

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第2期

Vol.34 No.2

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

16 届亚运会期间广州城区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对霾天气的影响	陶俊, 柴发合, 高健, 曹军骥, 刘随心, 张仁健 (409)
北京地区秋季雾霾天 PM _{2.5} 污染与气溶胶光学特征分析	赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 马志强, 董璠, 何迪 (416)
上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究	王倩, 陈长虹, 王红丽, 周敏, 楼晟荣, 乔利平, 黄成, 李莉, 苏雷燕, 牟莹莹, 陈宜然, 陈明华 (424)
杭州市大气超细颗粒物浓度谱季节性特征	谢小芳, 孙在, 付志民, 杨文俊, 林建忠 (434)
保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别	李杏茹, 杜熙强, 王英锋, 王跃思 (441)
春节期间西安城区碳气溶胶污染特征研究	周变红, 张承中, 王格慧 (448)
华东区域高山背景点 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 背景值及污染特征	苏彬彬, 刘心东, 陶俊 (455)
基于电子鼻土壤与地下水污染修复现场 TVOC 和恶臭的评估	田秀英, 蔡强, 刘锐, 张永明 (462)
积融雪控制下土壤大气间汞交换通量特征	张刚, 王宁, 艾建超, 张蕾, 杨净, 刘子琪 (468)
靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究	徐林波, 高勤峰, 董双林, 刘佳, 傅秀娟 (476)
正构烷烃及单体碳同位素记录的石臼湖生态环境演变研究	欧杰, 王延华, 杨浩, 胡建芳, 陈霞, 邹军, 谢云 (484)
干旱区城市昌吉降雪及积雪中 PGEs 含量分布及其影响因素	刘玉燕, 刘浩峰, 张兰 (494)
降尘收集方法对降尘效率的影响	张正偲, 董治宝 (499)
海河流域水生生态功能一级二级分区	孙然好, 汲玉河, 尚林源, 张海萍, 陈利顶 (509)
长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究	时志强, 张运林, 王明珠, 刘笑茵 (517)
内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究	黄昌春, 李云梅, 徐良将, 杨浩, 吕恒, 陈霞, 王延华 (525)
溶氧对富集培养的河口湿地表层沉积物氨氧化菌多样性及氨氧化速率的影响	邱昭政, 罗专溪, 赵艳玲, 颜昌宙 (532)
自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究	张华兵, 刘红玉, 李玉凤, 安静, 薛星宇, 侯明行 (540)
淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制	周亮, 徐建刚, 孙东琪, 倪天华 (547)
高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征	崔玉洁, 刘德富, 宋林旭, 陈玲, 肖尚斌, 向坤, 张涛 (555)
城市雨水径流水质演变过程监测与分析	董雯, 李怀恩, 李家科 (561)
复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果	任峰, 陆忆夏, 刘琴, 汤杨杨, 王世和, 高海鹰, 乔红杰, 王为进 (570)
给水管网中耐氯分枝杆菌的灭活特性及机制研究	郑琦, 陈超, 张晓健, 陆品品, 刘源源, 陈雨乔 (576)
1 株溶藻菌的部分生物学特性及溶鱼腥藻作用	李三华, 张奇亚 (583)
水生植物热解生物油中对肋骨藻抗氧化酶活性的影响	姚远, 李锋民, 李媛媛, 单时, 李杰, 王震宇 (589)
TiO ₂ 光催化联合技术降解苯酚机制及动力学	张轶, 黄若男, 王晓敏, 王齐, 丛燕青 (596)
皮革废水有机污染物生物降解特性研究	王勇, 李伟光, 杨力, 宿程远 (604)
链霉菌 FX645 对偶氮染料红 AR30 的降解机制研究	谢练武, 方继前, 郭亚平 (611)
一种负载型生物载体的制备及性能研究	杨基先, 曾红云, 周义, 邱珊, 马放, 王蕾, 肖大伟 (616)
基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 培养研究	嵇雯雯, 夏会龙, 方治国, 刘惠君 (622)
温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响	陈汉龙, 严媛媛, 何群彪, 戴晓虎, 周琪 (629)
天然和水热合成针铁矿对有机物厌氧分解释放 CH ₄ 的影响	姚敦璠, 陈天虎, 王进, 周飞跃, 岳正波 (635)
蚀刻废液及其回收后生产的铜盐产品中 PCDD/Fs 含量水平及分布特征	青宪, 韩静磊, 温炎桑 (642)
基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 夏天翔, 朱笑盈, 韩丹, 张丽娜 (647)
区域地下水污染风险评价方法研究	杨彦, 于云江, 王宗庆, 李定龙, 孙宏伟 (653)
地下水有机污染源识别技术体系研究与示范	王晓红, 魏加华, 成志能, 刘培斌, 纪轶群, 张干 (662)
祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究	朱凌宇, 潘剑君, 张威 (668)
黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应	骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 周宝库, 徐明岗, 张敬业, 夏平 (676)
根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响	张晶, 于玲玲, 辛木贞, 苏德纯 (685)
长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究	罗璐, 周萍, 童成立, 石辉, 吴金水, 黄铁平 (692)
外源 Cr(Ⅲ) 在我国 22 种典型土壤中的老化特征及关键影响因子研究	郑顺安, 郑向群, 李晓辰, 刘书田, 姚秀荣 (698)
某林丹生产企业搬迁遗留场地土壤中六六六的残留特征	潘峰, 王利利, 赵浩, 尤奇中, 刘林 (705)
大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析	刘芳, 王书肖, 吴清茹, 林海 (712)
天津成人头发指甲中有机氟污染物的残留特征	姚丹, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 王艳萍, 刘国卿 (718)
沉积物中雌激素及壬基酚、辛基酚、双酚 A 的测定	吴唯, 史江红, 陈庆彩, 张晖, 刘晓薇 (724)
动物饲料中砷、铜和锌调查及分析	姚丽贤, 黄连喜, 蒋宗勇, 何兆桓, 周昌敏, 李国良 (732)
氟虫双酰胺在水稻和稻田中的残留动态研究	王点点, 宋宁慧, 吴文铸, 由宗政, 何健, 石利利 (740)
2 株降解菲的植物内生细菌筛选及其降解特性	倪雪, 刘娟, 高彦征, 朱雪竹, 孙凯 (746)
嗜盐拟香味菌 Y6 降解硝基苯的特性研究	厉阗, 钱坤, 肖伟, 王进军, 邓新平 (753)
固定化条件对苯系物细胞传感器检测效果的影响	唐阔, 马安周, 于清, 邓雪梅, 吕迪, 庄国强 (760)
16S rDNA 克隆文库分析高含盐生物脱硫系统细菌多样性	刘卫国, 梁存珍, 杨金生, 王桂萍, 刘苗苗 (767)
氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响	刘涛, 李冬, 曾辉平, 畅晓燕, 张杰 (773)
筒青霉 (<i>Penicillium simplicissimum</i>) 对木质纤维素的降解及相关酶活性特征	沈莹, 胡天觉, 曾光明, 黄丹莲, 尹璐, 刘杨, 吴娟娟, 刘晖 (781)
石油污染土壤微生物群落结构与分布特性研究	杨萌青, 李立明, 李川, 李广贺 (789)
土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响	王桂珍, 李兆君, 张树清, 马晓彤, 梁永超 (795)
生活垃圾填埋过程含水率变化研究	李睿, 刘建国, 薛玉伟, 张媛媛, 岳东北, 聂永丰 (804)
动物消化机制用于木质纤维素的厌氧消化	吴昊, 张盼月, 郭建斌, 吴永杰 (810)

祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究

朱凌宇, 潘剑君*, 张威

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 依据三库一级动力学理论, 通过室内土样培养实验, 研究了祁连山不同海拔高度土壤总有机碳库(C_{soc})、活性碳库(C_a)、缓效性碳库(C_s)和惰性碳库(C_r)特征及有机碳(SOC)的分解特征. 结果表明, 祁连山不同海拔 A、B 层土壤总有机碳库含量分别为 $7.606 \sim 89.026 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $5.804 \sim 84.267 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 活性碳库含量分别为 $0.180 \sim 1.328 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $0.159 \sim 1.273 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 缓效性碳库含量分别为 $3.650 \sim 35.173 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $3.703 \sim 43.623 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 惰性碳含量分别为 $3.776 \sim 65.298 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $1.942 \sim 48.121 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 总有机碳库随海拔表现出“增加-减少-增加-减少”的变化趋势, 3 种组分碳库未表现出海拔高度上的明显变化规律, 大致呈现中高海拔 > 高海拔 > 中低海拔. 土壤总有机碳库和惰性碳库含量在海拔之间有极显著差异($P < 0.01$), 缓效碳库有显著性差异($P < 0.05$), 活性碳库间无显著性差异. 培养结果显示土壤有机碳分解速率也未表现出随海拔高度的明显变化规律, 与碳库变化几乎一致. 不同海拔土壤有机碳日释放速率峰值与整个培养过程土壤有机碳释放速率变化一致, 可以用以代表有机碳分解的快慢特征. 活性碳库与有机碳日释放速率峰值满足线性关系($P < 0.01$). 培养结果显示土壤有机碳按活性碳库、缓效性碳库、惰性碳库的顺序进行周转. 多项式方程能很好表达有机碳累积释放量与时间的关系, 三次多项式已能达到较好的精度($R^2 > 0.99$).

关键词: 祁连山; 海拔; 土壤有机碳; 三库; 周转

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)02-0668-08

Study on Soil Organic Carbon Pools and Turnover Characteristics Along an Elevation Gradient in Qilian Mountain

ZHU Ling-yu, PAN Jian-jun, ZHANG Wei

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: On the basis of the first order dynamic model combining with the laboratory soil incubation experiment, characteristics of soil organic carbon pools(C_{soc}), active carbon pools(C_a), slow carbon pools(C_s), passive carbon pools(C_r) and their turnover in Qilian Mountain were studied. It has been showed that the size of C_{soc} in horizon A and B ranges from $7.606 \sim 89.026 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $5.804 \sim 84.267 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, which shows tendency of “increase-decrease-increase-decrease” with elevation. The size of C_a , C_s and C_r in horizon A and B under different elevations respectively ranges from $0.180 \sim 1.328 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $0.159 \sim 1.273 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; $3.650 \sim 35.173 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $3.703 \sim 43.623 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; $3.776 \sim 65.298 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $1.942 \sim 48.121 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, which incarnates no obvious variation law with elevation. The contents of C_{soc} , C_r and C_s significantly differ with different elevation gradients. There is no significant difference in the C_a content between different elevation gradients. Decomposition rate of C_{soc} also has no evident change law in elevation. The peak of daily carbon release rate varies with carbon release rate in the whole incubation process, which could be used to present character of SOC turnover rate. It has been also showed that C_a and peak of daily carbon release rate have a significant relationship, and they follow the linear relationship. The incubation reveals that C_{soc} turns over in sequence of C_a , C_s and C_r . Polynomial equation presents relation between total SOC release amount and time, of which cubic polynomial has achieved preferable precision($R^2 > 0.99$).

Key words: Qilian Mountain; elevation; soil organic carbon(SOC); three carbon pools; turnover

土壤碳库是陆地碳库的重要组成部分, 土壤作为陆地生态系统的核心, 是连接大气圈、水圈、岩石圈和生物圈的纽带. 研究认为陆地生态系统既可能是全球 CO_2 循环的“汇”, 也可能是“源”, 主要取决于土壤碳库的变化^[1]. 土壤有机碳的微小变动即可导致大气 CO_2 浓度的较大变化^[2], 可见土壤碳库的稳定与释放与大气碳库的变化密切相关, 并影响到全球气候变化. 土壤有机碳的积累和分解的速率决定着土壤碳库储量. 确定土壤有机碳库的大小、组成及驻留时间能更好地理解陆地生态系统对气候

的响应^[3].

土壤有机碳库及周转极其复杂, 许多学者将总有机碳库划分成多个碳库分别进行研究, 用单一组分或一库来描述整个土壤的分解速率和周转本身也是不合理的. 在对有机碳的分组和反应方程研究的

收稿日期: 2012-05-06; 修订日期: 2012-08-10

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050703)

作者简介: 朱凌宇(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤信息与环境、碳循环, E-mail: lingyu_zhu@163.com

* 通讯联系人, E-mail: jpan@njau.edu.cn

基础之上, Parton 等^[4]提出了综合的植被-土壤生态系统模型-CENTURY 模型, 将土壤有机质库分为活性有机碳库(C_a)、慢分解土壤有机质(C_s)、惰性土壤有机碳(C_l)这 3 个库, 每一个分室的土壤有机碳的分解都遵循一级反应动力学方程. Kelly 等^[5]指出 CENTURY 模型是土壤碳动态研究非常有用的工具.

山地生态系统是陆地生态系统的重要组成部分, 由于植被、气候、土壤类型及研究方法的差异, 对于山地土壤有机碳库特征及分解动态仍然缺乏全面而系统的认识. 山地土壤有机碳库的差异体现在随海拔梯度引起的温度、湿度、植被类型、土壤类型等要素的显著改变^[6]. 国内外学者对海拔梯度山地土壤有机碳的研究主要集中在有机碳随海拔的变化及影响因子上. 所采用方法不同, 研究结果差异也较大. 对不同地区^[7~9]不同海拔土壤有机碳的研究发现, 土壤有机碳含量随海拔高度的变化有显著的变化, 但不同研究地点变化规律不一. 在影响有机碳矿化的因素中, 温度^[10]和水分^[11]是调控其在海拔高度上变化的主导因子, pH 影响不显著^[11]. 有学者对祁连山沿海拔梯度的碳氮分布及影响因素进行研究^[12], 指出气候、植被和利用方式是引起有机碳分异的主导因子, 植被类型分布和人类活动影响对土壤有机碳垂直变化影响显著^[13], 凋落物层厚度仅对 0~20cm 土层有机碳含量有显著影响^[14]. 然而不同

海拔土壤不同碳库及周转特征尚无研究报道, 对于全面揭示祁连山地区土壤有机碳周转规律也缺少研究数据. 位于高寒地区青藏高原、内蒙古高原和黄土高原的过渡区的祁连山^[15], 从低海拔到高海拔分布有多种植被, 对应有多种土壤类型, 深入研究不同海拔下不同类型植被土壤的有机碳库及分解特征, 对于更好地了解山地土壤有机碳稳定性, 认识山地生态系统碳汇功能, 预测其作为碳源或碳汇的潜在能力具有重要的理论和现实意义. 同时本研究对于探索有机碳分解规律、完善土壤有机碳库周转理论具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 研究区概况及样品采集

采样区位于肃南县裕固族自治县境内的祁连山上, 属大陆性高寒半干旱、半湿润森林草原气候. 祁连山植被分布受到水热状况影响, 垂直梯度变化明显, 从下到上依次为荒漠草原植被带, 干性灌丛草原植被带, 山地森林草原植被带, 亚高山灌丛草甸植被带, 高山寒漠草甸植被带. 综合考虑不同土壤类型、植被类型和海拔, 在海拔梯度上选取 4 种典型植被类型的 6 个样地, 每个样地参照 CENTURY 模型的等厚度原则采集两个土层, 共计 12 个样品. 样品带回后风干, 捡出残根及侵入体后过筛备用. 采集土壤相关信息见表 1.

表 1 采样点植被、土壤类型及土壤性质

Table 1 Vegetation soil types and soil characteristics of sampling points

编号	深度 /cm	层次	海拔 /m	植被类型	土壤类型	pH	砂粒 (2~0.05 mm)	粉粒 (0.05~0.002 mm)	黏粒 (<0.002 mm)
Qls1a	0~30	A	2 634	稀疏的草	灰钙土	8.23	28.40	61.40	10.30
Qls1b	30~60	B				8.49	33.86	56.60	9.48
Qls2a	0~30	A	2 668	原始杉木林	森林灰褐土	8.16	13.33	71.80	14.90
Qls2b	30~60	B				8.17	19.51	67.40	13.10
Qls3a	0~30	A	2 815	草	山地粗骨栗钙土	8.56	30.58	55.90	13.50
Qls3b	30~60	B				8.44	24.21	61.70	14.10
Qls4a	0~30	A	2 923	成年云杉	森林灰褐土	8.11	17.30	69.00	13.70
Qls4b	30~60	B				8.35	17.22	69.00	13.80
Qls5a	0~30	A	3 004	草	亚高山灌丛草原土	8.04	19.52	66.70	13.70
Qls5b	30~60	B				8.41	18.22	67.00	14.80
Qls6a	0~30	A	3 890	高山草甸	高山草甸土	8.15	19.31	65.90	14.80
Qls6b	30~60	B				8.19	18.53	66.80	14.60

1.2 实验方法

1.2.1 有机碳分解动态测定

采用室内恒温培养、碱液吸收法. 称取过 20 目风干土样 100 g 于特制的呼吸瓶中平铺于瓶底部, 调节土壤含水量为最大持水量的 65% 并保持瓶内密封; 在吸收小瓶中用注射器注入 20 mL 0.5

mol·L⁻¹ NaOH (保证在要求时间内能吸收完释放的 CO₂, 并有少量盈余), 加完后密封吸收瓶; 放置在 25℃ 的恒温培养箱内, 黑暗条件下培养 90 d, 定时通气 (每天 1 次或 2 次), 以提供微生物活动所必须的氧气, 用钠石灰过滤 CO₂. 在一定时间间隔 (本实验是第 2、4、8、13、18、25、32、39、46、53、62、68、

79、90 d)之后,将吸收液用注射器全部抽出并换上新的吸收液,按上述方法继续培养;抽出的吸收液加 20 mL 1 mol·L⁻¹ 的 BaCl₂,摇匀后以酚酞为指示剂,用 0.4 mol·L⁻¹ HCl 滴定中和未耗尽的 NaOH,通过 HCl 消耗量来计算 CO₂ 的数量,进而求出有机碳的分解量。

1.2.2 有机碳及惰性碳测定

土壤总有机碳(C_{soc})用重铬酸钾容量法(外加热法)测定。

土壤惰性碳(C_i)用酸水解法测定。取过 2 mm 筛风干土 1 g 于消煮管中,加入 6 mol·L⁻¹ HCl 20 mL,在 115℃ 下消煮 16 h。冷却后用蒸馏水洗至中性,烘干,碾磨过 180 μm 筛。然后用重铬酸钾容量法(外加热法)测定所得有机碳含量即为惰性碳含量。

1.2.3 活性碳库和缓效性碳库的拟合

结合室内培养数据和分析测定的数据,运用三库一级动力学方程对土壤活性碳库(C_a)和缓效性碳库(C_s)大小及周转时间进行拟合。拟合方程为:

$$C_{socl} = C_a \times \exp(-k_a \times t) + C_s \times \exp(-k_s \times t) + C_r \times \exp(-k_r \times t) \quad (1)$$

式中,C_{socl}是时间 *t* 时刻的有机碳含量;C_a、k_a 表示土壤有机碳活性碳库含量(g·kg⁻¹)及其分解速率(d⁻¹);C_s、k_s 表示土壤有机碳缓效性碳库含量(g·kg⁻¹)及其分解速率(d⁻¹);C_r、k_r 表示土壤有

机碳惰性碳库含量(g·kg⁻¹)及其分解速率(d⁻¹);k_a、k_s、k_r 与平均驻留时间(mean residue time, MRT)呈倒数关系。由于实验室培养温度与田间实际温度之间存在差异,必然影响各碳库周转时间,因此需对其进行转换:

$$MRT_{lab} = MRT_{field}/Q_{10} \quad (2)$$

$$Q_{10} = 2^{[(25-MAT)/10]} \quad (3)$$

MAT 为研究区的年平均温度。该模型中变量 C_{socl} 和 *t*,未知参数为 C_a、k_a、k_s, (C_s 用方程 C_s = C_{soc} - C_r - C_a 代替以减少一个参数),由于土壤惰性碳平均驻留时间太长,不容易获得,一般假设田间土壤惰性碳的平均驻留时间为 1 000 a(基本不会影响模型)^[16],由此可计算出 k_r, C_r 可直接测得。运用统计软件 SAS 8.2 的非线性过程(NLIN PROC)运行该模型,即可实现参数的拟合。

1.2.4 土壤理化性质测定

土壤 pH 采用电极法,质地采用吸管法,参照文献[17]。

2 结果与分析

2.1 不同海拔土壤有机碳库库容

表 2 列出了不同海拔 A、B 两层土壤总有机碳库、各组分碳库的库容以及各组分碳库占总有机碳库的比例。

表 2 不同海拔土壤总有机碳库和三库含量

Table 2 Contents of C_{soc}, C_a, C_s and C_r along elevation gradient

海拔 /m	土壤类型	土层	C _{soc} /g·kg ⁻¹	C _a /g·kg ⁻¹	C _a /C _{soc} /%	C _s /g·kg ⁻¹	C _s /C _{soc} /%	C _r /g·kg ⁻¹	C _r /C _{soc} /%
2 634	灰钙土	A	7.606	0.180	2.37	3.650	47.99	3.776	49.64
		B	5.804	0.159	2.74	3.703	63.80	1.942	33.46
2 668	森林灰褐土	A	80.569	0.899	1.12	30.668	38.07	49.002	60.81
		B	84.267	0.450	0.53	43.623	51.77	40.194	47.70
2 815	山地粗骨栗钙土	A	67.807	0.306	0.45	23.715	35.19	43.642	64.36
		B	78.638	1.273	1.62	33.071	42.06	44.294	56.32
2 923	森林灰褐土	A	89.026	1.328	1.49	35.173	39.51	52.525	59.00
		B	83.460	0.574	0.69	37.952	45.47	44.934	53.84
3 004	亚高山灌丛草原土	A	85.366	0.942	1.10	19.126	22.41	65.298	76.49
		B	68.472	0.436	0.64	19.915	29.09	48.121	70.27
3 890	高山草甸土	A	67.211	0.636	0.95	26.242	39.04	40.333	60.01
		B	54.815	0.276	0.50	23.203	42.33	31.336	57.17

不同海拔高度 A、B 层土壤中,总有机碳库含量分别为 7.606 ~ 89.026 g·kg⁻¹, 5.804 ~ 84.267 g·kg⁻¹; 活性碳库含量分别为 0.180 ~ 1.328 g·kg⁻¹, 0.159 ~ 1.273 g·kg⁻¹; 活性碳占总有机碳的比例分别为 0.45% ~ 2.37%, 0.50% ~ 2.74%。缓效性碳库含量分别为 3.650 ~ 35.173 g·kg⁻¹,

3.703 ~ 43.623 g·kg⁻¹; 缓效性碳占总有机碳比例分别为 22.41% ~ 47.99%, 29.09% ~ 63.80%。惰性碳含量分别为 3.776 ~ 65.298 g·kg⁻¹, 1.942 ~ 48.121 g·kg⁻¹; 惰性碳占总有机碳比例分别为 49.64% ~ 76.49%, 33.46% ~ 70.27%。土壤总有机碳库随海拔高度变化可分为 4 个区间: 2 634 ~

2 668 m, 有机碳库随海拔升高而增加; 2 668 ~ 2 815 m, 有机碳库随海拔升高而减少; 2 815 ~ 2 923 m, 有机碳库随海拔升高而增加; 2 923 ~ 3 890 m, 有机碳库随海拔升高而减少; 土壤活性碳库、缓效性碳库和惰性碳库均未表现出随海拔明显的变化规律, 大体为中海拔 > 高海拔 > 中低海拔. 海拔高度的差异引起气候、温度、降雨量、植被类型、生物等因素的改变, 土壤有机碳库含量高低正是这些因素综合作用的结果. 据报道, 祁连山地区海拔梯度上温度和降水表现为: 气温随海拔升高而逐渐递减^[18], 降水随海拔高度的升高逐渐增多, 但大致在 3 000 m 以上随海拔高度的升高反而减少^[19]. 2 800 ~ 3 000 m 中高海拔地区森林灰褐土和亚高山灌丛草原土分别具有最高的总有机碳库和惰性碳库, 主要是因为成年云杉的植被覆盖向地表输送了丰富的枯枝落叶, 温度和降雨量相对较低, 并不利于有机质的分解, 因而引起有机碳的积累; 草本植物根系生命周期短, 大量死亡的根系向土壤追加了大量有机质, 由于植被覆盖单一, 微生物群落也较贫乏, 能被分解的土壤有机碳数量有限, 大部分转化成性质稳定的惰性碳积累下来. 总有机碳库和惰性碳库以 2 600 ~ 2 700 m 中低海拔地区灰钙土为最低, 因为少雨和高温导致植被覆盖稀疏, 生物量少, 同时人为扰动较大, 都不利于土壤碳的积累. 3 890 m 高海拔地区因其降雨量和温度都低, 枯枝落叶向土壤输送及微生物分解有机质作用都不强, 因而总有机碳库和惰性碳库介于中低海拔与中高海拔之间. 总言之, 有机碳库随海拔的变化, 体现了区域植被群落结构、随海拔气候环境的变化以及人类活动干扰的交互作用. 随海拔升高, 气温和土温降低而降雨量增加, 中高海拔地区土壤在高降雨量作用下植被覆盖丰富, 因此有大量的植物残体输入, 低温则抑制了有机质的分解, 因而有机碳大量积累; 随着海拔上升, 气温和降雨均减少, 地上净初级生产力呈现下降趋势^[18], 进入土壤中的有机质数量^[20]亦减少; 中低海拔地区温度高降水少, 微生物活性增强, 同时人为扰动严重影响有机碳积累.

惰性碳库含量在海拔间差异最大, 变幅达 34 倍, 但占总有机碳的比例的差异最小, 变幅只有 2.5 倍. 惰性碳库是性质最稳定、最不易分解和转化的碳库, 它的差异性体现了不同海拔下形成的自然土壤的差异性. 正由于惰性碳库是最稳定的碳库, 难以和其他碳库进行转化, 因此在总有机碳库中所占比例几乎是一定的, 不同海拔之间差异也最小. 缓效性

碳库和惰性碳库含量及所占比例变幅在二者之间. 方差分析表明, 土壤总有机碳库和惰性碳库在不同海拔之间存在极显著差异 ($P < 0.01$), 缓效性碳库存在显著性差异 ($P < 0.05$), 活性碳库无显著性差异. 因为活性碳是有机碳各组分中最不稳定的部分, 容易被微生物分解而经常处于变化当中, 导致不同海拔之间并不会有明显差异. 据此可将状态稳定的总有机碳库和惰性碳库作为评价和比较不同海拔高度土壤有机碳积累状况、储量及稳定性的指标.

同一海拔不同土层的土壤, 总有机碳库、活性碳库和惰性碳库含量总体呈现 A 层 > B 层, 缓效性碳库含量总体呈现 B 层 > A 层, 但缓效性碳库比例始终是 B 层 > A 层, 惰性碳库比例始终是 A 层 > B 层. 一般认为土壤总有机碳库含量随深度增加而减少, 但本研究中 2 668 m 和 2 815 m 处土壤有机碳反而呈现 B 层 > A 层, 可能是因为中低海拔地区温度高、降水量大, 地上植被生长茂盛, 大量的凋落物得以进入土壤形成腐殖质并向深处转移, 表层土壤因氧气和温度状况良好, 微生物分解作用强烈, 致使表层土壤有机质被大量分解. 另一方面, 地下生物量也可能是造成有机碳随深度增加的原因. 可见地面植被向土壤表层输送的凋落物, 主要影响 A 层土壤^[21], 使得总碳库、活性碳库和惰性碳库的含量有所增加; 对惰性碳库影响最大, 提高含量的同时还提高了比例. 缓效性碳和惰性碳库共同构成总有机碳库的 97% ~ 99% 左右的库容, 两种碳库含量此消彼长, 以维持碳库的稳定性. 除亚高山灌丛草原土以外, 不同海拔土壤缓效性碳和惰性碳库的比例相差并不大, 几乎各占一半. 惰性碳库一般被认为是碳“汇”的标志, 高的惰性碳比例对于减缓土壤向大气中 CO₂ 的排放和碳的固定起到重要作用. 3 004 m 亚高山灌丛草原土具有最高的惰性碳库比例, 最具固碳能力.

2.2 土壤有机碳分解特征

由图 1 看出, 不同海拔土壤有机碳分解呈现一致的变化规律, 即培养前期分解快、后期分解缓慢. 有机碳分解特征是培养前期在短时间内 (一般为 2 d) 分解速率达到峰值, 此后至培养 30 d 左右回落至一个低值; 在此之后分解速率日变幅不大, 并逐渐趋于平稳. 初步分析是因为前期培养时土壤中碳源充足, 加水引起的激发效应刺激了微生物的活性, 因而分解速率很快达到最大; 随着土壤中易分解成分 (如糖类、氨基酸等) 逐渐被分解, 碳成为限制因子, 从而使分解速率趋于平缓^[22].

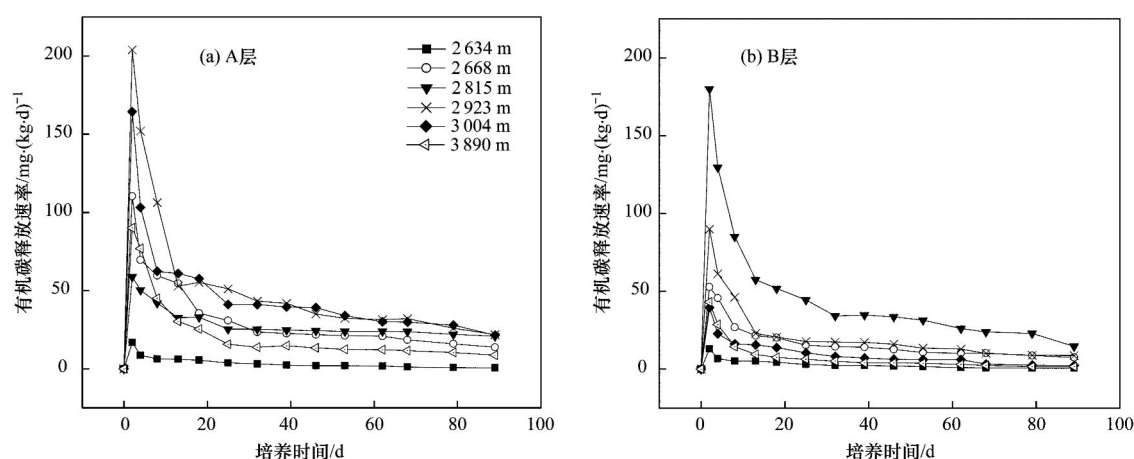


图1 不同海拔土壤有机碳释放速率曲线

Fig. 1 Curves of SOC release rate under different elevations

在整个培养周期,不同海拔土壤有机碳分解速率:A层为2923 m > 3004 m > 2668 m > 3890 m > 2815 m > 2634 m, B层为2815 m > 2923 m > 2668 m > 3004 m > 3890 m > 2634 m,有机碳分解速率呈现出与有机碳库几乎一致的变化趋势.有机碳分解速率受碳库丰缺状况影响,与有机碳含量呈正相关. A、B两层土壤有机碳日释放速率峰值与培养期间有机碳分解速率变化完全一致,有机碳日释放速率峰值可作为土壤有机碳释放快慢特征的表征.相关分析表明,A层土壤有机碳日释放速率峰值与活性碳含量呈极显著相关关系($P < 0.01$),与总有机碳含量呈显著相关关系($P < 0.05$),与缓效性碳和惰性碳含量无显著相关关系.由此可见,土壤活性碳含量是A层土壤有机碳日释放速率峰值的决定性因素,总有机碳含量是影响土壤有机碳释放的重要因素. B层土壤有机碳日释放速率峰值仅与活性碳含量呈极显著相关关系($P < 0.01$),与其他碳库含量均无显著相关关系.说明在整个土壤发生层上,活性碳库含量是影响土壤有机碳释放速率决定性因素.线性回归拟合得到有机碳日释放速率峰值与活性碳含量的关系方程: $y = 154.82x - 7.6328$ ($P < 0.01$),决定系数达0.95.

同一海拔不同土层有机碳分解速率变化规律亦与有机碳库随土层变化规律相同,但变化幅度因地面植被的不同而有明显差异,草原(甸)土壤显著高于杉木林土壤,可见土壤剖面垂直方向有机碳分解主要受凋落物影响.在凋落物质量因子中,木质素含量被认为是最重要的指标^[23],木质素不仅自身难以分解,还会在凋落物的全纤维素类复合物周围形成屏障而阻碍分解^[24].草是禾本科植物,茎叶柔软,在

土壤中易被微生物利用^[25],故表层有机碳释放速率比下层有明显升高;杉木的硬质叶子含有较高的木质素、纤维素,难被微生物利用,因而上下层变化幅度不会太大.

2.3 土壤有机碳累积释放特征

在整个培养周期土壤有机碳日释放量的总和即为有机碳累积释放量,可根据有机碳日释放速率转化而来,能够很好地反映土壤有机碳释放量的变化趋势.如图2,不同海拔A层土壤有机碳累积释放量是2923 m > 3004 m > 2668 m > 2815 m > 3890 m > 2634 m, B层土壤有机碳累积释放量是2815 m > 2923 m > 2668 m > 3004 m > 3890 m > 2634 m,与有机碳分解速率呈现一致的变化趋势.

将有机碳累积释放曲线拟合后发现(表3),多项式方程能很好表达碳累积释放量与时间的关系,且次数越高拟合的精度越高,三次多项式已能达到较好的精度($R^2 > 0.99$),这与史学军等的研究结果一致^[21].土壤有机碳累积释放量对时间的表达式可确定为 $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$.

如图2所示,有机碳累积释放量在培养前半个月平均达到总释放量的35.79%;前一个月平均达59.53%;前两个月平均可达85.26%,两个月以后日分解量变化很小并达到平衡.按照一段时间内有机碳释放量的增长幅度,将有机碳分解划分为3个阶段,即前半个月的快速分解阶段(活性碳周转期),前两个月的缓慢分解阶段以及两个月至培养结束的平衡阶段,与前人的研究结果一致^[26].

在整个培养周期,土壤有机碳累积释放量在0.262 ~ 4.080 g·kg⁻¹,占总有机碳的0.96% ~

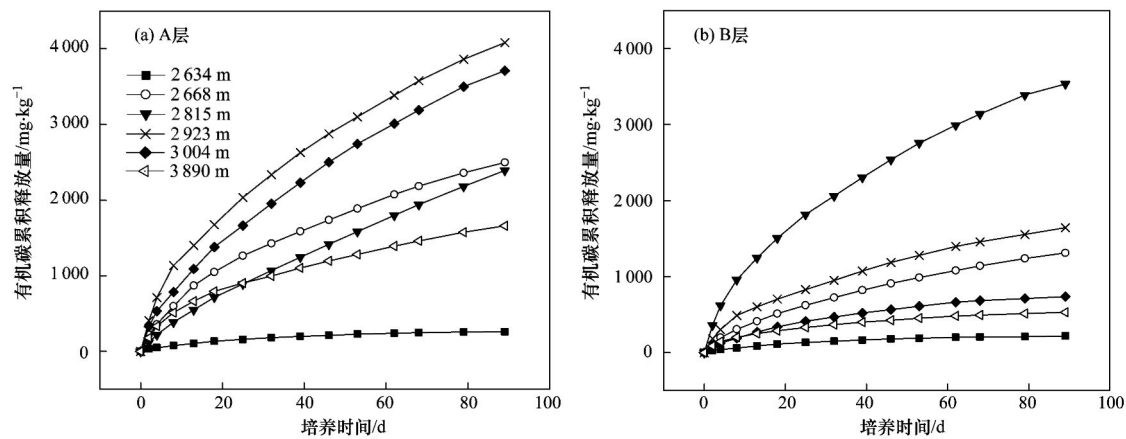


图 2 不同海拔土壤有机碳累积释放量曲线

Fig. 2 Curves of cumulative SOC release amount under different elevations

表 3 有机碳累积释放量与时间拟合函数

Table 3 Fitting function of accumulative SOC release amount with time				
海拔/m	土壤类型	土层	有机碳累积释放量与时间的拟合函数	R ²
2 634	灰钙土	A	$y = 0.000\ 5x^3 - 0.103\ 3x^2 + 8.152\ 4x + 13.498$	0.996 5
		B	$y = 0.000\ 4x^3 - 0.084\ 4x^2 + 6.748\ 8x + 9.982\ 1$	0.997 2
2 668	森林灰褐土	A	$y = 0.004\ 2x^3 - 0.784x^2 + 63.869x + 92.744$	0.996 6
		B	$y = 0.001\ 7x^3 - 0.329\ 9x^2 + 30.529x + 49.81$	0.997 4
2 815	山地粗骨栗钙土	A	$y = 0.001\ 7x^3 - 0.317\ 5x^2 + 41.143x + 43.355$	0.999 1
		B	$y = 0.005\ 3x^3 - 1.038\ 7x^2 + 88.56x + 189.2$	0.994 9
2 923	森林灰褐土	A	$y = 0.006\ 3x^3 - 1.189\ 5x^2 + 99.994x + 221.94$	0.994 6
		B	$y = 0.002\ 5x^3 - 0.480\ 9x^2 + 40.725x + 103.84$	0.992 4
3 004	亚高山灌丛草原土	A	$y = 0.003\ 6x^3 - 0.738\ 5x^2 + 77.96x + 151.03$	0.997 6
		B	$y = 0.001\ 1x^3 - 0.232\ 6x^2 + 20.314x + 32.072$	0.997 2
3 890	高山草甸土	A	$y = 0.003\ 8x^3 - 0.667\ 4x^2 + 46.951x + 104.99$	0.990 5
		B	$y = 0.001\ 3x^3 - 0.246\ 3x^2 + 16.904x + 51.418$	0.994 3

4.58%,占活性碳的136.30%~781.66%,占缓效性碳的2.25%~18.50%,占惰性碳的1.53%~11.16%,这说明土壤有机碳的周转次序依次是活性碳、缓效性碳、惰性碳。有机碳累积释放量在前半个月达到活性碳含量的96.90%,从另一方面说明活性碳在有机碳周转过程中最先被分解,并且在前半个月几乎周转完全。活性碳在整个培养过程被全部分解,随着活性碳库逐渐被消耗完毕,一部分缓效碳库和惰性碳库向活性碳库转化,活性碳库得到补充以维持有机碳周转的需要。因为这种转化的过程相当缓慢,在培养后期,活性碳含量成为限制因素,微生物只能利用少量的活性碳和部分缓效性碳及惰性碳,因而有机碳释放速率降低并趋于稳定。活性碳库在有机碳周转中起到十分重要的作用,有机碳分解的动态变化正是由活性碳随时间减少所导致。

有机碳累积释放曲线和分解速率曲线均能反映土壤有机碳的周转情况,分解速率曲线侧重于刻画在培养期间土壤呼吸的日变化状况,而有机碳累积

释放曲线能够量化有机碳分解过程中的矿化量,都是土壤碳循环研究中的有力工具。

3 讨论

3.1 不同海拔土壤有机碳库

由海拔高度引起的土壤碳库的变化表现在温度、水分、植被、土壤性质等因子的交互作用。在自然条件下,温度影响微生物的生理活性;土壤水分间接影响植物根系光合及呼吸所需养分的有效性^[11,27];凋落物性质影响土壤中的C、N含量及有机质的品质和稳定性;土壤质地、pH、含水量等性质与土壤有机碳有一定的相关性^[28]。祁连山土壤总有机碳库和各组分碳库在海拔高度上表现为中高海拔>高海拔>中低海拔,这种变化规律主要由气候因子即温度和降水量所主导。薛晓娟等^[18]发现祁连山东段南麓土壤随海拔上升有分段变化规律,王长庭等^[9]对三江源地区土壤有机碳研究发现有机碳和全氮含量均随海拔上升呈现出“V”字形变化规

律,与本研究结果类似.程先富等^[29]研究表明,海拔与有机碳含量呈极显著正相关关系,与本研究不一致;但其也从气温、降水和植被方面探讨海拔对有机碳的影响,与本研究观点一致.不同土壤碳库受海拔因素的影响程度也不尽相同,总有机碳库和惰性碳库在海拔间有极显著差异($P < 0.01$),缓效碳库有显著性差异($P < 0.05$),活性碳库之间无显著性差异,表明土壤有机碳库和惰性碳库受海拔因素影响较大,活性碳库受海拔因素影响较小,土壤有机碳库和惰性碳库更能作为评价不同海拔土壤碳库状况的指标.一般而言,随土层加深,有机碳含量显著降低,这在多人研究中得到证实^[7,12,18],但本研究中出现下层有机碳含量高于表层的现象,有可能在某种机制下形成的腐殖质向下层转移,森林土壤有机碳形成及储量的机制值得重新探讨.土壤有机碳三库在不同土层之间并无显著性差异,体现有机碳在剖面垂直方向分布较为均匀,这主要与植物残体在土壤剖面分布有关^[18].但是各碳库在每层所占比重有明显规律,缓效性碳库无论含量还是比例都是在B层占优势,惰性碳库则在A层有明显优势,与邵月红等^[26]研究一致,可见对土壤表层的保护对于土壤碳库稳定性的维护意义重大.

3.2 土壤有机碳分解速率及影响因素

不同海拔土壤有机碳分解速率变化与有机碳库变化趋势一致,说明土壤碳库与有机碳分解有一定的相关性.在不同土层,有机碳分解速率受海拔高度的影响程度也不同,表层土壤更为敏感^[7,15].三库中活性碳库与有机碳分解关系最为密切,活性有机碳所占比例不同会影响土壤矿化速率^[30].本研究发现在整个土壤发生层上,活性碳含量与土壤有机碳日释放速率峰值满足线性关系($P < 0.01$);但与活性碳比例无相关性($P > 0.05$),这与孟静娟等^[22]结果一致.活性碳库决定着有机碳周转的速率,土壤有机碳分解随时间的变化主要由活性碳含量随培养时间减少所致^[31].土壤活性碳在整个培养过程得到完全分解,随着活性碳库周转完毕,一部分缓效性碳库和惰性碳库随之向活性碳库转化.活性碳对有机碳分解的影响机制还需做进一步研究.

土壤有机碳的分解受温度、水分、土壤性质、外来有机物等因素的影响^[32],海拔高度将改变植被组成、水分、养分、土壤类型等一系列因子,这些因子都可能影响有机碳的周转.本研究是基于恒温恒湿下的实验室培养,温度和水分不再是有机碳分解的影响因子,外来有机物及土壤质地、pH等性质有

可能是影响有机碳分解的主要因素^[21].土壤性质中,质地对活性碳库和缓效性碳库具有调控效应:当土壤中砂性成分低、黏土成分高时,土壤中的碳稳定性将增加^[33,34];土壤中有有机碳含量随粉粒和黏粒含量增加而增加,这主要与粉粒对土壤水分有效性、植被生长的正效应及黏粒对土壤有机碳的保护作用有关.但同时,由于黏粒对有机物质的保护能力有一定限度,最终会达到饱和状态,因此土壤黏粒含量还影响土壤有机质达到平衡状态的时间^[35].本研究中,有机碳分解速率随黏粒含量升高表现出升高的趋势,但相关性不显著($R^2 = 0.206, P > 0.05$),可能地点的不同改变了质地对有机碳速率的影响程度.pH通过影响土壤微生物的活动,从而影响有机碳的分解和积累.研究发现有机碳分解速率与pH表现为一定的负相关关系^[36,9],本研究也不例外,但相关性不高($R^2 = 0.143, P > 0.05$),可能和研究区土壤pH变化不大有关.凋落物对有机碳分解的影响在于其进入土壤后不但会增加土壤中碳源,改变土壤理化性质,还会改变土壤微生物群落结构^[37,38].凋落物化学组成、类型及性质,如木质素和氮的含量、C/N、木质素/N、C/P是主要影响因素^[39].有人得出凋落物的C/N和木质素/N与土壤有机碳矿化速率呈正相关关系^[40],也有人得到相反的结果^[37].可能因为影响不同海拔高度土壤有机碳周转的因素复杂,单一方面研究并不能真实反映碳分解的规律,而限制对碳释放机制的认识和掌握,对多因素的交互效应和影响机制的研究还有待深入进行下去.

4 结论

(1)祁连山土壤有机碳库随海拔高度有一定的变化规律,大致是中高海拔>高海拔>中低海拔,在海拔梯度上温度和水分是影响碳库变化的主导因子,在土壤剖面垂直方向凋落物起到主要作用.

(2)土壤有机碳三库受海拔的影响程度不一,海拔对惰性碳库影响最大、活性碳库影响最小.

(3)土壤有机碳按照活性碳、缓效性碳和惰性碳的次序进行周转,呈现前期快后期慢的特点,随海拔高度的变化与有机碳库变化一致.活性碳在有机碳周转过程中起到决定性作用,与有机碳分解速率之间有显著的线性关系.

(4)不同海拔土壤有机碳累积释放量与有机碳日均释放速率呈正相关.多项式方程能很好表达碳累积释放量与时间的关系,三次多项式已能达到较好的精度($R^2 > 0.99$).

参考文献:

- [1] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition and the effect of global warming on soil organic C storage[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, **27** (6): 753-760.
- [2] 吴庆标, 王效科, 郭然. 土壤有机碳稳定性及其影响因素[J]. *土壤通报*, 2005, **36**(5): 743-747.
- [3] 方华军, 杨学明, 张晓平. 农田土壤有机碳动态研究进展[J]. *土壤通报*, 2003, **34**(6): 562-568.
- [4] Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, *et al.* Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, **7**(4): 785-809.
- [5] Kelly R H, Parton W J, Crocker G J, *et al.* Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the century model[J]. *Geoderma*, 1997, **81**(1-2): 75-90.
- [6] Rodeghiero M, Cescatti A. Main determinants of forest soil respiration along an elevation/temperature gradient in the Italian Alps[J]. *Global Change Biology*, 2005, **11**(7): 1024-1041.
- [7] 周焱, 徐宪根, 阮宏华, 等. 武夷山不同海拔高度土壤有机碳矿化速率的比较[J]. *生态学杂志*, 2008, **27**(11): 1901-1907.
- [8] 王建林, 欧阳华, 王忠红, 等. 贡嘎南山-拉轨岗日山南坡高寒草原生态系统表层土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. *土壤通报*, 2010, **41**(2): 346-350.
- [9] 王长庭, 龙瑞军, 曹广民, 等. 三江源地区主要草地类型土壤碳氮沿海拔变化特征及其影响因素[J]. *植物生态学报*, 2006, **30**(3): 441-449.
- [10] 施政, 汪家社, 何容, 等. 武夷山不同海拔土壤呼吸及其主要调控因子[J]. *生态学杂志*, 2008, **27**(4): 563-568.
- [11] 吴雅琼, 刘国华, 傅伯杰, 等. 森林生态系统土壤 CO₂ 释放随海拔梯度的变化及其影响因子[J]. *生态学报*, 2007, **27** (11): 4678-4685.
- [12] 张鹏, 张涛, 陈年来. 祁连山北麓山体垂直带土壤碳氮分布特征及影响因素[J]. *应用生态学报*, 2009, **20**(3): 518-524.
- [13] 孙慧兰, 李卫红, 杨余辉, 等. 伊犁山地不同海拔土壤有机碳的分布[J]. *地理科学*, 2012, **32**(5): 603-608.
- [14] 柯炳炅, 张璐, 苏志尧. 粤北亚热带山地森林土壤有机碳沿海拔梯度的变化[J]. *生态与农村环境学报*, 2012, **28**(2): 151-156.
- [15] 吴建国, 艾丽, 朱高, 等. 祁连山北坡云杉林和草甸土壤有机碳矿化及其影响因素[J]. *草地学报*, 2007, **15**(1): 20-28.
- [16] Lal R, Kimble J M, Follett R F, *et al.* Assessment methods for soil carbon[M]. USA: CRC Press LLC, 2000. 200-202.
- [17] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012. 8-16.
- [18] 薛晓娟, 李英年, 杜明远, 等. 祁连山东段南麓不同海拔土壤有机质及全氮的分布状况[J]. *冰川冻土*, 2009, **31**(4): 642-649.
- [19] 贾文雄. 祁连山气候的空间差异与地理位置和地形的关系[J]. *干旱区研究*, 2010, **27**(4): 607-615.
- [20] 范永刚, 胡玉昆, 李凯辉, 等. 巴音布鲁克主要草地类型表层土壤有机碳特征及其影响因素的研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, **22**(8): 179-184.
- [21] 史学军, 陈锦盈, 潘剑君, 等. 几种不同类型土壤有机碳库容大小及周转研究[J]. *水土保持学报*, 2008, **22**(6): 123-127.
- [22] 孟静娟, 史学军, 潘剑君, 等. 农业利用方式对土壤有机碳库大小及周转的影响研究[J]. *水土保持学报*, 2009, **23** (6): 144-148.
- [23] 彭少麟, 刘强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应[J]. *生态学报*, 2002, **22**(9): 1534-1544.
- [24] 李海涛, 于贵瑞, 李家永, 等. 井冈山森林凋落物分解动态及磷、钾释放速率[J]. *应用生态学报*, 2007, **18**(2): 233-240.
- [25] 杨曾奖, 曾杰, 徐大平, 等. 森林枯枝落叶分解及其影响因素[J]. *生态环境*, 2007, **16**(2): 649-654.
- [26] 邵月红, 潘剑君, 孙波. 不同森林植被下土壤有机碳的分解特征及碳库研究[J]. *水土保持学报*, 2005, **19**(3): 24-28.
- [27] Scott-Denton L E, Sparks K L, Monson R K. Spatial and temporal controls of soil respiration rate in a high-elevation, subalpine forest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35** (4): 525-534.
- [28] Zhang Y D, Liu S R, Ma J M. Water-holding capacity of ground covers and soils in alpine and sub-alpine shrubs in western Sichuan, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(9): 2775-2782.
- [29] 程先富, 史学正, 于东升, 等. 兴宁县森林土壤有机碳库及其与环境因子的关系[J]. *地理研究*, 2004, **23**(2): 211-217.
- [30] Updegraff K, Pastor J, Bridgman S D, *et al.* Environmental and substrate controls over carbon and nitrogen mineralization in northern wetlands[J]. *Ecological Applications*, 1995, **5**(1): 151-163.
- [31] Franzluebbers A J, Haney R L, Honeycutt C W, *et al.* Climatic influences on active fractions of soil organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, **33**(7-8): 1103-1111.
- [32] 李海鹰. 实验室培养下中国亚热带和温带土壤有机碳分解特征的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007. 8-10.
- [33] 陈锦盈, 孙波, 李忠佩, 等. 不同土地利用类型土壤有机碳各库大小及分解动态[J]. *水土保持学报*, 2008, **22**(1): 91-95.
- [34] 邵月红. 我国亚热带和温带土壤有机碳动态变化及 InTEC 模型的验证[D]. 南京: 南京农业大学, 2005. 49-50.
- [35] 史学军. 中国东部典型区域土壤有机碳和土壤凋落物分解特征研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009. 12-13.
- [36] 孟静娟. 余江县活性-惰性土壤碳库的空间分异及其主控因素研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011. 43-44.
- [37] 史学军, 潘剑君, 陈锦盈, 等. 不同类型凋落物对土壤有机碳矿化的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(6): 1832-1837.
- [38] Li Y Q, Xu M, Sun O J, *et al.* Effects of root and litter exclusion on soil CO₂ efflux and microbial biomass in wet tropical forests[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**(12): 2111-2114.
- [39] 孙志高, 刘景全, 于君宝, 等. 模拟湿地水分变化对小叶章枯落物分解及氮动态的影响[J]. *环境科学*, 2008, **29**(8): 2081-2093.
- [40] Giardina C P, Ryan M G, Hubbard R M, *et al.* Tree species and soil textural controls on carbon and nitrogen mineralization rates[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, **65**(4): 1272-1279.

CONTENTS

Characterization of Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Hazy Weather During 16 th Asian Games in Guangzhou	TAO Jun, CHAI Fa-he, GAO Jian, <i>et al.</i>	(409)
PM _{2.5} Pollution and Aerosol Optical Properties in Fog and Haze Days During Autumn and Winter in Beijing Area	ZHAO Xiu-juan, PU Wei-wei, MENG Wei, <i>et al.</i>	(416)
Forming Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources Apportionment of VOCs in Autumn of Shanghai, China	WANG Qian, CHEN Chang-hong, WANG Hong-li, <i>et al.</i>	(424)
Study on Number Concentration Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles in Hangzhou	XIE Xiao-fang, SUN Zai, FU Zhi-min, <i>et al.</i>	(434)
Pollution Characteristics and Source Identification of Atmospheric Particulate Matters <i>n</i> -Alkanes in Baoding City	LI Xing-ru, DU Xi-qiang, WANG Ying-feng, <i>et al.</i>	(441)
Study on Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in Xi'an City During the Spring Festival	ZHOU Bian-hong, ZHANG Cheng-zhong, WANG Ge-hui	(448)
Characteristics of PM ₁₀ and PM _{2.5} Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin, LIU Xin-dong, TAO Jun	(455)
Assessment of TVOC and Odor in the Remediation Site of Contaminated Soil and Groundwater Using Electronic Nose	TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, LIU Rui, <i>et al.</i>	(462)
Characteristics of Mercury Exchange Flux Between Soil and Atmosphere Under the Snow Retention and Snow Melting Control	ZHANG Gang, WANG Ning, AI Jian-chao, <i>et al.</i>	(468)
Study on Heavy Metal Contaminations and the Sources of Pb Pollution in Jinghai Bay Using the Stable Isotope Technique	XU Lin-bo, GAO Qin-feng, DONG Shuang-lin, <i>et al.</i>	(476)
Eco-environmental Evolution Inferred from <i>n</i> -Alkanes and $\delta^{13}\text{C}$ Records in the Sediments of Shijiu Lake	OU Jie, WANG Yan-hua, YANG Hao, <i>et al.</i>	(484)
Distribution of PGEs Contents and Its Factors in Snowfall and Snow Cover over the Arid Region in Changji City	LIU Yu-yan, LIU Hao-feng, ZHANG Lan	(494)
Effect of Dust Deposition Collection Methods on Collection Efficiency	ZHANG Zheng-cai, DONG Zhi-bao	(499)
Regionalization of the Freshwater Eco-regions in the Haihe River Basin of China	SUN Ran-hao, JI Yu-he, SHANG Lin-yuan, <i>et al.</i>	(509)
Characteristics of Diffuse Attenuation Coefficient of Underwater Irradiance in the Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	SHI Zhi-qiang, ZHANG Yun-lin, WANG Ming-zhu, <i>et al.</i>	(517)
Study on Influencing Factors and Universality of Chlorophyll- <i>a</i> Retrieval Model in Inland Water Body	HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, XU Liang-jiang, <i>et al.</i>	(525)
Effect of Dissolved Oxygen on Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Enrichment Culture from Estuarine Wetland Surface Sediments and Ammonia-oxidizing Rate	QIU Zhao-zheng, LUO Zhuan-xi, ZHAO Yan-ling, <i>et al.</i>	(532)
Spatial Variation of Soil Moisture/Salinity and the Relationship with Vegetation Under Natural Conditions in Yancheng Coastal Wetland	ZHANG Hua-bing, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i>	(540)
Spatial Heterogeneity and Classified Control of Agricultural Non-Point Source Pollution in Huaihe River Basin	ZHOU Liang, XU Jian-gang, SUN Dong-qi, <i>et al.</i>	(547)
Phosphorus Output Characteristics Under Different Rainfall-Runoffs in Gaolan River	CUI Yu-jie, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i>	(555)
Monitoring and Analysis on Evolution Process of Rainfall Runoff Water Quality in Urban Area	DONG Wen, LI Huai-en, LI Jia-ke	(561)
Characteristics and Contribution of the Strengthening Units of Composite Constructed Wetland for Treating Urban Sewage	REN Feng, LU Yi-xia, LIU Qin, <i>et al.</i>	(570)
Inactivation of <i>Mycobacteria mucogenicum</i> in Drinking Water: Chlorine Resistance and Mechanism Analysis	ZHENG Qi, CHEN Chao, ZHANG Xiao-jian, <i>et al.</i>	(576)
Partial Biological Characteristics and Algicidal Activity of an Algicidal Bacterium	LI San-hua, ZHANG Qi-ya	(583)
Effects of Macrophytes Pyrolysis Bio-oil on <i>Skeletonema costatum</i> Antioxidant Enzyme Activities	YAO Yuan, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(589)
Mechanism and Kinetics of Phenol Degradation by TiO ₂ Photocatalytic Combined Technologies	ZHANG Yi, HUANG Ruo-nan, WANG Xiao-min, <i>et al.</i>	(596)
Biodegradation Characteristics of Organic Pollutants Contained in Tannery Wastewater	WANG Yong, LI Wei-guang, YANG Li, <i>et al.</i>	(604)
Microbial Degradation Mechanism of Disperse Azo Dye Red 30 by <i>Streptomyces</i> sp. FX645	XIE Lian-wu, FANG Ji-qian, GUO Ya-ping	(611)
Study on Preparation and Performance of a Biological Carrier with Tourmaline	YANG Ji-xian, ZENG Hong-yun, ZHOU Yi, <i>et al.</i>	(616)
Study on the <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivation Technology Based on the Excess Sludge Utilization	JI Wen-wen, XIA Hui-long, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i>	(622)
Effects of Mild Thermal Pretreatment on Anaerobic Digestibility of Sludge with Low Organic Content	CHEN Han-long, YAN Yuan-yuan, HE Qun-biao, <i>et al.</i>	(629)
Effect of Natural and Hydrothermal Synthetic Goethite on the Release of Methane in the Anaerobic Decomposition Process of Organic Matter	YAO Dun-fan, CHEN Tian-hu, WANG Jin, <i>et al.</i>	(635)
Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Spent Etching Solution and Its Copper Salt Recycling Products	QING Xian, HAN Jing-lei, WEN Yan-shen	(642)
Case Study on Health Risk Assessment Based on Site-Specific Conceptual Model	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i>	(647)
Study on the Risk Assessment Method of Regional Groundwater Pollution	YANG Yan, YU Yun-jiang, WANG Zong-qing, <i>et al.</i>	(653)
Groundwater Organic Pollution Source Identification Technology System Research and Application	WANG Xiao-hong, WEI Jia-hua, CHENG Zhi-neng, <i>et al.</i>	(662)
Study on Soil Organic Carbon Pools and Turnover Characteristics Along an Elevation Gradient in Qilian Mountain	ZHU Ling-yu, PAN Jian-jun, ZHANG Wei	(668)
Response of Black Soil Organic Carbon, Nitrogen and Its Availability to Long-term Fertilization	LUO Kun, HU Rong-gui, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i>	(676)
Phytoavailability and Chemical Speciation of Cadmium in Different Cd-Contaminated Soils with Crop Root Return	ZHANG Jing, YU Ling-ling, XIN Shu-zhen, <i>et al.</i>	(685)
Study on Mechanism of SOM Stabilization of Paddy Soils Under Long-term Fertilizations	LUO Lu, ZHOU Ping, TONG Cheng-li, <i>et al.</i>	(692)
Aging Process of Cr(III) in 22 Typical Soils of China and Influence Factors Analysis	ZHENG Shun-an, ZHENG Xiang-qun, LI Xiao-zheng, <i>et al.</i>	(698)
Residual Characteristics of HCHs in Soils of a Former Lindane Production Enterprise	PAN Feng, WANG Li-li, ZHAO Hao, <i>et al.</i>	(705)
Evaluation and Source Analysis of the Mercury Pollution in Soils and Vegetables Around a Large-scale Zinc Smelting Plant	LIU Fang, WANG Shu-xiao, WU Qing-ru, <i>et al.</i>	(712)
Residue of Organic Fluorine Pollutants in Hair and Nails Collected from Tianjin	YAO Dan, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i>	(718)
Analysis of Estrogens, Nonylphenol, 4-tert-Octylphenol and Bisphenol A in the Sediments	WU Wei, SHI Jiang-hong, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i>	(724)
Investigation of As, Cu and Zn Species and Concentrations in Animal Feeds	YAO Li-xian, HUANG Lian-xi, JIANG Zong-yong, <i>et al.</i>	(732)
Residue Dynamics of Flubendiamide in Paddy Field	WANG Dian-dian, SONG Ning-hui, WU Wen-zhu, <i>et al.</i>	(740)
Isolation of Two Endophytic Phenanthrene-Degrading Strains and Their Degradation Capacity	NI Xue, LIU Juan, GAO Yan-zheng, <i>et al.</i>	(746)
Biodegradation of Nitrobenzene by a Halophilic <i>Myroides odoratimimus</i> Strain Y6	LI Tian, QIAN Kun, XIAO Wei, <i>et al.</i>	(753)
Effect of Immobilization on Biosensor for Benzene Derivates Detection	TANG Kuo, MA An-zhou, YU Qing, <i>et al.</i>	(760)
Investigation of Bacterial Diversity in the Biological Desulfurization Reactor for Treating High Salinity Wastewater by the 16S rDNA Cloning Method	LIU Wei-guo, LIANG Cun-zhen, YANG Jin-sheng, <i>et al.</i>	(767)
Assessment of the Effect of Influent NH ₄ ⁺ -N Concentration on the Abundance and Community Structure of Functional Bacteria in CANON Process	LIU Tao, LI Dong, ZENG Hui-ping, <i>et al.</i>	(773)
Biodegradation of Lignocellulose by <i>Penicillium simplicissimum</i> and Characters of Lignocellulolytic Enzymes	SHEN Ying, HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i>	(781)
Microbial Community Structure and Distribution Characteristics in Oil Contaminated Soil	YANG Meng-qing, LI Li-ming, LI Chuan, <i>et al.</i>	(789)
Degradation of Oxytetracycline in Chicken Feces Aerobic-Composting and Its Effects on Their Related Parameters	WANG Gui-zhen, LI Zhao-jun, ZHANG Shu-qing, <i>et al.</i>	(795)
Research of Moisture Content Variation in MSW Landfill	LI Rui, LIU Jian-guo, XUE Yu-wei, <i>et al.</i>	(804)
Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass with Animal Digestion Mechanisms	WU Hao, ZHANG Pan-yue, GUO Jian-bin, <i>et al.</i>	(810)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年2月15日 34卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 2 Feb. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 90.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行