

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0106

冉欣, 孙世军, 冯江, 等. 基于污染物总量控制的流域水环境管理绩效优化研究—以吉林省招苏台河流域为例[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 128-135, 145. RAN X, SUN S J, FENG J, et al. Optimization of water environment management performance based on total amount control of pollutants—A case study of Zhaosutai River Basin in Jilin Province[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 128-135, 145. (in Chinese)

# 基于污染物总量控制的流域水环境 管理绩效优化研究

—以吉林省招苏台河流域为例

冉欣<sup>1</sup>, 孙世军<sup>1</sup>, 冯江<sup>1</sup>, 崔朋<sup>1</sup>, 龙振宇<sup>1</sup>, 刘思含<sup>2</sup>

(1. 东北师范大学 环境学院, 长春 130117; 2. 吉林省环境工程评估中心, 长春 130117)

**摘要:** 为探寻流域污染物总量控制和水环境管理绩效之间的关系, 建立覆盖流域社会、经济、生态的水环境综合管理绩效指标体系, 计算环境绩效并分析其变化趋势, 以水污染物削减量为决策变量, 以投入资金量最小为优化目标, 设置环境绩效优化、控制断面水质达标、污染物削减提升的约束条件, 构建基于结构、工程、监管提升的流域水环境管理绩效优化模型。以吉林省招苏台河流域为例, 利用 Lingo8.0 软件编程进行优化求解, 得到优化方案总投资 15.09 亿元, COD、氨氮总削减量分别为 9879.1 t, 619.68 t, 规划期末水环境管理绩效提升至 0.856。水环境管理绩效指标体系可较全面的反映绩效值的定量变化, 得到的优化方案满足流域水环境质量改善和污染物总量控制的要求, 有效降低资金投入, 为流域管理和发展提供参考。

**关键词:** 水环境绩效指数; 总量减排; 指标体系; 优化模型; 总量控制方案

**中图分类号:** X522   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-1683(2018)04-0128-08

## Optimization of water environment management performance based on total amount control of pollutants—A case study of Zhaosutai River Basin in Jilin Province

RAN Xin<sup>1</sup>, SUN Shijun<sup>1</sup>, FENG Jiang<sup>1</sup>, CUI Peng<sup>1</sup>, LONG Zhenyu<sup>1</sup>, LIU Sihan<sup>2</sup>

(1. School of Environment, Northeast Normal University, Changchun 130117, China;

2. Jilin Environmental Engineering Assessment Center, Changchun 130117, China)

**Abstract:** In order to explore the relationship between total amount control of pollutants and water environment management performance, we established a comprehensive management performance index system for water environment covering social, economic, and ecological aspects of the basin. We calculated the environmental performance and analyzed its change trend. Taking the reduction of water pollutants as the decision making variable, with minimum investment as the optimization objective, we set certain constraints, and built a water environment management performance optimization model. Taking Zhaosutai River basin in Jilin Province as a case study, using Lingo8.0 software programming to optimize the solution, we obtained an optimization scheme that required a total investment of 15.09 billion Yuan, could reduce the chemical oxygen demand and ammonia nitrogen by 9879.1 tons and 619.68 tons respectively, and could improve the end of term water environment management performance to 0.856. The performance index system for water environment management can comprehensively reflect the quantitative change of performance value. The optimization scheme meets the requirements of water quality improvement and total amount control of

收稿日期: 2017-10-09   修回日期: 2018-04-24   网络出版时间: 2018-05-28  
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180525.1537.002.html>  
基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2014ZX0720F011)

**Fund:** National Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment(2014ZX0720F011)

**作者简介:** 冉欣(1993), 女, 黑龙江哈尔滨人, 主要从事环境规划与管理方面的研究。E-mail: 2267416348@qq.com

**通讯作者:** 孙世军(1974), 男, 吉林通化人, 副教授, 博士, 从事环境规划与管理方面的研究。E-mail: sunsj763@nenu.edu.cn

pollutants in the basin, and effectively reduces capital input. It can provide a reference for water environment management and sustainable development of river basins.

**Key words:** water environment performance index; total emission reduction; index system; optimization model; total amount control scheme

1960年起日本在水质规划中相继引入“总量控制”概念<sup>[12]</sup>。20世纪70年代,日本和美国同期将总量控制写入法律文件中<sup>[2]</sup>。随着美国TMDL计划和欧盟水框架指令实行,污染物总量控制成为流域环境管理的指导思想<sup>[3,4]</sup>。从1988年《水污染排放许可证管理暂行办法》至1995年《水污染防治法》,不达标水体实施重点污染物总量控制。从水资源总量及污染物总量角度<sup>[5]</sup>出发,刘年磊等利用熵值法与改进等比例法<sup>[6]</sup>进行污染物总量目标分配,于雷等应用环境预警分析长三角地区水环境承载力<sup>[7]</sup>对污染物总量控制的影响。1990年,ISO 14031环境绩效评估国际标准开启了对流域水环境管理的研究<sup>[8]</sup>。2011年中央一号文件对“最严格水资源管理制度<sup>[9,10]</sup>”进行系统界定,在此背景下,陶洁等人构建三条红线控制指标体系并应用到新密市水资源管理工作中<sup>[11]</sup>;郭唯等以郑州市为例建立了水资源管理绩效评估体系<sup>[12]</sup>;游进军等提出多维调控的水资源总量控制方案<sup>[13]</sup>。王金南等将在地方政府绩效考核中引入环境绩效<sup>[14]</sup>。环境绩效常用评价方法包括AHP法、模糊综合评价法<sup>[15]</sup>、PSR模型<sup>[16]</sup>等,而水环境管理绩效评价被融合到环境绩效的研究中,尚未形成一套科学的评价体系和定量的研究方法,尤其是将总量控制思想与水环境管理绩效相结合的研究鲜有报道。

“十三五”期间,我国实施质量改善及总量控制“双约束”模式<sup>[17]</sup>。在此背景下基于污染物总量控制<sup>[18,19]</sup>,综合考虑流域环保投资、水环境管理绩效、控制断面水质等多项因素的影响,构建流域环境绩效指标系统,定量探寻污染物总量控制和绩效间的关系,以招苏台河为例,得到在目标环境绩效下水污染物最优总量控制方案,以期对流域水环境管理和可持续发展提供更具实用性的参考。

## 1 研究区域概况

吉林省招苏台河流域位于东经 $124^{\circ}17' - 124^{\circ}57'$ ,北纬 $44^{\circ}13' - 44^{\circ}35'$ 之间,流域总面积 $1118\text{ km}^2$ 。招苏台河在吉林省境内长度约103 km,发源于梨树县十家堡镇土门岭(大黑山脉赫里峰),流经梨树县8个乡镇,在喇嘛甸镇张家桥进入辽宁省昌图县境

内,最终汇入东辽河。研究区域地理位置见图1。

吉林省招苏台河流域属北温带半湿润大陆季风性气候,四季分明。多年平均气温 $6.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,多年平均风速 $3.6\text{ m/s}$ ,风向WSW(西南西)。招苏台河梨树县控制单元白山桥水文站集水面积 $47\text{ km}^2$ ,招苏台河平均宽度 $4.68\text{ m}$ ,月平均水深 $0.26\text{ m}$ ,多年平均径流量为 $4.55\text{ 亿 m}^3$ 。河川径流量主要由降水形成,年降水量平均为 $577.2\text{ mm}$ ,主要集中在6月至8月。丰水期降水占全年降水总量的80%;枯水期部分河段甚至出现断流。区域水资源总量为 $3.8\text{ 亿 m}^3/\text{a}$ ,其中地表水资源量为 $1.69\text{ 亿 m}^3/\text{a}$ 。水资源现状供水量为 $1.54\text{ 亿 m}^3/\text{a}$ ,现状用水量 $1.386\text{ 亿 m}^3/\text{a}$ 。

梨树县农业人口约占人口总数的75%,耕地、村镇及工矿用地、交通运输用地等人类干扰较大的面积占流域总面积的94%,流域受人类活动干扰强烈。招苏台河常年处于Ⅲ类和劣Ⅲ类水平,枯水期氨氮超标倍数更高。近年来伴随着种植业和禽畜养殖业的快速发展,农业面源污染严重,招苏台河水污染问题亟待解决。

辽河是我国东北地区水污染较为严重的河流之一,招苏台河属于东辽河流域,且为吉林省和辽宁省跨境河流,跨境河流水体不达标对下游水体影响范围较广。故以此为对象寻求如何提高流域环境绩效水平具有一定代表性。



图1 研究区地理位置

Fig. 1 The geographical location of study region

## 2 指标体系构建

### 2.1 构建依据

流域环境管理从早期单纯追求经济发展转化为经济、社会和生态环境协调可持续发展,流域水环境

管理评价指标体系正是流域环境管理工作的努力方向和目标体现。

参考 ISO14031:2013《环境管理环境绩效评价指南》<sup>[20]</sup> 和《GRI 可持续发展报告指南》第四版<sup>[21]</sup>。选取其中与水环境、生态环境、社会环境及污染物排放相关的指标,遵循宏观性、系统性、可操作性等原则<sup>[22]</sup>,从流域水环境管理绩效内涵出发,基于社会、经济及生态<sup>[23]</sup>三方面构建评价指标系统,指标体系见图 2。

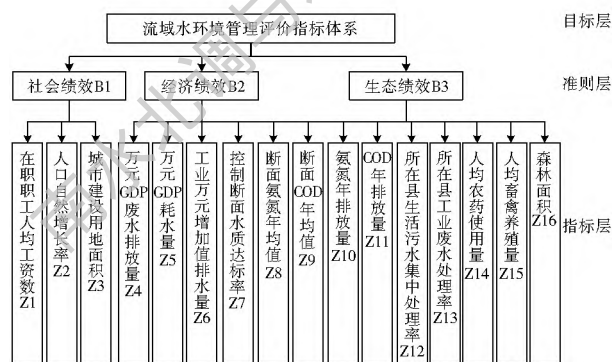


图 2 评价指标体系  
Fig. 2 Evaluation index system

## 2.2 数据处理

指标参数来自梨树县统计局汇编《梨树县国民经济统计资料》(2005-2010 年)、《梨树县统计年鉴》(2010-2015 年)、梨树县环境监测站提供招苏台河水质监测数据及 2016 年 5 月现场调查数据。

指标系统权重计算采用均方差决策法,具有“概

念清楚、涵义明确、计算简便、精度较高<sup>[24,25]</sup>”等特点。基本过程如下:

(1) 评价指标的标准化处理。

标准化处理公式见式(1)和(2)<sup>[26]</sup>。上述指标中 Z1、Z2、Z3、Z7、Z12、Z13、Z16 为效益型指标, Z4、Z5、Z6、Z8、Z9、Z10、Z11、Z14、Z15 为成本型指标。

效益型指标:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{j\max} + x_{j\min}} \quad x_{ij} \in [0, 1] \quad (1)$$

成本型指标:

$$y_{ij} = 1 - \frac{x_{ij}}{x_{j\max} + x_{j\min}} \quad x_{ij} \in [0, 1] \quad (2)$$

式中:  $x_{ij}$  为指标数值;  $x_{j\max}$  和  $x_{j\min}$  为指标值中的极值。

(2) 指标层权重数值求解。

a. 均值见式(3)。  $E(I_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}$  (3)

b. 利用式(3)得方差。

$$\sigma(I_j)^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - E_j)^2 \quad (4)$$

c. 利用式(4)得标准差。

$$\sigma(I_j) = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - E_j)^2 \right]^{0.5} \quad (5)$$

d. 根据式(3)和式(5)得权重。

$$w = \sigma(I_j) / \left( \sum_{i=1}^n \sigma(I_j) \right) \quad (6)$$

式中:  $x_{ij}$  为指标数值;  $E(I_j)$  为均值;  $\sigma(I_j)^2$  和  $\sigma(I_j)$  分别为方差和标准差;  $w$  为该指标层的指标权重值。

依据以上公式计算,结果见表 1 和表 2。

表 1 招苏台河流域环境绩效指标值及标准化值

Tab. 1 The index system and standardized value of environment performance in Zhaosutai River

指标	2006		2007		2008		2009		2010		2011		2012		2013		2014		2015	
	指标	标准	指标	标准	指标	标准	指标	标准	指标	标准	指标	标准	指标	标准	指标	标准	指标	标准	指标	标准
Z1/元	9692	0.19	12404	0.24	14689	0.28	14689	0.28	17879	0.34	24001	0.46	27164	0.52	29828	0.57	29828	0.57	42386	0.81
Z2(%)	9.5	0.86	6.26	0.57	5.23	0.47	4	0.36	4	0.36	4.31	0.39	1.58	0.14	4.5	0.41	5.09	0.46	2.49	0.22
Z3/km <sup>2</sup>	9.60	0.33	12.50	0.44	12.90	0.45	13.10	0.46	17.20	0.60	14.40	0.50	15.60	0.54	16.80	0.59	17.90	0.62	19.10	0.67
Z4/t	2.088	0.79	1.575	0.84	1.265	0.87	0.806	0.92	0.610	0.94	0.938	0.85	5.274	0.47	4.532	0.55	3.122	0.69	2.989	0.70
Z5/t	2.410	0.31	2.018	0.42	1.676	0.52	1.068	0.69	2.050	0.41	1.933	0.44	1.771	0.49	1.642	0.53	1.541	0.56	1.448	0.58
Z6/t	6.184	0.85	3.197	0.92	2.112	0.95	1.410	0.96	0.995	0.98	39.255	0.02	18.717	0.53	15.284	0.62	10.496	0.74	10.229	0.75
Z7(%)	0	0.00	8.3	0.08	0	0.00	8.3	0.08	83.3	0.83	50	0.50	41.7	0.42	75	0.75	91.6	0.92	100	1.00
Z8/(mg·L <sup>-1</sup> )	3.77	0.69	6.817	0.44	10.82	0.12	7.86	0.36	3.00	0.75	4.54	0.63	3.31	0.73	2.92	0.76	1.88	0.85	1.41	0.88
Z9/(mg·L <sup>-1</sup> )	203.2	0.09	171.89	0.23	73.64	0.67	34.94	0.84	33.12	0.85	26.35	0.88	23.92	0.89	24.29	0.89	26.35	0.88	19.37	0.91
Z10/t	698.19	0.41	521.49	0.56	1086.11	0.08	998.38	0.16	360.15	0.70	363.92	0.69	552.31	0.53	245.33	0.79	273.86	0.77	129.58	0.92
Z11/t	48203.3	0.02	16561.91	0.66	11274.86	0.77	5761.35	0.88	3617.45	0.93	2969.42	0.94	1961.58	0.96	2430.09	0.95	3219.42	0.93	1961.28	0.98
Z12(%)	31	0.25	31.36	0.26	42.47	0.36	42.47	0.36	72.59	0.61	70.38	0.59	75.02	0.63	81.56	0.69	87.21	0.74	82.53	0.70
Z13(%)	0.6	0.38	0.60	0.39	0.60	0.39	0.60	0.39	0.60	0.39	0.88	0.57	0.92	0.59	0.96	0.62	0.96	0.61	0.96	0.62
Z14/kg	2.86	0.58	3.16	0.54	3.39	0.51	3.46	0.50	3.52	0.49	3.62	0.47	3.75	0.45	3.78	0.45	3.91	0.43	3.99	0.42
Z15/只	27.88	0.60	34.30	0.51	37.23	0.47	45.04	0.36	25.81	0.63	27.09	0.61	27.27	0.61	27.09	0.61	25.04	0.64	26.82	0.62
Z16/hm <sup>2</sup>	48793	0.52	48793	0.52	48793	0.52	66629	0.71	66629	0.71	66629	0.71	66629	0.71	27442	0.29	28237	0.30	28711	0.31

表2 指标层权重

Tab. 2 Weight of index layer

指标	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Z11	Z12	Z13	Z14	Z15	Z16
w	0.06	0.059	0.031	0.082	0.033	0.089	0.122	0.074	0.093	0.083	0.089	0.052	0.035	0.015	0.028	0.055

## 2.3 流域水环境管理绩效计算

结合上文计算得到招苏台河流域水环境管理指标值及权重,采用线性加权法,确定招苏台河流域各指标的加权值,水环境管理绩效指数  $WEPI(t)$  见式(7):

$$WEPI(t) = \sum_{i=1}^m (w_i \cdot x_i(t)) \quad (7)$$

式中:  $w$  为该项指标权重;  $x_i(t)$  为  $t$  时期该指标标准值。

利用 SPSS 22.0 软件计算招苏台河流域水环境管理绩效值,利用 OriginPro8.5 软件对指标体系各指标绩效变化作图分析,2006–2015 年招苏台河流域水环境管理各指标绩效指数变化详见图 3。

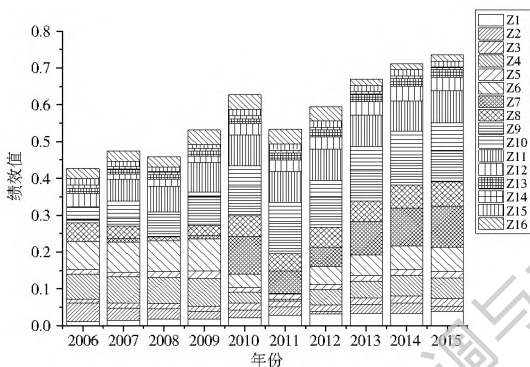


图3 指标体系各指标绩效变化

Fig. 3 Performance variation of each index of the index system

2007–2008 年氨氮排污量由 521.498 t 上升至 1 086.118 t, 控制断面氨氮浓度从 6.817 mg/L 上升至 10.823 mg/L, 断面水质达标率下降, 导致 2007–2008 年招苏台河环境管理总绩效下降。2010 年由于氨氮排污量由 998.380 t 减少至 360.157 t, 招苏台河流域水质达标率显著提升, 故 2010 年绩效值相较于 2009 年出现陡然增长。2010–2011 年控制断面氨氮浓度由 3.00 mg/L 上升至 4.54 mg/L, 万元 GDP 废水排放量增加, 生活污水集中处理率降低, 导致断面水质达标率由 83.3% 下降至 50%, 进而 2011 年水环境管理总绩效下降。绩效变化见图 4。

从图 4 可以看出, 从 2006 年至 2015 年招苏台河流域水环境管理总绩效呈现出先上升后下降波动再缓慢持续上升的趋势。由 2006 年至 2015 年绩效分别为 0.43、0.48、0.46、0.53、0.63、0.53、0.60、

0.67、0.71、0.74, 随着梨树县环境基础建设工程的大力推进, COD 和氨氮年排放量降低, 对招苏台河流域水环境质量改善和环境绩效提升起到关键作用。

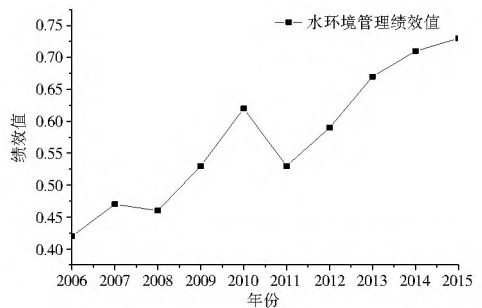


图4 2006–2015 年招苏台河流域水环境管理绩效变化

Fig. 4 The variation of water environment management performance in Zhaosutai River Basin from 2006 to 2015

## 3 流域水环境管理绩效优化

基于污染物总量控制构建水环境管理绩效优化模型,与传统模型相比,结合招苏台河流域实际情况,在保证环境绩效目标前提下,得到流域水污染物减排的最优配置方案,对改善水环境质量更具有实用性及推广性,该方法弥补了利用数学优化模型进行流域水环境管理绩效研究的空白,为流域水环境管理工作提供了新思路。

随着招苏台河流域梨树县经济发展加快,排放污染物总量增多,需建设污染治理工程改善流域水环境。由梨树县污染治理防治方案可知:2020 年前梨树县拟建 77 项流域污染治理工程方案,其中结构提升包括 4 项工业源污染防治工程;工程提升包括 31 项城镇生活污染治理工程,23 项养殖污染防治与资源化工程,18 项河道面源污染修复工程;监管/管理提升包括 1 项流域监管能力建设工程。预计上述污染治理工程总削减量为 COD: 1 783.61 t/a, 氨氮: 102.98 t/a。对应 2020 年环境绩效值为 0.818。以此作为流域污染控制原参考方案。

### 3.1 绩效提升指标系统

根据《“十二五”主要污染物总量减排核算细则》(环发[2011]148号),减排措施主要包括结构、工程和管理三项。结合指标设立要求<sup>[27-28]</sup>和环境污染物总量控制的提升方法<sup>[29]</sup>,建立基于污染物总量控制的环境绩效提升指标系统<sup>[30]</sup>,详见表 3。

表 3 基于总量控制的绩效提升指标系统

Tab. 3 Performance improvement index system based on total amount control

指标系统	目标层	准则层	指标层
招苏台河流域水环境管理绩效提升指标体系	结构提升	工业源污染防治	清洁生产工艺 关闭部分生产线、淘汰部分生产设备
		城镇生活污染治理工程	城镇雨水、污水收集工程 城镇生活污水处理工程 城镇生活垃圾收集与处理处置工程
	工程提升	养殖源污染防治与资源化工程	畜禽粪便收集与储存工程 畜禽粪便资源化利用工程 畜禽养殖污水收集与资源化工程
		河道面源污染修复工程	农田面源控制 河道湿地恢复 河段清淤疏浚
	监管/管理提升	COD 及氨氮环境管理绩效提升措施	流域监管能力建设工程

### 3.2 目标函数

优化模型以所构建的指标为基础, 选取流域在各环境绩效提升措施下水污染物削减量为决策变量, 提升措施投入资金量最小化为优化目标, 基准年为 2016 年, 目标年为 2020 年, 模型目标函数的表达式为:

$$\text{Minimize } f = \sum_j \sum_m \sum_t \text{SER}_{jmt} \cdot \text{CSR}_{jmt} + \sum_j \sum_m \sum_t \text{EER}_{jmt} \cdot \text{CER}_{jmt} + \sum_j \sum_z \sum_t \text{MER}_{jzt} \cdot \text{CMR}_{jzt} \quad (8)$$

式中:  $f$  为规划期流域绩效提升投入资金(亿元);  $j$  为水污染控制因子类型,  $j = 1, 2$ , 分别代表 COD 和氨氮;  $t$  为规划期内不同年份,  $t = 1, 2, 3, 4, 5$ ;  $m$  为水环境绩效提升措施类别,  $m = 1, 2, 3, 4$ ;  $z$  为水环境绩效监管/管理提升措施类别,  $n = 1$ ;  $\text{SER}_{jmt}$  为  $t$  年份结构提升措施  $m$  对应 COD 和氨氮削减量(t);  $\text{EER}_{jmt}$  为  $t$  年份工程提升措施  $m$  对应 COD 和氨氮削减量(t);  $\text{MER}_{jzt}$  为  $t$  年份监管提升措施  $z$  对应 COD 和氨氮削减量(t);  $\text{CSR}_{jmt}$  为  $t$  年份结构提升措施  $m$  对应 COD 和氨氮削减费用(万元/t);  $\text{CER}_{jmt}$  为  $t$  年份结构提升措施  $n$  对应 COD 和氨氮削减费用(万元/t);  $\text{CMR}_{jzt}$  为  $t$  年份结构提升措施  $z$  对应 COD 和氨氮削减费用(万元/t)。

### 3.3 约束条件

(1) 水环境管理绩效达标约束。

基于优化模型获得优化方案的环境管理绩效应不小于项目原参考方案的环境管理绩效, 其约束表达式如下:

$$\sum_j A_j \cdot \sum_j \sum_m \sum_t \text{SER}_{jmt} + \sum_j A_j \cdot \sum_j \sum_m \sum_t \text{EER}_{jmt} + \sum_j A_j \cdot \sum_j \sum_z \sum_t \text{MER}_{jzt} + B \geq EP \quad (9)$$

式中:  $EP$  为原参考方案在规划期末的水环境管理绩效值;  $A_j$  为 COD 和氨氮对应管理绩效基数值;  $B$  为研究区域绩效常数。

(2) 流域控制断面达标约束。

在环境绩效提升措施实施后, 招苏台河需实现流域六家子、四台子和新立屯断面全部达标(Ⅱ类), 以此确定控制断面达标约束如下:

$$\sum_j \sum_m \sum_t \text{SER}_{jmt} + \sum_j \sum_m \sum_t \text{EER}_{jmt} + \sum_j \sum_z \sum_t \text{MER}_{jzt} \geq TCT_j \quad (10)$$

式中:  $TCT_j$  为原参考方案中污染物  $j$  在规划期的削减目标量(t)。

(3) 污染物新增量约束。

通过核算并增加污染物新增量约束, 确保环境绩效提升工程措施的污染物削减量高于区域动态增长幅度, 实现优化方案动态变化, 见下式:

$$\sum_m \text{SER}_{jmt} + \sum_m \text{EER}_{jmt} + \sum_z \text{MER}_{jzt} \geq SA_{jt}, \forall j, t \quad (11)$$

式中:  $SA_{jt}$  为  $t$  时期水污染物  $j$  新增排污情况(t)。

(4) 各环境绩效提升措施下削减约束。

依照规划期内“强化结构提升、细化工程提升、实化监管提升”的目标要求, 提出对各环境绩效提升措施在不同规划时期下需完成一定的削减目标, 其约束表达式如下:

$$\sum_t \text{SER}_{jmt} \geq OSR_{jm} \quad (12)$$

$$\sum_t \text{EER}_{jmt} \geq OER_{jm} \quad (13)$$

$$\sum_t \text{MER}_{jzt} \geq OMR_{jz} \quad (13)$$

式中:  $OSR_{jm}$  为环境绩效结构提升措施  $m$  中  $j$  缩减限值(t);  $OER_{jm}$  为环境绩效工程提升措施  $m$  中  $j$  缩

减限值( $t$ );  $OMR_{jt}$  为环境绩效监管/管理提升措施  $z$  中  $j$  缩减限值( $t$ )。

(5) 非负约束。

在求解过程中, 待求的决策变量应为正数, 即为非负值, 对各决策变量进行非负约束。

$$SER_{jmt} > 0 \quad (15)$$

$$EER_{jmt} > 0 \quad (16)$$

$$MER_{jzt} \geq 0 \quad (17)$$

### 3.4 优化求解

模型投资和削减效果参数依据吉林省梨树县统计局出版的《梨树县国民经济统计资料》(2005-2010年)<sup>[31]</sup>、《梨树县统计年鉴》(2010-2015年)<sup>[32]</sup>、《全国水资源保护措施规划阶段补充技术规范》<sup>[33-34]</sup>、《饮用水源地规范化建设项目与投资技术指南》<sup>[35]</sup>及项目可研资料<sup>[36]</sup>, 详见表4<sup>[37-39]</sup>和表5。

表4 流域水环境绩效优化模型参数

Tab. 4 The parameters of water environment performance optimization model

项目	单位投资 /(万元·个 <sup>-1</sup> )	单位削减 COD /(t·个 <sup>-1</sup> )	单位削减氨氮 /(t·个 <sup>-1</sup> )
结构提升	3 820	15.63	13.23
城镇生活污染治理工程	1 700	32.42	1.96
养殖源污染防治与资源化工程	2 037	38.38	0.11
河道面源污染修复工程	1 703	0.66	0.005
监管/管理提升	10~30	--	--

表5 不同规划期环境绩效提升措施的削减目标

Tab. 5 Reduction objectives of environmental performance improvement measures in different planning stages

水污染物	年份	结构提升	工程提升			监管/管理提升
			城镇	养殖	河道	
COD	2016	56.4	907.6	796.8	10.7	9
	2017	57.0	904.7	796.9	11.1	9
	2018	57.6	912.4	800.2	10.9	9
	2019	59.0	901.7	799.7	11.0	9
	2020	56.6	913.4	797.6	11.4	9
NH <sub>3</sub> -N	2016	6.1	58.3	51.4	2.5	1.7
	2017	6.1	56.9	51.8	2.5	1.7
	2018	6.1	57.6	53.8	2.7	1.7
	2019	6.1	58.5	50.9	2.6	1.7
	2020	6.1	58.8	51.8	2.6	1.7

根据收集到的数据, 将模型参数整理后输入计算机, 利用 Lingo 8.0 软件编程并进行优化求解, 获得招苏台河流域在规划期间水环境管理资

金总投入为 15.09 亿元。模型优化结果方案配置见表 6。

表6 模型优化结果方案

Tab. 6 Model optimization scheme

水污染物	年份	结构提升	工程提升			监管/管理提升
			城镇	养殖	河道	
COD	2016	62.5	1005.4	882.7	11.9	10
	2017	63.1	1002.2	882.8	12.3	10
	2018	63.8	1010.7	886.4	12.1	10
	2019	65.4	998.9	885.9	12.2	10
	2020	62.7	1011.9	883.6	12.6	10
NH <sub>3</sub> -N	2016	6.24	60.0	52.9	2.56	1.8
	2017	6.27	58.6	53.3	2.57	1.8
	2018	6.3	59.3	55.4	2.74	1.8
	2019	6.27	60.2	52.4	2.72	1.8
	2020	6.25	60.6	53.3	2.69	1.8

### 3.5 结果分析与讨论

(1) 在满足以提升措施投入资金量最小为优化目标, 以控制断面水质达标, 水环境管理绩效和污染物削减量不低于原参考方案三个约束条件下的优化组合, 规划期内优化方案的总削减 COD、氨氮分别为 9 879.1 t、619.68 t, 流域水环境管理绩效提升总投资为 15.09 亿元, 到规划时限环境管理绩效提升值为 0.856。与研究区域的原参考方案相比水污染物 COD 和氨氮的削减量分别增加了 9.73% 和 2.93%, 投入的总资金量较案例参考方案的 17.1 亿元缩减了 11.75%, 规划期末的水环境管理绩效较参考方案的 0.818 增加了 4.7%。与招苏台河流域现状环境绩效值相比增加了 15.7%。

(2) 在实际工作中对绩效提升措施进行合理规划配置, 可满足水环境管理绩效要求, 便于 COD 和氨氮减排符合实际, 具有现实意义。其中工程提升措施削减效果最优, 城镇生活污染治理工程削减量分别占 COD、氨氮总削减量的 50.90% 和 48.21%。从绩效提升措施的水污染物削减潜力上来看, 招苏台河流域较为有效的提升措施为城镇生活污染治理和养殖源污染防治<sup>[40-41]</sup>。

## 4 结论

基于总量控制构建基于结构、工程、监管提升的招苏台河流域水环境管理绩效优化模型。以招苏台河流域为例, 得到在目标环境绩效下水污染物最优总量控制方案, 有效降低流域水环境管理绩效提升投入的总资金量, 为流域水环境管理和可持续发展



提供理论依据。

吉林省招苏台河流域在“十二五”时期水环境管理绩效值不断增长与城镇基础设施(污水管网、污水处理厂)的完善、水污染治理工程的实施密切相关。在规划期间招苏台河流域管理部门应侧重城镇生活源与养殖源污染控制方面,水污染治理工程的实施对流域环境管理绩效提升具有重要作用。

本文选取的流域绩效评价指标体系针对其他各省市水环境特性需进行有针对性的调整,因地制宜,改善水环境质量。基于污染物总量构建流域绩效提升系统涉及评价指标较多,今后仍需进一步完善相关数据,提高研究成果的指导性和可操作性。

#### 参考文献(References):

- [1] CONG J R, QING Z, JIAN P G, et al. Total amount control of pollutant and allocation of total permitted pollution discharge capacity[J]. Trans Tech Publications, 2013: 653-657. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.246-247.653.
- [2] 刘文琨, 肖伟华, 黄介生, 等. 水污染物总量控制研究进展及问题分析[J]. 中国农村水利水电, 2011(8): 9-12. (LIU W K, XIAO W H, HUANG J S, et al. The total amount control research progress and problem analysis of water pollution[J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(8): 9-12. (in Chinese))
- [3] 张修宇, 陈海涛. 我国水环境污染污染物总量控制研究现状[J]. 华北水利水电学院学报(自然科学版), 2011, 32(5): 142-145. (ZHANG X Y, CHEN H T. Current research situations of water pollutant total control in China[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2011, 32(5): 142-145. (in Chinese))
- [4] USEPA. Protocol for developing nutrient TMDLs[R]. Office of Water 4503F Washington DC: 20460, EPA 841-B-99-007, 1999.
- [5] 冯金鹏, 吴洪寿, 赵帆. 水环境污染总量控制回顾、现状及发展探讨[J]. 南水北调与水利科技, 2004, 2(1): 45-47. (FENG J P, WU H T, ZHAO F. A recollection and prospect of the water pollution[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2004, 2(1): 45-47. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2004.01.013.
- [6] 刘年磊, 蒋洪强, 卢亚灵, 等. 水污染物总量控制目标分配研究—考虑主体功能区环境约束[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(5): 80-87. (LIU N L, JIANG H Q, LU Y L, et al. Study on allocation for total amount controlling objectives of water pollutants—considering the constraint of environmental goals of national main function regions[J]. China Population Resources and Environment, 2014, 24(5): 80-87. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-2104.2014.05.013.
- [7] 王金南, 于雷, 万军, 等. 长江三角洲地区城市水环境承载力评估[J]. 中国环境科学, 2013, 33(6): 1147-1151. (WANG J N, YU L, WAN J, et al. Assessment on water environmental carrying capacity in the Yangtze river delta[J]. China Environmental Science, 2013, 33(6): 1147-1151. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2013.06.026.
- [8] WILLIAM T S. Ranking tributaries for setting remediation priorities in a TMDL context[J]. Chemosphere, 2008, 71(10): 1895.
- [9] 王浩. 实行最严格水资源管理制度关键技术支撑探析[J]. 中国水利, 2011(6): 28-29, 32. (WANG H. Exploration and analysis of key technological support for the strictest managerial system of water resources[J]. China Water Resources, 2011(6): 28-29, 32. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2011.06.015.
- [10] 左其亭, 李可任. 最严格水资源管理制度理论体系探讨[J]. 南水北调与水利科技, 2013(1): 34-38. (ZUO Q T, LI K R. Discussion on theoretical system of the strictest water resources management system[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013(1): 34-38. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2013.01034.
- [11] 陶洁, 左其亭, 薛会露, 等. 最严格水资源管理制度“三条红线”控制指标及确定方法[J]. 节水灌溉, 2012(4): 64-67. (TAO J, ZUO Q T, XUE H L, et al. Control indicators and determination methods of “three red lines” of the strictest water resources management system[J]. Water Saving Irrigation, 2012(4): 64-67. (in Chinese))
- [12] 郭唯, 左其亭, 靳润芳, 等. 郑州市最严格水资源管理绩效评估体系及应用[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(4): 86-91. (GUO W, ZUO Q T, JIN R F, et al. Performance evaluation system and application of the strictest water resources management in Zhengzhou[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(4): 86-91. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2014.04.019.
- [13] 游进军. 基于水资源多维属性的总量控制浅析[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(3): 48-52. (YOU J J. Discussion on gross control based on multi-attribute of water resources[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(3): 48-52. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2012.03048.
- [14] 王金南, 曹东, 曹颖, 等. 环境绩效评估: 考量地方环保实绩[J]. 环境保护, 2009(16): 23-24. (WANG J N, CAO D, CAO Y, et al. Environmental performance assessment: considering local environmental performance[J]. Environmental Protection, 2009(16): 23-24. (in Chinese)) DOI: 10.14026/j.cnki.0253-9705.2009.16.004.
- [15] 吴书悦, 杨雨曦, 彭宜蕾, 等. 区域用水总量控制模糊综合评价研究[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(4): 92-97. (WU S Y, YANG Y X, PENG Y Q, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of regional total water consumption control[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(4): 92-97. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2014.04.020.
- [16] 王丽, 王燕云, 吴晓红, 等. 区域性水环境绩效审计评价指标体系的构建及其运用研究[J]. 科技情报开发与经济, 2013, 23(11): 137-139. (WANG L, WANG Y Y, WU X H, et al. Study on the construction and application of the evaluation indexes system for regional water environment performance audit[J]. Sci Tech Information Development & Economy, 2013,

- 23(11): 137-139. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1005-6033.2013.11.053.
- [17] 李庄. 基于结构、工程、监管减排与排污权交易的污染物总量控制优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013. (LI Z. Optimization research in total amount control of pollutants based on the emission reduction of structure, Engineering, Management and Emission Trading[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013. (in Chinese))
- [18] 荣飞. 新乡市河流纳污能力及入河污染物总量控制研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2014. (RONG F. Study on pollutant holding capability of rivers and total quantity control in Xinxiang City[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2014. (in Chinese)) DOI: 10.7666/d.1542967.
- [19] 路瑞, 赵越, 续衍雪, 等. 从水污染防治角度出发的全国分省域水环境安全研究[J]. 中国环境管理, 2016, 8(3): 48-52. (LU R, ZHAO Y, XU Y X, et al. Study on water environment security for provinces based on water pollution control[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2016, 8(3): 48-52. (in Chinese)) DOI: 10.16868/j.cnki.1674-6252.2016.03.048.
- [20] 黄进. 国际标准中组织环境绩效评价指标体系的研究[J]. 标准科学, 2015(7): 77-84. (HUANG J. Research on environmental performance evaluation indicators in different international standards[J]. Standard Science, 2015(7): 77-84. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1674-5698.2015.07.018.
- [21] 黄进. 对 ISO14001:2015《环境管理体系要求及使用指南》“战略性环境管理”思维的理解[J]. 中国标准化, 2016(7): 84-88. (HUANG J. Understanding of the "strategic environmental management" thinking of ISO14001:2015 environmental management system requirements and usage guide[J]. China Standardization, 2016(7): 84-88. (in Chinese))
- [22] 路瑞, 赵越, 续衍雪, 等. 从水污染防治角度出发的全国分省域水环境安全研究[J]. 中国环境管理, 2016, 8(3): 48-52. (LU R, ZHAO Y, XU Y X, et al. Study on water environment security for provinces based on water pollution control[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2016, 8(3): 48-52. (in Chinese)) DOI: 10.16868/j.cnki.1674-6252.2016.03.048.
- [23] 王亚华, 吴丹. 淮河流域水环境管理绩效动态评价[J]. 中国人口资源与环境, 2012, 22(12): 32-38. (WANG YH, WU D. Dynamic performance evaluation of water environment management in Huaihe river[J]. China Population Resources and Environment, 2012, 22(12): 32-38. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-2104.2012.12.006.
- [24] 王明涛. 多指标综合评价中权数确定的利差、均方差决策方法[J]. 中国软科学, 1998(8): 100-107. (WANG M T. The decision method of difference and mean square for the determination of the weight in the multi index comprehensive evaluation[J]. China Soft Science Chin Soft Sci, 1998(8): 100-107. (in Chinese))
- [25] 戴全厚, 刘国彬, 刘明义, 等. 小流域生态经济系统可持续发展评价——以东北低山丘陵区黑牛河小流域为例[J]. 地理学报, 2005, 60(2): 209-218. (DAI Q H, LIU G B, LIU M Y, et al. An evaluation on sustainable development of economic system in small watershed in hilly area of northeast China [J]. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(2): 209-218. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn.0375-5444.2005.02.004.
- [26] 曾畅云, 李贵宝, 傅桦. 水环境安全及其指标体系研究以北京市为例[J]. 南水北调与水利科技, 2004, 2(4): 31-35. (ZENG C Y, LI G B, FU H. Study on water environment security and evaluation index system a case study of Beijing[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2004, 2(4): 31-35. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2004.04.010.
- [27] 袁永强. 辽河流域环境管理绩效及相关制度研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2014. (YUAN Y Q. LiaoHe river environment management performance and related policy research[D]. shen Yang: shenyang University, 2014. (in Chinese))
- [28] 刘圣, 娄华君, 贾绍凤, 等. 内蒙古准格尔旗地下水环境承载力评价[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(1): 45-50. (LIU S, LOU H J, JIA S F, et al. Assessment of groundwater environment carrying capacity in Zhungeer county of Inner Mongolia [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(1): 45-50. (in Chinese))
- [29] 孔祥娟, 杨榕, 柴宏洋, 等. 城市水环境系统综合评价体系研究与示范[J]. 给水排水, 2013, 39(10): 21-23. (KONG X J, YANG R, CHAI H X, et al. Research and demonstration on comprehensive evaluation system of urban water environment system[J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39(10): 21-23. (in Chinese)) doi: 10.3969/j.issn.1002-8471.2013.10.005.
- [30] 华迎春, 陈卫兵. 区域污染物总量控制动态管理模式探索[J]. 环境经济, 2007(6): 28-32. (HUA Y C, CHEN W B. Study on dynamic management mode of total amount control of regional pollutants[J]. Environmental Economy, 2007(6): 28-32. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-724X.2007.06.006.
- [31] 吉林省梨树县统计局. 梨树县国民经济统计资料[M]. 四平: 吉林省内部资料出版社, 2005~2010. (Statistical Bureau of Lishu County in Jilin Province. National economic statistics of Lishu County[M]. SiPing: Jilin Internal Data Press, 2005~2010. (in Chinese))
- [32] 吉林省梨树县统计局, 国家统计局梨树调查队. 梨树县统计年鉴[M]. 四平: 吉林省内部资料出版社, 2010~2015. (Statistical Bureau of Lishu County in Jilin Province, Lishu survey team of the National Bureau of Statistics. Statistical Yearbook of Lishu County[M]. SiPing: Jilin Internal Data Press, 2010~2015. (in Chinese))
- [33] 全国水资源保护规划技术大纲[R]. 北京: 水利部水利水电规划设计总院, 2012. (Technical outline of national water resources protection planning [R]. Beijing: China Renewable Energy Engineering Institute, 2012. (in Chinese))
- [34] 全国水资源保护措施规划阶段补充技术规定[R]. 北京: 水利部水利水电规划设计总院, 2014. (Technical regulations are added to the national water resources protection measures in the planning stage[R]. Beijing: China Renewable Energy Engineering Institute, 2014. (in Chinese))

(下转第 145 页)



- [17] 张泽鹏,朱玉晨,郝奇琛,等. 呼和浩特盆地地下水流系统变异机制及其资源效应[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(2): 63-68. (ZHANG Z P, ZHU Y C, HAO Q C, et al. A study on variation mechanism of groundwater flow system in the Hohhot basin and its resources effect analysis[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(2): 63-68. (in Chinese)) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2017.02.10.
- [18] 袁伟,郭宗楼,袁华. 污水灌溉的研究现状及利用前景分析[J]. 中国农村水利水电, 2005(6): 19-21. (YUAN Wei, GUO Zonglou, YUAN Hua. Analyses of the research status and the application of sewage water irrigation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2005(6): 19-21. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2005.06.006.
- [19] 李绪谦. 环境水化学[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 2001. (LI X Q. Water environment chemistry[M]. Changchun: Jilin Scientific and Technology Press, 2001, 63-65. (in Chinese))
- [20] ABDELKADER R, LARBI D, RIHAB H, et al. Geochemical characterization of groundwater from shallow aquifer surrounding Fetzara Lake N. E. Algeria[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2012, 5(1): 1-13. DOI: 10.1007/s12517-010-0202-6.
- [21] MAYO A L, LOUCKS M D. Solute and isotopic geochemistry and groundwater flow in the Central Wasatch Range, Utah[J]. Journal of Hydrology, 1995, 172: 31-59. DOI: 10.1016/0022-1694(95)02748-E.
- [22] MOHSEN J. Chemical characteristics of groundwater in parts of mountainous region, Alvand, Hamadan, Iran[J]. Environmental Geology, 2006, 51(3): 433-446. DOI: 10.1007/s00254-006-0338-6.
- [23] 王礼恒,董艳辉,宋凡,等. 甘肃石油河流域地下水补给来源与演化特征分析[J]. 干旱区地理, 2017, 40(1): 54-61. (WANG L H, DONG Y H, SONG F, et al. Recharge sources and hydrogeochemical properties of groundwater in the Shiyou River, Gansu Province[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(1): 54-61. (in Chinese)) DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2017.01.007.
- [24] JANKOWSKI J, ACWORTH R I. Impact of debris-flow deposits on hydrogeochemical processes and the development of dryland salinity in the Yass River catchment, New South Wales[J]. Australia Hydrogeology Journal, 1997, 5(4): 71-88. DOI: 10.1007/s100400050119.
- [25] 赵文涛,王喜宽,张青,等. 河套地区土壤矿物组成分析及与各元素的关系[J]. 物探与化探, 2009, 33(1): 16-19. (ZHAO W T, WANG X K, ZHANG Q, et al. An analysis of the composition of soil minerals and the relationships of various elements in the HeTao area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2009, 33(1): 16-19. (in Chinese))
- [26] KUMAR S K, RAMMOHAN V, SAHAYAM J D, et al. Assessment of groundwater quality and hydrogeochemistry of Manimuktha River basin, Tamil Nadu, India[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 159: 341-351. DOI: 10.1007/s10661-008-0633-7.
- [27] 孙一博,刘鹏飞,王文科,等. 渭河流域地下水的水化学特征及形成机制[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(2): 152-158. (SUN Y B, LIU P F, WANG W K, et al. Chemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Wei River Basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(2): 152-158. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2016.02.027.
- [28] TRUESDELL A H. Effects of physical processes on geothermal fluids. Application of geochemistry in geothermal reservoir development[M]. Rome: UNITAR / CTNDP publication, 1991, 71-92.

(上接第 135 页)

- [35] 饮用水源地规范化建设项目与投资技术指南[R]. 北京: 江湖湖泊专项技术指南编制组, 2013. (Technical guidelines for standardized construction projects and investment of drinking water sources[R]. Beijing: Compilation group of special technical guidelines for rivers and lakes, 2014. (in Chinese))
- [36] 招苏台河流域梨树县控制单元水污染防治方案[R]. 北京: 中国环境科学研究院, 2016. (The water pollution prevention and control plan of Lishu county control unit in Zhaosutai River Basin[R]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2016. (in Chinese))
- [37] M G KANG, G M LEE, I H KO. Evaluating watershed management within a river basin context using an integrated indicator system[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2010, 136(2): 258-267. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2010)136:2(258).
- [38] 吴丹,王亚华. 中国七大流域水资源综合管理绩效动态评价[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(1): 32-38. (WU D, WANG Y H. Dynamic performance evaluation of water resources management in seven river basin of China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(1): 32-38. (in Chinese)) DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201401005.
- [39] 哈力曼·哈麦拉,田义文. 我国污染物总量控制制度研究[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(5): 2237-2238. (HALIMAN · H, TIAN Y W. Research on the system of total hanount control of pollutants in China[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(5): 2237-2238. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0517-6611.2013.05.123.
- [40] H CHEN, C Y DUAN. Research on the pattern of comprehensive improvement of small watershed pollution in Guangxi Province[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014(2): 394-398. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.535.394
- [41] 张勇,汤洁,李昭阳,等. 吉林省招苏台河流域农业非点源污染特征研究[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(12): 29-34. (ZHANG Y, TANG J, LI Z Y, et al. Characteristics of agricultural nonpoint source pollution in Zhaosutai basin of Jilin Province[J]. Environmental Pollution and Control, 2015, 37(12): 29-34. (in Chinese)) DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2015.12.006.