

荒漠化地区土壤理化性质及其对胡杨林生长的影响

钟家骅¹, 管文轲², 易秀¹, 霍艾迪¹, 秦媛¹, 刘德林³, 何晓霞³

(1. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054;

2. 新疆林业科学院, 乌鲁木齐 830002; 3. 新疆塔里木胡杨林国家级自然保护区, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:天然植被是抑制荒漠化过程及保护生物多样性的重要因素。为探讨荒漠化地区的土壤理化性质及其与胡杨林生长间的关系,以塔里木胡杨林国家级自然保护区为研究区,采用样地调查、取样试验与分析相结合的方法,比较了区内不同样地的土壤理化性质与胡杨长势。结果表明:研究区内土壤机械组成在塔河南岸以粉粒为主,北岸以细砂粒占优势,胡杨林在粉质、砂质壤土上长势良好;胡杨生长良好地区土壤 pH 值在 7.83~8.00;0—20 cm 土层有机质在 0.33%~0.80%,含盐量在 0.42%~6.28%,盐分以水溶性硫酸盐与氯化物为主,不同样地土壤理化指标差异显著。在塔河中游荒漠绿洲地带,土壤盐碱化是影响胡杨林繁衍发育的主要因素,排盐在促进胡杨更新复壮过程中至关重要。

关键词:荒漠化;土壤理化性质;胡杨;塔里木河

中图分类号:S153

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)04-0134-05

Soil Physical and Chemical Properties and Their Effects on *Populus euphratica* Growth in Desertification-Prone Areas

ZHONG Jiahua¹, GUAN Wenke², YI Xiu¹, HUO Aidi¹, QIN Yuan¹, LIU Delin³, HE Xiaoxia³

(1. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region,

Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Xinjiang Academy of Forestry,

Urumqi 830002, China; 3. Xinjiang Tarim *Populus euphratica* National Nature Reserve, Korla, Xinjiang 841000, China)

Abstract: Natural vegetation is one of the key factors in the conservation of biological diversity and desertification control. In order to study the physical and chemical properties of soil and their effects on the growth of *Populus euphratica* in desertification-prone areas, we took Tarim National Nature Reserve as the research area. Through the field investigation and sample collection and analysis, the results were obtained as follows. Soil particle in the south bank of middle reach of Tarim River mainly composed of silt, however, fine sand preponderated in the north bank. *Populus euphratica* grew well in the silty loam and sandy loam; the soil pH value between 7.83 and 8.00 was suitable for the growth of *Populus euphratica*; the soil salinity totality in 0—20 cm depth was greater than 0.4%, and the content of soil organic matters was 0.33%~0.80%, the salt content was 0.42%~6.28% in the studied area. The salt took hydrosoluble sulfate and chloride as the principal substance; they were statistically different in the soil physical and chemical properties of different regions. In the middle reaches of Tarim River, soil salinization and alkalization were the dominant factors inhibiting the growth of *Populus euphratica* forest. Reducing the salt amount in soil was a preferential measure for ecological recovery.

Keywords: desertification; soil physical and chemical properties; *Populus euphratica*; Tarim River

在生态系统中,土壤作为陆地生态系统得以维持与正常运转的最基本载体,与植被相互依存。一方面,土壤水盐是荒漠区植被地下生境的关键因子,直接影响和制约着天然植被的发育^[1];另一方面,天然

植被是抑制荒漠化过程及保护生物多样性的重要因素^[2]。因此,土壤理化性质的空间分布特征及其与植被生长间的关系是开展恢复生态学研究的重点领域之一^[3]。

胡杨 (*Populus euphratica* Oliv.), 为杨柳科 (Salicaceae) 杨属 (*populus*) 中的古地中海孑遗树种, 主要分布于北纬 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$, 亚洲中、西部荒漠区及地中海、北非和欧洲南部。塔里木盆地是胡杨林分布的主要区域, 其面积约占全国胡杨林面积的比例为 89.1% ^[4], 占世界胡杨林资源的 54.3% ^[5]。近几十年来, 随着人口增加与水、土资源的不断开发利用, 塔里木河(简称塔河)中下游地区植被衰败, 大片胡杨林死亡, 沙漠化面积扩大, 生态环境严重恶化, 已成为制约流域社会经济和生态环境可持续发展的主要因素^[6]。调查结果显示, 塔里木胡杨自然保护区内胡杨林面积 2007 年为 6.26万 hm^2 , 相比 1973 年减少了 50% ^[7]。现有研究表明, 土壤性状方面, 在塔河中游, $0\sim 20\text{ cm}$ 土层 pH 值在 $8.3\sim 8.57$, 有机质在 $0.62\%\sim 1.72\%$, 全盐量在 $0.45\%\sim 1.27\%$, 受河水漫溢和植物根系的影响, 盐分、pH 值、养分等随土层深度增加而降低的规律不太明显, 土壤含水量是影响干旱区植物生长的首要因子, 土壤质地、全盐量、pH 值是影响荒漠河岸林群落演替的主要因子^[8]。中游地区胡杨林不同的演替阶段, 胡杨幼龄、中龄、成熟和过熟林下土壤养分集中在 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层, 近熟林则集中在 $0\sim 10\text{ cm}$ 和地表以下 $20\sim 40\text{ cm}$ 土层; 土壤有机质、碱解 N、速效 P、速效 K 质量分数随胡杨林演替过程先增加后降低^[9]。而依据地下水位与植被发育状况, 可将塔河中游河岸林分为河岸地带、过渡地带、荒漠地带 3 种生境, 河岸地带与过渡地带植被盖度可达 80% 以上; 在植被发育较差的荒漠地带土壤容重下降, 盐分含量增加; 水热组合合理的过渡地带土壤有机质、全磷、全钾最高^[8]。塔河下游铁干里克绿洲荒漠过渡带, $0\sim 50\text{ cm}$ 土层有机质在 $0.36\%\sim 0.84\%$, pH 值 $7.79\sim 8.82$, 土壤均呈碱性, 且部分地区碱性较强, 不同的监测区中植被优势种绝大部分为耐盐碱的灌木与草本植物^[3]。类似的研究表明, 阿其克苏河下游河岸带土壤为碱性, 有机质在 $0.32\%\sim 2.77\%$, 碱解氮和速效磷含量远低于土壤中有机的含量; $0\sim 10\text{ cm}$ 土层全盐量不高, 均值为 0.37% , 最高可达 0.76% ; 胡杨生长良好条件下 $0\sim 10\text{ cm}$ 土层有机质在 $0.8\%\sim 2.5\%$, 全盐量在 $0.5\%\sim 0.7\%$ ^[10]。在艾比湖湿地, 土壤质地以粉砂质壤土与砂质壤土为主, 土壤盐化程度高, 多有碱化现象, 胡杨疏林采样点 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层含盐量达 5% , 有机质含量低, 其空间变化说明河流促进沿岸植被生长, 而对有机质积累起到积极作用^[11]; 全盐量为 16.85% 的土壤条件下, 胡杨无法生长; 土壤盐渍化抑制胡杨对养分的吸收, 即使有机质含量较高, 胡杨的生长亦会受到抑制^[12]。疏勒河下游, 表层土壤含水量在 $0.8\%\sim$

4.49% , 全盐量在 $2.99\%\sim 23.75\%$, 自中游向下游土壤水份减少, 盐分增加, 胡杨生长受到土壤水盐胁迫, 是下游胡杨林矮小、空心、朽心的重要原因^[1,13]。在渭干河—库车河三角洲绿洲, 怪柳、盐穗木和芦苇是绿洲盐渍土上的优势植物, 广泛分布于各种盐渍化生境, 土壤盐分是土壤化学因子中影响植被分布的主要因子^[14]。

植被的演替发育会随着土壤理化性质、水分、养分、地形等因素变化而呈现不同的生长特征。由于严酷的环境抑制了幼苗的萌发与存活, 目前, 研究区内胡杨林资源在种群结构上幼龄期个体较少, 种群维持面临困难, 拯救胡杨林行动迫在眉睫。目前对塔河中游不同植被发育条件下土壤理化性质及其与胡杨生长状况间对应关系的研究较少, 本文以保护区为研究区域, 研究胡杨林不同生长环境下土壤理化性质, 了解土壤养分与盐分的动态变化及与胡杨林退化过程相互联系, 为科学利用与保护塔河流域水土资源与胡杨林更新复壮提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

塔里木胡杨国家级自然保护区位于新疆巴音郭楞蒙古自治州, 横跨尉犁与轮台县; 地处塔克拉玛干大沙漠北缘, 位于塔河中游英巴扎—喀尔曲尕段, 以塔里木盆地内陆干旱区中的胡杨林荒漠生态系统为保护对象。保护区东西长 109.7 km , 南北宽 47.1 km , 总面积 39.54万 hm^2 , 位于北纬 $40^{\circ}55'\sim 41^{\circ}15'$, 东经 $84^{\circ}15'\sim 85^{\circ}30'$ 。保护区属温带大陆性平原区荒漠气候, 区内年平均气温 10.9°C , 年日照时数为 $2\,442\sim 2\,925\text{ h}$, 极端最低气温 -25.5°C , 气温年均日较差 14.6°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 $4\,125.3^{\circ}\text{C}$, 无霜期 $180\sim 224\text{ d}$, 年平均降雨量 65.5 mm , 年均蒸发量 $2\,024\text{ mm}$ ^[8], 年平均风速 1.8 m/s ^[9], 全年盛行东北风, 其次为西南风, 海拔高度 912 m ^[9], 地面坡降约 $1/4\,000$ ^[7]。植物组成以杨柳科、怪柳科、豆科、菊科、禾本科为主, 土壤以胡杨林土、荒漠土、盐碱土和沙土为主^[8]。该区草本植物主要有芦苇、胀果甘草、骆驼刺等, 灌木主要以多枝怪柳、铃铛刺为主, 胡杨为该区乔木层主要建群种^[9]。

塔河自西向东横贯保护区全境, 在区内的河段长度为 162.2 km , 区内常年性河流总长为 310.2 km 。塔河汛期在区内由于渗漏、两岸漫溢等消耗的水量为 $2.6\sim 3.2\text{ 亿 m}^3$, 区内地下水的 99.2% 由地表水垂直入渗转化而来^[15]。据 2007 年的遥感影像分析, 保护区内胡杨林面积为 6.26万 hm^2 , 旱生草地面积为 16.61万 hm^2 , 水域面积为 3.25万 hm^2 , 农田面积为 1.1万 hm^2 , 盐碱地面积为 7.55万 hm^2 , 沙漠面积达 7.22万 hm^2 ^[15]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与情况介绍 采用实地考察、布设样地、植被调查、样品采集与试验分析等方法,研究在胡杨林不同生境下的土壤理化性质。2016 年 9 月, 时值塔河汛期,在塔里木胡杨国家级自然保护区内进行野外调查,将胡杨林群落的生境分为荒漠化区、过渡地带与河岸地带 3 种类型,所选 5 个样地呈南北向分布,位于塔河南岸的样地编号为: S_1 , S_2 和 S_3 , 编号从 S_1 — S_3 依次靠近河岸;位于塔河北岸的样地编号为: N_1 , N_2 , N_1 接近河岸, N_2 距河岸较远。调查区内胡杨林生长情况,包括植被种类、生境、盖度等,主要植物种类有胡杨、灰杨、沙枣、枸杞、盐穗木、铃铛刺、骆驼刺、甘草等。不同样地植被调查状况详见表 1。

表 1 研究区不同区域植被生长状况

样地编号	生境	主要植被	总盖度
S_1	过渡地带	胡杨—柽柳	30%~60%
S_2	河岸地带	胡杨—柽柳—芦苇	80%~100%
S_3	河岸地带	胡杨	80%~100%
N_1	河岸地带	胡杨—柽柳—甘草	80%~100%
N_2	荒漠化区	柽柳—盐生草	≤30%

1.2.2 样品采集与测试方法 依据胡杨林群落不同的生境类型在河道干流的南北两岸选取样地进行土壤样品采集,其中 S_1 , S_2 , S_3 样地在塔河南岸, N_1 , N_2 样地在塔河北岸。样地规格为 100 m×100 m 正方形,每个样地内设置 3 个 30 m×30 m 的样方,每个样方内随机选取 3 个点,每个点采集 0—20 cm 厚表层土样,混合后用四分法取得 1 kg 左右,每个样地采得 3 个土壤混合样。样品经处理后进行各项指标的测定。碱解氮采用碱解—扩散法,速效磷采用 0.5 mol/L NaHCO_3 浸提钼锑抗比色法,速效钾采用 NH_4OAc 浸提—火焰光度法,机械组成采用比重计法、pH 值采用玻璃电极法、有机质采用重铬酸钾外加热法、含盐量采用残渣烘干法测定。

1.2.3 数据处理方法 植物数量调查以盖度为主要指标,以所设置的样方中植被垂直投影面积占样方面积的比率求得。各项土壤理化指标经分析测试后,结果采用 Excel 2007 软件取平均值并作图表,统计分析采用 DPS 7.05 软件,运用单因素方差分析和多重比较进行各样地土壤指标的差异显著性检验,用典型相关分析提取典型变量分析两组变量间的关系。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

2.1.1 土壤机械组成 按美国制粒级划分,将土壤颗粒分为黏粒(≤0.002 mm)、粉粒(0.05~0.002

mm)和砂粒(2.0~0.05 mm)3 大类别。研究区各样地的土壤中,砂粒含量在 4.2%~80.5%,砂粒的径级组成主要是细砂(0.25~0.10 mm)和极细砂(0.10~0.05 mm);粉粒含量在 17.4%~88%,粉粒组成集中在 0.05~0.01 mm 粒径范围内;黏粒含量在 2.1%~19.4%;从整体上看,研究区内土壤的机械组成以粉粒与极细砂为主。不同编号样地土壤质地如下, S_1 样地:粉土; S_2 样地:粉壤土; S_3 样地:粉壤土; N_1 样地:砂质壤土; N_2 样地:壤质砂土。土壤颗粒大小分布情况与土壤的质地详见表 2。

表 2 研究区不同区域的土壤颗粒分布

粒径/mm	各样地土壤小于某粒径 土粒所占质量百分数/%				
	S_1	S_2	S_3	N_1	N_2
<0.5	—	—	—	—	100
<0.25	—	100	100	100	96.2
<0.075	100a	93.6c	97.6b	84.2d	80.2e
<0.05	95.8a	77.4b	69.5c	52.3d	19.5e
<0.01	27.9b	46.3a	21.3c	19d	8e
<0.005	14.5b	34.2a	12.2c	14.9b	4.5d
<0.002	7.8c	19.4a	7.4c	12.6b	2.1d

注:同行不同小写字母代表差异显著($p<0.05$),下表同。

2.1.2 土壤化学性质 结果表明,保护区土壤的 pH 值范围在 7.83~8.46,有机质含量范围在 0.33%~0.80%,碱解氮含量范围在 8.8~30.6 mg/kg,速效磷的含量在 3.9~21.8 mg/kg,速效钾的含量在 116~758 mg/kg。 S_3 与 N_1 样地的有机质含量最高,分别为 0.8%与 0.7%(表 3)。

表 3 研究区各样地土壤养分含量

样地 编号	pH 值	有机质/ %	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
S_1	8.46a	0.46c	12.3d	21.8a	116.0e
S_2	8.41a	0.33d	8.8e	6.0d	270.0c
S_3	7.91c	0.80a	19.3c	11.5c	627.0b
N_1	7.83d	0.70b	26.3b	3.9e	758.0a
N_2	8.25b	0.34d	30.6a	16.9b	187.0d

研究区内地表以下 0—20 cm 土样中含盐量均大于 0.4%,所含盐分以氯化物和硫酸盐为主,重碳酸根含量较低。编号为 S_3 及 N_1 的样地土壤盐渍化程度最高,地表土层含盐量>1.5%,详见表 4。

2.2 胡杨林发育状况

研究区植被组成以旱生、盐生植物为优势物种,适宜在砂质土壤中生长。常见的林下植被有枸杞、盐穗木、铃铛刺、骆驼刺、甘草、芦苇、盐生草。各样地植被发育情况详见表 5。

表 4 研究区不同样地土壤盐分含量

样地 编号	盐分含量/(mg·100 g ⁻¹)					全盐量/ %
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	
S ₁	32.57c	30.39c	108.07e	290.75c	28.98d	0.664c
S ₂	30.06d	18.23d	186.12c	161.33d	35.09c	0.584d
S ₃	100.20b	69.89b	546.34b	478.67b	50.34a	1.619b
N ₁	205.41a	121.55a	1873.17a	2087.53a	39.66b	6.284a
N ₂	30.06d	18.23d	144.09d	108.14e	27.46e	0.415e

表 5 研究区不同区域植被盖度变化情况

样地 编号	胡杨		柽柳		林下 植被
	高度/m	盖度/%	丛径/m	盖度/%	
S ₁	6c	15c	4a	40a	枸杞,盐穗木
S ₂	8b	60ab	2bc	20bc	芦苇,骆驼刺
S ₃	12a	70a	1c	10c	芦苇
N ₁	9b	50b	2bc	30ab	甘草,盐生草
N ₂	6c	10c	3ab	20bc	盐生草

2.3 典型相关分析

采用对指标分组并运用典型相关方法分析土壤性质(组 1)与胡杨长势(组 2)两组性状间的关系。所选基础变量包括:pH 值(X_1),有机质含量(X_2 ,%),全盐量(X_3 ,%),粉粒含量(X_4 ,%),碱解氮(X_5 ,mg/kg),速效磷(X_6 ,mg/kg),钙(X_7 ,mg/100 g),硫酸根(X_8 ,mg/100 g),氯化物(X_9 ,mg/100 g);胡杨高度(Y_1 ,m),胡杨盖度(Y_2 ,%)。从两组基础变量中分别提取具有最大相关系数的前两对典型变量 U_1,V_1 和 U_2,V_2 可较充分地概括样本信息,依据分析结果,前两对典型变量相关系数的统计检验达到极显著水平($p<0.01$)。典型变量与基础变量间的换算系数详见表 6。

表 6 各组的典型变量系数

组 1	U_1	U_2	组 2	V_1	V_2
X_1	-13.4288	-22.5325	Y_1	1.0000	-1.9325
X_2	-9.8850	-19.6324	Y_2	0.0000	2.1759
X_3	-1.1548	-2.9276			
X_4	5.6785	10.8301			
X_5	0.0193	0.6325			
X_6	0.5327	0.6143			
X_7	-0.5271	0.0844			
X_8	-0.4001	-0.0059			
X_9	-0.3121	0.0008			

2.4 讨论

2.4.1 土壤质地与胡杨林发育状况 通过对塔河两岸各样地土壤样品颗粒组成的分析,可得出不同立地条件下的胡杨林下土壤质地,这是土壤最基本的物理性状指标,直接影响土壤肥力与理化性质^[15]。塔河水源受季节影响非常大,夏季冰雪融水大量下泄,整

个流域水量激增,河水漫灌大片沿岸地区,将上游的泥沙沉积^[5],因此,在塔河流域两岸冲、洪积平原的分选沉积与河道北移等因素作用下,使塔河两岸非地带性分布的土壤质地变化较为复杂。由于洪水漫溢对河岸林土壤结构的影响,塔河中游形成较为黏重的土质^[16]。在水分条件较好的河岸地带分布有粉质、砂质壤土,持水、蓄水和保肥能力较好,胡杨在此条件下生长最为良好;而植物亦可加速土壤形成过程,使粉粒、黏粒物质含量增加,根系亦起到固结沙粒作用^[17]。随着与河岸的距离增加,风蚀分选过程使土壤细粒物质不断损失,粗粒物质相对增多^[17-20],土壤质地转变为干燥的粉土、砂土,肥力贫瘠且温度变化剧烈,植被发育较差。

2.4.2 土壤养分和盐分与胡杨林发育状况 塔河中游地区土壤养分总体状况为全氮、全磷含量偏低,全钾含量较高^[5]。土壤水分是影响土壤性状的重要因素,也是干旱地区生态过程的主要驱动因子^[21]。研究区内土壤总体较为贫瘠,土壤有机质与速效钾在水热条件较好的河岸地区含量最高,该区域内土壤质地为粉、砂质壤土,利于保水保肥;而较多的植物凋落物和较快的分解速度利于有机物质积累,由此为胡杨的生长提供了必需的养分。碱解氮、速效磷的含量较低,并未成为影响胡杨林发育演替的主要因素。研究表明,pH 值与有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷呈负相关^[14],表明土壤 pH 值大小直接影响土壤有机质的分解速度,进而影响土壤养分的有效性。研究区中植被条件较好的胡杨林地与胡杨—柽柳混交林地土壤 pH 值较低,为 7.83~7.91;而有机质含量高,为 0.70%~0.80%,土壤理化性质较优。当土壤表土层(0—20 cm)含盐量超过 0.1%(石膏土壤为 0.2%),即可认为其发生了盐碱化^[22]。研究区土壤积盐程度说明其普遍存在盐化现象,地表盐壳与盐霜广泛分布,考虑到区内有大面积棉花种植等农垦活动,这是原生与次生盐碱化共同作用的结果。河岸地带由于受到季节性洪水淹没和地下水沿河淡化带的影响,促使土壤脱盐过程的发生,降低了盐分过量积累对植被萌发与生长的抑制作用,因此该区域分布有较多胡杨实生幼苗和柽柳幼株。

2.4.3 土壤性质与胡杨长势的典型相关分析 植物多样性与数量特征和土壤理化性质存在一定相关性,土壤理化性质的空间变异促使区域植物生长状况发生明显变化并影响群落演替,而植物的空间分布特征对土壤理化性质有明显改良作用^[8]。在相关分析的

第一对典型变量中,土壤酸碱度指标 X_1 与胡杨高度指标 Y_1 的系数最大,主要说明了土壤碱化程度与胡杨高度的负相关关系。第二对典型变量中,土壤指标 X_1 与胡杨盖度指标 Y_2 的系数最大,说明了土壤碱化程度与胡杨盖度的负相关关系。在土壤性质中,pH 值是影响胡杨长势的主要因子,土壤碱化过程的前提是土壤中含有过多易溶性盐类,因此,在促进胡杨林更新复壮过程中,排盐是首要的,可以通过合理灌溉,保持适合的潜水位,防止次生盐碱化加剧,或通过适时引水漫灌排盐。其次,固沙、培肥、种植绿肥等措施逐渐改良土壤性质。

3 结论

(1) 研究区内土壤质地具有粉、砂质特征,塔河南岸土壤颗粒以粉粒为主,北岸则砂粒占优势。在粉土及砂土中胡杨发育不良甚至衰败,河岸辐射带分布的粉壤土或砂壤土更适合胡杨生长。

(2) 研究区内土壤养分贫瘠,有机质含量最高为 0.8%,随着与河道距离的增加而迅速降低,肥力不足不利于改善植物根系生长的环境条件,抑制了胡杨林的更新复壮。

(3) 研究区土壤呈碱性(pH 值 7.5~8.5),土壤盐分含量高,易溶盐组分以硫酸盐及氯化物为主,不同样地土壤理化性质指标存在显著性差异。区内土壤中盐分的积聚与较高的 pH 值是抑制胡杨萌发与生长的主要因素,土壤 pH 值低于 8 的地区适宜胡杨生长。

致谢:感谢新疆林业科学院为项目的野外调查和土壤样品采集提供全力支持。

参考文献:

- [1] 刘普幸,张克新,霍华丽,等.疏勒河中下游绿洲胡杨林土壤水盐的空间变化特征与成因[J].自然资源学报,2012,27(6):942-950.
- [2] 李毅,刘建军.土壤空间变异性研究方法[J].石河子大学学报,2010,4(4):331-337.
- [3] 郑田,李建贵,李卫红,等.塔里木河下游绿洲荒漠过渡带土壤异质性及对植物群落的影响[J].中国沙漠,2010,40(1):128-134.
- [4] Philipp P. The Ecological Amplitude *Populus euphratica* at the Middle Reaches of the River Tarim, Western China[D]. Berlin: Technical University, 2005.
- [5] 王亮,王夏楠,周正立,等.塔里木河中游典型样地土壤主要理化性质比较研究[J].北方园艺,2014(23):148-151.
- [6] 张云,左其亭,王小平,等.塔里木河流域水资源分析系统开发研究[J].干旱区地理,2006,29(6):823-828.
- [7] 克力木·买买提,海米提·依米提,阿布都沙拉木·加拉力丁.塔里木河流域胡杨保护区土地覆盖变化研究[J].干旱区资源与环境,2010,24(1):154-157.
- [8] 张海涛,梁继业,周正立,等.塔里木河中游荒漠河岸林土壤理化性质分布特征与植被关系[J].水土保持研究,2016,23(2):6-12.
- [9] 王新英,史军辉,刘茂秀.塔里木河流域不同龄组胡杨林土壤理化性质及相关性[J].东北林业大学学报,2016,44(9):63-68.
- [10] 张连成,王勇辉.阿其克苏河河岸带典型植被覆盖下土壤化学特征[J].西南师范大学学报,2015,40(9):168-173.
- [11] 金海龙,白祥,满中龙,等.新疆艾比湖湿地自然保护区土壤空间异质性研究[J].干旱区资源与环境,2010,24(2):150-156.
- [12] 许娜,张蓉蓉.艾比湖典型地段土壤特征对胡杨生长的影响[J].广角镜,2012(3):157-159.
- [13] 刘普幸,姚晓军,张克新,等.疏勒河中下游胡杨林土壤水盐空间变化与影响[J].水科学进展,2011,22(3):360-365.
- [14] 王雪梅,柴仲平,塔西甫拉提·特依拜.渭干河—库车河三角洲绿洲土壤盐分对植被分布格局的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(1):219-223.
- [15] 吐热尼古丽·阿木提,阿尔斯朗·马木提,木巴热克·阿尤普.塔里木河流域胡杨生态系统脆弱性及其对策:以塔里木胡杨自然保护区为例[J].干旱区资源与环境,2008,22(10):96-100.
- [16] 李荔,周正立,吕瑞恒,等.塔里木河流域荒漠河岸林土壤理化性质[J].东北林业大学学报,2015,43(11):75-78.
- [17] 孙保平.荒漠化防治工程学[M].北京:中国林业出版社,2000.
- [18] 霍艾迪,刘志丽,康相武,等.利用 MODIS 影像反演沙漠化地区地表温度的方法研究[J].高技术通讯,2008,18(5):511-518.
- [19] 霍艾迪,张广军,武苏里,等.国内外荒漠化动态监测与评价研究进展与存在问题[J].干旱地区农业研究,2007,25(2):206-211.
- [20] 霍艾迪,康相武,刘志丽,等.利用 MODIS 数据反演沙漠化地区地表温度的简化模式:以陕西北部地区为例[J].地球科学与环境学报,2009,31(3):306-311.
- [21] 张笑培,杨改河,任广鑫,等.黄土高原南部植被恢复对土壤理化性状与土壤酶活性的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(6):64-70.
- [22] 赵焯.土壤环境科学与工程[M].北京:北京师范大学出版社,2012.