

DOI: 10.5846/stxb201310162505

李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 缙云山不同土地利用方式土壤有机碳组分特征. 生态学报, 2015, 35(11): 3733-3742.

Li J L, Jiang C S, Hao Q J. Distribution characteristics of soil organic carbon and its physical fractions under the different land uses in Jinyun Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(11): 3733-3742.

缙云山不同土地利用方式土壤有机碳组分特征

李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊*

西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室 西南大学资源环境学院, 重庆 400715

摘要:探讨了我国西南地区缙云山亚热带常绿阔叶林(以下简称林地)、果园、坡耕地以及撂荒地 4 种土地利用方式对土壤有机碳(SOC)组分含量及其分配比例的影响。采用物理分组技术,将 SOC 分为粗颗粒有机碳(cPOC)、细颗粒有机碳(fPOC)、微团聚体内颗粒有机碳(iPOC)、微团聚体内粉+黏颗粒(s+c_m)有机碳及粉+黏颗粒(s+c)有机碳。研究表明:在 0—60 cm 的土壤深度范围内,SOC、cPOC、fPOC、iPOC、s+c_m 组分以及 s+c 组分有机碳平均含量均为林地(9.02、3.14、1.61、0.33、0.42、3.53 g/kg)显著高于果园(3.27、0.93、0.27、0.10、0.24、1.73 g/kg)和坡耕地(2.58、0.51、0.10、0.12、0.08、1.77 g/kg),说明林地开垦会导致 SOC 及各组分的流失;而撂荒地上述 SOC 及其各组分含量分别为 14.90、5.17、2.36、0.42、0.59 和 6.36 g/kg,均显著高于坡耕地,表明耕地撂荒后 SOC 及其组分能得到有效的恢复和截存。在 SOC 的各物理组分中,iPOC 的有机碳分配比例最低,4 种土地利用方式下均为 3%左右;cPOC 和 fPOC 作为活性较强的非保护有机碳库,在林地和撂荒地中所占 SOC 分配比例最高,达到 50%以上;而果园和坡耕地中<53 μm 的粉+黏颗粒有机碳组成的化学保护有机碳库分配比例最大,分别为 65.9%和 71.6%,表明林地和撂荒地土壤有机碳的活性远远大于坡耕地及果园,支持更高的土壤肥力。在 SOC 及其组分中,fPOC 可作为评估土地利用变化对土壤有机碳库影响的良好指标。

关键词:缙云山;土地利用;土壤有机碳;物理分组

Distribution characteristics of soil organic carbon and its physical fractions under the different land uses in Jinyun Mountain

LI Jianlin, JIANG Changsheng, HAO Qingju*

Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: The distribution characteristics of soil organic carbon (SOC) and its physical fractions under the different land uses in Jinyun Mountain were studied in this paper. Subtropical evergreen broad-leaved forest (forest for short), sloping farmland, orchard and abandoned land were selected and soils at the depths of 0—60 cm were sampled in the spring of 2011 to determine the contents of soil organic carbon fractions. Five soil organic carbon fractions, i.e., coarse particulate organic carbon (cPOC), fine particulate organic carbon (fPOC), intra-microaggregate particulate organic carbon (iPOC), silt and clay within microaggregates (s+c_m), silt and clay (s+c) were separated by physical fractionation technique. The results showed that the contents of SOC, cPOC, fPOC, iPOC, s+c_m and s+c in the whole soil depth from 0 to 60 cm were significantly higher in the forest (9.02, 3.14, 1.61, 0.33, 0.42, 3.53 g/kg) than those in the orchard (3.27, 0.93, 0.27, 0.10, 0.24, 1.73 g/kg) and in the sloping farmland (2.58, 0.51, 0.10, 0.12, 0.08, 1.77 g/kg), which indicated the reclamation of forest would result in the loss of SOC and its fractions. 14.90, 5.17, 2.36, 0.42, 0.59, 6.36 g/kg of SOC and its corresponding fractions in the abandoned land were remarkably higher than those in the sloping farmland, which

基金项目:国家自然科学基金项目(41275160, 41005069, 40975095);中央高校基本科研业务费专项资金(XDJK2012A005, XDK2013A009)

收稿日期:2013-10-16; **网络出版日期:**2014-08-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: haoqingju@163.com

indicated the abandon from farmland would lead to the effective recovery and sequestration of SOC and its fractions. Among the SOC physical fractions, the ratios of iPOC to SOC were the lowest and accounted for only 3% in each land use type. The cPOC and fPOC fractions were considered as unprotected carbon pool with higher liability. The ratios of cPOC and fPOC to SOC were highest in the soils of the forest and abandoned land, reached to more than 50%. The $<53\ \mu\text{m}$ fraction contains organic carbon which is stabilized both as a consequence of its complex chemical composition and by adsorption to silt and clay particles. The ratios of $<53\ \mu\text{m}$ fraction containing organic carbon to SOC were highest in the soils of the orchard and sloping farmland, 65.9 and 71.6%, respectively. The results showed that the liability of soil organic carbon in the soils of forest and abandoned land were higher than those in the orchard and sloping land, that is to say, there is stronger soil fertility in the soils of forest and abandoned land. Furthermore, we suggest that fPOC is a promising fraction for assessing the impact of land use change on SOC in Jinyun Mountain.

Key Words: Jinyun Mountain; land use; soil organic carbon; physical fractionation

土壤有机碳(SOC)是土壤的重要组成部分,不但是土壤质量的重要基础,在全球碳循环中也起着至关重要的作用。地表土壤大约含有 2500 Pg 的碳,其中 1550 Pg 为 SOC 库^[1]。土地利用方式的变化不仅直接改变 SOC 的含量和分布,而且还通过影响 SOC 形成及转化的因子而间接改变 SOC 的含量与分布^[2],并因而对大气 CO₂ 浓度产生重要影响^[3]。在土壤有机碳背景值很大的情况下,利用总有机碳来评价土地利用或管理方式的变化对土壤碳动态的影响是非常困难的^[4],因此,对土地利用或管理措施变化更为敏感的有机碳组分研究在近年来得到很大重视,而物理分组技术由于基本不改变有机碳原有的性质而得到广泛应用^[5]。Six 等^[6]根据不同的土壤有机质保护机制,利用物理分组技术把 SOC 分成 3 个不同的概念库:活性非保护有机碳、物理保护有机碳和惰性的化学及生物化学保护有机碳,从而为详细的模型初始化及赋值提供基础数据。

近年来,国内关于土地利用变化对 SOC 的影响开展了大量的研究工作,并取得了较为丰硕的研究成果,但这些研究主要集中在土壤总有机碳^[7]、活性有机碳^[8]或土壤团聚体有机碳^[9]等方面,但利用物理分组技术旨在分离与概念性有机质模型库相关组分的研究还非常少见。目前国内有研究者利用这套物理分组技术研究了不同施肥处理对 SOC 组分的影响,比如 Huang 等^[10]研究了中国亚热带地区红壤长期施肥下对土壤有机碳物理组分的影响,发现土壤有机碳库向微团聚体的转变有利于土壤有机碳的长期截存,微团聚体保护碳可作为评估长期施肥对红壤有机碳储存的良好指标;黄山等^[11]采用土壤有机碳物理分组技术,研究了东北黑土稻田转换为旱地后土壤有机碳及其组分的响应特征,发现稻田土壤比旱地更具固碳潜力,其优势主要体现在土壤中包裹态颗粒有机质和矿物结合有机质组分碳的富积;徐江兵等^[12]对长期施肥条件下旱地红壤水稳性团聚体进行物理分组,发现有机肥的施用显著提高了红壤团聚体中各物理组分的含量,并降低了土壤大团聚体的周转。缙云山位于我国西南地区的重庆市,是国家级自然保护区,也是许多国家级珍稀濒危保护植物的生长地,保护区内土地利用方式多样。本文以缙云山为研究对象,借助物理分组技术,探讨亚热带常绿阔叶林、果园、坡耕地以及撂荒地 4 种不同土地利用方式下土壤各有机碳组分的分布状况,从而为有效的土地管理措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

缙云山位于重庆市境内,东经 106°22',北纬 29°49',海拔高度为 350—951.5 m,属于亚热带季风湿润性气候,年均气温 13.6 °C,年均降水量为 1611.8 mm。缙云山主要植被为典型的中亚热带常绿阔叶林,地质岩层由三叠纪须家河组厚层砂岩夹薄层泥页岩和煤线组成,土地类型主要以山地黄壤居多,此外还有棕黄壤以及少量人为利用的水稻土。林地表层土壤有机碳含量为 22.89 g/kg,全氮含量为 1.67 g/kg,碱解氮为 171.38 mg/kg,硝态氮为 16.06 mg/kg,铵态氮为 6.13 mg/kg,全磷为 140.30 mg/kg,有效磷为 7.10 mg/kg,有效

硫为 139.04 mg/kg,速效钾为 81.49 mg/kg,pH 值为 3.95,土壤容重为 1.07 g/cm³。

1.2 样品采集

土壤样品于 2011 年 6 月采自缙云山阳坡同一海拔高度处,土壤为酸性黄壤。共选择林地、坡耕地、果园和撂荒地 4 种土地利用方式,其中林地为亚热带常绿阔叶林,主要树种为四川大头茶(*Gordonia acuminata*)、白毛新木姜子(*Neolitea aurata*)和四川杨桐(*Adinandra bockiana*);坡耕地为玉米地;果园为枣树和桔子种植园;撂荒地为弃耕多年的坡耕地,地面植被为生长旺盛的杂草,无灌木和乔木。每种土地利用类型选择 3 个样地,每个样地设置 3 个采样点,利用挖剖面取样法在各采样点分层取 0—10、10—20、20—30、30—40、40—50、50—60 cm 的土样,将各个样地的土样按照层次进行分层混合,然后用四分法取出足够的样品,除去砾石和根系,风干后过孔径 2 mm 筛。

1.3 土壤有机质分组

依照 Six 等^[6]的方法对土壤有机质进行物理分组(图 1)。首先,取 30 g 风干并过 2 mm 筛的土样置于 250 μm 筛上,并在过筛时加入 50 颗直径为 4 mm 的玻璃珠。为避免微团聚体被玻璃珠进一步破坏,在筛上冲入持续稳定的水流并将微团聚体冲刷到 53 μm 筛上。待大团聚体完全破坏后,留在 250 μm 筛上的即为粗颗粒态有机质(cPOM)($>0.25\text{ mm}$),然后再采用常规的湿筛法分离微团聚体和粉+黏颗粒(s+c)。所有组分在 50 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干并称重。

微团聚体的密度分组方法改良自 Six 等^[13]。取 5 g 110 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干的微团聚体,冷却到室温后加入到离心管中,倒入 35 mL 密度为 1.85 g/cm³ 的 NaI,并用手慢慢地摇 10 次,用 10 mL NaI 冲洗残留在离心管盖子和壁上的残渣,然后再将其放入 138 kPa 的真空干燥器中 10 min。取出静置 20 min 后,在 20 $^{\circ}\text{C}$ 下离心 60 min (1250 g)。离心后的悬浮物用 20 μm 的滤膜抽滤,得到的即为细颗粒态有机质(fPOM)。离心管底部的重组用 50 mL 去离子水冲洗两次后,加入 30 mL 0.5% 的六偏磷酸钠,振荡 18 h,然后过 53 μm 筛,留在筛上的为微团聚体内颗粒有机质(iPOM),筛出的为微团聚体内的粉+黏颗粒(s+c_m)。所有组分均在 50 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干称重。

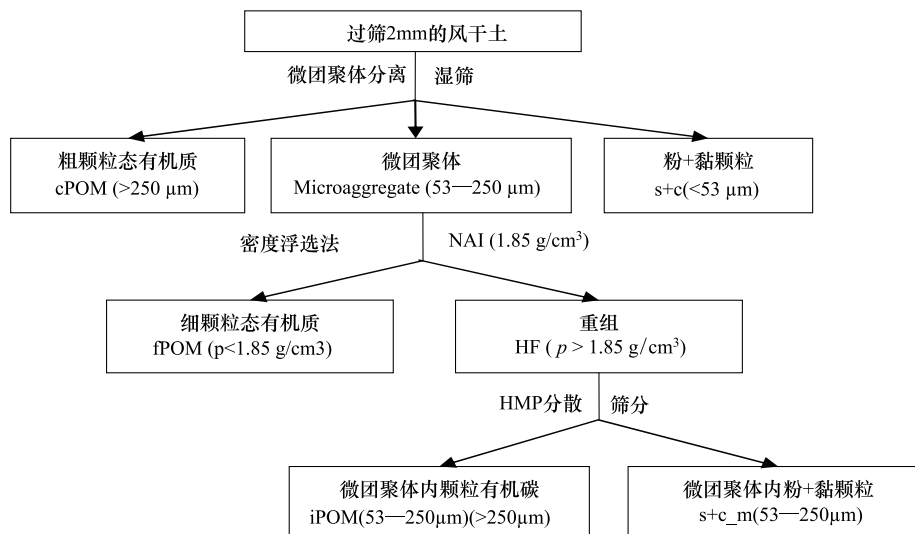


图 1 土壤有机质物理分组框架图(根据 Six 等^[6]修改)

Fig.1 Physical fractionation scheme (modified after Six et al.^[6])

cPOM(coarse particulate organic matter):粗颗粒有机质,fPOM(fine particulate organic matter):细颗粒有机质,iPOM(intra-microaggregate particulate organic matter):微团聚体内颗粒有机质,s+c_m(silt and clay within microaggregates):微团聚体内粉+黏颗粒,s+c(silt and clay):粉+黏颗粒,HF(heavy fraction):重组,HMP:六偏磷酸钠

全土以及分组后的物理组分土壤样品由于不含碳酸盐,采用干烧法测定全土以及各有机质组分中的 SOC

含量,所用仪器为 Multi N/C 2100 分析仪(德国耶拿)。各个组分的质量以及有机碳含量的结果用于有机质组分含量、有机碳含量及分配比例的计算,其计算公式如下:

各有机质组分含量(%) = 各有机质组分质量/土壤质量×100

各有机质组分有机碳含量(g/kg) = 各有机质组分自身有机碳含量(g/kg)×各组分含量(%)

各有机质组分有机碳的分配比例(%) = 各有机质组分有机碳含量/SOC×100

敏感性指标^[14] = (变量最大值-变量最小值)/变量最小值

1.4 数据处理

用 SPSS19.0 对不同土地利用方式之间以及同一土地利用方式不同土壤深度之间的各有机质组分含量、SOC 含量及其分配比例进行方差分析(ANOVA),当其通过方差齐次性检验时($P>0.05$),则进行均值间最小差异显著性(LSD)检验;若其不能通过方差齐次性检验($P<0.05$),则采用 Tamhane's T2 进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式对土壤有机碳组分含量的影响

图 2 为不同土地利用方式下 4 种土地利用方式土壤 SOC 及有机质组分中有机碳的含量。不管土层如何,s+c 组分有机碳与 cPOC 含量最高,fPOC 居中,而 s+c_m 组分有机碳及 iPOC 含量最低。

在 0—10 cm 土层,林地 SOC 含量显著高于其他 3 种土地利用方式(图 2),而在向下的各个土层则均为撂荒地最高,林地次之。在整个 0—60 cm 土层,SOC 含量为撂荒地(14.90 g/kg)>林地(9.02 g/kg)>果园(3.27 g/kg)>坡耕地(2.58 g/kg)。果园和坡耕地的 SOC 含量分别比林地减少了 63.74% 和 71.40% ($P<0.05$),说明林地垦殖为果园和坡耕地后造成了土壤碳的损失;而撂荒地 SOC 含量比坡耕地高出了 477.52% ($P<0.05$),说明将坡耕地撂荒后,有利于土壤中有有机碳的恢复和积累。

除撂荒地外,其它 3 种土地利用方式下粗颗粒态有机碳(cPOC)均呈现出明显的垂直递减的剖面分布特征。土地利用方式对 cPOC 具有非常明显的影响,在 0—60 cm 的所有土层上不同土地利用方式间的 cPOC 含量均达到显著差异;在 0—10 cm 土层,林地的 cPOC 含量(10.49 g/kg)最高,其次为撂荒地(5.13 g/kg)和果园(2.66 g/kg),坡耕地(0.89 g/kg)最低;而在 20—60 cm 的各个土层则为撂荒地最高,其次是林地,果园和坡耕地最低。在整个 0—60 cm 土壤深度内 cPOC 的平均含量为撂荒地(5.17 g/kg)>林地(3.14 g/kg)>果园(0.93 g/kg)>坡耕地(0.51 g/kg)(图 2)。

4 种土地利用方式下土壤细颗粒态有机碳(fPOC)、微团聚体内颗粒有机碳(iPOC)、s+c_m 组分有机碳及 s+c 组分有机碳含量均随土壤深度的增加而降低,并表现出明显的垂直分层现象(图 2)。在 0—10 cm 土层,这 4 种组分有机碳含量均为林地显著高于其它 3 种土地利用方式,而在 10—60 cm 的各个土层则是撂荒地最高,林地次之。在 0—60 cm 的所有土层上 fPOC 和 s+c_m 组分有机碳含量均为坡耕地最低,而 iPOC 含量最低的是果园;除 0—10 cm 及 20—30 cm 土层外,其它土层中果园和坡耕地的差异并不大。在 0—60 cm 的土壤深度内 fPOC 含量为撂荒地(2.36 g/kg)>林地(1.61 g/kg)>果园(0.27 g/kg)>坡耕地(0.10 g/kg),iPOC 为撂荒地(0.42 g/kg)>林地(0.33 g/kg)>坡耕地(0.12 g/kg)>果园(0.10 g/kg),s+c_m 组分有机碳为撂荒地(0.59 g/kg)>林地(0.42 g/kg)>果园(0.24 g/kg)>坡耕地(0.08 g/kg),s+c 组分有机碳为撂荒地(6.36 g/kg)>林地(3.53 g/kg)>坡耕地(1.77 g/kg)≈果园(1.73 g/kg)。

由试验结果可以看出,上述 5 种有机碳组分的含量的高低顺序大致均为撂荒地、林地、果园、坡耕地。除 s+c 组分有机碳含量在坡耕地与果园间的差异不显著外,不同土地利用方式间这 4 种组分有机碳的差异均达到显著水平($P<0.05$),表明林地转换为果园和坡耕地将导致这 5 种组分有机碳含量显著降低,而坡耕地撂荒则有助于其恢复和升高。

2.2 不同土地利用方式对土壤有机碳组分分配比例的影响

图 3 为不同土地利用方式下土壤有机碳组分的碳分布。4 种土地利用方式下 s+c 组分有机碳分配比例

最高,平均占土壤总碳库的 53.97%,其次是 cPOC,分配比例为 28.26%,s+c_m 组分有机碳与 iPOC 的分配比例最低,分别为土壤总碳库的 4.46%和 3.05%。

4 种土地利用方式下 cPOC 分配比例在 0—60 cm 深度内的剖面分布趋势不尽相同(图 3)。林地和果园 cPOC 分配比例随着土壤深度的增加而减小,而撂荒地和坡耕地则相反,随土壤深度的增加而增大。不同土地利用方式对 cPOC 分配比例的影响显著,坡耕地在 0—60 cm 的所有土层上均最低,除 0—10 cm 土层林地最高外,其余土层均为撂荒地最高。在整个 0—60 cm 土壤深度内,cPOC 分配比例的平均值为撂荒地(35.09%)>林地(31.69%)>果园(25.49%)>坡耕地(20.76%)。林地垦殖为果园和坡耕地后显著降低了 cPOC 分配比例($P<0.05$),而坡耕地撂荒则导致 cPOC 分配比例有了一个显著的升高($P<0.05$)。

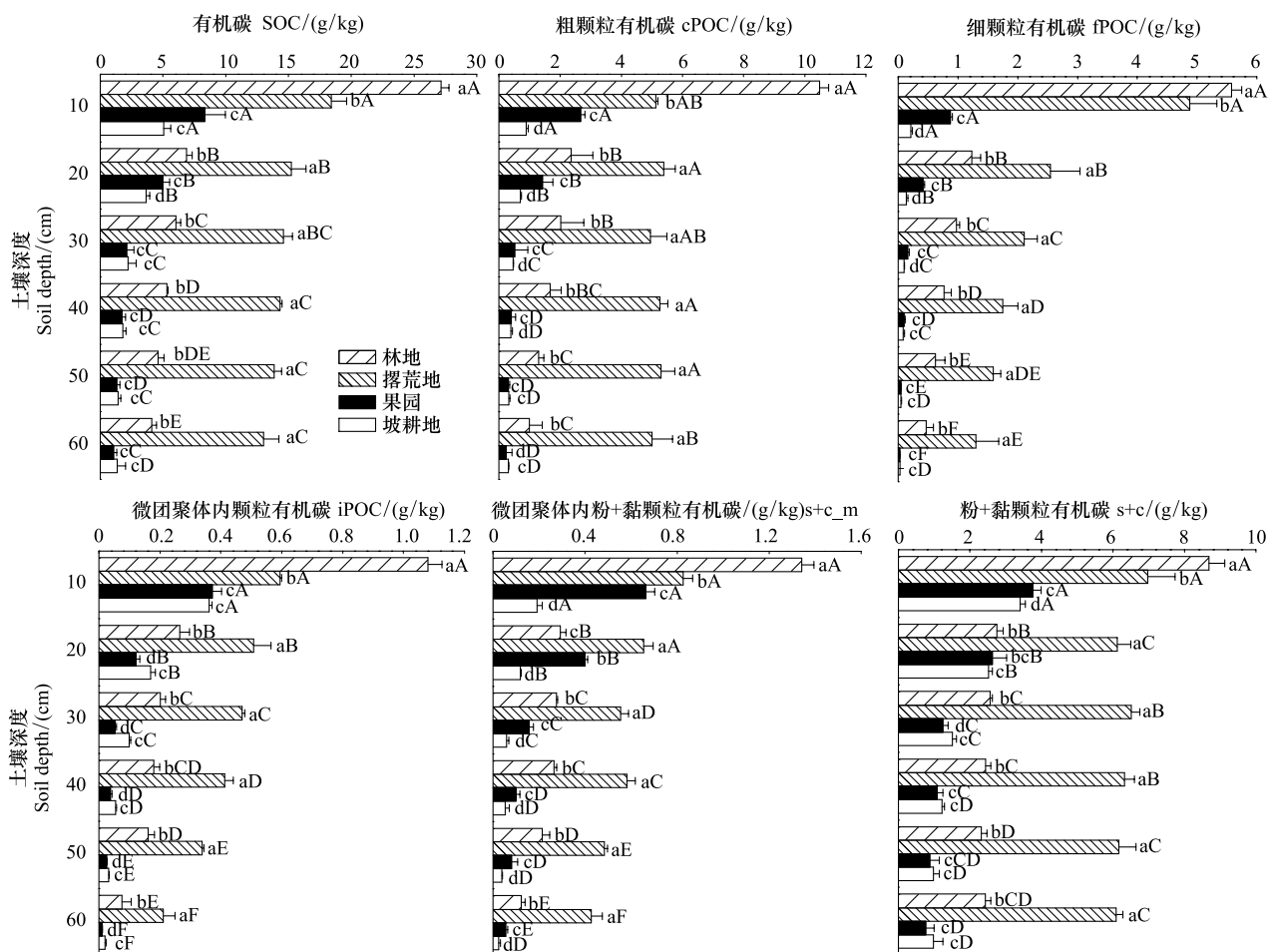


图 2 不同土地利用方式下土壤有机碳组分含量

Fig.2 The contents of soil organic carbon fractions of the different land uses

图中小写字母表示同一土壤深度不同土地利用类型下土壤有机碳组分在 5% 水平上的差异性;大写字母表示同一土地利用类型不同土壤深度下土壤有机碳组分在 5% 水平上的差异性

除坡耕地 fPOC 分配比例随土壤深度的增加而降低不是很明显外,其它 3 种土地利用方式均表现为随土壤深度的增加而显著降低(图 3)。不同土地利用方式间 fPOC 分配比例差异显著,坡耕地在 0—60 cm 的所有土层上均最低,除 0—10 cm 土层撂荒地最高外,其余土层均为林地最高。在整个 0—60 cm 土层,fPOC 分配比例与 cPOC 相似,林地(15.67%)和撂荒地(15.22%)要显著高于果园(6.31%)和坡耕地(3.83%),与林地相比,果园和坡耕地大大降低了 fPOC 的分配比例,而坡耕地闲置为撂荒地则促使 fPOC 分配比例增大。

4 种土地利用方式下 iPOC 的分配比例均呈现出随土壤深度的增加而减小的趋势(图 3),不同土地利用方式间 iPOC 的分配比例差异显著,在 0—30 cm 深度内的各个土层上 iPOC 比例要显著高于其它 3 种土地利

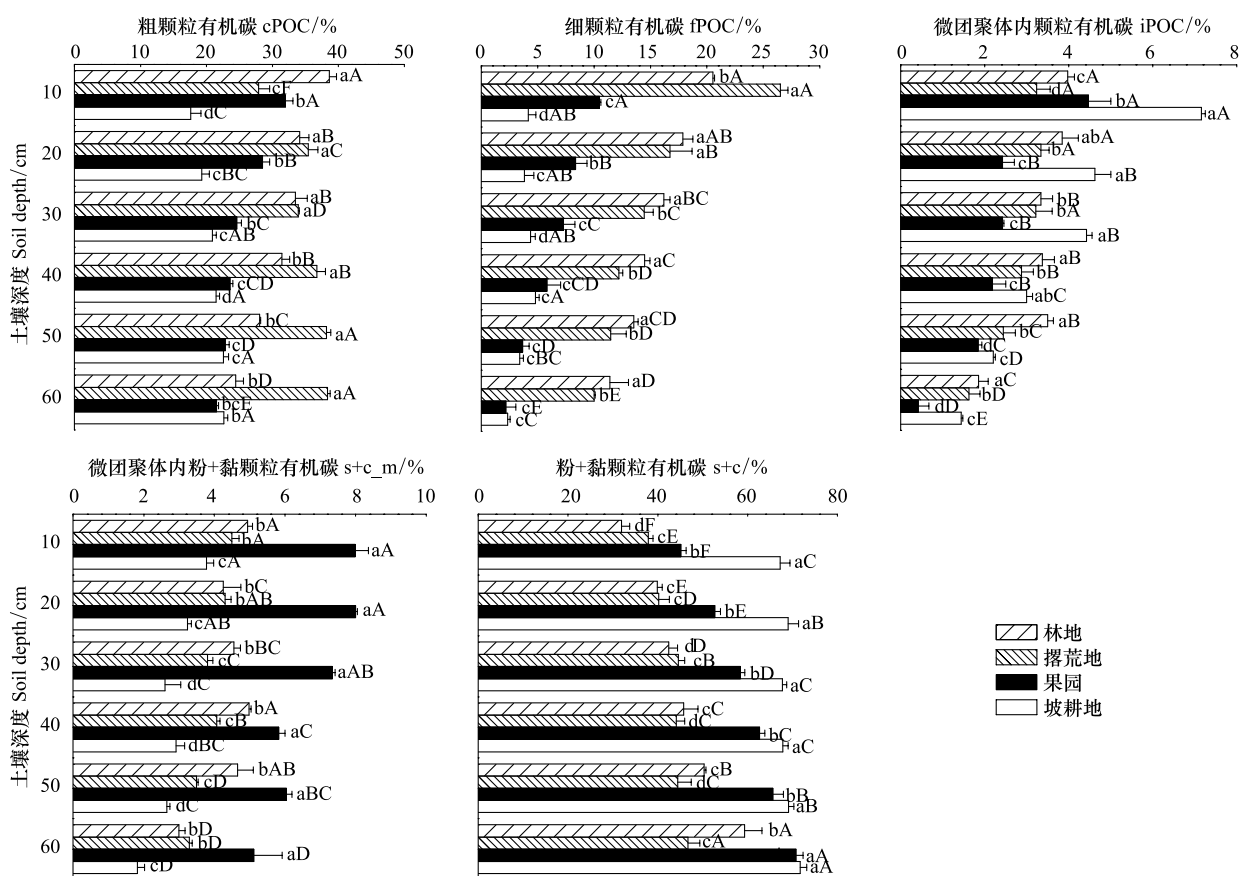


图3 不同土地利用方式土壤有机碳组分分配比例

Fig.3 The ratios of soil organic carbon fractions of the different land uses

用方式,而在 30—60 cm 的各土层上则为林地最高。在整个 0—60 cm 土层内,iPOC 分配比例的平均值为坡耕地 (3.81%)>林地 (3.31%)>撂荒地 (2.79%)>果园 (2.29%)。

4 种土地利用方式下 s+c_m 组分有机碳分配比例总体上表现为随土壤深度的增加而降低,但林地的这种变化趋势并不是很明显(图 3)。在 0—60 cm 的所有土层上 s+c_m 组分有机碳分配比例均为果园最高,而坡耕地最低。单因素方差分析表明,不同土地利用方式间 s+c_m 组分有机碳分配比例差异显著,尤其是在 0—30 cm 土层内差异更加明显。在 0—60 cm 土层内,s+c_m 组分有机碳分配比例平均值为果园 (6.71%)>林地 (4.40%)>撂荒地 (3.91%)>坡耕地 (2.83%)。

与其它 4 种有机碳组分不同,s+c 组分有机碳分配比例呈现为随土壤深度的增加而升高的趋势,尤其是林地和果园这种趋势更加明显(图 3)。土地利用方式对 s+c 组分有机碳分配比例的影响显著,在 0—60 cm 的所有土层,坡耕地的有机碳分配比例最高,其次是果园,撂荒地在 0—30 cm 土层高于林地,而在 30—60 cm 土层则低于林地。在整个 0—60 cm 土层,s+c 组分有机碳分配比例为坡耕地 (68.77%)>果园 (59.19%)>林地 (44.94%)>撂荒地 (42.99%)。与 cPOC 及 fPOC 不同,林地转变为坡耕地和果园导致 s+c 组分有机碳比例分别提高了 53.03%和 31.71% ($P<0.05$),而将坡耕地撂荒则使得 s+c 组分有机碳比例降低了 37.49% ($P<0.05$)。

2.3 土壤总有机碳与土壤团聚体有机碳物理组分有机碳含量敏感性分析

表 1 为不同土地利用方式下 0—60 cm 各土层不同有机碳组分的敏感性分析,可以看出,在各个土层中,fPOC 含量对土地利用变化的响应都要远大于其它有机碳组分。在整个 0—60 cm 土壤深度内,不同有机碳组分对土地利用变化的敏感性为 fPOC (22.02)>s+c_m (6.33)>SOC (4.77)>cPOC (4.58)>iPOC (3.14)>s+c (2.68),表明 fPOC 对土地利用方式的改变最为敏感,而 s+c 组分有机碳含量对土地利用变化的敏感性最差,

因此 fPOC 可作为评估土地利用变化对土壤有机碳库影响的良好指标。

表 1 不同有机碳组分变化的敏感性指标

Table 1 Sensitivity indexes of the soil organic carbon fractions

土壤深度/cm Soil depth	有机碳 SOC	粗颗粒有机碳 cPOC	细颗粒有机碳 fPOC	微团聚体内 颗粒有机碳 iPOC	微团聚体内 粉+黏颗粒 s+c_m	粉+黏颗粒 s+c
0—10	4.38	2.94	25.45	1.99	6.04	1.55
10—20	3.17	2.79	17.19	3.19	4.54	1.43
20—30	5.85	8.42	20.67	8.11	8.59	4.24
30—40	7.30	11.94	19.05	9.91	10.06	4.85
40—50	9.35	16.30	31.86	12.69	11.91	6.01
50—60	11.03	20.47	53.82	45.63	16.22	6.94
平均值	4.77	4.58	22.02	3.14	6.33	2.68

SOC: 土壤有机碳 soil organic carbon; cPOC: 粗颗粒有机碳 coarse particulate organic carbon; fPOC: 细颗粒有机碳 fine particulate organic carbon; iPOC: 微团聚体内颗粒有机碳 intra-microaggregate particulate organic carbon; s+c_m: 微团聚体内粉+黏颗粒 silt and clay within microaggregates; s+c: 粉+黏颗粒 silt and clay

3 讨论

土地利用及土地利用方式变化对土壤有机碳有较大的影响^[15],而植被物种的组成,土地利用类型以及管理措施都会影响到土壤有机碳的质量、数量和周转^[16]。本研究结果表明,在整个 0—60 cm 的土壤深度内,土壤总有机碳及其各组分有机碳含量的高低顺序大致均为撂荒地、林地、果园及坡耕地,林地转变为坡耕地或果园后,土壤有机碳含量大幅下降,而将坡耕地闲置为撂荒地后,土壤有机碳得以恢复和增加。林地和撂荒地由于没有人类活动的干扰,地表的植被凋落物可通过分解补充土壤碳库;而且林木和草本植物根系的转化也是土壤碳的主要来源^[17];但林地由于位于土壤表层之下的树木根系粗大,难于分解,土壤有机质来源缺乏,从而导致含量较低,而撂荒地草本植物的根系特别是细根分布较浅,根系的腐解转化快,从而在 0—60 cm 的整个土壤剖面上土壤碳含量都比较高^[18]。果园周围居住的大多为山地农民,由于运输不便以及经济落后等原因,这些居民依靠果树的剪枝作为薪柴的主要来源,再加上果实的收获等,使得果园的土壤碳含量比林地低。坡耕地由于常年翻耕,土表松软,水土流失严重,致使伴随于其中的有机碳流失严重;并且人为翻耕增加了土壤的通透性,加剧了土壤有机碳的矿化;而且由于作物的收获,致使植物中的碳不能还田,这些原因都导致坡耕地不利于土壤碳的积累。

根据 Six 等^[6,19]提出的概念模型,cPOC 和 fPOC 构成的碳库可定义为非保护有机碳库,主要受土壤有机质输入的影响^[20],具有较强的生物活性;iPOC 为闭蓄在微团聚体内部的物理保护有机碳库,是土壤中相对活跃的有机碳库^[21]; <53 μm 的粉+黏颗粒有机碳组成了化学保护有机碳库(微生物来源的腐殖酸较多,并与黏粒结合),分解慢,有利于长期保存^[22]。由表 2 可以看出,物理保护有机碳库最小,约占土壤总有机碳的 3%左右;林地和撂荒地作为非人类干扰的自然生态系统,土壤有机质来源比较丰富,非保护有机碳库最大,占土壤总有机碳的 50%以上;果园和坡耕地作为受人类活动强烈干扰和影响的人工生态系统,由于土壤有机质来源缺乏及其自身碳的流失,非保护有机碳库迅速降低,而化学保护有机碳库最大,占到土壤总有机碳的 60%—70%多。Besnard 等^[23]用 ^{13}C 自然丰度技术发现,游离态颗粒有机质(即团聚体间颗粒有机质)与闭蓄态颗粒有机质(即团聚体内颗粒有机质)在 C 与 N 含量、C/N、形态及 $\delta^{13}\text{C}$ 在森林土壤中均无显著差异,但在耕作土壤中却有显著差异,研究者认为封闭在 50—200 μm 微团聚体内的颗粒有机质的周转时间比在其它位置的颗粒有机质更长,所以,干扰较少的土壤由于团聚体对土壤有机质的保护作用,比受干扰的土壤能积累更多的易变性有机碳,与本文的研究结果一致。cPOC 和 fPOC 作为活性有机碳可以直接参与土壤生物化学过程,同时也是土壤生物活动的能源和土壤养分的驱动力^[24]。因此,林地和撂荒地土壤有机碳的活性远远大于坡耕地

及果园,具有更高的土壤肥力。

表 2 在 0—60cm 土壤深度内不同土地利用类型下各概念性碳库中有机碳含量(g/kg) 及其占土壤总有机碳百分比(%) 以及与对照相比的相对差异(%)

Table 2 The contents of soil conceptual carbon pools and the percentages (%) to the total SOC and the relative differences (%) with the control treatment in the 0—60cm soil depth under the four land uses

土地利用方式 Land use type	有机碳 SOC	颗粒有机碳 cPOC + fPOC (非保护)	微团聚体内颗粒有机碳 iPOC (物理保护)	<53 μm 土壤组分有机碳 <53 μm soil fraction (化学保护)
林地 Forest	9.02 ¹	4.75 (52.66) ²	0.33 (3.66)	3.95 (43.79)
果园 Orchard	3.27 [-63.75] ³	1.20 (36.70) [-74.74]	0.10 (3.06) [-69.70]	1.97 (60.42) [-50.13]
坡耕地 Sloping farmland	2.58 [-71.40]	0.61 (23.64) [-87.16]	0.12 (4.65) [-63.64]	1.85 (71.71) [-53.16]
撂荒地 Abandoned land	14.90 [478]	7.53 (50.54) [1134]	0.42 (2.82) [250]	6.95 (46.64) [276]

1: 各概念性碳库中的有机碳含量;2: 各概念性碳库占土壤总有机碳的百分比;3: 各土地利用类型与对照相比的有机碳相对差异,其中坡耕地和果园是以林地作为对照,而撂荒地则是以坡耕地为对照

土地利用变化对土壤有机碳有较大影响,相比于总有机碳,非保护有机碳库变化更大,而物理保护和化学保护有机碳库变化则小一些(表 2)。在林地转变为坡耕地与果园时,非保护有机碳库分别降低了 87.16% 和 74.74%,而在坡耕地弃耕为撂荒地后,非保护有机碳库则增加了 11.34 倍。因此在土地利用转变过程中,随着有机质输入的增加或减少,土壤中非保护有机碳库也会迅速的升高或降低。Köbl 和 Kögel-Knabner^[25] 发现与游离态颗粒有机碳相比,闭蓄态颗粒有机碳含有更多的烷基碳(即碳化合物的长链如酸、油脂、角质酸、蛋白质和缩氨酸)和较少的氧-烷基碳(如碳水化合物和多糖),表明在游离态颗粒有机碳转变为闭蓄态颗粒有机碳过程中,存在易分解碳水化合物选择性分解和惰性的长链碳的保护现象。Golchin 等^[26] 发现在耕作土壤中,由于团聚体的持续破坏,导致有机质的矿化作物使易利用的氧-烷基碳优先损失,可能这也是本研究中林地垦殖为坡耕地和果园后非保护有机碳库快速降低的一个重要原因。不同组分有机碳分布的转变可通过土壤有机碳化学成分的变化反映出来^[18],本文的试验结果表明在坡耕地在弃耕撂荒时 fPOC 的上升幅度大于 iPOC,由此推断在这个转变过程中应该伴随着氧-烷基碳的富集。

Christensen^[27] 研究发现在长期耕作的旱田里,其耕层土壤中非复合组分占总有机碳的比例通常低于 10%,Sleutel 等^[20] 发现在比利时两块农田的表层土壤(0—20 cm)中,cPOC 与 fPOC 合起来占土壤总有机碳的比例为 5%—14%,Köbl 和 Kögel-Knabner^[25] 也发现对砂至壤土,这两个组分占土壤总有机碳的比例为 2.5—13.4%。但本研究中坡耕地表层土壤(0—20 cm)中这两种组分占土壤总有机碳比例的和约为 20%,比以上的研究结果要高。fPOC 即自由轻组有机碳,主要来源于不同分解阶段的植物残体,真菌的菌丝和孢子、种子、动物残体、微生物残骸等^[28],对土壤有机质周转有重要作用,是植物养分的短期储存库,具有较高的易变性^[29],是土壤中不稳定有机碳库的重要组成部分^[30]。本研究发现 fPOC 作为活性碳组分对土地利用变化最敏感,其敏感性指标远远高于其它有机碳组分。Sleutel 等^[20] 也认为 fPOC 可作为农田管理措施变化对碳库影响的良好指标,但是 fPOC 的敏感性随着管理措施的变化也在发生着改变。他们在比利时的一个长期野外试验站,发现在低有机质输入的情况下,随着农田厩肥施用量的增加,fPOC 占总有机碳的分配比例也呈现出明显的随之升高趋势,但在高有机质输入下(从每 4 年 40 t 厩肥+40 t NKP 化肥处理到每 4 年 80 t 厩肥处理),其分配比例没有进一步的显著性的升高,从而表明这类非保护性碳库可以变得饱和。另外,Carter 等^[31] 在加拿大渥太华的沙壤土的一个研究发现轻组有机碳的分配比例在添加厩肥的处理下(50 t/hm² 每季作物)高于不添加厩肥的处理,但是在 50 t/hm² 处理与 100 t/hm² 处理之间没有发现持续的升高趋势,从而证明该活性组分对管理方式有不同的响应。

本研究发现不同土地利用方式下 iPOM 含量远高于 fPOM,在整个 0—60 cm 土壤深度内,4 种土地利用方式下 iPOM 含量分别为林地 16.66%,撂荒地 5.24%,坡耕地 4.14%和果园 3.54%;而土壤中 fPOM 含量非常低,在 0.27‰—2.12‰之间,但 iPOC 的分配比例却显著低于 fPOC(图 4),表明有机质组分自身的碳浓度在其中

发挥了重要作用。该结果与 Elliott^[32]的研究相反,他认为团聚体组分中有机碳的分布主要是受该组分含量的控制,但我们的研究结果与 Del Gald 等^[33]相似,他们发现牧场中 53—250 μm 土壤组分有机碳分配比例比原始草原低 38%,但其组分含量两者之间却没有显著差异。而且, Sleutel 等^[20]也发现与对照(不施厩肥)相比,施加厩肥后的确可以提高 iPOC 的分配比例,但对 iPOM 的含量却没有明显影响。Six 等^[6]以及 Huang 等^[10]通过研究发现,iPOC 对生态系统变化敏感,受土地利用变化及土地管理方式(例如耕作方式、施肥)的强烈影响。但我们的研究发现 iPOC 的敏感性指标非常低(表 1),对土地利用变化并不敏感,这可能与不同的土壤类型或者气候条件有关。

<53 μm 土壤组分有机碳含量相对较高,但对土地利用变化并不敏感,其变化幅度甚至低于 SOC(表 2),与 Sleutel 等^[20]的研究一致,即随着厩肥施用量的增加,<53 μm 土壤组分有机碳含量及其分配比例均得到提高,然而增加幅度却远低于土壤总有机碳。徐江兵等^[12]通过对旱地红壤表层(0—15 cm)有机碳物理分组发现,矿物结合态有机碳(即本文中的 s+c_m 组分有机碳)是土壤有机碳的主要组成部分,占总有机碳的 76%—85%,但在本研究中 s+c_m 组分有机碳占土壤总有机碳的分配比例却非常低,在坡耕地 0—20 cm 土层中约为 4%,这种研究结果上的差异也许是由于不同的土壤类型所致,本研究中的坡耕地为黄壤,而徐江兵等^[12]的土壤类型为红壤。然而,具体原因还有待于进一步的研究。

4 结论

(1) 林地及撂荒地 SOC 及其各组分碳含量都显著高于果园和坡耕地,说明林地开垦将会造成土壤中碳的流失,而坡耕地撂荒后则有助于碳的恢复和截存;

(2) 林地和撂荒地中活性较强的 cPOC 及 fPOC 的有机碳分配比例较高,而果园和坡耕地中受化学保护的粉+黏颗粒有机碳分配比例较高,说明林地和撂荒地 SOC 的活性高于果园和坡耕地,从而具有更高的土壤肥力;

(3) fPOC 对土地利用方式的变化比 SOC 及其它组分更敏感,可作为评估土地利用变化对土壤有机碳库影响的良好指标。

参考文献(References):

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [2] 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*, 1987, 51(5): 1173-1179.
- [3] 苏永红, 冯起, 朱高峰, 司建华, 常宗强. 土壤呼吸与测定方法研究进展. *中国沙漠*, 2008, 28(1): 57-65.
- [4] Garten C T, Wullschlegel S D. Soil carbon inventories under a bioenergy crop (*Switchgrass*): Measurement limitations. *Journal of Environmental Quality*, 1999, 28(4): 1359-1365.
- [5] Marriott E E, Wander M M. Total and labile soil organic matter in organic and conventional farming systems. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(3): 950-959.
- [6] Six J, Callewaert P, Lenders S, De Gryze S, Morris S J, Gregorich E G, Paul E A, Paustian K. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(6): 1981-1987.
- [7] 唐国勇, 李昆, 孙永玉, 张春华. 土地利用方式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响. *林业科学研究*, 2011, 24(6): 754-759.
- [8] 蓝家程, 傅瓦利, 袁波, 彭景涛, 张婷, 付允. 岩溶山区土地利用方式对土壤活性有机碳及其分布的影响. *中国岩溶*, 2011, 30(2): 175-180.
- [9] 李娟, 廖洪凯, 龙健, 陈彩云. 喀斯特山区土地利用对土壤团聚体有机碳和活性有机碳特征的影响. *生态学报*, 2013, 33(7): 2148-2156.
- [10] Huang S, Peng X X, Huang Q R, Zhang W J. Soil aggregation and organic carbon fractions affected by long-term fertilization in a red soil of subtropical China. *Geoderma*, 2010, 154(3/4): 364-369.
- [11] 黄山, 芮雯雯, 彭现宪, 刘武仁, 张卫建. 稻田转变为旱地下土壤有机碳含量及其组分的变化特征. *环境科学*, 2009, 30(4): 1146-1151.
- [12] 徐江兵, 李成亮, 何园球, 王艳玲, 刘晓利. 不同施肥处理对旱地红壤团聚体中有机碳含量及其组分的影响. *土壤学报*, 2007, 44(4): 675-682.

- [13] Six J, Elliott 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.
- [14] Bremer E, Janzen H H, Johnston A M. Sensitivity of total, light fraction and mineralizable organic matter to management practices in a Lethbridge soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 1994, 74(2): 131-138.
- [15] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 2000, 6(3): 317-327.
- [16] Berger T W, Neubauer C, Glatzel G. Factors controlling soil carbon and nitrogen stores in pure stands of Norway spruce (*Picea abies*) and mixed species stands in Austria. *Forest Ecology and Management*, 2002, 159(1/2): 3-14.
- [17] Zhong L, Zhao Q G. Organic carbon content and distribution in soils under different land uses in tropical and subtropical China. *Plant and Soil*, 2001, 231(2): 175-185.
- [18] 邱莉萍, 张兴昌, 程积民. 土地利用方式对土壤有机质及其碳库管理指数的影响. *中国环境科学*, 2009, 29(1): 84-89.
- [19] Six J, Conant R T, Paul E A, Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155-176.
- [20] Sleutel S, De Neve S, Nemeth T, Toth T, Hofman G. Effect of manure and fertilizer application on the distribution of organic carbon in different soil fractions in long-term field experiments. *European Journal of Agronomy*, 2006, 25(3): 280-288.
- [21] Conant R T, Six J, Paustian K. Land use effects on soil carbon fractions in the southeastern United States. II. changes in soil carbon fractions along a forest to pasture chronosequence. *Biology and Fertility of Soils*, 2004, 40(3): 194-200.
- [22] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展. *土壤学报*, 2011, 48(2): 412-418.
- [23] Besnard E, Chenu C, Balesdent J, Puget P, Arrouays D. Fate of particulate organic matter in soil aggregates during cultivation. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(4): 495-503.
- [24] 张瑞, 张贵龙, 姬艳艳, 李刚, 常泓, 杨殿林. 不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响. *环境科学*, 2013, 34(1): 277-282.
- [25] Köbl A, Kogel-Knabner I. Content and composition of free and occluded particulate organic matter in a differently textured arable Cambisol as revealed by solid-state ^{13}C NMR spectroscopy. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2004, 167(1): 45-53.
- [26] Golchin A, Clarke P, Oades J M, Skjemstad J O. The effects of cultivation on the composition of organic matter and structural stability of soils. *Australian Journal of Soil Research*, 1995, 33(6): 975-993.
- [27] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52(3): 345-353.
- [28] Spycher G, Sollins P, Rose S. Carbon and nitrogen in the light fraction of a forest soil: vertical distribution and seasonal patterns. *Soil Science*, 1983, 135(2): 79-87.
- [29] Balesdent J. The significance of organic separates to carbon dynamics and its modelling in some cultivated soils. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(4): 485-493.
- [30] 董洪芳, 于君宝, 管博. 黄河三角洲碱蓬湿地土壤有机碳及其组分分布特征. *环境科学*, 2013, 34(1): 288-292.
- [31] Carter M R, Angers D A, Gregorich E G, Bolinder M A. Characterizing organic matter retention for surface soils in eastern Canada using density and particle size fractions. *Canadian Journal of Soil Science*, 2003, 83(1): 11-23.
- [32] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 627-633.
- [33] Del Galdo I, Six J, Pressotti A, Cortufo M F. Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fraction and stable C isotopes. *Global Change Biology*, 2003, 9(8): 1204-1213.