

DOI: 10.11686/cyxb2024188

http://cyxb.magtech.com.cn

王光沛, 魏艳, 谌芸. 紫花苜蓿根系构型和力学特征对生长时间的响应. 草业学报, 2025, 34(4): 82-92.

WANG Guang-pei, WEI Yan, CHEN Yun. Changes in *Medicago sativa* root system architecture and mechanical characteristics during the growing period. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(4): 82-92.

## 紫花苜蓿根系构型和力学特征对生长时间的响应

王光沛, 魏艳, 谌芸\*

(西南大学资源环境学院, 水土保持生态修复重庆市重点实验室, 重庆 400715)

**摘要:**为探究紫色土区紫花苜蓿根系构型和力学特征随生长时间的变化规律,于播种后60、90、120和150 d时采集整株根系进行扫描获取形态与拓扑参数,并进行整株抗拔和单根抗拉试验分别获得根系抗拔和抗拉强度。结果表明:1)随生长时间增加,紫花苜蓿的总根长、总根表面积、总根体积和根尖数均显著增加,其中根长和根尖数增长速率最高的时间段为90~120 d,根表面积和根体积为120~150 d,根系的分形维数和分形丰度亦显著增加,150 d相较于60 d时分别增加了7.50%、28.63%;2)根系抗拔/拉强度与根系直径呈负幂函数关系,且同一直径的根系抗拔/拉强度随生长时间增加先增大后减小,峰值分别出现在90和120 d;3)相关分析表明土壤自然含水率与紫花苜蓿根系抗拔/抗拉强度呈极显著正相关( $P < 0.01$ ), $>0.25$  mm水稳性团聚体含量与平均连接长度呈显著负相关( $P < 0.05$ ),冗余分析显示根系分形丰度和分形维数对根系抗拔/拉强度的贡献较显著( $P < 0.05$ ),分别为75.1%和13.6%。研究结果可为紫色土区坡地水土流失治理中紫花苜蓿科学应用和效果预测提供一定的理论依据。

**关键词:**水土流失;草本植物;根系形态;分形丰度;抗拉强度

## Changes in *Medicago sativa* root system architecture and mechanical characteristics during the growing period

WANG Guang-pei, WEI Yan, CHEN Yun\*

College of Resources and Environment, Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration of Chongqing, Southwest University, Chongqing 400715, China

**Abstract:** The aim of this study was to explore the variations in root system architecture and mechanical characteristics of *Medicago sativa* plants in a purple soil area during the growing season after sowing. The whole root system was collected from *M. sativa* plants at 60, 90, 120 and 150 days after sowing, and the morphological and topological parameters were measured. The root pull-out strength and tensile strength were determined by pull-out resistance tests and single root tensile tests, respectively. It was found that: 1) The total root length, total root surface area, total root volume, and number of root tips of *M. sativa* increased significantly during the growing period. The greatest increase in root length and largest increase in the number of root tips was between 90 d and 120 d, whereas the largest increases in root surface area and root volume were between 120 d and 150 d. The fractal dimension and fractal abundance of *M. sativa* roots were significantly higher, by 7.50% and 28.63%, respectively, at 150 d than at 60 d. 2) There was a negative power function relationship between root pull-out/tensile strength and

收稿日期:2024-05-21;改回日期:2024-08-09

基金项目:国家自然科学基金项目(42377324),西南大学教育教学改革研究项目(2022JY074)和重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202100218)资助。

作者简介:王光沛(2000-),男,重庆彭水人,在读硕士。E-mail: 1933152286@qq.com

\*通信作者 Corresponding author. E-mail: sy22478@126.com

root diameter, and the root pull-out/tensile strength of roots of the same diameter increased initially and then decreased during the growing period, with the highest values at 90 d and the lowest values at 120 d. 3) Correlation analyses showed that the soil water content was significantly positively correlated with the pull-out or tensile strength of *M. sativa* roots ( $P < 0.01$ ), and the proportion of  $>0.25$  mm water-stable aggregates was negatively correlated with the average link length ( $P < 0.05$ ). The results of a redundancy analysis showed that the fractal abundance and fractal dimension of roots contributed significantly to the pull-out or tensile strength of *M. sativa* roots ( $P < 0.05$ ), with respective contributions of 75.1% and 13.6%. The results of this study provide a theoretical basis for the use of *M. sativa* to control soil erosion in purple soil areas and to predict its effectiveness in this role.

**Key words:** soil and water loss; herbaceous plants; root morphology; fractal abundance; tensile strength

近年来,利用草本植物根系加固边坡和防治土壤侵蚀的方法已经被广泛应用,由于植物根系在土壤中生长发育形成复杂的根系网络,可将土体内部剪应力转化为自身的拉应力,从而达到固结土体的效果<sup>[1]</sup>。由紫色砂页岩发育而成的紫色土,其结构疏松且土层浅薄,抗侵蚀能力较差,导致紫色土区土地退化和水土流失问题严重,阻碍了该区土壤环境及农业的可持续发展<sup>[2]</sup>。应用草本植物防治坡耕地的土壤侵蚀,改善土壤理化性质,提高土壤肥力,一直是水土保持领域研究的热点<sup>[3]</sup>。草本植物根系构型能直观地表现其根系在土壤中的生长情况,常用根系的形态特征和拓扑结构特征来表示,不仅反映植物根系对土壤环境的生长适应情况,还体现根系的固土效果<sup>[4]</sup>。根长等根系形态指标反映了根系的体量大小<sup>[5]</sup>,分形参数反映了根系的分布范围及分枝情况<sup>[6]</sup>,拓扑指数反映了根系分枝和空间拓展模式<sup>[7]</sup>,平均连接长度是根系各节点之间的平均长度,能表征根系的分枝生长能力<sup>[8]</sup>。抗拉拔力学特性则反映根系抗拔/抗拉能力及抵抗抗变形的能力<sup>[9]</sup>。近年来的研究表明,不同植物单根抗拉力学特性差异显著,由于植物种类的不同,其根系抗拉拔参数(如抗拉力、抗拉强度、弹性模量等)与直径和根长等根系参数之间呈线性相关或非线性相关<sup>[10]</sup>。部分学者研究集中在根系化学成分,认为根系木质素、纤维素和半纤维素等化学成分的含量能够显著影响根系抗拉拔力学特性<sup>[11]</sup>;还有部分学者认为,由于侧根的存在,使得根系与土壤的接触面积增大,大幅度提高了根土之间的摩擦力,增加了有效抗拉根系数量,从而提高了植物的护坡能力<sup>[12]</sup>。草本植物根系抗拉拔力学特性可作为草本固土护坡效应的重要评判依据,但其固土能力是复杂的根系系统相互作用的结果,且植物根系的固土护坡效应是一个长期且复杂的过程,根系固土效果与植物生长时间紧密相连<sup>[13]</sup>,因此不同生长时间根系构型特征和根系力学特性变化差异无疑是研究植物综合固土效果的重要内容。然而,目前对紫色土区草本植物根系构型与抗拉拔力学特性研究较少,对不同生长时间草本植物抗拉拔力学特性的对比研究更为匮乏。紫花苜蓿(*Medicago sativa*)是常见的优质牧草及果园绿肥,其耐旱性强且主根发达,固土能力在西北黄土高原地区和西南紫色土区均表现显著<sup>[11,14]</sup>,具有较高的经济价值及水土保持效益。为全面了解紫花苜蓿在紫色土区的抗拉力学特性,本研究选取紫花苜蓿为对象,测定并计算不同生长时间紫花苜蓿根系形态参数、分形参数、拓扑参数和单根抗拉、抗拔力学参数,对土壤理化性质与紫花苜蓿根系特征参数,根系构型和力学特性参数分别进行相关分析,通过冗余分析对影响力学特性的主导因子进行量化,以期为紫色土区紫花苜蓿根系固土力学机制研究提供参考,为水土流失治理中植物措施的科学推广应用提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于重庆市北碚区西南大学紫色丘陵区坡耕地水土流失监测基地(106°26' E, 29°49' N),海拔约 230 m,属亚热带季风性气候,年均气温约 18 °C,降水集中在 5—9 月,年均降水量约 1100 mm,土壤类型为中性紫色土。

### 1.2 试验设计

2023 年 4 月,在研究区内选择样地并进行整地除草(整地时将残留的杂草根系一并清理以消除残留根系对试

验的影响),以紫花苜蓿为供试草种,采用撒播的方式(种子和沙土混合比为1:1.5)种植,种植密度为 $0.0020\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。在植物生长至两个月时开始取样,之后每隔一个月进行一次样品采集,共进行4次取样(60、90、120、150 d)。试验开始时,进行一次裸地土壤样品采集和测定。

### 1.3 样品采集与处理

**1.3.1 土壤样品采集** 2023年4月,在裸地选择3个采样点,采集土壤本底值样品。2023年6—9月,在试验区选择紫花苜蓿的标准株<sup>[11]</sup>,在标准株附近分别选择3个采样点采集根区的土壤样品。每个生长时间采集3袋散土、3个容重环刀和3个铝盒用于测定土壤理化性质。共采集15袋散土、15个容重环刀和15个铝盒。

**1.3.2 根系样品采集** 对选定的标准株,采用挖掘法,先剪去植株的地上部分,清除表层的枯落物和杂质等。再以标准株为中心,将根系周围的土壤尽可能剥离,连土带根整株取走,带回实验室后放入 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存,取得的试样尽快测定,每个时间采集10株,共采集40株。

**1.3.3 抗拉试验根系制备** 采用挖掘法将整株根系挖出后,将根系洗净扫描,再从中剪取顺直且直径均一的根,制作成长度为 $7\text{ cm}$ 的单根用于测定抗拉力,单根直径为 $0.06\sim 3.64\text{ mm}$ ,样本标距 $50\text{ mm}$ ,两端采用树脂防止滑脱。每个时间制作60个样本,共制作240个样本。

### 1.4 测定指标与方法

**1.4.1 土壤理化性质** 采用环刀法和烘干法测定土壤容重、含水率和孔隙度,采用湿筛法测定水稳性团聚体,采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机质<sup>[15]</sup>含量(表1)。

表1 研究区基本土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties in the study area

生长时间 Growth time (d)	土壤容重 Soil bulk density ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	自然含水率 Soil water content (%)	总孔隙度 Total porosity (%)	水稳性团聚体 Water-stable aggregates ( $>0.25\text{ mm}$ , %)	有机质 Soil organic matter ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
0	$1.40\pm 0.07$	$8.84\pm 1.86$	$47.35\pm 2.50$	$66.64\pm 1.87$	$15.94\pm 1.82$
60	$1.49\pm 0.10$	$12.14\pm 0.71$	$43.73\pm 3.68$	$78.47\pm 3.23$	$14.15\pm 3.00$
90	$1.29\pm 0.03$	$9.16\pm 0.53$	$51.31\pm 1.14$	$75.71\pm 2.92$	$9.62\pm 3.40$
120	$1.37\pm 0.01$	$9.30\pm 0.26$	$48.14\pm 1.58$	$75.56\pm 2.56$	$17.83\pm 2.04$
150	$1.41\pm 0.06$	$2.45\pm 0.60$	$46.94\pm 3.35$	$76.33\pm 0.70$	$18.49\pm 1.31$

注:数据为平均值±标准差,下同。

Note: Data are mean±standard deviation, the same below.

**1.4.2 根系构型特征** 1)根系形态特征参数:将取出的完整植株的根系,采用EPSON扫描仪(PERFECTION C700,北京)进行根系灰度扫描(分辨率设置为 $800\text{ dpi}$ ),采用WinRHIZO(Pro. 2009)根系分析系统进行分析,测定完整植株的根径、根长、根表面积、根体积、根尖数等指标。2)根系拓扑结构:分形维数用盒维数法<sup>[16]</sup>来表示,先获取根系分布图上边长为 $c$ 的小正方形和根系所截的小正方形数目( $N_c$ )。得到不同边长水平对应的 $N_c$ 后,分别以 $\lg c$ 、 $\lg N_c$ 为横坐标和纵坐标作图,得到直线方程:

$$\lg N_c = -FD \times \lg c + \lg K \quad (1)$$

式中: $FD$ 为分形维数(fractal dimension);截距 $\lg K$ 为分形丰度。

根系的拓扑结构分为鱼尾型分枝和叉状分枝2种模式(图1),拓扑指数表达式为<sup>[17]</sup>:

$$TI = \lg A / \lg M \quad (2)$$

式中: $A$ 为最长通道(连接最多的通道)的内部连接数; $M$ 为外部连接总数; $TI$ 为拓扑指数(topological index), $TI$ 的值越接近1表明根系分枝越少,根系越近似鱼尾型分枝结构,越接近0.5越近似叉状分枝结构。

**1.4.3 根系力学特征** 使用艾德堡仪器有限公司生产的 HP-500 数显式推拉力计对紫花苜蓿根系进行现场原位整株抗拔试验,测定抗拔力并计算抗拔强度,每个生长时间选择 60 个样本,共 240 个样本,试验成功率为 77.32%。

考虑根系不同含水率对根系的抗拉力影响较大,将制备好的根系样本泡水 12 h,根系重量无变化视为饱和。使用电子万能试验机(CMT6503,深圳)进行室内单根抗拉试验,计算抗拉强度<sup>[18]</sup>,试验成功率为 66.21%,具体操作步骤见刘泉宏<sup>[10]</sup>的方法。抗拔/抗拉强度计算公式为:

$$T = 4F/\pi D^2 \quad (3)$$

式中: $T$ 为根系的抗拔/抗拉强度(MPa); $F$ 为极限抗拔/抗拉力(N); $D$ 为根系直径(mm)。

## 1.5 数据处理

使用 Excel 2019 对数据进行处理分析;采用 Origin 2022 作图;采用 SPSS 25.0 进行差异显著性检验(Duncan 法)和 Pearson 相关分析;采用 Canoco 5 进行冗余分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 根系构型特征分析

**2.1.1 根系形态特征** 紫花苜蓿的总根长、根表面积、根体积以及根尖数均随着植物生长时间的增加整体上呈先缓慢上升后快速增加的趋势(表 2)。在 60~90 d 内,紫花苜蓿根系形态参数均无显著变化。90 d 后,除平均根系直径外,其他形态参数则随时间增加显著增加,在 150 d 时取得峰值,此时总根长、根表面积、根体积以及根尖数分别是 60 d 时的 7.92、6.38、5.25 和 6.79 倍,根表面积和根体积增长速率最快的时间段为 90~120 d,增长率分别为 109.73% 和 152.94%,根长和根尖数增长速率最快在 120~150 d,分别为 164.29% 和 195.52%。

表 2 不同生长时间紫花苜蓿根系形态参数

Table 2 Root morphological indexes of *M. sativa* at different growth times

生长时间 Growth time (d)	平均根径 Average root diameter (mm)	总根长 Total root length (cm)	总根表面积 Total root surface area (cm <sup>2</sup> )	总根体积 Total root volume (cm <sup>3</sup> )	根尖数 Root tips
60	0.62±0.08ab	39.01±16.78c	7.71±3.88c	0.12±0.08c	66.10±37.87c
90	0.56±0.15b	66.54±15.42bc	11.71±3.99c	0.17±0.09c	95.10±22.09bc
120	0.69±0.17a	116.93±32.03b	24.56±5.41b	0.43±0.16b	151.80±36.98b
150	0.53±0.08b	309.03±149.00a	49.21±20.45a	0.63±0.23a	448.60±165.36a

注:不同小写字母表示不同生长时间之间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters indicate that there are significant differences among different growth times ( $P<0.05$ ).

**2.1.2 根系拓扑结构** 紫花苜蓿的分形维数和分形丰度均随着生长时间增加呈增大趋势(图 2)。生长时间 150 d 的紫花苜蓿相较于 60 d 时分形维数和分形丰度分别增加了 7.50%、28.63%。即紫花苜蓿根系在 150 d 时的分枝较多,在土体中拓展范围较大,根系较为发达。紫花苜蓿拓扑指数为 0.5~1.0,随生长时间增加无显著变化,即紫花苜蓿的分枝模式处于叉状分枝和鱼尾状分枝之间。紫花苜蓿平均连接长度随生长时间增加呈减小趋势,150 d 较 60 d 时减小了 35.35%,根系平均连接长度越小,各级侧根上的分枝数越多,即紫花苜蓿在 150 d 时侧根分枝数最多。

### 2.2 根系力学特征分析

**2.2.1 整株抗拔强度** 不同生长时间紫花苜蓿根系直径与抗拔强度之间均存在幂函数关系。抗拔强度随直

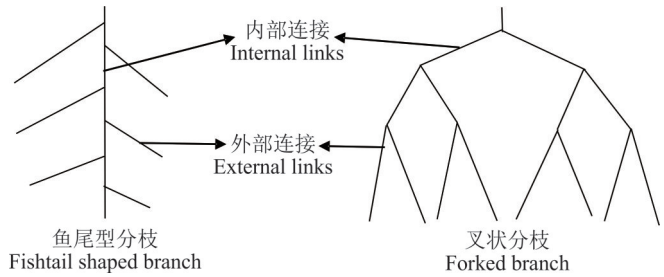


图 1 根系拓扑结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of root topology

径增大而减小(图3),除150 d外,其余生长时间紫花苜蓿根系直径与抗拔强度拟合的相关系数 $R^2$ 均较高,抗拔强度为2.93~70.49 MPa。且抗拔强度在90 d时最大,分别是60、120和150 d的1.45、2.03和2.22倍。

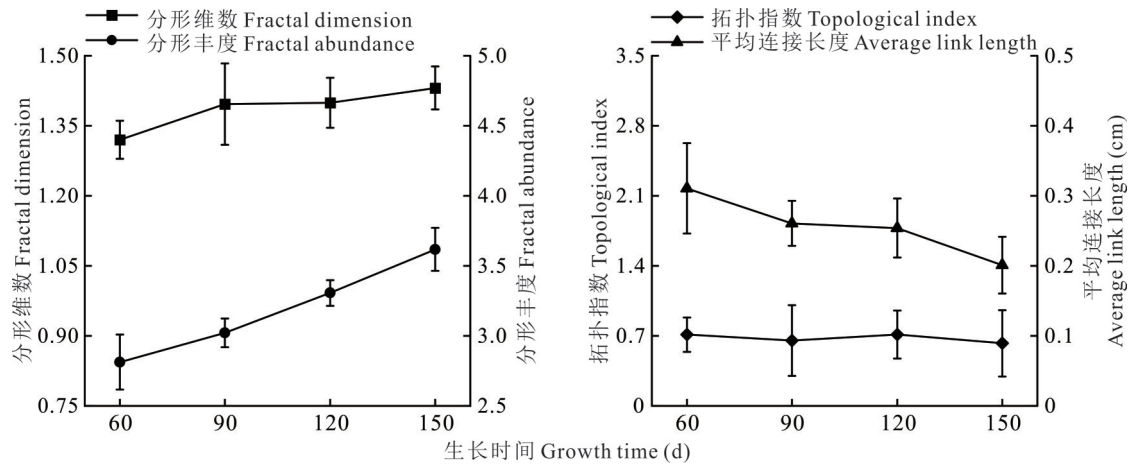


图2 不同生长时间紫花苜蓿根系分形特征和拓扑结构的变化

Fig. 2 Root fractal parameters and topological index of *M. sativa* at different growth times

**2.2.2 单根抗拉强度** 不同生长时间紫花苜蓿单根直径与抗拉强度之间均满足  $T = a \times D^b$  幂函数关系( $a$ 、 $b$  为拟合参数)。不同生长时间根系抗拉强度与根径相关系数 $R^2$ 均较高(图4)。紫花苜蓿根系的抗拉强度为3.08~105.67 MPa。不同时间紫花苜蓿根系抗拉强度随直径的变化幅度不同,但均随着直径增大而减小,且都与直径间存在幂函数关系。同一直径抗拉强度随生长时间增加先增加后减小,且在150 d抗拉强度小于其他生长时间,分别较60、90和120 d减小了53.76%、56.50%和58.95%。

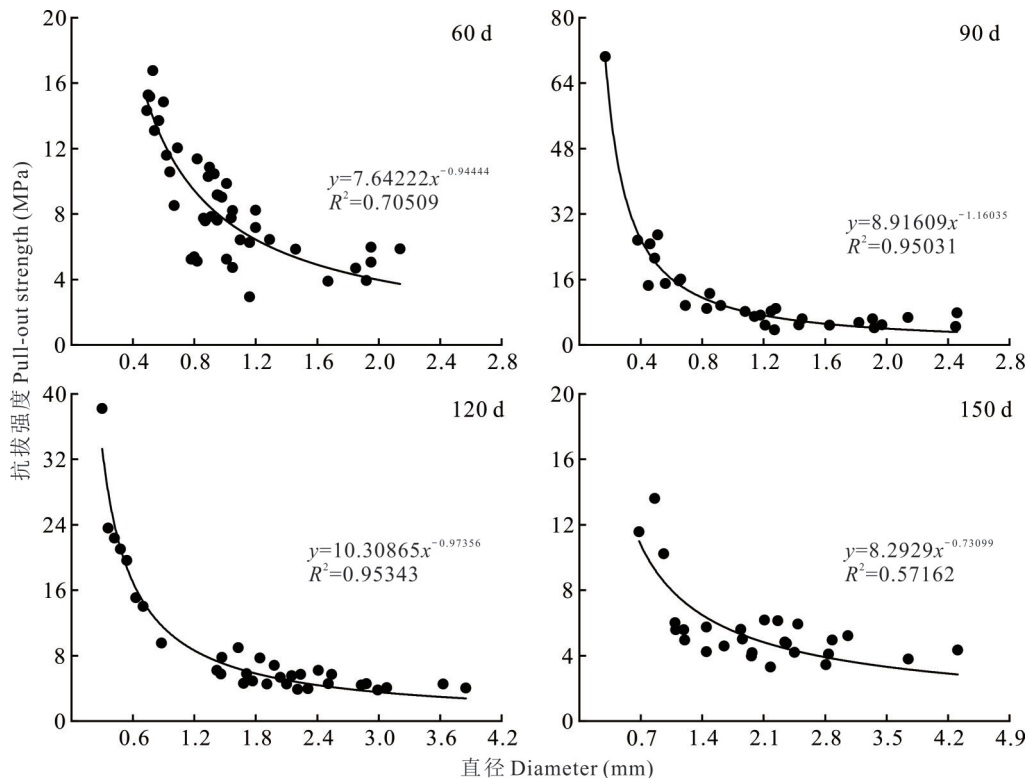


图3 不同生长时间紫花苜蓿根系抗拔强度随直径的变化规律

Fig. 3 Relationship between pull-out strength and diameter of *M. sativa* root system at different growth times

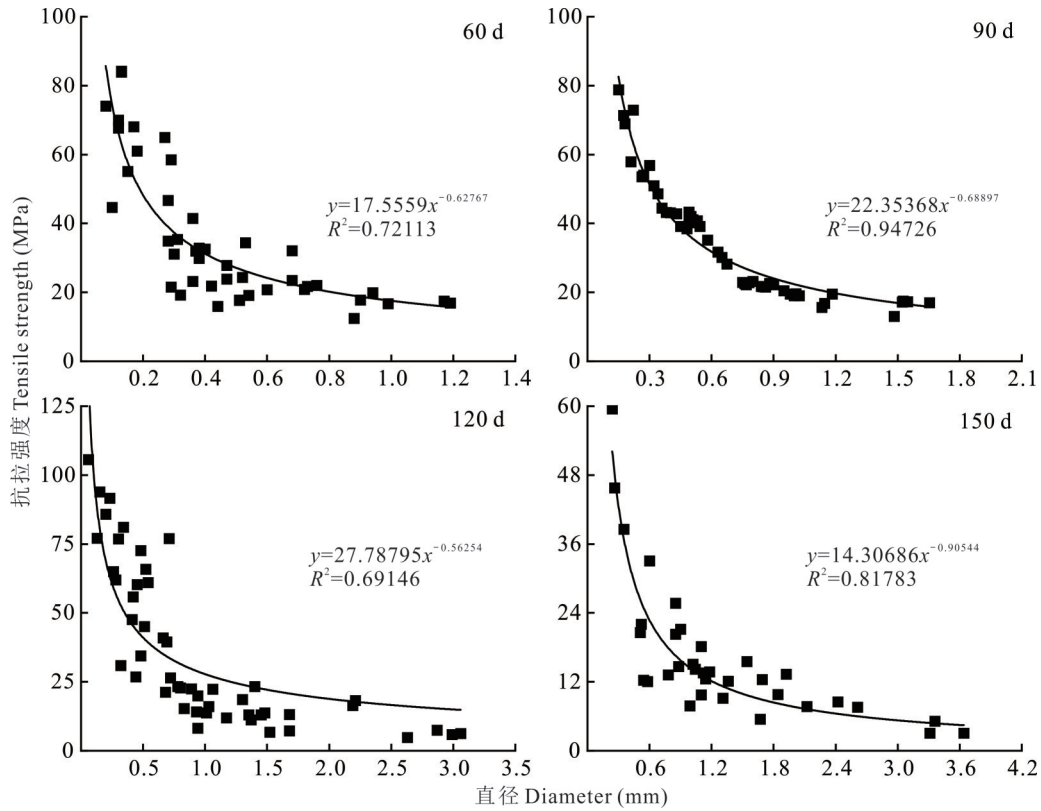


图 4 不同生长时间紫花苜蓿根系抗拉强度随直径的变化规律

Fig. 4 Relationship between tensile strength and diameter of *M. sativa* root system at different growth times

### 2.3 根系特征的影响因素

**2.3.1 土壤理化性质对根系特征的响应** 对紫花苜蓿不同生长时间根系特征参数与根区土壤理化性质进行相关分析(表 3),土壤自然含水率与紫花苜蓿根系抗拉强度和抗拔强度呈极显著正相关( $P<0.01$ ), $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量与平均连接长度呈显著负相关( $P<0.05$ ),有机质含量与抗拔强度呈显著负相关( $P<0.05$ )。

表 3 土壤理化性质与根系参数相关分析

Table 3 Correlation analysis of soil physical and chemical properties and root parameters

指标 Index	RL	RSA	RV	RT	FD	FA	TI	AL	TS	PS
容重 Soil bulk density	0.239	0.232	0.204	0.300	-0.293	0.352	-0.261	0.070	0.155	0.085
自然含水率 Soil water content	0.021	0.035	0.091	0.256	-0.172	0.133	0.140	0.063	0.748**	0.811**
总孔隙度 Total porosity	0.203	0.217	0.196	0.249	0.284	0.336	0.280	-0.147	-0.182	-0.133
水稳性团聚体 Water-stable aggregates ( $>0.25\text{ mm}$ )	0.280	0.224	0.189	0.371	-0.021	0.287	-0.133	-0.622*	0.119	0.315
有机质 Soil organic matter	0.014	0.123	0.144	0.151	-0.188	0.011	-0.400	0.196	-0.498	-0.632*

RL: 根长 Root length; RSA: 根表面积 Root surface area; RV: 根体积 Root volume; RT: 根尖数 Root tips; FD: 分形维数 Fractal dimension; FA: 分形丰度 Fractal abundance; TI: 拓扑指数 Topological index; AL: 平均连接长度 Average link length; TS: 抗拉强度 Tensile strength; PS: 抗拔强度 Pull-out strength. \*:  $P<0.05$ ; \*\*:  $P<0.01$ ; 下同 The same below.

**2.3.2 根系构型特征对力学特性的影响** 对紫花苜蓿不同生长时间的抗拉和抗拔强度与根系构型参数进行相关分析(表 4),紫花苜蓿抗拉强度与根长、根表面积、根体积、根尖数、分形维数以及分形丰度呈极显著负相关( $P<0.01$ ),与平均连接长度呈极显著正相关( $P<0.01$ )。抗拔强度与分形维数和分形丰度呈极显著负相关( $P<0.01$ ),与根长、根表面积和根体积呈显著负相关( $P<0.05$ ),与平均连接长度呈极显著正相关( $P<0.01$ )。

表4 根系构型参数与力学参数相关分析

Table 4 Correlation analysis of root configuration parameters and mechanical parameters

指标 Index	RL	RSA	RV	RT	FD	FA	TI	AL
TS	-0.557**	-0.616**	-0.653**	-0.551**	-0.567**	-0.711**	0.057	0.508**
PS	-0.328*	-0.369*	-0.401*	-0.309	-0.502**	-0.439**	0.012	0.428**

紫花苜蓿根系的构型特征和力学特性之间存在显著相关性,通过冗余分析对影响紫花苜蓿抗拉拔性能的主导因子进行分析发现,紫花苜蓿根系分形丰度与分形维数对根系抗拉拔强度的贡献较高,分别为75.1%和13.6%( $P < 0.05$ ),表明分形维数和分形丰度是影响根系抗拉拔性能的主导因子(表5)。第1轴与第2轴反映了根系抗拉拔强度与根系构型参数的关系,且主要在第1轴,其中第1轴解释量为96.06%,第2轴的解释量是3.94%(图5)。

表5 基于冗余分析估算的根系构型参数对力学参数的贡献

Table 5 Contribution of root configuration parameters to mechanical parameters estimated based on redundancy analysis

指标 Index	FA	FD	RSA	AL	RT	RL	RV	TI
贡献率 Contribution rate (%)	75.1	13.6	3.2	1.5	2.1	1.1	2.1	1.3
$P$	0.002	0.044	0.318	0.532	0.436	0.622	0.424	0.614

### 3 讨论

#### 3.1 不同生长时间根系构型特征的差异

作为影响植被固土能力的主要因素之一,植物根系构型是指根系的各个构件在空间上的复杂组合,常用根系的几何形态特征、分形特征和拓扑结构特征来表征<sup>[5]</sup>。植物根系的形态与分布首先由植物本身的遗传特性所决定,环境变化对植物根系也有重要影响<sup>[19-20]</sup>。本研究中,紫花苜蓿根系形态参数均随生长时间增加整体上呈增长趋势,说明随着生长时间的增加,根系逐渐生长发育,呈圆锥形向外延伸<sup>[1]</sup>,形成复杂的网络结构,有利于吸收土壤水分和养分,从而更好地适应生长环境。植物根系对生境的适应能力让其可以通过改变拓扑结构来增强对资源的竞争力<sup>[7]</sup>。拓扑指数反映不同植物根系的分枝模式,拓扑指数越

接近1,根系分枝为鱼尾型分枝模式,其根系分布越小,养分运输效率越低。拓扑指数越接近0.5,根系越接近叉状分枝模式,根系生长范围越广,养分运输效率越高。本研究中,紫花苜蓿拓扑指数随生长时间无显著变化,根系模式处于鱼尾型和叉状分枝模式之间,这种根系模式使得紫花苜蓿根系之间更容易形成网格加筋作用,增强紫花苜蓿根系网络固结土壤的范围和能力,此时根系分枝状况和空间占有对营养物质的吸收起着关键作用<sup>[21]</sup>,故而提高其固土能力。分形参数可反映不同环境下根系发育程度、空间占有能力及营养物质吸收效率,其微小差别就会导致根系分枝状况的极大差异<sup>[21]</sup>。闫励等<sup>[22]</sup>对沙棘(*Hippophae rhamnoides*)根系研究发现,其根系分形维数随细根数量的增加而增大,根系分形丰度与根系的延展范围和拓展能力等呈正相关<sup>[23]</sup>。本研究中,紫花苜蓿的分形维数和分形丰度均随着生长时间增加而增加,说明其随着时间增加,分枝数量、拓展范围等迅速扩大,逐渐构建更复杂密集的根系系统,保障了良好的资源吸收和竞争能力<sup>[24]</sup>。

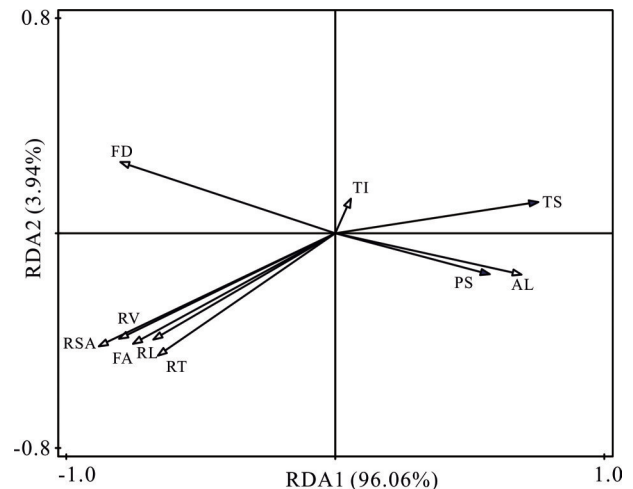


图5 根系构型与力学特性冗余分析

Fig. 5 Redundancy analysis of root configuration and mechanical properties

### 3.2 植物根系力学特征的影响因素

Yan等<sup>[25]</sup>通过研究分析认为,根系受土体运动产生的拉拔力是植物根系的主要固土力学效应,故反映根系受力潜能的抗拔/抗拉强度是评判根系固土能力的有效指标。本研究发现紫花苜蓿根系的抗拉强度总是随着根径的增大呈减小趋势,且同一直径抗拉强度随生长时间增加先增加后减小,且150 d时紫花苜蓿抗拔/抗拉强度显著低于其他生长时间;本研究发现150 d土壤含水率显著低于其他时间的3.61~5.95倍(表1),且本研究中土壤含水率与紫花苜蓿抗拔/抗拉强度呈极显著正相关(表3),这可能是由于150 d极端高温导致紫花苜蓿酶系统失活,生理代谢失衡,生长势下降,根系活力降低,从而影响到根系抗拉拔性能<sup>[26]</sup>。李绍才等<sup>[27]</sup>研究发现灌木抗拔力随株高、生物量等的增加而增大。郑明新等<sup>[28]</sup>对多花木兰(*Indigofera amblyantha*)根系研究发现,根系抗拉强度受根系微观结构、化学成分和水分等的影响,不同生长期植物根系平均抗拉强度亦有所差异。苑淑娟等<sup>[29]</sup>的研究表明,沙柳(*Salix psammophila*)、沙地柏(*Sabina vulgaris*)和白沙蒿(*Artemisia sphaerocephala*)的抗拉强度表现为生长初期大于生长旺盛期,郑明新等<sup>[28]</sup>关于不同生长期多花木兰、刘泉宏<sup>[10]</sup>关于不同生长时间紫花苜蓿和拉巴豆(*Dolichos lablab*)单根抗拉强度的研究结果与之相反。根系抗拉强度还与其化学成分含量显著相关,叶超等<sup>[30]</sup>研究发现纤维素、半纤维素含量与根系抗拉强度呈正相关。由于根系相较素土具有更大的抗拉强度,对土体加载时,土体受到的剪应力通过根土间相互作用逐渐转移到根系中,根系纤维可以产生对提高固土能力有积极作用的附加黏聚力<sup>[31]</sup>,从而通过增强复合土体的抗剪性能来提高其固土能力。植物不同生长阶段根系构型的变化也会影响其根系抗拉性能,从而影响其固土效果。张兴玲等<sup>[32]</sup>发现根系构型与土体间相互作用的力学特性具有显著的时间效应。朱志昊等<sup>[33]</sup>研究表明,随着生长时间增加,根系生长发育使得主根向土壤更深处延伸,形成更复杂的根系网络,充分发挥根系的加筋、锚固和支撑作用。本研究紫花苜蓿在150 d时总根长和总根表面积上占明显优势,根系几何形态参数增加,根系与土壤间的摩擦力也越大,使得根系网络固土的作用更加显著,根系稳定土体的能力也变得更强大<sup>[34]</sup>。此外,土壤理化性质与根系特征参数也密切相关,本研究中紫花苜蓿根系平均连接长度与 $>0.25$  mm水稳性团聚体含量呈显著负相关(表3),而随着生长时间增加,平均连接长度减小,说明随着生长时间增加,紫花苜蓿各级侧根分支增加,根系穿插进入土壤增加孔隙度,促进水稳性团聚体的形成,从而提高固土能力。

## 4 结论

1) 随生长时间增加,紫花苜蓿总根长、总根表面积、总根体积和根尖数均显著增加,峰值出现在150 d,此时分别是60 d时的7.92、6.38、5.25、6.79倍,分形维数和分形丰度亦呈显著增大趋势,拓扑指数为0.5~1.0,平均连接长度随生长时间增加呈减小趋势;2) 不同生长时间紫花苜蓿根系抗拔/抗拉强度与根系直径均呈负幂函数关系,且平均抗拔/拉强度均随生长时间增加先增大后减小,分别在90 d(39.91 MPa)和120 d(12.48 MPa)最大,且均在150 d取得最小值;3) 紫花苜蓿根系抗拔/抗拉强度与自然含水率呈极显著正相关, $>0.25$  mm水稳性团聚体含量与平均连接长度呈显著负相关,有机质含量与抗拔强度呈显著负相关。4) 紫花苜蓿根系抗拉强度和抗拔强度均与平均连接长度呈极显著正相关,与除拓扑指数以外的其他参数均呈显著或极显著负相关。紫花苜蓿根系分形丰度与分形维数对根系抗拉拔强度的贡献较显著( $P < 0.05$ )。

## 参考文献 References:

- [1] Baets D S, Poesen J, Reubens B, et al. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. *Plant and Soil*, 2008, 305(1/2): 207–226.
  - [2] Zhao W J, Dong Q Q, Yan T T, et al. Relationship between slope spectrum's information entropy and terrain factors in water erosion areas of purple soil in southwest China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(9): 160–167, 342.
- 赵维军,董奇群,燕婷婷,等.西南紫色土水蚀区坡谱信息熵与地形因子关系分析. *农业工程学报*, 2020, 36(9): 160–167, 342.

- [3] Ma Y, He B H, He J L, *et al.* Confirmation of critical distance between hedgerows for non-point pollution control based on hydrodynamics in purple soil area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(4): 60–64.  
马云, 何丙辉, 何建林, 等. 基于水动力学的紫色土区植物篱控制面源污染的临界带间距确定. *农业工程学报*, 2011, 27(4): 60–64.
- [4] Guo Y F, Zhang Z Q, Qi W. Comparison of root structure and root tensile resistance of different shrubs in arsenic sandstone area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(3): 273–280.  
郭月峰, 张志强, 祁伟. 砒砂岩区不同灌木根系构型及根系抗拉对比. *水土保持学报*, 2023, 37(3): 273–280.
- [5] Shan L S, Li Y, Ren W, *et al.* Root architecture of two desert plants in central Hexi Corridor of Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1): 25–31.  
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. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 25–31.
- [6] Zhang Y, Li C Y, Han S J, *et al.* Root architecture of main tree species and the effects on soil reinforcement in typical black soil region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(5): 1726–1734.  
张扬, 李程远, 韩少杰, 等. 典型黑土区主要树种根系构型特征及其对固土能力的影响. *应用生态学报*, 2021, 32(5): 1726–1734.
- [7] Ren J, Zhao C Z, Zhao X W, *et al.* Fractal characteristics of *Agriophyllum squarrosum* roots in desert-oasis ecotone in Jinta County, Gansu Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(15): 5298–5305.  
任杰, 赵成章, 赵夏纬, 等. 金塔绿洲荒漠交错带沙蓬根系分形特征. *生态学报*, 2020, 40(15): 5298–5305.
- [8] Tang Z Q, Chen Y J, Hu J, *et al.* Analysis of root architecture and rhizosheath characteristics of seven forage species in desertified grassland of Northwest Sichuan. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(2): 22–31.  
唐子钦, 陈有军, 胡健, 等. 川西北沙化草地7种牧草根系构型及根鞘特征分析. *中国草地学报*, 2020, 42(2): 22–31.
- [9] Genet M, Stokes A, Salin F, *et al.* The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots. *Plant and Soil*, 2005, 278(1/2): 1–9.
- [10] Liu X H. The effects of terrace hedgerows roots on the erodibility of the root-soil complex in the purple soil area. Chongqing: Southwest University, 2021.  
刘泉宏. 紫色土区地埂篱根系对根-土复合体抗侵蚀性能的影响. 重庆: 西南大学, 2021.
- [11] Wei Y, Liu Y B, Liu X H, *et al.* Study on shear strength of root-soil composite of *Dolichos lablab* and *Medicago sativa* in purple soil region. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(8): 82–90.  
魏艳, 刘有斌, 刘泉宏, 等. 紫色土区拉巴豆和紫花苜蓿根-土复合体抗剪性能研究. *草业学报*, 2023, 32(8): 82–90.
- [12] Zhang W H, Wang G Y, Hu S H, *et al.* Indoor experimental study on the pull-out force of *Symplocos anomala* Brand root. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, 18(3): 22–30.  
张文豪, 王桂尧, 胡圣辉, 等. 薄叶山矾根系抗拔力的室内试验研究. *中国水土保持科学*, 2020, 18(3): 22–30.
- [13] Fan C C, Lai Y F. Influence of the spatial layout of vegetation on the stability of slopes. *Plant and Soil*, 2014, 377(1/2): 83–95.
- [14] Pu J Z, Lv X Z, Zhang Q F, *et al.* Characteristics and influencing factors of runoff and sediment yield of typical grassland in loess hilly and gully region. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(2): 1–6.  
普隽泽, 吕锡芝, 张秋芬, 等. 黄土丘陵沟壑区典型草被产流产沙特征及其影响因素. *水土保持研究*, 2023, 30(2): 1–6.
- [15] Institute of Soil Physics, Nanjing Soil Research Institute, Chinese Academy of Sciences. *Physical properties of soil*. Beijing: Beijing Science Press, 1978.  
中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. *土壤物理性质测定法*. 北京: 科学出版社, 1978.
- [16] Zhang L Y, Duan Q S, Li Y M. Soybean roots architecture and the mechanical properties of the root-soil complex in mountain red soil on sloping farmland. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(9): 1464–1476.  
张立芸, 段青松, 李永梅. 坡耕地山原红壤大豆根系构型及根土复合体力学特性. *中国生态农业学报*, 2022, 30(9): 1464–1476.
- [17] Fitter A H. An architectural approach to the comparative ecology of plant root systems. *New Phytologist*, 2008, 106(S1): 61–77.
- [18] Yang J S, Wu B, Kang R J, *et al.* Effects of different phosphogypsum content on root characteristics and pull-out mechanical

- properties of bermudagrass in vegetation concrete. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2023: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1735.TV.20230705.0904.002.html>.
- 杨嘉渠, 吴彬, 康柔嘉, 等. 植被混凝土不同磷石膏掺量对狗牙根根系特性及抗拔力学性能的影响. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2023: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1735.TV.20230705.0904.002.html>.
- [19] Wang Y H, Xu J W, Han Y J, *et al.* Characteristics of root morphology of five salt tolerance species of seedlings in Yellow River delta area. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(1): 261–266.
- 王月海, 许景伟, 韩友吉, 等. 黄河三角洲5个耐盐树种苗木根系形态结构特征. *水土保持研究*, 2014, 21(1): 261–266.
- [20] Huang B F, Xin J L, Dai H W, *et al.* Root morphological responses of three hot pepper cultivars to Cd exposure and their correlations with Cd accumulation. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, 22(2): 1151–1159.
- [21] Margitta D, Arthur B. Fractal geometry and root system structures of heterogeneous plant communities. *Plant and Soil*, 2005, 272(1/2): 61–76.
- [22] Yan L, Yang F S, Li H E, *et al.* Fractal features of *Hippophae rhamnoides* roots under different site conditions in soft sandstone area. *Arid Zone Research*, 2019, 36(2): 467–473.
- 闫励, 杨方社, 李怀恩, 等. 砒砂岩区不同立地地下沙棘根系分形特征. *干旱区研究*, 2019, 36(2): 467–473.
- [23] Ma X Z, Wang X P. Root architecture and adaptive strategy of two desert plants in the Alxa Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(17): 6001–6008.
- 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. *生态学报*, 2020, 40(17): 6001–6008.
- [24] Yang X L, Zhang X M, Li Y L, *et al.* Analysis and estimation of root architecture in the hinterland of Taklimakan desert base on the fractal theory. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(8): 145–150.
- 杨小林, 张希明, 李义玲, 等. 基于分形理论的塔克拉玛干沙漠腹地自然植物根系构型特征分析. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(8): 145–150.
- [25] Yan Z X, Song Y, Jiang P, *et al.* Mechanical analysis of interaction between plant roots and rock and soil mass in slope vegetation. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2010, 31(5): 617–622.
- [26] Liu D L, Zhang H, Cao X C, *et al.* Impacts of heat stress on the photosynthetic physiology of alfalfa. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, 22(3): 657–660.
- 刘大林, 张华, 曹喜春, 等. 夏季高温胁迫对紫花苜蓿光合生理机制的影响研究. *草地学报*, 2014, 22(3): 657–660.
- [27] Li S C, Sun H L, Yang Z R, *et al.* Mechanical characteristics of interaction between root system of plants and rock for rock slope protection. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006(10): 2051–2057.
- 李绍才, 孙海龙, 杨志荣, 等. 护坡植物根系与岩体相互作用的力学特性. *岩石力学与工程学报*, 2006(10): 2051–2057.
- [28] Zheng M X, Huang G, Peng J. Tensile-pullout properties of roots of *Magnolia multiflora* in different growth stages and stability of slope with its root. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(20): 175–182.
- 郑明新, 黄钢, 彭晶. 不同生长期多花木兰根系抗拉拔特性及其根系边坡的稳定性. *农业工程学报*, 2018, 34(20): 175–182.
- [29] Yuan S J, Niu G Q, Liu J, *et al.* Instantaneous anti-tension and tensile strength of single root of four plant species in two growth periods. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(5): 21–25.
- 苑淑娟, 牛国权, 刘静, 等. 瞬时拉力下两个生长期4种植物单根抗拉力与抗拉强度的研究. *水土保持通报*, 2009, 29(5): 21–25.
- [30] Ye C, Guo Z L, Cai C F, *et al.* Relationship between root tensile mechanical properties and main chemical components of five herbaceous species. *Pratacultural Science*, 2017, 34(3): 598–606.
- 叶超, 郭忠录, 蔡崇法, 等. 5种草本植物根系理化特性及其相关性. *草业科学*, 2017, 34(3): 598–606.
- [31] Ji J N, Zhang Z Q, Guo J T, *et al.* Finite element numerical simulation of Black Locust (*Robinia pseudoacacia*) and Arborvitae (*Platycladus orientalis*) roots on slope stability on Loess Plateau of China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(19): 146–154.
- 及金楠, 张志强, 郭军庭, 等. 黄土高原刺槐和侧柏根系固坡的有限元数值模拟. *农业工程学报*, 2014, 30(19): 146–154.
- [32] Zhang X L, Hu X S, Li G R, *et al.* Time effect of young shrub roots on slope protection of loess area in Northeast Qinghai–Tibetan Plateau. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(4): 136–141.

- 张兴玲, 胡夏嵩, 李国荣, 等. 青藏高原东北部黄土区灌木幼林根系护坡的时间效应. 农业工程学报, 2012, 28(4): 136—141.
- [33] Zhu Z H, Meng C, Wang X, *et al.* Geometric distribution, formation, and topological structure of soil aggregates after introduction of *Caragana korshinskii* on the desert steppe. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(11): 53—64.  
朱志昊, 孟晨, 王兴, 等. 荒漠草原人工柠条引入后土壤团聚体几何分布及拓扑结构演变特征. 草业学报, 2023, 32(11): 53—64.
- [34] Liu Y B, Yu D M, Fu J T, *et al.* Experimental study on root-soil friction mechanical mechanism of *Caragana korshinskii* Kom. in loess area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(10): 198—205.  
刘亚斌, 余冬梅, 付江涛, 等. 黄土区灌木柠条锦鸡儿根—土间摩擦力学机制试验研究. 农业工程学报, 2017, 33(10): 198—205.