间而变化,可把污染物的监测值看成一个随机变量,任一次的监测数值看成是随机变量的一个随机样本,以此来求出各种污染物质浓度出现的概率。由于人类自身对湖泊水环境系统认识的局限性,可把某种水质污染物浓度看成具有随机性和灰色性双重不确定性的随机变量,某种污染物质浓度超过某类水质类别标准值的风险率可以用灰色-随机风险率来进行量化^[8-13]。该方法对复杂的水环境系统具有更为准确、更为全面的评价结果。

许多学者和专家认为概率的值不是一个确定的数值,而是具有几个不同的数值或是一个区间,在此区间上是等概的。这一概率区间类似于灰色系统的区间灰数,因而称其为事件的灰色概率。

1.3.1 集值测度

设 (Ω, Ψ) 为可测空间,称映射 $\Pi: \Psi \rightarrow P(R_m)$ 为集值测度,若对 A 中任意不交集列 $A_n (n \geq 1)$,有

$$\Pi \left(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n \right) = \sum_{n=1}^{\infty} \Pi(A_n) \quad (1)$$

其中 $P(R_m)$ 表示 R_m 中全体非空子集。则 (Ω, Ψ, Π) 称为集值测度空间。

1.3.2 灰色概率

设 (Ω, Ψ) 为可测空间,称映射 $P_G: \Psi \rightarrow P[0, 1]$ 为灰色概率,若 P_G 是 (Ω, Ψ) 上的闭区间集值测度;且 $1 \in P_G(\Omega)$ 。则 (Ω, Ψ, P_G) 称为灰色概率空间。

1.3.3 灰色概率的灰度

(Ω, Ψ, P_G) 中,对任意事件 $A, P_G(A)=[a^*, a^*], 0 \leq a^* \leq a^* \leq 1$,则称

$$G_D(P_G(A)) = a^* - a^* \quad (2)$$

为灰色概率 $P_G(A)$ 的灰度。

当灰度值为1时,表明所获取的信息极为贫乏,对事件 A 的概率毫无把握;随着获取信息的增加,灰度逐渐减少,当灰度值为0时,对事件 A 发生的概率唯一确知,灰色概率退化为经典概率。

1.3.4 灰色概率分布

定义在样本空间 Ω 上,取值于实数域的函数 ξ ,称为是样本空间 Ω 上的随机变量,并称

$$F_G(x) = P_G(\xi \leq x) \quad (-\infty < x < +\infty) \quad (3)$$

是随机变量 ξ 的灰色概率分布函数,简称灰色概率分布。 P_G 为实数域上随机变量 ξ 的灰色概率估计。

1.3.5 灰色概率密度

若 ξ 是随机变量, $F_G(x)$ 是它的灰色概率分布,如果存在函数 $f_G(x)$,使对于任意的 x ,有

$$F_G(x) = \int_{-\infty}^x f_G(y) dy \quad (4)$$

则称 $f_G(x)$ 为 $F_G(x)$ 的灰色概率密度函数,简称灰色概率密度。

为更直观地表现灰色概率分布的“灰色”特性,式(4)可表示如下式所示

$$\begin{aligned} F_G(x) &= \int_{-\infty}^x f_G(y) dy = [F_{G^*}(x), F_{G^*}(x)] \\ &= \left[\int_{-\infty}^x f_{G^*}(y) dy, \int_{-\infty}^x f_{G^*}(y) dy \right] \end{aligned} \quad (5)$$

1.3.6 灰色期望

(Ω, Ψ, P_G) 中,若 ξ 是随机变量,其灰色概率分布函数为 $F_G(x)$,则当

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x| dF_G(x) < \infty$$

称 ξ 的灰色数学期望(简称灰色期望)存在,且

$$E_G(\xi) = [E_{G^*}(\xi), E_{G^*}(\xi)] = \int_{-\infty}^{\infty} x df_G(x)$$

$$= \left[\int_{-\infty}^{\infty} x dF_c^*(x), \int_{-\infty}^{\infty} x dF_{c^*}(x) \right] \quad (6)$$

1.3.7 灰色方差

(Ω, Ψ, P_c) 中,若 ξ 是一个随机变量,其灰色概率分布函数为 $F_c(x)$,称 ξ 的灰色方差存在,且

$$\begin{aligned} D_c(\xi) &= [D_{c^*}, D_c^*(\xi)] = E_c(\xi - E_c(\xi))^2 \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} (\xi - E_c(\xi))^2 dF_c(x) \\ &= \left[\int_{-\infty}^{\infty} (\xi - E_c^*(\xi))^2 dF_{c^*}(x), \int_{-\infty}^{\infty} (\xi - E_{c^*}(\xi))^2 dF_c^*(x) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

2 结果与讨论

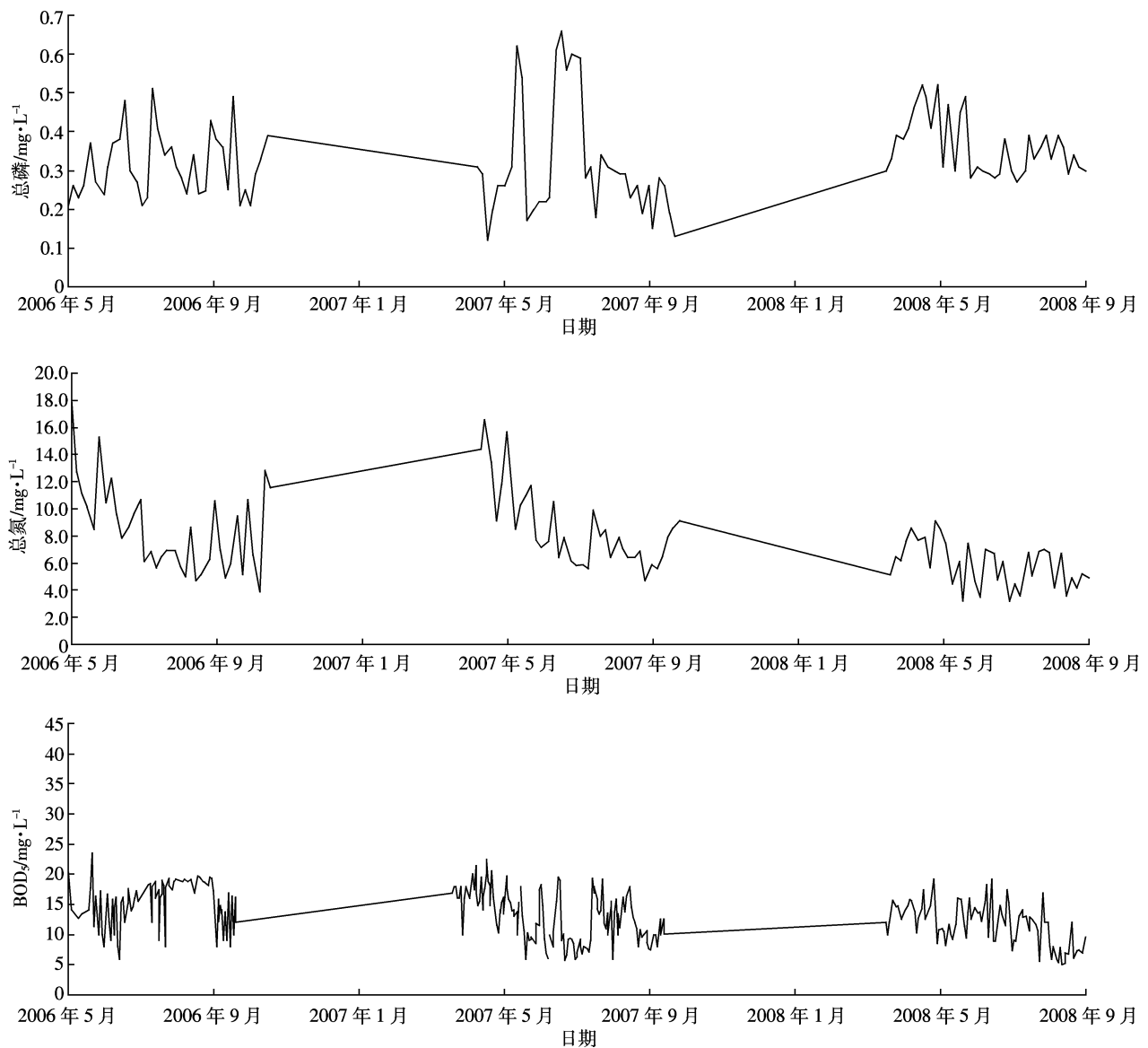
2.1 入湖断面各水质动态变化图

为了解入湖断面总磷、总氮、生化需氧量、化学需

氧量的变化频率、幅度以及随机性,绘制了各项水质指标连续监测的水质动态变化图(图1)。可以看出,各水质指标在2007年随机波动性较大,变异系数较高;2006年和2008年总磷随机变化情况相当,监测结果波动较小;2008年总氮随机波动性较小;生化需氧量在3年内波动均较大;化学需氧量在2006年波动最小,变异系数为0.12。该变化结果与上游汇水水质的随机波动性不无关系。

2.2 入湖断面各水质分布参数状况

从源头治理水污染是维护和恢复湖库水生态的根本。乌梁素海源头(总排干渠道)含有大量农田排水、生活污水和工业废水,总排干渠道水质的好坏直接影响到整个乌梁素海内的水质状况。因此,计算评价入湖水质超标风险对控制上游排水水质,治理和修



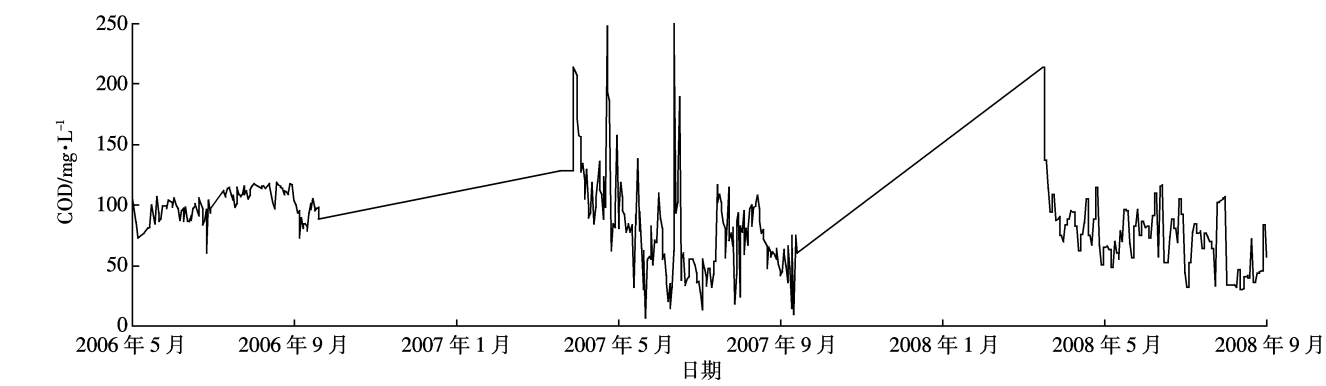


图 1 2006 年—2008 年入湖断面各水质动态图
Figure 1 Variety of water quality in the flow into section from 2006 to 2008

复乌梁素海具有重要的参考依据。

为揭示乌梁素海入湖水体富营养化污染和有机污染物质浓度超标风险率情况,本文以 2006 年、2007 年和 2008 年入湖断面水质实测数据为基础,参照地表水环境质量标准(GB 3838—2002),对总氮、总磷、BOD₅、COD 4 项指标进行了灰色-超标风险率计算和分析。2006 年、2007 年和 2008 年灰色-概率分布的方差以及上、下数学期望情况分别见表 1、表 2 和表 3, (μ 为数学期望, μ^* 为上数学期望, μ_* 为下数学期望, σ 为标准差)。从各水质均值的年际变化过程可以看出,总磷浓度均值有逐年增加的趋势,2008 年总磷浓度已达到 V 类标准的 2 倍, 主要与人们生活水平提高、生活污水排量增加和大量使用含磷洗涤剂有关。另外,乌梁素海上游许多工厂水质未达标排放对结果不无影响。虽然总氮浓度年际均值呈现出下降趋势,在某种程度上说明排入乌梁素海的水体中含氮物质有所减少,但因 2006 年和 2007 年均方差较大,总氮浓度离散程度较高,可能存在一定的偶然因素,但总体看来均已超过 V 类标准的 2 倍。有机污染指标 BOD₅ 的各项水质参数年际变化均不大,均值在 12 mg·L⁻¹ 左右波动,已超出地表水环境质量评价 V 类标准, COD 均值在近两年有较小波动,均达到地表水环境质量评价 V 类标准的 2 倍,表明水体中含有大量的有机物等还原性物质。上述分析结果表明,乌梁素海入湖水体富营养化污染和有机污染都已十分严重。

2.3 入湖断面各水质参数单项评价超标风险率和综合评价超标风险率结果

为反映乌梁素海入湖水体灰色-随机风险程度,根据单项污染参数评价模型和水质综合评价模型原理,计算了 2006 年、2007 年和 2008 年各水质参数单项评价超标风险率和综合评价超标风险率,结果如表

表 1 2006 年入湖断面各水质分布参数计算结果(mg·L⁻¹)
Table 1 Results of water quality parameters distribution of the flow into section in 2006(mg·L⁻¹)

水质分布参数	总磷	总氮	BOD ₅	COD
μ	0.24	10.43	11.85	100.78
μ^*	0.28	13.92	15.81	102.07
μ_*	0.19	6.94	7.90	99.48
σ	0.09	6.82	7.73	12.51

表 2 2007 年入湖断面各水质分布参数计算结果(mg·L⁻¹)
Table 2 Results of water quality parameters distribution of the flow into section in 2007(mg·L⁻¹)

水质分布参数	总磷	总氮	BOD ₅	COD
μ	0.37	5.78	14.18	79.88
μ^*	0.46	6.84	16.78	83.92
μ_*	0.29	4.71	11.58	75.85
σ	0.24	2.93	8.55	42.71

表 3 2008 年入湖断面各水质分布参数计算结果(mg·L⁻¹)
Table 3 Results of water quality parameters distribution of the flow into section in 2008(mg·L⁻¹)

水质分布参数	总磷	总氮	BOD ₅	COD
μ	0.40	4.46	11.20	75.19
μ^*	0.45	5.00	13.38	79.04
μ_*	0.36	3.92	9.02	71.35
σ	0.14	1.66	5.49	27.43

4、表 5 和表 6 所示。可以看出,3 年来综合评价模型各水质在Ⅲ类和 V 类综合控制条件下,风险率几乎都为 100%,且灰色概率的灰度几乎为 0,表明各水质指标综合评价结果属于劣 V 类水质, 且为唯一确知;3 年来总磷的 V 类达标率分别为 17.6%~53.6%、13.6%~35.6%、3.8%~13.1%, 总氮的 V 类达标率分别为 4.01%~23.58%、4.95%~17.88%、3.59%~12.3%, 表明入湖水体总磷的 V 类达标率逐年降低,总氮的 V 类达

标率波动不大,入湖水体氮磷污染处于不断加剧状态。从 BOD₅ 和 COD 的灰色-随机风险率计算结果可知 BOD₅ 和 COD 的 V 类平均风险率分别超过了 60% 和 80%,有机污染风险率极高,表明入湖水体中含有大量的有机污染物质。

表 4 2006 年入湖口断面水质参数超标
灰色-随机风险率计算结果(%)

Table 4 Results of water quality parameters exceeding the standard value with Grey-Stochastic risk method in 2006(%)

水质标准	区间	总磷	总氮	BOD ₅	COD	综合模型
Ⅲ类	下限	95.05	80.78	69.15	100.00	100.00
	上限	99.62	97.06	93.70	100.00	100.00
V类	下限	46.41	76.42	39.36	100.00	100.00
	上限	82.38	95.99	77.34	100.00	100.00

表 5 2007 年入湖口断面水质参数超标
灰色-随机风险率计算结果(%)

Table 5 Results of water quality parameters exceeding the standard value with Grey-Stochastic risk method in 2007(%)

水质标准	区间	总磷	总氮	BOD ₅	COD	综合模型
Ⅲ类	下限	84.38	89.80	81.33	90.49	99.97
	上限	95.82	97.67	93.19	93.32	100.00
V类	下限	64.43	82.12	57.14	79.95	99.45
	上限	86.43	95.05	78.52	84.85	99.98

表 6 2008 年入湖口断面水质参数超标
灰色-随机风险率计算结果(%)

Table 6 Results of water quality parameters exceeding the standard value with Grey-Stochastic risk method in 2008(%)

水质标准	区间	总磷	总氮	BOD ₅	COD	综合模型
Ⅲ类	下限	98.57	96.08	81.86	96.93	100.00
	上限	99.77	99.20	95.64	98.42	100.00
V类	下限	86.86	87.70	42.86	87.29	99.88
	上限	96.16	96.41	72.91	92.22	100.00

2.4 入湖断面各水质超过不同浓度标准值的灰色-随机风险率结果

为计算出水质参数超过不同浓度标准值的灰色-随机风险率,通过自定义一系列水质参考值后,可计算出各水质参数超过不同浓度值的灰色-随机风险率,以此绘制水质参数超过不同浓度值的风险率曲线图。乌梁素海入湖水体断面总磷、总氮、BOD₅ 和 COD 水质参数不同污染强度对应的灰色-随机超标风险率曲线分别如图 2、图 3 和图 4 所示。可以看出,2006 年、2007 年和 2008 年总磷浓度为 0.2 mg·L⁻¹ (V 类标准值) 的达标率分别为 17.6%~53.6%、13.6%~35.6%、

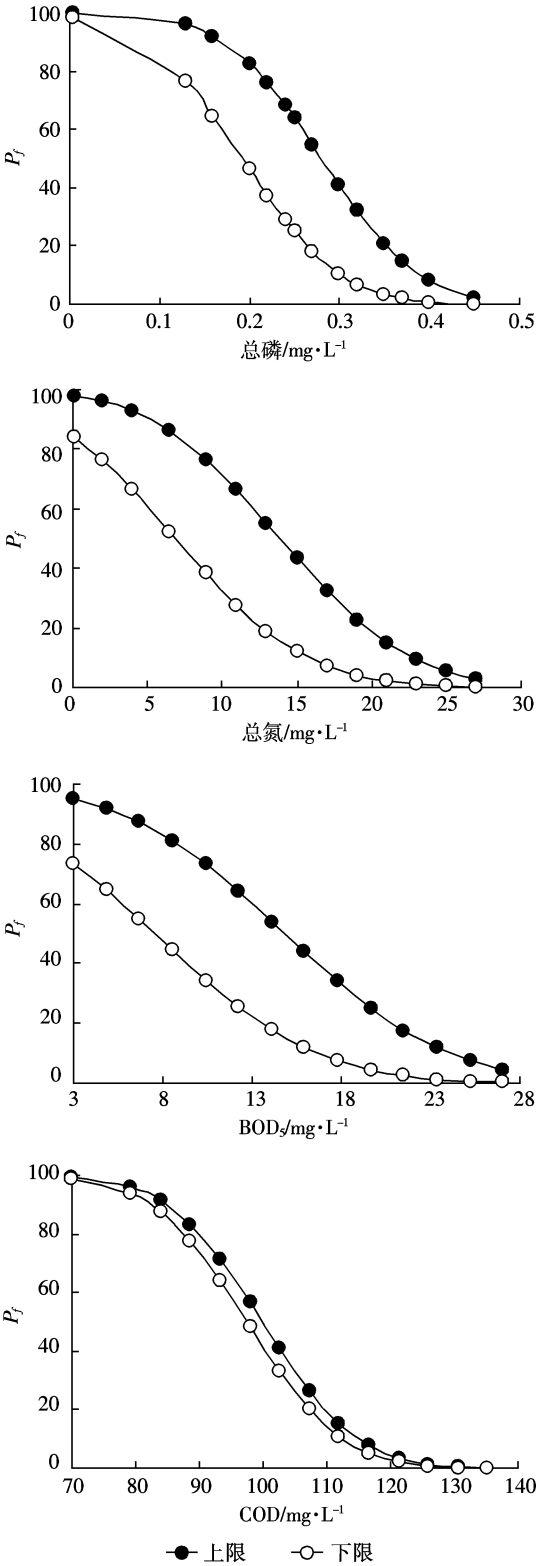


图 2 2006 年入湖断面水质参数超过不同浓度值的风险率图
Figure 2 Risk of water quality parameters exceeding the different concentration value in the flow into section in 2006

3.8%~13.1%,浓度为 0.4 mg·L⁻¹ (V 类标准值的 2 倍) 的达标率分别为 91.8%~99.2%、40.1%~68.1%、36.3%~

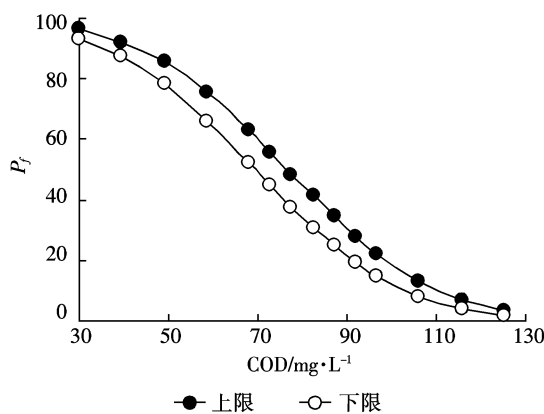
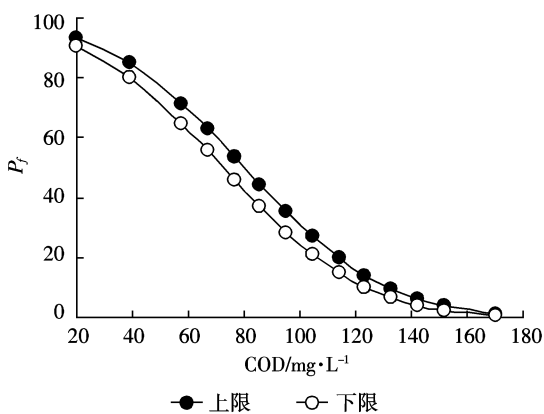
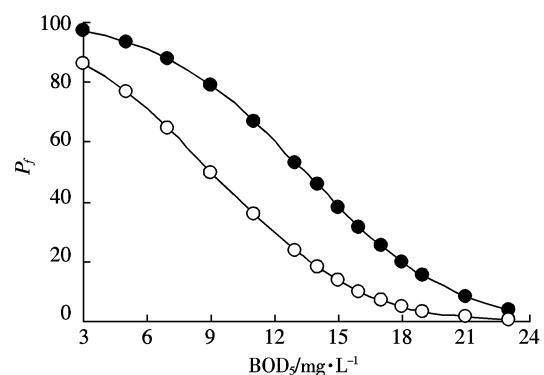
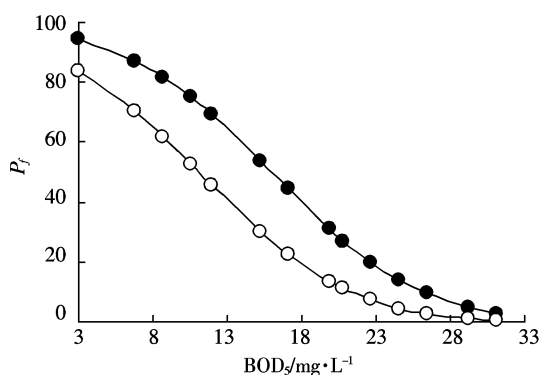
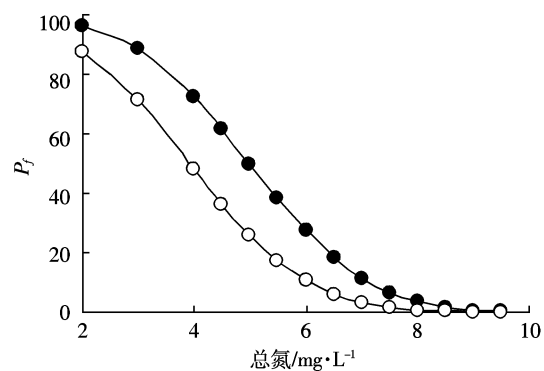
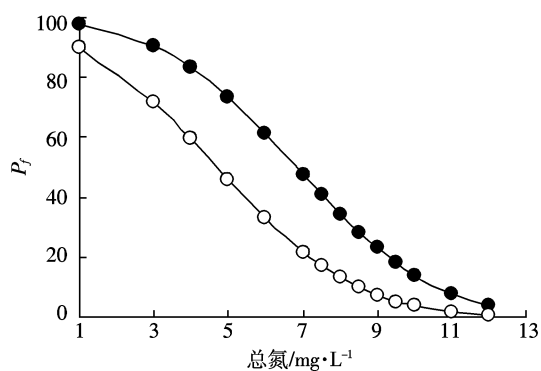
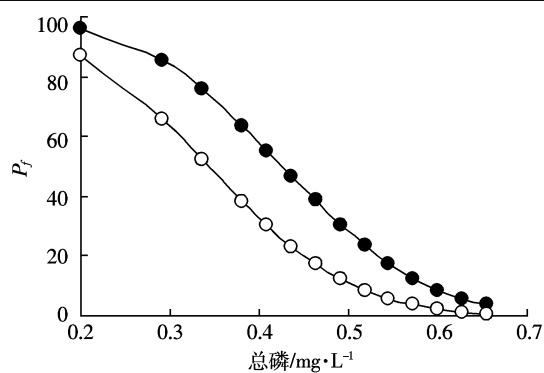
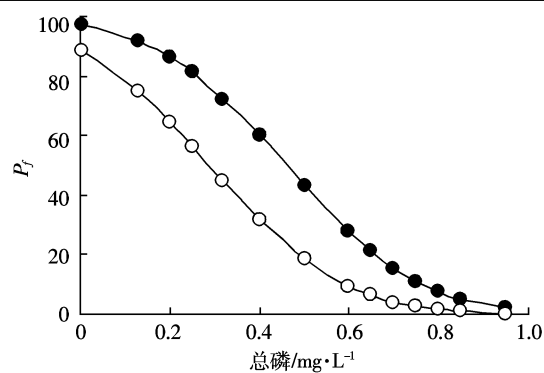


图3 2007年入湖断面水质参数超过不同浓度值的风险率图
Figure 3 Risk of water quality parameters exceeding the different concentration value in the flow into section in 2007

图4 2008年入湖断面水质参数超过不同浓度值的风险率图
Figure 4 Risk of water quality parameters exceeding the different concentration value in the flow into section in 2008

61.8%;总氮浓度为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (V类标准值)的达标率分别为 4.1%~23.6%、5.1%~19.3%、3.6%~12.3%,浓度

为 $6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (V类标准值的3倍)的达标率分别为 13.2%~47.4%、38.6%~67.0%、72.6%~89.4%。上述结

果表明:总磷浓度为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的达标率逐年降低,总氮浓度为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的达标率也呈现出降低趋势,总氮浓度为 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的达标率出现增加趋势,总体看来入湖水体中氮磷浓度有增加趋势; BOD_5 和 COD 的 2 倍 V 类标准值的逐年平均达标率分别为 82.2%、77.1%、92.8% 和 5.0%、50.0%、57.0%。由此可见,乌梁素海入湖水体富营养化和有机污染均达到相当严重的程度,为维护乌梁素海流域生态系统平衡和人们正常生产生活,控制乌梁素海入湖断面水质浓度已迫在眉睫。

3 结论

(1)从乌梁素海入湖口断面总氮、总磷、 BOD_5 、COD 4 项水质指标的分布参数结果可知,这 4 项水质指标均已大比例超出地表水环境质量评价 V 类标准。表明乌梁素海入湖水体富营养化污染和有机污染十分严重。

(2)从入湖断面各水质参数单项评价超标风险率和综合评价超标风险率结果可知,2006 年、2007 年和 2008 年 3 年来综合评价各水质在 III 类和 V 类综合控制条件下,风险率均接近 100%,且灰色概率的灰度几乎为 0,各水质指标综合评价结果属于劣 V 类水质,且为唯一确知。

(3)通过水质参数超过不同标准浓度的风险率曲线。表明乌梁素海入湖水水质超标风险率极高且处于逐年增加的趋势,这与内蒙古乌梁素海湖区内正遭受着严重的富营养化、有机物质、盐化等多种复合污染存在着必然的因果关系。因此,控制入湖污染物浓度对发挥乌梁素海流域生态系统功能及治理修复乌梁素海具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 冯素珍,李畅游. 内蒙古乌梁素海污染源调查研究[J]. 中国农村水利水电, 2010(4): 125-128.
FENG Su-zhen, LI Chang-you. Research on pollution sources for Wuliangsu Lake in Inner Mongolia[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2010(4): 125-128.
- [2] 李畅游,任春涛,武国正,等. 基于 MATLAB 实现的乌梁素海水质等级的模糊模式识别评价[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6): 2299-2304.
LI Chang-you, REN Chun-tao, WU Guo-zheng, et al. Fuzzy pattern recognition of water quality grade in Lake Wuliangsu realized by MATLAB[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(6): 2299-2304.
- [3] 郑伟,韩秀珍,刘诚,等. 内蒙古乌梁素海黄苔暴发卫星遥感动态监测[J]. 湖泊科学, 2010, 22(3): 321-326.
ZHENG Wei, HAN Xiu-zhen, LIU Cheng, et al. Satellite remote sensing data monitoring "Huang Tai" algae bloom in Lake Wuliangsu, Inner Mongolia[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(3): 321-326.
- [4] 李玉洪,穆伊舟,王万战. 乌梁素海退水对黄河水质影响分析[J]. 人民黄河, 2008, 30(12): 57-58.
LI Yu-hong, MU Yi-zhou, WANG Wan-zhan. The influence analysis of Wuliangsu Drainage for Yellow River water quality[J]. *Yellow River*, 2008, 30(12): 57-58.
- [5] 刘东波,陈玉娟,黄道,等. 随机灰色提前期条件下制造/再制造混合系统库存优化[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2007, 33(4): 529-535.
LIU Dong-bo, CHEN Yu-juan, HUANG Dao, et al. Inventory optimization of the manufacturing/remanufacturing hybrid system with random grey leadtimes[J]. *Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 33(4): 529-535.
- [6] 王坚强,任世昶. 基于期望值的灰色随机多准则决策方法[J]. 控制与决策, 2009, 24(1): 39-43.
WANG Jian-qiang, REN Shi-chan. Grey random multi-criteria decision-making approach based on expected value[J]. *Control and Decision*, 2009, 24(1): 39-43.
- [7] 胡国华,夏军,赵沛伦. 河流水质风险评价的灰色随机风险率方法[J]. 地理科学, 2002, 22(2): 249-252.
HU Guo-hua, XIA Jun, ZHAO Pei-lun. Grey-stochastic risk assessment method for river water quality[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(2): 249-252.
- [8] 李兴. 内蒙古乌梁素海水水质动态数值模拟研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
LI Xing. Study on dynamic numerical simulation of water quality for Wuliangsu Lake in Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009.
- [9] 贺锡泉. 非突发性环境风险研究[J]. 中国环境科学, 1990, 10(3): 218-223.
HE Xi-quan. Research of non-sudden environmental risk[J]. *China Environmental Science*, 1990, 10(3): 218-223.
- [10] Warrant Piver, Lee A Duval, Jill A Schreifer. Evaluating health risks from ground-water contaminants[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1998, 124(5): 475-468.
- [11] 陈小红,涂新军. 一个水质风险率计算的随机模型[J]. 环境科学学报, 2000, 20(3): 290-293.
CHEN Xiao-hong, TU Xin-jun. A stochastic model for the risk rate of concentrations exceeding the threshold[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(3): 290-293.
- [12] 李兴,李畅游,代文婕,等. 基于灰色-随机风险率方法的湖泊水质分析[J]. 环境工程, 2009, 27(4): 117-119.
LI Xing, LI Chang-you, DAI Wen-jie, et al. Analysis of lake water quality based on Grey-Stochastic risk method[J]. *Environmental Engineering*, 2009, 27(4): 117-119.
- [13] 胡国华,夏军. 风险分析的灰色随机风险率方法研究[J]. 水利学报, 2001, (4): 1-6.
HU Guo-hua, XIA Jun. Grey-Stochastic risk method research of risk analysis[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001(4): 1-6.