

系统分析在东线引江水量 平衡中的应用

刘昌明 杜伟

(中国科学院地理研究所)

提 要

本文根据自然地理地带性规律指标与水量平衡原理, 提出了统一需水与环境要求的跨流域调水水量分配的系统分析模型, 并以南水北调一期工程为例, 展示了地理系统分析的具体应用。

由于系统分析能对多目标、多因素、多功能、多用户的大系统作出全面的综合, 因而为地理学提供了新的手段与方法, 促进了地理学综合研究的定量化。目前采用的水资源评价与规划方法涉及工程技术和经济评价的居多^[1], 对跨流域调水工程进行地理系统分析的极少。我国幅员辽阔, 人口众多, 气候条件复杂, 水资源分布不均, 供需矛盾各地不同。现行的跨流域调水往往是一种战略措施。目前提出的南水北调工程, 引水路线长, 结构复杂, 是一个范围很广的供水系统, 它将会对调水涉及到的地区的地理环境产生深刻的影响。因此, 对这种大型调水工程进行地理系统分析, 应是一项有价值的地理综合研究。

一、宏观地理系统的建模原则、方法与模式

地理系统作为物理系统, 它的最主要的输入输出是水量和热量。在用数学方程式把系统内各物理量之间以及它们与外部输入之间的关系未作分解之前, 任何定量分析都是不可能的。由于地理系统的复杂性, 在建立模型的过程中, 要特别注意同时兼顾描述的精确性和数学形式的易处理性。应对地理系统作尽可能严格的拟合, 并力图获得简明的数学描述形式。在一次近似模型的基础上求得系统的某些特性以后, 根据需要, 再进一步建立更精确的模型, 然而在所有阶段上应记住各种特定的模型所能达到的近似程度。地理系统中的内在联系, 可以用线性的或非线性的、时变的或时不变的(自主的)微分方程来描述, 而微分方程的阶取决于我们对地理系统进行分解的程度。这种地理剖析愈是精细, 分解出来的物理量的个数愈多。因此, 对地理系统进行分解时, 要考虑模型的拟合程度, 也要考虑系统求解的难易性。

1. 地理系统的水量平衡与环境生态的理想水分条件 根据能量和质量守恒定律, 研

究自然地理系统的输入输出量,最为精确和易行的方法是在水热平衡的基础上作分析。对一个地区的环境来说,水量平衡要素(如降水、蒸发、地表水与地下水等等)是重要的生态物理因子。跨流域或跨地区的调水工程,必然引起水量平衡要素及它们对比关系的变化,最终会影响到环境生态系统。在跨地区调水规划和水资源利用的方案中,往往由于偏重于供需关系的分析或只考虑供需平衡,而造成水资源利用后的不利环境后果。例如,调入缺水地区的水量不是愈多愈好。在某些地区,过多的水量会造成土壤次生盐渍化或渍害。一般认为调水量取决于用水的要求,但从根本上看是个如何控制水量平衡要素及其对比关系变化的适宜度问题。这个问题可以用地理学的观点来分析。自然地帶性规律的理论研究表明,水量平衡结构是地带划分的重要依据之一。一般采用包含水分、热量条件的辐射干燥指数,即以 R/LP (R 为净太阳辐射, L 为蒸发潜热, P 为降水量) 作为指标。实际上 R/LP 是蒸发能力 (E_0) 与降水量 (P) 之比。因为在热量平衡方程^[2]中, R/L 代表了蒸发输出消耗能量的上限,即 $PE = R/L$, 这里 PE 称为潜在蒸发。一般认为 $PE = E_0$ 。考虑到地表水量平衡中的径流因地貌、土壤等多种地理条件而有不同,排除地表产生径流不同条件的影响,可以把辐射干燥指数中的降水量要素减去地表水的流失或径流量 (R_s), 而后得到土壤水分总通量 (M):

$$P - R_s = M \quad (1)$$

由干燥指数的定义与式 (1) 可以得出水利设施对环境影响有判别意义的指标 (C_r), 即

$$C_r = \frac{R}{L(P - R_s)} = \frac{PE}{M} \approx \frac{E_0}{M} \quad (2)$$

这里我们把 C_r 取名为水分适宜度。当 $C_r > 1$ 表明地区干旱, 需要补水 (引水灌溉); 当 $C_r < 1$ 表明地区湿涝, 需要排水 (除涝), 当 C_r 接近 1 时, 才会出现水分适宜条件, 农田生态环境应出现最佳状况, 即不早不涝。从理论讲, 南水北调在农业发展中的主要任务可以归结为对 $E_0/M > 1$ 的地区进行补水, 使水量输入区的水分适宜度向着 1 转化, 其实质可概括为:

$$C_r = \frac{E_0}{M + T} \rightarrow 1 \quad (3)$$

式中 T 为调水量, 它应为地区的缺水量扣除当地地表径流、地下水的貯蓄和提取的利用量。 T 的量值应使水分适宜度 $C_r \rightarrow 1$, 以改善农业生态条件, 提高水量输入区作物的产量, 促进工业生产产值和人民生活水平的提高, 由此可见, 农业生态环境的最佳可与调水工程的环境经济效益最佳联系起来。由 (2)、(3) 式可得:

$$\frac{E_0}{P} = 1 - \alpha + \frac{T}{P} = \frac{E + T}{P} \quad (4)$$

式中: E 为蒸散发量, α 相当于径流系数。应当指出的是, 从目前情况来看 α 已经深受人类活动的影响。在华北平原的一般年份, 由于用水量大, 水利工程拦蓄能力强, 当地数量有限的地表径流常被充分利用, $\alpha \rightarrow 0$ 或 $\alpha = 0$, 在这种条件下式 (4) 的调水量比值 T/P 与干燥指数 E_0/P 有以下的关系 (缺水量取负值):

$$T/P = 1 - E_0/P \quad (5)$$

可见调水量 (T) 与干燥指数 $\frac{E_0}{P}$ 有直接的关系。令

$$r = E_0 / P \quad \text{则} \quad (6)$$

$$T/P = 1 - r$$

$$\text{或} \quad T = P - E, \quad (7)$$

显然, 这时的 T 表示满足地理系统达到生态环境最佳状态的最大需水量。若调水量大于这个 T 值, 就可能产生对生态环境不利的影响。因此, 对于华北平原地区, 我们可以借助于 P 值和 $P - E$ 值来研究调水的最优水量分配问题。

2. 跨流域调水的地理系统分析模型

对所研究的地理系统进行数学描述, 即数学模型化, 而模型化的继续就是仿真。其最终目的是要求对这个地理系统作物理解释或研讨, 最后得出满足一定应用要求的模型。地理系统的状态变化可用状态方程来表示:

$$\dot{\vec{x}}_r = f_r(\vec{x}_r, \vec{u}_r, t) \quad (8)$$

这里 $\vec{x}_r = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}'$ 称为状态列矢量; $\vec{u}_r = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}'$ 称为输入列矢量; t 为时间。显然, 状态方程对系统的描述等价于几个一阶纯量微分方程, 地理系统的仿真则是上述方程的积分过程 (如图 1 所示)。仿真过程的数学表达式为:

$$\vec{x}_r(t) = \vec{x}_r(t_0) + \int_{t_0}^t f_r\{\vec{x}_r(t), \vec{u}_r(t), t\} dt \quad (9)$$

根据上述思想, 我们来探讨跨流域调水地理系统分析模型的建立。东线调水一期工程沿线降水、蒸发能力和干燥指数 (r) 的经向地理分布如图 2 所示。图 2 的阴影部分是东线调水地区达到水热平衡, 出现生态环境最佳状态的缺水量。从地理观点来看, 将长江水调入这些地区, 实质是从几何上填充图 2 所示的阴影面积。那么, 在这些地区如何安排和分配南水北调的引江流量, 使调入的水量填补这块阴影面积的数量最大, 这是我们要从地理系统分析中寻找的答案。这个答案能够保证工业与城市用水并满足农业生态环境为最佳的基本要求。

设 D 表示从调水点起算的经向投影距离; D_{i-1}, D_i 表示降水分布函数曲线由 D_{i-1} 到 D_i

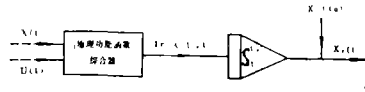


图 1 概化条件下的地理系统仿真过程图
Generalization of simulation processes
of the geographical systems

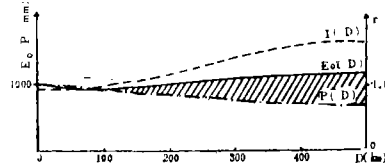


图 2 P, E_0, r 径向地理分布图
The cross-sectional graphs of P, E_0 and r

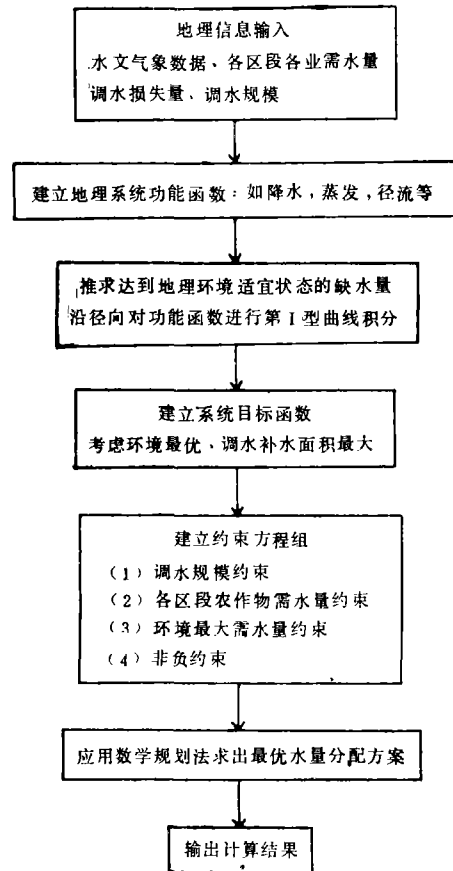


图 3 数学模型计算框图
Framework of the mathematical model

的弧长; 设 Y_i 表示 i 河段引江水的补水深度(毫米), A_i 表示 i 河段规划设计的农业灌溉面积(万亩), IN 表示调水沿线总的工业用水量, $IN = IN_1 + IN_2 + \dots + IN_i + \dots + IN_n$, 这里 IN_i 为沿干渠第 i 个调水河段的工业用水量; L 表示调水沿线水量损失总量, 包括蒸发损失和输水损失: $L = L_1 + L_2 + \dots + L_i + \dots + L_n$, 这里 L_i 表示第 i 个调水河段的农业灌溉需水量, T 表示调水总量, t 表示时间, 用 m 表示计算时段数。模型的模拟计算框图如图 3 所示。

(1) 目标函数: 水量分配为最优, 即引江总补水面积 ($\bar{D}_{i-1}(t), D_i(t), y_i$) 为最大。首先考虑这个地理系统在时域空间中的状态变化, 其目标函数的形式为:

$$F(t) = \max \sum_{i=1}^n \left\{ \int_{D_{i-1}(t)}^{D_i(t)} \sqrt{1 + \left[\frac{dP(D(t))}{dD(t)} \right]^2} dD(t) \right\} y_i(t) \quad (10)$$

事实上, 这个地理系统的原状态方程为:

$$\frac{dF(t)}{dt} = \sum_{i=1}^n \left\{ \sqrt{1 + \left[\frac{dP(D(t))}{dD(t)} \right]^2} y_i(t) + \left[\int_{D_{i-1}(t)}^{D_i(t)} \sqrt{1 + \left[\frac{dP(D(t))}{dD(t)} \right]^2} dD(t) \right] \frac{dy_i(t)}{dt} \right\} \quad (11)$$

为了便于计算机求解将 (10) 式离散化得

$$F = \max \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\int_{D_{i-1}}^{D_i} \sqrt{1 + \left[\frac{dP(D)}{dD} \right]^2} y_i \right]_j \right\} \quad (12)$$

(2) 约束方程组:

1) 调水规模 各段的工业用水量, 农业灌溉用水量和调水损失量的总和应当等于调水总量, 即:

$$\sum_{i=1}^n A_i y_i + \sum_{i=1}^n IN_i + \sum_{i=1}^n L_i = T \quad (13)$$

2) 各区段农业需水量 供给农业灌溉的水量应小于或等于各段规划设计农业最大需水量, 即:

$$A_i y_i \leq A N_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (14)$$

3) 环境最大需水量 干渠沿线各区段的水量分配不应超过用水区环境最佳所需要的最大的补水量, 即按前述式 (7) 控制补水面积应处于 $E_0(D)$ 与 $P(D)$ 两曲线之间:

$$\sum_{i=1}^m \left\{ \int_{D_{i-1}}^{D_i} \sqrt{1 + \left[\frac{dP(D)}{dD} \right]^2} dD y_i \right\}_j \leq \sum_{i=1}^m \left\{ \int_{D_{i-1}}^{D_i} (E_0(D) - P(D)) dD \right\}_j \quad (15)$$

4) 非负限制

$$y_i \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

二、地理系统分析方法在东线一期工程中的应用

由于东线引江工程的近期与最终规模尚未决定，这里仅在一定的假设条件下做模拟计算，将东线一期工程洪泽湖以北地区分成五段，即洪泽湖至骆马湖段，骆马湖至下级湖段，下级湖段，上级湖段，上级湖至东平湖段。利用数值积分法求得上述各段的降水分布函数的曲线积分。农业规划灌溉面积、农业灌溉需水量、各段工业用水量、各段水量损失量等全部参照南水北调东线一期工程规划方案中所采用的一组规划数据（如表 1）。假设出洪泽湖的流量为 250 秒立方米^[3, 4]，并以它作为洪泽湖以北各段的总控制水量。计算机计算结果由表 2 给出。

表 1 东线一期工程各段规划参考数据
The adopted data from the water diversion project

河 段	出洪泽湖 至骆马湖	出骆马湖 至下级湖	下 级 湖	上 级 湖	出上级湖 至东平湖
灌溉面积（万亩）	222	160	65	201	105
灌溉用水量（亿立方米）	18.73	10.96	5.46	22.88	4.83
工业用水量（亿立方米）	1.51	4.70	1.50	3.4	1.00
调水损失量（亿立方米）	2.10	0.90	5.80	6.1	0.90

（一）地理系统优化配水过程分析

1. 东线调水的最优化配水过程是非线性的。表 3 所列的计算机成果描述了不同调水规模最优化水量分配比例的变化过程，也是我们所要推求的最优决策过程。图 4 中的 I、II、III、IV、V 分别代表从洪泽湖到东平湖五个河段的最优化配水过程线，显示了这五个河段的配

表 2 地理系统最优调水水量分配成果表
Optimal water allocation of geographical systems of water transfer project

河 段	补水深度（毫米）	流量分配（立方米/秒）
出洪泽湖至骆马湖	$Y(1) = 1.27$	$Q(1) = 72$
出骆马湖至下级湖	$Y(2) = 1.03$	$Q(2) = 53$
下线湖	$Y(3) = 1.26$	$Q(3) = 35$
上级湖	$Y(4) = 1.14$	$Q(4) = 70$
由上级湖至东平湖	$Y(5) = 0.63$	$Q(5) = 20$

水决策过程线都是非线性的，即当调水规模按某一比例线性增长时，各段的配水比并不按比例线性增加。因而应当按照各段的各业用水量和环境要求最优选取引江流量，以求得环境和经济最大效益。

2. 从表 3 中可以看出，当调水量加大时，虽然骆马湖至下级湖段、下级湖、上级湖至东平湖段的配水量并不减少，但图 4 表明其相应的配水比是随水量加大而减少的。洪泽湖段和上级

湖段配水比曲线的变化幅度很大。这就是说江苏省和山东省各自应有一个重点供水段，因此，在南水北调东线一期工程的水量分配与运用上要有轻重缓急，保证两个省的农业产值达到经济上的最优。同时，减少两省之间的用水矛盾。

表 3 不同调水规模的最优化水量分配过程
Optimal process of water allocation of different transfer scales

出洪泽湖的 调水流量	最优化流量分配比例 (%)				
	出洪泽湖 至骆马湖	出骆马湖 至下级湖	下 级 湖	上 级 湖	出 上 级 湖 至 东 平 湖
150	12.0	35.3	23.4	16.0	13.3
160	17.5	33.1	21.9	15.0	12.5
170	22.4	31.2	20.6	14.0	11.8
180	26.7	29.4	19.5	13.3	11.1
190	30.5	27.9	18.5	12.6	10.5
200	34.0	26.5	17.5	12.0	10.0
210	34.3	25.2	16.7	14.3	9.5
220	32.7	24.1	15.9	18.2	9.1
230	31.3	23.0	15.2	21.7	8.7
240	30.0	22.1	14.6	25.0	8.3
250	28.8	21.2	14.0	28.0	8.0

3. 从图 4 表 3 中我们还可以看出，随着调水量的不断增大，开始是向需水量较大的洪泽湖至骆马湖和上级湖段大量配水。其配水次序是先满足前者增长的需要，后者保持一定的配水。当调水量增加到满足了江苏段后，系统转向满足山东省的上级湖段。这是因为：我们所设计的这个地理系统是以生态环境最佳为目的的。一般来讲，大规模的调水所产生的环境影响南段小于北段，例如，进行大面积农业灌溉，北段产生次生土壤盐渍化的可能性大于南段；另一方面，北段的调水运行费用大于南段。因此，从环境与经济的角度考虑，在调水量充足的条件下，先满足江苏段，后满足山东段，这样可以减少对自然环境的影响，达到地理系统生态环境最佳目标。

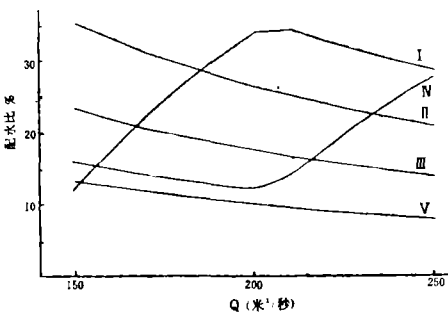


图 4 最优化决策过程线
The curves of optimization process

(二) 水量分配系统分析结果

基于所研究的地理系统具有降水功能，蒸发功能和人为调节与控制功能，并以生态环境最佳为目标，得出的配水方案表明：当出洪泽湖的流量为250秒立方米时，最优调水分配决策为：洪泽湖至骆马湖段为72秒立方米；骆马湖至下级湖段为53秒立方米；下级湖段为35秒立方米；上级湖段为70秒立方米；上级湖至东平湖段为20秒立方米。这一水量分配方案是由

前述的系统目标与系统的约束条件在系统内部作自动调节后所得到的优化结果。由于地理系统优化方案考虑了工业用水量,各段农业灌溉面积和调水损失量的大小,以及满足生态环境最优的条件,因而,比较符合实际供需情况,例如,洪泽湖至骆马湖与上级湖两段,农业灌溉的规划面积都很大,均超过两百万亩,因此,系统配给它们的水量在这五段中是最高的,均在70秒立方米以上。从感性认识上看,计算结果是符合客观实际的。说明上述地理系统的模型设计原则与计算有一定的实用价值,可供跨流域调水规划的参考。

本文的研究表明:系统分析方法用于自然地理综合研究是可行的,有效的;对于发挥地理学综合性特点与实现地理学定量化是有益的。本文提出的地理系统分析希望对配水方案的制定与工程管理运营提供一个方法论或理论上的参考。基于系统的建模方法已提出,一期工程以后的二期工程与最终规模的规划,均可按此模式计算。调水规模的改变或扩大,不会影响模型的应用,只要改变输入参数和约束方程,就可以得到相应的结果。

参 考 文 献

- 〔1〕 Mohanty, R. P., Searching for Definitions and Boundaries in Water Resources, International Journal of Water Resources Development Vol. 1, No. 2, PP133—145, 1983.
- 〔2〕 布德科:地表热量平衡,科学出版社,1959年。
- 〔3〕 郭启光:治淮与南水北调,治淮,第一期,1983年。
- 〔4〕 刘昌明、许越先:南水北调东线“分期实施,先通后畅”简析,地理研究, 2 (3), 1983年。

《干旱区地理》(季刊)

内容简介 主要刊登有关国内外干旱区地理的理论和方法;干旱区自然地理和人文地理;自然资源开发和保护以及学术动态;专题综述和少量译文。

刊 号 58—45

编 辑 《干旱区地理》编辑部

(中国科学院新疆地理研究所)

定 价 0.70元

AN APPLICATION OF SYSTEM ANALYSIS TO WATER ALLOCATION IN THE FIRST-STAGE PROJECT OF THE EAST-ROUTE WATER TRANSFER IN CHINA

Liu Chengming Du Wei

(Institute of Geography, Academia Sinica)

Abstract

The present paper mainly deals with water allocation in the First-Stage Project of the East-Route Water Transfer in China on the basis of system analysis from geographical point of view. According to water-heat budget of the water transfer regions, the water allocation can be estimated geographically

by an index of aridity, $\left(\frac{E_o}{P} \right)$

$$\frac{T}{P} = 1 - \frac{E_o}{P}$$

or

$$T = E_o - P$$

where: P = precipitation, E_o = potential evaporation. As for the value T , it is referred to as the water allocation from the geographical point of view. The T also depends on Agricultural and industrial sectors and water consumption of urban and rural population.

The objective function is obtained as follows:

$$F(t) = \max \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\int_{D_{i-1}}^{D_i} \sqrt{1 + \left(\frac{dP(D)}{dD} \right)^2} y_i \right] y_j \right\} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$$

It's the subject of water consumption from all the sectors of water user.

Finally, this paper illustrates the results calculated by the output of the presented model: 1, Water allocation varies nonlinearly in accordance with the magnitude of water diversion; 2, Two major water supply sections would be found in northern Jiangsu and southwestern Shandong Provinces respectively and 3, Water allocation should be subjected to the benefit of environmental ecosystems.