

# 基于负荷历时曲线法的永定河流域河北段磷纳污能力研究

赵杰杰<sup>1</sup>, 雷坤<sup>2</sup>, 孙明东<sup>2</sup>, 徐香勤<sup>2</sup>, 程全国<sup>1\*</sup>

姓名, 小四楷体

1.沈阳大学环境学院

单位全称(学校包括院系)

2.中国环境科学研究院

摘要应包括目的、方法、结果及结论四部分

**摘要** 以永定河流域 2002—2016 年水文数据为依据, 利用负荷历时曲线(LDC)法计算永定河流域河北段左卫、老鸦庄、响水堡、石匣里和八号桥 5 个断面的总磷(TP)纳污能力, 并分析纳污能力的时空变化; 结合 2010—2016 年水质监测数据, 计算各断面水体 TP 现状污染负荷, 分析其主要污染源类型与污染负荷应削减量。结果表明: 永定河流域河北段水体 TP 纳污能力时空差异较大, 下游纳污能力大于上游; 5 个断面不同月份、季节的 TP 允许负荷波动较大, 强纳污能力主要集中在 7 月、10—11 月, 而 1—2 月纳污能力最弱; 永定河流域河北段主要受非点源污染排放的影响, 除老鸭庄断面在丰水区和中流量区 TP 负荷无需削减外, 其他 4 个断面在丰水区、中流量区和枯水区均需进行不同程度的削减。永定河流域河北段水体 TP 现状负荷已超过允许负荷, 需要制定不同时间尺度的总量控制目标与方案。

**关键词** 总量控制; 负荷历时曲线(LDC); TP; 纳污能力; 永定河流域

关键词应为5~8个

中图分类号:X524

英文题目第一个单词首字母大写, 其余除  
专有词外一律小写, 小四字体。

## Application of load duration curve to analyze the total phosphorus capacity of Hebei Section of Yongding River Watershed

ZHAO Jiejie<sup>1</sup>, LEI Kun<sup>2</sup>, SUN Mingdong<sup>2</sup>, XU Xiangqin<sup>2</sup>, CHENG Quanguo<sup>1\*</sup>

姓全大写, 名只首字母大写, 双字名之间没有短线

英摘时态: 描述一般现实规律用  
一般现在时; 描述自己的成果用  
一般过去时

1.School of Environment Science and Engineering, Shenyang University

2.Chinese Research Academy of Environmental Sciences

**Abstract** To study the capacity of phosphorous (TP) of five control sections (Zuowei, Laoyazhuang, Xiangshuipu, Shixiali, Baohaoqiao) in Hebei section of Yongding River Basin and provide scientific basis for implementing effective water environment management plan, TP's sptaiotemporal dynamic and the quantity of TP's load reduction need to be calculated. To achieve these goals, hydrological data from 2002 to 2016 and water quality data from 2010 to 2016 were analyzed with load duration curve (LDC) method. The results show the capacity of TP in study area has been overloaded, the capacity of TP varies great by month and season. The capacity of TP in downstream is relatively larger. The highest capacity of TP is mainly on October, November, and July, while the lowest is mainly on January and February. Non-point source pollution emission was the dominant pollution source in this area. The TP's actual load of each station needs to be reduced in different degrees in the moist condition interval, mid-range flow interval and dry condition interval except for Laoyazhuang station. It is necessary to formulate total control targets at different time scales.

**Key words** total amount control; load duration curve (LDC); total phosphorus; capacity; Yongding Watershed

如果有项目支持, 给出项目类型及编号

收稿日期: 2019-08-07

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07107-001, 2018ZX07111-002)

作者简介: 赵杰杰(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事水环境管理研究, 1215967028@qq.com

\*责任作者: 程全国(1966—), 男, 教授, 主要从事环境可持续发展与规划研究, chengqg2011@163.com

包括作者姓名、出生年、性别, 职称(参加工作的作者), 学历, 主要研究方向及Email

前言：介绍研究背景，本研究与前人工作的关系及研究存在的问题和研究目的，可取得的研究成果等

近年来，随着经济社会的快速发展，许多区域水环境承受的压力日益增大，水环境污染问题日趋严重。

对河流污染负荷总量进行规划，提出有效的流域污染物总量控制方案对于改善河流水质，实现可持续发展具有重要意义<sup>[1]</sup>。目前河流污染负荷总量控制规划多采用数学模型进行分析<sup>[2]</sup>，主要包括斯特里特-费尔普斯（S-P）、QUAL、WASP(water quality analysis simulation program)、MIKE 和环境流体动力学（EFDC）模型体系等<sup>[3]</sup>。模型的选择取决于水域的流速、流量、宽深比、迁移扩散速率、温度等诸多因素，但由于我国水环境管理起步较晚，数学模型所需的系统监测数据相比国外较为匮乏，因此基于常规监测数据的分析方法更为适用<sup>[4]</sup>。常见的非模型方法包括负荷历时曲线（load duration curve, LDC）法、质量平衡法和还原法等<sup>[5]</sup>，LDC 法于 1959 年由 Searcy 首次提出<sup>[6]</sup>，其对数据需求量小且操作简便，一直在美国最大日负荷总量（TMDL）计划制定中应用。LDC 法在我国同样被广泛应用，陶子夜<sup>[7]</sup>将 LDC 法应用于通顺河武汉段流域 TMDL 计划中；王生愿等<sup>[8]</sup>将 LDC 法运用到梁子湖流域容量总量控制中；近年来 LDC 法更多的与计算机模型相结合应用于流域管理中；嵇灵焯等<sup>[9-11]</sup>将 LDC 法与 WASP 模型相结合应用于东苕溪流域总量控制；Kim 等<sup>[12]</sup>研发了基于网络的 LDC 系统，将该系统与谷歌地图相连接可以实现监测数据的可视化，与其他模块的集成可以实现对流域 TMDL 的自动化计算与分析。笔者采用 LDC 法对永定河流域河北段总磷（TP）纳污能力进行研究，以期为实施有效的水环境管理方案提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

永定河流域地跨内蒙古、山西、河北、北京、天津 5 个省（区、市），总面积为 4.7 万 km<sup>2</sup>。其上游有洋河、桑干河两大主要汇水河<sup>[13]</sup>。洋河发源于内蒙古自治区兴和县和山西省杨高县，于河北省张家口市怀安县柴沟堡镇汇合为洋河，流经宣化、下花园等区县后，与桑干河于张家口市怀来县朱官屯汇合后称永定河。洋河与桑干河汇合后流入官厅水库，其汇入流量占官厅水库入库总流量的 90%以上<sup>[14-16]</sup>。官厅水库曾是北京市饮用水的重要供水水源之一，但由于水体受到污染，于 1997 年退出北京市饮用水供水系统，2007 年恢复为北京市应急备用水源地<sup>[17]</sup>。近年来国内学者对官厅水库及其入库河流开展了大量的研究<sup>[18-21]</sup>，结果表明入库河流主要污染指标为化学需氧量（COD）、TP、总氮（TN）、氨氮等，库区水体氮磷比为 30:1，磷是富营养化的限制因子。陈红军<sup>[22]</sup>研究发现，2004 年 7—11 月官厅水库 TP 输入量为 67.1 t，其中永定河输入量占 89.8%。赵建国等<sup>[17]</sup>研究发现，永定河怀来段 TP 浓度均值为 0.64 mg/L，氮磷比年均值为 32.78，水体浮游植物总体处于磷限制状态。永定河上游河流中磷污染物是官厅水库主要磷源输入<sup>[23-26]</sup>，河流中营养盐的累积增加了河流富营养化的风险<sup>[27]</sup>，也给官厅水库饮用水水源地功能恢复带来潜在风险。笔者选取老鸦庄断面作为洋河支流清水河的代表控制断面，石匣里断面作为桑干河支流的代表控制断面，洋河的左卫断面、响水堡断面、八号桥断面分别作为永定河流域河北段上游、中游和下游的代表控制断面（图 1）。选取 TP 为控制目标，利用 LDC 法探究永定河流域河北段纳污能力。

图表的排列，应在正文中先提及，再排图表

字号：一级标题小四黑体；二级标题五号黑体；三级标题仅数字黑体。  
正文五号宋体，1.5倍行距；文中数字与字母为五号Times New Roman

按正文的序号于号角  
文献出现的顺序编号，方内表示

两个或多个连续数字不用连接，数字连续用逗号连接

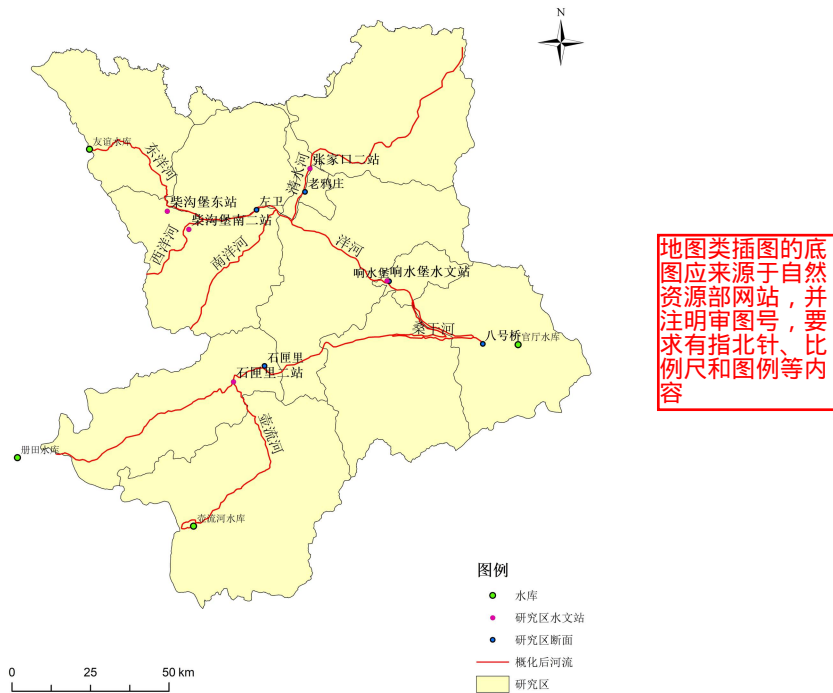


图 1 研究区断面分布

Fig.1 Location of monitoring sites in research area

## 1.2 数据来源

从张家口市环境科学研究院收集了 2010—2016 年左卫、响水堡、八号桥、石匣里、老鸦庄断面的水质监测数据以及 2002—2016 年柴沟堡东站、柴沟堡南二站、张家口二站、石匣里二站、响水堡水文站的逐日平均流量数据。以就近水文站流量作为对应断面流量，其中左卫断面流量为柴沟堡东站和柴沟堡南二站流量之和；八号桥断面由于距上游水文站较远，该断面流量由石匣里二站和响水堡水文站流量经 ArcGIS 水文分析模块分析后，按汇水区面积比例计算得到。根据张家口市水环境功能区划和考核断面达标整治计划，到 2020 年，除老鸦庄断面需达到 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》<sup>[28]</sup>中 IV 类水质标准外，其他 4 个断面均需达到 III 类水质标准，负荷历时曲线绘制时各断面水质控制标准与整治目标一致。

国家标准  
先标  
给准  
再给  
准名

## 1.3 研究方法

LDC 法是基于河流长序列日均流量数据绘制流量历时曲线 (flow duration curve, FDC) 后，结合实际水质监测的瞬时流量与污染物浓度，将流量与污染物允许负荷合理地联系在一起，建立河道断面水质变化与流域潜在污染机制间的联系。与模型法相比，LDC 法更为简单易用，对历史资料要求较低。LDC 可以反映流域内水质现状、允许负荷、现状负荷、污染负荷类型等水环境信息，为总量控制方案提供合理依据<sup>[2,29-32]</sup>。LDC 法纳污能力计算的主要步骤<sup>[7-12,29-34]</sup>：1) 将长序列逐日平均流量进行降序排列，计算累积频率，以流量为 Y 轴，以保证率为 X 轴绘制 FDC；2) 明确流域水质管理目标，结合研究区的水环境功能区划与相关水质管理要求，确定水质管理目标的标准值；3) 将 FDC 中 Y 值与水质控制标准值相乘后作为 LDC

的 Y 值（通常选取对数坐标轴），仍以保证率为 X 轴，同时将实际监测所得瞬时流量与水质数据相乘即得实测负荷，根据监测时间内流量对应的累积频率，以散点的形式绘制于 LDC 上。

## 2 结果与讨论

结果与讨论：包括对研究结果的介绍、描述和分析、评论

### 2.1 TP 纳污能力空间变化特征

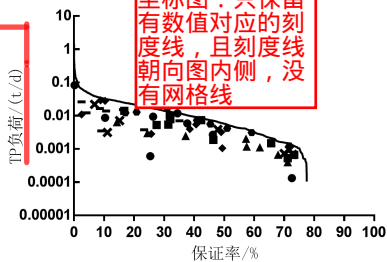
根据美国国家环境保护局(US EPA)推荐,将 LDC 按保证率划分为以下 5 个流量历时区间(flow duration interval, FDI)：保证率为 0%~10%的高流量区；保证率为 10%~40%的丰水区；保证率为 40%~60%的中流量区；保证率为 60%~90%的枯水区；保证率为 90%~100%的低流量区<sup>[35]</sup>。根据各水文站逐日平均流量、各断面水质数据及水质管理目标，得到 5 个断面的 LDC 及 2010—2016 年 TP 实测负荷如图 2 所示。由图 2 可知，老鸦庄、左卫和石匣里断面均出现不同程度断流现象，其中老鸦庄断面断流现象最为严重，全年有近 20%的时间处于断流状态，左卫和石匣里断面约有 5%的时间处于断流状态。由于老鸦庄断面断流时间较长，按推荐方法划分 FDI 无法满足要求，结合永定河流域气候、水文变化特征，将老鸦庄断面保证率为 0%~5%时划分为高流量区，5%~30%时为丰水区，30%~50%时为中流量区，50%~70%时为枯水区，70%~80%时为低流量区。

数值范围用~线连接，单位相同的前面的单位省略，但%不能省略

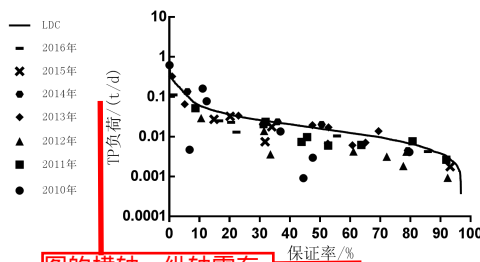
由图 2 可见，断面 LDC 变化趋势较为一致，均呈典型的 S 型。结合实测负荷分布可知，洋河上游老鸦庄断面水质较好，2010—2016 年全流量区间内 TP 实测负荷基本未超过允许负荷；左卫断面 TP 负荷存在轻度超标状况，且主要出现在丰水区、中流量区和枯水区；桑干河的石匣里与左卫断面情况基本一致，超标点也集中在丰水区、低流量区和枯水区；洋河响水堡断面超标点主要集中在丰水区和中流量区；洋河下游八号桥断面超标情况较为严重，全流量区间均存在超标点且超标频率高。

图表中的变量与单位之间用斜线分开

坐标图：只保留有数值对应的刻度线，且刻度线朝向图内侧，没有网格线



(a)老鸦庄



(b)左卫

图例要清晰、分辨易分：图例不超过 3 个时，可用黑、白、灰区分；超过 3 个可用不同图案区分

图的横轴、纵轴需有轴名，并标注单位

注：Y 轴为 lg 对数坐标轴；LDC 上对应的 Y 值为 TP 允许负荷。

图注小五宋体，居中于图下、图表题上方。

图 2 断面的 LDC 及 2010—2016 年 TP 实测负荷

Fig.2 LDC and actual load from 2010 to 2016 at monitoring sites

图题包括中英文图题名

根据超标点所处的保证率区间，可以进行点源与非点源负荷贡献的判别<sup>[35]</sup>。对于河流水体，不同流量模式下流域污染源贡献程度不同。一般认为，超标点保证率为 85%~99%时，主要污染源贡献为点源；10%~70%时，主要污染源贡献为非点源；70%~85%时，则受点源和非点源的综合影响；保证率小于 10%和大于 90%代表极端丰水和极端枯水的特殊情况，对应非可行管理区和点源失控区，本研究暂不予考虑<sup>[35-39]</sup>。从图 2 可知，老鸦庄、左卫、响水堡和石匣里断面的超标点集中分布在保证率为 10%~70%，表明其主要污染源贡献为非点源；八号桥断面在全流量区间均有超标，大部分超标点分布在保证率为 10%~70%，

少数分布在保证率为 85%~99%，表明其主要受点源和非点源的综合影响。污染源贡献类型的不同与研究区产业结构布局有一定关联，如清水河老鸦庄断面、洋河左卫断面及桑干河石匣里断面控制范围内人口稀少，主要以农业为经济支柱，导致存在较高的非点源污染流失风险；洋河下游的响水堡和八号桥断面控制范围内人口密度较大，工业与养殖业发达，且部分河段两岸种植业发达，河流水质受点源和非点源的综合影响。

排除极端丰水和极端枯水的特殊情况，以 5 个断面丰水区、中流量区和枯水区的 TP 纳污能力为研究重点，选取相应区间中点保证率所对应的最大日负荷作为各流量区的最大允许负荷<sup>[34]</sup>，其结果如表 1 所示。由表 1 可知，5 个断面中老鸦庄断面 TP 纳污能力最弱，八号桥断面最强，其 TP 允许负荷在丰水区、中流量区和枯水区分别为老鸦庄断面的 5.3 倍、7.5 倍和 14.2 倍；同一断面不同流量模式下，老鸦庄断面 TP 允许负荷变化最为剧烈，其丰水区和中流量区的允许负荷分别为枯水区的 7.6 倍和 2.9 倍，断面的空间分布差异与流量区间变化会导致 TP 允许负荷变化显著。

表用三线表，包括中英文表题名。

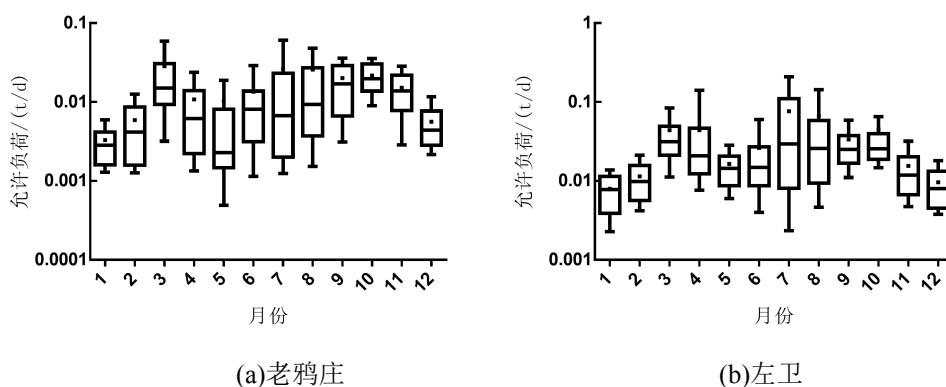
表中数值单位相同时，将单位置于英文表题右侧

表 1 5 个断面不同流量区间 TP 允许负荷  
Table 1 TP capacity of all sites in different flow intervals t/a

断面	丰水区	中流量区	枯水区
老鸦庄	8.74	3.41	1.15
左卫	10.99	5.80	2.95
石匣里	13.56	9.40	5.71
响水堡	20.69	9.21	3.08
八号桥	46.81	25.83	16.41

## 2.2 TP 纳污能力时间变化特征

根据各断面 LDC，以月份为时间尺度，得到 5 个断面不同流量保证率下的 TP 允许负荷，如图 3 所示。由图 3 可知，老鸦庄和左卫断面的纳污能力峰值均出现在 7 月，之后呈递减趋势，其中老鸦庄断面在 3 月、左卫断面在 3—4 月纳污能力明显增加；石匣里断面纳污能力峰值出现在 10 月，除 11 月纳污能力显著增加外，其余月份纳污能力在小范围内波动；响水堡断面纳污能力峰值出现在 10 月，其 11 月箱型图形状较为特殊，箱尾明显增长，流量波动剧烈，且流量分布集中在大流量区；八号桥断面纳污能力峰值出现在 10 月，10—11 月纳污能力明显增加，1—2 月则明显偏小，其余月份纳污能力在小范围内波动。



注：Y轴为lg对数坐标轴。

图 3 5 个断面 TP 允许负荷月变化

Fig.3 TP capacity variation of 5 monitoring sites in different months



月份、年份之间  
用一字线连接

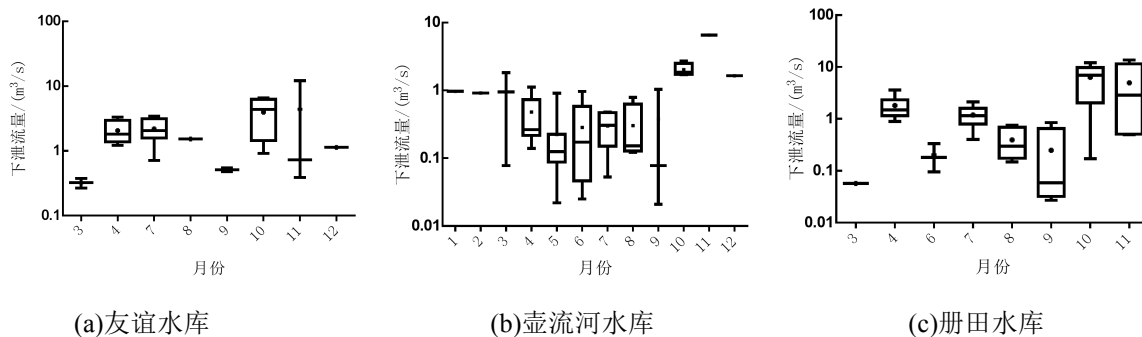
根据永定河流域所属区域气候特点，以3—5月为春季、6—8月为夏季、9—11月为秋季、12月—翌年2月为冬季，基于各断面LDC得到TP允许负荷季节变化，结果如图4所示。由图4可知，5个断面各季节的最大日允许负荷平均值所在位置与对应的50%累积频率所处的相对位置均存在不同程度的偏移，这种偏移说明了纳污能力的波动，且偏离程度越大说明纳污能力波动越大。

5个断面不同季节允许负荷如表2所示。由表2可知，上游老鸭庄和左卫断面TP纳污能力季节变化趋势一致，表现为夏季>春季>秋季>冬季；下游石匣里、响水堡和八号桥断面纳污能力季节变化趋势一致，表现为秋季>春季>夏季>冬季。结合图4可知，TP纳污能力强的季节，其最大日允许负荷平均值和50%累积频率值所处的相对位置偏移程度也相对较大，5个断面春季和冬季最大日允许负荷平均值点与50%累积频率值所处相对位置最为接近，春季、夏季、秋季最大日允许负荷平均值点所处位置均高出50%累积频率值所处位置，说明永定河流域河北段年内大部分时间流量较小且波动较大。

表2 5个断面不同季节TP允许负荷  
Table 2 TP capacity of 5 monitoring sites in different seasons

断面	春季	夏季	秋季	冬季
老鸭庄	3.60	4.02	3.05	0.90
左卫	7.05	12.83	4.60	1.63
石匣里	5.07	5.25	20.65	3.10
响水堡	6.67	7.30	12.73	3.90
八号桥	14.53	14.55	43.27	9.00

永定河流域河北段建有大量的水利水电设施，其中友谊水库位于左卫断面上游，册田水库和壶流河水水库位于石匣里断面上游。2002—2016年友谊水库、册田水库和壶流河水水库多年月均下泄流量如图5所示。由图5结合图3可知，友谊水库下泄时间集中在4月、7月和10月，而左卫断面3—4月纳污能力显著增强，该变化与春季冰层融化和友谊水库下泄有显著关系；左卫断面纳污能力出现峰值的7月为汛期，此时降雨明显增加，且上游水库下泄流量较大。壶流河水水库下泄时间集中在4—10月，册田水库下泄时间集中在4月、7—11月，2个水库10月下泄频率较高且流量较大，其余月份也有一定的下泄流量，这与石匣里断面纳污能力在10月出现峰值，其余月份纳污能力在小范围内波动的规律基本吻合。综上，由于天气变化和流域内工业、种植业需水量的变化，水利设施需在不同时段进行水量调控，不定期、不定量的蓄水与下泄使各监测断面流量波动变化，进而使TP纳污能力发生变化。



注：Y轴为lg对数坐标轴。  
图5 3座水库多年月均下泄流量变化  
Fig.5 Monthly discharge variation of each reservoir in different years

## 2.3 TP 负荷应削减量分析

根据实测 TP 负荷所在流量区间的分布，取各流量区间内 90%保证率所对应 TP 实测负荷作为各流量区间的 TP 现状负荷<sup>[35]</sup>。5 个断面不同流量区间 TP 现状负荷如表 3 所示。

表 3 5 个断面不同流量区间 TP 现状负荷

Table 3 Actual load of 5 monitoring sites in different flow intervals

t/a

断面	丰水区	中流量区	枯水区
老鸦庄	8.04	3.23	1.29
左卫	23.56	7.94	3.74
石匣里	15.35	9.34	6.53
响水堡	23.21	13.46	3.86
八号桥	75.89	42.38	23.46

用允许负荷减去现状负荷可得各断面应削减负荷，若差值为负，表示现状负荷已超过最大允许负荷；若差值为正值，则表示未超过。用应削减量表示为达到相应水质标准需要削减的负荷量，应削减率表示为达到相应水质标准需要削减现状负荷的百分比。对超标断面进行应削减量和应削减率计算，结果如表 4 所示。由表 4 可知，老鸦庄断面仅在枯水区需削减，丰水区和中流量区无需削减，目前水质状况基本可以达到 GB 3838—2002 中Ⅳ类水质标准；其余 4 个断面污染状况较为严重，在丰水区、中流量区和枯水区均需进行不同程度的削减。由于在丰水区和中流量区的主要污染源贡献为非点源，因此应重点加强流域内种植业、养殖业等污染源的管控，同时减少磷肥的使用；在枯水区水质受到点源和面源的综合影响，在控制面源污染的同时，可以通过对工业企业和污水处理厂的提标改造来削减现状负荷。

表 4 5 个断面不同流量区间应削减量和应削减率

Table 4 Load reduction and reduction rate of all sites in different flow intervals

断面	丰水区		中流量区		枯水区	
	应削减量/(t/a)	应削减率/%	应削减量/(t/a)	应削减率/%	应削减量/(t/a)	应削减率/%
左卫	12.57	53	2.14	27	0.78	21
石匣里	1.79	12	0.05	1	0.83	13
响水堡	2.57	11	4.25	32	0.78	20
八号桥	29.08	38	16.54	39	7.05	30

## 3 结论

结论：总结研究的主要认识和论点；与前人研究工作的异同；本论文在理论和实用上的意义与价值；进一步深入研究的建议等

(1) 永定河流域河北段 5 个断面的 TP 纳污能力空间分布差异显著：清水河老鸦庄断面最弱，洋河上游左卫断面、桑干河石匣里断面次之，洋河中游响水堡断面较强，永定河八号桥断面最强。

(2) 5 个断面的 TP 纳污能力在不同时间尺度上波动剧烈：老鸦庄、左卫断面的月纳污能力峰值出现在 7 月，石匣里、响水堡、八号桥断面峰值出现在 10 月；老鸭庄、左卫断面夏季纳污能力最强，石匣里、响水堡和八号桥断面秋季纳污能力最强。流域内建有大量水利设施，为满足工业与种植业等产业的需求，水利设施在不同时间段进行水量调节是导致纳污能力在不同时间尺度上波动的主要原因。

(3) 除老鸦庄断面在丰水区和中流量区的现状负荷未超过允许负荷外，其余 4 个断面在丰水区、中流量区和枯水区现状负荷均超过允许负荷，其中左卫断面在丰水区的负荷应削减率为 53%，八号桥断面在

丰水区、中流量区和枯水区的应削减率均超过 30%。永定河流域河北段现状污染负荷超过允许负荷情况较严重，需制定不同时间尺度与不同流量模式下的污染物总量控制方案与政策。

## 参考文献

执行GB/T 7714 2015文后参考文献的著录格式及要求

学位论文

期刊：应有英译文，要求来源于原刊，原刊没有可不提供，不能自行翻译

- [1] 高园. 负荷历时曲线法在江西省五河流域TMDL计划中的应用[D].南昌:南昌大学,2013.
- [2] 卢文喜,安永凯,张蕾. 负荷历时曲线法在东辽河流域最大日负荷量中的应用[J].水电能源科学,2012,30(7):44-46.  
LU W X,AN Y K,ZHANG L.Application of load duration curve method to total maximum daily loads in Dongliao River Basin[J].Water Resources and Power,2012,30(7):44-46.
- [3] 刘奇. 水环境容量与水质模型研究综述[J].中国水运(航道科技),2018(1):33-39.
- [4] 程艳,李炳花,此里能布,等. 水污染LDC在洱海弥直河流域水质分析中的应用[J].水电能源科学,2008(4):27-30.  
CHENG Y,LI B H,CI L N B,et al.Application of pollutant load duration curves in water quality characteristics analysis of Mijuhe River Watershed in Erhai Basin[J].Water Resources and Power,2008(4):27-30.
- [5] 付意成,徐文新,付敏. 我国水环境容量现状研究[J].中国水利,2010(01):26-31.  
FU Y C,XU W X,FU M.Research on the water environment capacity status in China[J].China Water Resources,2010(1):26-31.
- [6] SEARCY J K.Flow-duration curves[M].Washington DC:USGS Water-Supply Paper,US Government Printing Office,1959.
- [7] 陶子夜. 负荷历时曲线法在通顺河武汉段流域 TMDL 计划中的应用[D].武汉:武汉理工大学,2018.
- [8] 王生愿,桂发二,方纬,等. 负荷历时曲线法在梁子湖流域污染容量总量控制中的应用[J].长江流域资源与环境,2016,25(5):845-850.  
WANG S Y,GUI F E,FANG W,et al.Load duration curve method in Liangzi Lake Basin pollution capacity total amount control[J].Resource and Environment in the Yangtze Basin,2016,25(5):845-850.
- [9] 嵇灵焯. 基于环境容量的总量控制方法比较研究:以东苕溪流域为例[D].杭州:浙江大学,2018.
- [10] CHEN D J,LU J,WANG H L,et al.Combined inverse modeling approach and load duration curve method for variable nitrogen total maximum daily load development in an agricultural watershed[J].Environmental Science & Pollution Research,2011,18(8):1405-1413.
- [11] LEE E J,KIM T G,CHOI K S.A study of the load allocation using watershed model and load duration curve in TMDL[J].KSCE Journal of Civil Engineering,2018,22(9):3222-3232.
- [12] KIM J,ENGEL B A,PARK 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 waterbody[J].Journal of Environmental Management,2012,97:46-55.
- [13] 杜勇,万超,杜国志. 永定河流域生态治理关键问题及方向[J].中国水利,2018(18):10-11.  
DU Y,WAN C,DU G Z.Trend and key issues on eco-restoration of Yongding River Basin[J].China Water Resources,2018(18):10-11.
- [14] 赵建国,李洪波,李霄宇,等. 永定河怀来段水质污染特征及污染源解析[J].环境科学与技术,2018,41(增刊1):299-306.  
ZHAO J G,LI H B,LI X Y,et al.Water pollution characteristics and pollution source of Yongdinghe River in Huailai[J].Environmental Science & Technology,2018,41(Suppl 1):299-306.
- [15] 庞博,王铁宇,吕永龙,等. 洋河流域张家口段河流水质演化及驱动因子分析[J].环境科学,2013,34(1):379-384.  
PANG B,WANG T Y,LÜ Y L,et al.Temporal variation of water quality and driving factors in Yanghe Watershed of Zhangjiakou[J].Environmental Science,2013,34(1):379-384.
- [16] 云晋,郝桂珍,宋凤芝,等. 永定河上游水质污染特征及评价[J].河北建筑工程学院学报,2018,36(4):80-84.  
YUN J,HAO G Z,SONG F Z,et al.Characteristics and evaluation of water pollution in the upper reaches of Yongding River[J].Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering,2018,36(4):80-84.
- [17] 赵建国,李洪波,刘存歧,等. 永定河怀来段水体富营养化评价[J].环境工程技术学报,2018,8(3):248-256.  
ZHAO J G,LI H B,LIU C Q,et al.Evaluation of eutrophication of water body in Huailai section of Yongding River[J].Journal of Environmental Engineering Technology,2018,8(3):248-256.
- [18] 魏静,郑小刚,张国维,等. 官厅水库、密云水库上游流域地表水氮磷含量现状[J/OL].环境工程,2019.(2019-12-07)[2019-12-10].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2097.X.20191207.0917.002.html>.  
WEI J,ZHENG X G,ZAHNG G W,et al.Study on nitrogen and phosphorus content of surface water in the upstream basin of Guanting Reservoir and MiYun Reservoir[J/OL].Environmental Engineering,2019.(2019-12-07)[2019-12-10].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2097.X.20191207.0917.002.html>.
- [19] 周洋凯. 官厅水库主要入库支流动态水环境容量研究[D].张家口:河北建筑工程学院,2019.
- [20] WANG H C,WANG D T,LUO Y.Analysis of water quality variation trend of Guanting Reservoir based on Markov model[C]//Proceedings of the 2018 7th international conference on energy,environment and sustainable development (ICEESD 2018),2018.

来源于互联网的文献：要求有更新日期或引用日期及网址