

目次

疫情期间人为源减排对城市大气氧化性的影响	朱剑蓝, 秦墨梅, 朱嫣红, 胡建林 (617)
不同天气形势对南京地区双高污染的输送及潜在源区分析	秦阳, 胡建林, 孔海江 (626)
不同方法判定南京臭氧生成敏感区的差异	陈柑羽, 李勋, 李琳, 秦墨梅, 谢鸣捷, 王鸣, 李婧祺, 胡建林 (635)
2006~2021年夏半年上海臭氧浓度特征及其大气环流背景分析	郑庆锋, 梁萍, 段玉森, 林燕芬, 张宋嘉, 徐卫忠 (645)
基于大气成分观测网的山西省近地面O ₃ 体积分数分布特征	李莹, 王淑敏, 裴坤宁, 闫世明, 孙鸿博, 张逢生, 高兴艾 (655)
伊宁市夏季大气臭氧生成机制及减排策略	王文婷, 谷超, 李丽明, 李新琪, 郑镇森, 耿春梅, 王晓丽, 杨文 (668)
运城市四季VOCs特征、来源及臭氧形成敏感物种	阴世杰, 刘新翌, 刘亚非, 李晨露, 张晨, 张欢, 王正, 程强 (678)
郑州市秋冬季污染过程中大气VOCs污染特征、来源解析及活性分析	赖梦洁, 张栋, 于世杰, 宋鑫帅, 李晓, 张瑞芹 (689)
郑州市PM _{2.5} 中有机的污染特征、来源解析及二次生成	李子涵, 董喆, 尚瑞琪, 孔梓涵, 李晓, 张瑞芹 (700)
中国三大城市群PM _{2.5} 浓度非线性变化分析	吴舒祺, 顾杨旸, 张天岳, 赵文吉 (709)
基于LEAP模型的临港新片区中长期碳排放预测及减排潜力分析	吴琮, 马昊, 任洪波, 郭明星, 陈鹏, 李琦芬 (721)
碳交易背景下中国华北地区碳代谢格局变化	郑宏媚, 沈方, 许光耀, 关欣 (732)
考虑区域特点和车型差异的氢燃料电池汽车全生命周期减碳预测分析	马菁, 蔡旭, 张春梅, 兰利波, 陈轶嵩, 付佩 (744)
我国主要河流水系硝态氮污染特征及定量源解析	韦英怀, 胡敏鹏, 陈丁江 (755)
不同时空尺度下土地利用结构与空间格局对苏州水质的影响	谭娟, 熊丽君, 王卿, 任志文, 朱丹丹, 王敏 (768)
深圳市2015~2021年雨源型河流水质时空变化及其对降雨的响应	韦必颖, 成建梅, 苏晓煜, 程天舜 (780)
河南黄河改道区浅层地下水化学特征与主控污染源解析	王帅, 任宇, 郭红, 曹文庚, 李祥志, 肖舜禹 (792)
北京西山岩溶地下水化学特征及成因分析	郭高轩, 代垠东, 许亮, 朱琳, 欧志亮, 戚琦, 辛宝东 (802)
店埠河流域地表水-地下水水化学特征及其成因分析	郑涛, 秦先燕, 吴剑雄 (813)
张家口地区枯水期地下水水化学特征及其成因机制分析	金爱芳, 殷秀兰, 李长青, 李文娟, 庞菊梅, 金晓媚 (826)
黄河中下游典型抗性细菌及抗性基因污染分布	闵威, 高明昌, 孙绍芳, 宋茜茜, 邱立平 (837)
制药废水中抗生素抗性的污染特征、检测手段和控制方法	彭安萍, 高虎, 张新波 (844)
水体组分对聚苯乙烯纳米颗粒聚沉行为的影响	汤端阳, 郑文丽, 陈关潼一, 陈思莉, 陈尧, 赵晓丽, 汪浩 (854)
富磷废弃钙基生物炭对水体中铅的去除	刘天, 吕思璐, 杜兴国, 程敏, 谢燕华 (862)
壳聚糖改性生物炭的制备及其对水溶液中Cd ²⁺ 的吸附机制	姜凌, 安靖玥, 岳小琼, 李亚雄, 夏秋乐, 祝婷文佳, 柴丽红 (873)
硼掺杂介孔炭吸附四环素的效能与机制	邹震, 许路, 乔伟, 唐茂森, 金鹏康 (885)
磁性含磷油茶壳生物炭对水中磺胺甲噁唑的吸附特性	韩帅鹏, 唐李文, 刘勤, 林家亮, 李晓慢, 程建华, 胡勇有 (898)
广东省高分辨率温室气体排放清单及特征	卢清, 唐明双, 廖彤, 黄志炯, 钟庄敏, 宋佩珊, 沈劲, 张智胜, 梁小明, 孙家仁, 陈来国 (909)
辽河口“退塘还湿”修复区生态系统CO ₂ 交换及其环境调控	刘思琪, 陈虹, 邢庆会, 程浩, 韩建波, 徐雪梅 (920)
生物炭施用两年后对热带地区稻菜轮作土壤N ₂ O和CH ₄ 排放的影响	胡煜杰, 唐瑞杰, 胡天怡, 陈琦琦, 汤水荣, 阮延正, 孟磊 (929)
生物炭改良盐碱地研究与应用进展	魏盈, 焦乐, 张鹏, 刘福德, 肖辉, 董昱辰, 代红文 (940)
免耕对农田土壤团聚体的影响研究: Meta分析	徐艺萍, 饶越悦, 孟艳, 温媛, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (952)
黔中喀斯特地区典型县域碳储量时空演变及多情景模拟预测: 以普定县为例	李月, 罗红芬 (961)
不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响	李越, 徐曼, 谢永红, 王颖, 黄容, 谢军, 王子芳, 高明 (974)
Ca改性生物炭对土壤磷赋存形态影响及稳定化机制	张超, 翟付杰, 单保庆 (983)
秦岭中段不同恢复阶段弃耕农田植物多样性变化及其驱动因素	闫成龙, 薛悦, 王艺菲, 康海斌, 王得祥 (992)
我国典型制药厂污染场地中抗生素的污染特征及生态风险	杨炯彬, 黄争, 赵建亮, 何良英, 刘有胜, 胡立新, 石义静, 应光国 (1004)
广州市土壤多环芳烃污染特征及风险评估	邹子航, 陈莲, 张培珍, 王雨茜, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 (1015)
基于源导向的土壤重金属风险评价及管控因子分析	潘泳兴, 陈盟, 王樯樯 (1026)
基于Monte-Carlo模拟的湖南省典型工厂周边农田土壤重金属区域潜在生态风险特征及来源解析	罗豪杰, 潘俊, 陈小霞, 张敏, 沈良辰, 李歆, 丁平, 蔡丹, 蔡立梅, 胡国成 (1038)
基于参数优化和蒙特卡罗模拟的砷污染地块健康风险评估	袁贝, 刘虎鹏, 杜平, 陈娟, 张云慧, 张昊 (1049)
基于APCS-MLR和PMF模型的赤泥堆场周边耕地土壤重金属污染源解析	沈智杰, 李杰芹, 李彩霞, 廖泽源, 梅楠, 罗程钟, 王定勇, 张成 (1058)
PE-Cd复合污染土壤中Cd释放迁移特征及机制	王迪, 徐绍辉, 耶明艳, 林青 (1069)
氯代乙烯的厌氧微生物还原脱氯特性	李伟, 刘贵平, 刘峻, 吕良华, 乔文静, 余欣, 张晓旻, 蒋建东 (1080)
昭通市农田土壤和蔬菜重金属污染评价及相关性分析	张好, 董春雨, 杨海婵, 孙思静, 韩宇, 黄祖志, 张乃明, 包立 (1090)
钝化剂对轻中度镉污染农田的安全利用效果	王晓晶, 张东明, 曹阳, 吕家琰, 代允超 (1098)
氧化石墨烯负载铁锰复合材料对镉污染土壤的钝化修复	袁婧, 吴骥子, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣, 赵科理 (1107)
关键生育期施加外源灌溉水对水稻镉吸收转运的影响	周霞, 胡雨丹, 周航, 陈琼, 谭文韬, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (1118)
外源锌对镉胁迫下玉米幼苗生长及根系构型分级的影响	张辉红, 魏畅, 柳海涛, 张静静, 刘芳, 赵颖, 张雪海, 李鸽子, 姜瑛 (1128)
稀土元素铈对镉胁迫下小麦幼苗生长的缓解效应	张静静, 徐正阳, 焦秋娟, 范丽娜, 刘芳, 赵颖, 宋佳, 化党领, 李鸽子, 柳海涛 (1141)
根施伯克氏菌对小麦镉吸收转运的两段式阻控作用	郭佳佳, 王常荣, 刘仲齐, 黄青青, 张长波, 黄永春, 薛卫杰, 孙约兵 (1150)
高密度聚乙烯微塑料与氯噻磺隆对大豆生长和根际细菌群落的复合胁迫效应	胡晓玥, 滑紫微, 姚伦广, 杜丽, 牛秋红, 李玉英, 闫路, 陈兆进, 张浩 (1161)
微塑料的人体富集及毒性机制研究进展	包亚博, 王成尘, 彭吾光, 依代倩, 向萍 (1173)
机器学习在微塑料识别与环境风险评估中的应用研究进展	白润昊, 范瑞琪, 刘琪, 刘勤, 严昌荣, 崔吉晓, 何文清 (1185)
微塑料与农田土壤中典型污染物的复合污染研究进展	侯宇晴, 李冰, 王金花, 宋文慧, 王兰君, 王军, 朱鲁生 (1196)
水中微/纳塑料电化学检测及去除的研究进展	郑伟康, 刘振中, 项晓方 (1210)
基于分布式认知理论的农户面源污染治理支付意愿影响因素	郭晨浩, 李林霏, 夏显力 (1222)

秦岭中段不同恢复阶段弃耕农田植物多样性变化及其驱动因素

闫成龙¹, 薛悦², 王艺菲¹, 康海斌¹, 王得祥^{1*}

(1. 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100; 2. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210008)

摘要: 植被恢复过程往往伴随着显著的地上植物多样性的变化, 探讨枯落物养分-土壤养分-酶活性化学计量对地上植被变化的驱动机制, 对于维持区域生物多样性保护和生态稳定至关重要. 以秦岭不同恢复年限(1、8、16、31 和 50 a)的典型弃耕农田为研究对象, 通过野外调查分析了植被恢复过程中植物群落多样性的变化特征, 测定了枯落物养分、土壤养分、 β -1,4-葡萄糖苷酶(BG)、纤维二糖水解酶(CBH)、 β -1,4-N-乙酰基氨基葡萄糖苷酶(NAG)、亮氨酸氨基肽酶(LAP)和酸性磷酸酶(AP)这 5 种胞外酶活性等指标, 探讨了植被恢复过程中枯落物养分、土壤养分和酶活性化学计量比的变化特征及其对植物多样性变化的驱动机制. 结果表明: 植物群落多样性指数随植被恢复年限增加均呈先减小后增大的趋势, 在恢复 16 a 时最小; 主成分分析结果表明, 植被恢复不同年限植物群落多样性指数及枯落物-土壤-酶化学计量特征之间有显著区别, 植物群落多样性指数与枯落物碳磷比及枯落物氮磷比具有强烈的正相关关系, 而与土壤酶碳磷比(EEA C:P)具有明显的负相关关系; 冗余分析结果表明 EEA C:P 对植被恢复过程中植物多样性变化的解释率最高, 为 25.93%, 其次为土壤全磷(TP), 解释率为 5.94%, 是调控植物多样性变化的关键因子. 综上所述, 秦岭中段弃耕农田植被恢复后期植物种类和数量明显增多, 土壤环境的变化影响了微生物的代谢活动从而改变了酶活性, 枯落物-土壤-土壤胞外酶通过反馈与调节对群落环境和植物多样性产生影响, EEA C:P 和 TP 是植被恢复过程中地上植物多样性变化的主要驱动因素.

关键词: 植被恢复; 植物多样性; 生态化学计量学; 土壤胞外酶; 土壤养分; 枯落物养分

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)02-0992-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202303002

Plant Diversity Changes and Its Driving Factors of Abandoned Land at Different Restoration Stages in the Middle of the Qinling Mountains

YAN Cheng-long¹, XUE Yue², WANG Yi-fei¹, KANG Hai-bin¹, WANG De-xiang^{1*}

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210008, China)

Abstract: The process of vegetation restoration is often accompanied by significant changes in aboveground plant diversity. To explore the driving mechanism of litter nutrient-soil nutrient-enzyme activity stoichiometry on aboveground vegetation change is of great importance for maintaining regional biodiversity conservation and ecological stability. Taking typical abandoned farmland of different restoration years (1, 8, 16, 31, and 50 a) in the Qinling Mountains as the research object, the variation characteristics of plant community diversity during vegetation restoration were analyzed through field investigation. Litter nutrients, soil nutrients, and the activities of five extracellular enzymes, including β -1,4-glucosidase (BG), cellobiohydrolase (CBH), β -1,4-N-acetylglucosaminidase (NAG), leucine aminopeptidase (LAP), and acid phosphatase (AP), were determined. The characteristics of litter nutrients, soil nutrients, and enzyme stoichiometric ratios during vegetation restoration and the driving mechanism of plant diversity changes were discussed. The results showed that the plant community diversity index firstly decreased and then increased with the increase in vegetation restoration years, and the minimum was reached at 16 years after restoration. The results of principal component analysis showed that there were significant differences between total plant community diversity index and litter-soil-enzyme stoichiometric characteristics in different years of vegetation restoration. The plant community diversity index had a strong positive correlation with litter C:P ratio and litter N:P ratio but had a negative correlation with soil enzyme C:P ratio (EEA C:P). The results of redundancy analysis showed that soil EEA C:P had the highest explanation rate of plant diversity changes during vegetation restoration (25.93%), followed by soil TP (5.94%), which was the key factor regulating plant diversity changes. In conclusion, plant species and quantity increased significantly in abandoned farmland in the middle part of the Qinling Mountains at the late stage of vegetation restoration. Changes in the soil environment affected microbial metabolic activities and thus changed enzyme activities. Litter-soil-soil extracellular enzymes affected the community environment and plant diversity through feedback and regulation. EEA C:P and TP were the main driving factors of aboveground plant diversity change during vegetation restoration.

Key words: vegetation restoration; plant diversity; ecological stoichiometry; soil extracellular enzymes; soil nutrient; litter nutrient

植被恢复是森林生态系统自我繁衍和恢复的关键, 草本植物和木本植物种群不断发生演替推动植物群落的组成、结构和物种多样性不断变化, 是一个重要且复杂的生态学过程, 对于生态系统功能的维持具有重要意义^[1]. 由于原始植物群落类型、干扰类型或区域气候等的差异, 在自然恢复过程中, 植物群落的变化往往是不同的^[2,3], 总体上来看, 在植被恢复

过程中植物多样性和丰富度会明显增大, 不同恢复阶段植物群落的组成和结构差异显著, 优势度朝着更具抗干扰能力和维持群落稳定性能力的物种发

收稿日期: 2023-03-01; 修订日期: 2023-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(32271861)

作者简介: 闫成龙(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为植被恢复及植物多样性, E-mail: yanchi197@163.com

* 通信作者, E-mail: wangdx66@126.com

展,优势种不断更替,最终到达一定恢复年限后群落趋于稳定^[4-7]。

植被和土壤是不可分割的整体,在植被恢复过程中微生物分泌的胞外酶可以分解土壤有机质从而影响了土壤理化性质^[8-10],而土壤养分的改变又决定植物的生长发育水平^[11]。在弃耕农田的植被恢复过程中,植物多样性、土壤养分和土壤酶活性表现出明显的协同规律^[12],随着恢复年限的增加,植被盖度和组成发生显著变化^[13],同时土壤酶活性的变化进一步加剧土壤养分变化^[14]。此外,不同植被恢复类型枯落物释放养分的差异,还可能导致植被恢复对于不同土壤酶活性的影响不同^[15],枯落物分解增加了土壤中外源碳(C)、氮(N)和磷(P)等元素的输入,为植物生长提供养分,并激活土壤酶活性,从而促进枯落物的分解,形成枯落物-土壤-胞外酶这一正反馈机制,促进土壤养分循环,提高土壤养分供应能力^[16]。总而言之,植被恢复是植物和土壤相互制约,在不断反馈中共同发育使得群落朝着正向演替发展的过程,并且在不同的植被恢复阶段有着显著的差异^[17-19]。

生态化学计量学作为研究多种元素生物地球化学循环的重要手段,对于探讨土壤、植物和微生物等不同生态系统成分之间的平衡具有重要意义^[20],同时也是研究植物生长发育过程中的养分限制情况和与土壤之间相互作用关系的方法^[21,22]。近年来,众多学者就植被恢复过程中的土壤养分和酶生态化学计量特征取得了大量研究成果。有研究表明,在弃耕农田植被恢复中,不同恢复植被对土壤性质影响不同,N是植物生长的主要限制因素^[23,24]。也有研究表明,植被恢复显著提高了土壤养分和土壤胞外酶活性,土壤养分的变化导致了土壤酶活性的变化^[25]。由此可见,生态化学计量学是探讨不同恢复时期生态系统各组成部分变化特征的良好手段。

目前秦岭地区关于植被恢复的研究主要包括不同地貌区植被恢复特征及其影响因素^[26],撂荒地植被恢复过程中微生物的代谢特征^[27],尾矿堆积体植被恢复及演替^[28],不同恢复年限土壤碳氮磷的生态化学计量特征^[29]和不同植被恢复类型对土壤入参与产流的影响^[30]等,而对于植被恢复过程中枯落物、土壤养分和酶活性与植物多样性之间的变化关系的研究鲜见报道,这不利于理解植被恢复过程中土壤微生物介导的植物-土壤养分循环机制及其对地上植物群落变化的影响。因此,本研究以秦岭中段不同恢复年限的弃耕农田为研究对象,通过对不同恢复年限枯落物养分、土壤养分和土壤酶活性生态化学计量特征及其相关性,以及植物多样性对枯落物-土壤-酶

化学计量响应机制的研究,探讨弃耕农田植被恢复过程中植物多样性的变化特征及其关键限制因子,以期揭示该区域植被恢复和土壤养分供给间的关系提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究于陕西省宁陕县火地塘(33°18′~33°28′N,108°21′~108°39′E)林区进行,属于北亚热带和暖温带过渡地带,夏季多雨,秋冬寒冷,海拔1450~2473 m,年平均气温8~10℃,年降水量1000~1200 mm,年蒸发量800~950 mm,年日照时数1100~1300 h,无霜期170 d。代表性的植被类型包括落叶阔叶林、针阔混交林、针叶林和高山草甸等,土壤类型包括山地棕壤和暗棕壤,土层厚度45~105 cm。20世纪60年代开始大量农田被弃耕,随之出现不同年限的植被恢复区域。

1.2 样地设置

2020年7~9月,通过查阅资料,走访当地农户,核实恢复年限,在火地塘同一流域内选择自然恢复1、8、16、31和50 a的典型撂荒地作为研究对象,各恢复阶段立地条件(坡度、坡向和海拔)保持一致,间距离大于300 m。在每个恢复年限的样地中分别设置5个样方,共计25块,样方间的距离大于30 m。林地阶段样方面积为20 m×20 m,灌木阶段为5 m×5 m,草地阶段为2 m×2 m。对样方内的乔木的高度、胸径和冠幅;灌木和草本的高度、盖度和数量进行详细调查。

1.3 样品采集

1.3.1 枯落物采集

在乔木和灌木阶段的各样方内沿对角线设立3个1 m×1 m的小样方,收集样方中的全部枯落物并均匀混合;在草地阶段,收集各样方内的全部枯落物并混合均匀,将收集的枯落物带回实验室后烘干,充分研磨后过筛,待后续测定养分。

1.3.2 土壤样品采集

使用直径4.5 cm的土钻沿“S”形采集土壤样品,取土之前去除土壤表层的腐殖质和枯落物,取样深度0~20 cm(林地、灌木和草地阶段分别设置12、8和8个采样点),均匀混合同一样方内的土样,过孔径2 mm筛剔除植物根系、石块等杂质装入冰盒带回实验室,将带回实验室的土样分为2部分,其中一部分在4℃下冷藏存放,以便于后期测定胞外酶的活性,另一部分放置在阴凉通风处,用于测定土壤理化性质。

1.4 样品分析

1.4.1 土壤理化性质和枯落物养分测定

采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳(SOC)

和枯落物碳(LC)含量. 采用凯氏定氮法测定土壤全氮(TN)和枯落物氮(LN)含量. 土壤全磷(TP)和枯落物磷(LP)采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HClO}_4$ 消解, 钼锑抗比色法测定^[31].

1.4.2 胞外酶活性测定

采用改良 96 微孔板荧光光度法^[32,33]测定 β -1,4-葡萄糖苷酶(BG)、纤维二糖水解酶(CBH)、 β -1,4-N-乙酰基氨基葡萄糖苷酶(NAG)、亮氨酸氨基肽酶(LAP)和酸性磷酸酶(AP)这 5 种土壤胞外酶的活性. 用土壤 SOC 对酶活性进行标准化处理, 酶活性单位为 $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$.

1.5 数据处理

本研究选取以下 4 种多样性指数进行计算和分析^[34].

$$\text{Patrick 丰富度指数: } R = S \quad (1)$$

$$\text{Simpson 指数: } \lambda = 1 - \sum_{i=1}^S \frac{N_i(N_i - 1)}{N(N - 1)} \quad (2)$$

$$\text{Shannon-Wiener 指数: } H' = - \sum_{i=1}^S \left(\frac{N_i}{N} \right) \ln \left(\frac{N_i}{N} \right) \quad (3)$$

$$\text{Pielou 均匀度指数: } J_{sw} = \frac{H'}{\ln(S)} \quad (4)$$

式中, R 表示丰富度指数; S 表示 i 物种所在样方的物种总数; λ 表示 Simpson 指数; N_i 表示第 i 个物种的重要值; N 表示 i 物种所在样方全部物种的重要值之和; H' 表示 Shannon-Wiener 指数; J_{sw} 表示均匀度指数.

林地恢复阶段的群落物种总多样性为乔木(权重系数 0.5)、灌木(权重系数 0.25)和草本(权重系数 0.25)各层多样性指数之和; 灌木恢复阶段群落物种总多样性为灌木(权重系数 0.5)、草本(权重系数 0.5)多样性指数之和; 草地阶段群落物种总多样性为草本层的多样性指数^[35].

采用 R(v 3.6.2) 软件对实验数据进行统计分析. 运用单因素方差分析法(one-way ANOVA)分析: 不同恢复年限植物群落总多样性指数、枯落物养分

含量及其化学计量比、土壤全量养分及其化学计量比、土壤胞外酶活性及其化学计量比的变化差异, 并采用 Tukey's HSD 进行事后多重比较. 对植物群落总多样性指数、枯落物养分含量及其化学计量比、土壤全量养分及其化学计量比、土壤胞外酶活性及其化学计量比之间进行 Pearson 相关性分析, 采用 "corplot" 包绘制相关性热图. 采用 "vegan" 包进行植物群落总多样性指数与枯落物-土壤养分-胞外酶活性及化学计量比之间冗余分析. "ggbiplot" 包进行主成分分析(PCA)确定植被恢复过程中植物群落总多样性指数和枯落物-土壤养分-胞外酶活性及化学计量比的总体差异.

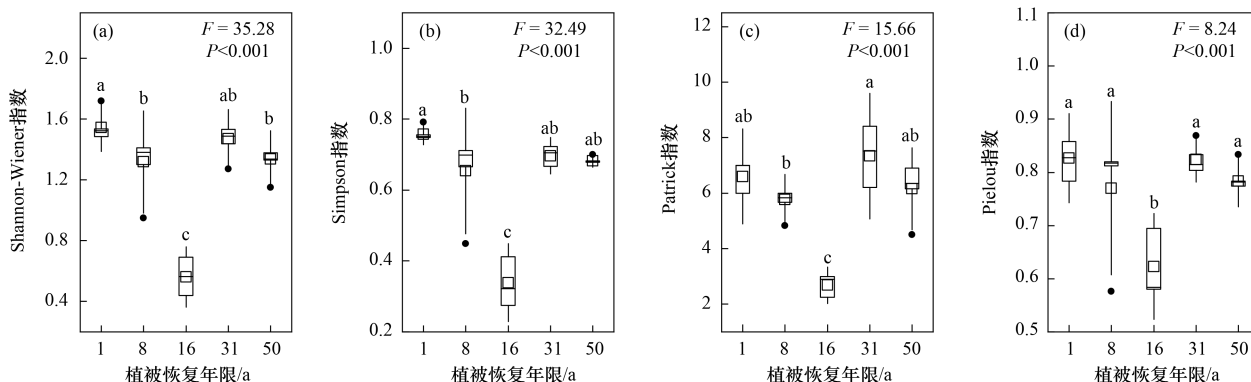
2 结果与分析

2.1 植被恢复过程中植物群落总多样性的变化特征

随着植被恢复的进行, 植物种类不断发生变化(表 1), 植被恢复第 1 a, 优势种为一年生草本马唐(*Digitaria sanguinalis*)和一年蓬(*Erigeron annuus*), 恢复 8 a 后, 灌木层的优势种为盐肤木(*Rhus chinensis*), 草本层以黄腺香青(*Anaphalis aureopunctata*)取代马唐成为新的优势种. 植被恢复 16 a 后, 漆树(*Toxicodendron vernicifluum*)和盐肤木成为乔木层的优势种, 灌木层的优势种为弓茎悬钩子(*Rubus flosculosus*). 栗(*Castanea mollissima*)为恢复 31 a 和 50 a 乔木层的优势种, 细叶苔草(*Carex rigescens*)为草本层的优势种. 植物多样性指数随着植被恢复的进行呈现显著变化, 植物群落 Patrick 指数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数均呈先减小后增大的趋势, 在恢复 16 a 时最小(图 1).

2.2 枯落物养分化学计量比随植被恢复的变化特征

植被恢复过程中枯落物养分含量存在显著差异(图 2). ω [枯落物碳(LC)]随植被恢复呈显著下降的



不同小写字母表示不同恢复年限间具有显著性差异($P < 0.05$), 下同

图 1 植被恢复过程中群落总物种多样性

Fig. 1 Total species diversity of communities during vegetation restoration

表 1 研究区植物组成
Table 1 Vegetation characteristics of sampling sites

恢复年限/a	层次	优势种	伴生种
1	乔木层		
	灌木层		
	草本层	马唐(<i>Digitaria sanguinalis</i>)和一年蓬(<i>Erigeron annuus</i>)	臭蒿(<i>Artemisia hedinii</i>)
8	乔木层		
	灌木层	盐肤木(<i>Rhus chinensis</i>)	旱柳(<i>Salix matsudana</i>)和小叶杨(<i>Populus simonii</i>)
	草本层	黄腺香青(<i>Anaphalis aureopunctata</i>)	臭蒿(<i>A. hedinii</i>)和一年蓬(<i>Erigeron annuus</i>)
16	乔木层	漆树(<i>Toxicodendron vernicifluum</i>)和盐肤木(<i>R. chinensis</i>)	栗(<i>Castanea mollissima</i>)
	灌木层	弓茎悬钩子(<i>Rubus flosculosus</i>)	勾儿茶(<i>Berchemia sinica</i>)和圆锥山蚂蝗(<i>Desmodium elegans</i>)
	草本层	艾(<i>Artemisia argyi</i>)	一年蓬(<i>E. annuus</i>)和活血丹(<i>Glechoma longituba</i>)
31	乔木层	栗(<i>C. mollissima</i>)	野核桃(<i>Juglans cathayensis</i>)、小叶杨(<i>Populus simonii</i>)、盐肤木(<i>R. chinensis</i>)
	灌木层	圆锥山蚂蝗(<i>Desmodium elegans</i>)和弓茎悬钩子(<i>Rubus flosculosus</i>)	白檀(<i>Symplocos paniculata</i>)和榛(<i>Corylus heterophylla</i>)
	草本层	细叶苔草(<i>Carex rigescens</i>)和荩草(<i>Arthraxon hispidus</i>)	艾(<i>A. argyi</i>)和大叶假冷蕨(<i>Pseudocystopteris atkinsonii</i>)
50	乔木层	栗(<i>C. mollissima</i>)和盐肤木(<i>R. chinensis</i>)	锐齿槲栎(<i>Quercus aliena</i> var. <i>acutiserrata</i>)和化香树(<i>Platycarya strobilacea</i>)
	灌木层	四照花(<i>Dendrobenthamia japonica</i> var. <i>chinensis</i>)	木姜子(<i>Litsea pungens</i>)和苦糖果(<i>Lonicera fragrantissima</i> subsp. <i>standishii</i>)
	草本层	细叶苔草(<i>C. rigescens</i>)和马唐(<i>D. sanguinalis</i>)	唐松草(<i>Thalictrum aquilegifolium</i> var. <i>sibiricum</i>)和大叶假冷蕨(<i>Pseudocystopteris atkinsonii</i>)

趋势,变化范围为 402.78~474.47 g·kg⁻¹,在恢复 1 a 时最大,恢复 50 a 时最小,与恢复 1 a 相比降低了 15.11%。 ω [枯落物氮(LN)]随植被恢复先增大后减小,变化范围为 11.32~15.61 g·kg⁻¹,在恢复 31a 时达到最大,在恢复 50 a 时最小。 ω [枯落物磷(LP)]随植被恢复呈先增大后减小的趋势,变化范围为 1.80~2.61 g·kg⁻¹,在恢复第 16 a 后最大,50 a 时最小,与恢复 1、8、16 和 31 a 相比分别降低了 13.88%、11.76%、31.03% 和 25%。随着恢复年限增加,枯落物碳比氮(LC:N)值(化学计量比,下同)先减小后增大,变化范围为 27.20~35.96,枯落物碳比磷(LC:P)值随着植被恢复总体呈先减小后增大的趋势,变化范围为 168.83~243.56,枯落物氮比磷(LN:P)值呈先增大后减小的趋势,变化范围为 5.64~7.51。

2.3 土壤养分化学计量比随植被恢复的变化特征
土壤养分含量及其化学计量特征随植被恢复出现显著变化(图 3)。 ω [土壤有机碳(SOC)]在恢复前期无明显变化,但在恢复 50 a 时显著增大,为 36.80 g·kg⁻¹,相比于恢复 1、8、16 和 31 a 分别增加了 173.20%、175.66%、117.62% 和 134.10%。TN 含量随恢复年限的增加逐渐增加,在恢复 50 a 时最大,相比于恢复 1、8、16 和 31 a 分别增加了 117.05%、127.64%、73.91% 和 97.18%。 ω [土壤全磷(TP)]呈

先增大再减小的趋势,在恢复 16 a 时最大[(1.43±0.13)g·kg⁻¹],恢复 50 a 时最小[(0.52±0.09)g·kg⁻¹]。SOC:TN 值随恢复年限显著增大,在恢复 50 a 时最大,SOC:TP 值和 TN:TP 值在恢复前期无明显变化,而在恢复 50 a 时显著增大。

2.4 胞外酶化学计量比随植被恢复的变化特征
植被恢复过程显著影响土壤 C、N 和 P 循环相关酶活性及其化学计量比(图 4)。土壤碳循环酶(BG+CBH)、氮循环酶(NAG+LAP)和磷循环酶(AP)活性随植被恢复年限增加均呈先增大后减小的趋势,在恢复 31 a 时最大。(BG+CBH):(NAG+LAP)值(化学计量比,下同)随植被恢复年限增加而减小,在恢复 1 a 时最大,恢复 50 a 时最小。(BG+CBH):AP 值随植被恢复年限增加呈先增大后减小的趋势,在恢复 16 a 时达到最大,(NAG+LAP):AP 值随植被恢复年限增加而增加,恢复 50 a 时最大。

2.5 植物多样性与枯落物-土壤-胞外酶化学计量特征的关系
植物多样性指数与枯落物-土壤养分-胞外酶活性计量比具有显著相关性(图 5)。Simpson 指数与 BG+CBH、TP、LP 和 EEA C:P 呈显著负相关,与 LC:P、LN:P 呈显著正相关;Shannon-Wiener 指数与 TP、LP 和 EEA C:P 呈显著负相关,与 LC:P、LN:P 呈显著正相

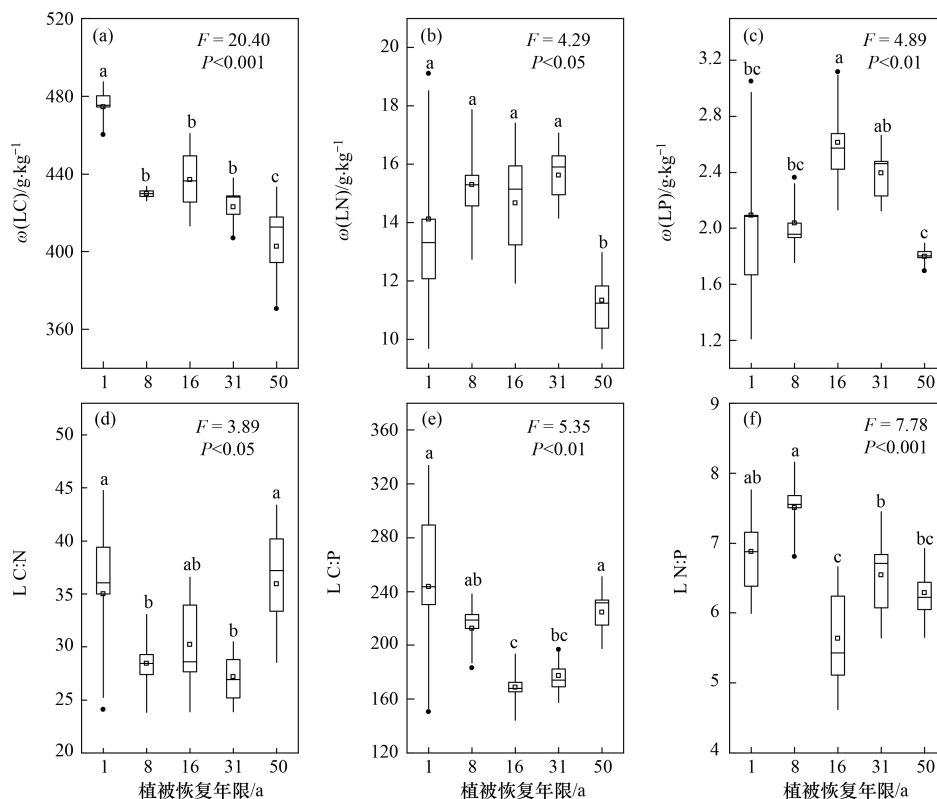


图2 植被恢复过程中枯落物养分及其化学计量比的特征变化

Fig. 2 Changes in litter nutrients and their stoichiometric ratios during vegetation restoration

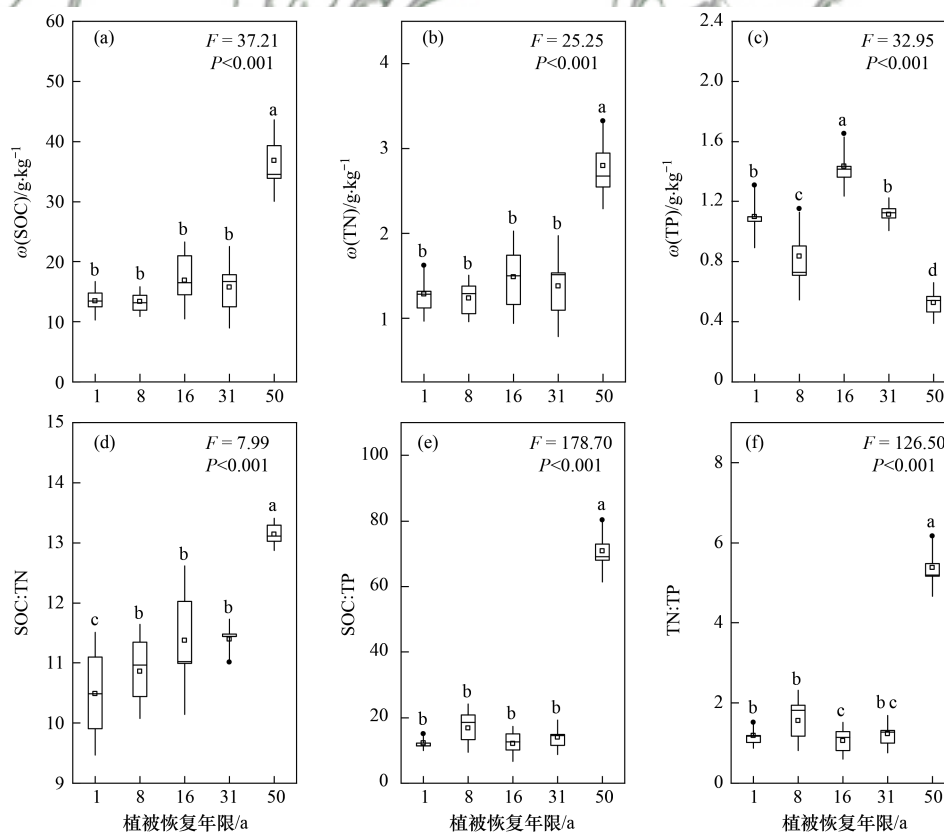


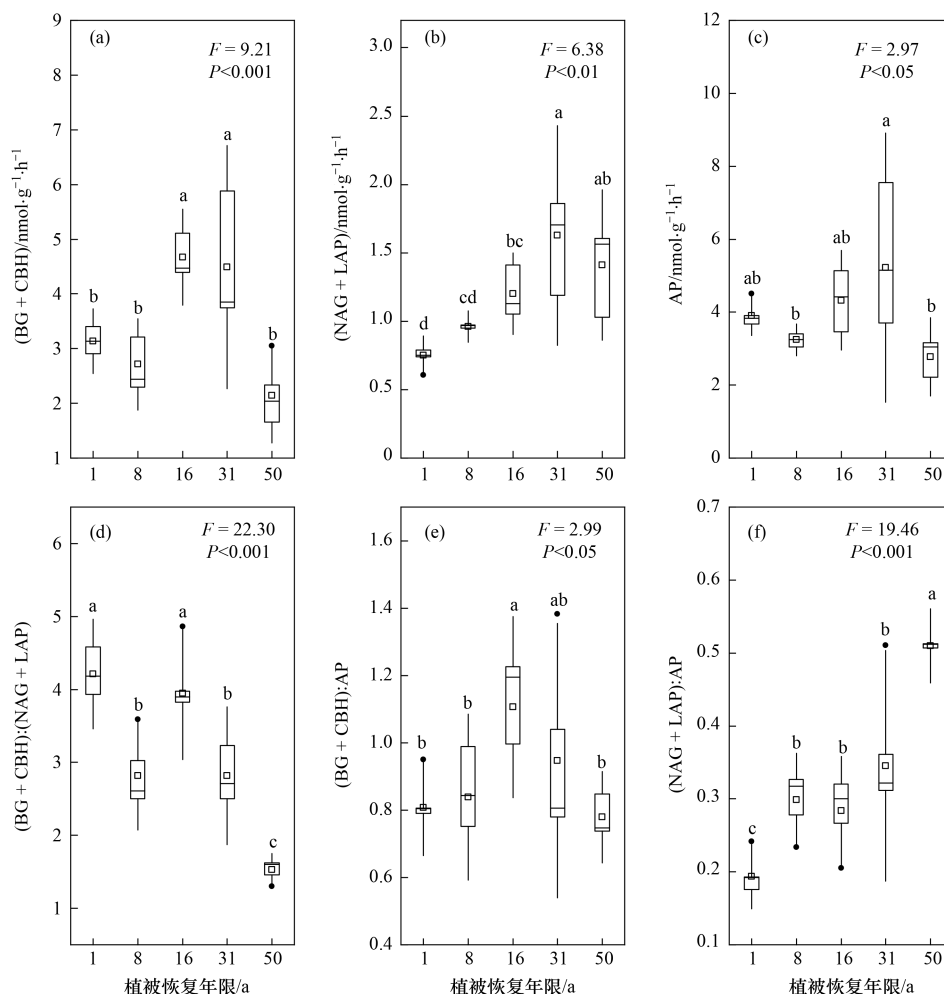
图3 植被恢复过程中土壤全量养分含量及其化学计量比特征变化

Fig. 3 Changes in soil total nutrient content and its stoichiometric ratio during vegetation restoration

关;Pielou指数与EEA C:P呈显著负相关,与L N:P呈显著正相关;Patrick指数与TP、LP和EEA C:P呈显

著负相关,与L N:P呈显著正相关.

LC与NAG+LAP及EEA N:P呈极显著负相关,与



BG+CBH 表示土壤碳循环酶活性, NAG+LAP 表示土壤氮循环酶活性, AP 表示土壤磷循环酶活性, 酶活性单位以 SOC 计

图4 植被恢复过程中土壤酶活性及其化学计量特征变化

Fig. 4 Changes in soil enzyme activity and its stoichiometric characteristics during vegetation restoration

EEA C:N 极显著正相关; LN 与 SOC:TP 和 TN:TP 极显著负相关, 与 TP 显著正相关; LP 与 LN 和 TP 极显著正相关, 与 SOC:TP 和 TN:TP 显著负相关, LC:N 和 LC:P 极显著正相关。

PCA 结果表明, 植物群落总多样性指数、枯落物养分化学计量比、土壤养分化学计量比和胞外酶化学计量比通过前两个主成分轴共解释了 71% 的植被恢复的变化(图 6)。整体来看, 植被恢复过程中植物群落总多样性指数、枯落物养分化学计量比、土壤养分化学计量比和胞外酶化学计量比存在显著差异。恢复 16 a 与恢复 1、8、31 和 50 a 的样地在 PC1 轴上区别显著, 恢复 50 a 的样地与恢复 1、8 和 31 a 的样地在 PC2 上区别显著。PCA 结果还表明, 植物群落多样性指数与 LC:P 和 LN:P 具有强烈的正相关关系, 而与 EEA C:P 具有明显的负相关关系。

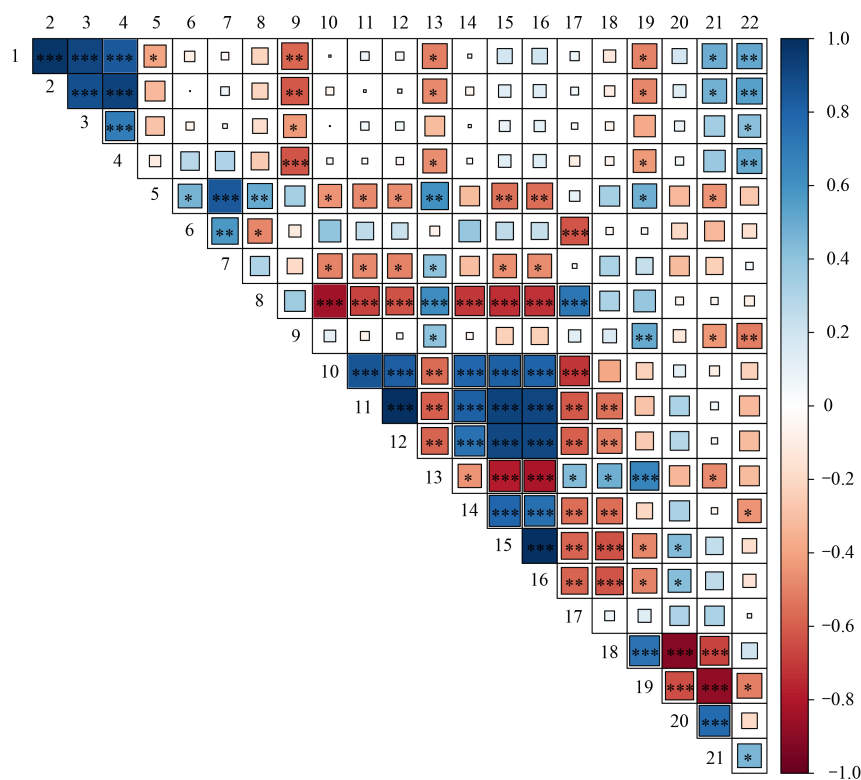
通过对植物群落总多样性指数与枯落物-土壤-胞外酶化学计量比进行冗余分析, 进一步找出植被恢复过程中植物多样性变化的主要驱动因子(图 7)。枯落物-土壤养分-胞外酶活性计量比对植物群落总

多样性指数在 PC1 和 PC2 的解释率分别为 72.02% 和 12.31%, 总解释率为 84.33%, EEA C:P 对植被恢复过程中植物多样性变化的解释率最高为 25.93%, 其次为 TP, 解释率为 5.94%, 是主要影响因子。

3 讨论

3.1 枯落物-土壤养分-胞外酶活性化学计量特征随植被恢复的变化

枯落物是陆地生态系统关键的组成部分, 一方面作为土壤有机质来源关乎土壤养分水平, 一方面影响动植物的生长发育活动, 其积累和分解速率受地上植物和环境决定^[36]。因此, 植被恢复引起的植物多样性增加和土壤性质的改善必然导致枯落物的组成更加丰富、分解速率显著变化^[37,38]。本研究发现, LN 含量随植被恢复呈先增大后降低的趋势(图 2), 这与 Wang 等^[39]在黄土高原子午岭的研究结果一致, 植物快速生长需要消耗大量的 N 来参与光合作用^[40], 生物量在分解过程中的损耗以及养分向土壤中的转移可能导致植被恢复后期 LN 含量降低。LP 含量呈先增



1. Simpson 指数, 2. Shannon-Wiener 指数, 3. Pielou 指数, 4. Patrick 指数, 5. BG+CBH 表示土壤碳循环酶活性, 6. NAG+LAP 表示土壤氮循环酶活性, 7. AP 表示土壤磷循环酶活性, 8. EEA C:N 表示土壤酶碳氮比, 9. EEA C:P 表示土壤酶碳磷比, 10. EEA N:P 表示土壤酶氮磷比, 11. SOC 表示土壤有机碳, 12. TN 表示土壤全氮, 13. TP 表示土壤全磷, 14. SOC:TN 表示土壤碳氮比, 15. SOC:TP 表示土壤碳磷比, 16. TN:TP 表示土壤氮磷比, 17. LG 表示枯落物碳, 18. LN 表示枯落物氮, 19. LP 表示枯落物磷, 20. L C:N 表示枯落物碳氮比, 21. L C:P 表示枯落物碳磷比, 22. L N:P 表示枯落物氮磷比, 下同; * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$, 蓝色表示正相关, 红色表示负相关, 颜色越深表示相关性越强

图 5 植物群落总多样性指数与枯落物-土壤-酶化学计量比的 Pearson 相关性

Fig. 5 Pearson correlation between total diversity index of plant community and litter-soil-enzyme stoichiometric ratio

大后减小的趋势, N:P 和 C:P 在恢复后期显著增大, 且 C:N 低于 40^[41], C:P 低于 600^[42], 表明枯落物中的 N 和 P 一直处于释放状态, 这可能导致植被恢复后期 LP 含量降低. 枯落物养分与土壤养分呈正相关, 这表明土壤中养分的消耗速率低于枯落物养分归还到土壤的速率, 植被恢复促进了生态系统的养分循环.

本研究中 SOC 和 TN 含量随植被恢复显著提升 (图 3), 这与 Ma 等^[43]在甘肃省合水县的研究结果一致, 王志齐等^[44]在黄土高原的研究有同样的结果, 由于微生物代谢活动和枯落物分解速率的增强不断改善土壤环境, 土壤微生物生物量 C 和根系分泌物等的输入在此过程中增加, 因此促进了土壤中 SOC 的积累^[45]; 枯落物中 N 元素更容易矿化和释放, 随着植被恢复植物多样性和丰富度的提升使得枯落物增加, 进而促进了土壤 N 的积累^[46]. 本研究发现土壤 C:P 和 N:P 在恢复后期达到最高水平, 这表明植被恢复后期, 土壤中的 P 较为缺乏, 植物的生长发育可能受到 P 元素的限制, 这与 Jiao 等^[47]在黄土高原的研究结果一致. 不同恢复年限的植被类型不同, 这种差异是造成 TP 含量变化的一个原因^[48], 本研究中枯落物中的 P 一直在释放, 但恢复后期 TP 含量却相对降低, 这表

明一方面该阶段植物的生长对 P 的需求处于较高的水平, 另一方面枯落物分解归还的 P 可能并未全部补充到土壤中, 也可能是因为水土流失.

胞外酶化学计量比能够反映微生物的生长活动及其代谢状况^[49,50]. 本研究发现, 土壤中的 BG+CBH、NAG+LAP 和 AP 活性在恢复前期呈增大趋势 (图 4), 这表明植被恢复过程中微生物的 C、N 和 P 的代谢逐渐增强, 这可能是因为在农田弃耕初期, 土壤养分仍处于较高的水平, 并且随着地面植物多样性的增加, 其与土壤微生物对土壤资源的竞争加剧^[51]. 土壤 EEA C:N 和 EEA C:P 在植被恢复后期呈下降趋势, 与钟泽坤等^[52]在黄土丘陵区的研究结果一致, 这表明随植被恢复年限增加微生物对 C 获取酶的需求逐渐减缓, 可能与植被恢复过程中植物多样性的增加, 枯落物组成更丰富, 根系分泌物和枯枝落叶分解使得进入土壤的 C 增加有关^[53], 且 TP 含量随植被恢复呈先增大后减小的趋势 (图 3), 这些结果表明在植被恢复早期微生物对 C 的需求大于 P, 而在后期则相反. 综上所述, 在植被恢复过程中, 不同恢复植被枯落物归还到土壤引起土壤养分产生变化, 微生物对此作出响应调整自身酶活性来获取相应的养分, 使

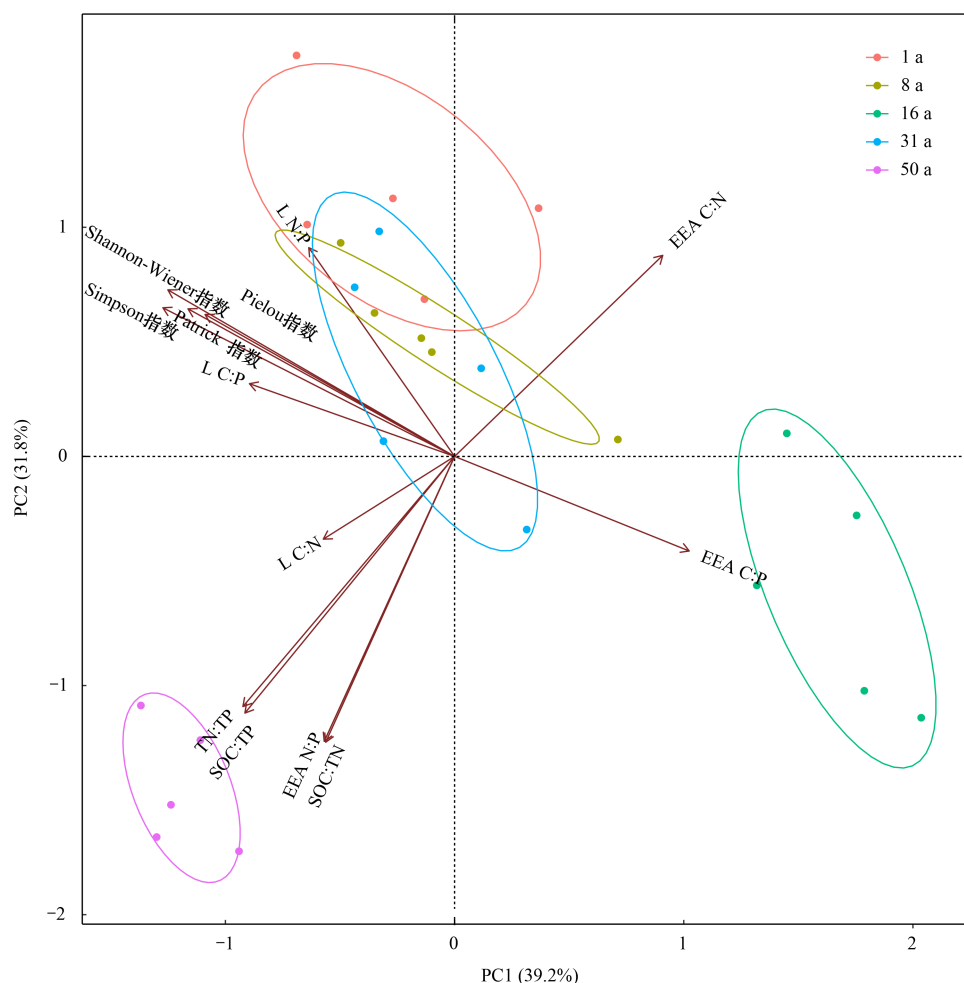


图6 植物群落总多样性指数及枯落物-土壤-酶化学计量比的主成分分析

Fig. 6 Principal component analysis of total diversity index and litter-soil-enzyme stoichiometric ratio of plant communities

得胞外酶活性化学计量特征产生变化。

3.2 枯落物-土壤-酶化学计量特征对植物多样性的驱动作用

枯落物组成、质量和数量的变化对自身分解速率、土壤环境和微生物生命活动均有强烈的影响^[54~56]。在植被恢复过程中,植物的根系分泌物及枯落物归还改变了土壤养分,促使微生物调整酶活性来获取外界养分,随着植被恢复年限的增加,枯落物-土壤-酶化学计量特征调控土壤养分循环并驱动土壤环境朝正向发育^[57],决定着植被的发育。王凯博等^[58]在子午岭的研究发现,TN和有机质与植物多样性呈显著正相关,但植物对土壤性质的影响随着土壤深度的增加减弱,这可能是因为枯落物和植物根系分泌物都集中在表层土壤造成的。刘洋等^[59]在太行山的研究发现随着植被恢复过程中植物多样性显著增加,土壤有机质、全量养分、速效养分和土壤物理性质均得到提升,从而使得研究区的植物多样性稳步提高。本研究发现植物群落 Patrick 指数和 Pielou 指数与 L N:P 显著正相关, Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数与 L C:P 和 L N:P 显著正相关(图 5),再次表明

枯落物与植物的丰富度、均匀度、多样性和优势度有着不可分割的关系。土壤中的酶能够反映土壤养分供给和植物吸收养分的效果,进而对森林生态系统中的土壤 C、N 和 P 循环产生影响,枯落物的类型、养分含量和根系分泌物等因素均会影响其活性^[60,61],因此土壤酶活性在不同的恢复阶段具有不同的响应。本研究中,植物群落 Patrick 指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数与 EEA C:P 显著负相关, Simpson 指数与 BG+CBH 和 EEA C:P 显著负相关,这表明土壤酶与植物多样性关系密切。何跃军等^[62]在重庆石灰岩地区的研究发现,植物多样性与碱性磷酸酶活性呈显著或极显著相关性,与本研究的結果一致,廖全兰等^[63]和潘玉梅等^[64]研究同样发现,植物多样性与土壤酶活性之间关系密切,分解枯落物的真菌在胞外酶活性对植物多样性的响应上可能存在重要的调控作用。植物多样性的变化是植物对生物和非生物环境综合作用的外在反映,在植被恢复过程中,土壤、光照和水分等环境因子的改变促进了植物群落的演替,土壤酶在植物-土壤养分循环机制中发挥着重要作用,因此枯落物-土壤-酶是作为一个彼

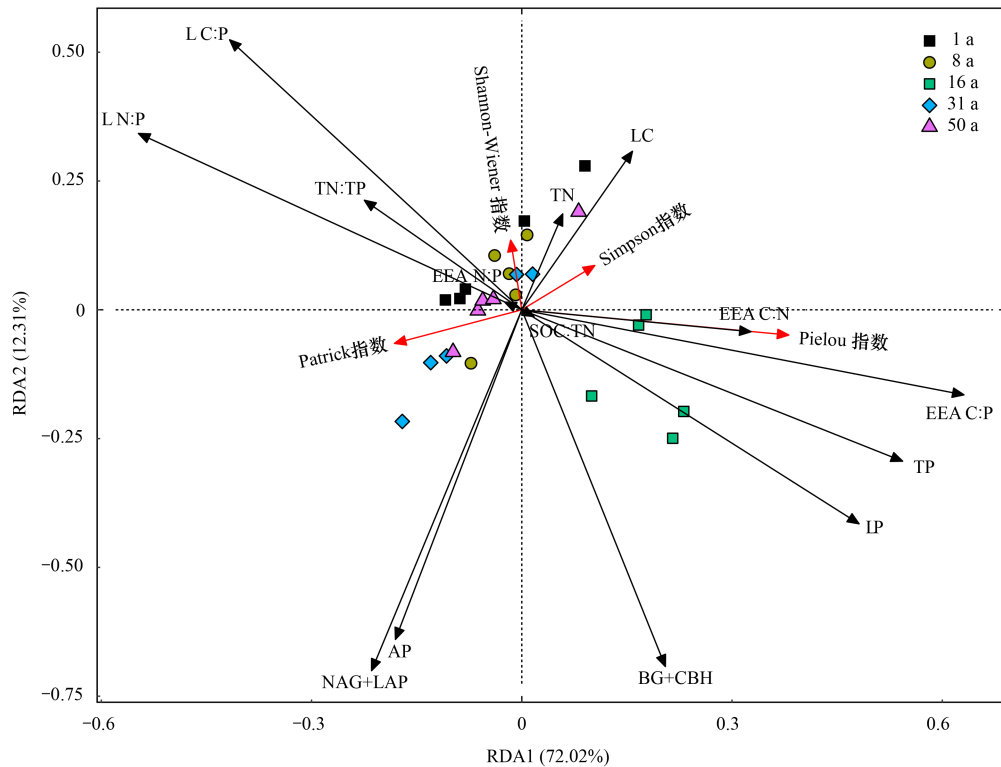


图7 植物群落总多样性指数与枯落物-土壤-酶化学计量比的冗余分析

Fig. 7 Redundancy analysis of total diversity index and litter-soil-enzyme stoichiometric ratio of plant communities

此限制、相互促进的整体在植被恢复过程中推动植物-土壤系统的发展。

PCA 主成分分析的结果表明,植物群落总多样性指数与 LC:P 和 LN:P 具有强烈的正相关关系,而与 EEA C:P 具有明显的负相关关系,表明枯落物和土壤酶活性的化学计量比是植被恢复过程中植物群落总多样性变化的主要调控因素。Raiesi 等^[65]研究发现土壤酶活性对于植被恢复具有驱动作用,与本研究的结果一致。综上所述,通过 PCA 主成分分析和 RDA 冗余分析本研究发现,在弃耕农田植被恢复过程中,EEA C:P 及 TP 是植物多样性变化的重要调控因素。

4 结论

(1) 秦岭中段弃耕农田植被恢复后期植物种类和数量明显增多,植被恢复使植物群落结构复杂化,群落更稳定。

(2) 植被恢复后期,枯落物碳、氮和磷含量显著下降,而土壤碳、氮含量显著提高。

(3) 植被恢复降低了土壤碳和磷循环酶活性,增大了土壤氮循环酶活性;植被恢复过程中土壤环境的变化强烈影响微生物代谢活动。

(4) EEA C:P 和 TP 是植被恢复过程中地上物种多样性的主要驱动因素。

(5) 本研究通过分析植被恢复过程中枯落物养

分-土壤养分-酶活性化学计量对地上植物多样性变化规律的驱动机制,为秦岭地区生物多样性保护和区域生态稳定提供了理论依据。

参考文献:

- [1] Grime J P. Biodiversity and ecosystem function: The debate deepens[J]. Science, 1997, **277**(5330): 1260-1261.
- [2] 詹瑾, 韩丹, 杨红玲, 等. 科尔沁沙地植被恢复过程中群落组成及多样性演变特征[J]. 中国沙漠, 2022, **42**(2): 194-206.
Zhan J, Han D, Yang H L, et al. Evolution characteristics of vegetation community composition and diversity during the restoration of Horqin Sandy Land in 2005-2019 [J]. Journal of Desert Research, 2022, **42**(2): 194-206.
- [3] 武秀娟, 奥小平. 油松林火烧迹地恢复初期林下植被特征[J]. 西北林学院学报, 2022, **37**(5): 155-161.
Wu X J, Ao X P. The characteristics of understory vegetation in the early stage of restoration of burned *Pinus tabulaeformis* forests [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, **37**(5): 155-161.
- [4] 卢笑玥, 焦子怡, 赵雪, 等. 油井开发迹地植被群落自然恢复动态特征[J]. 草业科学, 2022, **39**(6): 1080-1091.
Lu X Y, Jiao Z Y, Zhao X, et al. Dynamic characteristics of vegetation communities in natural recovery oil well development sites[J]. Pratacultural Science, 2022, **39**(6): 1080-1091.
- [5] 张继义, 赵哈林, 张铜会, 等. 科尔沁沙地植被恢复系列上群落演替与物种多样性的恢复动态[J]. 植物生态学报, 2004, **28**(1): 86-92.
Zhang J Y, Zhao H L, Zhang T H, et al. Dynamics of species diversity of communities in restoration processes in Horqin Sandy Land[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2004, **28**(1): 86-92.
- [6] 哈文秀, 肖桂英, 曹建华, 等. 喀斯特断陷盆地地区不同恢复阶段群落物种组成与多样性特征[J]. 生态学杂志, 2020, **39**

- (1): 36-45.
- Ha W X, Xiao G Y, Cao J H, *et al.* Species composition and diversity of plant community at different restoration stages of Karst Graben Basin [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39** (1): 36-45.
- [7] 古琛, 贾志清, 何凌仙子, 等. 恢复年限对高寒中间锦鸡儿群落组成和多样性的影响[J]. *草业科学*, 2022, **39**(7): 1303-1311.
- Gu C, Jia Z Q, He L X Z, *et al.* Chronosequence influences plant composition and diversity of *Caragana intermedia* plantations in an alpine sandy area[J]. *Pratacultural Science*, 2022, **39**(7): 1303-1311.
- [8] 乐易迅, 胡敏杰, 肖琳, 等. 河口湿地红树林植被恢复对土壤养分动态的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, **36**(3): 333-337.
- Le Y X, Hu M J, Xiao L, *et al.* Effects of mangrove vegetation restoration on soil nutrient dynamics in Estuarine Wetlands [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, **36**(3): 333-337.
- [9] 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.
- [10] 乐易迅, 胡敏杰, 赖兴凯, 等. 泉州湾河口湿地不同植被恢复下沉积物磷形态和酶活性特征[J]. *环境科学学报*, 2022, **42** (5): 355-363.
- Le Y X, Hu M J, Lai X K, *et al.* Changes of phosphorus speciation and enzyme activities in sediments of the Quanzhou Bay estuarine wetland under different vegetation restoration patterns [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, **42**(5): 355-363.
- [11] 孙小丽, 康萨如拉, 张庆, 等. 荒漠草原物种多样性、生产力与气候因子和土壤养分之间关系的研究[J]. *草业学报*, 2015, **24**(12): 10-19.
- Sun X L, Kang S R L, Zhang Q, *et al.* Relationship between species diversity, productivity, climatic factors and soil nutrients in the desert steppe [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, **24**(12): 10-19.
- [12] 郭曼, 郑粉莉, 和文祥, 等. 黄土丘陵区不同退耕年限植被多样性变化及其与土壤养分和酶活性的关系[J]. *土壤学报*, 2010, **47**(5): 979-986.
- Guo M, Zheng F L, He W X, *et al.* Variation of vegetation diversity and its relationship with soil nutrient and enzyme activity in lands of different abandoned years in the Loess Hilly-Gully Region [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, **47**(5): 979-986.
- [13] 赵啸龙, 谢玉鸿, 马旭君, 等. 科尔沁沙质草地不同恢复年限草本层群落结构及其与土壤理化性质的关系[J]. *中国沙漠*, 2022, **42**(2): 134-141.
- Zhao X L, Xie Y H, Ma X J, *et al.* Vegetation structure and its relationship with soil physicochemical properties in restoring sandy grassland in Horqin Sandy Land [J]. *Journal of Desert Research*, 2022, **42**(2): 134-141.
- [14] 乔文静, 戴银月, 张伟, 等. 黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5687-5698.
- Qiao W J, Dai Y Y, Zhang W, *et al.* Relationship between the vegetation community and soil nutrient and enzyme activity during the restoration of abandoned land in the Loess Hilly Region [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5687-5698.
- [15] Osborne B B, Soper F M, Nasto M K, *et al.* Litter inputs drive patterns of soil nitrogen heterogeneity in a diverse tropical forest: Results from a litter manipulation experiment [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, **158**, doi: 10.1016/j.soilbio.2021.108247.
- [16] Wang C, Yang Q N, Zhang C, *et al.* Soil organic nitrogen components and N-cycling enzyme activities following vegetation restoration of cropland in Danxia degraded region [J]. *Forests*, 2022, **13**(11), doi: 10.3390/f13111917.
- [17] Png G K, Lambers H, Kardol P, *et al.* Biotic and abiotic plant-soil feedback depends on nitrogen-acquisition strategy and shifts during long-term ecosystem development [J]. *Journal of Ecology*, 2019, **107**(1): 142-153.
- [18] Márton J, Nyárai F H, Tarnawa Á, *et al.* Plant and soil interrelations [J]. *Cereal Research Communications*, 2008, **36**: 7-10.
- [19] Kardol P, Bezemer T M, Van Der Putten W H. Temporal variation in plant-soil feedback controls succession [J]. *Ecology Letters*, 2006, **9**(9): 1080-1088.
- [20] Zechmeister-Boltenstern S, Keiblinger K M, Mooshammer M, *et al.* The application of ecological stoichiometry to plant-microbial-soil organic matter transformations [J]. *Ecological Monographs*, 2015, **85**(2): 133-155.
- [21] He J S, Wang L, Flynn D F B, *et al.* Leaf nitrogen: phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomes [J]. *Oecologia*, 2008, **155**(2): 301-310.
- [22] Elser J. Biological stoichiometry: A chemical bridge between ecosystem ecology and evolutionary biology [J]. *The American Naturalist*, 2006, **168**(S6): S25-S35.
- [23] 郭鑫, 魏天兴, 陈宇轩, 等. 黄土丘陵区典型退耕恢复植被土壤生态化学计量特征[J]. *干旱区地理*, 2022, **45**(6): 1899-1907.
- Guo X, Wei T X, Chen Y X, *et al.* Characteristics of soil ecological stoichiometry in typical fallow-restored vegetation in the Loess Hilly areas [J]. *Arid Land Geography*, 2022, **45**(6): 1899-1907.
- [24] 陈培云, 范弢, 何停, 等. 滇东岩溶高原不同恢复阶段云南松林叶片-枯落物-土壤碳氮磷化学计量特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2022, **28**(6): 1549-1556.
- Chen P Y, Fan T, He T, *et al.* Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus in leaf litter soil of *Pinus yunnanensis* forest during different restoration stages in the karst plateau of eastern Yunnan [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2022, **28**(6): 1549-1556.
- [25] 李欢, 魏雅丽, 闫帮国, 等. 元谋干热河谷沟蚀地区植被恢复对土壤养分和酶活性的影响[J]. *土壤通报*, 2020, **51**(5): 1118-1126.
- Li H, Wei Y L, Yan B G, *et al.* Effect of vegetation restoration on soil nutrients and enzyme activities in the Gully Eroded areas of Yuanmou Dry-hot Valley [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, **51**(5): 1118-1126.
- [26] 杨媛媛, 余志鹏, 宋进喜, 等. 2000年以来泸沱河流域不同地貌区植被变化特征及影响因素研究[J]. *生态环境学报*, 2022, **31**(2): 224-230.
- Yang Y Y, She Z P, Song J X, *et al.* Study on vegetation variation characteristics and influencing factors in different geomorphic zones in the Chanbahe river basin since 2000 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, **31**(2): 224-230.
- [27] 薛悦, 康海斌, 杨航, 等. 秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 550-559.
- Xue Y, Kang H B, Yang H, *et al.* Extracellular enzyme stoichiometry and microbial metabolism limitation during vegetation restoration process in the middle of the Qinling Mountains, China [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 550-559.
- [28] 晁颖. 秦岭北麓尾矿堆积体植被恢复及演替初步研究[D]. 杨

- 凌: 西北农林科技大学, 2022.
- Chao Y. Preliminary study on vegetation restoration and succession of tailings accumulation in the north foot of Qinling Mountains[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022.
- [29] 张富荣, 柳洋, 史常明, 等. 不同恢复年限刺槐林土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征[J]. 生态环境学报, 2021, **30**(3): 485-491.
- Zhang F R, Liu Y, Shi C M, *et al.* Soil carbon, nitrogen, phosphorus content and their ecological stoichiometric characteristics in different plantation ages [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, **30**(3): 485-491.
- [30] 彭舜磊, 梁亚红, 陈昌东, 等. 伏牛山东麓不同植被恢复类型土壤入渗性能及产流预测[J]. 水土保持研究, 2013, **20**(4): 29-33.
- Peng S L, Liang Y H, Chen C D, *et al.* Prediction of soil infiltration capacity and runoff under different restored vegetation types on the eastern side of Funiu Mountains [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, **20**(4): 29-33.
- [31] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [32] 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.
- [33] German D P, Weintraub M N, Grandy A S, *et al.* Optimization of hydrolytic and oxidative enzyme methods for ecosystem studies [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, **43**(7): 1387-1397.
- [34] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 等. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II 丰富度、均匀度和物种多样性指数[J]. 生态学报, 1995, **15**(3): 268-277.
- Ma K P, Huang J H, Yu S L, *et al.* Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China: II. species richness, evenness and species diversities [J]. Acta Ecologica Sinica, 1995, **15**(3): 268-277.
- [35] 张峰, 张金屯, 上官铁梁. 历山自然保护区猪尾沟森林群落植物多样性研究[J]. 植物生态学报, 2002, **26**(S1): 46-51.
- Zhang F, Zhang J T, Shangguan T L. Plant diversity of forest community in Zhuweigou of Lishan Mountain nature reserve [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2002, **26**(S1): 46-51.
- [36] 李强, 周道玮, 陈笑莹. 地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用[J]. 生态学报, 2014, **34**(14): 3807-3819.
- Li Q, Zhou D W, Chen X Y. The accumulation, decomposition and ecological effects of above-ground litter in terrestrial ecosystem [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(14): 3807-3819.
- [37] Hättenschwiler S, Tiunov A V, Scheu S. Biodiversity and litter decomposition in terrestrial ecosystems [J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2005, **36**: 191-218.
- [38] Han W X, Fang J Y, Guo D L, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. New Phytologist, 2005, **168**(2): 377-385.
- [39] Wang Z F, Zheng F L. Impact of vegetation succession on leaf-litter-soil C:N:P stoichiometry and their intrinsic relationship in the Ziwuling Area of China's Loess Plateau [J]. Journal of Forestry Research, 2021, **32**(2): 697-711.
- [40] Takashima T, Hikosaka K, Hirose T. Photosynthesis or persistence: nitrogen allocation in leaves of evergreen and deciduous *Quercus* species [J]. Plant, Cell and Environment, 2004, **27**(8): 1047-1054.
- [41] Parton W, Silver W L, Burke I C, *et al.* Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition [J]. Science, 2007, **315**(5810): 361-364.
- [42] 黄雍容, 高伟, 黄石德, 等. 福建三种常绿阔叶林碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2021, **41**(5): 1991-2000.
- Huang Y R, Gao W, Huang S D, *et al.* Ecstoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in Fujian evergreen broad-leaved forest [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(5): 1991-2000.
- [43] Ma R T, Hu F N, Liu J F, *et al.* Shifts in soil nutrient concentrations and C:N:P stoichiometry during long-term natural vegetation restoration [J]. PeerJ, 2020, **8**, doi: 10.7717/peerj.8382.
- [44] 王志齐, 杜兰兰, 赵慢, 等. 黄土区不同退耕方式下土壤碳氮的差异及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(3): 716-722.
- Wang Z Q, Du L L, Zhao M, *et al.* Differences in soil organic carbon and total nitrogen and their impact factors under different restoration patterns in the Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27**(3): 716-722.
- [45] Wei Y A, Yu L F, Zhang J C, *et al.* Relationship between vegetation restoration and soil microbial characteristics in degraded Karst regions: a case study [J]. Pedosphere, 2011, **21**(1): 132-138.
- [46] Güsewell S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance [J]. New Phytologist, 2004, **164**(2): 243-266.
- [47] Jiao F, Wen Z M, An S S, *et al.* Successional changes in soil stoichiometry after land abandonment in Loess Plateau, China [J]. Ecological Engineering, 2013, **58**: 249-254.
- [48] Cheng Y T, Li P, Xu G C, *et al.* Spatial distribution of soil total phosphorus in Yingwugou watershed of the Dan River, China [J]. CATENA, 2016, **136**: 175-181.
- [49] Adamczyk B, Kilpeläinen P, Kitunen V, *et al.* Potential activities of enzymes involved in N, C, P and S cycling in boreal forest soil under different tree species [J]. Pedobiologia, 2014, **57**(2): 97-102.
- [50] Waring B G, Weintraub S R, Sinsabaugh R L. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial nutrient acquisition in tropical soils [J]. Biogeochemistry, 2014, **117**(1): 101-113.
- [51] Bardgett R D, Bowman W D, Kaufmann R, *et al.* A temporal approach to linking aboveground and belowground ecology [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2005, **20**(11): 634-641.
- [52] 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.
- [53] Zhong Z K, Zhang X Y, Wang X, *et al.* Soil bacteria and fungi respond differently to plant diversity and plant family composition during the secondary succession of abandoned farmland on the Loess Plateau, China [J]. Plant and Soil, 2020, **448**(1-2): 183-200.
- [54] 张雅琪, 陈林, 庞丹波, 等. 土壤微生物群落对枯落物输入的响应[J]. 应用生态学报, 2022, **33**(11): 2943-2953.
- Zhang Y Q, Chen L, Pang D B, *et al.* Responses of soil microbial community structure to litter inputs [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, **33**(11): 2943-2953.
- [55] 王浩, 党晓宏, 蒯博, 等. 采煤沉陷区不同林分枯落物分解速率及养分动态变化[J]. 北方园艺, 2022, (19): 87-93.

- Wang H, Dang X H, Lin B, *et al.* Decomposition rate of litter and dynamic change of nutrients in different stands in coal mining subsidence area [J]. *Northern Horticulture*, 2022, (19): 87-93.
- [56] 卢胜旭, 许恩兰, 吴东梅, 等. 米槠人工林土壤微生物群落组成对凋落物输入的响应[J]. *森林与环境学报*, 2020, **40**(1): 16-23.
- Lu S X, Xu E L, Wu D M, *et al.* Response of soil microbial community composition on litterfall input in a *Castanopsis carlesii* plantation[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2020, **40**(1): 16-23.
- [57] 贺启琮, 陈大岭, 李邵宇, 等. 阴山北麓不同恢复年限弃耕地植物群落生物量与土壤养分变化[J]. *中国草地学报*, 2022, **44**(10): 30-37.
- He Q K, Chen D L, Li S Y, *et al.* Changes of plant community biomass and soil nutrients in abandoned farmland in different restoration years at the northern piedmont of Yinshan Mountain[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, **44**(10): 30-37.
- [58] 王凯博, 陈美玲, 秦娟, 等. 子午岭植被自然演替中植物多样性变化及其与土壤理化性质的关系[J]. *西北植物学报*, 2007, **27**(10): 2089-2096.
- Wang K B, Chen M L, Qin J, *et al.* Plant species diversity and the relation with soil properties in natural succession process in Ziwuling area [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, **27**(10): 2089-2096.
- [59] 刘洋, 侯占山, 赵爽, 等. 太行山片麻岩山区造地边坡植被恢复过程中植物多样性与土壤特性的演变[J]. *生态学报*, 2018, **38**(15): 5331-5339.
- Liu Y, Hou Z S, Zhao S, *et al.* Evolution of plant species diversity and soil characteristics on hillslopes during vegetation restoration in the gneiss region of the Taihang Mountains after reclamation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(15): 5331-5339.
- [60] 符裕红, 黄宗胜, 喻理飞. 岩溶区典型根系地下生境类型中土壤酶活性研究[J]. *土壤学报*, 2012, **49**(6): 1202-1209.
- Fu Y H, Huang Z S, Yu L F. Soil enzyme activities in the type of root underground habitat typical of karst areas[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, **49**(6): 1202-1209.
- [61] 杨万勤, 钟章成, 陶建平, 等. 缙云山森林土壤酶活性与植物多样性的关系[J]. *林业科学*, 2001, **37**(4): 124-128.
- Yang W Q, Zhong Z C, Tao J P, *et al.* Study on relationship between soil enzymic activities and plant species diversity in forest ecosystem of MT. Jinyun[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, **37**(4): 124-128.
- [62] 何跃军, 刘锦春, 钟章成, 等. 重庆石灰岩地区植被恢复过程土壤酶活性与植物多样性的关系[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2008, **30**(4): 139-143.
- He Y J, Liu J C, Zhong Z C, *et al.* Correlation between soil enzyme activities and biodiversity during the recovery process of vegetation in a Limestone area[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2008, **30**(4): 139-143.
- [63] 廖全兰, 龙翠玲, 薛飞, 等. 茂兰喀斯特森林不同地形土壤酶与植物多样性的关系[J]. *东北林业大学学报*, 2021, **49**(10): 117-121, 126.
- Liao Q L, Long C L, Xue F, *et al.* Effect of different terrains in Maolan Karst forest on soil enzyme activity and plant diversity[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2021, **49**(10): 117-121, 126.
- [64] 潘玉梅, 张乃莉. 亚热带森林树种多样性对凋落叶分解胞外酶活性的影响[J]. *生物多样性*, 2021, **29**(11): 1447-1460.
- Pan Y M, Zhang N L. Effects of tree diversity on enzyme activity in litter of a subtropical forest ecosystem [J]. *Biodiversity Science*, 2021, **29**(11): 1447-1460.
- [65] Raiesi F, Salek-Gilani S. The potential activity of soil extracellular enzymes as an indicator for ecological restoration of rangeland soils after agricultural abandonment [J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, **126**: 140-147.

CONTENTS

Impacts of Anthropogenic Emission Reduction on Urban Atmospheric Oxidizing Capacity During the COVID-19 Lockdown	ZHU Jian-lan, QIN Mo-mei, ZHU Yan-hong, <i>et al.</i> (617)
Transport and Potential Sources Regions of Double High Pollution in Nanjing by Different Synoptic Situations	QIN Yang, HU Jian-lin, KONG Hai-jiang (626)
Differences of Three Methods in Determining Ozone Sensitivity in Nanjing	CHEN Gan-yu, LI Xun, LI Lin, <i>et al.</i> (635)
Characteristics of Ozone Concentration in Shanghai and Its Associated Atmospheric Circulation Background During Summer Half-years from 2006 to 2021	ZHENG Qing-feng, LIANG Ping, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (645)
Distribution Characteristics of Near Surface Ozone Volume Fraction in Shanxi Province Based on Atmospheric Composition Observation Network	LI Ying, WANG Shu-min, PEI Kun-ning, <i>et al.</i> (655)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in Yining City	WANG Wen-ting, GU Chao, LI Li-ming, <i>et al.</i> (668)
Characteristics, Sources, and Ozone-sensitive Species of VOCs in Four Seasons in Yuncheng	YIN Shi-jie, LIU Xin-gang, LIU Ya-fei, <i>et al.</i> (678)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Activity Analysis of Atmospheric VOCs During Winter and Summer Pollution in Zhengzhou	LAI Meng-jie, ZHANG Dong, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (689)
Pollution Characteristics, Sources, and Secondary Generation of Organic Acids in PM _{2.5} in Zhengzhou	LI Zi-han, DONG Zhe, SHANG Lu-qi, <i>et al.</i> (700)
Nonlinear Variations in PM _{2.5} Concentration in the Three Major Urban Agglomerations in China	WU Shu-qi, GU Yang-yang, ZHANG Tian-yue, <i>et al.</i> (709)
Medium and Long-term Carbon Emission Projections and Emission Reduction Potential Analysis of the Lingang Special Area Based on the LEAP Model	WU Qiong, MA Hao, REN Hong-bo, <i>et al.</i> (721)
Dynamic Analysis on Carbon Metabolism of the Northern Region of China Under the Background of Carbon Emission Trading Policy	ZHENG Hong-mei, SHEN Fang, XU Guang-yao, <i>et al.</i> (732)
Carbon Reduction Analysis of Life Cycle Prediction Assessment of Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Considering Regional Features and Vehicle Type Differences	MA Jing, CAI Xu, ZHANG Chun-mei, <i>et al.</i> (744)
Nitrate Pollution Characteristics and Its Quantitative Source Identification of Major River Systems in China	WEI Ying-huai, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (755)
Effects of Land Use Structure and Spatial Pattern at Different Temporal and Spatial Scales on Water Quality in Suzhou Creek	TAN Juan, XIONG Li-jun, WANG Qing, <i>et al.</i> (768)
Spatial-temporal Variation in Water Quality of Rain-source Rivers in Shenzhen from 2015 to 2021 and Its Response to Rainfall	WEI Bi-ying, CHENG Jian-mei, SU Xiao-yu, <i>et al.</i> (780)
Chemical Characteristics of Shallow Groundwater in the Yellow River Diversion Area of Henan Province and Identification of Main Control Pollution Sources	WANG Shuai, REN Yu, GUO Hong, <i>et al.</i> (792)
Chemical Characteristics and Genetic Analysis of Karst Groundwater in the Beijing Xishan Area	GUO Gao-xuan, DAI Yin-dong, XU Liang, <i>et al.</i> (802)
Hydrochemical Characteristics and Its Origin of Surface Water and Groundwater in Dianbu River Basin	ZHENG Tao, QIN Xian-yan, WU Jian-xiong (813)
Hydrochemical Characteristics and Genesis Mechanism of Groundwater in the Dry Period in the Zhangjiakou Area	JIN Ai-fang, YIN Xiu-lan, LI Chang-qing, <i>et al.</i> (826)
Distribution of Typical Resistant Bacteria and Resistance Genes in Source Water of the Middle and Lower Reaches of the Yellow River	MIN Wei, GAO Ming-chang, SUN Shao-fang, <i>et al.</i> (837)
Contamination Characteristics, Detection Methods, and Control Methods of Antibiotic Resistance in Pharmaceutical Wastewater	PENG An-ping, GAO Hu, ZHANG Xin-bo (844)
Effect of Water Components on Aggregation and Sedimentation of Polystyrene Nano-plastics	TANG Duan-yang, ZHENG Wen-li, CHEN Guan-tong-yi, <i>et al.</i> (854)
Lead Removal from Water by Calcium-containing Biochar with Saturated Phosphate	LIU Tian, LÜ Si-lu, DU Xing-guo, <i>et al.</i> (862)
Preparation of Chitosan-modified Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺ in Aqueous Solution	JIANG Ling, AN Jing-yue, YUE Xiao-qiong, <i>et al.</i> (873)
Efficacy and Mechanism of Tetracycline Adsorption by Boron-doped Mesoporous Carbon	ZOU Zhen, XU Lu, QIAO Wei, <i>et al.</i> (885)
Adsorption Properties of Magnetic Phosphorous Camellia Oleifera Shells Biochar to Sulfamethoxazole in Water	HAN Shuai-peng, TANG Li-wen, LIU Qin, <i>et al.</i> (898)
High Resolution Emission Inventory of Greenhouse Gas and Its Characteristics in Guangdong, China	LU Qing, TANG Ming-shuang, LIAO Tong, <i>et al.</i> (909)
Ecosystem CO ₂ Exchange and Its Environmental Regulation of a Restored Wetland in the Liaohe River Estuary	LIU Si-qi, CHEN Hong, XING Qing-hui, <i>et al.</i> (920)
Effects of Biochar Application Two Years Later on N ₂ O and CH ₄ Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region of China	HU Yu-jie, TANG Rui-jie, HU Tian-yi, <i>et al.</i> (929)
Research and Application Progress of Biochar in Amelioration of Saline-Alkali Soil	WEI Ying, JIAO Le, ZHANG Peng, <i>et al.</i> (940)
Effect of No-tillage on Soil Aggregates in Farmland: A Meta Analysis	XU Yi-ping, RAO Yue-yue, MENG Yan, <i>et al.</i> (952)
Spatio-temporal Evolution and Multi-scenario Simulation of Carbon Storage in Karst Regions of Central Guizhou Province; Taking Puding County as An Example	LI Yue, LUO Hong-fen (961)
Effects of Different Modifiers on Aggregates and Organic Carbon in Acidic Purple Soil	LI Yue, XU Man, XIE Yong-hong, <i>et al.</i> (974)
Effect of Ca Modified Biochar on the Chemical Speciation of Soil Phosphorus and Its Stabilization Mechanism	ZHANG Chao, ZHAI Fu-jie, SHAN Bao-qing (983)
Plant Diversity Changes and Its Driving Factors of Abandoned Land at Different Restoration Stages in the Middle of the Qinling Mountains	YAN Cheng-long, XUE Yue, WANG Yi-fei, <i>et al.</i> (992)
Contamination Characteristics and Ecological Risk of Antibiotics in Contaminated Sites of Typical Pharmaceutical Factories in China	YANG Jiong-bin, HUANG Zheng, ZHAO Jian-liang, <i>et al.</i> (1004)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Guangzhou	ZOU Zi-hang, CHEN Lian, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i> (1015)
Quantifying the Contribution of Soil Heavy Metals to Ecological and Health Risk Sources	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (1026)
Potential Ecological Risk Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils around Typical Factories in Hunan Province Based on Monte-Carlo Simulation	LUO Hao-jie, PAN Jun, CHEN Xiao-xia, <i>et al.</i> (1038)
Health Risk Assessment for an Arsenic-contaminated Site Based on Monte Carlo Simulation and Parameters Optimization	YUAN Bei, LIU Hu-peng, DU Ping, <i>et al.</i> (1049)
Pollution Source Apportionment of Heavy Metals in Cultivated Soil Around a Red Mud Yard Based on APCS-MLR and PMF Models	SHEN Zhi-jie, LI Jie-qin, LI Cai-xia, <i>et al.</i> (1058)
Characteristics and Mechanism of Cd Release and Transport in Soil Contaminated with PE-Cd	WANG Di, XU Shao-hui, SHAO Ming-yan, <i>et al.</i> (1069)
Characterization of Reductive Dechlorination of Chlorinated Ethylenes by Anaerobic Consortium	LI Wei, LIU Gui-ping, LIU Jun, <i>et al.</i> (1080)
Analysis of Heavy Metal Pollution Evaluation and Correlation of Farmland Soil and Vegetables in Zhaotong City	ZHANG Hao, DONG Chun-yu, YANG Hai-chan, <i>et al.</i> (1090)
Safe Utilization Effect of Passivator on Mild to Moderate Cadmium Contaminated Farmland	WANG Xiao-jing, ZHANG Dong-ming, CAO Yang, <i>et al.</i> (1098)
Simultaneous Immobilization of Cadmium and Arsenic in Paddy Soils with Novel Fe-Mn Combined Graphene Oxide	YUAN Jing, WU Ji-zi, LIAN Bin, <i>et al.</i> (1107)
Effects of the Application of Irrigation Water Containing Zn at the Key Growth Period on the Uptake and Transport of Cd in Rice	ZHOU Xia, HU Yu-dan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (1118)
Effects of Exogenous Zinc on Growth and Root Architecture Classification of Maize Seedlings Under Cadmium Stress	ZHANG Hui-hong, WEI Chang, LIU Hai-tao, <i>et al.</i> (1128)
Mitigative Effect of Rare Earth Element Cerium on the Growth of Zinc-stressed Wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) Seedlings	ZHANG Jing-jing, XU Zheng-yang, JIAO Qiu-juan, <i>et al.</i> (1141)
Two-stage Inhibition Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 Application on Cadmium Uptake and Transport in Wheat	GUO Jia-jia, WANG Chang-rong, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (1150)
Effects of Combined Stress of High Density Polyethylene Microplastics and Chlorimuron-ethyl on Soybean Growth and Rhizosphere Bacterial Community	HU Xiao-yue, HUA Zi-wei, YAO Lun-guang, <i>et al.</i> (1161)
Human Accumulation and Toxic Effects of Microplastics: A Critical Review	BAO Ya-bo, WANG Cheng-chen, PENG Wu-guang, <i>et al.</i> (1173)
Overview of the Application of Machine Learning for Identification and Environmental Risk Assessment of Microplastics	BAI Run-hao, FAN Rui-qi, LIU Qi, <i>et al.</i> (1185)
Research Process on the Combined Pollution of Microplastics and Typical Pollutants in Agricultural Soils	HOU Yu-qing, LI Bing, WANG Jin-hua, <i>et al.</i> (1196)
Research Progress in Electrochemical Detection and Removal of Micro/Nano Plastics in Water	ZHENG Wei-kang, LIU Zhen-zhong, XIANG Xiao-fang (1210)
Factors Influencing Willingness of Farmers to Pay for Agricultural Non-point Source Pollution Control Based on Distributed Cognitive Theory	GUO Chen-hao, LI Lin-fei, XIA Xian-li (1222)