

全球新冠疫苗分配情况的测度

徐 菊, 宋 鑫, 丁梓洁

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2022年4月26日; 录用日期: 2022年5月20日; 发布日期: 2022年5月27日

摘 要

世界卫生组织总干事谭德塞在致辞中表示, 新冠肺炎疫情是百年一遇的健康危机。目前新冠疫苗的研发成功正是解决这个危机的关键, 接种疫苗能够极大地降低人体感染病毒致病的概率。但是由于全球国家之间贫富差距大, 医疗科技水平不一, 新冠疫苗研发与分配也存在均衡性的问题。为解决全球疫苗分配不均的问题, 世界卫生组织整理并公布了其成员国中每个国家的疫苗需求量。本文以其公布的国家名单为基础, 为寻求公平公正的疫苗分配方案和确定具体实际疫苗分配数两个问题, 通过计算和推导, 建立运筹学0-1规划模型和回归分析模型, 并考虑多种影响因素, 使模型更具合理性和实用性, 最后利用LINGO软件进行模型求解, 解决第一批疫苗分配问题。

关键词

新冠疫苗分配, 0-1规划, LINGO, 回归分析

Measurement of Global COVID-19 Vaccine Distribution

Ju Xu, Xin Song, Zijie Ding

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 26th, 2022; accepted: May 20th, 2022; published: May 27th, 2022

Abstract

The director general of the World Health Organization, Tedros Adhanom Ghebreyesus, said in his speech that the COVID-19 is a once-in-a-century health crisis. The key to resolving the crisis is the development of a vaccine. Vaccination can greatly reduce the probability of human infection of the virus. However, due to the large gap between the rich and the poor among countries around the world and the different levels of medical technology, there is a balance problem in the development and distribution of the COVID-19 vaccine. To solve the global inequity in vaccine distribu-

tion, the World Health Organization has collated and published the vaccine requirements of each of its member countries. This paper uses its published list of countries as the basis for the two problems of finding an equitable vaccine distribution plan and determining the actual number of vaccines to be distributed. Through calculations and derivations, an operations research 0-1 planning model and a regression analysis model are developed, and various influencing factors are taken into account to make the model more reasonable and practical, and finally the model is solved using LINGO software to solve the first batch of vaccine distribution problems.

Keywords

COVID-19 Vaccine Allocation, 0-1 Planning, LINGO, Regression Analysis

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

新型冠状病毒肺炎是迄今为止人类遇到的规模最大的传染性疾​​病[1]。各国都在尽力抑制疫情扩散，但新冠病毒的顽固性和变异性，为防控疫情工作增加了许多难度。如今全球每日感染新冠病毒的人数仍高居不下，新冠疫苗的研制成功，是目前大规模有效抗击疫情的最好办法[2]。不仅可以增加未感染人数的免疫能力，减缓每日新增确诊的速率，也能加快恢复全球政治，经济秩序，降低由于疫情带来的社会影响[3]。因此，各国都尽全力研发和购买疫苗。而近日世界卫生组织公布的数据显示，低收入国家的疫苗接种率不容乐观，截止 2021 年 12 月份全球有 41 个低收入国家仍未能为其 10% 的人口接种疫苗，98 个国家则未达到 40%。人民疫苗联盟斥责富裕国家囤积疫苗的行为，而全球 30 个低收入和 37 个中低收入国家仅能通过世卫组织主导的“新冠肺炎疫苗实施计划(COVAX)”获取疫苗，这些国家 90% 的人口在 2021 年年内无望接种[4]。疫苗只出现在高收入国家，但只有全球范围内不同区域的疫情都得到控制，才可能阻断病毒的传播链。因此，必须将研发成功的疫苗在全球范围内进行公平分配，加快全球战胜疫情的速度[5]。

本文依据世界卫生组织公布的全球各个国家的疫苗总需求量表，基于运筹学中整数规划，0-1 规划的思想 and 统计学思想，建立模型并利用 LINGO 软件进行模型求解，解决第一批新冠疫苗的公平分配问题。

2. 模型建立与求解

2.1. 问题描述

综合世界卫生组织发布的 COVAX 计划中的第一轮疫苗分配计划表，考虑到第一批疫苗资源有限，本文将在计划表中找出十八个国家首先进行疫苗分配。为了防止计算过程过于冗杂，本文通过已公布名单中世卫组织考虑分配的国家名单再综合其所在区域的疫情严重程度，将范围缩小至 25 个国家。所有国家可分成六大片区(非洲，美洲，东南亚区域，欧洲，东地中海区域，西太平洋区域)经过分析发现，此分配问题可以利用运筹学中的 0-1 规划问题进行求解。在规划过程中需要考虑到的因素：

1) 如何从 25 个国家中选出前 18 个完成首轮新冠疫苗分配；

2) 在分配疫苗的过程中，要综合考虑国家的疫情严重程度，卫生基础条件和人口占比，三个因素来分配疫苗资源；

3) 如何具体出每个国家实际分配的疫苗数。

2.2. 模型建立

2.2.1. 模型一：分配疫苗国家的确定

1) 问题分析

从 25 个国家中选择 18 个国家进行首轮疫苗分配，分配时要考虑每个的国家疫情严重程度，人口占比和卫生基础条件，且考虑到六个区域中每个区域都能分配到疫苗，保证公平公正，使群体免疫效益最大化。

2) 变量设定

设南非，佛得角，突尼斯，卢旺达，贝宁，几内亚，马尔代夫，不丹，秘鲁，哥伦比亚，萨尔瓦多，玻利维亚，巴哈马，乌克兰，摩尔多瓦，格鲁吉亚，波斯尼亚和黑塞哥维那，阿尔巴尼亚，约旦河西岸和加沙，吉布提，蒙古，菲律宾，韩国，斐济，新西兰分别为 $x_i (i=1,2,\dots,25)$

其中，

$$x_i = \begin{cases} 0, & \text{当没有选中 } x_i \\ 1, & \text{当选中 } x_i \end{cases} (i=1,2,\dots,25) \quad (1.1)$$

3) 目标函数设立

研制新冠疫苗抗击疫情旨在实现全球大规模免疫，加速对新冠疫情的彻底消灭，因此使用人口占比为价值系数，目标函数为使全球接种人数达到最高。即公式

$$\max z = \sum_{i=1}^{25} a_i x_i \quad (a_i \text{ 为人口占比数的参考数值}) \quad (1.2)$$

4) 约束条件确定

约束条件主要从国家的人口占比，疫情严重程度和卫生基础条件三个方面考虑。根据表 1，分别将人口占比和疫情严重程度从高到低依次排名，表示其参考数值越高，则越需要分配疫苗。卫生基础条件按低到高依次排名，表示卫生条件越落后，参考数值越高，越需要分配疫苗。考虑这是第一批接受疫苗分配的国家，主要是解决疫情最严重且人口很多的国家，先防止疫情扩散。以人口占比 30%，疫情严重程度占比 50%，卫生基础条件占比 20% 进行综合打分，得到综合分值。其中贝宁疫情严重程度的参考数值为 0.58 且人口占比小，其所在区域已获得新冠疫苗分配较其他国家更多，综合考虑将贝宁直接设置 $x_5 = 0$ ，表示其不参与第一轮疫苗分配。另外将非洲，欧洲，西太平洋三个人口数量排名前三的区域中疫情最严重的国家设置变量为 1，表示确定参与第一轮疫苗分配。

$$\text{s.t.} \begin{cases} x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 \leq 4 \\ x_7 + x_8 \leq 2 \\ x_9 + x_{10} + x_{11} + x_{12} + x_{13} \leq 4 \\ x_{14} + x_{15} + x_{16} + x_{17} + x_{18} \leq 4 \\ x_{19} + x_{20} \leq 1 \\ x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} \leq 3 \\ \sum_{i=1}^{25} x_i = 18 \\ x_2 = 1 \\ x_{16} = 1 \\ x_{21} = 1 \\ x_5 = 0 \\ x_i \in \{0,1\} \quad i=1,2,\dots,25 \end{cases} \quad (1.3)$$

Table 1. Composite scores by country
表 1. 各个国家综合分值

	国家	人口(人)		疫情严重程度(人)		卫生基础条件		综合分值
		实际数值	参考数值	实际数值	参考数值	实际数值	参考数值	
非洲	南非	57,398,421	97	3,659,698	16.03	96.30%	52.54	39.526
	佛得角	553,335	34	55,863	25.39	72.20%	70.08	36.050
	突尼斯	11,659,174	79	987,256	21.29	93.70%	54.00	39.374
	卢旺达	12,501,156	82	129,378	2.60	73.19%	69.14	31.788
	贝宁	11,485,674	76	26,567	0.58	99.00%	50.96	25.740
	几内亚	1,313,894	46	36,393	6.97	90.50%	55.91	24.564
东南亚区域	马尔代夫	444,259	31	165,729	93.81	90.80%	55.73	73.632
	不丹	817,054	37	10,112	3.91	55.80%	90.68	27.882
美洲	秘鲁	32,551,815	85	3,497,896	27.16	50.60%	100	53.296
	哥伦比亚	49,464,683	91	6,049,952	30.82	97.00%	52.16	47.124
	萨尔瓦多	6,411,558	67	147,786	5.80	73.80%	68.56	30.592
	玻利维亚	11,215,674	73	889,747	20.03	87.20%	58.03	38.224
	巴哈马	399,285	28	33,129	20.87	99.80%	50.70	28.262
欧洲	乌克兰	44,009,214	88	4,734,333	27.05	83.50%	60.60	45.950
	摩尔多瓦	4,041,065	61	495,415	30.83	94.30%	53.66	41.430
	格鲁吉亚	3,907,131	58	1,553,668	100	90.60%	55.85	82.770
	波斯尼亚和黑塞哥维那	3,503,554	55	368,735	26.64	52.00%	97.30	46.444
	阿尔巴尼亚	2,934,363	49	271,527	23.27	97.50%	51.90	34.142
东地中海	约旦河西岸和加沙	9,903,802	70	570,355	14.48	89.50%	56.54	33.996
	吉布提	971,408	43	15,542	4.02	98.70%	51.27	21.266
西太平洋	蒙古	3,121,772	52	461,347	37.16	67.90%	74.52	47.600
	菲律宾	106,512,074	100	3,653,265	8.63	96.90%	52.22	35.622
	韩国	51,269,185	94	2,058,184	10.10	56.80%	89.08	42.676
	斐济	912,241	40	63,668	17.55	99.90%	50.65	28.660
	新西兰	4,749,598	64	33,317	1.76	90.70%	55.79	25.014

数据来源：世界人口排行榜，全球新冠肺炎疫情实时查网站以及自行整理计算数据。

上表数据中，国家人口数据来源于世界人口排行榜，参考数值的设定主要依据国家人口数，最多的设置为 100，由此由高到低递减。疫情严重程度以及卫生基础条件来自全球新冠肺炎疫情实时查，疫情严重程度的参考分值设定依据为国家确诊新冠疫苗人数与国家总人口的占比，占比越大说明该国的疫情较为严重。卫生基础条件的参考分值是将卫生基础条件最弱国家分数设为 100。依次根据占比分值递减。

2.2.2. 模型二：确定具体疫苗数

1) 问题分析

为确定分配给 18 个国家的具体疫苗数，本文将进一步构建回归模型进行分析。

2) 变量设定

18个国家对应的疫苗需求量已经从世界卫生组织公布的名单中得到, 现将国家人口数, 疫情严重程度, 以及疫苗总需求量作为影响因素来计算每个国家应得到的疫苗数。 y 值即为所求的国家实际能分配到的疫苗数, x 值为目标疫苗需求量。其中, 疫苗需求量是从世卫组织公布名单中确定的数值; 目标分配比例为国家人口数与疫情严重程度分值取平均值的百分数; x 值为国家疫苗需求量与目标分配比例相乘后得到的数值(如表 2)。

Table 2. Number of vaccines needed by country

表 2. 各国家需要疫苗数情况

国家	疫苗需求量(支)	目标分配比例	目标函数的 x 值(支)
南非	2,426,400	95.5	2,317,212
佛得角	108,000	41.5	44,820
突尼斯	412,800	79.5	326,112
卢旺达	744,000	68.5	509,640
马尔代夫	108,000	47.5	51,300
不丹	108,000	35.5	38,340
秘鲁	1,296,000	86.5	1,121,040
哥伦比亚	2,066,400	95.5	1,973,412
萨尔瓦多	225,600	62.5	141,000
玻利维亚	672,000	74.5	500,640
乌克兰	1,776,000	92.5	1,642,800
摩尔多瓦	108,000	65.5	70,740
格鲁吉亚	129,600	70.5	90,720
波斯尼亚和黑塞哥维那	108,000	59.5	64,260
约旦河西岸和加沙	168,000	71.5	120,120
蒙古	112,800	59.5	67,116
菲律宾	4,584,000	95.5	4,377,720
韩国	2,102,400	89.5	1,881,648

3) 目标函数设定

疫苗实际分配数应和 x 值成正比关系, 人口越多且疫情越严重则分配到的疫苗数更多, 综合考虑, 将模型设置为对数方程

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \mu \quad (\text{其中, } \beta_0 \text{ 和 } \beta_1 \text{ 属于任意实数; } \mu \text{ 为随机误差项}) \quad (2.1)$$

4) 约束条件确定

第一批新冠疫苗数的总和为 1,200,420 支, 且通过观察已公布分配表中的数据发现, 一个国家最多能分配到 117,000 支和最少可以分配到 5850 支。

$$\sum_{i=1}^{18} y_i = 1200420 \quad (2.2)$$

$$\max y_i = 117000 \quad (2.3)$$

$$\min y_i = 5850 \quad (2.4)$$

2.3. 模型求解

2.3.1. 模型一求解：确定分配国家

使用 LINGO 进行模型求解[6]，得到如表 3 结果。其中，1 表示该国家在第一批疫苗分配名单中，0 表示该国家不在第一批疫苗分配名单中。

Table 3. Country distribution

表 3. 国家分配情况

南非	1	萨尔瓦多	1
佛得角	1	玻利维亚	1
突尼斯	1	圭亚那	0
卢旺达	1	乌克兰	1
贝宁	0	摩尔多瓦	1
几内亚	0	格鲁吉亚	1
马尔代夫	1	波斯尼亚和黑塞哥维那	1
不丹	1	摩纳哥	0
秘鲁	1	约旦河西岸和加沙	1
哥伦比亚	1	吉布提	0
蒙古	1	韩国	1
菲律宾	1	斐济	0
新西兰	0		

2.3.2. 模型二求解：确定具体分配疫苗数

求得模型方程

$$y = 28017 \ln(x) - 285889 \quad (3.1)$$

$$R^2 = 0.9374 \quad (3.2)$$

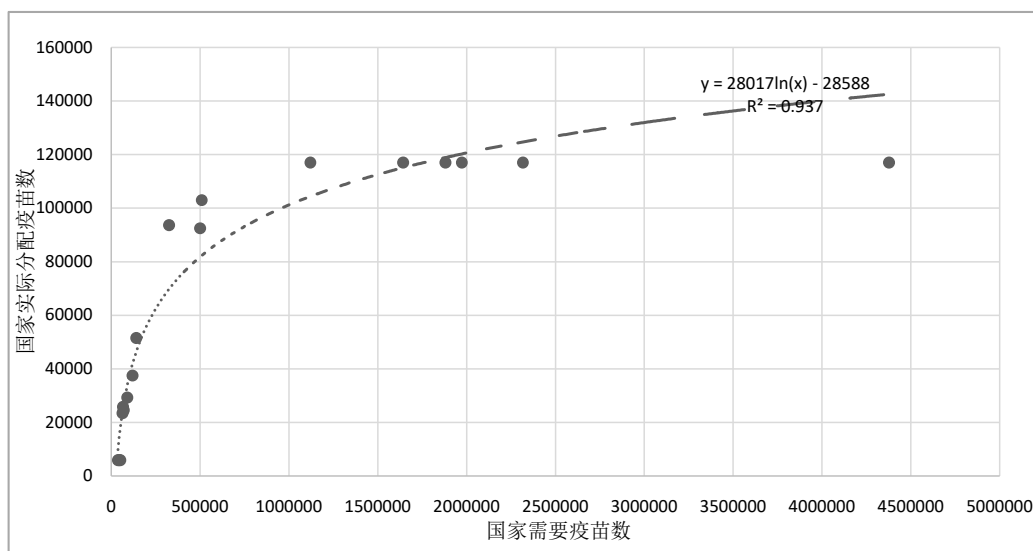


Figure 1. Number of vaccines actually allocated by country

图 1. 国家实际分配疫苗数

如图 1, 将综合过国家人口和疫情严重程度的国家需要疫苗数, 输入方程中, 即可得到国家实际分配疫苗数。该模型从国家人口, 疫情程度, 疫苗需求量三角度综合考虑, 保证分配到的疫苗发挥出最大的效果, 有效地抑制得到疫苗分配的国家所在区域的疫情扩散。该方程为疫苗的实际分配提供了数据信息支撑, 用科学办法计算出分配数, 在实际分配中有重要参考价值。

2.4. 进一步分析

本文在模型一的建立过程中, 考虑约束条件时, 纳入多方面因素, 不仅从人口数量, 疫情严重程度和卫生基础条件三方面考虑, 同时保证了人口数排名前三的区域中疫情最严重的国家一定能分配疫苗。模型二的建立中, 基于已公布名单中国家疫苗需求量, 加入人口数量和疫情严重程度两个因素, 使变量值更能反应该国的实际情况。这些在实际中具有重要参考价值。本文的模型在运筹学思想的基础上分析如何进行第一批新冠疫苗的分配, 不带有任何政治色彩, 是实际疫苗分配中的重要决策基础。在现实分配中, 可能会考虑到政治因素, 以及是否有国家疫情突发异常严峻等不可控因素, 但若只专注主要因素, 忽略其他不可控条件的影响, 本文的模型考虑较为全面, 具有一定的合理性和可行性。

3. 总结与展望

本文基于运筹学与统计学理论, 根据世界卫生组织公开发布的文件 COVAX 第一批分配疫苗数据, 构建了 0-1 规划模型和回归分析模型。进而检验了疫苗分配问题与国家人口, 疫情严重程度以及卫生基础条件之间的关系, 测度了各国家实际疫苗分配数与疫苗需求量之间的关系。通过建立、分析、求解模型解决疫苗分配问题, 具有一定的公平性、合理性和有效性。

0-1 规划方法和回归分析思想将第一批新冠疫苗在数学理论上完成公平公正地分配。在建立模型的过程中, 考虑到各方面因素, 不单一以某方面作为决策因素。在后续的研究中, 也应该考虑多方面因素, 加入监测模型, 实时更新全球新冠确诊人数, 将对疫苗分配计划不断改进和完善, 也为后续批次疫苗分配计划提供计算依据。同时, 构建环境向量, 以综合反应国家得到疫苗分配后的具体变化, 即对后来的感染人数进行预测。本文所创建的模型都具有可拓展性, 随着相关数据的获取, 该模型的拟合性将会更好。此外, 本文的模型不仅适用于疫苗分配问题上, 相关资源调配问题也同样适用。

基金项目

本文受到教育部青年基金项目(20YJC790118)的资助。

参考文献

- [1] 王雪松, 刘金源. 全球公共产品视角下新冠肺炎疫苗供给困境、中国路径与挑战对策[J]. 当代世界与社会主义, 2021(1): 132-141.
- [2] 温亚亚, 宋丽, 汪巧菊, 潘志明, 焦新安. 新冠肺炎疫苗的研究现状及面临的挑战[J]. 生物技术通报, 2022, 38(9): 145-154.
- [3] 多项技术并行助力疫苗研发 新冠疫苗不会成为“马后炮” 科技界携手加速推进新冠肺炎疫苗研发进程[J]. 中国科技产业, 2020(3): 1-3.
- [4] 宁婧, 张勇勤, 蒋冠华, 崔娜, 张世远, 周一帆. 家长对未成年子女接种新冠肺炎疫苗犹豫影响因素研究进展[J]. 中国学校卫生, 2022, 43(4): 627-631.
- [5] 陈薇, 朱凤才. 新冠病毒肺炎疫苗研制面临的挑战[J]. Engineering, 2020, 6(10): 27-32.
- [6] 万义国, 游小青. 优化建模软件 LINGO 在运筹学中的应用[J]. 山西建筑, 2007(15): 367-368.