

问题选择 B
MCM/ICM
Summary Sheet

2207864

水利水电共享摘要

本文针对美国西部五州的水资源短缺问题，基于等价替代模型、动态规划等算法，建立了数学模型，为水利基础设施人员提供根据实际情况进行各阶段的水量分配方案，以应对当前的水资源短缺状况。

针对问题1，首先，建立基于水库等效替代模型的多目标规划模型，实现水资源的合理配置。经计算，米德湖每天需要供水 121387624m^3 ，输送时间为20.75小时，鲍威尔湖每天需要供水 72711113m^3 ，输送时间为12.3小时，但至少需要额外约 87610200m^3 的水才能满足固定的日需求。本模型中的大坝每天可提供稳定的2776MWH的电力供应，详见表4。其次，采用动态规划算法来维护各个模型的实时数据，且一旦完成输水任务，就需要重新启动模型。最后，模拟计算出格伦峡谷大坝向胡佛大坝提供 $300\text{m}^3/\text{s}$ 的稳定流量；每天有 23,489.741 立方米的水流入加利福尼亚湾；每年需向墨西哥赔偿 3000 万美元。

对于问题2，我们利用基于EWM的TOPSIS法评估各州农业和工业的重要性，在此情况下，根据评估结果，优先向评级最高的加州供水。然后利用0-1规划，根据水库水位情况分三个阶段进行讨论，给出划分标准。每个阶段，优先考虑尽可能满足居民用水需求、维持水位平衡和保证水坝稳定供电，同时考虑对墨西哥的影响等，设计不同的分配标准，详见P15。

针对问题3，我们提出补水方案解决供大于求的现状，其中提高输电效率可节约发电用水 $29788\text{m}^3/\text{d}$ ，再生水技术可减少一般需水量约 $6.9 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ ，覆盖聚乙烯柔性布可减少蒸发量 $5.28 \times 10^4 \text{m}^3/\text{年}$ 。问题2中的多阶段标准可根据实际情况进行分类讨论。农业和工业用水定额分阶段不同，5个州实现全民供水。农业和工业用水分配，加州全额供应，其他州第一阶段供应76.77%；第二阶段供应37.8%-43.8%；第三阶段供应8.8%。各阶段总发电量为27,673,000MW，详见P18。

针对问题4，基于模型结合具体数据分析了人口、农业和工业发展、节水节电措施、可再生能源技术的引入对模型的量化影响。

关键词：动态规划，多目标规划，基于EWM的TOPSIS方法，多阶段讨论

内容

1.引言.....	3
1.1 问题背景.....	3
1.2 我们的工作.....	3
2. 假设与论证.....	4
3. 符号.....	4
4. 模型准备.....	4
5. 问题 1 的解决方案.....	6
5.1 步骤 1：建立水库等效替代模型.....	6
5.2 步骤 2：建立多目标规划水量调度函数.....	8
5.2.1 数据处理.....	8
5.2.2 模型构建.....	10
5.2.3 模型细化.....	10
5.3 步骤 3：附加问题.....	12
5.3.1 对墨西哥的补偿.....	12
5.3.2 流入加利福尼亚湾的水量.....	13
6.问题 2 的解决方案.....	14
6.1 基于 EWM 的 TOPSIS 法.....	14
6.2 基于 0-1 规划的多阶段讨论.....	16
6.2.1 阶段 1.....	16
6.2.2 阶段 2.....	16
6.2.3 阶段 3.....	16
7.问题 3 的解决方案.....	17
7.1 问题概述.....	17
7.2 具体措施及其效益.....	17
7.2.1 提高电力输送效率.....	17
7.2.2 再生水利用.....	17
7.2.3 减少湖面水蒸发.....	17
7.3 多阶段讨论.....	18
7.3.1 第 1 阶段.....	19
7.3.2 第 2 阶段.....	19
7.3.3 第 3 阶段.....	20
7.3.4 补充说明.....	20
8. 问题 4 的含义.....	20
8.1 需求何时发生变化？.....	20
8.2 技术何时改进？.....	21
8.3 何时节省需求？.....	21
9. 敏感性分析.....	21
10. 模型评估及进一步讨论.....	23
10.1 优点.....	23
10.2 不足与改进.....	23
10.3 模型推广.....	23
11. 参考文献.....	24
12. 合理的解决方案.....	25

1.引言

美国西部五州加州、亚利桑那州、科罗拉多州、新墨西哥州和怀俄明州的水源主要来自米德湖和鲍威尔湖。米德湖由胡佛水坝蓄水而成，鲍威尔湖则由格伦峡谷水坝蓄水而成，两座水库均可为周边居民提供水力发电。随着人口、农业、工业的快速发展和气候变化，两座水库的水量正在迅速减少。2021年，两座水库的水位均降至历史最低点。在资源紧缺的当下，为了有效利用两座水库的蓄水量，优化水电资源配置，尽最大努力保障周边居民的正常生活，政府水资源管理者不得不重新考虑两座湖泊2022年的资源配置方案。

1.1 问题背景

考虑到背景信息的分析和问题陈述的约束条件，需要具体解决以下问题：

当两个水库的水位固定时，模拟计算出满足指定需求所需的从每个水库提取的水量和时间。它还考虑了当水库资源无法满足固定需求时需要补充水库的额外水资源量。找到应对水资源短缺问题的最佳分配方案并描述分配标准。使用该模型解决如何在水资源短缺的情况下满足水和电力需求。考虑五州地区人口、农业、工业、可再生能源技术以及水电保护措施变化的影响。

1.2 我们的工作

开发了两座水库水资源分配的多目标规划模型，以模拟和解决满足需求的相关问题。通过分析各州农业和工业的重要性，给出了水资源的最佳配置。分多个阶段讨论了该模型，并给出了划分每个阶段的标准和解决方案。描述了模型的适应性，最后提供了敏感性分析和模型评估。准备一篇一页的文章，提交给《干旱与口渴》杂志。

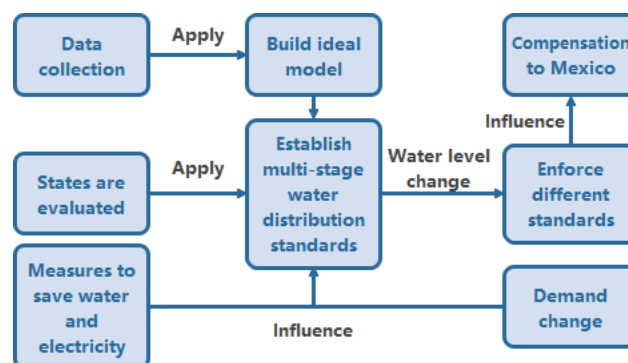


图1：总体关系图

2. 假设与依据

假设1：短时间内不考虑水分蒸发和降雨对水库水位的影响

解释：为了简化模型，本文忽略了模型水位因气候因素（即蒸发和降雨）引起的不稳定性。事实上，极端天气对模型的影响可能很大，但概率较小，暂不考虑。

假设2：假设五个州的人口、农业或工业不会发生剧烈变化，从而对模型产生剧烈影响。

理由：水库用水量与五州人口数量、耕地面积和工业发展水平密切相关。模型和数据库基于当前条件，这使我们能够合理地忽略人口和产业结构突然变化的极端情况。

假设3：水坝产生的水力发电并入电网，然后发电厂将电力输送到各州。

理由：由于模型对各州电力的分配涉及人口、政治政策和其他相关因素，本文计算总发电量所消耗的水量，忽略对各州电力的分配。

假设4：米德湖和鲍威尔湖地区的水密度为 1g/cm^3 。

解释：由于模型涉及的数据较大，且湖水密度非常接近 1g/cm^3 ，因此最终的误差可以忽略不计。

3. 符号

表格列出了本文中使用的符号。表1：符号

Symbol	Description	Unit
P	Lake Powell water level	ft
M	Lake Mead water level	ft
$Demand$	Total demand	m^3
$Proportion$	Actual quota percentage	--
$Supply$	Actual water supply from the two reservoirs	m^3
PWN	Actual power generation	kWh
$MFlow$	Lake Mead Flow	m^3
$PFlow$	Lake Powell Flow	m^3

注：部分变量这里没有列出，具体含义将在使用时介绍。

4. 模型准备

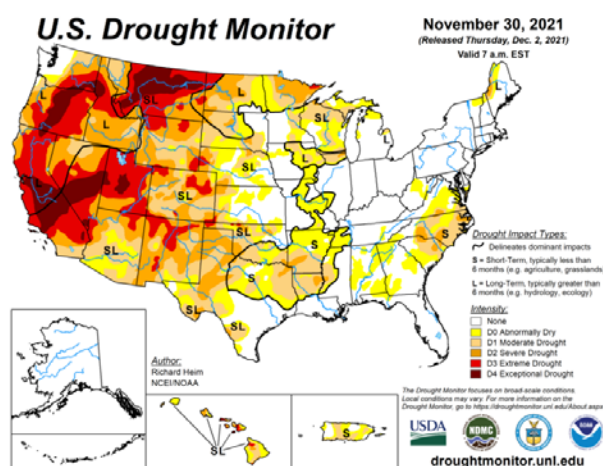
4.1 数据概览

由于全球变暖、森林火灾等极端气候事件，数据显示，2021年美国西部72%的地区将处于“严重干旱”状态，26%的地区将处于“异常干旱”状态。在极端气候下，米德湖和鲍威尔湖的水位都已降至历史最低水平，并将继续下降。

下图是美国气象局官网^[1]的干旱监测图，图中用不同的颜色表示不同程度的干旱

干旱程度，颜色越深代表干旱越严重，直观的可以看出美国西部的干旱程度与东部有很大的差别，其中加州人口基数大，森林火灾等因素造成了目前干旱面积大、程度重的局面。

由于模型需要两座水库才能满足周边五个州的供水和电力需求水平，我们收集了五个州（亚利桑那州、加利福尼亚州、



通过查阅相关文献，我们预测 2020 年美国将有 350 万人受到冠状病毒疫情的影响（怀俄明州、新墨

表二：2020年五州人口及用水量统计

State name	Population	Residential water consumption (tons/day)	Industrial water consumption (tons/day)	Agricultural water consumption (tons/day)
California	39937489	19759850.64	11965687.33	73550555.16
Arizona	7378494	4610631.82	3838407.77	1693861.62
Colorado	5845526	3088896.19	772224.05	33205634.06
New Mexico	2096640	908498.88	57916.80	10095693.80
Wyoming	567025	395878.39	118513.52	30036487.14

4.2 数据可视化

下图显示了各州用水数据的可视化。从下面的信息可以看出，加利福尼亚州每天的用水量最多，占五个州的 54%。这些水大部分用于农业，占 76%。

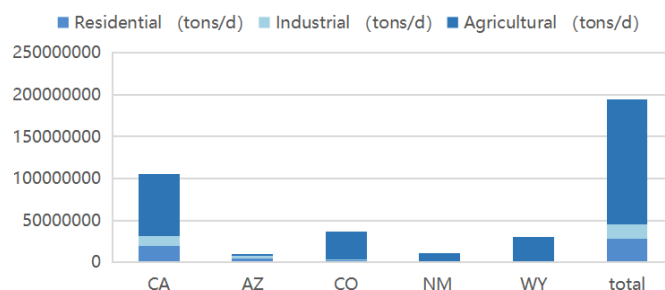


图 2：各州的用水量

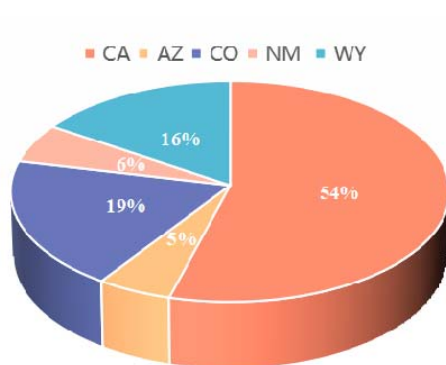


图3：总用水量占比

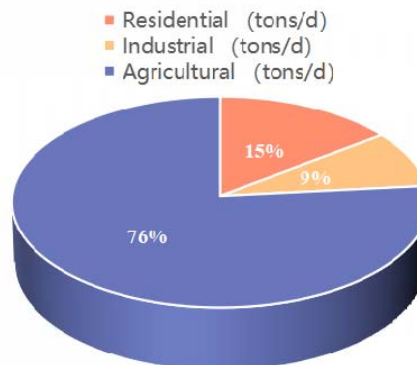


图4：用水量占比

5. 问题 1 的解决方案

5.1 步骤1：建立油藏等效替代模型

由于胡佛大坝（米德湖）和格伦峡谷大坝（鲍威尔湖）的入库径流量、库容、形状和高程等都不相同，其影响因素复杂多样，很难在短时间内探究相关因素之间的关系。因此，为了研究两座水库在水资源调度中的相关问题，选择运用解决物理问题常用的等效思想，建立水库的理想化模型。水库的等效理想化模型是指在面对水库调度这样一个动态、离散、复杂的科学问题时，首先抽象出水库的根本特性——蓄水量，舍弃非根本特性，转化为人们熟悉的模型以供替代研究。通过查阅资料得知，米德湖的库容为350亿立方米，鲍威尔湖的库容为333亿立方米，因此，创建一个等体积的倒置圆锥体来表示两个湖泊的外观，如图5所示。

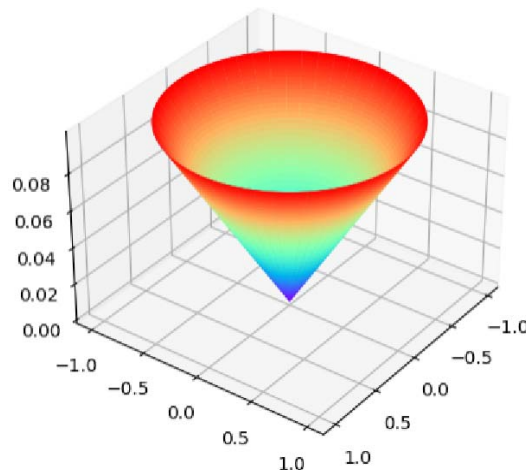


图5 油藏抽象模型

已知米德湖当前水位为1067.65英尺，水库满库水位为1220英尺，库容350亿立方米，当前库容为满库容的35%，满足水力发电的最低水位为833.33英尺^[2]。已知鲍威尔湖当前水位为3546.93英尺，水库满库水位为3700英尺，库容333亿立方米，当前库容为满库容的30%，满足水力发电的最低水位为3490英尺^[3]。

根据以上数据建立模型，设定基本参数MP为米德湖最大库容，MN为米德湖当前库容，MH为最高水位与最低水位差，ML为满足水力发电需要的最低水位

$$\begin{cases} MP = 35000000000m^3 \\ MN = 12250000000m^3 \\ MH = 46.436m \\ ML = 833.33ft \end{cases}$$

已知圆锥的体积由公式给出（R 是圆锥底面半径，H 是圆锥的高度）。

$$V = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot H}{3} \quad (1)$$

求解抽象模型底部半径和高度的公式由圆锥体积公式推导而来，并带入米德湖数据如下（MAH表示模型高度，MNH表示当前储水高度）：

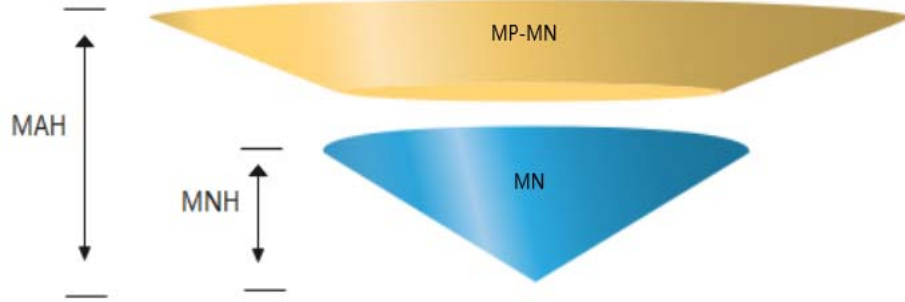


图6：模型高度图

蓝色表示水库当前的水量，黄色表示已经消失的水量。

$$MAH = \frac{MH \cdot \sqrt[3]{\frac{MP}{MN}}}{\sqrt[3]{\frac{MP}{MN}} - 1} \quad (2)$$

从上面的图表和公式中我们可以看出 $MNH = MAH - MH$
锥体底部半径求解如下（MNR为当前水体半径，MAR为模型半径）

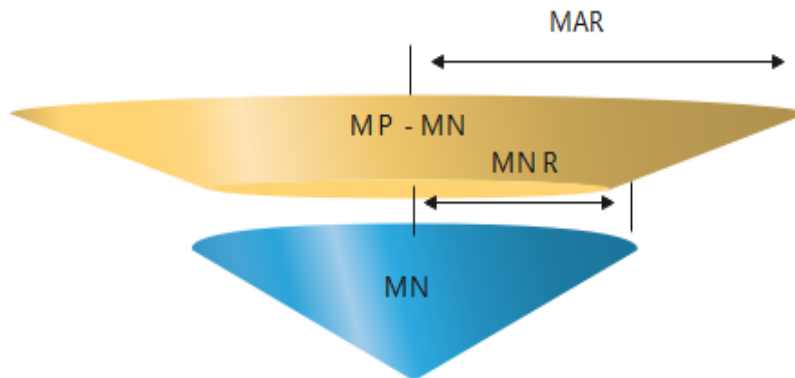


图7 模型底部半径示意图

蓝色表示水库当前的水量，黄色表示已经消失的水量。

$$MAR = \sqrt{\left(\frac{3 \cdot MP}{MAH \cdot \pi}\right)} \quad (3)$$

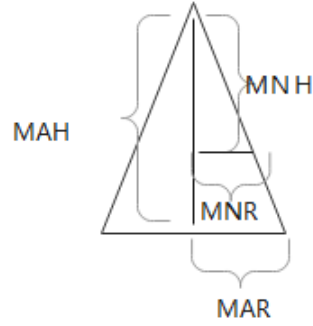


图8：模型飞机示意图

由三角形正切定理我们可以知道：

$$MNR = \frac{MNH \cdot MAR}{MAH} \quad (4)$$

最终得出的数据为：

$$\begin{cases} MAR = 14326.332m \\ MAH = 162.834m \\ MNR = 10191.447m \\ MNH = 115.843m \end{cases}$$

设置基本参数PP表示包威尔湖最大水量，PN表示包威尔湖现状库容，PH表示最高与最低水位差，PL表示满足水力发电的最低水位；PAH表示模型高度，PAR表示模型底部半径；PNR表示现状库容形成的锥体底部半径，PNH表示高度。

$$\begin{cases} PP = 33300000000m^3 \\ PN = 10656000000m^3 \\ PH = 46.634m \\ PL = 3490ft \end{cases} \quad \text{带入上述方程可得}$$

$$\begin{cases} PAR = 14679.280m \\ PAH = 147.573m \\ PNR = 10040.486m \\ PNH = 100.938m \end{cases}$$

5.2 第二步：建立多目标规划供水调度

功能

5.2.1 数据处理 1. 一般水处理

设置二维数组来存储表 2 的数据，并将 Demand 设置为代表总需求，因此

$$Demand = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 Data_{ij} \quad (5)$$

2. 发电用水量计算

两座水坝的基本数据如下，利用水力发电原理^[4]从米德湖和鲍威尔湖引水发电。

表 3 大坝基本信息

Dam information	Hoover Dam ^[5]	Glen Canyon Dam ^[6]
Dam Height(m)	221.4	216.4
Annual power generation(kWh)	4.2 billion	3.46 billion
Inlet diameter(m)	3.7	4
Outlet diameter(m)	4.3	4.2
Gravitational acceleration(m/s ²)	9.85	

水力发电厂实际出力方程^[4]。

$$\dot{P} = K_j \cdot Q \cdot H(kw) \quad (6)$$

H表示水面至坝底的距离，重力加速度为g，大坝受力系数为Kj=8，J表示年发电量，R表示出水口半径，r表示进水口半径，Q表示单位时间内流过水轮机的水量，PW表示发电所需水量，dh为水面至坝底的距离。由上述公式推导出两座大坝的耗水量公式。

$$PW = \frac{R \cdot J \cdot \sqrt{2(H - dh)}}{365 \cdot K_j \cdot \sqrt{2(H - dh)} \cdot g \cdot H \cdot r} \quad (7)$$

$$h_1 \approx 221.4 - (MAH - MNH), PW_1 \approx 112724.369m^3$$

$$h_2 \approx 216.4 - (PAH - PNH), PW_2 \approx 82551.407m^3$$

3. 计算流入两大湖的水量

通过访问美国地质调查局水资源^[7] 获得了米德湖和鲍威尔湖的实时水位变化信息。

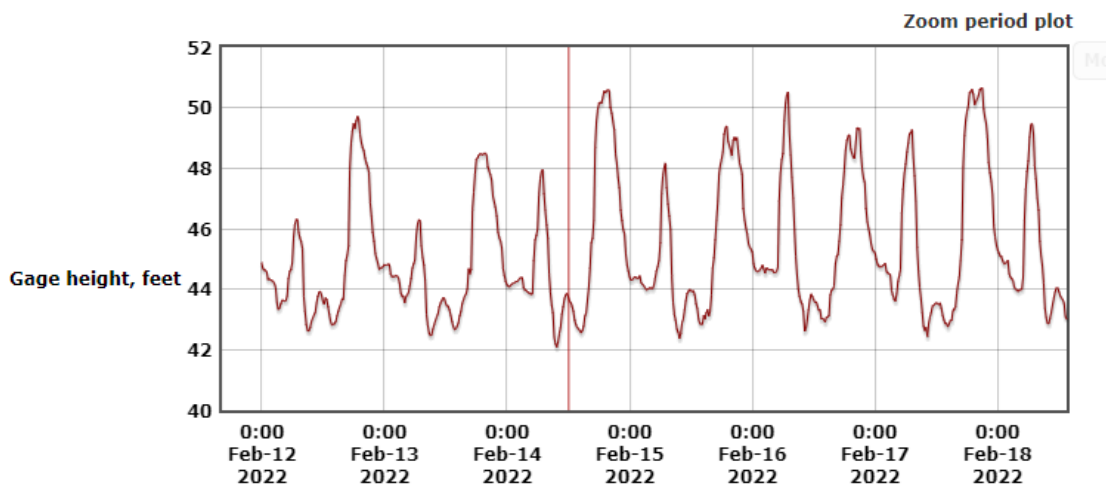


图9：米德湖实时水位变化

从图中提取信息得到米德湖 MC= 的日水面变化量为 0.179m，可以认为上图的谷底与峰顶之间为米德湖的新流入水量，因此有以下公式计算米德湖的流量（MFlow 表示米德湖的流量）：

$$MFlow = MN - \frac{\left(\left(\frac{MNH - MC}{MNH}\right) \cdot MNR\right)^2 \cdot \pi \cdot (MNH - MC)}{3 \times 24 \times 3600} \quad (8)$$

带入数据得到： $MFlow = 674.037m^3/s$

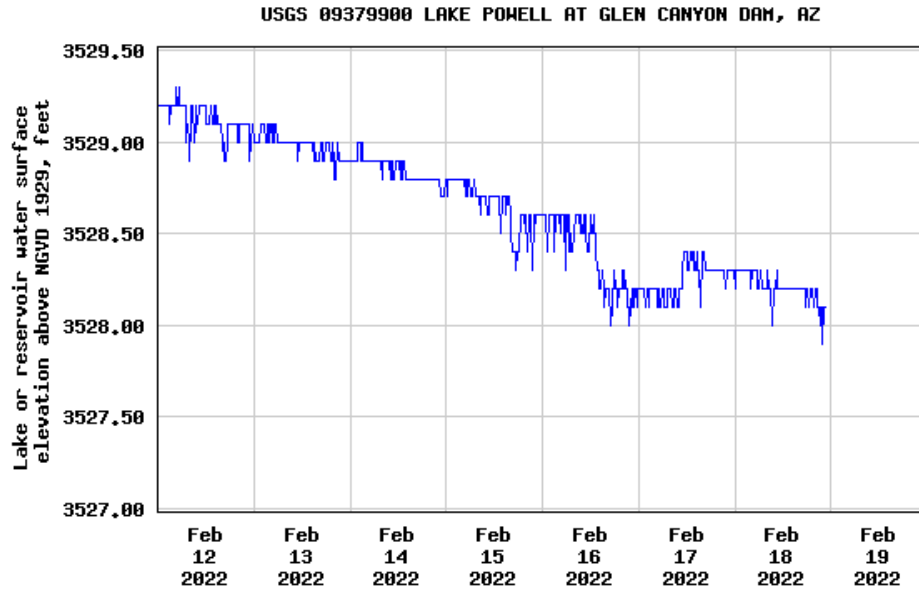


图10：鲍威尔湖实时水位变化

提取图中的信息得到鲍威尔湖每日湖面变化 $PC=0.0305m$ ，可以认为上图的波谷与波峰之间为鲍威尔湖新流入的水量，因此利用公式8计算鲍威尔湖的流量（ $PFlow$ 代表米德湖的流量），得到数据为：

$$PFlow = 558.470m^3/s$$

5.2.2 模型构建

计算了五个州的总需水量，并用动态规划算法描述了米德湖和鲍威尔湖的状况，其中水资源的分配由多目标规划确定，首先优先考虑每天流入两个湖泊的水量进行供应。如果新的流入量无法满足供应量，则从水库中抽取水进行供应，并按照以下流程进行。

设置 MFD 表示米德湖的每日流入量， PFD 表示鲍威尔湖的每日流入量，已知两个湖的流量，因此。

$$MFD = MFlow \times 24 \times 3600 = 58236771.685m^3 \quad (9)$$

$$PFD = PFlow \times 24 \times 3600 = 48251764.971m^3$$

已知某大型水坝输水站的效率为，该输水站有30~45台水泵^[8]。设 T 表示输水时间， RW 表示从水库取水总量， LW 表示需要补充补给的最小水量， $LakeK$ 表示当前水面与最低生成水位线之间的体积， $Lake$ 表示需要从水库中抽取的水量。根据以上数据和方程建立多目标规划模型。

$$T_i = \frac{RW_i}{130000 \times 45} \quad (10)$$

$$LW = Demand - PW_2$$

$$\begin{cases}
Demand = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 Data_{ij} \\
Demand = Demand - (MFD + PFD) \\
Lake_i = \frac{Demand \cdot LakeK_i}{LakeK_1 + LakeK_2} \\
RW_1 = Lake_1 + MFD \\
RW_2 = Lake_2 + PFD \\
LakeK_1 = \frac{\pi \cdot MNH_t \cdot MNR_t^2}{3} - \frac{\pi \cdot (MNH_t - MH) \cdot (\frac{MNR_t \cdot (MNR_t - MH)}{MNR_t})^2}{3} \\
LakeK_2 = \frac{\pi \cdot PNH_t \cdot PNR_t^2}{3} - \frac{\pi \cdot (PNH_t - PH) \cdot (\frac{PNR_t \cdot (PNR_t - PH)}{PNR_t})^2}{3} \\
M_t > ML \\
P_t > PL \\
\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 Data_{ij} \geq MFD + PFD
\end{cases}$$

采用动态规划方法动态维护模型数据。

米德湖抽象模型水深状态转移方程如下。

$$MNH_{t+1} = \sqrt[3]{\frac{MNH_t - Lake_1}{MNH_t}} \cdot MNH_t \quad (11)$$

米德湖抽象模型底面半径：

$$MNR_{t+1} = \frac{MNR_t \cdot MNH_{t+1}}{MNH_t} \quad (12)$$

Current water MNH_t state transfer equation for Lake Mead.

$$MNH_{t+1} = MNH_t - Lake_1 \quad (13)$$

The Lake Powell abstraction model water depth PNH_t state transfer equation is as follows.

$$PNH_{t+1} = \sqrt[3]{\frac{PNH_t - Lake_2}{PNH_t}} \cdot PNH_t \quad (14)$$

鲍威尔湖抽象模型底面半径：

$$PNR_{t+1} = \frac{PNR_t \cdot PNH_{t+1}}{PNH_t} \quad (15)$$

鲍威尔湖当前水状态转移方程。

$$PN_{t+1} = PN_t - Lake_2 \quad (16)$$

利用动态规划确定发电量与水位的关系：

米德湖和鲍威尔湖水位每下降一英尺，发电量就会减少6MW^[14]，因此建立发电量与水位的关系方程，令PWN表示当前状态下的发电量，FWL表示水位下降量，取水位下降前后发电量的平均值作为发电量

因此给出以下公式。

$$PWN_{t+1} = \frac{PWN_t - 6000 \times FWL + PWN_t}{2} \quad (17)$$

已知胡佛大坝目前发电量约为 1567 (MW)，格伦峡谷大坝发电量约为 1200 (MW) [14]，应用上述方程，让 MPWN 表示米德湖的当前发电量，让 PPWN 表示鲍威尔湖的当前发电量。

$$FWL_1 = \frac{MNH_{t+1} - MNH_t}{0.3048}, \quad FWL_2 = \frac{PNH_{t+1} - PNH_t}{0.3048}$$

由此可以计算出MPWN和PPWN的值，最终得到下表中的数据。

表4 计算结果

Data	MeadLake	Data	PowellLake
$RW_1(m^3)$	121387623.88	$RW_2(m^3)$	72711113.28
$MFlow \cdot Day(m^3)$	58236771.68	$PFlow \cdot Day(m^3)$	48251764.97
$RW_1 - MFlow(m^3)$	63150852.20	$RW_2 - PFlow(m^3)$	24459348.31
$T_1(h)$	20.75	$T_2(h)$	12.30
$PW_1(m^3)$	112724.37	$PW_2(m^3)$	82551.41
$FWL_1(m)$	0.19	$FWL_2(m)$	0.08
$MPWH(M \cdot W \cdot H / Day)$	1565.13	$PPWH(M \cdot W \cdot H / Day)$	1,199.21
$Demand - (RW_1 + RW_2) = 87610200.52m^3$			

5.2.3 模型细化 1. 模型

运行频率

由于采用动态规划算法描述水库引水模型基础数据，需要及时更新，因此每次调水任务完成后均需运行一次模型。

2. 格兰峡谷大坝与胡佛大坝之间的连接

根据格伦峡谷大坝下游检测站的数据，通过上述计算，格伦峡谷大坝到米德湖的流量为 $300m^3/s$

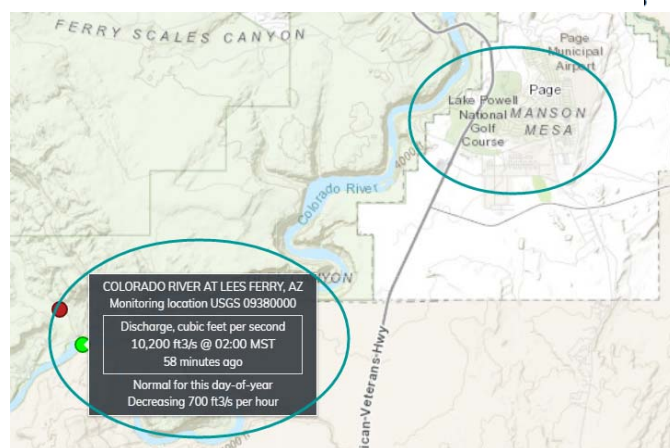


图 11：格兰峡谷大坝下游流量图

5.3 步骤 3：附加问题

5.3.1 对墨西哥的补偿

数据来自位于墨西哥和美国之间的科罗拉多河流量探测器的 USGS Water Resources [7]。在干旱期间，科罗拉多河流入墨西哥的水量急剧下降，由于美国在上游修建水坝控制水资源，以及科罗拉多河流域人口、农业和工业扩张导致对水的需求增加，流入墨西哥的水量进一步减少，这也导致海水回流到科罗拉多河。在加利福尼亚湾的出口处，高盐度的水被用来浇灌农作物，导致附近的农业遭受重大打击，损失接近 1 亿美元 [9]。

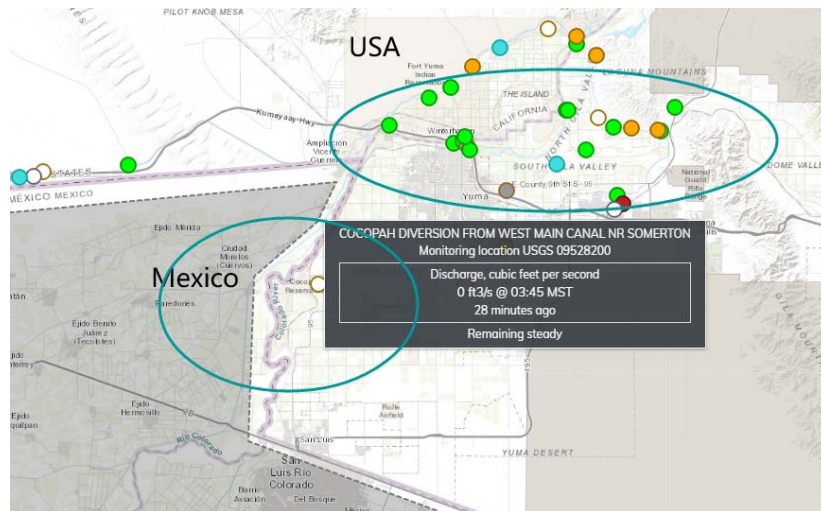


图 12：科罗拉多河流入墨西哥
墨西哥的赔偿额应按照农业保险赔偿规定为30% [10]。

$$100000000 \times 30\% = 30000000$$

因此它需要向墨西哥支付至少 3000 万美元。

5.3.2 加利福尼亚湾水流量

由于上游修建水坝，流入加利福尼亚湾的水量大大减少。流入加利福尼亚湾的最大水量可以通过 USGS Water Resources [7] 计算出来，该数据检测到了墨西哥附近的水量

。

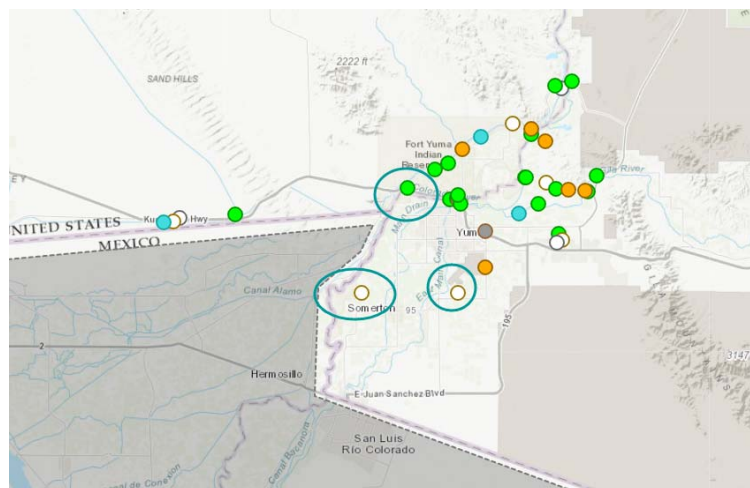


图13：科罗拉多河边境检查站

两个白点表示 0ft/s，顶部绿点表示 9.6ft/s，由此我们可以计算出这段时间内加利福尼亚湾的日流入量为

$$23489.741m^3$$

6.问题2的解决方案

6.1 基于EWM的TOPSIS方法

通过查阅资料和利用网站资源，获取了亚利桑那州、加利福尼亚州、科罗拉多州、新墨西哥州、怀俄明州5个州2004年的总就业人数、工业、农业产出、农业投入等数据，并采用基于EWM的TOPSIS模型对各州的农业和工业进行打分，以经济效率最大化为原则确定供水顺序。

TOPSIS法是一种常用的综合评价方法，能充分利用原始数据中的信息，准确反映评价解之间的差异，又称优劣解距离法^[15]。其基本原理是通过检测评价对象与最优解和劣势解的距离，对评价对象进行排序。评价对象距离最优解越近，距离劣势解越远，则评价对象越好；距离劣势解越近，距离最优解越远，则评价对象越差。

表5：指标统计

State name	Total Employment	Industries	Agricultural output	Agricultural input
AZ	3041476	75569280	0.7767	0.5610
CA	19784145	578107490	9.0782	5.0492
CO	2958379	72318151	1.3403	1.2982
NM	1027003	26022552	0.6094	0.6828
WY	343755	9777143	0.2618	0.4583

步骤 1：原始矩阵正

综合分析已识别的指标（如表5所示），农业投入为负（成本型）指标，农业产出^[12]、私营工业总产值、总就业为正（效益型）指标^[11]。所谓正向原矩阵，就是将指标类型统一转换为正向指标，即农业投入总额为正数。这里所有元素均为正数，因此采用如下公式进行转换。

步骤 2：对矩阵进行正向归一化

$$x_i = \frac{1}{x_l} \quad (18)$$

为了消除不同指标之间量级上的影响，采用由5个状态组成的规范化矩阵，将4个待评价指标（已为正值）取正值，得到一个规范化矩阵，其中，各个元素为：

$$z_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (19)$$

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1j} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2j} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ z_{i1} & z_{i2} & \cdots & z_{ij} \end{bmatrix} \quad (20)$$

步骤 3：EWM 方法

熵权法（EWM）是用事物同一指标的变异程度来描述该指标的重要程度。如果某指标的数据在各个状态之间变化不大，则该指标对评价体系的影响就小；如果某指标的数据在各个状态之间变化很大，则该指标对评价体系^[15]的影响就大。指标的熵值可以用来判断指标的离散程度，其熵值越小，指标的离散程度越大，指标对综合评价的影响（权重）就越大。赋值结果见下表。

表 6：指标权重

Name	weight
Total Employment	0.277615278
Industries	0.302280945
Agricultural output	0.318963902
Agricultural input	0.101139875

步骤 4：计算并归一化分数

Define maximum value $Z^+ = (Z_1^+, Z_2^+, Z_3^+, Z_4^+)$	Define minimum value $Z^- = (Z_1^-, Z_2^-, Z_3^-, Z_4^-)$
↓	↓
Define the distance of the i^{th} evaluation object from the maximum value $P_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^5 (Z_j^+ - z_{ij})^2}$	Define the distance of the i^{th} evaluation object from the minimum value $P_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^5 (Z_j^- - z_{ij})^2}$
↓	↓
Calculate the unnormalized score for the i^{th} evaluation subject, $S_i = \frac{P_i^-}{P_i^- + P_i^+}$	

第五步：输出排名结果

表 7：评级总体排名

Rank	Name	Score
1	CA	0.908040769
2	AZ	0.192118332
3	CO	0.162126485
4	WY	0.120273956
5	NM	0.117320380

基于经济效益最大化，通过各州评级量表的输出，可以知道农业和工业对各州的重要性。由于加州工业和农业经济规模庞大，因此优先为农业分配水资源

加州农业和工业用水量最大；其余四州农业和工业用水量差异不大，且等级不高，因此无需特殊考虑，按实际变化情况分配。在各州原有农业、工业用水比例不变的情况下，按原分配给各州的农业、工业水资源比例分配。至于各州用水总量的具体分配比例，由相关政府部门分配。

6.2 基于0-1规划的多阶段讨论

当大坝当前水位高于最低发电水位时，大坝可以同时供水和发电。但当大坝当前水位低于最低发电水位时，大坝只能供水，不能发电。同时需要注意的是，两坝水位同时相等的概率是极小的。因此，基于0-1整数规划方法，米德湖和鲍威尔湖当前水位是否高于最低发电水位线分别表示为和，如下所示。

$$I_i = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad (21)$$

其中，“0”表示当前水位在最低发电水位线以下，只能供水；“1”表示当前水位在最低发电水位线以上，可以供电。

每个阶段都要满足各州的生活用水需求并且要考虑墨西哥的补偿以及科罗拉多河下游的影响。它分为以下三个阶段。

6.2.1 第一阶段

第1阶段，表明两座水库水位均在最低发电水位以上，且水资源丰富，均具备供水、供电能力。从表7的排序结果可以看出，CA的工业和农业经济规模远远超过其他州，此阶段的主要目标是暂时减缓用水量，维护生态，因此此阶段的策略为：

- a) 满足加州工业和农业需求 b) 其余四个州分配剩余的水量 c) 两座水坝稳定发电

6.2.2 第二阶段

在第2阶段，有两种类似的情况，分别为。在时，表明米德湖水位线低于最低发电水位，但鲍威尔湖水位线仍在最低发电水位之上。在时，表明鲍威尔湖水位低于最低发电水位，但米德湖水位高于最低发电水位。无论发生上述哪种情况，我们都知道其中一个水库肯定已经无法供电，但两个水库目前都有供水能力。这一阶段的主要目标是维持水库水位，并尽量让大坝继续发电，因此这一阶段的策略为：

- a) 停止状态为0的水库利用水力发电

功能，所以大坝关闭了闸门

b) 所有州都从水库分配供水 d) 通过能够发电的水坝稳定发电

6.2.3 第 3 阶段

在第3阶段，水资源已经处于非常危急的状态，两个湖泊都发出了紧急信号，水位线都低于最低发电水位，都已经无法发电，也就是。这个阶段的主要目标是维持水库水位，减缓枯竭的速度。那么，这个阶段的策略是： $I=0, i=1,2$

a) 为彻底停止两湖的发电功能，大坝关闭了闸门

b) 所有州都从水库分配供水

具体的分析将在本文的下一部分中进行描述。

7. 问题 3 的解决方案

7.1 问题概述

由于持续干旱和高温，鲍威尔湖和米德湖的水资源难以满足居民和工业用水和电力需求。为了尽可能保障各州的生产和生活，需要采取额外措施来满足需求。以下是具体方案。

7.2 具体措施及其效益

7.2.1 提高电力传输效率

离子

从模型计算结果可知，两湖每天需要195,275m³的水量才能满足日发电需求，我们通过提高电力输送效率来减少日发电所需水量，以缓解水资源压力。

假设输电效率提升率为 P_e ，原发电用水量为每天，则提高输电效率后节约的水量为

$$S = \frac{P_e I_a}{P_e + 1} \quad (22)$$

若通过定期维护发电机组、更换电缆等方式将 P_e 取为18%，则算出每天可节水约29,788 m³，可满足加州20,127户家庭的每日用水量。

7.2.2 再生水利用

由于五州日均需水量较大，通过再生水可回收大量水量，缓解供水短缺问题。设工业、农业、生活用水回收率分别为 R_i, R_a, R_r ，及。则各州日均工业、农业、生活用水量分别为 SW_i, SW_a, SW_r ，及。另外，再生水项目实施后，各州回收水总量为：

$$T_o = SW_i \cdot R_i + SW_a \cdot R_a + SW_r \cdot R_r \quad (23)$$

水资源分配数据^[13]显示，工业用水重复利用率为20-30%，农业用水重复利用率为40-50%。

通过安装灌溉防渗渠道可回收水30%-40%，居民用水重复利用率为40%-50%。设，，
，各州每日节水量如下表所示。 $R_i = 26\% \quad R_a = 35\% \quad R_r = 44\%$

表 8：每日节水量

State name	Residential (tons/d)	Industrial (tons/d)	Agricultural (tons/d)	Total (tons/d)
California	8694334.282	3111078.706	25742694.31	37548107.29
Arizona	2028678.001	997986.0202	592851.567	3619515.588
Colorado	1359114.324	200778.253	11621971.92	13181864.5
New Mexico	399739.5072	15058.368	3533492.83	3948290.705
Wyoming	174186.4916	30813.5152	10512770.5	10717770.51
Total	12656052.6	4355714.862	52003781.12	69015548.59

从上表可以看出，共计节水6900万吨/日，其中居民生活用水节水率为18.3%，工业用水节水率为6.4%，农业用水节水率为75.3%。7.2.3减少湖面水量蒸发。

由于近年来极端天气频发，每年有大量水被蒸发消耗，可通过在水面覆盖聚乙烯软膜来减少蒸发，这种方法每年可抑制蒸发量

$$E_i = S \cdot EV \cdot P_i \cdot G_p \quad (24)$$

式中， S 为聚乙烯软片覆盖面积，为单位面积年平均蒸发量， P_i 为聚乙烯软片蒸发抑制率，取值为44.35%^[16]，为抑制保证率，设为90%。假设湖泊水面面积年变化较小，可代入理想模型中的鲍威尔湖和米德湖数据，得到两湖年抑制蒸发量约为和。

$$2.59 \times 10^8 m^3$$

$$2.69 \times 10^8 m^3$$

厚度2.5mm的聚乙烯柔性板的支出约为1.015亿美元，使用寿命5年，平均每年支出2030万美元。

7.3 多阶段讨论

采用再生水利用措施可能会减少米德湖和鲍威尔湖对这五个州的供水量，从而对

$$Demand = Demand - 69000000 = 125098737.17 m^3$$

根据问题2中制定的解决冲突的标准，可知三个阶段都需要满足居民供水，因此设置WOL表示五个州的居民供水，设置NewData二维列表存储表8中的数据，设置SW表示各州实际收到的配额，设置Proportion表示实际供水比例。

$$WOL = \left(\sum_{i=1}^5 Data_{i1} \right) - 69000000 \times 0.183 \quad (25)$$

$WOL = 16136755.92 m^3$ 。设置为表示两个水库可以供水的最大水量：

$$\begin{aligned} \text{Supply} &= (M\text{Flow} + P\text{Flow}) \times 86400 \\ \text{Supply} &= 106488536.65\text{m}^3 \end{aligned} \quad (26)$$

7.3.1 第一阶段

在满足五个州的居民用水配额后。

$$\text{Demand} = \text{Demand} - \text{WOL}, \quad \text{Supply} = \text{Supply} - \text{WOL} \quad (27)$$

此时, $\text{Demand} = 108961981.25\text{m}^3$, $\text{Supply} = 90351780.73\text{m}^3$ 。

a) 满足CA的工业和农业配额后：

$$\begin{aligned} \text{Demand} &= \text{Demand} - \text{NewData}_{12} - \text{NewData}_{13} \\ \text{Supply} &= \text{Supply} - \text{NewData}_{12} - \text{NewData}_{13} \end{aligned} \quad (28)$$

然后, $\text{Demand} = 108.234\text{m}^3$, $\text{Supply} = 61498007.71\text{m}^3$ 。

b) 其余四个州按比例分配剩余配额，并按顺序供水。

各州实际配额如下：

$$SW_i = \frac{(\text{NewData}_{i2} + \text{NewData}_{i3}) \cdot \text{Supply}}{\text{Demand}} \quad (29)$$

$$\text{Proportion} = \frac{\text{Supply}}{\text{Demand}} \times 100\% = 76.77\%$$

c) 水坝发电。

两个水库的水位可视为恒定。此外，米德湖的发电量稳定在1567(MW)，鲍威尔湖的发电量稳定在1200(MW)。

d) 对墨西哥的赔偿以及对科罗拉多河下游的影响

联邦政府将需要向墨西哥补偿失去的配额和农作物损失的成本。流入加利福尼亚湾的水量将持续下降。

7.3.2 第二阶段

现阶段，两座水库上游的流量估计只有原来的60%。如果格伦峡谷大坝关闭，米德湖的流量将减少50%。

a) 停止状态0水库利用大坝的水力发电功能关闭闸门

$$\text{Supply} = (M\text{Flow} * 0.3 + M\text{Flow} * 0.3 * (2 - 2^{1/2}) + P\text{Flow} * 0.6) * 86400 \quad (30)$$

计算结果 $\text{Supply} = 65893162.88\text{m}^3$ 或 46422123.84m^3

为五个州的居民提供供水保障

$\text{Supply} = 47756406.96\text{m}^3$ 或 30285367.91m^3 ，满足供水量后为 108961981.25m^3

b) 需要限制五个州的农业、工业用水，并按等级供水

$$\text{Proportion} = \frac{\text{Supply}}{\text{Demand}} \times 100\% = 43.83\% \text{ or } 37.80\%$$

c) 水坝发电

根据公式 (18)，此时的发电量为300MW

d) 对墨西哥的赔偿以及对科罗拉多河下游的影响

对墨西哥的补偿在第一阶段有所增加。然而，流入加利福尼亚湾的水量却进一步减少。

。

7.3.3 第三阶段

据估计，水流量只有原来的30%，届时米德湖的流量将进一步减少约50%，因为格伦峡谷大坝将明确关闭闸门。

a) 需要彻底停止两湖的发电功能，大坝关闭闸门

$$Supply = (MFlow * 0.15 + PFlow * 0.3) * 86400 \quad (31)$$

计算结果 = 25211061.92 m^3

$Supply$ = 满足蓄水面积后 7074306.0 m^3

b) 进一步限制五个州的农业和工业用水量

$$Proportion = \frac{Supply}{Demand} \times 100\% = 8.83\%$$

c) 水坝发电

此时两座水坝均无法正常发电，因此发电量为0 (MW)

d) 对墨西哥的赔偿以及对科罗拉多河下游的影响

墨西哥的配额是全额补偿的，而且科罗拉多河的出水口被海水严重堵塞，附近的农作物受到严重威胁。

7.3.4 附加说明

a) 当供应满足五个州的全部需求时

按照各州全量需求情况按得分顺序分配水量，此时流入加利福尼亚湾的水量大增，墨西哥的农业损失减少，联邦政府支付的赔偿金额也减少，两座水坝可以稳定发电。

b) 当供水不能满足五个州居民的用水需求时。

此时，为了满足居民的基本供水，就要从水库存量中抽水，这样一来，水库的水位就不断下降，这种情况下，就无法保证居民供水的连续性。工业和农业都没有了供水，这也意味着两湖将枯竭。

8. 问题 4 的含义

8.1 需求何时发生变化？

用水需求随时间变化，人口、农业和工业水平是影响用水需求的重要因素。显然，水资源作为消费成本，也限制了人口、农业和工业的发展。短期内，人口、农业和工业与用水需求呈正相关。

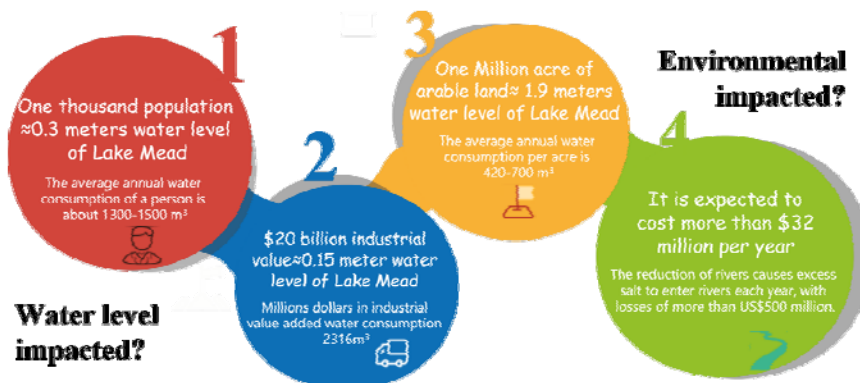


图14：需求变化的影响

8.2 技术何时改进？

主要的可再生能源技术有海水淡化、苦咸水淡化和再生水利用。下图分别用红色、黄色和蓝色表示苦咸水淡化、海水淡化和再生水利用技术对米德湖水位的的影响变化。

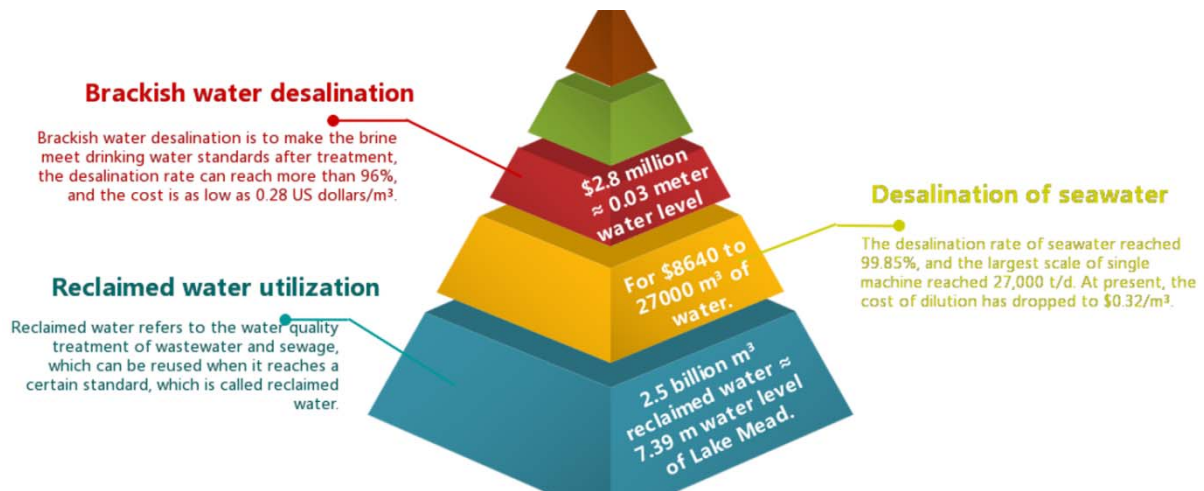


图 15：技术改进的影响

显而易见的是，在所有可再生能源技术中，影响最大的是再生水技术的使用。未来，随着再生水技术的不断发展，相信各州都会更加重视如何提高再生水的利用率。

8.3 何时保存需求？

目前，在地表水资源贫乏的地区，节水的常用方法有：减少工业用水量，提高水的重复利用率；实施科学灌溉，降低农业用水率；回收利用城市污水，开辟第二水源。节电的常用方法有：改造老旧设备，提高输电效率；采用节能设备；树立全民节电意识等。

假设五州工业用水减少5%，一年可节水305737677.81m³，相当于米德湖水位上升0.96米；居民生活用水减少5%，一年可节水524938545.4m³，相当于米德湖水位上升1.63米；农业用水减少5%，一年可节水2711625730m³，相当于米德湖水位上升7.98米。假设五州每户用电量节省5%，则合计可节省11071992.84kWh，相当于胡佛水坝和格兰峡谷水坝7天的发电量。

9.敏感性分析

由于米德湖抽象模型与鲍威尔湖抽象模型结构相似，因此只能对其中一个进行敏感性分析，这里选择米德湖进行敏感性分析，为了更好地体现模型敏感性，设置三组有代表性的参数作为分析对象。

$$\begin{aligned} \text{a)b) } Demand &\Leftrightarrow MHN_{t+1} - MNH_t \\ MH &\Leftrightarrow MPWN \end{aligned}$$

c) $MP \Leftrightarrow MAR$

其中左侧变量分别为均匀变化率、降低30%、降低25%、降低20%、降低15%、降低10%，即每组分析对象有5个数据，将变化数据带入上述公式，计算出右侧变量对应的变化率，结果如下。

表9 右侧变量对应值

change	$MHN_{t+1} - MNH_t(m)$	$MPWN(k \cdot w \cdot h)$	$MAR(m)$
0%	0.19	1567	14326.33
10%	0.150	1534	13591.15
15%	0.130	1517	13208.23
20%	0.100	1501	12813.86
25%	0.086	1484	12406.97
30%	0.064	1468	11986.27

表 10：右侧变量的相应变化率

change	a	b	c
10%	21.1%	2.1%	5.1%
15%	31.6%	3.2%	7.8%
20%	47.3%	4.2%	10.6%
25%	54.7%	5.2%	13.4%
30%	66.3%	6.3%	16.3%

可视化上述数据：

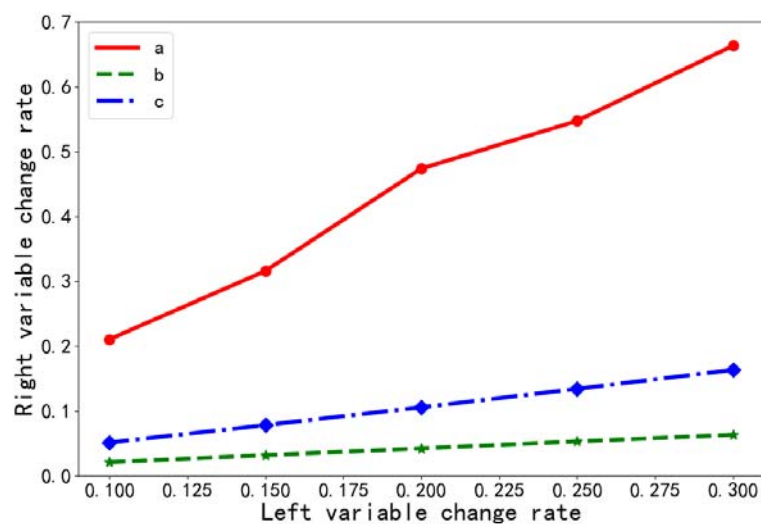


图 16：敏感性分析的可视化

从图16可以看出a组的灵敏度较好，水库水位下降不是很快，且基数较小，因此当用水量发生变化时，水库水位下降变化十分灵敏，且有规律。

10.模型评估及进一步讨论

10.1 优点

构建的水资源配置动态规划模型科学合理，在模型构建中结合美国西部的实际情况和具体数据对水资源进行调度规划，结果可靠，具有统计描述性。

本文分期论述了目前大坝蓄水现状，给出了划分标准，思路清晰、简明扼要，在不同阶段给出了不同的解决措施，兼顾了各种因素，使模型结果更贴近事实。

该模型适用性广，建立的等效模型忽略了库底地形的变化，且该模型可以推广用于考虑其他地形水库的类似配水问题。

10.2 不足之处及改进

模型忽略了短时期内降雨和库容蒸发对水库库容的影响，但实际应用中这些因素都会对结果产生一定的影响，可在模型中引入基于实际气候的扰动项，使结果更加准确。

有些数据不是时效性的，可能现在的数据情况不一样，导致模型结果和实际情况有误差，如果数据更充足，模型结果会更准确。

10.3 模式推广

该模型可以推广应用到其他地表水贫水地区的水库资源配置中,或其他因资源稀缺而产生的固定需求配置问题中,替换本文中特定的相关数据,运用问题求解的思路。

11. 参考文献

[1]干旱 - 2021 年 8 月 | 美国国家环境信息中心 (NCEI) (noa- a.gov) [2]<https://new.qq.com/omn/20210906/20210906A0518600.html> [3]<https://zhuanlan.zhihu.com/p/413680288> [4]<https://www.pengky.cn/shuidianzhan/01-shuilifadian/shuilifadian.html> [5]<https://baike.baidu.com/item/%E8%83%A1%E4%BD%9B%E6%B0%B4%E5%9D%9D/1840542> [6]<https://baike.baidu.com/item/%E6%A0%BC%E4%BC%A6%E5%B3%A1%E5%9D%9D/6952794> [7] <https://waterdata.usgs.gov> [8] <https://zhidao.baidu.com/question/488138275126259972.html> [9]<https://www.wanweibaike.net/wiki-%E7%A7%91%E7%BE%85%E6%8B%89%E5%A4%9A%E6%B2%B3> [10]<https://www.51dongshi.com/eedfrhrecr.html> [11] <https://www.bea.gov/> [12] <https://www.usda.gov/> [13] <https://www.zhihu.com/question/439557125/answer/1680189105> [14] <https://new.qq.com/omn/20210613/20210613A06PVH00.html> [15] 毛惠敏. 基于熵值法 TOPSIS模型的房地产企业财务风险评价[J]. 中国市场, 2021(16):156-159+171.DOI:10.13939/j.cnki.zgsc.2021.16.156。 [16] 吴金辉. 干旱区水库抑制水面蒸发试验研究[D]. 西安理工大学, 2008。

Drought and Thirst

合理的解决方案

by TEAM 2207864

随着全球变暖导致的气候变化，美国西部地区正经历降雨短缺、气温持续升高等极端天气。科罗拉多河流域面积不断缩小，影响到大多数西部水库的蓄水量减少，胡佛水坝和格伦峡谷水坝就是典型代表。我们对这些水坝的计算机模拟显示，至少需要额外87,610,200.52立方米的水才能满足亚利桑那州、加利福尼亚州、怀俄明州、新墨西哥州和科罗拉多州500万人的用水需求。因此，在不久的将来，水坝可能无法满足美国西部的用水需求，五个州的相关政府机构将不得不确定最佳的水电分配方案来管理水坝，以尽快解决水资源短缺和各州之间的利益竞争问题。我们的团队结合现在和未来的供水状况，制定了以下水量分配情景。

首先，水坝尽可能满足居民用水和用电需求，对各州的农业和工业用水有不同程度的限制，这个限制程度就是各州原有的水资源分配比例，与原有的农业和工业用水比例相同。

其次，考虑经济效率最大化原则，对五州农业和工业对GDP影响的重要程度进行降序排列，即各州农业和工业供水量的排序，结果显示加州的农业和工业都非常重要，因此决定优先考虑

加州是供水量最大的州，其余四州重要性基本相似，无需特殊考虑，根据实际变化情况进行分配。至于各州总水量的具体分配比例，政府相关部门应综合考虑人口、地理面积、政策等因素进行合理分配。

最后，我们通过研究发现，引入多项措施将大大缓解目前的缺水状况。例如，提高电力输送效率、使用再生水、海水淡化等。定期维护发电机组、更换电缆，可使电力输送效率提高18%，每天可节省近3万立方米的水，可满足加州2万多户家庭的日常用水需求。如果工业再生水回收率为26%，农业用水回收率为35%，居民用水回收率为44%，那么五个州每天可节省6900万立方米的水。目前海水淡化成本为0.28美元/立方米，脱盐率可达99.85%，单机最大规模可达2.7万吨/天。这意味着每天花费7560美元，最多可获得27000立方米的清洁水。综上所述，再生水是最快见效、经济投资最小的方法之一。

当然，最简单、最经济的措施是呼吁民众节约水电，政府无需额外投入资金，即可获益。数据计算表明，居民用水每减少5%，一年可节省524938545.4立方米的生活用水，相当于米德湖水位上升1.63米。

