

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.06.001

一种考虑容量沿程变化的水环境容量计算方法

华祖林^{1,2,3},程浩淼^{1,2}

(1. 河海大学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. 河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心,江苏 南京 210098)

摘要: 基于水环境容量的定义和本质内涵,厘清目前常用的计算中小型河流的零维和一维环境容量计算方法中存在的不足。针对现有计算方法的不足与弊端,考虑了河流环境容量是沿程变化的这一事实,提出一种中小型河流环境容量的计算新方法,该方法消除了现行方法中夸大的部分环境容量,更契合天然实用情形;在此基础上,推求出河道存在环境容量的临界判据,即最大允许排污浓度或河道最大允许超标长度比例,并进行了算例的应用与比较。

关键词: 水环境容量;沿程变化;计算方法;临界判据

中图分类号: X824 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2015)06-0505-06

A method for estimating water environmental capacity based on its variation along river

HUA Zulin^{1, 2, 3}, CHENG Haomiao^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the definition and connotation of water environmental capacity, the shortcomings of currently prevalent zero-dimensional and one-dimensional methods for estimating the water environmental capacity of medium- and small-sized rivers are pointed out. According to these shortcomings, a new method considering the variation of water environmental capacity along a river is put forward. This method eliminates the exaggerated part of the environmental capacity estimation generated with the previous methods, and it is more practical. Moreover, the critical judgment criteria for estimating the existence of water environmental capacity are derived, including the maximum allowable concentrations of discharged pollutants and the maximum ratio of the length of the river reach with water quality indicators exceeding the standards to the total length of the river. Finally, practical cases are provided in order to compare the proposed method with previous methods.

Key words: water environmental capacity; variation along river; calculation method; critical judgment criteria

随着当代社会经济的高速发展,工业生活废污水大量排入河流,河流的水环境质量不断恶化,给我国社会经济的可持续发展带来严峻的挑战。因此各级政府在环境管理中,准确确定河流的水环境容量具有重要的作用。精确计算出水体的环境容量值可为采取相关措施控污和改善水质提供技术支撑。

环境容量的概念最先是由日本学者借喻物理学上的电容概念并根据总量控制原则提出的,欧美国家则

收稿日期: 2015-06-04
基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07103-005);“十二五”国家科技支撑计划(2012BAB03B04);国家自然科学基金(51179052);上海市水务局科研项目(2014-10)
作者简介: 华祖林(1965—),男,江苏江阴人,教授,主要从事水环境模拟与污染物输运机理研究。E-mail: zulinhua@hhu.edu.cn

更多地使用日最大总负荷^[1-3](total maximum daily load, TMDL)、同化容量^[4-5](assimilative capacity)、污染负荷分配^[6-7](wasteload allocation, WLA)等术语。我国也在环境容量理论方面开展了相应的研究^[8-10],但目前对环境容量仍没有达成完整统一的定义,目前学术界普遍认可的水环境容量的概念定义为“某一水环境单元在特定的环境目标下所能容纳污染物的量”。其概念上强调了水环境容量的本质三要素:水质标准、水体条件和污染物特性。因此水环境容量的内涵主要应该有:其一,水环境容量是环境系统本身的自然属性,是由自净容量和稀释容量组成的;其二,水环境容量是与污染物对环境造成的影响息息相关的,其大小是由水环境系统功能决定的。总之,水环境容量的目的是在水环境功能区水质达标的前提下,为制定污染物总量控制方案提供技术依据。

目前水环境容量的计算方法有零维、一维、二维、三维等方法,其中对大江大河、湖库、近海等宽阔水域常采用二维、三维方法计算^[11-13];而针对中小型河流则常用零维、一维方法,并在中小河流环境容量的确定方法上也取得了一定的研究进展。譬如:龚若愚等^[14]采用了零维水环境容量计算公式,计算了柳江河新圩至窑埠段的COD和氨氮2项指标的水环境容量值;王华等^[15]基于零维方法对感潮河段进行了环境容量计算;罗缙等^[16]也是运用零维计算方法建立了太湖流域平原河网区往复流河道的水环境容量模型;周孝德等^[17]提出了计算河流水环境容量的一维方法,并应用于渭河干流的环境容量计算;陈丁江等^[18]在一维方法的基础上建立了针对饮用水水源保护区内河流环境容量的计算模型和方法;杨杰军等^[19]运用河流环境容量的零维、一维计算方法核算了中国北方河道、拦河闸水体和感潮河段3种水体的水环境容量。但是中小型河流的水环境容量计算运用零维和一维2种方法,仍存在以下明显不足。

a. 零维方法。水环境容量计算公式为

$$E = E_1 + E_2 = Q(C_s - C_0) + kVC_s \quad (1)$$

式中: E ——水环境容量, g/s; E_1 ——稀释容量, g/s; E_2 ——自净容量, g/s; Q ——河段上游来水流量, m^3/s ; C_s ——水质标准, mg/L ; C_0 ——上游来水本底浓度, mg/L ; k ——综合降解系数, s^{-1} ; V ——河段水体体积, m^3 。

零维方法计算水环境容量主要存在的问题是:该方法认为河道环境容量沿程分布是均匀的,没有考虑沿程变化,同时也没有考虑排污情况与排污位置等,因此是理论上的最大值,只具有一定的指导意义。而在实际天然河道中,河道容量沿程分布是沿程变化且不均匀的,同时考虑排污状况在实际应用时是很必要的,因此零维方法计算的水环境容量在实际天然河道的环境管理中直接应用存在一定的偏差。

b. 一维方法。一维方法考虑了排污情况,从排污口断面到下游控制断面长度为 l 的河段,以控制断面水质达标为条件来确定环境容量。目前最流行的是认为下游控制断面达标,反推出河段段首处的污染物浓度为 $C_s \exp(kl/u)$ 。这样有:

$$E = E_1 + E_2 = C_s(Q + q) - C_0Q + \left[C_s \exp\left(\frac{kl}{u}\right) - C_s \right] (Q + q) = C_s(Q + q) \exp\left(\frac{kl}{u}\right) - C_0Q \quad (2)$$

式中: q ——排污口的平均排污流量, m^3/s ; l ——河段长度, m ; u ——河流平均流速, m/s 。

一维方法较零维方法更符合实际情况,也是目前应用最广泛的方法。根据式(2),一维方法可以理解和解释为:目标河段的水环境容量即为段首处污染物浓度与河段上游来水本底浓度之差所形成的容量,如图1所示。

显然,一维方法存在着明显弊端。(a)该方法中排污口断面到下游控制断面全河段的污染物浓度都是超标的,只在控制断面段尾处水质达标,因此该河段水环境功能区全部不达标,这是不符合水环境容量内涵的,也不利于污染物质的削减与控制。(b)该方法夸大了目标河段的自净容量,即图1中实际降解曲线上方的容量是不存在的;同时也不能真实地反映环境容量的沿程变化过程,应用于生产实际通常会产生较大的偏差。(c)忽略了河流由于本身断面不均匀产生的纵向分散效应,但在实际河段中由于断面不均匀导致流速不均匀是很自然的,因此污染物的纵向分散作用常常是不能忽略的。

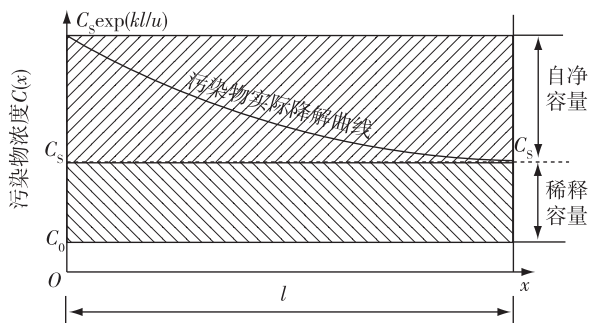


图1 一维方法计算水环境容量示意图
Fig. 1 Sketch of one-dimensional method for calculating water environmental capacity

笔者针对目前常用于中小型河流的零维、一维环境容量计算方法中存在的弊端,认为河流环境容量应是沿程变化的,同时考虑了河流纵向分散作用和河流自身可能存在固定污染源的情况,提出了一种水环境容量计算的新方法。

1 河流水环境容量计算新方法

1.1 水环境容量计算新方法

河流污染物在恒定情况的一维输运基本方程为

u \frac{\partial c}{\partial x} = E_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - kc \tag{3}

其中

E_x = \frac{0.011u^2B^2}{h\sqrt{ghI}}

式中: c ——断面污染物平均浓度, mg/L ; x ——纵向距离, m ; E_x ——纵向分散系数, m^2/s ; B ——河段平均河宽, m ; g ——重力加速度, m/s^2 ; h ——河段平均水深, m ; I ——河底比降。

可得到考虑河流自净和纵向分散作用的一维污染物输运方程的解:

C(x) = C_1 \exp \left[\frac{ux}{2E_x} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4E_x k}{u^2}} \right) \right] \tag{4}

式中: C_1 ——段首处的污染物浓度, mg/L 。

根据定义和内涵,水环境容量是由自净容量和稀释容量两部分组成的,前人研究顾及了当上游来水的污染物浓度超出水质标准时,河段也是不具备稀释容量的,应该存在负稀释容量。但是,在河道中存在固定污染源的情况下,河流的污染物浓度是沿程变化的,这样就造成了在全河段中不同河段部分的自净容量是变化的;实际上该水质超标段是不应具备自净容量的,换言之,即应该存在负自净容量,故河段的自净容量理应考虑其沿程的变化。进而推出最终的环境容量值。推导过程如下:

如图 2 所示,对于河长为 l 的中小型河段,若其段首处存在一固定排污浓度的污染源,根据河道容量的沿程变化,结合式(4)可得出在时间段 t 内目标河段的稀释总量与自净总量之和 W ,见式(5)。

W = W_1 + W_2 = [C_s(V_1 + V_2) - C_0V_1] + \int_0^l [C_s - C(x)] A dx =

[C_s(V_1 + V_2) - C_0V_1] + \int_0^l \left\{ C_s - C_1 \exp \left[\frac{ux}{2E_x} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4E_x k}{u^2}} \right) \right] \right\} A dx =

2C_s(V_1 + V_2) - C_0V_1 + \frac{2E_x C_1 (V_1 + V_2)}{ul \left(1 - \sqrt{1 + 4E_x \frac{k}{u^2}} \right)} \left\{ 1 - \exp \left[\frac{ul}{2E_x} \left(1 - \sqrt{1 + 4E_x \frac{k}{u^2}} \right) \right] \right\} \tag{5}

式中: W_1 ——稀释总量, g ; W_2 ——自净总量, g ; A ——河流断面面积, m^2 ; V_1 ——河段上游来水体积, m^3 ; V_2 ——污水排放体积, m^3 ;其他符号含义同前。

最后,计算河道的环境容量 E (即为单位时间内的 W 值):

E = \frac{W}{t} = 2C_s(Q + q) - C_0Q + \frac{2E_x C_1 (Q + q)}{ul \left(1 - \sqrt{1 + 4E_x \frac{k}{u^2}} \right)} \left\{ 1 - \exp \left[\frac{ul}{2E_x} \left(1 - \sqrt{1 + 4E_x \frac{k}{u^2}} \right) \right] \right\} \tag{6}

特别地,河段水质在段首处、段尾处达标时的 2 种极限情形如下:

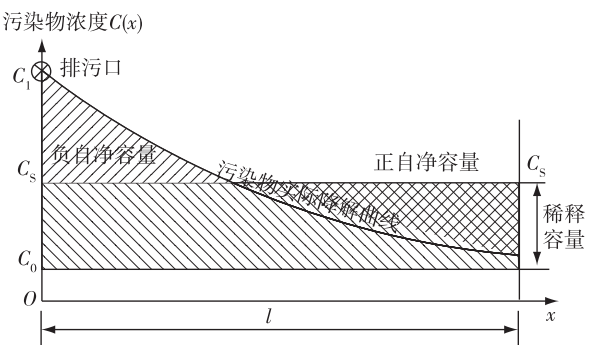


图 2 水环境容量计算新方法示意图
Fig. 2 Sketch of new method for calculating water environmental capacity

a. 当 $C_1 = C_s$ 时, 目标河段在段首处水质达标, 由于水体的降解分散作用, 河段全段水质达标。此时严格控制了河段的水质不超标, 要求太严格了, 如图 3 所示。计算公式如下:

$$E = C_s(Q + q) \left\{ 2 + \frac{2E_x}{ul \left(1 - \sqrt{1 + 4E_x \frac{k}{u^2}} \right)} \left[1 - \exp \left[\frac{ul}{2E_x} \left(1 - \sqrt{1 + 4E_x \frac{k}{u^2}} \right) \right] \right] \right\} - C_0 Q \quad (7)$$

b. 当 $C_1 = C_s \exp \left[\frac{ul}{2E_x} \left(\sqrt{1 + 4E_x \frac{k}{u^2}} - 1 \right) \right]$ (由式(4)反推出) 时, 即目标河段在段尾处水质达标, 实际河段全段水质超标, 此时环境容量计算值一般为负值, 又不利于污染物控制了, 如图 4 所示。

$$E = 2C_s(Q + q) - C_0 Q + \frac{2E_x C_s(Q + q)}{ul \left(1 - \sqrt{1 + 4E_x \frac{k}{u^2}} \right)} \left\{ \exp \left[\frac{ul}{2E_x} \left(\sqrt{1 + 4E_x \frac{k}{u^2}} - 1 \right) \right] - 1 \right\} \quad (8)$$

因此, 合理的做法应首先判断该河段是否存在环境容量, 并确定其存在正环境容量时的临界条件, 再进行河段水环境容量的计算。

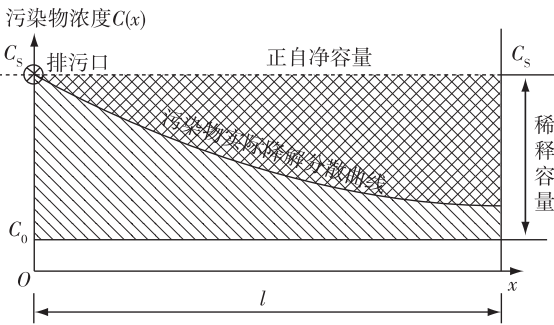


图3 全段达标时水环境容量计算示意图

Fig. 3 Sketch of water environmental capacity calculation when water quality indicators throughout reach are within standards

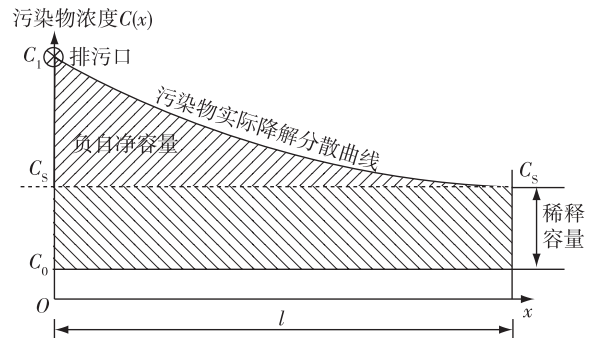


图4 全段超标时水环境容量计算示意图

Fig. 4 Sketch of water environmental capacity calculation when water quality indicators throughout reach exceed standards

1.2 河道存在正环境容量的临界判据

1.2.1 河道存在正环境容量的最大允许排污浓度

对于实际河段, 由于水环境容量的稀释部分和自净部分都是可能存在正或负的情况, 可令目标河段总的环境容量为零, 求解出河段存在正环境容量的排污口临界排放浓度, 即最大允许排污浓度值。

令河段水环境容量 $E = 0$, 可由式(6)推导出河段起始断面浓度的最大值 $C_{1, \max}$:

$$C_{1, \max} = \frac{ul [2C_s(Q + q) - C_0 Q] \left(1 - \sqrt{1 + 4E_x \frac{k}{u^2}} \right)}{2E_x(Q + q) \left\{ \exp \left[\frac{ul}{2E_x} \left(1 - \sqrt{1 + 4E_x \frac{k}{u^2}} \right) \right] - 1 \right\}} \quad (9)$$

则可求得河段存在环境容量的排污口最大允许排放浓度:

$$C_{p, \max} = \frac{C_{1, \max}(Q + q) - C_0 Q}{q} = \frac{ul [2C_s(Q + q) - C_0 Q] \left(1 - \sqrt{1 + 4E_x \frac{k}{u^2}} \right)}{2E_x q \left\{ \exp \left[\frac{ul}{2E_x} \left(1 - \sqrt{1 + 4E_x \frac{k}{u^2}} \right) \right] - 1 \right\}} - \frac{C_0 Q}{q} \quad (10)$$

1.2.2 河道存在正环境容量的最大允许超标长度比例

当河段总的水环境容量为零时, 可计算出河道存在正环境容量的最大允许超标长度比例 $\alpha_{\max}$:

$$\alpha_{\max} = \frac{2E_x}{ul \left(\sqrt{1 + \frac{4E_x k}{u^2}} - 1 \right)} \ln \frac{ul [2C_s(Q + q) - C_0 Q] \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4E_x k}{u^2}} \right)}{2E_x C_s(Q + q) \left\{ \exp \left[\frac{ul}{2E_x} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4E_x k}{u^2}} \right) \right] - 1 \right\}} \quad (11)$$

1.3 计算步骤

采用本文计算方法的流程如图 5 所示。

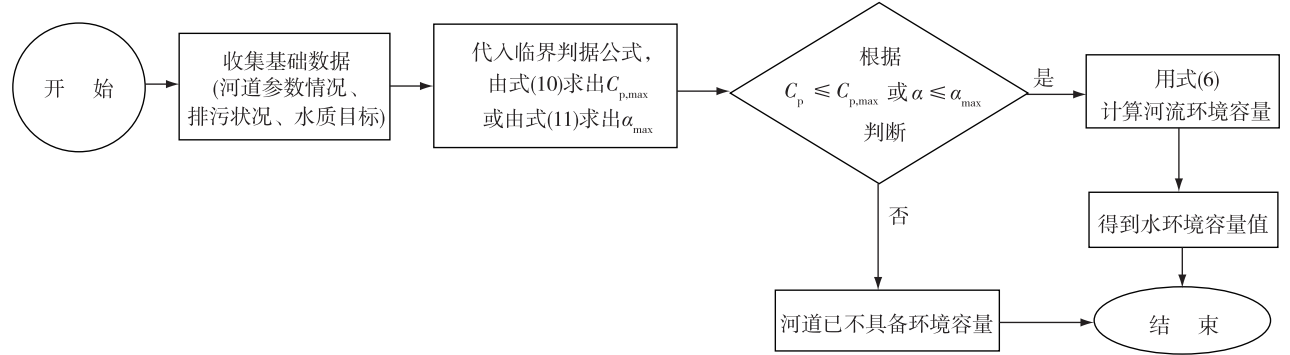


图 5 水环境容量计算流程
Fig. 5 Flow chart of water environmental capacity calculation

2 算例比较

某河段长 $l=25\text{ km}$, 流量 $Q=10\text{ m}^3/\text{s}$, 流速 $u=0.2\text{ m/s}$, 本底浓度 $C_0=18\text{ mg/L}$, 其相应的 COD_{Mn} 水质目标 $C_s=20\text{ mg/L}$, COD_{Mn} 综合降解系数 $k=0.25/\text{d}$ 。该河道段首处设有固定排污浓度 $q=0.8\text{ m}^3/\text{s}$ 的排污源, 由经验公式得到纵向分散系数 $E_x=0.53\text{ m}^2/\text{s}$ 。分别设定 3 种不同的排污浓度背景值进行算例比较, 浓度值分别为 80、150、200 mg/L 。

根据本文提出的环境容量计算方法的步骤, 首先依据上述基础数据, 由临界判据公式 (10) 或 (11), 得到当存在正环境容量时的最大允许排污浓度为 $C_{p,\text{max}}=150\text{ mg/L}$ 或该河道最大允许超标长度比例为 $\alpha_{\text{max}}=0.91$ 。故判断出排污浓度为 80 mg/L 时, 该河段存在正值的环境容量; 排污浓度为 200 mg/L 时, 该河段已不具备环境容量。具体计算结果见表 1。

表 1 不同排污状况下的环境容量计算值
Table 1 Water environmental capacity calculation results under different drainage conditions

算例	排污状况		实际超标长度 比例 α	环境容量/ ($\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$)		
	排污流量 $q/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	排污浓度背景值 $C_p/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		本文方法 E_1	零维方法 E_2	一维方法 E_3
1	0.80	80	0.34	47.25	92.34	130.12
2	0.80	150	0.91	0.00	92.34	130.12
3	0.80	200	1.00	-33.30	92.34	130.12

可以看出, 不论排污浓度如何变化, 对零维和一维方法的环境容量计算结果都是没有影响的; 而河流存在天然排污口的情况时, 该河段的容量是沿程变化的, 这也恰恰是决定河段是否存在环境容量的重要依据。对于算例 3, 排污浓度过大已经导致全河段的水质超标, 环境容量已为负值, 根本就不具备环境容量了, 因此零维、一维方法的结果是不符合天然实际情况的。本文新方法的计算结果可以反映实际河段水环境容量的沿程变化, 将临界排污浓度或最大允许超标长度比例作为评判是否存在河流容量的依据, 消除了自净容量的夸大部分, 结果更接近环境容量的真实值, 更具实用性和可操作性。

3 结 论

本文以水环境容量的定义和本质内涵为基石, 剖析并指出了常用于中小型河流的零维、一维环境容量计算方法的不足和弊端; 根据河流的天然情况和排污状况, 从水环境容量的内涵出发, 考虑了河流环境容量的沿程变化过程, 推导出一种计算河道环境容量的新方法, 使其与实际情况更为契合; 在此基础上, 提出了河道存在环境容量时的临界判据, 分别得到排污口最大允许排放浓度、河道最大允许超标长度比例的值。通过算例和比较分析, 证明了该计算新方法的结果更符合客观实际情形, 也易于操作应用。该计算方法可为环境管

理部门更准确地确定环境容量和合理控制排污口源强提供可靠的技术支撑。

参考文献:

- [1] SAHOO G B, NOVER D M, REUTER G E, et al. Nutrient and particle load estimates to Lake Tahoe (CA-NV, USA) for total maximum daily load establishment[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 444(2): 579-590.
- [2] CHEN D, DAHLGRENC R A, SHEN Y A. Bayesian approach for calculating variable total maximum daily loads and uncertainty assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 430(14): 59-67.
- [3] KIM J, ENGELB B A, PARKA Y S, et al. Development of Web-based Load Duration Curve system for analysis of total maximum daily load and water quality characteristics in a water-body[J]. *Environmental Management*, 2012, 97(2): 46-55.
- [4] SEHERER C R. On the efficient allocation of environmental assimilative capacity: the case of thermal emissions to large body of water[J]. *Water Resource Research*, 1975, 11(1): 180-181.
- [5] GOYAL P, ANAND S, GERA B S. Assimilative capacity and pollutant dispersion studies for Gangtok city[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(9): 1671-1682.
- [6] CHADDERTON R A, MILLER A C, MCDONNELL A J. Analysis of wasteload allocation procedures[J]. *Water Resources Bulletin*, 1981, 17(5): 760-766.
- [7] MAEDA S, KAWACHI T, UNAMI K, et al. Controlling wasteloads from point and nonpoint sources to river system by GIS-aided epsilon robust optimization model[J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2010, 4(1): 27-36.
- [8] 张永良, 刘培哲. 水环境容量综合手册[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- [9] 关卉. 湛江市水环境容量分析与应用研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
- [10] 张永良. 水环境容量基本概念的发展[J]. *环境科学研究*, 1992, 5(3): 59-61. (ZHANG Yongliang. The development of basic concept of water environmental capacity[J]. *Research of Environmental Sciences*, 1992, 5(3): 59-61. (in Chinese))
- [11] 宿俊英, 刘树坤, 何少答, 等. 太湖水环境容量的研究[J]. *水利学报*, 1992, 23(11): 22-36. (SU Junying, LIU Shukun, HE Shaoda, et al. Water quality management in Tai Lake[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1992, 23(11): 22-36. (in Chinese))
- [12] 陈益明. 规划环评中海湾水环境容量的计算方法[J]. *水资源保护*, 2014, 30(3): 70-75. (CHEN Yiming. A method for calculation of environmental capacity of bay water during planning environmental impact assessment[J]. *Water Resources Protection*, 2014, 30(3): 70-75. (in Chinese))
- [13] 黄真理, 李玉梁, 李锦秀, 等. 三峡水库水环境容量计算[J]. *水利学报*, 2004, 35(3): 7-14. (HUANG Zhengli, LI Yuliang, LI Jingxiu, et al. Water environmental capacity for the reservoir of three gorges project[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(3): 7-14. (in Chinese))
- [14] 龚若愚, 周源岗. 柳江柳州段水环境容量研究[J]. *水资源保护*, 2001, 17(1): 31-32. (GONG Ruoyu, ZHOU Yuangang. Study on capacity of water environment of Liuzhou Section of Liujiang River[J]. *Water Resources Protection*, 2001, 16(1): 31-32. (in Chinese))
- [15] 王华, 逢勇, 丁玲. 滨江水体水环境容量计算研究[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(12): 2067-2073. (WANG Hua, PANG Yong, DING Ling, Calculation of the water environment capacity for a water front body[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(12): 2067-2073. (in Chinese))
- [16] 罗缙, 逢勇, 罗清吉. 太湖流域平原河网区往复流河道水环境容量研究[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2004, 32(2): 144-146. (LUO Jin, PANG Yong, LUO Qingji, et al. Study on water environment capacity for reversing current channels in plain river network region in Taihu Lake Basin[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2004, 32(2): 144-146. (in Chinese))
- [17] 周孝德, 郭瑾珑, 程文, 等. 水环境容量计算方法研究[J]. *西安理工大学学报*, 1999, 15(3): 1-6. (ZHOU Xiaode, CHENG Jinong, CHENG Wen, et al. The comparison of the environmental capacity calculation methods[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 1999, 15(3): 1-6. (in Chinese))
- [18] 陈丁江, 吕军, 沈晔娜, 等. 饮用水水源保护区河流水环境容量计算模型[J]. *环境科学*, 2008, 29(9): 2437-2440. (CHEN Dingjiang, LYU Jun, SHEN Yena, et al. Water environmental capacity calculation model for the rivers in drinking water source conservation area[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(9): 2437-2440. (in Chinese))
- [19] 杨杰军, 王琳, 王成见, 等. 中国北方河流环境容量核算方法研究[J]. *水利学报*, 2009, 40(2): 194-200. (YANG Jiejun, WANG Ling, WANG Chengjian, et al. Environmental capacity of rivers in North China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(2): 194-200. (in Chinese))