

器官捐献的激励机制与匹配理论

叶航 郑恒

(浙江大学 经济学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 世界各国器官移植需求暴涨, 而供体相对不足。对于提高器官捐献量、缓解供需不足的问题, 国外围绕着如何扩大潜在器官捐献者、提高器官捐献率和如何提高捐献器官的匹配效率进行了研究和实践, 取得了显著成效。相比之下, 中国公民自愿器官捐献于 2010 年才开始试点, 相关的激励制度设计及匹配方法应用都还处于起步阶段。文章对国外关于器官捐献激励机制与匹配理论的研究及实践进行归纳和总结, 期望借鉴国外经验, 为中国器官捐献政策的制定和实施提供启示。

关键词: 器官捐献; 器官移植; 激励; 匹配

中图分类号: F069 **文献标识码:** A **文章编号:** 0257-0246 (2017) 08-0040-11

随着医疗技术的发展和进步, 器官移植成功挽救了许多患者的生命。器官供体分为两类, 包括活体供体和尸体供体。活体供体是指在不损害本人生命健康的前提下, 自愿将自己的某个器官或组织捐献给他人。活体供体器官捐献类型以肾脏最多, 且多捐献给有血缘关系的亲属。尸体供体是指个人在生前同意注册为器官捐献者, 死亡后将自己的器官或组织捐献给他人。由于尸体捐献者能够提供多种数量的器官, 所以移植的器官更多取自于尸体供体。每百万人口器官捐献率最高的两个国家是西班牙和克罗地亚, 2015 年分别达到 39.7 和 39.0, 美国 28.5 位居第六位, 乌克兰、多米尼加和日本排在末三位, 分别只有 0.1、0.7 和 0.72。^① 即便捐献率位居世界前位, 多国还是面临着器官移植供需的巨大缺口。美国器官供应移植网络 OPTN 的数据显示, 美国尸体器官捐献者从 2000 年的 5985 人增加至 2014 年的 8596 人, 增长了 44%。但是, 快速增加的捐献量还是跟不上增长更快的等待人员, 因为同时段新增等待器官移植的患者人数从 42 980 人增加至 58 851 人。2015 年之前, 中国器官移植供体大部分来自死囚犯。2015 年起, 中国开始禁止使用死囚器官作为移植供体来源, 公民捐献成为移植供体的唯一来源, 每百万人口器官捐献率大约在 2.0 左右。死囚器官的禁止使用使我国器官移植供体短缺问题更为严重。提高器官捐献率、建立器官捐献的激励和匹配制度以及完善的捐献体系是我国面临的重大现实问题。国外在器官捐献方面的研究与实践可以为我国带来一定的启示。

一、器官捐献的影响因素和激励机制

器官移植一方面能够延长患者的寿命, 另一方面大大降低医疗成本, 这导致器官移植的需求暴涨。针对这种超额需求, 经济学家们第一反应是无论活体器官还是尸体器官, 都应发挥价格的调节作

基金项目: 浙江省社会科学规划项目 (17NDJC166YB); 国家自然科学基金面上项目 (71373226)。

作者简介: 叶航, 浙江大学经济学院、浙江大学跨学科社会科学研究中心教授, 研究方向: 实验经济学、行为经济学和神经经济学;
郑恒, 浙江大学经济学院博士生, 浙江财经大学经济学院副教授, 研究方向: 器官捐献激励与匹配。

① 数据来源: 国际器官捐献移植登记网 (IRODaT), <http://www.irodat.org>。

用,以高价取代当前法律规定的零价格,允许器官交易。^① Barney 和 Reynolds 最早从成本收益的角度讨论了禁止市场交易给器官捐献需求者带来的福利损失。^② 但事实上,出于伦理及人权考虑,基本上所有国家的法律都明确禁止器官交易,如美国 1984 年的《联邦器官移植法》规定,器官交易是重罪;1994 年法国规定,买卖器官将被判刑 7 年和罚款 10 万欧元。即便是世界上唯一允许活体器官(主要是肾脏)有偿移植的国家,伊朗的活体器官有偿交易也是在政府严格管制下进行的,并非真正意义上的自由交易。^③ 器官交易制度则通过由患者构成的非盈利组织 DATPA (Dialysis and Transplant Patients Association) 来协商完成。^④

活体器官捐献主要限于亲属之间,但考虑到从健康人身上摘取器官的手术本身就有风险,器官移植手术不可能百分之百成功,而且如果鼓励亲属间移植可能让亲人感到压力或者有悖于伦理和个人意愿,因此临床上并不鼓励亲属间活体器官捐献。因此要减少器官供需缺口,关键是要提高公民死后尸体器官捐献率,采取各种激励来有效提高潜在的器官捐献者。

1. 器官捐献率的影响因素分析

器官捐献率的影响因素主要包括推定同意立法或者同意规则、潜在器官的可获得人数、捐献体系、宗教信仰、教育、立法体系、捐献登记的成本等。学者们从计量角度对各因素的相关效应进行了实证分析。Johnson 和 Goldstein 利用 1991—2001 年 17 个国家时间序列数据进行多元回归分析,发现推定同意默认规则促使每百万人口器官捐献率从 14.1 上升到 16.4,增加 16.3%。^⑤ 其他学者的论证也得到了类似的结论,Gimbel 等研究发现保持其他条件不变,推定同意立法的国家比知情同意国家每百万人口捐献率平均高 6.14。^⑥ Abadie 和 Gay 对 22 个国家 10 年的面板数据进行回归,发现推定同意默认规则会使器官捐献率上升 25%—30%。^⑦ Silva 等人通过 34 个国家 1998—2002 年的纵向面板数据分位数回归表明,推定同意对器官捐献具有积极作用,在 0.25、0.5、0.75 的分位数上其影响结果在 21%—26% 之间。^⑧

在影响器官捐献率的因素中,虽然推定同意立法促进了器官捐献率的增加,但上述研究同时表明其他的解释性因素与一国器官捐献率的变化也紧密相关。器官捐献率一定程度上取决于潜在的可获得捐助者,脑血管疾病死亡率、道路交通事故死亡率与捐献率呈正相关。这是因为大多数已故捐赠者都是因不可逆转的脑损伤而脑部死亡病人,最常见的原因就是交通事故和脑血管疾病。一个国家的移植协调程度和效率也会影响器官捐献率,在所有采用推定同意默认捐献的欧洲国家中,西班牙移植服务组织的运作十分高效,这也是西班牙器官捐献率高的重要原因。宗教信仰也会影响到一国器官捐献率,天主教徒可能更倾向于捐献器官,因为他们的宗教上承认器官移植是一种“生命的服务”。立法体系对捐献率也会产生影响,普通法法律制度下强调个人权利,而民法更注重国家权力。此外,一般情况下,一国公民受教育程度越高、获取捐献的相关信息越便捷,一定程度上就越容易提高器官捐献

^① Gary S. Becker, Julio Jorge Elias, "Introducing Incentives in the Market for Live and Cadaveric Organ Donations," *Journal of Economic Perspectives*, Vol. 21, No. 3, 2007, pp. 3-24.

^② Barney L. Dwayne Jr., Reynolds R. Larry, "An Economic Analysis of Transplant Organs," *Atlantic Economic Journal*, Vol. 17, No. 3, 1989, pp. 12-20.

^③ 郑恒 《国外器官捐献的经济激励、市场制度及改革启示》,《南方经济》2016 年第 4 期。

^④ 李锦辉 《伊朗人体器官移植制度成功的原因与启示》,《中国卫生法制》2011 年第 4 期。

^⑤ Eric J. Johnson, Daniel Goldstein, "Do Defaults Save Lives?" *Science*, Vol. 302, No. 5649, 2003, pp. 1338-1339.

^⑥ Ronald W. Gimbel, et al., "Presumed Consent and Other Predictors of Cadaveric Organ Donation in Europe," *Progress in Transplantation*, Vol. 13, No. 1, 2003, pp. 17-23.

^⑦ Abadie Abadie, Sebastien Gay, "The Impact of Presumed Consent Legislation on Cadaveric Organ Donation: A Cross-country Study," *Journal of Health Economics*, Vol. 25, No. 4, 2006, pp. 599-620.

^⑧ Everton Nunes da Silva, Ana Katarina Campelo, Giacomo Balbinotto Neto, "The Impact of Presumed Consent Law on Organ Donation: An Empirical Analysis from Quantile Regression for Longitudinal Data," *Latin American and Caribbean Law and Economics Association (ALACDE) Annual Papers*, 2007.

率。上述研究考虑的是国家层面的指标,如果将研究的视角放在个人层面,器官捐献率的影响因素可能会有所不同。为提高尸体器官捐献率,美国卫生和福利部HHS(Health and Human Service)要求所有医院都要把死亡病人的信息汇报给器官摘取组织OPO(Organ Procurement Organization),这样器官摘取组织就有机会联系到死亡者的家属征询器官捐献事宜。

总之,要提高器官捐献率,在条件成熟国家可以从知情同意立法改为推定同意立法。对于条件尚不具备或者不想改变推定同意立法的国家来说,提高器官捐献率的最有效途径包括:增加医疗保健费用支出、完善器官捐献体系、加强器官捐献信息的传播、提高公民接受高等教育的机会。进一步地,可以把器官捐献活动的目标设定为那些受教育程度较高的公民。

2. 器官捐献的激励机制

各国为了提高器官捐献率,采用了多种激励机制。从具体做法来看,主要包括改变默认规则,优先权分配,财政激励如直接的抵免税收、间接的报销丧葬费用、提供生命与伤残保险等,道德上的奖励如给予捐献者荣誉勋章等。但相关的激励机制尤其是前三种激励能否产生确切的效应呢?下面将逐一分析。

(1) 财政激励

面对供体器官的巨大不足,虽然很少有人反对旨在提高器官捐献率的举措,但理论界、政策制定方及公众之间对是否应该以财政措施激励器官捐献一直存在争论。

支持者认为,财政激励将有助于提高器官捐献率。虽然捐献者的动机往往是无私的,但也乐意接受相关费用的补偿,^①因此建议通过报销丧葬费、抵免所得税来增加尸体器官捐献率;通过支付工资损失、提供医疗保险和抵免收入税收来增加活体器官捐献;但不赞成直接将现金支付给捐献者或其近亲。^②美国移植外科学会伦理委员会深入探讨了器官捐献的四种经济激励措施:直接支付货币、抵免收入税收、报销丧葬费和慈善捐款,认为直接支付货币违反了现行的联邦法律和伦理原则,一致认为报销丧葬费、慈善捐赠与道德原则一致,是一种可接受的方法。^③实践中,移动捐助行动小组MDAT(Mobile Donor Action Team)设立在利雅得的财政激励采购系统IBPS(Incentive-based Procurement System)也证实了财政激励有助于提高器官捐献率,该系统使捐献率增长了3倍。现实中有不少国家采取了相应的激励措施,如新加坡人体器官移植法于2004年规定允许向器官捐献者提供经济补偿;美国多州通过了给予器官、骨髓捐献者税收优惠的立法许可;中国部分省份也在试点推行报销丧葬费、设立专项基金等对器官捐献进行补偿救助。

但反对者认为,财政激励的具体效果还有待商榷。有研究通过在奥地利随机发放调查问卷,测试不同形式和数额的财政激励是否能增加器官捐献许可,结果发现财政激励会减少器官捐献并且引起参与者强烈的排斥和负面反应。^④美国15个州在2004—2008年间,通过税收减免和一次税收抵免支付潜在的医疗、住宿和工资损失费用来增加活体器官捐献。为了确定这些政策对活体捐献率的影响,Venkataramani等人使用双重差分对比通过立法州和未通过立法州在立法前后活体捐献的变化,发现

^① Chloe Sharp, Gurch Randhawa, "Organ Donation as an 'Altruistic Gift': Incentives and Reciprocity in Deceased Organ Donation from a UK Polish Migrant Perspective," *Annals of Transplantation Quarterly of the Polish Transplantation Society*, Vol. 19, No. 1, 2014, pp. 23-31.

^② J. R. Rodrigue, et al., "Stimulus for Organ Donation: A Survey of the American Society of Transplant Surgeons Membership," *American Journal of Transplantation*, Vol. 9, No. 9, 2009, pp. 2172-2176; John S. Gill M. D., et al., "Financial Incentives to Increase Canadian Organ Donation: Quick Fix or Fallacy?" *American Journal of Kidney Diseases*, Vol. 63, No. 1, 2014, pp. 133-140.

^③ Robert Arnold, et al., "Financial Incentives for Cadaver Organ Donation: An Ethical Reappraisal," *Transplantation*, Vol. 73, No. 8, 2002, pp. 1361-1367.

^④ D. Mayrhofer-Reinhartshuber, et al., "Effects of Financial Incentives on the Intention to Consent to Organ Donation: A Questionnaire Survey," *Transplantation Proceedings*, Vol. 38, No. 9, 2006, pp. 2756-2760.

这些税收政策在统计学上对捐献率并没有显著影响。^① 还有学者也支持这一观点,甚至发现为增加尸体器官捐献或扩大器官捐献登记者而提出的各种财政激励措施反而导致器官供应的下降。^② 一项来自马来西亚的 1310 位受访者关于巨额财政措施能否提高活体肾脏捐献效果的研究反映,有 50% 的受访者愿意捐献器官的原因是“我想要在人生做一些高尚的事”,27.9% 的受访者愿意在适当的财政奖励下捐献自己的器官,只有 6.2% 的受访者愿意为了金钱而捐献,^③ 这表明财政奖励不是刺激个体作出捐献决定的主要原因。

(2) 改变默认规则

在美国、德国、土耳其、韩国、日本,器官捐献执行加入登记制度,在这种制度下个体被预设为不同意捐献器官。与之相反,法国、西班牙、新加坡、瑞典等国采用默认规则,事先推定个体同意捐献器官,但允许人们选择退出器官捐献。无论是对某个国家默认同意立法前后的比较,还是对是否采取默认同意立法国别之间的比较,都发现推定同意默认规则促进了器官捐献率的提高。^④

但也有学者对此提出了异议。Pierscionek 是较具代表性的一个,其理由是这种默认规则侵犯了当事人的选择权。^⑤ 在退出框架下,默认为同意捐献器官,并不能反映捐献者积极的捐献决定,很难作为显示捐献者明确捐献意图的证据。而推定不同意的加入框架下,由于计算机系统为器官捐献注册提供了快速的注册核准,同时还在线提供快速修改捐献者意愿的途径,确保最后显示的捐献注册状态是个体经过深思熟虑的。因此,医生无须再经过家属同意就可以直接合法地在捐献者死后摘取相关器官。^⑥ 但是,如果在默认同意的退出政策下,医生在摘取捐献者的移植器官前还有必要去争取家属的重新同意。

因此,英国和美国的部分州如伊利诺伊州、加利福尼亚州和纽约州继续实行原来的推定不同意,而非转向默认规则下的推定同意,但在器官捐献注册登记的方式上由加入框架转变为授权选择框架。在加入框架下,个体往往在州机动车管理部门考驾照时被要求回答是否同意注册器官捐献登记,打勾则意味着同意捐献,空白则意味着拒绝捐献。授权选择则改变了个体注册为捐献者的方式,^⑦ 在授权选择框架下,器官捐献选择被设计成回答“Yes”或者“No”的问题。如果回答“Yes”则意味着同意捐献,如果回答“No”则意味着拒绝捐献。

尽管有证据表明,就像退出政策一样,授权选择政策能够提高器官捐献的注册登记率,但相关的问题也随之而来。一项来自马萨诸塞州的组织和器官捐献登记处实际器官捐献者决定的试验性研究表明,授权选择框架并没有如人们所期望的那样促进捐献量的增长。^⑧ 相反,授权选择对于器官捐献还

^① Atheendar Venkataramani, et al., “The Impact of Tax Policies on Living Organ Donations in the United States,” *American Journal of Transplantation*, Vol. 12, No. 8, 2012, pp. 2133–2140.

^② Nicola Lacetera, et al., “Removing Financial Barriers to Organ and Bone Marrow Donation: The Effect of Leave and Tax Legislation in the U.S.,” *National Bureau of Economic Research Working Paper*, 2012; Alison J. Wellington, Edward A. Sayre, “An Evaluation of Financial Incentive Policies for Organ Donations in the United States,” *Contemporary Economic Policy*, Vol. 29, No. 1, 2011, pp. 1–13; Margaret M. Byrne, Peter Thompson, “A Positive Analysis of Financial Incentives for Cadaveric Organ Donation,” *Journal of Health Economics*, Vol. 20, No. 1, 2001, pp. 69–83.

^③ Makmor Tumin, et al., “Living Kidney Donation: The Importance of Public Education,” *Clinical Transplantation*, Vol. 28, No. 4, 2014, pp. 423–427.

^④ Amber Rithalia, et al., “Impact of Presumed Consent for Organ Donation on Donation Rates: A Systematic Review,” *British Medical Journal*, Vol. 338, No. 7689, 2009, p. a3162.

^⑤ Barbara K. Pierscionek, “What is Presumed When We Presume Consent?” *BMC Medical Ethics*, Vol. 9, No. 8, 2008, pp. 1–5.

^⑥ Alexandra K. Glazier, “The Principles of Gift Law and the Regulation of Organ Donation,” *Transplant International*, Vol. 24, No. 4, 2011, pp. 368–372.

^⑦ Richard H. Thaler, Cass R. Sunstein, *Nudge: Improving Decisions about Health, Wealth, and Happiness*, New Haven: Yale University Press, 2012.

^⑧ Judd B. Kessler, Alvin E. Roth, “Don’t Take ‘No’ For an Answer: An Experiment with Actual Organ Donor Registrations,” *National Bureau of Economic Research Working Paper*, 2014.

会产生负效应——注册者并非移植器官来源的唯一渠道，未注册者死后的器官也可能被其尚健在的亲属捐献。在实验中，Kessler 和 Roth 要求被试报告他们是否决定捐献家人过世后的器官。加入框架下个体仅仅是没有选择复选框来拒绝捐献，在授权选择框架下个体则明确选择了“No”，虽然这仅仅表明在那个时点个体拒绝注册成为捐献者，但恰恰是这个缺乏更多信息的拒绝决定会告知家属个体对死后是否捐献器官的意愿。而这一点是至关重要的，因为马萨诸塞州的历史数据表明，超过一半的未登记器官捐献者死后器官捐献是由其家人同意再捐献的。^①

(3) 引入优先权分配机制

对于如何分配捐献器官是一个复杂的问题。因为它不仅影响着谁可以获得下一个可用的器官，还通过影响潜在捐献者的决定来影响可获得的器官数量。为提高器官捐献率，新加坡、以色列和智利在器官分配上引入了优先权分配机制。如果个体最初已经同意并注册为器官捐献者，那么当他们今后也需要进行器官移植时，就可以优先获取他人捐献的器官。新加坡于1987年通过了《人体器官移植法案》(Human Organ Transplant Act)，将优先规则应用于选择退出制度。以色列于2010年通过了《器官移植法2008》(Organ Transplant Act 2008)，引入优先分配机制。个人或者直系亲属如果签署了器官捐献卡或者同意死后捐献器官就可以获得优先分配权。智利也于2013年通过了《器官捐献法20673》(Organ Donor Act with Law 20673)，宣称“在其他条件保持不变的情况下，那些没有注册为非捐献者将有权优先分配器官用于移植。”

Kessler 和 Roth 通过实验方法研究了优先权分配机制产生的效应，发现优先分配机制下器官捐献量明显要比控制组高。^② Li Danyang 等人也通过实验评价了优先权分配机制与默认规则结合带来的不同效应。^③ 控制组刻画了美国当前的器官捐献系统，被试默认为非捐献者，且捐献者没有优先获取权。对照组为退出组，分别刻画了西班牙和奥地利当前实施的默认公民为器官捐献者的退出框架。优先组刻画了以色列推定不同意原则下分配系统采取优先分配法，最后一组为优先分配且退出组，刻画了新加坡实施的退出框架下推定同意原则加优先分配机制。结果显示，推定同意加优先分配制度下器官捐献登记率最高。相比改变默认规则，从推定不同意进入框架到推定同意的退出框架，优先分配制能产生更大的边际收益。

但优先分配机制能如此显著提高捐献量有一个前提假设，那就是优先分配机制能被有效执行，也就是说，当人们为了获得优先分配权去注册登记为捐献者，一旦到了需要捐献的时候必须要同意并真正捐献自己的器官。但现实中，以色列在执行优先分配机制时却存在一个漏洞，即注册登记的器官捐献卡上还存在一个复选框，如果打勾则意味着捐献者死后，还需要其家庭选择一个牧师对其器官捐献进行许可。当个体需要器官移植时，为了在移植器官等候中获得优先分配签署了器官捐献卡，但同时选择这个复选框，则是希望家人或者牧师在自己死后拒绝捐献。因此，这个漏洞的存在本质上允许那些事实上根本不会捐献的个体优先获取了器官的分配。鉴于此，Kessler 等又通过实验研究了有漏洞存在时优先分配机制的效果。^④ 实验表明，当在优先分配机制中引入漏洞，允许被试为了优先分配权去注册登记，但无须支付成本且最后可以由家人或牧师拒绝捐献，漏洞完全消除了优先分配带来的激励效应。尤其当提供给被试相应的信息，如捐献成本的分布情况、之前轮数实验中利用漏洞的人数

^① Judd B. Kessler, Alvin E. Roth, "Getting More Organs for Transplantation," *American Economic Review*, Vol. 104, No. 5, 2014, pp. 425-430.

^② Judd B. Kessler, Alvin E. Roth, "Organ Allocation Policy and the Decision to Donate," *American Economic Review*, Vol. 102, No. 5, 2012, pp. 2018-2047.

^③ Li Danyang, et al., "Increasing Organ Donation via Changes in the Default Choice or Allocation Rule," *Journal of Health Economics*, Vol. 32, No. 6, 2013, pp. 1117-1129.

^④ Judd B. Kessler, et al., "Loopholes Undermine Donation: An Experiment Motivated by An Organ Donation Priority Loophole in Israel," *Journal of Public Economics*, Vol. 114, No. 6, 2014, pp. 19-28.

等，此时捐献率甚至低于没有引入优先分配规则时的状况。

二、器官捐献中匹配理论的应用与实践

1. 器官捐献中匹配理论的应用

健康的人拥有两个肾，如果缺失一个依然可以保持健康，所以活体捐献是肾脏供体的一大来源。根据美国器官供应移植网络（OPTN）的数据，2005年美国活体器官捐献6571例，肾脏捐献移植占95%；2014年5541例，肾脏捐献占90%。从捐献供体来看，亲属间的器官捐献超过80%，非亲属间器官捐献比例正在逐年上升。在器官捐献数量既定的情况下，得到合适肾脏的病人越多，被救活的生命就越多。因此，设计一个合理的分配机制，扩大配对，增加患者获得肾脏移植的机率，成为提高患者福利的可行选择，为此学者们将匹配理论应用到了器官捐献移植中。

肾脏移植的供体主要来自患者的亲属。如果捐献者与患者在血型或者免疫方面存在医学排斥，那么患者就无法接受捐献者提供的肾脏，也无法进行移植手术。最早关于排斥反应的患者—供体对之间肾脏两两交换的思想来自 Rapaport，他提出在供体—患者对不相容的情况下进行配对肾脏交换，即两对不相容的供体—患者对中的捐献者将肾脏捐献给另一对中的相容患者。^① 随后 Ross 等人进一步强化了交换的思想，讨论了排斥反应的患者供体对之间进行交换的可能性。^② 与活体捐献交换相区别，另一种为间接交换，或称为列表交换。间接交换涉及一个不相容的患者捐献夫妻对与尸体器官等候中的患者进行队列交换。在这种交换中，夫妻中捐献者将肾脏捐献给尸体器官等候中的患者，与之交换的是夫妻中的患者在尸体器官的等候中获得了高优先权。^③ 2003年，Roth 等发现上述肾脏交换和一对一匹配理论之间存在着相似之处。^④ 配对交换是匹配中 TTC 算法里“环”^⑤的最重要案例，而间接交换是匹配中 YRMH-IGYT（全称为：You Request My House—I Get Your Turn）算法里“链”^⑥的最重要案例。这个认知以及移植社区关于交换组织经验的缺乏，促使罗斯他们提出了肾脏交换中第一个正式匹配机制，即 TTCC（Trading Cycles and Chains）机制。^⑦

肾脏交换模型中，Roth 等人假设：患者偏好相容的肾脏，所有兼容的移植物的存活率是相同的；允许任何数量规模的交换；允许间接交换。^⑧ 模型定义：

一组患者供体对 $\{(k_1; t_1); \dots; (k_n; t_n)\}$ ；

对每一个患者 t_i 来说相容的肾脏 $K_i \subseteq K = \{k_1; \dots; k_n\}$ ；

对每一个患者 t_i 来说， P_i 表示严格偏好于 $K_i \cup \{k_i; w\}$ 。

模型的匹配结果是对患者来说达成一个匹配 μ ，具体包括：

对于每一个患者 t_i 来说 $\mu(t_i)$ 是指：或者分配到一个相容肾脏 $K_i \cup \{k_i\}$ ，或者选择了尸体器官

^① F. T. Rapaport, "The Case for a Living Emotionally Related International Kidney Donor Exchange Registry," *Transplant Proceedings*, Vol. 18, No. 3, 1986, pp. 5-9.

^② Laine Friedman Ross, et al., "Ethics of a Paired-Kidney-Exchange Program," *New England Journal of Medicine*, Vol. 336, No. 24, 1997, pp. 1752-1755.

^③ Laine Friedman Ross, E. Steve Woodle, "Ethical Issues in Increasing Living Kidney Donations by Expanding Kidney Paired Exchange Programs," *Transplantation*, Vol. 69, No. 8, 2000, pp. 1539-1543.

^④ Alvin E. Roth, et al., "Kidney Exchange," *National Bureau of Economic Research Working Paper*, 2003.

^⑤ Shapley Lloyd, Scarf Herbert, "On Cores and Indivisibility," *Journal of Mathematical Economics*, Vol. 1, No. 1, 1974, pp. 23-37.

^⑥ Abdulkadiroglu Atila, Tayfun Sönmez, "House Allocation with Existing Tenants," *Journal of Economic Theory*, Vol. 88, No. 2, 1999, pp. 233-60.

^⑦ Alvin E. Roth, Tayfun Sönmez, M. Utku Ünver, "Kidney Exchange," *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 119, No. 2, 2004, pp. 457-488.

^⑧ Alvin E. Roth, Tayfun Sönmez, M. Utku Ünver, "Kidney Exchange," *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 119, No. 2, 2004, pp. 457-488.

等候列表中的优先获取权 W 。

这里的 W 表示患者的捐献方与尸体器官等候列表中的优先权的获取进行交换。尽管有时候列表等候选择的 w 可以匹配给多个患者，但是一个肾脏不可能分配给多个病人。患者供体对中的捐献者 k_i 可能与患者 t_i 相容，也可能不相容。

如何达成肾脏交换的有效匹配 $\mu(t_i)$ ，Roth 等人提出了 TTCC 机制。患者 t_i 偏好要么是 $K_i \cup \{k_i\}$ 集合中的一个肾脏，要么是 w ，而每一个肾脏则指向配对相容的接受者 t_i 。因此，模型定义：

“Cycles” 即环：由肾脏和患者序列 $(k'_1; t'_1; \dots; k'_m; t'_m)$ 构成，序列中每一个元素都指向接下去的一个元素，即 k'_1 是患者 t'_m 的下一个元素。注意每一个肾脏或者每一个患者只能是一个环中的部分，因此任两个环不可能相交。

“Chains” 即链，一个 w 链 (w -chain) 由肾脏和患者序列 $(k'_1; t'_1; \dots; k'_m; t'_m)$ 构成，序列中的每一个元素也都指向接下来的元素，除了最后一个元素 t'_m 指向 w 。 $(k'_m; t'_m)$ 对作为一个 w 链的开头，这里的患者 t'_m 接受尸体肾脏器官， $(k'_1; t'_1)$ 对作为 w 链的末端，这里捐献者的器官 k'_1 将肾脏捐献给尸体器官等候中的患者。 w 链相当于间接交换，与前面直接交换的“环”不同， w 链中的肾脏或者患者可以是多个 w 链中的部分。究竟选择哪一个 w 链，依赖于选择规则的确定，一个可行的选择规则是尸体器官等候列表中的优先获取权。在此基础上 Roth 提出了一个引理：考虑一个图，在这个图上每一对患者供体对都是和列表等候选择 w 一样处于明确的节点，假设每个患者指向一个肾脏或一个 w ，同时每一个肾脏指向其配对的接收者。那么总是存在一个环或者一个 w 链。

既定时间下既定肾脏交换问题 $\{(k_i, t_i)^n \mid i = 1, (K_i)^n \mid i = 1, (P_i)^n \mid i = 1\}$ 由 TTCC 机制决定交换匹配，具体步骤如下：

(1) 最初所有的肾脏都是可用的，所有的代理人都是积极主动的。在每个阶段留下来的主动患者 t_i 指向剩下的未分配的最好肾脏或者等候列表选择 w ，这里无论哪个选择都是偏好的。每个阶段留下来的被动接收患者则指向他分配到的配对肾脏，每一个剩下的肾脏 k_i 指向配对的接受者 t_i 。

(2) 由引理可得，存在一个环或者一个 w 链，或者两者都有。如果没有环的话，继续前进到下面第 3 步，否则停留在已有的环并实施相应的交换，然后将所有在环中的患者以及他们的配对移除之前的序列。每一个剩下的患者在剩下的选择中指向位居最上的偏好选择，每一个肾脏指向其配对的接收者。如果没有环的话，继续前进到下面第 3 步。否则定位所有的环，进行相应的交换，并移除这些环。然后继续重复以上步骤直到没有环存在。

(3) 如果没有配对了，那么匹配任务完成。否则根据上述引理，余下的每对启动一个 w 链。对于患者来说最后的任务就是确定链选择规则并选定一个 w 链。要么已经选择的 w 链被移除，要么已经选择的 w 链保留下来。一旦 w 链被保留下来，那么链中的每一个患者变成被动接受配对者。

(4) 每一次一旦一个 w 链被选定，新的环就产生了。在剩下的主动患者以及没有被分配的肾脏中继续重复步骤 2 和步骤 3，直到没有患者剩下来。合理的链选择规则包括选择一个最长的 w 链或者选择具有最高优先权的对进行交换形成一个 w 链。链选择规则之所以重要，是因为它会影响器官匹配的效率。

在此基础上，Roth 他们提出了定理 1 和定理 2。^①

定理 1：考虑一个链选择规则，任何一个处于非末端的已选定的 w 链继续保留在列队中，在这个链的末端位置上的肾脏依然可以留给下一个环。任何链选择规则下的 TTCC 机制都是有效的。

定理 2：如果给定链选择规则是尸体器官等候列表中的优先获取权，那么 TTCC 机制是策略证明的。

TTCC 机制利用三组或更多组之间进行交换，考虑了患者的偏好，不仅那些在死者器官移植名单

^① Alvin E. Roth, Tayfun Sönmez, M. Utku Ünver, “Kidney Exchange,” *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 119, No. 2, 2004, pp. 457-488.

上拥有优先权并愿意移植的患者能够获益,那些已经配对的患者也能够获益,所有供体—患者对均可能从 TTCC 项目中潜在受益,从而提高患者和肾脏之间的匹配质量,是实现间接交换的有效方式。

上述 Roth 等人提出的匹配理论允许任何数目的患者—供体对的交换,包括两方交换以及三方交换,也包括尸体器官等候列表交换,还允许列表交换与活体交换结合在一起。^① 不仅包括有排斥反应的对,也包括无排斥反应的对,即通过交换以获得首选肾。正如我们前面指出的,如果排除列表交换,这是 Lloyd 和 Herbert 的“住房市场”(housing market)^② 以及 Gale 的 TTCC 算法产生的有效核分配,并且这种分配的存在是唯一的,^③ 该机制是激励相容的。^④ 如果我们把尸体器官等候列表交换也纳入模型中,则接近于 Abdulkadiroglu 和 Sönmez 的“房间分配”(room assignment)^⑤, Krishna 和 Wang 认为,如果链选择规则是选择具有最高优先权的对进行交换形成一个 w 链并保留在序列中,那么这里的等候列表选择 w 可以重新被解释为 Abdulkadiroglu 和 Sönmez 中一组空置的房间,那么 TTCC 机制和 YRMH-IGYT 算法这两种机制其实是相同的。^⑥

Roth 等人 2005 年进一步研究了肾脏交换的结构问题。^⑦ 假设仅考虑两患者和捐献者的交换,并且采用许多美国移植外科医生的假设,认为所有相容的移植其存活率是相同的,那么每个病人对所有相容的肾脏的偏好是无差异的。定义 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 由一组患者构成,每个患者带有至少一个或以上不相容的捐献者。仅考虑两两交换,将得出下列偏好关系:

对任意患者 j , 如果其捐献者捐献的器官与患者 i 相容,那么为 $j >_i i$; 对任意患者 j , 如果其捐献者捐献的器官与患者 i 不相容,那么为 $i >_j j$; 对任意患者 j, h , 如果他们的捐献者捐献的器官与患者 i 相容,那么为 $j \sim_i h$ 。

如果 $j >_i i, i >_j j$, 则患者 $i, j \in N$ 是相互相容的。那么一个匹配 μ : 是 $N \rightarrow N$ 的一个函数,因此 $\mu(i) = j \Leftrightarrow \mu(j) = i$, 其中 $\forall i, j \in N$ 。这一类机制具体包括确定的机制,如目前器官银行使用的尸体器官分配中设置的优先权,也包括随机匹配机制,如主张平等的机制,这将等同于一个个体接受移植的尽可能多的概率。

2. 器官捐献中匹配理论的实践

2000 年 UNOS 发起配对肾交换试点项目,同年移植团体发布共识声明,表明配对的肾脏交换项目被认为是“道德上可接受的”^⑧。考虑到供体看到其潜在的接受者已经获得了移植肾脏后可能会收回自己的捐献同意,因此所有的肾移植手术必须同时进行,即使是两组患者—供体对之间最简单的两方交换,也需要对两个供体和两个患者同时展开四台手术,一个三方交换则包含六台同时进行的手术。2001—2004 年,新英格兰地区 14 家移植中心有 5 次两两成功交换; 全美国则有 2 次三方成功交换。Roth 等人的研究显示,大多数高于两方交换收益的部分来自于三方交换,也可能包括列表交换

① Alvin E. Roth, Andrew Postlewaite, “Weak versus Strong Domination in a Market with Indivisible Goods,” *Journal Mathematical Economics*, Vol. 4, No. 2, 1977, pp. 131–137.

② Shapley Lloyd, Scarf Herbert, “On Cores and Indivisibility,” *Journal of Mathematical Economics*, Vol. 1, No. 1, 1974, pp. 23–27.

③ Alvin E. Roth, Andrew Postlewaite, “Weak versus Strong Domination in a Market with Indivisible Goods,” *Journal Mathematical Economics*, Vol. 4, No. 2, 1977, pp. 131–137.

④ Alvin E. Roth, “Incentive Compatibility in a Market with Indivisibilities,” *Economics Letters*, Vol. 9, No. 2, 1982, pp. 127–132.

⑤ Abdulkadiroglu Atila, Tayfun Sönmez, “House Allocation with Existing Tenants,” *Journal of Economic Theory*, Vol. 88, No. 2, 1999, pp. 233–260.

⑥ Aradhna Krishna, Yu Wang, “The Relationship between Top Trading Cycles Mechanism and Top Trading Cycles and Chains Mechanism,” *Journal of Economic Theory*, Vol. 132, No. 1, 2007, pp. 539–547; Alvin E. Roth, Tayfun Sönmez, M. Utku Ünver, “Kidney Exchange,” *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 119, No. 2, 2004, pp. 457–488.

⑦ Alvin E. Roth, Tayfun Sönmez, M. Utku Ünver, “Pairwise Kidney Exchange,” *Journal of Economic Theory*, Vol. 125, No. 2, 2005, pp. 151–188.

⑧ M. Abecassis, et al., “Consensus Statement on the Live Organ Donor,” *Journal of The American Medical Association*, Vol. 284, No. 22, 2002, pp. 2919–2926.

和非定向供体（不指定特定患者的无私的活体供体）。^① 2004年9月，新英格兰肾移植监督委员会批准成立由新英格兰器官银行 Francis Delmonico 医生、马萨诸塞州总医院 Susan Saidman 医生以及 Roth、Sönmez 和 Ünver 提出的肾交换中心。荷兰移植中心也同意成立一个全国性的活体捐献肾脏交换项目。自此，肾脏交换逐步实施，从最简单的病例（两方交换）和可以受益最多的患者（不相容患者对）开始。2010年，Abdulkadiroğlu 和 Sönmez 联系 Frank Delmonico 和 Susan Saidman 以及他们的团队一起成立了新英格兰肾脏交换项目 NEPKE（New England Program for Kidney Exchange），这是美国第一个区域性肾交换项目。2004年，肾脏交换项目试点由美国器官获取和移植网络中心 OPTN（Organ Procurement and Transplantation Network）全面开展。同时，世界各地的一些移植中心也陆续推出肾脏交换项目，如2010年10月澳大利亚多中心推行了肾脏配对捐献 KDP（Kidney paired donation）项目。

据测算，在一般的捐献接受对之间大概有 2/3 的捐献接受对由于 ABO 血型或者交叉配对阳性引起供受体不相容，以至于无法进行活体捐献移植。而肾脏配对捐献则能够很好地克服这个问题。根据现有的数据，KPD 项目能增加活体捐献的肾移植数量。相比透析和脱敏治疗，这也是一个符合成本效益的治疗。^② 相关学者用具体数据进行了验证。Saidman 等人将 ABO 血型或交叉配对阳性的患者—供体对的人口数据提交给计算机进行分析和匹配。^③ 具体数据包括 ABO 血型、捐献者和接受者的 HLA 类型、供体—受体的关系、不相容的原因等。用于初步模拟的数据集包括分别有一个捐献者的 29 例患者和分别有多个捐献者的 16 例患者，共包括 45 例患者和 68 对供体捐献对。还通过 OPTN/SRTR 数据进一步模拟评估多重交换组合的实践意义。结论显示如果允许只涉及两个患者供体对的交换，那么在数据组中，存在最大 8 个患者—供体对可以交换肾脏。如果三方交换也被允许，那么最多有 11 对可以交换肾脏。同时，用 OPTN / SRTR 数据模拟也表明如果三方交换被许可的话，潜在器官移植数量的增加非常显著。Klerk 等人利用荷兰 2004 年 12 月至 2011 年 1 月的活体供肾移植项目收集了受者和捐献者的年龄、参与交换项目原因等数据，进行了单变量和多变量 Cox 比例风险分析。^④ 发现荷兰活体供肾移植项目拥有高达 40% 的移植率，和较高的 5 年的存活率，其效果相当于直接活体捐献。Mrinal Pahwa 等人通过印度 2006 年 3 月至 2011 年 6 月 PKD 移植的相关数据，研究印度活体捐献交换项目实施 5 年来的效果，认为 PKD 移植是一种医疗上和经济上都可行的项目，可以用来解决供体器官短缺的问题。^⑤ Cantwell 等人也于 2015 年对澳大利亚多中心 KPD 项目实施 4 年后的经验进行了总结。^⑥

正如上面所述，KPD 项目通过对不相容的供受体对之间进行有效交换可以潜在地增加移植数量，但是自 20 世纪 80 年代开始，KPD 项目一直面临着法律、后勤和伦理的挑战，同时存在着不少局限性及其他问题，如 O 型血的不平衡、相互匹配的要求、同时供肾切取术要求、KPD 脱敏结合、列表配对捐献的角色、地理障碍、法律障碍、活体捐献者的安全、分散登记的问题和低效率的匹配算法

① Alvin E. Roth, Tayfun Sönmez, M. Utku Ünver, "Pairwise Kidney Exchange," *Journal of Economic Theory*, Vol. 125, No. 2, 2005, pp. 151-188.

② Archil B. Chkhotua, "Paired Kidney Donation: Outcomes, Limitations, and Future Perspectives," *Transplantation Proceedings*, Vol. 44, No. 6, 2012, pp. 1790-1792.

③ Susan L. Saidman, et al., "Increasing the Opportunity of Live Kidney Donation by Matching for Two and Three Way Exchanges," *Transplantation*, Vol. 81, No. 5, 2006, pp. 773-782.

④ Marry de Klerk, et al., "8 Years of Outcomes of the Dutch Living Donor Kidney Exchange Program," *Clinical Transplants*, Vol. 94, No. 10S, 2011, pp. 287-290.

⑤ Mrinal Pahwa, et al., "Paired Exchange Kidney Donation in India: A Five-Year Single-Center Experience," *International Urology and Nephrology*, Vol. 44, No. 4, 2012, pp. 1101-1105.

⑥ Linda Cantwell, et al., "Four Years of Experience with the Australian Kidney Paired Donation Programme," *Nephrology (Carlton)*, Vol. 20, No. 3, 2015, pp. 124-131.

等。^① Mahendran 和 Veitch 也指出围绕配对捐献的伦理争议包括保密性、捐献限制、手术的同时操作以及对 O 型血接受者的不利可能性。^② 后勤方面的问题包括供体手术位置和器官运输。因此 KPD 项目的广泛实施将取决于伦理和后勤方面的限制性问题的解决程度。

肾脏交换范围的变大要求信息交换设计也要随之作出变更。UNOS 配对肾捐献程序的管理者 Ruthanne Leishman 表示,“血型识别较为方便,但是寻找受捐献者的血型、抗体信息和捐献者的抗原信息则需要借助计算机的力量”^③。Leishman 还用实际案例证明了匹配算法的有效性,2002 年,由于没有算法帮助,大量的匹配工作通过手工完成,仅完成 2 例肾脏匹配。后期肾脏匹配数量大幅度提升,2003、2004 和 2007 年肾脏匹配从 19 例增加到 34 例再到 111 例——很大部分的原因在于计算机算法找到了越来越多匹配的器官捐献者和受赠者。因此,迫切需要通过设计计算机匹配算法来确定最大匹配数量的相容供体—受体对。

当然进行计算匹配,前提是成立互不相容、互相排斥的全国性的病人—捐献对数据库。早在 1997 年不少学者就提出了这个建议,^④ 但直到 2005 年,美国仍未成立全国性的不相容患者捐献对数据库。不过一些地方医院已建立了自己的数据库并用于肾脏的交换,比如阿拉巴马州、巴尔的摩(霍普金斯)和俄亥俄州(医学俄亥俄州大学)。Hanto 等人指出除了大量的不相容的患者—供体对数据的获取对找到有效匹配构成了障碍外,KPD 移植的成功实施还需要多个移植中心之间的有效协调。^⑤ 美国新英格兰肾脏交换项目 NEPKE (New England Program for Kidney Exchange) 和中大西洋配对交换项目 MAPEP (Mid-Atlantic Paired Exchange Program) 已开发了一个系统协议来有效地提高 KPD 移植数量。具体实践中通过移植中心将不相容对和非定向捐献者(NDD)的数据提交系统,根据供受者 ABO 血型、人类白细胞抗原,和接受者人类白细胞抗原抗体的筛选来确定相关匹配。利用计算机优化算法来匹配双方交换、三方交换以及 NDD 链,并列出的所有交换链。然后团队对相关的信息传递、交叉配型、手术日期、同时供肾手术的协调和其他问题进行沟通协调。NEPKE 和 MAPEP 合作表明,跨区域协调是可行性的。特别是当结合计算机优化和包含如三方交换,非定向捐献链,列表交换链等多重类型的匹配,跨地区合作后的移植数量远远超过单个交换项目中心所能达到的移植数量。

越来越多的肾脏配对捐献障碍被克服,肾脏匹配交换极大扩展了活体供池,有效增加了潜在移植数量,为不相容的供受体对提供了一种可替代的成功策略,越来越多的患者也由此受益。总之,当交换变得更加常规,互惠互利的机会将会越来越多。

三、总结和借鉴

为提高器官捐献率,各国采取财政激励、改变默认规则、优先权分配机制等激励措施,但考虑到国别差异及其他相关因素,现实中上述激励措施能否发挥相应的效应还有待于进一步检验。

2015 年之前,我国很大一部分器官移植供体来源于死囚。但 2015 年 1 月 1 日起我国停止使用死囚器官,公民自愿器官捐献成为器官供体的唯一来源。我国公民尸体器官捐献率在世界上处于后位。

^① Sommer E. Gentry, Robert A. Montgomery, Dorry L. Segev, “Kidney Paired Donation: Fundamentals, Limitations, and Expansions,” *American Journal of Kidney Diseases*, Vol. 57, No. 1, 2011, pp. 144–151.

^② Mahendran A. O., Veitch P. S., “Paired Exchange Programmes Can Expand the Live Kidney Donor Pool,” *British Journal of Surgery*, Vol. 94, No. 6, 2007, pp. 657–664.

^③ 《这些年,器官移植也靠大数据》,爱范儿网,http://www.ifanr.com/436172。

^④ Laine Friedman Ross, et al., “Ethics of a Paired-Kidney-Exchange Program,” *New England Journal of Medicine*, Vol. 336, No. 24, 1997, pp. 1752–1755.

^⑤ Ruthanne L. Hanto, Reitsma William, Francis L. Delmonico, “The Development of a Successful Multiregional Kidney Paired Donation Program,” *Transplantation*, Vol. 86, No. 12, 2008, pp. 1744–1748.

与之相关的是,公民自愿器官捐献的激励制度设计及匹配方法应用都还处于起步阶段。理论方面目前我国学者对于器官捐献的研究主要集中在国外捐献相关制度、体系、政策的介绍和借鉴上,实践方面我国已经意识到公民自愿器官捐献的重要性,并对捐献体系进行了初步的改革,成立了专门负责捐献和移植的机构,启动了人体器官捐献试点工作,基础性的捐献框架已经搭建,开始走上了器官捐献法制化道路,但目前的器官捐献体系还有待于进一步完善。器官捐献率的上升还取决于一国对器官捐献移植体系的改革以及器官捐献移植服务组织的高效运作。西班牙自1992年以来的器官捐献率一直排名世界前列。如此高的捐献率除了得益于推定同意默认规则外,还得益于该国移植服务组织的高效运作,如移植协调员的设立,中央办公室在支持所有器官捐献过程中的巨大努力,对医院进行的补偿,媒体的大力宣传等,所有这些方式在国际上被称为“西班牙模式”。因此,我国要借鉴吸收国外经验,建立完善的器官捐献体系。同时,从实证研究分析来看,除了移植能力外,医疗保健支出、立法体系、获取捐献信息的便利度以及社会的捐献偏好等都是影响器官捐献率的重要因素,因此,在完善我国器官捐献体系的同时还应该加强医疗保健支出、加强立法、采取有效方式广泛宣传、强化民众的社会捐献偏好、降低捐献的注册难度。

此外,要大幅提高中国的器官捐献率,提高器官匹配效率,还需要设计相应的激励机制。目前,国外对于器官捐献方面的理论研究已相对深入,具体实践方面也积累了成熟经验,但器官捐献各种激励机制产生的具体效果尚未有统一的结论。基于伦理、文化背景等国情不同,国外的激励制度可能并不一定适合我国,因此既要参照国外成熟的研究范式,还要结合我国的现实问题,利用前沿工具检验中国情境下各种激励机制的适用性,制定符合国情、伦理、文化的激励机制,以解决我国移植器官的供给不足问题。

最后,在活体器官捐献,尤其是亲属间的肾脏捐献中,由于存在虽有捐献意愿但配型不成功的可能,所以应当考虑如何将亲属间的一对一捐献转入肾脏交换市场,扩大配型对象以提高配型成功率。国外已经提出了肾脏交换中第一个正式匹配机制。要使匹配理论在肾脏交换市场中得到广泛应用,还要借助于计算机技术,其前提是成立互不相容、互相排斥的全国性的病人—捐献对数据库。现阶段,我国就可以着手建立这样的数据库,为今后肾脏的有效配对打好坚实的基础。

责任编辑:孙中博