DOI: 10.20103/j.stxb.202401090070
李傲天,李志丽,王红梅,刘梦迪.荒漠草原不同植物群落土壤氮矿化对水分梯度的响应.生态学报,2025,45(2):757-768.
Li A T, Li Z L, Wang H M, Liu M D.Response of soil nitrogen mineralization of different plant communities in desert grassland to different moisture gradients.Acta Ecologica Sinica,2025,45(2):757-768.

荒漠草原不同植物群落土壤氮矿化对水分梯度的响应

李傲天[1],李志丽[1],王红梅[1,2,3,*],刘梦迪[1]
1 宁夏大学农学院,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:为探究宁夏东部荒漠草原常见植物群落土壤氮矿化对土壤干旱响应特征,选取 5 种植物群落,即蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*),猪毛蒿(*Artemisia scoparia*),苜蓿(*Medicago sativa*),柠条(*Caragana korshinskii*)和黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)作为研究对象,开展常见植物群落土壤氮矿化对水分干旱梯度(自然、饱和、干旱)的响应特征研究。结果表明:各植物群落 0—20cm 土壤水分均处于 3.19%—5.17%范围,而 0—200cm 土壤平均含水量均具明显的垂直动态,显著高于浅层土层含水量,其变化范围为 10.89%—19.35%,并表现为柠条群落>猪毛蒿群落>蒙古冰草群落>黑沙蒿群落>苜蓿群落。土壤有机碳含量在蒙古冰草群落下为 3.505—3.985g/kg,高于其他群落;土壤全氮含量在蒙古冰草、猪毛蒿和柠条群落间差异不显著,为 0.146—0.157g/kg,但显著高于黑沙蒿和苜蓿群落。土壤氮矿化过程中,黑沙蒿、柠条和苜蓿样地的土壤硝化作用呈增加趋势,并随季节变化差异增大,而蒙古冰草土壤氮矿化过程则更加平稳,处于较低氮矿化水平的循环特征;相较于柠条和黑沙蒿群落土壤硝化作用对土壤干旱的积极响应,蒙古冰草和苜蓿群落的土壤微生物氮矿化对土壤旱化响应滞后。这 5 种植物群落土壤氮矿化关键指标主受养分因子影响,在自然降雨和干旱条件下土壤氮与土壤水分、全磷和氮磷比呈正相关,与有机碳和碳氮比负相关,各植物群落土壤铵态氮和硝态氮变化随着持续干旱加剧削弱了与其它养分因子的关联性,但饱和水分后持续干旱的土壤硝态氮和微生物生物量氮呈显著负相关($P<0.05$)。

关键词:荒漠草原;不同植物群落;土壤理化性质;土壤氮矿化;水分梯度

Response of soil nitrogen mineralization of different plant communities in desert grassland to different moisture gradients

LI Aotian[1], LI Zhili[1], WANG Hongmei[1,2,3,*], LIU Mengdi[1]
1 *School of Agriculture, 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: In order to explore the responses of soil nitrogen mineralization of common plant communities in the desert grassland of eastern Ningxia to soil drought, five plant communities, namely, *Agropyron mongolicum*, *Artemisia scoparia*, *Medicago sativa*, *Caragana korshinskii* and *Artemisia ordosica* were selected to investigate the changes in soil nitrogen mineralization of common plant communities under different soil water gradients (natural, saturated and drought). The results showed that soil moisture of different plant communities was 3.19%—5.17% in 0—20cm soil depth, while the average soil moisture content of each community in 0—200cm depth had all evident vertical dynamics, which were significantly higher than that of shallow soil layer, and its variation range was 10.89%—19.35%, and the sequence was as

基金项目:国家自然科学基金项目(32260348);宁夏高等学校一流学科建设项目(NXYLXK2017A01)
收稿日期:2024-01-09;　　**网络出版日期**:2024-10-10
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: whm_826@163.com

follows: *Caragana korshinskii* > *Artemisia scoparia* > *Agropyron mongolicum* > *Agropyron mongolicum* > *Medicago sativa*. Soil organic carbon content of *Agropyron mongolicum* was significantly higher than that of other communities and ranged from 3.505g/kg to 3.985g/kg. Soil total nitrogen content did not differ significantly between the community of *Agropyron mongolicum*, *Artemisia scoparia*, and *Caragana korshinskii*, and their value was 0.146—0.157g/kg, but higher than *Artemisia ordosica* and *Medicago sativa*. During soil nitrogen mineralization, soil nitrification of *Artemisia ordosica*, *Caragana korshinskii* and *Medicago sativa* community showed an increasing trend, and the difference increased with seasonal variation, whereas soil nitrogen mineralization of *Agropyron mongolicum* soil was characterized mineralization more stable, and the rate of soil nitrogen mineralization were relatively low. Compared to the positive response of soil nitrification action to soil drought in *Caragana korshinskii* and *Artemisia ordosica* community, the responses of soil nitrogen mineralization characteristics in *Agropyron mongolicum Medicago sativa* community was delayed. The main indices of soil nitrogen mineralisation were influenced by different nutrient factors. Under natural rainfall and drought conditions, soil nitrogen was positively correlated with soil moisture, total phosphorus and the nitrogen to phosphorus ratio, and negatively correlated with organic carbon and the carbon to nitrogen ratio. The changes of soil ammonium and nitrate nitrogen in each plant community weakened the correlations with other nutrient factors as persistent drought intensified, whereas soil nitrate nitrogen and microbial biomass nitrogen showed a significantly negative correlation after persistent drought and saturated moisture($P<0.05$).

Key Words: desert steppe; various plant communities; soil physicochemical properties; soil nitrogen mineralization; soil moisture gradient

荒漠草原是草原生态系统中最为旱生的类型,通常具植被稀疏,土壤较为贫瘠,生态系统抗干扰能力弱、稳定性低等特点[1]。土壤碳氮是对地表所有生物至关重要的营养元素,土壤碳有助于改善土壤的保水能力,优化土壤结构,并促进养分循环的速度,土壤氮素对生态系统生产力产生重要影响,与土壤碳密切相关,它们在调节陆地生态系统的结构和功能方面扮演着重要的角色[2]。土壤碳氮不仅受土壤矿物学、有机质输入和微生物群落呼吸等因素的控制,还会受土地利用方式变化的影响,土地利用方式的转变改变了植物群落结构、土壤侵蚀因子、土壤碳氮库的来源和分解等,从而进一步影响土壤碳、氮储量[3]。其中氮素是植物从土壤中吸收的重要矿物元素之一,对于荒漠草地植被的生长来说,它是主要的限制因素之一[4],保护性或合理的植被重建措施对于退化荒漠草原土壤碳氮的维持和增加具重要意义。

植物所吸收利用的土壤氮素大多是由有机氮经矿化以铵态氮或硝态氮形态参与植物生长循环,因此土壤氮素矿化过程及特征是了解旱区生态系统群落稳定性的重要指标,其中生长季氮矿化速率及其无机氮贡献比例与生态系统年内生产力密切相关[5],研究表明生长季内草地氮矿化约占全年氮矿化发生总量的90%,土壤铵态氮和硝态氮在被根系转运吸收的同时,部分铵态氮会发生硝化反应经生物氧化为硝酸盐(NO_3^-)存在[6]。在温带土壤中,氮净矿化速率具有季节性的动态变化,当土壤温度达到最高点,通常出现在夏季或秋季时,氮净矿化速率达到最大值[7],但在热带森林土壤中,温度对氮的净矿化速率没有明显影响[8]。然而净矿化速率也可能因为其它气候条件变化而发生改变,如在西班牙地中海气候下,Na del hoffer 等研究发现夏季与冬季的土壤微生物种群数量减少可能受夏季水分和冬季温度的限制[9],土壤水分在旱季和雨季之间的大幅波动对氮净矿化速率起着调节作用[10]。除此之外,土壤中氮素的总量及各种形态氮素与地上植被密切相关,可矿化的氮含量决定了土壤中植物生长所需的氮[11],而植物对土壤氮素的利用效率受到氮的可利用性的限制[12],它与群落演替间存在反馈关系。在干旱区或半干旱地区发生的荒漠草原灌从化过程中,随着荒漠灌丛植被转变过程,土壤矿化显著增加,加速了土壤矿化氮的释放,硝化速率变化趋势大于氨化速率,加速硝态氮的积累[13]。中国北方植被,特别是干旱和半干旱区植被与降水异常具有较高的相关性[14]。植被对干旱的生理反应在过渡和半干旱地区以及灌木和草中最为明显[15]。有研究表明植被恢复能提高土壤氮含量[16],但也有研究

表明,植被恢复导致土壤全氮含量的减少[17]。由于宁夏东部荒漠草原大面积地人为引入灌丛,加速了半干旱区草原灌丛化这一入侵过程,并形成大量灌丛草本镶嵌共存的景观现状,因而土壤碳氮及其土壤氮矿化,以及与氮素相关的土壤理化因子如何响应这种天然荒漠草地向灌丛地形成的稳态转变过程还有待深入研究。

宁夏东部荒漠草原处于我国生态安全建设的关键区域,经历了上个世纪草地退化和沙化、植被重建过程,经过了几十年的不同管理措施和程度的干扰作用下,该生态系统群落稳定性及可持续性有待继续研究[18]。特别是在全球降雨模式趋于干旱持续和极端频发的背景下,需要深入了解其干扰过后的荒漠草原植物植物群落组成、结构及其养分循环功能的影响。同时,选区的植物群落必须都是荒漠草原生态系统中的常见物种,并且它们的生长和土壤特性要对水分变化有显著的响应,还要所选取的植物群落代表不同的生态类型和功能,增加了研究的多样性和复杂性,有助于全面理解水分梯度变化对土壤和生态系统的影响,如蒙古冰草可能是草本植物,猪毛蒿和黑沙蒿是灌木,而苜蓿和柠条可能是豆科植物。基于以上原因,本研究以宁夏东部荒漠草原为对象,选取了人为不同措施干预下的蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*);猪毛蒿(*Artemisia scoparia*);苜蓿(*Medicago sativa*);柠条(*Caragana korshinskii*)和黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)5 种常见的植物群落,开展不同植物群落土壤关键养分含量和氮矿化变化特征的研究,探讨荒漠草原不同植物群落土壤碳氮及其土壤氮矿化对土壤旱化的响应特征,揭示不同群落共存下的荒漠草原土壤氮素特征及稳定性现状,以期为宁夏东部荒漠草原生态恢复的可持续发展提供理论科学依据和数据支撑。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

该研究区位于宁夏盐池县东部,毗邻毛乌素沙漠,地处鄂尔多斯台地(107°2′49.18″—107°2′57.38″E、39°4′45.85″—39°4′54.97″N)。该地区属于典型的大陆性季风气候,具干旱少雨,强烈蒸发,冬季寒冷,夏季炎热,日照充足等特点;年均降雨量在 250—350mm 之间,降水分布不均,集中在 7—9 月;年均气温约为 8.1℃,年均无霜期约为 160d;土壤类型主要为灰钙土和风沙土,土壤结构疏松,肥力较低。

该地区植被类型属荒漠草原,主要植物有短花针茅(*Stipa breviflora*)、刺蓬(*Salsola ruthenica*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、白草(*Pennisetum centrasiaticum*)、蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、赖草(*Leymus secalinus*)、蒙古虫实(*Corispermum mongolicum*)等。在盐池县高沙窝二步坑区域选择蒙古冰草(*A mongolicum*),苜蓿(*M sativa*),黑沙蒿(*A ordosica*),柠条(*C korshinskii*),猪毛蒿(*A scoparia*)植物群落开展相关研究(表 1)。

表 1　研究样地基本概况

Table 1　General situation of the study sites

样地 Sites	备注 Note	经度 Longitude	纬度 latitude	优势植物 Dominant species
蒙古冰草群落(MB) Agropyron mongolicum community	禁牧封育 15 年	107°3′57.6″E	38°2′49.2″N	蒙古冰草(Agropyron mongolicum)、赖草(Leymus secalinus)、短花针茅(Stipa breviflora)、蒙古虫实(Corispermum mongolicum)
猪毛蒿群落(ZMH) Artemisia scoparia community	2011 年补播沙打旺偷牧退化	107°2′49.2″E	38°4′44.4″N	猪毛蒿(Artemisia scoparia)、甘草(Glycyrrhiza uralensis)、沙打旺(Astragalus adsurgens)、蒙古虫实(Corispermum mongolicum)
苜蓿群落(MX) Medicago sativa community	禁牧、撂荒 10 年左右	107°2′52.8″E	38°4′51.6″N	苜蓿(Medicago sativa)、短花针茅(Stipa breviflora)、猪毛菜(Salsola collina)、叉枝鸦葱(Scorzonera divaricata)
柠条群落(NT) Caragana korshinskii community	种植 12 年左右、禁牧	107°5′16.8″E	38°5′20.4″N	柠条(Caragana korshinskii)、猪毛蒿(Artemisia scoparia)、刺蓬(Salsola ruthenica)、牛枝子(Lespedeza potaninii)、
黑沙蒿群落(HSH) Artemisia ordosica community	禁牧封育 15 年	107°5′20.4″E	38°4′26.4″N	黑沙蒿(Artemisia ordosica community)、白草(Pennisetum centrasiaticum)、猪毛蒿(Artemisia scoparia)、刺蓬(Salsola ruthenica)

猪毛蒿群落经 2013 年补播沙打旺后退化形成,苜蓿和柠条群落于 2010 年左右种植形成

1.2 土壤采样

土壤水分:2017—2021 年 3—12 月,对各样地 0—200cm 土壤水分进行长期定位观测,分别在蒙古冰草群落、猪毛蒿群落、苜蓿群落、黑沙蒿群落设置 3 个 5m×5m 的样区和 3 个 10m×10m(柠条地),每个样地都安装了 TDR 时域反射仪(Time Domain Reflectometry),共计 15 个 TDR 时域反射仪,用于在 0—200cm 的土层中测定土壤的体积含水量。每 20cm 为一层,此外,利用土钻在每个样地的固定样方观测点分别钻取 0—5、5—10、10—20cm 深度的土壤,并将其装入铝盒后进行称重,然后在恒定温度下(105℃,24h)烘干至恒定重量,以计算土壤的含水量。每月固定观测 2 次(若采样时遇到研究区降雨,可在降雨后 2—3 天测量表层土壤水分,以确保土壤达到稳定状态)。

土壤理化特性的观测:2017、2021 年的 8 月,在不同植物群落的样地内,设置 3 个样方,柠条样地的样方为 10m×10m,其他样地样方均为 5m×5m。清除地表的枯落物后,使用土钻从每个样方内取得了 0—20cm 深的土壤样品。每个样方内共取了 5 个混合样品来进行重复实验。将用于测定微生物特性的新鲜土样品装入无菌自封袋中,并放入冰盒中进行冷藏保存,温度保持在 4℃以下。另外一份土样阴干并通过 2mm 筛网处理后,用于分析和测定土壤养分含量。

1.3 氮素原位矿化培养

2021 年 4 月—9 月期间进行土壤氮矿化 PVC 原位培养试验,观测期分为生长初期(4—6 月,60d)、生长中期(6—8 月,120d)和生长后期(8—10 月,180d)。在固定的监测样地上,每个样地设置了 3 个重复。在 2021 年 4 月,每个样地埋设了 PVC 管(长 15cm,内径 5cm),5 个样地一次性埋入了所有培养管。该实验设置了三个水分梯度:持续干旱-100%(不浇水)、前期饱和(浇水至饱和/强降雨)和自然降雨,以模拟持续干旱(不浇水)、前期饱和(浇水饱和)、和自然降雨 3 个水分梯度,表明降雨增加或干旱缓解变化过程。根据水分梯度要求,对于浇水至饱和和干旱处理的管口进行避雨处理后,埋在样点的原始位置的坑内,自然降雨处理直接恢复表层覆盖物。各水分处理均有 3 个重复,各样地分别设置 9 个矿化原位管用于观测。

同时,在各个样地的观测样方内,使用土钻在 4 月份取得了 0—20cm 深的土壤样品作为氮转化培养的初始值测定土壤。矿化管取样日期分别为 2021 年 6 月 1 日、8 月 1 日和 10 月 1 日,共进行了 3 次取样。取样后的土壤保存完整,并及时带回实验室进行土壤硝态氮和铵态氮的含量测定。在 8 月份取样后,对部分土壤样品进行了土壤理化性质(全磷、全氮、有机碳,土壤水分)和微生物生物量的测定。

1.4 土壤指标测定方法

土壤有机碳的测定采用重铬酸钾氧化-外加热法;土壤全氮采用全自动凯氏定氮仪测定。土壤全磷(Total phosphorus,TP)采用钼蓝比色法测定。土壤微生物生物量碳(Microbial biomass carbon,MBC)及土壤微生物生物量氮(Microbial biomass nitrogen,MBN)采用氯仿熏蒸浸提法测定[13],公式如下:MBC = E_C/K_{EC} 式中:E_C 为熏蒸与未熏蒸土壤的差值;K_{EC} 为转换系数,取值为 0.38。MBN = E_N/K_{EN} 式中:E_N 为未熏蒸与熏蒸土样的差值;K_{EN} 为转换系数,取值为 0.45。培养后的土壤加入 2mol/L 的 KCl 溶液 50 mL(土∶水 = 1∶5),振荡 1h 后,静置 10—15min,取上清液过滤后,滤液采用流动分析仪测定无机氮含量(铵态氮和硝态氮,mg/kg)。

净矿化速率(R_{min})、净氨化速率(R_{amm})、净硝化速率(R_{nit})计算公式如下:

$$R_{min} = R_{amm} + R_{nit}$$

$$R_{amm} = ((NH_4^+\text{-}N)_{N+1} - (NH_4^+\text{-}N)_N)/T$$

$$R_{nit} = ((NO_3^-\text{-}N)_{N+1} - (NO_3^-\text{-}N)_N)/T$$

式中,$(NH_4^+\text{-}N)_N$ 和 $(NH_4^+\text{-}N)_{N+1}$ 为培养前后的铵态氮浓度;$(NO_3^-\text{-}N)_N$ 和 $(NO_3^-\text{-}N)_{N+1}$ 为培养前后的硝态氮浓度,T 为培养时间[7]。

1.5 数据统计与分析

采用 SPSS 25.0 软件和 Excel 16.0 软件对数据进行整理和统计分析,图表中数据为平均值±标准误。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验指标之间的显著性,α = 0.05。不同植被群落的土壤养分箱式图和氮

矿化动态特征,以及 RDA 冗余分析均采用 Origin 2022 软件完成。

2　结果与分析

2.1　不同植物群落土壤水分动态

各植物群落 0—20cm 土层土壤水分显著低于 0—200cm 土层,分别处于 3.19%—5.17%,10.89%—19.35%。0—20cm 土壤水分随季节波动,在 5 月和 9 月呈峰值,而 7—8 月水分最低(图 2);0—200cm 土壤水分随季节变化,表现为从春季开始的持续降低至 5 月,在 10 月有显著增加(图 1)。两种群落水分显著高于其他群落 56.76%。引入 10 年的柠条和退化的猪毛蒿群落的 80—200cm 深层水分大于蒙古冰草,苜蓿和黑沙蒿,其中在 0—60cm 深度之间各植被群落土壤水分含量及变化差异均小于 60—200cm 深度之间的土壤水分变化(图 2)。

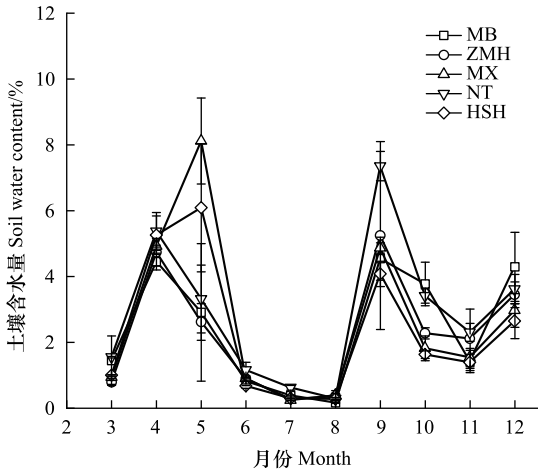

图 1　不同植物群落 0—20cm 土层土壤水分季节动态

Fig.1　Seasonal dynamics of soil moisture in the 0—20 cm soil layer of different plant communities

MB:蒙古冰草群落 *Agropyron mongolicum* community;ZMH:猪毛蒿群落 *Artemisia scoparia* community;MX:苜蓿群落 *Medicago sativa* community;NT:柠条群落 *Caragana korshinskii* community;HSH:黑沙蒿群落 *Artemisia ordosica* community

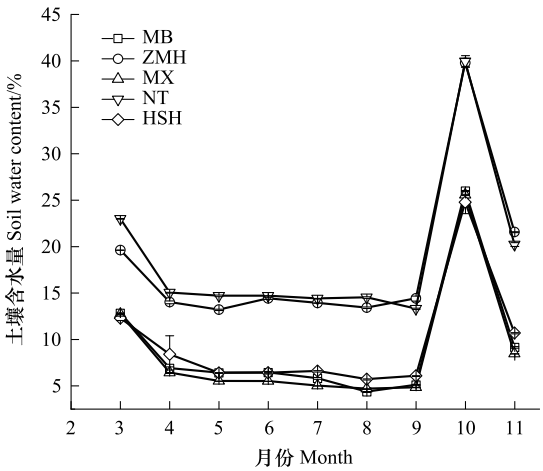

图 2　不同植物群落 0—200cm 土层土壤水分季节动态

Fig.2　Seasonal dynamics of soil moisture in the 0—200 cm soil layer of different plant communities

蒙古冰草群落的碳氮含量均较高,其中有机碳含量显著高于其他样地,达到了 3.985mg/kg,但全磷含量显著低于其他样地($P<0.05$),平均值为 0.115mg/kg。此外苜蓿和黑沙蒿群落的全氮含量显著低于其他样地($P<0.05$),分别为 0.128mg/kg 和 0.125mg/kg。微生物生物量氮在蒙古冰草样地显著低于其他样地($P<0.05$),平均值为 5.16mg/kg,而苜蓿地微生物量碳和量氮含量均较高。除了蒙古冰草群落之外,其他各群落的碳磷比差异不大,在蒙古冰草群落土壤碳氮比显著高于其他样地($P<0.05$),氮磷比高于其他群落但不显著(图 3)。

2.2　不同植物群落土壤氮矿化对不同水分梯度的响应

除自然降雨水分梯度下猪毛蒿植物群落的铵态氮波动明显外,其他植物群落不同水分处理下(随干旱加剧)土壤铵态氮含量变化不明显,其中在自然降雨梯度下蒙古冰草群落的硝态氮含量在整个生长季节显著低于其他群落,特别是柠条群落,硝态氮的占比显著大于铵态氮,并且在生长季前期大于后期;黑沙蒿和苜蓿群落的硝态氮含量呈现为夏季升高,春季和秋季降低的变化规律。而在干旱水分条件下,柠条和猪毛蒿群落的土壤硝态氮含量在整个生长季节均高于其他群落,其中生长季节中期,即 8 月阶段,柠条群落的土壤硝化过程

明显高于其他群落如蒙古冰草和苜蓿。虽然蒙古冰草群落和黑沙蒿在饱和水分条件下的土壤硝化过程在整个生长季节均高于其他群落,但是硝态氮含量随生长季节呈现降低趋势,并且各群落之间的差异减小(图 4)。

在不同水分处理下,各群落土壤氮矿化的氨化速率逐渐趋于平稳。随着干旱加剧,5 种植物群落的硝化速率由起初的下降趋势转变为上升趋势;同时,矿化速率也呈现出上升趋势。黑沙蒿和猪毛蒿群落土壤氮矿化过程的氨化速率均呈增长趋势。蒙古冰草群落的硝化速率随季节变化差异不大,而黑沙蒿群落的硝化速率由起初下降趋势逐渐趋于平缓,其他植物群落的氨化速率都随矿化时间表现增加趋势,其中,尤其是猪毛蒿群落的氨化速率增长的最快。黑沙蒿和苜蓿群落的矿化速率始终呈下降趋势,而柠条样地的矿化速率呈上升趋势(图 5)。

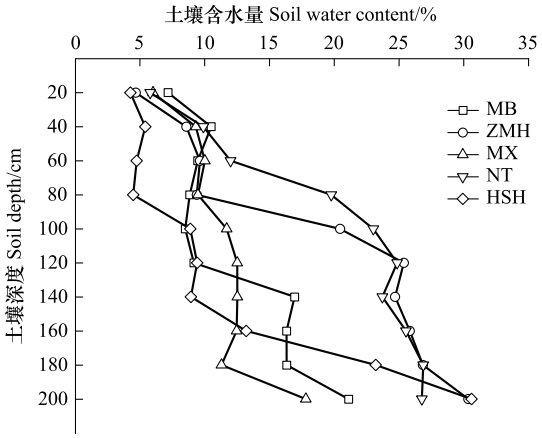

图 3 不同植物群落 0—200cm 土层土壤水分垂直动态

Fig.3 Vertical dynamics of soil moisture in the 0—200 cm soil layer of different plant communities

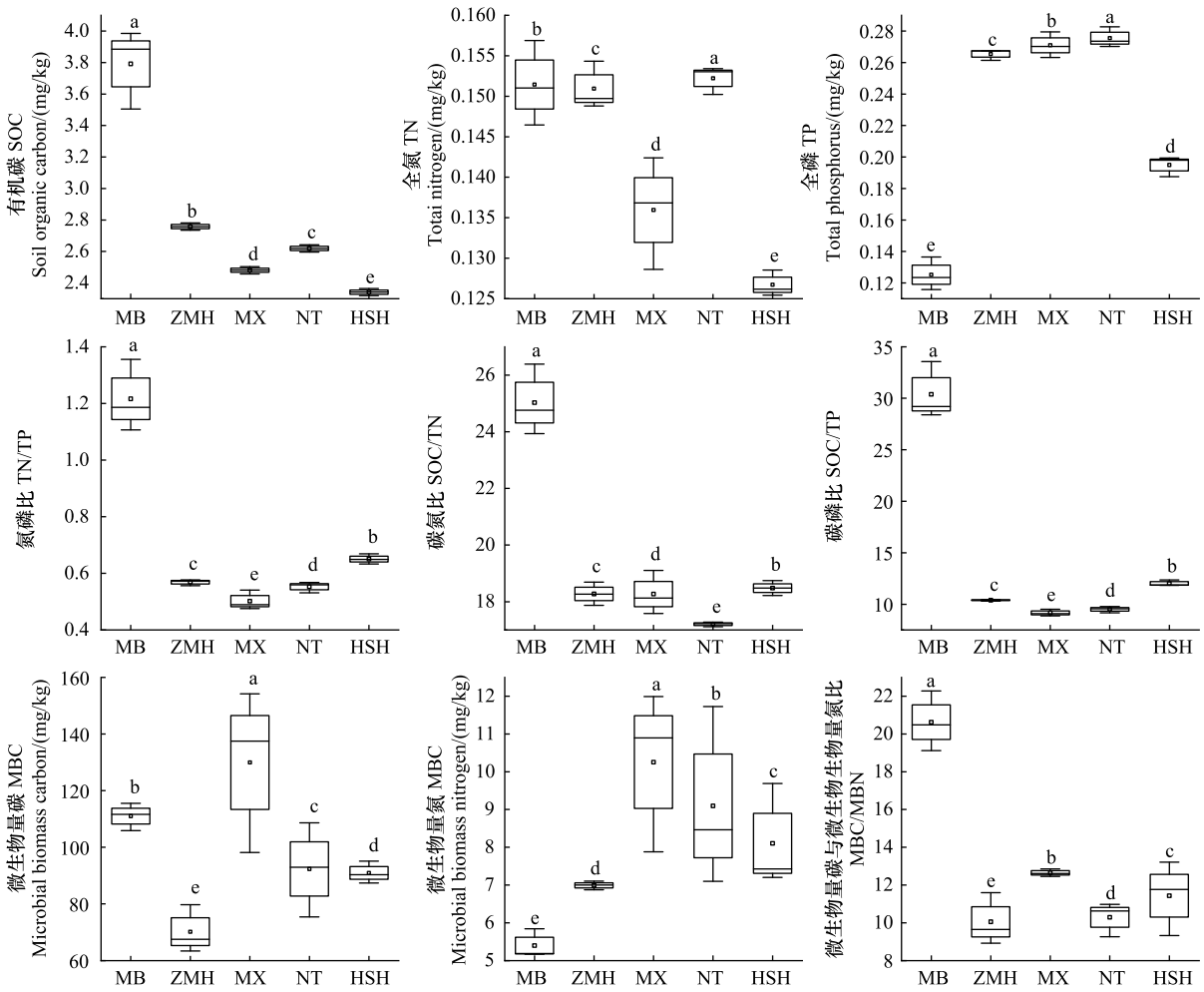

图 4 不同植物群落土壤养分特征

Fig.4 Characterization of soil nutrients in different plant communities

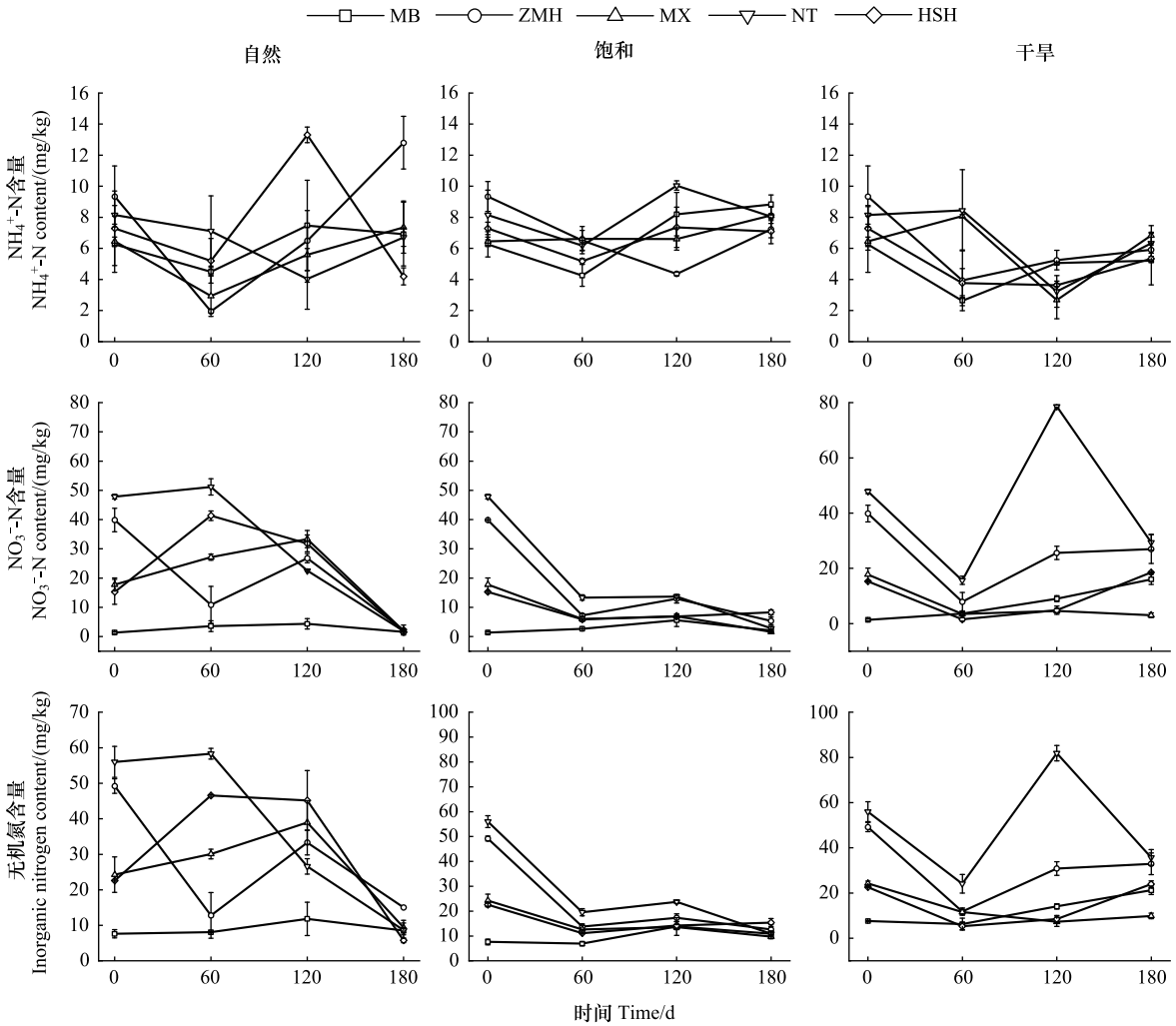

图 5　不同降雨梯度下土壤铵态氮,硝态氮和无机氮特征

Fig.5　Characteristics of soil ammonium nitrogen, nitrate nitrogen and inorganic nitrogen under different rainfall gradients

2.3　水分梯度下相关土壤因子与土壤氮矿化的相关性

荒漠草原不同植物群落的土壤矿化氮关键指标影响特征在不同水分处理下存在差异。其中自然降雨水分下,5 种植物群落土壤因子对土壤氮矿化的总解释变量为 95.01%,前两个轴分别解释了氮矿化数据中的 83.93%和 11.08%;氮与土壤水分,全磷和氮磷比呈正相关,而与有机碳和碳氮比负相关;此外,土壤水分还与全磷和生物量氮显著正相关;在干旱水分处理下,5 种植物群落土壤因子对土壤氮矿化的总解释变量为 99.92%,前两个轴分别解释了氮矿化数据中的 99.08%和 0.84%;氮与土壤水分和全磷,还有氮磷比呈正相关,而与有机碳和碳氮比以及微生物生物量碳和碳氮比负相关。在饱和梯度下,不同植物群落土壤因子对土壤氮矿化的总解释变量为 99.55%,前两个轴分别解释了氮矿化数据中的 93.76%和 5.79%;氮与氮磷比和全磷呈显著正相关,而与碳氮比和微生物生物量碳相关性不显著;净氨化速率和净硝化速率与碳氮比显著正相关。饱和水分下相关性表现为硝态氮和微生物生物量氮的呈显著负相关,随着干旱加剧,减弱了铵态氮和硝态氮与养分因子之间的相关性(图 6)。

3　讨论

3.1　不同植物群落对荒漠草原土壤特性的影响

土壤水分作为干旱半干旱区域的关键限制因子,直接影响着生态系统植被的多样性、组成和覆盖度,进而

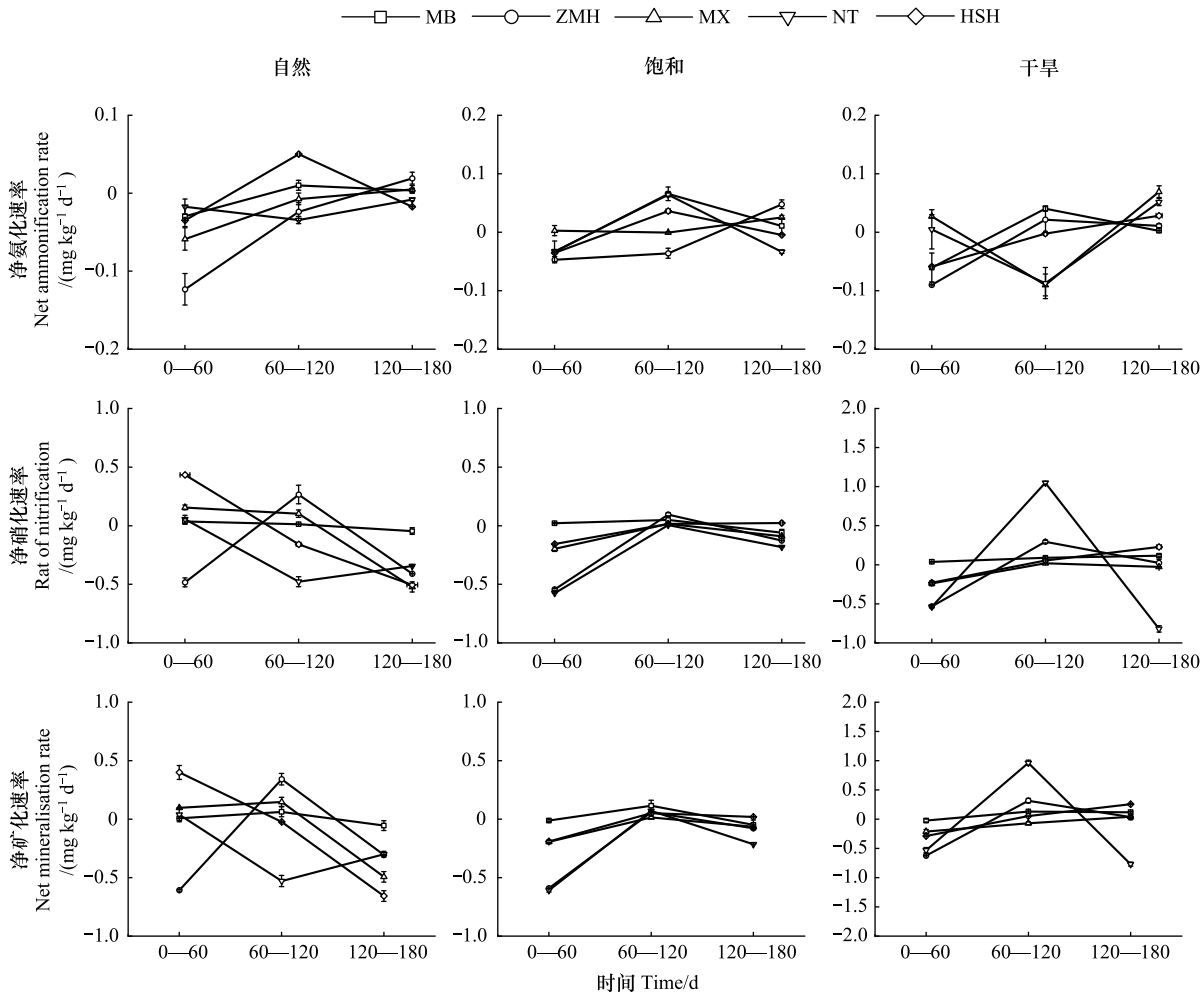

图 6 不同降雨梯度下土壤氮矿化及其速率特征

Fig.6 Characteristics of soil nitrogen mineralization and its rate under different rainfall gradients

调控植被修复和重建的可持续性[19]。自然降水是荒漠草原土壤水分的重要来源。研究发现,不同群落样地土壤水分季节动态表现为春季返潮上升,夏季生长消耗至秋季积累上升,这与赵亚楠等[20]的研究结论基本一致。除 0—200cm 土壤水分外,其它表层土壤理化特性均受不同植被恢复措施影响显著。其中,土壤有机碳、微生物量氮含量显著增加,而铵态氮、硝态氮、全氮和生物量均有所降低,不同植物群落硝态氮和铵态氮存在差异,这与前人的研究结果类似[21]。本研究发现,在自然降雨梯度下蒙古冰草群落的硝态氮含量在整个生长季节显著低于其他群落,尤其是柠条群落,硝态氮的占比显著大于铵态氮,并且在生长季前期大于后期;这可能是因为蒙古冰草是一种浅根性植物,其根系主要分布在 25cm 以上的土层中[22],这种根系分布特点意味着对土壤表面水分有较强的依赖性,而在土壤水分较少的条件下,土壤表层水分快速蒸发,不利于蒙古冰草的生长。而柠条在生长季前期,可能还未达到完全的生长状态,其根系活力和吸收能力相对较低,导致对氮的吸收不充分,硝态氮积累较多。随着时间的推移,植物生长旺盛,对氮的吸收增加,硝态氮占比相应减少[23]。将蒙古冰草、猪毛蒿、黑沙蒿构成一个典型的退化演替系列,这一系列反映了植物群落在演替过程中土壤特性的变化,蒙古冰草通常生长在较好的土壤条件下,能够提供更多的营养物质,有利于植物的生长和发展。在这个阶段,蒙古冰草群落的有机碳含量显著高于其他群落,全磷含量显著较低于其他群落。有机碳含量显著高于其他群落,这反映出蒙古冰草群落的生物生产力较高,或者积累的有机物质较多[24]。全磷含量显著较低于其他样地,这可能是因为蒙古冰草群落的磷循环特性或者土壤中磷的可利用性较低[25]。随着环境的进一步恶化,

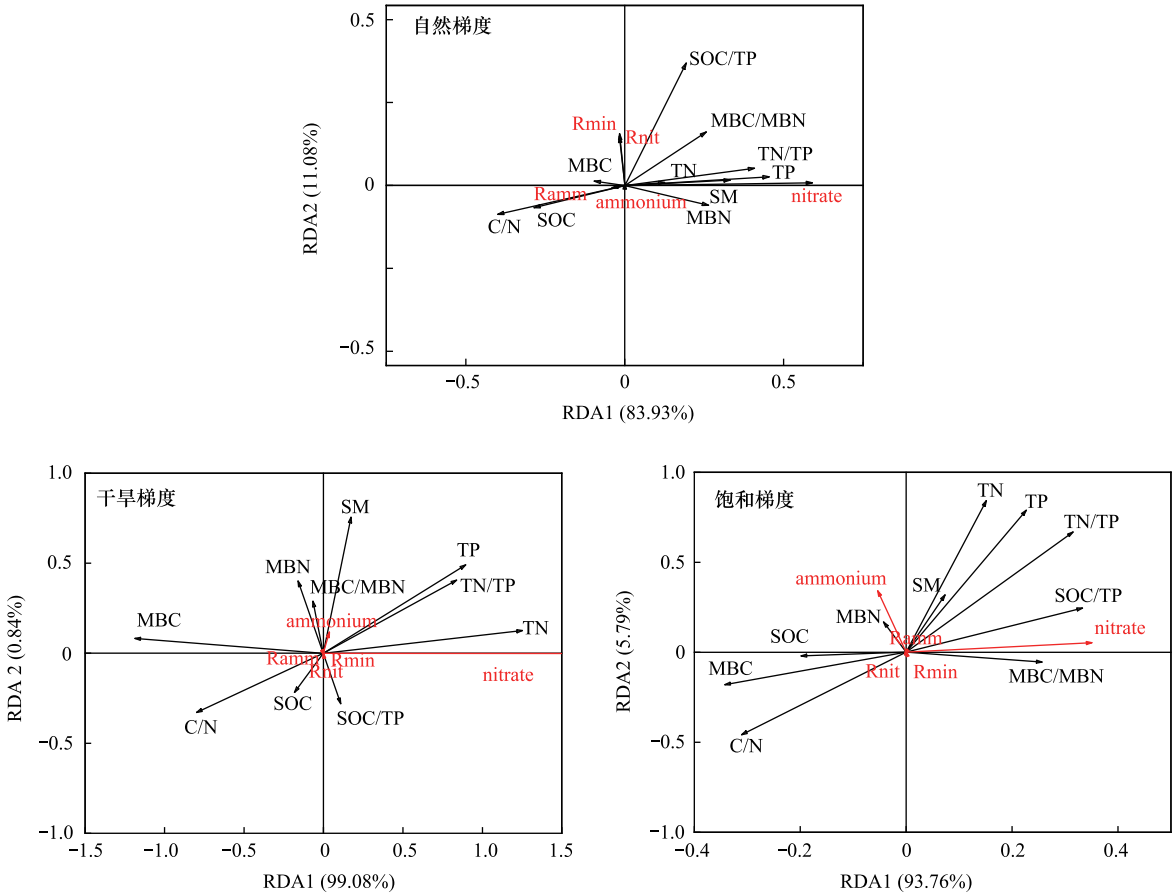

图 7　不同植物群落土壤因子与土壤氮矿化的 RDA 分析

Fig.7　RDA analysis of soil factors and soil nitrogen mineralisation in different plant communities

SM:土壤水分 Soil moisture;TN:全氮 Total nitrogen;SOC:有机碳 Soil organic carbon;TP:全磷 Total phosphorus;MBC:微生物量生物量碳 Microbial biomass carbon;MBN:微生物量生物量氮 Microbial biomass nitrogen;TN/TP:氮磷比 Nitrogen/Total phosphorus;SOC/TP:碳磷比 Organic carbon/Total phosphorous;MBC/MBN:微生物生物量碳和微生物生物量氮比 Microbial biomass carbon/Microbial biomass nitrogen;Ammonium:铵态氮 Ammonium nitrogen;Nitrate:硝态氮 Nitrate nitrogen;Ramm:净氨化速率 Rate of net ammonification;Rnit:净硝化速率 Rate of net nitrification;Rmin:净矿化速率 Rate of net mineralization;C/N:碳氮比 Carbon/Nitrogen ratio

猪毛蒿等植物可能会取代蒙古冰草,成为主导植物。这个阶段的土壤特性会有所变化,如土壤的全氮含量显著减少,因为猪毛蒿的根系可能不如蒙古冰草那样能够改善土壤结构[26]。当环境条件进一步恶化,黑沙蒿等更耐旱的植物可能会占据主导地位。

根据张玉琪等[27]的研究表明,随着退化程度的加重,土壤中的全氮、非颗粒有机氮、颗粒有机氮、铵态氮和硝态氮含量逐渐降低,有机氮和无机氮含量分别降低了 75.82%和 59.36%,从而导致氮素流失,对土壤氮库储量和土壤肥力产生了影响。研究表明,灌木侵占在区域尺度上对内蒙古表土有机碳(SOC)含量没有显著变化,部分原因是典型草原和荒漠草地的响应不同[28]。这一结果表明,灌木入侵的后果取决于气候、植被和土壤性质[29]。对黄土丘陵区柠条人工林地的研究中,随着柠条年限的增长,土壤中脲酶、蔗糖酶活性增强,同时柠条地的有机碳含量和全氮含量显著增长,它们会促进土壤中氮的循环和有机碳的释放,直接影响到土壤的肥力状态,造成土壤肥力提高,柠条地的有机碳含量和全氮含量也会随之增长[30—31]土壤理化性质还可能对其矿化过程产生重要影响;同时,柠条在生长初期的根系发达,能够改善土壤结构,增加土壤的通气性和渗透性,有助于土壤水分的保持和养分循环[31]。基于全球 Meta 分析表明约 30%氮矿化变化可以被土壤理化性质所解释。土壤硝态占到总无机氮库的三分之二以上,其主要受生长季节、地上生物量、土壤水分,以及温度敏感

性等多种变量影响[32]。本研究通过 RDA 揭示了土壤因子与氮矿化过程之间的关系。在自然降雨条件下,土壤水分和微生物生物量氮对氮矿化过程的调控效应显著;这说明土壤水分是影响氮矿化过程的关键因素之一[33],同时微生物是氮矿化的主要执行者,微生物生物量的大小直接影响氮的转化速率[34]。相比之下,在饱和降雨和干旱的环境影响下, 全氮和全磷的含量对土壤氮的矿化过程产生了显著的调节作用。全氮和全磷是土壤氮矿化过程中必不可少的营养物质,全氮的添加可以提高土壤中氮的含量,促进微生物的活性,从而加快氮的矿化速率[35]。全磷的添加则可以直接影响土壤中氮的有效性,因为磷是影响氮吸收的关键因素之一[36]。这表明水分、微生物活性以及养分含量在不同降雨模式下对土壤氮的生物地球化学循环具有重要影响。

3.2 荒漠草原不同植物群落土壤氮矿化对干旱的响应

土壤水分、养分和植被特征等因素是影响土壤微生物矿化的主要因素[28—29]。在荒漠草原地区,土壤水分是主要影响矿化作用的生态因素,主要来自降雨,对微生物的转化过程起着关键作用[37]。在对内蒙古典型草原的研究中表明,随着增雨/减雨频次的增加,土壤净氮矿化速率和净硝化速率均呈降低的趋势,最大土壤净氮矿化速率和净硝化速率多数出现在增雨/减雨 1 年、恢复 1 年的处理,表明较高的降雨量和频次改变对土壤净氮矿化速率和净硝化速率会产生抑制作用,而适宜的降雨量和频次改变对土壤氮矿化具有促进作用[38]。降雨梯度与一年生植物之间的相互作用复杂,一方面,降雨可以显著提高草地生态系统生物量,而植物的生长又反过来影响土壤氮矿化[39]。另一方面,植物残体的分解会释放出有机氮,影响土壤氮的动态平衡[40]。同时,植物根系活动可以扰动土壤结构,增加土壤孔隙度,促进氧气和水分到达微生物群落,从而提高氮矿化速率[41]。研究表明,宁夏东部荒漠草原中人为引入的柠条灌丛对土壤微生物矿化和水分梯度的响应的结果显示,灌丛地的矿化速率表现为硝化过程主导,对水分降低响应积极,封育草地对干旱具缓冲作用,而灌丛地对水分降低响应更为显著[42]。对亚热带森林中土壤氮素转化对季节降水变化的研究中发现,减少旱季降水量和增加雨季降水量会通过改变功能微生物丰度和微生物量碳来影响土壤氮转化,而土壤易氧化有机碳和 NH_4^+ 利用率的变化又会进一步影响土壤氮转化[43]。有研究表明降雨量的增加可以增强植物对氮的吸收并增加植物氮库,导致土壤氮有效性暂时下降[44]。而降雨量减少具有相反的效果,增加了水分胁迫,减少了植物蒸腾作用和对土壤养分的需求,导致干旱期土壤氮积累[45]。干旱地区生长季节的少量降雨会维持植物生境的养分循环[46],土壤微生物应对水分的差异产生不同的相应特征。本研究中,表现为自然降雨处理和干旱处理下,土壤硝化作用在柠条地的响应发生明显,在自然降雨处理下土壤硝化作用减弱,而在干旱处理下,土壤硝化作用增强。饱和水分条件生长季节的硝化过程减弱,柠条和黑沙蒿对土壤水分变化的响应明显,都是由硝化速率减弱转变为增强,但对于蒙古冰草群落来说,水分梯度的变化对其影响不太明显。这表明蒙古冰草具有一定的抗旱能力,即使在长期干旱条件下,也能维持土壤矿化过程的进行。3 个水分梯度下对各个群落的铵化过程影响并不明显。有研究表明尽管土壤水分降低会影响植被生理发育,但土壤微生物仍可以利用有限的土壤水分和养分进行矿化循环用于植物吸收[47]。然而,微生物并不总是能够适应极度干旱条件,在这种情况下,土壤微生物的活性会受到影响,它们可能会开始死亡或进入休眠状态[48]。因而,土壤水分作为为驱动力能够直接调节微生物活性丰度,或间接影响土壤含氧量,改变需氧微生物活动从而制约氮素转化[49]。土壤养分特征在不同植物群落下变化规律不同,表现为蒙古冰草群落的碳氮含量均比较高,其中有机碳含量显著高于其他群落,全磷含量显著较低于其他群落,此外苜蓿和黑沙蒿群落的全氮含量显著低于其他群落。在不同降雨处理下,土壤氮矿化表现出不同的变化特征。相关分析表明,在水分梯度下土壤水分,土壤养分含量以及微生物生物量碳和微生物生物量氮对土壤氮矿化造成不同的显著影响,总体呈现生长季内硝态氮含量受到灌丛的显著促进作用而铵态氮较为稳定。

4 结论

宁夏东部荒漠草原的植物群落演替中,5 种植物群落中,蒙古冰草群落的碳氮含量最高,猪毛蒿和柠条次

之;在土壤氮矿化过程中,黑沙蒿、柠条和苜蓿促进土壤氮素硝化,且随季节变化明显;蒙古冰草群落显示出较强的氮矿化稳定性,即使在干旱条件下也能保持一定的氮矿化水平。蒙古冰草和苜蓿群落在自然演替过程中表现出较好的稳定性土壤中的硝态氮和氨态氮含量受到土壤水分、全磷和氮磷比等环境因素的显著影响。然而,极端的降雨事件或持续干旱条件会改变这些土壤养分之间的关联。

参考文献(References):

[1] 李博. 中国北方草地退化及其防治对策.中国农业科学,1997,(6):2-10.

[2] Elser J J, Fagan W F, Kerkhoff A J, Swenson N G, Enquist B J. Biological stoichiometry of plant production: metabolism, scaling and ecological response to global change. New Phytologist, 2010, 186(3): 593-608.

[3] 赵亚楠, 杜艳艳, 马彦平, 赵延兵, 周玉蓉, 王红梅. 宁夏东部荒漠草原灌丛引入过程中土壤有机碳变化及其空间格局预测. 应用生态学报, 2019, 30(6): 1927-1935.

[4] 张珂, 何明珠, 李新荣, 谭会娟, 高艳红, 李刚, 韩国君, 吴杨杨. 阿拉善荒漠典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征. 生态学报,2014,34(22):6538-6547.

[5] Butler S M, Melillo J M, Johnson J E, Mohan J, Steudler P A, Lux H, Burrows E, Smith R M, Vario C L, Scott L.Soil warming alters nitrogen cycling in a New England forest: implications for ecosystem function and structure.Oecologia, 2012, 168(3):819-828.

[6] Li X J, Yang H T, Shi W L, Li Y F, Guo Q. Afforestation with xerophytic shrubs accelerates soil net nitrogen nitrification and mineralization in the Tengger Desert, Northern China. CATENA, 2018, 169: 11-20.

[7] 李志丽, 王红梅, 孙忠超, 马彦平, 赵亚楠, 李雪颖. 宁夏东部荒漠草原-灌丛地转变过程土壤氮素响应. 应用生态学报,2021,32(4):1230-1240.

[8] 李志杰, 杨万勤, 岳楷, 贺若阳, 杨开军, 庄丽燕, 谭波, 徐振锋. 温度对川西亚高山 3 种森林土壤氮矿化的影响. 生态学报,2017,37(12):4045-4052.

[9] Nadelhoffer K J, Aber J D, Melillo J M. Seasonal patterns of ammonium and nitrate uptake in nine temperate forest ecosystems. Plant and Soil, 1984, 80(3): 321-335.

[10] 邹亚丽. 甘肃庆阳不同生长年限紫花苜蓿草地土壤氮矿化的研究[D]. 兰州大学,2006.

[11] Kolberg R L, Rouppet B, Westfall D G, Peterson G A. Evaluation of an in situ net soil nitrogen mineralization method in dryland agroecosystems. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(2): 504-508.

[12] Reich P B, Grigal D F, Aber J D, Gower S T. Nitrogen mineralization and productivity in 50 hardwood and conifer stands on diverse soils. Ecology, 1997, 78(2): 335.

[13] Wong M T F, Akyeampong E, Nortcliff S, Rao M R, Swift R S. Initial responses of maize and beans to decreased concentrations of monomeric inorganic aluminium with application of manure or tree prunings to an Oxisol in Burundi. Plant and Soil, 1995, 171(2): 275-282.

[14] Chen Z F, Wang W G, Fu J Y. Vegetation response to precipitation anomalies under different climatic and biogeographical conditions in China. Scientific Reports, 2020, 10: 830.

[15] Li W, Pacheco-Labrador J, Migliavacca M, Miralles D, Hoek van Dijke A, Reichstein M, Forkel M, Zhang W, Frankenberg C, Panwar A, Zhang Q, Weber U, Gentine P, Orth R. Widespread and complex drought effects on vegetation physiology inferred from space. Nat Commun. 2023 Aug 15;14(1):4640.

[16] 苏永中, 赵哈林, 张铜会, 崔建恒. 不同强度放牧后自然恢复的沙质草地土壤性状特征. 中国沙漠, 2002, 22(4):26-31.

[17] 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. 植物生态学报, 2000, 24(5): 575-580.

[18] Huang J P, Ma J R, Guan X D, Li Y, He Y L. Progress in semi-arid climate change studies in China. Advances in Atmospheric Sciences, 2019, 36(9): 922-937.

[19] 陈洪松, 邵明安, 王克林. 黄土区荒草地和裸地土壤水分的循环特征. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1853-1857.

[20] 赵亚楠, 于露, 周玉蓉, 王红梅, 马千虎. 宁夏东部荒漠草原灌丛引入对土壤水分动态及亏缺的影响. 生态学报,2020,40(4):1305-1315.

[21] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. Soil Biology and Biochemistry, 1995, 27(6): 753-760.

[22] 孔茹洁, 卫洁, 陈清, 赵英, 冯星星. 土壤水分及其垂直分布对内蒙古草原冰草和冷蒿竞争的影响. 生态学报,2024,44(6):2495-2503.

[23] 张文文, 郭忠升, 宁婷, 白冬妹. 黄土丘陵半干旱区柠条林密度对土壤水分和柠条生长的影响. 生态学报,2015,35(3):725-732.

[24] 李云飞, 张雪, 刘智贤, 王培源, 刘秉青, 杨昊天, 刘立超, 吴旭东. 宁夏荒漠草原蒙古冰草功能性状和根际效应对土壤性状的响应.生态学报,2023,43(21):8683-8691.

[25] 杨阳, 刘秉儒. 荒漠草原不同植物根际与非根际土壤养分及微生物量分布特征. 生态学报,2015,35(22):7562-7570.

[26] 丁金梅, 王维珍, 米文宝, 侯凯元, 张喜旺, 赵亚楠, 文琦. 宁夏草地土壤有机碳空间特征及其影响因素. 生态学报,2023,43(5):1913-1922.

[27] 张玉琪, 吴玉鑫, 李强, 张德罡, 陈建纲, 柳小妮. 东祁连山不同退化程度高寒草甸土壤氮素与团聚体特征及关系研究. 草地学报,2021,29(10):2286-2293.

[28] 王学霞, 董世魁, 高清竹, 张勇, 胡国铮, 罗文蓉. 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. 草业学报,2018,27(6):1-9.

[29] 孙启兴, 杨晓东, 李浡睿, 孔翠翠, 伊力哈穆江·艾尼弯, 周洁, 吕光辉. 水力性状对荒漠植物群落物种多度分布格局的影响. 干旱区研究,2023,40(3):412-424.

[30] 王凯, 厉萌萌, 刘德权, 张凌基, 刘可欣, 许华, 唐亮, 何明珠, 张珂. 腾格里沙漠不同组成生物结皮特征及其对土壤酶活性的影响. 生态学报,2022,42(14):5859-5868.

[31] 杜娟, 黄海霞, 姚志勇, 宋苗苗, 侯倩倩. 不同恢复年限对柠条林地土壤养分含量和酶活性的影响. 草原与草坪, 2023, 43(1): 100-107.

[32] Shumway S W. Facilitative effects of a sand dune shrub on species growing beneath the shrub canopy. Oecologia, 2000, 124(1): 138-148.

[33] 黄容, 谢一平, 陈玉蓝, 张宗锦, 李冰, 王昌全. 水分条件对不同类型土壤氮矿化及酶活性的影响. 土壤,2022,54(5):950-957.

[34] Kuypers M M M, Marchant H K, Kartal B. The microbial nitrogen-cycling network. Nature Reviews Microbiology, 2018, 16(5): 263-276.

[35] 李阳, 徐小惠, 孙伟, 申颜, 任婷婷, 黄建辉, 王常慧. 不同形态和水平的氮添加对内蒙古草甸草原土壤净氮矿化潜力的影响. 植物生态学报,2019,43(2):174-184.

[36] Luo Q P, Gong J R, Xu S, Taogetao B, Wang Y H, Zhai Z W, Pan Y, Liu M, Yang L L. Effects of N and P additions on net nitrogen mineralization in temperate typical grasslands in Nei Mongol, China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(5): 480-492.

[37] Petrie M D, Collins S L, Litvak M E. The ecological role of small rainfall events in a desert grassland. Ecohydrology, 2015, 8(8): 1614-1622.

[38] 朱志成. 降雨量和频次改变对内蒙古典型草原土壤氮矿化和生产力的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.

[39] 张璞进, 黄建辉, 木兰, 单玉梅, 晔蕊罕, 温超, 常虹, 任婷婷, 陈世苹, 白永飞. 氮水添加对放牧背景下荒漠草原生产力的影响. 生态学报,2022,42(13):5458-5470.

[40] 汪景宽, 徐英德, 丁凡, 高晓丹, 李双异, 孙良杰, 安婷婷, 裴久渤, 李明, 王阳, 张维俊, 葛壮. 植物残体向土壤有机质转化过程及其稳定机制的研究进展. 土壤学报, 2019, 56(3): 528-540.

[41] 刘京伟, 李香真, 姚敏杰. 植物根际微生物群落构建的研究进展. 微生物学报, 2021, 61(2): 231-246.

[42] 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.

[43] Chen J, Xiao G L, Kuzyakov Y, Jenerette G D, Ma Y, Liu W, Wang Z F, Shen W J. Soil nitrogen transformation responses to seasonal precipitation changes are regulated by changes in functional microbial abundance in a subtropical forest. Biogeosciences, 2017, 14(9): 2513-2525.

[44] Knapp A K, Beier C, Briske D D, Classen A T, Luo Y Q, Reichstein M, Smith M D, Smith S D, Bell J E, Fay P A, Heisler J L, Leavitt S W, Sherry R, Smith B, Weng E S. Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems. BioScience, 2008, 58(9): 811-821.

[45] Dijkstra F A, He M, Johansen M P,et al.Plant and microbial uptake of nitrogen and phosphorus affected by drought using 15 N and 32 P tracers. Soil Biology & Biochemistry, 2015, 82:135-142.

[46] Nielsen U N, Ball B A.Impacts of altered precipitation regimes on soil communities and biogeochemistry in arid and semi-arid ecosystems. Global Change Biology, 2015, 21.

[47] 周建斌, 陈竹君, 李生秀. 土壤微生物量氮含量、矿化特性及其供氮作用. 生态学报, 2001, 21(10): 1718-1725.

[48] 王红, 范志平, 邓东周, 陈德龙, 孙学凯, 高俊刚, 曾德慧. 不同环境因子对樟子松人工林土壤有机碳矿化的影响. 生态学杂志, 2008, 27(9):7.

[49] Jansson J K, Hofmockel K S.Soil microbiomes and climate change. Nature Reviews Microbiology, 2020, 18(1):35-46.