

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

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

目次

气溶胶中不同类型碳组分粒径分布特征	杜翔, 赵普生, 董群, 苏捷 (3849)
郑州市 2014~2017 年大气污染特征及气象条件影响分析	郭蒙蒙, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (3856)
济南市背景区域大气 PM _{2.5} 污染特征及其对能见度的影响	别淑君, 杨凌霄, 高颖, 姜盼, 李岩岩, 杨雨蒙, 赵彤, 王文兴 (3868)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中多环芳烃来源解析及健康风险评估	刘晓迪, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 周贝贝, 刘子亭, 衣雅男, 李静, 魏本杰, 伏梦璇 (3875)
2001~2017 年全国气溶胶光学厚度时空分布及变化趋势	刘海知, 郭海燕, 马振峰, 徐辉, 包红军, 徐成鹏 (3886)
长三角地区吸收性气溶胶时空分布特征	赵楠, 曹梵诗, 田晴, 陈勇航, 刘琼, 黄艺伟, 王羽佳 (3898)
燃煤锅炉颗粒物化学组成排放特征	杨艳蓉, 周雪明, 秦娟娟, 谭吉华, 胡京南, 陈荣志, 段菁春, 李艳 (3908)
高速公路沿线 PM _{2.5} 中重金属污染特征	李晓宝, 廖祖文, 赵红, 彭成辉, 谭腾飞, 黄萍 (3916)
北京市道路扬尘重金属污染特征及潜在生态风险	胡月琪, 郭建辉, 张超, 王铮, 颜旭, 杨懂艳, 刘兆莹 (3924)
风蚀扬尘抑尘剂效率测试方法与应用	秦建平, 李贝贝, 杨涛, 宋博, 黄玉虎, 张春荣 (3935)
京津冀地区典型印刷企业 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析	刘文文, 方莉, 郭秀锐, 聂磊, 王敏燕 (3942)
成都市典型工艺过程源挥发性有机物源成分谱	周子航, 邓也, 吴柯颖, 谭钦文, 周小玲, 宋丹林, 黄凤霞, 曾文斌 (3949)
工业园区恶臭污染源排放特征和健康风险评估	孟洁, 翟增秀, 荆博宇, 崔焕文, 王亘 (3962)
典型华北农村地区冬季 HONO 的浓度水平及来源分析	王玉征, 薛朝阳, 张成龙, 刘鹏飞, 张圆圆, 陈晖, 陈建民, 牟玉静, 刘俊峰 (3973)
不同方法制备 Co ₃ O ₄ 催化剂 CO-SCR 性能及机制	仲雪梅, 张涛, 李佳萌, 秦萱, 王亚洲, 曾洁, 张光明, 常化振 (3982)
全氟烷基物质在胶州湾海水、沉积物及生物中污染特征	崔杰文, 彭吉星, 谭志军, 翟毓秀, 郭萌萌, 李兆新, 牟海津 (3990)
江苏水源地型水库异味物质发生风险及影响因素	史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 邹伟, 胡林娜, 笪文怡, 季鹏飞 (4000)
城镇流域水体-沉积物中溶解性有机质的荧光特性及影响因素: 以宁波市小浃江为例	高凤, 邵美玲, 唐剑锋, 曹昌丽, 易辉 (4009)
水华对沉积物中氮的转化和去除的影响	肖琳, 杨佳怡 (4018)
沉积物有效态磷对湖库富营养化的指示及适用性	刘辉, 胡林娜, 朱梦圆, 赵林林, 许海, 邹伟, 史鹏程, 韩慧洁, 季鹏飞, 朱广伟 (4023)
汾河下游雨季硝酸盐污染源解析	汪银龙, 冯民权, 董向前 (4033)
新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (4042)
基于多个扩增子的 DNA metabarcoding 技术探究黄海微型真核浮游植物多样性	张莉, 张远, 林佳宁, 王书平 (4052)
FG、MFG 和 MBFG 浮游植物功能群的比较: 以贵州三座水库为例	陈倩, 李秋华, 马欣洋, 熊梅君, 何应, 韩孟书 (4061)
天然含铁矿物对砷的吸附效果及机制	邵金秋, 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 杨林生, 杨硕 (4072)
镁-钙羟基磷灰石吸附剂对水中 Pb ²⁺ 的去除	何豪, 朱宗强, 刘杰, 朱义年, 阎起明, 刘阳, 莫南, 玄惠灵, 魏婉莹 (4081)
2,6-二氨基蒽醌/石墨烯复合电极强化电吸附 Pb ²⁺	晋圣兆, 向阳, 张隽瑀, 张凯, 吉庆华 (4091)
钙掺杂四氧化三铁回收水中磷的实验	白润英, 刘建明, 郝俊峰, 徐慧, 胡文斌, 宋蕾, 刘宇红, 李会东, 周琦善 (4098)
大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除	贾其隆, 陈浩, 赵昕, 李磊, 聂云汉, 叶建峰 (4105)
A ² /O 流量分配处理低 C/N 污水性能与微生物结构优化	荣懿, 刘小钗, 何音旋, 章武首, 金鹏康 (4113)
上向流厌氧滤池 (UAF) 处理城市生活污水的运行效能	杨忠启, 刘秀红, 李海鑫, 刘智斌, 刘润雨, 杨庆 (4121)
微氧条件下自养-异养联合反硝化工艺的电子平衡分析	张若晨, 陈川, 邵博, 王威, 徐熙俊, 任南琪 (4128)
基于反硝化除磷的低温启动与稳定运行的中试试验	张帆, 于德爽, 刘杰, 王晓霞, 宋新新, 李传举, 赵峰辉 (4136)
聚己内酯与聚羟基丁酸戊酸酯的脱氮性能对比	易成豪, 秦伟, 陈湛, 文湘华 (4143)
厌氧氨氧化颗粒污泥快速培养及其抑制动力学	唐鹏, 于德爽, 陈光辉, 张培玉, 王晓霞, 吕廷廷, 黄硕, 刘诚诚 (4152)
Ca ²⁺ 对污泥硝化活性和絮凝沉降性能的影响	张兰河, 赵倩男, 张海丰, 贾艳萍, 李正, 陈子成, 郭静波, 赵天鹏 (4160)
从剩余污泥厌氧发酵上清液中以鸟粪石形式回收磷	畅萧, 曾薇, 王保贵, 许欢欢 (4169)
信号分子联合脱氮硫杆菌对同步脱氮除硫的影响	徐金兰, 陈紫薇, 张少枫, 魏清旋 (4177)
海水养殖尾水直排对河道沉积物细菌群落的影响	胡越航, 宣丽霞, 裴琼芬 (4185)
耦合短程硝化反硝化的垃圾渗滤液厌氧氨氧化处理系统构建及微生物群落分析	赵晴, 刘梦莹, 吕慧, 梁俊宇, 刁兴兴, 张鑫, 孟了 (4195)
稻秸添加对两种水稻土产甲烷古菌及细菌的影响	保琼莉, 王凤花, 保万魁, 黄益宗 (4202)
地膜覆盖对稻-油轮作农田温室气体排放的影响	陈世杰, 江长胜, 倪雪, 李晓茜, 郝庆菊 (4213)
氮肥深施及间种白三叶草对茶园 N ₂ O 排放的影响	吕天新, 伍延正, 沈健林, 陈丹, 姜文倩, 王娟, 李勇, 吴金水 (4221)
三峡库区及其下游溶解氧化亚氮 (N ₂ O) 分布和释放	程芳, 丁帅, 刘素美, 宋国栋, 张桂玲 (4230)
沉降除藻协同沉积物覆盖对藻华水体甲烷释放的影响	朱琳, 于江华, 施文卿, 易齐涛, 曹华勇, 蒲寅羽 (4238)
新建铅蓄电池集聚区对周边土壤环境的影响: 基于重金属空间特征	丁亚丽, 廖敏, 方至萍, 陈树森, 张云, 郭佳雯, 梁雨琦 (4244)
不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地植被与土壤性质的影响	杨胜香, 李凤梅, 彭禧柱, 曹建兵, 高智席 (4253)
基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法	张云慧, 杜平, 何赢, 仲小飞, 罗会龙, 秦晓鹏, 徐刚 (4262)
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 (4270)
西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响	田静, 盛茂银, 汪攀, 温培才 (4278)
调理剂+淹水措施对 Cd 污染稻田控 Cd 效果分析	彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 何钟响, 杨蕊嘉, 李丹阳, 刘寿涛, 罗海艳 (4287)
海螺沟植物和积雪中有机磷酸酯的分布及来源	陈阳, 印红玲, 吴迪, 罗怡, 邓旭, 徐维新, 柳锦宝 (4295)
《环境科学》征订启事 (3923) 《环境科学》征稿简则 (3941) 信息 (4041, 4051, 4229)	

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 $16.75 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $59.66 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 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 $0.55 \sim 1.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 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 ($23.45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 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.hjxx.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 $16.75 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $59.66 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 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 $1.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 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 $23.45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 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_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 $4.1 \times 10^9 \text{ hm}^2$ 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 [$0.36 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 以 CO_2 计] 计算, 全球总的植硅体碳封存量会增加到每年 $1.5 \times 10^9 \text{ t CO}_2$, 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 $106^{\circ}16'$ ~ $106^{\circ}25'$, 北纬 $29^{\circ}39'$ ~ $29^{\circ}53'$ 之间, 总面积约 18 km^2 , 海拔高度 $300 \sim 951.5 \text{ m}$, 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°C , 年平均降雨量约 $1\,612 \text{ mm}$, 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 $0 \sim 20$ 、 $20 \sim 40$ 、 $40 \sim 60$ 和 $60 \sim 100 \text{ cm}$ 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; 土壤全磷采取钼钒黄比色法; 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:

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

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

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

土壤有机碳储量和植硅体碳储量的公式如下:

$$X = \sum_{i=1}^n (10\,000 \times H_i \times \text{BD}_i \times C_i) \quad (4)$$

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

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

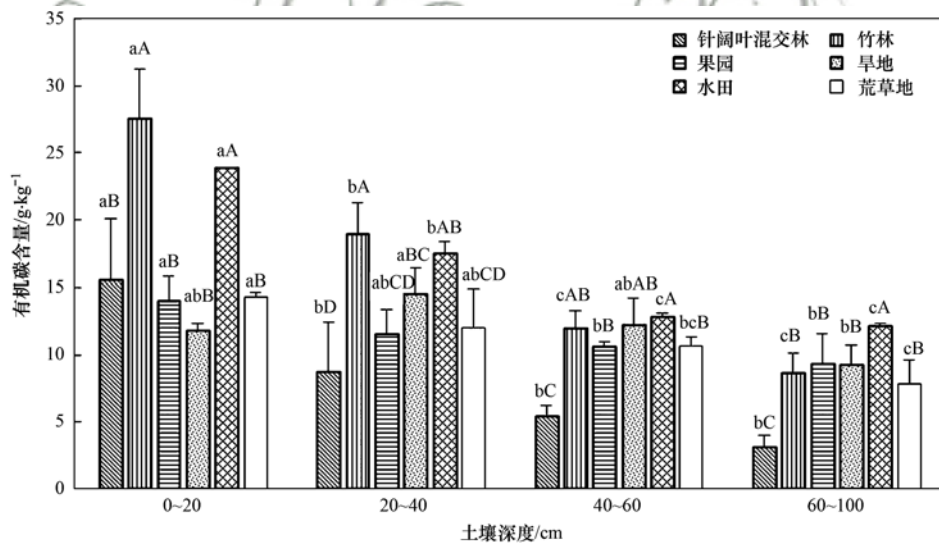
如图 1 所示,除旱地外,其他土地利用方式的土壤有机碳含量随着土层的加深而降低.在整个 0~100 cm 土层内,土壤各土层平均有机碳含量为竹林(16.75 g·kg⁻¹)和水田(16.54 g·kg⁻¹)最高,针阔叶混交林(8.16 g·kg⁻¹)最低.在 0~20 cm 的表土层,竹林和水田土壤中的有机碳含量显著高于其他土地利用方式($P < 0.05$),并且显著高于各自在 20~100 cm 的其他土层($P < 0.05$).在 20~100 cm 的各个土层,针阔叶混交林的土壤有机碳含量在各土地利用方式中均表现最低.在 40~60 cm 和 60~100 cm 两个土层中,各土地利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·kg⁻¹,平均含量表现为:水田(664.85 g·kg⁻¹)最高,竹林(654.69 g·kg⁻¹)次之,针阔叶混交林(538.05 g·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·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·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

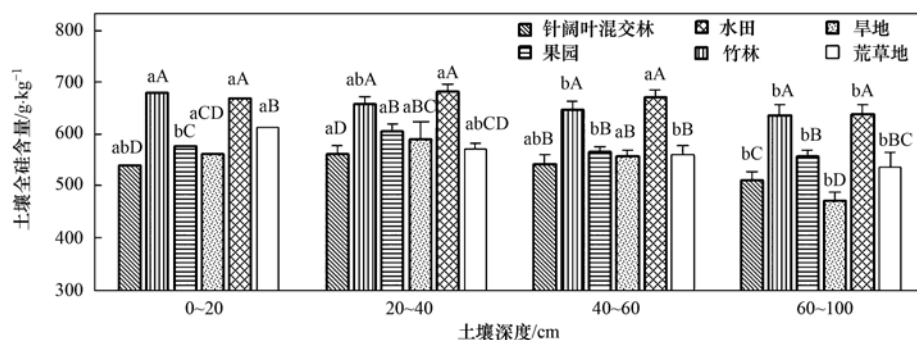


图 2 不同土地利用方式下土壤全硅含量

Fig. 2 Content of soil silicon for different land uses

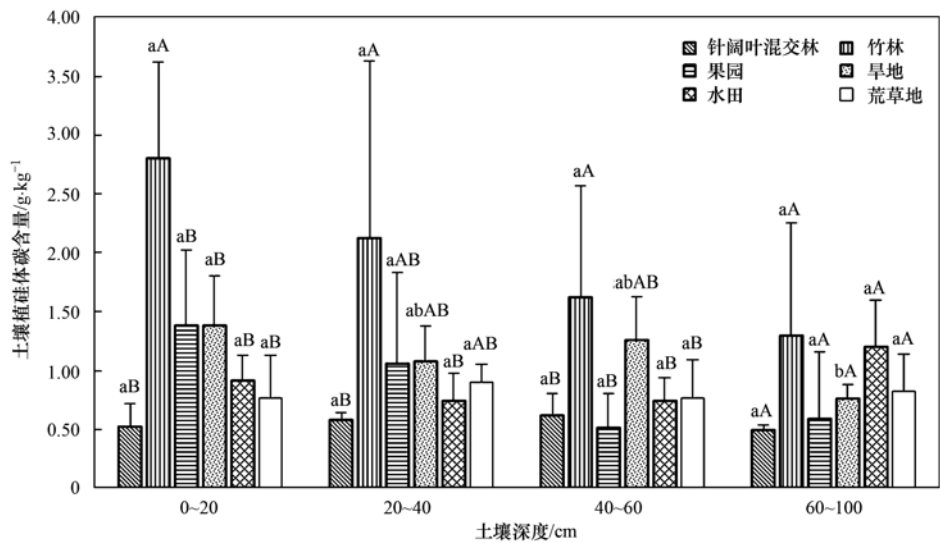


图5 不同土地利用方式下土壤植硅体碳含量
Fig. 5 Content of soil PhytOC for different land uses

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($202.07 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)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($95.51 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)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($8.19 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)<果园($12.00 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)<旱地($12.59 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)<荒草地($12.75 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) $\approx$ 水田($12.75 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)<竹林($23.45 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$).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 $14.26 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$;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 / $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$	土壤植硅体碳储量 / $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$
针阔叶混交林	$95.51 \pm 13.88\text{d}$	$8.19 \pm 0.80\text{b}$
竹林	$172.79 \pm 25.78\text{b}$	$23.45 \pm 12.45\text{a}$
果园	$159.75 \pm 15.30\text{bc}$	$12.00 \pm 3.53\text{b}$
旱地	$137.13 \pm 15.80\text{c}$	$12.59 \pm 2.30\text{b}$
水田	$202.07 \pm 3.24\text{a}$	$12.75 \pm 2.44\text{b}$
荒草地	$162.70 \pm 10.98\text{bc}$	$12.75 \pm 2.09\text{b}$

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($11.90 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)低于水田($16.54 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),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·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·kg⁻¹)和植硅体碳(1.30~2.80 g·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 CO₂[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, 应雨琪, 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 al.* 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.

CONTENTS

Size Distributions of Different Carbonaceous Components in Ambient Aerosols	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, DONG Qun, <i>et al.</i> (3849)
Analysis of Air Pollution Characteristics and Meteorological Conditions in Zhengzhou from 2014 to 2017	GUO Meng-meng, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (3856)
Characteristics of Atmospheric PM _{2.5} Pollution and Its Influence on Visibility in Background Areas of Ji'nan	BIE Shu-jun, YANG Ling-xiao, GAO Ying, <i>et al.</i> (3868)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} During Winter in Liaohe City	LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (3875)
Temporal-Spatial Characteristics and Variability in Aerosol Optical Depth over China During 2001-2017	LIU Hai-zhi, GUO Hai-yan, MA Zhen-feng, <i>et al.</i> (3886)
Spatial-Temporal Distribution of Absorptive Aerosols in the Yangtze River Delta	ZHAO Nan, CAO Fan-shi, TIAN Qing, <i>et al.</i> (3898)
Emission Characteristics of Chemical Composition of Particulate Matter from Coal-fired Boilers	YANG Yan-rong, ZHOU Xue-ming, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (3908)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} Near Highway	LI Xiao-bao, LIAO Zu-wen, ZHAO Hong, <i>et al.</i> (3916)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Heavy Metals in Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, GUO Jian-hui, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (3924)
Application of Test Method for Dust Suppression Efficiency of Wind Erosion Dust Suppressant	QIN Jian-ping, LI Bei-bei, YANG Tao, <i>et al.</i> (3935)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs in Printing Enterprises in Beijing-Tianjin-Hebei	LIU Wen-wen, FANG Li, GUO Xiu-rui, <i>et al.</i> (3942)
Source Profiles of VOCs Associated with Typical Industrial Processes in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, WU Ke-ying, <i>et al.</i> (3949)
Characterization and Health Risk Assessment of Exposure to Odorous Pollutants Emitted from Industrial Odor Sources	MENG Jie, ZHAI Zeng-xiu, JING Bo-yu, <i>et al.</i> (3962)
Analysis of HONO Concentration and Source in Typical Rural Area of North China	WANG Yu-zheng, XUE Chao-yang, ZHANG Cheng-long, <i>et al.</i> (3973)
CO-SCR Performance and Mechanism over Co ₃ O ₄ Catalysts	ZHONG Xue-mei, ZHANG Tao, LI Jia-yin, <i>et al.</i> (3982)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Alkyl Substances (PFASs) in Seawater, Sediments, and Biological Samples from Jiaozhou Bay, China	 CUI Wen-jie, PENG Ji-xing, TAN Zhi-jun, <i>et al.</i> (3990)
Occurrence and Influencing Factors of Odorous Compounds in Reservoirs Used as Drinking Water Resources in Jiangsu Province	 SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4000)
Fluorescence Characteristics and Influencing Factors of Dissolved Organic Matter (DOM) in Water and Sediment of Urban Watershed: A Case Study of Xiaojia River in Ningbo City	 GAO Feng, SHAO Mei-ling, TANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4009)
Water Bloom Modified Sediment Nitrogen Transformation and Removal	 XIAO Lin, YANG Jia-yi (4018)
Applicability of Bioavailable Phosphorus in Sediments to Indicating Trophic Levels of Lakes and Reservoirs	LIU Hui, HU Lin-na, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (4023)
Analysis of Nitrate Pollution Sources in the Rainy Season of the Lower Fenhe River	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (4033)
Hydrochemical Characteristics and Evolution of Groundwater in the Kashgar Delta Area in Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (4042)
Community Diversity of Eukaryotic Nano-phytoplankton in Yellow Sea Using DNA Metabarcoding Technology Based on Multiple Amplicons	 ZHANG Li, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (4052)
Comparison of Functional Groups of Phytoplankton in FG, MFG, and MBFG; Taking Three Reservoirs as an Example in Guizhou Plateau	CHEN Qian, LI Qiu-hua, MA Xin-yang, <i>et al.</i> (4061)
Adsorption and Mechanism of Arsenic by Natural Iron-containing Minerals	SHAO Jin-qiu, WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4072)
Removal of Pb ²⁺ from Aqueous Solution by Magnesium-Calcium Hydroxyapatite Adsorbent	HE Hao, ZHU Zong-qiang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4081)
Intensified Electrosorption of Pb ²⁺ by 2,6-diaminoanthraquinone/Graphene Composite Electrode	JIN Sheng-yao, XIANG Yang, ZHANG Jun-yu, <i>et al.</i> (4091)
Experiment on Recovery of Phosphorus from Aqueous Solution by Calcium Doped Fe ₃ O ₄	BAI Run-ying, LIU Jian-ming, HAO Jian-feng, <i>et al.</i> (4098)
Removal of Microplastics by Different Treatment Processes in Shanghai Large Municipal Wastewater Treatment Plants	JIA Qi-long, CHEN Hao, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (4105)
Enhanced Nutrient Removal and Microbial Community Structure in a Step-feed A ² /O Process Treating Low-C/N Municipal Wastewater	RONG Yi, LIU Xiao-chai, HE Yin-xuan, <i>et al.</i> (4113)
Performances Analysis of an Upflow Anaerobic Filter for Domestic Sewage Treatment	YANG Zhong-qi, LIU Xiu-hong, LI Hai-xin, <i>et al.</i> (4121)
Electron Equilibrium Analysis of Integrated Autotrophic and Heterotrophic Denitrification Process Under Micro-aerobic Conditions	ZHANG Ruo-chen, CHEN Chuan, SHAO Bo, <i>et al.</i> (4128)
Pilot Study on Start-up and Stable Operation at Low Temperature Based on Denitrifying Phosphorus Removal	ZHANG Fan, YU De-shuang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4136)
Comparison of Polycaprolactone and Poly-3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate for Nitrogen Removal	YI Cheng-hao, QIN Wei, CHEN Zhan, <i>et al.</i> (4143)
Rapid Cultivation of Anaerobic Ammonium Oxidation Granular Sludge and Inhibition Kinetics of Granular Sludge	TANG Peng, YU De-shuang, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (4152)
Effect of Ca ²⁺ on the Nitrification Activity and the Flocculation and Sedimentation Performances of the Activated Sludge	ZHANG Lan-he, ZHAO Qian-nan, ZHANG Hai-feng, <i>et al.</i> (4160)
Recovery of Phosphorus in the Form of Struvite from the Anaerobic Fermentation Supernatant of Excess Sludge	CHANG Xiao, ZENG Wei, WANG Bao-gui, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Signal Molecule Combined with <i>Thiobacillus denitrificans</i> on Simultaneous Removal of Nitrogen and Sulfur	XU Jin-lan, CHEN Zi-wei, ZHANG Shao-feng, <i>et al.</i> (4177)
Bacterial Community Composition in Channel Sediment in Response to Mariculture Wastewater Drainage	HU Yue-hang, XUAN Li-xia, QIU Qiong-fen (4185)
Setup and Microbial Community Analysis of ANAMMOX System for Landfill Leachate Treatment Coupling Partial Nitrification-Denitrification Process	 ZHAO Qing, LIU Meng-ying, LÜ Hui, <i>et al.</i> (4195)
Effects of Rice Straw Addition on Methanogenic Archaea and Bacteria in Two Paddy Soils	BAO Qiong-li, WANG Feng-hua, BAO Wan-kui, <i>et al.</i> (4202)
Effect of Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions from Rice-Rapeseed Rotation in Cropland	CHEN Shi-jie, JIANG Chang-sheng, NI Xue, <i>et al.</i> (4213)
N ₂ O Emissions from a Tea Field with Deep Application of Nitrogen Fertilizer and Intercropping with White Clover	LÜ Tian-xin, WU Yan-zheng, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (4221)
Distribution and Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) in Three Gorges Reservoir and Downstream River	CHENG Fang, DING Shuai, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (4230)
Synergy of Algal Sedimentation and Sediment Capping for Methane Emission Control in Bloom Waters	ZHU Lin, YU Jiang-hua, SHI Wen-qing, <i>et al.</i> (4238)
Impact of Newly Build Lead-Acid Battery Agglomeration Area on the Surrounding Soil Environment: A Study Based on the Spatial Characteristics of Heavy Metals	 DING Ya-li, LIAO Min, FANG Zhi-ping, <i>et al.</i> (4244)
Effects of Amendments with Different C/N/P Ratios on Plant and Soil Properties of a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, PENG Xi-zhu, <i>et al.</i> (4253)
Derivation of the Thresholds of Available Concentrations of Heavy Metals in Soil Based on Agricultural Product Safety	ZHANG Yun-hui, DU Ping, HE Ying, <i>et al.</i> (4262)
Content of Soil Phytolith-Occcluded Organic Carbon in Different Land Use Patterns at Jinyun Mountain	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (4270)
Influence of Land Use Change on Litter and Soil C, N, P Stoichiometric Characteristics and Soil Enzyme Activity in Karst Ecosystem, Southwest China	 TIAN Jing, SHENG Mao-yin, WANG Pan, <i>et al.</i> (4278)
Effect of Conditioning Agent Combined with Flooding Measures on Absorption and Accumulation of Cadmium in Rice	PENG Ou, LIU Yu-ling, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (4287)
Distribution and Sources of OPEs in Plants and Snow in Hailuoguo	CHEN Yang, YIN Hong-ling, WU Di, <i>et al.</i> (4295)