

土壤质量生物学指标研究进展^①

唐玉姝^{1,2}, 魏朝富^{1*}, 颜廷梅², 杨林章², 慈恩²

(1 西南大学资源与环境学院, 重庆 400716; 2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 本文对近年土壤微生物、土壤酶活性和土壤动物等土壤质量生物学指标研究成果进行了综合评述。土壤微生物是土壤有机组分和生态系统中最活跃的部分, 被认为是最敏感的土壤质量生物学指标: 微生物生物量代表参与调控土壤中能量和养分循环及有机物质转化所对应微生物的数量, 但须结合多样性研究以弥补其无法反映土壤微生物组成和区系变化的缺陷; 微生物群落组成和多样性动态反映土壤中生物类群的多变性和土壤质量在微生物数量和功能上的差异; 土壤微生物活性体现在土壤微生物商、微生物呼吸和代谢商等方面, 应考虑生物量大小与微生物种群活性间的相关关系以反映微生物种群内的差异。土壤酶活性具有极高时效性, 在较短时间内就能反映出土壤质量的变化。土壤动物通常以种类的组成和数量, 土壤动物区系的相对丰度、多样性或活性作为评价土壤生物质量的敏感指标。与土壤理化指标相比, 土壤生物学指标更能对土壤质量的变化做出灵敏迅速的响应, 因而被广泛地用于评价土壤质量。

关键词: 土壤微生物量; 微生物群落组成和多样性; 土壤微生物活性; 土壤酶活性; 土壤动物; 土壤质量

中图分类号: S154

土壤质量指标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的一般性健康状况的性状、功能或条件^[1]。土壤生物学指标可用于测定土壤结构的发展、养分储量和生物活动, 通常分为土壤微生物指标(微生物组成和多样性、微生物生物量、微生物活性)、土壤酶活性指标和土壤动物指标。土壤微生物参数可能是最早用于反映土壤质量的指标^[2], 而且是目前应用最多的生物学指标。自 19 世纪 80 年代末以来, 土壤酶作为土壤质量的生物活性指标一直是土壤酶学的研究重点。美国国家环保局(EPA)资助、Dick 主持的“*Soil Enzyme Stability as an Ecosystem Indicator*”项目(1998—2000)探讨了土壤酶活性作为土壤质量和生态系统功能指标的可行性以及土壤酶活性对农业管理措施的响应等, 并建立了土壤酶活性与其他土壤理化性质的概念模型^[3]。与土壤微生物指标和土壤酶活性指标相比, 用土壤动物来表征土壤质量的研究仍处于起步阶段^[4]。本文综述了近年来土壤质量生物学指标的最新研究成果, 旨在为土壤质量评价指标研究提供理论依据和研究思路。

1 土壤微生物指标

土壤微生物是土壤有机无机复合体的重要组成部分, 土壤生理、生化反应的参与者和推动者^[5]; 土壤微生物本身含有一定数量的 N、P、K 等营养元素, 可

看作土壤有效养分的一个活性库, 是植物生长可利用养分的重要来源^[6-7]。在农田系统中, 土壤有机质发生变化之前, 微生物群落对土壤环境变化已经产生可靠、直接的响应^[8]。因此, 土壤微生物被认为是表征土壤质量变化最敏感最有潜力的指标^[9]。

1.1 土壤微生物生物量

土壤微生物量作为土壤有机质的活性部分, 是参与调控土壤中能量和养分循环以及有机物质转化所对应微生物的数量, 反映了土壤同化和矿化能力^[10]; 微生物量库的任何变化都会影响土壤养分的循环和有效性, 其分布与其相应土层的土壤养分含量相关^[11]。土壤微生物生物量完全可以作为红壤地区土壤质量的生物指标^[12], 且能在短时间内发生大幅度变化, 可以很好地表征土壤总 C 或总 N 的动态变化^[9, 11]。

广义的土壤微生物量包括微生物 C (MBC)、微生物 N (MBN)、微生物 P (MBP) 和微生物 S (MBS)^[8, 13]。MBC 是土壤有机 C 的灵敏指标因子, 反映微生物群落的相对大小^[14], 能快速地响应不同土地管理措施的变化。MBC 与土壤总有机 C 相比, 活性强, 反应迅速, 对土壤变化的敏感性强, 能有效地指示土壤养分的变化^[15]。秸秆和富含有机物质的厩肥对土壤 MBN 的影响远大于化学肥料, 且土壤 MBN 含量随秸秆施用量增加而增加^[16]。土壤 MBP 的周转速率快, 且能释放为活性态 P 而被视为植物有效 P 供应的重要

①基金项目: 国家自然科学基金项目(40371073)和江苏省自然科学基金项目(BK2005169)资助。

* 通讯作者

作者简介: 唐玉姝(1982—), 女, 四川南充人, 硕士研究生, 主要研究方向为区域水土资源管理。E-mail: t0803@tom.com

来源^[13]。其含量变异也很大,与 MBC、MBN 之间有很好的相关性,并与土壤全 P、有机 P 及有效 P 含量呈明显正相关^[17-18]。湖南省 5 个典型稻田长期定位监测点,土壤 MBP 对土壤有机 C 和全 P 的变化虽有响应,但其关系并不确定,而土壤 MBP 与土壤 MBC 和 Olsen 法提取 P (Olsen-P) 的关系却极为密切^[19]。

微生物完成自身全部 C 素的更新所需的时间称为微生物 C 的周转期^[13,20],测定土壤微生物生物量 C 的周转动力学特性(周转速率或时间)是进一步了解土壤有机质和重要养分元素的转化与积累的重要手段。吴金水等^[20]在 25℃、100% 湿度培养条件下,加入 ¹⁴C 标记葡萄糖来标记土壤微生物生物量 C,在 100 天培养期内,每隔 20 天测定 1 次 ¹⁴C 标记微生物生物量 C (¹⁴C-B_C),采用一级热力学方程拟合测定期内(20~100 天) ¹⁴C-B_C 的周转速率常数(k),由此计算土壤微生物生物量 C 的表观周转时间。羊草草原牧草生长季内微生物生物量 C 的通量为 52.69 g/(m·a),周转时间约为 1.25 年^[21]。

目前土壤微生物量测定方法包括直接镜检法、ATP 分析法、熏蒸培养法、熏蒸提取法、底物诱导呼吸法。但这些方法只能用来反映总土壤微生物生物量,不能反映属或种群水平的微生物生物量^[22]。磷脂脂肪酸(PLFA)是活体微生物细胞膜的重要组分,不同类群的微生物能通过不同的生化途径合成不同的 PLFA^[22],PLFA 分析用于表征土壤中数量上占优势的微生物,其相对量可显示所指示微生物的相对含量,而其总量可被用作指示土壤微生物的生物量^[2]。

土壤微生物生物量只反映部分功能和专性微生物及其总量上的差异,而无法反映土壤微生物在组成和区系上的变化^[10,12],在一定程度上土壤生态系统物流、能流或者微生物群落库的组成需进一步详细调查。应结合土壤微生物多样性研究,才能更深入地反映土壤质量的生物活性^[10]。

1.2 微生物群落组成和多样性

土壤微生物群落的组成与活性在很大程度上决定了生物地球化学循环、土壤有机质的周转及土壤肥力和质量^[2],能早在土壤有机质变化被测定之前对土壤的变化提供可靠的直接证据。土壤微生物 3 大类群的数量与其发挥的生态功能密切相关,其数量的减少反映出土壤质量的下降^[23]。所有的微生物种群数量一般随着土壤深度的增加而降低,其中真菌数量的降低幅度较细菌高^[11]。土壤酸碱度对微生物数量影响显著,真菌数量在酸性土壤中多,细菌和放线菌数量在中性或碱性土壤中较多^[24]。

土壤有机质的组成和有效性是影响微生物生物量

以及群落组成的关键因素^[25-26]。细菌数量很大程度上与土壤有机质含量成正相关^[27]。在人工云杉林地中,随着抚育林龄的增加,土壤微生物总数、细菌及真菌数量随有机质的减少而降低^[28]。土壤中养分供应会对土壤微生物总量和群落多样性产生重要影响^[29]。长期施肥条件下土壤微生物与土壤养分之间具有很好的相关性。其中,细菌、固 N 菌数量与有机质、全 N、碱解 N、全 P、速效 P 含量呈显著正相关;未观察到真菌、放线菌数量与土壤养分因子之间有明显的相关性^[30]。

土壤微生物多样性包括物种多样性、遗传(基因)多样性、生态多样性以及功能多样性^[24],且研究方法正在向分子尺度发展^[31],是当今国际上共同关注的问题^[32]。它可以作为生物指标反映土壤中生物类群的多变性和土壤的生物活性,是健康土壤的重要指标,对微生物多样性的评价能进一步揭示土壤质量在微生物数量和功能上的差异^[33]。恢复一个受干扰的生态系统,如矿山复垦,不仅要恢复植被,还要恢复微生物群落^[9]。受有机质转化的影响,土壤有机 C 与土壤微生物功能多样性之间存在明显的相关性^[34]。孔维栋等^[35]应用 Biolog 方法研究认为,温室盆栽番茄施用有机物料可显著提高土壤有机质及微生物群落的多样性,且施用不同腐熟程度的牛粪对多样性具有正向或负向的作用。

1.3 微生物活性

土壤微生物活性反映了土壤中整个微生物群落或其中的一些特殊种群的状态^[9]。微生物商(C_{mic}/C_{org})比单一的微生物量和有机 C 更能反映土壤生态系统受到人为干扰后的效果,能预测土壤有机质长期变化或监测土地退化及恢复。如果土壤正在退化,微生物 C 库下降的速度将大于有机 C 的下降,微生物商随之降低^[36]。微生物商是土壤有机质变化的一个指示指标,反映了微生物生物量与土壤有机质含量紧密的联系,它在应用的时候能够避免使用绝对值或者不同有机质含量的土壤进行比较时出现问题^[36]。故在同一地带土壤微生物 C 与土壤有机 C 之比高于正常自然林的,是 C 的积累阶段,反之则是 C 的流失阶段^[37]。微生物商的大小还能反映降雨量与蒸发量的比例变化所代表的土壤 C 的损失或积累。因此,微生物商作为土壤环境质量的生物学指标比微生物生物量更可靠^[38]。

微生物呼吸强度可看作是衡量土壤微生物总的活性指标,它反映了整个微生物群落(包括休眠状态和活性状态)的活性。休眠状态的微生物在微生物量中占较高比重,而对呼吸起很大作用的活性微生物仅是比例很小的部分^[39]。

微生物的代谢商(qCO_2)为某一时刻 CO_2 释放速率与 MBC 的比, 反映了单位生物量的微生物在单位时间里的呼吸作用强度^[40], 它可以同时表示微生物量的大小和活性^[9], 并将微生物生物量和微生物的活性以及功能联系起来。它反映了微生物群落的维持能大小和对基质的利用效率等微生物群落生理上的特征, 揭示了土壤的发生过程、生态演变以及对环境胁迫的反应^[38]。根据 Odum 生态系统演替论, 随着时间或生态系统的演替, 总的呼吸量与总生物量之比应逐渐降低。由此可知 qCO_2 越低, 表明其存在的生境是越稳定成熟。若土壤的 qCO_2 明显偏高, 则表明它是一个被胁迫的不健康土壤, 可作为陆地群落胁迫和微生物群落定量变化的一个指标。

2 酶活性指标

土壤中所有生物生化过程之所以能够持续进行是依靠土壤酶作为动力的。国内外学者为此做了大量工作, 得出土壤酶活性大小可表征土壤中各种生物化学活性的高低和土壤养分转化强度与方向的动态变化等诸多结论^[5, 41-43]。Beck 提出了一个酶数量 (enzymaenumber, EAN) 指标:

$$EAN = 0.2 (DH + CA/10 + AP/40 + PR/2 + AM/20)$$

式中: DH 为脱氢酶活性 (TPF $g/(10\text{ kg}\cdot 27\text{ h})$), CA 为过氧化氢酶活性 ($O_2\%$ / 3 min), AP 为碱性磷酸酶活性 (PNP $mg/(10\text{ kg}\cdot 5\text{ h})$), PR 为蛋白酶活性 (氨基氮 $g/(10\text{ kg}\cdot 16\text{ h})$), AM 为淀粉酶活性 (淀粉分解 $\%/(10\text{ g}\cdot 16\text{ h})$)^[9]。可以用作评价不同土壤在酶活性质量上的相对高低。土壤酶活性与土壤质量的很多理化指标以及土壤生物数量和生物多样性相互联系, 并受到土壤有机无机复合体保护, 具有一定的稳定性, 能够较全面地、灵活可靠地反映出土壤生物学肥力质量变化和判别胁迫环境下以及人为扰动下土壤生态系统的早期预警^[44], 在一定程度上比静态的土壤理化性质更有实际意义。

2.1 土壤酶活性与土壤质量物理指标

和文祥等^[45]发现, 过高和过低的土壤温度直接影响到释放酶类的微生物种群及数量而导致土壤酶活性的钝化和失活。紫色土、黄壤腐殖土的蔗糖酶和过氧化氢酶活性都与温度密切相关^[46]。土壤 CO_2 和 O_2 与土壤微生物的活动状态有关, 因此土壤空气对土壤酶活性有直接影响^[47]。Overrein^[47]指出除半纤维素酶外, 蔗糖酶、淀粉酶、纤维素酶、脲酶、磷酸酶和硫酸酶同土壤氧的摄取量均呈正相关。

土壤团聚体稳定性与土壤微生物生物量呈显著相关, 如果能够证明有机物质分解菌是土壤酶的重要来

源, 则土壤酶活性和土壤结构参数间就可能存在相关关系。若这种相关性稳定, 就可以用相对简便的土壤酶活性指标替代其他繁琐的物理结构指标^[9]。理论上而言, 不同土壤团聚体的粒径间具有不同的营养元素, 适合不同种类的土壤微生物生存, 因此由土壤微生物起主要作用的土壤酶活性在不同土壤团聚体之间具有差别。

与腐殖质复合的土壤酶总是处于物理性的被保护状态, 能在较长时间内保持活性。土壤酶参与有机物质的分解和腐殖质的形成, 它与土壤的物理特性和水热状况以及土壤的无机和有机组分的组成及吸收性复合体的特征有着密切联系^[42]。喀斯特环境演替过程 (森林→灌木林→灌丛→草地→裸荒地), 随着退化程度加剧, 土壤有机残体分解速度及腐殖质再合成能力均有明显的下降, 土壤中黏粒含量和土壤酸度降低, 土壤微生物数量减少。这些变化与土壤酶活性降低有关^[23]。

2.2 土壤酶活性与土壤质量化学指标

当 pH 在 5.0 以下时, 过氧化氢酶和脱氢酶的活性几乎完全丧失, 而转化酶和脲酶受酸度的影响较小。土壤酶活性与土壤养分存在一定相关性, 并且有一定专一性。土壤全 N、全 P 通过直接和间接效应成为影响脲酶和酸性磷酸酶、转化酶活性的主要因素。在 N 素转化的每一阶段, 均有专性的土壤酶类参与, 累积在土壤有机质中的 N 决定了酶进入土壤中的数量。长期施用有机肥或化肥均可提高土壤中各种酶的活性, 其中磷酸酶增加较多, 而且有机无机肥配施效果最好^[48]。

在肥力因素中, 土壤酶活性与土壤有机质的相关性最为显著^[49]。土壤有机质的含量并不高, 但具有胶体特性^[11], 有显著的缓冲作用和持水力, 对土壤脲酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶活性的影响最强烈。土壤有机质是土壤中酶促底物的主要供源, 其存在的状况及 N 的形态和含量, 都与土壤酶活性变化相关^[15]。纳帕海高原湿地土壤脲酶、蛋白酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性与土壤有机质均呈显著正相关关系 (r^2 分别为 0.94、0.92、0.84 和 0.98), 土壤的变化状况能由土壤酶活性表现出来, 而土壤酶活性的变化又可以判断土壤有机质、全 N 存在的状况^[50]。Debosz 等^[51]研究了 8 年的有机物输入对纤维素酶变化的影响, 发现变化的驱动因子是温度和湿度等环境因子; 在作物生长期土壤酶活性均增强, 且其中 β -葡萄糖苷酶和纤维素酶增加 30%。Wang 等^[52]对太湖地区 12 种典型耕作土壤中 β -葡萄糖苷酶活性的剖面分布进行了观测, 表明 β -葡萄糖苷酶活性与土壤有机 C 和芳香硫酸酯酶呈显

著正相关,而与土壤 pH 呈显著负相关。

2.3 土壤酶活性与土壤质量微生物指标

很少有证据表明酶活性与土壤微生物的直接计数或者与 CO₂ 释放之间存在关系^[51]。因为微生物在培养的过程中都是以选择性培养基作为基础的,而微生物并不是土壤 CO₂ 排放的唯一来源,因此微生物计数法并不能准确反映土壤微生物活性;而且,特定的土壤酶都有它的专性反映,不是所有微生物种群在其生命周期的所有阶段都存在某种特定的土壤酶。再则,土壤酶活性是生物和非生物酶活性的总和,具有高的非生物酶含量的土壤也可能只有低的活性生物群落。

但是随着酶和微生物新的测试技术的发展,有研究表明^[53],在测得的土壤酶活性值中,活体微生物是直接影响酶活性的主要因子。根际微生物通过吸收土壤中的大量养分,形成近根缓效供应的养分库,而且根际微生物固持 N 导致根际土壤蛋白酶和酰胺酶活性高于非根际土壤;土壤酶活性的提高,进一步提高了根际微生物量的转化速度,使根际微生物 N 的富集更加明显^[54]。微生物 N 与脱氢酶的关联度明显强于土壤有机 C。过氧化氢酶能促进水解过氧化氢,是土壤合成腐殖质和防止过氧化氢对生物毒害的重要氧化还原酶系,其活性与土壤的微生物数量和活性有关。

细菌、真菌和放线菌等是土壤生态系统中土壤酶活性的重要来源。植物群落演替过程中,土壤酶活性与土壤微生物数量、微生物多样性、微生物生物量及土壤动物数量等呈显著相关^[55]。一般而言,特定的土壤酶活性与细菌、真菌和放线菌类群密切相关,如菌根菌等真菌可提高土壤酶活性。木霉属和腐霉属增加了砂壤土上的酸性和碱性磷酸酶、脲酶、 β -葡聚糖酶、纤维素分解酶和几丁质酶活性^[56]。放线菌能释放降解腐殖质和木质素的过氧化物酶、酯酶和氧化酶等。根际土壤的阿维属细菌中还存在着漆酶^[57]。孙秀山等^[58]通过连续 5 年盆栽实验研究了花生不同连作年限对植株生育、土壤及根际微生物主要类群和主要土壤酶活性变化及其交互作用,发现土壤真菌及花针期根际真菌显著抑制碱性磷酸酶活性;土壤细菌、放线菌及成熟期根际细菌显著促进碱性磷酸酶活性;花针期根际真菌显著抑制蔗糖酶和脲酶活性,土壤细菌显著促进蔗糖酶活性;土壤细菌、成熟期根际放线菌显著促进脲酶活性。

3 动物指标

土壤动物是土壤中一个重要的生物类群^[59],种类和数量都很可观,包括土壤原生动物和土壤后生动物。以 Kolkwitz 和 Marsson 在污水生物系统中根据耐性

指示动物的存在或缺失对有机污染区进行分级分区为开端,国际上关于土壤动物区系及多样性等作为土壤质量指标的研究已成为土壤生态学中的一个前沿领域^[60-62],这使得土壤动物的研究提升到了新的高度,内容涉及土壤动物与微生物相互作用对土壤理化性质的作用^[63]。

对土壤过程有显著影响的主要以无脊椎动物为主。它们依靠传播接种微生物等方式来加速营养物质的分解和还原,促进土壤大孔隙的形成,并促进团粒结构的形成和稳定^[64]。土壤动物的数量与土壤含水量在一定范围内呈正相关,且在不同季节,由于受气候条件、土壤环境、人为因素的影响,土壤动物的垂直分布有明显变化^[65]。张俊霞等^[66]对山西省太谷县枣园土壤动物进行了分层取样,通过 6 个样地的对比得出,土壤动物的类群数随着土壤养分的增加而增加,随着土壤体积质量的增大而减少,且其类群数和个体数随着土壤深度的增加而递减。

土壤动物数量变化与长期施肥导致土壤性质的变化有关^[67],土壤动物种群密度与土壤有机质含量呈负相关,与土壤全 N 含量呈正相关。林英华等^[68]以 8 类主要农田土壤动物与土壤理化性质的 6 项指标为研究对象,采用典型相关分析方法,发现土壤有机质、田间持水量和土壤全 N 对线虫、蛴螬类和鞘翅目昆虫影响较大,而土壤有机质和土壤全 N 对线虫、蛴螬类的作用最大,其他土壤因子与土壤动物类群之间相关性较弱。土壤动物群落的多样性与土壤有机质的含量呈正相关^[69]。袁金荣等^[70]对湖南衡阳地区的祁东、衡南、常宁 3 地紫色页岩母岩或母质地区土壤动物群落结构组成、分布特点和季节变化进行研究表明:紫色页岩土壤动物群落与肥沃地区土壤动物群落有很大差异,植被类型、土壤有机质含量是影响土壤动物群落结构的主要生态因子。土壤有机质含量越高,凋落物越丰富,土壤动物群落的多样性就越高。而有机质含量越高,其肥力也越高,立地质量也就越好,因此土壤动物的多样性可以作为评价土壤质量好坏的指标之一^[71]。

土壤动物的种类、数量、生物量与土壤营养元素的含量呈正相关;土壤动物体的矿质元素与其所在土壤的矿质元素相关显著,但土壤动物体的微量元素与土壤微量元素间没有明显的相关性^[72]。苏永春等^[73]研究了农田土壤动物的季节动态与土壤生物化学特征之间的关系,并利用灰色理论与方法进行分析,结果表明土壤动物和微生物的季节动态与土壤生物化学特征之间具有明显的相关性。郑祥等^[63]于 2003 年 10—11 月对金华北山落叶阔叶林和常绿阔叶林大型土壤动物

进行了调查,发现土壤养分和 pH 值与大型土壤动物群落组成和结构密切相关。

诸多学者的研究表明,土壤动物种类的组成和数量,土壤动物区系的相对丰度、多样性或活性可作为土壤质量的生物学指标,通常从个体和种群、群落及生物过程 3 个方面来考虑^[74]。蚯蚓可促进团粒结构的形成及反映土壤中有毒物质含量,其主要的线虫群落能够作为衡量土壤质量的体系。利用土壤动物指标评价土壤质量应根据不同问题选择监测的个体、群落功能和过程;还必须选择能评价土壤质量动态变化的一个基准点或参照点。

4 结语

生物性质被广泛地应用来评价土壤质量,但迄今为止,无论是单独性质或者是联合指标都没能得到广泛的应用。这些性质或指标在某些情况下对土壤质量的诊断有效,而在某些情况下完全没有作用。因此在现有的知识技术条件下,单单使用一种或两种生化参数来阐明土壤系统机能的复杂性是远远不够的。从方法学的角度来看,土壤样品的预处理、分析过程、测定单位必须标准化,否则会使不同实验室之间进行数据比较变得十分困难。而且在描述被污染土壤的质量或是特定处理方法对于土壤质量的影响时,不同研究人员有可能会得出完全相反的结论。考虑生物参数的高变异性以及对比有关高质量土壤的参照值和大量的数据库,从而制定一套评价土壤质量中的生物部分的最小参数集,并将土壤化学、物理和生物等相关学科统一起来表征土壤质量将是目前的主要任务。

参考文献:

- [1] 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
- [2] Zelles L. Fatty acid patterns of phospholipids and lipopolysaccharides in the characterisation of microbial communities in soil: A review. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 29: 11-29
- [3] 杨万勤,王开运.森林土壤酶的研究进展.林业科学,2004,40(2):156
- [4] 张华,张甘霖.土壤质量指标和评价方法.土壤,2001,33(6):328
- [5] 薛立,陈红跃,邝立刚.湿地松混交林地土壤养分、微生物和酶活性的研究.应用生态学报,2003,14(1):157-159
- [6] Colvan SR, Syers JK, O'Donnell AG. Effect of long-term fertiliser use on acid and alkaline phosphomonoesterase and phosphodiesterase activities in managed grassland. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 34(4): 258-263
- [7] Kennedy ZJ, Rangarajan M. Biomass production root colonization and phosphatase activity by six VA-mycorrhizal fungi in papaya. *Indian Phytopathology*, 2001, 54(1): 72-77
- [8] 张超兰,徐建民.外源营养物质对表征土壤质量的生物学指标的影响.广西农业生物科学,2004,23(1):81
- [9] 孙波,赵其国,张桃林,俞慎.土壤质量与持续环境. III:土壤质量评价的生物学指标.土壤,1997,29(5):225-234
- [10] 吴晓芙,胡曰利.土壤微生物生物量作为土壤质量生物指标的研究.中南林学院学报,2002,22(3):51-53
- [11] 杨瑞吉,杨祁峰,牛俊义.表征土壤肥力主要指标的研究进展.甘肃农业大学学报,2004,39(1):88
- [12] 俞慎,何振立,张荣光,陈国潮,黄昌勇,朱炳良.红壤茶树根层土壤基础呼吸作用和酶活性.应用生态学报,2003,14(2):179-183
- [13] 何振立.土壤微生物量及其在养分循环和环境质量评价中的意义.土壤,1997,29(2):61-69
- [14] Haynes RJ, Tregurtha R. Effects of increasing periods under intensive arable vegetable production on biological, chemical and physical indices of soil quality. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 28: 259-266
- [15] 吕国红,周广胜,赵先丽,周莉.土壤碳氮与土壤酶相关性研究进展.辽宁气象,2005,2:6-8
- [16] 李世清,李生秀,邵明安.半干旱农田生态系统作物根系和施肥对土壤微生物体氮的影响.植物营养与肥料学报,2004,10(6):613-619
- [17] 来璐,郝明德,王永功.黄土高原旱地长期轮作与施肥土壤微生物量磷的变化.植物营养与肥料学报,2004,10(5):546-549
- [18] 谢林花,吕家珑,张一平.长期不同施肥对石灰性土壤微生物磷及磷酸酶的影响.生态学杂志,2004,23(4):65-68
- [19] 黄敏,肖和艾,童成立.稻田土壤微生物磷变化对土壤有机碳和磷素的响应.中国农业科学,2004,37(9):1400-1406
- [20] 吴金水,肖和艾.土壤微生物生物量碳的表现周转时间测定方法.土壤学报,2004,41(3):401-407
- [21] 赵吉,郭婷,邵玉琴.内蒙古典型草原土壤微生物生物量及其周转与流通量的初步研究.内蒙古大学学报(自然科学版),2004,35(6):673
- [22] 王曙光,侯彦林.磷脂脂肪酸方法在土壤微生物分析中的应用.微生物学通报,2004,31(1):114-117
- [23] 龙健,李娟,滕应,黄昌勇.贵州高原喀斯特环境退化过程土壤质量的生物学特性研究.水土保持学报,2003,17(2):47-50
- [24] 张薇,魏海雷,高洪文,胡跃高.土壤微生物多样性及其环境影响因子研究进展.生态学杂志,2005,24(1):48-52
- [25] 郑华,欧阳志云,王效科,苗鸿,赵同谦,彭廷柏.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):1995-2000
- [26] Tiquia SM, Lloyd J, Herms DA, Hoitink HAJ, Michel FCJr. Effects of mulching and fertilization on soil nutrients, microbial

- activity and rhizosphere bacterial community structure determined by analysis of TRFLPs of PCR-amplified 16S rRNA genes. *Applied Soil Ecology*, 2002, 21: 31–48
- [27] 焦如珍, 杨承栋, 屠星南, 盛炜彤. 杉木人工林不同发育阶段林下植被、土壤微生物、酶活性及养分的变化. *林业科学研究*, 1997, 10 (4): 373–379
- [28] 庞学勇, 刘庆, 刘世全, 吴彦, 林波, 何海, 张宗锦. 川西亚高山云杉人工林土壤质量性状演变. *生态学报*, 2004, 24 (2): 261–266
- [29] 张奇春, 王光火, 方斌. 不同施肥处理对水稻养分吸收和稻田土壤微生物生态特性的影响. *土壤学报*, 2005, 42 (1): 116
- [30] 孙瑞莲, 朱鲁生, 赵秉强, 周启星, 徐晶, 张夫道. 长期施肥对土壤微生物的影响及其在养分调控中的作用. *应用生态学报*, 2004, 15 (10): 1907–1910
- [31] Liu BR, Jia GM, Chen J, Wang G. A review of methods for studying microbial diversity in soils. *Pedosphere*, 2006, 16 (1): 18
- [32] 章家恩, 蔡燕飞, 高爱霞, 朱丽霞. 土壤微生物多样性实验研究方法概述. *土壤*, 2004, 36 (4): 346–350
- [33] 杜相革, 董民, 曲再红, 史咏竹. 有机农业和土壤生物多样性. *中国农学通报*, 2004, 20 (4): 80–81
- [34] Yan F, McBratney AB, Copeland. Functional substrate biodiversity of cultivated and uncultivated A horizons of vertisols in NW New South Wales. *Geoderma*, 2000, 96: 321–343
- [35] 孔维栋, 刘可星. 有机物料种类及腐熟水平对土壤微生物群落的影响. *应用生态学报*, 2004, 15 (3): 487–492
- [36] Balota EL, Colozzi-Filho A, Andrade DS, Dick RP. Microbial biomass in soils under different tillage and crop rotation systems. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 38: 15–20
- [37] 周丽霞, 蚁伟民, 易志刚, 李志安, 丁明懋. 鹤山退化生态系统恢复过程中土壤微生物的特性. *热带亚热带植物学报*, 2004, 12 (3): 202–206
- [38] 龙健, 黄昌勇, 滕应, 姚槐应. 矿区重金属污染对土壤环境质量微生物学指标的影响. *农业环境科学学报*, 2003, 22 (1): 60–63
- [39] Insam H. Are the soil microbial biomass and basal respiration governed by the climatic regime? *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22 (4): 525–532
- [40] 王新, 周启星. 重金属与土壤微生物的相互作用及污染土壤修复. *环境污染治理技术与设备*, 2004, 5 (11): 1–5
- [41] Welp G. Inhibitory effects of the total and water-soluble concentrations of nine different metals on the dehydrogenase activity of a loess soil. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 30: 132–139
- [42] 朱艳, 曹卫星, 戴廷波, 孙传范. 小麦栽培氮肥运筹的动态知识模型. *中国农业科学*, 2003, 36 (9): 1006–1013
- [43] 张华, 张甘霖, 漆智平, 赵玉国. 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
- [44] 曹慧, 孙辉, 杨浩. 土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展. *应用与环境生物学报*, 2003, 9 (1): 105–109
- [45] 和文祥, 朱铭莪, 张一平. 土壤酶与重金属关系的研究现状. *土壤与环境*, 2000, 9 (2): 139–142
- [46] 赵之重. 土壤酶与土壤肥力关系的研究. *青海大学学报(自然科学版)*, 1998, 16 (3): 24–29
- [47] 万忠梅, 吴景贵. 土壤酶活性影响因子研究进展. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2005, 33 (6): 87–90
- [48] 袁玲, 杨邦俊, 郑兰君, 刘学成. 长期施肥对土壤酶活性和氮磷养分的影响. *植物营养与肥料学报*, 1997, 3 (4): 300–306
- [49] 何斌. 广西英罗港不同红树植物群落土壤理化性质与酶活性的研究. *林业科学*, 2002, 38 (2): 21–26
- [50] 常凤来, 田 昆, 莫剑锋, 陆梅, 李宁云. 不同利用方式对纳帕海高原湿地土壤质量的影响. *湿地科学*, 2005, 3 (2): 132–134
- [51] Debosz K, Rasmussen PH, Pedersen AR. Temporal variations in microbial biomass C and cellulolytic enzyme activity in arable soils: Effects of organic matter input. *Applied Soil Ecology*, 1999, 13 (3): 209–218
- [52] Wang XC, Lu Q. Beta-glucosidase activity in paddy soils of the Taihu Lake region, China. *Pedosphere*, 2006 16 (1): 118–124
- [53] Grierson PF, Adams MA. Plant species affect acid phosphatase, ergosterol and microbial P in a jarrah *Eucalyptus marginata* Donn ex Sm.) forest in south-western Australia. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 1817–1828
- [54] Li XZ, Sarah P. Enzyme activities along a climatic transect in the Judean Desert. *Catena*, 2003, 53 (4): 349–363
- [55] Taylor JP, Wilson B, Mills MS, Burns RG. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34: 387–401
- [56] Naseby DC, Pascual JA, Lynch JM. Effect of biocontrol strains of *Trichoderma* on plant growth, *Pythium ultimum* populations, soil microbial communities and soil enzyme activities. *Journal of Applied Microbiology*, 2000, 88: 161–169
- [57] Diamantidis G, Effosse A, Potier P, Bally R. Purification and characterization of the first bacterial laccase in the rhizospheric bacterium *Azospirillum lipoferum*. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 919–927
- [58] 孙秀山, 封海胜, 万书波, 左学青. 连作花生田主要微生物类群与土壤酶活性变化及其交互作用. *作物学报*, 2001, 27 (5): 617–621
- [59] 吾玛尔·阿布力孜, 艾尼瓦尔·吐米尔, 马合木提·哈力克. 新疆大学农场资源土壤动物调查初报. *干旱区研究*, 2005, 22 (2): 192–196
- [60] Wasilewska L. Soil invertebrates as bioindicators, with special reference to soil-inhabiting nematodes. *Russian Journal of*

- Nematology, 1998, 5: 113-126
- [61] Liang WJ, Lavian I, Steinberger Y. Dynamics of nematode community composition in a potato field. *Pedobiologia*, 1999, 43: 459-469
- [62] Porazinska DL, Duncan LW, McSorley R, Graham JH. Nematode communities as indicators of status and processes of a soil ecosystem influenced by agricultural management practices. *Applied Soil Ecology*, 1999, 13: 69-86
- [63] 郑祥, 鲍毅新, 孔军苗, 葛宝明. 金华北山阔叶林大型土壤动物群落的初步研究. *土壤*, 2005, 37 (5): 545-550
- [64] 孙权, 何振立, 纪立东. 侵蚀退化生态系统恢复的土壤质量指标. *宁夏农学院报*, 2004, 25 (2): 15-20
- [65] 谢桂林, 谢桂伟, 刘建丽. 菏泽牡丹园土壤动物的季节变化和垂直分布. *菏泽学院学报*, 2005, 27 (2): 46-51
- [66] 张俊霞, 刘贤谦. 太谷县枣园土壤动物与土壤养分的关系. *山西农业大学学报*, 2005, 8 (4): 8-11
- [67] 林英华, 杨学云, 张夫道. 长期施肥对黄土区农田土壤动物群落的影响. *中国农业科学*, 2005, 38 (6): 1213-1218
- [68] 林英华, 张夫道, 杨学云. 农田土壤动物与土壤理化性质关系的研究. *中国农业科学*, 2004, 37 (6): 871-877
- [69] 殷秀琴, 李建东. 羊草草原土壤动物群落多样性的研究. *应用生态学报*, 1998, 9 (2): 186-188
- [70] 袁金荣, 朱雅安, 林仲桂. 湖南衡阳地区紫色页岩土壤动物群落多样性研究. *湖南师范大学自然科学学报*, 2005, 28 (2): 70-75
- [71] 黄玉梅. 土壤动物群落多样性研究进展. *西部林业科学*, 2004, 33 (3): 63-67
- [72] 张雪萍, 李春艳, 殷秀琴. 不同使用方式林地的土壤动物与土壤营养元素的关系. *应用与环境生物学报*, 1999, 5 (1): 26-31
- [73] 苏永春, 勾影波, 王立新. 农田土壤动物和微生物与生物化学动态关系的研究. *生态学杂志*, 2004, 23 (3): 134-137
- [74] 刘晓冰, 邢宝山. 土壤质量及其评价指标. *农业系统科学与综合研究*, 2002, 18 (2): 109-111

Biological Indicator of Soil Quality: A Review

TANG Yu-shu^{1,2}, WEI Chao-fu¹, YAN Ting-mei², YANG Lin-zhang², CI En²
(1 College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China;
2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Current findings of the study on use soil microorganism, soil enzymatic activity and soil animals as biological indicators of soil quality are here in summarized and reviewed. Soil microbe is the most active part of soil organic constituents and ecosystem, and hence considered to be the most sensitive biological indicator of soil quality. Soil microbial biomass stands for quantity of the microorganisms that regulate energy and nutrient cycle in soil and transformation organisms, however, it is essential to combine this with the study on microbial diversity to make up the shortage that it fails to reflect composition of the soil microorganisms and variation of the microbiota. Dynamics of composition and diversity of the soil microbial community reflects variability of soil biological groups and variation of quantity and functions of soil microorganisms with soil quality. Soil microbial activity displays itself in microbial quotient, microbial respiration and metabolic quotient. The relationship of the size of biomass with activities of microbial groups should be taken into account as an indicator of differentiation between soil microbial groups. Soil enzymatic activity is an indicator extremely time-effective, and reflects nearly real-time change in soil quality. In the aspect of soil animals, species composition and population, relative abundance of soil fauna, diversity and activity are sensitive indicators of soil biological quality. Compared with physical and chemical indicators, biological indicators are more sensitive and quick in response to changes in soil quality, and hence more widely applied to soil quality evaluation nowadays.

Key words: Soil microbial biomass, Microbial community composition and diversity, Soil microbial activity, Soil enzymatic activity, Soil animal, Soil quality