

黄土丘陵沟壑区小流域多水源联合配置研究

陈渠昌^{1,2},白 霞²

(1. 中国水利水电科学研究院水环境研究所 北京 100038 ; 2. 中国农业大学水利与土木工程学院 北京 100083)

摘要 在分析黄土丘陵沟壑区地形地貌、水资源特点、利用现状、生产经营方式的基础上,提出以小流域为尺度的水资源优化配置研究的必要性。以县南沟小流域为研究区,对区域内常规和非常规水资源进行联合配置研究,建立适宜该地区的多目标、多水源联合配置模型。对配置方案的结构、社会发展协调性和用水效益进行分析。结果表明,配置方案结构合理,效益明显,有助于促进区域的社会协调发展。

关键词 黄土高原;丘陵沟壑区;小流域;多水源;水资源优化配置

中图分类号:TV211.1 文献标识码:A 文章编号:1004-693X(2010)01-0001-05

Study on joint allocation of multiple water resources for a small watershed in the loess hill and gully region

CHEN Qu-chang^{1,2}, BAI Xia²

(1. Department of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China ; 2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract : On the basis of analysis of landscape features, water resources, current water resource use, production, and operation modes, the necessity of optimizing allocation of water resources on a small watershed scale is detailed. Xiannangou was selected as a typical area for the study. The joint allocation of conventional and unconventional waters resources was studied and a joint multi-objective allocation model for multiple water resources was established. Through analysis of the allocation scheme configuration, coordination of social development, and benefits of water consumption, it was shown that the allocation scheme configuration was reasonable and could contribute to coordinated development of society.

Key words : loess plateau; hill and gully region; small watershed; multiple water resources; optimal allocation

黄土丘陵沟壑区位于黄土高原中部,地跨晋、陕两省 30 个县(市)。区内地形破碎,沟壑纵横,侵蚀强度剧烈,地表破碎度 40% 以上,人口居住分散,经济上具有一定的封闭性和相对独立性,农业生产只能在被沟壑割裂的自然单元内进行,彼此呈相对孤立的发展状态^[1]。大部分地区以粮食种植业为主,产业结构单一,以户经营,生产规模小,附加值低。黄土丘陵沟壑区多属于干旱半干旱区,水资源短缺,生态脆弱,水土流失严重,水土保持与生态建设任务艰巨。特有的地形地貌、气候特征、水资源及社会经济特点等决定了区域经济发展及生态建设对水资源

具有极强的依赖性。因此,结合小区域的实际情况,开展小尺度(小流域单元)的水资源配置与高效利用研究,对于指导黄土丘陵沟壑区这类水源小、地形破碎、生产经营相对独立地区的水资源高效利用,缓解区域内水资源供需矛盾,促进当地的经济发展和生态建设等,具有重要的意义。

1 小尺度(小流域)水资源配置模型构建

根据区域及其水资源特点以及区域经济社会发展对水资源的需求分析认为,小流域内的水资源配置问题,是一个多目标的优化决策问题,合理分配有限

的水资源,实现区域内水土保持、生态建设、工农业经济等效益最大化,促进区域社会经济的协调、可持续发展。因此选取多目标规划模型来解决较为复杂的小流域水资源配置问题^[2],以保证决策结果非劣性并尽可能接近理想值^[3]。选用多目标规划模型如下^[4]:

$$\begin{aligned} f(X) &= \max\{f_g(X)\} \\ G(X) &< 0 \\ X &\geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $f(X)$ 为总目标函数; $f_g(X)$ 为第 g 子目标, $g=1\sim M$, M 为子目标总数; $G(X)$ 为约束集; X 为决策向量。

1.1 模型子目标的确定

模型子目标可以根据所研究区域或小流域的特点与生产实际情况确定。笔者根据黄土丘陵沟壑区的特点和所面临的水土保持、生态建设、经济发展等艰巨任务,选取社会、经济、生态和水土保持效益为模型的4个子目标,分述于下。

1.1.1 经济目标

采用区域水资源开发利用带来的直接经济效益作为经济目标:

$$f_1(x) = \max \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (b_{ij}^k - c_{ij}^k) x_{ij}^k \alpha_i^k \quad (2)$$

式中: b_{ij}^k 、 c_{ij}^k 分别为水源 i 向子区 k 受水户类型 j 供水的效益系数和费用系数,元/ m^3 ; x_{ij}^k 为子区 k 水源 i 向受水户类型 j 的供水量, m^3 ; I 为水源类型总数,如地表径流、泉水、窖水、地下水等; J 为受水户用水类型总数,如生活用水、生态用水、工业用水、农业用水等; K 为受水子区域,可根据小流域特点将受水区分为若干子区,如沟头区、中游区、出口区等,每个子区可再根据地形、地类分为若干小区,如坡地区、坝地区、台地区、塌地区等; α_i^k 为子区 k 水源 i 的供水次序系数,指 i 水源相对其他水源供给某用户的供水优先程度,用式(3)确定^[5]:

$$\alpha_i^k = \frac{1 + n_{\max}^k + n_i^k}{\sum_{j=1}^j (1 + n_{\max}^k - n_i^k)} \quad (3)$$

式中: n_i^k 为子区 k 水源 i 供水次序序号,据子区各水源供水的便捷程度与合理性确定; $n_{\max}^k$ 为子区 k 水源供水次序序号最大值。

1.1.2 社会目标

缺水程度的高低直接影响区域经济发展与社会安定,笔者采用区域需水满足程度来间接量化社会效益。

$$f_2(x) = \max \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (x_{ij}^k / D_j^k) \quad (4)$$

式中: D_j^k 为子区 k 受水户类型 j 的需水量, m^3 。

1.1.3 生态目标

由于黄土丘陵沟壑区地形破碎带内几乎无常年河流,故不考虑区域内河流的生态用水,仅考虑区域植被建设的生态用水所产生的生态效益。生态效益不易量化,但植被覆盖度在一定意义上可代表区域内生态建设状况,因此利用植被覆盖度间接衡量生态效益。

$$f_3(x) = \max \left\{ \left[A_Y + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I (x_{ij}^k / q_i) + A_C \right] / A \right\} \quad (5)$$

式中: A_Y 为原有非经济林面积, hm^2 ; x_{ij}^k 为 k 区 i 水源生态供水总量, m^3 ; q_i 为单位面积植被生态用水量(灌溉), m^3/hm^2 ; A_C 为区域内草地面积, hm^2 ; A 为流域面积, km^2 。

1.1.4 水土保持目标

鉴于丘陵沟壑区水土流失严重的实际情况,选取水土保持减沙效益来表征水资源合理配置对流域水土保持的贡献,力求水资源配置朝有利于水土保持的目标发展,使流域内产沙量最小。

$$f_4(x) = \min \sum_{k=1}^K (S_N A_N + S_L A_L + S_C A_C + S_W A_W) \quad (6)$$

式中: S_N 为农田年均侵蚀模数, $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$; A_N 为农田面积, hm^2 ; S_L 为林地年均侵蚀模数, $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$; A_L 为林地面积, hm^2 ; S_C 为草地年均侵蚀模数, $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$; A_C 为草地面积, hm^2 ; S_W 为荒地年均侵蚀模数, $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$; A_W 为荒地面积, hm^2 。

1.2 模型约束的确定

a. 水资源量约束

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J X_{ij}^k \leq W_i \quad (7)$$

式中: W_i 为第 i 水源总水量, m^3 。

b. 需水量约束

生态需水约束:

$$D_{2\text{下}} \leq \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I X_{i2}^k \leq D_{2\text{上}} \quad (8)$$

式中: $D_{2\text{下}}$ 为生态需水量下限; $D_{2\text{上}}$ 为生态需水量上限,参考当地生态建设和专家意见确定。

生活需水约束:

$$D_{1\text{下}} \leq \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I X_{i1}^k \leq D_{1\text{上}} \quad (9)$$

生活需水是首要保证项,因此生活需水上下限有:

$$D_{1\text{下}} = D_{1\text{上}} = D_1 \quad (10)$$

式中: D_1 为生活需水量。

农业需水约束:包括农田粮食作物需水和经济作物需水。

农田需水约束由式 (11) 给出：

$$D_{T\text{下}} \leq \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I X_{iT}^k \leq D_{T\text{上}} \quad (11)$$

其中：

$$\begin{cases} D_{T\text{下}} = \sum_{n=1}^N S_{B_n} m_n \\ D_{T\text{上}} = \sum_{n=1}^N S_{Y_n} m_n \end{cases} \quad (12)$$

式中： S_{B_n} 为第 n 种作物保证灌溉面积， hm^2 ； S_{Y_n} 为第 n 种作物有效灌溉面积， hm^2 ； m_n 为第 n 种作物灌溉定额， m^3/hm^2 。

工业需水约束：

$$D_{A\text{下}} \leq \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I X_{iA}^k \leq D_{A\text{上}} \quad (13)$$

式中： $D_{A\text{上}}$ 为水平年工业需水量上限， m^3 ； $D_{A\text{下}}$ 为水平年工业需水量下限， m^3 。根据工业生产用水情况、重要性等，咨询有关专家确定。

c. 粮食安全约束

要保证粮食安全，粮食生产面积应不小于目前的粮食种植面积或规划面积。即：

$$A_N \geq A_{05} \quad (14)$$

式中： A_N 为粮食生产面积， hm^2 ； A_{05} 为现有粮食生产面积或规划面积， hm^2 。

d. 社会协调发展约束^[6]

水资源配置合理与否，可用区域协调发展系数（式 (15)）来表征水资源的利用与区域经济发展和促进区域生态环境改善的协调性。

$$\mu = \sqrt{\mu_{B1}(\sigma_1) \mu_{B2}(\sigma_2)} \geq \mu^* \quad (15)$$

其中

$$\mu(\sigma_1) = \begin{cases} 1.0 & \sigma_1 \geq \sigma_1^* \\ e^{-\frac{(\sigma_1 - \sigma_1^*)^2}{4}} & \sigma_1 < \sigma_1^* \end{cases} \quad (16)$$

$$\sigma_1 = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J X_{ij}^k}{\sum_j D_j} \quad (17)$$

$$\mu(\sigma_2) = \begin{cases} 1.0 & \sigma_2 \geq \sigma_2^* \\ e^{-\frac{(\sigma_2 - \sigma_2^*)^2}{4}} & \sigma_2 < \sigma_2^* \end{cases} \quad (18)$$

$$\sigma_2 = \frac{W_T/W_0}{E_T/E_0} \quad (19)$$

式中： μ_{B1} 为隶属函数，区域水资源利用与经济发展的协调函数相协调的模糊子集； μ_{B2} 为隶属函数，区域生态环境改善程度与经济发展的协调函数相协调的模糊子集； μ 、 μ^* 分别为区域协调发展系数及其极限值； σ_1 、 σ_1^* 分别为区域水资源利用与经济发展

比值及其最佳比值； σ_2 、 σ_2^* 分别为区域经济发展与生态环境改善程度的比值及其最佳比值； W_T 、 W_0 分别为区域规划年和基准年的经济供水量； E_T 、 E_0 分别为区域规划年和基准年的生态环境供水量。

水资源利用和生态环境改善与经济发展协调度，可以根据表 1 来确定。

表 1 水资源利用和生态环境改善与经济发展协调度分级^[7]

μ	$\mu \leq 0.45$	$0.45 < \mu \leq 0.55$	$0.55 < \mu \leq 0.9$	$0.9 < \mu \leq 1$
级别	不协调	临界状态	较协调	高度协调

e. 非负约束

$$X_{ij}^k \geq 0 \quad (20)$$

1.3 模型求解

就一般而言，对于给定的小区域或小流域，其子目标及子区数目都不会太多，可选用大系统总体优化遗传算法进行多目标规划问题的求解^[5]。求解过程如下：

a. 运用 MATLAB 中遗传算法工具箱对各目标独立寻优。首先编写 M 文件，确定模型中各目标的适应度函数，运用罚函数处理约束条件。之后调用遗传算法工具箱函数分别对各个子目标进行独立寻优，得到子目标最优解 x_n^* 及子目标函数最优值 f_n^* 。

b. 所求得各子目标的最优解 x_n^* （本文取 $n = 1, 2, 3, 4$ ）代入各目标函数 $f_n(x)$ ，可得到 n^2 个目标值组成的支付表，从中选取各子目标的最大值 f_n^* 和最小值 f_n^0 。

c. 对各子目标分别做无量纲处理，以避免各目标之间单位不同及目标数量级较大差异造成的影响。笔者按极大化、极小化处理。

极大化处理按式 (21) 进行^[5]：

$$l_n(x) = S_{\min} + \frac{f_n(x) - f_n^0(x)}{f_n^*(x) - f_n^0(x)} (S_{\max} - S_{\min}) \quad (21)$$

极小化处理按式 (22) 进行：

$$l_n(x) = S_{\max} - \frac{f_n(x) - f_n^0(x)}{f_n^*(x) - f_n^0(x)} (S_{\max} - S_{\min}) \quad (22)$$

式中： $l_n(x)$ 为标准化处理后的子目标（分效益）； $f_n^0(x)$ 为目标函数最小值； $f_n^*(x)$ 为目标函数最大值； $S_{\min}$ 、 $S_{\max}$ 分别为标准化区间下、上限，笔者分别取 1 和 100。

d. 总评价函数的确定。通过加权求和得出总体评价函数，将多目标优化问题化为单目标问题。子目标权重，可通过与决策者和专家协商、采用专家咨询法确定 $\alpha_n^{[7]}$ 。

f(x) = max \sum_{n=1}^n \alpha_n l_n(x) \tag{23}

式中:f(x)为总评价函数;α_n为每一子目标相应总目标的重要程度权重系数。

e. 以总体评价函数最大化为目标,取得总体最优解或近似最优解。

2 案例分析

2.1 典型小流域概况

选取陕西省安塞县南部县南沟小流域为研究区,该小流域属延河一级支流,流域面积 44.58 km²,沟道总长 12 km,沟壑密度 4.4 km/km^{1.8}。区域内多年平均气温 8.8℃,最高气温 36.8℃,最低气温 -23.6℃,无霜期为 160 d;多年平均蒸发量为 1 006.5 mm;多年平均降雨量为 551.1 mm,降水量时空分布不均匀,主要集中在 7、8、9 三个月,占全年降雨量的 65%。水资源缺乏,雨水资源是农业生产的主要水源。区内共有 4 个行政村,18 个自然村,543 户,2 466 人(2005 年),耕地总面积 321.57 hm²,人均耕地面积 0.13 hm²。农业生产主要以粮食作物为主,经济作物面积仅 27.87 hm²,占种植面积 9%。区域内水土流失较为严重,生态建设和水土保持任务大。

2.2 区域水资源分析

小流域内多年平均水资源量 230.73 万 m³,其中塘、坝、窖等地表水资源量 163.84 万 m³,地下水资源量 66.89 万 m³。可利用水资源总量为 167.23 万 m³,其中可利用地下水资源量为 3.39 万 m³,见表 2。以 2005 年为现状年,流域内水资源量及利用情况见表 3。

表 2 不同保证率下的水资源量

保证率	水资源量/万 m ³	可利用量/万 m ³
多年平均	230.73	167.23
P = 50%	217.60	154.10
P = 75%	181.62	118.12

表 3 2005 年水资源开发利用现状

水资源类型	总量/万 m ³	可利用量/万 m ³	利用量/万 m ³	开发利用程度/%
地表水	154.52	154.52	16.00	10
泉水	9.32	9.32	4.28	46
地下水	66.89	3.39	0.91	27
合计	230.73	167.23	21.19	13

根据当地发展规划对各部门需水量进行预测,结果如表 4,水资源平衡分析结果见表 5。

从表 5 可见,2010 年前,多年平均可利用水资源量基本能够满足需水要求,但在偏干旱年份或提高供水保证率的情况下就不能满足需水要求;到 2010 年后,出现水资源短缺,必须对流域内水资源进行优化配置和科学管理,减缓区域内各部门间的

用水矛盾。

表 4 县南沟小流域需水现状及预测

水平年	保证率	需水量/万 m ³				
		生活	生态	农业	工业	总量
2005	多年平均	4.29	1.96	123.42	0.91	130.58
	多年平均	5.50	11.62	143.63	0.68	161.43
2010	P = 50%	5.50	13.33	169.96	0.68	189.47
	P = 75%	5.50	16.61	220.82	0.68	243.61
2015	多年平均	6.68	6.09	163.98	0.92	177.67
	P = 50%	6.68	7.09	198.57	0.92	213.26
	P = 75%	6.68	9.00	265.40	0.92	282.00

表 5 县南沟小流域供需平衡现状及预测

水平年	保证率	需水量/万 m ³	工程供水能力/万 m ³	可供资源量/万 m ³	工程型缺水率/%	资源型缺水率/%
2005	多年平均	130.58	124.82	167.23	4.41	0
	多年平均	161.43	127.57	167.23	20.98	0
2010	P = 50%	189.47	118.06	154.10	37.69	18.67
	P = 75%	243.61	90.78	118.12	62.74	51.51
2015	多年平均	177.67	132.56	167.23	25.39	5.88
	P = 50%	213.26	121.96	154.10	42.43	27.74
	P = 75%	282.00	93.51	118.12	66.84	58.11

2.3 模型求解

利用上述水资源配置模型,对研究区域县南沟小流域水资源进行配置,使区域内水资源利用效率趋于最佳。模型中参数见表 6,求解结果分别列于表 7、表 8。

3 配置方案与问题分析

从表 7、8 可以看出,2010 年前水资源基本满足用水需求,只要加强水利工程建设和水资源开发力度,可以满足各部门需水要求,模型配置结果与前水资源平衡分析结果一致。2010 年后,如 2015 年水资源量已不能满足用水需求,那时必须实行节约用水和加强水资源管理,同时要根据资源量进行合理配置,优先满足生活、生态以及经济效益较高的工业用水,才能缓解区域用水矛盾,实现区域水资源效益最大化。以 2005 年为例,实施足量配水后,可使区域经济产值由原来的 816.75 万元,增加到 1 227.3 万元,增长 50%,综合效益提高了 1.22 倍。可见,小区域水资源配置,还是有较大潜力可挖的。社会效益方面,用水需求满足程度可由原 2.33 提高到 4.0,较大程度地提高社会的协调性,促进社会和谐发展。

一般来说,小尺度区域中子区与子目标数目不多,应用大系统总体优化遗传算法能有效地进行多目标寻优求解,实现区域常规与非常规水资源的联合调用,使区域水资源利用率及产出效益趋于最大化。但是小尺度水资源配置涉及社会、经济、资源和生态环境等多方面的因素,是一个复杂的大系统多

表 6 南沟小流域水资源进行优化配置模型参数

参数符号	参数名称	参数内容	确定方法	参数取值	有关说明
M	子目标数	经济、生态、水保、社会	统计分析	4	
i	水源类型	地表水、泉水、地下水	统计归类	1~3	
j	受水区用水类型	生活、生态、农业、工业		1~4	
k	受水子区	沟头区、上游区、下游区、沟口区	根据地形与水源	1~4	子区下级分区未列出
b_{ij}^k, c_{ij}^k	效益费用系数		根据实际情况确定		市场调查或实际发生
n_i^k	供水序号	子区 k 水源 i 供水序号	据水源向供水便捷程度和合理性确定		按优先顺序取值
$n_{\max}^k$	供水序号最大值	子区 k 水源 i 供水序号最大值			
D_j^k	需水量	子区 k 需水类型 j 的需水量	据实际情况确定		
$D_{2上}, D_{2下}$	生态需水上下限		$D_{2下} = 0.95 \ D_{2上}$		据生态建设任务和专家意见确定
$D_{A上}, D_{A下}$	工业需水量上下限		$D_{A上} = 0.90 \ D_{A下}$		专家意见确定
α_n	重要程度系数	各子目标在总目标中权重	专家咨询法		专家按重要性打分,经归一化处理

注 :其余参数确定见文中所述和根据实际调查确定。

表 7 2005 年/2010 年县南沟小流域水资源配置结果

分类	地表水/万 m ³		泉水/万 m ³		地下水/万 m ³		供水量/万 m ³		需水量/万 m ³		缺水率/%	
	2005	2010	2005	2010	2005	2010	2005	2010	2005	2010	2005	2010
生活	0	0	4.29	5.50	0	0	4.29	5.50	4.29	5.50	0	0
生态	1.15	10.94	0	0	0.81	0.68	1.96	11.62	1.96	11.62	0	0
农业	116.73	127.91	5.03	3.82	1.66	1.90	123.42	143.63	123.42	143.63	0	0
工业	0	0	0	0	0.91	0.68	0.91	0.68	0.91	0.68	0	0
合计	117.88	148.85	9.32	9.32	3.38	3.26	130.58	161.43	130.58	161.43	0	0

表 8 2015 年县南沟小流域水资源优化配置结果(多年平均)

分类	地表水/ 万 m ³	泉水/ 万 m ³	地下水/ 万 m ³	供水量/ 万 m ³	需水量/ 万 m ³	缺水率/ %
生活	0	6.68	0	6.68	6.68	0
生态	4.78	0	1.31	6.09	6.09	0
农业	149.72	2.64	1.15	153.51	163.98	6.38
工业	0	0	0.92	0.92	0.92	0
合计	154.50	9.32	3.38	167.20	177.67	5.89

目标优化问题 ,同时进行小尺度上水资源配置有其特点和难点 ,如水源资料、社会经济资料等不健全等。只有深入实际 ,经过周密调查和分析 ,才能合理确定模型参数 ,得到可行的配置结果。

对专家打分结果进行归一化处理后得到各目标权重由大至小排序为 :生态效益、经济效益、社会效益、水土保持减沙效益 ,对应的权重系数为 : $\alpha = (0.365 \ 0.296 \ 0.191 \ 0.148)$ 。

笔者配置模型中水土保持减沙效益采用多年平均产沙模数表征 ,更有效地反映区域产沙量与水资源配置关系的模型还有待于进一步研究 ,由于小区域中众多因素的不确定性 ,笔者所作的尝试还有许多不完善之处 ,期待更多研究者从事相关方面的研究。

参考文献 :

[1] 金瓯 .黄土高原地区综合运输网的发展及合理布局[M].北京 :科学出版社 ,1991 :4-11.

[2] 刘连梅 .南水北调中线工程河北受水区水资源优化配置研究[J].水科学与工程技 术 ,2007(1) :4-7.

[3] 魏昌林 .中国南水北调[M].北京 :中国农业出版社 ,2000.

[4] 翁文斌 ,王忠静 ,赵建世 .现代水资源规划 :理论、方法和技术[M].北京 :清华大学出版社 ,2004.

[5] 周丽 ,黄哲浩 ,贺惠萍 ,等 .多目标非线性水资源优化配置模型的混合遗传算法[J].水电能源科学 ,2005 ,23(5) :22-26.

[6] 陈燕飞 ,王祥三 .汉江流域水权初始配置模型研究[J].长江流域资源与环境 ,2007 ,16(3) :298-302.

[7] 姚荣 .基于可持续发展的区域水资源合理配置研究[D].南京 :河海大学 ,2005.

[8] 侯喜录 ,杜成祥 .不同植被类型小区径流泥沙观测试验[J].泥沙研究 ,1985(4) :35-45.

(收稿日期 2009-01-14 编辑 :高渭文)

