

基于园林护坡的9种常用地被植物固土效能研究

谢伟文 谢腾芳 李冰敏 关开朗 谭广文*

摘 要:以白云山风景名胜区常用的9种草本护坡植物的根土混合体进行抗剪、抗冲和抗蚀实验, 结果显示, 9种草本植物均能有效提高边坡稳定性, 固土效能排序为: 地毯草(*Axonopus compressus*)>银边草(*Arrhenatherum elatius*)>紫背竹芋(*Stromanthe sanguinea*)>南美蝎尾菊(*Sphagneticola trilobata*)>蜘蛛兰(*Hymenocallis speciosa*)>萱草(*Heimerocallis fulva*)>肾蕨(*Nephrolepis cordifolia*)>翠芦莉(*Ruellia simplex*)>冷水花(*Pilea notata*)。各指标贡献值为: 抗冲性(33.44%)>上层抗剪性(26.03%)>下层抗剪性(21.31%)>抗蚀性(19.22%), 即水文效应指标对边坡稳定的贡献值接近力学效应指标。上层抗剪性、下层抗剪性、抗蚀性3个指标之间均存在显著相关性($P<0.01$), 但抗冲性仅与抗蚀性存在显著相关性($P<0.01$)。

关 键 词: 风景园林; 边坡防护; 根系固土; 水土保持; 护坡草本; 白云山风景名胜区

文章编号: 1000-6664(2026)03-0100-07
DOI: 10.19775/j.cla.2026.03.0100
中图分类号: TU 986
文献标志码: A
收稿日期: 2024-05-14
修回日期: 2024-12-27
基金项目: 广州市科技计划项目(2014SY000010, 2013J4300002)

水土流失是当前世界面临的一大难题, 同时也是中国最重要的生态问题之一^[1-2]。2003年中国水土流失面积达365万 km², 经过十几年的生态治理, 至2020年, 水土流失面积下降至269.27万 km², 总体减少了24.4%^[3], 生态治理取得显著成效。在中国, 除了西北和黄土高原以外, 华南地区土壤侵蚀程度严峻。据2014年统计, 华南地区水土流失面积20.39万 km², 占区域总面积(96.37万 km²)的21.16%^[4]。华南地区气候属热带或亚热带季风气候, 终年高温多雨, 地形以丘陵为主, 土壤以页岩赤红壤为主, 母质疏松、土壤贫瘠。华南地区水土流失形式以坡面侵蚀和沟谷侵蚀为主, 随着坡度的增加, 在地表径流、矿物风化和土壤淋溶强烈作用下, 土壤侵蚀使土壤安息角变小, 从而引发土体滑移、土方坍塌等安全性问题。

当前对植物护坡的研究应用多集中在公路和矿山边坡2个方面^[5-11], 针对园林环境下的边坡防护研究尚属鲜见。且前者的试验对象均为一些喷播的护坡植物, 萌发期长且品类单一^[12]。园林边坡与前者最大的差别在于, 在具备边坡防护的

基本前提下, 还需有较高的景观价值, 包括植物的单株观赏性、多样的配置模式、快速成景的时效性等。然而, 实践中许多建设方往往过度追求美化效果, 忽视边坡环境的特殊性, 导致水土流失等问题。因此, 将水土保持学的相关理论引入风景园林实践, 深入探究园林植物在园林边坡上的应用, 可以创新性地弥补当前园林护坡植物盲目选择的不足。

植物具有较好的保水固土效能, 成本低、观赏性好、有利于环保, 是巩固边坡、防治水土流失的最佳手段^[13-14]。现有关于应用植物护坡的研究, 大体分为3个部分。1)物种选择: 通过单根抗拉试验、直剪试验、室内模拟冲刷试验、抗拔试验、抗冲试验等测试根系固土能力的试验, 对比不同草本植物根系与土壤的强度特性, 筛选出最优的固土植物, 如鸡眼草、狗牙根、香根草、剪秋罗等^[15-17]。2)种植技术: 通过实践总结出飘台绿化法、生态笼砖复绿法、混凝土框格复绿法、挂网喷播复绿法、生态袋复绿法、土工格室覆土复绿法等使植物稳定种植于边坡上^[8, 10]。3)群落配置: 通过地形改造、土壤修复、植被恢

复等生态修复措施, 将多种植物构建成一个稳定的群落^[5, 18]。

植物固土的关键部位在于根系^[19], 植物通过根系缠绕、穿插, 有效抑制表土侵蚀, 通过根系吸水 and 植被蒸腾作用降低土壤孔隙水压力, 通过与土壤接触发生有机物质的胶结作用等固结土壤内部团聚体, 从而改善土壤结构, 提高土壤渗透性, 增强土壤抗侵蚀性并抑制土壤侵蚀^[20-22]。因此植物根系可通过力学效应和水文效应影响土壤的稳定情况。植物根系与土壤形成一种有机结合的新复合材料, 被称为“根土混合体”。

与木本植物相比, 草本植物的护坡作用更强, 因为在相同条件下草本植物具有更大的根系密度、更高的品种多样性、更短的生长周期、更快的演替速度^[23]。华南地区草本植物种类繁多, 科学筛选固土效能强、适应效果好、景观价值高、适用于园林护坡的草本植物具有很强的现实意义。广州白云山风景名胜区是著名的5A级景区, 有鸣泉居、云溪植物园、云台花园、云萝植物等重量级山体园林^[24], 它们承担着广州接待贵宾的功能, 对园林有很高的要求, 其边坡景观在

* 通信作者(Author for correspondence) E-mail: 1002871592@qq.com

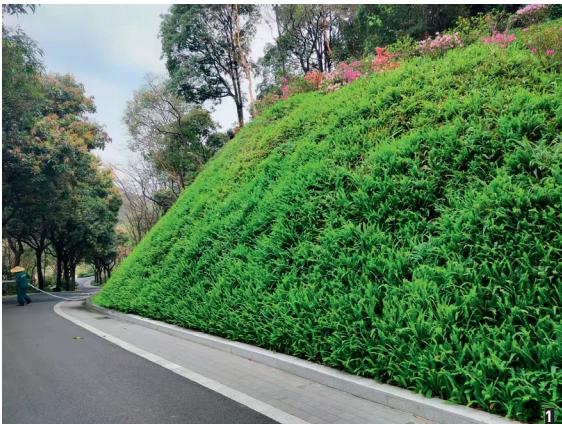
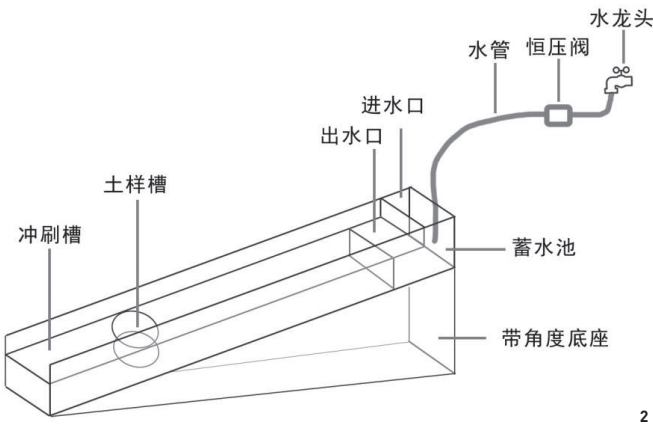


图1 实验场地
图2 冲刷模型图



珠三角地区具有重要代表性。笔者通过前期调查分析,运用层次分析法,构建生态性、适应性及观赏价值评价模型,从57种园林护坡植物中筛选出9种在白云山风景名胜区内边坡中应用频率较高、适应性优、观赏性好的多年生草本护坡植物作为本文的研究对象^[25],通过力学与水文试验评判其固土性能,筛选出观赏性好、适应性强、固土效果好的优良植物材料,供园林景区在进行边坡景观营造时参考。同时通过植物根系特征,从实践层面初步探讨植物根系固土的作用机理,为筛选其他园林护坡植物提供了参考。

1 研究材料与方法

1.1 研究区域概况

白云山风景名胜区位于广东省广州市东北部(113° 17' E, 23° 11' N),面积约20.98 km²,山体呈南北走向,主要山峰包括摩星岭、牛牯岭、五雷岭、子子髻岭、将军岭等。白云山隶属于亚热带季风气候,气候温和,雨量充沛,日照时间长。近3年年平均气温23.1~24.0℃,年降雨量1 793.8~1 933.6 mm。白云山为南粤名山之一,自古就有“羊城第一秀”之称,是典型的岭南山体园林。该区域地带性植被类型为常绿亚热带季雨林,自生护坡植物常为芒萁(*Dicranopteris pedata*)、乌毛蕨(*Blechnum orientale*)、肾蕨、南美蟛蜞菊等^[26]。

1.2 研究材料

实验区位于云溪植物园内部,云溪植物园位于白云山麓,是著名白云山风景名胜区的重要景观节点。样地边坡长300 m左右,斜面高程2~3 m,坡度25°~50°,坡向SE145°~S180°,地质为花岗岩发育的红壤,属于黏壤土类型。该类

表1 实验材料

序号	种名	科名	根系类型	生长习性
1	翠芦莉(<i>Ruellia simplex</i>)	爵床科	直根系	耐旱、湿、高温、贫瘠
2	地毯草(<i>Axonopus compressus</i>)	禾本科	须根系	喜湿喜阳较耐阴,不耐淹、旱、贫瘠
3	冷水花(<i>Pilea notata</i>)	荨麻科	直根系	喜湿喜湿较耐阴,不耐阳、旱、贫瘠
4	南美蟛蜞菊(<i>Sphagneticola trilobata</i>)	菊科	直根系	喜高温湿润、光照充足,耐瘠、热,不择土壤
5	肾蕨(<i>Nephrolepis cordifolia</i>)	肾蕨科	直根系	喜温暖湿润和半阴环境,较耐旱,耐贫瘠
6	萱草(<i>Heimerocallis fulva</i>)	阿福花科	须根系	喜湿润和半阴环境,较耐旱,较耐贫瘠
7	银边草(<i>Arrhenatherum elatius</i>)	禾本科	须根系	耐旱、贫瘠
8	蜘蛛兰(<i>Hymenocallis speciosa</i>)	石蒜科	须根系	喜温暖湿润,光照充足,较耐旱、贫瘠
9	紫背竹芋(<i>Stromanthe sanguinea</i>)	竹芋科	须根系	喜温暖、潮湿、荫蔽,不耐旱、贫瘠
10	素土(CK)	—	—	—

土壤孔隙间毛管作用发达,能储存大量的水分,但是水分流失快,保水抗旱效能差^[27]。实验材料为该边坡种植时间2年之久的9种护坡植物及其根系附近的土壤。选择的9种植物均为前期针对白云山风景名胜区护坡植物调查筛选出的应用频率高、适应性优、观赏性好的多年生草本植物^[25](表1)。植物种植面积为4 m²以上的成片式地被,植物均具有较好的适应性,生长条件稳定,生长形态正常。该边坡各植物土壤基本一致,取样标准为成年且长势优良的植株。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤试验

基于前人研究总结发现,植物根系可通过力学效应和水文效应共同影响土壤的稳定,因此,本文通过2个力学效应试验(上层土抗剪试验+下层土抗剪试验)和2个水文效应试验(抗冲试验+抗蚀试验)共4个指标对植物固土效能进行研究。

1) 上下层土壤抗剪试验。

相关研究表明,植物根系生物量在空间梯度上是不均匀的,一般随土层加深而减少,且大部分草本植物根系一般深度为10~20 cm^[28]。

本试验样本基于土壤常规含水量为25%±1%,使用湿度测试仪预先测量土壤湿度,符合常规湿度后采用61.8 mm×20 mm规格环刀分别在3株同种植物土壤深度为2和10 cm处各取4个未扰动的根土复合体样本,环刀取样至植株上、下、左、右4个方向距离根颈1 cm的位置,上、下层各4个土样。采用应变式直剪仪剪切土样,测量土样剪切应力,直剪仪量力环系数C=1.865。对上下层土样分别在施加100、200、300、400 kPa法向力条件下进行剪切,得到4个剪应力 τ ,以上取样和试验设置3个重复。根据库伦定律可得土壤内摩擦角和土壤凝聚力:

$$\tau_f = \sigma \tan \phi + c$$

式中: τ_f 为剪应力; σ 为法向力; ϕ 为内摩擦角; c 为凝聚力。

2) 土壤抗冲试验。

按上下层土壤抗剪试验的方法取得土壤-根系复合体样本。采用自制模型模拟边坡雨水冲刷,根据当地降雨情况设置水流量为2 L/min,冲刷时长为5 min,将3个土样分别在模拟边坡角度为20°、30°、45°下进行冲刷。冲刷

前烘干土样并记录恒重重量，冲刷后再次烘干称量恒重重量，两者之差为冲刷减少的土壤重量，以上取样和试验设置3个重复。抗冲指数公式为：
 $C=Q/\Delta W$
式中：C为抗冲指数；Q为冲刷总水量； ΔW 为冲刷减少的土壤重量。

3)土壤抗蚀试验。
取深度为3~6 cm处根系边缘的土壤，结合5和7 mm筛网，筛选5 mm<直径<7 mm的土壤团聚体30粒。采用静态崩解法，将土壤团聚体分别放置于筛孔为5 mm的筛网之上，注入自来水至刚好淹没土壤团聚体，计时10 min，结束时清点崩解团聚体颗粒数量，以上取样和试验设置3个重复。根据公式可得抗蚀指数：
 $S=(N-N_i)/N \times 100\%$

式中：S为抗蚀指数；N为总土粒数； N_i 为崩塌土粒数。

1.3.2 数据分析

使用Excel 2020对数据进行初步汇总处理；应用SPSSAU数据平台(<https://spssau.com>)对数据进行分析，采用正态Q-Q图检验数据分布情况，用Pearson分析数据相关性，显著性设定为 $P \leq 0.05$ ，极显著为 $P \leq 0.01$ ；用正向归一化处理数据并进行熵值法计算权重。

2 结果与分析

2.1 植物根系增强土壤抗剪性差异

2.1.1 植物增强上层土壤抗剪效能差异

在4种不同压力下，9种植物根系均能有效增强上层土壤的抗剪效能，其中银边草的增强效果最大，其次为蜘蛛兰、肾蕨等，最小为南美蟛蜞菊。以4个压力及其对应的剪应力进行拟合公式得到土壤-根系复合体凝聚力和内摩擦角(R^2

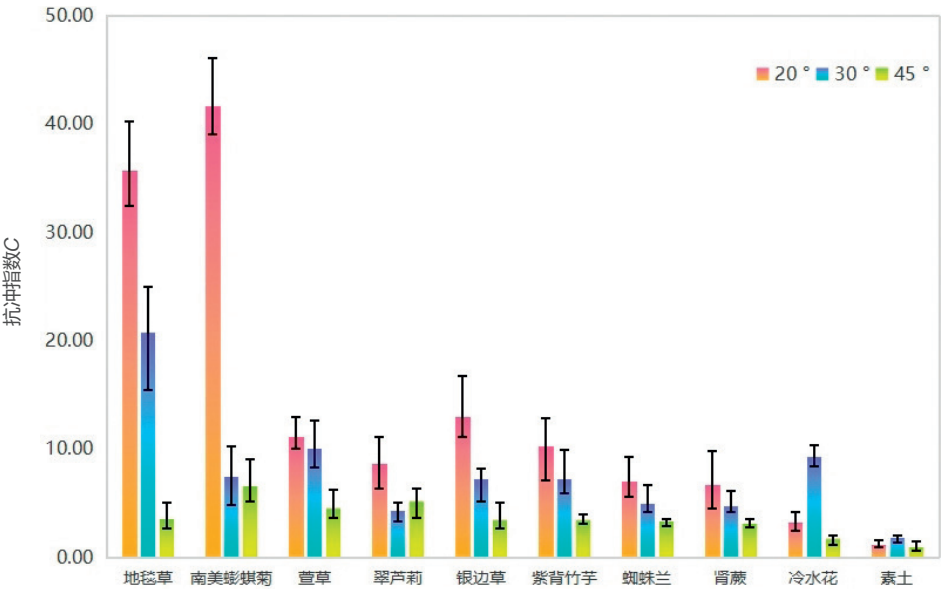


图3 9种草本植物根系增强土壤抗冲性差异

较大，说明公式较为吻合)，除了翠芦莉和冷水花，其他7种植物均有效提升了土体的凝聚力，除了南美蟛蜞菊，其他8种植物均有效提升了土体的内摩擦角(表2)，经Pearson相关性检验，抗剪效能与凝聚力和内摩擦力均有显著相关关系($P<0.01$)。

2.1.2 植物增强下层土壤抗剪效能差异

在4种不同压力下，9种植物根系均能有效增强下层土壤的抗剪效能，其中银边草的增强效果最大，其次为蜘蛛兰、紫背竹芋等，最小为冷水花。以4个压力及其对应的剪应力进行拟合公式得到凝聚力c和内摩擦角 ϕ ，9种植物均有效提升了下层土体的凝聚力，除蜘蛛兰外，其他8种植物均提高了土体的内摩擦角(表3)。经Pearson相关性检验，下层抗剪效能与凝聚力和内摩擦力均有显著相关关系，但与内摩擦力($P<0.05$)相比，凝聚力($P<0.01$)与抗剪效能的

关系更为显著。

2.2 植物根系增强土壤抗冲性差异

在恒定水流冲刷下，9种草本植物根系均有效增强了土壤的抗冲效能，平均增强效果为地毯草>南美蟛蜞菊>萱草>翠芦莉>银边草>紫背竹芋>蜘蛛兰>肾蕨>冷水花>素土。在20°、30°、45°实验下，随着模拟边坡角度的增大，水流获得更大的重力势能，被冲走的土壤也逐渐增多，植物根系增强土壤抗冲效能则逐渐降低。在坡度为20°时，南美蟛蜞菊与地毯草的抗冲指数显著高于其他植物，但在坡度增大时，其抗冲能力出现大幅度下降，说明其抗冲效能极不稳定(图3)。

2.3 植物根系增强土壤抗蚀性差异

在静水浸泡试验下，9种草本植物根系均能有效增强土壤的抗侵蚀效能，其中增强效能效果最好的为紫背竹芋和翠芦莉，在规定的时间内，无土壤团聚体被水侵蚀而崩散，其次为萱草、南

表2 9种草本植物根系增强上层土壤抗剪效能差异

种名	100 kPa均值	200 kPa均值	300 kPa均值	400 kPa均值	归一均值	拟合公式	凝聚力	内摩擦角	R^2
银边草	115.07 ± 17.33	166.17 ± 4.11	217.27 ± 11.69	276.95 ± 7.14	1.000	$y=53.68x+59.68$	53.68	59.68	1.00
蜘蛛兰	96.05 ± 5.96	165.99 ± 27.66	248.05 ± 9.44	257.37 ± 4.13	0.941	$y=56.60x+50.36$	56.60	50.36	0.93
肾蕨	109.10 ± 7.18	160.39 ± 9.49	207.02 ± 6.20	276.95 ± 7.23	0.940	$y=55.02x+50.82$	55.02	50.82	0.99
紫背竹芋	99.78 ± 2.43	154.80 ± 25.15	193.03 ± 10.00	272.29 ± 10.59	0.850	$y=55.58x+41.03$	55.58	41.03	0.98
地毯草	91.57 ± 4.69	124.96 ± 13.53	171.58 ± 1.43	275.27 ± 6.35	0.693	$y=59.78x+16.41$	59.77	16.41	0.93
萱草	72.74 ± 16.52	125.89 ± 3.38	195.83 ± 12.71	221.94 ± 4.07	0.551	$y=51.75x+24.71$	51.75	24.71	0.97
翠芦莉	69.01 ± 2.41	119.92 ± 4.23	186.50 ± 2.13	195.83 ± 2.26	0.443	$y=44.70x+31.05$	44.70	31.05	0.93
冷水花	66.21 ± 4.39	121.23 ± 17.13	175.31 ± 5.40	180.91 ± 3.01	0.382	$y=39.82x+36.37$	39.82	36.37	0.92
南美蟛蜞菊	57.82 ± 4.10	103.51 ± 6.80	166.92 ± 5.47	209.81 ± 0.77	0.343	$y=51.94x+4.66$	51.94	4.66	0.99
素土	46.11 ± 7.61	80.61 ± 8.64	107.66 ± 2.07	157.55 ± 13.78	0.000	$y=36.14x+7.64$	48.14	7.64	0.98

表3 9种草本植物增强下层土壤抗剪效能差异

种名	100 kPa均值	200 kPa均值	300 kPa均值	400 kPa均值	归一均值	拟合公式	凝聚力	内摩擦角	R ²
银边草	117.87 ± 2.69	173.45 ± 7.12	249.91 ± 1.61	286.65 ± 13.35	1.000	y=58.28x+61.27	58.28	61.27	0.98
蜘蛛兰	93.25 ± 3.34	170.65 ± 6.90	245.25 ± 3.98	353.42 ± 14.33	0.978	y=85.51x+1.87	85.51	1.87	0.99
紫背竹芋	123.09 ± 3.11	177.18 ± 6.12	235.92 ± 8.03	263.90 ± 16.07	0.975	y=48.12x+79.73	48.12	79.73	0.98
肾蕨	100.71 ± 9.68	180.91 ± 2.11	252.71 ± 3.54	292.81 ± 5.15	0.966	y=64.81x+44.76	64.81	44.76	0.98
萱草	100.71 ± 5.97	208.88 ± 4.44	232.19 ± 3.43	255.51 ± 20.48	0.940	y=48.77x+77.40	48.77	77.40	0.85
翠芦莉	79.64 ± 5.41	167.85 ± 0.36	196.94 ± 14.01	226.04 ± 22.90	0.695	y=46.83x+50.54	46.83	50.54	0.91
南美蟛蜞菊	86.16 ± 4.00	159.46 ± 4.08	192.10 ± 3.96	223.80 ± 7.72	0.691	y=44.56x+53.99	44.56	53.99	0.95
地毯草	83.93 ± 3.55	138.01 ± 1.62	179.04 ± 9.03	233.13 ± 12.58	0.632	y=48.86x+36.37	48.86	36.37	1.00
冷水花	76.47 ± 0.93	108.17 ± 2.41	131.48 ± 15.93	154.80 ± 2.89	0.377	y=25.83x+53.15	25.83	53.15	0.99
素土	40.14 ± 5.06	53.57 ± 2.13	79.68 ± 12.85	103.93 ± 2.26	0.000	y=21.75x+14.97	21.75	14.97	0.98

美蟛蜞菊、蜘蛛兰、地毯草、银边草、肾蕨、冷水花，其中肾蕨和冷水花的抗蚀指数显著低于其他植物，归一化值后，冷水花的增强土壤抗蚀效能仅为紫背竹芋和翠芦莉的一半(表5)。

2.4 植物根系护坡综合固土效能排序

将上层抗剪效能、下层抗剪效能、抗冲指数、抗蚀指数数据进行正向归一化，同时使用熵值法进行权重计算，得到4个指标权重值分别为26.03%、21.31%、33.44%和19.22%，各项指标间权重相对较为均匀(表6)，说明上层抗剪效能、下层抗剪效能、抗冲效能、抗蚀效能对土壤固土具有重要作用，但总体效果表现为水文效应(52.66%)接近力学效应(47.34%)，其中上层抗剪效能对根系固土的贡献略大于下层抗剪效能。综合各项指标获得9种植物根系固土效能排序，各植物根系对土壤固土具有明显的增强效应，其中，地毯草>银边草>紫背竹芋>南美蟛蜞菊>蜘蛛兰>萱草>肾蕨>翠芦莉>冷水花(表7)。

通过Pearson相关性检验(经Q-Q图检验数据为正态分布)，水文效应与力学效应之间还存在显著性关系，上层抗剪性与下层抗剪性和抗蚀性显著相关($P<0.01$)，但与抗冲性无关；下层抗剪性与上层抗剪性和抗蚀性显著相关($P<0.01$)，但与抗冲性无关；抗冲性仅与抗蚀性之间具有显著相关性($P<0.01$)；抗蚀性与上层抗剪性、下层抗剪性、抗冲性均有显著相关性($P<0.01$)，由此可见，力学效应与水文效应是相互影响的(表8)。

3 结论与讨论

3.1 植物根系增强边坡稳定

草本植物通过加筋作用，有效提高边坡的稳定性^[20-21, 29]，在本次实验中也得到证实。9种草本植

物均能有效提高边坡稳定性，固土效能排序为：地毯草>银边草>紫背竹芋>南美蟛蜞菊>蜘蛛兰>萱草>肾蕨>翠芦莉>冷水花。优先推荐使用地毯草、银边草、紫背竹芋、南美蟛蜞菊、蜘蛛兰作为白云山风景名胜区护坡植物。由于地毯草抗冲性不稳定，因此在此坡度较大的区域不建议使用。

3.2 植物根系通过力学效应增强土壤稳定性

力学效应倾向于根系对土壤的物理加固，其作用机制为植物通过根表面与土体间产生的摩擦力对土体产生较大的固持力，对滑动的坡面产生反方

表6 熵值法计算权重结果汇总

项目	平均值	标准差	信息熵值	信息效用值	权重值/%
上层抗剪效能	0.614	0.327	0.929 5	0.070 5	26.03
下层抗剪效能	0.725	0.327	0.942 3	0.057 7	21.31
抗冲指数	0.473	0.315	0.909 4	0.090 6	33.44
抗蚀指数	0.775	0.322	0.947 9	0.052 1	19.22

表7 9种草本植物根系护坡固土效能评分排序

序号	种名	上层抗剪效能	下层抗剪效能	抗冲指数	抗蚀指数	综合得分
1	地毯草	0.693	0.632	1.000	0.922	0.826
2	银边草	1.000	1.000	0.441	0.922	0.798
3	紫背竹芋	0.850	0.975	0.410	1.000	0.759
4	南美蟛蜞菊	0.343	0.691	0.991	0.941	0.749
5	蜘蛛兰	0.941	0.978	0.316	0.922	0.736
6	萱草	0.551	0.940	0.570	0.941	0.715
7	肾蕨	0.940	0.966	0.288	0.608	0.664
8	翠芦莉	0.443	0.695	0.463	1.000	0.610
9	冷水花	0.382	0.377	0.254	0.490	0.359
10	素土	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

表8 指标Pearson相关性矩阵

项目	综合得分	上层抗剪效能	下层抗剪效能	抗冲指数	抗蚀指数
综合得分	1.000	0.761**	0.879**	0.684**	0.930**
上层抗剪效能	0.761**	1.000	0.879**	0.107	0.595**
下层抗剪效能	0.879**	0.879**	1.000	0.286	0.807**
抗冲指数	0.684**	0.107	0.286	1.000	0.654**
抗蚀指数	0.930**	0.595**	0.807**	0.654**	1.000

注：** $P<0.01$ 。

向拉力,使斜坡保持稳定^[30]。抗剪强度或抗拉强度是表现力学效应的重要指标。通过上层土壤抗剪试验与下层土壤抗剪试验证明了植物根系可以通过力学效应增强土壤稳定性。虽然下层土壤抗剪效能比上层更大,但上层的贡献值更大,说明上层土壤的稳定更有利于防止水土流失。本研究力学效应作用于根系提高了土体的凝聚力和土壤摩擦角,其中提高土体的凝聚力的结论与Meng Suyun^[31]、申紫雁等^[32]、Hoque Iram Lamiya等^[33]研究结论一致,但提高土壤摩擦角的结论则与他们相悖,可能为试验土壤不同所致。

3.3 植物根系通过水文效应增强土壤稳定性

水文效应更倾向于通过根系分泌物改变土壤团聚体的化学性质使其更为牢固。水文效应的作用机制是个复杂的过程,与植物的呼吸作用、蒸腾作用、土壤紧实度、水稳性团聚体含量、孔隙度、容重、含水量及有机质含量的动态变化等有关^[21, 34]。抗冲指数和抗蚀指数是反应水文效应的重要指标。本文通过抗冲试验和抗蚀试验证明了植物根系可以通过水文效应增强土壤稳定性。此外,试验结果发现抗冲性与抗蚀性存在显著相关性,即在冲刷过程中亦存在土壤侵蚀的过程^[35]。土壤抗蚀性大小主要取决于土粒和水的亲和力及土粒间的胶结力,胶结力越小、水亲和力越大的土粒,则越易分散和悬浮,结构体越易受到破坏和解体^[13]。植物根系分泌物可改善土壤性质影响土粒胶结力,间接提高土壤抗蚀性。不同植物之间的分泌物存在显著差异,根系分泌物包括数百种特定的有机物类型,其中碳氢化合物、总糖、总氨基酸和酚类化合物对抗蚀性至关重要,这些有机质类型可以占到解释根系分泌物对抗蚀性总影响变化的20%~75%^[36]。因此,未来本研究需对其理化物质进行进一步研究。

3.4 水文效应与力学效应交互影响共同增强土壤稳定性

力学效应与水文效应对根系固土的作用机制不尽相同,贡献值也不同,试验结果为水文效应贡献值(52.66%)与力学效应贡献值(47.34%)相近,与陈雪冬等^[37]研究结果(水文贡献:力学贡献约为1:2)有一定差别,可能为所研究区域土壤性质不同所致。此外,力学效应与水文效应存在显著相关性,即水文效应与力学效应交互影响的。经过Pearson相关性分析发现,抗蚀指数与土壤凝聚力有显著相关性($P<0.1$),与内摩擦角无显

著相关性,即根系分泌物增强土壤抗侵蚀效能的同时也可能会增强抗剪效能。与此同时,根系在增强土壤抗剪效能的同时也会因为根系对水的物理阻隔而减少了水对土壤的侵蚀。

3.5 植物根系稳定土壤的侧重机制不同

植物根系稳定土壤的侧重机制不同,主要受根系形态影响。有些植物侧重于通过力学效应稳定边坡,有些植物则侧重于通过水文效应稳定边坡。例如本实验中,肾蕨具有丰富的根系,有效增强了土壤的抗剪效能,但其根系活性较低、含水量低。如干枝状,在干燥环境下,其根系含水量较少,细胞质变成凝胶状态,生命活动大大减弱,使分泌量减少,不利于改善土壤性质。与此相反,蜘蛛兰、银边草等具备肉质根的植物可充分利用根部储存的大量水分、糖类等营养物质来适应外界的逆境环境,同时改善根际环境。所以应当结合水文效应与力学效应综合评估植物固土效能。因此,为了保障植物对土壤的稳定性,应当加强养护水平,保持植物生长所需条件,维持植物根系的生物活性。

注:文中图片均由作者绘制或拍摄。

参考文献:

[1] 赵紫远,方海燕,武亚冰,等.坡形对黑土区坡耕地土壤侵蚀的模型模拟研究[J].水土保持学报,2022,36(6):23-29.
ZHAO Z Y, FANG H Y, WU Y B, et al. Simulating the Impact of Slope Shapes on Soil Erosion for the Black Soil Region, Northeastern China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6): 23-29.
[2] 吕娟,刘昌军,黄诗峰,等.天地一体化水系统全要素监测与模拟平台建设初探[J].中国防汛抗旱,2022,32(10):28-33.
LÜ J, LIU C J, HUANG S F, et al. A preliminary study on the construction of the all-element monitoring and simulation platform of the water system based on space-ground integration[J]. China Flood Control and Drought Relief, 2022, 32(10): 28-33.
[3] 王一峰,屈丽琴,李建明,等.基于近20年《中国水土保持公报》的水土流失治理分析[J].长江科学院院报,2023,40(7):59-65.
WANG Y F, QU L Q, LI J M, et al. Analysis of Soil Erosion Control Based on *China Soil and Water Conservation Bulletin* in the Past

Two Decades[J]. Journal of the Yangtze River Academy of Sciences, 2023, 40(7): 59-65.
[4] 劳世琦,冯波.华南地区土壤退化现状和防治对策[J].大众科技,2014,16(3):55-58.
LAO S Q, FENG B. The status and control measures of land degradation in South China[J]. Popular Science and Technology, 2014, 16(3): 55-58.
[5] 刘晓路,黄静,王睿.高速公路景观设计中生态修复设计的探讨:以贵阳环城高速公路南环线为例[J].中国园林,2016,32(11):27-31.
LIU X L, HUANG J, WANG R. On the Ecology Restoration of Highway Landscape Design: Taking the Highway of South Ring Road in Guiyang City as an Example[J]. China Landscape Architecture, 2016, 32(11): 27-31.
[6] 王小君.从生态防护角度探讨公路边坡类型及其综合防护对策[J].中国园林,2010,26(12):97-100.
WANG X J. Discussion of Measures and Techniques of Comprehensive Protection for Different Highway Slope Types from the Perspective of Ecological Protection[J]. Chinese Landscape Architecture, 2010, 26(12): 97-100.
[7] 芦建国,于冬梅,宁常,宁杭高速公路边坡生态防护综合评价[J].中国园林,2010,26(11):80-83.
LU J G, YU D M. The Ecological Protection and Landscape Evaluation of Slopes of Ning-Chang and Ning-Hang Expressways[J]. Chinese Journal of Landscape Architecture, 2010, 26(11): 80-83.
[8] 石东扬,熊志臣,金代钧,等.高速公路边坡绿化的研究[J].中国园林,2001,17(3):11-13.
SHI D Y, XIONG Z C, JIN D J, et al. Study on Expressway Side Slope Green[J]. Chinese Landscape Architecture, 2001, 17(3): 11-13.
[9] 陈影,张利,董加强,等.废弃矿山边坡生态修复中植物群落配置设计:以太行山北段为例[J].水土保持研究,2014,21(4):154-157.
CHEN Y, ZHANG L, DONG J Q, et al. Study on the Design Method of Plant Community for the Ecological Restoration of Slope in Abandoned Mine[J]. Soil and Water Conservation Research, 2014, 21(4): 154-157.
[10] 贾绿媛,林菁,王向荣,等.风景园林学视角下的采石废弃地植被修复策略[J].风景园林,2022,29(9):84-91.
JIA L Y, LIN Q, WANG X R, et al. Vegetation Restoration Strategies for Abandoned Quarry from the Perspective of Landscape Architecture[J]. Landscape Architecture, 2022, 29(9): 84-91.
[11] 宋怡,李帅,王向荣.矿业城市采矿塌陷地景观再生规划与设计[J].北京规划建设,2019(1):86-88.
SONG Y, LI S, WANG X R. Landscape regeneration planning and design of mining subsidence areas in mining cities[J]. Beijing Planning and Construction, 2019(1): 86-88.
[12] 李西,罗承德,陈其兵.岩石边坡植被护坡植物选择初探[J].中国园林,2004,20(9):55-56.
LI X, LUO C D, CHEN Q B. Preliminary Study of Plant Selection about Vegetation of Rock Slope[J]. Chinese Landscape Architecture, 2004, 20(9): 55-56.
[13] 朱显谟.黄土地区植被因素对于水土流失的影响[J].土壤学报,1960(2):110-121.

ZHU X M. The influence of vegetation factors on soil erosion in loss areas[J]. Journal of Soil Science, 1960(2): 110-121.

[14] 张超波.水土保持植物措施原理[M].北京: 知识产权出版社, 2015: 3-5.

ZHANG C B. Principles of Plant Measures for Soil and Water Conservation[M]. Beijing: Intellectual Property Press, 2015: 3-5.

[15] 王秉宇, 王士杰, 王秉天.3种生态护坡植物根固效应的试验研究[J].河北农业大学学报, 2024, 47(4): 117-125.

WANG B Y, WANG S J, WANG B T. Root reinforcement effect of three ecological slope protection plants[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2024, 47(4): 117-125.

[16] 王连锐, 严亚, 商崇菊, 等.两种草本植物对红黏土边坡的固土护坡效应[J].水土保持通报, 2024, 44(2): 146-154.

WANG L R, YAN Y, SHANG C J, et al. Soil Strengthening and Slope Protection Effect of Two Types of Herbaceous Plants on Red Clay Slopes[J]. Soil and Water Conservation Bulletin, 2024, 44(2): 146-154.

[17] 苏文欣.4种草本植物耐盐碱性及固土护坡能力研究[D].哈尔滨: 东北林业大学, 2023.

SU W X. Study on saline-alkali tolerance and soil consolidation and slope protection ability of four herbaceous plants[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2023.

[18] 李少丽, 许文年, 丰瞻, 等.边坡生态修复中植物群落类型设计方法研究[J].中国水土保持, 2007(12): 53-55.

LI S L, XU W N, FENG Z, et al. Research on the Design Method of Plant Community Types in Slope Ecological Restoration[J]. China Soil and Water Conservation, 2007(12): 53-55.

[19] 杨帆, 程金花, 张洪江, 等.坡面草本植物对土壤分离及侵蚀动力的影响研究[J].农业机械学报, 2016, 47(5): 129-137.

YANG F, CHENG J H, ZHANG H J, et al. Effect of Herb Plants on Soil Detachment and Erosion Dynamics[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 129-137.

[20] 占海歌.3种草本植物根系特征对土壤抗侵蚀性能影响[D].武汉: 华中农业大学, 2017.

ZHAN H G. Effects of root characteristics of three herbaceous plants on soil erodibility[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017.

[21] 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.

ZHOU Y Y, CHEN J P, WANG X M. Progress of study on soil reinforcement mechanisms by root and its expectation[J]. Chinese Journal of Ecology and Environment, 2012, 21(6): 1171-1177.

[22] 周云艳, 陈建平, 杨倩, 等.植物根系固土护坡效应的原位测定[J].北京林业大学学报, 2010, 32(6): 66-70.

ZHOU Y Y, CHEN J P, YANG Q, et al. In situ measurement of the mechanical effect of plant root systems on soil reinforcement and slope protection[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(6): 66-70.

[23] 郭洋楠, 宫传刚, 杨剑, 等.草本植物对边坡稳定性影响研究进展[J].草地学报, 2022, 30(4): 841-849.

GUO Y N, GONG C G, YANG J, et al. Research Progress on Influence of Herbaceous Vegetation on Slope Stability[J]. Journal of Grassland Science, 2022, 30(4): 841-849.

[24] 曾凤, 李许文, 胡晓敏, 等.广州白云山典型景区园林植物群落景观评价[J].中国园林, 2014, 30(8): 97-101.

ZENG F, LI X W, HU X M, et al. Landscape Evaluation of Typical Garden Plant Communities in Baiyun Mountain Scenic Site of Guangzhou[J]. Chinese Landscape Architecture, 2014, 30(8): 97-101.

[25] 谢伟文, 马绵英, 谭广文.广州白云山风景区园林边坡地被植物调查评价[J].广东园林, 2023, 45(2): 93-97.

XIE W W, MA M Y, TAN G W. Investigation and Evaluation of Landscape Slope Ground Cover Plants in Baiyun Mountain Scenic Area, Guangzhou[J]. Guangdong Garden, 2023, 45(2): 93-97.

[26] 谢伟文, 马绵英, 关开朗, 等.白云山景区南北坡向次生裸地植被恢复差异分析[J].热带农业科学, 2023, 43(8): 93-99.

XIE W W, MA M Y, GUAN K L, et al. Analysis of the Difference of Vegetation Restoration of Secondary Bare Land in the North-South Slope of Baiyun Mountain Scenic Area[J]. Tropical Agricultural Science, 2023, 43(8): 93-99.

[27] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹.中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J].生态学报, 2013, 33(24): 7615-7622.

ZHAO Q G, HUANG G Q, MA Y Q. The problems in red soil ecosystem in southern China and its countermeasures[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 33(24): 7615-7622.

[28] 邹丽梅.亚热带6个树种细根形态比较与根序分级构型研究[D].长沙: 中南林业科技大学, 2015.

ZOU L M. Root Identification and Variation in Architecture of Fine Roots of Subtropical Tree Species in Southern China[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2015.

[29] 叶建军, 许文年, 鄢朝勇, 等.边坡生物治理回顾与展望[J].水土保持研究, 2005(1): 173-177.

YE J J, XU W N, YAN C Y, et al. Review and Prospect of Slope Vegetative Treatment[J]. Soil and Water Conservation Research, 2005(1): 173-177.

[30] 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[J].农业工程学报, 2012, 28(4): 136-141.

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[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4): 136-141.

[31] MENG S Y, ZHAO G Q, YANG Y Y. Impact of plant root morphology on rooted-soil shear resistance using triaxial testing[J]. Advances in Civil Engineering, 2020(11): 1-13.

[32] 申紫雁, 李光莹, 刘昌义, 等.黄河源区4种植物根系力学特性及根-土复合体抗剪强度研究[J].中国水土保持, 2021(7): 49-52.

SHEN Z Y, LI G Y, LIU C Y, et al. Study on the root mechanical characteristics and root soil composite shear strength of four plant species in the Yellow River source area[J]. China Soil and Water Conservation, 2021(7): 49-52.

[33] LAMIYA H I, SHARIFUL I M, HOQUE E. Effect of vetiver root on triaxial shear strength of a cohesionless soil[J]. Geomechanics and Geoengineering: An International Journal, 2022, 17(3): 857-871.

[34] BARTHES B, AZONTONDE A, BABOULE B Z et al. Field scale run-off and erosion in relation to top soil aggregate stability in three tropical regions in Cameroon, Mexico[J]. European Journal of Soil Science, 2000(51): 485-495.

[35] 高维森, 王佑民.土壤抗蚀抗冲性研究综述[J].水土保持通报, 1992(5): 59-63.

GAO W S, WANG Y M. Review on the Study of Soil Anti-erosibility and Anti-scourability[J]. Soil and Water Conservation Bulletin, 1992(5): 59-63.

[36] WANG Z H, FANG H, CHEN M. Effects of root exudates of woody species on the soil anti-erodibility in the rhizosphere in a karst region, China[J]. Peerj (San Francisco, Ca), 2017(5): 3029.

[37] 陈雪冬, 李尤亮, 杨旸.植物根系对浅层边坡的水文力学加固研究[J].三峡大学学报(自然科学版), 2022, 44(1): 33-40.

CHEN X D, LI Y L, YANG Y. Study on Hydro-mechanical Effect of Plant Roots on the Shallow Slope[J]. Journal of Three Gorges University (Natural Science Edition), 2022, 44(1): 33-40.

(编辑/张婷)

作者简介:

谢伟文
1996年生/男/广东茂名/广州普邦园林股份有限公司助理工程师/研究方向为园林植物应用与生态(广州 510627)

谢腾芳
1984年生/女/广东博罗/广州普邦园林股份有限公司研究院总工程师, 高级工程师/研究方向为园林绿化(广州 510627)

李冰敏
1992年生/女/广东潮州/广州普邦园林股份有限公司高级工程师/研究方向为园林植物应用与生态(广州 510627)

关开朗
1988年生/男/广东阳江/广州普邦园林股份有限公司工程师/研究方向为生态学(广州 510627)

谭广文
1959年生/男/广东广州/广州普邦园林股份有限公司集团首席专家, 教授级高级工程师/研究方向为公园管理、规划设计、园林植物(广州 510627)

Study on Soil Consolidation Efficiency of 9 Common Ground Cover Plants Based on Landscape Slope Protection

XIE Weiwen, XIE Tengfang, LI Bingmin, GUAN Kailang, TAN Guangwen*

Abstract: To screen herbaceous plants that are adaptable to and conducive to stabilizing ecologically fragile garden slopes, this study selected 9 commonly used herbaceous slope-protection plants from Baiyun Mountain Scenic Area, a renowned mountain scenic spot in South China, and conducted tests on the shear strength, anti-scourability, and anti-erosion resistance of their root-soil composites. The results showed that all the tested plants could effectively improve slope stability, and the ranking of their comprehensive soil-fixing efficiency was as follows: *Axonopus compressus* > *Arrhenatherum elatius* 'Variegatum' > *Calathea insignis*>*Wedelia trilobata* > *Hymenocallis littoralis* > *Hemerocallis fulva* > *Nephrolepis cordifolia* > *Ruellia simplex* > *Pilea notata*. In terms of specific performance indicators reflecting different aspects of soil stability, *Arrhenatherum elatius* 'Variegatum', *Hymenocallis littoralis*, and *Nephrolepis cordifolia* had the highest shear strength in the upper soil layer; *Arrhenatherum elatius* 'Variegatum', *Hymenocallis littoralis*, and *Calathea insignis* exhibited the best performance in the shear strength of the lower soil layer; in terms of anti-scourability, *Axonopus compressus*, *Wedelia trilobata*, and *Hemerocallis fulva* showed the optimal performance; meanwhile, *Calathea insignis*, *Ruellia simplex*, and *Hemerocallis fulva* demonstrated the strongest anti-erosion resistance. The comprehensive evaluation based on all test indicators indicated that *Axonopus compressus*, *Arrhenatherum elatius* 'Variegatum', *Calathea insignis*, *Wedelia trilobata*, and *Hymenocallis littoralis* are highly suitable as excellent slope-protection plants for garden slopes in Baiyun Mountain Scenic Area and South China. To accurately quantify the relative contribution rate of each evaluation index to the overall soil-fixing effect, the entropy weight

method was adopted to measure the contribution degree of each index. The results revealed that the contribution rates followed the order: anti-scourability (33.44%) > upper-layer shear strength (26.03%) > lower-layer shear strength (21.31%) > anti-erosion resistance (19.22%), indicating that the importance of different indicators varied. The upper and lower-layer shear strengths are the core indicators reflecting the mechanical effects of root-soil composites, with the contribution rate of upper-layer shear strength being higher than that of the lower layer, while anti-scourability and anti-erosion resistance are the key indicators characterizing hydrological effects. Both mechanical and hydrological effects play significant and indispensable roles in the soil-fixing function of slope-protection plants. It is worth noting that the cumulative contribution rate of hydrological effect indicators reached 52.66%, which was equivalent to that of mechanical effect indicators (47.34%). Correlation analysis further revealed that there was a highly significant positive correlation ($P<0.01$) among upper-layer shear strength, lower-layer shear strength, and anti-erosion resistance, while anti-scourability was only highly significantly correlated with anti-erosion resistance ($P<0.01$). These findings collectively indicate that there is a clear synergistic mechanism between mechanical and hydrological effects during the soil-fixing process of slope-protection plants, and provide important theoretical support for the scientific selection of slope-protection plants in South China.

Keywords: landscape architecture; slope protection; root reinforcement of soil; soil and water conservation; vegetative slope protection; Baiyun Mountain Scenic Area

Biography

XIE Weiwen, male, born in 1996 in Maoming, Guangdong Province, Assistant Engineer in Guangzhou Pubang Landscape Architecture Co., Ltd., research area: landscape plant application and ecology (Guangzhou 510627)

XIE Tengfang, female, born in 1984 in Boluo, Guangdong Province, Chief Engineer of Research Institute and Senior Engineer in Guangzhou Pubang Landscape Architecture Co., Ltd., research area: landscape architecture (Guangzhou 510627)

LI Bingmin, female, born in 1992 in Chaozhou, Guangdong Province, Senior Engineer in Guangzhou Pubang Landscape Architecture Co., Ltd., research area: landscape plant application and ecology (Guangzhou 510627)

GUAN Kailang, male, born in 1988 in Yangjiang, Guangdong Province, Intermediate Engineer in Guangzhou Pubang Landscape Architecture Co., Ltd., research area: ecology (Guangzhou 510627)

TAN Guangwen, male, born in 1959 in Guangzhou, Guangdong Province, Group Chief Expert and Professor-level Senior Engineer in Guangzhou Pubang Landscape Architecture Co., Ltd., research area: park management, planning and design, landscape plant (Guangzhou 510627)