

黑土肥力质量评价的生物指标研究进展

房娜娜^{1,2}, 刘凯^{1,2}, 刘国栋^{1,2}, 许江^{1,2}, 张一鹤^{1,2},
杨泽^{1,2}, 陈江^{1,2}, 戴慧敏^{1,2}

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;
2. 中国地质调查局 黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳 110034

摘要: 由于受到自然因素和人类掠夺式开发利用的影响, 黑土肥力下降不断加剧, 对国家粮食安全构成重大威胁, 黑土肥力质量评价指标已成为当今土壤学的研究热点. 传统的研究涉及较多化学和物理指标, 近年来生物检测技术迅猛发展, 土壤生物指标因其灵敏性较高已逐渐成为土壤肥力质量评价的重要参数, 但还没有形成统一的标准, 因此有必要梳理一下土壤生物指标. 本文对近些年土壤微生物、酶活性及动物等土壤肥力质量评价的生物指标的研究进展进行了综述, 为黑土肥力质量评价提供新的研究思路 and 手段.

关键词: 黑土肥力; 质量评价; 土壤生物指标; 土壤微生物; 土壤酶; 土壤动物

开放科学标志码(OSID):



DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2020.06.003

RESEARCH PROGRESS ON BIOLOGICAL INDICATORS OF BLACK SOIL FERTILITY QUALITY EVALUATION

FANG Na-na^{1,2}, LIU Kai^{1,2}, LIU Guo-dong^{1,2}, XU Jiang^{1,2}, ZHANG Yi-he^{1,2},
YANG Ze^{1,2}, CHEN Jiang^{1,2}, DAI Hui-min^{1,2}

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China;
2. Key Laboratory of Black Land Evolution and Ecological Effects, CGS, Shenyang 110034, China

Abstract: Due to the influence of natural factors and human predatory development and utilization, the black soil fertility is continuously declining, which poses a major threat to national food security. The evaluation index of black soil fertility quality has become a research focus in pedology. Traditional researches involve numbers of chemical and physical indicators, while the soil bio-indicator has gradually become an important parameter of soil fertility quality evaluation for its high sensitivity with the rapid development of biological detection technology in recent years, but there is no unified standard yet. Therefore, the paper summarizes the research progress of bio-indicators for soil fertility quality evaluation such as soil microorganism, enzyme activity and animal to provide new research idea and method.

Key words: black soil fertility; quality evaluation; soil bio-indicator; soil microorganism; soil enzyme; soil animal

收稿日期:2020-08-26;修回日期:2020-09-01. 编辑:李兰英.

基金项目:中国地质调查局项目“兴凯湖平原及松辽平原西部土地质量地球化学调查”(编号 DD20190520).

作者简介:房娜娜(1982—),女,博士,工程师,主要从事土壤肥力与修复研究,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号,E-mail//fangnana0373@163.com.

通信作者:戴慧敏(1978—),女,博士,教授级高级工程师,主要从事地球化学研究,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号,E-mail//daihuimin78@126.com

0 前言

我国东北黑土区(又称寒地黑土区)作为全球仅有的三大黑土区之一,是地球上最珍贵的土壤资源^[1-2],被称为土壤中的“大熊猫”。近百年来,黑土地由于受到自然因素和人类掠夺式开发利用的影响,土层变薄、肥力下降、荒漠化、盐碱化、污染等环境问题突出,直接威胁到我国粮食安全^[2]。

土壤质量是指特定类型土壤在自然或农业生态系统边界内保持植物生产力,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。简单地说,土壤质量就是“土壤运行能力”^[3]。土壤肥力是指土壤为植物生长不断供应和协调养分、水分、空气和热量的能力^[4-5]。土壤肥力质量是指以土壤的植物生产功能为基础评价的土壤质量^[6]。土壤肥力质量与土壤环境质量、土壤健康质量共同构成土壤质量的3个方面^[3]。土壤肥力质量更注重土壤的生产力,其高低是决定土壤上生长的作物产量高低的重要因素。客观评价土壤肥力质量是准确了解土壤属性、充分利用土壤资源的保障^[7-9]。

土壤肥力质量是黑土退化研究的基础和重要内容之一,是客观评估黑土生产力、监测与农业管理有关的环境及可持续性变化的前提,对于制定合理的黑土保护、利用政策,维持黑土可持续利用具有重要意义^[10]。土壤肥力涉及土壤物理、化学、生物学性质和营养元素含量等,还包括土壤所处的环境等与作物生长有关的各个方面等,但至今未形成具有共识的土壤肥力综合评价指标值和方法^[11]。我国第二次土壤普查时采用了欧美国家的土壤肥力概念,以土壤的养分含量作为划分依据。这一土壤养分含量等级指标仍然是我国土壤肥力评价的基础^[12]。因此,以往对于黑土肥力质量评价也多关注其物理、化学指标,如土壤有机质、全量养分、速效养分、pH、阳离子交换量(CEC)、质地、耕层厚度等^[13]。随着研究发现土壤的生物学特性,包括土壤上生长的植物、土壤动物和微生物能在环境变化时表现出敏感的反应,生物指标作为土壤肥力质量评价的参数已表现出很大的潜力。就目前来看,土壤生物指标中酶活性、细菌数量和真菌数量使用频数最多^[14]。土壤微生物量碳、氮等生物因子作为土壤肥力的评价指标近年来也受到重视。但也有研究认为微生物多样性、酶活性等作为土壤质量评价指标存在一些问题^[15-16],如土壤酶活性的检测方法,包括土壤的前处

理、土壤灭菌、分析条件还需进一步研究。现代高通量测序、基因检测等技术使生物检测手段更加灵敏、精准,越来越多的生物指标能够被实时、定量、精准地检测出来,因此很有必要对黑土肥力质量评价的生物指标进行梳理,为黑土肥力质量评价提供理论支持。

1 土壤微生物指标

微生物是土壤生态系统中养分源和汇的一个巨大的原动力,在动植物残体的降解、养分循环与周转、土壤性质改善中起着重要作用^[17]。因此,土壤微生物可作为黑土肥力质量评价的最有潜力的敏感性生物指标之一。在农田系统中,微生物群落可以早在土壤有机质变化之前提供可靠的、土壤性质改变的直接证据^[18]。有学者认为生物指标包括:营养元素矿化、微生物生物量、微生物生物量占总碳的比例、土壤呼吸、呼吸占微生物生物量的比例、动物种群、凋落物分解的比例^[19-20]。

1.1 土壤微生物生物量

土壤微生物生物量(Microbial biomass, MB)是指土壤有机质中的有生命成分,但不包括大型动物(体积大于 $5 \times 10^3 \mu\text{m}^3$)和植物根系^[21]。它能代表参与调控土壤中能量和养分循环以及有机物质转化的对应微生物的数量^[18],与微生物个体数量相比,更能反映微生物在土壤中的实际含量和作用潜力,具有更加灵敏、准确的优点,因此常被用于评价土壤的生物学性状。Carter^[22]将土壤微生物量作为由于耕作措施引起的土壤生物特性变化的指标。微生物生物量已被许多学者用作因人为管理导致土壤变化的灵敏指标之一,故现已成为近年来国内外土壤学研究的热点之一^[23-24]。土壤微生物量与作物产量也表现出正相关关系,可以作为土壤肥力的生物指标^[25-26]。许多学者研究发现土壤微生物生物量与土壤肥力有十分紧密的关系,比如土壤微生物生物量和潜在的土壤可利用氮之间存在着显著的正相关^[27]。土壤微生物量碳(MBC)、微生物量氮(MBN)可以指示土壤中碳、氮的转化与储存能力,被认为是敏感的土壤质量指标^[28]。MBC对长期和短期施肥管理都很敏感,可作为一个生物学评价指标^[18]。土壤微生物量碳氮比(MBC/MBN)可表征微生物群落的结构特征。陈安强等^[29]研究认为,土壤MBC/MBN为3~5的土壤微生物群落以细菌为主,5~7的土壤微生物

物群落以放线菌为主, 4.5~15 的土壤微生物群落以真菌为主。季节更替条件下黑土的微生物量也有较大变动, 如 MBC 在仲春最高, 而 MBN 则在夏季最高^[30]。施肥对黑土微生物量也有显著影响, 如化肥配施有机肥处理可提高黑土 MBC 和 MBN 含量, 若减少有机肥的施用, 则会使黑土表层土壤 MBC 含量下降^[30]。土壤微生物量磷(MBP)在免耕和常规翻耕条件下无显著变化, 但施肥(化肥及有机肥配合施用)可显著提高其数量^[31-32]。

1.2 土壤微生物活性

土壤微生物活性是指土壤中整个微生物群落或其中的一些特殊种群的活跃状态^[18], 可以用微生物商(microbial quotient)、微生物呼吸(microbial respiration)和呼吸商(respiration quotient, q_{CO_2})等指标来衡量。其中微生物商是指微生物量碳与土壤有机碳的比值^[18]。微生物呼吸($CO_2-C\ h^{-1}$)在监测土壤有机物分解方面也是一个较好的参数, 但容易受基质、水分、温度等因素影响^[33]。呼吸商又称代谢商, 是基础呼吸(basal respiration, $CO_2-C\ h^{-1}$)与微生物生物量碳间的比率, 即每单位微生物生物量碳的具体呼吸率。它将微生物生物量的大小与微生物的生物活性和功能有机地联系起来^[13]。呼吸商是反映环境因素、管理措施变化^[34]对微生物活性影响的一个敏感指标。有研究表明, 呼吸商是反映农作系统(单作或轮作)和温度状况对土壤微生物影响的敏感指标, 如轮作系统中土壤呼吸商比单作低, 说明轮作系统比较稳定和成熟。另外, 呼吸商随土壤年龄而降低, 因此可以作为反映土壤演替的指标^[35]。Sparling 等^[36]认为, 如果土壤被过度使用, 土壤微生物碳库将会以较快的速率下降, 最终造成土壤有机质和微生物商的降低。Gupta 等^[37]发现, 土壤中施入不同的作物残体后也会引起土壤呼吸商的变化。在免耕的农田生态系统中, 微生物活性随土壤深度的变化而变化, 一般表层土壤中的微生物活性最大。然而在耕翻的农田生态系统中, 微生物活性在整个耕作层中相当一致^[38]。

1.3 土壤微生物群落结构与多样性

土壤微生物群落包括细菌、真菌和藻类。微生物群落结构和功能的变化与土壤有机质的含量和构成紧密相关^[37]。细菌是土壤物质转化的主要动力, 许多细菌类群可增加土壤中可给性氮素和磷素的含量, 提高土壤养分供应能力。放线菌的增加有利于分解土壤

中的有机质, 并产生抗生素和激素类物质, 有效抑制某些病原菌的生长, 对各种病害起一定的防治作用。土壤肥力影响微生物活动, 改变微生物类群, 同时, 大量的土壤微生物又反过来对土壤结构的改善以及养分积累、转化和维持起促进作用^[39]。焦晓光等^[40]认为, 黑土细菌、放线菌与土壤有机质含量呈正相关, 而真菌数量则随土壤有机质含量的增加呈降低趋势。研究表明: 人为加速侵蚀主要引起表土层细菌、放线菌、真菌数量减少, 其中以真菌下降率最高, 其中参与土壤碳、磷转化的纤维素分解菌、磷细菌分别在土地开垦后的 3 a、10 a 出现快速的下降过程, 对侵蚀环境反应敏感, 可作为反映侵蚀土壤质量变化的微生物指标^[41]。

土壤微生物的物种多样性、功能多样性及遗传多样性的变化, 是对土壤环境变化及栽培管理措施变化的响应, 能够反应土壤质量的指标信息^[42]。微生物生物多样性是指生命体在遗传、种类和生态系统层次上的变化^[21], 微生物的均衡性、丰富性和多样性是常用的指数^[43-44]。对黑土土壤微生物群落功能多样性进行研究, 找出土壤肥力和土壤微生物之间的关系, 对黑土土壤肥力评价具有重要意义^[45], 也可对退化黑土土壤进行有效的微生物修复提供重要参考。有研究认为, 土壤真菌与细菌的比率是反映土壤肥力的指标。低比率的“细菌型”土壤具有较高的肥力, 高比率的“真菌型”土壤则具有较强的致病力。这是由于真菌细胞中的 C/N 比率远高于细菌细胞, 因此真菌群落需要从土壤环境中摄取更多有机物作为碳源的营养来源, 从而可能较细菌群落更易降低土壤肥力^[46-47]。

近 10 年来, 随着分子生物学技术的飞速发展, 利用调控生物地球化学物质循环的关键酶的表达基因作为分子标记物, 已系统揭示了土壤中碳、氮、磷循环的关键酶的功能细菌对土壤肥力指标, 如有机质、有机氮、有机磷矿化的作用^[48-52]。如土壤中蓝单胞菌属、嗜嗜菌属和嗜热裂孢菌属能够分泌磷酸烯醇丙酮酸羧化酶或木质纤维素分解酶, 能够参与有机质矿化, 即土壤碳循环^[48-49]。Tan 等^[53]利用 454 高通量测序技术研究了不同磷梯度施肥(0、15、30 kg/hm^2)的施入显著降低了土壤中碱性磷酸酶活性, 但提高了土壤中 *phoD* 基因 α -多样性指数, 且显著降低了具有矿化有机磷为无机磷能力的荧光假单胞杆菌(*Pseudomonas*

fluorescens)^[52]的相对含量. Luo等^[54]发现长期有机和无机施肥条件下,慢生根瘤菌属(*Bradyrhizobium*)作为一种共生固氮菌,其相对含量最高.表明这个属在氮和磷循环中同时起到重要的作用.研究结果证明:黄土高原沟壑区农田土壤微生物多样性的 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Mcintosh 指数范围分别在 0.24~0.56、0.12~0.36、0.80~0.94 之间.相关分析表明,多样性指数较好地反映了该地土壤肥力的水平,可作为土壤肥力质量监测的生物学指标之一^[55].

2 土壤酶活性指标

土壤中几乎所有的生物化学反应都是有酶驱动的,酶特性是土壤新陈代谢和土壤肥力的重要指标^[56].土壤酶包括游离酶、胞内酶和胞外酶,主要源于土壤微生物的活动、植物根系分泌物和动植物残体腐解过程中释放的酶^[57].一些水解酶和氧化酶类对土壤有机质的形成和养分循环具有重要作用,主要包括碳循环中的淀粉酶、纤维分解酶、脂肪酶、硫代葡萄糖苷酶和蔗糖酶;氮循环中的蛋白酶、酰胺酶、脲酶和脱氢酶;磷循环中磷酸酶;硫循环中的芳基硫酸酯酶^[58].土壤酶的专一性和综合性特点使其有可能成为一个有潜力的土壤生物指标^[19].吴海燕等^[59]定量评价不同施肥措施对黑土肥力质量的影响,结果表明:长期不同施肥处理的玉米产量与土壤酶活性(脲酶、过氧化氢酶、磷酸酶、蔗糖酶)表现出显著或极显著正相关.这与隋跃宇等^[60]、Verstraete等^[61]结果一致.苏弘治^[62]运用主成分分析法、敏感性分析法、判别分析法评价常规垄作、免耕覆盖、错位轮还、全量深翻4种秸秆还田方式下土壤的综合肥力质量,并选取土壤酶活性(碳矿化酶、氮矿化酶、磷矿化酶、脱氢酶)作为生物肥力指标,发现过氧化物酶、 α -葡萄糖苷酶、N-乙酰- β -D-葡萄糖苷酶(NAG酶)、酰胺酶、酸性磷酸单酯酶、碱性磷酸单酯酶、磷酸二酯酶几种酶活性指标可作为黑钙土肥力质量评价的关键性指标.黑土酶活性随着土壤垂直层面的加深呈递减的趋势,而黑土磷酸酶、脲酶、转化酶等在玉米生长季内多呈现先降低后升高的趋势^[63],过氧化氢酶活性则呈现“低—高—低”的趋势^[64].黑土酶活性与养分之间有密切的关系,研究表明黑土中转化酶活性和土壤全氮、速效氮、全钾、速效钾、全碳含量显著相关^[65].长期定位试验表明,土壤酶在识别不同土壤管理措施

的效果时较敏感,如土壤磷酸酶^[66].研究表明:长期施用氮肥、磷肥对黑土脲酶、磷酸酶都有明显的促进作用^[67],施有机肥则可显著提高土壤脲酶、转化酶和过氧化氢酶活性^[68].而有研究却表明施肥对土壤过氧化氢酶具有一定的抑制作用^[69].长期施用有机肥条件下,增加铵态氮肥的施用比率会降低那些与氮循环有关酶的活性^[70],如酰胺酶和脲酶.同传统耕作相比,保护性耕作措施能减少对土壤的扰动,表土(<10 cm)中的酶活性明显较高^[71-72].

另外,除了土壤酶活性指标,也可用土壤酶促反应动力学方法来探讨土壤酶的来源、性质及影响因素,可以反映酶促反应过程,有助于揭示各反应的中间阶段以及各种生物现象,对提高土壤肥力和进一步调控反应过程有着重要意义^[73].通常会用米氏方程(Michaelis-Menten equation)来表示^[74].

$$V = \frac{V_{\max}[S]}{[S] + K_m} \quad (1)$$

其中 K_m 称为米氏常数, V_{\max} 为底物反应最大速率, S 为底物浓度, V 为反应速率. K_m 和 V_{\max} 即为土壤酶的动力学参数,可以显示土壤中酶含量的高低,还可以反映土壤酶与底物、土壤有机-无机复合体之间的紧密程度和作用过程,探索土壤酶来源及其存在状态以及各种因素对酶催化反应不同阶段的影响性质^[75].因此,土壤酶动力学参数被认为可作为土壤肥力的指标之一.黄土高原沟壑区高肥力土壤中水解酶 K_m 高于低肥力,但差异不显著,不同肥力间的脲酶 V_{\max} 、 V_{\max}/K_m 、 K_m 值达到显著性差异.转化酶 V_{\max}/K_m 、 K_m 能够反映土壤酸碱度的变化,脲酶动力参数与化学性质达到显著相关,表明脲酶的动力学参数 V_{\max} 、 V_{\max}/K_m 、 K_m 可作为该地区土壤肥力评价的指标之一^[55].Juma和Tabatabai^[76]指出施用浓度 10 $\mu\text{mol/g}$ 和 1 $\mu\text{mol/g}$ 正磷酸盐处理的土壤碱性磷酸酶动力学常数 K_m 值比无肥处理的低, V_{\max} 值相近,但明显大于无肥处理,说明施肥显著加快了土壤中的酶促反应速度,促进土壤中的磷循环.有结果证明^[77]:室内常温土培条件下,还原型谷胱甘肽 GSH 处理的黑土磷酸单酯酶、三酯酶和棕壤的二酯酶、三酯酶 V_{\max} 值显著大于空白对照,证明 GSH 是通过增大酶量实现 V_{\max} 值的增大.试验中 GSH 处理的棕壤磷酸单酯酶及黑土的磷酸二酯酶 K_m 值显著低于空白对照,说明 GSH 改变了酶结构,增强了

酶与底物的亲和力. 因此, 可以通过研究磷酸酶的动力学参数来分析土壤中有机磷转化的速度与方向.

单一或几组土壤酶活性不能全面地反映土壤的生物学状况, 因为土壤酶很容易受到季节和时空变化的影响^[78]. 我国学者周礼恺^[79]应用系统聚类分析方法证明利用土壤酶活性总体可以很好地评价土壤肥力质量, 从而来对不同肥力水平土壤进行分级. Stefanie等^[80]提出了一个基于酶活的土壤肥力生物学指标(BIF), 它按下式进行计算:

$$BIF=(DHG+kCA)/2 \quad (2)$$

式中, DHG 是脱氢酶活性, CA 是过氧化氢酶活性, k 是比例系数.

Perucci^[81]提出水解系数 Hc, $Hc=FDA_{\text{水解}}/FDA_{\text{总量}}$, FDA 为荧光素二乙酸酯.

目前, 土壤酶活性作为肥力评价指标的研究重点是寻找一个相对或统一的综合指标^[18], 而不是用单纯的土壤酶活性指标, 因此, 还需要进一步研究.

3 土壤动物指标

一些土壤动物(如蚯蚓、昆虫、线虫等)的丰度、多样性、食物链结构和群落稳定性非常适合土壤肥力质量评价指标^[82]. 土壤动物对土壤结构的影响可能是评价土壤肥力质量的最好的长期指标. 蚯蚓对土壤有机质转化和土壤结构形成有重要作用. 大量的研究表明, 土壤质地、湿度、pH、耕翻、作物残留物、化学添加剂等都能影响蚯蚓的种群和丰度, 因而可作为土壤肥力质量变化的一个极其重要的指标^[18]. Ditzler等^[83]选取土壤呼吸和蚯蚓数量两项生物指标来评价农田的土壤质量. 保持作物残茬对土壤肥力和细菌繁殖较为有利, 同时也会增加土壤原生动物的丰富性和多样性^[84]. 少耕或免耕可促进以食真菌为主的原生动物和线虫等的发展, 而常规耕作通常有利于生命周期短、代谢率高和扩散迅速的土壤动物^[21, 85]. Yeates等^[86]发现在反映线虫的营养结构和趋势方面, 一些生态指数如种类丰富度(species richness)和香浓指数(Shannon-Weaver index)非常实用, 因此, 很有潜力作为土壤肥力质量评价参数.

4 展望

土壤微生物特性(微生物生物量、呼吸商等, 群落

结构和多样性)是土壤肥力质量变化最敏感的指标^[78]. 土壤酶活性能表征土壤总的生物学活性和土壤肥力水平^[79]. 土壤动物(如线虫的丰富性和多样性)则可以很好地检测土壤食物网变化, 说明土壤生物指标可以成为土壤肥力质量评价指标的潜力.

目前关于黑土肥力质量评价的生物指标仅有零星的研究, 尚未形成体系, 因此急需建立一套评价黑土肥力质量的生物部分的最小参数集, 这些指标需要在不同农业生态系统中进行验证, 同时还要考虑一般土壤过程与土壤生物群落结构或生物学特性之间的关系、人为侵扰的影响等等.

参考文献:

- [1]孟凡杰, 于晓芳, 高聚林, 等. 黑土地保护性耕作发展的制约瓶颈和突破路径[J]. 农业经济问题, 2020(2):135-142.
- [2]韩晓增, 李娜. 中国东北黑土地研究进展与展望[J]. 地理科学, 2018, 38(7):1032-1041.
- [3]Karlen D L, Mausbach M J, Doran J W, et al. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation (a guest editor)[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(1):4-10.
- [4]杨瑞吉, 杨祁峰, 牛俊义. 表征土壤肥力主要指标的研究进展[J]. 甘肃农业大学学报, 2004, 39(1):86-91.
- [5]陈留美, 桂林国, 吕家珑, 等. 应用主成分分析和聚类分析评价不同施肥处理条件下新垦淡灰钙土土壤肥力质量[J]. 土壤, 2008, 40(6):971-975.
- [6]Hornick S B. Factors affecting the nutritional quality of crops [J]. American Journal of Alternative Agriculture, 1992, 7(1/2):63-68.
- [7]马强, 宇万太, 赵少华, 等. 黑土农田土壤肥力质量综合评价[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10):1916-1920.
- [8]Andrews S S, Karlen D L, Cambardella C A. The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method [J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(6):1945-1962.
- [9]Idowu O J, van Es H M, Abawi G S, et al. Farmer-oriented assessment of soil quality using field, laboratory, and VNIR spectroscopy methods[J]. Plant and Soil, 2008, 307(1/2):243-253.
- [10]秦焱, 王清, 张颖, 等. 基于可拓评判法的黑土肥力质量评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(S1):221-226.
- [11]蔡祖聪. 浅谈“十四五”土壤肥力与土壤养分循环分支学科发展战略[J]. 土壤学报, 2020, 57(5):1128-1136.
- [12]胡珍珠, 潘存德, 陈虹. 新疆若羌县红枣生产园土壤肥力研究[J]. 河北农业大学学报, 2019, 42(3):76-80.
- [13]孙云云, 赵兰坡. 土壤质量评价的生物指标及其相关性研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(5):116-120.
- [14]林卡, 李德成, 张甘霖. 土壤质量评价中文文献分析[J]. 土壤通报, 2017, 48(3):736-744.

- [15] Anderson T H. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2003,9(1/3): 285-293.
- [16] 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[J]. *应用与环境生物学报*,2003,9(1):105-109.
- [17] 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.
- [18] 孙波,赵其国,张桃林,等. 土壤质量与持续环境Ⅲ. 土壤质量评价的生物学指标[J]. *土壤*,1997(5):225-234.
- [19] Pankhurst C E, Doube B M, Gupta V V S R. Biological indicators of soil health[M]. Wallingford: CAB International, 1997:97-120.
- [20] Roberson E B, Shennan C, Firestone M K, et al. Nutritional management of microbial polysaccharide production and aggregation in an agricultural soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1995,59(6):1587-1594.
- [21] Doran J W, Safley M. Defining and assessing soil health and sustainable productivity[C]//Pankhurst E C, Doube B M, Gupta V V S R. *Biological Indicators of Soil Health*. Wallingford: CAB International, 1997:1-28.
- [22] Carter M R. Microbial biomass as an index for tillage-induced changes in soil biological properties[J]. *Soil and Tillage Research*, 1986,7(1/2):29-40.
- [23] Pankhurst C E. Biological indicators of soil health and sustainable productivity [C]//Greenland D J, Szabolcs I. *Soil Resilience and Sustainable Land Use*. Wallingford: CAB International, 1994:331-351.
- [24] 贾伟,周怀平,解文艳,等. 长期有机无机肥配施对褐土微生物生物量碳、氮量及酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*,2008,14(4):700-705.
- [25] Insam H, Mitchell C C, Dormaar J F. Relationship of soil microbial biomass and activity with fertilization practice and crop yield of three Ultisols[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991,23(5):459-464.
- [26] He Z L, Yao H, Chen G, et al. Relationship of crop yield to microbial biomass in highly weathered soils of China[C]//Ando T, Fujita K, Mae T, et al. *Plant Nutrition for Sustainable Food Production and Environment*. Tokyo: Kluwer Academic Publishers, 1997:751-752.
- [27] Powlson D S, Prookes P C, Christensen B T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987,19(2):159-164.
- [28] Garcia-Gil J C, Plaza C, Soler-Rovira P, et al. Long-term effects of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002,32(13):1907-1913.
- [29] 陈安强,付斌,鲁耀,等. 有机物料输入稻田提高土壤微生物碳氮及可溶性有机碳氮[J]. *农业工程学报*,2015,31(21):160-167.
- [30] 白震,何红波,解宏图,等. 施肥与季节更替对黑土微生物群落的影响[J]. *环境科学*,2008,29(11):3230-3239.
- [31] 徐阳春,沈其荣,冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. *土壤学报*,2002,39(1):89-96.
- [32] Brookes P C, McGrath S P. Effect of metal toxicity on the size of the soil microbial biomass[J]. *Journal of Soil Science*, 1984,35(2):341-346.
- [33] Brookes P C. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1995,19(4):269-279.
- [34] Grego S, Benedetti A, Dell'Orco S, et al. Agricultural practices and biological activity in soil [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 1996,5(5/6):282-288.
- [35] Turco R F, Kennedy A C, Jawson M D. Microbial indicators of soil quality[C]//Doran J W, Coleman D C, Bezdicsek D F et al. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Madison: Soil Science Society of America, 1994:73-90.
- [36] Sparling G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1992,30(2):195-207.
- [37] Gupta V, Roper M M, Kirkegaard J A, et al. Changes in microbial biomass and organic matter levels during the first year of modified tillage and stubble management practices on a red earth[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1994,32(6):1339-1354.
- [38] 易泽夫,荣湘民,彭建伟,等. 微生物变量作为土壤质量评价指标的探讨[J]. *湖南农业科学*,2006(6):64-65,69.
- [39] Karlen D L K, Gardner J C, Rosek M J. A soil quality framework for evaluating the impact of CRP[J]. *Journal of Production Agriculture*, 1998,11(1):56-60.
- [40] 焦晓光,高崇升,隋跃宇,等. 不同有机质含量农田土壤微生物生态特征[J]. *中国农业科学*,2011,44(18):3759-3767.
- [41] 史衍玺,唐克丽. 人为加速侵蚀下土壤质量的生物学特性变化[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*,1998,4(1):28-33,40.
- [42] 吴海燕,范作伟,陈帅民,等. 吉林省不同黑土土壤微生物学肥力指标差异[J]. *玉米科学*,2020,28(2):163-168.
- [43] Atlas R M. Diversity of microbial communities [C]//Marshall K C. *Advances in Microbial Ecology*. Boston: Springer, 1984:1-47.
- [44] Kennedy A C, Smith K L. Soil microbial diversity and the sustainability of agricultural soils[J]. *Plant and Soil*, 1995,170(1):75-86.
- [45] 魏巍,许艳丽,朱琳,等. 长期施肥对黑土农田土壤微生物群落的影响[J]. *土壤学报*,2013,50(2):372-380.
- [46] De Vries F T, Hoffland E, van Eekeren N, et al. Fungal/bacterial ratios in grasslands with contrasting nitrogen management [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006,38(8):2092-2103.
- [47] Cwalina-Ambroziak B, Bowszys T. Changes in fungal communities in organically fertilized soil[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2009,55(1):25-32.

- [48]Kulakova A N, Wisdom G B, Kulakov L A, et al. The purification and characterization of phosphonopyruvate hydrolase, a novel carbon-phosphorus bond cleavage enzyme from *Variovorax* sp. Pal2 [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2003,278(26):23426-23431.
- [49]Huang Y S, Shen F T. Bioprospecting of facultatively oligotrophic bacteria from non-rhizospheric soils [J]. *Applied Soil Ecology*, 2016,108:315-324.
- [50]Hai B, Diallo N H, Sall S, et al. Quantification of key genes steering the microbial nitrogen cycle in the rhizosphere of sorghum cultivars in tropical agroecosystems[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009,75(15):4993-5000.
- [51]Liu H Y, Li J, Zhao Y, et al. Ammonia oxidizers and nitrite-oxidizing bacteria respond differently to long-term manure application in four paddy soils of south of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018,633:641-648.
- [52]Miller S H, Browne P, Prigent-Combaret C, et al. Biochemical and genomic comparison of inorganic phosphate solubilization in *Pseudomonas* species [J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2010,2(3):403-411.
- [53]Tan H, Barret M, Mooij M J, et al. Long-term phosphorus fertilisation increased the diversity of the total bacterial community and the *phoD* phosphorus mineraliser group in pasture soils [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013,49(6):661-672.
- [54]Luo G W, Ling N, Nannipieri P, et al. Long-term fertilisation regimes affect the composition of the alkaline phosphomonoesterase encoding microbial community of a vertisol and its derivative soil fractions[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017,53(4):375-388.
- [55]谭向平. 黄土高原沟壑区土壤生物学特征研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2010:38-45.
- [56]陈恩凤. 土壤酶与土壤肥力研究[M]. 北京:科学出版社,1979:54-61.
- [57]任天志. 持续农业中的土壤生物指标研究[J]. *中国农业科学*, 2000,33(1):68-75.
- [58]Dick R P. Soil enzyme activities as indicators of soil quality [C]//Doran J W, Coleman D C, Bezdicek D F, et al. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, 1994:107-124.
- [59]吴海燕,金荣德,范作伟,等. 基于主成分和聚类分析的黑土肥力质量评价[J]. *植物营养与肥料学报*,2018,24(2):325-334.
- [60]隋跃宇,焦晓光,刘晓冰,等. 长期施肥对农田黑土酶活性及作物产量的影响[J]. *土壤通报*,2010,41(3):608-610.
- [61]Verstraete W, Voets J P. Soil microbial and biochemical characteristics in relation to soil management and fertility [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1977,9(4):253-258.
- [62]苏弘治. 秸秆还田对黑钙土性质的影响和黑钙土肥力质量综合评价[D]. 沈阳:辽宁大学,2019:29-34,50-53.
- [63]岳中辉,张兴义,隋跃宇,等. 黑土酶活性的剖面分布及其对养分的评价[J]. *水土保持学报*,2011,25(4):154-159,164.
- [64]岳中辉,张兴义,田宇,等. 寒地农田黑土酶活性的季节动态[J]. *中国农学通报*,2011,27(33):67-72.
- [65]焦晓光,魏丹,隋跃宇. 长期施肥对黑土和暗棕壤土壤酶活性及土壤养分的影响[J]. *土壤通报*,2011,42(3):698-703.
- [66]Jordan D, Kremer R J, Bergfield W A, et al. Evaluation of microbial methods as potential indicators of soil quality in historical agricultural fields[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1995,19(4):297-302.
- [67]王树起,韩晓增,乔云发,等. 长期施肥对东北黑土酶活性的影响[J]. *应用生态学报*,2008,19(3):551-556.
- [68]Berchet V, Boulanger D, Gounot A M. Use of gel electrophoresis for the study of enzymatic activities of cold-adapted bacteria[J]. *Journal of Microbiological Methods*, 2000,40(1):105-110.
- [69]刘妍,周连仁,苗淑杰. 长期施肥对黑土酶活性和微生物呼吸的影响[J]. *中国土壤与肥料*,2010(1):7-10.
- [70]Dick R P, Rasmussen P E, Kerle E A. Influence of long-term residue management on soil enzyme activities in relation to soil chemical properties of a wheat-fallow system[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1988,6(2):159-164.
- [71]Doran J W. Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980,44(4):765-771.
- [72]Angers D A, Bissonnette N, Légère A, et al. Microbial and biochemical changes induced by rotation and tillage in a soil under barley production [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1993,73(1):39-50.
- [73]朱铭莪,白红英,代伟. 陕西几种土壤过氧化氢酶的动力学和热力学特征[J]. *西北农业大学学报*,1989,17(1):20-26.
- [74]王镜岩,朱圣庚,徐长法. 生物化学(上) [M]. 3 版. 北京:高等教育出版社,2002:351-380,444.
- [75]樊军,郝明德. 旱地农田土壤脲酶与碱性磷酸酶动力学特征[J]. *干旱地区农业研究*,2002,20(1):35-37.
- [76]Juma N G, Tabatabai M A. Effects of trace elements on phosphatase activity in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1977,41(2):343-346.
- [77]房娜娜,武志杰,陈利军. 还原型谷胱甘肽(GSH)作用下土壤磷酸酶动力学特性研究[J]. *土壤通报*,2008,39(4):840-844.
- [78]Visser S, Parkinson D. Soil biological criteria as indicators of soil quality: Soil microorganisms [J]. *American Journal of Alternative Agriculture*, 1992,7(1/2):33-37.
- [79]周礼恺,张志明,曹承绵. 土壤酶活性的总体在评价土壤肥力水平中的作用[J]. *土壤学报*,1983,20(4):413-418.
- [80]Stefanic G, Eliade G, Chirnoageanu I. Researches concerning a biological index of soil fertility[C]//Proceedings of the 5th Symposium on Soil Biology. Bucharest: Romanian National Society of Soil Science, 1984:35-45.

(下转第 542 页/Continued on Page 542)

参考文献:

- [1]王加恩,胡艳华,宋明义,等. 土地质量地球化学评估与农用地分等成果整合方法——以浙江省嘉善县为例[J]. 广东土地科学,2012,11(2):25-31.
- [2]中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0295-2016 土地质量地球化学评价规范[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
- [3]刘国栋,崔玉军,刘立芬,等. 土地质量地球化学评价方法研究与应用:以黑龙江省宏胜镇为例[J]. 现代地质,2017,31(1):167-176.
- [4]李括,彭敏,赵传冬,等. 全国土地质量地球化学调查二十年[J]. 地学前缘,2019,26(6):128-158.
- [5]孙淑梅,张连志,闫冬. 吉林省德惠-农安地区土地质量地球化学评估[J]. 现代地质,2008,22(6):998-1002.
- [6]于成广,杨忠芳,杨晓波,等. 土地质量地球化学评估方法研究与应用:以盘锦市为例[J]. 现代地质,2012,26(5):873-878,909.
- [7]王增辉,王存龙,赵西强,等. 山东省黄河下游流域土地质量地球化学评估及方法研究[J]. 物探与化探,2013,37(4):743-748.
- [8]任家强,汪景宽,杨晓波,等. 辽河中下游平原土地质量地球化学评价及空间分布研究[J]. 沈阳农业大学学报,2011,42(2):208-211.
- [9]邹勇军,黄懿,李昌龙,等. 崇义县上堡梯田土地质量地球化学评估及开发建议[J]. 中国煤炭地质,2019,31(1):70-75.
- [10]王文俊. 福建省寿宁县 1:25 万土地质量地球化学评估[J]. 中国地质,2014,41(2):665-674.
- [11]刘希瑶. 土地质量地球化学评估在土地规划和管理中的作用[J]. 地质与资源,2012,21(6):557-562.
- [12]戴慧敏,赵君,刘国栋,等. 东北黑土地质量调查成果[J]. 地质与资源,2020,29(3):299.
- [13]中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0295—2016 土地质量地球化学评价规范[S]. 北京:中国标准出版社,2016:26-27.
- [14]生态环境部,国家市场监督管理总局. GB15618—2018 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S]. 北京:中国标准出版社,2018.
- [15]张福锁,崔振岭,王激清,等. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略[J]. 植物学通报,2007,24(6):687-694.
- [16]蔡庆生. 植物生理学[M]. 北京:中国农业大学出版社,2014:121-122.
- [17]周健民,沈仁芳. 土壤学大辞典[M]. 北京:科学出版社,2013:452-453.
- [18]Kolachi N F, Kazi T G, Wadhwa S K, et al. Evaluation of selenium in biological sample of arsenic exposed female skin lesions and skin cancer patients with related to non-exposed skin cancer patients[J]. Science of the Total Environment, 2011,409(17):3092-3097.
- [19]谭见安,朱文郁,李日邦,等. 克山病与环境硒等生命元素的关系[J]. 中国地方病学杂志,1991,10(5):269-274.
- [20]吴正奇,刘建林. 硒的生理保健功能和富硒食品的相关标准[J]. 中国食物与营养,2005(5):43-46.
- [21]杨忠芳,余涛,侯青叶,等. 海南岛农田土壤 Se 的地球化学特征[J]. 现代地质,2012,26(5):837-849.
- [22]中华人民共和国农业部. 绿色食品产地环境质量[S]. 北京:中国农业出版社,2014.
- [23]中华人民共和国农业部. 无公害农产品种植业产地环境条件[S]. 北京:中国农业出版社,2016.

(上接第 524 页/Continued from Page 524)

- [81]Perucci P. Enzyme activity and microbial biomass in a field soil amended with municipal refuse[J]. Biology and Fertility of Soils, 1992,14(1):54-60.
- [82]Doran J W, Zeiss M R. Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality[J]. Applied Soil Ecology, 2000,15(1):3-11.
- [83]Ditzler C A, Tugel A J. Soil quality field tools: Experiences of USDA-NRCS soil quality institute[J]. Agronomy Journal, 2002,94(1):33-38.
- [84]Pankhurt C E. Soil biota: Management in sustainable farming systems [M]. Melbourne: CSIRO Press, 1993:107-124.
- [85]Roper M M, Gupta V. Management-practices and soil biota [J]. Australian Journal of Soil Research, 1995,33(2):321-339.
- [86]Yeates G W, Orchard V A, Speir T W, et al. Impact of pasture contamination by copper, chromium, arsenic timber preservative on soil biological activity[J]. Biology and Fertility of Soils, 1994,18(3):200-208.