

李国傲,陈雪,孙建伶,等. 土壤有机碳含量测定方法评述及最新研究进展[J]. 江苏农业科学,2017,45(5):22-26.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.05.005

土壤有机碳含量测定方法评述及最新研究进展

李国傲,陈雪,孙建伶,李焯

(北京市环境保护科学研究院/国家城市环境污染控制工程技术研究中心,北京 100037)

摘要:土壤有机碳含量对整个生态系统有重要影响,准确测定其含量是开展其他科学研究的前提。从应用的角度对现有测定土壤有机碳含量的方法进行评述,介绍测定过程中的多种氧化方法和检测方法,详细描述不同方法的原理、应用范围和注意事项。对目前国际和国内现有的标准方法进行总结,通过不同方法间的对比,指出各个方法存在的问题与不足及其改进方法,为方法的选择提供参考,同时对最新的研究进展进行追踪与展望,提出随着信息技术的发展,无氧化过程的测定方法将会有更大的发展空间。

关键词:土壤;有机碳;测定方法;生态系统;研究进展

中图分类号: S153.6+2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)05-0022-04

土壤有机碳(soil organic carbon,简称 SOC)是土壤碳库的重要成分,在碳循环中起着重要作用^[1]。SOC 具有多种特性:与重金属离子和水氧化物相结合,形成水溶性和不溶性复合物;与黏土矿物和颗粒物相结合,吸附各种污染物、吸收和释放植物营养元素、保持土壤水分等,可见 SOC 可以改变土壤的性质并影响污染物在土壤中的迁移和转化^[2]。因此准确测定 SOC 含量具有重要意义。目前已有多种方法测定土壤和沉积物中 SOC 的含量,每种方法都具有各自的优缺点和相应的适用范围。当前 SOC 含量的测定不仅受样品本身限制还受其他因素的影响,如化学方法中试剂的纯度、光谱法中信号的干扰等,甚至相同的仪器和方法间测定的数据也存在较大偏差,因而 SOC 是一个高可变动性参数^[3],选择合适的方法是得到准确数据的前提。已有文献报道最新 SOC 含量测定的方法和关键技术^[4],吴才武等对 SOC 含量的测定方法也进行了阐述^[5]。本文对最新 SOC 含量测定方法进行综述,从应用的角度为实际测定土壤有机碳含量方法的选择提供参考。

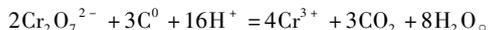
1 现有方法

1.1 氧化方法

SOC 的氧化方法有 2 种,一种是干法氧化,即燃烧法,将土壤样品置于炉中通过高温燃烧,使其中的有机碳(organic carbon,简称 OC)氧化成 CO₂。OC 燃烧不充分时可能产生一定量的 CO,为使其完全转化成 CO₂,经常须要借助过渡金属进行催化氧化。当反应炉温度为 950 ℃ 时,可选择 Cr₂O₃、CoO 和 CuO 作为催化剂;当选用 680 ℃ 时,可选用过渡金属,如 Pt、Cu、Ir 和 Ni 的氧化物。目前,大多数燃烧法均采用 950 ℃ 加催化剂,少数采用 680 ℃ 加催化剂。当反应炉温度

为 680 ℃ 时,能延长石英管的使用期限,改善重复性。反应温度越高,氧化就越完全,但应当注意的是,当温度高于 1 350 ℃ 时,样品中的无机碳(inorganic carbon,简称 IC)也会被完全氧化,所以燃烧法通常用于测定总碳(total carbon,简称 TC)含量,也可通过测定或去除 IC 含量的方法得到 SOC。测定 IC 含量的方法称为差减法,其原理为 SOC 含量 = TC 含量 - IC 含量;去除 IC 后测定的方法称为直接法,即在燃烧前酸化样品,去除所有的 IC。采用燃烧法测定 SOC 含量,样品前处理的工作量最小。仪器的捕集净化装置可以去除灰尘、颗粒物、卤气(特别是土壤样品中含有高盐或高氯)和水气,消除干扰,并且高温可以保证样品中各种形式的碳完全燃烧,因此燃烧法被认为是最准确的方法之一。不足之处在于,首先分析过程中必须维持气流通路,否则由于 CO₂ 的交叉污染会产生正偏差;其次,燃烧法温度难以控制,易导致氧化不完全。采用差减法时,由于 CO₂ 气体在空气中永久存在且含量高,会对试验产生干扰,出现 IC 含量大于 TC 含量的情况。此外,燃烧法还存在易于产生记忆效应、背景值高(其来源主要是所使用的酸、催化剂、之前注入的碳、载气以及试验设备)及分析费用较高等不足。

另一种方法是湿法氧化(酸化法),即向样品中加入过量的酸和氧化剂,使样品中的 OC 全部氧化成 CO₂ 排出,然后通过滴定法、质量法、热量法、分光光度法和气相色谱技术测定 CO₂ 含量,并最终计算出 OC 的含量。酸化法可采用的氧化剂种类较多,如过氧化氢、过氧化钾、高锰酸钾、重铬酸盐和过硫酸盐等。在氧化过程中,还常辅以加热、加压、紫外线照射等来提高氧化效率。目前常用的湿式氧化法有重铬酸盐氧化法、过硫酸盐氧化法、臭氧氧化法和微波消解法等。最著名的重铬酸盐氧化法是 Walkley-Black 过程^[6]。其化学反应式:



重铬酸盐法消解过程中会产生过量的 Cr₂O₇²⁻、Cr³⁺ 和 CO₂ 3 种产物,而燃烧法则只产生 CO₂。其中 Cr₂O₇²⁻ 含量可以采用滴定法测定,Cr³⁺ 含量可以采用比色法测定,CO₂ 含量可以采用前述方法测定。Walkley-Black 过程由于快速、简单、廉价而被广泛应用,但该方法存在氧化不完全的现象,为

收稿日期:2016-01-12

基金项目:北京市自然科学基金(编号:8142020)。

作者简介:李国傲(1986—),男,河北承德人,硕士,研究实习员,主要从事环境污染物分析方法和迁移转化研究。Tel:(010)68333644; E-mail:liguoao@cee.cn。

了克服此缺点,许多研究对 Walkley - Black 过程进行了改进:例如,对反应体系进行加热处理,使体系中 OC 消解更加完全,但必须严格控制体系的温度,防止酸性重铬酸盐溶液在高于 150 °C 时分解。在实际应用中,这种方法操作费时、费力、易污染环境。土壤中存在的 Cl^- 、 Fe^{2+} 及 MnO_2 在铬酸溶液中会参与氧化还原反应,导致结果不准确。 Fe^{2+} 或 Cl^- 会导致正误差,而活性的 MnO_2 会产生负误差,但大多数土壤中能够与 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 发生氧化还原作用的活性 MnO_2 的含量很少,即使锰含量较高的土壤,也仅有少量活性 MnO_2 ,所以对绝大多数土壤来说, MnO_2 的干扰不致产生较大误差,已有报道用该方法测定水泥生料中 OC 含量^[7]。

微波消解技术用于 SOC 含量的测定^[8],在一定程度上简化了测定程序,该方法与重铬酸盐氧化法相比,具有操作简单、污染小、快速、准确等优点。经 F/t 检验,2 种方法的分析结果无明显差异,但应注意的是,该方法在微波密闭消解过程中存在一定的危险性。

1.2 检测方法

样品被氧化后,可采用滴定法或比色法测定氧化剂的量,从而计算得到 SOC 含量。

滴定法:过量的 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 可以用硫酸亚铁胺 [$\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$] 或硫酸亚铁 (FeSO_4) 滴定到溶液颜色变化。手动滴定法最主要的问题是滴定终点不易判断,当土壤颜色较深时,溶液颜色变化模糊,极易产生人为误差。自动滴定法通过电位变化确定滴定终点,该技术将甘汞电极和铂电极放于消解液中,加入滴定液,直至滴定终点,并计算 OC 浓度。与手动滴定相比,电位滴定不需要人为确定滴定终点,使测定结果更加准确;采用自动滴定,不须要加入指示剂。

比色法:反应中产生的 Cr^{3+} 可以采用比色法测定。通过测定溶液中 Cr^{3+} 的颜色变化间接确定 SOC 含量。样品消解后,将消解液进行离心或过滤处理以去除大的悬浮颗粒物,采用比色计在 585 nm 处测定吸光度,与标准曲线相比进行定量。试验过程中须将样品进行转移,操作复杂,且重铬酸盐具有一定的危险性。

容量法、质量法、光度法、气相色谱法、压力计法测定氧化生成的 CO_2 ,可与燃烧法搭配使用。

容量法:与上述 2 种氧化方法搭配。将产生的 CO_2 用过量的 $\text{Ba}(\text{OH})_2$ 溶液吸收生成 BaCO_3 沉淀,反应后剩余的 $\text{Ba}(\text{OH})_2$ 用草酸 ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$) 标准溶液滴定,由空白滴定和样品滴定消耗的 $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$ 标准溶液的体积差计算 CO_2 含量,根据 CO_2 含量计算 SOC 含量。该方法与滴定法类似,但步骤繁琐,引入更大的不确定度,导致准确度差。张吉喆对该方法的影响因素进行了研究,并改进了分析方法,提高了分析效率^[9]。

质量法:通过测定生成的 CO_2 含量来计算 SOC 含量。生成的 CO_2 可以采用吸附剂吸收,吸收了 CO_2 的吸附剂质量会发生变化,因此在消解结束后,重新称量吸附剂的质量,将质量差转为 SOC 的含量,该方法灵敏度低,易受环境中 CO_2 的干扰,误差大。

光度法:将样品连同净化空气分别导入高温燃烧管和低温反应管中,经高温燃烧管的样品在高温下催化氧化,使 TC

和 IC 均转化成 CO_2 ;经低温反应管的样品被酸化使碳酸盐类物质分解成 CO_2 ,所生成的 CO_2 依次引入非色散红外检测器。由于一定波长的红外线可被 CO_2 选择吸收,并在一定含量范围内 CO_2 对红外线吸收强度与 CO_2 含量成正比,所以对样品中 TC 和 IC 进行定量测定,计算二者的差值,即为 OC 含量。

气相色谱法:采用配有热导检测器 (thermal conductivity detector,简称 TCD) 的气相色谱测定生成的 CO_2 含量,或将生成的 CO_2 转化为 CH_4 ,采用氢火焰离子化检测器 (flame ionization detector,简称 FID) 测定。该方法测定结果准确,但因其仪器昂贵,成本高,在实际应用中,很少选择此方法。

压力计法:测定生成的 CO_2 体积或压力。该方法只适用于高含量 CO_2 的粗略测定,不能准确定量,一般很少使用。

1.3 现有标准方法

各个国家和组织分别制定了相应的标准方法用于 SOC 的分析。国际标准化组织 (International Organization for Standardization,简称 ISO) 推荐 2 种方法,一种为重铬酸钾氧化,比色法测定 SOC 含量^[10];另一种为燃烧氧化,OC 被氧化为 CO_2 ,产生的 CO_2 可采用滴定法、质量法、电导法、气相色谱法及红外法等方法测定,通过生成 CO_2 的含量,计算 SOC 的含量^[11]。美国国家环境保护局 (United States Environmental Protection Agency,简称 USEPA) 中规定了适用于土壤和沉积物中 SOC 含量测定的标准,采用湿式或干式氧化法将样品中的 OC 转化成 CO_2 后,采用碳分析仪进行测定^[12]。美国材料与试验协会 (American Society for Testing and Materials,简称 ASTM) 于 1971 年颁布了关于泥炭和有机土壤中 OC 含量的测定方法^[13-15],该方法规定在 750 °C 下将样品置于马弗炉中干烧,根据差质量法测定样品中 OC 含量。欧洲标准^[16]中规定了固体废弃物、淤泥中 OC 含量的测定方法,指出可以采用直接法也可采用间接法测定 OC 含量。

我国现行 SOC 的分析方法有 NY/T 85—1988《土壤有机质测定法》、GB 9834—1988《土壤有机质测定法》、NY/T 1121.6—2006《土壤检测 第 6 部分:土壤有机质测定法》和《土壤元素的近代分析方法》。GB 9834—1988《土壤有机质测定法》和 NY/T 85—1988《土壤有机质测定法》规定用定量的重铬酸钾 - 硫酸溶液,在电沙浴加热条件下 (200 ~ 230 °C) 使 SOC 氧化,剩余的重铬酸钾用硫酸亚铁标准溶液滴定,试验以二氧化硅为空白进行标定。用重铬酸钾标准溶液标定得到硫酸亚铁标准溶液浓度值,根据滴定消耗硫酸亚铁标准溶液量换算出 SOC 含量。《土壤元素的近代分析方法》和 NY/T 1121.6—2006《土壤有机质测定法》规定在油浴加热条件下 [(175 ± 5) °C],其原理与分析步骤基本与 GB 9834—1988《土壤有机质测定法》和 NY/T 85—1988《土壤有机质测定法》相同,上述分析方法操作比较复杂,不仅所需试剂、玻璃器皿繁多,还须空白标定和标准溶液标定。

环保部分别在 2011、2013、2014 年发布了《土壤有机碳的测定重铬酸钾氧化 - 分光光度法》《土壤有机碳的测定燃烧氧化 - 滴定法》和《土壤有机碳的测定燃烧氧化 - 非分散红外法》。海洋沉积物的标准方法有 GB 17378.5—2007《海洋监测规范 第 5 部分:沉积物分析》GB/T 30740—2014《海洋沉积物中总有机碳的测定非色散红外吸收法》。这些方法都

是在原有方法基础上的部分重修,原理没有出现大的改变和技术进展。

1.4 不同方法比较及存在问题

随着仪器集成技术的进步,元素分析仪被大量生产和使用,元素分析仪是一台用于快速测定元素 C、H、N、S 含量的全自动仪器。Fellner 等用元素分析仪测定了垃圾衍生燃料中 OC 含量,与标准值比较达到 99% 的吻合度,建立了快速准确的测定方法^[17]。张威等利用该仪器测定了 SOC 含量、大气颗粒物的 C 含量、海洋沉积物中的碳酸盐含量,均得到了较好的结果^[18-21]。魏晓军等对元素分析仪测定石灰性土壤中的碳存在的问题进行了探讨,证明元素分析仪不适用于石灰性土壤 SOC 含量的测定^[22]。红外碳硫仪在原理上和元素分析仪一样,可进行以上测定^[23]。

邹德勋分别用重铬酸钾容量法、元素分析法、烧失量法测试了生物质废物,结果表明,重铬酸钾容量法测定结果为标准值的 77.7%~91.2%,拟合的换算关系也与传统关系有较大出入,说明换算系数 1.724 的应用限制^[24]。Gelman 等利用线性回归分析了高温氧化法与 Walkley-Black 法的分析结果,校正出新换算关系,由此说明化学氧化法的误差性^[25]。孙莹等优化了样品前处理、燃烧温度、最小加氧量和最佳称样量,综合构建、优化了直接固体进样 varioMACRO cube 元素分析仪,同时测定海洋沉积物样品中 OC 的条件^[26]。

黄颖华分别用重铬酸钾氧化还原容量法和碳分析仪测定海洋沉积物中 OC 含量。结果表明,重铬酸钾法测定 OC 含量的相对偏差高于高温催化燃烧法,高温法测定的 OC 回收率高于重铬酸钾法^[27]。这是由于海洋沉积物中存在大量的 Cl^- 和还原性物质,会消耗重铬酸盐,导致测定结果的不准确和不稳定。

于雯泉等研究结果显示,目前国际通用的 OC 测定方法中对沉积物进行热烘干的前处理步骤会造成较大的 OC 丢失,从而使 OC 分析测定产生较大的人为误差,解决这一问题的有效方法是在样品前处理过程中应用冷冻真空干燥^[28]。祝孟博等从酸处理、干燥方式等方面研究了预处理方法对不同样品 OC 含量和 ^{13}C 含量测定值的影响,结果表明,酸处理可能会造成水溶性有机碳(dissolved organic carbon,简称 DOC)的损失^[29]。

洪进校结合以往对 C 含量的分析测定方法,对非水滴定测定 CO_2 装置进行改造,设计一次性连续测定 IC、OC 含量的试验装置^[30],该方法一次试验同时测定 IC、OC 含量,简化了试验过程,降低了试验成本,节省了试验时间,排除了 OC 与 TC 的含量反差问题。

1.5 最新研究进展

前述所有方法都是基于化学原理对 SOC 含量进行准确测定,试验过程繁琐、耗时长、人力投入大、资源消耗多,对环境造成一定的污染。因此,逐渐产生了无氧化过程的方法,应用与 SOC 紧密相关的参数评估和测定 SOC 含量,在一定程度上起到了较好的指示作用。该类方法应用范围较窄,一般是常规测定方法的补充,其优点是可避免化学过程中的损耗和破坏,但仍存在误差大、测试难度大、需要基础数据建库印证等不足。

曲彦胜等结合丰富的地球物理信息和地球化学试验数据

来研究烃源岩,发现其准确性并不高^[31]。同位素一直是地质学领域常用的研究手段之一,Zhang 等根据稳定碳同位素法评估了中国南部红树林沉积物中 OC 含量的变化^[32];同样,Bauersachs 等也用该方法表征了梅塞尔油页岩的 OC 含量^[33]。该方法的应用表明了其在地学领域的实用性。Varma 等提出了通过颜色来评估页岩 OC 含量的简便方法,获得与标准值相当吻合的数据,指出其可应用于页岩气开发中的初步评估,还报道了固体核磁与红外光谱联用测定北极圈冻土 OC 含量变化,取得与埋藏深度、气候变化相一致的理想结果^[34]。Romero-Sarmiento 等提出了一种用测井信息建模测定页岩 OC、有机质成熟度、含气量分布的方法,并在美国巴内特页岩矿得到应用^[35]。

随着高光谱遥感技术的发展,近年来,利用光谱技术获取土壤信息已获得越来越广泛的关注。方利民等测定了 300 个土壤样品可见-近红外光谱数据并进行了分析计算,建立了预测模型,该模型对 SOC 含量测定的相关系数(r^2)达到 0.98 以上^[36]。王森等利用可见-近红外光谱技术对 SOC 含量进行了快速监测,研究表明,不同土壤须选择其对应的最优波段,土壤含水率对测定结果有较大的影响^[37-38]。有学者致力于水分对建模的影响,结果表明,含水率 25% 是影响精度的节点,高于 25% 精度低,应用直接标准化算法(direct standardization,简称 DS)能有效降低湿度差异对光谱反演土壤有机质的影响^[39-41]。汤娜等利用 BP 神经网络方法研究黑龙江黑土地地区的土壤光谱反射特征,结果证实,该方法可用于 SOC 含量的测定^[42]。李曦对全国各类土壤进行了光谱测量和理化分析,并对数据进行相关性分析,应用不同方法建立预测模型,得到了较好的结果,同时发现土壤中氧化铁含量对光谱信息有影响^[43]。史舟等的研究范围最大,包含了中国的主要土壤,其他大部分研究主要集中于某一地区进行建模和分析,模型的种类繁多,难以选择^[44-46],部分学者对不同模型进行了详细的比较,为后续的研究人员提供了详实的技术参考^[47-50]。

2 结论与展望

土壤和沉积物及其固体样品的 OC 化学分析目前已比较成熟,但仍存在一定的问题。如前处理过程,特别是干燥和研磨过程中挥发性有机物的损失会导致结果偏低。仪器法去除无机碳的过程须要加酸,若将酸洗净,可能会导致水溶性有机碳的损失;若不洗净,则可能对仪器产生腐蚀。随着遥感、地理信息系统、光谱等新兴技术的发展,利用最新技术对大空间尺度的样品或环境区域进行分析,实现了实时动态分析,克服了化学分析的各种缺点,提高分析效率,减少环境污染。但目前该类方法仍需实际化学分析数据的印证,无法直接得到准确浓度。对于特殊地区 SOC 含量的测定,如海洋沉积物中,还无法实现实时动态分析。因此,共同使用化学法和非化学法依然是大规模、大范围样品测定的主要手段。由于电子信息技术的进步和广泛应用,环境友好、实时监测、节省人力、拓展空间范围的分析方法是当前研究的主要方向,并将对传统的分析方法产生巨大的影响。

参考文献:

[1] 周桂香,张文元,胡冬南,等. 土壤有机碳影响因素及测定方法探

- 讨[J]. 江西林业科技, 2011(6): 31-34.
- [2] 李国傲, 陈振贺, 刘志富, 等. 北京地区潮土对土霉素的吸附特性研究[J]. 现代地质, 2015, 29(2): 377-382.
- [3] Kennedy D M, Woods J L D. 14. 22 Determining organic and carbonate content in sediments[J]. Treatise on Geomorphology, 2013, 14: 262-273.
- [4] 邱灵佳, 黄国林, 苏玉, 等. 总有机碳测定方法研究进展[J]. 广东化工, 2015, 42(9): 107-108.
- [5] 吴才武, 夏建新, 段峥嵘. 土壤有机质测定方法述评与展望[J]. 土壤, 2015, 47(3): 453-460.
- [6] Walkley A J, Black I A. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method[J]. Soil Science, 1934, 37(1): 29-38.
- [7] 魏军晓, 耿元波, 沈镭, 等. 水泥生料中有机碳测定方法研究[J]. 中国测试, 2015, 41(6): 34-38.
- [8] 梁重山, 党志, 刘从强. 土壤沉积物样品中有机碳含量的快速测定[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 135-139.
- [9] 张吉喆. 燃烧氧化-滴定法测定土壤中有机碳的影响因素研究[J]. 环境科学与管理, 2014, 39(8): 138-141.
- [10] Soil quality - determination of organic carbon by sulfochromic oxidation[S]. 1998.
- [11] Soil quality - determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis) [S]. 1995.
- [12] Methods for the determination of total organic carbon (TOC) in soils and sediments[S]. 2006.
- [13] Standard test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils[S]. 2014.
- [14] Standard test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils[S]. 2013.
- [15] Standard test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils[S]. 2007.
- [16] Characterization of waste - determination of total organic carbon (TOC) in waste, sludges and sediments[S]. 2001.
- [17] Fellner J, Aschenbrenner P, Cencic O, et al. Determination of the biogenic and fossil organic matter content of refuse - derived fuels based on elementary analyses [J]. Fuel, 2011, 90 (11): 3164-3171.
- [18] 张威, 刘宁, 吕慧捷, 等. TruSpec CN 元素分析仪测定土壤中碳氮方法研究[J]. 分析仪器, 2009(3): 46-49.
- [19] Lewandowska A, Falkowska L, Murawiec D, et al. Elemental and organic carbon in aerosols over urbanized coastal region (Southern Baltic Sea, Gdynia) [J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(20): 4761-4769.
- [20] 王巧环, 任玉芬, 孟龄, 等. 元素分析仪同时测定土壤中全氮和有机碳[J]. 分析实验室, 2013, 32(10): 41-45.
- [21] 程思海, 陈道华. 海洋沉积物中碳酸盐测定方法的研究[J]. 分析实验室, 2010, 29(增刊1): 424-426.
- [22] 魏晓军, 红梅, 于先泉, 等. 元素分析仪 (Elementar Vario MAC-RO) 测定石灰性土壤 C、N 时存在问题的探讨[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2011, 32(3): 161-167.
- [23] 廖滴文, 董震堃. 红外碳硫仪测定土壤中碳含量的探讨[J]. 价值工程, 2015(11): 181-182.
- [24] 邹德勋, 潘斯亮, 汪群慧. 生物质废物中有机质和有机碳的关系及其测定方法研究[C]//中国环境科学学会学术年会论文集: 第1卷, 2010.
- [25] Gelman F, Binstock R, Halicz L. Application of the Walkley - Black titration for the organic carbon quantification in organic rich sedimentary rocks [J]. Fuel, 2012, 96(1): 608-610.
- [26] 孙萱, 宋金明, 于颖, 等. 元素分析仪快速测定海洋沉积物 TOC 和 TN 的条件优化[J]. 海洋科学, 2014, 38(7): 14-19.
- [27] 黄颖华, 张浩. 两种测定海洋沉积物中总有机碳方法的比较[J]. 广西科学院学报, 2013, 29(4): 227-229.
- [28] 于雯泉, 钟少军. 海洋沉积物有机碳分析方法中干燥预处理过程人为误差的发现及其意义[J]. 环境科学学报, 2007, 27(5): 861-867.
- [29] 祝孟博, 宋建中, 彭平安. 预处理过程对不同类型样品中有机碳含量和稳定碳同位素测定的影响[J]. 地球与环境, 2015, 43(4): 476-482.
- [30] 洪进校. 非水滴定法连续测定土壤样品中的无机碳和有机碳[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [31] 曲彦胜, 钟宁宁, 刘岩, 等. 烃源岩有机质丰度的测井计算方法及影响因素探讨[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(2): 80-84.
- [32] Zhang J P, Shen C D, Hai R, et al. Estimating change in sedimentary organic carbon content during mangrove restoration in Southern China using carbon isotopic measurements [J]. Pedosphere, 2012, 22(1): 58-66.
- [33] Bauersachs T, Schouten S, Schwark L. Characterization of the sedimentary organic matter preserved in messel oil shale by bulk geochemistry and stable isotopes [J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2014, 410: 390-400.
- [34] Varma A K, Hazra B, Srivastava A. Estimation of total organic carbon in shales through color manifestations [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 18: 53-57.
- [35] Romero - Sarmiento M F, Ducros M, Carpentier B, et al. Quantitative evaluation of TOC, organic porosity and gas retention distribution in a gas shale play using petroleum system modeling: application to the mississippian barnett shale [J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 45: 315-330.
- [36] 方利民, 冯爱明, 林敏. 可见/近红外光谱快速测定土壤中的有机碳含量和阳离子交换量[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(2): 327-330.
- [37] 王森, 解宪丽, 周睿, 等. 基于可见光-近红外漫反射光谱的土壤有机质预测及其最优波段选择[J]. 土壤学报, 2011, 48(5): 1083-1089.
- [38] 王森, 潘贤章, 解宪丽, 等. 土壤含水量对反射光谱法预测土壤有机质的影响研究[J]. 土壤, 2012, 44(4): 645-651.
- [39] 陈红艳, 赵庚星, 张晓辉, 等. 去除水分影响提高土壤有机质含量高光谱估测精度[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 91-100.
- [40] 司海青, 姚艳敏, 王德营, 等. 含水率对土壤有机质含量高光谱估算的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 114-120.
- [41] 陈奕云, 漆锟, 刘耀林, 等. 顾及土壤湿度的土壤有机质高光谱预测模型传递研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(6): 1705-1708.
- [42] 汤娜, 张新乐, 刘焕军, 等. 土壤有机质与水分反射光谱响应特征综合作用模拟[J]. 土壤通报, 2013, 44(1): 72-76.
- [43] 李曦. 基于高光谱遥感的土壤有机质预测建模研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [44] 史舟, 王乾龙, 彭杰, 等. 中国主要土壤高光谱反射特性分类与有机质光谱预测模型[J]. 中国科学(地球科学), 2014, 44(5): 978-988.

安颖蔚,冯良山,张 鹏. 间作群体作物根系营养竞争与互作效应[J]. 江苏农业科学,2017,45(5):26-28.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.05.006

间作群体作物根系营养竞争与互作效应

安颖蔚,冯良山,张 鹏

(辽宁省农业科学院,辽宁沈阳 110161)

摘要:综述了间作群体作物根系对矿质营养和水分的竞争效应及对作物生长发育的影响,以及由于根系形态、间作作物养分需求差异、根系分泌物及土壤微生物变化等因素引起的间作作物营养互作效应。提出了 3 个方面的研究展望;开展间作作物根系错位效应及根系空间错位回避信号识别与传导机制研究;依托不同作物的间作竞争势及互作特点,开展作物根系竞争势等方面的科学分类及根系竞争与互作模型构建研究;不断创新根系监测与研究手段,提升作物根系研究水平,增加作物根系研究深度。

关键词:间作;根系竞争;根系互作

中图分类号:S344.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2017)05-0026-03

间作是我国传统农业的重要组成部分,多年来,这种方式广泛分布于我国南北各地^[1]。间作群体中,作物之间同时存在地上部和地下部的相互作用,这种作用有种间竞争和种间促进作用,二者作用的结果决定了间作群体的整体效益。大量试验研究表明,间作群体中在判定竞争平衡、竞争强度和资源利用方面,根系的竞争作用明显重要于地上部分,同时根系的互利效应在资源有限、竞争较为激烈的环境中作用也相当重要^[2]。根系之间的相互作用成为研究植物个体与群体关系的主要内容,同时对间作群体的合理构建也具有重要实践意义。近年来,国内外学者在此方面进行了大量深入的研究。

1 间作群体根系营养竞争效应

根系间的竞争包括植株个体自身根系的竞争以及个体与个体根系间(同种或异种)的竞争,通过干扰式竞争和掠夺式竞争 2 种形式争夺土壤资源^[2-4]。掠夺式竞争主要指根系通过直接与土壤相互作用吸收和争夺有限的资源,而产生的一种相互影响关系;干扰性竞争则是由于植物根系直接依靠分泌对其他个体有抑制作用或释放其他竞争者存在的无毒信号

等有机物而相互影响^[5-6]。

1.1 间作根系对矿质营养和水分的竞争

土壤矿质营养和水分是作物根系竞争的主要对象^[7]。作物根系吸收养分主要是通过根截获、质流扩散完成。几乎 99% 的氮以质流运输,这造成氮耗竭区重叠交错而形成竞争;磷和钾元素扩散迁移速度极慢,根系的广泛分布在磷、钾吸收上就显得尤为重要^[8-9]。根系不断吸收土壤水分和养分,会造成根际与非根际土壤的水分不平衡和养分浓度梯度,使质流和扩散能够不断进行。并且伴随着根系发育、根毛伸长、菌根菌丝延伸,根的吸收区域随之扩大,在增加作物利用养分空间的同时,也增加了根系间竞争的范围^[7-10]。研究表明,在一定条件下间作作物种间根系的相互影响及养分在土壤中的移动比地上相互影响更为重要^[11-12]。间作群体根系形态的差异是造成作物对土壤矿质营养和水分吸收量不同的主要原因之一。在时间上作物种间对养分和水分的的需求差异,也是影响根系对水分、养分吸收的重要原因^[11]。磷的吸收主要取决于根系在土壤中的分布位置,尤其是土壤浅层部分的根系分布密度,所以浅根系分布对磷的吸收更具意义^[13]。尽管深根系直根系对于吸收水分及某些养分有利,但它们相对于浅根系和须根系作物对磷的吸收则缺少竞争优势。

1.2 根系竞争对间作作物生长发育的影响

根系种间竞争可以影响间作群体里不同作物的分布面积和生长发育,进而对作物产量产生影响^[14-16]。目前,关于根系种间竞争对群体生产力的关系还没有得出明确的结论,二者有正向关系——竞争随着生产力的提高而加剧,或有负向关系,甚至没有直接联系^[17-18]。因此,作物面对相邻个体根

收稿日期:2016-02-01

基金项目:国家科技支撑计划(编号:2012BAD09B01);国家自然科学基金(编号:31170407);辽宁省农业领域青年人才培养项目(编号:2014017);辽宁省百千万人才培养项目(编号:2013921058)。
作者简介:安颖蔚(1974—),女,辽宁沈阳人,博士,研究员,主要从事农业科技推广与成果转化。E-mail: ywan755@163.com。
通信作者:冯良山,博士,副研究员,主要从事作物栽培与资源高效利用研究。E-mail: fenglsh@163.com。

[45] 韩兆迎, 朱西存, 刘 庆, 等. 黄河三角洲土壤有机质含量的高光谱反演[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1545-1552.
[46] 李媛媛, 李 微, 刘 远, 等. 基于高光谱遥感土壤有机质含量预测研究[J]. 土壤通报, 2014, 45(6): 1313-1318.
[47] 郭斗斗, 黄绍敏, 张水清, 等. 多种潮土有机质高光谱预测模型的对比如分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 192-200.
[48] 侯艳军, 塔西甫拉提·特依拜, 买买提·沙吾提, 等. 荒漠土壤

有机质含量高光谱估算模型[J]. 农业工程学报, 2014, 30(16): 113-120.
[49] 王延仓, 顾晓鹤, 朱金山, 等. 利用反射光谱及模拟多光谱数据定量反演北方潮土有机质含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(1): 201-206.
[50] 于 雷, 洪永胜, 耿 雷, 等. 基于偏最小二乘回归的土壤有机质含量高光谱估算[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 103-109.