

# 海河流域河道最小生态流量研究

郑建平<sup>1</sup>, 陈敏建<sup>2</sup>, 徐志侠<sup>3</sup>, 王芳<sup>4</sup>, 华祖林<sup>1</sup>, 褚君达<sup>1</sup>

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院水文水资源研究所, 江苏 南京 210000;  
3. 河海大学水资源环境学院, 江苏 南京 210098; 4. 中国水利水电科学研究院水资源所, 北京 100044)

**摘要:**应用基于河流形态的河道最小生态流量计算方法,选取潘家口、滦县、石匣里、官厅、观台、楚旺及称钩湾7个控制断面对海河流域河道最小生态流量进行计算.该方法立足河流形态,将水位-水面宽曲线突变点与维持一定生境(主要包括平均水深、流速等)综合考虑来确定临界流量.计算结果表明:7个控制断面的最小生态流量均值为 $5.84\text{ m}^3/\text{s}$ ,占多年平均流量的 $5.8\% \sim 10\%$ ;在最小生态流量下的水面宽率为 $43\% \sim 70\%$ (平均为 $61\%$ ),平均水深为 $0.24 \sim 0.59\text{ m}$ ,流速为 $0.24 \sim 0.34\text{ m/s}$ .这些计算结果与国际上已有的计算结果相符.根据流域相似性原理进行外推,计算了海河流域其他河道的最小生态流量.

**关键词:**海河流域;河道最小生态流量;河床形态;水力参数

中图分类号:P333 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2005)05-0012-04

**Calculation of minimum ecological flux of rivers for Haihe River Basin//ZHENG Jian-ping<sup>1</sup>, CHEN Min-jian<sup>2</sup>, XU Zhi-xia<sup>3</sup>, WANG Fang<sup>4</sup>, HUA Zu-lin<sup>1</sup>, CHU Jun-da<sup>1</sup>**(1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210000, China; 3. College of Water Resources and Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

**Abstract:**The minimum ecological flux of rivers for seven hydrological control sections in the Haihe River Basin was calculated by use of the minimum flux method based on river geomorphology. The method determined the critical flux by consideration of both breakpoint on the water level-river width curve and the maintenance of the original habitat (mainly including average water depth, average velocity, et al) to a certain extent. The results show that the average minimum ecological flux of the seven control sections is  $5.84\text{ m}^3/\text{s}$ , which accounts for  $5.8\% \sim 10\%$  of the long-term average value, and that under the minimum ecological flux, the ratio of river width is  $43\% \sim 70\%$  (the average value being  $61\%$ ), the average water depth is  $0.24 \sim 0.59\text{ m}$ , and the flow velocity is  $0.24 \sim 0.34\text{ m/s}$ . The calculated results are in accordance with those previously obtained and recognized at aboard. By extrapolation of the calculated results according to the similarity principle, the minimum ecological flux of other rivers in the Haihe River Basin can be obtained as well.

**Key words:** Haihe River Basin; minimum ecological flux of river; river geomorphology; hydraulic parameter

## 1 河流开发治理及河道生态问题

海河流域位于东经 $112^\circ \sim 120^\circ$ 、北纬 $35^\circ \sim 43^\circ$ ,流域面积 $31.78\text{ 万 km}^2$ .包括海河和滦河两大水系,其中海河水系又分为由蓟运河、潮白河、永定河组成的海河北系,以及由大清河、子牙河、漳卫南运河组成的海河南系.这些水系最终向渤海湾汇集,形成典型的扇形流域.

海河流域过去素有十年九涝之称,同时人口相对密集,是华北地区社会经济活动的中心,为了防洪兴

利,1949年后进行了大规模的河道整治.目前海河流域已建成大、中、小型水库1820座,控制了山区流域面积的 $85\%$ .建成引水工程1万处,提水工程8200处.1985~1998年平均每年当地地表水、地下水供水量为301亿 $\text{m}^3$ ,开发利用率 $81\%$ ,其中海河南系高达 $90\%$ <sup>[1]</sup>.水资源过度开发利用,使水的地面循环和垂向循环特征都发生了深刻变化,从而使海河流域几乎有河皆干,河流生态遭到毁灭性的破坏.

在人与自然和谐发展的新理念指导下,为促进海河流域水资源合理配置和科学管理,研究河道最

基金项目:国家“十五”科技攻关计划重大项目(2001BA610A-01-07)

作者简介:郑建平(1978—),女,江苏六合人,博士研究生,从事生态水力学及生态修复技术研究.

小生态流量是非常必要的。

## 2 河道最小生态流量的计算依据和方法

### 2.1 以往的研究方法简述

早在 20 世纪 40 年代就以美国为首开始了对河道内流量进行研究,从 70 年代至 80 年代末期,出现了许多河道生态环境需水的计算方法。最初根据水文历史资料提出了一些基于水文学的方法,如 7Q10 法<sup>[2]</sup>、Tenant 法<sup>[3]</sup>等;后来水力学家根据河道断面参数判断河流所需流量,形成了基于水力学的方法,如湿周法<sup>[4]</sup>、R2CROSS<sup>[5]</sup>法等;再后来又将水力分析与生境评价相结合,提出了基于生境适宜性评价和模拟的方法,如 IFIM 法<sup>[6]</sup>等。20 世纪 90 年代之后,随着河流连续统等思想的提出,河道生态环境需水理论开始完善,又出现了一些注重对河流生态系统整体考虑的新方法,如 BBM 法<sup>[7]</sup>、澳大利亚的整体法<sup>[8]</sup>等。但是,这些方法或方法的组合没有公认的适合于所有河流的生态环境评价<sup>[9]</sup>。

在国内,近年来一些学者提出了各自的计算方法,如采用人为干扰小的天然河流最小月平均实测径流量的多年平均值作为河流的基本生态环境需水量<sup>[10]</sup>;满足河流纳污功能的环境功能设定法<sup>[11]</sup>;基于不同保证率下,以天然年径流量百分比作为河道生态环境需水量等级的方法<sup>[12]</sup>。

在国家“十五”攻关项目中指出,河流最小生态流量最基本的功能是要维持河流水体的基本形态,保证其成为一个连续统,当水分条件不能满足河流流量一定的临界要求时,河流水体就会发生劣变,而这一临界要求就是河道最小生态流量。并且从河流形态入手,提出基于河道形态的河道最小生态流量计算方法<sup>①②</sup>,本文正是基于该方法计算的。

### 2.2 河道形态法的理论依据

河流作为一个渐变的连续体,是一个完整的生态系统。河流生态系统的物种丰富,维护河流连续性是研究河流生态流量最基本的目标。河床是承载河流生物所需水体的生境,在没有掌握河流关键物种所需的水流条件下,以保护河床即河流生境为生态保护的目标。

在河流的任一断面上,河道的某些水力特性,如水深、河宽及流速,和流量成简单的指数关系<sup>[13]</sup>:

$$w = aQ^b \quad d = cQ^f \quad v = kQ^m \\ b + f + m = 1 \quad ack = 1$$

式中:  $w$  为河宽;  $d$  为平均水深;  $v$  为平均流速;  $Q$  为

流量;  $a, c, k, b, f, m$  为常数。在水流未溢出主槽以前,  $b, f$  和  $m$  的平均值分别为 0.5, 0.4 和 0.1。这样的关系称之为河槽的“水力几何形态”。但当河流的几何形状发生突变时,如水流漫溢过自然堤时,它已不再限制于两岸之间,河流形状关系线的斜率(或指数)就会改变。这些几何形状突变处就对应于河宽-流量或水深-流量关系曲线的转折点。该转折点的意义是:流量大于该点时,随着流量的增加,河流水体水力特征(如水面宽、湿周、平均水深、断面面积等)增大不显著,但当流量低于该点时,水面宽、湿周、平均水深、断面面积等将急剧减小。该转折点对应的流量即为本文定义的最小生态流量。

### 2.3 基于河道形态的计算方法

基于河道形态的最小生态流量计算方法,是将水位-水面宽曲线突变点与维持一定生境的河流水体水力特征(主要包括平均水深、流速等)综合考虑来确定临界流量。

河道最小生态流量的计算方法如下:①选取典型计算时期,主要考虑河床演变相对平衡的阶段。②控制断面的选取,要求断面能基本控制所研究河流的水量,且具有需要的观测项目,如水位、流量、大断面等,同时有 10 年以上可利用的观测资料。③根据选定时期的水文观测资料(包括观测断面、水位、流量等)分别绘制断面图、水位过程线图、流量过程线图以及水位-流量关系曲线。④通过运行程序得到断面水力参数(包括各个水位下的湿周、水面宽、断面面积、平均水深、最大水深等),绘制水位-湿周关系曲线、水位-水面宽关系曲线。分析这两组曲线,确定该类曲线中突变点的位置。⑤通过突变点对应的水位,查水位-流量关系曲线,确定对应的流量,并将其作为最小生态流量的初步结果。⑥对第⑤步确定的流量进行校核,检查其作为最小生态流量的合理性。⑦通过多指标的分析判断,最终确定控制断面的最小生态流量。

该方法在我国现状条件下具有很强的可操作性和现实性。相对于国外已有的一些生境类研究方法,能够克服现场测量误差大、断面设置数少、不能反映年际间变化的缺点。

## 3 河道最小生态流量计算与结果分析

### 3.1 资料选择

海河流域的河系在平原区几乎全部人工化,为了减少人类干扰对最小生态流量标准的影响,本次

①“十五”国家科技攻关计划重大项目 2001BA610A-01-06,淮河流域生态用水及控制性指标研究,2003。

②“十五”国家科技攻关计划重大项目 2001BA610A-01,中国分区域生态用水标准研究,2003。

计算精选断面、水位流量实测数据等。根据我国目前有关河流的资料,选择了利用水文资料的河道形态分析法(简称河道形态分析法)。通过对主要控制站进行分析,寻找河道水力参数突变点,最终确定最小生态流量。

本研究中,考虑到海河流域 60% 为山区,40% 为平原,水系较多,并修建了大量的山区水库拦蓄来水,而且平原区天然河网不发育,受水利工程影响比山区更为复杂。所以,选取滦河干流上的潘家口站、滦县站,永定河支流桑干河上的石匣里站、干流上的官厅站,漳卫南运河水系漳河上的观台、卫河上的楚旺及卫运河上的称钩湾这几个主要控制站进行详细研究。涉及研究的还有滦河水系的桃林口站、潮白河水系的苏庄站、蓟河水系的于桥水库站、北运河水系的通县站、永定河水系的响水堡站、子牙河水系的献县和黄壁庄站以及大清河水系的东淀站,这些站由于本身条件及资料限制,采用同水系或临近相似水系测站结果外推的方法进行生态流量计算。水系与测站位置见图 1(有些测站现在已经改名或迁移,由于计算采用时段及资料关系,本文沿用旧的测站名称)。

计算时段总体上选择受人类活动干扰较少的时间。

由于海河流域在 20 世纪 50 年代后期就掀起了以蓄为主兴建水库的高潮,流域水资源开发利用较早、程度较高,所以计算时段较难选择,只能针对各水系工程情况选择相对稳定的时段进行计算。

本次计算使用的水文资料大部分来自 1965 ~ 1989 年的《海河流域水文年鉴》,具体项目包括:实测大断面、水位流量资料等。多年平均天然流量数据来自《海河志》。

### 3.2 结果分析

通过对海河流域潘家口、滦县、石匣里、官厅、观台、楚旺、称钩湾 7 个水文站历史水文资料的分析计算,得到 7 个控制断面的最小生态流量分别是 7.70, 11.20, 2.54, 4.46, 4.15, 3.73, 7.10  $\text{m}^3/\text{s}$ , 平均 5.84  $\text{m}^3/\text{s}$ ;占多年平均流量的 5.8% ~ 10%, 平均 7.44%;在最小流量下的水面宽率介于 43% ~ 70% 之间,平均 61%;平均水深介于 0.24 ~ 0.59 m 之间,平均 0.4 m;平均流速介于 0.24 ~ 0.34 m/s 之间,平均 0.3 m/s。计算结果见表 1。

对计算结果从以下 4 个方面分析其合理性:  
①从最小生态流量相应的水面宽占多年平均流量相应水面宽的百分比来看,百分比范围为 43% ~ 70%,平均 61%,与国外最小生态流量的水面宽百

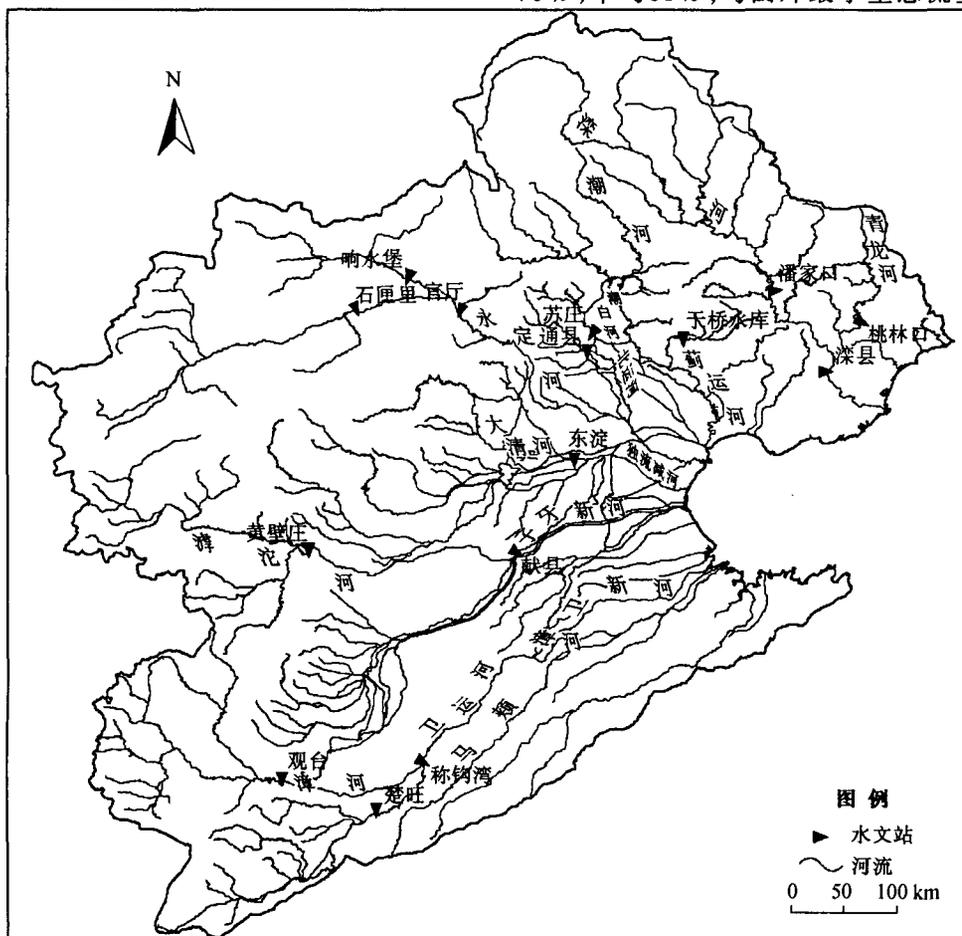


图 1 海河水系及其水文控制测站位置示意图

表1 海河流域典型站最小生态流量计算结果

水文站名	水系	河流名称	流域面积/ km <sup>2</sup>	最小生态流量/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	相应水位/ m	河底高程/ m	水面宽/ m	平均水深/ m	平均流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	多年平均流量/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	多年平均水面宽/ m	流量百分数/%	水面宽率/%	多年平均径流深/ mm
潘家口	滦河	滦河	33700	7.70	84.66	83.86	76	0.30	0.34	77.05	117.52	10.0	65	72
滦县	滦河	滦河	44100	11.20	21.36	19.05	102	0.38	0.29	140.16	161.58	8.0	63	100
石匣里	永定河	桑干河	23944	2.54	785.32	784.82	23	0.33	0.31	33.61	33.06	7.6	70	44
官厅	永定河	永定河	43402	4.46	438.66	437.82	35	0.43	0.30	60.25	51.71	7.4	68	44
观台	漳卫河	漳河	17800	4.15	148.39	147.95	52	0.24	0.33	56.89	77.82	7.3	67	101
楚旺	漳卫河	卫河	13481	3.73	45.04	44.06	27	0.51	0.27	62.15	62.93	6.0	43	145
称钩湾	漳卫河	卫运河	34766	7.10	36.63	35.50	50	0.59	0.24	123.22	98.39	5.8	51	112

注:多年平均流量采用《海河志》中1956~1984年系列还原数据;多年平均水面宽为多年平均流量下的水面宽;流量百分数=最小生态流量/多年平均流量;水面宽率=最小生态流量对应的水面宽/多年平均水面宽。

分比多为60%~70%基本相符。②从最小生态流量占多年平均流量的百分比来看,本次计算结果为5.8%~10%。在蒙大拿法中,认为10%的流量是为防止生态退化的最小流量,而且该方法同时指出,大江大河最小生态流量在5%~10%。本次估算结果和蒙大拿法还是相符的。③从生态流量及其控制面积的变化趋势来看,本次计算结果是随着流域面积的增加,百分比减小,与国际上的已有计算结果相符。这表明小河的生态风险比大河要大。④从上、下游断面的最小生态流量来看,下游断面的最小生态流量大于上游,符合水文规律。从以上分析可以看出,本次研究的结果比较合理。

通过以上典型站的多年平均流量和最小生态流量占多年平均流量百分比的关系,分别建立滦河、永定河、漳卫河3个水系上的线性公式,并根据流域的

相似性原则,将这些公式应用到其他水系上。外推到桃林口、苏庄、于桥水库、通县、响水堡、献县、黄壁庄和东淀这8个测站,求得相应的最小生态流量分别为3.05,6.37,2.06,1.42,1.75,7.22,4.88,7.11 m<sup>3</sup>/s(平均为5.84 m<sup>3</sup>/s),占多年平均流量的5.6%~12.1%(平均为8.93%)。详细计算结果见表2。

#### 4 河道现状实测流量和达到最小生态流量的调控对策

海河流域主要河流测站2000年实测流量如表3所示,大部分时间流量都低于最小生态流量,这就说明海河现状的河道生态需水远远得不到满足。

针对海河流域河道断流严重、最小生态流量得不到满足的现状,在未来生态用水调控中需考虑优先满足污染严重河道的最小生态需水,以兼顾河流

表2 公式外推其他站点最小生态流量

站名	位置	水系	流域面积/ km <sup>2</sup>	多年平均天然 流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	最小生态 流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	占多年平均流量 百分比/%	外推所用 公式
桃林口	青龙河	滦河	5250	26.3	3.05	11.6	滦河公式
苏庄	潮白河	潮白河	17595	60.6	6.37	10.5	滦河公式
于桥水库	州河	蓟运河	2060	17.3	2.06	11.9	滦河公式
通县	北运河	北运河	2650	11.8	1.42	12.1	滦河公式
响水堡	洋河	永定河	14507	23.0	1.75	7.6	永定河公式
献县	子牙河	子牙河	46000	128.1	7.22	5.6	漳卫河公式
黄壁庄	滹沱河	子牙河	23272	75.9	4.88	6.4	漳卫河公式
东淀	大清河	大清河	39244	125.3	7.11	5.7	漳卫河公式

表3 计算生态流量与2000年实测流量统计结果比较

站名	水系	流域面积/ km <sup>2</sup>	最小生态 流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	2000年实测连续时段平均流量最小值/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )							
				15d	30d	45d	60d	90d	120d	150d	全年
潘家口	滦河	33700	7.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.20	1.54	3.62
滦县	滦河	44100	11.20	3.06	3.80	4.90	5.59	5.67	8.36	10.08	22.07
响水堡	永定河	14507	1.75	0.39	0.41	0.44	0.47	0.50	0.56	0.68	1.14
石匣里	永定河	23944	2.54	0.11	0.24	0.37	0.65	1.01	1.17	1.54	2.33
官厅	永定河	43402	4.46	0.47	1.07	1.60	1.75	2.54	2.54	3.68	5.19
楚旺	南运河	13481	3.73	1.50	1.50	3.06	3.92	4.78	5.21	7.05	36.46
观台	南运河	17800	4.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.29
黄壁庄	子牙河	23272	4.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	3.58	4.15	11.37
献县	子牙河	46000	7.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

(下转第63页)

为双翼板,能有效分隔单元槽孔,保证不漏浆、不窜浆,从而保证墙体浇筑质量。

d. 链式开槽机只清理地面向下 9 m 左右的障碍物,9 m 以下仍采用振动沉模双模板法工艺成槽至设计深度,并浇筑成墙,所以成槽及浇筑成墙工艺与设计的要求是一致的。

#### 4 现场实施情况及经济效益分析

在开槽机开槽过程中发现,在地面向下 5 m 范围内夹有较大块石,大的直径有 50 ~ 60 cm;在 5 m 以下,土质很黏、很硬,土质、土体颜色混杂,初步分析为人工夯实所致。在开槽过程中遇到较大块石,对开槽机刀具有一定的损坏,但开槽实施顺利。用振动沉模双模板工艺在清理障碍物后又回填土的槽孔中施工,能顺利进行。

本期工程共完成防渗墙面积 3 850 m<sup>2</sup>,总投资 78 万元。在遇特殊地质情况下,采用该方法施工,具有工效高、造价低等特点。经济效益分析见表 1。从表 1 中可以看出,在振动沉模施工困难的条件下,采用振动沉模与链式开槽机相结合的施工方法,可以提高工效 3 ~ 5 倍,节省经费 35% ~ 40%。

表 1 经济效益分析结果

施工工艺	工效/ (m <sup>2</sup> ·台班 <sup>-1</sup> )	综合单价/ (元·m <sup>-2</sup> )
振动沉模方法	160 ~ 180	170
开槽机方法	100 ~ 120	230
特殊地质条件下 振动沉模方法	30 ~ 50	380 ~ 410
特殊地质条件下振动 沉模与开槽机相结合方法	150 ~ 165	215

#### 5 结 语

链式开槽机结合振动沉模的施工方法,是在施工过程中遇到特殊地质条件下提出的,它解决了现有振动沉模施工工艺遇硬黏性土很难穿透的弊端。现场施工情况分析表明,该施工方法不违背设计意图,与单纯采用耗时耗工的振动沉模方法相比,可提高施工工效,节省工程投资,保证施工质量。应用结果表明,在特殊地质条件下该施工方法是切实可行的。

#### 参考文献:

- [1] 张敏,徐铭,王岚. 振动沉模超薄防渗墙技术在洪泽湖大堤上的应用[J]. 水利建设与管理, 2002(5): 36—37.

(收稿日期: 2004-07-26 编辑: 高建群)

(上接第 15 页)的稀释自净作用,减轻河流水环境的污染程度,同时优先考虑满足入湖河道的生态需水,以实现湖泊天然的生态过程。在南水北调中线工程实施后,需要合理配置水资源,保证河道最小生态流量,逐步恢复海河流域的河流生态。

#### 参考文献:

- [1] 水利部海河水利委员会. 海河流域水资源规划简介[J]. 中国水利, 2003(2): 34—38.
- [2] Boner M C, Furland L P. Seasonal treatment and variable effluent quality based on assimilative capacity[J]. Journal Water Pollution Control Filed, 1982, 54: 1408—1416.
- [3] Tennant D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. Fisheries, 1976, 1(4): 6—10.
- [4] Bartschi D K. A habitat-discharge method of determining instream flows for aquatic habitat[A]. In: Orsborn J F, Allman C H. Proceedings of Symposium and Specilty Conference on Instream Flow Need II. Bethesda: American Fisheries Society[C]. Bethesda, Maryland: American Fisheries Society, 1976. 285—294.
- [5] Mosely M P. The effect of changing discharge on channal morphology and instream uses and in a braide river, Ohau River, New Zealand[J]. Water Resources Researches, 1982, 18: 800—812.
- [6] Bovee K D. A Guide to stream habitat analysis using the in-

stream flow incremental methodology[R]. U S Fish and Wildlife Service, Fort Collins, Colorado, 1982.

- [7] King J M, Low D. Instream flow assessment for regulated rivers in South Africa using the building block methodology[J]. Aquat Ecosyst Health Manag, 1998, 1(2): 109—124.
- [8] Arthington A H, King J M, O'Keefee J H, et al. Development of an holistic approach for assessing environmental flow requirements of riverine ecosystem[A]. In: Pigram J J, Hooper B P. Proceedings of an International Seminar and Workshop on Water Allocation for the Environment[C]. Armindale: University of New England, 1992. 69—76.
- [9] Annear T I, Chisholm H, Beecher A. Instream flows for riverine resource stewardship[R]. Cheyenne, Wyoming: Instream Flow Council, 2002.
- [10] 李丽娟, 郑红星. 海滦河流域河流系统生态环境需水量计算[J]. 地理学报, 2000, 55(4): 496—500.
- [11] 王西琴, 刘昌明, 杨志峰. 河道最小环境需水量确定方法及其应用研究(1)——理论[J]. 环境科学学报, 2001, 21(5): 543—547.
- [12] 杨志峰, 崔保山, 刘静玲, 等. 生态环境需水量理论、方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 51—53.
- [13] 里奥普 L B, 麦杜克 T. 河槽的水力几何形态及其在地质学上的意义[M]. 钱宁译. 北京: 水利出版社, 1957. 1—33.

(收稿日期: 2005-01-13 编辑: 高建群)