E方知库
Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2020
Vol.41 No.4
第41卷 第4期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第4期
2020年4月15日

目 次

基于深度学习的华东地区 $PM_{2.5}$ 浓度遥感反演 …… 刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一(1513)
秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响 …… 李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉(1520)
基于GAM模型的西安市 O_3 浓度影响因素解析 …… 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎(1535)
北京及周边6个城市大气 $PM_{2.5}$ 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征 …… 朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕(1544)
典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析 …… 李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤(1550)
成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析 …… 王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛(1561)
天津夏季郊区VOCs对臭氧生成的影响 …… 姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖(1573)
涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响 …… 吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正(1582)
典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因 …… 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤(1589)
中国地表水硝酸盐分布及其来源分析 …… 张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦(1594)
中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险 …… 杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇(1607)
小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析 …… 范新凤, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟(1619)
浙江省H市水处理及供水系统4种人工甜味剂的分布特征 …… 马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖(1629)
三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系 …… 米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书晗, 吴忠兴(1636)
骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子 …… 张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军(1648)
拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系 …… 王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁(1657)
基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素 …… 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升(1666)
岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析 …… 赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航(1676)
巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应 …… 李如忠, 王莉, 刘超(1684)
镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复 …… 丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇(1692)
氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用 …… 杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君(1700)
北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性 …… 陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡(1709)
新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用 …… 黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵娴, 冯华军(1716)
Ni掺杂 $Sb\text{-}SnO_2$ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶 …… 石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠(1725)
磁性 Fe_3O_4-CuO 非均相活化过碳酸钠降解AO7 …… 徐劼, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅(1734)
赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星:性能和机制 …… 史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟(1743)
工业废水水质对微气泡臭氧化深度处理影响 …… 张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜(1752)
污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性 …… 陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇(1761)
改性西瓜皮生物炭的制备及其对Pb(Ⅱ)的吸附特性 …… 毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆(1770)
A^2/O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性 …… 刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康(1779)
基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制 …… 杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮(1787)
HRT对CSTR亚硝化颗粒污泥性能影响 …… 王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪(1794)
低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征 …… 朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良(1801)
不同HRT下污水中有机物在ABR中的转化过程及污泥形态特征 …… 程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良(1808)
投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响 …… 杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪(1816)
中国193个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险 …… 李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新(1825)
基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染 …… 胡梦珺, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜(1838)
扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险 …… 姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然(1847)
桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估 …… 陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波(1855)
重庆市主要农耕区土壤Cd生物有效性及影响因素 …… 王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜(1864)
棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用 …… 刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛(1871)
连续4 a施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量 …… 薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颗榴, 周清, 宋达清, 张杨珠(1880)
纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响 …… 邓继宝, 张春来, 徐卫红(1888)
矿业废弃地复垦土壤-作物硒吸收特征及其对重金属拮抗效应 …… 尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文(1904)
不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响 …… 杨彩迪, 宗玉统, 卢升高(1914)
化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响 …… 朱浩宇, 高明, 龙翼,徐国鑫, 王富华, 王子芳(1921)
紫色土旱坡地氮流失通量对减肥配施秸秆的响应 …… 熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明(1930)
浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径 …… 吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰(1941)
极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素 …… 孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国(1950)
红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应 …… 吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽(1960)
稻田土壤 N_2O 消纳能力及 *nosZ-I* 型功能种群应答机制 …… 郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅(1968)
京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估 …… 陈盼, 施晓清(1976)
中国城市工业化发展与 $PM_{2.5}$ 的关系:兼论EKC曲线形成的内在机制 …… 李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波(1987)
《环境科学》征订启事(1618) 《环境科学》征稿简则(1635) 信息(1724, 1769, 1800)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第41卷第4期 2020年4月
Vol.41, No.4 Apr., 2020

红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应

吕来新[1], 宋蕾[1], 刘志理[1,2], 张金波[3], 金光泽[1,2*]

(1. 东北林业大学生态研究中心, 哈尔滨 150040; 2. 东北林业大学森林生态系统可持续经营教育部重点实验室, 哈尔滨 150040; 3. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023)

摘要: 土壤酶参与土壤中进行的众多复杂的生物化学过程,对陆地生态系统物质循环具有重要作用. 为了探索温带森林土壤酶活性和化学性质对氮沉降的响应,本研究依托于黑龙江凉水国家级自然保护区的红松(*Pinus koraiensis*)人工林氮添加实验样地,分析了4种土壤酶活性. 结果表明,土壤中*N*-乙酰-氨基葡萄糖苷酶(NAG)和碱性磷酸酶(AKP)活性均随着施氮浓度增加显著升高,而β-葡糖苷酶(BG)以及酸性磷酸酶(ACP)活性在不同的施氮处理之间无显著差异;同一施氮水平下的上层(0~10 cm)土壤的全碳、全氮、全磷、有效氮含量以及4种酶活性显著高于下层(10~20 cm)土壤,pH值则无显著差异. 全碳与NAG、BG、AKP、ACP之间均存在极显著正相关,全氮与BG、NAG、AKP、ACP存在显著或极显著正相关,有效氮与NAG、AKP间存在显著和极显著正相关,全磷与ACP、AKP存在显著和极显著正相关. 施氮水平和土层对土壤酶活性及土壤化学性质存在不同程度的影响,氮的长期大量输入可直接或间接地改变土壤化学性质并影响土壤酶活性.

关键词:温带森林; 氮沉降; 施氮水平; 土壤化学性质; 水解酶

中图分类号: X144 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)04-1960-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201906168

Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation

LÜ Lai-xin[1], SONG Lei[1], LIU Zhi-li[1,2], ZHANG Jin-bo[3], JIN Guang-ze[1,2*]

(1. Center for Ecological Research, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management, Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 3. School of Geography Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Soil enzymes participate in numerous complex biochemical processes that take place in the soil and play an important role in the material circulation of terrestrial ecosystems. To explore the response of soil enzyme activities and chemical properties to nitrogen deposition in temperate forests, this study analyzed four soil enzyme activities based on the nitrogen addition experiment plot of Korean pine (*Pinus koraiensis*) plantation, which was located in the Liangshui National Natural Reserve, Heilongjiang Province. The results showed that the activities of *N*-acetyl-glucosidase (NAG) and alkaline phosphatase (AKP) increased significantly with increasing nitrogen application concentration. The activity of beta-glucosidase (BG) and acid phosphatase (ACP) was not significantly different among different nitrogen application treatments. The contents of total carbon, total nitrogen, total phosphorus, and available nitrogen and four enzyme activity in the upper soil (0-10 cm) under the same nitrogen application level were significantly higher than those in the lower soil (10-20 cm), but the pH values were not significantly different. Total carbon has an extremely significant positive correlation with NAG, BG, AKP, and ACP. Total nitrogen has an obvious or extremely significant positive correlation with BG, NAG, and AKP as well as ACP. The available nitrogen has an obvious and highly significant positive correlation with NAG and AKP. The total phosphorus has an obvious and extremely significant positive correlation with ACP and AKP, respectively. The nitrogen application level and the soil layer had different effects on soil enzyme activity and soil chemical properties. Long-term large input of nitrogen can directly or indirectly change soil chemical properties and affect soil enzyme activity.

Key words: temperate forest; nitrogen deposition; nitrogen application level; soil chemical property; hydrolase

近几十年以来,化石燃料燃烧、含氮化肥的生产和使用以及畜牧业的发展等使人类活动引起的向大气排放的含氮化合物激增,导致大气氮沉降成比例地增加[1~3],到2050年全球大气氮沉降速率将比工业革命前增加近3倍[4]. 氮素是陆地植物净初级生产力的限制性因子,大气氮沉降的增加对植物净初级生产力及土壤固碳能力的提高有一定的贡献,但也产生土壤酸化、生物多样性丧失、氮损失增加等不利影响[5].

土壤中的碳、氮和磷主要以有机态的形式存在,分别占土壤中该元素总量的75%、95%和50%[6,7]. 土壤酶介导的土壤有机质矿化是土壤碳氮磷循环重要的生物化学过程,酶活性作为土壤的生物指标,相比于化学性质对于环境的变化更加敏感,它可以直接影响土壤中养分的释放和供应、土壤质量的维持以及温室气体的形成等[8],并可作为土壤养分含量预测的指示性指标. 此外,酶活性的差异

收稿日期: 2019-06-24; **修订日期**: 2019-11-04

基金项目: 中国科学院创新交叉团队项目(JCTD-2018-06); 中央高校基本科研业务费专项(2572019CP14)

作者简介: 吕来新(1993~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤生态,E-mail:1084014147@qq.com

* 通信作者,E-mail:taxus@126.com

能反映微生物的养分需求，体现微生物在环境波动时维持养分平衡的应对策略[9]. 土壤酶按照催化反应类型可以分为水解酶、氧化还原酶、连接酶、转移酶、裂合酶和异构酶 6 大类[10]. 其中，由微生物和植物根系分泌的水解酶是土壤中一种重要的酶类，参与土壤中众多重要的生物化学反应，与土壤中营养元素转化密切相关，其活性直接影响纤维素、半纤维素的分解[11].

氮沉降的增加改变土壤生态系统物质输入，对土壤中碳氮关键水解酶产生显著影响[12]. β-葡糖苷酶(BG)是参与纤维素降解的重要酶，*N*-乙酰-氨基葡萄糖苷酶(NAG)则参与氮循环过程中几丁质和肽聚糖的降解过程，磷酸酶(AP)通过水解磷酸单酯将底物分子上的磷酸基团除去，并生成磷酸根离子和自由的羟基，以上酶活性对土壤中养分循环利用起着重要作用[10]. 田善义等[12]的研究发现施肥能够提高土壤碳氮循环关键酶活性，而 Kang 等[13]和 Dong 等[14]的研究表明氮沉降抑制了温带土壤中碳、氮和磷水解酶活性，显著提高了亚热带地区的 NAG 酶、纤维素酶(CBH)和 AP 酶活性. 不同的氮沉降量、酶类型、土层深度以及土壤养分状态等可能使酶活性对氮沉降的响应不同[15~17]. Guo 等[18]的研究发现中等程度的施肥量使酶活性产生显著变化；杜林森等[19]的研究发现在不同施肥处理下上层土壤酶活性普遍高于下层土壤酶活性，不同施肥处理在 0 ~ 20 cm 土层 BG 酶活性与土壤碳氮含量有显著的正相关关系，而 NAG 酶在不同的土层间差异并不显著. 以往的研究多集中于热带和亚热带地区酶活性对氮添加的响应，而对温带森林的相关研究较少，尤其是关于不同土层深度的酶活性差异研究不足. 深层土壤中的微域环境对土壤生物和酶对氮沉降的响应程度有延缓作用，深层土壤的存在减少整体土壤养分的淋溶风险，避免水体富营养化，结合土壤化学性质以及土层深度的变化，进一步研究氮沉降对温带森林土壤中关键酶活性的影响十分必要.

红松(*Pinus koraiensis*)是我国东北东部地区的顶极植被——阔叶红松林的建群种，不仅在群落和生物多样性维持中具有重要作用，具有极高的经济价值和生态价值，成为本区域重要的造林树种. 文献[20 ~ 22]研究了该地区土壤温度、水分、温室气体排放、氮素转化和损失对模拟氮沉降的响应以及大气干湿氮沉降特征，Yang 等[23]研究了土壤化学计量学、凋落物化学计量学和较老叶片化学计量学在该区域对氮添加的敏感程度，并认为在与化学计量性状相关的森林生态系统因子中，土壤 C∶N∶P 化学计量学可能是一个较好的指示因子，可以用来指示 N∶P 沉积比增加的情况. 本文依托于黑龙江凉水国家级自然保护区的红松人工林氮添加样地，探索红松人工林不同土层的土壤酶活性和化学性质对氮添加的响应，探讨酶活性与化学性质间的关系，以期为理解氮沉降对森林土壤物质循环影响提供参考.

1　材料与方法

1.1　实验地概况与样地设置

本研究地位于黑龙江凉水国家级自然保护区(47°10′50″N, 128°53′20″E)，系小兴安岭南部达里带岭支脉的东坡，面积12 133 hm^2，海拔 280 ~ 707 m，地带性土壤为暗棕壤. 气候类型为大陆性季风气候，年平均气温 -0.3℃，年平均降水量 676 mm，年平均蒸发量 805 mm，地带性顶极植被为阔叶红松林. 本研究的样地为阔叶红松林经皆伐后造林的红松人工林，胸高断面积 41.6 $m^2 \cdot hm^{-2}$，平均胸径 16.0 cm.

1.2　研究方法

1.2.1　氮添加实验

2014 年 5 月在林内选取立地条件大致相同的林分，设置 20 个 5 m × 30 m 的样方，样方间设置 10 m 隔离带. 在 20 个样方内随机设置对照[CK：0 $kg \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$]、低氮[L：20 $kg \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$]、中氮[M：40 $kg \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$]和高氮[H：80 $kg \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$]这 4 组处理，每组处理 5 个重复. 从 2014 年起，每年 6、7、8 和 9 月的月中一次性以背式喷雾器人工均匀喷施对应剂量的 NH_4NO_3 溶液.

1.2.2　样品采集与测定

2018 年 7 月中旬用内径为 8 cm 的自制土钻在每个样方随机选取 3 个样点进行取样，根据剖面分为上层(0 ~ 10 cm)和下层(10 ~ 20 cm)进行采样，把土样密封、冷藏后带回实验室. 过 2 mm 土壤筛后将土样分成 2 份，1 份置于 4℃冰箱中保存用于土壤酶活性测定，1 份风干后保存用于土壤化学性质测定.

土壤酶活性的测定包括 BG 酶、NAG 酶、酸性磷酸酶(ACP)和碱性磷酸酶(AKP)，测定方法参考文献[24,25]. 对于 BG 酶和 NAG 酶，首先称取 1 g 新鲜土壤，加入 4 mL 醋酸缓冲液(pH = 5)和 1 mL 底物，37℃下培养 1h. 培养结束后加入 4 mL 氢氧化钠溶液和 1 mL 氯化钙溶液终止反应，410 nm 下测定透光率，进而计算出溶液中对硝基苯酚(*p*-NP)的浓度. 酸性/碱性 AP 测定方法与 BG 和 NAG 相似，但是底物为对硝基苯磷酸，ACP 缓冲液用 pH = 6 的通用缓冲液，AKP 用 pH = 9 的通用缓冲液.

土壤的化学性质的测定包括 pH、全碳、全氮、有

效氮和全磷. 土壤 pH 用 pH 计(HANNA pH211, Italy)测定,土液比为 1∶2.5;测定土壤全 C 含量采用碳氮分析仪(multi N/C 3000, Germany);测定土壤全 P 含量采用硫酸-高氯酸酸溶钼锑抗比色法;测量土壤中全 N 含量利用凯氏定氮仪(Kjeltec 2300, Sweden 的 Foss Tecator AB 公司生产);硝态氮,铵态氮含量采用连续流动分析仪(BRAN + LUEBBE-AA3, Germany)测定,浸提液为 2 mol·L^{-1}KCl,土液比为 1∶5,用硝态氮含量加铵态氮含量代表有效氮含量.

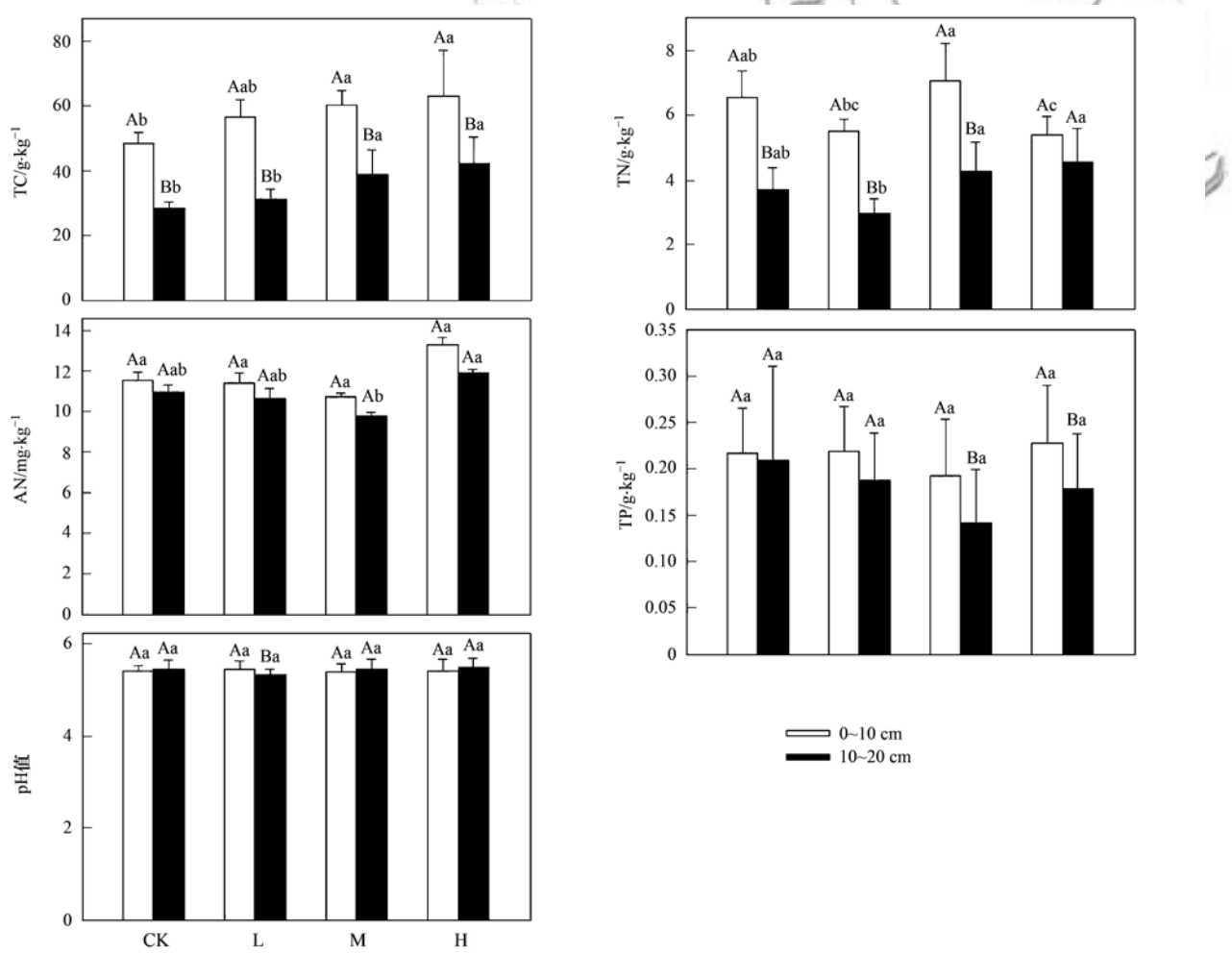
1.3 数据处理

利用单因素方差分析和 LSD 多重比较法对 4 种不同处理方式的单个化学性质及单个酶活性的差异显著性进行检验,利用 t 检验对同一处理的单个化学性质及单个酶活性进行显著性检验,以上统计检验使用了 SPSS 19 (SPSS for Windows, Chicago, USA). 基于不同处理方式及不同土层,分别运用 Smart 进行标准化主轴回归分析. 采用 Sigmaplot10.0 (Systat Software Inc., San Jose, CA, USA) 进行绘图.

2 结果与分析

2.1 土壤酶对氮添加的响应

BG 酶活性以及 ACP 酶活性在各处理间无显著差异;表层土的 NAG 酶活性在各处理间无显著差异,下层土壤高氮组的 NAG 酶活性显著大于对照和低氮组;高氮组表层土的 AKP 酶活性显著大于其他处理,下层土壤中、高氮组的 AKP 酶活性显著大于低氮组. 除高氮,BG 酶活性以及 NAG 酶活性在土层间均差异显著;除中氮,AKP 酶活性在土层间均差异显著;ACP 酶活性在各处理的土层间均差异显著(图 1).



不同大写字母代表该性质在不同土层间存在显著差异(P <0.05);不同小写字母代表该性质在不同处理间存在显著差异(P <0.05);
TC: 全碳; TN: 全氮; AN: 有效氮; TP: 全磷;CK: 对照处理; L: 低氮处理; M: 中氮处理; H: 高氮处理;下同

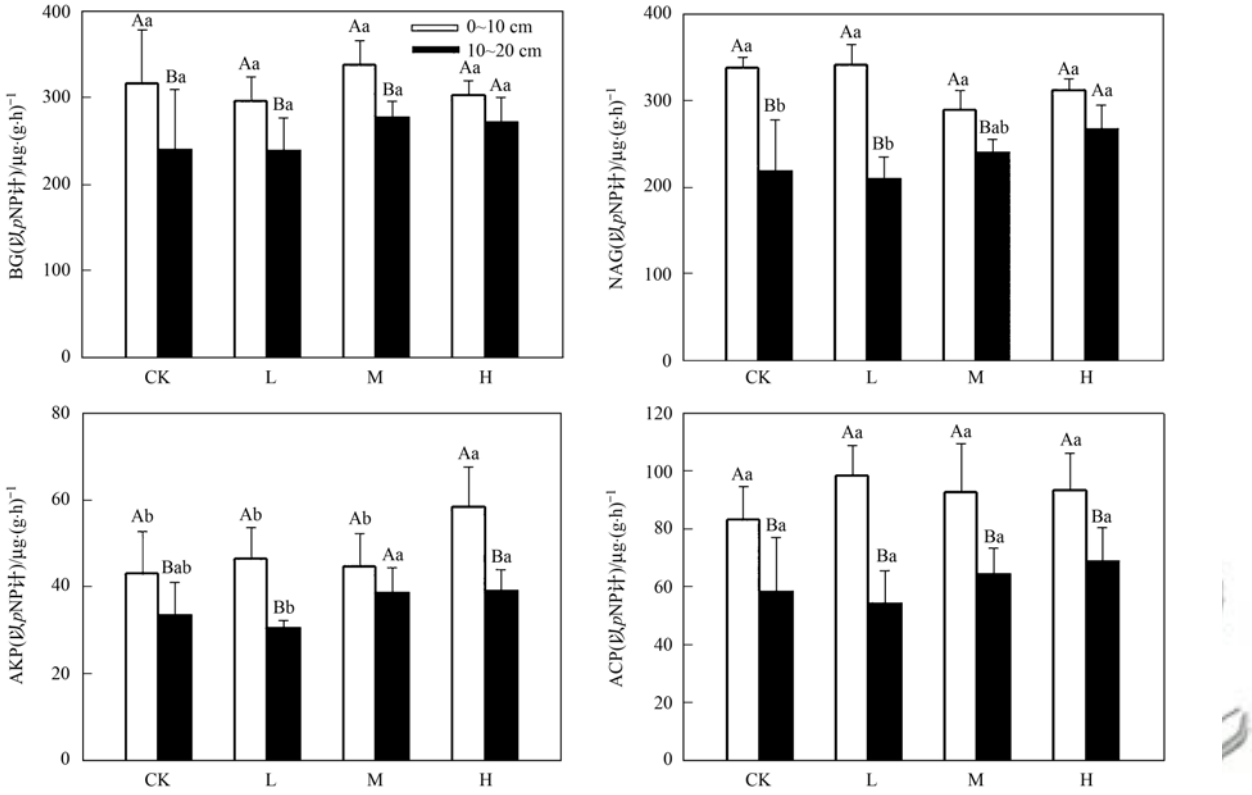
图 1 不同处理不同土层化学性质差异

Fig. 1 Chemical properties of different soil layers treated differently

2.2 土壤化学性质对氮添加的响应

土壤的 pH 在各处理的同一土层间以及同一处理的两个土层间均无显著差异;全碳含量随施氮浓度的上升而上升,中氮和高氮组全碳含量显著高于

对照，土层间均差异显著；全氮含量随着施氮梯度的改变有所改变但并不规律，土层间仅高氮组不显著；中氮组下层土壤的有效氮含量显著小于高氮组，两个土层间差异均不显著；全磷含量在不同施氮处理间差异不显著，且仅中、高氮组的土层间差异显著（图 2）.



不同大写字母代表该性质在不同土层间存在显著差异（$P<0.05$）；不同小写字母代表该性质在不同处理间存在显著差异（$P<0.05$）；BG：β-葡糖苷酶；NAG：*N*-乙酰-氨基葡萄糖苷酶；ACP：酸性磷酸酶；AKP：碱性磷酸酶；下同

图 2　不同处理不同土层酶活性差异

Fig. 2　Enzyme activity was different in different soil layers

2.3　土壤酶活性与碳氮磷的关系

全碳含量与 NAG 酶、BG 酶、AKP 酶和 ACP 酶活性均呈极显著正相关；全氮含量与 BG 酶活性呈显著正相关，与其它 3 种酶活性呈极显著正相关；有效氮与 NAG 酶、AKP 酶间存在显著和极显著正相关；全磷含量则只与 AKP 酶和 ACP 酶两种磷酸酶具有正相关关系（表 1）. 整体来看，化学性质与酶活性关系在不同处理间存在差异（图 1 和图 2）；AKP 酶与有效氮、全氮和全碳，以及 ACP 酶与全氮、全碳的回归斜率在 4 个处理间无显著差异；在全碳与 ACP 酶，全碳与 BG 酶，全碳与 NAG 酶及全氮与 NAG 酶中，回归斜率均在某种程度上随施氮浓度的增加而下降，即均为对照 > 低氮 > 中氮 > 高氮（图 3）. 表层土中，只有全碳和全磷与 AKP 酶活性显著相关和极显著相关；下层土中，全碳与 4 种水解酶间均存在极显著相关. 两个土层间比较，下层土壤的化学性质与酶活性间线性关系表现更为显著（见图 4）.

表 1　化学性质及酶活性相关性分析[1)]

Table 1　Correlation analysis of physicochemical properties and enzyme activities

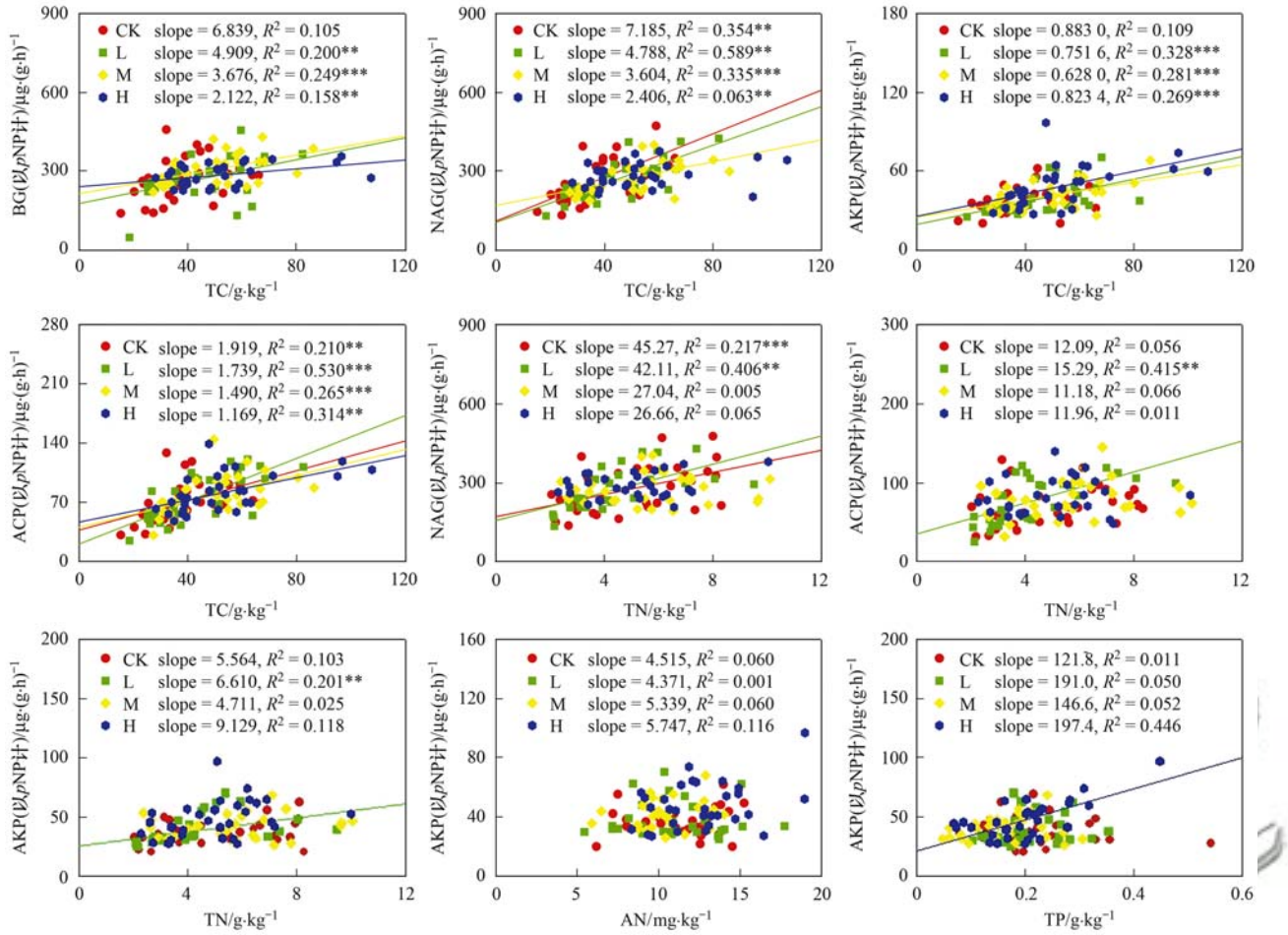
项目	TC	TN	AN	TP	pH
BG	0.394 **	0.213 *	0.057	0.001	−0.143
NAG	0.512 **	0.373 **	0.180 *	0.147	−0.006
ACP	0.579 **	0.311 **	0.105	0.192 *	0.001
AKP	0.545 **	0.299 **	0.243 **	0.246 **	0.018

1）* 表示显著相关，* * 表示极显著相关；AN：有效氮，TC：全碳，TN：全氮，TP：全磷，下同

3　讨论

3.1　土壤酶活性对氮沉降的响应

在本研究中随着施氮浓度的增加，不同施氮处理中的土壤 BG 和 ACP 活性变化不显著，而 NAG 和 AKP 活性有显著增强（图 1 和图 2），这与 Dong 等[14]在亚热带杉木（*Cunninghamia lanceolata*）人工林和 Shi 等[26]在温带草原的研究结果相一致. 氮的输入减缓了微生物与植物的氮竞争，微生物可利用氮增加，为平衡自身碳氮比，将增加对碳的需求，然而土壤的微域环境对其产生滞后效应，导致 BG 活性无显著增加[27]；只有当土壤中磷供应不足时，ACP 活性才会升高[28]，ACP 活性无明显变化说明施氮对该地块磷含量影响不明显，从化学计量角度考



* * 表示 P <0.01, * * * 表示 P <0.001; n = 120

图 3 化学性质与酶活性相关关系在不同施氮处理下的差异

Fig. 3 Correlation between physicochemical properties and enzyme activity was different under different nitrogen treatments

虑,则说明该地块磷含量较为充足. NAG 活性的增强则可能是因为氮添加增加植物生物量归还,导致土壤有机氮增加诱导 NAG 分泌[29],然而在 Kang 等[13]的研究结果中氮添加导致碳氮关键水解酶活性的下降,这可能与实验过程中的施肥水平以及所选择的代表性酶的种类不同有关. 本研究中,全碳含量与 4 种水解酶间相关性表现为极显著(表 1),说明全碳含量是土壤酶活性变化的关键因素,全氮含量、有效氮含量和全磷含量均对不同种类的酶存在影响.

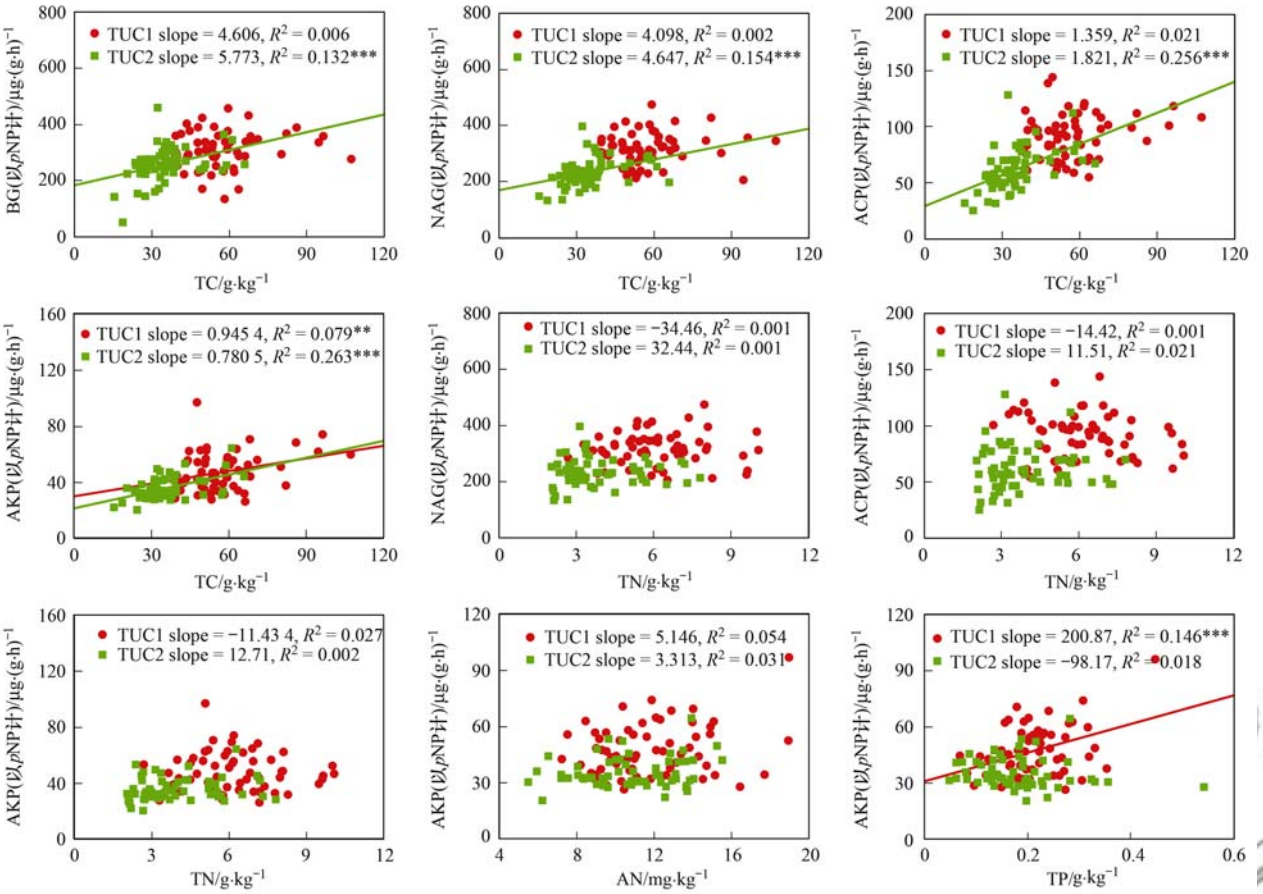
BG 酶和 NAG 酶活性在高氮组不同土层间差异不显著,而在其他组两个土层间差异显著,这是由于高氮组施肥量较大,对下层土壤影响明显,导致土层间差异不显著;ACP 酶活性在两个土层间一直存在显著差异,这说明土层对 ACP 酶影响更显著. 在同一施氮梯度下酶活性会随着土层加深而减弱,这与杨山等[30]的研究结果相一致.

3.2 土壤化学性质对氮沉降的响应

本实验中全碳含量随着施氮梯度的上升有显著升高,这可能是由于施氮降低矿化速率导致碳累积量的增加[31~33];此外,施氮促进植物生长,生物量的增加导致凋落物量增加,使来自凋落物的有机碳输入增加也是导致全碳含量升高的重要因素[34]. 全氮含量在不同施氮梯度间无显著差异,这可能是受到长期施肥影响,氮水解酶活性易受到外源氮添加影响且随施氮梯度增高而增高,导致氮素添加与消耗同时升高,致使氮含量表现不出显著差异. 陈林等[35]研究发现施加无机氮肥对全磷含量影响不显著,本研究中全磷含量无显著变化可能与施加氮肥种类相关. 实验发现氮添加处理对 pH 没有产生显著影响,这与 Shi 等[26]的研究有所区别,氮添加处理范围在其 pH 缓冲能力范围内[36],且施肥类型为硝酸铵,故本研究中氮添加没有引起 pH 值显著变化. 上层土壤的养分含量显著高于下层土壤,这可能是由于上层土壤与凋落物层接触较多,微生物活动更为活跃,根系分布也更加密集,养分循环相对较快,导致其上层土壤中碳氮含量显著高于下层土壤.

3.3 酶与化学性质间的关系

氮添加显著提高土壤中的碳含量,营养元素的摄入量增加促进了植物生长,根系分泌物增加,相应



TUC1：0～10 cm；TUC2：10～20 cm；＊＊表示 $P<0.01$，＊＊＊表示 $P<0.001$；$n=120$

图 4　化学性质与酶活性相关关系在不同土层中的差异

Fig. 4　Correlation between physicochemical properties and enzyme activity was different in different soil layers

的土壤酶活性显著增加[28]，从而提升土壤整体的酶活性. 在同一处理中，养分含量与对应的酶活性多存在线性相关关系，斜率随着施氮浓度的增加而升高，说明施氮在一定程度上加快了土壤中的养分循环. 上层土的养分含量以及酶活性均远高于下层土（图 1 和图 2），间接说明随着土层的加深，土壤养分状况变差，植物根系变少，微生物活动减弱，导致酶活性降低. 但是，上层土 3 种酶活性与土壤碳氮磷含量均不相关，而下层土 3 种酶活性仅与土壤碳含量显著正相关，这是由于土层间理化性质差异显著，施肥容易破坏土层的养分平衡.

在大多数温带森林中，氮素是营养限制因子[37]，本研究中施氮导致养分含量及碳、氮、磷相关酶活性的变化，外源氮添加提高了土壤养分状态及微生物活性，也间接提高了土壤酶活性，土壤酶活性与土壤有机质间存在显著正相关，这与 Taylor 等[38]的研究结果相符. 土壤微生物是土壤中最活跃的部分，微生物所分泌的土壤酶参与土壤养分循环与转化，酶活性的升高易造成养分淋溶并加剧土壤温室气体的排放. 不同施氮处理和不同土层中，4 种水解酶活性与全碳含量均表现出线性相关关系，与刘成刚等[39]的实验结果相一致，但全氮和磷的变化与李宗明等[40]研究结果相反，这可能与气候类型及地表植被，取样季节的差异性有关[41]. 本研究表明土壤全碳含量和氮含量是影响土壤酶活性的主要因子，至于其影响的内在机制还有待进一步深入地研究.

4　结论

（1）不同种类的酶活性对氮添加的响应有差异，NAG、AKP 活性随施氮显著升高，而 BG、ACP 无显著差异；施氮导致的部分水解酶活性的升高，可能增加土壤中养分元素淋溶的风险.

（2）土壤全碳含量随施氮梯度显著升高，而氮含量、磷含量、有效氮含量及 pH 无显著变化；上层土壤的化学性质（除 pH）及酶活性显著高于下层土壤.

（3）4 种水解酶均与碳含量存在线性相关关系，与其它部分养分含量之间存在相关关系，说明碳含量与酶活性存在更为密切的关系.

参考文献：

[1]　Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, *et al*. Human alteration

of the global nitrogen cycle: Sources and consequences[J]. Ecological Applications, 1997, **7**(3): 737-750.

[2] Galloway J N, Cowling E B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change[J]. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2002, **31**(2): 64-71.

[3] Galloway J N, Aber J D, Erisman J W, *et al*. The nitrogen cascade[J]. Bioscience, 2003, **53**(4): 341-356.

[4] Kanakidou M, Myriokefalitakis S, Daskalakis N, *et al*. Past, present, and future atmospheric nitrogen deposition[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2016, **73**(5): 2039-2041.

[5] LeBauer D S, Treseder K K. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed[J]. Ecology, 2008, **89**(2): 371-379.

[6] Woodmansee R G, Dodd J L, Bowman R A, *et al*. Nitrogen budget of a shortgrass prairie ecosystem[J]. Oecologia, 1978, **34**(3): 363-376.

[7] 张宝贵, 李贵桐. 土壤生物在土壤磷有效化中的作用[J]. 土壤学报, 1998, **35**(1): 104-111.
Zhang B G, Li G T. Roles of soil organisms on the enhancement of plant availability of soil phosphorus[J]. Acta Pedologica Sinica, 1998, **35**(1): 104-111.

[8] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. 土壤学报, 2004, **41**(4): 544-552.
Li Z P, Zhang T L, Chen B Y. Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, **41**(4): 544-552.

[9] 杨万勤, 王开运. 土壤酶研究动态与展望[J]. 应用与环境生物学报, 2002, **8**(5): 564-570.
Yang W Q, Wang K Y. Advances on soil enzymology[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2002, **8**(5): 564-570.

[10] Burns R J, DeForest J L, Marxsen J, *et al*. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, **58**: 216-234.

[11] Sinsabaugh R L. Phenol oxidase, peroxidase and organic matter dynamics of soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, **42**(2): 391-404.

[12] 田善义, 王明伟, 成艳红, 等. 化肥和有机肥长期施用对红壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2017, **37**(15): 4963-4972.
Tian S Y, Wang M W, Cheng Y H, *et al*. Long-term effects of chemical and organic amendments on red soil enzyme activities[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(15): 4963-4972.

[13] Kang H, Lee D. Inhibition of extracellular enzyme activities in a forest soil by additions of inorganic nitrogen[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2005, **36**(15-16): 2129-2135.

[14] Dong W Y, Zhang X Y, Liu X Y, *et al*. Responses of soil microbial communities and enzyme activities to nitrogen and phosphorus additions in Chinese fir plantations of subtropical China[J]. Biogeosciences, 2015, **12**(18): 5537-5546.

[15] 康海军, 李春光. 武夷山亚热带常绿阔叶林土壤养分及酶活性对氮沉降的响应[J]. 水土保持研究, 2019, **26**(2): 93-99.
Kang H J, Li C G. Responses of soil nutrients and enzyme activities to nitrogen deposition in subtropical evergreen broad-leaved forest in Wuyishan Mountain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, **26**(2): 93-99.

[16] Song Y Y, Song C C, Li Y C, *et al*. Short-term effect of nitrogen addition on litter and soil properties in *Calamagrostis angustifolia* freshwater marshes of Northeast China[J]. Wetlands, 2013, **33**(3): 505-513.

[17] 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): 2129-2133.
Tu L H, Hu H L, Hu T X, *et al*. Effects of simulated nitrogen deposition on soil enzyme activities in a *Betula luminifera* plantation in Rainy Area of West China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, **23**(8): 2129-2133.

[18] Guo P, Wang C Y, Jia Y, *et al*. Responses of soil microbial biomass and enzymatic activities to fertilizations of mixed inorganic and organic nitrogen at a subtropical forest in East China[J]. Plant and Soil, 2011, **338**(1-2): 355-366.

[19] 杜林森, 唐美铃, 祝贞科, 等. 长期施肥对不同深度稻田土壤碳氮水解酶活性的影响特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3901-3909.
Du L S, Tang M L, Zhu Z K, *et al*. Effects of long-term fertilization on enzyme activities in profile of paddy soil profiles[J]. Environmental Sciences, 2018, **39**(8): 3901-3909.

[20] Song L, Tian P, Zhang J B, *et al*. Effects of three years of simulated nitrogen deposition on soil nitrogen dynamics and greenhouse gas emissions in a Korean pine plantation of northeast China[J]. Science of the Total Environment, 2017, **609**: 1303-1311.

[21] 宋蕾, 田鹏, 张金波, 等. 黑龙江凉水国家级自然保护区大气氮沉降特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(10): 4490-4496.
Song L, Tian P, Zhang J B, *et al*. Characteristics of nitrogen deposition in Heilongjiang Liangshui national nature reserve[J]. Environmental Sciences, 2018, **39**(10): 4490-4496.

[22] Song L, Zhang J B, Müller C, *et al*. Responses of soil N transformations and N loss to three years of simulated N deposition in a temperate Korean pine plantation in northeast China[J]. Applied Soil Ecology, 2019, **137**: 49-56.

[23] Yang D X, Song L, Jin G Z. The soil C:N:P stoichiometry is more sensitive than the leaf C:N:P stoichiometry to nitrogen addition: A four-year nitrogen addition experiment in a *Pinus koraiensis* plantation[J]. Plant and Soil, 2019, **442**(1-2): 183-198.

[24] Zhao C Z, Zhu L Y, Liang J, *et al*. Effects of experimental warming and nitrogen fertilization on soil microbial communities and processes of two subalpine coniferous species in Eastern Tibetan Plateau, China[J]. Plant and Soil, 2014, **382**(1-2): 189-201.

[25] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, **34**(9): 1309-1315.

[26] Shi Y, Sheng L X, Wang Z Q, *et al*. Responses of soil enzyme activity and microbial community compositions to nitrogen addition in bulk and microaggregate soil in the temperate steppe of Inner Mongolia[J]. Eurasian Soil Science, 2016, **49**(10): 1149-1160.

[27] Keeler B L, Hobbie S E, Kellogg L E. Effects of long-term nitrogen addition on microbial enzyme activity in eight forested and grassland sites: Implications for litter and soil organic matter decomposition[J]. Ecosystems, 2009, **12**(1): 1-15.

[28] 宋震震, 李絮花, 李娟, 等. 有机肥和化肥长期施用对土壤活性有机氮组分及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, **20**(3): 525-533.
Song Z Z, Li X H, Li J, *et al*. Long-term effects of mineral versus organic fertilizers on soil labile nitrogen fractions and soil enzyme activities in agricultural soil[J]. Journal of Plant

Nutrition and Fertilizer, 2014, **20**(3): 525-533.

[29] Chen R R, Blagodatskaya E, Senbayram M, *et al*. Decomposition of biogas residues in soil and their effects on microbial growth kinetics and enzyme activities[J]. Biomass and Bioenergy, 2012, **45**: 221-229.

[30] 杨山, 李小彬, 王汝振, 等. 氮水添加对中国北方草原土壤细菌多样性和群落结构的影响[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(3): 739-746.
Yang S, Li X B, Wang R Z, *et al*. Effects of nitrogen and water addition on soil bacterial diversity and community structure in temperate grasslands in northern China[J]. Journal of Applied Ecology, 2015, **26**(3): 739-746.

[31] Pregitzer K S, Burton A J, Zak D R, *et al*. Simulated chronic nitrogen deposition increases carbon storage in Northern temperate forests[J]. Global Change Biology, 2008, **14**(1): 142-153.

[32] 黄玉梓, 樊后保, 李燕燕, 等. 氮沉降对杉木人工林生长及林下植被碳库的影响[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(4): 1407-1412.
Huang Y Z, Fan H B, Li Y Y, *et al*. Effects of nitrogen deposition on tree growth and understory carbon pools in Chinese fir plantation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, **18**(4): 1407-1412.

[33] 卢艺, 李瑞瑞, 胡菲, 等. N 添加对林地土壤脲酶活性及动力学参数的影响[J]. 河北农业大学学报, 2019, **42**(2): 48-53.
Lu Y, Li R R, Hu F, *et al*. Impacts of nitrogen supply on enzyme activity and kinetics parameters of forest soil urease[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2019, **42**(2): 48-53.

[34] 孙锋, 赵灿灿, 李江涛, 等. 与碳氮循环相关的土壤酶活性对施用氮磷肥的响应[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(4): 1016-1023.
Sun F, Zhao C C, Li J T, *et al*. Response of soil enzyme activities in soil carbon and nitrogen cycles to the application of nitrogen and phosphate fertilizer [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(4): 1016-1023.

[35] 陈林, 张佳宝, 赵炳梓, 等. 不同施氮水平下土壤的生化性质对干湿交替的响应[J]. 土壤学报, 2013, **50**(4): 675-683.
Chen L, Zhang J B, Zhao B Z, *et al*. Soil fertility and its response to drying-wetting alternation as affected by nitrogen fertilization rate[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, **50**(4): 675-683.

[36] 方瑛, 马任甜, 安韶山, 等. 黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1121-1127.
Fang Y, Ma R T, An S S, *et al*. Heidaigou opencast coal mine: Soil enzyme activities and soil physical and chemical properties under different vegetation restoration [J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 1121-1127.

[37] 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.
Shen F F, Yuan Y H, Fan H B, *et al*. Effects of elevated nitrogen deposition on soil organic carbon mineralization and soil enzyme activities in a Chinese fir plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(2): 517-527.

[38] Taylor J P, Wilson B, Mills M S, *et al*. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, **34**(3): 387-401.

[39] 刘成刚, 吴永波, 薛建辉, 等. 刺槐滇柏混交林及纯林土壤酶与养分相关性研究[J]. 土壤通报, 2012, **43**(6): 1427-1431.
Liu C G, Wu Y B, Xue J H, *et al*. The relationship between soil enzyme activity and soil nutrient in pure and mixed plantations of *Robinia pseudoacacia* and *Cupressus duclouxiana*[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, **43**(6): 1427-1431.

[40] 李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 等. 模拟氮沉降对干旱半干旱温带草原土壤细菌群落结构的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5665-5671.
Li Z M, Shen J P, Zhang L M, *et al*. Effects of stimulated nitrogen deposition on the bacterial community structure of semiarid temperate grassland[J]. Environmental Science, 2018, **39**(12): 5665-5671.

[41] Nannipieri P, Trasar-Cepeda C, Dick R P. Soil enzyme activity: A brief history and biochemistry as a basis for appropriate interpretations and meta-analysis[J]. Biology and Fertility of Soils, 2018, **54**(1): 11-19.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 41 No. 4

Apr. 15, 2020

CONTENTS

$PM_{2.5}$ Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning ····· LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, *et al.* (1513)

Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities ····· LI Rui, LI Qing, XU Jian, *et al.* (1520)

Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models ····· HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, *et al.* (1535)

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in $PM_{2.5}$ in Beijing and Six Surrounding Cities ····· ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, *et al.* (1544)

Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period ····· LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, *et al.* (1550)

Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu ····· WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, *et al.* (1561)

Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer ····· YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Yu-fen, *et al.* (1573)

Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry ····· WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, *et al.* (1582)

Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants ····· DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, *et al.* (1589)

Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China ····· ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, *et al.* (1594)

Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea ····· YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, *et al.* (1607)

Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaoqing River Estuary in Recent Ten Rears ····· FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, *et al.* (1619)

Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province ····· MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, *et al.* (1629)

Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir ····· MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, *et al.* (1636)

Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province ····· ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, *et al.* (1648)

Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland ····· WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, *et al.* (1657)

Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir ····· ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, *et al.* (1666)

Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake ····· ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, *et al.* (1676)

Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone ····· LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)

Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar ····· DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, *et al.* (1692)

Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments ····· YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, *et al.* (1700)

Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing ····· CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, *et al.* (1709)

3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment ····· HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, *et al.* (1716)

Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO_2 Ceramic Ring Particle Electrode ····· SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, *et al.* (1725)

Degradation of AO7 with Magnetic Fe_3O_4-CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System ····· XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, *et al.* (1734)

Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism ····· SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, *et al.* (1743)

Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation ····· ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, *et al.* (1752)

Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue ····· CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, *et al.* (1761)

Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(Ⅱ) ····· BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, *et al.* (1770)

Construction and Denitrification Performance of A^2/O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System ····· LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, *et al.* (1779)

Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants ····· YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, *et al.* (1787)

Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor ····· WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, *et al.* (1794)

Realization Process of Nitritation and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment ····· ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, *et al.* (1801)

Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs ····· CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, *et al.* (1808)

Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO_2) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge ····· YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, *et al.* (1816)

Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities ····· LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, *et al.* (1825)

Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests ····· HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, *et al.* (1838)

Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China ····· YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, *et al.* (1847)

Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi ····· CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, *et al.* (1855)

Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing ····· WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, *et al.* (1864)

Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar ····· LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, *et al.* (1871)

Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer ····· XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, *et al.* (1880)

Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil ····· DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)

Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals ····· YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, *et al.* (1904)

Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland ····· YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)

Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field ····· ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, *et al.* (1921)

Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw ····· XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, *et al.* (1930)

Effect and Approach of *Enteromorpha prolifera* Biochar to Improve Coastal Saline Soil ····· WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, *et al.* (1941)

Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert ····· MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, *et al.* (1950)

Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation ····· LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, *et al.* (1960)

Consumption Capacity of N_2O in Paddy Soil and the Response Mechanism of *nosZ-I*-containing Communities ····· GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, *et al.* (1968)

Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei ····· CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)

Relationship Between Urban Industrialization and $PM_{2.5}$ Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC ····· LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, *et al.* (1987)