

东北黑土有机质组分与结构的研究进展^①

梁尧^{1,2}, 韩晓增^{1*}, 丁雪丽¹

(1 中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土区农业生态院重点实验室, 哈尔滨 150081; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在全球气候变化背景下研究土壤有机质的转化过程对于评价陆地生态系统碳截获潜力具有重要意义, 而土壤有机质的循环特征及其稳定性与土壤有机质的组成和结构密切相关。东北黑土区是我国重要的商品粮基地, 近年来, 黑土有机质含量呈显著下降趋势, 造成黑土肥力和质量的严重退化。本文通过文献资料的整理, 总结了不同农田管理措施下黑土土壤有机质的消长动态、组分变化以及结构特征的研究现状, 并探讨了研究中存在的问题。开垦和耕作导致土壤有机质总量、活性组分以及腐殖物质含量的显著降低, 而平衡施用化肥和有机肥是维持和提升土壤有机质数量和质量的有效途径, 长期有机无机配施使土壤有机质结构趋于简单化, 有利于土壤肥力的保持。黑土有机质组化化学结构变化的驱动机制是值得人们长期探索的问题。

关键词: 黑土; 有机质; 消长; 组分; 结构

中图分类号: S153

土壤有机质是土壤的重要组成部分, 是陆地生态系统中最重要和最活跃的碳库之一。一方面, 土壤有机质能够提供作物所需的养分和改善土壤的肥力特征, 决定着农田生态系统生产力的高低及其稳定性^[1-2]; 另一方面, 土壤有机质代表了表层陆地生态系统最大的碳库, 其微小的变化会直接影响到大气碳库的源汇效应^[3]。因此, 在全球气候变化的背景下研究土壤有机质的转化过程对于评价陆地生态系统碳截获潜力具有重要意义, 而土壤有机质的循环特征及其稳定性与土壤有机质的结构和组成密切相关。长期以来, 人们在土壤有机质数量方面做了大量的工作, 由于土壤有机质组成和结构的复杂性, 把具有高度异质性的土壤有机质作为一个整体进行分析, 极大地限制了人们对陆地生态系统碳循环过程的认识^[4-6]。充分认识土壤有机质的转化循环必须从土壤有机质的组分和结构研究入手, 对土壤有机质组分进行量化估算及其结构的表征对于研究土壤有机质的变化至关重要^[7-10]。

东北黑土区是世界四大黑土带之一, 主要分布在松嫩平原东部地区, 包括黑龙江、吉林、辽宁省和内蒙古自治区的 90 个市县区, 总面积约为 600 万 hm^2 。东北黑土以有机质含量高、土质肥沃而闻名, 是我国重要的粮食生产基地, 对保障整个国家的粮食安全发挥着重要的作用^[11]。近年来, 东北黑土有机质含量呈显著下降的趋势, 这不仅导致土壤肥力降低, 土地生

产力下降, 对国家粮食安全产生了负面影响; 同时, 东北黑土区是我国重要的土壤有机碳储库 (有机碳储量为 12.6 Pg C), 黑土区由碳源向碳汇的转变将对全球气候变化产生深刻影响^[12-13]。因此, 明确黑土农田生态系统中有机质的数量、组分和结构的特征及其对农田管理措施的响应规律, 对正确评价黑土区农业生产对全球气候变化的影响和预测未来黑土系统生产力的可持续性和黑土质量的变化方向, 具有重要的理论意义。本文通过文献资料的整理和分析, 对近年来中国东北黑土不同农田管理措施下土壤有机质的消长规律进行了阐述, 并着重论述了有机质组分以及结构特征的变化, 以期深入认识黑土有机质的动态变化机制与合理制定农田土壤管理措施以提高黑土碳固定能力提供依据。

1 黑土有机质的消长动态及其影响因素

土壤有机质包括植物、动物及微生物遗体、排泄物、分泌物及其部分分解产物和土壤腐殖质。土壤有机质的数量是进入土壤的有机物数量与微生物参与下分解损失的平衡值。在众多有关土壤有机质变化趋势研究中, 通常的方法是根据长期定位试验对特定土地管理利用方式下土壤有机质的变化做出总结和预测。随着研究技术手段的发展, 一些陆地生态系统土壤有机碳的模型被成功地应用于长期定位试验观测数据的

①基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2010CB134509, 2011CB100506) 和国家自然科学基金项目 (40971152) 资助。

* 通讯作者 (xzhan@cern.ac.cn)

作者简介: 梁尧 (1984—), 女, 吉林辽源人, 博士研究生, 主要从事农田土壤碳循环的研究。E-mail: liangyaosmart@163.com

整合与预测中，这些模型已成为研究全球变化与陆地生态系统的重要手段。在有关东北黑土区有机质（碳）动态变化的报道中，以长期定位试验为手段的研究仍占有主体地位，而以定位试验数据为基础所开展的模型预测研究开始地相对较晚，目前引入到黑土有机碳研究中的模型主要包括 Roth C、CENTURY、DNDC 和 DSSAT 模型^[14-17]。

由于其特定的气候、生物环境条件，使黑土区土壤有机质得以积累，腐殖质含量高，土壤具有较高的有机碳密度和含量^[18-19]，且黑土有机质区域分布特点表现为由南向北逐渐递增^[20]。自然植被覆盖土壤或草原土壤开垦为农田后土壤有机质的含量显著降低，并导致土壤有机碳的大量释放^[21]。Wang等^[22]采用 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度估算了黑土有机碳的周转速率，认为经过 13 年的玉米连作，仅有 13% 的土壤有机碳被分解，黑土有机碳的半衰期达 65 年，而采用生物一级反应来拟合土壤有机碳的下降过程得到黑土有机碳的半衰期为 40 年^[23]。显然由于研究尺度和计算方法的不同，有关黑土有机碳半衰期的结果有所差别，但我们能够

得到的是黑土有机碳的周转速度较慢，而黑土区较低的年均温度（1.5℃）、较少的降雨量（530 mm）以及较长的霜冻期（170~180 天）均为黑土有机碳的积累创造了有利条件。随着开垦时间的增长，黑土总有机碳的含量逐渐降低，各地区受环境条件、管理方式以及开垦年限的影响，其下降程度有所差异（表 1），但整体趋势均表现为开垦初期下降速率较快，而后期趋于平缓^[23]。经过估算，在自然植被覆盖下，黑土区 1 m 土层碳库储量为 13.8 亿 t，而经过一百年的开垦耕作其储量降为 10.5 亿 t，减少了 23.9%^[24]。黑土有机碳各土层的损失量并不一致，表层土壤有机碳含量下降迅速，而亚表层损失量相对较少^[25]。综上所述，在东北黑土区，虽然土壤本身有机碳含量较高，但是在目前高强度的农田开垦条件下，加之作物秸秆大量移出农田生态系统，导致土壤有机碳呈亏缺状态，黑土已成为大气 CO_2 的“源”，如何通过合理的土地管理方式来提高黑土有机碳的含量和储量对于改善黑土区的大气 CO_2 的源汇效应和土壤肥力的维持具有重要的意义。

表 1 长期不同管理措施下黑土有机碳含量的变化

Table 1 Content variations of soil organic carbon in black soil under long-term different management practices

种植制度	施肥处理	年限	黑土 SOC 含量变化	研究区域	资料来源
大豆、小麦	NP	47 年	48.0%	黑龙江省嫩江	辛刚等 ^[23]
玉米-大豆-小麦	CK	20 年	-7.83%	黑龙江省海伦	赵丽娟等 ^[26]
轮作	N		-4.56%		
	NP		-1.61%		
	NPK		0.33%		
	OM (6 000 kg/(hm ² ·a))		-5.56%		
	N+OM (6 000 kg/(hm ² ·a))		0.35%		
	NP+OM (6 000 kg/(hm ² ·a))		1.05%		
	NPK+OM (6 000 kg/(hm ² ·a))		0.64%		
玉米-大豆-小麦	CK	16 年	-0.83%	黑龙江省海伦	乔云发等 ^[27]
轮作	NP		0.02 %		
	NK		-0.26%		
	NPK		0.09%		
	NPKOM (2 250 kg/(hm ² ·a))		0.28%		
玉米连作	无肥	16 年	0.00	吉林省公主岭	张璐等 ^[28]
	N		-1.2%		
	NP		4.8%		
	NPK		8.4%		
	NPKS		8.4%		
	NPKM (30 t/(hm ² ·a))		47.8%		
	1.5NPKM (45 t/(hm ² ·a))		62.4%		

农田管理措施是调控土壤有机质数量的重要因素。有关不同耕作方式^[29]、轮作制度^[30-31]以及施肥方式^[25-28, 32-34]等管理措施影响下黑土总有机碳的动态变化已开展了大量的研究。单施某一化肥或氮磷钾配施下, 土壤有机碳的变化与种植制度密切相关, 其数值可能上升、下降或保持不变, 与玉米-大豆-小麦轮作相比, 玉米连作更有利于土壤有机碳的积累(表 1)。黑土有机碳的数量对不同种类营养元素的响应有所差异, 氮素和磷素对黑土有机碳的消长起着重要作用, 而钾素对黑土有机碳动态变化影响较小^[34]。长期实施秸秆还田和施用有机肥是提高黑土有机碳水平的有效手段(表 1), 且土壤有机碳的增加量与有机物料的种类和数量密切相关, 土壤有机碳分解速率与黏粒+粉粒含量之间呈显著的线性负相关, 因此, 在相同数量有机物质输入的情况下, 黏粒含量较高的黑土能够固定更多的有机碳^[35]。然而, 土壤对碳的固持并非无限制的增加, 而是存在着一个最大保持容量, 即饱和水平, 当有机碳的含量逼近或达到饱和水平时, 外源碳输入量的增加将不再增加土壤有机碳库, 土壤有机碳的含量达到平衡值^[36], 而有关黑土有机碳是否存在平衡值或是平衡值的高低这一问题仍需要更深入的研究来解答。尽管如此, 从土壤有机碳输入和输出的角度来评估黑土有机碳的平衡已有相应的报道, 乔云发等^[27]研究表明玉米-大豆-小麦轮作体系下, 经过 16 年有机肥处理($2\,250\text{ kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$), 黑土有机碳年际间增加 $138\text{ kg}/\text{hm}^2$, 而不施肥, 土壤有机碳以每年 $0.22\text{ g}/\text{kg}$ 的速度下降, 平衡施用氮磷钾肥, 则每年的碳收支在 $12\sim 44\text{ kg}/\text{hm}^2$ 之间, 土壤有机碳含量基本保持不变。而李忠佩等^[37]研究指出, 以种植小麦和玉米为主的黑土区土壤有机质的年均矿化量约为 $905\text{ kg}/\text{hm}^2$, 若要维持土壤有机碳的平衡, 则每年施入土壤的有机物质数量应该达到 $4\,225\text{ kg}/\text{hm}^2$ (秸秆) 或 $3\,458\text{ kg}/\text{hm}^2$ (粪肥)。杨学明等^[14]用 Roth C 模型研究东北地区黑土长期定位施肥试验中玉米连作下土壤有机碳含量的变化指出如果实施秸秆还田($2.28\sim 4.87\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$), 到 2022 年时, 无肥、氮磷钾肥以及氮磷钾肥配施厩肥处理下, 土壤有机碳的含量将分别增加 26%、45% 和 46%。因此, 我们能够看到, 东北黑土区有机质含量下降的主要原因在于有机物质的投入量不足, 但由于土壤有机质本底值的差异以及分析估算方法的多样性而使得分析结果有所差别。

2 黑土有机质组分的分配特征及其影响因素

由于土壤有机质组成的复杂性, 既有有效性较高、

易被微生物分解矿化、能够被植物迅速利用的活性有机质, 也包括难分解、转化时间漫长的惰性有机质^[38], 将土壤有机质划分为具有不同组成和结构的库, 是研究土壤有机质有效性和周转特征的基础。普遍使用的方法是将土壤有机质划分为活性有机质、腐殖质以及惰性有机质^[39]。腐殖质在土壤中常与土壤矿物质部分呈不同紧密程度的团聚状态, 形成各种稳定的有机-矿物质化合物或复合胶体^[40], 属于土壤有机碳的非活性部分。早在 20 世纪 80 年代初期, 一些研究人员就已经开始对黑土腐殖物质进行初步的研究^[41-42], 随着分析技术的发展, 人们对黑土腐殖物质组成的认知取得了较大的进步。黑土腐殖物质的组成以胡敏酸(HA)和胡敏素(HM)为主, 富里酸(FA)的含量较低, 且 HF/FA 的比值多数大于 1.0, 其腐殖化程度较高, 高于风沙土和棕壤等土壤类型^[43]。随着土层深度的增加, 黑土 HA、FA 和 HM 的绝对含量逐渐降低, 同时 HA/FA 的比值也逐渐下降^[44]。不同的提取方式将造成腐殖物质组成和数量上的差异, 黑土中采用焦磷酸钠提取的 HA 数量比 NaOH 的提取量高出 40.9%^[45]。焦磷酸钠所提取的是与 Ca^{2+} 和 Fe^{3+} 相结合的 HA 和 FA, 而 NaOH 提取的则是与 Al^{3+} 结合的 HA 和 FA^[40], 因此, 黑土腐殖物质中 HA 主要是与 Ca^{2+} 和 Fe^{3+} 离子相结合而存在的。Xing 等^[46]采用焦磷酸钠对黑土 HA 进行了 23 次连续提取, 提取量以第 1 次为最高, 占腐殖物质总量的 21%, 随着提取次数的增加, HA 的量逐渐降低, 第 23 次的提取量仅为腐殖物质总量的 0.11%, 同时其将 HM 部分又分成了高分子量部分和低分子量部分, 其中低分子 HM 部分占有较大的比例, 约为 34.4%, 而高分子 HM 部分约占 24.1%。而窦森等^[47]采用 Pallo 修改法将黑土 HM 分成铁结合胡敏素(HMi)、黏粒结合胡敏素(HMc)和继承性胡敏素(ISHM), 三者 in 土壤全碳中所占的比例分别为 3.1%、2.7% 和 34%。

作为土壤有机质的稳定组分, 腐殖物质对于土壤质量的指示作用具有一定的滞后性, 因此, 人们逐渐采用有机质的活性组分来表征土壤物质循环特征、评价土壤质量, 这些活性组分能够作为土壤潜在生产力以及由土壤管理措施引起土壤有机质变化的早期指标。活性有机质是土壤有机质的活性部分, 由于其在土壤中有活性较高、易被土壤微生物分解矿化、对植物养分供应有最直接作用的组分^[48], 同时是土壤微生物活动的能源和土壤养分的驱动力, 能直接参与土壤生物化学过程^[49]。有关黑土活性有机质的相关报道起始于 21 世纪初期, 主要运用中等强度的氧化剂所氧化的有机碳定义为土壤活

性有机碳^[50]。随着有机质分组技术的发展和完善,大量研究采用活性有机质组分来指示自然和人为因素在短期或长期影响下黑土活性有机质动态变化(表 2)。根据分组方法的差异,有机质活性组分可分为水溶性有机

质、轻组有机质、颗粒有机质、微生物量碳氮以及易氧化碳等。尽管不同研究者对活性有机碳的测定方法和所指活性有机碳的部分不尽相同,但其都可在不同程度上反映有机质的有效性,指示土壤有机质或土壤质量。

表 2 关于黑土有机质组分的相关研究

Table 2 References on soil organic matter fractions in black soil

土壤有机质组分	影响因素	参考文献	起始年限
腐殖物质	土地利用方式	李海波等 ^[51] ; 吕贻忠等 ^[52] ; 赵红等 ^[53]	1988 年
	施肥方式	窦森等 ^[54-55] ; 刘淑霞等 ^[56] ; 肖彦春等 ^[57] ; 高洪军等 ^[58] ; 徐金忠等 ^[59]	
易氧化有机质	施肥方式	王晶等 ^[50]	2002 年
	土地利用	Han 等 ^[60] ; 张迪等 ^[61]	
微生物量碳氮	地形	方华军等 ^[62]	2004 年
	季节性变化	张明等 ^[63]	
	施肥方式	宋日等 ^[64] ; 王晶等 ^[65] ; 李东坡等 ^[66] ; 王继红等 ^[67] ; 隋跃宇等 ^[68-69]	
	耕作措施	张彬等 ^[70]	
轻组有机碳氮	空间分布	解宏图等 ^[71] ; 李执强等 ^[72]	2006 年
	地形	申艳等 ^[73]	
	土地利用与施肥	Han 等 ^[60] ; 赵丽娟等 ^[26] ; 李海波等 ^[51] ; 张迪等 ^[74] ; 芦思佳等 ^[75]	
水溶性有机碳氮	地形	方华军等 ^[62]	2006 年
	冻融作用	刘淑霞等 ^[76]	
	施肥方式	郑立臣等 ^[77] ; 王连峰等 ^[78] ; 张迪等 ^[74] ; 梁尧等 ^[79]	
颗粒有机碳氮	分布特征	方华军等 ^[80] ; 梁爱珍等 ^[81]	2006 年
	地形	方华军等 ^[82]	
	土地利用与施肥	安婷婷等 ^[83] ; 李维福等 ^[84] ; 梁尧等 ^[85]	

土壤有机质组分的变化取决于土壤有机质输入和输出的相对关系,即有机物质分解矿化损失和腐殖化、团聚作用积累的动态平衡与土壤物质迁移淀积的统一。影响有机质分解和生成的因素包括土壤所处气候区的温度、水分、地形以及包括耕作措施、作物残茬管理方式、施肥制度、轮作方式、灌溉制度等人为管理方式,同时,土壤本身的一些性质,如质地等,尤其是黏粒矿物对土壤有机质的形成与稳定关系密切(表 1)。研究者们将多种分组方法相结合,对各种影响因子下的黑土有机质组分的分配特征进行了比较与分析。

土壤有机质组分对不同的水热和地形因素有着较强的响应。随着纬度的增加,各地区黑土轻组有机碳氮与颗粒有机碳氮的含量逐渐升高^[71],然而,与之相反,土壤易氧化碳含量却表现为逐渐降低的趋势。地形对黑土有机质组分的影响较为复杂。土壤侵蚀以及耕作倾向于破坏水稳性大团聚体,相应地增加了水稳

性微团聚体的比例。大团聚体破坏后,包裹在大团聚体内的轻质活性碳及细颗粒结合的惰性碳随地表水流沿坡迁移,而颗粒有机碳等活性碳在迁移和累计过程中易被微生物利用分解,在沉积区难以积累。活性碳一经矿化,剩下的微团聚体碳受到物理保护,不易被微生物利用,在沉积区表层土壤将形成一个惰性碳汇^[80]。此外,土壤侵蚀显著降低了表层土壤易矿化碳、水溶性有机碳以及微生物量碳的含量,坡脚沉积部位表层这些活性有机碳的相对含量较高,土壤有机碳的矿化潜力较大^[62]。

农田管理措施是土壤有机质组分变化的主导因素。多年来,研究者们关于施肥和耕作等因素影响下黑土有机质组分的变化特征开展了大量的研究,且多侧重于探究施肥对土壤有机质组分的影响(表 2)。然而由于研究角度和分组方法的差异,使得各有机质组分对不同肥料的响应有所差异。一些研究指出,长期施用化肥显著提高了土壤轻组有机碳、易氧化碳、热

水浸提有机碳的含量^[26-78], 而另一研究却表明化肥降低了颗粒有机碳氮、微生物量碳氮的含量, 且随着氮肥用量的增加而呈下降的趋势^[67,84]。有机肥对于黑土有机质组分的提升作用是毋庸置疑的, 有机物料本身含有相当数量的腐殖物质, 这些物质的施入对于土壤有机质的更新与活化具有重要的作用, 各有机碳组分的提高程度取决于有机物料的腐殖化系数与投入量。玉米秸秆和小麦秸秆更有利于黑土轻组有机碳的积累, 而粪肥更有助于微生物量碳和水溶性有机碳的提升^[79], 且随着有机肥用量的升高, 土壤活性有机碳的数量呈逐渐上升的趋势^[63]。有机肥的施用使进入土壤的有机碳与矿质颗粒形成有机无机复合体有利于腐殖质的积累, 对于各组分的积累效果也有所争议。窦森等^[55]指出土壤有机培肥后松结合态腐殖质升高, 稳结合态腐殖质下降; 而高洪军等^[58]却指出长期有机培肥后各结合态腐殖质均有所积累, 且高量有机肥对腐殖质积累效果最好。产生这些差异的原因可能是施肥年限以及肥料种类的差异。为了验证长期定位试验的结果, 关于室内培养下外源添加对黑土腐殖物质的特征也有一定的报道。向黑土底土中加入高量的玉米秸秆后, 经过 180 天的培养, 有机质的腐殖化程度显著提高, 且 HA 的含量在土/秸比为 2:1 时最高^[57]。用 ¹³S 方法研究黑土中添加小麦秸秆后腐殖物质组分的转化时发现, 新形成的和原土中的 HA 和 FA 间发生转化, 并且主要以 FA 向 HA 转化为主, 随着培养时间的延长, HA 的增加量要显著大于 FA^[56]。

有机质组分与团聚体之间关系密切, 不同腐殖物质组分性质的差异将促使其形成不同粒级的团聚体。随着人们对团聚体研究的不断深入, 有关团聚体中腐殖物质组分的分布特征已成为近年来研究的热点。黑土 HA 和 FA 在各粒级团聚体全碳中所占比例分别为 8.26%~19.33% 和 12.29%~21.42%, 二者的相对含量随着粒级的减小而升高^[86]。对不同肥力黑土微团聚体中腐殖物质的研究表明, 在 <0.25 mm 的各粒级微团聚体中, 粒径越小, HA 所占比例越大, 原因在于小粒级团聚体主要靠腐殖化程度高的有机质组分维持其稳定性^[87]。长期有机肥和化肥配施则造成大团聚体中 0.25~2 mm 粒级团聚体中 HA 含量和 HM 含量的增加^[88]。

目前, 针对不同自然和人为因素影响下东北黑土有机质组分的分配特征已开展了大量的研究, 综合分析其研究结果主要呈现出以下特点: ①由于研究目的、试验条件及分组方法的复杂多样性, 导致关于黑土有机质分组的研究结果并不一致, 尤其是活性组分部分,

由于其含量较低, 对环境因子的变化较为敏感, 因而造成其结果有很大分异; ②土壤有机质分组能够更真实、更准确地反映出土壤有机质的变化以及存在形态, 但以此为基础所进行的关于黑土有机质的稳定机制及其固碳能力的研究还有待于进一步的开展; ③以团聚体为尺度所进行的土壤有机碳组分分配特征的研究呈方兴未艾之势。

3 黑土腐殖物质的结构特征及其影响因素

土壤有机质是一种结构较为复杂的混合物, 腐殖物质是土壤有机质的主体, 占土壤有机质的 60%~90%。非腐殖物质是指具有特定的物理化学性质、结构已知的有机化合物。而腐殖物质是经土壤微生物作用后, 由多酚和多醌类物质聚合而成的含芳香环结构、脂族特征的、新形成的一系列黑色至棕黑色的非晶型准高分子有机化合物。因此, 人们对土壤有机质结构的探索多侧重于对土壤腐殖物质结构的研究^[89-90], 有关黑土腐殖物质结构的研究多集中于对胡敏酸组分结构特征的探讨。现代仪器分析技术的发展有力地推动了人们对腐殖物质结构的认知, 元素分析、差热分析、红外光谱、荧光光谱、热解-气质联用光谱、核磁共振波谱以及同位素示踪等技术已成为探究土壤有机质结构特征的有效手段。但对于腐殖物质这种分子结构十分复杂且不均一性很强的高分子有机物来说, 多种分析方法的联合应用是使其结构研究取得突破的关键^[91-93]。

元素组成、分子量和官能团: 腐殖物质主要由 C、H、O、N、P、S 等元素组成, 黑土 HA 分子的 C 含量为 521~581 g/kg, H 含量为 47~64 g/kg, N 的含量为 21~46 g/kg, C/H 比为 0.64~1.028, O/C 比为 0.421~0.53, 要高于水稻土和草甸土等土壤类型元素比^[94]。采用蒸汽压渗透法所测得的 HA 分子数均分子量表明, 土壤 HA 的数均分子量约为 3 453, 而黑土 HA 的数均分子量约为 6 848, 高于土壤的平均值^[95]。从官能团的组成来看, 不同类型土壤 HA 之间, 黑土 HA 的羧基含量和羧基/酚羟基比值均较高, 分别为 430 cmol/kg 和 1.35^[94]。综合以上化学特征分析可知, 黑土 HA 的相对分子量较大, C/H 比和 O/C 比较高, 官能团组成上较为成熟, 说明黑土 HA 较为成熟。

光学和光谱学性质: 色调系数 ($\Delta\lg K$) 和 E4/E6 比能够反映腐殖质分子结构的复杂程度, 即 $\Delta\lg K$ 值和 E4/E6 比越高, 其分子结构越简单。土壤腐殖质各组分的 $\Delta\lg K$ 值范围分别为: HA 0.53~0.74, FA 0.96~1.20, HMi 0.55~0.74, HMc 0.47~0.74, 可见, FA 的

$\Delta\lg K$ 值较高, HA 和 HMi 的 $\Delta\lg K$ 值居中, 而 HMc 的最低。而黑土 HA、FA、HMi 和 HMc 各腐殖物质组分的 $\Delta\lg K$ 值分别为 0.53、1.03、0.64 和 0.51, 进一步证明了黑土 HA 的分子结构较为复杂^[96-97]。

腐殖物质的红外光谱是具有专性分子结构特征的谱带, 根据红外吸收曲线的峰位、峰强以及峰形能够判断腐殖物质的官能团组成^[98]。HA、FA、HMi 和 HMc 具有相似的光谱特征, 它们红外光谱的吸收峰主要出现在: 2915~2935 cm^{-1} 和 2840~2855 cm^{-1} (脂族 C-H 伸缩振动); 1715~1735 cm^{-1} (羧基中的 C=O 伸缩振动), 1590~1625 cm^{-1} (芳香环 C=C 伸缩振动) 等几个部分^[90]。土壤 HA 的 2920 cm^{-1} (脂族)/1720 cm^{-1} (羧基) 比值为 1.01~3.53, FA 为 0.03~0.23^[98], 而有关黑土 HA 红外光谱的报道中^[99], 其 2920 cm^{-1} /1720 cm^{-1} 比值却远低于这一范围, 可能是由于提取方法所造成的结果差异。在对黑土 HA 进行 23 次连续提取过程中, 随着提取次数的增加, HA 分子的芳香结构与脂族结构的比例约为 0.53~0.64, 脂族 C-H 键的振动强于芳香结构的伸缩振动, 后提取的 HA 分子富含较多的脂族结构^[46]。

核磁共振波谱特征: 国内外有关土壤有机质核磁共振的研究主要集中于土壤腐殖物质的 ^1H -核磁共振和 ^{13}C -核磁共振波谱。土壤胡敏酸的 ^1H -核磁共振图谱主要将 H 的化学位移归为烷基氢和芳香氢两个区域, 黑土 HA 分子结构中具有较高比例的羧基 H 和芳香 H, 计算得到的芳香度 (fa) 为 40.5%, 远高于土壤的平均值 36.0%^[54]。腐殖物质的 ^{13}C 核磁共振波谱图中碳的信号可分为 4 个区, 分别是烷基区 (0~50 ppm), 烷氧区 (50~110 ppm), 芳香区 (110~160 ppm) 以及羰基区 (160~200 ppm)^[100]。土壤 HA 的 ^{13}C -核磁共振波谱表明虽然 HA 有明显的芳香结构, 但不超过 40%, 而脂肪族结构却占相对优势, 可以认为土壤 HA 是以烷氧 C 和烷基 C 等脂肪族结构为主体, 以芳香结构为核心并含有少量 (13.2%) 羧基结构的“准高分子”混合物。综合比较黑土、棕壤、草甸土和水稻土的 ^{13}C 核磁共振波谱能够发现, 在 4 种类型土壤 HA 中, 黑土 HA 含有较多的羰基 C 和芳香 C, 较少的烷基 C, 而烷氧 C 的含量和分布差异不大, 含量均表现为多羟基>甲氧基碳>双氧碳^[101]。在研究提取次数对黑土 HA 结构影响中, 随着连续提取次数的增加, 后提取的 HA 分子具有较高的脂族碳含量, 而芳香碳 C 和羧基 C 的信号则随着提取次数的增加而减弱^[46], 这进一步证明了其元素组成和红外光谱

分析的结果。近些年, 关于黑土 HM 的 ^{13}C -核磁共振波谱特征也有一定的报道, 黑土 HM 中烷基 C 的平均比例最高, 约为 48.9%, 其次为烷氧 C 和羰基 C, 而芳香 C 的平均比例最低^[100]。

农田管理措施是改变土壤有机质结构的重要因素。有关黑土腐殖物质结构的研究多集中于探讨不同施肥方式下 HA 结构特征的变化。单施化肥对黑土 HA 结构的影响并不显著^[54], 而长期有机无机配施后黑土 HA 分子结构的变化主要表现在以下几个方面: ①数均分子量下降, 降低幅度达 73%; ②C 含量、C/H 和 O/C 原子比均降低; ③红外光谱表现为脂族 C-H 键的振动增强, 芳香结构的伸缩振动减弱; ④ ^1H -核磁共振波谱证明, HA 分子中的羧基含量明显减少, 芳香 H 含量下降, 脂族氢和芳香氢的比例提高; ⑤ ^{13}C -核磁共振波谱也显示 HA 分子羰基含量减少了 37.7%, 芳香 C 含量也减少, 但非取代的芳香 C 比例增加。烷氧 C 有所增加, 且也是多羟基 C 增加较多, 达 37%。烷基 C 变得更为复杂, 含量也有所提高, HA 脂族性 C 和芳香 C 的比例也增加^[94-95,101-102]。综合上述各种分析的结果我们能够确定长期施用有机肥后, 黑土 HA 分子数均分子量减小, 缩合度下降, 脂族性增强, 芳香性减少, 黑土 HA 向着脂族化年轻化和简单化的方向发展, 这与棕壤和水稻土等土壤类型 HA 所表现出相同的变化规律, 腐殖物质的这一变化趋势对于土壤肥力的保持是十分有利的。将玉米植株残体施入黑土 120 天后, 经 ^1H -核磁共振波谱分析, 土壤 HA 分子也表现出芳香度降低, 芳香 C 减少, 而烷基 C 和烷氧 C 增加的现象, HA 的氧化程度降低^[103]。关于长期施肥后黑土 FA 和 HM 结构变化的研究较少, 与不施肥相比, 有机无机配施后 HM 分子中烷基 C 比例增加, 烷氧 C 和芳香 C 比例下降, 烷基 C/烷氧 C、脂族 C/芳香 C 和疏水 C/亲水 C 比值增加, 随有机肥施用量的提高和施用年限的增加这一规律表现得更加明显, 因此, 长期施用有机肥使土壤 HM 的结构向着烷基化和疏水性程度增加的方向发展^[102]。将玉米秸秆施入黑土底土培养后, 高土/秸比更有利于 HMi 活性的提高和脂肪族结构的增加, 而低土/秸比更有利于 HMc 活性的提高和脂肪族结构的增加^[104]。

有关耕作措施对黑土腐殖物质结构影响的研究有一定报道, 常规耕作下表层黑土 HA 中杂环氮的数量增加; 宽窄行交替休闲处理下表层土壤 HA 结构中的含氮化合物数量、脂肪族化合物数量增加; 而旋耕整作处理增加了表层土壤 HA 结构中的羟基、脂肪族和

氨基化合物含量^[105]。26 年的免耕增加了黑土 HA 的芳香度、脂肪化程度和聚合程度,而翻耕增加了黑土 HA 的氧化程度,由此说明长期的免耕处理使黑土腐殖质结构趋于稳定,而翻耕处理使黑土腐殖质结构趋于简单^[106]。

4 结语与展望

土壤有机质的组分和结构特征决定了其稳定性,而土壤有机质的稳定性与其数量密切相关。农田管理措施对黑土有机质的数量、组成与结构特征产生了深刻的影响。合理的农田管理措施如秸秆还田、施用有机肥等能够提高黑土有机质的数量,改善土壤有机质的组成,优化有机质的质量。通过以上的综述,笔者认为以下几点的研究工作仍是十分必要的:①黑土有机碳动态变化机理不甚明确。在今后的研究中,应加强土壤有机碳动态变化机理的研究,并试图通过各种调控机制控制土壤有机碳的变化过程,为黑土的可持续利用提供重要的理论基础;②外源有机物质的输入是维持和提升农田土壤有机质数量的关键,考虑到土壤对有机质的固持能力是有限的,同时过量有机物质的输入将对环境造成负面影响,建立黑土农田外源有机物质输入量与土壤有机质含量之间的量化关系是十分必要的;③虽然关于农田管理措施下黑土有机质组分特征的研究已有很多,但由于土壤有机质背景值较高,短期内波动较小,其对管理措施的响应具有滞后性,采用土壤有机质组分来反映不同管理措施下土壤有机质数量和质量的中短期变化仍符合有机质转化和积累的研究趋势,同时,以此为基础所进行的黑土有机质稳定机制及其固碳能力的相关研究还有待于进一步的深化与开展;④由人类活动引起的土地利用和土地覆盖变化是土壤有机碳库最直接的影响因子,而有关土地利用和土地覆盖变化对土壤有机质结构的影响研究较少。因此,今后要加强土地利用和土地覆盖变化对土壤有机质结构影响方面的研究;⑤有关黑土有机质化学结构的研究多侧重于对胡敏酸结构的报道,而对其他有机质组分的研究还不够深入,特别是关于有机质活性组分结构特征的表征,此外,黑土有机质组分化学结构变化的生物化学驱动机制仍是值得人们长期探索的问题。

参考文献:

[1] 潘根兴,赵其国.我国农田土壤碳库演变研究:全球变化和国家安全粮食.地球科学进展,2005,20(4):384-392

- [2] Powlson DS, Oik DC. Long-term soil organic matter dynamics // Kirk GJD, Oik DC. Carbon and Nitrogen Dynamics in Flooded Soils. Proceedings of a Workshop, 2000: 19-22
- [3] Post WM, Emanuel WP, Zinke, PJ, Stangenberger A. Soil carbon pools and world life zones. Nature, 1982, 298: 156-159
- [4] Shaver GR, Giblin AE, Nadelhoffer KJ, Thielert KK, Downs MR, Launder JA, Rastetter EB. Carbon turnover in Alaskan tundra soils: Effects of organic matter quality, temperature, moisture and fertilizer. Journal of Ecology, 2006, 94: 740-753
- [5] Steinbeiss S, Beßler H, Engels C, Temperton VM, Buchmann N, Roscher C, Kreuziger Y, Baade J, Habekost M, Gleixner G. Plant diversity positively affects short-term soil carbon storage in experimental grasslands. Global Change Biology, 2008, 14: 2937-2949
- [6] 周萍, Piccolo A, 潘根兴, Smejkalova D. 三种南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究 III. 两种水稻土颗粒有机质结构特征的变化. 土壤学报, 2009, 46(3): 398-405
- [7] McCallister DL, Chien W. Organic carbon quantity and forms as influenced by tillage and cropping sequence. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2000, 31: 465-479
- [8] Bayer C, Martin-Neto, Mielniczuk J, Saab SC, Bagnato VS, Milori DMP. Tillage and cropping system effects on soil humic acid characteristics as determined by electron spin resonance and fluorescence spectroscopies. Geoderma, 2002, 105: 81-92
- [9] 窦森, 李凯, 崔俊涛, 关松, 张晋京. 土壤腐殖物质形成转化与结构特征研究进展. 土壤学报, 2008, 45(6): 1148-1158
- [10] Banger K, Toor GS, Biswas A, Sidhu SS, Sudhir K. Soil organic carbon fractions after 16-years of applications of fertilizers and organic manure in a Typic Rhodalfs in semi-arid tropics. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 86: 391-399
- [11] 黑龙江土壤普查办公室和黑龙江省土地管理局. 黑龙江土壤. 北京: 中国农业出版社, 1992: 864
- [12] Wang SQ, Zhou CH, Liu JY, Tian HQ, Li KR, Yang XM. Carbon storage in northeast China as estimated from vegetation and soil inventories. Environmental Pollution, 2002, 116: 157-165
- [13] 黄耀, 孙文娟. 近 20 年来中国大陆农田表土有机碳含量的变化趋势. 科学通报, 2006, 51(7): 750-763
- [14] 杨学明, 张晓平, 方华军, 朱平, 任军, 王立春, 梁爱珍. RothC-26.3 模型模拟玉米连作下长期施肥对黑土有机碳的影响. 中国农业科学, 2003, 36(11): 1318-1324
- [15] 高鲁鹏, 梁文举, 姜勇, 闻大中. 利用 CENTURY 模型研究东北黑土有机碳的动态变化 I. 自然状态下土壤有机碳的积累. 应用生态学报, 2004, 15(5): 772-776
- [16] 韩冰, 王效科, 欧阳志云. 中国农田生态系统土壤碳库的饱和

- 水平及其固碳潜力. 农村生态环境, 2008, 28(2): 612-619
- [17] 杨靖民, 窦森, 杨靖一, Hoogenboom G, 姜旭, 张庆忠, 姜洪威, 贾丽慧. 基于DSSAT 模型的吉林省黑土作物-土壤氮循环和土壤有机碳平衡. 应用生态学报, 2011, 22(8): 2 075-2 083
- [18] 史奕, 陈欣, 闻大中. 东北黑土团聚体水稳定性研究进展. 中国生态农业学报, 2005, 13(4): 95-98
- [19] 韩贵清, 杨林章. 东北黑土资源利用现状及发展战略. 北京: 中国大地出版社, 2009: 7-9
- [20] 许信旺, 潘根兴, 汪艳林, 曹志宏. 中国农田耕层土壤有机碳变化特征及控制因素. 地理研究, 2009, 28(3): 601-612
- [21] Lal R. Soil carbon sequestration in China through agricultural intensification and restoration of degraded and desertified ecosystems. Land Degradation and Development, 2002, 13: 469-478
- [22] Wang GH, Han XZ, Nakayama N, Watanabe T, Watanabe A, Kimura M. Soil organic matter dynamics in lands continuously cultivated with maize and soybean in Heilongjiang Province, Northeast China: Estimation from natural ^{13}C abundance. Soil Science and Plant Nutrition, 2006, 52: 139-144
- [23] 辛刚, 颜丽, 汪景宽, 关连珠. 不同开垦年限黑土有机质变化的研究. 土壤通报, 2002, 33(5): 332-335
- [24] 韩晓增, 王守宇, 宋春雨, 乔云发. 土地利用/覆盖变化对黑土生态环境的影响. 地球科学, 2005, 25(2): 203-208
- [25] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, 方华军, 申艳, 李文凤. 东北黑土有机碳的分布及其损失量研究. 土壤通报, 2008, 39(3): 533-538
- [26] 赵丽娟, 韩晓增, 王守宇, 刘鸿翔, 李海波, 苗淑杰, 王凤. 黑土长期施肥及养分循环再利用的作物产量及土壤肥力变化IV. 有机碳组分的变化. 应用生态学报, 2006, 17(5): 817-821
- [27] 乔云发, 韩晓增, 苗淑杰, 李海波, 王树起. 黑土农田有机碳平衡与消长动态. 水土保持学报, 2008, 22(1): 96-99
- [28] 张璐, 张文菊, 徐明岗, 蔡泽江, 彭畅, 王伯仁, 刘骅. 长期施肥对中国3种典型农田土壤活性有机碳库变化的影响. 中国农业科学, 2009, 42(5): 1 646-1 655
- [29] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, Drury CF. 耕作方式对耕层黑土有机碳库储量的短期影响. 中国农业科学, 2006, 39(6): 1 287-1 293
- [30] 李海波, 韩晓增, 徐艳丽, 侯雪莹. 不同管理方式对黑土农田根际土壤团聚体稳定性的影响. 水土保持学报, 2008, 22(3): 110-115
- [31] Liu XB, Han XZ, Song CY, Herbert SJ, Xing BS. Soil organic carbon dynamics in black soils of China under different agricultural management systems. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2003, 34: 973-984
- [32] Liu XB, Liu JD, Xing BS, Herbert SJ. Effect of long-term continuous cropping, tillage and fertilization on soil organic carbon and nitrogen of black soils in China. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2005, 36: 1 229-1 239
- [33] 迟凤琴, 王鹤桥. 不同有机物料在黑土中的腐解及土壤有机质平衡的研究. 土壤通报, 1996, 27(3): 124-125
- [34] 乔云发, 苗淑杰, 韩晓增. 长期施肥条件下黑土有机碳和氮的动态变化. 土壤通报, 2008, 39(3): 545-548
- [35] Zhang WJ, Wang XJ, Xu MG, Huang SM, Liu H, Peng C. Soil organic carbon dynamics under long-term fertilizations in arable land of northern China. Biogeosciences, 2010, 7: 409-425
- [36] West TO, Six J. Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity. Climatic Change, 2007, 80: 25-41
- [37] 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. 土壤学报, 2002, 39(3): 351-360
- [38] Christensen BT. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. Advance in Soil Science, 1992, 20: 2-90
- [39] Baldock JA, Nelson PN. Soil organic matter // Sumner ME. Handbook of Soil Science. Boca Raton, FL, USA: CRC Press Inc, 1999: 25-84
- [40] 李云峰. 土壤腐殖质的研究(博士学位论文). 杭州: 浙江农业大学, 1996: 34-43
- [41] 孙宏德, 李军, 尚惠贤, 王柏涛, 宋钢. 黑土腐殖质含量和组成及其与肥力相关性的分析. 土壤通报, 1983(2): 8-9
- [42] 陈恩凤, 周礼恺, 邱凤琼, 严昶升, 高子勤. 土壤肥力实质的研究- I 黑土. 土壤学报, 1984, 21(3): 229-237
- [43] 李凯, 窦森. 不同类型土壤胡敏酸组成的研究. 水土保持学报, 2008, 22(3): 116-157
- [44] 张晋京, 窦森, 李翠兰, 王淑华. 土壤腐殖质分组研究. 土壤通报, 2004, 35(6): 706-709
- [45] 张晋京, 张大军, 窦森, 宋祥云. 田间定位施肥对土壤腐殖质组分数量与特性的影响. 土壤通报, 2006, 37(6): 1 243-1 246
- [46] Xing BS, Liu JD, Liu XB, Han XZ. Extraction and characterization of humic acids and humins from a black soil of China. Pedosphere, 2005, 15: 1-8
- [47] 窦森, 肖艳春, 张晋京. 土壤胡敏素各组分数量及结构特征初步研究. 土壤学报, 2006, 43(6): 934-940
- [48] 沈宏, 曹志宏, 胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应. 生态学杂志, 1999, 18(3): 32-38
- [49] Cookson WR, Abaye DA, Marschner P, Murphy DV, Stockdale E A, Goulding KWT. The contribution of soil organic matter fractions to carbon and nitrogen mineralization and microbial community size and structure. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37: 1 726-1 737
- [50] 王晶, 朱平, 张男, 解宏图, 张旭东. 施肥对黑土活性有机碳和碳库管理指数的影响. 土壤通报, 2003, 34(5): 394-397

- [51] 李海波, 韩晓增, 王风, 乔云发. 不同土地利用下黑土密度分组中碳、氮的分配变化. 土壤学报, 2008, 45(1): 112-119
- [52] 吕贻忠, 丛巍巍, 廉晓娟. 不同耕作措施对黑土腐殖酸组成与红外光谱特性的影响. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(10): 2642-2645
- [53] 赵红, 郑殷恬, 吕贻忠, 袁丽伟, 曾宪楠. 免耕与常规耕作下黑土腐殖酸含量与结构的差异. 生态环境学报, 2010, 19(5): 1238-1241
- [54] 窦森. 土壤有机培肥后胡敏酸结构性性质变化规律的系统研究 (博士学位论文). 长春: 吉林农业大学, 1988
- [55] 窦森, 陈恩凤, 须湘成, 张继宏. 施用有机肥料对土壤胡敏酸结构特征的影响—胡敏酸的光学性质. 土壤学报, 1995, 32(1): 41-49
- [56] 刘淑霞, 刘景双, 王金达, 于君宝, 魏丽红. 用 ^{13}C 法研究黑土有机碳组分的变化规律. 水土保持学报, 2004, 18(3): 71-73
- [57] 肖彦春, 李凯, 窦森. 黑土底土加入大比例玉米秸秆后胡敏素组分的变化. 水土保持学报, 2007, 21(3): 61-64
- [58] 高洪军, 窦森, 朱平, 曾范, 彭畅, 曲晓晶. 长期施肥对黑土腐殖质组分的影响. 吉林农业大学学报, 2008, 30(6): 825-829
- [59] 徐金忠, 孟凯, 崔晓阳, 冯军, 宋金凤. 不同施肥处理对黑土腐殖质组成的影响. 东北林业大学学报, 2009, 37(11): 84-85
- [60] Han XZ, Wang SY, Veneman PLM, Xing BS. Change of organic carbon content and its fractions in black soil under long-term application of chemical fertilizers and recycled organic manure. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2006, 37: 1127-1137
- [61] 张迪, 韩晓增, 李海波, 宋春, 侯雪莹. 不同植被覆盖与施肥管理对黑土活性有机碳及碳库管理指数的影响. 生态与农村环境学报, 2008, 24(4): 1-5
- [62] 方华军, 杨学明, 张晓平, 梁爱珍, 申艳. 坡耕地黑土活性有机碳空间分布及生物有效性. 水土保持学报, 2006, 20(2): 59-63
- [63] 张明, 白震, 张威, 丁雪丽, 宋斗妍, 朱俊丰, 朱平. 长期施肥农田黑土微生物量碳、氮季节性变化. 生态环境, 2007, 16(5): 1498-1503
- [64] 宋日, 吴春胜, 牟金明, 姜岩, 郭继勋. 玉米根茬留田对土壤微生物量碳和酶活性动态变化特征的影响. 应用生态学报, 2002, 13(3): 303-306
- [65] 王晶, 解宏图, 张旭东, 朱平, 王陆玲. 施肥对黑土土壤微生物生物量碳的作用研究. 中国生态农业学报, 2004, 12(2): 118-120
- [66] 李东坡, 武志杰, 陈利军, 朱平, 任军, 彭畅, 梁成华. 长期培肥黑土微生物量碳动态变化及影响因素. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1334-1338
- [67] 王继红, 刘景双, 于君宝, 王金达. 氮磷肥对黑土玉米农田生态系统土壤微生物量碳、氮的影响. 水土保持学报, 2004, 18(1): 35-38
- [68] 隋跃宇, 张兴义, 焦晓光. 不同施肥制度对玉米生育期土壤微生物量的影响. 中国生态农业学报, 2007, 15(3): 52-54
- [69] 隋跃宇, 焦晓光, 高崇生, 程伟, 张兴义, 刘晓冰. 土壤有机质含量与土壤微生物量及土壤酶活性关系的研究. 土壤通报, 2009, 40(5): 1036-1039
- [70] 张彬, 白震, 解宏图, 张旭东, 张晓平, 时秀焕. 保护性耕作对黑土微生物群落的影响. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 83-88
- [71] 解宏图, 李维福, 郑立臣. 东北黑土活性有机碳、氮分布研究. 土壤通报, 2008, 39(2): 249-253
- [72] 李执强, 汪景宽, 曹宏杰, 李双异, 于树. 水热梯度变化及不同施肥处理对东北地区土壤轻组有机碳、氮的影响. 土壤通报, 2009, 40(5): 1014-1017
- [73] 申艳, 张晓平, 梁爱珍, 方华军, 杨学明. 坡耕地黑土不同密度的土壤有机碳组分的空间分布特征. 土壤通报, 2008, 39(5): 1023-1029
- [74] 张迪, 韩晓增. 长期不同植被覆盖和施肥管理对黑土活性有机碳的影响. 中国农业科学, 2010, 43(13): 2715-2723
- [75] 芦思佳, 韩晓增, 尤孟阳, 朱巍巍. 施肥对黑土密度分组中碳、氮的影响. 水土保持学报, 2011, 25(2): 177-180
- [76] 刘淑霞, 王宇, 赵兰坡, 刘景双, 秦治家. 冻融作用下黑土有机碳数量变化的研究. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 984-990
- [77] 郑立臣, 解宏图, 张威, 张旭东. 秸秆不同还田方式对土壤中溶解性有机碳的影响. 生态环境, 2006, 15(1): 80-83
- [78] 王连峰, 蔡延江, 张喜林, 解宏图, 张旭东. 长期不同施肥制度下的黑土热水提取态有机碳的变化. 土壤通报, 2009, 40(2): 262-266
- [79] 梁尧, 韩晓增, 宋春, 李海波. 不同有机物料还田对东北黑土活性有机碳的影响. 中国农业科学, 2011, 44(17): 3565-3574
- [80] 方华军, 杨学明, 张晓平, 梁爱珍, 申艳. 东北黑土区坡耕地表层土壤颗粒有机碳和团聚体结合碳的空间分布. 生态学报, 2006, 26(9): 2847-2853
- [81] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, 申艳, 时秀焕, 范如芹, 方华军. 黑土颗粒态有机碳与矿物结合态有机碳的变化研究. 土壤学报, 2010, 47(1): 153-158
- [82] 方华军, 杨学明, 张晓平, 梁爱珍, 申艳. 黑土坡耕地侵蚀和沉积对物理性组分有机碳积累与损耗的影响. 土壤学报, 2008, 44(3): 467-474
- [83] 安婷婷, 汪景宽, 李双异, 于树, 朱平. 施用有机肥对黑土团聚体有机碳的影响. 应用生态学报, 2008, 19(2): 369-373
- [84] 李维福, 解宏图, 白震, 陈盈, 闫颖, 张旭东. 长期施肥对黑土颗粒有机质的分布及其碳、氮含量的影响. 土壤通报, 2009,

- 40(2): 267–271
- [85] 梁尧, 韩晓增, 王凤菊, 王凤仙. 草地和农田生态系统中黑土活性有机碳的特征. 土壤通报, 2011, 42(4): 864–871
- [86] 郝翔翔, 窦森, 安丰华, 李明敏. 不同利用方式下土壤团聚体腐殖质组成及胡敏酸结构特征. 水土保持学报, 2010, 24(5): 248–252
- [87] 关连珠, 张伯泉, 颜丽. 不同肥力黑土、棕壤各级微团聚体组成及其胶结物质的研究. 土壤学报, 1991, 22(1): 55–60
- [88] 李凯, 窦森, 韩晓增, 陈辉, 周桂玉. 长期施肥对黑土团聚体中腐殖物质组成的影响. 土壤学报, 2010, 47(3): 579–583
- [89] Spaccini R, Mbagwu JSC, Conte P, Piccolo A. Change of humic substances characteristics from forested to cultivated soils in Ethiopia. Geoderma, 2006, 132: 9–19
- [90] 窦森. 土壤有机质. 北京: 科学出版社, 2010: 88–98
- [91] Hatcher PG, Dria KJ, Kim S, Frazier SW. Modern analytical studies of humic substances. Soil Science, 2001, 166(11): 770–794
- [92] Abbt-Braun G, Lankes U, Frimmel FH. Structural characterization of aquatic humic substances—the need for a multiple method approach. Aquatic Sciences, 2004, 66(2): 151–170
- [93] 张晋京, 窦森. 土壤胡敏素研究进展. 生态学报, 2008, 28(3): 1229–1239
- [94] 窦森, 陈恩凤, 须湘成, 谭世文, 张继宏. 土壤有机培肥后胡敏酸结构特征变化规律的探讨 I. 胡敏酸的化学性质和热性质. 土壤学报, 1992, 29(2): 199–207
- [95] 窦森. 不同来源胡敏酸的结构表征. 吉林农业大学学报, 1989, 11(2): 50–56
- [96] 李凯. 土壤胡敏素组成及其对不同氧气和二氧化碳浓度的响应(硕士学位论文). 长春: 吉林农业大学, 2006
- [97] 张晋京, 张大军, 窦森, 宋祥云. 田间定位施肥对土壤腐殖质组分数量与特性的影响. 土壤通报, 2006, 37(6): 1243–1246
- [98] 梁重山, 党志, 刘丛强. 胡敏酸的结构特征及其吸附行为. 分析化学, 2006, 34(3): 288–292
- [99] 肖彦春, 窦森. 土壤腐殖质各组分红外光谱研究. 分析化学, 2007, 35: 1596–1600
- [100] 张晋京, 窦森, 朱平, 高洪军, 宋祥云, 王立春. 长期施用有机肥对黑土胡敏素结构特征的影响—固态 ^{13}C 核磁共振研究. 中国农业科学, 2009, 42(6): 2223–2228
- [101] 窦森, 华士英, 朱涛. 胡敏酸的 ^{13}C -核磁共振研究. 高等学校化学学报, 1990, 11(7A): 768–770
- [102] Dou S, Zhang JJ, Li K. Effect of organic matter applications on ^{13}C -NMR spectra of humic acids of soil. European Journal of Soil Science, 2008, 59: 532–539
- [103] 吴景贵, 王明辉, 姜亦梅, 吴江. 核磁共振波谱法研究玉米植株残体培肥对土壤胡敏酸的影响. 农业环境科学学报, 2005, 24(5): 892–898
- [104] 肖彦春, 李凯, 窦森. 黑土底土加入大比例玉米秸秆后胡敏素组分的变化. 水土保持学报, 2007, 21(3): 61–64
- [105] 吕貽忠, 丛巍巍, 廉晓娟. 不同耕作措施对黑土腐殖酸组成与红外光谱特性的影响. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(10): 2642–2645
- [106] 赵红, 郑殷恬, 吕貽忠, 袁丽伟, 曾宪楠. 免耕与常规耕作下黑土腐殖酸含量与结构的差异. 生态环境学报, 2010, 19(5): 1238–1241

Review of Soil Organic Matter Fractions and Structure of Black Soil in Northeast China

LIANG Yao^{1,2}, HAN Xiao-zeng¹, DING Xue-li¹

(1Key Laboratory of Mollisols Agroecology, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In the case of global climate change, it is essential to study the transformation process of soil organic matter (SOM) for improving the potential of terrestrial carbon sequestration. SOM cycle and stabilization are significantly related to its fractions and structure characteristics. Black soil in northeast China is well known of its high SOC stocks, it plays a crucial role in national food production. Recently, SOM content of black soil decreased dramatically, which resulted in the degradation of soil fertility and quality. The current advances of SOM dynamics, fractions and structure of black soil in northeast China as influenced by different agricultural managements were reviewed in this paper, and the further researches on SOM of black soil were also discussed. It showed that reclamation and tillage resulted in total SOM content, labile fractions and humic substance decreased markedly, the content and quality of SOM promoted as the application of optimum chemical fertilizer and organic manure, and SOM structure became simpler with long-term application of chemical fertilizer plus organic manure, which was positive to increase soil fertility. The mechanism of change on SOM fractions and its structure need to be further understood.

Key words: Black soil, Soil organic matter, Dynamic, Fractions, Structure