DOI: 10.20103/j.stxb.202403280667

耿莞,陈济丁,孔亚平,陶双成,赵倩,李金波,宋桂龙.基于根系类型组合的护坡植物根系生态位特征.生态学报,2025,45(4):1913-1924.
Geng W, Chen J D, Kong Y P, Tao S C, Zhao Q, Li J B, Song G L.Characterization of root ecological niche of slope protection plants based on root type combinations.Acta Ecologica Sinica,2025,45(4):1913-1924.

基于根系类型组合的护坡植物根系生态位特征

耿 莞[1,3],陈济丁[2],孔亚平[2],陶双成[2],赵 倩[1,4],李金波[1,3],宋桂龙[1,3,*]

1 北京林业大学草业与草原学院,北京 100083

2 交通运输部科学研究院,北京 100029

3 国家林业草原运动场与护坡草坪工程技术研究中心,北京 100083

4 威海市林业发展中心,威海 264200

摘要:根系生态位特征是护坡植物选择的重要依据,而具有不同根系生态位特征的植物组合,直接影响坡面土体的固持和植被恢复效果。选取了 4 种根系类型的常用护坡植物,分别为垂直轴根型灌木紫穗槐(*Amorpha fruticosa* L.)、水平轴根型灌木胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)、根蘖型草本紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)、丛生型草本高羊茅(*Festuca arundinacea*),依据根系类型进行了 9 种组合,采用湿法客土喷播对模拟边坡进行修复治理,研究不同植物组合的根系生态位特征,以明确不同类型根系之间错综复杂的位置关系及生态功能,为边坡修复植物选择及加固坡面稳定提供一定参考。研究结果表明:(1)不同根系结构类型组合在土层的空间分布具有显著差异。在 0—10 cm 土层中,高羊茅组合的根长及根干重百分比显著高于其他组合为 86.9%和 90.83%;而紫穗槐+苜蓿组合则在 5 cm 以下的土层中显著高于其他组合,为 63.73%和 76.52%。(2)不同组合根系生态位指数均随径级数量的增加而递减,均呈现反 J 型。高羊茅组合和胡枝子组合根系生态位指数均随土层深度的增加先升高后降低,其余组合随土层深度的增加而降低。高羊茅组合垂直空间生态位变化最大,其变幅为 0.21—3.51。在 10 cm 以下土层中,除紫穗槐+苜蓿组合外的其余组合生态位指数均显著下降表现为表层聚集生态位型。(3)生态位指数最高的组合是紫穗槐+胡枝子,为 1。紫穗槐+胡枝子+高羊茅组合的细根生态位宽度指数、生态位重叠度及地下种间竞争指数均显著高于其他组合,分别为 0.089、0.036 和 0.438,种间竞争强度最大。综合不同根系类型植物组合的根系生态位特征,表现较好的根系类型组合为垂直轴根型+水平轴根型的紫穗槐+胡枝子组合、垂直轴根型+水平轴根型+丛生型的紫穗槐+胡枝子+高羊茅组合、根蘖型苜蓿组合和垂直轴根型+根蘖型的紫穗槐+苜蓿组合。

关键词:模拟边坡;根系类型组合;根系生态位;生态位宽度;生态位重叠

Characterization of root ecological niche of slope protection plants based on root type combinations

GENG Wan[1,3], CHEN Jiding[2], KONG Yaping[2], TAO Shuangcheng[2], ZHAO Qian[1,4], LI Jinbo[1,3], SONG Guilong[1,3,*]

1 *College of Grassland Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*

2 *Research Institute of Transport, Beijing* 100029, *China*

3 *National Engineering Research Center of Forestry Grassland Sports Ground and Slope Protection Turf, Beijing* 100083, *China*

4 *Forestry Development Center of Weihai, Weihai* 264200, *China*

Abstract: Root ecological niche characteristics are an important basis for the selection of slope protection plants, and the combination of plants with different root types has ecological niche differences due to the root structure, which directly affects the plant's effect of soil retention and restoration on slopes. In this experiment, four commonly used slope protection

基金项目:国家重点研发计划课题(2021YFB2600104)

收稿日期:2024-03-28; **网络出版日期**:2024-11-14

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

plants with different root types as case study: *Amorpha fruticosa* L. with a vertical axis root type, *Lespedeza bicolor* Turcz. with a horizontal axis root type, *Medicago sativa* L. with a root tillers type, and *Festuca arundinacea* with a tufted root type. The planting method involved simulated wet spraying on slopes is used to study the ecological characteristics of different root system combinations. By clarifying the intricate relationship between different types of roots and their ecological functions, the study provides a reference for selecting plants for slope restoration and reinforcement of slope stability. The results show that: (1) There is a significant difference in the distribution of different root structure types in various soil layers. In the soil layer at a 0—10 cm depth, GG (*Festuca arundinacea*) exhibited a significantly higher percentage of root length and root dry weight than other combinations, at 86.9% and 90.83% respectively. Meanwhile, in the soil layer below 5 cm, ZM (*Amorpha fruticosa* L.+*Medicago sativa* L.) showed significantly higher than other combinations, at 63.73% and 76.52% respectively. (2) The root niche index decreased as the number of radial levels increased, displaying an inverse J-shaped. The root niche index of GG and HH (*Lespedeza bicolor* Turcz.) initially increased and then decreased with soil depth, whereas the other combinations decreased with increasing soil depth. GG showed the most substantial change in vertical spatial niche, with a range of 0.21—3.51. In soil layers less than 10 cm deep, except for ZM, the niche index of the other combinations significantly decreased, indicating a surface aggregation niche type. Similarly, all position index decreased significantly, suggesting a surface aggregation ecological position type. (3) The combination with the highest overall ecological niche index after normalization was ZH (*Amorpha fruticosa* L. + *Lespedeza bicolor* Turcz.), which was 1. Additionally, the only three plant combinations of ZHG (*Amorpha fruticosa* L. + *Lespedeza bicolor* Turcz. + *Festuca arundinacea*) had significantly higher fine-root niche index, niche width, and subsurface interspecific competition index than the other combinations, with values of 0.089, 0.036, and 0.438, respectively. When combining the niche characteristics of different plant combinations with various root types, the better-performing root type combinations out of the 9 combinations were: vertical-axis-root type+horizontal-axis-root type (ZH), vertical axis root type+horizontal axis root type +clumping type (ZHG), root tillers type (MM), and vertical axis root type+root tillers type (ZM).

Key Words: simulated slope; root type combination; root niche; niche width; niche overlap

在边坡植被修复中,植物根系对提升植被景观效果、维系坡面稳定性及改善水土保持能力等至关重要。主要体现在不同结构类型的根系可通过改善土壤结构来提升固土能力及土壤抗侵蚀性[1—2]。根系结构类型表示植物根系在空间中的排列方式,反映了植物的养分利用策略并直接影响着植被固土护坡效果[3—4]。根系依据空间分布及类型特征分为轴根型、根蘖(茎)型、丛生型、地下茎型和攀缘根型[5]。其中,不同的根系类型对边坡适应程度不同,且根系可调整自身生长及生理代谢过程来改变根系类型以适应不同的土壤环境,以增强其生态功能,最终形成相应的根系结构来影响边坡的稳定性。

边坡植被修复的基础是物种的选择与配置,决策前需要考虑立地条件、气候环境以及植物适应性。目前,许多相关研究多集中在单一草本或木本植被对边坡稳定性的影响[6—7],包括根系特征[8]、冠层结构[9]等方面。木本植物与草本植物具有不同的根系结构类型,主要体现在不同深度土层中表现出分布差异。然而,不同物种组合所形成的根系分布具有不同的根系生态位及生态功能。根系生态位是指在群落中不同物种的根系时空分布及其相互机能关系。在植被恢复领域中大量研究证明了根系的综合生态功能由根系的结构特征直接决定,且当结构特征越复杂时,根系的生态功能性越强[10—12]。探索不同根系类型的植物组合,因根系结构及生态位差异而产生不同效果的生态过程是当前研究的重要内容。

早在 1968 年 Levins R[13] 提出了生态位的计算方法,胡建忠等[14]在 2005 年仿照群落生态学方法,计算了根系的生态位指数,用以量化和对比区域内不同群落间植物根系的整体特征。依据根系特征进行合理的植物组合可优化植被根系生态位,有助于黄土高原等生态脆弱地区的人工植被恢复[12,14—16]。对京承高速公路土石边坡的植物根系地下分布特征的研究发现,在地下深度 20 cm 的范围内随着深度的增加木本植物的根长比

例和根干重比例逐渐降低[17]。而无论在野外原位拉拔试验还是模拟边坡中,都表明根系抗拉拔作用均与植被根系的结构及生态位特征有关[17—19]。综上,关于自然或人工植被群落地上生态位特征、单种植物根系护坡安全稳定性能及力学等方面的研究较多,鲜有边坡人为设计不同类型根系组合并探究其根系生态位特征和功能的研究。

本研究结合前期研究基础选取根系结构类型为水平轴根型、垂直轴根型、根蘖(茎)型和丛生型的胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、紫穗槐、紫花苜蓿和高羊茅这 4 种较为常见的护坡植物为本研究供试材料,在模拟边坡的环境中,对不同根系类型组合下的根系分布情况及生态位特征开展研究,探讨适宜边坡恢复的根系类型组合,揭示不同植物组合恢复边坡的地下格局,为后期对不同坡质、土层厚度、固持需求及承载力的边坡生态恢复技术提供一定的理论支撑。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地位于北京市门头沟区军庄镇。当地年均温 11.7℃,年平均日照 2470 h,年平均无霜期 200 d,年均降水量约 600 mm,年蒸发量为 477 mm。本试验于 3—11 月开展,试验坡面模拟岩石边坡构造,坡度为 45°,坡向向东。模拟坡面土壤以京礼高速填方土为基质,掺 30%草炭、200 g/m^3 缓释肥、270 g/m^3 聚丙烯酰胺,pH 为 7.4。土壤物理性质见表 1[20]。

表 1　样地土壤物理性质

Table 1　Physical and chemical properties of soil in the sample plot

深度/cm Depth	容重/(g/cm^3) Bulk density	含水量/% Soil moisture content	总孔隙度/% Total porosity	毛管孔隙度/% Capillary porosity	非毛管孔隙度/% Non-capillary porosity
0—5	0.74	23.35	54.2	49.9	14.3
5—10	1.064	18.44	54.5	47.9	6.6
>10	1.941	12.31	48	32.5	5.5

1.2　试验设计

研究选取了图 1 中 4 种根系类型的北方地区常用优良护坡植物为试验材料,其中灌木、草本各两种,具体为水平轴根型的胡枝子、垂直轴根型的紫穗槐、丛生型的高羊茅和根蘖型的紫花苜蓿。

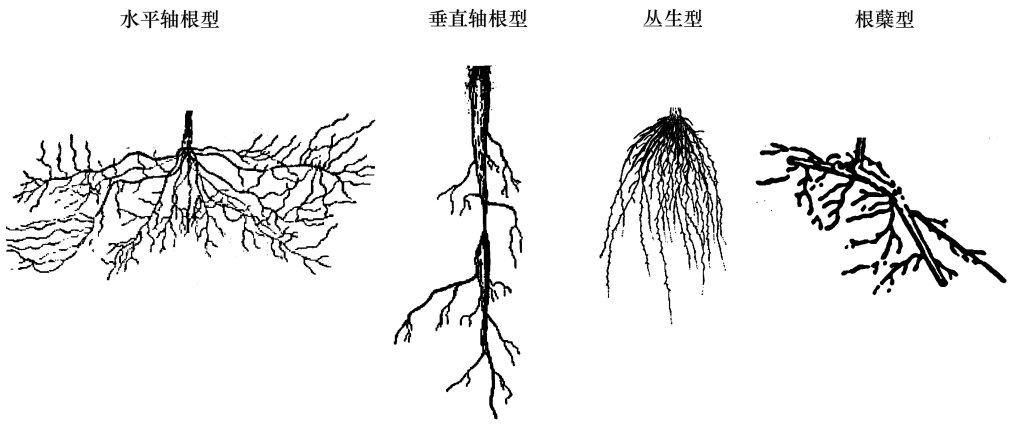

图 1　试验材料根系类型示意图

Fig.1　Schematic diagram of test materials root system types

根据种群的生态位原理和根系类型特点,结合模拟坡面的特征,共设计 9 种植物组合设计方案见表 2,其中播种量参考文献[21]。

表 2 植物组合设计方案

Table 2 Combination design scheme of test area

编号 Number	根系类型组合 Root system type	植物组合 Plant configuration	播种量/(g/m²) Seeding rate
GG	丛生型	高羊茅	3.5
ZG	垂直轴根型+丛生型	紫穗槐、高羊茅	13+1.5
HG	水平轴根型+丛生型	胡枝子、高羊茅	12+1.5
ZH	水平轴根型+垂直轴根型	紫穗槐、胡枝子	6.5+7
MM	根蘖型	紫花苜蓿	5
ZM	垂直轴根型+根蘖型	紫穗槐、紫花苜蓿	13+3
ZHG	水平轴根型+垂直轴根型+丛生型	胡枝子、紫穗槐、高羊茅	6.5+6.5+1.5
HH	垂直轴根型+垂直轴根型	紫穗槐	14
ZZ	水平轴根型	胡枝子	15

表中字母为植物组合拼音首字母缩写

共设置 10 个(9 种组合+空白对照)模拟边坡侵蚀槽,尺寸为 2 m×1 m×0.2 m,侵蚀槽垂直结构如图 2 所示。采用湿法客土喷播将试验材料喷于槽内。每个侵蚀槽养护操作一致,植物苗期浇水 2—3 次/周,长成后 4—5 次/月,每次灌水 20 min。

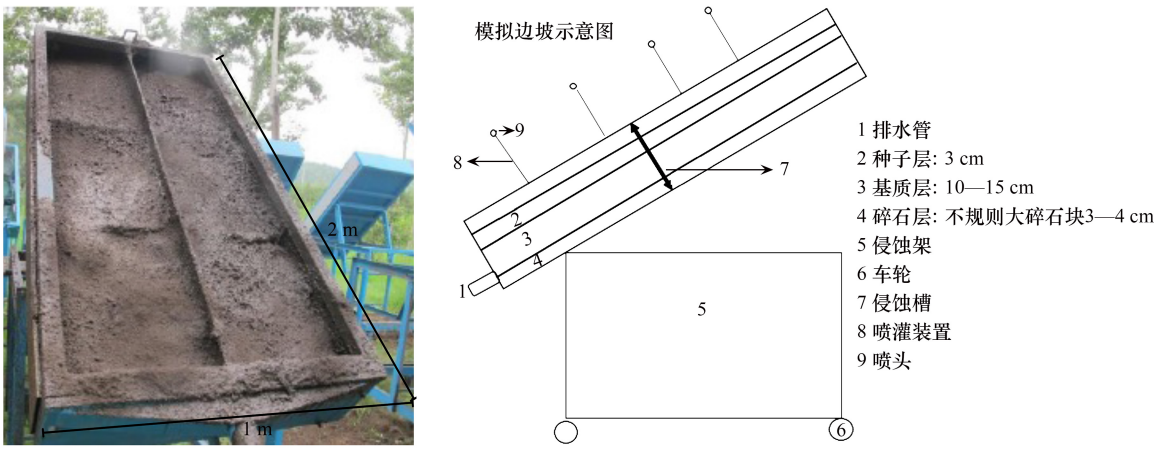

图 2 模拟边坡实物图、示意图

Fig.2 Physical diagram and schematic of simulated slope

1.3 指标与方法

待植物生长到第 8 个月时,对坡面植物生长情况进行调查,结果见表 3。同时对根系进行分层取样[22],分层深度为 0—5 cm、5—10 cm、>10 cm(岩石层);每个土壤层内按根系直径(D)分为 $D \leqslant 2$ mm、2 mm$<D \leqslant$ 5 mm、$D>5$ mm 共 3 个等级。采用 5 点取样法收集土壤样品,使用 100 cm³ 环刀取回的土样进行物理性质测定。

蒸馏水冲洗根系样品杂质,擦拭表面水分,使用 Epson Twain Pro (32bit)根系扫描仪和 Win-RHIZO 根系分析系统获得植物根长、根体积、根数量等数据。将根系样品置于烘箱 105℃ 杀青 30 min 后 80℃ 烘干至恒重,获得根系生物量。

(1) 生态位指数

群落生态学的根系生态位指数(RENI)计算公式为[14,23]:

$$E_{rm} = 1/3 \sum_r \sum^m \left(\frac{W_{rm}}{W_{\max}} + \frac{C_{rm}}{C_{\max}} + \frac{S_{rm}}{S_{\max}} \right) \quad (1)$$

式中, E_{rm}为不同土层径级根系生态位指数;W_{max}为根量 W_{rm}的最大值、C_{max}为根长 C_{rm}的最大值、S_{max}为根数 S_{rm}的最大值,r 表示土层,m 表示径级。

表 3　不同植物组合生长情况表

Table 3　Investigate the growth of overground parts of the plant

编号 Number	冠幅/cm Crown width	高/cm Height	地上鲜重/g Aboveground fresh weight	地上干重/g Aboveground dry weight
GG	50×55	35	311.11	99.82
ZG	60×55	45	375.21	102.34
HG	60×50	57	323.65	100.23
ZH	90×97	130.3	97.23	49.20
MM	50×50	42	115.32	45.23
ZM	60×40	87	100.24	45.24
ZHG	87×70	67	287.32	70.34
HH	80×70	50	43.24	28.23
ZZ	82×54	80.5	43.55	16.32

植物组合根系生态位指数 E,计算公式为:

$$E = \sum_{r,m} E_{rm} \tag{2}$$

(2)生态位宽度

生态位宽度计算公式为[13]:

$$B_i = 1/r \sum_{j=1}^{r} P_{ij}^2 \; j = 1.2.3 \cdots r \tag{3}$$

$$B_h = 1/r \sum_{j=1}^{r} P_{ij}^2 \; j = 1.2.3 \cdots r \tag{4}$$

式中,B_i和 B_h表示物种 i 和物种 h 的生态位宽度指数;r 为土层数,且 $r \geq 3$;P_{ij}和 P_{hj}表示为物种 i、物种 h 对不同资源位 j 的利用率。

(3)生态位重叠值

$$L_{ih} = B_i \sum_{j=1}^{r} P_{ij} P_{hj} \tag{5}$$

$$L_{hi} = B_h \sum_{j=1}^{r} P_{ij} P_{hj} \tag{6}$$

式中,L_{ih}和 L_{hi}具有域值[0,1]。

(4)地下种间竞争指数

$$A_{ih} = \sum_{j=1}^{r} P_{ij} P_{hj} \sqrt{\sum_{j=1}^{r} P_{ij}^2 \sum_{j=1}^{r} P_{hj}^2} \tag{7}$$

式中,地下种间竞争指数 $A_{ih} = A_{hi}$,且 $A_{ih} \leqslant 1$[24]。

1.4　数据分析

对所有数据进行单因素方差分析(One-Way ANOVA),并利用最小显著差异法(LSD)检验不同数据组间的差异显著性。最后用平均值和标准误差表示测定结果。使用 IBM SPSS Statistics 22 对数据进行分析,使用 Graphpad Prism 10 进行图表绘制。

2　结果与分析

2.1　不同植物组合根系空间分布特征

在不同土层中,不同物种组合的根长与根干重占比存在空间异质性(图 3)。0—5 cm 土层中,根长百分

比的排序为 *GG*>ZHG>HG>ZG>ZH>MM>ZZ>HH>ZM,其中 GG 和 ZGH 组合根长百分比占比最高,分别为 54.72%和 54.40%,显著大于其他组合;*ZM* 和 *HH* 占比最低,分别为 23.48%和 23.77%,显著小于其他组合。在 5—10 cm 土层中,HH 根长百分比占比最高,为 43.48%,显著大于其他组合,ZZ 占比最低,只有 24.27%。整体来看,GG 在<10 cm 土层中根长占比最高,显著高于其他组合。在>10 cm 土层中,ZM 根长百分比占比最高,为 50.77%,显著高于其他组合。

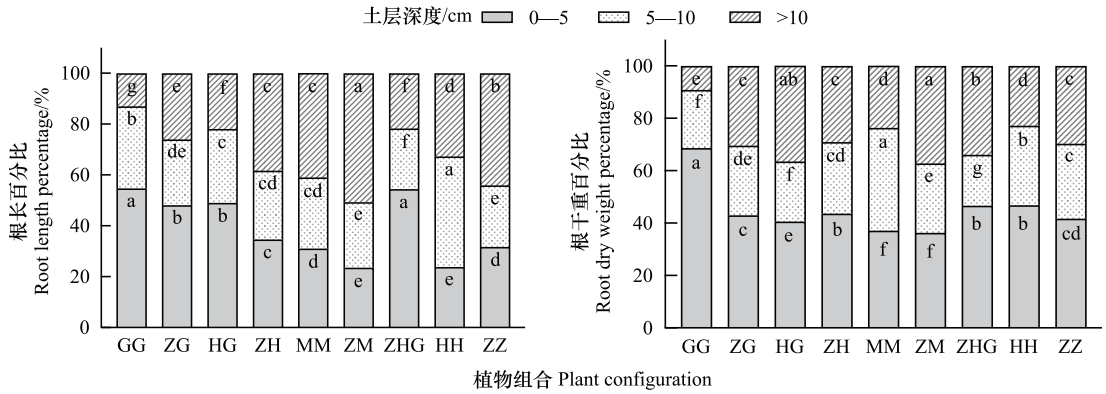

图 3 不同组合根长百分比与根干重百分比

Fig.3 Root length percentage and root dry weight percentage of different combinations

不同大写字母缩写代表植物组合;GG,高羊茅;ZG,紫穗槐+高羊茅;HG,胡枝子+高羊茅;ZH,紫穗槐+胡枝子;MM,紫花苜蓿;ZM,紫穗槐+紫花苜蓿;ZHG,胡枝子+紫穗槐+高羊茅;HH,胡枝子;ZZ,紫穗槐;不同小写字母表示不同土层深度存在差异显著(P<0.05)

根干重表现出与根长百分比相似的变化趋势。在 0—5 cm 土层中,9 种组合的根干重百分比排序为 GG>HH>ZHG>ZH>ZG>ZZ>HG>MM>ZM。其中,GG 的根重百分比占比最高,为 68.58%,显著高于其他组合。同时,在 0—10cm 土层,GG 占比同样显著高于其他组合,高达 90.83%。在 5—10 cm 土层中,MM 组合占比最高,为 39.28%,显著高于其他组合。在 10 cm 以下土层中,根重百分比占比从大到小依次为 ZM、HG、ZHG、ZG、ZZ、ZH、MM、HH、和 GG,其中 ZM、HG、ZHG 显著高于其他组合,分别为 37.3%,36.54%,33.92%。

比根长、比根面积呈现出不同组合间、土层间差异(图 4)。在 0—5 cm 土层中,比根长大小排序为 GG>HG>ZHG>ZG>ZH>ZM>ZZ>MM>HH,其中 GG 组合比根长最高,为 435.675 cm/g,显著高于其他组合,HH 组合比根长最低,为 13.99 cm/g,显著低于其他组合。在 5—10 cm 土层和>10 cm 土层中,物种组合的比根长分布呈现出与 0—5 cm 相似的变化趋势,GG 组合均表现出最高的比根长,分别为 789.72 cm/g 和 2012.85 cm/g,

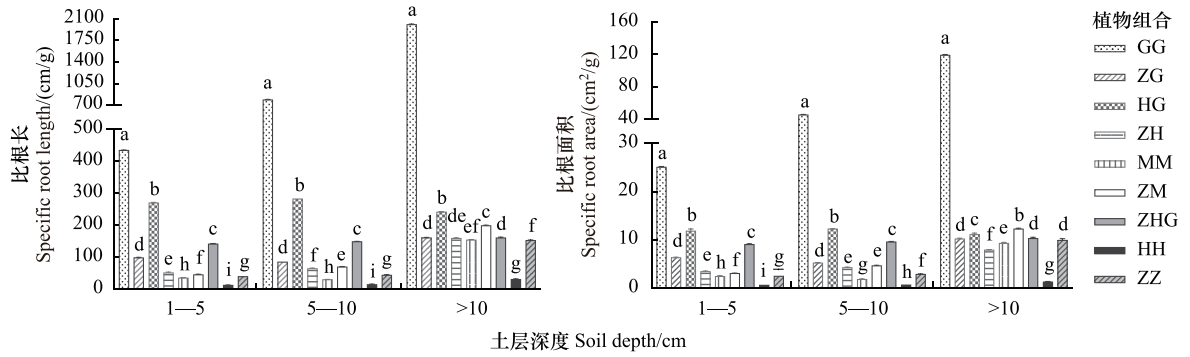

图 4 不同组合比根长与比根面积

Fig.4 Specific root length percentage and Specific root area of different combinations

不同大写字母缩写代表植物组合;GG,高羊茅;ZG,紫穗槐+高羊茅;HG,胡枝子+高羊茅;ZH,紫穗槐+胡枝子;MM,紫花苜蓿;ZM,紫穗槐+紫花苜蓿;ZHG,胡枝子+紫穗槐+高羊茅;HH,胡枝子;ZZ,紫穗槐;不同小写字母表示同一土层深度不同植物组合存在差异显著(P<0.05)

均显著高于其他组合。而 HH 组合呈现最低的比根长,分别为 16.81 cm/g 和 32.41 cm/g,均显著低于其他组合。

在各土层,不同组合比根面积呈现出与比根长相似的变化趋势。在三个土层中,GG 组合均表现出最高的比根面积,显著高于其他组合($P < 0.05$),而 HH 均表现出最低的比根面积。

2.2　生态位指数特征

(1)不同植物组合生态位指数的地下分布格局

不同组合根系生态位在垂直空间上呈现不同土层间的异质性分布(图 5)。研究发现,9 种组合根系生态位指数变幅范围大小排序依次为 GG>ZG>ZZ>ZHG>HG>ZH>HH>ZM>MM。其中,GG 组合的生态位垂直空间最宽,其生态位指数变幅为 0.21—3.51,而 *MM* 组合生态位垂直空间最窄,生态位指数变幅为 1.45—1.71。此

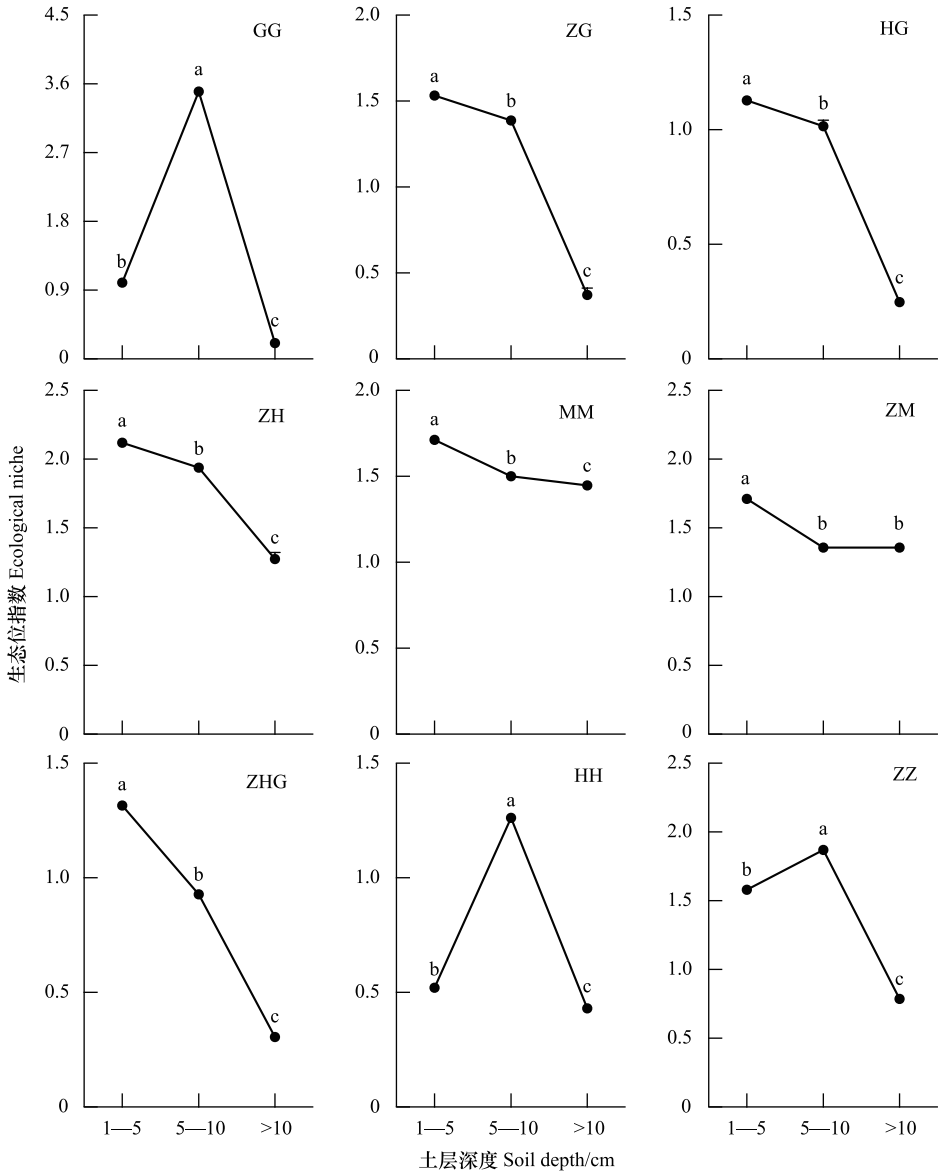

图 5　不同组合根系生态位指数与土层深度的关系

Fig.5　Relationship between soil depth and RENI of different root combination

不同大写字母缩写代表植物组合;GG: 高羊茅;ZG: 紫穗槐+高羊茅;HG: 胡枝子+高羊茅;ZH: 紫穗槐+胡枝子;MM: 紫花苜蓿;ZM: 紫穗槐+紫花苜蓿;ZHG: 胡枝子+紫穗槐+高羊茅;HH: 胡枝子;ZZ: 紫穗槐;不同小写字母表示不同土层深度存在差异显著($P<0.05$);RENI: Root ecological niche index

外,根据不同植物组合生态位指数随土层深度的变化规律可以分为 3 种类型:

一是随着土层深度增加,生态位指数持续降低,并且随着土层深度增加,降低幅度逐渐减缓。符合这种类型的组合有 ZG、HG、ZH 和 ZHG。

二是随着土层深度增加,生态位指数持续降低,并且随着土层深度增加,降低幅度逐渐加快。符合这种类型的组合有 MM 和 ZM。

三是随着土层深度增加,生态位指数先升高后降低,即生态位指数最高点出现在 5—10 cm 土层。符合这种类型的组合有 GG、HH 和 ZZ,且不同土层的生态位指数变化显著。

(2)不同植物组合生态位指数的径级分布特征

物种组合在径级数量分布上呈现出明显的生态位分异格局(图 6)。随着径级的增加,不同组合的生态位指数变化趋势相似,均呈现逐渐降低趋势,表现为反 J 型。同一组合在不同径级之间差异均显著。在较小的径级范围中($D \leqslant 2$ mm),各组合生态位指数均达到最高,ZH、ZM、MM 组合的生态位指数相对较高,分别达到 3.07,2.93 和 2.84。值得注意的是,GG 根系仅在 $D \leqslant 2$ mm 径级范围内分布。

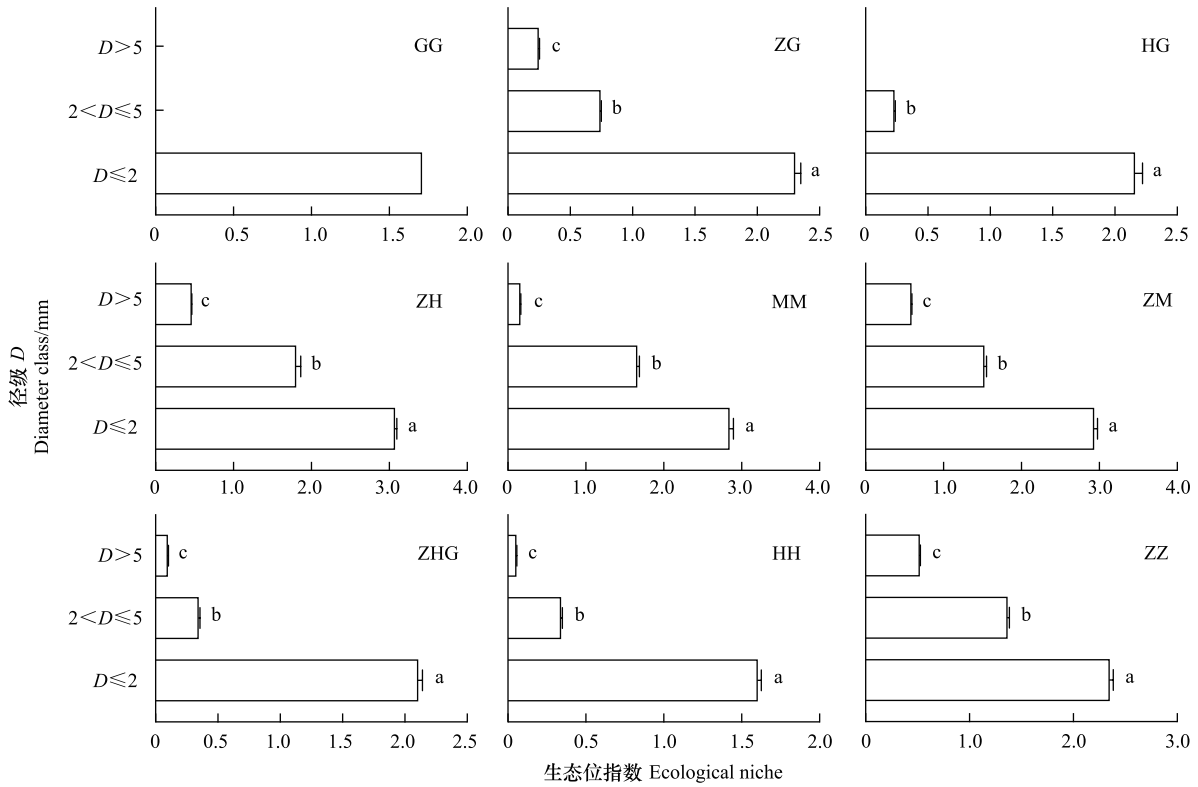

图 6 不同组合根系径级与生态位指数关系

Fig.6 Relationship between root diameters and RENI of different root combinations

不同大写字母缩写代表植物组合;GG,高羊茅;ZG,紫穗槐+高羊茅;HG,胡枝子+高羊茅;ZH,紫穗槐+胡枝子;MM,紫花苜蓿;ZM,紫穗槐+紫花苜蓿;ZHG,胡枝子+紫穗槐+高羊茅;HH,胡枝子;ZZ,紫穗槐;不同小写字母表示不同径级存在差异显著($P<0.05$)

(3)不同植物组合根系生态位指数比较

通过对根系生态位指数进行归一化处理,本研究比较了不同物种组合在同一尺度上的生态位适应性(图 7)。结果显示,不同物种组合间根系生态位指数均存在显著差异,根系生态位指数大小排序依次为 ZH>ZM>MM>ZZ>ZG>ZHG>HG>HH>GG。ZH 组合的根系生态位指数最高,为 1,其次是 ZM、MM 和 ZZ,分别占 ZH 的 94.49%、87.30%和 79.32%。有 4 种组合的生态位指数小于 0.5,分别是 ZHG、HG、HH 和 GG,为 0.477、0.448、0.374 和 0.312。

2.3　不同植物组合的生态位宽度及生态位重叠

通过对生态位宽度指数和生态位重叠指数分析,确定了各组合在生态位空间中的定位(表 4)。不同组合的生态位宽度存在显著差异,细根生态位宽度表现为 ZHG>HG>ZG>HH>MM>ZH>ZZ>ZM,粗根生态位宽度表现为 HH>ZHG>MM>ZH>ZG>HG>ZZ>ZM。其中,ZHG 的细根生态位宽度和粗根生态位宽度均相对较高,分别为 0.089 和 0.170。ZM 组合的细根和粗根生态位宽度均最小,分别为 0.063 和 0.073。

此外,不同物种组合存在生态位重叠的现象,生态位重叠值指数越大,说明组合中竞争越大。如表 4 所示,ZHG 的生态位重叠值指数最大且显著大于其他组合,为 0.036。其次为 ZG 和 HG 组合,显著大于 MM、ZH、HH 和 ZZ。而 ZM 与 ZZ 的生态位重叠值最小。

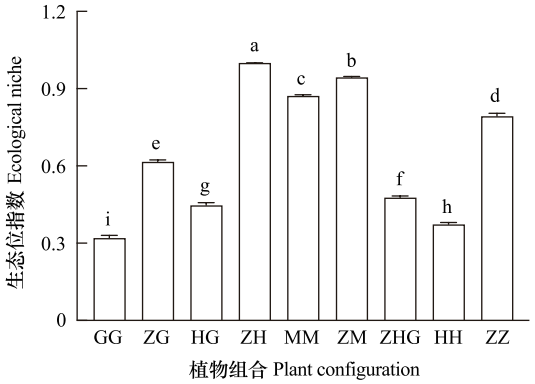

图 7　不同根系组合的根系生态位指数的比较

Fig.7　Comparison of RENI of different root combinations

不同大写字母缩写代表植物组合;GG,高羊茅;ZG,紫穗槐+高羊茅;HG,胡枝子+高羊茅;ZH,紫穗槐+胡枝子;MM,紫花苜蓿;ZM,紫穗槐+紫花苜蓿;ZHG,胡枝子+紫穗槐+高羊茅;HH,胡枝子;ZZ,紫穗槐;不同小写字母表示不同植物组合存在差异显著($P<0.05$)

2.4　不同植物组合的地下种间竞争指数

不同物种组合的地下种间竞争指数存在显著性差异(图 8)。结果显示,8 种组合的地下种间竞争指数波动范围为 0.317—0.438,大小排序为 ZHG>ZG>HG>ZH>MM>ZM>ZZ>HH,且不同物种组合间均存在显著性差异。由紫穗槐、胡枝子和高羊茅组成的非单一物种组合地下种间竞争指数均显著高于其余组合,种间竞争强度大,其中 ZHG 组合竞争强度最大,种间竞争指数为0.438,且显著高于其他组合。ZG 和 HG 次之,为 0.415 和 0.394。说明垂直轴根型、水平轴根型和丛生型根系类型组合中种间对地下土壤资源的竞争更为强烈。单一物种植物组合地下种间竞争指数相对非单一物种植物组合较小,其中 HH 的地下种间竞争指数最小,为 0.317。而 MM 的种间竞争指数高于 ZM、ZZ 和 HH,单一物种情况下植物对地下土壤资源的竞争大小排序为根蘖型>垂直轴根型>水平轴根型。

表 4　不同根系组合的生态位特征

Table 4　Ecological characteristics of different root combinations

编号 Number	生态位宽度指数 Niche width index		生态位重叠指数 Niche overlap index
	细根 Fine roots	粗根 Coarse root	
ZG	0.083±0.001b	0.133±0.001c	0.029±0.002b
HG	0.086±0.001ab	0.113±0.001d	0.028±0.002bc
ZH	0.067±0.001d	0.135±0.001c	0.020±0.001de
MM	0.072±0.001c	0.135±0.001c	0.021±0.001cd
ZM	0.063±0.004d	0.073±0.001f	0.016±0.001f
ZHG	0.089±0.004a	0.170±0.003b	0.036±0.002a
HH	0.072±0.001c	0.275±0.002a	0.019±0.002de
ZZ	0.066±0.001d	0.087±0.003e	0.016±0.001de

不同大写字母缩写代表植物组合;GG,高羊茅;ZG,紫穗槐+高羊茅;HG,胡枝子+高羊茅;ZH,紫穗槐+胡枝子;MM,紫花苜蓿;ZM,紫穗槐+紫花苜蓿;ZHG,胡枝子+紫穗槐+高羊茅;HH,胡枝子;ZZ,紫穗槐;不同小写字母表示不同植物组合存在差异显著($P<0.05$)

3　讨论

植物对土壤资源的利用在一定程度上由根系的空间分布决定[25]。根长、根干重、比根长和比根面积等指标可从不同维度反映根系吸收营养和水分的能力被广泛用于评价根系生理生态功能[26]。通常认为,根系更长的植物的抗逆性及稳固性更强;比根长与细根数量同根表面积成正比,在相同环境条件下的养分利用效率

更高[27—29]。本研究结果表明 GG 的根系基本全为细根(即 $D \leqslant 2$ mm),主要分布在 0—10 cm 表层土壤中,且比根长和比根面积均显著高于其他组合,说明该植物组合根系主要分布在表层土中,更有利于充分吸收坡面表层土壤中的水肥。这可能是由于随着坡面土层深度及灌溉次数的增加,而高羊茅作为浅根丛生型植物,土壤水分、养分等存在空间异质性进而抑制了其 10 cm 及以下更深土层中的根系生长。ZM 为垂直轴根型和根蘖型根系组合,其根系主要分布在 5 cm 以下的土层中,其 10 cm 以下更深土层中的比根长和比根面积更大,为该组合利用更深土层营养奠定基础。综上所述,不同根系结构类型组合在土层空间的分布具有显著差异,该结果可作为北方地区不同土层厚度边坡人工植被修复工程中植物组合选择与配置的重要依据。

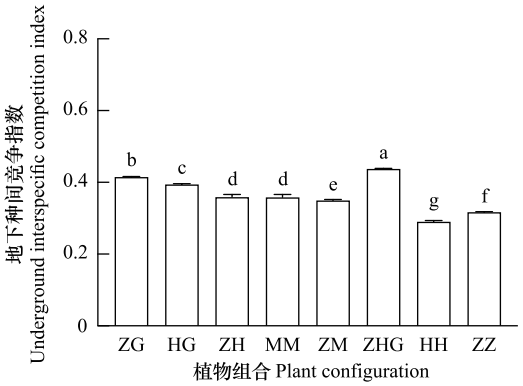

图 8 不同组合地下种间竞争指数

Fig.8 Competition index between different combinations of underground species

不同大写字母缩写代表植物组合;GG,高羊茅;ZG,紫穗槐+高羊茅;HG,胡枝子+高羊茅;ZH,紫穗槐+胡枝子;MM,紫花苜蓿;ZM,紫穗槐+紫花苜蓿;ZHG,胡枝子+紫穗槐+高羊茅;HH,胡枝子;ZZ,紫穗槐;不同小写字母表示不同植物组合存在差异显著($P<0.05$)

植物根系的垂直分布反映了根系层次及密度的变化规律。不同植物组合的生态位指数在垂直空间分布存在差异。根系生态位指数是用于描述根系在当前环境的生态功能特征,主要包括垂直空间分布、径级分布以及功能分布三方面特征[12]。一般来说,在土壤表层,植物根系生态位指数最高,植物根系通过与土粒间形成的内聚力和机械加固作用,可有效提高表层土壤的抗蚀性[14]。本试验中,GG(高羊茅+高羊茅)和 MM(苜蓿+苜蓿)这两种组合的根系分布主要在表层土壤,表层土壤易受侵蚀,种植这两种根系组合的植物可提高边坡抗侵蚀性能。而 ZG(紫穗槐+高羊茅)、HG(胡枝子+高羊茅)、ZH(紫穗槐+胡枝子)和 ZHG(紫穗槐+胡枝子+高羊茅)次之,其表层的生态位指数较更深土层更大。这几种组合在模拟边坡的表层土壤中表现出相对较高的根系生态位指数,为表层聚集生态位型。因此,表层土壤分布越多不同类型的植物根系,土壤抵抗外力侵蚀的功能就越强[30]。同时,生态位指数与径级关系反映了不同径级根系的数量分布特征。本试验发现,不同植物组合的径级分布特征相似,均呈反 J 型,表现为典型的灌木林地细根-浅根型群落,密集生长于表层土壤的细根对稳固土壤具有积极作用。从坡面土层整体来看,ZH(紫穗槐+胡枝子)的生态位指数最高,因组合内水平轴根型和垂直轴根型的根系类型在深层和浅层土壤中根系的多层次加筋分布,根系有效发挥了对土壤的固持作用,有助于提高边坡稳定性。

生态位宽度代表物种利用资源的程度,宽度越大,说明物种对资源的利用能力和适应环境的能力越强,分布范围也越广[30—31]。生态位重叠反映了物种间资源需求和利用的相似性,重叠值越大,物种对资源的利用越相似,种间竞争越激烈[32]。有研究表明,增强根系获取土壤资源的能力主要通过细根实现,而粗根或老根则在储存土壤水分和养分方面发挥更大作用[33]。相似的营养需求特性可能导致不同物种之间的生态位大幅重叠[34]。本研究比较了细根和粗根两种根系类型的物种组合生态位。在模拟边坡中,当细根和粗根的根系相互作用增强时,根系生态位可能会发生分化,向不同土壤空间或深度伸展,从而减少重叠部分。这种分化减弱了种间竞争,促进了物种间的相互制约与共存。ZM(紫穗槐+苜蓿)的细根和粗根生态位宽度较其他组合较小,生态位重叠值也较小,此组合的细根和粗根对资源的利用程度不高,对生态因子的需求小于其他组合。ZHG(紫穗槐+胡枝子+高羊茅)、ZG(紫穗槐+高羊茅)和 HG(胡枝子+高羊茅)组合中细根生态位宽度显著大于其他组合,但粗根生态位宽度无显著优势。其中,ZHG 生态位重叠值显著高于其他组合,组合内细根分布范围大且资源利用的相似程度高,而地下竞争种间指数结果同样表明该组合对土壤中水分等需求较大,说明三种植物对同一资源的竞争及利用程度较大。此外,ZG(紫穗槐+高羊茅)、HG(胡枝子+高羊茅)和 ZH(紫穗

槐+胡枝子)的竞争指数次之,与生态位重叠结果一致。

综合根系类型与生态位特征分析,表现较好的组合为垂直轴根型+水平轴根型(ZH)、垂直轴根型+水平轴根型+丛生型(ZHG)、根蘖型(MM)和垂直轴根型+根蘖型(ZM)。结合实际裸露坡面恢复情况,ZHG 组合由于对资源的竞争最大不宜用于土壤较为贫瘠的坡面,易于引发恢复效果的退化;ZH、ZM 和 MM 组合适用于土层较厚的边坡,其中具有根蘖型植物的组合可能对坡面的固土作用更强,MM 较其余组合更适用于坡度较大或土较薄坡质不利于恢复的坡面。

4　结论

不同根系结构类型组合在土层的空间分布具有显著差异,GG 的根系主要分布在表层土壤;ZM 的根系主要在 5 cm 以下的土层分布。不同组合根系生态位指数均随径级数量的增加而递减,均呈现反 J 型。在不同土层深度中,GG 和 HH(胡枝子)根系生态位指数均随土层深度的增加先升高后降低,其余组合的生态位指数均与土层深度呈负相关。在 10 cm 以下土层中,除 ZM 外的其余组合生态位指数均显著下降表现为表层聚集生态位型。同时,组合物种个数会直接影响根系生态位分布特征,ZHG 的细根生态位宽度指数、生态位重叠度及地下种间竞争指数均显著高于其他组合,分别为 0.089、0.036 和 0.438。根据不同组合生态位特征,得出 9 个组合中表现较好的根系类型组合为垂直轴根型+水平轴根型(ZH)、垂直轴根型+水平轴根型+丛生型(ZHG)、根蘖型(MM)和垂直轴根型+根蘖型(ZM)。为北方地区不同土层厚度边坡人工植被修复工程中植物配置提供重要依据。

参考文献(References):

[1] Bischetti G B, Chiaradia E A, Epis T, Morlotti E. Root cohesion of forest species in the Italian Alps. Plant and Soil, 2009, 324(1-2): 71-89.

[2] 熊燕梅, 夏汉平, 李志安, 蔡锡安. 植物根系固坡抗蚀的效应与机理研究进展. 应用生态学报, 2007, 18(4): 895-904.

[3] 姚甲宝, 楚秀丽, 周志春, 童建设, 王晖, 余家中. 不同养分环境下邻株竞争对木荷和杉木生长、细根形态及分布的影响. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1441-1447.

[4] 徐立清, 崔东海, 王庆成, 张勇, 马双娇, 朱凯月, 胡建文, 李红丽. 张广才岭西坡次生林不同生境胡桃楸幼树根系构型及细根特征. 应用生态学报, 2020, 31(2): 373-380.

[5] 严小龙. 根系生物学原理与应用. 北京: 科学出版社, 2007: 44-45.

[6] Löbmann M T, Geitner C, Wellstein C, Zerbe S. The influence of herbaceous vegetation on slope stability: A review. Earth-Science Reviews, 2020, 209: 103328.

[7] Zhou M X, Yan G Y, Li Y B, Chen D, Yan C, Wang N, Jia C, Wang Q G, Xing Y J. Root biomass and root morphological traits of three shrub species: implications for the soil anti-scouring resistance of the ecological slope. PLoS One, 2023, 18(11).

[8] 赵倩. 不同根系类型组合模式根系生态位及护坡性能研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.

[9] Kim J H, Fourcaud T, Jourdan C, Maeght J, Mao Z, Metayer J, Meylan L, Pierret A, Rapidel B, Roupsard O, Rouw A, Sanchez M V, Wang Y, Stokes A. Vegetation drives slope stability and its variability through hydrological impacts. Geophysical Research Letters, 2017.

[10] 祝维, 周欧, 孙一鸣, 古丽米热·依力哈木, 王亚飞, 杨红青, 贾黎明, 席本野. 混交林内毛白杨和刺槐根系吸水的动态生态位划分. 植物生态学报, 2023, 47(3): 389-403.

[11] 赵阳, 王若鉴, 李波, 王飞, 齐瑞, 陈学龙, 刘锦乾. 退化人工云杉林次生演替阶段木本植物优势种群生态位特征. 中南林业科技大学学报, 2024, 44(4): 96-105.

[12] 常恩浩, 李鹏, 肖列, 徐国策, 赵宾华, 苏远逸, 冯朝红. 黄土丘陵沟壑区植被恢复演替过程中根系行为特征. 生态学报, 2019, 39(6): 2090-2100.

[13] Levins R. Evolution in changing environments: some theoretical explorations. Monographs in Population Biology, 1968.

[14] 胡建忠, 郑佳丽, 沈晶玉. 退耕地人工植物群落根系生态位及其分布特征. 生态学报, 2005, 25(3): 481-490.

[15] Wang Z, Liu G B, Xu M X, Zhang J, Wang Y, Tang L. Temporal and spatial variations in soil organic carbon sequestration following revegetation in the hilly Loess Plateau, China. CATENA, 2012, 99: 26-33.

[16] Liu Y, Yu D S, Wang N, Shi X Z, Warner E D, Zhang H D, Qin F L. Impacts of agricultural intensity on soil organic carbon pools in a main vegetable cultivation region of China. Soil and Tillage Research, 2013, 134: 25-32.

[17] 徐洪雨, 王英宇, 宋桂龙, 韩烈保. 华北土石山区公路边坡常见植物根系地下分布特征. 中国水土保持科学, 2013, 11(2): 51-58.
[18] 李绍才, 孙海龙, 杨志荣, 何磊, 崔保山. 护坡植物根系与岩体相互作用的力学特性[D]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2051-2057.
[19] 伍红燕. 模拟边坡条件下不同植物根构型及其单根抗拉特性研究. 北京: 北京林业大学, 2020.
[20] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
[21] 胡夏嵩. 青藏高原植被护坡. 北京: 地质出版社, 2011.
[22] 代永欣, 贾慧珍, 张鹏云, 史静儒, 于江波, 王林. 苹果砧木八棱海棠和 M9T337 的根系分布及水分输导组织特征. 山西农业大学学报(自然科学版), 2019, 39(1): 56-60.
[23] 李振基, 陈圣宾. 群落生态学. 北京: 气象出版社, 2011.
[24] Pianka E R. The structure of lizard communities. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1): 53-74.
[25] Ma Z Q, Guo D L, Xu X L, Lu M Z, Bardgett R D, Eissenstat D M, McCormack M L, Hedin L O. Erratum: evolutionary history resolves global organization of root functional traits. Nature, 2018, 555(7694): 94-97.
[26] 王娜, 沈雅飞, 程瑞梅, 等.三峡库区马尾松细根生产和周转及其影响因子.应用生态学报,2017,28(12):3827-3832.
[27] 万海霞, 许浩, 王月玲, 韩新生, 董立国, 郭永忠, 安钰, 贾廷民. 宁夏南部黄土丘陵区 3 种草本根土复合体抗冲性及其与影响因素的关系. 水土保持研究, 2024, 31(3): 115-127.
[28] 汪雪, 刘晓静, 王静, 童长春, 吴勇. 紫花苜蓿-燕麦连续间作下根系及土壤养分时空变化特征. 应用生态学报, 2023, 34(10): 2683-2692.
[29] 樊子豪, 张瑞香, 冯雪琦, 马瑞婧, 郭二辉. 河滨湿地不同植物群落根系分布特征与土壤理化性状的关系—以黄河中游荥阳段为例. 生态学报, 2023, 43(11): 4772-4781.
[30] 庞圣江, 张培, 杨保国, 刘士玲, 邓硕坤, 贾宏炎. 广西大青山西南桦人工林草本优势种群生态位研究. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(6): 94-101.
[31] 刘润红, 常斌, 荣春艳, 姜勇, 杨瑞岸, 刘星童, 曾惠帆, 傅桂焕. 漓江河岸带枫杨群落主要木本植物种群生态位. 应用生态学报, 2018, 29(12): 3917-3926.
[32] 龚雪伟, 吕光辉. 艾比湖流域杜加依林荒漠植物群落多样性及优势种生态位. 生物多样性. 2017, 25(1): 34-45.
[33] Weemstra M, Mommer L, Visser E J W, van Ruijven J, Kuyper T W, Mohren G M J, Sterck F J. Towards a multidimensional root trait framework: a tree root review. The New Phytologist, 2016, 211(4): 1159-1169.
[34] Connell J H. Intermediate-disturbance hypothesis. Science, 1979, 204(4399): 1344-1345.