DOI: 10.20103/j.stxb.202311092431

赵晓钰,陈彦硕,李志刚,王红梅,张振杰,李志丽,苏荣霞,赵亚楠.荒漠草原灌丛转变土壤有机碳矿化及其对降水梯度的响应.生态学报,2024,44 (15):6630-6641.

Zhao X Y, Chen Y S, Li Z G, Wang H M, Zhang Z J, Li Z L, Su R X, Zhao Y N.Soil organic carbon mineralization and its response to precipitation gradients during anthropogenic shrub encroachment in desert steppe. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(15):6630-6641.

荒漠草原灌丛转变土壤有机碳矿化及其对降水梯度的 响应

赵晓钰1,陈彦硕1,李志刚1,王红梅1,2,3,*,张振杰1,李志丽1,苏荣霞1,赵亚楠1

1 宁夏大学林业与草业学院,银川 750021

2 宁夏草牧业工程技术研究中心,银川 750021

3 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点培育实验室,银川 750021

摘要:为探究灌丛引入对荒漠草原土壤有机碳稳定性的影响,选取近 40 年的典型草原-灌丛镶嵌体(荒漠草地,草地边缘,灌丛 边缘、灌丛地)为研究对象,开展荒漠草原向灌丛人为转变过程野外原位观测结合室内培养的土壤有机碳矿化及其对降水变化 (+40%、+20%、CK、-20%、-40%)的响应特征研究,主要结果如下:荒漠草原人为灌丛转变的过程中土壤有机碳、全氮和全磷含 量显著降低;土壤有机碳累积矿化量、碳矿化速率、碳矿化及微生物代谢熵均随着转变过程呈上升趋势,且灌丛地较荒漠草地 分别增加了 26.6%、27%、25.8%和 26.8%;土壤潜在可矿化有机碳量随转变波动上升,灌丛地显著高出荒漠草地 31.55%;转变样 地在不同降水梯度下土壤有机碳矿化速率呈下降趋势,但灌丛地、灌丛边缘土壤有机碳矿化始终高于荒漠草地和草地边缘地, 其中灌丛地与灌丛边缘有机碳矿化对降水降低响应更加敏感和积极,结果表明荒漠草原向灌丛转变过程增强了土壤有机碳微 生物矿化的同时,还提高了其应对干旱的能力,这种能力或许是以更高的微生物代谢熵和二氧化碳通量为代价。 关键词:荒漠草原;人为灌丛化;土壤碳矿化;降水梯度

Soil organic carbon mineralization and its response to precipitation gradients during anthropogenic shrub encroachment in desert steppe

ZHAO Xiaoyu¹, CHEN Yanshuo¹, LI Zhigang¹, WANG Hongmei^{1,2,3,*}, ZHANG Zhenjie¹, LI Zhili¹, SU Rongxia¹, ZHAO Yanan¹

1 College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 Ningxia Grassland and Animal Husbandry Engineering Technology Research Center, Yinchuan 750021, China

3 Key Cultivation Laboratory of Ecosystem Restoration and Reconstruction, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China

Abstract: To explore the impact of the anthropogenic transition from grassland to shrubland on soil organic carbon stability, a nearly 40 years typical grassland-shrubland mosaic (desert grassland, grassland edge, shrubland edge, shrubland) was selected to investigate soil organic carbon mineralization and its response characteristics of the precipitation (+40%, +20%, CK, -20%, -40%) by field in-situ observations combined with indoor incubation in the transition process. The main results were that soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus contents were significantly reduced and the cumulative soil organic carbon mineralization, the mineralization rate of soil organic carbon, carbon mineralization, and microbial metabolic entropy all showed an increasing trend with the transition process. It increased by 26.6%, 27%,

收稿日期:2023-11-09; 网络出版日期:2024-05-24

基金项目:国家自然科学基金项目(32260348,31860677);宁夏高等学校一流学科建设项目(NXYLXK2017A01)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: whm_826@ 163.com

25.8%, and 26.8% in shrubland compared to desert grassland. The potentially mineralized carbon increased with transition fluctuations and was significantly higher in shrubland than in desert grassland by 31.55%. Under different precipitation gradients, the cumulative soil organic carbon mineralization in each transition site tended to increase with incubation time, and the mineralization rate of soil organic carbon tended to decrease. However, soil organic carbon mineralization was higher in shrubland and shrubland edge than in desert grassland and grassland edge. Soil organic carbon mineralization in shrubland and its edge was more sensitive and cheerful in response to reduced precipitation. In a conclusion, microbial mineralization of soil organic carbon was accelerated, and its capability of responding to drought was enhanced during these vegetation shifts. The results suggested that the transition process enhanced the microbial mineralization of soil organic carbon with transition process enhanced the microbial mineralization of soil organic carbon with transition process enhanced the microbial mineralization of soil organic carbon with transition process enhanced the microbial mineralization of soil organic carbon with transition process enhanced the microbial mineralization of soil organic carbon with transition process enhanced the microbial mineralization of soil organic carbon with drought, a capacity that perhaps came at the cost of higher microbial metabolic entropy and CO_2 fluxes.

Key Words: desert steppe; anthropogenic shrub encroachment; soil carbon mineralization; precipitation gradient

全球超过 50% 的草原在气候变化和人类活动增加的背景下正在经历不同程度的退化^[1]。其中灌丛化过 程通过提高灌丛或者木本植物密度、覆盖率和生物量实现对干旱或半干旱草地的入侵和扩张^[2],导致其生态 系统主导地位的草本向灌木转变,引起植被生产力、生物多样性、土壤旱化等一系列变化^[3]。灌丛转变引起 土壤植被类型、地下根系分布和数量、地上生物量、土壤分解等方面的变化,导致土壤微生物数量变化,进而引 起土壤有机碳积累和组分组成变化,特别是不稳定有机碳的含量和比例变化,从而引起土壤有机碳矿化变 化^[4-5]。有机碳矿化对土壤质量和生态系统稳定性至关重要,能敏感响应环境变化,因此,可作为评价土壤固 碳的指标,通常利用土壤矿化率、累积矿化量和累积矿化比例等指标进行评估^[6]。在宁夏荒漠化草原,灌丛 密度高会导致该地区土壤碳矿化量升高,灌丛下碳矿化潜力更高^[7]。在北美干旱草地生态系统中,土壤有机 碳潜在矿化量会随着灌丛化程度加深而增加^[8],随着灌丛化完全入侵,土壤有机碳矿化作用增加^[9]。由于土 壤有机碳稳定性对土壤碳循环和周转有着显著的影响,对碳固存和碳储量变化起着直接决定性作用^[10],因 此荒漠草原人为灌丛化过程中土壤有机碳稳定性及土壤碳固持特征有待进一步研究。

干湿交替往往会导致土壤水分频繁变化从而影响土壤有机碳矿化^[11]。降水量增加显著提高干旱土壤有 机碳矿化速率^[12],但在土壤极端湿润情况下,降水则会造成其作用减弱甚至产生反作用^[13]。随土壤水分增 加,土壤微生物活性随之增加,导致可溶物质溶出,土壤有机碳矿化增加^[14]。降水量降低导致土壤含水量降 低会抑制土壤微生物养分循环,从而对土壤微生物含量和土壤碳平衡产生影响^[15]。模拟预测 21 世纪全球大 部分地区的土壤湿度可能出现降低趋势^[16],全球性的严重干旱时间可能会延长,会对土壤生物和植物造成不 规则和极端胁迫。在年降水量增加的地区,蒸散增加或降水格局改变会对生长季节土壤含水量产生影响,这 些气候变化可能对养分供应、植物生产力、生物地球化学过程、气体和淋溶损失产生影响,从长远来看,还可能 对土壤碳库产生影响^[17],对于干旱区灌丛化土壤旱化加剧的现状,加之全球降水模式的改变,干旱区荒漠草 原土壤有机碳固持将迎来挑战。

鉴于此,本研究利用宁夏东部荒漠草原灌丛引入形成近40年典型草原-灌丛镶嵌体,选取其内部荒漠草地、草地边缘、灌丛边缘、灌丛地作为草原灌丛人为转变过程样地,开展不同降水梯度(+40%、+20%、CK、-20%、-40%)对转变过程土壤有机碳矿化特征影响的研究,以期探究转变过程土壤有机碳矿化及其对降水梯度变化的响应,旨在为未来气候变化下人为灌丛过程对荒漠草原土壤有机碳固持趋势提供理论依据和数据支撑。

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东部荒漠草原地区,地理坐标为37°43′—37°46′ N,107°16′—107°17′ E,属典

型半干旱大陆性季风气候,年平均气温 7.8 ℃。年均降水量为 297 mm (1986—2021 年),66.3% 降水集中在 7—9月(夏季风期间),2020—2022 年年均降水量为 254 mm,夏季风期间降水量为 144 mm,与近 30 多年平 均降水年相比分别下降了 14.5%和 26.9%。研究区土壤结构松散,肥力较低,土壤水分含量低,含沙量大,土 壤颗粒体积百分含量均表现为砂粒>粉粒>黏粒,碱性土壤(pH 值为 7.5—8.5)^[18]。该研究区属荒漠草原植 被类型,植物群落主要有蒙古冰草 (Agropyron mongolicum)、牛枝子(Lespedeza potaninii)、猪毛蒿 (Artemisia scoparia)、短花针茅 (Stipa breviflora)、长芒草 (Stipa bungeana)、赖草 (Leymus secalinus)和白草 (Pennisetum centrasiaticum)等;沙生植物主要是黑沙蒿(Artemisia ordosica)等,该地区于 20 世纪七八十年代开始拧条 (Caragana Korshinskii Kom)灌木的大量引入,使得该区域荒漠草原植被组成发生巨大变化^[19]。目前,研究区 约有 48.5%被人工灌木覆盖,形成大量草原-灌丛镶嵌的荒漠草原景观^[20]。



图 1 研究区地理位置图 Fig.1 Location of the study area and sites

1.2 样地选取与试验设计

样地位于宁夏东部盐池四墩子荒漠草原试验站内,根据生态系统转变和灌丛入侵过程理论^[21],选取近 40 年典型的草原-灌丛镶嵌体,将其内部分为荒漠草地(desert grassland,DG)、草地边缘(grassland edge,GE) 、灌丛边缘(shrubland edge,SE)、灌丛地(shrubland,SL)4个样地,分别代表荒漠草原向灌丛地连续转变不 同阶段。荒漠草地及草地边缘随机设置6个5m×5m样区,灌丛边缘及灌丛地各设置6个10m×10m样区。 随后分别在每个样区内不同微生境下依据盖度比例进行土壤样品收集。具体参见表1。由于灌丛转变过程 各样地形成了较大差异的微生境,因此将每个样区内按不同微生境又分为草下、空斑、灌下、灌间。

每个转变样地微生境特征:根据不同微生境在样地中的比例由群落面积加权法计算得出[22]。

1.3 土壤样品采集

2022 年 8 月,在荒漠草地、草地边缘、灌丛地边缘、灌丛地进行采样,在每个样方去除地表枯落物后按不同微生境(草下、空斑、灌下、灌间)随机取 4—6 个 0—20 cm 土芯,其中,荒漠草地草下、空斑各取 3 个样品, 草地边缘、灌丛边缘和灌丛地草下、空斑、灌下、灌间各取 3 个样品,共 42 个样品,然后将每个样区内同一微 生境土壤混合形成复合样品并进行均质化处理,过2 mm 筛分为3 个子样品,第一份子样品风干至恒重以测 量土壤理化性质,第二份子样品在4℃下冷藏保存并于10 d 内分析微生物生物量碳,第三份子样品在4℃下 冷藏保存直到进行潜在碳矿化分析。

Table 1 Site description											
样地 Site	草本盖度/% Grass coverage	裸地盖度/% Bare coverage	灌丛盖度/% Shrub coverage	物种数 Special number	优势植物 Dominant plant						
DG	71.25	28.75	0	25	蒙古冰草 (Agropyron mongolicum)、短花针茅 (Stipa breviflora)、猪毛蒿 (Artemisia scoparia)、牛枝子 (Lespedeza potaninii)						
GE	69.40	26.65	3.95	19	远志(Polygala tenuifolia)、乳浆大戟(Euphorbia esula)、 牛枝子、草木樨状黄芪(Astragalus melilotoides)						
SE	63.98	19.65	16.37	16	柠条(Caragana korshinskii)、短花针茅、远志、叉枝鸭葱 (Scorzoneradivaricata)						
SL	30.25	44.50	31.48	15	拧条、猪毛蒿、狗尾草 (Setaria viridis)、地锦(Euphorbia humifusa)						

表1 样地概况 Table1 Site descriptid

DG:荒漠草地 Desert grassland; GE:草地边缘 Grassland edge; SE:灌丛边缘 Shrubland edge; SL:灌丛地 Shrubland

1.4 室内不同降水梯度下土壤有机碳矿化

为探究荒漠草原灌丛转变土壤有机碳矿化及其对降水变化的响应,进行室内有机碳矿化培养实验。为充 分模拟野外样地矿化,同期分别收集各转变样地枯落物与土壤样品。培养所需土壤取自植被生长季期间各样 地 0—20 cm 的活跃表层,利用土钻进行多点取样,混匀后带回室内去除杂物,过 2 mm 筛处理,用于后期培 养。根据盐池县 1987—2019 年期间的降水数据,32 年的均值与年最高和最低的降水,设置降水处理为 +40%、+20%、对照、-20%、-40%,四个样地各 6 组处理,3 次重复,共计 72 个处理。水分添加量基于前 32 年 盐池当地年均降水量为 302 mm,7 月份平均降水量为 69.18 mm,8 月平均降水量为 68.6 mm,整个培养期间共 添加 8 次水分,每次间隔一周,水分添加量依据量雨桶(直径 20 cm、高 10 cm)与培养瓶(直径 10 cm、 高 15 cm)体积比换算。

土壤有机碳的矿化实验采用室内培养的方法,培养周期为 60 d,选择直径 10 cm,高 15 cm 的培养瓶。将不同枯落物按干重比 1:60 添加于每份对应样地的土壤样品中,为避免枯落物添加量差异造成的激发效应,各个处理均为每份土样 100 g,枯落物 1.7 g,混匀后放于培养瓶中,设置三个未装土壤的培养瓶作为空白对照。 在培养瓶中放入装有 15 mL 1 mol/L NaOH 的小烧杯,以吸收有机碳矿化所释放的 CO₂。将装有土壤样品以及作为空白对照的培养瓶密封后放入恒温培养箱在 25 ℃进行恒温培养。每个处理共设置 3 个重复,培养过程中定期(1、3、6、9、15、21、28、36、44、60 d)取出已吸收 CO₂的 NaOH 溶液,加入 1 mol/L BaCl₂溶液使 CO₃²⁻ 沉淀,以酚酞作指示剂,再用 1 mol/L 的标准 HCI 滴定小烧杯中的溶液,最后根据 HCI 标准的用量计算 CO₂的释放量。每一次测定 CO₂的释放量后,保持培养瓶开口 2 h,以保证为土壤微生物呼吸提供足够的氧气。培养过程中 CO₂的累积矿化量以 mg CO₂-C/kg 干土表示。培养过程中采用称重法测得土壤水分的损失量,并添加去离子水进行补充。

1.5 土壤指标测定

土壤 pH 与养分测定参考鲍士旦^[23]《土壤农化分析》中的方法,土壤 pH 采用玻璃电极法(土水比为 2.5: 1)在 HI98128 酸度计测定。使用燃烧法和 HCl-燃烧法在 TOC 分析仪测定土壤有机碳含量。采用凯氏定氮仪 测定土壤全氮含量。采用钼锑抗-紫外分光光度法测定土壤全磷含量。土壤硝态氮和铵态氮含量用氯化钾溶 液提取-连续流动分析仪测定。

土壤微生物生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)采用氯仿熏蒸浸提法测定^[24]。

土壤微生物生物量碳: MBC = $\frac{E_c}{K_{EC}}$,式中: E_c 为熏蒸与未熏蒸的土壤差值; K_{EC} 为转换系数,为 0. 38^[25]。

土壤潜在可矿化碳(Potentially mineralized C, C_0)采用密闭培养碱液吸收法测定^[26]。

1.6 数据处理

(1) 土壤有机碳矿化 CO₂-C 释放量计算:

$$C_i = \frac{(\nu_1 - \nu_2) \times N \times 6}{m}$$

式中, C_i 为第 *i* 次滴定土壤 CO₂释放量(mg CO₂-C); V_1 和 V_2 分别代表空白样的 HCl 滴定量(mmol)和培养土 样 NaOH 溶液的 HCl 滴定量(mmol),N 为 NaOH 溶液浓度,m 为培养土样重量。

(2)土壤有机碳矿化速率(mg g⁻¹ d⁻¹)为累积土壤碳矿化量随时间变化曲线的斜率。累计土壤碳矿化量 用培养期间单位质量土壤释放的 CO₂-C 总量(mg/g)来表示。

(3) 土壤微生物代谢熵计算:

$$T = \sum C_i / (\text{MBC} \times T)$$

式中,T为土壤微生物代谢熵(mg CO2-C g⁻¹MBC h⁻¹),MBC 为土壤微生物量碳浓度(g/kg)

(4)土壤有机碳矿化比计算:

$$R = \sum C_i / \text{SOC}$$

R 为土壤有机碳矿化比,即释放 CO₂-C 的量与原土壤有机碳含量的比值。SOC 为土壤有机碳浓度 (g/kg)。

(5)将培养时间与土壤有机碳的累积矿化量通过一级动力学方程来进行分析,

$$C_t = C_0 [1 - \exp(-kt)]$$

式中,*t*为培养时间,*C*_{*t*}为时间*t*时有机碳的积累矿化量,*k*为矿化速率常数,*C*₀为土壤潜在可矿化有机碳量。 可根据以上动力学方程式计算出土壤潜在可矿化有机碳量和矿化速率常数,另外通过*C*₀/SOC 计算潜在可矿 化有机碳占总有机碳的比例。

使用统计分析软件 SPSS 22.0,对转变样地土壤基本理化性质(每个样地数据来自不同微生境数据的加权 平均所得)、转变样地(降水对照)及不同降水处理下土壤有机碳矿化相关指标(土壤有机碳矿化量、土壤有机 碳矿化速率、碳矿化比、微生物代谢熵);使用单因素方差分析及 LSD 显著性检验法进行分析。使用 Origin 2021 绘制图表。

2 结果与分析

2.1 转变过程中土壤理化性质变化

由表2可知,随荒漠草原向灌丛转变,土壤容重先降低后升高,表现为灌丛地显著高于荒漠草地、草地边缘和灌丛边缘,而土壤温度表现为下降趋势,表现为草地边缘高于灌丛边缘、荒漠草原和灌丛地且差异不显著;水分呈下降趋势,荒漠草原显著高于草地边缘、灌丛边缘和灌丛地;pH呈下降趋势,荒漠草地显著高于灌丛地;土壤有机碳和全氮均呈下降趋势,且荒漠草地显著高于草地边缘、灌丛边缘和灌丛地;全磷呈下降趋势, 荒漠草地显著高于灌丛地;铵态氮呈下降趋势,但差异不显著;硝态氮和微生物生物量碳呈下降趋势,表现为 荒漠草地显著高于灌丛地;

2.2 转变过程土壤有机碳矿化特征

如图 2 所示,灌丛边缘与灌丛地累积矿化量与平均矿化速率显著高于荒漠草地与草地边缘(P<0.05)。 随荒漠草原向灌丛转变,土壤有机碳累积矿化量升高 26.9%,平均矿化速率升高 22.6%。各样地碳矿化比与 累积矿化量变化一致,其中灌丛边缘最高(0.348),草地边缘最低(0.236),微生物代谢熵与碳矿化比均随荒漠 草原向灌丛转变过程呈先降低后升高的趋势,且灌丛地高于荒漠草地,随荒漠草原向灌丛转变,碳矿化比升高 27%,微生物代谢熵升高 26.8%。

Table 2 Son chemicophysical properties changes during the transition from desert steppe to sin ubland									
土壤性质 Soil property	DG	GE	SE	SL					
土壤容重 Bulk density/(g/cm ³)	$1.41 \pm 0.18 \mathrm{b}$	1.35±0.09b	1.42±0.05b	1.56±0.02a					
土壤温度 Soil temperature/℃	18.95±1.72a	19.78±1.73a	18.88±1.48a	18.79±1.54a					
土壤水分 Soil water content/%	7.86±0.51a	$6.67{\pm}0.33\mathrm{b}$	$5.80{\pm}0.19{\rm b}$	$3.53 \pm 0.41 \mathrm{c}$					
pH	$8.45 \pm 0.05 a$	$8.12 \pm 0.01 c$	$8.33{\pm}0.13{\rm b}$	$8.34{\pm}0.01{\rm b}$					
土壤有机碳 Soil organic carbon/(g/kg)	8.52 ±1.58a	$5.66 \pm 0.09 \mathrm{b}$	$5.83~\pm0.06\mathrm{b}$	$4.18~\pm 0.09 \mathrm{b}$					
全氮 Total nitrogen/(g/kg)	$0.35 \pm 0.00a$	$0.24~\pm 0.01\mathrm{b}$	$0.25~\pm 0.00\mathrm{b}$	$0.10\ \pm 0.00\mathrm{c}$					
全磷 Total phosphorus/(g/kg)	$0.34 \pm 0.00a$	$0.31~\pm 0.00\mathrm{b}$	$0.28\ \pm 0.00c$	$0.23~\pm 0.00\mathrm{d}$					
铵态氮 Ammonium nitrogen/(mg/kg)	$3.67 \pm 0.17a$	$2.86 \pm 0.43a$	$3.68 \pm 0.07 \mathrm{a}$	$2.89 \pm 0.17a$					
硝态氮 Nitrate nitrogen/(mg/kg)	$2.53 \pm 0.02a$	$2.43~\pm 0.01\mathrm{b}$	$2.40~\pm 0.02\mathrm{b}$	$1.69\ \pm 0.02 \mathrm{c}$					
微生物生物量碳 Microbial biomass carbon/(mg/kg)	$96.94 \pm 7.80\mathrm{b}$	$132.68 \pm 14.26a$	$145.00 \pm 2.73a$	$59.98 \pm 4.37c$					

表 2 荒漠草原向灌丛转变过程土壤理化性质变化 Fable 2 Soil chemicophysical properties changes during the transition from desert steppe to shrublan

DG:荒漠草地 Desert grassland; GE:草地边缘 Grassland edge; SE:灌丛边缘 Shrubland edge; SL:灌丛地 Shrubland; 不同字母表示同一指标不同样地内的差异显著(P<0.05)



图 2 转变样地土壤有机碳累积矿化量、平均矿化速率、碳矿化比、微生物代谢熵

Fig.2 Variation of cumulative mineralization, average mineralization rate, carbon mineralization ratio, and microbial metabolic entropy of SOC mineralization along transition sites

DG:荒漠草地 Desert grassland; GE:草地边缘 Grassland edge; SE:灌丛边缘 Shrubland edge; SL:灌丛地 Shrubland;不同字母表示同一指标不同样地内的差异显著(P<0.05)

2.3 转变过程土壤有机碳矿化对降水变化响应

由图 3 所示,4 个样地不同降水梯度下土壤有机碳矿化速率均在培养初期迅速下降,后逐渐趋于平稳。 在第 28 天培养结束进行第二次降水处理后,各样地不同降水梯度下第 36 天矿化速率均略有升高。其中各样 地减水 20% 和减水 40% 在培养前一个月矿化速率持续降低,而增水梯度矿化速率在第 9 天与第 21 天出现 两次峰值。此外,培养初期各样地不同降水梯度下矿化速率表现为减水处理较高,而在培养中后期则为增水 处理更高。

由图 4 和图 5 可知随降水减少各样地累积矿化量与平均矿化速率均呈现下降趋势,各样地累积矿化量与 平均矿化速率均在增水 40% 最高,在减水 40% 最低。其中草地边缘与灌丛地不同增水处理下累积矿化量与





Fig.3 SOC cmineralization rates of the transition sites under different precipitation gradients





平均矿化速率无显著差异(P>0.05),荒漠草地与灌丛地不同减水处理下累积矿化量与平均矿化速率无显著差异(P>0.05)。增水处理下累积矿化量与平均矿化速率显著高于正常降水处理(P<0.05),减水处理下累积

矿化量与平均矿化速率显著低于正常降水处理(P<0.05)。随降水梯度降低,荒漠草地、草地边缘、灌丛边缘 和灌丛地有机碳累积矿化量分别下降 43.7%、41.9%、41.4% 和 27.6%,平均碳矿化速率分别下降 43.7%、 43.8%、41.5%和 26.4%。



图 5 转变样地不同降水梯度下平均碳矿化速率

Fig.5 Average carbon mineralization rate of the transition sites under different precipitation gradients

由图 6 和图 7 可知随降水减少各样地碳矿化比与微生物代谢熵均呈下降趋势。各样地碳矿化比与微生物代谢熵均在增水 40% 最高,在减水 40% 最低。其中草地边缘与灌丛地不同增水处理下碳矿化比与微生物代谢熵均无显著差异(P>0.05),荒漠草地与灌丛地不同减水处理下累积矿化量与平均矿化速率无显著差异(P>0.05)。增水处理下累积矿化量与平均矿化速率显著高于正常降水处理(P<0.05),减水处理下累积矿化量与平均矿化速率显著高于正常降水处理(P<0.05),减水处理下累积矿化量与平均矿化速率显著高于正常降水处理(P<0.05),减水处理下累积矿化量与平均矿化速率显著低于正常降水处理(P<0.05)。随降水梯度降低,荒漠草地、草地边缘、灌丛边缘和灌丛地碳矿化比分别下降 43.8%、42.1%、41.3% 和 26.4%,微生物代谢熵分别下降 43.7%、41.9%、41.3% 和 26.5%。

使用一级动力学方程将各样地不同降水梯度下土壤有机碳累积矿化量与培养时间进行拟合,结果如表 3 所示,其中荒漠草地在增水 40%、20% 处拟合未收敛,草地边缘在增水 40%处拟合未收敛,其余样地各降水处 理下拟合效果均较好。随降水增多,各样地土壤潜在可矿化有机碳量呈上升趋势。*k* 值在 0.03 至 0.14 之间, 其中草地边缘增水 20% 最低,荒漠草地减水 40% 最高。对各样地降水处理下土壤有机碳累积矿化量随培养 时间变化情况及动力学模拟如图 8 所示。

3 讨论

3.1 灌丛化对土壤有机碳矿化影响

有机碳储量变化对土壤碳循环有显著影响,有机碳矿化是影响土壤碳储量的重要因素^[27],然而,灌木引 入对荒漠草原土壤有机碳矿化如何影响仍不确定。本实验中随荒漠草原向灌丛转变土壤有机碳平均矿化速 率增加,表明灌丛转变提高了土壤有机碳分解速率。研究表明随着灌丛转变,灌丛地中土壤微生物能更好的 适应旱化土壤,活性更高,加速枯落物分解^[28]。研究表明土壤碳、氮养分增加可以促进土壤有机碳矿化^[29], 1.0

0.8

0.6

0.4

0.2

0

1.0

0.8

0.6

0.4

0.2

0

碳矿化比 Carbon mineralization rate







Fig.6 SOC mineralization ratios of transition sites under different precipitation gradients





Fig.7 Entropy of microbial metabolism of transition sites under different precipitation gradients

本研究中灌丛化导致土壤有机碳和全氮含量降低,但土壤有机碳矿化增加,可能是因为不同植被类型导致植 被盖度、土壤微生物生存环境及根系分布不同,导致微生物活性及有机质输入差异,从而导致土壤有机碳矿化 差异^[30]。与草地相比,在灌木下观察到的土壤有机碳分解速度较慢通常是由于灌木向土壤输入低质量的凋

44 卷



图 8 转变样地不同降水梯度下有机碳累积矿化量随培养时间变化情况及动力学模拟

Fig.8 Variation of accumulated SOC mineralization of transition sites with incubation time and kinetic simulation under different precipitation gradients

Table 3	Table 3 Kinetic parameters of SOC mineralization along transition sites under different precipitation gradients							
降水梯度	样地	拟合参数 Fitting parameter						
Precipitation gradients	Sample plot	$C_0(\text{ mg/g})$	$C_0 / \text{SOC} (\%)$	$k (\mathrm{d}^{-1})$	R^2			
+40%	DG							
	GE							
	SE	2.888 ± 0.311	0.496	0.041 ± 0.009	0.937 ***			
	SL	3.013 ± 0.309	0.72	0.042 ± 0.009	0.939 ***			
+20%	DG							
	GE	2.412 ± 0.278	0.426	0.030 ± 0.006	0.967 ***			
	SE	2.638 ± 0.286	0.453	0.040 ± 0.009	0.938 ***			
	SL	2.978 ± 0.273	0.712	0.042 ± 0.008	0.954 ***			
СК	DG	1.693 ± 0.199	0.242	0.041 ± 0.010	0.921 ***			
	GE	2.086 ± 0.241	0.369	0.034 ± 0.008	0.954 ***			
	SE	2.061 ± 0.190	0.354	0.058 ± 0.014	0.897 ***			
	SL	2.552 ± 0.242	0.61	0.050 ± 0.011	0.921 ***			
-20%	DG	1.126 ± 0.083	0.161	0.077 ± 0.017	0.885 ***			
	GE	1.210 ± 0.207	0.214	0.082 ± 0.010	0.903 ***			
	SE	1.731±0.169	0.297	0.071 ± 0.020	0.828 ***			
	SL	1.978 ± 0.129	0.473	0.097 ± 0.021	0.874 ***			
-40%	DG	0.972 ± 0.060	0.139	0.140 ± 0.033	0.806 ***			
	GE	1.119 ± 0.065	0.198	0.119 ± 0.025	0.859 ***			
	SE	1.465 ± 0.071	0.251	0.138 ± 0.026	0.887 ***			
	SL	1.845 ± 0.143	0.441	0.097 ± 0.025	0.821 ***			

表 3 转变样地不同降水梯度下土壤有机碳矿化的动力学参数

落物(即木质素,单宁和脂质含量高)的原因^[31]。本研究中,灌丛地相对于荒漠草原有机碳矿化较快可能归因于灌木下的土壤 C/P 或 N/P 降低,即 P 的相对占比升高,P 作为核酸和膜分子合成和能量代谢不可缺少元素,灌丛地较高的 P 占比相对于荒漠草地更加满足微生物需求与资源供给,进而提高灌丛地的微生物活性^[32]。

3.2 降水变化对人为灌丛化有机碳矿化的影响

最近的研究强调了气候或降水模式对有机碳矿化过程的影响^[33],评估降水变化如何影响矿化潜力对于 了解不同的降水梯度下有机碳分解过程至关重要。荒漠草原生态系统降水少,土壤有机碳、氮含量低,土壤呼 吸通常较弱,增加降水后,土壤碳通量可增加至 30 倍,土壤有机碳矿化大幅度增加^[34]。在各降水梯度下,四 样地的累积矿化量、矿化速率、碳矿化比和微生物代谢熵均呈上升趋势。随着降水梯度降低,各样地土壤水分 含量下降,微生物代谢熵呈下降趋势,土壤可利用有机碳含量降低,土壤质量下降,土壤有机碳矿化也呈下降 趋势。培养结束时各样地不同降水梯度下累积矿化量均表现为增水 40%>增水 20%>对照>减水 20%>减水 40%。研究^[35]表明,土壤充水孔隙 60% 左右时,土壤微生物活性更高,增加土壤有机碳矿化,反之,则会降低 土壤有机碳矿化。培养初期增加降水土壤水分较高导致土壤孔隙空间中氧气的有效性降低,通透性降低,同 时微生物活性降低,从而降低了有机碳矿化。降水量降低会使土壤微生物新陈代谢能力减弱,进而影响土壤 微生物量和活性,当土壤水分含量过低时,会对土壤微生物活性^[35]和土壤碳矿化产生明显抑制作用^[36]。随 培养时间延长,减水处理水分降低成为限制因子时,微生物活性受限,有机碳矿化低于增水处理。在相同降水 梯度下,灌丛地与灌丛边缘平均碳矿化速率明显高于荒漠草地与草地边缘,表明灌丛地对降水变化响应更加 敏感。

4 结论

荒漠草原向灌丛人为转变近 40 年过程中土壤有机碳、全氮和全磷含量均呈显著降低变化;各转变样地 土壤有机碳累积矿化量、平均碳矿化速率、碳矿化比和微生物代谢熵均为增水高于减水且有机碳矿化速率随 培养时间延长呈下降趋势,均表现为灌丛地高于荒漠草地,说明旱化条件下,灌丛地比荒漠草地更易发生矿 化,灌丛枯落物对于微生物的分解更具影响,加速微生物代谢速率并提高其应对干旱的能力,同时降低了荒漠 草原土壤有机碳固持潜力。

参考文献(References):

- [1] White R P, Murray S, Rohweder M, White R P, Murray S, Rohweder M. Pilot analysis of global ecosystems: Grassland ecosystems. World Resources Institute, 2000, 4(6): 275.
- [2] Van Auken O W. Causes and consequences of woody plant encroachment into western North American grasslands. Journal of Environment Management, 2009, 90(10): 2931-2942.
- [3] 彭海英,李小雁,童绍玉.内蒙古典型草原灌丛化对生物量和生物多样性的影响.生态学报,2013,33(22):7221-7229.
- [4] Li Y Y, Dong S K, Wen L, Wang X X, Wu Y. Soil carbon and nitrogen pools and their relationship to plant and soil dynamics of degraded and artificially restored grasslands of the Qinghai-Tibetan Plateau. Geoderma, 2014, 213: 178-184.
- [5] Nie X D, Yuan Z J, Huang B, Liao Y S, Zhang X Q, Li Z W, Li D Q. Effects of water erosion on soil organic carbon stability in the subtropical China. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(10): 3564-3575.
- [6] Kan Z R, Ma S T, Liu Q Y, Liu B Y, Virk A L, Qi J Y, Zhao X, Lal R, Zhang H L. Carbon sequestration and mineralization in soil aggregates under long-term conservation tillage in the North China Plain. CATENA, 2020, 188: 104428.
- [7] 周玉燕, 贾晓红, 赵昕, 陈国雄, 高艳红, 吴攀. 不同植被配置下土壤碳矿化潜力. 生态学杂志, 2011, 30(11): 2442-2448.
- [8] Connell R K, O'Connor R C, Nippert J B, Blair J M. Spatial variation in soil microbial processes as a result of woody encroachment depends on shrub size in tallgrass prairie. Plant and Soil, 2021, 460(1-2): 359-373.
- [9] Pellegrini E, Boscutti F, Alberti G, Casolo V, Contin M, De Nobili M. Stand age, degree of encroachment and soil characteristics modulate changes of C and N cycles in dry grassland soils invaded by the N₂-fixing shrub Amorpha fruticosa. Science of the Total Environment. 2021, 792: 148295.

- [10] Puissant J, Mills R T E, Robroek B J M, Gavazov K, Perrette Y, De Danieli S, Spiegelberger T, Buttler A, Brun J J, Cécillon L. Climate change effects on the stability and chemistry of soil organic carbon pools in a subalpine grassland. Biogeochemistry, 2017, 132(1-2): 123-139.
- [11] Navarro-García F, Casermeiro M Á, Schimel J P. When structure means conservation: Effect of aggregate structure in controlling microbial responses to rewetting events. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 44(1): 1-8.
- [12] Maucieri C, Zhang Y, McDaniel M D, Borin M, Adams M A. Short-term effects of biochar and salinity on soil greenhouse gas emissions from a semi-arid Australian soil after re-wetting. Geoderma, 2017, 307: 267-276.
- [13] Negandhi K, Edwards G, Kelleway J J, Howard D, Safari D, Saintilan N. Blue carbon potential of coastal wetland restoration varies with inundation and rainfall. Scientific Reports, 2019, 9: 4368.
- [14] 朱灵,张梦瑶,高永恒.高寒草原土壤有机碳矿化对水氮添加的响应.水土保持通报,2020,40(1):30-37.
- [15] Han G X, Sun B Y, Chu X J, Xing Q H, Song W M, Xia J Y. Precipitation events reduce soil respiration in a coastal wetland based on four-year continuous field measurements. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 256/257: 292-303.
- [16] Borken W, Savage K, Davidson E A, Trumbore S E. Effects of experimental drought on soil respiration and radiocarbon efflux from a temperate forest soil. Global Change Biololgy, 2006, 12(2): 177-193.
- [17] Borken W, Matzner E. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils. Global Change Biology, 2009, 15 (4): 808-824.
- [18] 孙忠超,周玉蓉,赵亚楠,郭天斗,于露,王红梅.荒漠草原土壤微生物矿化对灌丛引入过程及水分的响应.生态学报,2021,41(4): 1537-1550.
- [19] 赵亚楠,周玉蓉,王红梅.宁夏东部荒漠草原灌丛引入下土壤水分空间异质性.应用生态学报,2018,29(11):3577-3586.
- [20] 赵亚楠,赵亚峰,王红梅,马彦平,李志丽.荒漠草原灌丛转变土壤水分与地上生物量空间异质性及阈值响应.林业科学,2021,57 (12):1-12.
- [21] 王红梅, 王仲良, 王堃, 陈欢, 刘安乐. 华北农牧交错带农田-草地景观镶嵌体土壤水分空间异质性. 生态学报, 2013, 33 (19): 6287-6294.
- [22] 赵亚楠. 荒漠草原灌丛人为转变过程中土壤碳氮耦合特征及机制[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [24] 吴金水,林启美,黄巧云,贺纪正,肖和艾.土壤微生物生物量测定方法及其应用.北京:气象出版社,2006.
- [25] Voroney R P, Paul E A. Determination of k_c and k_N in situ for calibration of the chloroform fumigation-incubation method. Soil Biology and Biochemistry, 1984, 16(1): 9-14.
- [26] Horwath W R, Pual E A. Microbial Biomass. Methods of Soil Analysis: Part 2-Microbiological and Biochemical Properties.
- [27] Xiang W, Freeman C. Annual variation of temperature sensitivity of soil organic carbon decomposition in North peatlands : implications for thermal responses of carbon cycling to global warming. Environmental Geology, 2009, 58(3): 499-508.
- [28] Zhao Y N, Wang H M, Guo T D, Li Z L, Mi W B, Cao Z. Response of soil C⁻, N⁻, and P⁻ acquisition enzymes to moisture pulses in desert grassland to shrubland state transition. Science of The Total Environment, 2023, 861: 160569.
- [29] Thiessen S, Gleixner G, Wutzler T, Reichstein M. Both priming and temperature sensitivity of soil organic matter decomposition depend on microbial biomass-An incubation study. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 57:739-748.
- [30] 曹润,王邵军,陈闽昆,左倩倩,王平,曹乾斌.西双版纳热带森林不同恢复阶段土壤微生物生物量碳的变化.生态环境学报,2019,28 (10):1982-1990.
- [31] Gutiérrez-Girón A, Díaz-Pinés E, Rubio A, Gavilán R G. Both altitude and vegetation affect temperature sensitivity of soil organic matter decomposition in Mediterranean high mountain soils. Geoderma, 2015, 237-238: 1-8.
- [32] Jia B, Li J, Mou X M, Chen J, Li F C, Ma Q J, Li X J. Shrubification decreases soil organic carbon mineralization and its temperature sensitivity in alpine meadow soils. Soil Biology and Biochemistry, 2022, 168: 108651.
- [33] Hawkes C V, Waring B G, Rocca J D, Kivlin S N. Historical climate controls soil respiration responses to current soil moisture. PNAS, 2017, 114 (24): 6322-6327.
- [34] Jin Z, Qi Y C, Dong Y S, Domroes M. Seasonal patterns of soil respiration in three types of communities along grass-desert shrub transition in Inner Mongolia, China. Advances in Atmospheric Sciences, 2009, 26(3): 503-512.
- [35] Das S, Richards B K, Hanley K L, Krounbi L, Walter M F, Walter M T, Steenhuis T S, Lehmann J. Lower mineralizability of soil carbon with higher legacy soil moisture. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 130: 94-104.
- [36] Schindlbacher A, Rodler A, Kuffner M, Kitzler B, Sessitsch A, Zechmeister-Boltenstern S. Experimental warming effects on the microbial community of a temperate mountain forest soil. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(7): 1417-1425.