

土壤质量评价指标体系与评价方法研究进展与展望

张心昱,陈利顶

(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:在过去的 10 年里,土壤质量评价成为国际研究的热点。综述了土壤质量评价指标体系和土壤质量评价方法。在总结、分析国内外土壤质量评价指标体系与评价方法的最新进展和研究不足的基础上,提出未来我国土壤质量研究工作的建议。

关键词:土壤质量;土壤质量评价指标;评价方法;进展;展望

中图分类号:S152;S153

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2006)03-0030-05

The Progress and Prospect of Soil Quality Indicators and Evaluation Methods

ZHANG Xin-yu, CHEN Li-ding

(Key Laboratory of System Ecology, Research Center for Ecological Sciences, CAS, Beijing 100085, China)

Abstract: The research of soil quality has attracted many concentrations during the last decade. The soil quality indicators and the evaluation methods were reviewed. Some research limitations and suggestions in China in the future were also proposed based on the analysis of the soil quality research performed around the world.

Key words: soil quality; soil quality indicators; evaluation methods; progress; prospect

随着社会的发展和人口的增多,土壤资源受到日益增大的压力。由于目前存在的土壤侵蚀严重、有机质降低、土壤肥力和生产力降低、土壤化学和重金属污染、以及由此导致的大气和水体质量降低等问题,引起了人们对土壤质量的概念及其评价的研究兴趣^[1]。我国土壤资源严重不足,而且由于长期不合理的利用,土壤退化严重。据统计,因土壤侵蚀、肥力贫瘠、盐渍化、沼泽化、污染及酸化等造成的土壤退化总面积约 4.6 亿 hm^2 ,占全国土地总面积的 40%,是全球土壤退化总面积的 1/4^[2]。只有对土壤质量进行准确评价,才能客观了解不同土壤管理措施对土壤的影响,并及时的调整土地管理措施,为土地的可持续发展提供理论依据。

1 土壤质量的概念

土壤质量(soil quality)通常被定义为“特定类型土壤在自然或农业生态系统边界内保持动植物生产力,保持或改善大气和水的质量以及支持人类健康和居住的能力”^[3],或者被简单的定义为“土壤实现各种功能的能力”^[4]。一些重要的土壤功能(或生态系统服务)包括:生产功能,即土壤是植物生长的介质;环境功能,即土壤是物质过滤、缓冲和转换的反应器,使环境、地下水及食物链免遭污染,土壤又是环境中有害化合物的形成、减毒和降解的缓冲剂,调节和分配环境中水的流动;土壤是很多植物、动物和微生物免遭灭绝的栖息地和遗传库。人类对土地的利用和管理对土壤产生不断影响,所以土壤质量是一个动态的概念,由于不合理的土地管理措施将导致土壤功能的恶化,所以需要一定的工具和方法监测土壤质量^[5]。土壤健康(soil health)是一个与土壤质量类似的概念,多数研

究者认为两者可以通用,但农民更倾向于使用土壤健康,用定性的指标来描述土壤状况,而科学家倾向于使用土壤质量,用土壤分析的量化指标来描述土壤特征^[6]。

土地质量(land quality)的概念指的是土地的状态或条件(包括土壤、水文和生物特性),及其满足人类需求(包括农林生产、自然保护以及环境管理)的程度^[6]。土地质量概念把土地条件与土地生产能力、自然保护和环境管理功能联系在一起,所以土地质量研究需要针对土地利用的具体功能和类型进行。土地的生产能力主要指的是粮食和木材生产能力;土地的自然保护与环境管理功能包括促进营养循环、保持水土、污染物过滤、水的净化、温室气体的源-汇功能、以及动植物基因和生物多样性保护。从这个概念可以看出,土壤质量是土地质量中的重要内容。

2 土壤质量评价指标概念

评价某一特定土壤的质量是由该土壤的固有属性、预期的土地利用类型和管理目的决定的。目前对土壤质量评价指标的研究较多,人们普遍认为土壤质量是不能直接测定的指标,需要通过测定不同的土壤性态来反映土壤质量,所以评价土壤质量必须借助一定的评价指标体系。目前土壤质量研究的焦点是哪些土壤性质应该作为土壤质量评价指标。土壤质量评价指标可以被简单的定义为对土壤功能变化最敏感的土壤性质和过程,众多的土壤质量评价指标组成最小数据集(Minimum Data Set),用来间接的评价土壤功能。土壤质量不可能由单一的指标表示,土壤质量评价指标必须由足够的代表土壤化学、生物和物理性质和过程的复杂指标组

收稿日期:2005-05-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40321101,40371115)

作者简介:张心昱(1973-),女,满族,辽宁桓仁人,博士后,从事土地与土壤环境保护方面的科研工作;通讯作者:陈利顶。

成^[7~9]。土壤质量评价指标是由满足主要管理目标的土壤功能决定的^[10]。

土地质量指标(LQIs, Land Quality Indicators),描述土地质量及其相关的人类活动,描述土地满足人类需求的条件、这些条件的变化、以及相关的人类行为。“压力-状态-响应(P-S-R, Pressure-State-Response)”模型能够衡量土地资源所承受的压力,这种压力对土地质量的影响以及社会对这些变化的响应。按照P-S-R框架,土地质量指标可分为三组^[6]:压力指标(Pressure Indicators)描述人类活动对土地资源施加的压力;状态指标(State Indicators)指的是土地资源的现状及其时间变化;响应指标(Response Indicators)描述各级层次的管理者、决策者和政策制定者对土地压力、土地质量状态及其变化所作出的响应。就土地状态指标而言,一般认为土壤质量是土地质量指标体系中最重要状态指标之一,应该包括土壤物理、化学和生物质量三个方面^[11~13],强调土壤恢复性(Resilience)和抵抗性(Resistance)在维持土壤质量的重要作用^[14]。

3 土壤质量评价指标体系

3.1 定性指标

Karlen等^[15]认为土壤质量研究应包括两个重点领域:普及教育和土壤质量评价。其中采用农民添打打卡的方式可以兼顾这两个目的。Roming等^[16]设计的土壤健康卡,通过农民对耕层、蚯蚓、径流、积水、植物生长状况、耕作难易程度和产量等指标进行描述,简单的分成差、一般和好三个等级,获得土壤的部分描述性指标。该打打卡可以促进农民对土壤质量的认知,激励土地所有者和使用者认真考虑土地管理措施是否合理^[15]。Ericksen和Ardon^[17]也研究了农民对土壤质量的一些定性指标的认知,包括利用干湿状态时的耕作难易程度判断土壤质地、利用灌溉与排水的难易程度判断坡度和利用表层颜色辨别土壤有机质含量。Pulido和Bucco^[18]研究了农民通过定性分析坡度、坡位、质地和土壤颜色获得的土地质量,证明了其与定量指标分析结果的一致性。

3.2 定量指标

很多土壤质量评价选择20多个土壤性质作为土壤质量评价指标体系^[19~20],这些指标可以按照传统的土壤性质分成三类:化学指标、物理指标和生物学指标。

3.2.1 化学指标

Schoenholtz^[21]综述了农业、林业和草原土壤中用来评价土壤质量的土壤化学指标,包括土壤有机碳指标和营养指标两类,其中土壤有机碳指标有土壤有机碳和土壤有机质;营养指标有全N、可交换性 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、矿化N;全P、矿化P、可交换性P、Bray P、P吸附性;全K、可交换性K;可交换性Ca、Mg、S;CEC;pH;EC。张鹏飞等^[22]在干旱区的土壤质量评价中又增加了干残渣含量、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 含量作为土壤质量评价的化学指标。

3.2.2 物理指标

Schoenholtz^[21]综述了土壤研究者建议使用 and 已经使用的土壤评价物理指标,包括静态指标和动态指标两类,其中静态指标有:土壤质地、土层和表土层厚度、土壤容重、土壤韧性、饱和导水率、土壤流失量、土壤孔隙度、土壤强度、团聚体稳定性和土壤耕性;动态指标有最小持水量、耕作践踏状况(trafficability)、淋失潜力和侵蚀潜力。

3.2.3 生物指标

土壤生物学指标包括:微生物生物量C和N、潜在可矿

化N、土壤呼吸量、生物量C/有机总C、呼吸量/生物量、土壤微生物的群落组成和多样性、土壤酶活性、土壤动物等指标^[23,24]。为了增强人们对土壤生物指标的认识,1998年在美国举办了题为“土壤健康:管理土壤质量的生物成分”的会议。土壤生物参数(例如丰度、多样性、食物链结构和群落稳定性)是土壤质量评价的有效指标,一些可见的土壤生物如蚯蚓、昆虫和霉菌非常适合作为土壤质量评价指标^[25]。Anderson^[26]综述了土壤质量评价的微生物生态-生理指标,认为微生物的生物多样性指标还不足以作为土壤质量评价指标,但是土壤呼吸量、生物量C/有机总C指标可以用来评价土壤质量,但是需要进行这些参数在自然界的偏差分析研究。曹慧等^[27]综述了土壤酶活性对土壤质量指示作用的研究进展,认为虽然酶活性作为土壤质量评价指标还存在很多问题,但是酶活性可以作为土壤质量评价的指标。Parisi等^[28]建议了一种以土壤微节肢动物为基础获得QBS(土壤生物质量)的土壤质量评价方法,该方法对出现在土壤中的各种微节肢动物类型进行打分(0~20分),反映它们对土壤环境的适应性,然后对其得分进行累加获得QBS,应用QBS可以作为有效的评价土壤生物质量的工具。由于该方法利用生物因素进行评价,所以对生物体的诊断能力是关键。

3.3 实践中常用指标

最近的研究中,人们对如何把科学变成实践更感兴趣^[29],趋向于将简单、经济、可快速测定的土壤性质作为评价土壤质量评价指标。复杂的土壤质量评价指标体系更适于科学研究,而不具有可操作性^[30~32]。

Brejda等^[33,34]在美国中部和南部的高原以及Mississippi黄土山地和Palouse大草原的研究表明,从20个土壤性状中可以通过因子分析和判别分析,筛选出5个或6个土壤性状作为土壤质量评价指标,包括总有机碳(TOC)、全氮(TN)、水稳性团聚体含量(WSA)、潜在可矿化氮(PMN)、土壤微生物生物量(MBC)和土壤盐渍度等,但是该研究认为,不同区域能反映土壤质量的评价指标会有不同,在美国没有在区域尺度上统一评价土壤质量的指标体系,但各指标体系中均包含TOC指标,体现了TOC在监测土壤质量的重要性。

Andrews等^[35]在美国建立的土壤管理评价框架中,在Georgia, Iowa, California和Pacific Northwest的研究中,第一步选择评价指标,该框架可以针对产量最大化、废物循环或环境保护来选择指标,组成最小数据集,其中供选择的指标有呼吸商($q\text{CO}_2$)、容重(D_b)、有效磷(BOP)、总有机碳(TOC)、土壤微生物生物量(MBC)、潜在可矿化态氮(PMN)、土壤微团聚体(AGG)、有效水容量(AWC)、电导率(EC)和钠吸附比(SAR)10项指标。Andrews等(2002)认为几个经过认真选择的土壤指标可以为土壤质量评价提供足够的信息。

在新西兰^[30~32],针对土地利用和土壤组合的500个评价单元,研究表明,经过筛选,可以用四类功能的7个土壤性状指标来评价土壤质量,即有机物资源(TOC, TN, MN)、物理状况(D_b , 土壤微孔性)、肥力(Olsen-P)和酸度(pH),这7个土壤性状足以反映评价单元的土壤质量,可以为当地和全国尺度内的环境报告提供依据。

在我国,张华等^[36]和赵玉国等^[37]在农场尺度对海南土壤质量现状进行系统评价,将土壤质量划分为水分有效性、养分有效性和根系适应性三项功能,包括总有机碳(TOC)、土壤微生物生物量(MBC)、速效P、速效K、水稳定性团聚体

含量(WSA)、pH、阳离子交换量(CEC)、容重(D_b)、黏粒含量(CI)和土层深度 10 项指标。

4 土壤质量评价方法

赵其国等^[21]介绍了美国土壤质量评价的方法,包括多变量指标克立格法(MVIK, multiple variable indicator kriging)、土壤质量动力学方法和土壤质量综合评分方法。郑昭佩等^[38]又补充了一个土壤相对质量评价法。

4.1 多变量指标克立格法

该法是美国农业部和华盛顿州立大学的研究者提出的,该方法可以将无数量限制的单个土壤质量指标综合成一个总体的土壤质量指数。这一过程称为多变量指标转换(MVIT),是根据特定的标准将测定的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,是在地区的基础上建立和评价的。运用非参数型地统计学方法,指标克立格法(IK indicator kriging),通过 MVIT 的转换数据估计未采样地区的数值,然后测定不同地区土壤质量达到优良的概率,最后利用 GIS 技术绘出建立在景观基础上的土壤质量达标概率图。

4.2 土壤质量动力学方法

该法是在全过程测定土壤质量的指标,确定一个管理系统的实际行为,并据此评估其可持续性,其步骤如下:确定一个管理系统期望产出;评价系统的设计,确定其是否能生产期望的产出;确定土壤质量的重要参数并建立其质量标准;建立评价一个管理系统的初始状况;评价系统的产出,确定它是源于系统设计,还是源于系统的执行过程,或者是两者的总和;稳定失控的系统过程;借助于合适的试验设计技术,改善一个稳定管理系统的持续性。

4.3 土壤质量综合评分方法

Karlen 和 Stott^[39]提出了一个评价土壤质量的框架体系,评价体系建立在系统工程理论的多目标分析原则基础上,首先针对特殊的问题、过程、管理措施或政策,确定评价的关键功能;然后对每一项功能进行次一级功能划分,如支持作物生长的能力划分为扎根深度、与水分有关的能力、与养分有关的能力以及化学障碍,这样划分直到每一项功能都可以用一系列直接测定的土壤指标来表达;最后各个参数和功能都被赋予一个权重,通过加乘运算计算土壤的质量系数。

Andrews 等^[35]采用计算机编程的方法,建立了评价土壤质量的土壤管理框架,该框架将土壤质量评价分成三步:首先选择对关键的土壤功能敏感的评价指标(Indicator)组成最小数据集(Minimum Data Set);然后解释这些指标(Interpretation),采用适当的模型(如线性或非线性、最优、越多越好和越少越好)对各个指标进行赋值,获得无量纲的数值;最后对各指标的得分进行综合(Integration),采用一定的数学模型对各指标的值进行综合,获得一个被认为可以综合反映土壤质量的系数值(Index Value)。该方法可以针对不同的土壤类型、土地利用类型和土地管理实践,在不同的研究区域选择不同的土壤指标对不同的土壤功能进行质量评价。Cambardella 等^[40]在 Iowa 西南部的黄土山地,应用该方法在地块、景观和小流域尺度范围内评价了耕作对土壤质量退化的影响,以及不同地形部位土壤质量的特征。Andrews 等^[10]认为,在选择土壤评价指标时,主成分分析法(PCA, Principle Component Analysis)和专家法(EO, Expert Opinion)都可以选择有代表性的土壤指标组成最小数据集(MDS),主成分分析法需要大量的数据,而专家法可能带来

学科的偏见;在指标评分方法中,非线性方程比线性方程效果更好;在综合指标的评分方法中,累加法(additive index)、权重累加法(weighted additive index)或决策支持系统法(decision support system)均获得相同的结果。

孙波等^[41]采用模糊隶属度函数和标准评分方程评价了东南丘陵山区的土壤肥力,蔡崇法等^[42]用该法评价了红壤地区乡镇土壤肥力;张华等^[36]和赵玉国等^[37]在农场尺度对海南土壤质量现状进行系统评价,提出了将土壤质量划分为水分有效性、养分有效性和根系适应性三项功能,建立标准评分方程,在 GIS 支持下,采用系统评价模型对该区的土壤质量进行综合评价。

4.4 土壤相对质量评价法

通过引入土壤相对土壤质量指数来评价土壤质量的变化,这种方法首先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),从而定量的表示所评价土壤的质量与理想土壤质量之间的差距。王效举等^[43~45]采用加权平均方法评价了红壤小区土壤质量变化,将各项评价指标均能满足植物生长需要的土壤质量指数作为评价标准,定量的评价了干烟州实验站不同土地利用类型土壤质量的变化特征。Fu 等^[46,47]和刘世梁等^[48]采用主成分分析方法,利用上坡位的土壤质量为基准,评价了四川卧龙山区不同土坡位的土壤质量;利用所测量的土壤性质中最高值与最低值之差值作为标准,比较了该区天然林地、草地、灌木林地、次生林地、耕地和人工林地的土壤质量。

郑昭佩等^[38]认为,在这些方法中,土壤相对质量评价方法更为方便、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。

5 土壤质量评价存在的问题与建议

5.1 土壤质量标准化

与人类生活息息相关的土、水和气三大资源中,水和气均已严格的质量标准,而土壤还没有质量标准。Northcliff^[49]认为土壤质量评价必须针对特定的土壤功能进行,而且为了对不同地区和不同研究者的研究结果进行比较,必须对土壤质量评价进行标准化,包括对确定研究目的、选择评价指标、确定和描述点位、确定采样程序和方法、样品储藏、准备和预处理、样品分析和结果表达方式、针对评价目的进行结果分析、获得解决方案各个步骤的标准化。目前国际上对分析方法的标准化研究较多,而土壤质量评价步骤中任何一步未实行标准化,都将导致研究结果无可比性。未来应加强国际间的合作,对土壤质量评价的各个步骤实行标准化。

5.2 土壤质量的复杂性

土壤质量作为土壤内部属性不能直接被人们认识,必须对一系列的土壤性质的综合评价才能间接了解,而土壤是具有多方面功能的综合体,不同人士对土壤的关注角度不一样,土壤质量评价必须是土壤多方面功能的综合,不能等同于过去土壤肥力水平的评价。而目前研究中没有对土壤质量评价功能的统一认识,没有对土壤质量评价指标充分认识,没有充分考虑外部因子如土地利用、土壤管理措施、生态环境系统以及社会经济和政治状况等对土壤质量的影响。

我国现存的土壤质量评价,多数为针对土壤侵蚀和土壤肥力下降等进行土壤质量评价,多采用传统的土壤物理或化

学性状及少数生物学性状来评价土壤质量,很少对土壤的各项功能和土壤质量的评价指标体系进行综合质量评价,并且很少对土壤质量评价方法进行研究和对土壤质量评价的结果进行验证。未来应加强对土壤质量评价指标体系与评价方法的研究,包括针对不同的土壤功能,选择土壤质量评价指标体系,对阈值、量化、评价方法和评价模型进行研究。

5.3 土壤环境与健康质量评价

土壤质量的评价是结合其功能进行的评价,包括生产功能、环境功能和健康功能。土壤虽然有容纳和净化污染物的功能,但在强烈的超负荷环境冲击下,土壤的缓冲和净化功能将面临巨大的威胁,从而导致土壤、水和大气质量的下降。目前,我国耕地资源相对匮乏,环境污染较为严重,必须利用一切可以利用的土壤资源,提高土地利用强度,同时又必须解决高强度利用过程中的土壤环境与生态问题。因此必须加强土壤质量与水、大气环境质量以及动植物和人类健康的研究,建立实现作物持续优质高产而环境负面效应又小的土壤质量管理模式。

5.4 土壤质量在实践中的应用

土壤质量最初提出的目的是为可持续发展服务,但目前我国的土壤质量研究多为理论研究,很少对土壤质量评价的结果在实践中进行应用推广。我国土壤质量评价研究多为

在一些地区进行零星的主要为土壤肥力和退化等方面研究,没有在国家、地区等大的尺度上形成规模性研究,没有与以往的土壤普查获得的数据相结合进行评价,而我国在全国范围内可以获得的土壤质量评价指标非常有限,分别在50年代末和70年代末在全国范围内进行土壤普查,普查的土壤指标不包括土壤生物指标,并且间隔时间长,没有长期的进行监测和定位研究,使得土壤质量评价数据匮乏,研究区域不系统,没有在大的尺度形成规模。

2000年1月正式启动的“土壤质量演变规律与持续利用”国家重点基础发展规划项目,着重在水稻土、红壤、潮土和黑土4种土壤区进行土壤质量演变和持续利用的研究,随着研究的进行将会产生具有实践意义的成果。我国土壤质量研究应该利用这样的契机,加强土壤和土地质量动态数字数据库及管理信息系统的研究,为土壤质量保持与提高提供途径与技术。充分利用调查获得的数据,在国家、地区或区域范围内,把土壤质量的评价结果应用到社会实践中,为相关政策的制定提供基础,为土地利用和管理提供依据。在过去的10年里,土壤质量评价成为国际研究的热点,预计未来随着人们对保护土壤及其功能可持续性的进一步认识,土壤质量研究会吸引更多研究者、管理者、决策者甚至使用者的关注。

参考文献:

- [1] Karlen D L, Andrews S S, Doran J W. Soil quality: Current concepts and applications[J]. *Advances in Agronomy*, 2001, 74: 1 - 40.
- [2] 赵其国,孙波,张桃林. 土壤质量与持续环境 土壤质量定义与评价方法[J]. *土壤*, 1997, 29(3): 113 - 120.
- [3] Doran J W, Parkin T B. Defining and assessing soil quality[A]. In: Dorman J W. et al. ed. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*[M]. Soil Science Society of American Publication No 35. Inc, Madison, Wisconsin, USA. 1994. 3 - 21.
- [4] Karlen D L, Mausbach M J, Doran J W, et al. Soil quality: a concept, definition, and frame for evaluation[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1997, 61: 4 - 10.
- [5] Andrews S S, Karlen D L, Cambardella C A. The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2004, 68: 1945 - 1962.
- [6] Pieri C, Dumanski J, Hamblin A, et al. Land Quality Indicators[Z]. World Bank Discussion Paper 315. World Bank, Washington, D. C., 1995.
- [7] Gregorich E G, Carter M R, Angers D A, et al. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils[J]. *Can. J. Soil Sci.*, 1994, 74: 367 - 385.
- [8] Snakin V V, Krechetov P P, Kuzovnikova T A, et al. The system of assessment of soil degradation[J]. *Soil Technology*, 1996, 8: 331 - 341.
- [9] Karlen D L, Andrews S S, Doran J W, et al. Soil quality - humankind's foundation for survival[J]. *J. Soil and Water Conservation*, 2003, 58: 171 - 179.
- [10] Andrews S S, Karlen D L, Mitchell J P. A comparison of soil quality of indexing methods for vegetable production systems in northern California[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 90: 25 - 45.
- [11] Hartermink A E. Soil chemical and physical properties as indicators of sustainable land management under sugar cane in Papua New Guinea[J]. *Geoderma*, 1998, 85: 283 - 306.
- [12] Karlen D L, Rosek M J, Gardner J C, et al. Conservation reserve program effects on soil quality indicators[J]. *J. Soil and Water Conservation*, 1999, 54(1): 439 - 444.
- [13] Lal R. *Soil Quality and Soil Erosion*[M]. CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington, D. C. 1999.
- [14] Seybold C A, Hemick J E, Brejd J J. Soil resilience: A fundamental component of soil quality[J]. *Soil Science*, 1999, 164(4): 224 - 234.
- [15] Karlen D L, Ditzler C A, Andrews S S. Soil quality: why and how? [J]. *Geoderma*, 2003, 114: 145 - 156.
- [16] Romig D E, Carlynd M J, Harris R E, et al. How farmers assess soil health and quality[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 50: 229 - 236.
- [17] Ericksen P J, Ardon M. Similarities and differences between farmer and scientist views on soil quality issues in central Honduras[J]. *Geoderma*, 2003, 111: 233 - 248.

- [18] Pulido J S, Bocco G. The traditional farming system of a Mexican indigenous community: the case of Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacan, Mexico[J]. *Geoderma*, 2003, 111: 249 - 265.
- [19] Filip Z. International approach to assessing soil quality by ecologically related biological parameters[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 88:169 - 174.
- [20] Zalidis G, Stamatiadis S, Takavaoglou V, et al. Impacts of agricultural practices on soil and water quality in the Mediterranean region and proposed assessment methodology[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 88: 2002, 137 - 146.
- [21] Schoenholtz S H, Miegroet H V, Burger J A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities[J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 138: 335 - 356.
- [22] 张鹏飞,田长彦,卞卫国,等. 克拉玛依农业开发区土壤质量评价指标的筛选[J]. *干旱区研究*, 2004, 21(2):165 - 170.
- [23] 孙波,赵其国,张桃林,等. 土壤质量与持续环境 土壤质量评价的生物学指标[J]. *土壤*, 1997, 29(5):225 - 234.
- [24] Nambiar K K M, Gupta A P, Fu Q L, et al. Biophysical, chemical and socio-economic indicators for assessing agricultural sustainability in the Chinese coastal zone[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2001, 87: 209 - 214.
- [25] Doran J W, Zeiss M R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality[J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, 15: 3 - 11.
- [26] Anderson T H. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2003, 9(1 - 3): 285 - 293.
- [27] 曹慧,孙辉,杨浩,等. 土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2003, 9(1):105 - 109.
- [28] Parisi V, Menta C, Gardi C, et al. Microarthropod communities as a tool to assess soil quality and biodiversity: a new approach in Italy[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 105: 323 - 333.
- [29] Doran J W. Soil health and global sustainability: translating science into practice[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 88: 119 - 127.
- [30] Lilburne L R, Hewitt A E, Sparling G P, et al. Soil quality in New Zealand: policy and the science response[J]. *J. Environmental Quality*, 2004, 31: 1768 - 1773.
- [31] Lilburne L, Sparling G, Schipper L. Soil quality monitoring in New Zealand: development of an interpretative framework[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, 104: 535 - 544.
- [32] Sparling G P, Schipper L A, Bettjeman W, et al. Soil quality monitoring in New Zealand: practical lessons from a 6-year trial[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, 104: 523 - 534.
- [33] Brejda J J, Moorman T B, Karlen D L, et al. Identification of Regional Soil Quality Factors and Indicators: I. Central and Southern High Plains[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, 64: 2115 - 2124.
- [34] Brejda J J, Karlen D L, Smit h J L, et al. Identification of Regional Soil Quality Factors and Indicators: II. Northern Mississippi Loess Hills and Palouse Prairie[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, 64: 2125 - 2135.
- [35] Andrews S S, Karlen D L, Cambardella C A. The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2004, 68: 1945 - 1962.
- [36] 张华,张甘霖,漆志平,等. 热带地区农场尺度土壤质量现状的系统评价[J]. *土壤学报*, 2003, 40(2):186 - 193.
- [37] 赵玉国,张甘霖,张华,等. 海南岛土壤质量系统评价与区域特征探析[J]. *中国农业生态学报*, 2004, 12(3):13 - 15.
- [38] 郑昭佩,刘作新. 土壤质量及其评价[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(1):131 - 134.
- [39] Karlen D L, Scott D E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality[A]. In: Dorman J W. et al. ed. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*[M]. Soil Science Society of American Publication No 35. Inc, Madison, Wisconsin, USA, 1994. 53 - 72.
- [40] Cambardella C A, Moorman T B, Andrews S S, et al. Watershed-scale assessment of soil quality in the loess hills of southwest Iowa[J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 78: 237 - 247.
- [41] 孙波,赵其国,张桃林. 我国东南丘陵山区土壤肥力的综合评价[J]. *土壤学报*, 1995, 32(4): 362 - 369.
- [42] 蔡崇法,丁树文,史志华,等. GIS支持下乡镇域土壤肥力评价和分析[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(2): 99 - 102.
- [43] 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[J]. *地理科学*, 1997, 17(2): 141 - 142.
- [44] Wang X J, Gong Z T. Assessment and analysis of soil quality changes after eleven years of reclamation in subtropical China[J]. *Geoderma*, 1998, 81: 339 - 355.
- [45] 王效举,龚子同. 红壤丘陵小区域不同利用方式下土壤变化的评价和预测[J]. *土壤学报*, 1998, 35(1):135 - 139.
- [46] Fu B J, Liu S L, Lv Y H, et al. Comparing the soil quality changes of different land uses determined by two quantitative methods[J]. *J. of Environmental Sciences*, 2003, 15(2): 167 - 172.
- [47] FU B J, Liu S L, Chen L D, et al. Soil quality regime in relation to land cover and slope position across a highly modified slope landscape[J]. *Ecology Research*, 2004, 19: 111 - 118.
- [48] 刘士梁,傅伯杰,吕一河,等. 坡面土地利用方式与景观位置对土壤质量的影响[J]. *生态学报*, 2003, 23(3): 414 - 420.
- [49] Nortcliff S. Standardization of soil quality attributes[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 88: 161 - 168.