

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.02.040

CSTR:32310.14.stbxb.2025.02.040

马大卫, 马彦军, 郭咏淳, 等. 河西走廊盐碱地 4 种典型植被类型土壤理化性质和酶活性特征[J]. 水土保持学报, 2025, 39(2): 102-110.

MA Dawei, MA Yanjun, GUO Yongchun, et al. Soil physicochemical properties and enzyme activity characteristics of four typical vegetation types in saline-alkali lands of the Hexi corridor[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(2): 102-110.

河西走廊盐碱地 4 种典型植被类型土壤理化性质和酶活性特征

马大卫¹, 马彦军¹, 郭咏淳¹, 曾雨¹, 马瑞¹, 祝建刚²

(1. 甘肃农业大学林学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省祁连山水源涵养林研究院, 甘肃 张掖 734000)

摘要: [目的] 探究河西走廊荒漠盐碱地 4 种植被类型土壤理化性质和酶活性变化及其影响因素, 为荒漠盐碱地土壤养分循环和调控机制提供理论依据。[方法] 以河西走廊荒漠盐碱地土壤为研究对象, 选取黑果枸杞 (*Lycium ruthenicum* Murr.) 单一群落 (HH)、黑果枸杞和芦苇 (*Phragmites australis*) 群落 (HL)、黑果枸杞和骆驼刺 (*Alhagi camelorum* Fisch.) 群落 (HT)、黑果枸杞和柽柳 (*Tamarix chinensis* Lour.) 群落 (HC) 4 种典型植被类型。每个植被类型设置 3 个重复样地, 通过野外调查和室内分析相结合的方法, 对该 4 种植被类型下土壤理化性质 (有机碳、全氮、全磷) 和酶活性 (脲酶、碱性磷酸酶、硝酸还原酶、亚硝酸还原酶) 进行测定, 采用方差分析和冗余分析评估土壤理化性质和酶活性差异, 并分析其影响因素。[结果] 在河西走廊荒漠盐碱地 4 种不同植被类型中, 土壤有机碳随土层深度的加深而增加, HC 中最高, HH 中最低, 差异显著 ($p < 0.05$); 土壤全氮随土层深度的加深而减弱, HH 中最高, HC 中最低, 差异显著 ($p < 0.05$); 全磷无显著变化 ($p > 0.05$)。脲酶、碱性磷酸酶、硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性随土层深度的加深呈下降趋势, 表现出表聚现象。碱性磷酸酶、硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性在不同植被类型间差异显著 ($p < 0.05$), 分别在 HL、HH 和 HT 中最高, 在 HT、HC 和 HH 中最低。全氮与脲酶和硝酸还原酶活性呈显著正相关; 在 20~40 cm 土层中, 有机碳与脲酶和硝酸还原酶活性呈显著负相关。[结论] 不同植被类型和土层变化引起土壤理化性质显著变化, 进而调控土壤酶活性的变化及分布, 其中土壤全氮和有机碳是影响土壤酶活性的关键因素, 能够较好地解释其分布规律和变化特征。

关键词: 盐碱地; 植被类型; 理化性质; 土壤酶活性

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0102-09

Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activity Characteristics of Four Typical Vegetation Types in Saline-alkali Lands of the Hexi Corridor

MA Dawei¹, MA Yanjun¹, GUO Yongchun¹, ZENG Yu¹, MA Rui¹, ZHU Jiangang²

(1. College of Forestry, Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Qilian Mountain Water Conservation Forest Research Institute, Zhangye, Gansu 734000, China)

Abstract: [Objective] To explore the changes of soil physical and chemical properties and enzyme activities of four vegetation types in desert saline-alkali lands in the Hexi Corridor and their influencing factors, and to provide a theoretical basis for soil nutrient cycling and regulation mechanism in desert saline-alkali lands. [Methods] Taking the desert saline-alkali soil in the Hexi Corridor as the research object, four typical vegetation types, including *Lycium ruthenicum* Murr. single community (HH), *L. ruthenicum* and *Phragmites australis* community (HL), *L. ruthenicum* and *Alhagi camelorum* Fisch. community (HT), *L. ruthenicum* and *Tamarix chinensis* Lour. community (HC), were selected. Three replicate plots were set up for each vegetation type. Through the combination of field investigation and indoor analysis, soil physical and chemical properties (including organic carbon, total nitrogen, total phosphorus) and enzyme activities (including urease, alkaline phosphatase, nitrate

收稿日期: 2024-11-26

修回日期: 2024-12-29

录用日期: 2025-01-03

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-01-26

资助项目: 甘肃省高校产业支撑计划项目 (2023CYZC-46); 甘肃省白银市景泰县盐碱地综合利用试点项目 (JTYJDSDXM-SG-02); 甘肃省自然科学基金项目 (24JRRG016); 国家自然科学基金项目 (31760244, 31060215)

第一作者: 马大卫 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事林业研究。E-mail: 1047405943@qq.com

通信作者: 马彦军 (1975—), 男, 教授, 博士, 主要从事植物种质资源调查收集、保存研究。E-mail: mayanjun@gsau.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

reductase, nitrite reductase) of the four vegetation types were measured. Variance analysis and redundancy analysis were used to evaluate the differences in soil physical and chemical properties and enzyme activities, and the influencing factors were analyzed. [Results] In the soil of the four different vegetation types in the Hexi Corridor, organic carbon content increased with the increase of soil depth, being the highest in HC and the lowest in HH, and the difference was significant ($p < 0.05$). Total nitrogen content decreased with the increase of soil depth, being the highest in HH and the lowest in HC, and the difference was significant ($p < 0.05$). There was no significant change in total phosphorus ($p > 0.05$). The activities of urease, alkaline phosphatase, nitrate reductase and nitrite reductase decreased with the increase of soil depth, showing the phenomenon of surface aggregation. The activities of alkaline phosphatase, nitrate reductase and nitrite reductase were significantly different among different vegetation types ($p < 0.05$), being the highest in HL, HH and HT, and the lowest in HT, HC and HH, respectively. Total nitrogen content was significantly positively correlated with urease and nitrate reductase activities ($p < 0.05$). In the 20—40 cm soil layer, organic carbon content was significantly negatively correlated with urease and nitrate reductase activities ($p < 0.05$). [Conclusion] The changes of different vegetation types and soil layers cause significant changes in soil physical and chemical properties, and then regulate the changes and distribution of soil enzyme activities. Soil total nitrogen and organic carbon contents are the key factors affecting soil enzyme activities, and can better explain the distribution and change characteristics of soil enzyme activities.

Keywords: saline-alkali land; vegetation type; physicochemical properties; soil enzyme activities

Received: 2024-11-26

Revised: 2024-12-29

Accepted: 2025-01-03

Online (www.cnki.net): 2025-01-26

我国盐碱地分布广泛,是典型的中低产土壤类型之一,占全国耕地面积约6.62%^[1]。近年来土地荒漠化和退化问题日益严重,盐碱地面积在持续扩大,尤其是干旱和半干旱地区,如我国甘肃河西走廊。盐渍化土壤具有盐分和碱性物质积累的特点,具有较强的生态恢复难度和土地利用困境,对生态环境、农业生产和生物多样性构成严重威胁^[2]。因此,如何治理、改良和利用该类型土壤是我国研究者亟待解决的问题。

土壤的理化性质对生态系统功能、植物生长、土壤微生物及酶活性具有关键性作用^[3],如土壤的有机质、全氮、有效磷和速效钾质量分数直接影响植物的养分供给;土壤中有有机质可以为微生物提供碳源和能量,进而影响酶活性及土壤呼吸作用等。土壤酶是土壤中各种生命活动的重要参与者,在有机物质分解与转化过程中发挥关键驱动作用。土壤酶通过参与一系列的生物化学反应,促进土壤中有机的分解,营养元素的循环和植物生长。例如,脲酶参与氮的循环,磷酸酶释放土壤中的磷元素等。土壤酶来源广泛,主要包括植物根系分泌物、土壤动物的活性影响、微生物的代谢产物及其分解后的残留物。这些多种来源共同作用,支撑土壤中酶活性的维持和生态功能的实现。土壤酶活性受到土壤理化特性、植物种类、水热条件等多因子的共同作用,常被用作土壤质量、养分循环和微生物活性的重要指

示剂^[4]。

不同植被类型对土壤理化性质和酶活性的影响具有复杂的联动关系,既通过直接生物作用影响酶活性,还通过改变土壤理化性质进一步调节其作用。近年来,不同植被类型土壤酶活性、理化性质的研究已成为热点。然而,关于盐碱地土壤的研究我国学者多集中于基本理化性质、植物适应机制等方面^[5-6],但不同植被类型对盐碱地土壤理化性质和酶活性的调控作用的研究尚显不足。刘晴虞等^[7]研究发现,杨树纯林更有利于提高土壤氮含量和酶活性;杨娟等^[8]研究发现,贺兰山亚高山草甸中酶活性均大于其他植被类型。尽管在森林和草原生态系统中已有较多相关研究,但关于我国荒漠盐碱地的报道鲜有所闻。甘肃省盐碱土分布广泛,主要集中在河西走廊、黄河沿岸等地区,各地区不但面积有别,而且盐分组成和植被类型存在差异,土壤理化性质和酶活性变化规律尚不清楚。因此,仍需对该地区不同植被类型下土壤理化性质和酶活性分布特征进一步研究。

黑果枸杞(*Lycium ruthenicum* Murr.)、黑果枸杞和骆驼刺(*Alhagi camelorum* Fisch.)、黑果枸杞和柽柳(*Tamarix chinensis* Lour.)、黑果枸杞和芦苇(*Phragmites australis*)4种植物群落在河西走廊盐碱地中具有代表性^[9],在盐碱地中分布广泛,其中黑果枸杞作为一种耐旱、耐盐的典型植物,是研究盐渍化

土壤特征的重要对象^[10]。而与黑果枸杞共生的其他植物(骆驼刺、芦苇、怪柳)在不同条件下的相互作用,能为盐碱地土壤质量变化、营养循环和微生物活动提供多样化背景。本研究选取该 4 种植物群落的土壤,分析其理化性质和酶活性变化,以探讨 4 种植被类型对土壤酶活性的影响及其调控因素,旨在明晰荒漠盐碱地土壤理化性质和酶活性变化情况及影响因素,为荒漠盐碱地土壤酶活性变化、养分循环模式和调节机制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

4 个试验地点位于河西走廊中西部(39°58′28″~40°25′77″N, 98°45′93″~99°26′12″E),海拔 1 420~1 400 m,区域气候为温带大陆性气候,主要特征为戈壁地貌。年平均气温为 6.6~9.6℃,年降水量 120.8~430.1 mm,年蒸发量 1 567.9~2 631.3 mm,年日照时间可达 2 600~3 250 h^[11]。4 个试验地土壤均为灰棕漠土,土表层具有肉眼可见白色盐渍,土壤干燥。植被类型以半灌木和荒漠草本为主,各试验地点的植物群落分别为黑果枸杞单一群落、黑果枸杞和骆驼刺群落、黑果枸杞和怪柳群落、黑果枸杞和芦苇群落。

1.2 试验设计

2023 年 8 月,在 4 个试验地点随机布设 3 个面积为 20 m×20 m 的标准样方,共 12 个样方。在每个样方内采用五点混合法取样,用直径 4 cm 的土钻分别采集 0~10、10~20、20~40 cm 土层深度的土壤样品,放入自封袋中并冷藏运输至实验室。土壤样品在实验室通过 2 mm 筛网筛分后,分为 2 组,其中一组置于阴凉环境中自然风干,测定其化学性质;另一组置于 0~6℃的冷藏条件下,用于检测土壤酶活性和其他相关指标。

1.3 土壤化学性质及酶活性测定

采用重铬酸钾氧化外加加热法测定有机碳(SOC),半微量凯氏定氮法测定全氮(TN),氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定全磷(TP)^[12];采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定脲酶(Ure);采用磷酸苯二钠比色法,37℃恒温培养箱培养 2 h 测定碱性磷酸酶(ALP);硝酸还原酶(NR)和亚硝酸还原酶(NiR)活性采用苯磺酸-醋酸-α-苯胺比色法测定^[13]。

1.4 数据处理

采用 Excel 和 SPSS 软件对数据进行统计分析。利用单因素方差分析(One-way ANOVA)比较不同理化性质及酶活性差异($\alpha=0.05$);用双因素方差分析检验 4 种植被类型和不同土层下土壤理化性质和酶活性的交互作用;利用 Origin 2022 软件制作图表并绘制相

关热图;利用 Canoco 5.0 软件进行冗余分析(RDA)。

2 结果与分析

2.1 4 种植被类型中土壤理化性质变化

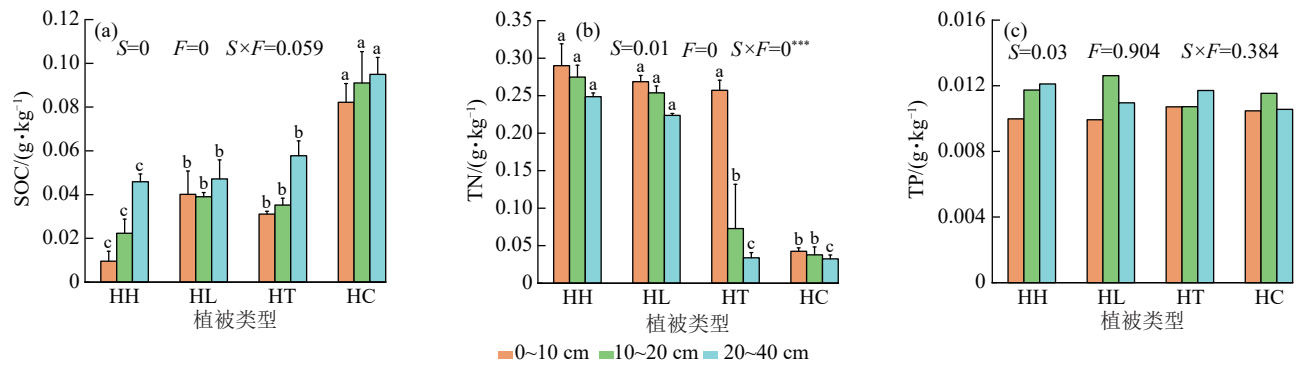
从图 1 可以看出,在 0~10、10~20、20~40 cm 土层中,HC 群落中有机碳质量分数最高,分别为 0.082、0.091、0.094 g/kg;HH 中有机碳质量分数最低,分别为 0.009、0.022、0.045 g/kg,差异显著($p<0.05$)。HC 群落中全氮质量分数最低,分别为 0.028、0.031、0.032 g/kg;HH 群落中全氮质量分数最高,分别为 0.248、0.274、0.289 g/kg,差异显著($p<0.05$)。在 4 种植被类型中,20~40 cm 土层的有机碳质量分数整体高于 0~10、10~20 cm 土层,但差异不显著($p>0.05$),仅在 HH 群落中,20~40 cm 土层中有机碳质量分数大于 0~10 cm 差异显著($p<0.05$);HH 群落与 HL 群落中,20~40 cm 土层中全氮质量分数整体比 0~10、10~20 cm 土层中高;在 HT 群落中,全氮质量分数随土层加深而显著降低($p<0.05$)。全磷质量分数在 4 种植被类型和土层间并无显著差异($p>0.05$)。

通过植被类型和土层的交互作用对其土壤理化性质的双因素方差分析表明,4 种植被类型对土壤有机碳、全氮质量分数产生显著影响($p<0.05$),但对全磷质量分数无显著影响。土层对土壤有机碳、全氮和全磷质量分数影响显著($p<0.05$)。土层与植被类型交互作用对土壤全氮质量分数有显著影响($p<0.05$)。

2.2 4 种植被类型中土壤酶活性变化

由图 2 可以看出,各植被类型土壤脲酶活性为 0.007~0.483 mg/(g·d),土层之间存在显著差异($p<0.05$),整体上随着土层深度增加而降低,0~10 cm 土层脲酶活性显著高于其他 2 层($p<0.05$)。各植被类型土壤碱性磷酸酶活性为 0.043~0.868 mg/kg,在 4 种植被类型和 3 种土层中存在显著差异($p<0.05$),在 HL 中最高,HT 中最低;碱性磷酸酶活性在 HH、HT 和 HC 植被类型中,随土层加深而降低。4 种植被类型中硝酸还原酶活性为 0.53~2.42 μ g/(g·d),在 4 种植被类型和 3 种土层中存在显著差异($p<0.05$),在各植被类型中随着土层加深而减弱,0~10 cm 土层硝酸还原酶活性均高于其他 2 个土层($p<0.05$),在 4 种植被类型中,其活性为 HH>HL>HT>HC,差异显著($p<0.05$)。4 种植被类型中亚硝酸还原酶活性为 0.002~0.02 μ g/(g·h),在 4 种植被类型和 3 种土层中存在显著差异($p<0.05$),其活性随着土层加深而降低,在 HT 中最高,HH 中最低。

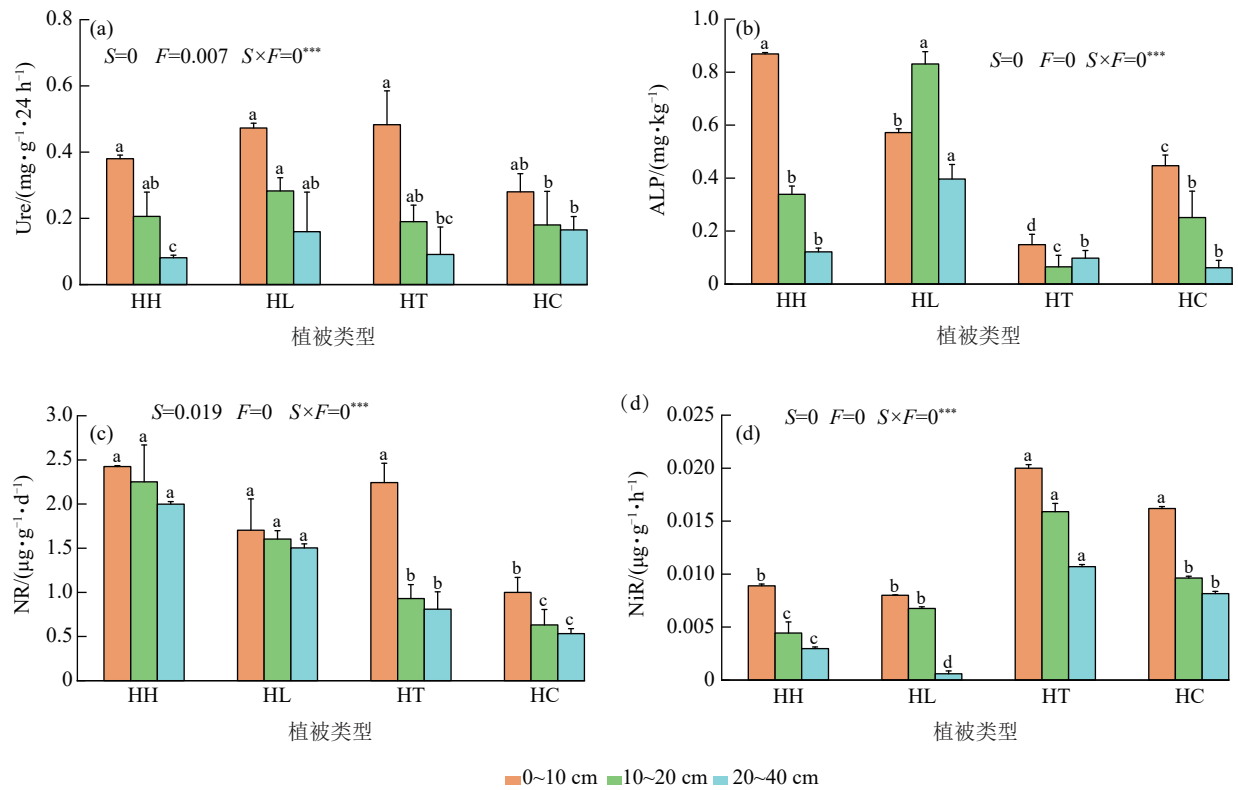
双因素方差分析表明,土层对脲酶、碱性磷酸酶、硝酸还原酶和亚硝酸还原酶影响显著($p<0.05$);植被类型对脲酶、碱性磷酸酶、硝酸还原酶和亚硝酸还原酶产生显著影响($p<0.05$);土层与植被类型的交互作用对脲酶、碱性磷酸酶、硝酸还原酶和亚硝酸还原酶产生显著影响($p<0.05$)。



注:不同小写字母表示不同植被带相同土层间差异显著($p<0.05$);HH为黑果枸杞单一植物群落;HL为黑果枸杞和芦苇植物群落;HT为黑果枸杞和骆驼刺植物群落;HC为黑果枸杞和怪柳植物群落; S 为土壤; F 为植被; SOC 为有机碳; TN 为全氮; TP 为全磷;***表示交互作用在0.05水平上差异显著。

图 1 4种植被类型土壤基本理化性质

Fig. 1 Basic physical and chemical properties of soils at four vegetation types



注:不同小写字母表示不同植被带相同土层间差异显著($p<0.05$);HH为黑果枸杞单一植物群落;HL为黑果枸杞和芦苇植物群落;HT为黑果枸杞和骆驼刺植物群落;HC为黑果枸杞和怪柳植物群落; S 为土壤; F 为植被; Ure 为脲酶; ALP 为碱性磷酸酶; NR 为硝酸还原酶; NiR 为亚硝酸还原酶;***表示交互作用在0.05水平上差异显著。

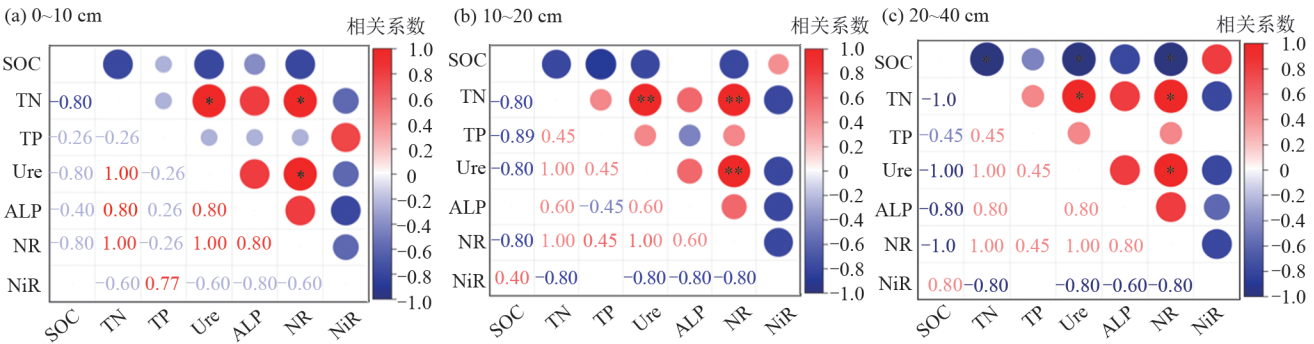
图 2 4种植被类型土壤酶活性

Fig. 2 Soil enzyme activities in four vegetation types

2.3 土壤酶活性与土壤理化性质相关性分析

从图 3 可以看出,在 4 种植被类型中,0~10 cm 土层,全氮质量分数与脲酶和硝酸还原酶活性呈显著正相关($p<0.05$),而有机碳质量分数与土壤各酶活性相关性较弱且不显著($p>0.05$);10~20 cm 土层中,全氮质量分数与脲酶和硝酸还原酶呈极显著正相关($p<0.01$),有机碳质量分数和各酶活性呈负相关,差异不显著($p>0.05$);20~40 cm 土层中,全氮质量分数与

脲酶和亚硝酸还原酶呈显著正相关($p<0.05$),有机碳对脲酶和硝酸还原酶的影响呈显著负相关($p<0.05$)。



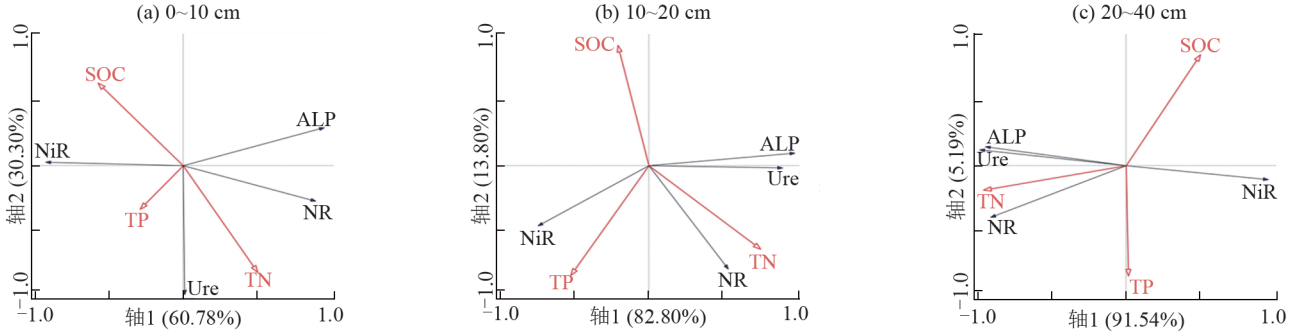
注: SOC 为有机碳; TN 为全氮; TP 为全磷; Ure 为脲酶; ALP 为碱性磷酸酶; NR 为硝酸还原酶; NiR 为亚硝酸还原酶; * 表示 $p<0.05$; ** 表示 $p<0.01$ 。

图 3 不同土层土壤理化性质与土壤酶活性的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis between soil physicochemical properties and soil enzyme activity in different soil layers

由土壤理化性质和酶活性冗余分析(图4)可知,在不同植被类型,0~10 cm 土层中,土壤理化性质对土壤酶活性重要性由大到小为全氮、有机碳、全磷,其中全氮对脲酶和硝酸还原酶重要性的影响达到显著水平($p<0.05$),而其他理化性质对土壤酶活性的重要性影响并不显著;10~20 cm 土层中,全氮质量分数对脲酶活性和硝酸还原酶活性表现为投影面积大,方向相同,

分别对二者活性的重要性影响呈极显著正相关($p<0.01$),有机碳与各酶活性呈负相关;在20~40 cm 土层中,脲酶活性和硝酸还原酶活性与全氮质量分数夹角为锐角且方向一致,呈显著正相关($p<0.05$),与有机碳质量分数呈负相关。20~40 cm 土层中,土壤全氮和有机碳对酶活性的影响呈显著水平,但全磷对土壤酶活性影响未达到显著水平(表1)。



注: SOC 为有机碳; TN 为全氮; TP 为全磷; Ure 为脲酶; ALP 为碱性磷酸酶; NR 为硝酸还原酶; NiR 为亚硝酸还原酶。

图 4 不同土层土壤酶活性与土壤理化性质的冗余分析 (RDA)

Fig. 4 Redundancy analysis (RDA) of soil enzyme activity and soil physicochemical properties in different soil layers

表 1 不同土层土壤理化性质对土壤酶活性的贡献率

Table 1 Contribution rate of soil physicochemical properties to soil enzyme activity in different soil layers

理化性质	0~10 cm			10~20 cm			20~40 cm		
	贡献率%	F	p	贡献率%	F	p	贡献率%	F	p
SOC	17.8	3.3	0.066	21.5	7.4	0.426	67.8	11.9	0.002
TN	72.3	30.5	0.002	68.6	24.2	0.002	85.6	24.6	0.002
TP	14.6	7.8	0.168	9.9	1.9	0.828	7.8	0.6	0.926

3 讨论

3.1 4种植被类型土壤理化性质变化的影响

本研究中,有机碳质量分数在4种土层未表现较大差异,说明该地土壤有机碳质量分数受其他影响因子大于土层的变化。0~10 cm 土层中有机碳质量分数在HH群落中明显小于HC植物群落,原因可能是黑果枸杞的根系多数分布在该土层,通过根系分

泌有机酸等物质,改善土壤结构,增强土壤的保水性和透气性,在一定程度上降低盐分浓度,进而促进微生物活动,加快有机碳矿化,与郭珂好等^[14]研究结果相符,进一步证明,黑果枸杞在0~10 cm 土层中对有机碳矿化的影响;另一原因可能是黑果枸杞凋落物中木质素质量分数高,分解周期长,养分解速率慢的结果。本研究中,4种植被类型下土壤全氮质量分数在0~10 cm 土层中最高,说明该地全氮有表聚现

象,类似趋势也在其他相关研究中被观察到,如弓文艳等^[15]研究指出,林分土壤全氮质量分数变化具有明显的垂直分布特征,随土层深度的增加而显著减少;徐国荣等^[16]研究发现,不同退化植被中土壤全氮质量分数随土层深度的增加而降低。在黑果枸杞和骆驼刺植物群落中,全氮质量分数随土层加深显著降低,可能是由于土层加深,有机质输入逐渐减少,深层土壤中微生物的养分获取受限,从而影响其活性和代谢过程。另有研究^[17]发现,当植物被盐碱、干旱等环境因素胁迫时,通常减少植物各部分生物量来适应胁迫环境。相较于其他植物,骆驼刺通过减少地下生物量来适应胁迫环境的程度大于减少地上生物量,一定程度上降低地下部分养分的积累和循环速率,因此,全氮质量分数在该植物群落中随土层加深而显著降低。有研究^[18]表明,土壤中的磷元素更容易与铁、铝等阳离子结合,形成不易溶解的磷酸盐,导致土壤全磷的有效性降低,无法被植物充分利用。本研究中,全磷质量分数在4种植被类型和土层中没有显著变化规律,说明磷酸盐结构的稳定性,即受土层和植被类型影响较弱;其次,含磷矿物质由于沉积作用的影响,在植物所需的各种营养元素中,其在风化壳中的迁移性极低,因此全磷质量分数未发生显著变化。

3.2 4种植被类型土壤酶活性变化的影响

酶作为一种重要的生化反应物质,其活力是衡量土壤质量的重要指标^[19]。土壤脲酶是水解土壤中有机质的重要酶类,可将有机物转变成被植物吸收利用的无机氮,从而促进植物生长发育^[20]。本研究中,4种植被类型表层土壤脲酶活性高于深层土壤,与王彦峰等^[21]对黄土高原中脲酶活性研究结果一致,其原因在于随着土层加深,土壤密度变小,孔隙和通气能力变差,有机质养分也随之下落,抑制微生物的生长和新陈代谢,从而导致脲酶活性下降。有研究^[22]表明,不同植被类型可能通过多种途径直接或间接影响土壤内部环境、物理性质及养分动态,从而进一步改变土壤酶活性。本研究中土壤脲酶活性在4种植被类型中差异却不显著,可能是因为根际之外的土壤中,植被类型对脲酶活性的影响被弱化,导致不同植被类型下的微生物群落功能趋同^[23],从而使脲酶活性在不同植被类型中差异不显著。LI^[24]研究发现,如果研究区土壤的基础理化性质较为一致,植被类型对土壤脲酶活性的影响会被削弱。本研究位于荒漠盐碱地区,土壤的盐渍化使得该地区植被类型单一,土壤养分质量分数较低等,这些因素共同作用导致不同植被类型土壤理化性质变化较为

一致,进而抑制土壤脲酶的活性,在4种植被类型下未表现出显著差异,表明脲酶活性受到土壤环境条件的强烈限制,而非主要由植被类型决定。另外,该研究区土壤pH较高,高pH通过影响酶结构变化、抑制微生物活性等一系列作用使土壤脲酶活性降低。土壤硝酸还原酶和亚硝酸还原酶是影响土壤脱氮效率的关键酶,可以减少土壤中氮素的损失,使得氮素能够更好地被植物利用^[25]。已有研究^[26]表明,导致不同植被类型下土壤酶活性变化的原因存在于植物根系组成和根系分泌物存在差异,并且凋落物的种类和数量有显著差异。本研究也发现,硝酸还原酶和亚硝酸还原酶在4种植被类型中表现出明显差异,与LIU^[27]研究结果相符。本研究发现,相较于其他3种植物群落,亚硝酸还原酶活性在HH群落中变化差异比硝酸还原酶更明显,是因为与亚硝酸还原酶相关的反硝化菌对HH群落中温度、水分、植物根系分泌物等更加敏感^[28]。然而,土壤有机质为土壤酶促反应提供重要的底物来源,在该盐碱地4种植物群落中,3个土层的有机质质量分数较低,导致土壤微生物多能利用的底物匮乏,且土壤通透性差,因此硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性不高。土壤碱性磷酸酶能将有机磷化合物矿化,从而释放无机磷,为微生物和植物提供磷^[29]。本研究不同土层下,即使全磷质量分数没有显著变化,土壤碱性磷酸酶活性却表现出显著差异,即随土层加深而降低,与廖远行等^[30]研究喀斯特地区不同植被类型下碱性磷酸酶活性特征相一致。原因可能是不同植被类型土壤中可用磷质量分数差异所致,当可用磷质量分数较高的情况下,植物根系对这部分磷进行直接吸收,降低碱性磷酸酶活性。不仅如此,在不同植被类型下,碱性磷酸酶活性在HT中最低,原因是在盐碱胁迫下骆驼刺的抗逆机制可能不同于其他植物。一般而言,植物根系作为植物地下生物量最主要的储存空间,同时也是快速生长的重要部位,内部富含各类元素、有机质及相关酶,在逆境胁迫条件下时,这些养分和生化成分协同作用,共同抵御环境的恶劣影响^[31]。然而,骆驼刺则采取一种特殊的策略,即通过显著降低地下生物量养分的循环速率和积累水平,甚至暂停根系生长来应对胁迫。与此同时,磷元素及其相关的酶(如碱性磷酸酶)在根系中大量分布可能影响其抗逆性。基于此,根系内代谢活动可能受到抑制,进而导致碱性磷酸酶活性显著降低。

本研究中,4种植被类型土壤脲酶、碱性磷酸酶、硝酸还原酶和亚硝酸还原酶多为0~10 cm高于10~20、20~40 cm土层,一方面说明土壤表层水热条件和

通风条件好,植被根系分布多,促进土壤代谢产酶能力;另一方面,说明这 3 种酶都具有表聚现象,与 CHEN 等^[32]研究结果一致。

3.3 土壤理化性质对酶活性的调控作用

本研究中,4 种植被类型 0~10、10~20、20~40 cm 土层中,土壤全氮质量分数与脲酶和硝酸还原酶活性呈显著正相关,与谷晓楠等^[33]研究结果一致。说明土壤全氮水平对脲酶和硝酸还原酶活性有积极作用,土壤中全氮质量分数可以为酶促反应提供底物和活动场所,进而促进酶的合成。已有研究^[34]表明,土壤有机碳质量分数的增加可以为微生物提供碳源,促进脲酶,硝酸还原酶等活性。本研究中,4 种植被类型 20~40 cm 土层中,土壤有机碳质量分数与脲酶和硝酸还原酶却呈显著负相关,原因可能是土壤中的盐分,pH 等环境因素过高,对微生物群落及其酶活性产生抑制作用,这种情况下,即使土壤中有机碳质量分数高,脲酶和硝酸还原酶活性也可能下降,其次在盐碱地中,土壤的高盐度和碱性环境可能进一步加剧这种负相关关系。本研究围绕 4 种植被类型下土壤的基本理化特性(有机质、全氮、全磷),重点分析酶活性的分布特征,并探讨其与理化性质的相互联系。然而,土壤酶活性与环境因素之间的相互关系极为复杂。例如,氮素的形态及其循环,微生物群落结构及养分循环动态等多重因素。因此,未来的研究应更加关注环境因素对土壤酶活性的多维度影响,深入分析不同植被类型微生物群落结构及其代谢特性。同时,结合研究区域的生态特点,进一步揭示多种因素对土壤酶活性的响应机制,以期全面了解河西走廊盐碱地土壤生态功能在不同植被类型下的动态变化。

4 结 论

1)在河西走廊 4 种植被类型土壤中,有机碳随质量分数随土层加深而增加,且在 HC 中质量分数最高,在 HH 中最低;全氮质量分数随土层加深而减弱,在 HH 中最高,在 HC 中最低;而全磷质量分数无显著变化规律。

2)在 4 种植被类型中,脲酶、碱性磷酸酶、硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性均随土层的加深而减弱,即该 4 种酶具有表聚现象。其次,碱性磷酸酶,硝酸还原酶和亚硝酸还原酶在不同植被类型中表现出显著差异,分别在 HL、HH、HT 中最高,在 HT、HC、HH 中最低。

3)在 4 种植被类型不同土层中,全氮质量分数对脲酶和硝酸还原酶活性影响呈显著正相关,对 2 种酶活性具有促进作用;在不同植被类型 20~40 cm 土层中,有机碳质量分数对脲酶和硝酸还原酶活性影响呈显著负相关,对 2 种酶活性有抑制作用。

参考文献:

- [1] 杨劲松,姚荣江,王相平,等.中国盐渍土研究:历程、现状与展望[J].土壤学报,2022,59(1):10-27.
YANG J S, YAO R J, WANG X P, et al. Research on salt-affected soils in China: History, status quo and prospect[J].Acta Pedologica Sinica,2022,59(1):10-27.
- [2] LIU M, ZENG F, SONG S. Status and influencing factors of soil salinization in China: A review[J].Sustainability,2019,11(1):e33.
- [3] 蒋嘉瑜,刘任涛,张安宁.干旱与半干旱荒漠草原区柠条灌丛土壤分形维数与理化性质对比分析[J].水土保持研究,2021,28(4):54-61.
JIANG J Y, LIU R T, ZHANG A N. Comparative analysis of soil fractal dimension and soil physical and chemical properties between *Caragana korshinskii* shrub plantations in arid and semi-arid desert steppe [J]. Research of Soil and Water Conservation,2021,28(4):54-61.
- [4] 杨佳鹤,何进宇,石伟业,等.粉垄耕作对土壤养分及酶活性的影响[J].中国农业大学学报,2024,29(12):237-253.
YANG J H, HE J Y, SHI W Y, et al. Effects of Fentlong cultivation on soil nutrients and enzyme activities[J]. Journal of China Agricultural University,2024,29(12):237-253.
- [5] 李永涛,魏海霞,王莉莉,等.凋落物输入变化对黄河三角洲柽柳人工林土壤有机碳及其组分的影响[J].东北林业大学学报,2024,52(7):64-70.
LI Y T, WEI H X, WANG L L, et al. Effects of litter input changes on soil organic carbon and its fractions in *Tamarix chinensis* plantation in the Yellow River Delta[J]. Journal of Northeast Forestry University,2024,52(7):64-70.
- [6] 刘昊,麻仲花,刘威帆,等.不同耕作方式配施有机肥对盐碱地玉米根际土壤微生物群落的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2025,33(1):25-39.
LIU H, MA Z H, LIU W F, et al. Effects of different tillage methods combined with organic fertilizer on microbial community in rhizosphere soil of maize in saline-alkali land[J].Chinese Journal of Ecological Agriculture,2025,33(1):25-39.
- [7] 刘晴虞,王磊,史经攀,等.平原沙土区河岸带不同植被类型对土壤氮组分及酶活性的影响[J].水土保持研究,2023,30(5):85-91.
LIU Q Y, WANG L, SHI J P, et al. Effects of different vegetation types on soil nitrogen fractions and enzyme activity in riparian zones of plain sandy area[J].Research of Soil and Water Conservation,2023,30(5):85-91.
- [8] 杨娟,刘占军,任振强,等.贺兰山西坡不同植被类型土

- 壤理化性质和酶活性特征[J].浙江农林大学学报, 2024, 41(4): 787-796.
- YANG J, LIU Z J, REN Z Q, et al. Characteristics of soil physicochemical properties and enzyme activities in different vegetation types on the western slope of Helan Mountain[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2024, 41(4): 787-796.
- [9] 李善家, 王兴敏, 刘海峰, 等. 河西走廊荒漠植物多样性及其对环境因子的响应[J]. 生态环境学报, 2023, 32(3): 429-438.
- LI S J, WANG X M, LIU H F, et al. Diversity of desert plants in Hexi Corridor and its response to environmental factors[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023, 32(3): 429-438.
- [10] 唐卫东, 魏林源, 李得禄, 等. 河西走廊荒漠草地黑果枸杞群落结构特征及土壤性质研究[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(3): 24-30.
- TANG W D, WEI L Y, LI D L, et al. Community structure characteristics and soil properties of *Lycium ruthenicum* in desert grassland in Hexi Corridor[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(3): 24-30.
- [11] YANG L S, FENG Q, ADAMOWSKI J F, et al. Causality of climate, food production and conflict over the last two millennia in the Hexi Corridor, China[J]. Science of the Total Environment, 2020, 713: e136587.
- [12] 王晶晶. 热带和亚热带不同森林类型土壤胞外酶活性及计量关系的纬度分异规律及驱动因素[D]. 福州: 福建师范大学, 2022.
- WANG J J. Latitudinal differentiation law and driving factors of extracellular enzyme activity and measurement relationship in soils of different tropical and subtropical forest types[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2022.
- [13] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 320-338.
- GUAN S Y. Soil enzyme and its research method[M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1986: 320-338.
- [14] 郭珂好, 冯雷, 李云, 等. 黑果枸杞改良塔里木河上游阿拉尔垦区盐碱地的效果分析[J]. 中国土壤与肥料, 2023(12): 70-77.
- GUO K Y, FENG L, LI Y, et al. Analysis of improvement saline-alkali land of *Alar reclamation* area in the upper reaches of Tarim river by *Lycium ruthenicum*[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(12): 70-77.
- [15] 弓文艳, 陈丽华, 郑学良. 基于不同林分类型下土壤碳氮储量垂直分布[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 152-157.
- GONG W Y, CHEN L H, ZHENG X L. Vertical distributions of soil carbon and nitrogen reserves in different forests[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(1): 152-157.
- [16] 徐国荣, 马维伟, 宋良翠, 等. 植被不同退化状态下杂海湿地土壤氮含量及酶活性特征[J]. 生态学报, 2020, 40(24): 8917-8927.
- XU G R, MA W W, SONG L C, et al. Characteristics of soil nitrogen content and enzyme activity in Gahai wetland under different vegetation degradation conditions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(24): 8917-8927.
- [17] 徐梦琦, 高艳菊, 张志浩, 等. 骆驼刺叶片和根系主要功能性状对水分胁迫的适应[J]. 草业科学, 2021, 38(8): 1559-1569.
- XU M Q, GAO Y J, ZHANG Z H, et al. Adaptation of the main functional trait of *Alhagi sparsifolia* leaves and roots to soil water stress[J]. Pratacultural Science, 2021, 38(8): 1559-1569.
- [18] ZHAO Y. Phosphorus transformation and availability in weathered soils[J]. Geoderma, 2019, 338: 290-299.
- [19] 马昱萱, 刘立志, 张宇飞, 等. 添加碳氮对大豆秸秆还田土壤酶活性及微生物量碳的影响[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(10): 75-80.
- MA Y X, LIU L Z, ZHANG Y F, et al. Effects of carbon and nitrogen addition on soil enzyme activity and microbial biomass carbon content of soybean straw after returning to field[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(10): 75-80.
- [20] 张雅茜, 方晰, 洗应男, 等. 亚热带区4种林地土壤微生物生物量碳氮磷及酶活性特征[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5326-5338.
- ZHANG Y Q, FANG X, XIAN Y N, et al. Characteristics of soil microbial biomass carbon, nitrogen, phosphorus and enzyme activity in four subtropical forests, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): 5326-5338.
- [21] 王彦峰, 王兵, 肖波, 等. 陕北黄土高原藓结皮的7种土壤酶活性及其剖面分布特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(3): 161-169.
- WANG Y F, WANG B, XIAO B, et al. Soil enzyme activities and vertical distribution of moss-dominated biological soil crusts on the Loess Plateau in northern Shaanxi[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2017, 45(3): 161-169.
- [22] 邱月, 刘平, 魏忠平, 等. 渤海泥质海岸四种典型防护林对土壤微生物生物量、酶活性及土壤养分的影响[J]. 土壤通报, 2017, 48(5): 1119-1125.
- QIU Y, LIU P, WEI Z P, et al. Effects of four typical shelterbelts on soil microbial biomass, enzyme activities and soil nutrient in the Bohai muddy coast[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(5): 1119-1125.
- [23] LI Y. Effects of vegetation types on soil enzyme activities and microbial community in semi-arid grasslands [J]. Applied Soil Ecology, 2021, 168: e104127.
- [24] LI H. Interactions between vegetation type and soil enzyme activity in homogeneous soils[J]. Catena, 2020,

- 193:e104609.
- [25] 林玉, 聂富育, 杨万勤, 等. 四川盆地西缘 4 种人工林土壤氮转化酶的季节动态[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(3): 634-639.
- LIN Y, NIE F Y, YANG W Q, et al. Seasonal dynamics of soil nitrogen transformation enzymes at four plantations in the western edge of Sichuan basin [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2019, 25(3): 634-639.
- [26] 胡宗达, 刘世荣, 罗明霞, 等. 川西亚高山不同演替阶段天然次生林土壤碳氮含量及酶活性特征[J]. 植物生态学报, 2020, 44(9): 973-985.
- HU Z D, LIU S R, LUO M X, et al. Characteristics of soil carbon and nitrogen contents and enzyme activities in sub-alpine secondary forests with different successional stages in Western Sichuan, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44(9): 973-985.
- [27] LIU L. Impact of plant diversity on soil nitrogen enzyme dynamics [J]. Plant and Soil, 2020, 455(1/2): 71-83.
- [28] WANG Y. Microbial functional traits and their responses to vegetation and microclimate in soil nitrogen cycling [J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: e571563.
- [29] 朱虹颖, 靳振江, 张晓文, 等. 岩溶区与非岩溶区稻田土壤磷含量与碱性磷酸酶活性比较[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(5): 1083-1090.
- ZHU H Y, JIN Z J, ZHANG X W, et al. Comparison of soil phosphorus content and alkaline phosphatase activity in paddy fields in karst and non-karst areas [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024, 41(5): 1083-1090.
- [30] 廖远行, 舒英格, 王昌敏, 等. 喀斯特地区不同植被类型土壤微生物量磷、碱性磷酸酶及植酸酶的变化特征[J]. 南方农业学报, 2023, 54(6): 1762-1770.
- LIAO Y H, SHU Y G, WANG C M, et al. Change characteristics of soil microbial phosphorus, alkaline phosphatase and phytase under different vegetation types in karst area [J]. Journal of Southern Agriculture, 2023, 54(6): 1762-1770.
- [31] 尹辉, 张波, 荆瑞雪, 等. 干旱区不同地理种群骆驼刺元素组成及表面结构特征的对比研究[J]. 生态学报, 2019, 39(18): 6745-6752.
- YIN H, ZHANG B, JING R X, et al. Elemental compositions and surface structures of *Alhagi sparsifolia* Shap. in different geographical populations in arid zone [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(18): 6745-6752.
- [32] CHEN D M, SALEEM M, CHENG J H, et al. Effects of aridity on soil microbial communities and functions across soil depths on the Mongolian Plateau [J]. Functional Ecology, 2019, 33(8): 1561-1571.
- [33] 谷晓楠, 贺红士, 陶岩, 等. 长白山土壤微生物群落结构及酶活性随海拔的分布特征与影响因子[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8374-8384.
- GU X N, HE H S, TAO Y, et al. Soil microbial community structure, enzyme activities, and their influencing factors along different altitudes of Changbai Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(24): 8374-8384.
- [34] LUO S. Organic carbon availability drives enzymatic processes in nitrogen cycling [J]. Science of the Total Environment, 2021, 780: e146641.
- (上接第 101 页)
- [37] 马春梅, 贾鲜艳, 杨静, 等. 内蒙古草地生态环境退化现状及成因分析[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2000, 21(1): 117-120.
- MA C M, JIA X Y, YANG J, et al. The current situation and cause analysis of ecological environment degeneration of Inner Mongolia grassland [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2000, 21(1): 117-120.
- [38] 孙肖钰. 近 20 年内蒙古自治区生态文明建设成效评估[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- SUN X Y. Effectiveness evaluation of ecological civilization construction in Inner Mongolia autonomous region in recent 20 years [D]. Xi'an: Changan University, 2021.