

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第12期

Vol.39 No.12

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征 秦雨, 张强, 李鑫, 赵红艳, 同丹, 郑逸璇, 耿冠楠, 贺克斌 (5289)
基于 LUR 模型的中国 PM_{2.5} 时空变化分析 刘炳杰, 彭晓敏, 李继红 (5296)
长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制
..... 黄丹丹, 周敏, 余传冠, 朱书慧, 王裕成, 乔利平, 楼晟荣, 陶士康, 杨强, 李莉 (5308)
春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析 杨阳, 李杏茹, 陈曦, 刘水桥, 刘雨思, 徐静, 王莉莉, 陶明辉, 王格慧 (5315)
成都双流夏秋季环境中 VOCs 污染特征 邓媛元, 李晶, 李亚琦, 吴蓉蓉, 谢绍东 (5323)
佛山市典型铝型材行业表面涂装 VOCs 排放组成
..... 李霞, 苏伟健, 黎碧霞, 龙森, 黎丽莉, 张洲, 于跃刚, 王云鹏, 王新明 (5334)
四川省人为源大气污染物排放清单及特征 周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 杨欣悦, 周小玲 (5344)
炼焦工序颗粒物排放特征 王彦辉, 赵亮, 孙文强, 叶竹, 蔡九菊 (5359)
小流域大气氮干湿沉降特征 王焕晓, 庞树江, 王晓燕, 樊彦波 (5365)
流域氮素主要输出途径及变化特征 李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 刘宏斌, 胡万里, 刘申, 任天志 (5375)
生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响 斯林林, 周静杰, 吴良欢, 胡兆平 (5383)
长江上游农业源溪流雨季中 N₂O 间接排放特征 田琳琳, 王正, 朱波 (5391)
不同氮污染特征河流 NO₃⁻ 浓度、释放通量与排放系数 王森, 李亚峰, 雷坤, 杨丽标 (5400)
多种同位素手段的硝酸盐污染源解析: 以会仙湿地为例 彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁 (5410)
典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 δ¹⁸O 时空分布特征: 以重庆市中梁山岩溶槽谷为例
..... 吴韦, 蒋勇军, 贾亚男, 彭学义, 段世辉, 刘九缠, 王正雄 (5418)
沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析 刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 蔡月梅, 边超, 吕永高, 陈远铭 (5428)
2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响 廖安然, 宋献方, 张应华, 杨丽虎, 卜红梅, 马英, 韩冬梅, 秦文婧, 杨胜天 (5440)
周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征
..... 周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 李再兴, 罗晓 (5451)
三峡库区沉积物中镍污染特征评价 张伟杰, 殷淑华, 徐东昱, 高丽, 高博 (5464)
四面山大洪湖底泥/水界面汞的迁移转化规律 郭攀, 孙涛, 杨光, 马明 (5473)
大兴安岭南麓河湿地类型对土壤中甲基汞分布的影响 周心功, 刘玉荣, 李晶, 周志峰 (5480)
模拟三峡库区消落带土壤有机磷酸酯类水释放特征 杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (5487)
典型旅游城市河流水体及污水厂出水中全氟烷基酸类化合物的空间分布及其前体物的转化
..... 王世亮, 孙建树, 杨月伟, 张敏 (5494)
4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析 江肖良, 李孟, 张少辉, 张世羊 (5503)
微量元素锰对威氏海链藻生长及叶绿素荧光的影响 王木兰, 姜玥璐 (5514)
广东省水库拟柱孢藻 (*Cylindrospermopsis raciborskii*) 的分布特征及影响因子分析 雷敏婷, 彭亮, 韩博平, 雷腊梅 (5523)
磁性壳聚糖接枝聚丙烯酰胺去除水体中腐殖酸 尤雯, 刘海成, 曹家玮, 沈耀良, 陈卫 (5532)
臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果 兰亚琼, 刘锐, 马正杰, 陈吕军 (5541)
水解酸化/AO 组合工艺处理印染废水色度去除与脱氮性能 顾梦琪, 尹启东, 刘爱科, 吴光学 (5550)
“异养-硫自养”组合工艺去除高浓度高氯酸盐特性 刘颖男, 陶华强, 宋圆圆, 张春青, 逯彩彩, 韩懿, 李海波, 郭建博 (5558)
静压快速启动亚硝酸盐依赖型甲烷厌氧氧化反应 王一因, 胡振, 茹东云, 姜丽萍, 刘华清 (5565)
多级 AO 耦合流离生化工艺流量分配比优化及脱氮机制 王帆, 李军, 边德军, 聂泽兵, 张莉, 孙艺齐 (5572)
主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效能脱氮过程 刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 王建芳, 吴鹏, 钱飞跃, 陈重军 (5580)
不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响 高雪健, 张杰, 李冬, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (5587)
主流厌氧氨氧化工艺的运行优化及其微生物的群落变迁 付昆明, 付冀, 李慧, 姜姍, 仇付国, 曹秀芹 (5596)
厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性 陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 黄勇, 李祥, 陆明羽, 方文辉, 金润 (5605)
低温反硝化菌——施氏假单胞菌 N3 的筛选及脱氮性能 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (5612)
复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险 吴健, 王敏, 张辉鹏, 黄宇驰, 徐志豪, 李青青, 陈昊, 黄沈发 (5620)
不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险 李春芳, 曹见飞, 吕建树, 姚磊, 吴泉源 (5628)
某大型神渣场地土壤 As 污染特征及生态风险评价 刘庚, 石瑛, 田海金, 李豪, 张蕾, 牛俊杰, 郭观林, 张朝 (5639)
亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系 辛胜林, 梁月明, 彭文杰, 宋昂, 靳振江, 朱美娜, 李强 (5647)
岩溶区典型灌丛植物根系从枝菌根真菌群落结构解析 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (5657)
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 李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 刘国平, 白文明, 贺纪正 (5665)
添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响 柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 祝贞科, 李科林, 彭佩钦, 吴小红, 葛体达, 吴金水 (5672)
长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响 马欣, 魏亮, 唐美玲, 徐福利, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5680)
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 乔文静, 戴银月, 张伟, 付淑月, 杨改河, 韩新辉, 陈正兴, 高德新, 冯永忠 (5687)
生活垃圾不同填埋阶段的富里酸对五氯苯酚的降解 刘思佳, 何小松, 张慧, 祖国峰, 席北斗, 李丹, 党秋玲 (5699)
CO₂ 倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征 唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 王光军, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5708)
基于层次分析法的医疗废物处置技术评价 许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 李金惠 (5717)
中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力 刘晓永, 王秀斌, 李书田 (5723)
《环境科学》第 39 卷(2018 年) 总目录 (5740)
《环境科学》征订启事 (5343) 《环境科学》征稿简则 (5439) 信息 (5595, 5619, 5638)

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

乔文静^{1,2}, 戴银月^{1,2}, 张伟^{1,2}, 付淑月^{1,2}, 杨改河^{1,2*}, 韩新辉^{1,2}, 陈正兴^{1,2}, 高德新^{1,2}, 冯永忠^{1,2}

(1. 西北农林科技大学农学院, 杨凌 712100; 2. 陕西省循环农业工程技术研究中心, 杨凌 712100)

摘要: 为揭示黄土丘陵区植被恢复过程中土壤性质变化趋势, 以黄土丘陵区 10~45a 的撂荒地为研究对象, 分析撂荒后植被恢复过程中植物群落演变规律、土壤养分含量、4 种酶活性变化及其相关关系. 结果表明, 随着撂荒年限的增加, 恢复过程中主要群落的演变为猪毛蒿 (*Artemisia scoparia*) → 达乌里胡枝子 (*Lespedeza dahurica*) + 铁杆蒿 (*Artemisia sacrorum*) → 芡蒿 (*Artemisia giraldii*) + 铁杆蒿 → 白羊草 (*Bothriochloa flaccidum*) + 芡蒿, 群落多样性指数整体表现为先增后减的趋势, 菊科 (Compositae)、禾本科 (Poaceae) 及豆科 (Leguminosae) 这 3 科占比从 66.67% 降至 50%, 后上升到 75%. 土壤有机碳 (SOC)、全氮 (TN)、全磷 (TP)、速效氮 (AN)、速效磷 (AP) 与碱性磷酸酶 (ALP)、过氧化氢酶 (CAT)、脲酶 (UE) 与蔗糖酶 (SC) 这 4 种酶活性呈增加趋势, 但增加程度不同, 化学计量比总体呈波动上升趋势. 菊科、禾本科与豆科相比总科数、总属数、总种数及植物多样性, 对养分和酶活性有更显著的影响, 贡献率分别为 72.8%、69.1%、66.0%, 且三大科对土壤酶的影响大于土壤养分, 其中禾本科与豆科对养分及酶活性表现为正影响, 而菊科表现为负影响. 撂荒恢复过程中草地群落优势科占比的升高显著影响土壤酶的升高, 并导致土壤养分变化.

关键词: 黄土丘陵区; 撂荒地; 植物群落; 化学计量; 酶活性

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)12-5687-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.201802030

Relationship Between the Vegetation Community and Soil Nutrient and Enzyme Activity During the Restoration of Abandoned Land in the Loess Hilly Region

QIAO Wen-jing^{1,2}, DAI Yin-yue^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, FU Shu-yue^{1,2}, YANG Gai-he^{1,2*}, HAN Xin-hui^{1,2}, CHEN Zheng-xing^{1,2}, GAO De-xin^{1,2}, FENG Yong-zhong^{1,2}

(1. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Shaanxi Engineering Research Center of Circular Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: The trends of and relationships among the plant community, soil nutrients, and four soil enzymes were investigated after being abandoned for 10, 15, 20, 30, and 45 years to reveal the soil properties during the restoration in the Loess Hilly Region. The results indicate the following ranking of dominant plant community species: *Artemisia scoparia* → *Lespedeza dahurica* + *Artemisia sacrorum* → *Artemisia giraldii* + *Artemisia annua* → *Bothriochloa flaccidum* + *Artemisia selengensis*. The ranking reflects an increase along the chronosequence of abandoned land. Moreover, the ratio of the total species of Compositae, Poaceae, and Leguminosae decreases from 66.67% to 50% and then increases up to 75%. The SOC, TN, TP, AN, AP, and four enzyme activity types (ALP, CAT, UE, and SC) increase but respond differently to restoration, while the stoichiometric ratio fluctuates. In contrast to the number of plant families, genus, species, and plant diversity, Compositae, Poaceae, and Leguminosae have major effects on the soil nutrient and enzyme activity, which explains the total variation of 72.8%, 69.1%, and 66.0%, respectively. The effects of these three families on the soil enzymes are greater than that on soil nutrients. Poaceae and Leguminosae have a positive effect on the nutrient and enzyme activity, while the family Compositae has a negative effect. Overall, the changes of dominant species of grassland communities during restoration significantly affect the soil enzyme and thereby are responsible for the soil nutrient dynamics.

Key words: Loess Hilly Region; abandoned land; vegetation community; stoichiometry; enzyme activity

退耕还林还草工程实施以来, 黄土丘陵地区植被覆盖显著增加^[1,2], 土壤侵蚀得到有效控制^[3]、土壤质量明显改善^[4], 生态效益逐渐提高^[5]. 植被恢复过程实质上是植物与土壤相互反馈的协同作用过程^[6]. 其中, 土壤为植物生长提供必要的水分和养分, 而植物在生长过程中以凋落物和根系等形式实现土壤养分循环和质量改良^[7]. 因此, 明确植被

恢复过程中植物群落特征与土壤养分变化的关系, 对揭示黄土丘陵区植被恢复过程及土壤性质变化趋

收稿日期: 2018-02-04; 修订日期: 2018-05-16

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0504601); 国家自然科学基金项目 (41571501)

作者简介: 乔文静 (1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为资源与环境生态学, E-mail: Qiaowj1994@163.com

* 通信作者, E-mail: ygh@nwsuaf.edu.cn

势具有重要的科学意义。

植物作为生态系统的生产者,在长期的生长过程中逐渐形成了独特的形态、生理和物候特征.研究表明,不同科植物的叶片养分含量存在差异,如豆科植物中 N 含量较多,禾本科植物的 C 含量较高,菊科植物叶片中 P 和 K 含量大于禾本科和豆科^[8].在植物凋落物的形式为土壤提供养分输入的过程中^[9],不同物种进行养分归还速度和数量不同^[10],如阔叶树的养分归还比例大于针叶树^[11],次生林的养分归还量大于原生林^[12],从而导致土壤养分状况存在差异.此外,不同造林物种还可以通过影响土壤微生物群落组成及多样性^[13]、土壤酶活性^[14]和植物的根系分泌物^[15],导致土壤养分含量的差异.综上,不同植物种群通过其自身独特的生物学特性影响土壤养分的来源及代谢过程,从而导致不同的植物-土壤反馈机制^[16].然而,植被恢复过程中物种组成变化引起的土壤理化性质及生物学活性变化过程极为复杂,相关研究仍不是很明确,如研究发现植被恢复中,植物的多样性、生物量^[17]以及植物的群落组成^[18, 19]对土壤造成影响,但是恢复过程中不同功能组植物(植物科属组成)对于土壤特性的影响机理亟待深入研究.

撂荒演替是一种改善土壤条件和恢复退化环境的有效途径,已成为生态学研究的热话题之一^[20].有研究表明,撂荒演替过程中物种组成变化表现为由一年生草本群落逐渐向多年生草本和小灌木群丛转变^[21],菊科植物逐渐取代禾本科植物成为群落优势物种,其中豆科植物伴生^[22],物种多样性也随演替年限的增加而增加^[23].撂荒恢复过程中群落结构组成及多样性的变化会促进土壤理化性质的改善以及微生物丰富度和酶活性的提升.有学者将土壤理化性质的变化与植物群落进行了相关性分析,多集中于数学关系的研究层面,有研究表明土壤养分和物种多样性呈显著的正相关性^[18],土壤有机质和全氮与物种多样性^[19]及地上生物量^[17]

呈显著正相关,但缺乏土壤养分对物种组成变化响应过程的深入分析,尤其是对不同功能组植物是如何影响土壤养分及生物学特征的研究.因此,本文选择黄土丘陵区耕地撂荒后不同恢复年限的草地序列,通过对植被群落与多样性特征、土壤养分含量与酶活性变化特征及相关性关系分析,以期为深入认知撂荒地恢复过程中植物-土壤的互馈与协同恢复机制提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于陕西省延安市吴起县杨青川流域(36°33'33"~37°24'27"N, 107°38'57"~108°32'49"E),海拔1 233~1 809 m,土壤为黄绵土,地形为黄土高原梁峁丘陵沟壑区,属暖温带半干旱气候,年平均降水量为478.3 mm,雨季在7~9月,年均温度7.8℃,年日照时间约为2 400 h,年最高气温在7~8月(37℃),年最低气温在1~2月(-20℃).草本植被多以禾本科(Poaceae)、豆科(Leguminosae)和菊科(Compositae)为主,优势种主要为猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、芨蒿(*Artemisia giraldii*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza dahurica*)及白羊草(*Bothriochloa flaccidum*)等.

1.2 样地选择与植被调查

通过查阅资料及实地调查,2015年7~8月于流域内选择撂荒10、15、20、30和45 a的草地群落作为研究对象,详细信息见表1.每个草地中设置3个20 m×20 m的大样方,3个样方之间的距离超过了大多数土壤变量的空间依赖性(<13.5 m)^[13],在每个大样方中按“S”形随机地选取10个1 m×1 m的小样方,使用样方法调查记录样方内所有出现的草本植物的植物名,使用标尺测量样方内每株植物的高度,同种植物的盖度及密度^[18].并使用GPS进行样地经纬度、海拔及坡向等样地信息的采集.

表1 采样点基本信息及土壤基本性质¹⁾

Table 1 Characteristics of the soil sampling sites and basic soil properties

年限/a	海拔/m	坡度/(°)	坡向/(°)	经纬度	土壤含水量/%	土壤容重/g·cm ⁻³
10	1 417	20	南偏西 15	E108°13.074'; N36°51.080'	7.52 ± 0.24 c	1.26 ± 0.01 a
15	1 467	17	南偏东 40	E108°13.075'; N36°51.169'	8.56 ± 0.15 b	1.2 ± 0.01 b
20	1 440	18	南偏西 15	E108°12.521'; N36°51.135'	9.4 ± 0.08 a	1.19 ± 0.01 b
30	1 425	25	南偏东 20	E108°12.667'; N36°51.333'	9.14 ± 0.19 ab	1.19 ± 0.01 b
45	1 541	24	南偏东 16	E108°13.401'; N36°53.331'	8.63 ± 0.21 b	1.11 ± 0.03 c

1) 小写字母表示在0.05水平上显著,下同

1.3 土壤样品采集

在每个 20 m × 20 m 的大样方中按照“S”形选取 10 个采样点,除去表面凋落物及植物残体后,用直径为 5 cm 的土钻采集表层(0~10 cm)土壤,将同一样地内 10 个土样混合均匀后分成两份,一份过 2 mm 筛网筛分后 4℃ 冷藏保存,用于测定土壤酶活性,另一份室温下风干后用于测定土壤理化性质。

1.4 土壤理化性质及土壤酶的测定

采用烘干法测定土壤含水量(soil water content, SWC)^[24],环刀法测量容重(soil bulk density, SBD)^[25]。土壤有机碳(SOC)使用重铬酸钾容量法测定,全氮(TN)采用半微量凯氏测定法,全磷(TP)利用碳酸钠熔融-钼锑抗比色法测定,速效氮(AN)采用 KCl 浸提流动注射分析仪测定,速效磷(AP)采用碳酸氢钠法测定^[25]。碱性磷酸酶(alkaline phosphatase, ALP)使用磷酸苯二钠比色法测定,用 1 g 土壤中 2 h 后的苯酚量(mg)表示;过氧化氢酶(catalase, CAT)采用高锰酸钾滴定法测定,以 1 g 土壤 20 min 后消耗 0.1 mol·L⁻¹的高锰酸钾量(mL)表示;脲酶(urease, UE)利用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定,活性以 24 h 后 1 g 土壤中的 NH₄⁺-N 量(mg)表示;蔗糖酶(saccharase, SC)采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,以 24 h 后 1 g 土壤中含有的葡萄糖量(mg)表示^[26, 27]。

1.5 物种多样性计算

选取 Gleason 丰富度指数(G , Gleason index 指数)、Simpson 多样性指数(D , Simpson index 指数)、Shannon-Wiener 多样性指数(H , Shannon-Wiener index 指数)和 Pielou 均匀度指数(E , Pielou index 指数)这 4 个指数来进行物种多样性的衡量^[28-29],选取重要值来反映物种在这一群落的优势程度^[30]。

Gleason 丰富度指数(G):

$$G = \frac{S}{\ln A}$$

Simpson 多样性指数(D):

$$D = 1 - \sum_i \frac{N_i(N_i - 1)}{N(N - 1)}$$

Shannon-Wiener 多样性指数(H):

$$H = - \sum_i P_i \ln P_i$$

Pielou 均匀度指数(E):

$$E = \frac{H}{\ln S}$$

式中, S 为物种数量, A 为样方面积, N_i 为 i 种的重要值, N 为样地中全部种的重要值之和; P_i 为 i 种的相对重要值, $P_i = N_i/N$ 。

$$\text{重要值} = \frac{\text{相对盖度} + \text{相对密度} + \text{相对高度}}{3}$$

$$\text{相对密度} = \frac{\text{某个种的密度}}{\text{全部植物种的密度和}}$$

$$\text{相对盖度} = \frac{\text{某个种的盖度}}{\text{所有种的盖度和}}$$

$$\text{相对高度} = \frac{\text{某个种在全部样方中的高度和}}{\text{所有种高度和}}$$

1.6 数据处理

使用 Excel 和 SPSS 21.0 对数据进行计算及分析,利用单因素方差分析(one-way DUNCAN)进行差异显著性检验,Pearson 相关分析进行植物多样性与土壤养分及酶活性的相关性分析,利用多项式拟合(Polynomial Fit)对各多样性指数进行线性拟合,使用 Canoco 5 对植被及土壤进行 PCA、RDA 分析,并用 Origin 8.5 及 Canoco 5 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同年限草地植物群落物种组成

2.1.1 不同年限草地植物群落物种数量特征

不同撂荒年限草地群落中科、属、种的组成如表 2 所示。不同撂荒年限草地群落总物种数量表现为:20 a > 15 a > 30 a > 45 a > 10 a。总科数、总属数随着撂荒年限的增加均呈先增加后降低的趋势,且均在撂荒 20 a 的群落中物种数量最大,撂荒 10 a 的群落物种数量最小。菊科、禾本科以及豆科植物在不同撂荒年限草地中均有分布,且不同撂荒年限

表 2 不同撂荒年限草地植被科、属、种组成

Table 2 Number of plant families, genus, and species for different years of abandonment

年限/a	总科数	总属数	总种数	三大科的种数分布			合计	占本群落比率/%
				菊科	禾本科	豆科		
10	6c	12c	15c	5	2	3	10	66.67
15	9b	16b	20b	5	2	3	10	50.00
20	11a	20a	24a	5	3	4	12	50.00
30	9b	16b	19b	3	5	5	13	68.42
45	7c	12c	16c	3	4	5	13	75.00

草地群落均以菊科、禾本科、豆科为主,三大科的物种数量随着撂荒年限的增加而增加,但三大科占本群落的比率呈先降后升的趋势,占比从大到小的顺序为 45 a > 30 a > 10 a > 20 a = 15 a.

2.1.2 不同撂荒年限草地的群落恢复特征

本研究结果显示,不同撂荒年限草地群落物种组成存在差异,且 PCA 分析表明其可分成四类(图 1),分别是 10 a 群落、15 a 群落、20 a 群落、30 a 群落和 45 a 群落. 草地撂荒恢复过程中,共分布 15 科 35 属 43 种植物(表 3). 按物种重要值来看,猪毛蒿、达乌里胡枝子、铁杆蒿、茭蒿、白羊草等菊科、禾本科以及豆科植物在不同撂荒年限草地中均占优势地位,且部分物种虽在不同撂荒年限草地群落中均有分布,但它们在群落中的地位及作用不同. 撂荒 10 a 草地优势种为猪毛蒿,亚优势种为鹅观草(*Roegneria kamoji*),伴生种为甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)与草地早熟禾(*Poa pratensis*)等;撂荒 15 a 草地群落优势种仍为猪毛蒿,亚优势种有达乌里胡枝子和赖草(*Leymus secalinus*),伴生种为阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)与茭蒿等;恢复至撂荒 20 a 时,铁杆蒿与达乌里胡枝子逐渐成为草地优势种,假苇拂子茅(*Calamagrostis pseudophragmites*)成为亚优势种,大针茅(*Stipa grandis*)及茭蒿等物种为群落的伴生种;撂荒 30 a 时,茭蒿取代达乌里胡枝子和铁杆蒿成为草地群落优势种,铁杆蒿变为亚优势种,达乌里胡枝子与白羊草则成为伴生种;撂荒 45 a 时,白羊草及茭蒿为草地的优势种,亚优势种为铁杆蒿及达乌里胡枝子. 45 a 撂荒恢复过程中,豆科的达乌里胡枝子与菊科的铁杆蒿在 5 个年限草地中均有分布,禾本科的赖草及菊科的茭蒿主要分布在撂荒 15 a 以后的草地中,唇形科(Labiatae)的活血丹(*Glechoma longituba*)、香青兰(*Dracocephalum moldavica*)及蔷薇科(Rosaceae)的翻白委陵菜(*Potentilla discolor*)、二裂委陵菜(*Potentilla bifurca*)在撂荒 10~20 a 的草地中分布,而蔷薇科的蛇莓(*Duchesnea indica*)与堇菜科(Violaceae)的紫花地丁(*Viola philippica*)主要在撂荒 20~45 a 的草地中分布,其中还有一些伞形科(Umbelliferae)、旋花科(Convolvulaceae)、藜科(Chenopodiaceae)、败酱科(Valerianaceae)、毛茛科(Ranunculaceae)、茜草科(Rubiaceae)、远志科(Polygalaceae)、牻牛儿苗科(Geraniaceae)及车前科(Plantaginaceae)等物种在撂荒恢复过程中作为偶见种在草地中分布.

在不同撂荒年限草地群落的优势种不断发生变化,但达乌里胡枝子、铁杆蒿、茭蒿及赖草等菊科、豆科和禾本科植物的优势度始终较大. 随着撂荒年限的增加,豆科植物重要值呈增加趋势,10~45 a 豆科植物重要值分别为 21.66%、23.29%、27.88%、29.82%、33.38%;禾本科植物重要值呈先增加,后趋于平缓的趋势,10~45 a 禾本科植物重要值分别为 18.73%、19.83%、22.05%、27.57%、26.08%;菊科植物重要值呈降低趋势,10~45 a 菊科植物重要值分别为 48.80%、44.37%、36.98%、33.07%、26.97%. 三大科重要值之和占草地群落植物总重要值 85% 以上,为植物群落分布的主要物种.

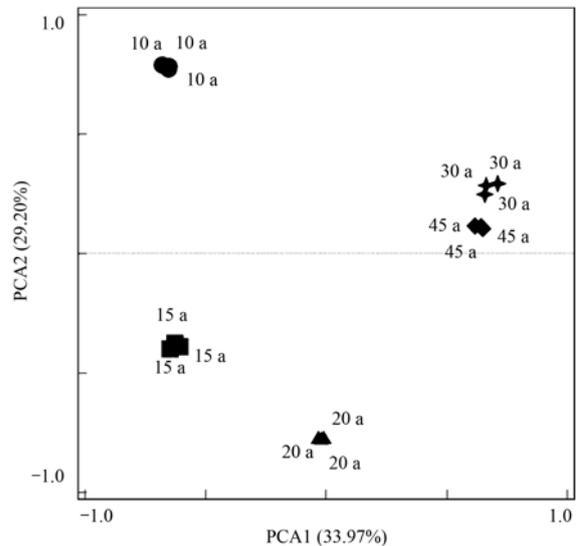


图 1 草地植被群落物种分布主成分分析

Fig. 1 Principal component analysis of the plant species distribution in the grassland community

2.2 不同撂荒年限草地群落的多样性

利用抛物线方程对各多样性指数进行拟合可得到二次拟合图像,发现草地群落的多样性指数随着撂荒年限的增加变化明显. 从图 2 可以得出,在撂荒恢复 10~45 a, G 、 H 和 E 随着撂荒年限的增加均呈现出先增后减趋势,且都在撂荒 20 a 达到最大值. G 最小值在撂荒 45 a, H 与 E 的最小值在撂荒 10 a. D 随着撂荒年限的增加与其他多样性指数的变化趋势不同,呈先减后增的趋势,最大值出现在撂荒 10 a,最小值出现在撂荒 15 a.

2.3 不同撂荒年限草地群落土壤养分含量及化学计量比

不同撂荒年限草地土壤养分含量如图 3 所示. SOC 含量随着撂荒年限的增加呈逐渐增加的趋势,

表 3 不同撂荒年限草地植物群落物种重要值/%

Table 3 Importance value of the plant species in plant communities in different years of abandonment/%

物种	科	属	撂荒年限/a				
			10	15	20	30	45
活血丹 <i>Glechoma longituba</i>	唇形科 Labiatae	活血丹属 <i>Glechoma</i>	1.12 ± 0.09	0.23 ± 0.11	0.2 ± 0.04	—	—
香青兰 <i>Dracocephalum moldavica</i>	唇形科 Labiatae	青兰属 <i>Dracocephalum</i>	0.87 ± 0.19	2.95 ± 0.09	1.93 ± 0.11	—	—
甘草 <i>Glycyrrhiza uralensis</i>	豆科 Leguminosae	甘草属 <i>Glycyrrhiza</i>	9.4 ± 0.89	—	—	—	—
达乌里胡枝子 <i>Lespedeza dahurica</i>	豆科 Leguminosae	胡枝子属 <i>Lespedeza</i>	5.71 ± 0.51	10.16 ± 0.59	14.83 ± 0.33	8.85 ± 0.19	9.53 ± 0.08
多花胡枝子 <i>Lespedeza floribunda</i>	豆科 Leguminosae	胡枝子属 <i>Lespedeza</i>	6.55 ± 0.57	—	—	5.34 ± 0.32	6.55 ± 0.5
披针叶野决明 <i>Thermopsis lanceolata</i>	豆科 Leguminosae	野决明属 <i>Thermopsis</i>	—	5.76 ± 0.09	—	—	—
毛苕子 <i>Vicia bungei</i>	豆科 Leguminosae	野豌豆属 <i>Vicia</i>	—	7.37 ± 0.2	—	5.68 ± 0.3	—
黄花草木犀 <i>Melilotus officinalis</i>	豆科 Leguminosae	草木犀属 <i>Melilotus</i>	—	—	6.4 ± 0.43	5.54 ± 0.16	7.3 ± 0.26
白花草木犀 <i>Melilotus alba</i>	豆科 Leguminosae	草木犀属 <i>Melilotus</i>	—	—	—	—	5.34 ± 0.08
草木犀状黄耆 <i>Astragalus melilotoides</i>	豆科 Leguminosae	黄耆属 <i>Astragalus</i>	—	—	—	4.41 ± 0.33	—
米口袋 <i>Gueldenstaedtia multiflora</i>	豆科 Leguminosae	米口袋属 <i>Gueldenstaedtia</i>	—	—	0.79 ± 0.05	—	4.66 ± 0.37
紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	豆科 Leguminosae	苜蓿属 <i>Medicago</i>	—	—	5.86 ± 0.13	—	—
大针茅 <i>Stipa grandis</i>	禾本科 Poaceae	针茅属 <i>Stipa</i>	—	—	7.38 ± 0.33	6.36 ± 0.35	4.23 ± 0.38
长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	禾本科 Poaceae	针茅属 <i>Stipa</i>	—	—	—	4.51 ± 0.31	3.44 ± 0.36
鹅观草 <i>Roegneria kamoji</i>	禾本科 Poaceae	鹅观草属 <i>Roegneria</i>	10.25 ± 0.48	—	—	—	—
草地早熟禾 <i>Poa pratensis</i>	禾本科 Poaceae	早熟禾属 <i>Poa</i>	8.48 ± 0.43	8.56 ± 0.31	—	2.34 ± 0.27	—
赖草 <i>Leymus secalinus</i>	禾本科 Poaceae	赖草属 <i>Leymus</i>	—	11.27 ± 1.08	5.24 ± 0.22	5.66 ± 0.27	4.72 ± 0.33
假苇拂子茅 <i>Calamagrostis pseudophragmites</i>	禾本科 Poaceae	拂子茅属 <i>Calamagrostis</i>	—	—	9.43 ± 0.21	—	—
白羊草 <i>Bothriochloa flaccidum</i>	禾本科 Poaceae	孔颖草属 <i>Bothriochloa</i>	—	—	—	8.7 ± 0.16	13.69 ± 0.31
裂叶堇菜 <i>Viola dissecta</i>	堇菜科 Violaceae	堇菜属 <i>Viola</i>	—	—	0.35 ± 0.08	—	—
紫花地丁 <i>Viola philippica</i>	堇菜科 Violaceae	堇菜属 <i>Viola</i>	1.07 ± 0.15	—	0.68 ± 0.03	2.03 ± 0.17	6.02 ± 0.31
阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	菊科 Compositae	狗娃花属 <i>Heteropappus</i>	5.25 ± 0.24	9.43 ± 0.42	5.43 ± 0.2	—	4.47 ± 0.4
猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	菊科 Compositae	蒿属 <i>Artemisia</i>	23.56 ± 1.06	14.73 ± 0.83	—	—	—
铁杆蒿 <i>Artemisia sacrorum</i>	菊科 Compositae	蒿属 <i>Artemisia</i>	7.89 ± 0.15	7.31 ± 0.3	16.49 ± 0.56	12.74 ± 0.41	9.05 ± 0.15
茼蒿 <i>Artemisia giraldii</i>	菊科 Compositae	蒿属 <i>Artemisia</i>	—	9.05 ± 0.29	8.03 ± 0.17	15.42 ± 0.22	13.45 ± 0.34
角蒿 <i>Incarvillea sinensis</i>	菊科 Compositae	蒿属 <i>Artemisia</i>	—	3.84 ± 0.57	4.61 ± 0.51	—	—
刺儿菜 <i>Cirsium setosum</i>	菊科 Compositae	蓟属 <i>Cirsium</i>	5.55 ± 0.16	—	2.43 ± 0.2	—	—
苦苣菜 <i>Ixeris polyccephala</i>	菊科 Compositae	苦苣菜属 <i>Ixeris</i>	6.55 ± 0.09	—	—	4.92 ± 0.28	—
翻白委陵菜 <i>Potentilla discolor</i>	蔷薇科 Rosaceae	委陵菜属 <i>Potentilla</i>	3.25 ± 0.26	1.12 ± 0.07	0.68 ± 0.16	—	—
二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	蔷薇科 Rosaceae	委陵菜属 <i>Potentilla</i>	4.5 ± 0.58	1.23 ± 0.1	0.84 ± 0.11	—	—
蛇莓 <i>Duchesnea indica</i>	蔷薇科 Rosaceae	蛇莓属 <i>Duchesnea</i>	—	—	2.52 ± 0.14	3.49 ± 0.21	5.16 ± 0.35
败酱 <i>Patrinia scabiosaeifolia</i>	败酱科 Valerianaceae	败酱属 <i>Patrinia</i>	—	4.1 ± 0.23	2.11 ± 0.13	—	—
车前 <i>Plantago asiatica</i>	车前科 Plantaginaceae	车前属 <i>Plantago</i>	—	1.25 ± 0.01	0.68 ± 0.01	—	0.83 ± 0.06
灰绿藜 <i>Chenopodium glaucum</i>	藜科 Chenopodiaceae	藜属 <i>Chenopodium</i>	—	0.29 ± 0.05	—	—	—
猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	藜科 Chenopodiaceae	猪毛菜属 <i>Salsola</i>	—	0.5 ± 0.08	—	—	—
打碗花 <i>Calystegia hederacea</i>	旋花科 Convolvulaceae	打碗花属 <i>Calystegia</i>	—	0.56 ± 0.08	—	1.16 ± 0.18	—
田旋花 <i>Convolvulus arvensis</i>	旋花科 Convolvulaceae	旋花属 <i>Convolvulus</i>	—	0.28 ± 0.06	0.43 ± 0.07	—	—
长冬草 <i>Clematis hexapetala</i>	毛茛科 Ranunculaceae	铁线莲属 <i>Clematis</i>	—	—	1.77 ± 0.11	—	—
小柴胡 <i>Bupleurum tenue</i>	伞形科 Umbelliferae	柴胡属 <i>Bupleurum</i>	—	—	0.89 ± 0.06	—	—
翠雀 <i>Delphinium grandiflorum</i>	毛茛科 Ranunculaceae	翠雀属 <i>Delphinium</i>	—	—	—	1.9 ± 0.24	—
茜草 <i>Rubia cordifolia</i>	茜草科 Rubiaceae	茜草属 <i>Rubia</i>	—	—	—	0.69 ± 0.16	—
细叶远志 <i>Polygala linarifolia</i>	远志科 Polygalaceae	远志属 <i>Polygala</i>	—	—	—	0.25 ± 0.09	—
老鹳草 <i>Geranium wilfordii</i>	牻牛儿苗科 Geraniaceae	老鹳草属 <i>Geranium</i>	—	—	—	—	1.57 ± 0.27

从撂荒 10 a 的 $4.69 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 显著增加到撂荒 45 a 的 $11.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相比增加了 2.38 倍; 土壤 AP 在土壤中含量的变化趋势与 SOC 相同, 从撂荒 10 a 的 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 显著增加到撂荒 45 a 的 $2.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相比增加了 4.1 倍; 土壤 TN、TP 含量随着撂荒年限的增加呈先增后减的趋势, 且均在撂荒 30 a 达最大值, 分别为 $0.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 与 $0.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 土壤 AN

含量随着撂荒年限的增加呈先减后增的趋势, 在撂荒 15 a 时达最小值到 $23.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 总的来说, 草地群落土壤养分含量随着撂荒年限的增加呈波动型增加.

不同撂荒年限草地群落土壤养分化学计量比如图 4 所示. 草地群落土壤中 C:N 随着撂荒年限的增加呈先减后增的趋势, 最小值出现在撂荒 20 a, C:

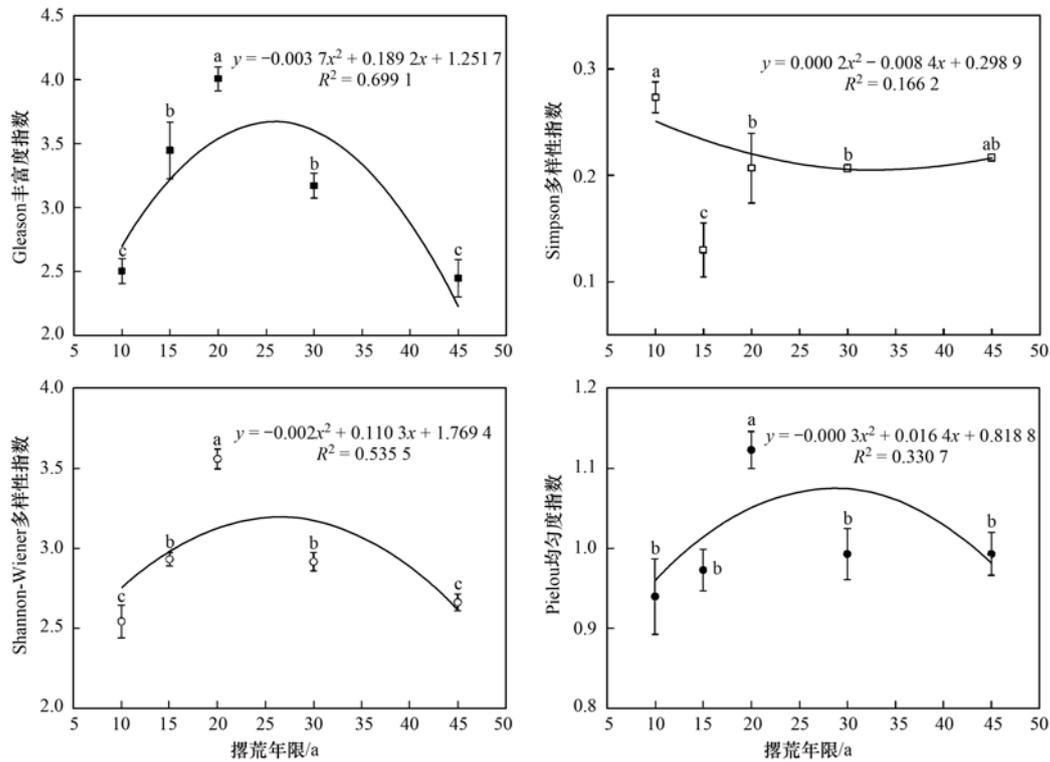


图2 不同撿荒年限草地群落的多样性指数

Fig. 2 Diversity indexes of grassland communities in different years of abandonment

N 从撿荒10~30 a 增减都不显著, 30~45 a 增加显著; 草地群落土壤 C:P 随着撿荒年限的增加呈增加的趋势, 撿荒45a 相比撿荒10a, C:P 增加了2.24倍; 草地群落土壤 N:P 随着撿荒年限的增加呈先增后减的趋势, N:P 比值的增减范围在0.3~1.3之间, 最大比值出现在撿荒30 a.

2.4 不同撿荒年限草地群落土壤酶活性

4种土壤酶随着撿荒年限的增加所表现出的趋势如图5所示. 随着撿荒年限的增加, 土壤中ALP与UE活性均呈现出持续增加的趋势, 其中ALP活性在撿荒45a时相比撿荒10a增加了1.66倍, UE活性在撿荒45a时相比撿荒10a增加了2.22倍, 且增加显著; 土壤中CAT和SC活性随着撿荒年限的增加呈现先增后减的趋势, 其中CAT活性在撿荒15~20a增加显著, 在撿荒20a达到最大值后活性降低但不显著, SC活性在撿荒30a达最大值后显著降低. 总体上看土壤酶活性是随着撿荒年限的增加而升高的.

2.5 草地群落组成和多样性与土壤养分及酶的相关性

对不同撿荒年限草地群落及其多样性与土壤养分和土壤酶的关系采用冗余度(RDA)分析, 结果如图6. 将土壤养分及土壤酶作为响应变量时, 菊科、

禾本科及豆科对其有极显著影响(菊科: 贡献率=72.8%, $F=29.5$, $P=0.002$; 豆科: 贡献率=69.1%, $F=25$, $P=0.002$; 禾本科: 贡献率=66.0%, $F=22$, $P=0.002$), 盖度对其有显著影响(盖度: 贡献率=25.4%, $F=4.1$, $P=0.032$), 总属数、总种数、总科数及植物多样性对土壤养分及土壤酶没有显著性影响. 将SBD及SWC作为响应变量时, 盖度、总科数、总种数、G、H及总属数对其有极显著影响(盖度: 贡献率=73.5%, $F=35$, $P=0.002$; 总科数: 贡献率=54.1%, $F=15.1$, $P=0.004$; 总种数: 贡献率=54.0%, $F=15$, $P=0.004$; G: 贡献率=54.0%, $F=15$, $P=0.004$; H: 贡献率=45.9%, $F=10.9$, $P=0.01$; 总属数: 贡献率=42.7%, $F=9.6$, $P=0.01$), 菊科及禾本科对其有显著性影响(菊科: 贡献率=32.3%, $F=6.1$, $P=0.036$; 禾本科: 贡献率=29.9%, $F=5.5$, $P=0.046$), 其他草地群落指标对SWC及SBD没有显著性影响.

以上结果得出草地群落的不同科植物对土壤养分及酶活性影响较大. 对禾本科, 菊科及豆科的重要值与土壤养分及土壤酶进行相关性分析. 由表4可看出, 禾本科对SOC、TN、AN、AP、ALP、UE和SC呈极显著正相关($P<0.01$), 对TP和CAT呈显

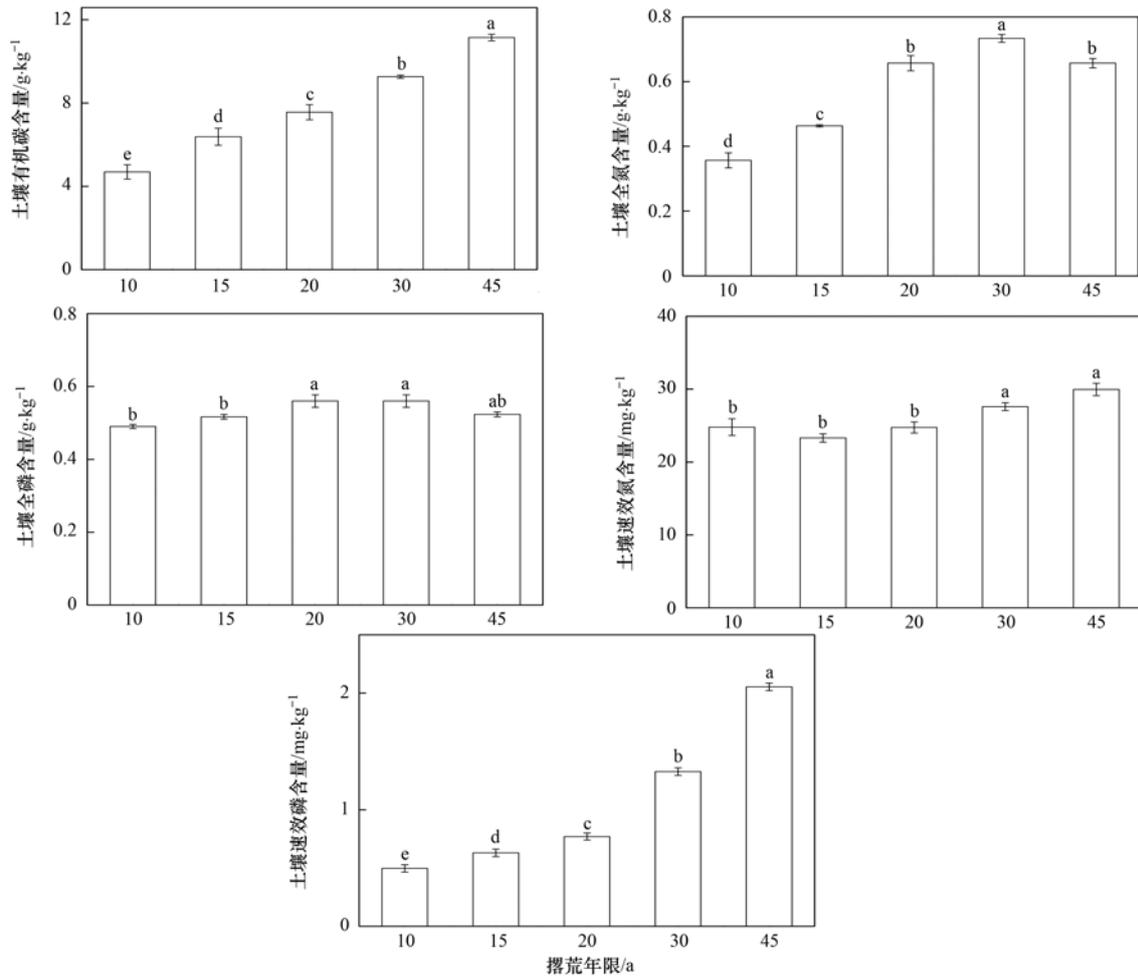


图3 不同撂荒年限草地土壤养分含量

Fig. 3 Soil nutrient content in plant communities in different years of abandonment

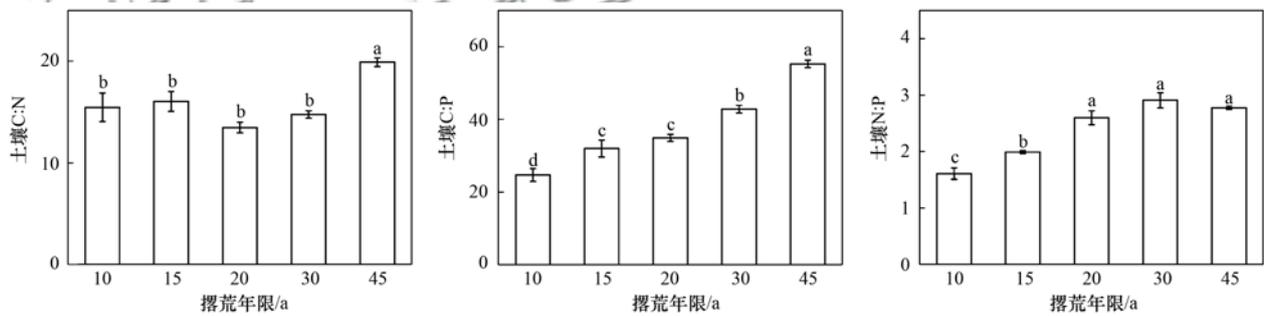


图4 不同撂荒年限草地群落土壤化学计量比

Fig. 4 C, N, and P stoichiometry in plant communities in different years of abandonment

表4 三大科重要值与土壤养分及土壤酶的相关性分析¹⁾

Table 4 Correlations between the importance of the three families, soil nutrients, and enzymes

项目	有机碳 SOC	全氮 TN	全磷 TP	有效氮 AN	有效磷 AP	碱性磷酸酶 ALP	过氧化氢酶 CAT	脲酶 UE	蔗糖酶 SC
菊科	-0.968 **	-0.874 **	-0.500	-0.773 **	-0.924 **	-0.948 **	-0.735 **	-0.973 **	-0.835 **
禾本科	0.879 **	0.877 **	0.548 *	0.792 **	0.824 **	0.919 **	0.621 *	0.901 **	0.920 **
豆科	0.964 **	0.860 **	0.490	0.732 **	0.905 **	0.920 **	0.719 **	0.948 **	0.804 **

1) **表示 $P < 0.01$, *表示 $P < 0.05$

著正相关($P < 0.05$); 豆科与 SOC、TN、AN、AP、ALP、CAT、UE 和 SC 呈极显著正相关($P < 0.01$),

豆科对 TP 没有显著相关性; 与其他科不同, 菊科与 SOC、TP、AN、AP、ALP、CAT、UE 和 SC 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 菊科对 TP 无显著相关性。

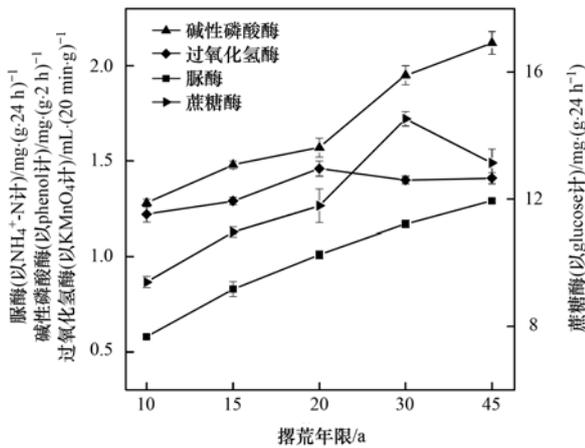
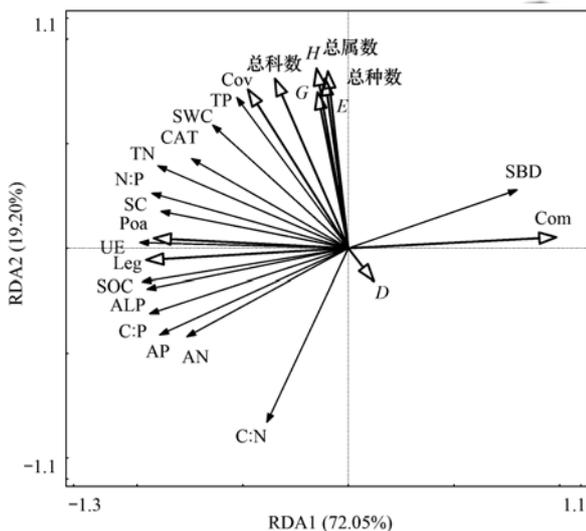


图 5 不同撿荒年限草地群落土壤酶活性

Fig. 5 Soil enzymes in plant communities in different years of abandonment



Leg: 豆科; Poa: 禾本科; Cov: 盖度; Com: 菊科; D: Simpson 多样性指数; E: Pielou 均匀度指数; G: Gleason 丰富度指数; H: Shannon-Wiener 多样性指数; ALP: 碱性磷酸酶; UE: 脲酶; SC: 蔗糖酶; CAT: 过氧化氢酶; SWC: 土壤含水量; SBD: 土壤容重; 图中 Gleason 丰富度指数和物种总种数箭头重合

图 6 草地群落组成及多样性与土壤养分和土壤酶关系的 RDA 分析

Fig. 6 RDA analysis among plant families, genus, species, and diversity indexes and C, N, and P and enzymes of the soil

3 讨论

随着撿荒年限的增加, 撿荒恢复各研究阶段主要群落分别为猪毛蒿 (10 a、15 a) → 达乌里胡枝子 + 铁杆蒿 (20 a) → 芨蒿 + 铁杆蒿 (30 a) → 白羊草 + 芨蒿 (45 a), 且恢复过程中优势物种均为豆科, 菊

科及禾本科植物. 草地群落的科、属、种数量呈先增后减的趋势, 菊科、禾本科和豆科物种数量占群落总种数比例呈先减后增的趋势, 三大科植物占比由撿荒 10 a 的 66.67% 上升至撿荒 45 a 的 75% (表 2). 这是由三大科植物独特的生物学特性决定的, 它们能适应该地区干旱少雨、土壤贫瘠的生态环境^[31]. 菊科和禾本科植物通过增加根系生物量及根系深度来获取更多的水分^[32], 豆科与根瘤菌的共生可使其在相对干旱条件下快速生长^[33], 并且与土壤产生协同作用增加土壤养分含量, 为其他物种提供养分资源^[34]. 同时, 植物总生产力的增加提高了凋落物生物量, 凋落物覆盖的增加减少了土壤水分蒸发及地表径流, 土壤含水量升高^[35], 从而促进植物的生长, 其他科物种数量增加. 在撿荒 20 ~ 30 a 间, 草地群落的生物量增加、总蒸腾量增多, 致使土壤含水量逐渐降低, 进而导致植物群落多样性减少, 而三大科植物相比其他科植物更加耐旱, 在干旱胁迫下, 豆科、菊科、禾本科植物通过增加根冠比^[36], 产生抗旱性酶类^[37]等来适应干旱环境, 且撿荒 30 a 后铁杆蒿、猪毛蒿等菊科植物化感作用的增强, 抑制了其他草本植物种子的发芽和幼苗的生长^[38], 所以三大科植物占群落总数的比例及优势度逐渐增高. 三大科植物优势度的改变也影响了物种的多样性, 本研究中多样性指数 G、H 和 E 随着撿荒年限的增加均呈现出先增后减趋势 (图 2), 郭曼等^[39]在黄土高原的研究也有相同的结果, 但草地的 G、H 和 E 指数明显高于林下草本多样性指数^[40], 可能是因为乔木林竞争及郁闭作用. 此外, 物种的生物学特性、菊科植物的化感作用、种内种间竞争、SWC 和 SBD 等因素也会影响物种的多样性^[41].

生态恢复是植被与土壤协同变化的过程, 地上植物群落的结构组成和生物量变化必然会引起地下土壤理化性质的改变. 本研究结果显示, 在植被恢复后 10 ~ 45 a, 土壤养分及酶活性随着撿荒年限的增加呈增加趋势. 因撿荒过程中植被生产力增加使群落生物量和凋落物的覆盖增加, 为土壤提供了更多的养分归还, 同时地表覆盖增加使得土壤含水量增加, 且凋落物会响应水分含量增加而加速分解^[42], 进而导致养分含量增加. 禾本科与豆科植物含有大量的 C 与 N, 植物自身营养物质归还给土壤后使得 SOC 及土壤 TN 的含量增加显著 (图 3). 菊科种内竞争较为激烈, 数量及重要值在撿荒年限增加过程中有减少的趋势, 并且其自身的碳、氮含量

不如豆科及禾本科植物^[43], 所以菊科与养分含量呈负相关关系。相对于 SOC 和土壤 TN, 土壤 TP 含量在撂荒过程中增加缓慢(图 3), 这主要是由于土壤 P 主要来源于微生物介导的含磷矿物分解与转化^[44]。C、N 和 P 的不平衡增加导致 C/N、C/P 和 N/P 比值发生变化, 尤其是 C/P 和 N/P 显著增加(图 4), 表明 P 元素逐渐成为植物生长的限制性元素^[45]。此外, 植物群落通过影响土壤酶活性控制的土壤养分代谢过程来影响土壤养分含量^[46]。本研究中土壤酶活性在撂荒 10~20 a 显著增加, 而撂荒 20 a 后部分土壤酶如 SC、CAT 活性有降低现象(图 5), 且三大科植物对土壤酶活性有显著影响(表 4)。撂荒 10~20 a 植物快速生长, 外源基质(凋落物和根)输入量增加, 土壤微生物及植物活动分泌的代谢产物(土壤酶)增加^[47], 且不同植被下土壤理化性质及酶活性不同, 导致土壤养分状况提高^[48, 49]。随着植被的恢复, 植物耗水增加, 土壤含水量在 20 a 后下滑, 导致土壤微生物生物量及活性也逐渐降低^[50], 引起部分酶活性降低。本研究结果显示, 禾本科与豆科植物与参与 C、N 和 P 代谢酶的活性均呈显著正相关, 而菊科则表现为负相关(表 4)。一方面是由于禾本科与豆科植物富含丰富的 C 和 N, 可为酶的合成提供丰富的原料^[46]; 另一方面, 禾本科和豆科植物富含蛋白质, 需大量 ALP、UE、CAT 和 SC 参与其凋落物蛋白化合物水解、有机磷化合物分解及含碳化合物分解过程^[51]。菊科植物由于其成分分布数量较少, 在群落中重要值逐渐降低, 导致其与 4 种酶活性呈负相关, 这也表明菊科植物对土壤的碳氮磷代谢过程成负反馈效应。此外, 与三大科物种相比, 整体物种多样性与土壤养分和酶活性的关系相对较小, 表明撂荒恢复过程中土壤养分主要受某些特定功能群影响^[52, 53], 本研究同时发现植物功能群落相对于物种多样性, 更能反映土壤的养分状况。综上, 在撂荒恢复过程中三大科植物占比及重要值逐渐增高, 其通过自身养分归还为土壤提供营养物质, 同时影响土壤微生物及酶活性, 这影响了代谢及养分分解过程, 从而对土壤性质整体状况产生直接与间接的影响。

4 结论

撂荒恢复 10~45 a 过程中, 各阶段主要群落分别为猪毛蒿→达乌里胡枝子+铁杆蒿→茭蒿+铁杆蒿→白羊草+茭蒿, 草地群落的科、属、种数量呈现先增后减的趋势, 菊科、禾本科和豆科物种数量

及重要值占群落总种数比例呈先减后增的趋势, 三大科植物占比由撂荒 10 a 的 66.67% 上升至撂荒 45 a 的 86.67% (表 2), 其中菊科植物占比随着年限的增加呈减少趋势。相对于土壤养分, 酶活性对三大科变化的响应更为敏感。草地群落中三大科植被的增减也可作为判断在撂荒后植被恢复过程中土壤养分变化的一个重要指标, 通过地上植被的调查间接了解或预测地下土壤变化状况。

参考文献:

- [1] Sun W Y, Song X Y, Mu X M, *et al.* Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, **209-210**: 87-99.
- [2] Bai J J, Di L P, Bai J T. NDVI and regional climate variation since the implementation of revegetation program in northern Shaanxi Province, China [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, **7(11)**: 4581-4588.
- [3] 崔晓临, 雷刚, 王涛, 等. 退耕还林还草工程实施对洛河流域土壤侵蚀的影响 [J]. *水土保持研究*, 2016, **23(5)**: 68-73.
Cui X L, Lei G, Wang T, *et al.* Impacts of grain for green project on soil erosion in Luohe River Basin of northern Shaanxi Province, China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, **23(5)**: 68-73.
- [4] 张晓霞, 杨宗儒, 查同刚, 等. 晋西黄土区退耕还林 22 年后林地土壤物理性质的变化 [J]. *生态学报*, 2017, **37(2)**: 416-424.
Zhang X X, Yang Z R, Zha T G, *et al.* Changes in the physical properties of soil in forestlands after 22 years under the influence of the Conversion of Cropland into Farmland Project in Loess region, western Shanxi Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37(2)**: 416-424.
- [5] 邓景成, 高鹏, 穆兴民, 等. 黄土高原退耕还林工程对生态环境的影响及对策建议 [J]. *水土保持研究*, 2017, **24(5)**: 63-68.
Deng J C, Gao P, Mu X M, *et al.* Impacts and advice of the grain for green project to ecological environment on the Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, **24(5)**: 63-68.
- [6] 雒明伟, 毛亮, 李倩倩, 等. 青藏高原筑路取土迹地恢复植物群落与土壤的碳氮磷化学计量特征 [J]. *生态学报*, 2015, **35(23)**: 7832-7841.
Luo M W, Mao L, Li Q Q, *et al.* C, N, and P stoichiometry of plant and soil in the restorable plant communities distributed on the Land Used for Qinghai-Tibet Highway Construction in the Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35(23)**: 7832-7841.
- [7] Korb J E, Johnson N C, Covington W W. Slash pile burning effects on soil biotic and chemical properties and plant establishment: recommendations for amelioration [J]. *Restoration Ecology*, 2004, **12(1)**: 52-62.
- [8] 刘洋, 曾全超, 安韶山, 等. 黄土丘陵区草本植物叶片与枯落物生态化学计量学特征 [J]. *应用生态学报*, 2017, **28**

- (6): 1793-1800.
- Liu Y, Zeng Q C, An S S, *et al.* Ecological stoichiometry of leaf and litter of herbaceous plants in loess hilly and gully regions, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, **28**(6): 1793-1800.
- [9] 李鑫, 曾全超, 安韶山, 等. 黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 1084-1091.
- Li X, Zeng Q C, An S S, *et al.* Ecological stoichiometric characteristics in leaf and litter under different vegetation types of Zhifangou Watershed on the Loess Plateau, China [J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 1084-1091.
- [10] Horodecki P, Jagodziński A M. Tree species effects on litter decomposition in pure stands on afforested post-mining sites[J]. Forest Ecology and Management, 2017, **406**: 1-11.
- [11] 赵勇, 吴明作, 樊巍, 等. 太行山针、阔叶森林凋落物分解及养分归还比较[J]. 自然资源学报, 2009, **24**(9): 1616-1624.
- Zhao Y, Wu M Z, Fan W, *et al.* Comparison of nutrient return and litter decomposition between coniferous and broad-leaved forests in Hilly Region of Taihang Mountains [J]. Journal of Natural Resources, 2009, **24**(9): 1616-1624.
- [12] 曾昭霞, 刘孝利, 王克林, 等. 桂西北喀斯特区原生林与次生林凋落物及养分归还特征比较[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(1): 146-151.
- Zeng Z X, Liu X L, Wang K L, *et al.* Comparison of litterfall and nutrients return properties of primary and secondary forest ecosystems, the karst region of Northwest Guangxi [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, **19**(1): 146-151.
- [13] Ren C J, Chen J, Deng J, *et al.* Response of microbial diversity to C:N:P stoichiometry in fine root and microbial biomass following afforestation[J]. Biology and Fertility of Soils, 2017, **53**(4): 457-468.
- [14] 何兵, 李睿玉, 张红, 等. 5种外来菊科植物对根际土壤微生物群落和酶活性的影响[J]. 安全与环境学报, 2013, **13**(3): 176-180.
- He B, Li R Y, Zhang H, *et al.* Effects of five alien Compositae plants on the growth of the microbial community of the rhizosphere and the soil's enzyme activity [J]. Journal of Safety and Environment, 2013, **13**(3): 176-180.
- [15] An S S, Cheng Y, Huang Y M, *et al.* Effects of revegetation on soil microbial biomass, enzyme activities, and nutrient cycling on the Loess Plateau in China[J]. Restoration Ecology, 2013, **21**(5): 600-607.
- [16] Perkins L B, Nowak R S. Native and non-native grasses generate common types of plant-soil feedbacks by altering soil nutrients and microbial communities[J]. Oikos, 2013, **122**(2): 199-208.
- [17] 薛超玉, 焦峰, 张海东, 等. 黄土丘陵区弃耕地恢复过程中土壤与植物恢复特征[J]. 草业科学, 2016, **33**(3): 368-376.
- Xue C Y, Jiao F, Zhang H D, *et al.* The characteristics of plant species and soil quality in the restoration process of the Loess Hilly Region [J]. Pratacultural Science, 2016, **33**(3): 368-376.
- [18] 刘海威, 张少康, 焦峰. 黄土丘陵区不同退耕年限草地群落特征及其土壤水分养分效应[J]. 草业学报, 2016, **25**(10): 31-39.
- Liu H W, Zhang S K, Jiao F. Relationships between community characteristics and soil nutrients and moisture in abandoned hill country grassland [J]. Acta Pratacultural Sinica, 2016, **25**(10): 31-39.
- [19] 杨丽霞, 陈少锋, 安娟娟, 等. 陕北黄土丘陵区不同植被类型群落多样性与土壤有机质、全氮关系研究[J]. 草地学报, 2014, **22**(2): 291-298.
- Yang L X, Chen S F, An J J, *et al.* Relationships among community diversity and soil organic matter, total nitrogen under different vegetation types in the Gully Region of Loess Region [J]. Acta Agrictir Sinica, 2014, **22**(2): 291-298.
- [20] Zhang C, Liu G B, Xue S, *et al.* Soil bacterial community dynamics reflect changes in plant community and soil properties during the secondary succession of abandoned farmland in the Loess Plateau[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, **97**: 40-49.
- [21] 杜峰, 徐学选, 张兴昌, 等. 陕北黄土丘陵区撂荒群落排序及演替[J]. 生态学报, 2008, **28**(11): 5418-5427.
- Du F, Xu X X, Zhang X C, *et al.* The ordination of abandoned old-field communities and secondary succession rate, successional divergence or convergence in the Loess Hilly Region of northern Shaanxi Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, **28**(11): 5418-5427.
- [22] 张海东, 汝海丽, 焦峰, 等. 黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤 C、N、P、K 化学计量学特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1128-1138.
- Zhang H D, Ru H L, Jiao F, *et al.* C, N, P, K stoichiometric characteristic of leaves, root and soil in different abandoned years in Loess Plateau [J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 1128-1138.
- [23] 秦伟, 朱清科, 张宇清, 等. 陕北黄土区生态修复过程中植物群落物种多样性变化[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(2): 403-409.
- Qin W, Zhu Q K, Zhang Y Q, *et al.* Dynamics of plant community species diversity in the process of ecological rehabilitation in North Shaanxi Loess Area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, **20**(2): 403-409.
- [24] 张学礼, 胡振琪, 初士立. 土壤含水量测定方法研究进展[J]. 土壤通报, 2005, **36**(1): 118-123.
- Zhang X L, Hu Z Q, Chu S L. Methods for measuring soil water content: a review [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, **36**(1): 118-123.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000. 25-78.
- [26] 张超, 刘国彬, 薛蕊, 等. 黄土丘陵区不同林龄人工刺槐林土壤酶演变特征[J]. 林业科学, 2010, **46**(12): 23-29.
- Zhang C, Liu G B, Xue S, *et al.* Evolution of soil enzyme activities of *Robinia pseudoacacia* plantation at different ages in Loess Hilly Region [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, **46**(12): 23-29.
- [27] Ren C J, Kang D, Wu J P, *et al.* Temporal variation in soil enzyme activities after afforestation in the Loess Plateau, China [J]. Geoderma, 2016, **282**: 103-111.
- [28] 马克平. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(上)[J]. 生物多样性, 1994, **2**(3): 162-168.
- [29] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的

- 测度方法(下)[J]. 生物多样性, 1994, **2**(4): 231-239.
- [30] 林勇, 艾训儒, 姚兰, 等. 木林子自然保护区不同群落类型主要优势种群的生态位研究[J]. 自然资源学报, 2017, **32**(2): 223-234.
Lin Y, Ai X R, Yao L, *et al.* Niches of main dominant species of different community types in Mulinzi Nature Reserve [J]. Journal of Natural Resources, 2017, **32**(2): 223-234.
- [31] 郝文芳, 杜峰, 陈小燕, 等. 黄土丘陵区天然群落的植物组成、植物多样性及其与环境因子的关系[J]. 草地学报, 2012, **20**(4): 609-615.
Hao W F, Du F, Chen X Y, *et al.* Composition and diversity analysis of natural-community plants in the Loess Hilly Region [J]. Acta Agrestia Sinica, 2012, **20**(4): 609-615.
- [32] 张超, 董淑琦, 刘国彬, 等. 黄土丘陵区植被演替中不同草本植物间的化感效应[J]. 草地学报, 2012, **20**(5): 848-854.
Zhang C, Dong S Q, Liu G B, *et al.* Allelopathic effect of different herbaceous plants during vegetation succession in the Hilly-Gully Region of Loess Plateau [J]. Acta Agrestia Sinica, 2012, **20**(5): 848-854.
- [33] 张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 等. 基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 1131-1137.
Zhang R Y, Xu D H, Chen L Y, *et al.* Plant N status in the alpine grassland of the Qinghai-Tibet Plateau: base on the N:P stoichiometry [J]. Environmental Science, 2014, **35**(3): 1131-1137.
- [34] Van Ruijven J, Berendse F. Positive effects of plant species diversity on productivity in the absence of legumes [J]. Ecology Letters, 2003, **6**(3): 170-175.
- [35] 王冬, 杨政, 郝红敏, 等. 黄土区退耕草地凋落物—土壤界面水分过程特征研究[J]. 水土保持研究, 2015, **22**(1): 80-84.
Wang D, Yang Z, Hao H M, *et al.* Hydrological processes of litter-soil interfacial systems in restoration grasslands of the Loess Plateau, China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, **22**(1): 80-84.
- [36] 苏日古嘎, 张玉霞, 朱爱民. 干旱胁迫对 3 种野生豆科牧草生长发育和抗旱生理机制的影响[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2017, **32**(5): 424-428, 441.
Suriguga, Zhang Y X, Zhu A M. Effects of drought stress on growth development and physiological mechanisms of drought resistance of 3 wild Leguminous forages [J]. Journal of Inner Mongolia University for Nationalities (Natural Sciences), 2017, **32**(5): 424-428, 441.
- [37] 李磊, 贾志清, 朱雅娟, 等. 我国干旱区植物抗旱机理研究进展[J]. 中国沙漠, 2010, **30**(5): 1053-1059.
Li L, Jia Z Q, Zhu Y J, *et al.* Research advances on drought resistance mechanism of plant species in arid area of China [J]. Journal of Desert Research, 2010, **30**(5): 1053-1059.
- [38] 周凯, 郭维明, 徐迎春. 菊科植物化感作用研究进展[J]. 生态学报, 2004, **24**(8): 1776-1784.
Zhou K, Guo W M, Xu Y C. Advances of research on allelopathic potential in compositae [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, **24**(8): 1776-1784.
- [39] 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.
- [40] 崔宁洁, 张丹桔, 刘洋, 等. 不同林龄马尾松人工林下植物多样性与土壤理化性质[J]. 生态学报, 2014, **33**(10): 2610-2617.
Cui N J, Zhang D J, Liu Y, *et al.* Plant diversity and soil physicochemical properties under different aged *Pinus massoniana* plantations [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, **33**(10): 2610-2617.
- [41] 刘旻霞. 亚高寒草甸不同坡向植物光合生理和叶片形态差异[J]. 生态学报, 2017, **37**(24): 8526-8536.
Liu M X. Studies on physiological and leaf morphological traits for photosynthesis on different slopes in a subalpine meadow [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(24): 8526-8536.
- [42] Zhong Y Q W, Yan W M, Wang R W, *et al.* Differential responses of litter decomposition to nutrient addition and soil water availability with long-term vegetation recovery [J]. Biology and Fertility of Soils, 2017, **53**(8): 939-949.
- [43] 宋彦涛, 周道玮, 李强, 等. 松嫩草地 80 种草本植物叶片氮磷化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2012, **36**(3): 222-230.
Song Y T, Zhou D W, Li Q, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry in 80 herbaceous plant species of Songnen grassland in Northeast China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, **36**(3): 222-230.
- [44] 杨珏, 阮晓红. 土壤磷素循环及其对土壤磷流失的影响[J]. 土壤与环境, 2001, **10**(3): 256-258.
Yang Y, Ruan X H. Soil circulation of phosphorus and its effects on the soil loss of phosphorus [J]. Soil and Environmental Sciences, 2001, **10**(3): 256-258.
- [45] Fan H B, Wu J P, Liu W F, *et al.* Linkages of plant and soil C: N:P stoichiometry and their relationships to forest growth in subtropical plantations [J]. Plant and Soil, 2015, **392**(1-2): 127-138.
- [46] Zhang W, Qiao W J, Gao D X, *et al.* Relationship between soil nutrient properties and biological activities along a restoration chronosequence of *Pinus tabulaeformis* plantation forests in the Ziwuling Mountains, China [J]. CATENA, 2018, **161**: 85-95.
- [47] 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.
Liu 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.
- [48] 刘洋, 黄懿梅, 曾全超. 黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 3931-3938.
Liu Y, Huang Y M, Zeng Q C. Soil bacterial communities under different vegetation types in the Loess Plateau [J]. Environmental Science, 2016, **37**(10): 3931-3938.
- [49] 李君剑, 刘峰, 周小梅. 矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1836-1841.
Li J J, Liu F, Zhou X M. Effects of different reclaimed scenarios on soil microbe and enzyme activities in mining areas [J]. Environmental Science, 2015, **36**(5): 1836-1841.
- [50] Ren C J, Chen J, Lu X J, *et al.* Responses of soil total microbial biomass and community compositions to rainfall reductions [J].

Soil Biology and Biochemistry, 2018, **116**: 4-10.

- [51] 张笑培, 杨改河, 任广鑫, 等. 黄土高原南部植被恢复对土壤理化性状与土壤酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, **28**(6): 64-68.

Zhang X P, Yang G H, Ren G X, *et al.* Effects of vegetation restoration on soil physical-chemical properties and activities of soil enzyme in the gully region of the Loess Plateau [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, **28**(6): 64-68.

- [52] Siebenkäs A, Roscher C. Functional composition rather than species richness determines root characteristics of experimental grasslands grown at different light and nutrient availability[J]. Plant and Soil, 2016, **404**(1-2): 399-412.

- [53] Hu G Z, Liu H Y, Yin Y, *et al.* The role of legumes in plant community succession of degraded grasslands in northern China [J]. Land Degradation & Development, 2016, **27**(2): 366-372.

环 境 科 学

CONTENTS

Patterns of Mortality from Air Pollutant Emissions in China's Coal-fired Power Plants	QIN Yu, ZHANG Qiang, LI Xin, <i>et al.</i> (5289)
Analysis of the Temporal and Spatial Variation of PM _{2.5} in China Based on the LUR Model	LIU Bing-jie, PENG Xiao-min, LI Ji-hong (5296)
Physicochemical Properties of the Aerosol Particles and Their Impacts on Secondary Aerosol Formation at the Background Site of the Yangtze River Delta .....	..... HUANG Dan-dan, ZHOU Min, YU Chuan-guan, <i>et al.</i> (5308)
Analysis of Different Particle Sizes, Pollution Characteristics, and Sources of Atmospheric Aerosols During the Spring Dust Period in Beijing	YANG Yang, LI Xing-ru, CHEN Xi, <i>et al.</i> (5315)
Characteristics of Ambient VOCs at the Shuangliu Site in Chengdu, China, During Summer and Autumn	DENG Yuan-yuan, LI Jing, LI Ya-qi, <i>et al.</i> (5323)
Source Profiles and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Surface Coating of Aluminum Products in Foshan, China	LI Xia, SU Wei-jian, LI Bi-xia, <i>et al.</i> (5334)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollutant Sources in the Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (5344)
Characteristics of Particulate Matter Emissions from the Coking Process	WANG Yan-hui, ZHAO Liang, SUN Wen-qiang, <i>et al.</i> (5359)
Dry and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen in Small Catchments	WANG Huan-xiao, PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (5365)
Seasonal Changes of the Pathways of Nitrogen Export from an Agricultural Watershed in China	LI Wen-chao, LEI Qiu-liang, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (5375)
Dynamics and Runoff Losses of Nitrogen in Paddy Field Surface Water Under Combined Application of Biochar and Slow/Controlled-Release Fertilizer .....	..... SI Lin-lin, ZHOU Jing-jie, WU Liang-huan, <i>et al.</i> (5383)
Indirect Nitrous Oxide Emissions from an Agricultural Headwater Stream During the Rainy Season in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, ZHU Bo (5391)
Concentration, Flux, and Emission Factor of N ₂ O in Rivers with Different Nitrogen Pollution Features	WANG Miao, LI Ya-feng, LEI Kun, <i>et al.</i> (5400)
Identification of Nitrate Pollution Sources Through Various Isotopic Methods: A Case Study of the Huixian Wetland	PENG Cong, PAN Xiao-dong, JIAO You-jun, <i>et al.</i> (5410)
Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δD and δ ¹⁸ O in a Typical Karst Valley: A Case Study of the Zhongliang Mountains, Chongqing City .....	..... WU Wei, JIANG Yong-jun, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5418)
Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River	LIU Jiang-tao, CAI Wu-tian, CAO Yue-ting, <i>et al.</i> (5428)
Impact of Maximum Precipitation in 2017 on the Runoff Component of Reclaimed Water-Intaking River	LIAO An-ran, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (5440)
Spectral Evolution Characteristics of DOM in Sediment Interstitial Water During the Formation Stage of Thermal Stratification in the Main Reservoir Area of the Zhoucun Reservoir .....	..... ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5451)
Pollution Characteristic of Ni in Sediments in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Wei-jie, YIN Shu-hua, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5464)
Migration and Transformation of Mercury at Sediment-Water Interface of the Dahong Lake Reservoir in the Simian Mountains	GUO Pan, SUN Tao, YANG Guang, <i>et al.</i> (5473)
Effects of Wetland Types on Distribution of Soil Methylmercury Based on the Region of Nanweng River in the Greater Xing'an Mountains	ZHOU Xin-quan, LIU Yu-rong, LI Jing, <i>et al.</i> (5480)
Simulation of the Migration and Release Characteristics of Organophosphate Esters in Fluctuation Zone Soil of the Three Gorges Reservoir During Flooding .....	..... YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5487)
Spatial Distribution of Perfluoroalkyl Acids and Transformation of Their Precursors in River Water Samples and Effluents of Wastewater Treatment Plants in a Typical Tourism City .....	..... WANG Shi-liang, SUN Jian-shu, YANG Yue-wei, <i>et al.</i> (5494)
Purification Efficiency and Microbial Characteristics of Four Biofilters Operated Under Different Conditions	JIANG Xiao-liang, LI Meng, ZHANG Shao-hui, <i>et al.</i> (5503)
Effects of Manganese on the Growth and Fluorescence Induction Kinetics of <i>Conticribra weisflogii</i>	WANG Mu-lan, JIANG Yue-lu (5514)
Distribution and Factors Affecting <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> in Guangdong Reservoirs	LEI Min-ting, PENG Liang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (5523)
Removal of Humic Acid from Water by Magnetic Chitosan-Grafted Polyacrylamide	YOU Wen, LIU Hai-cheng, CAO Jia-wei, <i>et al.</i> (5532)
Ozone-Biological Activated Carbon for Advanced Removal of Typical Persistent Organic Pollutants from Micro-Polluted Source Water in the Yangtze Delta Region .....	..... LAN Ya-qiong, LIU Rui, MA Zheng-jie, <i>et al.</i> (5541)
Color and Nitrogen Removal from Synthetic Dye Wastewater in an Integrated Hydrolysis/Acidification and Anoxic/Aerobic Process	GU Meng-qi, YIN Qi-dong, LIU Ai-ke, <i>et al.</i> (5550)
Removal Characteristics of High Concentrations of Perchlorate Using a "Heterotrophic Sulfur Autotrophic" Combination Process	LIU Ying-nan, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5558)
Rapid Start-up of a Nitrite-Dependent Methane Anaerobic Oxidation Reaction Under Static Pressure Conditions	WANG Yi-nan, HU Zhen, RU Dong-yun, <i>et al.</i> (5565)
Optimization of the Flow Distribution Ratio and Mechanism of Nitrogen Removal in a Multi-level AO Coupled Flow Biochemical Process	WANG Fan, LI Jun, BIAN De-jun, <i>et al.</i> (5572)
High-rate Nitrogen Removal in a Two-stage Partial Nitrification-ANAMMOX Process Under Mainstream Conditions	LIU Wen-ru, YANG Dian-hai, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (5580)
Effects of Different Substrate Concentrations on the Short-term Storage of ANAMMOX Bacteria	GAO Xue-jian, ZHANG Jie, LI Dong, <i>et al.</i> (5587)
Optimization of the Mainstream Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Changes of the Microbial Community	FU Kun-ming, FU Chao, LI Hui, <i>et al.</i> (5596)
Granular Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Sludge During the Recovery Process	CHEN Fang-min, GU Cheng-wei, HU Yu-ting, <i>et al.</i> (5605)
Characterization of a Newly Isolated Strain <i>Pseudomonas</i> sp. N3 for Denitrification at Low Temperature	LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, XIAO Lin (5612)
Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk of Soil from Reclaimed Industrial Sites and Surrounding River Sediments	WU Jian, WANG Min, ZHANG Hui-peng, <i>et al.</i> (5620)
Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals for Different Types of Land Use and Evaluation of Human Health	LI Chun-fang, CAO Jian-fei, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (5628)
Soil Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of As at a Large-scale Arsenic Slag-contaminated Site	LIU Geng, SHI Ying, TIAN Hai-jin, <i>et al.</i> (5639)
Relationship Between the Bacterial Abundance and Production with Environmental Factors in a Subtropical Karst Reservoir	XIN Sheng-lin, LIANG Yue-ming, PENG Wen-jie, <i>et al.</i> (5647)
Structure Analysis of Arbuscular Mycorrhizal in Roots from Different Shrubs in Karst Regions	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (5657)
Effects of Stimulated Nitrogen Deposition on the Bacterial Community Structure of Semiarid Temperate Grassland	LI Zong-ming, SHEN Ju-pei, ZHANG Li-mei, <i>et al.</i> (5665)
Effect of Phosphorus Addition on the Abundance of Autotrophic CO ₂ -Fixation Microorganisms in Rhizospheric Soil from a Phosphorus-Limited Paddy Field .....	..... BAI Jing, LI Yi-fei, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (5672)
Effects of Varying Long-term Fertilization on Organic Carbon Mineralization and Priming Effect of Paddy Soil	MA Xin, WEI Liang, TANG Mei-liang, <i>et al.</i> (5680)
Relationship Between the Vegetation Community and Soil Nutrient and Enzyme Activity During the Restoration of Abandoned Land in the Loess Hilly Region .....	..... QIAO Wen-jing, DAI Yin-yue, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (5687)
Degradation of Pentachlorophenol by Fulvic Acid in a Municipal Solid Waste Landfill	LIU Si-jia, HE Xiao-song, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (5699)
Effect of CO ₂ Doubling and Different Plant Growth Stages on Rice Carbon, Nitrogen, and Phosphorus and Their Stoichiometric Ratios .....	..... TANG Mei-ling, XIAO Mou-liang, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (5708)
Assessment of Medical Waste Disposal Technologies Based on the AHP	XU Xiao-fang, TAN Quan-yin, LIU Li-li, <i>et al.</i> (5717)
Livestock and Poultry Faeces Nitrogen Loading Rate and Its Potential Return to Farmland in China	LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian (5723)