

河流水功能过渡区长度的影响研究

徐贵泉^{1 2}, 褚君达²

(1. 上海市水务规划设计研究院, 上海 200232; 2. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 采用水功能过渡区的新理念, 根据一维水流的污染物对流扩散方程, 提出河流水功能过渡区长度的计算方法, 并分析了水功能过渡区长度受水动力条件、污染物特性、底泥释放污染物等影响因素的变化规律, 为分析论证水功能区的合理性、可行性以及优化调整过渡区提供了关键技术支撑和科学依据。

关键词 河流; 水功能区; 过渡区长度; 计算方法; 影响因素

中图分类号 X52 **文献标识码** A **文章编号** 1004-693X(2006)04-0024-03

Influence of length of river water functional transition zone

XU Gui-quan^{1 2}, CHU Jun-da²

(1. Shanghai Water Planning and Design Research Institute, Shanghai 200232, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract According to the new concept of water functional transition zone and the one-dimensional convection-diffusion equation, a method for calculating the length of water functional transition zone of rivers was proposed. The variation laws of the influences factors of hydraulic conditions, contaminant characteristics and contaminants released from sediment on the length were studied. This method provides a technical support and scientific basis for demonstration of the rationality and feasibility and optimization of water functional transition zone.

Key words river; water functional region; length of transition zone; calculation method; influencing factor

国外的水功能区没有设置过渡区, 国内的水功能区划提出了设置水功能过渡区的新概念^[1-3], 目的是为了确高功能水域的水质能够满足高标准的水质要求。经济社会的生活、生产、生态等方面都需要用水, 水的用途不同, 对水质的要求也不同, 因此, 要顺利衔接水质要求不同的相邻功能区, 就得设置由低标准水质过渡到高标准水质的水功能过渡区。但是, 过渡区的范围到底是多大, 目前尚未发现关于水功能过渡区范围的定量计算方法的科技文献。在绝大多数的水功能区划中, 过渡区的范围一般采用 5 ~ 20 km 左右, 带有一定的盲目性, 缺乏定量的科学依据。因此, 研究水功能过渡区范围的计算方法及其影响因素, 不仅在学术上具有重大意义和理论价值, 而且也是分析论证水功能区的合理性、可行性以及优化调整水功能过渡区或缓冲区范围等实际工作

中迫切需要解决的关键技术问题^[4]。

1 一维水流的污染物对流扩散水质基本方程

基于水流的运动规律和污染物在水流中的迁移转化规律, 如果河流沿纵向的流动是主导流动, 水流沿横向、垂向的流速分量可以忽略不计, 而且在河流同一横断面上的浓度(或温度)是混合均匀的, 即在河流同一横断面上任意一点的浓度(或温度)沿横向、垂向的梯度可以忽略不计, 因此, 可将实际水流的污染物对流扩散方程简化为一维的污染物纵向对流扩散方程, 来研究河流横断面污染物混合均匀的一维水流水功能过渡区的长度及其浓度分布。

一维水流的污染物对流扩散基本方程:

$$\frac{\partial (AC)}{\partial t} + \frac{\partial (QC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AE_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) - kAC + \frac{A}{h} S_0 \quad (1)$$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59979006); 上海市科委重点科研资助项目(04DZ12027)

作者简介: 徐贵泉(1965—)男, 江苏如东人, 高级工程师, 博士, 主要从事环境水力学与水务规划设计方面的研究工作。E-mail: xugq1123@

式中: A 为过水断面面积 m^2 ; Q 为流量 m^3/s ; C 为污染物质量浓度 mg/L ; k 为污染物综合衰减系数, $1/\text{s}$; E_x 为纵向分散系数 m^2/s ; S_0 为底泥释放污染物系数, $\text{g}(\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$; h 为平均水深, m ; x 为纵向距离, m ; t 为时间 s 。

2 恒定流的水功能过渡区长度研究

在恒定流状态下,对某一水功能过渡区的任意位置,流量 Q 为不随纵向位移和时间变化的常数 $Q(x, t) = Q$, C 为不随时间变化的常数 $C(x, t) = C$ 。如果水流从低标准水质流向高标准水质,则在水功能过渡区范围内一般不允许排放污染物,由此来计算确定水质过渡区范围,否则,水质过渡区的范围将会扩大,而且受污染负荷的大小影响显著。

2.1 均匀流条件下的水功能过渡区

方程(1)在恒定流态下,假设 E_x 、 A 、 k 、 h 、 S_0 沿河流纵向没有变化,则得一维恒定流的污染物对流扩散方程:

$$\frac{d^2 C}{dx^2} - \frac{u}{E_x} \frac{dC}{dx} - \frac{kC}{E_x} = -\frac{S_0}{hE_x} \quad (2)$$

根据二阶常系数的非齐次线性微分方程求解方法,经过推导可得一维恒定流的污染物对流扩散方程的解析解为

$$C(x) = \left(C_u - \frac{S_0}{kh} \right) \exp \left[\frac{ux}{2E_x} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4kE_x}{u^2}} \right) \right] + \frac{S_0}{kh} (u \neq 0) \quad (3)$$

一维恒定流态下水功能过渡区长度的计算公式为

$$L = \frac{2E_x}{u \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4kE_x}{u^2}} \right)} \ln \left(\frac{khC_d - S_0}{khC_u - S_0} \right) (u \neq 0) \quad (4)$$

式中: C_u 为上游低标准水质的污染物质量浓度 mg/L ; C_d 为下游高标准水质的污染物质量浓度 mg/L ; L 为低标准水质(高污染物浓度)过渡到高标准水质(低污染物浓度)的过渡区长度 m ; u 为水质过渡区的恒定流断面平均流速 m/s 。

因此,只要水流是从低标准水质(高污染物浓度)的水体流向高标准水质(低污染物浓度)的水体,就存在水质过渡区,其范围大小与河流的断面平均流速、污染物综合衰减系数、相邻水质标准差异、纵向分散系数、底泥释放污染物、水深等因素有关。

2.2 非均匀流条件下的水功能过渡区

首先根据河流断面平均流速的沿程变化和高标准水质临界位置划分河段,然后参照均匀流的计算方法,逐河段联立浓度分布方程,计算相应河段上边

界的断面污染物浓度,再用低标准水质的污染物浓度与逐河段的上边界断面污染物浓度进行分析比较,推求水功能过渡区的上边界位置,由此再计算水功能过渡区的长度,详见文献[4]。

3 非恒定流的水功能过渡区研究

实际河流中的水流运动一般都属于非恒定流动,因此可根据水流运动的时空变化和资料条件,选定下列3种方法来确定水功能过渡区长度。

a. 稳态法。根据长系列的水文资料进行水文概率统计分析,采用 $P = 10\%$ 保证率的最丰月平均流量相应的断面平均流速、平均水深,再结合污染物综合衰减系数和底泥释放污染物系数的有关实验成果,将最丰月断面平均流速、平均水深、纵向分散系数、相邻高、低标准水质的污染物浓度、污染物综合衰减系数和底泥释放污染物系数,代入公式(4),来分别计算不同水质指标的过渡区长度。

b. 准动态法。根据长系列水文资料中断面平均流速在每年枯、平、丰水期的变化情况,分时段选择样本系列,整编后形成枯水期、丰水期、平水期三种样本长系列水文资料,然后对此分时段、分河段对流量或流速进行概率统计分析,可得出不同时段 $P = 10\%$ 的河流分河段临界流速,即河流的实际流速小于等于该临界流速出现的概率为 90% ,参照稳态法来分别计算在不同时段相关水质指标的过渡区长度。

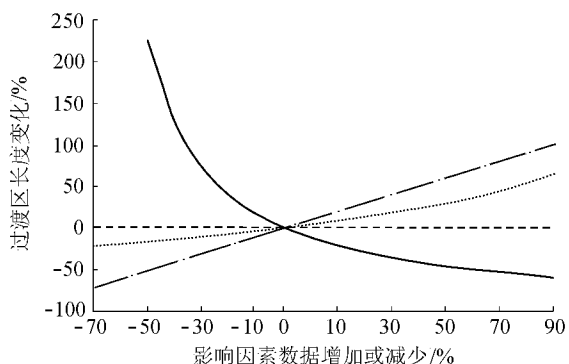
c. 动态法。基于非恒定流的水量水质和水环境容量集成模型,选定 $P = 10\%$ 的河流设计水文变化过程,模拟计算水功能过渡区长度的变化过程。

上述三种计算方法各有千秋。稳态法简单实用,得出的过渡区长度是一个稳态值,但是没有考虑过渡区长度随水情的变化,过渡区长度在平、枯水期偏大。准动态法应用也不复杂,得出的过渡区长度考虑了在枯、平、丰水期的变化,更加实用,与实际比较接近,但是不能反映过渡区长度的月、日变化。动态法采用数值计算方法,可以全面反映不同水情对水功能过渡区长度的影响变化。

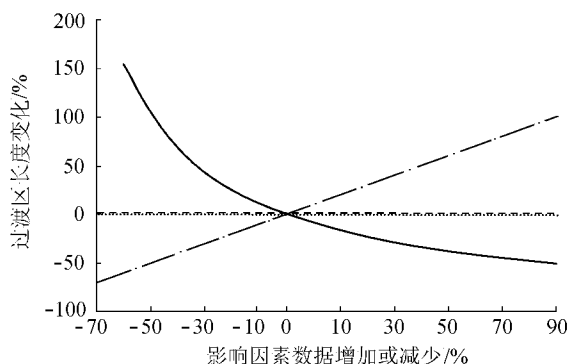
4 河流水功能过渡区长度的影响分析

已知某一条河流,水功能过渡区的类型为Ⅳ类水质过渡到Ⅲ类水质,河流的平均水深约为 3.50 m 。计算分析 BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Cr} 相应的水功能过渡区长度受水动力条件、污染物特性以及底泥释放污染物的影响变化。根据以往国内外对河流水质参数的大量研究成果, BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Cr} 综合衰减系数变化比较集中的范围为: $k_B = 0.08 \sim 0.20 \text{ d}^{-1}$ 、 $k_N = 0.04 \sim 0.10 \text{ d}^{-1}$ 、 $k_C = 0.04 \sim 0.10 \text{ d}^{-1}$ 。

—— 综合衰减系数 ---- 纵向分散系数 - · - 断面平均流速 底泥释放系数



(a) $\text{NH}_3\text{-N}$



(b) COD_{Cr}

图1 IV ~ III类水的过渡区长度影响因素灵敏度分析比较

4.1 水动力条件的影响分析

水功能过渡区的长度均随着流速的增大呈线性关系显著扩大,即 $L = au + b$,系数 a 、 b 随着水质指标、水功能过渡区类型、污染物综合衰减系数不同而变化。当流速每增加 0.0208 m/s 时, BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Cr} 随着其综合衰减系数的增大,相应过渡区扩大的长度分别为 $9.12 \sim 3.65 \text{ km}$ 、 $18.24 \sim 7.30 \text{ km}$ 、 $18.24 \sim 7.30 \text{ km}$ 。随着流速的增大,如果污染物综合衰减系数越小,则水功能过渡区长度的增量越大,如果污染物综合衰减系数越大,则水功能过渡区长度的增量越小。随着河流纵向分散系数的递增, BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Cr} 的过渡区长度变化不大。

4.2 污染物特性的影响分析

水功能过渡区的长度均随着污染物综合衰减系数的增大,按其幂函数 $L = ak^b$ ($a > 0$, $b < 0$ 且 $b \approx -1$) 的关系曲线减小,系数 a 、 b 随着水质指标、水功能过渡区类型、流速不同而变化。当流速为 0.0208 m/s 时, BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Cr} 的过渡区长度随相应综合衰减系数递增变化分别缩短了 5.48 km 、 10.95 km 、 10.95 km ;当流速增大到 0.2083 m/s 时, BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Cr} 的过渡区长度随相应综合衰减系数递增变化分别缩短了 54.74 km 、 109.48 km 、 109.48 km ,每当流速增大一倍, BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Cr} 随其综合衰减系数递增变化,相应过渡区缩短的最大长度也增加一倍。水质指标不同,相应的过渡区长度也不同,一般地 $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标要求的过渡区长度最长, BOD_5 指标要求的过渡区长度最短,即 $L_N \geq L_C > L_B$ 。

4.3 底泥释放污染物的影响分析

设河流底泥释放污染物 BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Cr} 的系数递增变化范围每天为 $0.0 \sim 0.13 \text{ g/m}^2$,断面平均流速为 0.1042 m/s ,则 BOD_5 和 COD_{Cr} 的过渡区扩大的长度范围均在 4 km 以下, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的过渡区长度增

加了 207.59 km 。因此,随着底泥释放污染物系数的递增, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的过渡区增加的长度最长, COD_{Cr} 的过渡区增加的长度最短, $\Delta L_N > \Delta L_B > \Delta L_C$ 。

4.4 影响因素的灵敏度分析

以 BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Cr} 的综合衰减系数和相应的底泥释放污染物系数实验研究成果以及断面平均流速 0.1042 m/s 为基准值,同倍比放大或缩小调整各自变化的百分数,来计算分析这些因素对过渡区长度的影响灵敏度。上述因素同倍比放大变化对水功能过渡区长度的影响灵敏度大小排序为:断面平均流速大于污染物综合衰减系数大于底泥释放污染物系数大于纵向分散系数;上述因素同倍比缩小变化对水功能过渡区长度的影响灵敏度大小排序为:污染物综合衰减系数大于断面平均流速大于底泥释放污染物系数大于纵向分散系数(图1)。

5 结 语

本文采用水功能过渡区的新理念,根据一维水流的污染物对流扩散方程,经过推导提出了河流水功能过渡区长度的计算方法,并分析了水功能过渡区长度受水动力条件、污染物特性、底泥释放污染物等影响因素的变化规律。

参考文献:

- [1] 王超,朱党生,程晓冰.地表水功能区划分系统的研究[J].河海大学学报:自然科学版,2002,30(5):7-11.
- [2] 纪强,史晓新,朱党生.中国水功能区划的方法与实践[J].水利规划与设计,2002(1):44-47.
- [3] 袁弘任.水功能区划方法及实践[J].水利规划与设计,2003(2):19-24.
- [4] 徐贵泉.感潮河网水功能过渡区及水环境承载能力研究[D].南京:河海大学,2005.

(收稿日期:2005-08-18 编辑:高渭文)