

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第7期

Vol.36 No.7

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析	李莉, 蔡蓓琳, 周敏 (2327)
长三角冬季一次霾过程气溶胶及其水溶性离子的区域分布特征	王曼婷, 朱彬, 王红磊, 薛国强, 何俊, 徐宏辉, 曹锦飞 (2337)
北京城区大气 PM _{2.5} 主要化学组分构成研究	刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 陈添, 赵红帅, 陈圆圆, 陆皓昀 (2346)
2014年春季山东省 PM _{2.5} 跨界输送研究	贾海鹰, 程念亮, 何友江, 陈云波, 杜晓惠, 单晓丽 (2353)
燃煤电厂产生和排放的 PM _{2.5} 中水溶性离子特征	马子珍, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥, 邓建国, 段雷 (2361)
南京夏季城市冠层大气 CO ₂ 浓度时空分布规律的观测	高韵秋, 刘寿东, 胡凝, 王淑敏, 邓力琛, 于洲, 张圳, 李旭辉 (2367)
北京市机动车尾气排放因子研究	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2374)
北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力	张维康, 王兵, 牛香 (2381)
长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算	丁青青, 魏伟, 沈群, 孙予罕 (2389)
基于区域循环模型 IAP-N 的安徽省农用地 N ₂ O 排放量估算	韩云芳, 韩圣慧, 严平 (2395)
不同源汇信息提取方法对区域 CO ₂ 源汇估算及其季节变化的影响评估	张芳, 周凌晔, 王玉诏 (2405)
实测/预测辽河铬(VI)水生生物基准与风险评估	王晓南, 闫振广, 刘征涛, 张聪, 王伟莉 (2414)
博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价	张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清 (2422)
岩溶泉水化学性质及 δ ¹³ C _{DIC} 影响因素	赵瑞一, 吕现福, 刘子琦, 吕春艳 (2430)
柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析	原雅琼, 何师意, 于爽, 孙平安, 王艳雪, 武招云, 李新桂, 谢明鲜, 刘文, 李瑞, 张华生 (2437)
重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价	庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 王效科, 庞容, 邓睿, 孟龄, 马慧雅 (2446)
三峡库区消落带土壤邻苯二甲酸二丁酯静态释放特征	王法, 王强, 木志坚, 杨志丹, 宋娇艳 (2453)
干湿循环对三峡支流消落带沉积物中可转化态氮及其形态分布的影响	林俊杰, 张帅, 杨振宇, 何立平, 周依, 张倩茹 (2459)
天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究	王斌, 马健, 王银亚, 尹湘江 (2465)
西大海湖沉积物营养盐垂直分布特征变化分析	段木春, 肖海丰, 臧淑英 (2472)
草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价	杨敏, 张晟, 刘朔孺 (2480)
宁波三江口水域原核生物群落结构分析	胡安谊, 李姜维, 杨晓永, 王弘杰, 于昌平 (2487)
全氟化合物对表层沉积物中细菌群落结构的影响	孙雅君, 王铁宇, 彭霞薇, 王佩 (2496)
菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质及植物生长的影响	马月, 王国祥, 曹勤, 王小云, 马杰 (2504)
生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究	李立青, 龚燕芳, 颜子钦, 单保庆 (2511)
复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究	王晓璐, 左剑恶, 千里里, 邢薇, 缪恒峰, 阮文权 (2518)
3种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响	吕露, 张梦露, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (2525)
基于透射光法探讨水流流速对 DNAPL 运移分布的影响	高燕维, 郑菲, 施小清, 孙媛媛, 徐红霞, 吴吉春 (2532)
BDD 和 PbO ₂ 电极电化学氧化苯并三氮唑的对比研究	伍娟丽, 张佳维, 王婷, 倪晋仁 (2540)
开放系统下方解石对邻苯二甲酸的吸附	李振炫, 黄利东, 陈艳芳, 缪晔, 刘大刚, 许正文 (2547)
碳纳米管-羟磷灰石对铅的吸附特性研究	张金利, 李宇 (2554)
刚果红分子印迹聚合物纳米微球的合成及吸附性能	常自强, 陈复彬, 张玉, 时作龙, 杨春艳, 章竹君 (2564)
碱热-酸热法合成二氧化钛-钛酸纳米管复合纳米材料对 Cd(II) 和苯酚的同步去除	雷立, 晋银佳, 王婷, 赵泉, 晏友, 刘文 (2573)
固定化菌剂对污水和牛粪中雌二醇和己烯雌酚的去除作用	李欣, 凌婉婷, 刘静娴, 孙敏霞, 高彦征, 刘娟 (2581)
PN-ANAMMOX 一体化反应器处理电子行业 PCB 废水	袁琬, 李祥, 周呈, 陈宗姮 (2591)
Fenton 氧化深度处理石化废水厂二级出水研究	王翼, 吴昌永, 周岳溪, 张雪, 董波, 陈学民 (2597)
制革废水和印染废水的综合毒性评估及鉴别	黄利, 陈文艳, 万玉山, 郑国娟, 赵远, 蔡强 (2604)
不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化	陈燕, 刘国华, 范强, 汪俊妍, 齐鲁, 王洪臣 (2610)
利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数	王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 李静文, 李紫棋, 余勇 (2617)
连续流态下以实际低基质生活污水培养好氧颗粒污泥及其脱氮性能	姚力, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建 (2626)
广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价	张金莲, 丁疆峰, 卢桂宇, 党志, 易筱筠 (2633)
山东省临沂市土壤有机氯农药滴滴涕残留量与空间分布特征	喻超, 王增辉, 王红晋, 代杰瑞, 庞绪贵, 赵西强, 刘华峰 (2641)
金华市萤石矿区土壤氟污染评价	叶群峰, 周小玲 (2648)
土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制	侯亚红, 王磊, 付小花, 乐毅全 (2655)
黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素	李如剑, 王蕊, 李娜娜, 姜继韶, 张彦军, 王志齐, 刘庆芳, 吴得峰, 郭胜利 (2662)
缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响	雷利国, 江长胜, 郝庆菊 (2669)
塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析	朱美玲, 贡璐, 张龙龙 (2678)
不同部位玉米秸秆对两种质地黑土 CO ₂ 排放和微生物量的影响	刘四义, 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 贾淑霞, 陈学文, 张士秀, 孙冰洁, 陈升龙 (2686)
1株对叔丁基邻苯二酚降解菌的筛选鉴定及响应面法优化其降解	贺强礼, 刘文斌, 杨海君, 彭晓霞, 关向杰, 黄水娥 (2695)
耐高浓度沼液产油小球藻的分离鉴定与特征分析	杨周, 王文国, 马丹炜, 汤晓玉, 胡启春 (2707)
水介质中 C ₆₀ 纳米晶体颗粒与 Cu ²⁺ 对小鼠腹腔巨噬细胞的复合毒性研究	于叶, 卞为林, 张慧敏, 张波, 何义亮 (2713)
地表水体中同时分析 18 种糖皮质激素方法的建立	郭文景, 常红, 孙德智, 吴丰昌, 杨浩 (2719)
《环境科学》征订启事 (2553) 《环境科学》征稿简则 (2640) 信息 (2546, 2609, 2616, 2647)	

塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析

朱美玲^{1,2}, 贡璐^{1,2*}, 张龙龙^{1,2}

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

摘要: 土壤酶能反映土壤生物化学过程的强度与方向, 深入解析土壤酶活性与环境因子的相关性, 有助于探索土壤生态过程, 为开展土壤系统的科学调控提供科学依据. 以塔里木河上游阿拉尔垦区为研究区, 选择新开棉田、10 a 棉田、30 a 棉田、果园、人工林、天然林、荒草地、盐碱地及沙地等不同土地利用类型为研究对象, 运用经典统计学分析绿洲土壤酶活性及环境因子的分异规律, 并结合冗余分析技术研究土壤酶活性与环境因子相关关系. 经典统计学分析显示, 土壤过氧化氢酶、脲酶、转化酶、碱性磷酸酶活性均值分别为 $4.27 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $0.34 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $2.08 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 冗余分析结果表明: 全氮、有机质、有效磷、土壤含水量、全盐与土壤酶活性呈极显著相关性 ($P < 0.01$); 土壤容重与土壤酶活性表现为显著相关性; 其他环境因子与土壤酶活性的相关性均不显著 ($P > 0.05$). 环境因子与土壤酶活性相关性大小排序为全氮 > 有机质 > 有效磷 > 土壤含水量 > 全盐 > 容重 > 速效钾 > pH.

关键词: 土壤酶活性; 环境因子; 冗余分析; 绿洲; 塔里木河上游

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)07-2678-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.07.047

Soil Enzyme Activities and Their Relationships to Environmental Factors in a Typical Oasis in the Upper Reaches of the Tarim River

ZHU Mei-ling^{1,2}, GONG Lu^{1,2*}, ZHANG Long-long^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Urumqi 830046, China)

Abstract: The intensity and direction of soil biochemical process can be reflected by soil enzyme. The relationship between enzyme activity of soil and environmental factors is deeply studied in this paper, which can contribute to explore the soil ecological process and to provide scientific evidence for scientific regulation of soil system. Soil samples from new cropland, ten-years cropland, thirty-years cropland, orchard, plantation, natural forest, grassland, saline land and desert in the upper reaches of the Tarim River were collected. The relationships between soil enzyme activities and environmental factors were analyzed by traditional statistics and redundancy analysis (RDA). The results showed that soil enzyme activities in this area were low, with the average of enzyme properties as follows: catalase, urease, invertase and alkaline phosphatase, with activity of $4.27 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, $0.34 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, $2.08 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ and $0.08 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. According to the RDA results, the total nitrogen, organic matter, available potassium, soil moisture and total salt were significantly correlated with enzyme activity while a relatively significant correlation between bulk density and enzyme activity was found. There was no significant correlation between available potassium/pH and enzyme activity. The importance of environmental factors to soil enzyme activities could be arranged as total nitrogen > organic matter > available potassium > soil moisture > total salt > bulk density > available potassium > pH.

Key words: soil enzyme activities; environmental factors; redundancy analysis; oasis; the upper reaches of the Tarim River

土壤作为陆地生态系统的关键组分, 在全球物质循环、能量转化过程中发挥着重要作用. 土壤酶是土壤系统中最活跃的有机成分之一^[1], 可反映土壤生物化学过程的强度与方向^[2], 其活性与理化环境密切相关^[3]. 土壤酶能够活化土壤中各类元素的化合物, 进而提高土壤有效养分、改善土壤质量; 同时, 土壤环境因子提供了酶促反应的底物和环境, 直接影响着酶活性大小. 探讨土壤酶活性与多种环境因子的相关关系, 有助于深入解析土壤生态过程, 进而开展土壤系统的科学调控.

诸多学者对土壤酶活性与环境因子的关系进行了广泛研究. Martens 等^[4]发现土壤酶活性与土壤

水分的含量呈正相关性. 牛世全等^[5]研究结果显示, 磷酸酶、脲酶活性与土壤含水率密切相关. Margesin 等^[8]研究表明土壤酶活性与土壤肥力高度相关. Baldrian 等^[9]、Štursová 等^[10]认为较高的有机碳含量能促进土壤酶的合成. Kalbitz 等^[11]研究发现土壤碳氮可影响土壤酶活性. Kim 等^[12]和 Cusack 等^[13]研究证明在本底氮含量低的地区土壤酶活性与全氮表现为正响应. Nausch 等^[14]分析表

收稿日期: 2014-11-13; 修订日期: 2015-02-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(31160127, 41461105)

作者简介: 朱美玲(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为干旱区资源与环境, E-mail: zmleco@163.com

* 通讯联系人, E-mail: gonglu721@163.com

明磷酸酶与磷的相关性显著。综上可知,以往研究多涉及酶活性与水分^[4-7]、养分^[8-15]的相关性,较少选择盐渍指标分析二者相互影响^[16,17],在研究方法上多采用简单的相关分析方法探讨土壤酶与环境因子之间的关系。冗余分析是一种非线性多元直接梯度排序法,包含信息量大,结果明确直观。该方法主要应用于植被的结构与格局研究,针对土壤特征的研究鲜有报道。本研究利用冗余分析研究土壤酶活性与多类环境因子的相关关系,有助于直观诠释多变量间的相互作用,同时也是对该方法在其他领域应用的有益尝试。

阿拉尔垦区地处塔里木河上游、塔克拉玛干大沙漠北缘,属于典型的生态脆弱带和环境危机带。在全球变化和人类活动的综合影响下,原本脆弱的生态环境加之高强度的土地资源开发、不合理的灌溉垦殖方式使得绿洲系统内部负荷逐年加大,土壤贫瘠化、沙化、盐碱化的现状愈发严重,土壤生态系统的理化、生物学特性在绿洲内外呈现不同的分异规律^[18]。本文以塔里木河上游阿拉尔垦区为典型研究区,在系统分析土壤酶活性及环境因子分异规律的基础上,利用冗余分析技术深入解析土壤酶活性与水分、容重、盐分及养分等多因子间的相关关系,通过深刻理解绿洲土壤性状间的复杂关系,以为绿洲土壤保育与调控、土地资源的开发利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

阿拉尔垦区处于塔里木河上游冲积平原,地跨东经 80°30′~81°58′、北纬 40°22′~40°57′。地势北高南低,北靠天山山脉,南临塔克拉玛干沙漠,平均海拔 1 012 m。长期受大陆性气候及山盆相间地貌格局的影响,绿洲形成暖温带大陆性干旱荒漠气候,降水稀少,蒸发强烈,日照丰沛:年均气温 10.7℃,年均降水量为 17.4~42.8 mm,年均蒸发量 1 125~1 600 mm,年均日照 2 900 h,无霜期 220 d。土壤母质为棕漠土,主要土地利用类型为棉田、果园、人工林、天然林、荒草地、盐碱地及沙地等。垦区属新疆生产建设兵团直辖的县级市,近年来人为活动频繁,土地利用受人类活动干扰较大,植被破坏和土壤三化问题严重^[19]。

1.2 野外采样

样区设置于垦区内农一师十二团,采样时间为 2013 年 7 月。选择样区内同一海拔高度、地理位置

相邻、土壤性质均一的 9 种土地利用类型,即新开棉田、10 a 棉田(连作,10 CF)、30 a 棉田(连作,30CF)、果园(主要种植类型为枣树,Orchard)、人工林(主要植被类型为胡杨,分布于农田周边,PF)、天然林(主要植被类型为胡杨,分布于河岸旁,NF)、荒草地(主要植被类型为柽柳、骆驼刺、芦苇等,分布于绿洲与荒漠交错带,GL)、盐碱地(主要植被类型为盐穗木、盐爪爪,分布于农田外围,SAL)及沙地(植被盖度小于 5%,分布于绿洲边缘,SL)为研究样地。每种土地利用类型选择 5 个典型样方,样方面积分别为棉田、荒草地、盐碱地和沙地 5 m×5 m,果园和林地 10 m×10 m。每个样方按 S 型布设 5 个样点,采集表层土壤样品(0~20 cm),将 5 个样点采取的土壤样品去除植物根系及石块,充分混匀并按四分法取 1 kg 放入土样袋,带回实验室,风干后研磨过筛以供测定。

1.3 实验方法

本研究选择了氧化还原酶类的过氧化氢酶活性和水解酶类的转化酶、脲酶、碱性磷酸酶活性以及土壤含水量、容重、pH、电导率、全盐、有机质、全氮、有效磷、速效钾等土壤指标,具体测试方法如下。

土壤酶活性指标:过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法;转化酶活性采用硫代硫酸钠滴定法;脲酶活性采用苯酚钠比色法;碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法^[11]。

土壤理化因子指标:土壤水分采用烘干法;容重采用环刀法;pH 值采用电位法;电导率采用电导法;全盐含量采用由八大离子含量加和计算得出,具体 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 采用双指示剂中和法, Cl^- 采用 AgNO_3 滴定法, SO_4^{2-} 采用间接滴定法, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 采用 EDTA 络合滴定法, Na^+ 和 K^+ 采用火焰光度法;有机质采用重铬酸钾滴定法;全氮采用半微量凯氏法;有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;速效钾采用醋酸铵浸提-火焰光度计法^[20]。

1.4 数据处理

实验所得数据在 SPSS 19.0 软件中进行统计分析:计算数据平均值和标准差(SD);选择单因素方差分析检验不同土地利用类型下土壤酶活性及环境因子的差异,并采用 LSD 方法进行显著性多重比较,差异显著性水平为 $\alpha = 0.05$ 。

利用国际标准通用软件 CANOCO 5.0 分析土壤酶活性及环境因子相关关系。首先对指标进行去趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA),得到反映土壤酶活性变化程度的排序轴梯度

长度 (lengths of gradient, LGA), LGA 小于 3 适合线性模型, LGA 在 3 与 4 之间, 两种模型均适合, 梯度长度大于 4 适合非线性模型^[21]. 结果显示 4 个排序轴的最大梯度长度仅为 0.763, 小于 3, 说明土壤酶活性与环境因子之间有很好的线性关系, 因此本研究采用线性模型对各指标进行冗余分析 (redundancy analysis, RDA). 作为多元线性回归的拓展, RDA 能进行多变量直接梯度分析, 即分析两个变量集之间的线性关系, 并将两个变量集反映在同一直角坐标系中, 直观反映两变量集的相关关系^[22,23]. 如果某影响因子具有高的变异膨胀因子 (>20) 表明其与其他因子具有高的多重共线性, 对模型的贡献很少^[24]. 本文以过氧化氢酶、脲酶、转化酶、磷酸酶这 4 种土壤酶活性为研究对象, 以土壤含水量、容重、pH、电导率、全盐、有机质、全氮、有效磷、速效钾等为环境因子, 对环境因子使用前向选择法和 Monte Carlo 检验法^[23], 结果显示, 电导率和全盐具有高膨胀因子 (>20). 将对模型贡献最小的电导率去除后, 重新获得土壤含水量、容重、pH、全盐、有机质、全氮、有效磷、速效钾的变异膨胀因子, 其膨胀因子均小于 10, 可知此 8 个环境因子对模型均有一定的贡献, 可进行后续分析. 将环境因子进行重要性排序后, 对与土壤酶活性呈极显著相关的 5 个环境因子进行深入分析, 进一步确定单一环境因子对土壤酶活性的影响, 分析采用 *t*-value 双序图. *t*-value 双序图包含代表土壤酶活性指标的箭头连线和环境因子箭头及虚实圆圈, 如果某个土壤酶活性指标的箭头连线完全落入线圆圈中, 代表该种土壤酶活性与研究的单一环境因子具有显著相关性, 如果落入实线圈表示呈显著正相关, 落入虚线圈为显著负相关^[23].

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型土壤酶活性及环境因子差异性分析

研究区土壤酶活性偏低, 土壤过氧化氢酶、脲酶、转化酶、碱性磷酸酶活性均值分别为 4.27 mL·g⁻¹、0.34 mg·g⁻¹、2.08 mL·g⁻¹、0.08 mg·g⁻¹. 绿洲内土壤水分含量为 25.39%; 研究区容重均值为 1.26 g·cm⁻³; 土壤偏碱性, pH 均值 8.19; 计算可得平均土壤电导率为 3.47 mS·cm⁻¹; 盐渍化程度较高, 全盐含量高达 15.41 g·kg⁻¹; 区域内土壤较贫瘠, 养分含量低, 有机质、全氮、有效磷、速效钾的均值依次为 8.92 g·kg⁻¹、0.39

g·kg⁻¹、12.31 mg·kg⁻¹、408.38 mg·kg⁻¹.

各土地利用类型的土壤酶活性存在不同程度的差异 (表 1), 天然林过氧化氢酶活性可达 8.72 mL·g⁻¹, 显著高于其他土地利用类型, 荒草地、盐碱地、沙地过氧化氢酶活性极低, 分别为 (1.74 ± 1.00) mL·g⁻¹、(2.28 ± 0.96) mL·g⁻¹、(1.09 ± 0.19) mL·g⁻¹; 脲酶活性大小为天然林 > 10 a 棉田 > 果园 > 人工林 > 30 a 棉田 > 新开棉田 > 沙地 > 盐碱地 > 荒草地; 10 a 棉田、果园、人工林、天然林的转化酶活性显著高于新开棉田、荒草地、盐碱地、沙地, 30 a 棉田转化酶活性与果园、人工林无显著差异; 不同土类土壤碱性磷酸酶与转化酶活性规律一致.

不同土地利用类型土壤环境因子的分异规律受人为灌溉影响, 棉田、人工林、果园土壤含水量显著高于盐碱地、荒草地及沙地; 沙地容重达 (1.52 ± 0.08) g·cm⁻³, 显著高于林地、各类棉田、果园、盐碱地、荒草地; 各土地利用类型 pH 值差异性不显著, 最大值出现在盐碱地, 为 8.51 ± 0.14; 盐碱地、荒草地电导率和全盐显著高于林地、各类棉田、果园、沙地, 其电导率为 (10.65 ± 0.90) mS·cm⁻¹、(10.22 ± 1.33) mS·cm⁻¹, 全盐含量为 (51.07 ± 4.42) g·kg⁻¹、(46.51 ± 7.02) g·kg⁻¹.

在不同土地利用类型样点中, 林地有机质含量高于棉田、荒草地、盐碱地、沙地, 其中天然林显著高于其他土地利用类型; 天然林全氮含量最高, 达 (0.83 ± 0.39) g·kg⁻¹, 其次为 10 a 棉田, 两者显著高于新开棉田、30 a 棉田、荒草地、盐碱地、沙地; 荒草地、盐碱地、沙地有效磷含量较低, 分别为 (3.25 ± 1.56)、(5.00 ± 3.09)、(1.92 ± 0.78) mg·kg⁻¹, 10 a 棉田、林地较高且无显著性差异; 天然林速效钾含量显著高于其他土地利用类型, 其余 8 种土类土壤全氮实测值无显著差异.

2.2 土壤酶活性与环境因子相关关系

2.2.1 土壤酶活性与环境因子 RDA 排序

对土壤酶指标以及经变异膨胀因子筛选后的 8 个环境因子进行 RDA (使用 Monte Carlo 检验), 得到环境因子对 4 种土壤酶活性差异性解释量, 见表 2. 4 种土壤酶活性在第 I 轴、第 II 轴的解释量分别为 75.0% 和 1.0%, RDA 前两个排序轴保留了土壤酶活性数据总方差的 75.9%, 即 8 个环境因子累计解释土壤酶活性特征的 75.9%; 且对土壤酶活性与环境因子关系的累计解释量达 99.4%. 由此知前两轴已能很好地反映土壤酶活性与环境因子的关系, 且主要是由第 I 轴决定.

表 1 不同土地利用类型土壤酶活性及环境因子的多重比较

Table 1 Results of multiple comparison of the soil enzymatic activities and environmental factors under different sampling regions										
项目	新开棉田	10 年棉田	30 年棉田	果园	人工林	天然林	荒草地	盐碱地	沙地	平均含量
过氧化氢酶/mL·g ⁻¹	3.12±0.99 ^{cd}	5.79±2.90 ^b	4.86±0.78 ^{bc}	5.81±2.86 ^b	5.05±1.53 ^{bc}	8.72±3.29 ^a	1.74±1.00 ^d	2.28±0.96 ^d	1.09±0.19 ^d	4.27±2.90
脲酶/mg·g ⁻¹	0.18±0.05 ^{ef}	0.62±0.18 ^{ab}	0.33±0.08 ^{de}	0.49±0.14 ^{bd}	0.42±0.10 ^{cd}	0.69±0.35 ^a	0.10±0.01 ^f	0.10±0.02 ^f	0.11±0.02 ^f	0.34±0.26
转化酶/mL·g ⁻¹	1.22±0.81 ^{cd}	3.29±0.77 ^a	2.01±0.67 ^{bc}	3.17±1.04 ^{ab}	3.01±0.87 ^{ab}	4.09±2.03 ^a	0.65±0.42 ^d	0.77±0.52 ^d	0.53±0.35 ^d	2.08±1.55
碱性磷酸酶/mg·g ⁻¹	0.04±0.03 ^c	0.12±0.06 ^{ab}	0.08±0.01 ^{bc}	0.18±0.09 ^a	0.12±0.07 ^{ab}	0.16±0.12 ^a	0.01±0.01 ^c	0.02±0.01 ^c	0.02±0.01 ^c	0.08±0.08
土壤含水量/%	36.62±13.03 ^a	36.48±5.35 ^a	36.90±4.43 ^a	30.44±10.63 ^{ab}	34.44±14.65 ^a	22.50±10.90 ^{bc}	11.68±2.94 ^d	10.58±1.97 ^{cd}	8.90±6.32 ^d	25.39±14.10
容重/g·cm ⁻³	0.97±0.10 ^f	1.26±0.04 ^{cd}	1.32±0.02 ^{bc}	1.15±0.04 ^e	1.21±0.08 ^{de}	1.14±0.03 ^e	1.35±0.05 ^b	1.39±0.05 ^b	1.52±0.08 ^a	1.26±0.16
pH	8.11±0.49 ^{abc}	8.11±0.30 ^{abc}	7.71±0.25 ^c	8.02±0.33 ^{bc}	8.39±0.38 ^{ab}	8.40±0.39 ^{ab}	8.38±0.23 ^{ab}	8.51±0.14 ^a	8.10±0.41 ^{abc}	8.19±0.39
电导率/mS·cm ⁻¹	0.59±0.30 ^d	0.99±0.60 ^{cd}	0.70±0.65 ^d	1.27±0.75 ^{cd}	1.94±0.68 ^{bc}	2.50±0.57 ^b	10.22±1.33 ^a	10.65±0.90 ^a	2.35±0.63 ^b	3.47±3.88
全盐/g·kg ⁻¹	2.04±0.92 ^d	3.87±2.49 ^d	2.05±1.65 ^d	4.57±2.45 ^{cd}	8.63±4.85 ^{bc}	10.66±2.47 ^b	46.51±7.02 ^a	51.07±4.42 ^a	9.26±1.05 ^b	15.41±18.60
有机质/g·kg ⁻¹	4.69±0.59 ^{cd}	12.33±1.51 ^b	7.28±0.79 ^c	12.72±1.03 ^b	14.70±1.57 ^b	20.39±9.00 ^a	3.12±0.97 ^d	3.85±1.57 ^{cd}	1.17±0.29 ^d	8.92±6.77
全氮/g·kg ⁻¹	0.20±0.02 ^{de}	0.69±0.17 ^{ab}	0.33±0.05 ^{cd}	0.50±0.06 ^{bc}	0.55±0.15 ^b	0.83±0.39 ^a	0.15±0.04 ^{de}	0.17±0.07 ^{de}	0.05±0.01 ^e	0.39±0.29
有效磷/mg·kg ⁻¹	11.50±5.82 ^{bcd}	15.13±11.53 ^{ab}	11.17±9.24 ^{bcd}	24.47±11.73 ^a	13.83±8.93 ^{abc}	25.54±14.24 ^a	3.25±1.56 ^{cd}	5.00±3.09 ^{bcd}	1.92±0.78 ^d	12.31±11.19
速效钾/mg·kg ⁻¹	118.00±58.47 ^b	212.60±88.47 ^b	135.80±54.10 ^b	206.00±86.66 ^b	569.40±566.87 ^b	1093.80±772.39 ^a	627.20±538.19 ^b	599.60±552.39 ^b	113.00±53.20 ^b	408.38±492.57

表 2 土壤酶活性指标差异的解释变量冗余分析

Table 2 RDA (redundancy analysis) of ecological characteristics of soil enzymatic activities				
排序轴	第 I 轴	第 II 轴	第 III 轴	第 IV 轴
土壤酶活性特征解释量/%	75.0	1.0	0.4	0.1
土壤酶活特征与环境因子相关性	0.916	0.337	0.480	0.410
土壤酶活性特征累计解释量/%	75.0	75.9	76.3	76.4
土壤酶活性特征——环境因子关系累计解释量/%	98.1	99.4	99.9	100.0
典范特征值		0.764		
总特征值		1.000		

进一步得到土壤酶活性与环境因子二维排序图(图 1)。土壤酶活性指标用实线箭头连线表示,环境因子用虚线箭头连线表示;箭头连线的长短表示各指标对模型贡献率的大小,箭头连线越长对模型贡献率越大,反之,则越小;箭头与排序轴的夹角表示相关性的 大小,夹角越小,相关性越大;环境因子箭头连线在土壤酶活性箭头连线上的投影越长(余弦值越大),则对土壤酶活性影响越大^[22]。

由图 1 所示,全氮(F)、有机质(E)与有效磷(G)的箭头连线最长,可知全氮、有机质、有效磷对土壤酶活性差异性起到较好的解释,这与表 4 的分析相一致。其中有机质与转化酶(c)、全氮与脲酶(b)、有效磷与碱性磷酸酶(d)夹角很小且方向一致,呈正相关关系;过氧化氢酶(a)与全氮、有机质、有效磷均为正相关性,但相关性均不大;由此可知,全氮对脲酶存在显著的正效应,是影响脲酶的主导因子,有机质是影响转化酶活性的重要因素,有效磷主要影响磷酸酶活性,过氧化氢酶活性主要受所有环境因子的累加作用的影响。其余因子中,土壤含水量(A)对 4 种酶活性表现为正相关,盐分因子及土壤容重均呈现负相关性。

进一步研究环境因子对土壤酶活性影响的重要

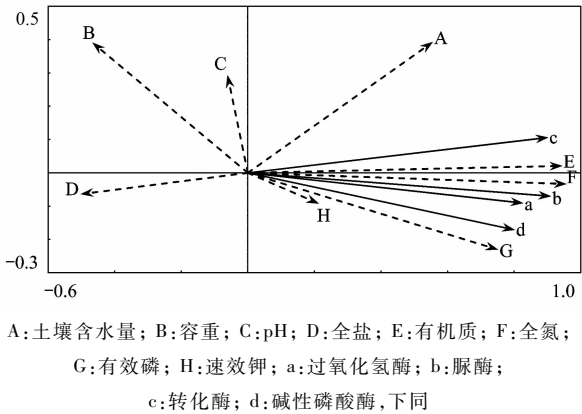


图 1 土壤酶活性与环境因子指标的冗余度分析(RDA)

Fig. 1 Biplot of the first two axes of the RDA(redundancy analysis) for environmental factors associated with ecology characteristics of soil enzymatic activities

性大小,对 8 个环境因子分别进行蒙特卡洛检验排序,得到土壤理化变量的重要性排序,结果见表 3。8 个环境因子对土壤酶活性影响重要性由大到小为全氮、有机质、有效磷、土壤含水量、全盐、容重、速效钾、pH,其中全氮、有机质、有效磷、土壤含水量、全盐对土壤酶活性的影响呈极显著水平($P < 0.01$),全氮、有机质、有效磷对土壤酶活性大小差异性的解释分别达 68.7%、66.9%、42.5%,说明

土壤养分含量是其呈现差异性的关键因子,其次为土壤含水量、全盐;容重对土壤酶活性的影响显著;速效钾、pH 对土壤酶活性的影响小,均未达到显著水平.

表 3 环境因子解释的重要性排序和显著性检验结果

Table 3 Importance and significance level of environmental factors				
环境因子	重要性排序	环境因子所占解释量/%	F	P
全氮	1	68.7	94.468	0.002
有机质	2	66.9	86.938	0.002
有效磷	3	42.5	31.807	0.002
土壤含水量	4	23.3	13.091	0.002
全盐	5	18.9	10.033	0.006
容重	6	16.5	8.511	0.012
速效钾	7	3.5	1.553	0.210
pH(1:5)	8	0.4	0.154	0.832

2.2.2 单一环境因子对土壤酶活性的影响

对土壤酶活性有极显著影响的 5 个环境因子进行深入分析,进一步确定单一环境因子对土壤酶活性的影响,分析采用 CANOCO 5.0 中的 t -value 双序图.

对全氮进行分析[图 2(a)],脲酶、转化酶、碱性磷酸酶完全落入实线圈内,说明全氮与脲酶、转化酶、碱性磷酸酶呈显著正相关关系,同时过氧化氢酶穿过实线圈,由此看出全氮与过氧化氢酶活性呈正相关性. 由图 2(b)看出转化酶、脲酶均完全落入实线圈中,则有机质与转化酶、脲酶显著正相关. 图 2(c)表示有效磷与土壤酶活性关系,可知有效磷对碱性磷酸酶、过氧化氢酶、转化酶、脲酶等 4 种

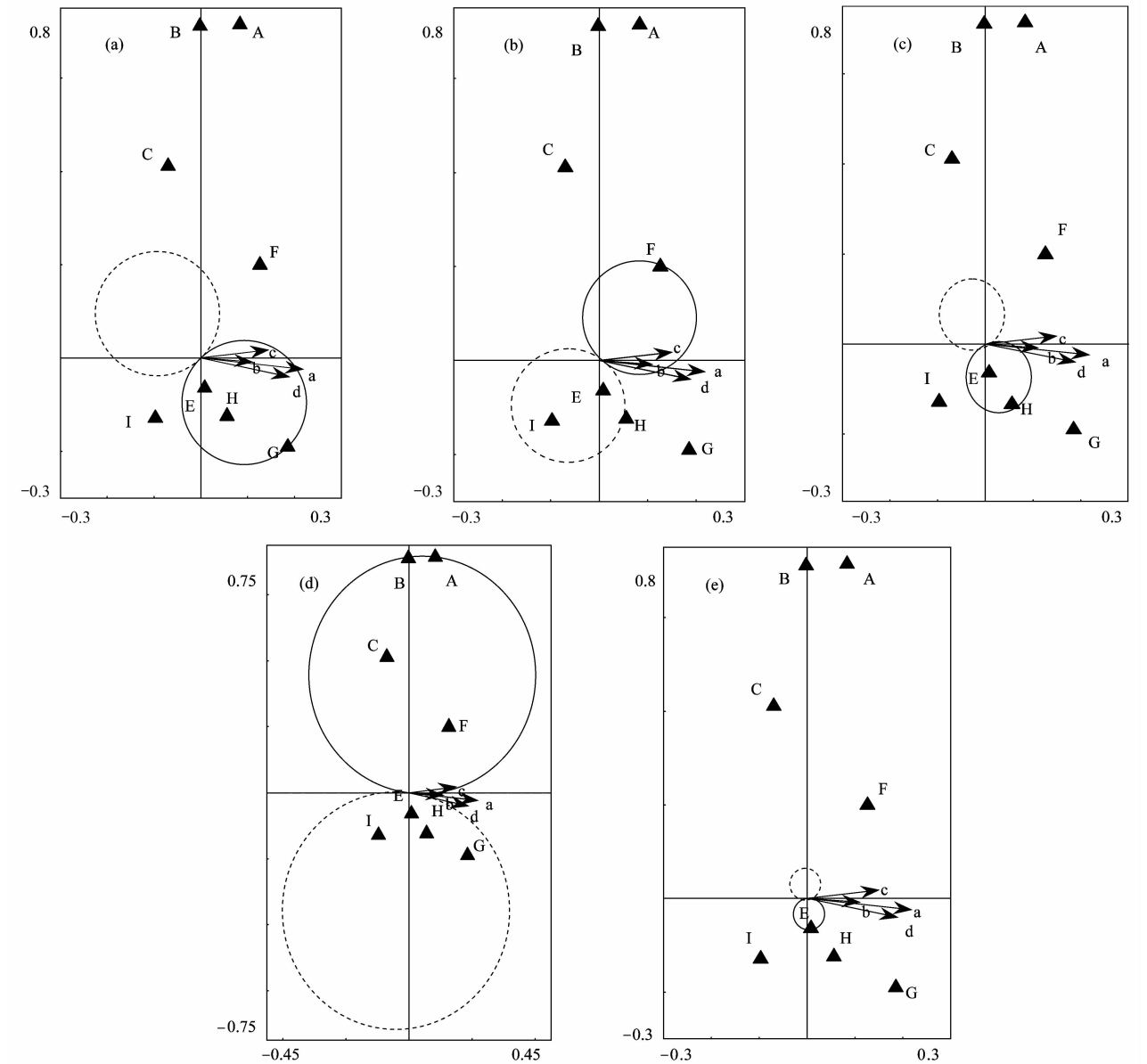


图 2 单一因子对土壤酶活性特征影响的检验结果

Fig. 2 The t -value for single factor influencing ecological characteristics of soil enzymatic activities

土壤酶活性呈现正相关关系,其中碱性磷酸酶落入实线圈的线段长度最长,反映有效磷与碱性磷酸酶相关性最大。通过对土壤含水量进行分析[图 2(d)],转化酶完全落入实线圈,土壤含水量与转化酶的关系显著正相关。全盐与土壤酶活性的关系见图 2(e),全盐含量与单个土壤酶活性的相关性均不大。

3 讨论

3.1 土地利用方式对土壤酶活性的影响

土地利用与土地覆被变化是全球变化的重要组成部分和主要原因,土地利用变化可以引起陆地生物地球化学循环过程的变化,导致土壤性状改变。不同土地利用方式下,植被根系、凋落物以及动植物活体或残体的种类与数量均发生变化,进而影响土壤生态过程,使土壤酶活性产生不同程度的差异。

研究区土壤酶活性对土地利用方式响应不同,存在显著的空间差异。天然林、人工林和果园植物丰富的凋落物和根系分泌物促进微生物繁殖,丰富了土壤酶的来源^[25],因此土壤过氧化氢酶、脲酶、转化酶、碱性磷酸酶活性均较高,这与文献[26~28]的结论一致。棉田的土壤酶活性与连作年限密切相关,垦区内连作棉田的土壤酶活性在耕作年限达到 10 a 时最高,随后呈逐渐降低的趋势。刘瑜等^[29]对北疆连作棉田的研究发现,土地开垦 6~8 a 时土壤质量最好,但随连作年限增加土壤酶活性明显下降,与研究区土壤性质的变化相似,棉田土壤的这种变化可能与该区棉田垦殖过程有关。研究区棉田开荒初始土壤酶活性极低,与荒草地、沙地相近;随着后期灌溉、施肥等耕作活动的影响,土壤酶活性不断提高;但随着种植模式长期的重复、土壤微生物区系逐渐趋于单一、棉田土壤质量开始退化,造成棉田在耕作至一定年限后土壤酶活性的下降。盐碱地、荒草地和沙地土壤酶活性普遍较低。盐碱地盐渍化程度高,盐胁迫抑制了植被生长,进而影响酶活性的高低;荒草地和沙地植被盖度低,地表裸露程度高,植物根系、根系微生物及根系生物活动微弱,最终导致土壤酶活性偏低。上述盐碱地、荒草地和沙地土壤酶活性特性与范君华等^[30]、徐华勤等^[31]的结论和观点亦相符。

3.2 环境因子对土壤酶活性的影响

土壤酶是土壤中最活跃的部分,直接参与土壤的重要生态过程,对生态系统环境变化极度敏感,其活性强弱受多种环境因子影响。土壤酶催化生物残

体与大分子有机物水解、转化,增加土壤养分含量,提高土壤肥力,同时土壤肥力状况又是酶活性的基础,土壤碳氮磷等环境因子与土壤酶活性的变化息息相关^[32]。Kandeler 等^[33]指出土壤酶活性与土壤养分的存在状况、形态和含量等相关;李为等^[34]的研究也表明土壤水解酶类活性与土壤养分水平密切相关。其中,全氮能增加植被地上及地下活细根生物量,促进根际微生物生长,致使土壤中相关酶活性增强^[35];有机质可改变土壤孔隙度、通气度与土壤团粒结构^[36],具有显著的缓冲作用和持水力,是各种酶类的重要载体,为土壤酶发挥作用提供场所与适宜的条件;有效磷可促进植被根系生长,增强土壤微生物对土壤酶的合成,提高土壤酶活性^[37]。这与有关学者对沿塔里木盆地绿洲土壤酶活性与氮含量相关关系的研究结论相一致^[38]。Taylor 等^[39]研究也表明土壤酶与土壤有机质之间存在显著正相关性。王群等^[40]研究表明有效磷对磷酸酶、脲酶及多酚氧化酶有正效应。以上结论均表明土壤碳氮磷对土壤酶活性的强弱起重要作用。

除养分要素外,水盐要素也是影响土壤酶活性的重要因子,土壤酶活性对土壤水分与全盐含量变化的响应极为敏感。大部分研究表明,土壤水分的增加为各种酶促反应提供了反应条件与场所使土壤酶活性升高,其活性随土壤含水量的升高而增强^[5,41];但当土壤过湿时,酶活性会减弱。在水分充裕的地区,过多的土壤水分会改变微生物环境,并形成还原条件,增加 Fe^{2+} 等还原性因子进而影响土壤酶释放,从而影响土壤酶活性^[42]。土壤中盐分的增加对植被根系及生长发育产生一定的影响,对土壤自身的物理、化学性状产生不良效应,使土壤酶活性受到一定程度的限制^[43]。毛志刚等^[17]分析土壤因子对土壤酶活性的影响,得到与本研究较为一致的结果,即土壤脲酶、转化酶、碱性磷酸酶及过氧化氢酶与盐分之间均存在显著负相关关系。

前人研究大多仅单独考虑土壤酶活性对土壤养分、水分或土壤盐分的响应,而本研究区域受大陆性气候的长期作用,土壤生态系统的形成和发育的关键制约因子除养分条件外,还包括水分与盐分,故单独研究土壤养分、水分及盐分与土壤酶活性的相关性是存在缺陷的。本研究综合探讨上述环境因子的特征,发现土壤酶受土壤碳氮磷、水分及盐分等多重环境因子的作用,均表现为极显著相关性。

4 结论

(1)研究区环境恶劣,地处亚欧大陆内陆,土壤

酶与土壤、水文等环境密切相关,其活性普遍偏低:过氧化氢酶、脲酶、转化酶、碱性磷酸酶活性均值分别为 $4.27\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $0.34\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $2.08\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $0.08\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. 不同土地利用类型的土壤过氧化氢酶、脲酶、转化酶、碱性磷酸酶活性与有机质、全氮、有效磷均表现为林地较高,荒草地、盐碱地、沙地最低;棉田中 10 a 棉田土壤酶活性及养分含量最高. 棉田、人工林、果园土壤含水量最高. 沙地容重最大,达 $(1.52 \pm 0.08)\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. 盐碱地、荒草地电导率和全盐显著高于其他土地利用类型,其全盐含量为 $(51.07 \pm 4.42)\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $(46.51 \pm 7.02)\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,电导率为 $(10.65 \pm 0.90)\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、 $(10.22 \pm 1.33)\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$.

(2)对土壤酶活性与理化因子进行冗余分析,结果表明土壤酶活性与土壤碳氮磷含量关系密切,全氮、有机质、有效磷对土壤酶活性大小差异性的解释分别为 68.7%、66.9%、42.5%,且其与土壤酶活性的相关性达极显著水平($P<0.01$). 除养分要素外,水盐因素也是影响土壤酶活性的重要因子,研究显示土壤水分、盐分与土壤酶活性相关性也达极显著水平($P<0.01$). 容重对土壤酶活性的影响显著;速效钾、pH 对土壤酶活性的影响小,未达到显著水平.

参考文献:

[1] 关松荫,张德生,张志明. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986. 14-339.

[2] 周礼恺,张志明,陈恩凤. 黑土的酶活性[J]. 土壤学报,1981,18(2): 158-165.

[3] 沈芳芳,袁颖红,樊后保,等. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响[J]. 生态学报,2012,32(2): 517-527.

[4] Martens D A, Johanson J B, Frankenberger W T. Production and persistence of soil enzymes with repeated additions of organic residues[J]. Soil Science, 1992, 153(1): 53-61.

[5] 牛世全,李君锋,杨婷婷,等. 甘南玛曲沼泽湿地土壤微生物量、理化因子与土壤酶活的关系[J]. 冰川冻土,2010,32(5): 1022-1029.

[6] 秦华军,何丙辉,赵旋池,等. 西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征[J]. 环境科学,2014,35(9): 3580-3586.

[7] Calamai L, Lozzi I, Stoteky G, *et al.* Interaction of catalase with montmorillonite homoionic to cations with different hydrophobicity: effect on enzymatic activity and microbial utilization[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(6): 815-823.

[8] Margesin R, Schinner F. Phosphomonoesterase, phosphodiesterase, phosphotriesterase, and inorganic pyrophosphatase activities in forest soils in an alpine area: effect

of pH on enzyme activity and extractability[J]. Biology and Fertility of Soils, 1994, 18(4): 320-326.

[9] Baldrian P, Trögl J, Frouz J. Enzyme activities and microbial biomass in topsoil layer during spontaneous succession in spoil heaps after brown coal mining[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(9): 2107-2115.

[10] Štursová M, Baldrian P. Effects of soil properties and management on the activity of soil organic matter transformation enzymes and the quantification of soil-bound and free activity[J]. Plant and Soil, 2011, 338(1-2): 99-110.

[11] Kalbitz K, Schmerwitz J, Schwesig D, *et al.* Biodegradation of soil-derived dissolved organic matter as related to its properties[J]. Geoderma, 2003, 113(3-4): 273-291.

[12] Kim H, Kang H. The impacts of excessive nitrogen additions on enzyme activities and nutrient leaching in two contrasting forest soils[J]. Journal of Microbiology, 2011, 49(3): 369-375.

[13] Cusack D F, Silver W L, Torn M S, *et al.* Changes in microbial community characteristics and soil organic matter with nitrogen additions in two tropical forests[J]. Ecology, 2011, 92(3): 621-632.

[14] Nausch M, Nausch G. Stimulation of peptidase activity in nutrient gradients in the Baltic Sea[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(13): 1973-1983.

[15] 葛晓改,肖文发,曾立雄,等. 三峡库区不同林龄马尾松土壤养分与酶活性的关系[J]. 应用生态学报,2012,23(2): 445-451.

[16] 潘能,侯振安,陈卫平,等. 绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究[J]. 环境科学,2012,33(12): 4081-4087.

[17] 毛志刚,谷孝鸿,刘金娥,等. 盐城海滨湿地盐沼植被及农作物下土壤酶活性特征[J]. 生态学报,2010,30(18): 5043-5049.

[18] 贡璐,张海峰,吕光辉,等. 塔里木河上游典型绿洲不同连作年限棉田土壤质量评价[J]. 生态学报,2011,31(14): 4136-4143.

[19] 贡璐,张雪妮,吕光辉,等. 塔里木河上游典型绿洲不同土地利用方式下土壤质量评价[J]. 资源科学,2012,34(1): 120-127.

[20] 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,1999. 12-172.

[21] Hao X M, Li W H, Huang X, *et al.* Assessment of the groundwater threshold of desert riparian forest vegetation along the middle and lower reaches of the Tarim River, China[J]. Hydrological Processes, 2010, 24(2): 178-186.

[22] Lepš J, Šmilauer P. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO[M]. Cambridge University Press, 2002. 197-205.

[23] Šmilauer P, Lepš J. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO 5[M]. Cambridge University Press, 2014. 309-322.

[24] Beyene A, Addis T, Kifle D, *et al.* Comparative study of diatoms and macroinvertebrates as indicators of severe water pollution: case study of the Kebena and Akaki rivers in Addis

- Ababa, Ethiopia[J]. *Ecological Indicators*, 2009, **9**(2): 381-392.
- [25] 杨榕, 李博文, 刘微. 胶质芽胞杆菌对印度芥菜根际土壤镉含量及土壤酶活性影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(6): 2436-2441.
- [26] Ladd J N. Origin and range of enzyme in soil [A]. In: Burns R G (ed.). *Soil Enzymes* [M]. London: Academic Press, 1978. 415-471.
- [27] Dick W A, Juma N G, Tabatabai M A. Effects of soils on acid phosphatase and inorganic pyrophosphatase of corn roots[J]. *Soil Science*, 1983, **136**(1): 19-25.
- [28] 徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 等. 缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(10): 4009-4016.
- [29] 刘瑜, 梁永超, 褚贵新, 等. 长期棉花连作对北疆棉区土壤生物活性与酶学性状的影响[J]. *生态环境学报*, 2010, **19**(7): 1586-1592.
- [30] 范君华, 刘明. 塔里木极端干旱区 5 种土地利用方式对土壤微生物多样性与酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(S1): 131-135.
- [31] 徐华勤, 章家恩, 冯丽芳, 等. 广东省典型土壤类型和土地利用方式对土壤酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, **16**(6): 1464-1471.
- [32] Zantua M I, Dumenil L C, Bremner J M. Relationships between soil urease activity and other soil properties [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1977, **41**(2): 350-352.
- [33] Kandeler E, Luxhel J, Tschierko M, *et al.* Xylanase, intertase and protease at the soil-litter interface of a loamy sand [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, **31**(8): 1171-1179.
- [34] 李为, 余龙江, 李涛, 等. 岩溶生态系统土壤酶活性的时空动态及其与土壤肥力的关系——以桂林丫吉村岩溶试验场为例[J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(1): 260-266.
- [35] 涂利华, 胡红玲, 胡庭兴, 等. 模拟氮沉降对华西雨屏区光皮桦林土壤酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, **23**(8): 2129-2134.
- [36] 贾曼莉, 郭宏, 李会科. 渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2777-2784.
- [37] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987. 254-260.
- [38] 周晓兵, 张元明, 陶冶, 等. 古尔班通古特沙漠土壤酶活性和微生物量氮对模拟氮沉降的响应[J]. *生态学报*, 2011, **31**(12): 3340-3349.
- [39] Taylor J P, Wilson B, Mills M S, *et al.* Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface and subsoils using various techniques[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**(3): 387-401.
- [40] 王群, 夏江宝, 张金池, 等. 黄河三角洲退化刺槐林地不同改造模式下土壤酶活性及养分特征[J]. *水土保持学报*, 2012, **26**(4): 133-137.
- [41] Jin K, Sleutel S, Buchan D, *et al.* Changes of soil enzyme activities under different tillage practices in the Chinese Loess Plateau[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, **104**(1): 115-120.
- [42] Kang H, Freeman C. Phosphatase and arylsulphatase activities in wetland soils: annual variation and controlling factors[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, **31**(3): 449-454.
- [43] 张建锋, 张旭东, 周金星, 等. 盐分胁迫对杨树苗期生长和土壤酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, **16**(3): 426-430.

CONTENTS

Potential Source Contribution Analysis of the Particulate Matters in Shanghai During the Heavy Haze Episode in Eastern and Middle China in December, 2013	Li Li, CAI Jun-lin, ZHOU Min (2327)
Composition and Regional Characteristics of Atmosphere Aerosol and Its Water Soluble Ions over the Yangtze River Delta Region in a Winter Haze Period	WANG Man-ting, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (2337)
Chemical Species of PM _{2.5} in the Urban Area of Beijing	LIU Bao-xian, YANG Dong-yan, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2346)
Numerical Study on the Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Shandong Province During Spring in 2014	JIA Hai-ying, CHENG Nian-liang, HE You-jiang, <i>et al.</i> (2353)
Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} Emitted from Coal-Fired Power Plants	MA Zi-zhen, LI Zhen, JIANG Jing-kun, <i>et al.</i> (2361)
Direct Observation on the Temporal and Spatial Patterns of the CO ₂ Concentration in the Atmospheric of Nanjing Urban Canyon in Summer	GAO Yun-qiu, LIU Shou-dong, HU Ning, <i>et al.</i> (2367)
Emission Factors of Vehicle Exhaust in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2374)
Adsorption Capacity of the Air Particulate Matter in Urban Landscape Plants in Different Polluted Regions of Beijing	ZHANG Wei-kang, WANG Bing, NIU Xiang (2381)
Major Air Pollutant Emissions of Coal-Fired Power Plant in Yangtze River Delta	DING Qing-qing, WEI Wei, SHEN Qun, <i>et al.</i> (2389)
Estimation of N ₂ O Emission from Anhui Croplands by Using a Regional Nitrogen Cycling Model IAP-N	HAN Yun-fang, HAN Sheng-hui, YAN Ping (2395)
Evaluation on the Impacts of Different Background Determination Methods on CO ₂ Sources and Sinks Estimation and Seasonal Variations	ZHANG Fang, ZHOU Ling-xi, WANG Yu-zhao (2405)
Measured and Predicted Aquatic Life Criteria and Risk Assessment of Chromium (VI) in Liaohe River	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, <i>et al.</i> (2414)
Pollution and Potential Ecology Risk Evaluation of Heavy Metals in River Water, Top Sediments on Bed and Soils Along Banks of Bortala River, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwalili, JIANG Feng-qing (2422)
Influencing Factors for Hydrochemistry and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of Karst Springs	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, LIU Zi-qi, <i>et al.</i> (2430)
Hydrochemical Characteristics and the Dissolved Inorganic Carbon Flux in Liuzhou Section of Liujiang Basin	YUAN Ya-qiong, HE Shi-yi, YU Shi, <i>et al.</i> (2437)
Characteristics of Total Nitrogen and Total Phosphorus Pollution and Eutrophication Assessment of Secondary River in Urban Chongqing	QING Xu-yao, REN Yu-fen, LÜ Zhi-qiang, <i>et al.</i> (2446)
Static Migration and Release of Dibutyl-Phthalate in the Fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir	WANG Fa, WANG Qiang, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (2453)
Effect of Drought and Subsequent Re-wetting Cycles on Transferable Nitrogen and Its Form Distribution in the Sediment of Water Level Fluctuating Zone in the Tributary of Three Gorge Reservoir Areas	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, YANG Zhen-yu, <i>et al.</i> (2459)
Distribution of Chlorophyll-a and Eutrophication State in Tianchi Lake of Tianshan Mountains in Summer	WANG Bin, MA Jian, WANG Yin-ya, <i>et al.</i> (2465)
Vertical Distribution Characteristics and Analysis in Sediments of Xidaihai Lake	DUAN Mu-chun, XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying (2472)
Phytoplankton Community Structure and Water Quality Assessment in Jialing River After the Impoundment of Caojie Reservoir	YANG Min, ZHANG Sheng, LIU Shuo-ru (2480)
Analysis of Prokaryotic Community Structure in River Waters of the Ningbo Sanjiang Mouth	HU An-yi, LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, <i>et al.</i> (2487)
Effects of Perfluoroalkyl Substances on the Microbial Community Structure in Surface Sediments of Typical River, China	SUN Ya-jun, WANG Tie-yu, PENG Xia-wei, <i>et al.</i> (2496)
Coupling Effects of Decomposed <i>Potamogeton crispus</i> and Growing <i>Ceratophyllum demersum</i> on Water Quality and Plant Growth	MA Yue, WANG Guo-xiang, CAO Xun, <i>et al.</i> (2504)
Bioretention Media Screening for the Removal of Phosphorus in Urban Stormwater	LI Li-qing, GONG Yan-fang, YAN Zi-qin, <i>et al.</i> (2511)
Treatment of Urban Runoff Pollutants by a Multilayer Biofiltration System	WANG Xiao-lu, ZUO Jian-e, GAN Li-li, <i>et al.</i> (2518)
Effect of Three Typical Disinfection Byproducts on Bacterial Antibiotic Resistance	LÜ Lu, ZHANG Meng-lu, WANG Chun-ming, <i>et al.</i> (2525)
Laboratory Investigation of DNAPL Migration Behavior and Distribution at Varying Flow Velocities Based on Light Transmission Method	GAO Yan-wei, ZHENG Fei, SHI Xiao-qing, <i>et al.</i> (2532)
Comparative Study of Benzotriazole Electrochemical Oxidation at Boron-doped Diamond and PbO ₂ Anodes	WU Juan-li, ZHANG Jia-wei, WANG Ting, <i>et al.</i> (2540)
Sorption of <i>o</i> -Phthalate onto Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, HUANG Li-dong, CHEN Yan-fang, <i>et al.</i> (2547)
Adsorption Behaviors of Lead on Multi-Walled Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Composites	ZHANG Jin-li, LI Yu (2554)
Synthesis and Study on Adsorption Property of Congo Red Molecularly Imprinted Polymer Nanospheres	CHANG Zi-qiang, CHEN Fu-bin, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2564)
Simultaneous Removal of Cd(II) and Phenol by Titanium Dioxide-Titanate Nanotubes Composite Nanomaterial Synthesized Through Alkaline-Acid Hydrothermal Method	LEI Li, JIN Yin-jia, WANG Ting, <i>et al.</i> (2573)
Immobilization of Estrogen-degrading Bacteria to Remove the 17 β -estradiol and Diethylstilbestrol from Polluted Water and Cow Dung	LI Xin, LING Wan-ting, LIU Jing-xian, <i>et al.</i> (2581)
Optoelectronic PCB Wastewater Treatment by Partial Nitrification-ANAMMOX Integrative Reactor	YUAN Yan, LI Xiang, ZHOU Cheng, <i>et al.</i> (2591)
Treatment of Petrochemical Treatment Plant Secondary Effluent by Fenton Oxidation	WANG Yi, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (2597)
Comprehensive Toxicity Evaluation and Toxicity Identification Used in Tannery and Textile Wastewaters	HUANG Li, CHEN Wen-yan, WAN Yu-shan, <i>et al.</i> (2604)
Carbon/nitrogen Removal and Bacterial Community Structure Change in an A/O Activated Sludge System Under Different Dissolved Oxygen Conditions	CHEN Yan, LIU Guo-hua, FAN Qiang, <i>et al.</i> (2610)
ORP in the Main Anoxic Stage as the Control Parameter for Nitrogen and Phosphorus Removal in the Single Sludge System with a Continuous Flow	WANG Xiao-ling, SONG Tie-hong, YIN Bao-yong, <i>et al.</i> (2617)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Real Low Concentration Domestic Wastewater and Its Denitrification Performances Under the Continuous Flow	YAO Li, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2626)
Heavy Metal Contamination in Farmland Soils at an E-waste Disassembling Site in Qingyuan, Guangdong, South China	ZHANG Jin-lian, DING Jiang-feng, LU Gui-ning, <i>et al.</i> (2633)
Residues and Spatial Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides DDTs in Soil of Linyi City, Shandong Province	YU Chao, WANG Zeng-hui, WANG Hong-jin, <i>et al.</i> (2641)
Assessment of Soil Fluorine Pollution in Jinhua Fluorite Ore Areas	YE Qun-feng, ZHOU Xiao-ling (2648)
Response of Straw and Straw Biochar Returning to Soil Carbon Budget and Its Mechanism	HOU Ya-hong, WANG Lei, FU Xiao-hua, <i>et al.</i> (2655)
Changes of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors of Apple Orchards and Black Locusts in the Small Watershed of Loess Plateau, China	LI Ru-jian, WANG Rui, LI Na-na, <i>et al.</i> (2662)
Impacts of Land Use Changes on Soil Light Fraction and Particulate Organic Carbon and Nitrogen in Jinyun Mountain	LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2669)
Soil Enzyme Activities and Their Relationships to Environmental Factors in a Typical Oasis in the Upper Reaches of the Tarim River	ZHU Mei-ling, GONG Lu, ZHANG Long-long (2678)
Effects of Different Residue Part Inputs of Corn Straws on CO ₂ Efflux and Microbial Biomass in Clay Loam and Sandy Loam Black Soils	LIU Si-yi, LIANG Ai-zhen, YANG Xue-ming, <i>et al.</i> (2686)
Isolation, Identification of a <i>p</i> - <i>tert</i> -Butylcatechol-Degrading Strains and Optimization for Its Degradation by Response Surface Methodology	HE Qiang-li, LIU Wen-bin, YANG Hai-jun, <i>et al.</i> (2695)
Isolation, Identification and Characteristic Analysis of an Oil-producing <i>Chlorella</i> sp. Tolerant to High-strength Anaerobic Digestion Effluent	YANG Chuang, WANG Wen-guo, MA Dan-wei, <i>et al.</i> (2707)
Coupled Cytotoxicity of C ₆₀ Nano-Crystal Particle with Cu ²⁺ to the Mouse Peritoneal Microphage RAW 264. 7	YU Ye, BIAN Wei-lin, ZHANG Hui-min, <i>et al.</i> (2713)
Simultaneous Analysis of 18 Glucocorticoids in Surface Water	GUO Wen-jing, CHANG Hong, SUN De-zhi, <i>et al.</i> (2719)

《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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976 年 8 月创刊)

2015 年 7 月 15 日 第 36 卷 第 7 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 7 Jul. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧 阳 自 远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《 环 境 科 学 》 编 辑 委 员 会 北京市 2871 信箱 (海淀区双清路 18 号 , 邮政编码 : 100085) 电话 : 010-62941102, 010-62849343 传真 : 010-62849343 E-mail : hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871 , Beijing 100085 , China Tel: 010-62941102, 010-62849343 ; Fax : 010-62849343 E-mail : hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码 : 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street , Beijing 100717 , China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话 : 010-64017032 E-mail : journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail : journal@ mail. sciencecp. 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 国内邮发代号 : 2-821
CN 11-1895/X

国 内 定 价 : 120.00 元 国外发行代号 : M 205

国 内 外 公 开 发 行