

荒漠草原 4 种常见植物群落土壤酶活性比较

邵文山^{1,2}, 李国旗^{1,2*}, 陈科元^{1,2}, 赵盼盼^{1,2}

(1 宁夏大学 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021; 2 宁夏大学 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021)

摘 要: 该研究以宁夏盐池县沙边子地区 4 种常见的植物群落苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)和盐爪爪(*Kalidium foliatum*)为研究对象, 通过对群落组成和土壤基本理化性质的研究, 以及对脲酶、过氧化氢酶、磷酸酶、蔗糖酶 4 种常见土壤酶活性的检测, 分析了荒漠草原不同植物群落的土壤微环境。结果表明: (1) 不同植物群落物种组成不同, 且在研究区禾本科、菊科、藜科植物出现的频率相对较高。(2) 不同植物群落土壤理化性质存在差异。苦豆子群落土壤容重较低, 土壤全氮含量相对较高; 芨芨草群落土壤 pH 明显较高, 土壤有机碳含量相对较高; 油蒿群落土壤水分含量较低, 土壤全磷含量较低; 盐爪爪群落土壤盐分含量显著高于其它植物群落。(3) 不同植物群落土壤酶活性存在差异, 其中芨芨草和油蒿群落的表层土(0~10 cm)的土壤脲酶活性较高; 油蒿和盐爪爪群落的土壤过氧化氢酶随着土层加深酶活性反而有升高趋势; 苦豆子和芨芨草群落的土壤磷酸酶活性较高, 盐爪爪群落各土层间磷酸酶活性无显著差异; 4 种群落土壤蔗糖酶活性普遍较低, 且各土层间差异也不大。(4) 不同植物群落的同种土壤酶活性间相关性不同。研究认为, 根据不同植物群落特征及土壤特性, 尤其是不同植物群落间土壤酶活性的相关性, 可预测荒漠草原地区植物群落演替趋势, 通过适度的人为调控, 可使群落向进展方向演替。

关键词: 植物群落; 土壤酶活性; 荒漠草原

中图分类号: Q151.94; S154.4 **文献标志码:** A

Comparative Studies on Soil Enzymic Activities of Four Kinds of Common Plant Communities in Desert Steppe

SHAO Wenshan^{1,2}, LI Guoqi^{1,2*}, CHEN Keyuan^{1,2}, ZHAO Panpan^{1,2}

(1 Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2 Key Laboratory for Recovery and Restoration of Degraded Ecosystem in North-western China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In this paper, *Sophora alopecuroides*, *Achnatherum splendens*, *Artemisia ordosica* and *Kalidium foliatum* are 4 kinds of common plant communities growing in Yanchi County of Ningxia Province. They were taken as examples to study the soil microenvironment of different plant communities in desert steppe. After the study of community composition, the basic physical and chemical properties of the soil, we measured urease, catalase, phosphatase, sucrase. The results showed that: (1) the species composition of the different plant communities were various, and the frequency of occurrences of Gramineae, Compositae, Chenopodiaceae were relatively high in survey region. (2) There were differences on soil physical and chemical properties in the 4 kinds of plant communities. For example, the soil bulk density was less in *S. alopecuroides* community and the total nitrogen was relatively higher, the pH and organic carbon content of soil

收稿日期: 2015-12-15; 修改稿收到日期: 2016-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(31540007)

作者简介: 邵文山(1990—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事植物生态学、土壤生态学研究。E-mail: jinhaide@163.com

* 通信作者: 李国旗, 研究员, 主要从事植物生态学等方面的研究。E-mail: guoqilee@163.com

were significantly higher than others in *A. splendens* community. The soil moisture content and total phosphorus were lower in *A. ordosica* community and the salt content was higher markedly in *K. foliatum* community. (3) There were differences of soil enzyme activity among 4 kinds of plant communities. The urease activity of *A. splendens* and *A. ordosica* communities topsoil soil(0—10 cm) was higher; soil catalase of *A. ordosica* and *K. foliatum* communities increased as soil deepening; soil phosphatase activity of *S. alopecuroides* and *A. splendens* communities were higher and soil phosphatase activity of *K. foliatum* community was no significant difference in various soil layer($P>0.01$); soil sucrose activity of 4 kinds of communities was generally low, and the little difference between the soil layer. (4) The correlation of the same soil enzyme activity was different among various plant communities. In conclusion, the different plant community characteristics and soil traits, especially the correlations of soil enzyme activities among different plant communities, can predict the succession of plant communities in desert steppe, and can be used as ways of vegetation restoration of desert steppe on the other hand. That is, moderate artificial disturb can raise soil enzyme activity, then increase biomass, which make desert steppe onto positive succession.

Key words: plant communities; soil enzyme activity; desert steppe

植物群落是构成生态系统的基础,是一个地区生态系统稳定的关键。荒漠草原地区植被较为稀疏,且多呈斑块状分布,其生态系统极为脆弱,加之现在人类越来越频繁的干扰,极易发生退化^[1]。土壤作为植被的常规载体是一个活的生态系统,而植被又是影响土壤结构和养分的重要因素,同时它还具有保水固土、防止侵蚀、改良土壤和改善生态环境等作用^[2]。土壤酶因其与植物生长、土壤理化性质、环境条件等密切相关,被作为土壤生态系统变化的敏感指标^[3],自 20 世纪 80 年代以来,一直是土壤学、生态学界等研究的热点。目前,有关农田、湿地等方面的土壤酶研究很多,但对于荒漠草原的土壤酶活性研究较少。

土壤酶作为土壤中的生物催化剂,参与包括土壤生物化学过程在内的自然界物质循环和能量流动^[4-5],土壤中所进行的一切生物和化学过程都要由酶的催化作用才能完成,可以说它既是土壤有机物转化的执行者,又是植物营养元素的活性库^[6]。特别是脲酶、过氧化氢酶、磷酸酶、蔗糖酶在土壤养分循环以及植物生长所需养分的供给中扮演着重要角色,所以本试验选择了这 4 种酶作为分析对象。脲酶是土壤中广泛存在的一种水解酶,能将土壤中的有机物质分解,促其水解生成 NH_3 和 CO_2 ,而 NH_3 是植物氮素营养的直接来源, CO_2 是植物光合作用的基本原料之一^[3];过氧化氢酶是合成土壤腐殖质和防止过氧化氢对生物毒害的重要氧化还原酶系,是参与土壤中物质和能量转化的重要酶之一^[7];磷酸酶可促进土壤中有机磷化合物水解,生成能为植物所利用的无机态磷^[8];土壤蔗糖酶能促进蔗糖分解,能反映土壤中的有机碳的转化和呼吸强度^[9]。研究土壤酶活性有助于揭示植物与土壤内在联系。

宁夏盐池县是陕、甘、宁、蒙四省(区)的交界地带,全县地处农牧交错带,自然环境具有典型的过渡性特点,县境由东南至西北为广阔的干草原和荒漠草原。本研究选取宁夏盐池县沙边子地区 4 种常见的植物群落,苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)和盐爪爪(*Kalidium foliatum*),通过地上植被调查、土壤基本理化性质的测定和 4 种基本土壤酶活性检测,揭示了不同植物群落及同种植物群落不同土壤层土壤酶活性的规律,从微观角度反映了植被与土壤的关系,为揭示荒漠草原不同植物群落演替规律、预测植被变化及植被恢复提供了理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验区位于宁夏东部盐池县($\text{E}106^{\circ}30' \sim 107^{\circ}47'$, $\text{N}37^{\circ}04' \sim 38^{\circ}10'$)沙边子,处于毛乌素沙地西南边缘,自然条件较为恶劣,属于典型中温带大陆性气候,年平均气温 7.7°C ,年均无霜期 165 d,年均降水量 $250 \sim 300 \text{ mm}$,且降水主要集中在 6~9 月,潜在年蒸发量为 $2\,500 \text{ mm}$ 左右。土壤类型主要为灰钙土,还有大面积的风沙土、黄绵土等,土壤质地以沙土、沙壤和粉沙壤为主。沙边子虽然距离盐池县城仅 20 多公里,但气候条件有一定差异,虽然降雨量相差不大,但年平均气温比盐池低,蒸发量比盐池大,日照比盐池短,风沙比盐池大。土地类型按地貌、植被、土壤、地下水等因素的不同,采用综合分类的原则,可分为沙丘地、滩地和覆沙基岩梁地^[10]。试验研究地区坐标为 $\text{E}107^{\circ}24'$, $\text{N}37^{\circ}43'$,布设在封育的荒漠草场区,围封前长期过度的人类活动干扰使草场发生了严重退化,封育后植被有所恢复。植

被主要以苦豆子 (*S. alopecuroides*)、芨芨草 (*A. splendens*)、盐爪爪 (*K. foliatum*)、油蒿 (*A. ordosica*)、柠条 (*Caragana intermedia*)、白刺 (*Nitraria tangutorum*) 和牛心朴子 (*Cynanchum komarovii*) 等为主。

1.2 试验设计

于 2015 年 7 月下旬植物生长最旺盛的时期,选取围栏封育内苦豆子、芨芨草、油蒿和盐爪爪为优势种的 4 种植物群落类型草地,在每种草地中选取地势相对平坦、环境条件较为一致的 25 m×30 m 的 4 个大样方,在每个大样方内设 5 条“之”字型样线,每条样线间距 5 m,每条样线上距 5 m 取 1 个 1 m×1 m 的小样方,每条样线上取 6 个,共计 120 个小样方进行植被调查。调查结束后,在每个草地类型 5 条样线上的小样方内分别按 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 取土,将同一样线上的 6 个土样混合均匀,共计 60 个土样带回实验室,风干后过筛,进行土壤酶活性的测定和土壤理化性质的测定。

1.3 测定内容及方法

土壤水分采用常规的烘干法测定,土壤容重采用环刀法测定^[2,11],全盐含量采用 DDS-307 电导率仪,pH 采用 HI 98128 酸度计,土壤有机碳测定用重铬酸钾容量法-外加热法,全氮用半微量凯氏定氮法,全磷用钼锑钒比色法^[12]。土壤酶活性的测定中脲酶采用苯酚钠-次氯酸钠比色法^[13],土壤中脲酶

活性的测定是以脲素为基质经酶促反应后测定其生成的氨量,也可以通过测定未水解的尿素量来计算,本试验以尿素为基质,根据酶促产物氨与苯酚-次氯酸钠作用生成蓝色的靛酚,来分析脲酶活性;过氧化氢酶以容量法测定^[12-14],用高锰酸钾溶液滴定过氧化氢分解反应剩余的过氧化氢量,以此表示过氧化氢酶的活性;磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法测定^[13,15],是依据酶促生成的有机基团量来计算磷酸酶活性;蔗糖酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定^[13],蔗糖酶酶解所生成的还原糖与可与 3,5-二硝基水杨酸反应生成橙色的 3-氨基-5-硝基水杨酸,颜色深度与还原糖量有关,以此用测定还原糖量来表示蔗糖酶的活性。

1.4 数据处理

用 Excel 2003 软件进行数据整理及部分图表制作,通过 SPSS 17.0 软件进行方差、显著性及相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同植物群落种类组成

4 种植物群落种类组成各不相同,但也有在不同群落中重复出现的植物(表 1)。在苦豆子群落中出现了 15 种植物,隶属于 9 个科 15 个属,其中以禾本科的居多,有 5 种;在芨芨草群落中出现的植物有 14 种,隶属于 7 个科 11 个属,其中菊科有 4 种,禾

表 1 植物群落种类组成
Table 1 Species composition of the plant communities

群落类型 Community type	物种组成 Species composition	物种数 Species number	总盖度 Total coverage/%	优势种盖度 The coverage of dominant species/%
苦豆子群落 Community of <i>S. alopecuroides</i>	苦豆子 <i>S. alopecuroides</i> 、苦苣菜 <i>Sonchus deraceus</i> 、冰草 <i>Agropyron cristatum</i> 、碱蓬 <i>Suaeda glauca</i> 、灰灰菜 <i>Chenopodium album</i> 、白草 <i>Pennisetum flaccidum</i> 、西伯利亚滨藜 <i>Atriplex sibirica</i> 、芨芨草 <i>A. splendens</i> 、白刺 <i>N. tangutorum</i> 、西伯利亚蓼 <i>Polygonum sibiricum</i> 、猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i> 、针茅 <i>Stipa capillata</i> 、芦苇 <i>Phragmites australis</i> 、披针叶野决明 <i>Thermopsis lanceolata</i> 、鹅绒藤 <i>Cynanchum chinense</i>	15	55~60	35~40
芨芨草群落 Community of <i>A. splendens</i>	芨芨草 <i>A. splendens</i> 、白刺 <i>N. tangutorum</i> 、白草 <i>P. flaccidum</i> 、冰草 <i>A. cristatum</i> 、猪毛蒿 <i>A. scoparia</i> 、野艾蒿 <i>Artemisa lavandulaefolia</i> 、黄蒿 <i>Artemisia annua</i> 、西伯利亚滨藜 <i>A. sibirica</i> 、灰灰菜 <i>C. album</i> 、阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i> 、西伯利亚蓼 <i>P. sibiricum</i> 、苦马豆 <i>Sphaerophysa salsula</i> 、囊果碱蓬 <i>Suaeda physophora</i> 、碱蓬 <i>S. glauca</i>	14	50~55	35~40
油蒿群落 Community of <i>A. ordosica</i>	油蒿 <i>A. ordosica</i> 、苦豆子 <i>S. alopecuroides</i> 、灰灰菜 <i>C. album</i> 、牛心朴子 <i>C. komarovii</i> 、西山委陵菜 <i>Potentilla sischanensis</i> 、白草 <i>P. flaccidum</i> 、丝叶山苦荚 <i>Ixeris chinensis</i> 、猪蒿 <i>Olgaea leucophylla</i> 、冰草 <i>A. cristatum</i> 、碱蓬 <i>S. glauca</i>	10	35~40	30~35
盐爪爪群落 Community of <i>K. foliatum</i>	盐爪爪 <i>K. foliatum</i> 、白刺 <i>N. tangutorum</i> 、碱蓬 <i>S. glauca</i>	3	40~45	40~45

本科和藜科各有 3 种;油蒿群落中有 10 种植物,隶属于 7 个科 10 个属,其中菊科的出现 3 种,禾本科出现 2 种;盐爪爪群落中物种较少,出现了 3 种,分别属于不同的科和属,优势种盐爪爪属于藜科盐爪爪属。4 种群落中碱蓬是唯一一种都存在的物种,这与它自身的优势密切相关,碱蓬为藜科一年生草本植物,生存繁殖属于机会主义且生长周期短,在条件适宜时可迅速生长并产生大量的种子。此外,4 种群落中属于菊科、禾本科及藜科的相对较多,这与它们能够适应严酷的自然条件有关。4 种群落中优势种的盖度差异不大,但群落盖度有差异性,苦豆子群落的最高,油蒿群落的最低,盐爪爪群落中因其它植物种出现频率、多度较低,群落盖度基本为优势种盖度。

2.2 不同植物群落土壤理化性质

土壤水分是植物生长和植被恢复的主要限制因子,尤其是在干旱地区^[16],土壤水分的变化又受到降雨量、土壤性质和植被类型等的影响^[17]。土壤水分含量(表 2),不同植物群落间存在差异,总体上盐爪爪群落 > 芨芨草群落 > 苦豆子群落 > 油蒿群落;同一植物群落不同土壤层除芨芨草群落,其它 3 种群落的差异不显著($P>0.05$),芨芨草群落中 0~10 cm 层的低于 10~20 cm 和 20~30 cm 层,且差异显著($P<0.05$)。土壤容重是土壤基本理化性状之一,与土壤保水、蓄水及抗侵蚀性和土壤的透气性等密切相关^[18]。4 种植物群落的土壤层中油蒿群落

的容重与其它群落土壤层有明显差异,且它的不同土层间差异不显著($P>0.05$);盐爪爪群落和芨芨草群落 0~10 cm 层土壤容重低于 10~30 cm 层;苦豆子群落中 0~20 cm 土层的土壤容重处于同一水平,均低于深层土壤。土壤 pH 是决定土壤肥力的重要特征参数之一,而且 pH 值变化可直接影响到土壤酶参与土壤中生化反应的速度^[19-20]。从表 2 可知,4 种植物群落土壤 pH 均为碱性,不同植物群落、同一群落不同土层间均有差异,且都随着土层的加深 pH 有增大趋势,芨芨草群落土壤 pH 要显著高于其它植物群落的土壤。土壤电导率与土壤全盐含量呈正相关,由此可以用电导率的大小表征全盐含量的大小^[21]。土壤全盐含量盐爪爪群落 > 苦豆子群落 > 芨芨草群落 > 油蒿群落,不同群落类型的土壤全盐含量总体差异显著;盐爪爪群落、苦豆子群落土壤中,随着土层的加深,土壤全盐含量下降,且前者各土层间的差异显著($P<0.05$),油蒿群落土壤中盐分含量最低;苦豆子群落和油蒿群落土壤各土层间全盐含量差异不显著($P>0.05$)。

土壤 C/N/P 是植物生长必备的大量元素之一,对植物的生存具有重要意义;同时据研究发现,它们还对土壤酶活性有明显的影 响。4 种植物群落中,不同植物群落同一土层土壤中 C/N/P 含量具有差异,同种植物群落不同土层间的变化趋势也有差异。对于土壤有机碳,芨芨草群落土壤中含 量最高,油蒿群落表层土(0~10cm)含量较低,且各土层间变化

表 2 植物群落土壤理化性状
Table 2 Soil chemical and physical properties of different plant communities

植物群落 Community type	土层深度 Soil depth /cm	含水量 Soil water content/%	土壤容重 Soil bulk density /(g/cm ³)	pH	电导率 Conductivity /[ms/(cm * 10)]	有机碳 Organic Carbon /(g/kg)	全氮 Total nitrogen /(g/kg)	全磷 Total phosphorus /(g/kg)
苦豆子群落 Community of <i>S. alopecuroides</i>	0~10	13.40±0.63 b	1.21±0.17 b	8.82±0.08 e	10.17±2.58 d	7.72±0.18 b	0.61±0.06 a	0.28±0.03 a
	10~20	13.25±1.11 b	1.26±0.10 b	9.02±0.19 cd	9.16±1.90 d	6.79±0.21 c	0.33±0.02 bc	0.22±0.01 bc
	20~30	13.93±2.79 b	1.31±0.09 a	9.10±0.13 cd	8.71±2.18 d	5.62±0.14 d	0.27±0.02 d	0.21±0.02 c
芨芨草群落 Community of <i>A. splendens</i>	0~10	13.56±1.87 b	1.21±0.10 b	9.16±0.08 c	1.68±0.18 fg	9.13±0.21 a	0.36±0.03 b	0.27±0.03 a
	10~20	15.04±1.64 a	1.38±0.10 a	9.63±0.01 b	3.62±0.64 ef	7.49±0.16 bc	0.28±0.01 cd	0.22±0.01 b
	20~30	15.78±0.28 a	1.38±0.22 a	9.86±0.04 a	4.89±0.40 e	7.22±0.14 bc	0.15±0.02 f	0.20±0.01 c
油蒿群落 Community of <i>A. ordosica</i>	0~10	10.10±0.33 c	1.54±0.19 a	8.78±0.06 e	0.49±0.01 g	5.93±0.21 d	0.21±0.02 e	0.15±0.01 d
	10~20	10.10±0.02 c	1.51±0.13 a	8.95±0.13 d	0.49±0.02 g	5.47±0.24 e	0.22±0.02 de	0.13±0.02 d
	20~30	10.36±0.22 c	1.52±0.12 a	9.08±0.04 cd	0.47±0.01 g	5.43±0.08 e	0.20±0.02 ef	0.12±0.01 d
盐爪爪群落 Community of <i>K. foliatum</i>	0~10	16.27±2.07 a	1.26±0.17 b	8.58±0.09 f	39.87±1.00 a	8.69±0.08 a	0.37±0.02 b	0.24±0.03 ab
	10~20	17.41±1.61 a	1.46±0.09 a	8.68±0.08 ef	33.07±1.01 b	7.48±0.18 bc	0.32±0.06 bc	0.25±0.00 ab
	20~30	17.14±1.18 a	1.36±0.16 a	8.86±0.04 e	28.40±1.51 c	4.37±0.40 f	0.06±0.02 g	0.22±0.01 bc

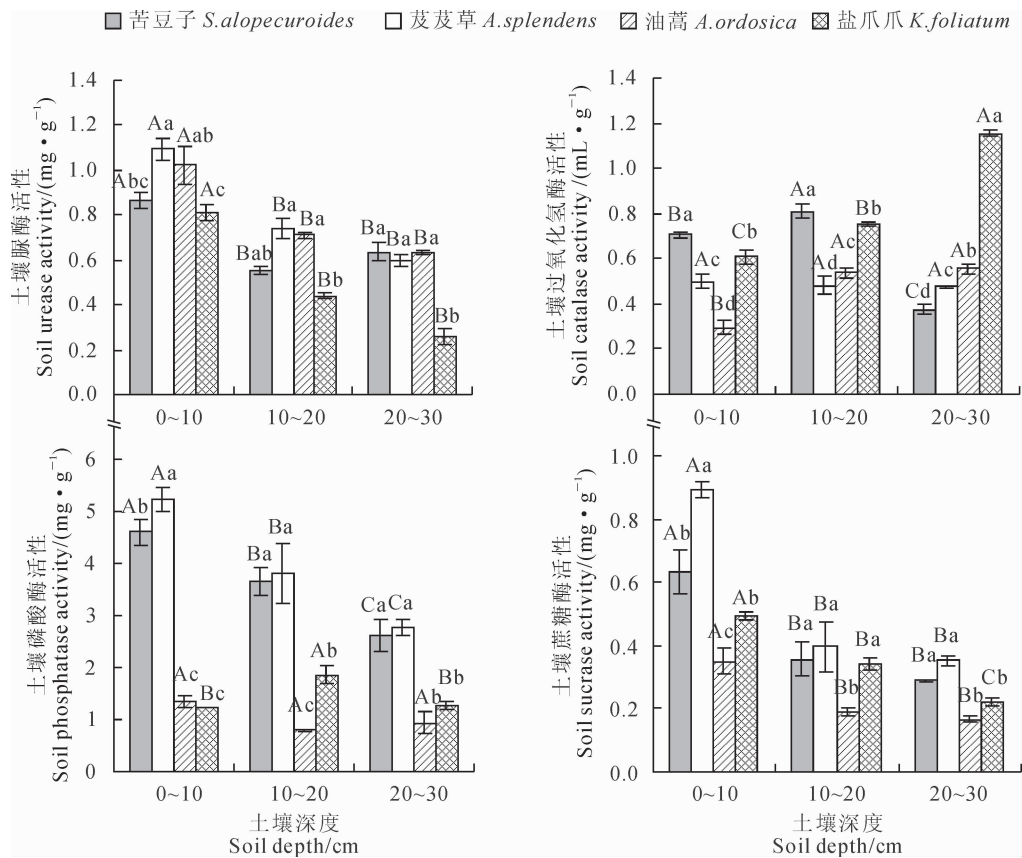
注:不同字母表示不同植物群落间差异显著($P<0.05$)。
Note: Different letters mean significant difference among plant communities at the 0.05 level.

差异不大,10~20 cm 和 20~30 cm 间差异不显著 ($P>0.05$),而其它群落中各土层间随着土壤深度加深,有机碳含量不断下降且差异显著 ($P<0.05$);对于土壤全氮,苦豆子群落土壤含量最高,随着土壤深度的增加,除油蒿群落外均有下降趋势,且在苦豆子、芨芨草群落中差异显著 ($P<0.05$),油蒿群落土壤各层中差异不显著 ($P>0.05$),盐爪爪群落中 0~10 cm 和 10~20 cm 间差异不显著 ($P>0.05$),但 20~30 cm 土层中含量明显降低;对于土壤全磷,油蒿群落中明显较低且其各土层间差异不显著 ($P>0.05$),而其它 3 种群落在同一土壤土层中全磷含量差异不显著 ($P>0.05$),除盐爪爪外,苦豆子和芨芨草群落随着土层的加深,全磷含量下降。

2.3 不同植物群落土壤酶活性变化

土壤中的脲酶对于提高土壤氮素的利用率及促进土壤氮素循环具有重要作用^[22]。4 种植物群落中芨芨草群落、油蒿群落、盐爪爪群落土壤中脲酶活性

随土层的增加,脲酶活性均有降低的趋势(图 1),而且在降低趋势中均呈现出 0~10 cm 与 10~20 cm 和 20~30 cm 差异极显著 ($P<0.01$),10~20 cm 和 20~30 cm 差异不显著 ($P>0.01$),可能的原因与土壤酶的来源有关,表层土中微生物、一些土壤动物等更加活跃,其次土壤表层存在枯落物。苦豆子群落中土壤脲酶活性先降低后升高,变化过程中同样 0~10 cm 和深层土差异极显著 ($P<0.01$),而 10~20 cm 和 20~30 cm 差异不显著 ($P>0.01$),出现这种情况的原因可能同样与土壤酶的来源有关,20~30 cm 土层中脲酶活性升高可能与植物根系分泌物有关。不同植物群落土壤脲酶的变化趋势不同,不同植物群落同一土层间存在差异,有的甚至存在极显著的差异 ($P<0.01$),其原因除了不同样地土壤养分的差异^[6,23-24],还与地上植被的不同有关,不同植物根系及枯落物分泌物、分泌量均存在差异,土壤动物对其环境的适应能力也有所不同。



不同大写字母表示同一植物群落不同土层极显著差异,不同小写字母表示不同植物群落同一土层极显著差异 ($P<0.01$)。

图 1 不同植物群落土壤酶活性

In the figure, different capital letters mean significant difference at the confidence level of $P<0.01$ in the same plant community among different soil horizons, different normal letters mean significant difference at the confidence level of $P<0.01$ in the same soil horizon among the different plant communities.

Fig. 1 The soil enzyme activities of different plant communities

过氧化氢酶可以表示土壤氧化过程的强度,在一定程度上反映了土壤微生物学过程的强度^[25]。4种群落中土壤过氧化氢酶活性差异明显(图 1)。芨芨草群落中不同土壤层过氧化氢酶活性有逐层下降的趋势,但差异不显著($P>0.01$),且 0~20 cm 土壤层的过氧化氢酶活性又显著($P<0.01$)低于其它 3 种群落,一方面与酶的来源有关,另一方面也说明了芨芨草对贫瘠土壤的适应能力。苦豆子和盐爪爪群落不同土壤层间过氧化氢酶活性差异极显著($P<0.01$),前者随土层的加深先升后降且 0~10 cm 高于 20~30 cm;后者随着土层的加深,过氧化氢酶活性反而出现显著升高,且 20~30 cm 中的是所有测定值中最高的,可能的原因还土壤水分和盐分有关,高盐土壤限制了土壤微生物的种类和数量,此外与植物根系分布也有关,优势种盐爪爪属于小灌木扎根相对较深。油蒿群落土壤层中过氧化氢酶活性也存在随土层加深而升高,可能同样与植被的根系分布有关,油蒿属于半灌木类植物。

磷酸酶是土壤中广泛分布的一种水解酶,是一类催化有机磷化合物水解的酶,其活性高低对土壤中有机磷的生物有效性有直接影响^[26]。4 种群落中苦豆子、芨芨草群落中随着土层的加深(图 1),一方面磷酸酶活性均呈降低趋势且差异极显著($P<$

0.01);另一方面相比较同一土层,两者的磷酸酶活性差异不明显但均要明显高于另外 2 种群落,可能有草本植物和灌木植物间的差异,有关这方面的研究还需进一步探索。油蒿群落和盐爪爪群落中随着土层的加深,前者先降后升,但差异均不显著($P>0.01$),可能还与土壤质地有关,油蒿群落土壤多为沙土;后者先升后降,0~10 cm 和 20~30 cm 间差异不显著($P>0.01$),但两者与 10~20 cm 的差异极显著($P<0.01$)。

蔗糖酶能够催化多种低聚糖的水解,在土壤碳循环中意义重大,能较好的反映土壤肥力水平和生物学活性强度^[27]。从图 1 可知,4 种群落中土壤蔗糖酶活性随着土层的加深,均呈降低趋势,其中苦豆子群落、芨芨草群落和油蒿群落土壤中 0~10 cm 和 10~20 cm、20~30 cm 间均表现为差异极显著($P<0.01$),而 10~20 cm 和 20~30 cm 间差异不显著($P>0.01$),说明这 3 种群落土壤表层蔗糖酶较为活跃,可能一方面与土壤表层糖份来源广有关,另一方面可能和土壤酶来源有关;盐爪爪群落土壤各层间均差异极显著($P<0.01$),说明 10~20 cm 和 20~30 cm 土层间土壤成分、土壤酶来源等都有可能存在差异。

表 3 不同群落间土壤酶活性相关性

Table 3 Correlation coefficients between soil enzyme activities under different plant communities

项目 Project	土壤酶种类 Soil enzyme species	苦豆子群落 Community of <i>S. alopecuroides</i>	芨芨草群落 Community of <i>A. splendens</i>	油蒿群落 Community of <i>A. ordosica</i>	盐爪爪群落 Community of <i>K. foliatum</i>
苦豆子群落 Community of <i>S. alopecuroides</i>	脲酶 Urease	1.000	0.560	0.608	0.551
	过氧化氢酶 Catalase	1.000	0.171	-0.323	-0.875**
	磷酸酶 Phosphatase	1.000	0.910**	0.704*	-0.029
	蔗糖酶 Sucrase	1.000	0.961**	0.903**	0.905**
芨芨草群落 Community of <i>A. splendens</i>	脲酶 Urease	0.560	1.000	0.955**	0.968**
	过氧化氢酶 Catalase	0.171	1.000	-0.320	-0.291
	磷酸酶 Phosphatase	0.910**	1.000	0.677*	-0.060
	蔗糖酶 Sucrase	0.961**	1.000	0.957**	0.914**
油蒿群落 Community of <i>A. ordosica</i>	脲酶 Urease	0.608	0.955**	1.000	0.954**
	过氧化氢酶 Catalase	-0.323	-0.320	1.000	0.731*
	磷酸酶 Phosphatase	0.704*	0.677*	1.000	-0.639
	蔗糖酶 Sucrase	0.903**	0.957**	1.000	0.911**
盐爪爪群落 Community of <i>K. foliatum</i>	脲酶 Urease	0.551	0.968**	0.954**	1.000
	过氧化氢酶 Catalase	-0.875**	-0.291	0.731*	1.000
	磷酸酶 Phosphatase	-0.029	-0.060	-0.639	1.000
	蔗糖酶 Sucrase	0.905**	0.914**	0.911**	1.000

注: * 表示显著相关($P<0.05$), ** 表示极显著相关($P<0.01$)
Note: * Correlation is significant at the 0.05 level, ** Correlation is significant at the 0.01 level.

2.4 不同群落间土壤酶活性相关性

不同群落间同种土壤酶活性间的相关性分析在一定程度上反映了群落间对不同土壤酶的需要(表 3)。对于脲酶,芨芨草群落、油蒿群落和盐爪爪群落两两之间均呈极显著正相关($P < 0.01$);对于过氧化氢酶,苦豆子群落和盐爪爪群落间呈极显著负相关($P < 0.01$),油蒿群落和盐爪爪群落间呈显著正相关($P < 0.05$);对于磷酸酶,苦豆子群落和芨芨草群落间呈极显著正相关($P < 0.01$),油蒿群落和苦豆子群落、芨芨草群落呈显著正相关($P < 0.05$);对于蔗糖酶,4 种群落两两之间均呈极显著正相关($P < 0.01$)。

3 讨 论

3.1 不同植物群落物种组成对植被恢复的影响

荒漠草原严酷的生态条件及前期过度放牧等一系列自然和人为因素,已经严重打破了地区的生态平衡,传统的禁牧封育措施虽然在一定程度上改善了生态环境,使植被覆盖率、植被生物量等都有了提高,但生态恢复是一个漫长的过程,还存在植物种类丰富度偏低、群落物种多样性偏低等问题,适当的人为定向恢复手段颇具价值。从表 1 可知,荒漠草原区不同植物群落物种组成不同,而作为一个地区生态系统稳定的基础,植物的种类、数量等尤为关键,现在在荒漠草原区人工补播种子越来越常见,在具体实施中应该根据当地原有植物的物种组成特征,有针对性的实施。本研究发现菊科、禾本科、藜科植物种类耐旱、耐盐碱等更具优势,且一年生植物具有一定的繁殖优势,由此,在前期人工补播种子时应适当增加一些一年生植物,另外可尽量选择当地适应性强的菊科、禾本科、藜科植物。

3.2 土壤理化性质对不同植物群落的影响

本研究发现,荒漠草原区土壤盐碱度普遍较高,且在不同植物群落所在土壤间差异明显,其原因除了土壤质地的不同,还与各植物群落植物种有关。芨芨草群落中 pH 高于其它植物群落就与其自身具有优良的耐盐碱性有关,已有研究证明芨芨草是一种改良盐碱地的优良植物^[28],而随着土壤层的加深,土壤 pH 值出现反常升高的原因可能与土壤中的盐分随降水下渗有关。土壤水分、容重与湿润地区草地^[29]土壤相比差异较明显,出现这种情况的原因可能是:(1)植被盖度不同,油蒿群落植被盖度显然低于其它 3 种植物群落,而盐爪爪群落出现例外,与该地区地势相对低且距离盐湖较近等因素有关;

(2)植物种类不同,不同植物由于根系生长、分布、发达程度等的不同,对土壤保水程度不同;芨芨草为多年生禾本科植物,根系主要分布在 0~30 cm 土层深度^[11],因此相对同属于草本类植物群落的苦豆子,芨芨草在 10~30 cm 处土壤水分含量较高;(3)枯落物差异,草场经封育后,植被枯落物量明显增加,调查发现,盐爪爪群落和芨芨草群落中枯落物量高于苦豆子群落,油蒿群落中最低。土壤 C/N/P 含量在随土壤深度加深过程中大体呈现下降趋势,这与大多数相似的研究中一致,但不同植物群落间下降幅度具有差异,而且 C/N/P 3 种成分的含量在各群落土壤中存在差异,说明不同植物对土壤 C/N/P 的要求各异,以往的荒漠草原研究中往往强调水分对植物分布的影响,忽略了土壤内在营养成分的影响;不同植物群落在各土层间 C/N/P 的含量不同,其原因一方面与土壤本身有关,另一方面和植物根系的分布和营养物质吸收有关,而植物营养物质的吸收又和水分密切相关。

3.3 不同植物群落土壤酶活性的变化

土壤酶活性方面,不同植物群落土壤酶活性存在差异,且不同群落土层间变化规律也不同。刘淑慧等^[30]对松嫩平原盐碱草地主要植物群落土壤酶活性做过研究,结果表明:不同植物群落土壤酶活性不同,各植物群落的土壤酶活性垂直分布多表现为随着土壤深度的加深而依次递减的规律,且表层(0~10 cm)土壤酶活性最为活跃。王晓龙等^[31]对鄱阳湖典型湿地植物群落表层土壤酶活性分析显示,不同群落土壤酶活性也存在差异。马文文等^[32]对荒漠草原盐爪爪群落和骆驼刺群落土壤酶活性进行过研究,结果表明:盐爪爪群落土壤酶活性高于骆驼刺群落,且随土层的加深而降低。本研究中,4 种植物群落不同土壤酶活性差异不同,芨芨草群落和油蒿群落表层土(0~10 cm)脲酶活性明显高于苦豆子群落和盐爪爪群落,盐爪爪群落土壤过氧化氢酶活性相对较高,油蒿群落磷酸酶活性偏低,蔗糖酶活性 4 种群落间差异不明显;此外,本试验中 4 种植物群落土壤中随着土层的加深,土壤酶活性的变化趋势也不同,大部分随着土层的加深酶活性有降低的趋势,这与大多数研究中土壤酶的变化趋势一致,但也有其它变化规律,芨芨草群落各土层中的过氧化氢酶活性差异不显著($P > 0.01$),在盐爪爪群落中过氧化氢酶活性随土层的加深却反而升高,而磷酸酶活性先升后降。其原因从土壤酶活性的来源看,与植物种类的不同有关,不同植物根系分泌物、枯落

物积累及分泌物不同,导致不同土壤酶活性不同,其次还可能与土壤养分、土壤质地等有关,有关这方面报道近几年也较多。此外,4种植物群落中随着土层的加深,4种土壤酶活性的变化趋势不同,这与植物根系的分布有关,盐爪爪和油蒿属于灌木类植物,根系分布与草本类的苦豆子和芨芨草不同,而同属于草本类的芨芨草和苦豆子植物,芨芨草的根系更加发达。

3.4 不同植物群落土壤酶活性的相关性

有关不同植物群落间土壤酶活性的相关性研究鲜有报道,南京大学盐生植物实验室在盐沼湿地生态系统的修复方面对此有过相关研究,通过对恢复

区土壤酶活性等的研究,实现芦苇对互花米草的替代,从而很好地改善了生境中土壤的理化条件^[7]。本研究中,不同植物群落在所检测的4种土壤酶中,同种土壤酶在不同植物群落土壤中的相关性不同,有极显著正相关、极显著负相关和相关性不显著。由此,鉴于土壤酶活性的意义,根据不同土壤酶活性的相关性,一方面可预测荒漠草原地区植物群落的演替趋势,另一方面生态恢复是一项长期工程,目前,宁夏荒漠草原生态恢复以封育禁牧为主,还属于传统的自然恢复手段,以土壤酶为突破,通过适度的人为调控,可使群落向正方向演替或通过群落替代提高荒漠草原生物量。

参考文献:

- [1] 阿娟,张福顺,张晓东,等. 荒漠植物群落特征及其与气候因子的对应分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, **26**(1): 174-178.
A J, ZHANG F S, ZHANG X D, *et al.* The characteristics of desert plant community and the corresponding analysis on climatic factors[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, **26**(1): 174-178.
- [2] 贾倩民,陈彦云,杨阳,等. 不同人工草地对于干旱区弃耕地土壤理化性质及微生物数量的影响[J]. 水土保持学报, 2014, **28**(1): 178-182, 220.
JIA Q M, CHEN Y Y, YANG Y, *et al.* Effect of different artificial grassland on soil physico-chemical properties and microbial quantities of abandoned land in arid area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, **28**(1): 178-182, 220.
- [3] 弋良朋,马健,李彦. 荒漠盐生植物根际土壤酶活性的变化[J]. 中国生态农业学报, 2009, **17**(3): 500-505.
YI L P, MA J, LI Y. Dynamics of soil enzyme activity in the rhizosphere of desert halophyte[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, **17**(3): 500-505.
- [4] 耿玉清,王冬梅. 土壤水解酶活性测定方法的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2012, **20**(4): 387-394.
GENG Y Q, WANG D M. Research advances on the measurement methods for soil hydrolytic enzymes activities[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, **20**(4): 387-394.
- [5] 张志丹,赵兰坡. 土壤酶在土壤有机培肥研究中的意义[J]. 土壤通报, 2006, **37**(2): 2362-2368.
ZHANG Z D, ZHAO L P. The significance of soil enzyme in studying soil fertility management[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, **37**(2): 2362-2368.
- [6] 安韶山,黄懿梅,刘梦云. 宁南山区土壤酶活性特征及其与肥力因子的关系[J]. 中国生态农业学报, 2007, **15**(5): 55-58.
AN S S, HUANG Y M, LIU M Y. Characteristics of soil enzyme activities and their relationships with soil properties in southern Ningxia Loess hilly region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, **15**(5): 55-58.
- [7] 杨志勇,李刚,姚成,等. 苏北大丰生态工程区两种植物群落土壤酶活性比较[J]. 生态学报, 2009, **29**(7): 3649-3657.
YANG Z Y, LI G, YAO C, *et al.* Comparative studies on the soil enzymic activities of two plant communities in Da feng ecological engineering wetland of Northern Jiangsu[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(7): 3649-3657.
- [8] GARG S, BAHL G S. Phosphorus availability as influenced by organic manures and fertilizer P associated phosphatase activity in soils[J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(13): 5773-5777.
- [9] 李东坡,武志杰,陈利军,等. 长期定位培肥黑土土壤蔗糖酶活性动态变化及其影响因素[J]. 中国生态农业学报, 2005, **13**(2): 102-105.
LI D P, WU Z J, CHEN L J, *et al.* Dynamics of invertase activity of black soil treated by a long-term located fertilization and its influence[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, **13**(2): 102-105.
- [10] 宋炳奎. 宁夏盐池县沙边子研究基地沙漠化土地的整治和效益[J]. 中国沙漠, 1989, **9**(2): 4-16.
SONG B K. Rehabilitation and benefit of desertified land in Shabianzi research base, Yanchi County, Ningxia[J]. *Journal of Desert Research*, 1989, **9**(2): 4-16.
- [11] 魏强,凌雷,柴春山,等. 甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质[J]. 生态学报, 2012, **32**(15): 4700-4713.
WEI Q, LING L, CAI C S, *et al.* Soil physical and chemical properties in forest succession process in Xinglong Mountain of Gansu[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(15): 4700-4713.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 68-70.
- [13] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 260-346.
- [14] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 116-190.
- [15] 钱洲,俞元春,俞小鹏,等. 毛乌素沙地飞播造林植被恢复

- 程土壤酶活性的变化[J]. 水土保持研究, 2014, **21**(6): 95-100.
- QIAN Z, YU Y C, YU X P, *et al.* Changes of soil enzyme activities in Mu Us Sandy land with aerial seeding afforestation [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, **21**(6): 95-100.
- [16] 陈云明, 侯喜禄, 刘文兆. 黄土丘陵半干旱区不同类型植被水土保持效益研究[J]. 水土保持学报, 2000, **14**(3): 57-61.
- CHEN Y M, HOU X L, LIU W Z. Soil and water conservation function and ecology benefits of different types vegetation in Semi-arid loess hilly region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, **14**(3): 57-61.
- [17] 刘效东, 乔玉娜, 周国逸. 土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用[J]. 植物生态学报, 2011, **35**(12): 1 209-1 218.
- LIU X D, QIAO Y N, ZHOU G Y. Controlling action of soil organic matter on soil moisture retention and its availability [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, **35**(12): 1 209-1 218.
- [18] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J]. 土壤学报, 2010, **47**(4): 611-620.
- LI Z, WU P T, FENG H, *et al.* Simulated experiment on effects of soil bulk density on soil water holding capacity[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, **47**(4): 611-620.
- [19] 孟红旗, 刘景, 徐明岗, 等. 长期施肥下我国典型农田耕层土壤的 pH 演变[J]. 土壤学报, 2013, **50**(6): 1 109-1 116.
- MENG H Q, LIU J, XU M G, *et al.* Evolution of pH in topsoils of typical Chinese croplands under Long-term fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, **50**(6): 1 109-1 116.
- [20] 杨恒山, 张庆国, 邵继承, 等. 种植年限对紫花苜蓿地土壤 pH 值和磷酸酶活性的影响[J]. 中国草地学报, 2009, **31**(1): 32-35, 44.
- YANG H S, ZHANG Q G, TAI J C, *et al.* Effects of growth years on soil pH and phosphatase activities in alfalfa fields [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2009, **31**(1): 32-35, 44.
- [21] 武得礼, 王夏仙. 电导法测定土壤全盐量应用条件的探讨[J]. 土壤肥料, 1997, (4): 37-40.
- WU D L, WANG X X. Study on the applied conditions of determining total salt content by methods of electrical conductivity[J]. *Soil Fertilizer*, 1997, (4): 37-40.
- [22] BALIGAR V C, WRIGHT R J, SMEDLEY M D. Enzyme activities in hill land soils of the Appalachian region[J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 1988, **19**(4): 367-384.
- [23] 马朋, 李昌晓, 雷明, 等. 三峡库区岸坡消落带草地、弃耕地和耕地土壤微生物及酶活性特征[J]. 生态学报, 2014, **34**(4): 1 010-1 020.
- MA P, LI C X, LEI M, *et al.* Responses of soil microorganisms and soil enzyme activities to different land use patterns in the water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(4): 1 010-1 020.
- [24] 郭曼, 郑粉莉, 和王祥, 等. 黄土丘陵区不同退耕年限植被多样性变化及其与土壤养分和酶活性的关系[J]. 土壤学报, 2010, **47**(5): 979-986.
- GUO M, ZHENG F L, HE W X, *et al.* Variation of vegetation diversity and its relationship with soil nutrient and enzyme activity in land of different abandoned years in the loess hilly-gully region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, **47**(5): 979-986.
- [25] 鲁萍, 郭继勋, 朱丽. 东北羊草草原主要植物群落土壤过氧化氢酶活性的研究[J]. 应用生态学报, 2002, **13**(6): 675-679.
- LU P, GUO J X, ZHU L. Soil catalase activity of main plant communities in *Leymus chinensis* grassland in northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(6): 675-679.
- [26] 舒世燕, 王克林, 张伟, 等. 喀斯特峰丛洼地植被不同演替阶段土壤磷酸酶活性[J]. 生态学杂志, 2010, **29**(9): 1 722-1 728.
- SHU S Y, WANG K L, ZHANG W, *et al.* Soil alkaline Phosphatase activity at different vegetation succession stages in karst peak cluster depression[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, **29**(9): 1 722-1 728.
- [27] NAUSCH M, NAUSCH G. Stimulation of peptidase activity in nutrient gradients in the Baltic Sea[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**(13): 1 973-1 983.
- [28] 张雅琼, 梁存柱, 王炜, 等. 芨芨草群落土壤盐分特征[J]. 生态学杂志, 2010, **29**(12): 2 438-2 443.
- ZHANG Y Q, LIANG C Z, WANG W, *et al.* Soil salinity and *Achnatherum splendens* distribution[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, **29**(12): 2 438-2 443.
- [29] 王学霞, 董世魁, 李媛媛, 等. 三江源区草地退化与人工恢复对土壤理化性状的影响[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(4): 113-117, 122.
- WANG X X, DONG S K, LI Y Y, *et al.* Effects of grassland degradation and artificial restoration on soil physicochemical properties in Three-river headwater[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, **26**(4): 113-117, 122.
- [30] 刘淑慧, 康跃虎, 万书勤, 等. 松嫩平原盐碱草地主要植物群落土壤酶活性研究[J]. 土壤, 2012, **44**(4): 601-605.
- LIU S H, KANG Y H, WAN S Q, *et al.* Soil enzyme activities under plant communities in saline-sodic grassland in songnen plain[J]. *Soils*, 2012, **44**(4): 601-605.
- [31] 王晓龙, 徐力刚, 白丽, 等. 鄱阳湖典型湿地植物群落土壤酶活性[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(4): 798-803.
- WANG X L, XU L G, BAI L, *et al.* Soil enzyme activities in Poyang Lake wetlands with typical hygrophilous vegetations [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(4): 798-803.
- [32] 马文文, 姚拓, 靳鹏, 等. 荒漠草原 2 种植物群落土壤微生物及土壤酶特征[J]. 中国沙漠, 2014, **34**(1): 176-183.
- MA W W, YAO T, JIN P, *et al.* Characteristics of microorganisms and enzyme activity under two plant communities in desert steppe[J]. *Journal of Desert Research*, 2014, **34**(1): 176-183.