

参赛队员：赵未来 龚星雨 张刘嘉

学校：武外英中 WHBC

省份：湖北

国家/地区：中国

指导老师：Xueying Hu

论文题目：水资源最优分配模型

目录

目录.....	2
摘要.....	4
ABSTRACT.....	5
一、研究背景.....	7
二、模型假设与符号.....	8
2.1 模型假设.....	8
2.2 模型的符号说明.....	8
三、水资源调配静态模型.....	9
3.1. 水资源调配的经济理论分析.....	9
3.2 缺水、丰水城市划分.....	11
3.2.1 聚类板块划分.....	11
3.2.2 各版块需求供给量.....	16
3.3 调配成本.....	17
3.3.1 运输成本.....	17
3.3.2 建设成本.....	19
3.3.3 外部性成本.....	20
3.4 短缺成本.....	21
3.5 水资源调配综合模型.....	23
3.6 结果分析.....	25
四、水资源调配动态模型.....	26
4.1 问题分析.....	26
4.2 水资源的供给变化.....	26
4.2.1 降水量.....	26
4.2.2 地表水（surface water）.....	28
4.2.3 地下水（underground water）.....	28
4.2.4 总供给量模拟.....	29
4.3 水资源的需求变化.....	30
4.3.1 农业用水.....	30
4.3.1 工业用水.....	31
4.3.2 居民用水.....	31

4.4 供给量模拟.....	32
4.5 用水缺口.....	34
五、敏感性分析.....	35
5.1 考虑技术进步.....	35
5.2. 降雨量分布的影响.....	36
六、模型建议.....	37
6.1 优点分析.....	37
6.2 缺点分析.....	38
七、结论和建议.....	38
7.1 结论.....	38
7.2 建议.....	39
参考文献.....	40

摘要

经济学是一门研究稀缺资源最优配置的学科。我国的水资源由于分布不均,很多地方出现了不同程度的缺水状况。为了更好的提高水资源的配置效率,本文使用经济数学模型,将经济理论与实际数据相结合,针对中国水资源的最优调配方案进行了一系列研究。

首先,本文利用引入资源后的索洛模型,分析丰水地区与缺水地区水资源所带来的边际效用,结果显示,丰水地区的边际效用低,水资源的边际产出较小;缺水地区的边际效用高,水资源的边际产出高,因此跨区域调水就有利可图。此后,本文定义短缺成本是由水资源需求得不到满足而发生的成本,可利用水资源投入产出表计算各地水资源的影子价格得来。本文从运输成本、建设成本、外部性成本以及短缺成本四个角度出发,分析丰水地区与缺水地区间跨域调水发生的总的调配成本,以最小化调配成本为目标函数,建立水资源调配的运输模型,使用 lingo 进行求解得到丰水地区向缺水地区的调水的份额。结果显示在满足所有省份需求水量的情况下,仅分为两个部分南水北调并不是最优方案。从理论上讲,就近运水可能更具有可实施性:例如,广东、湖北、湖南、江西、福建等省份与天津、北京、河南、河北、山东等地进行独立进行交易 348.6 亿立方米水,仅修建一条河道。此外,北方大省,例如新疆、西藏等地将水运送到临近省份,例如宁夏等缺水地区。这种情况下的调运费用会大大降低,同时也能避免损耗,根据情况更方便地调整调水方案。其次,考虑到不同时间,缺水地区的用水量、供水量的不同,本文于第四部分建立了水资源调配的动态模型,即考虑随着时间变化可能会变化的因素。将用水量分为农业用水、工业用水以及居民生活用水;供水量主要来源于地表水以及地下水。本文以北京为例,综合影响用水量、供水量的因素,分别建立相应的回归模型来预测水的供给与使用。最后,考虑到技术进步会使用水的效率提升,会相应减少对水资源的消耗,本文对技术进步、降雨量的分布等做了敏感性分析。

总的来说,我国水资源问题是一个比较重要且紧迫的问题。本文利用调配成本定量分析了应从丰水地区运往缺水地区多少水量,很具有创新性价值。此外,文中考虑了在时间因素的情况下调配水资源的最佳方案,这对国内平衡水资源配置具有比较大的意义。

关键词: 资源配置 索洛模型 投入产出 运输模型

ABSTRACT

Economy is a discipline that studies optimal allocation of scarce resources. In China, many regions have different degrees of water shortage due to the uneven distribution of water resources. In order to improve the efficiency of water resources allocation, this paper mainly carried out a series of studies on the optimal allocation of water resources in China with the application of the economic mathematical model.

Firstly, by using the Solow model after introducing resources, the paper analyzes the marginal utility of water resources in water-rich area and water shortage area. The results show that the marginal utility of water rich area is low and the marginal output of water resource is small. However, the marginal utility of water shortage areas is high, and the marginal output of water resources is high, so trans-regional water diversion is more ideal. Shortage cost is defined as the cost when water demand could not be satisfied in a city, which could be calculated by using input-output analysis (shadow price). Then, this paper analyzes the total allocation cost of cross-regional water transfer between water-rich area and water shortage area from four aspects, accordingly, transportation cost, construction cost, external cost and shortage cost. The transportation model of water resources allocation is established with the objective function aiming to minimize the allocation cost, and the paper also applies lingo to calculate the amounts of water transferred from water-rich area to water shortage area. The results show that only two parts of the South - to - North Water Diversion Project are not the optimal solution in the case of meeting the volume demanded of all provinces. In theory, it may be more implementable to transport water by nearby principle : For example, Guangdong, Hubei, Hunan, Jiangxi, Fujian and other provinces like Tianjin, Beijing, Henan, Hebei, Shandong, etc. for 348.6 cube meter of water, carrying out independent trading by constructing only one river channel. In addition, the northern provinces, such as Xinjiang and Tibet, could transport water to neighboring provinces, such as Ningxia, Liaoning and other water - deficient areas. In this case, the transportation cost can be greatly reduced and the loss can be avoided. Therefore, it would be flexible to make water transfer scheme adjustment under different situation .

Secondly, considering the difference of water consumption and water supply over time in water shortage area, the paper established the dynamic model of water resources allocation with the consideration of factors that may change over time. The water consumption is divided into agricultural water, industrial water and household water; alternatively, the water supply mainly includes surface water and groundwater. In this paper, Beijing is studied as an example. After summarizing the influential factors of water consumption and water supply, the paper establishes the regression models to predict the quantity of supply and demand for water. Finally, this paper carries out the sensitivity analysis of technological progress, rainfall distribution etc, considering that technological progress will reduce the consumption of water

resources in response to the rise in the efficiency of water consumption.

The problem of water resources in China is important and urgent. In this paper , it is very innovative to study how much water should be transported from water-rich areas to water - deficient areas through the quantitative analysis of allocation cost. It also takes time into consideration to find the optimal scheme for water allocation, which has great significance for the balance of domestic water resource allocation .

Key words: Resource Allocation Solow Model Input-Output
Transportation model

2018S . -T . Yau High School Science Award

一、研究背景

经济学，是一门研究稀缺资源配置的学科。我国水资源由于分配不均、使用效率低等原因，很大程度上不能满足经济、人口发展需要。因此，如何有效合理的配置水资源，提高经济社会的运行效率，具有很重要的意义。

水是支撑社会进步、经济发展的基本要素。人类的一切活动均建立在对水的开发与利用之上。首先，水资源是人类生存发展不可或缺的要素，没有水，一切生命都无从谈起；其次，通过利用水资源灌溉农业，可以提供给人们赖以生存的食物，通过加工，制造成各种工业品，供人们生活需要；最后，水资源是工业生产的必要条件，社会中的各行各业都需要利用水来进行生产，发电、纺织、钢铁冶炼等等，水资源都是最重要的一部分。水资源带给人类的好处远远不止于人口剧增、灌溉农业扩大、工业化和城市化发展、城乡居民生活水平提高，同时也给予了人类生存的机会与空间。总而言之，水资源对于人类的生存和发展、社会的进步与提升具有很重要的意义。

尽管我国的水资源总量多，基数大，但是由于水资源所支撑的人口、经济规模比较大，人均占有量低于世界平均水平，这严重制约了我国的经济的发展，相比于发达国家，我国的水资源利用效率不高，这导致很多地区出现了不同程度的缺水状况。此外，由于地理位置、所处气候带不同等原因，我国水资源分布极不平衡，呈现出东多西少、南多北少的趋势。水资源的时空分布变异性大，其与土地资源的匹配状况不理想，导致西北各省的生态环境相对脆弱，影响了人民生活以及各产业的生产效率。一般而言，我国北方地区由于人口密度大，其水资源开发利用程度已很高，取水主要来源于地下水，很多省份的地下水位降低幅度很大，当地生态环境、可持续发展模式已受到明显影响，部分地区河道断流、湖泊干涸，下含水层接近疏干；洪涝灾害，干旱缺水，水污染和生态环境逐渐恶化¹。因此，评价我国各省市的水资源开发利用现状，分析水资源未来演变趋势，预测水资源供需发展态势，具有很重要的意义。

一般而言，根据边际效用递减理论，丰水地区水资源带来的边际效用少，缺水地区的边际效用大，因此通过跨区域调水将水资源从丰水地区转移至缺水地区，对于促进各省市水资源的合理有效配置、提高经济效率具有很深远的意义。通过查阅文献资料，国内外很多地方为了均衡社会发展、保障人民生活需要与经济发展水平，出现了很多水资源跨域调配工程，即将水资源从丰水地区转移至缺水地区。国外比较有加利福尼亚州水资源跨域调配工程、联邦中央河谷工程、以色列调水工程等。在国内，比较出名的调水工程即“南水北调”项目²。1952年，毛泽东就提出了“南水北调”项目的构想，这个工程在京津冀城市化速度急剧加速、人口激增的情形下背景下得以完成。通过“南水北调”项目，北方各大城市减少了对地下水资源的消耗，保障了城市的供水以及原有的生态环境面貌，此举措迅速

1 柳长顺，陈献，刘昌明等. 国外流域水资源配置模型研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版)

2 欧阳琪，张远东. 加利福尼亚州水资源调配工程[J]. 南水北调与水利科技，2006，4(6):1-12

带动了中国经济增长，现已成为京、津、冀、豫、鲁地区受水区大中型城市的供水“生命线”，超过一亿人口的生活得以改善。

但是，南水北调工程仍有不完善之处。初期的建设成本过高、清理泥沙沉积、半道结冰等因素，导致此工程在构想、实施、运输等方面出现了比较大的差异。对于取水地而言，为保护水源区的生态环境，保证水质水量，水源区所在县市在退耕还林、关停污染企业、治理水土流失等多个方面做出了巨大投入，也一定程度上导致了经济的逆向发展¹。

为了更好的跨区域调水问题，本文利用层次分析法分析国内各省市的缺水程度，将省市划分为丰水、不缺水、缺水三类地区，从调水过程中可能发生的成本出发，以所有调水成本最小化为目标，在满足取水地生态环境的基础上，根据已知条件计算出丰水地区的可利用水资源量。针对运水方案作出了进一步的完善，在满足成本最小化的同时根据不同地区地貌特征提出最佳调水方案，实现资源配置最优化。

二、模型假设与符号

2.1 模型假设

假设 1. 人口、产业等集中在地区省会。

一般而言，省会城市的人口、经济规模比其他地级市要密集，这条假设可以将取水点、供水点视为各省省会城市，简化了数据计算过程；此外，省会城市一般在该地区的水源中心，比如武汉、重庆等城市。该假设简化了分析过程。

假设 2. 调水成本包含三个方面，一是运输成本，二是河道等的建设成本，三是外部性成本；其中外部性成本能很好的刻画调水所引起的生态环境的变化。

调配成本通常包括运水、人工、修缮等基本费用，以及清污、转移居民等后续间接费用。在此论文中，我们仅将调配成本分为三个大的板块进行考虑：运输成本、建设成本，以及外部性成本，而不考虑其他成本因素所带来的影响。

假设 3. 所用数据皆为实时数据

文章所取调配方案是在现有南水北调工程的基础上加以完善，而非推翻重来。所用数据皆为南水北调工程线实施之后所得数据，反应如今真实生活状况，而不是自然水资源或需求量。

假设 4: 仅考虑经济问题

我们假设居民及有关部门全力配合调配，不会产生任何额外成本或道路不可运行的纷争。文章将从经济角度思考问题，从最终成本、有效利用等方面决定运输道路，不研究方案的可行性。

2.2 模型的符号说明

表 2-1

符号	意义	单位
W	水资源总量	N/A
l	A 片区中心点到 B 片区中心点的直线距离	千米
h	模型中 A, B 两地海拔差	千米
I	示性函数	N/A
α	每度电抽水储能电站转化效率	N/A
C	成本	亿元
γ	水资源总产出	N/A
θ	常数	N/A
P	每度电的价格	元/度
n	需修建的河道的可使用年限	年
v	所运输水的体积	亿立方米

三、水资源调配静态模型

此章节针对静态情况下水的最佳分配问题,进行了片区分类、计算成本,并通过 Lingo 建立模型求解得出具体最小成本的路径,即为本年最优运水方案。

3.1. 水资源调配的经济理论分析

在传统的索洛经济增长模型中,其主要包括四个变量,即产出,资本,劳动和知识,生产函数的形式为:

$$Y(t) = F(K(t), A(t)L(t))$$

这个模型假设相对于资本、劳动和知识来说,其他投入要素并不重要。但这个假设并不准确。很显然,一些诸如水、土地等自然资源会显著制约着经济的增长。水资源对于一个地区的发展而言是边际效用递减的,假定生产函数中考虑水资源,同时满足规模报酬不变的假设,此时考虑到水资源的生产函数就可以采用柯布道格拉斯的函数形式,结果如下所示:

$$Y(t) = K(t)^\alpha [A(t)L(t)]^\beta W(t)^\gamma$$

其中 α 、 β 、 γ 为正数，且满足 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。此时上面的形式满足规模报酬不变的结果。

$$\frac{\partial Y}{\partial W} = \gamma K(t)^\alpha [A(t)L(t)]^\beta W(t)^{\gamma-1}$$

这个是对水资源的产出求导得到水的边际产出，因为 $\gamma < 1$ ，因此等式右边 W 的指数伽马减一是小于零的。随着水资源的增长幅度越来越大，其对生产的增长幅度的影响越来越弱，即水资源所带来的边际效用递减。从另一个角度看水资源的边际产出，上式变形如下：

$$\frac{\partial Y}{\partial W} = \gamma \left(\frac{K(t)}{W(t)} \right)^\alpha \left(\frac{A(t)L(t)}{W(t)} \right)^\beta$$

K 除以 W 代表的经济学含义是每单位水所能支撑的资本，所能支撑的资本越多，意味着边际产出就越高。而 AL 除以 W 则代表的经济学含义是每单位水能支撑的有效劳动，每单位水能支撑的有效劳动越多，也会导致边际产出越高³。例如北京，缺水城市，每立方米的水支撑的人就多，边际产出就会高。

设丰水地区水资源总量 W_1 ，资本存量，有效劳动分别为 K_1 ， A_1L_1 ；缺水地区的水资源总量 W_2 ，资本存量，有效劳动分别为 K_2 ， A_2L_2 。则丰水地区的水资源边际产量为：

$$MPW_1 = \frac{\partial Y}{\partial W} = \gamma \left(\frac{K_1}{W_1} \right)^\alpha \left(\frac{A_1L_1}{W_1} \right)^\beta$$

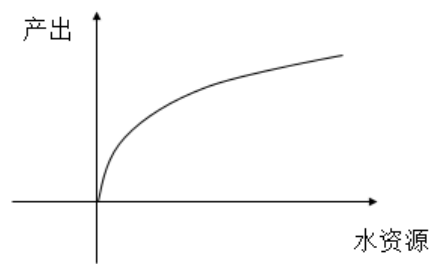
缺水地区的水资源的边际产量为：

$$MPW_2 = \frac{\partial Y}{\partial W} = \gamma \left(\frac{K_2}{W_2} \right)^\alpha \left(\frac{A_2L_2}{W_2} \right)^\beta$$

则当调水过程中的总成本小于两者边际之差时，跨域调水是可行的，即：

$$TC < \min(MPW_2 - MPW_1)$$

3 王欢. 基于边际效用理论的水资源价值研究[D]. 北京工业大学, 2012.



由此分析水资源富足的地方，水资源的边际效用较小，而水资源短缺的地方，水资源的边际效用比较大。这样，若调配总成本小于两地用水边际效用差值，通过水资源的交易，可以使双方的效用最高。

3.2 缺水、丰水城市划分

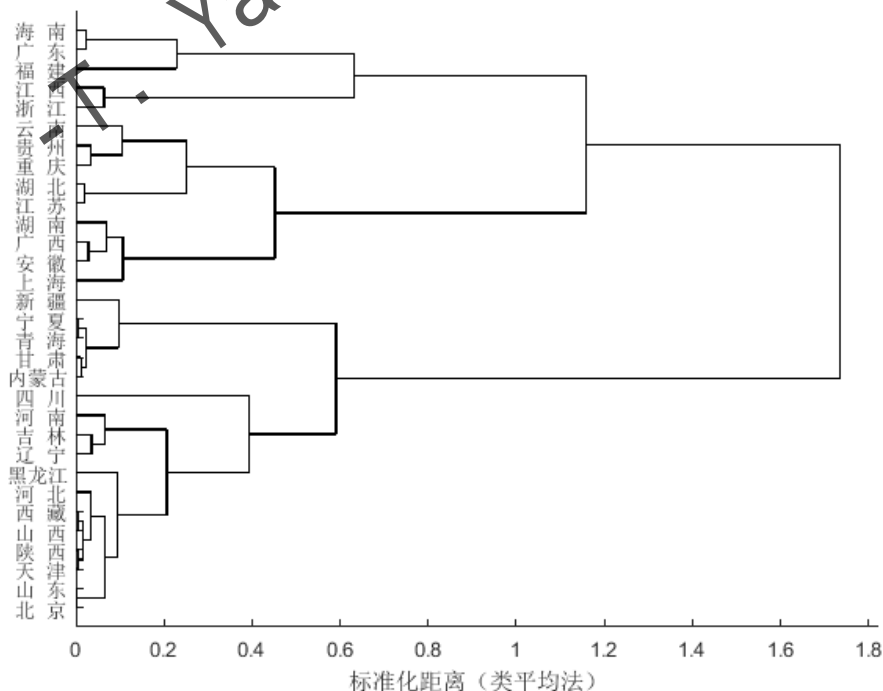
本文根据不同省份丰、缺水程度、地理位置、海拔高度等因素，将中国本地不同省份划分为 12 个板块。全文所有内容将根据此板块划分进行收集数据，分析以及评定。

3.2.1 聚类板块划分

为了直观的分析这些地区的区别，利用人均水资源量、人均供水量、万元 GDP 需水量三个指标进行系统聚类。为了消除变量不同单位的影响，需要对数据进行标准化处理，这三类变量的数据标准化方法均为：

$$x_i = \frac{X_i - \bar{X}}{S_x}$$

采用类平均法进行系统聚类，系统聚类图结果如下（图 3-1）：



通过结合系统聚类的结果，可以将一些性质相类似的省市结合在一起，简化模型。该聚类图上方位位置大致为丰水地区，下方位置大致为缺水地区。

水资源短缺评价体系⁴：水资源总量不足、利用效率不高以及不同地区需求量不同等因素，客观而言，导致水资源短缺类型判定的复杂性。国内外很多学者针对水资源短缺情况进行了度量，但是仍旧存在指标单一的问题。例如，国际上通常使用水资源稀缺指数来衡量水资源短缺的程度，但这个指标仅考虑了万立方米的所能支撑的人口数，并没能全面的考虑问题。

此文章以 2016 年的数据为例，针对评判方法的模糊与单一性做出了调整。分省份将人均水资源量、人均供水量、人均科技投入、HDI、单位耕地用水，以及万元 GDP 需水量记入考虑范围内，使用层次分析法来确定各指标的权重，根据每个指标重要程度的不同来进行计算：

表 3-1

指标	人均供水	人均水资源	人均科技投入	HDI	单位耕地用水	GDP 需水量
人均供水	1	1.00	5	5	7	7
人均水资源	1	1.00	5	5	7	7
人均科技投入	1/5	1/5	1	1	2	2
HDI	1/5	1/5	1	1	2	2
单位耕地用水	1/7	1/7	1/2	1/2	1	1
万元 GDP 需水量	1/7	1/7	1/2	1/2	1	1

指标	人均供水	人均水资源	人均科技投入	HDI	单位耕地用水	GDP 需水量
权重	0.369	0.369	0.0838	0.084	0.0472	0.0472

结果显示，人均供水量与人均水资源量为主要决定因素，同时科技投入、

4 童绍玉，周振宇，彭海英．中国水资源短缺的空间格局及缺水类型[J]．生态经济, 2016, 32(07):168-173.

与 HDI 分别占有 0.0838 与 0.0838 的权重，单位耕地用水与 GDP 需水量同样会对短缺情况的判断有所影响，但比重不大。

处理一手数据时，由于六个指标数值较大，且单位无法统一，为了避免不精确或错误的结果产生，本文中对这些指标先取对数在进行标准化变换，使其统一为相同格式：

正向指标的变化格式：

$$x'_i = \frac{\ln x_i - \ln(\min_i x_i)}{\ln(\max_i x_i) - \ln(\min_i x_i)}$$

负向指标的变化格式：

$$x'_i = \frac{\ln(\max_i x_i) - \ln x_i}{\ln(\max_i x_i) - \ln(\min_i x_i)}$$

其中， x_i 是对第 i 个指标的实值， x'_i 则为指标 x_i 的标准化值。 $\max_i x_i$ 、 $\min_i x_i$ 分别是指标 x_i 中的最大值与最小值。

根据权重与标准化后的数据进行进一步统计计算，得出结果为：

表 3-2

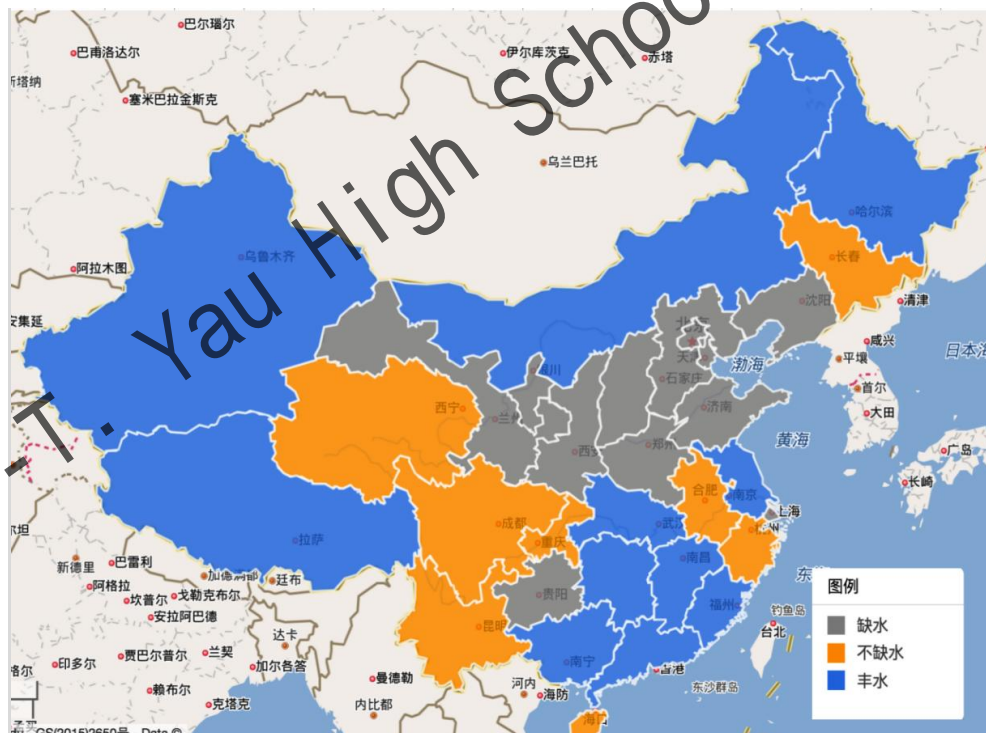
天津市	0.185377	缺水	吉林省	0.459131	正常
北京市	0.209839	缺水	安徽省	0.474517	正常
山西省	0.233626	缺水	浙江省	0.482049	正常
河北省	0.251548	缺水	海南省	0.483847	正常
山东省	0.260342	缺水	广东省	0.496762	丰水
河南省	0.274845	缺水	湖北省	0.501773	丰水
陕西省	0.297908	缺水	湖南省	0.50745	丰水
宁夏回族自治区	0.362629	缺水	内蒙古自治区	0.51436	丰水
辽宁省	0.367934	缺水	广西壮族自治区	0.521719	丰水
甘肃省	0.370234	缺水	江西省	0.530098	丰水

水资源最优分配模型

上海市	0.376508	缺水	江苏省	0.539034	丰水
贵州省	0.378708	缺水	福建省	0.543885	丰水
重庆市	0.406572	正常	黑龙江省	0.554563	丰水
四川省	0.425155	正常	西藏自治区	0.644902	丰水
云南省	0.42778	正常	新疆维吾尔自治区	0.729631	丰水
青海省	0.450786	正常			

地图上直观显示分区结果：

图 3-2



评价结果显示，共有 12 个省份水资源紧缺，11 个省份有能力提供供水。稀缺省份主要分布于西南部省份，以及偏东部地区。从供水能力上看，拥有供水能力的省份大多位于中国西部、北部，与东南处省份以湖南为中心，向四周扩散的省份密集处。

图 3-3



根据评价结果，依照海拔相似，地区相近的前提进行板块划分，最终结果分为了12个板块，分别包括六个缺水板块以及六个丰水板块：

表 3-3

SupplyA	广东省湖北省湖南省江西省福建省
SupplyB	内蒙古自治区黑龙江省
SupplyC	广西壮族自治区
SupplyD	江苏省
SupplyE	西藏自治区
SupplyF	新疆维吾尔自治区
DemandA	天津市北京市河南省河北省山东省
DemandB	山西省
DemandC	陕西省宁夏回族自治区甘肃省
DemandD	上海市
DemandE	贵州省
DemandF	辽宁省

其中，丰水片区：Supply A 包括广东、湖北、湖南、江西、福建，Supply B 为内蒙、黑龙江，Supply C 为广西壮族自治区，Supply D 为江苏省，Supply E 为西藏自治区，Supply F 为新疆维吾尔自治区；缺水片区：Demand A 包括天津、北京、河南、河北、山东，Demand B 为山西省，Demand C 包含山西、宁夏、甘肃，Demand D 为上海市，Demand E 为贵州省，Demand F 为辽宁省。

3.2.2 各版块需求供给量

设我国各省份 2016 年水资源总量可记为 $Stot$ ，单位为亿立方米。设蒸发等原因所导致的水资源损耗不受运送距离的影响，皆为 5%。同时，所有河流可利用率汇总，如表格所示⁵：

表 3-4

所有河流：	可利用率：
松花江	0.47
黄河	0.54
淮河	0.47
长江	0.28
东南河	0.33
珠江	0.25
西南河	0.14
西北河	0.37

注：本文仅考虑河口流量 1000 立方米每秒以上的河流可利用率进行计算

则各省份供水量 S 为：在考虑供给省份运送路途损耗中以及总水量可利用率所带来的影响下的所得计算量。而供水量 S 与用水量 D 之间的差值。将各省份或自治区总需求或供给量相减，即为当地水资源需求或供给量。通过片区分布，将所含省份计算结果相加，得出个片区总供水或缺水量，如表格所示：（单位：亿立方米）

5 王建生，钟华平，耿雷华，徐澎波，刘翠善，水资源可利用量计算，2006

表 3-5

	DemandA	DemandB	DemandC	DemandD	DemandE	DemandF	
SupplyA							532.354
SupplyB							32.764
SupplyC							24.404
SupplyD							39.599
SupplyE							232.66
SupplyF							16.358
	-348.629	-103.086	-252.788	-87.72	-51.046	-52.5	

注：负值为对应需求量，正值为对应供给量

若总需求量大于总供给量，则有一部分水留在供给地点本地，不予运送；若总需求量小于总供给量，则有一部分需求无法被满足，会导致额外成本产生。在建模时可视为需要虚拟供给点来提供。依照表格中总需求量与总供给量间的差值，得出虚拟供给（dummy supply）所需提供量为 17.63 亿立方米。

3.3 调配成本

调配成本包括运输、建设、以及外部性等一切调配运水途中所会直接或间接导致的成本。取每个片区内省份各项成本的平均值，作为该片区调配成本进行模型分析，得出最优调配方案。

3.3.1 运输成本

在调水问题上，运输成本主要体现于因海拔差所引起的额外能量需要。在运输过程中，由于各省市海拔高度不同，水位高低使不同分配方案所导致的运输成本也随之变化。因此，如何更好地利用地势因素，减少成本，在计算最优化方案中至关重要。以下内容主要针对地势问题所带来的能量损耗，计算出运输中的额外成本变量，研究最小成本化的通行路线。

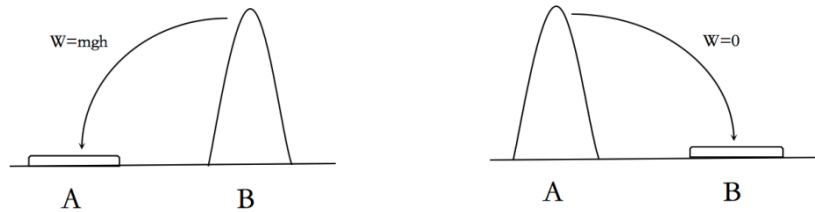
模型：设 B 地与 A 地海拔差值为 h_{AB} ，将 V_{AB} 单位水从 B 地运往 A 地，需要消耗总能量 W 根据能量守恒定律，将重力势能转化为电能进行计算，为：

$$W = V_s \rho g h I (h_{AB} > 0)$$

ρ 为水的密度单位（ $1000\text{kg}/\text{m}^3$ ）， V_s 为单位水的体积。 V_{AB} 为从 A 地运往 B 地

的总需水量。设示性函数 I ，

$$I = \begin{cases} 1, & h_{AB} > 0 \\ 0, & h_{AB} < 0 \end{cases}$$



假设 B 地海拔高于 A 地，即 $h_{AB} > 0$ ，A 地海拔高于 B 地，则需电能 W 支持将水送往高处。若高度差 $h_{AB} < 0$ ，则从 A 运水至 B 地可利用重力使水直接掉落，无需电能输入， I 值为 0。

每立方米运输需要花费的电力成本 C_1 为：

$$C_1 = PW/\alpha$$

p 为每度电的价格， W 为运水所需输出电量， α 每度电抽水储能电站转化效率。以年度为基准单位，所消耗 c 的总值，即为建模所需运输成本。

（数据使用： $\alpha = 76\%$ ， $P = 0.89$ 元/度）

计算每条道路运输成本结果为：（单位：亿元/亿立方米）

表 3-6

运输成本	Demand A	Demand B	Demand C	Demand D	Demand E	Demand F
Supply A	0	3.0	3.8	0	3.6	0
Supply B	0	3.0	2.2	0	1.7	0
Supply C	0	2.3	1.5	0	1.0	0
Supply D	0	4.7	3.9	0	3.4	0.1

6 严恺. 水利词典：上海辞书出版社，1994：447

Supply E	0	0	0	0	0	0
Supply F	0	2.4	1.6	0	1.1	0

3.3.2 建设成本

建设成本即为建造项目在建设过程中所耗费的物化劳动和活劳动的货币支出总和，主要分为两个部分，始建成本（包括挖通河道，修筑沟渠等成本；后续费用）与后续费用（清淤、疏通等建造后续进程所引起的外加支出）⁷。此模型通过对于南水北调中，东二线数据的分析，初步推算出 A，B 两点每年所需使用的建设成本。

始建成本：因此设修建河道从 A 地到 B 地的每米沟渠始建成本为 C_1 ，A 地到 B 地的输水总长为 l_{AB} ，需修建的河道的可使用年限为 n ，南水北调的建设成本为 C_a ，南水北调的输水总长为 l_a 。

$$C_2 = \frac{\frac{C_a}{l_a}}{n} \cdot l_{AB}$$

（数据使用：南水北调东中线的始建成本 C_a 为 2546 亿元，总长度为 2898.445 千米。⁸）

清淤成本：设后续处理，疏通 A，B 两地河道间每单位体积淤泥清理总成本为 C_3 ，每清理长度一米体积的淤泥所需平均成本为 P_0 元，A 片区中心点到 B 片区中心点的直线距离为 l_{AB} ，需修建的河道的可使用年限为 n 。

$$C_3 = \frac{P_0 \cdot l_{AB}}{n}$$

⁷ 王文元，夏伯忠．新编会计大辞典：辽宁人民出版社，1991—01

⁸ 李伯牙，21 世纪经济报道

设 A, B 两地运输每单位体积水所需河道修成本为 C_{tot} , 则其可通过上面两个式子表达出来, 分别为 C_2, C_3 以及总需运水量 Q 。

$$C_{tot} = \frac{C_2 + C_3}{Q}$$

计算每条道路建设成本结果为: (单位: 亿元/亿立方米)

表 3-7

运输成本	Demand A	Demand B	Demand C	Demand D	Demand E	Demand F
Supply A	13.44	13.4	19.59	27.99	27.99	29.29
Supply B	14.99	13.78	20.29	10.23	25.46	25.65
Supply C	14.01	19.18	17.4	14.29	18.42	21.48
Supply D	10.54	19.24	18.76	3.16	34.04	38.27
Supply E	8.58	29.77	5.48	15.53	18.12	30.05
Supply F	22.58	5.41	29.79	13.59	37.41	34.06

3.3.3 外部性成本

“外部性”是指非交易情况下, 经济主体的行为对另一经济主体造成了一定的影响而不必为此支付成本。简言之, 外部性表示对第三方造成的伤害。水资源外部性指水资源消耗者对其它主体产生的非市场性的影响。造成水污染的当事人并未承担损失, 而由第三方承担。在水资源的调配过程中, 可能会受到沿途的污染; 以及由于改变了水资源的分配状况, 可能会造成对生态环境的破坏。水资源一旦被使用, 便将排出使用区形成污水。污水量若超出范围排入河道将导致水道污染进而影响人正常生活用水质量。水资源外部性成本包括水资源污染造成的经济损失及恢复水环境的成本。本模型假设水资源污染的经济损失为 C_x , 废水处理和

水环境恢复费用 C_y 。则有:

$$C_{\text{externality}} = C_x + C_y = \sum_{i=1}^m K_{ix} H_i M + \sum_{i=1}^m K_{iy} H_i M = \sum_{i=1}^m K_i H_i M +$$

其中, K_{ix} 为损失系数, 第 i 种污染因素造成的经济损失产品的总生产值; K_{iy} 为恢复系数, 为第 i 种污染因素造成损失的水环境费用产品的生产总值; K_i 为外

部成本系数； H_i 为第 i 种污染因素单位量的外部成本； m 为产品产值。实际上，上式是处理水资源调配发生的各种外部性的理想公式，但很难获得各种污染因素影响程度，故本文采用污水处理费用来间接表示外部性成本。

设某城市治理废水项目总费用为 C_0 ，废水排放总量为 m_0 ，废水密度为 ρ ，因此，计算出每单位体积废水的处理成本 C'

$$C' = \frac{C_0}{\frac{m_0}{\rho}}$$

通过此计算方法，求出 A、B 两地污水处理价格的平均数，作为外部性成本进行计算，其结果为（元/ m^3 ）：

表 3-8

运输成本	Demand A	Demand B	Demand C	Demand D	Demand E	Demand F
Supply A	0.113	0.161	0.067	0.167	0.040	0.134
Supply B	0.282	0.377	0.189	0.390	0.135	0.324
Supply C	0.356	0.404	0.310	0.410	0.283	0.377
Supply D	0.256	0.303	0.210	0.310	0.183	0.277
Supply E	0.132	0.180	0.086	0.186	0.059	0.154
Supply F	0.090	0.140	0.046	0.146	0.019	0.113

3.4 短缺成本

当一个地区的水资源得不到满足时，其往往影响一个地区的发展。农业缺水会导致农业生产减少；工业缺水会制约着工业的生产。水资源短缺造成的经济损失对于不同的地域，水的边际效用是不一样的。北京等城市因为人口密集、产业集中，水资源的短缺对该城市的影响较大。本文为了精确的评估因为水资源短缺而造成的损失，利用 Leontief 的宏观经济投入产出模型，参考碳排放中的一些方法^[1]，将各行业的用水量，构建水资源投入产出模型，进而计算出水资源的影子价格。水资源投入产出表：

表 3-9

产出 投入	中间使用							最终使用	总产出
	部门	1	...	j	...	n	总计	总计	总计
中 间 投入	1	x_{11}					$x_{1.}$	y_1	X_1
	...								
	i			x_{ij}			$x_{i.}$	y_i	X_i
	...								
	n					x_{nn}	$x_{n.}$	y_n	X_n
	总计	$x_{.1}$		$x_{.j}$		$x_{.n}$		Y	X
初 始 投入		X_1	...	X_j		X_n	X		
用 水 量	1	W_1							
	...		W_2						
	n					W_n			
	合计	W_1	W_2			W_n			

根据 Leontief 的相关推导，总产出可以表示为：

$$\mathbf{X} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{Y}$$

\mathbf{X} 表示总产出， \mathbf{Y} 表示最终产品， $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ 表示里昂惕夫逆阵，也被称为完全需要系数矩阵。设 j 行业用税额为 Q_j ，则各行业用水量可以表示为：

$$\mathbf{W} = \mathbf{QX}$$

与上面总产出联系在一起，可以写为：

$$\mathbf{W} = \mathbf{QX} = \mathbf{Q}(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{Y}$$

借鉴于碳排放强度的名称[]， $\mathbf{Q}(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ 可以称之为水资源消耗强度，即生产单位的最终产品时，需要消耗的水资源量。水资源的边际成本。在线性规划中，

(1) 目标方程:

$$Z = \max Y^t$$

$$\begin{cases} (I - A^t)^{-1} \times Y^t = X \\ Y^t \geq Y^0 \\ X^t \leq X^0 \\ W^t = Q^t X^t \\ W^t \leq W^0 \end{cases}$$

上面的约束方程，分别代表投入产出方程（即完全需要系数矩阵与最终乘积为总产出）、第 t 年最终产出应大于第 0 年的，总产出（含中间产品）应小于第 0 年的。这个线性规划问题表明在已有的水资源、生产条件下，所能达到的最大生产。根据对偶理论，最后一个约束的系数即为水的影子价格（资源的价格）。

(2) 短缺成本计算结果为：（单位：亿元/亿立方米）

表 3-10

DemandA	DemandB	DemandC	DemandD	DemandE	DemandF
21.9	14.9	9.1	19.9	7.77	20.0

3.5 水资源调配综合模型

将从丰水地区运输到缺水地区的各项成本，包括运输成本、建设成本、外部性成本等加总在一起，构成了不同调水路线的成本。对于短缺成本而言，当用水得不到满足时，才会发生此类成本，因此构造一个虚拟的供水点。通过上一节，可以得到从供给水地运往需求水资源地方的单位水量的总成本（元/立方米或者亿元/亿立方米），结果如下表所示：

表 3-11

运水成本	Demand A	Demand B	Demand C	Demand D	Demand E	Demand F
SupplyA	13.5	18.1	18.1	10.8	12.3	22.7
SupplyB	13.6	17	21.8	19.5	31.6	5.5
SupplyC	19.7	22.7	19.2	19.0	19.8	29.8
SupplyD	28.2	15.1	18.6	3.5	19.1	13.9

水资源最优分配模型

SupplyE	28.0	25.7	18.7	34.2	18.2	37.4
SupplyF	29.4	28.2	23.4	38.5	31.3	34.2
Dummy supply	21.9	14.9	9.1	19.9	7.8	20.0

设 C_{ij} 表示从 i 地往 j 地单位体积（亿立方米）调水的总成本， X_{ij} 表示从 i 地往 j 地调水的总量， S_i 表示 i 地区所能供应的可利用水资源总量， D_j 表示 j 地区所需要的水资源总量。各个符号代表的含义如下表所示：

表 3-12

	需求 1	...	需求 j	...	需求 m	供给量
供给 1	C_{1j} X_{1j}	...	C_{1j} X_{1j}	...	C_{1m} X_{1m}	S_1
...
供给 i	C_{il} X_{il}	...	C_{ij} X_{ij}	...	C_{im} X_{im}	S_i
...
供给 n	C_{nl} X_{nl}	...	C_{nj} X_{nj}	...	C_{nm} X_{nm}	S_n
需求量	D_1		D_j		D_m	

因此，模型的目标函数为：

$$\min W = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij} X_{ij}$$

在调水的过程中，应该满足缺水地区的用水需求。对于丰水地区而言，其所能调配的水量应该是在保证自身需求后所能供给的可利用水资源总量，即约束应分为供给约束以及需求约束两大块。则约束可以表示为：

供给约束： $\sum_{j=1}^m X_{ij} = S_i, i = 1, 2, \dots, n$ ，即从 i 地运往其余各缺水地区的总供给量应

为 i 地所能供给的可利用水资源量。

需求约束： $\sum_{i=1}^n X_{ij} = D_j, j=1,2,\dots,m$ ，即从各丰水地区运往 j 地的水资源量应为 j

地的所短缺的水资源总量。

综合以上，水资源综合调配模型为：

$$\begin{aligned} \min W &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij} X_{ij} \\ s.t. &\begin{cases} \sum_{j=1}^m X_{ij} = S_i, & i=1,2,\dots,n \\ \sum_{i=1}^n X_{ij} = D_j, & j=1,2,\dots,m \\ X_{ij} \geq 0 & (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m) \end{cases} \end{aligned}$$

该问题可以通过使用运输单纯形法计算求得使总成本最优的结果。本文通过使用 Lingo 软件对上述模型进行求解。

3.6 结果分析

表 3-13

	Demand A	Demand B	Demand C	Demand D	Demand E	Demand F
Supply A	348.629	78.682	0	67.857	37.186	0
Supply B	0	0	0	0	0	32.764
Supply C	0	24.404	0	0	0	0
Supply D	0	0	0	19.863	0	19.736
Supply E	0	0	232.66	0	0	0
Supply F	0	0	16.358	0	0	0
Supply G (dummy supply)	0	0	3.77	0	13.86	0

注: SupplyA 为广东、湖北、湖南、江西、福建, SupplyB 为内蒙、黑龙江, SupplyC 为广西壮族自治区, SupplyD 为江苏省, SupplyE 为西藏自治区, SupplyF 为新疆维吾尔自治区。DemandA 为天津、北京、河南、河北、山东, DemandB 为山西省, DemandC 包含陕西兰夏甘肃, DemandD 为上海市, DemandE 为贵州省, DemandF 为辽宁省

根据编程结果可知, 最佳调配方案为广东、湖北、湖南、江西、福建片区向天津、北京、河南、河北、山东片区运 348.629 亿立方米水, 独立进行交易。山西省则从内蒙、黑龙江片区调运 78.682 亿立方米水, 同时从广西壮族自治区调运 24.404 亿立方米水以满足需求。山西兰夏甘肃则从西藏调运 232.66 亿立方米水, 从新疆调运 16.358 亿立方米, 3.77 亿立方米需求无法被满足。上海市的需求通过广东、湖北、湖南、江西、福建片区提供 67.857 亿立方米, 江苏省提供 19.863 亿立方米被满足。广东、湖北、湖南、江西、福建片区调配 37.186 亿立方米给贵州省使用, 同时保留剩余需求量缺口 13.86 亿立方米。最后, 辽宁省需从内蒙、黑龙江调配 32.764 亿立方米, 从江苏省调配 19.736 亿立方米, 以达到最佳调配结果。

四. 水资源调配动态模型

4.1 问题分析

随着时间的推移, 每个省份对于水资源的需求量和供给量会发生变化。一旦变化发生, 静态部分分配方案则不为最优配置情况。因此, 我们研究了水资源调配的动态模型。以北京市为例, 分析往年得出所有研究调配所需变量随着时间变化的回归模型。通过此方法, 可得出各个省份在未来几年可能发生的水资源波动情况。依照预测值, 根据第三部分内容重新计算, 可以得到根据时间变化所改变的新调配方案。

4.2 水资源的供给变化⁹

4.2.1 降水量

水资源供给, 即水资源总量主要通过两个变量进行计算: 地表水资源量以及地下水资源量。而雨水降水直接成正比导致了地表地下水量的增加, 因而引起水资源供给量的变化。此章节主要研究影响水资源供给的因素, 通过降水量与地表水、地下水的关系, 进行相关动态预测。

每年下降的雨水不是固定的量, 一般围绕均值上下波动, 假设每年的雨水近似服从一个正态分布, 即:

$$rain_t \sim N(\mu, \sigma^2)$$

由于真实的均值与方差不可知, 因此可用样本均值和方差来代替, 即:

9 中国国家统计局

$$\text{样本均值: } \bar{X} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \text{rain}_{T-i}$$

$$\text{样本方差: } S^2 = \frac{1}{T-1} \sum_{i=1}^T (\text{rain}_{T-i} - \bar{X})^2$$

存在下列关系，即：

$$E(\bar{X}) = E\left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \text{rain}_{T-i}\right) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T E(\text{rain}_{T-i}) = \mu_{10}$$

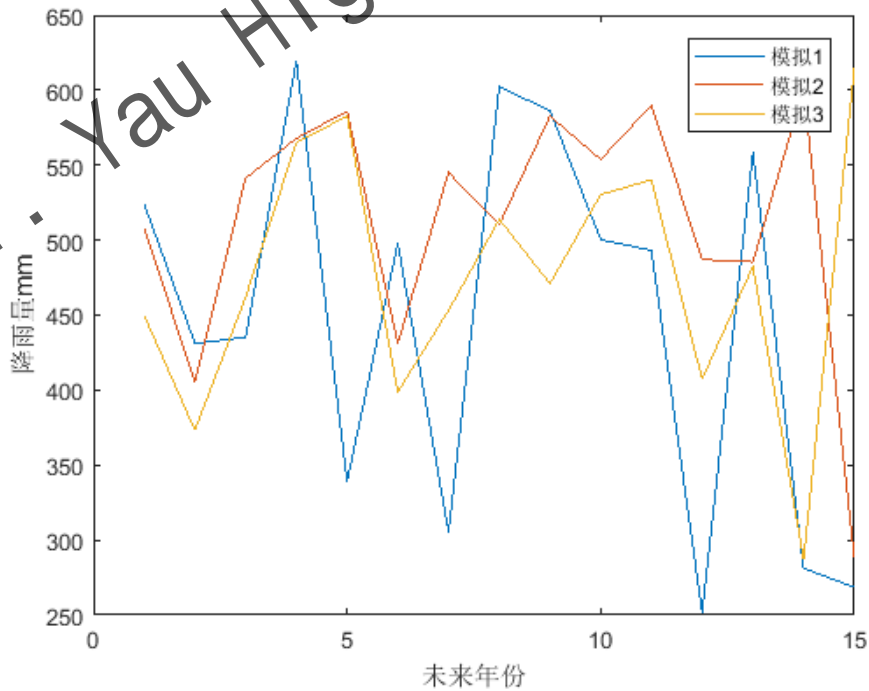
$$E(S^2) = E\left[\frac{1}{T-1} \sum_{i=1}^T (\text{rain}_{T-i} - \bar{X})^2\right] = \sigma^2$$

利用 matlab 进行编程，可以求得北京市 2004~2016 年的平均降雨量以及样本方差，其结果为：

$$\bar{X}=500.23, S^2=99.93$$

即认为北京市降雨量服从 $N(500.23, 99.93)$ 的正态分布，故可以利用样本均值和样本方差来模拟北京市未来几年的降雨量。因为假设降雨分布是 iid 的，服从一个随机过程，使用 matlab 对未来降雨量进行模拟，其结果如下：

图 4-1



10 贾绍凤, 张士锋, 杨红, 等. 工业用水与经济的关系——用水库兹涅茨曲线[J]. 自然资源学报, 2004, 19(3):279-284

4.2.2 地表水 (surface water)

地表水有原有地下水, 降雨等来源。因此可以建立如下的自回归模型:

$$S_f(t) = \beta_0 + \beta_1 S_f(t-1) + \beta_2 \text{rain}(t) + \varepsilon_t$$

表 4-1

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-3.834847	3.767323	-1.017924	0.3353
SURFACE(-1)	-0.062260	0.211322	-0.294623	0.7750
RAIN	0.027871	0.006678	4.173435***	0.0024

注: *, **, ***分别代表在 10%, 5%, 1% 的显著性水平下显著。

其中, 时间为 t 年, β_0 为常数项, $S_f(t-1)$ 为 t 年前一年地表水量, $\text{rain}(t)$ 为 t 年的降雨量。由表可得, 北京市年降雨量每增加 1mm, 会导致北京市地表水量上涨 0.028 亿立方米, 前一年的地表水每增加 1 亿立方米, 会导致下一年地表水下降 0.06 亿立方米。由于前一年水量增加, 用水需求增大, 人们往往大量使用水资源忽视节约用水, 导致下一年地表可用水量供给减少。因此, 北京市年地表水量与前一年地表水量成反比关系、与年降雨量成正比关系。

4.2.3 地下水 (underground water)

地下水来源于原有地下水、雨水渗透、地上水渗透。因此可以建立自回归模型来预测下一阶段的地下水总量。

$$S_u(t) = \alpha_0 + \alpha_1 S_u(t-1) + \alpha_2 \text{rain}(t) + \varepsilon_t$$

表 4-2

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	12.41222	4.923271	2.521134**	0.0327
UNDERGROUND(-1)	-0.227672	0.229823	-0.990642	0.3477
RAIN	0.024746	0.006978	3.546307***	0.0063

注: *, **, ***分别代表在 10%, 5%, 1% 的显著性水平下显著。

其中, 假设时间为 t 年, α_0 为常数项, $S_u(t-1)$ 为 t 年前一年的地下水量,

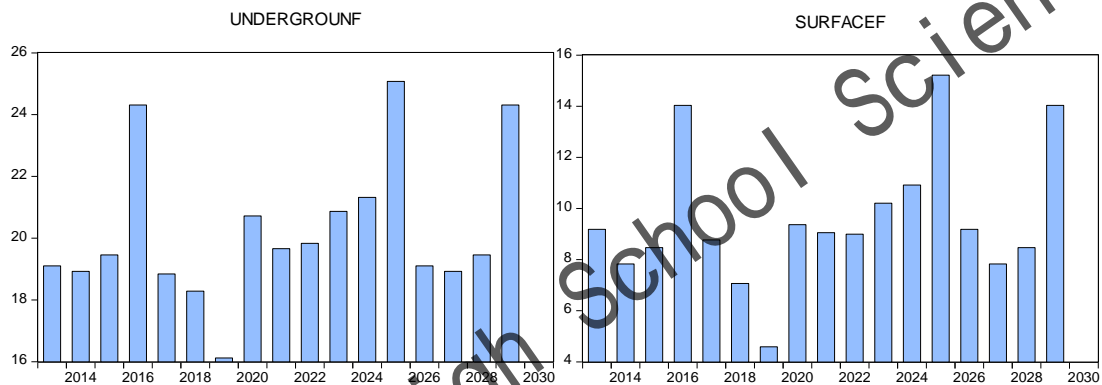
$rain(t)$ 为 t 年的降雨量。

由表可得，北京市年降雨量每增加 1mm，会导致北京市地下水数量增加 0.025 亿立方米，前一年地下水量每增加 1 亿立方米，会导致下一年地下水量下降 0.23 亿立方米。由于前一年水量增加，农业灌溉、城市用水量上涨，导致下一年地下水供给减少。因此，北京市年地下水量与前一年地下水量成反比关系、与年降雨量成正比关系。

4.2.4 总供给量模拟

利用 matlab 与 evIEWS 等软件，可以得到未来 15 年内的地表水与地下水量的预测结果，如下图所示：

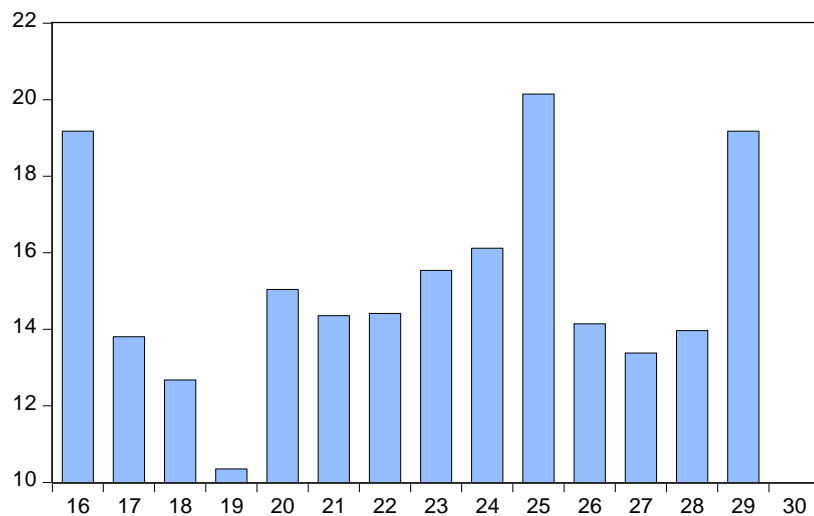
图 4-2



上面两者之和为北京市的水资源总量，因为北京市水资源要留有一些水资源供生态环境使用，因此，其可利用水资源量为：

图 4-3

WATER



左边第一幅图是未来北京市地下水量的预测结果，其很大程度上与降雨量相

关，两者的变化趋势基本相似。

4.3 水资源的需求变化

按水的最终去向划分，水的去向可以包括三个部门，即工业部门、农业部门以及生活部门。这三个部门的性质不同，因此需要单独进行分析。因此，本文就这三个板块分别讨论，通过分析会导致每个版块数值变化的因素，用 Eviews 进行回归，得到计算动态模型的具体公式，加以运用。

4.3.1 农业用水

我国用水需求很大一部分程度来自于农业用水。由于需要种植粮食等作物，需要消耗大量的水资源。事实证明，农业就业人员占比的大小也与农业用水正相关¹¹。此外，农业排灌机数量增加，代表消耗水资源量的上升。因此，我们可以假定农业用水仅与与农业灌溉面积、人口结构及农业使用机械数量有关。故 t 年的农业用水可以表示为：

$$D_a(t) = \theta_0 + \theta_1 Land_t + \theta_2 AE_t + \theta_3 POP_t$$

其中， D_a 表示在 t 年时农业用总水量， θ_0 为常数项，Land 代表有效灌溉面积。CAPITAL 则通过农业排灌机械数量代做运算，代表种植产量代入方程。通过搜集分析 2004 到 2016 年的数据资料，回归结果显示为：

表 4-3

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-2.072002	2.475419	-0.837031	0.4242
AREA	0.006372	0.007235	0.880691	0.4014
STRUCTURE	9.664877	3.242789	2.980421**	0.0154
CAPITAL	0.000176	5.78E-05	3.035926**	0.0141

注：表中* 号表示假设检验的显著性水平，其中***Sig<0.01，**Sig<0.05，* Sig<0.

结果显示，北京市有效灌溉面积每增加一千公顷，会导致用水量增加 63 万七千立方米，第一产业就业人口比例每增加 1%，会导致增加 9.66 亿立方米需水。此外，每多用一台农业排灌机，代表总种植产量需求增加，导致农业需水量对应

11 周祖昊, 杨波, 刘海振, 邵薇薇, 曹小磊. 华北地区农业用水影响因素与保障对策研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(08):24-27.

增长 1.76 万立方米。由此看来，灌溉面积，农业就业人员占比，以及使用机械数量皆成正比关系。模型成立，自变量与因变量之间的假设关系是存在的。

4.3.1 工业用水

由索洛模型知，工业产值的生产函数可用下式进行表示¹²：

$$Y=K^{\alpha}(AL)^{\beta}W^{\gamma}$$

用北京市全社会固定资产投资代替资本量，规模以上工业企业单位数代替工业产值，则用水的需求为：

$$D_i(t) = En(t)^{\frac{1}{\gamma}} [A(t)L(t)]^{\frac{\beta}{\gamma}} I(t)^{-\frac{\alpha}{\gamma}}$$

其中， $Di(t)$ 代表 t 年时的工业用水总量， $A(t)L(t)$ 代表 t 年时的第二产业总就业人口， $En(t)$ 代表 t 年时规模以上工业企业总单位数， $I(t)$ 代表 t 年时的全社会固定资产投资总量。根据上面关系可知，工业产值和规模以上工业企业单位越高，那么工业用水量越多，而全社会固定资产投资越多，工业用水量却越少。因此，可以初步得出工业用水量与第二产业就业人口、规模以上工业企业单位数和全社会固定资产投资有关。

代入方程，通过 1997 年到 2016 年的数据，回归模型分析结果如下表格所示：

表 4-4

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-3.559096	8.790309	-0.404889	0.6950
QPOP	44.66353	27.31275	1.635263	0.1364
WENTERPRISE	0.889962	2.702999	0.329250	0.7495
WINVESTMENT	-2.101339	3.459734	-0.607370	0.5586

通过表格，可得知北京市第二产业就业人口每增加 1 千万人，工业用水量会增加 44.66 亿立方米，规模以上工业企业单位数每增加 1 万个，工业用水量将会增加 0.89 亿立方米，全社会固定资产投资每增加 1 万亿元，工业用水量将会减少 2.1 亿立方米，但由于数据量比较少的原因，这些结果并不显著。不过根据其正负性，可得出结论，工业用水量与第二产业就业人口、规模以上工业企业成正比关系，与全社会固定资产投资成反比关系。

4.3.2 居民用水

根据陈晓光等对城市居民用水需求影响因素研究¹³，我们可以假定居民生活

12 张陈俊，章恒全. 新环境库兹涅茨曲线：工业用水与经济增长的关系[J]. 中国人口·资源与环境，2014，24(5):116-123.

13 陈晓光，徐晋涛，季永杰. 城市居民用水需求影响因素研究[J]. 水利经济，2005(06):25-26+68+73

用水与人口数量、经济规模及居民消费水平相关。对数据的定性分析表明，城市居民消费水平越高，年居民用水需求量越大。例如北京市 2004 年居民消费水平从 13425 元上升到 2016 年 48883 元，与此同时，城市用水量从 2004 年 12.91 亿立方米上涨到 2016 年 17.8 亿立方米。其他城市的居民用水量也呈现类似关系。

故 t 年的生活用水量可以表示为：

$$D_R(t) = \gamma_0 + \gamma_1 QPOP(t) + \gamma_2 WGDP(t) + \gamma_3 WC(t) + \varepsilon_t$$

其中， D_R 表示在 t 年时居民用水总量， γ_0 为常数项， $QPOP$ 代表年末常住千万人口， $WGDP$ 为万亿元地区生产总值， WC 为万元居民消费水平。通过搜集分析 1997 年到 2016 年数据资料，结果显示为：

表 4-5

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	10.31395	4.145802	2.487807**	0.0345
WGDP	1.307790	2.942593	0.444434	0.6672
QPOP	1.560529	2.927851	0.532995	0.6069
WCONSUM_LEVEL	0.145485	1.204404	0.120794	0.9065

注：表中* 号表示假设检验的显著性水平。其中***Sig<0.01, **Sig<0.05, * Sig<0.1

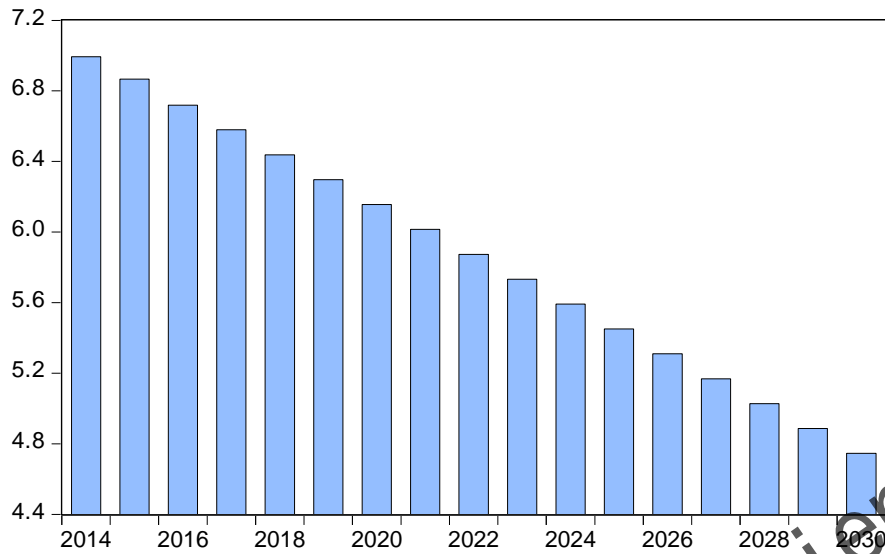
结果显示，北京市经济规模每增加一万亿元，会导致用水量增加 1.31 亿立方米，年末常住人口每增加一千万人，会导致用水量增加 1.56 亿立方米，此外，居民消费水平每增加一万元，会导致用水量增加 0.14 亿立方米。由此看来，北京经济规模、人口、居民消费水平与居民用水量呈正相关性。

4.4 供给量模拟

农业用水需求：对于北京市而言，大规模的城市化会减少耕地面积，因此农业从业人口比例、灌溉面积趋向于递减的趋势，本文利用近些年的农业人口、灌溉面积、农业排灌机械的数量变化趋势计算农业需水量。使用的模型是上文所建立的关于农业用水的回归模型，其未来十多年的变化结果如下图所示：

图 4-4

AWF

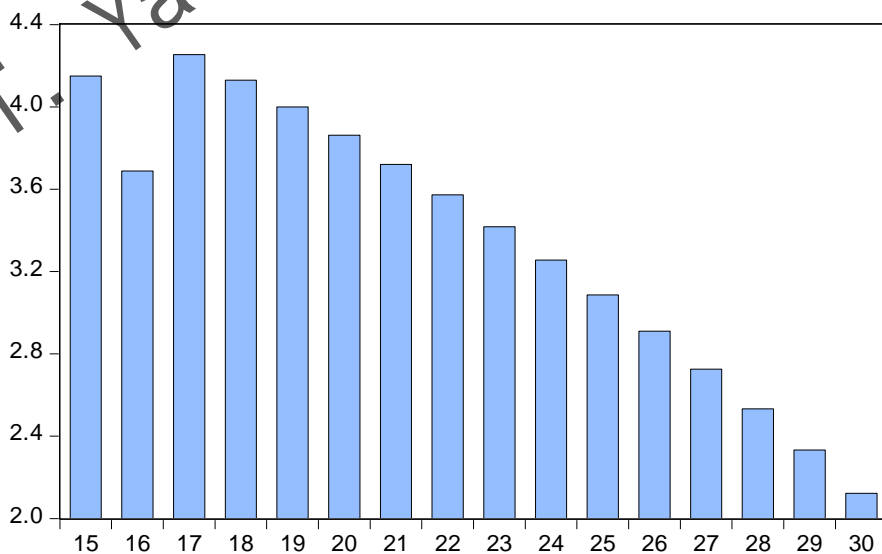


由于北京市的城市化进程比较快，土地灌溉面积以及农业从业人口都在缩减。根据近些年的灌溉面积、农业从业人口变化趋势，因此农业用水的情况每年都在减少。

工业用水需求：随着社会发展，工业企业数量逐渐增加，就业人员也相对有所增长，按理说用水量应随之增加。但由于国家在创新能源新新设备等方面投资较多，导致整体用水量仍呈下降趋势：

图 4-5

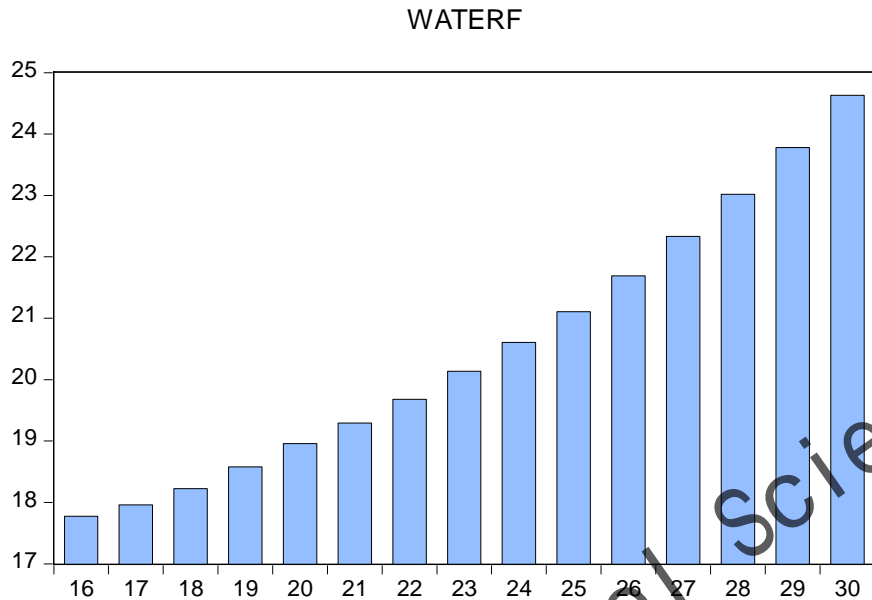
WATERF



生活用水需求：对于北京市常住人口、经济规模的预测可以用自回归模型进行。

根据上文中的居民用水的需求结果，可以得到未来 15 年左右的用水量需求。由于人口增长会从各方面导致水的需求总量增加（表 4-5），这种稳定上升趋势也能从回归图表中看出：

图 4-6

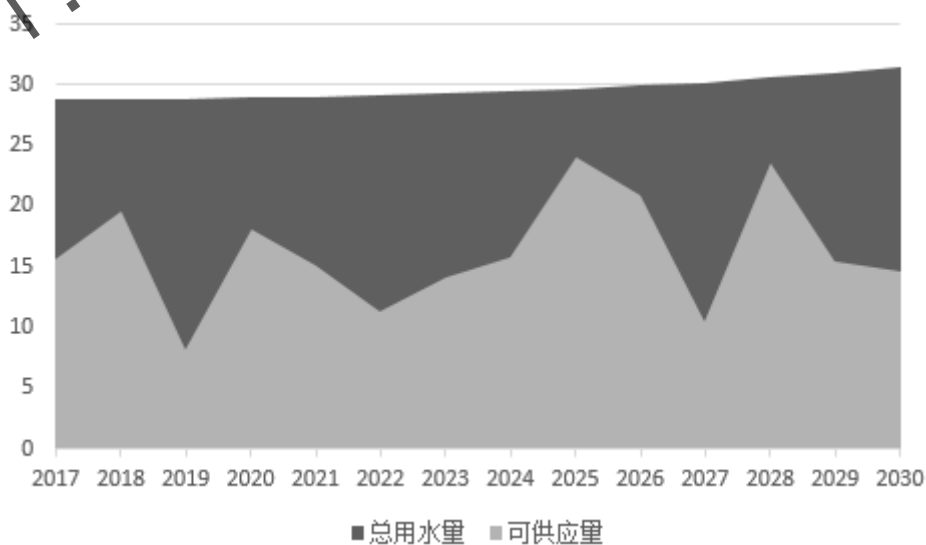


从 2016 年的 18 亿立方米，到 2030 年的接近 25 亿立方米，水的需求总量增加了 2 倍之多，足以窥见人口暴增对稀缺资源带来的负外部影响。此类急速需求增长，也会使水的有效分配方案收到巨大影响。

4.5 用水缺口

通过综合用水的供给与需求因素，可以得到北京市至 2030 年的用水缺口数据，未来 15 年间的用水总量可以表示为：

图 4-7



通过数据可发现,北京市的用水缺口于 2019 迅速上升至 20.62 亿立方米,又于 2020 骤降至 10.90 亿立方米,从 2020 至 2024,用水缺口趋势呈缓慢平稳状态,但于 2025 下降至 5.52 亿立方米,从 2025 至 2027 年期间用水缺口增加至 19.70,于 2028 减少至 7.11 亿立方米,最后阶段 2028 至 2030 用水缺口皆呈上升趋势。

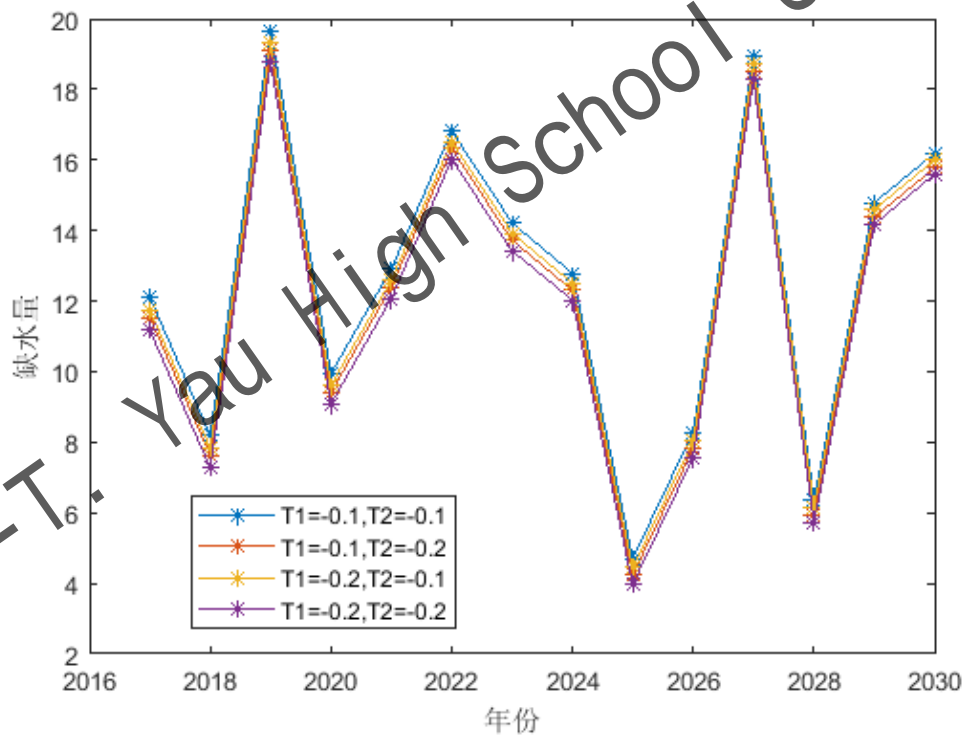
五、敏感性分析

5.1 考虑技术进步

因为在短期,发生技术进步的可能性比较小,但是在比较长的一段时间,则有很大可能在水的节约上面的技术进步¹⁴。下面分析不同的技术进步对用水缺口的影响:

$$D(t) = e^{-\varphi_1(t)} D_I(t) + e^{-\varphi_2(t)} D_A(t) + policy(t) D_R(t)$$

图 5-1



这张图反映比较小的技术进步导致的用水需求的变化。从图中可以看出,四条曲线所代表的四种不同的技术进步,变化趋势几乎是一模一样,并且四条曲线的间隔基本没有,甚至于 2026 至 2028 年间,四条曲线近乎合并为同一条曲线,可以清楚得知,在此阶段技术进步对于用水需求的改变基本为零,因此,分析该

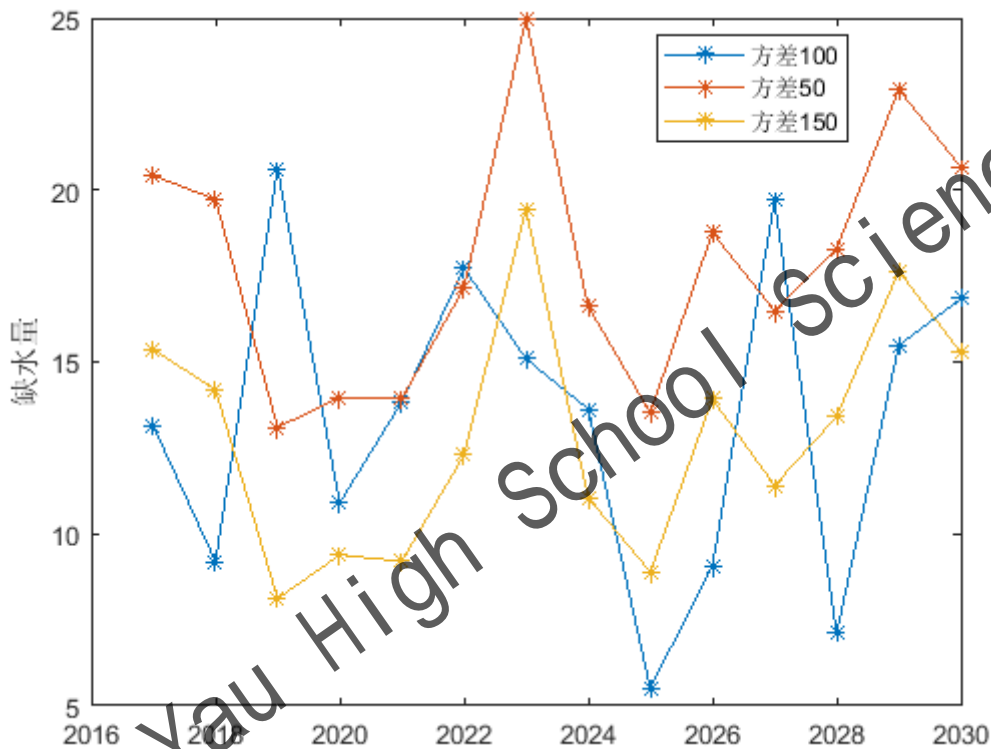
14 佟金萍, 马剑锋, 王慧敏, 秦腾, 刘高峰. 农业用水效率与技术进步: 基于中国农业面板数据的实证研究[J]. 资源科学, 2014, 36 (09): 1765-1772.

图可得出用水需求对技术进步的变化不敏感。

5.2. 降雨量分布的影响

事实上，降雨量的分布也是会随时间变化的，而不是遵从于服从相同均值方差的正态分布。现在假设由于气候变化，北京市的降雨量不再遵从均值为 500.23，方差为 99.93 的正态分布。N(500.23, 99.93)，下面是不同分布的模拟结果：

图 5-2



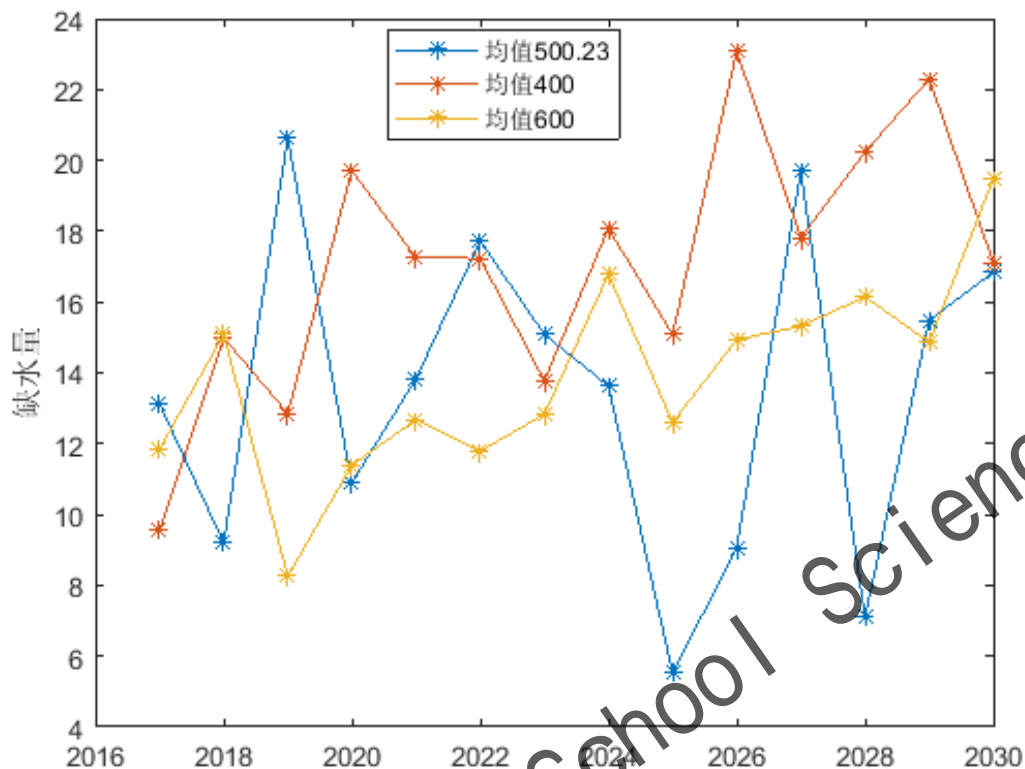
通过图表可得，方差偏大大的曲线变化幅度较小。

方差为 50 时，2016 至 2019 年间缺水量呈下降趋势，2019 至 2021 期间缺水量变化较为平稳，2021 至 2023 期间缺水量骤增至 25 亿立方米，2023 至 2025 年间降低到 15 亿立方米左右，2025 至 2030 期间缺水量稳步上升至约 20 亿立方米。

方差为 100 时，几乎每年的缺水量都有着极大的变化，2016 至 2030 期间缺水量骤增与骤降的情况交替发生，最低甚至可达 5 亿立方米左右，而最高可达 20 亿立方米。

改变均值后，降水量的影响：

图 5-3



分析图表，可清晰认识到均值较大的曲线缺水较少。

均值为 400 时，缺水最少的一年为 2017 年，接近 10 亿立方米，而最高的则是 2026 年，缺水达到了接近 24 亿立方米，整个曲线缺水虽然有下降的部分，但更多的还是呈上升的状态，因此整体的趋势仍然是呈现缺水较多且增加的状态。

均值为 500 时，缺水最高可达接近 21 亿立方米于 2019 年，最低可达 6 亿立方米左右于 2025 年，但因为该曲线变化幅度较大，更多的部分还是处于缺水较大的状态，因此曲线整体的状态仍然是呈缺水较多的状态。

均值为 600 时，缺水最高可达约 19 亿立方米于 2030 年，最低可达 8 亿立方米左右于 2019 年，该曲线整体较为平稳，除了最后一年的缺水较高外，大部分的曲线都处于缺水较少的状态，因此曲线整体呈现的状态为缺水较少。

六、模型建议

6.1 优点分析

1.从经济学角度看，全文研究的是经济研究主要目标的具现化——稀缺资源的有效配置。同时，也运用了数据以及应用数学知识加以支撑，不仅仅是建立在理

论基础上，而是将理论与实际相结合，综合实际情况考虑，然后通过回归、预测等方式建立准确模型。

2. 文章并没有将资源配置仅仅停留于一个区域或一个省份内，而是从流域、海拔、地理位置等整体角度综合了各个子区的水资源状况作为参考，进行更加有效地整体比较。

3. 由于我国水资源系统较为复杂，仅仅静态模型并不能很好的解释并提出合理的调配方案，而提供动态方案的论文其实很少。所以本文综合考虑了水资源的动态分析，人工水循环系统、天然水循环系统的计算表达式进行回归，得出了长期情况下模型可能的变化以及对应调整方案，而不仅仅是静态构想，彰显了文章的创新性以及独立思辨能力。

6.2 缺点分析

1. 本文研究的是如何有效调配水资源，此方案仅靠调配无法完全满足所有省份的水资源需求量，仍有省份会有缺水情况出现。

2. 由于实际情况下调运成本或水资源总量动态变化变量较多，所以可能出现在计算调配成本过程中因考虑因素不完全可能导致细微结果偏差。

3. 由于整个模型都是以满足当地人口水资源需求为前提建立的，因此没有考虑其他可能导致水资源效用最大化的方案的可行性。举例来说，由于运水的成本巨大，水资源的短缺成本小的地区完全可以通过迁入其他地方来减少对水资源的消耗，根据“愚公移山，不如搬家”的道理，可能市民迁移等其他方案也能在不移动水资源的情况下，同时满足成本最小化。

七、结论和建议

7.1 结论

1. 由于建设成本远远大于其他运输、外部性等成本损失，因此政府可以就近选择运输地点。将距离不远的两个省份或片区用水渠相连，并进行内部运水交易。比如，将水从西藏运送到山西、宁夏等地，取长补短。同时，山西宁夏甘肃和贵州来说，水资源需求无法被完全满足，因为相对来说，水资源匮乏对于这些省份城市短缺成本较小，因此，只有当这些城市的资源不被满足时，才能达到成本最小化。

2. 相对总供给量来说，北京市年降雨量每增加 1mm，会导致地表水量上涨 0.028 亿立方米，地下水量上升 0.025 亿立方米。而相反，前一年的地表水或地下水量每增加 1 亿立方米，由于资源浪费、使用更多等原因，则会导致下一年地表水下降 0.06 亿立方米，地下水量下降 0.23 亿立方米。

3. 而相对总需求量来说，灌溉面积，农业就业人员占比，以及使用机械数量增加，会导致农业用水量的增长。工业用水量与第二产业就业人口、规模以上工业企业成正比关系，却由于科技进步等间接结果，与全社会固定资产投资成反比关系。居民用水量，作为反映总人口以及用水设施的测量标准，与北京市经济规模、人口、居民消费水平与居民用水量呈正相关性。

4. 考虑科技进步的情况下，随着时间增长，如果科技进步难以跟上人口增长的速度，总需求量会大量增加，而导致水资源的更加缺乏。丰水地区会大量减少，同时缺水地区增加，导致难以达到最优平均分配效果。

7.2 建议

我国生态环境、自然条件、人口基数、社会发展水平等方面存在区域差异问题，水资源配置将会是一个挑战性的复杂难题。根据不同地域多元化水土资源，未来水资源配置问题可深化研究：

1. 基于生态环境与人类和谐发展考虑，提倡水资源可持续性战略，将目标定为促进经济生态平衡而不仅仅局限于满足人类水资源基本需求；

2. 加强科技模型设计，随着研究的进展，对水资源数据更加全面、精确方面追求渐渐提高，应投入更多在开发分析及软件工具上，全面预测计算多种因素的不同配置组合；

3. 加强水资源管理，针对产业结构提出有效用水策略，分部门供水工程建设管理模式问题是否合理等；

4. 调动全民水资源节约意识，利用广告宣传、公益活动，科普水知识，树立绿色用水观念。

参考文献

- [1]柳长顺,陈献,刘昌明,等.国外流域水资源配置模型研究进展[J].河海大学学报(自然科学版),2005,33(5):522-524.
- [2]欧阳琪,张远东.加利福尼亚州水资源调配工程[J].南水北调与水利科技,2006,4(6):1-12.
- [3]王欢.基于边际效用理论的水资源价值研究[D].北京工业大学,2012.
- [4]童绍玉,周振宇,彭海英.中国水资源短缺的空间格局及缺水类型[J].生态经济,2016,32(07):168-173.
- [5]水资源可利用量计算 王建生,钟华平,耿雷华,徐澎波,刘翠善,2006
- [6]严恺.水利词典:上海辞书出版社,1994:447
- [7]王文元,夏伯忠.新编会计大辞典:辽宁人民出版社,1991—01
- [8]李伯牙,21世纪经济报道.
- [9] 中国国家统计局 <http://www.stats.gov.cn/>
- [10] 贾绍凤,张士锋,杨红等.工业用水与经济发展的关系——用水库兹涅茨曲线[J].自然资源学报,2004,19(3):279-284.
- [11]周祖昊,杨波,刘海振,邵薇薇,曹小磊.华北地区农业用水影响因素与保障对策研究[J].中国农村水利水电,2017(08):24-27.
- [12] 张陈俊,章恒全.新环境库兹涅茨曲线:工业用水与经济增长的关系[J].中国人口·资源与环境,2014,24(5):116-123.
- [13]陈晓光,徐晋涛,季永杰.城市居民用水需求影响因素研究[J].水利经济,2005(06):25-26+68+73.
- [14] 佟金萍,马剑锋,王慧敏,秦腾,刘高峰.农业用水效率与技术进步:基于中国农业面板数据的实证研究[J].资源科学,2014,36(09):1765-1772.

致谢页

具体分工如下：

赵未来进行了摘要部分内容的写作及翻译，并且进行了动态情况下的回归分析即编程预测；

龚星雨进行了成本方面的数据计算，得出静态部分的最终结论，并将文章整合，将定义、图表、结论进行排版；

张刘嘉进行了图表显示结果分析，模型建议及结论的拟写，以及绘图制作过程；

胡雪莹老师帮忙指导了短缺成本的计算方法，并为文章疏通思路。

除此之外，所有研究成果皆为小组讨论所得结果。包括：模型假设、综合模型建立、聚类分析、以及统计数据的收集。文章脉络大纲等思路也是多次统筹更改所建。

学术诚信签名

本参赛团队声明所提交的论文是在指导老师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。尽本团队所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。若有不实之处，本人愿意承担一切相关责任。

参赛队员： 赵木荣 张易雨 张利嘉 指导老师： 胡志远

2018年 9月 27日