Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2019
Vol.40 No.8
第40卷 第8期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 40 卷　第 8 期
2019 年 8 月 15 日

目　次

2016 年京津冀地区红色预警时段 $PM_{2.5}$ 污染特征与浓度控制效果 …… 张冲, 郎建垒, 程水源, 王晓琦(3397)
北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析 …… 徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪(3405)
合肥市 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中元素组成特征及重污染成因分析 …… 刘可可, 张红, 刘桂建(3415)
濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析 …… 陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞珑, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红(3421)
关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析 …… 康宝荣, 刘立忠, 刘焕武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖(3431)
长春秋季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源 …… 吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟(3438)
中国城市扩张及空间特征变化对 $PM_{2.5}$ 污染的影响 …… 王桂林, 张炜(3447)
不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂 $PM_{2.5}$ 排放的影响 …… 邓建国, 马子轸, 李振, 段雷, 蒋靖坤(3457)
浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数 …… 徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶(3463)
生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征 …… 马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳(3470)
青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征 …… 宫静, 祁建华, 李鸿涛(3477)
广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价 …… 宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钏, 郭鹏然(3489)
截污调水后滇池表层沉积物中 16 种 PAHs 的分布特征 …… 胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏(3501)
黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析 …… 邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟(3509)
风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响 …… 余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰(3519)
向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应 …… 王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳(3530)
外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响 …… 李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏(3539)
新疆喀什三角洲地下水 SO_4^{2-} 化学特征及来源 …… 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌(3550)
黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析 …… 李洲, 李晨曦, 华琨, 李志(3559)
北京市河流秋季浮游动物群落特征分析 …… 王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫(3568)
三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系 …… 刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴(3577)
渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测 …… 万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文(3588)
汾河下游水体 *nirS* 型反硝化细菌群落组成与无机氮关系 …… 汪银龙, 冯民权, 董向前(3596)
饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析 …… 胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉(3604)
基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果 …… 彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然(3612)
植被对绿色屋顶径流量和水质影响 …… 章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷(3618)
光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制 …… 范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟(3626)
多种材料对水中氨氮的吸附特性 …… 焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬(3633)
不同氨氮浓度对 4 株常见藻株生长及酶活性的影响 …… 常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭(3642)
3 种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程 …… 刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水(3650)
铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制 …… 韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁(3660)
缺氧 MBBR 耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮 …… 杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀(3668)
连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响 …… 薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐(3675)
FeS 自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制 …… 马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海(3683)
ANAMMOX 体系中氨与硫酸盐的同步转化条件 …… 董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇(3691)
全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析 …… 张冰, 吴林蔚, 文湘华(3699)
不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比 …… 刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海(3706)
异养硝化细菌 *Acinetobacter junii* NP1 的同步脱氮除磷特性及动力学分析 …… 杨垒, 陈宁, 任勇翔, 崔珅, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯(3713)
Type 0092 丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现 …… 高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻(3722)
高盐高碱环境下硝化反硝化过程及 N_2O 产生特征 …… 代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双(3730)
生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响 …… 王一宇, 王圣森, 戴九兰(3738)
两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响 …… 周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋(3746)
承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征 …… 孙厚云, 卫晓锋, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞(3753)
厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析 …… 张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌(3764)
宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析 …… 张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮(3774)
铁铈氧化物对土壤As(Ⅴ)和 P 的稳定化效果 …… 林龙勇, 阎秀兰, 杨硕(3785)
铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤 As 的稳定化作用 …… 周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣(3792)
生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响 …… 刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水(3799)
有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响 …… 汪月, 张名豪, 赵秀兰(3808)
土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响 …… 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明(3816)
宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响 …… 高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅(3825)
不同浸提剂条件下生物炭溶解性有机物的浸出规律 …… 何品晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡(3833)
基于成组生物毒性测试的 $PM_{2.5}$ 毒性 …… 江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭(3840)
《环境科学》征订启事(3587)　《环境科学》征稿简则(3595)　信息(3611, 3705, 3745)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第 40 卷 第 8 期 2019 年 8 月
Vol. 40, No. 8 Aug., 2019

宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响

高涵[1], 肖礼[1,2], 牛丹[1], 倪银霞[1], 黄懿梅[1*]
(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100; 2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘要: 以宁夏南部山区柠条、山桃、苜蓿和长芒草这 4 种植被为研究对象, 玉米(农地)为对照, 测定土壤中 7 种氮素的含量及 2 种氮素转化相关酶的活性, 通过冗余分析方法探究退耕还林还草对土壤氮素及其转化酶活的影响. 结果表明:① 与玉米地相比, 长芒草地的颗粒有机氮, 轻组分有机氮, 微生物生物量氮和铵态氮分别增加 35.3%、83.3%、64.2% 和 110.0%; 苜蓿地的可溶性有机氮和铵态氮分别增加 0.7% 和 67.5%; 长芒草地的天冬酰胺酶和蛋白酶活性活性分别提高 360% 和 144.8%, 说明退耕还草对氮素及其转化酶有一定促进作用; ② 山桃地的有机氮、轻组分有机氮、颗粒有机氮和可溶性有机氮分别比玉米地高 3.7%、133.3%、70.6% 和 28.1%, 柠条地的轻组分有机氮和山桃地的微生物生物量氮分别比玉米地高 16.7% 和 49.6%, 柠条地和山桃地的蛋白酶活性均高于玉米地, 说明退耕还林对氮素及其转化酶同样有促进作用. ③ 冗余分析(RDA)结果和环境因子解释率表明, 土壤含水率, pH 值和有机碳是影响宁南山区氮素分布与转化的关键因子. 退耕还林还草改变了氮素相关转化酶的活性、对氮素组成有一定的促进作用, 为黄土高原生态恢复和土壤质量管理提供了理论依据.

关键词:冗余分析; 退耕还林还草; 氮组分; 酶活性; 宁南山区
中图分类号: X171.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2019)08-3825-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201811038

Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia

GAO Han[1], XIAO Li[1,2], NIU Dan[1], NI Yin-xia[1], HUANG Yi-mei[1*]
(1. Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, College of Natural Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: The effects of the policy of converting farmland to forest and grassland on soil nitrogen content and conversion enzyme activity were studied. *Caragana intermedia*, *Prunus davidiana*, *Medicago* spp., and *Stipa bungeana* and a corn control were examined to determine the concentrations of seven soil nitrogen components and the activity of two nitrogen conversion enzymes. The main factors affecting soil nitrogen distributions and transformation was also explored using redundancy analysis (RDA). The results showed that: ① Compared with the corn soil, the content of particulate organic nitrogen, light fraction organic nitrogen, microbial biomass nitrogen, and ammonium nitrogen in the *Stipa bungeana* soil increased by 35.3%, 83.3%, 64.2%, and 110.0%, respectively; soluble organic nitrogen and ammonium in the *Medicago* spp. soil increased by 0.7% and 67.5%, respectively; the asparaginase and protease activities in the *Stipa bungeana* soil increased by 360% and 144.8%, respectively, indicating that conversion of farmland to forest and grassland has a promoting effect on nitrogen components and conversion enzyme activity; ② The content of organic nitrogen, light organic nitrogen, particulate organic nitrogen, and soluble organic nitrogen in the *Prunus davidiana* soil was 3.7%, 133.3%, 70.6%, and 28.1% higher than that of the corn soil, respectively. The light fraction organic nitrogen content of the *Caragana intermedia* soil and microbial biomass nitrogen content of the *Prunus davidiana* soil was 16.7% and 49.6% higher than that of the corn soil, respectively. Protease activity in the *Caragana intermedia* and *Prunus davidiana* soils was higher than in the corn soil, further indicating that the conversion of farmland to forest and grassland promotes the accumulation of nitrogen components and enhances conversion enzyme activity; ③ The RDA and environmental factor explanation rate results indicated that soil water content, pH, and soil organic carbon were the key factors affecting nitrogen distribution and transformation in the mountainous area of southern Ningxia. Overall, the results show that converting farmland into forest and grassland has changed conversion enzyme activity and has promoted the accumulation of nitrogen components in soils. This provides a theoretical basis for ecological restoration and soil quality management in the Loess Plateau.

Key words: redundancy analysis; converting farmland into forest and grassland; nitrogen components; enzyme activities; mountainous area of southern Ningxia

收稿日期: 2018-11-05; **修订日期**: 2019-03-08
基金项目: 国家自然科学基金项目(41101254); 中国科学院对外合作重点项目(161461KYSB20170013)
作者简介: 高涵(1995~), 女, 硕士, 主要研究方向为生态环境工程, E-mail:gaohan_cyndi@163.com
* 通信作者, E-mail:ymhuang1971@nwsuaf.edu.cn

土壤是生物赖以生存的基础，而氮素是土壤中影响植物生长和生态系统生产力的主要限制因子[1]. 植物在生态系统氮保持中起着重要作用，除把无机氮转化为有机氮之外，还能降低土壤氮素的淋溶损失，通过根系分泌物和凋落物增加土壤氮输入，进而促进微生物生长，增强微生物氮的固定[2]. 土壤中的氮素主要以有机态的形式存在，大部分有机氮通过矿化作用成为无机态氮供植物利用，小部分有机氮可直接为植物所吸收[3]，土壤活性有机氮一般包括颗粒有机氮(PON)、可溶性有机氮(DON)、轻组分有机氮(LFON)和微生物生物量氮(MBN)这4个部分. 土壤酶系统是土壤生理生化特性的重要组成部分，土壤酶活性可作为土壤质量的生物活性指标[4]. 土壤中进行的一切复杂生物化学过程，都有土壤酶参与，尤其是土壤有机氮的氨化过程，基本上是一系列酶作用的过程[5]. 土壤氮转化酶是具有特殊生物催化能力的蛋白质，能促进有机氮转化成植物能直接利用的有效氮[6]，所以土壤氮转化酶在氮素转化与植物生长中起着重要作用. 蛋白酶和天冬酰胺酶是参与土壤氮素转化的关键性酶，蛋白酶对土壤生物可利用氮贡献最大，可作为氮素氨化的指示变量，而天冬酰胺酶活性能够反映土壤中含氮有机化合物的转化动态，其含量直接影响氮素的矿化过程.

但是，植被类型不同，凋落物、腐殖质、根系系统和吸收营养方式都存在差异[7]，这些因素可能影响不同土壤氮转化酶活性，进而影响土壤氮循环. 此外，在不同植被类型下，地面覆被不同，对土壤养分的富集和再分配作用，以及氮素转化的影响不同，进而会对土壤氮素转化酶和氮素及其在土壤剖面上的分布产生影响[1]. 因此，研究退耕还林还草后土壤氮素组分特征及其影响因素，对提高土壤氮素养分有重要意义.

宁南山区作为黄土高原典型区域，自1999年黄土高原地区开展大规模退耕还林还草以来，其植被恢复效益显著[8]. 目前有研究发现植被恢复能提高土壤氮含量[9]，但也有研究发现植被恢复导致土壤氮含量降低[10]，说明不同地点、不同植被恢复措施对土壤氮的恢复能力不同. Schmidt 等[11]的研究发现土壤干旱能够减少土壤微生物群落和微生物活性[11]，从而影响氮素转化酶的活性. 王学霞等[12]的研究发现土壤含水量、有机碳和全氮含量是影响土壤氮素含量和转化的主要因素，而朱光艳等[13]认为pH值是影响土壤氮素转化的主要因子. 近年来，有许多研究者分析发现退耕影响土壤酶活性和土壤氮素组成，而退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化相关酶活性，以及影响因素尚不明确. 为此，本研究以宁南山区玉米地为对照，柠条地、山桃地、苜蓿地和长芒草地为不同处理，探究宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响，以期为黄土高原科学合理推进退耕还林还草工程提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区固原市原州区东南部河川乡上黄村，地理位置为35°59′～36°03′N，106°26′～106°30′E，海拔为1 534～1 822 m，属于泾河水系支流小川河中游(图1). 该区属半干旱中温带向暖温带过渡气候，年均温为7.1℃，年均降水量为420 mm，干燥度为1.5～2.0，雨季从7月开始持续到10月，8月的降水量占总降水量的24%，多年平均蒸发量为1 400 mm，无霜期140 d；研究区的土壤类型主要是黄土母质上发育的淡黑垆土和黄绵土；主要植被类型有人工灌木林(柠条、山桃、山杏等为优势种)，苜蓿地(苜蓿为优势种)，长芒草地(长芒草、阿尔泰狗娃花、茭蒿和百里香等为优势种)和农地(玉米、小麦和荞麦等为优势种).

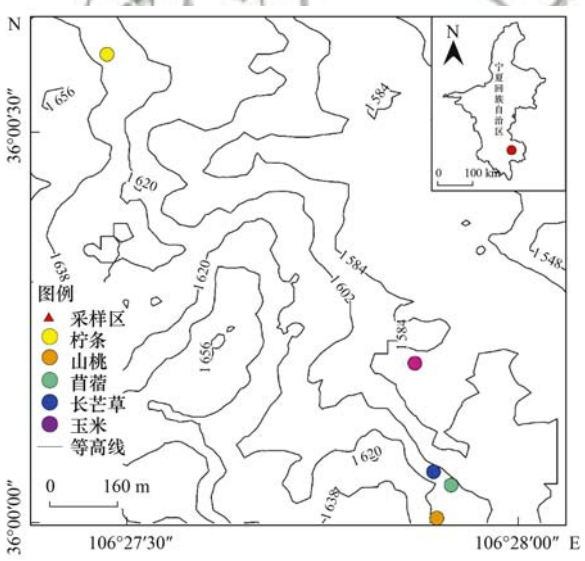

图1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of the sampling points

1.2 样品采集

于2015年7月植物生长最旺盛季节，选取宁南山区的玉米(corn，CO)作为对照，柠条(*Caragana intermedia*，CI)、山桃(*Prunus davidiana*，PD)、苜蓿(medicago，ME)和长芒草(*Stipa bungeana*，SB)为不同的处理(样地的基本信息见表1)，每个样方设置3个样地(20 m×20 m)作为野外重复. 选择0～20 cm土层，各样方按照“S”布点法

采集并混合，混合后的土样装入塑封袋，并带回实验室，一部分土样保存于 -20℃冰箱，用于测定酶的活性，另一部分土样进行过筛风干处理，用于土壤基本理化性质和氮组分的测定.

表 1　样地基本信息概况

Table 1　Details of the sampling sites

植物类型	代码	盖度/%	伴生种	退耕年份	坡向	坡度/(°)	经纬度	海拔/m
柠条	CI	58	洋冰草和茭蒿	1983	东偏北 37°	9	N36°00′35. 98″　E106°27′28. 47″	1 649
山桃	PD	45	长芒草	2000	北偏东 41°	18	N36°00′0. 36″　E106°27′53. 77 ″	1 632
苜蓿	ME	30	长芒草	2004	北偏东 20°	26	N36°00′2. 90″　E106°27′54. 87″	1 605
长芒草	SB	50	阿尔泰狗娃花和苇玲菜	/	东偏北 37°	29	N36°00′3. 93″　E106°27′53. 52″	1 615
玉米	CO	85	杂草	/	/	0	N36°00′12. 26″　E106°27′52. 09″	1 585

1.3　土壤基本理化性质测定

pH 值用无 CO_2 水浸提，pH 计测定；含水率(SW)用称重法测定；有机碳(SOC)用重铬酸钾-外加热法测定；碳氮比(C/N)通过有机碳与总氮的比值求得；采用半微量凯氏法测定总氮(TN)；硝态氮(NO_3^--N)和铵态氮(NH_4^+-N)采用新鲜土样 1 mol·L^{-1}KCl 浸提流动分析仪测定；有机氮(SON)采用不包含硝态氮和亚硝态氮的半微量凯氏法测定总氮，减去铵态氮(NH_4^+-N)后所得；以上指标参考文献[14]进行测定；微生物生物量氮(MBN)采用氯仿熏蒸-K_2SO_4 浸提-过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定；可溶性有机氮(DON)采用 K_2SO_4 浸提-过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测出可溶性总氮后减去浸提液中的矿质氮(NO_3^--N + NH_4^+-N)得到；轻组分有机氮(LFON)和颗粒有机氮(PON)均用半微量凯氏定氮法测定；蛋白酶(PT)采用改良的茚三酮比色法测定[15]；天冬酰胺酶(ASP)采用文献[16]的蒸馏法进行测定.

1.4　数据处理

试验数据采用 Excel 2013 整理，SPSS 20.0 进行统计分析. 采用单因素方差分析(One-way ANOVA)以及 Duncan 多重比较分析方法. 各个指标之间采用 Pearson 相关系数法进行相关性分析. 同时，运用 Canoco 5.0 软件进行土壤基本理化性质和氮组分与酶活性的冗余分析(RDA)，并利用 Origin 2017 软件和 ArcGIS 10.5 软件作图.

2　结果与分析

2.1　土壤基本理化性质变化特征

如表 2 所示，pH 值在 7.41 ~ 7.73 间变动，5 种土壤均呈中性偏弱碱性. 含水率为 10.50% ~ 11.83%. 土壤的有机碳和碳氮比在不同植物类型间差异显著($P < 0.05$). 其中山桃地的有机碳显著高于其他样地.

表 2　不同植物类型下土壤基本理化性质1)

Table 2　Soil physical and chemical properties under different plant types

类型	pH	含水率/%	有机碳/g·kg^{-1}	C/N
CI	7.73 ±0.10a	11.07 ±0.21b	15.37 ±0.10c	17.72 ±0.66c
PD	7.56 ±0.02b	10.88 ±0.15bc	26.15 ±0.29a	23.30 ±0.48a
ME	7.51 ±0.03bc	10.50 ±0.27c	10.49 ±0.24e	12.38 ±0.45d
SB	7.47 ±0.01bc	10.65 ±0.34bc	19.89 ±0.42b	20.49 ±0.60b
CO	7.41 ±0.02c	11.83 ±0.48a	11.48 ±0.16d	10.91 ±0.12e

1)同列不同小写字母表示不同样地之间差异显著($P < 0.05$)，下同

2.2　土壤氮组分及其占比变化特征

如图 2 所示，轻组分有机氮，硝态氮和微生物生物量氮在不同样地间差异显著($P < 0.05$). 与玉米地相比，有机氮在苜蓿地和长芒草地分别降低 21.5% 和 7.5%($P < 0.05$)，颗粒有机氮在苜蓿地降低 88.9%，山桃地和长芒草地的颗粒有机氮分别增加 70.6% 和 35.3%($P < 0.05$)；轻组分有机氮除苜蓿地降低 16.7% 外，柠条地，山桃地和长芒草地分别增加 16.7%、133.3% 和 83.3%($P < 0.05$)；微生物生物量氮在柠条地和苜蓿地分别降低 63.1% 和 58.2%，而山桃地和长芒草地分别增加 49.6% 和 64.2%($P < 0.05$)；可溶性有机氮在柠条地降低 71.1%，山桃地增加 28.1%($P < 0.05$)；硝态氮除柠条地增加 12.0% 外，山桃地，苜蓿地和长芒草地分别减少 61.7%、92.3% 和 85.9%($P < 0.05$)；铵态氮在柠条地，山桃地和苜蓿地分别增加 310.0%、110.0% 和 67.5%($P < 0.05$). 与天然草地相比，有机氮(15.2%)，颗粒有机氮(60.9%)，轻组分有机氮(54.5%)，微生物生物量氮(74.5%)，硝态氮(45.5%)和铵态氮(20.2%)在人工草地均降低($P < 0.05$).

如图 3 所示，PON/TN，MBN/TN 和NO_3^--N/TN

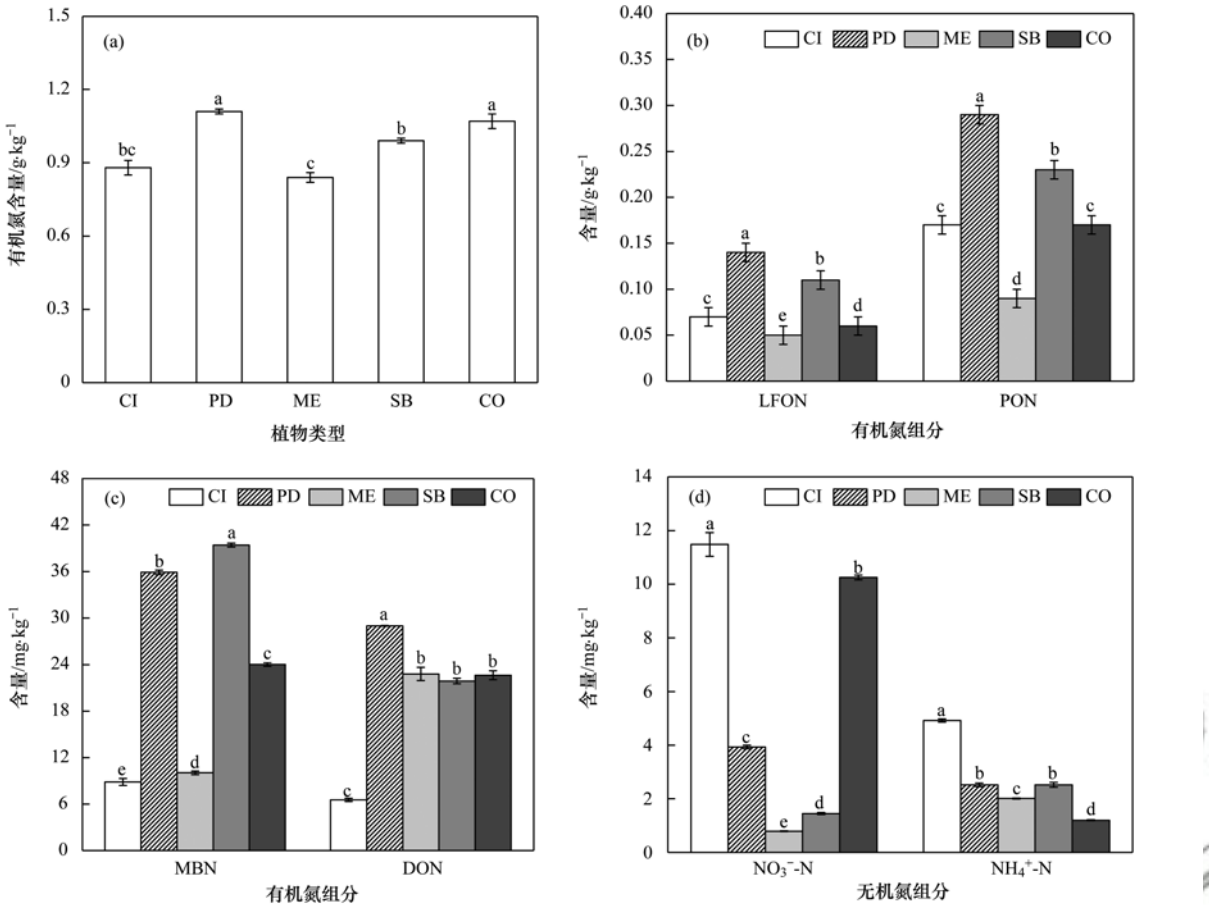

图 2 不同植物类型氮组分特征

Fig. 2 Characteristics of nitrogen components under different plant types

在不同样地间差异显著($P < 0.05$). 与玉米地相比, SON/TN 除柠条地减少 0.78% 外, 山桃地和苜蓿地分别增加 0.48% 和 0.73% ($P < 0.05$); PON/TN 除苜蓿地减少 4.46% 外, 柠条地, 山桃地和长芒草地分别增加 3.04%、10.64% 和 7.82% ($P < 0.05$); LFON/TN 在柠条地, 山桃地和长芒草地分别增加 2.20%、6.95% 和 4.99% ($P < 0.05$); MBN/TN 在柠条地和苜蓿地分别减少 1.22% 和 1.03%, 在山桃地和长芒草地分别增加 1.01% 和 1.75% ($P < 0.05$); DON/TN 在山桃地和苜蓿地分别增加 0.52% 和 0.61% ($P < 0.05$); NO_3^--N/TN 除柠条地增加 0.34% 外, 山桃地, 苜蓿地和长芒草地分别减少 0.60%、0.86% 和 0.80% ($P < 0.05$); NH_4^+-N/TN 在柠条地和苜蓿地分别增加 0.44% 和 0.13% ($P < 0.05$). 与长芒草地相比, 苜蓿地除 DON/TN 增加 0.50% 外, PON/TN、LFON/TN、MBN/TN 和NO_3^--N/TN 分别减少 12.29%、5.50%、2.78% 和 0.05% ($P < 0.05$).

2.3 土壤氮素转化酶活性变化特征

如图 4 所示, 与玉米地相比, 天冬酰胺酶活性除长芒草地增加 360% 外, 柠条地和山桃地分别降低 40.0% 和 70.0% ($P < 0.05$); 蛋白酶活性除苜蓿地降低 65.8%, 柠条地、山桃地和长芒草地分别增加 115.0%、67.9% 和 144.8% ($P < 0.05$). 与长芒草地相比, 这两种酶活性在苜蓿地分别降低 91.3% 和 86.0% ($P < 0.05$).

2.4 土壤基本理化性质和氮素转化酶活与氮素之间的关系

冗余分析(RDA)及环境因子解释率结果如图 5 所示. 土壤氮组分与基本理化性质和氮素转化酶活之间夹角的余弦值代表两者的相关性大小, 夹角越小相关性越大, 反之越小; 土壤基本理化性质和氮素转化酶环境变量线段的长短表示其对氮素组分影响的大小, 线段越长, 影响越大, 反之越小. 变量因子解释率越大, 影响越大, 反之越小. 从图 5 可以看出, 含水率的射线较长, 且其解释率达到了 29.8%, 说明其对氮素组分影响较大, 碳氮比的射线较短, 其解释率仅 5.0%, 说明其对氮素组分影响较小; pH 和有机碳的解释率分别为 26.4% 和 19.4%, 影响仅次于含水率; 有机氮, 颗粒有机氮, 轻组分有机氮和微生物生物量氮与含水率, 有机碳, 碳氮比, 天冬酰胺酶和蛋白酶均呈正相关, 与 pH 值均呈负相关; 铵态氮与 pH 值和含水率呈正相关, 与有机碳、碳氮比, 天冬酰胺酶和蛋白酶呈负

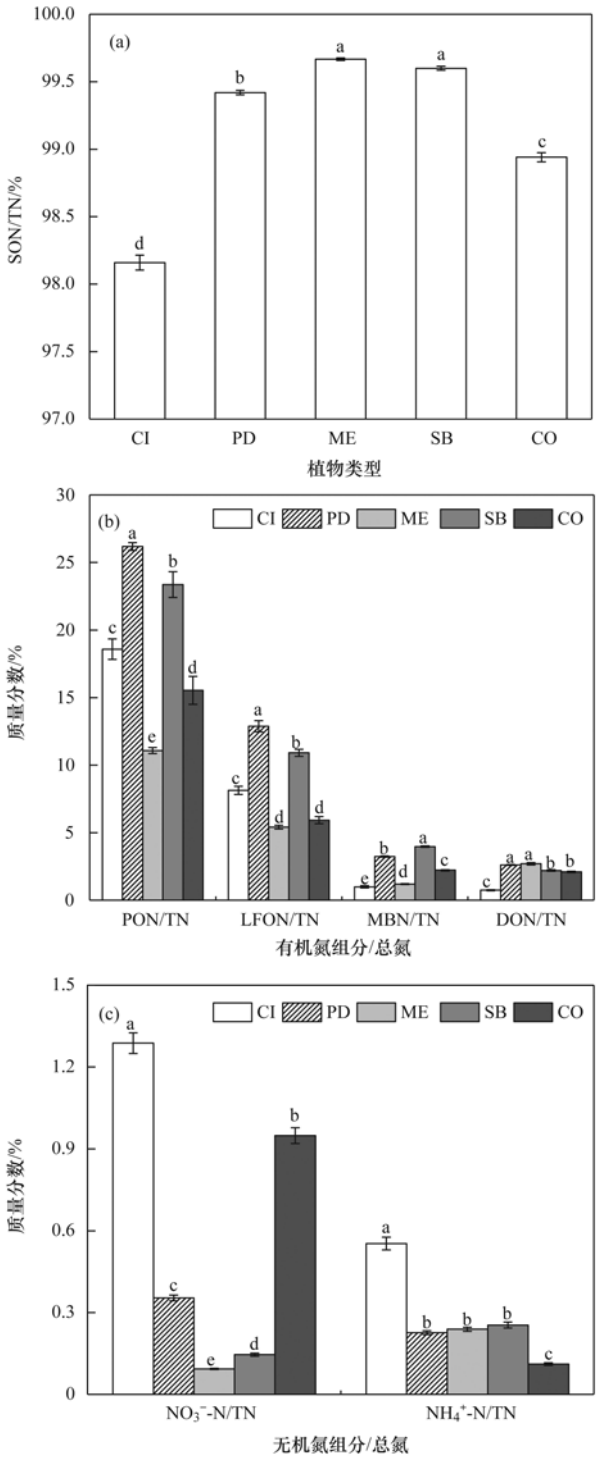

图 3　土壤氮组分占总氮的比例

Fig. 3　Ratio of soil nitrogen components to total nitrogen

相关；硝态氮与 pH 值，含水率和蛋白酶呈正相关，与有机碳、碳氮比和天冬酰胺酶活性呈负相关；同时，可溶性有机氮与有机碳、碳氮比、天冬酰胺酶呈正相关，而与 pH 值、含水率和蛋白酶呈负相关.

3　讨论

3.1　退耕还林还草对土壤氮素含量及组成的影响

植被类型的改变影响土壤有机氮的动态变化，一方面地上生物量和植物残体归还量的不同影响土壤有机氮的输入，另一方面土壤的物化过程和生物过程的不同影响土壤有机氮的输出[17]. 樊军等[18]对黄土高原人工草地土壤氮素进行了研究，结果显示，连续种植苜蓿会使土壤氮素降低；张春霞等[19]的研究表明，连续种植苜蓿，土壤氮素含量在5a时最低，且氮素含量随着生长年限有所提高. 由图 2 知，苜蓿地的总有机氮、轻组分有机氮、颗粒有机氮和微生物生物量氮含量分别比玉米地降低 21.5%、16.7%、88.9% 和 58.2%，其原因可能是由于本研究区苜蓿生长超过 5a，根系活力下降，导致生物量减少，从而对氮素的利用强度减弱，由于氮素的总体消耗，其含量虽有一定恢复，但恢复速度相对较慢，从而出现苜蓿地 4 种氮素含量均低于玉米地的现象. 山桃地的有机氮、轻组分有机氮、颗粒有机氮和可溶性有机氮含量均高于苜蓿地、长芒草地和玉米地，可以看出在实行退耕还林与还草这两种措施下，退耕还林更利于氮素的累积. 本研究中，不同植物类型间硝态氮含量变化最大，即硝态氮对植物类型变化最敏感；彭文英等[20]的研究也发现速效氮对植被恢复的敏感性较强，而相较于铵态氮，硝态氮更为敏感. 可能的原因是：一方面，本研究区 pH 接近于中性，利于氨化细菌生存，氨化作用强烈[21]，产生的氨转化为硝态氮；另一方面，铵态氮溶解性大，能够被植物快速吸收[22]，间接导致硝态氮含量升高. 有研究表明，人工林通过次生演替可加速土壤特性的恢复及增强土壤肥力[23]，在增强土壤水文效应方面，自然恢复植被不及人工林[24]，本研究中，柠条地的有机氮、轻组分有机氮、颗粒有机氮、微生物生物量氮和可溶性有机氮含量均低于长芒草地，即自然恢复植被对氮素的改善优于人工林，可能是因为人工林物种多样性恢复比自然恢复植被慢[25]，枯落物层不明显，另外人为干扰使土壤持水性能降低[26]，从而影响氮素的累积有关.

3.2　退耕还林还草对土壤氮素转化酶活性的影响

不同植物的根系分泌物存在差异，将影响土壤微生物的数量和酶活性[27]. 有研究表明，土壤酶活性在很大程度上受微生物量的影响[28]. 土壤中微生物的代谢和更新速度很快，而土壤微生物量的高低可表示参与分泌有机物、自身分解和呼吸排泄等过程时土壤微生物的多少，值越高表示参与的土壤微生物越多，相应地微生物细胞的分泌物及其残体的分解物则会越多，反之越少[29]. 由于长芒草地中微生物生物量氮含量高，所以土壤天冬酰胺酶活性和蛋白酶活性显著高于玉米地，而苜蓿地中微生物生物量氮含量低，所以土壤天冬酰胺酶活性和蛋白

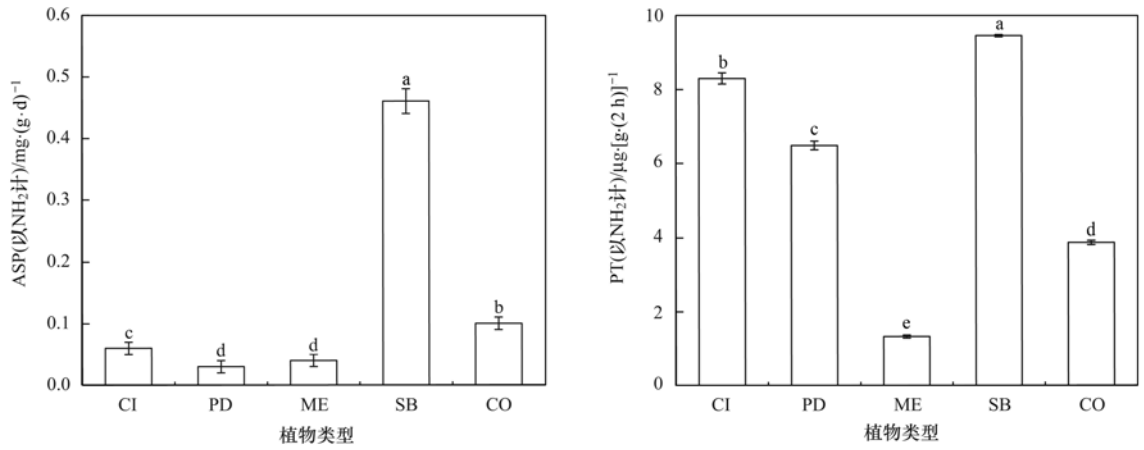

图 4 不同植物类型土壤酶活性特征

Fig. 4 Characteristics of soil enzyme activities under different plant types

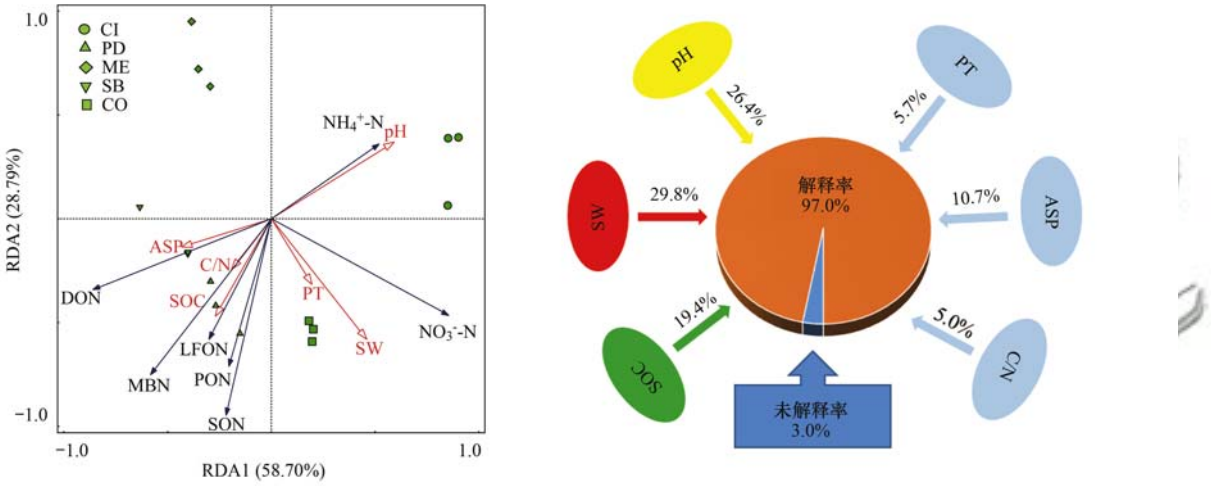

图 5 基于 5 种不同植物类型土壤基本理化性质和氮素转化酶与氮素的冗余分析及环境因子解释率

Fig. 5 Redundancy analysis of soil physical and chemical properties, enzyme activity, and nitrogen components under five different plant types, and the variance explained by each factor

酶活性低于玉米地，同样，山桃地中土壤微生物生物量氮高于玉米地，同时它的蛋白酶活性也高于玉米地，由此也可以说明退耕还林还草能提高两种酶的活性. 本研究结果显示，不同植物类型的蛋白酶活性存在差异，与本研究结果相似，邢肖毅等[30]在黄土丘陵区子午岭的研究也发现，不同植物类型的蛋白酶活性不同，可能是由于植被类型和恢复年限等因素使地被覆盖物存在差异，从而影响了土壤酶活性的高低[31]，因而蛋白酶活性不同.

3.3 影响土壤氮素分布和转化的因素分析

RDA 结果显示，pH 与有机氮、颗粒有机氮、轻组分有机氮、微生物生物量氮和可溶性有机氮表现出了显著的负相关关系，与硝态氮和铵态氮表现为正相关关系，这与蒋跃利等[32]研究宁南山区不同草地结果相一致. pH 值升高将增加土壤有机质的可溶性，为微生物的活动提供大量富含 C 和 N 基团的物质，从而促进氮的矿化，即土壤 pH 与氮矿化作用正相关[33]，本研究区的土壤均为碱性，pH 越低的土壤，越接近中性，越有利于微生物增加活性，因此 pH 与氮素表现出了以上的相关关系. Prescott 等[34]认为当土壤碳氮比小于 25∶1时，土壤中的氮素会出现净矿化，是微生物分解的最佳条件. 本研究中，土壤硝态氮和铵态氮与 C/N 呈现出负相关关系，这与已有研究结果一致[35]，而土壤可溶性有机氮与蛋白酶活性呈负相关，与舒向阳等[36]研究结果不一致，该研究结果显示可溶性有机氮与蛋白酶呈极显著正相关，可能是因为 5 种植物土壤的碳氮比范围为 10.91 ~ 23.30，微生物分解较强，使可溶性有机氮分解释放出矿质态氮，从而可溶性有机氮降低[37]. 土壤中各项有机氮素之间均具有正相关关系，可见氮循环的各个环节是密切相关的. 王晓锋等[38]的研究结果表明，土壤天冬酰胺酶和蛋白酶与无机氮形态有一定的相关关系. 在本研究中，7 种土壤氮素形态与天冬酰胺酶和蛋白酶之间存在显著的相关性，表明这两种酶是本研究区土壤氮转化的重要参与酶类[39].

由图5解释率的结果显示，土壤含水率、pH值和有机碳对土壤氮素影响较大，而充足的水分和适宜的pH值是土壤氮素矿化必不可少的条件，土壤有机碳是土壤氮素的基质[35]，因此三者与土壤氮素密切相关. 本研究表明土壤含水率、pH值和有机碳是该研究区域影响氮素分布与转化的主要理化性质因素.

4　结论

(1)退耕还林还草明显改变了土壤氮素组成的含量及氮素相关转化酶的活性，对氮素及其相关转化酶均有一定的促进作用；

(2)冗余分析(RDA)结果和环境因子解释率表明，土壤含水率，pH值和有机碳是影响宁南山区氮素分布与转化的关键因子；

(3)天冬酰胺酶和蛋白酶与7种氮素均呈显著相关性，说明这两种酶是本研究区土壤氮转化的重要参与酶.

参考文献：

[1] 田飞飞，纪鸿飞，王乐云，等. 施肥类型和水热变化对农田土壤氮素矿化及可溶性有机氮动态变化的影响[J]. 环境科学，2018，**39**(10)：4717-4726.
Tian F F，Ji H F，Wang L Y，*et al*. Effects of various combinations of fertilizer，soil moisture，and temperature on nitrogen mineralization and soluble organic nitrogen in agricultural soil[J]. Environmental Science，2018，**39**(10)：4717-4726.

[2] Cheng X L，Yang Y H，Li M，*et al*. The impact of agricultural land use changes on soil organic carbon dynamics in the Danjiangkou Reservoir area of China[J]. Plant and Soil，2013，**366**(1-2)：415-424.

[3] 闵九康，刘寄陵. 土壤酶的研究及其意义[J]. 土壤肥料，1978，(5)：16-19.

[4] Wang B，Xue S，Liu G B，*et al*. Changes in soil nutrient and enzyme activities under different vegetations in the Loess Plateau area，Northwest China[J]. Catena，2012，**92**：186-195.

[5] Mengel K，Schneider B，Kosegarten H. Nitrogen compounds extracted by electroultrafiltration (EUF) or CaCl2 solution and their relationships to nitrogen mineralization in soils[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science，2015，**162**(2)：139-148.

[6] Chapin Ⅲ F S，Matson P A，Vitousek P. Principles of terrestrial ecosystem ecology[M]. New York：Springer-Verlag，2011.

[7] 张萍，章广琦，赵一娉，等. 黄土丘陵区不同森林类型叶片-凋落物-土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报，2018，**38**(14)：5087-5098.
Zhang P，Zhang G Q，Zhao Y P，*et al*. Ecological stoichiometry characteristics of leaf-litter-soil interactions in different forest types in the Loess hilly-gully region of China[J]. Acta Ecologica Sinica，2018，**38**(14)：5087-5098.

[8] 王超，甄霖，杜秉贞，等. 黄土高原典型区退耕还林还草工程实施效果实证分析[J]. 中国生态农业学报，2014，**22**(7)：850-858.
Wang C，Zhen L，Du B Z，*et al*. Assessment of the impact of grain for green project on farmers' livelihood in the Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture，2014，**22**(7)：850-858.

[9] 翁伯琦，郑祥洲，丁洪，等. 植被恢复对土壤碳氮循环的影响研究进展[J]. 应用生态学报，2013，**24**(12)：3610-3616.
Weng B Q，Zheng X Z，Ding H，*et al*. Effects of vegetation restoration on soil carbon and nitrogen cycles：A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2013，**24**(12)：3610-3616.

[10] 盛才余，刘伦辉，刘文耀. 云南南涧干热退化山地人工植被恢复初期生物量及土壤环境动态[J]. 植物生态学报，2000，**24**(5)：575-580.
Sheng C Y，Liu L H，Liu W Y. Biomass and dynamics of soil environment during the early stage of vegetation restoration in a degraded dry-hot mountain area of Nanjian，Yunnan[J]. Acta Phytoecologica Sinica，2000，**24**(5)：575-580.

[11] Schmidt B H M，Kalbitz K，Braun S，*et al*. Microbial immobilization and mineralization of dissolved organic nitrogen from forest floors[J]. Soil Biology and Biochemistry，2011，**43**(8)：1742-1745.

[12] 王学霞，董世魁，高清竹，等. 青藏高原退化高寒草地土壤氮矿化特征以及影响因素研究[J]. 草业学报，2018，**27**(6)：1-9.
Wang X X，Dong S K，Gao Q Z，*et al*. The rate of soil nitrogen transformation decreased by the degradation of alpine grasslands in the Qinghai Tibet Plateau[J]. Acta Prataculturae Sinica，2018，**27**(6)：1-9.

[13] 朱光艳，胡同欣，李飞，等. 火后不同年限兴安落叶松林土壤氮的矿化速率及其影响因素[J]. 中南林业科技大学学报，2018，**38**(3)：88-96.
Zhu G Y，Hu T X，Li F，*et al*. Soil nitrogen mineralization rate and its impact factors in *Larix gmelinii* forest after different years fire disturbance[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology，2018，**38**(3)：88-96.

[14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京：中国农业出版社，2000.

[15] 蔡红，沈仁芳. 改良茚三酮比色法测定土壤蛋白酶活性的研究[J]. 土壤学报，2005，**42**(2)：306-313.
Cai H，Shen R F. Determination of soil protease activity with modified ninhydrin colorimetry[J]. Acta Pedologica Sinica，2005，**42**(2)：306-313.

[16] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京：农业出版社，1986.

[17] 周涛，史培军. 土地利用变化对中国土壤碳储量变化的间接影响[J]. 地球科学进展，2006，**21**(2)：138-143.
Tao Z，Shi P J. Indirect Impacts of land use change on soil organic carbon change in China[J]. Advances in Earth Science，2006，**21**(2)：138-143.

[18] 樊军，郝明德，邵明安. 黄土高原沟壑区草地土壤深层干燥化与氮素消耗[J]. 自然资源学报，2004，**19**(2)：201-206.
Fan J，Hao M D，Shao M A. Soil desiccation and nitrogen consumption of artificial meadow in the Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources，2004，**19**(2)：201-206.

[19] 张春霞，郝明德，李丽霞. 黄土高原沟壑区苜蓿地土壤碳、氮、磷组分的变化[J]. 草地学报，2005，**13**(1)：66-70.
Zhang C X，Hao M D，Li L X. Soil composition of carbon，nitrogen and phosphorus after successive years of alfalfa planting in the gullies of the Loess Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica，2005，**13**(1)：66-70.

[20] 彭文英，张科利，陈瑶，等. 黄土坡耕地退耕还林后土壤性质变化研究[J]. 自然资源学报，2005，**20**(2)：272-278.
Peng W Y，Zhang K L，Chen Y，*et al*. Research on soil quality change after returning farmland to forest on the Loess sloping croplands[J]. Journal of Natural Resources，2005，**20**(2)：

272-278.

[21] Maithani K, Arunachalam A, Tripathi R S, *et al*. Nitrogen mineralization as influenced by climate, soil and vegetation in a subtropical humid forest in northeast India[J]. Forest Ecology and Management, 1998, **109**(1-3): 91-101.

[22] Jackson L E, Schimel J P, Firestone M K. Short-term partitioning of ammonium and nitrate between plants and microbes in an annual grassland[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1989, **21**(3): 409-415.

[23] Lamb D. Large-scale ecological restoration of degraded tropical forest lands: The potential role of timber plantations[J]. Restoration Ecology, 1998, **6**(3): 271-279.

[24] 张远东, 赵常明, 刘世荣. 川西亚高山人工云杉林和自然恢复演替系列的林地水文效应[J]. 自然资源学报, 2004, **19**(6): 761-768.
Zhang Y D, Zhao C M, Liu S R. Woodland hydrological effects of spruce plantations and natural secondary series in sub-alpine region of western Sichuan[J]. Journal of Natural Resources, 2004, **19**(6): 761-768.

[25] 吴彦, 刘庆, 乔永康, 等. 亚高山针叶林不同恢复阶段群落物种多样性变化及其对土壤理化性质的影响[J]. 植物生态学报, 2001, **25**(6): 648-655.
Wu Y, Liu Q, Qiao Y K, *et al*. Species diversity changes in subalpine coniferous forests of different restoration stages and their effects on soil properties[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2001, **25**(6): 648-655.

[26] 庞学勇, 刘庆, 刘世全, 等. 人为干扰对川西亚高山针叶林土壤物理性质的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2002, **8**(6): 583-587.
Pang X Y, Liu Q, Liu S Q, *et al*. Effect of human induced disturbance on soil physical properties of subalpine conferous forests in western Sichuan[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2002, **8**(6): 583-587.

[27] Makoi J H J R, Ndakidemi P A. Selected soil enzymes: Examples of their potential roles in the ecosystem[J]. African Journal of Biotechnology, 2008, **7**(3): 181-191.

[28] 沈宏, 曹志洪, 徐本生. 玉米生长期间土壤微生物量与土壤酶变化及其相关性研究[J]. 应用生态学报, 1999, **10**(4): 471-474.
Shen H, Cao Z H, Xu B S. Dynamics of soil microbial biomass and soil enzyme activity and their relationships during maize growth[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, **10**(4): 471-474.

[29] 王晓凌, 陈明灿, 李凤民, 等. 苜蓿草地土壤干层对土壤脲酶活性和土壤蛋白酶活性的影响[J]. 水土保持研究, 2007, **14**(4): 445-448.
Wang X L, Chen M C, Li F M, *et al*. Effects of dry soil layers on activity of soil urease and protease in Alfalfa grassland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, **14**(4): 445-448.

[30] 邢肖毅, 黄懿梅, 安韶山, 等. 黄土高原沟壑区森林带不同植物群落土壤氮素含量及其转化[J]. 生态学报, 2013, **33**(22): 7181-7189.
Xing X Y, Huang Y M, An S S, *et al*. Soil nitrogen concentrations and transformations under different vegetation types in forested zones of the Loess Gully Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(22): 7181-7189.

[31] Bell T H, Klironomos J N, Henry H A L. Seasonal responses of extracellular enzyme activity and microbial biomass to warming and nitrogen addition[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, **74**(3): 820-828.

[32] 蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 等. 宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2365-2373.
Jiang Y L, Zhao T, Yan H, *et al*. Variation of soil nitrogen during in situ mineralization process under different grasslands in the mountainous area of southern Ningxia, northwest China[J]. Environmental Science, 2014, **35**(6): 2365-2373.

[33] Curtin D, Campbell C A, Jalil A. Effects of acidity on mineralization: pH-dependence of organic matter mineralization in weakly acidic soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1998, **30**(1): 57-64.

[34] Prescott C E, Chappell H N, Vesterdal L. Nitrogen turnover in forest floors of coastal douglas-fir at sites differing in soil nitrogen capital[J]. Ecology, 2000, **81**(7): 1878-1886.

[35] Chu H Y, Grogan P. Soil microbial biomass, nutrient availability and nitrogen mineralization potential among vegetation-types in a low arctic tundra landscape[J]. Plant and Soil, 2010, **329**(1-2): 411-420.

[36] 舒向阳, 胡玉福, 杨雨山, 等. 川西北草地沙化对土壤可溶性有机氮及酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, **36**(1): 66-71.
Shu X Y, Hu Y F, Yang Y S, *et al*. Soil dissolved organic nitrogen and enzyme activities at different desertification grasslands in Northwest Sichuan[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, **36**(1): 66-71.

[37] 吴旺旺, 张丽丽, 林达, 等. 氮沉降对凋落叶分解前期土壤酶活性的影响[J]. 森林与环境学报, 2017, **37**(2): 174-180.
Wu W W, Zhang L L, Lin D, *et al*. Effects of simulated nitrogen deposition on soil enzyme activity during early stage of leaf litter decomposition[J]. Journal of Forest and Environment, 2017, **37**(2): 174-180.

[38] 王晓锋, 刘红, 张磊, 等. 澎溪河消落带典型植物群落根际土壤无机氮形态及氮转化酶活性[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(10): 3059-3068.
Wang X F, Liu H, Zhang L, *et al*. Inorganic nitrogen forms and related enzyme activity of rhizosphere soils under typical plants in the littoral zone of Pengxi River[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(10): 3059-3068.

[39] Weng B S, Xie X Y, Yang J J, *et al*. Research on the nitrogen cycle in rhizosphere of *Kandelia obovata* under ammonium and nitrate addition[J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, **76**(1-2): 227-240.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 40 No. 8

Aug. 15, 2019

CONTENTS

Characteristics of $PM_{2.5}$ Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016 ····· ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, *et al.* (3397)

Concentration Characteristics of $PM_{2.5}$ and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter ····· XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, *et al.* (3405)

Elemental Composition Characteristics of $PM_{2.5}$ and PM_{10}, and Heavy Pollution Analysis in Hefei ····· LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)

Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China ····· CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, *et al.* (3421)

Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in $PM_{2.5}$ in the Guanzhong Area ····· KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, *et al.* (3431)

Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun ····· WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, *et al.* (3438)

Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on $PM_{2.5}$ Pollution in China ····· WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)

Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of $PM_{2.5}$ from Coal-Fired Power Plants ····· DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, *et al.* (3457)

Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province ····· XU Jia-qi, WANG Zhe-ming, SONG Shuang, *et al.* (3463)

Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site ····· MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, *et al.* (3470)

Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao ····· GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)

Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou ····· SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, *et al.* (3489)

Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project ····· HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, *et al.* (3501)

Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta ····· QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, *et al.* (3509)

Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China ····· YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, *et al.* (3519)

Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir ····· WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, *et al.* (3530)

Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging ····· LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, *et al.* (3539)

Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang ····· WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, *et al.* (3550)

Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands ····· LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, *et al.* (3559)

Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing ····· WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, *et al.* (3568)

Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors ····· LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, *et al.* (3577)

Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin ····· WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, *et al.* (3588)

Community Composition of *nirS*-type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenhe River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen ····· WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)

Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water ····· HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, *et al.* (3604)

Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling ····· PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, *et al.* (3612)

Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs ····· ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, *et al.* (3618)

Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process ····· FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, *et al.* (3626)

Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials ····· JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, *et al.* (3633)

Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains ····· CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, *et al.* (3642)

Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials ····· LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, *et al.* (3650)

Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid ····· HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, *et al.* (3660)

Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR ····· YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, *et al.* (3668)

Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System ····· XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, *et al.* (3675)

Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX ····· MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, *et al.* (3683)

Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems ····· DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, *et al.* (3691)

Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China ····· ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)

Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations ····· LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, *et al.* (3706)

Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium *Acinetobacter junii* NP1 ····· YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, *et al.* (3713)

Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification ····· GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, *et al.* (3722)

Nitrification, Denitrification, and N_2O Production Under Saline and Alkaline Conditions ····· DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, *et al.* (3730)

Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil ····· WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)

Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields ····· ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, *et al.* (3746)

Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde ····· SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, *et al.* (3753)

Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City ····· ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, *et al.* (3764)

Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Arban Soils ····· ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, *et al.* (3774)

Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(Ⅴ) and P ····· LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)

Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions ····· ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, *et al.* (3792)

Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils ····· LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, *et al.* (3799)

Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils ····· WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)

Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates ····· LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, *et al.* (3816)

Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia ····· GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, *et al.* (3825)

Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents ····· HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, *et al.* (3833)

Toxicity of $PM_{2.5}$ Based on a Battery of Bioassays ····· JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, *et al.* (3840)