

基于生态目标的河道生态环境需水量计算

孙涛¹, 杨志峰^{1,2}

(1. 北京师范大学环境学院水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学环境学院水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要:以生态目标的确定为基础, 通过建立目标参数与径流间的关系计算得到河道生态环境需水量。其中生态目标由关键期生态目标和时间变化目标2部分组成。考虑不同功能生态环境需水量间的兼容性, 以最高等级为标准确定关键期生态目标。采用河道多年平均天然径流量年内时间变化率作为生态环境需水量时间变化目标。海河流域永定河官厅水库下游河道计算中, 以生态、生产需水矛盾最突出的4月生物繁殖初始时期对流速的要求作为关键期生态目标, 根据河道断面实测资料确定目标参数与径流间的关系。计算结果表明, 最小、适宜以及理想等级年度生态环境需水量分别为 $1.56 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $5.97 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $11.02 \times 10^8 \text{ m}^3$, 分别占河道天然径流量的7.19%, 27.51%和50.78%, 年内汛期8月及春季生物繁殖期(4月~6月)需水量需分别达到年度总量的20%。

关键词:生态环境需水量; 生态目标; 河道; 永定河

中图分类号:X171.1 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2005)05-0043-06

Calculation of Environmental Flows in River Reaches Based on Ecological Objectives

SUN Tao¹, YANG Zhi-feng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Based on the identifying the ecological objectives, environmental flows in river reaches is calculated after the relation between parameters of objectives, and river discharges is determined. The ecological objectives are determined in a two step process: the objective will be determined for the critical period of the year, then the temporal variation will be defined. Considering the compatibility between the different kinds of environmental flow requirements, the strictest objective is settled to be the ecological objectives for the critical period of the year. The temporal variation of the natural river discharge monthly is settled to be the temporal variation of ecological objectives. In the studies of the environmental flows in the river reaches downstream for Guanting reservoir in the Yongding River of Haihe River Basin, the requirements of velocities for spawning of the fish in April are regarded as the ecological objectives in the most critical period because this also is the period of highest water demand for irrigation. The relation between objectives and river discharge is identified using historical data at the river station. The results indicate that the minimum, medium and ideal lever of annual environmental flow requirements are $1.56 \times 10^8 \text{ m}^3$, $5.97 \times 10^8 \text{ m}^3$ and $11.02 \times 10^8 \text{ m}^3$, about 7.19%, 27.51% and 50.78% of the natural river discharge respectively. The ratio of water requirements monthly should be 20% in the flood period (Aug.) and be 20% in biological propagation period in spring (Apr. ~ Jun.).

Key words: environmental flows; ecological objective; river reaches; Yongding River

河道是河流生态系统的主体, 其基本特点是其中水体的流动性及相应的时空差异性, 从而实现流域内物质运输以及生物的生存和迁徙。河道生态环境需水量计算通过分析河道生态系统对径流质、量及其时空变化规律的要求, 为生态环境保护及科学配置水资源提供科学依据。

目前关于河道生态环境需水量的研究已取得较大进展^[1~4], 其中应用广泛的是水文学和水力学方法。水文学方法基于河道径流对生态系统重要的基础性作用, 根据简单的水文学指标对河道流量进行设定, 假定恢复、保持河道内一定规模的来流即可实

现生态系统对径流的需求。Tennant方法即是一种典型的水文学方法^[5], 方法采用一定经验百分比的秋、冬季及春、夏季年均流量作为相应的生态环境需水量。水文学方法中流量经验百分比的确定是关键, 在对径流与生物种群分布关系缺乏足够认识的情况下, 参数的确定具有较大的经验性, 方法的应用需经过验证。

收稿日期:2004-08-19; 修订日期:2005-01-20

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50239020); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2003CB415204)

作者简介: 孙涛(1975~), 男, 博士, 主要从事生态环境需水和河口近岸海域环境模拟研究, E-mail: suntao@bnu.edu.cn.

水力学方法根据生物栖息地对水力学参数(如宽度、深度、流速和湿周等)的要求确定相应所需流量。湿周法及 R2Cross 法等均为典型的水力学方法,相关方法在澳大利亚,南非等国已得到快速发展^[6~8]。水文学及水力学方法计算过程简单,目前多用于流域生态环境需水量初期估算。

近些年来,基于模拟生态系统内物质、能量循环的生态模型方法在河流生态系统管理和恢复工作中得到较广泛地应用。Mitsch 等建立了生态模型模拟水文学参数与生态系统物质循环间的联系,研究不同输入参数对生态系统影响,进而分析河道下游湿地恢复对磷输入的需求,确定恢复湿地生态健康需保证的输入水量^[9]。Timchenko 等建立了营养物质初级生产及消耗平衡生态模型^[10],通过引入与流量相关的水体滞留时间参数,建立了输入流量与生态系统间的关系。由于目前生态学资料的欠缺及方法应用的复杂性,生态模型方法在我国的应用具有一定的局限性。

本文以确定随时空变化的生态目标为基础,通过建立生态目标与河道径流间的关系计算得到河道生态环境需水量。针对目前河道生态系统生态学资料缺乏,特别是与水文物理过程相对应的生态学资料非常匮乏的状况,将河道生态系统不同功能随时间变化的生态目标划分为关键期生态目标和需水量时间变化目标 2 部分。计算方法在海河流域永定河生态环境需水量计算中得到应用。

1 计算方法

生态环境需水量研究考虑生态系统状况与径流变化间的关系,计算过程包括体现生态系统状况的生态目标选择,以及目标参数-径流关系确定 2 个主要部分。河道生态环境需水量研究首先确定关键控制点生态、环境目标,其后通过建立生态环境目标参数与径流水质、水量及相应时空差异间的关系,得到不同功能生态环境需水量,考虑不同功能及不同空间生态环境需水量间兼容性,整合得到河道系统整体生态环境需水量。

1.1 生态目标

河道生态环境需水量计算通过保持河道生态系统水体的流动性及其时空变化,实现河道物质运输、生物栖息和迁徙通道的生态功能。计算生态目标主要体现在:①保持河道生态系统基本型态,实现河道泥沙平衡的泥沙输运水流速度目标;②不同时期、不同类型水生生物生存水深及水面面积等目标;③河

道水生生物繁殖水流速度目标;④不同时期河道栖息地水体温度、透明度及营养物等水质目标;⑤不同时期河道下游生态系统的水量及水质目标等。河道生态系统对径流的要求一方面体现生态系统自身健康对水位、水面、水质等参数的要求,更重要的是体现在流域生态系统对河道物质运输和生物迁徙通道功能的要求。

生态环境需水量生态目标具有功能、空间及时间的差异性。其中功能和空间差异性体现在不同结构的河道内不同类型生物种群对相应物理环境的要求不同,要求针对不同类型河道提出不同功能的需水量计算目标。生态目标时间差异性体现在河道水生生物随年内季节变化对物理环境要求的差异,不同时期生态环境需水计算目标亦有所不同。

考虑系统化生态学资料的欠缺,目前难于针对不同功能需水量提出随时间变化的生态目标。本文将生态目标划分为关键期生态目标和时间变化目标 2 部分。

1.1.1 关键期生态目标

不同类型生态环境需水量生态目标间存在显著的兼容性。以最高等级为标准确定河道生态环境需水量计算目标,可以同时满足不同功能生态环境需水量要求。

目前流域中下游平原河道,特别是水库下游河段受到流域水资源开发的影响较大,是生态环境需水量研究的重点区域。针对河道生态系统水体流动性基本特征的要求,选择水流流速作为生态环境需水量计算的目标参数,对实现维持河道生态系统的基本结构和功能至关重要。

1.1.2 时间变化目标

河道生态系统需水量生态目标的时间差异性显著。生态系统冬季对水量要求相对较少,相应为水生生物提供稳定的栖息地。随着季节变化,温度不断升高,径流量和生物种群分布相应均不断增加。自然状况下,河道天然径流量变化与生物种群分布间具有密切的对应关系。目前广泛应用的水文学方法即利用径流与生态系统间密切的相关关系作为研究基础。本文河道生态环境需水量生态目标的时间变化以保持生态系统自然状况为基础,根据河段典型断面天然径流量多年平均时间变化确定。时间变化目标采用各月水量占年度总量的比例表示:

$$R_i = \sum_{j=1}^n W_{ji} / \sum_{j=1}^n W_j \quad (1)$$

式中, R_i 表示各月水量比例,下标 i 为月份。 W_j 表

示不同 j 年度天然径流总量, W_{ji} 表示第 j 年 i 月河道天然径流量, n 为天然径流量统计年数.

1.2 生态目标与径流量

河道生态环境需水量生态目标一般主要体现在流速或水深 2 方面.对于断面相对规则的河道可采用曼宁公式建立流速、水深与河道径流量间的关系,进而确定相应关键期生态环境需水量,计算公式如式(2):

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} \sqrt{i} \quad (2)$$

式中, v 为河道流速, R 为水力半径, n 为曼宁底床糙率系数, i 为河道纵向坡度.对于宽浅型河道,水力半径可采用平均水深近似计算得到,由此根据河道流速目标参数可计算得到水深 H 为:

$$H = \left(\frac{nv}{\sqrt{i}} \right)^{3/2} \quad (3)$$

或根据河道水深目标参数可计算得到流速:

$$v = \frac{1}{n} H^{2/3} \sqrt{i} \quad (4)$$

假定河道平均水面宽为 B , 可计算得到一定生态目标条件下的生态环境需水量 W 为:

$$W = Q \cdot t = vt(H \cdot B) \quad (5)$$

式中, Q 为流量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), t 为时间, 计算关键期以月份为单位.

生态环境需水量计算,特别是考虑生态目标阈值情况时,河道断面多为不规则形状,采用简单的曼宁公式时,其计算优势不存在,并可能会产生较大的误差.采用河道断面实测目标参数与流量关系或相对复杂的水动力学模型方法可成为确定关键期生态环境需水量的主要手段.

1.3 年内各月生态环境需水量

在计算得到多年平均各月天然径流量比例及关键期生态环境需水量后,由式(6)可得到生态环境需水年度总量.

$$W_{\text{Annual}} = W_c / R_c \quad (6)$$

式中, W_{Annual} 为生态环境需水年度总量, W_c 和 R_c 分别为关键期生态环境需水量和相应占年度总量的比例.各月生态环境需水量可采用下式计算:

$$W_i = W_{\text{Annual}} \cdot R_i \quad (7)$$

2 海河流域永定河生态环境需水量

自上世纪 60 年代以来,在自然因素(降水减少等)和人为因素(水资源的过度开采和利用等)的双重作用下,海河流域内许多河流出现了季节性断流

甚至全年断流.海河流域内湿地由于缺乏水体补充,面积不断萎缩.流域入海水量锐减,渤海湾的大黄鱼等优良鱼种已基本消失,生存于河口并在咸淡水混合区产卵的蟹类生物已经绝迹,河口区生态遭到根本性破坏.同时由于污染物的过度排放,多数河流水质问题严重.水量及水质问题已成为目前国内大量河流生态系统面临的共同威胁.

本文以海河北系永定河官厅水库下游河段为例,研究相应河道生态环境需水量.图 1 给出了永定河水系主要河道分布状况.永定河上游有桑干河、洋河 2 大支流,两河在河北省怀来县朱官屯汇合后称永定河.官厅到三家店为官厅山峡,三家店以下为中下游地区.永定河泛区出口屈家店以下大部分洪水由永定新河入海,小部分洪水经北运河入海河干流.

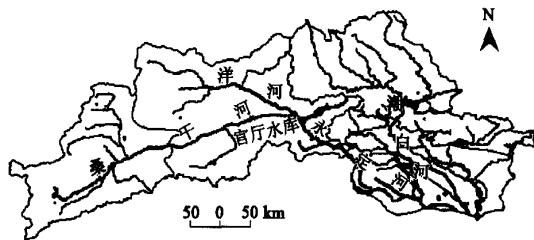


图 1 海河流域永定河水系河流分布

Fig. 1 Distribution of river reaches in Yongding River of Haihe River Basin

永定河多年平均天然径流量为 $21.7 \times 10^8 \text{ m}^3$.图 2 给出了永定河多年平均天然径流量年内时间分布,2 个峰值分别在 8 月和 3 月.图 2 纵坐标表示多年平均各月径流量占多年平均径流总量的百分比.

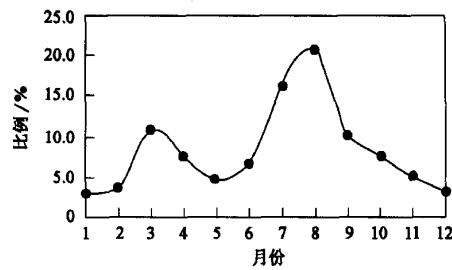


图 2 永定河天然径流量年内变化

Fig. 2 Average monthly natural distribution of discharge in Yongding River

选择代表性水生生物繁殖期需求作为生态环境需水量生态目标.我国北方地区河道内淡水鱼类以鲤(*Cyprinus carpio*), 鲫鱼(*Carassius auratus*), 鳊(*Hypophthalmichthys molitrix*), 草鱼

(*Ctenopharyngodon idellus*), 青鱼 (*Mylopharyngodon piceus*) 等家鱼为主, 繁殖期为 4 月到 6 月间. 一方面, 繁殖期生物对河道内水温、流速、水深等参数均有相对严格的要求, 同时这一时期也是农业灌溉的关键时期, 用水矛盾突出.

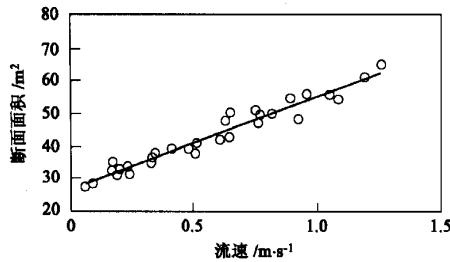
本文选择生态系统需水矛盾最突出的 4 月生物繁殖初始时期对环境的要求作为关键期生态目标, 同时以河道天然径流时间变化为时间变化目标, 可以综合满足河道生态系统不同功能生态环境需水量的要求. 家鱼繁殖期主要生态目标见表 1 所示^[11].

表 1 家鱼繁殖期主要生态目标

Table 1 The main ecological objectives in the period of the spawning season for fish

流速/ $m \cdot s^{-1}$	水深/m	温度/°C	水质
0.12~0.7	1.0~1.5	20~25	渔业水质标准

目前海河流域多数河流多处于蓄水断流的状



态. 河道内水体流动性对其中淡水鱼类的性腺发育成熟及产卵特别重要. 家鱼卵均为半浮性卵, 在静水条件下会逐渐下沉, 落底堆积, 导致溶氧不足, 而在水流的作用下受精卵漂浮在水中, 流水可提供充足的溶氧, 及时带走胚胎排出的废物, 保持水质清新, 达到孵化的目的. 以保护河道生态系统水体流动性的基本特征为目的, 考虑生物繁殖对物理环境的要求, 选定流速作为河道生态环境需水量生态目标计算参数. 目前淡水人工养殖根据产卵场物理环境的不同对水流流速的要求一般从 $0.12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 到 $0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 以鱼卵能均匀随水流分布漂浮为原则, 生物对水体流速的要求具有显著的阈值性. 计算中目标参数选定为 $0.15 \sim 0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

永定河生态环境需水量计算以三家店附近河道为研究区. 河道流速与过流断面及水深间相关关系见图 3 所示.

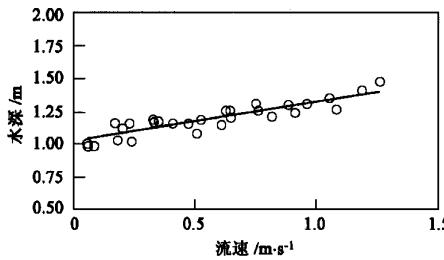


图 3 永定河三家店站断面平均流速与平均水深及过水断面

Fig. 3 Average velocity, water depth and area of cross section at the Sanjiadian station in Yongding River

三家店断面实测断面流速与过流断面面积及水深间的关系相对稳定, 永定河关键期河道生态环境需水量计算如表 2 所示.

表 2 永定河关键期河道生态环境需水量计算

Table 2 Calculation of environmental flow requirements for the Yongding River in the critical period

等级	流速目标/ $m \cdot s^{-1}$	断面面积/ m^2	流量/ $m^3 \cdot s^{-1}$	4月生态环境需水量/ 10^8 m^3
最小	0.15	31.00	4.65	0.12
适宜	0.45	39.57	17.81	0.46
理想	0.70	46.71	32.70	0.85

根据表 2 计算得到关键期生态环境需水量及图 3 给出的河道天然径流量年内时间变化目标, 计算得到永定河各月及全年生态环境需水量(表 3).

3 分析讨论

河道生态环境需水量主要由天然径流量补充, 其计算结果将为流域水资源科学配置提供依据, 表 5 比较了不同等级生态环境需水量占河道天然径流量的比例.

永定河河道生态系统最低等级生态环境需水量

表 3 永定河官厅水库以下河段各月不同等级生态环境需水量 $\times 10^8 \text{ m}^3$

Table 3 Environmental flow requirements monthly for the downstream of Guanting reservoir in the Yongding River $\times 10^8 \text{ m}^3$

等级	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	总量
最小	0.05	0.06	0.17	0.12	0.07	0.11	0.25	0.33	0.16	0.12	0.08	0.05	1.56
适宜	0.19	0.22	0.64	0.46	0.28	0.40	0.97	1.25	0.60	0.45	0.29	0.20	5.97
理想	0.35	0.41	1.19	0.85	0.52	0.75	1.79	2.31	1.11	0.84	0.54	0.37	11.02

为河道天然径流量的 7.19 %, 维持河道生态系统优良水平的年度需水量占河道天然径流量 50.78 %. 图 4 比较了不同等级生态环境需水年度总量与河道多年实测年径流量.

表 4 生态环境需水量与天然径流量

Table 4 Natural river discharge and environmental flow requirements

年均天然径流量 $\times 10^8 \text{m}^3$	生态环境需水量占径流量的比例/%		
	最小	适宜	理想
21.7	7.19	27.51	50.78

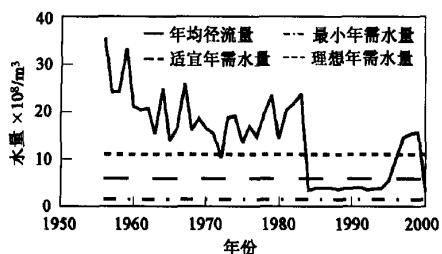


图 4 永定河年均径流量与年度生态环境需水量

Fig. 4 Annual river runoff and environmental flow requirements in the Yongding River

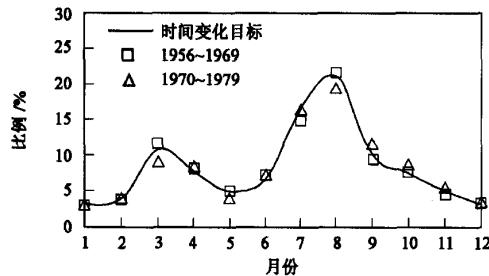


图 5 永定河径流量年内时间变化与生态环境需水目标

Fig. 5 Temporal variation of river runoff monthly in the Yongding River and the ecological objectives

统鱼类等水生生物繁殖栖息地的需求.

表 5 河道关键期径流分布与生态目标/%

Table 5 Temporal variations of the river discharge and the ecological objectives/%

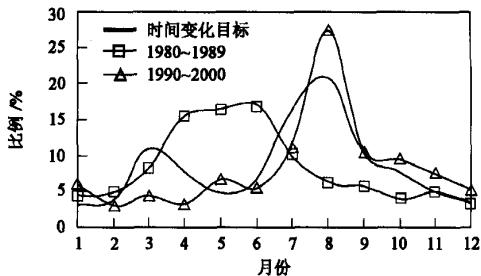
关键期	汛期(8月)	春季生物繁殖期(4~6月)
生态目标	20.95	19.19
1980~1989	6.28	48.51
1990~2000	27.62	15.5

自然条件下, 河道天然径流量时间变化与相应河道生态状况密切相关, 在保证生态环境需水年度总量要求的条件下, 径流量年内时间变化自然状态的改变会造成顾此失彼的状况. 保证不同等级生态环境需水年度总量及其年内随时间的合理分配是实

不考虑水质影响的条件下, 1984 年前河道实际径流量基本可以满足不同等级生态环境需水年度总量的要求. 近些年来河道实际径流量明显减少, 但尚可满足最低等级生态环境需水年度总量的要求.

时间变化目标是河道生态环境需水量生态目标中的重要部分, 图 5 比较了生态环境需水量年内时间变化目标与河道不同时期实测径流的年内分配. 图 5 中纵坐标为各月径流量占年度总量的比例.

20 世纪 50~70 年代永定河官厅水库以下河道径流年内时间变化基本符合生态环境需水量时间变化目标要求. 自 1980 年代以来, 径流量年内时间变化改变明显. 表 5 比较了 1980 年代及 1990 年代河道关键期径流分布与相应的生态目标. 1980 年代河道 4~6 月径流量占全年总量的比例达到 48.51 %, 结果满足农业灌溉及其他水生生物繁殖的需求, 但汛期 8 月径流量比例仅为 6.28 % 远小于目标 20.95 % 的要求, 汛期河道泥沙输运的需求无法得到实现. 1990 年代以来径流集中期转移至汛期, 8 月径流量占全年径流量的 27.62 %, 结果虽然满足了汛期对泥沙输运的要求, 却无法满足春季河道生态系



现不同类型生态目标的基本要求.

本文河道生态环境需水量计算中 2 个关键步骤是生态目标的确定以及生态目标与河道径流量关系的确定. 由于目前相关生态资料的普遍欠缺, 采用关键期生态目标和需水量时间变化目标 2 部分代替河道生态系统不同功能随时间变化的生态目标, 采用断面实测目标参数与断面流量关系的方法确定满足一定条件生态目标的生态环境需水量. 研究方法适用于目前生态资料欠缺河道生态环境需水量的计算. 对于断面相对规则的河道可采用曼宁公式确定相应流速、水深等目标参数与生态环境需水量间的关系.

研究方法采用单一断面实测资料确定一定范围

内河道生态环境需水量,其结果对于断面空间差异大,断面形状复杂河道的应用有一定的局限性,相应研究可利用相对复杂的水动力学或生态学模型确定目标参数与河道径流量的关系,同时对于距离上游水库较远的河段水量配置尚需考虑河道蒸发及渗漏需水量的要求.

4 结论

基于生态目标的河道生态环境需水量计算由生态目标和目标参数-径流量关系2部分组成.其中生态目标划分为关键期生态目标和时间变化目标2部分.关键期生态目标以不同类型生态目标中最高等级为标准确定,河道多年平均天然径流量年内时间变化率作为生态环境需水量时间变化目标.

海河流域永定河官厅水库下游河道最小、适宜以及理想等级生态环境需水量分别为 1.56×10^8 m³, 5.97×10^8 m³和 11.02×10^8 m³,分别占河道天然径流量的7.19%,27.51%和50.78%,年内汛期8月份及生物繁殖期(4月~6月)需水量需分别达到年度总量的20%.

计算方法适用于目前生态资料欠缺河道生态环境需水量的计算.同时可随着河道生态学资料的不断积累开展深入研究.

参考文献:

- [1] 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): 495~500.

- [2] 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(I)——理论[J].环境科学学报,2001,21(5):544~547.
- [3] 王西琴,杨志峰,刘昌明.河道最小环境需水量确定方法及其应用研究(II)——应用[J].环境科学学报,2001,21(5):548~552.
- [4] 杨志峰,张远.河道生态环境需水研究方法比较[J].水动力学研究与进展,2003,18(3):294~301.
- [5] Tennant D L. Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation and relative environmental resources [J]. Fisheries, 1976,1(4): 6~10.
- [6] Yong W J, Lam D C L, Ressel V, et al. Development of an environmental flows decision support system[J]. Environmental Modelling and Software, 2000,15(3):257~265.
- [7] King J, Louw D. Instream flow assessments for regulated rivers in South Africa using the Building Block Methodology [J]. Aquatic Ecosystems Health and management, 1998,1(2):109~124.
- [8] Huges DA, Hannart P. A desktop model used to provide an initial estimate of the ecological instream flow requirements of rivers in South Africa[J]. Journal of hydrology, 2003, 270(3-4):167~181.
- [9] Mitsch W J, Wang N M. Large-scale coastal wetland restoration on the Laurentian Great Lakes: Determining the potential for water quality improvement [J]. Ecological Engineering, 2000, 15 (3-4):267~282.
- [10] Timchenko V, Oksiyuk O, Gore J. A model for ecosystem state and water quality management in the Dnieper River delta [J]. Ecological Engineering, 2000,16(1):119~125.
- [11] 王武.鱼类增养殖学[M].北京:中国农业出版社,2000. 395~396.