第 18 卷第 2 期
1999 年 6 月

地 理 科 学 进 展
PROGRESS IN GEOGRAPHY

Vol 18, No. 2
June, 1999

文章编号: 1007-6301 (1999) 02-0118-11

红壤退化中的土壤质量评价指标及评价方法

孙 波, 赵其国
(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 土壤质量评价与监测是评价土壤退化的重要工作, 也是重新设计持续性的土壤管理系统的基础。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。本文首先提出了选择红壤质量评价指标的原则, 并从化学、物理学和生物学三个方面初步探讨了评价红壤质量动态变化可资采用的指标体系, 综述了国内在南方丘陵区红壤质量演化的研究中应用的指标; 最后从土地评价方法中选择了可用于红壤质量评价的方法, 并简要综述了国际上最新的土壤质量评价方法。

关 键 词: 红壤; 退化; 土壤质量; 评价
中图分类号: S159 **文献标识码**: A

近年来, 国际上不断召开学术会议讨论土壤质量与持续生产、环境和人类健康间的关系[1]。土壤质量是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 (降低环境污染物和病菌损害) 以及促进动植物和人类健康的能力[2]。土壤具有不同等级的质量, 这是与土壤的形成因素以及耕作引起的动态变化有关的一种固有属性, 因而也是一种指示土壤条件动态变化的方法, 它既能反映土壤管理的变化, 也能反映土壤退化恢复的能力。

我国南方红黄壤地区总面积 218 万平方公里, 占全国土地面积的 22.7%, 虽然具有丰富的光、温、水、土和生物资源, 但红壤质量的退化已成为限制这一地区农业持续发展的障碍因素。本区水土流失面积达 $79.9\times10^4 km^2$; 养分贫瘠的土壤占耕地的 66.2%; 受盐渍化、沼泽化、污染和酸化影响的土壤面积分别为 100、350、320 和 150 万公顷。根据我们的评价结果, 处于轻度、中度和严重退化的土壤面积分别占 21.5%, 49.5% 和 29.0%, 旱地土壤中退化最严重的元素是磷, 而水田土壤中钾元素的亏缺越来越严重。目前对红壤质量的认识存在一些不足之处, 一是对红壤肥力的现状及其分布的认识大多基于第二次全国土壤普查资料, 缺乏对最新状态的了解, 特别是对其动态变化方面的认识; 二是对红壤质量的评价指标认识不统一, 偏重于土壤化学和物理性质的评价, 缺乏完善的生物学评价指标。因此, 研究红壤质量与红壤退化间的关系, 通过红壤质量对红壤退化和环境恶化作出

收稿日期: 1999-01; **修订日期**: 1999-04
基金项目: 中国科学院重点基金项目 (KZ952-J1-013); 国家自然科学基金项目 (49631010)
作者简介: 孙波 (1968-), 男, 中国科学院南京土壤研究所红壤生态与网络信息系统研究中心副主任, 红壤生态实验站副站长, 博士, 副研究员。主要从事土壤质量退化和恢复研究, 已发表论文 20 余篇。

定量的全面评价, 并由此评价和设计持续性的红壤管理系统, 寻求恢复红壤质量的对策, 为本区农业经济的持续发展提供理论支持。

1　选择红壤质量评价指标的出发点

评价土壤质量首先要确定可测定的全面评价土壤质量的指标体系, 建立其评价标准; 研究耕作措施等因素对土壤质量变化的影响, 筛选出评价土壤质量短期和长期变化的指标体系; 最后, 根据现有的研究结果和数据找出适宜的指标和评价方法。

影响选择评价土壤质量指标体系的因素很多。首先, 要明确评价目标 (针对何种问题), 确定发生问题的区域特征, 然后提出具有代表性的评价指标。土壤质量的评价包括三个尺度: 一是研究土壤过程 (如土壤有机质和团聚体的形成过程) 对土壤质量的影响; 二是研究耕作措施和种植制度对土壤质量的影响; 三是研究区域管理政策 (如开垦荒地、城镇化) 对土壤质量的影响。大尺度的评价指标是对小尺度评价指标的扩展或联合。选择评价指标不仅存在研究尺度上的差异, 在同一个尺度中也有不同问题的差异。在土壤过程的水平上, 研究酸雨引起的酸化过程对红壤质量的影响时, 土壤交换性铝是重要指标; 而研究矿区重金属污染过程的影响时, 土壤中重金属含量成为主导指标。其次, 问题发生的区域不同, 指标的选择也不一样。如在广西石灰岩地区水田土壤中, 铁锰结核的形成是一个重要的退化过程, 而在珠江三角洲的水田土壤中盐渍化是主要的退化过程。因此选择评价指标时因考虑评价区域的地理状况 (气候、地形等), 针对不同的土壤退化特点选择评价指标。最后, 要保证评价指标的有效性、可靠行、敏感性、可重复性及可接受性。在选择评价指标时, 还要考虑数据的可获取性。即使某一指标十分重要, 如果其可获取性较差或分析费用昂贵, 就需要用其他指标进行替代或者用土壤转化函数 (Pedotransfer Functions, PTF) 进行估计。例如在评价红壤抗侵蚀质量时, 红壤对雨水入渗功能可由渗漏速率来评价, 而渗漏速率可利用土壤的表面结壳、表面粗糙度、作物残茬覆盖和大孔隙 4 项指标进行评价, 其中红壤的表面结壳性不易测定, 可由质地、厚度、强度和形成速率进行估计。在选择土壤质量的评价指标时, 一些测定困难的指标 (如土壤酶活性) 需要制定通用的测定标准 (土壤样品的预处理、分析过程、测定单位), 这样才能保证评价的可靠性。土壤质量的评价指标来源于农业实践和理论研究。农民通常从实用性和直观性出发, 提出一些描叙性的软指标; 而研究人员大多从理论研究出发, 提出一些定量的分析性指标。前者为后者的形成与验证提供了一个科学基础, 因此评价土壤质量时, 还需要将农民的观察数据与科学家们的分析数据综合起来, 问卷调查就是一个很好合作方法。

2　红壤退化中土壤质量评价指标

红壤退化过程主要包括侵蚀、肥力贫瘠化、酸化和污染, 所有这些退化过程均将影响土壤的化学过程 (如吸附、交换、沉淀、扩散等)、物理学过程 (如土壤结构形成、气体扩散、水分运动等) 和生物学过程 (微生物分解和合成、酶促反应等), 并最终表现为红壤物理、化学与生物学特性的退化。因此系统的评价指标应从这三个方面进行筛选。

2.1 化学指标体系

红壤退化过程必然影响到红壤中化学元素的含量及其形态分布。这些元素从对作物营养的关系上分为大量元素（N、P、K）、中量元素（Ca、Mg、S）和微量元素（Mn、B、Cu、Zn、Fe、Mo 等），从土壤中存在的形态上分为有机态、无机态、交换态和水溶态等，其中交换态和水溶态是比较敏感的指标。在选择这些敏感指标评价红壤质量的变化时，要证明其含量的变化是由红壤退化过程引起的，而非自然环境条件（温度，降雨）变化所引起的。例如红壤中NO_3^- N 含量的变化不仅受施肥的影响，还受微生物分解等过程的影响，因此在不同季节变化很大，在评价时要注意在采样时间上的可比性。以往研究土壤肥力时，土壤大量和中量元素的含量常是研究肥力变化的指标。土壤微量元素含量的变化虽然较慢，但人为活动可加速这些元素含量的变化，如污染改变了土壤重金属元素的含量及其形态分布。一些对植物有利的有机化合物，如促进土壤微量元素释放的有机酸，也可作为评价土壤质量的指标，而一些有害的有机化合物如农药在土壤中的含量变化是评价土壤环境质量变化的重要指标。此外，红壤的化学环境指标能够反映出红壤质量退化过程的特征，如酸度、缓冲性能、电导率和氧化还原电位等可反映出诸如酸化和淹水还原过程对红壤质量的影响。

对江西进贤的研究表明，随着耕作熟化过程的进行，红壤全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾含量以及 pH、CEC、交换性钙镁通常增加，土壤交换性氢铝、SiO_2、Fe_2O_3、Al_2O_3 含量下降[3~5]。但也有一些退化的结果，如在红壤性水稻土中发现随着水耕熟化土壤全钾含量出现下降趋势[6]。红壤丘陵区植被的退化导致土壤养分全量和速效含量的下降，pH 和 CEC 也下降[7]。在江西低丘区的淹育型、潴育型和潜育型红壤性水稻土中，Fe、Mn 的分异在潴育型水稻土中最明显，潜育型水稻土剖面中无定型铁铝的变幅最大，水稻土W 层的晶胶率（结晶铁/无定型铁）以潴育型水稻土为最高（此值可区分水稻土的发育程度），但土壤中粘土矿物的组成无明显差异[8]。

施肥影响了红壤中元素的含量。第四纪红壤荒地开垦为旱地后，如果不施用过磷酸钙之类的肥料，则土壤中NO_3^-、Cl^-、$H_2BO_3^-$ 含量下降；$H_2PO_4^-$ 含量提高；MoO_4^{2-} 含量基本不变，只有长期施用化肥时其含量才有所下降；而 SO_4^{2-} 含量急剧增加[9]。红壤中不同形态磷的含量变化也可反应土壤质量的变化，熟化度高的旱地红壤和红壤性水稻土中，磷的解吸率提高，吸附率降低，其中有机磷和磷酸铝含量提高，而闭蓄态磷和磷酸铁含量降低[10]。施用石灰或石灰石粉后提高了红壤pH 和交换性钙含量，降低了土壤的交换性铝含量[11]，而施用石膏也可降低红壤交换性铝含量[12]。

对南方红壤的研究表明，模拟酸雨导致土壤pH 和盐基饱和度的下降[13]，土壤有机质含量出现一定程度的下降，阴离子态营养元素（N、P、S）的有效性提高，阳离子态营养元素（Ca、Mg、K 等）的供应水平降低，土壤交换性能的质量下降[14]。

丘陵区红壤中微量元素的含量随土链中利用方式和地形部位而变化。与丘陵上部的红壤相比，土链下部水稻土中Mn 的含量升高，其中潜育性水稻土中Co、Ni、Ba、V 含量升高，Zn 含量较低，潴育性水稻土中Cr、Cu、Ni、V 含量降低；在第四纪红粘土红壤土链中，坡麓红壤表土中Mn、Co 含量较上坡升高；而在红砂砾岩红壤土链中，坡麓红壤表土中Cr、V、Sn 含量较上坡降低。在石灰性紫色岩低丘红壤土链中，水稻土中 Zn 含量升高，而Mn、Ba、Co 含量降低[15]。施肥影响了红壤中有效态微量元素的含量，长期单一施用NPK 化肥使得红壤中有效态 Fe、Mn、Cu、Zn、B 含量下降 3 毫克/千克以上，施用猪粪、稻杆等有

机肥提高了红壤有效态 Fe、Mn、Cu、Zn 的含量，但有效态B 含量变化不大[16]。

2.2　物理学指标体系

红壤的物理学性质通常包括土壤结构、土壤水、土壤热、土壤通气性和机械阻力几个方面，通常包括颗粒组成、孔隙度、容重、团聚体数量和稳定性、机械强度、土层厚度、渗透率、田间持水量、土壤持水特性、土温变幅、土壤氧扩散率等指标，其中红壤结构方面的指标是红壤物理环境变化的核心。

红壤的比重很少变化，但热带、亚热带土壤中活性较强的无机结构胶结物甚至粘粒在成土过程中总是呈减少和下移的趋势[17]。随着红壤植被的退化，水土流失加剧，土层厚度变薄，土壤沙化，结构性变差，土壤温度和湿度的变幅增大，其调控能力减弱[7]。红壤荒地开垦为旱地和水田后，红壤容重增加，但随着红壤的进一步熟化，土壤的容重下降[18]。红壤性水稻土的随水耕熟化过程孔隙性状况改善，主要表现在耕层土壤容重降低，总孔隙度提高，特别是通气孔隙、毛管孔隙均发育得较好，毛管孔隙明显增加[6, 19]。

红壤荒地开垦后，土壤中的> 1 mm 的大团聚体减少，< 0.25 mm 土壤微团聚体的数量增加[6, 18]，而且土壤团聚体内的孔隙增加[20]，微团聚体中N、P 的供应能力增强[10]。结构系数和土壤微团聚体的保持率随着土壤中各种胶结物含量的明显下降而减小，但辟为水田后，随着有机胶结物的更新和增加，两者明显提高[20, 21]。

红壤开垦后，熟化度较高的水稻土和旱地土壤的通气孔隙度增大，透水性增强（渗透速率 K10 提高），蒸发性减弱（蒸发速率降低），供水性变好，有效水含量增加[22]。长期施用有机肥在改善红壤孔隙性、增加微团聚体数量的同时，提高了红壤在高水势段的持水量[23]。赤红壤荒地开垦后，土壤饱和导水率（K10）和土壤水力扩散率均增大[24]。不同母质发育的红壤其持水性与土壤CEC 和毛管孔隙度密切相关; 水分扩散率与土壤容重和有机质含量相关，当容重相同时，与土壤质地相关; 土壤导水率与通气孔隙度密切相关[25]。目前国内对红壤的氧扩散率和机械阻力的研究较少。

在选择红壤物理指标评价红壤质量时，一是要考虑不同物理指标间的相关性及其与其他化学和生物学指标的相关性，彼此间可能有一定的替代性; 二是要考虑在田间原位测定的土壤物理参数存在巨大的空间变异性[26]，应通过地统计学方法将其应用于土壤质量的评价。

2.3　生物学指标体系

土壤有机质是最常用的评价指标，包括土壤中的动植物残体、微生物及其产物以及腐殖质。特别是腐殖质中胡敏酸的含量和特征是评价土壤有机质变化的重要指标。

土壤微生物参与土壤中的元素循环，对土壤结构特别是团聚体的形成具有重要作用，其数量和种群变化是评价土壤质量变化的敏感指标，包括土壤三大类菌的数量和优势种群以及土壤微生物生物量。土壤微生物生物量指土壤中体积小于 $5\times10^3\mu m^3$ 的生物总量，广义上包括土壤微生物碳、氮、磷、硫。

土壤酶活性和土壤呼吸商（qCO_2，指单位的微生物生物量碳的基础呼吸量，计量单位是 CO_2^- 碳，克/小时）可用来评价土壤的生物活性。土壤酶主要来自微生物和植物，其中比较重要的土壤酶包括参与碳循环的淀粉酶、纤维分解酶、脂肪酶、硫代葡糖苷酶和蔗糖酶; 参与氮循环的蛋白酶、酰胺酶、脲酶和脱氨酶; 参与磷循环的磷酸酶; 参与硫循环的芳基硫酸酯酶。

土壤动物虽然包括一些脊椎动物，但从生物量和数量上来说仍以无脊椎动物为主。从大小上分为以下 3 类：① 土壤微动物（< 100 μm）如原生动物门、线虫纲和轮虫纲中的动物，存在于土壤团粒表面水膜中，它们与土壤微生物间的营养关系（如线虫以土壤细菌和真菌为食）影响着土壤有机物质的矿化和养分的有效性；② 土壤中型动物（100～2 000 μm）如螨虫、弹尾目、小昆虫、蜘蛛以及与线蚓科的一些动物，这些生物形成的不同食物链影响了有机物质的降解和矿化，线蚓科等较大的中型动物通过钻洞和排泄球状排泄物产生团粒，增加了水分的入渗和土壤孔隙度；③ 土壤大型和巨大型动物（> 2 000 μm）如蚂蚁、白蚁、蜈蚣、昆虫、蚯蚓、蜗牛等，他们的活动可以增加有机物质的分解和养分在根区的有效性，蚂蚁、白蚁和蚯蚓能够通过形成大孔隙和团粒显著地改善土壤结构，增强土壤对环境污染的缓冲能力。因此土壤动物的数量、多样性或活性能够作为评价土壤质量的有用指标。

对湖南长沙和江西进贤的红壤及红壤性水稻土的研究表明，土壤有机质含量、腐殖质碳含量、胡敏酸碳含量（*HA*）、*HA*/*FA* 在旱耕熟化和水耕熟化的过程中不断增加，而且水耕熟化促进了腐殖质的形成，红壤性水稻土中腐殖质的含量通常大于同地带的旱地。随着不断的熟化，土壤 *HA* 的光密度值增加，其（log*K*（Log*K* 400- log*K* 600）降低，芳香核原子团增多，缩合度增大[4, 6, 8, 27, 28]。腐殖质组成中松结合态的比例增加，而紧结合态的比例下降[29]。

不同的利用方式以及耕作熟化程度影响了红壤的微生物数量、组成、优势种以及土壤酶活性。对广西南宁砂岩发育的赤红壤研究表明，虽然不同利用方式下土壤微生物碳量差异不大，但旱地土壤中放线菌、真菌和好气纤维分解细菌含量比林地和水田高，林地中马尾松林地土壤含量较高；旱地中真菌的优势种是镰孢属（Fusarium）、轮枝孢属（Verticillium），水田是小威氏曲霉（Westerdykella），林地是梨头霉（Absidia）和毛头霉（Mucor）等藻类菌；红壤呼吸量、微生物活性、纤维分解强度和硝化强度的大小顺序为水田> 旱地> 林地[30]。不同林型中微生物的差异主要表现在数量上，微生物总数的顺序是混交林> 豆科纯林> 纯桉林，而三大类菌的比例及其季节性变化基本一致，其优势种群在组成上差异也不大[31]。在广西南宁的红壤中，细菌和有机磷细菌的含量变化次序是农田> 针叶林> 阔叶林> 荒地，水田和旱地红壤中细菌以坚硬芽孢杆菌（B. fimus）和巨大芽孢杆菌（B. megaterium）占优势；阔叶林红壤中以多粘芽孢杆菌、覃状芽孢杆菌（B. mycoides）和节细菌为主，荒地中巨大芽孢杆菌明显较少[32]。对浙江衢县不同熟化度的黄筋泥（荒地、旱地、菜园地）研究表明，红壤微生物总数随土壤的熟化而提高，其中细菌和放线菌比例增加，真菌比例下降；熟化度较高的红壤中好气固氮细菌如圆褐固氮菌（Azotobacter chrococcum）、拜氏固氮菌（Beijerinckia）开始发育；红壤呼吸强度、纤维分解强度和硝化强度也随土壤的熟化而提高[33]。

不同利用方式影响了红壤酶活性的高低，在园地红壤中脲酶活性的大小顺序为茶园> 柑桔园> 杨梅园> 桃园，在经济林地红壤中为樟树林> 桉树林> 胡枝子灌木林，在林地红壤中为针阔林> 阔叶林> 针叶林> 荒地；而红壤转化酶和酸性磷酸酶活性也呈现出一定的规律性[34]。红壤酶活性（如转化酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶、脲酶、蛋白酶、酸性磷酸酶）通常随土壤的熟化过程而不断提高[29, 35, 36]。酸雨对红壤中不同酶的活性作用不同，土壤转化酶活性在经过模拟酸雨淋洗后被激活，而土壤磷酸酯酶和脲酶活性在初期被抑制，后

期表现出不同程度的恢复[37]。土壤酶活性受根际分泌物的影响, 其活性与土壤有机质、全氮、速效氮、速效磷、速效钾的含量呈现出不同程度的相关性[38]。

影响土壤酶活性的因素很多, 其田间的变化很大, 在寻找酶活性的统一指标时, 需要排除其他因素的干扰, 如利用酶活性和有机碳或粘粒含量的比值就能够比单纯的以土壤酶活性作指标更好地反映砂质土壤和粘质土壤在生物学活性上的差异。一些联合指标, 如生物肥力指标 ($BIF = (DH + kCA)/2$, DH 为脱氢酶活性, CA 为过氧化氢酶活性) 和酶数量指标 ($EAN = 0.2(DH + CA/10 + Ap/40 + PR/2 + AM/20)$), DH 为脱氢酶活性, CA 为过氧化氢酶活性, AP 为碱性磷酸酶活性, PR 为蛋白酶活性, AM 为淀粉酶活性), 可以评价不同土壤在酶活性质量上的相对高低[39]。在红壤质量的评价中, 国内对土壤动物指标的研究很少, 这与其测定困难有关。对江西第四纪红粘土红壤的研究表明, 耕作方式可以改变表层 (0～10 cm) 红壤中动物区系的组成和数量。与常规耕作相比, 免耕增加了表层红壤蚯蚓和线蚓科动物 (Enchytraeids) 的密度和生物量; 同时也增加了节肢动物蜘蛛和小蜘蛛的密度, 但其中甲虫的密度减少。免耕比常规耕作减少了表层红壤线虫的密度, 但不同类型线虫的变化方式不一样。植物寄生性线虫 (Plant parasites) 密度减少 (其中 Helicotylenchus 属减少, 而 Criconemoides 和 Xiphinema 属增加), 尤其是食细菌线虫 (Bacterivores) 的减少幅度最大, 其中小杆目 (Rhabditida) 密度的减幅达 44.2%, 是线虫总密度减少的主要原因; 而食真菌线虫 (Fungivores) 和杂食性线虫 (Omnivore-predators) 密度增加[40]。

综上所述, 以往在研究红壤质量变化时广泛应用了化学指标及物理结构方面的指标, 目前红壤微生物学和酶学指标已成为研究热点, 但对红壤动物学指标的研究仍十分薄弱。在研究红壤退化时, 必须针对特定的退化过程, 选择比较成熟的、具有代表性和灵敏性的评价指标体系, 对红壤质量的变化进行综合评价。

3　红壤退化中土壤质量评价方法

目前土壤质量评价方法的发展处于起步阶段, 而土地评价方法比较丰富和系统, 主要包括参数法、模型法、景观生态法、土地系统分析法和地理信息系统法, 其中很多评价方法和原理可以借鉴到土壤质量的评价之中。

模型是对系统各物理量之间关系和过程的定量描述, 包括 3 类: ① 经验模型, 通过经验观察建立土壤质量与土壤属性间的模型, 如用于模糊综合评价的阈模型, 其简单模式是: 如果 $X > P_1$, $Y < P_2$, 则结果为 Z; X 和 Y 是输入的数据 (模糊定量的特征, 如土壤类型), P_1 和 P_2 是控制参数, Z 是输出值简单的编码 (如 0 表示不适宜, 1 表示适宜); ② 确定过程模型, 根据已知的物理和化学过程, 模拟土壤系统中各要素间的相互关系, 通过求解描述这些过程的方程, 获得土壤质量值, 如 Darcy 定律 ($qs = -Kd\psi/ds$) 描述了土壤水下渗与土壤性质间的关系; ③ 随机过程模型, 由于土壤系统的输入-输出间具有随机性, 通过分析具有一定规律的随机过程, 模拟大量事件的平均行为, 其输出的结果是在一系列结果范围内的可能性, 如高斯随机场、马尔科夫链等[41]。表 1 列出了在土壤质量评价过程中可以利用的一些经验模型。

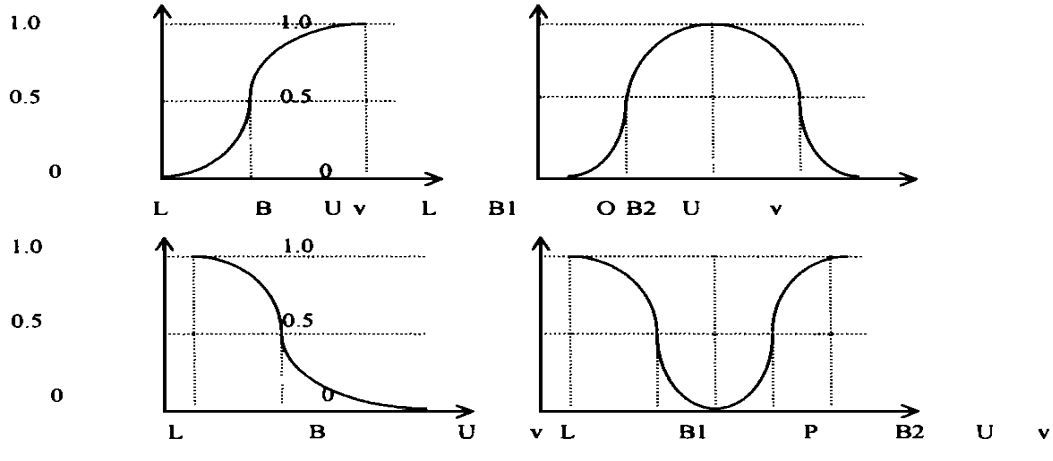
表 1 土壤质量评价过程中可以应用的一些经验模型

Tab. 1 Some empirical models can be used in the process of soil quality evalution

评价过程	应用的模型和方法
选择评价因素	主成分分析、逐步回归分析、层次分析法、多元回归分析、相关系数检验、灰色关联度分析
确定各因素的权重	层次分析、多元回归分析、主成分分析、逐步回归分析、灰色关联度分析
单因素评价和综合评价	分级赋值法、模糊综合判别、聚类分析

参数法是根据评价目的，选取有关的特性，根据这些特性间的相对重要性分别给出数字值，以数字值替代评价要素；然后考虑到各要素之间的相互关系，通过数学运算将这些数字值综合成最终的性能指数，并用以反映土壤质量的高低。根据评价要素间的相互作用及计算方法分成 3 类：① 累加型，$P = A + B + C + D$，假设各个因素无相互作用，有利因素相加，不利因素加以负值；② 乘积型，$P = A \times B \times C \times D$，利用极小值律，即土地的产量受最低数值因素的限制，较符合实际；③ 复合型，$P = (A + B) \times (C + D)$。

在土壤质量评价中最实用的是指数评分法，包括 4 个步骤[42]：①针对特定的问题、过程、管理措施或政策，确定土壤质量中需要评价的关键功能，建立定量评价的指标体系和评价标准（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评价标准）；② 测定土壤性质（评价指标），建立各个土壤性质与土壤功能间的关系模型。这一过程针对各项指标，建立相应的评分函数（将数字的或主观的评级转变为变幅为 0- 1 的无量纲数值）（图 1），确定其阈值，并给各项指标评分；③ 利用经验模型（层次分析、多元回归分析、主成分分析、逐步回归分析、灰色关联度分析等）或根据专家意见确定各项评价指标和土壤功能的权重，在各级指标体系中所有指标的权重之和应为 1 或 100%；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，其总和即为土壤质量的等级值。



L、B、U 和 S 分别表示阈值下限、基准线、阈值上限斜率

图 1 常用的 4 种评分函数

Fig. 1 Four grades functions in common use

在土壤质量评价的空间尺度转化方面，可以利用景观生态法和地理信息系统（GIS）法

将点上的评价转化为面上的评价。笔者在评价我国南方红壤丘陵区土壤肥力时，首先利用 GIS 技术，建立了土壤分布的空间数据库；然后在第二次土壤普查资料的基础上，利用评分法对不同土壤的肥力进行了综合评价；最后绘制了土壤肥力评价的空间分布图[43]。

近来，有人提出用多变量指标克立格法（Multiple Variable Indicator Kriging，MVIK）对土壤质量进行空间尺度上的评价，分为 5 个步骤[44]：① 确定土壤质量的评价指标，并在研究区域利用栅格法采集土壤样品，分析土壤性质，建立土壤质量数据集；② 根据已有的理论或经验，对所有评价指标设定其相应的临界值（代表土壤质量的最优范围或阈值），不满足临界值的数据赋予 0，满足临界值的数据赋予 1，将原始数据转换为评价指标值；③ 设定良好的土壤质量所需满足临界值的指标个数，利用多变量指标转换把各个指标值合成一个综合指标值；④ 对各综合指标值作自相关函数和滞后距离间的变差函数图（Variogram）；⑤ 根据各综合指标值的变差函数模型，利用非参数型的统计学方法——指标克立革法（Indicator Kriging，IK）估计未采样地区的综合指标值，表示土壤质量达到优良的概率，最后利用 GIS 将可能性的等值线图转换为区域分布图，显示出建立在景观基础上的土壤质量达到优良的概率图。

由于土壤是一个开放的动态变化的系统，所以应该采用动态评价方法，利用土壤系统的动力学特征定量评价土壤质量的变化，并对土地管理措施的持续性进行评价。土壤的质量（Q）可看作是它相对于标准（最优）状态的现存状态，是土壤性质（q_i）的函数，通过在全过程中测定 q_i 的变化，借助于数学模型评价土壤质量的动力学特征（dQ/dt）[45]：

$$\frac{dQ}{dt} = f\left(\frac{(q_{it} - q_{it0})}{q_{it0}} \cdots \frac{(q_{nt} - q_{nt0})}{q_{nt0}}\right)$$

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选择描述土壤质量的最少指标集，并结合土壤转换函数监测土壤质量的变化。dQ/dt 为正值时表示土壤质量在进化，为负值时表示土壤质量在退化。也可根据期望值或均方差设置土壤系统保持其质量持续性的上下限，然后监测土壤性质，计算土壤质量指数的变化，如果其变化趋势处于上下限的控制范围内，说明土壤质量是进化的。王效举等在评价江西千烟洲红壤低丘区土壤质量的变化时，提出土壤质量相对指数（Relative Soil Quality Index，RSQI）的概念，并利用其变化速率（RSQI）评价了不同利用方式对土壤质量演化的影响，最后利用 GIS 技术绘制了土壤质量变化图[46]。

4　小结

评价红壤退化过程中的土壤质量是一个系统工程。首先要根据评价目标及其评价区域的特点，针对不同的红壤退化过程，在保证有效性、可靠行、敏感性、可重复性及可接受性的基础上，筛选出反映红壤退化过程的评价指标体系，建立其评价标准。

红壤退化过程最终表现为土壤物理、化学与生物学特性的退化，因此其评价指标体系应包括这三个方面。在化学指标方面包括红壤中化学元素（大量、中量和微量元素）和化合物（农药等）的含量及其形态分布，以及红壤的化学环境特征（酸度、缓冲性能、电导率和氧化还原电位等）。物理学指标体系包括红壤结构（颗粒组成、孔隙度、容重、团聚体

数量和稳定性、土层厚度等)，红壤水（田间持水量、有效水含量、蒸发速率、吸水速率、渗透速率等)，红壤热（土壤温度及其变幅)，红壤通气性（土壤氧扩散率等）和红壤机械阻力（机械强度）几个方面，其中红壤结构是红壤物理环境变化的核心。生物学指标体系包括红壤中有机质和腐殖质（特别是胡敏酸）的含量和品质（HF/FA，HA 的光密度)，微生物的数量（微生物总数和微生物生物量碳)、种群特征（三大类菌组成和优势种群）和活性（纤维分解强度和硝化强度)，红壤酶（转化酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶、脲酶、蛋白酶、酸性磷酸酶）活性和呼吸商，红壤动物（微动物如线虫、中型动物如线蚓科动物、大型和巨大型动物如蚯蚓）的数量、多样性和活性。

在评价红壤质量的过程中（选择评价因素、确定各因素的权重、单因素评价和综合评价)，可以利用的一些经验模型，如主成分分析、逐步回归分析、层次分析、多元回归分析、相关系数检验、灰色关联度分析、分级赋值、模糊综合判别、聚类分析等。利用景观生态法、地理信息系统、指标克立格法能够进行区域（面）红壤质量的评价工作，而在点的评价中最实用的是指数评分法。利用红壤质量的动力学特征可以更好地评价红壤质量的动态变化。

参考文献:

[1] Soil Quality Management and Agro-ecosystem Health, Proceeding of 14th International Conference, East and Southeast Asia Federation of Soil Science Societies[M]. Cheju: Republic of Korea. 1997.

[2] Doran J W, Parkin T B. Defining and assessing soil quality[A]. In: Defining Soil Quality for a Sustainable Environment[C]. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA, 1994.

[3] 魏孝孚，罗永进，张志达. 低丘红壤新造田土壤肥力特征及其演变[J]. 土壤，1981，**13**(6)：201～204.

[4] 林明海，赖庆旺. 不同熟化度红壤及红壤性水稻土的腐殖质组成及其特性[J]. 土壤学报，1982，**19**(3)：237～247.

[5] 裴德安，刘勋，古国裁. 红壤熟化过程中的肥力演变[A]. 见：江西省红壤试验站、江西省农牧渔业厅土地利用管理局编. 江西红壤研究(第二集)[C]. 南昌：江西科学技术出版社，1987. 49～66.

[6] 邓铁金，樊友安，周任发. 红壤性水稻土的形成过程特点及其肥力演变[J]. 土壤学报，1985，**22**(1)：1～11.

[7] 章明奎. 亚热带丘陵区植被退化对丘陵红壤理化性质的影响[J]. 土壤，1995，**27**(5)：241～244.

[8] 范本兰，杜国华. 江西低丘红壤性水稻土的主要化学特性研究[J]. 土壤学报，1985，**22**(2)：183～190.

[9] 谢开云，王玉芹，刘更另. 第四纪红壤不同熟化措施下的阴离子态养分含量及其剖面分布[J]. 热带亚热带土壤科学，1996，**5**(3)：139～144.

[10] 武冠云. 不同肥力红壤及其位团聚体的肥力特征[J]. 土壤，1986，**18**(4)：174～180.

[11] 孟赐福，袁嗣良. 淹水条件下施加石灰和有机质对酸性土壤性质和磷吸附的影响[J]. 土壤学报，1988，**25**(2)：146～155.

[12] Sun Bo, Moreau R, Poss R. Alleviation of subsoil acidity of red soil in Southeast China with lime and gypsum [J]. *Pedosphere*, 1998, **8**(2): 113～120.

[13] 周修萍，江静蓉，梁伟. 模拟酸雨对南方五种土壤理化性质的影响[J]. 环境科学，1988，**9**(3)：6～11.

[14] 刘洪杰. 酸沉降对热带土壤肥力状况的可能影响[J]. 农业环境保护，1992，**11**(4)：156～158，162.

[15] 陈志诚，赵文君. 泰和县丘陵区四个土链中微量元素的含量与分布[J]. 土壤，1986，**18**(2)：93.

[16] 陈琼贤，刘国坚，段斌源. 有机肥料和无机肥料对土壤微量元素的影响[J]. 热带亚热带土壤科学，1997，**6**(4)：235～238.

[17] 邓时琴，徐梦熊. 中国颗粒研究(III)——赣中丘陵红壤及其颗粒的物理特征[J]. 土壤学报，1990，**27**(4)：368～376.

[18] 唐淑英，钟继洪，杨兴邦. 新垦赤红壤结构特性的演化[J]. 土壤学报，1995，**32**(3)：253～265.

[19] 樊润威, 朱济成, 姚贤良. 赣中丘陵地区红壤及红壤性水稻土的孔隙性[J]. 土壤学报, 1966, **14**(2): 196～205.
[20] 姚贤良, 于德芬. 赣中丘陵地区红壤性水稻土的结构状况及其肥力意义[J]. 土壤学报, 1962, **10**(3): 267～289.
[21] 姚贤良, 许绣云, 于德芬. 不同利用方式下红壤结构的形成[J]. 土壤学报, 1990, **27**(1): 25～33.
[22] 姚贤良, 于德芬. 赣中丘陵地区红壤的不同结构对某些水分物理性质的影响[J]. 土壤学报, 1966, **14**(1): 65～72.
[23] 许绣云, 姚贤良, 刘克樱. 长期施用有机物料对红壤性水稻土的物理性质的影响[J]. 土壤, 1996, **28**(2): 57～61.
[24] 张秉刚, 钟继洪, 桌蓦宁. 博罗县下村农场缓坡台地赤红壤的水分性能及其意义[J]. 热带亚热带土壤科学, 1994, **3**(3): 127～131.
[25] 袁东海, 陈明亮. 鄂东南红壤水分运动参数与红壤性质的相关性[J]. 华中农业大学学报, 1995, **14**(1): 53～57.
[26] 梁春祥, 姚贤良. 华中丘陵红壤物理性质空间变异的研究[J]. 土壤学报, 1993, **30**(1): 69～78.
[27] 林明海, 赖庆旺. 不同熟化度红壤及红壤性水稻土的腐殖质组成及其特征[J]. 土壤学报, 1982, **19**(3): 227～247.
[28] 李忠佩, 程励励, 林心雄. 退化红壤的有机质状况及施肥影响的研究[J]. 土壤, 1994, **26**(2): 70～76.
[29] 周礼恺, 严昶升, 武冠云. 土壤肥力实质的研究(III) ——红壤[J]. 土壤学报, 1986, **23**(3): 193～203.
[30] 顾希贤. 红壤利用方式与微生物学特征[J]. 土壤, 1992, **24**(5): 268～269.
[31] 杨风, 潘超美, 李幼菊. 亚热带赤红壤不同林型对土壤微生物区系的影响[J]. 热带亚热带土壤科学, 1996, **5**(1): 20～26.
[32] 尹瑞龄. 利用方式对红壤的细菌区系及活性的影响[J]. 土壤, 1992, **24**(5): 264～265.
[33] 钱泽澎, 何福恒, 冯孝善. 红壤微生物学特性(一) ——浙江省低丘红壤的微生物学分析[J]. 土壤学报, 1964, **12**(4): 391～400.
[34] 潘映华, 施亚琴, 李振高. 红壤区不同植被下土壤酶活性的研究[A]. 见: 中国科学院红壤生态实验编. 红壤生态系统研究(第三集) [C]. 北京: 中国农业科技出版社. 1995. 172～178.
[35] 陈本楚, 钱泽澎. 红壤微生物学特性(二) ——浙江省低丘红壤的酶和呼吸活性[J]. 土壤学报, 1966, **14**(3): 221～224.
[36] 俞静文等. 红壤酶活性与土壤肥力[A]. 见: 全国土壤酶学研究文集[C]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1988. 179～184.
[37] 吴杰民, 许加宁, 吴顺志. 模拟酸雨对土壤酶活性的影响[J]. 环境科学, 1988, **9**(1): 26～30.
[38] 陈大勋, 陆集卿, 李双霖. 福建省几种土壤类型酶活性的研究[J]. 福建农学院学报, 1986, **15**(1): 73～85.
[39] Dick R P. Soil enzyma activities as indicators of soil quality[A]. In: Defining Soil Quality for a Sustainable Environment[C]. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA, 1994. 105～124.
[40] Hu F, Li H X, Wu S M. Differentiation of soil fauna population in conventional tillage and no-tillage red soil ecosystems[J]. *Pedosphere*, 1997, **7**(4): 339～348.
[41] 傅伯杰. 土地评价的理论与实践[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1991.
[42] Karlen D L, Diane E S. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality[M]. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA, 1994. 53～72.
[43] 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.
[44] Smith J L, Halvorson J J, Papendick R I. Multiple varible indicator Kriging: a procedure for integrating soil quality indicators[A]. In: Defining Soil Quality for a Sustainable Environment[C]. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA, 1994. 149～157.
[45] Larson W E, Pierce F J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainble management[A]. In: Defining Soil Quality for a Sustainable Environment[C]. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA, 1994. 37～52.
[46] 王效举, 龚子同, 张西森. 地理信息系统辅助土壤质量变化图的编制[J]. 土壤, 1997, **29**(1): 37～42.

Evaluation indexes and methods of soil quality concerning red soil degradation

SUN Bo, ZHAO Qi-guo

(Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing 210008, China)

Abstract: Being important for evaluation of soil degradation, monitoring and assessment of soil quality is a sound basis for updating the designs of sustained soil management system. But now there is a lack of uniform indexes for evaluating soil quality changes, and the methods to integrate the main soil properties with soil management practice are also meager for the same purpose. In this paper, principles of selecting indexes for red soil quality evaluation are put forward firstly. And then an index system applicable to evaluating dynamic changes in red soil quality is approached from chemical, physical and biological aspects. Indexes used to conduct research on evaluation of red soil quality in hilly region of South China are reviewed. Besides, the methods from land assessment are chosen for evaluation of red soil quality, and some new methods for soil quality assessment in the world are outlined, too.

Key words: red soil degradation; soil quality; evaluation