

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第4期

Vol.38 No.4

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

西宁近郊大气氮干湿沉降研究	许稳, 金鑫, 罗少辉, 冯兆忠, 张霖, 潘月鹏, 刘学军 (1279)
兰州春夏季 PM ₁₀ 碳组分昼夜变化特征与来源分析	马丽, 余晔, 王博, 赵素平, 李刚 (1289)
海南三亚大气颗粒物中水溶性无机离子浓度及其粒径分布特征	王璐, 刘子锐, 温天雪, 苗红妍, 王跃思 (1298)
2015年北京城区大气 PM _{2.5} 中 NH ₄ ⁺ 、NO ₃ ⁻ 、SO ₄ ²⁻ 及前体气体的污染特征	丁萌萌, 周健楠, 刘保献, 王焱, 张博韬, 石爱军, 杨懂艳, 常森 (1307)
北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险	齐丽, 任玥, 刘爱民, 黄业茹, 赵震, 王江, 李泓 (1317)
北京和保定地区大气细颗粒物中可培养细菌的种群特征	胡亚东, 马安周, 吕鹏翼, 张杨, 庄国强 (1327)
基于实时交通数据的南京市主次干道机动车排放特征分析	李笑语, 吴琳, 邹超, 张意, 毛洪钧, 荆博宇 (1340)
过渡金属掺杂对铜锡烧绿石催化碳烟燃烧性能的影响	李曦峰, 孙宇琦, 王仲鹏, 牟宗刚, 崔兆杰 (1348)
南水北调中线北京段水质状况分析	徐华山, 赵磊, 孙昊苏, 任玉芬, 丁涛, 常帅, 王海东, 李森, 果钊 (1357)
三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征	杨兵, 何丙辉, 王德宝 (1366)
基于偏最小二乘模型的河流水质对土地利用的响应	李琳琳, 张依章, 唐常源, 郑磊, 孟伟, 卢少勇, 敦宇 (1376)
抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征	王琳杰, 余辉, 牛勇, 牛远, 张有林, 刘倩, 吉正元 (1384)
千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素	俞焰, 刘德富, 杨正健, 张佳磊, 徐雅倩, 刘晋高, 严广寒 (1393)
高通量测序技术研究辽河真核浮游藻类的群落结构特征	王靖淇, 王书平, 张远, 林佳宁, 高欣, 臧小苗, 赵茜 (1403)
三门湾近海有机污染对浮游细菌群落的影响	戴文芳, 郭永豪, 郁维娜, 熊金波 (1414)
沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化	金赞芳, 龚嘉临, 施伊丽, 金漫彤, 李非里 (1423)
广州南沙红树林湿地水体和沉积物中有机氯农药的残留特征	丁洋, 黄焕芳, 李绘, 罗杰, 郑煌, 孙焰, 杨丹, 张原, 祁士华 (1431)
太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价	边博, 周燕, 张琴 (1442)
锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果	朱广伟, 李静, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军, 张运林, 秦伯强 (1451)
超滤处理东江水不可逆膜污染物的识别和活性炭对其吸附去除	杨海燕, 王灿, 鄢忠森, 李冬平, 赵焱, 瞿芳术, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1460)
UV/SPS 降解水中三氯生的效能及动力学	李青松, 李学艳, 姚宁波, 骆靖宇, 李国新, 陈国元, 高乃云 (1467)
真空紫外-亚硫酸盐法降解 PFOS 影响因素	韩慧丽, 王宏杰, 董文艺 (1477)
g-C ₃ N ₄ 协同光催化还原 Cr(VI) 及氧化磺基水杨酸	李莉莉, 陈翠柏, 兰华春, 刘菲, 安晓强 (1483)
锆改性硅藻土吸附水中磷的研究	范艺, 王哲, 赵连勤, 吴德意 (1490)
3 种常规消毒方法对磺胺类抗性基因削减效果的比较	郑吉, 周振超, 陈芳, 陈涛, 魏媛媛, 韩玥, 陈红 (1497)
典型生活污水处理工艺对雌激素效应的去除	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1506)
SRT 对酵母-SBR 处理油脂废水稳定性的影响	吕文洲, 张树林, 乔宇祥, 刘英 (1513)
分散染料 neocron black (NB) 的生物降解特性	杨波, 丁凤友, 徐辉, 李方, 田晴, 马春燕 (1520)
多聚磷酸盐激酶基因在污水生物除磷中的功能	南亚萍, 周国标, 袁林江 (1529)
生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程	付昆明, 周厚田, 苏雪莹, 王会芳 (1536)
厌氧氨氧化反应器脱氮性能及细菌群落多样性分析	曹雁, 王桐屿, 秦玉洁, 韩彬, 任君怡 (1544)
内环境调节层对厌氧生物反应器填埋场中氮转化的影响	何正坤, 宋博宇, 朱南文, 董军 (1551)
矿化垃圾中 Fe(III) 还原耦合 CH ₄ 厌氧去除特性	王立立, 何婷, 龙焰, 刘常宝 (1558)
应用铅同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析	孙境蔚, 于瑞莲, 胡恭任, 苏光明, 王晓明 (1566)
畜禽粪有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异	何梦媛, 董同喜, 茹淑华, 苏德纯 (1576)
山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析	葛蔚, 程琪琪, 柴超, 曾路生, 吴娟, 陈清华, 朱祥伟, 马东 (1587)
江汉平原典型土壤环境中有机磷农药的分布特征及影响因素	王建伟, 张彩香, 潘真真, 廖小平, 刘媛, 吕曲, 汤蜜 (1597)
基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析	蔡观, 胡亚军, 王婷婷, 袁红朝, 王久荣, 李巧云, 葛体达, 吴金水 (1606)
秸秆还田对外源氮在土壤中转化及其微生物响应的影响	陈珊, 丁咸庆, 祝贞科, 王娟, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (1613)
生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响	张阳阳, 胡学玉, 邹娟, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (1622)
淹水水稻土消耗 N ₂ O 能力及机制	王玲, 邢肖毅, 秦红灵, 刘毅, 魏文学 (1633)
不同污水处理工艺非二氧化碳温室气体的释放	李惠娟, 彭党聪, 刘文博, 姚倩, 卓杨 (1640)
施用不同污泥堆肥品对土壤温室气体排放的影响	杨雨滢, 易建婷, 张成, 陈宏, 木志坚 (1647)
不同镉水平下纳米沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响	迟苏琳, 徐卫红, 熊仕娟, 王卫中, 秦余丽, 赵婉伊, 张春来, 李彦华, 李桃, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1654)
不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制	彭琴, 李哲, 梁东丽, 王梦柯, 郭璐 (1667)
褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用	刘仕翔, 黄益宗, 罗泽娇, 黄永春, 蒋航 (1675)
不同形态磺胺类药物在根-土界面的空间分布及毒性评价	金彩霞, 司晓薇, 王万峰, 王春峰, 王子英, 张琴文, 王婉 (1683)
三峡库区消落带沉积物对鱼体富集率的影响	孙松, 李楚娴, 张成, 王永敏, 王定勇 (1689)
重庆市居民头发重金属富集特征及相关性分析	何明靖, 李琦, 王登祥, 赵佳渊, 杨婷 (1697)
16S rRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (1704)
石墨烯掺杂聚苯胺阳极提高微生物燃料电池性能	黄力华, 李秀芬, 任月萍, 王新华 (1717)
美国污染场地清理的风险评估简介及政策制定	容跃 (1726)
《环境科学》征稿简则 (1505) 《环境科学》征订启事 (1682) 信息 (1339, 1459, 1612)	

基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析

蔡观^{1,2}, 胡亚军³, 王婷婷³, 袁红朝^{2,3}, 王久荣^{2,3}, 李巧云^{1*}, 葛体达³, 吴金水³

(1. 湖南农业大学生物科学技术学院, 长沙 410128; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所公共技术服务中心, 长沙 410125; 3. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 农业生态系统过程重点实验室, 长沙 410125)

摘要: 适宜的磷素分级方法是研究磷素组分特征与评价其有效性的关键。以磷素的化学与生物活化特点, 采用改进的生物有效性的磷素分级方法, 应用其研究不同土地利用方式下旱地土与水田土中磷素组分与有效磷 (Olsen-P) 的关系, 并分析环境因子对磷组分的影响。磷素分级方法将磷素分为 4 个组分: ①自由扩散或根际截留的磷 ($\text{CaCl}_2\text{-P}$); ②有机酸活化和无机弱结合磷 (Citrate-P); ③系列酶矿化的有机磷 (Enzyme-P); ④潜在活化的无机磷库 (HCl-P)。结果表明, 旱地土及水田土 4 种磷素组分含量均表现为: $\text{HCl-P} > \text{Citrate-P} > \text{Enzyme-P} > \text{CaCl}_2\text{-P}$, 且旱地土各磷组分均显著高于水田土。Olsen-P 与各磷素组分均呈显著正相关, 表明各磷素组分对有效磷都有贡献。具体表现为: 在旱地土中, Olsen-P 与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 和 Enzyme-P 相关性较高 ($R^2 = 0.359$; $R^2 = 0.386$); 在水田土中, Olsen-P 与 Citrate-P 相关性较高 ($R^2 = 0.788$), 说明旱地土中有效磷主要来自土壤自由扩散的无机磷和易矿化的有机磷部分, 而水田土中有效磷主要来自弱酸活化的无机磷。冗余分析结果表明, 磷素组分主要受土壤 pH 和黏粒含量的影响, 指示在农业生产活动中, 可通过调节土壤 pH 值, 提高土壤有效磷含量。

关键词: 磷素分级; 生物有效性; 环境因子; 旱地土; 水田土

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)04-1606-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201608178

Characteristics and Influencing Factors of Biologically-based Phosphorus Fractions in the Farmland Soil

CAI Guan^{1,2}, HU Ya-jun³, WANG Ting-ting³, YUAN Hong-zhao^{2,3}, WANG Jiu-rong^{2,3}, LI Qiao-yun^{1*}, GE Ti-da³, WU Jin-shui³

(1. College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Public Service Technology Center, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: A suitable fractionation method of phosphorus (P) is a key to effective assessment of soil P componential features. Here a new biologically-based P (BBP) method was used to evaluate the P fractions in the upland and paddy soils across large-scale area in China. The soil P was divided into four components: ① soluble or rhizosphere-intercepted ($\text{CaCl}_2\text{-P}$), ② organic acid activated and inorganic weakly bound (Citrate-P), ③ enzyme mineralization of organic P (Enzyme-P), ④ potential activation of inorganic P (HCl-P). Then, the relationships between biologically-based P fractions and standard Olsen-P were investigated, and driving factors of P fractions were identified. The results showed that P content was in order of $\text{HCl-P} > \text{Citrate-P} > \text{Enzyme-P} > \text{CaCl}_2\text{-P}$. All P components of upland soil displayed higher levels than those of paddy soil. Moreover, the P components were highly positively correlated with the Olsen-P, suggesting that each P component contributed to soil P availability. However, it was found that Olsen-P was most highly correlated with $\text{CaCl}_2\text{-P}$ and Enzyme-P ($R^2 = 0.359$; $R^2 = 0.386$) in upland soil, while Olsen-P was most highly with Citrate-P ($R^2 = 0.788$) in paddy soil. This result indicated that available P of upland soil was mainly from organic P mineralization and soluble P, and available P in paddy soil was mainly from inorganic P activation. Redundancy analysis (RDA) showed that the P components were mainly affected by soil pH and silt content, which suggested that it could enhance the P availability via regulating soil pH in the agricultural activities.

Key words: phosphorus fractionation; bio-availability; environmental factors; upland soil; paddy soil

磷是作物生长发育的必须营养元素, 是影响作物生长和产量的关键因素。土壤中存在多种形态的磷, 磷的不同形态直接决定其生物有效性^[1,2]。土壤有效磷是土壤中可被植物吸收的磷组分, 一般采用 NaHCO_3 提取的 Olsen-P 表征, 这部分磷主要来自土壤中全部水溶性磷、部分吸附态磷、有机磷和某些沉

淀态磷。为探讨不同的磷组分对有效磷的贡献, 可对

收稿日期: 2016-08-25; 修订日期: 2016-10-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41430860); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDB15020401); 湖南省国际与区域合作重点项目 (2013WK4009)

作者简介: 蔡观 (1992 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤生态学, E-mail: caiguan1992@163.com

* 通信作者, E-mail: 1753994368@qq.com

土壤磷进行分级。传统上,无机磷分级一般采用 Chang-Jackson 法分为磷酸铝盐(Al-P)、磷酸铁盐(Fe-P)、闭蓄态磷酸盐(O-P)和磷酸钙盐(Ca-P,含 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$)这4个组分^[3,4]。有机磷分级一般采用 Bowman-Cole 法分为活性有机磷、中活性有机磷、中稳性有机磷、高稳性有机磷这4个组分^[5~7]。然而,鉴于土壤磷化合物的成分复杂性^[8],采用化学溶剂提取并对磷素分级存在诸多问题。如:采用化学溶剂连续提取磷组分时,每种化学溶剂并不能对与之对应的磷组分提取完全^[9];部分有机磷被包裹在团聚体中,尽管这部分有机磷能够被化学溶剂提取,但并不能被微生物矿化并释放,导致有机磷的生物有效性的评价产生偏差。此外,针对不同类型的土壤,各种磷分级方法具有局限性,如范业宽等^[10]认为 Bowman-Cole 法应用于石灰性土壤时,在土壤预处理、浸提顺序、浸提剂浓度、中稳性和高稳性有机磷 pH 分界值都需要修正。此外,不同的土壤采用不同磷分级方法,如酸性土壤中无机磷分级一般采用 Chang-Jackson 的方法^[11],而在石灰性土中,一般采用蒋柏藩的提取方法^[12]。这种方法上的差异,导致大尺度下磷分级评价方法统一的困难。更为重要的是,这些分级方法不能充分反映土壤根际过程。因此,磷素分级方法是否能科学客观地反映不同形态磷在土壤中的真实分布情况和磷素分级方法的广泛适用性有待深入研究。

客观反映磷生物有效性的准确性是磷素分级方法优化的关键。Deluca 等^[13]从生物学利用难易程度开发了基于生物有效性的磷素分级方法(biologically based P, BBP 法)。BBP 方法主要考虑微生物分泌有机酸、酸性磷酸酶等活化的磷表征磷形态,分为4个组分:① $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2 提取的可溶性磷($\text{CaCl}_2\text{-P}$),模拟能直接被根际截留或扩散的磷酸根离子;② $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 柠檬酸提取的磷(Citrate-P),模拟能够被有机酸活化释放的无机磷;③ $0.02 \text{ EU}\cdot\text{mL}^{-1}$ 酶提取的磷(Enzyme-P),模拟易被微生物和植物分泌的酸性磷酸酶和植酸酶矿化有机磷部分;④ $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸提取的无机磷(HCl-P),模拟氢质子活化的最大潜力磷库。该方法主要特点是模拟微生物和植物根系的磷矿化利用,恰当的评价了各磷形态的生物有效性。因此,本研究在优化的 BBP 方法基础上,分析我国典型农田土壤的磷素组分特征,并评价其与有效磷之间的关系,通过明确基于生物有效性的磷组分含量,以期对磷肥的合理施用和农业的可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

景观尺度上,在作物生长季(6月)采集水田土和旱地土(种植玉米)耕层(0~20 cm)土壤样品各43个。采集过程中兼顾土壤类型,选择典型红壤、潮土和黑土这3种土壤类型,其中红壤选自湖南、江西(水田土和旱地土各15个);潮土选自河南、广西、江苏(水田土和旱地土各15个);黑土选自吉林(水田土和旱地土各13个)。

1.2 土壤培养

土壤样品挑除沙砾、作物根系残体和可见动物,过2 mm 筛并充分混匀,然后取300 g 混匀土壤装入200 mL 的塑料广口瓶,置于25℃下遮光培养14d。旱地土壤培养过程中土壤水分保持在田间持水量的40%左右,水田土壤采用淹水培养(淹水深度为2 cm)。

1.3 BBP 磷分级方法

基于生物有效性的土壤磷分级测定采用 Deluca 的 BBP 方法,其简要步骤为:称取0.5 g 土壤加入10 mL 的提取液,装入15 mL 离心管25℃恒温振荡3 h ($180 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$),离心提取上清液。其中, $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2 提取液用于提取 $\text{CaCl}_2\text{-P}$, $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 柠檬酸提取液用于提取 Citrate-P, $0.02 \text{ EU}\cdot\text{mL}^{-1}$ 酶提取液用于提取 Enzyme-P, $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸提取液用于提取 HCl-P。研究中 $0.02 \text{ EU}\cdot\text{mL}^{-1}$ 酶的提取液包含植酸酶(Sigma P1259; Enzyme Commission Number 3.1.3.26)、酸性磷酸酶(Sigma P3627; Enzyme Commission Number 232-630-9)和碱性磷酸酶(Sigma P5931; Enzyme Commission Number 3.1.3.1),3种酶的浓度均为 $0.02 \text{ EU}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。鉴于植酸酶本身含磷,在使用之前采用透析袋对植酸酶4℃条件下透析5 d,去除植酸酶含有的磷。采用孔雀石绿法测定磷浓度^[14],孔雀石绿法具有较高的灵敏性,能够准确测定磷含量较低的样品,如提取 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 。而对于高磷含量样品,则对样品进行适当的稀释后(如: Citrate-P 和 HCl-P)测定。此外,孔雀石绿法能在酸性条件下准确测定溶液磷浓度。

1.4 BBP 磷分级方法优化

Deluca 磷分级方法提取的有机磷是酸性磷酸酶(植物来源)和植酸酶所活化的有机磷。鉴于微生物的磷酸酶活化作用,本方法在此基础上,添加碱性磷酸酶(微生物来源),使提取的活化有机磷组分更全

面和更具代表性. 此外, Deluca 磷分级方法以醋酸钠溶液 ($50\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) 为提取缓冲液, 且添加了 $0.008\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化镁作为碱性磷酸酶的激活剂. 研究发现, 该提取缓冲液 (不添加酶) 能够提取到土壤较高的无机磷. 为避免该有机磷组分受无机磷影响, 采用纯水代替醋酸钠缓冲溶液. 同时采用纯水提取无机磷, 利用差减法扣除纯水提取的无机磷.

1.5 土壤理化性质测定

供试土壤基本理化性质见表 1, 测定方法为: 土

壤 pH 测定采用 PHS-3C 酸度计测定 ($1:2.5$ 土水比, PHS-3C, 上海利达). 土壤总氮采用碳氮自动分析仪测定. 土壤速效钾采用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙酸铵 ($\text{pH}=7.0$) 浸提. 土壤有机碳采用外加热重铬酸钾容量法^[15]. 土壤有效磷 (Olsen-P) 采用 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaHCO}_3$ 浸提, 钼蓝比色法测定^[16]. 土壤粒径分析采用激光粒度仪 (Mastersizer 2000, 英国 Malvern) 测量土壤粒径的体积分数, 为降低试验误差, 每个样品设置 3 个重复.

表 1 供试土壤的基本性质

Table 1 Selected properties of upland and paddy soils used in the experiment

土壤类型	利用方式	pH 值 (KCl)	有机质 $/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾 $/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Olsen-P $/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	总氮 $/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	粒径 ($<0.002\text{ mm}$)/%
红壤	旱地 ($n=15$)	4.88 ± 0.21	12.6 ± 1.23	164 ± 21.7	32.9 ± 6.74	1.03 ± 0.05	16.42 ± 4.88
	水田 ($n=15$)	6.88 ± 1.19	37.3 ± 3.21	127 ± 25.0	26.8 ± 6.90	1.99 ± 0.12	9.69 ± 4.51
潮土	旱地 ($n=15$)	8.04 ± 0.07	24.1 ± 0.80	267 ± 19.1	48.7 ± 7.79	1.37 ± 0.03	7.69 ± 0.95
	水田 ($n=15$)	6.81 ± 0.40	21.1 ± 2.87	99.8 ± 24.6	13.2 ± 2.80	1.28 ± 0.09	14.67 ± 9.34
黑土	旱地 ($n=13$)	5.78 ± 0.27	30.5 ± 1.59	217 ± 12.9	49.7 ± 6.91	1.42 ± 0.04	10.16 ± 1.70
	水田 ($n=13$)	6.23 ± 0.24	26.7 ± 2.71	148 ± 25.0	17.7 ± 1.36	1.41 ± 0.10	8.60 ± 2.68

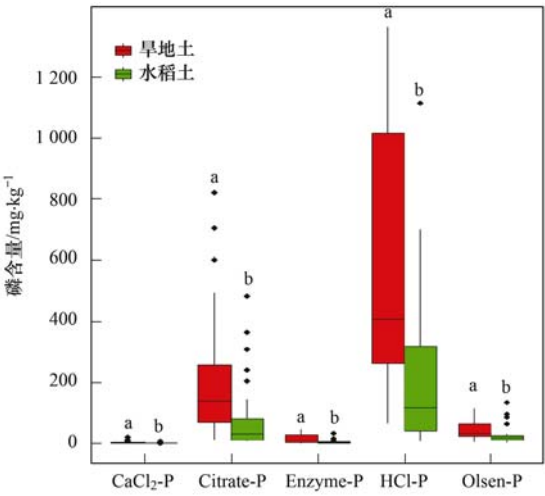
1.6 数据处理

采用 SPSS 20.0 进行 Pearson 相关分析和 T 检验. 采用冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 评价环境因子对磷组分的影响. 在冗余分析之前, 对磷组分矩阵进行除趋势对应排序分析 (detrended correspondence analysis, DCA), 鉴定出本数据适合线性模型 (即数据适合冗余分析). 冗余分析通过 Canoco 5.0 软件实现.

2 结果与分析

2.1 基于生物有效性的土壤磷素组分含量与有效磷 (Olsen-P) 含量特征

供试土壤有效磷 (Olsen-P) 含量从 $10.40\sim56.61\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异幅度大 (变异系数为 64.9% ; $n=86$). 土地利用方式显著影响 Olsen-P 含量, 表现为旱地土高于水田土 (图 1). 根据磷素生物可利用性划分的 4 种磷组分含量也差异显著, 由高到低依次 $\text{HCl-P}>\text{Citrate-P}>\text{Enzyme-P}>\text{CaCl}_2\text{-P}$. 进一步的 T 检验结果表明, 旱地土的各磷素组分含量均显著高于水田土. 其中旱地土和水田土 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量分别为 $0.18\sim20.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.02\sim6.57\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Enzyme-P 含量分别为 $0.71\sim45.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.24\sim13.88\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Citrate-P 含量分别为 $13.2\sim820.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $7.17\sim481.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; HCl-P 含量分别为 $65.0\sim1365.6$



a、b 字母表示旱地土与水稻土磷含量差异显著 ($P<0.05$)

图 1 基于生物有效性的土壤磷素组分含量特征

Fig. 1 Composition characteristics of soil phosphorus based on the biological availability

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $6.33\sim1115.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 1).

2.2 基于生物有效性的土壤磷素组分与有效磷 (Olsen-P) 关系

分别对基于生物可利用性 (BBP 法) 的旱地土和水田土的 4 个磷组分与 Olsen-P 进行相关分析, 结果表明土壤 Olsen-P 与各磷组分均呈显著正相关; 在旱地土中, Olsen-P 与 Enzyme-P ($R^2=0.386$, $P<0.001$) 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ ($R^2=0.359$, $P<0.001$) 相关性较与 Citrate-P ($R^2=0.197$, $P=$

0.002) 和 HCl-P ($R^2 = 0.158$, $P = 0.005$) 高 (图 2); 在水田土中, Olsen-P 与 Citrate-P 相关性高 ($R^2 = 0.788$, $P < 0.001$), 与 CaCl_2 -P ($R^2 =$

0.205, $P = 0.001$)、Enzyme-P ($R^2 = 0.267$, $P < 0.001$) 和 HCl-P ($R^2 = 0.300$, $P < 0.001$) 相关性较低 (图 3)。

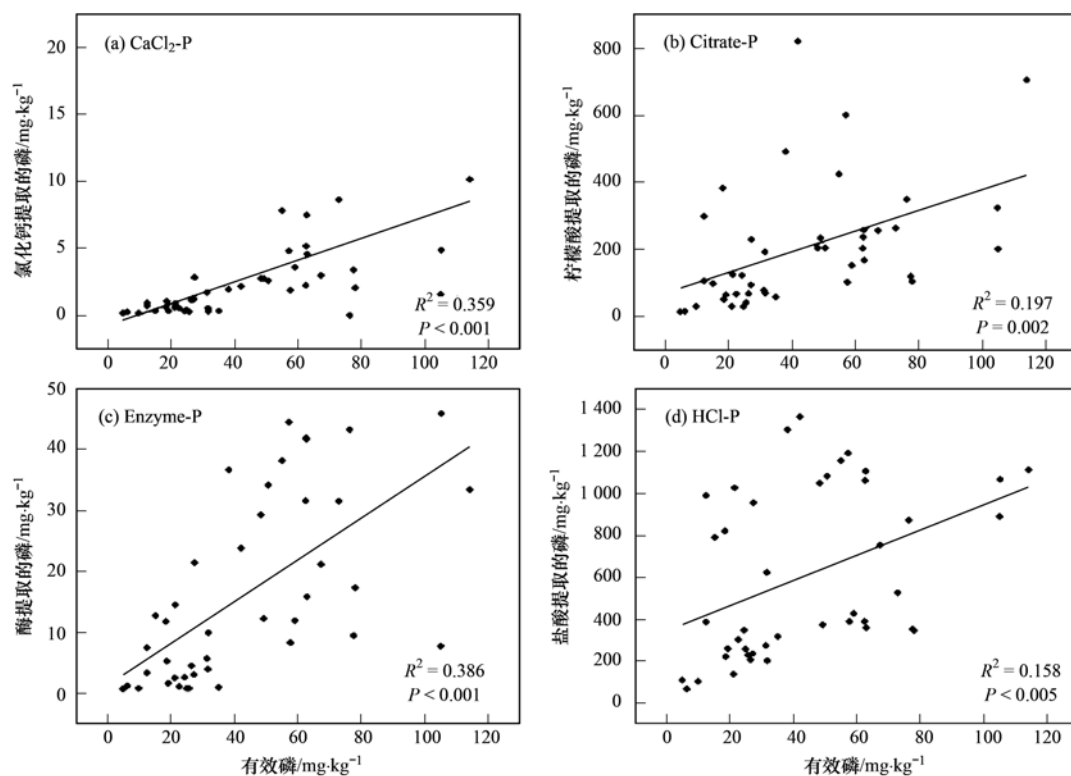


图 2 旱地土壤中 4 种不同生物有效性磷与有效磷 (Olsen-P) 相关性

Fig. 2 Relationships between Olsen-P content and the four fractions of the proposed biologically-based P in upland soil

2.3 基于生物有效性的土壤磷素组分与环境因子的关系

利用 Canoco 软件 RDA 分析土壤理化性状对土壤磷组分的影响, 采用正向选择筛选显著影响磷素组分的土壤理化因子 ($P < 0.05$) (图 4)。土壤理化因子共解释磷素组分 21.02% 的变异, 其中, 第一排序轴解释变异 (21.01%), 为显著性轴 ($P < 0.05$)。因子筛选结果表明, 土壤 pH 值 ($F = 15.31$, $P = 0.002$) 和土壤黏粒含量 ($F = 6.07$, $P = 0.01$) 是影响磷素组分的显著因子。且各磷组分与土壤 pH 值显著正相关, 与土壤黏粒含量显著负相关。

3 讨论

BBP 方法旨在考虑土壤根际过程的基础上建立一套简单的磷素评估体系, 并能在复杂的景观尺度上运用。需要指出的是, BBP 方法中 Citrate-P 和 HCl-P 采用较高浓度的柠檬酸和盐酸提取, 高于植物和微生物分泌的有机酸和氢质子浓度。因此, BBP 方法提取的 Citrate-P 和 HCl-P 更倾向表征微生物和植物活化磷素的最大潜能。在 Deluca 的 BBP

提取方法中, Enzyme-P 只包括酸性磷酸酶和植酸酶矿化的有机磷, 且采用了 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的醋酸钠为缓冲体系。本研究在此基础上, 考虑了酸性、碱性磷酸酶和植酸酶矿化的有机磷, 更加全面地反映了土壤中易被矿化的有机磷。通过比较发现, Deluca 提取的 Enzyme-P 的含量均值在 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 远高于本研究中提取的 Enzyme-P 含量 (一般低于 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。进一步分析发现, 作为缓冲液的醋酸钠能够直接提取到较高含量的无机磷, 这可能导致 Deluca 的 BBP 方法高估 Enzyme-P 含量。因此, 本研究采用纯水为缓冲液, 同时本研究在土壤本身的 pH 值条件下进行酶促反应, 使酶的矿化条件更加接近实际情况。

本研究发现, 在旱地土和水田土中, 尽管 Olsen-P 与各磷素组分均显著相关, 但与不同的磷素组分相关系数明显不同, 表明旱地土和水田土 Olsen-P 来源不同。旱地土的 Olsen-P 主要来自溶解性的无机磷和酶矿化的有机磷, 而水田土的 Olsen-P 主要来自有机酸活化的无机磷部分。在旱地土壤中, Enzyme-P 要高于 CaCl_2 -P, 表明 Enzyme-P 对 Olsen-P

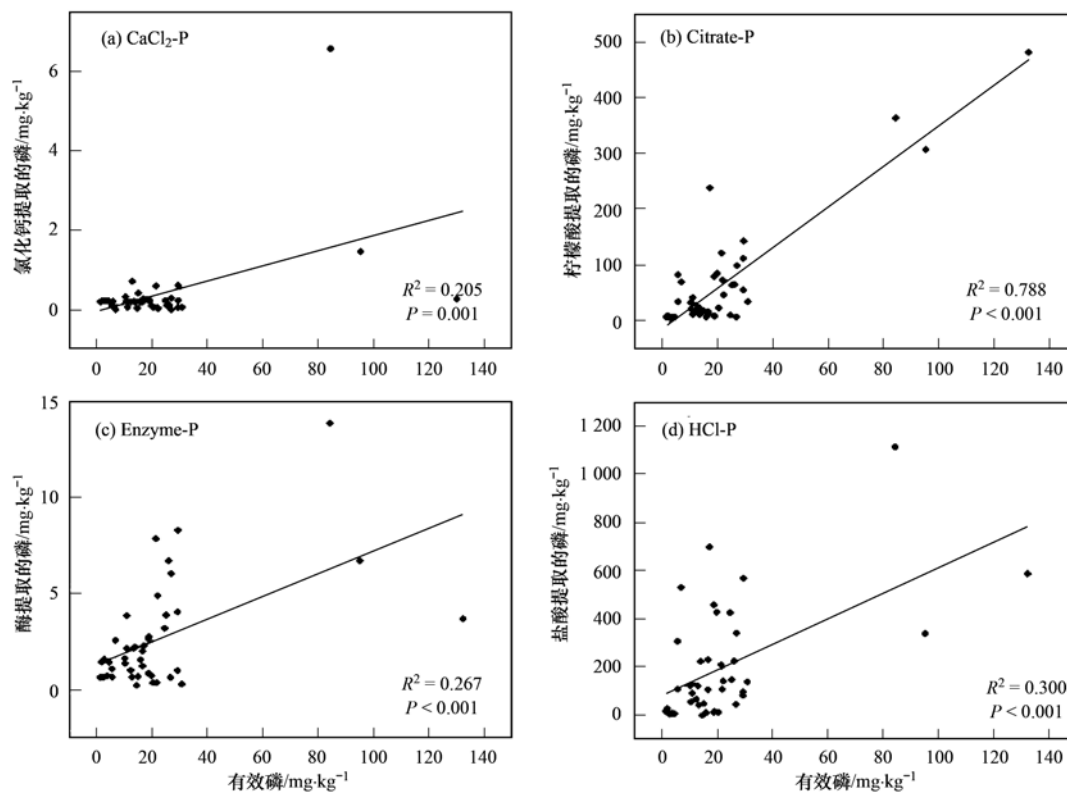
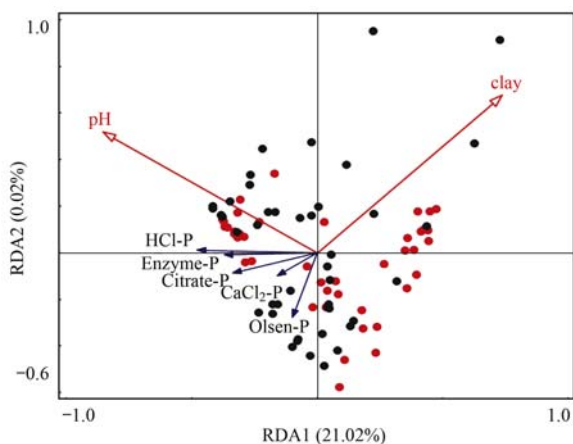


图3 水田土壤中4种不同生物有效性磷与有效磷(Olsen-P)相关性

Fig. 3 Relationships between Olsen-P content and the four fractions of the proposed biologically-based P in paddy soil



仅显示差异性显著的环境因子

图4 环境因子与4种生物有效性磷和有效磷(Olsen-P) RDA分析

Fig. 4 Redundancy analysis (RDA) revealing the effects of environmental factors on biologically-based P (BBP) and the conventional Olsen-P

的贡献更为重要. 传统上采用 Bowman-Cole 有机磷分级研究发现, 土壤有效磷与活性有机磷、中活性有机磷以及中稳性有机磷都呈显著相关, 表明土壤有机磷库矿化可直接补充有效磷源, 并影响土壤速效磷的水平^[17]. 本研究比 Bowman-Cole 有机磷分级更进一步, 直接证明酶矿化的有机磷与有效磷的关

系. 值得注意的是, 在旱地土中有效磷可能主要来自酶矿化的有机磷, 表明旱地土有机磷矿化作用在作物磷营养中的重要地位. 这主要是由于有机磷在淹水或湿度大的状态下矿化速率快^[18,19], 导致旱地有机磷底物含量可能较水田土高. 此外, 由于旱地土比水田土对无机磷具有更强的固定作用, 磷的有效性更低^[20], 这也促进微生物不断地转化无机磷为有机磷. 在水田土中, Citrate-P 的 Olsen-P 的贡献较大, 表明有机酸活化的无机磷作用重要. 以往研究表明, 水田土中, 磷的有效性与铁、铝离子参与的化学过程关系密切^[21]. 本研究结果暗示了微生物作用不能忽视. 在厌氧的条件下, 土壤微生物分泌更多的有机阴离子, 在磷酸根离子的专性吸附位点进行竞争吸附, 通过配位交换提高有效磷含量^[22].

土壤 pH 值显著影响磷素组分^[23], 研究发现 pH 是影响土壤磷组分的关键因子, 这与 Deluca 等^[13]的大尺度的结果相一致. 这可能的原因是, 在酸性或中性的土壤中, pH 值的升高降低了活性铁、铝含量, 进而使铁铝的吸附固定和沉积作用降低, 导致表观上 pH 值与各磷组分的正相关性^[24]. 此外, 在本研究中, 土壤黏粒也是影响磷组分的显著因子, 表明土壤质地是影响磷组分的关键因素. 以往的研究表

明,土壤黏粒含量越高,土壤磷吸附能力越强^[25~27]。这主要原因是黏性的活性表面积大,对磷酸根离子具有强吸附作用。另外,黏粒中无定型凝胶和结晶态矿物的胶态微粒对磷也产生吸附固定。

4 结论

(1)供试土壤的各磷素组分含量表现为:HCl-P > Citrate-P > Enzyme-P > CaCl₂-P,旱地土各磷素组分含量高于水田土各磷素组分含量。

(2)旱地土壤有效磷主要来自自由扩散的无机磷和易矿化的有机磷,而水田土有效磷主要来自弱酸活化的无机磷。

(3)土壤 pH 值和黏粒含量是影响磷素组分特征的关键因素。

参考文献:

- [1] 黄清辉,王东红,马梅,等. 沉积物和土壤中磷的生物有效性评估新方法[J]. 环境科学, 2005, **26**(2): 206-208.
Huang Q H, Wang D H, Ma M, *et al.* New method to assess phosphorus bioavailability in the sediments and soils [J]. Environmental Science, 2005, **26**(2): 206-208.
- [2] 雷宏军,刘鑫,朱端卫. 酸性土壤磷分级新方法建立与生物学评价[J]. 土壤学报, 2007, **44**(5): 860-866.
Lei H J, Liu X, Zhu D W. Development of a new phosphorus fractionation scheme in acid soils and biological evaluation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, **44**(5): 860-866.
- [3] 何莹. 酸性土壤调理剂对石灰性土壤无机磷转化的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
He Y. Effect of acidic soil conditioner on the inorganic phosphorus transformation of the calcareous soil [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [4] 韩晓飞,高明,谢德体,等. 长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(6): 2284-2290.
Han X F, Gao M, Xie D T, *et al.* Variation characteristics of inorganic phosphorus in purple soil profile under different conservation tillage treatments [J]. Environmental Science, 2016, **37**(6): 2284-2290.
- [5] 王斌. 土壤磷素累积、形态演变及阈值研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
Wang B. Study on the accumulation, form change and threshold values of phosphorus in soils [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [6] 李楠,单保庆,张洪,等. 北运河下游典型灌渠沉积物有机磷形态分布特征[J]. 环境科学, 2010, **31**(12): 2911-2916.
Li N, Shan B Q, Zhang H, *et al.* Organic phosphorus forms in the sediments in the downstream channel of North Canal River Watershed [J]. Environmental Science, 2010, **31**(12): 2911-2916.
- [7] Zhu Y R, Wu F C, He Z Q, *et al.* Characterization of organic phosphorus in lake sediments by sequential fractionation and enzymatic hydrolysis. [J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(14): 7679-7687.
- [8] McLaren T I, Smernik R J, McLaughlin M J, *et al.* Complex forms of soil organic phosphorus—a major component of soil phosphorus [J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(22): 13238-13245.
- [9] 冯跃华,张杨珠. 土壤有机磷分级研究进展[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2002, **28**(3): 259-264.
Feng Y H, Zhang Y Z. Research progress on the fractionation of soil organic phosphorus [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2002, **28**(3): 259-264.
- [10] 范业宽,李世俊. Bowman—Cole 石灰性土壤有机磷分组法的改进[J]. 土壤通报, 2004, **35**(6): 743-749.
Fan Y K, Li S J. A modification of Bowman—Cole's fractionation method of soil organic phosphorus [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, **35**(6): 743-749.
- [11] Chang S C, Jackson M L. Solubility product of iron phosphate [J]. Soil Science Society of America Journal, 1957, **21**(3): 265-269.
- [12] 蒋柏藩,顾益初. 石灰性土壤无机磷分级体系的研究[J]. 中国农业科学, 1989, **22**(3): 58-66.
Jiang B P, Gu Y C. A suggested fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils [J]. Scientia Agricultura Sinica, 1989, **22**(3): 58-66.
- [13] Deluca T H, Glanville H C, Harris M, *et al.* A novel biologically-based approach to evaluating soil phosphorus availability across complex landscapes [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, **88**: 110-119.
- [14] Ohno T, Zibilske L M. Determination of low concentrations of phosphorus in soil extracts using malachite green [J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, **55**(3): 892-895.
- [15] Nelson D W, Sommers L E. Total carbon, organic carbon, and organic matter [A]. In: Miller R H, Keeney D R (Eds.). Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical Microbiological Properties (2nd ed.) [M]. Madison, WI: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1982. 961-1010.
- [16] Olsen S R, Cole C V, Watanabe F S, *et al.* Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate [M]. Washington DC: USDA Circular, Printing Office, 1954.
- [17] Dodd R J, Sharpley A N. Recognizing the role of soil organic phosphorus in soil fertility and water quality [J]. Resources Conservation and Recycling, 2015, **105**: 282-293.
- [18] 赵少华,宇万太,张璐,等. 土壤有机磷研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(11): 2189-2194.
Zhao S H, Yu W T, Zhang L, *et al.* Research advance in soil organic phosphorus [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, **15**(11): 2189-2194.
- [19] 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 Q, 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.
- [20] 张洪霞. 红壤旱地和稻田土壤磷素微生物转化及其有效性研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2011.
Zhang H X. Research on microbial transformation of phosphorus and its effectiveness in upland and paddy red soils [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2011.

- [21] 程传敏, 曹翠玉. 干湿交替过程中石灰性土壤无机磷的转化及有效性[J]. 土壤学报, 1997, **34**(4): 382-391.
- Cheng C M, Cao C Y. Transformation and availability of inorganic phosphorus in calcareous soils during flooding and draining alternating process[J]. Acta Pedologica Sinica, 1997, **34**(4): 382-391.
- [22] Chen Y P, Rekha P D, Arun A B, *et al.* Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities. [J]. Applied Soil Ecology, 2006, **34**(1): 33-41.
- [23] Devau N, Le Cadre E, Hinsinger P, *et al.* Soil pH controls the environmental availability of phosphorus: experimental and mechanistic modelling approaches [J]. Applied Geochemistry, 2009, **24**(11): 2163-2174.
- [24] Fageria N K, Barbosa Filho M P. Influence of pH on productivity, nutrient use efficiency by dry bean, and soil phosphorus availability in a no-tillage system [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2008, **39**(7-8): 1016-1025.
- [25] 刘文静, 张平究, 董国政, 等. 不同退耕年限下菜子湖湿地土壤磷素组分特征变化[J]. 生态学报, 2014, **34**(10): 2654-2662.
- Liu W J, Zhang P J, Dong G Z, *et al.* Characteristics of soil phosphorus fractions in wetlands with various restoration age in caizi lake, Anhui Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(10): 2654-2662.
- [26] Yao Q Z, Du J T, Chen H T, *et al.* Particle-size distribution and phosphorus forms as a function of hydrological forcing in the Yellow River [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(4): 3385-3398.
- [27] Day L D, Collins M E, Washer N E. Landscape position and particle-size effects on soil phosphorus distributions [J]. Soil Science Society of America Journal, 1987, **51**(6): 1547-1553.

《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

Dry and Bulk Nitrogen Deposition in Suburbs of Xining City	XU Wen, JIN Xin, LUO Shao-hui, <i>et al.</i> (1279)
Day-Night Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in PM ₁₀ During Spring and Summer of Lanzhou	MA Li, YU Ye, WANG Bo, <i>et al.</i> (1289)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions in Sanya, Hainan	WANG Lu, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1298)
Pollution Characteristics of NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ in PM _{2.5} and Their Precursor Gases During 2015 in an Urban Area of Beijing	DING Meng-meng, ZHOU Jian-nan, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1307)
Pollution Characteristics of PCDD/Fs in Ambient Air and Exposure Risk Assessment Around a Municipal Solid Waste Incinerator in Beijing	QI Li, REN Yue, LIU Ai-min, <i>et al.</i> (1317)
Community Characteristics of Cultivable Bacteria in Fine Particles (PM _{2.5}) of Beijing and Baoding	HU Ya-dong, MA An-zhou, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (1327)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Artery and Collector Roads in Nanjing Based on Real-time Traffic Data	LI Xiao-yu, WU Lin, ZOU Chao, <i>et al.</i> (1340)
Catalytic Combustion of Soot Particulates over Rare Earth Pyrochlore Oxides Doped with Transition Metals	LI Xi-feng, SUN Yu-qi, WANG Zhong-peng, <i>et al.</i> (1348)
Water Quality Analysis of Beijing Segment of South-to-North Water Diversion Middle Route Project	XU Hua-shan, ZHAO Lei, SUN Hao-su, <i>et al.</i> (1357)
Hanfeng Pre-reservoir Commissioning Time Variation Feature of the Hydrology and Water Quality in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (1366)
Modeling of Water Quality Response to Land-use Patterns in Taizi River Basin Based on Partial Least Squares	LI Lin-lin, ZHANG Yi-zhang, TANG Chang-yuan, <i>et al.</i> (1376)
Distribution Characteristics of Water Temperature and Water Quality of Fuxian Lake During Thermal Stratification Period in Summer	WANG Lin-jie, YU Hui, NIU Yong, <i>et al.</i> (1384)
Vertical Stratification Characteristics of Dissolved Oxygen and Phytoplankton in Thousand-Island Lake and Their Influencing Factors	YU Yan, LIU De-fu, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (1393)
Community Structure Characteristics of Eukaryotic Planktonic Algae in Liaoh River Through High-throughput Sequencing	WANG Jing-qi, WANG Shu-ping, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1403)
Effects of Coastal Organic Pollution on Bacterioplankton Community in Sanmen Bay	DAI Wen-fang, GUO Yong-hao, YU Wei-na, <i>et al.</i> (1414)
Nitrate Source Identification and Nitrification-denitrification at the Sediment-water Interface	JIN Zan-fang, GONG Jia-lin, SHI Yi-li, <i>et al.</i> (1423)
Residues of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Water and Sediments from Nansha Mangrove Wetland	DING Yang, HUANG Huan-fang, LI Hui, <i>et al.</i> (1431)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals from River Network Sediment in Western Area of Taihu Lake	BIAN Bo, ZHOU Yan, ZHANG Qin (1442)
Efficacy of Phoslock® on the Reduction of Sediment Phosphorus Release in West Lake, Hangzhou, China	ZHU Guang-wei, LI Jing, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (1451)
Identification and PAC Adsorption of Fouling Responsible for Irreversible Fouling During Ultrafiltration of Dongjiang River Water	YANG Hai-yan, WANG Can, YAN Zhong-sen, <i>et al.</i> (1460)
Efficiency and Kinetics of Triclosan Degradation in Aqueous Solution by UV/Sodium Persulfate	LI Qing-song, LI Xue-yan, YAO Ning-bo, <i>et al.</i> (1467)
Influencing Factors on the Degradation of PFOS Through VUV-SO ₃ ²⁻	HAN Hui-li, WANG Hong-jie, DONG Wen-yi (1477)
Simultaneous Photocatalytic Reduction of Cr(VI) and Oxidation of SSA by Carbon Nitride	LI Li-li, CHEN Cui-hai, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (1483)
Modification of Diatomite by Zirconium and Its Performance in Phosphate Removal from Water	FAN Yi, WANG Zhe, ZHAO Lian-qin, <i>et al.</i> (1490)
Reducing Effect of Three Disinfection Technologies for Sulfonamides Resistance Genes	ZHENG Ji, ZHOU Zhen-chao, CHEN Fang, <i>et al.</i> (1497)
Removal of Estrogenic Effect by Typical Domestic Wastewater Treatment Processes	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1506)
Effect of SRT on Stability of Yeast-SBR in Treating Oil-containing Wastewater	LÜ Wen-zhou, ZHANG Shu-lin, QIAO Yu-xiang, <i>et al.</i> (1513)
Degradation of the Disperse Dye Neocron Black(NB) by Biological Treatment	YANG Bo, DING Feng-you, XU Hui, <i>et al.</i> (1520)
Function of Polyphosphate Kinase Gene in Biological Phosphate Removal During the Wastewater Treatment Process	NAN Ya-ping, ZHOU Guo-biao, YUAN Lin-jiang (1529)
Short-cut Nitrification Recovery and Its Transformation into CANON Process in a Biofilm Reactor	FU Kun-ming, ZHOU Hou-tian, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (1536)
Nitrogen Removal Characteristics and Diversity of Microbial Community in ANAMMOX Reactor	CAO Yan, WANG Tong-yu, QIN Yu-jie, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Environment Adjustment Layers on Nitrogen Transformation in Anaerobic Bioreactor Landfills	HE Zheng-kun, SONG Bo-yu, ZHU Nan-wen, <i>et al.</i> (1551)
Characteristics of Anaerobic Methane Removal Coupled to Fe(III) Reduction in Aged Refuse	WANG Li-li, HE Ting, LONG Yan, <i>et al.</i> (1558)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Tracing Sources by Pb & Sr Isotope in the Soil Profile of Woodland in Quanzhou	SUN Jing-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1566)
Accumulation and Migration Characteristics in Soil Profiles and Bioavailability of Heavy Metals from Livestock Manure	HE Meng-yuan, DONG Tong-xi, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (1576)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils from Shandong	GE Wei, CHENG Qi-qi, CHAI Chao, <i>et al.</i> (1587)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Organophosphorus Pesticides in Typical Soil Environment of Jiangnan Plain	WANG Jian-wei, ZHANG Cai-xiang, PAN Zhen-zhen, <i>et al.</i> (1597)
Characteristics and Influencing Factors of Biologically-based Phosphorus Fractions in the Farmland Soil	CAI Guan, HU Ya-jun, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Straw Application on the Dynamics of Exogenous Nitrogen and Microbial Activity in Paddy Soil	CHEN Shan, DING Xian-qing, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (1613)
Effects of Biochar on Surface Albedo and Soil Respiration in Suburban Agricultural Soil	ZHANG Yang-yang, HU Xue-yu, ZOU Juan, <i>et al.</i> (1622)
N ₂ O Consumption Ability of Submerged Paddy Soil and the Regulatory Mechanism	WANG Ling, XING Xiao-yi, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (1633)
Non-CO ₂ Greenhouse Gas Release from Different Biological Wastewater Treatment Processes	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, LIU Wen-bo, <i>et al.</i> (1640)
Effect of Application of Sewage Sludge Composts on Greenhouse Gas Emissions in Soil	YANG Yu-han, YI Jian-ting, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1647)
Effect of Nano Zeolites on pH, CEC in Soil and Cd Fractions in Plant and Soil at Different Cadmium Levels	CHI Sun-lin, XU Wei-hong, XIONG Shi-juan, <i>et al.</i> (1654)
Dynamic Differences of Uptake and Translocation of Exogenous Selenium by Different Crops and Its Mechanism	PENG Qin, LI Zhe, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (1667)
Alleviation Effects of Exogenous Melatonin on Ni Toxicity in Rice Seedlings	LIU Shi-xiang, HUANG Yi-zong, LUO Ze-jiao, <i>et al.</i> (1675)
Forms Distribution and Ecotoxicity of Three Forms of Sulfonamides in Root-Soil Interface of Maize	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Wan-feng, <i>et al.</i> (1683)
Effect of Sediments on Bioaccumulation of Mercury in Fish Body in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	SUN Song, LI Chu-xian, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1689)
Bioaccumulation and Correlation of Heavy Metals in Human Hairs From Urban and Rural Areas of Chongqing	HE Ming-jing, LI Qi, WANG Deng-xiang, <i>et al.</i> (1697)
Microbial Community Structure and Diversity in Cellar Water by 16S rRNA High-throughput Sequencing	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (1704)
Performance Improvement of Microbial Fuel Cell with Polyaniline Doped Graphene Anode	HUANG Li-hua, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i> (1717)
Brief Introduction of Pollution Sites Remediation and Risk Assessment and Its Policy Making in United States	RONG Yue (1726)