

城市合流排水管道水-沉积物界面污染研究进展

李海燕¹, 苏豪儒¹, 黄 延²

(1. 北京建筑工程学院城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室, 北京 100044;
2. 北京市环境保护监测中心, 北京 100048)

摘要:城市合流排水管道中水-沉积物界面物质在雨水径流的冲刷作用下会将其中的污染物重新释放排入受纳水体,成为水体面源污染的重要来源。综述国内外对水-沉积物界面物质的组成、污染特性及模型模拟方面的研究进展。将水-沉积物界面污染物分成有机层、近床固体层和流动泥沙层,其中有机层和近床固体层有较高的有机物含量和含水量,流动泥沙层含有较多的挥发性物质。研究表明:水-沉积物界面物质抗侵蚀性微弱,含水量是影响其剪应力的最重要因素;已有水-沉积物界面的模型模拟研究主要集中在利用模型预测近床固体对初期冲刷的污染贡献、有机层的污染物侵蚀量和近床固体层的生物降解量等。认为今后应加强对水-沉积物界面污染特性的研究,建立适合本地的水-沉积物界面污染贡献模型。

关键词:水-沉积物界面;面源污染;城市排水管道;管道沉积物

中图分类号:X523 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)03-0084-05

Research progress on the pollutant from the water-sediment interface in urban combined drainage pipes//LI Haiyan¹, SU Haoru¹, HUANG Yan² (1. Ministry of Education Key Laboratory of Urban Storm Water System and Water Environment, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Municipal Environmental Monitoring Centre, Beijing 100048, China)

Abstract: Pollutant from sediment in the combined drainage pipes has been a main source of the non-point source pollution for the receiving water. Hence, it is of great importance to study the action of the pollutant from the water-sediment interface. The composition of the water-sediment interface, the pollutant characteristics, and the simulation model of the interface of the water-sediment were reviewed. The water-sediment interface pollutant can be divided into the organic layer, the near-bed solid layer and the fluid sediment layer. Both the organic layer and the near-bed solid layer have relatively high organic content and high water content, while the fluid sediment layer has high concentration of volatile matter. It can be concluded that the erosion resistance of the water-sediment interface pollutant is weak, and the water content is the main factor which affects the shear stress of the water-sediment interface. Besides, the existing research on model simulation of the water-sediment interface mainly focuses on predicting the contribution of the near-bed solid on the initial flushing, the pollutant erosion of the organic layer, and the biological degradation of the near-bed solid layer. It is advised that the pollutant characteristics of the water-sediment interface needs further study, and the local water-sediment interface pollution contribution model needs to be established.

Key words: water-sediment interface; non-point source pollution; urban drainage pipe; pipe sediment

城市排水管道承担城市生活污水、工业废水和雨水的收集及输送任务,是城市排水系统的重要组成部分。我国的排水管道普遍存在管道腐蚀、沉积物累积的现象。对北京城区部分排水管道的调查^[1]发现,所研究的排水管道中有 60% 存在沉积物,有 15% 沉积物累积量较大。沉积物的存在不仅降低了管道的排水能力,在降雨径流的冲刷作用下

还会将其中赋存的大量污染物重新释放排入受纳水体,污染水体环境。有研究^[2-3]表明,雨季时释放到水体的铜、多环芳烃和总固体悬浮物的主要来源是管道沉积物,服务区雨水管道沉积物中常规污染物含量较高,雨水冲刷管道容易对附近水体造成污染。在合流制排水系统中,管道沉积物累积引发的污染问题尤为突出,是合流制溢流污染负荷的重要组成,

基金项目:国家自然科学基金(50808009);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2010ZX07320-002);北京市城市雨水系统与水环境生态技术创新团队项目(PHR201106124)

作者简介:李海燕(1975—),女,河北唐山人,副教授,主要从事城市雨水利用与径流污染控制研究。E-mail:lihaiyan@bucea.edu.cn

会对受纳水体造成威胁^[4]。管道中水-沉积物界面污染物的释放是管道出流对城市水体污染的重要来源^[5],系统研究其组成及污染特性对于控制来自管道沉积物的污染具有重要意义。

国外自 20 世纪中后期即开始了相关研究,并积累了大量研究成果,而国内的研究多数集中在合流制溢流污染的水质水量分析及污染控制措施方面,未关注到合流制溢流污染的主要来源——水-沉积物界面的污染。笔者综述了国内外对城市排水管道水-沉积物界面污染的研究进展,为进一步控制合流制溢流污染提供借鉴。

1 水-沉积物界面物质的组成

不同学者在不同场地条件下采用不同的方法对水-沉积物界面进行了研究,得出的结论不尽相同,并以不同的专业术语定义了水-沉积物界面物质的组成。综合各自特点,可将水-沉积物界面污染物按组成为有机层、近床固体层和流动泥沙层。

1.1 有机层

根据众多学者的研究,有机层由不同种类的颗粒物组成,呈现不同的理化特征,并且具有良好的生物活性。Skipworth 等^[6]将由橄榄石组成的黏性沉积物在实验室水槽内放置 4 h,然后用水流以不同的流速进行冲刷,结果发现沉积物的顶部存在一有机层。Ahyerre 等^[7]对 Le Marais 实验区排水管网的水-沉积物界面进行了研究,结果显示水-沉积物界面由有机物质和附着在沉积物表面上的纤维物质组成,该层的厚度在 1.5 ~ 7 cm 之间,具有良好的稳定性。研究表明,有机层在旱季时累积形成,在暴雨时非常容易受到侵蚀,由不同的层状结构组成,随着深度的增大矿物质含量增大,抗侵蚀力也增大^[6,8-9]。Oms 等^[10]对巴黎 Saint Gilles 实验区主干道的沉积物有机层进行了研究,并用内窥镜对有机层的形成过程进行观察,结果表明有机层由大的有机颗粒物、纤维物质和小颗粒物质组成,具有多相性;有机层增长到一定厚度后趋于稳定,在受到侵蚀后能在 2 h 内重新生成。

1.2 近床固体层

Arthur^[11]将在沙床附近输移的所有固体定义为近床固体层,并在 Dundee 的 3 个实验区研究了该层的挥发性物质和有机物质污染负荷。研究结果显示,不同场地样品中两类污染物质含量差异极大,坡度和流速最高的管道中,沉积物的污染物含量最低。其他相关研究成果表明,在 Marseille 实验区排水管道主干线上采集的沉积物样品与在 Dundee 的 Dens Bra 实验区管道采集的样品具有几乎相等的挥发性

物质含量^[12]。McGregor^[13]研究发现近床固体层极易被侵蚀,其中赋存的污染物大部分溶入污水或者处于悬浮状态,在合流制溢流污染时被释放出来。

1.3 流动泥沙层

多数研究发现,水-沉积物界面的部分区域含有高浓度的固体,研究区域对象不同,浓度值不同,Ashley 等^[14-15]将其定义为流动泥沙层。然而,对于此高浓度固体区域的形成原因,不同的学者持有不同的观点。Verbanck^[16]认为在沙床附近有一移动层,并提出了使用悬浮输移模型预测旱季流时水-沉积物界面固体的输移量。Arthur^[11]认为高浓度固体区域是由采样时对沙床附近的固体扰动而造成的。Ahyerre 等^[7]观察了管道同一截面上的悬浮固体浓度剖面图,结果发现高浓度固体来源于底部稳定的有机层而不是上覆水流。

2 水-沉积物界面物质的污染特性

对欧洲管道沉积物的研究^[5]发现,水-沉积物界面物质是合流制溢流污染物的主要来源,其污染潜力主要受其自身理化性质的影响,如污染物的赋存量、抗侵蚀能力等。因此,对其悬浮固体含量、挥发性固体含量、COD 及其临界剪应力等特性进行了详细研究。

2.1 水-沉积物界面物质的理化性质

暴雨冲刷时,有机层释放大量的污染物质,是沉积物冲刷释放悬浮颗粒物、挥发性固体、COD 和 BOD₅ 的主要污染源^[17]。Le Marais 实验区管道中的有机层 COD 和 BOD₅ 含量较高,但低于上覆水中的 COD 和 BOD₅;挥发性物质的含量则与上覆水中的相似^[9]。近床固体层沉积物样品的理化性质有着相似之处:具有较高的有机物含量和含水量,其挥发性物质含量与旱季流时污水中的挥发性物质含量相似;与管道中粗糙的沉积物颗粒相比,近床固体层的有机物含量更高^[12]。但是,不同采样点沉积物近床固体层样品的有机物含量也存在很大差异,原因可归纳为以下几点:水流的流速和剪切力越高,颗粒物中的有机物含量越低;与主干道相连的支干道越多,沿沙床输移的固体中有机物含量越高;管道所在的位置地势越低,小粒径颗粒物中有机物含量越高。流动泥沙层具有较高的挥发性物质含量,这可能是由于厨房残余、人类排泄物等颗粒物粒径较大不能随着水流输移而是在水中旋转或悬浮造成的^[5]。

2.2 水-沉积物界面的抗侵蚀性

水-沉积物界面的抗侵蚀性可以通过剪应力来表示,其强弱直接决定沉积物径流冲刷时的污染释放强度。水-沉积物界面的抗侵蚀性非常微弱,其临

界剪应力在 0.5 ~ 1.8 N/m 之间^[12,16,18-20]。有机物的含量是影响水-沉积物界面抗侵蚀性的一个重要因素, Wotherspoon^[21] 和 Arthur^[11] 做了进一步的研究, 发现样品有机物含量增加, 剪应力降低。Desutter^[22] 比较了沉积物含水量和有机物含量对剪应力的影响, 最后得出以下结论: 含水量是影响剪应力的最重要因素, 其次是有机物含量。此外, 小颗粒物质含量、沙床坡度^[23] 和管道横截面形状^[24] 也是影响沉积床剪应力的重要因素, 并且沉积物的剪应力随沉积床深度的增加而增加^[25]。

3 水-沉积物界面的模拟研究

了解水-沉积物界面对排水管道出流的污染贡献对保护受纳水体有极其重要的意义。国外从 20 世纪中后期就开始了对水-沉积物界面污染贡献的研究, 并逐步建立了侵蚀模型、污染贡献预测模型等对水-沉积物界面污染进行模拟。

3.1 近床固体对初期冲刷的污染贡献预测

近床固体对初期冲刷的污染贡献包括无机颗粒物和有机物两部分。Arthur^[11] 分别采用修正的 Perrusquia 和 Nalluri 层载公式(式(1))^[26] 和经验公式(式(2))^[27] 预测近床固体的无机颗粒物和有机物对初期冲刷的污染贡献。众多学者认为采用修正的 Perrusquia 和 Nalluri 层载公式预测近床固体无机负荷对初期冲刷的贡献是最合理的^[12]。但是 Verbanck^[28] 认为, 近床固体不一定会以底移质的形式进行移动, 采用式(1)预测近床固体无机负荷对初期冲刷的贡献的方法并不精确, 因此, 提出了两层模型, 该模型将冲刷时的扰动区域分为核心层和外缘层, 且假设两层均以悬移质的形式进行移动, 其中核心层即近床固体层在水流底层移动, 外缘层在水流上层移动。Ashley 等^[19] 得出了在沙床底层以悬移质形式移动的固体质量浓度的计算公式(式(3)), 由此可以计算出初期冲刷时近床固体层在竖直方向上的无机负荷污染贡献, 参考水位 a^* 的值通过旱季时用小管采样器在管道内采集的悬浮固体进行校正, 得出参考值为 0.3 m^[12]。有人认为此方法得出的悬浮固体的浓度值并不精确, 因为采样器管径很小, 许多本应被采集到的固体颗粒并未被采集, 所以, 采用此方法计算得出的近床固体的浓度值比实际值偏低^[16,29]。

$$\Phi_b = 3.7552 \times 10^{-3} \Theta_g^{2.2} D_*^{0.38} Z^{-1.11} \left(\frac{B}{Y} \right)^{0.78} \quad (1)$$

式中: Φ_b 为输移速率, g/s; Θ_g 为移动的颗粒物数量; D_* 为无因次粒径; Z 为相对粒度; B 为冲积床的宽度, m; Y 为流动深度, m。

$$C_v = -105.73 + 2.55 \times 10^{-3} \frac{I_r T_{SSS}}{D_r} + 0.2023 \frac{y_0}{y_{max}} + 47.808 \frac{\tau_0}{\tau_b} + 120.45 \frac{\rho_d}{\rho_w} \quad (2)$$

式中: C_v 为沉积物的质量浓度, mg/L; I_r 为降雨强度, mm/h; T_{SSS} 为最近一次降雨开始时与测量时的时间间隔, h; D_r 为总的降雨深度, mm; y_0/y_{max} 为平均流动深度与早流平均最大深度之比; τ_0/τ_b 为平均剪应力(通过平均流速计算得出)与沉积床的剪应力(通过沉积床上 50 mm 处的流速计算得出)之比; ρ_d/ρ_w 为近床固体层的干密度与水的密度之比, $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ 。

$$\frac{C_y}{C_a^*} = \left(\frac{y}{a^*} \right)^{-\eta} \quad (3)$$

式中: C_y 为水深为 y 时的悬移质固体质量浓度, mg/L; a^* 为参考水位, m; C_a^* 为参考质量浓度, mg/L; η 为沉降系数。

3.2 有机层污染物侵蚀量预测

Ahyerre 等^[9] 通过研究旱季时有机层污染物(包括悬浮颗粒物、挥发性固体、COD 和 BOD₅) 的累积量及 30 场降雨事件对有机层的侵蚀特性, 得出了降雨事件特征参数与有机层污染物侵蚀量的关系, 计算公式见式(4) ~ (7)。

$$\rho(SS) = 482.07 Q_{max} + 29.65 D_{WP} + 2.09 I_{max} - 11.10 I_{mean} + 29.88 \quad (4)$$

$$\rho(VS) = 290.48 Q_{max} + 17.62 D_{WP} + 0.91 I_{max} - 6.28 I_{mean} + 45.4 \quad (5)$$

$$\rho(COD) = 167.17 Q_{max} + 32.39 D_{WP} + 2.54 I_{max} - 10.52 I_{mean} + 188.11 \quad (6)$$

$$\rho(BOD_5) = 20.26 H_{tot} + 14.83 D_{WP} - 3.51 \quad (7)$$

式中: $\rho(SS)$ 为悬浮颗粒物质量浓度, mg/L; $\rho(VS)$ 为挥发性固体质量浓度, mg/L; $\rho(COD)$ 为化学需氧量的质量浓度, mg/L; $\rho(BOD_5)$ 为生化需氧量的质量浓度, mg/L; Q_{max} 为最大出口流量, m³/s; D_{WP} 为降雨前的干旱时间, d; I_{max} 为最大降雨强度, mm/h; I_{mean} 为平均降雨强度, mm/h; H_{tot} 为降雨总深度, mm。

3.3 近床固体层的生物降解量预测

为了解近床固体层对合流制溢流污染的影响, Ristenpart 等^[15,18-19] 研究了近床固体层 BOD₅、COD 的污染负荷, 也有学者研究了近床固体层的重金属污染负荷。但是, 这些常规指标并不足以解释近床固体层对合流制溢流的污染作用, 近床固体层的可生物降解特性直接影响其污染释放作用, 生物降解量可更加清晰地反映近床固体层的污染作用。

Vollertsen 等^[30] 采用模型模拟的方法测定了近床固体层的氧气吸收率来分析近床固体层的生物降

解量。Ashley 等^[31]研究发现,在初期被暴雨冲刷的近床固体层有较高的生物降解性,而在晚期被冲刷的近床固体层的生物降解性较低。

4 结 语

国外对城市排水管道水-沉积物界面的研究起步较早,主要集中在对其物质组成、污染特性以及模型模拟等方面的研究。尽管这些研究取得了一定的成果,但不同学者的研究成果也存在着争议与分歧。关于水-沉积物界面物质的组成,需要在更多的区域进行更多的试验对以前的研究成果进行验证及补充。水-沉积物界面物质的污染特性受时间、空间、降雨特点等因素的影响,应进一步研究其变化规律,为制定相应的污染控制措施提供依据。在水-沉积物界面的模型模拟研究中,沉积物的输移形式并不确定,而是基于假设得出预测模型,研究结果与实际情况存在较大偏差。

国内对城市排水管道沉积物污染的研究刚刚起步,主要集中在沉积物的来源、性质、污染物赋存状况等方面的研究。我国许多城市尤其老城区还有较大比例的合流制,许多新建的分流制管道系统也存在严重的雨污混接现象,而水-沉积物界面是合流制溢流污染的主要来源,因此,应加强对水-沉积物界面物质污染特性的研究,与国内管道系统的实际情况相结合,建立适合本地的水-沉积物界面污染贡献模型,从而制定相应的污染防治措施。

参考文献:

[1] 李茂英,李海燕. 城市排水管道中沉积物及其污染研究进展[J]. 给水排水, 2008, 34 (增刊 1): 88-92. (Li Maoying, Li Haiyan. The study progress on the sewer sediment and its pollution [J]. Water & Wastewater Engineering, 2008, 34(Sup1): 88-92. (in Chinese))

[2] GASPERI J, GROMAIRE M C, KAFI M, et al. Contributions of wastewater, runoff and sewer deposit erosion to wet weather pollutant loads in combined sewer systems[J]. Water Research, 2010, 44 : 5875-5886.

[3] 杨云安,管运涛,许光明,等. 老城区不同功能区排水管道沉积物性质研究[J]. 给水排水, 2011, 37 (9): 159-162. (YANG Yun' an, GUAN Yuntao, XU Guangming, et al. The study on properties of the sewer sediment in different functional zone in old city area [J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37 (9): 159-162. (in Chinese))

[4] SAKRABANI R, VOLLERTSEN J, ASHLEY R M, et al. Biodegradability of organic matter associated with sewer sediments during first flush [J]. Science of the Total Environment, 2009, 407 (8): 2989-2995.

[5] CHEBBO G, ASHLEY R, GROMAIRE M C. The nature and pollutant role of solids at the water-sediment interface in combined sewer networks [J]. Water Science and Technology, 2005, 47 (3): 1-10.

[6] SKIPWORTH P, TAIT S, SAUL P. Erosion of sediment beds in sewers; model development [J]. J of Hydraulic Division, ASCE, 1999, 125 (6): 566-573.

[7] AHYERRE M, CHEBBO G, SAAD M. Sources and erosion of organic solids in a combined sewer [J]. Urban Water, 2000, 2 (4): 305-315.

[8] AHYERRE M, OMS C, CHEBBO G. The erosion of organic solids in combined sewers [J]. Wat Sci Tech, 2001, 43 (5): 95-102.

[9] AHYERRE M, CHEBBO G, SAAD M. Nature and dynamic of the water-sediment interface in combined sewer trunks [J]. Journal of Environmental Engineering, 2001, 127 (3): 233-239.

[10] OMS C, GROMAIRE M C, CHEBBO G. Nature and dynamic behavior of organic surface layer deposits during dry weather [J]. Wat Sci Tech, 2005, 52 (3): 103-110.

[11] ARTHUR S. Near bed solid transport in a combined sewers [D]. Dundee: University of Abertay Dundee, 1996.

[12] OMS C, SAKRABANI R, MCILHATTON T, et al. Near bed solids in combined sewers [C] // STRECKER E W, HUBER W C. Global Solutions for Urban Drainage: Ninth International Conference on Urban Drainage (9ICUD). [S. l.] : American Society of Civil Engineers, 2002.

[13] MCGREGOR I. Release of characteristic pollutants from combined sewer sediments [D]. Dundee: University of Abertay Dundee, 1993.

[14] ASHLEY R M, ARTHUR S, COGHLAN B P, et al. Fluid sediment in combined sewers [J]. Wat Sci Tech, 1994, 29 (1/2): 113-123.

[15] RISTENPART E, ASHLEY R M, UHL M. Organic near-bed fluid and particulate transport in combined sewers [J]. Wat Sci Tech, 1995, 31 (7): 61-68.

[16] VERBANCK M A. Capturing and releasing settleable solids-the significance of dense undercurrents in combined sewer flows [J]. Wat Sci Tech, 1995, 31 (7): 85-89.

[17] CHEBBO G, GROMAIRE M C. The experimental urban catchment “Le Marais” in Paris; what lessons can be learned from it? [J]. Journal of Hydrology, 2004, 299: 312-323.

[18] RISTENPART E. Sediment properties and their changes in a sewer [J]. Wat Sci Tech, 1995, 31 (7): 77-83.

[19] ASHLEY R M, VERBANCK M A. Mechanics of sewer sediment erosion and transport [J]. J Hydr Res, 1996, 34 (6): 753-770.

[20] RISTENPART E. Solids transport by flushing of combined sewers [J]. Wat Sci Tech, 1998, 37 (1): 171-178.

[21] WOTHERSPOON D J J. The movement of cohesive sediment in a large combined sewer [D]. Dundee:

- University of Abertay Dundee,1994.
- [22] DESUTTER R. Erosion and transport of cohesive sediment mixtures in unsteady flow [D]. Gent: University of Gent, 2000.
- [23] RUSHFORTH P. The erosion and transport of sewer sediment mixtures [D]. Dundee: University of Abertay Dundee,2001.
- [24] MOHAMMADI M. The initiation of sediment motion in fixed bed channels [J]. Iranian Journal of Science & Technology,2005,29(3):365-372.
- [25] TAIT S J,CHEBBO G,SKIPWORTH P J, et al. Modeling in-sewer deposit erosion to predict sewerflow quality[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129(4):316-324.
- [26] PERRUSQUIA G, NALLURI C. Modelling of bed-load transport in pipe channels [C]//Proc Int Conf on the Transport and Sedimentation of Solid Particles. Prague: [s. n.],1995.
- [27] ARTHUR S,ASHLEY R M. Near bed solids transport rate prediction in a combined sewer network [J]. Wat Sci Tech,1997,36(8/9):129-134.
- [28] VERBANCK M A. Computing near-bed solids transport in sewer sand similar sediment-carrying open channel flows [J]. Urban Water,2000,2(4):277-284.
- [29] ARTHUR S,ASHLEY R M. Near bed solids transport and first foul flush in combined sewers [C]//Proceedings of Second International Conference of the Sewer as a Physical, Chemical and Biological Reactor. Aalborg, Denmark:[s. n.],1997.
- [30] VOLLERTSEN J, HVITVED J T. A erobic microbial transformations of resuspended sediments in combined sewers;a conceptual model [J]. Wat Sci Tech,1998,37(1):69-76.
- [31] ASHLEY R M,HVITVED J T,VOLLERTSEN J, et al. In-sewer processes and potential impacts [C]//Proc CIWEM Conference on Latest Developments in CSOs. London:[s. n.],2001.
- (收稿日期:2012-07-27 编辑:骆超)
-
- (上接第 67 页)
- [8] LIU Changming, LIU Xiaoyan. Healthy river and its indication, criteria and standards [J]. Journal of Geographical Sciences,2009,19:3-11.
- [9] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用 [M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- [10] 胡成,苏丹. 综合水质标识指数法在浑河水质评价中的应用[J]. 生态环境学报,2011,20(1):186-192. (HU Cheng, SU Dan. Application of comprehensive water quality identification index in water quality assessment of Hun River [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011,20(1):186-192. (in Chinese))
- [11] 陈洋波,陈俊合,李长兴,等. 基于 DPSIR 模型的深圳市水资源承载能力评价指标体系[J]. 水利学报,2004(7):98-103. (CHEN Yangbo, CHEN Junhe, LI Changxing, et al. Indicators for water resources carrying capacity assessment based on driving forces-pressure-state-impact-response model [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2004(7):98-103. (in Chinese))
- [12] 张继权,伊坤朋,TANI H,等. 基于 DPSIR 的吉林省白山市生态安全评价[J]. 应用生态学报,2011,22(1):189-195. (ZHANG Jiquan, YI Kunpeng, TANI H, et al. Ecological security assessment of Baishan City in Jilin Province based on DPSIR [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2011,22(1):189-195. (in Chinese))
- [13] 朱党生,张建永,廖文根,等. 水工程规划设计关键生态指标体系[J]. 水科学进展,2010,21(4):560-566. (ZHU Dangsheng, ZHANG Jianyong, LIAO Wengen, et al. A key ecological indicator system for water project planning and design [J]. Advances in Water Science, 2010,21(4):560-566. (in Chinese))
- [14] 刘英英,石培基,刘玲,等. 基于 DPSIR 陇南市土地利用规划环境影响评价[J]. 土壤通报,2010,42(4):795-800. (LIU Yingying, SHI Peiji, LIU Ling, et al. Based in DPSIR environmental impact assessment in land use planning of Longnan City [J]. Chinese Journal of Soil Science,2010,42(4):795-800. (in Chinese))
- [15] 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. (CHEN Shouyu. Theory and model of engineering variable fuzzy set :mathematical basis for fuzzy hydrology and water resources [J]. Journal of Dalian University of Technology,2005,45(2):308-312. (in Chinese))
- [16] 李文君,邱林,陈晓楠,等. 基于集对分析与可变模糊集的河流生态健康评价模型[J]. 水利学报,2011,42(7):775-782. (LI Wenjun, QIU Lin, CHEN Xiaonan, et al. Assessment model for river ecology health based on set pair analysis and variable fuzzy set [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(7):775-782. (in Chinese))
- [17] 胡晓雪,杨晓华,酆建强,等. 河流健康系统评价的集对分析模型[J]. 系统工程理论与实践,2008(5):164-170. (HU Xiaoxue, YANG Xiaohua, LI Jianqiang, et al. Set pair analysis model for river health system assessment [J]. Systems Engineering Theory & Practice,2008(5):164-170. (in Chinese))
- [18] 申艳萍. 城市河流生态系统健康评价实例研究[J]. 气象与环境科学,2008,31(2):13-16. (SHEN Yanping. Case study on assessment of urban river ecosystem health [J]. Meteorological and Environmental Sciences,2008,31(2):13-16. (in Chinese))
- (收稿日期:2012-07-02 编辑:骆超)