环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2019
Vol.40 No.9
第40卷 第9期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第40卷 第9期
2019年9月15日

目 次

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第40卷 第9期 2019年9月
Vol. 40, No. 9 Sep., 2019

缙云山不同土地利用方式下土壤植硅体碳的含量特征

罗东海, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 李娇, 高明*
(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: 植硅体碳是长期封存土壤有机碳的一种形式, 对土壤固碳有重要意义. 以西南地区常见的6种土地利用方式(针阔叶混交林、竹林、果园、旱地、水田和荒草地)为研究对象, 探讨了不同土地利用方式下植硅体碳含量在不同剖面上(0~20、20~40、40~60和60~100 cm)的分布规律, 并估算了植硅体碳储量, 分析了陆地生态系统碳汇特征. 结果表明, 在6种土地利用方式中, 竹林土壤有机碳和植硅体含量在土壤剖面上的平均值均为最高, 分别为16.75 $g \cdot kg^{-1}$和59.66 $g \cdot kg^{-1}$. 在4个土层, 竹林土壤植硅体含量均显著高于其他土地利用方式($P<0.05$). 对植硅体碳而言, 6种土地利用方式下的土壤植硅体碳平均含量变化范围在0.55~1.96 $g \cdot kg^{-1}$, 其中竹林各土层的植硅体碳含量都高于其他土地利用方式. 竹林土壤植硅体碳总储量(23.45 $t \cdot hm^{-2}$)显著高于其他土地利用方式土壤植硅体碳总储量($P<0.05$). 统计分析表明, 土壤全硅与土壤植硅体、土壤植硅体碳均表现出极显著的正相关关系($P<0.01$). 不同土地利用方式下土壤植硅体与植硅体碳的含量总体表现为随着土层深度的增加而下降, 存在一定的表层富集现象.

关键词: 缙云山; 土地利用方式; 植硅体碳(PhytOC); 土壤有机碳; 植硅体碳储量
中图分类号: X171.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2019)09-4270-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201812054

Content of Soil Phytolith-Occluded Organic Carbon in Different Land Use Patterns at Jinyun Mountain

LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LU Chang, HUANG Rong, WANG Fu-hua, LI Jiao, GAO Ming*
(College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Phytolith-occluded organic carbon (PhytOC) is a form of long-term storage of soil organic carbon, which is of great significance for soil carbon sequestration. Taking six land use patterns in southwest China as the research object, including coniferous and broad-leaved mixed forest, bamboo forest, orchard, dry land, paddy field, and grassland, we compare the distribution of the PhytOC content under the different land use patterns in different depth sections of 0-20, 20-40, 40-60, and 60-100 cm. In addition, we estimate the storage of phytOC and analyze the carbon sequestration characteristics of the terrestrial ecosystems. According to the results, the soil organic carbon and phytolith mean content in the bamboo forest were the highest in the soil profile, at 16.75 $g \cdot kg^{-1}$ and 59.66 $g \cdot kg^{-1}$, respectively. In all soil layers, the phytolith content of the bamboo forest soil was significantly higher than that in other land use patterns ($P<0.05$). The average content of soil phytOC in the six land use patterns ranged from 0.55 to 1.96 $g \cdot kg^{-1}$, and the phytOC content of each layer of bamboo forest was higher than that in other land uses. The total carbon storage of phytOC in the bamboo forest soil, at 23.45 $t \cdot hm^{-2}$, was significantly higher than that of other soil use methods ($P<0.05$). Statistical analysis showed that soil silicon had a significant positive correlation with the soil phytolith and the soil phytOC ($P<0.01$). The soil phytolith and phytolith carbon content in different land use patterns generally showed a decrease with an increase in soil depth, and a certain surface enrichment phenomenon was noted.

Key words: Jinyun Mountain; land use patterns; phytolith-occluded organic carbon; soil organic carbon; storage of PhytOC

土壤碳库的碳储量约为植物碳储量的3倍, 大气碳储量的2倍,是陆地生态系统中最大的碳库[1], 土壤碳库的微小变化也会给全球气候变化带来巨大的影响. 而增加土壤碳库中稳定性碳含量是稳定土壤碳库的一个有效途径. 植硅体(phytoliths)也被称为蛋白石、植硅石或植物硅酸体, 是植物在生长过程中依靠根系从土壤中吸收可溶性的二氧化硅($H_4SiO_4H_4$), 在蒸腾作用下, 逐渐沉淀在植物的细胞壁、内腔和细胞壁间的无定形二氧化硅[2,3]. 植硅体中包含的有机碳即为植硅体碳(phytolith-occluded organic carbon, PhytOC). 森林生态系统富含植被资源, 植物残体或凋落物在微生物分解等作用下, 植硅体碳会伴随着植硅体被释放到土壤中. 但因为植硅体有很强的化学与物理抗性, 所以可以保护其中的植硅体碳在土壤中保存上千年[4], 是土壤碳库中稳定性碳的重要来源.

根据Parr等[5]的研究, 假如在全球4.1×10^9 hm^2的潜在耕地上都种植竹类植物, 以竹类植物中等的植硅体碳封存速率[0.36 $t \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$, 以$CO_2$计]计算, 全球总的植硅体碳封存量会增加到每年$1.5 \times 10^9$ t CO_2, 可占到当前增加大气CO_2排放量的11%, 将会有效地减少全球CO_2的含量. 因此,

收稿日期: 2018-12-06; **修订日期**: 2019-03-20
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800101)
作者简介: 罗东海(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤面源污染防治, E-mail: 1030979061@qq.com
* 通信作者, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

研究土壤中植硅体碳的含量和封存特性，有助于对土壤碳库的变化进行更加科学有效的评估，在全球碳循环和减缓全球变暖中有着十分重要的作用[6]. 近几十年来，我国相关植硅体碳的研究范围逐步扩展到农田、森林、草原和湿地等多种生态系统[7~10]. Song 等[11]通过估算中国 8 种不同典型森林生态系统的植硅体碳产生通量和产生量，发现竹林植硅体碳产生通量最高，针叶林则最低. 林维雷等[10]重点比较了我国亚热带地区多种森林土壤中的植硅体碳含量，结果表明毛竹林土壤中的植硅体碳含量最高. 潘文杰等[12]综述了当前我国陆地各生态系统中有关于植硅体碳的研究材料，得出在植硅体碳产生速率上，农田生态系统要高于森林和草地生态系统. 黄先飞等[13]的研究表明，农用地的有机碳储量大于林地，同时也高于荒地. 李雄等[14]的研究也表明，在我国温带季风性气候区，农田土壤有机碳含量要高于林地和草地. 张影等[15]对近 20 多年的相关文献进行统计分析，发现土地利用类型中森林、草地和农田的土地利用变化和管理对土壤有机碳的影响最大. 但是，我国有关于土壤植硅体碳的研究，多是在一个生态系统中比较，而对于在多种土地利用方式下的土壤植硅体碳的含量特征，仍未进行全面系统地研究. 尤其是我国西南地区具有多种多样的土地利用类型和生态系统，复杂的地形结构，人类活动影响显著，具有较高的科研价值，然而到目前我国对于西南地区土壤植硅体碳的研究还鲜见报道. 因此，本研究选取中国西南地区最有代表性的 6 种土地利用类型作为实验对象，通过对比分析，阐明在各土地利用方式下土壤植硅体碳的含量特征，以期为进一步估测不同土地利用方式下植硅体碳封存潜力提供实验依据.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

缙云山位于重庆市北碚区嘉陵江温塘峡畔，在重庆市中心西北方向，地理坐标介于东经 106°16′~106°25′，北纬 29°39′~29°53′之间，总面积约 18 km^2，海拔高度 300~951.5 m，气候类型属于典型的亚热带季风湿润气候，年平均气温约 13.6℃，年平均降雨量约1 612 mm，年平均蒸发量约 778 mm. 缙云山具有丰富多样的植被类型，属于国家级的自然保护区，素来享有“川东小峨眉”的美誉. 缙云山最常见的土地利用类型为林地(灌木林、毛竹林、常绿阔叶林和针阔叶混交林)和耕地(旱坡地和水田).

1.2　样品采集与测定方法

1.2.1　样品采集

2016 年 9 月，采取中国西南地区重庆市缙云山 6 种典型土地利用类型：果园、旱地、竹林、水田、荒草地和针阔叶混交林的土壤，作为研究对象. 在每种土地利用类型中选取 3 个采样点，每个采样点设置 3 个重复. 首先清理掉土壤表层的各种杂物，再利用剖面取样法分别在 0~20、20~40、40~60 和 60~100 cm 土层深度采集土壤样品，采用四分法取得足量的样品. 采集土样后带回实验室，挑出其中的砾石以及植物根系，置于干燥处通风阴干，最后过孔径 2 mm 筛和 0.25 mm 筛，用于各项指标的测定. 采样点信息与供试土壤基本理化性质参见文献[16].

1.2.2　测定项目及方法

土壤容重采取环刀法；土壤 pH 采取酸度计法；土壤全氮采取蒸馏滴定法；土壤全磷采取钒钼黄比色法；土壤全钾采取火焰光度计法；碱解氮采取碱解扩散法；速效钾采取火焰光度计法；速效磷采取钼锑抗比色法；土壤有机碳采取重铬酸钾-外加热法；土壤硅采取用钼蓝比色法. 植硅体的提取采用 Parr 等[17]所用的微波消解法，土壤植硅体碳的测定采取杨杰等[18]所用的碱溶分光光度法.

土壤植硅体各项指标计算公式如下：

土壤植硅体含量($g \cdot kg^{-1}$) =
植硅体质量(g)/样品质量(kg)　　(1)

植硅体中有机碳含量($g \cdot kg^{-1}$) =
植硅体碳质量(g)/植硅体质量(kg)　　(2)

土壤植硅体碳含量($g \cdot kg^{-1}$) =
植硅体碳质量(g)/样品质量(kg)　　(3)

土壤有机碳储量和植硅体碳储量的公式如下：

$$X = \sum_{i=1}^{n} (10\,000 \times H_i \times BD_i \times C_i) \qquad (4)$$

式中，X 为土壤有机碳储量或者土壤植硅体碳储量($kg \cdot hm^{-2}$)；H_i 为第 i 层土壤深度(m)；BD_i 为第 i 层土壤容重($g \cdot cm^{-3}$)；C_i 为第 i 层有机碳含量或者植硅体碳含量($g \cdot kg^{-1}$).

1.3　数据处理

本实验数据统计分析和图表制作分别采用了 SPSS 21.0 和 Microsoft Excel 2013 软件. 本文的结果均是以 3 次重复的平均值表示. 各变量之间的差异显著性($P<0.05$ 和 $P<0.01$)是利用单因素方差分析(ANOVA)与 Duncan 法进行测验. 采用 Pearson 法进行变量间的相关关系分析.

2 结果与分析

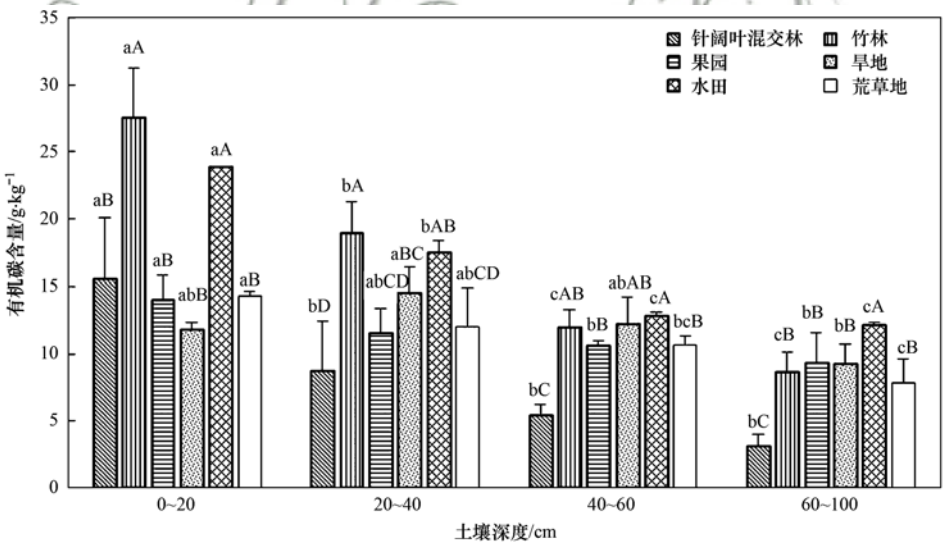
2.1 土壤中有机碳含量

如图 1 所示，除旱地外，其他土地利用方式的土壤有机碳含量随着土层的加深而降低. 在整个 0 ~100 cm 土层内，土壤各土层平均有机碳含量为竹林(16.75 $g \cdot kg^{-1}$)和水田(16.54 $g \cdot kg^{-1}$)最高，针阔叶混交林(8.16 $g \cdot kg^{-1}$)最低. 在 0 ~20 cm 的表土层，竹林和水田土壤中的有机碳含量显著高于其他土地利用方式($P<0.05$)，并且显著高于各自在 20 ~100 cm 的其他土层($P<0.05$). 在 20 ~100 cm 的各个土层，针阔叶混交林的土壤有机碳含量在各土地利用方式中均表现最低. 在 40 ~60 cm 和 60 ~100 cm 两个土层中，各土地利用方式下的土壤有机碳含量表现类似.

2.2 土壤全硅含量以及土壤植硅体含量

如图 2 所示，水田与竹林的土壤全硅含量在 0 ~100 cm 的所有土层都显著高于其他 4 种土地利用方式($P<0.05$). 在 0 ~100 cm 整个土层中，不同土地利用方式下土壤全硅含量的变化范围为 471.84 ~679.08 $g \cdot kg^{-1}$，平均含量表现为：水田(664.85 $g \cdot kg^{-1}$)最高，竹林(654.69 $g \cdot kg^{-1}$)次之，针阔叶混交林(538.05 $g \cdot kg^{-1}$)最低. 6 种土地利用方式中，竹林和荒草地的土壤全硅则在表层土壤中含量最高，其他 4 种土地利用方式的土壤全硅含量在 20 ~40 cm 土层最高，水田在 60 ~100 cm 土层的全硅含量明显低于其他土层($P<0.05$).

从图 3 可以看出，在 0 ~100 cm 的 4 个土层，竹林土壤植硅体含量(41.38 ~81.63 $g \cdot kg^{-1}$)皆显著高于其他 5 种土地利用方式($P<0.05$)，并且这 5 种土地利用类型之间无显著差异($P>0.05$)，针阔叶混交林(8.25 ~13.85 $g \cdot kg^{-1}$)则在各个土层均表现为最低. 竹林和水田的土壤植硅体含量表现为亚表层(20 ~40 cm)最高，但水田在各土层间的土壤植硅体含量差异较小，针阔叶混交林、果园、旱地和荒草地的土壤植硅体含量均表现为随着土层厚度的加深而降低趋势，存在一定表层富集现象.



图中不同小写字母表示同一土地利用方式不同土壤深度在 0.05 水平上的差异显著性，不同大写字母表示同一土壤深度不同土地利用方式在 0.05 水平上的差异显著性，下同

图 1 不同土地利用方式下土壤有机碳含量

Fig. 1 Content of soil organic carbon for different land uses

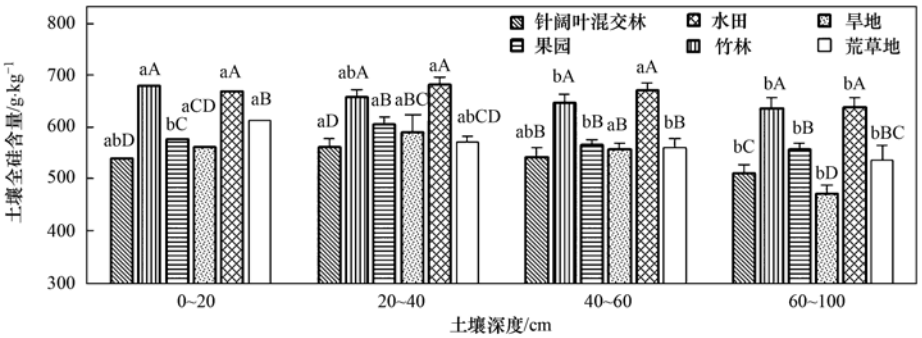


图 2 不同土地利用方式下土壤全硅含量

Fig. 2 Content of soil silicon for different land uses

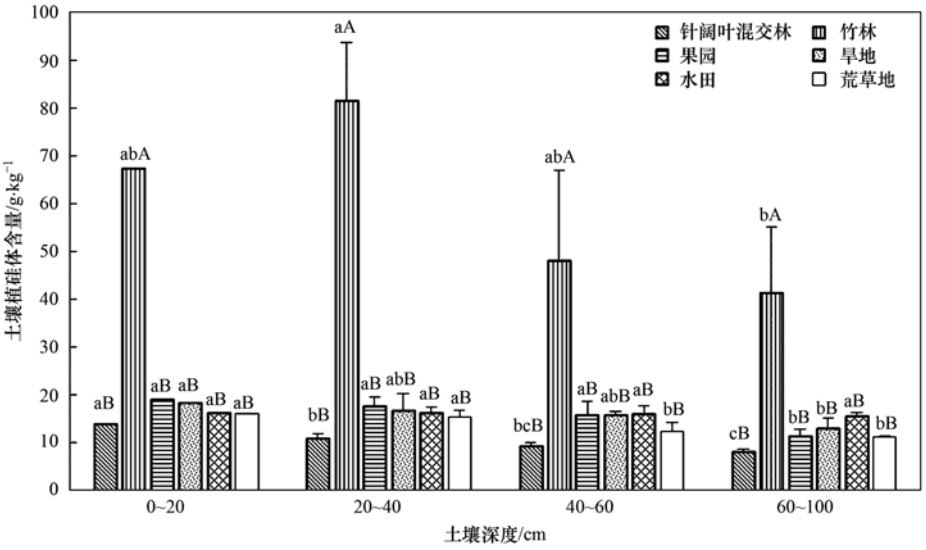


图 3　不同土地利用方式下土壤植硅体含量

Fig. 3　Content of soil phytolith for different land uses

2.3　土壤植硅体中有机碳含量以及土壤中植硅体碳含量

如图 4 所示，在 0 ~ 100 cm 整个土壤剖面中，不同土地利用方式下土壤植硅体中有机碳含量的变化范围在 24.21 ~ 78.27 g·kg^{-1}之间，竹林(37.08 g·kg^{-1})土壤植硅体中有机碳的平均含量最低，旱地(69.04 g·kg^{-1})最高. 在 0 ~ 20 cm 土层，针阔叶混交林土壤植硅体碳含量最低，在 20 ~ 60 cm 土层则是以竹林土壤植硅体中有机碳含量最低；旱地则是在 0 ~ 60 cm 的 3 个土层中的含量皆为最高. 荒草地与针阔叶混交林土壤植硅体中有机碳含量随着土层深度的增加而逐渐地升高. 各土地利用方式中只有针阔叶混交林各土层之间的土壤植硅体中有机碳含量存在显著差异($P < 0.05$).

从图 5 可以看出，在整个土壤剖面中，土壤植硅体碳含量的变化范围在 0.50 ~ 2.80 g·kg^{-1}之间，竹林(1.96 g·kg^{-1})和旱地(1.12 g·kg^{-1})的土壤植硅体碳平均含量最高，针阔叶混交林(0.55 g·kg^{-1})最低. 在 0 ~ 100 cm 的各个土层，竹林土壤植硅体碳含量均表现为最高，针阔叶混交林在除 40 ~ 60 cm 土层外的其他土层土壤植硅体含量均表现为最低. 竹林土壤在 0 ~ 20 cm 的表土层的植硅体碳含量显著高于其他土地利用方式($P < 0.05$). 在 20 ~ 40 cm 土层，针阔叶混交林和水田 2 种土地利用类型土壤植硅体碳含量显著低于竹林($P < 0.05$). 在 40 ~ 60 cm 土层，只有旱地土壤植硅体碳含量与竹林之间差异不显著，其他 4 种土地利用方式均显著低于竹林. 而在 60 ~ 100 cm 土层，各土地利用方式下土壤植硅体碳含量差异不显著. 总体上，竹林、果园、旱地这 3 种土地利用类型的土壤

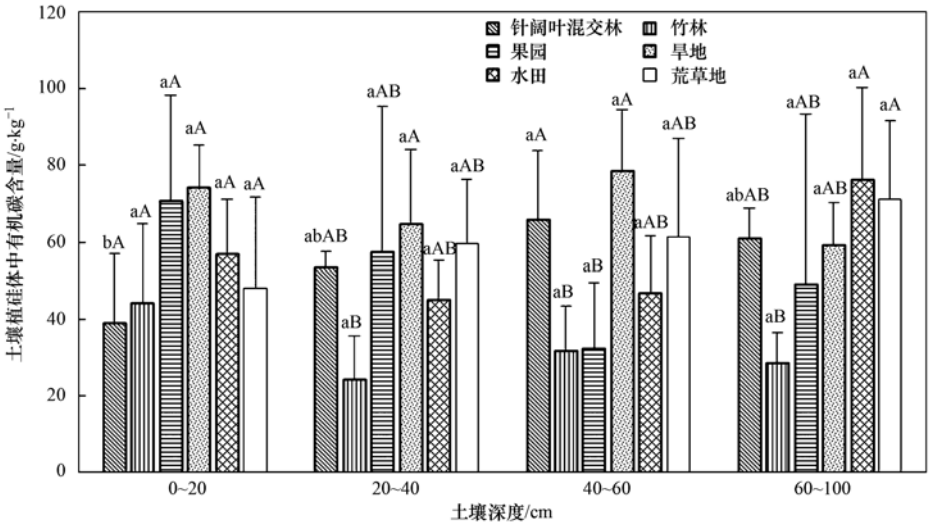


图 4　不同土地利用方式下土壤植硅体中有机碳含量

Fig. 4　Contents of organic carbon in soil phytolith for different land uses

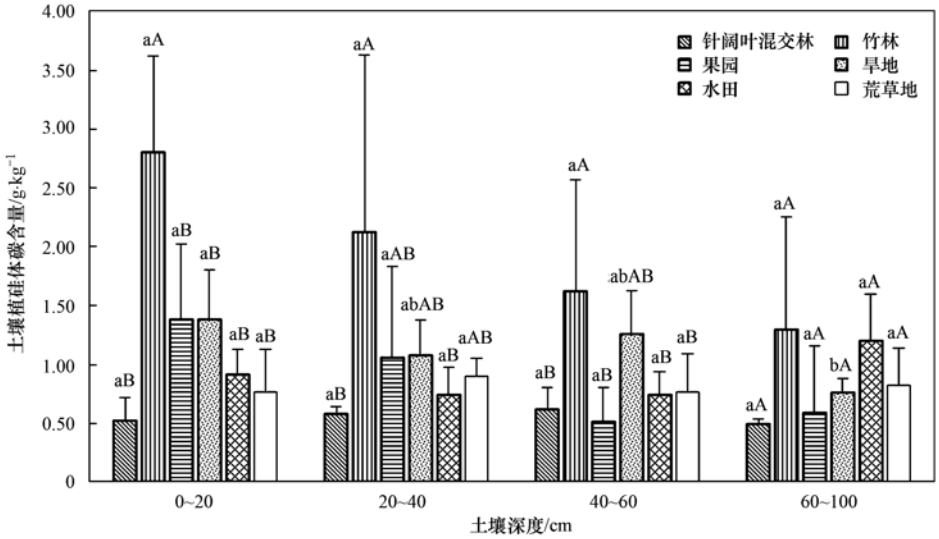


图 5 不同土地利用方式下土壤植硅体碳含量

Fig. 5 Content of soil PhytOC for different land uses

植硅体碳的分布以表层居多(0 ~ 20 cm), 而水田的土壤植硅体碳则多分布在底层土壤(60 ~ 100 cm).

2.4 不同土地利用下土壤有机碳与植硅体碳储量估算

在计算土壤有机碳储量后发现(表 1), 在 0 ~ 100 cm 土壤深度内, 水田土壤中的有机碳储量(202.07 $t \cdot hm^{-2}$)表现为最高, 与其他 5 种土地利用类型存在显著性差异($P < 0.05$); 针阔叶混交林土壤中的有机碳储量(95.51 $t \cdot hm^{-2}$)表现为最低, 与其他 5 种土地利用类型存在显著性差异($P < 0.05$).

从表 1 可以看出, 各土地利用方式下的土壤植硅体碳储量表现为: 针阔叶混交林(8.19 $t \cdot hm^{-2}$) < 果园(12.00 $t \cdot hm^{-2}$) < 旱地(12.59 $t \cdot hm^{-2}$) < 荒草地(12.75 $t \cdot hm^{-2}$) ≈ 水田(12.75 $t \cdot hm^{-2}$) < 竹林(23.45 $t \cdot hm^{-2}$). 竹林与其他 5 种土地利用类型在土壤植硅体碳储量上存在显著性差异($P < 0.05$), 同时, 与储量最低的针阔叶混交林相比, 高出了 14.26 $t \cdot hm^{-2}$; 除竹林外的其他 5 种土地利用方式之间不存在显著性差异($P > 0.05$).

表 1 不同土地利用方式下土壤有机碳与植硅体碳储量

Table 1 Storage of soil organic carbon and PhytOC for different land uses

土地利用方式	土壤有机碳储量 /$t \cdot hm^{-2}$	土壤植硅体碳储量 /$t \cdot hm^{-2}$
针阔叶混交林	95.51 ± 13.88d	8.19 ± 0.80b
竹林	172.79 ± 25.78b	23.45 ± 12.45a
果园	159.75 ± 15.30bc	12.00 ± 3.53b
旱地	137.13 ± 15.80c	12.59 ± 2.30b
水田	202.07 ± 3.24a	12.75 ± 2.44b
荒草地	162.70 ± 10.98bc	12.75 ± 2.09b

3 讨论

3.1 不同土地利用方式对土壤有机碳含量以及有机碳储量的影响

植物所产生的枯枝落叶和地下根系是土壤有机质的主要来源[19]. 本研究中, 竹林中的毛竹产生的生物量大, 每年产生大量的凋落物, 在竹林土壤表面可以积累较多的有机物质, 因此有机碳含量较高且主要分布在 0 ~ 20 cm 土层[20]. 而针阔叶混交林与竹林相比, 其中的植物生长相对更为缓慢, 每年产生的枯枝落叶较少, 根系也更加粗壮, 并且多年生长, 难以被微生物分解利用, 转化成土壤中的有机碳. 荒草地也由于其地面生长的主要是草本植物, 产生的生物量比较少, 能提供给土壤的有机物料不多, 所以针阔叶混交林和荒草地土壤有机碳含量表现都比较低. 竹林和针阔叶混交林产生的有机物料不易受到人类活动的影响, 可以自然存在于土壤的表面, 因此存在比较显著的土壤有机碳表层富集现象[21]. 但是在果园种植模式中, 多年生长的果树所产生的落叶枯枝也相对较少, 作为包含果树生产的主要有机物质的果实, 会被农户收获贩卖, 并且农户往往会带走修剪下来的枝叶添作薪柴, 进一步降低了土壤中有机物质的输入, 所以果园土壤的有机碳含量表现较低[22]. 根据以往的研究, 旱地土壤中的有机碳含量通常会低于淹水土壤[23], 本研究也显示, 旱地土壤中的有机碳含量(11.90 $g \cdot kg^{-1}$)低于水田(16.54 $g \cdot kg^{-1}$), 原因是农户通常会在水稻的种植过程中, 施加额外的有机肥, 以保证水稻的生长; 水稻在每年被收割以后, 通常也会在水田中留下部分植株, 在被微生物分解过后可

以提供一部分有机质；而且本实验中的水田，在水稻的种植过程中，不会进行传统的农耕，减少了对土壤结构的破坏，提高了土壤内部微生物的活性，可以固定更多的不稳定碳[24]．徐鹏等[25]对旱地中的有机质含量研究中，认为农户按照种植旱地作物的传统观念，会带走或焚烧农作物的秸秆部分，减少了旱地土壤中有机物料的输入；并且农民通常讲究勤耕细作，但是对旱地土壤进行的翻耕，会增加土壤中的空气含量，破坏土壤的物理结构，增加土壤微生物的分解速率，进一步降低旱地土壤的有机碳含量，所以导致旱地土壤有机碳含量不高；此外，农民对土壤的翻耕，会把本来存在于土壤表层的有机物质带到更深的土层，所以在旱地土壤中，有机碳含量最高的土层是 20 ~ 40 cm 的亚表层．

不同土地利用方式在影响有机碳在土壤中的剖面分布的同时，也能够影响有机碳在土壤中的积累与分解，由此对土壤中的有机碳储量产生影响．例如在 0 ~ 100 cm 土壤深度内，水田土壤中的有机碳储量显著高于其他 5 种土地利用类型（$P < 0.05$），这与黄先飞等[13]的研究一致．寻其原因，一方面水田有较高的有机物输入量，另一方面，水田含水量较其他土地利用方式更高，土壤中的空气含量则相对更少，从而抑制了好氧微生物的活动，减缓了有机质的矿化过程，使其在土壤中大量积累．

3.2　不同土地利用方式对土壤植硅体、植硅体碳含量及植硅体碳储量的影响

通过相关性分析（表 2），土壤植硅体中有机碳与土壤植硅体碳之间没有显著的相关性，而土壤全硅、土壤植硅体和土壤植硅体碳这 3 种含量指标之间均存在极显著的正相关性（$P < 0.01$），这与之前的研究结果一致[10]．植硅体是植物从土壤中吸收可溶性的二氧化硅而生成的，然后随着枯枝落叶回归到土壤中，所以土壤全硅含量与土壤植硅体含量之间呈现极强的相关性[26]．在不同土地利用方式下，生长着不同的地面植物，而不同植物种类合成植硅体的能力有很大差别，产生的生物量也有很大差别，从而导致不同土壤中植硅体含量存在一定的差别[27]．土壤中的植硅体碳含量主要取决于植硅体本身的固碳能力与固碳效率，以及植硅体碳自身的稳定性[28]．通常而言，裸子植物对硅的吸收能力小于被子植物，被子植物中的双子叶植物对硅的吸收能力又弱于单子叶植物，而禾本科植物则是单子叶植物中硅高浓度累积的代表[29]．本实验 6 种土地利用方式中，竹林土壤的植硅体含量表现为最高，同时竹林土壤植硅体碳储量也表现为最高．虽然竹林土壤植硅体中有机碳含量较低，但是由于毛竹是单子叶植物，本身具有很强的富硅能力，植株中能合成与积累更多的植硅体（图 4），同时竹林产生的生物量大，枯枝落叶较多，因此可以在土壤中累积更多的植硅体，也就有更多的植硅体碳，最终使得竹林土壤植硅体碳储量也最高（表 1）．除植物类型会影响土壤中的植硅体含量以外，人为活动也存在重要影响．原本水稻属于禾本科植物，合成植硅体的能力极强，但是水稻植株在成熟以后会被人为收割，留在水田中的往往只有很少一部分，这便减少了水田土壤中植硅体的来源，此外水田中水分含量更为丰富，加大了土壤植硅体的溶解[30]，部分植硅体碳在土壤植硅体的溶解过程中被释放出来，因而其土壤植硅体碳储量较低．果园和旱地也由于人为活动的影响减少了凋落物回归土壤，所以在本实验中，用于种植被子植物的水田（水稻）、果园（柑橘）和旱地（玉米）土壤的植硅体含量和储量均低于竹林．而针阔叶混交林中的主要植物是松树类和杉木类，皆属于裸子植物，合成植硅体的能力较弱，所以其土壤中的植硅体含量较低．

土壤剖面特征、土壤空隙的大小、土壤水分状况、植硅体与土壤黏粒的黏合强度和植硅体的溶解度等多种条件共同决定了土壤植硅体在土壤剖面中的分布特征[10]．本研究结果表明，旱地、果园、荒草地和针阔叶混交林这 4 种土壤利用类型中的植硅体含量会随着土层深度的增加而下降，存在一定的表层富集现象．这是由于凋落在土壤表层的枯枝落叶是土壤植硅体的主要来源，植硅体有很强的抗分解能力，在枝叶被微生物分解后，植硅体仍可以保留在土壤中，虽然部分植硅体可以随土壤孔隙向下淋溶[5]，但表层土壤是首先接收植硅体，并且会随枯枝落叶而得到补充，所以土壤表层的植硅体含量会高于其他土层．同理包裹在植硅体中的植硅体碳也存在一定的表层富集现象．

表 2　土壤植硅体碳相关指标之间的相关系数

Table 2　Correlation coefficients of related indicators of soil PhytOC

指标	植硅体碳	植硅体中有机碳	植硅体	全硅
植硅体碳	1			
植硅体中有机碳	−0.184	1		
植硅体	0.870 **	−0.592 **	1	
全硅	0.525 **	−0.423 *	0.562 **	1

1）* 表示在 0.05 水平上显著相关，* * 表示在 0.01 水平上极显著相关（$n = 72$）

4 结论

在 0 ~ 100 cm 土壤深度内，各土地利用方式土壤有机碳含量变化范围在 8.16 ~ 16.75 $g \cdot kg^{-1}$，除旱地外，其他土地利用方式下土壤有机碳含量均随着剖面加深而递减. 土壤全硅含量与土壤植硅体含量和植硅体碳含量之间呈现出极显著正相关关系. 土壤植硅体含量和植硅体碳含量总体呈现出随着土层深度的增加而下降的趋势，存在一定的表层富集现象，而土壤植硅体中有机碳则在底层(60 ~ 100 cm)土壤含量较高. 6 种土地利用方式中，竹林土壤中的植硅体(41.38 ~ 81.63 $g \cdot kg^{-1}$)和植硅体碳(1.30 ~ 2.80 $g \cdot kg^{-1}$)含量皆表现为最高，而竹林土壤植硅体中有机碳含量最低. 在整个土壤剖面，水田有机碳储量最高，其次为竹林；竹林的土壤植硅体碳储量最高.

参考文献：

[1] 陈仕奇，吕盛，高明，等. 缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征[J]. 环境科学，2019，**40**(2)：953-960.
Chen S Q, Lv S, Gao M, *et al*. Characteristics of soil organic carbon and mineralization with different stands in Jinyun Mountain[J]. Environmental Science, 2019, **40**(2): 953-960.

[2] Piperno D R. Quaternary environmental history and agricultural impact on vegetation in Central America[J]. Annals of the Missouri Botanical Garden, 2006, **93**(2): 274-296.

[3] 吕厚远，贾继伟，王伟铭，等. “植硅体”含义和禾本科植硅体的分类[J]. 微体古生物学报，2002，**19**(4)：389-396.
Lu H Y, Jia J W, Wang W M, *et al*. On the meaning of phytolith and its classification in Gramineae[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2002, **19**(4): 389-396.

[4] 张金林，傅伟军，周秀峰，等. 典型麻竹林土壤植硅体碳的空间异质性特征[J]. 土壤学报，2017，**54**(5)：1147-1156.
Zhang J L, Fu W J, Jiang X F, *et al*. Spatial variability of phytolith-occluded organic carbon in soil under typical Dendrocalamus latiflorus munro groves[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, **54**(5): 1147-1156.

[5] Parr J, Sullivan L, Chen B H, *et al*. Carbon bio-sequestration within the phytoliths of economic bamboo species[J]. Global Change Biology, 2010, **16**(10): 2661-2667.

[6] 许子娟，左昕昕，范百龄，等. 植硅体圈闭碳地球化学研究进展[J]. 地球科学进展，2017，**32**(2)：151-159.
Xu Z J, Zuo X X, Fan B L, *et al*. Advances in geochemical study of phytolith occluded carbon[J]. Advances in Earth Science, 2017, **32**(2): 151-159.

[7] Song Z L, Liu H Y, Si Y, *et al*. The production of phytoliths in China's grasslands: implications to the biogeochemical sequestration of atmospheric CO_2[J]. Global Change Biology, 2012, **18**(12): 3647-3653.

[8] 李自民，宋照亮，姜培坤. 稻田生态系统中植硅体的产生与积累——以嘉兴稻田为例[J]. 生态学报，2013，**33**(22)：7197-7203.
Li Z M, Song Z L, Jiang P K. The production and accumulation of phytoliths in rice ecosystems: a case study to Jiaxing paddy field[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(22): 7197-7203.

[9] 李自民，宋照亮，李蓓蕾. 白洋淀芦苇湿地生态系统中植硅体的产生和积累研究[J]. 土壤学报，2013，**50**(3)：632-636.
Li Z M, Song Z L, Li B L. Generation and accumulation of phytoliths in Baiyangdian reed wetland ecosystems[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, **50**(3): 632-636.

[10] 林维雷，应雨骐，姜培坤，等. 浙江南部亚热带森林土壤植硅体碳的研究[J]. 土壤学报，2015，**52**(6)：1365-1373.
Lin W L, Ying Y Q, Jiang P K, *et al*. Study on phytolith-occluded organic carbon in soil of subtropical forest of southern Zhejiang[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, **52**(6): 1365-1373.

[11] Song Z L, Liu H Y, Li B L, *et al*. The production of phytolith-occluded carbon in China's forests: Implications to biogeochemical carbon sequestration[J]. Global Change Biology, 2013, **19**(9): 2907-2915.

[12] 潘文杰，杨孝民，张晓东，等. 中国陆地生态系统植硅体碳汇研究进展[J]. 地球科学进展，2017，**32**(8)：859-866.
Pan W J, Yang X M, Zhang X D, *et al*. Advances in study of phytolith carbon sequestration in terrestrial ecosystems of China[J]. Advances in Earth Science, 2017, **32**(8): 859-866.

[13] 黄先飞，周运超，张珍明. 土地利用方式下土壤有机碳特征及影响因素——以后寨河喀斯特小流域为例[J]. 自然资源学报，2018，**33**(6)：1056-1067.
Huang X F, Zhou Y C, Zhang Z M. Characteristics and affecting factors of soil organic carbon under land uses: a case study in Houzhai River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2018, **33**(6): 1056-1067.

[14] 李雄，张旭博，孙楠，等. 不同土地利用方式对土壤有机无机碳比例的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2018，**24**(6)：1508-1519.
Li X, Zhang X B, Sun N, *et al*. Impact of land uses on the ratio of soil organic and inorganic carbon[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, **24**(6): 1508-1519.

[15] 张影，巩杰，马学成，等. 基于文献计量的近 20 多年来土地利用对土壤有机碳影响研究进展与热点[J]. 土壤通报，2016，**47**(2)：480-488.
Zhang Y, Gong J, Ma X C, *et al*. Research progress on the impact of land use on soil organic carbon based on the bibliometric method[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, **47**(2): 480-488.

[16] 陆畅. 土地利用方式对土壤植硅体碳和团聚体有机碳的影响[D]. 重庆：西南大学，2018.
Lu C. Effects of land uses on soil phytOC and organic carbon of soil aggregates[D]. Chongqing: Southwest University, 2018.

[17] Parr J F, Dolic V, Lancaster G, *et al*. A microwave digestion method for the extraction of phytoliths from herbarium specimens[J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 2001, **116**(3-4): 203-212.

[18] 杨杰，李永夫，黄张婷，等. 碱溶分光光度法测定植硅体碳含量[J]. 分析化学，2014，(9)：1389-1390.
Yang J, Li Y F, Huang Z T, *et al*. Determination of phytolith-occluded carbon content using Alkali Dissolution-Spectrophotometry[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2014, (9): 1389-1390.

[19] Zhong L, Zhao Q G. Organic carbon content and distribution in soils under different land uses in tropical and subtropical China[J]. Plant and Soil, 2001, **231**(2): 175-185.

[20] 彭琳，王晓君，黄从德，等. 凋落物输入改变对慈竹林土壤有机碳的影响[J]. 水土保持通报，2014，**34**(1)：129-132.
Peng L, Wang X J, Huang C D, *et al*. Effects of litter input

change on soil organic carbon in Dendrocalamus Affinnis Forest [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, **34**(1): 129-132.

[21] 王凤, 孟浩峰, 侯德明, 等. 黑河上游冰沟流域 3 种林地土壤有机碳分布特征与土壤特性的关系[J]. 草业科学, 2015, **32**(4): 640-646.
Wang F, Meng H F, Hou D M, *et al*. Relationship between soil organic carbon distribution and soil properties among three woodlands at Ice Valley in the upper reaches of Heihe basin[J]. Pratacultural Science, 2015, **32**(4): 640-646.

[22] 李如剑, 王蕊, 李娜娜, 等. 黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2662-2668.
Li R J, Wang R, Li N N, *et al*. Changes of soil organic carbon and its influencing factors of apple orchards and black locusts in the Small Watershed of Loess Plateau, China[J]. Environmental Science, 2015, **36**(7): 2662-2668.

[23] 李昌新, 黄山, 彭现宪, 等. 南方红壤稻田与旱地土壤有机碳及其组分的特征差异[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(3): 606-611.
Li C X, Huang S, Peng X X, *et al*. Differences in soil organic carbon fractions between paddy field and upland field in red soil region of south China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, **28**(3): 606-611.

[24] 姜学兵, 李运生, 欧阳竹, 等. 免耕对土壤团聚体特征以及有机碳储量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, **20**(3): 270-278.
Jiang X B, Li Y S, Ouyang Z, *et al*. Effect of no-tillage on soil aggregate and organic carbon storage[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, **20**(3): 270-278.

[25] 徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 等. 缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(10): 4009-4016.
Xu P, Jiang C S, Hao Q J, *et al*. Effects of the different land use on soil labile organic matter and carbon management index in Junyun Mountain[J]. Environmental Science, 2013, **34**(10): 4009-4016.

[26] 何珊琼, 黄张婷, 姜培坤, 等. 热带、亚热带典型森林-土壤系统植硅体碳演变规律[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(3): 697-704.
He S Q, Huang Z T, Jiang P K, *et al*. Evolution pattern of phytolith-occluded carbon in typical forest-soil ecosystems in tropics and subtropics, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27**(3): 697-704.

[27] 张新荣, 胡克, 王东坡, 等. 植硅体研究及其应用的讨论[J]. 世界地质, 2004, **23**(2): 112-117.
Zhang X R, Hu K, Wang D P, *et a*. Discussion on research and application of phytolith[J]. Global Geology, 2004, **23**(2): 112-117.

[28] 丁新泉, 刘敏超, 闫翠香. 土壤植硅体碳积累潜力影响因素分析[J]. 土壤通报, 2014, **45**(3): 749-753.
Ding X Q, Liu M C, Yan C X. Influencing factors of carbon sequestration potential within phytolith-occluded organic carbon of soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, **45**(3): 749-753.

[29] 尹帅, 姜培坤, 孟赐福, 等. 绿竹和麻竹地上部植硅体碳封存潜力[J]. 生态学报, 2017, **37**(20): 6827-6835.
Yin S, Jiang P K, Meng C F, *et al*. Comparison of PhytOC sequestration rates in above-ground apart of *Dendrocalamopsis oldhami* (Munro) Keng f. and Dendrocalamus latiflorus Munro [J]. Acta Ecologica sinica, 2017, **37**(20): 6827-6835.

[30] Blecker S W, Mcculley R L, Chadwick O A, *et al*. Biologic cycling of silica across a grassland bioclimosequence[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2006, **20**(3): GB3023.

HUANJING KEXUE Vol. 40 No. 9
Environmental Science (monthly) Sep. 15, 2019

CONTENTS