

环境科学与管理采样方法

Field Sampling for Environmental Science and Management

〔英〕R. 韦伯斯特 R. M. 拉克 著
李艳 史舟 译



科学出版社



环境科学与管理采样方法

Field Sampling for Environmental
Science and Management

〔英〕R. 韦伯斯特 R. M. 拉克 著

李 艳 史 舟 译

科学出版社

北 京

图字：01-2016-8749 号

内 容 简 介

本书首先通过情景设置，介绍采样的原因及相关概念。然后介绍基于设计的采样方法及其统计学技术，如简单随机采样、分层随机采样、系统采样、不对齐采样和集群采样等。接着探讨对环境变量进行采样来预测环境属性时，如何充分利用相关分类图的知识，如何对一个设计的实验进行采样并应对可能出现的特殊问题，如何利用辅助环境变量基于回归分析进行采样并提高估计精度；并讨论嵌套采样在环境变量变异性调查中的重要地位，以及如何设计高效的嵌套采样模式，如何分析来自于这种高效采样模式的数据。最后介绍地统计学空间预测和制图方法，以及适用于地统计学预测的采样设计。

本书不仅可作为高校环境科学、生态学、农学等学科的教学参考书，也可供科研院所、环境监测单位和各级管理部门的工作人员阅读参考。

Field Sampling for Environmental Science and Management, by Richard Webster and R. Murray Lark.
©2013 Richard Webster and R. Murray Lark

All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by Routledge, a member of the Taylor & Francis Group.

本书封面贴有 Taylor & Francis 防伪标签，未贴防伪标签属未获授权的非法行为。

图书在版编目(CIP)数据

环境科学与管理采样方法/(英)R.韦伯斯特(Richard Webster)，(英)R. M.拉克(R. Murray Lark)著；李艳，史舟译. —北京：科学出版社，2017.6

书名原文：Field Sampling for Environmental Science and Management

ISBN 978-7-03-052887-2

I. ①环… II. ①R… ②R… ③李… ④史… III. ①环境科学—科学研究—采样 ②环境管理—采样 IV. ①X

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第110001号

责任编辑：王海光 高璐佳 / 责任校对：李 影

责任印制：张 伟 / 封面设计：刘新新

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年6月第 一 版 开本：720×1000 1/16

2017年6月第一次印刷 印张：10

字数：202 000

定价：78.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

译者序

长期以来，我国经济发展方式粗放，各类污染物排放总量居高不下，导致部分地区环境污染严重，对脆弱的生态环境构成了严重威胁。如何有效地保护水、土壤、大气、生态等环境，已经成为关系国计民生、社会发展的重大科学问题。

面对资源约束趋紧、环境污染加重、生态系统退化的严峻形势，国家大力推进生态文明建设和环境网络监测，以有效推进环境污染预防和风险管控，监测环境质量变化趋势。近年出台的一系列重要文件中，均明确了具体要求和部署。《生态环境监测网络建设方案》明确要求，全面布设监测点，涵盖大气、水、土壤、噪声、辐射等要素，建设布局合理、功能完善的全国环境质量监测网络。《生态文明体制改革总体方案》提出，完善覆盖全部国土空间的监测系统，动态监测国土空间变化。《国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》明确提出，实行省以下环保机构监测监察执法垂直管理制度，强化企业污染物排放自行监测和环境信息公开。而在2016年5月31日，国务院正式印发《土壤污染防治行动计划》（简称“土十条”），明确提出整合优化土壤环境质量监测点位，建成国家土壤环境质量监测网络，基本形成土壤环境监测能力。

要推进这些工作，如何采样布点是关键，这也是翻译本书的初衷和动力。科学合理的采样方法是生态环境监测的前提，而目前，我们对采样还缺乏系统完整的认识。本书中文版的推出，可为高校科研院所、各级管理部门和环境监测单位的水、土壤、大气、生态等环境调查及动态监测工作提供必要的采样方法和技术借鉴，也可以为各高校的环境、生态、农业等学科的教学提供辅助教材。

本书基于充分的理论基础为如何进行科学采样提供方法指导。书中内容主要是基于设计的采样方法，以对环境特性的均值进行估计。本书的特点有：由简单随机采样开始，逐渐转向更为高效的采样设计，如空间分层随机采样、按类分层采样和集群采样；既包括传统土壤调查的目的性采样，又描述了混合采样对估计误差的影响，以及如何利用辅助环境变量基于回归分析来提高估计精度；阐释了进行均值估计的基于设计的采样方法和进行空间预测及制图的基于模型的采样方法（地统计学方法）之间的区别，并分别描述了适合变异函数估算的采样方法及克里格预测的采样方法；引入了多阶段采样方法，使采样方案既不会造成样本短缺又不会导致采样开支过大，并可使调研者随着经验知识的积累调整采样方案。本书的另一特色是包括大量的农业、生态和环境科学的采样案例研究，可读性强，实用价值高。

本书的出版得到了两位原书著者的大力支持。R.韦伯斯特教授就职于国际知名的英国洛桑研究所，是国际计量土壤学和土壤地统计学的奠基人，鉴于其学术贡献和影响力，国际土壤学会在2006年设立了以他命名的Webster金章，以表彰本领域的杰出科学家。另一位作者R.M.拉克教授目前就职于英国地质调查局，是国际知名的环境计量学家、英国皇家统计学会院士。两位教授皆毕业于牛津大学土壤学科，长期合作将统计学应用于环境科学与土壤科学。本书是他们多年科研合作的成果，科学性和实用性兼备。

本书的翻译由史舟教授负责组织实施。翻译人员：第1、2、4、6、9章，李艳副教授；第3章，蒋青松博士；第5章，胡碧峰博士；第7章，周银博士；第8章，李洪义教授。最后由史舟教授统稿和修改成书。由于翻译水平有限，不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

译者

2017年1月

前 言

人们越来越关注所生存的环境，想知道大气和地下水的质量，想了解土壤及其覆盖的植被，以及其他诸多环境特性。他们期望科学家可以给出答案：空气中有多少花粉，地下水中硝酸盐的浓度是多少，土壤厚度有多深，土壤表面植被覆盖率是多少，并想知道这些指标是否会随时间的变化而变化，以及在它们空间上的变异程度。

环境是连续的，科学家不可能测得每一处环境变量的特性值，因而不得不依赖于采样，不管是野外直接测样还是野外取得样本材料后带回实验室进行室内分析。只有如此他们才能评价环境的质量，回答大众的提问，并监测环境特性随时间的变化规律。在调查中他们必须能预测未采样点的环境特性。要想使实验和观测结果具有典型性和代表性，采样就必须是合理的。然而大多数采样是有缺陷的，大量花费高昂代价获得的数据却没有利用价值，只是因为最初的采样方案并不令人满意。许多在化学、物理学和生物学具有极高专业造诣的环境科学家对采样却几乎一无所知。

一些统计课程和教科书也会提到采样方法，但很少把它作为一个系统的问题来看待。当然，也不乏一些专门介绍采样的书籍，比较著名的有 Cochran (1977) 的经典教程和 de Gruitjer 等 (2006) 的书籍。然而大多数环境科学家在其科研训练中所获得的对采样的认知并不完善，与系统、专业的采样知识体系间仍存在较大差距，本书旨在缩小和填补这一差距。

墨西哥国立自治大学 (Universidad Nacional Autónoma de México) 的地球科学家认识到科学采样的重要性。2003 年，受墨西哥土壤科学学会的赞助，我们受邀讲授一期采样的短期课程。事后，学会索要课程的讲义和图表以制作书册，并翻译成西班牙语出版 (Webster, 2008)。从那时起，我们意识到需要将采样方法普及到更广泛的读者群。为此，我们大大扩展了最初的版本，形成了本书。

本书的前两章通过设置情景，介绍为什么需要采样和为什么环境科学家应该在正确理解采样的情况下来处理研究对象。第 3 章到第 7 章介绍采样的统计学技术，这些技术大部分是在 20 世纪 30 年代发展起来的，并结合案例介绍如何将其应用于环境科学调查。第 8 章利用了前面介绍的技术，同时在分析中融入了我们自己的创新性研究进展。最后一章突破了传统的、基于设计的调查和估计方法，以应对新的理论发展及其在环境科学中的应用，介绍了基于模型的预测方法，并根据我们自己的相关研究对其进行示例说明。

在本书的编写过程中，我们受到对采样方法具有浓厚兴趣的同事的鼓励和帮助，其中一些数据和案例由他们提供。我们特别感谢 Dra Siebe，她给了我们编写本书的初始动力，感谢洛桑研究所的同事 C.W. Watts 博士和 K.W.T. Goulding 博士为第 6 章和第 7 章中的案例提供数据，雷丁大学的 M.A.Oliver 博士提供 Wyre 森林土壤调查数据，洛桑研究所 B.P. Marchant 博士提供第 9 章所用到的资料，美国北卡罗来纳州立大学的 D. Pearce 博士允许我们使用第 8 章所用到的有关采样数据。最后，回顾早期的职业生涯，我们对牛津大学 Philip Beckett 博士的激励和指导充满感激之情。

R. 韦伯斯特 R. M. 拉克

2012 年 1 月

目 录

译者序

前言

第 1 章	引言	1
1.1	为何要采样?	1
1.2	分析	6
1.3	经典统计学和地统计学	7
1.4	章节安排	8
第 2 章	目标和概念	9
2.1	采样目的	9
2.2	不确定性	13
2.3	采样实践	14
2.4	随机变量和其分布	17
第 3 章	简单随机采样	21
3.1	估计	21
3.2	样本容量	28
3.3	采样比例	32
3.4	检测	36
3.5	观测中的误差和偏差	39
第 4 章	效益, 经济和逻辑	43
4.1	分层随机采样	44
4.2	系统采样	45
4.3	不对齐采样	47
4.4	区域分类	51
4.5	逻辑和集群采样	52
4.6	序列(ranked-set) 采样	56
4.7	比率和回归估计	59
第 5 章	空间分类预测	62
5.1	分类分析——方差分析	63
5.2	预测原则和对采样的意义	68

第 6 章	对设计实验进行采样	74
6.1	混合	79
6.2	伪重复	80
第 7 章	回归分析和验证采样	82
7.1	回归方程	83
7.2	校准	91
第 8 章	嵌套采样与分析	93
8.1	嵌套采样和空间尺度	98
8.2	不均衡采样	101
8.3	空间嵌套采样设计优化	111
8.4	区域化变量理论下的嵌套分析	115
第 9 章	基于地统计学模型的预测	117
9.1	采矿背景	118
9.2	一般问题	119
9.3	地统计学模型	120
9.4	地统计学线性预测	122
9.5	变异函数估计	123
9.6	克里格预测的采样方法	126
9.7	混合采样	135
9.8	优化样本设计和模拟退火	135
9.9	变异函数估计的采样方法	140
9.10	地统计学采样准则	144
参考文献		147

第1章 引言

要点:

- 环境是连续的，只有通过采样才能获知其量化信息。
- 环境是变化的，只有大量重复采样才能全面揭示其变异性。
- 采样方案应该是正规、科学的设计而非偶然为之，以提供无偏的信息。
- 采集足够的样本以确保随后的数据统计分析，以及提取具有合理信度的信息。

1.1 为何要采样？

人类需依赖于复杂、脆弱且相互关联的环境系统——大气、海洋、陆地和淡水。这些环境系统都受到人类活动的深刻影响。我们耕作土壤，砍伐森林，排放废气和颗粒物进入大气，我们从海洋获取食物并排入废物。同时，我们知道必须保护这些生态系统，这要求我们了解它们，知道它们的特性，能够监控和预测它们的习性。

但是要实现这些目标必须要有量化信息的支持。不管是想了解全国土壤碳流失量的政策制定者，还是想了解某一蓄水层地下水中砷含量的监管部门，或是想要了解不同管理方式下氧化亚氮排放量差异的科研工作者，都需要可靠的信息，并需要相当的投入来获取这些信息。

而两个困难也随之而来。第一个困难在于我们不可能实测得到所有环境系统的属性值：我们不可能实测所有土壤中的碳储量，我们不可能分析一个地区所有地下水中砷的含量，同样，我们不能实测空气中所有的氧化亚氮。我们所能做的就是对少量的大气、水或土壤进行实测，将其称为样本，并期望实测的样本具有典型性和代表性。我们所拥有的任何环境信息都是零散而不完整的。如果我们想获得较为完整的环境信息，就不得不进行采样。

1.1.1 变异性、重复性和有偏性

随之而来的第二个困难是大气成分、地下水中砷含量及土壤中碳储量从一个地方到另一个地方是变化着的，具有变异性。利用少量的样本进行实测会导致对总体的错误估计。在一个特定凿洞内取水测定其砷含量，若得到一个异常低值，会使人产生误解，认为每处的水都是安全可饮用的。若得到一个异常高值，同样会使人产生误解，认为没有一处的水是安全可饮用的。但事实往往并非如此。在

某一处打钻取土样测定土壤磷含量，若得到一个异常小值，会引致农民在整块农田上施用大量化肥，多余的肥料会通过地表径流进入水体导致水体的富营养化。若得到一个异常大值，会引致农民不施肥而造成作物减产和农民减收。土壤中某污染物(如二噁英)含量的异常高值可能会促使当地政府清理整片区域而额外增加纳税人负担，但事实是污染只存在于某些“热点区域”。

即使以上案例中样本不是异常值而是典型值，第二个困难也不能被完全克服。与异常样本相比，这样的典型样本也许使我们对总体的理解稍微好一点，但对我们理解所存在的空间变异并没有多大的帮助，也可能提供错误的环境安全评价。某个区域的某些人可能正在饮用含有有毒砷的地下水，尽管大部分区域地下水是没有毒的。磷的样本可能采自于某个粪堆处，该处磷含量远远超过作物生长所需要的正常含量。靠近繁忙路口的空气可能污染严重，而城市中其他区域的空气可能非常干净。在很多情况下，我们也想知道异常状况存在于哪些区域并对感兴趣的变量进行制图。制图是我们了解所处的环境并对其做出反馈的重要一步。

简而言之，只是获得任何环境属性的单一实测值是远远不够的，因为我们不能确保它是典型的。而最琐碎的环境问题要求对所涉及的环境属性的变异性做出一定的评价。解决问题之道就是利用可重复(replicated)的采样。也就是说，样本应尽量包括一个以上小的研究样区以评价环境特性的变异性。

案例：孟加拉国地下水中的砷

出于充分的理由，我们在上文中提到了水里的砷。在孟加拉国，97%的人口以地下水作为饮用水源。据估计开挖有600万~1.1亿个深度为10~150 m的取水井来取水。在许多地方，水体中含有具有潜在危害浓度的砷：其浓度超过了孟加拉国最大安全阈值(50 $\mu\text{g/L}$)，远远高于世界卫生组织(WHO)所设定的更严格的标准(10 $\mu\text{g/L}$)。砷是原生的，吸附在全新世河流冲积物和三角洲沉积物的氧化铁上。它在地下厌氧条件下被释放到溶液中并污染水体。

在20世纪90年代末，孟加拉国国家水化学调查组在约129 000 km^2 的面积上，在超过3000个不深于150 m的水井里采集水样以评估砷污染状况。所得结果见表1.1，该表数据来自英国地质调查局和孟加拉国公共健康工程部(BSG and DPHE, 2001)与Gaus等(2003)的研究。

表1.1很清楚地展示了砷含量数据的变异特征，以及对我们做出判断可能产生的影响。与WHO设定的安全值(10 $\mu\text{g/L}$)相比，约30%的取水井中砷的含量比较小($\leq 0.6 \mu\text{g/L}$)，甚至50%的值都小于该安全阈值。然而，40%~50%(根据Gaus等的研究，为45.2%)的含量都超过了10 $\mu\text{g/L}$ ，其中20%~30%(根据Gaus等的研究，为27.2%)的含量超过了孟加拉国设定的安全阈值。

表 1.1 孟加拉国地下水中砷含量的描述性统计分析(单位: $\mu\text{g/L}$)

实测值数目	3208
平均值	60.5
中值	6.08
标准差	123.1
百分位数	
10	0.1
20	0.2
30	0.6
40	2.0
50(中值)	6.1
60	16.6
70	40.4
80	83.4
90	199.7
95	320.0
99	570.7

很明显，任何一个单一的测试值都很可能造成误导。在超过一半的取水井里，水是安全可饮用的，而许多其他取水井中的水则并不安全。甚至连平均值($60.5\text{ }\mu\text{g/L}$ ，超过了国家设定的安全阈值)也具有误导性。如果用平均值代表全国地下水中砷含量状况，那么该国所有的取水井都应该被关闭了。

对这样的结果我们马上会想到应该对每个取水井都测试其砷的含量。但表 1.1 所不能揭示的另一面就是：究竟哪里的水是有毒性的。碰巧的是，有毒水的分布是零星的和碎片化的。利用先进的统计技术，Gaus 等利用这些样本数据制作了 As 含量空间分布图，表明在这个国家的大部分地区，发生砷中毒的可能性不大。因此如果要进一步测定砷含量，应该优先在那些发生砷中毒可能性最大的地区进行采样和测定。

我们需要多个测量值的另一个原因：可以提高我们评估环境变量的信度。环境科学家通常使用平均值来表征环境变量——如地下水中砷的平均浓度、土壤平均碳含量。假定所采集的样本是有代表性的，我们可以使用实测值的算术平均数来估计真正的平均值。多个样本计算出的平均值比单一样本计算出的平均值具有更大的信度。假定样本是根据某些规则所采集的，我们应该能够把真正的平均值置于某一置信区间内。另外，我们也需要多个样本来做预测，不管是预测来年的

气温，或是土壤压实度，还是地下水中砷的含量。同样，我们需要将预测值置于一定的信度区间内。

直观上，我们知道，样本量越大，那么基于这些样本所做出的估计和预测的信度就越高。一般来说，与小样本对比，大样本使我们对环境的评估更加客观和敏感。例如，基于某个地区 30 个气象站数据对气温做出的预测比基于 3 个气象站数据所做的预测更可信。如果两年间的温差只有 2°C ，我们肯定想要超过 3 个气象站的数据，来确保所做出的关于“第二年比前一年温暖”的预测具有更大的可靠性。这似乎是常识。但是我们是否可以把这种预测的可靠性和信度定量化？答案是肯定的，我们可以用统计学实现。统计学不仅可以让我们估计平均值，预测实际值，还可以给出估计和预测的误差和置信区间。它使我们能够以定量的方式来表达不确定性。

重复采样是至关重要的，但成本也很高。在一片道路稀疏、交通不便的大区域，从一个样地到另一个样地进行采样会耗费大量的时间和金钱。同时测试诸如二噁英等高毒物质的样本需要高灵敏度的实验室分析设备，并严格把控测试各环节，成本非常高。科学家可能会疑惑于是否需要大量的样本来证实或否定他们的直觉。工程师疑惑于应该基于多少个实测土壤样本来对未采样点的土壤属性进行预测。公共机构和建筑公司不想花更多的冤枉钱来获得那些有助于他们做出决策的辅助信息。那么采集多少样本能达到他们想要的目标？统计学可以为他们提供基于理性标准的答案。

在一个具有较大变异性的环境中，不仅可重复性是非常重要的，合理的采样设计也是非常重要的。例如，假设现在要监测某地区地下水质量，我们要从村庄里的水井中采集水样以弄清其中所含的细菌数目。由于水井已经存在，因此采样的成本不会太高。然而，这些水井里的水很可能比远离村庄的水井的水有更多的污染物，那么我们就很有可能得到一个有偏估计。如果我们想要得到无偏估计，应该选择更具全局性和代表性的典型样本，在某些情况下甚至不得不重新开挖水井。显然，这将花费更多金钱。再例如，在采集森林冠层样品数据时，为方便起见我们可能会把照度计放置于路边来采样。然而，我们很有可能再次得到一个有偏结果，因为路边树冠的密度相比于森林里其他地区来说要小。为了避免偏差，我们应该深入到森林深处，而这将产生更大的费用。如上所述，有偏估计会给决策带有很大的不确定性，导致在本该有所行动时没有行动，反而对不存在的威胁反应过度。

我们想避免偏差，而我们通常总可以通过设计采样来避免偏差。这意味着要用概率采样来代替“方便的”或投机取巧式的采样，甚至代替依靠于专家判断的有目的性采样。在统计术语中，这是指所有的采样点或采样单元被选中的概率是

相同的，最起码是已知的。这意味着要以严格的规则随机抽选采样单元。即所有采样单位通过其命名，或其编号，或其空间坐标被随机选择。如果在选择时没有其他约束条件，那么结果就是简单随机采样。基于这样的样本观测值会产生平均值的无偏估计和估计误差。这就是概率采样相较于其他所有采样方法的优势所在。

案例：瑞士侏罗山土壤中的重金属

采矿业、制造业和道路运输业可能将有毒金属扩散到环境中。在一些地区，特别是靠近加工厂的地区，影响是非常明显的：植被矮小、稀疏，仅包括抗性较强的几个树种。在其他地方的影响可能没那么明显，但是有潜在的危害。进入 20 世纪后，人们越来越意识到这些影响，想修复清洁他们的环境，恢复土壤的肥力和环境的安全。瑞士联邦政府首先在国家层面上采取了行动，设置了土壤中重金属安全含量的最大指导值[见 FOEFL (1987) 指南]，要求各州明确那些重金属含量超过最大指导值的地区，以实施污染修复或用途管制措施。

被调查的第一批地区中，包括了纳沙泰尔州侏罗山拉绍德封周边地区。在那里测到重金属镉具有非常高的含量，而即使很少量的镉对人类和牲畜都是有毒的。地方工业排放或城镇垃圾被疑为污染物来源。Meuli 等 (1994) 系统地采集了这些地区的土壤样本，用以评估镉及其他重金属的含量等级，确认哪些区域的含量超过了指导值。总共测得 366 个样品，所得结果见表 1.2。

表 1.2 土壤表层中 4 种潜在有毒重金属含量的描述性统计(单位: mg/kg)

	Cd	Cu	Pb	Zn
平均值	1.31	24.6	56.5	77.3
最大值	5.13	193.0	357.0	294.6
标准差	0.87	25.3	39.1	33.9
VSB ₀ 指导值	0.8	50	50	200
实测值大于指导值的数目	214	34	159	4
实测值大于指导值的比例/%	66	9	43	1

注：①样点数目为 366；②VSB₀ 将指导值定义为对食品作物生长的最大安全含量(FOEFL,1987)

在该表中显示，如果超过 0.8 mg/kg，即 FOEFL (1987) 指南中 VSB₀ (有关土壤中污染物法令的注释) 关于土壤中镉安全含量的最大阈值，那么情况就比较严重。结果发现，2/3 的样品中镉含量超标。Meuli 等 (1994) 进一步对镉的空间分布进行制图，发现其分布是零散的，最大含量远离拉绍德封地区。

该结果与事先预想的污染物来自于城镇并不相符。Atteia 等 (1995) 试图分析土壤母质 (底层侏罗纪岩石) 来寻求解释，但没有得到有价值的结论。

后来, Dubois 等(2002)在对 Cd 高含量区的一系列的采样调查中发现了原因: 这些高含量区的岩石中含有大量的 Cd, 导致土壤中 Cd 的浓度高达 18 mg/kg。地方当局因此有了困扰。显然他们不能去除 Cd, 也没有任何来自于城镇的污染是他们能阻止的, 他们所能做的就是禁止在那里生产食物和饲养牲畜。

表 1.2 也列出了其他三种潜在的有毒重金属——铜(Cu)、铅(Pb)和锌(Zn)的调查数据。这里 Pb 由于在许多方面都会损害人类的健康而引起了最大的关注。可以看出, 43%的样本中 Pb 的含量超过 VSB₀ 指导值(50 mg/kg)。Meuli 等和 Atteia 等(1994,1995)再次发现 Pb 的最大含量在远离城镇的地方, 因此并不能将它们归咎于人为污染。9%的 Cu 含量超过了 VSB₀ 指导值, 1%的 Zn 含量超过了 VSB₀ 指导值。Cu 和 Zn 这两种成分都是人类所需要的营养成分, 少量的富余不大会对人体健康造成危害。

在这批样品中也测定了其他三种重金属元素——钴(Co)、铬(Cr)和镍(Ni), 我们在随后的章节中会给出调查统计结果。读者若希望获取该数据以尝试我们所给出的方法, 可访问 <http://www.pedometrics.org/data/juraset.txt> 或查阅由 Goovaerts(1997)的著作。

1.2 分 析

从上面的讨论可以看出, 当已采集了样本, 并得到了样本的实验室测试结果时, 显然科学家的任务并没有结束。解决问题要求采样必须可以通过一种合适的方法来解读数据的变异, 并在结果中能定量地表达信度, 这需要合适的统计分析方法。虽然经野外采样和实验室工作之后才进行统计分析是最常见的做法, 但是没有针对性地思考需要完成任务而去计划野外工作或实验室工作是错误的。采样设计对最终的分析有约束作用, 而且选择采用的数据分析方法对样本数量的大小也是有影响的。基于最终的统计分析考虑, 甚至实验室的工作也要事先计划, 因为这样可以控制各种影响, 如不同批次间的分析差异, 或地面采样后某一特定单元被处理的时长不同。总之, 采样、实验室工作和统计分析工作必须以一种有机的、综合的方式, 在统计人员、野外采样工作人员和分析人员相互了解对方的要求和约束条件下进行整体规划和设计。

最终, 必须根据采样设计进行数据分析, 并对数据进行必要的初步性探索分析。包括对数据进行可能的错误性检查, 检查异常值或错误值。例如, 一个 pH 为 65 的数值显然是错误的, 可能是数据输入时小数点位被输错; 总和为 150 的一组百分数肯定有问题; 一张地图上土壤样点的空间分布位于海洋中, 可能是由于经纬度坐标弄反了。

一旦数据通过了错误性检查,接下来应对它进行统计描述。最简单的统计描述应该包括平均值、方差、标准差、标准误,这些可能是所有统计分析都要求的统计指标。在有些例子中,要设置置信区间或比较均值,统计分布类型是很重要的。直方图可显示数据是否有明显的偏态,可以用偏态系数对其进行量化。有时,还需要对数据进行转换以使其分布接近于正态分布或某种已知的分布。直方图还可以揭示异常值或不寻常的观测值,其可能是初步筛选未能检出的错误值,也可能是真正的实测值——是采样总体中的非典型样本,如从一个老粪堆上所采集的土壤样本。在某些情况下,特殊的统计处理允许我们在不扭曲所要研究的环境变量总体评估结果的情况下保留异常值。

1.3 经典统计学和地统计学

采样估计理论在20世纪30年代发展起来。统计学家发现了判断性采样的缺陷,在洛桑研究所 R.A. Fisher 所做的实验设计和分析的研究基础上建立了该理论。该理论经受住了时间的考验,至今仍是包括环境科学在内的许多学科领域的实践基础。它的核心是估计,从样本数据来估计总体的平均值和方差等参数,而总体的平均值和方差由于缺乏完整的信息,并不能被确切地知道。我们将其称为“经典统计学”。

近些年,另一种统计学方法——地统计学理论和方法开始发展起来。它于20世纪50年代首先被应用于南非的矿藏勘探工作中来计算矿石储量。D.G. Krige (1951)发现任何小区块里金矿的含量都依赖于周边的区块,如果将周边区块中金矿含量考虑进来的话,可以提高目标区块金矿的预测精度。在50年代后期,这项技术吸引了一些法国工程师尤其是 G. Matheron 的注意,他发展了 Krige 的创新性概念,在做了大量理论工作的基础上提出了区域化变量理论,形成了地统计学的基本框架。

区域化变量的基本理论是相当普遍的,可以适用于几乎任何环境变量:地下水中的砷、土壤磷素、森林冠层、农业杂草和害虫等。在所有这些情况下,人们感兴趣的变量在某种尺度上存在空间自相关性,所以统计意义上,在某一处它的属性值依赖于周边点位上的属性值,且距离周边点位越近,依赖程度越大,距离越远,依赖程度越小。这意味着,我们可以根据某点周边的实测值来估计该点的值。这同时也意味着我们可以插值制图并生成插值图的预测误差图。没有其他的插值技术能够做到这一点。

许多统计学家将其称为“预测”以与全局参数估计进行区分。尽管 Matheron (1989)认为这种区别很大程度上是语义上的区别,然而,还有一个根本性区别,

那就是，经典估计是基于采样设计，该设计体现样品单元的随机选择。相反，地统计学估计，或称“预测”，是基于地理空间上的随机变异模型。任何感兴趣变量被视为空间自相关随机过程的输出量。这并非不合理的，许多环境变量在空间上的变化如此复杂，以至于它们的变异貌似是随机的(Webster, 2000)。在荷兰工作的 de Gruijter 和其同事已经把这一区别视为他们所有实践和教学的基石，并且在他们的书中着重强调了这一点(de Gruijter et al., 2006)。

地统计学方法对模型的依赖性消除了一些在设计上的约束。采样不必是随机的，因为随机性所需的应用理论已体现在模型中了。采样点或采样单位并不需要具有相同的或已知的被选中的概率。不过仍然必须意识到可能的偏差，并要尽量规避这种偏差。从村里现有水井中取水样来进行预测，仍有可能会高估整个地区地下水中细菌的含量。如果沿着森林中道路来测量穿过林分的光线并以此进行预测，仍有可能高估了那些远离道路的森林深处可到达地面的光线。在测量土壤磷含量时，避开农田通道可能导致对磷含量的低估，等等。

1.4 章节安排

本章是环境采样的开篇。我们阐述了为什么必须进行采样。环境变量的变异性意味着我们必须重复采样来表征这种变异性，我们根据样本数据所做的估计或预测可以用定量区间表示出来。考虑到经典统计学的理论，重复采样必须适当地被随机化，以避免偏差，并使我们能够在基于合理假设的基础上完成数据分析。数据分析必须与样本采样和实验室处理相结合。在某些情况下——当我们关注的是空间预测和制图而不是对总体的估计时——地统计学方法优于经典统计学。其他具体章节安排如下。

第2章主要介绍关键的概念，这些概念对于任何采样工作都是必须确定下来的，这样才能使采样可以成功地实现调查目标。我们还介绍了关于随机变量的概念，这也是读者需要掌握的，以便理解后面的章节。第3章和第4章描述了概率采样是如何通过采样设计来执行的，以及它是如何被有效实施的。第3章还介绍了一些其他更适合于特定目的监测而非量化现象的采样设计。第5章讨论了当对现有设计实验采样时会出现的特殊问题。第6章中讨论了在对环境变量进行采样以预测环境属性时，如何充分地利用相关分类图的知识(如地质图、土壤图或植被类型图)。第7章将读者带入回归分析领域，介绍如何针对回归分析进行采样。嵌套采样在环境变量变异性调查中有着重要地位。第8章介绍了内在的思路，如何设计高效采样模式，如何分析来自于这种高效采样模式的数据。最后，第9章介绍利用地统计学方法进行空间预测，以及适用于地统计学预测的采样设计。