

文章编号: 1672-3031(2017)03-0180-07

水网连通下山东蓝色半岛经济区水资源优化调配研究

冷曼曼^{1,2}, 赵进勇³, 李庆国², 张 晶³, 付意成³

(1. 北京林业大学 水土保持学院水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 济南大学 资源与环境学院, 山东 济南 250022; 3. 中国水利水电科学研究院 水环境研究所, 北京 100038)

摘要: 对山东半岛蓝色经济区进行水资源优化配置, 利于解决区内水资源短缺, 促进经济区发展及规划实现。以山东现代水网建设为依托, 针对山东蓝色地区水系连通的水资源可持续开发利用的功能需求以及河库连通的二元水网特征, 构建水资源优化调配模型。模型基于最严格水资源管理制度需求, 通过对现状及规划水平年水资源供需预测分析, 开展山东半岛蓝色经济区水系连通下的分层水资源优化配置研究。研究结果为优化区域水资源配置方案, 实现地区水资源与社会经济协调发展提供理论支撑。

关键词: 山东半岛蓝色经济区; 水资源优化配置; 水网; 分层

中图分类号: TV213.9

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2017.03.003

1 研究背景

山东半岛蓝色经济区位于环渤海和东北亚经济圈的关键地带, 是山东省“十二五”重点发展区域, 因此, 经济区的规划与发展必然会给本就严峻的区域水问题带来更大挑战。山东现代水网战略是营造优美舒适的自然、人文水环境和水生态景观及绿色经济产业、建设文明蓝色经济区的一项重要支撑措施^[1]。山东省的现代水网即在已建和规划的各类水利工程的基础上, 以南水北调和胶东调水为骨干, 辅以区域水系联网工程, 共同构成山东省“南北贯通、东西互济、蓄引结合、库河串联、城乡一体”的现代化水网, 为山东社会经济的腾飞提供助力。河湖水系连通性是流域内河流与湖泊、河道与河漫滩之间物质流、能量流、信息流和物种流保持畅通的基本条件。恢复河湖水系连通性规划除了论证恢复连通性的生态功能以外, 还需论证恢复连通性在水资源配置, 水资源保护和防洪抗旱方面的作用^[2]。本文以山东现代水网建设为依托, 针对山东蓝色地区水系连通的水资源可持续开发利用功能需求以及河库连通的二元水网特征, 构建水资源优化调配模型。模型基于最严格水资源管理制度需求, 通过对现状及规划水平年水资源供需预测分析, 开展山东半岛蓝色经济区水系连通下的水资源优化配置研究。

基于现代水网规划及胶东调水路线, 处于水网连通下的山东半岛蓝色经济区为较为缺水的青岛、烟台、威海和潍坊地区。而东营、日照和滨州的两个县在大的连通体系之外, 可单独分析, 本文不再考虑。因此, 本文研究分区为青岛、烟台、威海和潍坊。山东半岛蓝色经济区供水水源分为地表水、地下水、引黄水和引江水, 用水对象可分为生活用水、工业用水、农业用水和生态环境用水, 区域调水路线和水资源配置系统概化见图1。

2 水网联通下山东蓝色半岛经济区水资源优化调配模型

2.1 基于最严格水资源管理制度的水资源优化配置模型

(1) 目标与目标函数。水资源配置模型是基于水资源开发利用、节约用水和保护、水资源供需预

收稿日期: 2016-08-18

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201401003, 201501030, 201201113)

作者简介: 冷曼曼(1991-), 女, 山东鱼台人, 博士生, 主要从事水资源优化配置和流域水文循环研究。

E-mail: 672454740@qq.com

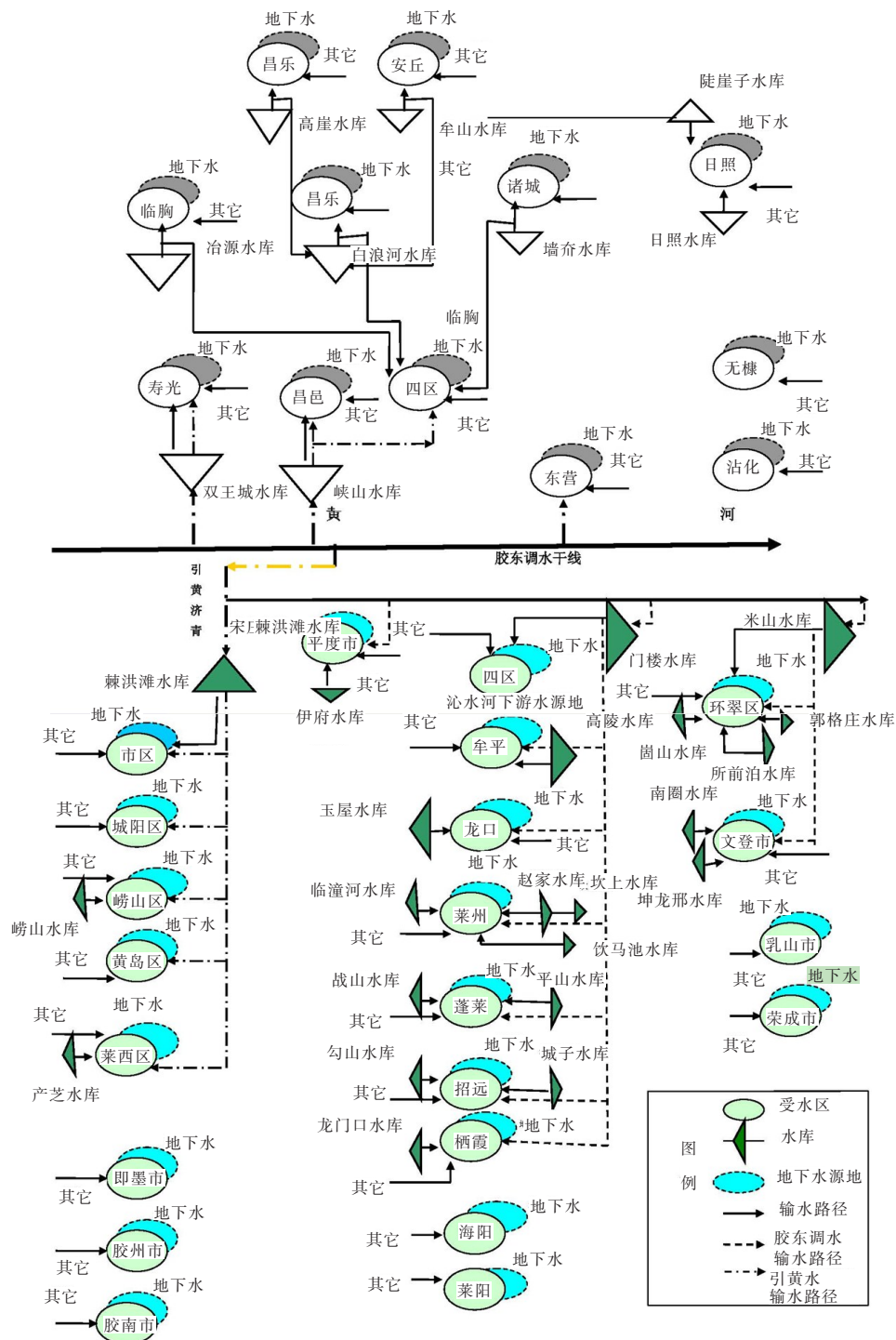


图1 山东半岛蓝色经济区调水路线和水资源配置系统概化图

测等分析制定的总体布局和方案，与最严格水资源管理制度中的“三条红线”和“四项制度”密切联系。水资源优化配置模型的有效实施要以最严格水资源管理制度为保障^[3]。水资源优化配置模型的社会目标与水量约束、经济目标与用水效率约束、环境目标与水质约束均与最严格水资源管理制度的用水总量控制制度、用水效率控制红线和限制纳污红线互相对应。基于以上论述，考虑水资源配置的目的是支撑整个大系统的社会、经济、环境的全面协调和可持续发展，其目标常设为实现社会、经济和环境的综合效益最大化^[4-6]。即

$$F(X) = \text{opt} \{f_1(x), f_2(x), f_3(x)\} \quad (1)$$

依据用水总量控制制度设定社会目标：

$$\min f_1(x) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} \left[D_j^k - \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k \right] \quad (2)$$

式中： x_{ij}^k 为水源 i 向 k 分区 j 种供水目标的供水量，万 m^3 ； D_j^k 为 k 分区 j 种供水目标的需水量，万 m^3 。

依据用水效率控制指标设定经济目标：

$$\max f_2(x) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} \sum_{i=1}^{I(k)} (b_{ij}^k - c_{ij}^k) x_{ij}^k \alpha_i^k \beta_j^k w_k \quad (3)$$

式中： b_{ij}^k 为效益系数，元/ m^3 ； c_{ij}^k 为费用系数，元/ m^3 ； α_i^k 为供水次序系数； β_j^k 为用水公平系数； w_k 为 k 分区权重系数。

依据限制纳污控制指标，以区域性污染物(COD)排放量最小作为环境效益目标，即：

$$\min f_3(x) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} 0.01 d_j p_j \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k \quad (4)$$

式中： d_j 为 j 种供水目标单位废水排放量中重要污染物COD含量； p_j 为 j 种供水目标污水排放系数。

(2)约束条件。约束条件的选取不仅要依照研究区的情况，还要严格按照最严格水资源管理制度量化具体指标。

①用水总量约束。

可供水量约束：

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} x_{ij}^k \leq W_{\text{公共}} + W_{\text{独立}} \quad (5)$$

式中： $W_{\text{公共}}$ 为共同拥有的水，即引黄水和引江水； $W_{\text{独立}}$ 为本身独有的水，即地表水和地下水。

输水能力约束：

$$\sum_{j=1}^{J(k)} x_{ij}^k \leq S_i^k \quad (6)$$

式中： S_i^k 为 k 分区 i 水源的最大输水能力。

②用水效率约束。可设定用水户最高用水定额及最低用水定额，进行水资源需水预测，建立用水效率约束：

$$D_{j\min}^k \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k \leq D_{j\max}^k \quad (7)$$

式中： $D_{j\min}^k$ 、 $D_{j\max}^k$ 分别为 k 分区 j 种供水目标的最小和最大需水量

③水质约束。第3条红线为限制纳污控制红线，即污染物排放浓度不能大于其允许排放量的最高浓度，污染物排放量不能超过其允许的总排放量，并满足用水户对水质要求的约束：

$$d_{kj}^c \leq d_o^c \quad (8)$$

式中： d_{kj}^c 为 k 分区 j 种供水目标的污染物COD浓度； d_o^c 为污染物COD达标排放规定的浓度。

④变量非负约束及其它各个分区供水设施对引黄水的分水比例等一些约束条件，本文暂不考虑。

2.2 分层协调式多目标优化模型方法 研究区水资源配置问题复杂，不确定因素众多，不同区域优化目标存在区别，系统内供水水源及供水对象多样，因此，建立区域复杂巨系统多目标水资源优化调配模型存在问题难以表述，模型变量多、维数高，且是多目标等。传统优化建模及求解方法往往难以实现或成效不佳。鉴此，本文基于智能算法及多目标模糊优选模型提出分层协调式求解方法^[7]。具体如下：(1)根据重要水库节点将研究区分区，进行各区水资源需求分析；(2)针对山东半岛蓝色经济区水网连通特征，把水源分为当地水源与公共水源，并依据社会经济原则、水管理制度以及水资源承载力及技术条件原则，以公共水源对象，拟定大系统配水方案；(3)依据各区水资源可持续开发利用目标与需求，基于最严格的水资源管理制度构建分区水资源优化调配模型，并运用群智能算

法对模型进行求解^[8]，求出给定供水方案下各分区典型年水资源优化配置方案；(4)依据大系统总体目标要求，在给出分区优化配置结果的基础上，采用多目标模糊优选模型对方案集进行优选，得到蓝色半岛经济区较优水资源配置方案，并把较优的大系统配水方式反馈回子系统^[9]；(5)通过上层反馈信息，进一步微调初拟配水方案，并再次进行各分区水资源优化配置，通过这种分层协调式多目标理论来实现大系统和分区水资源配置方案间的优化和协调，最终选出山东半岛蓝色经济区水资源优化配置方案。方法步骤示意图见图2。

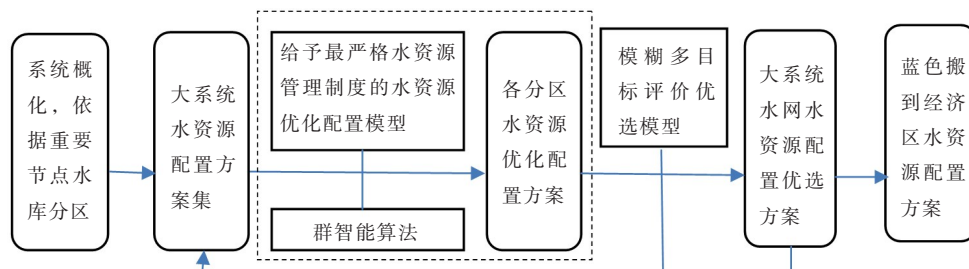


图2 分层协调式多目标优化模型方法

3 山东蓝色半岛经济区水资源优化配置

3.1 模型参数分析

(1)用水部门公平系数。确定用水优先权是模型分析计算的前提。本文根据研究用水部门的性质和重要程度，按照“先生活，后生产”的原则，将各用水部门用水的优先程度转化为 $[0, 1]$ 区间上的系数 β_j^k ，利用下式确定^[4]：

$$\beta_j^k = (1 + n_{\max}^k - n_j^k) / \left[\sum_{k=1}^K (1 + n_{\max}^k - n_j^k) \right] \quad (9)$$

式中： $n_{\max}^k$ 为在某分区中4个用水部门最大的比重， n_j^k 为某分区中某一用水部门的比重。

经计算，青岛市各用水户的生活、工业、农业和生态用水公平系数分别为0.4、0.3、0.2、0.1；威海市各用水户的生活、工业、农业和生态用水公平系数分别为0.4、0.2、0.1、0.3；烟台市各用水户的生活、工业、农业和生态用水公平系数分别为0.4、0.2、0.3、0.1；潍坊市各用水户的生活、工业、农业和生态用水公平系数分别为0.4、0.2、0.3、0.1。

(2)供水次序系数。根据当地各水源调节能力的不同，将当地水资源的供水次序划分成不同的优先级，具有较低调节能力的水源先供水，具有较高调节能力的水源后供水。供水次序为地表水工程供水，地下水工程供水；对于客水，根据客水的成本和实际情况，通常作为当地水资源的补充水源；还有海水利用，污水回用等。供水次序系数 α_i^k 的计算公式为：

$$\alpha_i^k = (1 + n_{\max}^k - n_i^k) / \left[\sum_{k=1}^K (1 + n_{\max}^k - n_i^k) \right] \quad (10)$$

式中： $m_{\max}^k$ 为在某分区中供水部门最大的比重； m_i^k 为某分区中某一供水部门的比重。

(3)用水效益系数。工业用水的效益系数，取用水定额（工业万元产值取水量，单位： $\text{m}^3/\text{万元}$ ）的倒数：

$$b_{\text{工},j} = \frac{1}{D} \quad (11)$$

式中： $b_{\text{工},j}$ 为工业用水净效益系数； D 为工业万元增加值用水量。

生活与环境用水效益系数一般难以定量化，为保证其得到满足，效益系数赋予较大值。农业灌溉用水效益系数按灌溉后的农业增产效益乘以水利分摊系数确定。具体分摊系数可参考有关规定。单方水效益系数可通过单位面积灌溉净效益和用水定额来求得，即：

$$b_{\text{农},j} = \frac{B_{\text{农},i}}{M_{\text{农},i}} \quad (12)$$

式中： $b_{农,j}$ 为第*i*种农作物单方水净效益系数，即农业用水效益系数； $B_{农,i}$ 、 $M_{农,i}$ 分别为第*i*种农作物单位面积灌溉净效益和耗水定额。

灌溉效益水利分摊系数一般为0.20~0.60，本文取0.50。依据各市的水资源规划报告，计算出青岛市、烟台市、威海市和潍坊市的用水效益系数。本文以威海市为例分析其效益系数，见表1。

表1 威海市用水效益系数

	2012年				2015年				2020年			
	生活	工业	农业	生态	生活	工业	农业	生态	生活	工业	农业	生态
文登市	0.06	0.04	0.0294	0.09	0.09	0.07	0.031	1.1	0.13	0.09	0.0333	1.4
环翠区	0.06	0.04	0.0125	0.09	0.09	0.07	0.015	1.1	0.13	0.09	0.0167	1.4
荣成市	0.06	0.04	0.0033	0.09	0.09	0.07	0.004	1.1	0.13	0.09	0.005	1.4
乳山市	0.06	0.04	0.0033	0.09	0.09	0.07	0.004	1.1	0.13	0.09	0.005	1.4

(4)费用系数。不同水源供水给各用水部门的费用系数，可参考其水费征收标准确定。对于有资料的水源工程，根据资料计算确定；缺乏资料时，参考邻近地区同类水源工程选取。依据各市的统计年鉴，得出青岛市、威海市、烟台市和潍坊市各费用系数。同样以威海为例费用系数见表2。

表2 威海市各费用系数

	2012年				2015年				2020年			
	生活	工业	农业	生态	生活	工业	农业	生态	生活	工业	农业	生态
文登市	1.6	1.9	0.4	0.3	1.7	2.0	0.4	0.3	1.9	2.2	0.5	0.4
环翠区	2.8	3.3	0.6	0.6	3.0	3.5	0.7	0.7	3.3	3.8	0.8	0.8
荣成市	1.6	1.9	0.4	0.4	1.7	2.0	0.4	0.4	1.9	2.2	0.5	0.5
乳山市	1.7	2.0	0.5	0.5	1.8	2.1	0.5	0.5	2.0	2.3	0.6	0.6

(5)需水量上下限及可供水量约束。对青岛、威海、烟台、潍坊的生活、工业、农业和生态需水量进行预测分析。依据山东省的水资源规划报告，分析确定2015年、2020年山东半岛蓝色经济区的水资源地表水、地下水、引黄水和引江水的最大供水量。

3.2 大系统水资源配置方式与方案集 从研究区地市的水资源状况看，当地的地表水和地下水无法满足生活和生产需求，基本上处于缺水状况。本文以胶东调水和南水北调东线的一部分工程为基础，研究在整个水网连通条件下，引黄和引江水的调度问题。依据配水方案的可实施性和山东半岛蓝色经济区的实际状况，以均衡青岛、威海、烟台和潍坊的供水量为目的，通过采用行政、经济、法制和科技等一系列手段，充分发挥水资源最大的社会、经济和生态效益。依此总体原则，本文设定社会效益、水资源管理需求、水资源承载能力与技术条件可行性原则^[10-11]，并对各原则进行细化，进而明确水资源配置方式，以不同配置方式的组合，在水量不变的前提下，可初拟得到山东半岛蓝色经济区20个水资源配置方案见表3。

3.3 水资源配置优化方案成果及分析 采用前文提出的水资源优化配置模型和分层协调式求解方法，将20种初拟的基于不同原则和目标下的配水方案作为初始模型输入代入各分区进行优化配置，将各分区的优化配置结果反馈到大系统，在方案优选的基础上调整水网总调配方案，再到各分区进行优化配置，反复调整直到满足总目标要求。山东半岛蓝色经济区系统的水资源优化配置较优方案为方案一，既考虑了缺水量最小、经济效益最大，同时又兼顾了生态效益，最终得到优选方案见表4。

该优选方案的缺水量和经济效益指标如下：2012年50%、75%的缺水量为105 678万m³、219 655万m³；2015年50%、75%的缺水量为106 732万m³、154 861万m³；2020年50%、75%的缺水量为35 193万m³、39 328万m³。2012年50%、75%的经济效益值为316 042万元、285 435万元；

表3 山东半岛蓝色经济区初拟方案集

方案名称	调配方式								
	社会经济原则		水管理原则				水承载力原则与技术条件可行性		
	缺水量最小	效益最大	最严格水资源管理制度	节水措施	水权约束	分质供水	总量控制	丰增枯减	合理流转
方案1	▼	▼							
方案2			▼	▼	▼	▼			
方案3							▼	▼	▼
方案4	▼	▼	▼						
方案5	▼				▼				
方案6	▼					▼			
方案7	▼			▼			▼		
方案8	▼		▼					▼	
方案9	▼			▼		▼	▼		
方案10		▼	▼		▼				
方案11	▼	▼		▼					
方案12	▼	▼			▼				▼
方案13	▼			▼			▼		
方案14		▼	▼		▼			▼	
方案15	▼	▼	▼		▼		▼		
方案16		▼	▼	▼	▼	▼	▼		
方案17			▼	▼		▼		▼	▼
方案18	▼		▼			▼			
方案19		▼			▼		▼		
方案20	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼

表4 缺水量最小、经济效益最大的水资源配置方案

(单位: 万 m³)

分区	年份	需水量		供水量		余(+)缺(-)水量	
		p=50%	p=75%	p=50%	p=75%	p=50%	p=75%
青岛	2012年	130565	153412	108020	98170	-22545	-55242
	2015年	156674	161638	125895	125864	-30779	-35774
	2020年	144184	144182	144184	147300	0	3118
威海	2012年	79578	88140	79578	45627	0	-42513
	2015年	80637	88430	54347	54687	-26290	-33743
	2020年	82774	82775	65233	65248	-17541	-17527
烟台	2012年	166323	180004	127671	117673	-38652	-62331
	2015年	174093	187560	128715	128541	-45378	-59019
	2020年	188896	188896	163248	163977	-25648	-24919
潍坊	2012年	187596	212382	174429	152813	-13167	-59569
	2015年	199520	221931	195235	195606	-4285	-26325
	2020年	203514	203540	211510	203540	7996	0

2015年50%、75%的经济效益值为467 861万元、468 320万元；2020年50%、75%的经济效益值为744 265万元、740 268万元。2012年、2015年和2020年在不同的保证率下，缺水量是逐渐减少的，由此可见，客水资源对山东半岛蓝色经济区的水资源紧缺程度具有缓解作用，在合理调度客水的情况下，虽仍然缺水，但是在分配到各分区，在充分满足生活、工业用水下，生态环境用水达到70%以上，农业用水达到50%以上，较好地体现了现代水网水资源配置目的，缓解了当地水资源紧缺程度。

4 结语

依据山东半岛蓝色经济区需要及水资源短缺特点,基于最严格的水资源管理制度与水网连通理论,建立了适于山东半岛蓝色经济区的多目标分层协调水资源优化配置模型方法。最终优化得到山东半岛蓝色经济区水资源配置方案,为实现现代水网水资源配置的战略目的、缓解了当地的水资源紧缺程度提供了一定的理论基础。

优化模型方法的方案集合初拟是关键,需要较多的经验或者大数量的备选方案供模型分析,为此,本文的模型初拟方案集尚需进一步丰富,提供更多满足不同目标的组合,为最终优化方案的确定提供扎实可靠的基础。同时,本文侧重于水资源配置的经济效益研究,对水资源的生态环境效果研究不够,尚需进一步探讨。

参 考 文 献:

- [1] 崔国韬,左其亭.河湖水系连通与最严格水资源管理的关系[J].南水北调与水利科技,2012,10(2):129-132.
- [2] 董哲仁,王宏涛,赵进勇,等.恢复河湖水系连通性生态调查与规划方法[J].水利水电技术,2013,44(11):8-13.
- [3] 王伟荣,张玲玲.最严格水资源管理制度背景下的水资源配置分析[J].水能源科学,2014,32(2):38-41.
- [4] 刘利.滨海缺水城市水资源优化利用研究[D].青岛:中国海洋大学,2011.
- [5] 李宗礼,李新攀,赵文举,等.基于多目标遗传算法的石羊河流域水资源优化配置模型[J].兰州理工大学学报,2013,39(2):52-55.
- [6] 李其峰,谢新民,付意成,等.基于三次平衡的五家渠市水资源优化配置研究[J].水电能源科学,2011,29(3):16-19.
- [7] 王凌著.智能优化算法及其应用[M].北京:清华大学出版社,2001.
- [8] 闫志宏,刘彬,张婷,等.基于多目标粒子群算法的水资源优化配置研究[J].水能源科学,2014,32(2):35-37.
- [9] 周慧成,陈守煜.具有模糊约束的多阶段多目标系统模糊优化理论与模型[J].水利学报,1992(2):29-36.
- [10] 吴险峰,王丽萍.枣庄城市复杂多水源供水优化配置模型[J].武汉水利电力大学学报,2000(1):30-32.
- [11] 王浩,陈敏建,秦大勇,等.西北地区水资源合理配置和承载能力研究[M].郑州:黄河水利出版社,2003.

Optimal allocation of water resources in the Blue Economy Region of Shandong Peninsular based on water network interconnection

LENG Manman^{1,2}, ZHAO Jinyong³, LI Qingguo², ZHANG Jing³, FU Yicheng³

(1. Key laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification, Ministry of Education/Water and Soil Conservation College, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. School of Resources and Environment, University of Jinan, Ji'nan 250022, China;

3. Water Environmental Department, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The water resources optimal allocation in the Blue Economy Region of Shandong Peninsular will help to solve water resources shortage problems, promote economic development and implement plans. Based on Shandong modern water network construction, the water resources optimal allocation model was constructed, focusing on functional requirements of sustainable development and utilization of water reservoirs interconnection. Through analyzing and predicting the water supply and demand balance of the current and planned year, the strictest water resources management system was used to research the hierarchical water resources optimal allocation in the Blue Economy Region of Shandong Peninsular. The results provide the optimization of regional water resources allocation schemes and theoretical support for realizing the coordinated development of regional water resources and social economy.

Keywords: Blue Economy Region of Shandong Peninsular; water resources optimal allocation; water network; hierarchical

(责任编辑:王成丽)