

鄂州航空港通渠河岸植物根系加固土体的机理

黄钢^{1,2}, 郑明新¹, 王庆², 卢雪松², 彭晶²

(1. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 黄冈师范学院 建筑工程学院, 湖北 黄冈 438000)

摘要: [目的] 定量分析鄂州航空港通渠河岸草灌植物(狗牙根、香根草和紫穗槐)根系分布参数对土体的加固作用,为更好地评价植物根系固土效能提供理论依据。[方法] 通过根钻取样法探究草灌根系分布参数在不同深度的变化规律;开展室内直剪试验和室外张力计测试分别研究了根系分布参数变化对抗剪强度指标和基质吸力的影响。[结果] ①植物的根系分布总体上随着土体深度的增加而减少,灌木植物(紫穗槐)根系分布参数在深度为 0—40 cm 范围内是草本植物(香根草和狗牙根)的 2.13~2.90 倍。②灌木植物根—土复合体黏聚力明显大于草本植物,黏聚力与根长度密度(RLD)和根表面积密度(RSAD)满足多项式函数关系。③根系分布参数 RLD 和 RSAD 的黏聚力和基质吸力差异达到显著水平($p < 0.05$)。④灌木植物(紫穗槐)RLD 和 RSAD 对土体基质吸力的增强作用存在最优含根密度。[结论] 狗牙根、白三叶和紫穗槐根系均能显著发挥固土作用。由于根系分布、固土深度、固土方式等差异,三者的固土作用不同,可将三者结合种植,不仅有利于河岸边坡的稳定,也可提高土体的抗冲性。

关键词: 通渠河岸; 根—土复合体; 黏聚力; 基质吸力; 根系分布参数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)01-0015-07

中图分类号: TU411.3

文献参数: 黄钢, 郑明新, 王庆, 等. 鄂州航空港通渠河岸植物根系加固土体的机理[J]. 水土保持通报, 2021,41(1): 15-21. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.01.003; Huang Gang, Zheng Mingxin, Wang Qing, et al. Mechanism of soil reinforcement by vegetation roots in canal of Ezhou airport [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(1):15-21.

Mechanism of Soil Reinforcement by Vegetation Roots in Canal of Ezhou Airport

Huang Gang^{1,2}, Zheng Mingxin¹, Wang Qing², Lu Xuesong², Peng Jing²

(1. Department of Civil Architecture College, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China;

2. Department of Civil and Architecture Engineering, Huanggang Normal University, Huanggang, Hubei 438000, China)

Abstract: [Objective] The root distribution parameters of grass-shrub vegetation (*Cynodon dactylon*, *Vetiveria zizanioides*, and *Amorpha fruticosa*) on soil reinforcement on the banks of the canal of Ezhou airport were analyzed quantitatively to provide a theoretical basis for better evaluation of the effectiveness of vegetation root soil. [Methods] The root-drill sampling method was used to explore the changes in grass-shrub root distribution parameters at different depths. Indoor direct shear tests and outdoor tensiometer tests were carried out to study the effect of root distribution parameters on shear strength indices and matrix suction. [Results] ① The root distribution of grass-shrub vegetation generally decreased with increasing soil depth. The root distribution parameters of shrubs (*A. fruticosa*) and herbs (*C. dactylon* and *V. zizanioides*) were 2.13—2.90 times in the depth of 0—40 cm. ② The cohesion of the shrub root-soil composite was significantly higher than that of the herbs, and the cohesion satisfied a polynomial function relationship with root length density (RLD) and root surface area density (RSAD). ③ RLD and RSAD had significant differences in cohesion and matrix suction ($p < 0.05$). ④ There was an optimal root density for the RLD and RSAD of shrubs (*A. pseudoacacia*) to enhance the suction of the soil matrix. [Conclusion] The root systems of *C. dactylon*, *V. zizanioides*, and *A. fruticosa* can play a significant role in soil fixing. Owing to their

收稿日期: 2020-05-31

修回日期: 2020-09-21

资助项目: 国家自然科学基金项目“干湿循环条件下煤系土强度特性及边坡致灾风险分析”(51568022); 湖北省教育厅科技研究项目“鄂东大别山区岩质边坡原生态恢复技术研究”(30002/203201920903); 黄冈师范学院高级别培育项目(204202004303)

第一作者: 黄钢(1987—), 男(汉族), 江西省九江市人, 博士研究生, 主要从事环境岩土保护的研究工作。Email: 627823405@qq.com。

root distribution, soil fixing depth, soil fixing methods, the three plants have different soil-fixing functions. The three plants can be combined for planting, which is not only beneficial to the stability of riverbank slopes, but also improves the soil erosion resistance.

Keywords: riparian riverbank; root-soil composite; cohesion; matric suction; root distribution parameter

中国是山地大国,水土流失问题十分突出,且灾情严重。生态护坡措施是防治水土流失的一种重要措施,在边坡工程治理水土流失中植物根系发挥着重要的作用^[1]。植物根系可以改善边坡土壤结构,增强根土壤的抗蚀性、抗冲性和抗剪切性,提高边坡的稳定性^[2]。植物根系对边坡表层土壤加固作用已成为当前生态环境领域研究的热点。

目前,国内外学者探索植物根系对土体加固主要集中在根系的力学效应方面^[3]。研究表明植物根系可使坡面表层土抗剪强度显著提高^[4],根系主要通过增强土壤的黏聚力来提高土壤的抗剪强度^[5]。根系在土体中延伸、穿插、交织分布,增强土层整体性,提高其抗冲性^[6]。土壤抗侵蚀性、抗冲性与抗剪切性的提高主要通过植物根系的分布和力学特性及其与土壤的作用来实现^[7]。根—土加固效果主要取决于根系形态分布,垂直于土体表面延伸的根系可以通过增加剪切面上根土体的抗剪强度来加固土体^[8]。根系的作用依赖于其根系分布参数^[9]。根系分布参数反应了植物根系在土中的分布特征和根系形态^[10]。近年来,采用根长度密度(RLD)、根重量密度(RWD)和根面积比(RSAD)等^[11-12]来表示根系分布参数。Fu等^[13]研究了黄土地区根系分布参数随深度的变化及对土壤抗剪强度影响。Vannoppen等^[14]研究发现根长度密度(RLD)比根重量密度(RWD)更适合评价根系对土体的抗侵蚀性。但研究发现根重量密度(RWD)影响根系的固持力大小^[15],根系重量密度与土壤抗剪强度密切相关^[16]。以上研究可知,虽然植物根系分布对土体有加固作用被大家所认知,但根系分布参数对边坡表层土壤的强度影响规律如何,特别是对于植物边坡浅层非饱和土而言,基质吸力不容忽视^[17-18]。植物根系形态结构特征因物种和生长的环境条件不同而不同^[19]。不同草灌植物根系分布参数对基质吸力规律的研究成果相对较少。目前还没有形成共识。

本文以鄂州国际物流航空港马湖水系统综合治理工程通渠河岸某生态边坡为对象,研究了植物根系对土的加固机理,采用根钻取样法探究了 3 种植物不同深度根分布参数变化规律,开展直剪试验和张应力测试研究了根分布参数变化对抗剪强度指标和基质吸力的影响,定量探索河道植物根系对土加固效果。本次研究对河岸边坡合理利用和发挥植物根系作用

提供新的参考资料,对鄂州航空港通渠河岸浅表层边坡的防治提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

马湖水系统综合治理工程是保障航空都市区和未来鄂州机场防洪安全的基础性工程,河道整治和河道边坡生态修复需要抵御 20 年一遇的洪水和 50 年一遇的暴雨。项目地处属于北亚热带季风性湿润气候,夏季占全年降水量的 40%,5 月中旬至 7 月中旬为梅雨季节,地区年平均降水量 1 282.8 mm,月最大降水量 185 mm。该河岸边坡为开挖形成的两级边坡,坡比为分别为 1:0.5,1:1。一级边坡高约为 8 m,土体主要为中风化花岗岩,地质情况较好。二级边坡高约为 6 m,土体经过现场勘测试验测得研究区为粉质黏土,边坡防护为客土喷播的生态边坡防护形式,采用植被生长 1 a 的狗牙根和香根草草本植物与紫穗槐的灌木植物相结合(见图 1)。

狗牙根(*Cynodon dactylon*):多年生草本植物,喜光耐旱耐瘠,生长期长,生活力强,繁殖力强,须根系发达,具有根匍匐茎,匍匐茎蔓延力强,蘖茎部形成蘖节,分蘖节上生不定根,耐频繁的刈割,践踏后易于复苏。狗牙根植物在湖北翻坝高速等工程被使用,为良好的固坡保土植物。

香根草(*Vetiveria zizanioides*):多年生草本植物,抗热抗寒性强,可生长酸性和砂质等特殊土中,具有很强的繁殖能力,须根系发达,叶片茂盛,蓄水保土作用明显,适宜在坡地、河岸种植护岸,防治水土流失。

紫穗槐(*Amorpha fruticosa*):多年生的落叶灌木,该植物耐旱、耐寒、耐盐碱、耐湿、抗风沙、抗逆性能力极强,对土壤要求不严,在道路边坡、河岸边坡、盐碱地均可生长。该植物根萌芽繁殖力强,根系发达,可深入土层 2 m 左右或更深,具有很好稳定边坡和水土保持的能力。

根据根形态的分类^[20],狗牙根和香根草为草本植物,其根系分布类型符合 M 型(大多数根系分支并向不同方向延伸)。大多数的根系直径小于 2 mm,须根发达,和土壤结合较好,有利于土壤的加固。紫穗槐的根系分布类型符合 VH 型(主根发达,侧根向水平方向延伸),主根发达,侧根丰富且大多数直径大

于 2 mm。因此,灌木植物(紫穗槐)有利于边坡的稳定和抗风作用。



注:a 渠道生态边坡; b 狗牙根根形态; c 紫穗槐根形态; d 香草根形态。

图 1 通渠河岸生态边坡及草灌植物根形态

1.2 试验方法

1.2.1 根系分布特征 本试验于 2019 年 11 月 1 到 12 月 25 日在鄂州市燕矶镇的马湖水系统综合治理工程通渠河岸边坡和黄冈师范学院建筑工程学院实验室展开,从研究区的二级边坡上选择 3 种植物。在距坡面 0—10, 10—20, 20—30, 30—40, 40—50, 50—60, 60—70 cm 内用根钻采集根土样品,根钻内径为 10 cm,每层 5 个样品。用根土样本来测量根系分布参数。先用水冲洗掉根土样的土壤部分。根据 3 种根系直径、长度和表面形状等特征分拣 3 种植物根系,得到的根系放入保鲜袋中。由于 3 种植物死根含量极低(小于 1%),试验选取的根系为活根。再使用 WinRHIZO (Pro, 200 4 c)根系分析系统确定根系指标:根长、平均根直径、根表面积和根体积。根重量的获取主要是采用烘干法:将根系置于烘箱中,在 65 °C 下干燥 48 h。

根据 Murielle 等^[15]研究,根系分布参数采用根长度密度 RLD、根重量密度 RWD 和根表面积密度 RSAD3 个参数来表示,公式如下:

$$RLD = \frac{L}{V} \times 100\% \quad (1)$$

式中: L 为根在根钻内长度(cm); V 为根钻体积(cm^3)。

$$RWD = \frac{W}{V} \times 100 \quad (2)$$

式中: W 为根在根钻内重量(g)。

$$RSAD = \frac{A}{V} \times 100\% \quad (3)$$

式中: A 为根在根钻内的表面积(cm^2)。

1.2.2 抗剪强度参数测定 分别在距坡面 0—10, 10—20, 20—30, 30—40, 40—50, 50—60, 60—70 cm 处采用铝制饭盒采集原状根—土样品,每层 4 个样品。利用南京土壤仪器厂生产的 ZJ(三速)电应变控制直剪仪测量根—土复合体试样的抗剪强度参数。依次施加垂直荷载 100, 200, 300, 400 kPa。力环速率系数为 1.5 kPa/0.01 mm。剪切速率为 1.0 r/min。抗剪强度选择曲线的峰值点剪切应力,或选择相对应的剪切位移 4 mm 的剪切应力(如曲线上没有明显的峰值点)。试验方法主要参照国家土工试验标准方法。

1.2.3 基质吸力测试 植物边坡根土部分因一般在地下水水位线上浅层土体,为非饱和土。非饱和土是一种由固相、液相和气相三相组成的土,气相和液相的存在影响着土体的强度特性。非饱和土抗剪强度可按 Fredlund 等提出采用延伸的摩尔—库伦公式来表示:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + (u_a - u_w) \tan \varphi^b + c \quad (4)$$

式中: c 和 φ 为有效应力强度参数; σ 为净法向应力和 $u_a - u_w$ 为基质吸力; φ^b 为随基质吸力变化的剪切摩擦角,它一般都会随着吸力的增加而减少,很难测定,一般取 $1/2\varphi$ 。

基质吸力的测定仪器采用 UGT 张力计(见图 2)。UGT 张力计是基于多孔瓷头和压力量测装置组成的。在使用前先对张力计加满蒸馏水,预加一定的正压力得到基准压力值。将张力计插入距坡面不同深度土中静置 10 min,待土中的吸力与陶瓷头的吸力达到平衡时,测得土中的基质吸力值。最后确定的基质吸力为测得的基质吸力值减去预加的基准压力值,每个深度的基质吸力测量 3 次,取平均值。分别距坡面 5, 15, 25, 35, 45, 55, 65 cm 处测定 3 种植物根土的基质吸力。



图 2 采用 UGT 张力计测试现场

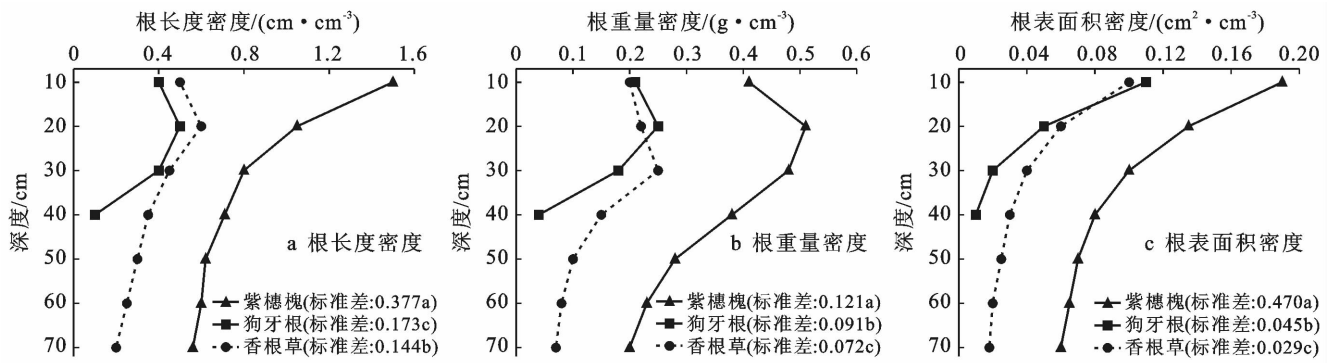
1.2.4 数据统计分析 对试验数据采用单因素方差分析(ANOVA)检验不同根—土复合体的抗剪强度指标和基质吸力的差异。试验数据在 IBM SPSS Statistics 23 统计分析软件中进行。

2 结果与分析

2.1 植物根系分布参数

不同深度处 3 种植物的根系分布参数见图 3。3 种植物的根分布参数总体上随着土体深度的增加而减少,且平均根表面密度 RSAD 差异达到显著水平($p < 0.05$)。由图 3a 可知,在深度为 0—40 cm 土层范围内,平均根长密度 RLD 最大的是紫穗槐(1.35 cm/cm^3),其次是香根草(0.63 cm/cm^3),最小的是狗牙根(0.47 cm/cm^3)。紫穗槐的平均根长密度 RLD 是香根草的 2.13 倍和狗牙根的 2.90 倍。在深度为 40—60 cm 土层范围内,没有狗牙根根系存在,紫穗槐的平均根长密度 RLD 是香根草的 2.37 倍。狗牙

根在 0—40 cm 土层的总根长密度占有所有土层的总根长密度的 99.99%,香根草占比 70.12%,紫穗槐占比 50.13%。由图 3b 可知,香根草、紫穗槐 10—20, 20—30 cm 土层的 RWD 均大于 0—10 cm 土层,狗牙根 10—20 cm 土层的 RWD 大于 0—10 cm 土层。土体表层(0—30 cm)的植物 RWD 明显大于更深土层。紫穗槐重量密度 RWD(0.59 g/cm^3)在深度为 0—40 cm 土层范围内分别是香根草 RWD(0.27 g/cm^3)的 2.17 倍和狗牙根 RWD(0.23 g/cm^3)的 2.61 倍。紫穗槐重量密度 RWD 在深度为 40—70 cm 土层范围内明显大于香根草。从图 3c 可以看出,根表面密度明显随着土体深度的增加而减少。在深度为 0—40 cm 的土层范围内,紫穗槐的平均根表面密度 RSAD ($0.17 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$)分别是香根草 RSAD($0.08 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$)的 2.19 倍和狗牙根 RSAD($0.06 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$)的 2.66 倍。基于以上的分析可以看出,灌木植物(紫穗槐)的根系分布参数明显大于草本植物(香根草、狗牙根)。



注:标准差值数字后的 a, b, c 为显著性差异符号。a 表示最大, b, c 次之。下同。

图 3 不同深度植物根系分布参数

2.2 抗剪强度参数

通过对不同土层深度的 3 种植物根—土复合体进行直剪试验,测得抗剪强度参数(见图 4)。由图 4a 可知,3 种草灌植物黏聚力总体上随着土体深度的增加而减少,但不显著($p = 0.925$)。在土层 10—20 cm 内黏聚力大小依次为:紫穗槐根—土复合体 > 香根草根—土复合体 > 狗牙根—土复合体,而在 20—30, 30—40 cm 土层的香根草根—土复合体黏聚力小于狗牙根—土复合体的。灌木(紫穗槐)根—土复合体黏聚力明显大于草本(香根草和狗牙根)根—土复合体的黏聚力,分别是香根草根—土复合体平均黏聚力(27.61 kPa)的 1.75 倍、狗牙根根—土复合体平均黏聚力(26.07 kPa)的 1.85 倍。在深度为 0—40 cm 范围,相对于狗牙根根—土复合体平均黏聚力(26.07 kPa),紫穗槐根—土复合体平均黏聚力(48.25 kPa)提高了 1.85 倍。在深度为 40—70 cm 范围内,紫穗

槐(26.71 kPa)的黏聚力增强效果明显大于香根草(15.38 kPa)。说明灌木植物(紫穗槐)根—土复合体黏聚力明显大于草本植物(香根草和狗牙根)。从图 4b 可以看出 3 种植物根—土复合体内摩擦角总体上随着土体深度的增加而减少,且呈显著水平($p < 0.05$)。在 3 种植物根—土复合体在不同深度下,内摩擦角变化不大。说明草灌物种对土体的内摩擦角影响较小。

植物根系分布参数影响着其抗剪强度参数,3 种植物根土抗剪强度参数与根系分布参数的关系和显著性见图 5。图 5a 可知,黏聚力与 RLD, RWD, RSAD 回归分析的拟合参数分别为 0.94, 0.83, 0.88。3 种根系分布参数的黏聚力差异达到显著水平($p < 0.05$)。黏聚力与 RLD 满足多项式函数关系, RLD 主要集中在 $0.43 \sim 0.9 \text{ cm}/\text{cm}^3$ 范围内;黏聚力与 RSAD 满足多项式函数关系, RSAD 主要集中在小于

0.1 cm²/cm³ 范围内,在这些范围内,黏聚力快速增加。黏聚力与 RWD 满足线性函数关系。说明 RWD 的增加有利于固土作用且满足线性关系,与 Marie 等^[15]结果生物量和抗剪强度一致呈线性关系一致。土壤内摩擦角的增大较黏聚力速率缓慢(图 5)。土

壤内摩擦角与草灌根系分布参数呈线性关系,但土壤内摩擦角差异未达到显著性水平($p>0.05$)。这主要是因为草灌植物根系纤维细胞对土壤颗粒影响有关,增加的根系纤维细胞微生物活动增加土壤的团聚,对土壤表面摩擦力和土颗粒咬合力影响较小。

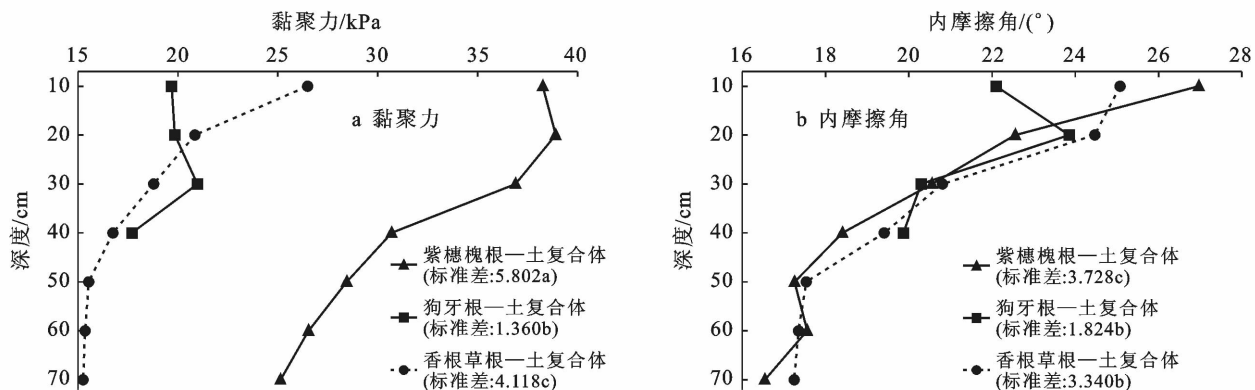
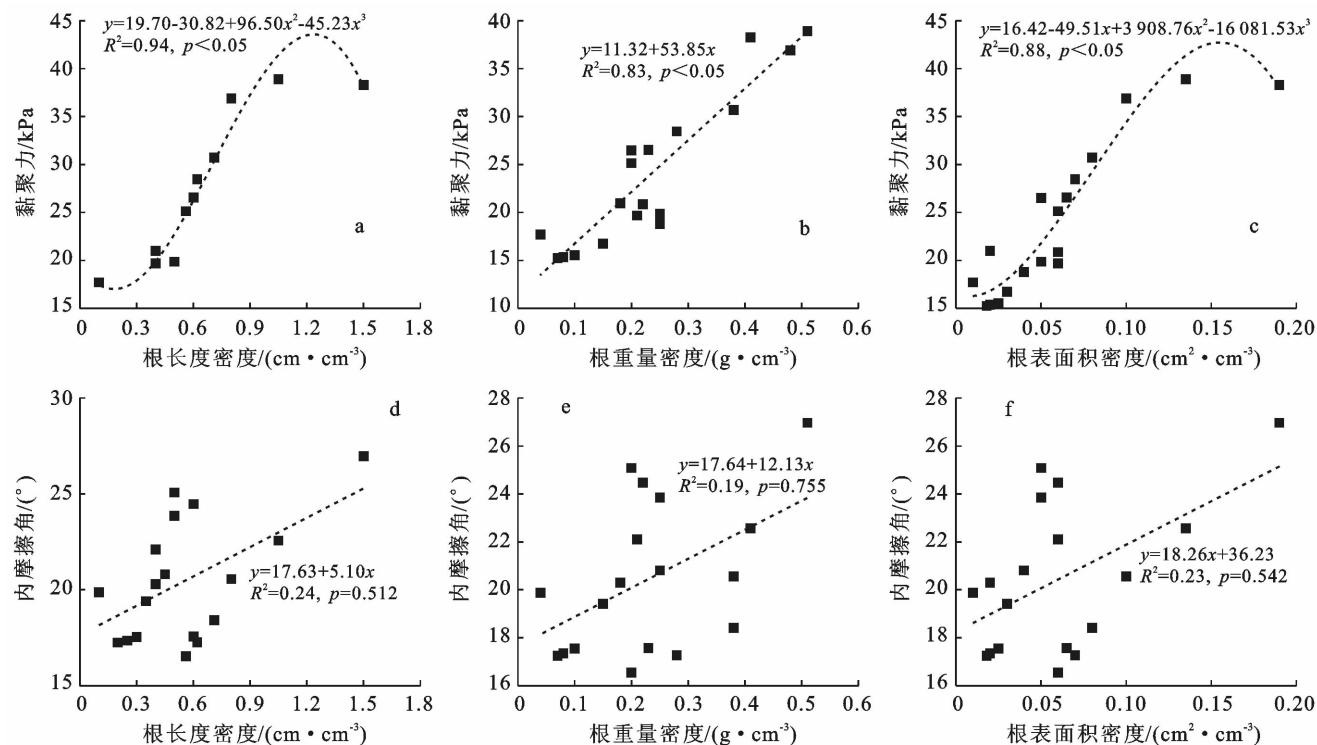


图 4 植被边坡不同深度根土的抗剪强度参数



注:a-c 为黏聚力与根分布参数的回归分析;d-f 为内摩擦角与根分布参数的回归分析。

图 5 抗剪强度指标与根分布参数的回归分析

2.3 基质吸力

由图 6 可知,草本植物(香根草和狗牙根)根-土复合体的基质吸力随着土体深度的增加而减少,而灌木植物(紫穗槐)根-土复合体的基质吸力随着深度的增加呈现先增加后减小趋势。在深度为 0—20 cm,香根草根-土复合体平均基质吸力(100 kPa)和狗牙根根-土复合体平均基质吸力(91.5 kPa)均高于紫穗槐

根-土复合体平均基质吸力(89 kPa)。在深度为 20—70 cm 范围内灌木植物(紫穗槐)根-土复合体的基质吸力明显大于草本(香根草和狗牙根)根-土复合体的基质吸力。在表层(0—20 cm)草本植物(香根草和狗牙根)提高土体基质吸力强于灌木(紫穗槐)的,但在灌木(紫穗槐)在深度为 20—70 cm 范围内提高的土体基质吸力强于草本植物(香根草和狗牙根)。

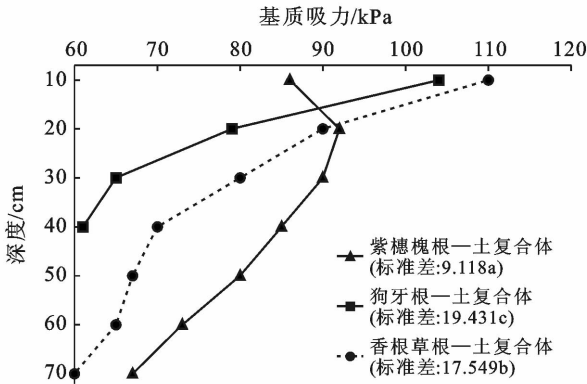


图 6 植被边坡不同深度根土的基质吸力

图 7 为基质吸力与 3 种植物根系分布参数的回归分析。根系分布参数 RLD 和 RSAD 的基质吸力差异达到显著性水平 ($p < 0.05$)。图 7a 可知,草本植

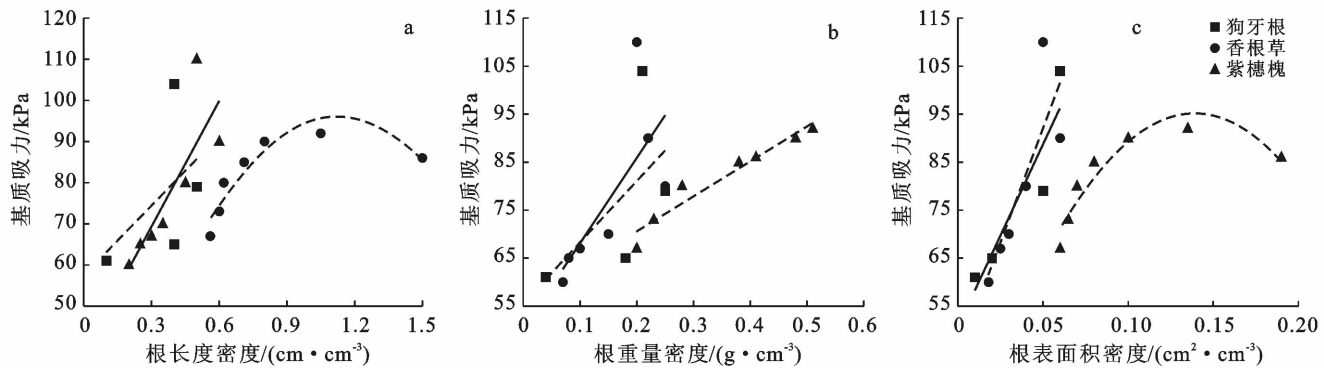


图 7 基质吸力与根分布参数的回归分析

3 讨论

3.1 植物根系对土加固机理分析

土壤冲刷是河岸最严重的环境问题之一^[21],影响着河道的畅通和周边生态环境的稳定^[22]。由于南方春夏暴雨频繁,在暴雨过程中或河道水位的上升会出现坡面侵蚀和巨大的土壤流失。大量的研究证实,河岸植物根系具有减少径流和土壤流失的潜力^[23-24]。通过本文得知草本植物香根草细根($d < 2 \text{ mm}$)根系的加筋和和灌木植物紫穗槐粗根($d > 2 \text{ mm}$)锚固,可以增加土壤与根系的黏聚力。这是由于根径越大,根系越深,根土界面摩擦力就越大,进而对土壤的摩擦锚固作用就越强^[5]。草本植物狗牙根须根($d < 1 \text{ mm}$)还可以阻止了土壤颗粒的分散,提高了土壤的抗侵蚀性,从而保证河岸边坡的整体稳定性^[25]。在浅层,植物根系的基质吸水作用可降低土壤的孔隙水压力(机械—水文效应)的作用提供了这种加固^[2]。并且由于根系错综盘结、纵横交错贯穿于土体中,起到加筋作用,提高河岸边坡的耐冲性和抗侵蚀性^[26]。鄂州航

物狗牙根和香根草根土基质吸力随着 RLD 的增加总体呈增大趋势,两者满足线性函数关系 ($p < 0.05$)。这说明草本植物 RLD 的增加可以增大基质吸力。灌木紫穗槐根土基质吸力随着 RLD 的增加呈先增大,出现峰值后随着 RLD 的增加而减小趋势,两者满足二阶多项式函数关系 ($p < 0.05$)。这说明灌木植物 RLD 的增加可以增大基质吸力,但是超过临界值后,基质吸力就会降低。见图 7c 中草灌植物根—土 RSAD 对基质吸力的影响与 RLD 相同。图 7b 的 RWD 与基质吸力关系满足线性关系,两者的关系不显著 ($p > 0.05$)。这说明 RLD 和 RSAD 的改变显著影响了基质吸力,可能是由于根系的长度和根土面积比影响了根系和土壤的接触面积,根土的接触面积影响着根系在土壤中的吸水面积,从而影响着土壤基质吸力^[11]。

空港通渠河岸植物根系的存在显著提高了土体的抗剪强度,这种增强作用主要是通过增加黏聚力和基质吸力来实现的。

3.2 根系分布参数的影响

植物根分布参数对抵抗降雨或河水上漲的侵蚀具有重要影响。本研究发现 3 种草灌植物根分布参数 RSAD 随着深度增加而显著降低趋势;狗牙根植物 RLD 和草灌植物 RWD 先随着深度的增加呈先增加,到峰值后降低。而 Jin 等^[11]得出灌木植物 RWD 随着深度的增加而减小趋势,这可能是作者选用的灌木苜蓿 (*Medicago Sativa*) 和本文的紫穗槐物种不同,根系对养分和水分的吸收能力不同,所以重量不同。Fu 等^[13]研究草灌植物 RLD 与深度呈指数关系,本研究的狗牙根植物 RLD 与深度不满足指数关系,这可能反应本文研究的 3 种草灌植物与 Fu 等研究的柠条锦鸡儿和霸王灌木植物物种的不同,需要进一步的研究来解释这些差异。根分布参数对黏聚力的影响也和 Jin 等^[11]研究成果有差异。Jin 等^[11]认为根分布参数与黏聚力的关系满足线性关系,而本文

研究 RLD, RSAD 与黏聚力的关系满足二次多项式函数关系的结论更为合理,其相关系数更大。这说明植物根—土复合体存在一个最优的根系密度,使根系土壤的黏聚力达到最大。本研究得出基质吸力与根系分布参数总体满足多项式或线性函数关系的结果是未考虑含水量的影响,张伟伟等^[5]认为草本植物根系对土壤的基质吸力的影响受降雨影响。植物根系的含水量与土壤的含水量的差值决定了根系的吸水能力,从而影响土壤的基质吸力^[27]。本研究表明植物根系可以提高河岸边坡的黏聚力和基质吸力,要确定植物根对土体的固土效果,还需进一步研究根长密度、根重量密度和根系表面积密度哪一因素起主导作用,以及 3 种根土分布参数对不同含水量根土基质吸力的研究。

鄂州航空港通渠河岸植物根系发达,草灌植物根土复合体抗剪强度的增加,可有效减少坡面土壤侵蚀和水土流失。灌木植物根—土复合体试样中最优含根量的确定,对于在鄂州航空港通渠开展河岸植被恢复的指导意义主要表现在:在开展河岸生态修复中可起到科学指导植物种植的作用。通过对种植植物的间距、密度等方面进行控制根系分布参数,进而实现植物根系在土体中接近或达到最优含根量,有助于最大限度地实现草灌植物根系的护坡作用,为鄂州航空港通渠河岸植被修复提供新思路。

4 结论

(1) 3 种草灌植物根系分布特征参数总体上随着土体深度的增加而减少。在深度为 0—40 cm 土层范围内,灌木植物(紫穗槐)根系分布数(RLD: 1.35 cm/cm³, RWG: 0.59 g/cm³, RSAD: 0.17 cm²/cm³)分别是香根草(RLD: 0.63 cm/cm³, RWG: 0.27 g/cm³, RSAD: 0.08 g/cm³)的 2.13~2.19 倍和狗牙根(RLD: 0.47 cm/cm³, RWG: 0.23 g/cm³, RSAD: 0.06 g/cm³)的 2.61~2.90 倍。

(2) 草灌植物黏聚力上随着土体深度的增加而减少;灌木植物(紫穗槐)根—土复合体黏聚力明显大于草本植物(香根草和狗牙根)。黏聚力与 RLD 和 RSAD 满足多项式函数关系。黏聚力在 RLD 为 0.43~0.9 cm/cm³ 和 RSAD 小于 0.1 cm²/cm³ 范围内快速增加,3 种根系分布特征参数的黏聚力差异达到显著水平($p < 0.05$)。土壤内摩擦角的增大较内聚力速率缓慢。土壤内摩擦角与草灌根系分布参数关系呈线性关系,但差异未达到显著水平($p > 0.05$)。

(3) 草本植物根—土复合体的基质吸力随深度的增加而减少,而紫穗槐根—土复合体的基质吸力随

深度的增加呈先增加后减小。基质吸力随着草本植物 RLD 和 RSAD 的增加而增大。灌木植物(紫穗槐)RLD 和 RSAD 对土体基质吸力的增强作用存在最优含根密度,根—土复合体含根密度为最优含根密度时其基质吸力可至相对最大值。根系分布参数 RLD 和 RSAD 的基质吸力差异达到显著水平($p < 0.05$)。

本研究主要对河岸边坡植物的根系形态和根系分布进行了研究,由于根系分布的影响随植物生长时间的变化而变化,且受试验条件的限制,未进行不同时空草灌植被根系的固土分析。今后应加强河岸边坡植物根系固土的系统性研究。且河岸土壤水分作为一个重要因素,影响根系的生长、分布和根系固土作用,其影响作用较为复杂,为是今后研究的主要内容。

[参 考 文 献]

- [1] 陈文乐, 杜鹃, 方迎潮, 等. 泥石流频发区典型乔灌植物根系的固土效应[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 32-39.
- [2] 吴宏伟. 大气—植被—土体相互作用: 理论与机理[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(1): 1-47.
- [3] 钟荣华, 鲍玉海, 贺秀斌, 等. 三峡水库消落带 4 种草本根系抗拉特性及根系粘聚力[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 188-194.
- [4] 张强. 黑沙蒿根—土复合体土工特性研究[D]. 内蒙古呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [5] 张伟伟, 吴玉柏, 纪建中, 等. 降雨入渗条件下黄河古河道草本植物护坡效应分析[J]. 中国农村水利水电, 2016 (11): 151-155, 159.
- [6] 曹云生, 陈丽华, 盖小刚, 等. 油松根系的固土力学机制[J]. 水土保持通报, 2014, 34(5): 6-10.
- [7] 孟飞. 河道植物护岸耐冲性研究[D]. 辽宁 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- [8] 吴鹏, 谢朋成, 宋文龙, 等. 基于根系形态的植物根系力学与固土护坡作用机理[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(5): 139-142.
- [9] 欧阳前超, 魏杨, 周霞, 等. 土石山区护坡草本植物根系抗拉力学特性[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(4): 35-41.
- [10] 刘秀萍, 陈丽华, 陈吉虎. 刺槐和油松根系密度分布特征研究[J]. 干旱区研究, 2007, 24(5): 647-651.
- [11] Jin Huifang, Shi Dongmei, Zeng Xiaoying, et al. Mechanisms of root-soil reinforcement in bio-embankments of sloping farmland in the purple hilly area, China [J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(10): 2285-2298.
- [12] De Baets S, Torri D, Poesen J, et al. Modelling increased soil cohesion due to roots with EUROSEM [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008, 33 (13): 1948-1963.

- [10] 齐鹏程. 川西北高寒沙地 4 种适生植物根际土壤有机碳、氮组分及酶活性特征研究[D]. 四川 成都: 四川农业大学, 2016.
- [11] 苟小林, 刘文辉, 陈有军, 等. 植物沙障不同种植模式对川西北沙地的恢复效应[J]. 草业学报, 2019, 28(6): 33-44.
- [12] 刘成志. 高寒地区河谷型沙害形成机理与防治技术研究[D]. 湖北 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [13] 杨洪晓, 卢琦, 吴波, 等. 青海共和盆地沙化土地生态修复效果的研究[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(2): 7-12.
- [14] 刘君梅. 共和盆地植被恢复过程中生物多样性及其与生境的关系研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
- [15] 李昌龙, 徐先英, 金红喜, 等. 玛曲高寒草甸沙化过程中群落结构与植物多样性[J]. 生态学报, 2014, 34(14): 3953-3961.
- [16] 拉元林, 全晓毅. 青海省海南州高寒草地荒漠化治理技术与对策[J]. 草业科学, 2005, 22(8): 55-61.
- [17] 齐雁冰, 常庆瑞, 贾科利, 等. 高寒地区荒漠化现状与防治途径探讨[J]. 水土保持学报, 2003, 17(5): 39-41.
- [18] Luo Jiufu, Deng Dongzhou, Zhang Li, et al. Soil and vegetation conditions changes following the different sand dune restoration measures on the Zoige Plateau [J]. Plos One, 2019, 14(9): e0216975.
- [19] 王升堂. 极端高寒干旱区城镇防沙的理论与实践: 以西藏狮泉河镇为例[D]. 北京: 北京师范大学, 2006.
- [20] 尹书乐. 共和盆地典型人工灌木群落生态特性与土壤碳研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015.
- [21] 柳小妮, 孙九林, 张德罡, 等. 东祁连山不同退化阶段高寒草甸群落结构与植物多样性特征研究[J]. 草业学报, 2008, 17(4): 1-11.
- [22] 田丽慧, 张登山, 彭继平, 等. 高寒沙地人工植被恢复区地表沉积物粒度特征[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 32-39.
- [23] 蒲琴, 胡玉福, 蒋双龙, 等. 不同生态治理措施下高寒沙化草地土壤氮素变化特征[J]. 草业学报, 2016, 25(7): 24-33.
- [24] 张学元. 青海高寒地区沙化土地治理途径的研究[J]. 中南林业调查规划, 2006, 25(3): 11-14, 22.
- [25] 苟小林, 涂卫国, 李玲, 等. 川西北地区沙化草地特征研究[J]. 草地学报, 2016, 24(4): 768-775.
- [26] 吴汪洋, 张登山, 田丽慧, 等. 近 10 年青海湖东沙地人工植被群落特征[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 2109-2121.

(上接第 21 页)

- [13] Fu Jiangtao, Hu Xiasong, Brierley G, et al. The influence of plant root system architectural properties upon the stability of loess hillslopes, Northeast Qinghai, China [J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(5): 785-801.
- [14] Vannoppen W, Vanmaercke M, De Baets S, et al. A review of the mechanical effects of plant roots on concentrated flow erosion rates [J]. Earth-Science Reviews, 2015, 150: 666-678.
- [15] Genet M, Stokes A, Salin F, et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots [J]. Plant and Soil, 2005, 278(1/2): 1-9.
- [16] 许锐, 郭璐, 李寻昌, 等. 延安地区黑沙蒿生长特征及护坡效应研究[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(9): 19-24.
- [17] 黄海, 陈正汉, 李刚. 非饱和土在 p-s 平面上屈服轨迹及土-水特征曲线的探讨[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 316-321.
- [18] 杨钢. 非饱和土试样优选及循环荷载作用下的变形特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [19] 周萍, 文安邦, 严冬春, 等. 三峡库区紫色土坡耕地草本植物根系固结地埂的土力学机制[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 85-90.
- [20] Li Yunpeng, Wang Yunqi, Ma Chao, et al. Influence of the spatial layout of plant roots on slope stability [J]. Ecological Engineering, 2016, 91: 477-486.
- [21] 贺隆元, 潘昆, 陈春武, 等. 生态护坡技术在云南省水利工程中运用的探讨[J]. 林业建设, 2015(4): 142-145.
- [22] 高至国, 矫之明, 胡湘, 等. 牡丹江河道生态护岸研究[J]. 黑龙江水专学报, 2010, 1(3): 67-69.
- [23] 马亮. 河道整治中生态护岸的设计及应用[D]. 苏州: 苏州大学, 2014.
- [24] 顾向阳, 顾竹珺, 李飞鹏, 等. 河道生态护岸设计中的底泥固化技术中试[J]. 净水技术, 2018, 37(3): 107-112.
- [25] 周云艳, 陈建平, 王晓梅. 植物根系固土护坡机理的研究进展及展望[J]. 生态环境学报, 2012, 21(6): 1171-1177.
- [26] 孟飞. 河道植物护岸耐冲性研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- [27] Tardieu F, Draye X, Javaux M. Root water uptake and ideotypes of the root system: Whole-plant controls matter [J]. Vadose Zone Journal, 2017, 16(9): 1-10.