

# 基于水资源合理配置的流域水土保持结构优化模型研究

何长高<sup>1,2</sup>, 董增川<sup>1</sup>, 陈卫宾<sup>1</sup>, 石景元<sup>1</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 江西省水利厅, 江西 南昌 330009)

摘要: 利用水土保持措施调控流域来水的模拟结果, 建立了基于水资源优化配置的水土保持措施优化配置多目标耦合模型。利用遗传算法对模型进行了优化求解, 得出了平水年来水过程下不同规划水平年最优水土保持措施配置及水资源优化配置结果, 为流域水土流失治理和水资源调控提供了新的思路和参考依据。

关键词: 水资源; 优化配置; 水土保持; 多目标

中图分类号: TV213 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2008)11-1738-05

作者简介: 何长高(1962-), 男, 教授级高级工程师, 博士研究生, 主要研究方向为水资源高效利用及管理。E-mail: hocg@jxsl.gov.cn。

## Scale optimization of water and soil conservation measures based on rational allocation of water resources

HE Chang-gao<sup>1,2</sup>, DONG Zeng-chuan<sup>1</sup>, CHEN Wei-bin<sup>1</sup>, SHI Jing-yuan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Water Resources Department of Jiangxi Province, Nanchang 330009, China)

Abstract: Using the simulated results of hydrological response to water and soil conservation, a coupling model was established, that is, the optimization model of water and soil conservation measures based on the optimized allocation of water resources. The optimization solution to the model was obtained through GA. The best scale of water and soil conservation measures was obtained based on the optimized allocation of water resources in different planning years. It would offer a new way and references for water and soil erosion control and rectification and regulation of water resources.

Key words: water resources; optimized allocation; water and soil conservation; multi-objective

## 0 研究背景

水土保持会改变区域水资源的形成、循环规律和过程<sup>[1-4]</sup>。针对在优化配置水土保持措施时, 未考虑不同措施对流域径流及水资源的影响的现状, 以江西省修河流域大垵水库以上集水区为研究区域, 在模拟分析不同水土保持措施对水库来水影响的基础上, 建立起了基于水资源优化配置的水土保持措施结构优化配置模型, 以期为流域水土流失治理和水资源调控提供更为科学的参考依据。

## 1 模型建立

### 1.1 目标函数

第一, 相对水量最小目标。该目标是使各用水部门相对缺水总量最小。它考虑到了社会各部门之间的利益, 有利于各部门之间的协调发展, 体现了水资源配置的协调性和公平性。

第二, 经济效益最大目标。实现水土保持经济效益

以及研究区域内的不同生产部门的供水效益最大化。

### (1) 相对水量最小优化目标

根据区域内各水源的供水范围, 可将水源划分成两类: 当地水源(仅供所在供水子区)和水库水(各供水子区可共用)。设区域内供水区划分为  $K$  个子区,  $k=1, 2, \dots, K$ , 第  $k$  子区有  $I(k)$  个当地水源、 $J(k)$  个用水部门。区域内有  $C$  个水库。因此, 对于  $k$  子区而言是  $I(k) + C$  个水源和  $J(k)$  个用户的水资源优化配置问题。

$$\min Q_{\text{缺}} = \min \sum_t \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} \left( \frac{Q_{kjt} - \left( \sum_{i=1}^{I(k)} WG_{ijt}^k + \sum_{c=1}^C WG_{cjt}^k \right)}{Q_{kjt}} \right), \quad (1)$$

基金项目: 2005年江西省重大关键技术攻关计划项目(200501A0500101)

收稿日期: 2008-09-18

式中,  $Q_{缺}$  为各部门相对各计算时段缺水之和,  $Q_{kjt}$  为  $k$  供水子区  $j$  用水部门  $t$  计算时段的需水量,  $WG_{ijt}^k$  为  $t$  计算时段  $i$  当地水源向  $k$  供水子区  $j$  用户的供水量,  $WG_{cjt}^k$  为  $t$  计算时段  $c$  水库向  $k$  供水子区  $j$  用户的供水量。

(2) 经济效益最大优化目标

设研究区划分为  $M$  个治理区, 第  $m$  治理区内有  $N(m)$  种水土保持措施。

$$\max f(x) = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} (\sum_{i=1}^{I(k)} b_{ij}^k \cdot WG_{ijt}^k + \sum_{c=1}^C b_{cj}^k \cdot WG_{cjt}^k) + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N(m)} b_{mn} \cdot X_{mn} \quad (2)$$

式中,  $b_{ij}^k$  为  $i$  当地水源向  $k$  供水子区  $j$  用户单位供水量的效益系数,  $b_{cj}^k$  为  $c$  水库向  $k$  供水子区  $j$  用户单位供水量的效益系数,  $b_{mn}$  为  $m$  治理区第  $n$  种水土保持措施的效益系数,  $X_{mn}$  为  $m$  治理区第  $n$  种水土保持措施的措施量。

1.2 决策变量

决策变量为各种水土保持措施的实施面积  $X_{mn}$  以及各类用水户分配水量  $WG_{ijt}^k$ 、 $WG_{cjt}^k$  作为决策变量。

1.3 约束条件的建立

1.3.1 减沙约束

各项措施总的减沙量不小于流域水土保持措施泥沙治理目标。

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N(m)} X_{mn} \Delta W_{ns} \geq W_{m0} \quad (3)$$

式中,  $\Delta W_{ns}$  为第  $n$  种坡面治理措施单位面积的年减少土壤流失量,  $N(m)$  为第  $m$  治理区坡面治理措施的种类,  $W_{m0}$  为第  $m$  治理区内土壤流失年减少量治理目标。

1.3.2 耕地最小面积约束

包括梯田在内的基本农田的面积应该满足当地最小人均耕地面积需求。

$$X_{m梯} + S_{m0} \geq Z \cdot P_m \quad (4)$$

式中,  $X_{m梯}$  为  $m$  治理区梯田规划面积,  $S_{m0}$  为  $m$  子区规划前的总耕地面积,  $Z$  为研究区域内最小人均耕地面积,  $P_m$  为  $m$  治理区域内的总人口。

1.3.3 治理面积约束

各项水土保持措施面积之和等于流域治理总面积,

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N(m)} X_{mn} = S \quad (5)$$

$$X_{mn} \leq \beta_{mn} \quad (6)$$

式中,  $S$  为规划治理的总坡面面积,  $\beta_{mn}$  为  $m$  治理区适宜第  $n$  种水土保持措施的最大面积。

1.3.4 供水能力约束

(1) 水库水可供水量约束

a) 水库的水量平衡方程

$$V_{ct+1}^p = V_{ct}^p + WD_{ct}^p \cdot \sum_{n=1}^{N(m)} (X_{mn} \cdot (1 - \delta_{mnc})) - WG_{ct}^p - WS_{ct}^p \quad (7)$$

式中,  $V_{ct}^p$  为第  $p$  水平年第  $c$  水库在第  $t$  时段初的库容,  $WD_{ct}^p$  为第  $p$  水平年第  $c$  水库在第  $t$  时段天然入库径流量,  $WG_{ct}^p$  为第  $p$  水平年第  $c$  水库在第  $t$  时段的供水量,  $WS_{ct}^p$  为第  $p$  水平年第  $c$  水库在第  $t$  时段的损失水量,  $\delta_{mnc}$  为在第  $m$  个治理区实施单位面积的第  $n$  种水土保持措施使  $c$  水库  $t$  计算时段的来水量减少的百分比。

b) 水库的供需水量平衡方程

$$WG_{ct}^p = \sum_{k \in M_c^p} WG X_{ctk}^p \quad (8)$$

式中,  $M_c^p$  为  $p$  水平年  $c$  水库的供水单元集,  $WG X_{ctk}^p$  为  $p$  水平年第  $c$  水库  $t$  时段向第  $k$  供水单元的供水量。

c) 水库的供水能力限制

$$WG_{ct}^p \leq WGM_{ct}^p \quad (9)$$

式中,  $WGM_{ct}^p$  为第  $p$  水平年第  $c$  水库在第  $t$  时段的最大可供水量。

d) 水库蓄水容量限制

$$VL_{ct}^p \leq V_{ct}^p \leq VM_{ct}^p \quad (10)$$

式中  $VL_{ct}^p$ ,  $VM_{ct}^p$  分别为第  $p$  水平年第  $c$  水库在第  $t$  时段初的最小、最大允许蓄水库容。

(2) 当地水可供水量约束

a) 当地水主要包括提引水及本地小型水利工程蓄水, 在本次研究中忽略水土保持措施对当地水源来水的影响, 因此水量平衡方程为

$$V_{it+1}^p = V_{it}^p + WD_{it}^p - WG_{it}^p - WS_{it}^p \quad (11)$$

b) 提引水约束

$$0 \leq TWG_t^p \leq TY_t^p \quad (12)$$

式中,  $TWG_t^p$  表示  $p$  水平年第  $t$  时段提引水供水量,  $TY_t^p$  表示  $p$  水平年第  $t$  时段提引水可供水量。

1.3.5 需水约束

$$\sum_{c=1}^{I(k)+C} WG_{kcj}^p \leq S_{kj}^p \quad (13)$$

式中,  $S_{kj}^p$  为第  $p$  水平年  $k$  子区  $j$  用户总需水量。

1.3.6 非负约束

各决策变量应该大于等于 0。

2 模型求解

本配置模型不仅仅是多水源、多用户配置模型, 属大系统多目标优化模型, 具有目标多、决策变量众多的特点, 由于可调节水源的存在, 约束条件中的来

水量受水土保持措施变量大小的影响，每一组水土保持措施变量取值对应一组来水量，约束之间存在着复杂的关联关系，使得模型求解比较复杂。因此，采用基于目标函数满意度的交互式多目标决策技术<sup>[5-8]</sup>将多目标模型转化为单目标问题进行求解。单目标模型的求解则通过大系统分层优化技术，建立二级递阶优化模型，将系统分解为水土保持措施优化配置层和水资源优化配置层两个子系统，采用分解-协调技术中的模型协调法，将关联约束变量在第一层进行预分，第二层在这个基础上进行优化，并将第二层水资源优化配置层的优化结果及第一层水土保持措施配置层反馈到总协调层。这样反复进行迭代循环计算，直到达到计算终止条件为止（如图1）。每一次的迭代计算过程都将采用遗传算法<sup>[9]</sup>来实现。

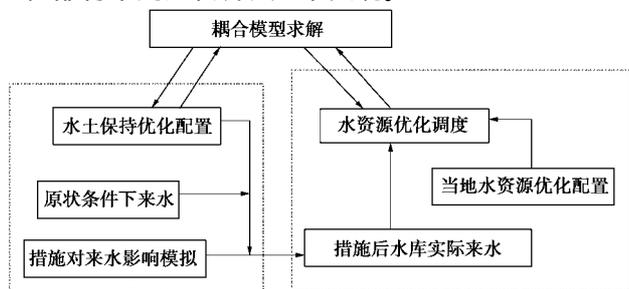


图1 耦合模型分层优化示意图

Fig. 1 Stratified optimization of coupling model

### 3 模型应用及结果分析

将该模型应用在江西省铜鼓县境内的大垵水库集水区域，区域总面积 610.45 km<sup>2</sup>，其中水土流失面积 162.9 km<sup>2</sup>，占总面积的 26.7%。区域内供水水源主要有大垵水库水，提引水及当地小型水利工程蓄水。大垵水库总库容 1.146 亿 m<sup>3</sup>，死库容 0.148 亿 m<sup>3</sup>。将当地小型水利工程概化为一个虚拟水库。虚拟水库总库容

1393 万 m<sup>3</sup>，死库容 185 万 m<sup>3</sup>。以 50% 频率年来水过程作为水库入流，水土流失治理前来水过程如表 1 所示。根据江西省 2005 年重大关键技术攻关计划项目《水土保持在流域水资源优化配置中作用及机理研究》应用 SWAT 模型对大垵水库集水区梯田、林草、经果林及水土保持林等措施对大垵水库来水的影响进行模拟，结果（以来水增量的百分比表示）如表 2 所示。水库供水区用水户类型主要有生活、农业、工业及水力发电（含河流生态用水）等。在配水时首先满足生活用水和河流生态用水，然后将剩余的水在其他三部门之间进行分配。参考《江西省水土保持生态环境建设规划》，规划水平年分为 2010 年以前、2011~2030 年和 2031~2050 年三个阶段。经调查统计和预测计算，各规划年需水量如表 3 所示。经模型求解，水土保持措施配置和水资源配置优化结果如表 4、表 5 所示。

由表 4 可以看出，在水土保持措施优化结果中，水保林面积最大，经济果木林次之，梯田面积最小，且在水保林措施中前期面积很大，而后面积急剧递减。这主要是由于流域内适宜水保林措施的面积大、水土流失量控制要求以及各措施对流域水资源调控作用等共同的影响。在梯田措施中，2010~2030 年所占比重较大，2030 年以后梯田措施的实施面积所占比例很小，这与当地人口在 2033 左右达到最高峰的增长趋势是相符合的。从水资源情况来看，流域内来水过程（见表 1）变幅大，与需水过程（见表 3）形成错峰，且在 9 月出现严重缺水。经过模型的优化，利用水保措施和水库的调节作用，配置的水资源（见表 5）基本可以满足经济社会发展需求，解决了部分时段（9、10 月）水资源短缺的矛盾。

表 1 水土流失治理前各月份来水过程表

Table 1 Incoming water by month before the control and rectification of soil erosion

单位: 10000 m<sup>3</sup>

类别	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
水库来水	2050	3344	6613	10769	12238	13109	8592	3989	2833	1972	2203	1764
虚拟水库水	23	28	19	96	102	259	193	285	154	137	86	163
当地提引水	22	18	22	20	22	20	22	22	20	22	20	23

表 2 研究区水土保持单位措施量（10000 公顷）对来水影响结果表

Table 2 Effect of water and soil conservation measures of unit area (10000 ha.) on incoming water

单位: %

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全年
种草措施	0.598	-0.798	-1.340	-1.792	-1.219	-1.495	-1.824	2.600	1.517	4.694	1.943	3.082	-0.697
水保林	0.753	-0.802	-1.187	-0.979	-0.809	-2.018	-1.209	1.398	1.043	2.670	1.963	0.377	-0.818
经济果林	0.825	-0.447	-2.318	-2.138	-1.589	-1.175	-1.554	4.253	1.254	3.220	2.219	2.602	-0.880
梯田	1.299	-0.836	-0.999	-1.820	-1.331	-1.503	-1.494	2.436	1.666	3.804	2.201	3.363	-0.628

表 3 各部门需水量表

Table 3 Water demand by sectors

单位: 10000 m<sup>3</sup>

年份	部门	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
2010	农业	452	394	134	368	108	972	1804	1993	2976	1247	108	447
	工业	53	48	53	51	53	51	53	53	51	53	51	53
	生活	108	98	108	104	108	104	108	108	104	108	104	108
2030	农业	466	406	138	379	111	1002	1859	2053	3066	1285	111	461
	工业	118	106	118	114	118	114	118	118	114	118	114	118
	生活	144	129	144	139	144	139	144	144	139	144	139	144
2050	农业	473	412	140	386	113	1018	1889	2086	3116	1305	113	468
	工业	172	155	172	167	172	167	172	172	167	172	167	172
	生活	166	150	166	160	166	160	166	166	160	166	160	166
水力发电		13392	12096	13392	12960	13392	12960	13392	13392	12960	13392	12960	13392

注: 水力发电需水量按水电站额定发电流量计算。

表 4 不同规划年份各措施面积优化结果表

Table 4 Results of optimization in area with various measures in different planning years

单位: hm<sup>2</sup>

时段	梯田	种草	经济果木林	水保林	总规划面积
2010年之前	320	168	1470	4232	6190
2011~2030年	2030	952	1926	1145	6353
2031~2050年	84	2340	986	337	3747
合计	2434	3460	4382	5714	16290

表 5 水资源优化配置结果表

Table 5 Results of optimized allocation of water resources

单位: 10000 m<sup>3</sup>

年份	部门	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
2010	农业	452	394	134	368	108	972	1804	1993	2976	1247	108	447
	工业	53	48	53	51	53	51	53	53	51	53	51	53
	生活	108	98	108	104	108	104	108	108	104	108	104	108
	水力发电	1492	2835	6300	10274	11015	10117	6772	2195	1899	1759	2074	1354
2030	农业	466	406	138	379	111	1002	1859	2053	3066	1285	111	461
	工业	118	106	118	114	118	114	118	118	114	118	114	118
	生活	144	129	144	139	144	139	144	144	139	144	139	144
	水力发电	1389	2720	6134	10051	10815	10070	6537	2103	1532	1662	2001	1266
2050	农业	473	410	140	386	113	1018	1889	2086	3116	1305	113	468
	工业	172	155	172	167	172	167	172	172	167	172	167	172
	生活	166	150	166	160	166	160	166	166	160	166	160	166
	水力发电	1311	2637	6017	9896	10678	10109	6377	2038	1423	1396	1942	1201

## 4 结 语

水土保持措施对流域径流具有削峰补枯的作用。在水资源日益短缺、生态环境恶化、水土流失严重、降水分布不均的情况下,有必要综合利用和发挥水土

保持的多重功能和效益。针对当前水土保持措施配置模型忽略水土保持水文效应的缺陷,在对水土保持措施水文效应模拟的基础上,建立了水土保持措施与水资源联合优化配置模型,为我国尤其是南方地区的流域水土流失治理和水资源综合调控提供了新的思路和

更为科学的决策方法。

参考文献：

- [1] 张胜利, 李光录. 黄土高原沟壑区小流域水土保持工程体系优化配置研究[J]. 西北林学院学报, 2000, 15(4): 30-38. (ZHANG Sheng-li, LI Guang-lu. Research on optimization allocation of small basin water and soil conservation projects in gully region of loess plateau[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2000, 15(4): 30-38. (in Chinese))
- [2] 李成杰, 许靖华, 焦宝明. 试论水土保持措施优化配置方法[J]. 水土保持科技情报, 2004, 6: 11-12. (LI Cheng-jie, XU Jing-hua, JIAO Bao-ming. A preliminary study into the optimization allocation methods of water and soil conservation measures[J]. Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation, 2004, 6: 11-12. (in Chinese))
- [3] 琚彤军, 刘普灵. 燕儿沟流域水土治理措施优化配置示范研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(5): 53-67. (JU Tong-jun, LIU Pu-ling. Pilot study into the optimization allocation methods of water and soil conservation measures in yanergou basin[J]. Journal of Water and Soil Conservation, 2001, 15(5): 53-67. (in Chinese))
- [4] 袁惠波, 袁正科. 麻岭小集水区水土保持林草植被景观格局配置及优化[J]. 湖南林业科技, 2003, 30(4): 28-31. (YUAN Hui-bo, YUAN Zheng-ke. Allocation and optimization of water and soil conservation forest, grass and vegetation landscaping in minor catchment area of maling[J]. Hunan Forest Science and Technology, 2003, 30(4): 28-31. (in Chinese))
- [5] CHANKONG V, HAIMES Y. Multi-objective decision making: theory and methodology[M]. North-Holland, 1983.
- [6] 吴清烈, 徐南荣. 基于目标满意度多目标决策的改进交互式方法[J]. 管理工程学报, 1996, 10(4): 217-222. (WU Qing-lie, XU Nan-rong. Modified interactive approach based on objective satisfaction multi-objectives decision-making[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 1996, 10(4): 217-222. (in Chinese))
- [7] 蒋尚华, 徐南荣. 基于目标达成度和目标综合度的交互式多目标决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(1): 9-14. (JIANG Shang-hua, XU Nan-rong. Interactive multi-objective decision-making method based on objective realization and objective integration[J]. Systems Engineering-theory and Practice, 1999, 19(1): 9-14. (in Chinese))
- [8] 达庆利, 刘新旺. 多目标线性规划模糊决策的加权集成方法[J]. 系统工程学报, 1999, 19(3): 247-250. (DA Qing-li, LIU Xin-wang. Weighted integration method of fuzzy decision-making in multi-objective linear planning[J]. Journal of Systems Engineering, 1999, 19(3): 247-250. (in Chinese))
- [9] 曲中水, 刘淑兰. 基本遗传算法的收敛性分析[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2003, 8(1): 42-45. (QU Zhong-shui, LIU Shu-lan. Convergence analysis of basic genetic algorithm[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2003, 8(1): 42-45. (in Chinese))