

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2013.01.010

淮河干流信阳段水质预测模型

尤 宾¹, 臧红霞², 李永丽³

(1. 河南省信阳水文水资源勘测局, 河南 信阳 464000; 2. 河南省商丘水文水资源勘测局, 河南 商丘 476000;
3. 河南省水文水资源局, 河南 郑州 450003)

摘要:根据水体扩散理论, 建立淮干水质预测相关模型, 并进行验证; 首次对淮河干流信阳段 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD 的综合衰减系数, 复氧系数和耗氧系数等 4 项开展现场试验及分析, 结果表明, 引起误差的主要原因是复氧率及光合作用随河流而异, 难以准确确定。

关键词:水质模型; 预测; 淮河干流; 信阳段

中图分类号: X32 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2013)01-0041-05

Water quality prediction model for Xinyang section of main stream of Huaihe River

YOU Bin¹, ZANG Hongxia², LI Yongli³

(1. Xinyang Bureau of Hydrology and Water Resources Survey of Henan Province, Xinyang 464000, China;
2. Shangqiu Bureau of Hydrology and Water Resources Survey of Henan Province, Shangqiu 476000, China;
3. Hydrology and Water Resources Bureau of Henan Province, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Based on the water diffusion theory, a water quality prediction model was established for the main stream of the Huaihe River, and the model validation was performed. Field tests and scientific analysis were conducted to study $\text{NH}_3\text{-N}$, the integrated attenuation coefficient of COD, the reaeration coefficient, and the oxygen-consuming coefficient of the Xinyang section of the main stream of the Huaihe River. According to the results, the main cause of error is that the reaeration rate and photosynthesis vary with different rivers and cannot be easily determined.

Key words: water quality model; prediction; main stream of Huaihe River; Xinyang section

1 概 况

1.1 信阳市段水资源概况

信阳市位于河南省最南部、大别山北麓与淮河之间, 处于北亚热带和暖温带的过渡地带, 年平均气温 15.2℃。

信阳市河流主要以淮河及其支流为主, 淮河干流在河南省境内总长 417 km, 境内平均降水量 1 120 mm, 信阳市多年平均地表水资源量为 78.60 亿 m^3 , 多年平均地下水资源量为 26.86 亿 m^3 , 扣除多年平均重复量 17.41 亿 m^3 , 实际多年平均水资源总量 88.05 亿 m^3 , 高于全省、低于全国平均水平, 属弱富水区^[1]。

1.2 研究区域水文特性概况

研究区域设 3 个断面: 息县水文站、淮河 106 花卜桥断面、淮滨水文站。息县水文站至淮河 106 花卜桥断面相距 40 km, 淮河 106 花卜桥断面至淮滨水文站相距 60 km。

息县水文站是淮河上游的重要控制站, 断面以上淮干流程 255 km, 流域面积 10 190 km^2 , 最大河宽 2 435 m, 河底最低高程 30.11 m。枯水期水面宽约 150 m, 平均水深约 1 m。多年平均流量 120 m^3/s , 丰水期平均流量 203 m^3/s , 平水期平均流量 77.7 m^3/s , 枯水期平均流量 37.5 m^3/s 。

淮河 106 花卜桥断面无水文资料, 根据上游息

县水文站实测径流资料,用面积比法转移到 106 花卜桥断面,106 花卜桥断面最小月平均流量 3.337 m³/s,年平均流量 27.17 m³/s。

淮滨水文站是淮河上游豫境出口控制站,区间面积 5 815 km²,最大河宽 1 260 m,河底最低高程 16.21 m,枯水期水面宽约 100 m,平均水深约 2.5 m。多年年平均流量 175 m³/s,丰水期平均流量 299 m³/s,平水期平均流量 113 m³/s,枯水期平均流量 54.3 m³/s。

据《河南省水功能区划》,淮河干流水系共划分 1 个一级功能区:淮河息县淮滨开发利用区;4 个二级功能区:淮河息县农业用水区、淮河息县排污控制区、淮河息县淮滨农业用水区、淮河淮滨县排污控制区。

监测表明,息县和淮滨县城镇污染主要是有机污染,主要污染因子为 NH₃-N 和 COD,息县城镇入河排污口污水平均排放量为 600 万 t/a,淮滨县污水平均排放量为 500 万 t/a。

2 水质模型的建立

2.1 技术路线

a. 选择研究区域。确定淮干息县—106 花卜桥—淮滨段为研究对象,了解区域自然地理和社会经济情况以及河流特性,确定多支流河段水质模型的结构。

b. 估算模型参数。通过确定参数率定方法,进行水团跟踪试验,选择能较精确重现观测数据的最佳参数,代入数学模型,得出 3 个河段的相关参数最佳值。

c. 模型验证。用与建模无关数据代入模型中演算,表明模型选用是合适的,参数能较好地满足模型。

d. 模型应用。通过与历史实测值进行比较,运用单一河段污染指标浓度预测、多支流河段污染指标浓度预测方法,进行水质预测,结果较为满意,证明所建立的水质模型可以在实际工作中运用。

水质模型技术路线见图 1。

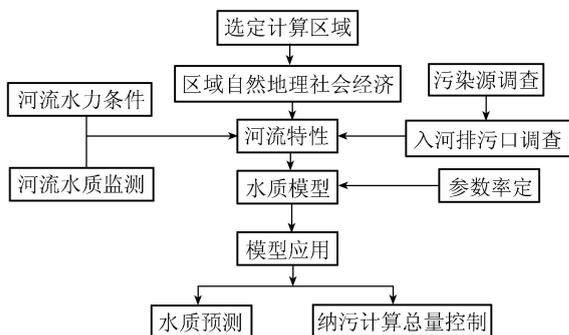


图 1 水质模型技术路线^[2]

2.2 水质模型

如果忽略扩散作用,一维水质模型稳态解析解为^[3]

$$\rho = \rho_0 \exp(-KX/U) \quad (1)$$

式中: ρ 为河流水体中污染物质量浓度,mg/L; ρ_0 为起始断面河水中污染物质量浓度,mg/L; K 为污染物衰减系数; X 为与起始断面间的距离,km; U 为设计条件下河段平均流速,km/d。

淮干息县至淮滨段河流较长,区间有潢河、寨河、浍河等支流和城镇排污口汇入,可以通过河段的划分,使其成为多个单一河段的串联。本文选取 106 花卜桥段作为一个监测站点,将息县和淮滨段之间划为 3 个河段,设 3 个水质监测断面。

由一维稳态模型公式可得差分解^[4]:

$$\rho_{\text{下}} = \rho_{\text{上}} \left(1 - 0.0116 \frac{KX}{U} + 0.0116 \frac{C^*}{\rho_{\text{上}} Q} \right) \alpha \quad (2)$$

$$\rho'_{\text{下}} = \rho'_{\text{上}} \left[1 - 0.0116 \frac{X(K_1 \rho_{\text{上}} - K_2 D)}{\rho'_{\text{上}} U} + 0.0116 \frac{O^*}{\rho_{\text{上}} Q} \right] \alpha \quad (3)$$

其中

$$\alpha = Q/(Q + q)$$

式中: $\rho_{\text{上}}$ 为上断面污染物质量浓度,mg/L; $\rho_{\text{下}}$ 为下断面污染物质量浓度,mg/L; $\rho'_{\text{上}}$ 为上断面 DO 质量浓度,mg/L; $\rho'_{\text{下}}$ 为下断面 DO 质量浓度,mg/L; K_1 为耗氧系数,d⁻¹; K_2 为复氧系数,d⁻¹; C^* 为河流旁侧或支流污染来量,kg/d; O^* 为河流旁侧或支流 DO 来量,kg/d; Q 为流量,m³/s; α 为稀释流量比; q 为污水或支流流量,m³/s; D 为氧亏值,为饱和 DO 质量浓度与现状 DO 质量浓度之差,mg/L。

3 水质模型参数的估算

3.1 参数确定

3.1.1 耗氧系数 K_1

有机生物化学耗氧量降低的速度与它剩余的未氧化物质的需氧量成正比,这个比例常数即定义为耗氧系数。

a. 野外实测数据估算 K_1 值^[2]。

由于淮干息县至淮滨段沿河有支流加入,流量稳定增加,本文采用多支流河段推流模型,由实测资料推求 K_1 值。

$$K_1 = \frac{2.3}{t_0 - t} (\lg \frac{\rho}{\rho_0} - \lg \frac{Q}{Q_0}) \quad (4)$$

式中: t_0 为水流流经上断面的时间; t 为水流流经下断面时间。

b. K_1 经验公式。

$$K_1 = 1.80Q^{-0.49} \quad (5)$$

3.1.2 综合衰减系数 K

综合衰减系数 K 是反映污染物沿河段长度变

化的综合系数,本文确定以 K_C 代表 COD 指标的综合衰减系数, K_N 代表 NH_3-N 指标综合衰减系数。采用一维稳态水质模型,仅考虑降解、平流项。

3.1.3 复氧系数 K_2

对复氧系数 K_2 ,本文采用经验公式^[5]:

$$K_2 = 5.01U^{0.969}/H^{1.673} \quad (6)$$

其中流速 $U=0.5 \sim 2.0$ m/s,水深 $H>1$ m。

3.2 参数率定

3.2.1 方法

a. K_1 实测。采用水团跟踪测定方法^[6]。即在采样断面测定流速,据与下游断面的间距计算水团到达下游断面的时刻(即下游断面取样时刻),以此类推至河段末端断面。计算公式见式(4)。 K_1 值受水温影响较大,有以下关系:

$$K_1(T) = K_1(20)1.047^{(T-20)}$$

式中: $K_1(T)$ 、 $K_1(20)$ 分别为水温为 T 和 $20^\circ C$ 时的耗氧系数。

b. 综合衰减系数 K 。

$$\rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{KX}{86400U}\right) \quad (7)$$

3.2.2 率定

2009年9月9—26日,在淮河干流息县到淮滨段

进行了水团跟踪水质水量监测(共9组数据),监测断面共3个:息县、106花卜桥、淮滨。主要监测项目: BOD_5 、DO、 NH_3-N 、COD、水温、流量等,监测成果见表1。表1中序号所对应的3次监测分别是息县、106花卜桥、淮滨。水质水量监测均按规范进行。

将有关数据代入式(4)~(7),得出: K_1 、 K_N 、 K_C 的实验值和经验值,以及 K_2 的经验值,见表2。

表2 淮干息县至淮滨段 K_1 、 K_2 、 K_N 、 K_C 参数平均值 d^{-1}

K_1		K_2		K_N		K_C	
经验	实测	经验	经验	实测	经验	实测	实测
0.124	0.327	0.482	0.130	0.208	0.150	0.268	

4 水质模型的验证

2009年9月28日—10月25日在淮河干流息县到淮滨段进行了验证水质模型的水质水量监测(水团跟踪共8组数据),监测断面共3个:息县、106花卜桥、淮滨。主要监测项目: BOD_5 、DO、 NH_3-N 、COD、水温、流量等,结果见表3。将有关数据代入式(2)、(3),再进行计算,可得出 K_1 、 K_N 、 K_C 参数平均精度,见表4。

息县—淮滨段选取经验公式平均值 $K_1 = 0.124 d^{-1}$, $K_2 = 0.482 d^{-1}$; K_N 选取实测推导公式平均

表1 息县至淮滨段水团跟踪实验水质水量监测成果

序号	时间	水位/ m	流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	断面面积/ m^2	水面 宽/m	平均流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	平均 水深/m	水温/ $^\circ C$	距离/ km	$\rho(DO)/$ ($mg \cdot L^{-1}$)	$\rho(BOD_5)/$ ($mg \cdot L^{-1}$)	$\rho(NH_3-N)/$ ($mg \cdot L^{-1}$)	$\rho(COD)/$ ($mg \cdot L^{-1}$)
1	09-09T14:00	35.17	342	621	230	0.55	2.70	27.0		7.1	5.5	1.47	18.5
	09-10T8:45		350	501	243	0.70	2.06	24.8	40	6.6	3.5	1.22	14.6
	09-11T12:00	25.96	406	990	132	0.41	7.50	26.2	60	6.2	2.5	0.95	10.8
2	09-10T8:00	34.90	288	576	225	0.50	2.56	26.2		7.5	4.6	1.97	16.1
	09-11T6:00		295	446	240	0.66	1.86	21.6	40	6.7	3.2	1.62	12.7
	09-12T14:00	25.47	382	910	130	0.42	7.00	27.0	60	6.3	2.2	1.21	8.5
3	09-11T5:00	34.84	275	573	224	0.48	2.56	25.6		7.1	4.1	1.38	13.2
	09-12T6:20		282	434	240	0.65	1.81	22.4	40	6.9	2.9	1.10	10.7
	09-13T14:00	25.06	366	916	129	0.40	7.10	27.2	60	6.1	2.1	0.83	7.8
4	09-12T5:00	34.74	253	539	220	0.47	2.45	26.2		7.1	5.1	2.15	17.4
	09-13T6:40		261	427	240	0.61	1.78	23.4	40	6.7	3.6	1.82	14.2
	09-14T14:00	24.64	327	838	125	0.39	6.70	27.8	60	6.4	2.5	1.45	9.3
5	09-13T5:00	34.67	238	530	219	0.45	2.42	26.0		6.3	5.7	2.47	22.6
	09-14T6:20		243	405	237	0.60	1.71	23.1	40	5.9	3.5	2.02	17.6
	09-15T14:00	24.33	318	838	125	0.38	6.70	27.1	60	5.2	2.4	1.56	12.7
6	09-15T5:00	34.67	243	518	225	0.47	2.30	26.1		6.3	5.4	2.08	16.8
	09-16T6:40		254	417	238	0.61	1.75	23.4	40	5.2	3.3	1.64	13.6
	09-17T14:00	24.14	315	769	122	0.41	6.30	27.3	60	5.0	2.4	1.12	10.3
7	09-21T15:00	34.33	169	445	218	0.38	2.04	25.2		7.0	6.1	2.34	18.4
	09-22T16:00		199	398	234	0.50	1.70	25.3	40	6.7	3.7	1.95	14.1
	09-24T7:00	22.95	270	675	118	0.40	5.72	24.4	60	6.3	2.4	1.42	10.0
8	09-22T9:30	34.14	129	405	170	0.32	2.38	26.6		6.7	6.3	3.50	25.7
	09-23T13:20		154	376	225	0.41	1.67	19.2	40	6.5	4.0	2.61	18.6
	09-25T8:00	22.80	209	598	115	0.35	5.20	21.0	60	6.2	2.5	1.96	11.8
9	09-23T7:00	34.09	103	395	169	0.26	2.34	22.0		7.4	6.2	1.93	31.3
	09-24T11:50		118	357	223	0.33	1.60	19.8	40	6.7	3.2	1.53	22.3
	09-26T7:00	22.68	179	598	115	0.30	5.20	20.0	60	6.5	1.8	1.06	14.3

表3 息县至淮滨段验证水质模型的水质水量监测成果

断面名称	时间	水位/ m	流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	断面面 积/ m^2	水面 宽/m	平均流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	平均 水深/m	水温/ $^{\circ}C$	距离/ km	$\rho(DO)/$ ($mg \cdot L^{-1}$)	$\rho(BOD_5)/$ ($mg \cdot L^{-1}$)	$\rho(NH_3-N)/$ ($mg \cdot L^{-1}$)	$\rho(COD)/$ ($mg \cdot L^{-1}$)
息县	09-28T5:00	34.50	193	482	233	0.40	2.07	18.8		6.7	5.1	1.86	16.8
106花卜桥	09-29T5:00		216	415	240	0.52	1.73	19.2	40	7.2	3.3	1.54	13.2
淮滨	09-30T18:00	24.71	262	844	126	0.31	6.70	18.7	60	7.8	2.3	1.17	9.5
息县	10-03T9:00	4.97	307	579	228	0.53	2.54	19.2		6.7	4.8	1.74	17.2
106花卜桥	10-04T5:00		312	458	240	0.68	1.91	17.6	40	7.1	3.8	1.53	13.7
淮滨	10-05T12:00	24.90	383	869	126	0.44	6.90	19.6	60	7.5	2.8	1.06	10.7
息县	10-09T8:00	34.27	155	442	220	0.35	2.01	17.4		6.2	5.7	2.16	19.5
106花卜桥	10-10T15:00		181	422	228	0.43	1.85	18.6	40	6.7	3.8	1.76	14.7
淮滨	10-12T15:00	22.75	211	604	114	0.35	5.30	18.1	60	7.4	3.0	1.32	10.6
息县	10-13T14:00	34.03	106	380	168	0.28	2.26	21.2		6.5	5.3	2.36	18.6
106花卜桥	10-15T6:30		115	361	220	0.32	1.64	17.4	40	7.2	3.0	1.80	12.8
淮滨	10-17T12:00	21.65	163	582	112	0.28	5.20	19.2	60	7.5	1.9	1.35	7.4
息县	10-14T13:00	33.97	100	371	168	0.27	2.21	19.8		6.1	5.4	2.26	21.5
106花卜桥	10-17T6:35		110	356	220	0.31	1.62	17.6	40	6.9	2.7	1.84	15.2
淮滨	10-19T12:00	21.46	126	450	110	0.28	4.09	19.1	60	7.4	1.9	1.43	9.4
息县	10-15T13:00	33.92	89	358	168	0.25	2.13	18.4		6.3	5.4	2.41	22.7
106花卜桥	10-19T6:35		94	312	195	0.30	1.60	16.8	40	6.8	3.2	1.92	17.0
淮滨	10-21T11:00	21.29	114	440	110	0.26	4.00	18.4	60	7.3	1.7	1.46	10.8
息县	10-16T13:00	33.88	84	351	167	0.24	2.10	18.0		5.8	5.8	3.02	26.1
106花卜桥	10-21T6:40		85	294	186	0.29	1.58	16.8	40	6.9	3.2	2.41	18.7
淮滨	10-23T11:00	21.33	120	446	110	0.27	4.05	16.2	60	7.4	2.0	1.85	12.3
息县	10-17T13:00	33.84	80	332	166	0.24	2.00	18.4		5.6	6.1	2.86	25.6
106花卜桥	10-23T6:14		80	287	185	0.28	1.55	12.0	40	6.7	3.4	2.32	17.8
淮滨	10-25T11:00	21.26	108	430	110	0.25	3.91	16.6	60	7.1	2.1	1.82	10.9

表4 K_1 、 K_N 、 K_C 参数平均精度

%

河段	K_1			K_N			K_C		
	经验公式	经验公式 平均	实测值	经验公式	实测推导 公式	实测推导 公式平均	经验公式	实测推导 公式	实测推导 公式平均
息县-106花卜桥	95.8	96.1	79.4	87.3	91.3	95.2	79.7	87.8	91.8
106花卜桥—淮滨	92.0	91.1	81.9	92.1	94.5	91.2	73.2	84.0	91.1

值为 $0.208 d^{-1}$; K_C 选取实测推导公式平均值为 $0.268 d^{-1}$ 。确定了参数后,将参数代入相关公式即可得出息县至淮滨段的水质模型公式。

验证表明,引起误差的主要原因是复氧率及光合作用随河流而异,难以准确确定。由于目前的认识水平和测量精度,很难使误差下降。

5 模型应用

5.1 单一河段污染指标浓度预测

2009年笔者进行了某燃气电厂水资源论证工作,由于拟建电厂取水口暨潢川县杨围孜电灌站输水口处未设水质监测断面,通过调查得知 NH_3-N 是论证的重要水质指标,但只有2次水质监测资料,并由于时间紧,尚缺其他水期的资料。为得到客观的淮河杨围孜电灌站输水口水质情况,以便对电厂取水口水质做出客观的评价,笔者采用水质模型方法推求出其他水期淮河杨围孜电灌站输水口处的 NH_3-N 值^[7]。具体做法如下:

因淮河杨围孜电灌站输水口在淮河106花卜大

桥下200m,距上游息县水文站断面40km,水文部门常年在息县水文站设有水质监测站,可以根据本文研究成果,利用水质模型计算下游淮河杨围孜电灌站输水口的 NH_3-N 指标值。

确定采用一维水质模型,相关参数:①自净系数 K 值。本次研究息县至106花卜桥段 $K_N = 0.225 d^{-1}$;②河段平均流速 U 。采用经验公式计算: $U = \alpha Q^\beta$,式中 α 、 β 为经验数据,由实测资料用回归方法确定。经用息县水文站多年的实测资料建立流量与流速关系,息县站 $U = 0.0374Q^{0.4721}$,淮滨站 $U = 0.0116Q^{0.6429}$,计算后将不同水期的两断面 NH_3-N 指标列表分析。

根据分析,淮河杨围孜电灌站输水口处 NH_3-N 略小于息县断面水质,比较符合客观实际。这是由于区间无大的污染源,加上有支流寨河(Ⅲ类水)加入,水体经过40km的传输, NH_3-N 污染物经自净和稀释作用,含量略有降低。

据此,可以得出淮河杨围孜电灌站输水口处水质类别:年平均为Ⅳ-Ⅴ类,汛期为Ⅲ-Ⅳ类,非汛期

为IV-V类。平均精度为84.7%。

5.2 多支流河段污染指标浓度变化预测

由于息县和淮滨两站之间有支流和排污口加入,故选用多支流河段水质模型进行预测,选取息县和淮滨站历史同步监测资料(2000—2007年),利用已建立的水质模型和率定的参数值进行预测。选取33次DO监测数据,平均精度96.3%;选取26次BOD₅监测数据,平均精度81.7%;选取17次NH₃-N监测数据,平均精度97.0%;选取17次COD监测数据,平均精度83.6%。水质模型对现状水质的模拟精度较高,符合水质模拟的要求。

6 存在问题

a. 研究中“河段水流平均流速”是用上下断面的“断面实测流速”的平均值来代替的,将产生一定的误差^[8]。

b. 水质监测频率低,断面的监测频率为每天一次,难以全面控制水质变化的全过程。

c. 综合衰减系数的影响因素众多,受实际数据所限,率定过程不可避免地受一些不确定信息的影响,产生一定的计算误差。

由于存在以上问题,本研究有待今后进一步完善。

参考文献:

[1] 王玉振. 信阳市水资源现状分析与开发利用[J]. 河南水利与南水北调, 2009(4): 50-51. (WANG Yuzhen. Analysis of water resources development and utilization in Xinyang City [J]. Henan Water Resources & South-to-

North Water Diversion, 2009(4): 50-51. in Chinese))

[2] 金光炎, 黄道基, 郑英铭, 等. 水质数理统计评价预测与规划[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1991: 482-488.

[3] 金腊华, 徐峰俊. 水环境数值模拟与可视化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 160-163.

[4] 高维真, 徐惠慈, 陈鸣钊, 等. 江苏淮阴清安河水质控制模型研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1984(3): 19-20. (GAO Weizhen, XU huici, CHEN mingzhao, et al. Jiangsu Huaiyin Qing an river water quality control model research [J]. Journal of Hohai University: Natural Science, 1984(3): 19-20. (in Chinese))

[5] 张逢甲, 金传良, 顾丁锡, 等. 水污染容许排放量计算方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1991: 314-320.

[6] 吕贤弼, 张思聪, 王裕玮, 等. 卫运河水质模型参数的试验测定[J]. 水资源保护, 1994(3): 1-7. (LU Xianbi, ZHANG Sichong, WANG Yuwei, et al. Experimental determination of parameters of water quality model for Weiyun River [J]. Water Resources Protection, 1994(3): 1-7. (in Chinese))

[7] 吴师. 淮河鲁台子-石头埠动态纳污能力估算及水质污染预测预报[J]. 水资源保护, 2005, 21(4): 52-55. (WU Shi. Estimation of dynamic pollution receiving capacity and forecast on water quality pollution for the Lutaizi-Shitoubu section of the Huaihe River [J]. Water Resources Protection, 2005, 21(4): 52-55. (in Chinese))

[8] 杨迪虎. 淮河淮南、蚌埠段动态纳污能力分析[J]. 水资源保护, 2005, 21(4): 56-59. (YANG Dihu. Dynamic pollution receiving capacity in Huainan-Bengbu section of the Huaihe River [J]. Water Resources Protection, 2005, 21(4): 56-59. (in Chinese))

(收稿日期: 2012-03-06 编辑: 徐娟)

(上接第40页)

[3] 肖成猷, 朱建荣, 沈焕庭. 长江口北支盐水倒灌的数值模型研究[J]. 海洋学报, 2000, 22(5): 124-132. (XIAO Chengyou, ZHU Jianrong, SHEN Huaning. Study of numerical modelling about salt water now backward in the Changjiang Estuary north branch [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2000, 22(5): 124-132. (in Chinese))

[4] 顾莉, 华祖林, 树锦, 等. 江苏近海水域水环境质量现状评价[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, 40(5): 498-502. (GU Li, HUA Zulin, SHU Jin, et al. Assessment of water quality in coastal water areas of Jiangsu Province [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012, 40(5): 498-502. (in Chinese))

[5] 刘树锋, 黄健东, 张从联. 咸潮影响河段取水水源可靠性的分析[J]. 水资源保护, 2012, 28(1): 54-58. (LIU Shufeng, HUANG Jiandong, ZHANG Conglian. Reliability analysis of water intake sources in river reaches affected by salty tides [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(1): 54-58. (in Chinese))

[6] 长江勘测规划设计研究院上海分院. 长江口水源地咸潮控制临界流量的研究与确定[R]. 上海: 长江勘测规划设计研究院上海分院, 2011.

[7] 上海市堤防(泵闸)设施管理处. 崇明岛东风西沙水库及取输水泵闸工程环境影响报告[R]. 上海: 上海市堤防(泵闸)设施管理处, 2010.

(收稿日期: 2011-12-15 编辑: 彭桃英)