

DOI: 10.20103/j.stxb.202210233015

李金波, 伍红燕, 赵斌, 陈济丁, 宋桂龙. 模拟边坡条件下常见护坡植物苗期根系构型特征. 生态学报, 2023, 43(24): 10131-10141.

Li J B, Wu H Y, Zhao B, Chen J D, Song G L. Root architecture characteristics of common slope protection plants at seedling stage under simulated slope conditions. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(24): 10131-10141.

模拟边坡条件下常见护坡植物苗期根系构型特征

李金波¹, 伍红燕¹, 赵斌², 陈济丁³, 宋桂龙^{1,*}

1 北京林业大学草业与草原学院, 国家林业草原运动场和护坡草坪工程技术研究中心, 北京 100083

2 北京市首发天人生态景观有限公司, 北京 100000

3 交通运输部科学研究院, 北京 100029

摘要: 植物根系对提高边坡稳定性具有重要作用。采用喷播的方式在侵蚀槽中制备模拟石质边坡, 植物生长 6 个月后采用全根挖掘和 Win-RHIZO 根系分析仪扫描相结合的方法, 研究了模拟边坡条件下 11 种常见护坡植物苗期的根系构型特征。结果表明: 紫花苜蓿根系生物量最大, 柠条根系生物量最小, 二者主根发达, 仅分布在下坡方向。沙打旺、胡枝子、紫穗槐和欧李根系生物量、总根数、总基根数、总根长、总根表面积、总根体积均较大, 在上坡方向和下坡方向分布均匀, 拓扑指数介于 0.53—0.61 之间, 为叉状分枝结构, 根系固土护坡能力较强, 可作为边坡生态修复工程的优选植物。根系生物量与根系表面积、根体积呈现显著的线性正相关关系 (R^2 分别为 0.68 和 0.80), 拓扑指数与根系长度、根系表面积、总根数、总基根数呈现显著的指数负相关关系 (R^2 分别为 0.82、0.68、0.87、0.86), 可为植物根系构型研究提供科学依据及理论支撑。

关键词: 边坡; 灌木; 草本植物; 根系构型; 拓扑结构

Root architecture characteristics of common slope protection plants at seedling stage under simulated slope conditions

LI Jinbo¹, WU Hongyan¹, ZHAO Bin², CHEN Jiding³, SONG Guilong^{1,*}

1 School of Grassland Science, Beijing Forestry University, Engineering and Technology Research Center for Sports field and Slope Protection Turf, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100083, China

2 Beijing Shoufa Tianren Ecological Landscape Limited Company, Beijing 100000, China

3 China Academy of Transportation Science, Beijing 100029, China

Abstract: Plant roots play an important role in improving slope stability. Root structure characteristics can reflect plant root function and ecological adaptation strategies, which is important for plant growth and development and ecological stability. In this study, simulated stony slopes were prepared by spraying in erosion channels. After 6 months of plant growth, whole-root excavation and Win-RHIZO root analyzer were combined to study the root architecture characteristics of 11 common slope protection plants under simulated slope conditions. Correlation analysis was used to analyze the relationships between plant root morphology and topological structure. The results showed that the biomass of 11 plant species showed significant differences, and the aboveground biomass ranging from 1.77 g to 23 g, the root biomass ranging from 1.1 g to 17.75 g. The root biomass of *Alfalfa* was the largest, while that of *Caragana korshinskii* was the smallest. The main roots of both were developed and only distributed in the down-slope direction. The root biomass, total number of roots, total number of basal roots, total root length, total root surface area, and total root volume of *Astragalus adsurgens*, *Lespedeza bicolor*, *Amorpha fruticosa*, and *Cerasus humilis* were all large, and the roots were uniformly distributed in the up-slope and down-slope

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB26001004); 北京市首发天人生态景观有限公司 (2018HXFWLXT031)

收稿日期: 2022-10-23; **网络出版日期:** 2023-11-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: syihan@163.com

directions. The topological index of these four kinds of plants was between 0.53 and 0.61, which indicated a forked branch structure. The root topological index of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H.F.Chow. was 0.81, which was the largest compare to the other 10 plant species. The root system has strong soil fixation and slope protection ability, which could be used as the preferred plants for slope ecological restoration engineering. Both root surface area and root volume were linearly and positively correlated with root biomass ($R^2=0.68$ and 0.80 , respectively), while the root length, root surface area, total number of roots, and total number of basal roots were exponentially and negatively correlated with topological index ($R^2=0.82$, 0.68 , 0.87 and 0.86 , respectively). The root structure types of the 11 plant species in this study were classified, and the results were as follows: *Astragalus adsurgens*, *Amorpha fruticosa* L., *Rosa xanthina* Lindl., *Vitex negundo* var. *heterophylla* (Franch.) Rehd. were R-type root structure due to the developed inclined root systems. *Alfalfa*, *Caragana korshinskii* Kom. and *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H.F.Chow. were V-type root structure due to the obvious taproots and few horizontal roots and inclined roots. *Prunus humilis* Bunge was M-type root structure due to the numerous and dense root branches. *Lespedeza bicolor* Turcz., *Rhus chinensis* Mill. and *Indigofera pseudotinctoria* Matsum. were VH-type root structure due to the taproots and the roots were distributed horizontally in the soil surface. The results of the study can provide scientific basis and theoretical support for further study of plant root architecture.

Key Words: slope; shrub; herbaceous plant; root architecture; topological structure

根系是植物吸收水分和养分元素的重要器官,可为植物地上部生长提供稳定性且发挥重要的贮藏功能,对植物生长发育起着不可或缺的作用^[1-2]。根系在土壤中的分布特征主要表现为根系构型(Root System Architecture, RSA),可反映土壤的物质和能量被植物利用的可能性以及生产力^[3-4]。根系构型指植物不同径级的根在土壤中的相互连接情况和空间分布^[5],包括平面几何构型和立体几何构型,平面几何构型主要包括根系总根长、总体积、总表面积等,立体几何构型主要通过根系拓扑结构反映,包括不同径级根的发生及在空间的三维分布、根系的生长角度等^[4]。研究根系构型特征可更准确的了解根系功能及其生态适应策略,对植物生长发育和生态稳定性具有重要意义。

根系构型是植物最重要的形态特征之一,具有较强的可塑性,既由遗传因素控制,又受到许多环境因子的调控^[3]。近年来,国内外学者针对植物根系构型开展了大量研究,指出根系构型受到土壤水分、养分、根际微生物、土壤密度、坡度、温度、激素水平、光照等诸多因素的影响^[1-7]。其中,坡度是植物在自然条件下面临的一大生境胁迫,不同立地条件下根系构型表现出表型可塑性。任杰等研究了丘间低地、缓平沙坡、坡顶平地 3 种立地条件下沙蓬(*Agriophyllum aquarrosum*)的根系分形特征,结果表明沙蓬根系分型维数从丘间低地到坡顶平地呈现减小趋势,而分型丰度呈现增大趋势^[8]。前人利用计算机图像分析系统在坡地、阶地、平地 3 种条件下的研究发现坡地显著增加了金雀花(*Spartium junceum* L.)和甘蓝蜜树(*Fraxinus ornus* L.)幼苗一级、二级和三级侧根的长度和数量^[9]。植物根系在维持坡体稳定性和控制土壤侵蚀等方面发挥重要作用^[2,10-11]。利用植物防止斜坡浅层滑坡、增强坡体稳定性,是有效的生物工程措施,在世界范围内得到了广泛应用^[12]。研究表明植物根系可显著提高斜坡的最小临界坡度 6.67° — 20.19° ,从临界坡度来看 H 型根系的植物适合缓坡地区,而 R 型根系的植物适合陡坡地区^[13]。研究不同植物在坡体条件下的根系构型特征,有利于选择适宜的植物品种进而设计合理的种植方案,对加强生态工程具有重要意义。

灌木和草本植物在边坡生态修复中发挥重要作用,在陡峭岩石坡面、采石场、公路或铁路边坡等立地条件下,常采用草本型植物群落和草灌型植物群落进行生态修复^[14-15]。赵炯昌等研究了模拟降雨条件下沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、苜蓿(*Medicago sativa*) 3 种典型灌草及其地上部和根系对黄土坡面产流和产沙过程的影响,发现苜蓿具有最佳的减流效益,而柠条的减沙效果最佳,根系发挥了较大的减沙作用,平均相对贡献达 78.44% ^[16]。植物须根的加筋效应、主根和粗根的锚固效应和支撑效应可控制土壤侵蚀,起到加固土体、稳定边坡的作用^[17-18]。目前,草本植物和灌木常被用于边坡生态修复工程,但在边

坡条件下典型灌草植物的根系形态特征还尚未见系统研究,其在坡体生境下的根系构型少见报道。本研究以常见典型护坡植物为研究对象,对模拟边坡条件下不同植物的根系平面、立体几何构型及拓扑结构进行研究,揭示常见灌草植物在坡体生境下的根系构型特性,以期为边坡生态修复工程种植方案及设计提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在北京市门头沟区军庄镇(39°59′27.79″ N,116°05′3.74″ E)进行,海拔 120 m,年平均气温为11.7 ℃,年平均降水量为 528.7 mm,年蒸发量为 1632 mm^[19]。

1.2 试验材料

供试植物包含 2 种草本植物和 9 种灌木(表 1)。在 11 种植物材料中,欧李利用 10 cm 扦插苗种植,其余植物采用播种方式种植。紫花苜蓿种子购自克劳沃生态科技有限公司,其余植物种子购自北京千年大地草业生态科技发展有限公司,播种前对种子进行预处理。

表 1 植物材料
Table 1 Plant materials

名称 Name	拉丁名 Latin name	科 Family	种类 Species	名称 Name	拉丁名 Latin name	科 Family	种类 Species
沙打旺(SDW)	<i>Astragalus adsurgens</i> Pall.	豆科	草本	欧李(OL)	<i>Cerasus humilis</i> (Bge.) Sok.	蔷薇科	灌木
紫花苜蓿(MX)	<i>Medicago Sativa</i> L.	豆科	草本	黄刺玫(HCM)	<i>Rosa xanthina</i> Lindl.	蔷薇科	灌木
柠条(NT)	<i>Caragana korshinskii</i> Kom.	豆科	灌木	盐肤木(YFM)	<i>Rhus chinensis</i> Mill.	漆树科	灌木
马棘(MJ)	<i>Indigofera pseudotinctoria</i> Matsum.	豆科	灌木	荆条(JT)	<i>Vitex negundo</i> L.	马鞭草科	灌木
胡枝子(HZZ)	<i>Lespedeza bicolor</i> Turcz.	豆科	灌木	酸枣(SZ)	<i>Ziziphus jujuba</i> Mill.	鼠李科	灌木
紫穗槐(ZSH)	<i>Amorpha fruticosa</i> L.	豆科	灌木				

供试土壤为京礼高速公路边坡填方用土,经自然风干过筛后与草炭、保水剂、粘结剂以及缓释复合肥均匀混合成喷播基质备用。其中,草炭的添加量为 30%;缓释复合肥的添加量为 200 g/m³;保水剂选用高吸水性树脂,粘结剂选用聚丙烯酰胺,添加量均为 270 g/m³。喷播 3 d 后基质的基本物理性质见表 2,基质容重和孔隙度指标采用环刀法测定^[20]。

表 2 基质物理性质
Table 2 The physical properties of substrate

容重/(g/cm ³) Soil bulk density	总孔隙度/% Total porosity	毛管孔隙度/% Capillary porosity	非毛管孔隙度/% Non-capillary porosity
1.47±0.05	39.66±3.34	37.37±3.68	2.29±0.61

1.3 试验设计

试验在侵蚀槽(长 2 m、宽 1 m、高 0.2 m,容积 0.4 m³,底部铺设 2.5—3 cm 厚度不规则青石板)中进行,设定侵蚀槽与水平面夹角为 45°,用以模拟 45°岩石边坡。每个侵蚀槽内用隔板分成 6 个小区,种植 1 种植物。采用客土喷播方式在侵蚀槽中喷覆约 10—11 cm 厚的基质层,静置 3 d 后进行播种及扦插苗移栽。播种后用混合基质覆盖,初期铺设无纺布,使用微喷灌系统进行浇水,每个侵蚀槽垂直布设 4 个微喷管以保证灌溉的均匀性。播种至出苗 1 周期间浇水频率为 2 次/d,出苗 2 至 4 周期间浇水频率为 1 次/d,出苗 4 周后浇水频率为 2—3 次/周,每次浇水时间 10 min。种子发芽后对植物进行间苗,每个小区保留 1 株植物,培养 6 个月。

1.4 根系样品采集及指标测定

在采集植物根系前,先浇水浸湿基质以方便根系取样,防止根系断裂。原位挖掘全根系后,利用卷尺及量角器现场观测并记录植物根系分支特征、根系分布范围、不同方向根系分布数量等指标,对植物进行全方位拍

照后带回实验室置于 4 ℃ 冰箱中保存,进行指标测定。

1.4.1 根系分布范围

用卷尺测量根系在自然状态下向根基为准的上坡方向和下坡方向(图 1)延伸到的最远竖直距离^[21]。

1.4.2 根数

参考 Ghestem 等人^[22]提出的标准判定植物水平根、倾斜根、垂直根的数量(图 1),参考 Stokes 等人^[23]提出的标准判定植物 I 级、II 级、III 级和 IV 级侧根的数量。主要判定标准如下:

水平根:根系生长方向与坡面夹角 0°—30°的根;

倾斜根:根系生长方向与坡面夹角 30°—60°的根;

垂直根:根系生长方向与坡面夹角 60°—90°的根;

I 级侧根:从主根或根茎伸出的侧根;

II 级侧根:从 I 级侧根伸出的侧根;

III 级侧根:从 II 级侧根伸出的侧根;

IV 级侧根:从 III 级侧根伸出的侧根。

1.4.3 根系拓扑指数

参考 Fitter^[24]提出的方法测定植物根系拓扑指数(Topological Index, TI)。

$TI = \lg A / \lg M$ (A 为最长根系通道内部连接的总数, M 为根系所有外部连接的总数)

1.4.4 根长度、根表面积、根体积

使用 Epson Scan V800 根系扫描仪对植物根系进行扫描,采用根系分析系统软件 Win-RHIZO PRO 2013 (Regent Instruments Inc., Canada)对根系图片进行分析,获得根系总根长、总根表面积、总根体积以及不同径级根系的根长、根表面积、根体积^[25]。根系径级的划分参考张彦东等人^[26]提出的方法,按照根系直径(d)将根系分为细根($0 \text{ mm} < d \leq 2 \text{ mm}$)、中根($2 \text{ mm} < d \leq 5 \text{ mm}$)、粗根($d > 5 \text{ mm}$)。

1.4.5 根系生物量

生物量测定采用烘干法,将植物地上部和根系置于烘箱于 105 ℃ 杀青 30 min 后,调至 80 ℃ 烘至恒重,用万分之一天平称重并记录。

1.4.6 根系结构类型划分

参考 Yen 等人^[27]提出的标准对植物根系结构类型进行分类,包括水平型(Horizontal type; H 型)、直角型(Rectangular type, R 型)、垂直及水平型(Vertical and horizontal type, VH 型)、垂直型(Vertical type, V 型)、团网型(Meshy type, M 型)(图 2)。主要判定标准如下:

H 型:一级根多呈水平分布,水平方向分布范围广;

R 型:主根明显,倾斜根发达;

VH 型:主根明显且较长,大多数侧根在水平面上分布较多且分布范围广;

V 型:主根明显且发达,侧根稀疏且较短;

M 型:无主根,根系分枝多而密,倾斜根和须根发达。

1.5 数据处理及分析

原始数据经 Excel 2019 软件整理,运用 SPSS 21.0 对数据进行统计分析,分析结果用 Origin 作图。

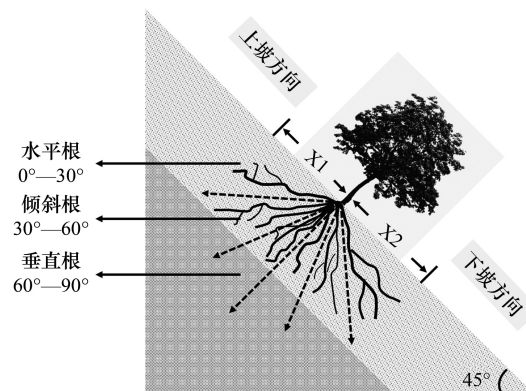


图 1 根系示意图

Fig.1 Schematic diagram of root system



图 2 根系结构分类图^[27]

Fig.2 Classification diagram of root architecture

H 型:水平型; R 型:直角型; VH 型:垂直及水平型; V 型:垂直型; M 型:团网型

2 结果与分析

2.1 生物量

模拟边坡条件下不同植物的生物量如图 3 所示。11 种植物地上部生物量呈现明显差异,介于 1.77—23 g 之间,柠条的地上部生物量最小,沙打旺和苜蓿两种草本植物地上部生物量在 11 种植物中位于前列,仅低于马棘、胡枝子、黄刺玫和盐肤木。11 种植物根系生物量介于 1.1—17.75 g 之间。在 9 种灌木植物中,胡枝子、紫穗槐、欧李和盐肤木根系生物量较大,均显著高于柠条、马棘、黄刺玫、荆条和酸枣。和地上部生物量相似,柠条在所有植物中根系最小,生物量仅有 1.1 g。沙打旺和苜蓿两种草本植物根系生物量均较大,分别为柠条根系生物量的 11.1 和 16.14 倍。

2.2 根系数量

模拟边坡条件下不同植物总根数和总基根数如图 4 所示。11 种植物根系总数呈现欧李>胡枝子>沙打旺>紫穗槐>黄刺玫>紫花苜蓿>马棘>盐肤木>荆条>柠条>酸枣的趋势(图 4)。不同植物总根数差异显著,欧李总根数约为酸枣总根数的 14.32 倍。11 种植物根系数量占比较大的均为 II 级侧根和 III 级侧根,II 级侧根占比介于 29.21%—67.99%之间,III 级侧根介于 13.43%—51.29%之间。其中,黄刺玫、荆条、酸枣和柠条只能达到 3 级侧根,其余 7 种植物均有 4 级侧根。欧李、紫穗槐、胡枝子 3 种植物根系大部分为 III 级侧根,占比介于 44.23%—51.29%之间,其余 8 种植物都呈现以 II 级侧根为主的趋势。

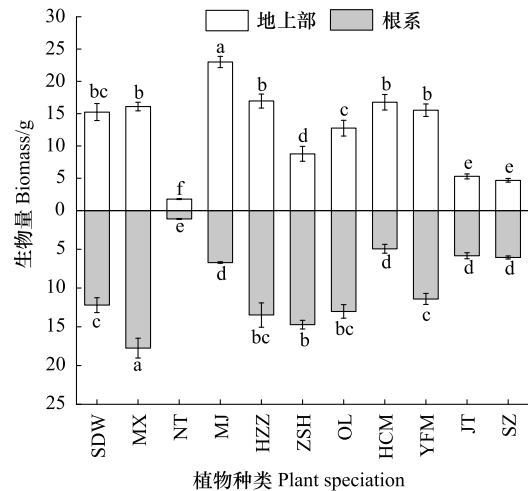


图 3 模拟边坡条件下不同植物的生物量

Fig.3 The biomass of different plant under simulated slope conditions

不同小写字母表示不同植物间生物量差异显著 ($P < 0.05$); SDW: 沙打旺; MX: 苜蓿; NT: 柠条; MJ: 马棘; HZZ: 胡枝子; ZSH: 紫穗槐; OL: 欧李; HCM: 黄刺玫; YFM: 盐肤木; JT: 荆条; SZ: 酸枣

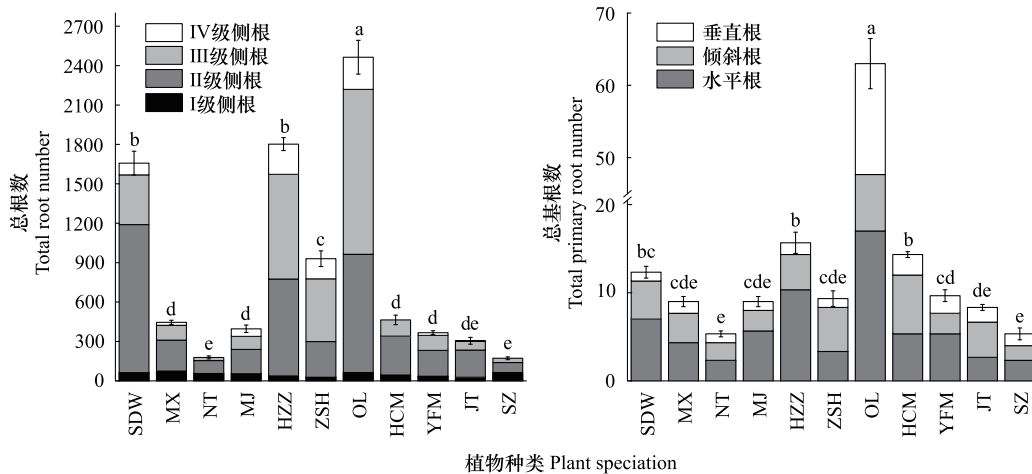


图 4 模拟边坡条件下不同植物根系的数量

Fig.4 The root number of different plant under simulated slope conditions

不同小写字母表示不同植物间根系数量差异显著 ($P < 0.05$)

11 种植物的总基根数呈现欧李>胡枝子>黄刺玫>沙打旺>盐肤木>紫穗槐>紫花苜蓿>马棘>荆条>柠条>酸枣的趋势(图 4)。和总根数结果相似,不同植物间总基根数差异显著,欧李总基根数约为柠条和酸枣总基根数的 11.82 倍。11 种植物的垂直根都占比较小,范围在 8.11%—25%之间。紫穗槐、欧李、黄刺玫和荆条

4种植物的倾斜根在总基根数中占比最大,范围在 46.51%—53.57%之间,其余植物均以水平根系为主,占比范围在 43.75%—65.96%之间。

2.3 根系形态

模拟边坡条件下不同植物的根系形态特征见表 3。不同植物的根系总长度呈现欧李>沙打旺>胡枝子>紫穗槐>马棘>紫花苜蓿>荆条>黄刺玫>盐肤木>酸枣>柠条的趋势,欧李根系总长度约为柠条的 10.7 倍。不同植物的根系总表面积呈现欧李>胡枝子>沙打旺>盐肤木>紫穗槐>紫花苜蓿>马棘>荆条>酸枣>黄刺玫>柠条的趋势,欧李根系总表面积约为柠条的 7.8 倍。不同植物的根系总体积呈现沙打旺>盐肤木>紫花苜蓿>紫穗槐>胡枝子>欧李>马棘>酸枣>荆条>黄刺玫>柠条的趋势,沙打旺根系总体积约为柠条的 13 倍。在 11 种植物中,柠条的 3 种根系形态特征都小于其余 10 种植物。

表 3 不同植物的根系形态

Table 3 Root morphological of different plant

植物种类 Plant speciation	根系总长度/cm Total root length	根系总表面积/cm ² Total root surface area	根系总体积/cm ³ Total root volume
SDW	3774.92±491.16b	547.77±44.49bc	28.64±2.67a
MX	1887.33±125.29d	449.62±63.56c	26.38±5.18a
NT	514.51±38.40f	83.23±3.35f	2.27±0.05d
MJ	1987.54±31.75d	344.87±7.53d	11.41±0.16c
HZZ	3345.78±513.16bc	566.42±53.06b	23.04±2.50ab
ZSH	2760.81±325.73c	456.22±31.82bc	23.13±1.75ab
OL	5524.66±259.03a	648.08±36.06a	19.29±1.35b
HCM	1326.47±136.96def	220.14±21.58e	6.86±0.93cd
YFM	1292.88±132.84def	460.56±41.46bc	27.92±2.24a
JT	1419.46±45.41de	308.11±12.81de	9.09±0.57c
SZ	806.46±18.51ef	223.04±7.46e	9.14±0.40c

同列不同小写字母表示不同植物间差异显著 ($P<0.05$)

不同径级根系在植物根系形态特征中的占比如图 5 所示。对于 11 种植物,根系总长度都呈现出以细根 ($0<d\leq2\text{mm}$) 为主的趋势,占比约为 83.91%—97.41%之间,粗根所占比例最小(图 5)。沙打旺、胡枝子、紫穗槐、欧李细根占比在 94.43%—97.41%之间,细根长度在 2630.42—5381.46 cm 之间。紫花苜蓿、马棘、黄刺玫、盐肤木、荆条细根占比在 83.91%—97.40%之间,细根长度在 1084.81—1918.16 cm 之间。酸枣和柠条总根长较小,其细根长度分别仅有 729.23 cm 和 498.67 cm。11 种植物中根和粗根长度较小,中根长度范围介于 15.84—188.89 cm 之间,粗根长度范围介于 0—22.34 cm 之间。和其他植物不同,柠条只有中根和细根。

不同径级根系在植物根表面积中的占比如图 5 所示。和根长相似,不同径级根系占比都呈现出细根>中根>粗根的趋势。和根长相比,细根在根系根表面积中的占比有所下降,约为 52.08%—89.31%,细根根表面积在 69.18—510.38 cm²之间。紫花苜蓿和盐肤木细根和中根在根表面积中的占比相差较小,其他植物细根占比为中根占比的 2.35—11.46 倍。不同植物中根根表面积在 14.05—180.77 cm²之间,粗根根表面积在 0—54.97 cm²之间。

不同径级根系在植物根总体积中的占比如图 5 所示。和根长、根表面积不同,不同植物间细根、中根、粗根根体积在根系总体积中的占比趋势不同。柠条、马棘、黄刺玫、荆条不同径级根体积占比呈现细根>中根>粗根的趋势,紫花苜蓿和盐肤木不同径级根体积占比呈现中根>粗根>细根的趋势,胡枝子、欧李、酸枣不同径级根体积占比呈现中根>细根>粗根的趋势,沙打旺和紫穗槐不同径级根体积占比呈现粗根>中根>细根的趋势。在所有植物中,欧李的细根体积最大,为 7.27 cm³;盐肤木的中根体积最大,为 14.70 cm³;沙打旺的粗根体积最大,为 12.74 cm³。

2.4 根系分布范围及拓扑结构

模拟边坡条件下不同植物的根系分布范围如图 6 所示。对于不同植物,在上坡方向根系分布范围呈现盐肤木>欧李>胡枝子>马棘>紫穗槐>沙打旺>酸枣>荆条>黄刺玫>柠条=紫花苜蓿的趋势,其中,柠条和紫花苜蓿在

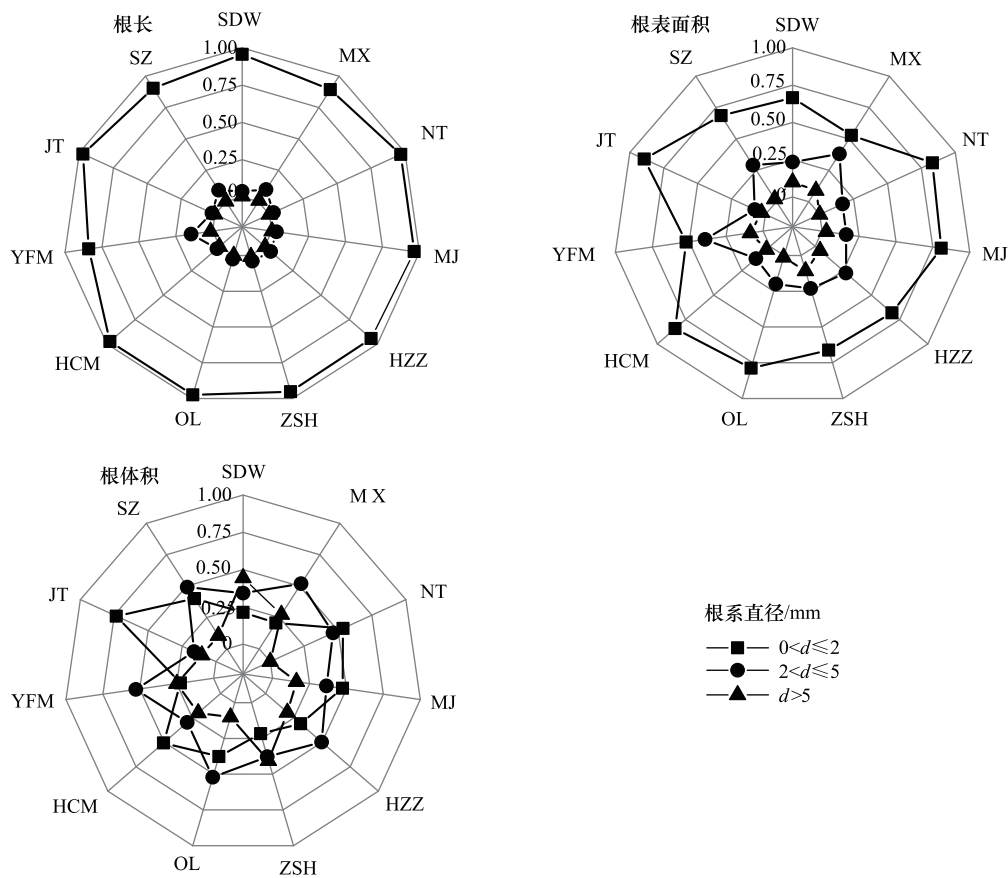


图 5 植物根系形态特征中不同径级根系的占比

Fig.5 The ratio of different diameter classes roots in plant root morphological characteristics

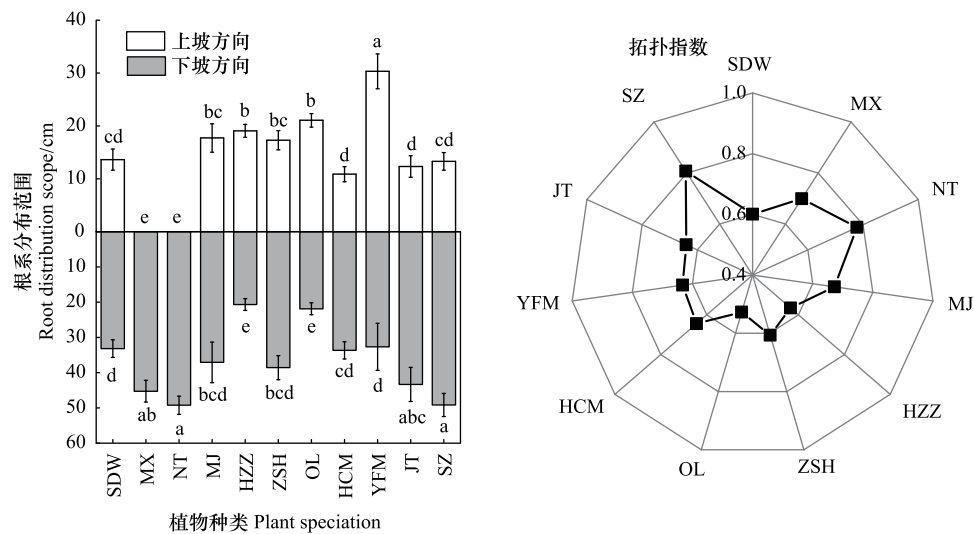


图 6 模拟边坡条件下不同植物根系分布范围及拓扑指数

Fig.6 Characteristics of root distribution and root topological index of different plant under simulated slope conditions

不同小写字母表示不同植物间根系分布范围差异显著 ($P<0.05$)

上坡方向没有根系分布;在下坡方向根系分布范围呈现柠条>酸枣>紫花苜蓿>荆条>紫穗槐>马棘>黄刺玫>沙打旺>盐肤木>欧李>胡枝子的趋势。对比每种植物在上坡方向和下坡方向的根系分布范围,欧李、胡枝子、盐肤木 3 种植物在两个方向上根系分布较均匀,其余植物均呈现出下坡方向根系分布范围大于上坡方向的趋势。

模拟边坡条件下不同植物的根系拓扑指数如图 6 所示。对于不同植物,根系拓扑指数呈现酸枣>柠条>紫花苜蓿>马棘>黄刺玫>荆条>盐肤木>紫穗槐>沙打旺>胡枝子>欧李的趋势,所有植物根系拓扑指数均大于 0.5,酸枣根系拓扑指数为 0.81,欧李和胡枝子根系拓扑指数分别为 0.53 和 0.57。

2.5 根系形态指标相关性分析

对不同植物的根系形态特征做相关性分析(表 4),结果表明:植物根系长度与根表面积、总根数、总基根数极显著正相关($P<0.01$),根表面积与根体积、总根数、根系生物量极显著正相关($P<0.01$),根体积与根系生物量极显著正相关($P<0.01$),总根数与总基根数极显著正相关($P<0.01$)。根系拓扑指数与根长、根表面积、总根数呈现极显著负相关关系($P<0.01$),与总基根数呈现显著负相关关系($P<0.05$)。

表 4 不同植物根系特征相关性分析

Table 4 Correlation analysis of root characteristics of different plant							
指标 Indices	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7
x1	1						
x2	0.872 **	1					
x3	0.534	0.841 **	1				
x4	0.966 **	0.825 **	0.489	1			
x5	0.807 **	0.588	0.161	0.783 **	1		
x6	0.599	0.843 **	0.905 **	0.524	0.285	1	
x7	-0.824 **	-0.832 **	-0.561	-0.801 **	-0.622 *	-0.556	1

x1:根长 Root length;x2:根表面积 Root surface area;x3:根体积 Root volume;x4:总根数 Total root number;x5:总基根数 Total primary root number;x6:根系生物量 Root dry weight;x7:根系拓扑指数 Root topological index;* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关,** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关

基于不同植物根系特征相关性分析结果,对不同植物根系生物量、拓扑指数分别与根系形态特征做相关性回归分析,结果如图 7 所示。根系生物量和根系表面积、根体积都呈现显著的线性正相关关系, R^2 分别为

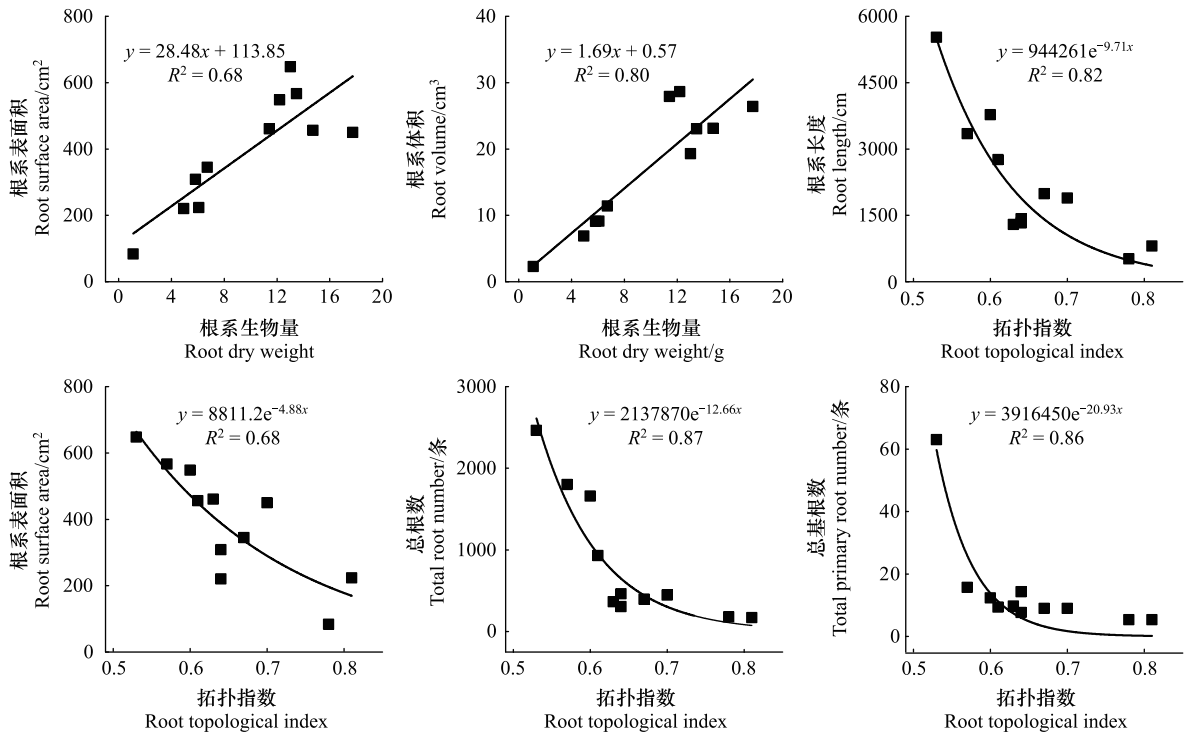


图 7 不同植物根系特征相关性回归分析

Fig.7 Correlation regression analysis of root characteristics of different plant

0.68和0.80。拓扑指数与根系长度、根系表面积、总根数、总基根数都呈现显著的指数负相关关系, R^2 分别为0.82、0.68、0.87、0.86。

2.6 根系结构划分

参考 Yen(1987)^[27]的分类标准,对研究中11种植物根系进行结构类型划分,结果如下:沙打旺、紫穗槐、黄刺玫、荆条4种植物分布较多的倾斜根系,为R型根系结构(图8,以沙打旺为例)。紫花苜蓿、柠条、酸枣3种植物有明显主根,水平根和倾斜根数量较少,为V型根系结构(图8,以紫花苜蓿为例)。欧李无主根,根系分支多而密,呈团网状分布,为M型根系结构(图8)。胡枝子、盐肤木、马棘3种植物有主根,且根系在土壤表层大多呈水平方向分布,为VH型根系结构(图8,以胡枝子为例)。

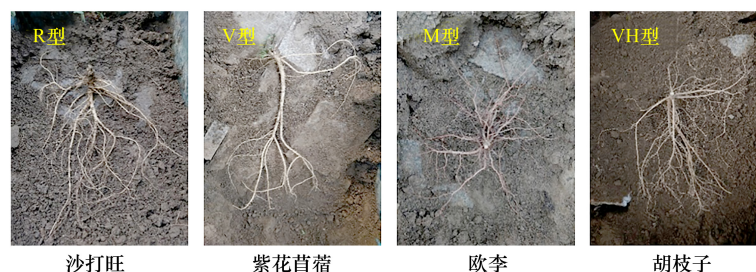


图8 原位根系图

Fig.8 Root system diagram in situ

3 讨论

植物根系在固结土壤、提高土壤抗侵蚀能力方面发挥重要作用^[28]。不同生境条件下植物根系表现出较强的可塑性,根系构型可反映植物对环境的适应性^[4,29-30]。前人研究了不同坡度下胡枝子和紫花苜蓿的根系分布特征及抗拔力,结果表明根系生物量随着坡度增大逐渐降低,胡枝子根系生物量与抗拔力呈现显著正相关关系^[21]。本研究中沙打旺、紫花苜蓿、紫穗槐、胡枝子、欧李、盐肤木6种植物根系生物量较大,可能具有较强的固土能力。

不同径级根系特征可更准确反映出植物根系对土体稳固的效果,细根生理活性较高,是植物根系吸收土壤中水分和养分的重要功能器官^[19]。植物根系固土能力与根系序级紧密相关,根系表面与土体间形成的摩擦力以及根系分支造成的结构力会随着根系序级增多而逐渐增大,进而增强土体稳定性^[32]。本研究中胡枝子、紫穗槐、欧李3种植物总根数较多,且III级侧根占比较大,说明这3种植物细根比较发达,水分及养分吸收能力较强,稳固土体能力突出。不同方向的根系对土体稳定性的作用不同,倾斜根可发挥很好的抗剪切作用,垂直根可起到锚固作用,水平根则易于与人工边坡挂网相结合而增强坡体稳定性^[13]。本研究中沙打旺、紫穗槐、欧李、黄刺玫、荆条5种植物倾斜根占比较大,可提升坡体抗剪切性能。

根系长度、表面积、体积是衡量植物根系生长状况的重要指标,可直接影响根系的吸收能力以及根土摩擦力^[2]。周云艳等研究了植物根系长度对生态袋加筋土挡墙稳定性的影响,结果表明随着根系长度增加,生态袋加筋土挡墙稳定性及承载能力提高^[32]。本研究中沙打旺、欧李、胡枝子、紫穗槐4种植物根系形态整体上高于其他植物,且细根发达,有利于提高根系与土体之间的摩擦阻力以及土体抗剪能力,具有较好的固土护坡性能,这与前人的研究结果相类似^[21,34]。根系分布范围可决定植物对土壤水分及养分的利用程度,植物在坡体生境下会受到土壤重量、地上部重力、坡度等诸多机械应力的影响,进而改变植物根系的空间分布^[35]。植物根系分布范围较大且均匀时更有利于提升坡体稳定性,本研究中欧李、盐肤木、胡枝子3种植物在下坡和上坡方向分布均匀,具有较强的固土护坡能力。根系拓扑结构可以反映根系的觅养策略,尤其是侧根对营养物质的竞争能力,受到植物种类以及立地环境条件等多方面因素的影响^[29]。拓扑指数接近1时根系分支为人

字形分支模式,接近 0.5 时根系分支接近叉状分枝模式。本研究中欧李、胡枝子 2 种植物根系拓扑指数接近 0.5,表明根系分支发达,固土能力较强,可形成更多的根土复合体^[29,35]。酸枣、柠条 2 种植物根系拓扑指数接近 1,说明主根发达,可发挥锚固作用。前人在水稻根系形态与氮素吸收积累的相关性研究中发现水稻总根长、总根表面积、总根体积与生物量都呈现极显著的正相关关系^[36],这与本研究结果相类似。本研究中根系生物量与根表面积、根体积呈现线性正相关关系,表明在根系难以原状挖掘的条件下,也可通过植物根系生物量对根系形态进行预测。根系拓扑指数与总根长、总根表面积以及总根数呈现显著的指数负相关关系,表明植物根系长度、表面积越大,根系越趋近于叉状分枝模式。此外,也可通过根系形态特征对根系拓扑结构进行预测分析。

根系结构类型受到遗传基因以及生长环境的共同影响,研究植物根系结构可以定性表达不同植物在固土护坡工程中的应用潜力。R 型根系结构在垂直方向锚固、斜向抗剪、水平加筋作用突出;V 型根系结构具有发达的垂直根,抗剪和锚固作用较强;VH 型根系结构的植物根系在深层锚固和水平加筋协同作用突出;M 型根系结构具有较多细根,水分及养分吸收能力强,加筋能力突出。本研究中沙打旺、欧李、黄刺玫、荆条、紫穗槐属于 R 型和 M 型根系结构,说明这 5 种植物根系有利于提升土壤抗剪、加筋作用,固土护坡能力较强。紫花苜蓿、柠条、酸枣属于 V 型根系结构,这 3 种植物虽有发达的主根,但侧根数较少,在岩石坡面会增大坡体下滑速度,增大坡体失稳的可能性,类似结果在前人研究中也有报道^[13]。

4 结论

模拟边坡条件下,11 种常见护坡植物根系生长及形态特征存在差异。对比 11 种植物,欧李、沙打旺、紫穗槐、胡枝子 4 种植物根系生物量、总根数、总基根数、根系长度、根表面积、根体积、根系分布范围等根系形态特征均较大,具有明显的叉状分枝结构,固土护坡能力较强,可在边坡生态修复工程中作为优选植物。植物根系表面积和根体积与根系生物量呈现显著线性正相关关系,而根系长度、根系表面积、总根数、总基根数与根系拓扑指数呈现显著指数负相关关系。对于不易原状挖掘的植物根系,可根据根系生物量对根系形态特征进行预测。

参考文献 (References):

- [1] Malekpoor Mansoorkhani F, Seymour G B, Swarup R, Moeiniyan Bagheri H, Ramsey R J L, Thompson A J. Environmental, developmental, and genetic factors controlling root system architecture. *Biotechnology and Genetic Engineering Reviews*, 2014, 30(2): 95-112.
- [2] Reubens B, Poesen J, Danjon F, Geudens G, Muys B. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review. *Trees*, 2007, 21(4): 385-402.
- [3] 陈伟立, 李娟, 朱红惠, 陈杰忠, 姚青. 根际微生物调控植物根系构型研究进展. *生态学报*, 2016, 36(17): 5285-5297.
- [4] 汪堃, 南丽丽, 郭全恩, 姚宇恒, 何海鹏, 夏静, 马彪. 干旱胁迫对不同根型苜蓿根系构型的影响. *生态学报*, 2022, 42(20): 8365-8373.
- [5] Waidmann S, Sarkel E, Kleine-Vehn J. Same same, but different: growth responses of primary and lateral roots. *Journal of Experimental Botany*, 2020, 71(8): 2397-2411.
- [6] Freschet G T, Roumet C, Comas L H, Weemstra M, Bengough A G, Rewald B, Bardgett R D, De Deyn G B, Johnson D, Klimešová J, Lukac M, McCormack M L, Meier I C, Pagès L, Poorter H, Prieto I, Wurzbarger N, Zadworny M, Bagniewska-Zadworna A, Blancaflor E B, Brunner I, Gessler A, Hobbie S E, Iversen C M, Mommer L, Picon-Cochard C, Postma J A, Rose L, Ryser P, Scherer-Lorenzen M, Soudzilovskaia N A, Sun T, Valverde-Barrantes O J, Weigelt A, York L M, Stokes A. Root traits as drivers of plant and ecosystem functioning: current understanding, pitfalls and future research needs. *New Phytologist*, 2021, 232(3): 1123-1158.
- [7] Huang G Q, Zhang D B. The plasticity of root systems in response to external phosphate. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(17): 5955.
- [8] 任杰, 赵成章, 赵夏纬, 马俊逸, 李子琴, 苟芳珍. 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.
- [9] Chiatante D, Sarnataro M, Fusco S, Di Iorio A, Scippa G S. Modification of root morphological parameters and root architecture in seedlings of *Fraxinus ornus* L. and *Spartium junceum* L. growing on slopes. *Plant Biosystems-an International Journal Dealing With All Aspects of Plant Biology*, 2003, 137(1): 47-55.

- [10] Wang X H, Ma C, Wang Y Q, Wang Y J, Li T, Dai Z S, Li M Y. Effect of root architecture on rainfall threshold for slope stability: variabilities in saturated hydraulic conductivity and strength of root-soil composite. *Landslides*, 2020, 17(8): 1965-1977.
- [11] Li Y P, Wang Y Q, Ma C, Zhang H L, Wang Y J, Song S S, Zhu J Q. Influence of the spatial layout of plant roots on slope stability. *Ecological Engineering*, 2016, 91: 477-486.
- [12] Stokes A, Salin F, Kokutse A D, Berthier S, Jeannin H, Mochan S, Dorren L, Kokutse N, Ghani M A, Fourcaud T. Mechanical resistance of different tree species to rockfall in the French Alps. *Plant and Soil*, 2005, 278(1): 107-117.
- [13] 王鑫皓. 林分类型和根系构型对斜坡稳定性的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
- [14] 陈影, 张利, 董加强, 赵文廷. 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. *水土保持研究*, 2014, 21(4): 154-157, 162.
- [15] 李少丽, 许文年, 丰瞻, 周明涛. 边坡生态修复中植物群落类型设计方法研究. *中国水土保持*, 2007(12): 53-55.
- [16] 赵炯昌, 卫伟, 段兴武. 模拟降雨下黄土坡面水沙过程对3种灌草植被垂直结构变化的响应. *生态学报*, 2021, 41(21): 8602-8611.
- [17] Mickovski S B, van Beek L P H. Root morphology and effects on soil reinforcement and slope stability of young vetiver (*Vetiveria zizanioides*) plants grown in semi-arid climate. *Plant and Soil*, 2009, 324(1): 43-56.
- [18] 欧阳森. 根系构型调控对植物固土护坡性能的影响研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021.
- [19] 张晓航, 杨建英, 赵惠恩, 朱立娟, 张森. 公路边坡喷播绿化初期根系特征及其对抗剪强度的影响. *生态学杂志*, 2019, 38(5): 1528-1537.
- [20] 韦江杏, 邓羽松, 廖达兰, 黄婉霞, 黄娟, 蒋代华. 桂东南花岗岩崩岗土壤界限含水率空间变异及影响因素. *土壤学报*, 2022: 1-15. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20220824.1726.009.html>
- [21] 徐洪雨. 坡度对岩石边坡植物根系分布及抗拔力的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [22] Ghestem M, Veylon G, Bernard A, Vanel Q, Stokes A. Influence of plant root system morphology and architectural traits on soil shear resistance. *Plant and Soil*, 2014, 377(1): 43-61.
- [23] Stokes A, Atger C, Bengough A G, Fourcaud T, Sidle R C. Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides. *Plant and Soil*, 2009, 324(1): 1-30.
- [24] Fitter A H. An architectural approach to the comparative ecology of plant root systems. *New Phytologist*, 2008, 106: 61-77.
- [25] 李金波, 李诗刚, 宋桂龙, 濮阳雪华, 薛博晗, 隋永超. 胁迫对黑麦草根系形态及养分吸收的影响. *草业科学*, 2018, 35(6): 1385-1392.
- [26] 张彦东, 沈有信, 白尚斌, 王政权. 混交条件下水曲柳落叶松根系的生长与分布. *林业科学*, 2001, 37(5): 16-23.
- [27] Yen C P. Tree root patterns and erosion control. *International workshop on soil erosion and its countermeasures*. Bangkok: Soil and Water Conservation Society of Thailand, 1987: 92-111.
- [28] 熊寿德, 段青松, 方雪峰, 李建兴, 黄广杰, 刘宇飞, 刘武江, 张立芸. 三江并流区水电站消落带适生草本植物根系固土能力. *生态学报*, 2022, 42(17): 7210-7221.
- [29] 赵艳云, 陆兆华, 夏江宝, 刘京涛. 黄河三角洲贝壳堤岛3种优势灌木的根系构型. *生态学报*, 2015, 35(6): 1688-1695.
- [30] 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.
- [31] 李云鹏. 北京典型植物根系固土机理及含植被坡体稳定分析研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- [32] 周云艳, 钱同辉, 宋鑫, 王晓梅, 朱笑, 李小龙. 植物根系长度对生态袋加筋土挡墙稳定性的影响. *农业工程学报*, 2020, 36(13): 102-108.
- [33] 韩立亮, 宋桂龙. 护坡木本植物根系的力学特性及其与细胞壁成分的关系. *北京林业大学学报*, 2015, 37(11): 120-127.
- [34] Di Iorio A, Lasserre B, Scippa G S, Chiatante D. Root system architecture of *Quercus pubescens* trees growing on different sloping conditions. *Annals of Botany*, 2005, 95(2): 351-361.
- [35] Burylo M, Rey F, Roumet C, Buisson E, Dutoit T. Linking plant morphological traits to uprooting resistance in eroded marly lands (Southern Alps, France). *Plant and Soil*, 2009, 324(1): 31-42.
- [36] 陈晨, 龚海青, 张敬智, 郜红建. 水稻根系形态与氮素吸收累积的相关性分析. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(2): 333-341.