

地下水埋深和土壤质地对胡杨实生幼苗根系生长及构型的影响

丁晓雪^{1,3}, 赵成义², 曾 勇^{1,3}, 马晓飞^{1,3}

(1.中国科学院新疆生态与地理研究所阿克苏水平衡试验站, 乌鲁木齐 830011;

2.南京信息工程大学土地科学研究中心, 南京 210044; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为揭示生长在不同地下水埋深和土壤质地的胡杨实生幼苗根系的生长适应策略, 以胡杨实生幼苗为试验材料, 设置 30(A₁), 60(A₂), 90 cm(A₃) 3 个地下水埋深处理, 砂土(B₁), 砂壤土(B₂) 和黏壤土(B₃) 3 种土壤质地处理, 研究了塔里木河流域地下水埋深和土壤质地对胡杨(*Populus euphratica*) 实生幼苗根系生长及构型的影响。结果表明: (1) 地下水埋深的增加, 可促进胡杨幼苗根系形态的发育和根系生物量的积累, 胡杨幼苗扎根深度、根系总长度、根系总体积和根系总表面积均在 A₃B₂ 处理下达到最大值。(2) 根系削弱系数(β)、R₅₀ 和 R₉₀ (50% 和 90% 根系生物量分布深度) 均与地下水埋深呈正比关系, 土壤深层根系生物量随地下水埋深的加深而增加, A₂ 和 A₃ 地下水埋深下根系生物量呈 B₂ > B₃ > B₁ 的变化趋势; 胡杨细根生物量在各处理下其土壤垂直分布均呈“单峰型”曲线变化规律。(3) 根系平均连接长度随地下水埋深的加深而增加, 在 A₃B₁ 处理下达到最大 14 cm。B₂ 和 B₃ 条件下幼苗根系随地下水埋深的增加逐渐由趋向叉状型分支结构转变为趋向鲱骨型分支结构; 各 B₁ 处理下根系拓扑参数较大, 幼苗根系分支结构一直趋向鲱骨型分支结构。研究结果可为塔里木河流域水资源优化配置提供依据。

关键词: 根系构型; 地下水埋深; 土壤质地; 胡杨实生幼苗

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)05-0235-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.05.032

Impact of Groundwater Depth and Soil Texture on Root Growth and Architecture of *Populus Euphratica* Seedlings

DING Xiaoxue^{1,3}, ZHAO Chengyi², ZENG Yong^{1,3}, MA Xiaofei^{1,3}

(1. Aksu Water Balance Station, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011; 2. Land Science Research Center, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: In order to reveal the different growth adaptation strategies of the root system of *Populus euphratica* seedlings growing in different groundwater depth and soil texture, taking *P. euphratica* seedlings as experimental materials, three groundwater depths of 30 (A₁), 60 (A₂) and 90 (A₃) cm were set up, and three soil textures of sand (B₁), sandy loam (B₂) and clay loam (B₃) were combined in the study. The impacts of groundwater depth and soil texture on the root growth and architecture of *P. euphratica* seedlings in Tarim River Basin were studied. The results showed that: (1) The increase of groundwater depth promoted the development of root morphology and root biomass accumulation of *P. euphratica* seedlings. The root depth, total root length, total root volume and total root surface area of *P. euphratica* seedlings all reached the maximum under the A₃B₂ treatment. (2) root weakening coefficient (β), R₅₀ and R₉₀ (50% and 90% of root biomass distribution depth, respectively) were proportional to groundwater depth, and the root biomass of deep soil increased with the increasing of groundwater depth. Under the condition of A₂ and A₃, the root biomass showed the trend of B₂ > B₃ > B₁. The vertical distribution of fine root biomass presented a “single peak” curve under each treatment. (3) The average root connection length increased with the deepening of groundwater depth, and reached the maximum of 14 cm under the A₃B₁ treatment. Under B₂ and B₃ conditions, with the increasing of groundwater depth, the root system of seedlings gradually changed from a forked branch structure to herring bone branching. Under the B₁ condition, the root topological parameters

收稿日期: 2021-03-16

资助项目: 国家自然科学基金项目(41671030); 中国科学院 A 类战略性先导科技专项(XDA2006030201); 中科院青年千人项目(Y772121)

第一作者: 丁晓雪(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事干旱区生态水文研究。E-mail: dingxiaoxue18@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 赵成义(1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事生态水文研究。E-mail: zhaocy@nuist.edu.cn

were larger, and the root branch structure of seedling tended to herring bone branching. These results could provide reference for the optimal allocation of water resources in the Tarim River Basin.

Keywords: root architecture; groundwater depth; soil texture; *Populus euphratica* seedlings

胡杨(*Populus euphratica*)作为荒漠河岸植被的建群种是中亚干旱区绿洲生态安全的天然屏障^[1-2]。其群落演替与流域水文条件变化(如河流断流、湖泊干枯等)和土壤环境变化(如地形地貌、土壤质地和盐渍化等)密切相关^[3-4]。地下水和基质是干旱区荒漠河岸林生态系统最关键的环境因子,决定植物的生理生态学特征和群落更替^[1,3]。胡杨林的更新与分布取决于其幼苗阶段对多变生境的适应性,幼苗期是胡杨全生活周期中最脆弱的阶段^[5]。洪水漫溢后的河漫滩为河岸植物种子自然萌发提供了低盐、高水和黏质土的适宜生境条件^[2,6],是胡杨最理想的繁殖更新地,同时河漫滩生境地下水波动频繁,土壤质地受河流相沉积过程影响,质地空间变异大^[6-7],这些因素都对胡杨幼苗在河漫滩的繁殖构成了风险。根系是植物吸收水分和养分的关键器官之一^[8],但由于根系在地下生长,直观地研究根系构型比较困难。以往研究^[5,8]多集中于根长、表面积、生物量分布与分配等形态指标。Wang 等^[1]研究发现,胡杨幼苗的根冠比随干旱胁迫的增加而增大。而相较根系形态指标,拓扑结构特征可能更准确地反映植物根系构型,故近年来有关根系拓扑结构特征的研究报道较多。单立山等^[9]通过对超旱生红砂根系构型对生境变化研究发现,干旱促使红砂根系连接长度增加,根系拓扑结构也有由叉状分支向鲱骨型分支发展的趋势;井家林^[10]对不同生境胡杨根系构型的研究发现,水土条件较好时,胡杨会形成无独立主根的网状构型,水土条件匮乏时,会形成具有明显主根,侧根不发达的根系构型。这些研究都表明,根系构型对植物适应多变生境有明显的响应。针对胡杨实生

幼苗根系表型如何适应水分波动及土壤环境变化,本文尝试基于胡杨实生幼苗生长水分控制试验,研究地下水埋深和土壤质地对胡杨实生幼苗根系生长、分布和构型的影响,分析胡杨实生幼苗根系适应不同生境的特性及影响因素,探索胡杨实生幼苗根系对河漫滩生境变化的适应机制,为塔里木河流域水资源优化配置和生态修复提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

胡杨幼苗根系生长试验在中国科学院阿克苏水平衡试验站(40°37'N,80°49'E)内进行,该区海拔 1 031 m,位于阿克苏河流域冲洪积平原绿洲内,属极端干旱区气候特征,多年平均气温 11.2 ℃,全年日照时间 2 950 h,日照百分率 68%,太阳辐射强烈,干旱少雨,蒸发强烈,年平均降水量不足 50 mm,年平均蒸发量在 2 500 mm 以上,无霜期 207 天,地下水埋深在 2~4 m。荒漠河岸优势植物主要为胡杨(*Populus euphratica*)、怪柳(*Tamarix ramosissima*)等^[11]。

1.2 试验设计

试验始于 2020 年 5 月 20 日,历时 92 天。试验设置 30(A₁),60(A₂),90(A₃) cm 3 个地下水埋深处理;砂土(B₁)、砂壤土(B₂)和黏壤土(B₃)3 种土壤基质处理,共计 9 个处理,每个处理 4 个重复,共 36 个土柱。供试土壤理化性质见表 1,所有供试土壤经过筛后装入 PVC 土柱(口径 20 cm,高度 120 cm),供试幼苗为塔里木河上游河漫滩 2 年生胡杨实生幼苗,每个土柱内移栽 2 株,待土柱水分充分平衡后开始控制试验(图 1)。

表 1 供试土壤的理化性质

土壤 质地	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	pH	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)
砂土	92.5	2.8	4.7	1.62	8.45	1.84	0.15
砂壤土	55.4	26.8	17.8	1.45	7.84	6.96	0.50
黏壤土	48.5	33.0	18.5	1.32	7.57	11.92	0.82

1.3 胡杨实生幼苗根系生长参数测定

胡杨实生幼苗生长 92 天后,将所有胡杨苗切割为地上和根系 2 部分,用水小心冲洗根系,用测距仪测量株高、各级根长度和连接长度,用电子游标卡尺测量幼苗的基径和各级根直径,每次测定重复 3 次;记录各级根数、根系内部连接、外部连接和根系分支数(图 2)。将根系以每 10 cm 为 1 层,按细根(<2 mm)和粗根(>2 mm)分级与地上生物量分别装入纸袋,在 105 ℃下杀青 30 min,65 ℃下烘干至恒重,测定地上、地下生物

量。胡杨实生幼苗的生长特征见表 2。

1.4 胡杨幼苗根系分布及构型计算

依据 Gale 等^[12]提出的根系垂直分布模型,胡杨幼苗根系垂直分布模型计算公式为:

$$Y=1-\beta^d \tag{1}$$

式中:Y 为从土壤表面到一定土层深度 d(cm)的根系生物量累计百分比; β 为根系消弱系数,通过对根系垂直分布模型进行非线性拟合得到。 β 范围为 0~1, β 值越大,表示根系在深层土壤分布比例较多; β 越

小,表示根系在浅层土壤分布比例较大。

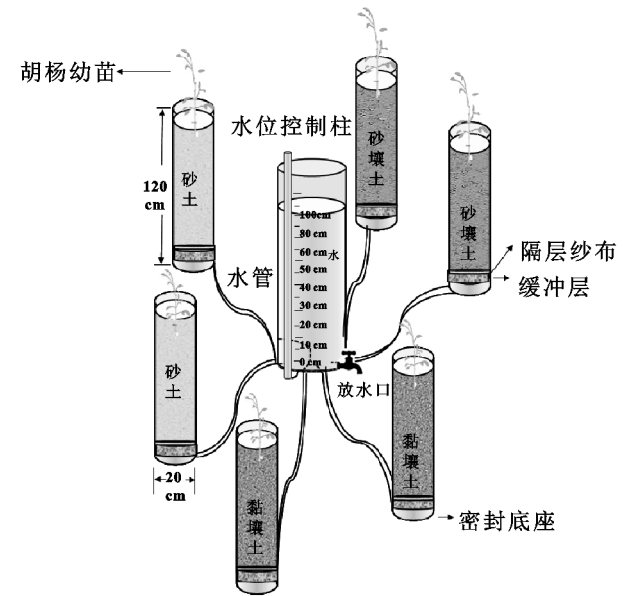


图 1 试验设计装置示意

表 2 不同处理下胡杨实生幼苗生长特征

处理	株高/cm	基径/mm	生物量/g		根冠比
			地下生物量	地上生物量	
A ₁ B ₁	59.25	3.47	1.32	1.47	0.89
A ₁ B ₂	84.40	5.03	5.86	6.65	0.88
A ₁ B ₃	92.42	6.20	6.17	6.08	1.01
A ₂ B ₁	51.71	3.55	1.57	1.71	0.91
A ₂ B ₂	109.50	6.42	7.19	6.35	1.14
A ₂ B ₃	80.85	5.58	6.78	6.25	1.08
A ₃ B ₁	38.00	3.52	4.52	1.68	2.69
A ₃ B ₂	101.00	7.56	14.78	7.39	2.00
A ₃ B ₃	83.25	6.95	11.75	9.22	1.27

注:表中生物量表示每株胡杨实生幼苗地上、地下生物量。

根冠比=根系生物量/地上生物量

根宽深比=根系侧根自然状态下延伸的最远水平距离/根系自然状态下的扎根深度

R_{50} 和 R_{90} 分别为 50% 和 90% 的根系生物量在土壤中的分布深度。

Fitter 等^[13-14]、Bouma 等^[15] 提出了 2 种典型的根系极端分支构型:鲃骨型分支和叉状型分支,还利用拓扑指数表示根系分支构型,其中拓扑指数 $TI = \lg A / \lg M$ (A 为根系最长路径上内部连接的数量; M 为根系外部连接的数量)(图 2)。典型的鲃骨型 $TI=1$,叉状型分支 TI 约等于 0.5,即当根系分支模式越接近鲃骨型分支时, TI 越接近 1,而越接近叉状型分支时, TI 越接近 0.5。但是这 2 种根系分支构型都是十分理想的情形。

实际上,绝大多数植物的根系分支构型是处于这 2 种理想分支模式的过渡模式。为此,Oppelt 等^[16] 在这 2 种典型极端分支模式的基础上提出了新的修正拓扑参数^[11],将植株基部到每个根终端的连接数称为拓扑长度 a ,最大拓扑长度与已有拓扑模型中的

等级 A 相同, b 为根系平均拓扑长度,其中 b 和根系通道所有拓扑长度 P_e 相联系,可以用 $b = p_e / v_0$ (v_0 与 Fitter 拓扑模型的外部连接总和 M 相同)表示,由于 a 、 b 受 v_0 值的变化影响,故通过对 a 、 b 线性转换得到修正拓扑参数 q_a 、 q_b ,计算公式为:

$$q_a = \frac{a - 1 - \lg v_0}{v_0 - 1 - \lg v_0} \tag{2}$$

$$q_b = \frac{b - 1 - \lg v_0}{(v_0 + 1) / 2 - v_0^{-1} - \lg v_0} \tag{3}$$

式中: a 为最大拓扑长度; b 为根系的平均拓扑长度, $\lg v_0 = \ln v_0 / \ln 2$; q_a 、 q_b 的范围为 0~1,当 $q_a = q_b = 1$ 根系呈鲃骨型分支,当 $q_a = q_b = 0$ 时,呈叉状型分支。

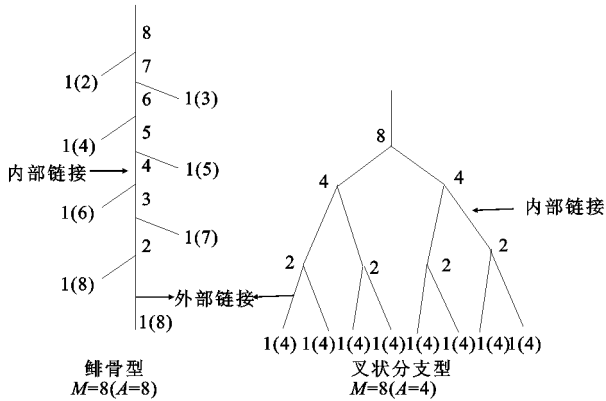


图 2 根系拓扑结构示意

所得数据用 SPSS 21.0 软件进行方差分析,LSD 法进行处理间差异显著性检验($\alpha=0.05$),使用 Origin 18 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同处理下胡杨实生幼苗的根系生长特征

扎根深度、根系总长度、根系总体积和根系总表面积 4 个根系生长指标,研究胡杨实生幼苗根系生长随地下水埋深和土壤质地的变化特征,结果表明,地下水埋深、土壤质地及其二者交互作用对胡杨实生幼苗扎根深度、总根系长度、体积和表面积均产生显著影响($P<0.05$)(表 3)。

表 3 地下水埋深和土壤质地对胡杨实生幼苗根系发育的双因素方差分析(P 值)

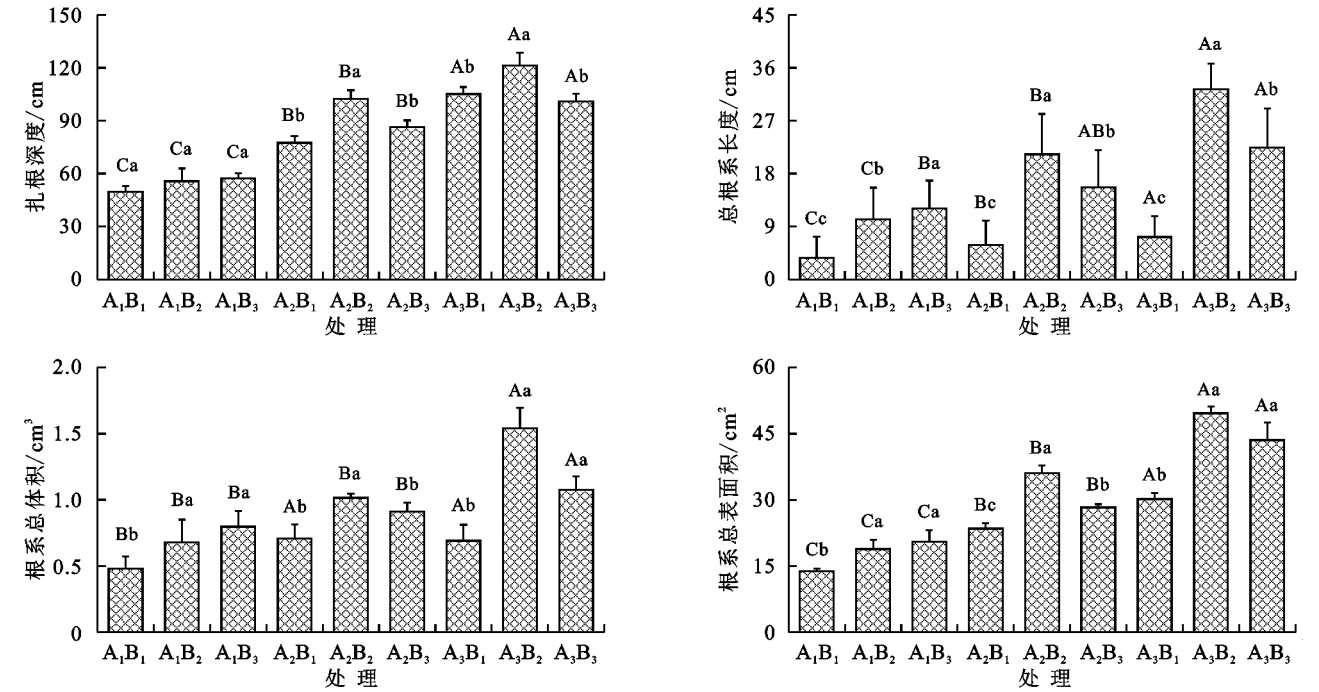
因素	扎根深度	总根系长度	总根系体积	总根系表面积
地下水埋深	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
土壤质地	0.002	<0.001	0.001	<0.001
地下水埋深 * 土壤质地	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

由图 3 可知,胡杨实生幼苗根系扎根深度、总根长、根系总体积和根系总表面积均随地下水埋深的加深而增加,表现出 $A_1 < A_2 < A_3$ 的变化趋势。胡杨实生幼苗扎根深度在地下水埋深较浅(A_1)时,幼苗扎根深度在各基质处理时无显著差异($P>0.05$),地下水埋深处理较深(A_2 和 A_3)时,幼苗扎根深度在 B_2 处理下显著高于 B_1 和 B_3 处理($P<0.05$)。根系总体积与根系总表面积在

A₁和A₃地下水埋深处理下,B₂与B₁处理之间差异显著($P<0.05$),而与B₃差异不显著;A₂地下水埋深处理时,3种土壤质地处理均差异显著($P<0.05$)。

以上分析表明,4个胡杨实生幼苗根系生长指标对地下水埋深的响应不一致,不同土壤质地对胡杨幼苗扎根深度、根系总长度、根系总体积和根系总表面积的影响亦有所差异,如胡杨实生幼苗4个根系生长指标在

A₃B₂处理下均达到最大值,且与其他处理达到显著性水平($P<0.05$)。幼苗扎根深度、幼苗根系总长度、总体积、总表面积在A₂和A₃处理下均呈现B₂>B₃>B₁趋势。而A₁处理下表现为B₃>B₂>B₁,表明在地下水埋深较浅(A₁)时,胡杨实生幼苗从黏壤土中吸收较多的水分和养分促进幼苗根系生长,在其他基质处理下,适度的增加基质中的砂粒可以促进根系的生长。



注:图柱上方不同大写字母表示不同地下水埋深的显著性差异($P<0.05$);不同小写字母表示土壤质地的显著性差异($P<0.05$)。下同。

图 3 不同处理下胡杨实生幼苗根系生长特征

2.2 地下水埋深和土壤质地对胡杨实生幼苗根系分布的影响

由表 4 和图 4 可知,对胡杨实生幼苗而言,随地下水埋深的增加,幼苗扎根深度和根系干重逐渐增加;根系消弱系数 β 、 R_{50} 和 R_{90} 均呈增大的趋势。结果表明,不同地下水埋深下,随土层深度增加,根系干重逐渐减少,但根系在深层土壤中分布的百分比增大。在不同土壤质地处理下,根系生物量总在砂土处理下最小,且在A₂和A₃处理下根系生物量呈B₂>B₃>B₁的变化趋势。

表 4 不同处理下胡杨实生幼苗根系分布特征

处理	根宽深比	β	R^2	R_{50}	R_{90}
A ₁ B ₁	0.28Ab	0.95±0.01Cc	0.878	15.29±1.2	40.81±3.6
A ₁ B ₂	0.48Ab	0.97±0.01Ca	0.836	20.35±0.8	44.32±3.2
A ₁ B ₃	0.55Aa	0.96±0.01Cb	0.912	16.09±0.8	46.76±1.7
A ₂ B ₁	0.14Bb	0.97±0.01Bc	0.894	25.36±1.8	74.25±3.1
A ₂ B ₂	0.32Ba	0.98±0.01Ba	0.941	28.96±3.6	96.20±4.7
A ₂ B ₃	0.30Ba	0.97±0.01Bb	0.913	24.41±3.2	81.10±5.2
A ₃ B ₁	0.09Cb	0.98±0.01Aa	0.892	38.39±4.5	97.52±4.4
A ₃ B ₂	0.22Ca	0.98±0.01Ab	0.899	37.52±2.7	106.61±5.9
A ₃ B ₃	0.24Ca	0.98±0.01Ac	0.894	35.01±4.3	96.32±4.3

注:表中数据内平均值±标准差;同列不同大写字母表示不同地下水埋深的显著性差异($P<0.05$);不同小写字母表示土壤质地的显著性差异($P<0.05$)。下同。

从胡杨实生幼苗根系分布特征分析可知,不同地下水埋深和土壤质地处理下,胡杨实生幼苗根宽深比随地下水埋深的增加而减小,根宽深比在A₁B₃处理下达到最大,表明在水分充足时,胡杨实生幼苗同时扩展根系水平范围和扎根深度,增加主根的纵向延展能力适应干旱胁迫。胡杨实生幼苗根系主要分布在40 cm以上的土层, R_{50} 在3个地下水埋深处理下分别为17.29,26.24,36.97 cm, R_{90} 分别为43.96,83.85,100.15 cm,说明地下水埋深越浅,胡杨实生幼苗根系分布表聚性越明显。B₁在不同地下水埋深处理下根系分布也呈现表聚性,但与B₂与B₃处理相比垂直分布较均匀。

从胡杨实生幼苗细根系在土层中的垂直分布特征上看,胡杨实生幼苗的细根垂直分布基本呈先升后降的“单峰型”曲线,表明胡杨实生幼苗细根在地下水埋深附近集中分布,这与总根系干重垂直分布有显著区别。A₂B₁处理的细根集中分布在60—70 cm,A₂B₂和A₂B₃处理的细根主要分布在40—50,50—60 cm。表明不同土壤质地下胡杨实生幼苗吸收水分和养分的能力具有一定差异性。

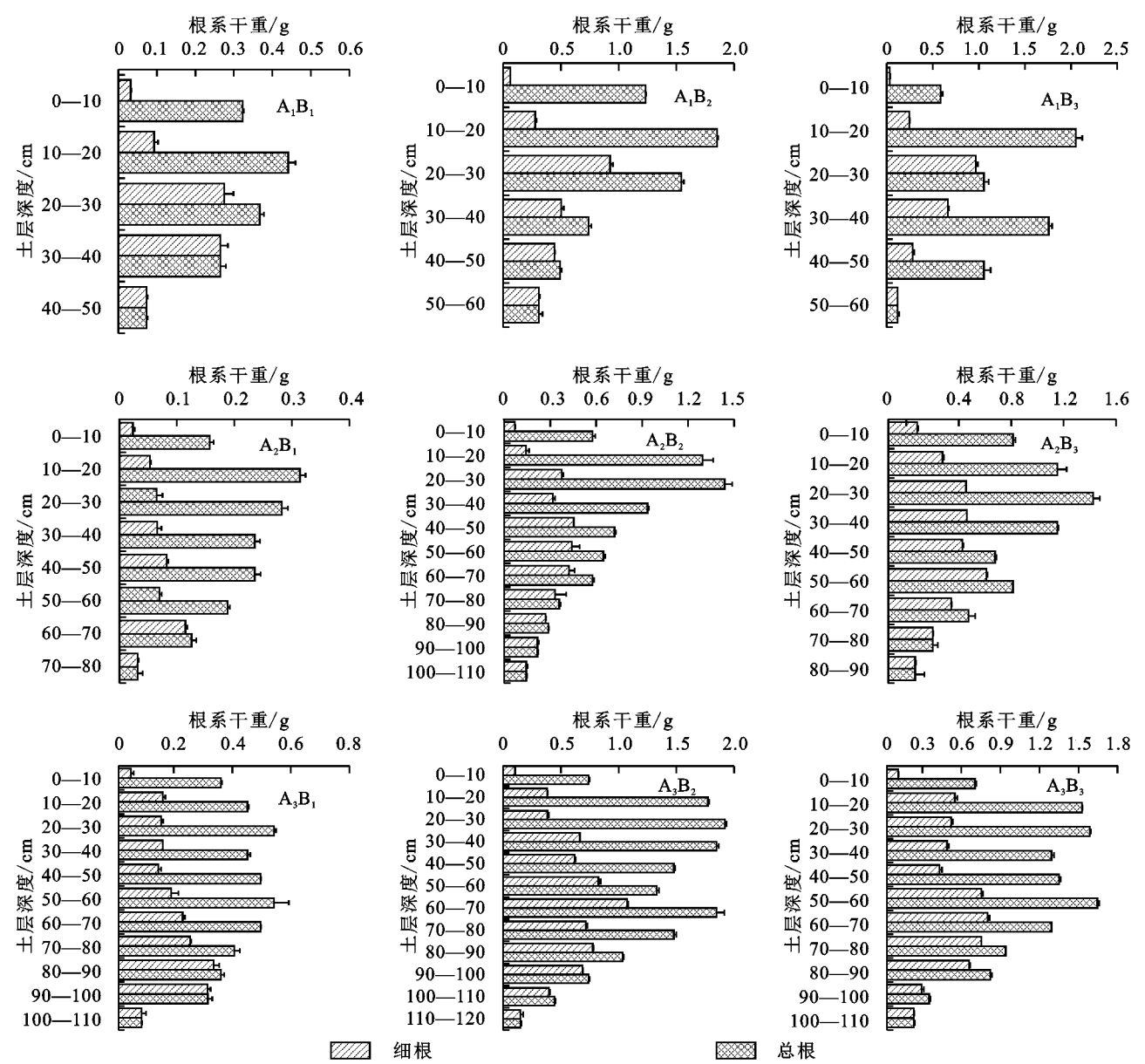


图4 不同处理下胡杨幼苗根系生物量垂直分布变化

2.3 地下水埋深和土壤质地对胡杨实生幼苗根系构型的影响

幼苗根系连接长度(L)和根系构型参数 $a(A)$ 、 v_0 (M)、 p_e 、 b 、 TI 、 q_a 和 q_b 有显著影响($P<0.05$),但二者的交互作用对 TI 、 q_a 和 q_b 无显著影响($P>0.05$)。

表5 地下水埋深和土壤质地对胡杨实生幼苗根系构型参数的双因素方差分析(P 值)

因素	L	$a(A)$	$v_0(M)$	p_e	b	TI	q_a	q_b
地下水埋深	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.016	<0.001	<0.001
土壤质地	<0.001	0.057	<0.001	<0.001	0.003	<0.001	<0.001	<0.001
地下水埋深 * 土壤质地	<0.001	0.008	<0.001	<0.001	0.013	0.485	0.060	0.629

根系连接长度的大小影响根系在土壤中的空间拓展和吸收水分及养分的能力,根系连接长度越长,其空间扩展能力越强。由图5可知,胡杨实生幼苗的根系连接长度随地下水埋深的增加而增大,其中 A_3B_1 处理下为最大14 cm,显著高于其他处理($P<0.05$)。不同土壤质地地下根系连接长度在地下水埋深较浅(A_1)时不显著($P>0.05$),随着地下水埋深的增加,基质对根系连接长度产生影响,根系连接长度在 A_2 处理下, B_1 与 B_2 处理之间差异显著($P<0.05$),而与 B_3 差异不显著($P>0.05$), A_3 地下水埋深时,根系连接长度呈现 $B_1>B_2>B_3$ 的变化趋势。

根系最长路径上内部连接的连接数 $a(A)$,根系所有外部连接总数 $v_0(M)$ 、平均拓扑长度 b 和根系通道所有拓扑长度 P_e 均随地下水埋深的增加而增大(表6)。由图5可知,根系拓扑参数 TI 、 q_a 和 q_b 在不同处理间的变化趋势基本一致,不同地下水埋深处理

间差异显著($P<0.05$)。生长于 A_1B_2 和 A_1B_3 处理上的胡杨实生幼苗根系的拓扑参数相对较小($TI<0.7$; $q_a<0.2$; $q_b<0.1$),说明其根系分支结构较复杂,根系分支模式接近叉状分支型模式。而 A_2B_2 、 A_2B_3 、 A_3B_2 和 A_3B_3 条件下的胡杨实生幼苗根系拓扑参数相对较大($TI>0.7$; $q_a>0.2$; $q_b>0.1$),表明 B_2

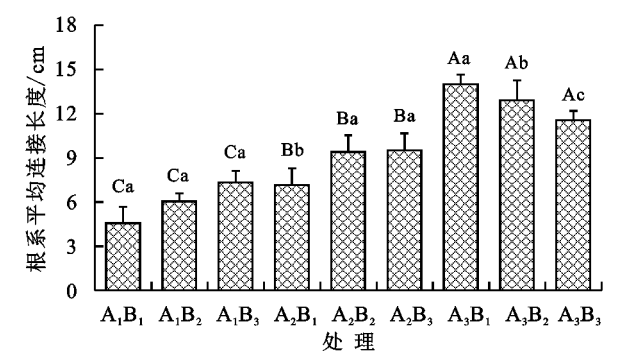


图 5 不同处理下胡杨实生幼苗根系连接长度与拓扑参数变化

表 6 不同处理下胡杨实生幼苗根系构型参数

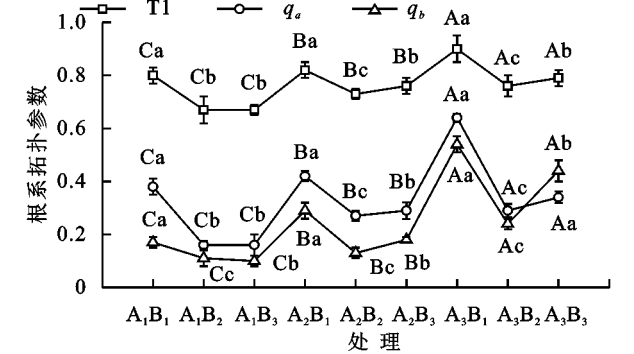
处理	$a(A)$	$v_0(M)$	p_e	b
A_1B_1	13 ± 1.5	25 ± 4.0	181 ± 11.0	7.24 ± 1.2
A_1B_2	14 ± 3.0	52 ± 5.4	355 ± 12.5	6.83 ± 0.6
A_3B_3	16 ± 2.3	62 ± 3.8	487 ± 27.8	7.85 ± 1.7
A_2B_1	16 ± 1.2	30 ± 3.4	232 ± 22.6	7.73 ± 0.5
A_2B_1	20 ± 1.6	55 ± 5.3	412 ± 11.4	7.49 ± 2.0
A_2B_3	19 ± 3.5	49 ± 2.1	368 ± 19.5	7.51 ± 0.9
A_3B_1	20 ± 1.8	31 ± 1.7	385 ± 31.5	12.42 ± 2.8
A_3B_2	25 ± 2.6	68 ± 6.9	929 ± 34.7	14.75 ± 3.3
A_3B_3	23 ± 4.4	54 ± 1.4	862 ± 38.3	15.59 ± 3.8

3 讨论

3.1 胡杨实生幼苗生物量分配对地下水埋深和土壤质地的响应

胡杨幼苗根系生长及生物量与地下水埋深和土壤质地密切相关^[1]。本研究发现,当地下水埋深较深(A_3)时,土壤含水量降低,胡杨幼苗通过向根系分配更多的资源构建根系,其中由于砂土持水能力弱致其根冠比也最大(表 2);当地下水埋深在 A_1 与 A_2 水平时,根冠比接近 1,幼苗选择兼顾地上与地下生物量接近等速生长的需求。这与白雪等^[17]对疏勒河流域地下水埋深对胡杨幼苗生物量分配的研究结果一致,符合最优分配理论。彭刚^[18]对胡杨实生幼苗的研究中发现,随地下水埋深的增加胡杨实生幼苗可通过增大扎根深度提高根系生物量以适应干旱胁迫环境来维持其对土壤中水分和营养的需求,当地下水埋深增加至 120 cm 时,幼苗扎根深度可达 137 cm。干旱区疏叶骆驼刺(*Alhagi sparsifolia* Shap.)和多枝怪柳(*Tamarix ramosissima*)等荒漠耐旱型植物也存在这种生理生态学现象^[19]。本研究表明,同一地下水

和 B_3 处理下,胡杨幼苗根系构型随地下水埋深的增加逐渐由叉状型分支构型向鲃骨型分支构型过渡。而各 B_1 处理下根系拓扑参数较大($TI>0.8$; $q_a>0.3$; $q_b>0.2$),幼苗根系分支结构一直趋向鲃骨型分支模式。可见生长在不同土壤质地上的胡杨实生幼苗根系具有不同的生长适应构型。



埋深下,生长在不同基质中的胡杨幼苗根系形态生长差异显著,幼苗吸收水分和养分的能力取决于其扎根深度和分支特征等。胡杨实生幼苗能够在不同生境下适应相当长的时间,生物量最优分配机制是其适应不同生境的主要策略。

3.2 胡杨实生幼苗根系分布对地下水埋深和土壤质地的响应

地下水埋深、土壤质地影响土壤含水量和养分特征,植物根系为适应不同外部环境,其垂直扎根深度和根系分布随生境发生一定的改变,表现出较高的根系可塑性。大量研究^[5,8,20]表明,地下水埋深越浅,根系生物量在地表的集聚性越明显;地下水埋深越深,根系生物量的垂直分布越分散。土壤质地对根系生物量的影响,其实是土壤紧实度影响根系扩展能力而引起根系分布的差异^[21]。土壤中砂粒含量过高,不利于根系发展不定根,在一定范围内,随土壤中黏粒的增加,细根生物量在土壤中所占的比例加大^[21-22]。根宽深比可衡量植物根系横向与纵向生长的比例,反映根系在土壤中的分布状况^[5]。苗木在受到干旱胁迫时增大扎根深度可以明显增加对地下水的利用以维持其成活和生长^[23]。本研究中,地下水埋深的增大与基质中砂粒的增加促进了胡杨幼苗根系水平方向和垂直方向的分布,但各处理下根宽深比均 <1 ,与井家林^[10]、叶子奇^[24]对额济纳旗绿洲胡杨幼苗根系分布结果不同,这可能是野外自然条件与培养试验条件的差异引起的。本研究中,地下水埋深的增加,促进根系生物量的积累,同时导致根系分布深层化,这与疏叶骆驼刺(*Alhagi sparsifolia* Shap.)和沙地柏(*Sabina vulgaris*)等植物通过增加扎根深度和根系生物量在深层土壤中的分布来适应土壤水分匮乏的结果相符^[19]。

3.3 胡杨实生幼苗根系构型对地下水埋深和土壤质地的响应

在干旱生境下,根系连接长度和几何拓扑结构均是植物适应胁迫环境的信号^[15,25],通过增加植物根系连接长度可以扩展根系在土壤中的分布范围,以获取更多的水分和养分。杨小林等^[25]在对塔克拉玛干沙漠腹地的研究中发现,柽柳(*Tamarix taklamakanensis*)、沙拐枣(*Calligonum roborovskii*)和罗布麻(*Apocynum venetum*)的根系平均连接长度均较大,最小也达 1.12 m,这与郭京衡等^[26]对塔克拉玛干沙漠南缘绿洲农田 3 种防护林植物的根系平均连接长度在 33.67 cm 以上有显著差异。这些根系平均连接长度的差异除了与遗传因素有关,更大的可能是与不同的变异生境如土壤质地、地下水埋深、盐分含量等有关。本研究中,根系平均连接长度随地下水埋深的加深而增大,生长在 90 cm 地下水埋深砂土处理上的胡杨实生幼苗根系平均连接长度达到 14 cm。结果表明,随干旱胁迫的增加,胡杨实生幼苗通过增加根系的平均连接长度来吸取更多的养分和水分以满足其器官组织的构建。

根系构型通常被认为是物种的遗传潜力和适应不同生境可塑性之间的权衡,影响植物根系吸收效率及器官组织构建所需碳量^[13-16]。研究根系拓扑结构主要是分析不同的生境条件是否会导致根系在分支模式和延伸策略上产生适应性变化^[25]。通常鲃骨型根系分支少,根系较分散,内部竞争较小,而又状型分支则相反^[16]。这导致投入等量碳,鲃骨型分支相较叉状型根系分布范围更广,故鲃骨型根系更适应于干旱贫瘠的生境^[13-16]。马雄忠等^[20]对阿拉善高原 2 种荒漠植物根系构型的研究发现,红砂(*Reaumuria songarica*)和珍珠猪毛菜(*Salsola passerina*)的根系均接近鲃骨型分支。叶子奇^[24]在对额济纳河漫滩实生胡杨幼苗的研究中发现,深根系、大根冠比和鲃骨型根系构型是胡杨实生幼苗适应河漫滩生境的重要特征。与本研究中生长期于砂土上的胡杨实生幼苗根系生长特征相似,根冠比大,次级分支少,根系构型趋向于鲃骨型,是其适应干旱胁迫环境的生长策略。井家林^[10]通过研究距河道不同距离生境的胡杨根系构型发现,距离河道越远,地下水埋深越深,水平走向的根系减少,垂直向下的粗大根系增加,形成比较明显的主根;反之,距离河道越近,地下水埋深越浅,水平根系发达,没有明显的主根。与本研究地下埋深较浅的处理下,砂壤土和黏壤土中幼苗具有较多根系分支的结果相一致。综上所述,不同处理的胡杨实生幼苗根系构型特征具有差异性,胡杨幼苗根系在适应不同生境时,通过生物量分配、根系构型特征采取了相应的生态适应策略,表现出明显的根系可塑性。

4 结论

(1)不同土壤质地下,胡杨幼苗根系的扎根深度、总根系长度、根系总体积和根系总表面积均随地下水埋深的增加而增大;同时土壤质地的影响可因地下水埋深不同而不同,地下水埋深为 30 cm 时,胡杨幼苗根系的 4 个生长指标随土质中砂粒的增加而减小;地下水埋深为 60,90 cm 时,呈砂土<黏壤土<砂壤土的变化趋势。

(2)地下水埋深的增大,促进胡杨实生幼苗根系生物量的积累,同时导致其根系分布深层化。不同处理下细根分布始终在地下水埋深附近达到最大,同时砂土处理下细根生物量的“集中分布层”比砂壤土和黏壤土低,更趋近地下水位。

(3)随地下水埋深和土质中砂粒的增加,胡杨幼苗可通过增大扎根深度、根系平均连接长度、增加根冠比以及构筑鲃骨型分支结构来适应干旱环境,生物量最优分配机制和根系形态可塑性是其适应不同生境的主要策略。本研究仅探讨胡杨实生幼苗根系的生长、分布与根系构型对地下水埋深和土壤质地的短期响应差异,仍有待于开展生理生态学特征的长期观测并深入研究其过程与机理,以丰富胡杨实生幼苗对地下水埋深和土壤质地及其交互作用的生态适应机制,为塔里木河流域水资源优化配置和生态修复提供依据。

参考文献:

- [1] Wang L J, Zhao C Y, Li J, et al. Root plasticity of *Populus euphratica* seedlings in response to different water table depths and contrasting sediment types[J]. PLoS One, 2015, 10 (3): e0118691.
- [2] Li J, Yu B, Zhao C, et al. Physiological and morphological responses of *Tamarix ramosissima* and *Populus euphratica* to altered groundwater availability[J]. Tree Physiology, 2013, 33(1): 57-68.
- [3] 曾勇,赵成义,李传金,等.塔里木河沿岸不同生境下胡杨群落的空间分布格局及关联性[J].生态学杂志, 2019, 38(11): 3273-3282.
- [4] 徐梦辰,陈永金,刘加珍,等.塔里木河中游水文影响下的胡杨种群格局动态[J].生态学报, 2016, 36(9): 2646-2655.
- [5] 吕爽,张现慧,张楠,等.胡杨幼苗根系生长与构型对土壤水分的响应[J].西北植物学报, 2015, 35(5): 1005-1012.
- [6] 雷善清,王文娟,王雨辰,等.不同土壤水盐条件下多枝柽柳(*Tamarix ramosissima*)对胡杨(*Populus euphratica*)幼苗的影响[J].生态学报, 2020, 40(21): 7638-7647.
- [7] Cao D C, Li J W, Huang Z Y, et al. Reproductive characteristics of a *Populus euphratica* population and prospects for its restoration in China[J]. PLoS One, 2012, 7 (7): e39121.

- [J].防护林科技,2016(12):59-60.
- [12] 孙守家,李春友,何春霞,等.基于树轮稳定碳同位素的张北杨树防护林退化原因解析[J].应用生态学报,2017,28(7):2119-2127.
- [13] Jackson M B, Ricard B. Physiology, biochemistry and molecular biology of plant root systems subjected to flooding of the soil[M].Berlin Heidelberg: Springer, 2003,168:193-213.
- [14] 邸楠.毛白杨根系性状时空变异及土壤水分吸收利用特征与机制[D].北京:北京林业大学,2019.
- [15] 史凯航.“三北”防护林退化及指标分析[J].辽宁林业科技,2015(5):57-59.
- [16] 赵佳宁,梁韵,柳莹,等.森林生态系统细根周转规律及影响因素[J].植物学报,2020,55(3):308-317.
- [17] Claus A, George E. Effect of stand age on fine-root biomass and biomass distribution in three european forest chronosequences[J].NRC Research Press Ottawa, Canada,2005,35(7):1617-1625.
- [18] 井家林.极端干旱区绿洲胡杨根系空间分布特征及其构型研究[D].北京:北京林业大学,2014.
- [19] Liu Y H, Xu Z, Duffy R, et al. Analyzing relationships among water uptake patterns, rootlet biomass distribution and soil water content profile in a subalpine shrubland using water isotopes[J].European Journal of Soil Biology,2011,47:380-386.
- [20] 安书超.建平县防护林退化成因及对策[J].防护林科技,2016(2):80,84.
- [21] 董玉峰,姜岳忠,王卫东,等.大汶河流域杨树根系的生物量组成和空间分布[J].中国水土保持科学,2014,12(5):30-35.
- [22] 李盼盼.杨树人工林细根的空间分布特征及其季节动态[D].山东 泰安:山东农业大学,2012.
- [23] 燕辉,苏印泉,朱昱燕,等.秦岭北坡杨树人工林细根分布与土壤特性的关系[J].南京林业大学学报(自然科学版),2009,33(2):85-89.
- [24] 张治军,王彦辉,于澎涛,等.不同优势度马尾松的生物量及根系分布特征[J].南京林业大学学报(自然科学版),2008,51(4):71-75.
- [25] 代永欣,王林,万贤崇.干旱导致树木死亡机制研究进展[J].生态学杂志,2015,34(11):3228-3236.
- (上接第 241 页)
- [8] 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[J].生态学报,2018,38(16):5739-5749.
- [9] 单立山,李毅,任伟,等.河西走廊中部两种荒漠植物根系构型特征[J].应用生态学报,2013,24(1):25-31.
- [10] 井家林.极端干旱区绿洲胡杨根系空间分布特征及其构型研究[D].北京:北京林业大学,2014.
- [11] 赵成义,施枫芝,盛钰,等.近 30 年阿克苏绿洲水面蒸发趋势及影响因素[J].水土保持学报,2012,26(1):237-240.
- [12] Gale M R, Grigal D F. Vertical root distributions of northern tree species in relation to successional status[J].Canadian Journal of Forest Research,1987,17(8):829-834.
- [13] Fitter A H. An architectural approach to the comparative ecology of plant root systems[J].New Phytologist, 1987,106:61-77.
- [14] Fitter A H, Stickland T R. Architectural analysis of plant root systems: III. Studies on plants under field conditions[J].New Phytologist,1992,121(2):243-248.
- [15] Bouma T J, Nielsen K L, Van Hal J, et al. Root system topology and diameter distribution of species from habitats differing in inundation frequency[J].Functional Ecology,2001,15(3):360-369.
- [16] Oppelt A L, Kurth W, Godbold D L. Topology, scaling relations and Leonardo's rule in root systems from African tree species[J].Tree Physiology,2001,21(2/3):117-128.
- [17] 白雪,赵成章,康满萍.疏勒河中游河岸林地地下水埋深对胡杨幼苗生物量分配与生长的影响[J].生态学杂志,2020,39(11):3605-3612.
- [18] 彭刚.基于稳定同位素的胡杨幼苗水分利用策略初探[D].北京:中国科学院大学,2013.
- [19] 曾凡江,郭海峰,刘波,等.多枝怪柳和疏叶骆驼刺幼苗生物量分配及根系分布特征[J].干旱区地理,2010,33(1):59-64.
- [20] 马雄忠,王新平.阿拉善高原 2 种荒漠植物根系构型及生态适应性特征[J].生态学报,2020,40(17):6001-6008.
- [21] 贾立华,赵长星,王月福,等.不同质地土壤对花生根系生长、分布和产量的影响[J].植物生态学报,2013,37(7):684-690.
- [22] 鲍雅静,曹明,李政海,等.羊草与大针茅根系构型对水分梯度响应的比较研究[J].生态学报,2019,39(3):1063-1070.
- [23] 赵菊花,汪正祥,雷耘,等.长柄水青冈幼苗根系构型及动态变化[J].武汉植物学研究,2010,28(6):718-724.
- [24] 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.
- [25] 杨小林,张希明,李义玲,等.塔克拉玛干沙漠腹地 3 种植物根系构型及其生境适应策略[J].植物生态学报,2008,32(6):1268-1276.
- [26] 郭京衡,曾凡江,李芸君,等.塔克拉玛干沙漠南缘 3 种防护林植物根系构型及其生态适应策略[J].植物生态学报,2014,38(1):36-44.