

湘中丘陵区不同土地利用方式土壤水溶性有机碳含量*

张仕吉¹ 项文化^{1,2**} 孙伟军¹ 方 晰^{1,2}

(¹中南林业科技大学生命科学与技术学院, 长沙 410004; ²南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004)

摘 要 为了解土地利用方式对土壤有机碳库的影响,研究了湘中丘陵区 6 种土地利用方式(石栎+青冈次生林、杉木人工林、毛竹林、苗圃、农用旱地、水田)土壤水溶性有机碳(DOC)含量及其季节动态,分析了土壤 DOC 含量与土壤自然含水率、碳(C)、氮(N)含量之间的关系。结果表明:土壤 DOC 含量随土壤深度增加而下降,秋季土层之间差异最小,土壤 DOC 分配比例随土壤深度增加而增大;不同土地利用方式土壤 DOC 含量差异显著,与石栎+青冈次生林相比,毛竹林、杉木人工林、水田、农用旱地、苗圃依次下降了 10%~12%、11%~12%、13%~19%、18%~25% 和 37%~42%,夏季不同土地利用方式之间差异最大。不同土地利用方式土壤 DOC 含量季节变化明显,均表现为:春、夏、冬季较高,秋季最低,秋季与春、夏、冬季之间差异显著;土壤 DOC 含量与土壤自然含水率、TOC、MBC、ROC、MOC、全 N、水解 N 含量呈显著或极显著正相关。可见,土地利用方式显著影响土壤 DOC 含量及其空间分布,次生林转变为人工林或农用地后,土壤 DOC 含量明显下降。

关键词 湘中丘陵区;土地利用方式;土壤水溶性有机碳;季节变化

中图分类号 S153.6 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2014)8-2065-07

Soil dissolved organic carbon concentration under different land-use patterns in a hilly area of central Hunan Province, China. ZHANG Shi-ji¹, XIANG Wen-hua^{1,2**}, SUN Wei-jun¹, FANG Xi^{1,2} (¹College of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; ²National Engineering Laboratory of South Forestry Ecology Applicable Technologies, Changsha 410004, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(8): 2065–2071.

Abstract: In order to understand the effects of land-use patterns on soil organic carbon (SOC) pool, a study was conducted to examine the seasonal variation of soil dissolved organic carbon (DOC) and its correlation with soil moisture content, carbon (C) and nitrogen (N) concentrations in six adjacent land use types: (1) *Lithocarpus glaber* + *Cyclobalanopsis glauca* secondary forest, (2) *Cunninghamia lanceolata* plantation, (3) *Phyllostachys edulis* forest, (4) seedling nursery land, (5) slope cropland, and (6) paddy field in a hilly area of central Hunan, China. The results showed that DOC concentrations decreased with soil depth and with the minimum difference of DOC concentrations between soils layers occurring in autumn, while the proportion of DOC increased with increasing the soil depth. Soil DOC concentrations were significantly different among the land use types. Soil DOC concentrations decreased by 10%–12%, 11%–12%, 13%–19%, 18%–25% and 37%–42% in *P. edulis* forest, *C. lanceolata* plantation, paddy field, slope cropland and seedling nursery land, respectively, as compared with *L. glaber* + *C. glauca* secondary forest. The differences in DOC concentration among different land use types were maximum in summer. Seasonal variations in DOC concentration were considerable but a similar change pattern was found in the six land use types. Soil DOC concentrations were significantly higher in spring, summer and winter than in autumn. Positive correlations were found be-

* 国家林业公益性行业科研专项(201304317)和国家林业局林业科技推广项目([2012]61号)资助。

** 通讯作者 E-mail: xiangwh2005@163.com

收稿日期: 2013-12-18 接受日期: 2014-01-23

tween DOC concentrations and soil moisture content, TOC, MBC, ROC, MOC, total N, and available N. These results demonstrated that land-use patterns significantly affected soil DOC concentration and its spatial distribution. Soil DOC concentrations were significantly reduced when secondary forests were converted to plantations or agricultural lands.

Key words: hilly area of central Hunan; land-use types; soil dissolved organic carbon; seasonal variation.

土壤水溶性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC) 是土壤活性有机碳库的重要组成部分,也是土壤微生物的主要能源和土壤有机碳矿化的中间物质(李忠佩等,2004;李玲等,2012),其含量和性质能够反映土壤有机碳的稳定性(Zhao *et al.*, 2008;李玲等,2012),在陆地生态系统碳循环中发挥着重要作用(Aitkenhead-Peterson *et al.*, 2009)。此外,土壤 DOC 随土壤水分的运移而进入水体环境,是陆地生态系统碳、养分向水域系统传输的主要形式,成为了连接陆地和水生生态系统之间地球化学循环的重要物质(Freeman *et al.*, 2004)。随着全球温室效应加剧,泥炭地及河流 DOC 含量呈明显上升趋势(Wallage *et al.*, 2006)。因此,土壤 DOC 已成为全球碳循环研究的重要内容(Strohmeier *et al.*, 2013)。

土壤 DOC 含量受环境因子(Masayuki *et al.*, 2003;张剑等,2009;刘荣杰等,2013)、土壤理化性质(McGill *et al.*, 1986;张金波等,2005;柳敏等,2007)、施肥(Lepisto *et al.*, 1995;Freeman *et al.*, 2004)和土地利用方式(Zhang *et al.*, 2006;田静等,2011)变化的影响。近年来,国内外学者对森林、农田土壤 DOC 含量的季节动态及其与环境因子的相关性进行了一些研究(张剑等,2009;Wilson *et al.*, 2009;刘荣杰等,2013),但由于土壤活性有机碳库组成及其影响因素的多样性、复杂性,研究结论不尽一致,不同生态系统和各种环境因子对土壤 DOC 的影响机理还缺乏深入了解。土地利用方式一方面通过改变植被组成结构和生物多样性而影响生态系统碳库贮量、组成、稳定性及其周转,另一方面通过改变土壤理化性质、养分循环和水循环过程而影响土壤 DOC 动态和陆地生态系统碳的生物地球化学循环,从而成为影响陆地生态系统碳循环的主要人为因素。目前,土地利用方式对土壤 DOC 含量及其动态影响的研究较少(Aitkenhead-Peterson *et al.*, 2009;蓝家程等,2011)。湘中丘陵区人口密集,农业相对发达,土地供求矛盾尖锐,土地利用方式复杂多样,特别是近年来随着城市化和社会经济快速发展,土地利用方式变化更为明显和多样化。本研究以湘中丘陵

区 6 种土地利用方式:石栎(*Lithocarpus glaber*)+青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)次生林、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林、毛竹(*Phyllostachys heterocycla*)林、苗圃、农用旱地、水田)为对象,比较其土壤 DOC 含量及其季节动态,分析土壤 DOC 含量与土壤理化性状的相关性,以揭示土地利用方式对土壤有机碳库的影响机制,为深入研究人类活动对土壤碳库动态和土壤质量演变作用机制提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

研究地设在湖南省长沙县路口镇大山冲林场(28°23'N—28°24'N, 113°17'E—113°19'E),位于幕阜山余脉的西缘,为典型的低山丘陵,海拔 55 ~ 350 m,属于亚热带大陆型季风湿润气候,年平均气温 16.6 ~ 17.6℃,最高气温 40℃,最低气温 -11℃,相对湿度较大,年降水量为 1412 ~ 1559 mm,2010—2012 年月平均降水量和月平均气温如图 1 所示。土壤以红壤为主,由板岩和页岩发育而成,地带性植被为亚热带常绿阔叶林,属于湘中湘东山丘盆地栲(*Castanopsis fargesii*)林、马尾松(*Pinus massonana*)林、毛竹林、油茶(*Camellia oleifera*)林及农田植被区——幕阜、连云山地丘陵植被小区,土地利用方式主要有水田(粮田)、农用旱地(菜地)、次生林、人工林、苗圃等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选定及土壤样品采集 在长沙县路口

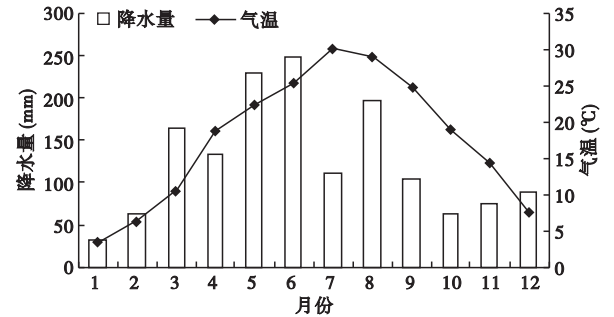


图 1 研究地 2010—2012 年月平均降水量和月平均气温
Fig.1 Monthly precipitation and air temperature in years of 2010 to 2012

镇大山冲林场及附近,选择6种土地利用方式:石栎+青冈次生林、杉木人工林、毛竹林、苗圃、农用旱地、水田,分别用No. 1、No. 2、No. 3、No. 4、No. 5和No. 6表示(下同),各土地利用方式的基本情况见表1。

在石栎+青冈次生林、杉木人工林、毛竹林内,分别在上坡、中坡、下坡各设置1块10 m×10 m的固定样方,构成3个重复;农用旱地、苗圃地、水田因人为耕作活动,土壤理化性质比较均匀,在农用旱地、苗圃、水田内分别随机设置3个10 m×10 m的固定样方,构成3个重复。每个固定样方分别随机布置3个采样点。

每个采样点按0~15 cm、15~30 cm分层,于2011年12月20日(冬季)、2012年3月23日(春季)、2012年6月26日(夏季)和2012年9月28日(秋季)分别在连续天晴1周后采集土壤样品。每次采样时在每个采样点挖1个土壤剖面,沿土壤剖面从下至上采集土壤;每个固定样方的3个土壤剖面相同层次土壤混合为1个土壤样品(约取2 kg);每种土地利用方式每一季节分别采集土壤样品6个,取3个固定样方的算术平均值作为每种土地利用方式每季节的最终测定结果。

1.2.2 土壤样品分析 对土壤样品清除植物根系、凋落物和石砾等杂质后,每一土壤样品分成2份:1份过2 mm土壤筛后装入无菌塑料袋密封存放于冰箱0~4℃下保存,用于测定土壤DOC、微生物生物量碳(MBC)、可矿化有机碳(MOC)、自然含水率;另1份自然风干后,过0.25 mm土壤筛,用于测定土壤总有机碳(TOC)、易氧化有机碳(ROC)、全N、水解N。

土壤DOC用鲜土10 g,按水土比4:1,蒸馏水

浸提,在25℃下恒温振荡30 min(200 r·min⁻¹)后,离心20 min(4000 r·min⁻¹),用0.45 μm滤膜抽滤,滤液直接在TOC-1020A分析仪上测定(汪伟等,2008);MBC用氯仿熏蒸、K₂SO₄浸提、滤液直接在TOC-1020A分析仪测定(段正锋等,2009);MOC用短期(3 d)室内培养,碱液吸收酸滴定法测定(王清奎等,2007;段正锋等,2009);TOC用重铬酸钾水合加热法测定,ROC用333 mmol·L⁻¹ KMnO₄氧化比色法测定(龚伟等,2008),土壤自然含水率用105℃烘干法、全N用凯氏半微量定氮法、水解N用碱解扩散法测定。

1.3 数据处理

土壤DOC分配比例是指土壤DOC含量占土壤TOC含量的百分比(田静等,2011),计算公式为:

$$DOC \text{ 分配比例}(\%) = \frac{\text{土壤 DOC 含量}}{\text{土壤 TOC}} \times 100$$

用SPSS 10.0软件进行数据统计分析,用单因素方差分析(one-way ANOVA)比较不同土地利用方式土壤DOC含量及其分配比例的差异,计算平均值和标准差,用Tukey-Kramer多重检验法检验各土地利用方式之间、土层之间、季节之间的差异显著性($P < 0.05$),用Pearson相关分析计算土壤DOC含量与土壤理化性状之间的相关系数,用Excel软件作图。

2 结果与分析

2.1 土壤DOC含量及其分配比例

由表2可知,不同土地利用方式的土壤DOC含量差异显著($P < 0.05, n = 12$),0~15 cm土层DOC平均含量在0.276~0.475 mg·g⁻¹,变异系数为18%,15~30 cm土层在0.265~0.417 mg·g⁻¹,变异系数为14%。

表1 样地的基本特征
Table 1 Basic characteristics of sampling sites

样地	土地利用方式	坡向	坡度(°)	海拔(m)	植物特征
No. 1	石栎+青冈次生林	西北	22	225~254	石栎和青冈为优势树种,林龄58年,密度为1340株·hm ⁻² ,平均胸径12.7 cm,平均树高10.3 m
No. 2	杉木人工林	东南	24	223~258	杉木为优势树种,林龄51年,密度为625株·hm ⁻² ,平均胸径23.54 cm,平均树高19.51 m,每年秋末冬初人工整枝,清除林下植物和枯死木
No. 3	毛竹林	东南	15	210~230	毛竹为优势树种,林龄30年,密度8452株·hm ⁻² ,平均胸径13.54 cm,平均树高9.25 m,每年秋末冬初清除林下植物和枯死木,机械翻耕并施农家肥
No. 4	苗圃	东南	5~10	180~210	存在25年以上,栽植油茶、女贞、红榿木等苗木
No. 5	农用旱地(菜地)	东南	5~10	180~210	具有长期耕作史,种植玉米、白菜、南瓜、辣椒、红薯、大豆等不定农作物
No. 6	水田(粮田)	东南	5	150~180	具有长期耕作史,栽植双季水稻

表 2 不同土地利用方式土壤 DOC 含量 (mg · g⁻¹)
Table 2 Contents of soil DOC under different land-use types

土壤层次 (cm)	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	<i>F</i>	<i>F</i> _{0.05} (5,66)
0 ~ 15	0.475±0.07 Aa	0.422±0.05 Ba	0.426±0.04 ABa	0.276±0.04 Ca	0.357±0.04 Da	0.383±0.07 BDa	20.25	2.37
15 ~ 30	0.417±0.06 Ab	0.367±0.03 Bb	0.368±0.04 Bb	0.265±0.03 Ca	0.341±0.04 Ba	0.363±0.04 Ba	17.47	2.37

4 个季节的平均值±标准差, *n* = 12, *n* 为样本数, 同行不同大写字母表示土地利用方式之间差异显著 (*P* < 0.05), 同列不同小写字母表示不同土层之间差异显著 (*P* < 0.05), 下同。

表 3 不同土地利用方式下土壤 DOC 的分配比例 (%)
Table 3 Proportions of soil DOC to total SOC under different land-use types

土壤层次 (cm)	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	<i>F</i>	<i>F</i> _{0.05} (5,66)
0 ~ 15	2.00±0.65 Aa	2.24±0.56 Aa	2.27±0.53 Aa	2.76±0.42 Ba	2.86±0.43 Ba	2.43±0.63 ABa	4.48	2.37
15 ~ 30	2.44±0.64 Aa	2.54±0.49 Aa	2.50±0.72 Aa	2.79±0.31 Aa	2.95±0.59 Aa	2.53±0.49 Aa	1.57	2.37

4 个季节的平均值±标准差, *n* = 12。

与石栎+青冈次生林相比,毛竹林、杉木人工林、水田、农用旱地、苗圃土壤 DOC 含量依次下降了 10% ~ 12%、11% ~ 12%、13% ~ 19%、18% ~ 25% 和 37% ~ 42%。在 0 ~ 15 cm 土层,石栎+青冈次生林与杉木人工林、苗圃、农用旱地、水田之间,杉木人工林、毛竹林与农用旱地、苗圃之间,农用旱地、水田与苗圃之间土壤 DOC 含量差异显著 (*P* < 0.05),但石栎+青冈次生林与毛竹林之间,杉木人工林与毛竹林、水田之间,农用旱地与水田之间差异不显著 (*P* > 0.05)。在 15 ~ 30 cm 土层,石栎+青冈次生林与其他 5 种土地利用方式之间,杉木人工林、毛竹林、水田、农用旱地与苗圃之间土壤 DOC 含量差异显著 (*P* < 0.05),但杉木人工林、毛竹林、农用旱地、水田两两之间差异不显著 (*P* > 0.05)。土壤 DOC 平均含量随土壤深度增加而下降,其中石栎+青冈次生林 (*P* = 0.044)、杉木人工林 (*P* = 0.002)、毛竹林尤为明显 (*P* = 0.002),表明土地利用方式对土壤 DOC 含量及其空间分布影响明显,但随着土壤深度增加各土地利用方式之间的差异逐渐减弱。

在 0 ~ 15 cm 土层,土壤 DOC 的分配比例在 2.00% ~ 2.86%,大小为:农用旱地>苗圃>水田>毛竹林>杉木人工林>石栎+青冈次生林(表 3),其中苗圃、农用旱地与毛竹林、杉木人工林、石栎+青冈次生林之间的差异达到显著水平 (*P* < 0.05),而水田、毛竹林、杉木人工林、石栎+青冈次生林之间,水田、苗圃、农用旱地之间差异不显著 (*P* > 0.05)。在 15 ~ 30 cm 土层,土壤 DOC 的分配比例在 2.44% ~ 2.95%,大小为:农用旱地>苗圃>杉木人工林>水田>毛竹林>石栎+青冈次生林,但不同土地利用方式两

两之间的差异不显著 (*P* > 0.05)(表 3),表明土地利用方式影响土壤 DOC 的分配比例,但随土壤深度增加影响程度下降。

2.2 土壤 DOC 含量的季节变化

6 种土地利用方式 0 ~ 15 cm、15 ~ 30 cm 土层的 DOC 含量呈现出明显的季节变化(图 2),变化趋势表现为:春、夏、冬季较高,秋季最低,秋季与春、夏、冬季之间差异显著 (*P* < 0.05),但春、夏、冬季之间差异不显著 (*P* > 0.05)。0 ~ 15 cm 土层 DOC 含量的季节变化较 15 ~ 30 cm 土层明显,特别是石栎+青冈次生林和水田的土壤 DOC 含量的季节变化。秋季土层之间的差异最小,夏季不同土地利用方式之间的差异最大。

2.3 土壤 DOC 含量与土壤理化性状之间的关系

整个研究区土壤 DOC 含量与土壤自然含水率之间相关性不显著 (*P* > 0.05),与土壤 TOC、MBC、ROC、MOC、全 N、水解 N 含量之间呈极显著 (*P* < 0.01)或显著 (*P* < 0.05)正相关(表 4)。不同土地利用方式的土壤 DOC 含量与土壤自然含水率、TOC、MBC、ROC、MOC、全 N、水解 N 含量之间均呈极显著 (*P* < 0.01)或显著 (*P* < 0.05)的正相关(表 4)。

3 结论与讨论

3.1 不同土地利用方式对土壤 DOC 含量的影响

本研究中,土壤 DOC 含量随土壤深度增加而下降,与已有的研究结果一致(Wallage *et al.*, 2006;汪伟等,2008;田静等,2011;刘荣杰等,2013),其中石栎+青冈次生林、杉木人工林、毛竹林尤为明显,主要是因为:(1)土壤 DOC 含量与土壤 TOC 含量呈极

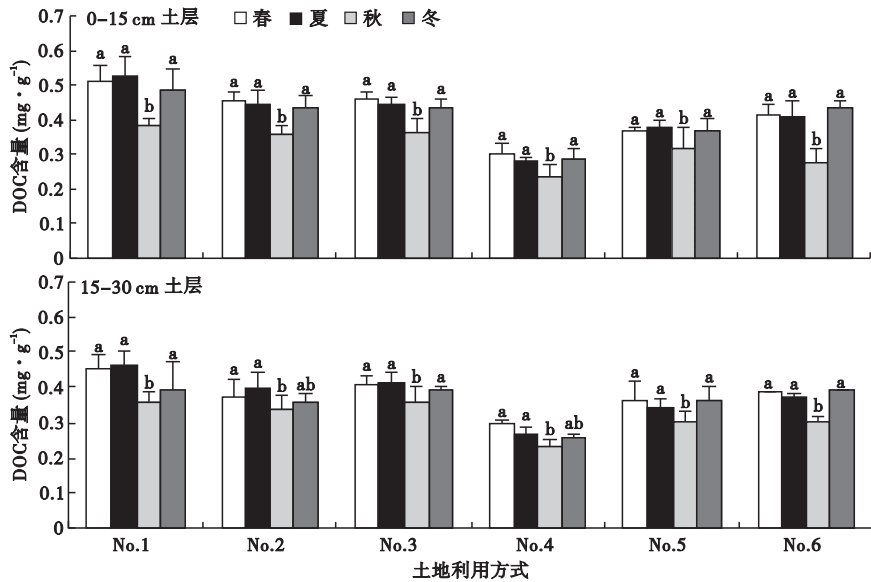


图2 不同土地利用方式土壤 DOC 含量的季节变化
Fig.2 Seasonal variations of DOC contents under different land-use types
不同小写字母表示同一土地利用方式不同季节之间差异显著 ($P<0.05, n=3$)。

表4 土壤 DOC 含量与土壤理化性状之间的相关系数
Table 4 Correlation coefficients between soil DOC and soil physicochemical properties

	研究区 ($n=144$)	No. 1 ($n=24$)	No. 2 ($n=24$)	No. 3 ($n=24$)	No. 4 ($n=24$)	No. 5 ($n=24$)	No. 6 ($n=24$)
含水率	0.021	0.529 **	0.430 *	0.641 **	0.681 **	0.587 **	0.703 **
TOC	0.351 **	0.487 *	0.444 *	0.433 *	0.740 **	0.782 **	0.636 **
MBC	0.192 *	0.550 **	0.544 **	0.540 **	0.581 **	0.539 **	0.620 **
ROC	0.374 **	0.608 **	0.548 **	0.582 **	0.563 **	0.572 **	0.548 **
MOC	0.275 **	0.458 *	0.658 **	0.539 **	0.609 **	0.614 **	0.544 **
全 N	0.253 **	0.559 **	0.428 *	0.538 **	0.578 **	0.561 **	0.445 *
水解 N	0.283 **	0.587 **	0.536 **	0.481 *	0.644 **	0.463 *	0.609 **

n 为样本数, * 相关性显著 ($P<0.05$), ** 相关性极显著 ($P<0.01$)。

显著或显著的正相关(表4),表明土壤 DOC 含量依赖于土壤 TOC 含量,随土壤 TOC 含量的增加而增加,而地表植物的枯落物、根系及根系分泌物分解、淋溶形成的有机碳首先进入土壤表层,导致土壤 TOC 含量随土壤深度增加而下降,DOC 含量也随之下降;(2)土壤 DOC 与土壤 MBC 呈极显著或显著的正相关(表4),表明土壤微生物生物量是影响土壤 DOC 产生和积累的重要因子,随土层深度增加,微生物可利用的有机物质减少,土壤微生物生物量及活性逐渐下降,土壤 DOC 含量也下降。此外,还可能与随土壤深度的增加,黏土矿物的物理吸附作用增强(田静等,2011)有关,这有待于进一步研究。

土地利用方式变化引起土壤 DOC 含量显著变化,主要是由于剩余有机质的稳定性和土壤有机质输入减少造成的(McGill *et al.*, 1986)。未扰动或扰动较少的自然林地土壤 DOC 含量较高,剧烈扰动且

经常扰动的土壤 DOC 含量迅速减少,冷和湿土壤容易造成厌氧条件,从而产生较多的 DOC(Christ *et al.*, 1996),林地开垦耕种是土壤 DOC 含量下降的主要原因(张磊等,2008)。本研究中,与石栎+青冈次生林相比,杉木人工林等 5 种土地利用方式土壤 DOC 含量显著下降,导致这一结果可能是因为:(1)人工林和农用地地表植被净初级生产量(NPP)降低或残留物移除,土壤有机碳输入减少,土壤 TOC 含量下降(张仕吉等,2013),土壤 DOC 含量也随之下降;(2)石栎+青冈次生林土壤的人为干扰较小,杉木人工林、毛竹林人为干扰也较小,而苗圃、农用地、水田经常人为翻耕扰动,导致土壤 DOC 含量明显下降。(3)水田土壤长期保持较高田间持水量,使土壤团聚体分散,促进土壤有机碳溶出,提高土壤 DOC 含量(韩琳等,2010),相关分析结果也表明,土壤 DOC 含量与土壤自然含水率呈极显著或显

著的正相关(表4)。因此,不同土地利用方式的土壤有机碳输入量和土壤理化性质的变化,导致其土壤 DOC 含量的差异显著。

土壤 DOC 的分配比例反映土壤有机碳的稳定性和损失,一般不超过 3% (Jandl *et al.*, 1997)。本研究的 6 种土地利用方式土壤 DOC 的分配比例在 2% ~ 2.95%, 以农用旱地最高, 其次是苗圃地, 杉木人工林、毛竹林较低, 石栎+青冈次生林最低, 表明农用旱地、苗圃因长期耕作加速土壤有机碳的分解和转化, 土壤有机碳的稳定性下降。土壤 DOC 的分配比例随土壤深度增加而增大, 表明下层土壤有机碳的稳定性高于表层土壤。

3.2 不同土地利用方式土壤 DOC 含量的季节动态

土壤 DOC 含量随环境因子(如降雨量、温度等)的季节变化而呈现一定的季节变化(汪伟等, 2008), 但由于气候、立地条件以及土壤理化性质的差异, 土壤 DOC 含量的季节变化呈现多种模式, 如春、夏季较高, 冬季较低 (Tipping *et al.*, 1999; Masayuki *et al.*, 2003; 张剑等, 2009), 冬季高, 夏季低(徐秋芳等, 2004; 汪伟等, 2008; 刘荣杰等, 2013), 秋季最高 (Zhou *et al.*, 2006), 也有季节变化不明显的 (Dosskey *et al.*, 1997)。

本研究的不同土地利用方式 2 个土层 DOC 含量均表现为春、夏、冬季含量较高, 秋季含量最低, 且秋季与春、夏、冬季差异显著。研究表明, 6 种土地利用方式土壤 DOC 含量与土壤自然含水率呈显著或极显著的线性正相关(表4)。由于土壤 DOC 是由相对较简单的有机化合物组成(刘荣杰等, 2013), 春、夏季温度升高, 降雨量增多, 土壤含水率升高, 经秋、冬季地表凋落物的积累和人为施肥, 土壤能提供大量易分解的有机质, 土壤微生物活性和新陈代谢提高, 有利于 DOC 的形成, 即使在春、夏季的降雨较多, 淋溶作用较强, 土壤微生物对土壤 DOC 的消耗量较大, 但土壤 DOC 含量仍维持较高的水平。在秋季气温仍较高, 降雨量明显减少, 土壤含水率下降, 大部分土壤微生物因土壤干燥而导致其活性极大减弱, 土壤 DOC 含量下降(曹建华等, 2005)。冬季温度低, 植物处于休眠状态, 土壤微生物活性明显下降, 土壤 DOC 消耗量下降而得到积累。此外, 冬季地表凋落物分解不彻底, 土壤积累较多有机物, 且以阴雨天气为主, 土壤含水量较高, 死亡的微生物残体释放出大量的 DOC (Schimel *et al.*, 1996)。土壤有机碳累积过程中, 气候因子(如降水

量、气温等)的季节性变化起重要作用, 一方面影响土壤有机碳的输入量, 另一方面影响土壤温、湿度, 造成土壤微生物活性的差异, 导致土壤 DOC 含量呈现季节变化。由于表土层环境因子的季节变化较下土层明显, 表土层 DOC 含量的季节变化也较下土层明显, 秋季表土层 DOC 含量下降幅度大, 下土层下降幅度小, 导致秋季土层间的差异最小。由于秋末冬初毛竹林机械翻耕以及苗圃、农用旱地、水田经常翻耕扰动, 微生物生物量及活性在土层间差异小, 造成毛竹林、苗圃、农用旱地、水田两土层 DOC 含量的差异较小。

3.3 土壤 DOC 含量与土壤因子的相关性

土壤含水量直接影响根际和土壤微生物活性, 从而影响土壤 DOC 含量 (Lou *et al.*, 2004)。研究表明, 在排水良好的土壤中, DOC 含量与土壤水分的正相关, 是由于高的水分含量提高微生物活性, 进而增加了水溶性有机化合物的形成(李忠佩等, 2004; Chow *et al.*, 2006)。本研究中, 6 种土地利用方式土壤 DOC 含量与土壤自然含水率均存在显著或极显著的正相关。

土壤 DOC 是土壤有机质淋溶和分解的产物, 与土壤 TOC、微生物生物量有较好的正相关 (Liang *et al.*, 1998; Haynes, 2000; 蓝家程等, 2011), 土壤微生物活性的增强促进 DOC 生成速率(徐秋芳等, 2005; 龚伟等, 2008)。但也有土壤 DOC 含量与土壤 MBC 含量之间不存在相关(姜培坤等, 2002)。本研究表明, 土壤 DOC 含量与土壤 TOC、MBC、ROC、MOC 含量之间均呈极显著或显著正相关, 表明土壤 DOC 含量不仅依赖于土壤 TOC 含量, 可指示土壤有机碳库的动态, 而且与土壤 MBC、ROC、MOC 含量紧密相关。土壤 N 含量影响微生物对有机质分解和利用速度, 而土壤 N 含量与土壤 TOC 含量显著相关, 因而土壤 DOC 与土壤 N 含量呈显著的正相关(张金波等, 2004)。由于影响土壤 DOC 含量及其季节变化的因素多且复杂, 一些环境因子和生物因素还可能交互起作用, 各种环境生态因子对不同土地利用方式土壤 DOC 的影响机理还有待于进一步研究。

参考文献

- 曹建华, 潘根兴, 袁道先, 等. 2005. 岩溶地区土壤溶解有机碳的季节动态及环境效应. 生态环境, 14(2): 224-229.
- 段正锋, 傅瓦利, 甄晓君, 等. 2009. 岩溶区土地利用方式对土壤有机碳组分及其分布特征的影响. 水土保持学报, 23(2): 109-114.

- 龚伟, 胡庭兴, 王景燕, 等. 2008. 川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤碳库与肥力的变化. *生态学报*, **28**(6): 2536–2545.
- 韩琳, 张玉龙, 金烁, 等. 2010. 灌溉模式对保护地土壤可溶性有机碳与微生物量碳的影响. *中国农业科学*, **43**(8): 1625–1633.
- 姜培坤, 周国模, 徐秋芳. 2002. 雷竹高效栽培措施对土壤碳库的影响. *林业科学*, **38**(6): 6–11.
- 蓝家程, 傅瓦利, 段正峰, 等. 2011. 岩溶山区土壤溶解性有机碳对土地利用方式的响应及其与土壤养分的关系, 水土保持研究, **18**(5): 76–80, 86.
- 李玲, 仇少君, 刘京涛, 等. 2012. 土壤溶解性有机碳在陆地生态系统碳循环中的作用. *应用生态学报*, **23**(5): 1407–1414.
- 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 2004. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系. *土壤学报*, **14**(4): 543–552.
- 刘荣杰, 李正才, 王斌, 等. 2013. 浙西北丘陵地区次生林与杉木林土壤水溶性有机碳季节动态. *生态学杂志*, **32**(6): 1385–1390.
- 柳敏, 宇万太, 姜子绍, 等. 2007. 土壤溶解性有机碳(DOC)的影响因子及生态效应. *土壤通报*, **38**(4): 758–764.
- 田静, 郭景恒, 陈海清, 等. 2011. 土地利用方式对土壤溶解性有机碳组成的影响. *土壤学报*, **48**(2): 338–346.
- 汪伟, 杨玉盛, 陈光水, 等. 2008. 罗浮栲天然林土壤可溶性有机碳的剖面分布及季节变化. *生态学杂志*, **27**(6): 924–928.
- 王清奎, 汪思龙, 于小军, 等. 2007. 常绿阔叶林与杉木林的土壤碳矿化潜力及其对土壤活性有机碳的影响. *生态学杂志*, **26**(12): 1918–1923.
- 徐秋芳, 姜培坤, 沈泉. 2005. 灌木林与阔叶林土壤有机碳库的比较研究. *北京林业大学学报*, **27**(2): 18–22.
- 徐秋芳, 姜培坤. 2004. 不同森林植被下土壤水溶性有机碳研究. *水土保持学报*, **18**(6): 84–87.
- 张剑, 汪思龙, 王清奎, 等. 2009. 不同森林植被下土壤活性有机碳含量及其季节变化. *中国生态农业学报*, **17**(1): 41–47.
- 张磊, 张磊. 2008. 土地耕作后微生物量碳和水溶性有机碳的动态特征. *水土保持学报*, **22**(2): 146–150.
- 张金波, 宋长春, 杨文燕, 等. 2005. 土地利用方式对土壤水溶性有机碳的影响. *中国环境科学*, **25**(3): 343–347.
- 张金波, 宋长春. 2004. 三江平原不同土地利用方式对土壤理化性质的影响. *土壤通报*, **35**(3): 371–373.
- 张仕吉, 项文化, 孙伟军, 等. 2013. 湘中丘陵区不同土地利用方式对土壤有机碳和微生物量碳的影响. *水土保持学报*, **27**(2): 222–227.
- Aitkenhead-Peterson JA, Steele MK, Nahar N, *et al.* 2009. Dissolved organic carbon and nitrogen in urban and rural watersheds of south-central Texas: Land use and land management influences. *Biogeochemistry*, **96**: 119–129.
- Chow AY, Tanji KK, Gao S, *et al.* 2006. Temperature, water content and wet-dry cycle effects on DOC production and carbon mineralization in agricultural peat soils. *Soil Biology and Biochemistry*, **38**: 477–488.
- Christ MJ, David MB. 1996. Temperature and moisture effects on the production of dissolved organic carbon in a spodosol. *Soil Biology and Biochemistry*, **28**: 1191–1199.
- Dosskey MG, Pertsch PM. 1997. Transport of dissolved organic matter through a sandy forest soil. *Soil Science Society of America Journal*, **61**: 920–927.
- Freeman C, Fenner N, Ostle NJ, *et al.* 2004. Export of dissolved organic carbon from peat-lands under elevated carbon dioxide levels. *Nature*, **430**: 195–198.
- Haynes RJ. 2000. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soil in New Zealand. *Soil Biology and Biochemistry*, **32**: 211–219.
- Jandl R, Sollins P. 1997. Water-extractable soil carbon in relation to the belowground carbon cycle. *Biology and Fertility of Soils*, **25**: 196–201.
- Lepisto A, Andersson L, Arheimer B, *et al.* 1995. Influence of catchments characteristics, forestry activities and deposition on nitrogen export from small forested catchments. *Water, Air, and Soil Pollution*, **84**: 81–102.
- Liang BC, Mackenzie AF, Schnitzer M, *et al.* 1998. Management-induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils. *Biology and Fertility of Soils*, **26**: 88–94.
- Lou YS, Li ZP, Zhang TL, *et al.* 2004. CO₂ emissions from subtropical arable soils of China. *Soil Biology and Biochemistry*, **36**: 1835–1842.
- Masayuki K, Hiroaki S, Kazuhiko Y, *et al.* 2003. Seasonal changes in organic compounds in soil solutions obtained from volcanic ash soils under different land uses. *Geoderma*, **113**: 381–396.
- McGill WB, Cannon KR, Robertson JA, *et al.* 1986. Dynamic of soil microbial biomass and water-soluble organic C in Breton L after 50 years of cropping to rotations. *Canadian Journal of Soil Science*, **66**: 1–19.
- Schimel JP, Clein JS. 1996. Microbial response to freeze-thaw cycles in tundra and taiga soils. *Soil Biology and Biochemistry*, **28**: 1061–1066.
- Strohmeier S, Knorr KH, Reichert M, *et al.* 2013. Concentrations and fluxes of dissolved organic carbon in runoff from a forested catchment: Insights from high frequency measurements. *Biogeosciences*, **10**: 905–916.
- Tipping E, Woolf C, Rigg E, *et al.* 1999. Climatic influences on the leaching of dissolved organic matter from upland UK moorland soils, investigated by a field manipulation experiment. *Environment International*, **25**: 83–95.
- Wallage ZE, Holden J, McDonald AT. 2006. Drain blocking: An effective treatment for reducing dissolved organic carbon loss and water discoloration in a drained peat-land. *Science of the Total Environment*, **367**: 811–821.
- Wilson HF, Xenopoulos MA. 2009. Effects of agricultural land use on the composition of fluvial dissolved organic matter. *Nature Geoscience*, **2**: 37–41.
- Zhang JB, Song CC, Yang WY. 2006. Land use effects on the distribution of labile organic carbon fraction through soil profiles. *Soil Science Society of America Journal*, **70**: 660–667.
- Zhao MX, Zhou JB, Kalbitz K. 2008. Carbon mineralization and properties of water-extractable organic carbon in soils of the south Loess Plateau in China. *European Journal of Soil Biology*, **44**: 158–165.
- Zhou GM, Xu JM, Jiang PK. 2006. Effect of management practices on seasonal dynamics of organic carbon in soils under bamboo plantations. *Pedosphere*, **16**: 525–531.

作者简介 张仕吉,男,1967年生,博士研究生,副研究员,主要从事森林生态学研究。E-mail: zhangshiji430202@163.com

责任编辑 王伟