

红壤典型区土壤中有机质的分解、积累与分布特征研究进展^①

李忠佩^{1,2}, 刘明¹, 江春玉¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 土壤有机质分解转化是红壤生态系统碳循环的重要环节。自中国科学院红壤生态实验站建站以来, 本课题组围绕土壤有机质分解转化的关键科学问题, 重点开展了有机物料在土壤中的分解与影响因素、土壤有机质的矿化过程动态、土壤有机质的积累过程特征、以及红壤水稻土团聚体中有机碳的分布规律等方面的研究。本文回顾了过去所开展的主要研究内容的进展情况, 并对今后的研究工作做出了初步展望。

关键词: 红壤典型区; 土壤有机质; 分解; 转化; 进展

中图分类号: S153.6

如何应对全球气候变化和实现资源可持续利用是当今世界面临的最严峻挑战。土壤-植物生态系统的碳循环由于在调节大气温室气体含量变化、影响系统稳定性和生产力形成、保持土壤肥力及农业持续发展上的作用, 一直以来倍受人们关注, 成为科学研究的热点。

土壤有机质分解转化是红壤生态系统碳循环的重要环节^[1]。植物从大气同化 CO₂ 形成植物体, 在收获或枯死时, 这些植物残体全部或部分进入土壤, 在土壤微生物的作用下, 部分形成土壤有机质, 部分以 CO₂ 或 CH₄ 的形式释放进入大气。这样一个过程虽然可以简单地表示为: 进入-转化-输出, 但由于这一过程特别是转化和输出过程是在土壤微生物的参与下进行, 环境因素的变化就起了重要的调节作用。同时, 人为活动对生物量形成和进入土壤的可能干扰, 使这一过程更加复杂化。

我国南方红壤地区, 地域广阔, 人口众多, 水热条件优越, 自然资源丰富, 土地利用类型繁多^[2]。土壤有机质在土壤肥力的形成和保持、生态系统的稳定和农业的持续发展以及大气温室气体浓度变化的调节上起着更重要的作用。首先, 作为一个较脆弱的生态系统, 其碳循环状况对系统稳定性的作用更大, 森林砍伐等人类活动对碳循环的扰动以及水土流失加剧等, 直接明显地影响到系统的生产力; 其次, 有机碳库中养分的比例比其他生态系统条件下更高, 有机碳在土壤物理结构的形成上作用更大, 因此土壤有机

碳与土壤肥力的关系更密切; 此外, 南方丰富的水热资源, 导致碳的周转速率较其他地区为快, 稻田生态系统还是大气 CH₄ 的重要来源, 碳循环的变化, 直接决定了该系统的源汇功能^[3]。鉴于上述, 红壤有机质的研究成为了农学、土壤学、生态学及环境科学领域的重要任务。

本课题组从 20 世纪 80 年代以来, 特别是从中国科学院红壤生态实验站建站以来, 通过资料调查、野外采样、田间长期试验观测, 对红壤有机质分解转化进行了多年的研究工作, 一个最根本的思路, 是希望从揭示各过程动态变化和形成机制的角度出发, 通过长期连续的工作, 能够系统阐明红壤生态系统碳循环与平衡特征。现将前期主要研究内容的进展情况总结如下, 并对今后的工作做出初步展望, 希望得到关心红壤研究的各位同行的帮助和指导。

1 有机物料在土壤中的分解与影响因素

有机物料(植物残体和动物粪便)的分解速率, 是评价其在保持和改善土壤有机质状况方面的作用, 预测土壤有机质含量的动态变化, 以及估计土壤在处理各类有机废弃物的能力等方面所必需的资料。早在 20 世纪 40 年代, 人们就曾采用实验室培育的方法, 研究植物残体的分解速率, 并把单位重量的植物碳在土壤中分解一年后的分数定义为腐殖化系数, 以此做为衡量不同植物残体对土壤有机质含量贡献大小的尺度。以后人们还采用盆钵培育法进行了类似的工

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171233)资助。

作者简介: 李忠佩(1962—), 男, 广西桂林人, 研究员, 主要从事土壤生物化学研究。E-mail: zhpli@issas.ac.cn

作。借助于这些方法,影响植物物质分解的一些因素及其规律得到了阐明。由于有机物料的分解速率,既决定于其本身的化学组成和状态,又决定于分解时的环境条件,包括土壤的水热状况、质地、黏土矿物组成、土壤酸度等^[4-5]。因此,为使获得的结果可供实际应用,后来人们的研究主要是在田间条件下进行。

1.1 方法

田间条件下测定有机物料分解速率的方法可分为两类,一类为示踪法,一类为非示踪法。示踪法是用同位素 ^{14}C 或 ^{13}C 标记植物物质作为供试物料,将它与定量的表土混合后,装入塑料筒(或砂滤筒)中,上、下底用玻璃布或细沙网封口,便于空气和水分的流通,令其在田间条件下腐解。这类方法有很多优点。首先,分解时的水热条件,植物物质的加量,施肥、耕作措施的影响等,均几乎与实际情况完全一致;第二,该法不受根系和小动物的干扰;第三,由于示踪法的灵敏度高,在采用高放射性比强物料的情况下,可用以追踪有机物料在较长时期(10 年或 10 年以上)的转化过程^[6-7]。但是,该法需要昂贵的设备;不但成本高、时间长,而且有的物料,在现有的技术设备条件下,标记尚有困难,这样就使得它不可能获得普遍采用。

非标记法又分为两种,一为塑料网袋法^[8],一为砂滤管法^[9]。塑料网袋法系将一定量(干物质 100 g,准确称量)的有机物料装入细孔的塑料网袋或玻璃纤维布袋内,置于田间地表或表土内令其分解。一定时间后取出塑料网袋,将供试样品烘干、称重,并进行灰分校正。这种方法的分解条件(水分、温度)与森林凋落物的分解条件很相近,适用于森林凋落物分解的研究。对于耕地土壤来说,由于植物根系的进入,以及土壤动物的侵袭,常给测定结果带来很大的误差,有时甚至得到不可靠的结果。另一方面,大量有机物料装在袋内不与土壤紧密接触,也使得测定结果的准确度大大降低。

砂滤管法(近年考虑到北方半干润条件和操作简便^[10],也有用 300 目的尼龙布制的尼龙袋代替)系将土壤与供试的有机物料按一定的比例混合均匀后,盛于透水透气性能良好但不会透入植物细根的砂滤管内,然后,将管和仅装有供试土壤的砂滤管,一起埋入田间表土层内,进行腐解试验研究。如假定有机物料加入土壤后,不影响土壤原有有机质的分解速率,则待供试样品经一定时间分解之后,取管定碳,用差异法求得有机物料的分解量或残留量。该法的优点是,分解的水热条件与田间实际情况很接近;能避免活的植物根系的干扰,以及所需设备简单,操作容易

快速;供试有机物料来源方便,适宜于大量测定各种有机物料在不同条件下的分解速率用。该法在实际操作中,还应十分注意供试土壤的选择和有机物料加入量的确定。如前所述,有机物料的分解速率和腐殖化系数均用差异法求得;因此,测定结果的精确度不仅决定于采用的分析方法,而且也决定于供试土壤原有的有机碳含量和有机物料的加入量。若供试土壤原有有机碳含量较高,有机物料的残留碳量较低,则结果的准确度将较低,甚至完全不可靠。因为,若残留碳量小于分析方法的测定误差,则很难判断试验结果。为保证测定结果的准确度,应尽可能选用有机质含量低、质地和黏粒矿物组成与当地表土相近的土壤作为供试土壤;另一方面,尽可能提高供试有机物料的加入量。但是,也应注意到,如以有机质含量极低的土壤为供试土壤,由于黏粒等的保护作用,所得到的腐殖化系数结果可能偏高^[5,11];有机物料的加量过大,由于某些分解产物的积累,也有可能严重改变其分解进程。一般来说,以选用有机碳含量为 5~6 g/kg、质地和黏粒矿物有代表性的当地土壤为宜。有机物料的加入量可根据试验目的和试验时间的长短确定,在 2.5%~8%。

1.2 分解速率与分解过程

采用塑料网袋法,本课题组研究不同植物凋落物在第四纪红色黏土发育红壤上的人工林中的分解速率,结果表明小叶栎落叶、马尾松松针、白茅枯草、刺芒野古草枯草的年分解速率分别为 45.3%、40.3%、27.2%、31.0%^[12]。试验在 11 月进行,凋落物及枯草残体的分解以最初的 1 个月及 3~6 个月内最快,而在 2~3 个月内速度较慢,特别是分解的第 3 个月,枯草残体的分解过程几乎停止。出现这种变化与气候条件有直接关系;而凋落物之间的差异,主要是其木质素 C/N 比值不同的结果。此外,采用不同孔径(2 mm 和 300 目)的尼龙网袋进行了对比试验,以部分确定土壤动物对凋落物分解的影响,研究结果显示,土壤动物可能会带来 10%~20% 的凋落物分解速率的差异。

采用砂滤管法,本课题组研究了不同有机物料在农田土壤中的腐殖化系数和分解过程^[13]。结果表明,红壤区水稻土中有机物料的腐殖化系数在 0.15~0.55,若按农田最常用的有机物料分类,绿肥类分解最快,腐殖化系数平均为 0.25;秸秆类物料次之,为 0.30;而稻麦根以及牛粪等分解最慢,腐殖化系数达 0.45~0.55。与其他地区相比,红壤中有机物料的腐殖化系数并不低,单就秸秆而言,其值仅比东北地区略低,高于华北、华南地区。

有机物料在红壤中的分解,以第 1 年最快,以后逐渐变慢。瘠薄红壤中有机物料第 1 年的分解速率达 56%,第 2 年为 10%,以后逐年减少,第 3~5 年保持在每年 4%~5%,第 6~10 年保持在每年 1%~2%;一般红壤中第 1 年的分解速率为 74%,第 2 年为 7%,以后基本保持在每年 1%~2%^[14]。Jenkinson 等用 ¹⁴C 标记黑麦草进行的田间试验结果表明^[6,15-16],第 1 年的分解速率为 67%,第 2~4 年和第 5~10 年的年平均分解速率分别为 4.3% 和 1.3%。可见,有机物料在瘠薄红壤和一般红壤中分解速率变化的差异,主要表现在分解的最初两年,第 1 年有机物料在瘠薄红壤中的分解速率比一般红壤中慢 10%~20%,而第 2 年却快 5%~10%,第 3 年以后,有机物料在不同土壤中的分解速率无明显差异。一般情况下,除较难分解的植物残体外,分解一年后未分解和半分解的植物残体量一般已很少,而在瘠薄红壤中,有机物料经一年的分解后,大都留存肉眼可见的残体碎屑,因此,在第 2 年仍保持较高的分解速率。

结果还表明,试验前加入石灰调节土壤 pH 至接近中性,可使物料第 1 年的分解速率加快 8% 左右,但第 2 年物料的分解速率比未加石灰的慢 4%~11%,第 3 年以后加与不加石灰处理的物料分解速率没有差异;分解 5 年后未加石灰稻草碳的残留量仅比加入石灰的高 3.7%(相对值高 28.5%),而绿萍的甚至于低 3.1%(相对值低 15%)。

1.3 影响因素^[14,17-18]

红壤中有机物料的分解,受各种因素的影响,包括物料的化学组成、土壤质地、土壤酸度、不同利用方式等,凡是影响土壤微生物活动的因素,都将影响有机物料的分解速率。

物料化学组成。在物料的各种组分中,以水溶性物质、苯醇溶性物质和蛋白质等分解最快,半纤维素、纤维素次之,木质素最难分解;因此,木质素含量的高低,明显影响有机物料的分解速率。以稻草、黄花苜蓿、稻根和麦根在红壤中进行的腐解试验,结果表明,随物料木质素含量依次升高,其分解速率依次降低,4 种物料的木质素含量与腐殖化系数的单相关系数为 $r = 0.994^{**}$,达到了极显著水平。有研究认为,物料分解并不与木质素含量直接相关,而是与木质素 C/N 比值有密切相关。但无论如何,木质素含量或木质素比例对有机物料的分解有着十分显著的影响是肯定的。各种作物地下部分(根)的木质素含量一般均显著高于地上部分,例如,稻根的木质素含量约比稻草高 60%,其腐殖化系数亦相差 46%。

物料组合。自然生态系统存在丰富的物种,归还

土壤的物料总是以多样性组合为特征。即便是农田生态系统,进入土壤的有机物料也包括作物残体、杂草、畜禽粪肥等多种多样。有机物料组合模式将明显改变微生物生长的物质条件,提供更加丰富的碳源,影响有机物料本身的分解转化。通过水稻秸秆、花生秸秆和猪粪 3 种物料的不同组合,研究有机物料混合处理后的分解状况,结果表明,与单一有机物料相比,不同物料混合后其分解速率变化均表现出交互作用效应,但有的组合处理表现出正交互作用效应,180 天分解期内混合物料分解速率比单一物料分解速率的加权平均值高 11.5%;而有的却相反,低了 4.4%^[19]。这显示,不同有机物料本身组分的巨大差异显著影响混合后各作用过程之间的调节方式,有关的过程机制需要进一步研究才能得以揭示。

土壤质地。土壤中的黏粒部分对有机物质的分解有保护作用,因而在黏粒含量高的土壤中有有机物料的分解速率常较慢。在红壤中进行的控制试验,供试土壤分别采自发育于第三纪红砂岩风化物(T)、第四纪红色黏土(Q₄)的红壤,其黏粒(<1μm)含量分别为 8.1% 和 37%;另一供试土壤采用 1/2T+1/2Q₄,其黏粒含量为 22.5%。研究结果表明,在黏粒含量最高的红壤中,稻草和稻根的年残留碳量也最高,分别为 32.1% 和 47.0%;在黏粒含量最低的红壤中,残留碳量也最少,分别为 21.5% 和 38.3%;黏粒含量居中的,则残留碳量介于两者之间,分别为 28.8%和 41.0%。黏粒含量除具有保护作用外,还影响土壤的水气状况和微生物活性。在旱地红壤条件下,黏粒含量高的土壤,其孔隙度常较小,通气状况也较差,从而也会减缓有机物质的分解。

土壤酸度。酸度较低,将显著抑制微生物的活性,因而影响土壤中有有机物质的分解。无论稻草还是稻根,在 pH 5.15 红壤中的碳残留量均较 pH 5.7 的红壤或 pH 7.2 的紫色土中碳的残留量要高,仅以黏粒含量相近的 pH 5.7 的红壤和 pH 7.2 的紫色土相比,低 pH 红壤中稻草碳的残留量较高 pH 紫色土中高 57%,而稻根碳残留量则高 22%。当加入白云石调节酸度后,有机物料的分解加快,分解半年或 1 年后稻草碳的残留量均较未加白云石粉处理的低 10% 左右。

原土有机质含量。低有机碳含量也会对有机物料的分解速率产生影响,红壤有机碳含量愈低,稻草碳的残留量增加得愈明显。如,有机碳含量为 3.7 g/kg 的红壤,稻草碳的残留量较之有机碳含量为 8.2 g/kg 的要增加 7%,有机碳含量为 1.8 g/kg 的则较之增加得更明显,达 43%。统计结果表明,稻草碳残留量与原土有机碳含量呈显著负相关($r = -0.879^{*}$, $n = 4$)。

综合分析研究结果,可以看出,有机碳含量 8 g/kg 以上时,有机物料的分解不受原土有机碳含量的影响。这种土壤有机质含量对有机物质分解的负反馈作用在最近的工作中也得到了进一步证实^[20]。

土地利用方式。水田土壤和旱作土壤的水分状况有很大区别,前者由于相当长一段时间处于淹水条件,土壤中氧气供应明显不足,微生物尤其是真菌和放线菌的活动受到抑制,因而有机物料的分解较水分适宜的旱地土壤要慢,而腐殖化系数则较高。例如,稻草在水田土壤中的腐殖化系数比旱地土壤中高 27%,稻根则高 17%。在浙江和江西进行的另一组包括 10 余种物料的腐解试验结果也表明,物料在水田土壤中的腐殖化系数比旱地土壤中高 0~42%,平均高 12%~14%。不同植被情况下,有机物料的分解速率也不同,在草地条件下稻草的腐殖化系数比耕地高约 10%。

总之,有机物料在土壤中的分解是多种因素影响的综合反映。例如,瘠薄红壤由于酸度大($\text{pH} < 5$)、黏粒含量高(约 35%)、有机质含量低($< 5 \text{ g/kg}$),因此,有机物料的分解速率比一般红壤中要慢得多,而腐殖化系数则高达 0.31~0.55,平均 0.44,比一般红壤要高 41%;分解第 2 年后,物料碳的残留量仍达 0.25~0.42,平均 0.34,比一般红壤高 70%。对照一般红壤中有机物料分解速率的结果可知,木质素含量高的物料(牛粪、稻麦根等)在两种红壤中的腐殖化系数相近,约为 0.50~0.55,而木质素含量低的物料,在瘠薄红壤中的腐殖化系数约比一般红壤中高 60%。这表明,木质素含量高的物料在红壤中的分解,由于木质素含量的影响部分地掩盖了土壤性质的影响,而木质素含量低的物料在红壤中的分解,土壤性质将是主要的影响因子。

2 土壤有机碳的矿化量与矿化动态

土壤有机碳矿化是土壤碳循环的重要过程,不仅与养分的供应密切相关,也反映土壤微生物对碳源的有效利用情况。它既是有机碳输出的最重要方面,也是评价有机碳库平衡状况的基本资料。根据研究目的,土壤有机碳矿化测定通常要针对田间和室内要求而采用不同的方法。

2.1 土壤有机碳矿化量的测定方法

有 4 种方法可以测定田间条件下土壤有机碳的矿化量: 长期田间试验; 土壤中 ^{13}C 自然丰度的变化; 土壤有机质中 ^{14}C 放射比强的变化; 氮通量的质量平衡原理。第一种方法虽然从技术上说最简单易行,但需时较长。第二种方法系根据 C_4 植物和

C_3 植物中 ^{13}C 的丰度有显著不同(分别为 -9‰ ~ -19‰ 和 -23‰ ~ -40‰),需时较短,但仅适用于原为草地,开垦后一直种植玉米等作物的土壤。第三种方法系根据原子弹爆炸导致大气中 ^{14}C 含量的变化,按一定的公式计算出土壤有机碳分解速率。该法仅适用于新近加入土壤中的植物 ^{14}C ,且土壤有机碳的含量以及输入量和输出量均为常数的土壤-植物系统。第四种方法的依据是,在稳定条件下,通常土壤中有有机碳和有机氮的年矿化速率大体上是成比例的,可以根据无氮肥区作物吸收的氮量来计算土壤有机碳的分解速率。已有的大量有关氮素平衡的田间和室内试验结果表明,作物可从土壤中吸取不同来源的氮。例如,在不施氮肥的情况下,作物吸收的氮素可来源于种子、降水、灌溉水、非生物固氮以及土壤有机氮的矿化等;但作物吸氮过程中,土壤中有部分氮素会通过淋洗和径流或反硝化而损失,因此,欲测得作物吸收的氮量有多少来自土壤有机氮的矿化,就必须考虑利用上述除土壤有机氮来源外的其他来源的氮量以及土壤氮素的损失量等参数对作物年吸氮量进行校正。该方法需时较第二种方法尤短,只是需要进行大量田间试验、观测。

2.2 土壤有机碳的年矿化量

根据氮通量的质量平衡原理,本课题组采用无氮区试验研究了红壤水田和旱地土壤有机碳的矿化量^[21]。结果表明,无氮区双季稻作条件下,作物每年从土壤中吸收的氮量为 $63.8 \sim 160.1 \text{ kg/hm}^2$,平均为 115.8 kg/hm^2 ,若扣除非共生固氮、降雨、灌溉水、秧苗等的输入,并考虑淋洗、渗漏、反硝化等损失,则大致可以得出,每年有机氮的矿化量平均为 53.9 kg/hm^2 。以平均 C/N 比值为 11.2 计,可近似获得有机碳的矿化量平均为 603.3 kg/hm^2 ,矿化率为 2.35%~3.25%。红壤旱地作物(大麦-小米)的年吸氮量平均约为 47.8 kg/hm^2 ,据此计算得到土壤有机碳的年矿化量为 430.7 kg/hm^2 ,矿化率为 1.5%~2.4%。作物吸氮量的变异幅度很大,这是包括土壤类型、肥力水平、轮作制度(作物品种特性)等综合作用的结果,总的来说是土壤的供氮能力影响作物的吸氮量。本试验获得的结果,只能是近似值,因为进行校正的许多参数都是大致估计,很难准确计算。但从研究结果来看,红壤有机碳的矿化速率并不快,以前认为红壤地区由于水热条件较好土壤有机碳的年矿化速率在 3%~5%^[22],这样的估计可能偏高了。

2.3 土壤有机碳的矿化动态

室内条件下土壤有机碳的矿化通常采用恒温培养、碱液吸收法进行测定。通过田间采集不同利用年

限的红壤稻田土壤,本课题组布置培育试验采用碱液吸收法观测了土壤有机碳的矿化动态^[23]。结果表明,土壤有机碳日均矿化量在培养前期快速下降,其后下降趋缓,培养第 10 天后基本趋于稳定。在 20 天的培养期内,不同利用年限红壤稻田 0~10 cm 土壤有机碳的矿化率变动在 2.2%~3.3%,氮的矿化率变动在 2.8%~6.7%。总体而言,有机碳、氮的矿化率随着红壤水稻土的熟化过程而升高,0~10 cm 土壤有机碳的矿化率,以每日释放的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 计,若荒草地为 100,则 3、10、15、30、80 年水田分别为 169.4、277.1、268.8、527.1、510.4;但若以矿化量占总碳的比例,则相应数值分别为:108.0、147.3、108.0、119.2、111.6。可见,利用 30 年以上的红壤稻田土壤,不仅矿化量显著增加,而且矿化率也有明显升高。0~10 cm 土壤有机碳的矿化量(每日释放的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 量)与有机碳含量的单相关系数 $r=0.9802^{**}$, $n=6$ 。

不同土层土壤有机碳和有机氮的矿化速率,有随深度增加而下降的趋势,这表明下层土壤有机碳和有机氮对微生物的有效性比上层土壤低。在田间条件下,由于下层土壤通气状况较差,有机碳和有机氮的矿化速率可能更低;而对于表层土壤,由于培养过程中氧气逐渐减少,会使矿化量测定结果偏低。因此,在田间条件下,上下土层之间土壤有机碳和有机氮矿化速率的差异可能比测定值更大。

3 土壤有机质的积累特征

土壤有机碳库的变化实质上是一个动态平衡过程,因为从本质上说,有机物料的分解速率、土壤有机碳的矿化率、有机物料的进入量等都是时间的函数,如果考虑人为因素的影响,则变异性可能更大。因此,研究土壤有机碳的动态变化过程需要进行长期试验。国外的许多长期试验都超过了 50 年,最长的如英国洛桑试验站的 Broadbalk 小麦连作肥料试验已进行了 150 余年,通过这些长期试验,已取得了大量有价值的结果,如不同营养元素对植物的相对重要性,施肥对各种作物的增产效果,以及施肥对土壤肥力的影响等。国内迄今尚无超过 40 年的长期试验,但目前利用长期试验开展研究的工作非常受重视。本课题组从 1980 年代末起,在中国科学院红壤生态实验站建立了长期定位试验,研究不同施肥制度、有机物料种类和施用量条件下,土壤有机碳库的动态变化及其与土壤质量演变的关系。目前,该项工作正常运行,已取得了多方面的、系统的结果。

3.1 不同施肥处理土壤有机质积累过程

土壤有机质的积累是一个动态变化过程,因不同

的积累阶段、土壤条件和利用管理状况而有明显差异。从 1988 年开始,本课题组在中国科学院红壤生态实验站布置了长期微区、小区试验,通过设置不同母质类型、水分状况、肥料种类和用量的处理,研究了土壤有机质的长期积累过程。

微区试验结果表明^[24],施肥条件下,瘠薄土壤中有有机碳的积累量因有机物质的输入量、土壤性质等条件的不同而异。年施有机物料 4 500~9 000 kg/hm^2 时,5 年后不同瘠薄红壤的表土有机碳含量可提高 2.1~7.5 g/kg ,平均提高了 4.7 g/kg ,而单施化肥的处理平均仅提高 2.0 g/kg ;在施用较高量有机肥的情况下(9 000 kg/hm^2),5 年后表土有机碳含量从原来的 1.3~3.0 g/kg 提高到 7.0~9.7 g/kg 。不同母质发育的瘠薄红壤,主要因黏粒含量的不同,施用有机肥料后土壤中有有机碳的积累量也不同,其中第四纪红色黏土发育的红壤中,有机碳的积累量比第三纪红砂岩风化物的要高,平均约高 1.5 g/kg 。化肥用量相同时,土壤有机碳的积累量随有机物料用量增加而提高。

11 年的农林复合利用试验结果表明^[25],单种作物的处理,土壤有机碳含量从 2.5 g/kg 提高到 6.5 g/kg ,而每年翻埋或覆盖 15 000 kg/hm^2 新鲜胡枝子的处理,土壤有机碳含量从 2.5 g/kg 提高到 12 g/kg 。

不同的试验条件下,为什么会有这么大的差别,土壤有机碳的年均增长量为 0.2~1.0 g/kg ,从目前的试验结果看,是由原土有机碳含量、利用方式、有机物质进入量的差异造成的,但要确定定量关系似乎还比较困难。

3.2 稻田土壤有机碳积累特征

对植稻 0、3、10、15、30 和 80 年的稻田进行采样分析,结果表明,在水耕条件下,前 30 年土壤有机碳的增加与利用年限呈极显著的直线相关;30 年后,其增加速度明显减慢,并趋于稳定。综合估计,在红壤区现有有机物输入量下,红壤水稻土有机碳的平衡值约为 19 g/kg ^[23]。长期定位试验结果表明,旱地改水田后,经过约 15 年的水耕熟化,红壤稻田表层土壤有机碳含量从试验开始前的 3.9~5.7 g/kg ,增加到 7.1~9.2 g/kg ^[26];并且有机碳的增加与水耕利用年限呈线性关系,累积系数为 4.19~5.21^[27]。根据研究结果,可以预测红壤稻田水耕熟化 15 年,土壤有机碳的积累仍处于快速的线性增加时期,有机碳积累并达到平衡的时间约为 30 年。然而有报道表明,施用无机肥的土壤有机碳在 0~30 年一直没有达到稳定,而有机无机肥配施 20 年时,土壤有机碳就达到基本稳定^[28]。甚至有研究表明,施肥后土壤有机碳含量 15 年即达到各自相应的最高值,处于波动动态

平衡过程^[29-30]。

不同施肥处理对土壤有机碳积累过程也具有明显影响。与试验开始前比较,经过 15 年不同施肥处理,红壤水稻土表层土壤有机碳含量显著增加至 8.19 ~ 10.13 g/kg,并且表现为循环(C)、氮+循环(NC)、氮磷钾平衡施肥(NPK)、氮磷钾+秸秆还田(NPKS)、氮磷钾+循环(NPKC) 处理>氮磷(NP) 处理>氮钾(NK)、氮(N)处理>无肥对照(CK)^[26]。其他研究者关于不同施肥处理的长期定位试验结果也表明,氮磷钾平衡施肥以及有机无机肥配施条件下,红壤水稻土的有机质积累速度较快,而单施化肥,土壤有机质积累缓慢,对照或者不平衡施肥土壤有机质含量下降^[28-30]。

土壤有机碳的消长取决于有机物质的输入量和土壤有机碳矿化的平衡。因此土壤有机碳的积累过程不仅与有机肥料带入或者作物归还的有机物质总量有关,还受土壤自身有机碳含量影响。其他相关报道的长期试验均建立在高肥力土壤基础上,初始有机碳含量为 16.3 ~ 34.8 g/kg。而本课题组的长期定位试验土壤初始有机碳含量最高约为 5.7 g/kg,田间采样分析所选择的水稻种植 0 年的表层土壤有机碳含量仅为 4.7 g/kg,15 年时为 14.4 g/kg,30 年时为 19.6 g/kg,80 年时有机质含量为 22.2g/kg。初始土壤有机碳含量的不同部分解释了本研究红壤稻田有机碳积累平衡时间较长的原因。同时也提示,贫瘠旱地红壤的水耕熟化,有机碳达到平衡时间较长,低肥力红壤稻田对于增加大气 CO₂ 的固持具有潜在的重要作用。

3.3 红壤开垦利用后有机碳库的动态变化^[31]

红壤开垦利用后,由于改变了土壤有机碳的原有循环过程,导致土壤有机碳含量的不同变化。

泥质红壤和砂质红壤种植马尾松和湿地松之后,土壤有机碳的变化趋势基本一致,前 6 年间每年有机碳储量大约减少 200 ~ 600 kg/hm²,以后逐渐变慢;大概在 7 年之后,土壤有机碳储量变化趋于平稳,每年减少的量不足 200 kg/hm²。

潮土和水稻土开垦为桔园以后,土壤有机质含量变化趋势是先下降,后上升。潮土由于土壤原有有机质含量较低,只需要添加较少的有机质就可以保持土壤碳库的平衡。种植柑橘后,土壤有机碳在前 4 年基本保持稳定,第 5 年开始,凋落物和施肥补充的有机碳超过土壤有机碳的分解量,有机碳储量逐渐上升,到第 10 年时,每公顷土壤有机碳储量比原来增加了 1 400 kg。水稻土由于原来有机质含量较高,分解量较大,土壤有机碳储量从第 9 年才开始上升。

潮土开垦为牧草地后,由于牧草每年有机碳的形成量和转化量较大,从第 1 年开始,有机碳的进入量就超过了分解量,所以土壤有机碳储量没有降低过程,从种植牧草开始,就逐渐增加。

由此可见,土壤开垦为人工林和桔园后,在人为施用有机肥料不多或没有施用时,最初土壤有机碳储量呈降低趋势;但随着林木的生长,凋落物的数量不断增加,土壤有机碳储量变化趋于稳定;之后土壤有机碳储量又会逐渐上升,直至达到新的平衡。但是,在土壤有机碳储量从下降到平稳再到上升的这一过程中,不同阶段时间的长短,取决于开垦时土壤有机碳的含量及矿化速率、土壤性质以及种植植被的种类和人为添加有机物质的数量和质量。土壤有机质含量越高,矿化量越大,种植植被凋落物和人为添加有机物质数量越少,土壤有机碳降低和平稳的过程就越长。如果土壤中有有机物质的进入量很少甚至没有,则土壤有机碳含量就会持续下降,但有机碳每年减少的数量会逐渐降低。如果从一开始有机碳输入量就大于土壤有机碳损失量,则土壤有机碳就直接进入增加阶段,象潮土开垦为牧草地那样。

4 红壤水稻土团聚体中有机碳的分布规律

有机质在团聚体中的分布与变化是土壤中重要的生物地球化学过程,是土壤有机质平衡与矿化速率的微观表征。由于物理结构的差异,土壤不同组分中外源碳的可进入性不同,进而影响有机碳组分的周转及稳定^[32]。通过培育试验的观测分析,研究了不同水分状况下外源有机物料碳(玉米叶)在红壤水稻土团聚体中的分布特征^[33]。结果显示,不加物料的对照处理中,好气、淹水和干湿交替 3 种水分状况下 < 0.053 mm 粒级团聚体的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均显著高于 > 0.053 mm 粒级,土壤原有有机碳 ^{13}C 更多地积累在 < 0.053 mm 粒级中。添加物料后,淹水和干湿交替条件下 > 0.053 mm 粒级 $\delta^{13}\text{C}$ 显著高于 < 0.053 mm 粒级,有机物料 ^{13}C 更多地分布在 > 0.053 mm 粒级中。新增有机质能作为胶结剂使土壤颗粒黏结成团聚体,因此外源有机质更多地分布于较大粒级团聚体中^[34]。此外,团聚体中外源有机质的分配受物料输入、土壤类型、培养条件等因素的影响而有所波动^[33-35]。

大量研究表明不同粒级团聚体中有机碳的含量具有较大差异。测定不同肥力水平(有机碳含量分别为 9.48 g/kg 和 20.87 g/kg)和长期不同施肥处理的红壤水稻土团聚体中有机碳的分布特征^[36],结果显示,同一处理不同粒级水稳性团聚体中有机碳含量呈“S”型变化,均表现为 1 ~ 2 mm > 2 mm 以上 \approx 0.25 ~

1 mm > 0.053 mm 以下 > 0.053 ~ 0.25 mm。而易亚男等^[37]发现有机碳含量随团聚体粒级的减小而降低,以 > 2 mm 团聚体的有机碳含量为最高,且高于原土的有机碳含量, < 0.053 mm 的微团聚体有机碳含量最低。雷敏等^[38]采用湖南省 4 个稻田长期定位试验,发现各粒径团聚体中有机碳含量呈现由小变大再减小的趋势,0.25 ~ 1 mm 和 1 ~ 2 mm 粒径团聚体中有机碳含量均略高于 2 ~ 5 mm 和 0.05 ~ 0.25 mm 粒径。由于成土母质、耕作制度、施肥措施等差别,导致土壤物理性状和微生物活性不同,有机碳含量在红壤团聚体粒径间存在差异。但总体而言, > 0.25 mm 的各级团聚体有机碳含量高于 < 0.25 mm 的团聚体,水稳性大团聚体是红壤水稻土有机质的主要载体。

土壤肥力和施肥处理显著影响土壤中各级团聚体的配比和有机质含量,进而影响土壤有机质的分配。研究表明,新垦及低肥力红壤水稻土中,0.25 ~ 1 mm 和 > 2 mm 粒级对有机碳的赋存能力较强, > 0.25 mm 大团聚体对全土有机碳的贡献率达到 65.9% ~ 74.6%; 较高肥力土壤中,有机碳主要分配在 0.053 ~ 0.25 mm 和 0.25 ~ 1 mm 粒级,由于微团聚体数量比大团聚体多,有机碳主要分布在 < 0.25 mm 微团聚体中(58.8%)。质地黏重的新垦及低肥力红壤中,铁铝氧化物等无机物质作为主要胶结剂形成粘闭紧实、内部缺少孔隙的土壤结构,使土壤中水稳性大团聚体比例较高。有机质的提升和肥力的提高改善了土壤团聚体内部物理性质,通气多孔的结构反而影响其水稳性。因此,有机质在红壤团聚体中的分配不仅与其本身性质有关,还应关注铁铝氧化物胶体的作用。长期定位试验显示,化肥与有机肥配施及单施有机肥处理提高了红壤水稻土 > 2 mm 水稳性团聚体含量及其中有机碳的分布。易亚男等^[37]也发现施用有机肥处理 > 2 mm 团聚体的有机碳含量增幅最大,认为新施入的有机肥主要被该部分团聚体所固定。刘希玉等^[39]同样认为,长期施肥特别是施用有机肥有利于促进红壤水稻土大粒级团聚体形成。因此,在南方红壤地区的农业生产过程中施用有机肥,有助于土壤结构的改善和有机碳的积累。

5 问题与展望

1) 土壤有机质分解转化的过程动态不仅与土壤肥力变化有密切关系,而且是衡量系统稳定性和农业持续发展状况的重要标志。从区域水平上,土壤有机质分解转化是自然因素和人为活动综合作用的结果,特别是人为活动所造成的不同土地单元上有机物分配和转化过程的差异,是土壤有机质含量变化

的主要驱动力。但就目前的研究结果,大量的集中在小区试验等“点”位水平上各处理间的数量差异和随时间的变化,这些结果如何反映区域水平的实际情况,还存在空间尺度转换问题,这方面研究目前仍是薄弱环节。

2) 土壤有机质的积累过程涉及有机物质分解、各组分之间转化、以及在微域空间上的分配等复杂环节,而且还受温度、水分、物料组成、土壤性质等环境因素的影响。关于土壤有机质的形成转化与稳定性,以往多从土壤有机质分解、腐殖化及其与矿物质的复合机制方面开展研究。近年来,国际上关于土壤有机质的物理保护机制研究主要针对黏土矿物保护和土壤颗粒组胶合-聚合、以及有机质在微团聚体内的闭蓄和在微团聚体间的胶合作用。未来研究要特别针对我国农田管理中高投入和高强度利用特点,着重解析有机质与矿物、微生物界面过程的分子机制及其对土壤有机质稳定的作用与贡献,阐明不同农业管理措施和利用条件下土壤有机质的保持与稳定机制。

3) 土壤团聚体是土壤有机质分解转化的物理场所,不同团聚体中有机质含量、组成、以及转化过程特征都有明显差异。目前对土壤团聚体中有机质数量变化研究较多,但对有机质化学组成、结构特征及其形成演变规律的研究不够,应当加强这些方面的深入探索。

4) 土壤有机质的分解转化是受微生物驱动的生物化学过程。土壤中大多数微生物的种类和数量变化与有机质含量、作物产量具有正相关关系。但是,目前对土壤中碳转化主导功能微生物类群及其功能仍不清楚。要加强研究有机碳输入和降解过程中参与碳转化的功能微生物群落结构,分析有机质组成成分和碳转化相关酶活性的动态变化,揭示环境变化条件下有机质组成和碳转化相关微生物群落的演替规律,阐明土壤碳转化过程的微生物学机制。这将能够为高产农田土壤优化管理提供理论依据和技术支撑。

参考文献:

- [1] 窦森著. 土壤有机质[M]. 北京: 科学出版社, 2010
- [2] 孙波等著. 红壤退化阻控与生态修复[M]. 北京: 科学出版社, 2011
- [3] 蔡祖聪, 徐华, 马静著. 稻田生态系统 CH₄ 和 N₂O 排放[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009
- [4] Jenny H, Gessel SP, Bingham FT. Comparative study of decomposition rates of organic matter in temperate and tropical regions[J]. Soil Science, 1949, 68: 419-432
- [5] Pink LA, Allison FE. Maintenance of soil organic matter III. Influence of green manures on the release of native soil carbon[J]. Soil Science, 1951, 71: 67-75

- [6] Jenkinson DS. Studies on the decomposition of plant materials in soil V. The effects of plant cover and type on the loss of C from ^{14}C labelled ryegrass decomposing under field conditions[J]. *Journal of Soil Science*, 1977, 28: 424–434
- [7] Jenkinson DS, Ayanaba A. Decomposition of ^{14}C labelled plant material under tropical conditions[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1977, 41: 912–915
- [8] 陈灵芝, 林德莱. 英国 Hampstell 蕨菜草地生态系统中枯叶分解作用的研究[J]. *植物生态学与地植物学丛刊*, 1982, 6(4): 302–313
- [9] 林心雄, 程励励, 徐宁, 文启孝. 田间测定植物残体分解速率的砂滤管法[J]. *土壤学报*, 1981, 18: 97–102
- [10] 林心雄, 吴顺龄, 车玉萍. 干旱和半干旱地区测定有机物料分解速率的尼龙袋法[J]. *土壤*, 1992, 24(6): 315–318
- [11] Hassink J. Preservation of plant residues in soils differing in unsaturated protective capacity[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1996, 60: 487–491
- [12] 李忠佩, 林心雄, 车玉萍. 亚热带人工林地的生物归还量动态及土壤养分含量变化. 红壤生态系统研究(第三集)[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995: 199–207
- [13] 李忠佩, 林心雄, 车玉萍. 中国东部主要农田土壤有机碳库的平衡与趋势分析[J]. *土壤学报*, 2002, 39(3): 351–360
- [14] 李忠佩, 林心雄. 瘠薄红壤中有机物质的分解特征[J]. *生态学报*, 2002, 22(8): 1 224–1 230
- [15] Jenkinson DS. Studies on the decomposition of plant material in soil. I. Losses of carbon from ^{14}C -labelled ryegrass incubated with soil in the field[J]. *Journal of Soil Science*, 1965, 16: 104–115
- [16] Jenkinson DS, Rayner JH. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments[J]. *Soil Science*, 1977, 123(5): 298–305
- [17] 林心雄, 文启孝, 程励励, 车玉萍, 沈光裕, 李忠佩, 李忠. 土壤中有机物质分解的控制因素研究[J]. *土壤学报*, 1995, 32(增刊): 41–48
- [18] Li ZP, Cheng LL, Lin XX. Accumulation of organic matter in infertile red soils and its ecological importance[J]. *Pedosphere*, 2000, 10(2): 149–158
- [19] 宋蒙亚, 李忠佩, 刘明, 刘满强, 江春玉. 不同农田有机物料组合对物料分解过程的影响[J]. *土壤通报*, 2014, 45(3): 685–690
- [20] Tan BC, Fan JB, He YQ, Luo SM, Peng XH. Possible effect of soil organic carbon on its own turnover: a negative feedback[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 69: 313–319
- [21] 李忠佩, 林心雄. 田间条件下红壤水稻土有机碳的矿化量研究[J]. *土壤*, 2002, 34(6): 310–314
- [22] 李庆逵主编. 中国红壤[M]. 北京: 科学出版社, 1983
- [23] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云, 尹瑞岭, 施亚琴. 红壤稻田土壤有机质的积累过程特征分析[J]. *土壤学报*, 2003, 40(3): 344–352
- [24] 李忠佩, 焦坤, 林心雄, 程励励. 施肥条件下瘠薄红壤的生物化学性状变化[J]. *土壤*, 2003, 35(4): 304–310
- [25] Li ZP, Tang YL, Shi H, Zhang TL. Characteristics of C and N accumulation in infertile red soil under different rotation systems[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2002, 1(10): 1 125–1 132
- [26] Li ZP, Liu M, Wu XC, Han FX, Zhang TL. Effects of long-term chemical fertilization and organic amendments on dynamics of soil organic C and total N in paddy soil derived from barren land in subtropical China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2010, 106(2): 268–274
- [27] Liu M, Li ZP, Zhang TL, Jiang CY, Che YP. Discrepancy in response of rice yield and soil fertility to long term chemical fertilization and organic amendments in paddy soils cultivated from infertile upland in subtropical China[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(2): 259–266
- [28] 余喜初, 李大明, 柳开楼, 黄庆海, 叶会财, 徐小林, 陈明, 胡惠文. 长期施肥红壤稻田有机碳演变规律及影响因素[J]. *土壤*, 2013, 45(4): 655–660
- [29] 董春华, 高菊生, 曾希柏, 刘强, 徐明岗, 文石林. 长期有机无机肥配施下红壤性稻田水稻产量及土壤有机碳变化特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(2): 336–345
- [30] 董春华, 曾闹华, 高菊生, 刘强, 徐明岗, 文石林. 长期不同施肥模式下红壤性稻田水稻产量及有机碳含量变化特征[J]. *中国水稻科学*, 2014, 28(2): 193–198
- [31] 李忠佩, 王效举. 红壤丘陵区土地利用方式变更后土壤有机碳动态变化的模拟[J]. *应用生态学报*, 1998, 9(4): 365–370
- [32] He Y, Xu ZH, Chen CR. Using light fraction and macroaggregate associated organic matters as early indicators for management-induced changes in soil chemical and biological properties in adjacent native and plantation forests of subtropical Australia[J]. *Geoderma*, 2008, 147(3/4): 116–125
- [33] 江春玉, 李忠佩, 崔萌, 车玉萍. 水分状况对红壤水稻土中有机物料碳分解和分布的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(2): 137–146
- [34] 吕元春, 薛丽佳, 尹云锋, 高人, 马红亮, 杨玉盛. 外源新碳在不同类型土壤团聚体中的分配规律[J]. *土壤学报*, 2013, 50(3): 534–539
- [35] Verchot LV, Dutaur L, Shepherd KD. Organic matter stabilization in soil aggregates: Understanding the biogeochemical mechanisms that determine the fate of carbon inputs in soils[J]. *Geoderma*, 2011, 161: 182–193
- [36] 陈晓芬, 李忠佩, 刘明, 江春玉. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(5): 950–960
- [37] 易亚男, 尹力初, 张蕾, 高德才. 施肥对不同地下水位水稻土团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(5): 144–153
- [38] 雷敏, 周萍, 黄道友, 刘守龙, 朱捍华, 童成立. 长期施肥对水稻土有机碳分布及化学结合形态的影响[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(4): 967–974
- [39] 刘希玉, 王忠强, 张心昱, 徐丽丽, 施瑶, 孙晓敏, 杨凤亭. 施肥对红壤水稻土团聚体分布及其碳氮含量的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(16): 4 949–4 955

Decomposition, Accumulation and Distribution of Soil Organic Matter in Typical Red Soil region of China

LI Zhong-pe^{1,2}, LIU Ming¹, JIANG Chun-yu¹

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Decomposition and transformation of soil organic matter is the important component of carbon cycles in red soil ecosystem. Since the establishment of the Ecological Experimental Station of Red Soil, Chinese Academy of Sciences in 1985, we focused on the key scientific issues in soil organic matter transformation and conducted several research works including the decomposition of organic materials in soil and their affecting factors, mineralization of soil organic carbon in field or incubation condition, accumulation of soil organic matter with different landuse and fertilization, and distribution of organic carbon in paddy soil aggregates. This paper reviewed the progress of the research works in the past 30 years, briefly listed the main results, and proposed a preliminary perspectives in the future.

Key words: Typical red soil region; Soil organic matter; Decomposition; Transformation; Progress