

土壤质量与持续环境

I. 土壤质量的定义及评价方法^{*}

赵其国 孙 波 张桃林

(中国科学院南京土壤研究所 南京 210008)

摘 要

土壤质量的评价与监测是评价和重新设计持续性的土壤与土地系统的一个基础。评价土壤质量/健康 (soil quality/health) 十分复杂, 目前十分缺乏把各项土壤性质与土壤管理措施结合起来的评价方法。美国在1991年和1992年连续召开了两届关于土壤质量问题的学术讨论会, 并在1994年发行了《土壤质量与持续环境》一书, 本文对书中土壤质量的定义、指标与定量化方法方面的内容进行了评述。

关键词 土壤质量; 持续环境; 评价方法

当前, 随着人口—资源—环境之间矛盾的日趋尖锐, 土壤质量问题正在不断得到世界范围内的共同关注。这是因为在粮食增产和环境的持续发展, 土壤资源是一种具有脆弱性的非再生资源(人类的时间尺度上)。要想获得农业的稳定增产, 必须重新认识土壤在环境中的重要意义, 必须加强对土壤“代传”的保护, 其核心就是要注意土壤质量及其与环境间的相互关系。

长期以来, 科学家大多认为人为活动主要引起空气与水资源的质量退化, 很少有人认识到土壤质量也会在不同的利用与管理条件下发生严重退化。直到最近几年, 关于土壤质量在持续生产中的作用及其与植物、人类健康之间的关系, 才不断受到重视。特别是在具体的生产实践中, 人们开始认识到土壤质量是一种指示土壤条件动态变化的最敏感的方法, 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。正是在这种认识基础上, 美国在1991年和1992年连续召开了两届关于土壤质量问题的学术讨论会, 并发表了一系列文章。在1994年刊行的《土壤质量与持续环境》(Defining Soil Quality for a Sustainable Environment)一书中, 不少科学家对土壤质量的定义、指标与定量化方法, 以及土壤质量评价与土壤特性和土壤利用适宜度之间的关系, 提出了很多新的观点和方法, 以及土壤质量评价与土壤特性和土地利用适宜度之间的关系, 提出了很多新的观点和方法。书中详尽论述了土壤质量的评价方法、国家与全球土壤质量的评价模型与监测指标、土壤质量管理与长期土地利用对环境的影响等方面的问题。书中的重点是定义土壤质量、确定土壤质量指标和评价土壤生物学指标对土壤质量的重要性。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(49631010)。感谢潘剑君、秦明周、李勇对编译工作的帮助。

我国土壤资源严重不足,而且由于长期不合理的利用,土壤退化较为严重。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4.6亿公顷,占全国土地总面积的40%,是全球土壤退化总面积的1/4。所有这些退化均表现为土壤物理、化学与生物学特性的退化。因此正确研究土壤质量与土壤退化间的关系,通过土壤质量对土壤退化作出全面评价并寻求恢复土壤退化的对策,对当前国内的农业及国民经济的持续发展,具有重要的理论与实践意义。目前,我们承担了一项国家自然科学基金重点项目,研究我国东部红壤地区土壤退化问题,其中红壤质量的动态评价是一项重要内容。因此,我们对《土壤质量与持续环境》一书进行了系列评述(分成土壤质量的定义及评价方法、土壤质量评价的碳氮指标、土壤质量评价的生物学指标3篇),希望这些研究思路对国内土壤退化与土壤资源合理开发利用方面的工作有所助益。本文中概述了土壤质量的定义、评价指标与评价方法。

1 土壤质量的定义

土壤质量主要依据土壤功能进行定义,从以往对土壤质量的定义上看,共同之处是均包含了土壤在目前和未来其功能正常运行的能力,其混淆之处来自无法确认土壤功能的主要内容。92年在美国召开的土壤质量会议澄清了这一问题,认为土壤的主要功能包括三个方面:一是生产力,即土壤提高植物和生物生产力的能力;二是环境质量,即土壤降低环境污染物和病菌损害的能力;三是动物健康,即土壤质量影响动植物和人类健康的能力,因此,土壤质量定义为土壤在生态系统的范围内,维持生物的生产力、保护环境质量以及促进动植物健康的能力。土壤具有不同等级的质量,这是与土壤的各种形成因素以及土壤耕作引起的动态变化有关的一种固有的土壤属性^[1]。

2 土壤质量的评价指标体系

2.1 评价指标

目前,土壤质量(soil quality)和土壤健康(soil health)这两个词在科技文献和公众出版物中交替出现。科学家们喜欢用前者,而农民喜欢用后者。一般来说,反映土壤质量与健康诊断特征可以分成两组,一组是描述性“软”指标,用词表达,比较主观;另一组是分析性“硬”指标,具有定量单位,易为技术专家们接受。农民以最实用的方式定义土壤健康,通过对田间试验的观察,建立构成土壤健康的描述性特征,如看(look)、摸(feel)、嗅(smell)和尝(taste)等特征。就以物理、化学和生物指标表达的分析性特征而言,这些描述性特征为其形成与验证提供了一个科学基础,也是制定其它管理政策的基本依据,因此评价土壤质量和健康时,需要将农民的观察数据与科学家们的分析数据综合起来^[2]。

影响土壤质量评价指标选择的因素很多,如土壤质量定义的复杂性、控制生物地球化学过程的各种物理、化学和生物学因子及其在时空和强度上的变化等。土壤质量评价的指标体系需要确定问题发生的区域,评价食物的现实生产力,监测农业管理措施引起的持续性和环境质量的变化,帮助政府制定和评价农业持续发展和土壤持续利用的政策。

在评价土壤质量的基本定量指标体系中,物理学指标包括:土壤质地、土层和根系深度、土壤容重和渗透率、田间持水量、土壤持水特征、土壤含水量和土壤温度;化学指标包括:有机全C和N、pH、电导率、矿化N、P和K;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。Lanson和Piere提出一个评价土壤质量所需土壤性质的最小数据集(MDS, Minimum data set), 包括以下10项指标: 速效养分、有机全C、活性有机C、颗粒大小、植物有效性水含量、土壤结构及形态、土壤强度、最大根深、pH和电导率, 并提出用土壤转化函数(PTE, pedotransfer functions)估计土壤质量评价中难以测定或费用昂贵的土壤性质^[1]。

2.2 评价指标的收集

在Wisconsin州的土壤质量与健康研究中提出了一套土壤质量和健康的描述分析问卷调查方法。该方法强调农民参与的重要性, 通过农民与科学家间的合作, 以解释框图和访谈指南为基础, 由通用调查表、特定地点调查表、相关报告卡组成一套较为完整的系列评价信息收集工具。这个方法不仅能将反映土壤质量与健康的诊断指标分门别类, 而且也能阐明土壤和非土壤目标系统的软描述性和硬分析性指标之间和内部的相互关系^[3]。

2.2.1 解释框图

确认目标系统, 即土壤系统和非土壤系统, 后者是由土壤系统支持并与之相互作用的植物、动物—人类、水和大气系统, 每一系统描述性因素分为看、摸、嗅、尝四大类, 分析因素分为物理、化学和生物特性三类。此外, 还要建立各系统间和系统内部诊断指标间的相关和预测关系(图1)。

2.2.2 访谈指南

访谈指南是收集信息和交流的工具, 它是解释性框图的表格形式, 包括一些特殊性质和对描述方式的规定, 还包括了目标系统间及其内部各诊断特性间的相互关系。访谈指南分为三个步骤: 第一步, 从访谈中提取访问者对土壤质量和健康的直观感觉, 要求清晰地表达土壤特性; 第二步, 利用解释性框图, 检查补充未全部完成的问题; 第三步, 收集评价区域(如农场)的背景资料, 如区位、类型、管理措施和农业政策。

2.2.3 通用调查表

通用调查表是由农民和科学家运用自我语言编写的, 用于描述和评估土壤质量和健康的工具。主要包括4个部分:

- (1) 评价土壤质量和健康的描述性诊断指标和较少的分析指标, 由植物系统入手, 通过非土壤系统(动物—人类、水、大气)逐步深入到土壤系统;
- (2) 关键诊断指标重要性的排序;
- (3) 土壤与非土壤系统中关键性描述指标和分析指标间的相互关系;
- (4) 相关的农场背景和农业政策资料。

2.2.4 特定地点调查表

特定地点调查表同普通调查表相似, 但它仅是对一种土壤的调查。其主要作用是针对具体的评价项目在一个研究地点对土壤质量和健康的状态进行评价。

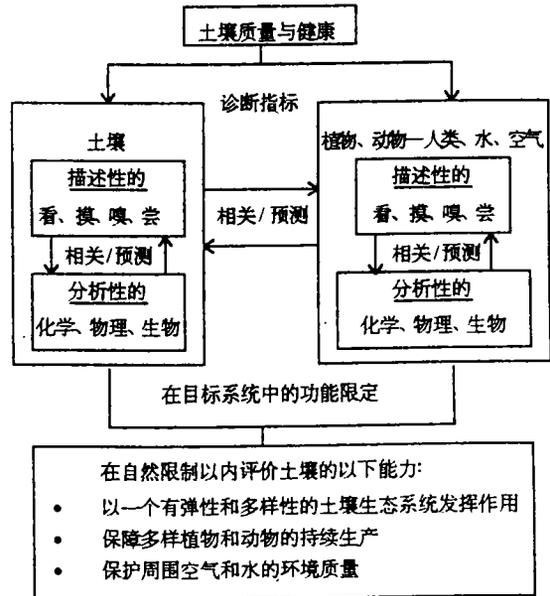


图1 土壤质量与健康的解释框图

2.2.5 相关报告卡

相关报告卡用于记录对评价土壤质量和健康具有潜在价值的描述性与分析数据,并对这些数据的重要性进行评估。通用调查表和特定地点调查表主要用于收集农民的描述性指标,而相关报告卡主要用于收集分析数据,包括以下4个部分:(1)年度的关键描述性质表,是由合作的农民表述的描述特定地点土壤质量和健康的基本性质;(2)季节的分析性质表,是经科学家确认的评价特定地点土壤质量和健康的一套最小数据集;(3)开放型表格,在农民参与下,科学家用以评估土壤和非土壤目标系统中描述性和分析性指标的相互关系;(4)综合背景表,包括农民对土壤质量和健康排序原理、相关注释、农业政策和农场背景。

3 土壤质量的评价方法

土壤质量的评价是设计和评价持续性土壤及土地管理系统的一个基础,土壤质量评价首先要确定有效、可靠、敏感、可重复及可接受的指标,建立全面评价土壤质量的框架体系。美国国家土壤保持局(SCS)建立的土壤评价目标包括:确定当前技术水平可测定的参数;建立评价这些参数的标准;建立评价短期和长期土壤质量变化的体系;确定耕作措施的组成及其对土壤质量的影响;评价现有的知识和数据以找出适合他们的适宜参数和方法。1992年在美国召开的关于土壤质量的国际会议建议标准的土壤质量评价应包括对气候、景观、土壤化学和物理性质的综合评价。以下是几种土壤质量的评价方法。

3.1 多变量指标克立格法(MVIK)

美国农业部和华盛顿州立大学的研究者总结了一套土壤质量与健康评价的多变量指标克立格法(MVIK multiple variable indicator kriging),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, 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。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^[4]。这种方法分为5个步骤:

(1) 建立土壤质量数据集 根据土壤质量定义,确定土壤质量的评价参数,在研究区域,利用栅格法采集土样,分析土壤性质,建立土壤质量数据集。

(2) 指标转换 根据已有的理论或经验,对所有参数设定其相应的临界值,不满足临界值的数据赋予0,满足临界的数据赋予1,从而将各个原始数据转换为指标值。

(3) 多变量指标转换MVIT 设定良好的土壤质量所需满足临界值的参数个数,利用MVIT把各个指标值合成一个联合指标值。

(4) 变差函数图(variogram) 传统的地统计学方法是利用半方程和距离作图,即变差函数图(variogram)。对空间连续的土壤性质而言,如果数据不对称、聚集或发生不均等的滞后均值时,变差函数图反映的信息就不完整。利用非遍历自相关函数(nonergotic autocorrelation function)可说明滞后均值和方差的变化:

$$P^*(h) = \frac{1}{N(h)} \frac{\sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - m_{-h}] [z(x_i + h) - m_{+h}]}{S_{-h} S_{+h}}$$

式中, $z(x_i + h)$ 和 $z(x_i)$ 分别是被矢量 h 分割的两个数据点, 分别是其头尾两端; $N(h)$ 是被矢量 h 分割的数据对数量; m_{-h} 和 m_{+h} 分别是矢量头尾端点的平均值; S_{-h} 和 S_{+h} 是矢量头尾端点的标准差。对各个联合指标值, 利用自相关函数和滞后距离作出相关图 (图2)。

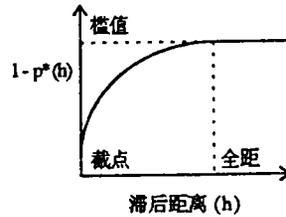


图2 自相关函数的相关图

(5) 多变量指标克立格法 MVIK 根据在各项联合指标值所作的变差函数图中建立的模型, 利用克立格法估计未采样地区的联合指标值, 表示其满足临界值的可能性。利用地理信息系统 (GIS), 可以将可能性等值线图转换为区域图, 显示具有较高土壤质量或需要加强管理的区域。如果样品数量充足, MVIK 可适用于较大区域内土壤质量的时空监测。

3.2 土壤质量动力学方法

土壤质量是可持续农业的重要组成部分。可持续性的两个中心点是土壤资源库的质量和土壤利用及管理与环境间的关系。可持续的土壤管理系统要求土壤质量能够维持或提高。以往常用比较估计法评价管理系统的可持续性, 即在某个特定时间, 比较一个系统与其替代系统的特征和产品, 根据被测参数差异的大小, 确定系统的相对可持续性。其不足之处是仅测量产出而几乎不涉及过程, 不能确定系统设计和操作的合理性。

由于土壤系统的动态性, 所以对可持续管理的测量应该采用动态评价方法, 利用系统的动力学特征测量其可持续性。这种方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。这并不排斥对替代管理系统的动力学过程的比较。此法建立在统计质量控制 (SQC, statistical quality control) 原理的基础之上, 其步骤如下: (1) 确定一个管理系统期望产出; (2) 评价系统的设计, 确定其是否能生产期望的产出; (3) 确定土壤质量的重要参数并建立其质量标准; (4) 建立评价一个管理系统的初始状况; (5) 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; (6) 稳定失控的系统过程; (7) 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^[5]。

对于可持续的管理系统的土壤质量动力学过程, 有两个方面的工作: 一是对土壤质量的动力学特征的定量, 二是设计和控制管理系统中影响土壤质量从而影响其持续性的过程。

3.2.1 土壤质量动力学过程的量化

这是从数量和动力学特征上对土壤质量进行定量, 确定土壤质量如何随管理措施而变化的。土壤质量 (Q) 是可测量的土壤性质 (q_i) 的函数, 通过在全过程中测定 q_i 的变化, 借助于模型或 SQC 程序, 评价土壤质量的动力学特征 (dQ/dt)。某一土壤的质量可看作是它相对于标准 (最优) 状态的现存状态, 由 q_i 的函数表示:

$$Q = f(q_1, \dots, q_n)$$

可持续管理系统中土壤质量的变化速率 dQ/dt 为:

$$\frac{dQ}{dt} = f \left[\frac{(q_{i1} - q_{i0}) \dots (q_{nr} - q_{nr0})}{q_{i0} \dots q_{nr0}} \right]$$

描述 Q 的 q_i 不可能包括所有的土壤性质，因而可用最小数据集 MDS，结合土壤转换函数 PTF 监测土壤质量的变化。选择 MDS 应根据土壤性质测定的难易程度、重现性高低及其对土壤质量关键变量的反映程度。进化土壤的 dQ/dt 为正值，而退化土壤为负值。

利用 MDS 估计土壤质量的变化有两种方法：

(1) 利用计算机模型确定 MDS 变化是如何影响诸如生产力这类重要的土壤功能。例如用 PTF 计算 pH、容重和有效水容量 (AWC) 对根系生产的满足度，进而计算生产力指数 (PI)：

$$PI = \sum_{i=1}^r (A_i \times C_i \times D_i \times WF)$$

式中， A_i 是有效水容量的满足度； C_i 是容重的满足度； D_i 是 pH 的满足度；WF 是权重因子； r 是对根系生长层 (深度) 分层的数目。然后利用土壤调查数据，土地利用和土壤侵蚀数据，可以估计土壤侵蚀对土壤生产力质量及其变化的影响。

(2) 利用统计质量控制程序，全过程重复测定 MDS，同时评价 MDS 参数的时间变化模型或 PTF，最后描述土壤质量的变化，并评价可持续的管理系统。控制图 (control chart) 是 SQC 中的一个标准工具 (图 3)，它

可用于表征土壤质量的变化。首先在全过程采样测定土壤性质 (MDS)，代表质量参数，或用 PTF 转换为其它质量参数。持续性的上下限根据已知或期望的精度设置，或根据过去获得的均方差设置。只要样点的均值落在上下限的范围内，即表明该过程或系统没有失控，持续性管理系统的特征就是 q_i 在过程中具有稳定性。而且 SQC 程序可以分析样点均值的变化趋势，如果一个管理系统的趋势在控制范围内，即说明土壤质量是进化的。

3.2.2 管理系统的设计和过程

可持续的管理系统需要设计和控制管理系统中影响土壤质量及系统持续性的过程，利用对过程的控制测定保持土壤质量，并寻找改进系统设计的机会，这样在监测土壤质量中控制采样的数量可达最少。管理者对控制过程十分重要，他应能解释控制图并采取相应的措施调整过程，使之恢复到控制状态，最终保证系统获得其设计中的期望产出。

评价土壤质量及管理系统持续性的过程见图 4。将土壤调查资料、MDS 和 PTF 输入模拟模型，设计可持续管理系统，并建立土壤质量的标准。在不同时间段监测不同 q_i 的控制

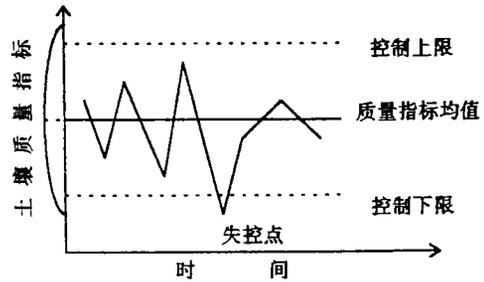


图 3 监测土壤质量控制图的基本概念

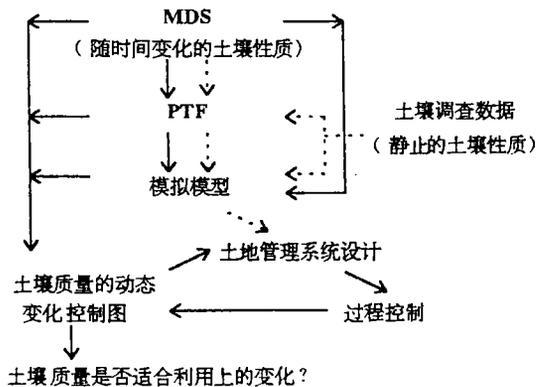


图 4 评价土地管理系统持续性的流程图

图, 单独或是联合用于系统的改良。控制图结合 MDS 和 PTF, 还能用于监测土壤质量, 以及用作质量标准 (quality standards) 的阈值或临界值。

3.3 土壤质量综合评分法

Doran 和 Parkin 将土壤质量评价细化为对 6 个特定的土壤质量元素 (SQ_{Ei}) 的评价:

$$SQ = f(SQ_{E1}, SQ_{E2}, SQ_{E3}, SQ_{E4}, SQ_{E5}, SQ_{E6})$$

式中, SQ 是土壤质量; SQ_{Ei} , i 从 1 到 6 分别表示食物与纤维的生产量、侵蚀量、地下水质量、地表水质量、大气质量和食物质量。土壤质量评价具有地区性和土壤特殊性, 对农业系统而言, 应根据土壤的最大产出量和环境正常运行的条件确定土壤质量评价指标的评价标准。通过建立各个元素的评价标准, 利用简单乘法运算求出土壤质量的大小:

$$SQ = (K_1 SQ_{E1})(K_2 SQ_{E2})(K_3 SQ_{E3})(K_4 SQ_{E4})(K_5 SQ_{E5})(K_6 SQ_{E6})$$

式中 K_i 是权重, 由地理、社会和经济因素所确定。

土壤质量与土壤的基本功能有关, 土壤质量评价应对土壤的三方面功能进行评价, 这些功能可进一步分解成 5 个特定的功能因子 (SF_i), 6 个土壤质量元素应针对这 5 个功能分别建立评价函数:

$$SQ_{Ei} = f_i(SF_1, SF_2, SF_3, SF_4, SF_5) \quad i = 1, 2 \dots 6$$

式中, SF_1 表示土壤保持、接收和释放水分到植物、溪流和底土层中的功能, SF_2 表示土壤保持、接收和释放养分和其它化合物的功能, SF_3 表示土壤促进和维持植物生长的功能, SF_4 表示土壤维持适宜土壤生物生存的功能, SF_5 表示土壤对耕作管理措施的反馈和抵抗退化的功能。由于同一土壤功能对土壤质量的不同方面其正反效应往往不同, 因此各个土壤质量元素与土壤功能间应建立不同的评价数学模型。最后根据不同地区特定的农作系统、地理位置和气候条件, 建立数学表达式说明 5 个功能因子与 MDS 中土壤性质之间的关系。循上述步骤, 即可通过 MDS 评价土壤质量^[1]。

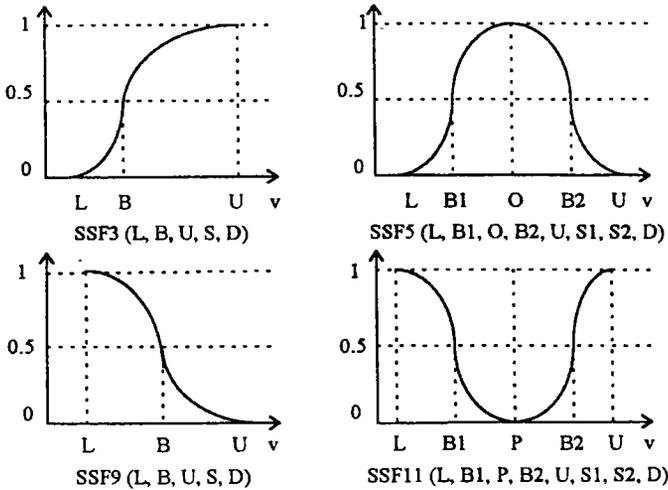
根据以上的概念方法, Karlen 和 Scott 以土壤抗侵蚀质量的评价为例, 提出了一个评价土壤质量的框架体系。评价体系建立在系统工程理论的多目标分析原则基础上, 首先针对特殊的问题、过程、管理措施或政策, 确定评价的关键功能; 然后在不同研究水平上进行物理和化学测定, 定量描述评价系统对这些功能的反应; 最后各个参数和功能都被赋予一个权重, 通过加乘运算计算土壤的质量指数^[6]。其评价过程分为四个步骤:

(1) 建立评价土壤抗侵蚀质量的定量指标体系。选择评价指标要考虑评价区域的地理状况 (气候、地形等) 和主要土壤侵蚀类型, 同时还要考虑数据的可获取性及 PTF。用于土壤抗侵蚀质量评价概念模型的四方面土壤功能是促进雨水进入、促进土壤水分的传输和吸收、抗物理性退化和维持植物生长。在各个功能中, 土壤质量指标分为几个等级, 当某项指标难以测定或者花费太高时, 就可用下一级指标代替。如土壤促进雨水进入的功能可由渗漏速率 (第一级) 评价, 渗漏速率可利用表面结壳、表面粗糙度、作物残茬覆盖和大孔隙 4 项指标 (第二级) 评价, 表面结壳不易测定, 可由质地、厚度、强度和形成速率 (第三级) 进行估计。

(2) 利用基于系统工程理论的多目标分析方法, 确定各项评价指标的权重。权重的大小反映了土壤质量评价指标的相对重要性。在各级指标体系中, 每一级指标的权重之和应为 1 或 100%。

(3) 针对各项指标, 建立相应的评分函数 (SSF, standard scoring functions) 并确定其

阈值, 然后给各项指标评分。评分函数是将数字的或主观的评级转变为变幅在 0—1 之间的无量纲的数值 (图 5)。



SSF3、SSF9、SSF5 和 SSF11 分别表示“越多越好 (more is better)”、“越少越好 (less is better)”、“最合适的范围 (an optimum range)”和“最不合适的范围 (an undesirable range)”, L、B、U 和 S 分别表示阈值下限、基准线、阈值上限和斜率

图 5 常用的 4 种评分函数

(4) 将各指标的评分值与权重系数相乘, 得到土壤质量评分的矩阵, 其总和即为土壤抗侵蚀质量的等级值。

在不同研究层次上, 上述方法可用于解决不同的问题。如在过程水平上, 研究土壤团聚体的形成和稳定性; 在农场水平上, 评价轮作和立体种植对土壤质量的影响; 在国家水平上, 研究政策对土壤质量的影响, 这些结果可用于建立水土保持项目的长期管理措施; 在全球水平上, 研究社会经济问题对土壤质量的影响, 如在土地脆弱带扩大农业耕作的问题。这些评价可看作是影响评价的因素在更高或更低的水平上进行的扩展或联合, 但这首先要求这一方法在不同评价水平上, 其指标的有效性、可靠性、敏感性、可重复性及可接受性达到一致。

参 考 文 献

- [1] Doran, J.W. and T.B. Parkin, in: *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*, 3-21, Soil Science Society of America, Inc, Madison, Wisconsin, USA, 1994.
- [2] Harris, R.F. and D.F. Bezdicek, in: *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*, 23-35, Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA, 1994.
- [3] Garlynd, M.J., et al., in: *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*, 159-168, Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA, 1994.
- [4] Smith, J, L., et al., in: *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*, 149-157, Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA, 1994.
- [5] Larson, W.E. and F.J. Pierce, in: *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*, 37-52, Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA, 1994.
- [6] Karlen, D.L. and D.E. Stott, in: *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*, 53-72, Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA, 1994.