

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第3期

Vol.38 No.3

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国人为源挥发性有机物反应性排放清单	梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 石田立, 孙西勃, 范丽雅, 叶代启 (845)
上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征	高爽, 张坤, 高松, 修光利, 程娜, 潘研 (855)
京津冀地区主要排放源减排对 PM _{2.5} 污染改善贡献评估	吴文景, 常兴, 邢佳, 王书肖, 郝吉明 (867)
北京冬季 PM _{2.5} 中金属元素浓度特征和来源分析	乔宝文, 刘子锐, 胡波, 刘景云, 逢妮妮, 吴方堃, 徐仲均, 王跃思 (876)
2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析	路娜, 李治国, 周静博, 赵鑫, 杨丽丽, 冯媛, 靳伟 (884)
利用 SPAMS 研究南宁市四季细颗粒物的化学成分及污染来源	刘慧琳, 陈志明, 毛敬英, 梁桂云, 黄炯丽, 李宏姣, 杨俊超, 莫招育 (894)
南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析	迟建伟, 李传金, 孙俊英, 张剑, 王辉, 王瀚韬, 李卫军 (903)
喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性	张崇森, 袁琳, 许鹏程, 刘可欣 (911)
生物滴滤塔净化含硫混合废气	叶杰旭, 缪孝平, 诸葛蕾, 赵翔宇, 江宁馨, 章晶晓, 陈东之, 陈建孟 (918)
西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析	房妮, 张俊辉, 王瑾, 姜珊, 夏敦胜 (924)
城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力	秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 张瑞钢 (936)
三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征	王静, 刘洪杰, 雷禹, 徐晶, 宋立岩, 李勇 (946)
隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素	赵登忠, 谭德宝, 李翀, 申邵洪 (954)
白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析	王乙震, 张俊, 周绪申, 孔凡青, 徐铭霞 (964)
唐山陡河水库沉积物汞的分布、来源及污染评价	吴婷婷, 王明猛, 陈旭锋, 刘文利, 李太山, 闫海鱼, 何天容, 李仲根 (979)
三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征	邓晗, 张翔, 张成, 王永敏, 王定勇 (987)
电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 黄庭, 尹伊梦, 赵珍丽 (993)
九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险	林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 韩璐 (1002)
厦门筼筮湖表层沉积物金属元素赋存形态及污染评价	杨秋丽, 于瑞莲, 胡恭任, 林承奇, 韩璐 (1010)
龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价	李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源 (1018)
碳化稻壳-铁锰氧化菌耦合净化严寒村高铁锰地下水效能与机制	孙楠, 湛燕丽, 张颖, 鲁岩, 宋秋霞, 李春艳, 姜昭 (1028)
高藻水臭氧预氧化过程有机物转化及消毒副产物生成势	张赛, 胡学斌, 古励, 李莉, 郭显强 (1038)
预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染影响的中试试验	杨海燕, 邢加建, 王灿, 孙国胜, 赵焱, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1046)
Cu-Al ₂ O ₃ 中骨架铜类芬顿催化去除水中有机污染物	徐丹, 张丽丽, 柳丽芬 (1054)
过硫酸钾氧化去除 Cu(CN) ₂ 中的氰污染物	王云飞, 李一兵, 王彦斌, 齐璠静, 赵凯, 田世超, 郭涛, 关伟, 赵旭 (1061)
微生物燃料电池强化去除农药 2,4-二氯苯氧乙酸及同步产电性能	全向春, 全燕苹, 肖竹天 (1067)
桉树遗态结构 HAP/C 复合材料对水中 Cu(II) 的吸附特征	李超, 朱宗强, 曹爽, 朱义年, 谭笑, 丁慧 (1074)
基于 A ² /O 处理工艺的生活污水的成组生物毒性评价	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1084)
污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭碧玲, 孙学成, 吴金水 (1093)
全海水盐度抑制下厌氧氨氧化工艺的恢复特性	齐泮晴, 于德爽, 李津, 管勇杰, 魏思佳 (1102)
饥饿对硫自养反硝化反应器生物群落结构的影响	李芳芳, 施春红, 李海波, 袁蓉芳, 马方曙 (1109)
快速启动厌氧氨氧化工艺	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, 程朝阳 (1116)
一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式	完颜德卿, 袁怡, 李祥, 毕贞 (1122)
侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响	马娟, 宋璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟 (1130)
厌氧氨氧化污泥群体感应信号分子检测及影响研究	陈舒涵, 李安婕, 王越兴, 吴玲娟 (1137)
有机负荷对醋糟厌氧消化系统启动的影响	戴晓虎, 于春晓, 李宁, 董滨, 戴翎翎 (1144)
过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制	白润英, 陈湛, 张伟军, 王东升 (1151)
不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果	董梦珂, 李怀正, 徐一啸 (1159)
全氟辛酸对大肠杆菌的氧化胁迫和膜损伤	杨蒙, 李伟, 叶锦韶, 龙焰, 秦华明 (1167)
纳米银在环境水样和实验介质中的理化性质和毒性效应	衣俊, 程金平 (1173)
血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯化合物的污染特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 张盼伟, 刘巧娜, 赵晓辉, 李东佼, 任敏, 赵丹丹 (1182)
纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟苏琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1189)
利用 <i>in vitro</i> 方法研究不同铁矿对土壤砷生物给性的影响	钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 何宏飞, 陈志良, 林亲铁, 王文科 (1201)
不锈钢电极对重金属污染土壤的强化电动修复及电极腐蚀结晶现象与机制	温东东, 付融冰, 张卫, 顾莹莹 (1209)
施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变	刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰 (1218)
施氮和水分管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究	王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 汤珍珠, 庞静, 李宝珍, 苏以荣, 葛体达, 吴金水 (1227)
模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响	陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 胡正华 (1235)
土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO ₂ 浓度和温度升高的响应	刘远, 王光利, 李恋卿, 潘根兴 (1245)
岩性对喀斯特灌丛土壤固氮菌与丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (1253)
板栗产区有机堆肥产物磷形态特征及其对叶片磷含量的影响	宋影, 郭素娟, 张丽, 孙慧娟, 谢明明, 武燕奇, 王静 (1262)
酸性物质对猪粪秸秆堆肥过程中氮素转化的影响	姜继超, 尧倩 (1272)
《环境科学》征稿简则 (1092)	
《环境科学》征订启事 (1158)	
信息 (1166, 1261, 1271)	

板栗产区有机堆肥产物磷形态特征及其对叶片磷含量的影响

宋影, 郭素娟*, 张丽, 孙慧娟, 谢明明, 武燕奇, 王静

(北京林业大学林学院, 省部共建森林培育保护与利用教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 采用 Dou 的磷形态分级方法和大田试验, 研究了板栗产区栗蓬栗叶-菌渣-秸秆-鸡粪混合堆肥 (BYZ)、菌渣鸡粪堆肥 (ZF)、栗蓬栗叶-菌渣-鸡粪堆肥 (BZ1 和 BZ2) 这 4 种有机物料中的磷形态特征及其对结果枝叶片磷含量的影响。结果表明: ① 4 种有机堆肥产物全磷含量表现为: BZ1 ($10.61 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > ZF ($9.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > BYZ ($8.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > BZ2 ($7.68 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 并均以无机磷为主, 无机磷占全磷的比例在 62.88% ~ 73.62% 之间; ② 4 种有机堆肥产物各形态总磷中除 ZF 以较稳定的 HCl-P 含量及其占回收全磷 (P_n) 比例最高以外, 其他 3 种均以活性的 $\text{H}_2\text{O-P}$ 含量及其占回收全磷 (P_n) 比例最高, NaOH-P 含量均较低; ③ 各形态中的无机磷以活性的 $\text{H}_2\text{O-P}_i$ 或 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 占形态总磷的比例最高 (89.17% ~ 96.00%), 且在回收全磷中 BZ2 中的无机磷主要分布在 $\text{H}_2\text{O-P}_i$ 和 HCl-P_i , 其他 3 种的无机磷主要分布在 $\text{H}_2\text{O-P}_i$ 、 HCl-P_i 和 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$, 各形态有机磷主要分布于残留态磷, BZ2 中比例最高; ④ 等磷量大田试验结果表明, 板栗结果枝叶片单位面积叶片磷含量整体表现为 BZ2 > BZ1 > BYZ > ZF > CK, 高峰期 (7 月)、平均每月叶片磷含量增值与堆肥产物中水溶性无机磷含量及其占回收全磷的比例呈显著或极显著正相关, 推测集中深施情况下有机堆肥产物中水溶性无机磷含量及占全磷的比例是当年板栗叶片磷吸收的重要因素。整体研究表明, 栗蓬栗叶-菌渣-鸡粪堆肥 (BZ2) 具有高比例的水溶态无机磷和残留态有机磷库, 使板栗叶片磷含量最高, 且其原料中板栗产业废弃物配比高达 80% (栗蓬栗叶 60% + 菌渣 20%), 是产区好氧堆肥原料体系的较佳选择。

关键词: 有机堆肥产物; 磷形态; 叶片磷; 板栗产区

中图分类号: X171; X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-1262-10 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201608088

Characterization of Phosphorus Forms in Organic Composts and Their Effects on Leaf Phosphorus Content of *Castanea mollissima* in Chinese Chestnut Producing Area

SONG Ying, GUO Su-juan*, ZHANG Li, SUN Hui-jun, XIE Ming-ming, WU Yan-qi, WANG Jing

(Key Laboratory for Silviculture and Conservation, Ministry of Education, College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Characterization of the forms of phosphorus (P) in four organic composts including compost of hulls and leaves of *Castanea mollissima*, edible fungi residues, corn stalks and chicken manure (BYZ), compost of edible fungi residues and chicken manure (ZF), composts of hulls and leaves of *C. mollissima*, edible fungi residues and chicken manure (BZ1 and BZ2) in Chinese chestnut producing area was conducted by sequential P fractionation developed by Dou *et al.* Field trial was conducted to study the effects of compost application on leaf phosphorus content of *Castanea mollissima*. The results showed that total phosphorus content (TP) of organic composts ranked as follows: BZ1 ($10.61 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > ZF ($9.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > BYZ ($8.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > BZ2 ($7.68 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), and the inorganic phosphorus (P_i) accounted for 62.88% - 73.62% of the total phosphorus in the organic composts. The content and proportion of HCl-P in the total fractionated phosphorus (P_n) was the highest among P forms in ZF, while that of $\text{H}_2\text{O-P}$ was the highest in BYZ, BZ1 and BZ2. The content of NaOH-P was very low in all the composts. Active $\text{H}_2\text{O-P}$ or $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ had the highest inorganic phosphorus proportion (89.17% - 96.00%) of all the P forms. The major P_i forms in BZ2 were $\text{H}_2\text{O-}$ and HCl- extractable P fractions, while $\text{H}_2\text{O-P}_i$, HCl-P_i and $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ were major P_i forms in BYZ, BZ1 and ZF. Residual-P was the predominant organic phosphorus form, and BZ2 showed the highest Residual-P proportion of the total fractionated phosphorus (P_n) among all the composts. Leaf phosphorus contents per unit area of *Castanea mollissima* by field trial on the added phosphorus-equivalent basis were expressed as: BZ2 > BZ1 > BYZ > ZF > CK. Increment of leaf phosphorus content per unit area in July and per month on average showed positive relationship with the content and proportion of $\text{H}_2\text{O-P}_i$ in the total fractionated phosphorus of composts, which presumably played a key role in leaf phosphorus absorption of *C. mollissima* measured in the year of deep concentrated fertilization. The results suggested that composts of hulls and leaves of *C. mollissima*, edible fungi residues and chicken manure (BZ2) was a good choice in given area for

收稿日期: 2016-08-12; 修订日期: 2016-09-26

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目 (2013BAD14B0402); 国家林业公益性行业科研专项重大项目 (201204401)

作者简介: 宋影 (1989 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为经济林 (果树) 栽培与利用, E-mail: sy892566@163.com

* 通信作者, E-mail: gwangzs@263.net

aerobic composting raw material system in which organic wastes from Chinese chestnut industry accounted for 80% (hulls and leaves of *Castanea mollissima* and edible fungi residues accounted for 60% and 20% respectively), which had a high proportion of H_2O-P_i and organic Residual-P pool and led to the highest leaf phosphorus content of *C. mollissima*.

Key words: organic compost; phosphorus forms; leaf phosphorus content; *Castanea mollissima* producing area

磷是植物生长发育所必需的大量营养元素之一,是森林地上部分净初级生产力的重要限制性元素^[1-8]。据统计,全球约有 30% 耕地土壤缺磷^[9],缺磷已成为世界农业生产中限制作物产量和品质的主要因素之一^[5]。目前施用的磷肥主要来自不可再生资源磷矿的开采,农林业生产对磷肥的大量需求使磷资源可能在百年内面临耗竭^[10-12]。而有机废弃物中包括粪肥、堆肥等含有大量磷素和有机质,合理循环利用其中的磷可有效补充土壤磷库,不仅减少磷矿的开采,还能减少环境污染和资源浪费^[6, 12, 13]。目前,有机废弃物作为土壤有机质和氮磷等营养来源在国内外广泛使用^[4, 14],然而长期大量不合理施用磷肥也会造成土壤磷素积累,增加磷流失风险^[3, 15, 16]。大量研究表明有机物料中磷的生物有效性、随水流失和被土壤固定的可能性不仅与土壤、气候和施用方式等因素有关^[6, 17, 18],还受有机物料中的磷形态及含量的影响^[5, 6, 19-23]。徐秋桐等^[17]研究表明,在等量磷素情况下,施用猪粪/稻草秸秆堆肥、生活垃圾堆肥、沼渣、猪粪、鸡粪、污泥等不同磷素特征的有机废弃物均增加了土壤有效磷和水溶性磷含量,降低了土壤对磷的吸附能力,但影响程度因有机废弃物来源而异。Grigatti 等^[5]通过连续浸提、土壤培养及植物盆栽试验等一系列研究表明,等磷量处理下具有最高易溶性磷含量的玉米秸秆堆肥处理的土壤有效磷和植物有效磷均最大。Sharpley 等^[23]研究表明土壤淋滤液中的磷含量与有机物料中的水溶性磷含量密切相关,而 Peirce 等^[14]采用小麦盆栽试验研究结果表明,贮存时间短的鸡粪正磷酸盐含量低,却表现出较高的 P 的植物有效性。Requejo 等^[12]对牛粪、生物废弃物堆肥等有机物料的长期大田应用研究结果表明,土壤中磷形态分布及生物有效性更依赖于植物、微生物以及非生物因素共同参与下的磷的周转过程,而不仅仅是添加的磷形态。这一系列研究结果表明,有机物料磷形态特征及其与磷的生物有效性的关系因来源、处理方式以及应用条件而异^[5, 6, 19-23]。因而研究有机物料中磷形态特征及其与磷的生物有效性的关系,是科学选取和合理施用有机物料的重要基础^[6]。

板栗(*Castanea mollissima*)是中国重要的经济林种之一,分布广泛遍及全国 26 个省市,而迁西县

作为主产区,已有两千多年的栽培历史,是河北省乃至全国最主要的板栗出口基地,已基本实现栽培品种良种化^[24]。随着栽培规模的扩大和栗蘑种植等产业的深入发展,板栗产业废弃物(如栗叶、栗蓬、栗蘑菌渣等)产量也随之增加,而堆肥化处理以其低成本、除臭、杀灭病原菌效果好等优点,已成为国内外农林废弃物资源化利用的主要途径之一^[20]。目前基于板栗产区废弃物的好氧堆肥配方已取得初步进展^[25, 26],但关于其堆肥产物中磷形态特征以及其对产区磷吸收的影响研究较少。鉴于此,本研究选取以板栗产区有机废弃物栗蓬栗叶、菌渣、秸秆、鸡粪为原料的 4 种好氧堆肥产物,分析它们中的磷形态特征及其在集中深施情况下对结果枝叶片磷含量的影响,以期板栗产区有机废弃物的有效处理及其堆肥产物的科学利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域和试验样地自然概况

研究区域位于河北省唐山市迁西县西荒峪山地板栗园中,地理坐标为 118°21'E, 40°12'N。属于东部季风暖温带半湿润气候,年平均气温 10.6℃,最热月(7 月)平均气温 25.4℃,最冷月(1 月)平均气温 -6.5℃,年平均降水量 744.7 mm。研究区域内多分布片麻岩,并以此为成土母质,土壤以砂质壤土为主,pH 值 6.44,土壤有机质含量 2.89 g·kg⁻¹,土壤全磷含量 0.65 g·kg⁻¹,有效磷含量 19.36 mg·kg⁻¹,属于低有机质含量中等磷水平土壤。试验样地以当地主栽品种燕山早丰(*C. mollissima*“Yan shan zao feng”)为主,树龄 13 a,种植密度为 1 665 株·hm⁻²,平均树高 2.5 m,冠幅 2 m × 2 m,采用中等强度的集约经营模式。

1.2 供试材料

本试验采取 4 种有机堆肥产物:栗蓬栗叶-菌渣-玉米秸秆-鸡粪混合堆肥(BYZ)、菌渣鸡粪堆肥(ZF)和 2 种栗蓬栗叶-菌渣-鸡粪堆肥(分别记为 BZ1 和 BZ2)(由试验区板栗叶与栗蓬自然凋落混合物 B、栗蘑菌渣 Z、玉米秸秆 Y 与鸡粪 F 分别按比例 B:Z:Y:F 2:2:2:4、Z:F 6:4、B:Z:F 4:2:4 和 B:Z:F 6:2:2 通过好氧堆肥获得)均由本实验室提供,所有供试堆肥产物的发芽指数均在 85% 以上,均达

到腐熟程度. 样品经自然风干后, 粉碎过 1 mm 筛, 不同堆肥基本性质见表 1.

表 1 供试有机堆肥产物基本性质

Table 1 Basic properties of tested organic composts

处理	pH	TOC/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	TN/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	TK/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	C/N
BYZ	8.81	192	17.24	10.34	11.14
ZF	8.76	135	13.16	8.05	10.22
BZ1	8.85	285	24.40	10.63	11.68
BZ2	7.69	399	23.20	9.35	17.20

1) BYZ: 栗蓬栗叶-菌渣-秸秆-鸡粪混合堆肥, 原料配比为栗蓬栗叶自然凋落混合物: 栗蘑菌渣: 玉米秸秆: 鸡粪 = 2: 2: 2: 4; ZF: 菌渣鸡粪堆肥, 原料配比为栗蘑菌渣: 鸡粪 = 6: 4; BZ1: 栗蓬栗叶-菌渣-鸡粪堆肥 1, 原料配比为栗蓬栗叶自然凋落混合物: 栗蘑菌渣: 鸡粪 = 4: 2: 4; BZ2: 栗蓬栗叶-菌渣-鸡粪堆肥 2, 原料配比为栗蓬栗叶自然凋落混合物: 栗蘑菌渣: 鸡粪 = 6: 2: 2; 下同

1.3 试验设计与处理

大田试验于 2015 年 5 ~ 9 月进行. 于 2015 年 5 月初, 在板栗林地选择土壤类型、坡度、坡向等基本一致的区域作为试验样地, 以长势一致、健康的板栗结果树为研究对象. 本试验设 5 个处理, 即对照 (CK, 不施磷, 氮和钾用量同有机肥处理)、BYZ、ZF、BZ1 和 BZ2, 各有机堆肥用量均以等磷量 (以 P_2O_5 计, $103 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 计, 氮和钾以上述堆肥的最高量计, 不足部分用尿素和氯化钾补充. 每个处理试验小区面积为 180 m^2 , 共计 30 棵树, 再以单株为小区, 采用环状沟施方式进行 (沿每棵树树冠滴水线 4 个方向开沟, 沟深 30 cm, 将堆肥产物均匀平铺至沟内, 填土, 一次性全量施入), 处理小区间设保护行. 并于施肥后每个月 (30 d) 上午 09:00 ~ 10:00 采集树冠中部外围东南西北的结果枝上着生雌花或栗蓬节位的叶片各 1 片 (长势良好, 且无病虫害), 直至采果结束 (2015 年 9 月). 将每个试验小区 30 棵树平均分为 3 组, 10 棵树即 40 片叶子为 1 个重复, 共计 3 个重复. 将采后的叶片立即装入保鲜袋, 并置于冰盒内, 迅速带回实验室进行处理. 试验为期 4 个月, 共计分析 5 次样品.

1.4 测定指标与方法

堆肥全磷 (TP) 和无机磷 (P_i) 参照邓佳等^[6]和鲁如坤^[27]的测定方法, 全磷 (TP) 与无机磷 (P_i) 差值得到有机磷 (P_o).

堆肥磷形态的分级测定: 参照 Dou 等^[28]的连续浸提方法, 称取 0.300 g 样品于 50 mL 离心管中, 依次用 30 mL 去离子水、 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 、 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaOH}$ 和 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HCl}$ 浸提, 离心, $0.45 \mu\text{m}$ 无磷滤膜抽滤, 钼蓝比色法直接测定上述每一步所得滤液的无机磷 (P_i) 含量 ($\text{H}_2\text{O}-\text{P}_i$ 、 $\text{NaHCO}_3-\text{P}_i$ 、 $\text{NaOH}-\text{P}_i$ 和 $\text{HCl}-\text{P}_i$), $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 氧化-钼蓝比色法^[6]测定上述各滤液液总磷 (P_t) 含量 ($\text{H}_2\text{O}-\text{P}_i$ 、

$\text{NaHCO}_3-\text{P}_i$ 、 $\text{NaOH}-\text{P}_i$ 和 $\text{HCl}-\text{P}_i$), 各滤液总磷和有机磷的差值即为滤液中的有机磷 (P_o), 将最后一步的残渣 180°C 蒸干后, $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2$ 消煮-钼蓝比色法^[29]测定残留态磷 (Residual- P_i) 含量.

单位面积叶片磷含量的测定: 采用 Yaxin-1242 叶面积仪测定叶片面积后洗净, 于烘箱 105°C 下杀青 30 min, 80°C 下烘干至恒重, 计算叶片干重与叶面积的比值, 即比叶质量. 粉碎过筛, 混匀后密封于样品袋中, 单位质量叶片磷含量用 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2$ 消煮-钼蓝比色法^[30]测定, 单位面积叶片磷含量 = 比叶质量 $\times$ 单位质量叶片磷含量^[31].

单位面积叶片磷增值 $y = (\text{有机堆肥产物处理单位面积叶片磷含量} - \text{对照单位面积磷含量}) / \text{对照单位面积叶片磷含量}$ (单位为 1)

1.5 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 法比较不同堆肥产物的化学组成、各磷形态含量以及叶片磷的差异, 用 Pearson 法作有机堆肥产物中的磷形态指标与叶片磷含量增值的相关性分析.

采用 Microsoft Excel 2003 进行图表制作.

2 结果与讨论

2.1 有机堆肥产物中的磷形态特征

2.1.1 有机堆肥产物中的无机磷 (P_i) 和有机磷 (P_o)

4 种有机堆肥产物中无机磷 (P_i) 含量均显著高于有机磷 (P_o) 含量 ($P < 0.05$) (图 1), 其中以栗蓬栗叶-菌渣-鸡粪堆肥 1 (BZ1) 最高 ($7.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 其次为栗蓬栗叶-菌渣-玉米秸秆-鸡粪混合堆肥 (BYZ) ($6.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 而栗蓬栗叶-菌渣-鸡粪堆肥 2 (BZ2) 最低 ($4.88 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). 有机堆肥产物中无机磷占全磷的比例为 62.88% ~ 73.62%, 仍以 BZ1 最高, BZ2

最低,这可能与 BZ2 原料中含有较高比例的板栗产业废弃物(栗蓬栗叶和菌渣占比 80%),堆肥过程中其中的有机磷还未得到充分释放^[6]. 有机磷含量较低($2.31 \sim 3.30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),仅为全磷的 26.38% ~ 37.12%,表明 4 种有机堆肥产物中磷以无机磷为主. 有研究发现,以玉米、小麦、稻草和蔬菜等农作物废弃物为原料的堆肥产物中无机磷占全磷的 90%^[20],在稻壳牛粪堆肥、锯末牛粪堆肥、家禽粪便堆肥、商业有机肥中无机磷占全磷的 60% 以上^[16],Gagnon 等^[19]对牛粪、猪粪、家禽粪便、土豆加工残余物、城市污泥等 7 种有机堆肥研究发现,无机磷占全磷的 73% ~ 96%,Li 等^[21]研究表明在中国农场的牛粪、猪粪以及鸡粪中,无机磷占全磷的 50% ~ 68%,邓佳等^[6]对重庆地区 5 种有机堆肥产物的研究发现,无机磷占回收全磷的 54.70% ~ 75.10%,这表明有机堆肥产物中无机磷占全磷的比例大小因来源和处理方式不同而有所差异,但磷均以无机磷为主.

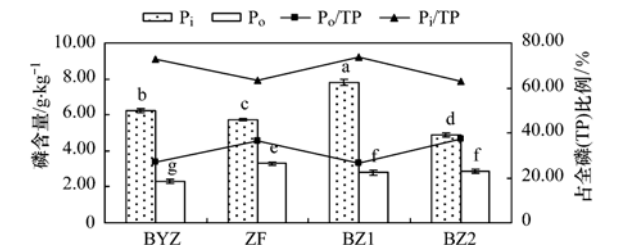


图1 有机堆肥产物无机磷、有机磷含量及占全磷的比例
Fig. 1 Contents of inorganic phosphorus and organic phosphorus and their proportions in the total phosphorus in organic composts

2.1.2 有机堆肥产物中的全磷(TP)、各形态总磷(P_i)组成及回收率(P_n/TP)

从表 2 可以看出,4 种有机堆肥产物间的全磷(TP)含量($P < 0.05$)存在显著差异,总体表现为:

BZ1 ($10.61 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > ZF ($9.03 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > BYZ ($8.56 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > BZ2 ($7.68 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),说明在堆肥原料(栗蓬栗叶、菌渣、玉米秸秆和鸡粪等)中保持氮源鸡粪配比不变(40%)的前提下(即 BZ1、ZF 和 BYZ),以栗蓬栗叶替代玉米秸秆使堆肥产物全磷含量显著增加,而以菌渣完全替代栗蓬栗叶和玉米秸秆效果也能取得相似的效果,而在栗蓬栗叶-菌渣-鸡粪堆肥(BZ)原料体系中,将栗蓬栗叶的比例从 40% 提高到 60%(即从 BZ1 到 BZ2),堆肥产物中全磷含量降低了 26.9%,这可能与原料性质(栗蓬栗叶本身含磷量低)有关^[32].

采用 Dou 等^[28]的磷形态分级方法,得出 4 种有机堆肥产物中全磷回收率(P_n/TP)较高,为 99.04% ~ 99.53%,略低于总磷(表 2),与邓佳等^[6]测定结果较一致. 4 种有机堆肥产物中除 ZF 以较稳定的 HCl-P_i 形态总磷含量($2.45 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)最高以外,其他 3 种均以活性的 H₂O-P_i 含量最高,其中 BZ1 中最高($3.79 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),分别比 BZ2、BYZ 和 ZF 高 28.5%、46.3% 和 166.9% ,

BYZ 和 BZ1 各形态总磷表现出相似的大小顺序,为 H₂O-P_i > HCl-P_i > NaHCO₃-P_i > NaOH-P_i = Residual-P_i,这可能与两种堆肥原料中 80% 相同有关; BZ2 各形态总磷情况为: H₂O-P_i > Residual-P_i > HCl-P_i > NaOH-P_i > NaHCO₃-P_i,表明高配比的板栗产业废弃物堆肥产物(BZ2)呈高水溶态含量和高残留态含量的两极分化特点; ZF 各形态总磷的顺序为 HCl-P_i > Residual-P_i > NaHCO₃-P_i > H₂O-P_i = NaOH-P_i,这与邓佳等^[6]对牛粪秸秆堆肥、污泥堆肥的研究结果基本一致. 而各有机堆肥产物中中等活性的 NaOH-P_i 含量均较低,这与付广清等^[33]对猪粪、牛粪的研究结果一致.

表 2 有机堆肥产物全磷(TP)及各形态总磷(P_i)含量(平均值 ± 标准差, n = 3)

处理	H ₂ O-P _i /g·kg ⁻¹	NaHCO ₃ -P _i /g·kg ⁻¹	NaOH-P _i /g·kg ⁻¹	HCl-P _i /g·kg ⁻¹	Residual-P _i /g·kg ⁻¹	P _n /g·kg ⁻¹	TP /g·kg ⁻¹	P _n /TP /%
BYZ	2.59 ± 0.05c A	1.59 ± 0.04b C	0.96 ± 0.06c D	2.40 ± 0.07b B	0.97 ± 0.04d D	8.52 ± 0.21c	8.56 ± 0.25c	99.53 ± 0.02
ZF	1.42 ± 0.02d D	1.78 ± 0.01a C	1.37 ± 0.03a D	2.45 ± 0.04b A	1.93 ± 0.02a B	8.95 ± 0.06b	9.03 ± 0.10b	99.11 ± 0.01
BZ1	3.79 ± 0.02a A	1.71 ± 0.03a C	1.19 ± 0.03b D	2.63 ± 0.05a B	1.24 ± 0.02c D	10.56 ± 0.11a	10.61 ± 0.16a	99.51 ± 0.01
BZ2	2.95 ± 0.03b A	0.65 ± 0.05c E	0.87 ± 0.05c D	1.42 ± 0.06c C	1.79 ± 0.04b B	7.68 ± 0.20d	7.76 ± 0.24d	99.04 ± 0.05

1) 小写字母为同一列不同处理间差异,大写字母为同一行中不同形态总磷间差异($P < 0.05$),下同

从图 2 可以看出,有机堆肥产物中各形态总磷占回收全磷的比例因原料配比不同而有所差异. BYZ、BZ1 和 BZ2 中均以 H₂O-P_i 所占比例最高,分别为 30.41%、35.90% 和 38.39%,低于 Gagnon

等^[19]测定的土豆加工残渣有机堆肥的 H₂O-P_i (48%)、高于 Takahashi 测定的农业废弃物堆肥^[20] (7.4%) 和家禽粪便堆肥^[16] (9.3%),与 Li 等^[21]测定的鸡粪中的 H₂O-P_i 相当(32%),而 ZF 中以 H₂O-

P_i 仅占 15.36%, 以 $HCl-P_i$ 所占比例最高 (27.39%), 这与邓佳等^[6]得出的研究结果一致. 易溶性总磷 ($H_2O-P_i + NaHCO_3-P_i$) 占回收全磷的比例总体表现为: $BZ1 (52.10\%) > BYZ (49.05\%) > BZ2 (46.88\%) > ZF (35.74\%)$, 而这部分形态磷被大量研究证明是为植物吸收利用或随水流失的形态^[6, 34, 35], 若仅从肥料即供植物吸收的角度考虑, 栗蓬栗叶-菌渣-鸡粪堆肥 ($BZ1$ 和 $BZ2$) 和栗蓬栗叶-菌渣-秸秆-鸡粪混合堆肥 (BYZ) 磷的有效性均较高而菌渣鸡粪堆肥 (ZF) 较低, 可能与其所含 $HCl-P_i$ 和 $Residual-P_i$ 均较高有关.

值得注意的是, $BZ2$ 中 H_2O-P_i (38.39%) 和 $Residual-P_i$ (23.34%) 所占回收全磷的比例均显著高于其他 3 种 ($P < 0.05$), 而 $NaHCO_3-P_i$ (8.49%) 和 $HCl-P_i$ (18.46%) 在 4 种堆肥产物中最低, $NaOH-P$ 与 BYZ 、 $BZ1$ 差异不显著 (均为 11.3%), 略低于 ZF (15.33%), 再次表明高配比的板栗产业废弃物堆肥产物 ($BZ2$) 表现出高水溶态比例和高残留态比例的两极分化特点.

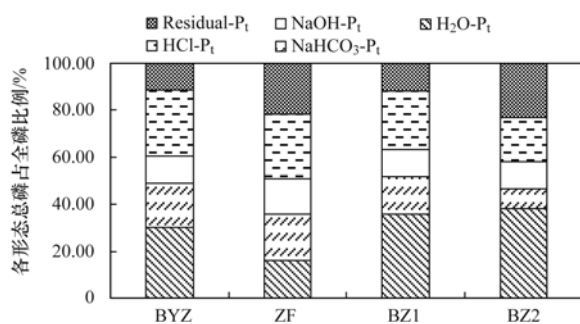


图2 有机堆肥各形态总磷 (P_i) 占回收全磷 (P_n) 的比例

Fig. 2 Proportions of total phosphorus of different forms (P_i) in the total fractionated phosphorus (P_n) of organic composts

2.1.3 有机堆肥产物各形态无机磷 (P_i)、有机磷 (P_o) 含量及在形态总磷 (P_t) 中的分布特征

本研究参照文献^[6], 将残留态磷归为有机磷, 从表 3 可以看出, 4 种有机堆肥产物各形态无机磷均显著高于对应形态的有机磷 ($P < 0.05$).

BYZ 和 $BZ1$ 中各形态无机磷含量的顺序为 $H_2O-P_i > HCl-P_i > NaHCO_3-P_i > NaOH-P_i$, 这与 Gagnon 等^[19]测定的猪粪堆肥结果一致, $BZ2$ 为 $H_2O-P_i > HCl-P_i > NaOH-P_i > NaHCO_3-P_i$, 这与 Gagnon 等^[19]测定的城市污泥堆肥结果一致, ZF 中 $HCl-P_i > NaHCO_3-P_i > H_2O-P_i > NaOH-P_i$, 这与 Gagnon 等^[19]测定的家禽堆肥、邓佳等^[6]测定的牛粪秸秆堆肥及农村生活垃圾堆肥 1 相一致, 这表明 4 种堆肥产物各形态无机磷含量大小排序存在一定

的差异, 可能与其原料配比不同以及由此引起与磷相关的微生物作用区不同有关. 4 种有机堆肥产物中的 H_2O-P_i 含量排列顺序为 $BZ1 > BZ2 > BYZ > ZF$, $NaHCO_3-P_i$ 情况为: $ZF = BZ1 = BYZ > BZ2$, 易溶性无机磷 ($H_2O-P_i + NaHCO_3-P_i$) 总体表现为: $BZ1 > BYZ > BZ2 > ZF$, 而稳定态 $HCl-P_i$ 表现为 $BZ2$ 最低 ($1.12 g \cdot kg^{-1}$, 表 3).

4 种有机堆肥产物各形态有机磷中均以最稳定的 $Residual-P_o$ ($0.97 \sim 1.93 g \cdot kg^{-1}$) 最高, 其次是 $HCl-P_o$ ($0.29 \sim 0.57 g \cdot kg^{-1}$) 而 $NaHCO_3-P_o$ 均较低. Takahashi^[16]和 Turner 等^[34]的研究表明, 在家禽粪肥中, $HCl-P_o$ 主要为较稳定的肌醇六磷酸盐, 说明 4 种堆肥产物中均含有一定量的肌醇六磷酸盐. 值得注意的是, 有机堆肥产物 $BZ1$ 、 $BZ2$ 和 BYZ 有较高的活性 H_2O-P_o ($0.29 \sim 0.45 g \cdot kg^{-1}$), 高于邓佳等^[6]测定的 7 种有机物料中的 H_2O-P_o 含量 ($0.04 \sim 0.12 g \cdot kg^{-1}$)、远低于 Takahashi^[16]测定的猪粪里的 H_2O-P_o 含量 ($2 g \cdot kg^{-1}$), 这部分磷在土壤容易被植物吸收利用或流失^[6], 而 ZF 中 H_2O-P_o 极低. 易溶性有机磷 ($H_2O-P_o + NaHCO_3-P_o$) 含量总体表现为: $BZ1 > BYZ > BZ2 > ZF$, 与易溶性总磷、易溶性有机磷排序相一致 (表 3).

从表 4 可以看出, 4 种有机堆肥产物各形态总磷中均以无机磷为主, 其占形态总磷的比例范围为 68.41% ~ 96.00%, 尤其以活性无机磷 (H_2O-P_i 或者 $NaHCO_3-P_i$) 占形态总磷的比例最高. 其中 $BZ2$ 和 ZF 中以 H_2O-P_i 占形态总磷的比例最高 (分别为 90% 和 96%), $BZ1$ 和 BYZ 中则为 $NaHCO_3-P_i$ 所占比例最高 (分别为 89.17% 和 93.93%), 4 种堆肥产物中 $HCl-P_i$ 占形态总磷的比例在 77.61% ~ 79.20% 之间, 变化不大. 有研究表明, $HCl-P_o$ 主要为较稳定的肌醇六磷酸盐^[16, 34], $HCl-P_i$ 主要为与钙镁等结合的磷化合物 (如羟基磷灰石)^[16, 35], 而 4 种堆肥产物中 $HCl-P_i/HCl-P_o$ 比值均在 3.6 左右, 说明 4 种堆肥产物中磷形态 $HCl-P_i$ 和 $HCl-P_o$ 的转化具有协同统一性.

2.1.4 有机堆肥产物各形态无机磷 (P_i)、有机磷 (P_o) 在回收全磷 (P_n) 的分布特征

从图 3 可以看出, 有机堆肥产物中各形态无机磷、有机磷在全磷的分布存在一定的差异,

易溶性无机磷 ($H_2O-P_i + NaHCO_3-P_i$) 占全磷比例总体表现为: $BZ1 (44.91\%) > BYZ (42.68\%) > BZ2 (40.98\%) > ZF (32.30\%)$. 在各形态无机磷

表 3 有机堆肥产物各形态无机磷(P_i)、有机磷(P_o)含量/g·kg⁻¹

处理	P _i				P _o				
	H ₂ O-P _i	NaHCO ₃ -P _i	NaOH-P _i	HCl-P _i	H ₂ O-P _o	NaHCO ₃ -P _o	NaOH-P _o	HCl-P _o	Residual-P _o
BYZ	2.14 ± 0.12	1.49 ± 0.03	0.74 ± 0.09	1.87 ± 0.11	0.45 ± 0.07	0.10 ± 0.01	0.22 ± 0.03	0.53 ± 0.04	0.97 ± 0.04
ZF	1.36 ± 0.02	1.53 ± 0.02	0.94 ± 0.03	1.90 ± 0.02	0.06 ± 0.00	0.25 ± 0.01	0.43 ± 0.01	0.55 ± 0.02	1.93 ± 0.02
BZ1	3.22 ± 0.01	1.53 ± 0.02	1.01 ± 0.07	2.06 ± 0.06	0.57 ± 0.01	0.19 ± 0.00	0.18 ± 0.04	0.57 ± 0.01	1.24 ± 0.03
BZ2	2.65 ± 0.02	0.49 ± 0.03	0.61 ± 0.04	1.12 ± 0.02	0.29 ± 0.01	0.16 ± 0.02	0.26 ± 0.01	0.29 ± 0.04	1.79 ± 0.05

表 4 有机堆肥产物各形态总磷(P_t)中无机磷(P_i)、有机磷(P_o)所占比例/%

处理	H ₂ O-P _t		NaHCO ₃ -P _t		NaOH-P _t		HCl-P _t	
	P _i /P _t	P _o /P _t	P _i /P _t	P _o /P _t	P _i /P _t	P _o /P _t	P _i /P _t	P _o /P _t
BYZ	82.78	17.22	93.93	6.07	76.86	23.14	77.95	22.05
ZF	96.00	4.00	85.85	14.15	68.41	31.59	77.61	22.39
BZ1	84.84	15.16	89.17	10.83	84.92	15.08	78.35	21.65
BZ2	90.00	10.00	75.65	24.35	69.78	30.22	79.20	20.80

中,BZ2、BZ1 和 BYZ 中各形态无机磷均以 H₂O-P_i 占全磷比例最高,依次为 34.55%、30.46% 和 25.17%,其次是 HCl-P_i (14.62% ~ 21.97%,其中 BZ2 最低),而在 ZF 中 HCl-P_i 所占比例最高(21.26%),推测可能与菌渣中含有大量与钙镁结合稳定的正磷酸盐有关^[6, 36],这也表明菌渣中的磷难降解,这可能也是导致其堆肥产物(ZF)中活性 H₂O-P_i、易溶性总磷(H₂O-P_i + NaHCO₃-P_i)所占全磷比例最低的重要原因. NaHCO₃-P_i 占全磷比例在 6.42% ~ 17.51%之间,以 BZ2 最低;NaOH-P_i 占全磷的比例范围为 7.90% ~ 10.49%,BZ2 最低,ZF 最高. 根据各形态无机磷所占比例可知,BYZ、BZ1 和 ZF3 种有机堆肥产物中的无机磷主要分布在 H₂O-P_i、HCl-P_i 和 NaHCO₃-P_i,而 BZ2 中的无机磷主要分布在 H₂O-P_i 和 HCl-P_i,说明高配比的板栗产业废弃物(特别是栗叶栗蓬)使堆肥产物(BZ2)中的磷向活性较高的 H₂O-P_i 转化.

有机磷形态 H₂O-P_o、NaHCO₃-P_o、NaOH-P_o 和 HCl-P_o 占全磷比例均较低,分别为 0.63% ~ 5.24%、1.13% ~ 2.81%、1.70% ~ 4.84% 和 3.84% ~ 6.21%,有机磷主要分布于残留态磷(11.44% ~ 23.34%),Residual-P 整体表现为 BZ2 > ZF > BZ1 = BYZ,说明高配比的板栗产业废弃物(特别是栗叶栗蓬)使堆肥产物(BZ2)中的残留态磷比例增加.

2.2 不同有机堆肥产物对板栗结果枝叶片磷吸收的影响

根据研究区板栗的生长周期特点,其物候期^[37]的划分依次为:展叶期(5月)、授粉期(6月初)、

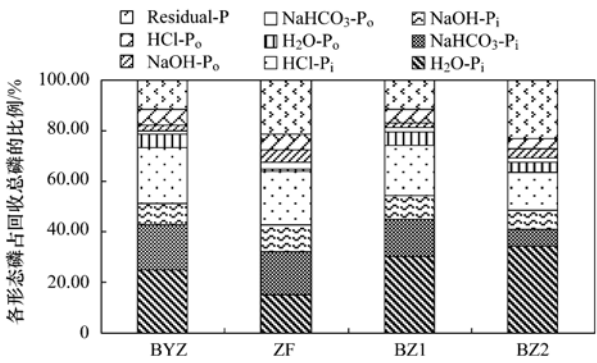


图 3 有机堆肥各形态无机磷(P_i)、有机磷(P_o)占回收全磷(P_t)的比例

Fig. 3 Proportions of inorganic phosphorus (P_i) and organic phosphorus (P_o) of different forms in the total fractionated phosphorus (P_t) of organic composts

坐果期(6月中旬)、幼果期(7月)、膨大期(8月)和成熟期(9月). 有研究表明,磷在板栗整个生长期起着重要作用^[32, 38, 39],影响叶片光合速率和碳素同化^[8],调节雌雄花比例^[32],是果实形成过程中所需核酸和核蛋白的结构元素^[38],是能量代谢和遗传的必需物质^[38],显著影响果树产量^[38, 40].

从图 4 可以看出,有机堆肥产物处理的单位面积叶片磷含量随生长期的推进总体表现出降低-升高-降低的变化,这与板栗各时期营养与生殖生长的矛盾有关^[32, 38, 39]. 在以营养生长为主的展叶期(5月),叶片营养较好,单位面积叶片磷含量处于中等水平,而进入开花授粉期(6月),雌雄花发育成为营养供应中心^[32],单位面积叶片磷含量降低. 随着叶片的进一步成熟,光合作用增强,单位面积的叶片干物质和磷等元素积累量均增加,而幼果期(7月)果

实干物质积累需求少,营养生长与生殖生长的矛盾得到缓和,表现为叶片磷含量升高^[38],并达到峰值,此时叶片磷含量表现为: BZ2 (505.52 mg·m⁻²) > BZ1 (436.79 mg·m⁻²) > ZF (331.97 mg·m⁻²) > BYZ (321.65 mg·m⁻²) > CK (222.02 mg·m⁻², $P < 0.05$). 随着果实进一步膨大与成熟,光合产物大量由叶片转运至果实,导致叶片磷含量降低^[39]. 到采果结束时(9月),叶片磷含量情况为: BZ2 > BZ1 = BYZ > ZF > CK.

从整个研究期看,各处理平均每月叶片磷含量总体表现为: BZ2 (347.54 mg·m⁻²) > BZ1 (282.19 mg·m⁻²) > BYZ (248.26 mg·m⁻²) > ZF (231.94 mg·m⁻²) > CK (206.20 mg·m⁻², $P < 0.05$),即 BZ2 最高,其次是 BZ1,CK 最低,这与7月和9月采果结束时的各处理磷含量大小顺序基本一致,说明板栗废弃物堆肥产物处理显著提高了板栗结果枝叶片磷含量,这与 Peirce 等^[14]研究结果基本一致.

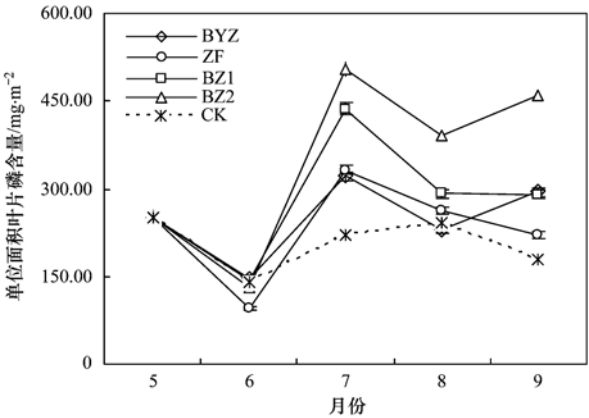


图4 不同有机堆肥产物处理下板栗结果枝叶片磷含量动态变化
Fig. 4 Dynamic changes of leaf phosphorus contents per unit area under different organic compost treatments

2.3 单位面积叶片磷增值与有机堆肥产物水溶性磷形态的相关分析

叶片矿质营养(包括磷)分析可对果树的营养状况进行有效评价,而7月是板栗营养诊断的关键时期^[41]. 各处理7月(y_7)和平均每月单位面积叶片磷含量增值($\bar{y}$)如表5所示. 4个有机堆肥产物中的差异显著($P < 0.05$),大小顺序为 BZ2 > BZ1 >

表5 有机堆肥产物处理7月(y_7)和平均每月($\bar{y}$)单位面积叶片磷含量增值(平均值±标准差, $n=3$)

Table 5 Increment of leaf phosphorus content per unit area in July(y_7) and per month on average (means±SD, $n=3$)

处理	y_7	$\bar{y}$
BYZ	0.449±0.021 d	0.204±0.006 c
ZF	0.495±0.020 c	0.125±0.005 d
BZ1	0.967±0.041 b	0.369±0.015 b
BZ2	1.277±0.052 a	0.685±0.025 a

BYZ > ZF,比对照增加 12.5% ~ 68.5%,而 y_7 则表现为 BZ2 最高,其次为 BZ1,而 BYZ 最低,比对照提高 44.9% ~ 127.7%,说明板栗废弃物堆肥产物处理显著提高了板栗结果枝叶片磷含量,且 BZ2 处理增幅最大.

相关分析(表6)表明,有机堆肥产物处理7月、平均每月单位面积叶片磷增值均与 H_2O-P_i 含量、 H_2O-P_i/P_{it} 、 H_2O-P_i/P_{it} 呈显著或极显著正相关,推测有机堆肥产物中水溶性无机磷含量及占全磷的比例是当年板栗叶片磷吸收的重要影响因素. 有研究表明, H_2O-P_i 主要是水溶性正磷酸盐,施入土壤后,短时间易被植物吸收或者随水流失^[35]. 也有研究认为,有机废弃物中磷的水溶性直接影响其施用后土壤磷对环境的影响,当废弃物被表施于农田时影响尤为明显^[17],而本试验将有机堆肥产物集中深施于该区板栗细根分布较多的区域(20~40 cm),降低了磷随地表径流或者降雨流失和被土壤固定的可能性,使 H_2O-P_i 被植物吸收可能性增加. Grigatti 等^[5]通过连续浸提、土壤培养及植物盆栽试验等一系列研究表明,等磷量处理下具有最高易溶性磷含量的玉米秸秆堆肥处理的土壤有效磷和植物有效磷均最大. Peirce 等^[14]研究结果表明,贮存时间短的鸡粪正磷酸盐含量虽较低,而 P 却表现出较高的植物有效性可能是因为其较高的有机磷库在微生物降解作用下对正磷酸盐库的持续补充快于土壤的吸附固定作用. 本研究中,栗蓬栗叶-菌渣-鸡粪堆肥 BZ2 具有较高的水溶态无机磷和高残留态有机磷,在施磷量相等的情况下,高浓度的残留态有机磷使微生物降解作用加强^[14],从而使有效磷含量进一步增

表6 单位面积叶片磷增值与有机堆肥产物各形态水溶性磷含量的相关分析

Table 6 Pearson correlations between increment of leaf phosphorus content per unit area and H_2O-P contents of different forms in composts

类型	水溶性磷 H_2O-P			水溶性磷 H_2O-P/P_{it}		
	H_2O-P_i	H_2O-P_i	H_2O-P_o	H_2O-P_i/P_{it}	H_2O-P_i/P_{it}	H_2O-P_o/P_{it}
y_7	0.619 *	0.603 *	0.233	0.734 **	0.785 **	0.360
$\bar{y}$	0.554	0.628 *	0.210	0.673 **	0.727 **	0.380

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

加,同时 BZ2 中有机质含量最高(表 1),在土壤中分解可产生大量带负电荷的低分子有机物,与磷酸根发生竞争吸附,掩蔽土壤磷的吸附位,降低土壤对磷的吸附能力^[17],使土壤有效磷增加,这可能也是栗蓬栗叶-菌渣-鸡粪堆肥 BZ2 处理单位叶片磷含量及增值均最高的重要原因。本研究仅进行一年的大田试验,对于长期施用板栗产区堆肥产物对结果板栗 P 的生物有效性还需进一步研究。

3 结论

(1)4 种有机堆肥产物全磷含量因原料配比不同而表现出一定的差异,具体表现为: BZ1 ($10.61 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > ZF ($9.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > BYZ ($8.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > BZ2 ($7.68 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),并均以无机磷为主,无机磷占全磷的比例在 62.88% ~ 73.62% 之间。

(2)4 种有机堆肥产物中除 ZF 以较稳定的 HCl-P 含量及其占全磷比例最高以外,其他 3 种均以活性的 $\text{H}_2\text{O}-\text{P}$ 含量及占全磷比例最高,NaOH-P 含量均较低。

(3)各形态中的无机磷中活性无机磷($\text{H}_2\text{O}-\text{P}_i$ 或者 $\text{NaHCO}_3-\text{P}_i$) 占形态总磷的比例最高 (89.17% ~ 96.00%),且在回收全磷中 BZ2 中的无机磷主要分布在 $\text{H}_2\text{O}-\text{P}_i$ 和 $\text{HCl}-\text{P}_i$,其他 3 种的无机磷主要分布在 $\text{H}_2\text{O}-\text{P}_i$ 、 $\text{HCl}-\text{P}_i$ 和 $\text{NaHCO}_3-\text{P}_i$,各形态有机磷主要分布于残留态磷,BZ2 中比例最高,即 BZ2 表现出高比例的水溶性磷和残留态有机磷库,兼具化学磷肥的速效和有机肥料的缓效特质。

(4)等磷量大田试验结果表明,板栗结果枝叶片单位面积叶片磷含量整体表现为 BZ2 > BZ1 > BYZ > ZF > CK,高峰期(7 月)与平均每月叶片磷含量增值与 $\text{H}_2\text{O}-\text{P}_i$ 含量、 $\text{H}_2\text{O}-\text{P}_i/\text{P}_n$ 、 $\text{H}_2\text{O}-\text{P}_i/\text{P}_n$ 呈显著或极显著正相关,推测集中深施情况下有机堆肥产物中水溶性无机磷含量及占全磷的比例是当年板栗叶片磷吸收的重要影响因素,且 BZ2 处理叶片磷含量及增值最高,综合考虑,栗蓬栗叶-菌渣-鸡粪(BZ2)体系是产区好氧堆肥原料的较佳选择,其原料中板栗产业废弃物配比高达 80% (栗蓬栗叶 60% + 菌渣 20%)。

(5)在经济林板栗有机肥集中深施实践中,进一步加强对有机堆肥产物中的磷形态与土壤磷相互作用的时间累积效应以及其与磷的生物有效性的相关规律研究,为板栗产业废弃物的有效处理及其堆肥产物的合理利用提供科学依据。

参考文献:

- [1] Cairney J W G. Ectomycorrhizal fungi: the symbiotic route to the root for phosphorus in forest soils[J]. *Plant and Soil*, 2011, **344** (1-2): 51-71.
- [2] Ngo P T, Rumpel C, Ngo Q A, *et al.* Biological and chemical reactivity and phosphorus forms of buffalo manure compost, vermicompost and their mixture with biochar[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **148**: 401-407.
- [3] Abdi D, Cade-Menun B J, Ziadi N, *et al.* Long-term impact of tillage practices and phosphorus fertilization on soil phosphorus forms as determined by ^{31}P nuclear magnetic resonance spectroscopy[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2014, **43** (4): 1431-1441.
- [4] Amanullah, Khan A. Phosphorus and compost management influence maize (*Zea mays*) productivity under semiarid condition with and without phosphate solubilizing bacteria[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, **6**: 1083.
- [5] Grigatti M, Boanini E, Cavani L, *et al.* Phosphorus in digestate-based compost: chemical speciation and plant-availability[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2015, **6**(4): 481-493.
- [6] 邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 等. 不同有机物料中的磷形态特征研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 1098-1104.
Deng J, Hu M K, Zhao X L, *et al.* Characterization of phosphorus forms in different organic materials [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 1098-1104.
- [7] 季萌萌, 彭玲, 文焰, 等. 供磷水平对苹果砧木氮、磷吸收和利用特性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, **21** (4): 1016-1021.
Ji M M, Peng L, Wen Z, *et al.* Nitrogen and phosphorus absorption and utilization characteristics of apple rootstocks under different phosphorus levels[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, **21**(4): 1016-1021.
- [8] 臧成凤, 樊卫国, 潘学军. 供磷水平对铁核桃实生苗生长、形态特征及叶片营养元素含量的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, **49**(2): 319-330.
Zang C F, Fan W G, Pan X J. Effect of phosphorus levels on growth, morphological characteristics and leaf element contents of *Juglans sigillata* dode seedlings[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, **49**(2): 319-330.
- [9] MacDonald G K, Bennett E M, Potter P A, *et al.* Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of United States of America*, 2011, **108**(7): 3086-3091.
- [10] Cordell D, Drangert J O, White S. The story of phosphorus: global food security and food for thought [J]. *Global Environmental Change*, 2009, **19**(2): 292-305.
- [11] Adhami E, Hosseini S, Owliaie H. Forms of phosphorus of vermicompost produced from leaf compost and sheep dung enriched with rock phosphate [J]. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 2014, **3**: 68.
- [12] Requejo M I, Eichler-Löbermann B. Organic and inorganic phosphorus forms in soil as affected by long-term application of organic amendments[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2014, **100**(2): 245-255.
- [13] Xue Q Y, Shamsi I H, Sun D S, *et al.* Impact of manure application on forms and quantities of phosphorus in a Chinese Cambisol under different land use [J]. *Journal of Soils and*

- Sediments, 2013, **13**(5): 837-845.
- [14] Peirce C A E, Smernik R J, McBeath T M. Phosphorus availability in chicken manure is lower with increased stockpiling period, despite a larger orthophosphate content[J]. Plant and Soil, 2013, **373**(1-2): 359-372.
- [15] 薛巧云. 农艺措施和环境条件对土壤磷素转化和淋失的影响及其机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- Xue Q Y. Effects of agronomic practices and environmental factors on soil phosphorus transformation and loss and corresponding mechanism[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [16] Takahashi S. Phosphorus characterization of manure composts and combined organic fertilizers by a sequential-fractionation method [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2013, **176**(4): 494-496.
- [17] 徐秋桐, 张莉, 章明奎. 不同有机废弃物对土壤磷吸附能力及有效性的影响[J]. 农业工程学报, 2014, **30**(22): 236-244.
- Xu Q T, Zhang L, Zhang M K. Effects of different organic wastes on phosphorus sorption capacity and availability in soils [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, **30**(22): 236-244.
- [18] 秦胜金, 刘景双, 王国平, 等. 三江平原不同土地利用方式下土壤磷形态的变化[J]. 环境科学, 2007, **28**(12): 2777-2782.
- Qin S J, Liu J S, Wang G P, *et al.* Phosphorus fractions under different land uses in Sanjiang plain[J]. Environmental Science, 2007, **28**(12): 2777-2782.
- [19] Gagnon B, Demers I, Ziadi N, *et al.* Forms of phosphorus in composts and in compost-amended soils following incubation[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2012, **92**(5): 711-721.
- [20] Takahashi S. Phosphorus fractionation of composted crop residues and forms of soil phosphorus after 22 years of compost application to andosols [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2014, **45**(7): 1003-1010.
- [21] Li G H, Li H G, Leffelaar P A, *et al.* Characterization of phosphorus in animal manures collected from three (dairy, swine, and broiler) farms in China[J]. PLoS One, 2014, **9**(7): e102698.
- [22] Pagliari P H, Laboski C A M. Investigation of the inorganic and organic phosphorus forms in animal manure [J]. Journal of Environmental Quality, 2012, **41**(3): 901-910.
- [23] Sharpley A, Moyer B. Phosphorus forms in manure and compost and their release during simulated rainfall [J]. Journal of Environmental Quality, 2000, **29**(5): 1462-1469.
- [24] 张蛟蛟, 李永夫, 姜培坤, 等. 施肥对板栗林地土壤 N_2O 通量动态变化的影响[J]. 生态学报, 2013, **33**(16): 4939-4948.
- Zhang J J, Li Y F, Jiang P K, *et al.* Effect of fertilization on the dynamic of soil N_2O fluxes in Chinese chestnut stands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(16): 4939-4948.
- [25] 杨娜, 郭素娟, 张峰. 板栗产区废弃物堆肥特性及腐熟度评价[J]. 北京林业大学学报, 2009, **31**(6): 198-202.
- Yang N, Guo S J, Zhang F. Characteristics of waste composting in *Castanea mollissima* Bl. areas and evaluation of maturity[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, **31**(6): 198-202.
- [26] 牛俊玲, 梁丽珍, 兰彦平. 板栗苞和牛粪混合堆肥的物质变化特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(4): 824-827.
- Niu J L, Liang L Z, Lan Y P. The substance changes during the composting of cow dung and envelope splits of chestnut [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, **28**(4): 824-827.
- [27] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [28] Dou Z, Toth J D, Galligan D T, *et al.* Laboratory procedures for characterizing manure phosphorus[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, **29**(2): 508-514.
- [29] NY 525-2012 有机肥料[S].
- NY 525-2012 Organic fertilizer[S].
- [30] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [31] 刘宏伟, 刘文丹, 王微, 等. 重庆石灰岩地区主要木本植物叶片性状及养分再吸收特征[J]. 生态学报, 2015, **35**(12): 4071-4080.
- Liu H W, Liu W D, Wang W, *et al.* Leaf traits and nutrient resorption of major woody species in the karst limestone area of Chongqing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(12): 4071-4080.
- [32] 郭素娟, 谢鹏. 花期和幼果期‘燕山早丰’板栗不同组织或器官矿质元素含量的变化[J]. 果树学报, 2014, **31**(5): 863-868.
- Guo S J, Xie P. Changes on the content of mineral elements in different tissues or organs of Chinese chestnut ‘Yanshanzaofeng’ during flowering and young fruit period [J]. Journal of Fruit Science, 2014, **31**(5): 863-868.
- [33] 付广青, 靳红梅, 叶小梅, 等. 猪和奶牛粪污厌氧发酵中固相磷形态变化分析[J]. 生态与农村环境学报, 2014, **30**(2): 239-245.
- Fu G Q, Jin H M, Ye X M, *et al.* Variation in forms of solid phase phosphorus in pig and dairy cow manures under anaerobic digestion[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2014, **30**(2): 239-245.
- [34] Turner B L, Leytem A B. Phosphorus compounds in sequential extracts of animal manures: Chemical speciation and a novel fractionation procedure [J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(22): 6101-6108.
- [35] 李洪刚, 陈玉成, 肖广全, 等. 鸟粪石结晶法处理牛场沼液过程中磷形态转化[J]. 农业工程学报, 2016, **32**(3): 228-233.
- Li H G, Chen Y C, Xiao G Q, *et al.* Phosphorous transformation during cattle farm biogas slurry treatment using struvite crystallization [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, **32**(3): 228-233.
- [36] 魏树伟, 王少敏, 张勇, 等. 不同土壤管理方式对梨园土壤养分、酶活性及果实风味品质的影响[J]. 草业学报, 2015, **24**(12): 46-55.
- Wei S W, Wang S M, Zhang Y, *et al.* Effects of different soil management methods on the soil nutrients, enzyme activity and fruit quality of pear orchards [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, **24**(12): 46-55.
- [37] 张铁如. 板栗无公害高效栽培[M]. 北京: 金盾出版社, 2004.
- [38] 谢鹏, 郭素娟, 吕文君. 板栗‘燕山早丰’不同类型枝条在花期和幼果期的矿质元素含量比较[J]. 东北农业大学学报,

- 2014, **45**(4): 41-45.
- Xie P, Guo S J, Lv W J. Comparison analysis on mineral elements of different shoots in Chinese chestnut 'Yanshanzaofeng' during flowering and young fruit period[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2014, **45**(4): 41-45.
- [39] 陈在新, 潘娟, 江道菊. 不同成熟期板栗品种(系)种子发育期主要营养物质与内源激素含量的动态变化[J]. 林业科学, 2011, **47**(1): 73-78.
- Chen Z X, Pan J, Jiang D J. Dynamic changes of main nutrients and endogenous hormones in seed of different mature period Chinese chestnuts during their seed development[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, **47**(1): 73-78.
- [40] Fageria N K, Melo L C, Oliveira J P, *et al.* Yield and yield components of dry bean genotypes as influenced by phosphorus fertilization[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2012, **43**(21): 2752-2766.
- [41] 郭素娟, 李广会, 熊欢, 等. “燕山早丰”板栗叶片 DRIS 营养诊断研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, **20**(3): 709-717.
- Guo S J, Li G H, Xiong H, *et al.* Foliar nutrition diagnosis of *Castanea mollissima* by using diagnosis and recommendation integrated system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, **20**(3): 709-717.
-

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2016 年 10 月 12 日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了 2015 年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示《环境科学》2015 年度总被引频次 8 844,影响因子 1.617,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.

CONTENTS

Reactivity-based Anthropogenic VOCs Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (845)
Characteristics of Reactive VOCs Species During High Haze-Pollution Events in Suburban Area of Shanghai in Winter	GAO Shuang, ZHANG Kun, GAO Song, <i>et al.</i> (855)
Assessment of PM _{2.5} Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Wen-jing, CHANG Xing, XING Jia, <i>et al.</i> (867)
Concentration Characteristics and Sources of Trace Metals in PM _{2.5} During Wintertime in Beijing	QIAO Bao-wen, LIU Zi-rui, HU Bo, <i>et al.</i> (876)
Online Source Analysis of Particulate Matter (PM _{2.5}) in a Heavy Pollution Process of Shijiazhuang City During Heating Period in 2015	LU Na, LI Zhi-guo, ZHOU Jing-bo, <i>et al.</i> (884)
Analysis of Chemical Composition and Pollution Source of the Fine Particulate Matter by the SPAMS in the Four Seasons in Nanning	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, MAO Jing-ying, <i>et al.</i> (894)
Physico-chemical Characteristics of Individual Aerosol Particles in Marine Atmosphere on South Hemisphere	CHI Jian-wei, LI Chuan-jin, SUN Jun-ying, <i>et al.</i> (903)
Characteristics of Spatial Distribution of Bacterial Aerosols Produced by Fountain	ZHANG Chong-miao, YUAN Lin, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (911)
Removal of Volatile Sulfur Odor by the Biotrickling Filter	YE Jie-xu, MIAO Xiao-ping, ZHUGE Lei, <i>et al.</i> (918)
Magnetic Characteristics and Environmental Pollution Analysis of Street Dust in Different Functional Zones of Xi'an City	FANG Ni, ZHANG Jun-hui, WANG Jin, <i>et al.</i> (924)
Pollution Characteristics and Nitrification and Denitrification Potential of Superficial Sediments from Streams in an Urban-Rural Fringe	QIN Ru-bin, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (936)
Nitrification and Denitrification Rates in a Small Tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir During Water Collection and Release Events	WANG Jing, LIU Hong-jie, LEI Yu, <i>et al.</i> (946)
Tempo-spatial Variations and Influential Factors of Carbon Dioxide Emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China	ZHAO Deng-zhong, TAN De-bao, LI Chong, <i>et al.</i> (954)
Seasonal Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Surface Water of Baiyangdian Lake	WANG Yi-zhen, ZHANG Jun, ZHOU Xu-shen, <i>et al.</i> (964)
Distributions, Sources and Pollution Assessment of Hg in Sediment of Douhe Reservoir in Tangshan City	WU Ting-ting, WANG Ming-meng, CHEN Xu-feng, <i>et al.</i> (979)
Release Characteristics of Mercury from Submersed Typical Herbaceous Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	DENG Han, ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (987)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water Around Electroplating Factories	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (993)
Speciation and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments from Jiulong River	LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (1002)
Fractionation and Contamination Assessment of Metal Elements in the Surface Sediments of Yundang Lagoon in Xiamen	YANG Qiu-li, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1010)
Source Analysis, Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sewage Irrigation Area Farmland Soils of Longkou City	LI Chun-fang, WANG Fei, CAO Wen-tao, <i>et al.</i> (1018)
Efficiency and Mechanism of Purifying High Iron-Manganese from Ground Water in the Cold Villages and Towns Based on The Coupling of Rice Husk and Iron-Manganese Oxidizing Bacteria	SUN Nan, CHEN Yan-li, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1028)
Peroxidation of High Algae-laden Water by Ozone; Algae Organic Matter Transformation and Disinfection By-products Formation	ZHANG Sai, HU Xue-bin, GU Li, <i>et al.</i> (1038)
Effects of Pretreatment on Hydraulic Irreversible Membrane Fouling During Ultrafiltration Short Process: A Pilot Study	YANG Hai-yan, XING Jia-jian, WANG Can, <i>et al.</i> (1046)
Fenton-like Catalytic Removal of Organic Pollutants in Water by Framework Cu in Cu-Al ₂ O ₃	XU Dan, ZHANG Li-li, LIU Li-fen (1054)
Oxidation Destruction of Cu(CN) ₃ ²⁻ by Persulfate	WANG Yun-fei, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (1061)
Enhanced Removal of Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid and Simultaneous Power Generation in Microbial Fuel Cells	QUAN Xiang-chun, QUAN Yan-ping, XIAO Zhu-tian (1067)
Adsorption Characteristics of Copper in Water by the Porous Biomorph-Genetic Composite of HAP/C with Eucalyptus Wood Template	LI Chao, ZHU Zong-qiang, CAO Shuang, <i>et al.</i> (1074)
Biological Toxicity Evaluation of Domestic Wastewater Based on A ² /O Treatment Processes Using a Battery of Bioassays	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1084)
Effect of Wastewater Nitrogen Concentrations on Nitrogen Removal Ability of <i>Myriophyllum aquaticum</i>	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1093)
Recovery Performance of ANAMMOX Process after Inhibition Resulting from Seawater	QI Pan-qing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1102)
Impact of Starvation Conditions on Biological Community Structure in Sulfur Autotrophic Denitrification Reactor	LI Fang-fang, SHI Chun-hong, LI Hai-bo, <i>et al.</i> (1109)
Quick Start-up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1116)
A New Model for the Treatment of Low Ammonia Nitrogen Wastewater by CANON Process	WANYAN De-qing, YUAN Yi, LI Xiang, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Side-stream Phosphorus Recovery on the Performance of EBPR System Under Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (1130)
Identification and Influence of Quorum Sensing on Anaerobic Ammonium Oxidation Process	CHEN Shu-han, LI An-jie, WANG Yue-xing, <i>et al.</i> (1137)
Effects of Organic Loading Rate on Startup Performance of Anaerobic Digestion with Vinegar Residues	DAI Xiao-hu, YU Chun-xiao, LI Ning, <i>et al.</i> (1144)
Influencing Mechanism of Calcium Peroxide Pre-treatment on Dewatering Performance of Waste Activated Sludge	BAI Run-ying, CHEN Zhan, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1151)
Treatment Effects of Earthworm Constructed Wetlands in Different Working Conditions	DONG Meng-ke, LI Huai-zheng, XU Yi-xiao (1159)
Effect of PFOA on Oxidative Stress and Membrane Damage of <i>Escherichia coli</i>	YANG Meng, LI Yi, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1167)
Physicochemical Properties and Antibacterial Effect of Silver Nanoparticles; A Comparison of Environmental and Laboratorial Conditions	YI Jun, CHENG Jin-ping (1173)
Pollution Characteristics of Chlorobenzenes in Organs of Fish from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1182)
Effect of Nano Zeolite on Growth, Activity of Antioxidant Enzyme, and Chemical Fractions and Concentration of Cd in Chinese Cabbage	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (1189)
Effect of Different Iron Minerals on Bioaccessibility of Soil Arsenic Using <i>in vitro</i> Methods	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, HUANG Run-lin, <i>et al.</i> (1201)
Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals Contaminated Soils by Stainless Steel Electrodes as well as the Phenomenon and Mechanism of Electrode Corrosion and Crystallization	WEN Dong-dong, FU Rong-bing, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1209)
Influence of the Application of Non-Hazardous Sewage Sludge on the Evolution of Soil Carbon Pool and Carbon Pool Management Index	LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, <i>et al.</i> (1218)
Input and Distribution of Photosynthesized Carbon in Soil-Rice System Affected by Water Management and Nitrogen Fertilization	WANG Ting-ting, ZHU Zhen-ke, ZHU Han-hua, <i>et al.</i> (1227)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in a Secondary Forest	CHEN Shu-tao, SUN Lu, SANG Lin, <i>et al.</i> (1235)
Response of Soil Nitrifier and Denitrifier Community and Activity to Elevated Atmospheric CO ₂ Concentration and Temperature	LIU Yuan, WANG Guang-li, LI Lian-qing, <i>et al.</i> (1245)
Effects of Lithology on the Abundance and Composition of Soil Nitrogen-fixing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Karst Shrub Ecosystem	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1253)
Characterization of Phosphorus Forms in Organic Composts and Their Effects on Leaf Phosphorus Content of <i>Castanea mollissima</i> in Chinese Chestnut Producing Area	SONG Ying, GUO Su-juan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (1262)
Effects of Acidic Materials on the N Transformations During the Composting of Pig Manure and Wheat Straw	JIANG Ji-shao, YAO Qian (1272)