

长期集约经营对雷竹林土壤碳氮磷库特征的影响*

张涛^{1,2} 李永夫^{1,2†} 姜培坤^{1,2} 周国模^{1,2} 秦华^{1,2} 林琳^{1,2}

(1 浙江农林大学,浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室,浙江临安 311300)

(2 浙江农林大学—中国科学院南京土壤研究所森林土壤与环境联合实验室,浙江临安 311300)

摘要 为了研究长期集约经营对雷竹林土壤碳库与养分库的影响,在浙江省临安市三口镇选择了两块相邻的集约经营雷竹林样地(经营时间分别为 1 a 和 15 a)采样,分析测定了土壤不同形态碳、氮和磷,并利用核磁共振方法分析了土壤总有机碳的波谱特征。结果表明:与集约经营 1 a 雷竹林相比较,15 a 集约经营雷竹林土壤总有机碳、水溶性有机碳、热水溶性有机碳和易氧化碳含量分别增加了 249%、197%、81.8% 和 116%,但微生物生物量碳含量下降了 17.6%。土壤有机碳的固态核磁共振结果表明,雷竹林土壤有机碳以烷基碳和烷氧碳为主。与 1 a 集约经营相比较,15 a 集约经营后,土壤烷基碳和烷基碳/烷氧碳比(A/O-A)显著增加($p < 0.05$)、芳香碳和芳香度显著下降($p < 0.05$),而烷氧碳和羧基碳没有显著变化。与集约经营 1 a 雷竹林相比较,15 a 集约经营雷竹林土壤水溶性有机氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、有效磷和有机磷含量显著增加($p < 0.05$),但微生物生物量氮和微生物生物量磷含量分别下降了 36.5% 和 22.7%。综上所述,长期集约经营导致雷竹林土壤碳库和氮磷养分库的贮量显著增加,而土壤微生物活性和土壤有机碳库的稳定性却显著下降。

关键词 雷竹林;集约经营;碳库;氮库;磷库;核磁共振

中图分类号 S714 **文献标识码** A

土壤有机碳库是陆地生态系统中非常重要的碳库^[1]。由于其容量巨大,较小的变化就会引起大气中 CO_2 浓度的较大波动。因此在全球生态系统碳循环中起着非常重要的作用。此外,土壤有机碳也是反映土壤肥力状况的重要指标之一,其数量及其组分特征均显著影响土壤生长力^[2]。因此,有关土壤碳库特征对人类干扰的响应机制越来越受到国内外学者的关注和重视^[3-5]。以往大量研究表明,经营管理措施显著影响土壤碳贮量。如陈安磊等^[6]的研究结果表明,与单一使用化肥相比,有机肥-化肥混施可显著提高红壤性稻田土壤的碳贮量。Finer 等^[7]报道采伐措施显著降低芬兰云杉林的土壤碳贮量。土壤碳库中包含各种不同形态的碳库,而不同活性碳库对经营管理措施的响应往往存在较大差异^[8]。因此,研究经营管理措施对不同活性碳库的影响对于深入阐明土壤碳过程的影响机理具有重要意义。

土壤水溶性有机碳(WSOC)和水溶性有机氮(WSON)被认为是陆地生态系统中最活跃的碳氮组

分。由于它们非常容易被土壤中的微生物分解,从而转化成其他形态的碳氮组分^[9],因此,越来越多研究人员利用 WSOC 和 WSON 的变化来间接表征土壤碳库和氮库的变化。此外,由于土壤微生物在养分循环以及有机质分解过程中发挥非常重要的作用,近年来微生物生物量碳(MBC)、微生物生物量氮(MBN)和微生物生物量磷(MBP)的变化也被认为是土壤碳库和养分库变化的表征指标^[10]。由于土壤有机碳库是由不同的含碳有机物组成,传统的物理和化学方法很难对不同的含碳有机物做到有效分离。核磁共振技术是一种原位测定土壤有机碳化学结构的方法,该方法在评价土壤碳库稳定性方面具有非常大的优势,被越来越多的研究者应用到土壤有机碳库研究中^[11]。

雷竹(*Phyllostachys praecox* C. D. Chu et C. S. Chao)是中国南方广泛分布的优良竹种。由于竹笋味道鲜美、营养丰富,并具有较高经济价值,雷竹林栽培面积日趋扩大。近年来,以冬季地表覆盖和施肥为核心的高效栽培技术在雷竹林生产上得到广

* 国家自然科学基金项目(31170576)、浙江省科技厅重点项目(2011C12019)、浙江省自然科学基金项目(Y3080337)和浙江农林大学科研发展基金项目(2007FR040)共同资助

† 通讯作者, E-mail: yongfuli@zafu.edu.cn

作者简介:张涛(1987—),男,硕士研究生,主要从事森林土壤学研究。E-mail: zhangtaozafu@163.com

收稿日期:2012-04-15;收到修改稿日期:2012-06-30

泛应用^[12]。该项技术既可使雷竹提早出笋,又显著提高竹笋产量,从而显著增加竹农的经济收益。然而,上述经营措施的长期使用,也给雷竹林生产带来了不少环境生态学方面的负面问题。如长期集约经营措施会导致雷竹林提前退化、雷竹林土壤生物学性质下降等问题^[13-14]。土壤碳库和养分库是表征土壤肥力的非常重要的指标。那么长期集约经营措施到底会对雷竹林土壤的碳库与养分库造成什么影响呢?本研究选择了两块立地条件一致的相邻雷竹林样地(集约经营时间分别为1a和15a)采样、分析测定了土壤的不同形态碳、氮和磷,并利用核磁共振方法分析了土壤总有机碳的波谱特征,研究结果将为集约经营雷竹林土壤碳库和养分库的管理以及雷竹林产业的可持续发展提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验区设在浙江省临安市三口镇,地理坐标为30°05' N,119°43' E。该地区为典型的北亚热带季风气候,雨量充沛(年降水量为1 420 mm),历年平均日照时数为1 943 h,无霜期为236 d,年平均气温为15.9℃。试验样地的土壤为红壤。试验区属于低山丘陵地貌,研究区原为水稻田。由于种植雷竹具有较高的经济效益,农户们将水稻田改造成雷竹林,并对雷竹林进行了集约经营管理。雷竹林的集约经营管理的核心内容是:冬季覆盖和重施肥料。每年11月下旬至12月上旬,农户们会在雷竹林的土壤表面覆盖有机物,以达到增温早出笋的目的^[15]。覆盖措施分成两步进行:首先在地表覆盖一层稻草(深度为10~15 cm),然后在稻草的上面覆盖一层苍糠(深度为10~15 cm),稻草和苍糠的年使用量分别为40 t hm⁻²和55 t hm⁻²。雷竹林的施肥方法如下:每年分3次施肥,分别在5月中旬,9月中旬和覆盖措施前1周左右。用撒施的方式进行施肥,随后进行深翻入土。所施用的肥料主要以复合肥(N:P₂O₅:K₂O=15:15:15)和尿素等化肥为主。雷竹林地每年肥料用量如下:复合肥2.25 t hm⁻²、尿素1.125 t hm⁻²,每次施入的数量基本相等。在改造成雷竹林后的前期(一般为1~5 a),施肥量相对较少。5 a以后,施肥量显著增加。

1.2 试验设计及取样

2009年7月,在研究区内选择立地条件基本一

致,集约经营历史分别为1 a和15 a的雷竹林样地各4个(集约经营历史1 a雷竹林是指水稻田改造成雷竹林后,经过1a雷竹种植的样地;集约经营历史15 a雷竹林是指水稻田改造成雷竹林后,经过15 a雷竹种植的样地),样地面积为400 m²。按照五点取样法用取土钻(直径为4.5 cm)采取各样地的表层(0~20 cm)土壤。同一个样地采集到5份土壤样品,将这5份样品均匀混合,作为代表该样地的土壤样品。土壤样品采集后,带回实验室后,过筛(筛孔为2 mm)分成2份。一份土壤样品风干处理后保存,此外,一份新鲜土样保存在冰箱(4℃)中待测。

1.3 测定项目与方法

土壤基本理化性状的测定指标如下:pH、总有机碳(TOC)、土壤全氮、碱解氮、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、全磷、有机磷、有效磷、速效钾。上述指标的具体测定方法均参照文献[16]。

土壤水溶性有机碳(WSOC)和水溶性有机氮(WSON)的测定参考文献[17]。土壤热水溶性有机碳(HWSOC)的分析参考文献[18]。

土壤微生物生物量碳和氮的测定采用氯仿熏蒸直接提取法^[19]。土壤微生物生物量磷测定参考文献[20]。土壤易氧化碳(ROC)含量的分析测定参考文献[21]。

核磁共振波谱分析,核磁共振波谱仪为AVANCE II 300 MHz,布鲁克公司,方法如下:预处理方法主要参考文献[22]。预处理过的样品测试参数参考文献[23]如下:旋转频率为5 000 Hz、光谱频率为75.5 MHz、接触时间为2 ms、循环延迟时间为2.5 s。参考文献[11],各类含碳基团所对应的¹³C信号的化学位移大致如下:烷基碳($\delta = 0 \sim 50$),烷氧碳($\delta = 50 \sim 110$),芳香碳($\delta = 110 \sim 160$)和羰基碳($\delta = 160 \sim 220$)。通过对核磁共振图谱谱峰曲线进行区域积分,就可以得到土壤样品中各种含碳组分占总有机碳的百分比。在本试验结果中,参照文献[24—25]计算了两个用来表征土壤有机质稳定性的指标:(1)A/O-A: $C_{\delta=0-50} / C_{\delta=50-110}$ (烷基碳/烷氧碳);(2)芳香度(Aromaticity): $C_{\delta=110-165} / C_{\delta=0-165}$ [芳香碳/(烷基碳+烷氧碳+芳香碳)] $\times 100\%$ 。

1.4 数据处理

本文的结果数据为4次重复的平均值。数据的统计分析工作均在SPSS 13.0软件上进行。采用单因素方差分析和新复极差法比较不同处理条件下数据组间的差异,显著性水平设定为 $p = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 长期集约经营对雷竹林土壤基本理化性质的影响

由表 1 可见,15a 集约经营雷竹林土壤有机质含量为 1a 经营雷竹林土壤的 349%。与集约经营 1a 雷竹林相比较,15a 集约经营雷竹林土壤全氮、全磷、碱解氮和速效钾含量显著增加 ($p < 0.05$),土壤 pH 显著下降 ($p < 0.05$)。

2.2 长期集约经营对雷竹林土壤碳库特征的影响

与 1a 集约经营的雷竹林土壤相比,15a 集约经营后,雷竹林土壤水溶性有机碳 (WSOC)、土壤热水溶性有机碳 (HWSOC) 和土壤易氧化碳 (ROC) 含量分别增加了 197%、81.8% 和 116%,而土壤微生物

生物量碳 (MBC) 下降了 17.5% (表 2)。雷竹林土壤有机碳的固态 ^{13}C 核磁共振波谱谱图如图 1 所示。经营 1a 和 15a 的雷竹林土壤有机碳的谱图均包含四个明显共振区,分别为烷基碳区 ($\delta = 0 \sim 50$)、烷氧碳区 $\delta = (50 \sim 110)$ 、芳香碳区 ($\delta = 110 \sim 160$) 和羰基碳区 ($\delta = 160 \sim 220$)。两种不同经营历史的雷竹林土壤不同含碳组分在 ^{13}C NMR 谱中的信号强度如表 3 所示。雷竹林土壤有机碳中的碳形态主要以烷氧碳为主。与 1a 集约经营相比较,15a 集约经营后,土壤烷基碳显著增加、芳香碳显著下降,而烷氧碳和羰基碳没有显著变化。A/O-A 值和芳香度是表征土壤有机碳稳定性的两大常用指标之一。与 1a 集约经营相比较,15a 集约经营后,雷竹林土壤有机碳土壤 A/O-A 值显著增加,而芳香度显著下降 ($p < 0.05$) (表 2)。

表 1 长期集约经营对雷竹林土壤 (0 ~ 20 cm) 基本理化性质的影响

Table 1 Effect of long-term intensive management of *Phyllostachys praecox* stands on basic soil properties (0 ~ 20 cm)

集约经营时间 Duration of intensive management (a)	pH (H_2O)	有机质 Organic matter (g kg^{-1})	全氮 Total N (g kg^{-1})	全磷 Total P (g kg^{-1})	碱解氮 Alkalytic N (mg kg^{-1})	速效钾 Available K (mg kg^{-1})
1	5.76a	24.82b	2.06b	0.48b	93.48b	88.56b
15	4.13b	86.51a	3.58a	1.87a	427.8a	335.7a

注 Note: 同一列数据带不同字母表示新复极差法多重比较差异显著 ($p < 0.05$), Different letters within the same column mean significant difference at $p = 0.05$ level according to Duncan's Multiple Range Test

表 2 长期集约经营对雷竹林土壤不同活性碳库的影响

Table 2 Effect of long-term intensive management of *Phyllostachys praecox* stands on soil labile carbon pools

集约经营时间 Duration of intensive management (a)	水溶性有机碳 Water-soluble organic C (mg kg^{-1})	热水溶性有机碳 Hot water-soluble organic C (mg kg^{-1})	微生物生物量碳 Microbial biomass C (mg kg^{-1})	易氧化碳 Readily oxidizable C (g kg^{-1})
1	14.62b	379.2b	246.8a	3.01b
15	43.48a	689.3a	203.5b	6.58a

注 Note: 同一列数据带不同字母表示新复极差法多重比较差异显著 ($p < 0.05$), Different letters within the same column mean significant difference at $p = 0.05$ level according to Duncan's Multiple Range Test

表 3 长期集约经营对雷竹林土壤不同含碳组分百分比的影响

Table 3 Effect of long-term intensive management on percentage of different carbon fractions in the soils under *Phyllostachys praecox* stands

集约经营时间 Duration of intensive management (a)	烷基碳 Alkyl C (%)	烷氧碳 O-alkyl C (%)	芳香碳 Aromatic C (%)	羰基碳 Carbonyl C (%)	烷基碳/烷氧碳 Alkyl C / O-alkyl C	芳香度 Aromaticity (%)
1	14.4b	49.5a	22.9a	13.2a	0.29c	26.4a
15	29.7a	48.3a	7.9b	14.1a	0.61a	9.2b

注 Note: 同一列数据带不同字母表示新复极差法多重比较差异显著 ($p < 0.05$), Different letters within the same column mean significant difference at $p = 0.05$ level according to Duncan's Multiple Range Test

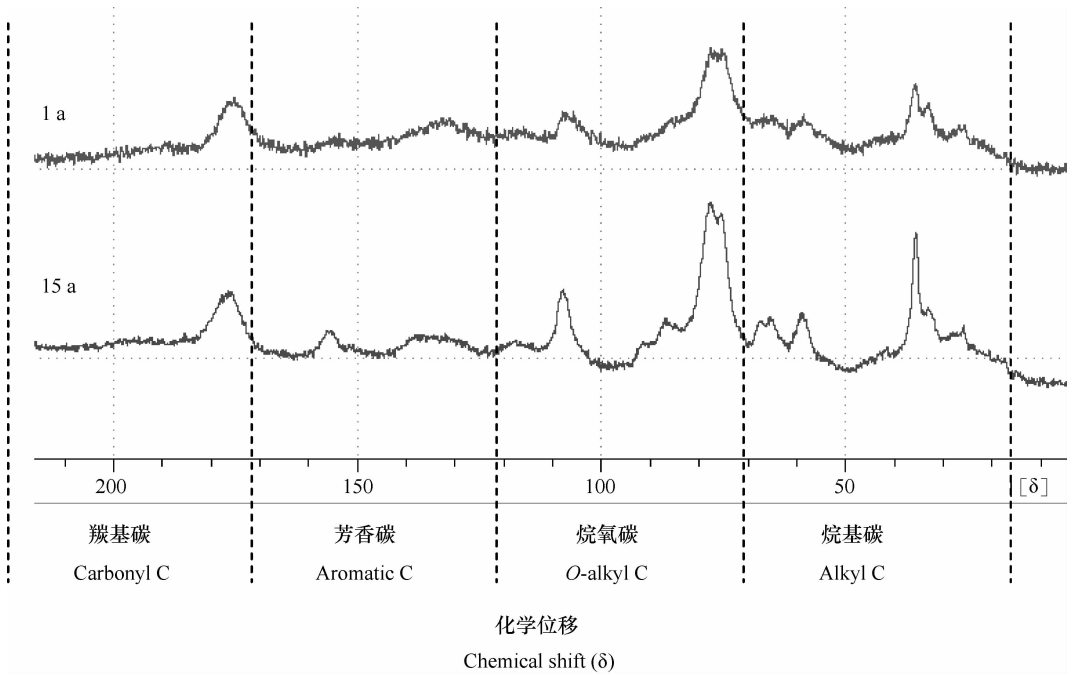


图 1 集约经营 1a 和 15a 的雷竹林土壤有机碳的固态 ^{13}C 核磁共振波谱谱图

Fig. 1 Solid-state ^{13}C NMR spectra of soil organic carbon in the soils under *Phyllostachys praecox* stands subjected to 1 and 15 years of intensive management

2.3 长期集约经营对雷竹林土壤不同形态氮素和磷素的影响

从表 4 可见,与 1a 集约经营相比较,15a 集约经营显著增加雷竹林土壤水溶性有机氮 (WSN)、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量,但是却导致雷

竹林土壤微生物生物量氮 (MBN) 下降了 36.5%。从表 5 可见,与 1a 集约经营相比较,15a 集约经营显著增加雷竹林土壤的有效磷和有机磷含量,分别增加了 949%、178%,而 MBP 含量却下降了 22.7%。

表 4 长期集约经营对雷竹林土壤不同形态氮含量的影响

Table 4 Effect of long-term intensive management of *Phyllostachys praecox* stands on contents of different forms of N in the soil

集约经营时间 Duration of intensive management (a)	水溶性有机氮 WSN (mg kg^{-1})	微生物生物量氮 MBN (mg kg^{-1})	铵态氮 NH_4^+ -N (mg kg^{-1})	硝态氮 NO_3^- -N (mg kg^{-1})
1	23.33b	86.48a	0.17b	6.43b
15	65.76a	54.92b	2.38a	30.74a

注 Note: 同一列数据带不同字母表示新复极差法多重比较差异显著 ($p < 0.05$), Different letters within the same column mean significant difference at $p = 0.05$ level according to Duncan's Multiple Range Test

表 5 长期集约经营对雷竹林土壤不同形态磷含量的影响

Table 5 Effect of long-term intensive management of *Phyllostachys praecox* stands on contents of different forms of P in the soil

集约经营时间 Duration of intensive management (a)	有效磷 Available P (mg kg^{-1})	有机磷 Organic P (g kg^{-1})	微生物生物量磷 MBP (mg kg^{-1})
1	51.18a	176.738a	58.62a
15	435.8b	491.258b	45.31b

注 Note: 同一列数据带不同字母表示新复极差法多重比较差异显著 ($p < 0.05$), Different letters within the same column mean significant difference at $p = 0.05$ level according to Duncan's Multiple Range Test

3 讨 论

3.1 长期集约经营对雷竹林土壤氮磷库的影响

不少研究表明,施肥与覆盖措施对土壤全氮含量及不同形态氮素分配具有显著的影响^[26-27]。本研究结果表明,与集约经营 1a 相比,15a 集约经营显著增加雷竹林土壤全氮含量(表 1),同时也显著增加了土壤不同形态氮素含量,WSON 和 NO_3^- -N 含量分别增加了 182% 和 378%。黄芳等^[27]的研究结果也表明,随着集约经营时间的增加,雷竹林土壤的全氮含量呈显著增加趋势。土壤 WSON 的来源非常复杂,主要包括根系和微生物的代谢产物和分泌物、新鲜的凋落物、降雨淋溶产物以及外源性氮输入等^[28],在本研究中长期集约经营导致雷竹林土壤 WSON 显著增加的原因可能有两个方面:(1)在雷竹林的集约经营过程中,从第 5 年开始在冬季进行了有机物料覆盖,而覆盖物的下层稻草腐烂后形成较多水溶性有机氮化合物进入土壤;(2)雷竹林成园后,根系生长非常旺盛,分泌出大量的含氮有机化合物。此外,土壤中 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量显著增加,主要与雷竹林经营过程中的长期施肥有关。孙晓等^[29]的研究结果也表明,随着集约经营时间的增加,雷竹林土壤中 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量呈显著增加趋势。

土壤的有效磷含量和全磷含量是用来表征土壤磷素丰缺状况的两个非常重要的指标。一般情况下,短期的经营管理措施会显著影响土壤的有效磷含量,而往往对土壤全磷含量的影响不显著。从本研究的结果来看,与集约经营 1a 雷竹林土壤相比,15a 集约经营后,土壤的有效磷和全磷含量显著增加(表 5)。这表明,长期集约经营后,雷竹林土壤的供磷能力显著增加,磷素处于非常盈余的状态。与无机磷素相比,土壤中的有机磷对植物的磷素营养同样也具有非常重要的意义。从本研究的结果来看,长期集约经营显著增加了雷竹林土壤的有机磷含量。由于本研究没有对有机磷进行分组研究,所以增加的有机磷部分的生物有效性如何还需要在今后的试验中去探明。黄芳等^[30]研究了雷竹林土壤磷素的剖面分布特征,发现土壤磷素主要积累在土壤表层。结合土壤氮磷养分增加的数据,表明长期集约经营的雷竹林土壤存在氮磷流失引起周边水体污染的风险。在今后的研究中,需采取相应措施来降低其风险的发生。

3.2 长期集约经营对雷竹林土壤微生物生物量氮磷钾的影响

土壤微生物生物量碳是反映土壤生物学特征的重要指标之一,由于该指标对人为干扰措施(如施肥、覆盖、翻耕等)的响应比较敏感,因此越来越多的研究人员利用该指标来表征土壤质量演变规律^[28]。本研究的结果表明,与集约经营 1a 雷竹林土壤相比,15a 集约经营导致 WSOC 和 ROC 显著增加,但却显著降低了 MBC 含量。雷竹林土壤 MBC 对长期集约经营的响应与其他活性碳库(如 WSOC, ROC)存在不同。秦华等^[31]利用空间代替时间的方法研究了雷竹林土壤 MBC 含量的演变规律,结果表明,随着集约经营时间的增加,土壤 MBC 含量呈显著下降趋势。一般情况下,土壤表层的有机物覆盖措施会增加土壤 MBC 含量^[8],而本试验中的土壤 MBC 含量下降的原因可能为:(1)除了有机物料覆盖措施之外,雷竹林的集约经营还包括超量施用化肥措施。在超量使用化肥的条件下,雷竹林土壤微生物活性可能会大大减弱,最终导致土壤微生物生物量的显著下降。(2)长期集约经营导致土壤酸化,可能也是导致土壤微生物生物量下降的原因之一^[31]。(3)长期集约经营会导致雷竹林土壤养分的过量积累,而养分的过量积累会引起土壤微生物生物量的下降^[32]。从雷竹林土壤 MBN 和 MBP 含量对长期集约经营的响应来看,其变化规律与 MBC 基本一致,主要也是由于长期集约经营导致土壤微生物活性与微生物生物量下降所引起的。

3.3 长期集约经营对雷竹林土壤碳库及其稳定性的影响

土壤有机碳数量和形态的变化是反应土壤质量状况变化的重要指标之一^[2]。本研究的试验结果表明,与集约经营 1a 雷竹林土壤相比,15a 集约经营后,雷竹林土壤的有机碳含量增加了 248.5%。土壤总有机碳增加主要归因于雷竹林集约经营中的冬季覆盖有机物措施,当这些覆盖物腐烂后进入土壤,显著增加土壤的有机碳含量。此外,增加的有机碳还有可能来自雷竹林生长过程中植物根系的分泌物。而上述两种来源的相对比例大小还需要做进一步的研究。不同的经营管理措施会对土壤的碳库特征产生非常显著的影响,而用不同方法表征的土壤活性碳对经营措施的响应规律往往存在较大的差异^[8, 33]。本研究的结果表明,与 1a 集约经营的雷竹林土壤相比,15a 经营的雷竹林土壤 WSOC、HWSOC 和 ROC 分别增加了 197%、81.8%

和 116% (表 2)。上述活性碳库增加的主要原因和总有机碳增加的原因一样,也是由于冬季采取的覆盖有机物措施引起的。此外,雷竹的栽培也会对上述活性碳库的含量造成一定的影响。以往不少研究也表明覆盖措施会增加林地土壤的 WSOC 和 HWSOC 含量^[8]。在本研究中,仅仅比较了集约经营 1a 与 15a 的雷竹林土壤样品,而集约经营 15a 以后,土壤总有机碳及相关活性碳库到底会继续增加还是趋于稳定,还需要在今后的研究中进一步探明。

土壤有机碳是由不同含碳有机化合物组成的混合物,这就给其测定带来了非常大的困难。而¹³C CPMAS 核磁共振波谱分析法是近几年发展起来的一项技术,以往的大量研究结果表明,该技术是研究土壤有机碳化学组成的非常有用的工具^[11]。在以往有关土壤有机碳的核磁共振研究中,绝大多数的土壤样品的有机碳谱图都呈现出四个比较明显的共振区:烷基碳区($\delta = 0 \sim 50$)、烷氧碳区($\delta = 50 \sim 110$)、芳香碳区($\delta = 110 \sim 160$)和羰基碳区($\delta = 160 \sim 220$)^[8, 11]。本研究结果发现,集约经营 1a 和 15a 的雷竹林土壤有机碳的核磁共振波谱也主要呈现四个共振区(图 3)。不同含碳组分占土壤总有机碳的比例在不同研究人员的试验结果中存在显著差异。如 Chen 等^[33]的试验结果发现,土壤有机碳中烷基碳所占的比例最高。而在本试验中,对于集约经营 1a 的雷竹林土壤而言,碳组分主要以烷氧碳为主(占 49.5%),其次为芳香碳(占 22.9%)。而对于集约经营 15a 的雷竹林土壤,主要以烷基碳和烷氧碳为主,两者分别占 48.3% 和 29.7% (表 3)。因此,可以认为在不同的研究结果中,不同形态碳组分所占比例存在较大差异。原因可能在于:不同的研究所涉及的植物种类、土壤类型以及经营管理方式存在较大差异。本试验的结果表明,雷竹林 15a 集约经营后较集约经营 1a 雷竹林的土壤烷基碳比例显著增加,芳香碳比例显著下降,而烷氧碳比例没有发生明显变化(表 3)。与集约经营 1a 雷竹林土壤相比,15a 集约经营显著增加土壤有机碳的 A/O-A 值,这表明长期集约经营促使土壤的有机碳更加稳定。而从芳香度的变化来看,15a 的集约经营较集约经营 1a 雷竹林显著降低土壤有机质的稳定性。上述结果的不一致的原因可能在于:雷竹林生长过程中使用的覆盖物主要为稻草和苍糠,而上述两种有机物料的降解产物主要是以烷基碳为主^[34];此外,在强度集约经营的条件下

(化肥的大量多次施用以及覆盖有机物措施),土壤中很难形成稳定性较高的碳组分——芳香碳,相反原本在土壤中存在的一部分芳香碳在集约经营的过程中遭到分解。

4 结 论

1) 与 1a 经营雷竹林相比,15a 集约经营导致雷竹林土壤酸化,显著增加了水溶性有机氮、铵态氮、硝态氮、有效磷及有机磷含量,表明长期集约经营雷竹林土壤存在氮磷流失引起周边水体污染的风险。在今后的研究中,需采取相应措施来降低其风险的发生。

2) 与经营 1a 雷竹林相比较,15a 集约经营雷竹林土壤总有机碳、水溶性有机碳、热水溶性有机碳和易氧化碳含量分别增加了 248.5%、197%、81.8% 和 116%。土壤有机碳的固态核磁共振结果表明,雷竹林土壤有机碳以烷基碳和烷氧碳为主。与 1a 集约经营相比较,15a 集约经营后,土壤烷基碳和 A/O-A 值显著增加($p < 0.05$)、芳香碳和芳香度显著下降($p < 0.05$),而烷氧碳和羰基碳没有显著变化。此外,微生物生物量碳、微生物生物量氮和微生物生物量磷含量分别下降了 36.5%、22.7% 和 17.6%。上述结果表明,长期集约经营增加土壤碳库贮量,但土壤微生物活性和土壤有机碳库的稳定性却显著下降。今后,应该采取相应措施来提高长期集约经营雷竹林土壤微生物活性与碳库的稳定性。

参 考 文 献

- [1] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2): 151—163
- [2] 周莉,李保国,周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展. *地球科学进展*, 2005, 20(1): 99—105. Zhou L, Li B G, Zhou G S. Advances in controlling factors of soil organic carbon (In Chinese). *Advances in Earth Sciences*, 2005, 20(1): 99—105
- [3] Jandl R, Lindner M, Vesterdal L, et al. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma*, 2007, 137(3/4): 253—268
- [4] 黄耀,孙文娟,张 稳,等. 中国陆地生态系统土壤有机碳变化研究进展. *中国科学:生命科学*, 2010, 40(7): 577—586. Huang Y, Sun W J, Zhang W, et al. Changes in soil organic carbon of terrestrial ecosystems in China: A mini-review (in Chinese). *Science China: Life Science*, 2010, 40(7): 577—586
- [5] Ma L, Yang L Z, Xia L Z, et al. Long-term effects of inorganic and organic amendments on organic carbon in a paddy soil of the

- Taihu Lake region, China. *Pedosphere*, 2011, 21 (2): 186—196
- [6] 陈安磊, 谢小立, 陈惟财, 等. 长期施肥对红壤稻田耕层土壤碳储量的影响. *环境科学*, 2009, 30 (5): 1267—1272. Chen A L, Xie X L, Chen W C, et al. Effect of long-term fertilization on soil plough layer carbon storage in a reddish paddy soil (In Chinese). *Environmental Science*, 2009, 30 (5): 1267—1272
- [7] Finer L, Mannerkoski H, Piirainen S, et al. Carbon and nitrogen pools in an old-growth, Norway spruce mixed forest in eastern Finland and changes associated with clear-cutting. *Forest Ecology and Management*, 2003, 174 (1): 51—63
- [8] Huang Z Q, Xu Z H, Chen C R, et al. Changes in soil carbon during the establishment of a hardwood plantation in subtropical Australia. *Forest Ecology and Management*, 2008, 254: 46—55
- [9] Ros G H, Tschudy C, Chardon W J, et al. Speciation of water-extractable organic nutrients in grassland soils. *Soil Science*, 2010, 175 (1): 15—26
- [10] 张成霞, 南志标. 土壤微生物生物量的研究进展. *草业科学*, 2010, 27 (6): 50—57. Zhang C X, Nan Z B. Research progress of soil microbial biomass in China (In Chinese). *Pratacultural Science*, 2010, 27 (6): 50—57
- [11] Mathers N J, Mao X A, Xu Z H, et al. Recent advances in the application of ^{13}C and ^{15}N NMR spectroscopy to soil organic matter studies. *Australian Journal of Soil Research*, 2000, 38: 769—787
- [12] 方伟, 何钧潮, 卢学可, 等. 雷竹早产高效栽培技术. *浙江林学院学报*, 1994, 11 (2): 121—128. Fang W, He J C, Lu X K, et al. Cultivation techniques of early shooting and high yield for *Phyllostachys praecox* (In Chinese). *Journal of Zhejiang Forestry College*, 1994, 11 (2): 121—128
- [13] 姜培坤, 俞益武, 张立钦, 等. 雷竹林地土壤酶活性研究. *浙江林学院学报*, 2000, 17 (2): 132—136. Jiang P K, Yu Y W, Zhang L Q, et al. Study on enzyme activities of soil under *Phyllostachys praecox* forest (In Chinese). *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2000, 17 (2): 132—136
- [14] Cao Z H, Huang J F, Zhang C S, et al. Soil quality evolution after land use change from paddy soil to vegetable land. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004 (2), 26: 97—103
- [15] 周国模, 金爱武, 何钧潮, 等. 覆盖保护地栽培措施对雷竹笋用林丰产性能的影响. *中南林学院学报*, 1999, 19 (2): 52—54. Zhou G M, Jin A W, He J C, et al. The influence of cultivation techniques used in covered protected plots on the high-yield property of Lei bamboo plantation for edible shoots (In Chinese). *Journal of South Central Forestry University*, 1999, 19 (2): 52—54
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. *Analytical Methods for Soil Agro-chemistry* (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [17] Jones D L, Willett V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38 (5): 991—999
- [18] Sparling G, Vojvodic-Vukovic M, Schipper L A. Hot-water-soluble C as a simple measure of labile soil organic matter: the relationship with microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30 (10/11): 1 469—1 472
- [19] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D C. An extraction method for measuring soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19 (6): 703—707
- [20] 沈程文, 肖润林, 徐华勤, 等. 覆盖与间作对亚热带丘陵茶园土壤微生物量的影响. *水土保持学报*, 2006, 20 (3): 141—144. Shen C W, Xiao R L, Xu H Q, et al. Effects of cover and intercropping on soil microbial biomass of tea plantations in subtropical hilly region (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20 (3): 141—144
- [21] Graeme J B, Rod D B L, Leanne 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): 1 459—1 466
- [22] Mathers N J, Xu Z H, Berners-Price S J, et al. Hydrofluoric acid pre-treatment for improving ^{13}C CPMAS NMR spectral quality of forest soils in southeast Queensland, Australia. *Australian Journal of Soil Research*, 2002, 40 (4): 655—674
- [23] 商素云, 李永夫, 姜培坤, 等. 天然灌木林改造成板栗林对土壤碳库和氮库的影响. *应用生态学报*, 2012, 23 (3): 659—665. Shang S Y, Li Y F, Jiang P K, et al. Effects of the conversion from native shrub forest to Chinese chestnut plantation on soil carbon and nitrogen pools (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23 (3): 659—665
- [24] Baldock J A, Oades, J M, Nelson P N, et al. Assessing the extent of decomposition of natural organic materials using solid-state ^{13}C NMR spectroscopy. *Australian Journal of Soil Research*, 1997, 35: 1 061—1 083
- [25] Dai K O H, Johnson C E, Driscoll C T. Organic matter chemistry and dynamic in clear-cut and unmanaged hardwood forest ecosystems. *Biogeochemistry*, 2001 (1), 54: 51—83
- [26] 王淑娟, 田霄鸿, 李硕, 等. 长期地表覆盖及施氮对冬小麦产量及土壤肥力的影响. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18 (2): 291—299. Wang S J, Tian X H, Li S, et al. Effects of long-term surface mulching and N addition on winter wheat yield and soil properties (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18 (2): 291—299
- [27] 黄芳, 蔡荣荣, 孙达. 集约经营雷竹林土壤氮素状况及氮平衡的估算. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13 (6): 1 193—1 196. Huang F, Cai R R, Sun D. Soil nitrogen status and estimated nitrogen balance budget in an intensive managed *Phyllostachys praecox* stand (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13 (6): 1 193—1 196
- [28] 杨绒, 周建斌, 赵满兴. 土壤中可溶性有机氮含量及其影响因素研究. *土壤通报*, 2007, 38 (1): 15—38. Yang R, Zhou J B, Zhao M X. Contents of soluble organic nitrogen in soil and its influencing factors (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38 (1): 15—38
- [29] 孙晓, 庄舜尧, 刘国群, 等. 集约经营下雷竹种植对土壤基本性质的影响. *土壤*, 2009, 41 (5): 784—789. Sun X, Zhuang

- S Y, Liu G Q, et al. Effect of Lei bamboo plantation on soil basic properties under intensive cultivation management (In Chinese). *Soils*, 2009, 41 (5): 784—789
- [30] 黄芳, 金炳华, 孙达, 等. 集约经营雷竹林序列的土壤磷素含量与组分. *土壤学报*, 2011, 48 (2): 347—355. Huang F, Jin B H, Sun D, et al. Variation of soil phosphorus content and components in a chronosequence of *Phyllostachys praecox* stands under intensive management (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (2): 347—355
- [31] 秦华, 徐秋芳, 曹志洪. 长期集约经营条件下雷竹林土壤微生物量的变化. *浙江林学院学报*, 2010, 27 (1): 1—7. Qin H, Xu Q F, Cao Z H. Soil microbial biomass in long-term and intensively managed *Phyllostachys praecox* stands (In Chinese). *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2010, 27 (1): 1—7
- [32] 路磊, 李忠佩, 车玉萍. 不同施肥处理对黄泥土微生物量碳氮和酶活性的影响. *土壤*, 2006, 38 (3): 309—314. Lu L, Li Z P, Che Y P. Effect of different fertilization treatments on soil microbial biomass and enzyme activities in hapli-stagnic anthrosols (In Chinese). *Soils*, 2006, 38 (3): 309—314
- [33] Chen C R, Xu Z H, Mathers N J. Soil carbon pools in adjacent natural and plantation forests of subtropical Australia. *Soil Science Society of American Journal*, 2004, 68(1): 282—291
- [34] 张艳. 集约经营雷竹林土壤碳过程研究. 临安: 浙江农林大学, 2011. Zhang Y. Study on the process of organic carbon in intensively managed *Phyllostachys praecox* stands (In Chinese). Lin'an: Zhejiang A & F University, 2011

EFFECT OF LONG-TERM INTENSIVE MANAGEMENT OF *PHYLLOSTACHYS PRAECOX* STANDS ON CARBON, NITROGEN, AND PHOSPHORUS POOLS IN THE SOIL

Zhang Tao^{1,2} Li Yongfu^{1,2†} Jiang Peikun^{1,2} Zhou Guomo^{1,2} Qin Hua^{1,2} Lin Lin^{1,2}

(1 Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China)

(2 Joint Laboratory of Forest Soil and the Environment, Zhejiang A & F University and ISSCAS, Lin'an, Zhejiang 311300, China)

Abstract To study effect of long-term intensive management of *Phyllostachys praecox* stands on C and nutrients pools in the soil, soil samples were collected from two adjoint *Phyllostachys praecox* stands that had been subjected to intensive management for 1 and 15 years, separately, in Lin'an County, Zhejiang Province. Different forms of C, N, and P pools were determined and spectral characteristics of soil total organic carbon were analyzed using the nuclear magnetic resonance (NMR) technique. Results show that in comparison to the *Phyllostachys praecox* stand, 1 year under intensive management, the stand 15 years under intensive management was 248.5%, 197%, 81.8%, and 116% higher in soil total organic carbon, water-soluble organic C, hot water-soluble organic C, and readily oxidizable C (ROC), respectively, but 17.6% lower in MBC content. Solid-state NMR spectroscopy of soil samples showed that alkyl C and O-alkyl C dominated soil organic C in *Phyllostachys praecox* stands. Compared to the *Phyllostachys praecox* stand 1 year under intensive management, the stand 15 years under intensive management was significantly higher in soil alkyl C content and alkyl C to O-alkyl C ratio (A/O-A) ($p < 0.05$), but much lower in aromatic C content and organic matter aromaticity ($p < 0.05$), and however remained unchanged in O-alkyl C and carbonyl C. Moreover, in comparison to the *Phyllostachys praecox* stand 1 year under intensive management, the stand 15 years under intensive management was much higher in soil water-soluble organic N, NH_4^+ -N, NO_3^- -N, available P, and organic P ($p < 0.05$), but 36.5% and 22.7% lower in microbial biomass N and microbial biomass P, respectively. In conclusion, long-term intensive management helps build up carbon pools and nutrients pools, but significantly affects activity of the soil microbial activity and stability of the organic carbon in the soil.

Key words *Phyllostachys praecox*; Intensive management; Carbon pool; Nitrogen pool; Phosphorus pool; NMR