

引用格式:曹馨,李新虎,高丽玲,等多目标多测度数据空间抽样方法,2018,20(10):1381-1387. [Cao X, Li X H, Gao L L, et al. Site selection of multi-objective survey[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(10):1381-1387.] DOI:10.12082/dqxxkx.2018.180130

多目标多测度数据空间抽样方法

曹馨^{1,2},李新虎^{1*},高丽玲¹,刑莉^{1,3}

1. 中国科学院城市环境研究所 中国科学院城市环境与健康重点实验室,厦门市城市代谢重点实验室,厦门 361021;
2. 中国科学院大学,北京 100049;3. 厦门大学环境与生态学院,厦门 361102

Site Selection of Multi-objective Survey

CAO Xin^{1,2}, LI Xinhui^{1*}, GAO Liling¹, XING li^{1,3}

1. Key Lab of Urban Environment and Health, Key lab of urban metabolism of Xiamen, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049; 3. College of the Environment & Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102

Abstract: The social survey questionnaires sometimes are multi-objective, and some objectives are attribute data or category variables. However, traditional spatial sampling theory is primarily used in single-target and non-attribute data. It is not suitable for the investigation required multi-type target objects. A new method based on variability model was proposed in this paper. The different types of variables can be measured by variability model on the spatial variability and used as the basis for spatial stratification to design sampling plan. Depending on the questionnaire about residents' daily travel energy consumption of Xiamen Island and historical data in this study, we calculated the values of variability of samples by the model and get the map of spatial distribution. Contrasted with the map of hierarchical combination of the integrated factors and the map of stratified sampling by experts, it got the value of variability through the pre-investigation, ultimately obtained program of sampling point distribution about the target settlement of Xiamen Island. The results showed that: (1) Contrast to experts layer, the main component layer and combination of factors layer from the perspective of variability values, combination of factors layered approach is more reasonable. This method reflects various factors that affect sampling in spatial distribution plan, which offers solution for the survey involving multiple data category and expands the application scope of "Sandwiches" model. (2) The number and distribution of samples are affected by variance in the sandwiches spatial Sampling. But they are not increased with the increase of variance, the number and the distribution of samples are affected by many factors, the size of the geographical space is one factor. (3) Variability model quantified various types of data about Sampling objectives successfully. In our study, we got more detail sampling plan based on pre-investigation in small range. The sampling accuracy is 0.0002 while sample size is 35. It meets the practical requirements of the survey of Xiamen. The number of samples and the accuracy are controlled in the reasonable range. Not only we saved manpower and material resources, but also, we improved the accuracy of sampling.

Key words: multi-objective sampling; multi-type data; variability; social survey; Xiamen

*Corresponding author: LI Xinhui, E-mail: xhli@iue.ac.cn

收稿日期:2018-03-14;修回日期:2018-07-12.

基金项目:国家自然科学基金项目(41671444)。[**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China, No.41671444.]

作者简介:曹馨(1993-),女,江西南昌人,硕士生,研究方向为城市功能与GIS数据分析。E-mail: xcao@iue.ac.cn

*通讯作者:李新虎(1978-),男,内蒙古人,副研究员,主要从事GIS空间数据分析研究。E-mail: xhli@iue.ac.cn

摘要: 社会问卷调查往往需要针对多目标测度不同类型的数据,而传统的抽样方法主要针对单目标对象,且数据类型为数值型数据。本研究以厦门岛出行调查为例,调查问卷包含了住区特征、居民社会经济状况、就业情况、出行方式、出行目的与时间等方面的指标,提出了以变异度模型为主的新方法。以厦门岛住区居民出行所带来的能耗问题收集的少量先验问卷信息以及历史数据为基础,通过模型表征测度不同类型变量的空间变异性,将其作为空间分层的依据从而完成抽样布点方案,评价精度通过抽样方差进行。结果表明:①综合多种因素分层可以灵活地解决调查中涉及类别数据以及数值型数据的问题,将影响抽样问题的各类型因素体现到样点空间布点方案中,扩大三明治空间抽样的应用范围;②三明治空间抽样各层样点的分布以及容量受层变异度值(相当于方差)的影响,但其样本容量并不是简单随着区域的层变异度值的增大而增大,空间抽样样本容量同时受到多个因素的影响,其地理空间的大小也是其中一个影响因素;③变异度模型成功地量化了各种类型数据,通过少量的预调查得到更详细的抽样方案,其抽样精度为0.0002,样本容量35,满足了问卷调查的目标需求并将抽样样本容量控制在合理的范围之内。

关键词: 多目标抽样;多类型数据;变异度;社会问卷调查;厦门岛

1 引言

据联合国统计,2007年底全球已有超过半数的人口聚集在城市区域内,人类已经进入城市型社会^[1-2],过去的20多年中,中国城市化进程明显加快,大城市中的职住分离,空间错位引发的通勤能耗问题已经引起了国内外学者的广泛关注^[3-11],研究此类社会问题一般采取问卷调查的形式,得到的信息能够更直接地反映问题。但此类问题往往具有复杂性和多元性,由多个因素交互影响形成的,需要针对多个目标进行抽样选点调查,并且涉及多测度类型的数据。目前的抽样理论针对多测度类型的数据、多目标的抽样问题还未很好的解决。现阶段国内已经有了一些针对多目标抽样问题理论和实践方面的成果^[11-19],用于多目标抽样调查主要有国家统计局正在推广的MPPS法以及多目标分层抽样法、多目标平衡抽样法、多目标比率与回归估计法、多目标双重抽样法、多目标双重事后分层抽样法、成本条件下的多目标复合抽样法等。多目标抽样需要平衡调查效率、精度、调查费用等因素,通常通过对调查对象进行分层来提高抽样的精度、效率,分层是否合理决定着多目标分层抽样的抽样效果的优劣^[11]。现有的传统抽样理论适用于数值数据的统计检验,一般对方差、均值、相关系数等参数进行检验,但是在实际抽样过程中缺乏针对类别数据和数值进行综合量化表达的简单易操作的模型,如何在实践中提高抽样的效率、解决实际抽样问题尚不成熟。

由于对厦门岛居民的出行能耗调查问卷中调查问卷中涉及多个目标,其涉及的问卷信息类型不仅有传统的数值型信息,也有涉及被调查者社会背景类别的数据信息,如被调查对象的受教育程度、

职业、性别等。针对包含多类型数据的多目标抽样,如何综合量化类别数据和数值型数据,并将其作为分层的依据,最终通过空间抽样模型得到调查样点分布方案是研究此类问题的前提。此类问题在目前的科研成果中还没有得到解决,因此如何在现有研究的基础上对多目标抽样技术进行系统的研究和改进,建立模型将类别数据和传统的数值型数据综合量化,表达作为分层的依据,提高其科学性和实用度已经成为人们急需解决的问题。

本文提出了变异度模型,运用其来表征测度不同类型变量的空间变异性,并将其作为空间分层的依据,该模型将多类型数据的变异度量化的概况,且对数据本身的分布不做要求,简化了抽样的分层依据。本文主要以厦门岛住区居民通勤方面的先验知识信息为基础,利用模型计算各分层层内的变异度值,将变异度值作为重要的参数进行空间抽样得到最终的调查样本点分布方案。

2 多目标空间抽样变异度模型

本文将变异度定义为一个区域的复杂程度,主要由2部分组成:数值变异度和类别变异度。数值变异度用标准差表示,类型变异度用Simpson's指数^[20]表示。Simpson's指数描述物种在群落中的情况,它是把物种数和均匀度结合起来的一个统计量^[21]。本模型中通过Simpson's指数描述抽样调查中某一目标涉及到的类别数据的多样性;标准差主要是表述各数据偏离平均数的距离(离均差)的平均数,能反映一个数据集的离散程度,其针对传统抽样调查中的数值型数据,变异度模型通过计算被调查区域内各类型数据的多样性来体现被调查区域的复杂性,变异度值越大代表调查区域越复杂,其能够综合量

化描述调查数据中的类别数据与数值数据。

2.1 不同测量类型数据度量

构建变异度模型主要涉及以下2个基本公式:类别数据变异性度量使用Simpson's指数(式(1)),非类别数据变异性使用标准差(式(2))。

$$D = 1 - \sum_{i=1}^c (N_i/N)^2 \tag{1}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{N-1}} \tag{2}$$

式中: c 表示样本类别数; N_i 表示第*i*类样本的数量; N 表示样本总量; X_j 表示第*j*个非类别变量的值; \bar{X} 表示所有非类别变量的平均值。

2.2 多目标变异性度量

由于实际多目标的抽样调查需要,将多目标变异度定义为:非类别变量变异度与类别变量的变异度及其对应权重的乘积。为了避免当抽样调查目标中没有类别数据,变异度为0的特殊情况,最终的变异度模型在结合非类别变量变异度度量值——方差与类别变量变异度度量值——Simpson's指数时作了简单的改进,即计算类别变异度时,在Simpson's指数上加1,当没有类别数据时,改进过的Simpson's指数部分就为1。根据度量数据的式(1)、(2)推导出多目标变异度(式(3))。

$$M = \sqrt{\sum_{i=1}^L Q_i S_i^2 \times \left(\sum_{k=1}^P Y_k (D_k + 1) \right)} \tag{3}$$

即,

$$M = \sqrt{\sum_{i=1}^L Q_i \frac{\sum_{j=1}^N (X_{i,j} - \bar{X}_i)^2}{N-1} \times \left(\sum_{k=1}^P Y_k \left[1 - \sum_{l=1}^{c_k} (N_{k,l}/N) \right]^2 + 1 \right)}$$

式中: M 表示多目标变异度; L 表示非类别变量的个数; P 表示类别变量的个数; N 表示样本量; \bar{X}_i 表示第*i*个非类别变量的样本均值; $X_{i,j}$ 表示在非类别变量*i*中第*j*个的值; c_k 表示第*k*个类别变量的类别数; $N_{k,l}$ 表示第1个类别变量在第*k*种类别出现的频数; Q_i 、 Y_k 为变量所对应的权重值; S_i 表示第*i*个变量的标准偏差; D_j 表示第*j*个离散变量的Simpson's指数。

2.3 多目标变异度模型在抽样调查选点中的应用流程

本研究通过将变异度模型与三明治空间抽样模型相结合,扩展了三明治空间抽样模型的应用

范围,解决实际抽样中遇到无法共同处理类别数据和数值型数据的问题,并在厦门岛住区抽样问题上得到应用。研究首先进行资料收集,通过层次分析法确定选取的各影响因素权重,利用变异度模型计算各层变异度值。在三明治空间抽样中运用综合因素分层图作为知识层,将变异度值替代方差作为抽样中的重要参数,得到抽样样点分布图(图1)。需要说明的是,变异度由标准差部分与辛普森部分相乘得到,辛普森指数本身是一个概率,因此变异度与标准差在量纲上是统一的,同时能够反映一个或多个指标在空间上的变化程度或复杂程度。

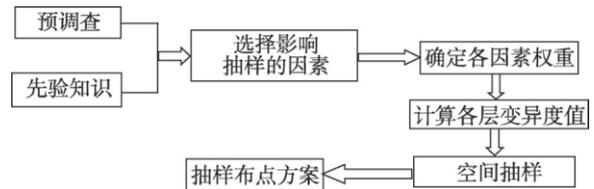


图1 变异度模型在抽样中的应用流程

Fig. 1 The sampling process based on variability model

3 研究区概况与数据源

3.1 地区概况

厦门市位于福建省东南部,北纬24°23'~24°54'、东经117°53'~118°26',厦门市由厦门本岛、鼓浪屿及其众多小岛屿和同安、集美、海沧、翔安等组成,陆地面积有1699.39 km²,海域面积有300多km²。其中,厦门岛面积约为132.5 km²,是福建省第四大岛屿,全岛海岸线约为234 km,如图2所示。

3.2 数据来源及处理

研究涉及到的分街道人口统计数据来源于各街道统计资料;基准地价统计数据来自于厦门市国土资源与房产管理局;厦门市坡度、等高线数据则来自于厦门市国土资源局信息中心。预调查问卷包括被调查者的个人社会经济信息,主要是职业、性别、目前的居住类型(自购房或租房)、上班购物出行方式以及被调查者的上班、购物出行时间等,采用居住区内以及周边街头随访的方式,调查人数220人,回收有效问卷206份。针对厦门岛住区居民能耗问题,随机抽取了11个住区点进行问卷调查预调研,问卷主要涉及影响抽样的8个因素:居住类型、性别、职业、上班出行方式、购物出行方式、家庭



图2 厦门区划以及地理位置图
Fig. 2 Location map of Xiamen

成员数、上班出行耗时、购物出行耗时。利用层次分析法软件yaahp,通过一致性检验,采用判断矩阵集结中的加权几何平均算法得到影响抽样的8个因素所占的权重值(表1)。

3.3 变异度的计算

根据厦门岛的实际情况,选择地形、人口密度分布和居住基准地价作为影响分层的3个因素,地形类型根据坡度和等高线进行划分,坡度小于5°,等高线值小于50 m的区域为平坦地势,其余为起伏

较大区域;人口密度分级时通过对各街道2008年人口数量调查统计,按照数据情况将每种类型距离大约设定在5000人/km²;研究区域2008年的居住用地基准价格在2000~5000元/m²,参考关于基准地价的应用分析的研究^[22],将居住用地基准地价分为5个等级,各因素的空间分级分布如图3所示。

在进行综合分层时,由于人口密度分布图与地形图相互吻合,可将二者叠加得到人口密度与地形图;然后考虑某一人口密度与地形类型所含地价类型数量来分层,所含的地价类型数量越多则情况越复杂,分层的等级越高,划分依据如表2所示,最后适当结合实际情况,利用地图代数运算进行整理、重分类^[23]得到厦门岛综合因素分层图(图4)。

问卷调查数据经过初步筛选以及无量纲化等处理,通过变异度模型计算综合因素分层图中各层的变异度值(表3)。

3.4 基于变异度计算的空间抽样

“三明治”空间抽样模型由王劲峰^[15]提出,模型利用了抽样对象在空间上的变异特征,考虑了自然和资源环境领域研究调查中数据具有相关性的特点,同时根据抽样对象特征进行分层,采用分层抽样,在最后结果表达时,通过均值和误差传递,能够在调查者感兴趣的区域内汇报结果。这种方法即利用了抽样对象的自然属性,也考虑到实际工作中需要根据行政区域汇报统计结果的现状^[24]。模型

表1 影响抽样的各因素权重值

Tab. 1 Weight of factors affected sampling

因素	类别数据					数值数据		
	居住类型	性别	职业	上班出行方式	购物出行方式	家庭成员数	上班出行耗时	购物出行耗时
权重	0.18	0.15	0.14	0.12	0.09	0.13	0.11	0.08

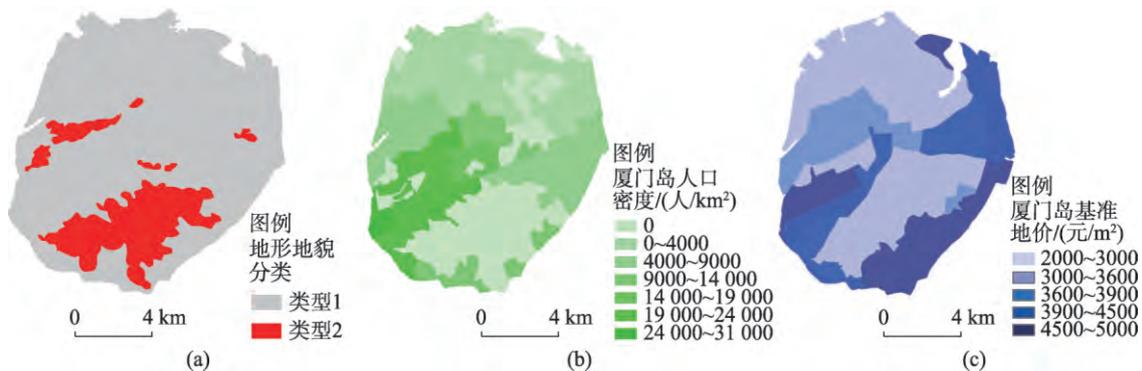


图3 影响因素分层图

Fig. 3 Stratified map of influencing factor

表2 综合因素分层表

Tab. 2 Stratified map of combination factors

人口密度与 地形分层	基准地价层				
	1	2	3	4	5
0	1	1	1	1	1
1	2	-	-	2	-
2	2	-	-	-	2
3	-	-	3	-	3
4	4	-	4	4	-
5	-	-	4	4	-
6	5	-	5	5	5

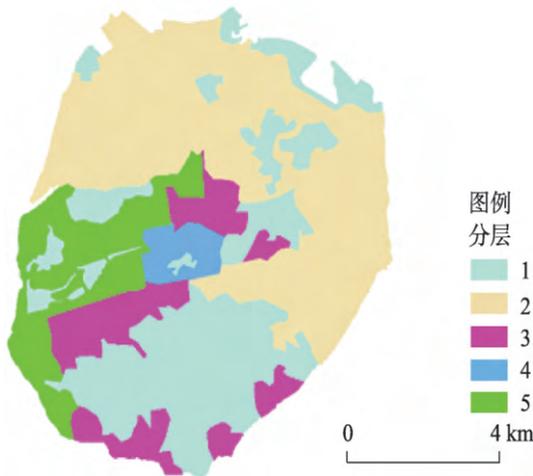


图4 综合因素分层

Fig. 4 Map of stratified combination factors

表3 各分层图中变异度值

Tab. 3 Variability in stratified combination factors

分层级数	综合因素分层变异度
1	0
2	0.11
3	0.11
4	0.12
5	0.12

注：变异度为“0”表示特殊地形(山或者湖泊)，人口几乎为0此区域不适合问卷调查

主要由3部分组成：① 抽样层：如连续的图片或者遥感图像；② 报告单元层，通常是国家或省市的行政区划界限图；③ 知识层，是指被监测的区域根据变量的一致性所划分的分层图。抽样层、报告单元以及知识层相互重叠形成一个综合的空间抽样布局^[25]。模型可用于大规模的自然资源，环境监测，经济、人口调查等领域。

本文以预调查以及调研得到的信息数据为基

础，从变异度着手选择综合因素分层图作为“三明治”空间抽样中的知识层，利用提出的变异度模型计算得到综合因素分层中各层的变异度值替代抽样中的方差进行“三明治”空间抽样。变异度模型与“三明治”空间抽样模型的结合，使“三明治”空间抽样模型不仅能针对传统的参数数据，还能利用变异度模型计算多类型数据(类别数据、数值型数据)的变异度值，抽样得到各层的样本容量，其能灵活解决调查中涉及类别数据以及数值型数据的问题，将影响此抽样问题的各类型因素体现到的样点空间布点方案中，扩大其应用范围。

4 结果分析

通过“三明治”空间抽样模型与变异度模型的结合，抽样精度使用相对标准误表示，抽样得到精度为0.0002，样本量为35的抽样样点分布，如图5所示。住区样点分布抽样精度为0.0002，总样本量35，第1层样本量为1；第2层样本量为10；第3层样本量为7；第4层样本量为3；第5层样本量为14。其空间抽样样点的总量受层方差(变异度值)的影响，随着层方差(变异度值)的增大样本容量也增大。

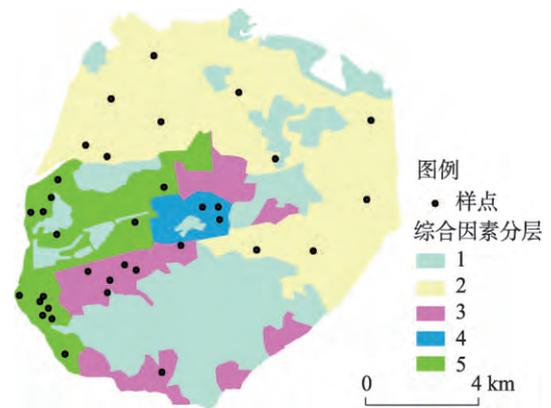


图5 住区样点分布图

Fig. 5 Distribution map of samples settlements

本次抽样通过变异度模型与“三明治”空间抽样模型的结合，在之前较小范围的预调查基础上，得到更详细的抽样样本方案，既节约了大量的人力物力，也提高了抽样的准确性。方案的抽样精度为0.0002，样本容量为35，满足了厦门住区问卷调查的实际要求并将抽样样本容量控制在合理的范围之内。

5 结论与讨论

随着对于住区居民通勤能耗方面的研究逐步深入,解决多目标多类型数据的抽样空间布点问题是实际抽样调查的客观要求。本文以厦门岛住区居民通勤问题抽样调查为例,通过对厦门岛住区居民相关的先验信息为基础进行分析抽样。而多目标抽样,是一个普遍存在的抽样需求,对于一个复杂问题的研究,需要设置涉及不同因素的许多项指标,这些指标的数据类型有可能包含类别数据和数值数据,在这种情况下,如何来进行样点的选取,既保证抽样的精度,也可以最大程度上节约成本。从这个角度上讲,本文提出的变异度模型,在抽样调查方面会有更加广泛的应用前景。此外,变异度指数作为一种涉及多测度数据情况下对复杂度的度量指标,也可以独立使用。

本抽样方案根据抽样调查的多个目标以及区域先验知识,确定调查的相关影响因素及其权重,通过变异度模型计算区域的变异度选择综合因素分层方法,通过“三明治”空间抽样模型得到详细的样点空间分布方案,解决了抽样调查中多类型数据的问题。需要指出的是,居民的出行方式以及性别、职业等信息只是影响居民通勤问题多种因素中的一部分,居民的收入等其他因素也存在着影响,可能在确定影响因素时有不足。研究多侧重于直接的应用,没有对抽样效率(抽样精度、抽样比)的各种影响因子(抽样格网大小、抽样层数等)进行综合比较分析,揭示各种因子对抽样效率影响的内在规律。案例应用初步地证实了变异度模型结合三明治抽样模型进行复杂情况下样点选取的可行性,但如何更有效地结合,在精度验证方面给出更合理的方案,需要进一步地理论和案例验证。

参考文献(Reference):

- [1] Zhao J Z, Dai D B, Lin T, et al. Rapid urbanization, ecological effects and sustainable city construction in Xiamen [J]. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 2010,17(4):271-272.
- [2] 崔胜辉,李方一,于裕贤,等.城市化与可持续城市化的理论探讨[J].*城市发展研究*,2010,17(3):17-21. [Cui S H, Li F Y, Yu Y X, et al. Theoretical thinking on urbanization and sustainable urbanization[J]. *Urban Development Studies*, 2010,17(3):17-21.]
- [3] 吝涛,李新虎,张国钦,等.厦门岛城市空间扩张特征及其影响因素分析[J].*地理学报*,2010,65(6):715-726. [Lin T, Li X H, Zhang G Q, et al. Dynamic analysis of island urban spatial expansion and its determinants: A case study of xiamen island[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010,65(6): 715-726.]
- [4] 刘志林,张艳,柴彦威.中国大城市职住分离现象及其特征——以北京市为例[J].*城市发展研究*,2009,16(9):110-114. [Liu Z L, Zhang Y, Chai Y W. Home-work Separation in the context of institution and spatial transformation in urban China: Evidence from Beijing household survey data[J]. *Urban Development Studies*, 2009,16(9): 110-114.]
- [5] 宋金平,王恩儒,张文新,等.北京住宅郊区化与就业空间错位[J].*地理学报*,2007,62(4):387-396. [Song J P, Wang E R, Zhang W X, et al. Housing suburbanization and employment spatial mismatch in Beijing[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007,62(4):387-396.]
- [6] Yang J W. Transportation implications of land development in a transitional economy: Evidence from housing relocation in Beijing[J]. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2006,1954(1):7-14..
- [7] 冯健,周一星.郊区化进程中北京城市内部迁居及相关空间行为——基于千份问卷调查的分析[J].*地理研究*, 2004,23(2):227-241. [Feng J, Zhou Y X. Intra-urban migration and correlative spatial behavior in Beijing in the process of suburbanization: Based on 1000 questionnaires [J]. *Geographical Research*, 2004,23(2):227-241.]
- [8] 李强,李晓林.北京市近郊区大型居住区居民上班出行特征分析[J].*城市问题*,2007(7):55-59. [Li Q, Li X L. Analysis of characteristics of residents' working-trip lived in Beijing inter-suburb residence[J]. *Urban Problems*, 2007(7):55-59.]
- [9] Wang D G, Chai Y W. The job-housing relationship and commuting in Beijing, China: The legacy of dan wei[J]. *Journal of Transport Geography*, 2009,17:30-38.
- [10] 张燕,柴彦威.基于居住区比较的北京城市通勤研究[J].*地理研究*,2009,28(5):1327-1330. [Zhang Y, Chai Y W. Characteristics of commuting pattern in Beijing: Based on the comparison of different urban residential areas[J]. *Geographical Research*, 2009,28(5):1327-1330.]
- [11] 肖玲.多主题分层抽样的分层技术[J].*统计研究*,1994(6): 74. [Xiao L. Stratified technique in multi-topic stratified sampling[J]. *Statistical Research*, 1994(6):74.]
- [12] 连健,李小娟,宫辉力,等.GIS支持下的空间分层抽样方法研究——以北京市人均农业总产值抽样调查为例[J].*地理与地理信息科学*,2008,24(6):30-34. [Lian J, Li X J, Gong H L, et al. Research of spatial stratified sampling

- techniques based on GIS: Take the per capita agricultural total output value sampling survey of Beijing as an example[J]. *Geography and Geo-information Science*, 2008,24(6):30-34.]
- [13] 周自翔,任志远.基于GIS的不同地貌类型区人口压力等级研究——以延安市为例[J].*干旱区域研究*,2005,22(2):274-276. [Zhou ZX, Ren Z Y. GIS-based study on the grades of population pressure in the different physiognomy subregions: A case study in Yan'an region[J]. *Arid Zone Research*, 2005,22(2):274-276.]
- [14] 曹志冬,王劲峰,李连发,等.地理空间中不同分层抽样方式的效率与优化策略[J].*地理科学进展*,2008,27(3):152-156. [Cao Z D, Wang J F, Li L F, et al. Strata efficiency and optimization strategy of stratified sampling on spatial population[J]. *Progress in Geography*, 2008,27(3):152-156.]
- [15] 李连发,王劲峰.地理数据空间抽样模型[J].*自然科学进展*,2002,12(5):545-547. [Li L F, Wang J F. Spatial sampling model of geography data[J]. *Progress in Natural Science*, 2002,12(5):545-547.]
- [16] 冯士雍.抽样调查应用与理论中的若干前沿问题[J].*统计与信息论坛*,2007,22(1):5-10. [Feng S Y. Some hotspot issues on the application and theory of survey sampling[J]. *Statistics & Information Forum*, 2007,22(1):5-10.]
- [17] 赵雪慧.抽样调查理论和方法的最新进展[J].*统计与信息论坛*,2003,18(5):24-30. [Zhao X H. New progress in theory and methodology of survey sampling[J]. *Statistics & Information Forum*, 2003,18(5):24-30.]
- [18] 王劲峰,李连发,葛咏,等.地理信息空间分析的理论体系探讨[J].*地理学报*,2000,55(1):92-95. [Wang J F, Li L F, Ge Y, et al. A theoretic framework for spatial analysis[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000,55(1):92-95.]
- [19] 林才生.多目标多层次复合抽样设计研究[D].厦门:厦门大学,2006. [Lin C S. A design on multi-object & multi-level composite sampling[D]. Xiamen: Xiamen University, 2006.]
- [20] 张金屯.数量生态学[M].北京:科学出版社,2005. [Zhang J T. *Quantitative ecology*[M]. Beijing: Science Press, 2006.]
- [21] 吴甘霖.生态系统多样性的测度方法及其应用分析[J].*安庆师范学院学报*,2004,10(3):19-22. [Wu G L. The measurement methods and application evaluation of ecosystem diversity[J]. *Journal of Anqing Teachers College (Nature Science)*, 2004,10(3):19-22.]
- [22] 杨吾扬.区位论原理[M].兰州:甘肃人民出版社,1989:22. [Yang W Y. *Principle of location theory*[M]. Lanzhou: Gansu People Press, 1989:22.]
- [23] 高丽玲,李新虎,王翠平,等.空间抽样的理论方法与应用分析——以厦门岛问卷调查为例[J].*地球信息科学学报*,2010,12(3):358-364. [Gao L L, Li X H, Wang C P, et al. Survey site selection based on the spatial sampling theory: a case study in xiamen island[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2010,12(3):358-364.]
- [24] 江成晟,王劲峰,曹志冬.地理空间抽样理论研究综述[J].*地理学报*,2009,64(3):368-369. [Jiang C S, Wang J F, Cao Z D. A review of Geo-spatial sampling theory[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009,64(3):368-369.]
- [25] Wang J, Liu J, Zhuan D. Spatial sampling design for monitoring the area of cultivated land[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002,23(2):263-284.