

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)

硝酸纤维素膜光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, 何睿, 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)

复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献

张彦军^{1,2}, 郭胜利^{1*}

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 2. 宝鸡文理学院地理与环境学院, 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 宝鸡 721013)

摘要: 在地形条件复杂的地区, 量化根系对土壤有机碳的贡献对科学评价水土流失区的土壤碳储量具有重要意义. 本研究在黄土高原丘陵沟壑区的砖窑沟小流域内, 基于地貌类型 (梁峁坡、沟坡和沟谷) 和植被措施 (农田、林地和草地措施) 两大因素采集土壤和根系样品, 在流域尺度上研究根系密度 (FRD) 对土壤有机碳密度 (SOCD) 的贡献. 在砖窑沟小流域内, 地形、植被措施和土层厚度及其交互作用显著影响 SOCD 和 FRD 的空间分布. SOCD 和 FRD 在不同地形部位下均呈现出沟谷 > 沟坡 > 梁峁坡的趋势, 在不同植被措施下均呈现出林地措施 > 草地措施 > 农田措施的趋势, 在不同土层厚度上均呈现出表层 (0~20 cm) 大于下层 (20~100 cm) 的趋势. 此外, FRD 对 SOCD 的影响显著 ($P < 0.05$), SOCD 随着 FRD 增加呈现出对数增加的趋势, 且不同地形和植被措施下的根系-碳转化效率差异显著 ($P < 0.05$). 在农田措施下, 沟谷 (0.87) 的根系-碳转化效率均是沟坡 (0.43) 和梁峁坡 (0.43) 的 2.0 倍; 在草地措施下, 沟坡 (0.57) 的根系-碳转化效率分别是沟谷 (0.45) 和梁峁坡 (0.27) 的 1.3 倍和 2.1 倍; 在林地措施下, 梁峁坡 (0.56) 的根系-碳转化效率是沟坡 (0.44) 的 1.3 倍. 因此, 在砖窑沟小流域内, 从增加根系-碳转化效率的角度而言, 沟谷适合进行农业生产, 沟坡适宜进行退耕还草, 而梁峁坡适合进行退耕还林.

关键词: 土壤有机碳; 地貌类型; 植被措施; 根系-碳转化效率; 黄土高原

中图分类号: X14; X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0961-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201704017

Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions

ZHANG Yan-jun^{1,2}, GUO Sheng-li^{1*}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulation, College of Geography and Environment Engineering, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China)

Abstract: Quantifying the contribution of fine root density (FRD) to soil organic carbon density (SOCD) under extremely complex landforms is of great significance for the evaluation of carbon storage at an eroded small catchment in hilly regions of the Loess Plateau. Soil and root samples were collected from typical landforms (a ridge slope, gully slope, and valley bottom) and different vegetation types (cropland, grassland, and woodland) to investigate the contribution of FRD to SOCD at the Zhuan Yaogou watershed. The spatial distribution of SOCD and FRD was influenced significantly by landforms, vegetation type, soil depth, or their interactions. SOCD and FRD tended to go in the following order: valley bottom > gully slope > ridge slope on different landforms, Woodland > grassland > cropland on different types of vegetation, and surface > lower depths at different soil depths. Additionally, FRD had a significant effect on SOCD ($P < 0.05$), SOCD increased logarithmically with FRD, and there was a significant difference in root-carbon conversion efficiency between different landforms and types of vegetation ($P < 0.05$). The root-carbon conversion efficiency on the valley bottom (0.87) was 2.0 times higher than those on ridge slopes (0.43) and gully slopes (0.43) on cropland; the root-carbon conversion efficiency on gully slopes (0.57) were 1.3 and 2.1 times greater than those in valley bottoms (0.45) and ridge slopes (0.27), respectively, on grassland; and the root-carbon conversion efficiency on ridge slopes (0.56) was 1.3 times greater than that on gully slopes (0.44). Therefore, from the perspective of increasing root-carbon conversion efficiency at the Zhuan Yaogou watershed in the hilly region of the Loess Plateau, valley bottoms are suitable for agriculture, gully slopes are suitable for returning farmland to grassland, and ridge slopes are suitable for returning farmland to woodland.

Key words: soil organic carbon; landforms; vegetation types; root-carbon conversion efficiency; Loess Plateau

黄土高原地区地形破碎、沟壑纵横, 水土流失严重^[1], 严重的水土流失导致其土壤碳库流失和土壤退化^[2], 而水土流失治理可显著改善土壤理化性状和提高土壤碳储量^[3, 4]. 而土壤碳库的恢复对维持地区的可持续发展和缓解气候变化具有重要意义^[5, 6]. 因此, 在黄土高原地区, 研究地形和植被措施对土壤有机碳 (SOC) 时空变异性的影响, 对

科学评价该区的土壤碳储量具有重要意义.

在地形条件复杂地区, 地形控制着地区的水土

收稿日期: 2017-04-04; 修订日期: 2017-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41801069, 41601016); 陕西省科技厅项目 (2018JQ3023); 宝鸡文理学院博士科研启动基金项目 (ZK2017041)

作者简介: 张彦军 (1985~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为陆地生态系统碳循环, E-mail: zhangyanjun@bjwlxy.cn

* 通信作者, E-mail: slguo@ms.iswc.ac.cn

流失状况^[1,7], 支配着地区水热资源的空间分布^[8,9], 决定着地区植被群落的空间配置^[10]. 因此, 植被措施、土壤微气候和土壤侵蚀均不同程度受到地形的制约, 从而导致有机碳储量在空间分布上的不均^[11,12]. 随着植被的恢复, 不同地形部位的景观发生了巨大的改变^[11,13], 致使不同地形部位的 SOC 差异显著^[14-16]. 除了地形因素以外, 植被措施/土地利用方式转化也是影响 SOC 的重要因素^[17,18], 且其主要通过改变进入土壤中有有机物质的数量和质量影响 SOC 的时空变异性^[19,20]. 根系生物量占到陆地生态系统净初级生产力的 70% 以上^[21], 而细根 ($d < 2 \text{ mm}$) 的生物量占到总根系生物量的 73%^[22]. 此外, 大量的研究结果显示根系凋落物对土壤有机碳储量的贡献远远大于地表凋落物对土壤有机碳储量的贡献^[19,20,23]. 但是, 目前大多数研究仅在相似或者单一地形条件下探讨不同植被条件下根系生物量对 SOC 的影响^[3,24-28], 但是同一植被措施下不同地形条件下根系生物量对 SOC 影响的研究很匮乏.

基于此, 本研究在黄土高原丘陵沟壑区的砖窑沟小流域内, 基于地貌类型 (梁峁坡、沟坡和沟谷) 和植被措施 (农田、林地和草地措施) 两大因素, 在流域尺度上采集土壤和根系样品, 探讨细根对土壤有机碳储量的贡献, 以期为合理估算地形复杂地区的碳储量提供数据支持和理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

砖窑沟流域 ($39^{\circ}11'06'' \sim 39^{\circ}13'47'' \text{ N}$, $111^{\circ}12'03'' \sim 111^{\circ}19'28'' \text{ E}$) 位于晋西北河曲县沙坪乡, 地势东高西低, 海拔 845 ~ 1244 m, 主沟方向为东西向, 长约 14.2 km, 支沟从南北两面汇入, 南北剖面呈凹形, 分水岭与沟底高差达 150 ~ 200 m, 起伏剧烈. 流域 (黄土丘陵沟壑区) 沟壑密度为 $6.24 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$, 沟谷切割深度一般在 50 ~ 100 m 之间, 有的高达 200 m 左右. 流域总面积 29.11 km^2 , 地貌类型由梁峁坡、沟坡和沟谷组成, 三者 within 流域内所占的比例分别为 47.7%、47.3%、5.0%. 流域内坡度在 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 范围之间的土地面积占整个流域面积的 40.40%; $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 之间占 29.81%; $25^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 之间占 12.44%; $> 35^{\circ}$ 的占 17.35%.

流域属大陆性季风气候, 年平均降水量 447.5 mm, 蒸发量 1913.7 mm, 年内降雨主要集中在 6 ~ 9 月, 其中 7、8 月占全年降水量的 52.3%, 并多为大雨和暴雨. $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温天数为 140 d, 无霜期

为 156 d, 全年日照达 2856 h. 多年平均大风日数 87.2 d. 以春季最多, 占 41.64%. 流域属于黄土高原典型的水蚀和风蚀交错区, 地面割裂度为 55.1%, 年土壤侵蚀模数 $> 20000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$, 属于剧烈侵蚀. 流域的土壤以栗褐土为主, 土壤层次发育不明显, 多表现出母质性状, 质地偏轻, 有机质含量一般在 0.50% 左右, 全 N、全 P 仅 0.04% 和 0.05%, 全 K 含量 2.00% 左右.

流域植被措施多样, 主要农作物有糜子 (*Panicum miliaceum* L.)、玉米 (*Zea mays* L.)、谷子 (*Setaria italica*) 等; 林地包括乔木林和灌木林, 且主要为人工林, 乔木林地主要有刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 林、小杨树 (*Populus simonii* Carr.) 林、沙枣 (*Elaeagnus angustifolia* L.) 林等, 灌木林有柠条 (*Caragana korshinskii* Kom.)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides* L.); 草地分为人工草地和天然草地两种类型, 其中人工草地主要有苜蓿 (*Medicago sativa* L.)、香蒲 (*Typha orientalis* Presl)、沙打旺 (*Astragalus adsurgens* Pall.) 等, 且主要分布在梁峁坡上, 而天然草地主要有草木樨 (*Melilotus suaveolens* Ledeb.)、冰草 (*Agropyron cristatum* L. Gaertn.) 等, 且主要分布在沟坡上.

1.2 测定项目及方法

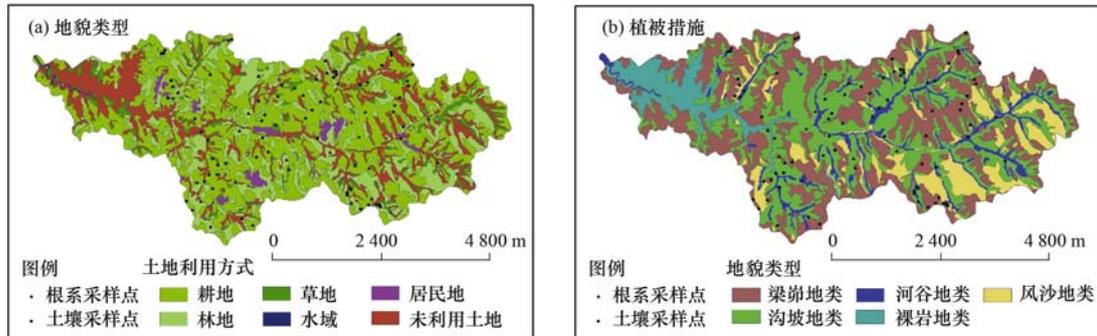
1.2.1 土壤和根系样品的采集

基于小流域内的地貌类型和植被措施两大因素, 采用“分层次采样的方法” ($0 \sim 20$ 、 $20 \sim 40$ 、 $40 \sim 60$ 、 $60 \sim 80$ 、 $80 \sim 100 \text{ cm}$, 共 5 层), 采集土壤和根系样品. 将地貌类型 [梁峁坡 (对照)、沟坡和沟谷] 作为一级层次, 将同一地貌类型条件下的不同植被措施 [农田 (对照)、林地措施、草地措施] 作为二级层次. 在流域内, 以横断面思路为依据, 采集土壤和根系样品, 并充分考虑空间异质性, 在沿途进行补点采样. 3 种地貌类型在野外的判别依据为: 沟缘线以上为梁峁坡 (包括峁顶), 沟缘线以下到坡脚线以上为沟坡, 多个坡脚线之间相对平坦的地区为沟谷. 结合砖窑沟流域的实际情况于 2010 年 9 月进行采样. 采样时利用 GPS 定位, 并记录每个采样点的海拔、经纬度、地貌类型、植被措施等信息.

在流域尺度上采集不同地貌类型、不同治理措施的土壤样本 99 个, 其中梁峁坡上共采集了 55 个土壤样本, 沟坡上共采集了 32 个土壤样本, 沟谷上共采集了 12 个土壤样本, 林地措施下共采集了 19 个土壤样本, 草地措施下共采集了 36 个土壤样本, 农田措施下共采集了 44 个土壤样本 (图 1). 每个样本 3 ~ 5 次重复 (“S”型路线), 其中 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土

层采集了 60 个土壤样本, 0~40 cm 土层采集了 20 个土壤样本, 0~100 cm 土层采集了 19 个土壤样本. 共计 767 个土壤样品, 其中 0~20 cm 的土壤样

品大约为 60%, 20~40 cm 的土壤样品大约为 23%, 而 40~100 cm 的土壤样品大约为 17%, 采样土钻直径为 3 cm.



修改自文献[29]

图1 砖窑沟小流域地貌类型和植被措施的样本分布示意

Fig. 1 Sampling sites at the Zhuanyaogou watershed based on vegetation type and landforms

在流域尺度上, 基于地貌类型和植被措施两大因素, 以横断面思路为依据, 采集根系样本, 每个样本 5 次重复, 采样根钻直径为 9 cm. 在林地措施下, 在距树干分别大约 0.3、0.5、1、1.5 和 2 m 处随机进行根系样品的采集, 在草地措施下, 按照对角线法进行根系样品的采集, 在农田措施下, 2 个样品在植株间进行采集, 而 3 个样品在行间进行采集. 在流域尺度上共采集根系样本 17 个, 其中梁崩坡上采集了 8 个样本, 沟坡上采集了 5 个样本, 沟谷上采集了 4 个样本, 林地措施下采集了 5 个样本, 草地措施下采集了 5 个样本, 农田措施下采集了 7 个样本 (图 1), 共计 416 个根系样品. 将采集好的根系样品带回实验室, 人为利用镊子挑选里面的根系, 并根据直径将其分为两类, 细根 ($d \leq 2$ mm) 和粗根 ($d \geq 2$ mm), 并将其于烘箱中在 70℃ 下烘 72 h 至恒重.

1.2.2 样品分析

新鲜样品混合均匀后, 在室内进行自然风干, 风干样品过 0.15 mm 筛后, 测定 SOC ($\text{H}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 外加热法) 含量 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 土壤容重的测定利用环刀法.

1.2.3 土壤有机碳密度和根系密度的估算

土壤有机碳密度 (SOCD) 利用下列方程进行计算:

$$\text{SOCD} = \sum_i^m \text{SOC}_i \times \text{BD}_i \times D_i \quad (1)$$

式中, SOCD 是土壤有机碳密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$), SOC_i 是第 i 层的土壤有机碳含量 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), BD_i 是第 i 层的土壤容重 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), D_i 是第 i 层的土层厚度

(m), m 是土层的数量.

总土壤有机碳储量 (TSOC) 由下列方程计算:

$$\text{TSOC} = \sum_i^m \text{ASOCD}_i \times S_i \times D_i \quad (2)$$

式中, ASOCD_i 是第 i 层的土壤有机碳密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$), S_i 是第 i 层的面积 (m^2), D_i 是第 i 层的土层厚度 (m), m 是土层的数量.

根系密度 (FRD) 由下列方程计算:

$$\text{FRD} = \sum_i^m 10 \times R_i \times D_i \quad (3)$$

式中, FRD_i 是第 i 层的根系密度 ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$), R_i 是第 i 层的根系生物量 ($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-3}$), D_i 是第 i 层的土层厚度 (m), m 是土层的数量.

1.3 统计分析

利用 Excel 软件进行数据的预处理, 利用 Sigmpilot 软件进行有关基础图件的制作, 并用 SAS 软件的 UNIVARIATE plot normal 程序包对数据进行正态分布检验. 利用 SAS 软件对不同地貌类型和不同植被措施条件下的 SOCD 和 FRD 进行了方差分析 (GLM), 当 F 检验显著时再进行 3 种地貌类型 (梁崩坡、沟坡、沟谷) 和 3 种植被措施 (农田措施、林地措施、草地措施) 均值间的 Duncan 检验, 对同一地貌类型条件下不同植被措施以及同一植被措施条件下不同地貌类型进行方差分析 (GLM), 当 F 检验显著时进行均值间的 Duncan 检验. 此外, 利用 SAS 软件的 PROC reg 程序包对分析获得的 SOCD (y) 和 FRD (x) 进行回归分析 ($y = a \ln x + b$), 拟合系数 a 值的大小可以间接反映根系-碳转化效率, 即每增加 1 单位的 FRD 其 SOCD 的增加量.

2 结果与分析

2.1 SOCD 和 FRD 在流域尺度上的影响因素

在砖窑沟小流域内, SOCD (0 ~ 100 cm) 变化于 2.79 ~ 4.95 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间(表 1), 其均值为 3.48 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 且数据接近正态分布 ($W = 0.91$). FRD (0 ~ 100 cm) 的变化范围为 387 ~ 1 303 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 其均值为 713 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 数据类似正态分布 ($W = 0.87$). 同时, 研究结果显示, 除了地貌类型和植被

措施交互作用对 FRD 的影响不显著以外 ($P > 0.05$), 植被措施, 地貌类型、土层厚度以及他们之间彼此的交互作用均显著地影响 SOCD 和 FRD 的空间变异性 ($P < 0.05$).

2.2 在流域尺度上植被措施对 SOCD 和 FRD 的影响
在同一地貌类型条件下, 植被措施显著地影响 SOCD 和 FRD 的剖面分布特征, 且二者均呈现出表层 (0 ~ 20 cm) 大于下层 (20 ~ 100 cm) 的趋势 (图 2).

表 1 地形、植被措施和土层厚度交互作用对 SOCD 和 FRD 的影响¹⁾

Table 1 Interaction of vegetation types, landforms, and soil depth with soil organic carbon density (SOCD) and fine root density (FRD) at the watershed scale

| 项目 | 自由度 | SOCD | | | | FRD | | | |
|-------|-----|-------|-------|-------|-----------|---------|---------|-------|-----------|
| | | 平方和 | 均方差 | F | $P_r > F$ | 平方和 | 均方差 | F | $P_r > F$ |
| C | 2 | 29.03 | 14.51 | 46.82 | <0.01 | 425 155 | 212 577 | 34.15 | <0.01 |
| D | 4 | 71.36 | 14.27 | 46.04 | <0.01 | 747 300 | 149 460 | 14.01 | <0.01 |
| L | 2 | 2.07 | 1.03 | 3.33 | <0.05 | 51 624 | 25 812 | 4.15 | <0.05 |
| C×L | 3 | 3.17 | 1.06 | 3.41 | <0.05 | 35 677 | 11 892 | 1.91 | >0.05 |
| C×D | 10 | 10.33 | 1.33 | 4.30 | <0.01 | 458 581 | 45 858 | 7.37 | <0.01 |
| D×L | 10 | 9.44 | 0.94 | 3.04 | <0.01 | 177 866 | 17 786 | 2.86 | <0.01 |
| C×D×L | 15 | 18.21 | 1.21 | 3.92 | <0.01 | 199 781 | 13 319 | 2.14 | <0.01 |

1) C 代表植被措施, D 代表土层厚度, L 代表地貌类型

在梁崩坡上, 表层 (0 ~ 20 cm) 的 SOCD 呈现出林地措施 (1.34 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) > 草地措施 (1.09 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) > 农田 (1.11 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) 的趋势 ($P < 0.05$), 而表层农田和草地措施的 SOCD 差异不明显 ($P > 0.05$), 在 20 ~ 100 cm 土层, SOCD 在农田、林地和草地措施之间的差异不显著 ($P > 0.05$); 在沟坡上, 不同土层间 (0 ~ 100 cm 土层, 20 cm 的间隔) 的 SOCD 均呈现出林地措施 (4.95 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) > 草地措施 (3.04 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) > 农田 (2.79 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) 的趋势; 在沟谷, 不同土层间 (0 ~ 100 cm 土层, 20 cm 的间隔) 的 SOCD 在农田和草地措施之间差异不显著, 但是仍呈现出农田大于草地措施的趋势 (4.12 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 3.19 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$).

在 0 ~ 100 cm 土层, 在梁崩坡上林地措施的 FRD (1 037 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) 分别是草地措施 (619 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) 和农田 (387 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) FRD 的 1.7 和 2.7 倍; 在沟坡上的 FRD 呈现出林地措施 (1 303 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) > 草地措施 (756 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) > 农田 (472 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) 的趋势; 在沟谷上的 FRD 也呈现出草地措施大于农田的趋势 (571 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 559 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$).

2.3 在流域尺度上地貌类型对 SOCD 和 FRD 的影响

在同一植被措施条件下, 地貌类型对 SOCD 和 FRD 的剖面分布特征影响显著 ($P < 0.05$), 且二者均呈现出表层 (0 ~ 20 cm) 大于下层 (20 ~ 100 cm)

的趋势 (图 3).

在农田措施中, 0 ~ 40 cm (20 cm 间隔) 土层, 沟谷的 SOCD (2.34 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) 分别是梁崩坡 (1.77 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) 和沟坡 (1.59 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) 的 1.3 和 1.5 倍, 然而沟坡和梁崩坡的 SOCD 差异不明显 ($P > 0.05$), 在 40 ~ 100 cm 土层, 地貌类型对 SOCD 的影响不显著 ($P > 0.05$); 在草地措施中, 表层 (0 ~ 20 cm) 的 SOCD 呈现出沟谷 (1.34 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) > 沟坡 (1.11 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) > 梁崩坡 (1.09 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) 的趋势 ($P < 0.05$), 然而梁崩坡和沟坡的 SOCD 没有差异 ($P > 0.05$), 同时在 20 ~ 100 cm 土层 (20 cm 间隔), 沟谷、梁崩坡和沟坡的 SOCD 差异不显著 ($P > 0.05$); 在林地措施中, 0 ~ 60 cm 土层 (20 cm 间隔), 沟坡的 SOCD 是梁崩坡的 1.30 倍 (3.59 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 2.76 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$), 在 60 ~ 100 cm 土层中, 二者的差异不明显 ($P > 0.05$).

在同一植被措施下, 地貌类型对 FRD 的影响显著 ($P < 0.05$). 在 0 ~ 100 cm 土层, 农田措施下的 FRD 呈现出沟谷 (559 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) > 沟坡 (472 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) > 梁崩坡 (387 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) 的趋势; 草地措施下沟坡 (756 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) 和梁崩坡 (619 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) 的 FRD 分别是沟谷 (571 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) 的 1.3 和 1.1 倍; 在林地措施中, 沟坡的 FRD 是梁崩坡的 1.3 倍 (1 303 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 1 037 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$).

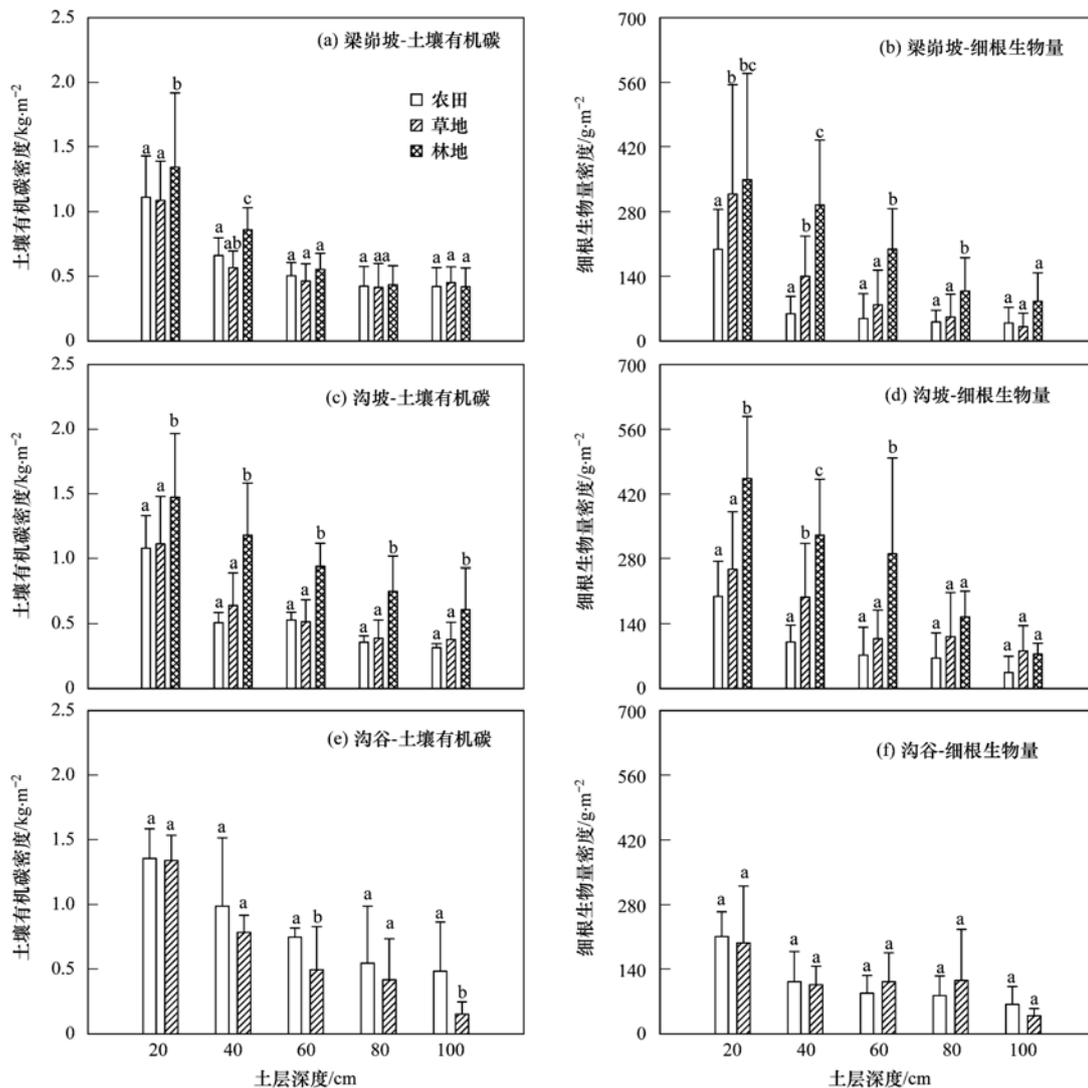


图2 植被措施对 SOCD 和 FRD 的影响

Fig. 2 Effect of vegetation type on SOCD and FRD

2.4 在流域尺度上 SOCD 和 FRD 在剖面上的相对分布比例

在小流域尺度上, SOCD 和 FRD 在不同土层厚度间 (0 ~ 100 cm, 20 cm 间隔) 的相对比例差异显著 ($P < 0.05$), 且二者均呈现出上层 (0 ~ 40 cm) 远远大于下层 (40 ~ 100 cm) 的趋势 (图 4)。

在农田措施下, 梁崩坡 0 ~ 40 cm 土层的 SOCD 和 FRD 分别占整个剖面 (0 ~ 100 cm) 的 57% 和 67%, 沟坡分别占 57% 和 63%, 沟谷依次占 57% 和 58%; 在草地措施下, 梁崩坡 0 ~ 40 cm 土层的 SOCD 和 FRD 分别占整个剖面 (0 ~ 100 cm) 的 55% 和 74%, 沟坡分别占 58% 和 60%, 沟谷依次占 67% 和 53%; 在林地措施下, 梁崩坡上 0 ~ 40 cm 土层的 SOCD 和 FRD 分别占整个剖面 (0 ~ 100 cm) 的 61% 和 62%, 沟谷依次占 54% 和 60%。

在梁崩坡上, 农田措施下 0 ~ 40 cm 土层的 SOCD 和 FRD 分别占整个剖面 (0 ~ 100 cm) 的

57% 和 67%, 草地措施下分别为 55% 和 74%, 林地措施下依次为 61% 和 62%; 在沟坡上, 农田措施下 0 ~ 40 cm 土层的 SOCD 和 FRD 分别占整个剖面 (0 ~ 100 cm) 的 57% 和 63%, 草地措施下分别为 58% 和 60%, 林地措施下依次为 54% 和 60%; 在沟谷上, 农田措施下 0 ~ 40 cm 土层的 SOCD 和 FRD 分别占整个剖面 (0 ~ 100 cm) 的 57% 和 58%, 草地措施下分别为 67% 和 53%。

2.5 在流域尺度上 FRD 对 SOCD 的影响

在流域尺度上, FRD 是影响 SOCD 的重要因素 (表 2), 本研究结果显示 SOCD (y) 随着 FRD (x) 增加呈现出对数增加的趋势 ($y = a \ln x + b$), 且拟合系数 a 可以指示根系-碳转化效率, 即每增加 1 单位的 FRD 其 SOCD 的增加量。

在同一植被措施下, 不同地貌类型间的根系-碳转化效率差异显著 ($P < 0.05$)。在农田措施下, 其根系-碳转化效率呈现出沟谷 (0.87) > 沟坡

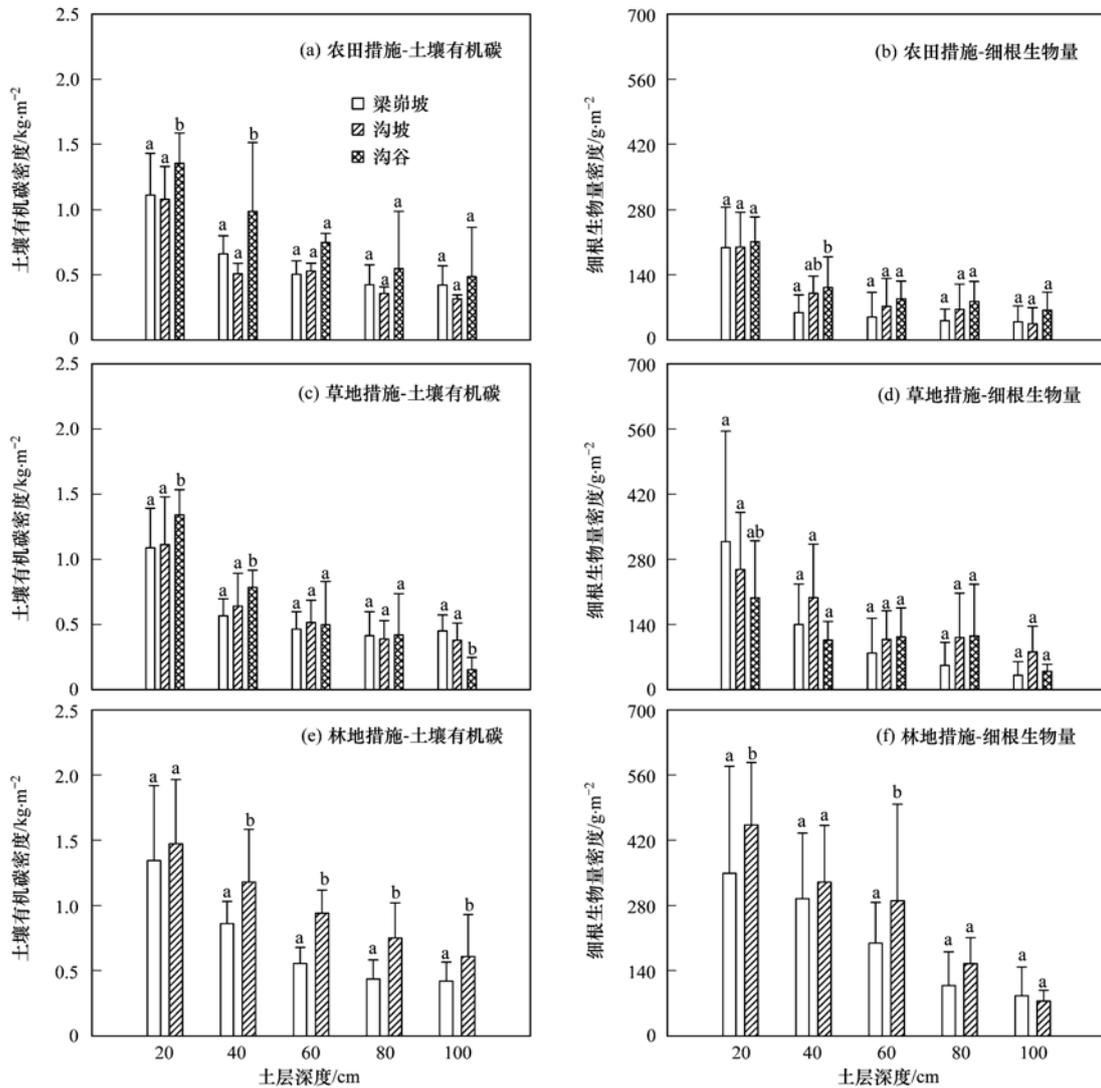


图3 地貌类型对SOCD和FRD的影响

Fig. 3 Effect of landforms on SOCD and FRD

(0.43) = 梁崩坡 (0.43) 的趋势; 在草地措施下, 其根系-碳转化效率呈现出沟坡 (0.57) > 沟谷 (0.45) > 梁崩坡 (0.27) 的趋势; 在林地措施下, 其根系-碳转化效率呈现出梁崩坡 (0.56) > 沟坡 (0.44) 的趋势。

表2 不同植被类型和地形条件下的SOCD与FRD的对数回归分析

Table 2 Logarithmic regression analysis of SOCD and FRD for different landforms and vegetation types

| 地貌 | 植被措施 | 方程式 | R ² | P _r > F |
|-----|------|----------------------|----------------|--------------------|
| 梁崩坡 | 农田 | y = 0.43 ln x - 1.15 | 0.99 | <0.01 |
| | 草地 | y = 0.27 ln x - 0.62 | 0.76 | <0.05 |
| | 林地 | y = 0.56 ln x - 2.17 | 0.76 | <0.05 |
| 沟坡 | 农田 | y = 0.43 ln x - 1.34 | 0.82 | <0.05 |
| | 草地 | y = 0.57 ln x - 2.20 | 0.81 | <0.05 |
| | 林地 | y = 0.44 ln x - 1.39 | 0.85 | <0.05 |
| 沟谷 | 农田 | y = 0.87 ln x - 2.73 | 0.95 | <0.01 |
| | 草地 | y = 0.45 ln x - 2.35 | 0.70 | <0.05 |

在同一地貌类型下, 根系-碳转化效率因不同植被措施差异显著 (P < 0.05). 在梁崩坡上, 其根系-碳转化效率呈现出林地 (0.56) > 农田 (0.43) > 草地 (0.27) 的趋势, 在沟坡上, 其根系-碳转化效率呈现出草地 (0.57) > 林地 (0.44) > 农田 (0.43) 的趋势, 在沟谷上, 其根系-碳转化效率呈现农田 (0.87) > 草地 (0.45) 的趋势。

3 讨论

在砖窑沟小流域的剖面中 (0 ~ 100 cm), 其TSOC为 3.48 kg·m⁻², 这显著低于中国热带和亚热带东部的平均TSOC (21.4 kg·m⁻²)^[30]、中国西南山区的平均TSOC (14.43 kg·m⁻²)^[31]、整个中国的平均TSOC (9.6 kg·m⁻²)^[32]、甚至也远远低于整个黄土高原地区的平均TSOC (7.7 kg·m⁻²)^[33]. 砖窑沟小流域内其较低的TSOC可能归咎于严重的水土流失以及较少的降雨^[1, 3, 4]. 但是, 砖窑沟小流域

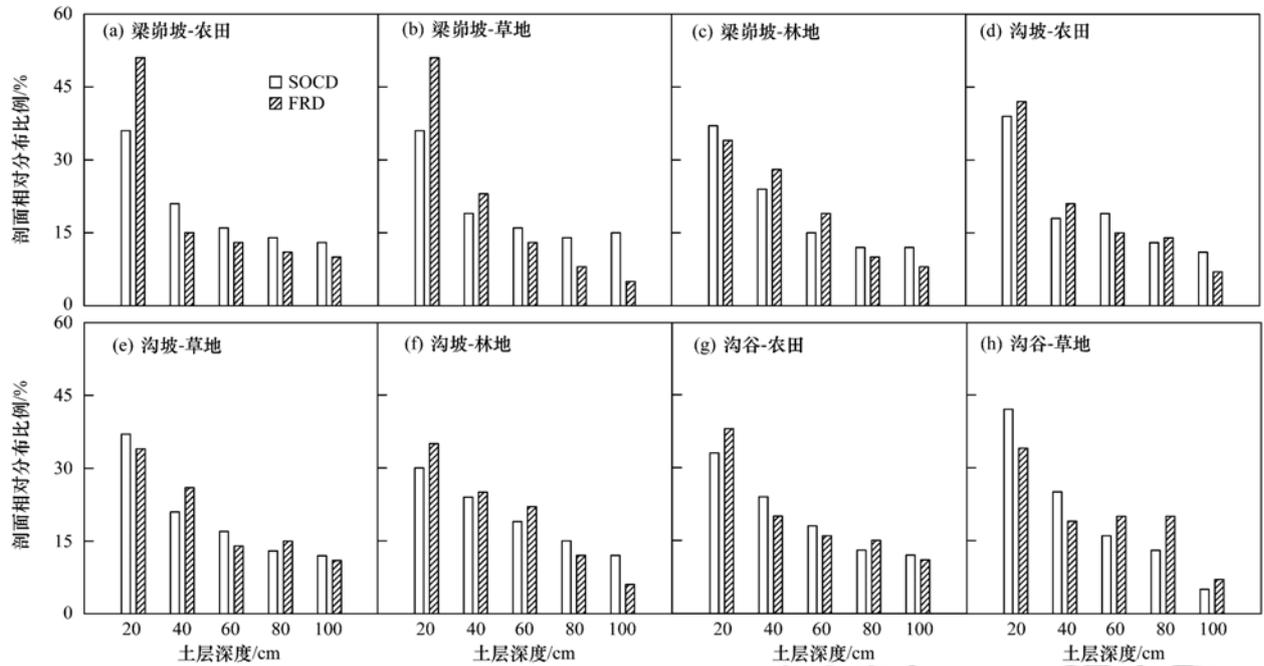


图4 SOCD和FRD在剖面内的相对分布比例

Fig. 4 Distribution ratio of SOCD and FRD in the soil profile(0-100 cm)

的TSOC却远远大于纸坊沟小流域的TSOC ($3.48 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $2.63 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$)^[34],这可能取决于地形条件,因为在纸坊沟小流域内并没有考虑地形因素对SOC分布的影响,而已有的研究结果显示地形显著地影响SOC的空间分布^[33, 35].在本研究中,植被措施和地貌类型对SOCD的影响显著($P < 0.05$),同一地貌类型条件下的SOCD呈现出林地措施>草地措施>农田措施的趋势,其主要通过影响到土壤中有有机物质(地上凋落物和地下根系)的数量和质量影响SOCD的时空变异性^[19, 20].同一植被措施下的SOCD基本呈现出沟谷>沟坡>梁崩坡的趋势,其主要通过侵蚀影响SOC的迁移与掩埋^[2, 7, 36, 37]和控制土壤水分平衡,从而间接影响SOCD的时空变异性^[8, 38].

根系尤其是细根($d \leq 2 \text{ mm}$),对土壤有机碳库的贡献高达25%~80%^[39],且根系在剖面内的分布状态影响着土壤剖面中碳的位置和数量^[40].虽然根系凋落物是影响土壤有机碳储量的重要因素,但是大多数研究仅在相似或者单一地形条件下探讨不同植被条件下根系生物量对SOC的影响^[3, 25, 41],但是同一植被措施下不同地形条件下根系生物量对SOC影响的研究很匮乏.本研究结果显示,SOCD和FRD具有较强的相关性($P < 0.05$,图4和表2),且均呈现出上层(0~40 cm)大于下层(40~100 cm)的趋势(图4).在梁崩坡和沟坡中,有57%的SOCD分布在上层,然而却有超过64%的FRD分布在上层,即植被的根系分布比SOC的分

布浅,这与已有的研究结果相类似^[40, 42].但是,在沟谷中,有超过62%的SOCD分布在上层,然而仅有56%的FRD分布在上层,这可能因为遭受侵蚀且富含有机碳的表土在沟谷进行沉积所造成的^[11, 36].进一步的研究结果显示,SOCD随着FRD的增加呈现出对数增加的趋势(表2),而在中国不同景观类型下的研究发现SOCD随着FRD的增加呈现出线性增加的趋势^[41].除了地下根系凋落物以外,土壤温度、土壤水分、地上凋落物、地形以及土壤微生物的群落结构等因素均影响SOCD的空间分布^[7, 23, 43, 44],因此对数关系模型更能客观公正地反映FRD对SOCD的贡献,且拟合系数 a 值的大小,能间接地反映根系-碳转化效率,即每增加单位FRD时SOCD的增加量.

同一地貌类型条件下的根系-碳转化效率的差异与有机物质的数量和性质关系密切,这与已有的研究结果基本吻合^[3, 25, 41].但是,同一植被措施下,不同地形条件下根系-碳转化效率的差异可能是地形、人类活动、根系凋落物归还量以及土壤侵蚀综合作用的结果^[4, 7, 50, 51].在农田措施下,其根系-碳转化效率呈现出沟谷(0.87)>沟坡(0.43)=梁崩坡(0.43),其可能是土壤侵蚀和人类活动综合作用的结果,一方面随侵蚀迁移和搬运的泥沙和径流分别在沟谷和沟坡进行沉积,造成该部位的有机碳的富集^[4, 45],另一方面由于沟谷地形平坦,人类活动(耕作、施肥、灌溉)的加剧间接导致农田措施下的FRD呈现出沟谷($559 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)>沟坡

($472 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) > 梁峁坡 ($387 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) 的趋势, 进而影响根系-碳转化效率; 在草地措施下, 其根系-碳转化效率呈现出沟坡 (0.57) > 沟谷 (0.45) > 梁峁坡 (0.27) 的趋势, 其可能与植被措施类型有关, 沟坡由于其较大的坡度不利于人类活动, 导致沟坡上的草地以自然恢复的草地为主 (本土植被), 而本土植被对环境具有较强的适应性以及抵抗外界干扰的能力^[46, 47], 可能不同程度地增加了其根系-碳转化效率; 在林地措施下, 其根系-碳转化效率呈现出梁峁坡 (0.56) > 沟坡 (0.44) 的趋势, 这可能与地形限制人类活动和人类对植被措施的选择等因素有关, 而植被措施和人类活动反过来通过影响土壤的物理、化学和生物属性而间接影响 SOC 的空间分布和储量^[33], 进而影响根系-碳转化效率. 因此, 从增加根系-碳转化效率的角度而言, 根据对数关系模型结果的进一步分析得到: 梁峁坡是恢复林地措施的最佳地形部位, 沟坡是恢复草地措施的最佳地形部位, 而沟谷是农作物生长的最佳地形部位 (平坦的地形条件和较高的水分以及 SOC 储量).

4 结论

在地形条件复杂的地区, 量化根系对 SOC 的贡献对科学评价水土流失区的土壤碳储量具有重要意义. 地形、植被措施和土层厚度及其交互作用显著地影响 SOCD 和 FRD 在流域内的空间分布. 在流域尺度上, FRD 对 SOCD 的影响显著 ($P < 0.05$), 且 SOCD (y) 随着 FRD (x) 增加呈现出对数增加的趋势 ($y = a \ln x + b$). 在农田措施下, 其根系-碳转化效率呈现出沟谷 > 沟坡 = 梁峁坡的趋势; 在草地措施下, 其根系-碳转化效率呈现出沟坡 > 沟谷 > 梁峁坡的趋势; 在林地措施下, 其根系-碳转化效率呈现出梁峁坡 > 沟坡的趋势. 因此, 在砖窑沟小流域内, 从增加根系-碳的转化效率角度而言, 沟谷适合进行农业生产, 沟坡适宜进行退耕还草, 而梁峁坡适合进行退耕还林.

参考文献:

- [1] 唐克丽. 黄土高原水蚀风蚀交错区治理的重要性与紧迫性[J]. 中国水土保持, 2000, (11): 11-12, 17.
Tang K L. Importance and urgency of harnessing the interlocked area with both water and wind erosion in the Loess Plateau[J]. Soil and Water Conservation in China, 2000, (11): 11-12, 17.
- [2] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget [J]. Environment International, 2003, **29**(4): 437-450.
- [3] Wang Z Q, Guo S L, Sun Q Q, *et al.* Soil organic carbon sequestration potential of artificial and natural vegetation in the hilly regions of Loess Plateau[J]. Ecological Engineering, 2015, **82**: 547-554.
- [4] 张彦军, 郭胜利, 南雅芳, 等. 水土流失治理措施对小流域土壤有机碳和全氮的影响[J]. 生态学报, 2012, **32**(18): 5777-5785.
- [5] Zhang Y J, Guo S L, Nan Y F, *et al.* Effects of soil erosion control measures on soil organic carbon and total nitrogen in a small watershed [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(18): 5777-5785.
- [6] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change[J]. Geoderma, 2004, **123**(1-2): 1-22.
- [7] Pan G X, Smith P, Pan W N. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, **129**(1-3): 344-348.
- [8] Dialynas Y G, Bastola S, Bras R L, *et al.* Topographic variability and the influence of soil erosion on the carbon cycle [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2016, **30**(5): 644-660.
- [9] Griffiths R P, Madritch M D, Swanson A K. The effects of topography on forest soil characteristics in the Oregon Cascade Mountains (USA): implications for the effects of climate change on soil properties [J]. Forest Ecology and Management, 2009, **257**(1): 1-7.
- [10] McNab W H. A topographic index to quantify the effect of mesoscale landform on site productivity [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1993, **23**(6): 1100-1107.
- [11] Kobayashi Y, Koike F. Separating the effects of land-use history and topography on the distribution of woody plant populations in a traditional rural landscape in Japan [J]. Landscape and Urban Planning, 2010, **95**(1-2): 34-45.
- [12] Wang Y F, Fu B J, Liu Y H, *et al.* Effects of vegetation restoration on soil organic carbon sequestration at multiple scales in semi-arid Loess Plateau, China [J]. CATENA, 2011, **85**(1): 58-66.
- [13] Wang Z, Liu G B, Xu M X, *et al.* Temporal and spatial variations in soil organic carbon sequestration following revegetation in the hilly Loess Plateau, China [J]. CATENA, 2012, **99**: 26-33.
- [14] Gong J, Chen L, Fu B, *et al.* Effect of land use on soil nutrients in the loess hilly area of the Loess Plateau, China [J]. Land Degradation & Development, 2006, **17**(5): 453-465.
- [15] Chaplot V, Bouahom B, Valentin C. Soil organic carbon stocks in Laos: spatial variations and controlling factors [J]. Global Change Biology, 2010, **16**(4): 1380-1393.
- [16] Fang X, Xue Z J, Li B C, *et al.* Soil organic carbon distribution in relation to land use and its storage in a small watershed of the Loess Plateau, China [J]. CATENA, 2012, **88**(1): 6-13.
- [17] Oueslati I, Allamano P, Bonifacio E, *et al.* Vegetation and topographic control on spatial variability of soil organic carbon [J]. Pedosphere, 2013, **23**(1): 48-58.
- [18] Deng L, Liu G B, Shanguan Z P. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: a synthesis [J]. Global Change Biology, 2014, **20**(11): 3544-3556.
- [19] Song X Z, Peng C H, Zhou G M, *et al.* Chinese Grain for Green Program led to highly increased soil organic carbon levels: a meta-analysis [J]. Scientific Reports, 2014, **4**: 4460.
- [20] Kätterer T, Bolinder M A, Andrén O, *et al.* Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, **141**(1-2): 184-192.
- [21] Rasse D P, Rumpel C, Dignac M F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation [J]. Plant and Soil, 2005, **269**(1-2): 341-356.
- [22] De Graaff M A, Schadt C W, Rula K, *et al.* Elevated CO₂ and

- plant species diversity interact to slow root decomposition [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(11): 2347-2354.
- [22] Yuan Z Y, Chen H Y H. Fine root biomass, production, turnover rates, and nutrient contents in boreal forest ecosystems in relation to species, climate, fertility, and stand age: literature review and meta-analyses [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2010, **29**(4): 204-221.
- [23] Hu Y L, Zeng D H, Ma X Q, *et al.* Root rather than leaf litter input drives soil carbon sequestration after afforestation on a marginal cropland [J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, **362**: 38-45.
- [24] Wang Y, Ji H F, Wang R, *et al.* Impact of root diversity upon coupling between soil C and N accumulation and bacterial community dynamics and activity: result of a 30 year rotation experiment [J]. *Geoderma*, 2017, **292**: 87-95.
- [25] 王彦丽. 不同植被恢复措施下剖面根系与 SOC 的分布特征 [J]. *水土保持研究*, 2013, **20**(6): 19-23, 43.
Wang Y L. Profile distribution characteristics of root biomass and soil organic carbon under different vegetation restoration measures [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, **20**(6): 19-23, 43.
- [26] 韩畅, 宋敏, 杜虎, 等. 广西不同林龄杉木、马尾松人工林根系生物量及碳储量特征 [J]. *生态学报*, 2017, **37**(7): 2282-2289.
Han C, Song M, Du H, *et al.* Biomass and carbon storage in roots of *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* plantations at different stand ages in Guangxi [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(7): 2282-2289.
- [27] 匡文浓, 钱建强, 马群, 等. 五种荒漠灌木群落土壤有机碳垂直分布及其与根系分布的关系 [J]. *生态学杂志*, 2016, **35**(2): 275-281.
Kuang W N, Qian J Q, Ma Q, *et al.* Vertical distribution of soil organic carbon and its relation to root distribution in five desert shrub communities [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(2): 275-281.
- [28] 罗永清, 赵学勇, 王涛, 等. 沙地植物根系特征及其与土壤有机碳和总氮的关系 [J]. *草业学报*, 2017, **26**(8): 200-206.
Luo Y Q, Zhao X Y, Wang T, *et al.* Characteristics of the plant-root system and its relationships with soil organic carbon and total nitrogen in a degraded sandy grassland [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, **26**(8): 200-206.
- [29] 中国科学院水利部西北水土保持研究所. 黄土高原综合治理试验示范区: 专题地图集 [M]. 北京: 测绘出版社, 1991.
- [30] Li Z, Jiang X, Pan X Z, *et al.* Organic carbon storage in soils of tropical and subtropical China [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, **129**(1-4): 45-60.
- [31] Zhang Y, Zhao Y C, Shi X Z, *et al.* Variation of soil organic carbon estimates in mountain regions: a case study from Southwest China [J]. *Geoderma*, 2008, **146**(3-4): 449-456.
- [32] 于东升, 史学正, 孙维侠, 等. 基于 1:100 万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究 [J]. *应用生态学报*, 2005, **16**(12): 2279-2283.
Yu D S, Shi X Z, Sun W X, *et al.* Estimation of China soil organic carbon storage and density based on 1:1 000 000 soil database [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, **16**(12): 2279-2283.
- [33] Liu Z P, Shao M A, Wang Y Q. Effect of environmental factors on regional soil organic carbon stocks across the Loess Plateau region, China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, **142**(3-4): 184-194.
- [34] Li M M, Zhang X C, Pang G W, *et al.* The estimation of soil organic carbon distribution and storage in a small catchment area of the Loess Plateau [J]. *CATENA*, 2013, **101**: 11-16.
- [35] Zhu H H, Wu J S, Guo S L, *et al.* Land use and topographic position control soil organic C and N accumulation in eroded hilly watershed of the Loess Plateau [J]. *CATENA*, 2014, **120**: 64-72.
- [36] 杜兰兰, 王志齐, 王蕊, 等. 模拟条件下侵蚀-沉积部位土壤 CO₂ 通量变化及其影响因素 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3616-3624.
Du L L, Wang Z Q, Wang R, *et al.* Variation of soil CO₂ flux and environmental factors across erosion-deposition sites under simulation experiment [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3616-3624.
- [37] 李如剑, 张彦军, 赵慢, 等. 坡度和降雨影响土壤 CO₂ 通量和有机碳流失的模拟研究 [J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(4): 1336-1342.
Li R J, Zhang Y J, Zhao M, *et al.* Simulation on the effects of slope and rainfall on soil CO₂ flux and SOC loss [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(4): 1336-1342.
- [38] Zhao X, Wu P, Gao X, *et al.* Soil quality indicators in relation to land use and topography in a small catchment on the Loess Plateau of China [J]. *Land Degradation & Development*, 2015, **26**(1): 54-61.
- [39] Usman S, Singh S P, Rawat Y S, *et al.* Fine root decomposition and nitrogen mineralisation patterns in *Quercus leucotrichophora* and *Pinus roxburghii* forests in central Himalaya [J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, **131**(1-3): 191-199.
- [40] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. *Ecological Applications*, 2000, **10**(2): 423-436.
- [41] Wang Y G, Li Y, Ye X H, *et al.* Profile storage of organic/inorganic carbon in soil: from forest to desert [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(8): 1925-1931.
- [42] Olupot G, Daniel H, Lockwood P, *et al.* Root contributions to long-term storage of soil organic carbon: theories, mechanisms and gaps [A]. In: *Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World* [C]. Brisbane, Australia: DVD, 2010. 112-115.
- [43] Dai X Q, Wang H M, Fu X L. Soil microbial community composition and its role in carbon mineralization in long-term fertilization paddy soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **580**: 556-563.
- [44] 邹俊亮, 郭胜利, 李泽, 等. 小流域土壤有机碳的分布和积累及土壤水分的影响 [J]. *自然资源学报*, 2012, **27**(3): 430-439.
Zou J L, Guo S L, Li Z, *et al.* Soil organic carbon accumulation and distribution in a small watershed and the effects of soil water [J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, **27**(3): 430-439.
- [45] Khan F, Hayat Z, Ahmad W, *et al.* Effect of slope position on physico-chemical properties of eroded soil [J]. *Soil & Environment*, 2013, **32**(1): 22-28.
- [46] Hyvönen T. Impact of temperature and germination time on the success of a C₄ weed in a C₃ crop: *Amaranthus retroflexus* and spring barley [J]. *Agricultural and Food Science*, 2008, **20**(2): 183-190.
- [47] 南志标, 王锁民, 王彦荣, 等. 我国北方草地 6 种乡土植物抗逆机理与应用 [J]. *科学通报*, 2016, **61**(2): 239-249.
Nan Z B, Wang S M, Wang Y R, *et al.* Stress tolerance mechanisms of 6 native plant species growing in China's northern grassland and their utilization [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, **61**(2): 239-249.

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, <i>et al.</i> | (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) |