

甘肃民勤荒漠区植物群落土壤的理化性质和酶活性分析

王瑛瑛, 汤萃文^①, 贺媛真, 田童童, 苏艳斌

(兰州交通大学环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 对甘肃民勤连古城国家级自然保护区内霸王[*Zygophyllum xanthoxylum* (Bunge) Maxim.]、红砂[*Reaumuria songarica* (Pall.) Maxim.]、猫头刺(*Oxytropis aciphylla* Ledeb.)、针茅(*Stipa capillata* Linn.)群落 0~20、20~40 和 40~60 cm 土层土壤的理化性质和酶活性进行比较,并对土壤理化指标与土壤酶活性的关系进行分析。结果表明:总体上,4种植物群落土壤中,红砂群落的土壤总有机碳、全氮、速效磷和速效钾含量及蔗糖酶活性最高,针茅群落的土壤全磷含量最高,猫头刺群落的土壤全钾含量最高;霸王群落的土壤脲酶、淀粉酶、纤维素酶和碱性磷酸酶活性最强。总体来看,4种植物群落土壤理化指标均随着土壤深度增加而降低,4种植物群落的土壤脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性以及霸王、红砂和针茅群落的土壤淀粉酶活性也随着土壤深度增加而减弱。Pearson 相关性分析结果表明土壤理化指标与土壤酶活性多呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)正相关。冗余分析结果显示:第1和第2轴分别能够解释民勤荒漠区植物群落土壤理化性质与土壤酶活性关系的 61.01%和 18.63%,并且,土壤总有机碳含量、速效钾含量、pH 值和含水量对土壤酶活性的影响较大;蒙特卡罗检验结果显示土壤铵态氮含量、pH 值、总有机碳含量和含水量对土壤酶活性影响的贡献率分别为 31.6%、12.7%、11.8%和 11.6%,且影响均达到显著水平。综上所述,甘肃民勤荒漠区 4种植物群落总体表现为红砂群落的土壤理化性质最好,霸王群落的土壤酶活性最强,并且,土壤越深,指标数值越小。土壤总有机碳含量、pH 值和含水量对该区域 4种植物群落土壤酶活性的影响较大。

关键词: 土壤理化性质; 土壤酶活性; 植物群落; 民勤荒漠区

中图分类号: S153.6; S158.3; S714.8 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2024)06-0056-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2024.06.06

Analyses on soil physicochemical properties and enzyme activities of plant communities in Minqin desert region of Gansu Province WANG Yingying, TANG Cuiwen^①, HE Yuanzhen, TIAN Tongtong, SU Yanbin (School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2024, 33(6): 56–64

Abstract: The soil physicochemical properties and enzyme activities in soil layers of 0–20, 20–40, and 40–60 cm within communities of *Zygophyllum xanthoxylum* (Bunge) Maxim., *Reaumuria songarica* (Pall.) Maxim., *Oxytropis aciphylla* Ledeb., and *Stipa capillata* Linn. in Minqin Liangucheng National Nature Reserve of Gansu Province were compared, and the relationships between soil physicochemical indexes and soil enzyme activities were analyzed. The results show that, in general, among the soils of the four plant communities, the contents of total organic carbon, total nitrogen, available phosphorus, and available potassium, as well as sucrase activity in soil of *R. songarica* community are the highest, the total phosphorus content in soil of *S. capillata* community is the highest, while the total potassium content in soil of *O. aciphylla* community is the highest; the activities of urease, amylase, cellulase, and alkaline phosphatase in soil of *Z. xanthoxylum* community are the strongest. Overall, the soil physicochemical

收稿日期: 2024-05-17

基金项目: 甘肃省科技计划项目(22JR5RA328)

作者简介: 王瑛瑛(1999—),女,甘肃平凉人,硕士研究生,主要从事土壤微生物方面的研究。

^①通信作者 E-mail: cuiwent73@mail.lzjtu.cn

引用格式: 王瑛瑛, 汤萃文, 贺媛真, 等. 甘肃民勤荒漠区植物群落土壤的理化性质和酶活性分析[J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(6): 56–64.

indexes of the four plant communities decrease with the increase of soil depth, the activities of urease, catalase, sucrase, and alkaline phosphatase in soils of the four plant communities, as well as the amylase activity in soils of *Z. xanthoxylum*, *R. songarica*, and *S. capillata* communities also decrease with the increase of soil depth. The result of Pearson correlation analysis indicates that there are significant ($P < 0.05$) or extremely significant ($P < 0.01$) positive correlations between most soil physicochemical indexes and soil enzyme activities. The result of redundancy analysis reveals that the first and second axes can explain 61.01% and 18.63% of the relationships between soil physicochemical properties and soil enzyme activities of plant communities in Minqin desert region, respectively. Moreover, the effects of soil total organic carbon content, available potassium content, pH value, and water content on soil enzyme activities are relatively great. The result of Monte Carlo test indicates that the contribution rates of effects of soil ammonium nitrogen content, pH value, total organic carbon content, and water content on soil enzyme activities are 31.6%, 12.7%, 11.8%, and 11.6%, respectively, and all effects reach significant level. In summary, the soil physicochemical properties of *R. songarica* community are the best, and the soil enzyme activities of *Z. xanthoxylum* community are the strongest among the four plant communities of Minqin desert region of Gansu Province. Furthermore, the deeper the soil, the smaller the index value. Soil total organic carbon content, pH value, and water content have relatively great influence on soil enzyme activities of the four plant communities in this region.

Key words: soil physicochemical property; soil enzyme activity; plant community; Minqin desert region

酶促反应能够打破土壤有机质的复杂结构,将复杂化合物转化为简单化合物,从而被土壤微生物分解和利用^[1]。土壤中的酶主要由微生物、植物根系及土壤动物分泌而来^[2],土壤酶活性是衡量土壤质量的重要指标^[3]。研究发现,土壤酶活性与土壤养分含量关系密切^[4],在土壤碳、氮、磷转化过程中扮演重要角色^[3]。通常情况下,土壤酶活性与土壤养分含量存在协同作用,共同调控土壤养分循环过程^[5]。土壤酶活性还与土壤深度和植被类型关系密切^[6]。明确各地区不同土壤深度和植被类型下的土壤酶活性特征对于区域土壤改良具有重要意义。

甘肃民勤连古城国家级自然保护区气候干旱,降水稀少,植被贫乏,土壤侵蚀严重,荒漠化程度加剧,严重影响了当地的生态环境与社会经济发展,因此,改善该地区的生态环境势在必行。相关研究^[7-10]表明:植物对土壤质量改善和维持至关重要,能够改善土壤理化性质,提高土壤肥力。处于荒漠区的植物不但可减弱风沙等对其生长区的影响,还对当地土壤环境有着至关重要的作用。目前国内关于荒漠区植物的研究主要集中在植物对土壤养分和生物活性的影响^[11]、植物对土壤结构和土壤肥力的促进作用^[12]、植物群落多样性与土壤因子的关系^[13]、土壤酶活性和微生物代谢功能与土壤理化性质的关系^[14]等方面。已有研究表明:甘肃民勤荒漠区膜果麻黄(*Ephedra przewalskii* Stapf)、齿叶白刺(*Nitraria roborowskii* Kom.)、红砂[*Reaumuria songarica* (Pall.)

Maxim.]、沙拐枣(*Calligonum mongolicum* Turcz.)、梭梭[*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge]群落0~30 cm土层土壤的脲酶、淀粉酶和纤维素酶活性均随土壤深度增加而减小,红砂群落0~30 cm土层土壤的蔗糖酶和碱性磷酸酶活性则随土壤深度增加而先增大后减小^[15];不同植物群落间土壤微生物生物量碳和生物量氮各异,以红砂群落和膜果麻黄群落最显著;土壤全氮含量、有效磷含量、硝态氮含量和含水量是影响土壤微生物生物量碳的主要因子,土壤含水量、有效磷含量、速效钾含量、全氮含量和硝态氮含量是影响土壤微生物生物量氮的主要因子^[16];垂直剖面上,土壤碳含量、氮含量、碳磷比和氮磷比均随着土壤深度增加而减小,碳氮比则随着土壤深度增加而先减小后增大,并且,凋落物、土壤微生物及植物等因子的影响,0~30 cm土层土壤的生态化学计量特征与30~60 cm土层间存在显著差异^[17]。然而,关于荒漠区不同植物群落的土壤理化性质和不同深度的土壤酶活性差异以及荒漠区不同植物群落土壤理化性质与土壤酶活性的关系等尚不清楚,而研究荒漠区植物对土壤理化性质和酶活性的影响有助于了解荒漠区植物与土壤的关系,探明植物对荒漠生态系统的适应机制。

鉴于此,本研究对甘肃民勤连古城国家级自然保护区内的主要天然植物群落——霸王[*Zygophyllum xanthoxylum* (Bunge) Maxim.]、红砂、猫头刺(*Oxytropis aciphylla* Ledeb.)、针茅(*Stipa capillata*

Linn.)群落0~60 cm 土层土壤的理化性质和酶活性进行了比较,并对不同植物群落的土壤理化指标、不同深度土壤酶活性的变化规律以及土壤理化指标与土壤酶活性间的相关性进行了分析,以期揭示不同植物群落间土壤理化性质与土壤酶活性的关系,为荒漠生态系统的科学治理和人工恢复提供理论依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

本研究区位于甘肃民勤连古城国家级自然保护区(东经 102°30′~103°57′、北纬 38°10′~39°09′)内。该区域属温带大陆性干旱气候区,降水较少且分布不均,但蒸发量大,气候干燥,干旱灾害频发。保护区内人为干扰较少,自然植被以旱生、沙生和盐生的多年生草本、灌木和半灌木种类为主,天然植物种类有齿

叶白刺、猫头刺、盐爪爪[*Kalidium foliatum* (Pall.) Moq.]、沙拐枣、泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa* Maxim.)、霸王、膜果麻黄、针茅、红砂等。这些荒漠植物具有极强的抗旱性,可与其他伴生种组合成多种植物群落,形成完整的荒漠生态系统,在防风固沙、保持水土、维护干旱荒漠区生态平衡和改善沙区环境上发挥重要作用^[14]。保护区地貌以沙丘为主,沙丘间露出的地面凹凸不平,土壤为细砂和中细砂,夹有砂壤土、粉质壤土及粉质粘土的透镜体(厚 0.3~0.6 m),水土流失及荒漠化程度严重。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与处理 于 2023 年 8 月,在研究区设置 8 个面积 100 m×100 m 的样地(表 1),所有样地均为戈壁。在每个样地的四角和中心各设置 1 个面积 10 m×10 m 的样方,详细记录样方内的植物群落特征,包括植物的种类、株数、株高、冠幅和盖度。

表 1 甘肃民勤荒漠区 8 个样地的主要信息

Table 1 Main information of eight plots in Minqin desert region of Gansu Province

样地编号 Plot No.	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Elevation	盖度/% Coverage	主要植物种类 ¹⁾ Main plant species ¹⁾
1	E102.983 486°	N38.980 663°	1 385	30~35	Zx, Rs, Oa, Ns, Nr, Ep
2	E103.445 399°	N39.118 971°	1 314	25~30	Zx, Rs, Oa, Ns, Nr, Cc, Sc
3	E103.083 697°	N38.989 209°	1 359	25~35	Zx, Rs, Oa, Nr, Sc, Ck1, Ha
4	E102.881 395°	N38.996 330°	1 442	40~45	Zx, Rs, Oa, Ep, Sc, Ha, Cm, Af, Ck2
5	E102.685 478°	N39.032 283°	1 468	30~40	Zx, Rs, Oa, Nr, Sc, Ha, Cp, Kf
6	E102.596 588°	N38.992 002°	1 445	45~55	Zx, Rs, Oa, Sc, Ha, Cp, Kf, Pa
7	E102.582 797°	N38.999 492°	1 450	20~30	Zx, Rs, Oa, Sc, Cp
8	E103.215 048°	N38.369 250°	1 472	40~50	Zx, Rs, Oa, Ns, Nr, Ep, Cc, Sc, Ha, Af, Cp

¹⁾ Zx: 霸王 *Zygophyllum xanthoxylum* (Bunge) Maxim.; Rs: 红砂 *Reaumuria songarica* (Pall.) Maxim.; Oa: 猫头刺 *Oxytropis aciphylla* Ledeb.; Ns: 泡泡刺 *Nitraria sphaerocarpa* Maxim.; Nr: 齿叶白刺 *Nitraria roborowskii* Kom.; Ep: 膜果麻黄 *Ephedra przewalskii* Stapf; Cc: 驼绒藜 *Ceratoides compacta* (Losinsk.) C. P. Tsien et C. G. Ma; Sc: 针茅 *Stipa capillata* Linn.; Ck1: 柠条锦鸡儿 *Caragana korshinskii* Kom.; Ha: 梭梭 *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge; Cm: 沙拐枣 *Calligonum mongolicum* Turcz.; Af: 冷蒿 *Artemisia frigida* Willd.; Ck2: 甘肃锦鸡儿 *Caragana kansuensis* Pojark.; Cp: 珍珠柴 *Caroxylon passerinum* (Bunge) Akhani et Roalson; Kf: 盐爪爪 *Kalidium foliatum* (Pall.) Moq.; Pa: 芦苇 *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.

每个样地随机选择生长旺盛的霸王、红砂、猫头刺和针茅各 5 株,株间距至少 5 m;去除植株下土壤表面的枯枝落叶,用土钻(内径 5 cm)采集根部周围 0~20、20~40 及 40~60 cm 土层土壤,将相同样地、相同植物和相同土层的土壤混匀,装入自封袋后 4 ℃ 条件下运回实验室,置于 4 ℃ 冰箱中保存、备用。实验前,去除土壤中的石块、植物残体、根系,自然风干后研磨成粉,过筛(孔径 2 mm)。将土壤均匀分成 2 份,一份用于土壤理化性质测定;另一份置于 4 ℃ 冰箱中,用于土壤酶活性测定,并于 3 d 内完成检测。

1.2.2 土壤理化性质及酶活性测定 采用燃烧氧化-非分散红外法^{[18]27-29}测定土壤总有机碳含量,采用半微量凯氏法^{[18]44-49}测定土壤全氮含量,采用 HClO₄-H₂SO₄ 法^{[18]74-76}测定土壤全磷含量,采用火焰光度计法^{[18]101-103}测定土壤全钾含量,采用纳氏比色法^{[18]408-412}测定土壤铵态氮含量,采用氮试剂重量法^{[18]414-416}测定土壤硝态氮含量,采用钼兰比色法^{[18]81-83}测定土壤速效磷含量,采用火焰光度计法^{[18]106-107}测定土壤速效钾含量,采用电位法^[19]测定土壤 pH 值,采用烘干法^{[18]22-24}测定土壤含水量;使用

苏州格锐思生物技术有限公司生产的相应试剂盒测定土壤中脲酶、淀粉酶、过氧化氢酶、蔗糖酶、纤维素酶和碱性磷酸酶的活性。每个指标重复取样检测3次,结果取平均值。

1.3 数据分析

使用 EXCEL 2019 软件对数据进行初步整理,使用 SPSS 19.0 软件对数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA)、多重比较(Duncan's 法)和 Pearson 相关性分析。使用 Canoco 5 软件进行冗余分析(redundancy analysis, RDA),利用蒙特卡罗检验(Monte Carlo test)计算每个土壤理化指标对土壤酶活性的解释率并进行显著性检验。

2 结果和分析

2.1 不同植物群落土壤理化性质的比较

对不同植物群落同一土层土壤的理化性质进行比较,结果(表2)显示:红砂群落的土壤总有机碳含量显著($P<0.05$)高于其他植物群落,针茅群落的土壤总有机碳含量在0~20和20~40 cm土层最低。红

砂群落的土壤全氮含量总体上最高,猫头刺群落的土壤全氮含量最低,且二者总体上差异显著。红砂群落的土壤全磷含量总体上显著低于霸王、猫头刺和针茅群落,而针茅群落的土壤全磷含量最高。红砂和猫头刺群落的土壤全钾含量显著高于霸王和针茅群落,且猫头刺群落的土壤全钾含量最高,霸王群落的土壤全钾含量基本上最低。4种植物群落的土壤铵态氮和硝态氮含量均无明显规律。总体来看,红砂群落的土壤速效磷和速效钾含量最高,霸王群落的土壤速效磷含量最低、速效钾含量较低,且红砂群落的土壤速效磷和速效钾含量显著高于霸王群落。总体上,4种植物群落的土壤pH值和含水量差异不明显,仅针茅群落20~40和40~60 cm土层土壤pH值显著低于其余植物群落同层土壤,红砂群落0~20 cm土层土壤含水量显著高于其余植物群落同层土壤。

对同一植物群落不同土层土壤的理化性质进行比较,结果(表2)显示:供试4种植物群落的土壤理化性质指标总体表现为0~20 cm土层最高、40~60 cm土层最低,并且基本上随着土壤深度增加而逐渐降低。

表2 甘肃民勤荒漠区不同植物群落各土层土壤的理化性质($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

土层/cm Soil layer	各植物群落的土壤总有机碳含量/(g·kg ⁻¹) Total organic carbon content in soil of each plant community				各植物群落的土壤全氮含量/(g·kg ⁻¹) Total nitrogen content in soil of each plant community			
	Zx	Rs	Oa	Sc	Zx	Rs	Oa	Sc
0~20	3.27±0.09Ba	4.58±0.29Aa	2.84±0.03Ca	2.27±0.15Ba	0.58±0.01Ba	0.83±0.02Aa	0.50±0.01Ba	0.85±0.02Aa
20~40	2.74±0.12Bb	3.62±0.17Ab	2.00±0.07Bb	1.99±0.01Bb	0.41±0.13Ba	0.77±0.15Aa	0.32±0.09Bb	0.39±0.16Bb
40~60	1.25±0.06Bc	3.05±0.13Ab	1.72±0.03Bb	1.87±0.04Bb	0.35±0.11Aa	0.48±0.04Ab	0.28±0.05Ab	0.42±0.10Ab
土层/cm Soil layer	各植物群落的土壤全磷含量/(g·kg ⁻¹) Total phosphorus content in soil of each plant community				各植物群落的土壤全钾含量/(g·kg ⁻¹) Total potassium content in soil of each plant community			
	Zx	Rs	Oa	Sc	Zx	Rs	Oa	Sc
0~20	0.37±0.08Aa	0.20±0.09Ba	0.33±0.05Aa	0.38±0.02Aa	2.84±0.06Ba	4.88±0.02Aa	5.16±0.18Aa	3.14±0.03Ba
20~40	0.24±0.03Aa	0.18±0.05Aa	0.25±0.07Aa	0.29±0.07Aa	1.55±0.05Bb	3.23±0.19Ab	4.21±0.04Ab	2.35±0.01Ba
40~60	0.20±0.04Aa	0.03±0.01Bb	0.17±0.01Aa	0.27±0.05Aa	1.62±0.08Bb	3.18±0.19Ab	3.99±0.15Ab	1.58±0.06Ba
土层/cm Soil layer	各植物群落的土壤铵态氮含量/(mg·kg ⁻¹) Ammonium nitrogen content in soil of each plant community				各植物群落的土壤硝态氮含量/(mg·kg ⁻¹) Nitrate nitrogen content in soil of each plant community			
	Zx	Rs	Oa	Sc	Zx	Rs	Oa	Sc
0~20	22.34±9.15Aa	14.58±0.28Ba	17.47±0.31Ba	14.12±0.17Ba	42.45±3.68Ca	54.81±6.53Ba	68.92±16.15Aa	72.53±14.38Aa
20~40	13.38±4.45Bb	13.00±0.37Ba	15.25±1.28Aa	13.37±0.36Ba	25.93±5.52Ab	14.00±3.03Bb	26.84±6.74Ab	25.90±10.47Ab
40~60	8.36±0.38Cc	10.30±0.14Bb	10.27±0.18Bb	12.31±0.29Ab	22.58±6.34Ab	2.41±0.08Cc	14.86±0.08Bc	21.38±9.08Ab
土层/cm Soil layer	各植物群落的土壤速效磷含量/(mg·kg ⁻¹) Available phosphorus content in soil of each plant community				各植物群落的土壤速效钾含量/(mg·kg ⁻¹) Available potassium content in soil of each plant community			
	Zx	Rs	Oa	Sc	Zx	Rs	Oa	Sc
0~20	10.30±2.68Ca	16.07±3.52Aa	12.25±1.60Ba	9.78±1.33Ca	304.50±109.53Ba	288.40±42.71Bb	340.30±132.94Aa	379.20±127.44Aa
20~40	4.31±0.75Cb	7.00±1.43Ab	5.40±1.39Bb	6.81±1.41Ab	220.55±59.27Bb	310.00±120.38Aa	190.90±47.69Cb	214.67±65.91Bb
40~60	3.87±0.73Db	8.12±1.53Ab	5.01±0.96Cb	6.40±0.43Bb	154.60±14.37Bc	196.30±37.95Ac	172.40±49.28Ab	114.30±31.54Cc

续表2 Table 2 (Continued)

土层/cm Soil layer	各植物群落的土壤 pH 值 pH value of soil of each plant community				各植物群落的土壤含水量/% Water content in soil of each plant community			
	Zx	Rs	Oa	Sc	Zx	Rs	Oa	Sc
0~20	8.99±2.37Aa	8.98±1.44Aa	8.91±0.53Aa	8.83±1.36Aa	6.28±1.14Ba	13.42±2.45Aa	6.00±1.37Ba	6.00±0.26Ba
20~40	8.54±1.46Aa	8.63±0.27Aa	8.78±1.25Aa	7.86±1.42Bb	2.07±0.26Ab	3.00±0.49Ab	4.00±0.25Ab	2.00±0.43Ab
40~60	8.07±2.67Aa	8.02±1.63Aa	8.65±0.58Aa	7.17±1.39Bb	3.34±0.15Ab	2.00±0.31Ab	2.00±0.48Ac	1.00±0.28Ab

¹⁾ Zx: 霸王 *Zygophyllum xanthoxylum* (Bunge) Maxim.; Rs: 红砂 *Reaumuria songarica* (Pall.) Maxim.; Oa: 猫头刺 *Oxytropis aciphylla* Ledeb.; Sc: 针茅 *Stipa capillata* Linn. 同行中不同大写字母表示在同一土层不同植物群落间差异显著 ($P<0.05$) Different uppercases in the same row indicate the significant differences ($P<0.05$) between different plant communities at the same soil layer; 同列中不同小写字母表示在同一植物群落不同土层间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P<0.05$) between different soil layers of the same plant community.

2.2 不同植物群落土壤酶活性的比较

对不同植物群落同一土层土壤的酶活性进行比较,结果(表3)显示:霸王群落的土壤脲酶活性最强,显著($P<0.05$)高于其余植物群落,而猫头刺群落的土壤脲酶活性基本上最弱。总体来看,霸王群落的土壤淀粉酶活性最强,红砂群落的土壤淀粉酶活性基本上最弱,且二者差异显著。4种植物群落的土壤过氧化氢酶活性无明显规律,0~20 cm 土层中,针茅群落的土壤过氧化氢酶活性最强,猫头刺群落的土壤过氧化氢酶活性最弱;20~40 cm 土层中,霸王群落的土壤过氧化氢酶活性最强,猫头刺群落的土壤过氧化氢酶活性最弱;40~60 cm 土层中,红砂群落的土壤过氧化

氢酶活性最强,针茅群落的土壤过氧化氢酶活性最弱。总体上看,红砂群落的土壤蔗糖酶活性最强,霸王群落的土壤蔗糖酶活性最弱(0~20 cm 土层除外),且4种植物群落的土壤蔗糖酶活性差异不显著;霸王群落的土壤纤维素酶和碱性磷酸酶活性最强,针茅群落的土壤纤维素酶和碱性磷酸酶活性最弱,且二者差异显著。

对同一植物群落不同土层的土壤酶活性进行比较,结果(表3)显示:供试4种植物群落的土壤脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性以及霸王、红砂和针茅群落的土壤淀粉酶活性基本上表现为0~20 cm土层最强、40~60 cm 土层最弱,并且基本上随

表3 甘肃民勤荒漠区不同植物群落土壤的酶活性($\bar{X}\pm SD$)¹⁾Table 3 Soil enzyme activities of different plant communities in Minqin desert region of Gansu Province ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

土层/cm Soil layer	各植物群落的土壤脲酶活性/($\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$) Urease activity in soil of each plant community				各植物群落的土壤淀粉酶活性/($\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$) Amylase activity in soil of each plant community			
	Zx	Rs	Oa	Sc	Zx	Rs	Oa	Sc
0~20	179.29±86.38Aa	119.43±55.45Ba	81.95±38.09Ca	86.14±28.35Ca	699.32±24.77Aa	527.91±132.87Ca	440.20±69.73Da	602.96±154.43Ba
20~40	110.77±44.42Ab	77.36±27.52Bb	59.83±16.90Bb	67.97±19.84Bb	635.99±229.44Aa	451.09±92.20Bb	459.27±61.02Ba	495.36±34.70Bb
40~60	114.02±36.05Ab	60.86±34.36Bc	54.35±16.93Bb	53.31±35.76Bb	434.75±89.75Ab	381.03±91.75Bc	497.40±32.90Aa	419.09±51.94Bb
土层/cm Soil layer	各植物群落的土壤过氧化氢酶活性/($\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$) Catalase activity in soil of each plant community				各植物群落的土壤蔗糖酶活性/($\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$) Sucrase activity in soil of each plant community			
	Zx	Rs	Oa	Sc	Zx	Rs	Oa	Sc
0~20	319.77±56.44Aa	328.87±50.13Aa	255.09±93.64Ba	362.78±57.20Aa	5.66±0.38Aa	4.80±1.39Aa	4.18±1.11Aa	4.18±0.49Aa
20~40	266.48±77.99Ab	249.48±38.35Ab	176.06±70.12Bb	176.36±61.58Bb	3.61±0.89Ab	4.72±1.61Aa	4.00±0.34Aa	3.65±0.18Aa
40~60	207.50±20.75Ac	220.40±29.50Ab	157.27±70.26Bb	137.61±33.35Bb	3.47±0.06Ab	3.82±0.53Aa	3.74±0.55Aa	3.63±0.96Aa
土层/cm Soil layer	各植物群落的土壤纤维素酶活性/($\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$) Cellulase activity in soil of each plant community				各植物群落的土壤碱性磷酸酶活性/($\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$) Alkaline phosphatase activity in soil of each plant community			
	Zx	Rs	Oa	Sc	Zx	Rs	Oa	Sc
0~20	345.03±28.69Ac	355.31±94.75Ac	189.20±61.16Bc	174.72±41.53Bb	349.11±143.58Aa	321.09±31.26Aa	226.38±50.10Ba	150.34±19.30Ca
20~40	636.62±100.25Aa	613.76±36.26Aa	332.11±78.38Ba	274.94±51.08Ba	348.11±111.15Aa	245.86±35.62Bb	95.43±13.49Cb	102.76±28.31Cb
40~60	484.09±185.72Ab	441.60±57.47Ab	296.38±41.14Bb	72.05±14.91Cc	341.44±52.70Aa	77.77±15.32Bc	80.97±16.27Bb	77.64±9.19Bc

¹⁾ Zx: 霸王 *Zygophyllum xanthoxylum* (Bunge) Maxim.; Rs: 红砂 *Reaumuria songarica* (Pall.) Maxim.; Oa: 猫头刺 *Oxytropis aciphylla* Ledeb.; Sc: 针茅 *Stipa capillata* Linn. 同行中不同大写字母表示在同一土层不同植物群落间差异显著 ($P<0.05$) Different uppercases in the same row indicate the significant differences ($P<0.05$) between different plant communities at the same soil layer; 同列中不同小写字母表示在同一植物群落不同土层间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P<0.05$) between different soil layers of the same plant community.

着土壤深度增加而逐渐减弱;猫头刺群落的土壤淀粉酶活性恰好相反,表现为 0~20 cm 土层最小、40~60 cm 土层最大,并且基本上随着土壤深度增加而逐渐增强;4 种植物群落的土壤纤维素酶活性均在 20~40 cm 土层最强,霸王、红砂和猫头刺群落的土壤纤维素酶活性均在 0~20 cm 土层最弱,而针茅群落的土壤纤维素酶活性在 40~60 cm 土层最弱。

2.3 土壤理化性质与土壤酶活性的关系分析

2.3.1 Pearson 相关性分析 相关性分析结果(表 4)表明:土壤理化指标与土壤酶活性多呈显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)正相关,其中,脲酶活性与铵态氮含量和含水量呈极显著正相关,与总有机碳含量、全磷含量、硝态氮含量、速效磷含量、速效钾含量和 pH 值呈显著正相关;淀粉酶活性与全磷含量、铵态氮含量和 pH 值呈极显著正相关,与硝态氮含量和速效钾含量呈显著正相关;过氧化氢酶活性与总有机碳含量、全氮含量、铵态氮含量、硝态氮含量、速效磷含量、速效钾含量、pH 值和含水量呈极显著正相关,与全磷含量呈显著正相关;蔗糖酶活性与总有机碳含量、铵态氮含量、速效磷含量、速效钾含量、pH 值和含水量呈极显著正相关,与全磷含量和硝态氮含量呈显著正相关;纤维素酶活性与全磷含量和硝态氮含量呈显著负相关;碱性磷酸酶活性与总有机碳含量、铵态氮含量、速效钾含量、pH 值和含水量呈显著正相关。

2.3.2 冗余分析 冗余分析结果(图 1)表明:第 1 和第 2 轴分别能够解释民勤荒漠区植物群落土壤理化

性质与土壤酶活性关系的 61.01% 和 18.63%,二轴共可解释民勤荒漠区植物群落土壤理化性质与土壤酶活性关系的 79.64%。表明第 1 和第 2 轴涵盖了民勤荒漠区植物群落土壤理化性质与土壤酶活性关系的大部分信息,并且,第 1 轴起主要作用。

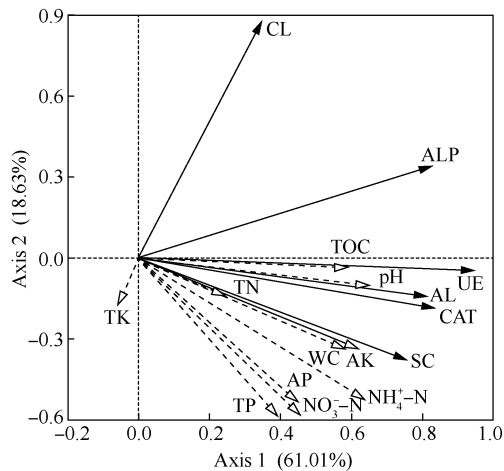
从箭头夹角看,除全钾含量,其他土壤理化指标与脲酶和碱性磷酸酶活性均呈正相关,影响从大到小依次为总有机碳含量、pH 值、速效钾含量、含水量、全氮含量、铵态氮含量、速效磷含量、硝态氮含量、全磷含量;除全钾含量,其他土壤理化指标与淀粉酶和过氧化氢酶活性均呈正相关,影响从大到小依次为 pH 值、总有机碳含量、速效钾含量、含水量、全氮含量、铵态氮含量、速效磷含量、硝态氮含量、全磷含量;除全钾含量,其他土壤理化指标与蔗糖酶活性均呈正相关,影响从大到小依次为速效钾含量、含水量、全氮含量、铵态氮含量、pH 值、总有机碳含量、速效磷含量、硝态氮含量、全磷含量;总有机碳含量、pH 值、速效钾含量、含水量、全氮含量与纤维素酶活性呈正相关,而铵态氮含量、速效磷含量、硝态氮含量、全磷含量和全钾含量与纤维素酶活性呈负相关。

蒙特卡罗检验结果(表 5)表明:从贡献率看,各土壤理化指标对土壤酶活性的影响从大到小依次为铵态氮含量、pH 值、总有机碳含量、含水量、硝态氮含量、速效磷含量、全钾含量、全氮含量、速效钾含量、全磷含量,并且,铵态氮含量、pH 值、总有机碳含量和含水量对土壤酶活性的影响均达到显著水平。

表 4 甘肃民勤荒漠区植物群落土壤理化指标与土壤酶活性的相关系数
Table 4 Correlation coefficients between soil physicochemical indexes and soil enzyme activities of different plant communities in Minqin desert region of Gansu Province

土壤理化指标 Soil physicochemical index	与各土壤酶活性的相关系数 ¹⁾ Correlation coefficient with each soil enzyme activity ¹⁾					
	脲酶活性 Urease activity	淀粉酶活性 Amylase activity	过氧化氢酶活性 Catalase activity	蔗糖酶活性 Sucrase activity	纤维素酶活性 Cellulase activity	碱性磷酸酶活性 Alkaline phosphatase activity
总有机碳含量 Total organic carbon content	0.457 *	0.234	0.626 **	0.708 **	0.285	0.417 *
全氮含量 Total nitrogen content	0.010	0.016	0.632 **	0.280	0.027	0.134
全磷含量 Total phosphorus content	0.406 *	0.596 **	0.378 *	0.329 *	-0.487 *	0.209
全钾含量 Total potassium content	-0.203	-0.184	0.193	0.153	-0.099	-0.114
铵态氮含量 Ammonium nitrogen content	0.652 **	0.612 **	0.500 **	0.784 **	-0.212	0.322 *
硝态氮含量 Nitrate nitrogen content	0.377 *	0.424 *	0.692 **	0.373 *	-0.456 *	0.292
速效磷含量 Available phosphorus content	0.391 *	0.174	0.650 **	0.631 **	-0.308	0.237
速效钾含量 Available potassium content	0.431 *	0.457 *	0.847 **	0.640 **	-0.012	0.342 *
pH 值 pH value	0.494 *	0.516 **	0.676 **	0.622 **	0.215	0.440 *
含水量 Water content	0.510 **	0.305	0.706 **	0.611 **	-0.113	0.450 *

¹⁾ *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.



TOC: 总有机碳含量 Total organic carbon content; TN: 全氮含量 Total nitrogen content; TP: 全磷含量 Total phosphorus content; TK: 全钾含量 Total potassium content; NH_4^+-N : 铵态氮含量 Ammonium nitrogen content; NO_3^--N : 硝态氮含量 Nitrate nitrogen content; AP: 速效磷含量 Available phosphorus content; AK: 速效钾含量 Available potassium content; pH: pH 值 pH value; WC: 含水量 Water content. UE: 脲酶活性 Urease activity; AL: 淀粉酶活性 Amylase activity; CAT: 过氧化氢酶活性 Catalase activity; SC: 蔗糖酶活性 Sucrase activity; CL: 纤维素酶活性 Cellulase activity; ALP: 碱性磷酸酶活性 Alkaline phosphatase activity.

图1 甘肃民勤荒漠区植物群落土壤理化指标及土壤酶活性冗余分析
Fig. 1 Redundancy analysis of soil physicochemical indexes and soil enzyme activities of plant communities in Minqin desert region of Gansu Province

表5 甘肃民勤荒漠区植物群落土壤理化指标对土壤酶活性影响的蒙特卡罗检验结果
Table 5 Results of Monte Carlo test of effects of soil physicochemical indexes on soil enzyme activities of plant communities in Minqin desert region of Gansu Province

土壤理化指标 Soil physicochemical index	贡献率/% Contribution rate	F 值 F value	P 值 P value
铵态氮含量 Ammonium nitrogen content	31.6	4.3	0.020
pH 值 pH value	12.7	3.6	0.026
总有机碳含量 Total organic carbon content	11.8	2.9	0.038
含水量 Water content	11.6	2.5	0.041
硝态氮含量 Nitrate nitrogen content	11.5	2.1	0.150
速效磷含量 Available phosphorus content	11.2	1.8	0.168
全钾含量 Total potassium content	8.4	1.7	0.200
全氮含量 Total nitrogen content	7.7	3.2	0.056
速效钾含量 Available potassium content	3.1	0.7	0.562
全磷含量 Total phosphorus content	1.5	0.6	0.618

3 讨论和结论

3.1 民勤荒漠区不同植物群落的土壤理化性质

本研究中,民勤荒漠区不同植物群落土壤各理化指标均随着土壤深度增加而逐渐降低,这是因为荒漠

区土壤干旱且植物凋落物较少,营养成分和物理化学反应多集中在土壤表面,而土壤表面直接接触外部环境,养分会随着水流或其他介质向下层迁移、扩散,造成养分含量从地表向下递减^[20]。

土壤 pH 值受凋落物、土壤结构、植物根系分泌物、土壤微生物多样性、土壤养分有效性等因子的影响^[21]。总体来看,猫头刺群落 3 个土层土壤的 pH 值最高,针茅群落 3 个土层土壤的 pH 值最低,这可能与猫头刺群落根系较长(根系长度可达到 50 cm,甚至更长)、根部凋落物较少,而针茅根系较短(最长不到 20 cm)、根部凋落物较多有关。杨媛媛等^[22]发现,0~60 cm 土层土壤为酸性,且土壤 pH 值随土壤深度增加而增大,分析认为这主要是因为林下凋落物层较厚,土壤中有有机酸含量较高,致使土壤酸化,并且,越靠近地面的土壤凋落物越多,土壤有机酸含量自然越高,使得上层土壤的 pH 值小于下层土壤。本研究结果却恰好相反,3 个土层土壤均为碱性,且土壤 pH 值随着土壤深度增加而减小。可见,不同气候带植被土壤的酸碱度存在明显差异。

比较 4 种植物群落的土壤理化性质,红砂群落的土壤总有机碳、全氮、速效磷和速效钾含量总体上最高,土壤全钾含量较高,表明红砂群落土壤营养丰富,能够为土壤微生物生长提供适宜环境,促进土壤微生物对土壤有机物的分解和转化,有利于土壤有机碳的积累^[23]。值得注意的是,红砂群落 0~20 cm 土层土壤含水量显著($P<0.05$)高于其他植物群落,这是因为民勤荒漠区干旱少雨,红砂根系粗壮,锁水能力较强。

3.2 民勤荒漠区不同植物群落的土壤酶活性

对民勤荒漠区 4 种植物群落土壤 6 种酶活性进行比较,总体来看,淀粉酶活性最强,蔗糖酶活性最弱,据此推测淀粉酶是民勤荒漠区 4 种植物群落土壤中最活跃的水解酶。另有研究表明植被退化会显著影响淀粉酶活性,降低其酶促反应效率,致使土壤环境恶化^[24]。因此,可通过淀粉酶活性推测植被覆盖度^[25]。本研究中,4 种植物群落的土壤淀粉酶活性基本上明显强于其他 5 种酶,由此认为研究区域内的植被覆盖度较为良好。

纤维素酶主要源于土壤微生物^[26]。供试 4 种植物群落土壤的纤维素酶活性均表现为在 20~40 cm 土层最强,且霸王群落 20~40 cm 土层土壤纤维素酶活性最强,这是因为本研究区干旱少雨,地表温度较

高,表层土壤不适合微生物生存,且土壤中有有机质含量较少,上层土壤中的有机质会缓慢下移^[27],使得表层土壤微生物减少,致使大量微生物聚集在20~40 cm土层,从而使此层土壤纤维素酶活性最强。

总体来看,4种植物群落的土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性均随着土壤深度增加呈现逐渐减弱的趋势,这可能与凋落物和植物根系在土壤中的垂直分布有关^[28-29]。荒漠区植物群落的林下凋落物及植物根系主要分布在表层土壤中,是植物吸收营养的主要区域,根系通过根-土壤界面的物质交换对微生物活性、群落结构和土壤微环境产生影响^[21],且上层土壤通气性好,微生物最活跃,导致上层土壤酶活性远远强于下层土壤,而酶促反应可以有效促进土壤的理化反应,从而推动生态系统的物质循环和能量流动^[22]。土壤养分、水分、空气是影响土壤酶活性的重要因子,并且,随着土层深度增加,土壤的养分含量、水分含量及通气性均逐渐下降,酶促反应速率也逐渐下降,土壤酶活性自然随之降低^[30]。

3.3 民勤荒漠区不同植物群落土壤理化性质与土壤酶活性的关系

土壤酶可催化生物地球化学反应,指示土壤生态系统功能^[31]。土壤酶活性主要受土壤理化性质、养分有效性、土壤微生物含量以及气候和区位的综合影响^[32];有机质可改善土壤的孔隙度和通气性,为土壤酶发挥作用提供适宜条件^[33];氮、磷、钾可以促进植物根际微生物生长,提高土壤微生物生物量碳和生物量氮,促进土壤微生物合成各种酶,从而提高土壤酶活性^[34];pH值可影响土壤酶结构,进而影响土壤酶活性^[21];土壤含水量能够提高土壤微生物活性,有利于土壤微生物多样性提高^[35]。本研究中,土壤中的脲酶活性与铵态氮含量和含水量极显著($P<0.01$)正相关,这可能与民勤荒漠区土壤贫瘠、土壤保肥性能弱、降水量少、有机质含量低、氨大量挥发、氮素流失严重,可供土壤脲酶分解的底物较少等有关^[36]。土壤中的淀粉酶活性与全磷含量、铵态氮含量和pH值极显著正相关,与硝态氮含量和速效钾含量显著正相关,说明可根据这些土壤理化指标判断土壤淀粉酶活性,前者数值越高,后者活性越强。土壤中的过氧化氢酶活性和蔗糖酶活性与多数土壤理化指标呈显著或极显著正相关,二者均与总有机碳含量极显著正相关,与艾比湖流域荒漠土壤酶活性与土壤有机质含量的相关性^[37]基本一致,这很可能与二者的研究区域

均为干旱区,区内环境和气候等较为相似有关。土壤中的碱性磷酸酶活性与总有机碳含量、铵态氮含量、速效钾含量、pH值和含水量显著正相关,且与含水量的相关系数最大,说明土壤水分含量变化对土壤碱性磷酸酶活性影响最大。

RDA分析结果表明民勤荒漠区植物群落土壤的总有机碳含量、pH值、速效钾含量和含水量对土壤酶活性的影响均较大,而蒙特卡罗检验结果显示铵态氮含量、pH值、总有机碳含量和含水量对土壤酶活性影响显著,二者存在一定差异。究其原因,可能是蒙特卡罗检验为RDA分析的延伸,且数据存在误差。

3.4 结论

民勤荒漠区4种植物群落的土壤理化性质和酶活性存在明显差异,土壤理化性质大体表现为红砂群落最高,并随土壤深度增加而降低;土壤酶活性总体表现为霸王群落最高,并随土壤深度增加而减小;土壤总有机碳含量、pH值和含水量是影响土壤酶活性的主要因子,因此,可利用土壤酶活性来表征民勤荒漠区土壤质量状况。在后期民勤荒漠区生态恢复过程中,建议增加红砂和霸王的种植量,以加速该区域荒漠化恢复进程。

需要指出的是,本研究仅对4种植物群落土壤的酶活性和理化性质特征及关系进行了分析,研究结果无法全面反映民勤荒漠区植物群落土壤酶活性的主要影响因子,后续研究应综合考虑可能对土壤酶活性产生影响的各种因子,并结合研究区特点(如坡度、坡向等),全面深入地分析民勤荒漠区土壤酶活性对环境因子变化的响应。

参考文献:

- [1] 张宏伟,崔晓阳,郭亚芬.寒温带林区不同林型土壤酶活性和微生物生物量的变化特征[J].东北林业大学学报,2021,49(8):64-69.
- [2] 徐春燕,王涛,贾晨波,等.贺兰山东麓荒漠植物对土壤化学性质和酶活性的影响[J].生态环境学报,2020,29(12):2346-2354.
- [3] 李欣,陈小华,顾海蓉,等.典型农田土壤酶活性分布特征及影响因素分析[J].生态环境学报,2021,30(8):1634-1641.
- [4] 陈卓,徐海燕,殊秋丽,等.祁连山不同草地类型土壤理化性质及酶活性特征[J].绿色科技,2024,26(2):53-59,65.
- [5] 李茜,孙亚男,林丽,等.放牧高寒嵩草草地不同演替阶段土壤酶活性及养分演变特征[J].应用生态学报,2019,30(7):2267-2274.
- [6] 苏天燕,刘子涵,丛安琪,等.地下水埋深对半干旱区典型植物群落土壤酶活性的影响[J].中国沙漠,2021,41(4):185-194.

- [7] 陈 婷, 陈 于, 朱灿灿, 等. 不同施磷水平下外生菌根真菌对薄壳山核桃幼苗生长和磷吸收的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(3): 27-35, 49.
- [8] 杨丽梅, 周昀璠, 徐胜涛, 等. 不同植物覆盖下蕉园土壤化学性质和酶活性的变化特征[J]. 西南农业学报, 2024, 37(1): 163-171.
- [9] 罗莉娟, 尹清孝, 孙 伟, 等. 四川米仓山水青冈天然林下不同植物群落的土壤酶活性及化学计量特征[J]. 植物研究, 2024, 44(3): 470-480.
- [10] 海 龙, 曾 楠, 刘 洋, 等. 不同造林模式林下草本植物群落和土壤养分特征[J]. 生态环境学报, 2019, 28(11): 2141-2148.
- [11] 阿布拉江. 科尔沁沙地四种天然灌丛土壤养分及生物活性特征研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011: 2.
- [12] 那尔格孜·阿力甫, 宋泊沂, 庄伟伟. 准噶尔无叶豆对邻近草本植物群落多样性的影响及其与土壤因子的关系[J]. 草业科学, 2024, 41(7): 1583-1594.
- [13] 王顺霞, 周静静, 李云飞, 等. 宁夏荒漠草原典型植物群落多样性与土壤因子关系[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2023, 59(6): 711-719.
- [14] 姚佳妮, 刘 爽, 张钧杰, 等. 宁夏荒漠草原典型灌丛根际土壤酶活性及微生物代谢多样性[J]. 草业学报, 2024, 33(9): 1-14.
- [15] 李春霖. 甘肃民勤荒漠区典型植物群落土壤酶活性和土壤微生物量碳氮特征研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022: 22.
- [16] 汤萃文, 王瑛瑛, 李春霖, 等. 民勤荒漠区不同植物群落土壤微生物生物量碳氮及生态化学计量特征[J]. 林业与生态科学, 2024, 39(2): 190-196.
- [17] 李凡凡. 民勤荒漠区植物-土壤系统碳氮磷生态化学计量特征及空间变异[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2024: 1-2.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] 宫欢欢, 尤一泓, 林勇明, 等. 不同林龄木麻黄纯林土壤酶活性与土壤养分研究[J]. 江西农业大学学报, 2017, 39(3): 516-524.
- [20] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 等. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中N、P的化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 64-71.
- [21] 朱湾湾, 王 攀, 许艺馨, 等. 降水量变化与氮添加下荒漠草原土壤酶活性及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2021, 45(3): 309-320.
- [22] 杨媛媛, 陈奇伯, 黎建强, 等. 滇中地区常绿阔叶林土壤酶活性与理化因子通径分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(3): 86-91, 128.
- [23] 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.
- [24] 孙文颖, 马维伟, 李 广, 等. 尕斯库勒湖湿地植被退化过程中土壤蔗糖酶和淀粉酶活性的动态特征[J]. 草地学报, 2019, 27(1): 88-96.
- [25] 罗娜娜, 盛茂银, 王霖娇, 等. 长期植被恢复对中国西南喀斯特石漠化土壤活性有机碳组分含量和酶活性的影响[J]. 植物生态学报, 2023, 47(6): 867-881.
- [26] 王静蕾, 祝国强, 陈毅凡, 等. 几种食用菌胞外降解酶的研究进展[J]. 贵州农业科学, 2023, 51(6): 112-119.
- [27] 梁雨欣, 夏 炎, 满秀玲, 等. 大兴安岭寒温带森林演替过程中土壤碳氮磷含量及生态化学计量特征[J]. 林业勘查设计, 2024, 53(2): 76-83.
- [28] 雷跻初, 刘小伟, 邓 军, 等. 渭北旱塬不同年限撂荒地土壤酶活性及其化学计量变化特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 44-52.
- [29] 陈小花, 陈宗铸, 雷金脊, 等. 东寨港红树林湿地土壤因子与酶活性的关系[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 79-86.
- [30] 贾 丹, 王琪瑶, 李云红, 等. 小兴安岭红松林土壤理化性质及酶活性的研究[J]. 林业科技, 2023, 48(3): 23-26.
- [31] ZUCCARINI P, ASENSIO D, SARDANS J, et al. Effects of nitrogen deposition on soil enzymatic activity and soil microbial community in a Mediterranean holm oak forest[J]. Geoderma, 2023, 430: 116354.
- [32] 罗明霞, 胡宗达, 刘兴良, 等. 川西亚高山不同林龄粗枝云杉人工林土壤微生物生物量及酶活性[J]. 生态学报, 2021, 41(14): 5632-5642.
- [33] 朱美玲, 贡 璐, 张龙龙. 塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析[J]. 环境科学, 2015, 36(7): 2678-2685.
- [34] 梁 洋, 邵 森, 马冰倩. 太岳山油松人工林土壤质量随林龄的演变特征[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(3): 581-589.
- [35] 朱庆征, 冯志培, 冯二朋, 等. 祁连山区不同海拔植被带土壤微生物磷脂脂肪酸分析[J]. 中国水土保持科学, 2023, 21(6): 32-42.
- [36] 刘淑娟, 张 伟, 王克林, 等. 桂西北喀斯特峰丛洼地不同植被演替阶段的土壤脲酶活性[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5789-5796.
- [37] 刘晓星, 吕光辉, 杨晓东, 等. 艾比湖流域5种土壤类型的酶活性和理化性质[J]. 干旱区研究, 2012, 29(4): 579-585.

(责任编辑: 佟金凤)