

## 海口市森林资源调查空间平衡抽样研究

李苑菱, 陈宗铸, 雷金睿, 陈小花, 杨琦, 吴庭天

(海南省林业科学研究所, 海口 571100)

**摘要:**传统抽样方法因存在适应性弱、空间相关性高等缺陷, 越发不适用我国的森林资源调查。随着调查精度要求提高和社会经济条件变化, 空间平衡抽样(SBS)的理论与方法应运而生。以海口市为研究案例, 对空间平衡抽样与传统抽样方法进行抽样精度、抽样效率和空间相关性等性能指标的比较分析。研究表明: 1) 在海口市各地类面积模拟抽样中, 抽样精度从高到低依次为空间平衡抽样 > 系统抽样 > 简单随机抽样; 2) 在模拟抽样性能评价中, 空间平衡抽样的空间相关性、抽样精度和抽样效率均优于简单随机抽样、系统抽样。通过研究, 以期为森林资源调查探索出更为经济适用的方法途径, 为提高森林资源调查效率提供科学依据。

**关键词:**海口市; 空间平衡抽样; 传统抽样方法; 森林资源调查; ArcGIS

**中图分类号:**S757.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-6622(2019)02-0047-07

**DOI:**10.13466/j.cnki.lyzyl.2019.02.007

## Study on Spatial Balance Sampling of Forest Resources Survey in Haikou

LI Yuanling, CHEN Zongzhu, LEI Jinrui, CHEN Xiaohua, YANG Qi, WU Tingtian

(Hainan Provincial Forestry Science Research Institute, Haikou 571100, Hainan, China)

**Abstract:** At present, the sampling method of forest resources survey in China has some disadvantages, such as poor adaptability and strong spatial correlation. With the improvement of investigation accuracy and the change of social and economic conditions, the theory and method of spatial balance sampling (SBS) came into being. In this paper, the performance indexes of sampling accuracy, sampling efficiency and spatial correlation of 3 different sampling schemes of spatial balance sampling and traditional sampling are compared and analyzed by taking Haikou as the research case. The results show that: 1) in the simulated sampling of various areas of Haikou, the sampling accuracy from high to low is the spatial balance sampling > system sampling > simple random sampling; 2) in the simulated sampling performance evaluation, the spatial correlation, sampling accuracy and sampling efficiency of spatial balance sampling are better than simple random sampling and system sampling. This study aims to explore more economical and applicable methods for forest resource survey, in order to provide scientific basis for forestry development.

**Key words:** Haikou city, spatial balance sampling, traditional sampling methods, forest resources survey, ArcGIS

收稿日期: 2019-01-24; 修回日期: 2019-04-18

基金项目: 海南省森林资源年度监测平衡抽样方法研究(SQ2017JSKF0035);

国家重点研发计划子课题(2016YFD0600601-4)

作者简介: 李苑菱(1992-), 女, 海南澄迈人, 助理工程师, 硕士, 研究方向: 森林资源监测。Email: liyuanlinghn@163.com

通讯作者: 陈宗铸(1977-), 男, 海南海口人, 副研究员, 硕士, 研究方向: 森林资源监测。Email: chenzongzhu@foxmail.com

## 0 引言

森林资源作为陆地生态系统的构建主体,在林业可持续发展中是不可或缺的存在,也是社会经济发展的基础与根本<sup>[1]</sup>。因此,定期进行森林资源调查,了解森林资源的增减动态变化,对森林资源的保护与发展利用具有重要意义。但因受到经济条件和时间等因素的制约,目前仍以抽样调查为主要技术手段<sup>[2]</sup>。我国在20世纪50年代后,才逐步开展全国的森林资源调查工作。在50年代初期,调查主要以经纬仪、罗盘仪等测量工具为技术手段;50年代中期时创建了以目测调查为主,航空拍摄为辅的森林调查技术体系,此后还引进角规测树技术。而到60年代后,国外抽样调查技术方法的引进也促进了我国森林调查技术体系的革新与突破<sup>[3-4]</sup>,并在70年代后期逐渐趋于完善<sup>[2]</sup>。然而随着社会经济条件发生变化,我国的森林资源调查内容的增加和调查精度要求的提高<sup>[5]</sup>,传统抽样方法的局限性也越发突出。传统抽样方法在森林调查中具有空间关联性较强、工作量大以及无法进行多方案模拟试验分析等不足,因此,设计研制出具有严格统计学基础、低成本高效率、适应性强的抽样方法及其模拟软件已成为林业工作者的一项重要研究内容。

由于森林资源调查因子中,多是区域变化变量,而不是纯随机变量,因此空间抽样技术,这种兼具考虑空间相关性的理论方法应运而生<sup>[6]</sup>。空间平衡抽样(Spatial Balanced Sampling, SBS)在1997年由美国Stevens提出<sup>[7]</sup>,在算法设想上不仅结合了传统抽样的优点,还强调了在抽取样本时的空间随机等概和均匀分布,并尽可能过滤无反应样本单元,提高抽样精度。空间平衡抽样在国外仍处于理论探索开发阶段<sup>[8-13]</sup>,而有关空间平衡抽样的理论与应用研究在国内也尚处于起步阶段。李明阳等<sup>[14-18]</sup>在空间平衡抽样上展开了大量的研究,如在森林资源调查、森林生物多样性监测及野生哺乳动物调查等多方面应用中,对于空间平衡抽样方法的原理与应用展开了相关的探讨。空间平衡抽样以GIS为技术手段,在抽样框创建、可视化、定位寻找等方面具有显著优势,为森林资源抽样调查提供了

一种新型的方式。

本文以海口市作为研究对象,以GIS平台为技术支撑,以2017年海口市Landsat-8 OLI-TIRS遥感影像数据和同期海口市森林资源二类调查本底数据为主要信息源,对遥感图像进行校正、融合等预处理步骤,按照森林调查类型分类标准,获取各类型的准确资料。通过简单随机、系统、空间平衡3种不同抽样方法,提取样本信息,并对研究区域的地类信息进行参数估算。在此基础上对不同抽样结果的抽样精度、抽样效率和空间相关性等性能评价指标进行比较分析,以期森林资源调查探索出更为经济适用的抽样方法。

## 1 研究区域概况

海口市位于海南岛东北部,地理坐标 $19^{\circ}32' \sim 20^{\circ}05'N$ , $110^{\circ}10' \sim 110^{\circ}41'E$ ,是海南省政治经济文化中心。下辖4个区21个街道22个镇207个社区245个行政村<sup>[19]</sup>。北临琼州海峡,东邻文昌,南接定安,西邻澄迈。海口市陆地面积 $2\,284.49\text{km}^2$ ;地形西南高东北低,以滨海平原地貌为主,海拔较低,马鞍岭为隆起最高点;全年日照充足,气候宜人,年均气温 $24.2^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量 $2\,067\text{mm}$ ,年均蒸发量 $1\,835\text{mm}$ <sup>[20]</sup>;植被类型丰富多样,其中,天然植被主要有滨海红树林、稀树灌木、稀树草原、热带滨海沙生等群落,人工植被则主要有桉树(*Eucalyptus robusta*)、橡胶(*Hevea brasiliensis*)、木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)、椰子林(*Cocos nucifera*)等。全市林地面积总共有 $100\,327.20\text{hm}^2$ ,活立木蓄积量为 $2\,720\,445\text{m}^3$ ,具有天然林资源较少,商品林比重高,热带经济林优势突出,优势树种分布具明显区域性,森林树种较为单一的林地特征。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源与预处理

2017年海口市森林资源二类调查数据来源于海口市林业局。按林地分类标准,分为有林地、疏林地、灌木林地、未成林造林地、苗圃地、无立木林地、宜林地、非林地等8个地类(图1(a)),根据矢量数据统计各地类的面积百分比。

2017年海口市 Landsat-8 OLI-TIRS 遥感影像数据来源于美国地质调查局数据中心 (<https://glovis.usgs.gov/>), 轨道号为 p124/r46, 全色波段分辨率为  $15\text{m} \times 15\text{m}$ , 多光谱波段分辨率为  $30\text{m} \times 30\text{m}$ 。以海口市行政界线为掩膜, 裁剪获得研究区域遥感影像, 并经过校正、融合和彩色变换等预处理后, 运用 ArcGIS 10.2 的栅格计算器生成研究区域归一化植被指数(NDVI)栅格图, 作为空间平衡抽样包含概率图层的输入信息源, 空间分辨率  $30\text{m}$ <sup>[21]</sup>。计算公式为:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

式中:  $NIR$  表示近红外波段,  $R$  表示可见光红波段。

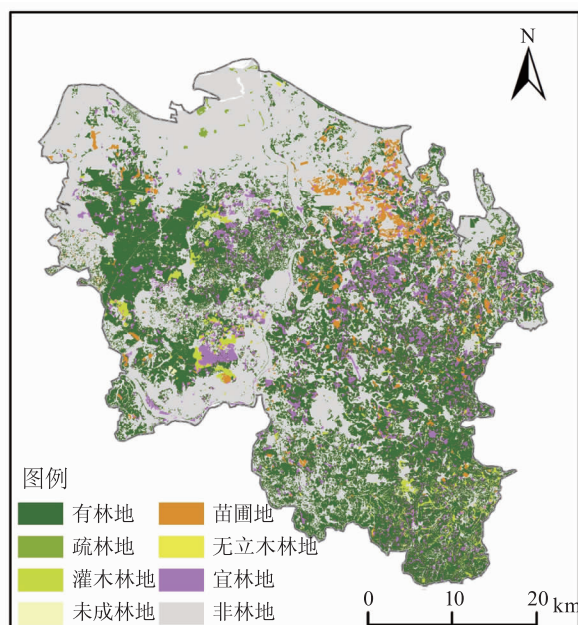
## 2.2 抽样方法实现

在2013年的海南省国家森林资源连续清查(一类调查)中采取系统抽样的方式以  $4\text{km} \times 3\text{km}$  间距网格进行布样调查, 其中在海口市内共布设185个固定样地。本文为了研究系统抽样、随机抽样和空间平衡抽样等3种方法的性能, 样本容量均抽取185个样点进行比较分析, 其抽样样本的实现分别采取以下方法:

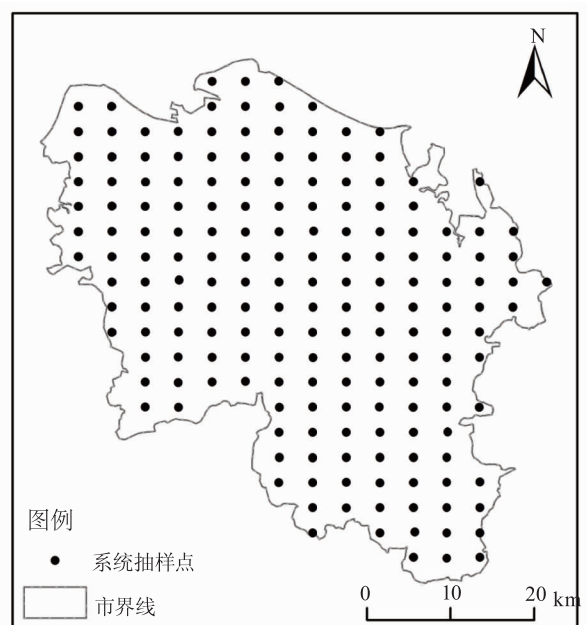
1) 传统抽样。2种传统抽样方法均利用 ArcGIS

平台外挂的 Hawth's Tools 分析工具进行抽样(图1(b)、图1(c))<sup>[22]</sup>。

2) 空间平衡抽样。目前国际上通用的算法有2种: GRTS 和 RRQR<sup>[3,23]</sup>。研究主要采用了 RRQR 算法, 其算法设计的步骤为: a. Morton 二维编址。将区域划分为4个大小一致的板块并分别编码为1—4, 为  $A_1$  层;  $A_1$  层中每一板块再同样划分成4个板块并编码生成  $A_2$  层; 由此递归下去直至产生  $A_n$  层, 并对  $A_1$ — $A_n$  层中的每一板块进行分层编址。b. 四分递归排序。即将每一板块的 Morton 编址按顺序逐一转换成一维线性地址, 编码为  $B(0-n)$ 。c. Morton 反向编址。将开头生成的每一板块中的 Morton 地址的顺序颠倒, 重新编址, 并在此基础上同时进行反向 Morton 排序, 转换成反向一维线性地址, 编码为  $B'(0-n)$ 。d. 增加抽样随机成分, 加入包含概率栅格层, 生成平衡抽样样本点(图1(d))<sup>[22,24]</sup>。对反向 Morton 地址进行随机排列, 保证抽样样本的空间随机性; 加入包含概率栅格图层, 并结合反向 Morton 排序栅格图层进行过滤运算, 使无反应样本单元的出现度大大降低; 经过滤后的栅格图层再进行随机抽样, 便可产生空间平衡抽样方案。RRQR 算法是在 ArcGIS 平台上通过 Python 语言编程实现。



(a)海口市森林资源分布图



(b)系统抽样示意图

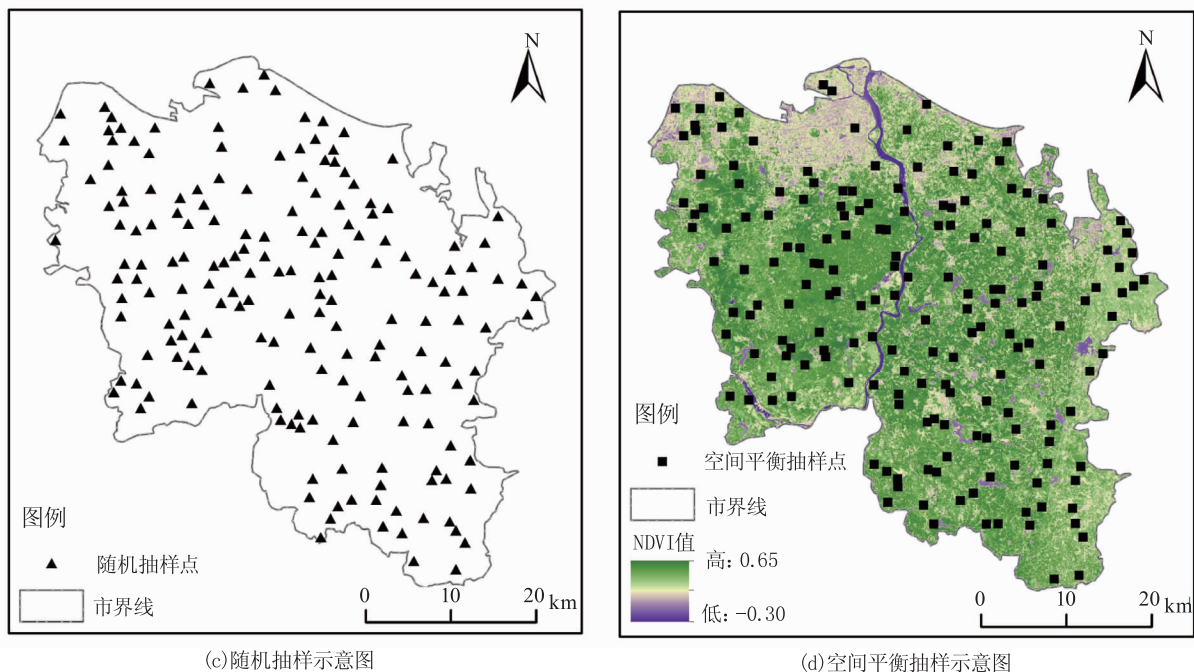


图1 抽样结果示意图

Fig. 1 Diagram of sampling results

### 2.3 抽样评价指标

针对不同抽样方法的性能评价,研究选取了空间关联性、抽样效率和抽样精度来作为评价指标<sup>[25-26]</sup>。空间关联性选取空间自相关系数Moran's  $I$  (简称  $I$ )、 $Z$  值来衡量;抽样效率选用 NDVI 均值来衡量,均值越大,抽样效率越高;抽样精度则采用 NDVI 变异系数来衡量,变异系数越大,抽样精度越低。

为评价样点的空间关联特征和聚集性,以样点的 NDVI 值为数据源进行分析。3 种抽样方法中的样点 NDVI 值借助 ArcGIS 进行提取,空间自相关指数Moran's  $I$  利用 ArcGIS 空间分析模块完成计算<sup>[22]</sup>。计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})} \quad (2)$$

式中: $n$  表示空间单元容量, $x_i$  和  $x_j$  表示  $x$  在  $i$  单元和  $j$  单元的值, $w_{ij}$  表示相邻权重矩阵。

在 3 种抽样生成样点的基础上,分别以样点为圆心,生成半径为 14.57m 的样圆 (面积 666.67m<sup>2</sup>),与海口市森林资源二类调查数据叠加,得到每个样圆的各地类面积。统计分析 3 种抽样方法的海口市各

地类的面积百分比,并与实际二类调查成果进行比较,同时计算调查精度<sup>[27-28]</sup>,计算公式为:

$$Pc = 1 - [ |s - a| / a ] \quad (3)$$

式中: $s$  为各抽样方法获得的各地类面积, $a$  为二类调查中的各地类面积。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同抽样调查方法精度分析

从表 1 可以看出,因研究区内疏林地、未成林造林地和无立木林地面积占比很少,3 种抽样调查方法中的样本点主要集中分布在有林地、灌木林地、苗圃地和宜林地这 4 种类型中。3 种不同抽样方法的总体平均精度从高到低依次为空间平衡抽样 (95.86%) > 系统抽样 (88.04%) > 随机抽样 (77.19%),空间平衡抽样的精度最高,随机抽样的精度最低。从海口市各地类类型面积比例与二类调查数据相比较来看,3 种不同抽样方法的调查精度趋势同样表现为空间平衡抽样最高,随机抽样最低。随机抽样虽简单易行,但样本点空间易分布不均,导致了较低的精度;系统抽样虽保证了样本点

的均匀分布,但也存在抽样误差不能合理计算和调查因子的周期性变化等2点缺陷,因此精度居中;空

间平衡抽样则结合了两者的优点,使样本空间格局与总体空间格局具有近似型,因而精度较为理想。

表1 不同地类抽样方法精度分析

Tab. 1 Accuracy analysis of sampling methods in different classes

%

森林类型	抽样调查各地类面积比			二类调查 各地类面积比	调查精度		
	系统抽样	随机抽样	空间平衡抽样		系统抽样	随机抽样	空间平衡抽样
有林地	77.21	74.76	74.49	74.17	95.90	99.20	99.57
疏林地	—	—	—	0.25	—	—	—
灌木林地	4.38	2.24	4.19	3.98	89.95	56.28	94.72
未成造林地	—	—	—	0.35	—	—	—
苗圃地	4.37	4.59	6.58	6.02	72.59	76.25	90.70
无立木林地	—	—	—	0.26	—	—	—
宜林地	14.04	18.42	14.75	14.98	93.72	77.04	98.46
合计/平均值	100	100	100	100	88.04	77.19	95.86

### 3.2 不同抽样结果性能比较分析

从表2可知,从高到低依次排序:空间相关性结合 Moran's  $I$  值和  $Z$  值来看,趋势为系统抽样 > 随机抽样 > 空间平衡抽样;抽样精度趋势为空间平衡抽样(0.311 9) > 系统抽样(0.392 0) > 随机抽样(0.422 3);抽样效率趋势为空间平衡抽样(0.408 9) > 系统抽样(0.383 2) > 随机抽样(0.377 3)。总体来看,系统抽样空间相关性最高、抽样效率和抽样精度居中;随机抽样空间相关性较高,抽样效率与抽样精度最低;空间平衡抽样的抽样效率、精度及空间相关在3种方法中均属最优。空间平衡抽样主要强调了在抽取样本时的空间随机等概和均匀分布,并尽可能过滤无反应样本单元,从而使抽样精度和效率大幅提高。因此,与传统抽样方法相比,空间平衡抽样优势更为突出。

表2 不同抽样结果性能分析

Tab. 2 Performance analysis of different sampling results

抽样方法	抽样效率	抽样精度	空间关联性	
			Moran's $I$	$Z$ 值
系统抽样	0.3832	0.3920	0.2202	4.0487
随机抽样	0.3773	0.4223	0.0928	3.0042
空间平衡抽样	0.4089	0.3119	0.0933	2.0065

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

本文以海南省海口市为研究区域对象,以2017年海口市 Landsat-8 OLI-TIRS 遥感影像数据和同期海口市森林资源二类调查本底数据为数据基础,经过图像预处理,按林业调查森林类型分类标准,获取各类型的准确资料。同时选取3种不同抽样方法,通过参数提取与估算对各样本点的地类信息进行研究。在此基础上,采用抽样精度、抽样效率和空间相关性这3种评价指标对3种抽样方法进行分析,以期对森林资源调查探索出更为经济适用的抽样方法。所得结论如下:

1) 海口市森林地类面积模拟抽样方法调查精度分析表明,在随机、系统、空间平衡3种抽样方法当中,空间平衡抽样精度最高,系统抽样精度居中,随机抽样精度最低;同时,从海口市各地类类型面积比例来看,3种不同抽样方法的调查精度趋势同样表现为空间平衡抽样最高、系统抽样居中、随机抽样最低。

2) 海口市森林蓄积量模拟抽样方法性能评价分析表明,空间平衡抽样在空间相关性、抽样精度和抽样效率这3方面均优于随机抽样和系统抽样。与传统抽样方法相比,空间平衡抽样优势更为突出;而在2种传统抽样方法中,系统抽样也较随机抽

样更占优势。

#### 4.2 讨论

传统的抽样调查法在森林处于大面积连续分布的状况时,可以获取较为精确的数据。但由于科技的发展和人为干扰活动所造成的森林生境破碎化和资源日益枯竭,从而导致森林资源存在大量点状、线状或面状分布的情况,传统抽样方法则难以对此进行精准测定。因此,探索开发与研制改进出更为适用的森林抽样方案迫在眉睫<sup>[16,29-30]</sup>。

在繁杂多样的抽样方法中,每种抽样方法都有其优缺处。本研究结合前人众多的研究成果<sup>[5,14-18,28]</sup>,对空间平衡抽样与2种传统抽样方法的优缺点进行对比。如表3所示,与传统抽样方法相比:空间平衡抽样无论是在调查成本的减少还是在抽样精度的提升上均具有明显的优势<sup>[14,17]</sup>,本研究所得结论也验证了这一结果;但如果样本容量与理论计算容量相差过多,且抽样强度不够时,样本可能存在无法均匀分布的情况<sup>[15-16]</sup>;空间平衡抽样属于不等概抽样,在算法设计和实施上较之传统抽样更为复杂困难,但随着3S技术的推广与普及,有效地降低了空间平衡抽样的实施难度。

表3 传统抽样与空间平衡抽样的比较

Tab.3 Comparison of traditional sampling and spatial balance sampling

评价指标	简单随机抽样	系统抽样	空间平衡抽样
变异性	高	中	低
空间分布	不均匀	均匀	不均匀-均匀
抽样概率	等概	等概	不等概
抽样成本	中等	高	低
方法难易度	简单	简单	复杂
适应性	强	弱	强

与传统经典抽样方法相比,空间平衡抽样的方法理论还存在较多不完善之处,还有待未来更深入的研讨。比如样本点面积大小、抽样框栅格图层大小、抽样强度大小、抽样软件像元分辨率限制和多环境因子的选择等因素均对空间平衡抽样存在一定影响<sup>[18,22,31-32]</sup>。此外,空间平衡抽样设计成本与

样本代表性的权衡、空间辅助信息在参数估计中的应用等等这些问题都有待学者们在未来的研究中去一一解决<sup>[33]</sup>。最后,研究中所得出结论是建立在海口市地区的森林结构复杂多样、调查因子空间自相关性等特征的基础上,但在其他地区的森林调查中是否适用还不得而知,尚需进一步研究和探讨。

#### 参考文献:

- [1] 刘三平,李利,曾伟生.关于完善地方森林资源监测体系的思考[J].中南林业调查规划,2011,30(3):1-4.
- [2] 曾伟生,周佑明.森林资源一类和二类调查存在的主要问题与对策[J].中南林业调查规划,2003,22(4):8-11.
- [3] 白降丽,彭道黎,庾晓红.我国森林资源调查技术发展研究[J].山西林业科技,2005(1):4-7.
- [4] 闫飞.森林资源调查技术与方法研究[D].北京:北京林业大学,2014.
- [5] Stehman S V. Basic probability sampling designs for thematic map accuracy assessments[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999,20(12):2423-2441.
- [6] 冯士雍.抽样调查理论与方法[M].上海:上海科学技术出版社,1996.
- [7] Stevens D L Jr. Variable density grid-based sampling designs for continuous spatial populations[J]. Environmetrics,1997,8:164-195.
- [8] Oakley K L,Thomas L P,Fancy S G. Guidelines for long-term monitoring protocols[J]. Wildlife Society Bulletin, 2003, 31(4): 1000-1003.
- [9] Arthur G,Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics[J]. Geographical Analysis, 1992, 24(3): 189-206.
- [10] Mitchell S,Csillag F,Tague C. Advantages of open-source GIS to improve spatial environmental modelling[R]//Proceedings of the Open Source GIS-GRASS users conference. Trento, Italy; Estates Gazette,2002.
- [11] Stevens D L Jr.,Olsen A R. Spatially balanced sampling of natural resources[J]. Journal of the American Statistical Association, 2004,99(465):262-278.
- [12] Stevens D L Jr,Olsen A R. Variance estimation for spatially balanced samples of environmental resources[J]. Environmetrics, 2003,14:593-610.
- [13] Matheron G. Principles of geostatistics[J]. Economic Geology, 1963,58:1246-1266.
- [14] 李明阳,张向阳,吴文浩,等.基于GIS的森林资源调查空间平衡抽样方法研究[J].林业资源管理,2008(4):137-142.
- [15] 李明阳,吴文浩,何燕洁.空间平衡抽样及其在森林资源调查



- 中的应用[J]. 林业调查规划,2008,33(4):1-6.
- [16] 李明阳,刘米兰,刘敏. 森林资源与生态监测的空间平衡抽样方法研究[J]. 西南林业大学学报:自然科学,2010,30(4):1-5.
- [17] 李明阳,王晓俊,刘米兰,等. 基于GIS的野生哺乳动物空间平衡抽样方法研究—以南京东郊为例[J]. 中南林业科技大学学报,2011,31(1):98-103.
- [18] 李明阳,营利荣. 森林资源调查空间抽样与数据分析[M]. 中国林业出版社,2013.
- [19] 海口市行政区划[EB/OL]. 中国海口政府门户网站,(2018-12-18)[2019-01-24]. <http://www.haikou.gov.cn/>.
- [20] 海口市情[EB/OL]. 中国海口政府门户网站,(2016-07-15)[2019-01-24]. <http://www.haikou.gov.cn/>.
- [21] Wang Jinfeng, Liu Jiyan, Zhuan Dafang, et al. Spatial sampling design for monitoring cultivated land[J]. International Journal of Remote Sensing,2002,23,(2):263-284.
- [22] 刘敏,李明阳,陈溢南. 基于GIS平台的森林资源调查模拟抽样软件性能及其应用分析[J]. 中南林业调查规划,2011,30(4):34-37.
- [23] 刘安兴,蔡良良,余光辉. 森林资源二类调查新颁规定的应用分析[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2006,30(2):127-130.
- [24] Smith T H. The foundations of survey sampling: a review[J]. Journal of the Royal Statistics Society,1976,139:183-204.
- [25] 李明阳,黄文奇,刘敏. 基于连清体系的森林生物多样性监测网络构建研究—以湖南省为例[J]. 林业资源管理,2012(5):51-58.
- [26] 刘敏. 基于GIS的森林资源调查空间平衡抽样方法研究[D]. 南京:南京林业大学,2012.
- [27] 冯益明,唐守正,李增元. 空间统计分析在林业中的应用[J]. 林业科学,2004,40(3):149-155.
- [28] 宋新民,李金良. 抽样调查技术[M]. 北京:北京林业出版社,2007.
- [29] 刘敏,李明阳. 基于GIS和高分辨率遥感数据的城市绿地抽样调查方法研究[J]. 林业调查规划,2011,36(2):59-61.
- [30] 孙皓皓,余光辉,温小荣,等. 空间自相关分析及绿地覆盖率的分层抽样估计[J]. 中南林业科技大学学报,2012,32(4):75-80.
- [31] 杨建宇,岳彦利,宋海荣,等. 基于空间平衡法的县域耕地质量监测布样方法[J]. 农业工程学报,2015,31(24):274-280.
- [32] 殷守强,王鑫,贺文龙,等. 耕地质量监测中不同抽样方法的精度比较—以河北省黄骅市为例[J]. 资源科学,2016,38(11):2049-2057.
- [33] 郝一炜,金勇进. 经济社会调查中的空间平衡抽样设计[J]. 统计与信息论坛,2018,33(11):3-8.

## (上接第38页)

- [28] 环境保护部科技标准司. GB 3838-2002, 地标水环境质量标准[S]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [29] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. Water Research,1980,14(8):975-1001.
- [30] 徐争启. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术,2008,31(2):112-115.
- [31] 戴万宏,黄耀,武丽,等. 中国土壤地带性有机质含量与酸碱度的关系[J]. 土壤学报,2009,5(1):851-860.
- [32] 樊燕,武伟,刘洪斌. 土壤重金属与土壤理化性质的空间变异及研究[J]. 西南师范大学学报:自然科学版,2007,32(4):58-63.
- [33] 杜岩功,崔骁勇,许庆民,等. 青海省三江源地区草地土壤有机质与砷含量空间分别特征[J]. 中国草地科学,2012,34(5):24-29.
- [34] 吕宪国. 湿地生态系统观测方法[M]. 北京:中国环境科学出版社,2004.
- [35] 中国环境保护部. HJ 623-2011, 区域生物多样性评价标准[S]. 北京:中国环境科学出版社,2011.
- [36] 薛亮,赵振斌,延军平. 西安市灞河湿地鸟类生境构成与保护价值评价研究[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(8):116-119.
- [37] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京:农业出版社,1992.
- [38] 郭凤鸣,成金华. 层次分析法判断矩阵一致性检验及偏差修正方法研究[J]. 中国国土资源经济,1997(7):19-24.
- [39] 麦少芝,徐颂军,潘颖君. PSR模型在湿地生态系统健康评价中的应用[J]. 热带雨林,2005,25(4):317-321.
- [40] 陈俐交,宗勇军,邵秘华,等. 双台子河口湿地植被修复生境健康评价方法研究[J]. 环境工程,2017,35(2):158-162.
- [41] 张巍. 湿地公园生态恢复方法探讨—以湖北浮桥河国家级湿地公园为例[J]. 林业资源管理,2018(3):35-39.