

区域土壤质量

时空演变分析方法与实证研究

张世文 著

中国农业科学技术出版社

区域土壤质量

时空演变分析方法与实证研究

张世文 著



中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

区域土壤质量时空演变分析方法与实证研究 / 张世文著. —北京 : 中国农业科学技术出版社, 2018.9

ISBN 978-7-5116-3762-8

I. ①区… II. ①张… III. ①土壤环境—时空演变—研究 IV. ①X21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 145983 号

责任编辑 张志花

责任校对 李向荣

出 版 者 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电 话 (010) 82106636 (编辑室) (010) 82109702 (发行部)
(010) 82109709 (读者服务部)

传 真 (010) 82106631

网 址 <http://www.castp.cn>

经 销 者 各地新华书店

印 刷 者 北京建宏印刷有限公司

开 本 710 mm×1 000 mm 1/16

印 张 16.25

彩 插 4 面

字 数 290 千字

版 次 2018 年 9 月第 1 版 2018 年 9 月第 1 次印刷

定 价 58.00 元

感谢国家重点研发计划项目“旱作区土壤肥力和生产力演变规律及肥沃耕层特征”（2016YFD0300801）；国家自然科学基金面上项目“不同重构措施复垦土壤水氮运移和作物生长模拟与响应机制”（41471186）资助

前 言

第六十八届联合国大会正式宣布，将 2015 年定为“国际土壤年”，其口号为“健康土壤带来健康生活”。国际土壤科学联合会还确定每年 12 月 5 日为世界土壤日。对“健康土壤”的热议，再次成为公众关注的焦点。

土壤是一个非常美妙的自然体。土壤这层地球表面的皮肤的确丰富多彩，她不但为植物与动物提供良好的生态环境，也为人类提供良好的生活环境，而这层皮肤的健康决定着人类的生存和健康状态。可以说，没有健康的土壤，地球上的生命则不可持续。“民以食为天”，“土壤是万物之本、生命之源”。土壤是人类赖以生存、兴国安邦、生态文明建设的基础资源，是保障国家粮食安全与生态环境安全的重要物质基础。对于我国这样一个人口众多、土壤资源紧缺的国家而言，健康的土壤则显得尤为重要。土壤质量与持续环境的研究已成为当前我国学者和国际土壤学、农学及环境科学界共同关注的热点课题之一。区域土壤质量时空演变特征的研究将为土壤资源可持续发展提供技术支撑。

笔者以（重构）土壤质量及其要素为对象，以区域为尺度，提出区域土壤质量时空演变分析方法，并进行了实证研究，在此基础上，编写了《区域土壤质量时空演变分析方法与实证研究》一书。全书包括方法和实证两篇，共计涵盖 9 章内容。第一篇区域土壤质量时空演变分析方法包括区域土壤质量研究进展、区域土壤质量评价方法、区域土壤质量关键要素时空演变研究方法 3 章内容，详细阐述了当前区域土壤质量评价和时空演变规律的方法。在详细阐述区域土壤质量时空演变分析方法的基础上，进行了案例研究。实证研究包括区域土壤质量评价实证研究、区域土壤质量数字制图实证研究、区域土壤有机质（碳）时空演变特征、区域土壤质地时空演变特征、县域土壤磷素流失风险评估、区域土壤重金属空间分布特征研究，研究对象包括非重构土壤和重构土壤，关键质量要素包括土壤有机质、土壤质地和土壤重金属等。

本书编写过程中得到了我的恩师——中国农业大学黄元仿教授悉心指导，共同商定编写提纲；得到了安徽理工大学地球与环境学院领导们（张平松、盛鹏飞、吴荣新等）的支持，是在笔者师弟师妹们（李贞、曹梦、孙忠祥、兴安、卓志清等）、研究生们（葛畅、刘慧琳、聂超甲、胡青青、沈强、孔晨晨、丁雪姣等）共同参与下完成的，在此一并表示感谢。受研究和认识水平所限，难免存在不当之处，欢迎大家提出批评意见。



2018年3月于淮南

目 录

第一篇 区域土壤质量时空演变分析方法

第一章 区域土壤质量研究进展	2
第一节 土壤质量内涵与研究现状	2
第二节 土壤质量评价研究	4
第三节 区域土壤质量时空变异性研究	11
第二章 区域土壤质量评价方法	13
第一节 区域土壤质量评价与数字制图方法	13
第二节 县域土壤磷素流失风险评价	23
第三节 区域土壤质量评价系统	30
第三章 区域土壤质量要素时空演变研究方法	41
第一节 区域土壤质量要素空间分布特征研究方法	41
第二节 区域土壤质量要素空间预测方法	53
第三节 区域土壤质量要素时间演变规律研究方法	76

第二篇 区域土壤质量时空演变实证研究

第四章 区域土壤质量评价实证研究	80
第一节 不同时空尺度土壤质量评价	80
第二节 重构区土壤质量综合评价	90

第五章 区域土壤质量数字制图实证研究..... 99

 第一节 数据处理分析..... 99

 第二节 基于不同方法土壤质量数字制图.....101

第六章 区域土壤有机质（碳）时空演变特征.....109

 第一节 分类变量辅助下的土壤有机质空间预测.....109

 第二节 景观高度异质区域土壤有机碳时空演变特征.....121

 第三节 顾及各向异性区域土壤有机碳三维模拟.....132

 第四节 基于多方法耦合的区域土壤有机碳空间特征与尺度效应.....139

第七章 区域土壤质地时空演变特征.....150

 第一节 基于数据转换与成分克里格法的区域土壤质地空间预测.....150

 第二节 区域土壤质地空间变异及其影响机制.....158

 第三节 区域土壤质地空间变异及其影响机制.....169

 第四节 区域土壤黏粒三维模拟及其与采样密度的响应.....180

第八章 县域土壤磷素流失风险评估.....187

 第一节 山区县域土壤磷素流失风险评估.....187

 第二节 平原县域土壤磷素流失风险评估.....194

第九章 区域（重构）土壤其他属性时空演变.....205

 第一节 区域土壤重金属铅含量及其影响因素.....205

 第二节 历史遗留工矿废弃地复垦土壤重金属含量及其影响因素.....213

 第三节 不同覆土厚度下粉煤灰充填复垦土壤关键肥力指标空间
 分布特征.....225

 第四节 矿业地复垦土壤重金属含量演变规律研究.....234

主要参考文献.....245

附图.....251

第一篇

区域土壤质量时空演变分析方法

第一章 区域土壤质量研究进展

20 世纪 70 年代后,随着人口和经济发展对土地压力的增大,土壤资源的过度开发利用导致了土壤资源退化加剧,进而影响到农业可持续发展以及生态环境、全球变化,土壤质量(soil quality)这一概念是在这种情况下提出来的。土壤质量不仅涉及土壤的功能、类型和所处的地域,而且还与土壤管理、生态环境系统、社会经济等外界因素有关。随着时代的发展和科学技术水平的提高,土壤质量的概念、研究手段和技术在不断地发展变化。本章重点阐述土壤质量内涵的发展以及区域土壤质量评价和时空变异研究的最新进展。

第一节 土壤质量内涵与研究现状

土壤是人类赖以生存和发展的基础,一个健康或质量好的土壤是净化空气和水环境的过滤器,是全球气体的主要汇(库),管理良好的土壤有利于全球气候变化(因其影响 CO_2 的平衡),是有机废物分解与解毒及植物养分循环的最终受体和孵化室。人们逐渐认识到土壤质量在持续生产、人类健康及环境质量中占有愈来愈重要的地位,必须像关心水质、大气质量一样关心土壤质量。土壤质量与持续环境的研究已成为当前我国学者和国际土壤学、农学及环境科学界共同关注的热点课题之一。土壤质量是个非常综合的概念,与土壤、土地利用、管理和政策等众多方面都有联系。20 世纪 70 年代初,土壤质量一词出现在《土壤学》文献上(Alexander, 1971; 赵其国等, 1997; 曹志洪, 2001; Wang et al., 1998),自此之后,许多学者就土壤质量概念与内涵提出自己的看法(Warkentin, 1995; 张桃林等, 1999; Islam, et al., 2000; 曹志洪等, 2001)。近年来,人们对土壤质量的认识进一步深化,但对于土壤质量的概念,仍未形成统一看法(熊东红等, 2005)。无论怎样定义土壤质量,其共性都是土壤在现今和将来均能有效发挥功能的一种能力。土壤质量的定义应该包括两方面土壤特性,即土壤的内在性质(inherent soil quality)和受人类使用及管理影响的土壤动态性质(dynamic soil quality)。土壤的内在性质是由土壤的五大成土因素(气候、地形、母质、生物和时间)决定的,土壤动态性质是受人类利用和

管理的影响,它综合了土壤类型和发挥功能的自然能力及对它的使用和管理的性质。这个观点通常作为土壤健康的内涵,同时也是评价土壤质量的重点(Doran, et al., 2000)。由于许多外部因子(如土地利用)以及社会经济和政治状况都会影响土壤质量,土壤本身包含了众多在时间和空间上存在显著变化的化学、物理和生物因子,这些因子在土壤质量中的重要作用程度至今没有被充分认识,同时,由于从事的工作不同或其观点的不同,不同的人对土壤质量的认知也不相同,故而土壤质量研究具有复杂性。土壤质量评价是指土壤实现其功能程度的评价。Warkentin (1995)认为土壤功能是评价土壤质量的基础,土壤质量是指在特定区域的限制条件下,土壤功能能否最优发挥。Doran(1994)将土壤的主要功能概括为生产力、环境质量和动物健康3个方面。因而,土壤质量评价是综合土壤各方面的功能,包括保持生物生产力、维持环境质量以及促进动植物健康的属性,并根据土壤已知的外部性质对这一内在属性进行度量(图 1-1 为典型肥沃土壤的组成)。

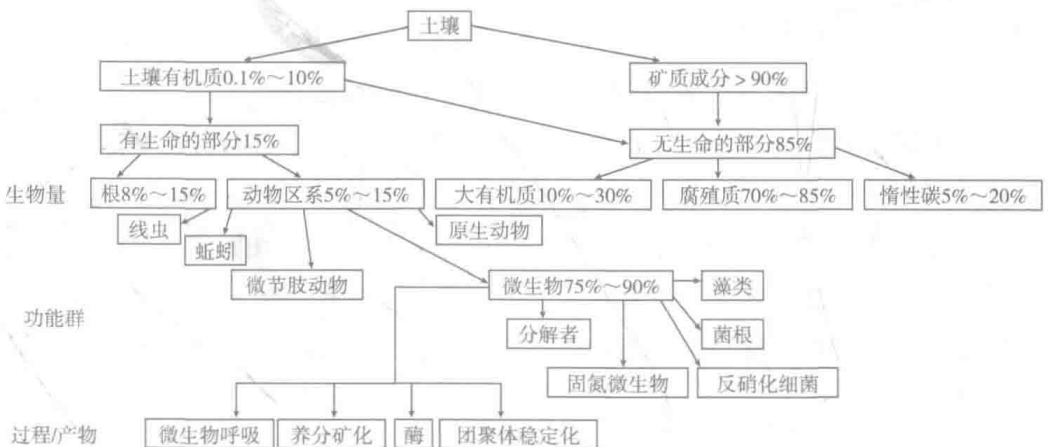


图 1-1 典型肥沃土壤的组成 (图中的百分数以干重表示) (Theng et al., 1989)

土壤质量是揭示土壤条件动态变化最敏感的指标,且它能体现人类的活动对土壤的影响。土壤质量演变规律、调控机理和评价理论是土壤质量基础研究的核心。近年来人们就土壤质量的概念、评价指标、土壤质量与生产力、土壤质量与环境质量及动物、人类健康等方面进行了研究及报道。但当前区域土壤质量时空演变研究仍然存在诸多不足之处。

评价不全面,标准不统一,系统化程度低。评价研究对不同土壤属性的阈值与最适值的确定,各种土壤属性的不同水平间的相互组合对土壤质量的体现,各种土壤属性与土壤功能之间的关系等都比较模糊和不全面,土壤质量评价研究仍然只是从不同关心角度进行的尝试。同时,尚未形成公认的或统一的土壤质量指标及定量化的评价方法,研究尺度也主要集中在某个特定土地利用方式下或者农业耕地条件下,评价尺度不够大,且土壤重金属污染等负面指标纳入土壤质量评价范围的研究也较少,以上这些有待进一步的研究。

空间分布特征研究方法多样,针对性不强,系统性较差。土壤质量及其要素空间分布特征研究方法由最初的经典统计学方法发展到了时序分析方法、地统计学方法、分形维数方法以及应用地理信息系统的研究方法。每种方法具有自身的优点和缺点,应根据实际情况和不同目的选用不同方法。目前的研究主要采用变异函数和变程作为众多土壤质量及其要素空间特征表征参数,但仅从基于采样点的变异函数出发,分析不够全面,且研究结果往往随着实证区域、尺度等变化,无明显固定优势。且地统计学无法描述具有离散特点(即空间负相关)的空间变量特征,也不能对变程等进行显著性检验。

空间预测(模拟)精度不高,时空分离,重构土壤涉猎不多。总结以往的研究,不难发现以下问题:①由于缺乏长期定位监测,目前的研究一般只对区域内单一时期的土壤质量及其要素空间分布特征进行研究,或是停留在对多个时期土壤样品的统计特征对比和分析的阶段,尚没有达到时空建模的层次;②研究未充分考虑重构土壤无序、易变、突变、不连续性等特征;③时间和空间维度完全分离,时空耦合研究相对较少,缺乏支持时空地统计方法的程序或软件。

第二节 土壤质量评价研究

一、土壤质量指标体系

土壤质量作为一个复杂的功能实体,不能够直接测定,但可以通过土壤质量指标来推测。土壤质量是土壤的许多物理、化学和生物学性质,以及形成这些性质的一些重要过程的综合体现。土壤质量指标(soil quality index, SQIs)可分成描述性指标和分析性指标两类。

描述性数据因为不能量化而被视为“软”数据,常常不能得到科学家和技术

专家们足够的重视,而农民及其他直接使用土壤的人却是通过这些不能量化的指标认识土壤质量的。农民和科学家的合作,可以在土壤质量研究中将农民的观察知识和分析数据结合起来发展土壤质量评价方法,为土壤资源的经济和环境可持续发展提供指导。Harris et al. (1996) 提供了以解释框图和访谈指南为基础的一套较为完整的土壤质量评价信息收集工具。Romig et al. (2000) 基于农民的土地评价方法中给出的 Wisconsin 土壤健康评分卡中,包括了 24 项土壤指标在内的 43 项指标,根据农民对这些指标的评分可以得到土壤的健康状况。USDA-NRCS 设计的 Maryland 土壤质量评价手册将土壤动物、有机质颜色、根系和残留物、表土紧实性、土壤耕性等土壤特性划分为差、中、好 3 个等级,并加以详细描述,在此基础上得到土壤质量的定性状况。

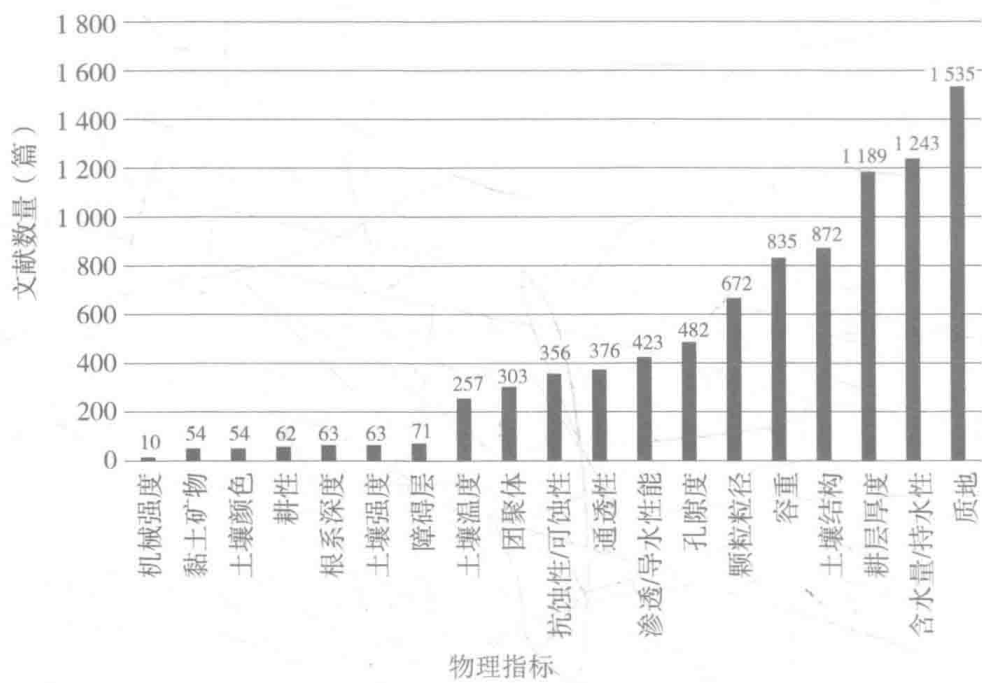
分析性指标又进一步分为物理指标、化学指标和生物指标。Larson & Pierce (1991) 提出了土壤质量评价最小数据集 (Minimum Data Set, MDS) 的概念,可用于监测由土壤和作物管理措施引起的土壤质量的变化,并建议使用土壤转换方程 (Pedo-Transfer Functions, PTFs) 来估计不易实际测得的指标。1991 年的土壤质量评价与监测国际会议把渗透作用、有效持水量和耕层深度作为影响土壤质量的首选物理指标,而水稳性团聚体、分散性的黏土矿物和密度作为次要的物理指标。化学指标包括 pH、含盐量、阳离子交换量、有机质和重金属等。多数与会者对衡量土壤质量的理化指标形成一致意见,而对生物指标没能达成统一的意见。美国土壤保持组织建议将渗透作用、土壤质地、团聚作用等 16 项列为土壤质量评价的物理指标,而把阳离子交换量、肥力和有机质含量作为化学指标。Arshad & Coen (1992) 列出了类似的土壤物理化学属性并建议通过长期的试验来确定管理措施对土壤质量的影响。Karlsen & Sotott (1994) 提出物理指标是渗透作用、水力传导、切变强度和团聚体稳定性,这些指标与土壤侵蚀密切相关。Doran et al. (1996) 扩展了 MDS, 将微生物生物量和可矿化的 N 等生物学指标考虑到最小数据集中。近年来,土壤质量评价的生物学指标越来越受到重视,生物学指标包括土壤中生长的植物、土壤动物、土壤微生物等,其中应用最多的是土壤微生物指标 (刘占锋等, 2006; Bastida et al., 2006a, 2006b, 2008)。

综合国外土壤质量指标研究的成果 (Puglisi et al., 2005, 2006; Mohanty et al., 2007), 国际上在进行土壤质量评价时使用频率最高的若干种指标及其选取的理由见表 1-1。

表 1-1 国际上土壤质量评价常选指标

指标分类	指标名称	选择理由
土壤化学指标	有机质	作为营养来源，它可以改善土壤的结构、持水量和提高生物活性
	阳离子交换量	反映土壤保持和提供养分的能力
	养分指标（TN、AK、AP 等）	提供养分的能力
	土壤 pH	反映土壤的缓冲能力
土壤物理指标	土壤质地	控制水、气和养分的释放、保持和交换
	土层厚度	反映可利用资源的数量
	有效持水量	反映保持水分的能力
土壤微生物指标	土壤微生物量	控制土壤有机质的转化并影响碳的积累，它同时是植物养分的源和库

为满足各自的评价目的，不同研究者所利用的指标也不同（图 1-2）。



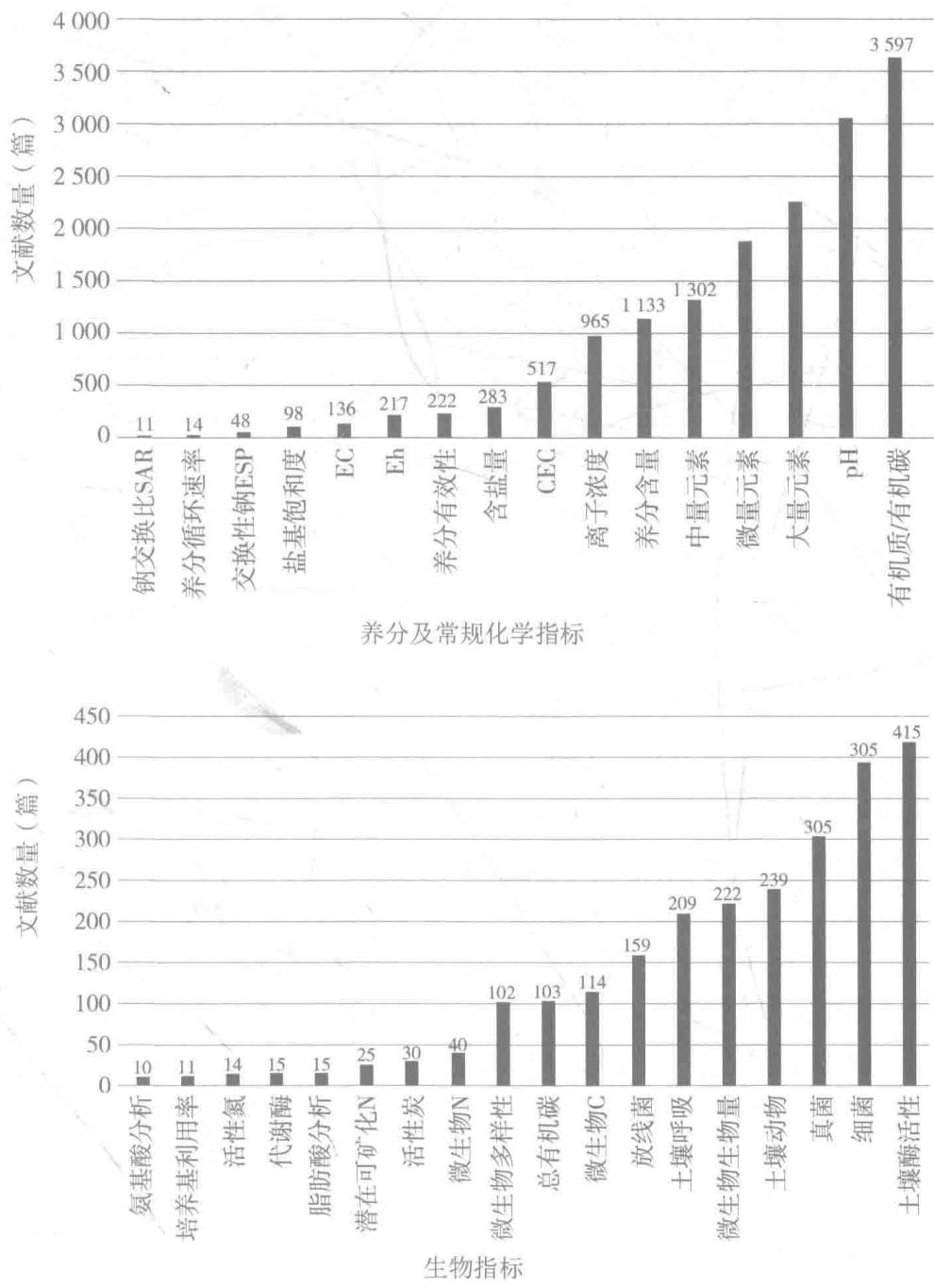


图 1-2 我国土壤质量评价指标 (林卡等, 2017)

土壤质量指标的确定复杂而重要, 不同的土壤系统之间差异很大。当前我国的土壤质量评价指标体系尚存在一些问题。

①由于土壤利用方式的多变性、土壤性质的时空变异性、数据获取的成本

高及因子间的共线性等因素,显然不可能获取所有因子的数据,而只能从候选指标集中选出 1 个能最大限度的代表所有候选指标信息的最小数据集(MDS)。MDS 作为 1 种工具在土壤质量评价及监测工作中得到广泛的应用(Andrews et al.,2002; Goovaerts et al.,2006),简单地说,MDS 就是可以反映土壤质量最少的指标参数集合。在过去的 20 年内提出的各种定量确定土壤质量 MDS 的方法,以数理统计方法中主成分分析(PCA)应用最广泛(Andrews, et al., 2002; Yemefack, et al.,2006)。

②选取的指标主要都是土壤自然属性,呈现多样性,却没有把影响土壤质量的社会和经济因素等都考虑进去。

③不同尺度或层次的指标转化与衔接问题、数据获取的途径与获取方法的标准化问题。

④通常情况下的土壤质量评价都是把土壤作为一个自然独立体考虑的,并没有与生态系统相联系。评价土壤质量时往往趋于对某一点的测量,很少考虑相互之间的联系。

⑤各种土壤属性与功能之间的关系,以及形成各种土壤属性的过程机理等问题尚未十分明确(张华等,2001)。

二、土壤质量评价尺度问题

土壤质量评价尺度包括时间和空间两种尺度。土壤性质因各种外部因子的变化和内部各种因子的相互作用而产生变化。根据土壤性质随时间变化的速率和频度可以区分为“短期的”“动态的”和“长期的”“静态的”(张华等,2001)。

Papendick et al. (1994) 认为土壤质量评价应该是土壤“动态”和“静态”属性的混合。Carter et al. (1997) 认为可以用土壤健康描述土壤短时期内的“动态”状况,用土壤质量描述长时间尺度上“内在的”和“静态的”用于某种特定目的的能力。土壤质量评价可以在多个尺度上进行,可以是土体、土壤上图单元、田块、景观以至整个流域。国内外学者在不同尺度上也做了大量的研究(Pennock, 1994; Smith et al., 1993; Hellkamp et al., 2000; Wirth, 2001; Sparling et al., 2002)。不同的评价尺度可以满足不同的需求(图 1-3)。

尺度是土壤质量时空变异研究中的一个基本概念,已引起了广泛关注。通常包括研究对象或现象在空间上或时间上的量度,即空间尺度和时间尺度。时间和空间尺度还具有复杂性、变异性特征。尺度研究的根本目的在于通过适宜的空间和时间尺度来揭示和把握复杂的土壤质量变异规律。Cambardella et al. (1994) 在两个田块尺度范围内研究了土壤质量指标(土壤有机碳、全 N、pH、容重等)的空间分布格局。结果表明在此尺度下 MBC 和 MBN 均属于中等程

度的空间变异。John et al. (1999) 在加利福尼亚南部丛林生态系统中的 1 个 3m×10m 小地块取样, 并对一系列的指标进行了时空分析。这些变量在土壤中并没有随机分布, 而是都有各自的分布方式。Pennock et al. (1994) 根据分散的采样数据在景观和地区尺度上评价了 3 个草甸农业系统的土壤质量。



图 1-3 土壤质量评价的空间尺度

三、土壤质量评价方法

随着地统计学、GIS 技术、模糊数学、计量经济学等在土壤质量评价的应用, 土壤质量评价方法已呈现多样化发展, 可根据评价对象、评价范围和功能选择相合适的评价方法 (Goovaerts, 1999, Kwansoo et al, 2001, Gruijter et al, 1997)。广义上分为定性和定量两种类型的评价方法, 土壤质量的评价由定性分析向定量评价过渡。

定性描述土壤质量的方法较直观, 用诸如土壤看起来如何、摸起来如何、闻起来如何等词描述, 这也是农民经常采用的方法 (张桃林等, 1999)。定性评价方法选择的指标是容易观察和迅速定性的。这种定性的方法允许土地经营者们开发出 1 种可以用于在他们自己的土地上评价、监测土壤质量且简单的指标线索。包括土壤质量卡 (赵其国等, 1997; Douglas, et al, 2003)、土壤质量试验箱 (United States Department of Agriculture, 1999), 定性评价方法所得