

张月,蔡木林,邢敏,等.控制单元污染源排污许可总量限值优化研究:以永定河流域为例[J].环境工程技术学报,2023,13(1):431-437.
ZHANG Y,CAI M L,XING M,et al.Optimization of total discharge permit limit of pollution sources in control units: a case study of Yongding River watershed[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(1): 431-437.

控制单元污染源排污许可总量限值优化研究

——以永定河流域为例

张月¹,蔡木林²,邢敏¹,陈鹏¹,王海燕²,乔飞²,李珊珊^{1*}

1.北京市生态环境保护科学研究院

2.中国环境科学研究院

摘要 排污许可证制度是目前普遍采用的水环境管理的重要制度之一,在水污染控制和水环境质量改善中发挥着重要作用。通过将基于水环境容量约束和基于流域排放标准的允许排放量进行对比,构建了控制单元排污许可总量限值管理模式和污染源排污许可总量限值优化方法。基于永定河流域典型控制单元的实证研究表明,在执行流域排放标准时,北京段典型控制单元可满足水环境质量改善需求,但张家口段典型控制单元仍需要削减 COD_{Cr} 210.388 t/a。张家口段典型控制单元内 2 家污水处理厂上游间接排放固定源需分别削减 COD_{Cr} 0.002 和 32.039 t/a。

关键词 排污许可;总量控制;控制单元;熵权法;永定河流域

中图分类号: X522

文章编号: 1674-991X(2023)01-0431-07

doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20210775

Optimization of total discharge permit limit of pollution sources in control units: a case study of Yongding River watershed

ZHANG Yue¹, CAI Mulin², XING Min¹, CHEN Peng¹, WANG Haiyan², QIAO Fei², LI Shanshan^{1*}

1.Beijing Municipal Research Institute of Eco-Environmental Protection

2.Chinese Research Academy of Environmental Sciences

Abstract Pollutant discharge permit system is widely used in water environment management, which has played an important role in water pollution control and water environment quality improvement. By comparing the allowable discharges based on the water environmental capacity constraints and the discharge standards for the watershed, the management mode of total discharge permit limit of control units and the optimization method of total discharge permit limit of polluting sources were constructed. The empirical study based on the typical control units of Yongding River watershed showed that the typical control unit of Beijing section could meet the needs of water environment quality improvement when implementing the watershed discharge standard, but the typical control unit of Zhangjiakou section still needed to reduce 210.388 t/a of COD_{Cr}. In the typical control unit of Zhangjiakou section, 0.002 and 32.039 t/a of COD_{Cr} should be reduced respectively in the two fixed sources whose wastewater was discharged into the sewage treatment plants.

Key words pollutant discharge permit; total amount control; control unit; entropy method; Yongding River watershed

排污许可证制度是世界各国普遍采用的水环境管理的重要制度之一,在水污染控制和水环境质量改善中发挥着重要作用。美国排污许可核算和分配方法主要有基于技术标准的最实用控制技术(BPT)、最佳常规污染物控制技术(BCT)、最佳可行

技术(BAT)和最佳流域管理措施(BMP)以及以每日最大负荷总量(TMDL)计划为代表的基于水环境容量的污染物总量管理模式^[1-2],同时将以技术为基础的排放标准限制和以水质为基础的排放总量限制相结合,在基于技术的排放标准不能确保实现纳污水

收稿日期:2021-11-29

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

作者简介:张月(1993—),女,助理研究员,硕士,主要从事环境规划与管理研究, yuezhangww@126.com

* 责任作者:李珊珊(1983—),女,正高级工程师,博士,主要从事环境污染与防治研究, liss0502@163.com

体的水质要求时,采用更严格的基于水质的排放限制^[3-4]。欧盟依据《水框架指令》^[5]要求水体达到良好水质状态,当实际水质不能满足这一要求时,企业允许的污染物排放量会被缩减,以达到水质改善的目标需求。从发达国家和地区排污许可管理经验来看,基于水质目标的排污许可管理才是最终的发展方向^[6-8]。

针对基于水质目标的许可限值,国内外主要通过核算水环境容量确定允许排放量并进行分配。国外多数研究在考虑经济发展的基础上将数学模型运用于水环境容量与污染负荷分配的计算中^[9-10]。我国大部分研究以“流域—行政区”或“流域—行政区—污染源”作为排污许可分配主线^[11-12]。近年来,鉴于以行政区为单位分配水环境容量可能存在并不能满足流域水环境质量管理要求的问题,以“流域—控制单元”或“流域—控制单元—污染源”为主线的分配方法逐渐涌现^[13-14]。对于水污染负荷分配方法的研究,常用的主要有基于公平原则的等比例分配法^[15-16]、按贡献率削减分配法^[13]、基于效率原则的经济最优法^[17]、以及基于公平和效率原则的层次分析法^[18]、基尼系数法^[19-20]、多目标优化法^[21]和双向耦合优化模型法^[22]等。如薛佳等^[16]构建了污染物总量分配指标体系,运用等比例分配法实现污染物总量的合理分配;庄园^[13]依据浑河抚顺段点源、面源现状水体污染负荷贡献率,对流域内污染负荷直接排放源及间接排放源进行了基于容量总量控制的排污许可分配;党海迪^[23]通过分析双桥河小流域水污染物总量控制技术中纳污能力和污染负荷分配的关键问题,形成了一套小流域系统的污染负荷总量分配技术。

流域排污许可制度的实施对于有效控制流域水污染物排放具有重要意义。由于流域执行的现行排放标准或流域排放标准管控的是浓度限值,与水环境质量目标不直接挂钩,可能存在部分水体水质不达标的情况。为解决浓度限值不能满足水环境质量改善需求的问题,亟需从流域水质达标出发,实施基于水质目标的流域排污许可管理^[2,24]。笔者结合我国流域排污许可管理现状及存在问题,探索了基于水环境质量改善的流域排污许可管理模式,对控制单元污染源排污许可总量限值进行优化研究,并选择永定河流域典型控制单元开展实证研究,以期为我国流域排污许可科学化、精细化管理提供决策支撑和方法借鉴。

1 控制单元排污许可总量限值管理模式

为强化流域排污许可精细化管理,以“流域—控

制单元—污染源”为主线,将基于水环境容量约束和基于流域排放标准的允许排放量进行对比,制定不同的排污许可总量限值管理模式。

情景 1: 当基于水环境容量约束的允许排放量 > 基于流域排放标准的允许排放量时:

$$\Delta T = T_N - T_V < 0 \quad (1)$$

式中: T_V 为控制单元内某污染物基于水环境容量约束的允许排放量, t/a; T_N 为执行流域排放标准时控制单元内该污染物的允许排放量, t/a; ΔT 为削减量, t/a。

此情景下,削减量为负,执行流域排放标准可以满足流域水环境质量改善的需求,故这一类控制单元内的排污单位应按照流域排放标准,确定固定污染源的排污许可限值。

情景 2: 当基于水环境容量约束的允许排放量 < 基于流域排放标准的允许排放量时:

$$\Delta T = T_N - T_V > 0 \quad (2)$$

此情景下,削减量为正,控制单元内污染物的排污许可限值应选择基于水环境容量约束的允许排放量。控制单元在执行流域排放标准的同时,考虑对超出控制单元水环境容量的排放量进行削减。

T_N 按下式计算:

$$T_N = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Q_{ij} \times S_N \quad (3)$$

式中: Q_{ij} 为控制单元内第 i 个行业中第 j 个企业的污水排放量, t/a; $i=1, 2, \dots, m$; $j=1, 2, \dots, n$; S_N 为某污染物的流域排放标准限值, mg/L。

2 控制单元污染源排污许可总量限值优化

为进一步优化控制单元内的污染源排污许可总量限值,构建如图 1 所示的固定源污染物排污许可削减量分配方案,将 ΔT 分配到控制单元的各排污企业中去。

2.1 行业层面污染物削减量分配比例的确定

通过专家打分法确定控制单元内行业层面污染物削减量分配比例(A_i)。具体打分方法和基本步骤: 1) 根据对排污许可总量分配的理解,选择合适的行业类别给定权重的专家成员; 2) 设计行业类别给定权重的征询意见表,每个行业类别权重介于 0~1,全部行业类别权重相加总和为 1; 3) 综合考虑行业发展、生产技术和污染风险等影响因素,请专家填写征询意见表,对不同行业类别进行权重赋值; 4) 分别对每个行业类别所有专家的权重取平均值,得到每个行业类别的平均权重,将汇总分析结果反馈给所有专家; 5) 专家判断反馈结果是否能够代表他们的意见,如有不妥之处或是不能反映专家意见的地

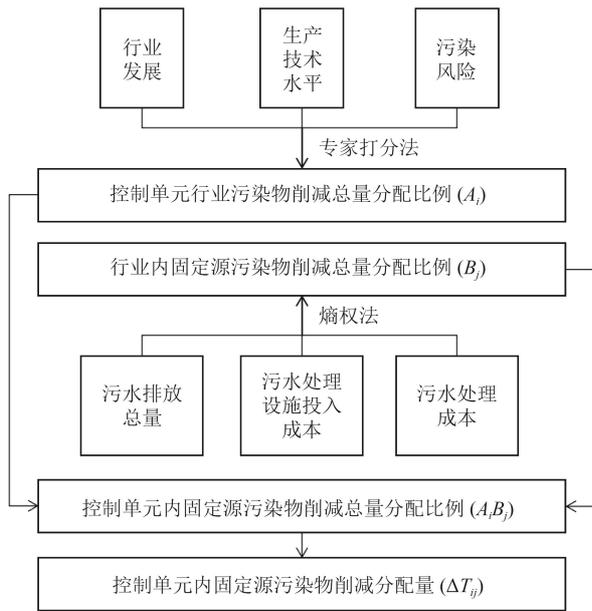


图 1 控制单元内各固定源污染物削减总量分配方案

Fig.1 Allocation scheme of pollutant reduction amount for each fixed source in the control units

方,重复步骤 3)和 4),直至专家打分不再变动为止;6)将最终确定的行业类别平均权重作为行业层面污染物削减量分配比例(A_i)。

2.2 行业内固定源污染物削减量分配比例的确定

通过熵权法确定第 p 个评价指标的权重(w_p),从而确定不同行业内各固定源的污染物削减量分配比例(B_j)。假设影响企业削减量分配的评价指标有 s 个,待分配削减量的企业有 n 个,则可构建评价矩阵:

$$X = (x_{pj})_{s \times n} \quad (4)$$

式中 x_{pj} 为第 j 个企业的第 p 个评价指标, $p=1, 2, \dots, s$ 。本研究主要采用污水排放总量、污水处理设施投入成本和污水处理成本 3 个评价指标,其数据来源于“永定河流域水质目标综合管理示范研究”课题^[25]的实地调研。

由于各评价指标量纲不一致,故需对数据进行标准化处理以消除量纲的影响。采用极差标准化对评价矩阵进行标准化处理^[26],其中正向指标按式(5)计算,负向指标按式(6)计算:

$$y_{pj} = \frac{x_{pj} - \min(x_{pj})}{\max(x_{pj}) - \min(x_{pj})} \quad (5)$$

$$y_{pj} = \frac{\max(x_{pj}) - x_{pj}}{\max(x_{pj}) - \min(x_{pj})} \quad (6)$$

式中 y_{pj} 代表第 j 个企业的第 p 个评价指标标准化后的值。各评价指标数据经标准化处理后,可得到矩阵 $Y = (y_{pj})_{s \times n}$ 。

第 p 个指标的熵值(v_p)按下式计算:

$$v_p = -k \sum_{j=1}^n f_{pj} \ln f_{pj} \quad (7)$$

式中: $k = 1/\ln n$; $f_{pj} = y_{pj} / \sum_{j=1}^n y_{pj}$ 。

w_p 按下式计算:

$$w_p = \frac{1 - v_p}{\sum_{p=1}^s (1 - v_p)} \quad (8)$$

行业内各固定源的污染物削减量分配比例按下式计算:

$$B_j = \frac{\sum_{p=1}^s x_{pj} \times w_p}{\sum_{p=1}^s \sum_{j=1}^n x_{pj} \times w_p} \quad (9)$$

2.3 控制单元固定源污染物削减分配量的确定

将 A_i 和 B_j 相乘,得到流域控制单元各固定源的污染物削减量分配比例($A_i B_j$)。最终根据 $A_i B_j$,按下式计算确定控制单元内固定源污染物削减量的分配值(ΔT_{ij}):

$$\Delta T_{ij} = \Delta T \times A_i B_j \quad (10)$$

3 永定河流域典型控制单元实践案例

3.1 流域概况及典型控制单元选择

永定河是海河流域七大水系之一(112°06'E~117°45'E, 39°18'N~41°20'N),流经内蒙古、山西、河北 3 省(区)及北京、天津 2 个直辖市,被誉为北京市的母亲河,流域面积为 4.7 万 km²。流域持续多年干旱少雨,下游常年处于断流状态,2019 年开始实施生态补水,从山西省自黄河跨流域调水补充永定河水源。目前,流域内 COD_{Cr}、氨氮超标较严重,入河排污量远超水体纳污能力,存在水资源过度开发、环境承载能力差、污染严重、生态系统退化等问题,严重制约了京津冀地区经济社会的可持续发展^[27]。对流域重点涉水排污单位实施差异化和精细化管理,是改善提升永定河流域水环境质量的有效手段。

控制单元划分是为实施基于水环境质量的流域排污许可管理提供水质目标管理的基本控制单元。根据永定河流域水功能区区划,基于流域地表水文分析、污染源信息及水系特征,“永定河流域水质目标综合管理示范研究”课题^[25]开展了干流河段的划分及控制区域的确定,将永定河流域划分为 22 个控制单元(图 2),并计算了各控制单元基于水环境容量约束的允许排放量。笔者在此基础上,以 C-016-001-01 和 C-011-002-04 这 2 个相对典型的控制单元

为例,开展流域排污许可总量限值优化的实证分析。控制单元 C-016-001-01 和 C-011-002-04 分别位于北京市段内和张家口市段内,其基于水环境容量

约束的允许排放量 COD_{Cr} 分别为 1 684.02 和 1 082.00 t/a,氨氮分别为 84.20 和 202.30 t/a,总磷分别为 16.84 和 13.40 t/a^[25](表 1)。



图 2 永定河流域典型控制单元示意

Fig.2 Schematic diagram of typical control units in Yongding River watershed

表 1 基于水环境容量约束的典型控制单元允许排放量

Table 1 Allowable discharge of typical control units based on water environmental capacity constraints t/a

| 控制单元 | COD _{Cr} | 氨氮 | 总磷 |
|--------------|-------------------|--------|-------|
| C-016-001-01 | 1 684.02 | 84.20 | 16.84 |
| C-011-002-04 | 1 082.00 | 202.30 | 13.40 |

基于“永定河流域水质目标综合管理示范研究”课题中由中国环境科学研究院编制的河北省地方标准《永定河流域水污染物排放标准》(建议稿)^[25],永定河流域重点控制区和一般控制区的排放限值如表 2 所示。控制单元 C-016-001-01 和 C-011-002-04 均位于重点控制区,其 COD_{Cr}、氨氮和总磷的流

表 2 永定河流域水污染物排放标准

Table 2 Discharge standard of water pollutants in Yongding River watershed mg/L

| 污染物 | COD _{Cr} | 氨氮 | 总磷 |
|-------|-------------------|----------|-----|
| 重点控制区 | 30 | 1.5(2.5) | 0.3 |
| 一般控制区 | 40 | 2.0(3.5) | 0.4 |

注:括号内、外数值分别为水温≤12℃、>12℃时的值。

域排放标准分别为 30、1.5 和 0.3 mg/L。本研究采用上述排放限值进行控制单元基于流域排放标准的允许排放量计算。

3.2 排污许可总量限值管理模式确定

基于环境统计数据,计算控制单元执行流域排放标准时的水污染物排放量,并与基于水环境容量约束的允许排放量^[25]进行比较,结果如表 3 所示。其中,控制单元 C-016-001-01 执行流域排放标准时,COD_{Cr} 排放量为 9.188 t/a,氨氮排放量为 0.459 t/a,总磷排放量为 0.092 t/a,均小于该控制单元基于水环

表 3 控制单元基于水环境容量约束和基于流域排放标准的允许排放量对比

Table 3 Comparison of the allowable discharges based on water environmental capacity constraints and watershed discharge standards in the control units t/a

| 类别 | 控制单元C-016-001-01 | | | 控制单元C-011-002-04 | | |
|-----------|-------------------|-------|-------|-------------------|--------|--------|
| | COD _{Cr} | 氨氮 | 总磷 | COD _{Cr} | 氨氮 | 总磷 |
| 基于水环境容量约束 | 1 684.02 | 84.20 | 16.84 | 1 082.0 | 202.3 | 13.4 |
| 基于流域排放标准 | 9.188 | 0.459 | 0.092 | 1 292.388 | 64.619 | 12.924 |
| 污染物削减量 | 0 | 0 | 0 | 210.388 | 0 | 0 |

境容量约束的允许排放量,符合 1 节中情景 1。故该控制单元不需要进一步削减企业污染物排放量,在发放排污许可证过程中严格执行流域污染物排放标准即可满足水环境质量改善需求。而控制单元 C-011-002-04 执行流域排放标准时, COD_{Cr} 排放量为 1 292.388 t/a, 氨氮排放量为 64.619 t/a, 总磷排放量为 12.924 t/a。其中 COD_{Cr} 的排放量大于该控制单元基于水环境容量约束的允许排放量,符合 1 节中情景 2。故该控制单元需要削减 COD_{Cr} 210.388 t/a。

3.3 污染源排污许可总量限值优化方案

因控制单元 C-011-002-04 中排水直接进入永定河流域的为 2 家污水处理厂,在执行流域排放标准时仍需要减排 COD_{Cr} 210.388 t/a,故对处理后废水排入这 2 家污水处理厂的上游固定源进行排污许可总量限值优化,即对需要削减的 COD_{Cr} 进行分配。根据 2 家污水处理厂污水处理/排放量的比例,核算得到污水处理厂 A 需要削减 COD_{Cr} 5.565 t/a,污水处理厂 B 需要削减 COD_{Cr} 204.823 t/a。根据污水处理厂污水处理/排放量与上游固定源污水排放量的比例,推算得到污水处理厂 A 上游固定源共需削减 COD_{Cr} 0.002 t/a,污水处理厂 B 上游固定源共需削减 COD_{Cr} 32.039 t/a。

污水处理厂上游固定源包括炼铁、建筑工程用机械制造、热电联产、毛皮鞣制加工、陶瓷制品制造和水泥制造等行业在内的 9 家企业,其中 1 家企业废水排入污水处理厂 A,8 家企业废水排入污水处理厂 B。根据图 1 固定源污染物排污许可削减量分配方案,考虑行业发展、生产技术和污染风险等影响因素,采用专家打分法确定行业层面污染物削减量分配比例;选择污水排放总量、污水处理设施投入成本和污水处理成本作为主要影响因素,采用熵权法根据式(8)确定三者的影响权重,由式(9)计算得到不同行业内各固定源的污染物削减量分配比例;最终根据式(10)计算得到该控制单元固定源污染物削减量分配值,由此核算污水处理厂上游各固定源 COD_{Cr} 的削减量,结果如表 4 所示。污水处理厂 A 上游的固定源仅 1 家水泥制造企业,因此其 COD_{Cr} 的削减量为 0.002 t/a。对于污水处理厂 B 上游的固定源,炼铁企业被分配的 COD_{Cr} 削减量最高(8.650 t/a, 占比 27.0%),其次为水泥制造企业(5.447 t/a, 占比 17.0%)、建筑工程用机械制造企业(4.485 t/a, 占比 14.0%)和陶瓷制品制造企业(4.148 t/a, 占比 12.9%)。

关于控制单元间接排放固定源排污许可的总量优化,王笑楠^[14]在永定河流域张家口段基于水质的排污许可限值研究中,主要考虑了间接排放企业与

表 4 控制单元固定源水污染物削减分配情况

Table 4 Reduction allocation of fixed source water pollutants in the control units

| 企业编号 | 行业类型 | 废水排放去向 | A_i | B_j | $A_i B_j$ | COD_{Cr} 削减量/(t/a) |
|------|-----------|--------|-------|-------|-----------|----------------------|
| 企业1 | 炼铁 | 污水处理厂B | 0.27 | 1.00 | 0.27 | 8.650 |
| 企业2 | 建筑工程用机械制造 | 污水处理厂B | 0.14 | 1.00 | 0.14 | 4.485 |
| 企业3 | 热电联产 | 污水处理厂B | 0.12 | 1.00 | 0.12 | 3.845 |
| 企业4 | 毛皮鞣制加工 | 污水处理厂B | 0.12 | 0.76 | 0.09 | 2.917 |
| 企业5 | 毛皮鞣制加工 | 污水处理厂B | 0.12 | 0.24 | 0.03 | 0.928 |
| 企业6 | 陶瓷制品制造 | 污水处理厂B | 0.18 | 0.72 | 0.13 | 4.148 |
| 企业7 | 陶瓷制品制造 | 污水处理厂B | 0.18 | 0.28 | 0.05 | 1.619 |
| 企业8 | 水泥制造 | 污水处理厂B | 0.17 | 1.00 | 0.17 | 5.447 |
| 企业9 | 水泥制造 | 污水处理厂A | | | | 0.002 |

污水处理厂的距离和间接排放企业的污染物排放量。本研究主要以行业特征、污水排放总量、污水处理设施投入成本和污水处理成本作为设置分配权重的重要影响因素,多因素的考量使削减量分配结果更加科学合理。但在确定行业分配权重时,存在一定的主观局限性,进而在一定程度上降低了固定源污染物分配的公平性。此外,控制单元内除企业等固定源排污外,还存在城市生活和农业等非点源污染^[8,28],尚需在实践中进一步探索相应的削减和控制方法。

4 结论与建议

4.1 结论

(1)在充分考虑实现流域水质达标的基础上,通过将基于水环境容量约束和基于流域排放标准的允许排放量进行对比,可制定不同的排污许可总量限值管理模式。采用专家打分法和熵权法,分别确定行业层面和行业内固定源污染物削减量分配比例,可计算得到控制单元固定源污染物削减分配量,为流域污染源排污许可总量限值优化提供方法借鉴。

(2)永定河流域北京市内典型控制单元(C-016-001-01)执行流域排放标准时,污染物排放量小于基于水环境容量约束的允许排放量,严格执行流域排放标准即可满足水环境质量改善需求。张家口市内典型控制单元(C-011-002-04)执行流域排放标准时, COD_{Cr} 的排放量大于基于水环境容量约束的允许排放量,故需要削减 COD_{Cr} 210.388 t/a;其中污水处理厂 A 和 B 分别需要削减 COD_{Cr} 5.565 和 204.823 t/a,上游间接排放固定源分别需削减 COD_{Cr} 0.002 t/a(1 家企业)和 32.039 t/a(8 家企业)。

4.2 建议

(1) 针对不同类型控制单元实施差异化排污许可管理模式

基于控制单元水环境容量进而确定基于水质目标的固定污染源排污许可限值, 是未来实现固定污染源精细化管理的必然要求。考虑到不同控制单元环境压力与水质改善需求存在差异, 不同类型控制单元的排污许可限值确定方法应有所区别。对于水质稳定达标的控制单元, 可执行现行固定污染源排放要求; 对于水质不能稳定达标的控制单元, 应详细分析固定污染源对水质的影响, 针对不同水期执行更为严格的流域排放标准, 或执行基于水环境容量约束的“一企一标”, 以实现排污许可管理对水质改善的精准支撑。

(2) 持续完善控制单元排污许可削减量的分配方法

对于控制单元固定源排污许可削减量的分配, 未来的研究应在分析控制单元同质性和异性的基础上, 进一步选择有针对性、代表性的影响削减量分配的关键因素, 并充分考虑技术、经济成本和区域环境管理政策等方面。多因素的考量可使削减量分配结果更加科学合理, 但兼顾主观性和客观性赋予各因素权重一直是个难题。因此, 目前常用的基于公平、效率原则的分配方法需进一步优化, 其精准性、适应性需在实践中持续探索和完善。

参考文献

- [1] 白颖杰, 曾科, 高镜清, 等. 中美水污染物排污许可限值核定技术对比[J]. *环境工程*, 2021, 39(2): 16-20.
BAI Y J, ZENG K, GAO J Q, et al. A comparative study on assessment technology of pollutants discharge permit limits between China and the United States[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(2): 16-20.
- [2] 胡颖, 邓义祥, 郝晨林, 等. 我国应逐步实施基于水质的排污许可管理[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(11): 2507-2514.
HU Y, DENG Y X, HAO C L, et al. Gradual implementation of pollutant discharge permit management based on water quality targets in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(11): 2507-2514.
- [3] Office of Water Enforcement and Permit of US EPA, Office of Water Regulations and Standards of US EPA. Technical support document for water quality-based toxics control[M]. Washington DC: Office of Water, 1991.
- [4] US EPA. Guidance for water-quality-based decisions: the TMDL process[M]. Washington DC: Office of Water, 1991.
- [5] 马丽娜, 于丹, 李慧, 等. 欧盟水框架指令对我国水环境保护与修复的启示[J]. *城市环境与城市生态*, 2016(5): 37-41.
MA L N, YU D, LI H, et al. Implications of the EU water framework directive for water environmental protection and restoration[J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2016(5): 37-41.
- [6] 李丽平, 徐欣, 李瑞娟, 等. 中国台湾地区排污许可制度及其借鉴意义[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(6): 201-205.
LI L P, XU X, LI R J, et al. Discussions on the pollutant discharge permit system in Chinese Taipei and its references[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(6): 201-205.
- [7] 孙彩萍, 刘孝富, 孙启宏, 等. 美国固定源监管机制对我国排污许可证实施的借鉴[J]. *环境工程技术学报*, 2018, 8(2): 191-199.
SUN C P, LIU X F, SUN Q H, et al. An inspiration to pollution permitting system implementation in China from the United States' stationary source supervisory mechanism[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2018, 8(2): 191-199.
- [8] 邓义祥, 郝晨林, 李子成, 等. 基于技术和水质相结合的排污许可限值核定技术研究[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(11): 2515-2522.
DENG Y X, HAO C L, LI Z C, et al. Revision and determination of wastewater discharge permit limit based on technology and water quality target[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(11): 2515-2522.
- [9] 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.
- [10] KERACHIAN R, KARAMOUZ M. A stochastic conflict resolution model for water quality management in reservoir-river systems[J]. *Advances in Water Resources*, 2007, 30(4): 866-882.
- [11] 田平, 方晓波, 王飞儿, 等. 基于环境基尼系数最小化模型的水污染物总量分配优化: 以张家港平原水网区为例[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(3): 801-809.
TIAN P, FANG X B, WANG F E, et al. Use of a minimum environmental Gini coefficient model on optimizing the allocation plan of total pollutant load in water bodies: a case study at Zhangjiagang River-network plain[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(3): 801-809.
- [12] 钟晓航, 王飞儿, 俞洁, 等. 基于WASP水质模型与基尼系数的水污染物总量分配: 以南太湖苕溪入湖口区域为例[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2015, 42(2): 181-188.
ZHONG X H, WANG F E, YU J, et al. Application of WASP model and gini coefficient in the total amount control of water pollutant: a case study in Tiaoxi Estuary of South Taihu Lake[J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2015, 42(2): 181-188.
- [13] 庄园. 浑河抚顺段控制单元污染物排污许可分配[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2016.
- [14] 王笑楠. 永定河流域张家口段基于水质的排污许可限值研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2021.
- [15] 苑清敏, 高凤凤. 基于改进等比例分配方法的大气污染物总量分配效率[J]. *科技管理研究*, 2016, 36(13): 197-204.
YUAN Q M, GAO F F. The distribution efficiency of total air pollutants based on the improved method of proportion

- distribution[J]. *Science and Technology Management Research*, 2016, 36(13): 197-204.
- [16] 薛佳, 徐明德, 阎正坤. 流域水污染物总量分配模型研究[J]. *环境工程*, 2014, 32(3): 126-130.
- XUE J, XU M D, YAN Z K. Research on total pollutant load allocation model for river basin[J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(3): 126-130.
- [17] 郭宏飞, 倪晋仁, 王裕东. 基于宏观经济优化模型的区域污染负荷分配[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2003, 11(2): 133-142.
- GUO H F, NI J R, WANG Y D. Regional waste-load allocation based on macroeconomic optimization model[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2003, 11(2): 133-142.
- [18] 谢梦达, 张林姣. 基于层次分析法的东海陆源污染物总量分配研究[J]. *科技与管理*, 2016, 18(4): 19-24.
- XIE M D, ZHANG L J. A study of distribution of the total amount of East Sea land-based pollutants based on the AHP method[J]. *Science-Technology and Management*, 2016, 18(4): 19-24.
- [19] 吴文俊, 蒋洪强, 段扬, 等. 基于环境基尼系数的控制单元水污染负荷分配优化研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(5): 8-16.
- WU W J, JIANG H Q, DUAN Y, et al. Application of total water pollutant load distribution in control-unit based on the environmental Gini coefficient[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(5): 8-16.
- [20] 白辉. 基于水环境承载力的区域污染物总量控制方法研究及应用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- [21] 张璇, 王盼, 何洋, 等. 水污染负荷分配双层多目标优化模型研究[J]. *西安理工大学学报*, 2020, 36(4): 475-485.
- ZHANG X, WANG P, HE Y, et al. Study of two-layer multi-objective optimization model for water pollution load distribution in rivers[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2020, 36(4): 475-485.
- [22] DUAN H Y, CUI L Y, SONG J N, et al. Allocation of pollutant emission permits at industrial level: application of a bidirectional-coupling optimization model[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 242: 118489.
- [23] 党海迪. 基于水质达标的小流域排污许可分配技术研究: 以安徽双桥河流域为例[D]. 西安: 陕西科技大学, 2018.
- [24] 叶维丽, 周海洋, 张金辉, 等. 基于水质目标的排污许可限值管理体系思考与建议[J]. *环境保护*, 2021, 49(9): 23-25.
- YE W L, ZHOU H Y, ZHANG J H, et al. Thoughts and suggestions of the management system of pollutant permit limitation based on water quality improvement objectives[J]. *Environmental Protection*, 2021, 49(9): 23-25.
- [25] 永定河流域水质目标综合管理示范研究[R]. 北京: 中国环境科学研究院, 2021.
- [26] 戴平. 水功能区达标规划中的点源削减量分配方法应用研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2016.
- [27] 永定河综合治理与生态修复总体方案[R]. 天津: 水利部海河水利委员会, 2016.
- [28] 包琳琳, 吴楠. 基于控制单元的襄河流域容量总量控制及水质达标对策[J]. *安徽农业大学学报*, 2017, 44(6): 1084-1092.
- BAO L L, WU N. Pollutant total amount control technique based on environmental capacity and countermeasure proposal to achieve water quality objectives in control unit of Xianghe River Basin[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2017, 44(6): 1084-1092. ◇