

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0557

吴超, 苏婧, 胡友彪, 等. 2015. 不确定性流域污染负荷优化分配模型及其应用[J]. 环境科学学报, 35(12): 4120-4127

Wu C, Su J, Hu Y B, et al. 2015. Uncertainty in watershed pollutants load allocation optimization model and its application[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 35(12): 4120-4127

不确定性流域污染负荷优化分配模型及其应用

吴超^{1,2}, 苏婧^{1,3,*}, 胡友彪², 纪丹凤¹, 熊锋¹, 魏代春¹, 席北斗¹, 朱建超¹

1. 中国环境科学研究院地下水与环境系统工程创新基地, 北京 100012

2. 安徽理工大学地球与环境学院, 淮南 232001

3. 广东省浩然环保水污染治理院士工作站, 广州 510630

收稿日期: 2015-04-16 修回日期: 2015-06-23 录用日期: 2015-07-09

摘要: 流域优化决策模型以最优化建模方法指导流域管理决策过程, 然而流域系统的不确定性会导致决策存在一定风险. 本研究通过建立区间参数机会约束线性规划 (ICILP) 模型来处理流域决策过程中的不确定性, 并将该模型运用于太滹运河流域优化决策中, 探讨在不同违反概率下系统最优解. 结果表明, 随着允许入湖量约束违反概率增加, 系统对污染物削减量和削减成本有所降低. 由于受到经济成本和削减量约束, 系统优先减小环境代价较大、削减效率较低的工程项目规模. 但受到最低处理率约束, 违反概率增加到一定水平时各工程项目趋于定值. 虽然较高的违反概率使系统成本降低, 但也会导致削减效率降低, 不利于流域保护. 因此, 在实际管理中应根据管理需求选择合适的削减方案以达到保护流域水质的目标.

关键词: 流域; 污染负荷分配; 不确定性; 区间参数; 机会约束

文章编号: 0253-2468(2015)12-4120-08 中图分类号: X524 文献标识码: A

Uncertainty in watershed pollutants load allocation optimization model and its application

WU Chao^{1,2}, SU Jing^{1,3,*}, HU Youbiao², JI Danfeng¹, XIONG Feng¹, WEI Daichun¹, XI Beidou¹, ZHU Jianchao¹

1. Innovation Base of Ground Water & Environmental System Engineering, Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012

2. School of Earth and Environment, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001

3. CNHOMELAND Environmental Protection Water Pollution Governance Academician Workstation, Guangzhou 510630

Received 16 April 2015; received in revised form 23 June 2015; accepted 9 July 2015

Abstract: Optimization model can be used to guide the decision making process in watershed management, but the uncertainty of watershed system could lead to some risk decision. In this study, an interval-parameter chance-constrained linear programming (ICILP) model was developed to deal with the uncertainty in watershed decision making process, and was applied to Taige Canal Watershed optimization, to explore the optimal system solution in different violation levels. The results show that with the increase of violation levels of water environmental capacity, pollutants and costs reduction within the system decreased. Due to the cost and reduction constraint, the model will be prone to reduce the project with larger environmental consumption and/or with lower cut efficiency. But under the constraint of minimum treatment rate, each project reaches a fixed value when the violation probability increases to a certain level. Higher violation probability could reduce system costs, but would also reduce cut efficiency, thus there is no benefit to watershed protection. Therefore, in practice, appropriate reduction plan should be selected according to the management demand to achieve the protection of basin water quality.

Keywords: watershed; waste load allocation; uncertainty; interval-parameter; chance-constrained

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (No.2012ZX07101-002); 国家自然科学基金 (No.71103166)

Supported by the Major Science and Technology Project of Water Pollution Control and Treatment of China (No.2012ZX07101-002) and the National Natural Science Foundation of China (No.71103166)

作者简介: 吴超 (1989—), 男, E-mail: wuchao190@126.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: sujing169@163.com

Biography: WU Chao (1989—), male, E-mail: wuchao190@126.com; * **Corresponding author**, E-mail: sujing169@163.com

1 引言(Introduction)

流域是水文循环过程和污染物传输的基本单元,也是开展水污染控制、生态修复和综合管理的最适宜空间尺度(刘永等,2012).近年来,随着社会经济快速发展,污染流域的因素日益增多,流域水系污染和生态退化已经成为我国面临的重要生态环境问题(刘年磊等,2012).因此,探索湖泊流域水污染防治的创新模式,合理安排水污染控制与生态恢复等技术,已经成为湖泊流域管理的战略性问题(周丰等,2007).流域水污染负荷分配是协调社会经济发展和生态环境保护关系的重要措施(李如忠等,2011).通过水污染负荷优化分配,控制流域范围内主要污染源的污染排放量,使受纳水体达到给定的水质目标,最终实现区域总量控制.

国内外学者就水污染负荷分配模型开展了大量研究工作,开创了以效率、公平或两者结合为原则的多种分配方法(夏明芳等,2012;舒琨,2010),并先后提出了治污成本最小模型(Fujiware *et al.*, 1986)、等比例削减模型(Takvi *et al.*, 1996)、多目标削减模型(李开明等,1990)、合作博弈论(Krawczyk *et al.*, 2005)、基尼系数法(吴悦颖等,2006)、层次分析法(李如忠等,2003)等多种分配模型.但是,流域是一个复杂系统的集合,系统的输入和输出行为表现出多种不确定性(刘年磊,2011),如何有效处理这类不确定性是当前环境规划领域面临的一大难点.在流域污染负荷优化分配研究方面,最常用的是区间线性规划.如吕宁馨等(2012)以富营养化控制成本最小为目标函数,建立了区间线性规划模型(ILP),并将其运用到抚仙湖流域污染负荷削减中;为了保证解空间的绝对可行性,周丰等(2008)提出了改进区间线性规划(MILP),并将该方法运用到邛海流域规划中;之后周丰等(2011)又提出强化区间线性规划(EILP),刘年磊等(2012)将该方法运用到邛海流域污染负荷削减分配中.考虑到传统区间优化存在决策不可行的风险,2010年,Zou等(2010)提出了风险显性区间数线性规划模型(REILP),该方法综合考虑决策意愿和风险水平,在邛海流域(Liu *et al.*, 2011)和抚仙湖流域(Zhang *et al.*, 2013)的规划中得到很好运用.这类方法大多以区间分析为基础,逐步实现解空间的绝对可行性.

然而在水污染负荷分配模型中,除了区间参数以外,还有会以随机形式出现的参数,如水环境容

量(周丰等,2010;李连欢,2012).而ILP模型对于某些变量或参数为随机数($X(t)$)的情形无能为力.机会约束规划(CCP)能有效处理模型中存在的随机变量,在固废管理(陈祥荣等,2009;苏婧等,2009)、能源管理(张晓萱等,2009)、水质管理(李连欢,2012)中有广泛运用,而在水污染负荷分配方面相关研究较少.因此,有必要将CCP模型引入到水污染负荷分配模型中.本文将ILP和CCP模型结合,建立一个区间参数机会约束线性规划(ICILP)的水污染负荷优化分配模型,以处理流域决策过程中复杂的不确定性.

2 区间参数机会约束线性规划模型(ICILP model)

2.1 区间参数机会约束线性优化模型表示方法

ICILP模型以区间或者随机形式表示模型中某些参数,该模型可以在污染物削减量发生一定程度波动时,仍能保证水质达到标准.ILP以区间形式表示参数 A 和 C 的不确定性,在实际运用中更容易获取,且能够将不确定性信息直接反映在优化模型中(Chinneck, 2000).CCP能够处理模型右手边随机性约束(Huang, 1995),将CCP模型带入到区间规划框架中,能够更加有效地处理模型中 A 、 B 、 C 存在的不确定性.区间参数机会约束线性优化模型如下:

$$\text{Min} f^{\pm} = C^{\pm} X^{\pm} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} A_i^{\pm} X^{\pm} \leq B_i^{\pm}, A_i^{\pm} \in A^{\pm}, i = 1, 2, \dots, k_1 \quad (2)$$

$$\text{Pr} \{ t | A_i(t) X^{\pm} \leq b_i^{\pm} \} \geq 1 - q_i, A_i(t) \in A(t) \\ i = k_1 + 1, k_2 + 1, \dots, m \quad (3)$$

$$x_j^{\pm} \geq 0, x_j^{\pm} \in X^{\pm}, j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中, $A^{\pm} \in \{R^{\pm}\}^{m \times n}$, $B^{\pm} \in \{R^{\pm}\}^{m \times 1}$, $C^{\pm} \in \{R^{\pm}\}^{1 \times n}$, $X^{\pm} \in \{R^{\pm}\}^{n \times 1}$ (R^{\pm} 被定位为—组区间数), q_i 为可接受的约束违反概率水平.

ICILP模型中有两类不确定性:一类是以区间形式表示,另一类在约束条件右端以随机数表示.模型求解时可以根据目标函数的上下界拆分成两个确定的子模型,然后根据 q_i 值的变化按照顺序依次进行求解,就可以在决策空间内得到稳定的可行解(Huang *et al.*, 1995; Huang *et al.*, 1998).区间-机会约束模型的最优解为 $x_{j\text{opt}}^{\pm} = [x_{j\text{opt}}^-, x_{j\text{opt}}^+]$, $\forall j; f_{\text{opt}}^{\pm} = [f_{\text{opt}}^-, f_{\text{opt}}^+]$

2.2 优化模型建立

根据以上分析,建立流域污染负荷优化削减模型.模型以污染物控制成本最小为目标函数,包括建设成本和维护成本.约束条件中考虑允许入湖量、子

区域污染治理规模、点源污染控制、面源污染控制、生态修复工程等,具体如下(各参数符号见表1)。

$$\min f^{\pm} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (\text{UCC}_{jk}^{\pm} \cdot X_{ijk}^{\pm}) + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K [(P_{ij}^{\pm} + \sum_{k=1}^K X_{ijk}^{\pm}) \cdot \text{UMC}_{jk}^{\pm}] \quad (5)$$

约束条件:

允许入湖量约束:表示所有工程项目实施后,新增加工程项目和原有工程项目对 TN 和 TP 的削减量应大于需要削减量(需要削减量=污染物排放量-水环境容量),其约束表示如下:

$$\Pr \left\{ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (X_{ijk} \cdot \text{ANR}_j^{\pm}) + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (P_{ij}^{\pm} \cdot \text{ANR}_j^{\pm}) \geq \sum_{i=1}^I \{\text{TND}_{ik}^{\pm} - \text{TNC}_k^{\pm}\} \geq 1 - q_i, \forall i, k \right. \quad (6)$$

$$\Pr \left\{ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (X_{ijk} \cdot \text{APR}_j^{\pm}) + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (P_{ij}^{\pm} \cdot \text{APR}_j^{\pm}) \geq \sum_{i=1}^I \{\text{TPD}_{ik}^{\pm} - \text{TPC}_k^{\pm}\} \geq 1 - q_i, \forall i, k \right. \quad (7)$$

子区域污染治理规模约束:表示流域内各个子区域新增加工程项目和原有工程项目对 TN 和 TP 的削减量应该小于其排放量,其约束表示如下:

$$\sum_{j=1}^J (X_{ijk}^{\pm} \cdot \text{ANR}_j^{\pm}) + \sum_{j=1}^J (P_{ij} \cdot \text{ANR}_j^{\pm}) \leq \text{RNE}_k \cdot \text{TND}_{ik}^{\pm}, \forall i \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^J (X_{ijk}^{\pm} \cdot \text{APR}_j^{\pm}) + \sum_{j=1}^J (P_{ij} \cdot \text{APR}_j^{\pm}) \leq \text{RPE}_k \cdot \text{TPD}_{ik}^{\pm}, \forall i \quad (9)$$

点源污染控制工程约束:分别表示在不同阶段,工业污水、城镇生活污水和城镇污水管网建设的最低处理率,其约束表示如下:

$$\sum_{k=1}^K X_{i1k}^{\pm} + P_{i1}^{\pm} \geq \text{MIW}_k^{\pm} \cdot \text{IWE}_{ik}^{\pm}, \forall i, k \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{i2k}^{\pm} + P_{i2}^{\pm} \geq \text{IST}_k^{\pm} \cdot \text{IWE}_{ik}^{\pm}, \forall i, k \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{i3k}^{\pm} + P_{i3}^{\pm} \geq \text{RWT}_k^{\pm} \cdot \text{TWD}_{ik}^{\pm}, \forall i, k \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{i4k}^{\pm} + P_{i4}^{\pm} \geq \text{USPN}_k^{\pm} \cdot \text{UFN}_{ik}^{\pm}, \forall i, k \quad (13)$$

面源污染控制工程约束:分别表示农村生活污水、种植业面源污染治理、畜禽养殖粪便无害化处理和循环水池清洁养殖的最低满足程度,具体约束如下:

$$\sum_{k=1}^K X_{i5k}^{\pm} + P_{i5}^{\pm} \geq \text{RRW}_k^{\pm} \cdot \text{TRW}_{ik}^{\pm}, \forall i, k \quad (14)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{i6k}^{\pm} + P_{i6}^{\pm} \geq \text{NPCR}_k^{\pm} \cdot \text{TLAQ}_{ik}^{\pm}, \forall i, k \quad (15)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{i7k}^{\pm} + P_{i7}^{\pm} \geq \text{SBR}_k^{\pm} \cdot \text{LPBW}_{ik}^{\pm}, \forall i, k \quad (16)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{i8k}^{\pm} + P_{i8}^{\pm} \geq \text{ACPR}_k^{\pm} \cdot \text{CFA}_{ik}^{\pm}, \forall i, k \quad (17)$$

生态修复项目约束:分别表示生态湿地工程、河滨缓冲带建设工程、生态湿地和生态隔离带、河道综合整治的最低满足程度,其约束表示如下:

$$\sum_{k=1}^K X_{i9k}^{\pm} + P_{i9}^{\pm} \geq \text{EWS}_k^{\pm} \cdot \text{EWA}, \forall i, k \quad (18)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{i10k}^{\pm} + P_{i10}^{\pm} \geq \text{RRE}_k^{\pm} \cdot \text{TRE}, \forall i, k \quad (19)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{i11k}^{\pm} + P_{i11}^{\pm} \geq \text{AWP}_k^{\pm} \cdot \text{AAW}, \forall i, k \quad (20)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{i12k}^{\pm} + P_{i12}^{\pm} \geq \text{DTP}_k^{\pm} \cdot \text{TLD}, \forall i, k \quad (21)$$

非负约束:所有方法措施的新增加规模都应该不小于0,其约束表示如下:

$$X_{ijk}^{\pm} \geq 0, \forall i, j, k \quad (22)$$

表1 模型中符号的意义

Table 1 The abbreviation and meaning of symbols in model

符号	含义	单位	符号	含义	单位
X_{ijk}^{\pm}	决策变量,表示工程项目新增加规模	$\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ 或 hm^2	USPN_k^{\pm}	k 阶段城镇污水管网覆盖率	/
i	子区域	/	TWD_{ik}^{\pm}	k 阶段区域 i 内城镇生活污水产生量	$\text{m}^3 \text{d}^{-1}$
j	工程项目类型	/	UFN_{ik}^{\pm}	k 阶段区域 i 内城镇家庭总户数	户
k	规划的不同时间段	/	RRW_k^{\pm}	k 阶段农村生活污水的处理率	/
UCC_{jk}^{\pm}	k 阶段工程 j 的单位投资成本	10^8 元	TRW_{ik}^{\pm}	k 阶段区域 i 内农村生活污水排放量	$\text{m}^3 \text{d}^{-1}$
UMC_{jk}^{\pm}	k 阶段工程 j 的单位运营及维护成本	10^8 元	TLAQ_{ik}^{\pm}	k 阶段区域 i 内的耕地面积	hm^2
P_{ij}^{\pm}	区域 i 内第 j 种工程方案在基准年规模	$\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ 或 hm^2	NPCR_k^{\pm}	k 阶段农业面源污染治理面积比例	/

续表1

符号	含义	单位	符号	含义	单位
APR_j^{\pm}	工程 j 对 TP 的单位削减量	$t \cdot hm^{-2}$ 或 $t \cdot m^{-3} \cdot a^{-1}$	SBR_k^{\pm}	k 阶段畜禽养殖粪便无害化处理率	/
ANR_j^{\pm}	工程 j 对 TN 的单位削减量	$t \cdot hm^{-2}$ 或 $t \cdot m^{-3} \cdot a^{-1}$	$LPBW_{ik}^{\pm}$	k 阶段区域 i 内畜禽养殖粪便总产生量	$m^3 \cdot d^{-1}$
TPD_{ik}^{\pm}	不同阶段区域 i 的 TP 入湖量	$t \cdot a^{-1}$	$ACPR_k^{\pm}$	k 阶段循环水池清洁养殖比例	/
TND_{ik}^{\pm}	不同阶段区域 i 的 TN 入湖量	$t \cdot a^{-1}$	CFA_{ik}^{\pm}	k 阶段区域 i 内水产养殖面积	hm^2
TPC_k	k 阶段流域 TP 的环境容量	$t \cdot a^{-1}$	EWS_k^{\pm}	k 阶段设计生态湿地工程最低满足程度	/
TNC_k	k 阶段流域 TN 的环境容量	$t \cdot a^{-1}$	EWA	设计氮磷拦截工程的面积	hm^2
RNE_k	k 阶段子流域内 TN 削减的满足程度	/	RRE_k^{\pm}	k 阶段河滨带建设最低满足程度	/
RPE_k	k 阶段子流域内 TP 削减的满足程度	/	TRE	设计的河滨带建设的面积	hm^2
MIW_k^{\pm}	第 k 阶段工业污水提标改造处理率	/	AWP_k^{\pm}	k 阶段流域生态隔离带最低满足程度	/
IWE_{ik}^{\pm}	k 阶段区域 i 内工业污水排放总量	$m^3 \cdot d^{-1}$	AAW	设计的生态湿地和生态隔离带面积	hm^2
IST_k^{\pm}	第 k 阶段工业企业清洁生产率	/	DTP_k^{\pm}	k 阶段河道综合整治的比例	/
RWT_k^{\pm}	k 阶段城镇生活污水的集中处理率	/	TLD	表示河道综合整治的长度	km

3 案例研究 (Case study)

3.1 研究区域背景

太滬运河位于江苏省常州市武进区南部,是武进区“三横三纵”骨干河道之一,是贯通滬湖和太湖竺山湾的主要水力通道,也是太湖主要入湖河流之一.整个河段绝大部分位于常州市武进区境内,由西向东分别贯穿武进区的前黄镇和雪堰镇,东部入湖(太湖)河段位于宜兴市境内,于宜兴市周铁镇汇入太湖竺山湾.近年来,太滬河流域内污染因素日益增多,入河污染物总量激增,运河内水质恶化,给太湖竺山湾造成严重危害,因此,对该流域内污染物排放做出合理规划将有利于太湖的保护.根据《太滬运河水环境综合整治规划》中对流域范围(图1)划

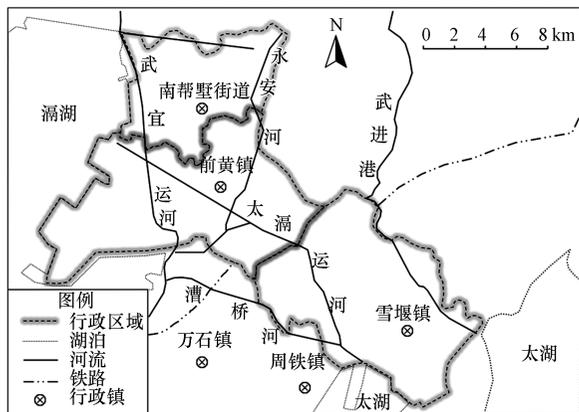


图1 太滬运河流域范围图

Fig.1 Taige canal watershed

分,太滬运河规划区范围包括武进区南夏墅街道、前黄镇和雪堰镇(部分),规划区域总面积 179.06 km^2 ,共涉及 59 个行政村.

3.2 模型参数

规划分为 3 个阶段,第一阶段为 2007—2012 年,第二阶段为 2013—2020 年,第三阶段为 2021—2030 年.为解决模型中参数不确定性,规划过程中部分参数和结果采用区间数表示,设置参数上下限,求解过程分为两个子模型分别求解.模型中部分参数见表 2,由于篇幅限制,仅列出部分数据.流域内污染源主要包括工业污水排放源、城镇生活污染源、农村生活污水排放源、种植业污染排放源、畜禽养殖污染排放源、水产养殖污染排放源,数据主要来源于《太滬运河水环境综合整治规划》和文献《太滬河流域水环境污染解析》(张文艺等,2012).

流域污染管理过程中,受诸多因素影响,往往出现污染物削减后入湖量超出水环境容量,在环境容量周围一定范围内波动,将其定义为污染物允许入湖量,允许入湖量是以水环境容量为期望值的正态分布函数.污染物实际入湖量在一定程度上可大于水环境容量,而这种情况并不会对最终的削减效果造成太大影响.本研究中设定置信水平 $1-q_i$,要求 TN 及 TP 允许入湖量约束成立的概率水平至少要大于置信水平 $1-q_i$.通过相关数据分析,考虑违反概率为 0、0.01、0.05 和 0.1 四种情况,TN 及 TP 容量见表 3.

表 2 太滹运河流域 ICILP 模型中主要参数

Table 2 Main parameters of Taige Canal Watershed ICILP model

规划阶段	MIW _k [±]	IST _k [±]	RWT _k [±]	USPN _k [±]	RRW _k [±]	NPCR _k [±]
k=1	[0.30,0.40]	[0.30,0.40]	[0.50,0.60]	[0.40,0.50]	[0.40,0.50]	[0.20,0.30]
k=2	[0.60,0.70]	[0.60,0.70]	[0.70,0.80]	[0.70,0.80]	[0.65,0.70]	[0.50,0.60]
k=3	[0.80,0.80]	[0.80,0.80]	[0.90,0.95]	[0.90,1.00]	[0.85,0.95]	[0.80,0.85]
规划阶段	SBR _k [±]	ACPR _k [±]	EWS _k [±]	RRE _k [±]	AWP _k [±]	DTP _k [±]
k=1	[0.35,0.45]	[0.25,0.35]	[0.30,0.40]	[0.30,0.40]	[0.30,0.40]	[0.25,0.35]
k=2	[0.60,0.75]	[0.50,0.65]	[0.60,0.70]	[0.60,0.70]	[0.60,0.70]	[0.50,0.60]
k=3	[0.80,0.90]	[0.80,0.85]	[0.85,0.90]	[0.85,0.90]	[0.85,0.90]	[0.75,0.80]

注:[]表示区间数.

表 3 不确定性违反概率下 TN 及 TP 允许入湖量

Table 3 The Distribution information of uncertain environmental capacities for TN and TP

物质	规划阶段	不同违反概率(q_i)下的允许入湖量/($t \cdot a^{-1}$)			
		0	0.01	0.05	0.1
TP	k=1	13.790	14.489	14.984	15.371
	k=2	10.460	11.159	11.654	12.041
	k=3	8.120	8.819	9.314	9.701
TN	k=1	289.82	296.81	301.76	305.63
	k=2	248.35	255.34	260.29	264.16
	k=3	208.45	215.44	220.39	224.26

4 结果与讨论 (Results and discussion)

4.1 优化结果分析

用 LINGO 软件对 ICILP 模型进行编程求解,可以得到在不同违反概率水平下 3 个阶段 12 个方案在 3 个区域内的规模.由于篇幅限制,仅列出流域内各种工程方案新增加规模总和,具体见表 4.从表中可以看出,在 4 种违反概率情形下,工程方案 2、3、4、5、9 没有变化,而其他 7 种工程方案随着违反概率水平的增大而出现不同程度的减小,其中以方案 1、6、8、10 减少量最大.这主要是随着违反概率的增加,TN 和 TP 需削减量减小,由于受到削减成本和削减效率较高的工程措施,而减小削减成本相对较大的工程措施.

表 4 不同违反概率水平下 X_{jk}^* 最优结果和成本Table 4 Optimal solutions and costs of X_{jk}^* with different q_i levels

方案	各工程方案新增加规模/($m^3 \cdot d^{-1}$ 或 hm^2)				污染控制成本/ 10^8 元			
	$q_i=0$	$q_i=0.01$	$q_i=0.05$	$q_i=0.1$	$q_i=0$	$q_i=0.01$	$q_i=0.05$	$q_i=0.1$
j=1	[16077,16339]	[14010,15917]	[12861,15917]	[12861,15917]	[0.12,0.23]	[0.10,0.23]	[0.09,0.23]	[0.09,0.23]
j=2	[12861,15917]	[12862,15917]	[12861,15917]	[12861,15917]	[0.46,0.70]	[0.46,0.72]	[0.46,0.72]	[0.46,0.71]
j=3	[988,1049]	[988,1049]	[988,1049]	[988,1049]	[0.03,0.10]	[0.03,0.10]	[0.03,0.09]	[0.03,0.09]
j=4	[9036,10600]	[9036,10600]	[9036,10600]	[9036,10600]	[0.38,0.55]	[0.38,0.55]	[0.38,0.55]	[0.38,0.55]
j=5	[10024,11136]	[10024,11136]	[10024,11136]	[10024,11136]	[0.25,0.35]	[0.25,0.35]	[0.25,0.35]	[0.25,0.32]
j=6	[6550,6798]	[5559,5887]	[5240,5778]	[5240,5778]	[2.23,2.84]	[1.89,2.44]	[1.78,2.39]	[1.78,2.38]
j=7	[195,214]	[195,214]	[195,214]	[195,203]	[0.28,0.50]	[0.27,0.50]	[0.26,0.50]	[0.25,0.46]
j=8	[947,1121]	[887,955]	[887,955]	[887,955]	[0.35,0.60]	[0.33,0.50]	[0.32,0.49]	[0.32,0.49]
j=9	[60,60]	[60,60]	[60,60]	[60,60]	[0.06,0.07]	[0.06,0.07]	[0.06,0.07]	[0.06,0.07]
j=10	[460,460]	[460,460]	[420,443]	[410,414]	[0.58,0.80]	[0.57,0.81]	[0.54,0.73]	[0.51,0.68]
j=11	[200,200]	[200,200]	[180,180]	[170,180]	[0.40,0.70]	[0.40,0.65]	[0.36,0.58]	[0.34,0.58]
j=12	[212,223]	[223,223]	[223,223]	[202,223]	[0.08,0.10]	[0.08,0.10]	[0.08,0.10]	[0.08,0.09]
总计	/	/	/	/	[5.22,7.54]	[4.82,7.02]	[4.61,6.80]	[4.55,6.65]

注:j=1 为工业污水提标改造处理工程;j=2 为工业企业清洁生产工程;j=3 为城镇污水处理厂建设工程;j=4 为城镇污水管网建设工程;j=5 为农村生活污水处理工程;j=6 为种植业污染控制工程;j=7 为畜禽养殖粪便无害化处理工程;j=8 为循环水池清洁养殖工程;j=9 为太滹运河农业氮磷拦截工程;j=10 为滨滨带建设工程;j=11 为太滹运河生态湿地和生态隔离带建设工程;j=12 为太滹运河片区河网综合治理工程;[]表示区间参数.

当 $q_i=0$ 和 $q_i=0.01$ 时,模型运行结果主要减少点源和面源污染控制工程的规模,生态修复项目规模基本不变.这从侧面说明了生态工程项目的单位削减效率和成本均优于点源和面源污染控制项目.当违反概率水平增加,即 $q_i=0.05$ 和 $q_i=0.1$ 时,点源和面源污染控制工程的规模基本趋于稳定,而生态修复项目减小量相对较小.可见,各工程项目新增加规模并不会随着违反概率增加而一直减小,当违反概率增加到一定程度受各工程方案最低削减率的约束,使点源和面源污染控制工程新增加规模趋于定值,而减少削减效率较高的生态工程措施,故前面所述的在低违反概率水平下生态工程措施保持不变并不是受到最低削减率约束,生态工程措施仍具有可降低的空间.因此,在流域污染治理中,生态工程措施同点源和面源治理措施一样均具有重要作用.当流域管理要求越来越严格时,在满足各污染源最低削减率条件下,可优先考虑适度增加生态工程措施的规模来达到削减要求,之后再增加点源和面源污染控制工程,这样会使削减效率提高,削减成本合理.

4.2 污染控制成本分析

不同违反概率水平下污染控制优化投资结果

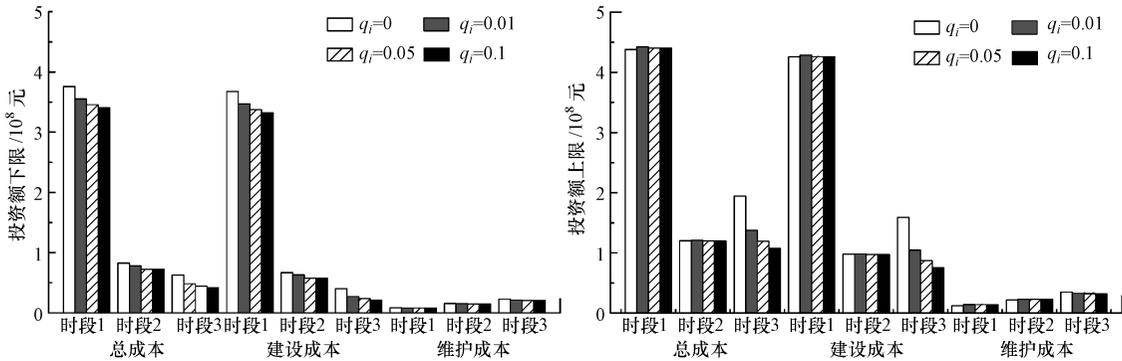


图2 不同违反概率水平下污染控制成本
Fig.2 Optimal costs under different q_i levels

4.3 TN 及 TP 削减量分析

由表 3 和各工程项目单位削减量计算可得到流域内 TN 及 TP 的年削减入湖量,具体见图 3.从图中可以看出,TN 和 TP 年削减量在 3 个阶段逐步增大.4 种违反概率水平下,规划期结束后减少 TN 的入湖量分别为 $[284.47, 315.49]$ 、 $[277.48, 308.50]$ 、 $[272.53, 302.45]$ 、 $[269.72, 299.68]$ $t \cdot a^{-1}$,减少 TP 的入湖量分别为 $[14.405, 16.609]$ 、 $[14.068, 16.235]$ 、 $[13.798, 15.742]$ 、 $[13.709, 15.526]$ $t \cdot a^{-1}$.

如表 4 所示.结果显示,4 种违反概率情形下投资成本分别为 $[5.22, 7.54]$ 亿元、 $[4.82, 7.02]$ 亿元、 $[4.61, 6.80]$ 亿元和 $[4.55, 6.65]$ 亿元, $q_i=0$ 时污染控制成本最高, $q_i=0.1$ 时污染控制成本最低,且随着 q_i 的增大污染控制成本减小的幅度逐渐变小.即随着违反概率水平增加,系统的投资成本有所降低,但污染控制成本在较大 q_i 值时会趋于稳定.这是由于部分工程方案新增加规模随着违反概率增加而减小,之后各工程项目受最低削减量和最小削减量约束逐步趋于稳定.从各工程项目投资情况来看,针对点源和面源污染控制工程方案投资较大,其中以种植业污染控制工程 ($j=6$) 投资最大.生态修复工程方案中以河滨带建设 ($j=10$) 投资较大.图 2 是 4 种概率水平下各阶段的投资情况,图中显示各方案的总投资多集中在第一阶段,且第一阶段工程方案投资占总投资比例均超过 60%.总投资中以建设成本为主,维护成本比例较小.维护成本为时段 1 < 时段 2 < 时段 3,这是由于在时段 1 新增加工程项目在时段 2 和时段 3 均有维护费用,即随着时间推移,需要维护的工程项目累加导致后期维护成本增大.

可见,污染物削减量随着违反概率增加而减小, $q_i=0$ 即不允许违反概率时污染物削减量最大, $q_i=0.1$ 时污染小削减量相对减小.这是由于违反概率增大,允许入湖量也相应增大,受此约束条件约束,不等式右边逐步减小,因此,相对较小的 X_{ijk}^* 即能满足约束.较高的违反概率会导致系统的成本降低,但污染物削减量也相应减少,因此,在流域管理中,应根据实际管理需求选择合适的工程方案.图 4 是子区域内 TN 及 TP 在各阶段的削减量,从不同违反概率上

来看,随着违反概率增加各区域内也都表现出污染物削减量逐步减小;从不同区域污染物削减量上来看,两种污染物削减量均表现为南夏墅街道>前黄镇>雪堰镇,这是由于模型中输入的 TND_{ik}^* 和 TPD_{ik}^*

为南夏墅街道>前黄镇>雪堰镇,受制于区域污染物治理规模条件约束,模型运行得到的结果不会超出相对应的人湖量.

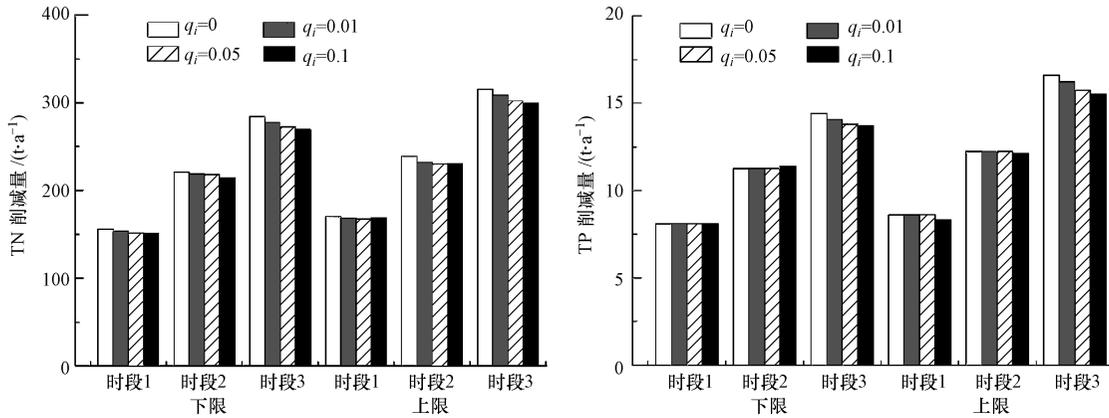


图3 不同概率水平下 TN 和 TP 削减量

Fig.3 TN and TP reduction under different q_i levels

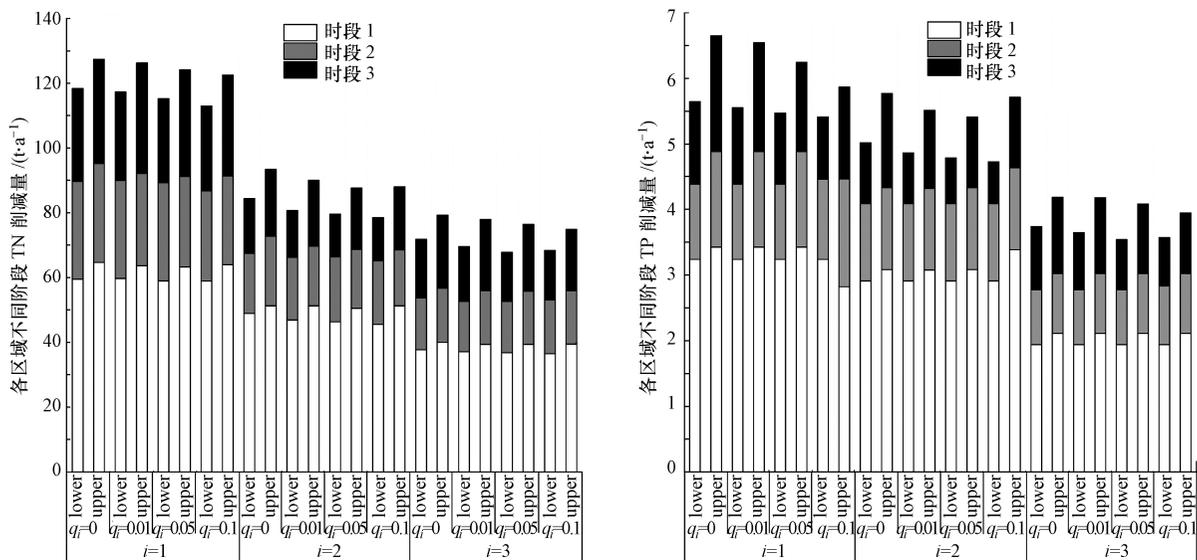


图4 不同违反概率水平下子区域 TN 和 TP 削减量

Fig.4 TN and TP reduction of the sub-watershed with different q_i levels

5 结论 (Conclusions)

研究中讨论了 4 种违反概率情况,优化结果表明,随着违反概率增加系统投资成本有所降低,系统优先减少环境成本较高、削减效率较低的工程措施,但较高的违反概率同时也会导致污染物削减量减少.优化结果提供了不同违反概率下流域污染负荷优化削减分配方案,在实际运用中管理者可根据管理需求选择合适的方案.

责任作者简介:苏婧(1983—),女,副研究员,主要从事湖泊营养物质基准标准研究工作.

参考文献 (References):

陈祥荣,席北斗,孙春宝,等.2009.不确定性城市生活垃圾管理规划及其应用[J].环境科学研究, 22(12): 1489-1494
Chinneck J W, Ramadan K. 2000. Linear programming with interval coefficients[J]. Journal of Operational Research Society, 51(2): 209-220

- Fujiware R V, Sobel M S.1986.Estuarine water quality management and forecasting[J].*Journal of Environmental Engineering*, 112(2): 185-199
- Huang G H, Baetz B W, Patry G G, *et al.* 1995. Grey integer programming: an application to waste management planning under uncertainty[J].*European Journal of Operational Research*, 83(3): 594-620
- Huang G H.1998.A hybrid inexact-stochastic water management model [J].*European Journal of Operational Research*,107(1): 137-158
- Krawczyk.2005. Coupled constraint Nash equilibria in environmental games[J].*Resource and Energy Economics*, 27: 157-181
- 刘永,邹锐,郭怀成.2012.智能流域管理研究[M].北京:科学出版社
- 刘年磊,毛国柱,赵林,等.2012.基于强化区间线性规划方法的流域环境系统管理优化[J].*天津大学学报*, 45(1): 21-28
- 刘年磊.2011.基于不确定性的环境系统风险优化决策模型研究与应用[D].天津:天津大学
- 李如忠,舒琨.2011.基于多目标决策的水污染负荷分配方法[J].*环境科学学报*, 31(12): 2814-2821
- 李如忠,钱家忠,汪家权.2003.水污染物允许排放总量分配方法研究[J].*水利学报*, 34(5): 112-115
- 李开明,陈铣成,许振成.1990.潮汐河网区水污染总量控制及其分配方法[J].*环境科学研究*, 3(6): 36-42
- Liu Y, Zou R, Guo H C, *et al.* 2011. A risk explicit interval linear programming model for uncertainty-based nutrient-reduction optimization for the lake Qionghai Watershed[J].*Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE*, 137(1): 83-91
- 吕宁馨,苏婧,席北斗,等.2012.基于优化模型的抚仙湖营养物质标准技术经济评估方法[J].*环境工程技术学报*, 2(3): 223-227
- 李连欢.2012.区间机会约束线性优化模型应用于白洋淀的水质管理[D].北京:华北电力大学
- 舒琨.2010.水污染负荷分配理论模型与方法研究——以巢湖流域为例[D].合肥:合肥工业大学
- 苏婧,席北斗,刘鸿亮,等.2009.北京市生活垃圾管理的多重不确定性长期规划模型[J].*中国环境科学*, 29(10): 1105-1110
- 张晓萱,黄国和,席北斗,等.2009.电厂优化配煤的不确定性机会约束非线性规划方法[J].*中国电机工程学报*, 29(5): 11-15
- 张艺艺,韩有法,陆丽巧,等.2012.太滹运河流域水环境污染解析[J].*中国农村水利水电*, 9:47-50
- Takyi A K, Lence B J.1996. Chebyshev model for water-quality management [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122(1):40-48
- 夏明芳,边博,王志良,等.2012.太湖流域重污染区污染物总量控制技术及其综合示范[M].北京:中国环境科学出版社
- 周丰,郭怀成,刘永,等.2007.湿润区湖泊流域水资源可持续发展评价方法[J].*自然资源学报*, 22(2): 290-301
- 吴悦颖,李云生,刘伟江.2006.基于公平性的水污染总量分配评估方法研究[J].*环境科学研究*, 19(2): 66-70
- 周丰,陈国贤,郭怀成,等.2008.改进区间线性规划及其在湖泊流域管理中的应用[J].*环境科学学报*, 28(8): 1688-1698
- 周丰,郭怀成.2010.不确定性非线性系统“模拟—优化”耦合模型研究[M].北京:科学出版社
- Zou R, Liu Y, Liu L, *et al.*2010.REILP approach for uncertainty-based decision making in civil engineering[J].*Journal of Computing in Civil Engineering*, 24(4): 357-364
- Zhang X L, Huang K, Zou R, *et al.*2013.A risk explicit interval linear programming model for uncertainty-based environmental economic optimization in the lake Fuxian Watershed, China[J].*The Scientific World Journal*, DOI: 10.1155/2013/824078