



اثر کاربری اراضی بر تغییرات سن کربن-۱۴ و تعیین کیفیت مواد آلی خاک با استفاده از طیف‌سنجی تبدیل فوریه‌ی زیر قرمز

ابراهیم مقیسه*^۱، محمد قنادی مراغه‌^۲، احمد حیدری^۳

۱. پژوهشکده‌ی تحقیقات کشاورزی، پزشکی، و صنعتی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۴۹۸-۳۱۴۸۵، کرج - ایران

۲. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران - ایران

۳. گروه مهندسی علوم خاک، دانشگاه تهران، صندوق پستی: ۴۱۱۱، کرج - ایران

چکیده: کربن آلی خاک نقش مهمی در چرخه‌ی کربن جهان داشته و مطالعه‌ی پویایی آن با توسعه‌ی صنعت هسته‌ای همراه بوده است. جداسازی فیزیکی، عمرسنجی با کربن-۱۴ و طیف‌سنجی تبدیل فوریه‌ی زیر قرمز (FTIR)، از روش‌های معتبر در تعیین پویایی و اثرات کاربری اراضی بر کربن آلی خاک است. در این مطالعه، با استفاده از فن‌آوری عمرسنجی کربن-۱۴ و طیف‌سنجی تبدیل فوریه‌ی زیر قرمز همراه با جزء به جزء کردن فیزیکی مواد آلی، اثر سه کاربری جنگل پهن‌برگ، سوزنی‌برگ و مرتع بر متوسط زمان ماندگاری و کیفیت کربن آلی خاک بررسی شد. نتایج طیف‌های تبدیل فوریه‌ی زیر قرمز نشان داد که گروه‌های عاملی حلقوی به مقدار بیش‌تر و با تجزیه‌ی کم‌تر در جنگل سوزنی‌برگ سبب افزایش کربن آلی خاک شده است. قطعات مواد آلی آزاد و درون خاک‌دانه‌ای به عنوان شاخص حساس به کاربری اراضی شناسایی شدند. نسبت کربن آلیفاتیک به آروماتیک در بقایای گیاهی و بخش درون خاک‌دانه‌ای جنگل پهن‌برگ نسبت به سایر کاربری‌ها بیش‌تر است. در دو کاربری جنگل پهن‌برگ و سوزنی‌برگ حداکثر سن کربن-۱۴ و متوسط زمان ماندگاری آن، در افق B بود، در حالی که در مرتع، در افق A اندازه‌گیری شد. گروه‌های عاملی حلقوی همراه با سن کربن-۱۴ شاخص مطمئنی برای مطالعه‌ی فرایندهای تجزیه و هوموسی شدن هستند.

کلیدواژه‌ها: کربن آلی خاک، کاربری اراضی، طیف‌سنجی تبدیل فوریه‌ی زیر قرمز، جزء به جزء کردن فیزیکی، عمرسنجی کربن-۱۴

Impacts of Land Use on Variations of Soil ¹⁴C-Age and Determination of Organic Matter Quality by FTIR Spectrometry

E. Moghiseh*¹, M. Ghannadi Maragheh², A. Heidari³

1. Agriculture, Medicine and Industrial Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.Box: 31485-498, Karaj - Iran

2. Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 14395-836, Tehran - Iran

3. Soil Science Department, University of Tehran, P.O.Box: 4111, Karaj - Iran

Abstract: Soil organic carbon (SOC) plays an important role in the global carbon cycle, and study of dynamics concerns the recent development of nuclear industry. Physical fractionation, radiocarbon dating and FTIR spectrometry methods are among the most important methods for determining carbon dynamics and thereby the magnitude of soil carbon response to land uses. In this study, methodologies of carbon dating and FTIR spectrometry were used to characterize impacts of land use on mean residence times and quality (functional groups) of soil organic carbon based on physical fractionation methods in three land uses including deciduous, coniferous forests and rangelands. The FTIR spectra showed that higher aromatic carbon proportion and its lower decay rate of organic matter in coniferous forest have caused more SOC content. Free and intra-aggregates particulate organic matters (POM) have been recognized as criterion indices for deciduous forest use. Compared to the other land uses, the higher aliphatic to aromatic carbon ratios were obtained in litter and intra-aggregates POM of deciduous forest. The highest ¹⁴C age in both forest land uses (deciduous and coniferous) was measured in the B horizon, while in the rangeland occurred at the A horizon. Aromatic functional groups as well as ¹⁴C age are suitable parameters for homification processes.

Keywords: Soil Organic Carbon, Land Use, FTIR Spectrometry, Physical Fractionation, ¹⁴C Dating

*email: emoghiseh@nrcam.org

تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۱۱/۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۹/۲۷



۱. مقدمه

کاربری‌های مختلف اراضی قابل شناسایی هستند [۱۳، ۱۴]. این روش بر مبنای جذب یا عبور در ناحیه‌ی زیر قرمز طیف الکترومغناطیسی به وسیله‌ی پیوندهای شیمیایی مواد آلی است که به صورت ارتعاش در محدوده‌ی امواج الکترومغناطیسی با طول موج ۲۵۰۰ تا ۲۵۰۰۰ nm یا عدد موج ۴۰۰ تا 4000 cm^{-1} نشان داده می‌شود. گروه‌های عاملی آلیفاتیک (C-H) و آروماتیک (C=C) به ترتیب در محدوده‌ی ۲۸۰۰ تا 3000 cm^{-1} و ۱۶۰۰ تا 1640 cm^{-1} به عنوان شاخص آب‌گریزی (A) و آب‌دوستی (B) مواد آلی هستند [۱۵]؛ لذا، با استفاده از نسبت A/B، میزان آب‌گریزی مواد آلی مشخص می‌شود. این شاخص، معرف میزان دفع آب از خاک‌دانه‌ها، افزایش پایداری خاک‌دانه‌ها در آب و سرعت تجزیه‌ی کربن آلی است [۱۶]. هدف این پژوهش، بررسی سن کربن-۱۴ خاک در برخی اجزای مواد آلی در افق‌های A و B و نیز تعیین گروه‌های عاملی کربن آلی با استفاده از طیف‌سنجی تبدیل فوریه‌ی زیر قرمز، در کاربری‌های جنگل پهن‌برگ، جنگل سوزنی‌برگ و مرتع بود.

۲. مواد و روش‌ها

نمونه‌های خاک در ۸ تکرار از افق‌های A و B به همراه بقایای گیاهی سه کاربری جنگل پهن‌برگ (PF)، جنگل سوزنی‌برگ (SF) و مرتع (R) در منطقه‌ی کلاردشت استان مازندران انتخاب شدند. جنگل پهن‌برگ در محدوده‌ی ۵۱۵۱۱۰/۱VE، ۴۰۳۸۱۴۸/۹VN با پوشش غالب راش، جنگل سوزنی‌برگ در محدوده‌ی ۴۰۳۸۱۵۹/۵۹N، ۴۰۳۸۱۵۹/۱۴E با پوشش غالب نونل سبز و کاربری مرتع در محدوده‌ی ۴۰۳۸۲۵۸/۱۹N، ۵۱۴۹۹۴/۸VE با گونه‌های مختلف گرامینه^(۱) پوشیده شده‌اند [۱۷]. برای جزء به جزء کردن مواد آلی براساس اندازه، مقدار ۳۰۰ گرم از کل نمونه‌ی هر افق (بعد از عبور از الک ۲ میلی‌متری) درتکاننده به مدت ۱۶ ساعت با محلول سدیم هگزامتافسفات (۵ گرم در لیتر) در تماس قرار گرفت. سپس با ریختن سوسپانسیون حاصل بر روی الک ۵۳ میکرون ذرات کوچک‌تر از ۵۳ میکرون (سیلت + رس) از ذرات درشت مواد آلی جدا شدند [۱۸]. به منظور جزء به جزء کردن مواد آلی خاک‌دانه‌ها براساس چگالی و اندازه، ابتدا قطعات مواد آلی آزاد^(۲) (F-POM)، خاک‌دانه‌های درشت بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر، خاک‌دانه‌های متوسط (۰٫۲۵۰ تا ۲ میلی‌متر)، و خاک‌دانه‌های ریز (۵۳ تا ۲۵۰ میکرون) افق A، براساس چگالی ۱٫۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب محلول سدیم یدید

مواد آلی نقش مهمی در فرایندهای خاک هم‌چون چرخه‌ی عناصر غذایی، تشکیل ساختمان خاک، رسوب‌گذاری کربن، نگهداری آب، سمیت‌زدایی ترکیب‌های شیمیایی، و منبع انرژی ریزجانداران خاک دارند [۱]. از این رو تغییرات کمی و کیفی در کاربری‌های اراضی و تغییرات اقلیمی، ضرورت مطالعه‌ی تغییرات کربن خاک را برجسته می‌نماید [۲]. بیش‌تر مطالعات چند سال اخیر پیرامون بررسی کربن آلی خاک، با استفاده از روش‌های جداسازی مواد آلی بر مبنای خاک‌دانه، چگالی و اندازه [۳] و ایزوتوپ‌های کربن بوده است [۴، ۵]. در مطالعه‌ی پویایی مواد آلی خاک، با استفاده از کربن-۱۴، متوسط زمان ماندگاری^(۱) کربن در خاک برآورد می‌شود [۴]. از آنجایی‌که در مطالعات ردیابی، کربن-۱۴ طبیعی به‌طور یکنواخت همگی اجزای کربن را نشان‌دار می‌نماید، روشی کاملاً کاربردی در مقایسه با سایر ردیاب‌ها است [۶]. مواد آلی خاک، مخلوطی از مواد ناهمگن با سن متفاوت بوده، و در مراحل مختلف تجزیه و در اعماق مختلف با ذرات معدنی خاک ارتباط داشته و تعیین سن دقیق آن‌ها مقدور نیست، اما پس از جداسازی مواد آلی، می‌توان سن آن را با استفاده از کربن-۱۴ برآورد نمود [۷]. وو و ادنل [۸] و مجموعاً و کوزیاکو [۹] در طی مراحل مختلف هم‌چون، اکسایش شیمیایی، استفاده از تله‌ی سدیم هیدروکسید و سوسوزن و شمارش ذرات بتا به وسیله‌ی سوسوزنی مایع، سن کربن-۱۴ مواد آلی خاک را تعیین نمودند. مولنار و همکاران [۱۰]، طی ۸ ساعت اکسایش شیمیایی، همراه با تله‌ی باریوم هیدروکسید، و خالص‌سازی گاز در یک سیستم کروماتوگراف، سن کربن آلی خاک را برآورد نمودند. در کشور ما، در مطالعات انجام شده در زمینه‌ی عمرسنجی، از نمونه‌های خالص کربن آلی هم‌چون زغال و یا کربن معدنی (ترکیبات آهکی) استفاده شده است. اصغری‌زاده و همکاران [۱۱]، سن ۸ نمونه‌ی صدف سواحل جنوبی کشور را تحت اکسایش شیمیایی در یک سیستم سنتز بنزن، و با استفاده از شمارگر سوسوزنی، در گستره‌ی ۲۱۰ تا ۳۸۹۰ سال تعیین کردند. اما در زمینه‌ی عمرسنجی کربن آلی خاک، مستندات مشاهده نشده است.

مطالعات محدودی مربوط به استفاده از طیف‌سنجی زیر قرمز برای شناسایی گروه‌های عاملی مواد آلی خاک وجود دارد [۱۲]. با استفاده از طیف‌سنجی تبدیل فوریه‌ی زیر قرمز، گروه‌های عاملی مواد آلی و میزان تجزیه‌ی کیفیت بقایای گیاهی در



کربن زیاد، قابلیت اختلاط با سوسوزن‌ها بدون از دست دادن خواص، قابلیت انتقال نور، و مقاوم در برابر خطای خاموشی، ماده‌ای مناسب برای اندازه‌گیری کربن-۱۴ است [۱۱]. در این مطالعه، کربن آلی خاک طی مراحل اکسایش، کاربیداسیون، هیدرولیز، و تریمریزاسیون تحت شرایط خلاء به بنزن تبدیل شده است. به استثنای مرحله اکسایش، بقیه‌ی مراحل تولید بنزن از کربن آلی همانند روش مطالعه‌ی اصغری‌زاده و همکاران [۱۱] است.

در این پژوهش برای سوزاندن کربن آلی در مرحله‌ی اکسایش، بسته به میزان کربن آلی نمونه، ۱۵۰ تا ۲۵۰ گرم نمونه‌ی خاک در یک لوله‌ی کوارتز بین دو کوره قرار داده شد. کوره‌ها در دمای ۸۰۰ درجه تنظیم شده و عمل اکسایش خشک کربن آلی در حضور گاز اکسیژن خالص، به مدت ۱ الی ۲ ساعت انجام شد [۲۱]. در نهایت بنزن سنتز شده به داخل یک ظرف تفلونی منتقل و به دقت توزین شد. بنزن سپس با مقدار ۱۶ میلی‌لیتر سوسوزن تجاری به عنوان زمینه‌ی شمارش مخلوط شدند. نمونه‌ها قبل از شمارش به مدت ۳ تا ۴ هفته در یک محیط تاریک و خنک نگه‌داری شدند تا در صورت آلودگی احتمالی به رادون (^{222}Rn) با نیم-عمر ۳/۸۲ روز، واپاشی لازم انجام شود و خطای شمارش به حداقل برسد. در نهایت نمونه‌ها به مدت حداقل ۴۰۰ دقیقه در سه نوبت به وسیله‌ی دستگاه شمارگر سوسوزن مایع شمارش شدند و فعالیت پرتوزایی آن برحسب شمارش در دقیقه (cpm) اندازه‌گیری شد. به منظور انجام محاسبات سن کربن-۱۴، از استاندارد اگزالیک اسید (NBS) با برند SRM-4990C، NIST استفاده شد. بعد از اعمال تصحیحات، سن نسبی کربن آلی خاک یا متوسط زمان ماندگاری (سال) BP (سال ۱۹۵۰) [۲۲] با استفاده از رابطه‌ی زیر برآورد شد

$$(2) \quad \left[\frac{\text{شمارش بر دقیقه‌ی خالص بر گرم بنزن (S)}}{\text{شمارش بر دقیقه‌ی خالص بر گرم بنزن (NBS)}} \right] \ln 0.33 = 8.033 \times \text{متوسط زمان ماندگاری (سال)}$$

درصد کربن جدید ($\text{pMC}^{(7)}$) با رابطه‌ی زیر برآورد شده است

$$(3) \quad \text{pMC} = \left[\frac{\text{شمارش بر دقیقه‌ی خالص بر گرم بنزن (S)}}{\text{شمارش بر دقیقه‌ی خالص بر گرم بنزن (NBS)}} \right] \times 100$$

در این پژوهش اثر کاربری‌های جنگل پهن‌برگ، جنگل سوزنی‌برگ و مرتع بر درصد کربن با استفاده از نرم‌افزار آماري SPSS 19.0 مورد ارزیابی قرار گرفت.

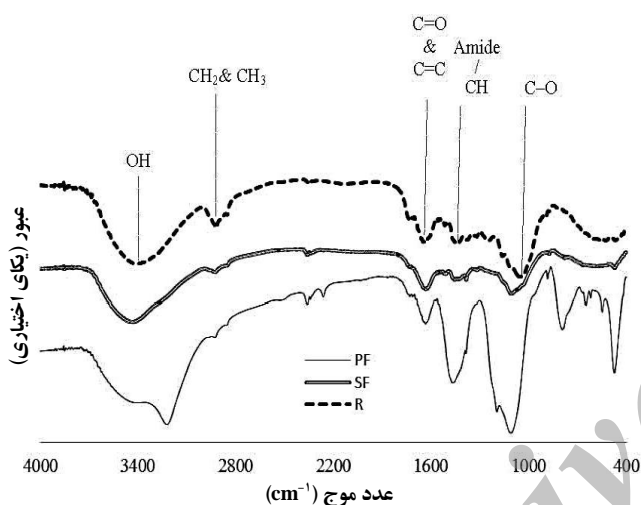
جداسازی شدند [۱۸]. سپس جزء سنگین مرحله‌ی قبل براساس اندازه‌ی ذرات و با استفاده از سدیم هگزا متافسفات (۵ گرم در لیتر) به دو جزء قطعات مواد آلی محصور درون خاک‌دانه^(۴) (IA-POM) (بزرگ‌تر از ۵۳ میکرون) و جزء کمپلکس‌های رس + سیلت^(۵) (IA-S+C) (کوچک‌تر از ۵۳ میکرون) تفکیک شدند [۱۹]. تمام اجزای جدا شده در مراحل قبلی بعد از خشک شدن در دمای ۶۰°C، توزین و آسیاب شدند. درصد کربن هر جزء با استفاده از دستگاه تجزیه‌ی عنصری CHNSO-Analyzer اندازه‌گیری شد. برای تعیین گروه‌های عاملی و ترکیب شیمیایی بقایای گیاهی و اجزای مواد آلی (IA-POM, F-POM) و IA-S+C در خاک‌دانه‌های ۰/۲۵۰ تا ۲mm و جزء IA-S+C در خاک‌دانه‌های بزرگ‌تر از ۲mm افق A سه کاربری PF, SF, R، ۱۰ میلی‌گرم از هر نمونه با ۳۰۰ میلی‌گرم پودر پتاسیم برمید، مخلوط شد. تحت فشار، برای هر نمونه یک قرص تهیه شد [۱۳]. طیف زیر قرمز با استفاده از دستگاه طیف‌سنج تبدیل فوریه‌ی زیر قرمز در محدوده‌ی ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ cm^{-1} تهیه شد. سپس با کم کردن طیف زمینه، طیف اصلی نمونه استخراج شد. برای کمی نمودن تغییرات نسبی طیف مادون قرمز، نسبت شدت جذب باندهای 1630 cm^{-1} : 2920 cm^{-1} (نسبت A/B) برای بقایای گیاهی و هر جزء کربن آلی خاک برآورد شد [۲۰]. هم‌چنین مقدار نسبی یا درصد جذب نسبی $(\text{rA}\%)^{(6)}$ مهم‌ترین گروه‌های عاملی هم‌چون کربن فنلی (OH)، آلیفاتیک (C-H)، آروماتیک (C=C)، آلیفاتیک + گروه‌های آمیدی، و پلی‌ساکاریدی (C-O) با استفاده از شدت جذب هر یک از گروه‌ها براساس رابطه‌ی زیر تعیین شد [۱۴، ۲۰]

$$(1) \quad \text{rA}\% = \frac{\text{شدت قله، مثلاً } 2930 \text{ cm}^{-1}}{\text{جمع شدت قله‌ها، مثلاً } 1030 \text{ cm}^{-1}, 1450, 1630, 2930, 3420} \times 100$$

به منظور عمرسنجی کربن-۱۴، کسر کمپلکس‌های رس + سیلت (IA-S+C) خاک‌دانه‌های بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر و ۰/۲۵ تا ۲ میلی‌متر افق A، حاصل از مرحله‌ی نهایی جزء به جزء‌سازی، و هم‌چنین کسر کوچک‌تر از ۵۳ میکرون کل نمونه‌ی افق A و افق B حاصل از جزء به جزء‌سازی براساس اندازه‌ی سه کاربری، انتخاب شدند. نمونه‌ها با هیدروکلریک اسید ۰/۱ نرمال شسته شد تا کربنات‌های معدنی کاملاً از بین بروند. برای شمارش بتا (β^-) حاصل از واپاشی کربن-۱۴ نمونه‌ی کربن آلی خاک، کربن باید از حالت جامد به بنزن مایع تبدیل شود. بنزن به دلیل دارا بودن

**۳. یافته‌ها و بحث****۱.۳ اثر کاربری اراضی بر کیفیت بقایای ورودی**

در این مطالعه حداکثر و حداقل مقادیر نسبی کربن آروماتیک و ترکیبات پلی فنولی بقایای ورودی خاک، به ترتیب در جنگل سوزنی برگ و پهن برگ هستند. وجود مقادیر زیاد پلی ساکاریدها در بقایای گیاهی سبب تجزیه‌ی سریع آن‌ها در جنگل پهن برگ شده [۲۴]، و در نتیجه سبب کاهش ذخیره‌ی کربن آلی در خاک می‌شود (جدول ۲)، در حالی که در کاربری جنگل سوزنی برگ مقادیر بالاتر لیگنین و فنول‌ها سبب کاهش تجزیه بقایای گیاهی شده و افزایش تجمع کربن آلی در خاک می‌شود (جدول ۲) [۲۵]. برخلاف مطالعه‌ی آنتیسپاری و همکاران [۲۶]، در این پژوهش حداکثر آب‌گریزی در بقایای گیاهی جنگل پهن برگ نسبت به جنگل سوزنی برگ و مرتع مشاهده شد (جدول ۱).



شکل ۱. طیف تبدیل فوریه‌ی زیر قرمز (FTIR) بقایای گیاهی کاربری‌های SF، PF و R.

در طیف تبدیل فوریه‌ی زیر قرمز بقایای گیاهی سه کاربری، باندهای ۱۰۴۰، ۱۴۵۰، ۱۶۳۷، ۲۹۳۰ و 3420 cm^{-1} مربوط به گروه‌های عاملی OH (ترکیبات فنولی)، کشش نامتقارن و متقارن گروه‌های عاملی C-H (کربن آلیفاتیک)، ارتعاش ساختاری باندهای C=C (کربن آروماتیک)، خم‌شدگی باندهای C-H آلیفاتیک و آمیدی، و کشش C-O پلی‌ساکاریدها شناسایی شدند (شکل ۱) [۱۴، ۱۹]. در جنگل پهن برگ (PF) بیش‌ترین مقدار جذب نسبی مربوط به کربن پلی‌ساکاریدی (۴۵٫۸۰٪) و حداقل آن مربوط به کربن آروماتیک (حلقوی) (۶٫۱۰٪) است. در کاربری جنگل سوزنی برگ (SF)، حداکثر جذب نسبی مربوط به کربن فنولی (۳۷٫۴۴٪) و حداقل آن مربوط به کربن آلیفاتیک (۹٫۸۷٪) است. فراوانی نسبی کربن پلی‌ساکاریدی جنگل سوزنی برگ نسبت به جنگل پهن برگ کاهش داشته و ترکیبات پلی‌فنولی افزایش نشان داده است. در کاربری مرتع (R)، همانند کاربری PF، حداکثر جذب نسبی مربوط به کربن پلی‌ساکاریدی بوده؛ ولی از جنگل پهن برگ کم‌تر است (جدول ۱). حداکثر نسبت کربن آلیفاتیک (A) (2930 cm^{-1}) به کربن آروماتیک (B) (1637 cm^{-1}) در بقایای گیاهی مربوط به کاربری جنگل پهن برگ (۱٫۳۱) است. کاربری‌های مرتع و جنگل سوزنی برگ در مرتبه‌ی دوم (۰٫۷۴) و سوم (۰٫۵۴) قرار دارند (شکل ۲). با توجه به نتایج طیف‌سنجی تبدیل فوریه‌ی زیر قرمز، نوع پوشش گیاهی بر کیفیت کربن آلی ورودی خاک تأثیر گذاشته است. از آنجایی که کربن آروماتیک و ترکیبات پلی‌فنولی شاخص‌های کیفیت بقایای ورودی خاک هستند [۲۳]،

جدول ۱. درصد جذب نسبی باندهای مختلف (گروه‌های عاملی) در بقایای گیاهی (L) و اجزای مختلف مواد آلی خاک افق A کاربری‌های اراضی

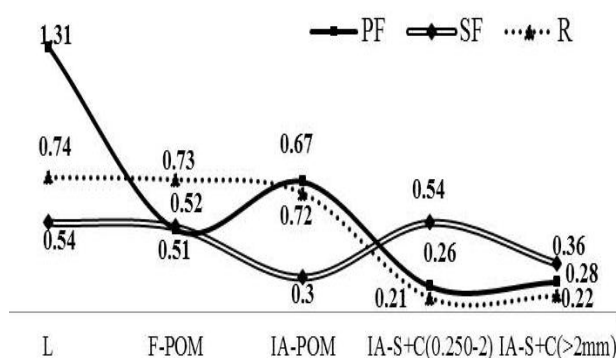
| پلی‌ساکارید-C | آلیفاتیک-C و آمید III | آروماتیک-C | آلیفاتیک-C | فنولیک-C | کاربری اراضی | جزء کربن آلی |
|---------------|-----------------------|------------|------------|----------|--------------|--------------|
| ۴۵٫۸۰ | ۱۶٫۸۸ | ۶٫۱۰ | ۷٫۹۹ | ۲۳٫۲۳ | PF | L |
| ۲۰٫۷۴ | ۱۳٫۶۱ | ۱۸٫۳۴ | ۹٫۸۷ | ۳۷٫۴۴ | SF | |
| ۳۰٫۲۳ | ۱۶٫۷۴ | ۱۶٫۳۹ | ۱۲٫۰۵ | ۲۴٫۴۹ | R | |
| ۳۹٫۴۳ | ۱۳٫۰۴ | ۱۶٫۹۷ | ۸٫۶۱ | ۲۱٫۹۵ | PF | F-POM |
| ۳۳٫۵۷ | ۱۶٫۳۳ | ۱۸٫۲۲ | ۹٫۵۴ | ۲۲٫۳۴ | SF | |
| ۴۳٫۵۸ | ۱۱٫۰۹ | ۱۳٫۴۸ | ۹٫۸۳ | ۲۲٫۰۲ | R | |
| ۳۲٫۴۵ | ۱۰٫۹۱ | ۱۶٫۵۳ | ۱۱٫۹۶ | ۲۸٫۱۵ | PF | IA-POM |
| ۲۶٫۹۳ | ۳۶٫۹۳ | ۱۷٫۰۸ | ۵٫۰۷ | ۱۳٫۹۹ | SF | |
| ۳۷٫۰۲ | ۱۶٫۲۸ | ۱۳٫۷۵ | ۹٫۲۲ | ۲۳٫۷۴ | R | |
| ۵۸٫۸۸ | ۸٫۷۰ | ۱۱٫۱۵ | ۲٫۹۴ | ۱۸٫۳۳ | PF | IA-S+C |
| ۵۸٫۵۷ | ۸٫۰۴ | ۱۰٫۱۴ | ۵٫۴۳ | ۱۷٫۸۲ | SF | ۰٫۲۵mm-۰٫۲ |
| ۵۸٫۴۱ | ۸٫۳۱ | ۱۱٫۴۲ | ۲٫۴۳ | ۱۹٫۴۳ | R | |
| ۶۱٫۴۱ | ۸٫۶۲ | ۹٫۶۷ | ۲٫۷۳ | ۱۷٫۵۷ | PF | IA-S+C |
| ۵۹٫۴۹ | ۸٫۳۸ | ۱۰٫۳۱ | ۳٫۶۹ | ۱۸٫۱۳ | SF | (>۲mm) |
| ۶۳٫۳۱ | ۸٫۴۷ | ۱۰٫۳۲ | ۲٫۳۱ | ۱۵٫۵۹ | R | |

و سوزنی‌برگ متوسط زمان ماندگاری یا سن کربن ذرات کوچک‌تر از ۵۳ میکرون، با عمق افزایش یافته است (جدول ۲). این افزایش سن کربن-۱۴ با عمق، هم‌سو با مطالعات رامپل و همکاران [۳۰] است. کم بودن سن در افق A نشان‌دهنده‌ی ورود کربن از بقایای گیاهی و ریشه‌های مرده به خاک، و اختلاط آن با کربن قدیمی است. با توجه به مقدار بیش‌تر کربن آلی، بخش کوچک‌تر از ۵۳ میکرون در جنگل سوزنی‌برگ نسبت به پهن‌برگ، نشان‌دهنده‌ی اضافه شدن کربن جدید در افق‌های A و B کاربری SF است (جدول ۲). کاهش فعالیت کربن-۱۴ و افزایش سن کربن آلی با عمق نتیجه‌ی تغییر عوامل کنترل‌کننده‌ی تجزیه و گردش مواد آلی خاک است؛ به طوری که در افق B، ورود کربن جدید از بقایای برگ محدود شده و سهم کربن مقاوم به تجزیه به علت مقاومت یا جذب با بخش معدنی در مقایسه با افق A بیش‌تر است [۳۰]. در کاربری مرتع، سن کربن-۱۴ در افق B کم‌تر از افق A اندازه‌گیری شد (جدول ۲)، که هم‌سو با نتایج فاولی و همکاران [۳۱] است. سن کربن-۱۴ جوان در افق‌های تحت‌الارض، مبین انتقال مواد آلی محلول از سطح به عمق‌های پایین‌تر، و میزان گردش سریع مواد آلی یا انتقال مواد توسط جانوران خاکزی است [۳۰]؛ در این مطالعه با توجه به تغییر کم‌تر مقدار کربن آلی B نسبت به A (جدول ۲)، انتظار می‌رود بالا بودن کربن ورودی از طریق ریشه در مقایسه با جنگل پهن‌برگ سبب افزایش درصد کربن جوان شود (جدول ۲) [۳۰].

۳.۳ اثر کاربری اراضی بر کمیت، کیفیت و سن کربن-۱۴ اجزای مواد آلی خاک

مقدار کربن آلی در اجزای F-POM و IA-POM تمام خاک‌دانه‌های کاربری جنگل سوزنی‌برگ و مرتع نسبت به جنگل پهن‌برگ کاهش یافته است (جدول ۳؛ $P < 0.05$) [۱۸]. مقدار بیش‌تر کربن این جزءها در جنگل پهن‌برگ نسبت به جنگل سوزنی‌برگ و مرتع، احتمالاً نتیجه‌ی حفاظت مواد آلی (F-POM و IA-POM) در بین و درون خاک‌دانه‌های جنگل پهن‌برگ است [۱۹].

با وجود مقدار کربن کل بیش‌تر در افق A کاربری SF در مقایسه با کاربری PF (جدول ۲)، با جداسازی اجزای کربن آلی مشخص شد که مقدار کربن آلی اجزای سبک و قطعات مواد آلی در جنگل سوزنی‌برگ نسبت به کاربری جنگل پهن‌برگ کم‌تر است (جدول ۳). به همین دلیل است که اجزای



شکل ۲. نسبت کربن آلیفاتیک (A) (2931 cm^{-1}) به کربن آروماتیک (B) (1637 cm^{-1}) در بقایای گیاهی (L)، و اجزاء کربن آلی افق A سه کاربری.

جدول ۲. درصد کربن آلی ذرات سیلت و رس (کوچک‌تر از ۵۳ میکرون) خاک و سن کربن-۱۴ و درصد کربن جدید این جزء در دو افق A و B سه کاربری مطالعه شده

| افق اراضی | کاربری | کربن آلی (%) | سن کربن-۱۴ (سال) | درصد کربن جدید (pMC) |
|-----------|--------|--------------|------------------|----------------------|
| A | PF | ۳,۴۶b | ۱۳,۰۵±۳۷ | ۸۵,۰۱±۰,۳۹ |
| | SF | ۵,۹۶a | ۹,۸۸±۳۹ | ۸۸,۴۲±۰,۴۳ |
| | R | ۲,۸۷c | ۱۱,۹۱±۳۵ | ۸۶,۲۱±۰,۱۱ |
| B | PF | ۱,۳۸b | ۴,۴۶۷±۵۰ | ۵۷,۳۵±۰,۱۳ |
| | SF | ۲,۵۳a | ۴,۴۱۰±۴۸ | ۵۷,۷۵±۰,۳۵ |
| | R | ۲,۶۹a | ۸,۰۷±۳۶ | ۹۰,۴۴±۰,۴۱ |

*: مقایسه‌ی آماری میانگین‌ها، حروف مشابه بیان‌گر عدم وجود تفاوت معنی‌دار (در سطح احتمال ۹۵٪ میانگین‌های هر خصوصیت بین کاربری‌ها ($P > 0.05$)).

۲.۲ اثر کاربری اراضی بر مقدار کربن آلی و سن کربن-۱۴ کربن آلی خاک کاربری سوزنی‌برگ، در بخش اندازه‌ای ذرات سیلت و رس افق A و B نسبت به کاربری جنگل پهن‌برگ افزایش نشان داد (جدول ۲)، که هم‌سو با نتایج والگت و همکاران است [۲۷]، در حالی که کربن آلی کاربری مرتع نسبت به جنگل پهن‌برگ، در افق A کاهش و در افق B افزایش نشان داد (جدول ۲) [۲۸]. مواد آلی مرتبط با این جزء به خاطر اتصال با سطوح معدنی، اغلب بخش غالب مواد آلی خاک را تشکیل می‌دهند و اهمیت زیادی در ظرفیت ذخیره‌ی طولانی‌مدت کربن در خاک‌ها دارد [۲۹].

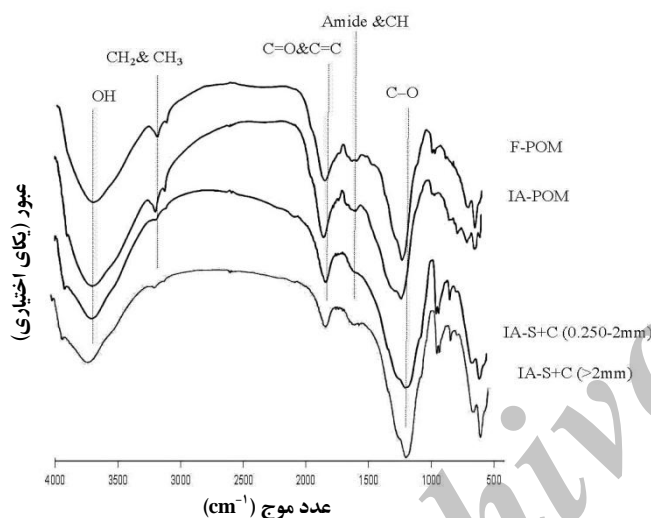
با تبدیل کاربری جنگل پهن‌برگ به سوزنی‌برگ درصد کربن جوان دو افق A و B، افزایش یافته و سن و متوسط زمان ماندگاری کربن-۱۴ کاهش پیدا کرده است. براساس نتایج عمرسنجی کربن-۱۴ مواد آلی خاک، در کاربری جنگل پهن‌برگ



جدول ۳. درصد کربن آلی، سن کربن-۱۴ و درصد کربن جدید در اجزای مواد آلی خاک دانه‌های افق A

| درصد کربن جدید (pMC) | سن کربن-۱۴ (سال) | IA-S+C | IA-POM | F-POM | کاربری اراضی | خاک دانه |
|----------------------|------------------|--------|--------|--------|--------------|-------------------|
| ۹۰,۴۷±۰,۳۵ | ۸۰,۴±۳۱** | ۳,۲۶b | ۹,۷۳a | ۳۴,۰۸a | PF | بزرگ تر از ۲mm |
| ۸۳,۹۶±۰,۳۸ | ۱۴۰,۴±۳۶ | ۵,۵۴a | ۹,۳۷a | ۲۷,۸۲b | SF | |
| ۸۷,۷۶±۰,۱۹ | ۱۰۴,۹±۳۵ | ۳,۲۳b | ۹,۶۷a | ۲۶,۴۲c | R | |
| ۷۷,۲۳±۰,۳۲ | ۲۰,۷±۳۴ | ۴,۵۷b | ۱۹,۰۲a | ۳۳,۲۸a | PF | ۲mm - ۰,۲۵۰ |
| ۹۴,۲۹±۰,۴۳ | ۴۷۲±۳۶ | ۵,۸۹a | ۷,۶۵c | ۳۰,۲۲b | SF | |
| ۸۱,۳۴±۰,۳۵ | ۱۶۵۹±۵ | ۳,۳۹c | ۹,۹۴b | ۲۷,۵۴c | R | |
| - | - | ۵,۱۲b | ۱۵,۸۰a | ۳۱,۵۵a | PF | کوچک تر از ۰,۵۳mm |
| - | - | ۶,۶۷a | ۴,۵۶b | ۳۱,۲۶a | SF | |
| - | - | ۴,۲۹c | ۴,۳۳b | ۲۱,۴۵b | R | |

°: مقایسه‌ی آماری میانگین‌ها، حروف مشابه بیان‌گر عدم وجود تفاوت معنی‌دار (در سطح احتمال ۹۵٪ میانگین‌های هر خصوصیت بین کاربری‌ها (P>۰,۰۵)).
°: سن کربن-۱۴ جزء IA-S+C



شکل ۳. طیف تبدیل فوریه‌ی زیر قرمز اجزای مواد آلی خاک دانه‌ی ۰,۲۵ تا ۲mm و جزء IA-S+C خاک دانه‌ی بزرگ تر از ۲mm کاربری‌های مطالعه شده.

لکن همان‌طور که مشاهده شد در این مطالعه میزان آب‌گریزی جزء درون خاک دانه‌ای و بقایای گیاهی در جنگل پهن‌برگ، بیش‌تر از سوزنی‌برگ است (شکل ۲).

خاک دانه‌های درشت جنگل پهن‌برگ و مرتع، ترکیبات فنولی و حلقوی کم‌تری نسبت به خاک دانه‌های ریز دارند که با نتایج سن کربن-۱۴ هم‌سو بوده و از سن کم‌تری نیز برخوردار هستند (جدول ۳) [۳۶]؛ در حالی که در خاک دانه‌های درشت جنگل سوزنی‌برگ با مقدار ترکیبات حلقوی بیش‌تر، سن کربن-۱۴ نسبت به خاک دانه‌های ریز بالاتر اندازه‌گیری شده است. از این‌رو مطالعه‌ی کیفیت مواد آلی خاک به ویژه مقدار ترکیبات حلقوی به همراه سن کربن-۱۴ آن‌ها، شاخص مطمئنی برای مطالعه‌ی فرایندهای تجزیه و هموسی شدن است.

IA-POM و F-POM مواد آلی خاک، به عنوان شاخص مهم و حساس به کاربری اراضی نسبت به کربن کل خاک معرفی شد [۳۲]. تقریباً در هر سه کاربری درصد کربن آلی جزء IA-S+C تمام خاک دانه‌ها با کاهش اندازه‌ی خاک دانه افزایش یافته است. این، نشان‌دهنده‌ی حفاظت مواد آلی در خاک دانه‌های ریز است که نقش مهمی در ذخیره‌ی طولانی‌مدت کربن دارد [۳۳]. از آن‌جایی که کربن آلی اجزای سبک و قطعات مواد آلی به عنوان ذخیره‌ی فعال خاک، شاخص مهم کیفیت مواد آلی خاک هستند [۳۴]، در این مطالعه اختلاف شدیدی بین کیفیت این دو جزء به ویژه جزء درون خاک دانه‌ای بین کاربری‌ها مشاهده شد، به طوری که حداکثر جذب نسبی کربن فنولی و آلیفاتیک در جنگل پهن‌برگ کربن فنولی و آروماتیک در مرتع در بین اجزای مواد آلی مطالعه شده مربوط به جزء مواد آلی درون خاک دانه‌ای (IA-POM) است. در حالی که این سه گروه عاملی در جزء IA-POM جنگل سوزنی‌برگ، شدیداً کاهش یافته‌اند (جدول ۱، شکل ۳).

در جزء IA-POM کاربری جنگل پهن‌برگ، نسبت کربن آلیفاتیک به آروماتیک (A/B) در مقایسه با دیگر کاربری‌ها به شدت افزایش یافته است (شکل ۲) [۳۵]؛ در حالی که در سایر کاربری‌ها به ویژه در جنگل سوزنی‌برگ کاهش و برعکس، شاخص ترکیبات حلقوی (B/A) افزایش یافته است. محصور شدن این مواد آلیفاتیک در درون خاک دانه‌های کاربری PF، بر پایداری خاک دانه و توقف^(۸) کربن آب‌گریز تأثیر دارد. براساس مطالعات آنتیسیاری و همکاران [۲۶]، ترکیبات آب‌گریز در خاک‌های جنگلی سوزنی‌برگ بیش‌تر است؛

**۴. نتیجه گیری****پی نوشت‌ها:**

۱. Mean Residence Time
۲. Graminea spp
۳. Free Particulate Organic Matter (F-POM)
۴. Intra-Aggregate Particulate Organic Matter (IA-POM)
۵. Intra-Aggregate Silt + Clay (IA-S+C)
۶. Relative Absorbance (rA)
۷. Percent Modern Carbon
۸. Sequestration

این پژوهش، پویایی کربن آلی در کاربری‌ها و افق‌های خاک را با استفاده از فن آوری سن‌یابی کربن-۱۴ به انجام رسانید. سیستم سنتر بنزن در سال ۱۳۷۳ در پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای به منظور عمرسنجی نمونه‌های خالص آلی و یا معدنی در مطالعات باستان‌شناسی طراحی شد. لکن در این پژوهش، با بهینه‌سازی روش اکسایش مواد آلی خاک در این سیستم، گامی برای مطالعه سریع‌تر و با هزینه کم‌تر برداشته شد. براساس نتایج عمرسنجی، درصد کربن جدید دو افق A و B در جنگل سوزنی‌برگ نسبت به جنگل پهن‌برگ افزایش، و متوسط زمان ماندگاری کربن-۱۴ کاهش یافته است. در این دو کاربری جنگل متوسط زمان ماندگاری کربن آلی (ذرات کوچک‌تر از ۵۳ میکرون) با عمق افزایش یافته است. اما به‌طور شگفت‌آور، در کاربری مرتع، سن کربن-۱۴ در افق B کم‌تر از افق A است. با مطالعه‌ی پویایی کربن آلی خاک با استفاده از روش‌های مختلف جداسازی مواد آلی (اندازه و چگالی)، مشخص شد که بخش قطعات مواد آلی سبک و بخش درون خاک‌دانه‌ای در مقایسه با کربن کل خاک، شاخص مهم و حساس نسبت به نوع کاربری اراضی از جنگل پهن‌برگ به سوزنی‌برگ و یا مرتع محسوب می‌شود. با استفاده از طیف‌سنجی تبدیل فوریه‌ی زیر قرمز، در این مطالعه مشخص شد که مواد آلی خاک‌های کشور، احتمالاً به دلیل محصور شدن مواد آلی در درون خاک‌دانه‌ها و آب‌گریز بودن گروه‌های عاملی، نقش مهمی در توقف کربن برای طولانی‌مدت داشته است. در کاربری‌های جنگل پهن‌برگ و مرتع، خاک‌دانه‌های درشت دارای ترکیبات فنولی و حلقوی کم‌تر و نیز سن کربن-۱۴ کم‌تری نسبت به خاک‌دانه‌های ریز داشته است. از این‌رو مقدار ترکیبات حلقوی و سن کربن-۱۴ مواد آلی، شاخص مناسبی برای میزان تجزیه‌ی کربن آلی خاک در مطالعه‌ی فرایندهای تجزیه و هموسی شدن است.

سپاس‌گزاری

نویسندگان مقاله از زحمات ارزشمند دکتر ثوابی، مدیر قطب علمی بهبود کیفیت خاک برای تغذیه‌ی متعادل گیاه دانشگاه تهران، دکتر احمدی، دکتر سامانی، فصیحی، شیروانی، مهندس آذری، سلیمی، کمالی، مهندس پیرولی، خراسانی و تیموری در فراهم آوردن امکانات و خدمات شایسته، قدردانی می‌نمایند.



1. D. C. Olk and G. E. Gregorich, Overview of the symposium proceedings, meaningful pools in determining soil carbon and nitrogen dynamics, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70 (2006) 967–974.
2. K. Heckman, A. C. Welty-Bernard Rasmussen, E. Schwartz, Changes of soil organic carbon and its fractions in relation to soil physical properties in a long-term fertilized paddy, *Soil Till. Res.* 104 (2009) 227–232.
3. F. Marzaioli, C. Lubritto, I. D. Galdo, A. D'Onofrio, M. F. Cotrufo, F. Terrasi, Comparison of different soil organic matter fractionation methodologies: Evidences from ultrasensitive ^{14}C measurements, *Nucl. Instru. Meth. Phys. Res. B*, 268 (2010) 1062-1066.
4. Y. Wang and Y. P. Hsieh, Uncertainties and novel properties in the study of the carbon dynamics, *Chemosphere* 49 (2002) 791-804.
5. J. Rethemeyer, P. M. Grootes, F. Bruhn, N. Andersen, M. J. Nadeau, C. Kramer, G. Gleixner, Age heterogeneity of soil organic matter, *Nucl. Instru. Meth. Phys. Res. B.* 223–224 (2004) 521–527.
6. E. A. Paul, H. P. Collins, S. W. Leavitt, Dynamics of resistant soil carbon of Midwestern agricultural soils measured by naturally occurring ^{14}C abundance, *Geoderma*, 104 (2001) 239–256.
7. J. Leifeld and J. Fuhrer, Long-term management effects on soil organic matter in two cold, high-elevation grasslands: clues from fractionation and radiocarbon dating, *Eur. J. Soil Sci.* 60 (2009) 230–239.
8. J. Wu and A. G. O'Donnell, Procedure for the simultaneous analysis of total and radioactive carbon in soil and materials, *Soil Biol. Biochem.* 29 (1997) 199-202.
9. B. Majumder and Y. Kuzyakov, Effect of fertilization on decomposition of ^{14}C labelled plant residues and their incorporation into soil aggregates, *Soil. Till. Res.* 109 (2010) 94–102.
10. M. Molnár, K. Joó, A. Barczy, Z. Szántó, I. Futó, L. Palcsu, L. Rinyu, Dating of total soil organic matter used in Kurgan studies, *Radiocarbon*, 46 (2004) 413–419.
11. F. Asghrizadeh, B. Salimi, M. Ghannadi Maraghe, A. Hocheghani, Determination of age the southern coast of Iran oyster samples with radiocarbon method, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 45 (2008) 7-11.
12. D. Ertlen, D. Schwartz, M. R. Trautmann, D. Brunet, Discriminating between organic matter in soil from grass and forest by near-infrared spectroscopy, *Eur. J. Soil Sci.* 61 (2010) 207–216.
13. F. J. Stevenson, *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*, John Wiley (1994).
14. L. V. Verchot, L. Dutaur, K. D. Shepherd, A. Albrecht, Organic matter stabilization in soil aggregates: Understanding the biogeochemical mechanisms that determine the fate of carbon inputs in soils, *Geoderma*, 161 (2011) 182–193.
15. D. Diehl, R. H. Ellerbrock, G. E. Schaumann, Influence of drying conditions on wet ability and DRIFT spectroscopic C–H band of soil samples, *Eur. J. Soil Sci.* 60 (2009) 557–566.
16. G. Onweremadu, T. Osuji, I. Eshett, U. Oparah, C. Onwuliri, Soil carbon sequestration in aggregate size of a forested isohyperthermic Arenic Kandudult, *Thai J. Agric. Sci.* 43(1) (2010) 9-15.
17. E. Moghiseh, Assessing the effects of changes in forest land-use on soil carbon dynamics and isotopic changes (Kelardasht, Mazandaran Province). Ph.D Thesis, Soil Science Department, University of Tehran (2012) (in Farsi).
18. E. G. Gregorich, M. H. Beare, Physically uncomplexed Organic Matter, In: M. R. Carter and E. G. Gregorich (eds). *Soil Sampling and Methods of Analysis*, (2th Ed.), Taylor & Francis Group, LLC. Chapter, 47 (2008).
19. J. D. Liao, T. W. Boutton, J. D. Jastrow, Storage and dynamics of carbon and nitrogen in soil physical fractions following woody plant invasion of grassland, *Soil Biol. Biochem.* 38 (2006) 3184–3196.



20. G. Haberhauer, B. Rafferty, F. Strebl, M. H. Gerzabek, Comparison of the composition of forest soil litter derived from three different sites at various decompositional stages using FTIR spectroscopy, *Geoderma*, 83 (1998) 331-342.
21. C. D. Shen, J. Beer, S. Ivy-Ochs, Y. Sun, W. Yi, P. W. Kubik, M. Suter, Z. Li, S. Peng, Y. Yang, ^{10}Be , ^{14}C distribution and soil production rate in a soil profile of a grassland slope at Heshan Hilly land Guangdong, *Radiocarbon*, 46 (2004) 445-454.
22. M. Stuiver and H. Polach, Discussion reporting of ^{14}C data, *Radiocarbon* 19, (1977) 355-363 (1977).
23. S. Hilli, S. Stark, J. Derome, Carbon quality and stocks in organic horizons in boreal forest soils, *Ecosystems*, 11 (2008) 270-282.
24. V. A. Kavvadias, D. Alifragis, A. Tsiontsis, G. Brofas, G. Stamatelos, Litter-fall, litter accumulation and litter decomposition rates in four forest ecosystems in northern Greece, *Forest. Ecol. Manage.*, 144 (2001) 113-127.
25. J. Koarashi, T. Iida, T. Asano, Radiocarbon and stable carbon isotope compositions of chemically fractionated soil organic matter in a temperate-zone forest, *J. Environ. Radioactivity*, 79 (2005) 137-156.
26. L. V. Antisari, S. Marinari, M. T. Dell'Abate, C. Baffi, G. Vianello, Plant cover and epipedon SOM stability as factors affecting brown soil profile development and microbial activity, *Geoderma*, 161 (2011) 212-224.
27. J. Walcott, S. Bruce, J. Sims, Soil carbon for carbon sequestration and trading: a review of issues for agriculture and forestry, Bureau of Rural Sciences, Department of Agriculture, Fisheries & Forestry, Canberra (2009).
28. B. M. Shrestha, B. K. Sitaula, B. R. Singh, R. M. Bajracharya, Soil organic carbon stocks in soil aggregates under different land use systems in Nepal, *Nutr. Cycle. Agroecosyst.*, 70 (2004) 201-213.
29. M. Von Lützwow, I. Kögel-Knabner, B. Ludwig, E. Matzner, H. Flessa, K. Ekschmitt, G. Guggenberger, B. Marschner, K. Kalbitz, Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: development and application of a conceptual model, *J. Plant. Nutr. Soil. Sci.* 171 (2008) 111-124.
30. C. Rumpel, I. Kögel-Knabner, F. Bruhn, Vertical distribution, age, and chemical composition of organic carbon in two forest soils of different pedogenesis, *Org. Geochem.* 33 (2002) 1131-1142.
31. F. Favilli, M. Egli, P. Cherubini, G. Sartori, W. Haeberli, E. Delbos, Comparison of different methods of obtaining a resilient organic matter fraction in Alpine soils, *Geoderma*, 145 (2008) 355-369.
32. Z. Tan, R. Lal, L. Owens, R. C. Izaurralde, Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice, *Soil Till. Res.* 92 (2007) 53-59.
33. P. Puget, C. Chenu, J. Balesdent, Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates, *Eur. J. Soil Sci.* 51 (2000) 595-605.
34. J. Luan, Sh. Liu, J. Wang, X. Zhu, Z. Shi, Rhizospheric and heterotrophic respiration of a warm-temperate oak chronosequence in China, *Soil Biol. Biochem.* 43 (2011) 503-512.
35. R. Wagai, L. M. Mayer, K. Kitatama, Nature of the "occluded" low-density fraction in soil organic matter studies: A critical review, *Soil Sci. Plant. Nutr.* 55 (2009) 13-25.
36. J. Six and J. D. Jastrow, Organic matter turnover, In: R. Lal (Ed.), *Encyclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker, New York (2006) 936-942.