

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.03.015

基于区间规划的沙颍河流域排污权交易方案优选

窦明^{1,2}, 张森¹, 王艳艳³, 李桂秋²

(1. 郑州大学水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学生态与环境学院, 河南 郑州 450001;
3. 山脉科技股份有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要:针对排污权交易中水体纳污能力、排污负荷、保护目标等因素的变化使得排污权交易过程具有很大的不确定性的问题,引入区间规划理论寻求考虑这些不确定因素情况下的最优解。采用MIKE11模型模拟沙颍河水量和水质过程,得到不同来水情势下各水功能区的纳污能力过程;应用环境容量模型进行初始排污权分配,提出基于区间规划的排污权交易模型和多目标优化求解方法,得到各计算单元在不同工况下的排污权交易区间值。结果表明,在优化后的排污权交易方案中,沙颍河流域经济效益增加582066万~1217602万元,剩余的环境容量为0~16948 t/a,水质达标率提升至85%~90%;经过区间规划优选出的方案,能体现排污权交易的不确定性因素,减少交易过程中各制约因素变化产生的影响。

关键词:排污权交易;区间规划;MIKE11模型;沙颍河

中图分类号:X196 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)03-0126-08

Optimization of emission right trading schemes in the Shaying River Basin based on interval planning // DOU Ming^{1,2}, ZHANG Sen¹, WANG Yanyan³, LI Guiqiu² (1. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Summit Technologies Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: Aiming at the issue of significant uncertainty in the process of emission trading due to changes in factors such as water pollution carrying capacity, pollution load, and protection goals, interval programming theory was introduced to seek the optimal solution considering these uncertain factors. The MIKE11 model was used to simulate the water quantity and quality process of the Shaying River, and the pollutant carrying capacity process of each water functional area under different inflow conditions was obtained. The environmental capacity model was used for initial allocation of emission permits, the emission permit trading model based on interval planning and multi-objective optimization solution method were proposed, and the interval values of emission permit trading for each calculation unit under different operating conditions were obtained. The results show that in the optimized emission trading plan, the economic benefits of the Shaying River Basin increase by 5820.66 million to 12176.02 million yuan, the remaining environmental capacity is 0 to 16948 t/a, and the water quality compliance rate increases by 85% to 90%. The scheme selected through interval planning can reflect the uncertainty factors of emission trading and reduce the impact of changes in various constraints during the trading process.

Key words: emission right trading; interval planning; MIKE11 model; Shaying River

随着环境污染问题日益突出,国家加大对污染物排放许可的管控^[1-2]。党的十九大报告提出“实施排污权的有偿使用和交易政策”,《中共中央国务院关于全面加强生态环境保护 坚决打好污染防治攻坚战的意见》则强调,要加快推行排污许可制度,对固定污染源实施全过程管理和多污染物协同控制。自1968年美国经济学家戴尔斯提出排污权概

念后,许多学者开展了有关排污权交易方面的研究,例如颜蕾等^[3]建立了二级市场上企业间的排污权交易模型;王威等^[4]提出了我国排污权交易市场的构建意见;闫峰陵等^[5]提出以水功能区划为基础的陆域限制排放总量方案;牟瑛等^[6]提出构建减排成本与排污双重信息非对称的污染物总量控制排污权交易机制设计模型。同时,国内外也有许多成功的

基金项目:国家自然科学基金(51879239);河南省高等学校重点科研项目计划(21A570008)

作者简介:窦明(1975—),男,教授,博士,主要从事水资源与水环境研究。E-mail: dou_ming@163.com

交易案例^[7-10]。然而在排污权核算和交易过程中涉及许多不确定性因素,使得交易结果存在大量风险,造成交易效果不尽理想。因此,需综合考虑排污权交易中所存在的不确定性因素,给出排污权交易的调控阈值范围。本文以沙颍河流域为研究区,基于区间规划理论,采用区间数描述排污权的阈值范围,再结合多目标区间规划模型,求解沙颍河流域在不同情况下的排污权区间规划交易方案,以期排污权交易进一步推进提供参考。

1 研究区概况

沙颍河是淮河的最大支流,发源于豫西伏牛山区,跨河南、安徽两省,流经许昌、周口、阜阳等8个市,于安徽省颍上县汇入淮河,河道全长620 km,流域面积36 728 km²。沙颍河流域目前河道普遍污染严重,是淮河干流的主要污染源,其排污量约占河南省淮河流域排污量的60%。

研究区共包含21个水功能区:郑州市5个、许昌市1个、漯河市1个、洛阳市1个、平顶山市3个、周口市6个、阜阳市4个。概化单元根据各市的名称拼音首字母进行编号,如洛阳编号为LY,洛阳只存在1个水功能区,则相应的水功能区编号为LY01;平顶山编号为PDS,平顶山内包含3个水功能区,因此编号为PDS01、PDS02、PDS03,以此类推。研究区内共包含78个排污口:北汝河4个、沙河1个、汾泉河14个、贾鲁河22个、沙颍河干流37个。将每个水功能区内的所有排污口概化为1个排污口来进行MIKE11模型的输入,对于其他支流,可将其看作点源来进行点源输入,如澧河、双泊河、清颍河。整个流域概化如图1所示。

2 研究方法

2.1 基于区间规划的排污权交易原理

排污权交易系统是一个存在诸多不确定性因素的复杂系统,需引入不确定性优化方法来进行建模和求解。区间规划可有效地表述求解交易过程中所存在的不确定性,其研究思路为:①以河流的水功能区为基础进行点源概化和单元划分;②基于MIKE11模型进行各计算单元纳污能力的动态阈值模拟;③综合考虑并计算各单元在不同条件下的减排潜力及污染物入河量,求解可交易排污权阈值;④以经济效益最优和水质保护效果最优作为目标函数,考虑水功能区限制纳污红线和排污者生产连续性约束等,构建基于区间规划的排污权交易多目标优化模型;⑤应用区间规划的交互式算法进行求解,得到不同条件下的排污权交易方案。

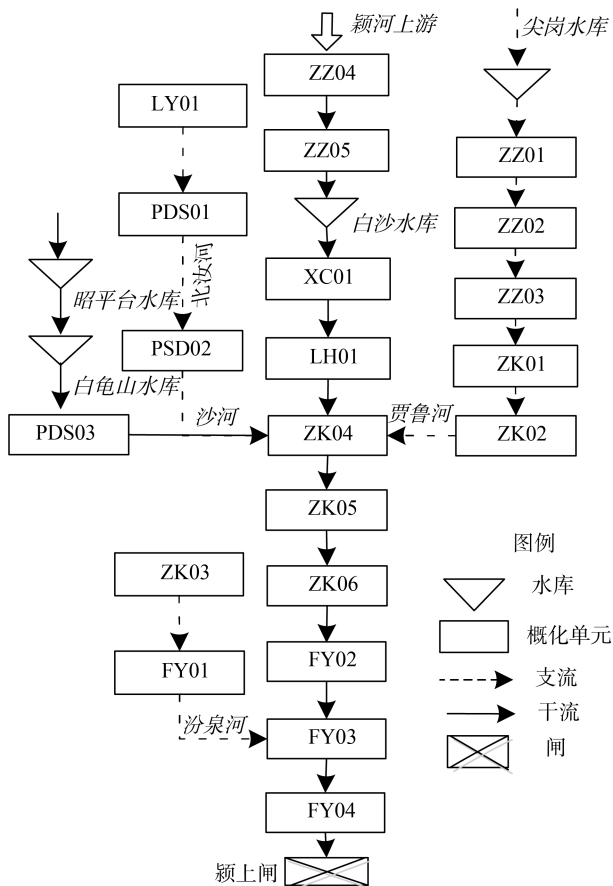


图1 流域概化图

Fig.1 Watershed generalization map

2.2 基于水质过程模拟的动态纳污能力计算

采用丹麦水资源和水环境研究所开发的MIKE11模型^[11]中HD模块和AD模块分别建立沙颍河水动力模型与水质迁移扩散模型。其中,HD模块基于一维非恒定流圣维南方程组模拟河流、河口的水流特征状态;AD模块基于一维水质模型模拟污染物在河道中的变化,只考虑流动方向上的各断面污染物浓度变化。在模拟纳污能力过程中,首先根据不同来水情势选择合适的水文条件;其次根据不同水质管理目标 C_s 进行纳污能力的阈值模拟;当污染物入河量使水质达到目标 C_s^- 时,模拟出对应的纳污能力为 W^- ,当污染物入河量使水质达到目标 C_s^+ ,模拟出对应的纳污能力为 W^+ ,最终可得到动态的纳污能力阈值 $[W^-, W^+]$ 。

2.3 基于区间规划的排污权交易模型

考虑不确定性因素对排污权交易结果的影响,建立基于区间规划的多目标优化模型。在排污权交易过程中,首先考虑交易过程中产生的效益问题,这是排污权交易的基础和动力;其次需要考虑对环境的影响,即环境问题中的水质状况,以保证水环境的可持续利用与发展^[12-16]。因此,可利用经济最优和水质最优作为目标函数进行优化求解。经济最优可

在一定程度上抑制因污染物大量排放所产生的费用,而水质最优可有效控制由于污染所造成的环境问题^[17-19]。

a. 经济最优目标函数。经济效益是基于各单元产生的直接效益与减排成本之间的关系所得到的最终效益,当某一单元的污染物入河量大于自身所分配的初始排污权时,就需要购买一定的排污权使自身的污染物可以合理排放,所产生的效益在交易之后可能会有所增加,而且也实现了流域内排污权的充分利用。假设单元 i 是出售排污权的一方,则拥有排污权创造一定的经济效益,出售一定量的排污权后单元 i 创造的最终效益为

$$B_{Ei} = B_i(P_{0i} - x_i) - T_i E_i + B_i x_i \quad (R_{Ai} - E_i \leq P_{0i}) \quad (1)$$

式中: B_{Ei} 为单元 i 创造的最终效益; B_i 为单元 i 排污权交易价格; R_{Ai} 为单元 i 现状污染物入河量; E_i 为单元 i 减排潜力; T_i 为单元 i 治污成本价格; x_i 为单元 i 出售的排污权; P_{0i} 为单元 i 初始排污权。

假设单元 j 是购买排污权的一方,可购买的排污权为 x_j ,则购买一定排污权后最终的经济效益为

$$B_{Ej} = B_j(P_{0j} + x_j) - T_j E_j - T_j x_j \quad (R_{Aj} - E_j > P_{0j}) \quad (2)$$

式中: B_{Ej} 为单元 j 创造的最终效益; B_j 为单元 j 排污权交易价格; R_{Aj} 为单元 j 现状污染物入河量; E_j 为单元 j 减排潜力; T_j 为单元 j 治污成本价格; x_j 为单元 j 购买的排污权; P_{0j} 为单元 j 初始排污权。

假设在交易过程中出售方出售排污权获得的经济效益和购买方因购买排污权支付的成本是相同的,即 $B_i x_i = T_j x_j$,则经济最优目标函数 f_1 可表示为

$$\max f_1 = \sum_{i=1}^m [B_i(P_{0i} - x_i) - T_i E_i] + \sum_{j=1}^n [B_j(P_{0j} + x_j) - T_j E_j] \quad (3)$$

式中 m 、 n 分别为出售、购买排污权的单元数量。

b. 水质最优目标函数。水质最优体现交易后各个单元最终排放的污染物入河量最小,即整个流域内的污染物排放量最小,保证流域内所剩的排污权最大,使水质状况逐步优化。水质最优目标函数 f_2 可表示为

$$\max f_2 = P_{0\text{总}} - \left(\sum_{i=1}^m R_i + \sum_{j=1}^n R_j \right) \quad (4)$$

式中: $P_{0\text{总}}$ 为整个流域初始分配的排污权之和; R_i 、 R_j 分别为计算单元 i 、 j 交易后的实际污染物入河量。

c. 约束条件。由于污染物入河量是有限制的,需要小于河流的纳污上限,才能保证不会对河流产生过多的负担;污染物的大量排放必然会导致河流

中水质的恶化,因此在约束中需要加入控制水质浓度的条件;污染物排放还需要考虑各种条件下排污者在实际生活中排放量,将实际排放量控制在一定的范围内。具体的约束条件包括:①入河总量控制约束,即污染物入河量需要小于河流的纳污上限;②水质达标率约束,即污染物排入河流后,河流污染物浓度需小于水质目标值;③排污者生产连续性约束,即综合考虑排污者的最大排污量、纳污能力、减排潜力以及社会经济发展状况等因素,保证实际排污量处于维持持续生产的污染物排放量下限与维持经济社会发展和水体纳污的污染物排放量上限之间。

上述区间优化模型的求解步骤为:①应用交互式算法将目标函数拆分为两个模型,分别为最优模型 f^* 和最差模型 f^- ;②由于在区间规划中容易出现变量最大值小于最小值的情况,因此首先求解最差模型,可得到最差情况下沙颍河各单元之间最大可交易排污权 $x_{j\text{opt}}^-$ 和最大的经济效益、最大的排污权剩余量 $f_{j\text{opt}}^-$;③求解最优模型,将最差模型中所求解出的 $x_{j\text{opt}}^-$ 作为约束条件放入最优模型中,保证变量 $x_{j\text{opt}}^+ > x_{j\text{opt}}^-$,可求得最优情况下研究区各单元之间最大可交易排污权 $x_{j\text{opt}}^+$ 和最大的经济效益、最大的排污权剩余量 $f_{j\text{opt}}^+$;④将结果进行整合,可得到 $x \in [x_{j\text{opt}}^-, x_{j\text{opt}}^+]$, $f \in [f_{j\text{opt}}^-, f_{j\text{opt}}^+]$;⑤根据各个单元的效益函数不同进行排污权交易,最终可得到整个流域的排污权交易过程。

3 结果与分析

3.1 基于水质过程模拟的动态纳污能力

选取不同来水条件对研究区进行纳污能力的阈值模拟。通过对 1956—2000 年的长序列流量数据进行频率分析,可得到在不同来水情势下的流量区间,以此为基准,分析 2001—2010 年的流量数据,得到丰、平、枯不同来水情势下的水文条件。由于平水年变化情况比较稳定,选取平水年进行模拟和排污权交易。2005—2007 年为率定期,2008—2010 年为验证期,模拟结果采用相对误差和纳什系数进行评价,污染物指标为 COD。

水动力模拟主要包含水位模拟和流量模拟,主要调节参数为糙率 n 。经过模拟得到沙颍河的糙率为 0.02 ~ 0.04。各站点水位的相对误差均在 5% 以内,纳什系数均在 0.90 以上;各站点流量的相对误差均在 18% 以内,纳什系数均在 0.78 以上。水质模拟过程中主要调节参数为降解系数 k 。经过模拟得到沙颍河流域 COD 的降解系数为 0.01 ~ 0.05。各站点 COD 降解系数相对误差均在 17% 以内,纳

什系数均在 0.80 以上。在水动力模型及水质模型模拟的基础上进行纳污能力阈值模拟。水质管理目标参考淮河各个水功能区的水质纳污状况以及淮委附表确定,得到研究区各单元水质管理目标值见表 1,各单元平水年纳污能力阈值见表 2。

由表 2 可见,处于沙颍河上游的沙河和北汝河的纳污能力阈值变化幅度及纳污能力阈值相对于其他河流较小;沙颍河下游纳污能力阈值相比而言较大,如汾泉河的两个水功能区纳污能力均大于沙河以及北汝河,这是因为下游的流量和流速相比于上游要大一些;在沙颍河的所有水功能区中纳污能力最大的是阜阳的 3 个水功能区,其纳污阈值比较大,变化幅度也比较大。

3.2 可交易排污权阈值

可交易排污权阈值的计算步骤为:① 利用 MIKE11 模型模拟出各单元不同水质浓度目标下的纳污能力 W , $1.5W$ 为纳污上限;② 参考文献[20],确定水功能区限排总量的确定标准,计算各单元的限排量,从而得到流域总的排污权 P 。为保证各水功能区生活污水的正常排放,保留排污权的 10% 作为基础保障,因此可分配的排污权为 90% P ;③ 应用初始排污权分配模型计算各个单元的初始排污权 P_0 ,分配模型采用环境容量模型;④ 计算各单元的减排潜力^[21-22],根据污染物入河量和减排潜力的关系可求解出减排后的污染物入河量 R_B ;⑤ 将 R_B 与 P_0 和 W 进行比较,如果 $R_B \leq 1.5W$,则可交易排污权 $T = P_0 - R_B$;若 $R_B > 1.5W$,则可交易排污权为 0,超过 $1.5W$ 的排污权则需要通过自身削减。对于各计

算单元来说,当 $R_B \leq P_0$ 时可以出售排污权,当 $R_B > P_0$ 时可以购买排污权。各单元的排污权区间数见表 3。

3.3 基于区间规划的排污权多目标优化交易

对于沙颍河排污权交易,采用先支流再干流的原则,如果支流交易后有多余的排污权则参与干流交易,如果没有则不参与。在支流计算过程中,目标函数按照经济效益最优单目标进行优化计算,干流则进行多目标优化。

3.3.1 支流排污权交易

排污权交易首先在沙颍河各支流的内部单元间进行,且交易以获得最大的经济效益为前提。经济效益计算过程中所涉及的效益函数和治污函数参考文献[23]。以沙河为例,该支流共涉及 4 个计算单元(沙河交易包含北汝河),由表 3 可知,在最优情况下单元 LY01、PDS01、PDS02、PDS03 均有排污权可以出售;在最差情况下,仅单元 LY01 有多余的排污权出售,其他 3 个单元均需要购买排污权。建立关于沙河排污权交易的目标函数和约束条件,通过 lingo 软件进行求解,可得到沙河的排污权交易结果, x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 的阈值分别为 $[29,530] \text{ t/a}$ 、 $[-415,0] \text{ t/a}$ 、 $[-302,322] \text{ t/a}$ 、 $[-228,64] \text{ t/a}$,经济效益最优函数的阈值为 $[38\,157,77\,012]$ 万元。最优情况下,单元 LY01 可出售 29 t/a 排污权给单元 PDS01,单元 PDS03 可出售 64/a 排污权给单元 PDS01,单元 PDS02 可出售 322 t/a 排污权给单元 PDS01,交易完成后剩余排污权为 0,交易后可得到经济效益 77 012 万元;最差情况下,单元 LY01 可出售 302 t/a

表 1 研究区各单元水质管理目标值
Table 1 Water quality management target value of calculation units in study area

单元	最小水质目标	最大水质目标	单元	最小水质目标	最大水质目标	单元	最小水质目标	最大水质目标
LY01	15	15	ZK01	20	30	LH01	20	30
PDS01	20	30	ZK02	25	30	ZK04	20	30
PDS02	20	30	ZK03	20	30	ZK05	20	30
PDS03	15	15	FY01	20	25	ZK06	20	30
ZZ01	20	30	ZZ04	15	20	FY02	20	30
ZZ02	20	30	ZZ05	15	20	FY03	20	30
ZZ03	20	30	XC01	20	30	FY04	20	30

表 2 研究区平水年各单元纳污能力阈值
Table 2 Threshold of pollutant carrying capacity in normal year of calculation units in study area

单元	纳污能力	单元	纳污能力	单元	纳污能力
LY01	[429,705]	ZK01	[339,509]	LH01	[885,1483]
PDS01	[761,1456]	ZK02	[1782,2863]	ZK04	[872,1478]
PDS02	[559,1052]	ZK03	[2247,4012]	ZK05	[1549,4788]
PDS03	[594,746]	FY01	[2189,3421]	ZK06	[2351,5664]
ZZ01	[4789,10091]	ZZ04	[754,900]	FY02	[3490,6995]
ZZ02	[484,712]	ZZ05	[515,1038]	FY03	[11609,23217]
ZZ03	[1031,1804]	XC01	[1731,2357]	FY04	[5739,10214]

表3 各单元排污权区间数

单位:t/a

Table 3 Number of emission rights intervals for each unit

unit:t/a

单元	污染物入河量	减排潜力	减排后的入河量	初始排污权	纳污上限	可交易排污权
LY01	[1 076, 1 324]	[936, 1 030]	[46, 388]	[417, 576]	[644, 1 058]	[29, 530]
PDS01	[1 377, 1 877]	[530, 585]	[794, 1 347]	[511, 671]	[1 142, 2 184]	[- 836, - 121]
PDS02	[1 003, 1 367]	[406, 446]	[537, 961]	[543, 859]	[893, 1 578]	[- 418, 322]
PDS03	[879, 1 218]	[304, 334]	[545, 713]	[577, 609]	[891, 1 119]	[- 337, 64]
ZZ01	[34 403, 46 913]	[4 165, 4 581]	[29 822, 42 748]	[4 648, 8 241]	[7 184, 15 137]	0
ZZ02	[612, 835]	[267, 294]	[318, 568]	[470, 582]	[727, 1 068]	[- 98, 414]
ZZ03	[2 621, 3 574]	[1 219, 1 341]	[1 280, 2 355]	[771, 1 071]	[1 547, 2 707]	[- 1 584, - 209]
ZK01	[330, 449]	[169, 186]	[143, 279]	[328, 415]	[509, 764]	[49, 272]
ZK02	[1 786, 2 436]	[1 456, 1 602]	[184, 980]	[1 730, 2 388]	[2 673, 4 297]	[750, 2 154]
ZK03	[8 316, 11 341]	[5 657, 9 903]	[410, 5 684]	[2 182, 3 276]	[3 371, 6 018]	[- 3 502, 2 861]
FY01	[4 862, 5 772]	[2 837, 3 425]	[1 437, 2 936]	[1 076, 1 402]	[3 284, 5 132]	[- 1 865, - 35]
ZZ04	[268, 366]	[127, 139]	[129, 239]	[731, 734]	[1 131, 1 350]	[492, 605]
ZZ05	[526, 718]	[379, 417]	[109, 338]	[500, 847]	[773, 157]	[161, 738]
XC01	[3 610, 4 333]	[1 009, 1 100]	[2 510, 3 324]	[1 339, 1 925]	[2 570, 3 536]	[- 1 985, - 585]
LH01	[3 868, 5 275]	[2 407, 2 647]	[1 221, 2 868]	[859, 1 211]	[1 327, 2 224]	0
ZK04	[1 058, 1 443]	[587, 674]	[384, 856]	[846, 1 207]	[1 307, 2 217]	[- 10, 823]
ZK05	[3 979, 5 426]	[2 822, 3 104]	[875, 2 604]	[1 504, 3 910]	[2 324, 7 182]	[- 1 100, 3 035]
ZK06	[6 243, 8 514]	[2 987, 3 286]	[2 958, 5 527]	[1 682, 2 852]	[3 527, 8 497]	[- 3 845, - 105]
FY02	[8 098, 10 021]	[3 441, 3 885]	[4 312, 6 580]	[3 223, 5 230]	[5 235, 10 493]	[- 3 356, 1 017]
FY03	[11 738, 13 578]	[3 919, 4 781]	[6 957, 9 659]	[9 239, 16 549]	[17 413, 34 826]	[- 420, 9 592]
FY04	[12 097, 14 672]	[4 519, 4 970]	[7 353, 10 153]	[5 570, 8 341]	[8 608, 15 320]	[- 4 583, 988]

注:正数表示该单元的排污权可以出售,负数表示该单元需要购买排污权,0表示可交易量为0。

给单元 PDS02,单元 LY01 可出售 228 t/a 给单元 PDS03,除此之外还需削减排污权 346 t/a,交易后可获得经济效益 38 157 万元。

对于汾泉河,只有两个计算单元 ZK03 和 FY01。最优情况下,单元 ZK03 可出售排污权 1 865 t/a 给单元 FY01,交易完成后剩余排污权数量为 996 t/a,获得经济效益 279 647 万元;最差情况下,两个单元均需要购买排污权。因此汾泉河两个单元的交易排污权阈值分别为 $[0, 1 865]$ t/a、 $[-1 865, 0]$ t/a,经济效益最优函数阈值为 $[22 689, 279 647]$ 万元。

对于贾鲁河,由于单元 ZZ01 的污染物入河量远大于水体的纳污上限,因此不参与交易。 x_6, x_7, x_8, x_9 的阈值分别为 $[-98, 313]$ t/a、 $[-352, -209]$ t/a、 $[49, 272]$ t/a、 $[0, 35]$ t/a,经济效益最优函数阈值为 $[26 457, 92 408]$ 万元。最优情况下,单元 ZK01 可出售 49 t/a 排污权给单元 ZZ03,单元 ZZ02 可出售 303 t/a 排污权给单元 ZZ03,交易完成后剩余排污权 861 t/a,最终可获得经济效益 92 408 万元;最差情况下,单元 ZK01 出售 98 t/a 给单元 ZZ02,单元 ZK01 出售 174 t/a 给单元 ZZ03,单元 ZK02 出售 35 t/a 给单元 ZZ03,交易完成后还剩余的排污权 2 119 t/a,获得经济效益 26 457 万元。由于单元 ZZ01 的污染物负荷量比较多,因此交易完成后剩余的排污权可用于单元 ZZ01 的污染物削减,因此不参与干流交易。

3.3.2 干流排污权交易

对于干流来说,参与交易的单元有 ZZ04、ZZ05、XC01、LH01、ZK04、ZK05、ZK06、FY02、FY03 以及 FY04,但由于单元 LH01 的污染物入河量已经远超过自身的纳污能力值,因此不参与交易。对于其他支流来说,沙河和汾泉河在交易之后有不同数量的排污权需要通过自身来削减,因此均不参与干流排污权的交易。经过区间多目标优化模型计算可得, $x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{16}, x_{17}, x_{18}, x_{19}, x_{20}, x_{21}$ 的阈值分别为, $[0, 605]$ t/a、 $[0, 738]$ t/a、 $[-212, -60]$ t/a、 $[0, 10]$ t/a、 $[-758, 1167]$ t/a、 $[-2970, -105]$ t/a、 $[0, 1 017]$ t/a、 $[-420, 0]$ t/a、 $[0, 988]$ t/a,目标函数阈值为 $[582 066, 1 217 662]$ 万元。最优情况下,只有单元 XC01 和单元 ZK06 需要购买排污权,其他的单元均有多余的排污权出售,因此单元 XC01 需向单元 FY04 购买排污权 212 t/a;单元 ZK06 向单元 FY04 购买排污权 776 t/a,向单元 FY02 购买排污权 1 017 t/a,向单元 ZK04 购买排污权 10 t/a,向单元 ZK05 购买排污权 1 167 t/a,经过交易之后剩余排污权为 16 948 t/a,交易后产生的经济效益为 1 217 662 万元;最差情况下,只有单元 ZZ04 和单元 ZZ05 有多余的排污权可以出售,单元 ZZ04 出售排污权 420 t/a给单元 FY03,单元 ZZ04 出售排污权 60 t/a给单元 XC01,单元 ZZ04 出售排污权 20 t/a给单元 ZK05,单元 ZZ05 出售排污权 105 t/a给单元 ZK05,

表4 交易前后水质情况 单位:mg/L

Table 4 Water quality situation before and after trading unit:mg/L

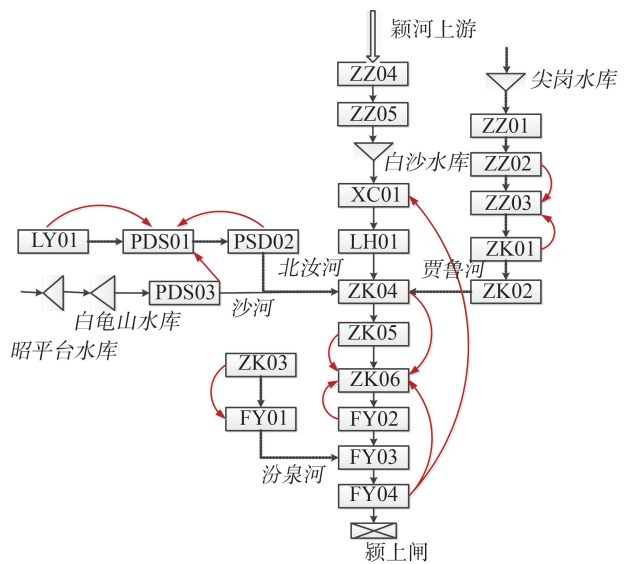
单元	交易前最小 质量浓度	交易后最小 质量浓度	交易前最大 质量浓度	交易后最大 质量浓度
LY01	8.52	9.12	10.85	9.69
PDS01	11.57	19.41	21.50	19.57
PDS02	11.63	19.98	21.91	22.57
PDS03	8.65	15.00	11.89	11.89
ZZ01	7.45	6.42	16.04	11.75
ZZ02	10.90	11.45	21.65	17.81
ZZ03	11.21	12.10	21.65	18.22
ZK01	30.82	31.51	32.05	32.05
ZK02	24.75	25.00	30.12	30.00
ZK03	29.17	28.95	27.95	25.87
FY01	12.13	13.04	17.37	17.41
ZZ04	6.04	4.31	10.08	4.31
ZZ05	8.34	5.85	14.17	5.87
XC01	9.61	8.70	23.44	19.88
LH01	13.23	28.76	23.55	38.57
ZK04	20.05	19.87	28.76	29.24
ZK05	18.37	19.99	27.48	27.90
ZK06	20.30	18.79	28.64	28.99
FY02	11.94	12.79	18.36	18.34
FY03	14.16	14.96	21.52	21.14
FY04	5.38	5.38	5.38	5.38

综上,分析可知:①汾泉河在排污权交易之后还有多余的排污权,但是由于汾泉河的两个水功能区内污染物排放量过多,因此在日常生活中应尽量减少化肥使用,注重污染物的削减,提高污染物处理率。②贾鲁河的郑州排污控制区(即单元 ZZ01)是所有水功能区中污染物排放量最多的,该功能区所排放的污染物已经大大超过了水体的纳污上限,只能通过自身削减;此功能区有 200 多家企业,包含金属工业制造、医院、纺织、造纸、各类酒店和饭店等行业,其中嵩岳集团、造纸公司、印染公司和啤酒公司的污染物排放量较多,因此应尽可能减少控制区内企业污染物的排放,且尽量提高企业污染物的处理效率。③对于沙颍河干流来说,由于禹州排污控制区(单元 XC01)和郾城排污控制区(单元 LH01)处于上游,流量、流速比较小,导致其纳污能力也比较小,尽管相比之下水功能区所排放的污染物比较少,但是由于纳污能力的限制,所以要求这两个水功能区内的企业应该尽量减少污染物的排放,提高减排潜力。

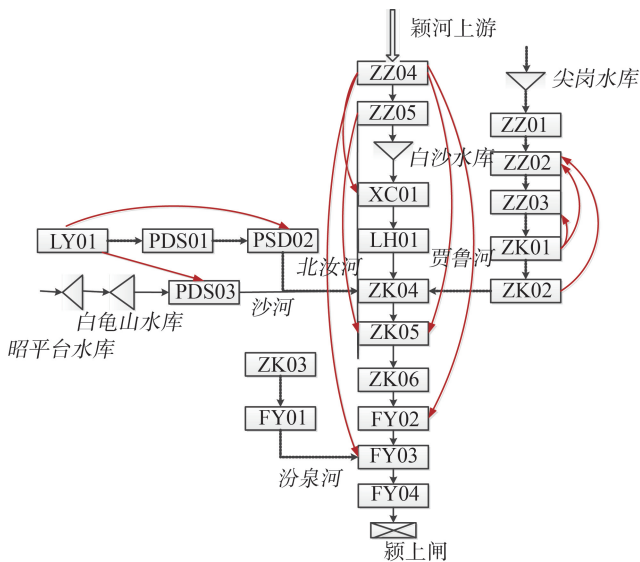
4 结 语

本文利用 MIKE11 模型进行纳污能力阈值模拟计算,基于区间数和区间规划理论,构建基于区间规划的排污权交易模型,考虑排污权交易过程中存在的不确定性因素,寻求排污权交易的最优解,该模型可以在一定程度上减少定量数据带来的误差,使交

其他的单元均需要购买一定的排污权数量,交易后的经济效益为 582066 万元。支流和干流具体的交易过程见图 2,图中的箭头从卖方指向买方。对于整个沙颍河流域,单元 ZZ01 和单元 LH01 不参与排污权交易过程,其余单元均参加交易。由图 2(a)图可见,最优情况下,有 15 个单元进行排污权交易,交易完成之后还有一定的排污权剩余;由图 2(b)图可见,最差情况下,参与交易的单元有 13 个,交易完成后还需要削减一定的排污权数量。在排污权交易后,对全流域的水功能区水质达标率进行评估,以确保该方案不突破纳污控制红线考核目标要求,得到交易前后水质达标情况,见表 4。可见,水质达标率在各单元进行排污权交易之前为 80%~85%,经过排污权交易之后水质达标率可达到 85%~90%。



(a) 最优情况



(b) 最差情况

图2 排污权交易过程

Fig.2 Chart of emission right trading process

易结果更加精确。对于沙颍河来说,各水功能区纳污能力不一定可以容纳其污染物入河量,通过各单元之间的排污权交易,可以使各水功能区的污染物排放都达到排放标准,不仅可以促进其经济发展,而且可以促使排污单位加强对污染物的管理和治理。本文只考虑了平水年情况下的排污权交易,未考虑其他来水情势下的交易,后续将进一步进行研究。

参考文献:

- [1] 迟国梁. 关于新时代流域水环境治理技术体系的思考[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 182-189. (CHI Guoliang. Thoughts on water environmental management technology system in watersheds in the new era[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 182-189. (in Chinese))
- [2] 罗亚娟. 生态嵌入视角下地方政府动员型水环境治理的实践逻辑及优化路径[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2020, 22(2): 96-104. (LUO Yajuan. The history and social impact of 1998 housing reform: a study based on the perspective of social inequality[J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2020, 22(2): 96-104. (in Chinese))
- [3] 颜蕾, 巫腾飞. 基于影子价格的排污权初始分配和交易模型[J]. 重庆理工大学学报(社会科学), 2010, 24(2): 53-56. (YAN Lei, WU Tengfei. Initial distribution and trading model of shadow price based emission permit[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Social Sciences), 2010, 24(2): 53-56. (in Chinese))
- [4] 王威, 张凤麟. 排污权交易市场的构建[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(增刊2): 47-50. (WANG Wei, ZHANG Fenglin. The formation of emission trading market[J]. Chinese Population, Resources and Environment, 2011, 21(Sup2): 47-50. (in Chinese))
- [5] 闫峰陵, 刘扬扬, 樊皓, 等. 基于水功能区纳污能力的攀枝花限制排污总量研究[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(11): 1774-1780. (YAN Fengling, LIU Yangyang, FAN Hao, et al. Total pollutant amount control program in Panzhihua based on permissible pollution bearing capacity of water[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(11): 1774-1780. (in Chinese))
- [6] 牟瑛, 陈欢, 李琨, 等. 环境初始排污权核算方法比较[J]. 中国资源综合利用, 2017, 35(3): 48-50. (MOU Ying, CHEN Huan, LI Kun, et al. Comparison of accounting methods for environmental pollution charge right[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2017, 35(3): 48-50. (in Chinese))
- [7] 张炳, 毕军, 袁增伟, 等. 基于 Agent 的区域排污权交易仿真与分析[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(20): 5651-5654. (ZHANG Bing, BI Jun, YUAN Zengwei, et al.

Agent-based simulation and analysis of regional emission trading system[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(20): 5651-5654. (in Chinese))

- [8] 饶从军, 王成, 段鹏. 基于贝叶斯博弈的排污权交易模型[J]. 统计与决策, 2008(15): 48-49. (RAO Congjun, WANG Cheng, DUAN Peng, et al. Emission trading model based on Bayesian game[J]. Statistic & Decision, 2008(15): 48-49. (in Chinese))
- [9] TANAKA M. Multi-sector model of tradable emission permits[J]. Environmental and Resource Economics, 2012(51): 61-77.
- [10] DOLGOPOLOVA I, HU B. Economic, institutional and technological uncertainties of emissions trading: a system dynamics modeling approach[J]. Climatic Change, 2014, 124(3): 663-676.
- [11] 孔宇, 孙巍, 李小龙等. 河道海绵建设中 SWMM-MIKE 11 耦合模型的构建及应用思路[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 74-79. (KONG Yu, SUN Wei, LI Xiaolong, et al. Building and application idea of SWMM-MIKE 11 coupling model in sponge river construction[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 74-79. (in Chinese))
- [12] 杨亭亭. 区间多目标规划在区域水资源优化调度中的应用[D]. 北京: 中国石油大学, 2011.
- [13] 姜秋香, 何晓龙, 王子龙, 等. 基于区间多阶段随机规划的水资源优化配置模型及应用[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(6): 1-7. (JIANG Qiuxiang, HE Xiaolong, WANG Zilong, et al. A model for optimal allocation of water resources based on interval multistage stochastic programming and its application[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(6): 1-7. (in Chinese))
- [14] 董增川, 陈牧风, 倪效宽, 等. 考虑模糊区间的水库群优化调度决策方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 233-240. (DONG Cengchuan, CHEN Mufeng, NI Xiaokuan, et al. Decision method of optimal operation of reservoir group considering fuzzy interval[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(3): 233-240. (in Chinese))
- [15] 陈丽娜, 韩龙喜, 谈俊益, 等. 基于多断面水质达标的河网区点面源污染负荷优化分配模型[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 128-134. (CHEN Linna, HAN Longxi, TAN Junyi, et al. Optimal allocation model of point and non-point pollution loads in river network based on water quality standard of multiple control sections[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 128-134. (in Chinese))
- [16] 岳国峰, 付强, 赵可, 等. 基于区间规划水权交易模型研究[J]. 东北农业大学学报, 2016, 47(3): 102-108. (YUE Guofeng, FU Qiang, ZHAO Ke, et al. Research on water rights trading based on interval programming[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2016, 47

- (3): 102-108. (in Chinese))
- [17] 窦明, 王艳艳, 李胚, 等. 基于限制纳污红线的排污权交易模型[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(8): 81-86. (DOU Ming, WANG Yanyan, LI Pei, et al. The emission trading model based on the limited pollutant on the red line [J]. Environmental Pollution and Control, 2016, 38(8): 81-86. (in Chinese))
- [18] 王文君, 方国华, 李媛, 等. 基于改进多目标粒子群算法的平原坡水区水资源优化调度[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 91-96. (WANG Wenjun, FANG Guohua, LI Yuan, et al. Optimal operation of water resources in plain slope water area based on improved multi-objective particle swarm optimization algorithm [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 91-96. (in Chinese))
- [19] 王艳艳, 窦明, 李桂秋, 等. 基于和谐目标优化的流域初始排污权分配方法[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(2): 12-16. (WANG Yanyan, DOU Ming, LI Guiqu, et al. The allocation methods of watershed initial emissions permits based on harmonious objectives optimization [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(2): 12-16. (in Chinese))
- [20] 汪斌. 淮河流域纳污能力及限制排污总量研究[R]. 蚌埠: 淮河水利委员会, 2006.
- [21] 韩明霞, 乔琦, 孙启宏. 辽河流域工业行业污染减排潜力实证研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(8): 75-79. (HAN Mingxia, QIAO Qi, SUN Qihong. Research of industrial pollutant emission reduction potential in the Liaohe River Basin [J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(8): 75-79. (in Chinese))
- [22] 李冬冬, 杨晶玉. 基于不同减排技术的排污权交易二级市场拍卖机制设计[J]. 系统管理学报, 2020, 29(2): 368-376. (LI Dongdong, YANG Jingyu. Auction mechanism design for emission trading in secondary market based on different abatement technology [J]. Journal of Systems & Management, 2020, 29(2): 368-376. (in Chinese))
- [23] 王艳艳, 窦明, 李桂秋, 等. 基于和谐目标优化的流域初始排污权分配方法研究[J]. 水利水电科技进展, 2014, 35(2): 12-16. (WANG Yanyan, DOU Ming, LI Guiqu, et al. The allocation methods of watershed initial emission permits based on harmonious objectives optimization [J]. Advance in Science and Technology of Water Resources, 2014, 35(2): 12-16. (in Chinese))
- (收稿日期: 2022-04-20 编辑: 王芳)

(上接第 108 页)

- [27] WU X, WANG Z, GUO S, et al. Scenario-based projections of future urban inundation within a coupled hydrodynamic model framework: a case study in Dongguan City, China [J]. Journal of Hydrology, 2017, 547: 428-442.
- [28] 王兆礼, 陈昱宏, 赖成光. 基于 TELEMAC-2D 和 SWMM 模型的城市内涝数值模拟[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 117-124. (WANG Zhaoli, CHEN Yuhong, LAI Chengguang. Numerical simulation of urban waterlogging based on TELEMAC-2D and SWMM model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 117-124. (in Chinese))
- [29] 李鹏, 徐宗学, 赵刚, 等. 基于 SWMM 与 LISFLOOD-FP 模型的城市暴雨内涝模拟: 以济南市为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(6): 1083-1092. (LI Peng, XU Zongxue, ZHAO Gang, et al. Simulation of urban rainstorm waterlogging processes based on SWMM and LISFLOOD-FP models: case study in Jinan City [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(6): 1083-1092. (in Chinese))
- [30] 曾照洋, 赖成光, 王兆礼, 等. 基于 WCA2D 与 SWMM 模型的城市暴雨洪涝快速模拟[J]. 水科学进展, 2020, 31(1): 29-38. (ZENG Zhaoyang, LAI Chengguang, WANG Zhaoli, et al. Rapid simulation of urban rainstorm flood based on WCA2D and SWMM model [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(1): 29-38. (in Chinese))
- [31] ZENG Z, WANG Z, LAI C. Simulation performance evaluation and uncertainty analysis on a coupled inundation model combining SWMM and WCA2D [J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2022, 13: 448-464.
- [32] CHEN Z, YIN L, CHEN X, et al. Research on the characteristics of urban rainstorm pattern in the humid area of Southern China: a case study of Guangzhou City [J]. International Journal of Climatology, 2015, 35: 4370-4386.
- [33] ADAMS B J, FRASER H G, HOWARD C D D, et al. Meteorological data analysis for drainage system design [J]. Journal of Environmental Engineering, 1986, 112(5): 827-848.
- [34] ZHANG M, XU M, WANG Z, et al. Assessment of the vulnerability of road networks to urban waterlogging based on a coupled hydrodynamic model [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 127105.
- [35] 岑国平. 城市雨水径流计算模型[J]. 水利学报, 1990(10): 68-75. (CEN Guoping. A model to simulate stormwater runoff in urban area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990(10): 68-75. (in Chinese))
- (收稿日期: 2022-06-14 编辑: 王芳)