

百方知库
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.2
第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响 李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)

珠三角地区利用 PM_{2.5} 反演气溶胶数浓度谱方法 李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)

广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性 范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)

扬州市 PM_{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评估 董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)

聊城市冬季 PM_{2.5} 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)

博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源 宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)

某集约化肉鸡饲养场 PM_{2.5} 中抗生素抗性基因的分布特征 刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)

水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响 胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)

滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献 任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)

基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)

湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响 余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)

异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险 李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 林祺, 王荣, 沈吉 (614)

珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素 杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)

北运河粪源微生物分布特征及健康风险评估 陈磊, 李蕾芳, 郅晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)

氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律 郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)

磁性铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响 王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)

钙预处理对磁性铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响 赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)

NH₄⁺ 对镁改性生物炭除磷效果的影响 郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)

3种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较 吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)

硝酸纤维素膜降解水中对硝基苯酚的机制 代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 郅超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)

ZnTiO₂-TiO₂ 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析 张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)

高指数晶面 TiO₂ 对铬的吸附及光催化去除 钟德健, 张建峰, 李尧, 谢晓丹 (701)

Fe⁰/海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B 张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)

不同滤料滤池启动期内对铁锰离子的去除机制 蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何静, 董杨, 王海港 (717)

SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能 张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)

一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制 薛文清, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)

臭氧-CNT 膜改性联用工艺通量及膜污染分析 王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)

多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除 刘淑惠, 田伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)

微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程 刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)

从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水 袁文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)

夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法 宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)

硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性 于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)

乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性 毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)

DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性 杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建园, 张帆, 吕廷廷 (791)

间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷 赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)

ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行 韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)

进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响 都叶奇, 于德爽, 甄建园, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)

ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性 李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)

不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响 李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)

调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行 李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)

C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响 张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)

基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性 王杨, 朱斌, 董俊, 白晓慧 (853)

黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征 姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)

基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化 祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)

硝化作用对盐碱湿地 N₂O 排放的影响及其环境因子分析 杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)

长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N₂O 和 NO 排放的影响 聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)

地膜覆盖和施肥对菜地 N₂O 排放的影响 倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)

双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系 肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)

多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响 李亚森, 丁松爽, 殷金玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)

桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征 丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)

工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析 李锋, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)

膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响 林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)

缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征 陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)

复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献 张彦军, 郭胜利 (961)

不同水平外源碳在稻田土壤转化与分配的微生物响应特征 王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓悟悟, 葛东达, 吴金水 (970)

宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评估 张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)

生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响 周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)

污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响 袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)

热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜粪混合物料及其甲烷高值化条件 卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)

《环境科学》征订启事(547) 《环境科学》征稿简则(828) 信息(581, 933, 952)

缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征

陈仕奇, 吕盛, 高明*, 黄容

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: 土壤有机碳库是陆地最大的有机碳储存库, 其微弱的变化就能影响大气 CO₂ 浓度的显著变化, 其中森林土壤碳库约占全球土壤碳库的 70%, 因此如何实现森林生态系统土壤有机碳库的高效管理成为目前的研究热点. 本研究以缙云山 5 种典型林分: 阔叶林、针叶林、针阔叶混交林、竹林及研究区内弃耕 15 a 的荒草地(对照土壤)为对象, 采用矿化培养实验, 分析了不同林分的土壤在不同土层(0~20、20~40、40~60、60~100 cm)中的有机碳矿化特征. 结果表明, 林分类型、培养时长和土层深度均对土壤有机碳矿化速率有显著影响. 不同林分土壤有机碳矿化速率均随着土层加深而降低, 其中 0~20 cm 土层的矿化速率 [11.97~25.12 mg·(kg·d)⁻¹] 均显著高于其他土层 ($P < 0.05$), 其他土层间矿化速率 [4.79~6.51 mg·(kg·d)⁻¹] 无显著性差异. 5 种林分的土壤有机碳累积矿化量均随着土层加深而降低, 0~20 cm 土层中竹林和阔叶林土壤有机碳累积矿化量最高, 分别为 177.66 mg·kg⁻¹ 和 120.38 mg·kg⁻¹, 随着土层加深在 60~100 cm 土层中, 针叶林累计矿化量最高达到了 46.96 mg·kg⁻¹. 双库一级动力学方程可以较好地拟合缙云山不同林分下土壤有机碳矿化过程, 不同林分下土壤易分解有机碳含量均随土层加深而降低, 针叶林土壤矿化能力较强, 对难分解有机碳库的利用程度较高, 而竹林和阔叶林土壤微生物活性较高, 可以有效促进碳循环, 提高土壤固碳能力.

关键词: 缙云山; 森林土壤; 有机碳; 矿化碳; 双库一级动力学方程

中图分类号: X14 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0953-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201805073

Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain

CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming*, HUANG Rong

(College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Soil organic carbon (SOC) is the largest organic carbon stock on land, and slight changes in SOC can significantly affect the atmospheric CO₂ concentration, among which forest soil carbon reservoir accounts for approximately 70% of the global soil carbon stock. Therefore, the implementation of efficient management for SOC stock in the forest ecosystem has become a popular research subject. The mineralized characteristics of SOC in different soil layers (0-20, 20-40, 40-60, and 60-100 cm) were analyzed in five typical stands of Jinyun Mountain: broadleaf forest, coniferous forest, coniferous and broadleaf mixed forest, bamboo forest, and 15a abandoned grassland (control soils) in the study area. The results showed that forest type, cultivation duration, and soil depth had significant effects on the SOC mineralization rate. The mineralization rate of SOC in different forest stands decreased with the deepening soil layer, among which the mineralization rate at the 0-20 cm soil layer [11.97-25.12 mg·(kg·d)⁻¹] was significantly higher than that of other soil layers ($P < 0.05$), and there were no significant differences between the mineralization rates of other soil layers [4.79-6.51 mg·(kg·d)⁻¹]. The accumulated mineralization of SOC in the five forests decreased with the deepening soil layer. The accumulated mineralization of SOC in the bamboo forest and broadleaf forest in the 0-20 cm soil layer was the highest at 177.66 mg·kg⁻¹ and 120.38 mg·kg⁻¹, respectively. With the deepening soil layer in the 60-100 cm soil layer, the accumulated SOC mineralization in the coniferous forest reached the highest (46.96 mg·kg⁻¹). The SOC mineralization process in the different stands of Jinyun Mountain can be well fitted by the double reservoir first-level kinetic equation. The content of easily decomposable SOC in different forest stands decreased with the deepening soil layer. Coniferous forest soil exhibited a stronger mineralization ability and higher utilization degree of refractory organic carbon stock, while bamboo forest and broadleaf forest soils had higher microbial activity, which could effectively promote the carbon cycle and improve the soil carbon fixation ability.

Key words: Jinyun Mountain; forest soil; organic carbon; mineralized carbon; double reservoir first-level kinetic equation

土壤碳库作为陆地生态系统最大的碳库, 其碳储量约是植物碳储量的 3 倍, 大气碳储量的 2 倍, 其中森林土壤碳库约占全球土壤碳库的 70%^[1], 其有机碳的动态变化对森林土壤碳库和全球碳平衡有重要作用^[2]. 研究森林土壤有机碳库, 不仅需要了解有机碳在土壤中的分布, 还需要明确其分解和排放机制, 从而更深层次了解森林土壤有机碳的动态变化及其土壤固碳能力, 这对于实现森林土壤有机碳的有效管理有重要指导意义^[3].

土壤有机碳矿化是土壤中原有的有机质和外源有机质在土壤微生物的作用下分解并向大气释放 CO₂ 的过程, 反映了土壤有机碳从有机态转变为无机态的过程, 对大气 CO₂ 循环有积极作用^[4]. 因此, 研究土壤有机碳矿化对于了解有机碳的循环和

收稿日期: 2018-05-08; 修订日期: 2018-08-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800101)

作者简介: 陈仕奇(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤面源污染防治, E-mail: 352963593@qq.com

* 通信作者, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

转化及全球气候变暖的控制等都有十分重要的意义。近年来,国内外开展了大量关于森林土壤有机碳矿化的研究,不仅植被类型、培养温度、水分^[5]和海拔^[6]等因素对森林土壤碳矿化速率具有显著影响,而且林分类型也是森林土壤碳矿化的重要影响因素^[5],不同林分的不同地表凋落物会导致输入土壤的有机质质量和数量存在差异,从而使得其矿化底物存在较大差别^[6]。海拔所造成的水热条件和植被覆盖度的差异是影响土壤表层有机碳分布的主导环境因子^[7],同时不同林分类型会造成林内环境和土壤微生物数量及活性的不同,而土壤微生物作为矿化过程的直接参与者受水热条件的影响会显著影响土壤有机碳矿化过程^[6]。为了进一步研究土壤有机碳矿化过程,已有学者采用单、双指数方程等模型拟合土壤活性碳的矿化过程和土壤有机碳矿化过程^[8]。

目前有关于土壤有机碳及矿化特征的研究大多集中在土壤表层(0~30 cm),对30 cm以下的土层研究较少。因此本文以缙云山不同林分下土壤为研究对象,拟通过室内培养的方法对比研究不同林分下0~100 cm土层(0~20、20~40、40~60、60~100 cm)土壤有机碳矿化特征,揭示不同林分下土壤有机碳分解释放特征,以期为森林生态系统固碳增汇潜力提供基础数据和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地区概况

缙云山位于重庆市北碚区嘉陵江温塘峡畔,地处东经106°17'~106°24',北纬29°41'~29°52',海拔高度200~952.5 m,属典型亚热带季风湿润性气候,年平均气温13.6℃,年平均降雨量1143 mm,年平均蒸发量为777.1 mm。缙云山植被类型多样,有高等植物244科、973属、1861种^[9],素有川东

小峨眉的美称。缙云山的地质岩层由三叠纪须家河组厚层砂岩夹薄层泥页岩和煤线组成,其土壤类型主要以山地黄壤居多,此外还有黄棕壤以及少量人为利用的水稻土^[10]。

1.2 土壤样品采集

2016年5月下旬,选择5种典型林分:阔叶林、针叶林、针阔叶混交林、竹林及研究区内弃耕15 a的荒草地(对照土壤)。每种林分类型选择3个取样点,在各个样点利用剖面取样法分别在0~20、20~40、40~60及60~100 cm土层深度取样,用四分法取足够样品。土样采集后迅速带回实验室,去除其中石块、植物根系及植物残体后,取部分新鲜土壤置于4℃冰箱中保存,于7 d内测定土壤微生物量碳(SMBC)和可溶性有机碳(DOC);剩余土样自然风干后过0.25 mm筛测定土壤有机碳含量(TOC)。采样点信息见表1。供试土样基本理化性质见表2。

1.3 测定方法

1.3.1 指标测定

土壤有机碳(TOC)采用 K_2CrO_7 外加热法测定^[11];土壤易氧化有机碳(ROC)采用高锰酸钾氧化比色法测定^[11];土壤可溶性有机碳(DOC)测定:取过2 mm筛的新鲜土样10 g于100 mL离心管内,加入去离子水20 mL(土水比为1:2),25℃下恒温振荡30 min($250 r \cdot min^{-1}$),离心20 min($4000 r \cdot min^{-1}$),然后上清液用真空泵抽滤过0.45 μm 微孔滤膜到50 mL塑料瓶中,滤液直接在Multi N/C 2100分析仪(耶拿,德国)测定土壤可溶性有机碳;土壤全氮采用凯氏定氮法测定^[11];全磷采用钼蓝比色法测定^[11];全钾采用碱性熔融-火焰光度法测定^[11];土壤碱解氮采用碱解扩散法测定^[11];土壤速效钾采用 NH_4Ac 浸提-火焰光度计法测定^[11];土壤有效磷:0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃浸提-钼蓝比色法测定^[11]。

表1 采样点信息

Table 1 Sampling point information

林分	海拔/m	坡向	郁闭度	起源	经度范围(E)	纬度范围(N)	主要树种
阔叶林	844~873	西北	0.9	天然	106°23'49.90"~106°23'50.66"	29°49'52.35"~29°49'54.25"	四川大头茶、白毛新木姜子、四川杨桐
针叶林	428~461	西北	0.8	天然	106°23'21.85"~106°23'27.56"	29°49'37.67"~29°49'37.92"	马尾松、杉木
混交林	654~684	西北	0.9	天然	106°23'54.40"~106°23'54.75"	29°50'32.01"~29°50'32.47"	四川大头茶、四川杨桐、马尾松
竹林	580~590	西北	0.85	天然	106°23'14.77"~106°23'15.90"	29°49'43.66"~29°49'44.19"	毛竹
荒草地	379~387	西北	0.09	天然	106°23'15.64"~106°23'15.83"	29°49'19.69"~29°49'20.58"	弃耕地

表2 不同林分0~20 cm土层土壤的基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of the 0-20 cm soil layer in different stands

林分类型	pH	全氮 /g·kg ⁻¹	全磷 /g·kg ⁻¹	全钾 /g·kg ⁻¹	碱解氮 /mg·kg ⁻¹	有效磷 /mg·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹	有机质含量 /g·kg ⁻¹
竹林	4.18±0.02	1.90±0.06	0.15±0.01	24.97±1.03	206.88±2.68	9.76±0.46	81.03±9.90	47.41±4.03
混交林	4.37±0.02	0.64±0.00	0.13±0.00	21.60±0.61	52.56±1.67	1.41±0.00	60.39±0.67	26.74±2.01
针叶林	4.02±0.02	0.67±0.00	0.10±0.01	13.36±2.26	36.82±0.67	1.69±0.19	30.70±0.32	14.36±1.57
草地	4.95±0.02	0.75±0.00	0.14±0.01	16.67±1.82	83.45±2.39	5.06±0.04	55.45±0.25	25.33±0.78
阔叶林	4.12±0.03	1.73±0.00	0.23±0.02	18.71±2.26	157.67±0.33	5.45±0.05	54.31±1.14	38.81±7.09

1.3.2 矿化培养实验

在培养实验中,称取过 2 mm 筛的供试土壤 20 g,平铺于 300 mL 培养瓶底部,培养瓶瓶口用带有小孔的橡胶塞塞住,并在小孔处涂抹硅胶以防止漏气,调节土壤含水量至 60% 田间持水量(WHC),置于 25℃ 恒温培养箱中预培养 7 d. 预培养结束后,利用称重法补充水分,调节田间持水量至 70% 的恒定值,放入 25℃ 的恒温培养箱中避光密封培养 66 d,并设置无土空白对照. 在培养的第 1、2、3、5、7、10、13、17、21、25、29、34、39、44、50、56、66 d 用注射器从培养瓶瓶塞的小孔处抽取气体 9 mL,运用气相色谱仪(Agilent, 7820A)分析 CO₂ 浓度. 气体采集后打开瓶塞充分交换培养瓶内外气体,约 20 min 后再次密闭抽气孔并盖上瓶塞,将密封培养瓶放入培养箱继续培养. 在培养期间,定期测定培养瓶重量,添加适量去离子水以保证田间持水量保持在 70%. 根据气体产物的释放量,计算培养期内有机碳的矿化速率和累积矿化量等.

1.4 有机碳矿化过程拟合方程

1.4.1 土壤有机碳矿化量

CO₂ 浓度计算:

$$F = \frac{P \times V \times M}{V_1 \times m \times 1000}$$

式中, F 代表 CO₂-C 的含量(mg·kg⁻¹); P 代表培养瓶内土壤所释放的 CO₂ 浓度(mg·kg⁻¹); V 为培养瓶内气体所占的体积(L); M 代表 CO₂-C 的摩尔质量(g·mol⁻¹); V_1 为标准大气压下气体的标准摩尔体积(22.4 L·mol⁻¹); m 为烘干土质量(g).

有机碳累积矿化量(mg·kg⁻¹)以单位质量土壤整个培养期内矿化释放的总碳量表示;矿化速率[mg·(kg·d)⁻¹]以单位质量土壤单位时间内矿化释

放的总碳量表示.

1.4.2 土壤有机碳矿化动力学方程

本研究选用双库一级动力学模型模拟有机碳矿化过程^[12]:

$$C_t = C_0 \times (1 - e^{-kt}) + (T_c - C_0) \times (1 - e^{-ht})$$

式中, C_t 是培养时间 t 时的累积矿化量(mg·kg⁻¹); C_0 和 k 表示土壤易分解有机碳含量(mg·kg⁻¹)及其矿化速率常数(d⁻¹); T_c 为供试土壤初始总有机碳含量(g·kg⁻¹), $T_c - C_0$ 、 h 表示土壤难分解有机碳含量(mg·kg⁻¹)及其矿化速率常数(d⁻¹); t 为培养时间(d).

1.5 数据处理

数据处理采用 SPSS 21.0 进行统计分析,作图采用 Origin 8.5 处理,采用 LSD 法对各处理的数据进行方差分析和显著性检验,显著性水平为 0.05.

2 结果与分析

2.1 缙云山不同林分土壤有机碳储量特征

不同林分下土壤有机碳储量存在显著性差异(表 3),在 0~100 cm 土壤剖面上,土壤有机碳储量大小依次为竹林,草地,阔叶林,混交林和针叶林,其有机碳储量分别为 184.85、162.06、135.41、100.36 和 93.74 t·hm⁻². 5 种林分有机碳储量在 0~60 cm 土层深度均表现为随土层加深而减少,且 0~10 cm 土层的有机碳储量显著高于 20~60 cm 土层($P < 0.05$),而 60~100 cm 土层与其他层次间则无明显规律. 在 0~20 cm 土壤表层中,竹林土壤有机碳储量最高,阔叶林次之,分别为 57 t·hm⁻² 和 49.07 t·hm⁻²,而针叶林最低,仅为 25.44 t·hm⁻². 不同林分在 0~40 cm 土层的有机碳储量占整个土壤剖面总储量的比例均高于 45.5%,有明显的表聚现象.

表 3 不同林分土壤有机碳储量¹⁾/t·hm⁻²

Table 3 Organic carbon storage in the soil of different stands/t·hm⁻²

土层深度/m	竹林	针叶林	阔叶林	草地	混交林
0~20	57 ± 11.55Aa	25.44 ± 4.43Cb	49.07 ± 1.99ABa	42.26 ± 1.91Bb	38.42 ± 10.92Bca
20~40	43.52 ± 7.52Abc	17.22 ± 1.14Cc	30.54 ± 1.25Bb	37.17 ± 1.07Ac	26.17 ± 0.91Bb
40~60	34.8 ± 1.7Ac	16.6 ± 1.97Bc	19.11 ± 3.33Bc	31.92 ± 0.51Ad	16.68 ± 0.52Bb
60~100	49.53 ± 0.55ABab	34.49 ± 2.25Ba	36.69 ± 6Bb	50.71 ± 0.62Aa	19.09 ± 0.64Cb

1) 列中不同小写字母相同表示同一林分不同土层之间差异显著($P < 0.05$),行中不同大写字母相同表示同一土层不同林分之间差异显著($P < 0.05$)

2.2 缙云山不同林分下土壤有机碳矿化速率

不同林分土壤有机碳矿化速率均随着培养时间而降低(图 1). 总体上表现为培养前 10 d,各林分土壤有机碳矿化速率快速下降;10~30 d,矿化速率缓慢下降;33 d 之后趋于平缓. 5 种林分土壤有机碳矿化速率随着土层加深而降低,其中 0~20 cm 土层的矿化速率均显著高于其他土层($P < 0.05$),其他土层间无显著性差异. 在 0~20 cm 土层中,培

养第 1 d 阔叶林有机碳矿化速率最高,达到了 25.12 mg·(kg·d)⁻¹,草地最低(11.97 mg·(kg·d)⁻¹). 到第 10 d 时,竹林、混交林、草地、针叶林和阔叶林 0~20 cm 土层有机碳矿化速率比第 1 d 分别下降了 52.66%、56.35%、46.81%、51.74% 和 71.62%. 而在 60~100 cm 土层中,培养第 1 d 矿化速率最高的是针叶林达到了 6.51 mg·(kg·d)⁻¹,显著高于其他林分($P <$

0.05), 其次为阔叶林[4.79 mg·(kg·d)⁻¹], 竹林在该土层的矿化速率虽然在培养初期较低, 但在整个培养期间无大幅变化, 在培养后期甚至显著高于

其他林分.

2.3 缙云山不同林分下土壤有机碳累积矿化量

如图2所示, 不同林分下有机碳累计矿化量均

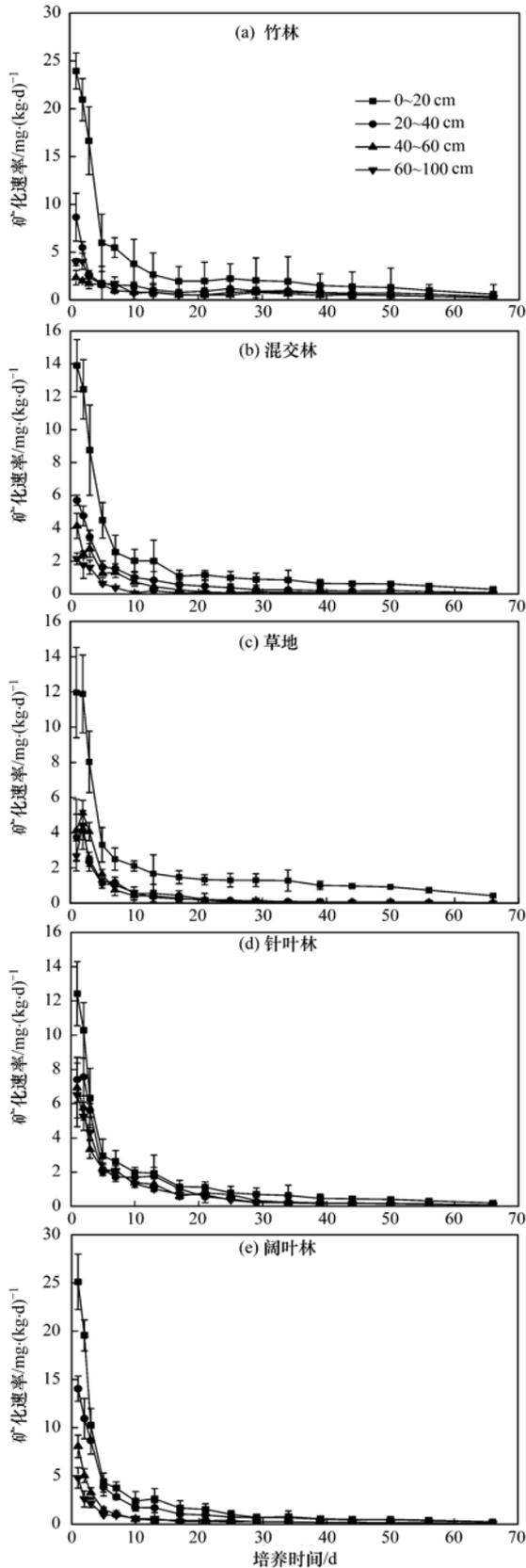


图1 不同林分下土壤有机碳矿化速率

Fig. 1 Mineralization rate of soil organic carbon in different forest stands

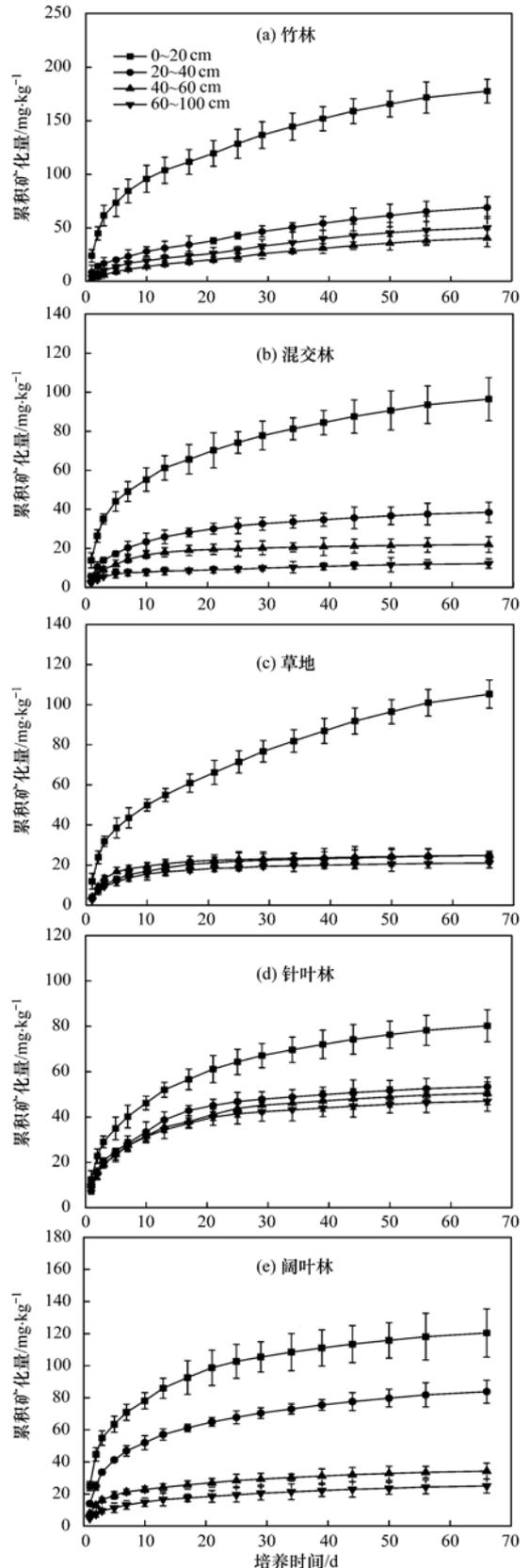


图2 不同林分下土壤有机碳累积矿化量

Fig. 2 Accumulation of organic carbon in soils of different forest stands

随培养时间的延长而提高。在 0~100 cm 土壤剖面上, 5 种林分的土壤有机碳累积矿化量均随着土层加深而降低, 除阔叶林外, 其他 4 种林分 0~20 cm 土层的累积矿化量显著高于其他土层 ($P < 0.05$)。在 0~20 cm 土层, 不同林分下土壤有机碳累积矿化量依次为: 竹林 ($177.66 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 阔叶林 ($120.38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 草地 ($105.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 混交林 ($96.48 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 针叶林 ($80.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 其中竹林土壤有机碳累积矿化量显著高于其他林分 ($P < 0.05$)。竹林和阔叶林 20~40 cm 土层的累积矿化量仍达到了较高水平, 分别为 $69.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $83.82 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在 60~100 cm 土层中, 针叶林

的累积矿化量最高, 达到了 $46.93 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2.4 缙云山不同林分下土壤有机碳矿化强度

土壤有机碳矿化强度是在 66 d 培养期间, 有机碳总矿化量占总有机碳含量的比值。从表 4 可以看出, 在整个土壤剖面上, 竹林、草地和混交林的土壤有机碳矿化强度变化相同, 即在 0~20 cm 土层最高, 同时随着土层加深总体上呈现逐渐降低的趋势, 而针叶林和阔叶林在各土层之间无明显规律。不同林分, 针叶林土壤有机碳矿化强度最高, 为 $8.98\% \sim 10.1\%$, 各土层中的有机碳矿化强度均显著高于其他林分 ($P < 0.05$); 其次为竹林 ($3.66\% \sim 6.46\%$); 而草地的矿化强度最低, 仅为 $2.46\% \sim 7.17\%$ 。

表 4 不同林分下土壤有机碳矿化强度/%

Table 4 Mineralization intensity of soil organic carbon in different forest stands/%

土层深度/cm	竹林	针叶林	阔叶林	草地	混交林
0~20	6.46 ± 1.28Aa	9.63 ± 1.85Aa	5.35 ± 0.65Aa	7.17 ± 1.89Aa	6.22 ± 1.76Aa
20~40	3.66 ± 0.59Bb	9.92 ± 1.59Aa	6.36 ± 0.92Aa	2.76 ± 0.18Bab	4.43 ± 0.81Bab
40~60	3.39 ± 0.87Bb	10.1 ± 2.09Aa	4.33 ± 0.13Ba	2.49 ± 0.35Bab	4.11 ± 0.59Bab
60~100	5.84 ± 1.69Aa	8.98 ± 1.06Aa	3.64 ± 0.57Ba	2.69 ± 0.27Bb	3.92 ± 0.47Bb

2.5 缙云山不同林分下土壤有机碳矿化的动力学特征

双库一级动力学方程可以很好地拟合不同林分下土壤有机碳矿化特征 ($R^2 > 0.96$), 从表 5 可以看出, 不同林分下土壤易分解有机碳含量随着土层加深而降低, 与土壤有机碳含量及其累积矿化量变化趋势相同, 除针叶林外, 其他 4 种林分在 0~20 cm

土层的易分解有机碳含量均显著高于其他土层 ($P < 0.05$)。在 0~20 cm 土层中, 不同林分下土壤易分解有机碳 (C_0) 含量依次为: 竹林 > 阔叶林 > 混交林 > 针叶林 > 草地, 与其有机碳含量分布特征相似。表 5 中 C_0/C_{66} 表示土壤易分解有机碳占有有机碳累积矿化量的比例, 从中可以看出, 不同林分下 C_0/C_{66} 比值在 0~100 cm 土层内无明显规律, 说明

表 5 不同林分下土壤有机碳矿化动力学参数¹⁾

Table 5 Kinetic parameters of soil organic carbon mineralization in different forest stands

林分	土层/cm	C_0 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	k / d^{-1}	h $\times 10^{-5}/\text{d}^{-1}$	C_0/C_{66} /%	C_0/SOC /%
竹林	0~20	84.06 ± 15.63a	0.23 ± 0.04a	5.1 ± 1.08a	47.31 ± 5.89b	0.31 ± 0.04a
	20~40	21.27 ± 5.21b	0.25 ± 0.02a	3.97 ± 0.59ab	30.79 ± 2.09a	0.11 ± 0.01a
	40~60	28.8 ± 6.59b	0.03 ± 0.05b	1.59 ± 0.11b	71.18 ± 10.54b	0.24 ± 0.02a
	60~100	15.17 ± 1.28b	0.23 ± 0.03a	6.66 ± 1.2a	30.14 ± 5.13a	0.18 ± 0.01a
混交林	0~20	52.93 ± 8.57a	0.21 ± 0.02a	4.12 ± 1.03a	54.85 ± 2.89a	0.34 ± 0.05a
	20~40	27.26 ± 3.61b	0.25 ± 0.02a	2.64 ± 0.72b	70.91 ± 6.57a	0.31 ± 0.04a
	40~60	15.8 ± 2.54b	0.12 ± 0.03a	0.46 ± 0.02c	71.85 ± 8.21a	0.29 ± 0.01a
	60~100	5.44 ± 0.81b	0.21 ± 0.03b	2.29 ± 0.82b	44.6 ± 5.23b	0.17 ± 0.01a
草地	0~20	45.94 ± 8.23a	0.28 ± 0.02a	6.74 ± 0.08a	43.65 ± 4.08a	0.31 ± 0.04a
	20~40	19.31 ± 2.08b	0.21 ± 0.02a	0.76 ± 0.03b	77.96 ± 9.23a	0.16 ± 0.01a
	40~60	20.58 ± 3.09b	0.28 ± 0.04a	0.67 ± 0.08b	82.81 ± 6.48a	0.21 ± 0.01a
	60~100	16.9 ± 1.84b	0.22 ± 0.04a	0.87 ± 0.07b	80.23 ± 7.59a	0.22 ± 0.01a
针叶林	0~20	50.52 ± 7.59a	0.21 ± 0.01a	6.02 ± 2.02a	62.98 ± 7.03a	0.61 ± 0.06a
	20~40	41.7 ± 6.09a	0.17 ± 0.01a	3.53 ± 0.57b	78.22 ± 11.05a	0.78 ± 0.11a
	40~60	36.36 ± 4.57a	0.19 ± 0.02a	4.79 ± 1.07b	72.06 ± 10.29a	0.73 ± 0.1a
	60~100	35.1 ± 5.6a	0.2 ± 0.06a	3.65 ± 0.48b	74.75 ± 9.61a	0.67 ± 0.08a
阔叶林	0~20	81.69 ± 10.58a	0.3 ± 0.06a	2.99 ± 0.14a	67.86 ± 8.29a	0.36 ± 0.01a
	20~40	54.37 ± 2.36b	0.27 ± 0.03a	3.83 ± 0.69a	64.86 ± 7.54a	0.41 ± 0.02a
	40~60	22.01 ± 1.28c	0.37 ± 0.05a	2.59 ± 0.37a	64.16 ± 9.05a	0.28 ± 0.02a
	60~100	15.3 ± 3.02c	0.29 ± 0.01a	2.49 ± 0.46a	61.1 ± 4.99a	0.22 ± 0.02a

1) C_0 表示土壤易分解有机碳含量; k 和 h 分别表示土壤易分解有机碳和难分解有机碳的矿化速率常数; C_{66} 指 66 d 的有机碳累积矿化量; C_0/C_{66} 指土壤易分解有机碳占有有机碳累积矿化量的比例

在其矿化过程中难分解有机碳也有着不同程度的作用。C₀/SOC 为土壤易分解有机碳占总有机碳的比例,在整个土壤剖面上,C₀/SOC 值没有明显规律,但是在不同林分间存在显著性差异,其中针叶林 C₀/SOC 显著高于其他林分,其他林分间没有显著性差异。*k* 表示土壤易分解有机碳矿化速率常数,*k* 在土层之间也无明显规律,不同林分下 *k* 值表现为阔叶林最高,其次为混交林和草地,针叶林的最低,仅为 0.17~0.21。*h* 表示土壤难分解有机碳矿化常数,从表 5 中可以看出,除竹林和阔叶林外,其他 3 种林分的 0~20 cm 土层 *h* 值均显著高于其他土层 ($P < 0.05$)。不同林分间土壤 *h* 值存在显著性差异,在 0~20 cm 土层中,草地 *h* 值达到了 $6.74 \times 10^{-5} \text{ d}^{-1}$,显著高于其他林分,但在整个土壤剖面上 *h* 值的平均值表现为:针叶林 ($4.5 \times 10^{-5} \text{ d}^{-1}$) > 竹林 ($4.33 \times 10^{-5} \text{ d}^{-1}$) > 阔叶林 ($2.96 \times 10^{-5} \text{ d}^{-1}$) > 混交林 ($2.37 \times 10^{-5} \text{ d}^{-1}$) > 草地 ($2.26 \times 10^{-5} \text{ d}^{-1}$)。

3 讨论

3.1 不同林分对土壤有机碳矿化特征的影响

土壤有机碳矿化速率是表征单位质量土壤在单位时间内矿化释放 CO₂ 的量,矿化速率越高表明土壤中微生物的数量越多,活性越强^[13]。已有研究表明,林分类型对土壤有机碳矿化存在显著影响^[8,14]。本研究中,随着土层加深,不同林分下土壤有机碳矿化速率也逐渐下降,可见土壤表层的微生物数量和活性较好,为土壤有机碳的分解利用提供了良好的环境。在 66 d 培养期间,不同林分下土壤有机碳矿化速率均表现为前期迅速下降,中期下降速度减缓,后期平缓的趋势,这与高菲等^[15]的研究结果相同。这是由于培养前期土壤中易分解有机碳含量较高,为微生物的分解活动提供了大量底物,导致前期矿化速率较高。而随着培养时间的延长,土壤中易分解有机碳含量减少,而难分解有机

碳难以被微生物分解利用,不仅造成了微生物分解的底物减少,同时降低了土壤中微生物的活性,因此在培养中后期矿化速率趋于平缓^[16]。不同林分间土壤有机碳矿化速率存在显著差异,本研究中竹林和阔叶林的矿化速率较高,而草地和针叶林较低。这是因为地表凋落物是影响土壤有机碳矿化的一个重要因素,作为土壤有机质的重要来源,凋落物的不同会影响输入土壤的有机质的数量和活性,进而影响其分解和循环^[17]。竹林和阔叶林地表凋落物中富含易被分解利用的木质素和纤维素,可以有效提高输入土壤的有机碳的含量,因此,竹林和阔叶林土壤有机碳矿化速率高于其他林分。此外,随着土层的加深,土壤有机碳矿化速率有显著降低,一方面是因为土壤中碳、氮、磷等养分是影响土壤微生物生长繁殖的重要营养元素,其含量的高低会影响土壤有机碳的矿化^[18],本研究中随着土层加深,土壤碳、氮、磷的含量逐渐降低,微生物缺少了必要的养分来源,导致其数量和活性均低于土壤表层;另一方面,植被根系和凋落物主要分布在表层土壤中,表层土壤的有机质输入量显著高于底层,因此有机碳矿化速率表现为随土层加深而降低的趋势。

土壤有机碳矿化强度表征了有机碳矿化量占总有机碳的比例,能够直观地显示土壤有机碳的相对稳定性^[19],本研究中,除了针叶林外,其他 4 种林分土壤矿化强度总体上呈随土层加深而降低的趋势,说明土壤表层有机质活性较高,底层土壤有机质则更为稳定。不同林分间有机碳矿化强度高低可以有效反映土壤碳库的源汇作用,针叶林土壤矿化强度显著高于其他林分,表明针叶林土壤稳定性较差,不利于有机碳固定。从表 6 中可以看出,不同林分下土壤有机碳累积矿化量与土壤总有机碳、微生物量碳和易氧化有机碳呈极显著正相关关系,这与杨开军等^[8]和 Dimassi 等^[20]的研究结果相同,说明土壤有机碳和微生物量碳是影响有机碳矿化的主要因素。

表 6 不同林分下土壤有机碳矿化指标与活性有机碳组分相关性¹⁾

Table 6 Correlation of soil organic carbon mineralization index and active organic carbon component in different forest stands

	累计矿化量	矿化强度	C ₀	SOC	MBC	DOC	ROC
累计矿化量	1.000			0.842 **	0.582 **	0.335	0.883 **
矿化强度	0.398	1.000		-0.109	-0.289	-0.103	0.119
C ₀	0.919 **	0.481 *	1.000	0.726 **	0.530 *	0.289	0.811 **

1) * 表示显著相关, ** 表示极显著相关; SOC 表示土壤有机碳, MBC 表示土壤微生物量碳, DOC 表示可溶性有机碳, ROC 表示易氧化碳, C₀ 表示易矿化有机碳

3.2 不同林分对土壤有机碳矿化动力学特征的影响

Alvarez 等^[21]利用不同指数模型模拟了不同土

地利用方式、不同植被类型及不同土层深度下土壤的矿化过程,指出双库一级动力学方程具有更好的拟合效果。本研究的拟合结果表明,不同林分下土

壤易分解有机碳含量(C_0)均随着土层加深而降低, 而通过与土壤总有机碳及其活性组分的相关性分析(表6)可以看出, 土壤易分解有机碳与累积矿化量极显著相关, 相关系数高达0.919, 表明不同林分下土壤有机碳矿化过程中以易分解有机碳的分解解释放为主. 而易分解有机碳与土壤总有机碳和易氧化有机碳呈极显著相关关系, 与微生物量碳呈显著正相关关系. 因此, 不同林分下土壤有机碳矿化受到土壤总有机碳、微生物量碳和易氧化有机碳的显著影响, 这与 Fang 等^[22]的研究结果相似. 不同林分间土壤易分解有机碳含量以竹林和阔叶林较高, 说明竹林和阔叶林土壤有机碳活性较高, 能够为土壤有机碳矿化提供充足的底物. k 表示的是土壤易分解有机碳矿化速率常数, 该值在土层和林分之间没有显著性差异, 但阔叶林和竹林的 k 高于其他林分, 可能是由于两种林分下土壤微生物活性较高, 在恒温培养条件下可以有效提高土壤有机碳矿化速率. 李顺姬等^[23]的研究指出 C_0/SOC 可以有效反映土壤有机碳的矿化能力, 比值越高, 矿化能力越强. 本研究中, 针叶林土壤 C_0/SOC 值最高, 说明针叶林土壤拥有较高的矿化能力.

双库一级动力学方程能够拟合不同林分下土壤难分解有机碳的及其矿化常数的分布变化. 在 66 d 的培养期间, 不同林分下土壤难分解有机碳占累计矿化量的比例存在差异, 表明难分解有机碳在土壤矿化过程中也有重要作用^[24]. 本研究中, 竹林和阔叶林 C_0/C_{66} 值较低, 表明竹林阔叶林土壤微生物数量和活性较强, 能够对土壤中易分解有机碳进行快速、充分地分解利用, 随着易分解有机碳含量的减少在培养后期则以难分解有机碳为主. 而针叶林的 k 值较低, C_0/C_{66} 值较高反映出其微生物活性较差, 完成易分解有机碳库的分解利用需要较长时间, 但针叶林的 h 值显著高于其他林分, 表明相比于其他林分, 针叶林覆盖下土壤微生物拥有较强分解利用难分解有机碳的能力. 因此, 如果延长培养时间, 针叶林可能会保持较高的矿化强度.

4 结论

(1) 不同林分下土壤有机碳矿化速率均随着培养时间延长而下降; 随着土层加深, 不同林分土壤矿化速率均呈现出随着涂层加深而降低的趋势, 其中 0~20 cm 土层的矿化速率均显著高于其他土层, 其他土层间无显著性差异.

(2) 不同林分下土壤有机碳累积矿化量与总有机碳、微生物量和易氧化有机碳极显著相关; 0~20 cm 土层中竹林和阔叶林累积矿化量较高, 而在

60~100 cm 土层却是针叶林最高.

(3) 双库一级动力学方程可以较好地拟合缙云山不同林分下土壤有机碳矿化过程, 其中针叶林土壤矿化能力较强, 对难分解有机碳库的利用程度较高, 而竹林和阔叶林土壤微生物活性较高, 可以有效促进碳循环, 提高土壤固碳能力.

参考文献:

- [1] 马昕昕, 许明祥, 杨凯. 黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探[J]. 环境科学, 2012, 33(11): 3893-3900.
Ma X X, Xu M X, Yang K. Soil organic carbon mineralization of black locust forest in the deep soil layer of the hilly region of the Loess Plateau, China[J]. Environmental Science, 2012, 33(11): 3893-3900.
- [2] 杨添, 戴伟, 安晓娟, 等. 天然林土壤有机碳及矿化特征研究[J]. 环境科学, 2014, 35(3): 1105-1110.
Yang T, Dai W, An X J, et al. Organic carbon and carbon mineralization characteristics in nature forestry soil[J]. Environmental Science, 2014, 35(3): 1105-1110.
- [3] 张玲, 张东来, 毛子军. 中国温带阔叶红松林不同演替系列土壤有机碳矿化特征[J]. 生态学报, 2017, 37(19): 6370-6378.
Zhang L, Zhang D L, Mao Z J. Characteristic mineralization of soil organic carbon in different successional series of broadleaved Korean pine forests in the temperate zone in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(19): 6370-6378.
- [4] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil carbon pools and world life zones[J]. Nature, 1982, 298(5870): 156-159.
- [5] 张政, 蔡小真, 唐德頔, 等. 可溶性有机质输入对杉木人工林表层土壤有机碳矿化的激发效应[J]. 生态学报, 2017, 37(22): 7660-7667.
Zhang Z, Cai X Z, Tang S D, et al. Priming effect of dissolved organic matter in the surface soil of a Cunninghamia lanceolata plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(22): 7660-7667.
- [6] 樊金娟, 李丹丹, 张心昱, 等. 北方温带森林不同海拔梯度土壤碳矿化速率及酶动力学参数温度敏感性[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 17-24.
Fan J J, Li D D, Zhang X Y, et al. Temperature sensitivity of soil organic carbon mineralization and β -glucosidase enzyme kinetics in the Northern temperate forests at different altitudes, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(1): 17-24.
- [7] 刘玉槐, 严员英, 张艳杰, 等. 不同温度条件下亚热带森林土壤碳矿化对氮磷添加的响应[J]. 生态学报, 2017, 37(23): 7994-8004.
Liu Y H, Yan Y Y, Zhang Y J, et al. Effects of Nitrogen and Phosphorus addition under different temperatures on the soil carbon mineralization in a Cunninghamia lanceolata plantation in the subtropics[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(23): 7994-8004.
- [8] 杨开军, 杨万勤, 贺若阳, 等. 川西亚高山 3 种典型森林土壤碳矿化特征[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(5): 851-856.
Yang K J, Yang W Q, He R Y, et al. Soil organic carbon mineralization characteristics of three dominant subalpine forests in Western Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2017, 23(5): 851-856.
- [9] 李银坤, 陈敏鹏, 梅旭荣, 等. 土壤水分和氮添加对华北平原高产农田有机碳矿化的影响[J]. 生态学报, 2014, 34

- (14): 4037-4046.
- Li Y K, Chen M P, Mei X R, *et al.* Effects of soil moisture and Nitrogen addition on organic carbon mineralization in a high-yield cropland soil of the North China Plain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(14): 4037-4046.
- [10] 王清奎, 汪思龙, 于小军, 等. 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[J]. *生态学杂志*, 2007, **26**(12): 1918-1923.
- Wang Q K, Wang S L, Yu X J, *et al.* Soil carbon mineralization potential and its effect on soil active organic carbon in evergreen broad-leaved forest and Chinese fir plantation [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, **26**(12): 1918-1923.
- [11] 祁心, 江长胜, 郝庆菊, 等. 缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(10): 3816-3824.
- Qi X, Jiang C S, Hao Q J, *et al.* Effects of different land uses on soil active organic carbon and nitrogen fractions in Jinyun Mountain [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(10): 3816-3824.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [13] Boyle M, Paul E A. Carbon and nitrogen mineralization kinetics in soil previously amended with sewage sludge[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, **53**(1): 99-103.
- [14] 张睿, 白杨, 刘娟, 等. 亚热带天然阔叶林转换为杉木人工林对土壤呼吸的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(10): 2946-2952.
- Zhang R, Bai Y, Liu J, *et al.* Effects of conversion of natural broad-leaved forest to Chinese fir plantation on soil respiration in Subtropical China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(10): 2946-2952.
- [15] 高菲, 林维, 崔晓阳. 小兴安岭两种森林类型土壤有机碳矿化的季节动态[J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(1): 9-16.
- Gao F, Lin W, Cui X Y. Seasonal dynamics of soil organic carbon mineralization for two forest types in Xiaoxing'an Mountains, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(1): 9-16.
- [16] Jha P, Garg N, Lakaria B L, *et al.* Soil and residue carbon mineralization as affected by soil aggregate size [J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, **121**: 57-62.
- [17] Thiessen S, Gleixner G, Wutzler T, *et al.* Both priming and temperature sensitivity of soil organic matter decomposition depend on microbial biomass - an incubation study [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **57**: 739-748.
- [18] Riffaldi R, Saviozzi A, Levi-Minzi R. Carbon mineralization kinetics as influenced by soil properties [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, **22**(4): 293-298.
- [19] 王莲阁, 高岩红, 丁长欢, 等. 变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4291-4297.
- Wang L G, Gao Y H, Ding C H, *et al.* Effects of variable temperature on organic carbon mineralization in typical limestone soils [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4291-4297.
- [20] Dimassi B, Mary B, Fontaine S, *et al.* Effect of nutrients availability and long-term tillage on priming effect and soil C mineralization [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **78**: 332-339.
- [21] Alvarez R, Alvarez C R. Soil organic matter pools and their associations with carbon mineralization kinetics [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, **64**(1): 184-189.
- [22] Fang C M, Smith P, Moncrieff J B, *et al.* Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature [J]. *Nature*, 2005, **433**(7021): 57-59.
- [23] 李顺姬, 邱莉萍, 张兴昌. 黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系[J]. *生态学报*, 2010, **30**(5): 1217-1226.
- Li S J, Qiu L P, Zhang X C. Mineralization of soil organic carbon and its relations with soil physical and chemical properties on the loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(5): 1217-1226.
- [24] 丁长欢, 王莲阁, 唐江, 等. 水热变化对三峡水库消落带紫色土有机碳矿化的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2763-2769.
- Ding C H, Wang L G, Tang J, *et al.* Effects of soil moisture and temperature variations on organic carbon mineralization of purple soil in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2763-2769.

CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (513)
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM _{2.5} Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (525)
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i> (532)
Source Apportionment and Health Risk Quantification of Heavy Metals in PM _{2.5} in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i> (540)
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (548)
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i> (558)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM _{2.5} of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i> (567)
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i> (573)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (582)
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (590)
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i> (603)
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (614)
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i> (625)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i> (633)
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (640)
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (649)
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i> (658)
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i> (669)
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i> (677)
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i> (685)
Preparation of ZnTiO ₃ /TiO ₂ Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (693)
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO ₂ Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i> (701)
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (708)
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (717)
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i> (724)
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Jian, <i>et al.</i> (730)
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i> (738)
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i> (747)
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i> (754)
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i> (761)
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (768)
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (774)
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i> (783)
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i> (791)
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i> (799)
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (808)
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i> (816)
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i> (823)
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (829)
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (837)
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrosation System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i> (845)
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i> (853)
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i> (859)
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i> (869)
Effect of Nitrification on N ₂ O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i> (876)
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N ₂ O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i> (885)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (893)
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i> (904)
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i> (915)
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (924)
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i> (934)
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i> (945)
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i> (953)
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li (961)
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (970)
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i> (978)
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i> (987)
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i> (994)
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1003)