

Effects of Time Scales on Water Resources Allocation

Yujie Zeng, Dedi Liu*, Qin Zhao, Hui Zou, Jing Tian, Jiayu Zhang, Youjiang Shen

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei
Email: *dediliu@whu.edu.cn

Received: Jun. 17th, 2019; accepted: Jul. 5th, 2019; published: Jul. 18th, 2019

Abstract

The water resources allocation is an important means to solve the problem of uneven distribution of water resources in time and space. However, there are few studies on the effects of time scales on water resources allocation. The effects caused by the variation of time scale are often ignored and lead to underestimation of water shortage risks in water resources management. IRAS water resources allocation model which can adjust the time step flexibly to adapt to different time scales, is employed to the middle and lower reaches of the Hanjiang River basin as a case study. There are three types of time scales (year, season and month) to be chosen for discussing the effects of time scales on water resources allocation. The results show that the effects of time scales on water resources allocation mainly depend on water resources conditions and the regulating capacity of the water system. Water shortage is few to find in all three-time scales if the water resources are enough to satisfy the water demand. However, the effects of time scales on water resources allocation are more sensitive in areas with water shortage and weak regulating capacity of the water system. As the variability of water inflow and demand water can be smoothed at long-term scale, the water shortage ratio at long-term scale is lower than that at a short-term scale. The results of the study have not only analyzed the effects of time scales on water resources allocation, but also warned the risks of water resources management at different time scales.

Keywords

Water Resources Allocation, IRAS Model, Time Scale, Hanjiang River Basin

不同时间尺度下水资源配置效应

曾侯杰, 刘德地*, 赵琴, 邹惠, 田晶, 张家余, 沈友江

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉
Email: *dediliu@whu.edu.cn

作者简介: 刘德地(1980-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 水文水资源。
*通讯作者。

文章引用: 曾侯杰, 刘德地, 赵琴, 邹惠, 田晶, 张家余, 沈友江. 不同时间尺度下水资源配置效应[J]. 水资源研究, 2019, 8(4): 324-334. DOI: 10.12677/jwrr.2019.84038

收稿日期：2019年6月17日；录用日期：2019年7月5日；发布日期：2019年7月18日

摘要

水资源配置是解决水资源时空分布不均的重要手段，而现有水资源配置研究中时间尺度相对单一，较少考虑到时间尺度的变化给配置方案带来的风险。针对此问题，本文以汉江流域中下游地区为研究对象，利用具有灵活调整计算时间步长功能的IRAS水资源配置模型，选择年、季、月三种时间尺度，分析不同时间尺度对水资源配置的影响。结果表明：不同地区由于水资源条件和系统调节能力不同，水资源配置具有时间尺度效应，在来水条件良好的区域，水资源配置的时间尺度效应不明显，而在水资源短缺且系统调节能力较弱区域，水资源配置的时间尺度效应比较敏感，这是由于长时间尺度配置条件平滑了来水与需水在时间上的变化性，降低了长时间尺度的配置结果的缺水率。本研究不仅将为确定水资源配置的适应性时间尺度提供依据，而且还可为新时期水资源的精细化配置和风险管理提供支撑。

关键词

水资源配置，IRAS模型，时间尺度，汉江流域

Copyright © 2019 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着社会经济的高速发展，人口数量的不断增长，城镇化进程的加快，用水需求量日益增加且供水保证率越高，导致水资源的供需矛盾愈发尖锐，使得生态环境保护和经济发展面临挑战[1][2]。合理分配有限的水资源，提高水资源利用效率，实现生态与社会经济协调、可持续发展已变得十分重要。水资源配置可对水资源进行重新分配与布局，是目前解决水资源供需矛盾问题的主要调控手段之一[3]，已成为国内外大量学者重点研究的课题。为与水资源管理部门的日常运行管理相适应，现有水资源配置研究常以日、月、年等单一时间尺度进行。甘治国等在年时间尺度条件下，基于北京市水资源利用现状，提出并开发了基于规则控制的北京市水资源配置模拟模型[4]；刘德地等在月时间尺度条件下，在分析咸潮影响区水资源特点的基础之上，以珠海市为例，建立了咸潮影响区的水资源优化配置模型[5]；王维平等在月时间尺度条件下，结合山东省莱州滨海平原地区海水入侵问题，以生态需水为约束条件、最大水资源开发能力为目标，构建起生态型水资源优化配置模型[6]；田晶等在月时间尺度条件下，以社会、经济和生态效益为目标，构建了汉江流域中下游地区水资源多目标优化配置模型[7]；樊尔兰等在旬时间尺度条件下，分析了西安市黑河水库水温、水质与水库取水建筑物之间的关系，建立了分层型水库水量水质综合优化调度数学模型[8]；张守平等在月时间尺度条件下，以改进的“三次平衡”思想为指导，在湟水干流地区进行了水质型缺水识别，构建了水量水质联合模拟与配置模型[9]。但现有水资源配置研究中时间尺度相对单一，较少考虑到时间尺度的变化给配置方案带来的风险，缺少不同时间尺度条件下配置方案的对比分析。Vörösmarty 等与 Mekonnen 等分别基于年尺度与月尺度条件下的来水与需水，预测了全球范围的缺水状况，发现月时间尺度条件下的缺水量超出年时间尺度条件下缺水量的40%，全球范围内面临缺水威胁的人口数目增长了将近一倍[10][11]，不同时间尺度条件下水资源短缺效应有所不同。而由美国康奈尔大学开发研制的 Interactive River-Aquifer Simulation (IRAS) [12]水资源配置模型

具有灵活调整计算时间步长的功能，可适应多种时间尺度的输入(如日、旬、月、季、年等)，能满足不同时间尺度条件下水资源配置效应的研究。

本文以汉江流域中下游地区为例，选择年、季、月三种时间尺度，在分析水资源系统中供、用、耗、排等主要环节所涉及的要素和相互连接关系的基础上，采用 IRAS 模型研究了水资源配置结果的时间尺度效应，以期为保障供水安全，提高配置效率提供支持。

2. IRAS 模型结构与原理

IRAS 是一款能够灵活调整计算时间步长，适用于多种时间尺度条件的水资源配置模拟模型，目前该模型已经在英国泰晤士河流域、墨西哥瓜纳华托河流域与葡萄牙瓜迪亚纳河流域等地区得到了成功应用。模型以物理水网为基础，通过分析水资源系统中供、用、耗、排等主要环节中所涉及的要素和相互连接关系，结合水资源系统的来水序列、需水序列、各类参数以及约束条件，在不同的调度运行规则下，模拟系统内水资源的配置过程。其原理如图 1 所示：

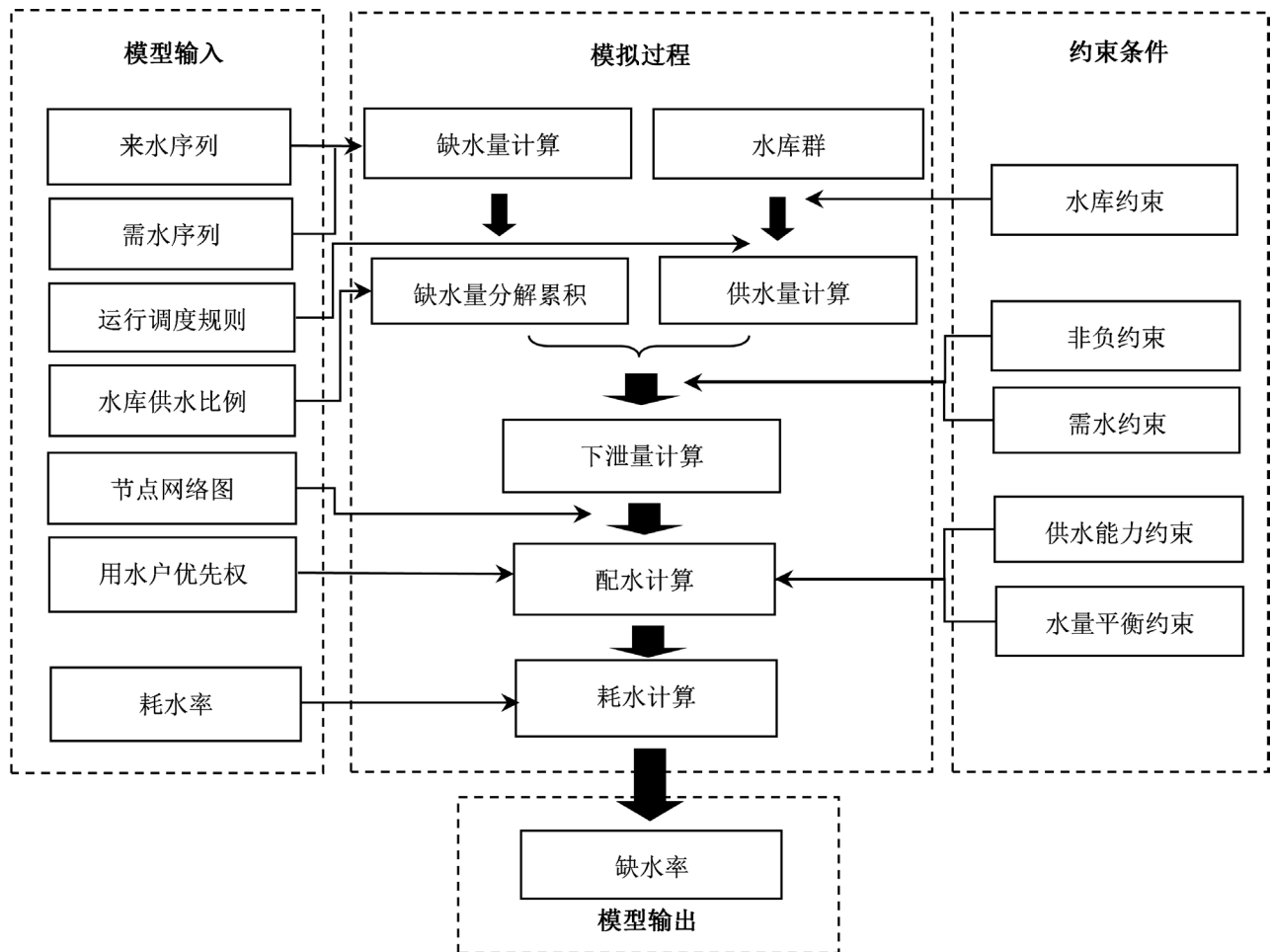


Figure 1. Framework of the IRAS model

图 1. IRAS 模型原理图

2.1. 系统概化

水资源系统规模庞大、涉及因素众多，结构纷繁复杂，而节点网络图是系统概化的具体表现，因此提炼出

具有代表意义的节点网络图是建立系统框架与通用性模型的前提。

IRAS 模型水资源系统中所涉及的实体元素可以分为节点与有向线段两种类型。节点用于描述研究区域中的工程设施、控制结构与用水单元, 根据实体元素的属性可将其分为水源节点、来水节点、用水节点、分流节点、汇流节点。有向线段用于描述节点之间存在的水量传输与影响关系, 根据水流是否能够双向流动可将其分为双向线段与单向线段。其中单向线段又可进一步分为需水线段、分流线段、天然线段, 参与到地表水的输送与分配过程之中; 双向线段通常结合达西定律用于地下水的模拟。

2.2. 参数设置

水资源配置的最终目的通常是宏观决策提供理论参考, 而宏观结果的可靠性离不开微观过程的精准性与合理性。模型中各类参数均能以“日”为单位实时变化, 因此可结合工程实际状况与人工经验对各类参数进行灵活地调整与修正, 以提高模拟过程的精准程度, 为配置方案的可靠性提供保障。

2.3. 运行规则

1) 时间步长划分

IRAS 模型以年为周期进行模拟计算, 其时间步长可灵活调整, 以适应不同时间尺度数据的输入, 为在日、旬、月、季、年等时间尺度条件下水资源配置模拟计算提供了支持。每个时间步长可进一步划分为不同子时间步长(最小为 1 天), 子时间步长的数目越多, 模拟过程越精细, 配置结果精度越高, 所需计算时间越长。

2) 缺水计算

当用水户的用水需求高于来水条件时, 采用公式(1)、(2)计算用水户的缺水量:

$$W_{st}^e = \frac{\sum_1^{st} W_{st}^{in} - \sum_1^{st} W_{st}^{r,in}}{st - 1} * (tst - st + 1) \quad (1)$$

$$W_{st}^d = \frac{W_t^{dem} - W_t^{dem} * f - \sum_1^{st-1} W_{st}^{in} - W_{st}^e}{tst - st + 1} \quad (2)$$

式中, t 表示当前时间步长; tst 表示时间步长包含子时间步长的总数; st 表示当前子时间步长; W_{st}^e 表示节点外推天然来水量; W_{st}^{in} 表示节点总入流量; $W_{st}^{r,in}$ 表示节点来源于水库的入流量; W_t^{dem} 表示节点总需水量; f 表示需求抑制系数; W_{st}^d 表示节点缺水量; 水量单位均为万 m^3 。

按照水资源配置公平性、有效性与可持续性原则, 根据水库与计算单元之间的水力联系, 确定水库对用水户的供水比例, 分解用水户缺水量, 并加以累积, 得到水库的拟放水量:

$$EW_{st}^{k,out} = \sum_{i=1}^N W_{st}^{i,d} * \alpha_{st}^{i,k} \quad (3)$$

式中, $EW_{st}^{k,out}$ 表示第 k 水库的拟放水量; $W_{st}^{i,d}$ 表示第 i 单元的缺水量; $\alpha_{st}^{i,k}$ 表示第 k 水库与第 i 计算分区之间的水力联系; 水量单位均为万 m^3 。

3) 供水计算

水库群的供水流量根据水库运行调度规则确定。其中龙头水库的供水流量根据水库的蓄水线与供水流量线确定, 其供水流量计算图如图 2 所示。根据模拟子时间步长在运行调度规则表中所处时段的初始最大、最小蓄水量, 结束最大、最小蓄水量与初始最大、最小供水流量, 结束最大、最小供水流量, 并结合当前时刻水库群的总蓄水量, 插值计算得该子时间步长内龙头水库的供水流量:

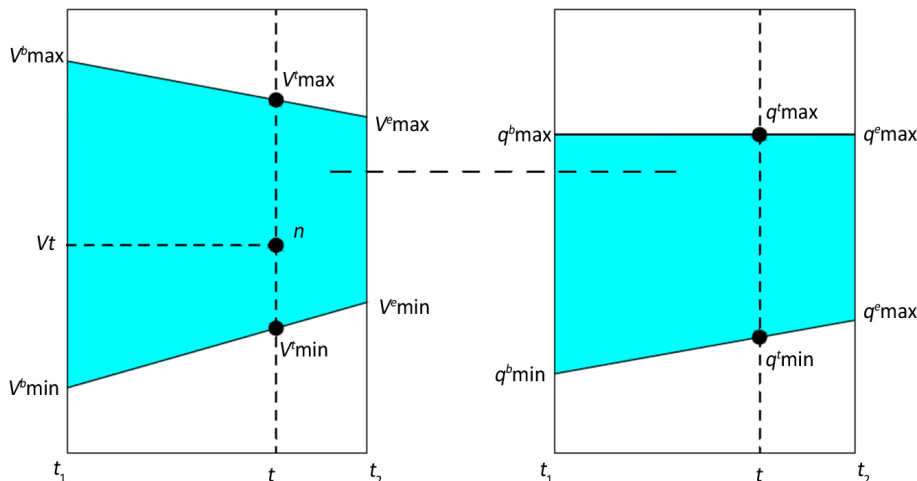


Figure 2. Calculation diagram of water supply discharge of the main reservoir
图 2. 龙头水库供水流量计算图

$$P_t = t/T \tag{4}$$

$$V_{max}^t = V_{max}^b * (1 - P_t) + V_{max}^e * P_t \tag{5}$$

$$V_{min}^t = V_{min}^b * (1 - P_t) + V_{min}^e * P_t \tag{6}$$

$$q_{max}^t = q_{max}^b * (1 - P_t) + q_{max}^e * P_t \tag{7}$$

$$q_{min}^t = q_{min}^b * (1 - P_t) + q_{min}^e * P_t \tag{8}$$

$$P_v = (V^t - V_{min}^t) / (V_{max}^t - V_{min}^t) \tag{9}$$

$$q^t = q_{min} * (1 - P_v) + q_{max} * P_v \tag{10}$$

式中， t 表示模拟当前时刻； T 表示模拟时段的总长度； P_t 表示已模拟时段占模拟时段总长度比例； V_{max}^t 、 V_{min}^t 表示水库群在 t 时刻的最大与最小蓄水量； V_{max}^b 、 V_{min}^b 、 V_{max}^e 、 V_{min}^e 表示水库群在时段起始与结束时的最大、最小蓄水量； q_{max}^t 、 q_{min}^t 表示龙头水库在 t 时刻的最大与最小供水流量； q_{max}^b 、 q_{min}^b 、 q_{max}^e 、 q_{min}^e 表示龙头水库在时段起始与结束时的最大、最小供水流量； V^t 表示水库群在 t 时刻的蓄水量； P_v 表示水库群蓄水量的插值比例； q^t 表示龙头水库在 t 时刻的供水流量；水量单位均为万 m^3 ；流量单位均为 m^3/s 。

水库群中的其他水库的供水流量根据水量平衡关系表确定。当水库的蓄水量大于水量平衡关系表中的临界蓄水量时，超过临界值部分的蓄水量将排向下游。

4) 配水与耗水计算

水资源在各个用水户之间的分配按照优先权从高到低的顺序进行。各类用水户用水过程乘以耗水系数，即可得到耗水过程。

2.4. 约束条件

1) 计算分区水量平衡约束

$$W_{st}^i = \sum_{m=1}^M W_{st}^m \cdot \beta_{st}^{i,m} + \sum_{k=1}^K W_{st}^{k,out} \cdot \alpha_{st}^{i,k} + W_{st}^{i,in} - \sum_{j=1}^J W_{st}^{i,j} \cdot c_{st}^{i,j} - W_{st}^{i,l} - W_{st}^{i,t} \tag{11}$$

式中： W_{st}^i 表示第 i 计算分区的水量； W_{st}^m 表示第 m 计算分区的水量； $\beta_{st}^{i,m}$ 表示第 i 与第 m 计算分区之间的水力联系； $W_{st}^{k,out}$ 表示第 k 水库的下泄量； $\alpha_{st}^{i,k}$ 表示第 k 水库与第 i 计算分区之间的水力联系； $W_{st}^{i,in}$ 表示第 i 计算分

区的天然来水量； $W_{st}^{i,j}$ 表示第 i 计算分区第 j 用水户的配水量； $c_{st}^{i,j}$ 表示第 i 计算分区第 j 用水户的耗水系数； $W_{st}^{i,l}$ 表示第 i 计算分区的损失水量； $W_{st}^{i,t}$ 表示第 i 计算分区的外调水量；水量单位均为万 m^3 。

2) 水库约束

① 水库水量平衡约束

$$V_{st+1}^k = V_{st}^k + W_{st}^{k,in} - W_{st}^{k,out} - W_{st}^{k,l} \quad (12)$$

式中： V_{st+1}^k 与 V_{st}^k 分别表示第 k 水库在第 $st + 1$ 与第 st 子时间步长内的库容； $W_{st}^{k,in}$ 与 $W_{st}^{k,out}$ 分别表示第 k 水库的来水量与下泄量； $W_{st}^{k,l}$ 表示第 k 水库的损失水量；水量单位均为万 m^3 。

② 水库库容约束

$$V_{\min st}^n \leq V_{st}^n \leq V_{\max st}^n \quad (13)$$

式中： $V_{\min st}^n$ 与 $V_{\max st}^n$ 分别表示第 n 水库在第 st 子时间步长内最小与最大库容；水量单位均为万 m^3 。

3) 非负约束

$$W_{st}^{i,j} \geq 0 \quad (14)$$

4) 需水约束

$$W_{st}^{i,j} \leq DW_{st}^{i,j} \quad (15)$$

式中： $DW_{st}^{i,j}$ 表示第 i 计算分区第 j 用水户在第 st 子时间步长内的需水量，万 m^3 。

5) 供水能力约束

$$\sum_{j=1}^J W_{st}^{i,j} \leq AW_{st}^i \quad (16)$$

式中： AW_{st}^i 表示第 i 计算分区在第 st 子时间步内的可供水量，万 m^3 。

3. 汉江流域中下游地区水资源配置模型构建

3.1. 研究区——汉江流域中下游地区概况

根据研究需要及掌握资料,本文以汉江中下游湖北省境内范围为研究对象,区域内国土面积约为 4.11 万 km^2 ,涉及神农架、十堰、襄阳、荆门、潜江、天门、仙桃、孝感和武汉等重要城市及其所辖的市、县、区以及“五三”、“沙洋”、“沉湖”等农场的全部或部分范围。汉江流域中下游地区包含以丹江口水库至汉口龙王庙的汉江干流及其分支东荆河为主要水源以及补充水源的供水范围,是实施最严格水资源管理制度的试点流域之一,且位于其上游侧的丹江口水库是南水北调中线工程的战略水源地,在全国水资源配置中具有重要地位。研究区域位于亚热带季风气候区,水资源总量丰富,多年平均降水量达 800~1100 mm,但时空分布不均,呈现出南多北少,水量集中在汛期的格局。并且随着人口数目增长与社会经济发展,需水量不断增大,供水保证率越来越高,区域内水资源的供需矛盾日益凸显,水资源条件已经成为限制流域内经济发展与生态稳定的瓶颈。

3.2. 计算单元划分

为便于与行政区的来水、需水信息结合,以水资源四级区为基础,结合县(市)级行政区划分计算单元并将研究区域划分为 28 个计算单元,计算分区空间分布与系统节点网络概化分别如图 3 与图 4 所示。

3.3. 模型输入

1) 水平年及计算步长

以 2010 年为基准年,2030 年为规划水平年,计算步长取为“年”、“季”、“月”。

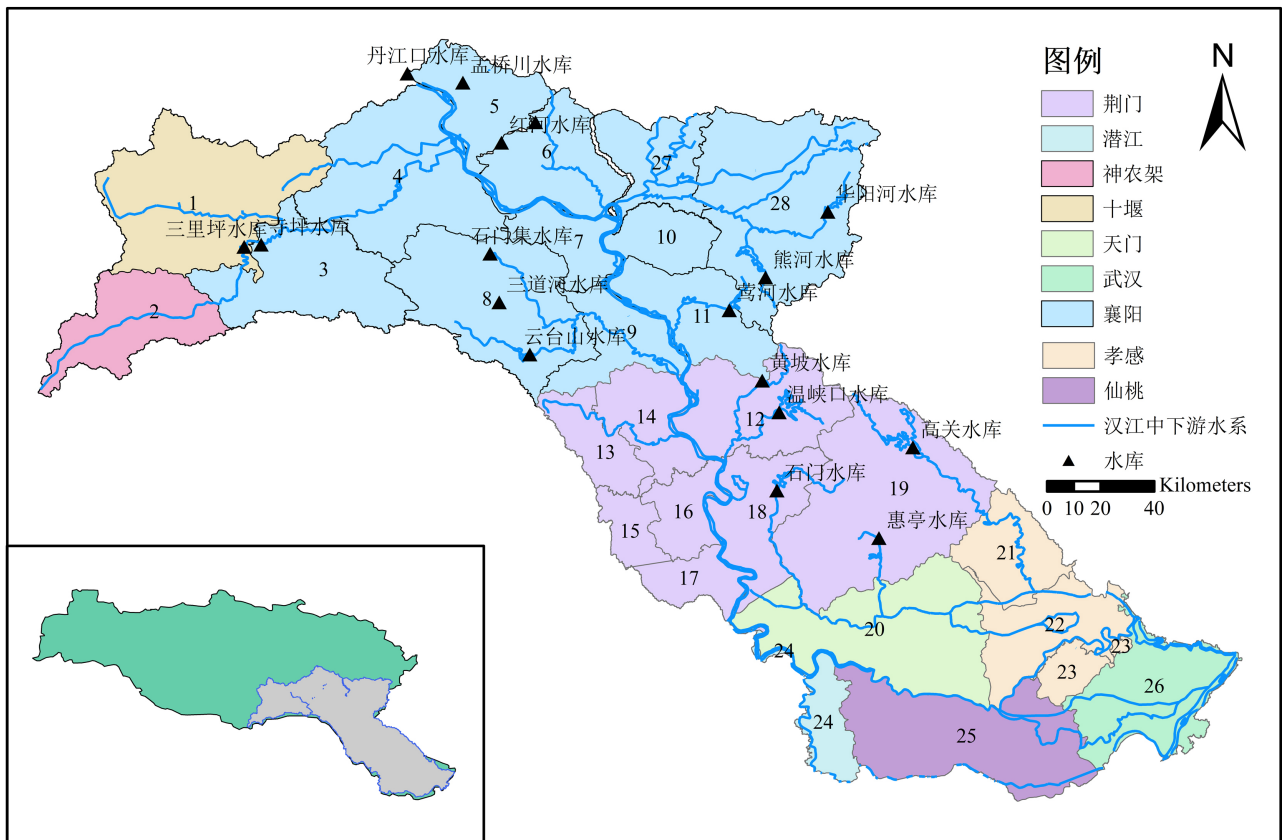


Figure 3. Spatial distribution of computing units and reservoirs in the middle and lower reaches of Hanjiang River basin
图 3. 汉江中下游各个计算单元与水库的空间分布

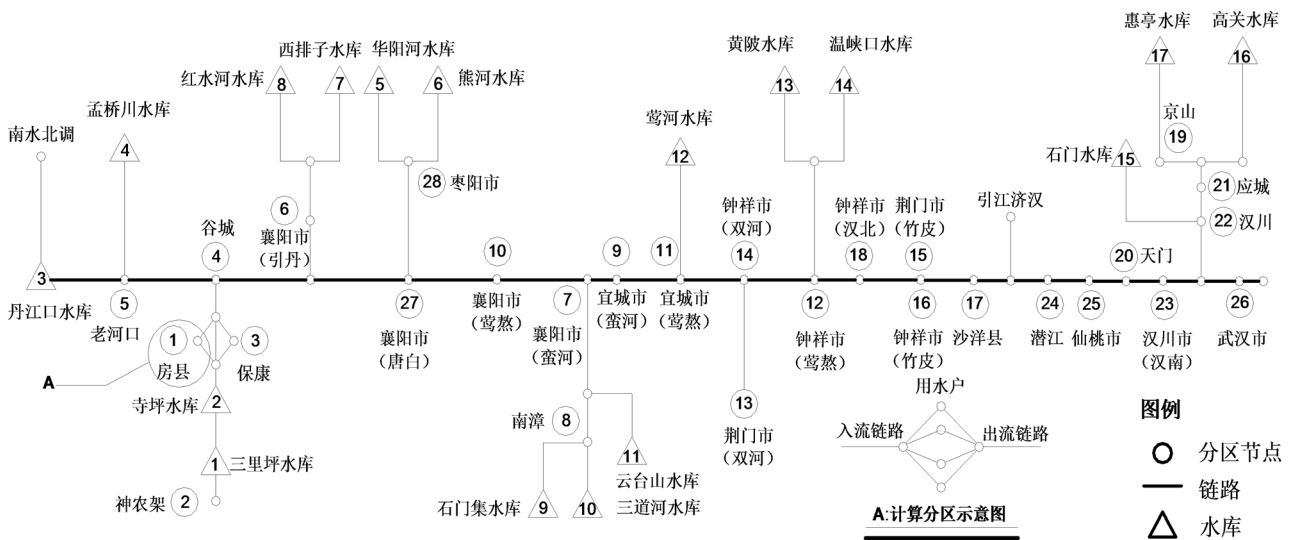


Figure 4. Schematic diagram of the middle and lower reaches of Hanjiang River basin
图 4. 汉江流域中下游水资源系统节点网络概化图

2) 来水条件与需水条件

根据长江水利委员会编写的《长江流域水资源综合规划》成果，输入各个计算单元的水资源量及水库入库流量采用历史时期(1956~2011年)长序列水文资料逐年、季、月长序列径流过程和水库监测入库流量过程进行调

算；需水基础数据主要来自长江水利委员会编写的《汉江流域综合规划》(下称《规划》)及《2010 年湖北省水资源公报》(下称《公报》)相关成果。各计算单元的用水部门包含：生活用水、工业生产用水、农业生产用水 3 种河道外需水和河道内生态用水共 4 类，以《公报》相关数据对基准年的用水指标进行校核和修正，进而对规划水平年的用水指标及定额进行预测，表 1 展示了汉江流域中下游地区在 2010 基准年与 2030 水平年河道外各用水户的平均需水状况；河道内生态需水量的估算采用 Tennant 法[13]，其逐月需水数据通过年需水量乘以各个月份的分配系数得到，分配系数以《规划》报告提供数据为准。

Table 1. Annual off-stream water demand in the present and planning years (100 million m³)

表 1. 现状与规划水平年河道外需水状况(亿 m³)

水平年	生活需水	城镇生产需水	农村生产需水	总需水
现状水平年(2010)	5.57	45.14	63.04	113.75
规划水平年(2030)	7.6	53.55	57.63	118.77

3) 参数设置

根据优先保证生活和生态基本用水的原则，供水优先权从高到低依次为：河道内生态用水、生活用水、城镇生产用水与农村生产用水，以此分析汉江流域中下游地区的水资源供需情况；汉江流域中下游地区的河道内生态用水、生活用水、城镇生产用水与农村生产用水的回归系数取值见表 2；研究区域内共有 17 座大中型水库，水库的特征参数参见文献[7]。

Table 2. Regression coefficient of every type of water use in the Hanjiang River basin

表 2. 汉江流域各类用水的回归系数

项目	河道内生态用水	生活用水	城镇生产用水	农村生产用水
耗水系数	0	0.4	0.3	0.6
回归系数	1	0.6	0.7	0.4

4. 结果分析

根据构建的水资源配置模型，对汉江流域中下游地区的用水、供水进行了模拟计算，分析了各计算单元 2010 基准年与 2030 水平年的三种时间尺度下的供需情况。汉江流域中下游地区在 2010 基准年与 2030 水平年中，年、季和月三种时间尺度下，各类用水户的总缺水状况如表 3 所示；由表 3 可知：在相同时间尺度下，2030 规划水平年的总缺水率与各类用水户的缺水率均大于或等于(不缺水时) 2010 基准年的总缺水率与各类用水户的缺水率；在“年”、“季”、“月”三种时间尺度条件下，2010 基准年与 2030 规划水平年中汉江流域中下游地区总缺水率分别为 0.7%、2.59%、5.39%与 1.19%、3.27%、6.34%，均随着时间尺度的缩短而上升。

Table 3. Total water scarcity in the middle and lower reaches of Hanjiang River basin (10,000 m³)

表 3. 汉江流域中下游地区总缺水状况(万 m³)

水平年	时间尺度	项目	生活生态	城镇生产	农村生产	河道外	河道生态	总缺水
2010	年	缺水量	1	2960	7593	10,554	12	10,566
		缺水率	<0.01%	0.66%	1.23%	0.94%	<0.01%	0.70%
	季	缺水量	241	24,568	13,318	38,127	1090	39,217
		缺水率	0.43%	5.44%	2.16%	3.39%	0.28%	2.59%
	月	缺水量	1045	40,016	37,087	78,148	3532	81,680
		缺水率	1.88%	8.86%	6.01%	6.95%	0.90%	5.39%

Continued

2030	年	缺水量	1	9264	9542	18,807	17	18,825
		缺水率	<0.01%	1.73%	1.65%	1.58%	<0.01%	1.19%
	季	缺水量	338	36,178	14,109	50,625	1100	51,725
		缺水率	0.45%	6.76%	2.45%	4.26%	0.28%	3.27%
	月	缺水量	1554	56,260	38,839	96,652	3560	100,212
		缺水率	2.05%	10.51%	6.74%	8.14%	0.91%	6.34%

由于水资源管理常以地级市为单位，将各个计算单元的缺水状况汇总统计到地级市之中，以进一步分析研究区域缺水分布状况与不同时间尺度条件下各地级市的缺水状况。表 4 展示了 2030 规划水平年中汉江流域中下游地区各地级市在三种时间尺度下的缺水状况。天门、孝感、潜江、仙桃与武汉由于紧邻汉江下游干流，来水条件良好，水利工程调控能力强，供水充沛，在三种时间尺度条件下的缺水率均很小，水资源配置的时间尺度效应并不明显，故不列入表 4 之中。

Table 4. Water scarcity in every city in the middle and lower reaches of Hanjiang River basin (10,000 m³)

表 4. 汉江流域中下游地区各地级市缺水状况(万 m³)

地级市行政区	项目	年尺度	季尺度	月尺度
十堰	缺水量	0	1857	3207
	缺水率	0.00%	4.07%	7.03%
神农架	缺水量	0	603	841
	缺水率	0.00%	3.55%	4.96%
襄阳	缺水量	16,181	42,364	83,907
	缺水率	2.55%	6.68%	13.23%
荆门	缺水量	2579	6503	9420
	缺水率	0.87%	2.21%	3.19%

十堰、神农架、襄阳与荆门在三种时间尺度条件下的缺水率均随着时间尺度的缩短而增加，水资源配置的时间尺度效应比较明显。以荆门市为例：荆门市需水量大，超过了天然来水条件，且水库调控能力有限，缺乏有效调节，缺水相对严重。图 5 展示了荆门市在三种时间尺度下的来水—需水关系，可以发现，长时间尺度配置条件平滑了来水与需水过程，需水与来水被均匀到年内其他时段，用水缺口有一定的减小：荆门市在月、季和年尺度下的用水缺口分别为 136,674、132,527 和 132,527 万 m³，但是由于其年内各个时段的需水均处于较高水平，三种时间尺度下的缺水量的减少并不明显。而在长时间尺度条件平滑来水与需水过程同时，用水缺口在年内的分布也变得更加均匀，其变差系数分别为 0.55、0.45 和 0，从而减小了水库在集中供水时期的供水压力，提升了区域的调控能力，因此长时间尺度条件下的配置结果缺水率低于短时间尺度条件下的配置结果缺水率。

5. 结论

本文以 2010 年为基准年，2030 年为规划水平年，在分析水资源系统中供、用、耗、排等主要环节中所涉及的要素和相互连接关系的基础上，运用 IRAS 模型在汉江流域中下游地区建立了水资源配置模拟模型，并利用模型可灵活调整计算时间步长，时间尺度适应性好的特点，研究了汉江流域中下游流域在年、季、月时间尺度条件下的水资源配置状况，得到的主要研究结论如下：水资源配置结果的时间尺度效应在不同地区有所差异，

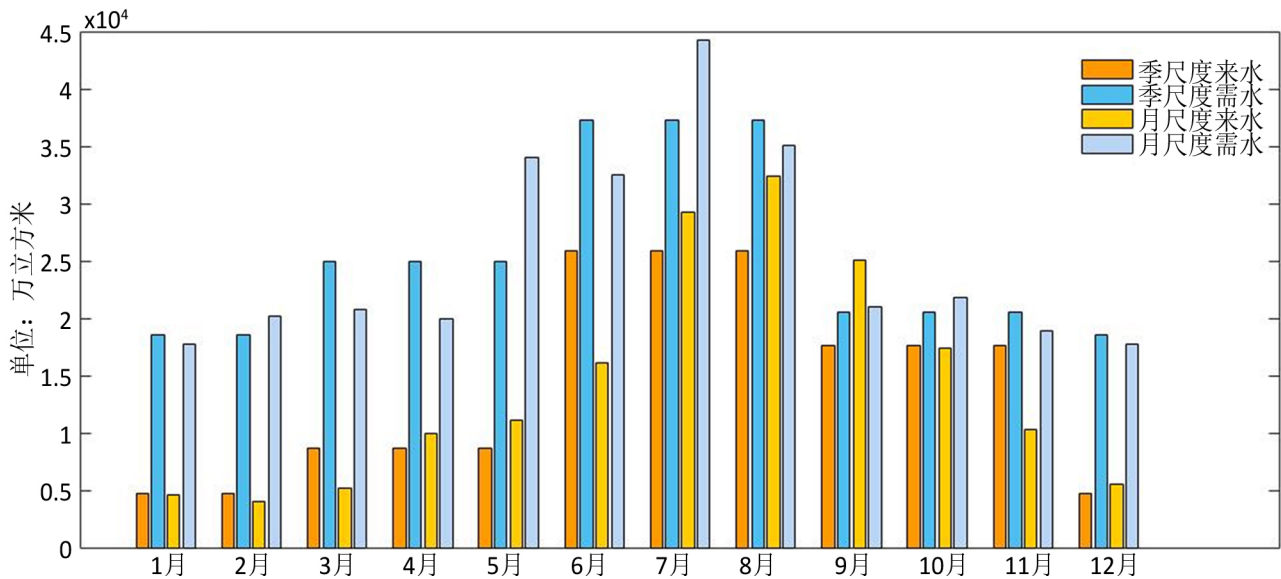


Figure 5. The process of water inflow and water demand in Jingmen city under seasonal and monthly scales

图 5. 荆门市在季、月尺度下来水 - 需水过程

这是由于不同地区由于水资源条件和系统调节能力不同；具有良好来水条件区域，在不同时间尺度条件下均不发生缺水，配置结果明显无变化，水资源配置时间尺度效应不明显；在水资源短缺且系统的调节能力较弱地区，长时间尺度配置条件将平滑需水变量与来水变量在时间上的不均匀性，进而提高需水变量与来水变量的匹配程度，减小总体用水缺口，均匀缺水在年内的分布，使得长时间尺度条件下的配置结果缺水率低于短时间尺度条件下的缺水率，水资源配置时间尺度效应比较敏感。因此水资源配置中各个计算单元的时间尺度效应与区域水资源条件与系统调节能力相关，选择合适的时间尺度不仅是反映出水资源配置空间区域性特点，也是新时期水资源的精细化配置和风险管理的必然要求。

基金项目

国家自然科学基金(51879194, 91647106, 51579183)资助项目。

参考文献

- [1] 王浩. 我国水资源合理配置的现状和未来[J]. 水利水电技术, 2006, 37(2): 7-14.
WANG Hao. Current status and future trend of rational allocation of water resources in china. Water Resources and Hydro-power Engineering, 2006, 37(2): 7-14. (in Chinese)
- [2] 尹家波, 郭生练, 吴旭树, 等. 两变量设计洪水估计的不确定性及其对水库防洪安全的影响[J]. 水利学报, 2018, 49(6): 715-724.
YIN Jiabo, GUO Shenglian, WU Xushu, et al. Uncertainty of bivariate design flood estimation and its impact on reservoir flood prevention. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(6): 715-724. (in Chinese)
- [3] 刘德地, 郭生练, 郭海晋, 等. 实施最严格水资源管理制度面临的技术问题与挑战[J]. 水资源研究, 2014(3): 179-188.
LIU Dedi, GUO Shenglian, GUO Haijin, et al. Technique controversies and challenges of applying the strictest water resources control system. Journal of Water Resources Research, 2014(3): 179-188. (in Chinese)
- [4] 甘治国, 蒋云钟, 鲁帆, 等. 北京市水资源配置模拟模型研究[J]. 水利学报, 2008, 39(1): 91-95.
GAN Zhiguo, JIANG Yunzhong, LU Fan, et al. Water resources deployment model for Beijing city. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(1): 91-95. (in Chinese)
- [5] 刘德地, 陈晓宏. 咸潮影响区的水资源优化配置研究[J]. 水利学报, 2007, 38(9): 1050-1055.
LIU Dedi, CEHN Xiaohong. Study on the optimal deployment of water resources in saltwater intrusion areas. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(9): 1050-1055. (in Chinese)

- [6] 王维平, 陈芳, 范明元, 等. 滨海地区生态型水资源优化配置模型[J]. 水利学报, 2006, 37(8): 991-995.
WANG Weiping, CEHN Fang, FAN Mingyuan, et al. Model for ecological oriented water resources optimal deployment in coastal area. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(8): 991-995. (in Chinese)
- [7] 田晶, 郭生练, 刘德地, 等. 汉江流域中下游地区水资源多目标优化配置[J]. 水资源研究, 2018, 7(3): 223-235.
TIAN Jing, GUO Shenglian, LIU Dedi, et al. Multi-Objective optimal allocation of water resources in the middle and lower reaches of Hanjiang River basin. Journal of Water Resources Research, 2018, 7(3): 223-235. (in Chinese)
- [8] 樊尔兰, 李怀恩. 分层型水库水量水质综合优化调度的研究[J]. 水利学报, 1996(11): 33-38.
FAN Erlan, LI Huaen. Optimal operation for stratified reservoir considering both water volume and quality. Journal of Hydraulic Engineering, 1996(11): 33-38. (in Chinese)
- [9] 张守平, 魏传江, 王浩, 等. 流域/区域水量水质联合配置研究 II 实例应用[J]. 水利学报, 2014, 45(8): 938-949.
ZHANG Shouping, WEI Chuanjiang, WANG Hao, et al. Basin/region water quality and quantity allocation II. Application. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(8): 938-949. (in Chinese)
- [10] VÖRÖSMARTY, C. J., GREEN, P., SALISBURY, J., et al. Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. Science, 2000, 289(5477): 284-288. <https://doi.org/10.1126/science.289.5477.284>
- [11] MEKONNEN, M. M., HOEKSTRA, A. Y. Four billion people facing severe water scarcity. Science Advances, 2016, 2(2): e1500323. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323>
- [12] MATROSOV, E. S., HAROU, J. J. and LOUCKS, D. P. A computationally efficient open-source water resource system simulator—Application to London and the Thames Basin. Environmental Modelling & Software, 2011, 26(12): 1599-1610. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.07.013>
- [13] TENNANT, D. L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation, and related environmental resources. Fisheries Management and Ecology, 1976, 1(4): 6-10. [https://doi.org/10.1577/1548-8446\(1976\)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1976)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2)