

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化 祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)

基于重庆本地碳成分谱的 PM_{2.5} 碳组分来源分析 张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)

重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究 徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)

基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析 王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)

基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价 刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)

典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析 徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)

火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究 王占山, 潘丽波 (853)

国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性 楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)

稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇 刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)

河口湿地近地面大气 CO₂ 浓度日变化和季节变化 张林海, 仝川, 曾从盛 (879)

三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量 李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)

施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH₄、N₂O 和 NH₃ 排放特征 万合锋, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)

干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响 张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)

长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究 吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)

汾河中下游浮游藻类群落特征及水质分析 王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)

基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究 陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)

三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征 李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)

黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析 于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)

太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素 揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)

黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系 董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)

纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究 杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)

铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究 唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)

磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响 张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)

预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响 赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)

陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行 付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)

冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征 黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)

烷基多苷促进污泥水解产酸的研究 陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)

高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响 操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)

兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价 李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)

珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价 郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)

海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价 李飞, 徐敏 (1035)

再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险 吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)

瓦埠湖流域庄集镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估 李如忠, 邹阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)

三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评估 张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)

基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价 陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)

干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究 薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)

缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入 孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)

三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响 韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)

黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例 师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)

天然林土壤有机碳及矿化特征研究 杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)

不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化 张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)

硫酸对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响 杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)

6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应 山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)

基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究 张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)

人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究 吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)

农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)

中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态 宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)

苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析 周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)

UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响 刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)

Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响 张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)

对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究 宋彩霞, 邓新平, 厉阆, 肖伟 (1176)

克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用 刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)

铅元素人为循环环境释放物形态分析 梁静, 毛建素 (1191)

污染排放与环境质量关系模型构建与应用 李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)

微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展 闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)

《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)

中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态

宋影, 辜夕容*, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩

(西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘要: 采用凋落物原位分解法, 研究了中亚热带马尾松林中马尾松、榲栌凋落叶单独及混合(自然质量比 8:2)分解过程中的微生物数量与酶活性动态。结果表明:①3 类凋落物的年分解常数 K 的大小为:混合凋落物(0.94) > 榲栌凋落物(0.86) > 马尾松凋落物(0.67); ②3 类凋落物真菌数量和微生物数量均在夏季(135 d 时)达到最大值, 而此时细菌和放线菌数量最低; ③3 类凋落物纤维素酶活性、酸性磷酸酶活性均与凋落物干重剩余率呈显著正相关($P < 0.05$), 而马尾松与混合型凋落物中的多酚氧化酶活性同凋落物干重剩余率呈极显著负相关($P < 0.01$); ④微生物数量和多酚氧化酶活性均总体表现为榲栌凋落物 > 混合凋落物 > 马尾松凋落物, 酸性磷酸酶活性多表现为榲栌凋落物最低, 与分解常数 K 排列有一定的差异, 说明凋落物分解是微生物和多种酶共同作用的结果。整体研究表明, 凋落物质量和季节气候的差异显著影响微生物群落及其调控的生态过程, 与纯马尾松凋落叶相比, 针阔混合使微生物数量和多酚氧化酶活性显著提高, 这可能是导致分解加快的重要原因。

关键词: 凋落物分解; 微生物数量; 酶活性; 马尾松林; 中亚热带

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-1151-08 DOI: 10.13227/j.hjx.2014.03.047

Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of *Pinus massoniana* Forest in Mid-subtropical Area

SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, MAO Wen-tao, WU Xue-lian, WAN Yu-xuan

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: The dynamics of microbial quantity and enzyme activities during decomposition process of masson pine (*Pinus massoniana*) leaf litter, oak (*Quercus aliena*) leaf litter and their mixture (at natural mass ratio, 8:2) were studied with litterbag method in the pinus forest typical vegetations of mid-subtropical Jinyun Mountain nature reserve. The results showed that the decomposition constant K of leaf litter ranked as follows: mixture (0.94) > oak (0.86) > masson pine (0.67). Microbial groups and enzyme activity exhibited some similar responses to the litter decomposition process. After 135 days, fungal and microbial quantities reached the maximum while bacterial and actinomycetic number reached the minimum, presumably due to the high-temperature environment. The correlative analysis showed that the cellulase and acid phosphatase activity had significant positive relationship with the dry weight remaining rate ($P < 0.05$), which played a key role for microbes in utilizing the substrates at early stages. Meanwhile, the polyphenol oxidase activity showed highly significant negative correlation with the dry weight remaining rate ($P < 0.01$) in pine litter and the mixed litter, which worked on further decay of recalcitrant compound at late stages. Through the whole process, the microbial quantity and polyphenol oxidase activity were generally in the order of oak litter > mixed litter > pine litter, while in most cases the oak litter showed the lowest acid phosphatase activity, the ranking of which had some differences with the order of the decomposition constant K , indicating that litter decomposition was the result of integrated action by microbe and many kinds of enzymes. The results suggested that differences in litter composition and seasonal climate strongly influenced the microbial communities and the ecosystem processes they mediate. When mixed with oak leaves in given stand, the pine litter had an accelerating decomposition rate, which might depend on the higher microbial quantity and polyphenol oxidase activity in the mixed litter.

Key words: leaf litter decomposition; microbial quantity; enzyme activity; masson pine stands; mid-subtropical zone

凋落物分解是森林土壤物质转化的基础, 是植物和微生物养分的主要来源, 在维持森林生态系统碳及养分循环中起重要作用^[1~4]。微生物通过产生并优化分配 C、N、P 循环相关酶类而成为主要的分解者^[5], 研究微生物及其所产生的酶在分解过程的活性动态, 对了解森林凋落物分解的微观生态过程具有重要意义。近年来, 国内外学者在研究森林凋落物分解过程的影响因素、养分释放和凋落物对土

壤性质的影响基础上^[1, 4], 更加关注微生物及其所产生的酶在凋落物分解过程中所起的作用^[5~11]。Criquet 等^[6]和张瑞清等^[9]在热带地区的研究表明, C 循环相关酶活性与凋落物分解的质量损失变化密

收稿日期: 2013-06-27; 修订日期: 2013-08-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(31100464); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2012B021)

作者简介: 宋影(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为林木营养、森林微生物生态学, E-mail: sy892566@163.com

* 通讯联系人, E-mail: gx0956@163.com

切相关. 而 Waring^[5] 在热带地区的研究表明, 凋落物组成差异显著影响真菌丰富度和酶活性的总体水平, 尤其是酸性磷酸酶和纤维素二糖水解酶, 酶可解释凋落叶分解速率种间变异的 35%. 季晓燕等^[11] 在对北亚热带酸雨处理下调落叶分解研究中发现, 脲酶和纤维素酶对凋落叶的分解贡献较大, 而蔗糖酶的影响相对较小. 这一系列研究结果表明, 微生物及所产生的酶与凋落物分解进程密切相关, 其种类及活性大小因凋落物组成和环境条件而异^[5~11]. 但目前国内有关中亚热带地区凋落物中微生物和酶活性对凋落物组成及分解进程的响应研究还相对较少.

马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 是我国南方重要的造林树种, 因其适应力强、速生、经济价值高、用途广等优点, 成为荒山荒地造林的先锋树种和重要的用材林树种之一^[12]. 近年来, 大面积人工马尾松纯林及纯林连栽而导致的土壤肥力退化、林分生产力低下和生态承受力脆弱等诸多问题日益突出^[13]. 目前已形成多种针阔混交经营模式^[14, 15], 以期促进凋落物分解和养分循环以缓解土壤肥力衰退现状. 为更加了解中亚热带地区凋落物分解的生态过程, 本研究以缙云山天然马尾松林中主要树种马尾松和槲栎 (*Quercus aliena*) 的凋落叶为材料, 分析它们在单一及混合分解过程中主要微生物类群及分解酶活性的变化规律, 探究我国南方低山丘陵地区马尾松林自然演替过程中的森林微生物生态过程, 以期为我国马尾松混交林营造和生态效应研究提供科学依据.

1 材料与与方法

1.1 研究区域和试验样地自然概况

研究区域位于重庆市缙云山自然保护区马尾松次生林地中, 地理坐标为 106°23'E, 29°50'N, 海拔 450~520 m, 坡度 23°~25°, 坡向 45°SE. 属中亚热

带湿润季风气候, 年平均气温 18.6°C, 最热月 (8 月) 平均气温 28.3°C, 最冷月 (1 月) 平均气温 8.3°C, 年平均降水量 1 243.8 mm. 研究区域内土壤以酸性黄壤为主, pH 值 3.9~4.3. 自然植被以常绿阔叶林、暖性针叶林为主, 其中马尾松和槲栎是这一区域的典型植被. 样地内除主要植物马尾松和槲栎外, 还零星存在四川山矾 (*Symplocos setchuensis*)、细枝柃 (*Eurya matsudai*)、黄牛奶树 (*Symplocos laurina*) 和马甲菝葜 (*Smilax lanceifolia*) 等其它植物.

1.2 试验设计与处理

于 2009 年 1 月初的晴朗天气下, 研究区内收集马尾松和槲栎新近凋落叶, 同期用 25 cm × 30 cm 矩形取样器, 按“S”型路径收集林地表层凋落物 7 份, 将收集到的材料上的泥沙去净, 混匀, 自然风干后备用. 经测定, 自然条件下马尾松与槲栎凋落物的平均质量比为 8:2, 供试凋落物性质见表 1.

凋落物的分解采用国际通用的凋落物分解袋 (litter bag) 法. 将收集到的风干凋落物分为 3 类: ①马尾松落叶 (*Pinus massoniana* leaf litter, PL); ②槲栎落叶 (*Quercus aliena* leaf litter, QL); ③混合凋落物 (Mixed leaf litter, 马尾松与槲栎落叶质量比 8:2, ML), 将它们分别装入 120 目尼龙网所制的 22 cm × 25 cm 凋落物袋中, 每袋 25.00 g. 每组凋落物 24 个, 共计 72 个凋落物袋. 在 2009 年 3 月初, 在样地内按随机区组试验设计法选取样点, 轻轻除去地表凋落物层, 将凋落物袋置于样点土壤表面, 让其自然分解. 以后每隔 45 d 回收各类凋落物袋 3 袋, 去除附着泥沙及根系等杂质, 将样品装入已灭菌的封口保鲜袋中迅速带回实验室, 每袋称量凋落物残留鲜重后, 充分混匀并平均分为两份, 1 份于 80°C 烘干至恒重, 测定凋落物干重剩余率, 另 1 份于 4°C 冷藏保存, 用于微生物数量及酶活性的测定, 1 个月内完成分析. 试验为期 360 d, 共计分析 8 次样品.

表 1 供试凋落物性质 (平均值 ± 标准差, n=3)

Table 1 Properties of experimental litters (means ± SD, n=3)

凋落物类型	C/g·kg ⁻¹	N/g·kg ⁻¹	P/g·kg ⁻¹	C/N
槲栎凋落物 (QL)	449.6 ± 7.3 b B	15.47 ± 0.44 a A	0.908 ± 0.028 a A	29.06 ± 1.42 c C
马尾松凋落物 (PL)	512.9 ± 7.8 a A	7.62 ± 0.36 c C	0.145 ± 0.039 c C	67.39 ± 2.18 a A
混合凋落物 (ML)	500.1 ± 9.5 a A	9.12 ± 0.47 b B	0.295 ± 0.032 b B	54.81 ± 1.92 b B

1) 同一列中标有相同小写字母表示差异不显著 ($P > 0.05$), 标有不同大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$)

1.3 测定指标与方法

烘干法称量凋落物残留干重, 使用 Olson 衰减指数模型 $M_t = M_0 e^{-kt}$ (式中, M_0 为初始质量, M_t 为

某一时间 t 时的总质量, k 为分解速率常数) 计算凋落物分解速率 k ^[16].

微生物数量的测定: 分别用牛肉膏蛋白胨培养

基、马丁氏培养基和高氏一号培养基培养凋落物中微生物,采用常规稀释平板计数法测定凋落物中细菌、真菌和放线菌的数量^[17]。

凋落物分解过程中酶活性的测定:根据土壤酶测定方法,在共底物培养的基础上,分别采用硫酸萘酚比色法、邻苯三酚比色法和磷酸苯二钠比色法测定凋落物中纤维素酶、多酚氧化酶和酸性磷酸酶活性^[18, 19]。纤维素酶、多酚氧化酶和酸性磷酸酶活性测定:1个酶活力单位(EU)分别以单位时间(1 h)内1 g凋落物催化生成的葡萄糖(37℃)、没食子素(30℃)、酚(37℃)的mg数表示。

1.4 数据处理

使用SPSS 17.0软件进行数据的统计分析。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)、Duncan和Dunnnett法比较不同类型凋落物的初始化学组成、干重剩余率、微生物数量及酶活性的差异,用Pearson法作酶活性与凋落物分解指标的相关性分析。

采用Microsoft Excel 2003进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 凋落物的分解动态

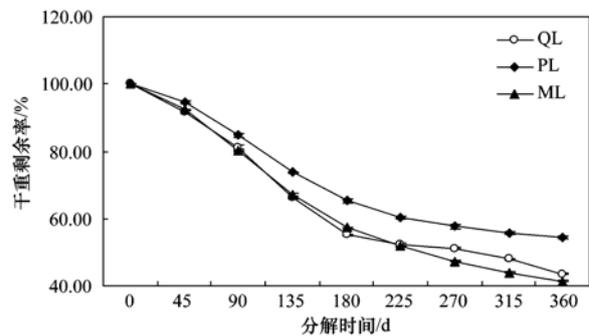
在整个分解期内,随着分解时间的增加,3类凋落物的干重剩余率均减小并表现出先快后慢的趋势,且马尾松凋落物的干重剩余率均高于另两类凋落物(图1)。在分解前期(0~225 d),榲栌凋落物和混合型凋落物的干重剩余率无明显差异,但到了后期(225~360 d),混合型凋落物的干重剩余率却显著低于榲栌凋落物($P < 0.05$)。到试验期末时,马尾松凋落物的干重剩余率最大(54.34%),其次为榲栌凋落物(43.49%),混合型凋落物的最小

(41.33%)。

根据Olson衰减模型,拟合出3类凋落物的干重残留率随时间(a)的指数方程,并利用该模型估测3类凋落物分解50%和分解95%所用时间,结果如表2所示。

从表2可以看出,3类凋落物分解模型与实验数据的拟合效果很好,决定系数 R^2 均在0.948以上。3类凋落物的分解常数的顺序为:混合凋落物>榲栌凋落物>马尾松凋落物,周转期(即分解95%所用时间)情况为马尾松凋落物>榲栌凋落物>混合凋落物,且马尾松凋落叶的周转期比榲栌凋落叶、混合凋落叶分别长29.2%、41.1%,可见阔叶凋落物榲栌的分解快于针叶马尾松,针阔混合促进了凋落物的分解。

将分解50%和分解95%所需时间进行比较发现,3类凋落物分解95%所需时间均为分解50%所需时间的4.5倍左右,与图1中凋落物分解先快后慢的变化特点相一致。



QL: 榲栌凋落物; PL: 马尾松凋落物; ML: 混合凋落物,下同

图1 凋落物干重剩余率动态

Fig. 1 Variation of dry weight remaining rate of forest litters with decomposition time

表2 凋落叶干重剩余率随时间的指数方程¹⁾

Table 2 Equation of dry weight remaining rate of litters with the development time

凋落物类型	指数方程	决定系数 R^2	分解常数 K	分解 50% 所用时间/a	分解 95% 所用时间/a
榲栌凋落物(QL)	$y = 96.377e^{-0.8572t}$	0.948	0.8572	0.77	3.45
马尾松凋落物(PL)	$y = 97.707e^{-0.6671t}$	0.951	0.6671	1.00	4.46
混合凋落物(ML)	$y = 98.695e^{-0.9439t}$	0.977	0.9439	0.72	3.16

1) y : 干重剩余率(%); t : 分解时间(a)

2.2 凋落物分解中的微生物数量动态

从表3可以看出,3类凋落物中微生物数量随着分解阶段的不同而有明显差异。除在45 d和315 d时略低外,榲栌凋落物中真菌数量在其他阶段均占到微生物总量的一半以上,在总体上占优势。尤其是在90~180 d这一阶段,其所占比例维持在90%以上;混合型凋落物中,细菌除在225~315 d

这段时间占绝对优势(>67%)外,其他时段均以真菌为主(>53%),尤其是45~135 d这段时间真菌数量维持在90%以上,占有绝对优势;马尾松凋落物中的真菌数量除在90、135和270 d时占有绝对优势(占比>74%)外,其他阶段均以细菌为主(>52%),而放线菌的数量在整个分解过程中所占比例都最低。值得注意的是,3类凋落物中真菌和微

表 3 凋落物分解中的微生物数量变化(平均数 ± 标准误)¹⁾

Table 3 Variation of microbial counts during litter decomposition process(Mean ± SD)					
凋落物类型	时间 /d	细菌数量 × 10 ⁶	真菌数量 × 10 ⁶	放线菌数量 × 10 ⁶	总数 × 10 ⁶
槲栎凋落物(QL)	45	0.617 ± 0.197 dB	0.203 ± 0.096 fB	0.137 ± 0.030 cB	0.957 ± 0.323 dC
	90	0.732 ± 0.211 dA	37.679 ± 8.026 bA	0.081 ± 0.028 cA	38.492 ± 8.275 bA
	135	0.068 ± 0.026 eA	155.111 ± 31.274 aA	0.010 ± 0.004 dB	155.189 ± 31.304 aA
	180	0.579 ± 0.163 dA	11.333 ± 1.006 cA	0.500 ± 0.087 aA	12.412 ± 1.256 cA
	225	6.219 ± 1.802 abB	7.442 ± 1.178 dA	0.311 ± 0.054 bA	13.972 ± 3.034 cB
	270	4.698 ± 1.224 bA	11.711 ± 1.110 cA	0.099 ± 0.032 cA	16.508 ± 2.366 cA
	315	8.678 ± 2.513 aA	2.197 ± 0.985 eA	0.453 ± 0.066 aA	11.328 ± 3.564 cA
	360	2.110 ± 0.756 cA	12.171 ± 1.014 cA	0.315 ± 0.058 bA	14.596 ± 1.828 cA
马尾松凋落物(PL)	45	23.176 ± 5.134 aA	7.738 ± 0.973 bA	0.091 ± 0.021 aB	31.005 ± 6.128 bA
	90	0.136 ± 0.098 cB	7.178 ± 1.012 bC	0.063 ± 0.009 aA	7.377 ± 1.119 cC
	135	0.079 ± 0.021 cA	100.284 ± 26.301 aA	0.008 ± 0.004 cB	100.370 ± 26.326 aA
	180	0.229 ± 0.161 cB	0.139 ± 0.052 dC	0.072 ± 0.010 aC	0.440 ± 0.223 dC
	225	0.582 ± 0.301 bcC	0.230 ± 0.097 dB	0.061 ± 0.010 aB	0.873 ± 0.408 dC
	270	0.271 ± 0.125 cB	0.824 ± 0.207 cB	0.016 ± 0.006 bcB	1.111 ± 0.338 dC
	315	1.025 ± 0.473 bC	0.100 ± 0.049 dC	0.028 ± 0.008 bC	1.153 ± 0.530 dC
	360	0.094 ± 0.066 cB	0.008 ± 0.002 eC	0.024 ± 0.006 bC	0.126 ± 0.074 eC
混合凋落物(ML)	45	0.704 ± 0.203 cB	9.614 ± 1.529 bcA	0.330 ± 0.097 aA	10.648 ± 1.829 bB
	90	0.180 ± 0.092 dB	14.058 ± 3.015 bB	0.096 ± 0.023 bA	14.334 ± 3.130 bB
	135	0.101 ± 0.047 dA	29.467 ± 6.334 aB	0.022 ± 0.007 dA	29.590 ± 6.388 aB
	180	0.522 ± 0.100 cA	0.775 ± 0.225 eB	0.126 ± 0.023 bB	1.423 ± 0.348 dB
	225	14.818 ± 2.315 aA	7.175 ± 2.236 cA	0.056 ± 0.011 cB	22.049 ± 4.562 aA
	270	2.367 ± 1.118 bA	0.641 ± 0.212 eB	0.022 ± 0.009 dB	3.030 ± 1.339 dB
	315	3.093 ± 1.032 bB	0.398 ± 0.168 eB	0.059 ± 0.012 cB	3.550 ± 1.212 cdB
	360	3.003 ± 0.998 bA	3.502 ± 1.020 dB	0.093 ± 0.022 bB	6.598 ± 2.040 cB

1) 小写字母为同一样品不同分解阶段间差异,大写字母为同一时间段不同样品间差异($P < 0.05$)

生物总量的峰值、细菌和放线菌数量的最低值均出现在 135 d(2009 年 7 月)。从表 3 中还可以发现,在分解前 180 d,3 类凋落物中高比例的真菌数量构成持续时间较长,在槲栎和混合凋落物中真菌占比超过 90% 的时间达 135 d 之多,在马尾松落叶中真菌数量超过 90% 的时间也有 90 d 之多;而 180 d 后,3 类凋落物中细菌占比明显升高,同真菌占比相当,某些时段细菌的数量甚至还超过真菌。

比较 3 类凋落物的微生物数量,除 45 d、135 d 外,混合型凋落物的细菌、真菌、放线菌数量比马尾松凋落物分别提高了 32.30% ~ 3105.69%、95.85% ~ 44925.71%、34.10% ~ 290.47%,3 类凋落物的微生物总量排列顺序为:槲栎凋落物 > 混合型凋落物 > 马尾松凋落物。

2.3 凋落物分解中酶活性动态

从图 2(a)可以看出,3 类凋落物的纤维素酶活性在分解前期(0 ~ 180 d)显著高于后期,总体表现出降低的趋势,与质量损失率的变化有一定的相关性。在分解初期(45 d),槲栎凋落物中的纤维素酶活性显著高于马尾松凋落物和混合型凋落物($P < 0.05$)。马尾

松和混合型凋落物中纤维素酶活性动态基本相同,表现为先升高后降低,在 90 d 时达到峰值,此时 3 类凋落物的纤维素酶活性情况为:混合型凋落物($6.26 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > 马尾松凋落物($5.20 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > 槲栎凋落物($2.76 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$),且三者之间有显著差异($P < 0.05$)。而 3 种凋落物中纤维素酶活性均在分解 180 d 后趋于平稳,维持在 $1.50 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右。

从图 2(b)可以看出,多酚氧化酶活性的变化总体表现为:槲栎凋落物 > 混合型凋落物 > 马尾松凋落物,与分解常数 K 排列有一定的差异,特别在分解 270 d 之前,槲栎凋落物中的多酚氧化酶活性显著高于马尾松和混合型凋落物($P < 0.05$),并随季节变化表现出一定的波动性,在 90 d 时达到最高,此时其酶活性分别是混合型和马尾松的凋落物 2.6、5.7 倍。而马尾松凋落物和混合型凋落物中的多酚氧化酶活性总体变化趋势基本一致,即随着分解时间延长,活性增强。值得注意的是,随着分解的进行,混合与槲栎凋落物的多酚氧化酶活的差异呈减小的趋势,在分解后期(270 ~ 360 d)混合凋落物达槲栎凋落物的 86.6% ~ 112.1%。

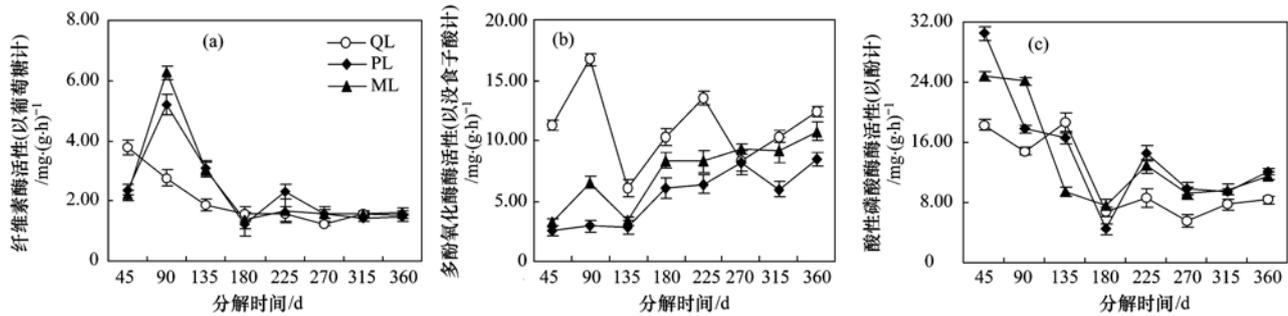


图2 不同凋落物分解中的酶活性变化

Fig. 2 Variation of enzyme activities in different forest litter with decomposition time

从图2(c)可以看出, 3类凋落物中酸性磷酸酶的活性均随分解时间的推移呈现逐步降低的趋势且在180 d时(2009年8月)均存在一最低值。除135 d和180 d外, 在其他分解阶段, 马尾松凋落物和混合型凋落物中的酸性磷酸酶活性均显著高于榿栎凋落物($P < 0.05$)。

2.4 酶活性与凋落物分解的相关性

相关分析(表4)表明, 3类凋落物中的纤维素

酶及酸性磷酸酶活性同凋落物的干重剩余率呈显著或极显著正相关, 结合干重剩余率随时间而降低的特征可见, 纤维素酶和酸性磷酸酶在凋落物分解的早期起重要作用, 可作为凋落物分解进程的重要指标。在马尾松与混合型凋落物中, 多酚氧化酶活性同凋落物干重剩余率均呈极显著负相关, 说明多酚氧化酶等木质素分解酶系可能是其后期分解中的主要影响因子。

表4 凋落物酶活性与干重剩余率的相关分析¹⁾

Table 4 Pearson correlations between enzyme activity and remaining dry weight in forest litters

类型	干重剩余率		
	榿栎凋落物(QL)	马尾松凋落物(PL)	混合凋落物(ML)
纤维素酶	0.922 **	0.603 **	0.579 *
多酚氧化酶	0.232	-0.850 **	-0.840 **
酸性磷酸酶	0.826 **	0.843 **	0.823 **

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

3 讨论

3.1 凋落物类型对分解速率及微生物的影响

森林凋落物的分解受气候、凋落物基质质量、微生物和土壤动物等多种因素的影响^[3, 4]。而在同一气候区, 凋落物基质质量是主导因素, 分解速率的差异主要与凋落物初始化学组成及叶的结构相关^[20]。有研究发现, 马尾松等针叶树种的叶片多为厚革质, 角质层发达, 含有较多的难分解成分(纤维素、木质素和单宁等), C/N 比较高(表1), 不利于淋溶作用、微生物分解和土壤动物的机械破坏等作用的发生, 而阔叶树种凋落物的难分解成分相对较低, 且比表面积(SLA)更大, 有利于微生物大量繁殖进行分解, 因此一般针叶树种分解速率低于阔叶树种^[1, 3, 21, 22]。本试验中榿栎凋落物分解速率快于马尾松凋落物, 与前人研究结果一致^[1, 3, 21, 22]。试验中还发现, 针叶类的马尾松凋落物与阔叶类的榿栎凋落物以自然质量比8:2混合后, 分解速率最快。林

开敏等^[23]在研究杉木和楠木凋落物的分解时, 也发现了相同的结果。陈法霖等^[24]研究也表明针叶凋落物加入阔叶凋落物后可使分解加快。也有研究发现, 凋落物混合分解效应(拮抗、协同或者无相互影响)因植物种类和比例而异^[3, 25-28]。而针阔混合的协同促进效应不单单是由于凋落物简单加和引起的品质差异, 可能还涉及凋落物品质改变所引起的有利的微生境变化, 如分解者的多样性、丰富度和活性等^[3, 10, 21, 29-31]。本研究结果显示, 单一针叶马尾松凋落叶加入少量阔叶榿栎后, 各微生物类群数量及微生物总量显著提高, 这可能是导致分解加快的一个重要原因。这也意味着在马尾松人工纯林中适当补植恰当的阔叶树种(如榿栎)可促进凋落物分解, 提高林地养分循环效率。

3.2 凋落物分解进程对微生物的影响

微生物是森林凋落物分解的主要贡献者, 其类群数量变化与凋落物品质和自然环境条件息息相关^[6, 11, 32, 33]。Kubartová等^[32]在研究不同林分条件

下纤维素降解过程中发现,时间效应比树种类型对微生物类群影响更大,而环境条件和季节效应似乎是微生物群落发展的决定因素,且真菌生物量在夏季较高. 而也有研究表明^[6, 33],凋落物分解过程中的真菌生物量在水热条件相对缓和的春末或秋季较佳. 这些结果充分显示,季节变化对微生物类群有一定的影响,并因环境条件不同而异. 本研究发现,在凋落物分解过程中,3 大类群微生物的数量及组成比例均随季节性差异出现相应改变. 随着气温逐渐升高,各类凋落物中的微生物活性增强,其中真菌最明显. 到夏季(135 d,即 2009 年的 7 月)时,真菌数量与微生物总数均达到峰值,与季晓燕等^[11]、Kubartová 等^[32]的研究结果相似,而与 Criquet 等^[6]、肖慈英等^[33]的研究结果不同,可能是由于研究区内 6~7 月的高温高湿的林地条件更适于微生物特别是真菌的滋生. 但随着气温的进一步上升,微生物的活动则受到抑制,表现在分解 180 d(即 2009 年 8 月)时,3 类凋落物中微生物总量均出现一低值. 这与 3 类凋落物干重剩余率的变化趋势一致,即 90~135 d 时干重损失最快即分解盛期,之后减缓. 可见,6~7 月微生物的大量滋生更有利于凋落物的分解. 同时微生物的优势类群还因分解阶段不同而存在差异,整体表现为真菌在分解前期占优势,之后则真菌与细菌占比相近,可能由于中亚热带地区较低的凋落物品质使得其分解初期即存在一个明显的真菌定殖过程,通过真菌菌丝穿透植物残体,在真菌所分泌的胞外酶作用下改变凋落物的组成结构^[1],从而促进后期细菌的定殖,这与 Wardle 等^[34]理论研究成果是一致的. 即在不同林分中,具有高质量叶凋落物的树种促进细菌为主的能量通道,而较低质量叶凋落物的树种促进真菌为主的能量通道. 这表明在凋落物分解的初始阶段,真菌发挥着主导作用,是分解者中的先行者,这与 Anderson 等^[35]在研究欧洲森林凋落物分解时得到的结果类似,推测这可能与真菌所分泌的纤维素酶有关;而分解后期则依赖于真菌和细菌的协同作用^[1].

3.3 凋落物类型和分解进程对酶活性的影响

作为参与凋落物分解最为重要的生物活性物质,酶活性涉及各种生物化学过程,与凋落物的分解直接相关,在很大程度上反映了土壤 C、N、P 等养分循环状况,且因凋落物类型及环境条件的不同而异^[8, 36~38]. 凋落物类型和分解进程对酶活性产生的影响,主要原因可能是凋落物的不同和分解进程的推移导致微生物量、区系组成以及代谢过程发生改

变,从而使得主要微生物产生的酶种类、数量和活性也发生变化^[1, 3, 4, 10]. Waring^[5]和 Allison 等^[7]研究表明,酶活性特别是 C 循环有关酶活性与凋落物分解的质量损失变化密切相关. 纤维素酶主要参与简单易分解含碳化合物的转化,与干重剩余率呈显著正相关,它的活性主要取决于有机质的性质,特别是 C/N 比^[1],具有较高 C/N 的马尾松和混合凋落物(表 1)90 d 前可能存在对纤维素分解菌群的诱集过程,使其纤维素酶活性大幅升高,随着分解的继续,可利用的底物数量减少,纤维素分解菌群数量减少,活性逐步降低,至 180 d 后基本维持恒定,这与 Waring^[5]、Allison 等^[7]和季晓燕等^[38]研究结果相似. 而多酚氧化酶主要参与难分解化合物(木质素和多酚类物质等)的分解,在马尾松和混合凋落物中与干重剩余率呈显著负相关,这可能是由于随着易分解成分的流失,凋落物中与难分解成分相适应的分泌多酚氧化酶微生物类群活性增强,此时酶活性逐步升高,在分解后期协同纤维素酶共同参与分解,这与张瑞清等^[9]研究结果一致. 酸性磷酸酶活性与凋落物干重剩余率呈显著正相关,在凋落物的分解初期发挥重要作用,这是因为凋落物中的磷含量很低(表 1),在分解早期微生物必须诱导合成大量磷酸酶以获取自身代谢所需磷元素,从而维持分解的进行,这与 Waring^[5]对热带地区凋落叶分解中酶活性动态研究的结果基本一致. 这表明,研究区内纤维素酶、多酚氧化酶及磷酸酶的活性均与凋落物的分解过程密切相关,可作为分解进程的重要指标. 由此可见,凋落物的分解并不是单个酶在起作用,而是多种酶共同作用的结果. 将 3 种类型凋落物酶活性比较分析表明,多酚氧化酶性表现为槲栎凋落物 > 混合凋落物 > 马尾松凋落物,而酸性磷酸酶活性多表现为槲栎凋落物最低,均与分解常数 K 排列有一定的差异,也再次充分说明单个分解酶不能完全指示凋落物的分解状况,这与 Waring^[5]和季晓燕等^[38]研究结果一致. 纯马尾松凋落物多酚氧化酶活性偏低,可能是其分解缓慢的又一重要原因.

综上,本试验研究了中亚热带马尾松林中凋落物类型对分解速率的影响,以及微生物和酶活性对凋落物类型、分解进程的响应. 而森林凋落物的分解是一个非常复杂的生态过程,其分解快慢不仅与凋落物类型、分解过程中的微生物与酶活性等生物因素有关,而且还受到 UV-B 辐射^[2]、季节性雪被和冻融^[39]、氮碳输入^[40]等诸多环境因素的影响,这还有待于更为全面和深入的探讨.

4 结论

(1) 针阔混合可显著提高凋落物的分解速率, 使周转期加快. 年分解常数 K 具体表现为: 混合凋落物(0.94) > 榲栌凋落物(0.86) > 马尾松凋落物(0.67).

(2) 凋落物品质和季节气候的差异显著影响着微生物类群变动. 3 类凋落物真菌数量和微生物数量均在夏季(2009 年 7 月)时达到峰值, 而此时细菌和放线菌数量最低. 单一针叶马尾松凋落叶加入少量阔叶榲栌后, 微生物数量显著提高, 这可能是导致分解加快的一个重要原因.

(3) 在为期 360 d 的分解过程中, 3 类凋落物纤维素酶活性、酸性磷酸酶活性均与凋落物干重剩余率显著正相关($P < 0.05$), 在分解过程中最先发挥作用, 而马尾松与混合型凋落物中的多酚氧化酶活性同凋落物干重剩余率极显著负相关($P < 0.01$), 3 种酶活性可作为分解进程的重要指标.

(4) 酶活性因凋落物类型而异, 多酚氧化酶活性总体表现为榲栌凋落物 > 混合凋落物 > 马尾松凋落物, 酸性磷酸酶活性多表现为榲栌凋落物最低, 与分解常数 K 排列有一定的差异, 说明凋落物分解是多种酶共同作用的结果. 整体研究表明现有针阔混合分解的协同促进效应可能与凋落物质量不同引起的微生物数量及相关酶活性的变化有关.

参考文献:

- [1] 汪思龙, 陈楚莹. 森林残落物生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2010. 182-209.
- [2] 宋新章, 卜涛, 张水奎, 等. UV-B 辐射对青冈凋落叶化学成分和分解的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2355-2360.
- [3] Ge X G, Zeng L X, Xiao W F, *et al.* Effect of litter substrate quality and soil nutrients on forest litter decomposition: a review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 102-108.
- [4] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 等. 森林凋落物分解研究进展[J]. 林业科学, 2006, 42(4): 93-100.
- [5] Waring B G. Exploring relationships between enzyme activities and leaf litter decomposition in a wet tropical forest[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 64: 89-95.
- [6] Criquet S, Ferre E, Farnet A M, *et al.* Annual dynamics of phosphatase activities in an ever green oak litter: Influence of biotic and abiotic factors[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(7): 1111-1118.
- [7] Allison S D, Vitousek P M. Extracellular enzyme activities and carbon chemistry as drivers of tropical plant litter decomposition[J]. Biotropica, 2004, 36(3): 285-296.
- [8] Aubert M L, Margerie P, Trap J, *et al.* Aboveground-
belowground relationships in temperate forests: Plant litter
composes and microbiota orchestrates[J]. Forest Ecology and
Management, 2010, 259(3): 563-572.
- [9] 张瑞清, 孙振钧, 王冲, 等. 西双版纳热带雨林凋落叶分解
的生态过程. III. 酶活性动态[J]. 植物生态学报, 2008, 32
(3): 622-631.
- [10] 陈法霖, 郑华, 欧阳志云, 等. 土壤微生物群落结构对凋落
物组成变化的响应[J]. 土壤学报, 2011, 48(3): 603-611.
- [11] 季晓燕, 江洪, 洪江华, 等. 模拟酸雨对亚热带三个树种凋
落叶分解速率及分解酶活性的影响[J]. 环境科学学报,
2013, 33(7): 2027-2035.
- [12] 祁承经, 汤庚国. 树木学[M]. (第二版). 北京: 中国林业
出版社, 2005. 45-46.
- [13] 杨成栋, 孙启武, 焦如珍, 等. 大青山一二代马尾松土壤性
质变化与地力衰退关系的研究[J]. 土壤学报, 2003, 40
(2): 267-273.
- [14] 韩锦春, 李宏开. 马尾松混交林混交模式的多层次综合评判
[J]. 植物生态学报, 2000, 24(4): 498-501.
- [15] 莫江明, 彭少麟, 方运霆, 等. 鼎湖山马尾松针阔叶混交林
土壤有效氮动态的初步研究[J]. 生态学报, 2001, 21(3):
492-497.
- [16] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and
decomposers in ecological systems[J]. Ecology, 1963, 44(2):
322-331.
- [17] 周德庆. 微生物学实验教程[M]. (第二版). 北京: 高等教
育出版社, 2006. 117-120.
- [18] 中国科学院南京土壤研究所微生物学教研组. 土壤微生物研
究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985. 260-273.
- [19] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法
及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006. 117-141.
- [20] 彭少麟, 刘强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应[J].
生态学报, 2002, 22(9): 1534-1544.
- [21] 胡亚林, 汪思龙, 黄宇, 等. 凋落物化学组成对土壤微生物
学性状及土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(10):
2662-2668.
- [22] 郭培培, 江洪, 余树全, 等. 亚热带 6 种针叶和阔叶树种凋
落叶分解比较[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(5):
655-659.
- [23] 林开敏, 章志琴, 曹光球, 等. 杉木与楠木叶凋落物混合分
解及其养分动态[J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2732-2738.
- [24] 陈法霖, 郑华, 阳柏芬, 等. 中亚热带几种针阔叶树种凋落
物混合分解对土壤微生物群落碳代谢多样性的影响[J]. 生
态学报, 2011, 31(11): 3027-3035.
- [25] 廖利平, 马越强, 汪思龙, 等. 杉木与主要阔叶造林树种叶
凋落物的混合分解[J]. 植物生态学报, 2000, 24(1): 27-
33.
- [26] Gartner T B, Cardon Z G. Decomposition dynamics in mixed-
species leaf litter[J]. Oikos, 2004, 104(2): 230-246.
- [27] Liu P, Huang J H, Han X G, *et al.* Litter decomposition in
semiarid grassland of Inner Mongolia, China[J]. Rangeland
Ecology and Management, 2009, 62(4): 305-313.
- [28] 陈瑾, 李扬, 黄建辉. 内蒙古典草原 4 种优势植物凋落物

- 的混合分解研究[J]. 植物生态学报, 2011, **35**(1): 9-16.
- [29] Hättenschwiler S, Tiunov A V, Scheu S. Biodiversity and litter decomposition in terrestrial ecosystems [J]. Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics, 2005, **36**(1): 191-218.
- [30] Kubartová A, Ranger J, Berthelin J, *et al.* Diversity and decomposing ability of saprophytic fungi from temperate forest litter[J]. Microbial Ecology, 2009, **58**(1): 98-107.
- [31] Wardle D A, Nilsson M C, Zackrisson O, *et al.* Determinants of litter mixing effects in a Swedish boreal forest[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, **35**(6): 827-835.
- [32] Kubartová A, Moukouri J, Béguristain T, *et al.* Microbial diversity during cellulose decomposition in different forest stands: I. microbial communities and environmental conditions [J]. Microbial Ecology, 2007, **54**(3): 393-405.
- [33] 肖慈英, 黄青春, 阮宏华. 松、栎纯林及混交林凋落物分解特性研究[J]. 土壤学报, 2002, **39**(5): 763-767.
- [34] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, *et al.* Ecological linkage between aboveground and belowground biota [J]. Science, 2004, **304**(5677): 1629-1633.
- [35] Anderson M, Kjölller A, Struwe S. Microbial enzyme activities in leaf litter, humus and mineral soil layers of European forests[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, **36**(10): 1527-1537.
- [36] Fioretto A, Papa S, Curcio E, *et al.* Enzyme dynamics on decomposing leaf litter of *Cistus incanus* and *Myrtus communis* in a Mediterranean ecosystem[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, **32**(13): 1847-1855.
- [37] Keeler B L, Hobbie S E, Kellogg L E. Effects of long-term nitrogen addition on microbial enzyme activity in eight forested and grassland sites: implications for litter and soil organic matter decomposition[J]. Ecosystems, 2009, **12**(1): 1-15.
- [38] 季晓燕, 江洪, 洪江华, 等. 亚热带3种树种凋落叶厚度对其分解速率及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2013, **33**(6): 1731-1739.
- [39] 周晓庆, 吴福忠, 杨万勤, 等. 高山森林凋落物分解过程中的微生物生物量动态[J]. 生态学报, 2011, **31**(14): 4144-4152.
- [40] 杨万勤, 邓仁菊, 张健. 森林凋落物分解及其对全球气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(12): 2889-2895.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron: Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangnu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Xiong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《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)

2014年3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 15, 2014

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行