

基于熵值法的南宁市膨胀土护坡植被根系特征指标评价

许英姿^{1,2}, 朱乔生^{1,2}, 黄效^{1,2}

(1.广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 2.广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘要: [目的] 评价植物对膨胀土边坡的防护作用, 为膨胀土边坡防护植被的选取提供科学参考。[方法] 在广西壮族自治区南宁市膨胀土地区草本植被中, 选取 8 种常见植物并提取其整体根系特征及分层根系特征, 统计分层根系特征的根长量、根表面积、根直径、根体积 4 个指标值。采用熵值法对所提取的 4 个根系特征指标进行赋权量化, 并基于不同指标的权重综合比较评价植被根系护坡效果的优劣。[结果] 植被的直径在 0.25~0.55 mm, 随深度加深变化不大。5 cm 的浅层土中的根长量、根表面积、根体积占整个深度范围的 50%~85.4%, 且随着土层深度的增加而急剧递减。鬼针草的根长量、根表面积、根体积在整个深度范围中均有明显优势。根长量、根表面积、根直径、根体积的权重系数分别为 0.310 0, 0.243 2, 0.165 4, 0.281 5。综合评价价值最高的是鬼针草, 为 0.916, 其次为高羊茅, 为 0.761。最低的是黑麦草, 为 0.110。[结论] 基于不同指标权重综合分析结果, 鬼针草的评级最高, 最适合作为南宁膨胀土地区的护坡植被。

关键词: 膨胀土; 植被防护; 根系评价; 熵值法

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2022)02-0189-06

中图分类号: TU443, S157.1, Q948.15

文献参数: 许英姿, 朱乔生, 黄效. 基于熵值法的南宁市膨胀土护坡植被根系特征指标评价[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 189-194. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.02.026; Xu Yingzi, Zhu Qiaosheng, Huang Xiao. Root evaluation of slope protection vegetation characteristic indexes on expansive soil in Nanning City based on entropy value method [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 189-194.

Root Evaluation of Slope Protection Vegetation Characteristic Indexes on Expansive Soil in Nanning City Based on Entropy Value Method

Xu Yingzi^{1,2}, Zhu Qiaosheng^{1,2}, Huang Xiao^{1,2}

(1. College of Civil and Architectural Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: [Objective] The protective effect of plants on the slope of an expansive soil was evaluated in order to provide a scientific reference for the selection of protective vegetation on the slope of expansive soils. [Methods] Eight common plants were selected from the herbaceous vegetation in the expansive soil area in Nanning City, Guangxi Zhuang Autonomous Region, and their overall root characteristics and stratified root characteristics were extracted. The four indexes of stratified root characteristics (root length, root surface area, root diameter, and root volume) were calculated. The entropy method was used to assign weights to the four characteristic indexes of the root system, and the advantages and disadvantages of the slope protection effect of vegetation root systems were evaluated comprehensively based on the weight of different characteristic indexes. [Results] The results showed that the root diameter of vegetation ranged from 0.25 mm to 0.55 mm, and there was little change with depth. Root length, root surface area, and root volume in shallow soil of 0—5 cm layer) accounted for 50.0%~85.4% of the entire depth range, and decreased sharply with increasing soil depth. Root length, root surface area, and root volume had obvious advantages over the entire depth range. The weight coefficients of root length, root surface area, root diameter, and root volume were 0.310 0, 0.243 2, 0.165 4, and 0.281 5, respectively. The comprehensive evaluation value was the highest for *Bidens pilosa*. (0.916), followed by

收稿日期: 2021-10-27

修回日期: 2021-11-22

资助项目: 广西国土资源厅重大科研课题“典型滑坡隐患点监测预警技术研究”(GXZC2018-G3-19302-JGYZ)

第一作者: 许英姿(1969—), 女(汉族), 江西省宜黄县人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程方面的研究。Email: xuyingzi@gxu.edu.cn.

Festuca elata (0.761). The lowest value was observed for *Lolium perenne* (0.110). [Conclusion] Based on the comprehensive analysis of different index weights, the rating of *Bidens pilosa* was the highest, and therefore, this species is the most suitable for slope protection in the expansive soil area of Nanning City.

Keywords: expansive soil; protection vegetation; root evaluation; entropy value method

膨胀土是一种具有显著胀缩性的特殊土^[1],其湿胀干缩的特性导致膨胀土在干湿循环条件下极易引起裂隙发育^[2]。研究^[3]表明,在膨胀土上开挖边坡极易引起灾害,因此膨胀土也被称为问题土。在膨胀土边坡防护技术中,以植被为主的生态护坡技术得到广泛应用。植被固坡机理已经有了许多成果,研究认为,植被防止浅层滑坡和水土流失主要与根系的力学加筋作用和水文效应有关^[4]。根系承受拉力,提供额外的抗剪强度,抑制裂隙的发展^[5],以机械加固边坡。同时植物蒸腾吸力引起的附加土基质吸力可以提高土体抗剪强度,降低水分渗透性^[6]。大量学者研究根系特征与植物固坡效果的关系,研究^[7]表明根系直径增加对干缩开裂的抑制作用呈先增加后降低的趋势。符金良^[8]发现香根草根含量越高,对膨胀土干缩裂隙开裂的抑制效果越好。Chau^[9]评估里蕨类植物根系减少侵蚀的潜力,认为叶面积比和根密度与减蚀潜力高度相关 Osman^[10]提出土壤含水量和根长密度均可作为边坡稳定性的指标。Ni^[11]研究了植物根系的水文效应对边坡稳定性的影响,认为根系覆盖范围内根体积比的分布形态对浅层加固有较强的影响。张荣^[12]和李彦^[13]认为小径级根系的总根密度和总根体积是影响土壤抗冲刷系数的主要因素。吴宏伟^[14]研究认为根表面积可以量化根系引起的基质吸力。护坡植被选种一直是学界的研究热点,Zhang^[15]结合物种重要性值和相对根系黏聚力指标对黑麦草香根草和百氏雀稗进行评价。Li^[16]研究了不同根系根型对水土流失的影响,推荐在工程实践中选择广泛分布(H型)和锥形根(VH型)结构的植被。Zhang^[17]开发了人工神经网络(ANN)模型对树木的根数、根面积比、根张力、土壤剪切强度和土壤水分含量的相对重要性进行计算,认为根表面积的影响权重最大。目前关于根系指标对边坡防护效果的评价研究较少,在根系指标的选取上或者较为单一,针对性不强。本文结合前人的研究成果,针对南宁市当地膨胀土边坡的护坡植被选取根长量、根表面积、根体积、根直径 4 个指标来评价根系对膨胀土边坡防护效果。根长量反映根系在土中的延伸总长度,根表面积反映根系与土

体的接触面积大小,根体积则取决于根长量和根直径,根直径反映根系的粗细与强度,4 者可以全面反映根系在土中的分布情况。上述 4 个指标对于膨胀土裂隙发育的抑制作用强弱尚不明晰,基于根系指标抑制裂隙发育的权重综合评价植物对膨胀土边坡的防护作用,对于膨胀土边坡防护植被的选取具有重要意义。

南宁市膨胀土地区土地贫瘠,土质呈中性或碱性,缺乏氮、磷,肥力低于广西耕地平均水平^[18],不利于外地物种生长。因此,在南宁市膨胀土地区选取 8 种常见的本地草本植物,采用熵值法进行根系特征的权重分析。熵值法^[19]是一种基于熵原理确定指标权重大小的客观评价方法,它反映各指标在竞争意义上的激烈程度,能将一些边界不清,难以量化的因素量化^[20]。基于权重结果对 8 种植物的根系进行综合评价,可以间接反映对膨胀土边坡的防护效果。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

试验所用植被根系采集地点为广西壮族自治区南宁市水牛研究所内的膨胀土边坡,根系采集时间为 2019 年 11 月,该时间南宁当地已进入旱季。本研究中所采集物种均为冬季可见的植物,该边坡在 2019 年春经过刮平处理,边坡上植物都是同一时期生长起来,保证了植物生长时间的一致。广西南宁属于亚热带季风气候,夏季炎热多雨,冬季温和少雨,年平均降雨量 1 304.2 mm。年气温平均值 21.5 ℃,年平均空气湿度 79%。通过现场调查分析,确定采集膨胀土边坡上常见的狗牙根(*Cynodon dactylon*)、小蓬草(*Conyza canadensis*)、阔叶雀稗(*Paspalum wettsteinii*)、牛筋草(*Eleusine indica*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)、高羊茅(*Festuca elata*)、黑麦草(*Lolium perenne*)、莎草(*Cyperus rotundus*) 8 种草本植被根系作为研究样本。本研究中所述草本植被均生长于膨胀土边坡上,植被根系范围内的土体为红褐色黏土,经相关室内试验知该土体为弱膨胀土。该土体的基本物理力学参数试验结果详见表 1。

表 1 土体基本物理力学性质

颜色	天然含水率/%	天然密度/(g·cm ⁻³)	比重	液限/%	塑限	塑性指数	自由膨胀率/%
红褐色	23.4	1.98	2.74	47.9	20.3	27.3	48.7

1.2 根系的采集方案

为了研究草本植物根系在膨胀土中不同深度的生长状况,分别对上述 8 种草本植物根系进行整体采集和分层采集。

1.2.1 根系整体采集 为了保证根系的完整性,采集整体根系时将根及其周围土体一并取出。调查表明,膨胀土边坡上生长的草本植物法向根系长度及侧向生长长度基本都在 20 cm 内,故采集整体根系时取根土复合体尺寸为 20 cm×20 cm×20 cm。每种植物挑选 3 株长势良好的样本。

1.2.2 根系分层采集 为了研究根系在不同深度的生长情况,每个植被根系从地表沿深度方向 0—5 cm, 6—10 cm, 11—15 cm, 16—20 cm 分别取 4 次样,每种植物挑选 3 株样本。

1.3 根系特征提取

采集的样本分类清洗、用吸水纸将根系表面干燥后,取各植物根系进行扫描分析。采用 Epson 数字化扫描仪进行扫描,分辨率为 300 dpi。将扫描的根系图像二值化后,用 WinRHIZO 植物图像根系分析系统对根系特征进行提取。扫描整株根系,对根系进行整体分析,获得整株根系的平均直径及整体形态;扫描根系在不同深度的生长情况,分层统计根系在不同深度范围的根长度、根表面积、根直径和根体积等根系特征。

2 根系特征分析

2.1 整体根系特征比较

采用 WinRHIZO 植物图像根系分析系统对南宁

市膨胀土边坡上常见的 8 种植物根系的整体根系特征进行分析,统计获得整株根系的平均直径、根型及形态特征详见表 2。

由表 2 可知,所有植物的平均根径均在 0~1 mm,小蓬草的平均直径最大,为 0.74 mm,黑麦草最小,为 0.28 mm。其余几种差别不大,在 0.45 mm 左右。大量研究表明^[12-13,21],0~1 mm 径级的细根对边坡土体的防护作用影响较大,在根径的角度上看,这些植被根径都在 0~1 mm,除了小蓬草偏大与黑麦草偏小外,其余区别不大。

从根型的角度看,小蓬草是主直根型,其余 7 种是须根型。直根型有明显主根,主根发达,根量较少。须根型无明显主根,茎的基部节上生长出许多大小、长短相仿的不定根,簇生呈胡须状,根量较多,根系分散。植被以须根型为主,南宁市膨胀土土地贫瘠,植物不易生长,须根型植物根系繁多,更容易从土体获取足够的营养物质,反过来大量的根系也增强了膨胀土强度,减少水土流失。

2.2 分层根系特征分析

每一种植物根系取 3 个平行样的平均值。系统分析得到与草本根系特征相关指标数值,结果如图 1 所示。由图 1 可知,根系直径基本在 0.25~0.55 mm,总体上随深度的加深变化不大。研究表明^[12-13,21],0~1 mm 径级内的细根对土壤侵蚀的影响较大。该地区的主要植被直径都小于 1 mm,对于膨胀土边坡的防护较为合适。小蓬草的直径在 5 cm 深度范围内最大,这是由于小蓬草是主直根型植物的缘故,主根较为发达。

表 2 研究区膨胀土边坡不同植物整体根系特征

植物名称	平均直径/mm	根型	形态特征
高羊茅	0.44	须根型	根量疏少,生长较长
小蓬草	0.74	主直根型	主根发达,垂直深入土体,侧根较少
莎草	0.44	须根型	根系较疏,根系上有少量小侧根
狗牙根	0.45	须根型	有根状茎和匍匐茎,匍匐茎平铺或埋入土里,节处向下生长不定根,主根较长
牛筋草	0.46	须根型	根系主要集中在 0~5 cm 内,少量须根生长较深
黑麦草	0.28	须根型	根系密集向下,有少量长根,呈毛笔状
阔叶雀稗	0.45	须根型	根系较发达,每条根都有小分叉侧根,呈发散状,主要集中在土层深度 0~5 cm
鬼针草	0.45	须根型	根系密集呈网状,有少量明显较粗较长的根系,总根长度大

根长度、根表面积、根体积 3 个特征指标的总体变化相似,在 5 cm 深度范围中所占比例较大,随深度增加急剧减小。为清楚根系在土层的分布情况,统计根长度、根表面积、根体积在 5 cm 土层深度范围内的所占比例情况详见表 3。根长度、根表面积、根体积都能反映根系分布情况,3 者在 5 cm 土层深度范围

中所占比例基本在 50% 以上,最高为 85.44%。说明该膨胀土地区的植被根系扎根较浅,集中分布在 5 cm 的表层土体中。分析认为,这是由于该膨胀土地区土地贫瘠,表层土由于生物分解等原因营养物质较为丰富,因此根系集中。对于边坡防护而言,大量根系在浅层土体中盘根错节,与土体形成稳固的根土复合

体,抑制裂隙的发育,减小降雨冲刷。在 5 cm 内,鬼针草的根长度、根表面积、根体积最大,在 6—20 cm

土层范围内,鬼针草与高羊茅根长度、根表面积、根体积极远远大于其他植物,同时两者相差不大。

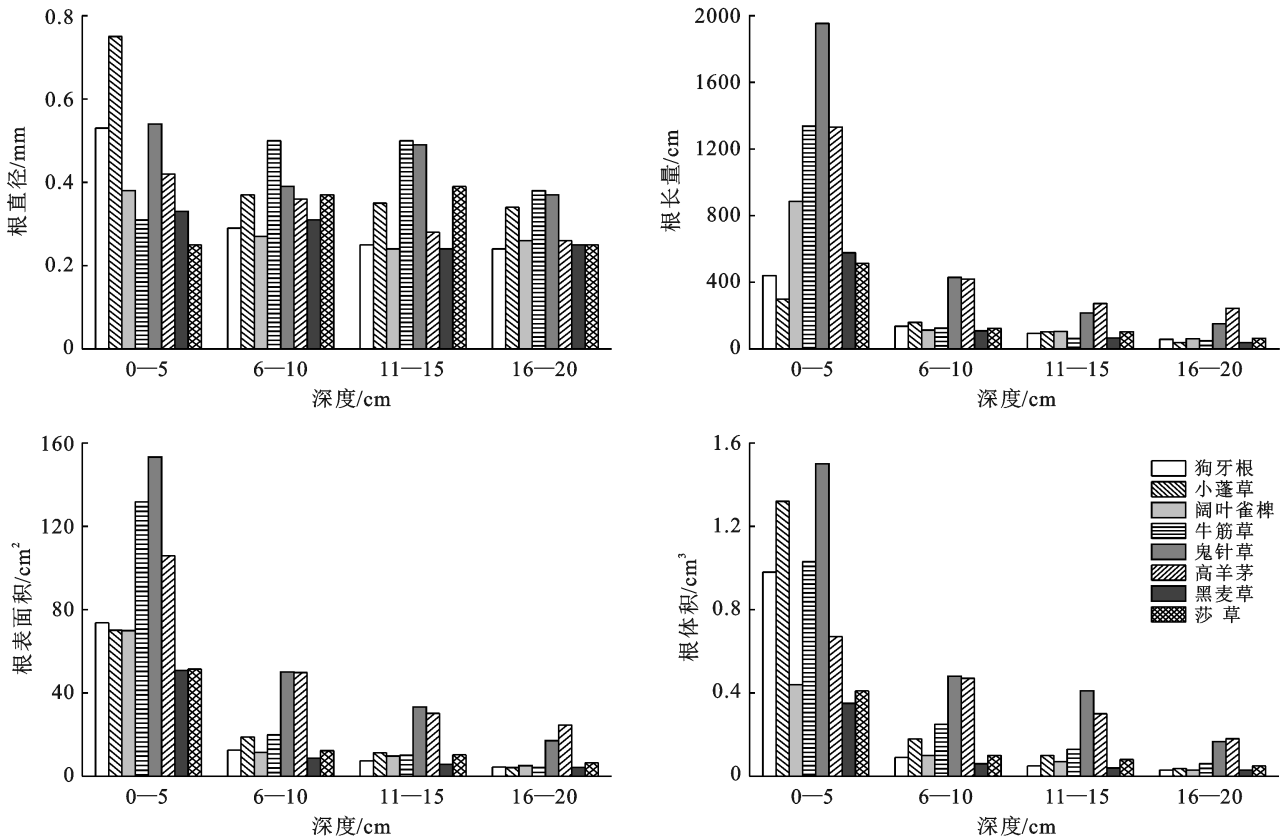


图 1 研究区各植被根系特征与不同深度的关系

表 3 研究区植物在 5 cm 范围内的根长度、根表面积、根体积所占比例

%

特征指标	狗牙根	小蓬草	阔叶雀稗	牛筋草	鬼针草	高羊茅	黑麦草	莎草
根长度	60.56	50.00	76.05	84.98	71.04	58.72	73.13	63.86
根表面积	75.12	67.10	72.72	78.60	60.40	50.30	73.32	63.91
根体积	85.44	80.73	68.70	70.31	58.73	41.59	73.25	63.96

3 熵值法评价

3.1 熵值法原理

熵是用于描述系统的混乱程度热力学概念,最早由 Shannon 引入信息论,表征信息源信号的不确定性,称为信息熵(简称熵),并在工程技术、社会经济等领域得到广泛运用。熵值法能够避免人为因素带来的偏差,反映出在各种评价指标值确定的情况下,各指标在竞争意义上的相对激烈程度,它能将一些边界不清、不易定量的因素定量化。本次研究所选取的根系特征指标较多,选用熵值法可以确定各个指标的权重值,进而实现综合评价^[22]。具体方法如下:

(1) 原始数据标准化处理。设某个根系特征在某个深度内指标为 x_{ij} , 其标准化值为 y_{ij} , 则正指标为:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (1)$$

($i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$)

逆指标为:

$$y_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (2)$$

($i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$)

(2) 指标权重计算公式。计算第 j 项指标下第 i 个评价对象评价指标的比重 p_{ij} 为:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

计算第 j 个评价指标的熵值 E_j 为

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

计算第 j 个评价指标的权重 W_j 为

$$W_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^m (1 - E_j)} \quad (5)$$

4 个根系特征在分别在 0—5 cm, 6—10 cm, 11—15 cm, 16—20 cm 的深度各有一个指标, 每种植物有 16 个权重指标, 由熵值法的计算公式计算可得 16 个根系指标的权重系数值 W_j (见表 4)。

计算植被得分公式为

$$Z_i = \sum_{j=1}^m \omega_j y_{ij} \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

该公式计算出的分数在 0~1。结果如图 2 所示。

表 4 研究区不同土层深度根系特征指标的权重系数值

深度根系特征	0—5 cm	6—10 cm	11—15 cm	16—20 cm	总和
根长量	0.084 6	0.126 4	0.052 0	0.047 0	0.310 0
根表面积	0.041 2	0.085 4	0.066 5	0.050 1	0.243 2
根直径	0.052 0	0.030 2	0.067 4	0.015 8	0.165 4
根体积	0.053 1	0.080 4	0.087 3	0.060 7	0.281 5

3.2 计算结果与分析

表 4 为 4 个根系特征在不同深度指标的权重系数值。根长量是根系在土体延伸的总长度, 根长量越大说明根系在土中穿插越密集, 对膨胀土的包裹性, 加筋作用越好。根表面积表示根系与土体的接触面积大小, 根表面积越大, 与膨胀土的摩擦力越大, 根表面积的大小还取决于根量、根直径。根体积描述根系的总体积, 取决于根直径与根量。从熵值法计算的权重结果可知, 根长量的权重最大, 为 0.310 0, 最小的是根直径, 为 0.165 4, 4 个指标的相对重要性排序为根长量 > 根体积 > 根表面积 > 根直径。说明根长量对膨胀土护坡效果影响最大, 根直径影响最小。对于植物固坡效果的影响因子权重处理中, Zhang 等^[17]人开发了人工神经网络(ANN)模型对树木的根数、根面积比、根张力、土壤剪切强度和土壤水分含量的相对重要性进行计算, 认为它们的相对重要性排序为: 根面积比 > 根拉伸强度 > 根数 > 土壤剪切强度。Zhang^[17]的研究选取了根系力学特性和土体的特征一起分析。事实上, 在同一个边坡上土体的物理情况基本是一样的, 本研究针对南宁膨胀土边坡防护的草本植物选种问题, 只选择根系特征进行分析比较。Zhang^[17]的研究结论里, 根面积比对土壤加固效果的影响最大(49.4%)。与本试验相比, 由于指标选择不一样, 相对重要性自然不同。但总的来说, 二者都验证了根表面积对固坡效果的重要性本文所采取的熵值赋权方法是根据实测数据进行的权重计算, 所得的权重系数均源自于数据自身的规律性, 具有客观性。采

用熵值法进行赋权计算在众多领域得到运用^[23-25], 实践验证了熵值法赋权的科学性与可靠性。

3.3 综合评价

基于指标标准化结果、根系指标权重值、综合评价算式的计算结果, 得到各种植物根系的根系综合评价价值, 以此作为植物根系评价依据(图 2)。鬼针草得分最高为 0.916, 其次高羊茅, 为 0.716。最小为黑麦草, 为 0.110。小蓬草的评价得分为 0.347, 排名中等。小蓬草的是直根型, 根系稀疏, 主根明显, 因此只在根直径这一指标中占优势, 根长量、根表面积并不占优势, 因此排名中等。鬼针草与高羊茅相较其他植物优势明显, 评分在其他植物的 2 倍以上。分析认为在根长量、根表面积、根体积这 3 个权重值较大的特征指标中, 鬼针草与高羊茅在各个深度范围中都较大。同时在 5 cm 深度范围中, 鬼针草的 3 个特征指标都高于高羊茅, 因此, 评分最高。在南宁市膨胀土边坡选择护坡植被时, 建议优先选取鬼针草。本研究旨在从根系的角度出发, 提出一种新的护坡植被选取的方法, 目前只有 Zhang^[17]研究基于数理统计对固坡效果的影响因子进行评价, 与 Zhang^[17]、Li 等^[16]人的试验相比, 本研究在指标选取上, 针对南宁市膨胀土边坡的特殊土况, 选取全面反映根系的 4 个特征, 在指标数据采集及处理上相对简洁, 在工程实践中更有可操作性与更高的效率。由于选取的根系指标能反映植被对土体的抗剪强度、裂隙发育的抑制、抗侵蚀性的积极作用, 选取的植物品种对于膨胀土地区的滑坡防护、水土保持具有更大作用。本试验给南宁市膨胀土边坡的滑坡治理水土保持提供了一种新的思路与方法。

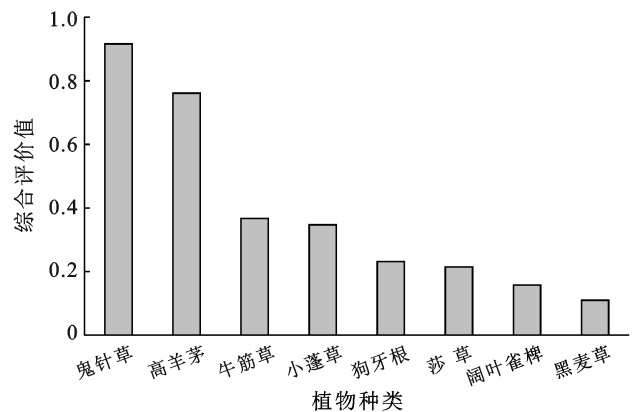


图 2 研究区植物根系的综合评价

4 结论

(1) 南宁市膨胀土地区常见草本植物中, 小蓬草为直根型, 其余为须根型。直根型植物主根发达, 根

量较少。须根型植物无明显主根,根量较多。植被根系直径总体相差不大,在 0.25~0.55 mm。在 5 mm 的根系占总根系的 50%~85.4%,每个深度中根系随着土层深度的增加而急剧递减。

(2) 根长量、根表面积、根直径、根体积对膨胀土护坡效果的影响权重占比分别为 0.310 0, 0.243 2, 0.165 4, 0.281 5。根长量直观反映根系对膨胀土的约束情况,影响权重最大。

(3) 针对南宁市膨胀土边坡的草本植被根系进行熵值法赋权评价,得分最高的是鬼针草,鬼针草根系密集,总根长量大,根长量、根表面积、根体积 3 个指标中具有明显优势,对膨胀土边坡防护和水土保持具有较好效果。

(4) 本研究为膨胀土边坡的护坡植被选取提供了一种新的思路和实测参考,指标数据的提取分析较为简便,对于膨胀土边坡生态防护的发展具有重要意义。

[参 考 文 献]

- [1] 骆赵刚,汪时机,杨振北.膨胀土湿干胀缩裂隙演化及其定量分析[J].岩土力学,2020,41(7):2313-2323.
- [2] 鲁志方,杨晓华,晏长根.土工格室植被护坡防膨胀土边坡开裂机理研究[J].公路,2016,61(4):23-28.
- [3] 殷宗泽,袁俊平,韦杰,等.论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J].岩土工程学报,2012,34(12):2155-2161.
- [4] Wang Xia, Hong Miaomiao, Huang Zheng, et al. Bio-mechanical properties of plant root systems and their ability to stabilize slopes in geohazard-prone regions [J]. Soil and Tillage Research, 2019, 189:148-157.
- [5] 李雄威,孔令伟,郭爱国.植被作用下膨胀土渗透和力学特性及埡坡防护机制[J].岩土力学,2013,34(1):85-91.
- [6] Ng Charles W W, Zhang Qi, Ni Junjun, et al. A new three-dimensional theoretical model for analysing the stability of vegetated slopes with different root architectures and planting patterns [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 130:103912.
- [7] 邓鹏,王桂尧,梅智鹏,等.根系分布对膨胀土干缩开裂影响试验研究[J].交通科学与工程,2021,37(1):19-25.
- [8] 符金良.香根草根系加筋膨胀土力学特性试验研究[D].湖南长沙:长沙理工大学,2018.
- [9] Chau N L, Chu L M. Fern cover and the importance of plant traits in reducing erosion on steep soil slopes [J]. Catena, 2017, 151:98-106.
- [10] Osman N, Barakbah S S. Parameters to predict slope stability: Soil water and root profiles [J]. Ecological Engineering, 2006, 28(1):90-95.
- [11] Ni J J, Leung A K, Ng C W W, et al. Modelling hydro-mechanical reinforcements of plants to slope stability [J]. Computers and Geotechnics, 2018, 95: 99-109.
- [12] 张荣,董洪君,周润惠,等.四川夹金山灌丛群落根系特征对土壤抗冲性的影响[J].生态学杂志,2020,39(11): 3558-3566.
- [13] 李彦,谷会岩,陈月明.植被细根对典型黑土土壤抗蚀性的影响[J].东北林业大学学报,2020,48(7):81-85.
- [14] 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.
- [15] Zhang Chaobo, Li Dongrong, Jiang Jing, et al. Evaluating the potential slope plants using new method for soil reinforcement program [J]. Catena, 2019, 180: 346-354.
- [16] 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.
- [17] Zhang C, Jiang J, Ma J, et al. Evaluating soil reinforcement by plant roots using artificial neural networks [J]. Soil Use Manage, 2015, 31(3):408-416.
- [18] 许松宜.南宁膨胀土边坡植被加强系统的试验研究[D].广西南宁:广西大学,2014.
- [19] 陈泽云.熵值法的船舶电子商务物流供应链评价[J].舰船科学技术,2020,42(24):199-201.
- [20] 伏坤,刘勇,王珣,等.基于熵值分析法的铁路高陡土质边坡安全性评价[J].铁道标准设计,2020,64(6):5-8.
- [21] 金晓,陈丽华.晋西黄土区不同植被类型土壤抗冲性及表层根系分布特征[J].水土保持学报,2019,33(6): 120-126.
- [22] 裴玮.基于熵值法的城市高质量发展综合评价[J].统计与决策,2020,36(16):119-122.
- [23] 杜国梁,高金川,李瑞冬.基于模糊综合评价法和熵值法的泥石流危险度评价[J].安全与环境工程,2013, 20(5):15-17,32.
- [24] 沈世伟,许君臣,代树林,等.基于熵值赋权法的节理岩体隧道爆破质量可拓学评价[J].土木工程学报,2013, 46(12):118-126.
- [25] 王伟,刘丹娜,彭第.基于熵值法的砂卵石地层深基坑开挖安全可拓评价[J].西南交通大学学报,2021,56(4): 785-791,838.