

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.032; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.032.

张旭, 姚晨, 杜婷, 等. 黄土区 3 种护坡植物三维可视化模拟与根系构型参数分析[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 218-226.

Zhang Xu, Yao Chen, Du Ting, et al. Three-dimensional visual simulation and root morphological parameter analysis of three slope protection plants in loess region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 218-226.

## 黄土区 3 种护坡植物三维可视化模拟与 根系构型参数分析

张旭<sup>1,2,3</sup>, 姚晨<sup>4</sup>, 杜婷<sup>4</sup>, 马志强<sup>4</sup>, 朱宏杰<sup>1,2,3</sup>, 汪艳<sup>4</sup>, 杜峰<sup>1,2,3,4</sup>

(1.中国科学院 教育部 水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌)

**摘要:** [目的]对植物根系数字化并进行三维实体可视化模拟, 对于了解植物根系形态和为水保工程制图提供植物实物图库都具有重要的理论与实践意义。[方法]逐层挖掘黄土区酸枣、沙棘、狼牙刺 3 种护坡植物根系, 使用 3D 数字化仪 FasTrak 获取根系三维点阵坐标后利用 SketchUp 软件对根系进行三维建模并提取根系构型参数。为了建立完整的植物地上地下三维实体图库, 同时使用 FreeScan UE 激光扫描仪得到相应地上部点云数据, 经 Solidworks 软件渲染后建立植物地上部三维模型。[结果](1)建立了 3 种植物的地上地下三维实体模型图; (2)3 种植物的根幅/根深均大于 1(1.10~3.41), 根系在水平方向上占有优势, 狼牙刺最小为 1.10; (3)3 种植物冠幅/根幅分别为酸枣(0.25)、沙棘(0.69)、狼牙刺(0.73), 均小于 1, 植物根系较地上部在水平方向上占优; (4)3 种植物 Fitter 拓扑指数均接近于 1, 分别为酸枣(0.915)、沙棘(0.802)、狼牙刺(0.771), 接近于鱼尾型分支; (5)植物根系总根长、总表面积、总体积在上坡方向占比大于 50%, 均在上坡方向更有优势。[结论]所建立的植物三维模型图对植物还原度高, 为整株植物三维可视化模拟提供了一种方法。

**关键词:**黄土区; 整株植物; 三维可视化模拟; SketchUp; 根系形态

中图分类号: Q945.79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0218-09

### Three-dimensional visual simulation and root morphological parameter analysis of three slope protection plants in loess region

Zhang Xu<sup>1,2,3</sup>, Yao Chen<sup>4</sup>, Du Ting<sup>4</sup>, Ma Zhiqiang<sup>4</sup>,

Zhu Hongjie<sup>1,2,3</sup>, Wang Yan<sup>4</sup>, Du Feng<sup>1,2,3,4</sup>

(1. The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] Digitizing plant roots and performing three-dimensional physical visualization simulations have important theoretical and practical significance for understanding plant root morphology and providing a physical plant library for water conservation project drawing. [Methods] The root systems of three types of slope protection plants, *Ziziphus jujuba* Mill. var. *spinosa*, *Hippophae rhamnoides*, and *Sophora davidii*, were excavated layer by layer in the loess area. The 3D digitizer FasTrak was used to

收稿日期: 2024-05-23

修回日期: 2024-06-17

资助项目: 国家自然科学基金项目“植物根系构型与力学特性对黄土区浅层坡体稳定性的影响”(41771322); “黄土区主要护坡植物根系构型与拓扑链接特性对边坡异质环境的响应”(42177458)

第一作者: 张旭(2000—), 女, 山西忻州人, 在读硕士研究生, 主要从事植物生理生态研究。E-mail: zhangxu21@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 杜峰(1971—), 男, 内蒙古丰镇人, 副研究员, 博士, 主要从事水土保持和群落生态的研究。E-mail: dufeng@ms.iswc.ac.cn

http://stbcjy.paperonice.org

obtain the three-dimensional lattice coordinates of the root system, and then SketchUp software was used to conduct three-dimensional models of the root system and extract the root system morphology parameters. In order to establish a complete above-ground and underground three-dimensional entity library of plants, the FreeScan UE laser scanner was used to obtain the corresponding above-ground point cloud data, and the above-ground three-dimensional model of the plant was established after rendering with Solidworks software. [Results] (1) The established three-dimensional plant model diagram truly restores the original form of the plant. (2) The root width/root depth of the three types of plants are all greater than 1 (1.10~3.41), and the root system has an advantage in the horizontal direction. The minimum value of *Sophora davidii*, is 1.10; the crown width/root width of the three plants are *Ziziphus jujuba* Mill. var. *spinosa* (0.25), *Hippophae rhamnoides* (0.69), and *Sophora davidii* (0.73), both are less than 1, and the plant roots are dominant in the horizontal direction compared with the aboveground parts. The topological index of Fitter of the three plants was close to 1. *Ziziphus jujuba* Mill. var. *spinosa* (0.915), *Hippophae rhamnoides* (0.802) and *Sophora davidii* (0.771), which were close to the herringbone branching. The total root length, total surface area, and total volume of plant roots all account for more than 50% in the up-slope direction, and they are all more advantageous in the up-slope direction. [Conclusion] The established three-dimensional plant model diagram has a high degree of plant reduction, and provides a method for the three-dimensional visual simulation of the entire plant.

**Keywords:** loess region; the whole plant; 3D visual simulation; SketchUp; root morphology

我国黄土区分布范围较大,存在大量的人为活动和大量裸露的山坡,在雨水的冲刷作用下,极易发生水土流失<sup>[1]</sup>,所以黄土区坡体防护是该区域生态安全的重点关注内容。黄土区的坡体防护使用较多的方法有工程边坡防护和生态边坡防护<sup>[2]</sup>。工程边坡防护形成的坡体是困难立地,植物无法生长<sup>[3-4]</sup>。而生态防护综合了植物、土壤等,可对坡体进行有效防护,改善了生态环境。护坡植物是生态护坡中主要的实施对象之一,选择合适的护坡植物有利于提高生态护坡效果。

护坡植物的护坡作用主要体现为地上冠层可以降低雨水对地表土壤的击溅动能,也可以对降水进行截留,延缓和降低地表径流形成时间与冲刷侵蚀动能,植物地上部还可以有效地降低风速,减少风害带来的干旱地区的水土流失问题;植物根系可以穿透土壤,在土壤中形成复杂的植物根系网络,改善土壤理化性质并形成根土复合体,增强土壤抗崩解、抗冲刷与抗剪切能力,降低坡体滑塌风险,减少土壤的流失。植物根系对土壤的抗崩解、抗冲刷与抗剪增强作用与其在根际范围内的三维立体分布有关,但是以往由于土壤介质的阻挡与限制,对于根系整体形态的研究较少。随着数字化技术的兴起与观测设备的完善,进行植物根系三维可视化并提取相应三维构型参数已成为可能。

植物三维可视化模拟之前主要为植物地上部的三维可视化模拟及植物地下部的三维可视化模拟,很少有研究对整株植物进行三维可视化模拟。且植物地上

部的三维可视化模拟在之前的研究中多为植物功能的模拟,对于植物形态的模拟则相对较少<sup>[5]</sup>。植物地上部三维可视化模拟主要有基于图像、规则及点云的三维建模。基于图像的三维建模主要是通过对植物二维图像数据进行处理后建立三维模型,该方法较为复杂、计算量较大。基于不同规则的三维建模主要使用参考轴、L-系统、参数集等方法进行建模,所建立的模型可对植物进行动态模拟但是模拟效率不高。点云数据的三维建模主要使用三维扫描仪获得点云数据进行建模,得到的数据量较大,但是模型较为逼真。植物地上部的三维可视化模拟在之前较多地用于作物以及园林植物模拟,对于护坡植物三维可视化的模拟较少。而植物根系的三维模拟因根系的特殊性,大多为虚拟模拟,很少有对植物根系原位数据测量模拟的。Diggle<sup>[6]</sup>是第一个使用三维模型对根系进行描述的,但是所建立的模型缺少根径等数据,仅对根系分支情况进行了模拟。相关的根系三维模型还有 SimRoot、Root Typ、ArchiSimple 模型等,这些模型都是对实验室种植物根系的模拟以及根系的仿真算法模拟,很少有对原位植物根系三维模拟。整株植物的模拟需结合地上部以及地下部进行模拟,在之前的植物模拟中对两者结合的三维可视化模拟少之又少<sup>[7]</sup>。整株植物三维可视化模拟为研究植物地上以及地下生长之间的关系提供了一种方法,并可将其运用到水土保持工程制图以及园林景观设计之中。

黄土区地形复杂,不同坡体之间存在着不同的异质埋深环境,即土壤的深度和质地会有所差别,不同的环境会对植物根系造成很大的影响。植物根系在固土护坡方面发挥着重要作用,所以植物对以上异质环境在根系形态方面的变化会相应影响到固土护坡功能。黄土区植物地上部三维可视化的研究对于研究植物冠层对坡体的防护作用以及生态护坡植物的选择具有重要意义。之前的研究中,已经有研究使用 SketchUp 软件结合 FreeScan UE 对整株植物进行三维可视化模拟,但是并未结合植物相关参数进行分析<sup>[8]</sup>。

本文以黄土区 3 种护坡植物(酸枣、沙棘、狼牙刺)为研究对象,将植物地上部以及地下部的三维可视化模拟结合起来建立植物整株三维可视化模型,并根据实际测量及模型提取的参数,对比分析 3 种植物根系构型的差异,以期为整株植物三维可视化模拟提供一种新的方法,并可以为植物根系参数的提取与分析提供一种思路。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

所选研究区位于陕西省延安市安塞区高桥乡(109°03'40"—109°20'10"E,36°30'50"—36°43'15"N),地处黄土高原丘陵区,地貌复杂,是温带大陆性半干旱气候,年均降水量 531 mm。该地区的土壤主要为黄绵土,土壤质地疏松,且土壤中有机质含量极低,在山坡上存在大量梯田,坡体脆弱,水土流失严重。该地区的优势植物种有白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、狼牙刺(*Sophora davidii*)、酸枣(*Ziziphus jujuba* Mill. var. *spinosa*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、小叶杨(*Populus simonii*)等。

### 1.2 研究对象

在经过实地探查后,选取黄土区分布较为广泛的 3 种护坡植物酸枣(*Ziziphus jujuba* Mill. var. *spinosa*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、狼牙刺(*Sophora davidii*) 3 种灌木。在所选研究区,根据调查的实际情况,选取 3 种灌木各 6 株。考虑到要排除其余植物根系的干扰,所选植株周围应无其余较大的灌木或乔木,且为单株植物,方便在根系挖掘过程中对所选植株根系进行辨别。表 1 为所选植物基本情况调查表。

### 1.3 根系样本采集

在试验前两个月,人工拔除所选植株周围的其余草本根系,尽量减少非目标植株根系对所采集根系的干扰,并用薄膜覆盖。采集时,记录所选植物的基本信息,主要包括株高、冠幅、基径等,并且在采集前使

用彩色喷漆对植物地上部以及地下部的上下坡方向进行标注。对植物地上部使用固定喷雾进行喷涂以保证植物地上部的形态,并减少植物地上部水分的散失。根系样本采集时,逐层挖掘根系,并配合使用毛刷等工具,小心清理浮土,尽量保证不破坏根系的生长方向和角度。在挖掘过程中,记录根系在土壤中的原位数据,方便后续参考。将整株植物采集后带回室内,从根茎相接处使用锯子将地上部与地下部锯开。

表 1 植物基本情况调查表

Table 1 Investigation on the basic situation of target plants

	植株	株高/cm	冠幅/cm	基径/cm	年龄/a
酸枣	1	119.8	94.8	2.87	6
	2	124.1	94.6	2.45	9
	3	102.5	40.3	1.46	5
	4	129.8	76.5	2.29	6
	5	136.2	52.1	2.01	5
	6	86.4	39.9	1.72	4
沙棘	1	136.8	124.1	3.85	6
	2	163.2	99.8	2.52	5
	3	136.9	133.3	2.90	9
	4	135.3	169.1	2.68	8
	5	135.2	142.5	2.74	8
	6	165.4	189.4	3.25	7
狼牙刺	1	196.2	150.1	3.12	11
	2	109.2	135.9	6.31	15
	3	159.2	97.0	2.58	8
	4	102.1	127.6	3.41	6
	5	85.8	86.7	1.66	5
	6	150.1	131.8	2.10	9

### 1.4 植物地上部三维可视化建模

对于所采集的植物地上部样本,使用手持三维扫描仪(FreeScan UE)进行扫描。该仪器对环境中的光照强度要求较高,在光照强度较大时,无法对其进行扫描,所以植物地上部的扫描需要在室内进行。在使用过程中,需要使用标记点对所需扫描的植株样本进行标记点的粘贴。在粘贴过程中,注意所粘贴的标记点数量足够进行扫描,在扫描仪能扫描的范围内至少有 4 个标记点,且不可在弯曲度较高的部位粘贴标记点。在扫描前,将手持三维扫描仪各部分连接好,使用标定板对仪器进行标定,以保证所得到地上部模型的准确性。标定后,新建工程,对已粘贴好标记点的样本进行扫描,扫描得到植物地上部的点云数据,并进行后处理,得到最终的点云数据,经 Solidworks 软件渲染后建立植物地上部三维模型。在扫描结束后,摘除样本的标记点,将其放入烘箱中 105 °C 烘干半小时,60 °C 烘干至恒重,使用天平进行称重,得到植物地上部的干重。

### 1.5 根系三维可视化模拟

将所采集的根系按照挖掘时所记录的原位数据固定在架子上,尽可能还原根系的原始形态,使用 FasTrak 运动追踪仪获取根系的坐标,并将所得到的数据导入到 AutoCAD 中进行转化,转化为 .dwg 文件,将其导入到 SketchUp 软件中进行建模,得到根系的三维可视化模型,对得到的模型进行参数提取。在试验结束后,烘干称重得到植物根系的干重。

### 1.6 植物根系形态参数计算

根据所得到的模型,提取得到根系的总根长、总表面积、总体积,并根据得到的参数计算得到根冠比(Root-shoot ratio, R/T)、比根长(Specific root length, SRL)、比表面积(Specific root area, SRA)、根长密度(Root length density, RLD)、根表面积密度(Root surface area density, RSAD)。比根长为根系单位质量的根长。比表面积指的是单位质量所含的根系表面积的值。根长密度指的是单位体积根际土壤内所含有的目标根系的长度。根表面积密度为单位体积根际土壤范围内所含有的目标根系的表面积。

$$SRL=L/W \quad (1)$$

$$SRA=A/W \quad (2)$$

$$RLD=L/V \quad (3)$$

$$RSAD=A/V \quad (4)$$

式中: $L$  为根系总长度(cm); $W$  为根系干重(g); $A$  为根系总表面积( $\text{cm}^2$ ); $V$  为根系所占土体体积( $\text{cm}^3$ ),计算根系所占土体体积时,将其近似看作一个圆锥体,计算公式为:

$$V=(D/2)^2 \cdot \pi h/3 \quad (5)$$

式中: $D$  为根系根幅(cm); $h$  为根系深度(cm)。

### 1.7 植物根系构型参数计算

植物根系构型参数主要有根尖数、分叉数、Fitter 拓扑指数等。Fitter 提出的根系拓扑结构有鱼尾型分支(Herringbone branching)和叉状分支(Dichotomous branching)两种极端模式,Fitter 拓扑指数公式为:

$$TI=\lg A/\lg M \quad (6)$$

式中:TI 为拓扑指数; $A$  为最长通道的内部链接数; $M$  为外部链接总数。TI 值越接近 1,越近于鱼尾型分支;TI 越接近 0.5 表明根系越近似于叉状分支。

## 2 结果与分析

### 2.1 整株植物三维可视化模拟

植物地上部与地下部按照比例结合后的整株三维可视化模型图见图 1—3。所得到的模型可以清晰地看到植物地上部以及地下部在各个方向的形态特征。该模型为三维实体矢量模型图,对于根系的细节还原度高,如根系的弯曲度和细根都得到了较好的还原。根据所得到的植物整株三维可视化模型图可以看出,不同植物地上部与地下部之间空间分布及资源分配存在着很大的差异。从图 1 可以看出,6 株酸枣地上部与地下部水平分布范围差别较大,地上部水平分布范围较小,且其主根较为明显。沙棘(图 2)地上部枝叶生长较为茂盛,对降水的截留效果较好。狼牙刺(图 3)根系分支较多,分布范围较广,根系对于土壤的缠绕加固作用较好。

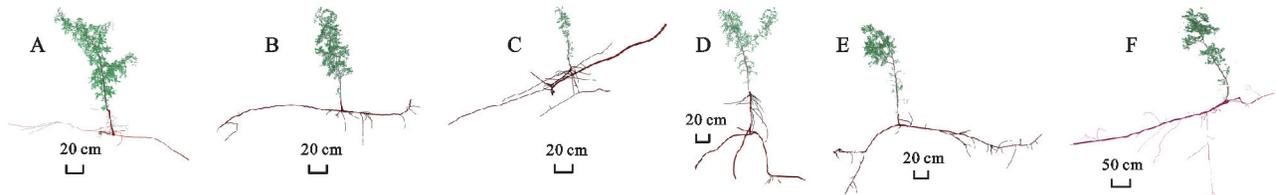


图 1 酸枣整株植物三维可视化模拟图

Fig. 1 Model diagram of *Ziziphus jujuba* Mill. var. *spinosa* whole plant

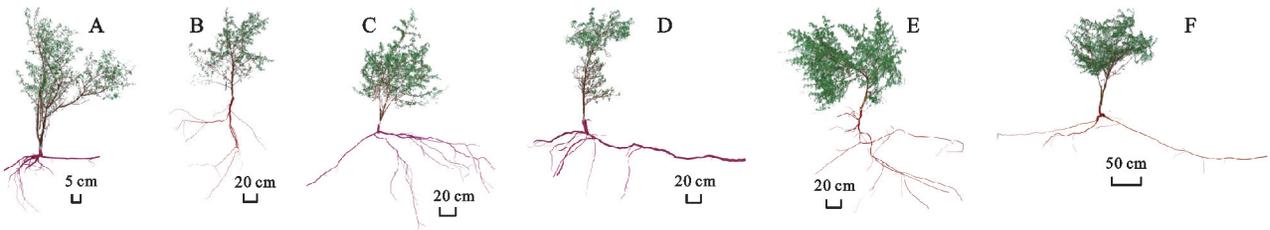


图 2 沙棘整株植物三维可视化模拟图

Fig. 2 Model diagram of *Hippophae rhamnoides* whole plant

### 2.2 3 种护坡植物参数对比分析

2.2.1 植物地上部与地下部生长优势的对比 由图 4 可知,3 种护坡植物的根幅由大到小依次为酸枣(284.85 cm)>沙棘(237.86 cm)>狼牙刺(170.44 cm),但

是这 3 种植物根幅差异不显著。酸枣和狼牙刺的根深存在显著差异,狼牙刺根深显著高于酸枣,为 146.72 cm;沙棘和其余两者之间不存在显著差异,酸枣根深在这 3 种植物中最小,为 95.82 cm( $p<0.05$ )。3 种植物的

根幅与根深的比值存在着显著差异,3种植物根幅与根深的比值分别为酸枣(3.41) > 沙棘(2.26) > 狼牙刺(1.10)。对于植物冠幅与根幅的比值,沙棘和狼牙刺没有显著差异,酸枣和沙棘、狼牙刺存在显著差异( $p < 0.05$ );酸枣、沙棘、狼牙刺冠幅与根幅的比值分别为0.25, 0.69, 0.73,均小于1,说明3种植物根系在水平方向上占有优势。酸枣与沙棘、狼牙刺株高与根深的比值存在显著的差异( $p < 0.05$ ),酸枣和沙棘株高与根深的比值均大

于1,酸枣与沙棘均为植物地上部生长高度大于根系地下部扎深的深度,比值为1.45, 1.44;而狼牙刺该比值小于1,说明狼牙刺根系向下扎的深度大于植株生长的高度。沙棘和狼牙刺的根冠比无显著差异,值都小于1,分别为0.72, 0.71,说明沙棘和狼牙刺在生物量的分配上,地上部植株的生物量大于根系生物量;酸枣的根冠比显著高于沙棘和狼牙刺的根冠比,其根冠比大于1,说明酸枣地下部生物量大于地上部。

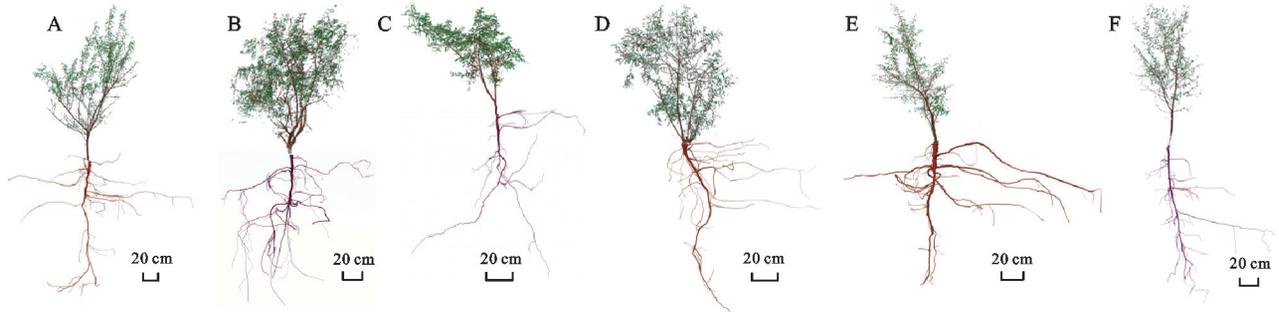


图3 狼牙刺整株植物三维可视化模拟图

Fig. 3 Model diagram of *Sophora davidii* whole plant

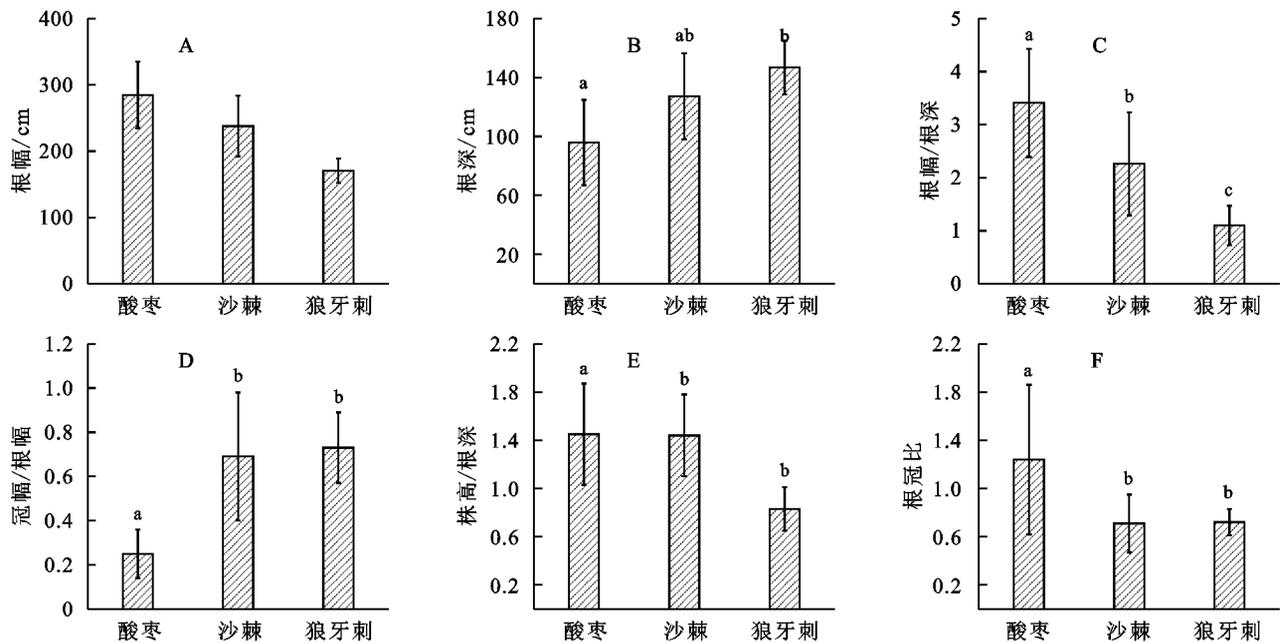


图4 植物地上部与地下部生长优势对比

Fig. 4 Comparison of growth superiority between aboveground and underground parts of plants

2.2.2 3种护坡植物根系参数对比分析 图5为黄土区3种护坡植物根系总根长、总表面积、总体积的对比图。从图中可以看出,除根系总长度外,根系总表面积、总体积没有显著的差异。狼牙刺的总根长显著高于酸枣总根长( $p < 0.05$ ),这3种植物的总根长从大到小依次为狼牙刺(1486.88 cm)、沙棘(1 000.28 cm)、酸枣(894.78 cm)。对比3种植物的根系总表面积得到,根系总表面积的大小关系与根系总长度相同,均为狼牙刺(1 991.21  $\text{cm}^2$ ) > 沙棘(1 814.32  $\text{cm}^2$ ) > 酸枣(1 577.69  $\text{cm}^2$ )。沙棘根系的总体积在这3种植物中最大,为

305.53  $\text{cm}^3$ ;其余2种植物根系的总体积相差不大,分别为酸枣(237.41  $\text{cm}^3$ )、狼牙刺(256.45  $\text{cm}^3$ )。

对3种植物进行单因素方差分析(表2)得到3种植物的比根长、比表面积、根长密度、根表面积密度均没有显著的差异。

### 2.3 3种护坡植物根系构型参数对比分析

根据表3可以得到,酸枣和沙棘的分叉数不存在显著的差异,而这两者均与狼牙刺存在显著差异( $p < 0.05$ )。狼牙刺的分叉数最大,为116。3种植物的根尖数存在显著差异,分别为酸枣(60)、沙棘(137)、狼

牙刺(281)。酸枣和狼牙刺根系的平均直径差异显著 ( $p < 0.05$ ), 分别为 8.07 mm 和 4.87 mm。酸枣、沙棘、狼牙刺的 Fitter 拓扑指数分别为 0.915, 0.802,

0.771, 均接近于鱼尾型分支, 沙棘和狼牙刺的 Fitter 拓扑指数没有显著的差异, 酸枣的 Fitter 拓扑指数显著高于其余两者 ( $p < 0.05$ )。

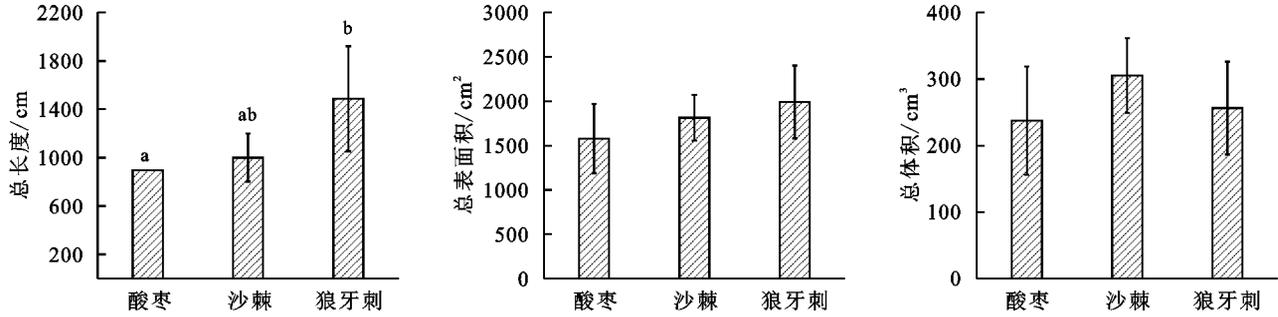


图 5 根系基本形态参数

Fig. 5 Root morphological parameters

表 2 植物比根长、比表面积、根长密度、根表面积密度

Table 2 Plant specific root length, specific root area, root length density, root surface area density

参数	酸枣	沙棘	狼牙刺
比根长/( $\text{cm} \cdot \text{g}^{-1}$ )	$5.54 \pm 3.54$	$5.27 \pm 1.06$	$8.49 \pm 7.24$
比表面积/( $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	$8.01 \pm 2.62$	$8.88 \pm 0.80$	$12.28 \pm 12.85$
根长密度/( $\times 10^{-4} \cdot \text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$6.39 \pm 3.44$	$10.46 \pm 6.38$	$12.96 \pm 0.62$
根表面积密度/( $\times 10^{-4} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$9.60 \pm 3.47$	$21.51 \pm 15.93$	$17.45 \pm 2.69$

表 3 3 种护坡植物根系构型参数对比

Table 3 Comparison of root architecture parameters of 3 slope protection plants

物种	分叉数	根尖数	平均直径/mm	Fitter 拓扑指数
酸枣	$64 \pm 21a$	$60 \pm 38a$	$8.07 \pm 0.46a$	$0.915 \pm 0.008a$
沙棘	$53 \pm 4a$	$137 \pm 42b$	$6.70 \pm 1.17ab$	$0.802 \pm 0.040b$
狼牙刺	$116 \pm 51b$	$281 \pm 48c$	$4.87 \pm 0.44b$	$0.771 \pm 0.057b$

2.4 坡上坡下基本参数对比分析

表 4 为 3 种植物根系上坡方向和下坡方向总根长的对比, 3 种植物根系的总根长均在上坡方向占比较多, 3 种植物根系在上坡方向的总根长所占百分比分别为酸枣(55.27%)、沙棘(60.23%)、狼牙刺(53.13%), 根系的总长度均表现为在上坡方向占有优势。

表 4 上、下坡方向根系总长度对比

Table 4 Comparison of total root length in up-slope and down-slope

物种	上坡方向		下坡方向	
	总长度/cm	所占百分比/%	总长度/cm	所占百分比/%
酸枣	$494.13 \pm 94.66$	$55.27 \pm 10.59$	$431.44 \pm 55.12$	$44.73 \pm 6.17$
沙棘	$621.13 \pm 147.60$	$60.23 \pm 14.31$	$379.15 \pm 46.71$	$39.77 \pm 4.53$
狼牙刺	$783.20 \pm 107.02$	$53.13 \pm 7.26$	$703.68 \pm 95.35$	$46.87 \pm 6.47$

根据表 5 可以得到 3 种植物根系上坡方向和下坡方向总表面积相差不大, 但也表现为上坡方向占有优势, 酸枣、沙棘、狼牙刺根系上坡方向的总表面积所占百分比分别为 51.01%, 58.12%, 51.24%。

表 6 为 3 种植物根系上坡方向和下坡方向根系总体积的对比。根据表 6 可以看出, 3 种植物的总体

积均在上坡方向占有优势, 上坡方向根系总体积占比均大于 50%。酸枣、沙棘、狼牙刺根的总表面积在上坡方向所占百分比分别为 53.48%, 53.33%, 54.70%。

表 5 上、下坡方向根系总表面积对比

Table 5 Comparison of total root area in up-slope and down-slope

物种	上坡方向		下坡方向	
	总表面积/ $\text{cm}^2$	所占百分比/%	总表面积/ $\text{cm}^2$	所占百分比/%
酸枣	$804.78 \pm 185.79$	$51.01 \pm 11.77$	$772.91 \pm 55.15$	$48.99 \pm 3.50$
沙棘	$1054.40 \pm 232.86$	$58.12 \pm 12.83$	$759.92 \pm 42.45$	$41.88 \pm 2.34$
狼牙刺	$1020.30 \pm 207.94$	$51.24 \pm 10.44$	$970.91 \pm 96.69$	$48.76 \pm 4.86$

表 6 上、下坡方向根系总体积对比

Table 6 Comparison of total root volume in up-slope and down-slope

物种	上坡方向		下坡方向	
	总体积/ $\text{cm}^3$	所占百分比/%	总体积/ $\text{cm}^3$	所占百分比/%
酸枣	$126.96 \pm 39.80$	$53.48 \pm 16.76$	$110.45 \pm 43.76$	$46.52 \pm 18.43$
沙棘	$162.93 \pm 36.13$	$53.33 \pm 11.82$	$142.60 \pm 32.45$	$46.67 \pm 10.62$
狼牙刺	$140.30 \pm 35.60$	$54.70 \pm 13.88$	$116.18 \pm 34.17$	$45.30 \pm 13.32$

对比表 4, 表 5, 表 6 可以得到沙棘根系的总长度、总表面积在上坡方向所占百分比均大于其余两者, 表明沙棘根系相较于其余 2 种植物根系在坡体条件下更倾向于在上坡方向进行生长。

3 讨论

3.1 植物三维可视化模拟的研究

植物三维可视化模拟是目前植物研究的一个重

要方向,为研究植物生长趋势及其对环境的适应提供了一种方法。本研究将植物地上部与地下部的三维可视化模型结合起来,建立了整株植物的三维可视化模型。本研究使用 FasTrak 三维数字化仪获取植物的三维坐标数据,该仪器在之前就较多用于根系三维坐标的获取<sup>[9]</sup>,相较于手工测量更为准确,得到的数据精确度更高,且通过对节点坐标数据的确定,也可以很好地确定节点坐标位置。杨乐<sup>[10]</sup>、朱晋宇<sup>[11]</sup>等在研究中使用 FasTrak 测定根系坐标并结合 Visual C++ 和 OpenGL 软件进行模拟,得到的坐标数据较为准确,但是所得到的模型只可进行生长动态模拟,不能进行参数提取。还有部分研究使用 FasTrak 测定坐标并结合 AMAPmod 软件进行模拟,但所得到的三维模型根系弯曲部分还原相对较差。SketchUp 软件是商用的软件,具有二次开发的功能,其中有很多二次开发的插件。SketchUp 软件所建立的模型为三维矢量模型,结合三维数字化仪使得模型还原度高。在之前的研究中,宋恒川等<sup>[12]</sup>使用手工测量结合 SketchUp 软件对乔木根系进行了三维模拟,但是由于数据获取为人工测量,有较大的误差。本研究相较于之前的 SketchUp 所建立的根系模型更为准确,且配合使用了相关插件,使得模型可以更好地还原根系的三维结构。本研究使用 FreeScan UE 手持三维激光扫描仪对植物地上部扫描后建立了植物地上部的模型。已有部分研究使用 FreeScan UE 激光扫描仪进行三维可视化模拟<sup>[13-14]</sup>,得到的模型曲面重建度高,且精度较高,所以对于较为复杂且曲面较多的植物地上部可以较好地模拟。综上所述,建立的整株植物三维可视化模型对植物原始形态还原度高,并将这种方法运用到实际中,比如运用到园林景观设计及水土保持工程制图的研究中。

### 3.2 植物根系构型参数对比分析

植物地上部与地下部相关参数的比值可以反映植物地上与地下的资源与空间分布情况。在胁迫环境中,植物根系性状对植物资源的获取所起到的作用至关重要。植物根冠比是衡量植物对环境适应的一个重要指标<sup>[15]</sup>。之前的研究表明,植物的根冠比会随着植株大小的增加而减小<sup>[16]</sup>。在干旱胁迫下,植物根冠比会增大,植物分配更多的资源到根系,从而使根系可以从环境中获取足够的水分和养分<sup>[15,17]</sup>。本研究的 3 种植物中,仅有酸枣的根冠比大于 1,说明酸枣根系生物量大于地上部生物量,其根系能够更好地吸收土壤中水分养分以供给植物地上部的生长,也说明酸枣可以较好地适应干旱胁迫。植物根系根幅与根深的比值可以反映根系在水平方

向和竖直方向分布的差异。3 种植物根幅与根深的比值有显著差异,根系在分布方式上不同,酸枣根幅/根深的值最大,与酸枣根蘖性繁殖的特点有一定关系,酸枣根系在土壤中分布较浅且分布范围较广,适合去探索土壤浅层的养分和水分,这与之前的研究结果相同<sup>[18]</sup>。3 种植物冠幅和根幅的比值均小于 1,说明这 3 种植物通过根系在水平方向扩展分布范围来吸收水分和养分。植物的株高与根深的比值与植物所处的生长环境有关,植物在养分充足的地方,植物生长迅速,植物地上部生长相对较快,植物根系分布在土壤中较浅的区域,这种情况会使得植物株高与根深的比值较大。本研究中,狼牙刺株高与根深的比值小于 1,狼牙刺为深根型植物,根系较为发达,更有利于利用深层土壤水分<sup>[19]</sup>。

植物根系可以表现出高度的可塑性,从而来适应根际土壤环境中水分和养分条件的变化。根际土壤养分的匮乏通常会使得植物对于地下部资源分配变多,这也体现在一些根系的参数上<sup>[20]</sup>,比如根系总长度、总表面积等。根系资源分配的增加,增加了根系在土壤中延伸的长度和根系与土壤的接触面积,以达到提高水分、养分吸收利用的目的<sup>[21-22]</sup>。之前的研究表明<sup>[23]</sup>,适度的干旱胁迫使得植物对环境变化表现出积极的响应,但是过度的干旱会抑制植物根系的生长。植物根系的比根长和比表面积可以反映植物根系对于资源吸收的能力<sup>[24]</sup>。处在发育前期的植物生长速率较快,根系通过伸长生长在根际土壤中探寻养分,这也使得根系的比根长和比表面积较大<sup>[25]</sup>。根长密度和根表面积密度越大的根系,根系在土壤中分布较为密集,根际土壤中细根较多,对土壤的黏结作用较强,根系抗侵蚀和抗剪的性能也较好<sup>[26-27]</sup>,对边坡防护效果也更好。根系的拓扑参数能够体现植物对于土壤中水分养分条件的响应。3 种植物均接近于 1,接近于鱼尾型分支,可以通过增加根系链接长度、减少根系内部的重叠,从而减少根系自身对养分的竞争,提高水分和养分的利用效率,从而更好在干旱缺水条件下进行生长。

不同植物护坡效果的不同与其根系构型有着很大的关系。在之前对于护坡植物的研究中发现<sup>[28]</sup>,根系越长,其分叉数也越多,表面积也越大,根系的抗拉强度也随之变大,根与土壤间摩擦变大。根系构型也决定了植物根系与土壤的接触面积,也决定了植物在边坡防护中所发挥的重要作用。所选的 3 种植物中,狼牙刺根系分叉数、根尖数相对较大,但根系平均直径相对较小,说明狼牙刺根系侧根生长能力较强,根系缠绕加固作用较强,更适合用于植物护坡中。

### 3.3 植物根系形态对异质埋深的响应

生长在边坡上的植物会受到不同机械应力的影响,这些机械应力主要包括风力、土壤自重以及植物自身的重量等。边坡上机械应力的不同会影响植物的生长形态,还可能对其根系的形态产生影响。但是在之前的研究中,关于植物根系与坡体之间响应的研究相对较少。植物根系形态在坡体上的生长受到很多因素的影响,比如不同的坡度、坡上坡下的非对称埋深的异质环境均会对植物根系形态产生影响。上坡方向和下坡方向的坡体非对称异质埋深对植物根系的形态也有较大的影响。根系的锚固力与边坡的坡度和根系在土壤中的分布与形态密切相关,并且上坡方向的根系与锚固阻力是正相关的<sup>[29]</sup>。本研究中,3种灌木根系的总长度、总表面积、总体积大都在上坡方向占有优势,说明这3种灌木均具有较好的锚固阻力,可以对边坡进行很好的防护。

## 4 结论

本研究建立了整株植物三维可视化模型图,还原了植物原始形态。基于三维模型的构型参数提取与分析得到:(1)不同植物地上部与地下部之间空间分布及资源分配存在着很大差异;(2)3种植物根幅、总表面积、总体积、比根长、比表面积、根长密度和根表面积密度没有显著差异;(3)3种植物的地上部与地下部参数的比值均有显著的差异;(4)酸枣、沙棘、狼牙刺的Fitterer拓扑指数接近于1,均接近于鱼尾型分支;(5)3种植物根系总根长、总表面积、总体积均在上坡方向占优,在上坡方向均大于50%。本研究丰富了国内植物三维数字模型的图库,也为植物根系生态适应性的研究提供了新的思路、方法与数据支撑。

### 参考文献(References):

- [1] 刘彦随,李裕瑞.黄土丘陵沟壑区沟道土地整治工程原理与设计技术[J].农业工程学报,2017,33(10):1-9.  
Liu Y S, Li Y R. Engineering philosophy and design scheme of gully land consolidation in Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(10):1-9.
- [2] 晏长根,梁哲瑞,贾卓龙,等.黄土边坡坡面防护技术综述[J].交通运输工程学报,2023,23(4):1-22.  
Yan C G, Liang Z R, Jia Z L, et al. Review on surface protection technologies of loess slope[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023,23(4):1-22.
- [3] 元波,许爱兰.公路工程中高边坡预应力锚索施工技术研究[J].运输经理世界,2023,(27):31-33.  
Qi B, Xu A L. Research on construction technology of prestressed anchor cables for medium and high slopes in highway projects[J]. Transport Business China, 2023, (27):31-33.
- [4] 朱兆华,赵其国,赖庆旺,等.我国南方工程边坡土壤生态修复技术创新的认知与实践[J].土壤,2017,49(4):643-650.  
Zhu Z H, Zhao Q G, Lai Q W, et al. Cognition and practice on technological innovation of ecological restoration of engineering slope soil in South China[J]. Soils, 2017,49(4):643-650.
- [5] 黄道平,雷加,王成,等.植物冠层三维结构获取技术的研究进展[J].计算机应用与软件,2011,28(12):108-111,114.  
Huang D P, Lei J, Wang C, et al. Development of research on acquisition technology of three-dimensional structure of plant canopy[J]. Computer Applications and Software, 2011,28(12):108-111,114.
- [6] Diggle A J. Rootmap: A root growth model[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 1988, 30(1/2):175-180.
- [7] 田悦,赵萍,李永奎,等.虚拟植物研究现状与建模方法分析[J].江苏农业科学,2018,46(22):14-19.  
Tian Y, Zhao P, Li Y K, et al. Analysis of the current status of virtual plant research and modeling methods[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018,46(22):14-19.
- [8] 李宏斌.基于三维可视化模型的植物根系构型和拓扑参数提取[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2023.  
Li H B. Extraction of Plant Root Configuration and Topological Parameters Based on 3D Visualization Model[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [9] Danjon F, Reubens B. Assessing and analyzing 3D architecture of woody root systems, a review of methods and applications in tree and soil stability, resource acquisition and allocation[J]. Plant and Soil, 2008,303(1):1-34.
- [10] 杨乐,彭军,龙兰,等.基于三维动态生长模型的水稻根系模拟[J].湖南农业大学学报:自然科学版,2022,48(5):613-618.  
Yang L, Peng J, Long L, et al. Rice root system simulation research based on three dimensional dynamic growth model[J]. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences, 2022,48(5):613-618.
- [11] 朱晋宇,惠放,李苗,等.氮水平对盆栽沙培番茄苗期根系三维构型与氮素利用的影响[J].农业工程学报,2015,31(23):131-137.  
Zhu J Y, Hui F, Li M, et al. Effect of different nitrogen concentrations on roots architecture and nitrogen use efficiency in potting tomato seedling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015,31(23):131-137.

- [12] 宋恒川,陈丽华,汲文宪,等.基于 SketchUp 的林木根系形态模拟研究[J].广东农业科学,2012,39(14):186-188.  
Song H C, Chen L H, Ji W X, et al. Research on tree root morphology simulation based on SketchUp [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2012,39(14):186-188.
- [13] 夏军勇,高睿杰,钟飞.基于 KDTree 改进的 Super-4PCS+ICP 算法在点云配准中的应用研究[J].激光与红外,2023,53(9):1333-1338.  
Xia J Y, Gao R J, Zhong F. Study on the application of Super-4 PCS + ICP algorithm based on KDTree improvement in point cloud alignment [J]. Laser & Infrared, 2023,53(9):1333-1338.
- [14] 欧阳静宣,徐升亮,肖礼兵,等.基于三维激光扫描的摩崖石刻重建技术与精度研究[J].特种铸造及有色合金,2023,43(12):1724-1728.  
Ouyang J X, Xu S L, Xiao L B, et al. Reconstruction technology and accuracy of cliff stone carvings based on 3D laser scanning [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023,43(12):1724-1728.
- [15] 石杨,尹希龙,李王胜,等.PEG 模拟干旱胁迫对耐旱型与干旱敏感型甜菜种质形态指标的影响[J].中国农学通报,2022,38(29):45-51.  
Shi Y, Yin X L, Li W S, et al. PEG simulated drought stress: Effects on morphological indices of drought-tolerant and drought-sensitive sugar beet germplasms [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38 (29):45-51.
- [16] Bray J R. Root production and the estimation of net productivity[J]. Canadian Journal of Botany, 1963,41 (1):65-72.
- [17] 张绪成,上官周平.施氮对不同抗旱性冬小麦叶片光合与呼吸的调控[J].应用生态学报,2006,17(11):2064-2069.  
Zhang X C, Shanguan Z P. Effects of nitrogen fertilization on leaf photosynthesis and respiration of different drought-resistance winter wheat varieties [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006,17(11):2064-2069.
- [18] 孙震洲.延崇高速土石边坡灌木根系特征及抗拔力研究[D].北京:北京林业大学,2020.  
Sun Z Z. Study on Root Characteristics and Pull-out Resistance of Shrubs on Soil Slope of Yanqing-Chongli Highway [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [19] 韩立冬.浅析子午岭林区狼牙刺育苗栽培技术[J].种子科技,2020,38(22):35-36.  
Han L D. Analysis on seedling raising and cultivation techniques of *Sophora davidii* in Ziwuling forest area [J]. Seed Science & Technology, 2020,38(22):35-36.
- [20] 王继伟,赵成章,赵连春,等.内陆盐沼芦苇根系形态及生物量分配对土壤盐分因子的响应[J].生态学报,2018,38(13):4843-4851.  
Wang J W, Zhao C Z, Zhao L C, et al. Response of root morphology and biomass of *Phragmites australis* to soil salinity in inland salt marsh [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(13):4843-4851.
- [21] 闫曼曼,郑剑超,张巨松,等.调亏灌溉对海岛棉光合物质生产与分配的影响[J].干旱区研究,2016,33(6):1351-1357.  
Yan M M, Zheng J C, Zhang J S, et al. Effects of regulated deficit irrigation on production and distribution of photosynthetic matter in *Gossypium barbadense* L [J]. Arid Zone Research, 2016,33(6):1351-1357.
- [22] Jefferies R A. Drought and chlorophyll fluorescence in field-grown potato (*Solanum tuberosum*) [J]. Physiologia Plantarum, 1994,90(1):93-97.
- [23] Xu G W, Song K J, Lu D K, et al. Influence of water management and nitrogen application on rice root and shoot traits [J]. Agronomy Journal, 2019, 111 (5): 2232-2244.
- [24] Yoshimura K, Masuda A, Kuwano M, et al. Programmed proteome response for drought avoidance/tolerance in the root of a C(3) xerophyte (wild watermelon) under water deficits [J]. Plant & Cell Physiology, 2008, 49 (2):226-241.
- [25] 赵艳云,陆兆华,夏江宝,等.黄河三角洲贝壳堤岛 3 种优势灌木的根系构型[J].生态学报,2015,35(6):1688-1695.  
Zhao Y Y, Lu Z H, Xia J B, et al. Root architecture and adaptive strategy of 3 shrubs in Shell Bay in Yellow River Delta [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35 (6):1688-1695.
- [26] 熊寿德,段青松,方雪峰,等.三江并流区水电站消落带适生草本植物根系固土能力[J].生态学报,2022,42 (17):7210-7221.  
Xiong S D, Duan Q S, Fang X F, et al. Soil-fixing capacity of suitable herbaceous plant roots in the water-level-fluctuating zone of hydropower station in the Three Parallel Rivers [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(17):7210-7221.
- [27] 王通.植被改善土壤侵蚀和水分流失效应分析[J].海河水利,2023(7):8-10.  
Wang T. Vegetation effects on soil erosion and water loss mitigation [J]. Haihe Water Resources, 2023(7): 8-10.
- [28] 解明曙.林木根系固坡土力学机制研究[J].水土保持学报,1990,4(3):7-14,50.  
Xie M S. A study on the soil mechanical role of tree roots in the stability of slopes [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1990,4(3):7-14,50.
- [29] Sun H L, Li S C, Xiong W L, et al. Influence of slope on root system anchorage of *Pinus yunnanensis* [J]. Ecological Engineering, 2008,32(1):60-67.