

DOI: 10.5846/stxb201301050036

余健, 房莉, 卞正富, 汪青, 俞元春. 土壤碳库构成研究进展. 生态学报, 2014, 34(17): 4829-4838.

Yu J, Fang L, Bian Z F, Wang Q, Yu Y C. A review of the composition of soil carbon pool. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(17): 4829-4838.

土壤碳库构成研究进展

余 健^{1,2,3}, 房 莉^{2,3}, 卞正富^{1,*}, 汪 青^{2,3}, 俞元春⁴

(1. 中国矿业大学环境与测绘学院, 徐州 221116; 2. 安徽师范大学国土资源与旅游学院, 芜湖 241003;
3. 安徽省自然灾害过程与防控省级实验室, 芜湖 241003; 4. 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037)

摘要: 土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库。土壤碳库的构成影响其累积和分解, 并直接影响全球陆地生态系统碳平衡, 同时也影响土壤质量变化。弄清土壤碳库的组分及构成, 是进一步研究土壤碳库变化机制的关键。综述了土壤碳库的组分和构成, 对有机碳库进行不稳定性有机碳库和稳定有机碳库归类, 描述各类碳库的性质, 并对各类碳库的分析测定方法进行了评述。提出在土壤碳库构成中增加黑碳和煤炭(碳)以完善土壤有机碳构成框架。在未来研究中, 应加强土壤无机碳及湿地土壤和新开发新复垦的重构土壤碳库构成及变化, 各类碳库化学构成, 交叉重叠的定量关系, 碳库之间的转化及在土壤中的迁移, 黑碳对土壤碳库稳定性及土壤质量的影响, 煤开采扰动区煤炭(碳)对土壤质量的影响及环境效应等科学问题的研究。

关键词: 土壤碳库; 构成; 有机碳; 活性碳; 稳定性有机碳; 无机碳

A review of the composition of soil carbon pool

YU Jian^{1,2,3}, FANG Li^{2,3}, BIAN Zhengfu^{1,*}, WANG Qing^{2,3}, YU Yuanchun⁴

1 College of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

2 College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China

3 Anhui Key Laboratory of Natural Disaster Process and Prevention, Wuhu 241003, China

4 College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

Abstract: The soil carbon pool is the biggest one in the terrestrial ecosystem. The composition of soil carbon pool influences carbon accumulation and decomposition, and directly controls global terrestrial carbon balance, and influences soil quality. Making clear the constitutes of soil carbon pool is the key process in revealing the mechanism of soil carbon pools change. This paper overviewed the structure and composition of the soil carbon pools. Soil carbon pools include soil inorganic carbon pool and soil organic carbon pool. Soil inorganic carbon pool includes HCO_3^- in soil solution, CO_2 in soil air, and CaCO_3 in soil. And CaCO_3 is the main component in soil inorganic carbon pool. Soil inorganic carbon pool can influence soil organic carbon pool by affecting composition of soil aggregates, microbial activity, soil pH, and soil organic matter decomposition rate. Soil organic carbon is a very complex continuous mixture, which includes a variety of organic carbon fractions and forms with different nature. And the content of all kind of soil organic carbon affects the transformation of soil carbon pool and thereby influences soil quality and carbon cycle in terrestrial ecosystem. Soil organic carbon pools are categorized into soil labile organic carbon pool and soil stable organic carbon pool. Among them, soil labile organic carbon can turnover within a certain time, and can be utilized by plant and microorganism, and have a major impact on the carbon balance. Soil labile organic carbon is also named soil activated organic carbon or effective carbon by some authors, and includes terms as available carbon (AC), dissolved organic carbon (DOC), water soil organic carbon (WSOC), readily oxidation carbon

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101529, 41101502, 31270664); 自然地理学省级重点学科和安徽师范大学国土资源与旅游学院科研团队资助项目(Asdgl102); 安徽师范大学科研培育基金项目(2010xmpy015)

收稿日期: 2013-01-05; **网络出版日期:** 2014-03-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zfbian@126.com

(ROC), microbial biomass carbon (MBC), biodegradable carbon, light fraction organic carbon (LFOC), particulate organic carbon (POC) and so on. Black carbon (BC) and coal carbon are suggested to be categorized into soil organic carbon pool to perfect the frame of soil organic carbon pool composition. Black carbon is a C-rich organic material derived from incomplete combustion of fossil fuels and vegetation and from weathering of graphitic C in rocks, and very stabile. Black carbon captures and sequesters carbon from the bio-atmospheric cycle, which, in the long term, reduces greenhouse gas emissions and thus mitigates the greenhouse effect. Meanwhile, resistant black carbon amendment increase soil organic matter, thus regulating soil structure and enhancing soil fertility. Because of its high adsorption capacity, black carbon adsorbs organic pollutants, heavy metals, nutrients to decrease ecosystem risk. The coal (carbon) in the surface layer soil mainly come from outside source; include garbage, filling, atmospheric sedimentation and so on. The coal mine area is usually the district absorbing the most coal (carbon). In future studies, we should strengthen the researches on the scientific issues including the chemical composition, overlapping quantitative relationship of the soil organic carbon pools, transformation and migration of soil organic carbon in the soil, the impact of black carbon on the stability of the soil carbon pool and soil quality, the impact of coal (carbon) on soil quality and environmental effects in the coal mining disturbed zone, and organic carbon change and mechanism in newly developed soil, reclamation soil and reconstruction soil.

Key Words: soil carbon; composition; organic carbon; active organic carbon; stable organic carbon; inorganic carbon

土壤碳库一直以来都是国内外学者关注的对象。早期的研究重点关注土壤有机质(碳)及其在土壤肥力中的作用,如对土壤养分、土壤结构、土壤保水保肥方面的意义。上世纪末开始关注土壤有机质(碳)对土壤中的污染物的缓冲和降解作用,关注土壤固碳及土壤碳转化和碳循环对全球气候变化的影响等。研究表明,陆地土壤是地球表面最大的碳库,全球土壤碳库达到 $2.2 \times 10^3 - 3 \times 10^3$ Pg,为植被碳库的 2—3 倍,是全球大气碳库的 2 倍^[1-2]。土壤覆盖面广,是陆地生态系统中碳的重要的“源”和“汇”^[2]。土壤碳库小幅度的变化就可能影响全球碳平衡,导致全球气候变化,进而对陆地生态系统的分布、组成、结构和功能产生深刻影响^[3]。近年来,国内外学者在土壤碳库构成及其转化方面加强了研究,土壤碳库构成研究是探知土壤对碳的固定能力和土壤碳库变化内部机制的重要环节,也是进一步探讨土壤有机碳影响土壤质量的内在机理的重要途径。

一般认为,土壤碳库由土壤有机碳库和无机碳库两部分组成。土壤无机碳库通过影响土壤团聚体的状况、微生物活性、土壤 pH、有机质的分解速率,进而影响土壤有机碳库^[4];土壤有机碳库分解释放 CO_2 进入土壤溶液转化为无机碳^[5]。土壤有机碳是非常复杂的连续混合物,存在多种有机碳组分和形式,各类有机碳的性质不尽相同,在土壤碳库中的含

量影响着土壤碳的转化,进而影响土壤质量变化及陆地生态系统碳循环。

1 土壤无机碳库

土壤无机碳库也是土壤碳库的重要组成部分。潘根兴认为土壤无机碳库包括土壤溶液中 HCO_3^- 、土壤空气中 CO_2 及土壤中淀积的 CaCO_3 ,后者多以结核状、菌丝状存在于土壤剖面,土壤无机碳以 CaCO_3 占绝对优势^[6]。早期对无机碳的研究不多,只作为土壤调查的一个环节,通过土壤石灰反应,来大致判定土壤剖面的酸碱状况,21 世纪初开始关注无机碳对土壤质量及土壤有机碳的影响,关注无机碳库储量及其转化。土壤无机碳主要存在于干旱土壤中,研究认为干旱土壤中无机碳含量可达有机碳含量的 5 倍,全球约有 40% 的干旱土地,而我国西北干旱区土壤的无机碳相当于全球的 1/20—1/15^[5-7]。土壤无机碳受气候变化与人类活动的影响,参与碳循环,进而影响全球温室效应,因此土壤无机碳库研究对于土壤碳库计算及碳循环研究是必不可少的^[8-9]。Wu 和 Guo 等根据土壤中无机碳的来源,进行将土壤的无机碳库分为成岩性无机碳和成土性无机碳^[9]。土壤中的游离碳酸钙影响土壤团聚体的状况、微生物活性、土壤 pH、有机质的分解速率,进而影响土壤有机碳库^[4]。

在土壤无机碳变化方面,一些研究发现化肥、有

机肥长期配合施用和长期施用有机肥可以在 0—30 cm 土层增加土壤有机碳含量,降低土壤中的无机碳含量,而长期单施化肥对土壤的有机碳和无机碳含量无明显差异^[10]。对旱地土壤而言,人为地表覆盖一般不会对土壤中无机碳产生明显影响^[11]。半干地区栗钙土不同利用方式的土壤剖面上无机碳含量不一样,可能与土壤侵蚀引起的碳酸盐再分布有关^[7]。土壤有机碳对碳酸盐的溶蚀具有驱动作用^[6]。Wang 和 Li 等^[12]研究认为土壤退化过程中随土壤退化的加剧,土壤中无机碳密度增大。一些研究也表明土壤有机碳在一定条件下会向无机碳转化^[13],甚至认为土壤中有有机碳经过百千万年后会慢慢全部退化为无机形态^[14]。由土壤有机碳 (soil organic carbon, SOC) 分解产生的 CO_2 溶解于水后,可以由溶液转化为重碳酸根而最终转化为重沉淀的碳酸盐碳。即 $\text{SOC} \rightarrow \text{CO}_{2(\text{g})} \rightarrow \text{CO}_{2(\text{aq})} \rightarrow \text{HCO}_3^- (\text{aq}) \rightarrow \text{CaCO}_{3(\text{s})}$ 。参与反应的 CO_2 除了来于土壤中有有机碳的矿化外,应该还有来自大气中的 CO_2 。土壤无机碳的形成与周转可能将大气 CO_2 、土壤有机碳分解的释放的 CO_2 以碳酸盐的形成封存于地下,进而减少向大气释放,降低了大气中 CO_2 浓度,减轻大气容纳 CO_2 压力。潘根兴也认为中国干旱性土壤中碳酸盐可能每年截储 $1.5 \times 10^6 \text{ t}$ 的大气碳^[5]。

2 土壤有机碳库

土壤有机碳库组分较为复杂,根据其稳定性可将其分为不稳定有机碳库和稳定性有机碳库,不稳定有机碳是一种有效碳,在调节土壤养分流向方面有重要作用,不仅对农业生产措施反应灵敏,而且与土壤潜在生产力关系密切,而稳定性有机碳只影响土壤性质^[15-16]。

2.1 土壤不稳定有机碳库

土壤不稳定有机碳是土壤中可在一定时间内发生周转或转化,可为植物和微生物利用,且对碳平衡有重要影响的那部分有机碳。因此,学者也将其称为活性有机碳或有效碳^[17]。沈宏等把在一定的时空条件下,受植物、微生物影响强烈、具有一定溶解性、在土壤中移动比较快、不稳定、易氧化、分解、易矿化,其形态、空间位置对植物、微生物来说活性比较高的那部分碳认为是土壤活性有机碳^[17]。国外描述活性碳的术语为有效碳^[18]、溶解性有机碳^[19]、

易氧化碳、易矿化碳^[19-21]、生物可降解碳、活性碳、微生物量碳^[22]、轻组有机碳、颗粒有机碳等^[23]。

2.1.1 土壤微生物量碳

土壤微生物量碳 (MBC) 是指土壤中体积在 $5-10 \mu\text{m}^3$ 之间的活的微生物体中所含的有机碳^[24],这部分微生物是土壤有机质中最活跃的和最易变化的部分。土壤微生物量、微生物种群活动、土壤酶活性等土壤微生物学性质常被用于预测土壤的生物学作用及人类干扰对土壤质量的影响^[25]。土壤的许多功能是由土壤中的活的有机体来实现的,土壤生物学健康是土壤质量的一个重要方面^[26]。土壤中微生物量碳与土壤总有机碳的比率是判断土壤微生物群体健康的一个指标,是土壤微生物对碳的可获得性、碳损失和土壤碳稳定性的重要指标^[27]。土壤微生物量碳的测定目前广泛应用的方法包括:氯仿薰蒸培养法 (FI)、氯仿薰蒸浸提法 (FE)、基质诱导呼吸法和精氨酸诱导氨化法等,每种方法各有其优点、缺点和适用范围及条件^[24]。

2.1.2 土壤易氧化碳

土壤易氧化碳 (ROC) 是土壤中最易氧化分解的那部分有机碳。在农业可持续发展的系统研究中,土壤碳库容量的变化,主要是发生在土壤易氧化有机碳库中的,所以认为这一活性指标对衡量土壤有机质的敏感性要优于其它农业变量,可以指示土壤有机碳的早期变化^[22]。土壤易氧化碳的测定目前还没有统一的方法。袁可能将土壤有机碳中能被 $0.2 \text{ mol/L K}_2\text{CrO}_7-1:3 \text{ H}_2\text{SO}_4$ 混合液在 $130-140^\circ\text{C}$ 下氧化的部分碳称为易氧化有机碳^[28]。徐建民、沈宏等^[29-30]曾应用这个定义研究土壤易氧化有机碳。Loginow^[15]、Lefroy^[31] 和 Blair^[16] 先后应用 KMnO_4 溶液氧化土壤有机碳,并将被 333 mmol/L 的 KMnO_4 溶液氧化那部分碳称为不稳定有机碳 (Labile Organic Carbon)。在相继研究中,部分学者将这种方法测得的土壤有机碳称为易氧化碳^[32]。Wei 和 Islam 等^[33]认为 333 mmol/L 的 KMnO_4 溶液浓度太高,实验过程直接比色较困难,而且会过多氧化土壤中的有机碳 (达总有机碳含量的 $14\%-27\%$),远大于土壤中的最不稳定的部分有机碳,提出采用轻度碱性 (0.1 mol/L CaCl_2) 的稀释 (0.02 mol/L) KMnO_4 溶液来氧化土壤有机碳中最易被氧化的部分有机碳,实验室和野外现场测定都能取得较好效果 ($R^2 = 0.98$)。

Tirol-Padre 等^[34] 和张迪等^[35] 应用这种方法进行了研究,并将所测定的碳称为土壤易氧化碳。笔者认为 Wei 等的方法简便、快捷、有效,测定的土壤有机碳组分更能代表易氧化的最不稳定的那部分有机碳。

2.1.3 溶解性有机碳

土壤溶解性有机碳(DOC)是可溶于水或稀盐溶液的那一部分土壤有机碳。土壤水溶性有机碳(WSOC)包括常温水溶性有机碳和热水溶性有机碳,后者通常大于前者,主要为芳香性氨基酸、富里酸和具有高度共轭体系的聚环芳香结构^[36]。稀盐溶液提取有机碳,被部分学者称为溶性有机碳(DOC),由一些腐殖酸组成^[37]。WSOC 和 DOC 是土壤中各种养分及环境污染物移动的载体因子,对土壤的 C、N、P、S 及污染物的迁移转化起着重要的作用^[22]。Zak 发现土壤的 DOC 与土壤的生物量碳高度相关^[38],可以作为微生物生长和生物分解速效养分资源的一个指标。DOC 的淋失是土壤碳损失的重要途径,因此它对于研究碳素循环及其环境问题具有重要意义。

2.1.4 生物可降解碳

土壤生物可降解碳也称为可矿化碳或易矿化碳^[17],主要利用微生物分解有机物质,测定 CO₂ 的释放量或专性呼吸率来求得^[39]。一般采用人为添加葡萄糖,进行室内培养测定 CO₂ 专性吸附率,再根据米氏公式求得,操作虽然繁琐,但结果准确^[40]。CO₂ 专性吸附率用来反映土壤可矿化碳,它也是一种生理生态指数,是联系环境胁迫、土壤肥力高低、耕种时间长短及其连续性的纽带,不同专性吸附率反映不同区系的微生物活性^[39]。土壤有效碳能很好地反映土壤碳素的有效形态,与土壤生物量极显著相关,是土壤活性有机碳库大小的实际估计^[40]。

2.1.5 轻组有机碳

轻组有机碳(LFOC)是存在于土壤中的轻组有机质中的有机碳。轻组有机质一般认为是土粒密度小于 118—210 g/cm³ 组分中的土壤有机质,包括游离腐殖酸和植物残体及其腐解产物等,周转期 1—15a,是植物残体分解后形成的一种过渡有机质库^[41];除一些植物残体及其中间产物外,还包括孢子、种子、动物残体、微生物的残骸以及一些吸附在碎屑上的矿质颗粒^[42];通过核磁共振技术分析轻组

分的化学成分发现,轻组分含有丰富的木质素二聚物、油脂、固醇、软木脂和脂肪酸^[43],主要是植物材料和腐殖质之间的有关糖类化合物、氨基酸的中间产物^[44]。轻组有机碳代表了中等分解速度的有机碳库^[45]或易变有机碳的主要部分^[41],在 C 和 N 循环中起显著作用,具有很强的生物活性,是土壤养分的重要来源^[46],被认为是土壤生物调节的重要和土壤肥力的指标,是衡量土壤质量的一个重要属性之一^[41]。在实验室分析中,采用 1.7—1.8 g/cm³ 重液分离出轻组有机碳组分,再用化学法^[47]或仪器^[48]测定轻组有机碳含量。国内外常用多钨酸钠^[48]或碘化钠^[11]来制备重液,也有学者采用溴仿-乙醇^[49]或氯化钙^[50]来制备。

2.1.6 颗粒有机碳

颗粒有机碳(POC),周转期 5—20a,是与砂粒结合(53—2000 μm)的有机碳部分,属于有机碳库中的慢碳库,这个库中有机碳主要来源于分解速度中等的植物残体分解产物^[45],并与土壤团聚体有机结合^[50]。吴建国等认为土壤中颗粒有机碳和轻组有机碳是土壤有机碳中分解相对快的部分^[51]。颗粒态有机碳是新鲜有机质向腐殖质转化中的过渡成分,属于土壤有机碳库中的相对易分解、生物活性较高的组分^[52],这部分有机碳也被认为是有机碳中的非保护性部分^[49]。土壤中颗粒有机碳对耕作管理措施变化反应敏感,极易因耕作管理措施的变化而快速丧失^[50],秸秆和绿肥的施用可以增加颗粒有机碳含量及其固定率^[53]。土壤颗粒有机碳的测定常用 53 μm 土筛来做分选^[52],或采用 5 g/L 六偏磷酸钠溶液分离^[47],再用化学法或仪器分析大于 53 μm 部分的有机碳含量。

2.2 土壤稳定性有机碳库

土壤稳定性有机碳库是与土壤活性有机碳库相对的一种碳库,它的稳定性强,包括以下一些术语,如“惰性”有机碳、矿物结合态有机碳、重组有机碳、煤炭(碳)等^[19-21,45],对于土壤总碳库的稳定、土壤结构的形成具有重要意义。

2.2.1 “惰”性有机碳

土壤惰性有机碳是在土壤中相对稳定性较高,不容易被微生物分解和植物利用的有机碳,它对农田管理措施反应不敏感,也是土壤肥力高低的一个重要指标^[54-55]。土壤惰性有机碳主要是土壤碳库中

的腐殖物质^[54]。作为稳定土壤碳库的腐殖质是通过微生物作用形成复杂、较稳定的大分子有机化合物^[56],是土壤有机质的主要组成部分,一般占有机质总量的 50%—70%^[57]。由于它具有胶体特性,能吸附较多的阳离子,因而使土壤具有保肥力和缓冲性,它还能使土壤疏松和形成结构体,从而改善土壤的物理性质,是土壤健康的重要保障^[58]。土壤腐殖质根据其在酸碱溶液中的溶解度分胡敏酸、富里酸和胡敏素 3 部分,而主要成分是胡敏酸和富里酸,二者的比例常常作为进一步说明土壤肥力的指标^[59]。长期不施肥或施用化肥对土壤腐殖质含量影响不大,施用有机肥可显著增加腐殖质含量^[57];秸秆还田和耕作可增加耕作层松结态腐殖质含量,扰动可增加土壤的腐殖化度^[60]。

2.2.2 矿物结合态有机碳

矿物结合态有机碳(MOM-C < 53 μm)多是腐殖化的有机物质,同时受土壤黏粒和粉粒保护,因此相对稳定,耕作方式变化相对增加的那部分有机碳可以长时间保存,对土壤有机碳的稳定起着重要作用^[61]。土壤矿物结合态有机碳与颗粒有机碳和团聚体结合碳之间存在密切关系,从而影响土壤有机碳的动态变化^[62]。矿物结合态有机碳可以稳定土壤有机碳库,从大的景观尺度和时间尺度来看,土壤有机碳的转化和储量的大的变化可能归因于矿物结合态有机碳的变化^[14]。土壤耕作过程中新进入的有机碳不会完全分解,累积的碳 80% 以上转化为大团聚体中矿物结合态组分^[63]。

2.2.3 重组有机碳

重组有机碳(HFOC)是与轻组有机碳相对的一种稳定有机碳类型,其主要成分是矿质颗粒^[64]。重组中的有机碳主要吸附在矿物表面或隐蔽在土壤微团聚体内部,与不同粒级的矿物颗粒紧密结合,形成有机-无机复合体,从而使其矿化速率大为减慢^[64-65]。因此,重组有机碳对土壤管理和作物系统变化的反应比较轻组有机碳(LFOC)慢,但它反映了土壤保持有机碳的能力^[64]。以往的研究将大部分与粗粉砂粒(20—50 μm)、细粉砂粒(2—20 μm)、粗粘粒(0.2—2 μm)和细粘粒(< 0.2 μm)结合的 C 分在了重组分中^[48,64]。长时间的耕作干扰会引起重组有机碳的比率变化,可能是土壤侵蚀造成重组有机碳的损失,也有可能是有机碳在轻组分和重组分

间存在不同分配或重组中有机碳与矿质颗粒结合存在差异造成^[65]。部分学者研究表明土壤重组有机碳与土壤微生物量关系密切^[66]。

2.2.4 煤炭(碳)

煤是植物死亡、堆积并发生成煤作用后的产物。成煤过程可分为泥炭化作用(腐泥化作用)和煤化作用两个阶段,形成腐植煤或腐泥煤或褐煤,进一步形成烟煤和无烟煤^[67]。煤炭的主要成分为腐殖质,是一种晶质状腐殖质^[68]。烟煤和无烟煤具有较强的稳定性。腐植煤、腐泥煤和褐煤一般认为是未完全成形的煤产物,较烟煤和无烟煤稳定性差,含有大量的腐殖酸类物质,目前已经大量用于制备腐殖酸肥料和吸附材料。长期裸露的煤,受风化或氧化作用,其组成、物理化学性质均会发生变化,这种经过风化的煤称为风化煤^[69]。风化煤进一步风化,碳含量和氢含量减少,氧含量增加,含氧酸性官能团增加,产生再生腐殖酸。目前部分学者已经开始对风化煤的应用价值进行研究,在改良土壤方面也开始有一些尝试^[70]。表层土壤中煤炭主要是外源输入,目前混入煤炭粒较多的土壤主要是煤矿区土壤。煤矿区采煤倾倒入及运煤过程中产生大量的煤灰颗粒随大气运动扩散到矿区的各个区域并沉降到土壤中,这一部分煤粒主要是较细的颗粒,往往表现为距产煤出口和运煤道路越近,土壤中煤粒含量越高。另一种煤粒进入土壤的途径是目前在矿区采煤塌陷地煤矸石或粉煤灰充填复垦引入的煤粒,这部分煤粒有的随矸石充填掩埋到一定深度,有的则随机分布在复垦土壤剖面中。这些进入土壤中的煤粒(碳)可能会进一步风化分解并进入到陆地生态系统的碳循环,也可能对土壤质量产生一定影响。

3 黑碳

黑碳是生物质或化石燃料不完全燃烧^[71]或者岩石风化^[72]的产物,是一种非纯净碳的混合物。它由一系列燃烧产生的高芳香化碳、元素态碳或石墨化碳构成,是土壤腐殖质中高度芳香化结构组分的来源,可以稳定土壤有机碳库,是构筑可持续利用土壤的前提^[73]。生物质不完全燃烧产生的黑碳包括一系列物质,如轻微炭化的生物质、炭化物质、木炭、烟炱、石墨态黑碳^[72-73]。其中烟炱也可能由化石燃料不完全燃烧产生^[71];石墨态黑碳也可能由含石墨

岩石风化产生^[72]。早期,黑碳被认为是几乎不可降解的^[73],但是近来有许多证据表明黑碳是可以降解的,但降解缓慢^[74]。由于黑碳的稳定性和相对漫长的降解过程,以黑碳形式存在的碳和氮(主要表现为芳香环结构和杂环氮结构^[74])得以长期保存,从而退出地-气快速循环。近年来易降解有机碳在黑碳降解过程中的促进作用正受到越来越多的关注。Hamer 等^[75]将玉米黑碳与沙混合培养,并添加 C¹⁴ 标记的易降解有机物葡萄糖,经 60 d 的对比培养实验研究发现,对照组玉米黑碳矿化率为 0.8%,添加葡萄糖组提高到 1.2%。Cheng 等^[76]对黑碳和黑碳-土壤混合物分别进行培养,并添加粪肥,结果表明,添加粪肥使黑碳的碳含量比对照组降低、氢和氧含量增加,促进了黑碳的降解。黑碳是近来研究的热点问题,它的降解已经被众多的研究证明是存在的,但其降解速率是相当缓慢的,因此部分专家将黑碳列为稳定性有机碳类,但究竟将其列为何种类型的有机碳,目前还没有统一或一致接受的观点。

4 研究述评

土壤碳库变化与土壤碳库构成特征密切相关,充分了解土壤碳库构成及其对土地利用的响应,弄清土壤碳库与 CO₂ 吸附与排放相关关系,有助于合理利用土地,实现土地的可持续利用。从国内外对土壤碳库及其构成的研究,可以看出:

(1)虽然关于土壤碳的研究已经有较大的进展,但成果较多注重土壤有机碳的研究,且多关注农业、林业、草地土壤,对土壤无机碳、湿地土壤、复垦土壤等,国内外虽有研究,但还很不深入。如森林采伐对森林土壤碳的影响,草地退化对土壤碳变化的影响,耕作制度变化对农业土壤碳库及碳平衡的影响,或综合研究土地利用变化对土壤碳汇、碳效应的影响等。以前认为无机碳在土壤中是很难转化的,因此也没有作深入研究,近年来的一些研究表明无机碳可以转化,它通过各种途径转化进入大气,并且可能转化为有机碳。湿地是地球陆地表面的一种重要生态景观类型,其生物量大,环境不同于旱地土壤,湿地具有很强的调节气候的作用,湿地土壤的碳库及其变化,近年来引起了众多学者的浓厚兴趣。复垦土壤碳库的研究目前还处在起步阶段,研究多偏向于复垦土壤总碳或总有机碳库方面^[77-78],对复垦土壤

的碳库组分研究方面目前仅少数学者进行了尝试性研究。煤矿区复垦土壤中煤炭(碳)的存在也为土壤碳构成研究赋予了新的内容。

(2)以往对土壤碳库研究的角度主要包括土壤碳通量、碳密度、碳储量、碳库管理指数等,在碳库组分研究方面,主要研究总碳、总有机碳及不稳定性碳中的一二种有机碳(如易氧化碳、微生物量碳或颗粒有机碳、轻组有机碳)较多,全面分析土壤中各碳类型的研究较少。诚然每一种不稳定性有机碳和稳定性有机碳都能反映土壤某些生理活性和碳转化特征,但都是从某些侧面来反映的,并不能全面解释或说明土壤碳或有机碳在土壤中起到积极作用的内在机理。目前的一些研究已经表明某些不稳定性有机碳之间、与总有机碳之间存在相关关系,但全面研究各类碳及其相互关系仍不多。在土壤碳转化过程,仅从某一种碳变化,或土壤总碳或总有机碳变化,进而分析土壤-大气碳循环机理,是不够深入的。土壤中各类碳之间的转化是碳循环中的重要过程,全面研究土壤中各类碳的变化及相关关系,弄清各类碳的相互转化关系,对于探讨土壤固碳及土壤质量的提高具有重要意义。

(3)土壤中各类有机碳主要是根据各类有机碳的有效性、性质、分离提取方法来命名和划分的,通过核磁共振法、荧光光谱、红外光谱等手段研究发现,各类有机碳的化学结构存在一定相似部分。从分离提取方法来看,各有机碳的提取环节中多数存在溶液提取环节,而且所用化学试剂对各类有机碳都可能造成一定破坏和影响。因此,所分离提取的各类有机碳之间必定存在交差重叠关系。研究表明,各类不稳定有机碳库之间存在显著或极显著正相关关系^[79-80],不稳定有机碳库与稳定有机碳库之间呈负相关关系^[50,81]。但目前为止,研究主要集中在相关关系上,而各类有机碳的交差重叠关系方面研究不多。弄清各类有机碳之间的交差重叠关系,建立各类有机碳之间的定量关系模型,对于简化土壤有机碳研究具有重要作用。近年来,红外光谱法和核磁共振法已经应用到有机碳的化学结构研究中,同位素示踪法及质谱法也广泛应用到有机碳迁移转化研究中,这些先进的现代技术方法可为土壤中各类有机碳库的重叠关系研究提供帮助。

(4)新开发、新复垦和其它受损土地重建过程中

对土壤进行重构,多采取较大的工程措施,如客土、充填、平整等,动用大型机械进行土地平整,这些工程措施会对土壤形成强烈的干扰或扰动,引起土壤剖面混乱,土壤结构和理化性质急剧变化,土壤碳组分及含量也会发生变化,土壤生产力低。国内在土地复垦方面涌现了许多专家学者,他们从复垦方式、复垦土壤剖面构建、复垦土壤理化特性、复垦土壤污染及评价、复垦土壤培肥及生态恢复方面做了许多研究,为进一步研究土壤复垦技术打下了基础。而目前对重构土壤有机碳构成及变化的研究还比较欠缺。土壤重构过程中,土壤中碳会发生什么变化?土壤中碳的变化对重建土壤的生产力是否产生影响及产生影响的机理是什么?还鲜有报道。因此,了解新开发土壤、新复垦土壤和其它受损土地重建的土壤的有机碳组分、含量差异及时空变化规律对于研究有效的土地开发技术、土地复垦技术和土壤重构技术尤为重要。

(5)以往的研究对土壤煤碳(煤炭中的碳)研究不多,而煤矿区受采煤运煤的影响,煤炭灰、煤灰势必不同程度沉降或撒落在矿区土壤中,而这部分碳往往给矿区土壤造成有机质含量很高的假象。目前对煤炭的研究主要重在煤的结构、化学构成、燃烧特性、H、S 等进行研究,旨在提高煤炭的利用效率和降低煤炭利用中的环境污染风险。对于煤的风化有一定研究,但主要是针对风化煤这一特殊煤产品,目前风化煤已经用于制造腐殖酸肥料。而对于从矿井中采出的原煤,它在土壤和空气中能否风化并向不稳定性有机碳转化,国内外还未见报道,煤炭或煤灰中的碳对煤矿区土壤质量的影响及环境效应有待研究。个别学者对土壤中的煤炭(碳)进行了分离研究^[82],但其文献中未见对准确性进行描述,因此这种分离测定方法,是否可行还有待验证。

References:

- [1] Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology*, 1995, 1(1): 77-91.
- [2] Post W M, Emanuel W R, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298(5870): 156-159.
- [3] Tian N, Wang Y X, Weng B Q. Advances in estimating soil carbon storage. *Subtropical Agriculture Research*, 2010, 6(3): 193-198.
- [4] Xu N Z, Zhang T L, Wang X X, Liu H Y, Liang X H. Statistical calculation of soil inorganic carbon stock in the Yangtze delta region. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(11): 1038-1044.
- [5] Pan G X. Pedogenic carbonates in arid soils of China and the significance in terrestrial carbon transfer. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1999, 22(1): 51-57.
- [6] Pan G X. Study on carbon reservoir in soils of China. *Bulletin of Science and Technology*, 1999, 15(5): 330-332.
- [7] Yang L F, Li G T, Zhao X R, Lin Q M. Profile distribution of soil organic and inorganic carbon in chestnut soils of Inner Mongolia. *Ecology and Environment*, 2007, 16(1): 158-162.
- [8] Schuman G E, Janzen H H, Herrick J E. Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands. *Environmental Pollution*, 2002, 116(3): 391-396.
- [9] Wu H B, Guo Z T, Gao Q, Peng C H. Distribution of soil inorganic carbon storage and its changes due to agricultural land use activity in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 129(4): 413-421.
- [10] Zeng J, Guo T W, Bao X G, Wang Z, Sun J H. Effects of soil organic carbon and soil inorganic carbon under long-term fertilization. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2008, (2): 11-14.
- [11] Li L L, Wang Z H, Wang X N, Zhang W W, Li X H, Li S X. Effects of soil-surface mulching on organic carbon, inorganic carbon and light fraction organic carbon in dryland soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(2): 478-483.
- [12] Wang Y, Li Y, Ye X, Chu Y, Wang X. Profile storage of organic/inorganic carbon in soil: from forest to desert. *Science of Total Environment*, 2010, 408(8): 1925-1931.
- [13] Zhang L, Sun X Y, Cao J X, Gao C D, Bao Y H X G. Transfer of soil organic carbon to soil inorganic carbon in carbonate rock soil of desert grassland. *Arid Land Geography*, 2010, 33(5): 732-739.
- [14] Torn M S, Trumbore S E, Chadwick O A, Vitousek P M, Hendricks D M. Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. *Nature*, 1997, 389(6647): 170-173.
- [15] Loginow W W, Winsniewski S G, Ciescinska B. Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation. *Polish Journal of Soil Science*, 1987, 20: 47-52.
- [16] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [17] Shen H, Cao Z H, Hu Z Y. Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(3): 32-38.
- [18] Martin J P, Haider K. Biodegradation of ¹⁴C-labeled model and cornstarch lignins, phenols, model phenolase humic polymers, and fungal melanins as influenced by a readily available carbon source and soil. *Applied and Environmental Microbiology*, 1979, 38(2): 283-289.
- [19] Fang H J, Yang X M, Zhang X P, Liang A Z, Shen Y. Spatial Distribution and its biologic availability of labile organic carbon of

- black soil at sloping field. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2): 59-63.
- [20] Pang X Y, Bao W K, Wu N. Influence factors of soil dissoluble organic matter (carbon) in forest ecosystems: a review. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2009, 15(3): 390-398.
- [21] Shao Y H, Pan J J, Sun B. Effect of a long-term organic manure application on the different available carbons in red soils. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(1): 125-127.
- [22] Wang J, Jie H T, Zhu P, Li X Y. Cannotation and modern analysis method for active soil organic matter (carbon). *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(6): 109-112.
- [23] McLauchlan K K, Hobbie S E. Comparison of labile soil organic matter fractionation techniques. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(5): 1616-1625.
- [24] Lu R K. *Method of Soil Agriculture Chemistry Analysis*. Beijing: Chinese Agriculture Science and Technology Publisher, 1999.
- [25] Melero S, López-Garrido R, Madejón E, Murillo J M, Vanderlinden K, Ordóñez R, Moreno F. Long-term effects of conservation tillage on organic fractions in two soils in southwest of Spain. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 133(1/2): 68-74.
- [26] Blagodatsky S, Grote R, Kiese R, Werner C, Butterbach-Bahl K. Modelling of microbial carbon and nitrogen turnover in soil with special emphasis on N-trace gases emission. *Plant and Soil*, 2011, 346(1/2): 297-330.
- [27] Melero S, Madejón E, Ruiz J C, Herencia J F. Chemical and biochemical properties of a clay soil under dryland agriculture system as affected by organic fertilization. *European Journal of Agronomy*, 2007, 26(3): 327-334.
- [28] Yuan K N. Studies on the organo-mineral complex in soil I. The oxidation stability of humus from different organo-mineral complexes in soil. *Acta Pedologica Sinica*, 1963, 11(3): 286-293.
- [29] Xu J M, Yuan K N. Research of oxidization stability of soil organic matter in zonal soil in China. *Chinese Journal of Soil Science*, 1995, 26(1): 1-2, 17-17.
- [30] Shen H, Cao Z H. Effect of long-term fertilization on soil available carbon pool and available ratio of soil carbon under different agroecosystems. *Tropical and Subtropical Soil Science*, 1998, 7(1): 1-5.
- [31] Lefroy R D B, Blair G J, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ^{13}C natural isotope abundance. *Plant and Soil*, 1993, 155-156: 399-402.
- [32] Lin M Y, Deng S H, Su Y R, Liu K P, Li F S. Effects of fertilization on soil active organic carbon and carbon sequestration of forage in Karst region. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(5): 1119-1126.
- [33] Weil R R, Islam K R, Stine M A, Gruver J B, Samson-Liebig S E. Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. *American Journal of Alternative Agriculture*, 2003, 18(1): 3-17.
- [34] Tirol-Padre A, Ladha J K. Assessing the reliability of permanganate-oxidizable carbon as an index of soil labile carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(3): 969-978.
- [35] Zhang D, Han X Z. Changes of black soil labile organic carbon pool under different vegetation and fertilization managements. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(13): 2715-2723.
- [36] Sarkhot D V, Grunwald S, Ge Y, Morgan C L S. Comparison and detection of total and available soil carbon fractions using visible/near infrared diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma*, 2011, 164(1/2): 22-32.
- [37] Vance G F, David M B. Dissolved organic carbon and sulfate sorption by spodosol mineral horizons. *Soil Science*, 1992, 154(2): 136-144.
- [38] Zak D R, Grigal D F, Gleeson S, Tilman D. Carbon and nitrogen cycling during old-field succession: constraints on plant and microbial biomass. *Biogeochemistry*, 1990, 11(2): 111-129.
- [39] Marumoto T, Anderson J P E, Domsch K H. Mineralization of nutrients from soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, 14(5): 469-475.
- [40] Bradley R L, Fyles J W. A kinetic parameter describing soil available carbon and its relationship to rate increase in C mineralization. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(2): 167-172.
- [41] Zeng H D, Du Z X, Yang Y S, Li X B, Zhang Y C, Yang Z F. Effects of land cover change on soil organic carbon and light fraction organic carbon at river banks of Fuzhou urban area. *The Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(3): 701-705.
- [42] Wang X Y, Zhao M L, Han G D, Walter W. Effects of grassland cultivation on soil light fraction. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 2009, 30(2): 121-125.
- [43] Schulten H R, Leinweber P. Thermal stability and composition of mineral-bound organic matter in density fractions of soil. *European Journal of Soil Science*, 1999, 50(2): 237-248.
- [44] Solomon D, Lehmann J, Zech W. Land use effects on soil organic matter properties of chromic luvisols in semi-arid northern Tanzania: carbon, nitrogen, lignin and carbohydrates. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 78(3): 203-213.
- [45] Camberdella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen dynamics of some fraction from cultivated grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(1): 123-130.
- [46] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, Lafond G P, Townley-Smith L. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(6): 1799-1806.
- [47] Wang X N, Geng Y Q, Yu X X. Soil total organic carbon and soil Labile organic carbon fraction under *Quercus variabilis* & *Pinus tabulaeformis* forest. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(3): 604-609.
- [48] Six J, Elliot E T, Paustian K, Doran J W. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland

- soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5): 1367-1377.
- [49] Li Y B, Yang X, Song X L, Xu H, Wang Y M, Wang C Z. Content and distribution of unprotected soil organic carbon in karst ecosystem. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(2): 402-406.
- [50] Liang A Z, Zhang X P, Yang X M, Shen Y, Shi X H, Fan R Q, Fang H J. Dynamics of soil particulate organic carbon and mineral-incorporated organic carbon in black soils in northeast China. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(1): 153-158.
- [51] Wu J G, Zhang X Q, Wang Y H, Xu D Y. The effects of land use changes on the distribution of soil organic carbon in physical fractionation of soil. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(4): 19-27.
- [52] Plante A F, Conant R T, Paul E A, Paustian K, Six J. Acid hydrolysis of easily dispersed and microaggregate-derived silt-and clay-sized fractions to isolate resistant soil organic matter. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57(4): 456-467.
- [53] Nayak A K, Gangwar B, Shukla A K, Mazumdar S P, Kumar A, Raja R, Kumar A, Kumar V, Rai P K, Mohan U. Long-term effect of different integrated nutrient management on soil organic carbon and its fractions and sustainability of rice-wheat system in Indo Gangetic Plains of India. *Field Crops Research*, 2012, 127: 129-139.
- [54] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, Ojima D S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains Grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 51(5): 1173-1179.
- [55] Meng L Y, Xin S Z, Su D C. Effects of materials containing different inert organic carbon on Cd speciation and bio-availability in soil. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(8): 1531-1538.
- [56] Hu X B, Ji F Y, Li S, Zhou G M, Yu D N, Tang X M, Yang D C, Yu B. Study of Vibrational spectra of Humic substance in soils from the Three Gorges Reservoir Area. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(5): 1376-1380.
- [57] Rodriguez-Murillo J C, Almendros G, Knicker H. Wetland soil organic matter composition in a Mediterranean semiarid wetland (Las Tablas de Daimiel, Central Spain): Insight into different carbon sequestration pathways. *Organic Geochemistry*, 2011, 42(7): 762-773.
- [58] Lin X G, Wang Y M. Humic substance is a safeguard to healthy soil quality. *Humic Acid*, 2010, (2): 1-10.
- [59] Hung W N, Lin T F, Chiu C H, Chiou C T. On the use of a freeze-dried versus an air-dried soil humic acid as a surrogate of soil organic matter for contaminant sorption. *Environmental Pollution*, 2012, 160(1): 125-129.
- [60] Han B, Xu S Q, Zhang H L, Chen F. Effects of tillage practices on combined forms of humus and humus components. *Journal of China Agricultural University*, 2010, 15(1): 72-78.
- [61] Watson J R, Parsons J W. Studies of soil organo-mineral fractions I. Isolation by ultrasonic dispersion. *European Journal of Soil Science*, 1974, 25(1): 1-8.
- [62] Fang H J, Yang X M, Zhang X P, Liang A Z, Shen Y. Effects of soil erosion and deposition on loss and accumulation of soil organic carbon in physical fractions. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(3): 467-474.
- [63] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(4/5): 665-676.
- [64] Wu T Y, Schoenel J J, Li F M, Qian P Y, Malhi S S. Influence of cultivation on organic carbon in three typical soils of China Loess Plateau and Canada Prairies. *The Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(12): 2213-2218.
- [65] Hang X R, Su J F, Xie F, Gao X Y, Yang J F, Lai H Y. Effect of long-term fertilization on organic carbon and the different soil organic fractions of Brown Earth. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(4): 730-733.
- [66] Bu X L, Ruan H H, Wang L M, Ma W B, Ding J M, Yu X N. Soil organic matter in density fractions as related to vegetation changes along an altitude gradient in the Wuyi Mountains, southeastern China. *Applied Soil Ecology*, 2012, 52: 42-47.
- [67] Chen P. Property Classification and Exploitation of Chinese Coal. Beijing: Chemical Industry Publisher, 2001.
- [68] Jiang X X. Coal Chemistry. Beijing: Coal Industrial Publisher, 2007.
- [69] Li H, Li Y Q, Shen C B, Yin J P, He Z W. Physicochemical properties of reclaimed soil with weathered coal in open cast mining areas of loess plateau. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(5): 1752-1756.
- [70] Wu R P, Li H, Cao P. Amelioration of weathered coal on soil physical, chemical properties and enzyme activities with vegetation restoration. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(9): 1855-1861.
- [71] Goldberg E D. Black Carbon in the Environment: Properties and Distribution. New York: John Wiley and Sons, 1985.
- [72] Dickens A F, Gélinais Y, Masiello C A, Wakeham S, Hedges J I. Reburial of fossil organic carbon in marine sediments. *Nature*, 2004, 427(6972): 336-339.
- [73] Zhang X D, Liang C, ZhuGe Y P, Jiang Y, Xie H T, He H B, Wang J. Roles of black carbon in the biogeochemical cycles of soil organic carbon. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(4): 349-355.
- [74] Masiello C A. New directions in black carbon organic geochemistry. *Marine Chemistry*, 2004, 92(1/4): 201-213.
- [75] Hamer U, Marschner B, Brodowski S, Amelung W. Interactive priming of black carbon and glucose mineralization. *Organic Geochemistry*, 2004, 35(7): 823-830.
- [76] Cheng C H, Lehmann J, Thies J E, Burton S D, Engelhard M H. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. *Organic Geochemistry*, 2006, 37(11): 1477-1488.
- [77] Shrestha R K, Lal R. Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation. *Geoderma*, 2011, 161(3/4): 168-176.

- [78] Chatterjee A, Lal R, Shrestha R K, Ussiri D A N. Soil carbon pools of reclaimed minesoils under grass and forest landuses. *Land Degradation and Development*, 2009, 20(3): 300-307.
- [79] Cui F J, Liu J H, Li L J, Gao J, Li Q. Effect of zero tillage with mulching on active soil organic carbon. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2012, 21(9): 195-200.
- [80] Mohanram A, Ray C, Metge D W, Barber L B, Ryan J N, Harvey R W. Effect of dissolved organic carbon on the transport and attachment behaviors of cryptosporidium parvum oocysts and carboxylate-modified microspheres advected through temperate humic and tropical volcanic agricultural soil. *Environmental Science & Technology*, 2011, 46(4): 2088-2094.
- [81] Oades J M, Vassallo A M, Waters A G, Wilson M A. Characterization of organic matter in particle size and density fractions from a red-brown earth by solid state ^{13}C NMR. *Australian Journal of Soil Research*, 1987, 25: 71-82.
- [82] Shrestha R K, Lal R, Jacinthe P A. Enhancing carbon and nitrogen sequestration in reclaimed soils through organic amendments and chiseling. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(3): 1004-1011.
- 参考文献:**
- [3] 田娜, 王义祥, 翁伯琦. 土壤碳储量估算研究进展. *亚热带农业研究*, 2010, 6(3): 193-198.
- [5] 潘根兴. 中国干旱性地区土壤发生性碳酸盐及其在陆地系统碳转移上的意义. *南京农业大学学报*, 1999, 22(1): 51-57.
- [10] 曾骏, 郭天文, 包兴国, 王卓, 孙建好. 长期施肥对土壤有机碳和无机碳的影响. *中国土壤与肥料*, 2008, (2): 11-14.
- [11] 李利利, 王朝辉, 王西娜, 张文伟, 李小涵, 李生秀. 不同地表覆盖栽培对旱地土壤有机碳、无机碳和轻质有机碳的影响. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(2): 478-483.
- [13] 张林, 孙向阳, 曹吉鑫, 高程达, 宝音贺希格. 荒漠草原碳酸盐岩土壤有机碳向无机碳酸盐的转移. *干旱区地理*, 2010, 33(5): 732-739.
- [17] 沈宏, 曹志洪, 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.
- [19] 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.
- [20] 庞学勇, 包维楷, 吴宁. 森林生态系统土壤可溶性有机质(碳)影响因素研究进展. *应用与环境生物学报*, 2009, 15(3): 390-398.
- [21] 邵月红, 潘剑君, 孙波. 长期施肥对红壤不同形态碳的影响. *中国生态农业学报*, 2006, 14(1): 125-127.
- [24] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [28] 袁可能. 土壤有机矿质复合体研究 I. 土壤有机矿质复合体中腐殖质氧化稳定性的初步研究. *土壤学报*, 1963, 11(3): 286-293.
- [29] 徐建民, 袁可能. 我国地带性土壤中有机质氧化稳定性的研究. *土壤通报*, 1995, 26(1): 1-2, 17-17.
- [30] 沈宏, 曹志洪. 长期施肥对不同农田生态系统土壤有效碳库及碳素有效率的影响. *热带亚热带土壤科学*, 1998, 7(1): 1-5.
- [32] 林明月, 邓少虹, 苏以荣, 刘坤平, 李伏生. 施肥对喀斯特地区植草土壤活性有机碳组分和牧草固碳的影响. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(5): 1119-1126.
- [35] 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.
- [47] 王肖楠, 耿玉清, 余新晓. 栓皮栎林与油松林土壤有机碳及其组分的研究. *土壤通报*, 2012, 43(3): 604-609.
- [48] 李阳兵, 杨霞, 宋晓利, 徐花, 汪杨梅, 王春致. 岩溶生态系统土壤非保护性有机碳含量研究. *农业环境科学学报*, 2006, 25(2): 402-406.
- [50] 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.
- [56] 胡学斌, 吉芳英, 黎司, 周光明, 虞丹尼, 谭雪梅, 杨大成, Yu B. 三峡库区土壤腐殖质的振动光谱研究. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(5): 1376-1380.
- [58] 林先贵, 王一鸣. 腐植酸类物质是土壤健康的重要保障. *腐植酸*, 2010, (2): 1-10.
- [60] 韩宾, 徐尚起, 张海林, 陈阜. 耕作方式对土壤腐殖质结合状态及组成的影响. *中国农业大学学报*, 2010, 15(1): 72-78.
- [62] 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*, 2007, 44(3): 467-474.
- [65] 韩晓日, 苏俊峰, 谢芳, 高晓宇, 杨劲峰, 赖鸿雁. 长期施肥对棕壤有机碳及各组分的影响. *土壤通报*, 2008, 39(4): 730-733.
- [67] 陈鹏. *中国煤炭性质、分类和利用*. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [68] 姜晓霞. *煤化学*. 北京: 煤炭工业出版社, 2007.
- [69] 李华, 李永青, 沈成斌, 尹建平, 贺振伟. 风化煤施用对黄土高原露天煤矿区复垦土壤理化性质的影响研究. *农业环境科学学报*, 2008, 27(5): 1752-1756.
- [70] 武瑞平, 李华, 曹鹏. 风化煤施用对复垦土壤理化性质酶活性及植被恢复的影响研究. *农业环境科学学报*, 2009, 28(9): 1855-1861.
- [73] 张旭东, 梁超, 诸葛玉平, 姜勇, 解宏图, 何红波, 王晶. 黑碳在土壤有机碳生物地球化学循环中的作用. *土壤通报*, 2003, 34(4): 349-355.
- [79] 崔凤娟, 刘景辉, 李立军, 高婕, 李倩. 免耕秸秆覆盖对土壤活性有机碳库的影响. *西北农业学报*, 2012, 21(9): 195-200.