

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第2期

Vol.36 No.2

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征 朱琮宇,程金平,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华(373)

大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响 蒲维维,石雪峰,马志强,赵秀娟,张小玲,徐晓峰(379)

近3年太原市夏季降水的化学特征研究 郭晓方,崔阳,王开扬,何秋生,王新明(388)

太原市PM_{2.5}中有机碳和元素碳的污染特征 刘珊,彭林,温彦平,白慧玲,刘凤娴,史美鲜,李丽娟(396)

青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布 李秋旭,何畅,马召辉,马丽花,扎西卓玛,王英,金军(402)

北京10个常绿树种颗粒物吸附能力研究 王兵,张维康,牛香,王晓燕(408)

人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征 宋志文,王琳,徐爱玲,吴等等,夏岩(415)

春季融雪补给后巩乃斯河水物理化学性质空间分布特征研究 刘翔,郭玲鹏,张飞云,马杰,牟书勇,赵鑫,李兰海(421)

青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析 李鹤,李军,刘小龙,杨曦,张伟,王洁,牛颖权(430)

亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析 张垒,李秋华,黄国佳,欧腾,李翎,吴迪,周黔兰,高廷进(438)

长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性 金晓丹,吴昊,陈志明,宋红军,何义亮(448)

黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究 郭兴森,吕迎春,孙志高,王传远,赵全升(457)

苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析 陈海龙,袁旭音,王欢,李正阳,许海燕(464)

滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力 孟亚媛,王圣瑞,焦立新,刘文斌,肖焱波,祖维美,徐天敏,丁帅,周童(471)

城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性 李如忠,钱靖,董玉红,唐文坤,杨继伟(481)

艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究 张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清(490)

工矿业绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价 臧飞,王胜利,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷(497)

山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价 戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋,周汝佳(507)

UV协同ClO₂去除三氯生及其降解产物的研究 李玉瑛,何文龙,李青松,金伟伟,陈国元,李国新(516)

氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中As(V)的去除机制研究 康英,段晋明,景传勇(523)

负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中Cr(VI)的研究 曾淦宁,武晓,郑林,伍希,屠美玲,王铁杆,艾宁(530)

磁性石墨烯吸附水中Cr(VI)研究 刘伟,杨琦,李博,陈海,聂兰玉(537)

TiO₂@酵母复合微球固定床吸附荧光增白剂-VBL的研究 王菲,张凯强,白波,王洪伦,索有瑞(545)

MnO₂/CFP复合电极的制备及电吸附Pb²⁺特性的研究 刘方园,胡承志,李永峰,梁乾伟(552)

吸附相反应技术制备微弱光响应的多组分掺杂TiO₂催化剂 王挺,祝轶琛,孙志轩,吴礼光(559)

掺铁TiO₂纳米管阵列模拟太阳光光电催化降解双酚A的研究 项国梁,喻泽斌,陈颖,徐天佐,彭振波,刘钰鑫(568)

天然矿物负载Fe/Co催化H₂O₂氧化降解阳离子红3R 马楠,刘华波,谢鑫源(576)

臭氧微气泡处理酸性大红3R废水特性研究 张静,杜亚威,刘晓静,周玉文,刘春,杨景亮,张磊(584)

碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响 韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪(590)

低温低溶解氧EBPR系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究 马娟,李璐,俞小军,魏雪芬,刘娟丽(597)

O池溶解氧水平对石化废水A/O工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响 丁鹏元,初里冰,张楠,王星,王建龙(604)

改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探 周雨璐,付豪逸,范先锋,王振宇,郑冠宇(612)

热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究 杨世东,陈霞,刘操,肖本益(619)

不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应 齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,贾军强,郭树芳,贺云龙,闫钟清,王丽芹(625)

地表臭氧浓度升高对旱作农田N₂O排放的影响 吴杨周,胡正华,李岑子,陈书涛,谢燕,肖启涛(636)

亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究 刘义凡,陈书涛,胡正华,沈小帅,张旭(644)

川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素 罗由林,李启权,王昌全,李冰,张新,冯文颖,翁倩,吴冕(652)

黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响 张帅,许明祥,张亚锋,王超华,陈盖(661)

汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性 张广帅,林勇明,马瑞丰,邓浩俊,杜锟,吴承祯,洪伟(669)

土壤电动修复的电极空间构型优化研究 刘芳,付融冰,徐珍(678)

有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险 张石磊,薛南冬,杨兵,李发生,陈宣宇,刘博,孟磊(686)

水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律 杨文骏,王英杰,周航,易开心,曾敏,彭佩钦,廖柏寒(694)

植物根系体外溶液的提取方法研究:以多环芳烃为例 朱满党,都江雪,乐乐,李金凤,杨青青,陆守昆,占新华(700)

垂序商陆叶细胞壁结合锰机制研究 徐向华,刘翠英,李平,郎漫,赵小艳,杨建军,官敏(706)

1株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究 刘文超,吴彬彬,李晓森,卢滇楠,刘永民(712)

CdSe/ZnS量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应 陈慕飞,黄承志,蒲德永,郑朝依,袁开米,金星星,张耀光,金丽(719)

锯齿新米虾对Cu²⁺和毒死蜱毒性的生理响应 李典宝,张玮,王丽卿,张瑞雷,季高华(727)

同步衍生超声乳化微萃取气相色谱法测定环境水样中的苯胺类化合物 田立勋,戴之希,王国栋,翁焕新(736)

热水环境中Na⁺活化斜发沸石吸附钙离子除硬过程研究 张硕,王栋,陈远超,张兴文,陈贵军(744)

区域经济-污染-环境三维评价模型的构建与应用 樊新刚,米文宝,马振宁(751)

《环境科学》征订启事(401) 《环境科学》征稿简则(437) 信息(489,522,726,735)

汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性

张广帅^{1,2}, 林勇明^{1,2*}, 马瑞丰¹, 邓浩俊^{1,2}, 杜锟^{1,2}, 吴承祯^{1,2,3}, 洪伟^{1,2}

(1. 福建农林大学林学院, 福州 350002; 2. 福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室, 福州 350002; 3. 武夷学院生态与资源工程学院, 南平 354300)

摘要: 为探讨汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落功能代谢的变化, 采用 Biolog-ECO 生态板技术, 研究了亚热带湿润季风气候和半干旱干热河谷气候未受损区、受损治理区、受损未治理区土壤微生物碳源代谢的多样性变化特征。结果表明, 平均颜色变化率(AWCD)在未受损区和受损治理区表现为亚热带湿润季风气候区 > 半干旱干热河谷气候区, 在受损未治理区表现为半干旱干热河谷气候区 > 亚热带湿润季风气候区, 不同气候区内受损未治理区 AWCD 值均处于最低水平; 亚热带湿润季风气候区土壤微生物的碳源利用类型明显多于半干旱干热河谷气候区, 在不同气候类型区内碳源利用种类均表现为受损治理区 > 未受损区 > 受损未治理区的趋势; 不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性特征差异显著, 其中多样性指数和均匀度指数均表现为未受损区 > 受损治理区 > 受损未治理区, 而受损治理区均具有最高的丰富度指数; 土壤微生物群落的碳源代谢特征与土壤养分、地上植被生物量及植被覆盖度具有一定的相关性, 表明地震及其次生灾害主要通过地对地表植被和土壤环境的作用间接影响土壤微生物群落的碳源利用能力, 在不同气候类型区与不同的受损治理情况下土壤微生物群落的碳源代谢特征具有显著差异。

关键词: 汶川地震; 不同气候区; 土壤微生物; 碳源代谢多样性; Biolog-ECO

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0669-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.02.039

Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake

ZHANG Guang-shuai^{1,2}, LIN Yong-ming^{1,2*}, MA Rui-feng¹, DENG Hao-jun^{1,2}, DU Kun^{1,2}, WU Cheng-zhen^{1,2,3}, HONG Wei^{1,2}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Key Laboratory for Forest Ecosystem Process and Management of Fujian Province, Fuzhou 350002, China; 3. College of Ecology and Resources Engineering, Wuyi University, Nanping 354300, China)

Abstract: The MS8.0 Wenchuan earthquake in 2008 led to huge damage to land covers in northwest Sichuan, one of the critical fragile eco-regions in China which can be divided into Semi-arid dry hot climate zone (SDHC) and Subtropical humid monsoon climate zone (SHMC). Using the method of Biolog-ECO-microplate technique, this paper aimed to determine the functional diversity of soil microbial community in the earthquake-affected areas which can be divided into undamaged area (U), recover area (R) and damaged area without recovery (D) under different climate types, in order to provide scientific basis for ecological recovery. The results indicated that the average-well-color-development (AWCD) in undamaged area and recovery area showed SDHC > SHMC, which was contrary to the AWCD in the damaged area without recovery. The AWCD of damaged area without recovery was the lowest in both climate zones. The number of carbon source utilization types of soil microbial in SHMC zone was significantly higher than that in SDHC zone. The carbon source utilization types in both climate zones presented a trend of recover area > undamaged area > damaged area without recovery. The carbon source metabolic diversity characteristic of soil microbial community was significantly different in different climate zones. The diversity index and evenness index both showed a ranking of undamaged area > recover area > damaged area without recovery. In addition, the recovery area had the highest richness index. The soil microbial carbon sources metabolism characteristic was affected by soil nutrient, aboveground vegetation biomass and vegetation coverage to some extent. In conclusion, earthquake and its secondary disasters influenced the carbon source metabolic diversity characteristic of soil microbial community mainly through the change of aboveground vegetation and soil environmental factors.

Key words: Wenchuan earthquake; different climate types; soil microbe; carbon source metabolic diversity; Biolog-ECO

土壤微生物对全球生态系统功能如有机质分解、养分运输、土壤结构稳定以及温室气体的产生和环境污染物的调节与净化发挥着关键作用^[1,2]。

土壤微生物是土壤生态系统最为活跃的组分, 是土壤肥力的重要调控因子, 也是土壤微生态系统物质

收稿日期: 2014-07-08; 修订日期: 2014-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201564); 福建农林大学林学院青年科研基金项目(6112C039Q)

作者简介: 张广帅(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向恢复生态学, E-mail: zgsfafu2012@163.com

* 通讯联系人, E-mail: monkey1422@163.com

循环的重要驱动因子之一^[3],其指标通常被用来评价退化生态系统中生物群系与恢复功能之间的关系. 地下土壤微生物与土壤养分进行复杂的交互作用,为地上植物的生长提供了重要保障,地球上90%以上的有机物矿化过程都是由细菌和真菌完成的^[4],它们承受长期胁迫或暂时性扰动的能力可以在一定程度上反映生态系统在各个过程的稳定性^[5]. 土壤微生物群落结构及其多样性特征对外界环境变化的反映比植物和动物更为敏感^[6,7],是生态环境恢复过程中的先锋指示者^[8].

“5·12”汶川特大地震重灾区位于四川盆地西缘龙门山断裂带,东西跨度约70 km,南北跨度约400 km,属四川盆地向青藏高原的过渡区域^[9~11],也是青藏高原高寒山地植被区与东北温暖湿润森林区的结合地带. 地震重灾区地质构造复杂,多高山峡谷地貌,滑坡、崩塌、泥石流等灾害频发,水土流失严重,生态环境十分脆弱^[12]. 高强度的地震灾害不仅能够直接通过崩塌、滑坡、泥石流等次生地质灾害摧毁大面积的森林群落,同时还可以通过对土壤环境的影响间接导致受灾区域幸存植被在随后的几年内死亡^[13,14]. 地震对植物生长的间接影响,其主要原因是地震扰动后,在土体移动过程中,土壤紧实度降低,表层土疏松,进而导致土壤水肥流失,土壤温度升高,而植物根系生境与土壤环境密切相关,从而影响植物机体的生理过程^[15].

目前关于地震灾区生态系统恢复的研究主要集中在立地条件、土壤侵蚀与植被受损特征、恢复模式等方面^[16~20],而作为土壤-植被系统对环境因子变化最为敏感且活跃程度最高的微生物群落特征却未见报道. 有鉴于此,本文运用 Biolog-ECO 技术,对地震灾区不同气候类型、不同恢复方式(自然恢复、人工治理)下土壤微生物群落的碳源代谢多样性进行研究,通过探讨气候类型、恢复方式以及受损程度对土壤微生物群落碳源代谢的影响,以期为准确评估灾区受损植被-土壤系统的恢复潜力及完善典型区域生态恢复措施提供新的思路和方法.

1 材料与方 法

1.1 研究区与样地概况

汶川地震重灾区位于四川盆地西北部和青藏高原东缘的过渡地带,地理位置为东经 102°49′~105°38′、北纬 30°45′~33°03′,受灾区域总面积达 26 410 km²,呈走向为西南-东北的条带状分布,两端

距离最长约 350 km. 灾区以龙门山为界,东南山麓为亚热带湿润季风气候,西北岷江河谷为典型半干旱干热河谷气候,本研究选取了受灾程度严重、气候特征典型且处于同一纬度带上的汶川县和绵竹市作为研究区,其中汶川县位于四川盆地西北部边缘,东经 102°51′~103°44′,北纬 30°45′~31°43′,研究样地所在威州镇位于县境北部岷江与杂谷脑河交会处,海拔 1 325 m,属于典型的半干旱干热河谷气候区,气温年较差小,日较差大,春季气温回升较快,秋季下降迅速,≥10℃的积温大,持续时间长,低温稳定,年平均气温 11.2~12.9℃,最热月平均气温 20~21.9℃,最冷月气温 0.4~2.4℃,降水较为充沛,干湿季明显,但是由于蒸发量大,全年水分亏损,年平均降水量 416 mm,雨季平均降雨量 425.2 mm,干季平均降雨量 81.9 mm. 绵竹市地处四川盆地西北部,东经 103°54′~104°20′,北纬 30°09′~31°42′,研究样地所在汉旺镇平均海拔 650 m,属于山前冲洪积扇状平原区,气候温和,降水充沛,四季分明属于亚热带季风性湿润气候区,年平均气温 15℃,年最大降雨量为 1 421.4 mm(1961 年),年最小降雨量为 699.3 mm(1965 年).

取样调查于 2014 年 6 月进行,试验区域分别设置在汶川县威州镇和绵竹市汉旺镇,治理工程位于试验区域内的生态治理典型示范区内,竣工时间均为 2011 年 3 月. 其中威州镇属于典型半干旱干热河谷气候,基带土壤为棕壤和河谷褐土. 威州镇治理区样地设置在滑坡体上,表面着生的植被类型为典型的先锋群落,主要物种包括狗尾草(*Setaria viridis*)、人为种植的一年生洋槐(*Robinia pseudoacacia*)和岷江柏(*Cupressus chengiana*)等,植被覆盖度约为 45%,治理措施以挡土墙、铁网石笼为主,挡土墙设置于坡脚以稳定坡面,从坡脚向上 3~5 m 间距按同一等高线布设铁网石笼,每一石笼间以 1 m 株间距种植岷江柏;未受损样地和受损未治理设置在相近处,未受损样地地表植被以白刺花(*Sophora davidii*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、刺果蔷薇(*Rosa acicularis*)等多年生草本和低矮灌木为主,植被覆盖度为 75%,受损未治理样地地表裸露,“砂石化”严重,植被覆盖率低仅为 5%. 汉旺镇属于典型亚热带湿润季风气候,基带土壤为黄壤及其亚类. 汉旺镇受损样地设置在崩塌体上,以竹栅栏为主要治理措施,从坡脚向上 3 m 间距按同一等高线布设竹栅栏,从中坡向上以 2 m 间距按同一等高线布设石片叠梯,竹栅栏与石

片叠梯间均以 1.5 m 株间距种植竹柳 (*Salix maizhokunggensis*), 现在植被以飞生蓬 (*Conyza canadensis*)、川滇盘果菊 (*Prenanthes henryi*)、竹柳 (*Salix fragilis*) 等为主要优势种, 植被覆盖度约为 60%; 未受损样地设置在相近处, 现有地表植被以莎草 (*Cyperus rotundus*)、刺槐 (*Robinia*

pseudoacacia)、扁桃 (*Amygdalus communis*) 等为主, 样地上坡分布有少量人工林, 如核桃 (*Carya hunanensis*)、红枫 (*Acer palmatum*) 等, 植被覆盖度达 85%。受损未治理样地设置在绵竹市汉旺镇清平乡内的滑坡体上, 以裸地为主, 基本无植被覆盖。样地位置及基本概况见表 1。

表 1 样地概况

Table 1 Survey of sample plots

气候类型	样地处理	经度/(°)	纬度/(°)	海拔/(m)	植被盖度 /%	土壤温度 /°C	土壤含水量 /%
亚热带湿润季风气候 (SHMC)	威州未受损区 (WZU)	104.160 5	31.461 5	729	85	20.00	29.00
	威州治理区 (WZR)	104.158 6	31.462 8	722	60	22.70	16.30
	威州受损未治理区 (WZD)	104.106 9	31.541 9	892	8	20.00	29.00
半干旱干热河谷气候 (SDHC)	汉旺未受损区 (HWU)	103.470 4	31.321 0	1 260	75	18.00	12.50
	汉旺治理区 (HWR)	103.572 8	31.472 5	1 371	45	20.10	16.40
	汉旺受损未治理区 (HWD)	103.423 6	31.385 6	1 265	5	18.60	14.80

1.2 土壤样品采集与养分测定

于每个试验样地沿坡向设置 1 条 5 m × 100 m 的样带, 以垂直高度 20 m 的间距把样地分为上坡、中坡、下坡, 每个坡位设置 3 个 5 m × 5 m 样方进行灌木调查, 在每个 5 m × 5 m 样方对角线上两端取 2 个 2 m × 2 m 小样方进行草本调查, 同时记录样方内出现的少量乔木。在每个坡位沿“S”形采集 6 个 0 ~ 20 cm 土壤样品, 分为 2 份, 1 份样品装入无菌保鲜袋, 并用冰盒暂时保存, 带回实验室放入冰箱 4℃ 保存, 过 2 mm 筛后用于土壤微生物群落碳源代谢多样性测定; 另一份装入自封袋带回实验室自然风干, 过 0.149 mm 筛后用于土壤养分测定。在土壤样品取样点附近, 对 0.5 m × 0.5 m 小样方内的灌草植被刈割法全部取样, 然后装入含有变色硅胶的自封袋带回实验室用烘干法测定其生物量。

土壤养分参照文献[21]进行, 其中土壤总有机碳 (TOC) 和全氮 (TN) 采用元素分析仪 (意大利, EA3000) 测定; 全磷 (TP) 含量采用碱熔-钼锑抗显色法测定; 全钾 (TK) 含量采用碱熔-原子吸收分光光度法 (仪器名称 AA7002 原子吸收分光光度计) 测定。

1.3 土壤微生物碳源代谢多样性测定

Biolog-ECO 技术通过测定分布于 96 孔中的不同类型碳源底物的分解情况来评价土壤微生物生理代谢特征, Biolog-ECO 生态板购自 BIOLOG 公司 (BIOLOG, Inc., CA, USA), 采用酶标仪 (TECAN Infinite 200, Switzerland) 在 590 nm 波长下进行测定和数据读取。Biolog-ECO 生态板内含有 6 大类 31 种碳源, 其中碳水化合物 (12 种) 氨基酸 (6 种)、羧

酸 (5 种)、多聚物 (4 种)、酚酸 (2 种)、胺类 (2 种)。具体试验方法参见文献[22]。

1.4 数据分析与统计

土壤微生物群落利用碳源的整体能力, 用平均颜色变化 (average-well-color-development, AWCD) 表示, 具体计算方法如下:

$$AWCD = \left[\sum (C_i - R) \right] / n$$

式中, C_i 为所测定的 31 个碳源孔吸光值, R 为对照孔吸光值, n 为碳源数目, 本研究中为 31。

本研究采用 AWCD 值在 144 h 的数据计算 Biolog-ECO 生态板中土壤微生物的群落代谢类型, 此时 AWCD 值在 0.25 ~ 0.6 之间, 这样可以对颜色变化率基本相同情况下 Biolog-ECO 板的碳源利用情况进行比较, 而不考虑接种密度带来的差异^[23], 同时由于 AWCD 正向反应的最低阈值 0.25, 这样可以在最短的时间内各处理间达到较好的分辨率^[24]。土壤微生物功能多样性指数分析选取 Shannon 多样性指数 (H)、Shannon 均匀度指数 (E)、优势度指数 (DI) 和 McIntosh 丰富度指数 (UI)。具体计算方法见文献[25]。数据用 EXCEL 2007 建库作图, 利用 SPSS 19.0 对土壤数据进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA)、皮尔逊 (Pearson) 相关分析, 利用国际通用软件 CANOCO 5.0 进行主成分 (PCA) 分析。

2 结果与分析

2.1 不同气候区土壤环境养分特征分析

比较不同气候区内不同受损治理情况下土壤环境的各养分含量可知 (表 2), 同一气候区内, 不同受

损治理情况下土壤有机碳、全氮含量具有显著差异,均表现为未受损区 > 受损治理区 > 受损未治理区,而全磷和全钾含量差异不显著. 相同受损治理情况下,不同气候区内土壤环境的各养分含量差异

不显著,在未受损区和受损治理区有机碳和全氮含量基本表现为亚热带湿润季风气候区 > 半干旱干热河谷气候区,全磷和全钾含量则与之相反,受损未治理区规律不明显.

表 2 各样地土壤养分特征¹⁾/g·kg⁻¹

Table 2 Soil nutrient characteristics of the sample plots/g·kg⁻¹

气候类型	样地处理	有机碳	全氮	全磷	全钾
亚热带湿润季风气候 (SHMC)	威州未受损区 (WZU)	42.76 ± 3.01A	2.57 ± 0.15A	0.73 ± 0.01A	37.96 ± 4.44A
	威州治理区 (WZR)	26.18 ± 2.05B	1.43 ± 0.08B	1.16 ± 0.05AB	36.76 ± 3.24A
	威州受损未治理区 (WZD)	5.72 ± 0.88C	0.84 ± 0.01C	2.18 ± 0.05B	49.14 ± 5.02A
半干旱干热河谷气候 (SDHC)	汉旺未受损区 (HWU)	30.10 ± 0.62AB	2.52 ± 0.02A	1.41 ± 0.04AB	44.48 ± 1.83A
	汉旺治理区 (HWR)	24.78 ± 4.33B	1.34 ± 0.32B	0.30 ± 0.03A	36.2 ± 5.58A
	汉旺受损未治理区 (HWD)	15.11 ± 1.56BC	0.72 ± 0.03C	1.27 ± 0.02AB	33.26 ± 3.25A

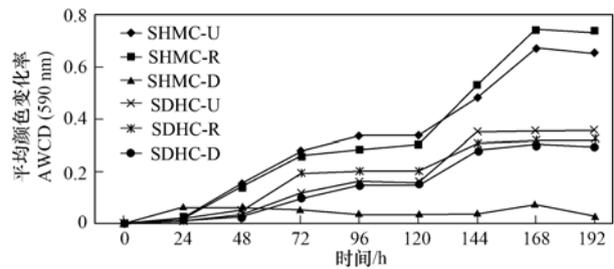
1) 同列不同大写字母表示在 0.05 水平上差异性显著

2.2 不同气候区土壤微生物的碳源利用动力学分析

AWCD 反映了土壤微生物群落对碳源的综合利用情况及其利用活性. 依 192 h 内碳源孔吸光测定值,计算出土壤微生物 AWCD 值并绘制其时间动态变化曲线(图 1). 可知,192 h 内亚热带湿润季风气候区受损未治理样地土壤微生物群落碳源利用能力普遍较低,其吸光值均在 0.1 以下,其它各类样地在 24 h 之内 AWCD 值较低,碳源基本未被利用,24 h 以后,AWCD 值开始出现变化,随着培养时间的延长,碳源开始被大量利用,在 48 ~ 72 h 和 120 ~ 144 h 内出现拐点. 总体上 AWCD 值呈“S”型曲线变化,144 h 后半干旱干热河谷气候区各样地以及亚热带湿润季风气候区受损未治理样地 AWCD 值变化趋于稳定,而亚热带湿润季风气候区未受损样地和受损治理样地 AWCD 值继续增强. 48 h 以后,除亚热带湿润季风气候区受损未治理样地外,AWCD 值在任意时间点均表现为亚热带湿润季风气候区 > 半干旱干热河谷气候区. AWCD 值在 48 ~ 132 h 内表现为 SHMC-U > SHMC-R > SDHC-R > SDHC-U > SDHC-D > SHMC-D, 132h 之后表现为 SHMC-R > SHMC-U > SDHC-U > SDHC-R > SDHC-D > SHMC-D.

2.3 不同气候区土壤微生物对不同类型碳源的利用能力分析

根据培养 144 h 后的吸光值可知,总体上,亚热带湿润季风气候区对 31 种碳源的利用强度整体水平较高且能够对较多种类的碳源进行利用. 如图 2 所示,根据吸光值大小,各样地吸光值在 0.5 以上的碳源数量分别为 SHMC-R (19) > SHMC-U (14) > SDHC-R (9) > SDHC-U (8) > SDHC-D (7) > SHMC-



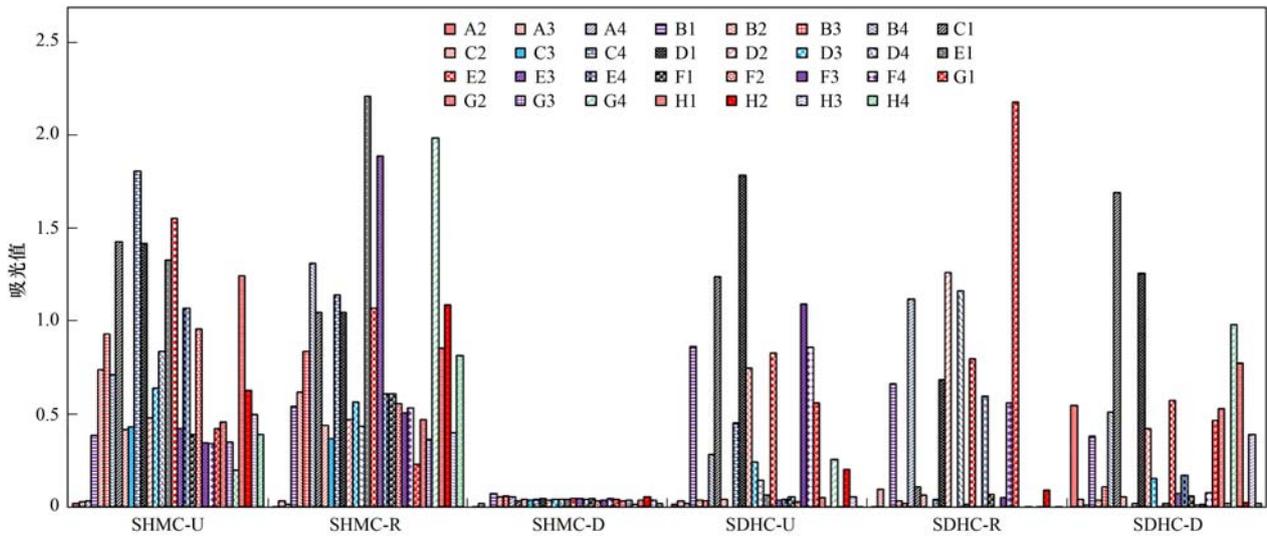
SHMC-U: 亚热带湿润季风气候未受损样地; SHMC-R: 亚热带湿润季风气候受损治理样地; SHMC-D: 亚热带湿润季风气候受损未治理样地; SDHC-U: 半干旱干热河谷气候未受损样地; SDHC-R: 半干旱干热河谷气候受损治理样地; SDHC-D: 半干旱干热河谷气候受损未治理样地,下同

图 1 土壤微生物碳源利用动力学特征

Fig. 1 Total carbon utilization kinetic characteristics of soil microbial community

D(0), 各样地吸光值在 1.0 以上的碳源数量分别为 SHMC-R (9) > SHMC-U (7) > SDHC-R (4) > SDHC-U (3) > SDHC-D (2) > SHMC-D (0).

吸光值越大,说明土壤微生物对碳源的利用能力越强,即亚热带湿润季风气候未受损区土壤微生物对吐温 40、L-苯基丙氨酸、吐温 80、 α -环式糊精、N-乙酰-D-葡萄糖胺、L-苏氨酸、 α -D-乳糖的利用能力较强;亚热带湿润季风气候受损治理区土壤微生物对 L-天门冬酰胺、吐温 40、L-苯基丙氨酸、吐温 80、 α -环式糊精、N-乙酰-D-葡萄糖胺、 γ -羟基丁酸、苯乙胺、D,L- α -磷酸甘油的利用能力较强;亚热带湿润季风气候区受损未治理区样地对各类碳源的利用能力均较弱;半干旱干热河谷气候区未受损样区土壤微生物对吐温 40、吐温 80、衣康酸的利用能力较强;半干旱干热河谷气候区受损治理区土壤微生物对 L-天门冬酰胺、D-甘露醇、L-丝氨酸、D-纤维



A2: β -甲基-D-葡萄糖苷(碳水化合物) β -Methyl-D-Glucoside, A3: D-半乳糖酸- γ -内酯(碳水化合物)D-Galactonic Acid Lactone, A4: L-精氨酸(氨基酸类)L-Arginine, B1: 丙酮酸甲酯(羧酸类)Pyruvic Acid Methyl Ester, B2: D-木糖(碳水化合物)D-Xylose, B3: D-半乳糖醛酸(碳水化合物)D-Galacturonic Acid, B4: L-天门冬酰胺(氨基酸类)L-Asparagine, C1: 吐温 40(多聚物)Tween 40, C2: i-赤藓糖醇(碳水化合物)i-Erythritol, C3: 2-羟基苯甲酸(酚酸类)2-Hydroxybenzoic Acid, C4: L-苯基丙氨酸(氨基酸类)L-Phenylalanine, D1: 吐温 80(多聚物)Tween 80, D2: D-甘露醇(碳水化合物)D-Mannitol, D3: 4-羟基苯甲酸(酚酸类)4-Hydroxybenzoic Acid, D4: L-丝氨酸(氨基酸类)L-Serine, E1: α -环糊精(多聚物) α -Cyclodextrin, E2: N-乙酰-D-葡萄糖胺(碳水化合物)N-Acetyl-D-Glucosamine, E3: γ -羟基丁酸(羧酸类) γ -Hydroxybutyric Acid, E4: L-苏氨酸(氨基酸类)L-Threonine, F1: 肝糖(多聚物)Glycogen, F2: D-葡萄糖胺酸(碳水化合物)D-Glucosaminic Acid, F3: 衣康酸(羧酸类)Itaconic Acid, F4: 甘氨酸-L-谷氨酸(氨基酸类)Glycyl-L-Glutamic Acid, G1: D-纤维二糖(碳水化合物)D-Cellobiose, G2: α -D-葡萄糖-1-磷酸(碳水化合物) α -D-Glucose-1-Phosphate, G3: α -丁酮酸(羧酸类) α -Ketobutyric Acid, G4: 苯乙胺(胺类)Phenylethylamine, H1: α -D-乳糖(碳水化合物) α -D-Lactose, H2: D,L- α -磷酸甘油(碳水化合物)D,L- α -Glycerol Phosphate, H3: D-苹果酸(羧酸类)D-Malic Acid, H4: 腐胺(胺类)Putrescine

图 2 地震灾区不同气候区土壤微生物对 31 种碳源的利用

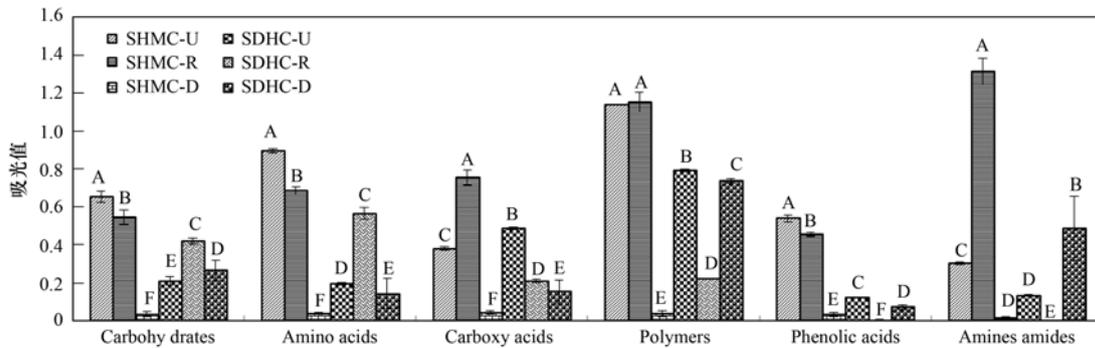
Fig. 2 Utilization of 31 kinds of carbon sources by the soil microbial community in different climate zones

Biolog-ECO 生态板上的 31 种碳源可以按照其化学基团的性质分成 6 大类,即碳水化合物、氨基酸、羧酸、多聚物、酚酸、胺类. 不同类型样地土壤微生物对 6 大类碳源的利用能力明显不同(图 3),反映了土壤微生物在数量和群落结构上的差异性.

2.4 不同气候区土壤微生物群落功能多样性指数

分析

根据 144 h 的吸光值数据,计算各样地土壤微生物的 Shannon 多样性指数(H)、Shannon 均匀度指数(E)、优势度指数(DI)和 McIntosh 丰富度指数(UI)(表 3). 总体上,不同气候类型区土壤微生物功能多样性差异显著($P < 0.05$). 亚热带湿润季风



Carbohydrates:碳水化合物; Amino acids:氨基酸; Carboxylic acids:羧酸; Polymers:多聚物; Phenolic acids:酚酸; Amines amides:胺类; 不同大写字母表示在 0.05 水平上差异性显著

图 3 土壤微生物对 6 类碳源的利用

Fig. 3 Utilization of 6 types of carbon sources by the soil microbial community

气候区内 Shannon 多样性指数、均匀度指数均表现为未受损区 > 受损治理区 > 受损未治理区, McIntosh 丰富度指数表现为受损治理区 > 未受损区 > 受损未治理区, 优势度指数表现为受损未治理区 > 未受损区 = 受损治理区; 半干旱干热河谷气候区

内 Shannon 多样性指数、均匀度指数表现为未受损区 > 受损未治理区 > 受损治理区, McIntosh 丰富度指数表现为受损治理区 > 未受损区 > 受损未治理区, 优势度指数表现为未受损区 = 受损未治理区 > 受损治理区.

表 3 地震灾区不同气候区土壤微生物群落功能多样性指数¹⁾

Table 3 Soil microbial community diversity index in different climate zones

气候区	样地	DI	H	E	UI
亚热带湿润季风气候 (SHMC)	威州未受损区 (WZU)	0.95 ± 0.08A	3.19 ± 0.06A	0.96 ± 0.04A	4.55 ± 0.98A
	威州治理区 (WZR)	0.95 ± 0.11A	3.18 ± 1.04A	0.95 ± 0.08A	5.09 ± 1.65A
	威州受损未治理区 (WZD)	0.99 ± 0.03A	0.37 ± 0.02C	0.11 ± 0.02C	0.22 ± 0.05C
半干旱干热河谷气候 (SDHC)	汉旺未受损区 (HWU)	0.91 ± 0.06AB	2.63 ± 1.03B	0.93 ± 0.05A	3.07 ± 0.89AB
	汉旺治理区 (HWR)	0.88 ± 0.11B	2.36 ± 1.14B	0.92 ± 0.11B	3.34 ± 1.31AB
	汉旺受损未治理区 (HWD)	0.91 ± 0.09AB	2.30 ± 0.89B	0.90 ± 0.15AB	2.82 ± 0.97B

1) 同列不同大写字母表示在 0.05 水平上差异性显著

2.5 地震灾区不同气候区土壤微生物与土壤环境的相关性分析

将 144 h 后平均颜色变化率 AWCD 值、Shannon 多样性指数 (H)、Shannon 均匀度指数 (E)、优势度指数 (DI)、McIntosh 丰富度指数 (UI) 与土壤养分各指标以及地上植被的群落平均盖度和群落平均生物量进行相关性分析后发现 (表 4) Shannon 多样性指数 (H)、Shannon 均匀度指数 (E) 和优势度指数 (DI) 两两之间达到了极显著相关 (P

< 0.01), McIntosh 丰富度指数 (UI) 与地上植被生物量和 AWCD 值达到了显著相关 ($P < 0.05$). 表征土壤微生物碳源利用强度的 AWCD 值和表征土壤微生物群落功能多样性的各指数与土壤养分虽然未达到显著相关水平, 但与地上植被生物量存在显著正相关性. 由此说明影响土壤微生物群落功能多样性的主要因素可能与碳源物质的来源, 地上植被的生产力等因素有密切关系并与土壤养分特征有一定联系.

表 4 地震灾区土壤环境与微生物群落功能多样性的相关关系¹⁾

Table 4 Correlational analyses of soil environment factors and soil microbial community diversity

	有机碳	全氮	全磷	全钾	盖度	生物量	AWCD	DI	H	E	UI
有机碳	1.00	0.881 *	-0.66	-0.34	0.829 *	0.976 **	0.52	-0.07	-0.08	-0.19	0.72
全氮		1.00	-0.32	0.11	0.942 **	0.838 *	0.34	0.01	-0.01	0.00	0.45
全磷			1.00	0.73	-0.33	-0.65	-0.16	0.56	0.55	0.69	-0.52
全钾				1.00	0.12	-0.32	-0.19	0.40	0.41	0.65	-0.48
盖度					1.00	0.849 *	0.42	-0.01	-0.03	-0.01	0.56
生物量						1.00	0.66 *	0.03	0.01	-0.11	0.831 *
AWCD							1.00	0.66	0.66	0.48	0.898 *
DI								1.00	0.999 **	0.954 **	0.27
H									1.00	0.957 **	0.26
E										1.00	0.06
UI											1.00

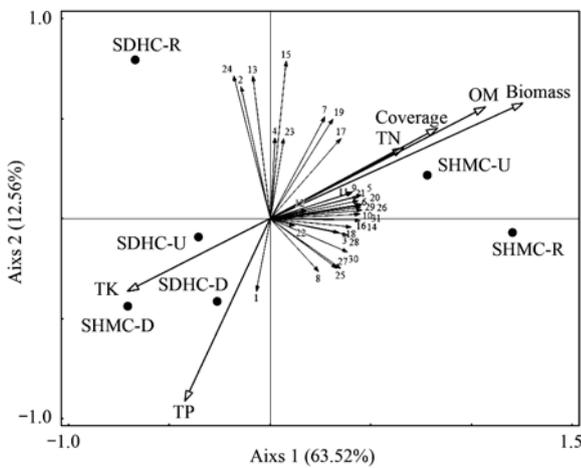
1) * 表示在 0.05 水平相关性显著, ** 表示在 0.01 水平上相关性极显著

2.6 不同气候区土壤微生物功能多样性的 PCA 分析及其环境解释

根据培养 144 h 不同碳源的吸光值, 结合各样地的土壤养分特征、地上植被盖度和生物量进行 PCA 分析 (图 4). 排序轴第 1 轴的贡献率为 63.52%, 排序轴第 2 轴的贡献率为 12.56%, 前 2 轴累计解释了变量的 76.08%. 箭头之间的夹角越小且箭头越长表示其相关性越强, 大多数种

类的碳源都与土壤有机质、全氮、地上植被的生物量和盖度具有较强的相关性. 样方间的距离长短表示其相似程度的大小, 距离越近, 相似程度越高, 据此可以把研究样地分为三组, 第一组为 SHMC-U 和 SHMC-R; 第二组为 SHMC-D, SDHC-U 和 SDHC-D; 第三组为 SDHC-R. 不同样地在不同碳源投影点的相对位置代表该碳源在该类型样地的重要程度, 顺着箭头方向表示其重要程度

越大,反之则表示重要程度越小. SHMC-U 和 SHMC-R 具有较为丰富的土壤有机质和全氮且地上植被覆盖度相对较高,生物量较大,故其土壤微生物对碳源的利用种类较多; SHMC-D 和 SDHC-D 土壤养分含量较少且地上植被覆盖度低,生物量小,碳源种类稀少,故微生物对碳源的利用程度较弱,但是专一性相对较强. 未受损区与受损区样地与土壤养分及地上植被生物量的垂直距离较近,说明土壤环境因子是制约微生物碳源的利用能力的关键因子,而受损治理区与土壤养分及地上植被生物量的垂直距离较远,说明土壤微生物对人类活动的敏感性较强.



1: β -甲基-D-葡萄糖苷 β -Methyl-D-Glucoside, 2: D-半乳糖酸- γ -内脂 D-Galactonic Acid Lactone, 3: L-精氨酸 L-Arginine, 4: 丙酮酸甲酯 Pyruvic Acid Methyl Ester, 5: D-木糖 D-Xylose, 6: D-半乳糖醛酸 D-Galacturonic Acid, 7: L-天门冬酰胺 L-Asparagine, 8: 吐温 40 Tween 40, 9: i-赤藓糖醇 i-Erythritol, 10: 2-羟基苯甲酸 2-Hydroxybenzoic Acid, 11: L-苯基丙氨酸 L-Phenylalanine, 12: 吐温 80 Tween 80, 13: D-甘露醇 D-Mannitol, 14: 4-羟基苯甲酸 4-Hydroxybenzoic Acid, 15: L-丝氨酸 L-Serine, 16: α -环式糊精 α -Cyclodextrin, 17: N-乙酰-D-葡萄糖胺 N-Acetyl-D-Glucosamine, 18: γ -羟基丁酸 γ -Hydroxybutyric Acid, 19: L-苏氨酸 L-Threonine, 20: 肝糖 Glycogen, 21: D-葡萄糖胺酸 D-Glucosaminic Acid, 22: 衣康酸 Itaconic Acid, 23: 甘氨酸-L-谷氨酸 Glycyl-L-Glutamic Acid, 24: D-纤维二糖 D-Cellobiose, 25: α -D-葡萄糖-1-磷酸 α -D-Glucose-1-Phosphate, 26: α -丁酮酸 α -Ketobutyric Acid, 27: 苯乙胺 Phenylethylamine, 28: α -D-乳糖 α -D-Lactose, 29: D, L- α -磷酸甘油 D, L- α -Glycerol Phosphate, 30: D-苹果酸 D-Malic Acid, 31: 腐胺 Putrescine, OM: 有机质 Organic C, TN: 全氮 TotalN, TP: 全磷 Total P, TK: 全钾 Total K, Coverage: 植被盖度, Biomass: 生物量

图 4 地震灾区不同气候区土壤微生物 PCA 排序

Fig. 4 Principle component analysis of soil microbial community diversity in different climate zones

3 讨论

土壤微生物的功能多样性是表征土壤环境干扰和修复的敏感指标^[26]. Biolog-ECO 生态板试验中的平均颜色变化率(AWCD)是主要通过微生物氧化不同碳源底物的能力来反映土壤微生物的群落活性进而揭示不同碳源利用的生理剖面. 本研究运用 Biolog-ECO 技术比较不同气候类型下不同受损程度和恢复方式下土壤微生物群落的功能多样性特征.

土壤微生物对不同种类碳源的利用程度在一定时间范围内随着时间的延长而增强,且变化趋势呈“S”型,与前人研究结果一致^[27]. 在土壤微生物群落碳源利用的动力学特征、碳源利用类型以及功能多样性指数方面不同类型样地之间均存在一定差异,导致这种差异的主要因素与水热条件、植被种类、植被生产力、地表枯落物、土壤养分以及根系分泌物等生态因子有关^[28]. 在特定的自然环境下,气候条件是制约土壤微生物群落多样性的一个重要原因. 罗海峰^[29]通过对我国 13 个地区的土壤微生物群落进行研究,发现无论是可培养细菌的多样性还是细菌物种遗传多样性均具有显著差异,这主要是不同环境条件影响所致. 而李云等^[30]通过研究不同气候条件对旱地红壤微生物群落代谢特征的影响证明红壤微生物的活性与月均温和累计降雨量呈显著正相关,本研究表明未受损区和受损治理区 AWCD 值均表现为亚热带湿润季风气候区 > 半干旱干热河谷气候区,主要是由于亚热带湿润季风气候区水热条件好,植被种类多且覆盖率高,土壤肥力条件优越,丰富的凋落物和根系分泌物为土壤微生物提供了充足的碳源. 受损未治理区 AWCD 值为半干旱干热河谷气候区 > 亚热带湿润季风气候区,主要原因是受损区植被覆盖率低,土壤结构松散,蓄水保肥能力弱,亚热带湿润季风气候区降水量大,进而养分流失严重,造成土壤微生物处于严重的胁迫生存条件.

对于完整的生态系统其地上植被群落、土壤环境与地下微生态系统是相互关联的,地上植被、土壤养分与微生物群落之间具有显著的相互作用关系. 有关研究表明,植被覆盖与裸露地相比,植被下土壤微生物生物量碳显著高于裸露地且随着恢复年限的增长差异越来越大^[31],Waid^[32]分析指出,植被是土壤生物赖以生存的有机营养物和能源的重要来源,同时活的植被也对植物凋落物的类型、堆积深度、水分含量等土壤生物定居的物理环境产生重要

影响,在地质灾害频发的生态脆弱区植被与土壤环境的梯度效应更为显著^[33]。汶川地震之后,地震及其所引发的次生地质灾害对植被覆盖造成了严重破坏^[34],导致土地裸露、土壤粗骨化、水土流失加剧^[16]。受损未治理区由于缺乏植被覆盖,土壤水、肥、气、热条件相对较差,故土壤微生物碳源利用种类最低,而人工治理措施不仅加强了土壤微生物对单一碳源利用的程度,也提高了碳源利用的种类,进而使土壤微生物群落的丰富度指数提高。亚热带湿润季风气候区土壤微生物的碳源利用种类明显多于半干旱干热河谷气候区,除了亚热带湿润季风气候区受损未治理区之外,其它各类样地土壤微生物功能多样性指数均表现为亚热带湿润季风气候区 > 半干旱干热河谷气候区,不同气候类型区内 Shannon 多样性指数和均匀度指数均表现为未受损区 > 受损治理区 > 受损区,一方面说明受损程度越高土壤微生物功能多样性越低,另一方面说明人工治理比自然恢复对土壤微生物功能多样性的贡献率更高。

将复杂的数据用二维图形表示出来,特征相近的样地在二维坐标图中位置相近,从而使研究者直观地感受到群落特征的差异性和协同性。应用 PCA 对各类样地土壤微生物碳源代谢多样性进行研究,土壤微生物的碳源代谢多样性特征及其碳源代谢类型与土壤养分特征和地上植被特征密切相关,土壤与植被的差异对土壤微生物功能代谢的影响是第一位的,而气候条件、受损程度以及恢复方式的不同主要是通过影响地上植被群落结构和土壤水肥特征来间接影响土壤微生物的功能代谢,土壤微生物群落结构和功能代谢特征对外界环境因子的扰动具有极强的敏感性,进而可以用来反映受损生态系统的恢复效果和恢复潜力。

4 结论

(1)应用 Biolog-ECO 生态板技术,实现了对汶川地震灾区不同气候区内未受损区、受损治理区和受损未治理区样地土壤微生物群落碳源代谢特征的测定。

(2)研究区各样地土壤微生物群落碳源利用的 AWCD 值随时间变化均呈“S”型曲线,其中半干旱干热河谷气候区各样地 AWCD 值差异性不显著,而亚热带湿润季风气候区内未受损区和受损治理区 AWCD 值显著高于受损未治理区。

(3)研究区各样地土壤微生物群落碳源利用种

类整体表现为亚热带湿润季风气候区 > 半干旱干热河谷气候区,各气候区内则为受损治理区 > 未受损区 > 受损未治理区。

(4)不同气候类型区内土壤微生物群落碳源代谢多样性指数差异显著,而同一气候区内各类型样地土壤微生物群落碳源代谢多样性指数差异性不显著,未受损区样地均具有最高的 Shannon 多样性指数和均匀度指数。

(5)研究区样地土壤微生物群落碳源代谢能力与地上植物生物量具有显著相关性,其在 PCA 二维坐标图中的排序位置与地上植物生物量、植被盖度、土壤有机碳和全氮含量相关性显著。

参考文献:

- [1] Vitousek P M, Matson P A. Mechanisms of nitrogen retention in forest ecosystem: a field experiment [J]. *Science*, 1984, **225** (4657): 51-52.
- [2] Kennedy A C, Smith K L. Soil microbial diversity and the sustainability of agricultural soils [J]. *Plant and Soil*, 1995, **170** (1): 75-86.
- [3] Harris J A, Birch P. Soil microbial activity in opencast coalmine restoration [J]. *Soil Use and Management*, 1989, **5** (4): 155-160.
- [4] 沈萍,陈向东. 微生物学复兴的机遇挑战和趋势 [J]. *微生物学报*, 2010, **50** (1): 1-6.
- [5] Girvan M S, Campbell C D, Killham K, *et al.* Bacterial diversity promotes community stability and functional resilience after perturbation [J]. *Environmental Microbiology*, 2005, **7** (3): 301-313.
- [6] Zhang N L, Guo J X, Wang X Y, *et al.* Soil microbial feedbacks to climate warming and atmospheric N deposition [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, **31** (2): 252-261.
- [7] Zelles L. Fatty acid patterns of phospholipids and lipopolysaccharides in the characterization of microbial communities in soil: a review [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, **29** (2): 111-129.
- [8] Hortal T R, Bruns T D. The molecular revolution in ectomycorrhizal ecology: peeking in to the black box [J]. *Molecular Ecology*, 2001, **10** (8): 1855-1871.
- [9] 李勇,周荣军, Densmore A L, *et al.* 青藏高原东缘龙门山晚新生代走滑-逆冲作用的地貌标志 [J]. *第四纪研究*, 2006, **26** (1): 40-50.
- [10] 欧阳志云,徐卫华,王学志,等. 汶川大地震对生态系统的影响 [J]. *生态学报*, 2008, **28** (12): 5801-5809.
- [11] 包维楷. 汶川地震重灾区生态退化及其恢复重建对策 [J]. *中国科学院院刊*, 2008, **23** (4): 324-329.
- [12] Cui P, Lin Y M, Chen C. Destruction of vegetation due to geohazards and its environmental impacts in the Wenchuan earthquake areas [J]. *Ecological Engineering*, 2012, **44**: 61-69.
- [13] Schaller G B, Hu J C, Pan W S, *et al.* The giant pandas of

- Wolong[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1985. 102-104.
- [14] Allen R B, Bellingham P J, Wisser S K. Immediate damage by an earthquake to a temperate montane forest[J]. *Ecology*, 1999, **80**(2): 708-714.
- [15] Cheng S, Yang G, Yu H, *et al.* Impacts of Wenchuan Earthquake-induced landslides on soil physical properties and tree growth[J]. *Ecological Indicators*, 2012, **15**(1): 263-270.
- [16] 吴聪, 王金牛, 卢涛, 等. 汶川地震对龙门山地区山地土壤理化性质的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2012, **18**(6): 911-916.
- [17] 张翔, 王庆安, 方自力, 等. 汶川地震灾区自然植被恢复的先锋植物特征分析[J]. *中国水土保持*, 2011(4): 47-49.
- [18] 王庆安, 张翔, 毛竹. 汶川地震生态环境破坏严重区地形高程和起伏度分布特点[J]. *科技导报* 2009, **27**(16): 53-59.
- [19] 林勇明, 吴承祯, 洪伟, 等. 汶川地震灾区典型区不同植被类型土壤种子库特征——以北川县苏保河、魏家沟流域为例[J]. *中国生态农业学报*, 2012, **20**(1): 99-104.
- [20] Zhang B, Jiao Q J, Wu Y H, *et al.* Estimating soil erosion changes in the Wenchuan earthquake disaster area using geospatial information technology[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2009, **3**(1): Art031675, doi: 10.1117/1.3153914.
- [21] 严旭升. 土壤肥力研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1998. 123-174.
- [22] 毕江涛, 贺达汉, 沙月霞, 等. 荒漠草原不同植被类型土壤微生物群落功能多样性[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, **27**(5): 149-155.
- [23] Garland J L. Analytical approaches to the characterization of samples of microbial communities using patterns of potential C source utilization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, **28**(2): 213-221.
- [24] Gomez E, Ferreras L, Toresani S. Soil bacterial functional diversity as influenced by organic amendment application[J]. *Bioresource and Technology*, 2006, **97**(13): 1484-1489.
- [25] 曹成有, 姚金冬, 韩晓妹, 等. 科尔沁沙地小叶锦鸡儿固沙群落土壤微生物功能多样性[J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(9): 2309-2315.
- [26] Sudden A M. Ecology: diversity and ecosystem resilience [J]. *Science*, 2000, **290**(5490): 233-235.
- [27] 董立国, 袁汉民, 李生宝, 等. 玉米免耕秸秆覆盖对土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. *生态环境学报*, 2010, **19**(2): 444-446.
- [28] 胡亚林, 汪思龙, 颜绍旭. 影响土壤微生物活性与群落结构因素研究进展[J]. *土壤通报*, 2006, **37**(1): 170-176.
- [29] 罗海峰. 变性梯度凝胶电泳技术研究土壤微生物多样性[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2004. 105-106.
- [30] 李云, 孙波, 李忠佩, 等. 不同气候条件对旱地红壤微生物群落代谢特征的长期影响[J]. *土壤*, 2011, **43**(1): 60-66.
- [31] Harris J A. Measurements of the soil microbial community for estimating the success of restoration[J]. *European Journal of Soil Science*, 2003, **54**(4): 801-808.
- [32] Waid J S. Does soil biodiversity depend upon metabiotic activity and influences[J]. *Applied Soil Ecology*, 1999, **13**(2): 151-158.
- [33] 张广帅, 邓浩俊, 俞伟, 等. 泥石流频发区山地土壤环境因子与植被群落垂直梯度及其关系分析——以云南小江流域为例[J]. *应用与环境生物学报*, 2014, **20**(4): 646-654.
- [34] 罗慧芬, 苗放, 叶成名, 等. 汶川地震前后茂县植被覆盖度变化研究[J]. *水土保持通报*, 2013, **33**(3): 202-205.

CONTENTS

Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days	ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping, WEI Yu-qing, <i>et al.</i> (373)
Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station	PU Wei-wei, SHI Xue-feng, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (379)
Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan	GUO Xiao-fang, CUI Yang, WANG Kai-yang, <i>et al.</i> (388)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Taiyuan	LIU Shan, PENG Lin, WEN Yan-ping, <i>et al.</i> (396)
Levels and Distribution of Organochlorine Pesticides and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Atmospheric Particulates in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	LI Qiu-xu, HE Chang, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (402)
Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing	WANG Bing, ZHANG Wei-kang, NIU Xiang, <i>et al.</i> (408)
Carbon Sources Metabolic Characteristics of Airborne Microbial Communities in Constructed Wetlands	SONG Zhi-wen, WANG Lin, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (415)
Spatial Distribution Characteristics of the Physical and Chemical Properties of Water in the Kunes River After the Supply of Snowmelt During Spring	LIU Xiang, GUO Ling-peng, ZHANG Fei-yun, <i>et al.</i> (421)
Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China	LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, <i>et al.</i> (430)
Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China	ZHANG Lei, LI Qiu-hua, HUANG Guo-jia, <i>et al.</i> (438)
Phosphorus Fractions, Sorption Characteristics and Its Release in the Sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China	JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (448)
Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary	GUO Xing-sen, LÜ Ying-chun, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (457)
Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis	CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, <i>et al.</i> (464)
Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake	MENG Ya-yuan, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (471)
Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch	LI Ru-zhong, QIAN Jing, DONG Yu-hong, <i>et al.</i> (481)
Sources, Pollution Statue and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaili, JIANG Feng-qing (490)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region	ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (497)
Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China	DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, <i>et al.</i> (507)
Removal of Triclosan with the Method of UV/ClO ₂ and Its Degradation Products	LI Yu-ying, HE Wen-long, LI Qing-song, <i>et al.</i> (516)
Mechanism of Groundwater As(V) Removal with Ferric Flocculation and Direct Filtration	KANG Ying, DUAN Jin-ming, JING Chuan-yong (523)
Preparation of Nano Zero-valent Iron/ <i>Sargassum horneri</i> Based Activated Carbon for Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution	ZENG Gan-ming, WU Xiao, ZHENG Lin, <i>et al.</i> (530)
Adsorption of Cr(VI) on Magnetic Graphene from Aqueous Solution	LIU Wei, YANG Qi, LI Bo, <i>et al.</i> (537)
Adsorption of the TiO ₂ @Yeast Composite Microspheres for Adsorbing Fluorescent Whitening Agent-VBL in Fixed Bed	WU Fei, ZHANG Kai-qiang, BAI Bo, <i>et al.</i> (545)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of MnO ₂ /CFP Composite Electrode	LIU Fang-yuan, HU Cheng-zhi, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (552)
Preparation of Weak Light Driven TiO ₂ Multi Composite Photocatalysts via Adsorption Phase Synthesis	WANG Ting, ZHU Yi-chen, SUN Zhi-xuan, <i>et al.</i> (559)
Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A in Water by Fe Doped-TiO ₂ Nanotube Arrays Under Simulated Solar Light Irradiation	XIANG Guo-liang, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (568)
Oxidation of Cationic Red 3R in Water with H ₂ O ₂ Catalyzed by Mineral Loaded with Fe/Co	MA Nan, LIU Hua-bo, XIE Xin-yuan (576)
Characteristics of Acid Red 3R Wastewater Treatment by Ozone Microbubbles	ZHANG Jing, DU Ya-wei, LIU Xiao-jing, <i>et al.</i> (584)
Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal	HAN Yun, XU Song, DONG Tao, <i>et al.</i> (590)
Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (597)
Effects of Dissolved Oxygen in the Oxidative Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater	DING Peng-yuan, CHU Li-bing, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (604)
Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement	ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, <i>et al.</i> (612)
Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant	YANG Shi-dong, CHEN Xia, LIU Cao, <i>et al.</i> (619)
Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded <i>Leymus chinensis</i> Steppes in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (625)
Impacts of Elevated Ozone Concentration on N ₂ O Emission from Arid Farmland	WU Yang-zhou, HU Zheng-hua, LI Cen-zi, <i>et al.</i> (636)
Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest	LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (644)
Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin	LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (652)
Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China	ZHANG Shuai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (661)
Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake	ZHANG Guang-shuai, LIN Yong-ming, MA Rui-feng, <i>et al.</i> (669)
Optimization of Electrode Configuration in Soil Electrokinetic Remediation	LIU Fang, FU Rong-bing, XU Zhen (678)
Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation	ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong, YANG Bing, <i>et al.</i> (686)
Transformation and Mobility of Arsenic in the Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils at Different Growth Stages of Rice	YANG Wen-tao, WANG Ying-jie, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (694)
Extraction of Plant Root Apoplast Solution; A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, <i>et al.</i> (700)
Mechanism of Manganese Binding to Leaf Cell Wall of <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LIU Cui-ying, LI Ping, <i>et al.</i> (706)
Degradation Characteristics of Naphthalene with a <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain Isolated from Soil Contaminated by Diesel	LIU Wen-chao, WU Bin-bin, LI Xiao-sen, <i>et al.</i> (712)
Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos	CHEN Mu-fei, HUANG Cheng-zhi, PU De-yong, <i>et al.</i> (719)
Physiological Response of <i>Neocaridina denticulata</i> to the Toxicity of Cu ²⁺ and Chlorpyrifos	LI Dian-bao, ZHANG Wei, WANG Li-qing, <i>et al.</i> (727)
Determination of Anilines in Environmental Water Samples by Simultaneous Derivatization and Ultrasound Assisted Emulsification Microextraction Combined with Gas Chromatography-Flame Ionization Detectors	TIAN Li-xun, DAI Zhi-xi, WANG Guo-dong, <i>et al.</i> (736)
Adsorption of Calcium Ion from Aqueous Solution Using Na ⁺ -Conditioned Clinoptilolite for Hot-Water Softening	ZHANG Shuo, WANG Dong, CHEN Yuan-chao, <i>et al.</i> (744)
Construction and Application of Economy-Pollution-Environment Three-Dimensional Evaluation Model for District	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning (751)

《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)

2015年2月15日 第36卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 2 Feb. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行