

DOI: 10.20103/j.stxb.202310212294

刘晶,何学敏,冯海鹏,巴合别勒德,杨欢,党子颜,松哈尔.胡杨根系拓扑分形特征对水分梯度的响应规律研究.生态学报,2026,46(6): - .
Liu J, He X M, Feng H P, Ba Hebielede, Yang H, Dang Z Y, Song H E. Investigating the response dynamics of fractal-topological characteristics in *Populus euphratica* root systems to moisture gradient variations. Acta Ecologica Sinica, 2026, 46(6): - .

胡杨根系拓扑分形特征对水分梯度的响应规律研究

刘 晶^{1,2,3}, 何学敏^{1,2,3,*}, 冯海鹏^{1,2,3}, 巴合别勒德^{1,2,3}, 杨 欢^{1,2,3}, 党子颜^{1,2,3},
松哈尔^{1,2,3}

1 新疆大学生态与环境学院, 乌鲁木齐 830017

2 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830017

3 新疆精河温带荒漠生态系统教育部野外科学观测研究站, 乌鲁木齐 833300

摘要:在干旱区的荒漠生态系统之中,水资源极为匮乏。而根系作为植物极为关键的功能器官,其空间根系分形直接影响植物水分资源获取能力。根系发达的胡杨(*Populus euphratica* Oliv.)作为干旱区典型落叶乔木,研究其异型根系结构特征,对于了解荒漠植物环境适应具有重要价值。本研究选取新疆艾比湖湿地国家级自然保护区内自然生长、健康的胡杨作为对象,利用 TRU 树木雷达通过三维建模与统计学分析,探讨胡杨根系拓扑分形特征对水分有效性梯度的响应规律,揭示胡杨根系对于水分变化的变化规律。结果表明:(1)土壤含水量随距河岸距离增加呈显著递减趋势(18.36→4.58%),垂直剖面上则表现为表层(0—20 cm)低值区(3.78%)到深层(>200 cm)高值区(11.50%)的逐渐跃升。(2)胡杨根系密度随离河距离增加呈现逐渐增加在降低的一个趋势,最大值为 2.58 g/cm³,最小值为 1.75 g/cm³,且主要集中在距离河 2—2.5 km 的样地中,在土壤的垂直分层上。近岸区(0—0.5 km)与远岸区(4—4.5 km)根系密度呈单峰分布,峰值位于 50—150 cm 层;根系密度离河距离 2—2.5 km 时,过渡带(2—2.5 km)则表现为双波动态,深层(>200 cm)密度达最大值。(3)胡杨根系密度与土壤水分含量之间的关系存在显著差异,在近河岸(0—0.5 km)和远河岸(4—4.5 km)处,整体呈现出随着土壤含水量的增加,根系密度先增加后减少的趋势。而在距河 2—2.5 km 处,根系密度与土壤水分含量之间呈现正相关,垂直剖面下的胡杨根系空间分布随土壤含水量变化呈线性分布。浅层(0—20 cm)呈正相关,深层(100—150 cm)负相关显著。

关键词:胡杨根系;水分梯度;树木雷达;根系密度;艾比湖

Investigating the response dynamics of fractal-topological characteristics in *Populus euphratica* root systems to moisture gradient variations

LIU Jing^{1,2,3}, HE Xuemin^{1,2,3,*}, FENG Haipeng^{1,2,3}, BA Hebielede^{1,2,3}, YANG Huan^{1,2,3}, DANG Ziyang^{1,2,3},
SONG Haier^{1,2,3}

1 College of Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830017, China

2 Key Laboratory of Oasis Ecology Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830017, China

3 Xinjiang Jinghe Temperate Desert Ecosystem Field Scientific Observation and Research Station of the Ministry of Education, Urumqi 833300, China

Abstract: In desert ecosystems of arid regions, water availability is severely limited. Root systems, serving as critical functional organs of plants, exhibit spatial fractal architectures that directly influence plant water acquisition capacity. *Populus euphratica* Oliv., a typical deciduous tree species in arid zones characterized by well-developed root systems, presents a valuable model for investigating dimorphic root architectural features. Such research provides crucial insights into the adaptive strategies employed by desert vegetation in response to environmental constraints. This study selected naturally

基金项目:中央引导地方科技发展专项(ZYYD2023A03);国家自然科学基金(31760168)

收稿日期:2023-10-21; **网络出版日期:**2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hxm@xju.edu.cn

occurring, healthy *Populus euphratica* specimens within the Xinjiang Ebinur Lake Wetland National Nature Reserve as research subjects. Employing TRU tree radar technology integrated with three-dimensional modeling and statistical analyses, we investigated the response patterns of topological fractal characteristics in *P. euphratica* root systems along water availability gradients, thereby elucidating the adaptive mechanisms governing root system plasticity in response to hydrological variability. Results revealed that: (1) Soil moisture content exhibited a significant decreasing gradient with increasing distance from the riparian zone (declining from 18.36% to 4.58%), while the vertical soil profile demonstrated a contrasting stratification pattern, characterized by a progressive increase from moisture-depleted surface horizons (0—20 cm; 3.78%) to water-enriched deeper soil layers (>200 cm; 11.50%). (2) *P. euphratica* root density exhibited a non-linear response pattern with increasing distance from the riverbank, initially increasing before subsequently declining across the lateral gradient, with values ranging from a minimum of 1.75 g/cm³ to a maximum of 2.58 g/cm³. Peak root densities were predominantly concentrated in sampling plots located 2—2.5 km from the river. Vertical distribution patterns varied systematically across the riparian-upland gradient: both proximal riparian zones (0—0.5 km) and distal zones (4—4.5 km) displayed unimodal root density distributions, with maximum concentrations occurring in the intermediate soil horizon (50—150 cm). In contrast, the intermediate transition zone (2—2.5 km) exhibited a distinct bimodal distribution pattern, characterized by maximum root density values in the deeper soil strata (>200 cm). (3) The relationship between *P. euphratica* root density and soil moisture content exhibited significant spatial variation. In both riparian (0—0.5 km) and distal zones (4—4.5 km), root density displayed a unimodal response to increasing soil moisture, initially increasing before subsequently declining. Conversely, in the intermediate zone (2—2.5 km from the river), root density showed a positive correlation with soil moisture content. Vertical analysis revealed that the spatial distribution of *P. euphratica* root systems exhibited a linear relationship with soil moisture gradients. Specifically, shallow soil horizons (0—20 cm) demonstrated a significant positive correlation, while deeper horizons (100—150 cm) exhibited a significant negative correlation.

Key Words: *Populus euphratica* root system; moisture gradient; tree radar; root density; Ebinur Lake

根系生态学(Root System Ecology)是20个世纪90年代所发展形成的一门新兴的热点学科^[1]。其主要是研究植物根系的形态结构及生态功能、根系与地上部分生长发育和产量的关系、不同环境因子对根系影响的一门学科^[2]。通过交叉学科的相互结合,对生态学地上部分和地下部分的关联^[3]、根系环境、地下生物多样性进行探索和研究。由于植物根系的向地性使得植物的根系大多都深埋在未知的地下土壤中,植物根系成为最不被人们所深入了解的植物器官^[4],因此,人们就会很难全面直观的认识植物的整体性。探究植物地下根系部分的结构和功能及其生长过程,能够对植物地下根系部分与其地上部分之间的相互关系进行探索和研究,从而深入地下生态学的研究^[5-6]。最初期的研究主要是采用挖掘法初步获取植物的根系结构特征^[7],探究的内容主要集中在植物根系构型^[8]、植被恢复的地下生态学反馈机制^[9]、地下水位的调控和模型构建^[10]等方面。在我国西北内陆干旱半干旱区,降水稀少、蒸发强烈,自然湖泊湿地、天然植被对浅层地下水水位埋深及其支持毛细供水能力具有强烈依赖性^[11]。在此环境下,研究植物根系的结构、功能及其适应性机制显得尤为重要。

胡杨(*Populus euphratica* Oliv.)作为荒漠生态系统中的建群种^[12-13],对极端的干旱环境条件有着较强的适应性^[14],同时,其作为干旱区天然分布的乔木树种,其强大的根系空间分布特征能反映其对于干旱条件的利用程度^[15]。众多学者已从种群特征^[16]、代谢过程^[17-18]、和长期水分利用效率^[19]等方面对胡杨地上部分在干旱环境下的适应性进行了研究。地下部分集中在根系结构与功能^[20]、荒漠河岸林胡杨根系空间分布研究^[21]、胡杨根系水分再分配^[22-23]以及建立了根系吸水模型^[24]。而根系作为植物获取地下资源的主要器官。为了适应土壤资源存在的内在异质性,可以在不同的综合水平上调整根系表型^[25-26]。然而,很少有研究关注胁迫植物不同表型变化的相对功能重要性,特别是根系结构变化的相对作用^[27-28]。且胡杨在长期与环境相

适应的历史进程中,形成了“林随水生”的特点^[29],并能够从生理、形态和构型等多方面特征对于干旱环境变化进行适应改变^[30—31]。现有胡杨根系研究多聚焦单一土层或静态水分条件,缺乏河岸带异质性环境下的三维空间解析;且针对胡杨的地下部分的研究具有一定困难,表现为地下空间探索缓慢,人们很难透彻的观察地下空间的状况^[32—34]。然而 TRU 树木雷达实现非破坏性根系三维重构,弥补传统挖掘法的空间尺度缺陷,利用 TRU 树木雷达探测胡杨根系的三维空间结构,对于深入研究地下生态学、有效解析胡杨根系的空间分布特征,为地下生态系统的动态变化和功能机制研究提供关键数据支持^[35]。

本文选取新疆艾比湖湿地国家级自然保护区内,自然生长于荒漠河岸林,凭借发达根系汲取地下水分的胡杨作为对象,利用 TRU 树木雷达分析胡杨地下根系空间分布特征,探讨量化离河岸距离和土壤深度增加时土壤含水量的变化特征,以及这些变化对胡杨根系水平和垂直分布的影响是什么?胡杨如何在河岸距离梯度(水平维度)与土壤垂直剖面(垂直维度)的双重水分异质性中优化根系分布?这些问题的研究是揭示胡杨根系如何在水分异质性中优化分布,同时对胡杨林保护与维持、更新具有重要理论与实践意义

1 试验地概况

艾比湖湿地国家级自然保护区(44°30′—45°09′N,82°36′—83°50′E)位于新疆博尔塔拉蒙古自治州境内,是准噶尔盆地西部最低洼地和水盐汇集中心。总面积 2670.85 km²,年平均降水量为 100 mm,蒸发量为 1600 mm 以上,日照时数约 2800 h,极端最高气温为 44℃,极端最低气温为-33℃,年平均气温为 6—8℃,属于典型的温带大陆性干旱气候。胡杨(*Populus euphratica* Oliv.)作为群落建群种,在样地内起主导作用,伴生植物有梭梭(*Haloxylon ammodendron* Bunge.)、骆驼刺(*Alhagi camelorum* Fisch.)、芦苇(*Phragmites australis* Trin. ex Steud.)、白麻(*Apocynum pictum* Schrenk.)等植物。

2 研究方法

2.1 野外调查与对象选取

在新疆艾比湖湿地国家级自然保护区内阿其克苏河北岸,沿垂直河岸方向由近及远分别选择面积为 250 m×50 m 三个样地(图 1),距离河岸 0—0.5 km 的样地记为样地一,距离河岸 2—2.5 km 的样地记为样地

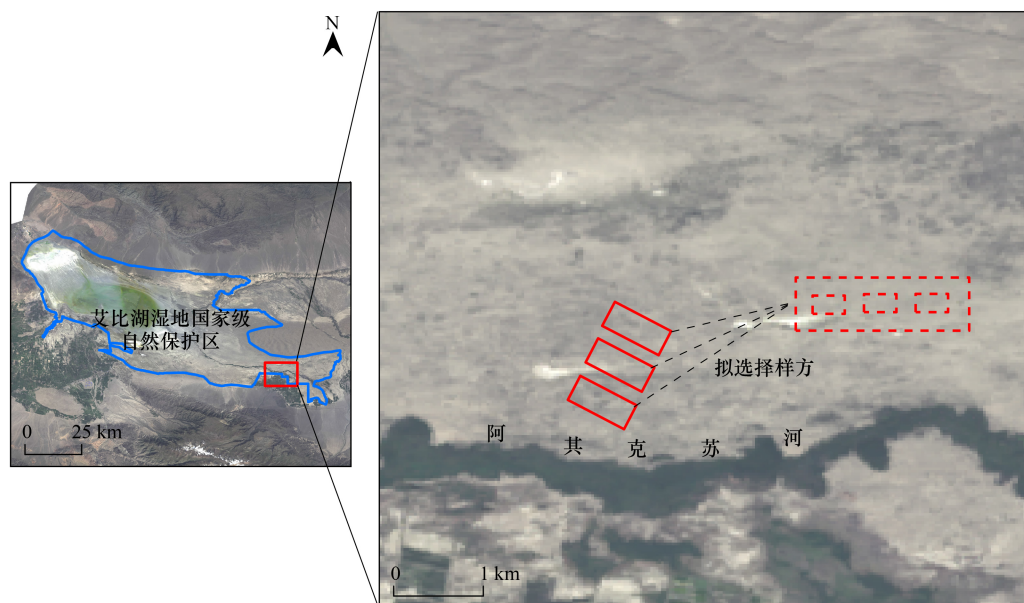


图 1 研究区概况图

Fig.1 Overview of the study area

二,距离河岸 4—4.5 km 的样地记为样地三。每个样地分别选取间隔 50 m 的 3 个样点内,根据树冠不受遮蔽的原则,每个样地随机选取了 9 棵长势良好,树干通直,冠幅适中,树皮光滑,无病虫害的胡杨作为研究对象(胸径为 14—20 cm 的幼龄胡杨 3 颗、20—35 cm 的中胡杨 3 颗、大于 35 cm 的大胡杨 3 颗),进行试验。同时在不同水分梯度下不同年龄层次的三颗胡杨冠下,清除土壤表层凋落物与石块后,同时利用土钻、取土器,采取冠下 3 个不同方向上的土层分别为 0—20 cm、20—50 cm、50—100 cm、100—150 cm、150—200 cm、>200 cm 的土壤样品各占三分之一,混匀存入密封袋,做好标记。测定土壤含水量、土壤容重等相关指标,土壤含水量采用称重法测量。

体积含水量计算公式可以表示为:

$$\theta = W \times \rho \quad (1)$$

式中, W 表示质量含水量(单位: g/kg); ρ 表示土壤容重(单位: g/cm³)

对于每个样地的平均含水量,应考虑各土层的深度和容重,采用加权平均的方法计算,那么样地平均含水量 $\bar{\theta}$ 的计算公式可以表示为:

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_i \times d_i)}{\sum_{i=1}^n d_i} \quad (2)$$

式中, θ_i 表示第 i 土层的体积含水量(单位: %); d_i 表示第 i 土层的厚度(单位: cm); n 表示土层的总数

2.2 利用 TRU 树木雷达扫描采集

树木雷达检测系统(Tree Radar Unit, Treeradar, Inc. USA),采用 400MHz 天线用于地下垂直方向 0—4 m 范围的胡杨根系雷达扫描,精确至直径为 2.0 cm 的根系。对不同胸径大小的胡杨依次测量,且在进行探测前,去除影响胡杨根系雷达探测的周边草本和小灌木根系。调整仪器参数,如图 2 所示,距离胡杨主干测量 1 m、2 m、3 m、4 m 距离做好标记,对胡杨根系分布特征的检测采用同心圆法,以胡杨树干为中心从正北方向多次顺时针检测。具体步骤为:以距离胡杨树干 1 m、2 m、3 m、4 m 处画圆,测量时从每个圆的正北方向开始沿着绳子做顺时针检测,回到正北方向检测结束并保存数据,而后进行下一个圆的检测。在检测时如果遇到裸露根系、地面突然严重下陷或突起等情况可能影响检测结果的部分时,应立刻点击 MARK 做标记,以备分析数据时使用。

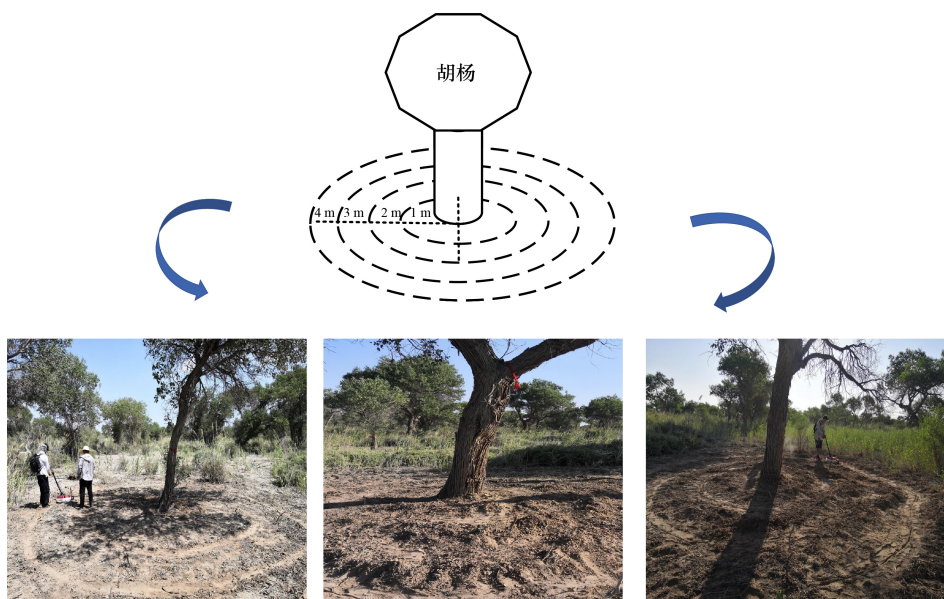


图 2 胡杨根系雷达扫描示意图

Fig.2 Radar scanning diagram of *Populus euphratica* root system

2.3 数据处理与数据分析

使用树木雷达检测系统自带的 TreeWin™ PRO 软件对所获取胡杨不同断面圆形数据信号进行处理和分析,处理每条圆形扫描线以创建二维“虚拟沟槽”地图,显示每个根监测点的 X(沿扫描线的距离)和 Y(深度)坐标,从而创建地下结构根四个深度切片的自顶向下的三维图像。同时利用 TreeWin™ PRO 软件可以对根系进行分层统计根系密度(条/m),计算公式为:

$$\rho = n/l$$
 (3)

每条雷达天线检测线的长度(l),某层探测根系的数量为(n),则该层的根系密度(ρ)

3 结果与分析

3.1 胡杨根系区土壤水分空间变化特征

根据各实验样地在水平、垂直方向上的土壤水分变化特征(表1),发现在水平方向上,土壤水分含量最大值为18.36%,最小值为4.58%,距离河岸由近及远的土壤含水量,整体呈递减趋势。在土壤垂直剖面上,表层土(0—20 cm)含水量较少,平均值为3.78%,在>200 cm 土层范围中的土壤含水量较高,平均值为11.50%,且每增加20—50 cm 深度,水分含量也随之增加,即土壤含水量整体呈现逐渐递增的趋势。

表 1 各样地在水平、垂直方向上的土壤水分变化特征

Table 1 Characteristics of soil moisture changes in various horizontal and vertical directions

离河距离 Distance from river/km	土壤含水量 SWC/%	土壤分层 SL/cm	质量含水量 MWC/(g/kg)	体积含水量 VWC/%
0—0.5	18.36	0—20	8.67	8.52
		20—50	11.43	14.72
		50—100	11.54	15.51
		100—150	13.06	16.96
		150—200	17.02	24.08
		>200	17.98	23.00
2—2.5	13.51	0—20	2.42	3.33
		20—50	4.71	7.12
		50—100	8.97	13.15
		100—150	10.05	14.73
		150—200	10.42	15.72
		>200	11.88	18.34
4—4.5	4.58	0—20	0.25	0.36
		20—50	0.72	1.09
		50—100	2.40	3.61
		100—150	3.15	5.18
		150—200	4.54	6.46
		>200	4.64	6.84

表中 SWC:土壤含水量 Soil water content; SL:土壤分层 Soil layer; MWC:质量含水量 Mass water content; VWC:体积含水量 Volumetric water content

3.2 不同水分梯度下胡杨根系变化特征及规律

由 TRU 树木雷达自带 TBA 软件分析得出胡杨的三维空间分布图(图3)可以看出:(1)幼龄胡杨、中等胡杨与大胡杨的根系分布程度都有明显规律,即随着胡杨平均胸径的增加,根系分布范围表现为大胡杨的广于中胡杨广于幼龄胡杨;(2)以离河距离为标准的样地中根系密度的分布规律为,距离河0—0.5 km处,根系分布范围较为疏散、稀少;距离河岸2—2.5 km时,根系表现为向地式生长,繁密且聚集,水平分布随胡杨的年龄增长而增长,根系分布贯穿所测深度范围内;距离河4—4.5 km处,根系分布表现为水平和垂直方向分布较均衡,整体分散且分布面积大。

由各样地垂直分布各层的根系密度比例可以看出(表2),在水平和垂直方向上,根系密度的变化呈现出

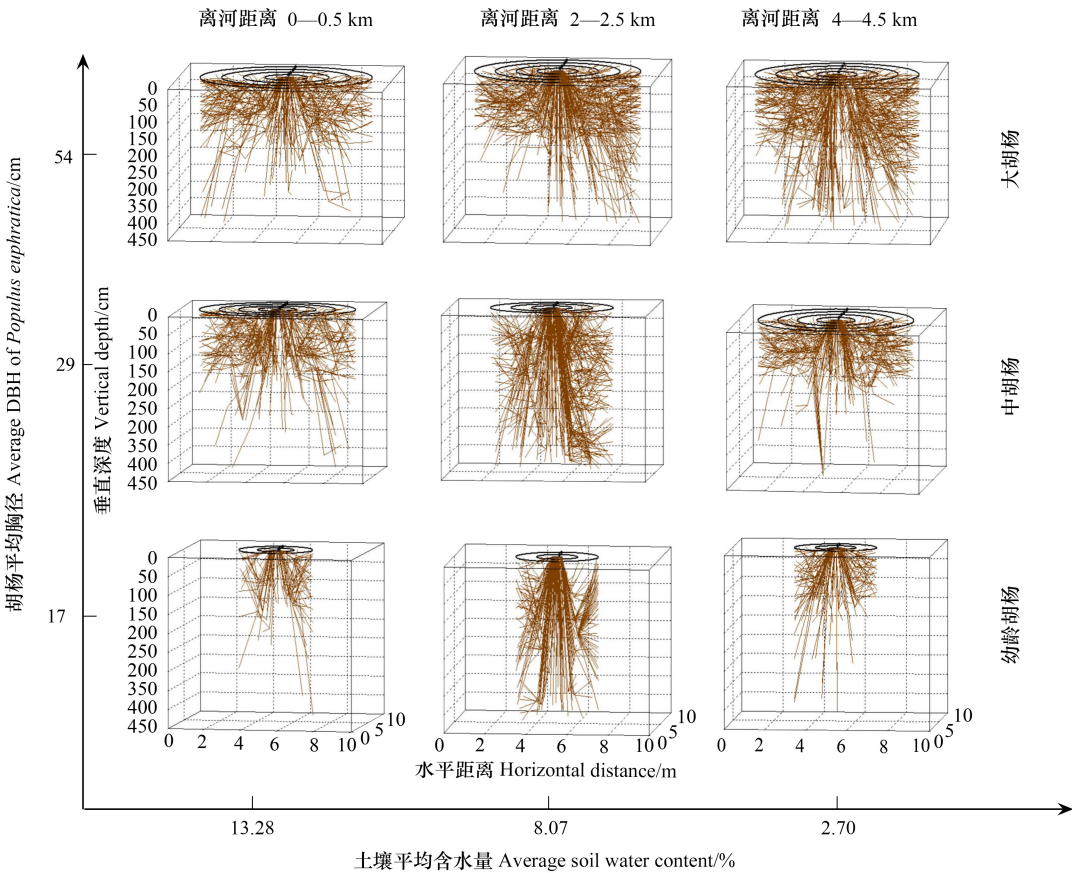


图3 树木根系空间分布三维图
Fig.3 Three-dimensional map of spatial distribution of tree roots

一定的趋势和特征,即距离河由近到远的各样地中,根系密度最大值为 2.58 g/cm^3 ,根系密度最小值为 1.75 g/cm^3 ,主要集中在距离河 $2\text{--}2.5\text{ km}$ 的样地中,根系密度整体趋势为随着离河的距离增加根系密度呈现逐渐增加在降低的一个趋势。在土壤的垂直层次上,根系密度离河距离 $0\text{--}0.5\text{ km}$ 与 $4\text{--}4.5\text{ km}$ 处呈现一个先增加后减少的趋势($0\text{--}0.5\text{ km}$ 处根系密度由 1.85 g/cm^3 、 2.84 g/cm^3 、 0.75 g/cm^3 , $4\text{--}4.5\text{ km}$ 处根系密度由 1.53 g/cm^3 、 3.29 g/cm^3 、 2.71 g/cm^3),即且在 $50\text{--}150\text{ cm}$ 范围内根系密度最大。根系密度离河距离 $2\text{--}2.5\text{ km}$ 时,根系密度由 1.45 g/cm^3 、 3.22 g/cm^3 、 2.82 g/cm^3 、 6.31 g/cm^3 。在 $>200\text{ cm}$ 处根系密度达到最大。

表2 离河岸不同距离下的不同土壤分层根系密度比例情况

Table 2 Vertical distribution patterns of root biomass fraction across soil horizons along a riparian distance gradient							
离河距离/km Distance from rive	年龄级 Age class	垂直根系密度 Vertical thick root density/(g/cm^3)					
		土壤分层 Soil layer/cm					
		0—20	20—50	50—100	100—150	150—200	>200
0—0.5	大胡杨	1.88	1.73	3.06	2.44	0.89	0.78
	中胡杨	1.78	1.26	2.91	2.52	1.30	0.70
	幼龄胡杨	1.88	1.49	2.56	2.45	1.16	0.76
2—2.5	大胡杨	1.28	2.01	3.77	2.75	2.10	1.83
	中胡杨	1.29	1.39	3.58	2.68	2.22	3.73
	幼龄胡杨	1.45	1.34	3.22	2.63	2.82	6.31
4—4.5	大胡杨	1.44	2.41	3.61	2.90	1.58	1.78
	中胡杨	1.30	2.49	3.78	2.83	1.08	0.82
	幼龄胡杨	1.30	2.75	3.80	2.87	1.47	1.06

不同水分梯度下的根系密度表现出显著的空间异质性(图4)。研究结果显示,根系密度在垂直于河岸的不同水分梯度区域呈现出显著差异($P<0.05$),其中近岸区域(0—0.5 km)的根系密度值显著高于远岸区域(2—2.5 km)。同时进一步分析胡杨不同生长阶段的根系密度分异规律(图4),发现不同生长阶段的胡杨(包括大胡杨、中胡杨和幼龄胡杨)根系密度差异不显著。根系密度在不同土壤深度之间存在显著差异(图4),50—100 cm 土壤分层的根系密度显著高于其他大部分土壤分层($P<0.05$),而0—20 cm 和150—200 cm 土壤分层的根系密度显著低于其他大部分土壤分层($P<0.05$)。

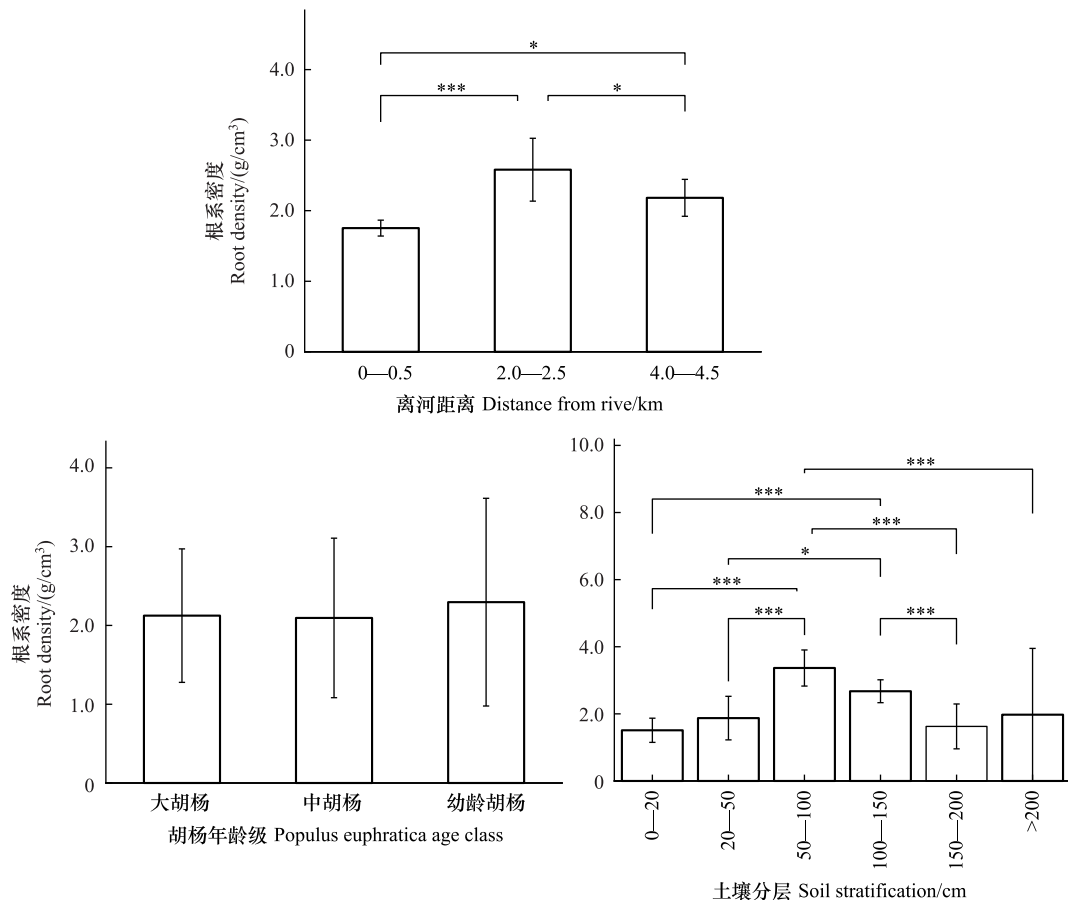


图4 胡杨根系密度沿河岸梯度及其与植株生长性状、土壤垂直分层的差异分析

Fig.4 Spatial variation in root density of *Populus euphratica* along riparian gradients and its correlation with plant growth traits and Soil stratification

柱状图和误差棒展示均值和标准偏差($n=3$); *, ** 和 *** 分别表示各因子及其交互作用在 $P<0.05$, $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 水平上存在显著效应

根系密度在不同土壤深度和不同距离河岸条件下表现出差异(图5)。在50—100 cm 土壤层,根系密度在2—2.5 km 和4—4.5 km 距离河岸条件下达到最高值,显示出明显的峰值。在>200 cm 土壤层,根系密度在4—4.5 km 距离河岸条件下显著增加,而在0—0.5 km 和2—2.5 km 条件下相对较低。

3.3 土壤水分对胡杨根系空间分布的影响

3.3.1 水分沿河变化对根系空间分布的影响

在水平方向上根系密度与土壤含水量具有规律性变化(图6),随着离河岸距离的增加,土壤含水量呈现上升趋势,而根系密度则表现出先上升后下降的动态变化。即随着土壤水分含量的降低,根系密度呈现先增加后减少的趋势。

不同距离河岸的胡杨根系密度与土壤水分含量之间的关系存在显著差异(图7)。在距河0—0.5 km 和

4—4.5 km 处,根系密度与土壤水分含量之间的关系较为复杂,整体呈现出随着土壤含水量的增加,根系密度先增加后减少的趋势。而在距河 2—2.5 km 处,根系密度与土壤水分含量之间呈现出线性关系($R^2 = 0.6425$),表明土壤水分含量对根系密度的影响较为显著。

3.3.2 水分沿土壤垂直剖面变化对根系空间分布的影响

在土壤垂直剖面上胡杨根系密度与土壤含水量呈现一定规律性变化(图 8),随着土壤深度的增加,土壤含水量呈现逐渐增加的趋势,而根系密度呈现先增加后减少的趋势,由于不同土壤的水分下渗率不同,形成垂直方向分异明显的土壤水分梯度,因此要求植物的根系更多向深层生长觅水。胡杨根系主集中在 50—150 cm 范围内。在 0—50 cm、150—200 cm、>200 cm 的土层,胡杨根系密度明显较少。

通过对土壤垂直方向 0—150 cm 的含水量与根系密度进行回归分析(图 9),在土壤垂直剖面变化下除了 0—20 cm 范围内根系密度随含水量增加而上升,其余深度范围都呈现负相关关系,即随着土壤深度的增加,根系密度呈现减小趋势。0—20 cm 的 R^2 为 0.7797,而在 100—150 cm 的 R^2 为 0.8266,表明在 0—20 cm 与 100—150 cm 土层范围内,根系密度与土壤水分的相关性比较大。

4 讨论

4.1 胡杨河岸距离梯度下的水分与根系分布变化及其响应规律

胡杨属于专性地下水的湿生植物,具有持续接触土壤水分的发达根系^[36]。生长早期主要利用土壤水分,后期倾向于利用地下水^[37],其根系是获取地下水维持生存的关键^[38]。且根系水平分布较为广泛^[39],根据土壤水分和养分的不同分布情况,在横向上形成复杂的根系网络^[40]。本研究发现,不同水分梯度下胡杨的根系密度呈现一定规律性变化。表现为距离河岸由近及远整体上土壤含水量由 18.36% 降低到 4.58%,呈现逐渐递减趋势。同时分析得出胡杨根系密度由 1.75 g/cm³ 升到 2.58 g/cm³ 再降到 2.18 g/cm³,根系密度在总体上,随着离河的距离的增加表现出先增多后减少的抛物线模型。土壤水分含量距离河岸由近到远呈现的是逐渐递减的一个趋势和根系密度呈现出抛物线的规律;近河区域因土壤水分与养分充足利于根系发育;随着离河距离增加,胡杨通过提升根系密度增强资源获取能力,并在临界阈值处达到峰值;当距离超过阈值后,因土壤较为干旱贫瘠,根系密度转而降低以减少资源消耗,体现其对于干旱环境的双重适应策略。土壤水分的变化与胡杨根系分布规律,更能反映出胡杨对于水分的变化趋势,通过根系构型来反应其环境限制因子的适应^[41]。根系的这种分布模式有助于植物更全面地探测和利用土壤中的水分和养分。

许多学者研究发现干旱区植物根系形态特征与水分供应呈显著关联^[42—43],反映其水分驱动的表现型适应

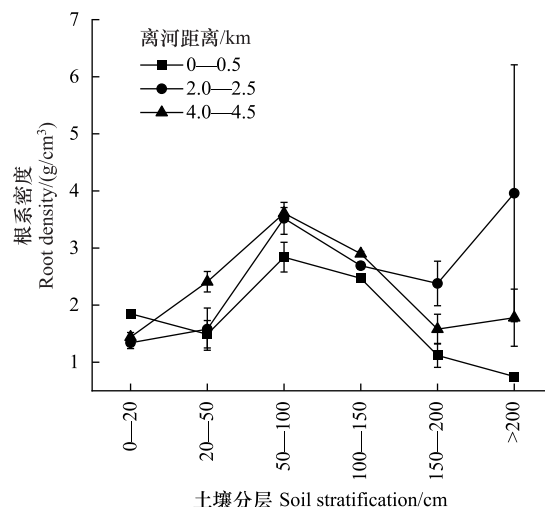


图 5 离河岸不同距离下的各土壤分层根系密度变化特征

Fig.5 Spatial analysis of root density variations in *Populus euphratica* in relation to soil moisture content at distinct riparian distances

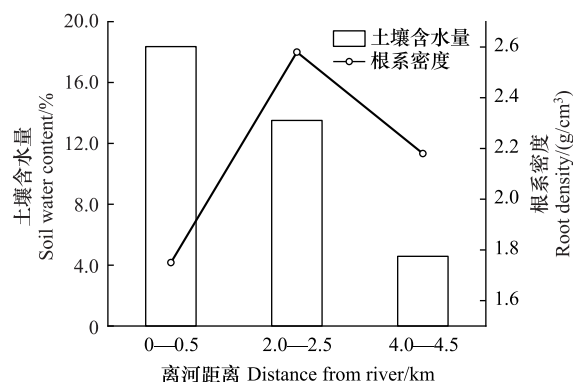


图 6 离河岸不同距离下的根系密度与土壤含水量变化关系

Fig.6 Spatial dynamics of root density in relation to soil moisture content at various riparian distances

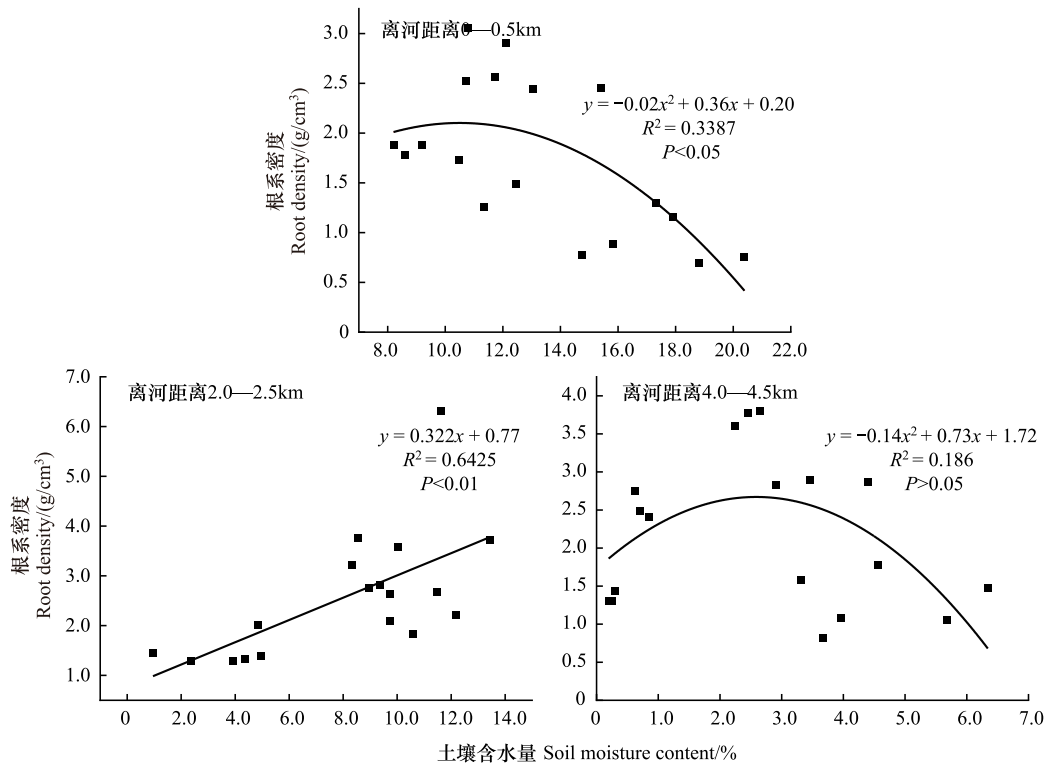


图7 离河岸不同距离下的胡杨根系密度与土壤水分的回归分析

Fig.7 Regression analysis of root density in relation to soil moisture content of *Populus euphratica* at various distances from the riverbank

实线表示具有显著线性关系; $P < 0.05$ 呈显著相关性, $P < 0.01$ 呈极显著相关性

性研究,而胡杨适应地下资源短缺的基本方法之一是最大限度地扩大细根面积^[44]。本文通过探讨水分梯度与胡杨根系空间分布之间的关系,发现不同距离河岸的胡杨根系密度与土壤水分含量之间的关系存在显著差异。距河 0—0.5 km 和 4—4.5 km 处,胡杨根系密度与土壤水分含量关系复杂,整体呈现土壤含水量增加时根系密度先增加后减少的趋势。距河岸 0—0.5 km 的近河区域,土壤水分条件较好,根系能够充分利用土壤中的养分生长。当水分增加时,土壤通气性变差,根系呼吸作用受抑制,胡杨根系会调整生长策略,从而减少在该区域的密度^[45—46];在远河区域(4—4.5 km),土壤水分匮乏诱发胡杨驱动根系向深层土壤延伸觅水,但深层土壤养分匮乏限制了根系的持续扩展^[47]。少量水分补充可短暂激活表层根系生长,但深层土壤的干旱胁迫和养分限制导致根系密度在水分增加后无法维持增长趋势,反而因资源竞争而减少^[48—49]。而在距河 2—2.5 km 处,胡杨根系通过水平扩展优化吸收效率,形成根系密度与土壤水分的线性正相关($R^2 = 0.6425$),苏里坦^[50]指出,胡杨根系密度对土壤水分梯度的响应机制可能源于该区域相对稳定的水分环境。其根系可通过动态调节密度直接响应水分变化,从而优化水分吸收效率^[51]。

4.2 胡杨土壤垂直剖面水分梯度下的根系分布及其响应规律

胡杨分布在土壤水分不足的干旱地区^[52]。在土壤水分胁迫下,胡杨幼苗的根系倾向于尽可能向下生长,

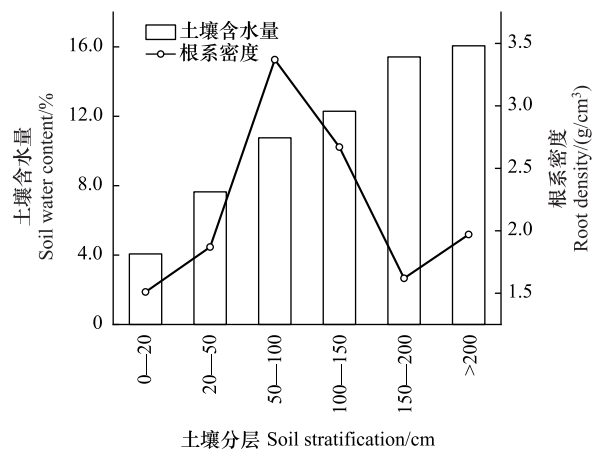


图8 土壤垂直剖面上根系密度与土壤含水量变化规律

Fig.8 Changes of root density and soil water content in vertical

以获得更深的土壤水分^[53]。作为荒漠河岸森林的主要构件,根系发育良好,根系/冠比较大,其根系通常具有深入土壤的趋势^[54],这有助于植物在干旱地区获取深层土壤中的水分^[55]。本研究发现土壤含水量在土壤的垂直剖面上呈线性变化规律,即随土壤深度的增加,土壤含水量均呈现逐渐增加趋势。这种土壤水分的深度变化影响着植物的根系分布,即研究结果发现在垂直深度为0—200 cm土壤的剖面上,每隔50 cm深度的根系密度分别为1.51 g/cm³、3.37 g/cm³、1.45 g/cm³、2.17 g/cm³,且主要集中在50—100 cm土层中,与杨丽等^[56]研究胡杨根系分布时发现根系主要集中在80—100的土层中,以下呈逐渐减小的趋势不符,同时根系密度整体空间构型上表现出鱼尾状的根系构型^[57],可能由于深层的缺氧和土壤紧实环境也限制了分支生长和扩展,从而随土壤深度的增加,根系密度分布由广变窄。

在土壤剖面垂直分异格局下,胡杨根系密度分配策略呈现显著的层化适应特征,其根表型可塑性响应与土壤水势梯度及有效性三维异质场形成空间互馈机制。在半干旱地区,胡杨幼苗容易受到干旱胁迫^[58—59],限制了根系向深层土壤的发育。因此,他们需要进行一些表型调整来应对干旱胁迫,如根系生物量分配增加^[60]、根系结构调整和根系形态调节。本研究通过建立0—150 cm的土壤含水量与根系密度回归模型,发现在0—20 cm土层范围内根系密度随土壤含水量增加而上升,而在20—150 cm土层深度范围内,根系密度随土壤含水量的增加呈现减小趋势。本研究观察到的现象可能是由于浅层土壤(0—20 cm)水分增加有利于植物通过扩展表层根系高效获取水分和养分,同时充足的水分促进微生物活动释放养分;而深层根系(20—150 cm)发育需要更高能量成本,当表层水分充足时植物会优先维持浅层根系以减少资源消耗,形成水分梯度驱动的根系分布策略^[61]。

5 结论

本研究通过分析不同水分梯度下(沿河、垂直)胡杨根系空间分布特征、规律及差异性,得出以下主要结论:

(1) 胡杨根系水平分布特征与土壤含水量关系密切。近岸(0—0.5 km)与远岸(4—4.5 km)区根系密度与土壤水分呈单峰响应模式(先增后减);而在距河2—2.5 km处,根系密度与土壤水分含量之间呈现出线性关系($R^2=0.6425$),表明土壤水分含量对根系密度的影响较为显著。

(2) 胡杨根系垂直分布特征与土壤含水量关系密切。整体上土壤含水量与根系密度呈现明显的相关性,垂直剖面上根系密度峰值(50—150 cm)与水分梯度下渗动态匹配,浅层(0—20 cm)呈正相关($R^2=0.7797$),深层(100—150 cm)负相关显著($R^2=0.8266$),垂直土壤剖面水分含量影响着根系的发展与空间分布。

(3) 随着胡杨平均胸径的增加,胡杨的根系密度在水平、垂直方向上均呈现增加趋势,且表层水分含量极低,幼龄胡杨根系发育受到水分限制。三维图像展示出当胡杨受到水分限制时,胡杨通过生长根系获取所需水分以供应自身生长,变为促进作用,而水分限制影响根系在水平、垂直方向延伸生长,进而影响胡杨整体根系的生长形态。

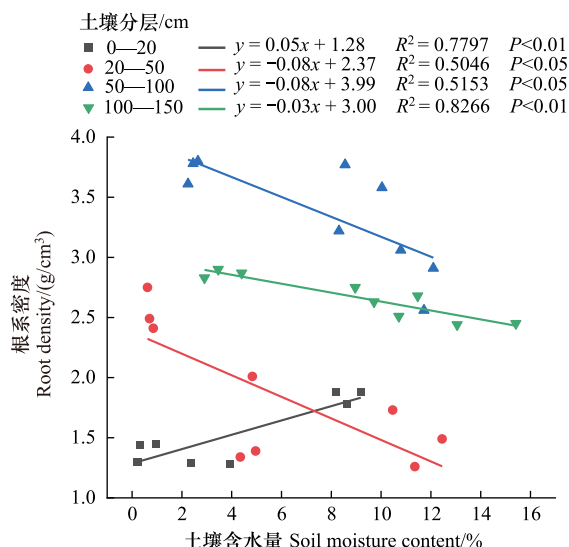


图9 不同深度根系密度与土壤含水量回归分析

Fig.9 Regression analysis of root density and soil moisture change in vertical direction

实线表示具有显著线性关系; $P < 0.05$ 呈显著相关性, $P < 0.01$ 呈极显著相关性

参考文献 (References):

- [1] Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R, Mooney H A, Sala O E, Schulze, E D. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 1996, 108(3): 389-411.
- [2] 蔡昆争. 作物根系生理生态学. 北京:化学工业出版社, 2011.
- [3] Han X, Yu G, Zhou G, Liu Y. Issues and prospects of belowground ecology with special reference to global climate change. *Science Bulletin*, 2005, 50(18): 2226-2238.
- [4] Wei R N, Ma L, Lu X, Xu L, Feng X J, Ma Y T, Li S, Ma S Y, Chai Q, Zhang X C, Yang X M. Research advances in plant root geotropism. *Plant Growth Regulation*, 2024, 102: 237-250.
- [5] Pineda A, Soler R, Weldegergis B T, Shimwela M M, Van Loon J J, Dicke M. Applying the aboveground-belowground interaction concept in agriculture: spatio-temporal scales matter. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2019, 7: 300.
- [6] Bardgett R D, Mommer L, De Vries F T. Going underground: root traits as drivers of ecosystem processes. *Trends in Ecology & Evolution*, 2014, 29(12): 692-699.
- [7] Jeong J S, Kim Y S, Baek K H, Jung H, Ha S H, Choi Y D, Kim M, Reuzeau C, Kim J K. Root-specific expression of OsNAC10 improves drought tolerance and grain yield in rice under field drought conditions. *Plant Physiology*, 2010, 153(1): 185-197.
- [8] 纪文文. 基于树木雷达的树木粗根空间分布特征及其影响因子研究[D], 哈尔滨:东北林业大学, 2020.
- [9] 黄建辉, 韩兴国, 陈灵芝. 森林生态系统根系生物量研究进展. *生态学报*, 1999, 19(2): 128-135.
- [10] 邓磊, 关晋宏, 张文辉. 辽东栎幼苗根系形态特征对环境梯度的响应. *生态学报*, 2018, 38(16): 5739-5749.
- [11] Cheng X R, Huang M B, Shao M G, Warrington D N. A comparison of fine root distribution and water consumption of mature *Caragana korshinskii* Kom grown in two soils in a semiarid region, China. *Plant and Soil*, 2009, 315: 149-161.
- [12] 王根绪, 程国栋. 干旱荒漠绿洲景观空间格局及其受水资源条件的影响分析. *生态学报*, 2000, 20(3): 363-368.
- [13] 王世绩, 陈炳浩, 李护群. 胡杨林. 北京:中国环境科学出版社, 1995.
- [14] 韩路, 王家强, 王海珍, 牛建龙, 于军. 塔里木荒漠绿洲过渡带主要种群生态位与空间格局分析. *植物科学学报*, 2016, 34(3): 352-360.
- [15] 马焕成, 王沙生, 蒋湘宁. 盐胁迫下胡杨的光合和—生长响应. *西南林学院学报*, 1998, 18(1): 33-41.
- [16] 王海珍, 陈加利, 韩路, 徐雅丽, 贾文锁. 地下水位对胡杨和灰胡杨叶绿素荧光光响应与光合色素含量的影响. *中国沙漠*, 2013, 33(4): 1054-1063.
- [17] 任志国, 陈亚鹏, 李卫红, 刘树宝. 地下水埋深对塔里木河下游建群种植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响. *草业学报*. 2014, 23(2): 76-82.
- [18] 周多多, 蒋少伟, 吴桂林, 李君. 不同水分条件下胡杨光响应曲线拟合模型比较. *植物科学学报*, 2017, 35(3): 406-412.
- [19] 叶茂, 徐海量, 王晓峰, 申瑞新. 塔里木河下游阿拉干断面胡杨根系空间分布规律研究. *西北植物学报*, 2011, 31(4): 801-807.
- [20] Zhao C Y, Si J H, Feng Q, Deo R C, Yu T F, Li P D. Physiological response to salinity stress and tolerance mechanics of *Populus euphratica*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(11): 533.
- [21] 司建华, 冯起, 李建林, 赵健. 荒漠河岸林胡杨吸水根系空间分布特征. *生态学杂志*, 2007, 26(1): 1-4.
- [22] 郝兴明, 陈亚, 李卫红, 郭斌, 赵锐锋. 胡杨根系水力提升作用的证据及其生态学意义. *植物生态学报*, 2009, 33(6): 1125-1131.
- [23] 杨晓东, 吕光辉. 新疆艾比湖湿地自然保护区胡杨根系水分再分配的估算. *植物生态学报*, 2011, 35(8): 816-824.
- [24] 冯起, 司建华, 李建林, 胡杨根系分布特征与根系吸水模型建立. *地球科学进展*. 2008, 23(7): 765-772.
- [25] Nicotra A B, Atkin O K, Bonser S P, Davidson A M, Finnegan E J, Mathesius U, Poot P, Purugganan M D, Richards C L, Valladares F, van Kleunen M. Plant phenotypic plasticity in a changing climate. *Trends in Plant Science*, 2010, 15(12): 684-692.
- [26] Poorter H, Niklas K J, Reich P B, Oleksyn J, Poot P, Mommer L. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytologist*, 2012, 193(1): 30-50.
- [27] Weemstra M, Mommer L, Visser E J W, van Ruijven J, Kuyper T W, Mohren G M J, Mohren G M J, Sterck F J. Towards a multidimensional root trait framework: a tree root review. *New Phytologist*, 2016, 211(4): 1159-1169.
- [28] Freschet G T, Violle C, Bourget M Y, Scherer-Lorenzen M, Fort F. Allocation, morphology, physiology, architecture: the multiple facets of plant above- and below-ground responses to resource stress. *New Phytologist*, 2018, 219(4): 1338-1352.
- [29] Li J, Yu B, Zhao C, Zhao C, Nowak R S, Zhao Z, Sheng Y, Li J. Physiological and morphological responses of *Tamarix ramosissima* and *Populus euphratica* to altered groundwater availability. *Tree physiology*, 2013, 33(1): 57-68.
- [30] Thevs, N., Zerbe, S., Schnittler, M., Abdusalih, Press- S J F-L-O U. Structure, reproduction and flood-induced dynamics of riparian Tugai forests at the Tarim River in Xinjiang, NW China. *Forestry*, 2008, 81(1): 45-57.
- [31] Zhu Y, Ren L, Skaggs T H, Lue H, Yu Z, Wu Y, Fang X. Simulation of *Populus euphratica* root uptake of groundwater in an arid woodland of the Ejina Basin, China. *Hydrological Processes: An International Journal*, 2009, 23(17): 2460-2469.
- [32] Hou L H, Gao W, Bom F D, Weng Z H, Doolette C L, Maksimenko A. Use of X-ray tomography for examining root architecture in soils. *Geoderma*, 2022, 405: 115405.
- [33] Wu Q, W J, Hu P C, Zhang W X, Ma Y T, Yu K, Guo Y, Cao J, Li H Y, Li B, Yao Y Y, Cao H X. Zhang W Y. Quantification of the three-dimensional root system architecture using an automated rotating imaging system. *Plant Methods*, 2023, 19(1): 16.
- [34] Ye Z, Wang J, Wang W, Zhang T, Li J. Effects of root phenotypic changes on the deep rooting of *Populus euphratica* seedlings under drought

- stresses. PeerJ, 2019, 7: e6513.
- [35] 李钊茜. 树木雷达的偏移成像算法研究[D]. 北京:北京林业大学, 2020.
- [36] Meinzer, O E. Plants as indicators of ground water. Journal of the Washington Academy of Sciences, 1926 16(21): 553-564.
- [37] Su Y H, Feng Q, Zhu G F, Zhang Q. Evaluating the different methods for estimating groundwater evapotranspiration using diurnal water table fluctuations. Journal of Hydrology, 2022, 607: 127508.
- [38] Tron S, Perona P, Gorla L, Schwarz M, Laio F, Ridolfi L. The signature of randomness in riparian plant root distributions. Geophysical Research Letters, 2015, 42(17): 7098-7106.
- [39] Zhang Z, Huang M. Effect of root-zone vertical soil moisture heterogeneity on water transport safety in soil-plant-atmosphere continuum in Robinia pseudoacacia. Agricultural Water Management. 2021, 246: 106702.
- [40] Zhang J, Wang J, Chen J, Song H, Li S, Zhao Y, Tao J, Liu J. Soil moisture determines horizontal and vertical root extension in the perennial grass *Lolium perenne* L. growing in Karst soil. Frontiers in plant science. 2019, 10: 629.
- [41] Shan L S, Zhang X M, Wang Y K, Wang H, Yan H N, Wei J, Xu H. Influence of moisture on the growth and biomass allocation in *Haloxylon ammodendron* and *Tamarix ramosissima* seedlings in the shelterbelt along the Tarim Desert Highway, Xinjiang, China. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(2): 93-101.
- [42] Comas L H, Becker S R, Cruz V M V, Byrnes P F, Dierig D.A. Root traits contributing to plant productivity under drought. Frontiers in Plant Science, 2013, 4: 442.
- [43] Fort F, Cruz P, Catrice O, Delbrut A, Luzarreta M, Stroia C, Jouany C. Root functional trait syndromes and plasticity drive the ability of grassland Fabaceae to tolerate water and phosphorus shortage. Environmental and Experimental Botany, 2015, 110: 62-72.
- [44] Olmo M, Lopez-Iglesias B, Villar R. Drought changes the structure and elemental composition of very fine roots in seedlings of ten woody tree species. Implications for a drier climate. Plant and Soil, 2014, 384(1): 113-129.
- [45] Koch M, Boselli R, Hasler M, Zöhr C, Athmann M, Kautz T. Root and shoot growth of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) are differently affected by increasing subsoil biopore density when grown under different subsoil moisture. Biology and Fertility of Soils, 2021, 57(8): 1155-1169.
- [46] Nunes J A S, Bonfim-Silva E M, da Silva T J A. Bulk density and water tensions in the soil on corn root production. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2016, 20(4): 357-363.
- [47] Zhang J, Wang J M, Chen J Y, Song H Y, Li S H, Zhao Y J, Tao J P, Liu J C. Soil moisture determines horizontal and vertical root extension in the perennial grass *Lolium perenne* L. growing in karst soil. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 629.
- [48] 李保珠, 安国勇, 韩栓. 植物激素 ABA 在水分胁迫下的功能及信号途径. 植物生理学报, 2012, 48(1): 11-18.
- [49] 李周, 高凯敏, 刘锦春, 梁千慧, 陶建平. 西南喀斯特地区两种草本对干湿交替和 N 添加的生长响应. 生态学报, 2016, 36(11): 3372-3380.
- [50] 苏里坦, 古力米热·哈那提, 刘迁迁. 塔里木河下游胡杨林根系吸水模型. 干旱区地理, 2017, 40(1): 102-107.
- [51] 王雅芸, 隆彦昕, 李岩, 王妍, 吕光辉, 杨建军, 高兴旺, 常顺利, 杨晓东. 胡杨土壤理化性质与微生物群落结构空间和分布的关系. 生态学报, 2021, 41(14): 5669-5684.
- [52] Chen Y, Li W, Xu C, Hao X. Effects of climate change on water resources in Tarim River Basin, Northwest China. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(4): 488-493.
- [53] Liu S B, Chen Y N, Chen Y P, Friedman J M, Hati J H A, Fang G H. Use of ^2H and ^{18}O stable isotopes to investigate water sources for different ages of *Populus euphratica* along the lower Heihe River. Ecological Research, 2015, 30(4): 581-587.
- [54] Yu T F, Feng Q, Si J H, Xi H Y, Li Z X, Chen A F. Hydraulic redistribution of soil water by roots of two desert riparian phreatophytes in northwest China's extremely arid region. Plant and Soil, 2013, 372(1): 297-308.
- [55] Tariq A, Graciano C, Sardans J, Zeng F J, Hughes A C, Ahmed Z, Ullah A, Ali S, Gao Y J, Peñuelas J. Plant root mechanisms and their effects on carbon and nutrient accumulation in desert ecosystems under changes in land use and climate. New Phytologist, 2024, 242(3): 916-934.
- [56] 杨丽, 张秋良, 常金宝. 胡杨树根系空间分布特性. 内蒙古农业大学学报(自然科学版). 2006, 27(1): 15-17.
- [57] 叶子奇. 干旱区河漫滩胡杨根系生长与形态适应对策研究[D]. 北京:北京林业大学, 2018.
- [58] Stella J C, Battles J J, McBride J R, Orr B K. Riparian Seedling Mortality from Simulated Water Table Recession, and the Design of Sustainable Flow Regimes on Regulated Rivers. Restoration Ecology, 2010, 18(s2): 284-294.
- [59] Thevs N, Zerbe S, Peper J, Succow M. Vegetation and vegetation dynamics in the Tarim River floodplain of continental-arid Xinjiang, NW China. Phytocoenologia, 2008, 38(1/2): 65-84.
- [60] Wang L J, Zhao C Y, Li J, Liu Z H, Wang J H. Root plasticity of *Populus euphratica* seedlings in response to different water table depths and contrasting sediment types. PLoS One, 2015, 10(3): e0118691.
- [61] Chen Y N, Li W H, Zhou H H, Chen, Y P, Ma J X. Analysis of water use strategies of the desert riparian forest plant community in inland rivers of two arid regions in northwestern China. Biogeosciences Discussions, 2014, 11(10): 14819-14856.