DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.05.015

基于云模型的东平湖枯水期地下水水质评价

胡尊芳[1,2],孙建峰[1],宋印胜[1],王仕昌[1],韩玉珍[1]

(1.山东省物化探勘查院,山东 济南 250013;2.山东大学土建与水利学院,山东 济南 250061)

摘要:为考察南水北调东线工程通水前后东平湖地区枯水期地下水水质变化情况,引入云模型,选择总硬度、SO_4^{2-}、Cl^-、NO_3^-、NH_4^+、F^- 6 个水质指标作为评价因子,将南水北调东线工程通水前后的东平湖地下水水质实测数据输入云模型,得到各评价因子的确定度和基于权重计算的各采样点的综合确定度,由最大确定度确定各采样点的水质级别。结果表明,南水北调东线工程通水后,所采集的 7 个地下水水样的水质级别并未降低,湖区东部水样的水质劣于西部。

关键词:水质评价;南水北调东线工程;东平湖;枯水期;地下水;云模型

中图分类号:X824 **文献标志码**:A **文章编号**:1004-6933(2016)05-0074-05

Evaluation of groundwater quality of Dongping Lake in dry season based on cloud model

HU Zunfang[1,2], **SUN Jianfeng**[1], **SONG Yinsheng**[1], **WANG Shichang**[1], **HAN Yuzhen**[1]

(1. *Shandong Institute of Geophysical and Geochemical Exploration*, *Jinan* 250013, *China*;
2. *School of Civil Engineering*, *Shandong University*, *Jinan* 250061, *China*)

Abstract: The cloud model was used to evaluate the changes in groundwater quality of Dongping Lake in dry seasons before and after the implementation of the South-to-North Water Diversion Eastern Route Project. Six indices, including total hardness, SO_4^{2-}, Cl^-, NO_3^-, NH_4^+, and F^-, were selected as the evaluation factors. Measured data were put into the cloud model to obtain the degree of determination for each index. Furthermore, the integrated degree of determination for each sampling site was calculated based on the weight of each index. Finally, the largest integrated degree of determination was used to determine the water quality level of each sampling site. The results show that the groundwater quality of the seven sampling sites did not deteriorate after the implementation of the Eastern Route Project, and the water quality of the eastern part of the lake was worse than that of the western part of the lake.

Key words: water quality evaluation; South-to-North Water Diversion Eastern Route Project; Dongping Lake; dry season; groundwater; cloud model

东平湖位于山东省泰安市,是南水北调东线工程的调蓄水库,同时也担负着黄河下游地区和山东省西水东调水资源调蓄调配的功能,地位重要。地下水是东平湖水环境的重要组成部分,一方面地下水是当地居民主要的生活水源,另一方面地下水通过与地表水的相互交换影响地表水水质,进而影响南水北调工程受水区域的用水安全,因此有必要对东平湖地下水水质进行调查评价。

有关地下水水质评价的方法有:单因子评价法、综合指数法、人工神经网络模型、模糊综合评价法、灰色聚类法等[1],但每种方法都有其局限性,鉴于此,笔者引入云模型地下水水质评价方法。云模型是基于概率论和模糊数学理论而构建出来的一种定性概念与其定性数值表示之间的不确定性转换模

基金项目:山东省物化探勘查院科研基金(2015);山东省地质勘查项目(鲁勘字(2011)121);山东省地矿局地质科技攻关项目(KY201516)

作者简介:胡尊芳(1986—),女,博士,主要从事污水处理与水环境评价研究。E-mail:shiwaixianshu@126.com

型[2]。云模型能综合考虑评价过程中评价标准的非线性、评价因子的多样性以及评价过程之中的模糊性与随机性等特点,在空气质量评价、水资源再生能力评价、土地利用风险评价、地震风险评价等多方面得到广泛应用[3-7]。

云模型在水环境评价领域也有应用,如杨文[8]首次采用云模型与 Spearman 秩相关系数相结合的方法对宁海县地表水环境质量进行了评价,结果表明模型分析结果与实际情况基本符合,云模型可以很好弥补 Spearman 秩相关系数中存在的不均匀性量化值缺陷;丁昊等[9]利用云模型对我国 14 个代表性湖库的富营养化情况进行了评价,并与国内外广泛应用的营养状态指数法、评分公式法及模糊综合评价法所得的结果进行了对比,验证了云模型方法的可行性和有效性;白晓燕等[10]采用基于 Critic 权重的云模型对东江干流水质进行了评价,结果表明云模型方法合理可行,且更为直观地反映了水质评价中的模糊性和随机性;王昭洋等[11]采用改进赋权的多维云模型对国内 12 个水库的富营养化进行了评价,准确获得了湖库水质的富营养化级别。

目前,东平湖地下水水质评价工作开展的相对较少,在 2013 年 10 月 19 日南水北调东线一期工程全线通水后,相关的工作更是没有展开。本文采用云模型对南水北调东线工程通水前后的东平湖地下水水质进行评价,以期为南水北调东线工程的运行管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析

考虑到南水北调东线试通水后,东平湖水质需要一定的时间才能稳定,因此选择通水 1.5 年后采集样品。具体采样工作于 2012 年 6 月和 2015 年 6 月进行,采样点布设在八里湾泵站两侧、大汶河入口处两侧、小清河出口处两侧以及东平湖东部和西部区域等重要位置,共 7 个采样点(图 1)。样品采集完毕后送到山东省鲁南地质工程勘察院,在 24 h 内测量总硬度、SO_4^{2-}、Cl^-、NO_3^-、NH_4^+、F^- 6 个因子的质量浓度,水样分析前采用 2% 的硝酸酸化,测量的相对标准偏差小于 2%。

1.2 云模型评价

a. 评价因子权重确定。根据东平湖地下水水质,选择总硬度、SO_4^{2-}、Cl^-、NO_3^-、NH_4^+、F^- 6 个因子建立水质评价体系,根据地下水质量标准(GB/T 14848—1993),将各项因子分为 5 个级别,各项因子具体的分级标准见表 1。

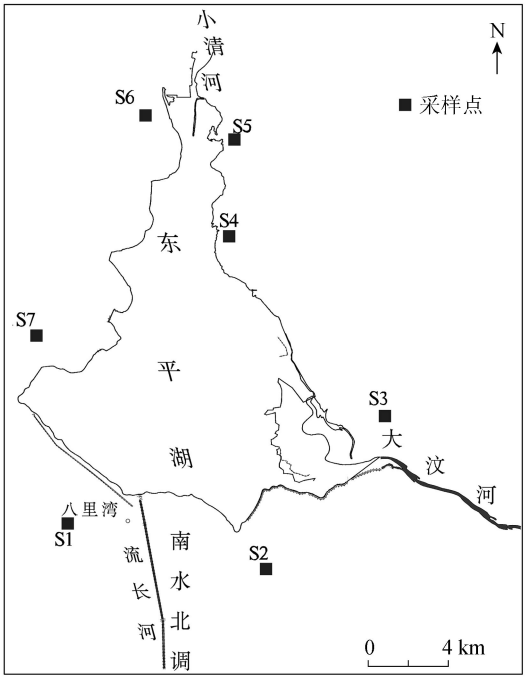


图 1 东平湖水系图及采样点位置

表 1 评价因子的分级标准 mg/L

分级	ρ(总硬度)	$\rho(SO_4^{2-})$	$\rho(Cl^-)$	$\rho(NO_3^-)$	$\rho(NH_4^+)$	$\rho(F^-)$
Ⅰ	(0, 150]	(0, 50]	(0, 50]	(0, 2.0]	(0, 0.02]	(0, 1.0]
Ⅱ	(150, 300]	(50, 150]	(50, 150]	(2.0, 5.0]	(0, 0.02]	(0, 1.0]
Ⅲ	(300, 450]	(150, 250]	(150, 250]	(5.0, 20]	(0.02, 0.2]	(0, 1.0]
Ⅳ	(450, 550]	(250, 350]	(250, 350]	(20, 30]	(0.2, 0.5]	(1.0, 2.0]
Ⅴ	(550,+∞)	(350,+∞)	(350,+∞)	(30,+∞)	(0.5,+∞)	(2.0,+∞)

鉴于各评价因子对水质评价结果的贡献不同,权重也不相同,笔者根据评价因子的实测质量浓度和各级别标准浓度计算权重。设评价因子合集 $X=\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$,它的权重矩阵为 $\boldsymbol{A}=[a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6]$,权重的计算公式为

$$a_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \tag{1}$$

$$w_i = \frac{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} c_i}{\frac{1}{k}\sum_{k=1}^{5} S_{ik}} \tag{2}$$

式中:n 为评价因子个数;m 为水体样本数;a_i 为评价因子 x_i 的权重;c_i 为 x_i 的实测质量浓度,mg/L;S_{ik} 为 x_i 的第 k 级标准值,mg/L;w_i 为第 i 个评价因子的 m 个水体样本的平均实测浓度值与该评价因子的 S_{ik} 值的平均值之比。将各评价因子的实测值代入式(1)~(2),可以得到 6 个评价因子的权重向量为:$\boldsymbol{A}=[0.2029, 0.1201, 0.0594, 0.4845, 0.0699, 0.0632]$,其中的数值从左到右分别为总硬度、$SO_4^{2-}$、$Cl^-$、$NO_3^-$、$NH_4^+$、$F^-$ 的归一化权重。

b. 特征参数确定。在确定评价因子和评价标

准的基础上，根据文献提出的方法确定云模型的 3 个数字特征：期望 E_x，熵 E_n，超熵 H_e[12]。假设对于某变量 V_{Qa}，具有上下边界[B_{min}，B_{max}]，则变量 V_{Qa} 的云模型的 3 个数字特征可以通过下式计算：

$$\begin{cases} E_x = \dfrac{B_{min} + B_{max}}{2} \\ E_n = \dfrac{B_{max} - B_{min}}{6} \\ H_e = k \end{cases} \tag{3}$$

式中：E_x 为云滴在论域空间分布的期望，最能代表定性概念的中心点，是概念量化的最典型样本点；E_n 为定性概念的不确定性度量，一方面是定性概念重合度量，反映论域空间可被定性概念接受的云滴取值范围，另一方面又是定性概念随机性度量，反映了能够代表这个定性概念云滴的离散度；H_e 为熵的不确定性度量，反映了在论域空间代表该语言值的所有点的不确定度的凝聚性，其取值范围间接反映了云滴的厚度，由熵的随机性和模糊性共同确定；B_{min}、B_{max} 分别为变量 V_{Qa} 的最小和最大边界；k 为常数，本文中 $k=0.01$。得到不同等级云模型数字特征计算方法见表 2。

表 2 中 $a \sim d$ 分别代表评价因子 x_i 的分级标准中的各个边界值，以总硬度为例，其各边界值分别为：$a=150$，$b=300$，$c=450$，$d=550$。

c. 云模型的生成。根据确定的云模型数字特征，运用 matlab R2007b 编写正态云发生器及半云发生器程序，输入相应的云参数，分别生成 6 个评价因子的云模型，如图 2 所示。横坐标代表评价因子的质量浓度，纵坐标代表评价因子的某一实测值通过云模型映射所对应的确定度 U。横坐标从左到右分别代表地下水质量标准的Ⅰ级到Ⅴ级所对应的云。以图 2(a) 总硬度为例，某实测点的总硬度为 280 mg/L 时，由正向云发生器可以得到总硬度隶属于各地下水水质级别的确定度分别为：$U_{Ⅰ}$(总硬度)=0，$U_{Ⅱ}$(总硬度)=0.545 8，$U_{Ⅲ}$(总硬度)=0.164 6，$U_{Ⅳ}$(总硬度)=0，$U_{Ⅴ}$(总硬度)=0，其中 $U_{Ⅱ}$ 值最大，$U_{Ⅲ}$ 次之，其他确定度为 0，说明总硬度为 280 mg/L 时，隶属于水质级别Ⅱ类的可能性最大，隶属于Ⅲ类有一定的可能，但是不隶属于其他的水质级别。同理，也可以求出其他评价因子的确定度，得到相对应的确定度矩阵。

表 2　不同等级云模型数字特征计算方法

等级	E_x	E_n	H_e
Ⅰ	$E_{x1}=\dfrac{a}{2}$	$E_{n1}=\dfrac{E_{x2}-E_{x1}}{3}$	0.01
Ⅱ	$E_{x2}=\dfrac{a+b}{2}$	$E_{n2}=\dfrac{E_{x2}-E_{x1}}{3}$	0.01
Ⅲ	$E_{x3}=\dfrac{b+c}{2}$	$E_{n3}=\dfrac{E_{x3}-E_{x2}}{3}$	0.01
Ⅳ	$E_{x4}=\dfrac{c+d}{2}$	$E_{n4}=\dfrac{E_{x4}-E_{x3}}{3}$	0.01
Ⅴ	$E_{x5}=c+d$	$E_{n5}=\dfrac{E_{x5}-E_{x4}}{3}$	0.01

d. 评价综合确定度的计算。在得到各评价因子隶属于各水质级别的确定度矩阵[$\boldsymbol{X}$][$\boldsymbol{Y}$]后，乘以相应的权重 $\boldsymbol{A}$，得到各评价因子的综合确定度 $\boldsymbol{A}$[$\boldsymbol{X}$][$\boldsymbol{Y}$]，计算其各列值的综合确定度，最大确定度所在的级别即为监测点所属的水质级别。

2　结果与讨论

南水北调东线工程通水前后东平湖地下水水质

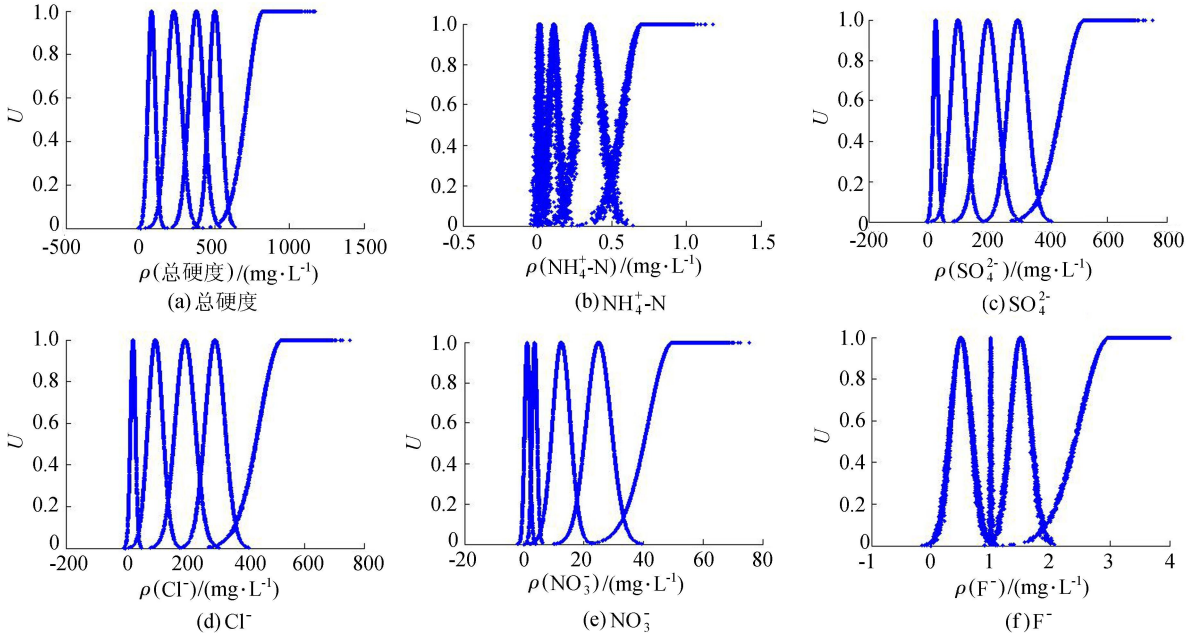


图 2　6 个评价因子对应各水质级别的云模型

评价结果见表3。从表3可以看出,南水北调东线工程通水前,东平湖地下水水质级别为Ⅰ~Ⅴ类均有分布,而在南水北调东线工程通水后,东平湖地下水水质为Ⅰ类或Ⅴ类,其中S1、S3、S5点的水质级别在通水前后没有差别,分别为Ⅰ、Ⅴ、Ⅴ类,S2、S6、S7点在通水后的水质级别优于通水前,分别由Ⅱ、Ⅲ、Ⅴ类提升至Ⅰ类,而S4点的水质级别在通水后下降一个级别,由Ⅳ类下降到Ⅴ类。另外还发现无论通水前后,东平湖东部地下水水质均劣于西部地下水水质。Wang等[13]的研究表明,东平湖东部地区的底泥重金属污染更加严重,说明东部地区存在污染源,推测可能是工矿业污染或农业污染。

表3 通水前后各采样点水质级别确定度及水质评价结果

采样时间	采样点	水质级别确定度 U					水质评价结果
		$U_{\mathrm{Ⅰ}}$	$U_{\mathrm{Ⅱ}}$	$U_{\mathrm{Ⅲ}}$	$U_{\mathrm{Ⅳ}}$	$U_{\mathrm{Ⅴ}}$	
通水前(2012年6月12日)	S1	0.3617	0.1229	0.1085	0.2040	0.0019	Ⅰ
	S2	0.1363	0.4305	0.2062	0.0015	0	Ⅱ
	S3	0.0271	0.0886	0.0261	0.1075	0.4896	Ⅴ
	S4	0.0580	0.1700	0.1041	0.3507	0	Ⅳ
	S5	0.0838	0.0963	0.2070	0.0009	0.4845	Ⅴ
	S6	0.0878	0.0794	0.4421	0.0129	0	Ⅲ
	S7	0.0191	0.0229	0.1327	0.0006	0.1393	Ⅴ
通水后(2015年6月9日)	S1	0.4885	0.0906	0.3274	0.0020	0	Ⅰ
	S2	0.3579	0.1066	0.1852	0.0109	0	Ⅰ
	S3	0.0144	0.1357	0.0267	0.2022	0.5058	Ⅴ
	S4	0.0205	0.0829	0.0253	0.1830	0.5167	Ⅴ
	S5	0.0458	0.0068	0.0045	0	0.8057	Ⅴ
	S6	0.2898	0.1685	0.0065	0.0910	0.0056	Ⅰ
	S7	0.2727	0.0132	0.1091	0.0616	0.0125	Ⅰ

另外,即使通水前后的水质级别一致,其确定度的不同又代表了不同意义,如S1点在通水前后的地下水水质级别均为Ⅰ类,但通水后S1点的$U_{\mathrm{Ⅰ}}$更大,故通水后S1点的水质级别更倾向于Ⅰ类,水质更好;对于S3点来说,通水前后水质级别均为Ⅴ类,且两者的确定度相差不大,因此可以认为通水前后S3点的地下水水质没有明显变化;对于S5点来说,通水前后的地下水水质级别均为Ⅴ类,但通水后S5点的$U_{\mathrm{Ⅴ}}$更大,更倾向于Ⅴ类,水质也更差。

通过基于云模型的确定度对东平湖地下水水质的评价可以看出,采用云模型评价南水北调东线工程通水前后东平湖地下水的水质具有如下优点:①可以避免单一评价指标的随机性和模糊性,如,根据国家标准,S1采样点在南水北调东线工程通水前,总硬度为Ⅳ类,SO_4^{2-}为Ⅲ类,Cl^-为Ⅱ类,NO_2^-为Ⅱ类,NH_4^+为Ⅲ类,F^-为Ⅳ类,可见采用单一指标无法准确判断水体的综合水质情况,而云模型通过确定度概念可以解决不同指标隶属于不同水质级别情况下综合水质的判别;②可以避免使用综合评分法时出现的某一评价指标偏大的情况,从而更客观合理地考量所有评价指标;③可以更准确地了解水体的水质情况,不仅可以了解水质的不同级别,对隶属于同一级别的水体也可以通过确定度的不同而分辨其水质的优劣。

3 结 论

a. 云模型评价方法可以克服单一评价指标的随机性和模糊性,能够客观合理地评价东平湖地下水水质。

b. 南水北调东线工程通水后,在7个采样点所采集的地下水水样的水质级别并未变差,原因可能是因为南水北调东线工程的引水为长江地表水,水中重金属质量浓度较低,因此客水的引入降低了东平湖地下水中重金属质量浓度。

c. 东平湖东部地区的地下水水质劣于西部地区,是因为东部地区存在污染源,推测可能是工矿业污染或农业污染。

在后续的研究工作中,建议增加地下水采样点数目并对客水水质进行分析,以期进一步了解南水北调东线工程对东平湖地下水水质的影响。

参考文献:

[1] 王文强. 地下水水质评价方法浅析[J]. 地下水,2007,29(6):37-39. (WANG Wenqiang. A brief analysis on groundwater quality evaluation methods [J]. Ground Water,2007,29(6):37-39. (in Chinese))

[2] 李德毅,杜鹢. 不确定性人工智能[M]. 北京:国防工业出版社,2005.

[3] 张峰,张鹏林,吕志勇,等. 云模型在城镇空气质量评价中的应用[J]. 环境科学与技术,2009,32(6):160-164. (ZHANG Feng, ZHANG Penglin, LYU Zhiyong, et al. Assessment of urban air quality based on cloud models [J]. Environmental Science & Technology,2009,32(6):160-164. (in Chinese))

[4] 贾琦,段春青,陈晓楠. 黄河流域水资源可再生能力评价的云模型[J]. 中国人口·资源与环境,2010,20(9):48-52. (JIA Qi, DUAN Chunqing, CHEN Xiaonan. Cloud model of water resources reproducible ability in the Yellow River Basin[J]. China Population, Resources and Environment,2010,20(9):48-52. (in Chinese))

[5] 周启刚,张晓媛,王兆林. 基于正态云模型的三峡库区土地利用生态风险评价[J]. 农业工程学报,2014,30(23):289-297. (ZHOU Qigang, ZHANG Xiaoyuan, WANG Zhaolin. Land use ecological risk evaluation in Three Gorges Reservoir area based on normal cloud model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2014,30(23):289-297. (in Chinese))

[6] 张秋文,章永志,钟鸣. 基于云模型的水库诱发地震风险多级模糊综合评价[J]. 水利学报,2014,45(1):87-

95. (ZHANG Qiuwen, ZHANG Yongzhi, ZHONG Ming. A cloud model based approach for multi-hierarchy fuzzy comprehensive evaluation of reservoir-induced seismic risk [J]. Journal of Hydranlic Engineering, 2014, 45(1): 87-95. (in Chinese))
[7] 王贺,刘高峰,王慧敏. 基于云模型的城市极端雨洪灾害风险评价[J]. 水利经济,2014,32(2):15-18. (WANG He, LIU Gaofeng, WANG Huimin. Urban extreme rainstorm flood loss based on cloud model[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2014, 32(2): 15-18. (in Chinese))
[8] 杨文. 基于云模型的宁海县地表水环境质量评价[D]. 金华: 浙江师范大学,2013.
[9] 丁昊,王栋. 基于云模型的水体富营养化程度评价方法[J]. 环境科学学报,2013,33(1): 251-257. (DING Hao, WANG Dong. The evaluation method of water eutrophication based on cloud model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(1): 251-257. (in Chinese))
[10] 白晓燕,赖成光,陈晓宏,等. 基于 Critic-cloud 模型的东江干流水质评价[J]. 水资源保护,2014,30(5): 26-31,59. (BAI Xiaoyan, LAI Chengguang, CHEN Xiaohong, et al. Evaluation of water quality of trunk stream of Dongjiang River based on Critic-cloud model[J]. Water Resources Protection, 2014, 30(5): 26-31, 59. (in Chinese))
[11] 王昭洋,王立,王小艺,等. 改进赋权的水体富营养化多维云模型评价[J]. 计算机与应用化学,2015,32(3): 346-350. (WANG Zhaoyang, WANG Li, WANG Xiaoyi, et al. Multi-dimensional cloud model evaluation of water eutrophication based on improved weight method[J]. Computers and Applied Chemistry, 2015, 32(3): 346-350. (in Chinese))
[12] 丁昊. 云模型在水体富营养化评价及水文序列展延中的应用[D]. 南京: 南京大学,2013.
[13] WANG Yunqiang, YANG Liyuan, KONG Linghao, et al. Spatial distribution, ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediments from Dongping Lake, Shandong, East China[J]. Catena, 2015, 125: 200-205.

(收稿日期:2015-10-22 编辑:王 芳)

(上接第 57 页)

[4] JJ101—2004 埋地聚乙烯给水管道技术规程[S]
[5] 胡平,刘毅,唐忠敏,等. 水库水温数值预测方法[J]. 水利学报,2010,41(9):1045-1053. (HU Ping, LIU Yi, TANG Zhongmin, et al. Numerical prediction method of reservoir water temperature [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(9): 1045-1053. (in Chinese))
[6] 杨伟. 半晶聚合物的应力应变行为及其与形态结构的关系[D]. 成都:四川大学,2006.
[7] 关长涛,陆光炯,林德芳,等. 圆形网箱框架用 PE 管材的弯曲疲劳试验[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2006, 36(2): 236-240. GUAN Changtao, LU Guangjiong, LIN Defang, et al. Bending fatigue test on pepipes used for circular cage floating collars [J]. Periodical of Ocean University of China (Natural Sciences Edition), 2006, 36(2): 236-240. (in Chinese))
[8] 尹华杰. 压力管道强度及应力分析. [EB/OL]. [2010-07-13]. http://wenku.baidu.com/view/e4253a7f5acfa1c7aa00cc69.html
[9] 李俊琦,樊友权,于兰英,等. 铁道车辆液压减振器低速特性的 CFD 仿真[J]. 机床与液压,2012,40(9):127-129. (LI Junqi, FAN Youquan, YU Lanying, et al. CFD simulation for low-speed performance of train damper[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2012, 40(9): 127-129. (in Chinese))
[10] 熊跃辉,刘蔚. 污水处理厂排放标准要进行分类指导[N]. 中国环境报,2014-07-08(02).

(收稿日期:2016-01-20 编辑:彭桃英)

(上接第 66 页)

[10] NGUYEN H T T, NIELSEN J L, NIELSEN P H. '*Candidatus* Halomonas phosphatis', a novel polyphosphate accumulating organism in full-scale enhanced biological phosphorus removal plants [J]. Environmental Microbiology, 2012, 14(10): 2826-2837.
[11] AMANN R I, LUDWIG W, SCHLEIFER K H. Phylogenetic identification and in situ detection of individual microbial cells without cultivation[J]. Microbiological and Molecular Biology Reviews, 1995, 59(1): 143-169.
[12] 郑金伟,冉炜,钟增涛,等. 增强型生物除磷过程中聚磷酸盐积累微生物的研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1487-1490. (ZHENG Jinwei, RAN Wei, ZHONG Zengtao, et al. Research advance in polyphosphate-accumulating microorganisms in enhanced biological phosphorus removal process [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(8): 1487-1490. (in Chinese))
[13] WANG Yayi, REN Zhongjia, JIANG Fan, et al. Effect of copper ion on the anaerobic and aerobic metabolism of phosphorus-accumulating organisms linked to intracellular storage compounds [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(1): 313-319.
[14] AL-NAJJARA M M, COATSB E R, LOGE F J. The role of the microbial stringent response in excess intracellular accumulation of phosphorous in mixed consortia fed synthetic wastewater [J]. Water Research, 2011, 45(16): 5038-5046.

(收稿日期:2015-12-29 编辑:徐 娟)