Chinese Journal of Applied Ecology, Apr. 2017, **28**(4): 1145-1154 DOI: 10.13287/j.1001-9332.201704.040

艾比湖湿地典型植物群落土壤酶活性季节变化特征

朱海强[1,2] 李艳红[1,2*] 李发东[1,2,3,4]

([1]新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054; [2]新疆维吾尔自治区重点实验室, 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室, 乌鲁木齐 830054; [3]中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; [4]中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100190)

摘 要 对艾比湖湿地典型芦苇和柽柳群落土壤过氧化氢酶、磷酸酶和脲酶及其影响因素进行了分析.结果表明: 在植物不同的生长期,土壤酶活性具有明显的季节变化特征,芦苇群落土壤过氧化氢酶、磷酸酶和脲酶峰值均出现在生长旺盛期(3.26、0.60、0.33 mg·g^{-1}),谷值出现在萌芽期和展叶期,而柽柳群落的峰值出现在枯黄期(6.33、0.58、0.21 mg·g^{-1}),谷值出现在开花期和生长旺盛期;脲酶在不同生长期较为稳定,是湿地土壤酶活性差异的指示指标;芦苇和柽柳群落不同生长期土壤酶活性与土壤有机质和全磷含量呈显著正相关,而与土壤含水量的相关性不显著;芦苇群落迅速生长期土壤酶活性与土壤铵态氮呈显著正相关;两种植物群落土壤盐分与酶活性的相关性不显著.芦苇和柽柳群落不同生长期土壤酶活性受多因素的共同影响,土壤有机质和水热因子是影响艾比湖高盐湖泊湿地土壤酶活性的主导因子.

关键词 芦苇; 柽柳; 土壤酶; 生长期

Seasonal variations of soil enzyme activities in typical plant communities in the Ebinur Lake wetland, China. ZHU Hai-qiang[1,2], LI Yan-hong[1,2*], LI Fa-dong[1,2,3,4] ([1]*College of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi* 830054, *China*; [2]*Key Laboratory of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Area, Urumqi* 830054, *China*; [3]*Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*; [4]*College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China*).

Abstract: In this study, the soil catalase, phosphatase and urease activities of typical plant communities of reed (*Phragmites australis*) and tamarisk (*Tamarix ramosissima*) and their influencing factors were investigated in Ebinur Lake wetland. The results showed that three soil enzyme activities of reed and tamarisk had seasonal dynamic characteristics during different growth periods. For the reed community, the peak concentrations of soil catalase, phosphatase and urease appeared at vigorous stage with 3.26, 0.60 and 0.33 mg·g^{-1}, respectively, and the minimum value occurred at budding stage and leaf-expansion stage. For the tamarisk community, the peak values of three soil enzyme activities appeared at withered stage with values of 6.33, 0.58 and 0.21 mg·g^{-1}, respectively, and the valley values were observed at flowering and vigorous stages. Urease was stable during different growth periods, and it could be used as an indicator to identify the differences of soil enzyme activities in the wetlands. The enzyme activities of reed and tamarisk had significant positive correlation with soil organic matter and total P in all growth periods, while there was no significant relationship between enzyme activities and soil water content. The enzyme activities of reed had significant positive correlation with ammonium nitrogen in the rapid growth period. There were no significant relationships between enzyme activities and soil salinity in both communities. The soil enzyme activities of reed and tamarisk were controlled by many factors. Soil organic matter, soil water and soil temperature were the main factors influencing the enzyme activities in the Ebinur Lake wetland.

Key words: *Phragmites australis*; *Tamarix ramosissima*; soil enzyme; growth period.

本文由新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题项目(2015KL015)、国家自然科学基金项目(41561104)、新疆师范大学地理学博士点支撑学科开放课题项目(XJNU-DL-201617)和天山学者项目资助 This work was supported by the Key Laboratory Open Topics of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2015KL015), the National Natural Science Foundation of China (41561104), the Xinjiang Normal University Doctoral Program of Geography Support Subject (XJNU-DL-201617), and the Tianshan Talents Program of Xinjiang Uygur Autonomous Region.

2016-08-16 Received, 2017-01-25 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lyh0704@126.com

土壤酶在湿地生态系统的物质循环中起重要作用[1],它参与土壤中一切生物化学反应,其活性大小易受季节变化[2-3]、土壤环境[4-6]、植物类型[7]的影响,因此土壤酶活性可作为衡量湿地生态环境演变的重要指标.近年来,对湿地土壤酶的变化规律及影响因素进行了一系列研究.国外学者主要以磷酸酶、芳基硫酸酯酶、蛋白酶及酚氧化酶为指标,研究了不同类型的沼泽湿地及 Everglades 湿地土壤的酶活性特征,发现在草本沼泽中酶活性有明显的变化规律,而在藓类沼泽湿地变化不明显,其中水位和温度是影响酶活性的主要因素[8-9].国内学者研究了鄱阳湖、梁子湖和白洋淀等淡水湖泊湿地土壤纤维二糖酶、过氧化物酶、磷酸酶、脲酶,结果显示,不同种类酶活性随季节的变化规律有所差异,土壤水分、有机质和温度对其影响显著[10-12].关于干旱区土壤酶活性的研究主要集中在黄土高原沟壑区、云雾山丘陵、盐池沙地、石羊河草地、甘家湖湿地等生态系统[4,13-16],而对高盐湖泊湿地土壤酶活性的研究较少.

艾比湖湿地作为干旱区典型的高盐湖泊湿地,新疆第一大咸水湖,对动植物栖息、生物多样性和区域生态平衡的维护有着重要意义.选用过氧化氢酶、脲酶、磷酸酶和蔗糖酶,对艾比湖东大桥和鸭子湾管护站内胡杨(*Populus euphratica*)、芦苇(*Phragmites australis*)、盐节木(*Halocnemum strobilaceum*)和梭梭(*Haloxylon ammodendron*)等典型植物群落[17]及不同土壤类型[18-19]的酶活性进行研究,结果表明,土壤养分和水分是影响酶活性的主导因子,但对植物不同生长周期土壤酶活性动态的研究较少.为此,本文以芦苇和柽柳两种耐盐碱植物群落为对象,利用通径分析定量解释不同生长周期土壤过氧化氢酶、磷酸酶和脲酶的影响因素及其变化规律,筛选出高盐湖泊湿地土壤酶的指示指标,以期为湿地生态环境的保护与管理提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于艾比湖湿地国家级自然保护区(44°30′—45°9′ N,82°36′—82°50′ E),该区域属温带大陆性干旱气候,年均降水量 100 mm,年蒸发量 1600 mm,蒸发量是降水量的 16 倍,气候极端干旱,全年 8 级以上大风 165 d.实验地选在保护区的鸟岛管护站,湖滨湿地南岸,典型植物群落为芦苇和柽柳,其中芦苇群落平均株高为 2.16 m,不同生长期覆盖度为 54%~69%;柽柳群落平均高度为 1.68 m,不同生长期覆盖度为 40%~55%.芦苇和柽柳群落土壤类型均为粉砂质壤土,平均粒径分别为 64.86 和 39.54 μm,表层土含盐量为 17.81 和 18.92 g·kg^{-1},根据盐分分级标准[20],土壤为重度盐化土.干旱、高盐和大风成为湿地生境恶化的主要因素.

1.2 研究方法

在鸟岛管护站典型植物芦苇和柽柳群落各设 3 个 100 m×100 m 样方,采用 5 点法,在每个样方内设置 5 个 10 m×10 m 的小样方(图 1).在 2015 年 4、5、6、8 和 9 月,调查样方内植物群落特征,记录植物的株数、高度,并计算冠幅和覆盖度.根据植物特征,芦苇生长季分为萌芽期(4 月)、迅速生长期(5 月)、展叶期(6 月)、生长旺盛期(8 月)、枯黄期(9 月);柽柳分为萌芽期(4 月)、展叶期(5 月)、开花期(6 月)、生长旺盛期(8 月)、枯黄期(9 月).土壤样品的采集分 5 层,分别为 0~5、5~10、10~20、20~40、40~60 cm.采集样品后去除杂质,经自然风干后,过筛保存.

1.3 测定项目与方法

过氧化氢酶活性采用紫外分光光度法[21-22],磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法[23](pH 9.4 硼酸盐缓冲液).脲酶采用苯酚钠-次氯酸钠比色法[24]测定,土壤有机质、全磷、总盐、铵态氮、硝态氮、土壤含水量和温度参照文献[25]测定.

1.4 数据处理

采用 SPSS 17.0 和 Excel 2003 软件对数据进行统计分析.采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)进行方差分析,用 Pearson 法对土壤酶活性和理化因子进行相关性分析($\alpha=0.05$),并进一步建立逐步回归方程进行通径分析.利用 Excel 2003 软件作图.

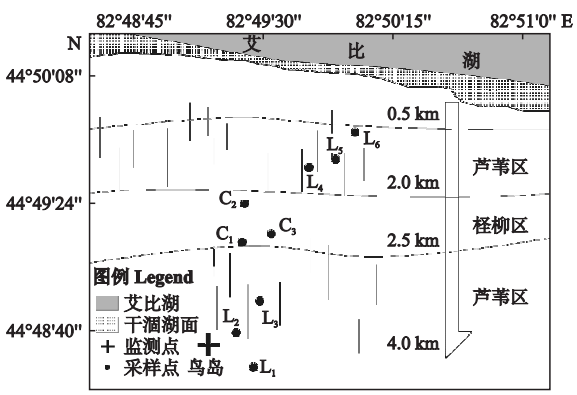

图 1 研究区示意图

Fig.1 Schematic map of study area.

L_1~L_6: 芦苇群落 *Phragmites australis* community; C_1~C_3: 柽柳群落 *Tamarix ramosissima* community.

2　结果与分析

2.1　芦苇和柽柳群落不同生长期土壤酶活性的动态变化

由图 2 可知，两种植物群落土壤表层（0~5 cm）酶活性均显著高于其他各层，且占总酶活性的比例较大，芦苇群落土壤表层过氧化氢酶、磷酸酶和脲酶所占比例分别为 51.6%、58.1%和 56.6%，柽柳群落所占比例分别为 43.7%、48.4%和 42.1%.从植物不同生长期来看，芦苇群落土壤过氧化氢酶、磷酸酶和脲酶活性峰值均出现在生长旺盛期（3.26、0.60、0.33 mg·g^{-1}），谷值出现在萌芽期（0.67、0.17 mg·g^{-1}）和展叶期（0.18 mg·g^{-1}）.三者的变化趋势略有差异，过氧化氢酶和磷酸酶表现为：生长旺盛期>枯黄期>迅速生长期>展叶期>萌芽期，脲酶表现为：生长旺盛期>枯黄期>迅速生长期>萌芽期>展叶期.方差分析显示，3 种酶活性在不同生长期的差异不同，过氧化氢酶活性除萌芽期与迅速生长期差异不显著外，其他各生长期之间均呈显著差异，磷酸酶活性在不同生长期之间均呈显著差异，脲酶活性除了生长旺盛期与其他生长期差异显著外，其他各生长期之间差异均不显著.

柽柳群落中，土壤过氧化氢酶活性峰值出现在枯黄期（6.33 mg·g^{-1}），均显著高于其他生长期，谷值出现在开花期（2.02 mg·g^{-1}），呈现出枯黄期>展叶期>萌芽期>生长旺盛期>开花期；磷酸酶活性变化规律与脲酶略有不同，二者的峰值均出现在枯黄期（0.58、0.21 mg·g^{-1}），谷值出现在生长旺盛期（0.37、0.10 mg·g^{-1}），磷酸酶表现为枯黄期>展叶期>开花期>萌芽期>生长旺盛期，脲酶活性则表现为枯黄期>萌芽期>开花期>展叶期>生长旺盛期.

不同植物群落间土壤酶活性也存在一定差异，柽柳群落过氧化氢酶活性显著高于芦苇群落，脲酶活性显著低于芦苇群落，磷酸酶在 2 个植物群落中无显著差异.

2.2　芦苇和柽柳群落不同生长期土壤理化因子的动态变化

由图 3 可知，两种植物群落不同生长期土壤有机质、全磷、总盐、土壤温度、pH 值、铵态氮和硝态氮均随土层深度的增加而减少，土壤含水量随着土层深度的加深而增大，其中，有机质和总盐表层含量与各土层间差异显著.芦苇群落土壤有机质、温度、总盐、全磷和铵态氮的峰值均出现在生长旺盛季，硝态氮则出现在迅速生长期，含水量在枯黄期出现峰值（0.17%），pH 值无明显变化，但总体上>7，属碱性土壤.柽柳群落土壤有机质、全磷含量在枯黄期出现峰值（79.46 g·mg^{-1}、1.30 g·kg^{-1}），温度、含水量在开花期、萌芽期出现峰值（31.3 ℃、0.13%），总盐和铵

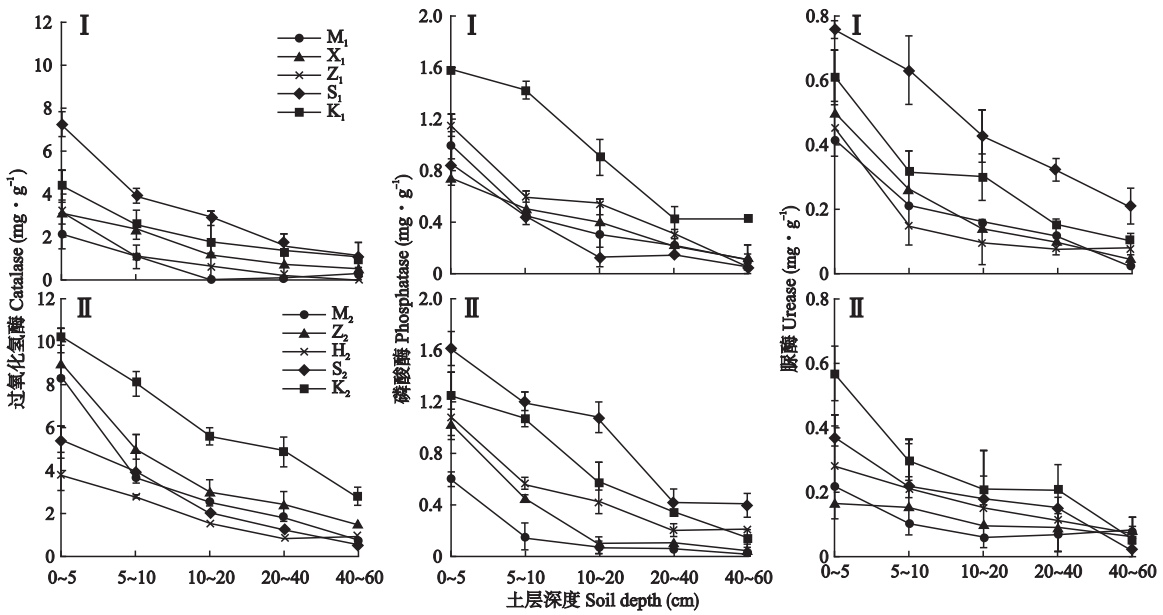

图 2　芦苇和柽柳群落不同生长期土壤酶活性

Fig.2　Soil enzyme activities of *Phragmites australis* and *Tamarix ramosissima* communities during different growth periods.

Ⅰ：芦苇群落 *Phragmites australis* community；Ⅱ：柽柳群落 *Tamarix ramosissima* community. M_1：萌芽期 Germination stage；X_1：迅速生长期 Rapid growth period；Z_1：展叶期 Leaf-expansion period；S_1：生长旺盛期 Vigorous growth stage；K_1：枯黄期 Withered period；M_2：萌芽期 Budding stage；Z_2：展叶期 Leaf-expansion period；H_2：开花期 Flowering stage；S_2：生长旺盛期 Vigorous growth stage；K_2：枯黄期 Withered period. 下同 The same below.

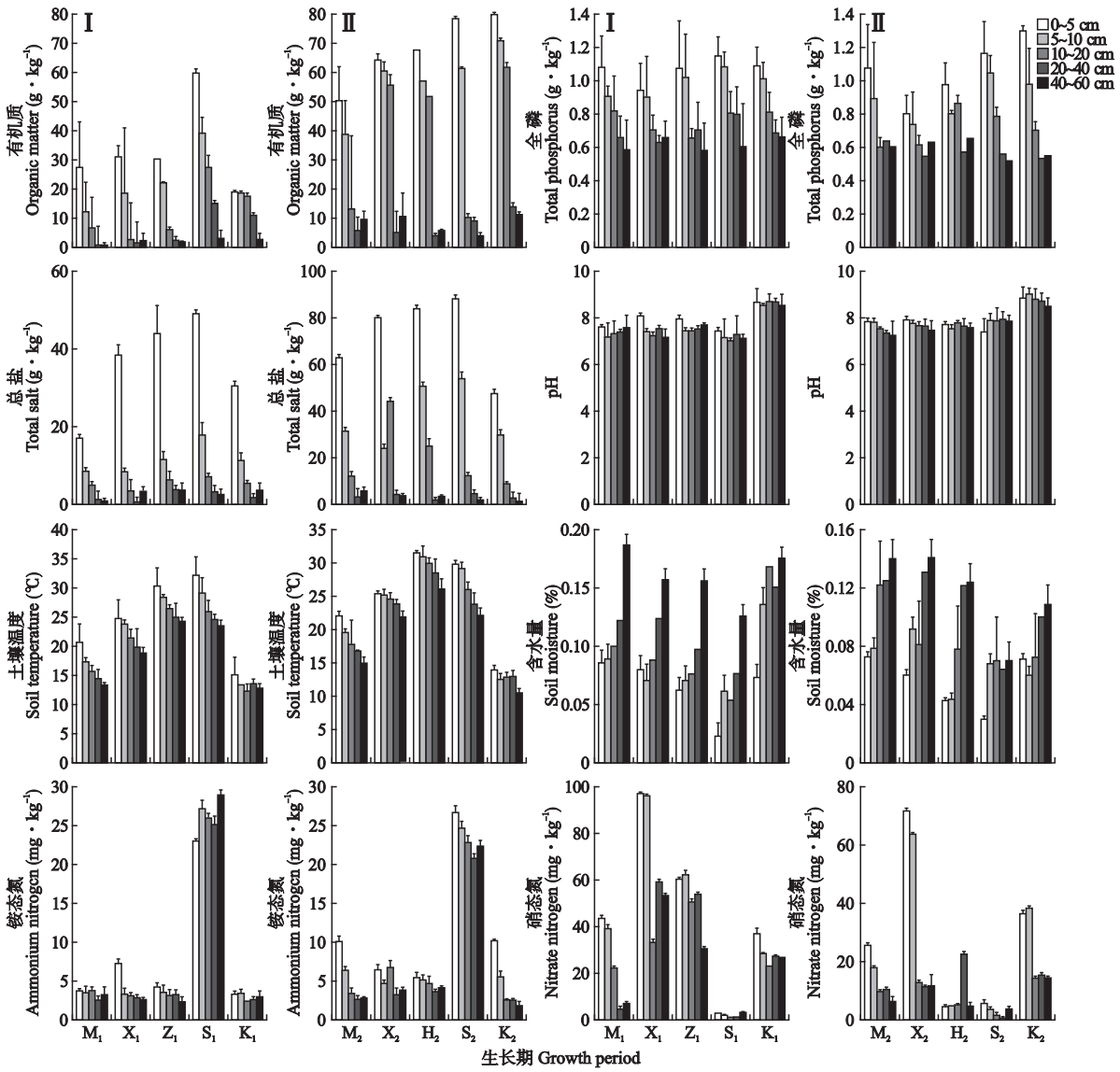

图 3 芦苇和柽柳群落不同生长期土壤理化因子特征

Fig.3 Characteristics of soil physicochemical factors of *Phragmites australis* and *Tamarix ramosissima* communities during different growth periods.

态氮均在生长旺盛期出现峰值(88 g · kg^{-1}、23.4 mg · kg^{-1}),硝态氮在展叶期达到最大,pH 值的变化不显著.两种植物群落土壤铵态氮属于强变异程度,全磷和 pH 值变异较小,芦苇群落土壤有机质和盐分质量分数小于柽柳,全磷和含水量高于柽柳.

2.3 芦苇和柽柳群落不同生长期土壤酶活性的影响因素

2.3.1 相关性分析 由表 1 可以看出,芦苇不同生长期有机质与酶活性呈显著正相关;全磷除萌芽期外,与其他各生长期酶活性均呈显著正相关;土壤酶活性与全盐和含水量的相关性不显著;除枯黄期外,各期酶活性与土壤温度呈显著正相关;pH 值在各个生长期与酶活性呈现不同的相关关系;除迅速生长期外,铵态氮与土壤酶活性的相关性不显著.

柽柳群落土壤酶活性与有机质、全磷呈显著正相关,与全盐的相关性不显著;开花期土壤酶活性与含水量均呈显著负相关;萌芽期酶活性、开花期磷酸酶和脲酶及生长旺盛期过氧化氢酶和磷酸酶与土壤温度呈显著正相关;萌芽期和展叶期 pH 值与 3 种酶活性呈显著正相关,生长旺盛期与酶活性呈显著负相关;除展叶期,其他各生长期酶活性均与铵态氮呈显著正相关;萌芽期、展叶期土壤酶活性与硝态氮呈显著正相关.

2.3.2 通径分析 通径分析是一种多元统计技术,可以通过自变量对因变量的直接通径系数和间接通径系数,揭示各自变量对因变量的相对重要

表 1　芦苇和柽柳群落不同生长期土壤理化因子和土壤酶活性的相关系数

Table 1　Correlation coefficients between soil enzyme activities and soil physicochemical properties of *Phragmites australis* and *Tamarix ramosissima* communities during different growth periods

群落 Community	生长期 Growth period	酶活性 Enzyme activity	有机质 Organic matter	全磷 TP	全盐 Total salt	含水量 Soil moisture	土壤温度 Soil temperature	pH	铵态氮 Ammonium N	硝态氮 Nitrate N
Ⅰ	M_1	过氧化氢酶 Catalase	0.757**	0.405	0.511	−0.664	0.951*	0.155	0.581	0.881*
		磷酸酶 Phosphatase	0.970**	0.369	0.374	−0.451	0.929*	0.433	0.586	0.767
		脲酶 Urease	0.870*	0.212	0.644	−0.239	0.792*	0.616	0.603	0.860
	X_1	过氧化氢酶 Catalase	0.691**	0.693**	0.754	−0.762	0.958*	0.640**	0.905*	0.771
		磷酸酶 Phosphatase	0.893**	0.959**	0.719	−0.341	0.875*	0.746**	0.953*	0.812
		脲酶 Urease	0.762**	0.824**	0.542	−0.367	0.960**	0.852**	0.892*	0.831
	Z_1	过氧化氢酶 Catalase	0.463*	0.544*	0.147	−0.668	0.914*	0.320	0.886	0.577
		磷酸酶 Phosphatase	0.940**	0.685**	0.323	−0.731	0.971**	0.725**	0.878	0.678
		脲酶 Urease	0.896**	0.700**	0.426	0.763	0.842	0.587**	0.867	0.533
	S_1	过氧化氢酶 Catalase	0.838**	0.827**	0.465	−0.499	0.977**	−0.313	−0.710	0.237
		磷酸酶 Phosphatase	0.905**	0.933**	0.547	−0.751	0.969**	−0.392	−0.649	0.257
		脲酶 Urease	0.399**	0.304*	0.120	−0.523	0.941*	−0.800*	−0.865	0.086
	K_1	过氧化氢酶 Catalase	0.306*	0.354*	0.709	−0.799	0.833	−0.033	0.547	0.816
		磷酸酶 Phosphatase	0.705**	0.794**	0.393	−0.844	0.861	−0.032	0.723	0.892*
		脲酶 Urease	0.827**	0.823**	0.356	−0.009	0.726	−0.066	0.399	0.705
Ⅱ	M_2	过氧化氢酶 Catalase	0.691**	0.389*	0.358	−0.893	0.954*	0.720**	0.993**	0.966**
		磷酸酶 Phosphatase	0.988**	0.826*	0.640	−0.849	0.903*	0.965**	0.975**	0.962**
		脲酶 Urease	0.986**	0.875**	0.689	−0.903	0.975**	0.968**	0.926*	0.920**
	Z_2	过氧化氢酶 Catalase	0.861**	0.634*	0.838	−0.861	0.835	0.919**	0.616	0.871**
		磷酸酶 Phosphatase	0.924**	0.771**	0.538	−0.419	0.823	0.906**	0.713	0.905**
		脲酶 Urease	0.746**	0.867*	0.481	−0.589	0.909	0.793**	0.569	0.941**
	H_2	过氧化氢酶 Catalase	0.220**	0.726*	0.470	−0.921*	0.862	−0.120	0.916*	−0.419
		磷酸酶 Phosphatase	0.868*	0.708**	0.208	−0.927*	0.943*	0.123	0.895*	−0.373
		脲酶 Urease	0.736*	0.754**	0.687	−0.392*	0.920*	0.184	0.893*	−0.351
	S_2	过氧化氢酶 Catalase	0.648	0.912*	0.323	−0.759	0.977**	−0.903**	0.938*	0.664
		磷酸酶 Phosphatase	0.361**	0.856*	0.590	−0.874	0.914*	−0.229**	0.896*	0.632
		脲酶 Urease	0.302**	0.923*	0.699	−0.487	0.810	−0.575**	0.907*	0.779
	K_2	过氧化氢酶 Catalase	0.722*	0.651**	0.679	−0.326	0.865	0.333	0.859*	0.799
		磷酸酶 Phosphatase	0.799*	0.479*	0.619	−0.602	0.762	0.456	0.968**	0.729
		脲酶 Urease	0.409**	0.330*	0.150	−0.648	0.694	0.633	0.996**	0.879

* $P<0.05$; ** $P<0.01$. Ⅰ: 芦苇群落 *Phragmites australis* community; Ⅱ: 柽柳群落 *Tamarix ramosissima* community. M_1: 萌芽期 Budding stage; X_1: 迅速生长期 Rapid growth period; Z_1: 展叶期 Leaf-expansion period; S_1: 生长旺盛期 Vigorous growth stage; K_1: 枯黄期 Withered pe-riod; M_2: 萌芽期 Budding stage; Z_2: 展叶期 Leaf-expansion period; H_2: 开花期 Flowering stage; S_2: 生长旺盛期 Vigorous growth stage; K_2: 枯黄期 Withered period. 下同 The same below.

性[26-27].土壤性质与酶活性之间存在复杂的相关关系,简单的相关分析不能全面考察变量间的关系.因此,为了正确评价土壤理化因子对酶活性的影响程度,本文选择直接通径系数与通径系数总和,定量研究土壤理化因子对酶活性的影响.

由表 2 可知,芦苇萌芽期和枯黄期土壤铵态氮和全磷对过氧化氢酶的直接通径系数较大,反映出二者的直接作用是影响过氧化氢酶活性的主要方式;迅速生长期、生长旺盛期土壤有机质和铵态氮对其直接作用较大;展叶期土壤温度和有机质对过氧化氢酶的直接影响相较于其他理化因子更显著.萌芽期土壤含水量、全磷对磷酸酶和脲酶的间接系数是直接系数的 2.7、2.8 和 3.0、3.3 倍,表明二者对酶活性有显著的间接作用;迅速生长期、展叶期土壤有机质与其之间的直接和间接系数均较大,含水量对酶活性有直接负效应和较大的间接正效应;生长旺盛期有机质、全磷是直接影响酶活性的主要因素;枯黄期含水量对酶活性表现出一定的抑制作用;不同生长期,土壤 pH 对酶活性均存在较低的直接、间接影响.

由表 3 可知,在柽柳萌芽期、枯黄期,土壤有机质和全磷对过氧化氢酶直接通径系数大,展叶期、开花期土壤有机质和土壤温度与其存在较强烈的直接正效应和直接负效应,生长旺盛期有机质与酶活性存在较大的直接和间接正效应,含水量则表现为直接负效应和较大的间接正效应.萌芽期、展叶期、生

表 2 芦苇不同生长期土壤理化因子对土壤酶活性的通径系数

Table 2 Path coefficients of soil physicochemical properties affecting soil enzyme activities in *Phragmites australis* communities during different growth periods

生长期 Growth period	变量 Variable	过氧化氢酶 Catalase		磷酸酶 Phosphatase		脲酶 Urease	
		直接通径系数 Indirect path coefficient	通径系数和 Sum of path coefficient	直接通径系数 Indirect path coefficient	通径系数和 Sum of path coefficient	直接通径系数 Indirect path coefficient	通径系数和 Sum of path coefficient
M_1	有机质 Organic matter	0.560	0.779	0.107	0.340	0.303	0.593
	盐分 Total salt	0.166	0.518	0.044	0.137	0.021	0.062
	全磷 Total P	0.722	1.026	0.200	0.560	0.356	1.071
	土壤含水量 Soil water content	−0.455	0.357	−0.319	0.862	−0.411	1.396
	土壤温度 Soil temperature	0.009	0.034	0.169	0.756	0.069	0.266
	pH	0.140	0.026	−0.049	−0.038	−0.014	−0.010
	铵态氮 Ammonium N	0.878	1.257	−0.085	−0.218	0.007	0.017
	硝态氮 Nitrate N	0.067	0.177	−0.001	−0.002	−0.003	−0.007
X_1	有机质 Organic matter	0.732	0.108	0.635	0.964	0.500	0.917
	盐分 Total salt	0.054	0.300	0.004	0.036	0.01	0.054
	全磷 Total P	0.225	0.288	0.306	0.397	0.395	0.509
	土壤含水量 Soil water content	−0.468	0.721	−0.440	0.851	−0.409	0.783
	土壤温度 Soil temperature	0.369	0.475	0.023	0.091	0.038	0.151
	pH	−0.092	−0.624	−0.094	−0.398	−0.022	−0.093
	铵态氮 Ammonium N	0.534	1.056	0.157	0.692	0.040	0.176
	硝态氮 Nitrate N	0.008	0.031	0.005	0.019	0.001	0.003
Z_1	有机质 Organic matter	0.420	0.719	0.536	0.616	0.300	0.513
	盐分 Total salt	0.079	0.293	0.040	0.148	0.101	0.375
	全磷 Total P	0.138	0.470	0.305	1.039	0.260	0.886
	土壤含水量 Soil water content	−0.250	0.901	−0.472	1.238	−0.286	1.031
	土壤温度 Soil temperature	0.451	1.553	0.274	0.454	0.217	0.024
	pH	0.185	0.096	−0.281	−0.045	0.042	0.282
	铵态氮 Ammonium N	−0.318	−1.009	0.273	0.866	0.094	0.298
	硝态氮 Nitrate N	−0.309	−0.418	0.138	0.186	−0.009	−0.012
S_1	有机质 Organic matter	0.648	1.526	0.470	0.138	0.638	0.420
	盐分 Total salt	0.030	−0.305	0.012	−0.122	0.080	−0.184
	全磷 Total P	0.470	1.542	0.386	0.266	0.376	0.234
	土壤含水量 Soil water content	−0.180	0.444	−0.127	0.313	−0.124	0.306
	土壤温度 Soil temperature	0.288	0.781	0.148	0.401	0.025	0.067
	pH	−0.076	−0.717	−0.157	−0.061	−0.070	−0.363
	铵态氮 Ammonium N	0.533	1.762	0.042	0.138	0.207	0.238
	硝态氮 Nitrate N	0.420	1.184	0.052	0.146	0.127	0.076
K_1	有机质 Organic matter	0.320	0.621	0.319	0.619	0.213	0.414
	盐分 Total salt	0.018	0.052	0.050	0.145	0.002	0.006
	全磷 Total P	0.580	0.392	0.518	0.125	0.481	0.320
	土壤含水量 Soil water content	0.262	0.811	−0.127	0.635	−0.059	0.295
	土壤温度 Soil temperature	−0.299	−0.616	−0.149	−0.284	−0.164	−0.044
	pH	0.109	−0.436	0.020	−0.008	0.190	−0.377
	铵态氮 Ammonium N	0.473	0.615	0.419	0.245	0.395	1.331
	硝态氮 Nitrate N	0.394	0.415	0.355	0.418	0.376	0.962

长旺盛期、枯黄期土壤全磷和有机质对磷酸酶的直接通径系数大于其他因子,开花期土壤含水量和铵态氮是影响酶活性变化的主要因素.开花期、展叶期土壤温度和有机质对脲酶的直接通径系数高于其他因子,开花期和生长旺盛期有机质和全磷与脲酶活性存在较大的直接、间接正效应,枯黄期铵态氮和有机质对脲酶有较大的直接作用,展叶期和生长旺盛期盐分对酶活性表现为负效应.

表 3　柽柳不同生长期土壤理化因子对土壤酶活性的通径系数

Table 3　Path coefficients of soil physicochemical properties affecting soil enzyme activities in *Tamarix ramosissima* communities during different growth periods

生长期 Growth period	变量 Variable	过氧化氢酶 Catalase		磷酸酶 Phosphatase		脲酶 Urease	
		直接通径系数 Indirect path coefficient	通径系数和 Sum of path coefficient	直接通径系数 Indirect path coefficient	通径系数和 Sum of path coefficient	直接通径系数 Indirect path coefficient	通径系数和 Sum of path coefficient
M_2	有机质 Organic matter	0.639	1.868	0.450	2.155	0.574	1.456
	盐分 Total salt	0.183	0.889	0.013	0.063	0.007	0.034
	全磷 Total P	0.542	2.264	0.520	2.505	0.419	3.126
	土壤含水量 Soil water content	−0.487	0.828	−0.360	2.384	−0.422	0.795
	土壤温 Soil temperature	0.360	0.963	0.006	0.028	0.150	0.136
	pH	−0.038	−0.154	−0.056	−0.084	0.027	0.123
	铵态氮 Ammonium N	0.294	0.304	0.117	0.570	0.020	0.097
	硝态氮 Nitrate N	−0.279	−1.349	0.041	0.198	−0.015	−0.072
Z_2	有机质 Organic matter	0.314	1.225	0.330	1.288	0.429	1.674
	盐分 Total salt	−0.163	−0.605	−0.190	−0.705	−0.200	−0.742
	全磷 Total P	0.249	0.894	0.430	1.544	0.330	1.185
	土壤含水量 Soil water content	0.158	−0.948	0.201	−1.200	0.250	−0.901
	土壤温 Soil temperature	−0.266	−1.357	−0.040	−0.106	0.407	0.240
	pH	0.019	0.139	0.062	0.177	0.080	0.317
	铵态氮 Ammonium N	0.066	0.201	0.063	0.192	–	–
	硝态氮 Nitrate N	0.013	0.046	0.004	0.014	0.001	0.003
H_2	有机质 Organic matter	0.500	1.178	0.419	0.987	0.410	0.966
	盐分 Total salt	0.055	0.121	0.018	0.040	0.105	0.232
	全磷 Total P	0.360	0.833	0.320	0.741	0.337	0.748
	土壤含水量 Soil water content	0.276	−1.142	0.730	−3.021	0.329	−1.569
	土壤温 Soil temperature	−0.475	−1.189	−0.147	−0.524	−0.450	−0.213
	pH	0.172	0.465	0.387	0.990	0.186	0.211
	铵态氮 Ammonium N	0.410	1.123	0.625	1.235	0.229	0.452
	硝态氮 Nitrate N	0.173	−0.369	0.025	−0.053	0.010	−0.021
S_2	有机质 Organic matter	0.539	1.666	0.210	0.660	0.642	0.632
	盐分 Total salt	−0.179	−0.237	−0.120	−0.360	−0.140	−0.420
	全磷 Total P	0.283	0.912	0.540	1.739	0.542	0.746
	土壤含水量 Soil water content	−0.531	1.745	−0.463	1.492	−0.465	1.092
	土壤温 Soil temperature	0.246	−1.957	0.099	0.310	0.195	0.611
	pH	−0.159	0.409	−0.019	0.003	−0.034	0.052
	铵态氮 Ammonium N	−0.302	−0.928	−0.082	−0.251	−0.212	−0.651
	硝态氮 Nitrate N	0.160	0.349	0.003	0.006	0.127	0.277
K_2	有机质 Organic matter	0.571	0.151	0.420	1.585	0.470	0.773
	盐分 Total salt	0.084	0.363	0.039	0.168	0.120	0.518
	全磷 Total P	0.540	0.312	0.373	1.597	0.107	0.458
	土壤含水量 Soil water content	−0.279	−1.481	0.260	−1.380	0.320	−1.699
	土壤温 Soil temperature	−0.036	−0.112	−0.041	−0.128	0.010	0.031
	pH	0.136	0.155	0.199	0.413	0.050	0.158
	铵态氮 Ammonium N	0.388	0.670	0.248	0.929	0.550	0.228
	硝态氮 Nitrate N	−0.137	−0.533	−0.035	−0.136	0.002	0.007

通过相关性和通径分析可知,在两种植物群落的不同生长期,土壤有机质、全磷和水热因素是影响酶活性的主要因素,其他各因子的影响相对较弱.

3　讨　　论

3.1　艾比湖高盐湖泊湿地芦苇和柽柳群落土壤酶的指示指标

植被类型的差异会导致枯落物、土壤肥力及微生物数量不同,进而影响土壤酶活性的大小[28].芦苇群落土壤过氧化氢酶和磷酸酶除了生长旺盛期外,其他各期酶活性均低于柽柳群落,脲酶活性在整个生长期却高于柽柳群落.这主要是由于柽柳群落枯落物、根系分泌物和土壤有机质较多,酶促底物充分;此外芦苇群落土壤含水量高于柽柳,对酶活性产生一定的抑制.其中,芦苇群落不同生长期土壤过氧化氢酶、磷酸酶和脲酶高于松嫩平原、甘肃盐碱草地

芦苇群落的土壤酶活性[29-30],这可能与二者的气候、土壤水肥及 pH 值的差异有关;柽柳群落土壤磷酸酶和脲酶活性低于民勤绿洲柽柳群落的酶活性[31],这可能由土壤质地、采样时间及微地形的不同引起的.酶活性变异系数可以表示酶对环境介质变化的敏感程度[32],通过芦苇和柽柳群落不同生长期酶活性的变异系数可以发现,芦苇群落萌芽期和展叶期过氧化氢酶的变异系数最大,其他 3 个生长期磷酸酶活性变异系数最大;柽柳群落萌芽期过氧化氢酶活性变异系数最大,其他 3 个时期均为磷酸酶变异系数最大.由整个生长期酶活性变异系数可知,芦苇和柽柳群落酶活性变异系数大小均为过氧化氢酶>磷酸酶>脲酶,过氧化氢酶对植物生长期差异引起的生存环境的变化最敏感,脲酶则较稳定,这与罗来超等[33]、高秀丽等[34]的研究结果不一致,可能与植物类型差异和人为影响干扰程度有关.通过以上分析得出,土壤脲酶可能是表征艾比湖高盐湖泊湿地土壤酶活性差异的指示指标.

3.2 艾比湖高盐湖泊湿地芦苇和柽柳群落土壤酶活性影响的主导因素

土壤理化因子和酶活性间存在复杂的关系且影响酶活性的因素随植物生长周期的不同而有所差异.土壤有机质和全磷对芦苇群落迅速生长期、展叶期、生长旺盛期及柽柳群落不同生长周期酶活性的直接影响大于其他因子,因为土壤酶以有机质为载体,有机质含量的增加改善了土壤肥力、质地及营养元素含量[35],导致微生物种类和数量增加,生长代谢更为活跃,因而酶活性高.这与杨星等[36]关于植物入侵对酶活性影响的研究结果有差异,可能是由气候环境、土壤结构和植物根系的差异造成的.土壤含水量和温度对芦苇展叶期酶活性的促进作用明显,对柽柳开花期酶活性的抑制作用显著,这种差异是因为土壤含水量和温度过高或过低能引起酶活性的钝化[37].季节变化导致土壤温度升高,土壤含水量的损耗增加,群落生境的不同进一步加剧了柽柳群落土壤水分亏缺程度,而芦苇群落土壤水分虽有减少但仍能维持在酶所需的范围内,这种差异促使水分在两种群落中对酶活性产生相反的直接和间接作用,这与 Garcia 等[38]认为温度最高的季节酶活性出现最大值的结果不同,可能是由土壤水热因素变化范围的差异引起的.高土壤盐分通过破坏蛋白质分子结构导致酶的水溶性降低,从而抑制酶活性.但不同生长周期土壤 pH 值和盐分对酶活性的影响程度较小,这与夏孟婧等[39]认为高盐分会抑制酶活性的结果不一致,因为在芦苇和柽柳不同的生长周期内,土壤水热因子变化对土壤通透性、微生物活动、根系分泌物产生的影响大于盐分对酶活性的盐析作用.综上所述,在艾比湖高盐湖泊湿地芦苇和柽柳不同生长周期内土壤有机质、全磷及水热因素对酶活性的影响程度大于 pH 值、盐分等因素.

参考文献

[1] Mao Z-G (毛志刚), Gu X-H (谷孝鸿). Distribution of the soil enzyme activities in different vegetation zones and farms in Yancheng coastal wetland. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(18): 5043-5049 (in Chinese)

[2] Li N-H (李南洁), Zeng Q-P (曾清苹), *et al*. Seasonal variations of soil microbial PLFAs and soil enzyme activity under the citrus plantation from Mt. Jinyun, Chongqing. *Environmental Science* (环境科学), 2017, **38**(1): 309-317 (in Chinese)

[3] Cao C-Y (曹成有), Chen J-M (陈家模), Shao J-F (邵建飞). Seasonal dynamics of soil microbial biomass and enzyme activities in four sand-fixation plantations on Horqin sandy land. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2011, **30**(2): 227-233 (in Chinese)

[4] Li L-H (李林海), Qiu L-P (邱莉萍), Meng M (梦梦). Responses of soil enzyme activities to re-vegetation in gully Loess Plateau of Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(12): 3355-3360 (in Chinese)

[5] Wu X-C (吴秀臣), Sun H (孙 辉), Yang W-Q (杨万勤). Effects of elevated temperature and atmospheric carbon dioxide on activity of soil enzymes. *Soils* (土壤), 2007, **39**(3): 358-363 (in Chinese)

[6] Li C-R (李传荣), Xu J-W (许景伟), Song H-Y (宋海燕), *et al*. Soil enzyme activities in different plantations in lowlands of the Yellow River delta, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2006, **30**(59): 802-809 (in Chinese)

[7] Lu S-B (鲁顺保), Zhou X-Q (周小奇), Rui Y-C (芮亦超), *et al*. Effects of forest type on soil organic matter, microbial biomass, and enzyme activities. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(10): 2567-2573 (in Chinese)

[8] Kang H, Freeman C. Phosphatase and arylsulphatase activities in wetland soils: Annual variation and controlling factors. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, **31**: 449-454

[9] Wright AL, Reddy KR. Phosphorus loading effects on extracellular enzyme activity in Everglades wetland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, **65**: 588-599

[10] Xiong H-F (熊汉锋), Huang S-K (黄世宽), Chen Z-P (陈治平), *et al*. Soil enzyme activities of wetland in Liangzi Lake. *Ecology and Environment* (生态环境), 2006, **15**(6): 1305-1309 (in Chinese)

[11] Nie D-G (聂大刚), Wang L (王 亮), Yin C-Q (尹

澄清), *et al*. Soil phosphatase activity and its affecting factors in Baiyangdian wetland. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2009, **28**(4): 698-703 (in Chinese)

[12] Zhang X (张　鑫), Geng Y-Q (耿玉清), Xu M (徐明), *et al*. Soil enzyme activity and influencing factors in lakeside wetland of Poyang Lake. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2014, **36**(1): 34-40 (in Chinese)

[13] An S-S (安韶山), Huang Y-M (黄懿梅), Zheng F-L (郑粉莉). Urease activity in the loess hilly grassland soil and its relationship to soil property. *Acta Agrestia Sinica* (草地学报), 2005, **13**(3): 233-237 (in Chinese)

[14] Liu L-D (刘丽丹), Xie Y-Z (谢应忠), Qiu K-Y (邱开阳), *et al*. The soil enzyme activities of three plant communities in Yanchi, Ningxia. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), 2014, **28**(4): 153-156 (in Chinese)

[15] Wang L-D (王理德), Yao T (姚　拓), He F-L (何芳兰), *et al*. Natural vegetation restoration and change of soil enzyme activity on secondary grassland of abandoned land area in the downstream of Shiyang River. *Acta Praculturae Sinica* (草业学报), 2014, **23**(4): 253-261 (in Chinese)

[16] Li Y-H (李艳红), Chu X-Z (楚新正), *et al*. Impacts of soil enzyme activity at edge of wetland in Xinjiang Ganjiahu with interfere of human activity. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2009, **18**(4): 1504-1507 (in Chinese)

[17] Tian Y-H (田幼华), Xie H (谢　辉), Lv G-H (吕光辉). A preliminary study on the soil enzyme distribution in typical plant community in Ebinur Lake area. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), 2010, **24**(9): 173-178 (in Chinese)

[18] Liu X-X (刘晓星), Lv G-H (吕光辉), Yang X-D (杨晓东), *et al*. Enzyme activities and physical and chemical properties of five different soils in the Ebinur Lake basin. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 2012, **29**(4): 579-585 (in Chinese)

[19] Ran Q-Y (冉启洋), Lv G-H (吕光辉), Wei X-F (魏雪峰), *et al*. Enzyme activities and physicochemical properties of soils in the Ebinur Lake Nature Reserve in Xinjiang, China. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 2014, **31**(4): 715-722 (in Chinese)

[20] Xinjiang Department of Agriculture, Xinjiang Soil Survey Office (新疆农业厅,新疆土壤普查办公室). The Soil of Xinjiang. Beijing: Science Press, 1996 (in Chinese)

[21] Yang L-F (杨兰芳), Zeng Q (曾　巧), *et al*. Measurement of catalase activity in soil by ultraviolet spectrophotometry. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2011, **42**(1): 207-210 (in Chinese)

[22] Trasar-Cepeda C, Camina F, Leirós MC, *et al*. An improved method to measure catalase activity in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, **31**: 483-485

[23] Shen G-Q (沈桂琴). The determination methods of soil phosphatase activity. *Soil and Fertilizer Sciences in China* (中国土壤与肥料), 1987, **24**(1): 40-42 (in Chinese)

[24] Huang J (黄　娟), Li Z (李　稹), Zhang J (张健). Improvement of indophenol blue colorimetric method on activity of urease in soil. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering* (土木建筑与环境工程), 2012, **34**(1): 102-107 (in Chinese)

[25] Zhang W (张　韫). Soil, Water, and Plant Physicochemical Analysis Tutorial. Beijing: China Forestry Press, 2011 (in Chinese)

[26] Du J-J (杜家菊), Chen Z-W (陈志伟). Using the SPSS method to realize path analysis of linear regression. *Bulletin of Biology* (生物学通报), 2010, **45**(2): 4-6 (in Chinese)

[27] Liu G-S (刘广深), Xu D-M (徐冬梅), Xu Z-J (许中坚), *et al*. Relationship between hydrilase activity in soil and soil properties in Zhejiang Province. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2003, **40**(5): 756-762 (in Chinese)

[28] Yang W-B (杨文彬), Geng Y-Q (耿玉清), Wang D-M (王冬梅). The activities of soil enzyme under different vegetation types in Li River riparian ecotones. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2015, **35**(14): 4604-4612 (in Chinese)

[29] Liu S-H (刘淑慧), Kang Y-H (康跃虎), Wan S-Q (万书勤), *et al*. Soil enzyme activities under plant communities in saline-sodic grassland in Songnen Plain. *Soils* (土壤), 2012, **44**(4): 601-605 (in Chinese)

[30] Nan L-L (南丽丽), Guo Q-E (郭全恩), Xiang H (向　华), *et al*. Soil enzyme activities under main plant communities of saline-alklied badlands in Gansu Province. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2015, **29**(4): 311-315 (in Chinese)

[31] Wang Y-W (王彦武), Chai Q (柴　强), Ouyang X-Z (欧阳雪芝), *et al*. Soil microbial populations and enzyme activities under different sand-fixation forests in oasis-desert ecotone of Minqin Desert. *Arid Land Geography* (干旱区地理), 2016, **39**(1): 104-111 (in Chinese)

[32] Cheng D-X (程东祥), Wang T-T (王婷婷), Bao G-Z (包国章), *et al*. Activities and influencing factors of the soil enzymes in Changchun City. *Journal of Northeast Normal University* (东北师大学报), 2010, **42**(2): 137-142 (in Chinese)

[33] Luo L-C (罗来超), Lv J-X (吕静霞), Wei X (魏鑫), *et al*. Effects of nitrogen fertilizer forms on soil enzyme activities at different growth stages of wheat. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2013, **31**(6): 99-102 (in Chinese)

[34] Gao X-L (高秀丽), Xing W-Q (邢维芹), Ran Y-L (冉永亮), *et al*. Effects of accumulation of heavy metals in soils on enzyme activities. *Asian Journal of Ecotoxicology* (生态毒理学报), 2012, **7**(3): 331-336 (in Chinese)

[35] Yang N (杨　宁), Zou D-S (邹冬生), Yang M-Y

(杨满元), *et al*. Soil enzyme activities in different re-vegetation stages on sloping-land with purple soils in Hengyang of Hunan Province, China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2013, **19**(6): 1516-1524 (in Chinese)

[36] Yang X (杨 星), Zhang L-H (张利辉), Zheng C (郑 超), *et al*. Effects of Flaveriabidentis invasion on soil microbial communities, enzyme activities and nutrients. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2012, **18**(4): 907-914 (in Chinese)

[37] Yang W-Q (杨万勤), Wang K-Y (王开运). Advances on soil enzymology. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* (应用与环境生物学报), 2002, **8**(5): 564-570 (in Chinese)

[38] Garcia C, Hemandez T, Roldan A, *et al*. Organic amendment and mycorrhizal inoculation as a practice in afforestation of soil with *Pinus halepensis* Miller: Effect on their microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**: 1173-1181

[39] Xia M-J (夏孟婧), Miao Y (苗 颖), Lu Z-H (陆兆华), *et al*. Responds of soil enzyme activities of degraded coastal saline wetlands to irrigation with treated paper mill effluent. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(21): 6599-6608 (in Chinese)

作者简介 朱海强, 男, 1992 年生, 硕士研究生. 主要从事干旱区资源开发与规划研究. E-mail: 974467061@qq.com

责任编辑 孙 菊

封 面 说 明

图片由新疆师范大学地理科学与旅游学院赵明亮、朱海强 2015 年 10 月拍摄于艾比湖湿地鸟岛管护站东南部的博州养殖场.鸟岛管护站位于湖滨湿地南岸,典型植物群落为芦苇和柽柳,其中芦苇群落平均株高为 2.16 m,不同生长期覆盖度为 54%~69%;柽柳群落平均高度为 1.68 m,不同生长期覆盖度为 40%~55%.芦苇和柽柳群落土壤类型均为粉砂质壤土,平均粒径分别为 64.86 和 39.54 μm,表层土含盐量为 17.81 和 18.92 $g \cdot kg^{-1}$,土壤为重度盐化土.干旱、高盐和大风成为湿地生境恶化的主要因素.艾比湖湿地作为绿洲与荒漠化共轭演变的重要核心位置,对区域气候、动植物多样性及土壤质量等生态环境的演变至关重要,近年来针对湿地土壤养分、水分和盐渍化程度的空间分异及胡杨、芦苇、盐节木和梭梭等典型植物群落及不同土壤类型的酶活性进行研究,以期为湿地生态环境的保护与可持续利用提供科学依据.

朱海强, 李艳红, 李发东. 艾比湖湿地典型植物群落土壤酶活性季节变化特征. 应用生态学报, 2017, **28**(4): 1145-1154
Zhu H-Q, Li Y-H, Li F-D. Seasonal variations of soil enzyme activities in typical plant communities in the Ebinur Lake wetland, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2017, **28**(4): 1145-1154 (in Chinese)