

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2015.04.014

暴雨径流对五里湖水质的影响

刘晓东^{1,2}, 胡功宇³, 周媛媛², 涂琦乐², 郑孝宇²

(1. 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 3. 长江水利委员会荆江水文水资源勘测局, 湖北 荆州 434002)

摘要:针对五里湖曲折不规则边界,采用四边形网格拟合,构建了基于四边形网格的平面二维通量向量分裂(FVS)格式水量水质耦合模型,并进行了模型验证。利用该模型模拟了设计暴雨径流对五里湖水质影响的动态过程,分析东西五里湖宝界桥断面 COD_{Mn}、NH₃-N、TP 和 TN 的交换通量。结果表明:在设计典型暴雨条件下,骂蠡港大流量的进水对西五里湖的水质有较大影响,设计暴雨发生 3 d 后,径流污水开始影响到西五里湖,在第 4 天后水质浓度达到峰值,使部分湖区水质由Ⅲ类变为Ⅳ类,但持续时间较短,此后浓度迅速减小。

关键词:暴雨径流;五里湖;二维水流水质耦合模型;四边形网格;COD_{Mn}

中图分类号:X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2015)04-0077-05

Impact of rainstorm runoff on water quality of Wuli Lake

LIU Xiaodong^{1,2}, HU Gongyu³, ZHOU Yuanyuan², TU Qile², ZHENG Xiaoyu²

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Nanjing 210098, China;
2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Jingjiang Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Changjiang Water Resources Commission, Jingzhou 434002, China)

Abstract: To fit the irregular boundaries of the Wuli Lake, quadrilateral mesh fitting has been used and a two-dimensional flux vector splitting (FVS) scheme flow-pollutant coupled model has been established, which was veriflicated after then. By using this model, the dynamic process of the impact of designed storm runoff on the water quality of Wuli Lake was simulated, the COD_{Mn}, NH₃-N, TP and TN exchange fluxes at Baojie bridge section were analyzed. The result showed that in the designed typical storm conditions, the Maligang River got large flow of water which had a great impact on the water quality of West Wuli Lake. After 3-day designed storm occurred, runoff sewage began to affect the West Wuli Lake, and the concentration reached the peak after the fourth day, which changed the water quality from class Ⅲ to class Ⅳ in some lake district, but the duration is short, which then decreases rapidly.

Key words: storm runoff; Wuli Lake; two-dimensional flow-pollutant coupled model; quadrilateral mesh; COD_{Mn}

五里湖位于江苏省无锡市境内,是太湖北部的一个内湖,为典型的平原浅水湖泊,湖泊东西长约 6 km,南北宽 0.3~1.5 km,平均水深约 1.8 m,面积约为 5.4 km²,沿线支流众多,主要有骂蠡港、梁塘河、梁溪河、长广溪等河道(图 1)。近年来,太湖富营养化现象日趋严重,尤其是五里湖,成为太湖流域水质

最差的水域, COD_{Mn}、TP、TN 等水质指标均为劣 V 类,藻类频繁暴发。加之五里湖水体流动缓慢、稀释自净能力差,湖体面积小、流程短;同时清淤后湖底地形比较平坦,五里湖流态相对单一,很容易受到进出湖吞吐流的影响,造成五里湖水环境严重恶化^[1]。

近年来,我国对五里湖和大太湖的水动力和水

基金项目:国家自然科学基金(51479064,51379060)

作者简介:刘晓东(1972—),男,副教授,博士,主要从事环境与生态水力学、环境模拟等研究。E-mail: lxd54321@163.com

通信作者:涂琦乐。E-mail: 15295527223@163.com

• 77 •



图1 五里湖区域

质数值模拟陆续开展了不少研究工作。例如,中国科学院南京地理与湖泊研究所重点研究了梅梁湖泵站不同调水流量和不同流出方式下五里湖水环境的变化^[2];田向荣等^[3]以改善梅梁湖、五里湖水环境为目标,重点分析了调水的敏感影响因子对梅梁湖、五里湖水环境改善效果的影响;丁玲等^[4]建立了五里湖二维水流水质耦合模型,并对模型参数进行率定,应用该模型模拟五里湖在不同计算工况下的 COD_{Mn} 浓度,分析调贡湖水入五里湖时五里湖水质的改善状况。骆辉煌^[5]研究了平面二维有限元水动力学模型 RMA2 和 RMA4 在五里湖调水数值模拟中主要参数的敏感性,提出通过集中调水和维持性调水相结合的方式改善五里湖水质的优化调水方案。

上述研究基本上都是针对常规水文条件下五里湖的水质状况,未考虑暴雨等极端水文情况下的影响。本文采用基于四边形网格的二维水流水质耦合模型模拟暴雨径流对五里湖水水质影响的动态过程,分析了宝界桥断面的交换通量。

1 平面二维通量向量分裂(FVS)格式水量水质耦合模型的构建

1.1 基本方程

二维水流水质模型基本方程组^[6-7]的守恒形式可表达为

$$\begin{cases} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial f(q)}{\partial x} + \frac{\partial g(q)}{\partial y} = b(q) \\ q = [h, hu, hv, hC]^T \\ f(q) = [hu, hu^2 + gh^2/2, huv, huC]^T \\ g(q) = [hv, huv, hv^2 + gh^2/2, hvC]^T \\ b(q) = [b_1, b_2, b_3, b_4]^T \end{cases} \quad (1)$$

其中, $b_1=0$, $b_2=gh(S_{0x}-S_{fx})$, $b_3=bh(S_{0y}-S_{fy})$, $b_4=\nabla \cdot (D_i \nabla(hC)) - K \cdot hC$
式中: x, y, t 分别为空间及时间坐标系; h 为水深; g

为重力加速度; u 和 v 分别为 x 和 y 向沿水深积分平均流速分量; C 为污染物沿水深积分的垂线平均浓度; q 为守恒物理量; $f(q)$ 为 x 向通量; $g(q)$ 为 y 向通量; $b(q)$ 为源(汇)项; S_{0x} 和 S_{fx} 分别为 x 向的水底底坡和摩阻坡度; S_{0y} 和 S_{fy} 分别为 y 向的水底底坡和摩阻坡度; D_i 为水平不同方向上的混合系数; K 为降解系数; $\nabla \cdot \nabla$ 为 Laplace 算子。

1.2 边界条件

1.2.1 入流边界

对于入流边界 Γ_0 , 须给定水位、流速及污染物浓度随时间的变化值:

$$\begin{cases} \xi(x, y, t) | \Gamma_0 = \xi_i(t) \\ u(x, y, t) | \Gamma_0 = u_i(t) \\ v(x, y, t) | \Gamma_0 = v_i(t) \\ C(x, y, t) | \Gamma_0 = C_0(t) \end{cases}$$

1.2.2 出流边界

采用自由出流边界, 即:

$$\frac{\partial u}{\partial s} = \frac{\partial v}{\partial s} = \frac{\partial \xi}{\partial s} = \frac{\partial C}{\partial s} \quad (s \text{ 为流线方向})$$

1.2.3 固壁边界

在湖岸等固壁边界采用不可入条件, 即 $v_n = 0$ (η 为边界法线方向)。

1.3 基本方程的有限体积法离散

对于任意单元 Ω , 其边界为 $\partial\Omega$, 通过对方程(1)积分并利用散度定理可得到有限体积法的基本方程:

$$\iint_{\Omega} q_t d\omega = - \int_{\partial\Omega} F(q) \cdot n dL + \iint_{\Omega} b(q) d\omega \quad (2)$$

式中: n 为单元边界 $\partial\Omega$ 的外法向单位向量; $d\omega$ 和 dL 分别为面积分和线积分微元; $F(q) \cdot n$ 为法向数值通量, $F(q) = (f(q), g(q))^T$ 。

采用一阶精度离散和 f, q 具有的旋转不变性, 得到式(2)的等价公式:

$$A \frac{\Delta q}{\Delta t} = - \sum_{j=1}^m T(\Phi)^{-1} f(\bar{q}) L^j + b^*(q) \quad (3)$$

其中 $b^*(q) = (Ab_1, Ab_2, Ab_3, \sum D_i(\nabla hC) L - AKhC)$
式中: $T(\Phi)$ 为坐标轴旋转角度 Φ 的变换矩阵; m 为单元边总数; L^j 为单元边 j 的长度; A 为单元面积。

在单元每一边两侧的 q 值不同, 问题归结为如何确定法向通量 $f(\bar{q})$, 这可通过解局部一维黎曼问题求得^[6]。

2 模型的检验

2.1 网格划分

为了更好地拟合复杂的湖泊边界, 采用四边形无结构网格, 网格尺寸变幅范围约 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \sim 40 \text{ m}$

×40 m,共有网格单元 8 000 多个,节点 9 000 余个。
计算网格如图 2。

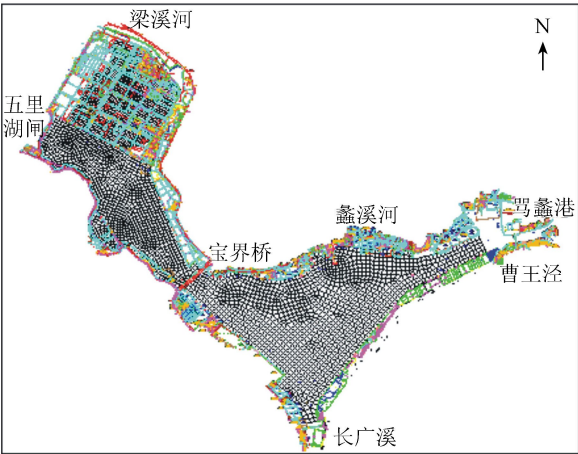


图 2 计算网格

2.2 模型验证

采用 2003 年 4 月资料在实际入流量和平均风速条件下进行模拟计算,糙率系数 0.018 ~ 0.022。模拟流场如图 3,在各监测点位上的流速在 0.015 ~ 0.045 m/s 之间,计算值与监测结果对比见图 4,与监测结果基本吻合,平均误差为 15.2%。

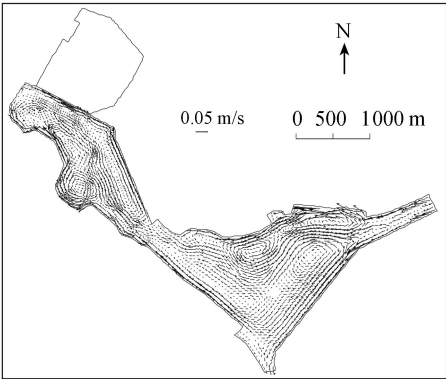


图 3 验证流场

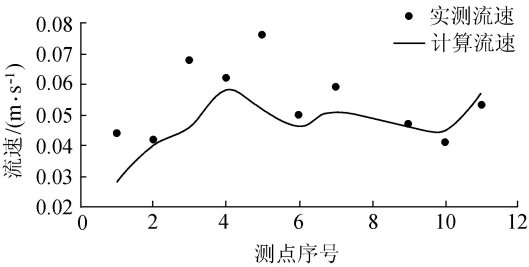


图4 计算流速与实测流速对比

3 暴雨径流影响模拟分析

3.1 设计暴雨径流

参照 2004 年入湖河流的实测水文资料,设计典型暴雨径流过程如图 5。

3.2 计算条件

计算的水质指标为 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 和 TN。

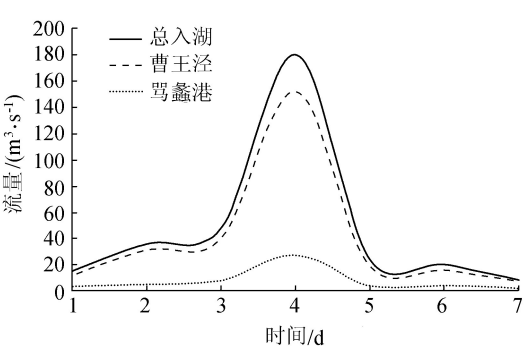


图5 设计暴雨径流过程线

五里湖水质取汛期平均质量浓度,入湖河流骂蠡港取汛期平均质量浓度,各水质指标设计质量浓度见表 1。风速取暴雨期间风速 12 m/s,风向取主导风向 ESE。

表 1 各水质指标的设计质量浓度 mg/L

湖区	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$	$\rho(\text{TP})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	$\rho(\text{TN})$
五里湖	5.69	0.12	1.65	4.27
骂蠡港	8.01	0.17	4.83	6.53

3.3 计算结果分析

五里湖暴雨期模拟典型流场见图 6。

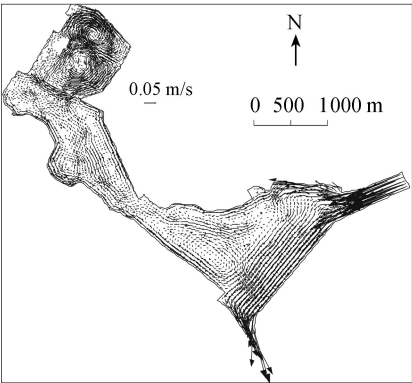


图 6 五里湖暴雨期模拟典型流场

3.3.1 COD_{Mn} 扩散过程

在暴雨发生后 1~7 d 内五里湖 COD_{Mn} 浓度变化等值线见图 7。进水 1 d 后, 进入的污水只局限在入水口附近的较小范围内(图 7(a))。进水 3 d 后, 污水的前锋越过宝界桥, 西五里湖开始受到影响(图 7(c))。进水 4 d 后, 污染物质大规模穿过宝界桥, 进入西五里湖, 部分湖区水质由Ⅲ类变为Ⅳ类。进水 5 d 后, 五里湖水质浓度分布趋于稳定。西五里湖 COD_{Mn} 的质量浓度有所升高, 宝界桥附近的质量浓度升高了约 0.8 mg/L (14%)。

宝界桥断面是东五里湖与西五里湖的交界断面, COD_{Mn}动态交换过程情况如表 2。由表 2 可见, 随着污染锋面的通过, 宝界桥断面上的浓度分布趋向均匀, 第 7 天的净进入通量仅 0.018 t/d。暴雨期间的最大净进入通量达到 1.539 t/d, 大大高于西五

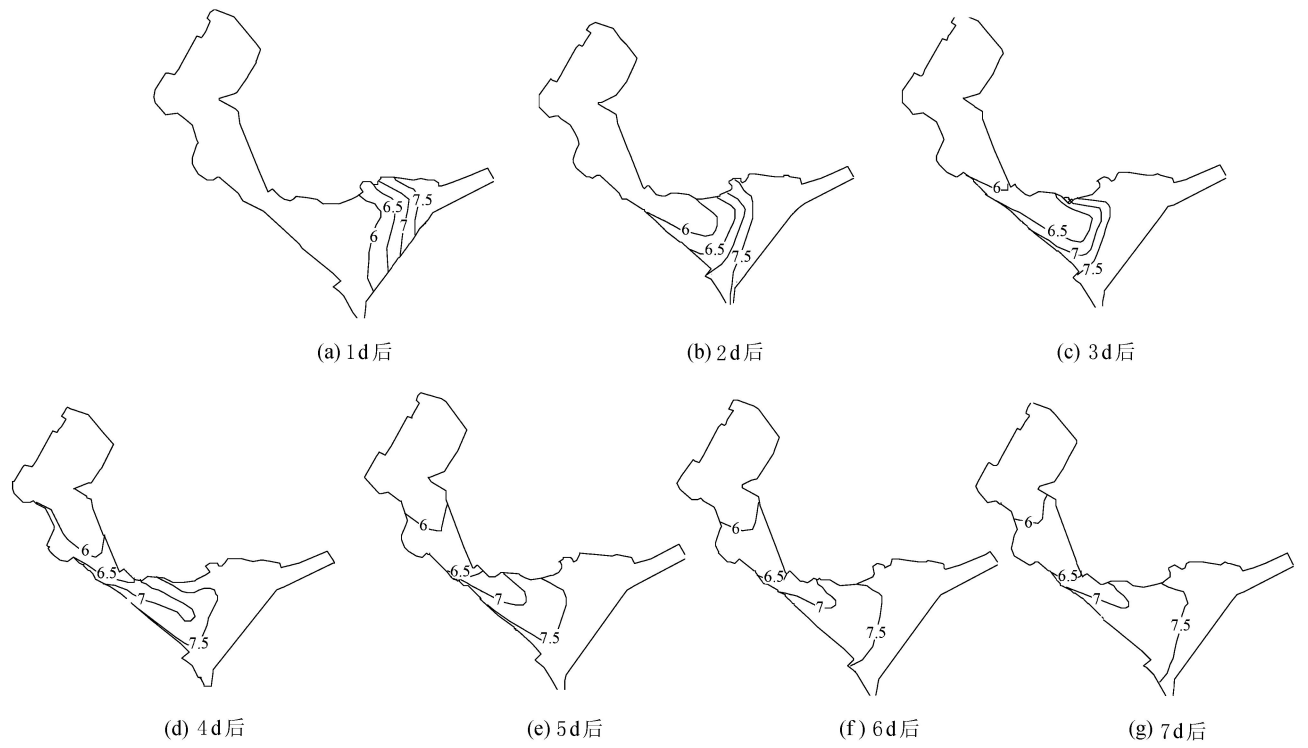


图7 五里湖暴雨1~7 d后 COD_{Mn}质量浓度变化等值线(单位:mg/L)

里湖的自净能力。

表2 宝界桥断面 COD_{Mn} 动态交换过程情况

时间	双向通量/(t·d ⁻¹)		进入西五里湖	
	由西入东	由东入西	净通量/(t·d ⁻¹)	累计增量/t
2 d 后	0.052	0.156	0.104	0.042
3 d 后	1.128	2.021	0.893	0.370
4 d 后	0.201	1.741	1.539	1.496
5 d 后	0.441	0.515	0.074	1.604
6 d 后	0.473	0.511	0.038	1.652
7 d 后	0.478	0.497	0.018	1.668

暴雨径流对湖泊水质的影响有明显的区域性,由图7可见,随着时间的推移,污染物浓度分布的范围开始发生变化。暴雨径流对湖泊水质产生一定影响,暴雨期间,骂蠡港进水口附近出现明显污染扩散带,在风生环流与扩散的共同作用下向湖心区迁移。随着污染物浓度的降低和湖泊水体的稀释、污染物浓度的降解和扩散,河口附近水质开始恢复。

3.3.2 TP、NH₃-N、TN 扩散过程

NH₃-N、TP、TN 的质量浓度等值线图变化特性与 COD_{Mn} 相似,这里不再给出。宝界桥断面 TP、NH₃-N、TN 的动态交换过程情况见表3。

由表3可见,自骂蠡港等河流进来的暴雨径流对西五里湖水水质影响很大,污染物净通量在第4天影响达到峰值,此后迅速减小。

4 结 论

- a. 构建了基于四边形网格的平面二维通量向量分裂(FVS)格式水量水质耦合模型,较好地拟合五里湖曲折不规则边界。
- b. 暴雨径流影响模拟结果表明:暴雨发生1 d后,影响只局限在入水口附近的较小范围内,3 d后污水的前锋越过宝界桥,西五里湖开始受到影响,4 d后污染物质大规模穿过宝界桥,进入西五里湖,部分湖区水质由Ⅲ类变为Ⅳ类,5 d后五里湖水水质浓度

表3 宝界桥断面 TP、NH₃-N、TN 动态交换过程情况

时间	TP				NH ₃ -N				TN			
	双向通量/(kg·d ⁻¹)		进入西五里湖		双向通量/(kg·d ⁻¹)		进入西五里湖		双向通量/(kg·d ⁻¹)		进入西五里湖	
	由西入东	由东入西	净通量/(kg·d ⁻¹)	累计增量/kg	由西入东	由东入西	净通量/(kg·d ⁻¹)	累计增量/kg	由西入东	由东入西	净通量/(kg·d ⁻¹)	累计增量/kg
2 d 后	1.111	3.353	2.242	0.913	0.071	0.213	0.143	0.058	0.050	0.151	0.101	0.041
3 d 后	24.250	43.448	19.198	7.952	1.542	2.763	1.221	0.506	1.095	1.962	0.867	0.359
4 d 后	4.324	37.422	33.098	32.155	0.275	2.380	2.105	2.045	0.195	1.690	1.495	1.452
5 d 后	9.479	11.075	1.596	34.482	0.603	0.704	0.101	2.193	0.428	0.500	0.072	1.557
6 d 后	10.162	10.981	0.819	35.520	0.646	0.698	0.052	2.259	0.459	0.496	0.037	1.604
7 d 后	10.280	10.676	0.397	35.863	0.654	0.679	0.025	2.281	0.464	0.482	0.018	1.619

分布趋于稳定。

c. 典型暴雨条件下,宝界桥断面污染物通量在第四天达到峰值,此后迅速减小。

参考文献:

[1] 柏祥,陈开宁,黄蔚,等. 五里湖水质现状与变化趋势[J]. 水资源保护,2010,26(5):6-10. (BAI Xiang, CHEN Kaining,HUANG Wei, et al. Current status and variation tendency of water quality in Wuli Lake, Jiangsu Province [J]. Water Resources Protection,2010,26(5):6-10. (in Chinese))

[2] 秦伯强,胡维平,陈伟民,等. 太湖水环境演化过程与机理[M]. 北京:科学出版社,2004.

[3] 田向荣,马巍,廖文根,等. 调水对梅梁湖、五里湖水环境影响研究[J]. 人民长江,2007,38(2):69-72. (TIAN Xiangrong,MA Wei,LIAO Wengen, et al. Effect of water diversion on water environment of Meilianghu lake and Wulihu lake [J]. Yangtze River,2007,38(2):69-72. (in Chinese))

[4] 丁玲,逢勇,赵棣华,等. 调水工程对五里湖水环境影响

(上接第46页)

笔者仅对流域综合规划环境影响评价中指标体系进行初步探讨,但是该研究过程尚未形成完整的理论流程,后续参考中可变性较大,因此需要进一步的理论研究和阐述;环境影响因子的识别标准未详细叙述,因此环境影响因子的识别需进一步规范化和可量化。

参考文献:

[1] RIKI T, MARIA R P. The practice of strategic environmental assessment [M]. London: Earthscan Publication Ltd,1996.

[2] HEDO D,BINA O. Strategic environmental assessment of hydrological and irrigation plans in Castilia y Leon, Spain [J]. Environmental Impact Assessment Review,1999,19:259-273.

[3] ARCE R, GULLÓN N. The application of strategic environmental assessment to sustainability assessment of infrastructure development [J]. Environmental Impact Assessment Review,2000,20:393-402.

[4] RAUSCHMAYER F, RISSE N. A framework for the selection of participatory approaches for SEA [J]. Envionmental Impact Assessment Review,2005,25:650-666.

[5] 朱坦. 战略环境评价[M]. 天津:南开大学出版社,2005.

[6] 靳小兵. 关于规划环评指标体系建设的建议[J]. 成都

分析[J]. 河海大学学报:自然科学版,2003,31(4):366-369. (DING Ling,PANG Yong,ZHAO Dihua, et al. Effect of water diversion project on water environment of Wulihu Lake [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,2003,31(4):366-369. (in Chinese))

[5] 骆辉煌. RMA2 和 RMA4 在五里湖调水模拟中的开发应用研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2005.

[6] 赵棣华,姚琪,蒋艳,等. 通量向量分裂格式的二维水流水质模拟[J]. 水科学进展,2002,13(6):701-706. (ZHAO Dihua,YAO Qi,JIANG Yan, et al. FVS scheme in2-D depth-averaged flow pollutants modeling [J]. Advances in Water Science,2002,13(6):701-706. (in Chinese))

[7] 赵棣华,戚晨,庾维德,等. 平面二维水流-水质有限体积法及黎曼近似解模型[J]. 水科学进展,2000,11(4):368-373. (ZHAO Dihua,QI Chen,YU Weide, et al. Finite volume method and riemann solver for depth-averaged two-dimensional flow-pollutants coupled model[J]. Advances in Water Science,2000,11(4):368-373. (in Chinese))

(收稿日期:2014-12-10 编辑:徐娟)

信息工程学院学报,2003,18(3):303-305. (JIN Xiaobing. Suggestion on index system construction for programming environmental impact assessment [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology,2003,18(3):303-305. (in Chinese))

[7] 刘大维. 区域开发环境影响评价中的环境影响识别[J]. 环境保护科学,2007,33(4):97-98. (LIU Dawei, Environmental impact identification in regional development environmental impact assessment [J]. Environmental Protection Science,2007,33(4):97-98. (in Chinese))

[8] 贺楠. 规划环评环境影响界定及评价指标确立的方法研究[D]. 北京:北京化工大学,2008.

[9] 吴飏. 区域规划环境影响评价的评价指标体系及应用[D]. 重庆:重庆大学,2004.

[10] 邹家祥,李志军,刘金珍. 流域规划环境影响评价及对策措施[J]. 水资源保护,2011,27(5):7-12. (ZOU Jiaxiang,LI Zhijun,LIU Jinzhen. Environmental impact assessment of river basin planning and countermeasure [J]. Water Resources Protection,2011,27(5):7-12. (in Chinese))

[11] 林逢春,陆雍森. 中国环境影响评价体系评估研究[J]. 环境科学研究,1999,12(2):8-11. (LIN Fengchun,LU Yongsen. Evaluation of the environmental impact assessment system in China[J]. Research of Enviromental Sciences,1999,12(2):8-11. (in Chinese))

(收稿日期:2015-01-03 编辑:徐娟)