

和田河上游灰杨不同林型土壤理化性质及酶活性分析

吕瑞恒^{1,2}, 梁继业^{1,2}, 于 军¹, 王夏楠^{1,2}, 王 亮^{1,2}, 周正立^{1,2*}

(1. 新疆生产建设兵团 塔里木盆地生物资源保护利用重点实验室, 新疆 阿拉尔 843300;
2. 新疆塔里木大学 植物科学学院, 新疆 阿拉尔 843300)

摘 要:以和田河上游灰杨不同林型 0~100 cm 土壤为研究对象,探讨 4 种林型土壤理化性质、土壤酶活性空间变化规律。结果表明,4 种林型土壤含水率、全盐量空间异质性较为明显。土壤容重随着土层加深表现出先增大后减小趋势,不同林型容重均值大小排序为Ⅱ>Ⅰ>Ⅲ>Ⅳ。不同林型土壤含水率均值变化则与容重相反,林型Ⅱ各土层含水率均为最低。4 种林型土壤 pH 值介于 8.15~9.17 之间,林型Ⅱ各土层全盐含量均为最低,林型Ⅰ、Ⅲ、Ⅳ土壤全盐量表现出表层聚集现象。在 4 种林型中,有机质含量随着土层加深变化均表现出先增大后减小的趋势,在 60~80 cm 土壤层有机质含量均最高。在不同土层中,过氧化氢酶、脲酶均以林型Ⅲ活性最强,蔗糖酶、碱性磷酸酶则以林型Ⅳ活性最强,过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶在土层 60~80 cm 活性最高。经相关分析和主成分分析表明,容重、含水率与其他测定指标相关性较强,水分指标在第 1 主成分中所占比重较大,对外界环境变化比较敏感。土壤结构、水分条件是影响和田河上游不同灰杨林型土壤特征的主要因素。

关键词:灰杨;和田河;林型;理化性质;土壤酶

中图分类号:S718.43 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2015)02-0027-06

Physicochemical Properties and Enzymatic Activities of Different *Populus pruinosa* Forest Types in the up Reaches of Hotan River

LYU Rui-heng^{1,2}, LIANG Ji-ye^{1,2}, YU Jun^{1,2}, WANG Xia-nan^{1,2}, WANG Liang^{1,2}, ZHOU Zheng-li^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Protection and Utilization of Biological Resources in Tarim Basin, Xinjiang Production & Construction Corps, Alar, Xinjiang 843300, China; 2. College of Plant Science and Technology, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China)

Abstract: In order to probe the spatial change rules of soil physicochemical properties and soil enzyme activities, 0~100 cm soil profiles of 4 *Populus pruinosa* forest types in the upstream of Hotan River were used as the research objects. The results showed that the spatial heterogeneity of the moisture content and total salt were more obvious than the other determined indexes in 4 types. The bulk density firstly increased then decreased with the depth of soil layers of 4 types. The order of average bulk density values was type Ⅱ>Ⅰ>Ⅲ>Ⅳ, while the reversed order was observed in soil moisture content. The pH values were between 8.15~9.17 in 4 types. The soil salt content was the lowest in type Ⅱ, and the soil salt gathered the topsoil in type Ⅰ, Ⅲ, and Ⅳ. Organic matter firstly increased then decreased as the soil depth in the 4 types, highest in 60~80 cm soil layer. In different soil layers, the activities of catalase and urease were the strongest in type Ⅲ, while the activities of invertase and phosphatase were the strongest in type Ⅳ.

收稿日期:2014-06-13 修回日期:2014-08-18

基金项目:国家自然科学基金(31360109);兵团博士点基金(2011BB021);“973”计划前期研究专项(2012CB723204);塔里木盆地生物资源保护和利用重点实验室开放课题(BRYB1305)。

作者简介:吕瑞恒,男,博士,研究方向:森林生态学。E-mail:lvrh514723@126.com

*通信作者:周正立,男,副教授,研究方向:荒漠植被恢复和保护。E-mail:zzlzktyd@163.com

Catalase, urease and invertase activities were the highest in 60~80 cm soil layer. Correlation analysis and principal component analysis showed that the bulk density and soil moisture content had a strong correlation with other measured indexes, the moisture indexes accounted for a large proportion in the first principal component, and it was sensitive to the change of external environment. Soil structure and soil moisture conditions had important influence on the other soil properties in the different *P. pruinosa* types in the upstream of the Hotan River.

Key words:*Populus pruinosa*; Hotan River; forest type; soil physicochemical property; soil enzyme

森林土壤是森林生态系统重要的组成部分,土壤中生物与环境相互作用产生的大量营养物质,能够提供林木生长发育所需的水、肥、气、热,影响林木的生长和林地生产力水平^[1-2]。土壤理化性质作为控制森林植物生长发育的关键生态因子,是决定土壤肥力和土壤质量的重要指标^[3]。土壤中的一切生物化学过程都是在土壤酶系统的作用下进行的,在森林生态系统中的物质循环和能量流动过程中扮演着重要的角色,其活性反映了土壤中的各种生物化学过程的动向和强度,由于土壤酶与土壤生物学活性密切相关,对生境条件的变化特别敏感,因而广泛应用于森林生态系统监测和环境质量评价过程中^[4-6]。

灰叶胡杨(*Populus pruinosa*)属于喜光、耐大气干旱、耐风沙盐碱树种,主要分布于我国新疆塔里木盆地西南部,作为荒漠河岸林主要优势种,对于改善生态环境,遏制沙漠化,保护生物多样性等诸多方面具有重大的作用^[7]。目前,众多学者侧重对灰杨生理特性、耗水规律、生长特性等单一方面进行研究^[8-11],而缺乏对灰杨林土壤特征基础性的研究。因此,以和田河上游区域不同灰杨林型为研究对象,分析比较灰杨林土壤理化性质及酶活性空间分布特征,对于揭示灰杨林土壤肥力状况,了解塔西南区域荒漠河岸植被与土壤相互关系具有积极作用,同时能够为荒漠生态公益林管护和健康性评价提供理论和数据支撑。

表 1 灰杨不同林型群落状况

Table 1 The conditions of different *P. pruinosa* communities

林型	样方面积/m ²	密度/(株·hm ⁻²)	胸径/cm	树高/m	冠幅/m		草主要种类	海拔/m	地下水位/m
					东西	南北			
I	150×50	101	15.69	4.77	2.96	2.93	多枝桤柳+盐穗木+芦苇	1 205	2.62
II	150×50	163	9.81	2.89	2.04	2.06	多枝桤柳+芦苇+胀果甘草	1 202	3.33
III	50×50	908	10.72	4.77	2.26	2.28	多枝桤柳(无其他植物、有人为干扰迹象)	1 197	1.61
IV	50×50	776	11.09	4.93	2.17	2.21	芦苇+胀果甘草	1 199	1.41

1.2 土壤取样方法

1.2.1 采样方法 在 4 种灰杨林生境类型下按照

1 研究地概况

该区位于塔里木盆地西南缘,南接昆仑山,北连塔克拉玛干大沙漠,属暖温带极端干旱荒漠气候,具有光热资源丰富、昼夜温差大、降水稀少、蒸发强烈、无霜期长等特点。年总辐射量为 578.2~634.3 KJ/cm²,仅次于青藏高原;全年日照时数 2 470~3 000 h,年平均日照百分率在 58%~60%之间,最高可达 84%;年平均温度 11.6℃,≥10℃ 积温 4 200℃,无霜期 170~201 d;年降水量 13.1~48.2 mm,年蒸发量 2 450~3 137 mm,干燥度>20;四季多风沙,每年浮尘天气 220 d 以上,其中浓浮尘(沙尘暴)天气在 60 d 左右。土壤类型为风沙土,森林群落结构简单,植物种类较为单一,主要有灰叶胡杨(*Populus pruinosa*)、胡杨(*Populus euphratica*)、多枝桤柳(*Tamarix ramosissima*)、芦苇(*Phragmites communis*)、胀果甘草(*Glycyrrhiza inflata*)、铃铛刺(*Halimodendron halodendron*)、黑果枸杞(*Lycium barbarum*)、盐穗木(*Halostachys caspica*)等。

1.1 群落样方设置

在和田河上游地区,地理位置 38°10′46.9″—38°11′33.8″N、80°35′11.8″—80°36′56.3″E,海拔 1 200 m 左右,依据植被群落外貌和地下水位分别设置样方进行调查,对每个样地进行每木检尺,调查该区域主要灰杨群落类型(表 1)。

对角线分别设置 3 个土壤剖面,分层方式为 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm 和 80~100

cm,每个剖面进行环刀、铝盒取样,分别测定土壤容重和含水率。同时,在土壤剖面 5 个层次进行鲜土取样,去除土样中的石块、根系和土壤动物,将同一林型土壤剖面土壤按照层次进行混合。取回的土壤样品经风干后,碾碎过筛,标记贮存于广口瓶中,于 4℃ 储藏备用。

1.2.2 样品分析指标与方法 土壤理化性质采用鲍士旦^[12]测定方法:容重采用环刀法,含水率采用烘干法,全盐量采用电导率法测定,pH 采用电位法,有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法,全氮采用硒粉-硫酸铜-硫酸消化法。土壤酶活性采用关松荫^[13]测定方法:过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法;脲酶采用靛酚比色法,土样在 38℃ 下培养 24 h;蔗糖酶采用硫代硫酸钠滴定法,土样在 38℃ 下培养 24 h;碱性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法,土样在 37℃ 下培养 24 h。

1.2.3 数据处理方法 对每个土壤样品所测指标进行 3 次平行测定,结果取其平均值。应用 SPSS20.0 软件,对不同林型同一土层理化性质、土壤酶指标采用 S-N-K 法进行单因素多重比较,不同林型土壤酶与土壤理化性质指标采用 Pearson 相关系数进行相关性分析,对所测定的指标均值首先进行数据标准化处理,进行主成分分析^[6]。

表 2 灰杨不同林型土壤理化性质

Table 2 The physicochemical properties of different *P. pruinosa* stands

林型	土层 /cm	容重 /(g·cm ⁻³)	含水率 /%	全盐量 /(g·kg ⁻¹)	pH	有机质 /(g·kg ⁻¹)	全氮 /(g·kg ⁻¹)	全磷 /(g·kg ⁻¹)	全钾 /(g·kg ⁻¹)
I	0~20	1.38±0.12	1.15±0.30a	5.14±0.46b	8.43±0.07b	6.98±0.35b	0.60±0.16a	0.50±0.10a	7.48±0.90b
	20~40	1.42±0.19a	1.95±0.36a	5.10±0.78d	8.53±0.07b	7.51±0.13b	0.62±0.07	0.65±0.04b	8.42±0.16b
	40~60	1.37±0.21	1.76±0.31b	1.32±0.10c	8.38±0.09b	7.90±0.35a	0.65±0.09	0.56±0.06a	6.55±0.89a
	60~80	1.39±0.18b	8.29±0.51b	1.16±0.06b	8.59±0.01b	10.71±0.58a	0.84±0.09a	0.55±0.01a	7.48±1.19a
	80~100	1.38±0.15b	3.53±0.59a	0.80±0.04c	8.49±0.06a	9.36±0.34b	0.75±0.01	0.76±0.01b	6.56±0.93a
	均值	1.39(1.38%)	3.34(86.99%)	2.70(81.86%)	8.48(0.97%)	8.49(17.93%)	0.69(14.62%)	0.61(16.82%)	7.30(10.68%)
II	0~20	1.41±0.22	0.38±0.03a	0.36±0.06a	8.17±0.04a	5.90±0.13a	0.77±0.07ab	0.53±0.01b	5.38±0.26a
	20~40	1.48±0.12b	0.53±0.13a	0.34±0.04a	8.15±0.09a	5.37±0.27a	0.79±0.05	0.57±0.05a	5.59±0.46a
	40~60	1.46±0.09	0.79±0.23a	1.08±0.12a	8.18±0.04a	8.28±0.40a	0.84±0.09	0.57±0.02a	5.62±0.50a
	60~80	1.50±0.12c	1.04±0.17a	0.84±0.06a	8.37±0.06a	12.80±0.93b	0.85±0.09a	0.62±0.06b	7.08±0.55a
	80~100	1.40±0.08b	1.50±0.21a	0.56±0.06a	8.43±0.03a	8.66±0.13a	0.83±0.02	0.66±0.04a	6.55±0.62a
	均值	1.45(3.01%)	0.85(52.13%)	0.64(50.24%)	8.26(1.57%)	8.20(35.91%)	0.81(4.24%)	0.59(8.56%)	6.0(12.16%)
III	0~20	1.36±0.14	4.40±0.20b	9.32±1.20d	9.01±0.02d	16.71±0.35d	0.80±0.05ab	0.61±0.10d	9.95±1.42c
	20~40	1.40±0.08a	7.76±0.56b	2.18±0.04b	8.78±0.04c	16.25±0.27c	0.84±0.09	0.61±0.01ab	10.29±1.06b
	40~60	1.41±0.10	6.94±0.43c	1.16±0.10b	9.16±0.09c	22.31±0.23b	0.94±0.19	0.62±0.02b	8.50±0.14b
	60~80	1.23±0.15a	7.05±0.49b	0.82±0.10a	9.17±0.09c	30.44±0.35c	1.26±0.02b	0.52±0.09a	8.43±0.03a
	80~100	1.40±0.13b	2.30±0.36a	0.58±0.06b	8.66±0.01b	26.83±0.53d	0.74±0.01	0.63±0.06a	10.23±0.58b
	均值	1.36(5.53%)	5.69(40.13%)	2.81(131.2%)	8.96(2.55%)	22.51(27.60%)	0.92(22.35%)	0.60(7.40%)	9.48(9.87%)
IV	0~20	1.36±0.20	14.42±1.01c	8.20±0.29c	8.81±0.04c	12.26±1.33c	0.90±0.14b	0.58±0.02c	11.28±0.86c
	20~40	1.37±0.23a	19.06±1.29c	3.28±0.12c	8.75±0.07c	25.45±1.30d	0.85±0.15	0.69±0.04c	10.38±0.59b
	40~60	1.40±0.14	21.19±0.32d	2.58±0.10d	8.54±0.16b	42.55±2.30c	0.83±0.11	0.63±0.05b	11.20±1.05c
	60~80	1.28±0.22a	7.98±0.86b	2.04±0.20c	8.55±0.02b	71.76±3.98d	1.87±0.06c	0.72±0.10c	12.16±0.91b
	80~100	1.31±0.13a	15.31±1.67b	2.70±0.12d	8.46±0.05a	17.48±2.30c	0.80±0.08	0.67±0.04a	10.22±0.93b
	均值	1.34(3.60%)	15.59(32.51%)	3.76(67.04%)	8.62(1.74%)	33.90(71.00%)	1.05(43.79%)	0.66(8.26%)	11.05(7.08%)

注:a、b、c、d 表示灰杨不同林型同一土壤层进行单因素多重比较,p<0.05,下同;均值一行括号内表示同一林型不同土层各指标变异系数。

2.2 不同林型灰杨林土壤酶活性

过氧化氢酶活性越高,越有利于土壤养分的积累,灰杨不同林型过氧化氢酶变化趋势,由图 1 可知:林型Ⅲ灰杨林土壤过氧化氢酶活性随着土层加深逐渐上升,林型Ⅱ则表现出先降低后升高的趋势,林型Ⅰ、Ⅳ土壤过氧化氢酶活性表现出先升高-下降-升高的变化趋势。灰杨不同林型同一土层过氧化氢酶变化趋势:林型Ⅲ各土壤层过氧化氢酶活性最高,林型Ⅳ、Ⅰ次之,林型Ⅱ最低,不同林型同一土层之间呈不同差异。

灰杨不同林型脲酶表现出不同的变化趋势:林型Ⅲ灰杨林土壤脲酶活性逐渐升高,在 60~80 cm 土层活性达到最大,林型Ⅱ表现出先升高一下降一平稳的变化趋势,林型Ⅳ表现出先升高一下降一升高一下降的变化趋势,生境Ⅰ的灰杨林土壤脲酶活

性逐渐下降。灰杨不同林型同一土层脲酶变化趋势:不同林型同一层次脲酶活性均以生境Ⅲ的灰杨林最高,林型Ⅰ在 20~100 cm 脲酶活性最低,林型Ⅱ脲酶活性 0~60 cm 高于生境Ⅰ、Ⅳ。

灰杨 4 种林型土壤蔗糖酶活性表现出不同的变化趋势,林型Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ为先升高-下降,林型Ⅳ灰杨林土壤蔗糖酶活性表现出先下降-升高-下降的变化趋势。不同林型同一土层蔗糖酶变化趋势:4 种灰杨林型蔗糖酶活性在 60~80 cm 均达到最大值,由于土层深度的变化,各林型同一土层蔗糖酶活性呈现出不同的差异性。

碱性磷酸酶活性在各林型土壤层变化趋势较为一致,随着土层加深,其活性变化并不明显。同一土层之间,表现出林型Ⅲ、Ⅳ活性显著高于林型Ⅰ、Ⅱ。

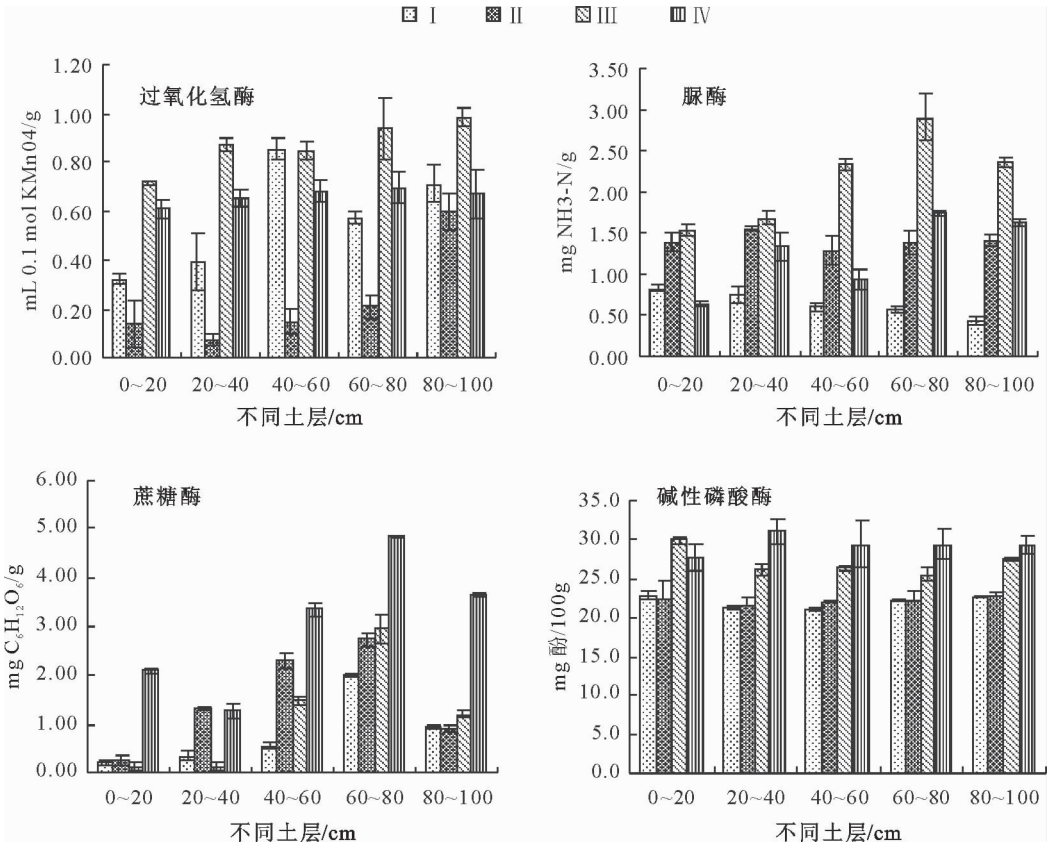


图 1 灰杨不同林型土壤酶活性分析

Fig. 1 The analysis of soil enzyme activities in different *P. pruinosa* stands

2.3 灰杨不同林型土壤肥力指标相关性分析及评价指标分析

针对灰杨不同林型土壤测定指标进行相关性分析(表 3)可知,土壤容重与含水率、碱性磷酸酶呈极显著负相关,与 pH、有机质、全钾、过氧化氢酶呈显著负相关。含水率与 pH、有机质、全钾、碱性磷酸酶呈极显著相关,与全盐量呈显著相关,这表明土壤结构、水分条件对和田河上游不同灰杨林型其他土

壤性质的变化有着重要影响。除与全盐量、全磷、蔗糖酶以外,有机质与所测定指标呈不同程度显著相关。本研究中 pH 值与含水率、有机质、全钾、过氧化氢酶、碱性磷酸酶都有极显著相关性,与容重、全氮有显著相关性,土壤酸碱度对土壤肥力、土壤有机质的合成与分解、各种元素的转化和释放都有着重要影响。

表 3 灰杨不同林型土壤理化性质与土壤酶活性相关性分析

Table 3 The correlation analysis between physicochemical properties and soil enzyme activities in different <i>P. pruinosa</i> stands												
指标	容重	含水率	全盐量	pH	有机质	全氮	全磷	全钾	过氧化氢酶	脲酶	蔗糖酶	碱性磷酸酶
容重	1.00	−0.61**	−0.43	−0.52*	−0.48*	−0.17	−0.09	−0.53*	−0.47*	−0.08	−0.18	−0.58**
含水率		1.00	0.51*	0.69**	0.72**	0.38	0.38	0.84**	0.30	0.05	0.29	0.72**
全盐量			1.00	0.40	0.19	−0.04	0.06	0.61**	0.14	−0.27	−0.16	0.44
pH				1.00	0.69**	0.47*	0.12	0.73**	0.60**	0.32	−0.09	0.64**
有机质					1.00	0.54*	0.43	0.80**	0.50*	0.51*	0.42	0.77**
全氮						1.00	0.002	0.36	−0.02	0.38	0.52*	0.30
全磷							1.00	0.41	0.13	0.08	0.21	0.41
全钾								1.00	0.39	0.26	0.19	0.81**
过氧化氢酶									1.00	0.38	−0.23	0.28
脲酶										1.00	0.12	0.39
蔗糖酶											1.00	0.10
碱性磷酸酶												1.00

注: ** 表示相关系数在 $p<0.01$ 时达显著水平, * 表示相关系数在 $p<0.05$ 时达显著水平, $n=20$ 。

对灰叶胡杨不同林型土层土壤理化性质、土壤酶等 13 个指标进行主成分分析结果(表 4)表明,第 1 主成分的方差的贡献率最大,为 67.38%,第 2 主成分方差贡献率为 18.71%,2 个主成分累积方差贡献率为 86.08%。通过(表 5)特征向量分析可知,第 1 主成分中信息量较为集中,主要包括土壤容重、地下水位、含水率、有机质等。第 2 主成分主要集中脲酶、全氮方面的信息。结合上述分析可知,土壤水文

指标所占比重较大,对外界环境变化比较敏感,结合相关分析认为,土壤含水率可以作为该地区评价土壤环境条件变化的首选指标。

表 4 土壤信息系统主成分分析

Table 4 Principal component analysis of soil information system			
项目	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分
特征根	8.76	2.43	1.81
方差贡献率/%	67.38	18.71	13.91
累计贡献率/%	67.38	86.08	100.00

表 5 土壤质量特征向量分析

Table 5 Principal component eigenvectors of information system													
项目	容重	含水率	全盐量	酸碱度	有机质	全氮	全磷	全钾	脲酶	蔗糖酶	碱性磷酸酶	过氧化氢酶	地下水位
1	0.96	0.95	0.93	0.65	0.95	0.43	0.86	0.94	0.17	0.68	0.93	0.74	−0.96
2	−0.02	−0.09	−0.25	0.46	0.23	0.90	−0.35	0.14	0.97	0.03	0.34	0.22	−0.19
3	−0.27	0.31	−0.25	−0.60	0.22	0.07	0.37	0.00	−0.15	0.74	0.14	−0.63	0.21

3 结论与讨论

荒漠河岸林是荒漠环境条件下的重要森林资源,分布于荒漠河流两岸,群落类型多样、结构简单、优势种明显是荒漠河岸植被典型特点^[13-14]。和田河位于塔里木盆地西南部,是一条常受风沙埋填的动荡河流,由于受到河道变迁而导致灰杨形成不同林型。研究表明,4 种灰杨林型土壤容重在 1.23~1.50 之间波动,土壤比较紧实,结构性差,孔隙少,水盐垂直空间分布差异性较大,地下水位较高区域土壤盐分有表层聚集现象。灰杨主要分布于河漫滩或地下潜水位较高的河流沿岸地带,受季节性洪水以及土壤质地的影响^[15-16],土壤保水保肥性能较差。有机质、全氮、4 种土壤酶活性表现出先增大后减小的趋势,下层土壤(40~80 cm)各种酶活性达到最大,具有明显的层次性。此种现象不仅受土壤物理性质的影响,土壤根系分布特点也是主要因素。和田地区常见风沙频繁,气候干旱,蒸发量较大,表层植被覆盖较低,无法固定表层凋落物,因此表层土壤生物化学反应过程缓慢,在下层根系分布区,有机养

分含量相对较高,土壤湿度也有所提高,改善了土壤微生物生存条件,相应各种土壤酶活性逐渐提高。

众多学者研究表明,水分是制约新疆南疆区域荒漠植被存在和发展的关键因子,结合荒漠干旱区气候条件和土壤物理结构特征^[17],降水、地下水是荒漠植被在自然条件下生态用水的主要来源。郝新民^[18]等对塔里木河下游区域荒漠植被进行研究分析得出地下水位深度与土壤湿度是影响植被分布的关键环境因素。本研究中,灰杨地下水位较高区林型(Ⅲ、Ⅳ)土壤湿度显著大于地下水位较低区林型(Ⅰ、Ⅱ),土壤含水率与其他理化性质密切相关,通过综合分析得出地下水位、容重、土壤含水率是该区域不同灰杨林型的土壤生物理化特性较为敏感性指标。土壤水分有效性作为植被—水分—土壤系统中关键性环节,决定于质地、孔隙度等土壤属性,通过携带和迁移方式又影响植物对有机质与养分含量的吸收利用^[19],这与其他学者^[20-21]对塔里木河荒漠植被研究较为一致。

土壤粒径分布作为重要的土壤物理属性,对土壤的水文特性、肥力状况以及土壤侵蚀等有着显著影

响,本研究中没有进行分析测定,尚需做进一步研究。

参考文献:

[1] 吕世丽,李新平,李文斌,等. 牛背梁自然保护区不同海拔高度森林土壤养分特征分析[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2013, 41(4):161-168,177.
LV S L, LI X P, LI W B, *et al.* Forest soil nutrient characteristics at different altitudes in Niubeiliang national natural reserve[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Edi., 2013, 41(4):161-168,177. (in Chinese)

[2] 刘贤德,赵维俊,张学龙,等. 祁连山排露流域青海云杉林土壤养分和 pH 变化特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(6): 1013-1020.
LIU X D, ZHAO W J, ZHANG X L, *et al.* Variation of soil nutrient content and pH value under *Picea crassifolia* forest in the pailugou drainage basin in the Qilian Mountains[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(6):1013-1020. (in Chinese)

[3] 李小容,白礼姣,陈本莉,等. 不同林龄木麻黄地土壤理化性质与生化活性分析[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(2):37-41.
LI X R, BAI L J, CHEN B L, *et al.* Analysis of soil physico-chemical properties and biological activity of the *Casuarina equisetifolia* forest with different ages[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014,29(2):37-41. (in Chinese)

[4] 杨万勤,王开运. 森林土壤酶的研究进展[J]. 林业科学, 2004, 40(3):153-159.
YANG W Q, WANG K Y. Advances in forest soil enzymology [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40(3):153-159. (in Chinese)

[5] 曹慧,孙辉,杨浩,等. 土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(1):105-109.
CAO H, SUN H, YANG H, *et al.* A review soil enzyme activity and its indication for soil quality[J]. Chin. J. Appl. Environ. Biol., 2003, 9(1):105-109. (in Chinese)

[6] 吕瑞恒,刘勇,李国雷,等. 北京延庆飞播林区不同植被类型土壤肥力的差异[J]. 东北林业大学学报,2009, 37(5):39-42.
LV R H, LIU Y, LI G L, *et al.* Differences in soil fertility for different vegetation types in Yanqing aerial seeding area, Beijing[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009, 37(5):39-42. (in Chinese)

[7] 新疆森林编辑委员会. 新疆森林[M]. 乌鲁木齐:新疆人民出版社,北京:中国林业出版社,1989:236-246.

[8] 王海珍,韩路,李志军,等. 塔里木河上游胡杨与灰杨光和水分支生理特性[J]. 生态学报,2009,29(11):5843-5850.
WANG H Z, HAN L, LI Z J, *et al.* The photosynthetic and water physiological characteristics of *Populus euphratica* and *Populus pruinosa* in the upper reaches of Tarim River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009,29(11):5843-5850. (in Chinese)

[9] 周孝明,陈亚宁,李卫红,等. 塔里木河下游胡杨树干液流特征研究[J]. 中国沙漠,2008,28(4):673-678.
ZHOU X M, CHEN Y N, LI W H, *et al.* Study of sap flow in stem of *Populus euphratica* in lower reaches of Tarim River [J]. Journal of Desert Research,2008,28(4):673-678. (in Chinese)

[10] 刘建平,李志军,何良荣,等. 胡杨、灰叶胡杨种子萌发期抗盐性的研究[J]. 林业科学, 2004, 40(2):165-169.

LIU J P, LI ZH J, HE L R, *et al.* Salt-tolerance of *Populus euphratica* and *P. pruinosa* seeds during germination[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40(2):165-169. (in Chinese)

[11] 韩路,王海珍,彭杰,等. 塔里木河上游灰胡杨种群生存分析[J]. 林业科学, 2010, 46(1):131-135.
HAN L, WANG H ZH, PENG J, *et al.* Survival analysis of *Populus pruinosa* population in the upper reaches of Tarim River[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(1):131-135. (in Chinese)

[12] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京:科学出版社, 1989.

[13] 王让会,王晓伟,游先祥,等. 荒漠河岸林生态系统的结构分析[J]. 干旱区研究, 2002, 19(2):7-11.
WANG R H, WANG X W, YOU X X, *et al.* Analysis on the structure of the desert riparian forest ecosystems[J]. Arid Zone Research, 2002, 19(2):7-11. (in Chinese)

[14] XU H L, YE M, LI J M. The ecological characteristics of the riparian vegetation affected by river overflowing disturbance in the lower Tarim River[J]. Environ Geol, 2009, 58: 749-1755.

[15] 桂东伟,雷加强,曾凡江,等. 塔里木盆地南缘绿洲农田土壤粒径分布分形特征及影响因素研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4):730-735.
GUI D W, LEI J Q, ZENG F J, *et al.* Fractal dimension of particle size distribution and its affecting factors in oasis farmland soils in southern marginal zones of Tarim Basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(4):730-735. (in Chinese)

[16] 韩路,王海珍,彭杰,等. 塔里木荒漠河岸林植物群落演替下的土壤理化性质研究[J]. 生态环境学报, 2010,19(12): 2808-2814.
HAN L, WANG H Z, PENG J, *et al.* Soil physical and chemical properties under succession of plant community in desert riparian forest of the Tarim River[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010,19(12):2808-2814. (in Chinese)

[17] WU Y P, SHEN Y P, LARRY LI. Possible physical mechanism of water vapor transport over Tarim River Basin[J]. Ecological Complexity, 2012(9):63-70.

[18] HAO X M, CHEN Y N, LI W H, *et al.* Hydraulic lift in *Populus euphratica* Oliv. from the desert riparian vegetation of the Tarim River Basin[J]. Journal of Arid Environments, 2010, 74:905-911.

[19] 王新平,张志山,张景光,等. 荒漠植被影响土壤水文过程研究述评[J]. 中国沙漠, 2005, 25(2):197-201.
WANG X P, ZHANG Z S, ZHANG J G, *et al.* Review to researches on desert vegetation influencing soil hydrological processes[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(2):197-201. (in Chinese)

[20] HAO X M, LI W H, HUANG X, *et al.* Assessment of the groundwater threshold of desert riparian foest vegetation along the middle and lower reaches of the Tarim River, China [J]. Hydrological Processes, 2010, 24:178-186.

[21] MA X D, CHEN Y N, ZHU C G, *et al.* The variation in soil moisture and the appropriate groundwater table for desert riparian forest along the Lower Tarim River[J]. J. Geogr. Sci., 2011,21(1):150-162.