

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.4
第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态 于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚(1521)

西安市 PM_{2.5} 中碳质气溶胶污染特征 牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣(1529)

太原市冬季 PM_{2.5} 化学组分特征与来源解析 刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰(1537)

郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析 闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚(1545)

珠海市郊区大气 PM_{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价 杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余(1553)

一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响 金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉(1562)

基于 SOA 转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟 高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰(1575)

京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析 孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊(1585)

2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算 赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀(1594)

基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性 齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰(1604)

四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势 周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲(1613)

餐饮源挥发性有机物组成及排放特征 高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣(1627)

广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程 PAN 和 O₃ 分析 邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰(1634)

北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化 胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超(1645)

南昌市扬尘 PM_{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评价 于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任(1656)

道路扬尘排放因子建立方法与应用 樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰(1664)

现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析 马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌(1670)

雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性 杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新(1680)

霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估 赵秀娟, 李梓铭, 徐敬(1688)

支持向量机回归在臭氧预报中的应用 苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫(1697)

基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的 PHEV 二氧化碳排放分析 郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高(1705)

岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应:以重庆龙凤槽谷地下河系统为例 段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠(1715)

胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险 刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民(1726)

湛江湾沉积物中六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)有机氯农药的分布特征与风险评估 彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中(1734)

生态净化系统中 DOM 光学特性及影响因素分析:以盐龙湖春季为例 马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳(1742)

溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系:基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC) 李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪(1751)

汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析 谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安(1760)

基于 RZWQM 模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律 郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生(1770)

澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征 程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘富雷, 马骏(1779)

福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征 何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳(1788)

尾水受纳河流中 PhACs 在传统水相中的分布及环境风险 王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华(1797)

绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价 李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 陈佳宇, 邓金玲(1803)

超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味 孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓(1811)

金属有机框架 MIL-53(Fe)可见光催化还原水中 U(VI) 闫增元, 刁海玲, 袁立永(1819)

覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异 龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞(1826)

气氧化铜改性介孔稻壳生物炭除磷性能 许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政(1834)

改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果 陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 刘彦廷, 王洪涛, 陆文静, 金军, 刘颖(1842)

纳米磁性磷酸二氢钙对 Cd 的吸附、回收与再生 李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕(1849)

赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制 黄绍福, 叶捷, 周顺桂(1857)

微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性 马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟(1865)

生活污水预沉淀-SNAD 颗粒污泥工艺小试 李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰(1871)

生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉刚(1878)

硫磺/硫酸铁自养反硝化系统脱氮性能 周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启(1885)

异养硝化细菌 *Pseudomonas putida* YH 的脱氮特性及降解动力学 汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 郇丹(1892)

污泥龄及 pH 值对反硝化除磷工艺效能的影响 韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良(1900)

盐度条件下 ANAMMOX-EGSB 反应器颗粒污泥微生物群落 王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳(1906)

内源磷 PHA 的贮存对混合菌群耐低温特性的影响 杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand(1914)

中国市政污泥中磷的含量与形态分布 王超, 刘清伟, 职音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔(1922)

广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价 王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪(1931)

长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮(N₂O)浓度特征及影响因素 田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波(1939)

内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤 CH₄ 吸收规律 杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋(1950)

水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应 王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹(1957)

土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响 徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣(1965)

黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素 覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥(1973)

农用地土壤抗生素组成特征与积累规律 孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青(1981)

生物发酵制药 VOCs 与臭味治理技术研究与发展 王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明哈, 杨敏(1990)

《环境科学》征订启事(1612) 《环境科学》征稿简则(1787) 信息(1663, 1796, 1833)

黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素

覃乾¹, 朱世硕¹, 夏彬², 赵允格², 许明祥^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100)

摘要:以黄土丘陵区具有典型侵蚀和沉积部位的5个有机碳水平的侵蚀坡面为对象,通过对雨季土壤微生物量碳的研究,辨析了侵蚀-沉积条件下坡面土壤微生物量碳时空变化的影响因素及影响程度。结果表明:①土壤侵蚀导致坡面侵蚀-沉积区土壤温湿度、有机碳含量出现明显的时空分异,分异程度与土壤有机碳水平有关;②雨季末土壤微生物量碳相比雨季前显著增加,增幅可达91.08%~286.83%。坡面沉积区土壤微生物量碳含量大于侵蚀区,随着土壤有机碳水平升高,侵蚀-沉积区土壤微生物量碳含量差增大,空间分异加剧;③坡面侵蚀-沉积区土壤微生物量碳对土壤有机碳含量、温度、湿度等因素的敏感程度不同,雨季前土壤微生物量碳对土壤湿度变化最敏感,而雨季末沉积区土壤微生物量碳对土壤温度变化最敏感,在侵蚀区对土壤有机碳变化更为敏感。土壤侵蚀和季节变化是导致坡面土壤微生物量碳时空分布差异的重要原因,土壤微生物量碳对影响因素的敏感性差异主要是不同时空条件下限制性要素的转换所致。

关键词:有机碳水平;侵蚀-沉积区;土壤微生物量碳(SMBC);土壤温湿度;敏感性

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1973-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201810035

Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region

QIN Qian¹, ZHU Shi-shuo¹, XIA Bin², ZHAO Yun-ge², XU Ming-xiang^{1,2*}

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling 712100, China)

Abstract: Soil erosion affects the soil environment and exerts an important impact on the soil organic carbon distribution, deposition, conversion, and carbon dioxide emission. The soil microbial biomass carbon can respond sensitively to these changes. The soil microbial biomass carbon under erosion and sedimentation conditions was studied for the erosional slopes at five organic carbon levels at typical erosion and deposition sites in the hilly loess plateau region. Through the study of the soil microbial biomass carbon in the rainy season, the influencing factors and their degree of influence on the soil microbial biomass carbon of the slope soil under erosion-sedimentation conditions were analyzed. The results showed that ① Soil erosion lead to significant spatial and temporal differentiation in the soil temperature and humidity and the soil organic carbon in the erosion and sedimentary area on the slope, and the degree of differentiation was related to the soil organic carbon level. ② The soil microbial biomass carbon increased significantly at the end of the rainy season, with an increase of 91.08%-286.83%. The soil microbial biomass carbon content in the slope sedimentary area was higher than that of the erosion area. With increasing soil organic carbon level, the difference between the soil microbial biomass carbon content of the erosion and sedimentary area increased, and its spatial differentiation increased. ③ The soil microbial biomass carbon in the erosion and deposition areas responded differently to the soil organic carbon content, temperature, soil moisture, and other factors. Before the rainy season, the soil microbial biomass carbon was most sensitive to soil moisture changes. However, at the end of the rainy season, the soil microbial biomass carbon was most sensitive to soil temperature changes in the deposition zone. The soil microbial biomass carbon was most sensitive to the soil organic carbon in the erosion zone. Soil erosion and seasonal variation were important reasons for the spatial and temporal distribution of the soil microbial biomass carbon on the eroding slopes. The differences in the sensitivity of the soil microbial biomass carbon to the different influencing factors was mainly due to the restrictive conversion of the different factors.

Key words: organic carbon levels; erosion/depositing area; soil microbial biomass carbon(SMBC); soil temperature and humidity; sensitivity

土壤侵蚀可改变土壤有机碳的空间分布,并可能导致陆地生态系统碳源汇格局的改变^[1,2]。Van Oost等^[3]的研究表明侵蚀导致侵蚀区土壤有机碳减少,沉积区有机碳因埋藏作用使碳的分解受到抑制而增加,在全球农田土壤形成 $0.12 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$ 的碳

汇;而Lal^[2]则认为侵蚀导致有机碳流失,但沉积

收稿日期: 2018-10-09; 修订日期: 2018-11-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771318); 国家重点研发计划项目(2017YFC0506503)

作者简介: 覃乾(1993~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤侵蚀的环境效应, E-mail: qq_hncx@nwfufu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn

区有机碳由于各种因素不能稳定存在,最终以 CO_2 的形式释放,在全球尺度每年产生 $0.8 \sim 1.2 \text{ Pg}$ 的碳源.此外,侵蚀导致侵蚀区及沉积区土壤环境的差异会进一步引起土壤碳排放的改变,增加了侵蚀对陆地系统碳固存影响的不确定性^[4,5].明确土壤有机碳矿化及 CO_2 排放对侵蚀坡面土壤有机碳再分布及土壤水热等环境要素的时空相应特征,将有助于科学评价和预测侵蚀影响下坡面土壤 CO_2 的源汇效应.

土壤微生物量碳(soil microbial biomass carbon, SMBC)是土壤有机碳中最为活跃和最易变化的部分^[6,7],其周转时间较土壤有机碳更快^[8],对环境变化响应更敏感.侵蚀影响土壤环境,导致土壤有机碳分布、沉积、转化及 CO_2 排放的巨大变化,土壤微生物量碳可敏感地反映这些变化.因此研究侵蚀环境下土壤微生物量碳的变化特征能更好地理解侵蚀对坡面土壤有机碳矿化及 CO_2 排放的影响.揭示侵蚀条件下土壤微生物对碳循环的影响,其关键在于明确土壤微生物活性对侵蚀-沉积环境的响应.

目前,对土壤微生物量碳季节变化研究较多^[9-11],空间分布相对较少^[12],而土壤微生物活动是在一定时空范围进行的,有必要从时间动态变化以及空间分布共同着手了解土壤微生物的活动特征^[13].黄土丘陵区是我国乃至全球土壤侵蚀最严重的区域之一,本研究将探索黄土丘陵区不同有机碳水平下典型侵蚀坡面土壤微生物量碳的时空变化特征,明确侵蚀对土壤微生物量碳的调控作用,通过揭示侵蚀条件下土壤微生物量碳对环境变化的敏感性,以为科学评价土壤侵蚀和碳循环提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究于中国科学院安塞水土保持综合试验站($108^{\circ}11' \sim 109^{\circ}26' \text{E}$, $36^{\circ}30' \sim 37^{\circ}19' \text{N}$)山地实验场进行.该站地处黄土高原中部,属于典型的丘陵沟壑区地带,平均海拔1371.9 m.气候类型属于中温带半干旱季风气候,全年平均气温 8.8°C (极端最高温 36.8°C ,极端最低温 -23.6°C),昼夜温差大,多年平均降水量 505 mm,主要集中在 7~9 月;年日照时数为 2395.6 h,日照百分率达 54%,全年无霜期 157 d.研究区土壤以黄绵土为主,抗侵蚀性差,水土流失严重,以细沟、浅沟侵蚀为主,地带性黑垆土已侵蚀殆尽.

1.2 研究方法

1.2.1 实验小区设置

为探明侵蚀对土壤微生物量碳时空动态的影

响,本研究在能够完整呈现土壤侵蚀-沉积过程的典型的“S”型坡面上进行.实验小区在 2011 年修建,具有明显的侵蚀、沉积部位,面积 $4 \text{ m} \times 17 \text{ m}$,坡向朝东,坡中、坡下的平均坡度分别为 19° 和 5° ,分别定义为侵蚀区和沉积区(图 1).通过施用不同用量的有机肥,设置 5 个土壤有机碳水平,每水平 4 次重复.在每个小区的侵蚀区和沉积区分别布设侵蚀针,每个部位布设 6 个,观测土壤侵蚀/沉积状况.为消除植物根系对土壤微生物量碳的影响,实验过程中不定期除草,保持小区为裸地状态.

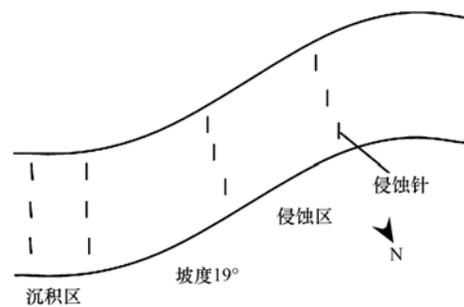


图 1 实验小区示意

Fig. 1 Sample plot

1.2.2 样品采集

为明确侵蚀坡面雨季前、雨季末土壤微生物量碳的变化及其影响因素,分别于 2017 年 6 月和 9 月采集土壤样品.样品采集用直径 5 cm 的土钻在每个小区的侵蚀区和沉积区分别采集 0~10 cm 土壤,每处理共 4 个重复样品.样品采集后置于装有冰袋的保鲜袋中,运回实验室后一部分于 4°C 下低温保存,其余自然风干过 0.25 mm 筛待用.

1.2.3 测定指标与方法

土壤有机碳:重铬酸钾外加热法^[14];土壤温度和湿度:Em50 自动监测设备(DECAGON 公司)测定;土壤微生物量碳:氯仿熏蒸- K_2SO_4 浸提法^[15]: $\text{SMBC} = 2.64\text{FC}$, 2.64 为换算系数,FC 为熏蒸与未熏蒸浸提液的有机碳的差值.

1.2.4 数据处理

分别用侵蚀区与沉积区之间土壤微生物量碳、土壤有机碳、土壤温度和土壤湿度的差值,即 ΔSMBC 、 ΔSOC 、 ΔT 和 ΔW 表征同期侵蚀-沉积作用对土壤微生物量碳和土壤温、湿度环境要素的影响.土壤侵蚀强度用侵蚀、沉积厚度表示.采用 SPSS 19.0 对不同有机碳水平间的坡面侵蚀-沉积区土壤微生物量碳及温湿度进行单因素方差分析和多重比较(LSD 法)分析.采用一般线性模型(GLM)中的方差成分估计模块来计算坡面土壤有机碳水平、土壤有机碳、土壤温湿度和侵蚀/沉积部位在

微生物量碳变异(方差)中所占的百分比. 将定性的坡面有机碳水平和侵蚀部位用不同的编码赋值方法使其量化: 有机碳水平 C1 ~ C5 分别赋值 1 ~ 5, 侵蚀区、沉积区分别赋值 1 和 2. 用 SPSS 19.0 (IBM Corp.) 和 Origin 2015 (Origin Lab Corp.) 统计软件分析和作图.

2 结果与分析

2.1 不同有机碳水平坡面土壤侵蚀-沉积强度

降雨侵蚀导致坡面土壤发生了再分布, 5 个有机碳水平的坡面上均发生了不同程度的侵蚀和沉积作用, 平均侵蚀和沉积厚度分别为 26.0 ~ 36.3 mm

和 16.4 ~ 24.3 mm, 但各有机碳水平的小区之间土壤侵蚀、沉积厚度差异不显著(表 1).

2.2 侵蚀坡面土壤温湿度时空变化特征

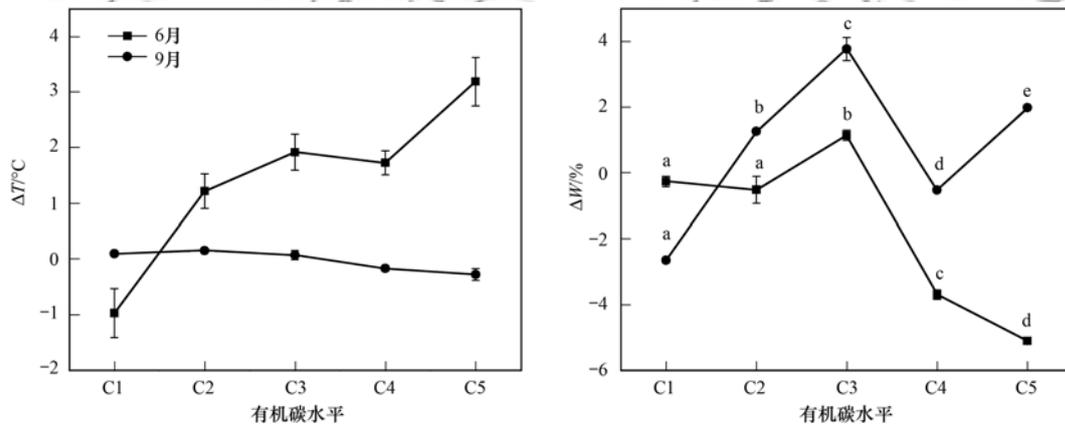
侵蚀导致坡面土壤温湿度出现明显的时空分异(图 2). 雨季前(6 月), 沉积区平均土壤温度高于侵蚀区, 侵蚀-沉积区土壤温度差(ΔT)介于 $-0.96 \sim 3.19^\circ\text{C}$ 之间; 沉积区平均土壤湿度低于侵蚀区, 侵蚀-沉积区土壤湿度差(ΔW)介于 $-5.10\% \sim 1.15\%$. 雨季末(9 月), 降雨侵蚀导致侵蚀区和沉积区土壤湿度增大, 温度降低, ΔT 减小至 $-0.28 \sim 0.15^\circ\text{C}$, 湿度差介于 $-2.64\% \sim 3.78\%$, 沉积区整体较侵蚀区温度低、湿度大.

表 1 不同有机碳水平下坡面土壤侵蚀强度¹⁾(平均值 \pm 标准误差)

Table 1 Soil erosion intensity on the slope for different organic carbon levels (mean \pm SE)

项目	侵蚀部位	有机碳水平				
		C1	C2	C3	C4	C5
侵蚀沉积厚度/mm	侵蚀区	-26.0 \pm 2.65a	-34.6 \pm 2.03a	-29.3 \pm 2.41a	-33.8 \pm 4.52a	-36.3 \pm 3.32a
	沉积区	18.8 \pm 2.23a	24.3 \pm 1.73a	18.3 \pm 1.98a	16.4 \pm 2.72a	17.8 \pm 2.46a

1) 正值和负值分别表示沉积厚度和侵蚀厚度; 不同小写字母表示不同碳水平下同一侵蚀部位差异显著($P < 0.05$)



不同小写字母表示同一时期不同有机碳水平下差异显著($P < 0.05$)

图 2 侵蚀对不同碳水平下土壤温湿度变化的影响

Fig. 2 Effects of erosion on the soil temperature and humidity for different carbon levels

侵蚀-沉积区土壤温、湿度差与有机碳水平相关. 雨季前坡面有机碳水平越高, 侵蚀-沉积区土壤温、湿度差越大. 雨季末坡面有机碳水平越高, 沉积区土壤湿度增加量和温度的减少量越大, 而侵蚀区无明显规律(表 2). 雨季前至雨季末, 坡面侵蚀-沉积区的土壤温差减小, 差异幅度从 $-3.34\% \sim 11.59\%$ 减小为 $-1.59\% \sim 1.08\%$, 有机碳水平越高差异减小幅度越大; 侵蚀-沉积区土壤湿度的差异也与有机碳水平有关, 当有机碳水平较低时(C1 ~ C3), 差异幅度增加, 分别增加了 10.83%、13.94%、11.50%, 有机碳水平较高时(C4 ~ C5), 侵蚀-沉积区土壤湿度的差异减小, 差异幅度分别减小了 42.56% 和 35.13%.

2.3 侵蚀坡面土壤有机碳时空变化特征

侵蚀坡面土壤有机碳含量也表现出明显的时空分异. 在雨季前, 侵蚀区土壤有机碳含量为 $4.25 \sim 6.54 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 沉积区土壤有机碳含量介于 $4.03 \sim 8.99 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 侵蚀-沉积区土壤有机碳含量差(ΔSOC)在 $-0.22 \sim 2.45 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间(表 3), 沉积区平均土壤有机碳含量高于侵蚀区, 但差异不显著($P < 0.05$). 雨季末, 侵蚀导致侵蚀、沉积区土壤有机碳含量改变, 范围分别为 $3.47 \sim 8.22 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $3.99 \sim 8.07 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, ΔSOC 变化为 $-0.68 \sim 0.61 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ [图 3(a)]. 当土壤背景有机碳水平较低时(C1 ~ C3), 侵蚀-沉积区土壤有机碳含量差异不明显; 有机碳水平较高时(C4 ~ C5), 坡面侵蚀-沉积

表 2 坡面侵蚀-沉积区土壤温湿度(0~10 cm)变化

Table 2 Variation of soil temperature and humidity (0-10 cm) in the erosion and sedimentary areas on the slope

位置	项目	C1		C2		C3		C4		C5	
		W/%	T/°C								
沉积区	6月	6.86	28.9	6.19	30.2	7.91	29.7	4.36	29.9	5.39	30.8
	9月	15.59	18.7	15.23	18.7	17.04	18.9	15.34	18.5	16.74	18.6
	变化量	8.73	-10.3	9.04	-11.5	9.13	-10.8	10.98	-11.4	11.35	-12.2
侵蚀区	6月	7.12	29.9	6.70	29.0	6.76	27.8	8.05	28.1	10.49	27.6
	9月	18.23	18.6	12.53	18.5	13.26	18.8	15.86	18.6	14.75	18.9
	变化量	11.11	-11.3	5.83	-10.5	6.50	-9.0	7.81	-9.5	6.66	-8.7

表 3 不同有机碳水平下坡面土壤有机碳含量¹⁾(平均值 ± 标准误差)

Table 3 Soil organic carbon content of the slope for different organic carbon levels (mean ± SE)

项目	侵蚀部位	有机碳水平				
		C1	C2	C3	C4	C5
雨季前土壤有机碳/g·kg ⁻¹	侵蚀区	4.25 ± 0.23a	4.35 ± 0.21a	4.81 ± 0.21ab	5.32 ± 0.14b	6.54 ± 0.55c
	沉积区	4.03 ± 0.20a	4.15 ± 0.37a	4.63 ± 0.22a	6.84 ± 0.31b	8.99 ± 0.44c

1) 不同小写字母表示不同碳水平下同一侵蚀部位差异显著(P < 0.05)

区土壤有机碳差异明显, 差异幅度分别为 28.57% 和 37.47%.

2.4 侵蚀坡面土壤微生物量碳时空变化特征

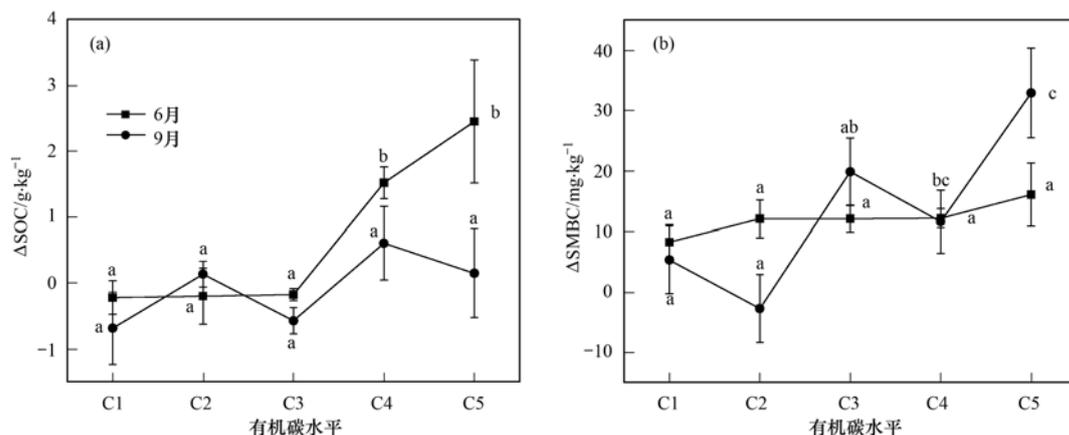
坡面土壤微生物量碳具有明显的时空分布特征. 由图 3(b)可知, 雨季前和雨季末侵蚀-沉积区土壤微生物量碳含量的差异(ΔSMBC)对侵蚀的响应不同. 雨季前, 沉积区土壤微生物量碳含量高于侵蚀区, ΔSMBC 介于 8.26 ~ 16.09 mg·kg⁻¹, 且这种差异随着有机碳水平的升高而增大, 与雨季前 ΔW、ΔT、ΔSOC 变化趋势基本一致, 但各有机碳水平间差异不显著(P > 0.05). 雨季末, 沉积区平均土壤微生物量碳含量高于侵蚀区, 含量差在 -2.72 ~ 32.93 mg·kg⁻¹ 间波动, 不同有机碳水平下差异显著(P < 0.05). 雨季前至雨季末, 侵蚀导致侵蚀-沉积区土壤微生物量碳含量的差异 ΔSMBC 减小, 差异幅度范围从 19.05% ~ 30.26% 减少到

-2.34% ~ 18.90%, 与 ΔT 的变化一致.

雨季前[图 4(a)]坡面侵蚀区土壤微生物量碳含量低于沉积区, 雨季末[图 4(b)], 当坡面有机碳水平较高时(C3 ~ C5), 侵蚀区土壤微生物量碳含量低于沉积区. 与雨季前相比, 雨季末坡面平均土壤微生物量碳含量显著增加, 高出雨季前 144.53%, 其中侵蚀区土壤微生物量碳的增长率高达 286.83%, 沉积区的增长率介于 91.08% ~ 211.96% 之间. 雨季前及雨季末, 坡面土壤微生物量碳含量均表现为随着有机碳水平的升高而增加, 且差异显著(P < 0.05). 表明土壤微生物对侵蚀区环境变化的敏感性高于沉积区, 且具有明显的季节变化.

2.5 侵蚀坡面土壤微生物量碳时空变化的影响因素

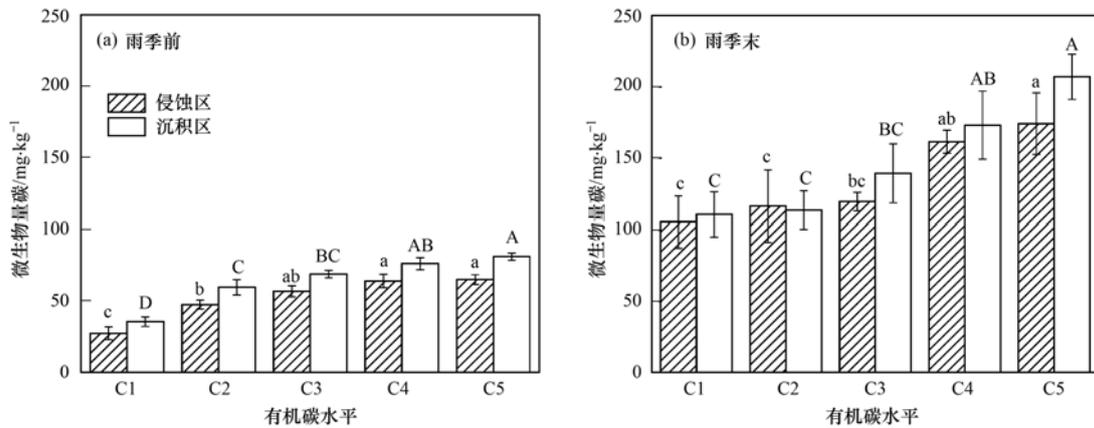
土壤侵蚀导致坡面土壤有机碳、温湿度发生改变, 进一步影响土壤微生物量碳的变化. 分别将雨



(a)、(b)分别为侵蚀-沉积区土壤有机碳含量差、微生物量碳含量差; 不同小写字母表示同一时期不同碳水平下差异显著(P < 0.05)

图 3 不同有机碳水平下坡面侵蚀与沉积区土壤有机碳和微生物量碳含量差

Fig. 3 Differences in the soil organic carbon and microbial biomass content between the erosion and sedimentary areas of the slope for different organic carbon levels



不同大(小)写字母表示同一侵蚀部位不同碳水平下差异显著($P < 0.05$)

图4 不同有机碳水平下坡面侵蚀-沉积区土壤微生物量碳含量(0~10 cm)

Fig. 4 Microbial biomass carbon content at the erosion-deposition positions for different organic carbon levels

季前和雨季末侵蚀、沉积部位的土壤微生物量碳含量,以及整个坡面土壤微生物量碳含量与坡面有机碳水平、侵蚀部位、侵蚀区和沉积区土壤有机碳含量、土壤湿度、土壤温度等因素用一般线性模型(GLM)进行方差成分估计分析,明确雨季前末众因子在侵蚀区和沉积区以及整个坡面上对土壤微生物量碳变化的影响方式和程度。结果表明,侵蚀坡面土壤微生物量碳在雨季前和雨季末对不同影响因子表现出不同的变异性,由表4可知,土壤微生物量碳受土壤温湿度、有机碳含量、坡面碳水平和侵蚀-沉积部位等多个因素的共同影响。在坡面尺度上,雨季前侵蚀坡面土壤微生物量碳主要受土壤湿度、温度和有机碳水平的影响,分别解释坡面微生物量碳变异的28.1%、31.5%和28.0%。到雨季末,坡

面土壤微生物量碳的主要限制性因素转变成土壤有机碳和坡面碳水平,对坡面微生物量碳变异的贡献分别为38.3%和35.7%,此时土壤温、湿度仅能解释其变异的18.8%。这表明在不同时段影响坡面土壤微生物量碳含量的主导因素不同。

由表5可知,雨季前坡面侵蚀区和沉积区主要受到土壤湿度的影响,分别可以解释土壤微生物量碳变异的78.3%和84.4%,其次受土壤有机碳影响,可解释其21.7%和15.6%的变异性。此时土壤温度对土壤微生物量碳的贡献率为0,表明土壤微生物量碳受土壤温度的影响较小。土壤湿度对沉积区土壤微生物量碳变异的贡献率高出侵蚀区6.1%,表明侵蚀、沉积部位对同一影响因子的敏感性不同。

表4 雨季前(6月)和雨季末(9月)侵蚀坡面不同因子在土壤微生物量碳含量变异(方差)中的贡献

Table 4 Contributions of different factors to the SMBC content variability (variance) on the eroding slope before the rainy season (June) and at the end of the rainy season (September)

方差来源	雨季前		雨季末	
	方差	方差百分比/%	方差	方差百分比/%
土壤湿度	306.407	28.1	-484.180	11.2
土壤温度	-338.717	31.8	329.579	7.6
有机碳含量	59.823	5.5	1650.132	38.3
碳水平	304.856	28.0	1540.339	35.7
侵蚀部位	80.173	6.6	305.024	7.2

表5 雨季前(6月)侵蚀区和沉积区不同因子在土壤微生物量碳含量变异(方差)中的贡献

Table 5 Contribution of different factors to the variation (variance) of the SMBC content on the erosion and deposition zones before the rainy season (June)

方差来源	侵蚀区		沉积区	
	方差	方差百分比/%	方差	方差百分比/%
土壤湿度	225.65	78.3	308.59	84.4
土壤温度	0	0	0	0
有机碳含量	62.684	21.7	56.963	15.6

与雨季前相比,雨季末坡面侵蚀、沉积部位土壤微生物量碳对影响因素的敏感性发生变化。雨季

末侵蚀、沉积部位土壤微生物量碳主要受土壤温湿度和有机碳的影响,但不同部位土壤微生物量碳的

主导因素不同(表6)。在侵蚀区,土壤微生物量碳主要受到土壤有机碳的影响,能解释其52.2%的变异性,其次受土壤湿度影响,能解释其变异的

34.6%。在沉积区,土壤温度对土壤微生物量碳的影响较大,能解释59.7%的变异性,而土壤湿度和有机碳对土壤微生物量碳变化的影响相对较小。

表6 雨季末(9月)侵蚀区和沉积区不同因子在土壤微生物量碳含量变异(方差)中的贡献

Table 6 Contribution of different factors to the SMBC content variation (variance) on the erosion and deposition zones at the end of the rainy season (September)

方差来源	侵蚀区		沉积区	
	方差	方差百分比/%	方差	方差百分比/%
土壤湿度	1 367. 194	34. 6	- 785. 761	15. 6
土壤温度	- 522. 376	13. 2	2 999. 225	59. 7
有机碳含量	2 059. 951	52. 2	1 240. 312	24. 7

综合以上分析结果可得,雨季前、末,影响侵蚀坡面土壤微生物量碳的主导因子不同,在坡面尺度上,土壤微生物量碳主要受有机碳水平的影响;侵蚀、沉积部位土壤微生物量碳对不同因子的敏感性不同,即不同时间和空间条件下土壤微生物量碳的限制因子不同。

3 讨论

土壤侵蚀过程为侵蚀和沉积环境中土壤微生物创造了不同的栖息地,改变土壤微生物群落的生长环境和营养物质含量,影响土壤微生物生长^[16],进而影响土壤微生物量碳的变化。

侵蚀导致坡面土壤发生了再分布,影响坡面土壤温湿度^[17]和土壤有机碳^[18]的空间变化。有研究表明^[18,19],降雨侵蚀过程中土壤湿度增加,结构体破坏,使得受团聚体保护的碳处于氧化环境中而易被微生物分解,而后径流流失使侵蚀区土壤变得干旱,降低土壤湿度的同时增加了土壤温度,沉积区的土壤有机碳由于深埋或发生重新团聚,保水能力增强,使土壤温度落后于大气温度^[20]。本研究重点关注了坡面侵蚀-沉积区之间土壤温湿度和有机碳含量差异的变化,结果表明,侵蚀导致侵蚀-沉积区土壤温度差异减小,土壤湿度差异变化与坡面土壤有机碳水平有关,当有机碳水平(C4~C5)较高时土壤湿度差异减小,且有机碳水平越高差异减小的幅度越大,相反,有机碳水平(C1~C3)较低时,土壤湿度差异增加。有机碳水平较低(C1~C3)时土壤质量较差,持水性弱,侵蚀区和沉积区土壤功能差异表现较明显,使得土壤湿度差异增加;有机碳水平较高(C4~C5)时土壤质量较好,持水性强,侵蚀区和沉积区土壤功能差异表现不明显,使得土壤湿度差异减小,故而有机碳水平越高差异越小。可见,土壤有机碳作为土壤质量的重要指标,可通过影响土壤结构调节土壤持水性和热容量,进而导致侵蚀坡面土壤水热的时空分异。此外,雨季前坡面长时间处于高温干旱的状态下,侵蚀区和沉积区具

有不同的水热条件,雨季末坡面土壤湿度增加,温度降低,侵蚀-沉积区温湿度差异改变,土壤温度受季节变化影响较大,侵蚀-沉积区土壤温湿度差异减小。

侵蚀导致了侵蚀-沉积区土壤温湿度差异和有机碳差异的改变,进而改变了侵蚀-沉积区土壤微生物量碳含量的差异。雨季末(9月)坡面土壤微生物量碳含量显著高于雨季前(6月)含量,呈现明显的季节变化。雨季前坡面土壤温度较高(28.9~30.8℃)、水分含量较低(4%~8%),土壤微生物生长受限^[21~23],影响微生物量碳含量;雨季末坡面土壤水分增加至15%~17%、温度降低至18.5~18.9℃,而研究显示,温度只有处于特定的范围内(低于6℃或高于35℃)才会引起微生物生物量碳的大幅度下降^[24],因而在温度、水分适宜的条件下土壤微生物量碳含量增加^[25]。这与管海英^[26]和白震等^[27]对土壤微生物量碳季节变化的研究结果一致。空间分布上,沉积区土壤微生物量碳高于侵蚀区,这与王超华^[28]、冯志珍等^[29]的研究结果一致。Li等^[30]的研究也表明土壤沉积有利于提高土壤微生物量碳含量,土壤侵蚀则导致土壤微生物量碳含量减少。

在坡面侵蚀、沉积条件下,影响土壤微生物变化的主导因素不同,进而导致土壤微生物量碳的时空格局发生变化^[31~33]。本研究中,土壤微生物量碳含量受土壤温湿度、土壤有机碳含量、坡面有机碳水平等因素的综合影响。不同时段坡面侵蚀-沉积部位土壤微生物量碳对因子的敏感性不同,雨季前,侵蚀和沉积区土壤微生物量碳均主要受土壤湿度影响,但对同一因子的敏感性不同,表现为土壤微生物量碳对沉积区土壤湿度变化较侵蚀区敏感。而雨季末,侵蚀区土壤微生物量碳受有机碳影响较大,沉积区受土壤温度影响较大。这是由于雨季前坡面处于一个高温干旱的环境,土壤湿度成为微生物活动的主要限制因子^[34,35];雨季末土壤湿度增加,不再限制微生物的生长,此时限制性因子发生

转换. 就侵蚀坡面而言, 土壤微生物量碳的变化对有机碳水平更为敏感. 因此, 在研究土壤微生物量碳时空分布及影响因素时, 建议分季节、分区探讨因素的影响. 而关于土壤微生物量碳限制性因子转换机制还有待进一步研究.

4 结论

(1) 土壤侵蚀导致坡面侵蚀-沉积区土壤温湿度、有机碳含量、土壤微生物量碳含量呈现明显的时空分异, 分异程度与土壤有机碳水平有关. 雨季末坡面土壤微生物量碳含量较雨季前提高 91.08%~286.83%, 具有明显的季节变化; 坡面沉积区土壤微生物量碳含量大于侵蚀区, 随着土壤有机碳水平升高, 侵蚀-沉积区土壤微生物量碳含量差增大, 空间分异加剧.

(2) 不同时空条件下土壤微生物量碳变化的主导因素不同, 对因素的敏感性不同. 雨季前侵蚀区和沉积区土壤微生物量碳主要受土壤湿度的影响, 分别能解释其变异的 78.3% 和 84.4%; 雨季末侵蚀区主要受土壤有机碳的影响, 沉积区主要受土壤温度的影响, 分别能解释侵蚀、沉积区土壤微生物量碳变异的 52.2% 和 59.7%.

(3) 土壤微生物量碳对影响因素的敏感性差异原因主要是不同因素的限制性转换.

参考文献:

- [1] Yue Y, Ni J R, Ciais P, *et al.* Lateral transport of soil carbon and land-atmosphere CO₂ flux induced by water erosion in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, **113**(24): 6617-6622.
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, **304**(5677): 1623-1627.
- [3] Van O K, Quine T A, Govers G, *et al.* The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle[J]. *Science*, 2007, **318**(5850): 626-629.
- [4] 刘兆云, 章明奎. 侵蚀-沉积连续地形中土壤碳库的空间分异[J]. *水土保持通报*, 2009, **29**(3): 61-65.
Liu Z Y, Zhang M K. Spatial variation of soil organic carbon pools in erosion-deposition continuation landform[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, **29**(3): 61-65.
- [5] 喻为, 李忠武, 黄金权, 等. 水力侵蚀影响下土壤有机碳和微生物数量动态变化特征[J]. *土壤学报*, 2015, **52**(2): 423-430.
Yu W, Li Z W, Hung J Q, *et al.* Dynamics of soil microbial population and organic carbon under water erosion [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, **52**(2): 423-430.
- [6] 万忠梅, 郭岳, 郭跃东. 土地利用对湿地土壤活性有机碳的影响研究进展[J]. *生态环境学报*, 2011, **20**(3): 567-570.
Wan Z M, Guo Y, Guo Y D. Research progress on influence of land use on wetland soil active organic carbon[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, **20**(3): 567-570.
- [7] Araújo A S F, Monteiro R T R. Microbial biomass and activity in a Brazilian soil amended with untreated and composted textile sludge[J]. *Chemosphere*, 2006, **64**(6): 1043-1046.
- [8] 李延茂, 胡江春, 汪思龙, 等. 森林生态系统中土壤微生物的作用与应用[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(10): 1943-1946.
Li Y M, Hu J C, Wang S L, *et al.* Function and application of soil microorganisms in forest ecosystem [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, **15**(10): 1943-1946.
- [9] 张春梅, 焦峰, 温仲明, 等. 延河流域自然与人工植被地上生物量差异及其土壤水分效应的比较[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2011, **39**(4): 132-138.
Zhang C M, Jiao F, Wen Z M, *et al.* Differences of above-ground biomass and comparisons of its effect on soil moisture between natural vegetation and artificial vegetation in Yanhe basin [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2011, **39**(4): 132-138.
- [10] 何容, 王国兵, 汪家社, 等. 武夷山不同海拔植被土壤微生物量的季节动态及主要影响因子[J]. *生态学杂志*, 2009, **28**(3): 394-399.
He R, Wang G B, Wang J S, *et al.* Seasonal variation and its main affecting factors of soil microbial biomass under different vegetations along an elevation gradient in Wuyi Mountains of China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, **28**(3): 394-399.
- [11] 朴河春, 洪业汤, 袁芷云, 等. 贵州喀斯特地区土壤中微生物量碳的季节性变化[J]. *环境科学学报*, 2000, **20**(1): 106-110.
Piao H C, Hong Y T, Yuan Z Y, *et al.* Seasonal changes of soil microbial biomass carbon in soils under karst areas of Guizhou province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, **20**(1): 106-110.
- [12] 胡婵娟, 傅伯杰, 刘国华, 等. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度上微生物的空间分布规律[J]. *水土保持学报*, 2009, **23**(3): 148-152.
Hu C J, Fu B J, Liu G H, *et al.* Distribution of soil microbe on hill slope scale on the hilly area of the Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, **23**(3): 148-152.
- [13] 管海英, 赵鑫, 靳佳, 等. 荒漠生态系统土壤表层微生物量碳空间分布及其影响因子[J]. *干旱区研究*, 2014, **31**(6): 1125-1131.
Guan H Y, Zhao X, Jin J, *et al.* Spatial patterns of soil microbial biomass carbon and factors influencing the distribution in a typical desert ecosystem [J]. *Arid Zone Research*, 2014, **31**(6): 1125-1131.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000. 30-34.
- [15] 林启美, 吴玉光, 刘焕龙. 熏蒸法测定土壤微生物量碳的改进[J]. *生态学杂志*, 1999, **18**(2): 63-66.
Lin Q M, Wu Y G, Liu H L. Modification of fumigation extraction method for measuring soil microbial biomass carbon [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, **18**(2): 63-66.
- [16] Ma W M, Li Z W, Ding K Y, *et al.* Effect of soil erosion on dissolved organic carbon redistribution in subtropical red soil under rainfall simulation [J]. *Geomorphology*, 2014, **226**: 217-225.
- [17] Chan C, Kay B D, Gregorich E G. Factors influencing mineralizable carbon in a landscape with variable topography [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2007, **87**(5): 495-509.
- [18] 张瑞, 苟晓敏, 赵玉珍, 等. 东北黑土区土壤侵蚀对土壤持水性的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, **29**(1): 62-65.
Zhang R, Gou X M, Zhao Y Z, *et al.* Influence of soil erosion on soil water capacity in the black soil area of northeast China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, **29**(1): 62-65.

- [19] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget [J]. *Environment International*, 2003, **29**(4): 437-450.
- [20] Pacala S W, Hurtt G C, Baker D, *et al.* Consistent land-and atmosphere-based U. S. carbon sink estimates [J]. *Science*, 2001, **292**(5525): 2316-2320.
- [21] 吴永胜, 哈斯, 李双权, 等. 毛乌素沙地南缘沙丘生物结皮中微生物分布特征[J]. *生态学杂志*, 2010, **29**(8): 1624-1628.
Wu Y S, Ha S, Li S Q, *et al.* Distribution patterns of microorganisms in biological crusts on sand dunes of southern Mu Us sandy land[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, **29**(8): 1624-1628.
- [22] 靳振江, 曾鸿鹄, 李强, 等. 起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 335-341.
Jin Z J, Zeng H H, Li Q, *et al.* Comparisons of microbial numbers, biomasses and soil enzyme activities between paddy field and dryland origins in karst cave wetland [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 335-341.
- [23] 邱甜甜, 刘国彬, 王国梁, 等. 黄土高原不同生长阶段油松人工林土壤微生物生物量碳的变化及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(3): 681-687.
Qiu T T, Liu G B, Wang G L, *et al.* Changes of soil microbial biomass carbon and their impact factors for *Pinus tabulaeformis* plantations at different development stages on the Loess Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(3): 681-687.
- [24] Joergensen R G, Brookes P C, Jenkinson D S. Survival of the soil microbial biomass at elevated temperatures[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, **22**(8): 1129-1136.
- [25] 赵彤, 蒋跃利, 闫浩, 等. 黄土丘陵区不同坡向对土壤微生物生物量和可溶性有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 3223-3230.
Zhao T, Jiang Y L, Yan H, *et al.* Effects of different aspects on soil microbial biomass and dissolved organic carbon of the loess hilly area [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 3223-3230.
- [26] 管海英, 王权, 赵鑫, 等. 两种典型荒漠植被区土壤微生物量碳的季节变化及影响因素分析[J]. *干旱区地理*, 2015, **38**(1): 67-75.
Guan H Y, Wang Q, Zhao X, *et al.* Seasonal patterns of soil microbial biomass C and impacting factors in two typical arid desert vegetation regions [J]. *Arid Land Geography*, 2015, **38**(1): 67-75.
- [27] 白震, 何红波, 解宏图, 等. 施肥与季节更替对黑土微生物群落的影响[J]. *环境科学*, 2008, **29**(11): 3230-3239.
Bai Z, He H B, Xie H T, *et al.* Influences of fertilization and seasonal variation on microbial community in a Chinese mollisol [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(11): 3230-3239.
- [28] 王超华, 许明祥, 冉宜凡, 等. 黄土丘陵区不同有机碳水平侵蚀坡面土壤微生物量碳的分布特征[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(10): 3284-3291.
Wang C H, Xu M X, Ran Y F, *et al.* Distribution of soil microbial biomass on eroded sloping land with different organic carbon contents in the hilly loess plateau region [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(10): 3284-3291.
- [29] 冯志珍, 郑粉莉, 易祎. 薄层黑土微生物生物量碳氮对土壤侵蚀-沉积的响应[J]. *土壤学报*, 2017, **54**(6): 1332-1344.
Feng Z Z, Zheng F L, Yi Y. Responses of microbial biomass carbon and nitrogen to erosion and deposition in black soil thin in depth [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, **54**(6): 1332-1344.
- [30] Li Z W, Xiao H B, Tang Z H, *et al.* Microbial responses to erosion-induced soil physico-chemical property changes in the hilly red soil region of southern China [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2015, **71**: 37-44.
- [31] 杨凯, 朱教君, 张金鑫, 等. 不同林龄落叶松人工林土壤微生物生物量碳氮的季节变化[J]. *生态学报*, 2009, **29**(10): 5500-5507.
Yang K, Zhu J J, Zhang J X, *et al.* Seasonal dynamics of soil microbial biomass C and N in two larch plantation forests with different ages in Northeastern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(10): 5500-5507.
- [32] 肖复明, 范少辉, 汪思龙, 等. 毛竹林土壤有机碳及微生物量碳特征研究[J]. *水土保持学报*, 2008, **22**(6): 128-131.
Xiao F M, Fan S H, Wang S L, *et al.* A study on the characteristics of soil organic carbon and microbial biomass carbon in *Phyllostachy edulis* plantation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, **22**(6): 128-131.
- [33] 刘平, 邱月, 王玉涛, 等. 渤海泥质海岸典型防护林土壤微生物量季节动态变化[J]. *生态学报*, 2019, **39**(1): 363-370.
Liu P, Qiu Y, Wang Y T, *et al.* Seasonal dynamics of soil microbial biomass in typical shelterbelts on the Bohai muddy coast [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(1): 363-370.
- [34] Chen D M, Mi J, Chu P F, *et al.* Patterns and drivers of soil microbial communities along a precipitation gradient on the Mongolian Plateau [J]. *Landscape Ecology*, 2015, **30**(9): 1669-1682.
- [35] Tripathi B M, Morenyane I, Sherman C, *et al.* Trends in taxonomic and functional composition of soil microbiome along a precipitation gradient in Israel [J]. *Microbial Ecology*, 2017, **74**(1): 168-176.

CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM _{2.5} in Xi'an	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During Winter in Taiyuan	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in a Suburb of Zhuhai City	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM _{2.5} in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM _{2.5} Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO ₂ Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yun-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N ₂ O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH ₄ Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)