·调查报告与分析·

中国疾控机构人员配置优化分析：基于多目标遗传算法

张圣捷[1]，黄烈雨[2]，莫非[2]，郭岩[2]

1. 中共中央党校(国家行政学院)应急管理研究院公共卫生应急管理教研室，北京 100091；
2. 中国疾病预防控制中心，北京 102206
通信作者：郭岩，E-mail：guoyan@chinacdc.cn

【摘　要】目的 针对当前全国疾病预防控制中心(简称“疾控”)人员配置存在的总量不足与区域不公问题，构建需求导向的公平性优化模型，为科学配置提供决策支持。**方法** 基于 2006—2019 年省级面板数据，运用熵权法融合传染病维度(鼠疫、霍乱等五类重点传染病发病率/死亡率)与人口维度(密度、抚养比、地形起伏度等)指标，构建地区优先级指数；将其嵌入人口加权基尼系数函数，提出改进的公平性度量指标；建立以最小化公平性系数和最小化人员调整量为双目标的多目标优化模型，采用非支配排序遗传(NSGA-Ⅱ)算法求解帕累托最优解集。**结果** 优先级指数显示四川省、新疆维吾尔自治区、广西壮族自治区等省(自治区、直辖市)为疾控人员高需求地区，通过帕累托前沿获得 80 组最优解，揭示公平性与实施成本的显著权衡关系，最大化公平性(基尼系数值降低 0.066 8)的代价是更大的调整量(19 410 人)；而最小化调整量(1 660 人)仅一定程度缓解公平性问题(基尼系数值降低 0.014 4)。**结论** 本研究创新性地将需求差异量化纳入资源配置公平性评估，结合多目标遗传算法生成的帕累托解集，为差异化疾控人员配置策略提供量化工具。

【关键词】 疾病预防控制机构；人员配置；多目标优化

Optimization of personnel allocation in disease prevention and control institutions of China based on multi-objective genetic algorithm

ZHANG Shengjie[1], HUANG Lieyu[2], MO Fei[2], GUO Yan[2] (*1. Department of Public Health Emergency Management*, *Institute of Emergency Management*, *Party School of the CPC Central Committee (National Academy of Governance)*, *Beijing* 100091, *China*; *2. Chinese Center for Disease Control and Prevention*, *Beijing* 102206, *China*)
Corresponding author: GUO Yan, E-mail: guoyan@chinacdc.cn

【Abstract】 Objective To construct a demand-oriented fairness optimization model to provide decision-making support for scientific allocation in response to the shortage and regional inequity in personnel allocation in disease prevention and control institutions of China. **Methods** On the basis of the provincial panel data from 2006 to 2019, the entropy weight method was used to integrate the indicators of infectious disease dimension (morbidity/mortality of five key infectious diseases, such as plague and cholera) and population dimension (such as density, dependency ratio, and topographic relief) for building the regional priority index. The index was embedded into the population-weighted Gini coefficient function, and thus the improved fairness metrics was proposed. A multi-objective optimization model with the dual objectives of minimizing the fairness coefficient and minimizing the amount of personnel adjustment was established, and the nondominated sorting genetic algorithm Ⅱ (NSGA-Ⅱ) was used to solve the Pareto optimal solution sets. **Results** The priority index showed that Sichuan, Xinjiang, and Guangxi were the areas with high demand for disease prevention and control personnel. Through the Pareto frontier, 80 sets of optimal solutions were obtained, revealing a significant trade-off between fairness and implementation cost. The cost of maximizing fairness (reducing the Gini coefficient value by 0.066 8) was the largest adjustment amount (19 410 people). It was possible to only alleviate the fairness issue to a certain extent (reducing the Gini coefficient by 0.014 4) with the minimum adjustment amount (1 660 people). **Conclusions** This study innovatively incorporates the quantification of demand differences into the assessment of resource allocation fairness and employees a multi-objective genetic algorithm to generate the Pareto solution sets, providing a quantitative tool for differentiated personnel allocation strategies in disease prevention and control institutions.

【Keywords】 disease prevention and control institutions; personnel allocation; multi-objective optimization

疾病预防控制(以下简称“疾控”)体系是公共卫生服务体系的重要组成部分[1−3]。疾控人员配置优化的意义在于更有效地完成疾控岗位分配，更好地满足疾病防控的需求，以提高疾病防控的效率和效果，从而有效降低疾病的传播和发病率。根据 2014 年中央编办、财政部、国家卫生计生委《关于印发疾病预防控制中心机构编制标准指导意见》提出的按照常住人口万分之 1.75 的比

开放获取：CC BY-NC-ND 4.0 DOI：10.11847/zgggws1148341
基金项目：国家自然科学基金地区项目(72164025)；中央财政—中国 CDC 公共卫生应急反应机制的运行项目(10239322 0020010000017)
第一作者：张圣捷(1994—)，讲师，博士，研究方向：公共卫生应急管理。
收稿日期：2025-06-27　修回日期：2025-08-14　录用日期：2025-10-17
利益冲突：不存在　伦理审查：免除审查　出版授权：全体作者已与编辑部签署作者贡献声明及版权转让协议

例核定疾控人员数量，地域面积在 50 万平方公里以上且人口密度<25 人/平方千米的省（自治区、直辖市），可按照不高于本地区常住人口万分之 3 的比例核定[4]。根据中国卫生统计年鉴，截至 2019 年，全国疾控人员总数仅为常住人口的万分之 1.33，距离国家要求的标准有一定提升空间；虽然经过近几年疾控体系改革，全国疾控队伍人员数量已有较大提升，但是整体来说距离万分之 1.75 的比例仍有差距，无法满足日益增长且复杂多变的公共卫生防控需求[5]。从省级层面来看，各地实际情况也有所不同[6]。在政府财政资源有限的情况下，如何科学决策，在兼顾公平性的情况下依据每省的实际需求找到最需要补充的人员数量是值得研究的问题。已有研究主要使用传统基尼系数度量公平维度[7–8]，从基尼系数本身计算过程来看，所反映的是平等理念，即个体相等时基尼系数最小，但所谓的平等并不一定意味着公平。传统基尼系数对地区间公平性考虑不够全面，采用传统基尼系数进行优化研究无法实现基于差异化需求的测量。为解决这一问题，本研究在传统基尼系数函数的基础上引入客观赋权法得出的权重，考虑到偏远、高传染病风险地区的客观需求，更具公平性视角。具体如何达成优化目标等方法报告如下。

1 资料与方法

1.1 数据来源　本研究数据来源于《中国卫生统计年鉴》、《中国统计年鉴》、各省份统计年鉴以及相关统计公报。由于传染病报告情况受新冠病毒感染疫情影响较之前有明显变化，因此，本研究将研究时间范围设置为 2006—2019 年。测度范围包括 2006—2019 年中国大陆的 31 个省（自治区、直辖市）。需要说明的是，传染病维度将致死率高、社会影响巨大的传染病纳入指标体系，分别是鼠疫、霍乱、病毒性肝炎、艾滋病、肺结核。人口维度中总人口是指年末常住人口数，地理起伏度变量来自封志明等[9]《中国地形起伏度及其与人口分布的相关性》。对于极个别缺失数据点，本研究使用相邻年份数据线性内插法以填补缺失数据，此外对于异常数据，使用相邻年份数据平均值进行平滑处理[10]。

1.2 方法

1.2.1 基于熵权法构建疾控人员配置公平性指标体系　2014 年中央编办印发《中央编办财政部国家卫生计生委关于印发疾病预防控制中心机构编制标准指导意见的通知》（中央编办发〔2014〕2 号），明确提出传染病因素和人口因素是人员配置的重要影响因素。故本研究从传染病维度和人口维度构建人员配置公平性指标体系，用来分析各地区传染病风险程度、人口经济水平，并为后续面向地区差异化的优先级设计提供较为客观的评价信息。疾控人员配置公平性指标体系的目标层和指标层设置见图 1。人口维度则关注社会结构因素，传染病维度聚焦疾病本身的风险特征，包含鼠疫、霍乱、病毒性肝炎、艾滋病和肺结核 5 种重点传染病的发病率和死亡率，直接反映区域疾病负担与传播风险。五种传染病的发病率和死亡率越高，表示该地区的传染病风险程度越高，对疾控人员配置的需求度更高。因此，5 种传染病的发病率和死亡率指标均为正向指标。选择这 5 种典型传染病是因为鼠疫和霍乱是法定最高等级的甲类传染病，具有暴发性传播与高致死风险；而艾滋病、病毒性肝炎及肺结核虽属乙类传染病，却因慢性化特征对社会和家庭产生深层影响，这些疾病依赖疾控系统承担患者随访、用药督导和耐药监测等长期管理任务，防止治疗中断导致的公共卫生危机[11–12]。目标层中人口维度选取人口密度、总抚养比、乡村人口占比、人口自然增长率和地形起伏度 5 个具体指标。其中人口密度是指在单位土地面积内的人口数量，反映地区人口的集群效应。人口密度越低，表示该地区对疾控人员配置的需求度越高。因此，该指标为负向指标。总抚养比和乡村人口占比表征地区人口结构。人口自然增长率是指一段时间内人口的自然增长数量与该时间段内的平均人口数量的比值，反映地区人口自然增长的趋势和速度，衡量人口增长状况。地形起伏度是指在指定区域内的最低点与最高点的海拔高度差，可以宏观地描述一个区域的地形特征，反映地区生活居住环境状况。总抚养比越高、乡村人口占比越高、人口自然增长率越高、地形起伏度越大，表示该地区对疾控人员配置的需求度越高。因此，这四项指标均为正向指标。指标体系权重确定的方法为客观赋权法中的熵权法，即根据指标离散程度确定各个指标对各地区疾控人员配置公平性的影响程度，所得到的权重客观性更强，精确性更高[13–17]。

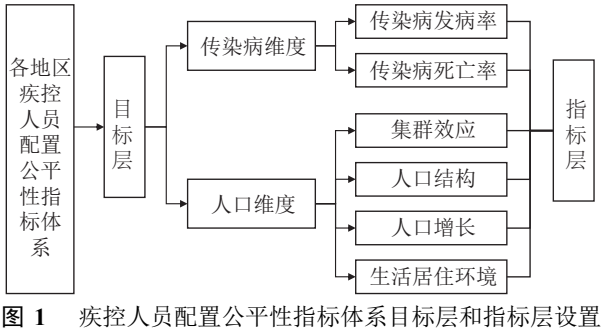


图 1　疾控人员配置公平性指标体系目标层和指标层设置
Fig. 1　Target and indicator layer settings of the fairness index system for disease prevention and control personnel allocation

1.2.2 按人口加权的基尼系数和基于优先级指数的基尼系数计算 如果将每个“省(自治区、直辖市)”视为相同个体,不进行按人口的加权,将会对基尼系数结果产生偏误[18]。更合理的做法是将“省”看作所辖人口的集合,人口越多的省在计算基尼系数时给予更大权重,此时得到的全国基尼系数更具代表性。人口加权后基尼系数计算方法为:设n为省份总数量,m_i表示第i个省份的年末常住人口数(万人)。将各省份每万人疾控人员数按人口加权后,可以得到包含m_i个$x_i(i=1,\ldots,n)$的人口加权样本值集合$\mathbb{Y}$,表示为:

$$\mathbb{Y}=\left\{\underbrace{x_1,\ldots,x_1}_{m_1},\underbrace{x_2,\ldots,x_2}_{m_2},\ldots,\underbrace{x_n,\ldots,x_n}_{m_n}\right\}$$

其中,人口加权样本值集合$\mathbb{Y}$中共有$n_Y=\sum_{i=1}^{n}m_i$项样本数据。接着使用基尼系数的直接计算法,则按人口加权的基尼系数G_p可以表示为:

$$G_p=\frac{1}{2n_Y^2\bar{y}}\sum_{k=1}^{n_Y}\sum_{l=1}^{n_Y}|y_k-y_l|$$

$$\bar{y}=\frac{1}{n_Y}\sum_{k=1}^{n_Y}y_k$$

其中,n_Y是人口加权样本值集合$\mathbb{Y}$中的样本量,$y_k,y_l\in\mathbb{Y}$,$|y_k-y_l|$表示任意两项样本值之差的模值,$\bar{y}$表示人口加权样本值集合$\mathbb{Y}$中所有样本值的均值。

基于疾控人员配置公平性指标权重,各地区传染病维度优先级指数γ_i^D和人口维度优先级指数γ_i^P分别为传染病和人口维度所有三级指标标准化后的数值与对应权重的乘积之和再乘以该维度的目标层权重,可以表示为:

$$\gamma_i^D=\omega^D\sum\nolimits_{j=1}^{10}\omega_j\alpha_{ij}$$

$$\gamma_i^P=\omega^P\sum\nolimits_{j=1}^{5}\omega_j\alpha_{ij}$$

其中,ω^D和ω^P分别为传染病和人口维度目标层权重,ω_j为对应的三级指标权重,α_{ij}为第i个省份的第j个指标值。综合传染病维度和人口维度,面向地区差异化的综合优先级指数γ_i为二者之和,可以表示为:

$$\gamma_i=\gamma_i^D+\gamma_i^P$$

因此,在按人口加权的基尼系数基础上,可以进一步将第i个省份的每万人疾控人员数$x_i(i=1,\ldots,n)$基于优先级指数进行调整。基于优先级指数调整后的每万人疾控人员数$\tilde{x}_i$可表示为:

$$\tilde{x}_i=\frac{1}{1+\gamma_i}x_i,\quad(i=1,\ldots,n)$$

将基于优先级指数调整后的每万人疾控人员数$\tilde{x}_i$作为基尼系数中的样本值,同样使用m_i表示第i个省份的年末常住人口数(万人),则将各省份基于优先级指数调整后的每万人疾控人员数$\tilde{x}_i$按人口加权后,可以得到包含m_i个$\tilde{x}_i(i=1,\ldots,n)$的人口加权样本值集合$\mathcal{Z}$,可以表示为:

$$\mathcal{Z}=\left\{\underbrace{\tilde{x}_1,\ldots,\tilde{x}_1}_{m_1},\underbrace{\tilde{x}_2,\ldots,\tilde{x}_2}_{m_2},\ldots,\underbrace{\tilde{x}_n,\ldots,\tilde{x}_n}_{m_n}\right\}$$

其中,人口加权样本值集合$\mathcal{Z}$中共有$n_Z=\sum_{i=1}^{n}m_i$项样本数据。接着使用基尼系数的直接计算法,则基于优先级指数的按人口加权基尼系数G_γ可以表示为:

$$G_\gamma=\frac{1}{2n_Z^2\bar{z}}\sum_{k=1}^{n_Z}\sum_{l=1}^{n_Z}|z_k-z_l|$$

$$\bar{z}=\frac{1}{n_Z}\sum_{k=1}^{n_Z}z_k$$

其中,n_Z是人口加权样本值集合$\mathcal{Z}$中的样本量,$z_k,z_l\in\mathcal{Z}$,$|z_k-z_l|$表示任意两项样本值之差的模值,$\bar{z}$表示人口加权样本值集合$\mathcal{Z}$中所有样本值的均值。

1.2.3 基于多目标遗传算法的疾控人员配置优化 传统优化方法在求解时需要先将多目标优化问题转化为单目标优化问题,一般每次只能得到一个解[19-21]。与传统优化方法不同,智能优化算法可针对更普适、更复杂的多极值问题,通过进化迭代自适应学习,根据问题的特征以不同方式编码,进行全局优化搜索,获得更加可靠、稳定的结果。同时在解决多目标优化问题时,能够求得帕累托最优解集,展示出多个冲突目标之间的权衡。遗传算法是目前最为成熟的智能优化算法之一,在多目标优化领域得到了广泛应用[22]。本文所采用的非支配排序遗传(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm Ⅱ, NSGA-Ⅱ)算法是对传统遗传算法的改进与提升[23]。对疾控人员配置优化问题主要考虑以下 2 项目标:一是要通过最小化基于优先级指数的按人口加权基尼系数G_γ,来实现各地区之间综合考虑传染病维度和人口维度的疾控人员配置公平性。二是要通过最小化所有地区疾控人员配置的总调整量D,让方案更具现实可操作性,在资源有限的情况下以适应需求,使得疾控人员的优化配置更具实际意义。考虑到当前每万人疾控人员数还远未达到国家要求,本研究优化问题中的疾控人员优化配置为增量配置,即各地区优化后的每万人疾控人员数需大于优化前的每万人疾控人员数:$x_i\geqslant\hat{x}_i$,$(i=1,\ldots,n)$;考虑到各地区对疾控人员优化配置的实际调整具有平稳性,优化配置对各地区每万人疾控人员数的调整幅度(调整量占原数值的比例)λ_i需不超

过设定比例上限λ^{ub}，即：$0 \leqslant \lambda_i \leqslant \lambda^{ub}$，$(i = 1,\ldots,n)$。

综上，构建优化变量为各省份每万人疾控人员数x_i（$i = 1,\ldots,n$）的疾控人员配置多目标优化模型可以表示为：

$$\begin{cases} \min G_\gamma = \dfrac{1}{2n_Z^2 \bar{z}} \displaystyle\sum_{k=1}^{n_Z} \sum_{l=1}^{n_Z} |z_k - z_l| \\ \min D = \displaystyle\sum_{i=1}^{n} (x_i - \hat{x}_i) \end{cases}$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{aligned} x_i &\geqslant \hat{x}_i, \quad (i = 1,\ldots,n) \\ 0 &\leqslant \lambda_i \leqslant \lambda^{ub}, \quad (i = 1,\ldots,n) \end{aligned}$$

该模型中，以最小化基于优先级指数的按人口加权基尼系数来提高地区间疾控人员配置的公平性。该基尼系数越小，表示各地区经优先级指数调整后的每万人疾控人员数的差异越小，公平性越好；以最小化所有地区疾控人员配置的总调整量来保证方案的现实可操作性，能够在资源有限的情况下以适应需求。该数值越小，表示各地区在原配置方案上所需要做出的调整越小，越具有实际可操作性。本研究所设计的疾控人员配置多目标优化模型，采用 NSGA-Ⅱ算法进行求解，该算法的基本流程见图 2。

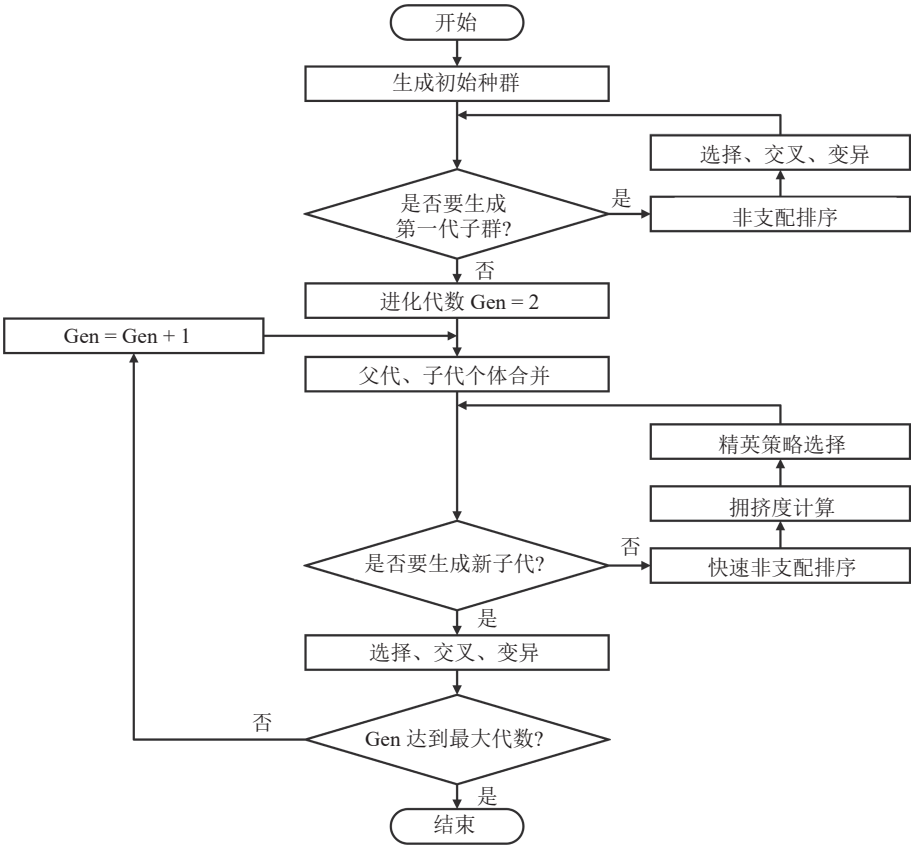


图 2　NSGA-Ⅱ算法流程示意图

Fig. 2　Illustration of the NSGA-Ⅱ flow

该多目标遗传算法中需要设定的运行参数[23]主要包括：(1) 种群规模。群体大小表示群体中所含个体的数量，取值较小可提高运算速度，但是会降低种群的多样性，出现提前收敛；而取值较大会使算法效率降低。本研究种群规模设置为 200。(2)交叉概率。交叉操作是遗传算法中产生新个体的主要方法，取值过小产生新个体速度较慢；但若取值过大会破坏种群中的优良模式，不利于算法收敛。本研究交叉概率设置为 0.8。(3)变异概率。变异概率直接影响算法的搜索和收敛性能，取值较大可产生出较多新个体，提高算法搜索能力，但降低收敛性能；取值较小可使算法更易收敛，但产生新个体的能力和算法搜索能力较差。本研究变异概率设置为 0.01。(4)最大遗传代数。最大遗传代数是表示算法运行结束条件的重要参数。本研究最大遗传代数设置为 2 000。(5)帕累托集比例。帕累托集比例为帕累托前沿上个体在种群中所占的比例。本研究帕累托集比例设置为 0.4，按种群规模为 200 计算，帕累托前沿上保留的个体数目为 80。此外，本研究中的选择策略使用锦标赛选择（tournament selection）策略[24]，函数容差设置为 10^{-6}。

1.3　统计分析　本研究数据处理与分析综合运用了 Microsoft Excel 和 MATLAB 软件，以完成不同阶段的计算与建模求解任务。对于指标体系权重构建和优先级指数计算部分，采用 Microsoft Excel

(Version: Office LTSC 2021)完成基础数据的整理、标准化处理，基于熵权法构建了目标层及各项三级指标的权重，并计算优先级指数及排名。对于多目标优化问题建模和求解部分，采用MATLAB R2021b(The MathWorks, Inc.)平台，基于优化工具箱(Optimization Toolbox，Version 9.1)和可视化优化工具“优化实时编辑器任务(Optimize Live Editor Task)”，使用 gamultiobj 求解器进行建模与求解。该算法旨在同时优化基于优先级指数的按人口加权基尼系数(最小化)和所有地区疾控人员配置的总调整量(最小化)两个目标函数，从而获得一组帕累托最优的疾控人员优化配置解决方案。

2 结 果

2.1 疾控人员配置公平性指标体系构成及权重(表 1) 将 2006—2019 年 31 个省份的各项指标数据代入，根据上述熵权法的具体步骤，计算得出目标层权重以及各项三级指标权重值。

表 1 疾控人员配置公平性指标体系构成及权重

Table 1 Composition and weighting of the fairness index system for disease prevention and control personnel allocation

目标层	权重	二级指标	三级指标	指标属性	权重
传染病维度	0.927 2	传染病发病率	鼠疫发病率/(1/10万)	正向	0.206 3
			霍乱发病率/(1/10万)	正向	0.122 8
			病毒性肝炎发病率/(1/10万)	正向	0.013 6
			艾滋病发病率/(1/10万)	正向	0.033 1
			肺结核发病率/(1/10万)	正向	0.008 1
		传染病死亡率	鼠疫死亡率/(1/10万)	正向	0.275 5
			霍乱死亡率/(1/10万)	正向	0.251 6
			病毒性肝炎死亡率/(1/10万)	正向	0.031 6
			艾滋病死亡率/(1/10万)	正向	0.040 5
			肺结核死亡率/(1/10万)	正向	0.016 9
人口维度	0.072 8	集群效应	人口密度/(人/km^2)	反向	0.035 6
		人口结构	总抚养比	正向	0.103 1
			乡村人口占比/%	正向	0.127 5
		人口增长	人口自然增长率/‰	正向	0.128 6
		生活居住环境	地形起伏度/m	正向	0.605 2

2.2 各省优先级指数及优先级排名(表 2) 将 2019 年 31 个省(自治区、直辖市)的各项指标数据代入优先级指数γ_i^D、γ_i^P和γ_i的计算公式，得到当前各地区的优先级指数。优先级指数越大的地区，优先级排名越高，表示该地区对疾控人员配置的需求度越高。

表 2 各省优先级指数及优先级排名

Table 2 Priority indices and rankings of provincial-level administrative regions

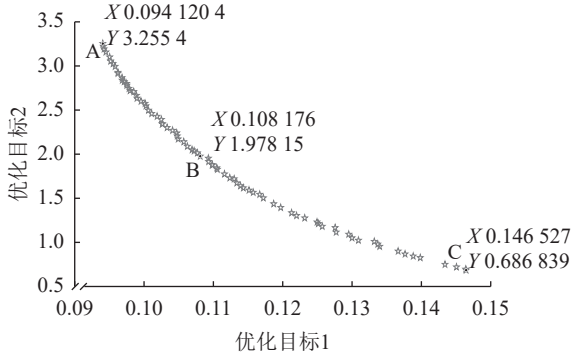
省(自治区、直辖市)	传染病维度优先级指数	传染病维度优先级排名	人口维度优先级指数	人口维度优先级排名	综合优先级指数	综合优先级排名
四川	0.059 1	3	0.045 1	3	0.104 2	1
新疆	0.059 4	2	0.034 9	6	0.094 3	2
广西	0.066 9	1	0.023 9	11	0.090 9	3
云南	0.044 0	6	0.039 5	4	0.083 5	4
西藏	0.011 9	19	0.068 1	1	0.080 0	5
贵州	0.045 9	4	0.031 3	7	0.077 1	6
青海	0.020 2	10	0.052 3	2	0.072 5	7
重庆	0.044 7	5	0.024 6	10	0.069 3	8
内蒙古	0.028 3	7	0.018 9	21	0.047 2	9
甘肃	0.009 5	25	0.035 4	5	0.044 9	10
湖南	0.022 4	9	0.020 7	15	0.043 0	11
宁夏	0.008 5	26	0.030 8	8	0.039 3	12
北京	0.027 3	8	0.011 8	26	0.039 1	13

续表 2
Table 2 Continued

省(自治区、直辖市)	传染病维度优先级指数	传染病维度优先级排名	人口维度优先级指数	人口维度优先级排名	综合优先级指数	综合优先级排名
河南	0.017 2	12	0.019 5	19	0.036 8	14
陕西	0.011 0	21	0.025 5	9	0.036 5	15
江西	0.016 0	13	0.020 4	16	0.036 3	16
广东	0.019 0	11	0.016 9	24	0.035 9	17
海南	0.015 6	14	0.019 3	20	0.034 9	18
湖北	0.013 8	16	0.020 4	17	0.034 2	19
福建	0.012 4	18	0.021 8	13	0.034 2	20
山西	0.009 7	24	0.023 3	12	0.033 1	21
安徽	0.011 3	20	0.019 6	18	0.030 9	22
浙江	0.010 9	22	0.017 9	22	0.028 9	23
河北	0.006 9	29	0.021 8	14	0.028 7	24
黑龙江	0.014 0	15	0.011 0	28	0.025 1	25
辽宁	0.013 6	17	0.010 5	29	0.024 1	26
山东	0.007 0	28	0.017 0	23	0.024 1	27
吉林	0.008 3	27	0.013 0	25	0.021 3	28
江苏	0.006 7	30	0.011 2	27	0.017 9	29
上海	0.009 7	23	0.005 3	31	0.015 1	30
天津	0.006 4	31	0.006 4	30	0.012 9	31

2.3　*多目标遗传算法求解*　基于以上数据、模型和运行参数对疾控人员配置多目标优化模型进行求解。需要说明的是，由于算法的初始种群是随机产生的。因此，每次运行的结果存在一定差异，本文展示的模型求解结果是一次运行得到的结果。遗传算法中的平均距离指的是一个种群内解之间相似性的度量，计算方式为每个解与其最相邻解之间的平均欧式距离。通过观察个体间平均距离，可以评估优化过程的收敛性。本研究中，算法能够在迭代初期迅速收敛，随着遗传代数迭代至 2000 代，个体间平均距离的散点分布逐渐在 0.3 附近趋于稳定。平均帕累托散布是用来衡量由多目标优化算法生成的一组解决方案分布均匀程度的一个重要指标。平均帕累托散布越小，解的分布越均匀，解集越多样化。本研究中，随着算法遗传代数迭代至 2000 代，平均帕累托散布的散点分布逐渐降低并趋于稳定，最终的平均帕累托散布值约为 0.15，表明算法所得出的解集具有良好的多样性。

在多目标优化中，帕累托前沿（Pareto Front）为不受任何其他解决方案支配的最优解集的图形展示，可以清晰直观展示出每个解决方案相对于多个目标的相对性能以及不同目标之间的权衡，是在多目标优化问题中做出冲突目标之间最理想权衡的重要工具。针对本研究的多目标优化问题，帕累托前沿如图 3 所示，二维图中的每一个点表示一个解决方案。其中横轴的优化目标一是指最小化基于优先级指数的按人口加权基尼系数，纵轴的优化目标二是指最小化所有地区疾控人员配置的总调整量。从图中可以看出这两项优化目标之间是存在冲突的，与多目标优化定义符合。从图中还可以看出，帕累托前沿上的最优解分布较为均匀，80 个点展示出本研究多目标优化问题在循环迭代 2 000 次之后的帕累托最优解集。



注：图中的 A、B、C 三个点分别为 80 个点中的第 1、40、80 个点，代表三套优化方案；*X* 值为优化目标一基尼系数值，*Y* 值为优化目标二疾控人员配置的总调整量。

图 3　帕累托前沿图
Fig. 3　Pareto frontier plot

2.4　*优化前后基尼系数对比（表 3）*　在多目标优化中，很难确定单一的“最佳”解决方案，因为多个目标经常相互冲突。帕累托前沿代表了非支配解的集合，其中任何解决方案都能在不剥夺另一个目标的情况下改善当前目标。因此，评估哪种帕累托解决方案更好取决于特定环境以及决策

者偏好。为便于结果说明和方案分析，本文选取图 3 中帕累托前沿面 80 个点中比较具有特征的 A、B、C 三个点进行分析。依据前文的计算和上述求解结果，疾控人员配置优化前后的基尼系数如表 3 所示。将优化前未经优先级指数调整的按人口加权基尼系数作为基线，可以看出，优化前经过优先级指数调整的按人口加权基尼系数有小幅的降低，这说明本研究构建和设计的疾控人员配置公平性指标体系和优先级指数，通过使用综合优先级指数对每万人疾控人员数进行调整，可以一定程度上降低基尼系数，提高地区间疾控人员配置的公平性。多目标优化后的三种方案均得到了更低的基尼系数，有效地提高了地区间疾控人员配置的公平性。其中，优化方案 A 的基尼系数下降得最为明显，说明优化方案 A 是地区间公平性相对更好的优化配置方案。优化方案 B 下降的基尼系数差。其次，优化方案 C 下降的基尼系数差最小。

表 3 优化前后基尼系数对比
Table 3 Comparison of Gini coefficients before and after optimization

基尼系数类型	基尼系数值	与基线的基尼系数差
优化前最新一年、未经优先级指数调整的按人口加权基尼系数(基线)	0.160 9	—
优化前最新一年、经过优先级指数调整的按人口加权基尼系数	0.155 0	−0.005 9 ↓
优化后方案A、经过优先级指数调整的按人口加权基尼系数	0.094 1	−0.066 8 ↓
优化后方案B、经过优先级指数调整的按人口加权基尼系数	0.108 2	−0.052 7 ↓
优化后方案C、经过优先级指数调整的按人口加权基尼系数	0.146 5	−0.014 4 ↓

2.5 优化前后的各省份每万人疾控人员数调整量(表 4) 各省份在三种优化方案下的每万人疾控人员数及相应的调整量如表 4 所示。相比于疾控人员配置优化前最新一年的每万人疾控人员数，三种优化方案中，优化方案 A 的总调整量最大，优化方案 B 的总调整量次之，优化方案 C 的总调整量最小。

表 4 优化前后的各省份每万人疾控人员数调整量(人/万人)
Table 4 Adjustment amount of disease prevention and control personnel per 10 000 population in each provincial-level administrative region before and after optimization

省(自治区、直辖市)	优化前每万人疾控人员数	优化后方案A每万人疾控人员数	方案A调整量/人	优化后方案B每万人疾控人员数	方案B调整量/人	优化后方案C每万人疾控人员数	方案C调整量/人
北京	1.400 5	1.433 2	71.8	1.410 7	22.6	1.400 5	0.2
天津	1.332 9	1.402 4	96.3	1.345 8	17.9	1.336 0	4.3
河北	1.156 7	1.406 5	1 859.5	1.187 6	230.1	1.164 4	57.3
山西	1.193 3	1.411 0	761.3	1.215 8	78.7	1.203 6	36.0
内蒙古	2.262 1	2.263 0	2.2	2.267 8	13.8	2.277 2	36.2
辽宁	1.403 3	1.418 5	65.0	1.413 5	43.6	1.410 3	29.9
吉林	1.749 2	1.750 1	2.4	1.754 9	14.2	1.754 5	13.0
黑龙江	1.723 8	1.727 2	11.1	1.728 0	13.7	1.727 9	13.3
上海	1.233 8	1.388 5	383.8	1.263 6	74.2	1.244 4	26.3
江苏	0.967 5	1.257 8	2 458.6	1.161 1	1 639.6	0.982 1	123.6
浙江	0.939 3	1.221 1	1 796.5	1.153 7	1 366.8	0.953 0	87.3
安徽	0.897 1	1.166 2	1 639.4	1.134 6	1 446.9	0.922 6	155.3
福建	1.017 4	1.322 6	1 262.6	1.071 8	225.1	1.025 0	31.4
江西	0.877 5	1.140 8	1 189.1	1.043 1	747.4	0.881 1	16.3
山东	0.922 9	1.199 8	2 798.4	1.156 9	2 364.8	0.927 8	49.5
河南	1.632 8	1.633 2	4.0	1.637 1	42.6	1.637 5	46.5
湖北	1.368 8	1.412 7	259.6	1.379 4	62.2	1.371 3	14.2
湖南	1.400 8	1.426 3	169.3	1.409 6	59.1	1.404 1	21.9
广东	0.803 0	1.043 9	3 008.6	1.040 3	2 962.4	0.822 9	247.3
广西	1.553 2	1.563 4	50.8	1.560 2	34.9	1.556 4	15.9
海南	1.143 7	1.341 0	196.3	1.186 2	42.3	1.178 0	34.1
重庆	0.913 7	1.187 9	873.8	1.046 9	424.3	0.971 9	185.5

续表 4
Table 4 Continued

省(自治区、直辖市)	优化前每万人疾控人员数	优化后方案A每万人疾控人员数	方案A调整量/人	优化后方案B每万人疾控人员数	方案B调整量/人	优化后方案C每万人疾控人员数	方案C调整量/人
四川	1.618 1	1.621 7	30.1	1.628 2	83.5	1.651 6	278.9
贵州	1.383 3	1.472 2	341.7	1.396 8	51.9	1.388 6	20.0
云南	1.833 9	1.835 5	7.5	1.836 9	14.1	1.835 9	9.4
西藏	2.964 0	2.975 7	4.2	2.978 0	5.1	2.973 1	3.3
陕西	1.507 4	1.518 6	44.2	1.524 1	65.9	1.524 3	66.7
甘肃	1.870 5	1.871 8	3.3	1.878 3	19.8	1.877 9	18.6
青海	2.532 2	2.537 0	2.8	2.537 7	3.2	2.533 8	0.9
宁夏	1.666 7	1.687 8	15.1	1.679 5	9.2	1.672 6	4.3
新疆	2.117 2	2.117 8	1.3	2.122 0	12.3	2.122 0	12.0
总调整量	—	—	19 410.5	—	12 192.0	—	1 659.9

3 讨　论

以往人力资源配置公平性的研究主要依赖传统基尼系数[25]、泰尔指数[26]、集中指数[8]衡量人口或地理维度的平等性。本研究通过构建各地区疾控人员配置公平性指标体系，设计面向地区差异化的优先级指数以体现传染病风险程度和人口特点，在使用按人口加权基尼系数的同时，将优先级放入基尼系数函数中，对基尼函数进行改进，使得疾控人数的优化配置向传染病风险高、人口密度低、工作开展难度大的地区予以倾斜，提升了客观性和公平性。又进一步基于多目标遗传算法进行疾控人员配置优化，得出具有现实可操作性的帕累托最优解决方案。

将基于熵权法、融合多维需求的优先级指数嵌入基尼系数计算，是本研究的方法创新。通过表 2 中各地区优先级指数可以看出传染病维度排名较为靠前的省(自治区、直辖市)包括广西、新疆、四川、贵州、重庆、云南、内蒙古；人口维度优先级指数较大、排名较为靠前的包括西藏、青海、四川、云南、甘肃、新疆、贵州等省(自治区、直辖市)，表明这些省份人口维度下居民居住较为分散，地形地势海拔变化大。综合传染病维度和人口维度，可以得出综合优先级指数较大、排名较为靠前的省(自治区、直辖市)包括四川、青海、西藏、新疆、河南、云南、重庆等，表明这些省份对疾控人员配置的需求度相对更高。由此可见，优先级指数显著拓展了公平性内涵，使优化结果更倾向于传染病高发、人口稀疏、自然环境恶劣的高需求地区。

针对疾控人员配置这一涉及 31 个连续决策变量、非线性目标、复杂约束的优化问题，人工智能 NSGA-Ⅱ算法展现出显著优势，为领域前沿。从优化前后基尼系数的对比结果来看，表 3 和表 4 中三种优化方案各有优势和劣势。三种方案中，优化方案 A 能够得到最低的基尼系数，最大程度提高地区间疾控人员配置的公平性，不过所需要做出的总调整量也是最大的，意味着该方案实施难度最大；优化方案 C 所需要做出的总调整量最小，意味着该方案最易于实施，但其所能够降低的基尼系数最小，对地区间公平性的提升较为有限；优化方案 B 则是二者的折中方案，需要做出的总调整量和对公平性提升的贡献均较为适中。

优化方案 A、B、C 只是对应为便于结果说明所选取的三个帕累托最优解，实际上本次模型求解所得出的帕累托前沿面上的所有点均对应一套最优方案，具体选择哪一点上的人员配置方案需要依据现实情况分类讨论。若想最大化公平性，则选择靠近纵轴的点，代价是会增加调整幅度，政府短时间内可能难以满足这样的人员配置方案。现阶段若想用最小的调整量一定程度缓解公平性问题，则尽可能选择靠近横轴的点。而如果想短时间内提升疾控服务的公平性，且财政保障能力允许，则尽可能选择靠近纵轴的点。在现有约束和目标函数下，实现“极高公平性”(基尼系数<0.09)所需的调整量会非线性地急剧增加，边际成本递增，而实现“基本可接受公平性”(基尼系数 0.14～0.15)的调整成本则相对可控。这与资源配置问题中常见的“效率边界”特征相符。

疾控人员配置优化的目标不仅仅包含公平性和最小化调整幅度，还包括如配置效率最大化等，但现阶段人员配置的效率难以定义并进行量化，尚不具备纳入模型的条件，未来条件成熟后有必要加以研究。基于本研究结果，建议国家及省级在核定和调整疾控编制时，应突破单一人口比例限制，建立综合考虑传染病负担、人口密度、地理环境等多维需求的动态配置标准，对四川、青海、西藏、新疆、云南等省(自治区、直辖市)高优先级地区给予重点倾斜。

数据可用性声明 本分析中使用的所有输入数据的引用和元数据均可从公开数据库下载（网站地址：https://data.cnki.net/yearBook/single?nav=%E7%BB%9F%E8%AE%A1%E5%B9%B4%E9%89%B4&id=N2024092336&pinyinCode=YSIFE）。

参考文献

[1] Arah O A, Westert G P, Delnoij D M, et al. Health system outcomes and determinants amenable to public health in industrialized countries: a pooled, cross-sectional time series analysis[J]. BMC Public Health, 2005, 5: 81.

[2] Basu S, Berkowitz S A, Phillips R L, et al. Association of primary care physician supply with population mortality in the United States, 2005–2015[J]. JAMA Internal Medicine, 2019, 179(4): 506-514.

[3] 李立明. 新中国公共卫生 60 年的思考 [J]. 中国公共卫生管理, 2014, 30(3): 311-315.

[4] 中央编办, 财政部, 国家卫生计生委. 关于印发疾病预防控制中心机构编制标准指导意见的通知 [EB/OL]. (2014-01-17)[2025-07-28]. http://jiuquan.gsjgbz.gov.cn/jq_zcfg2/202004/t20200408_177503.html

[5] 司向, 翟屹, 朱晓磊, 等. 我国疾控系统慢性病预防控制人力资源现状 [J]. 中国公共卫生, 2019, 35(5): 525-528.

[6] 张田田, 尹文强, 孟翠香, 等. 中国疾病预防控制机构人力资源配置公平性分析 [J]. 中国公共卫生, 2022, 38(3): 339-343.

[7] 白雪梅. 教育与收入不平等: 中国的经验研究 [J]. 管理世界, 2004(6): 53-58.

[8] 李程洪, 张前, 张祖涵, 等. 基于分段回归的医药卫生体制改革前后疾病预防控制机构人力资源配置公平性变化分析 [J]. 医学与社会, 2021, 34(3): 7-11.

[9] 封志明, 唐焰, 杨艳昭, 等. 中国地形起伏度及其与人口分布的相关性 [J]. 地理学报, 2007, 62(10): 1073-1082.

[10] 吴晓光, 徐精彩, 李树刚, 等. 基于 MATLAB 实验数据的几种处理方法 [J]. 自动化技术与应用, 2005, 24(1): 25-27.

[11] 都佳, 申泰华, 黄磊, 等. 疾控中心、社区和 HIV 感染者共建社区艾滋病管理网络模式的探讨 [J]. 现代预防医学, 2012, 39(4): 865-866.

[12] 吴蔚, 邱玉冰, 陈金瓯, 等. “十三五”期间云南省结核病新型防治服务模式实施效果研究 [J]. 卫生软科学, 2023, 37(6): 1-4.

[13] 章穗, 张梅, 迟国泰. 基于熵权法的科学技术评价模型及其实证研究 [J]. 管理学报, 2010, 7(1): 34-42.

[14] 陈云翔, 董骁雄, 项华春, 等. 基于信息熵的群组聚类组合赋权法 [J]. 中国管理科学, 2015, 23(6): 142-146.

[15] 程启月. 评测指标权重确定的结构熵权法 [J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(7): 1225-1228.

[16] 张挺, 李闽榕, 徐艳梅. 乡村振兴评价指标体系构建与实证研究 [J]. 管理世界, 2018, 34(8): 99-105.

[17] 翁异静, 杜磊, 来越富. 地方政府机构编制分配指标体系与规模优化模型设计 [J]. 统计与决策, 2019, 35(20): 54-58.

[18] 马海良, 王若梅, 訾永成. 中国省际水资源利用的公平性研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(12): 70-77.

[19] Kuo P C, Schroeder R A, Mahaffey S, et al. Optimization of operating room allocation using linear programming techniques[J]. Journal of the American College of Surgeons, 2003, 197(6): 889-895.

[20] Elazouni A M, Gab-Allah A A. Finance-based scheduling of construction projects using integer programming[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2004, 130(1): 15-24.

[21] Omu A, Choudhary R, Boies A. Distributed energy resource system optimisation using mixed integer linear programming[J]. Energy Policy, 2013, 61: 249-266.

[22] Katoch S, Chauhan S S, Kumar V. A review on genetic algorithm: past, present, and future[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80(5): 8091-8126.

[23] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-Ⅱ[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

[24] Fang Y, Li J. A review of tournament selection in genetic programming[C]//International symposium on intelligence computation and applications. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010: 181-192.

[25] 张人杰, 李娜, 戚小华, 等. 浙江省区域公共卫生应急能力与资源配置公平性分析 [J]. 中国公共卫生, 2020, 36(5): 775-779.

[26] 姜文娟, 张光鹏, 滕文杰, 等. 中国疾病预防控制机构人力资源配置公平性泰尔指数分析 [J]. 中国公共卫生, 2017, 33(7): 1092-1095.