第24卷第6期 2008年11月
水 资 源 保 护
WATER RESOURCES PROTECTION
Vol.24 No.6 Nov. 2008

稀土废水对黄河包头段水体营养状况的影响

于玲红[1,2],崔振华[3],甄树聪[2],李玉梅[2],邹健慧[2]

(1.北京科技大学土木与环境工程学院,北京 100083;2.内蒙古科技大学能源与环境工程学院,内蒙古 包头 014010;3.中冶东方工程技术有限公司,内蒙古 包头 014010)

摘要 通过对黄河水体流量、pH值、TN、TP、COD_{Mn}、浮游藻类等指标的监测,分析稀土废水排放对黄河水质的影响,并采用富营养化指数和生物多样性指数对黄河水质进行评价,结果表明黄河包头段水体在2004年12月至次年3月间富营养化状态严重。

关键词 稀土冶炼;氯铵;氨氮;富营养化;黄河包头段

中图分类号:X522 **文献标识码**:A **文章编号**:1004-6933(2008)06-0049-04

Influence of rare earth wastewater on eutrophication of the Baotou reach of the Yellow River

YU Ling-hong[1,2], CUI Zhen-hua[3], ZHEN Shu-cong[2], LI Yu-mei[2], ZOU Jian-hui[2]

(1. *Civil and Environmental Engineering School*, *University of Science and Technology Beijing*, *Beijing* 100083, *China*; 2. *School of Energy and Environmental Engineering*, *Inner Mongolia University of Science and Technology*, *Baotou* 014010, *China*; 3. *BERIS Engineering and Research Corporation*, *Baotou* 014010, *China*)

Abstract: The rare earth industry produces large amounts of chloramine wastewater containing ammonia nitrogen. Ammonia nitrogen wastewater seriously pollutes the Yellow River. According to the measurement of water discharge, pH, TN, TP, COD_{Mn}, planktonic algae and other indices, the influence of rare earth sewage on the water quality of the Yellow River is analyzed, and the water quality is evaluated by eutrophication and biodiversity indices. The results show that the water is in a severe eutrophic state from December to the next May in the Baotou reach of the Yellow River.

Key words: rare earth industry; chloramine; ammonia nitrogen; the Yellow River; eutrophication

包头是世界著名的稀土之乡,包头白云鄂博铁矿蕴含着丰富的稀土资源。全市共有稀土冶炼企业近百家,凭借资源优势和稀土应用技术的不断发展,稀土工业在当地的经济发展中占有极其重要的地位,但是稀土冶炼(包括稀土精矿分解、稀土元素的分离、稀土产品的制造和提纯)需使用大量的化学品,在生产中产生大量的废气、废水和废渣。包头市每年排放的稀土废水约250万m^3,占包头市工业废水排放总量的4%,氯铵废水是稀土冶炼中产生的三大废水之一[1],废水中氯化铵质量浓度为1100 mg/L,主要污染物是氨氮,氨氮年排放量为8089 t[2],未经处理的氨氮废水排入黄河后给黄河带来严重危害。

1 黄河包头段水源基本状况

1.1 流量

近年来,黄河过境流量逐年减少(图1,水量数

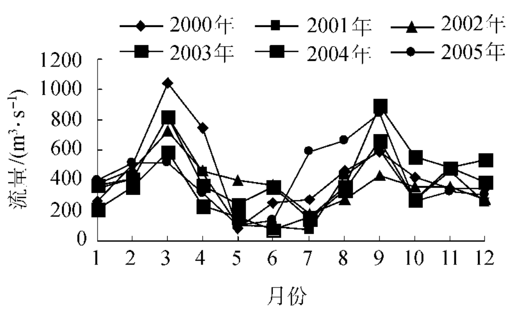

图1 黄河2000~2005年各月平均流量

基金项目:内蒙古自治区高等学校科研项目(NGjY07100)

作者简介:于玲红(1967—),女,河北黄骅人,副教授,硕士,主要从事微污染水处理技术研究。E-mail:ylh0730@163.com

据由内蒙古头道拐水文站提供),低流量持续时间增长,无论是枯水期、丰水期还是平水期水量严重不足。冬季河面结冰,年均封冻天数 100 d,封冰厚度平均为 0.72 m。黄河流量的减少使黄河水质呈恶化趋势。

1.2 稀土废水排入对黄河水质的影响

包头稀土冶炼废水主要通过昆都仑河和四道沙河排入黄河[3](图 2),且随着稀土生产规模的不断扩大,排入黄河的稀土废水量呈逐年递增的态势。通过四道沙河排入黄河的废水量约 1 800 万 m^3/a,是黄河包头段的第二大排污沟,从污染物排放量看,它却是第一大入黄污染源,等标污染负荷占 47.7%[4]。

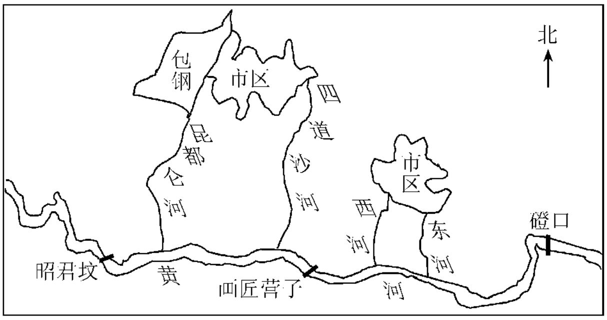

图 2 河流及监测断面位置示意图

包头市环境监测站 2004 年 10 月 ~ 2005 年 12 月间环境监测结果显示(表 1),黄河干流包头段 3 个断面(昭君坟、画匠营子、磴口)的污染程度顺水流方向呈先上升后下降的趋势,这与稀土废水排入黄河的位置和稀土废水随着水体流动得到稀释直接有关,表现为画匠营子断面处氨氮浓度明显上升。主要污染物指标是氨氮、高锰酸盐指数,氨氮最高质量浓度发生在 3 月 1 日,浓度为 3.42 mg/L,2004 年 12 月至 2005 年 4 月,5 个月的平均值为 1.96 mg/L,超标 0.96 倍。黄河在 2004 年 12 月 ~ 次年 4 月间总体水质属Ⅳ类、Ⅴ类甚至劣Ⅴ类。

表 1 黄河包头段各监测断面水质类别

时间	昭君坟	画匠营子	磴口	超标物
2004-10	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	氨氮
2004-11	Ⅳ	Ⅳ	Ⅴ	氨氮
2004-12	Ⅳ	Ⅳ	Ⅴ	氨氮
2005-01	Ⅳ	Ⅴ	劣Ⅴ	氨氮
2005-02	劣Ⅴ	劣Ⅴ	劣Ⅴ	氨氮
2005-03	劣Ⅴ	劣Ⅴ	劣Ⅴ	氨氮
2005-04	Ⅳ	Ⅳ	Ⅴ	氨氮
2005-05	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	—
2005-06	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	—
2005-07	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	—
2005-08	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	—
2005-09	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	—
2005-10	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	—
2005-11	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	—
2005-12	Ⅲ	Ⅴ	Ⅳ	氨氮

黄河包头段水质恶化阶段主要集中在当年 11 月至次年 4 月的 6 个月间,特别是在 12 月至次年 3 月的河面封冻至解冻期。由图 1 可知,该时段并不是黄河包头段流量的较低期,相反每年的 3 月冰凌溶化时,是黄河流量的高峰期。由此可推论出,水体流量减少导致污染物浓度增高[5-6],不是黄河包头段水质恶化的根本原因,而是与气温下降水面封冻后,水体内部生态与化学环境的特殊性、水体流速较小、藻类对温度的适应能力增强有关[7]。

2 黄河水体的营养状况调查与评价

选择与水体富营养化密切相关的 pH 值、TN、TP、COD_{Mn}、浮游藻类作指标,监测点选取在黄河包头段受稀土废水影响最为严重的画匠营子断面。多年监测结果显示,藻类繁殖高峰期(平均藻密度在 10^6 个/L 以上)为每年的 12 月至次年 5 月间。在 2004 年 12 月、2005 年 1 ~ 5 月作现场调查,同步取样,分别进行定性、定量测定。

2.1 结果与讨论

2.1.1 黄河水体的理化特征

监测结果表明(图 3,4),黄河包头段 pH 值相对稳定(7.59 ~ 8.15);COD_{Mn}在一月后呈上升的趋势,表明水体有机物含量增高。TP 呈现先上升后下降的趋势,2004 年 12 月 ~ 2005 年 3 月 TP 浓度较高,最高发生在 1 月($\rho(TP) = 0.06$ mg/L),整个监测期间 $\rho(TP)$均大于 0.02 mg/L;TN 浓度在 2004 年 12 月 ~ 2005 年 2 月间呈上升趋势,2 月份最高($\rho(TN) = 4.70$ mg/L),4 月后有所下降,这与表 2 中在该时段水体污染程度是相对应的。浮游藻类在 2004 年 12 月至 2005 年 3 月间呈繁殖高峰期,藻类数量平均在 8.95×10^6 个/L,比四、五月份要高出 72%,最高的 3 月份为 9.26×10^6 个/L,是 5 月份的 1.9 倍,6 个月中藻类数量均大于 10^6 个/L。

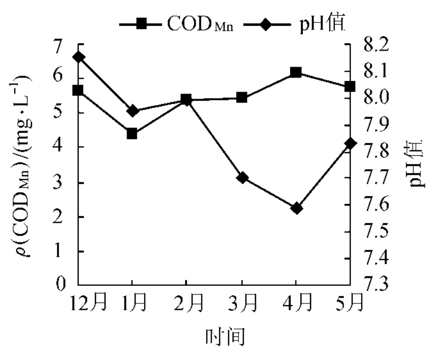

图 3 黄河水体 pH 值、COD_{Mn}变化(2004 ~ 2005 年)

藻类繁殖的高峰期与 TN、TP 的高浓度区是对应的,所以氮、磷浓度与藻类的繁殖密切相关,氮磷

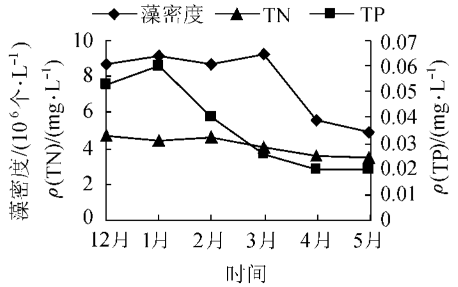

图 4 黄河水体藻类密度、TN、TP 的变化

比在73 以上，藻生长主要受磷浓度的限制。在这一时期，水体温度为 0～4℃，随着气温回升，藻类数量呈减少趋势（图 5），所以该环境生长的藻类不符合藻类数量随温度升高而增加的规律[8]。TN、TP 浓度的增高促进了藻类的繁殖，而温度不是藻类生长的关键因素。当水体中氮、磷被藻类吸收后，水中的氮、磷浓度下降。随着气温回升，河面解冻，水体流速增大，对藻类的生存环境造成影响，也起到了一定稀释作用，从而使藻类数量下降。这些说明，虽然藻类生长是多种因素协同作用的结果，但起决定作用的是水体中的营养盐浓度和水体的动力条件。

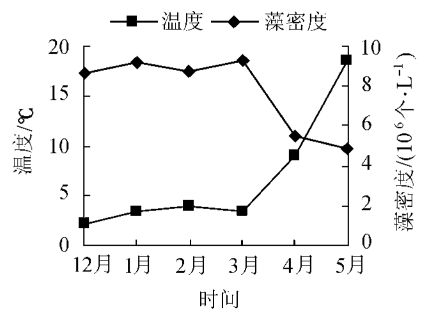

图 5 黄河水体藻类密度和温度的变化（2004～2005 年）

2.1.2 黄河水体浮游藻类群落组成

从黄河水体定性、定量水样中共鉴定出浮游藻类 5 门 15 种。其中绿藻门 6 种，占 66%，隐藻门 3 种，占 15%，硅藻门 2 种，占 15%（图 6）。裸藻门、甲藻门少量。绿藻门中的小球藻和鼓藻为优势藻种，3 月 10 日隐藻数量突增，与前后气温变化有一定关系。

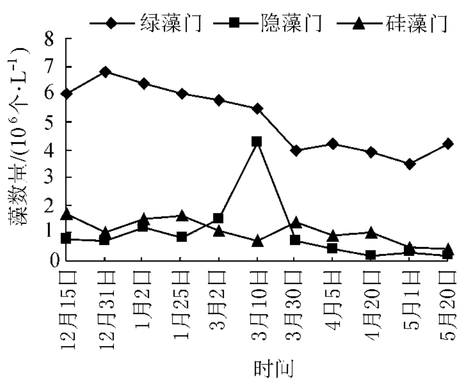

图 6 黄河水体主要藻类种属的变化

2.2 黄河水体的营养程度

2.2.1 评价方法

a. 富营养化指数 I_{TS}

国内外有关研究表明，氮、磷是造成水体富营养化的主要因素。根据美国明尼苏达大学陆地研究所提出的富营养化指数 I_{TS} 来判别水体的营养状况[9-10]。

$$I_{TS}(TP) = 10[6 - \ln(48/\rho(TP))/\ln 2]$$

$I_{TS} \leqslant 37$ 为贫营养，$I_{TS} = 38 \sim 53$ 为中营养，$I_{TS} \geqslant 54$ 为富营养。

b. 生物多样性指数

采用 Margalef 和 Shannon、Weaver 计算公式[10]：

$$\alpha = (S - 1)/\ln N$$

$$H' = C(N\log - \sum n_i \log n_i)/N \qquad C = 3.322$$

将所测藻类的属数 S、各属个体数 n_i 及个体总数 N 代入公式中，分别计算出多样性指数 α 和 H' 的值。

上述方程具有反映种类和个数两个变量的特点，种类越多，值越大，水质越好；反之，水体污染严重，水质恶化。指数在 0～1 为重污染，1～2 为中度污染，2～3 为轻度污染，大于 3 为清洁。

2.2.2 评价结果

2004 年 12 月～2005 年 5 月间黄河包头段画匠营子监测断面水体富营养化指数 I_{TS}和生物多样性指数的计算结果见表 2。

表 2 画匠营子断面 I_{TS}、α 和 H' 值

时间	ρ(TP)/(mg·L^{-1})	I_{TS}值	营养程度	α	H'	污染程度
2004-12	0.053	61	富营养	0.95	0.88	重污染
2005-01	0.06	63	富营养	0.92	1.43	重-中污染
2005-02	0.04	57	富营养	0.92	1.27	重-中污染
2005-03	0.026	51	中营养	0.87	1.46	重-中污染
2005-04	0.02	47	中营养	1.20	1.56	中污染
2005-05	0.02	47	中营养	1.32	1.65	中污染
平均	0.22	54	富营养	1.03	1.38	中污染

2.2.3 结果讨论

由表 2 可知，黄河画匠营子断面监测的 6 个月中，有 4 个 α 值在 1 以下（2004 年 12 月，次年 1～3 月），表明这 4 个月该断面水体达到了重污染程度，其他 3 个月 α 值介于 1～2，最大的为 1.32，显示这两个月水体受到中度污染而接近于重污染。从公式的合理性讲，H' 值优于 α 值。

经多种方法评价后，黄河水体在 2004 年 12 月至次年的 3 月间属重污染富营养化水体，之后富营养程度虽然有所下降，但仍属于中富营养状态。

3 结 论

a. 包头稀土冶炼氯铵废水的排放严重污染了

黄河水质，使黄河包头段水体有半年时间处于Ⅴ类或劣Ⅴ类状态。

b. 综合各项指标，可以判定黄河包头段在2004年12月至次年3月间，处于富营养化状态。

c. 黄河水源水质的富营养化必然对以黄河水为水源的包头市的饮用和工业用水安全造成威胁。

参考文献：

[1] 王利平，李义科，庞宏，等. 稀土冶炼氯胺废水氨氮去除试验研究[J]. 给水排水，2004，30(4)：50-52.

[2] 高际玫，董俊玲，张娜. 包头四道沙河流域稀土行业废水对水环境影响分析[J]. 内蒙古环境保护，2002，14(3)：31-33.

[3] 何江，米娜，匡运臣，等. 黄河包头段水环境中稀土元素的形态及分布特征[J]. 环境科学，2004，25(2)：61-66.

[4] 薛爱娣，张雪梅. 黄河水源污染对画匠营子水厂供水的影响[J]. 包钢科技，2002，28(2)：71-75.

[5] 李进修，杜斌，孙以三. 水动力条件对富营养化影响规律探讨[J]. 水利水电技术，2005，36(5)：15-18.

[6] 廖平安. 流速对藻类生长影响的试验研究[J]. 北京水利，2005(2)：12-14.

[7] 吴彦领. 以黄河为生活饮用水水源的卫生研究[J]. 河南预防医学杂志，2000，11(2)：72-75.

[8] 许秋瑾，高光，陈伟民. 太湖微囊藻毒素与湖泊物理因子之间的关系[J]. 中国环境监测，2004，20(1)：12-16.

[9] 孟玉珍. 郑州市水源水藻类和藻毒素污染调查[J]. 卫生研究，1999，28(2)：100-101.

[10] 胡鸿钧. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京：科学出版社，2006.

（收稿日期：2008-04-12　编辑：高渭文）

（上接第42页）

表5　各蓄水方案水库兴利效益

方案	汛限水位/m		弃水量/（亿 $m^3 \cdot a^{-1}$）	工业供水/（亿 $m^3 \cdot a^{-1}$）	工业供水增量/（亿 $m^3 \cdot a^{-1}$）	农灌面积/万顷	调节期末水位/m	期末库容/亿 m^3
	主汛期	后汛期						
1	102.0	102.0	4.14	1.18	—	3.33	101.57	2.155
2	102.0	103.0	3.96	1.32	0.14	3.33	101.92	2.356

在工业和生活供水保证率不低于97%的情况下，可使工业和生活供水量增至1.32亿 m^3/a，比原设计的增加0.26亿 m^3/a，增幅24%，能满足目前平顶山市1.18亿 m^3/a的工业和生活用水的实际需求以及近期平顶山市经济发展而增加的水量需求。

与原设计的单值静态汛限水位相比，在不降低水库防洪标准前提下，汛限水位动态控制运用后，对提高水库的综合效益十分有效。通过实例，本文研究成果的应用效益将十分显著，是水库洪水资源有效利用的可行方法。

3　结　语

运用模糊水文水资源学中确定性（成因）分析、概率统计分析与模糊集分析相结合的基本原理，综合考虑各方面的因素，较全面地揭示了河南白龟山水库汛期演变规律，将设计状态下的单一汛限水位变成多级汛限水位，从而调整白龟山水库的防洪调度方案，水库年均工业和生活供水量比原设计的增加24%，能满足目前平顶山市工业和生活水量的实际需求。本研究成果只是调整水库运行方式，并未降低水库防洪设计标准，所得结果合理、可靠，可推广运用于其他已建的水资源短缺地区的综合利用水库。为缓解我国缺水地区水库防洪与兴利矛盾及充分利用洪水资源提供了一条有效途径，对区域水资源的可持续开发利用具有理论与现实意义[6-8]。

本文在撰写过程中承蒙陈守煜教授指导，谨此表示谢意！

参考文献：

[1] 陈守煜. 模糊水文学与水资源系统模糊优化原理[M]. 大连：大连理工大学出版社，1990.

[2] 陈守煜. 工程水文水资源系统模糊集分析理论与实践[M]. 大连：大连理工大学出版社，1998.

[3] 陈守煜. 从研究汛期描述论水文系统模糊集分析的方法论[J]. 水科学进展，1995(2)：133-138.

[4] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京：国防工业出版社，1998.

[5] 陈守煜. 复杂水资源系统优化模糊识别理论与应用[M]. 长春：吉林大学出版社，1998.

[6] 陈守煜，王淑英，郭瑜等. 水库设计汛限水位动态模糊控制分析[J]. 大连理工大学学报，2005(5)：735-739.

[7] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M]. 大连：大连理工大学出版社，2005.

[8] 陈守煜. 工程可变模糊集理论与模型——模糊水文水资源学数学基础[J]. 大连理工大学学报，2005，45(2)：308-312.

（收稿日期：2008-02-19　编辑：高渭文）