

土壤质量与土壤质量指标及其评价

刘占锋, 傅伯杰*, 刘国华, 朱永官

(中国科学院生态环境研究中心系统生态重点实验室, 北京 100085)

摘要: 土壤作为一种重要的自然资源可以为人类生产食物和纤维, 并维持地球生态系统。土壤也是植物生长的媒介、水、热和化合物的源、水分的过滤器和废物分解的生物介质。土壤与水、气和植物互作并抑制环境的波动。土壤可以调节很多控制水气质量和促进植物生长的生态过程。土壤质量概念的引入使我们更全面地理解土壤, 也有助于合理地使用和分配劳力、能源、财政和其它投入。土壤质量也提供了一个通用的概念使得专业人员、生产者和公众明白土壤的重要性。此外, 它也是一个评价管理措施和土地利用变化对土壤影响的评价工具。土壤质量由土壤的物理、化学和生物性质组成, MDS 已被科学家们提出用于土壤质量评价。国际上比较常用的评价方法主要有多样指标克立格法、土壤质量动力学方法、土壤质量综合评分法和土壤相对质量法。人类对土地不和谐地利用和管理可以导致全球生物地球化学循环发生改变和加快土壤性质变化的速度, 当前世界各地土壤退化相当严重, 已日益威胁到人类赖以生存的土地资源。在探讨相关概念的基础上综述了近年来土地利用变化对土壤理化质量和生物质量的影响进展, 以引起国内外学者对土地利用变化对土壤质量影响研究的重视, 从而为探讨土地利用对土壤质量影响的机理和规律以及退化土地的恢复和区域土地资源管理以及土地的持续利用提供理论依据。土壤质量未来的研究应该集中在土壤质量指标与评价方法; 土壤质量变化的发生条件、过程、影响因素及其作用机理与时空规律性; 尺度问题的研究; 土壤质量保持与提高的途径及其关键技术研究。

关键词: 土壤质量; 土壤质量指标; 土壤质量评价; 土地利用变化

文章编号: 1000-0933(2006)03-0901-13 中图分类号: S151 文献标识码: A

Soil quality: concept, indicators and its assessment

LIU Zhan-Feng, FU Bo-Jie*, LIU Guo-Hua, ZHU Yong-Guan (Key Laboratory of System Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China), *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 901 ~ 913.

Abstract: As one of the vital natural resources, soil plays an important role in producing food and fiber for human beings, maintaining the terrestrial ecosystems and serving as a medium for plant growth, a sink for heat, water, and chemicals, a filter for water, and a biological medium for the decomposition of wastes. By interacting intimately with water, air, and plants, soil can buffer environmental fluctuations and regulate many ecological processes that control water and air quality and promote plant growth. The concept of soil quality defined as the capacity of a specific kind of soil to function, within natural or managed ecosystem boundaries, to sustain plant and animal productivity, maintain or enhance water and air quality and support human health and habitation. It was introduced to facilitate soil research by understanding soils more completely and by assisting the decision-making in the use and allocation of labor, energy, fiscal, and other inputs during the procedure of agricultural production. Consequently, soil quality provides a useful and universal concept for educating professionals, producers, and the public about the importance of soils. It also can be used to assess the impacts of management practices and land uses on soils.

Basically, soil quality is comprised of soil physical, chemical, and biological properties. So it is necessary to develop soil quality indicators which describe soil functions in natural and agro-ecosystems: promoting plant growth, protecting watersheds by

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目(40321101)

收稿日期: 2005-04-08; **修订日期:** 2005-10-24

作者简介: 刘占锋(1978~), 男, 河北邯郸人, 博士生, 主要从事景观生态学和土壤质量评价研究. E-mail: liuzhanfeng-2008@126.com

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: bfu@mail.rcees.ac.cn

Foundation item: The project was supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 40321101)

Received date: 2005-04-08; **Accepted date:** 2005-10-24

Biography: LIU Zhan-Feng, Ph. D. candidate, mainly engaged in landscape ecology and soil quality assessment. E-mail: liuzhanfeng-2008@126.com

partitioning and regulating precipitation and preventing air and water pollution. Monitoring the changes in soil quality indicators can provide useful information on the dynamics and trends of soil quality. Many soil attributes could serve as indicators of soil quality. However, they are often highly correlated, making it difficult to interpret the significance of changes in selected soil quality indicators. And also the scale problem should be taken into account. Indicators can be adjusted to match the scale of assessment or can be expanded to larger scales using various statistical procedures. A minimum data set (MDS) consisting of a set of soil attributes including soil chemical, physical and biological properties are selected to assess soil quality. The fitness of indicators used for soil quality assessment varies spatially depending on land types or land use, soil function and soil forming factors. Different land-use types may require adjusted critical limits and target values of certain soil functions, and require certain additional indicators for specific assessment. Various approaches, such as multiple-variable indicator kring (MVIK) method, integrated scoring method, dynamics method, and relative quality method, have been used to assess soil quality.

Ecologically incompatible human land-use and management practices such as deforestation and soil fertility depletion, cultivation, and land conversion, have greatly altered the global biogeochemical cycles and the dynamics of soil characteristics. Worldwide concern about soil degradation has been given, since it greatly threatened the soil resources on which humans live. Based on the discussion of basic concepts, we synthesized the research advances in the impact of land use changes on soil physical, chemical and biological quality. The problems needed to be solved in soil quality research and key issues for future studies were then analyzed. Much attention should be paid on soil quality indicator and assessment method, mechanism of soil quality change, scaling issue, and the practices of soil quality maintenance in the future studies.

Key words: soil quality; soil quality indicator; soil quality assessment; land use change

土壤作为一种重要的自然资源可以为人类生产食物和纤维,并维持地球上的生态系统。土壤也可作为植物生长的媒介、水、热和化肥的来源、水分的过滤器和废物分解的生物介质。土壤与水、气和植物互动并抑制环境的波动。土壤可以调节很多控制水气质量和调控植物生长的生态过程。但是人类对土地不和谐利用和管理已经导致全球生物地球化学循环发生改变和加快土壤性质变化的速度,当前世界各地土地退化相当严重,日益威胁到人类赖以生存的土地资源。本文综述了近年来土壤质量定义、评价指标和评价方法的研究进展,重点分析了土地利用变化对土壤理化质量和生物质量的影响,以引起国内外学者对土地利用变化对土壤质量影响研究的重视,从而为探讨土地利用对土壤质量影响的机理和规律以及退化土地的恢复和区域土地资源管理以及土地的持续利用提供理论依据。

1 土壤质量的定义和意义

土壤质量(soil quality)是维持地球生物圈最重要的因子之一,可以从生产力、可持续性、环境质量、对人类营养健康的影响等多方面来定义土壤质量^[1]。土壤质量是指土壤肥力质量、土壤环境质量及土壤健康质量 3 方面的综合量度,即土壤在生态系统的范围内,维持生物的生产能力、保护环境质量及促进动植物健康的能力^[2]。土壤肥力质量是土壤提供植物养分和产生生物物质的能力,是保障粮食生产的根本;土壤环境质量是土壤容纳、吸收和降解各种环境污染物的能力;土壤健康质量是土壤影响或促进人类和动植物健康的能力^[3]。

Parr 等提出了几个土壤质量定义的特定用处,可用于评价管理措施对土壤退化和保持的影响^[4]。土壤质量的概念有助于区别技术进步导致生产力的变化和土壤质量的变化导致的生产力的变化。土壤质量的概念也可用于监测与农业管理有关的可持续性和环境质量的变化。

2 土壤质量指标

土壤质量主要取决于土壤的自然组成部分,也与由人类利用和管理导致的变化有关。作为一个复杂的功能实体,土壤质量不能够直接测定,但可以通过土壤质量指标来推测。土壤质量的好坏取决于土地利用方式、生态系统类型、地理位置、土壤类型、以及土壤内部各种特征的相互作用,土壤质量评价应由土壤质量指标来确定。土壤质量指标(soil quality indicator)是表示从土壤生产潜力和环境管理的角度监测和评价土壤健康状况的性状、功能或条件^[5]。也有人认为土壤质量指标是指能够反映土壤实现其功能的程度、可测量的土壤或植

物属性^[6]。对土壤性质变化方向、变化幅度和持续时间的测定可用于监测农业土地管理的指标^[7,8]。近年来,很多土壤质量指标被提出,一些已经被检验和验证^[9,10]。评价土壤退化和生产力的土壤质量指标一般是基于农作物的生产力、土壤的物理化学性质和土壤有机质的丧失^[11]。

土壤质量指标的确定是一件很复杂的事情,而且在不同的土壤系统之间变化很大。Larson 和 Pierce 提出了最小数据集(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^[10]。他们将易用标准方法直接测定的物理化学指标结合起来,同时也建议使用土壤转换方程来估计不能实际测得的参数。MDS 中的土壤质量指标包括有机碳、速效养分、pH、电导率、质地、根系深度、容重、水分传导率和有效持水量,并建议将所有的土壤质量指标整合成一个综合的质量指标。Arshad 和 Coen 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^[9]。Doran 和 Parkin 扩展了 MDS,将微生物生物量和可矿化的 N 等生物学指标加了进去^[2]。

2.1 土壤质量的物理化学指标

土壤有机质是反映土壤质量的最重要的化学参数之一。除了作为营养来源,它可以改善土壤的结构和持水量和提高生物活性。它被包括在 MDS,并通过土壤转换方程来计算容重、持水量,淋溶势,离子交换量(CEC)和土壤生产力。

对土壤 pH、电导率、CEC 和养分含量的评价对评价土壤质量的化学方面是必要的^[2,9,10],因为它们提供了一个能够反映土壤提供养分和缓冲化学改良的能力的测定指标^[12]。pH 可以影响很多土壤生物学性质和化学性质间的关系。离子交换量是评价土壤保持和提供养分的能力的重要属性。

基础土壤物理质量指标在比较土壤类型间的质量差异很有用。土壤质地是最基本的土壤物理性质,它可控制水分、养分和气体的交换、保持和吸收。土层厚度是影响单位面积植物可利用资源数量的量化性质。

土壤容重随着土壤质地、结构和有机质含量不同变异很大,但是,对于特定的土壤类型,容重可用于监测土壤的紧实程度。土壤容重的变化除了本身影响水分和氧气的供应外,还可影响许多其它性质和过程。用锥形透度计测定土壤力度可作为一个反映土壤紧实的指标^[13]。

水分渗透、保持、可利用性、排水和水气平衡等指标对于全面监测土壤功能很重要。有效持水量和饱和水分传导率最常出现在土壤质量指标的 MDS 中。有效持水量表示土壤供应水分的相对能力。饱和水分传导率是一个反映土壤排水速度的指标,可用于判断土壤的水气平衡。

土壤结构是指被有机质和其它化学沉淀物粘结在一起的团聚体的大小和形状。它几乎可以影响土壤所有的物理、化学和生物性质。团聚体的稳定性可以用来描述当土壤处于不同压力下保持其固相和气液相比例的能力。由于土壤团聚体可以反映土壤生物性质、化学性质和物理性质间的相互关系,所以土壤团聚体是一个很重要的质量指标。Arshad 和 Coen^[9]指出作物和土壤管理措施对土壤物理质量的影响可以用土壤团聚体的大小分布和稳定性来描述。

2.2 土壤质量的生物学指标

由于有简单可行的测定方法,土壤质量评价初期主要集中在土壤的物理和化学性质^[10]。但是,土壤物理化学性质作为土壤质量指标有时不能评价土壤管理和土地利用的影响。

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上生长的植物、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。土壤微生物研究分为 3 个层次:种群层次、群落层次、生态系统层次,生态系统层次的研究被认为是最好的快速评价土壤质量变化的可能方法,多数研究认为,土壤微生物(包括微生物生物量、土壤呼吸)是土壤质量变化最敏感的指标。土壤动物是土壤环境质量和健康质量的重要指示特征,特别是无脊椎动物如线虫、蚯蚓等能够敏感地反映土壤中有毒物质含量。以植物作为土壤质量评价指标时,主要是考察植物的生长状况、产量格局、根系结构、植物组织特征、牧草物种的多样性和杂草的优势种,进而评价土壤的肥力质量和环境质量、健康质量。

Kennedy 和 Papendick^[14]指出土壤生物学性质和生物化学性可作为反映农业生态系统和土壤生产力变化

的指标。土壤微生物性质可以促进很多土壤物理化学性质的变化过程。微生物活性也参与分解、养分和能量循环、土壤团聚体的形成和有机质转化的调控等过程。

土壤微生物生物量被证明是一个稳定的、可靠的参数以用来做区域尺度量化分析,取样一般在营养生长末期或早春。它可作为潜在的土壤质量指标指示土壤有机质水平、平衡和未来的趋势,也可用于土壤质量的长期监测^[15,16]。前人的研究集中在微观尺度上与土壤养分循环和土壤质量相关的微生物活性的研究^[17]。但是,对土壤微生物生物量在景观尺度上的空间分布的分析研究很少^[18~20]。对土壤微生物活性控制的有机碳的转化过程和运移的研究有助于评价区域土壤资源的功能^[21]。综合的微生物指标已被选作土壤质量潜在指标,并在土壤物理和化学性质的背景下进行分析^[22]。

尽管土壤微生物生物量仅占有机碳的1%~3%和有机氮的2%~6%,但是它在有机质动态中起着很重要的作用。微生物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。土壤微生物各种各样的代谢活动能够调控土壤中能量和养分的循环,也在许多有机化合物的全球循环中起着重要作用。由于微生物生物量的重要作用,它常被选为反映土壤质量发展和退化的指标,也被用来评价土壤干扰和管理的影响。

活性有机质是土壤微生物最易分解的那部分有机质,它由微生物最易接近的碳和能量来源的那部分化合物组成,这部分有机质控制了土壤的生物过程和决定了向作物提供养分的能力。因此,活性有机质已经被认为是很重要的土壤质量指标且常常被包括在土壤质量评价中。

土壤酶活性起初用来评价土壤肥力,最近已被选作潜在的土壤质量指标。土壤酶的活性在养分循环中起着很重要的作用而且已被用作微生物活性指标^[23]。酶活性之所以能成为一个好的土壤质量指标是因为它在分解和矿化过程中起着重要作用而且对土壤管理措施变化反应敏感^[24]。

2.3 土壤质量的物理、化学和生物学指标间的相互关系

土壤微生物生物量、土壤呼吸和土壤理化性质间的相关性在各种尺度上都存在。有关研究集中在土壤肥力或土壤质量指标的空间分析^[25~27],在景观尺度上研究了土壤质量指标的变异,区域尺度上的研究很少。其它研究集中在微生物活性在景观尺度上的空间分布,如碳矿化和土壤酶活性^[28]。目前关于土壤微生物的区域变异研究集中在种群水平上^[29],按气候梯度利用常规统计方法研究微生物多样性的生物地理格局^[19]。进一步的工作需要研究土壤性质的空间自相关和协方差的时间稳定性,同时研究地貌特征、土壤理化性质和土壤微生物活性之间的功能相关性。

3 土壤质量的评价

评价土壤质量及其随时间变化的趋势^[9]是农业土地可持续管理中一个很重要的思想和指标^[30]。土壤质量的评价是指评价土壤实现其功能的程度。从作物生产的角度出发,土壤的功能就是提供养分和维持作物生长。土壤质量的评价不仅仅限于传统的农业作物。Conry 和 Clinch 在爱尔兰中部平原的研究把土壤质量和森林物种联系起来^[31]。土壤质量的监测和评价对阐述环境问题也很重要。Cooper 等评价了与美国食品工业相关的环境问题,建议发展将食品加工过程中的废物转化为能量和产品的方法来提高土壤质量和作物的营养品质^[32]。

土壤质量评价与监测是评价土壤退化的重要工作,也是设计和评价土壤持续利用及土壤管理系统的一个基础。目前缺乏统一的评价指标以及将各项土壤性质与土壤管理措施结合起来的评价方法。国际上比较常用的评价方法有以下几种:

(1)多变量指标克立格法(MVIK) 这种方法可以将多个土壤质量指标整合成一个综合的土壤质量指数,这一过程称为多变量指标转换(MVIT, multiple variable indicator transform),是根据特定的标准将测定值转换为土壤质量指数。各个指标的标准代表土壤质量最优的范围或阈值,是在地区基础上建立和评价。该法优于土壤质量评分法,它可以把管理措施、经济和环境限制因子引入分析过程,其评价范围可以从农场到地区水平。通过单项指标的评价,该法还能确定影响土壤质量的最关键因子^[1]。

(2)土壤质量动力学方法 由于土壤系统的动态性,对可持续管理的评价应该采用动态评价方法,利用系统动力学特征测量其可持续性。

(3)土壤质量综合评分法 Doran 和 Parkin 将土壤质量评价细化为食物与纤维的生产量、土壤侵蚀量、地下水质量、地表水质量、大气质量和食物质量等 6 个特定的土壤质量元素的评价。通过建立各个元素的评价标准,利用简单乘法运算计算出土壤质量的大小,每个元素的权重由地理、社会和经济因素所决定。

(4)土壤相对质量评价法 通过引入相对土壤质量指数来评价土壤质量的变化,这种方法首先是假设研究区有一种理想土壤,其各项评价指标均能完全满足植物生长需要,以这种土壤的质量指数为标准,其它土壤的质量指数与之相比,得出土壤的相对质量指数(RSQI),从而定量地表示所评价土壤的质量与理想土壤质量之间的差距,这样,从土壤的 RSQI 值就可以明显而直观地看出这种土壤的质量状况,RSQI 的变化量可以表示土壤质量的升降程度,从而可以定量地评价土壤质量的变化。上述几种土壤质量评价方法各有优点,可以认为土壤相对质量评价法更为方便、合理,它评价的是土壤的相对质量,而且可以根据不同地区的不同土壤建立理想土壤,选择代表性的土壤质量评价指标做出量化的评价结果。

国内学者在土壤质量评价的新方法建立方面作了大量的探索性工作。王效举等引入相对土壤质量指数的概念,应用地理信息系统技术,为小区域水平上土壤质量时空变化的评价提供了一种方法^[33]。在地理信息系统支持下,国内不少学者将灰色关联度法、模糊数学、多元统计分析、层次分析模型、地统计学方法、系统评价模型、Fuzzy 聚类分析方法等方法应用到土壤质量综合评价中^[34,35-37]。付强等将高维降维技术-投影寻踪评价模型(PPE)应用到土壤学科领域,为土壤分类与等级评价研究提供一条新思路^[38]。潘峰等将物元分析方法应用到土壤质量评价研究,为土壤的评价及综合利用提供了一种新的科学方法^[39]。曾国熙等将密切值法应用于土壤质量排序中,并提出了按密切值大小的突变进行分类的新方法,该方法原理简单,计算简便,结果客观可靠,是一种值得推广的多目标决策方法^[40]。齐伟等探讨了土壤质量时空变化一体化的评价方法,并以河北省曲周县一个 33km² 的小区为例,对 1980 年与 1999 年两个时段的 8 个单项土壤质量指标和土壤综合质量指标的时空变化进行了定量化评价。结果表明土壤质量指数法与 GIS 技术相结合,可以很好地表示土壤质量的时空变化^[41]。刘德春等根据随机过程原理,构建了新的转移矩阵,建立了一个马尔柯夫链综合土壤质量评价模型,通过实例证明了模型的可靠性^[42]。

土壤质量的评价可在多种尺度下进行,但是由于土地利用的多样性,评价指标应该是相对的而不是绝对的。在点尺度上,需要从机理水平理解土壤质量,强调土地利用决策对养分循环、淋溶、土壤结构、碳积累和其它相关过程的影响。在农田和小流域尺度上,尤其当土壤的初级功能为维持作物生产时,土壤质量的评价与生产力评价类似,但是它不仅强调产量,同时强调土壤资源的物理、化学和生物状况以及目前土地利用措施的长期经济变异性。在小区尺度上,需要进行田间试验来理解土壤质量和作物生产之间的关系。多名学者进行了土壤质量大尺度的研究,其中包括大面积的耕地和强度的土地利用。Wardle & Bollero 比较了 Illinois 州 36 个农场的土壤质量^[43]。Hellkamp 等调查了美国大西洋中部地区 293 个点耕地的土壤质量^[44]。Boehm & Anderson^[22]选取土壤属性作为土壤质量指标在景观尺度上评价了 3 种农作制度下土壤的质量。Wirth^[45]在区域尺度上调查了德国东北部低地土壤的微生物、物理和化学性质,分析了微生物生物量中的碳、土壤基础呼吸、有机碳、水溶性碳、全氮、离子交换量、pH 和质地,以评价其空间分布格局、空间自相关和年际变异。Sparling 等在国家尺度上研究了土壤质量的变异,并且评价了取样的代表性和确定了土地利用和土壤分类对土壤质量变异的贡献^[46]。

我国的土壤质量评价工作虽然起步晚,国内学者也在这方面做了大量的工作。孙波等首先提出了红壤质量评价指标的选择原则,并从化学、物理学和生物学 3 个方面探讨了评价红壤质量动态变化可采用的指标体系^[47]。傅伯杰等采用综合土壤质量指数和土壤退化指数比较了天然林地、草地、灌木、次生林地、耕地和退耕地等 6 种土地利用类型的土壤质量。结果表明灌木可以很好地恢复土壤性质,综合土壤质量指数和土壤退化指数可以很好地评价土壤质量水平^[48]。吴祥云等从土壤微生物、土壤持水性、土壤物理、化学性质方面探

讨不同类型樟子松人工固沙林土壤质量状况,研究结果表明针阔混交林比针叶纯林土壤质量高,同时指出林木对土壤的改良作用是一个长期的持续过程^[49]。杨志辉等通过田间试验对湿地稻-鸭复合生态系统的稻田土壤质量进行了研究。研究结果表明,实行稻-鸭生态复合种养,其土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾都有所增加,土壤物理性状也得到一定程度地改善,稻田土壤氧化还原状况也得到了明显改善^[50]。欧阳进良等在综合自然、社会经济信息,对曲周县进行的生态经济综合分区基础上进行农户调查,对各分区土壤质量状况及其变化以及不同分区之间农户行为差异的分析表明,农户主要通过种植行为选择和经营投入和资源利用等行为对土壤质量和环境产生影响,不同类型农户在种植行为选择和经营投入上有较大差别^[51]。卢铁光等通过建立土壤质量变化评价模式,来计算主要耕作土壤和表层耕作层的土壤质量矩阵,利用耕作层土壤质量指数的变化来定量分析该市 50a 农业生产以来土壤质量的变化趋势。结果表明土壤质量指数均呈下降趋势,土壤发生了退化^[52]。胡金明等利用主要耕作土壤表层土的土壤质量指数的变化来定量地分析三江平原地区大面积开荒后土壤质量的变化趋势,结果表明,大面积开荒后导致土壤发生了明显的退化^[53]。郑华等对南方红壤侵蚀区 4 种主要森林恢复类型下土壤物理、化学、生物学性状进行了比较研究,结果表明不同的森林恢复类型导致了土壤物理、化学和生物学性质的显著差异^[54]。马强等建立了黑土肥力评价指标体系,运用模糊数学和因子分析方法对黑土肥力水平进行评估、分级^[55]。张庆利等用修改后的内梅罗公式作为土壤质量的评价模型,将传统的统计方法与地统计学方法及 GIS 技术相结合,研究了金坛市土壤质量的空间分异规律,并对土壤质量进行了定量化的评价。结果表明土壤质量指数的分布特点明显与地形地势、径流方向和土地利用等有关,而地形地势是土壤质量空间分布的最根本的原因^[56]。

1999 年以来,我国科学家在揭示主要类型耕地土壤质量限制因子及交互作用的机理、土壤圈内外物质交换的过程、强度、机制及对环境的胁迫和土壤质量演变时空分规律的研究方面取得了显著成绩。有关研究表明,土壤质量在针对当地土壤退化问题而采取了保护性措施的地区将维持稳定或提高;而没有采取保护性耕作而又强度种植的地区和边缘地区土壤质量将会不断下降;当生荒地开辟为农田时,通常在开始的头 10a,其土壤质量会迅速下降,当投入大于产出时,土壤质量则会慢慢得到改善;合理增加有机物质、采取保护性耕地和作物轮作及种植豆科植物、作物残茬管理、侵蚀控制和修筑地下排水系统等措施,可使土壤质量得以维持甚至提高^[57]。

4 土地利用变化对土壤质量的影响

土壤质量是一种指示土壤条件动态变化最敏感的表达方法,它既能反映土壤管理的变化,也能反映土壤恢复退化的能力。许多自然和人为的生态过程如气候波动、植被演替、土地利用变化等都显著影响土壤质量的时空演变,其中土地利用方式和管理水平是影响土壤质量变化最普遍、最直接、最深刻的因素,可以导致土壤养分退化、水土流失、土地沙漠化等退化现象,亦可以达到提高土壤质量、改善生态环境的目的^[58]。人类活动可以导致土壤性质变化的速度^[59],当前世界各地土地退化相当严重,已日益威胁到人类赖以生存的土地资源。土地利用变化能够影响土壤水分和土壤养分的分布和迁移^[60],进而影响土壤的性质和质量。

4.1 对土壤物理化学质量的影响

科学家们已经对土地利用/覆被变化对土壤的物理化学性质的影响进行了广泛地研究。Lumbanraja 等^[61]在印尼 Sumatra 南部地区的研究表明:当初生林地转变为次生林、咖啡种植园和耕地后,土壤有机碳、全氮、速效磷、全磷和离子交换量明显下降。Hajabbasi 等^[62]在伊朗 Zagros 山脉的研究表明森林砍伐导致土壤容重增加,有机质、全氮和可溶性离子含量下降。Saikh 等^[63]在印度 Orissa 的研究表明林地转变为耕地后土壤有机质、全氮和 C/N 明显下降,全磷和速效磷则下降不明显。Lal^[64]指出尼日利亚地区森林砍伐后随着耕作时间的增加土壤化学性质恶化。对比天然林、人工林、草地、耕地等不同土地利用对土壤质量影响时发现,土地利用/土地覆被变化影响了土壤的物理结构、机械组成和养分等,耕作导致了土壤质量的明显降低,而造林和草地则有助于改善土壤质量^[65]。Celik^[66]研究了地中海高原土地利用类型变化对土壤性质的影响,结果表明牧场转变为耕地后土壤有机质含量降为原来的 49%,各种土地利用类型下土壤有机质在各层之间差异不明显,林地

和牧地间土壤有机质差异不明显,耕地、牧地和林地 0~20cm 土层容重差异明显。

许多农业管理措施对土壤有机质的质量和数量产生不利影响,这会进一步恶化土壤的物理、化学和生物化学性质,尤其是土壤肥力。Caravaca 等^[67]评价了土地利用变化对土壤有机质数量、质量以及与土壤微生物活性相关生物化学性质的影响,研究结果表明,与草地相比,农业措施明显降低了土壤中的总有机碳、腐殖质、水溶性碳、水溶性碳水化合物、脱氢酶、磷酸酶和 β -葡萄糖酶。科学家对林地向牧地和耕地转变对 C 积累^[68]和土壤养分可利用性^[69]进行了大量的研究。由于自然植被的去除、分解、燃烧或被支持低碳含量的作物取代,林地转变为牧地可以显著降低 C 的储存^[70],土地利用还对土壤 N 循环具有重要影响。

人类对土地不和谐地利用和管理已经导致全球生物地球化学循环发生改变。土地向耕地转变使土壤有机质降低。Elliott^[71]和 Gupta & Germida^[72]报道,耕作使牧场土壤有机质下降 25%~50%。林地、草地向耕地的转变使土壤性质退化,尤其降低土壤有机质和改变土壤团聚体的稳定性和分布^[73],使得土壤对侵蚀更敏感^[74]。Lemenih 等^[75]研究了埃塞俄比亚地区热带干 Afromontane 天然林转变为耕地和随后的耕作措施对土壤物理化学性质的影响,研究结果表明,随着耕作年限的增加,0~10cm 和 10~20cm 土层的容重显著增加,但是孔隙百分比显著下降。0~10cm 土壤碳和全氮含量显著下降,并且与耕作时间呈指数关系。但是,10~20cm 土壤碳和全氮含量在连续耕作 34a 后人然很高。耕种 26a 后,0~20cm 土层碳积累与天然林相比并不很低。与天然林地相比,连续耕种了 53a 的 0~10cm 土层可利用的 P、K 明显高于林地。可交换的 Ca 离子、离子交换量和盐基饱和度不同程度降低。Bewket & Stroosnijder^[76]研究了埃塞俄比亚西北高原一典型流域土地利用对土壤性质的影响,研究结果表明耕地、牧场和桉树种植园土壤的含砂量较高,但是 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和离子交换量较低。桉树林土壤容重较其它 3 种土地利用类型要高。天然林地与桉树林地在土壤有机质和全氮差异明显。耕地与桉树林地在速效磷差异明显。Du Toit 等^[77]发现在 Free 州 5~90a 的耕作使土壤的 C、N 损失 10%~73%。Nel 等^[78]发现在 Pretoria 地区 Hutton 土壤耕种 50a 后土壤 C 下降 50%。Lobe 等^[79]在 Free 州发现耕种 3.5a 后土壤 C 下降 50%。土壤对森林砍伐及随后耕作措施沿时间梯度的长期反应整体上表现为土壤质量的下降,这与其它热带地区森林砍伐及随后耕种引起土壤肥力下降的研究结果类似^[64,80]。Mills & Fey^[81]指出土地利用可以通过地表覆被的去除、耕作导致的风化、放牧导致的有机质投入的减少和微生物或活性增强显著地影响土壤有机质和增加土壤板结,最终导致土壤有机质降低。土地利用也可导致土壤化学性质发生变化,种植园林地导致土壤中硝酸盐增加,每年的火烧增加了黏粒的分散性和表土的板结。

针对土地利用变化对土壤质量的影响这一研究领域,我国学者也做了大量工作。黎华寿等对典型坡地相邻地块不同利用方式对土壤理化性状影响的研究表明,人工梯地上的农林复合系统和多年生作物复合群落的土壤容重、土壤结构和土壤持水力及水分渗透力与相邻天然森林土壤相近,优于退化灌草丛和残林地,并指出揭示建立仿森林结构的农林复合系统和多年生作物复合群落,并注意实行水土保持的耕作,是退化坡地生态重建的有效途径之一^[82]。苏永中等研究了科尔沁沙地退化草地开垦后,在 14a 不同的土地利用和管理方式下土壤物理、化学和生物学性状的特征。研究结果表明,不同的土地利用方式和管理措施显著影响土壤质量变化的程度和方向;调整土地利用结构,基本农田实行精细管理,旱作农田退耕还草还林是保护土地资源,实现区域生态恢复和重建的根本选择^[58]。刘世梁等从样带与生态系统类型尺度上探讨了土地利用与坡面景观位置对土壤水分与养分的影响,结果表明,灌丛有着较高的土壤质量指数,而人工林与农田的 QI 值较低,这表明灌丛在坡面上有着“肥力岛屿”效应。不同坡位条件下土壤质量指数表明,与中坡位和下坡位相比,上坡位与坡脚处土壤质量要高。结果说明坡面土壤质量的变化是土地利用方式变化与景观位置分异综合作用的结果^[83]。李阳兵等研究了土地利用方式对处于岩溶脆弱生境核心部位的土壤质量性状的影响,结果显示 4 个研究地区不同土地利用系统中各养分指标间存在较大的变化,但变化规律并不一致。在较大区域内土地利用方式对岩溶山地土壤属性的影响不显著,而小区域内不同土地利用方式下土壤质量存在显著差异。岩溶山地土壤质量与土地利用方式的关系复杂,存在区域差异性;同时人工造林改善土地质量状况需要较长时间的演替,简单的退耕还林很难使土壤质量得到恢复^[84]。李新宇等对河北省怀来县官厅水库南北两岸 8 种主要土

地利用类型的土壤养分、pH 值和土壤容重等进行了分析,讨论了不同土地利用方式对土壤质量的影响,并评价了不同土地利用方式下的土壤退化程度。结果表明:土地利用管理与保护措施是引起土地利用类型间土壤质量差异的主要因素^[85]。巩杰等对黄土丘陵小流域持续利用 25a 后的荒草地、山杏林地、农田、油松林地、灌木林地和撂荒地土壤性状的研究结果表明,不同土地利用方式和植被恢复类型对土壤质量有很大影响;植被恢复重建和农地撂荒将增加土壤有机质含量,提高土壤质量;粗放的农业耕作措施将降低土壤质量并引起土壤退化;灌丛有明显的肥力岛屿作用;撂荒在一定程度上可以培肥土壤^[86]。赫晓慧等以陕北农牧交错带为研究对象,对不同植被对土壤质量的影响进行了研究。结果表明人工植被的建立与生长明显改善了土壤质量,但不同样地随着植被盖度和植被种类的不同,土壤质量差异很大;多年生乔木林改良土壤质量的潜力最高,耕作粗放的农地土壤质量有所下降^[87]。章铁等研究了果农复合经营系统中的 6 种模式和 1 种单种作物对土壤肥力的影响。试验结果表明,果农复合经营模式的土壤肥力高于单种作物土壤的肥力;6 种复合经营模式中“鸡+桃”模式和“桃+紫花苜蓿”模式的土壤肥力最高^[88]。刘举等研究了黄土高原油松、刺槐人工林对土壤的培肥效应。结果表明种植人工林对土壤养分含量的提高有很大帮助,但不同林型提高程度不同。阔叶林下土壤肥力的提高较针叶林显著^[89]。袁菊等通过对贵州喀斯特生态脆弱区土壤的调查研究,结果表明,成土母质、海拔高度和利用方式对土壤的理化性质有较大影响,其中影响最大的是土地利用方式,即林地、灌木丛地、荒草地等自然植被下的土壤理化性状较好,养分含量高,而经开垦耕作后,土壤理化性质变化较大,土层变浅,腐殖质层变薄,颗粒变细,水稳性团粒减少,土壤易于流失,有机质及养分含量明显减少,pH 值升高,土壤贫瘠化,土壤总体质量表现出明显的退化^[90]。

4.2 对土壤生物质量的影响

土地利用变化也能够对土壤微生物产生明显的影响,影响土壤微生物数量和分布。Ruess 和 Seagle^[30]研究了坦桑尼亚 Serengeti 地区土壤微生物过程的景观格局,研究结果表明,土壤肥力和微生物过程的区域格局与 Serengeti 地区的年均降雨量呈负相关,土壤微生物过程与食草动物的利用和强度的景观格局密切相关。土壤水分、温度和由作物根系、根际产物和作物残茬引起的碳输入的季节性变化对土壤微生物生物量及其活性有明显影响。

土壤微生物生物量的季节变异在欧洲已有报道,Uckan 和 Okur^[91]对耕地和草地土壤中微生物生物量和酶活性的季节性变化进行了量化研究,发现对于不同取样时期土壤微生物生物量、可矿化碳和蛋白酶活性差异显著。Singh 等^[92]报道了微生物 C、N、P 在林地和干草原土壤中季节变化。Ross^[93]在新西兰的草丛草地和引种的牧场的研究表明土壤水分与土壤微生物生物量之间呈负相关。土壤水分和温度短期的波动会影响微生物生物量中碳含量。Arunachalam 等^[94]在印度东北部亚热带成熟阔叶林研究了林隙大小和土壤性质对土壤微生物生物量动态的影响,结果表明,土壤微生物群体在温度和湿度较低时较小,在雨季达到峰值;在雨季,由于植物对养分的更多需求限制了土壤微生物可利用的养分, C_{mic} 、 N_{mic} 、 P_{mic} 的值较低,此外还发现 C_{mic} 、 N_{mic} 、 P_{mic} 与土壤理化性质之间存在微弱的相关性。Yan 等^[95]研究了中国三峡地区土地利用变化对土壤微生物生物量和代谢熵的影响。与林地相比,柑橘-小麦和茶丛地土壤的土壤微生物生物量中的碳占土壤总有机碳的百分比是柑橘地的 4 倍。除了柑橘-小麦和林地,其他土地利用类型上均发现微生物碳、 C_{mic}/C_{org} 和速效氮之间有显著相关性。Sharma 等^[96]在对锡金 Mamlay 流域进行研究中发现,当林地转变为农业用地和荒地时,能够导致土壤微生物的明显减少,其中林地转变为荒地会导致微生物生物量 N 减少了 78%,微生物生物量 C 减少了 73%,微生物生物量 P 减少了 71%。Filser 等^[97]将种有谷物的耕地转变为综合耕作(integrated farming)、有机耕作(organic farming)、草地和休耕地后发现,除了草地外,微生物的数量在总体上表现了增加的趋势;草地、休耕地的 *Collembola* 丰富度略有降低,*Protaphorura armata* 和 *Lepidocyrtus cyaneus* 在所有土地利用类型中均呈减少的趋势。Powlson 等^[98]研究表明经过 18a 的秸秆还田,土壤微生物生物量增加了 50%,但是却没有观测到土壤总有机质发生明显变化。姚槐应等采用碳素利用(BIOLOG)及磷酸酯脂肪酸(PLFA)法,研究了 8 种红壤微生物群落的功能多样性和结构多样性。两种方法均表明土地利用方式能显著影响微生物的多样性。试验表明总

PLFA 含量与微生物生物量呈显著相关,茶叶园土中微生物对各类碳源的利用能力均很低,呈现出非常独特的微生物功能多样性^[99]。陈国潮等研究了土地利用对红壤土壤微生物生物量 C、N、P 的影响,发现土地利用对土壤微生物生物量 C 影响很大。 C_{mic} 在退化的休闲地最低,林地、茶园、柑橘灌丛和休闲草地次之,菜地和稻田最高。土地利用主要通过有机质的投入和累积来影响 C_{mic} 。 N_{mic} 与土壤中的总氮和速效氮显著相关,土地利用对其的影响相对较小^[100]。

Parkin^[101] 综述了与微生物种群及过程相关的空间变异,集中探讨了变异表达的尺度及在各个尺度水平上控制变异的土壤环境因子。空间变异可在不同尺度上表达,一般可分为微观尺度、小区尺度、大田或景观尺度和区域尺度。土壤微生物过程在景观尺度上的变异已经在森林生态系统、沙漠生态系统和农业生态系统中进行过研究。控制景观尺度上变异的基本因子包括土壤类型(质地、表土厚度、有机质含量、pH 值和养分状况)、地表地形和水分分布。控制区域尺度上变异的基本因子包括气候因子、土地利用格局、植被覆盖和地表特征。

5 土壤质量研究展望

土壤质量是个非常综合的概念,不仅涉及到土壤学、土地利用、农业种植措施和管理等众多方面,而且也与社会、经济和政策有关。所以,需要研究的领域很多。目前,对于土壤质量方面的研究主要集中在土壤质量现状的调查和分析、土壤质量评价的理论、方法和指标体系、土壤质量变化的原因、土壤质量动态监测与预测预警及对策等方面^[2, 9, 14, 102~104],总结当前国际土壤质量研究的最新进展,结合我国的实际情形,有关土壤质量研究应加强以下几个方面:

(1)土壤质量指标与评价方法 不同尺度研究问题,需要利用不同的技术测定不同的指标。这就要求发展大田尺度的指标进而为农户及时提供信息,此外也要发展区域尺度指标以监测土壤资源质量的发展趋势。Malcom Ewen^[105] 从能量效率角度对土壤质量进行了全新的定义,提出了通过土壤系统的能量效率来评价土壤质量,为建立通用的土壤质量评价指标进行了开拓性的工作。此外,Steinborn & Svirezhev^[106] 从热动力学角度出发选取熵作为指标评价了农业生态系统的可持续性,也展示了其在土壤质量评价方面的广泛应用前景。

(2)土壤质量变化的发生条件、过程、影响因素及其作用机理与时空规律性。重点是土地利用变化、土壤质量和土壤微生物环境之间的有机联系及其内在规律的研究。探讨土地利用变化与土壤微生物多样性之间的关系,进而揭示土地利用变化对土壤质量影响的机理和规律,这对于退化土地的恢复和区域土地资源管理以及土地的持续利用具有重要的意义。

(3)尺度问题的研究 尺度是发展合适的土壤质量指标中的很重要的一个问题。尺度的维数可在空间和时间两方面影响土壤质量的评价。研究区域小至景观中的一个点和研究小区,大至一个国家乃至世界。由于气候、土壤水分、人类活动、植物生长阶段和其他因子可引起土壤质量指标的时间变异,所以时间框架很重要。土壤质量指标对变化的反应时间决定了测定指标变化合适的时间间隔。这就要求在测试和揭示土壤特征时描述土壤过程的动态性和利用土壤特征的时间格局来描述土壤质量,此外也要重视管理措施改变后的过渡时期土壤特征的研究。科学家们采用两种途径来处理空间尺度问题:在土壤质量评价中选取与研究地理尺度相适应的指标和把由点尺度的指标获得的信息向更大尺度上扩展^[107]。

(4)土壤质量保持与提高的途径及其关键技术研究 土壤的组成不仅是矿物质,它是矿物质、微生物、根系分泌物、水分运动和非生物与生物动态过程的集合。提高土壤质量必须扩展土壤成分间互作研究,主要集中在根系生长动态对肥料及其它措施的反应、不同系统的水分利用效率、土壤养分测试的简易方法、选取时空变异性作为土壤质量指标等方面。

References:

- [1] Smith J L, Halvorson J J, Papendick R I. Using multiple-variable indicators Kriging for evaluating soil quality. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57:743 ~ 749.
- [2] Doran J W, Parkin T B. Defining and assessing soil quality. In: Doran J W, Coleman D C, Bezdicek D F, *et al.* eds. *Defining soil quality for a sustainable environment*. SSSA Spec. Publ. 35, Am. Soc. Agron., Madison, WI, 1994. 3 ~ 21.

- [3] Lu X N, Meng X N, Ma W Z, *et al.* Soil quality and its development. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2004, 16(2): 105 ~ 109.
- [4] Parr J F, Papendic R I, Hornick S B, *et al.* Soil quality: Attributes and relationships to alternative and sustainable agriculture. *Am. J. Altern. Agric.*, 1992, 7: 5 ~ 11.
- [5] Zheng P Z, Liu Z X. Soil quality and its evaluation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(1): 131 ~ 134.
- [6] Arshad M A, Martin S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystem. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2002, 88: 153 ~ 160.
- [7] Hartemink E A. Soil chemical and physical properties as indicator of sustainable land management under sugar cane in Papua, New Guinea. *Geoderma*, 1998, 85: 283 ~ 306.
- [8] Wang X, Gong Z. Assessment and analysis of soil quality changes after eleven years of reclamation in subtropical China. *Geoderma*, 1998, 81:339 ~ 355.
- [9] Arshad M A, Coen G M. Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. *Am. J. Altern. Agric.*, 1992, 7: 25 ~ 31.
- [10] Larson W E, Pierce F J. Conservation and enhancement of soil quality. In *Proc. Of the Int. Workshop on evaluation for sustainable land management in the developing world. International Board for Soil Resource and Management (IBSRAM). Proceeding no.123 vol.2. Bangkok, Thailand, 1991.*
- [11] Dick R P. A review: long-term effect of agricultural systems on soil biochemical and microbial parameters. *Agr. Ecosys. Environ.*, 1992, 40:25 ~ 36.
- [12] Cambell C A, Biederbeck V O, Zenter R P, *et al.* Effect of Crop rotations and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass and respiration in a thin Black Chernozem. *Can. J. Soil Sci.*, 1991, 71:363 ~ 376.
- [13] Whalley W R, Dumitru E, Dexter A R. Biological effect of soil compaction. *Soil Tillage Res.*, 1995, 35:53 ~ 68.
- [14] Kennedy A C, Papendic R L. Microbial characteristics of soil quality. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 50:243 ~ 248.
- [15] Dalal R C. Soil microbial biomass-what do the numbers really mean? *Australian J. Experimental Agriculture*, 1998, 38:649 ~ 656.
- [16] Gregorich E A, Carter M R, Angers D A, *et al.* Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Can. J. Soil Sci.*, 1994, 74:367 ~ 385.
- [17] Pankhurst C E, Hawke B G, McDonald H J, *et al.* Evaluation of soil biological properties as potential bioindicators of soil health. *Australian J. Experimental Agriculture*, 1995, 35:1015 ~ 1028.
- [18] Ruess R W, Seagle S W. Landscape patterns in soil microbial processes in the Serengeti national park, Tanzania. *Ecology*, 1994, 75(4):892 ~ 904.
- [19] Staddon W J, Treveors J T, Duchesne L C, *et al.* Soil microbial diversity and community structure across a climatic gradient in western Canada. *Biodiversity Conservation*, 1998, 7:1081 ~ 1092.
- [20] Wirth S J. Soil microbial properties across an encatchment in the moraine, agricultural landscape of northeastern Germany. *Geomicrobiology J.*, 1999, 16:207.
- [21] Burke I C. Landscape and regional biogeochemistry: approaches. In: Sala O E, Jackson R B, Mooney H A, Howarth RW eds. *Methods in ecosystem science*. New York: Springer, 2000. 277 ~ 288.
- [22] Boehm M M, Anderson D W. A landscape-scales study of soil quality in three Prairie farming systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1997, 61:1147 ~ 1159.
- [23] Frankenberger W T, Dick W A. Relationships between enzyme activities and microbial growth and activity in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1983, 47:945 ~ 951.
- [24] Bandick A K, Dick R P. Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biol. Biochem.*, 1999, 31:1471 ~ 1479.
- [25] Cahn M D, Hummel J W, Brouer B H. Spatial analysis of soil fertility for site specific management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994, 58:1240 ~ 1248.
- [26] Robertson G P, Klingensmith K M, Klug M J, *et al.* Soil resources, microbial activity and primary production across an agricultural ecosystem. *Ecol. Appl.*, 1997, 7:158 ~ 170.
- [27] Pennock D J, Anderson D W, deJong E. Landscape-scale changes in indicators of soil quality due to cultivation in Saskatchewan, Canada. *Geoderma*, 1994, 64:1 ~ 19.
- [28] Smith J L, Halvorson J J, Bolton H. Spatial relationships of soil microbial biomass and C and N mineralization in a semiarid shrub-steppe ecosystem. *Soil Biol. Biochem.*, 1994, 26:1151 ~ 1159.
- [29] Horn B W, Dorner J W. Soil populations of *Aspergillus* species from selection Flavi along a transect through peanut-growing regions of the United States. *Mycologia*, 1998, 90:767 ~ 776.
- [30] Herrick J E. Soil quality: an indicator of sustainable land management? *Appl. Soil. Ecol.*, 2000, 15: 75 ~ 83.
- [31] Conry M J, Clinch P. The effect of soil quality on the yield class of a range of forest species grown on the Slieve Bloom Mountain and foothills. *Forestry*, 1989, 62:397 ~ 407.
- [32] Cooper J L, Dostal K, Carrood P A. Report of the workshop session on environmental issues. *Food Tech.*, 1985, 39:33 ~ 35. *Inst. of Food Technologists, Chicago.*
- [33] Wang X J, Gong Z T. Evaluation and analysis of soil quality changes in different time periods at small regional level in red soil hilly regions. *Scientia Geographica Sinica*, 1997, 17(2):141 ~ 149.
- [34] Hou W G, Jiang S C, Xiong S Q, *et al.* Evaluation of soil quality based on GIS. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2003, 28(1): 60 ~ 64.
- [35] Zhang Q L, Shi X Z, Pan X Z, *et al.* Characteristics of spatio-temporal changes of soil fertility in Jintan County, Jiangsu Province. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2):315 ~ 319.
- [36] Zhang H, Zhang G L, Qi Z P, *et al.* Systematic assessment of soil quality at farm level in tropical area of China. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(2): 186 ~ 193.

- [37] Wan C X, Zhang X Y. Application of fuzzy mathematics in the appraisal of soil quality. *Journal of Applied Sciences*, 1991, 9(4): 359 ~ 365.
- [38] Fu Q, Jin J L, Men B H, *et al.* Applying RAGA-based PPE model to classify and evaluate soil grade. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2002, 22(5): 51 ~ 54.
- [39] Pan F, Liang C, Fu Q. Application of matter element model based on stratification analysis method in soil quality evaluation. *Research of Agricultural Modernization*, 2002, 23(2): 93 ~ 97.
- [40] Zeng G X, Liang C, Pei Y S. Application of osculating value method for prior order and classification of soil quality. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2004, 22(2): 39 ~ 41.
- [41] Qi W, Zhang F R, Niu Z G, *et al.* An assessment method of soil quality: spatial-temporal changes and its application. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(1): 1 ~ 5.
- [42] Liu D C, He X, Wang C X. The application of Markov Method in soil quality dynamic assessment. *Territory & Natural Resources Study*, 2004, 2: 51 ~ 52.
- [43] Wardle M M, Bollero G A. Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 1999, 63: 961 ~ 971.
- [44] Hellkamp A S, Bay J M, Campbell C L, *et al.* Assessment of the condition of agricultural lands in six mid-Atlantic states. *J. Environ. Qual.*, 2000, 29: 795 ~ 804.
- [45] Wirth S J. Regional-scale analysis of soil microbial biomass and soil basal CO₂-respiration in Northeastern Germany. In: Stott D E, Mohtar R H, Steinhardt G C, eds. *Sustaining the Global Farm*, 2001. 486 ~ 493.
- [46] Sparling G P, Schipper L A. Soil quality at a national scale in New Zealand. *Journal of Environmental quality*, 2002, 31: 1848 ~ 1857.
- [47] Sun B, Zhao Q G. Evaluation indexes and methods of soil quality concerning red soil degradation. *Progress in Geography*, 1999, 18(2): 118 ~ 128.
- [48] Fu B J, Liu S L, Chen L D, *et al.* Comparing the soil quality changes of different land uses determined by two quantitative methods. *Journal of Environmental Sciences*, 2003, 15(2): 167 ~ 172.
- [49] Wu X Y, Liu G, Han H. Soil quality in different types of sand-fixation plantation of *Pinus Sylvestris* var. *Mongolica*. *Protection Forest Science and Technology*, 2001, 4: 15 ~ 17.
- [50] Yang Z H, Huang H, Wang H. Paddy soil quality of a wetland rice - duck complex ecosystem. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35 (2): 117 ~ 121.
- [51] Ouyang J L, Yu Z R, Zhang F R. The study of the change of soil quality and the analysis of farm household based on eco-economy zone. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(6): 1147 ~ 1155.
- [52] Lu T G, Yang G L, Wang L K. Evaluation and analysis on soil quality changes based on relative soil quality index method. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2002, 34(1): 56 ~ 59.
- [53] Hu J M, Liu X T. Evaluation and analysis on soil quality changes in the Sanjiang Plain. *Scientia Geographica Sinica*, 1999, 19(5): 417 ~ 421.
- [54] Zheng H, Ouyang Z Y, Wang X K, *et al.* Effects of forest restoration types on soil quality in red soil eroded region, Southern China *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9): 1994 ~ 2002.
- [55] Ma Q, Yu W T, Zhao S H, *et al.* Comprehensive evaluation of cultivated black soil fertility. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10): 1916 ~ 1920.
- [56] Zhang Q L, Pan X Z, Wang H J, *et al.* Study on spatial distribution of soil quality and quantitative evaluation of soil fertility quality under middle spatial scale. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(6): 493 ~ 497.
- [57] Lin Q G. Soil quality research and sustainable development. *Journal of South China University of Tropical Agriculture*, 2002, 8(1): 54 ~ 56.
- [58] Su Y Z, Zhao H L. Effects of land use and management on soil quality of Heerqin sandy land. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(10): 1681 ~ 1686.
- [59] Carter M R, Gregorich E G, Anderson D W, *et al.* Concepts of soil quality and their significance. In: Gregorich E G, Carter M R, eds. *Soil quality for crop production and ecosystem health. Development in soil science no. 25*. Amsterdam: Elsevier, 1997. 1 ~ 20.
- [60] Fu B J, Chen L D, Wang J, *et al.* Land use structures and ecological processes. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(3): 247 ~ 255.
- [61] Lumbanraja J, Syam T, Nishide H, *et al.* Deterioration of soil fertility by land use changes in South Sumatra, Indonesia: from 1970 to 1990. *Hydrological Processes*, 1998, 12: 2003 ~ 2013.
- [62] Hajabbasi M A, Lalalian A, Karimzadeh R. Deforestation effects on soil physical and chemical properties, Lordegan, Iran. *Plant Soil*, 1997, 190: 301 ~ 308.
- [63] Saikh H, Varadachari C, Ghosh K. Changes in carbon, nitrogen and phosphorus levels due to deforestation and cultivation: a case study in Simlipal National Park, India. *Plant and Soil*, 1998, 198: 137 ~ 145.
- [64] Lal R. Deforestation and land-use effects on soil degradation and rehabilitation in western Nigeria. II. Soil chemical properties. *Land Degr. Dev.*, 1996, 7: 87 ~ 98.
- [65] Insam H, Parkinson D, Domsch K H. Influence of macroclimate on soil microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.*, 1989, 21(2): 211 ~ 221.
- [66] Celik I. Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a Southern Mediterranean highland of Turkey. *Soil & Tillage Research*, 2004.
- [67] Caravaca F, Masciadaro G, Ceccanti B. Land use in relation to soil chemical and biochemical properties in a semiarid Mediterranean environment. *Soil & Tillage Research*, 2002, 68: 23 ~ 30.
- [68] Fisher M J, Rao I M, Ayarza M A, *et al.* Carbon storage by introduced deep rooted grasses in the South American savannas. *Nature*, 1994, 371: 236

~ 238.

- [69] Ewel J J, Mazzarino M J, Berish C W. Tropical soil fertility changes under monocultures and successional communities of different structure. *Ecological Applications*, 1991, 1:289 ~ 302.
- [70] Houghton R. The global effects of tropical deforestation. *Environmental Science and Technology*, 1990, 24:414 ~ 422.
- [71] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1986, 50: 627 ~ 633.
- [72] Gupta V S R, Germida J J. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. *Soil Biol. Biochem.*, 1988, 20: 777 ~ 786.
- [73] Singh S, Singh J S. Water-stable aggregates and associated organic matter in forest, savanna, and cropland soils of a seasonally dry tropical region. *India Biol. Fert. Soils*, 1996, 22:76 ~ 82.
- [74] Wu R, Tiessen H. Effect of land use on soil degradation in Alpine grassland soil, China. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2002, 66: 1648 ~ 1655.
- [75] Lemenih M, Karlton E, Olsson M. Assessing soil chemical and physical property responses to deforestation and subsequent cultivation in smallholders farming system in Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004.
- [76] Bewket W, Stroosnijder L. Effects of Agroecological land use succession on soil properties in Chempha watershed, Blue Nile basin, Ethiopia. *Geoderma*, 2003, 111: 85 ~ 98.
- [77] Du Toit M E, Du Preez C C, Hensley M, *et al.* Effek van bewerking op die organiese materiaalinhoud van geselekteerde dro? landgronde in Suid-Afrika. *S. Afr. J. Plant Soil*, 1994, 11:71 ~ 79.
- [78] Nel P C, Barnard R O, Steynberg R E, *et al.* Trends in maize grain yields in a long-term fertilizer trial. *Field Crop. Res.*, 1996, 47:53 ~ 64.
- [79] Lobe I, Amelung W, Du Preez C C. Losses of carbon and nitrogen with prolonged arable cropping from sandy soils of the South African Highveld. *Eur. J. Soil Sci.*, 2001, 52: 93 ~ 101.
- [80] Islam K R, Weil R R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2000, 79: 9 ~ 16.
- [81] Mills A, Fey M V. Declining soil quality in South Africa: effects of land use on soil organic matter and surface crusting. *South African Journal of Science*, 2003, 99:429 ~ 436.
- [82] Li H S, Luo S M. Effect of different typical slope land Used patterns on soil physical and chemical Properties. *Journal of South China Agricultural University*, 2001, 22(2):1 ~ 4.
- [83] Liu S L, Fu B J, Lü Y H. Assessment of soil quality in relation to land use and landscape position on slope. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(3):414 ~ 420.
- [84] Li Y B, Gao M, Wei C F, *et al.* Effects of land use on soil quality in Karst hilly area. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21(1):41 ~ 49.
- [85] Li X Y, Tang H P, Zhao Y L, *et al.* Effects of land use on soil quality in Huailai Basin, Hebei Province. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(6):103 ~ 107.
- [86] Gong J, Chen L D, Fu B J, *et al.* Effects of land use and vegetation restoration on soil quality in a small catchment of the Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(12):2292 ~ 2296.
- [87] Hao X H, Chang Q R, Li R, *et al.* Study on the soil quality in agriculture and animal interlace zone under the different artificial vegetations. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(1):10 ~ 12.
- [88] Zhang T, Yang B. Fruit agriculture reunites to overate the mode system to the research of the influence of the fatty dint in soil. *Journal of Anhui A. Sci.*, 2005, 33(1):65 ~ 66.
- [89] Liu J, Chang Q R, Zhang J H, *et al.* Effect of vegetation on soil fertility in different woodlands on Loess Plateau. *Jour. of Northwest Sci-Tech Univ. of Agri. and For. (Nat. Sci. Ed.)*, 2004,32(suppl.): 111 ~ 115.
- [90] Yuan J, Liu Y S, He T B. Analysis of the soil quality deterioration of vulnerable Karst ecological region in Guizhou. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2004,23(3):230 ~ 233.
- [91] Uckan H S, Okur N. Seasonal changes in soil microbial biomass and enzyme activity in arable and grass land soil. <http://www.toprak.org.tr/isd/isd-77.htm>
- [92] Singh J S, Raghubanshi A S, Singh R S, *et al.* Microbial biomass act as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna. *Nature*, 1989, 338:499 ~ 500.
- [93] Ross D J. Soil microbial biomass estimated by the fumigation-incubation procedure: seasonal fluctuation and influence of soil moisture content. *Soil Biology & Biochemistry*, 1987, 19:397 ~ 404.
- [94] Arunachalam A, Arunachalam K. Influence of gap size and soil properties on microbial biomass in a subtropical humid forest of north-east India. *Plant and Soil*, 2000, 223: 185 ~ 193.
- [95] Yan T M, Yang L Z, Campbell C D. Microbial biomass and metabolic quotient of soils under different land use in the Three Gorges Reservoir area. *Geoderma*, 2003, 115: 129 ~ 138.
- [96] Sharma P, Rai S C, Sharma R, *et al.* Effects of land-use change on soil microbial C, N and P in a Himalayan watershed. *Pedobiologia*, 2004, 48:83 ~ 92.
- [97] Filser J, Mebes K H, Winter K, *et al.* Long-term dynamics and interrelationships of soil Collembola and microorganisms in an arable landscape following land use change. *Geoderma*, 2002, 105:201 ~ 221.

- [98] Powlson D S, Brookes P C, Christensen, B T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biol. Biochem.*, 1987, 19: 159 ~ 164.
- [99] Yao H Y, He Z L, Huang C Y. Effect of land use history on microbial diversity in red soils. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(2):51 ~ 54.
- [100] Chen C C, He Z L. Effect of land use on microbial biomass-C, -N and -P in red soils. *Journal of Zhejiang University*, 2003, 4(4):480 ~ 484.
- [101] Parkin T B. Spatial variability of microbial processes in soil—A review. *Journal of Environmental Quality*, 1993, 22:409 ~ 417.
- [102] Dumanski J, Pieri C. Land quality indicators: research plan. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2000, 81: 93 ~ 102.
- [103] Kirkby M J, Bissonais Y L, Coulthard T J, *et al.* The development of land quality indicators for soil degradation by water erosion. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2000, 81:125 ~ 135.
- [104] Bindraban P S, Stoortvogel J J, Jansen D M, *et al.* Land quality indicators for sustainable land management: proposed method for yield gap and soil nutrient balance. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2000, 81: 103 ~ 112.
- [105] McEwen M J. Considerations in determining soil quality and a conceptual strategy for the appraisal, maintenance and improvement of soil quality. The evolution of herbicide resistance. pdf <http://www.phasm.co.uk>, 2004.
- [106] Steinborn W, Svirezhev Y. Entropy as an indicator of sustainability in agro-ecosystems: North Germany case study. *Ecological Modelling*, 2000, 133(3): 247 ~ 257.
- [107] Seybold C A, Mausbach M J, Karlen D L, *et al.* Quantification of soil quality. In: R. Lal, J. M. Kimble, R. F. Follett and B. A. Stewart, editors. *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC Press. Washington, D.C., USA., 1997.387 ~ 404. 107.

参考文献:

- [3] 吕晓男,孟赐福,麻万诸,等. 土壤质量及其演变. *浙江农业学报*, 2004, 16(2):105 ~ 109.
- [5] 郑昭佩,刘作新. 土壤质量及其评价. *应用生态学报*, 2003, 14(1):131 ~ 134.
- [33] 王效举,龚子同. 红壤丘陵小区域水平上不同时段土壤质量变化的评价和分析. *地理科学*, 1997, 17(2):141 ~ 149.
- [34] 侯文广,江聪世,熊庆文,等. 基于 GIS 的土壤质量评价研究. *武汉大学学报*, 2003, 28(1):60 ~ 64.
- [35] 张庆利,史学正,潘贤章,等. 江苏省金坛市土壤肥力的时空变化特征. *土壤学报*, 2004, 41(2):315 ~ 319.
- [36] 张华,张甘霖,漆智平,等. 热带地区农场尺度土壤质量现状的系统评价. *土壤学报*, 2003, 40(2):186 ~ 193.
- [37] 万存绪,张效勇. 模糊数学在土壤质量评价中的应用. *应用科学学报*, 1991, 9(4): 359 ~ 365.
- [38] 付强,金菊良,门宝辉,等. 基于 RAGA 的 PPE 模型在土壤质量等级评价中的应用研究. *水土保持通报*, 2002, 22(5):51 ~ 54.
- [39] 潘峰,梁川,付强. 基于层次分析法的物元模型在土壤质量评价中的应用. *农业现代化研究*, 2002, 23(2):93 ~ 97.
- [40] 曾国熙,梁川,裴源生. 土壤质量排序和分类研究中密切值法的应用. *东北水利水电*, 2004, 22(2):39 ~ 41.
- [41] 齐伟,张凤荣,牛振国,等. 土壤质量时空变化一体化评价方法及其应用. *土壤通报*, 2003, 34(1):1 ~ 5.
- [42] 刘德春,何鑫,王昌全. 马尔柯夫法在土壤质量动态评价中的应用. *国土与自然资源研究*, 2004, 2:51 ~ 52.
- [47] 孙波,赵其国. 红壤退化中的土壤质量评价指标及评价方法. *地理科学进展*, 1999, 18(2): 118 ~ 128.
- [49] 吴祥云,刘广,韩辉. 不同类型樟子松人工固沙林土壤质量的研究. *防护林科技*, 2001, 4:15 ~ 17.
- [50] 杨志辉,黄瑛,王华. 稻-鸭复合生态系统稻田土壤质量研究. *土壤通报*, 2004, 35 (2): 117 ~ 121.
- [51] 欧阳进良,宇振荣,张凤荣. 基于生态经济分区的土壤质量及其变化与农户行为分析. *生态学报*, 2003, 23(6): 1147 ~ 1155.
- [52] 卢铁光,杨广林,王立坤. 基于相对土壤质量指数法的土壤质量变化评价与分析. *东北农业大学学报*, 2002, 34(1): 56 ~ 59.
- [53] 胡金明,刘兴土. 三江平原土壤质量变化评价与分析. *地理科学*, 1999, 19(5):417 ~ 421.
- [54] 郑华,欧阳志云,王效科,等. 不同森林恢复类型对南方红壤侵蚀区土壤质量的影响. *生态学报*, 2004, 24(9): 1994 ~ 2002.
- [55] 马强,宇万太,赵少华,等. 黑土农田土壤肥力质量综合评价. *应用生态学报*, 2004, 15(10): 1916 ~ 1920.
- [56] 张庆利,潘贤章,王洪杰,等. 中等尺度上土壤肥力质量的空间分布研究及定量评价. *土壤通报*, 2003, 34(6): 493 ~ 497.
- [57] 凌青根. 土壤质量研究与可持续发展. *华南热带农业大学学报*, 2002, 8(1):54 ~ 56.
- [58] 苏永中,赵哈林. 科尔沁沙地不同土地利用和管理方式对土壤质量性状的影响. *应用生态学报*, 2003, 14(10): 1681 ~ 1686.
- [60] 傅伯杰,陈利顶,王军,等. 土地利用结构与生态过程. *第四纪研究*, 2003, 23(3):247 ~ 255.
- [82] 黎华寿,骆世明. 高州市典型坡地不同利用方式对土壤理化性状的影响. *华南农业大学学报*, 2001, 22(2):1 ~ 4.
- [83] 刘世梁,傅伯杰,吕一河. 坡面土地利用方式与景观位置对土壤质量的影响. *生态学报*, 2003, 23(3): 414 ~ 420.
- [84] 李阳兵,高明,魏朝富,等. 土地利用对岩溶山地土壤质量性状的影响. *山地学报*, 2003, 21(1):41 ~ 49.
- [85] 李新宇,唐海萍,赵云龙,等. 怀来盆地不同土地利用方式对土壤质量的影响分析. *水土保持学报*, 2004, 18(6):103 ~ 107.
- [86] 巩杰,陈利顶,傅伯杰,等. 黄土丘陵区小流域土地利用和植被恢复对土壤质量的影响. *应用生态学报*, 2004, 15(12): 2292 ~ 2296.
- [87] 赫晓慧,常庆瑞,李锐,等. 陕北农牧交错带不同人工植被下的土壤质量研究. *水土保持研究*, 2005, 12(1): 10 ~ 12.
- [88] 章铁,扬斌. 果农复合经营模式系统对土壤肥力的影响. *安徽农业科学*, 2005, 33(1):65 ~ 66.
- [89] 刘举,常庆瑞,张俊华,等. 黄土高原不同林地植被对土壤肥力的影响. *西北农林科技大学学报*, 2004, 32(增刊): 111 ~ 115.
- [90] 袁菊,刘元生,何腾兵. 贵州喀斯特生态脆弱区土壤质量退化分析. *山地农业生物学*, 2004, 23(3):230 ~ 233.
- [99] 姚槐应,何振立,黄昌勇. 不同土地利用方式对红壤微生物多样性的影响. *水土保持学报*, 2003, 17(2):51 ~ 54.