

## 捕获再捕获法在人群规模估计中的应用进展

黄贵花 张晓婷 马凯芳 李东民

中国疾病预防控制中心性病艾滋病预防控制中心流行病学室, 北京 102206

通信作者: 李东民, Email: lidongmin@chinaaids.cn

**【摘要】** 捕获再捕获法作为一种经济、简便的方法, 在估计人群规模、估计及校正发病率或患病率等研究中广泛应用。本文对经典捕获再捕获法以及方法的改进、在人群规模估计中的应用等方面进行综述, 为后续开展相关工作提供参考。

**【关键词】** 捕获再捕获法; 估计; 人群规模

**基金项目:** 国家科技重大专项(2017ZX10201101-002-005)

### Application and progress of capture-recapture method in population size estimation

Huang Guihua, Zhang Xiaoting, Ma Kaifang, Li Dongmin

Division of Epidemiology, National Center for AIDS/STD Control and Prevention, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 102206, China

Corresponding author: Li Dongmin, Email: lidongmin@chinaaids.cn

**【Abstract】** Capture-recapture method is an economical and straightforward method widely used in fields such as estimating population size and estimating and adjusting incidence or prevalence. This paper reviews the classical capture-recapture method and its improvement and application in population size estimation in referring the subsequent related work.

**【Key words】** Capture-recapture method; Estimation; Population size

**Fund program:** National Science and Technology Major Project of China (2017ZX10201101-002-005)

捕获再捕获法(CR法)是通过两次及以上独立捕获来估计总体大小的一种方法。CR法最早用于生态学研究以估计野生动物种群数量<sup>[1]</sup>, 近年来也常用于估计难以进行普查的人群规模, 如艾滋病重点人群数量<sup>[2-3]</sup>、疾病发/患病或死亡人数等, 并且可根据所估计的疾病发/患病人数或死亡人数等对疾病的发病率<sup>[4-6]</sup>、患病率<sup>[7]</sup>、死亡率<sup>[8-9]</sup>和药物不良反应发生率<sup>[10]</sup>等进行校正。本文对经典CR法及改进方法的原理、应用条件、实例、优缺点等方面进行综述, 为后续开展相关工作提供参考。

#### 一、经典CR法

1. 基本原理: 基于双样本模型, 在一个研究总体  $N$  中随机抽取样本  $M$ , 对其做标记后释放, 经过一段时间后再捕获样本  $n$ , 其中 2 次均被捕获的样本数为  $m$ , 通过 2 个样本的大小和重叠的数量估计目标人群规模  $N^{[11-12]}$ 。其计算公式<sup>[13]</sup>:

$$N = \frac{(M+1)(n+1)}{(m+1)} - 1。$$

2. 应用条件: 该方法的应用需要同时满足 5 个条件<sup>[11, 14-15]</sup>: ①研究期间人群保持封闭, 总体中的个体不增加或减少; ②需有 2 个样本; ③标记不会丢失, 2 个样本中均被捕获的个体能够正确匹配; ④总体中的个体被捕获的机会相同; ⑤ 2 个样本独立, 即第 2 次个体被捕获的机会与第 1 次是否被捕获无关。

3. 应用: 在上海市浦东新区采用经典CR法计算出该地区 MSM 的人群规模<sup>[16]</sup>。考虑到个体特征差异导致其被捕获的机会不同, 相关学者按照特征分层后进行人群规模估计。如吕繁等<sup>[17]</sup>利用我国四川省乐山市市中区戒毒所历年登记在册资料, 按性别分层用该公式估计出当地吸毒人群规模, 一定程度上降低了性别差异对被捕获概率的影响。

DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20211130-00927

收稿日期 2021-11-30 本文编辑 斗智

引用格式: 黄贵花, 张晓婷, 马凯芳, 等. 捕获再捕获法在人群规模估计中的应用进展[J]. 中华流行病学杂志, 2022, 43(4): 603-607. DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20211130-00927.

Huang GH, Zhang XT, Ma KF, et al. Application and progress of capture-recapture method in population size estimation[J]. Chin J Epidemiol, 2022, 43(4): 603-607. DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20211130-00927.



根据人群规模可以进一步估计及校正相关疾病指标,如在调查我国北京市居民肌萎缩性侧索硬化症发病情况时,利用医院患者就诊记录和关爱中心的数据,采用经典CR法按不同性别、年龄组推算病例数量,进而估计发病率<sup>[18]</sup>。也有学者基于秘鲁医院和多发性硬化症协会登记资料,使用该方法估计出当地多发性硬化症病例数,并基于该结果校正了患病率<sup>[19]</sup>。

4. 优点:①经典CR法原理简单、成本低且易于实施,结果较为可靠<sup>[17]</sup>;②无需完整的抽样框<sup>[17]</sup>;③适用于调查难以接触的人群<sup>[2]</sup>;④可利用现有记录、档案等<sup>[20]</sup>;⑤开展现场调查时只需少量样本<sup>[21]</sup>。

5. 局限性:①实际应用中很难满足经典CR法的所有应用条件<sup>[14]</sup>,人口流动、标记丢失、样本之间不独立或部分个体被捕获的机会不等均可导致结果产生偏倚<sup>[22]</sup>;②通过协变量对同质亚人群进行分层分析,增加模型的数量,会造成某些层内人数较少,影响模型检验的统计效能<sup>[23]</sup>。

## 二、基于经典CR法的改进

### 1. Zelterman 模型:

(1)基本原理:经典CR法要求总体中个体被捕获的机会相同,而Zelterman模型通过忽略多次进入样本的少数人来减少被捕获概率间差异的影响。该模型使用同一来源样本,如公安部门、戒毒治疗中心或医院数据等<sup>[24-26]</sup>,在某段时间内,目标人群可能重复进入样本,造成部分个体被捕获的机会不等,其被捕获的次数可能为1次、2次或更多次,该模型认为与多次被捕获的个体相比,从未被捕获的个体与捕获次数少的个体更相似,因此其计算只统计出现1次或2次的个体<sup>[27]</sup>。捕获次数服从泊松分布,通过该分布来估计目标人群中未被捕获到的个体数量,从而得到目标人群规模。其计算公式<sup>[27]</sup>:
$$N_{all} = \frac{N_{iden}}{1 - e^{(-2 \times f_1) / f_2}}, N_{all}$$
为目标人群估计数; $N_{iden}$ 为某段时间内已被捕获人次总数; $e$ 为自然对数的底( $e=2.718\ 28$ ); $f_1$ 为仅被捕获1次的目标人群人数; $f_2$ 为被捕获2次的目标人群人数。

(2)应用条件:①研究期间人群保持封闭,总体中的个体不增加或减少<sup>[25]</sup>;②仅需1个样本;③标记不会丢失,同一个体再次捕获能够正确匹配<sup>[25]</sup>;④同一个体每次捕获都是独立的,即第2次个体被捕获的机会与第1次是否被捕获无关<sup>[28]</sup>。

(3)应用:多项研究基于Zelterman模型估算了当地吸毒人群规模,如Zhang等<sup>[25]</sup>利用2011-2015年我国云南省公安部门登记在册吸毒人员数据,分别统计每年登记在册的总人次、仅登记在册1~2次的人数,发现2011-2014年规模大幅增加,于2015年略有下降,估计数中登记在册吸毒人数占比逐年上升。Janssen<sup>[26]</sup>利用法国戒毒治疗中心登记的注射吸毒者、海洛因成瘾者和可卡因成瘾者数据<sup>[29-30]</sup>,基于该模型纳入协变量,估计上述3类人群规模,发现2006-2016年当地总人口中注射吸毒人数占比稳定,2009-2013年海洛因成瘾者人群规模及2010-2017年可卡

因成瘾者人群规模均有所上升。

(4)优点:①模型计算简便,结果稳健<sup>[30]</sup>;②仅需1个样本<sup>[30]</sup>;③具有较窄的95%CI<sup>[28]</sup>;④减少被捕获概率间差异的影响<sup>[28]</sup>。

(5)局限性:①同一个体捕获和再捕获之间可能不独立,曾进入过样本的目标人群可能会改变行为或者更被密切关注<sup>[25-26]</sup>;②人口流动导致很难实现人群封闭<sup>[28]</sup>;③标记丢失将导致同一个体无法正确匹配。

### 2. 对数线性模型:

(1)基本原理:经典CR法要求样本间相互独立,而对数线性模型对该条件不做要求。当有 $\geq 2$ 个来源样本时,把各样本资料看成不完全的2'列联表, $t$ 代表不同来源的样本数,该表显示人群中所有被捕获人员的经历,其中包含一个缺失项,代表所有样本中未被发现的目标人员<sup>[31]</sup>。对列联表格的估计数 $x$ ,取对数 $\log x$ ,将其表示为各样本及其交互作用的线性模型,利用该模型估计缺失项的数值,得到目标人群规模估计值<sup>[22,32]</sup>。

(2)应用条件:①研究期间人群保持封闭,总体中的个体不增加或减少;②需有 $\geq 2$ 个样本;③标记不会丢失,同一个体再次捕获能够正确匹配<sup>[32]</sup>;④允许样本间不独立。

(3)应用:有学者利用我国四川省西昌市戒毒所、戒毒人员社区和美沙酮戒毒治疗门诊资料,使用对数线性模型估计了当地吸毒人群规模,并对结果进行评估,认为该法具有较高的信度和效度<sup>[33]</sup>。该模型也常用于一般人群规模估计,如Sukrat等<sup>[34]</sup>利用泰国出生登记、公共卫生健康数据库和医院记录估计了青少年妊娠人数,并进一步得到妊娠率;Duca等<sup>[35]</sup>利用美国科罗拉多州4个卫生系统电子健康记录和付款人索赔数据库资料,通过该模型估计了冠心病患者数量,并根据该结果对青少年和成年人冠心病患病率进行校正,估计约47%的病例未被诊断发现。美国佛罗里达州一项调查利用实验室确诊病例报告资料、电子实验室报告资料和死亡记录数据,建立该模型估计了新生儿单纯疱疹病毒感染死亡人数,发现现有监测系统报告的死亡人数被严重低估<sup>[36]</sup>。

(4)优点:①不要求各样本独立<sup>[32-33]</sup>;②多来源样本资料可以提高样本的代表性。

(5)局限性:①多来源样本难以获得或者数据质量参差不齐<sup>[37]</sup>;②计算过程复杂,需要借助统计软件完成<sup>[32]</sup>。

### 3. 同伴推动抽样(respondent-driven sampling, RDS)法与经典CR法、对数线性模型的结合应用:

(1)基本原理:经典CR法和对数线性模型常使用现有资料对人群规模进行估计,但在实际应用中,缺乏可用资料或有些资料的个体占总体很小的比例<sup>[38-39]</sup>,导致样本统计代表性低<sup>[40]</sup>。RDS法作为一种近似概率抽样法,可以获得更具代表性样本。首先从目标人群中选取一定数量的“种子”,通过双向激励机制延长招募链,种子给同伴传递联系卡,同伴再向其同伴传递联系卡<sup>[41-42]</sup>,以此类推,当招募链延长到一定程度,达到所需的样本量,样本将独立于种子,

能够代表被抽样的人群<sup>[43-44]</sup>。同时限制每位参与者的联系卡数量,减少对种子的依赖,防止不合格的招募对象进入样本<sup>[45-46]</sup>。基于RDS法获得的目标人群样本,结合上述经典CR法或对数线性模型进一步估计目标人群规模。

(2)应用条件:RDS法与经典CR法结合应用时,需满足经典CR法的应用条件;RDS法与对数线性模型结合应用时,需满足对数线性模型的应用条件。

(3)应用:于越南海防市开展的注射吸毒人群规模估计研究,通过2次RDS法调查与发放标记物形成3次捕获,将捕获的结果两两配对并用经典CR法计算,获得了两组相一致的计算结果<sup>[11]</sup>。在估计比利时布鲁塞尔市注射吸毒人群规模时,通过RDS法获得捕获样本,与药物治疗登记资料和减少伤害服务登记资料形成3次捕获,使用对数线性模型估计获得结果,认为RDS法是获得隐匿人群代表性样本的良好方法<sup>[39]</sup>。

(4)优点:①不要求参与者提供其同伴的个人信息,减少拒绝参加的比例<sup>[47]</sup>,保护研究对象的隐私<sup>[44]</sup>,降低掩盖效应<sup>[46]</sup>;②避免推荐大量同质的同伴影响样本的代表性<sup>[46]</sup>;③目标人群中更加隐匿的对象<sup>[47]</sup>。

(5)局限性:①研究对象为了获取奖励可能重复参与研究<sup>[44]</sup>;②社交网络大的人更有可能包含在样本中<sup>[48]</sup>;③经典CR法或对数线性模型的局限性仍存在。

### 三、小结

由于利用的数据和模型不同,导致估计的结果各有差异。在选择模型之前,必须了解其应用条件、优点和局限性,并根据自身数据特点选择恰当的方法。经典CR法在人群规模估计的应用处在不断探索的阶段,结果的准确性取决于应用条件是否满足,目前缺乏能够满足所有应用条件的模型和衡量该方法结果准确性的金标准,因此需要对估计结果可能存在的偏倚进行具体分析并做出适当的调整<sup>[13]</sup>,同时可以采用多种模型或多种数据综合分析<sup>[49]</sup>,不同的计算结果之间可以相互验证<sup>[50]</sup>。针对不同的地区,应当充分了解当地的实际情况和现有资料,综合考虑各方面的因素来选择适宜的模型<sup>[51-52]</sup>。此外,数据的质量、可得性以及社会学因素均会影响估计的准确程度,尽管这些不是方法自身的缺陷,但说明了在应用过程中仍有许多问题需要解决。在今后的研究中,需要进一步改进模型或开发新的模型、联合其他方法来使估计结果更加稳健<sup>[37,53-54]</sup>。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

### 参 考 文 献

[1] International Working Group for Disease Monitoring and Forecasting. Capture-recapture and multiple-record systems estimation I: history and theoretical development [J]. *Am J Epidemiol*, 1995, 142(10): 1047-1058. DOI: 10.1093/oxfordjournals.aje.a117558.

[2] Karami M, Khazaei S, Poorolajal J, et al. Estimating the population size of female sex worker population in

Tehran, Iran: application of direct capture-Recapture method[J]. *AIDS Behav*, 2017, 21(8): 2394-2400. DOI: 10.1007/s10461-017-1803-9.

[3] Hu MG, Xu CD, Wang JF. Spatiotemporal analysis of men who have sex with men in mainland China: social app capture-recapture method[J]. *JMIR Mhealth Uhealth*, 2020, 8(1):e14800. DOI:10.2196/14800.

[4] Weng JP, Zhou ZG, Guo LX, et al. Incidence of type 1 diabetes in China, 2010-13: population based study[J]. *BMJ*, 2018, 360:j5295. DOI:10.1136/bmj.j5295.

[5] Barbadoro P, Luciani A, Ciotti M, et al. Two-source capture-recapture method to estimate the incidence of acute flaccid paralysis in the marches region (Italy)[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(24): 9400. DOI: 10.3390/ijerph17249400.

[6] Straetemans M, Bakker MI, Alba S, et al. Completeness of tuberculosis (TB) notification: inventory studies and capture-recapture analyses, six European Union countries, 2014 to 2016[J]. *Euro Surveill*, 2020, 25(12): 1900568. DOI:10.2807/1560-7917.ES.2020.25.12.1900568.

[7] Barocas JA, White LF, Wang JN, et al. Estimated prevalence of opioid use disorder in Massachusetts, 2011-2015: a capture-recapture analysis[J]. *Am J Public Health*, 2018, 108(12):1675-1681. DOI:10.2105/AJPH.2018.304673.

[8] Kendjo E, Thellier M, Noël H, et al. Mortality from malaria in France, 2005 to 2014[J]. *Euro Surveill*, 2020, 25(36): 1900579. DOI: 10.2807/1560-7917. ES. 2020.25.36. 1900579.

[9] Babakhanian M, Zarghami M, Alipour A, et al. An estimation of drug-related deaths in Iran, using the capture-recapture method (2014-2016)[J]. *Addict Health*, 2020, 12(2):87-97. DOI:10.22122/ahj.v12i2.266.

[10] Osmont MN, Degremont A, Jantzen H, et al. Hospital databases for the identification of adverse drug reactions: a 2-year multicentre study in 9 French general hospitals [J]. *Br J Clin Pharmacol*, 2021, 87(2): 471-482. DOI: 10.1111/bcp.14405.

[11] des Jarlais D, Khue PM, Feelemyer J, et al. Using dual capture/recapture studies to estimate the population size of persons who inject drugs (PWID) in the city of Hai Phong, Vietnam[J]. *Drug Alcohol Depend*, 2018, 185: 106-111. DOI:10.1016/j.drugalcdep.2017.11.033.

[12] Doshi RH, Apodaca K, Ogwal M, et al. Estimating the size of key populations in Kampala, Uganda: 3-source capture-recapture study[J]. *JMIR Public Health Surveill*, 2019, 5(3):e12118. DOI:10.2196/12118.

[13] 吕繁, 张大鹏, 贺雄, 等. 艾滋病高危人群基数估计及其方法 [J]. *中华流行病学杂志*, 2003, 24(11):987-990. DOI: 10.3760/j.issn:0254-6450.2003.11.008.

[14] Lyu F, Zhang DP, He X, et al. The progression of methods for estimating the size of populations at risk for HIV/AIDS [J]. *Chin J Epidemiol*, 2003, 24(11):987-990. DOI:10.3760/j.issn:0254-6450.2003.11.008.

[14] 徐鹏, 曾刚, 吕繁. 我国艾滋病高危人群基数估计方法研究及其在流行形势分析中的应用[J]. *医学研究杂志*, 2010, 39(5):41-45. DOI:10.3969/j.issn.1673-548X.2010.05.014.

Xu P, Zeng G, Lyu F. Study on methods for population size estimation of HIV high risk groups and its application in HIV/AIDS situation analysis in China[J]. *J Med Res*, 2010,

- 39(5):41-45. DOI:10.3969/j.issn.1673-548X.2010.05.014.
- [15] Leclerc P, Vandal AC, Fall A, et al. Estimating the size of the population of persons who inject drugs in the island of Montréal, Canada, using a six-source capture-recapture model[J]. *Drug Alcohol Depend*, 2014, 142:174-180. DOI: 10.1016/j.drugalcdep.2014.06.022.
- [16] 辛辛, 朱黎丹, 张勇, 等. 上海市浦东新区 MSM 的规模估计及性行为特征[J]. *中国热带医学*, 2021, 21(5): 460-466. DOI:10.13604/j.cnki.46-1064/r.2021.05.14.  
Xin X, Zhu LD, Zhang Y, et al. MSM population size estimation and behavior characteristics in Shanghai Pudong New Area[J]. *China Trop Med*, 2021, 21(5): 460-466. DOI:10.13604/j.cnki.46-1064/r.2021.05.14.
- [17] 吕繁, 李平, 刘刚, 等. 捕获再捕获法估计四川乐山市中区吸毒人群基数[J]. *中国药物依赖性杂志*, 2007, 16(4): 291-299. DOI:10.3969/j.issn.1007-9718.2007.04.013.  
Lyu F, Li P, Liu G, et al. Estimation of the population size of drug users in Shizhong district of Leshan city, Sichuan: a capture-recapture method[J]. *Chin J Drug Depend*, 2007, 16(4):291-299. DOI:10.3969/j.issn.1007-9718.2007.04.013.
- [18] Zhou SH, Qian SL, Li XH, et al. Using the capture-recapture method to estimate the incidence of amyotrophic lateral sclerosis in Beijing, China[J]. *Neuroepidemiology*, 2018, 50(1/2):29-34. DOI:10.1159/000486175.
- [19] Gonzales-Gamarra O, Alva-Diaz C, Pacheco-Barrios K, et al. Multiple sclerosis in Peru: national prevalence study using capture-recapture analysis[J]. *Mult Scler Relat Disord*, 2021, 55:103147. DOI:10.1016/j.msard.2021. 103147.
- [20] 王斌, 程峰, 梁伯衡, 等. 捕获-再捕获法在艾滋病高危人群基数估计中的运用[J]. *现代预防医学*, 2004, 31(6):832-833, 835. DOI:10.3969/j.issn.1003-8507.2004.06.014.  
Wang B, Cheng F, Liang BH, et al. Applications of capture-recapture method for estimating the size of sub-population at high risk for HIV/AIDS[J]. *Mod Prev Med*, 2004, 31(6):832-833, 835. DOI:10.3969/j.issn.1003-8507.2004.06.014.
- [21] Abdul-Quader AS, Baughman AL, Hladik W. Estimating the size of key populations: current status and future possibilities[J]. *Curr Opin HIV AIDS*, 2014, 9(2): 107-114. DOI:10.1097/COH.0000000000000041.
- [22] 王成, 凌莉, 何群. 艾滋病高危人群的基数估计[J]. *华南预防医学*, 2008, 34(5): 34-38. DOI: 10.3969/j. issn. 1671-5039.2008.05.009.  
Wang C, Ling L, He Q. Estimation of the size of population at high risk for HIV/AIDS[J]. *South China J Prev Med*, 2008, 34(5): 34-38. DOI: 10.3969/j.issn. 1671-5039.2008. 05.009.
- [23] Hickman M, Higgins V, Hope V, et al. Injecting drug use in Brighton, Liverpool, and London: best estimates of prevalence and coverage of public health indicators[J]. *J Epidemiol Community Health*, 2004, 58(9):766-771. DOI: 10.1136/jech.2003.015164.
- [24] van der Heijden PGM, Cruts G, Cruyff M. Methods for population size estimation of problem drug users using a single registration[J]. *Int J Drug Policy*, 2013, 24(6): 614-618. DOI:10.1016/j.drugpo.2013.04.002.
- [25] Zhang GB, Jiang H, Shen JC, et al. Estimating prevalence of illicit drug use in Yunnan, China, 2011-15[J]. *Front Psychiatry*, 2018, 9:256. DOI:10.3389/fpsy.2018.00256.
- [26] Janssen E. Estimating the number of people who inject drugs: a proposal to provide figures nationwide and its application to France[J]. *J Public Health (Oxf)*, 2018, 40(2):e180-188. DOI:10.1093/pubmed/idx059.
- [27] Zelterman D. Robust estimation in truncated discrete distributions with application to capture-recapture experiments[J]. *J Stat Plan Inference*, 1988, 18(2): 225-237. DOI:10.1016/0378-3758(88)90007-9.
- [28] Bouchard M. A capture - recapture model to estimate the size of criminal populations and the risks of detection in a marijuana cultivation industry[J]. *J Quant Criminol*, 2007, 23(3):221-241. DOI:10.1007/s10940-007-9027-1.
- [29] Janssen E. Estimating the number of heroin users in metropolitan France using treatment centers data: an exploratory analysis[J]. *Subst Use Misuse*, 2017, 52(5): 683-687. DOI:10.1080/10826084.2016.1245340.
- [30] Janssen E, Cadet-Tairou A, Gérome C, et al. Estimating the size of crack cocaine users in France: methods for an elusive population with high heterogeneity[J]. *Int J Drug Policy*, 2020, 76: 102637. DOI: 10.1016/j. drugpo. 2019. 102637.
- [31] Pezzotti P, Piovesan C, Michieletto F, et al. Estimating the cumulative number of human immunodeficiency virus diagnoses by cross-linking from four different sources[J]. *Int J Epidemiol*, 2003, 32(5): 778-783. DOI: 10.1093/ije/ dyg202.
- [32] 仇成轩, 施倡元. 捕获-再捕获方法及其在流行病学中的应用[J]. *中华预防医学杂志*, 1998, 32(1): 54-55. DOI: 10.3760/j.issn:0253-9624.1998.01.020.  
Qiu CX, Shi LY. Capture-recapture method and its applications in epidemiology[J]. *Chin J Prev Med*, 1998, 32(1):54-55. DOI:10.3760/j.issn:0253-9624.1998.01.020.
- [33] Chen KJ, Bian CR, Song BL, et al. Investigation and estimation of the prevalence of drug addicts in Xichang, China[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2019, 98(1):e13919. DOI: 10.1097/MD.00000000000013919.
- [34] Sukrat B, Okascharoen C, Rattanasiri S, et al. Estimation of the adolescent pregnancy rate in Thailand 2008-2013: an application of capture-recapture method[J]. *BMC Pregnancy Childbirth*, 2020, 20(1): 120. DOI: 10.1186/ s12884-020-2808-3.
- [35] Duca LM, Pyle L, Khanna AD, et al. Estimating the prevalence of congenital heart disease among adolescents and adults in Colorado adjusted for incomplete case ascertainment[J]. *Am Heart J*, 2020, 221: 95-105. DOI: 10.1016/j.ahj.2019.11.012.
- [36] Matthias J, du Bernard S, Schillinger JA, et al. Estimating neonatal herpes simplex virus incidence and mortality using capture-recapture, Florida[J]. *Clin Infect Dis*, 2021, 73(3):506-512. DOI:10.1093/cid/ciaa727.
- [37] 李平, 吕繁. AIDS 高危人群-吸毒人群基数估计国内研究实践[J]. *传染病信息*, 2005, 18(1): 43-45. DOI: 10.3969/j. issn.1007-8134.2005.01.032.  
Li P, Lyu F. Research and practice for population size estimation of population at high risk for HIV/AIDS-drug users in China[J]. *Infect Dis Inform*, 2005, 18(1): 43-45. DOI:10.3969/j.issn.1007-8134.2005.01.032.
- [38] Allen ST, O'Rourke A, White RH, et al. Estimating the number of people who inject drugs in a rural county in

- Appalachia[J]. *Am J Public Health*, 2019, 109(3):445-450. DOI:10.2105/AJPH.2018.304873.
- [39] Plettinckx E, Crawford FW, Antoine J, et al. Estimates of people who injected drugs within the last 12 months in Belgium based on a capture-recapture and multiplier method[J]. *Drug Alcohol Depend*, 2021, 219:108436. DOI: 10.1016/j.drugalcdep.2020.108436.
- [40] 王曼, 林鹏, 赵金扣, 等. 同伴推动抽样法在吸毒人群基数估计中的应用[J]. *中华疾病控制杂志*, 2011, 15(3): 203-206.  
Wang M, Lin P, Zhao JK, et al. Application of respondent-driven sampling in estimating the number of drug users[J]. *Chin J Dis Control Prev*, 2011, 15(3): 203-206.
- [41] 朱晓艳, 康殿民, 廖玫珍, 等. 同伴推动抽样法的应用[J]. *预防医学论坛*, 2007, 13(7): 632-635. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9153.2007.07.027.  
Zhu XY, Kang DM, Liao MZ, et al. The application of respondent-driven sampling[J]. *Prev Med Trib*, 2007, 13(7): 632-635. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9153.2007.07.027.
- [42] Johnston LG, Hakim AJ, Dittrich S, et al. A systematic review of published respondent-driven sampling surveys collecting behavioral and biologic data[J]. *AIDS Behav*, 2016, 20(8):1754-1776. DOI:10.1007/s10461-016-1346-5.
- [43] McLaughlin KR, Johnston LG, Gamble LJ, et al. Population size estimations among hidden populations using respondent-driven sampling surveys: case studies from Armenia[J]. *JMIR Public Health Surveill*, 2019, 5(1): e12034. DOI:10.2196/12034.
- [44] 赵金扣, 马小燕, 王丽艳, 等. 用于难以接近人群的一种新的抽样方法: 同伴推动抽样法(RDS)[J]. *疾病控制杂志*, 2005, 9(6):634-637. DOI:10.3969/j.issn.1674-3679.2005.06.029.  
Zhao JK, Ma XY, Wang LY, et al. A new approach of sampling hard-to-reach population, respondent-driven sampling(RDS)[J]. *Chin J Dis Control Prev*, 2005, 9(6): 634-637. DOI:10.3969/j.issn.1674-3679.2005.06.029.
- [45] Handcock MS, Gile KJ, Mar CM. Estimating the size of populations at high risk for HIV using respondent-driven sampling data[J]. *Biometrics*, 2015, 71(1): 258-266. DOI: 10.1111/biom.12255.
- [46] Heckathorn DD. Respondent-driven sampling: A new approach to the study of hidden populations[J]. *Soc Probl*, 1997, 44(2):174-199. DOI:10.2307/3096941.
- [47] 汤后林, 吕繁. 难以接近人群和隐蔽人群调查研究的抽样方法[J]. *现代预防医学*, 2007, 34(12):2258-2259, 2262. DOI:10.3969/j.issn.1003-8507.2007.12.024.
- Tang HL, Lyu F. Sampling methods for survey on hard-to-reach populations and hidden populations[J]. *Mod Prev Med*, 2007, 34(12): 2258-2259, 2262. DOI: 10.3969/j.issn.1003-8507.2007.12.024.
- [48] Wu JC, Crawford FW, Raag M, et al. Using data from respondent-driven sampling studies to estimate the number of people who inject drugs: application to the Kohtla-Järve region of Estonia[J]. *PLoS One*, 2017, 12(11): e0185711. DOI:10.1371/journal.pone.0185711.
- [49] 李希, 曹卫华. 艾滋病高危人群基数估计方法进展[J]. *中华流行病学杂志*, 2007, 28(11):1138-1140. DOI:10.3760/j.issn:0254-6450.2007.11.023.  
Li X, Cao WH. The progression of methods for estimating the size of populations at risk for acquired immunodeficiency syndrome[J]. *Chin J Epidemiol*, 2007, 28(11): 1138-1140. DOI: 10.3760/j.issn:0254-6450.2007.11.023.
- [50] Wesson P, Reingold A, McFarland W. Theoretical and empirical comparisons of methods to estimate the size of hard-to-reach populations: a systematic review[J]. *AIDS Behav*, 2017, 21(7): 2188-2206. DOI: 10.1007/s10461-017-1678-9.
- [51] 张巧利, 王晓霞, 陈柏芬, 等. 东莞市吸毒人群中艾滋病病毒感染者数量估计[J]. *疾病监测*, 2008, 23(3):153-155. DOI:10.3784/j.issn.1003-9961.2008.03.007.  
Zhang QL, Wang XX, Chen BF, et al. Estimation of the population size of drug abusers and the number of HIV infected drug abusers in Dongguan city[J]. *Dis Surveill*, 2008, 23(3): 153-155. DOI: 10.3784/j.issn.1003-9961.2008.03.007.
- [52] 刘利容, 刘民. 艾滋病高危人群基数估计方法的研究进展[J]. *国外医学·流行病学传染病学分册*, 2005, 32(6): 341-343. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4149.2005.06.008.  
Liu LR, Liu M. Development of methods for estimating the size of sub-population at high risk for HIV/AIDS[J]. *Epidemiol Lemol Fore Med Sci*, 2005, 32(6):341-343. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4149.2005.06.008.
- [53] Chen YH, McFarland W, Raymond HF. Estimated number of people who inject drugs in San Francisco, 2005, 2009, and 2012[J]. *AIDS Behav*, 2016, 20(12): 2914-2921. DOI: 10.1007/s10461-015-1268-7.
- [54] Khalid FJ, Hamad FM, Othman AA, et al. Estimating the number of people who inject drugs, female sex workers, and men who have sex with men, Unguja Island, Zanzibar: results and synthesis of multiple methods[J]. *AIDS Behav*, 2014, 18 Suppl 1: S25-31. DOI: 10.1007/s10461-013-0517-x.