

doi:10.16779/j.cnki.1003-5508.2016.06.005

# 土壤质量指标与评价研究进展

江 慧,张 琴

(四川省林业科学研究院,四川 成都 610061)

**摘要:**长期的人为破坏及不合理利用使土壤质量受到严重的威胁,传统的理化指标已难满足评价土壤质量的需要,寻找土壤质量评价指标已成为土壤生态学的研究热点。本文通过对近几年来土壤质量指标和土壤质量评价等相关研究成果进行了综合评述,以期寻找能够全面反映土壤质量动态变化和判别土壤质量变化的灵敏指标提供参考,为土壤的合理利用与保护提供理论依据。

**关键词:**土壤质量;指标;评价;研究进展

中图分类号:S714.5 文献标识码:A 文章编号:1003-5508(2016)06-0022-05

## Advances in Studies of Indexes of Soil Quality and Evaluation

JIANG Hui ZHANG Qin

(Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 610061, China)

**Abstract:** Soil quality was subjected to serious threat because of long-term man-made damage and unreasonable land using. Searching for the indexes of soil quality has recently become a research focus. The traditional physicochemical indexes can not meet the need of soil quality evaluation; Therefore, searching for the indexes which can reflect the dynamic changes and distinguish the changes of soil quality has become an important research task. In this paper, comprehensive review is made on the soil quality index and soil quality evaluation in order to provide theoretical basis for the reasonable utilization and the protection of cultivated land.

**Key words:** Soil Quality, Index, Evaluation, Progress

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<sup>[1]</sup>。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,同时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,国际上比较常用的土壤质量评价方法主要有多变量指标克立格法、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。土壤质量未来的研究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。

### 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、

收稿日期:2016-09-12

作者简介:江慧(1982-),女,安徽芜湖人,工程师,主要从事土壤研究工作。

对人类营养健康的影响等多方面来定义土壤质量<sup>[1]</sup>。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<sup>[2]</sup>。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<sup>[4]</sup>。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<sup>[3]</sup>。

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)概念,它包括了从多的土壤物理化学指标和生物学指标<sup>[1]</sup>。DMS 最小数据集将有机碳、速效养分、pH、电导率、质地、根系深度、容重、水分传导率、有效持水量、微生物生物量、可矿化的 N、土壤质地、土层厚度、土壤容重、土壤力度、土壤结构、水分渗透、有效持水量、饱和水分传导率、保持、可利用性、排水和水气平衡、土壤微生物生物量、活性有机质、土壤酶活性等土壤物理化学和生物学质量指标整合成一个综合的土壤质量指标体系,同类科学研究对 DMS 指标体系进行了丰富和完善。

### 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。它作为土壤物理化学指标包括在 MDS 数据集中,通过土壤转换方程可以计算土壤容重、持水量、淋溶势,离子交换量(CEC)和土壤生产力<sup>[3]</sup>。土壤 pH 值、电导率、CEC 和养分含量也是土壤质量评价中重要的化学指标,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。

土壤物理质量主要包括土壤质地、土层厚度、土壤容重、土壤力度、土壤结构、水分渗透、有效持水量、饱和水分传导率、保持、可利用性、排水和水气平衡等指标,这些物理指标对于全面监测土壤功能很重要。

### 2.2 土壤质量的生物学指标

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<sup>[3]</sup>。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<sup>[5]</sup>。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。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 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<sup>[6]</sup>。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<sup>[7]</sup>。

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<sup>[8]</sup>,可用于土壤质量的长期监测。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,在有机质动态中起着很重要的作用<sup>[9]</sup>。

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<sup>[10]</sup>,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。

土壤酶活性已被选作潜在的土壤质量指标<sup>[11]</sup>。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。

### 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学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,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。目前关于土壤微生物的区域变异研究集中在种群水平上,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,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是农业土地可持续管理中一个很重要的思想和指标。土壤质量的评价是指评价土壤实现其功能的程度。土壤质量的评价不仅仅限于传统的农业作物,相关研究把土壤质量和森林物种联系起来<sup>[12]</sup>,土壤质量的监测和评价对阐述环境问题也很重要。

#### 3.1 土壤质量评价方法

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<sup>[1]</sup>:

(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。

(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。

(5)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;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;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,是一种值得推广的多目标决策方法;齐伟<sup>[19]</sup>等探讨了土壤质量时空变化一体化的评价方法;刘德春<sup>[20]</sup>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,进行土壤质量评价。

#### 3.2 土壤质量评价的尺度

土壤质量的评价可在多种尺度下进行。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<sup>[13]</sup>。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。

Wardle & Bollero 比较了 Illinois 州 36 个农场的土壤质量。Hellkamp 等调查了美国大西洋中部地区 293 个点耕地的土壤质量<sup>[3]</sup>。Boehm & Anderson 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<sup>[8]</sup>。Wirth 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<sup>[13]</sup>。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<sup>[11]</sup>。

#### 3.3 我国土壤质量评价研究进展

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;傅伯杰<sup>[17]</sup>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;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;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;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;胡金明<sup>[18]</sup>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;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;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。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。

#### 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<sup>[1]</sup>。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通、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。人类活动可以导致土壤性质变化的速度,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,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

国外的研究成果表明: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。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。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。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。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,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  $\beta$ -葡萄糖酶。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,还对土壤 N 循环具有重要影响。

我国学者针对土地利用变化对土壤质量的影响研究出表明: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。刘世梁等的结果表明,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,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。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有明显的的影响,但变化规律并不一致,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。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。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。人工植被的建立与生长明显改善土壤质量,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。果农复合经营模式的土壤肥力高于单种作物土壤的肥力。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。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,土壤总体质量表现出明显的退化。

##### 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<sup>[8]</sup>。国外研究结果表明,土壤肥力和微生物过程的区域格局与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。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。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。土地利用方式能显著影响微生物的多样性。土地利用对土壤微生物生物量 C 影响很大。土地利用主要通过有机质的投入和累积来影响 Cmic。Nmic 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。

## 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,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<sup>[14]</sup>。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。从能量效率角度、热动力学角度对土壤质量进行研究和评价,具有广泛前景。

(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<sup>[15]</sup>。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<sup>[16]</sup>。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。

(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。

## 参考文献:

- [1] 曹志洪,周建民. 中国土壤质量[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [2] 徐建明,张甘霖. 土壤质量指标与评价[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [3] 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.
- [4] Arshad M A, Martin S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro ecosystems[J]. Agric Ecosyst Environ, 2002, 88: 153~160.
- [5] Bentham H, Harris J A, Birch P, et al. Habitat classification and soil restoration assessment using analysis of soil microbiological and physicochemical characteristics[J]. J Appl Ecol, 1992, 29: 711~718.
- [6] Dick R P. Soil enzyme activities as indicators of soil quality[A]. In: Doran JW, Coleman DC, Stewart B A.
- [7] 陈国潮. 土壤微生物量测定方法现状及其在红壤上的应用[J]. 土壤通报, 1999, 30(6): 284~287.
- [8] 胡曰利,吴晓芙. 土壤微生物生物量作为土壤质量生物指标的研究[J]. 中南林学院学报, 2002, 22(3): 51~53.
- [9] 刘守龙,肖和艾,童成立,等. 亚热带稻田土壤微生物生物量碳、氮、磷状况及其对施肥的反应特点[J]. 农业现代化研究, 2003, 24(4): 279~283.
- [10] Defining Soil Quality for a Sustainable Environment[C]. Madison: Soil Sci Soc Am Spec Publ, W I. 1994: 107~124.

(下转第 37 页)

(续表 2)

立地区	立地类型组	立地类型
	岩溶峡谷黄壤组	岩溶峡谷轻度裸露中厚层黄壤型 岩溶峡谷轻度裸露薄层黄壤型 岩溶峡谷中度裸露极薄层黄壤型 岩溶峡谷重度裸露极薄层黄壤型
	岩溶峡谷红色石灰土组	岩溶峡谷轻度裸露中厚层红色石灰土型 岩溶峡谷轻度裸露薄层红色石灰土型 岩溶峡谷中度裸露极薄层红色石灰土型 岩溶峡谷重度裸露极薄层红色石灰土型
	岩溶峡谷棕色石灰土组	岩溶峡谷轻度裸露中厚层棕色石灰土型 岩溶峡谷轻度裸露薄层棕色石灰土型 岩溶峡谷中度裸露极薄层棕色石灰土型 岩溶峡谷重度裸露极薄层棕色石灰土型

## 5.2 讨论

(1) 由于四川岩溶区岩溶地貌多样, 为避免立地类型组划分时组合数量过多而繁杂, 本文将峰丛洼地和孤峰残丘及平原两个具有小地形特征、面积小的岩溶地貌进行了归并, 其中峰丛洼地归入岩溶槽谷, 孤峰残丘及平原归入岩溶丘陵。

(2) 本文在立地类型划分的主导因子选择了基岩裸露度, 主要考虑的是基岩裸露度是土地石漠化的重要指标之一, 与植被恢复的技术措施有直接关联, 且直观、易判别和掌握, 与传统选择海拔、坡位等有所不同, 这是否适合还需要在实践中检验。

## 参考文献:

[1] 吴菲. 森林立地分类及质量评价研究综述[J]. 林业科技情报,

2010(1):12~13.

- [2] 周政贤, 杨世逸. 试论我国立地分类理论基础[J]. 林业科学, 1987(1).
- [3] 王德炉, 朱守谦, 黄宝龙. 贵州喀斯特石漠化类型及程度评价[J]. 大学学报, 2005(5):1057~1063.
- [4] 周政贤, 毛志忠, 喻理飞, 等. 贵州石漠化退化土地及植被恢复模式[J]. 贵州科学, 2002, 20(1).
- [5] 高华端, 林泽北, 罗婷, 等. 贵州省强度石漠化区立地分类系统研究[J]. 水土保持研究, 2011(2).
- [6] 吕仕洪, 陆树华, 李先琨, 等. 广西平果县石漠化地区立地划分与生态恢复试验初报[J]. 中国岩溶, 2005(3).
- [7] 陈平, 万福绪, 秦飞, 等. 徐州市石灰岩低山丘陵地立地分类及应用研究[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2009(3):69~72.

## (上接第 26 页)

- [11] Dick R P. Soil enzyme activities as integrative indicators of soil health[A]. In: Parkhurst CE, Doube BM, Gnpa VVSR. Bioindicators of Soil Health[C]. United Kingdom, Oxon; CAB International, 1997:121~156.
- [12] Doran J W, Parkin T B. Defining and assessing soil quality [A]. Soil Society of America Spatial Publication (SSSA Spec. Publ). 35. SSSA and ASA, Madison. Wisconsin, 1994:3~211.
- [13] Hoger D. Effects of crop rotation and soil cover on alteration of the soil micro flora generated by the culture of transgenic plants producing opines[J]. Molecular Ecology, 2000, 9:881~890.
- [14] Tschierko D, Kandeler E. Classification and monitoring of soil microbial biomass, mineralization and enzyme activities to indicate environmental changes [J]. Die Bodenkultur, 1999, 50: 215~226.

- [15] Harris J A. Measurements of the soil microbial community for estimating the Success of restoration[J]. Eur J Soil Sci, 2003, 54: 801~808.
- [16] Dung X Z, Hung J H. Diversity of prokaryotic microorganisms [J]. Biodiv Sci, 2001, 9(1):18~24.
- [17] 吴雅琼, 刘国华, 傅伯杰, 等. 《中国森林生态系统土壤 CO<sub>2</sub> 释放分布规律及其影响因素》[J]. 生态学报, 2007, 27(5):2126~.
- [18] 胡金明, 袁寒, 李杰, 等. 《滇西北山地湖沼纳帕海湿地地区土壤速效氮组分的分异及指示意义》[J]. 山地学报, 2011(3).
- [19] 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》[J]. 土壤通报, 2003(1).
- [20] 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》[J]. 国土与自然资源研究, 2004(2).