

松花江干流哈尔滨段 COD 和氨氮动态水环境容量研究

杜慧玲, 于晓英, 曲茉莉

(黑龙江省环境科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘要: 针对松花江流域存在季节性水环境容量不均衡的问题,以松花江干流哈尔滨段为研究对象,采用二维岸边排放模型段尾控制法,在动态水文设计条件下,计算 COD 和 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的环境容量。研究表明:计算区段内 COD 和 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的环境容量分布不够均匀,且 COD 环境容量分布均匀性更差;COD 和 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的环境容量最大值出现在 8 月份,最小值出现在 2 月份,丰水期环境容量最大,枯水期环境容量最小;同时,实际环境容量要远远小于理想环境容量,且 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的环境压力更加严峻。动态水环境容量研究结果可为水环境容量的合理利用以及松花江水质保障提供可行的参考。

关键词: 动态水环境容量; 氨氮; COD; 松花江哈尔滨段

中图分类号: X26; X143

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)02-0069-07

Research on COD and $\text{NH}_3\text{—N}$ dynamic environmental capacity in Harbin section of the Songhua River

DU Huiling, YU Xiaoying, QU Moli

(Heilongjiang Provincial Research Academy of Environmental Sciences, Harbin 150000, China)

Abstract: Based on the seasonal imbalance of water environmental capacity in Songhua River, the Harbin section of the main stream of the Songhua River was used as the research object, and the COD and $\text{NH}_3\text{—N}$ environmental capacity of Songhua River Harbin section was calculated using two-dimensional section-end model under dynamic hydrological design conditions. The results showed that the environmental capacity distribution of COD and $\text{NH}_3\text{—N}$ was uneven, and the environmental capacity distribution of COD was more unsatisfactory than that of $\text{NH}_3\text{—N}$. The peak and valley value of the COD and $\text{NH}_3\text{—N}$ environmental capacity appeared in August and February respectively. As for different seasons, the maximum and minimum value of the COD and $\text{NH}_3\text{—N}$ environmental capacity appeared in flood season dry season respectively. The actual value of water environmental capacity was much lower than the ideal value, and the environmental pressure of $\text{NH}_3\text{—N}$ was more severe accordingly. The investigation results may serve as reference for efficient utilization of environmental capacity and water quality security in Songhua River.

Key words: dynamic environmental capacity; ammonia nitrogen; chemical oxygen demand (COD); Songhua River Harbin section

1 研究背景

水环境容量是指在保证水环境功能的前提下, 容纳水体所能承受的最大污染物排放量, 或者在给定的水质目标和水文设计条件下, 水域的最大容许纳污量^[1]。中国水环境容量具有明显的空间分布特征^[2-4], 水环境容量丰裕度指数呈现出从东南沿

海向西部内陆逐渐递减的趋势。随着区域社会、经济功能的增强而产生的生活和工业耗水量、废水排放量和污染物排放量不断增加, 进而改变了区域生态结构, 降低了区域生态功能和水环境容量, 因此水环境容量是影响和决定区域可持续发展的重要因素^[5-8]。“十二五”期间, 随着东北地区振兴规划、黑龙江省“八大经济区”和“十大工程”建设的深入

收稿日期: 2017-08-29; 修回日期: 2017-11-13

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2014ZX07201-012)

作者简介: 杜慧玲 (1968-), 女, 辽宁沈阳人, 博士, 研究员级高工, 研究方向为水环境保护及水污染防治。

实施,松花江流域经济社会将呈现高速发展态势,流域治污压力持续加大。松花江流域地处高纬度地区,是中国境内唯一的一条冰封期 5 个月的河流,冰层厚度可达 1 m 左右,水温低,水环境容量低。因此,松花江水环境容量具有季节性变化大的特征,对其开展动态水环境容量研究具有重要意义。

截至目前,对于地表水体水环境容量的计算,中国发展了公式法^[9-11]、模型试错法^[12,13]、系统最优法^[14-16]、概率稀释模型法^[17]和未确知数学法^[18-20]等 5 大类计算方法。欧美国家对于水环境容量的计算,早期一般采用确定性方法进行研究^[21-22],20 世纪 70 年代后开始采用不确定性方法^[23-25]。其中,公式法可以认为是各类方法中最基本的方法,其他各类方法的计算也以水环境容量计算公式为基础。公式法已成为中国应用最广泛的方法^[26],《水域纳污能力计算规程》和《全国水环境容量核定技术指南》中所采用的即为公式法。近年来,国内外关于动态水环境容量的研究较多^[18-20,23-25,27-36],但对松花江流域动态水环境容量的研究相对较少^[27-32],且大部分研究集中在 2013 年以前,2013 年后哈尔滨新增两座污水处理厂,市控东江桥断面也已经取消。

$$c(x, y) = \exp\left(-K_1 \frac{x}{86400u}\right) \left\{ c_h + \frac{c_p Q_p}{H \sqrt{\pi M_y \cdot x \cdot u}} \left[\exp\left(-\frac{u \cdot y^2}{4M_y \cdot x}\right) + \exp\left(-\frac{u(2B-y)^2}{4M_y \cdot x}\right) \right] \right\} \quad (1)$$

式中: $c(x, y)$ 为河流中任一点 (x, y) 污染物的预测浓度,mg/L; x 为排污口至敏感点的纵向距离,m; y 为敏感点至排污口所在岸边的横向距离,m; Q_p 为排污口的流量,m³/s; c_p 为排污口污染物的排放浓度,mg/L; c_h 为污染物在河流中的背景浓度,mg/L; M_y 为河流的纵向和横向弥散系数,m²/s; u 为河流的纵向和横向平均流速,m/s; K_1 为污染物衰减速度常数,d⁻¹; B 为河流的水面宽度,m; H 为河流的平均水深,m。

由公式(1)可推导出水环境容量计算模型:

$$W = c_p Q_p = \left[c_s \exp\left(\frac{K_1 x}{86400u}\right) - c_0 \right] \cdot \frac{H \sqrt{\pi M_y \cdot x \cdot u}}{\exp\left(-\frac{u y^2}{4M_y \cdot x}\right) + \exp\left(-\frac{u(2B-y)^2}{4M_y \cdot x}\right)} \quad (2)$$

式中: c_s 为水质标准,mg/L; c_0 为污染物在河流中的背景浓度或本底值,mg/L。

因敏感点的位置常取在岸边,敏感点到排污口所在岸边横向距离为 0。则式(1)可简化为式(3),

本文研究依据新发布的《国务院关于全国重要江河湖泊水功能区划(2011-2030 年)的批复》(国函[2011]167 号)划分计算单元,对松花江干流哈尔滨段动态 COD 和 NH₃-N 环境容量进行计算,计算结果可以为污水处理厂减排以及“水十条”任务目标的完成提供技术支持。

2 研究方法

2.1 环境容量计算模型

水环境容量模型是依据水质模型来划分的,由简单到复杂依次为零维模型、一维模型、二维模型和三维模型。若要真实地反映污染物在水中的浓度分布,最精确的是三维模型,但是三维模型往往非常复杂,需要的参数很多且个别参数很难获取,因此实际运用中,通常根据实际需要,更多采用零维模型、一维模型和二维模型。

松花江哈尔滨段平均宽度约为 1 025 m,平均深度约为 4.5 m,多年平均流量大于 600 m³/s,属于宽浅河道大型河流,沿岸污染源为岸边排放,采用二维岸边排放水质模型(见式(1))能较为准确地模拟污染物在水体中的扩散规律,从而能够获得较精确地计算结果^[28]。

式(2)可简化为式(4)。

$$c(x, y) = \exp\left(-K_1 \frac{x}{86400u_x}\right) \cdot \left\{ c_h + \frac{c_p Q_p}{H \sqrt{\pi M_y \cdot x \cdot u_x}} \left[1 + \exp\left(-\frac{u_x B^2}{4M_y \cdot x}\right) \right] \right\} \quad (3)$$

$$W = c_p Q_p = \left[c_s \exp\left(\frac{K_1 x}{86400u_x}\right) - c_0 \right] \cdot H \sqrt{\pi M_y \cdot x \cdot u_x} \left[1 + \exp\left(-\frac{u_x B^2}{4M_y \cdot x}\right) \right]^{-1} \quad (4)$$

为了充分利用松花江哈尔滨段的水环境容量,不至于使该河段的水质恶化,采用段尾控制法^[28,37]核算该河段的水环境容量,其表达式见式(5)。

$$W = \sum_{i=1}^n W_i = \sum_{i=1}^n \left[c_s \exp\left(\frac{K_1 x_i}{86400u_x}\right) - c_0 \right] \cdot H \cdot \sqrt{\pi M_y \cdot x_i \cdot u_x} \cdot \left[1 + \exp\left(-\frac{u_x B^2}{4M_y \cdot x_i}\right) \right]^{-1} \quad (5)$$

2.2 计算单元的划分

依据《国务院关于全国重要江河湖泊水功能区划(2011-2030 年)的批复》(国函[2011]167 号),

将松花江干流哈尔滨段划分为朱顺屯－马家沟汇入口上和马家沟汇入口上－大顶子山两个计算单元,计算单元属性见表 1,图 1 为松花江哈尔滨段水系及监测断面图,图 2 为研究区域排污口和断面概化示意图。

表 1 计算单元属性

计算单元	计算单元 长度/km	控制单元 水质目标	上游来 水水质
朱顺屯－马家沟汇入口上	15.9	Ⅲ	Ⅱ
马家沟汇入口上－大顶子山	39.1	Ⅳ	Ⅲ

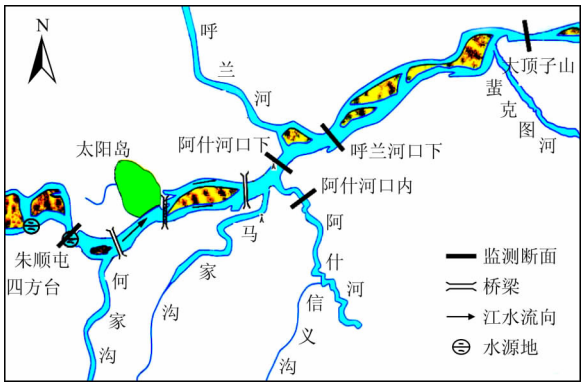


图 1 松花江哈尔滨段水系及监测断面图

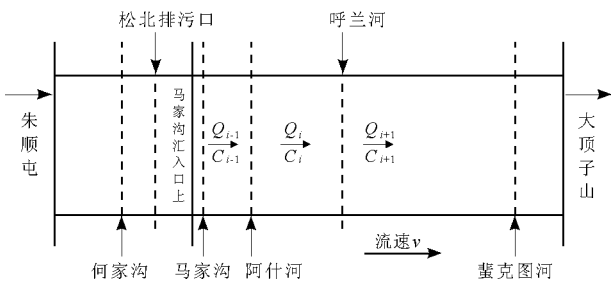


图 2 研究区域排污口和断面概化示意图

2.3 排污口及其位置

主要排污口及其与终点断面的距离见表 2。

表 2 主要排污口

序号	计算单元	主要排污口	
		名 称	与终点段面 的距离/km
1	朱顺屯－马家沟汇入口上	何家沟	13.40
		松 北	9.40
2	马家沟汇入口上－大顶子山	马家沟	36.25

2.4 模型参数的选取

2.4.1 水文参数 水文参数来自于松花江哈尔滨水文站 2009－2013 年的水文资料,流速、河流水面宽

度、河流平均水深等取相应月份的最小流量(当月的设计流量)下的值。据此计算的水环境容量值随月份不同而不同,呈现动态变化过程,在保障水质的前提下,可以合理利用松花江哈尔滨段的水环境容量。

2.4.2 横向弥散系数 M_y 和污染物的衰减速度常数 K_1 横向弥散系数 M_y 采用 Taylor 公式(6)进行初步求解。

$$M_y = (0.058h + 0.0065B) \sqrt{ghi} \quad (6)$$

式中: M_y 为河流横向的弥散系数, m^2/s ; B 为河流水面平均宽度, m ; h 为河流平均水深, m ; g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 ; i 为平均纵向坡降,松花江哈尔滨段取 $0.05\text{‰} \sim 0.1\text{‰}$ 。

已有研究结果表明^[7],松花江哈尔滨市江段的污染物降解系数 K_{COD} 采用 $0.150 \sim 0.200 \text{ d}^{-1}$, $K_{\text{NH}_3-\text{N}}$ 采用 $0.121 \sim 0.210 \text{ d}^{-1}$ 。

依据已有监测数据及式(3)进行松花江哈尔滨段综合降解系数 K_1 值的计算,利用计算结果对松花江大顶子山断面的 COD 以及 NH_3-N 的预测浓度和实测浓度进行了拟合分析和修正,对综合降解系数 K_1 值和 M_y 进行率定,率定结果如表 3 所示。

表 3 弥散系数和综合降解系数

月份	弥散系数/ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	综合降解系数/ d^{-1}	
		K_{COD}	$K_{\text{NH}_3-\text{N}}$
1	0.400	0.108	0.076
2	0.401	0.101	0.067
3	0.417	0.101	0.066
4	0.443	0.147	0.127
5	0.460	0.141	0.120
6	0.447	0.144	0.124
7	0.424	0.230	0.238
8	0.457	0.226	0.232
9	0.444	0.184	0.176
10	0.424	0.139	0.117
11	0.444	0.137	0.114
12	0.402	0.120	0.092

3 结果与分析

3.1 理想水环境容量的计算

依据公式(4)和(5)对朱顺屯－马家沟汇入口上和马家沟汇入口上－大顶子山两个计算单元的 COD 和 NH_3-N 理想动态环境容量(不考虑计算单元内支流和排污口的影响,同时上游水质按照功能区划水质取值)进行计算,计算结果见表 4。

表 4 理想动态 COD 和 NH₃—N 环境容量

月份	COD 动态容量				NH ₃ —N 动态容量			
	朱顺屯—马家沟汇入口上			马家沟汇入口上—大顶子山	朱顺屯—马家沟汇入口上			马家沟汇入口上—大顶子山
	何家沟	松北	合计	马家沟	何家沟	松北	合计	马家沟
1	1166	963	2129	19292	100	33	133	713
2	993	912	1904	17951	83	29	112	613
3	1196	1109	2305	21753	100	35	135	738
4	1856	1112	2969	24268	169	48	216	1094
5	2017	1245	3262	26895	182	52	235	1193
6	1862	1133	2995	24585	169	48	217	1100
7	2403	1129	3532	27145	226	58	284	1385
8	2795	1322	4118	31699	262	68	330	1611
9	2209	1147	3356	26411	205	55	260	1284
10	1666	1042	2708	22415	150	43	194	987
11	1767	1120	2887	23988	159	46	205	1048
12	1304	942	2246	19454	115	35	150	786
年环境容量	21235	13176	34411	285857	1919	550	2471	12552

由表 4 可见,松花江哈尔滨段 COD 和 NH₃—N 理想环境容量呈现出动态变化过程,最大值出现在 8 月,最小值出现在 2 月。理想水环境容量是计算实际水环境容量的基础,同时,其计算结果对于水环境容量的利用和规划具有指导性意义。

3.2 实际水环境容量的计算

在对理想水环境容量进行研究的基础上,结合实际情况,对松花江哈尔滨段的实际水环境容量进行研究。

3.2.1 考虑上游水质对水环境容量的影响 根据 2011—2015 年水质监测结果,朱顺屯断面目前只能达到Ⅲ类水体的要求而非理想的Ⅱ类水体。在计算实际水环境容量时,按照Ⅲ类水体 COD 限值为 20 mg/L、NH₃—N 为 1.0 mg/L 进行核算。由于本研究采用段尾控制法计算水环境容量,因此上游来水水质的变化对何家沟有一定的影响,而下游的松北排水区则不受影响。何家沟—松北排污口水环境容量重新核算结果见表 5。

表 5 何家沟—松北排污口各月实际水环境容量

项目	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	年总计
COD	255	240	292	299	334	304	306	358	310	280	300	251	3529
NH ₃ —N	9	8	9	13	14	13	16	18	15	12	12	10	149

与理想水环境容量相比,COD 年水环境容量从 21 235 t/a 降至 3 529 t/a,降低幅度达 83%,NH₃—N 年水环境容量从 1 919 t/a 降至 149 t/a,降低幅度达 92%。

由此可见,上游水体的水质是否能达标对下游水体的水环境容量有着很大的影响,若要确保下游水体水环境容量能满足该段生产和生活的需求,必须严格控制上游水体的水质。

3.2.2 考虑支流对水环境容量的影响 松花江朱

顺屯—大顶子山江段的主要支流从西到东,依次为阿什河、呼兰河、蜚克图河。这 3 条支流均在马家沟汇入口上一大顶子山江段汇入,3 条支流中蜚克图河流量最小,对干流的影响可以忽略,另外两条支流的水功能区划及水文参数见表 6。

根据水文资料,各支流的设计流量为近 10 年最枯月平均流量。此外,由于污染源流量较大,所以还需考虑污染源对水体的影响,表 7 为松花江哈尔滨段污水处理厂排污情况。

表 6 主要支流水功能区划及水文参数

支流名称	水域	功能区类型	水质目标	水质现状	设计流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
阿什河	阿城—松花江口	农业用水区	Ⅳ	劣Ⅴ	1.01
呼兰河	呼兰镇—入江口	农业用水区	Ⅳ	Ⅳ	2.80

表 7 污水处理厂清单

序号	名称	建成时间	设计规模/ $10^4 (\text{t} \cdot \text{d}^{-1})$	纳污水体
1	龙江环保集团股份有限公司—文昌	2003-08	32.5	阿什河口内断面以下
2	龙江环保集团股份有限公司—太平	2005-12	32.5	
3	哈尔滨市松北供排水有限公司	2013-01	10.0	松花江大顶子山断面以上
4	哈尔滨康达环保投资有限公司 (原国控名单中哈尔滨群力污水处理厂)	2011-11	33.0	由何家沟汇入松花江大顶子山断面以上
5	哈尔滨平义龙江环保治水有限责任公司 (平房污水处理厂)	2013-01	10.0	
6	哈尔滨平义龙江环保治水有限责任公司 (信义沟污水厂)	2011-08	25.0	阿什河口内断面以上(阿城水文站断面以下)
7	哈尔滨金城龙江环保水务有限公司(原国控名单中哈尔滨市阿城区腾飞污水处理有限责任公司)	2009-08	10.0	
8	哈尔滨市利林环保水处理有限公司	2007-01	2.0	呼兰河口内断面以上 (兰西水文站断面以下)
9	哈尔滨市呼兰区水务污水处理有限公司	2012-01	5.0	
10	哈尔滨利民污水处理厂	2011-01	5.0	

由于支流和排污口水量的汇入,水体的流量、流速、水面宽度及水深等都将发生变化。本研究假设支流和排污口水量的汇入并不会改变水体的宽度和深度,只对流速产生影响。将各支流及排污口作为流速变化的分界断面,依据表 6 和表 7,重新核算排污口及支流的流量,按照设计流量重新核算不同断面沿江流速变化。

3.2.3 实际水环境容量核算 综合考虑上游水质及支流汇入的实际情况,对松花江哈尔滨段 COD 和 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的水环境容量进行重新核算,结果见图 3 和图 4。

3.3 水环境容量动态变化情况分析

由图 3 和图 4 可见,COD 和 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的环境容量变化趋势相似。松花江干流哈尔滨段两个计算单元相应的两个江段中,马家沟汇入口上—大顶子山江段的水环境容量较大,朱顺屯—马家沟汇入口上江段的水环境容量较小。两个江段 COD 环境容量的比值约为 8.3, $\text{NH}_3\text{—N}$ 环境容量的比值约为 5.0,

说明两个江段的 COD 和 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的环境容量分布不够均匀,且 COD 环境容量分布均匀性更差些。

两个江段 COD 和 $\text{NH}_3\text{—N}$ 环境容量最大值均出现在 8 月,最小值均出现在 2 月,朱顺屯—马家沟汇入口上江段 COD 环境容量最大值和最小值的比值为 2.16(理想)和 1.49(实际), $\text{NH}_3\text{—N}$ 环境容量最大值和最小值的比值为 2.95(理想)和 2.26(实际),说明这一江段 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的波动幅度比 COD 大,实际环境容量的波动幅度比理想环境容量小。马家沟汇入口上—大顶子山江段 COD 环境容量最大值和最小值的比值为 1.77(理想)和 1.68(实际), $\text{NH}_3\text{—N}$ 环境容量最大值和最小值的比值为 2.63(理想)和 2.60(实际),说明这一江段 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的波动幅度亦比 COD 大,实际环境容量的波动幅度与理想环境容量相近。

朱顺屯—马家沟汇入口上江段和马家沟汇入口上—大顶子山江段 COD 实际环境容量与理想环境容量的比值分别为 0.484 和 0.483;两个江段

$\text{NH}_3\text{—N}$ 实际环境容量与理想环境容量的比值分别为 0.286 和 0.280。可见,实际环境容量要远远小于理想环境容量,而且 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的环境压力较 COD 更加严峻。

3.4 水环境容量影响因素分析

由公式(5)可见,降解系数、上游断面水质、功能区水质标准以及水流速度是影响水环境容量大小的主要因素。显而易见,降解系数与环境容量为正相关关系;而流速对环境容量大小的影响则非常复

杂,当流速 $u_x = K_1 x \ln(c_s/c_0)/86400$ 时,环境容量为 0;在其他参数不变的条件下,当 $c_s = c_0$ 时,流速越大,环境容量越小;实际在环境容量计算时,公式(5)中的每个变量都在时时发生变化,因此,环境容量和流速的定量关系还有待于深入研究。

图 5 和图 6 分别为松花江干流哈尔滨段 COD 和 $\text{NH}_3\text{—N}$ 水环境容量在各水期的均值。表 8 为松花江干流各水期平均流量和平均流速。

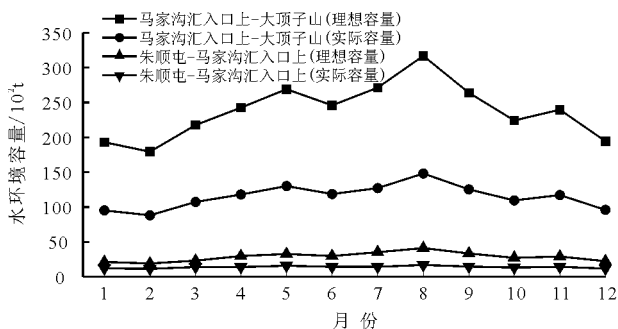


图 3 动态 COD 环境容量

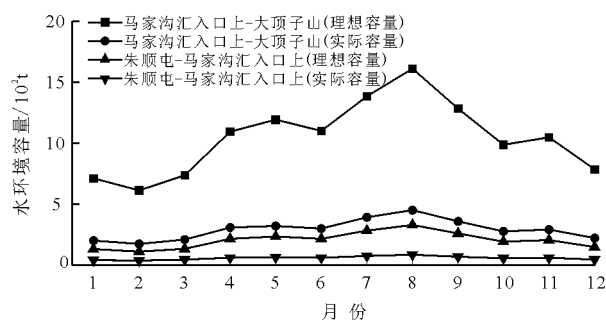


图 4 动态 $\text{NH}_3\text{—N}$ 环境容量

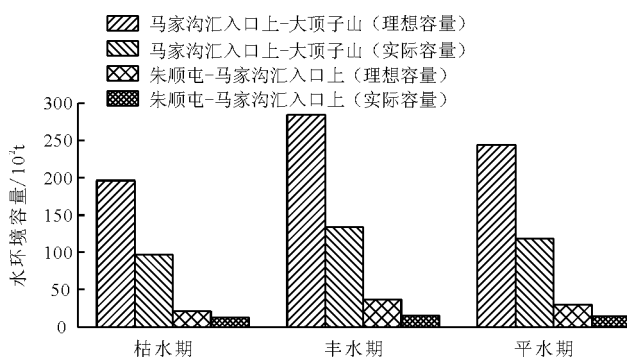


图 5 各水期 COD 水环境容量均值

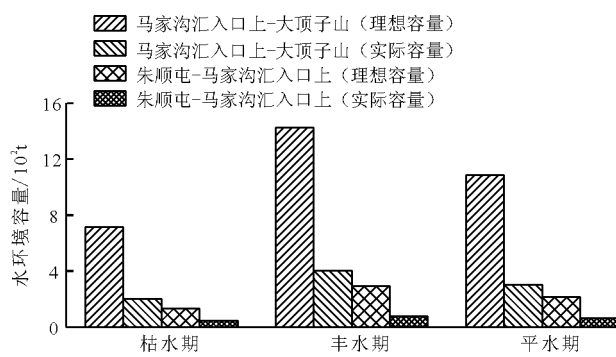


图 6 各水期 $\text{NH}_3\text{—N}$ 水环境容量均值

表 8 松花江各水期平均流量和平均流速

水期	平均流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	平均流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
枯水期	266	0.073
丰水期	1131	0.267
平水期	559	0.140

由图 5 和图 6 可见,丰水期 COD 和 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的环境容量最大,平水期次之,枯水期环境容量最小。这一方面是因为丰水期水温最高,微生物新陈代谢最旺盛,生化反应速率最快,COD 和 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的降解系数最大;而枯水期正值松花江的冰封期,水体温度低,降低了水体对污染物的降解作用。另一方面,表 8 中所列数据表明,各水期 COD 和 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的水环境容量的变化趋势与各水期流量和流速的变化趋势一致,可见,松花江哈尔滨段各水期水环境容量的

大小与水体流速呈现正相关特征。

4 结 论

(1)松花江干流哈尔滨段 COD 和 $\text{NH}_3\text{—N}$ 环境容量年内的变化趋势相似,环境容量最大值均出现在 8 月份,最小值均出现在 2 月份;马家沟汇入口上-大顶子山江段的水环境容量较大,朱顺屯-马家沟汇入口上江段的水环境容量较小,两个江段的 COD 和 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的环境容量分布不够均匀,且 COD 环境容量分布均匀性更差。

(2)朱顺屯-马家沟汇入口上江段 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的波动幅度比 COD 大,实际环境容量的波动幅度比理想环境容量小;马家沟汇入口上-大顶子山江段 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的波动幅度亦比 COD 大,实际环境容量的波动幅度与理想环境容量相近。

(3)丰水期 COD 和 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的环境容量最大,平水期次之,枯水期环境容量最小;各水期 COD 和 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的水环境容量的变化趋势与各水期流量和流速的变化趋势一致,说明水环境容量的大小受水量和水体流速等水文参数的影响较大。

(4)COD 和 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的实际环境容量要远远小于理想环境容量,而且 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的环境压力较 COD 更加严峻,为了更合理地利用松花江哈尔滨江段的水环境容量,后续研究可结合动态容量以及污水处理厂排污现状,给出各污水处理厂的污染物削减量,以保障松花江哈尔滨段的水质不断改善。

参考文献:

- [1] 王修林, 李克强. 渤海主要化学污染物海洋环境容量[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] 鲍全盛, 姜文来. 论我国河流环境容量空间分异与工业生产力的宏观布局[J]. 地理科学, 1998, 18(3): 205–212.
- [3] 鲍全盛, 王华东, 曹利军. 中国河流环境容量区划研究[J]. 中国环境科学, 1996, 16(2): 87–91.
- [4] 周密, 王华东, 张义生. 环境容量[M]. 长春: 东北师范大学出版社, 1987.
- [5] 张昌顺, 谢高地, 鲁春霞. 中国水环境容量紧缺度与区域功能的相互作用[J]. 资源科学, 2009, 31(4): 559–565.
- [6] LI Na, YANG Hong, WANG Lachun. Optimization of industry structure based on water environmental carrying capacity under uncertainty of the Huai River Basin within Shandong Province, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 112(2016): 4594–4604.
- [7] ZENG Weihua, WU Bo, CHAI Ying. Dynamic simulation of urban water metabolism under water environmental carrying capacity restrictions[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2016, 10(1): 114–128.
- [8] ZHOU Xiyin, LEI Kun, MENG Wei. Space-time approach to water environment carrying capacity calculation[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 149: 302–312.
- [9] 李永军, 陈余道, 孙涛. 地理信息模型方法初探河流环境容量——以漓江桂林市区段为例[J]. 水科学进展, 2005, 16(2): 280–283.
- [10] 董飞, 彭文启, 刘晓波, 等. 河流流域水环境容量计算研究[J]. 水利水电技术, 2012, 43(12): 9–14+31.
- [11] 于雷, 吴舜泽, 范丽丽, 等. 水环境容量一维计算中不均匀系数研究[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(1): 116–119.
- [12] ZHANG Ruibin, QIAN Xin, YUAN Xingcheng, et al. Simulation of water environmental capacity and pollution load reduction using QUAL2K for water environmental management[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2012, 9(12): 4504–4521.
- [13] 张红举, 甘升伟, 袁洪州, 等. 环太湖河流入湖水质控制浓度分析[J]. 水资源保护, 2012, 28(6): 8–11+54.
- [14] 刘晓波, 彭文启, 何国建, 等. 基于水质-污染源响应关系的抚仙湖水环境承载力计算研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2011, 26(6): 652–659.
- [15] 诸葛亦斯, 彭文启, 杜强, 等. 太子河闸坝河段水环境容量研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2011, 9(1): 29–34.
- [16] 周刚, 雷坤, 富国, 等. 河流环境容量计算方法研究[J]. 水利学报, 2014, 45(2): 227–234+242.
- [17] 栗苏文, 李红艳, 夏建新, 等. 基于 Delft3D 模型的大鹏湾水环境容量分析[J]. 环境科学研究, 2005, 18(5): 91–95.
- [18] 李如忠, 洪天求, 熊鸿斌, 等. 基于未确知数的湖库水环境容量定量研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2008, 23(2): 166–174.
- [19] CHEN Qiuwen, WANG Qibin, LI Zhijie, et al. Uncertainty analyses on the calculation of water environmental capacity by an innovative holistic method and its application to the Dongjiang River[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(9): 1783–1790.
- [20] 李如忠, 洪天求. 盲数理论在湖泊水环境容量计算中的应用[J]. 水利学报, 2005, 36(7): 765–771.
- [21] LIEBMAN J C, LYNN W R. The optimal allocation of stream dissolved oxygen[J]. Water Resources Research, 2010, 2(2): 581–591.
- [22] REVELLE C S, LOUCKS D P, LYNN W R. Linear programming applied to water quality management[J]. Water Resources Research, 1968, 4(1): 1–9.
- [23] BORSUK M E, STOW C A, RECKHOW K H. Predicting the frequency of water quality standard violations: a probabilistic approach for TMDL development. [J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(10): 2109–2115.
- [24] ELLIS J H. Stochastic water quality optimization using imbedded chance constraints [J]. Water Resources Research, 1987, 23(12): 2227–2238.
- [25] BURN D H, LENCE B J. Comparison of optimization formulations for waste-load allocations[J]. Journal of Environmental Engineering, 1992, 118(4): 597–612.
- [26] 董飞, 刘晓波, 彭文启, 等. 地表水水环境容量计算方法回顾与展望[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 451–463.
- [27] 马欢. 松花江哈尔滨段水环境容量研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [28] 姜曼曼. 松花江哈尔滨段动态水环境容量及其价值研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [29] 李亚男, 程卉. 松花江哈尔滨段理想水环境容量的计算[J]. 黑龙江环境通报, 2012, 36(4): 42–47.

(下转第 83 页)

参考文献:

- [1] 嵇涛,杨华,刘睿,等. TRMM 卫星降水数据在川渝地区的适用性分析[J]. 地理科学进展,2014,33(10):1375-1386.
- [2] 田苗,童杨辉. TRMM 卫星降水数据在江苏省的适用性分析[J]. 江苏农业科学,2016,44(12):440-444.
- [3] 王兆礼,钟睿达,赖成光,等. TRMM 卫星降水反演数据在珠江流域的适用性研究——以东江和北江为例[J]. 水科学进展,2017,28(2):174-182.
- [4] 吕洋,杨胜天,蔡明勇,等. TRMM 卫星降水数据在雅鲁藏布江流域的适用性分析[J]. 自然资源学报,2013,28(8):1414-1425.
- [5] PRAKASH S, MITRA A K, MOMIN I M, et al. Comparison of TMPA-3B42 versions 6 and 7 precipitation products with gauge-based data over India for the southwest monsoon period[J]. Journal of Hydrometeorology, 2015, 16(1):346-362.
- [6] AGHAKOUCHAK A, NASROLLAHI N, HABIB E. Accounting for uncertainties of the TRMM satellite estimates[J]. Remote Sensing, 2009, 1(3):606-619.
- [7] 王晓杰,刘海隆,包安明. TRMM 降水产品在天山及周边地区的适用性研究[J]. 水文,2014,34(1):58-64.
- [8] 蔡研聪,金昌杰,王安志,等. 中高纬度地区 TRMM 卫星降雨数据的精度评价[J]. 应用生态学报,2014,25(11):3296-3306.
- [9] 骆三,苗峻峰,牛涛,等. TRMM 测雨产品 3B42 与台站资料在中国区域的对比分析[J]. 气象,2011,37(9):1081-1090.
- [10] 穆振侠,姜卉芳,刘丰. 基于 TRMM/TMI 与实测站点的降水垂直分布差异性探讨[J]. 干旱区研究,2010,27(4):515-521.
- [11] 郝振纯,童凯,张磊磊,等. TRMM 降水资料在青藏高原的适用性分析[J]. 水文,2011,31(5):18-23.
- [12] 李威,蒋平,赵卫权,等. TRMM 卫星降水数据在喀斯特山区的适用性分析——以贵州省为例[J]. 水土保持研究,2016,23(1):97-102.
- [13] XIE P, ARKIN P A. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 78(11):2539-2558.
- [14] NEW M, TODD M, HULME M, et al. Precipitation measurements and trends in the twentieth century[J]. International Journal of Climatology, 2001, 21(15):1889-1922.
- [15] 罗火钱,李成伟,魏加华,等. TRMM 降水数据在沙溪流域的精度验证[J]. 亚热带资源与环境学报,2015,10(4):69-76.
- [16] 张月圆,李运刚,季璇,等. 红河流域 TRMM 卫星降水数据精度评价[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(2):1-8.
- [30] 姜欣,许士国,练建军,等. 北方河流动态水环境容量分析与计算[J]. 生态与农村环境学报,2013,29(4):409-414.
- [31] 王思文. 基于 WASP 模型的松花江哈尔滨段水环境容量模拟及总量控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨师范大学,2015.
- [32] 曹晓慧. 牡丹江段动态水环境容量及污染源总量控制对策[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [33] 张剑,付意成,韩会玲. 浑太河流域动态水环境容量设计水文条件研究[J]. 中国农村水利水电,2017(3):75-80.
- [34] 陈慧敏. 清渭河流域(许昌段)动态水环境容量研究[D]. 郑州:郑州大学,2016.
- [35] 卫志宏,杨振祥,吕兴菊,等. 洱海动态水环境容量模拟研究[J]. 生态科学,2013,32(3):282-289.
- [36] LI Keqiang, ZHANG Li, LI Yan, et al. A three-dimensional water quality model to evaluate the environmental capacity of nitrogen and phosphorus in Jiaozhou Bay, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 91(1):306-316.
- [37] 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.

(上接第75页)