

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示
李勣之, 姜璐, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年2月

第43卷 第2期
Vol.43 No.2

目次

综述

- 不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 李助之, 姜蓉, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁 (577)
再生水水质稳定性评价指标与体系 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国 (586)

研究报告

- 兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 黄文, 王胜利 (597)
基于多种新型受体模型的 PM_{2.5} 来源解析对比 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂 (608)
华中地区夏季 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源分析 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铨, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (619)
淄博 2021 年元宵节 PM_{2.5} 水溶性离子污染特征 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文 (629)
浙江省大气颗粒物 PM_{2.5} 中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲 (639)
2001~2019 年气象条件对江苏省 PM_{2.5} 分布的影响 潘晨, 康志明 (649)
基于神经网络和数值模型的重点区域 PM_{2.5} 预报比较分析 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (663)
2015~2020 年海南省臭氧时空变化及其成因分析 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤 (675)
济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜 (686)
山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源 (696)
基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善 PMF 源解析效果 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯 (707)
日照市夏季 VOCs 物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 姚维杰, 王大玮, 谢付堂, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发 (714)
泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤 (723)
典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜 (735)
2000~2020 年黄河流域植被时空演化驱动机制 田智慧, 任祖光, 魏海涛 (743)
西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 徐森, 李思亮, 钟君 (752)
生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮矿化和淋失特征的影响 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏 (762)
不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送 (770)
雨源型城市河流污染特征及水质联合评价: 以深圳龙岗河为例 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮 (782)
廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌 (795)
北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 郭芝芝, 苏振华, 邱琰茗, 郭道宇 (803)
河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素: 以石家庄为例 陈召莹, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰 (813)
青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊 (826)
鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强 (837)
鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赞 (847)
汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华 (859)
基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 王子娇, 李叙勇 (867)
新冠疫情下武汉典型饮用水水源中 DBPs 污染特征与风险评估 张坤峰, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨 (878)
铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 齐鹏, 胡春, 邢学群, 毕志浩, 李泽松 (887)
氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 柴铨, 许路, 金鑫, 石炬, 吴晨曦, 金鹏康 (896)
环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升 (907)
冷冻 PN/A 颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张琦英, 文言, 钱飞跃 (920)
不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞 (928)
云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波 (936)
山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 张丁, 黄容, 高雪松 (946)
地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索: 以农业发达地区为例 鞠铁男, 雷梅 (957)
西南地质高背景区蔬菜 Pb 的安全生产阈值与土地质量类别划分 穆德苗, 孙约兵 (965)
典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰 (975)
矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬 (985)
不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘祎丹, 阮心玲, 王洋洋 (995)
温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚 (1004)
两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全的影响 王港, 余海英, 李廷轩, 唐婵 (1015)
复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (1023)
产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦 Cd 吸收效应 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 庞发虎, 韩辉 (1031)
土壤 *phoC* 和 *phoD* 微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 杨文娜, 余冻, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 王子芳, 高明 (1040)
刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 李文杰, 张颖皎, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娟, 韩新辉 (1050)
中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (1059)
稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣 (1069)
模拟及实际根系分泌物对苤蓝土壤微生物群落的影响 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗 (1077)
德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君 (1089)
陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲伟, 龙小翠 (1097)
长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗 (1108)
《环境科学》征订启事 (618) 《环境科学》征稿简则 (761) 信息 (685, 935, 956)

中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征

焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲*

(福建农林大学林学院, 福州 350002)

摘要: 土壤酶活性是表征土壤微生物养分需求与养分限制状况的重要指标. 本文以中亚热带不同林龄(9、17、26、34 和 43 a)马尾松人工林为研究对象, 通过测定 β -葡萄糖苷酶(BG)、*N*-乙酰- β -氨基葡萄糖苷酶(NAG)、亮氨酸氨基肽酶(LAP)、酸性磷酸酶(AP)、多酚氧化酶(POX)和过氧化物酶(POD)活性, 并计算土壤酶化学计量比, 探讨不同发育阶段马尾松人工林土壤微生物的养分限制状况. 结果表明, 土壤 BG、NAG、AP、POX 和 POD 活性均随着林龄增加呈上升趋势, 土壤 LAP 活性随着林龄的增加呈波动式上升, 其中 17 a 生马尾松林 LAP 活性最低. 土壤酶 C:N:P 化学计量比约为 1:1:0.56 与全球生态系统酶 C:N:P 化学计量比 1:1:1 相偏离; 其中酶 C:N 随着林龄增加而增加, 酶 N:P 随着林龄增加而减少, 二者均在 17 a 后趋于稳定; 酶 N:P 在林龄间无显著差异; 酶化学计量的向量长度在林龄间无显著差异, 向量角度随着林龄增加而增加, 在 17 a 后趋于稳定但角度均小于 45°. 冗余分析(RDA)结果显示, 土壤碳质量指数与 pH 是影响土壤酶活性及其化学计量比的主要因子. 结果表明中亚热带不同生长阶段马尾松人工林土壤微生物均受到氮限制且随着林龄增加氮限制有所缓和, 而对 P 的需求逐渐增强. 因此, 建议未来马尾松人工林的经营应在马尾松生长初期增施氮肥, 随着马尾松的生长发育在施氮肥的同时施磷肥以维持马尾松人工林的生产力和可持续发展.

关键词: 马尾松; 林龄; 土壤酶活性; 土壤酶化学计量; 养分限制

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-1059-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202107043

Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of *Pinus massoniana* Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas

JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, LIU Xian, HU Ya-lin, WANG Yu-zhe*

(College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Soil enzyme activity is an important index to characterize the nutrient requirements and nutrient limitations of soil microorganisms. In this study, *Pinus massoniana* plantations of different stand ages (9, 17, 26, 34, and 43 a) in mid-subtropical China were taken as the research object; the activities of β -glucosidase (BG), *N*-acetyl- β -glucosaminidase (NAG), leucine amino-peptidase (LAP), acid phosphatase (AP), polyphenol oxidase (POX), and peroxidase (POD) were determined; and soil enzyme stoichiometric ratios were also calculated to investigate the soil microbial nutrient limitations of *P. massoniana* plantation development. The results showed that the activities of BG, NAG, AP, POX, and POD were enhanced with the increase in stand age, and the activity of LAP was the lowest at 17 a, which showed a significant difference and fluctuated among the neighboring stand ages. The soil enzyme C:N:P stoichiometric ratio was 1:1:0.56, which deviated from the global ecosystem enzyme C:N:P stoichiometric ratio (1:1:1). The enzyme C:N increased, whereas the enzyme N:P decreased, with increasing stand age, and both ratios tended to be stable after 17 a. There was no significant difference in enzyme N:P among different stand ages. The vector length of enzyme stoichiometry was not significantly different among the five stand ages. The vector angles increased with the increase in stand ages and tended to be stable after 17 a of stand age, but the angles were less than 45°. Redundancy analysis (RDA) revealed that soil carbon quality index and pH were the main factors influencing soil enzyme activity and the associated stoichiometric ratio. Our findings indicated that *P. massoniana* plantation soil microorganisms at different growth stages were all subjected to N limitation, and the N limitation was alleviated with the increase in stand age; however, the P requirement was gradually enhanced. Therefore, the management of *P. massoniana* plantations should take care to increase nitrogen fertilizer at the early growth stage of *P. massoniana*, and more phosphorus fertilizers need to be applied with nitrogen at the late growth stage in order to maintain the productivity and sustainable development of *P. massoniana* plantations.

Key words: *Pinus massoniana*; stand age; soil enzyme activity; soil coenzymatic stoichiometry; nutrient limitation

土壤酶是由土壤微生物活动、植物根系分泌以及植物残体和土壤动物区系分解产生的一类具有催化能力的蛋白质, 是生态系统的生物催化剂^[1]. 土壤酶在促进土壤营养元素的生物地球化学循环、腐殖质的合成和分解以及有机质的降解和转化等方面起着十分重要的作用^[2,3]. 由于土壤酶对环境变化的敏感性使其活性常作为评价土壤肥力、质量与土壤系统健康状况的指标^[4~6]. 土壤酶在调控物质循环的同时, 其活性受到诸多环境因子的影响. 有研究表明, 土壤酶活性的增强与土壤养分含量的提高密切相关^[1], 土壤中有有机质以及氮、磷和钾等营养元

素含量的高低均对土壤酶活性产生影响^[7]. 于德良等^[8]的研究结果发现, 有机质、碱解氮和全磷分别是土壤蔗糖酶、蛋白酶和磷酸酶活性的主要影响因素. 吕来新等^[9]的研究表明部分水解酶活性会因施氮而提高. 由于土壤酶与土壤微生物之间耦合关系的复杂性以及土壤酶对环境因子变化较为敏感^[10],

收稿日期: 2021-07-06; 修订日期: 2021-07-28

基金项目: 国家自然科学基金促进海峡两岸科技合作联合基金项目(U1805243)

作者简介: 焦鹏宇(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为森林土壤碳氮循环, E-mail: jiaopengyu@126.com

* 通信作者, E-mail: wangyuzhe@fafu.edu.cn

土壤酶活性对土壤肥力等环境因素变化的响应机制仍不清楚。

土壤酶化学计量是指生态系统中参与营养元素 C、N 和 P 循环的土壤酶活性的比值,包括参与 C 循环的 β -葡萄糖苷酶(BG);参与 N 循环的 *N*-乙酰- β -氨基葡萄糖苷酶(NAG)、亮氨酸氨基肽酶(LAP);参与 P 循环的酸性磷酸酶(AP)等^[11,12]。土壤酶化学计量能够反映微生物群落养分需求与土壤养分资源限制之间的生物地球化学平衡模式^[13],可以指示土壤微生物养分需求与养分限制状况^[14]。Sinsabaugh 等^[15]的研究发现,全球尺度上土壤酶化学计量比 $\ln(\text{BG}) : \ln(\text{NAG} + \text{LAP}) : \ln(\text{AP})$ 近似为 1:1:1,在区域尺度上由于环境条件与生物因子等因素存在差异,其实际值有所偏离。许森平等^[16]的研究发现温度、氮沉降和降水均能影响土壤酶化学计量比。钟泽坤等^[17]的研究发现植被与土壤理化性质的交互作用是影响土壤酶活性及其化学计量比的关键因子。Cui 等^[18]对黄土高原不同植被和土壤类型的研究发现,植被群落类型对酶化学计量比的影响大于土壤类型。尽管不同研究都发现酶化学计量与生态因子间联系紧密,但各区域不同因子对土壤酶化学计量比影响的贡献比例仍不明确,因此对特定区域土壤酶化学计量比的实际变化及其主要影响因素仍需进一步研究。

马尾松(*Pinus massoniana*)是我国亚热带重要的先锋和速生用材树种,具有适应性强和生长迅速的特点^[19]。根据第九次全国森林资源清查结果,马尾松现有林木株数合计 100.33 亿株,蓄积 9.08 亿 m^3 ^[20]。虽然马尾松具有耐瘠薄易栽培的特性,但粗放式经营使马尾松林地土壤肥力逐渐衰退,导致其林分生产力和产值降低^[21]。由于马尾松不同生长阶

段凋落物产量、质量和分解速率等存在差异^[22],不同林龄马尾松人工林土壤养分状况会发生改变。此外,不同生长阶段的马尾松人工林对养分需求存在不同^[23],马尾松生长过程中养分限制因子也因此可能会发生变化。目前关于马尾松人工林的研究主要集中在不同种植方式^[24,25]、病虫害防治^[26]和混交林营造^[27]等方面,对不同生长阶段马尾松人工林土壤养分限制状况鲜见报道。为此,本文以福建龙岩不同林龄马尾松人工林为研究对象,通过测定土壤 C、N 和 P 转化酶活性,并计算土壤酶化学计量比,探究马尾松人工林土壤微生物的养分限制因子,旨在为马尾松人工林施肥管理和可持续经营提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省龙岩市新罗区(24°47'02" ~ 25°35'22" N, 116°40'29" ~ 117°20'00" E),地处福建西南部,属亚热带季风气候区,年均温 16 ~ 20℃,年平均降水量 1 500 ~ 1 900 mm,平均无霜期 291 d,平均海拔约 685 m。全区人工林面积约 $5.58 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占全区林分面积(约 $16.67 \times 10^4 \text{ hm}^2$)的 33.5%,其中 1/3 为马尾松人工林(面积约 $1.87 \times 10^4 \text{ hm}^2$)。区内林地树种以马尾松为主,树种单一,林业有害生物马尾松毛虫和松材线虫病时有发生,林分生产力低下,立地条件差,急需加以改造才能提高林分质量和防护效果。本实验选取立地条件基本一致的不同林龄(9、17、26、34 和 43 a)马尾松人工林为研究对象,不同林龄样地间距离不超过 2 km,同一林龄样方之间间距不小于 30 m,样地基本概况见表 1。

表 1 样地基本概况

Table 1 Basic characteristics of sampling sites

林龄 /a	面积 /hm ²	平均胸径 /cm	平均树高 /m	海拔 /m	郁闭度	坡向	坡度/(°)	密度 /株·hm ⁻²
9	1.25	7.5	5.3	303	0.3	西南	24	1 500
17	1.80	11.0	6.5	359	0.55	东南	21	1 800
26	0.40	15.1	10.7	383	0.4	西南	22	1 500
34	0.56	17.9	10.7	307	0.35	西南	19	600
43	1.93	26.4	18.9	316	0.5	东南	14	900

1.2 样品采集与处理

在每个林龄马尾松人工林中,设置 4 个 20 m × 20 m 样方,共 20 个样方。用土钻(3.5 cm 直径)在每个样方随机选取 9 个点,去除表面枯枝落叶层,取 0 ~ 10 cm 新鲜土样,每 3 个点样品混合后作为一个土样,5 个林龄共 60 个土样。土壤样品带回实验室

后,先剔除土样中石砾、植物根等杂物,过 2 mm 筛。过筛后土壤分为 2 份:一份以 4℃ 冷藏用于测定土壤含水量、铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、可溶性有机氮(DON)、可溶性有机碳(DOC)以及土壤 C、N 和 P 酶活性;一份自然风干、研磨后用于测定 pH、全氮、全磷、全碳和有效磷。

1.3 土壤理化性质测定

土壤含水量用烘干法测定; 土壤 pH 采用雷磁 PHS-3C 型 pH 计进行测定(水土比 5:1); 将土壤样品风干后使用球磨机(净信, 上海)粉碎, 随后使用元素分析仪(Vario ISOTOPE cube, 德国)测定土壤全碳(TC)和全氮(TN); 用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮制备待测液, 用钼锑抗比色法测定土壤全磷(TP); 取 8 g 风干土, 用 AB-DTPA 浸提法[$1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{NH}_4\text{HCO}_3\text{-}0.005 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{DTPA}$ (pH = 7.6)] 浸提, 并用 ICP-OES(PE Optima 8000, 美国)测定土壤有效磷; 土壤铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)与硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)的测定是将土壤样品用 $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{KCl}$ 溶液浸提后, 用全自动间断分析仪(SmartChem 200, 意大利)测定; 土壤可溶性有机碳(DOC)采用总有机碳分析仪(TOC-VCPH/CN, 日本)测定; 土壤可溶性有机氮(DON)用可溶性全氮(TSN)和可溶性无机氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 之和)含量之差计算。

1.4 土壤酶活性测定

土壤酶活性使用比色法测定. 本研究测定了 6 种酶活性, 分别为 β -葡萄糖苷酶(BG)、*N*-乙酰- β -氨基葡萄糖苷酶(NAG)、亮氨酸氨基肽酶(LAP)、酸性磷酸酶(AP)、多酚氧化酶(POX)和过氧化物酶(POD). 测定原理, β -葡萄糖苷酶(BG): 分解对-硝基苯- β -D-吡喃葡萄糖苷生成对-硝基苯酚, 后者在 400 nm 有最大吸收峰; *N*-乙酰- β -氨基葡萄糖苷酶(NAG): 分解 *N*-乙酰- β -氨基葡萄糖苷生成对硝基苯酚, 后者在 400 nm 有最大吸收峰; 亮氨酸氨基肽酶(LAP): 分解 L-亮氨酸对硝基苯胺生成对硝基苯胺, 后者在 405 nm 有最大吸收峰; 酸性磷酸酶(AP): 可将酪蛋白水解产生酪氨酸, 在碱性条件下, 酪氨酸还原磷钼酸化合物生成钨蓝, 在 680 nm 有特征吸收峰; 多酚氧化酶(POX): 可催化邻苯二酚和 D-儿茶素生成有色产物, 其显色物质在 460 nm 处有最大吸收峰; 过氧化物酶(POD)能在 H_2O_2 中催化邻甲氧基苯酚生成四邻甲氧基苯酚, 该产物在 470 nm 处有特征吸收峰. 根据测定原理, 使用酶标仪(Labsystems Multiskan MS, 芬兰)在特定波长下读取吸光值, 通过测定吸光值升高速率来计算各种土壤酶活性. 酶活性结果以每天单位质量土样产生酶的摩尔质量来表示[$\mu\text{mol}\cdot(\text{d}\cdot\text{g})^{-1}$].

1.5 数据处理

文中将部分数据取对数转化以符合正态分布和方差齐性, 酶 C: N: P 通过 $\ln(\text{BG}): \ln(\text{NAG} + \text{LAP}): \ln(\text{AP})$ 计算. 采用基于酶的木质素-纤维素指数(LCI)评价土壤碳质量指数^[28], 计算公式为:

$$\text{LCI} = \ln(\text{POX})/(\ln\text{POX} + \ln\text{BG}) \quad (1)$$

式中, POX 为多酚氧化酶, BG 为 β -葡萄糖苷酶, $\ln(\text{POX})$ 与 $\ln(\text{BG})$ 分别为难、易分解碳的相对丰度. 采用公式(2)和(3)计算酶化学计量的向量长度(Vector L)和角度(Vector A)^[28]:

$$\text{Vector L} = \{[\ln(\text{BG})/\ln(\text{NAG} + \text{LAP})]^2 + [\ln(\text{BG})/\ln(\text{AP})]^2\}^{1/2} \quad (2)$$

$$\text{Vector A} = \text{Degrees}\{\text{ATAN2}[\ln(\text{BG})/\ln(\text{AP}), \ln(\text{BG})/\ln(\text{NAG} + \text{LAP})]\} \quad (3)$$

式中, NAG 为 *N*-乙酰- β -氨基葡萄糖苷酶, LAP 为亮氨酸氨基肽酶. Vector L 的长短表示土壤微生物碳限制程度的高低; Vector A 的大小表示土壤微生物氮、磷的限制程度的高低, 当 Vector A 偏离 45° 表示受氮限制或者磷限制, 向上偏离程度越大, 受磷限制越强, 向下偏离程度越大, 受氮限制越强.

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)分析不同林龄间马尾松人工林土壤理化性质、土壤酶活性、酶化学计量比以及 Vector L 和 Vector A 的差异. 通过 R-vegan 包的 decorana 函数执行不同林龄马尾松人工林土壤理化性质与酶活性及其计量比之间关系适用线性模型冗余分析(RDA). 然后使用方差膨胀因子(VIF)判断解释变量间的共线性程度, $\text{VIF} > 10$ 则存在共线问题需剔除该变量. 通过 Pearson 相关分析和 RDA 分析不同林龄土壤理化性质与土壤酶活性及其化学计量比的关系. 利用 SPSS 22.0 软件进行 ANOVA 和 Pearson 分析, RDA 及 VIF 计算在 R 语言的 vegan 程序包中完成. 利用 Rstudio 作图, 图表中数据均采用平均值 $\pm$ 标准误差表示.

2 结果与分析

2.1 不同林龄马尾松人工林土壤理化性质

马尾松人工林土壤整体呈酸性(pH 3.83 ~ 6.48), 随林龄增加呈逐渐降低趋势(表 2). 34 a 和 43 a 林地土壤含水量、DOC 和 DON 显著高于 9、17 和 26 a 林地($P < 0.05$). 马尾松林土壤 TN、TC 和 TP 含量均随着林龄增加呈上升趋势, 在 34 a 达到最大值且显著高于其他林龄($P < 0.05$); 9 a 与 17 a 马尾松林土壤 TN 和 TC 含量显著小于 43 a 与 26 a 林地($P < 0.05$); 9 a 林地土壤 TP 含量显著低于 17、34 与 43 a 林地($P < 0.05$), 其余林龄间无显著差异($P > 0.05$). 土壤有效磷含量在 9 a 和 17 a 林地中含量最低且显著低于其他林地($P < 0.05$). 土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在 34 a 林地含量最高且显著大于其他林龄($P < 0.05$). 43 a 马尾松人工林土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量最高且显著大于其他林龄($P < 0.05$), 其他林龄间无显著差异($P > 0.05$). 17 a 马尾松林土壤 C/N 最高且显著大于其他林地($P < 0.05$), 9 a 林地最低

且显著低于其他林龄 ($P < 0.05$). 土壤 C/P 比和 N/P 均随着林龄的增加先增加后降低, 在 26 a 林地中达到最大值, 其中 26、34 与 43 a 马尾松林显著大于

9 a 与 17 a ($P < 0.05$). 土壤 LCI 随着林龄的增加而降低, 9 a 马尾松林 LCI 显著高于其他林龄 ($P < 0.05$).

表 2 不同林龄马尾松人工林土壤理化性质¹⁾

Table 2 Soil physicochemical properties in *Pinus massoniana* plantations at different stand ages

土壤性质	林龄/a				
	9	17	26	34	43
pH	4.66 ± 0.04b	6.21 ± 0.05a	4.61 ± 0.03b	4.31 ± 0.05c	4.00 ± 0.05d
含水量/%	13.75 ± 1.38b	13.72 ± 1.28b	11.04 ± 0.81b	21.77 ± 0.97a	20.12 ± 1.28a
ω (全氮)/g·kg ⁻¹	0.51 ± 0.09c	0.82 ± 0.06c	1.77 ± 0.17b	2.67 ± 0.27a	1.95 ± 0.24b
ω (全碳)/g·kg ⁻¹	7.80 ± 1.90c	17.45 ± 1.53c	31.86 ± 3.31b	46.28 ± 5.74a	33.79 ± 4.56b
ω (全磷)/g·kg ⁻¹	0.19 ± 0.02c	0.31 ± 0.02b	0.26 ± 0.03bc	0.41 ± 0.05a	0.31 ± 0.03b
ω (有效磷)/mg·kg ⁻¹	1.26 ± 0.11c	1.44 ± 0.22c	4.11 ± 0.20a	2.60 ± 0.25b	3.26 ± 0.37b
ω (可溶性有机碳)/mg·kg ⁻¹	163.41 ± 30.38b	189.49 ± 21.51b	207.25 ± 9.76b	439.99 ± 13.18a	425.06 ± 24.66a
ω (铵态氮)/mg·kg ⁻¹	3.82 ± 0.71c	3.56 ± 0.82c	7.46 ± 0.98b	11.67 ± 1.91a	3.69 ± 0.62c
ω (硝态氮)/mg·kg ⁻¹	1.27 ± 0.53b	1.26 ± 0.44b	4.55 ± 0.55b	4.25 ± 1.11b	11.14 ± 2.09a
ω (可溶性有机氮)/mg·kg ⁻¹	52.75 ± 1.52b	52.63 ± 2.30b	51.49 ± 1.02b	70.82 ± 2.75a	67.20 ± 2.60a
C/N	13.85 ± 1.11c	21.33 ± 1.19a	17.93 ± 0.60b	16.95 ± 0.44b	17.05 ± 0.55b
C/P	37.92 ± 5.84b	61.43 ± 8.89b	144.83 ± 24.45a	123.71 ± 18.20a	115.51 ± 18.64a
N/P	2.58 ± 0.25b	2.75 ± 0.26b	8.08 ± 1.33a	7.25 ± 1.03a	6.66 ± 0.98a
土壤碳质量指数	0.62 ± 0.01a	0.58 ± 0.00b	0.56 ± 0.01c	0.56 ± 0.00c	0.55 ± 0.00c

1) C/N 表示全碳与全氮的比值, C/P 表示全碳与全磷的比值, N/P 表示全氮与全磷的比值; 不同小写字母代表不同林龄之间差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 不同林龄马尾松人工林土壤酶活性及酶化学计量特征

马尾松人工林土壤 BG、NAG、AP、POX 和 POD 活性均随林龄增加呈增加趋势(图 1), 土壤 LAP 活性随林龄增加呈波动式上升. 26、34 和 43 a 林龄间 BG、POD 活性显著大于 9 a 和 17 a 林地 ($P < 0.05$). 9 a 马尾松林地土壤 POX 酶活性最低且显著小于其他林地 ($P < 0.05$). 9 a 和 17 a 马尾松林土壤 NAG 活性显著低于 26、34 和 43 a 林地 ($P < 0.05$), 其余林龄间无显著差异 ($P > 0.05$). 土壤 AP 活性随林龄变化整体呈增加趋势, 但在 33 a 林地中酶活性有所下降, 其中 26 a 和 34 a 林龄间与 34 a 和 43 a 林龄间均无显著差异 ($P > 0.05$), 其余每两个林龄间均存在显著差异 ($P < 0.05$).

$\ln(\text{BG}): \ln(\text{NAG} + \text{LAP})$ (酶 C: N) 变化范围为 0.7 ~ 1.35, 9 a 土壤酶 C: N 最低且显著低于 17、34 和 43 a 林地 ($P < 0.05$). $\ln(\text{BG}): \ln(\text{AP})$ (酶 C: P) 变化范围为 1.17 ~ 2.41, 土壤酶 C: P 在各林龄间无显著差异 ($P > 0.05$). $\ln(\text{NAG} + \text{LAP}): \ln(\text{AP})$ (酶 N: P) 变化范围为 1.24 ~ 2.16, 9 a 土壤酶 N: P 最高且显著高于 26、34 和 43 a 林地 ($P < 0.05$), 其余林龄间土壤酶 N: P 无显著差异 ($P > 0.05$). 马尾松人工林土壤酶化学计量比 C: N: P 均值约为 1: 1: 0.56 (图 2).

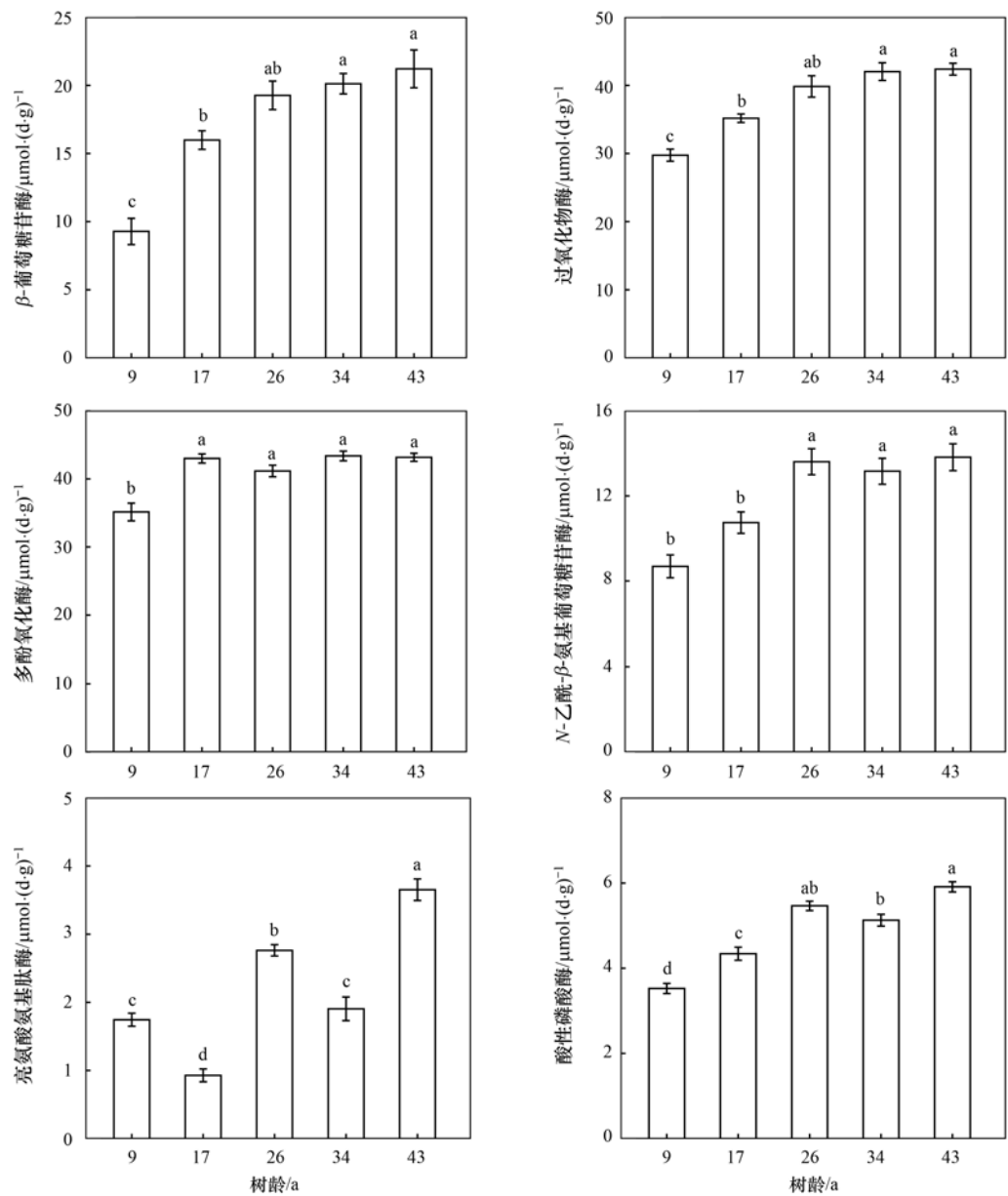
从图 3 可以看出, 不同林龄间向量长度 (Vector L) 无显著差异 ($P > 0.05$). 不同林龄间向量角度

(Vector A) 均小于 45°, 其中 17、26、34 和 43 a 林地向量角度显著大于 9 a ($P < 0.05$).

2.3 土壤理化因子对土壤酶活性及其化学计量的影响

土壤酶活性及其化学计量比与土壤理化性质相关分析表明(表 3): 6 种土壤活性与 TN、TC、DOC、 NO_3^- -N 和土壤 C/P 均呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与 LCI 呈显著负相关 ($P < 0.05$). BG、POD、NAG、LAP 和 AP 活性均与 pH 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与有效磷和土壤 N/P 呈显著正相关 ($P < 0.05$); BG、POD、POX、NAG 和 AP 活性均与土壤含水量呈显著正相关 ($P < 0.05$); BG、POD、POX 和 NAG 活性与 TP 和土壤 C/N 呈显著正相关 ($P < 0.05$); BG、POD、NAG 和 AP 活性与 DON 呈显著正相关 ($P < 0.05$); BG 和 POD 活性与 NH_4^+ -N 呈显著正相关 ($P < 0.05$). 酶 C/N 与 TN、TC、TP 和土壤 C/N 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与土壤碳质量指数呈显著负相关 ($P < 0.05$); 酶 C/P 仅与土壤碳质量指数呈显著负相关 ($P < 0.05$); 酶 C/P 与 TN、DOC 和土壤 C/P 呈显著负相关 ($P < 0.05$).

以土壤酶活性及其化学计量比为响应变量, 土壤理化性质及 C、N、P 化学计量比为解释变量进行冗余分析 (RDA). 结果显示, 土壤理化因子对土壤酶活性及其化学计量比的总累积解释率为 73.5%, 第一轴解释了变量的 65.3%, 第二轴解释了变量的 19.9% (图 4). 其中 LCI ($F = 28.9$; $P = 0.001$)、pH



不同小写字母代表不同林龄间差异显著 ($P < 0.05$)

图 1 不同林龄马尾松人工林的土壤酶活性

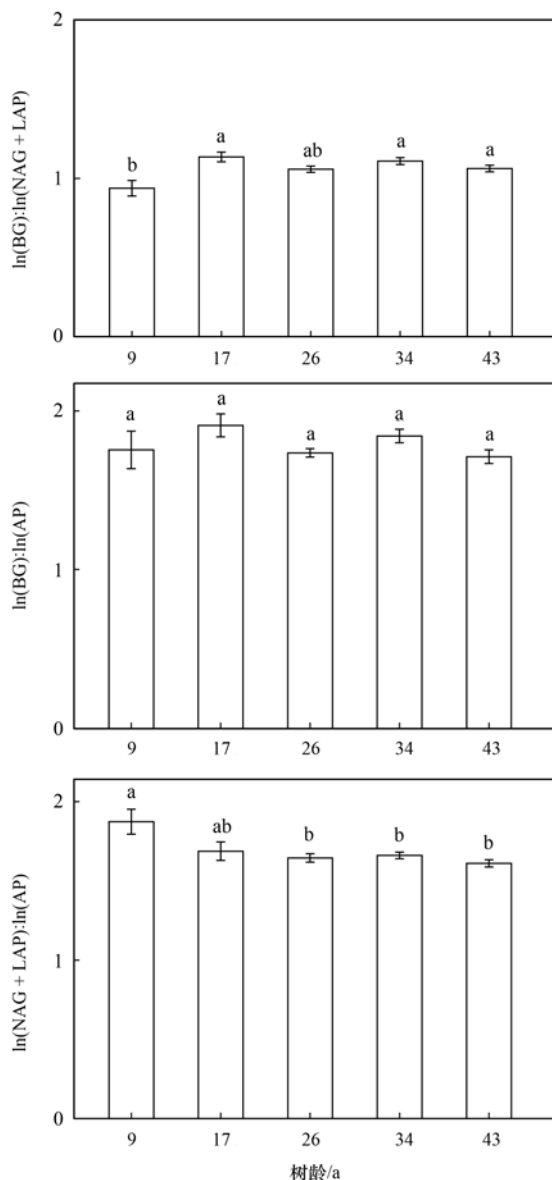
Fig. 1 Soil enzyme activities in *Pinus massoniana* plantations at different stand ages

表 3 土壤酶活性及其化学计量比与土壤理化性质之间的相关系数¹⁾

Table 3 Correlation coefficient between soil enzymes, enzymatic stoichiometry, and soil properties

	BG	POD	POX	NAG	LAP	AP	酶 C/N	酶 C/P	酶 N/P
pH	-0.270 *	-0.369 **	0.04	-0.333 **	-0.725 **	-0.443 **	0.203	0.235	0.084
含水量	0.455 **	0.379 **	0.358 **	0.362 **	0.146	0.305 *	0.201	0.18	-0.016
全氮	0.656 **	0.597 **	0.488 **	0.562 **	0.339 **	0.593 **	0.287 *	0.057	-0.271 *
全碳	0.648 **	0.593 **	0.519 **	0.571 **	0.303 *	0.577 **	0.291 *	0.077	-0.251
全磷	0.400 **	0.395 **	0.572 **	0.337 **	-0.068	0.205	0.309 *	0.242	-0.047
有效磷	0.530 **	0.530 **	0.249	0.548 **	0.522 **	0.592 **	0.125	-0.076	-0.238
可溶性有机碳	0.516 **	0.622 **	0.411 **	0.413 **	0.402 **	0.572 **	0.199	-0.093	-0.356 **
铵态氮	0.259 *	0.351 **	0.215	0.171	0.041	0.213	0.193	0.046	-0.157
硝态氮	0.561 **	0.562 **	0.404 **	0.472 **	0.544 **	0.493 **	0.15	0.036	-0.135
可溶性有机氮	0.348 **	0.323 *	0.233	0.420 **	0.244	0.397 **	0.012	-0.049	-0.096
C/N	0.300 *	0.265 *	0.496 **	0.292 *	-0.113	0.174	0.285 *	0.217	-0.066
C/P	0.506 **	0.458 **	0.308 *	0.453 **	0.376 **	0.533 **	0.2	-0.013	-0.260 *
N/P	0.490 **	0.441 **	0.254	0.418 **	0.410 **	0.532 **	0.18	-0.045	-0.277 *
土壤碳质量指数	-0.945 **	-0.640 **	-0.580 **	-0.621 **	-0.278 *	-0.598 **	-0.728 **	-0.483 **	0.228

1) * 和 ** 分别表示统计显著性水平 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$; BG 表示 β -葡萄糖苷酶, POX 表示多酚氧化酶, POD 表示过氧化物酶, NAG 表示 β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶, LAP 表示亮氨酸氨基肽酶, AP 表示酸性磷酸酶



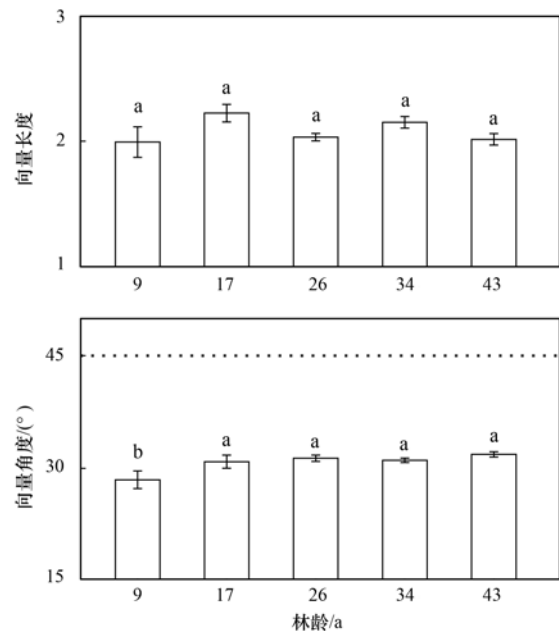
不同小写字母代表不同林龄间差异显著 ($P < 0.05$)
 图2 不同林龄马尾松人工林的土壤酶化学计量比特征
 Fig. 2 Ecoenzymatic stoichiometry in *Pinus massoniana* plantations at different stand ages

($F = 25.8$; $P = 0.001$)、TN ($F = 22.5$; $P = 0.001$)、土壤含水量 ($F = 8.6$; $P = 0.001$)、Available P ($F = 8.1$; $P = 0.001$)、TC ($F = 3.2$; $P = 0.033$)、DOC ($F = 3.1$; $P = 0.022$) 和 DON ($F = 2.9$; $P = 0.031$) 是影响土壤酶活性及其化学计量比的显著影响因子, 其解释率分别为 43.0%、14.0%、0.9%、0.5%、1%、0.4%、0.7% 和 1.3%。

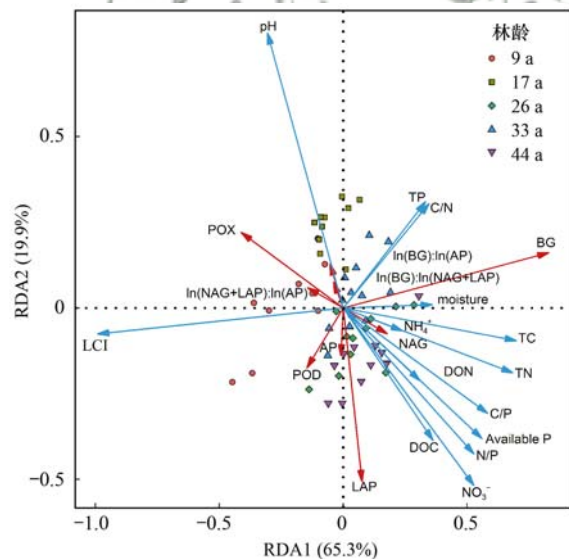
3 讨论

3.1 不同林龄马尾松人工林土壤酶活性变化特征

马尾松在不同生长阶段具有不同的养分需求和养分利用率^[23], 其凋落物现存量、周转速率、养分含量和归还量等也随其生长发育而改变^[29], 这会对



不同小写字母代表不同林龄间差异显著 ($P < 0.05$)
 图3 不同林龄马尾松人工林土壤酶向量角度和长度
 Fig. 3 Angle and length of soil enzyme vector in *Pinus massoniana* plantations of different stand ages



moisture:含水量; TN:全氮; TC:全碳; TP:全磷; DOC:可溶性有机碳; DON:可溶性有机氮; NH_4^+ :铵态氮; NO_3^- :硝态氮; Available P:有效磷; C/N:碳氮比; C/P:碳磷比; N/P:氮磷比; LCI:土壤碳质量指数

图4 土壤酶活性及其化学计量比与土壤理化因子的冗余分析(RDA)

Fig. 4 Redundancy analysis(RDA) of soil enzyme activities and eco-enzymatic stoichiometry ratios

土壤理化性质和微生物群落结构等产生影响,从而间接影响土壤酶活性^[30]. 本研究中不同林龄马尾松人工林土壤 TN、TC、DON 和 DOC 含量与除 LAP 外的土壤酶活性的变化趋势相同,均随着林龄增大而增加,具体表现为在 9 a 林龄中含量最低,在 34 a 林龄前后发生波动. 这与乔航等^[30] 对不同林龄油茶人

工林土壤酶和牛小云等^[31]对不同林龄日本落叶松人工林土壤酶的研究结果一致. 凋落物是森林土壤主要有机养分的供应者和养分归还者^[22]. 马尾松幼林(9 a)土壤养分含量最低可能是由于马尾松在生长初期林下植被种类和数量较少、自然整枝水平低,因而凋落物输入较少. POD 与 POX 均在腐殖质形成过程中起重要作用^[22],其活性过低将影响腐殖质的形成^[32],9 a 人工林 POD 与 POX 活性均较低,因而腐殖质层较薄. 另外其正处于速生阶段,对养分消耗较大且早期养分利用率低,周转期长,所以林地土壤养分处于较低水平. 随着林龄的增加,土壤中形成较为茂密的根系,且马尾松根系分布窄而浅也可能使得人工林表层土中生物量较高^[33],根系分泌物与凋落物的积累及植物残体输入量增加. 同时随着大气沉降、土壤及微生物固氮作用^[34],土壤中有有机养分增加^[35]. 输入土壤碳源与氮源的增加为土壤微生物提供了丰富的养分和能量,使得土壤酶活性也随之增加. 铵态氮和硝态氮可以反映土壤氮素的供应能力^[36],铵态氮含量在 34 a 的人工林达到最大值后开始降低,这可能是由于马尾松人工林在 34 a 后土壤硝化作用增强,森林土壤中 NH_4^+ -N 向 NO_3^- -N 的转化比较明显^[34],使得 NH_4^+ -N 含量逐渐降低, NO_3^- -N 含量逐渐升高. 值得注意的是 LAP 活性在各林龄间呈波动变化,根据许森平等^[16]对土壤微生物生物量碳、氮和磷对气候变化的响应机制的研究中,氮的有效性与 LAP 活性呈显著负相关,研究区马尾松不同生长阶段的 N 限制水平可能不同.

本研究中 AP 活性随着林龄的增加呈上升趋势,这可能与本研究区普遍缺磷有关,南方酸性土壤普遍供磷不足. AP 活性与全磷含量没有显著相关性,这与乔航等^[30]的研究结果一致. AP 活性与有效磷呈正相关,这与段春燕等^[37]对不同林龄桉树人工林土壤酶的研究结果一致. 根据 Burns 等^[38]的研究显示,微生物需要最大限度地提高酶生产的成本效益比,优先生产短缺资源的酶. 而当环境中营养物质匮乏,细胞面临分泌土壤酶产生的能量需求压力时,它们必须优先保持足够高的反应产物浓度来支持细胞功能并维持活力. 当为了响应资源需求而增加酶活性导致过量反应产物的释放,酶活性和资源可用性之间存在正相关关系. 根据全国第二次土壤普查养分分级标准^[39],本研究 5 个林龄全磷含量普遍低于 $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,处于第五级属于低水平;26 a 与 43 a 人工林土壤有效磷含量均低于 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,处于第五级属于低水平;9、17 和 34 a 人工林土壤有效磷含量均低于 $3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,处于第六级属于极低水平.

3.2 土壤理化性质对土壤酶活性及其化学计量比的影响

土壤理化因子通过调节微生物代谢作用,影响酶活性及其化学计量比^[14]. 本研究发现 LCI、pH、TN、土壤含水量、有效磷、TC、DOC 和 DON 是影响土壤酶活性及其化学计量比的显著影响因子,其中 LCI 与 pH 解释率达到了 57%,是影响土壤酶活性及其化学计量比的关键因素,这与张星星等^[14]对不同母质和森林类型土壤酶与史丽娟等^[33]对中亚热带典型人工林土壤酶的研究结果一致. LCI 越小表明土壤中易分解碳相对丰度越高,本研究中 LCI 与土壤酶活性呈显著负相关,LCI 随着林龄增加而减少,反映出随着林龄增加人工林凋落物质量增加,土壤中酚类化合物等难分解碳的含量减少,土壤碳基质的增加使得土壤碳转化酶活性升高. 本研究中氮、磷转化酶活性也随着土壤碳质量指数减小而增加,与 Hill 等^[28]对泥炭地有机质的生态酶化学计量学研究结果相反,可能与马尾松人工林生长过程中受 N 和 P 限制有关. 与 Hill 研究中实验区泥炭地养分相比,本文研究区土壤碳、氮、磷含量均较小. 随着林龄的增加,林地土壤酸性物质富集导致土壤 pH 逐渐降低^[40]. 此外,过氧化物酶活性增加也能够促进土壤中过氧化氢水解为水和 H^+ ,增加土壤酸度. 土壤 pH 与酶活性呈显著负相关,与 Sinsabaugh 等^[2]对全球生态尺度酶活性的研究结果一致. 这可能是由于 pH 通过影响土壤微生物群落结构、酶与土壤颗粒间结合状态、土壤养分及土壤功能等方式调控土壤酶活性^[41,42].

土壤酶活性及其化学计量比还受到土壤 TN、土壤含水量、有效磷、TC、DOC 和 DON 影响. 相关关系分析结果显示土壤 TN 与酶 N:P 呈显著负相关,土壤含水量、有效磷、TC、DOC 和 DON 与土壤酶活性及其化学计量比均呈显著正相关关系. 此外,土壤 C:N 与酶 C:N 呈显著正相关关系,土壤 C:P 与酶 C:P 呈显著负相关关系,土壤 N:P 与酶 N:P 呈显著负相关关系,说明土壤养分含量与土壤养分化学计量比均能影响土壤酶活性及其化学计量比,这与张星星等^[14]的研究结果一致. 值得注意的是,土壤酶化学计量比与土壤养分化学计量比的变化特征不完全相同. 这与乔航等^[30]的研究结果一致. 这可能是由于土壤元素计量比不能表征有效态养分的计量比,且土壤酶是由土壤微生物活动、植物根系分泌以及植物残体和土壤动物区系分解产生的一类具有催化能力的蛋白质,其分泌与土壤养分有效性、养分动态变化以及

植物养分需求密切相关,因此土壤生态酶计量比亦能够受土壤养分化学计量比的影响并能反映土壤养分限制状况^[17].

3.3 中亚热带马尾松人工林土壤微生物养分限制状况

土壤酶化学计量比是土壤养分限制状况的重要指示因子,本文中土壤 C、N 和 P 转化酶活性对数转换后的比值约为 1:1:0.56,与全球生态系统 1:1:1 相偏离^[15],酶 C:N、酶 C:P 与酶 N:P 分别为 0.93~1.13、1.71~1.91 和 1.61~1.87 均远高于全球平均水平 0.62、0.44 和 0.13^[15, 43],说明该区域土壤微生物对碳源和氮源需求较高.其中酶 C:N 与酶向量角度随着林龄增加而呈增加趋势,均表现为 9 a 林地最小,在 17 a 林龄后趋于稳定,且酶向量角度均小于 45°.另外,LCI 随着林龄的增加而减少.结果表明在 9 a 林地马尾松林土壤微生物受氮限制最为严重,此后随着凋落物输入量增加、养分重吸收以及土壤微生物固氮等因素作用下,马尾松林生态系统中碳素和氮素的输入量增加且随着林龄的增加马尾松林对养分元素的利用率呈上升趋势^[29],因此马尾松林土壤微生物氮限制随着林龄的增加有所缓解,但研究区土壤可利用氮素依然处于较低水平,所以该区马尾松林土壤微生物氮限制整体上未完全消除.酶 C:P 与酶向量长度在 5 个林龄间变化无显著差异,表明随着林龄增加马尾松林对 C、P 需求变化趋势一致.酶 N:P 随着林龄增加而减少,在 9 a 林地最高,在 17 a 林龄后趋于稳定,表明研究区马尾松土壤微生物在 17 a 后随着氮限制的缓和,对磷的需求逐渐增大,但整体上马尾松人工林土壤微生物仍以氮限制问题最为突出.此外酸性磷酸酶活性随着林龄的增加而呈上升趋势也表明马尾松人工林土壤微生物在生长后期对 P 的需求量增加.在以往报道中,我国热带及亚热带地区森林系统中普遍存在土壤微生物磷元素限制问题.但相比全球和区域尺度,中小区域尺度上林分类型、林下植被类型^[14]、季节变化^[44]以及同一土地利用方式随时间序列的变化^[45]等因素均能对土壤养分含量产生影响,使土壤养分限制在中小区域尺度上表现出差异.如潘复静等^[25]对广西南宁市横县镇龙林场不同林龄马尾松的研究发现,马尾松人工林土壤微生物受 P 限制.

4 结论

本研究区不同林龄马尾松人工林土壤微生物均受到氮限制,其中 9 a 林地受氮限制最为严重,随着林龄的增加土壤微生物氮限制虽有所缓和但未完全消除,且土壤微生物对磷的需求逐渐增强.土壤碳质

量指数和土壤 pH 是影响不同林龄马尾松人工林土壤酶活性及其化学计量比的主要因素.在马尾松人工林经营初期应注重增施氮肥,随着马尾松的生长发育应在增施氮肥的同时适施磷肥以维持马尾松人工林生态系统的生产力和长期稳定发展.

参考文献:

- [1] 刘善江,夏雪,陈桂梅,等.土壤酶的研究进展[J].中国农学通报,2011,27(21):1-7.
Li S J, Xia X, Chen G M, et al. Study progress on functions and affecting factors of soil enzymes[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(21): 1-7.
- [2] Sinsabaugh R L, Hill B H, Shah J J F. Eoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment[J]. Nature, 2009, 462(7274): 795-798.
- [3] Li G L, Kim S, Han S H, et al. Precipitation affects soil microbial and extracellular enzymatic responses to warming[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 120: 212-221.
- [4] Puglisi E, Del Re A A M, Rao M A, et al. Development and validation of numerical indexes integrating enzyme activities of soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(7): 1673-1681.
- [5] Yu P J, Tang X G, Zhang A C, et al. Responses of soil specific enzyme activities to short-term land use conversions in a salt-affected region, northeastern China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 687: 939-945.
- [6] Sinsabaugh R L, Gallo M E, Lauber C, et al. Extracellular enzyme activities and soil organic matter dynamics for northern hardwood forests receiving simulated nitrogen deposition[J]. Biogeochemistry, 2005, 75(2): 201-215.
- [7] Dick W A. Influence of long-term tillage and crop rotation combinations on soil enzyme activities[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48(3): 569-574.
- [8] 于德良,雷泽勇,张岩松,等.沙地樟子松人工林土壤酶活性及其影响因子[J].干旱区研究,2019,36(3):621-629.
Yu D L, Lei Z Y, Zhang Y S, et al. Soil enzyme activity and its affecting factors under *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in sandy land[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3): 621-629.
- [9] 吕来新,宋蕾,刘志理,等.红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应[J].环境科学,2020,41(4):1960-1967.
Lü L X, Song L, Liu Z L, et al. Response of soil enzyme activity and chemical properties to nitrogen addition in a Korean pine plantation[J]. Environmental Science, 2020, 41(4): 1960-1967.
- [10] Ren C J, Zhao F Z, Shi Z, et al. Differential responses of soil microbial biomass and carbon-degrading enzyme activities to altered precipitation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 115: 1-10.
- [11] Hill B H, Elonen C M, Jicha T M, et al. Sediment microbial enzyme activity as an indicator of nutrient limitation in great lakes coastal wetlands[J]. Freshwater Biology, 2006, 51(9): 1670-1683.
- [12] Hill B H, Elonen C M, Jicha T M, et al. Sediment microbial enzyme activity as an indicator of nutrient limitation in the great rivers of the Upper Mississippi River basin[J]. Biogeochemistry, 2010, 97(2-3): 195-209.
- [13] Hill B H, Elonen C M, Seifert L R, et al. Microbial enzyme stoichiometry and nutrient limitation in US streams and rivers

- [J]. Ecological Indicators, 2012, **18**: 540-551.
- [14] 张星星, 杨柳明, 陈忠, 等. 中亚热带不同母质和森林类型土壤生态酶化学计量特征[J]. 生态学报, 2018, **38**(16): 5828-5836.
- Zhang X X, Yang L M, Chen Z, *et al.* Patterns of ecoenzymatic stoichiometry on types of forest soils from different parent materials in subtropical areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(16): 5828-5836.
- [15] Sinsabaugh R L, Lauber C L, Weintraub M N, *et al.* Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale[J]. Ecology Letters, 2008, **11**(11): 1252-1264.
- [16] 许森平, 任成杰, 张伟, 等. 土壤微生物生物量碳氮磷与土壤酶化学计量对气候变化的响应机制[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(7): 2445-2454.
- Xu M P, Ren C J, Zhang W, *et al.* Responses mechanism of C: N: P stoichiometry of soil microbial biomass and soil enzymes to climate change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, **29**(7): 2445-2454.
- [17] 钟泽坤, 杨改河, 任成杰, 等. 黄土丘陵区撂荒农田土壤酶活性及酶化学计量变化特征[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 411-421.
- Zhong Z K, Yang G H, Ren C J, *et al.* Effects of farmland abandonment on soil enzymatic activity and enzymatic stoichiometry in the Loess Hilly region, China [J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 411-421.
- [18] Cui Y X, Fang L C, Guo X B, *et al.* Ecoenzymatic stoichiometry and microbial nutrient limitation in rhizosphere soil in the arid area of the Northern Loess Plateau, China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, **116**: 11-21.
- [19] 李峥. 福建省马尾松种源试验关键技术研究[J]. 林业勘察设计, 2008, (1): 86-89.
- [20] 李敏. 中国森林资源报告(2014-2018)[R]. 北京: 中国林业出版社, 2020. 3-5.
- Li M. China forest resources report (2014-2018) [R]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2020. 3-5.
- [21] 颜培栋, 李鹏, 零天旺, 等. 马尾松不同家系施磷肥效对比研究[J]. 广西林业科学, 2020, **49**(2): 168-174.
- Yan P D, Li P, Ling T W, *et al.* Comparison on effects of applying phosphorus fertilizer on different families of *Pinus massoniana* [J]. Guangxi Forestry Science, 2020, **49**(2): 168-174.
- [22] 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.
- Ge X G, Xiao W F, Zeng L X, *et al.* Relationships between soil nutrient contents and soil enzyme activities in *Pinus massoniana* stands with different ages in Three Gorges Reservoir Area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, **23**(2): 445-451.
- [23] 尉海东, 马祥庆. 不同发育阶段马尾松人工林生态系统碳储量研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, **35**(1): 171-174.
- Wei H D, Ma X Q. Study on the carbon storage and distribution of *Pinus massoniana* Lamb plantation ecosystem at different growing stages [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2007, **35**(1): 171-174.
- [24] 李玉凤, 李妹珍, 马姜明, 等. 林分密度对马尾松人工林土壤碳储量及其分配特征的影响[J]. 广西林业科学, 2021, **50**(1): 54-59.
- Li Y F, Li M Z, Ma J M, *et al.* Effects of stand density on soil carbon storage and distribution characteristics of *Pinus massoniana* plantations[J]. Guangxi Forestry Science, 2021, **50**(1): 54-59.
- [25] 潘复静, 陈英倩, 梁月明, 等. 种植密度对马尾松人工林土壤磷转化功能微生物与细菌群落结构的影响[J]. 生态学杂志, 2021, **40**(5): 1233-1243.
- Pan F J, Chen Y Q, Liang Y M, *et al.* Effects of stand density on community structure of soil *phoD*-harboring microorganisms and bacteria in *Pinus massoniana* plantations [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, **40**(5): 1233-1243.
- [26] 王莹. 预防森林病虫害的根本措施[J]. 现代园艺, 2021, **44**(2): 43-44.
- [27] 梁艳, 明安刚, 何友均, 等. 南亚热带马尾松-红椎混交林及其纯林土壤细菌群落结构与功能[J]. 应用生态学报, 2021, **32**(3): 878-886.
- Liang Y, Ming A G, He Y J, *et al.* Structure and function of soil bacterial communities in the monoculture and mixed plantation of *Pinus massoniana* and *Castanopsis hystrix* in southern subtropical China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, **32**(3): 878-886.
- [28] Hill B H, Elonen C M, Jicha T M, *et al.* Ecoenzymatic stoichiometry and microbial processing of organic matter in northern bogs and fens reveals a common P-limitation between peatland types [J]. Biogeochemistry, 2014, **120**(1-3): 203-224.
- [29] 杨会侠, 汪思龙, 范冰, 等. 不同林龄马尾松人工林年凋落量与养分归还动态[J]. 生态学杂志, 2010, **29**(12): 2334-2340.
- Yang H X, Wang S L, Fan B, *et al.* Dynamics of annual litter mass and nutrient return of different age Masson-pine plantations [J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, **29**(12): 2334-2340.
- [30] 乔航, 莫小勤, 罗艳华, 等. 不同林龄油茶人工林土壤酶化学计量及其影响因素[J]. 生态学报, 2019, **39**(6): 1887-1896.
- Qiao H, Mo X Q, Luo Y H, *et al.* Patterns of soil ecoenzymatic stoichiometry and its influencing factors during stand development in *Camellia oleifera* plantations [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39**(6): 1887-1896.
- [31] 牛小云, 孙晓梅, 陈东升, 等. 辽东山区不同林龄日本落叶松人工林土壤微生物、养分及酶活性[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(9): 2663-2672.
- Niu X Y, Sun X M, Chen D S, *et al.* Soil microorganisms, nutrients and enzyme activity of *Larix kaempferi* plantation under different ages in mountainous region of eastern Liaoning Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, **26**(9): 2663-2672.
- [32] 陆梅, 卫捷, 韩智亮. 滇池西岸4种针叶林的土壤微生物与酶活性[J]. 东北林业大学学报, 2011, **39**(6): 56-59.
- Lu M, Wei J, Han Z L. Soil microbes and enzyme activities in four types of coniferous forests in west bank of Dianchi Lake, Kunming[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, **39**(6): 56-59.
- [33] 史丽娟, 王辉民, 付晓莉, 等. 中亚热带典型人工林土壤酶活性及其化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(6): 1980-1988.
- Shi L J, Wang H M, Fu X L, *et al.* Soil enzyme activities and their stoichiometry of typical plantations in mid-subtropical China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, **31**(6): 1980-1988.
- [34] 陈伏生, 曾德慧, 何兴元. 森林土壤氮素的转化与循环[J]. 生态学杂志, 2004, **23**(5): 126-133.
- Chen F S, Zeng D H, He X Y. Soil nitrogen transformation and cycling in forest ecosystem [J]. Chinese Journal of Ecology,

- 2004, **23**(5): 126-133.
- [35] Pschenyckij C M, Clark J M, Shaw L J, *et al.* Effects of acidity on dissolved organic carbon in organic soil extracts, pore water and surface litters[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **703**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135585.
- [36] 刘先, 索沛衡, 杜大俊, 等. 连栽杉木人工林参与土壤碳氮转化过程酶活性及其与土壤理化因子的相关性[J]. *生态学报*, 2020, **40**(1): 247-256.
- Liu X, Suo P H, Du D J, *et al.* Soil carbon and nitrogen transformed enzyme activities in continuously cultivated Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations and their correlations with soil physicochemical factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(1): 247-256.
- [37] 段春燕, 何成新, 徐广平, 等. 桂北不同林龄桉树人工林土壤养分及生物学特性[J]. *热带作物学报*, 2019, **40**(6): 1213-1222.
- Duan C Y, He C X, Xu G P, *et al.* Soil nutrients and biological characteristics in *Eucalyptus* plantations of different planting ages at North Guangxi[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2019, **40**(6): 1213-1222.
- [38] Burns R G, 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.
- [39] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [40] 陈立新. 落叶松人工林土壤酸度变化与无机磷形态的关系[J]. *中国水土保持科学*, 2005, **3**(4): 108-114.
- Chen L X. Soil acidity change of Larch plantations and relation between change and inorganic phosphorus types[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, **3**(4): 108-114.
- [41] 王涵, 王果, 黄颖颖, 等. pH变化对酸性土壤酶活性的影响[J]. *生态环境*, 2008, **17**(6): 2401-2406.
- Wang H, Wang G, Huang Y Y, *et al.* The effects of pH change on the activities of enzymes in an acid soil [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2008, **17**(6): 2401-2406.
- [42] Liu J, Xia H J, Wang J Z, *et al.* Bioactive characteristics of soil microorganisms in different-aged orange (*Citrus reticulata*) plantations [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2012, **13**(6): 1277-1281, 1286.
- [43] Waring B G, Weintraub S R, Sinsabaugh R L. Eoenzymatic stoichiometry of microbial nutrient acquisition in tropical soils [J]. *Biogeochemistry*, 2014, **117**(1): 101-113.
- [44] 高雨秋, 戴晓琴, 王建雷, 等. 亚热带人工林下植被根际土壤酶化学计量特征[J]. *植物生态学报*, 2019, **43**(3): 258-272.
- Gao Y Q, Dai X Q, Wang J L, *et al.* Characteristics of soil enzymes stoichiometry in rhizosphere of understory vegetation in subtropical forest plantations [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2019, **43**(3): 258-272.
- [45] 解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 等. 滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1404-1412.
- Xie X F, Pu L J, Wang Q Q, *et al.* Response of soil enzyme activities and their relationships with physicochemical properties to different aged coastal reclamation areas, eastern China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1404-1412.

CONTENTS

A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China	LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, <i>et al.</i>	(577)
Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability	ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo	(586)
Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou	HUANG Wen, WANG Sheng-li	(597)
PM _{2.5} Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models	WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, <i>et al.</i>	(608)
Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM _{2.5} During Summer in Central China	SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, <i>et al.</i>	(619)
Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City	CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>	(629)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in PM _{2.5} in Zhejiang Province	LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i>	(639)
Impact of Meteorological Conditions on PM _{2.5} in Jiangsu Province from 2001 to 2019	PAN Chen, KANG Zhi-ming	(649)
Comparison and Analysis of PM _{2.5} Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model	GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, <i>et al.</i>	(663)
Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020	FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, <i>et al.</i>	(675)
Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O ₃ Pollution Event in Ji'nan	SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, <i>et al.</i>	(686)
Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong	YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, <i>et al.</i>	(696)
Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass	ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, <i>et al.</i>	(707)
Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer	YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, <i>et al.</i>	(714)
Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China	ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, <i>et al.</i>	(723)
Emission Characteristics of VOCs and <i>n</i> -alkanes from Diesel Forklifts	ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, <i>et al.</i>	(735)
Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020	TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao	(743)
Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a Karst River Basin, Southwestern China	XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun	(752)
Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake	XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, <i>et al.</i>	(762)
Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events	ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i>	(770)
Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen	BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, <i>et al.</i>	(782)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City	PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(795)
Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River	GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, <i>et al.</i>	(803)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example	CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i>	(813)
Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai	YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, <i>et al.</i>	(826)
Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang	GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, <i>et al.</i>	(837)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake	LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(847)
Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake	LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, <i>et al.</i>	(859)
Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation	WANG Zi-qiao, LI Xu-yong	(867)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, <i>et al.</i>	(878)
Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration	QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, <i>et al.</i>	(887)
Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar	CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(896)
Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water	ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, <i>et al.</i>	(907)
Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PV/A Granular Sludge	HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, <i>et al.</i>	(920)
Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance	FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, <i>et al.</i>	(928)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan	LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, <i>et al.</i>	(936)
Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain	ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song	(946)
Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example	JU Tie-nan, LEI Mei	(957)
Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China	MU De-miao, SUN Yue-bing	(965)
Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area	HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, <i>et al.</i>	(975)
Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas	ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, <i>et al.</i>	(985)
Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years	REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, <i>et al.</i>	(995)
Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth	CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, <i>et al.</i>	(1004)
Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments	WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, <i>et al.</i>	(1015)
Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i>	(1023)
Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat	LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, <i>et al.</i>	(1031)
Responses of Soil <i>PhoC</i> and <i>PhoD</i> Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1040)
Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of <i>Robinia pseudoacacia</i>	LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, <i>et al.</i>	(1050)
Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of <i>Pinus massoniana</i> Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas	JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, <i>et al.</i>	(1059)
Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils	DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, <i>et al.</i>	(1069)
Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil	HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, <i>et al.</i>	(1077)
Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine	HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, <i>et al.</i>	(1089)
Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weiwei Dryland of Shaanxi Province	WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, <i>et al.</i>	(1097)
Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta	XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1108)