

10.13869/j.cnki.rswc.20220304.001.

毛娜, 刘通, 江恒, 等. 蚯蚓对赤红壤草被恢复影响的试验研究[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 70-76.

MAO Na, LIU Tong, JIANG Heng, et al. Effects of Earthworms on Grass Regeneration in Lateritic Red Soil[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 70-76.

蚯蚓对赤红壤草被恢复影响的试验研究

毛娜^{1,3}, 刘通², 江恒², 李祥东^{1,2}, 程炯², 魏孝荣¹, 邵明安¹

(1.中国科学院 教育部水土保持与生态环境研究中心 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.广东省科学院生态环境与土壤研究所, 华南土壤污染控制与修复国家地方联合工程研究中心/广东省农业环境综合治理重点实验室, 广州 510650; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:生态修复是南方红壤丘陵区土地退化治理的有效手段之一,但现有研究较少关注土壤动物在生态修复过程中的作用。以退化的赤红壤为研究对象,基于盆栽试验,采用全因子设计方法模拟多种生态系统(裸土 vs. 黑麦草)×蚯蚓(不接种 vs. 接种蚯蚓)×水分(湿润 vs. 干旱),以揭示蚯蚓对干旱条件下退化土壤植被修复前后土壤理化性质和植被生产力的调控作用。结果表明:蚯蚓显著提高了湿润和干旱条件下黑麦草生物量。蚯蚓对土壤有机碳影响不显著,蚯蚓活动提高了裸土生态系统土壤总氮、硝态氮、铵态氮含量,以及黑麦草生态系统土壤速效磷含量。干旱胁迫降低黑麦草生物量,对土壤有机碳影响不显著,但显著改善蚯蚓存在土壤的 pH 值。黑麦草生物量与土壤总磷、硝态氮、铵态氮和速效磷显著正相关。偏最小二乘路径分析表明蚯蚓活动显著提高土壤全量和速效养分含量,湿润条件下速效养分对植被生物量具有显著正效应,干旱条件下其作用不显著。综上,蚯蚓活动改善土壤肥力状况,促进植被生长,蚯蚓活动可缓解干旱对植被生长的不利影响。研究结果对深入认识蚯蚓对生态系统作用具有重要意义,为退化土地生态修复管理提供科学依据。

关键词:赤红壤; 蚯蚓; 干旱胁迫; 黑麦草; 养分循环

中图分类号:S158

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)01-0070-07

Effects of Earthworms on Grass Regeneration in Lateritic Red Soil

MAO Na^{1,3}, LIU Tong², JIANG Heng², LI Xiangdong^{1,2},
CHENG Jiong², WEI Xiaorong¹, SHAO Ming'an¹

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.National-Regional Joint Engineering Research Center for Soil Pollution Control and Remediation in South China, Guangdong Key Laboratory of Integrated Agro-environmental Pollution Control and Management, Institute of Eco-environmental and Soil Sciences, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Ecological restoration is one of the effective measures to control land degradation in the red soil hilly region of south China. However, few studies have focused on the role of soil fauna in ecological restoration. In this study, a full-factor pot experiment, two ecosystems (bare soil vs. ryegrass) × earthworm (no inoculation vs. earthworm inoculation) × moisture (wet vs. drought), was used to reveal the regulatory effects of earthworms on soil physicochemical properties and vegetation productivity before and after the restoration of degraded soil under the drought stress. The results showed as follows. Earthworms significantly increased the biomass of ryegrass under different soil moisture conditions. Earthworm did not influence soil organic carbon, but increased soil total nitrogen, nitrate-nitrogen, ammonium-nitrogen in the bare soil ecosystem and the soil available phosphorus in the ryegrass ecosystem ($p < 0.05$). Drought decreased the biomass of

收稿日期: 2021-12-27

修回日期: 2022-01-13

资助项目: 国家自然科学基金项目(42007012; 42177305); 广东省科学院实施创新驱动发展能力建设专项(2020GDASYL-20200103085)

第一作者: 毛娜(1993—), 女, 陕西商洛人, 博士研究生, 研究方向为土壤碳氮循环。E-mail: maona0110@163.com

通信作者: 李祥东(1990—), 男, 山东枣庄人, 助理研究员, 研究方向为土壤物理和蚯蚓生态学。E-mail: xdli@soil.gd.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

ryegrass and had no significant effect on soil pH, but significantly increased the soil pH of earthworm presence soil. The biomass of ryegrass was significantly positively correlated with soil total phosphorus, nitrate-nitrogen, ammonium-nitrogen and available phosphorus ($p < 0.05$). Partial least square path analysis showed that earthworm significantly increased soil total and available nutrient contents, and soil available nutrients had a significant positive effect on vegetation biomass under wet conditions, but had no significant effects on vegetation biomass under drought conditions. In conclusion, earthworm activity improved soil fertility and thus promoted vegetation growth. Drought hindered the nutrient absorption and utilization by plants and limited vegetation productivity, but earthworm activity could alleviate the adverse effects caused by drought. These results have implications for understanding the roles of earthworms in the degraded ecosystem and provide a better insight to improve the ecological profit of restoration in eroded red soil.

Keywords: lateritic red soil; earthworm; drought; ryegrass; nutrient cycling

南方红壤丘陵区是中国仅次于黄土高原的水土流失区,其地形起伏大、母岩抗侵蚀能力弱,再加上南方地区暴雨频次高、风化作用强烈,使得该区土壤质量偏低^[1]。以花岗岩风化壳为母岩的赤红壤是南亚热带区域的代表性土壤,分布范围广,占广东省总面积的 44.7%,这类土壤酸化严重、有机质含量低、养分贫瘠,加之不合理的开垦利用,土壤退化极为严重^[2]。植被修复可以迅速提高植物生物量和土壤碳储量,是退化土地修复和改良的重要手段之一。关于造林或生态修复对土壤有机碳、理化性质的影响已开展大量研究^[3-4],但从土壤动物角度探究退化土地生态系统植被生产力和土壤理化性质变异的相对较少。

蚯蚓是最典型的大型土壤动物之一,能够通过取食、消化、排泄、分泌和掘穴等活动改善土壤结构,影响土壤物质循环和能量流动,被称为“生态系统工程师”^[5-6]。研究表明生态修复后蚯蚓可从邻近土地迁移至退化土地,蚯蚓群落种类和丰富度显著提高,土地修复 22 a 后,蚯蚓群落密度和生物量可达 208 条/ m^2 , 71 g/m^2 ^[7]。蚯蚓群落的存在和演变势必会影响土壤生态系统功能,如养分循环和植被生产力,但蚯蚓如何影响土壤植被修复过程尚不明确。

近年来,全球气候变暖,极端气候频发^[8]。1951—2008 年间,我国 54.6% 的陆地和 40% 的月份都经历了不同程度的干旱^[9]。在正常生态系统,干旱可能导致土壤水分亏缺、植被死亡和作物减产等^[10],那么退化生态系统对干旱胁迫的响应可能更加敏感。因此研究干旱胁迫对生态修复效应的影响很有必要。本研究以典型赤红壤为研究对象,基于盆栽模拟试验,探究蚯蚓活动对退化土壤修复前(裸土培养)和修复后(黑麦草种植)土壤理化性质的影响,探讨蚯蚓活动对植被生产力的影响机制,明确蚯蚓对赤红壤恢复草地生态系统养分循环的调控作用。为科学评估蚯蚓活动在生态修复过程中的作用提供数据支撑,也为生态修复经营管理提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为花岗岩风化发育的典型赤红壤,取自广东省广州市增城区桉树林区地表侵蚀裸露区域。该区属于南亚热带季风气候,年平均气温 21.6℃,日照时数 1 710 h,年平均降雨量 1 968 mm,干湿季节明显,雨量集中于 4—9 月,占全年的 80% 以上。供试土壤带回实验室风干,去除根系、砾石等杂质后过 8 mm 筛用于后续培养试验。该土壤为黏壤土,黏粒、粉粒和砂粒含量分别为 38.3%, 20.7% 和 41.0%, pH 为 4.5, 有机碳含量 2.7 g/kg, 土壤总氮和总磷含量分别为 0.16, 0.13 g/kg。

供试植物为多年生黑麦草(*Lolium perenne*),挑选颗粒完整,大小一致的种子用于试验。

供试蚯蚓为华南地区广泛分布的参状远盲蚓(*Amyntas aspergillum*),收集于广东省广州市增城试验基地农田,挑选生长健壮,大小均一的蚯蚓用于试验,蚯蚓重约 (3.0 ± 0.2) g。

1.2 试验设计

试验通过裸土和黑麦草培养分别模拟退化土地生态修复前和修复后,探讨蚯蚓活动对植被生产力和土壤理化性质的影响,以及生态恢复草地生态系统对干旱胁迫的响应。试验设置 8 个处理:包括 2 种模拟生态系统(裸土 vs. 黑麦草),2 种水分条件(湿润 vs. 干旱)和 2 种蚯蚓处理(有蚯蚓 vs. 无蚯蚓),每个处理设置 5 个重复,共 40 个盆栽。盆栽试验在广东省科学院生态环境与土壤研究所院内温室大棚中进行。盆栽试验主要时间节点如下:2020 年 12 月底盆栽装土,种植黑麦草,室内培养 60 d 后接种蚯蚓,蚯蚓接种后继续培养 50 d,然后进行 40 d 的干旱胁迫处理,盆栽试验总计 150 d,详细试验步骤如下。

(1) 土柱填装:试验所用盆栽容器为直径 15 cm、高 15 cm 的塑料桶,装填所用土壤为上述供试土壤,干容重为 1.2 g/cm^3 ,每个塑料桶填装供试干土

2 160 g,装填至盆内高度约 10 cm。蒸馏水调节土壤水分含量至田间持水量(27.6%)。

(2) 黑麦草种植:随机选取 20 个盆栽种植黑麦草。在种植前,浸泡黑麦草种子 4 h,翻松盆栽表层 1.5 cm 土壤,等间距穴植黑麦草,共 9 穴,每穴黑麦草 3 颗种子,种植后盆栽土壤浇水至田间持水量。对于裸土生态系统,也按照相同方式放上等量的、经高温处理失活的黑麦草种子。在接种蚯蚓和土壤干旱处理之前,所有盆栽的土壤水分维持在田间持水量。为减少温室大棚对阳光的遮挡影响,采用 LED 全光谱植物生长灯对盆栽进行日间补光,补光时间为每天 12 h,培养 60 d。培养过程中,每天给盆栽称重记录,以监测其土壤含水量在控制范围以内。

(3) 蚯蚓接种:裸土和黑麦草处理组随机挑选一半的盆栽(10 盆)接种蚯蚓,每盆 4 条,接种前用蒸馏水将蚯蚓清洗干净,再放在湿润的滤纸上任其自由排泄 24~48 h 清空蚯蚓肠道,随后放入土壤表面。盆栽塑料桶上沿用透明胶带围起,防止蚯蚓逃逸。定期检查盆栽蚯蚓生存状况,若蚯蚓死亡则用镊子小心去除蚯蚓尸体,并重新接种蚯蚓。继续培养 50 d。

(4) 模拟干旱处理:各个处理随机挑选一半的盆栽(5 盆)进行干旱胁迫处理,其他盆栽为湿润对照组。湿润对照组定期称重控水维持田间持水量。干旱处理组盆栽土壤水分随蒸发过程逐渐损失(注:自然蒸发过程中,土壤水分从田间持水量降至萎蔫含水量需要 15 d),以此来模拟土壤干旱,土壤干旱胁迫 20 d 后将土壤含水量调至田间持水量,随后继续模拟干旱 20 d。试验结束后,进行样品采集与测定。

1.3 样品采集与测定

(1) 黑麦草采集与测定:试验结束后,所有盆栽都进行破坏性取样。对于种植有黑麦草的盆栽,贴近土壤表面刈割黑麦草,收集全部地上生物量,放入信封袋中,80℃杀青 30 min,随后 60℃烘干至恒重,称重获得黑麦草生物量。

(2) 土样采集与测定:采集土壤样品前,用镊子挑出黑麦草根系和蚯蚓。由于黑麦草根系较为细少,烘干后与黑麦草地上部分一起称重计算生物量,蚯蚓收集后放归农田。盆栽土壤混合均匀后风干过 1 mm 和 0.25 mm 网筛,参考《土壤农化分析》^[11]测定土壤理化性质。土壤 pH 值采用 PHS-3C 仪测定,水土比($v:m$)为 2.5:1;土壤有机碳采用重铬酸钾氧化—外加加热法测定;土壤全氮采用凯氏定氮法测定;土壤全磷采用硫酸—高氯酸消解—钼锑抗比色法测定;土壤硝态氮和铵态氮采用 2 mol/L 氯化钾浸提,AA3 型连续流动分析仪测定;土壤 Olsen 速效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定。

1.4 数据处理与分析

数据经异常值检验、正态性检验和方差齐性检验后进行后续分析。采用双因素方差分析研究蚯蚓活动和干旱胁迫对黑麦草生物量和土壤理化性质的影响,采用 Duncan 多重比较法分析黑麦草生物量和土壤理化性质在不同处理间的差异显著性,采用皮尔逊相关分析探究土壤理化性质间的关系,通过主成分分析研究蚯蚓和干旱处理对土壤理化性质的影响,并经多元方差分析检验(Adonis 检验),采用偏最小二乘路径分析法研究不同水分条件下蚯蚓对黑麦草生态系统的影响机制。以上数据分析显著性检验水平均为 $p = 0.05$ 。数据处理和做图采用 R4.1.0 平台 agricolae,vegan,plspm 和 ggplot2 包以及 Excel 2016 完成。

2 结果与分析

2.1 蚯蚓和干旱对黑麦草生物量的影响

蚯蚓活动和干旱胁迫对黑麦草生物量的影响见表 1 和图 1。蚯蚓活动和干旱胁迫显著影响黑麦草生物量($p < 0.05$),其交互作用影响不显著($p = 0.176$)。湿润条件下,相比无蚯蚓组[(0.33 ± 0.05) g],蚯蚓活动显著提高了黑麦草生物量[(0.60 ± 0.15) g, $p < 0.05$]。干旱胁迫限制黑麦草生长,干旱处理的黑麦草生物量最小[(0.28 ± 0.02) g],蚯蚓-干旱处理时黑麦草生物量较低[(0.43 ± 0.12) g],但仍然高于不接种蚯蚓的处理。

2.2 蚯蚓和干旱对土壤理化性质的影响

蚯蚓活动和干旱胁迫对裸地和黑麦草生态系统土壤 pH 值、全量和速效养分含量影响见表 1 和图 2。蚯蚓活动和干旱胁迫对两种生态系统 pH 值影响显著,但其交互作用不显著。对于裸地生态系统,相比不添加蚯蚓组,蚯蚓接种显著改善了土壤 pH 值($p < 0.05$),干旱条件下土壤 pH 值增加,蚯蚓-干旱处理具有最高的 pH 值(4.94 ± 0.07)。黑麦草系统除蚯蚓-湿润与不接种蚯蚓组土壤 pH 值没有显著差异外,其余土壤 pH 值与裸地生态系统具有相同的变化趋势(图 2A)。蚯蚓活动和干旱胁迫对土壤有机碳无显著影响($p > 0.05$),各处理组间差异不显著(图 2B)。

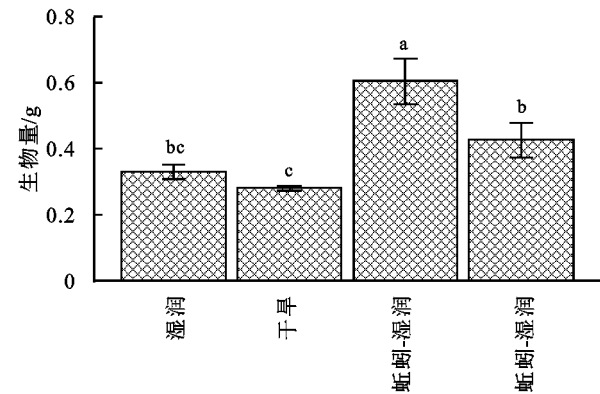
裸土培养时蚯蚓活动显著影响土壤总氮、硝态氮和铵态氮含量($p < 0.001$),干旱胁迫以及蚯蚓和干旱胁迫交互作用对土壤总氮、硝态氮和铵态氮含量无显著影响($p > 0.05$,表 1)。裸土培养的湿润和干旱组总氮和硝态氮含量分别为 0.16~0.17 g/kg 和 6.48~7.8 mg/kg,显著低于蚯蚓-湿润和蚯蚓-干旱组(图 2C 和 2E)。蚯蚓接种提高了土壤铵态氮含量,蚯蚓-干旱组最高为(43.95 ± 32.09) mg/kg,蚯蚓-湿润组铵态氮含量与其余处理差异

不显著($p>0.05$,图 2F)。对于黑麦草生态系统,蚯蚓活动、干旱胁迫及其交互作用对土壤总氮影响不显著(表 1),各处理组间差异不显著(图 2C)。蚯蚓活动提高土壤硝态氮含量,干旱胁迫降低硝态氮含量,因此仅干旱处理具有最低的硝态氮含量,显著低于蚯蚓-湿润组

($p<0.05$)。蚯蚓活动显著影响黑麦草生态系统土壤铵态氮含量,干旱胁迫以及蚯蚓和干旱胁迫交互作用影响不显著。干旱胁迫条件下土壤铵态氮含量最低 $[(7.42\pm2.29)\text{ mg/kg}]$,接种蚯蚓后具有最高的铵态氮含量 $[(27.5\pm11.91)\text{ mg/kg}]$ 。

表 1 蚯蚓和干旱对植被生物量和土壤理化性质影响的双因素方差分析

指标	变量	裸土系统			黑麦草系统		
		蚯蚓	干旱	蚯蚓×干旱	蚯蚓	干旱	蚯蚓×干旱
生物量	<i>F</i> 值				21.719	6.400	2.017
	<i>p</i> 值				<0.001	0.022	0.176
pH 值	<i>F</i> 值	66.764	13.236	4.112	7.253	13.486	1.029
	<i>p</i> 值	<0.001	0.002	0.060	0.016	0.002	0.326
有机碳	<i>F</i> 值	0.786	1.332	0.500	0.055	0.003	2.702
	<i>p</i> 值	0.388	0.265	0.490	0.818	0.954	0.120
总氮	<i>F</i> 值	42.323	0.013	1.910	4.036	0.047	0.876
	<i>p</i> 值	<0.001	0.910	0.186	0.062	0.831	0.363
总磷	<i>F</i> 值	3.810	9.287	0.777	7.471	0.749	1.023
	<i>p</i> 值	0.069	0.008	0.391	0.015	0.400	0.327
硝态氮	<i>F</i> 值	31.124	3.021	0.077	2.707	3.012	0.001
	<i>p</i> 值	<0.001	0.101	0.784	0.119	0.102	0.980
铵态氮	<i>F</i> 值	13.976	1.065	1.414	15.835	0.132	1.580
	<i>p</i> 值	0.002	0.317	0.252	0.001	0.721	0.227
速效磷	<i>F</i> 值	4.684	7.124	1.193	57.385	7.732	0.795
	<i>p</i> 值	0.046	0.017	0.291	<0.001	0.013	0.386



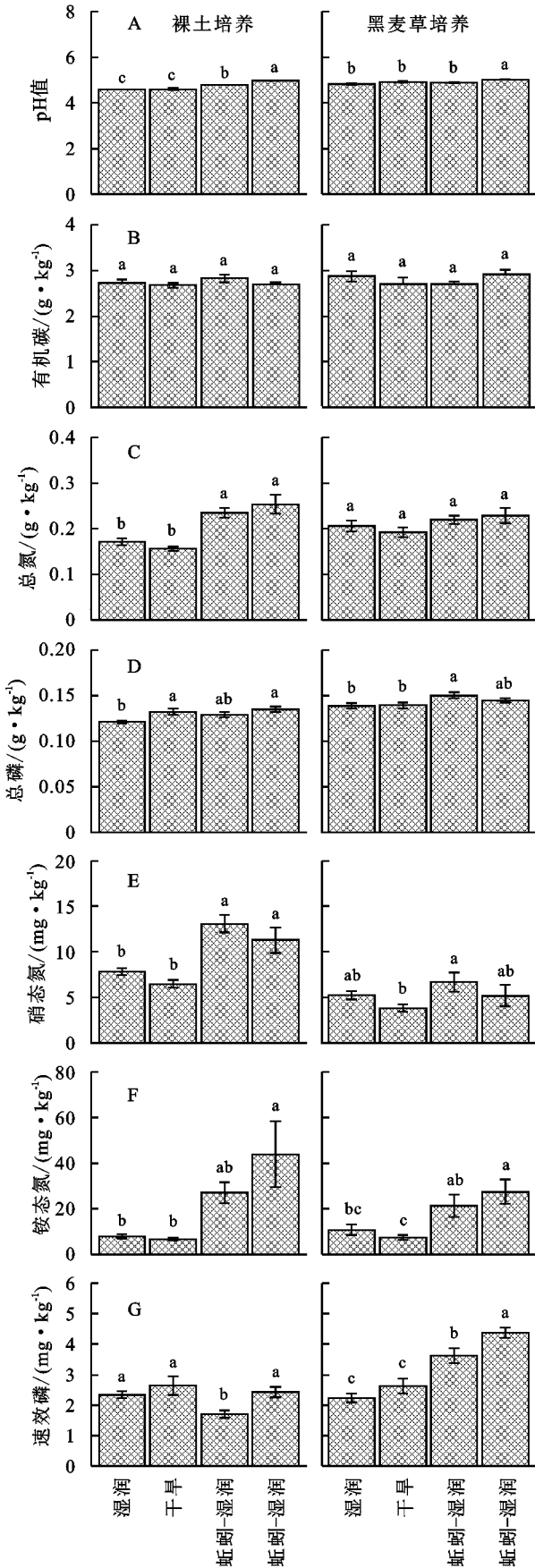
注:不同小写字母代表处理组间在 0.05 水平上具有显著差异。

图 1 蚯蚓活动和干旱条件下黑麦草生物量

双因素方差分析表明蚯蚓仅对黑麦草生态系统土壤总磷含量影响显著($p=0.015$),干旱仅对裸土生态系统土壤总磷含量影响显著,蚯蚓活动和干旱胁迫交互作用影响不显著(表 1)。干旱胁迫提高裸土中总磷含量,蚯蚓-干旱组总磷含量最高,显著高于湿润组(图 2D)。黑麦草系统蚯蚓-湿润组具有最高的全磷含量,高于不接种蚯蚓组。蚯蚓活动和干旱胁迫显著影响土壤速效磷含量($p<0.05$),但蚯蚓活动对土壤速效磷影响趋势在裸土和黑麦草生态系统之间不同(图 2G)。蚯蚓活动降低裸土土壤速效磷含量,但提高黑麦草系统土壤速效磷含量,干旱胁迫则对两种生态系统的速效磷含量均具有促进作用。其中裸土蚯蚓-湿润组具有最低的速

效磷水平,显著低于其他处理($p<0.05$)。黑麦草组蚯蚓-干旱组速效磷含量最高 $[(4.38\pm0.38)\text{ mg/kg}]$,显著高于其余处理($p<0.05$)。

土壤理化性质主成分分析结果见图 3,主成分分析前两轴能够解释裸土和黑麦草系统土壤理化性质变异的 76.1%和 75.0%。裸土生态系统土壤 pH 值、总氮、硝态氮和铵态氮含量相互之间呈显著正相关关系($p<0.01$,表 2)。土壤 pH 值与总磷相关系数为 0.478($p<0.05$),土壤速效磷和有机碳与其他理化性质之间无显著相关关系($p>0.05$)。多元方差分析表明处理能够解释裸土土壤理化性质变异的 50.3%($p=0.002$),相比不添加蚯蚓组,蚯蚓-湿润和蚯蚓-干旱处理具有较高的 pH 值、总氮、速效氮和总磷水平(图 3A)。黑麦草生态系统土壤 pH 值与铵态氮和速效磷含量显著正相关($p<0.05$),土壤总氮与土壤有机碳以及速效养分之间具有显著正相关关系($p<0.05$),土壤有机碳与土壤总磷以及土壤速效养分之间没有明显相关关系($p>0.05$,表 2)。土壤总磷与土壤总氮和硝态氮含量不相关($p>0.05$),但与土壤铵态氮含量呈显著正相关关系($p<0.05$)。图 3B 表明处理能够解释黑麦草生态系统土壤理化性质变异的 38.7%($p=0.006$),蚯蚓活动对土壤养分具有促进作用,总体而言蚯蚓-干旱组具有较高的养分水平。



注:同一列不同小写字母代表相同培养系统条件下处理组间在 0.05 水平上具有显著差异。

图 2 蚯蚓活动和干旱条件下土壤理化性质

2.3 蚯蚓和干旱对土壤生态系统养分循环的影响

皮尔逊相关分析表明黑麦草生物量与土壤总磷和有效养分具有显著正相关关系 ($p < 0.05$, 表 2)。图 4 呈现了湿润和干旱胁迫条件下蚯蚓活动对黑麦草生物量的影响机制,其中偏最小二乘路径模型的拟合优度大于 0.6,说明模型可以接受。湿润条件下(图 4A),蚯蚓活动显著提高土壤有机碳和全量养分(总氮和总磷)含量,进而促进了土壤中速效养分的增加,最终促进黑麦草生物量增加($p < 0.05$)。干旱胁迫条件下(图 4B),蚯蚓活动显著提高土壤 pH 值和全量养分($p < 0.05$),土壤全量养分提高显著促进土壤有效养分含量($p < 0.01$),但速效养分的增加对黑麦草生物量没有促进作用($p > 0.05$)。图 4C 总效应分析表明,湿润条件下蚯蚓、pH 值、全量和速效养分都能促进黑麦草生物量的增加,其中促进作用最强的是能够直接被植物吸收利用的速效养分。干旱条件下,蚯蚓、pH 值和土壤全量养分仍然对黑麦草生物量具有正效应,但速效养分的提高对黑麦草生物量的增加具有负效应,说明干旱阻断了黑麦草生长的养分吸收利用。

3 讨论

3.1 蚯蚓和干旱对植被生产力和土壤理化性质的影响

与以往研究结果一致^[6,12],蚯蚓存在可以促进植被生长,湿润条件下蚯蚓可以提高黑麦草生物量 81.8%,干旱条件下蚯蚓活动可促进植被生长 53.6%。现有研究表明蚯蚓对植被生产力的影响机制主要表现为对土壤结构的改善和养分有效性的提高。例如,接种蚯蚓显著提高土壤大团聚体含量^[13]和土壤孔隙结构^[14],改善土壤通气透水特性;蚯蚓取食植被残体和土壤中有机物质,释放土壤养分供给植物吸收利用^[12,15]。

本研究表明蚯蚓活动显著提高土壤 pH 值,这与蚯蚓表皮能分泌大量粘液,蚯蚓肠道排泄产物中包含氨基酸、糖类和钙镁钾无机盐等有关,这些组分使蚯蚓自身具有较强的 pH 值耐受能力,也能够调节土壤 pH 值^[16]。但随着植物对酸碱调节物质的吸收利用(氨基酸、无机盐等),对于有植物存在的生态系统,其对 pH 值的调节作用可能不显著(图 2A)。由于退化赤红壤有机质含量低,且没有外源有机物输入,蚯蚓活动对土壤有机碳动态影响不显著(图 2B)。与前人研究一致^[12,17],蚯蚓存在提高土壤氮和磷养分含量及其有效性(图 2C,D,E,F 和 G)。基于 Meta 分析, van Groenigen 等^[18]发现蚯蚓通过“浓缩过程”可以使蚯蚓粪中碳氮磷总量提高 40%~48%,使矿质氮和有效磷含量提高 241%和 84%。王霞等^[19]和 Le

Bayon 等^[20]研究表明接种蚯蚓能提高土壤中固氮菌的含量,蚯蚓处理后的土壤硝态氮、矿质总氮和有效磷含量明显增加。此外,蚯蚓分泌物和自身死亡组织易被矿化分解从而向土壤中输入氮磷等有效养分^[21]。但随着植被的吸收利用,蚯蚓对土壤中养分的提升作用可能会不显著(图 2E 和 2F)。

表 2 植被生物量和土壤理化性质指标间皮尔逊相关系数

培养系统	指标	生物量	pH 值	有机碳	总氮	总磷	硝态氮	铵态氮
裸地系统	有机碳		0.107					
	总氮		0.836**	0.407				
	总磷		0.478*	−0.103	0.348			
	硝态氮		0.616**	0.389	0.842**	0.178		
	铵态氮		0.775**	0.177	0.889**	0.362	0.753**	
	速效磷		−0.173	−0.414	−0.221	0.282	−0.327	0.086
	pH 值	0.158						
黑麦草系统	有机碳	−0.074	−0.228					
	总氮	0.361	−0.025	0.718**				
	总磷	0.707**	0.260	−0.184	0.132			
	硝态氮	0.459*	−0.347	0.380	0.677**	0.007		
	铵态氮	0.595**	0.475*	0.228	0.718**	0.510*	0.493*	
	速效磷	0.581**	0.523*	0.090	0.454*	0.635**	0.199	0.733**
	pH 值							

注: * 和 ** 分别表示在 0.05,0.01 水平上显著;裸地和黑麦草系统样本数均为 20。

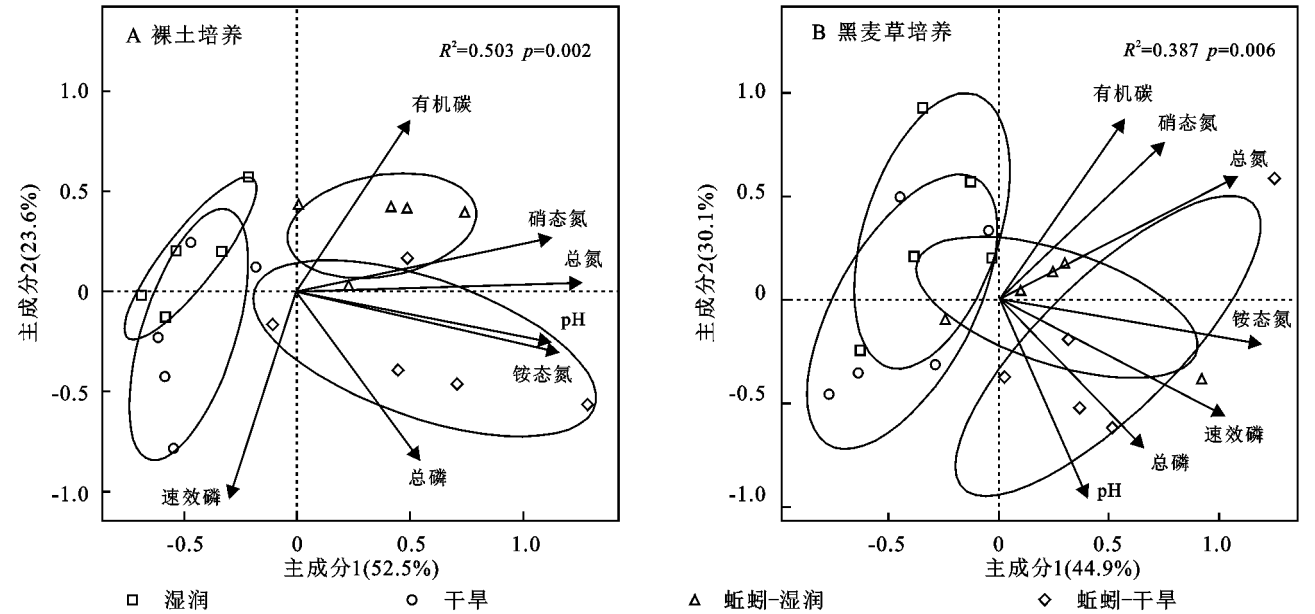


图 3 土壤理化性质主成分分析以及蚯蚓和干旱处理对土壤理化性质影响的多元方差分析

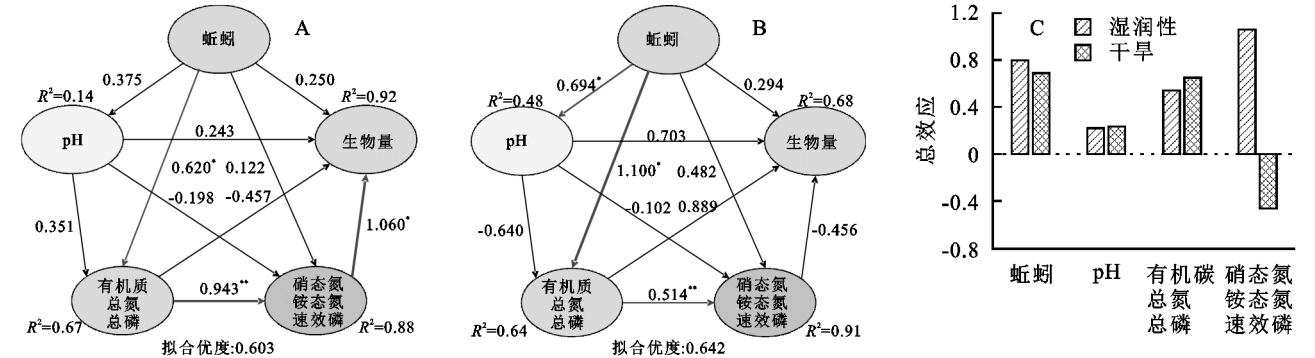


图 4 蚯蚓对植被生物量影响路径分析

干旱影响土壤结构、养分浓度、限制植被根系吸水 and 养分利用,影响植被生长和生产^[3,10]。本研究亦表明干旱胁迫条件下,黑麦草生物量在无蚯蚓和接种蚯蚓条件下分别降低 15.2% 和 28.3%。这主要是因为干旱胁迫致使植物从土壤中吸水水分和养分困难,影响黑麦草生长和发育。如前文所述,蚯蚓影响土壤酸碱物质构成,提高土壤 pH 值,土壤干旱限制土壤中酸碱有机物质的矿化和植物吸收利用,进而提高蚯蚓存在土壤的 pH 值,干旱胁迫对无蚯蚓存在土壤 pH 值影响不显著。由于赤红壤团粒结构差,有机质含量低,土壤贫瘠,本研究结果显示短期干旱对土壤有机碳、总氮、总磷含量影响并不显著^[3-4]。同等条件下(植物、蚯蚓存在)干旱胁迫对土壤硝态氮和铵态氮无显著影响,但由于有机质矿化和植物吸收利用的降低,有蚯蚓存在的土壤铵态氮(29.3%~61.9%)出现累积(图 2F)。与以往研究一致^[5],随着土壤酸度的增加土壤有效磷含量逐渐降低,加上有机质矿化和植物吸收利用的减少,干旱条件下土壤中速效磷含量显著高于湿润土壤(21.0%~42.7%)。

3.2 蚯蚓对恢复草地生态系统养分循环的调控作用

本研究结果表明,蚯蚓活动提高了土壤中全量和速效养分含量,促进了养分向植物的正向流动(图 4A),土壤干旱虽没有影响蚯蚓对土壤养分的提高作用,但阻断了植被对速效养分的吸收利用,影响植被生产力(图 4B)。相比蚯蚓-湿润组土壤,蚯蚓-干旱组虽然降低了黑麦草生产力,但仍显著高于没有蚯蚓的组分(图 1),且会提高土壤速效养分的累积(图 3)。因此蚯蚓存在会缓解土壤干旱造成的不利影响,退化土壤改良和修复过程中应关注蚯蚓对土壤修复的重要作用。与此同时,研究发现由于退化土壤结构不良,养分贫瘠,蚯蚓死亡时有发生,且黑麦草生物量低于其他培养基质试验,因此在关注土壤动物的同时应合理安排其他调控措施,例如施用有机肥,不仅可以直接改良土壤还可为土壤动物存活提供更好的条件。

4 结论

(1) 退化土壤修复前,接种蚯蚓的土壤 pH 值、总氮和矿质氮显著增加,植被修复后土壤总磷、铵态氮、速效磷和植被生物量显著增加。蚯蚓活动改善土壤 pH 值和肥力状况,进而促进植被生长,有利于土壤生态系统养分循环,提高植被生产力。

(2) 干旱胁迫对退化土壤修复前土壤理化性质影响不显著,显著降低植被修复后黑麦草生物量,提

高蚯蚓接种土壤的 pH 值、铵态氮和速效磷含量。

(3) 干旱胁迫阻断了植被对速效养分的吸收利用,影响植被生产力,但蚯蚓存在生态系统的植被生物量高于无蚯蚓生态系统,蚯蚓活动可缓解干旱造成的不利影响。

研究结果对深入认识蚯蚓对生态系统作用机制和退化土地生态修复管理具有重要意义。

参考文献:

- [1] 梁音,杨轩,潘贤章,等.南方红壤丘陵区水土流失特点及防治对策[J].中国水土保持,2008(12):50-53.
- [2] 广东省土壤普查办公室.广东土壤[M].北京:科学出版社,1993.
- [3] Zhang Q, Shao M, Jia X, et al. Changes in soil physical and chemical properties after short drought stress in semi-humid forests[J]. *Geoderma*, 2019,338:170-177.
- [4] 张池,高云华,陈旭飞,等.不同土地利用方式对赤红壤理化性质的综合影响[J].自然资源学报,2013,28(12):2140-2149.
- [5] Blouin M, Hodson M E, Delgado E A, et al. A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services[J]. *European Journal of Soil Science*, 2013,64:161-182.
- [6] 张卫信,陈迪马,赵灿灿.蚯蚓在生态系统中的作用[J].生物多样性,2007,15(2):142-153.
- [7] Butt K R, Quigg S M. Earthworm community development in soils of a reclaimed steelworks[J]. *Pedosphere*, 2021,31(3):384-390.
- [8] IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report[R] // Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Switzerland, Geneva, 2014.
- [9] Li M, Ma Z. Soil moisture drought detection and multi-temporal variability across China[J]. *Science China-Earth Sciences*, 2015,58(10):1-16.
- [10] Breshears D D, Cobb N S, Rich P M, et al. Regional vegetation die-off in response to global-change-type drought[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2005,102(42):15144-15148.
- [11] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [12] Van Groenigen J W, Lubbers I M, Vos H M, et al. Earthworms increase plant production: A meta-analysis[J]. *Scientific Reports*, 2014,4:6365.
- [13] Scullion J, Malik A. Earthworm activity affecting organic matter, aggregation and microbial activity in soils restored after opencast mining for coal[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000,32(1):119-126.

参考文献:

- [1] 卢耀如.岩溶水文地质环境演化与工程效应研究[M].北京:科学出版社,1999.
- [2] Zhou J, Tang Y Q, Zhang X H, et al. The influence of water content on soil erosion in the desertification area of Guizhou, China[J]. Carbonates and Evaporites, 2012, 27(2):185-192.
- [3] Bai Y E, Liu Q, Gu Z F, et al. The dissolution mechanism and karst development of carbonate rocks in karst rocky desertification area of Zhenfeng-Guanling-Huajiang County, Guizhou, China [J]. Carbonates & Evaporites, 2019, 34:45-51.
- [4] 王世杰.喀斯特石漠化:中国西南最严重的生态地质环境问题[J].矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(2):120-126.
- [5] Ying B, Xiao S Z, Xiong K N, et al. Comparative studies of the distribution characteristics of rocky desertification and land use/land cover classes in typical areas of Guizhou province, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(2):631-645.
- [6] 蒋忠诚, 李先琨, 胡宝清, 等.广西岩溶山区石漠化及其综合治理研究[M].北京:科学出版社, 2011.
- [7] 谢云, 刘宝元, 章文波.侵蚀性降雨标准研究[J].水土保持学报, 2000, 14(4):6-11.
- [8] 付超.江西暖季短时强降水特征及湖泊效应分析[D].成都信息工程大学, 2019.
- [9] 杜波, 唐丽霞, 潘佑静, 等.贵州喀斯特地区侵蚀性次降雨产流产沙特征研究[J].西南林业大学学报, 2016, 36(5):111-117.
- [10] 伍红雨, 王谦谦.近 49 年贵州降水异常的气候特征分析[J].高原气象, 2003, 22(1):65-70.
- [11] 郭渠, 陈佳, 李瑞, 等.重庆地区短历时强降水气候特征[J].干旱气象, 2018, 36(6):944-953.
- [12] 白占国, 万国江.滇西和黔中表土中⁷Be 与¹³⁷Cs 分布特征对比研究[J].地理科学, 2002, 22(1):43-48.
- [13] 曾凌云, 汪美华, 李春梅.基于 RUSLE 的贵州省红枫湖流域土壤侵蚀时空变化特征[J].水文地质工程地质, 2011, 38(2):113-118.
- [14] 熊康宁, 李晋, 龙明忠.典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J].地理学报, 2012, 67(7):878-888.
- [15] Wei X P, Yan Y, Xie D, et al. The soil leakage ratio in the Mudu watershed, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(8):721-732.
- [16] Yan Y J, Dai Q H, Yuan Y F, et al. Effects of rainfall intensity on runoff and sediment yields on bare slopes in a karst area, SW China[J]. Geoderma, 2018, 330:30-40.
- [17] 王万忠, 焦菊英, 郝小品.中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布(II)[J].水土保持学报, 1996, 2(1):29-39.
- [18] 刘琦, 白友恩, 顾展飞, 等.石漠化地区石灰岩和白云岩的溶蚀—蠕变特性试验研究:以贵州贞丰—关岭花江岩溶区为例[J].桂林理工大学学报, 2017, 37(3):399-404.
- [19] 郑海金, 杨洁, 左长清, 等.红壤坡地侵蚀性降雨及降雨动能分析[J].水土保持研究, 2009, 16(3):30-33.
- [20] Peng T, Wang S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China[J]. Catena, 2012, 90(1):53-62.
- [21] 刘琦, 王涵, 廖启迪, 邓大鹏, 姚邦杰.一种表层岩溶裂隙带土壤地表流失和地下漏失模拟装置[P].上海:CN112611850A2021-04-06.
- [22] 熊康宁, 黎平, 周忠发.喀斯特石漠化的遥感:GIS 典型研究[M].北京:地质出版社, 2002.
- [23] 任标.基于“三水”循环的石漠化地区土壤地表流失机理研究[D].上海:同济大学, 2020.
- [24] 孙三祥, 张云霞.降雨及坡面径流模拟试验相似准则[J].农业工程学报, 2012, 28(11):93-98.

(上接第 76 页)

- [14] Bottinelli N, Zhou H, Capowiez Y, et al. Earthworm burrowing activity of two non-Lumbricidae earthworm species incubated in soils with contrasting organic carbon content (Vertisol vs. Ultisol)[J]. Biology and Fertility of Soils, 2017, 53(8):951-955.
- [15] Lv M R, Fu S L, Shao Y H, et al. Earthworm pontoscolex corethrurus stimulated soil CO₂ emission by enhancing substrate availability rather than changing microbiota community structure[J]. Science of the Total Environment, 2020, 717:137227.
- [16] 张池, 周波, 吴家龙, 等.蚯蚓在我国南方土壤修复中的应用[J].生物多样性, 2018, 26(10):1091-1102.
- [17] 贺慧, 郑华斌, 刘建霞, 等.蚯蚓对土壤碳氮循环的影响及其作用机理研究进展[J].中国农学通报, 2014, 30(33):130-136.
- [18] Van Groenigen J W, Van Groenigen K J, Koopmans G F, et al. How fertile are earthworm casts? A meta-analysis[J]. Geoderma, 2019, 338:525-535.
- [19] 王霞, 李辉信, 朱玲, 等.蚯蚓活动对土壤氮素矿化的影响[J].土壤学报, 2008, 45(4):641-648.
- [20] Le Bayon RC, Binet F. Earthworms change the distribution and availability of phosphorous in organic substrates[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(2):235-246.
- [21] 李辉信, 胡锋, 焦加国.蚯蚓对农田土壤质量的影响[C].江苏耕地质量建设论文集, 2008:15-19.