

沂沭泗流域降解系数及纳污能力测算研究

李晶莹, 曹升乐, 杨裕恒

(山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061)

摘 要: 为了控制污染物排放、明确水功能区限制纳污红线,以沂沭泗流域境内的4个水功能区为例,分析了水体COD、氨氮的降解系数及其变化规律,拟合出了与流速相关的水体污染物降解系数的经验公式;采用一维水质模型,计算了2015年4个水功能区的COD、氨氮纳污能力,并核定75%和90%水文保证率下的COD和氨氮纳污能力分别为2020年和2025年限制纳污红线值,对其进行了预测。结果表明:2015年、2020年、2025年研究区的COD、氨氮纳污能力红线值分别为2 264.03、34.48、1 566.4、21.95 t与887.71、15.16 t,2020年和2025年的COD和氨氮应削减率为30.81%、36.34%与60.79%、56.03%。

关键词: 降解系数; 纳污能力; 限制纳污红线; 水功能区; 沂沭泗流域

中图分类号: X143; X828

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)01-0026-06

The degradation coefficient and assimilative capacity of Yishusi River Basin

LI Jingying, CAO Shengle, YANG Yuheng

(School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: In order to controll pollutant discharge and identifying the red line of restricting pollutants in the water function area, taking the four water function areas in the Yishusi River basin in Shandong Province as an example, the degradation coefficients and variations of water body COD and ammonia nitrogen were analyzed. The empirical formula for degradation coefficient of water pollutant, related to the velocity, were fitted. The pollutant carrying capacity of COD and $\text{NH}_3\text{—N}$ of four water function areas in 2015 were calculated by using one-dimensional water quality model, and it was verified that pollutant carrying capacities of COD and $\text{NH}_3\text{—N}$ at the hydrological guaranteed rates of 75% and 90% were defined as the capacity limit red lines in 2020 and 2025 for the studied region, respectively. Finally, the forecast was conducted. The results showed that, the permissible pollution bearing capacity of COD and $\text{NH}_3\text{—N}$ in 2015, 2020 and 2025 were 2264.03 and 34.48, 1566.4 and 21.95, and 887.71 and 15.16 tons, respectively. The pollutant reduction rates of COD and $\text{NH}_3\text{—N}$ were 30.81% and 36.34% in 2020, and 60.79% and 56.03% in 2025, respectively.

Key words: degradation coefficient; assimilative capacity; limit carry red line; water function zone; Yishusi River Basin

1 研究背景

水体通过物理的流动混合作用与生化的分解作用,具有自发稀释降解污染物的功能,使得水域内水质得到一定程度的提升。降解系数可以表示水域对污染物的降解能力,同时也是研究水域水质变化、纳污情况等问题的主要参数之一^[1]。为了分析污染

物降解系数通常采用现场测量、拟定经验公式或模型率定等方法^[2]。引起降解系数变化的因素较多,对于流速、流量、pH、水温等变量因子^[3],可通过测定方法获取数据后,需运用一些数学方法找出其变化规律^[4]。目前国内外对水体纳污能力的研究均基于水质数学模型^[5],通过模拟设计流量、入河污染物浓度、降解系数等因素对纳污能力的影响,逐步

收稿日期:2016-11-14; 修回日期:2016-12-02

基金项目:水利部公益项目(1261410110030)

作者简介:李晶莹(1993-),女,山东泰安人,硕士研究生,研究方向为水文学及水资源。

通讯作者:曹升乐(1960-),男,陕西蒲城人,博士,教授,博士生导师,研究方向为水文学及水资源。

建立起目标水质、现状水质与纳污能力之间的动态响应关系^[6],研究纳污能力已成为污染物排放量控制^[7]、水功能区水质目标确定^[8]与生态补偿建设^[9]等的科学依据。随着“中央一号文件”中“三条红线”政策的提出^[10],对水功能区纳污能力的研究提出了更高的要求,当前研究集中在构建“三条红线”控制指标体系^[11]、分析现状年纳污能力^[12]等方面,对于预测水功能区未来限制纳污红线值研究较少。

本文以沂沭泗水系为例,研究水体 COD、氨氮的降解系数及其变化规律,建立模型计算水功能区的纳污能力,并预测 2020 年与 2025 年限制纳污红线值^[13],将水功能区限制纳污研究作为减少水体污染任务的工作重点。

2 研究区域概况

沂沭泗河是沂河、沭河、泗河 3 条河流的简称,位于山东省西南部,连接了大汶河、小清河流域,毗邻豫皖苏^[14],也是南水北调工程的重点控制区域之一。该流域位于温带季风性气候带,夏季温热潮湿,冬季寒冷少雨,年平均气温 13 ~ 14℃,多年平均降雨量 723 mm。在沂沭泗流域农业、工业迅速发展的同时,水体污染物负荷日益增加,水资源短缺问题逐渐显著,这都成为水资源管理工作不可忽视的问题。因此,对沂沭泗流域的污染现状进行分析并计算纳污能力,是严控水体污染物排放的关键工作。

3 水功能区限制纳污红线值确定标准

考虑水功能区类别差异以及水功能区的污染状况,采用保持与限制两种途径量化不同规划水平年的限制纳污红线值,即各研究区水质目标和水质现状下水域能承担的最大污染负荷。对于水质已符合区划要求的功能区,要求保持水质状态,令限制纳污红线值为污染物入河量;而现状年污染超标不符合要求的功能区,则令其限制纳污红线值为计算的纳污能力,需要限制其污染物排放量,使其逐步达到符合要求的范围。如果研究水域为缓冲区或饮用水源区,以改善水质为原则,禁止排污,故限制纳污红线值为零。确定水功能区的限制纳污红线值是基于研究水域的管理需求、当前水质及污染情况,来推求降解系数并构建模型分析纳污能力。

4 确定降解系数

4.1 采样数据分析

本文数据来自中国环境监测总站(<http://www.cnemc.cn/>)与山东省水文局。选择 2015 年 5 月 7 日~6 月 18 日共 7 组数据,并选定临沂重坊桥河段、淄博田庄水库河段、临沂清泉寺河段、济宁红旗闸河段的化学需氧量(COD)、氨氮(NH₃-N)的浓度、河流温度、溶解氧、pH 值、流速等数据^[15],进行数据分析。

选择春夏时期对上述河段进行采样,温度为 17.4 ~ 24.2℃,水温处在升温状态,平均温度为 20.4℃。采样时的水温较为符合典型水温 20℃,属于水域产生降解作用的适合条件。取样水体的 pH 值范围为 7.27 ~ 8.65,均值为 7.97,此种弱碱状态适于水体污染物降解过程。实验周期内 DO 浓度变幅较大,采样点的溶解氧浓度值均在 7.18 ~ 16.2 mg/L 变动,且均值都处于 10.83 mg/L 左右,水体处于高好氧状态,适合水体污染物降解自净的发生。流速受降雨等自然因素影响以及人为活动影响较大,因此每次测算数值大小并不均一,在 0.03 ~ 0.54 m/s 之间浮动,各点的平均流速为 0.26 m/s。

综上所述,整个实验周期内室外实验部分研究水体的温度接近典型温度 20℃;溶解氧浓度的均值为 10.83 mg/L,水体处于高好氧状态;pH 值处于 8 左右,维持在弱碱性状态。所有这些条件均适合水体污染物降解过程的发生,为后续研究创造了良好条件。

4.2 数据应用神经网络分析

令温度为协变量,流速、pH、DO、COD、流量为影响因子,降解系数 K 为因变量进行神经网络分析,其中协变量采用标准化协变量重度标的方法进行计算。选用培训样本 80%、检验样本 20%,进行多层感知器模拟^[16],对上述影响因子进行标准化重要性分析(见图 1)。

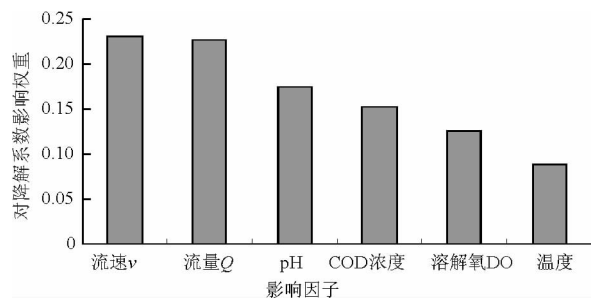


图 1 标准化影响因子重要性

从图 1 可以看出,5 个影响因子按重要程度排名依次是流速 v 、流量 Q 、pH、COD、DO、温度,其中流速为最重要的影响因子,温度的影响最弱。其原因可能是温度接近 20℃,波动较小,要探讨温度的

影响,须通过长期数据检测其变化。本文通过因子分析中降维的思想,找出与降解系数较为相关的影响因素,并进行进一步分析。分析说明,通过简化减少变量,代替原有变量进行模型的建立,可以克服过多研究变量所带来的分析过程复杂性。这在将来的研究中有重要意义。

4.3 降解系数结果分析

4.3.1 降解系数确定原理 水体污染物的降解过程,可根据一级反应动力学关系表达:

$$\frac{dC}{dt} = -KC \tag{1}$$

积分为:

$$C = C_0e^{-Kt} \tag{2}$$

得 的计算式为:

$$K = \frac{1}{t} \ln \left| \frac{C_0}{C} \right| \tag{3}$$

式中: t 为反应时间,d ; K 为污染物的综合降解系数, d^{-1} ; C 为 t 时刻测定的污染物浓度,mg/L ; C_0 为初始污染物浓度,mg/L。

4.3.2 降解系数与温度关系的回归 由于数据测定温度为 20℃,因此需换算至自然情况时的综合降解过程,符合菲尔普斯公式的适用条件^[17]:

$$K_t = K_{20} \cdot \theta^{t-20} \tag{4}$$

式中: K_t 为 T ℃ 时的 K 值, d^{-1} ; t 为水温,℃ ; K_{20} 为 20℃ 时的 K 值, d^{-1} ; θ 为温度系数,一般在 1.03 ~ 1.1 的范围内,本文根据以往数据,取 1.06^[18]。

4.4 污染物降解系数分析及经验公式拟合

根据以往经验及研究,温度、流速、DO、pH 值、污染物浓度 5 项影响因素中,流速是降解系数最关键的环境因素,并且与其呈现正相关关系。由上述 4 个断面的现场实测资料,采用计算机供给模拟出与流速相关的水体污染物降解系数的经验公式。当缺少相关水文数据或只需粗略计算时,可迅速求得相应水体污染物的降解系数,COD 与氨氮降解系数拟合曲线如图 2、3 所示,COD 与氨氮降解系数拟合公式见表 1。

拟合时发现以实验的方法来确定污染物综合降解系数时,实验本身系统和人为等因素会造成一定的误差,因而如果完全依据实验结果确定的降解系数也会有一定的偏差。例如在确定污染物化学需氧量 COD 的综合降解系数时,由于对低浓度 COD(小于 30 mg/L)测量本身就有一定的误差,所以若完全根据其实验结果来确定,可能就和实际情况有所不同;另外,在多泥沙河流上的水质监测时,样品前处

理的方法不同(如是否离心、固定剂的用量等),最后实验结果会有很大的差别。因此对于这样实验误差,应在实验数据的基础上,结合实际情况综合考虑,进行一定的修订,把误差减小到最小程度。

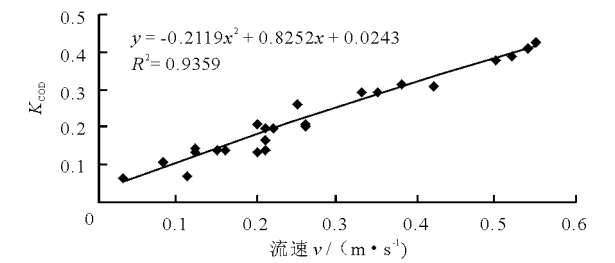


图 2 COD 降解系数拟合图

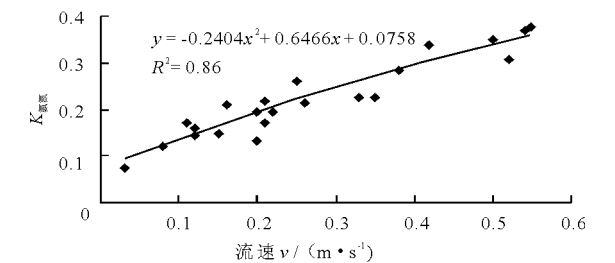


图 3 氨氮降解系数拟合图

表 1 降解系数 拟合公式

降解系数	拟合公式	R^2
K_{COD}	$K = -0.2119v^2 + 0.8252v + 0.0243$	$R^2 = 0.9359$
$K_{氨氮}$	$K = -0.2404v^2 + 0.6466v + 0.0758$	$R^2 = 0.86$

为了验证测算结果的可靠性,利用沂河水明崖、沭河陈塘桥、泗河故县坝 3 个监测断面历史资料对应水期的观测数据,计算 COD 和氨氮从水域上游流到下游采样点时的浓度,得计算值;并在下游采样点同时进行测定,得到实测值;并对降解系数计算值与实测值进行比较(见表 2)。

表 2 降解系数计算值与实测值比较

监测断面	流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	K_{COD}			$K_{氨氮}$		
		实测值	计算值	误差/ %	实测值	计算值	误差/ %
沂河水明崖	0.26	0.23	0.22	4.3	0.22	0.23	4.5
沭河陈塘桥	0.25	0.23	0.22	4.3	0.23	0.22	4.3
泗河故县坝	0.35	0.28	0.29	3.6	0.27	0.27	0

由表 2 可以看出,沂河、沭河、泗河 COD 和氨氮降解系数的实测值与计算值差别很小,这种差别的产生是因为忽略了下游断面污染物排放量的不稳定性,且上游排污对下游的影响有一定的水团运行时间滞后性。误差控制在 10% 以下,证明采用一维模型所求综合降解系数结果可信,将降解系数计算值结果用来确定水功能区纳污能力是可行的。

5 水功能区纳污能力计算及预测

以山东临沂重坊桥河段、淄博田庄水库河段、临沂清泉寺河段、济宁红旗闸河段分别位于的沂河临沂农业用水区、沂河沂源源头保护区、老沭河郯城农业用水区、泗河曲阜兖州段农业用水区为例,计算其纳污能力。

5.1 计算模型

由于沂沭泗河流属于小型河流,其特征为主要河道较窄,宽深比较小,污染物在较短时间内即可混合均匀,且其浓度在沿河流横向变化较小。此类型河流符合一维水质模型的适用条件^[19],故利用一维水质模型公式(2)来计算水功能区纳污能力。

$$W = 31.536(C_s e^{\frac{K_s L}{86.4 \times 24 u}} - C_0 e^{-\frac{K_s L}{86.4 \times 24 u}}) \cdot Q \quad (5)$$
式中: W 为计算单元的纳污能力,t/a; C_0 为计算单元上断面污染物浓度,mg/L; C_s 为计算单元水质目标值,mg/L; K 为污染物综合降解系数,d⁻¹; L 为功能区长度,km; u 为计算单元设计流量下的设计流速,m/s; Q 为计算单元上断面的设计流量,m³/s。

5.2 模型参数分析

5.2.1 水质目标浓度 C_s 按照《山东省水功能区划》中要求达到的水质目标对照相应标准予以确定。

5.2.2 初始浓度 C_0 如果研究水功能区段是河流源头段, C_0 为河流源头段的当前水质浓度;当研究

区段不是河流源头段时, C_0 则为上游水功能区的水质浓度^[20]。

5.2.3 设计流量 Q 水功能区设计流量对纳污能力的计算结果影响较大,水文保证率的设计流量会使水功能区的纳污能力产生较大变化。山东省河流大部分属于季节性河流,大多数水功能区最枯月流量为零,如果按照目前国内大多采用的方法以最枯水月平均流量作为设计流量^[21],则计算得的纳污能力为零。出于山东的实际情况考虑,采用沂沭泗流域 1985 – 2015 年共 30 a 主要水文测站的水文资料计算得到的 50% 水文保证率下的最枯月平均流量作为设计流量。

5.3 沂沭泗水系水功能区纳污能力计算

由沂沭泗流域水功能分区各项水质参数(见表 3)可以看出,沂河沂源源头保护区已达到水功能区规定的水质目标,只要控制区域内污染物浓度不再增加,维持当前水质即可,且此区段为源头保护区,纳污能力应为零;沂河临沂农业用水区、老沭河郯城农业用水区、泗河曲阜兖州段农业用水区则均需要削减入河排污量,故均需要计算其纳污能力作为限制纳污红线的量化值。COD 和氨氮降解系数根据 4 个监测断面的实测流速通过上述拟合公式求得,由此可以计算出 2015 年沂沭泗流域水功能区纳污能力(见表 4)。

表 3 沂沭泗流域水功能区水质参数

水功能区名称	河流名称	监测断面	河长 L /km	水质目标	现状水质	$C_{s\text{COD}}$	$C_{0\text{COD}}$	$C_{s\text{氨氮}}$	$C_{0\text{氨氮}}$
沂河临沂农业用水区	沂河	山东临沂重坊桥河段	44	V	V	40	30	2.0	2.6
沂河沂源源头保护区	沂河	淄博田庄水库河段	30	II	II	15	12	0.5	0.15
老沭河郯城农业用水区	沭河	临沂清泉寺河段	44	IV	劣 V	30	22	1.5	2.1
泗河曲阜兖州段农业用水区	泗河	济宁红旗闸河段	91.5	IV	V	30	33	1.5	2.1

表 4 2015 年沂沭泗流域水功能区纳污能力计算结果

水功能区	流量 Q / ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	流速 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	K_{COD} / d^{-1}	$K_{\text{氨氮}}$ / d^{-1}	COD 纳污能力 / $10^4 (\text{t} \cdot \text{a}^{-1})$	氨氮纳污能力 / $10^4 (\text{t} \cdot \text{a}^{-1})$
沂河临沂农业用水区	1.131	0.29	0.25	0.22	917.76	10.09
沂河沂源源头保护区	0.580	0.25	0.25	0.23	0	0
老沭河郯城农业用水区	1.223	0.25	0.21	0.22	747.88	10.73
泗河曲阜兖州段农业用水区	1.262	0.54	0.29	0.27	598.39	13.66

从表 4 可以看出,COD 纳污能力最大的水资源二级区是沂河临沂农业用水区为 917.76×10^4 t,氨氮纳污能力最大的水资源二级区是老沭河郯城农业用水区为 13.66×10^4 t。

6 水功能区纳污能力预测

6.1 预测纳污能力目标值

由于沂沭泗流域多数河流的水体污染负荷略

大,为便于管理和更好地实现水质改善效果,应按照阶段治理、逐步削减的政策制定阶段治理策略:

2020 年,沂沭泗流域的所有水功能区的水质达标率 80% 以上,主要河流重要的水功能区达标;2025 年基本实现水功能区污染负荷小于纳污能力,使水质达标率达到 95% 以上。为使功能区水质达标率在 2020 年和 2025 年分别达到 80% 和 95%,在污染物最大入河量计算的基础上,定义 75%、90% 水文保证率条件下的通过一维模型求得的纳污能力

分别为 2020 年和 2025 年研究区限制纳污能力,分别如表 5、表 6 所示。水功能区水质达标率现状在 60% 左右,为了在 2020 年和 2025 年达到 80% 和 95%,初步认为污染物入河量的应削减率应为 33.3% 和 58.3%。

6.2 结果分析

2015 年、2020 年、2025 年沂沭泗流域水功能区限制纳污红线值的测算结果如表 7 所示。

表 5 2020 年沂沭泗流域水功能区纳污能力预测结果

水功能区	流量 $Q /$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$K_{\text{COD}} /$ d^{-1}	$K_{\text{氨氮}} /$ d^{-1}	COD 纳污能力/ $10^4 (\text{t} \cdot \text{a}^{-1})$	氨氮纳污能力/ $10^4 (\text{t} \cdot \text{a}^{-1})$
沂河临沂农业用水区	0.77	0.26	0.30	0.20	769.16	7.83
沂河沂源源头保护区	0.26	0.21	0.23	0.17	0	0
老沭河郯城农业用水区	0.59	0.24	0.27	0.19	443.70	4.11
泗河曲阜兖州段农业用水区	0.31	0.21	0.23	0.18	353.54	10.01

表 6 2025 年沂沭泗流域水功能区纳污能力预测结果

水功能区	流量 $Q /$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$K_{\text{COD}} /$ d^{-1}	$K_{\text{氨氮}} /$ d^{-1}	COD 纳污能力/ $10^4 (\text{t} \cdot \text{a}^{-1})$	氨氮纳污能力/ $10^4 (\text{t} \cdot \text{a}^{-1})$
沂河临沂农业用水区	0.41	0.24	0.28	0.20	404.69	4.51
沂河沂源源头保护区	0.09	0.21	0.24	0.18	0	0
老沭河郯城农业用水区	0.20	0.22	0.25	0.18	148.56	1.54
泗河曲阜兖州段农业用水区	0.29	0.22	0.25	0.18	334.46	9.11

表 7 沂沭泗流域水功能区限制纳污红线值

水功能区	COD 限制纳污红线/ $10^4 (\text{t} \cdot \text{a}^{-1})$			氨氮限制纳污红线/ $10^4 (\text{t} \cdot \text{a}^{-1})$		
	2015	2020	2025	2015	2020	2025
沂河临沂农业用水区	917.76	769.16	404.69	10.09	7.83	4.51
沂河沂源源头保护区	0	0	0	0	0	0
沭河郯城农业用水区	747.88	443.70	148.56	10.73	4.11	1.54
泗河曲阜农业用水区	598.39	353.54	334.46	13.66	10.01	9.11
总计	2264.03	1566.40	887.71	34.48	21.95	15.16
应削减率/%		30.81	60.79		36.34	56.03

由表 7 可以看出,沂沭河流域 4 大水功能分区 2020 年预计 COD 和氨氮纳污能力分别为 1566.4 t 和 21.95 t;2025 年预计 COD 和氨氮纳污能力分别为 887.71 t 和 15.16 t。

水域污染负荷应削减率为该研究区当前纳污能力与预测各年限制纳污红线值之差除以水功能区现状纳污能力^[22]。根据以上当年纳污能力与预测限制纳污红线值,2020 年 COD 和氨氮的应削减率为分别为 30.81% 和 36.34%;2025 年 COD 和氨氮入

河量应削减率为分别为 60.79% 和 56.03%。这与水功能区限排总量逐步完成水功能区水质治理目标相符,也与水功能区水质阶段治理策略的逐步削减率 33.3% 和 58.3% 相符。综上所述,沂沭泗流域限制纳污红线值与污染物应削减率预测基本合理。

7 结 论

本文以沂沭泗水系为例,研究水体中 COD、氨氮的降解系数及其变化规律,建立一维水质模型分

析并预测2015年、2020年及2025年沂沭泗流域四个不同水功能区的纳污能力,且分析纳污能力变化和各研究区COD和氨氮应削减率,得到结论如下:

(1)初步判断温度、流量、DO、pH值等影响因素与水功能区纳污能力大小有关,同时初步可以看出流速越大,降解系数随之增加,水功能区纳污能力越强;设计流量增大,水域纳污能力增加。

(2)2015年沂沭泗流域4个功能区的COD、氨氮的纳污能力分别为2264.03t和34.48t。结合现状水体污染负荷和水质状况,核定75%与90%水文保证率下通过模型计算的纳污能力分别为2020年和2025年限制纳污红线值,计算得知沂沭泗流域4大水功能区2020年和2025年COD和氨氮纳污能力红线值递减。

(3)沂沭泗流域的限制纳污红线值与污染物应削减率的预测结果基本合理,初步实现“三条红线”制度中纳污能力红线的量化处理,可为细化限制排污总量规划方案提供依据,有助于“十三五规划”和“三条红线”的同步实施。

参考文献:

[1] 张秀菊,杨凯,蔡爱芳,等.不确定性参数对水体纳污能力的影响分析[J].中国农村水利水电,2012(1):13-17.

[2] 张亚丽,申剑,史淑娟,等.淮河支流污染物综合降解系数动态测算[J].中国环境监测,2015,31(2):64-67.

[3] 陶威,刘颖,任怡然.长江宜宾段氨氮降解系数的实验室研究[J].污染防治技术,2009,22(6):8-9+20.

[4] 李国权.三峡库区排污口下游污染物降解规律的研究[D].重庆:重庆交通大学,2013.

[5] 陈炼钢,施勇,钱新,等.闸控河网水文-水动力-水质耦合数学模型——II.应用[J].水科学进展,2014,25(6):856-863.

[6] 路雨,苏保林.河流纳污能力计算方法比较[J].水资源保护,2011,27(4):5-9+47.

[7] 罗勇强,吴琼,陈春梅.韩江流域纳污能力及入河污染物总量控制浅析[J].人民珠江,2012,33(6):71-74.

[8] 张守平.基于流域水循环及其伴生过程的水量水质联合配置研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2015.

[9] 彭斌,邓坚,韦利珠.新常态下广西饮用水源区水环境保护及其水生态补偿机制探究[J].人民珠江,2016,37(6):35-38.

[10] 窦明,王艳艳,李胚.最严格水资源管理制度下的水权理论框架探析[J].中国人口·资源与环境,2014,24(12):132-137.

[11] 刘晓,刘虹利,王红瑞,等.北京市水资源管理“三条红线”指标体系与评价方法[J].自然资源学报,2014,29(6):1017-1028.

[12] 柴元冰,赵伟华,郭伟杰.通天河及长江源区纳污能力与限排总量控制研究[J].长江科学院院报,2016,33(10):6-11.

[13] 魏素洁,张君,刘家宏,等.大汶河泰安段纳污能力计算[J].人民黄河,2012,34(12):63-65+68.

[14] 杨婷.山东省水资源管理体制研究[D].济南:山东大学,2008.

[15] 徐祖信.我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J].同济大学学报(自然科学版),2005,33(3):321-325.

[16] 胡晓丹.基于灰色-BP神经网络模型的淮河水污染预测[D].合肥:安徽农业大学,2010.

[17] 单铎.北运河氨氮降解系数测算研究[D].北京:首都师范大学,2013.

[18] 李国权.三峡库区排污口下游污染物降解规律的研究[D].重庆:重庆交通大学,2013.

[19] 张晓斌,张建国,白继中.汾河水环境容量计算及特征分析[J].水资源与水工程学报,2010,21(2):135-138.

[20] 刘帅.山东省水资源保护规划研究[D].济南:山东大学,2009.

[21] 桑蓉,富国,雷坤,等.水环境容量计算中设计流量的选择与应用[J].人民长江,2013,44(5):69-73.

[22] 孔繁力,赵哲.水功能区污染物控制量计算方法探讨[J].水文,2008,28(1):67-69.