

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.019.

黄梦琦, 张超波, 丁阳, 等. 干湿交替下黄土区苜蓿根系抗拔力学性能[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 214-223.

Huang Mengqi, Zhang Chaobo, Ding Yang, et al. Pullout Mechanical Properties of Alfalfa Roots in Loess Region Under Alternate Drying-Wetting [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 214-223.

干湿交替下黄土区苜蓿根系抗拔力学性能

黄梦琦, 张超波, 丁阳, 张强, 冯潇慧, 蒋静

(太原理工大学 水利科学与工程学院, 太原 030024)

摘要: [目的] 研究黄土区干湿交替过程对草本植物根系抗拔力学性能的影响, 以为草本植物根系固土护坡工程提供一定的理论支持和依据。[方法] 选取紫花苜蓿为研究对象, 采用重塑土根系拉拔试验, 研究苜蓿根系抗拔力学性能及其与根径、根长、土壤容重、干湿交替作用等影响因素的关系。[结果] (1) 苜蓿根系抗拔力学性能指标与根径、根长和土壤容重存在幂函数或指数函数关系。(2) 相比未干湿交替试样, 干湿交替试样根系抗拔力学性能指标均显著减小。(3) 砂壤土中苜蓿根系抗拔力学性能指标均优于壤土, 且干湿交替在砂壤土中对苜蓿根系抗拔力学性能指标的影响小于在壤土中的影响。(4) 根径、根长及容重和干湿交替的耦合作用对根系抗拔力学性能指标有显著影响。[结论] 在干湿交替作用下, 根径、根长和土壤容重对苜蓿根系抗拔力学性能有一定影响。

关键词: 干湿交替; 苜蓿根系; 抗拔力学性能; 耦合影响

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0214-10

Pullout Mechanical Properties of Alfalfa Roots in Loess Region Under Alternate Drying-Wetting

Huang Mengqi, Zhang Chaobo, Ding Yang, Zhang Qiang, Feng Xiaohui, Jiang Jing

(College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to reveal the effect of alternate drying-wetting on the pullout mechanical properties of herb roots in the loess region, and to provide some theoretical support and basis for herbaceous plant root soil fixing and slope protection engineering. [Methods] pullout test in laboratory was conducted on remolded loess samples with/without alfalfa roots to study the relationship between root pullout mechanical properties and the influencing factors, root diameter, root length, soil bulk density and alternate drying-wetting. [Results] (1) The mechanical properties of alfalfa roots were correlated with root diameter, root length and soil bulk density in power functions or exponential functions. (2) The roots pullout mechanical properties of the samples with alternate drying-wetting significantly reduced compared with those of the samples without alternate drying-wetting. (3) The pullout mechanical properties of alfalfa roots in the sandy loam were better than those of the roots in the loam, and the effect of alternate drying-wetting on the mechanical properties of alfalfa roots in the sandy loam was less than that in the loam. (4) The coupling effects of root diameter, root length, bulk density and alternate drying-wetting had significant effects on the pullout mechanical properties of alfalfa roots. [Conclusion] Under alternate drying-wetting conditions, the root diameter, root length and soil bulk density had certain effects on the mechanical properties of alfalfa roots.

Keywords: alternate drying-wetting; alfalfa root; pullout mechanical properties; coupling influence

收稿日期: 2022-10-18

修回日期: 2022-11-14

资助项目: 山西省基础研究计划项目(20210302123105); 山西省回国留学人员科研项目(2020-054)

第一作者: 黄梦琦(1998—), 女, 山东嘉祥人, 硕士研究生, 研究方向: 生态水利工程。E-mail: 1151501153@qq.com

通信作者: 张超波(1984—), 男, 湖南益阳人, 博士, 副教授, 研究方向: 流域生态修复和边坡保护工程。E-mail: zhangchaobo@tyut.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

黄土高原多年平均降雨量 400~600 mm,降雨集中于 7—8 月^[1]。黄土易经历频繁的降雨、蒸发和渗透过程,出现湿润和干燥交替过程。这种干湿交替过程易对土壤稳定产生不利影响,造成水土流失^[2]。植物措施具有较好经济效益和生态效益,广泛用于流域或区域防治水土流失和稳固边坡^[3]。

植物固土护坡存在水文效应和力学效应。其中力学效应表现在根系可与土壤紧密结合形成根—土复合体^[4],根系能提高复合体抗剪强度。根系在复合体中力学性能的发挥,即根系抗拔力学特性^[5]是影响根系固土力学效果的重要因素。当根系与土体的界面发生滑动破坏时,植物的根系在抗拔力的作用下将产生变形,进而会将这种力继续向下传递到更深层次的土壤,同时,根系的抗拔力也会转化成根土复合体的摩擦力,从而提高植物根系固持土体的能力^[6-7]。根据以往的研究结果,根径^[8-10]、根长^[11-12]、土壤容重^[13-14]均对根系的抗拔力学性能指标有显著影响。最大抗拔力、最大抗拔力对应的位移和根系拉拔能与各影响因素均呈正函数关系,最大抗拔强度只在根径因素影响下呈负函数关系。然而,黄土区土壤会受到复杂环境的变化,土壤会经历干湿交替过程。根据已有研究结果,干湿交替使黄土持水能力变弱、土壤营养元素含量降低,且随着干湿交替次数增多,营养元素流失速度变快^[15]。土壤在经历第 1 次干湿交替后,其干密度变化幅度最大^[16]。同时黄土的抗压强度、黏聚力和内摩擦角均减小,且在第 3 次干湿交替后,其抗剪力学性能指标减小幅度趋于稳定^[17]。干湿交替导致土壤含水量频繁发生改变,而与含水量密切相关的根面积比 RAR 则对边坡稳定性有直接影响^[18]。前人对根系抗拔力学特性和干湿交替对黄土力学性能影响开展了初步研究,但主要集中在植物自身影响因素下和黄土区同一种土质类型下,对于不同土质类型下根系抗拔力学性能以及根系最大抗拔力对应的位移和根系拉拔能的研究还较少。此外,黄土区复杂的土壤环境变化下,如干湿交替对根系在黄土中抗拔力学性能的影响规律尚不清楚,需分析干湿交替对根系抗拔力学性能的作用,揭示干湿交替、根系、土壤容重对根系抗拔力学性能的耦合影响。

因此,本文以紫花苜蓿根系为研究对象,开展室内根系拉拔试验,研究不同土质条件下,干湿交替对根系在土壤中力学性能发挥的影响。分析在干湿交替作用下,根土之间的力学作用,以期为复杂环境因素下草本植物根系固土护坡技术提供一定的理论支持和依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为山西省太原市,地理坐标为 111°30′—113°09′E,37°27′—38°25′N,海拔 800 m。属于温带大陆性季风气候,昼夜温差大。冬季较干冷,夏季较湿润多雨。1 月份平均气温为-6.4℃,7 月份平均气温为 23℃,多年平均气温为 9.5℃。四季降雨分布不均匀,多集中于 7—8 月份,多年平均降雨量为 468.4 mm。太原市土壤以褐色粉砂质土为主,整体较为松散,抗冲刷能力较弱。

1.2 样品采集与制备

1.2.1 根系采集 试验选取植物为紫花苜蓿。其适应能力强,分布范围广,常被用作水土保持和边坡固土。在 50 cm×50 cm×50 cm 培育箱中种植苜蓿。为保证植物生长环境与自然条件相似,土壤容重选取 1.2 g/cm³。培育箱底层铺设三层碎石再铺设一层过滤网作为反滤层,然后土壤分三层填装压实。苜蓿种植两个月后,从培育箱中挖出完整根系,用毛刷轻轻清扫泥土,之后用清水冲洗根系。为保证根系的鲜活性与完整性,将处理好的根系冷藏于-4℃的冰箱内备用。

1.2.2 土样采集 试验所用土壤取自山西省太原市郊区,为对比不同土质类型下根系抗拔力学性能,选取研究区广泛分布的砂壤土和壤土两种不同土质进行研究。将土壤运回实验室后,进行风干、碾碎和 2 mm 筛网过筛处理,用于后面重塑土拉拔试验试样的制备。土样的机械组成如表 1 所示。

表 1 土壤机械组成

Table 1 Mechanical composition of test soil sample			
土壤类型	砂粒 (2~0.05 mm)	粉粒 (0.05~0.002 mm)	黏粒 (<0.002 mm)
壤土	43.2%	39.7%	17.1%
砂壤土	52.4%	29.5%	18.1%

1.2.3 重塑土的制备 试验时分别研究干湿交替和根径、根长以及土壤容重对苜蓿根系抗拔力学性能的影响。根径为变量时,控制根长为 9 cm、土壤容重为 1.2 g/cm³ 不变,根径设置 0.3~0.5 mm,0.5~0.7 mm,0.7~0.9 mm 和 0.9~1.1 mm 4 个根径水平;根长为变量时,控制根径为 0.5~0.7 mm、土壤容重为 1.2 g/cm³ 不变,根长设置 7 cm,9 cm,11 cm 和 13 cm 共 4 个长度水平;容重为变量时,控制根径为 0.5~0.7 mm 和根长为 9 cm 不变,设置 1.1 g/cm³,1.2 g/cm³,1.3 g/cm³ 和 1.4 g/cm³ 4 个容重水平。根据试验所需的根长和根径修剪根系,并在各个根系距顶端 20 mm 的位置处用医用胶带缠绕,防止在拉拔过程中的滑出和

夹断。其余部分分三段并用游标卡尺测量直径,取平均值作为根系平均直径。配置好试验所需的土壤含水量(砂壤土为 5%,壤土为 10%),在半径为 24 mm,高为 130 mm 的中空圆柱盒中,用实心铁柱将土样分三层压实,每压实一层后,抛毛处理表面,开始下一层填装。铁柱中心留有 1 mm 的小孔,小孔中放入吸管,然后将苜蓿根系插入吸管,逐层击实。为使土样与根系充分粘结,将处理好的试样静置 24 h 后,开展根系拉拔试验。

1.3 根系拉拔试验

本试验研究重点为在干湿交替条件下各因素对根系抗拔力学性能的影响,同时根据已有研究,干湿交替 1 次对土壤的物理性质影响最大^[16]。因此本试验进行 0 次与 1 次干湿交替处理对比。干湿交替处理包括湿处理和干处理:湿处理是将试样放置在倒满水的培养皿中浸泡,砂壤土浸泡 3 h、壤土浸泡 4 h 达到饱和状态;干处理是将湿处理饱和后试样静置 1 h 后,放入 40℃ 的鼓风干燥箱中干燥,砂壤土干燥 20 h,壤土干燥 24 h 后使得土壤含水率达到初始含水率,然后开展重塑土根系拉拔试验。

根系拉拔试验采用万能材料试验机。将处理好的土样放置在试验台上,用夹具夹紧医用胶带缠绕的根系。将试验机与电脑连接,试验机通过向上移动的数显式推拉力计提供拔出荷载。根据已有研究,加载速度为 50~200 mm/min 时,其对苜蓿根系抗拔力学性能没有显著影响^[10]。因为加载速度取 50 mm/min 时试验过程更便于观测和数据记录,故试验选取 50 mm/min 的加载速度。当根系在恒定速率为 50 mm/min 的速度被拔出或拔断时,停止推拉力计并记录最大力数值,同时电脑端保存抗拔力与时间的数据。

最大抗拔强度用公式(1)计算

$$P = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (1)$$

式中: P 为极限抗拔强度(MPa); F 为最大抗拉力(N); D 为根系平均直径(mm)。

拔出力做功即拉拔能用公式(2)计算

$$W = \int_0^x F(x) dx \quad (2)$$

式中: W 为拔出力做功; $F(x)$ 为抗拔力和根系位移的函数关系; x 为最大抗拔力对应的位移。

1.4 数据分析

本文采用 SPSS 26 软件进行显著性水平分析和双因素方差分析,通过 Excel 绘制图表,分析影响根系抗拔力学性能指标各因素的作用水平差异。图中不同小写字母代表相同干湿交替处理下不同水平下的苜蓿根系

抗拔力学性能有显著性差异即 $p < 0.05$;图中不同大写字母表示相同水平下不同干湿交替处理的苜蓿根系抗拔力学性能有显著性差异即 $p < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 抗拔力和抗拔强度

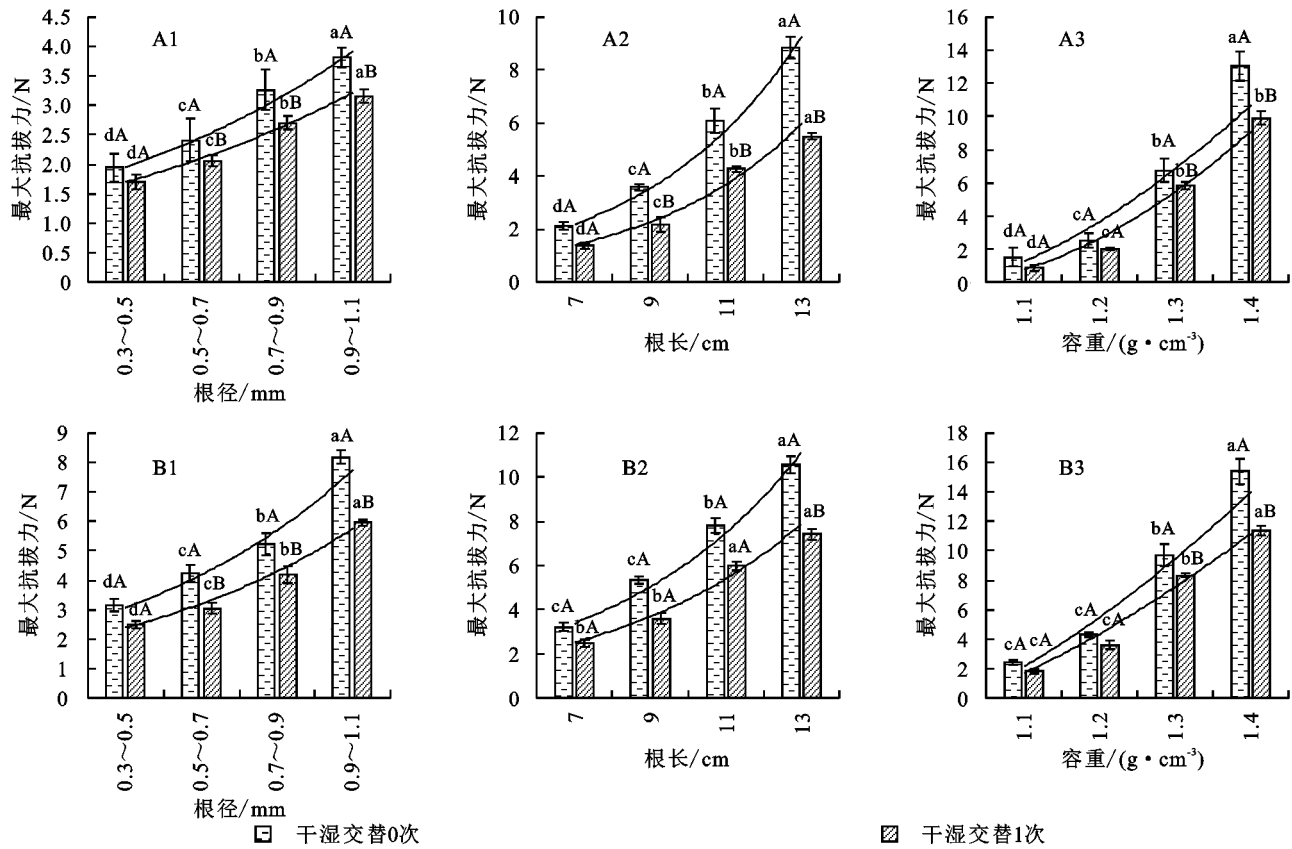
根径、根长、土壤容重和干湿交替次数均对苜蓿根系的抗拔力和抗拔强度有显著影响。由图 1、图 2 和表 2 可知,苜蓿根系最大抗拔力与根径呈正指数函数关系、最大抗拔强度与根径呈负指数函数关系。在根径、根长和土壤容重 3 个因素影响下,砂壤土中苜蓿根系最大抗拔力和最大抗拔强度均大于壤土,砂壤土中表现出的力学性能显著优于壤土。4 个根径范围下,干湿交替后苜蓿根系最大抗拔力和最大抗拔强度均显著减小,且最大抗拔强度减小范围为 28.32%~42.61%(壤土)和 0.08%~15.87%(砂壤土)。由此可见,砂壤土中干湿交替导致最大抗拔强度减少的幅度要低于壤土中减小的幅度。两种土质中根径和干湿交替均对根系抗拔力和抗拔强度有显著影响,但只在砂壤土中根径和干湿交替对抗拔力和抗拔强度的交互影响显著(表 3)。

由图 1、图 2 和表 2 可知,苜蓿根系最大抗拔力和最大抗拔强度与根长均呈正指数函数关系。4 个根系长度下,干湿交替后苜蓿根系最大抗拔力和最大抗拔强度均显著减小。同时最大抗拔力减小范围为 29.82%~39.48%(壤土)和 23.16%~32.33%(砂壤土),最大抗拔强度减小范围为 29.81%~39.42%(壤土)和 23.21%~30.38%(砂壤土)。由此可知,干湿交替后砂壤土中最大抗拔力和最大抗拔强度减少的幅度低于壤土中减小的幅度。两种土质中根长和干湿交替均对根系抗拔力和抗拔强度有显著影响,且两种土质中根长和干湿交替对抗拔力和抗拔强度的交互影响均显著(表 3)。

由图 1、图 2 和表 2 可知,苜蓿根系最大抗拔力和最大抗拔强度与土壤容重均呈正幂函数关系。4 个容重水平下,干湿交替后苜蓿根系最大抗拔力和最大抗拔强度均显著减小,且最大抗拔力减小范围为 13.34%~42.22%(壤土)和 14.30%~26.37%(砂壤土),最大抗拔强度减小范围为 13.89%~45.78%(壤土)和 12.05%~30.68%(砂壤土)。可见,砂壤土中干湿交替导致最大抗拔力和最大抗拔强度减少的幅度要低于壤土中减小的幅度。两种土质中容重和干湿交替均对根系抗拔力和抗拔强度有显著影响,但只在壤土中容重和干湿交替对抗拔力和抗拔强度的交互影响显著(表 3)。

由图 5 可知,在根径、根长和土壤容重 3 个因素影响下,两种土质中干湿交替处理的抗拔力和抗拔强度数据范围较没有干湿交替处理的变幅范围小。在根径因素下,干湿交替后最大抗拔力和最大抗拔强度分别减少了 15.84% 和 34.89%(壤土)和 24.56% 和 8.03%(砂壤土)

土);在根长因素下,干湿交替后最大抗拔力和最大抗拔强度分别减少了 35.56% 和 35.54%(壤土)和 27.7% 和 27.31%(砂壤土);在容重因素下,干湿交替后最大抗拔力和最大抗拔强度分别减少了 21.68% 和 23.27%(壤土)和 21.21% 和 21.85%(砂壤土)。



注: A 为壤土, B 为砂壤土, 1, 2, 3 分别为根径、根长、容重水平, 下同。

图 1 不同根径、根长和容重下苜蓿根系最大抗拔力

Fig. 1 maximum uplift resistance of alfalfa root system under different root diameters, root lengths, and bulk densities

2.2 位移

根径、根长、土壤容重和干湿交替次数均对苜蓿根系最大抗拔力对应的位移有显著影响。由图 3 和表 2 可知,苜蓿根系最大抗拔力对应的位移与根径呈正指数函数关系。在根径、根长和土壤容重 3 个因素影响下,砂壤土中苜蓿根系最大抗拔力对应的位移均大于壤土,砂壤土中表现出的力学性能显著优于壤土。4 个根径范围下,干湿交替后苜蓿根系最大抗拔力对应的位移显著减小,且壤土中位移减小范围为 14.35%~21.80%,砂壤土中位移减小范围为 12.47%~20.58%。

由图 3 和表 2 可知,最大抗拔力对应的位移与根长呈正指数函数关系。4 个根系长度下,干湿交替后苜蓿根系最大抗拔力对应的位移显著减小。同时壤土中最大抗拔力对应的位移减小范围为 18.92%~44.44%,砂壤土中减小范围为 20.05%~28.07%。两种土质中根长和干湿交替均对苜蓿根系最大抗拔力对应的位移有显著影响,但只在砂壤土中根长和干

湿交替对位移的交互影响显著(表 3)。

由图 3 和表 2 可知,最大抗拔力对应的位移与土壤容重呈正幂函数关系。4 个容重水平下,干湿交替后苜蓿根系最大抗拔力对应的位移显著减小,且壤土中最大抗拔力对应的位移减小范围为 17.78%~52.64%,砂壤土中减小范围为 14.80%~32.88%。两种土质中容重和干湿交替均对苜蓿根系最大抗拔力对应的位移有显著影响,但只在壤土中容重和干湿交替对位移的交互影响显著(表 3)。

由图 4 可知,在根径、根长和土壤容重 3 个因素影响下,两种土质中干湿交替处理的最大抗拔力对应的位移数据范围较没有干湿交替处理的变幅范围小。在根径因素下,干湿交替后位移分别减少了 18.07%(壤土)和 15.68%(砂壤土);在根长因素下,干湿交替后位移分别减少了 23.89%(壤土)和 21.84%(砂壤土);在容重因素下,干湿交替后位移分别减少了 23.78%(壤土)和 19.69%(砂壤土)。

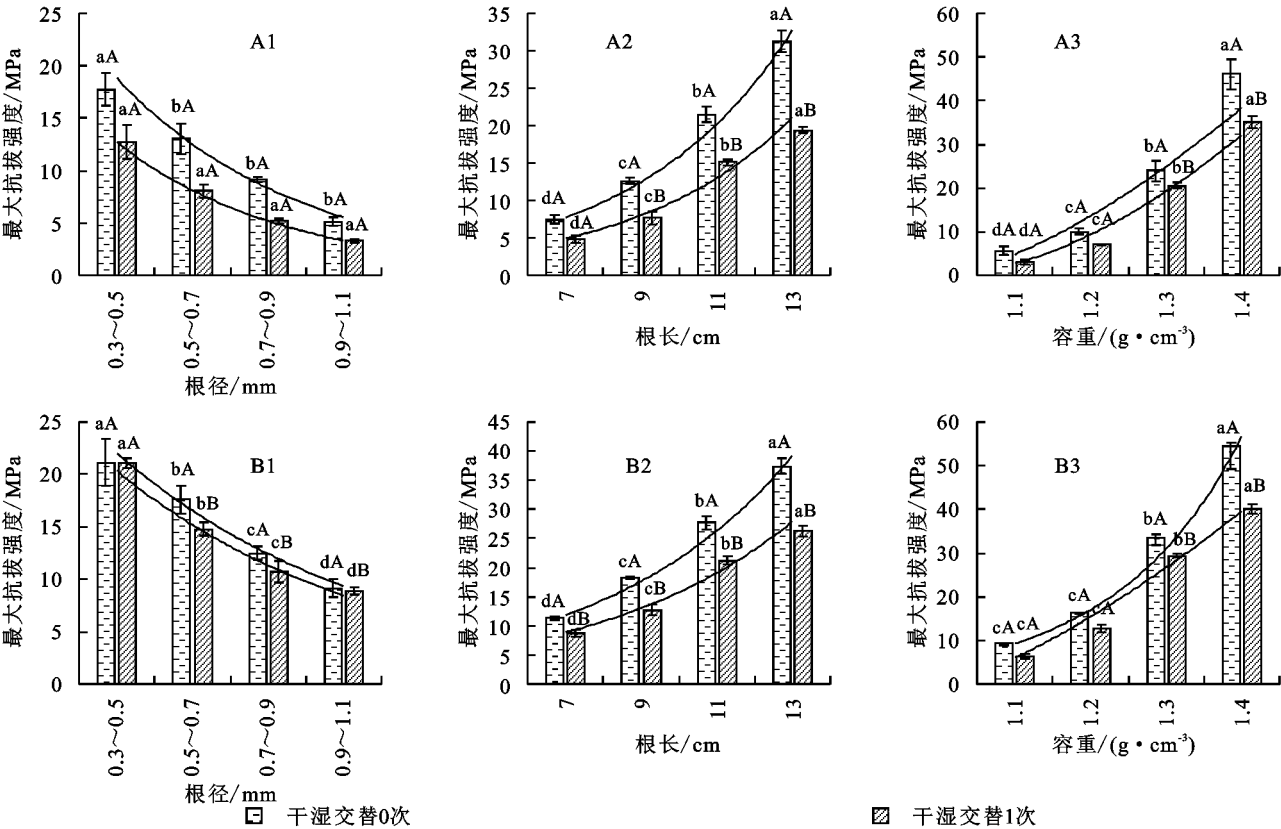


图 2 不同根径、根长和容重下的苜蓿根系最大抗拔强度

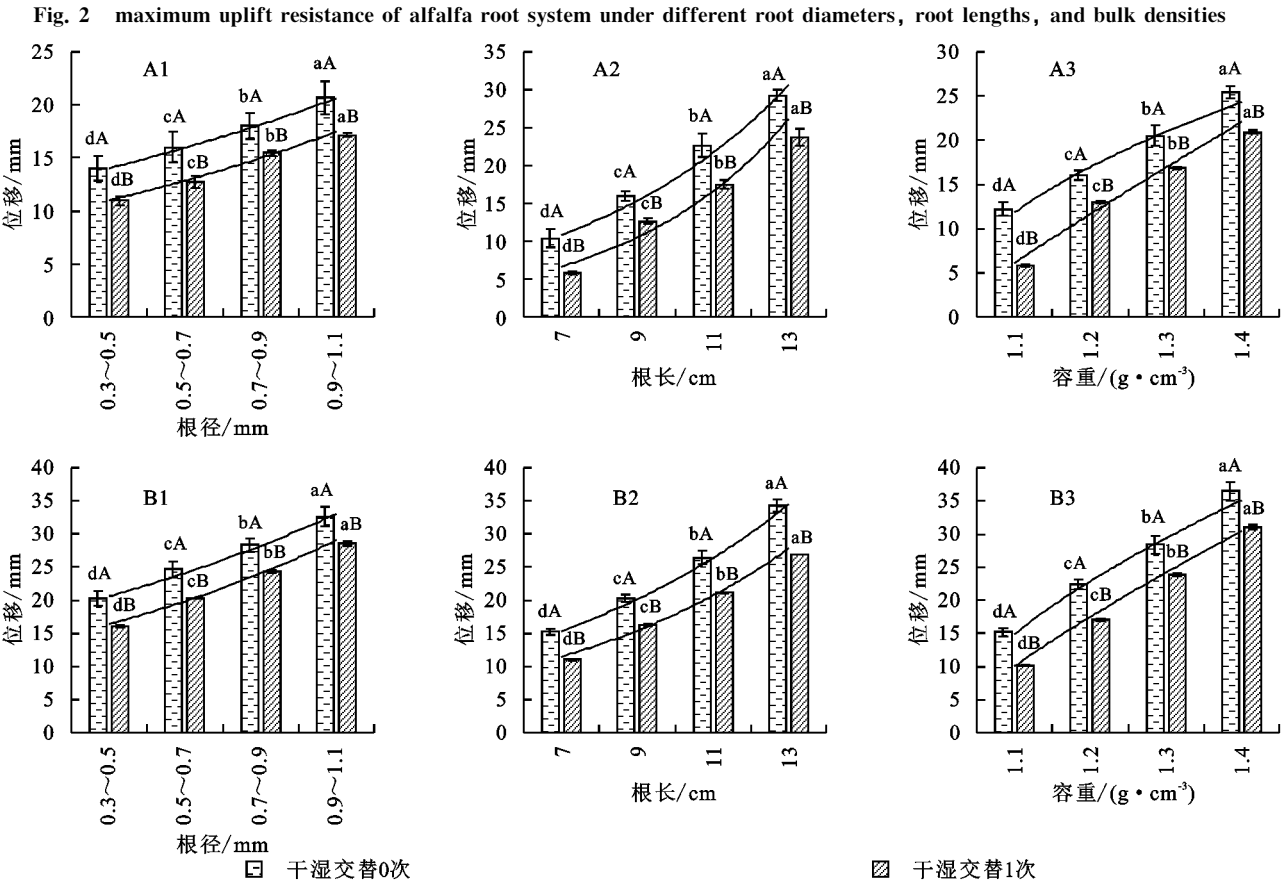


图 3 不同根径、根长和容重下的苜蓿根系最大抗拔力对应的拉拔位移

Fig. 3 The corresponding pull-out displacement of the maximum pull-out resistance of alfalfa roots under different root diameters, root lengths, and bulk densities respectively

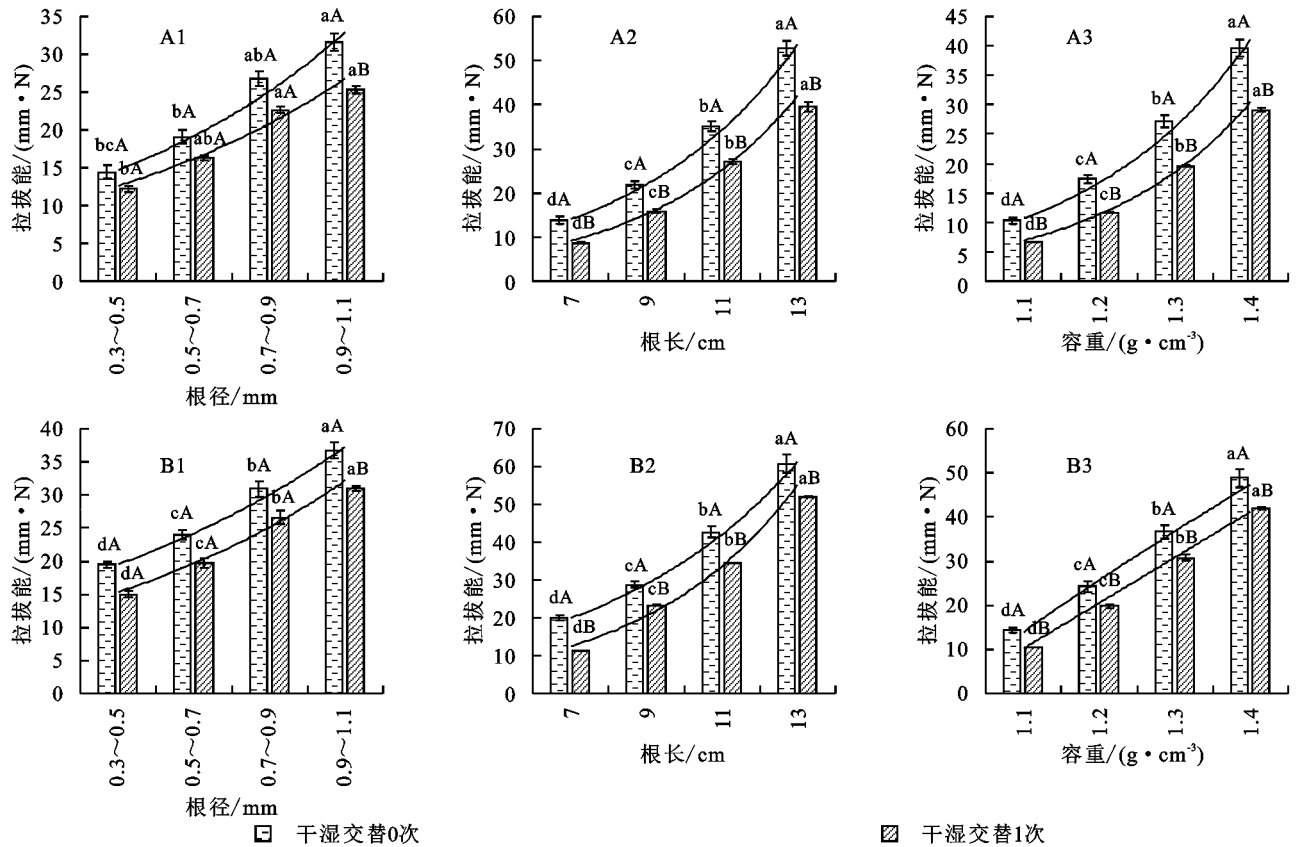


图4 不同根径、根长和容重下的苜蓿根系拉拔能

Fig. 4 Root pullout energy of alfalfa under different root diameters, root lengths, and bulk densities

2.3 拉拔能

拉拔能 V_r 即当苜蓿根系达到最大抗拔力时外力做的功。根径、根长、土壤容重和干湿交替次数均对苜蓿根系拉拔能有显著影响。由图4和表2可知,根系拉拔能与根径呈正指数函数关系。在根径、根长和土壤容重3个因素影响下,砂壤土中根系拉拔能均大于壤土,砂壤土中表现出的力学性能显著优于壤土。4个根径范围下,干湿交替后根系拉拔能显著减小,且壤土中拉拔能减小范围为14.82%~20.00%,砂壤土中拉拔能减小范围为13.74%~22.94%。两种土质中根径和干湿交替均对根系拉拔能有显著影响,但只在壤土中根径和干湿交替对拉拔能的交互影响显著(表3)。

由图4和表2可知,根系拉拔能与根长呈正指数函数关系。4个根系长度下,干湿交替后根系拉拔能显著减小。同时壤土中拉拔能减小范围为23.00%~37.86%,砂壤土中拉拔能减小范围为14.25%~42.82%。两种土质中根长和干湿交替均对根系拉拔能有显著影响,且在两种土质中根长和干湿交替对拉拔能的交互影响均显著(表3)。

由图4和表2可知,壤土中根系拉拔能与土壤容重呈正指数函数关系,砂壤土中根系拉拔能与土壤容重呈正幂函数关系。4个容重水平下,干湿交替后根系拉拔

能显著减小,且壤土中拉拔能减小范围为26.34%~35.50%,砂壤土中拉拔能减小范围为13.97%~27.52%。两种土质中容重和干湿交替均对根系拉拔能有显著影响,且在两种土质中容重和干湿交替对拉拔能的交互影响均显著(表3)。

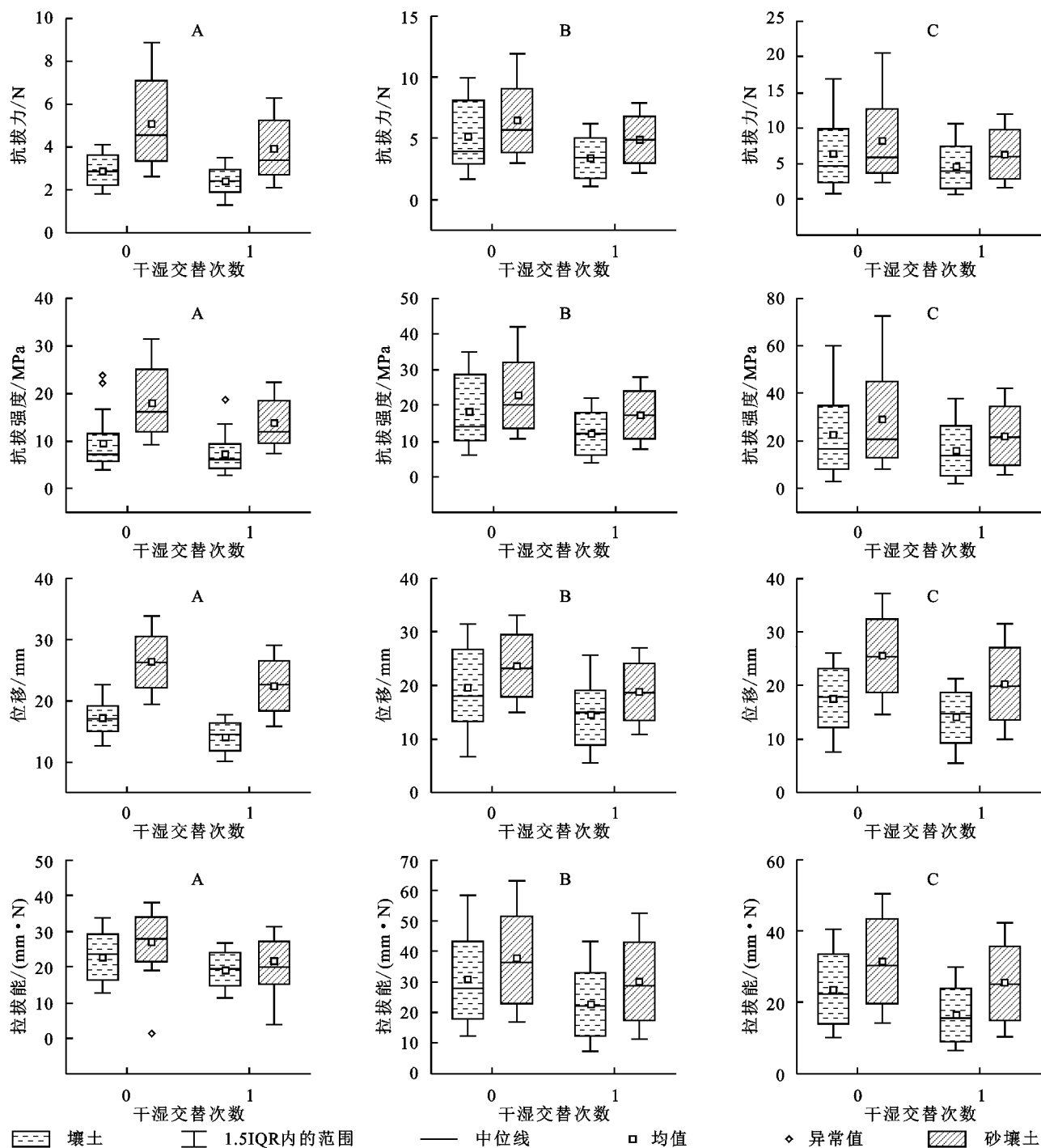
由图5可知,在根径、根长和土壤容重3个因素影响下,两种土质中干湿交替处理的根系拉拔能数据范围较没有干湿交替处理的变幅范围小。在根径因素下,干湿交替后拉拔能分别减少了16.81%(壤土)和16.89%(砂壤土);在根长因素下,干湿交替后拉拔能分别减少了26.29%(壤土)和20.27%(砂壤土);在容重因素下,干湿交替后拉拔能分别减少了29.11%(壤土)和17.05%(砂壤土)。

3 讨论

研究发现苜蓿根系抗拔力学性能指标与根径存在指数函数关系。这与夏振尧等^[8]和Wu等^[9]的研究结果一致,但李东嵘^[10]发现根系拉拔能与根径之间呈幂函数关系。这可能是因为试验方式以及土壤环境的差异,导致根系拉拔能和根径之间的函数关系有所差异。苜蓿根系抗拔力学性能指标与根长呈正指数函数关系。由于根系长度越长,根系与土壤间的接触面积越大,根土间的摩擦力也越大。所以,根系

抗拔力学性能指标随根长增加而增长,这与李臻等^[19]和李东峰^[10]的研究结果一致。苜蓿根系抗拔力学性能指标与土壤容重呈正函数关系。因为低容

重土壤具有孔隙较大、土壤颗粒连接不够紧密的特点,这使得根土间的摩擦力较小。所以根系在拔出力作用下,容易发生拉拔破坏^[10]。



注: A、B、C 分别代表不同根径、根长、容重水平。

图 5 不同根径、根长和容重下的苜蓿根系抗拔力学性能指标与干湿交替关系

Fig. 5 Relationship between the mechanical performance indicators of alfalfa root resistance and dry wet alternation under different root diameters, root lengths, and bulk densities

在干湿交替作用下,壤土和砂壤土中苜蓿根系最大抗拔力、最大抗拔强度、最大抗拔力对应的位移以及拉拔能均减小。主要因为干湿交替导致土壤结构受到破坏,根土界面土壤颗粒会重新组合,进而导致根系和土

壤颗粒之间的黏结力减弱、根土界面的摩擦力减小。刘艳等^[20]研究发现,干湿交替显著影响团聚体稳定性; Peng 等^[21]也研究发现,干湿交替使得土壤的孔隙度增大、异质性增强。在根径、根长和土壤容重 3 个因

素影响下,两种土质中干湿交替处理的抗拔力学性能其原因可能是没有干湿交替处理的土壤,其变异性较指标数据范围较没有干湿交替处理的变幅范围小。大,干湿交替处理后,土质变得较为均一。

表 2 根系抗拔力学性能指标与根径、根长、容重的函数关系

Table 2 The functional relationship between root resistance mechanical performance indicators and root diameter, root length, and bulk density						
影响因素	土壤类型	干湿交替次数	最大抗拔力/N	最大抗拔强度/MPa	位移/mm	拉拔能/(mm·N)
根径	壤土	0	$y = 1.5409e^{0.2335x}$ $R^2 = 0.9832$	$y = 28.316e^{-0.409x}$ $R^2 = 0.9809$	$y = 12.341e^{0.1283x}$ $R^2 = 0.9993$	$y = 11.2e^{0.2694x}$ $R^2 = 0.9772$
		1	$y = 1.3726e^{0.213x}$ $R^2 = 0.9884$	$y = 19.838e^{-0.447x}$ $R^2 = 0.9998$	$y = 9.4451e^{0.1538x}$ $R^2 = 0.9858$	$y = 9.7923e^{0.2516x}$ $R^2 = 0.9498$
	砂壤土	0	$y = 2.2607e^{0.308x}$ $R^2 = 0.9729$	$y = 29.293e^{-0.286x}$ $R^2 = 0.9789$	$y = 17.579e^{0.1576x}$ $R^2 = 0.994$	$y = 15.721e^{0.216x}$ $R^2 = 0.9942$
		1	$y = 1.7803e^{0.2934x}$ $R^2 = 0.9885$	$y = 27.306e^{-0.293x}$ $R^2 = 0.9885$	$y = 13.53e^{0.1912x}$ $R^2 = 0.9935$	$y = 11.971e^{0.2475x}$ $R^2 = 0.976$
	壤土	0	$y = 1.3484e^{0.4817x}$ $R^2 = 0.9909$	$y = 4.7553e^{0.4825x}$ $R^2 = 0.9909$	$y = 7.683e^{0.3453x}$ $R^2 = 0.9855$	$y = 8.9482e^{0.4475x}$ $R^2 = 0.9987$
		1	$y = 0.8583e^{0.4851x}$ $R^2 = 0.9518$	$y = 3.0357e^{0.4851x}$ $R^2 = 0.9518$	$y = 4.2101e^{0.4565x}$ $R^2 = 0.9505$	$y = 5.4632e^{0.5103x}$ $R^2 = 0.9875$
根长	砂壤土	0	$y = 2.2762e^{0.3965x}$ $R^2 = 0.9866$	$y = 7.9421e^{0.3991x}$ $R^2 = 0.9881$	$y = 11.763e^{0.2688x}$ $R^2 = 0.9996$	$y = 13.694e^{0.3743x}$ $R^2 = 0.9995$
		1	$y = 1.7178e^{0.3814x}$ $R^2 = 0.9647$	$y = 6.0752e^{0.3814x}$ $R^2 = 0.9646$	$y = 8.536e^{0.2951x}$ $R^2 = 0.9883$	$y = 7.5947e^{0.4963x}$ $R^2 = 0.9854$
	壤土	0	$y = 1.2378x^{1.5536}$ $R^2 = 0.9619$	$y = 4.8193x^{1.4967}$ $R^2 = 0.9631$	$y = 11.833x^{0.5197}$ $R^2 = 0.9773$	$y = 6.8222e^{0.4488x}$ $R^2 = 0.9939$
		1	$y = 0.7651x^{1.7863}$ $R^2 = 0.99$	$y = 2.7046x^{1.7867}$ $R^2 = 0.99$	$y = 6.1197x^{0.925}$ $R^2 = 0.979$	$y = 4.1996e^{0.4953x}$ $R^2 = 0.9927$
	砂壤土	0	$y = 2.1359x^{1.3552}$ $R^2 = 0.9812$	$y = 5.092e^{0.602x}$ $R^2 = 0.9925$	$y = 14.875x^{0.6189}$ $R^2 = 0.9882$	$y = 13.95x^{0.8824}$ $R^2 = 0.9949$
		1	$y = 1.6957x^{1.3588}$ $R^2 = 0.9821$	$y = 5.9973x^{1.3588}$ $R^2 = 0.9821$	$y = 0.036x^{0.7994}$ $R^2 = 0.9976$	$y = 10.216x^{1.0062}$ $R^2 = 0.9983$

表 3 苜蓿根系抗拔力学性能指标的双因素方差分析

Table 3 Two factor analysis of variance on the mechanical performance indicators of alfalfa root resistance to pulling								
参数	壤土				砂壤土			
	抗拔力/ N	抗拔 强度/MPa	位移/ mm	拉拔能/ (mm·N)	抗拔力/ N	抗拔 强度/MPa	位移/ mm	拉拔能/ (mm·N)
根径	73.2 *	43.8 *	59.4 *	447.1 *	123.5 *	123.5 *	1222.6 *	19.2 *
干湿交替	31.4 *	8.7 *	73.2 *	118.5 *	48.3 *	48.3 *	654.6 *	10.3 *
干湿交替×根径	0.9	1.7	0.3	10.6 *	4.4 *	4.4 *	0.6	1.8
根长	95.1 *	95.1 *	140 *	536.6 *	352.5 *	352.4 *	5356.9 *	5432.1 *
干湿交替	46.5 *	46.5 *	63.9 *	159.2 *	114.5 *	114.4 *	2436.1 *	938.1 *
干湿交替×根长	3.8 *	3.8 *	1.6	9.6 *	16.5 *	16.5 *	16.9 *	16.2 *
容重	138.6 *	138.6 *	2235.6 *	5892.8 *	102.9 *	102.9 *	3438.2 *	4221.9 *
干湿交替	23 *	23 *	604.5 *	2253.4 *	15.5 *	15.5 *	1185.9 *	680.6 *
干湿交替×容重	3.1 *	3.1 *	9.2 *	97.7 *	2.6	2.6	1.3	15.2 *

注: * 表示有显著差异($p < 0.05$);无 * 表示无显著差异($p > 0.05$)。

不同土质类型下苜蓿根系抗拔力学性能有显著差异。苜蓿根系在砂壤土中的最大抗拔力、最大抗拔强度、最大抗拔力对应的位移以及根系拉拔能都显著高于壤土。其原因可能为砂壤土含有较多、较大的砂粒。当土壤颗粒越大时,其形状越不规则,导致土壤颗粒表面越粗糙。土壤颗粒越大,在拉拔过程中土壤颗粒和根系相互错动使土颗粒重新排列组合所需的阻力就越大^[22]。因此根系在砂壤土中的抗拔力学性能表现出显著优于壤土的力学性能。

4 结论

(1) 苜蓿根系最大抗拔力、位移和拉拔能与根径均呈正指数函数关系,最大抗拔强度与根径呈负指数函数关系;根系最大抗拔力、最大抗拔强度、最大抗拔力对应的位移和根系拉拔能与根系长度呈正指数函数关系;根系最大抗拔力、最大抗拔强度、最大抗拔力对应的位移与土壤容重呈正幂函数关系。壤土中,根系拉拔能与容重呈正指数函数关系;砂壤土中,根系拉拔能与容重呈正幂函数关系。

(2) 壤土和砂壤土中,干湿交替导致苜蓿根系最大抗拔力、最大抗拔强度、最大抗拔力对应的位移以及拉拔能均显著减小。

(3) 苜蓿根系在砂壤土中的最大抗拔力、最大抗拔强度、最大抗拔力对应的位移以及根系拉拔能均显著高于壤土,且干湿交替在砂壤土中对苜蓿根系抗拔力学性能指标的影响小于在壤土中的影响。

(4) 根径和干湿交替次数的耦合作用只在砂壤土中对抗拔力、抗拔强度影响显著;根长和干湿交替次数的耦合作用在两种土质中均对抗拔力、抗拔强度和拉拔能影响显著,而只在砂壤土中对位移影响显著;容重和干湿交替次数的耦合作用只在壤土中对抗拔力、抗拔强度和最大抗拔力对应的位移影响显著,而在两种土质中均对拉拔能影响显著。

参考文献:

- [1] 李佳佳,樊妙春,上官周平.黄土高原南北样带刺槐林土壤碳、氮、磷生态化学计量特征[J].生态学报,2019,39(21):7996-8002.
- Li J J, Fan M C, Shangguan Z P. Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus of the Robinia pseudoacacia forest on the north-south strip of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(21):7996-8002.
- [2] Reubens B, Poesen J, Danjon F, et al. The role of fine and

coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review[J]. Trees-Structure and Function, 2007,21(4):385-402.

- [3] 张俊,张昕,严为贵,等.公路边坡典型乔灌木根系固土特性研究[J].智能城市,2020,6(23):39-40.
- Zhang J, Zhang X, Yan W G, et al. Study on soil fixing characteristics of typical arbor and shrub root systems on highway slopes[J]. Intelligent City, 2020,6(23):39-40.
- [4] 邢书昆,张光辉,朱平宗.黄土丘陵沟壑区退耕年限对根—土复合体抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):41-48,54.
- Xing S K, Zhang G H, Zhu P Z. Effect of vegetation restoration age shear strength of root-soil system in hilly ang gully region of the loess plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(4):41-48,54.
- [5] 肖海,张千恒,夏振尧,等.拉拔作用下护坡植物香根草根系的力学性能[J].农业工程学报,2022,38(11):91-97.
- Xiao H, Zhang X H, Xia Z Y, et al. Mechanical properties of roots of Vetiveria zizanioides as protection slope plants under tensile and pullout conditions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(11):91-97.
- [6] 常婧美,王桂尧,胡圣辉,等.灌木根系几何特性对拉拔力影响的试验研究[J].水土保持通报,2018,38(6):67-73.
- Chang J M, Wang G Y, Hu S H, et al. Experimental study on effect of geometric characteristics of shrub roots on pulling force[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(6):67-73.
- [7] 张春晓,陈终达.香根草根—土界面的单根拉拔摩擦特性研究[J].江苏科技信息,2016,503(26):69-71.
- Zhang C X, Chen Z D. Study of single drawing friction characteristics of Vetiveria zizanioides L. root-soil interface[J]. Jiangsu Science and Technology Information, 2016,503(26):69-71.
- [8] 夏振尧,管世烽,牛鹏辉,等.麦冬和多花木蓝根系抗拉拔特性试验研究[J].水土保持通报,2015,35(6):110-113.
- Xia Z Y, Guan S F, Niu P H, et al. Experimental study on pull-out resistive properties of ophiopogon japonicus and indigofera amblyantha roots[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015,35(6):110-113.
- [9] Wu T H, McKinnell III W P, Swanston D N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16(1):19-33.
- [10] 李东嵘.黄土区紫花苜蓿与沙棘根系拉拔受力机理研究[D].太原:太原理工大学,2020.
- Li D R. Root tensile and pullout mechanism of alfalfa

- and seabuckthorn in loess region[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020.
- [11] 周林虎,胡夏嵩,刘昌义,等. 西宁盆地黄土区 4 种灌木原位拉拔试验[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 236-242.
- Zhou L H, Hu X S, Liu C Y, et al. In-situ pull-out test four shrub plants in Xining basin of the loess plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(5): 236-242.
- [12] 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[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(3): 22-30.
- Zhang W H, Wang G Y, Hu S H, et al. Indoor experimental study on the pull-out force of symplocos anomala brand root[J]. Science of Soil and Water Conservation in China, 2020, 18(3): 22-30.
- [13] 刘小光. 林木根系与土壤摩擦锚固性能研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- Liu X G. Study on friction and anchorage characteristics between root system and soil[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.
- [14] 管世烽,夏振尧,张伦,等. 水平荷载作用下多花木蓝根系拉拔试验研究[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(6): 24-28.
- Guan S F, Xia Z Y, Zhang L, et al. Pull-out test of Indigofera amblyantha craib root under horizontal load[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(6): 24-28.
- [15] 刘学华. 干湿交替下土壤 C, N 养分流失机理研究[D]. 上海: 东华大学, 2015.
- Liu X H. Mechanism of soil C, N nutrient losses during wetting and drying processes[D]. Shanghai: Donghua University, 2015.
- [16] 孙召军,李金山,贾艳辉,等. 干湿交替次数对土壤干密度和饱和导水率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(6): 89-96.
- Sun S J, Li J S, Jia Y H, et al. Effect of wetting-drying cycles on bulk density and saturated hydraulic conductivity of soils [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(6): 89-96.
- [17] 袁志辉. 干湿循环下黄土的强度及微结构变化机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- Yuan Z H. Research on change mechanism of strength and microstructure of loess under wetting-drying cycle [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [18] Fan C C, Su C F. Effect of soil moisture content on the deformation behavior of root-reinforced soils subjected to shear[J]. Plant & Soil, 2009, 324(1/2): 57-69.
- [19] 李臻,余芹芹,杨占风,等. 西宁盆地两种灌木植物原位拉拔试验及其护坡效应[J]. 水土保持研究, 2011, 18(3): 206-209.
- Li Z, Yu Q Q, Yang Z F, et al. Research on in situ pull-out tests of two shrubs and its effects on slope protection in Xi'ning basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(3): 206-209.
- [20] 刘艳,马茂华,吴胜军,等. 干湿交替下土壤团聚体稳定性研究进展与展望[J]. 土壤, 2018, 50(5): 853-865.
- Liu Y, Ma M H, Wu S J, et al. Soil aggregates as affected by wetting-drying cycle: a review [J]. Soils, 2018, 50(5): 853-865.
- [21] Peng X, Horn R, Smucker A. Pore shrinkage dependency of inorganic and organic soils on wetting and drying cycles[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(4): 1095-1104.
- [22] 易富,王政宇,杜常博,等. 土工格栅与不同粒径填料界面作用特性试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(8): 2557-2562.
- Yi F, Wang Z Y, Du C B, et al. Experimental study on interface characteristics of geogrid and different particle size fillers[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(8): 2557-2562.