

道路开挖对亚高山草甸 4 种典型植物根系特征的影响

王忠良¹, 刘辉², 陈平平³, 李建兴³, 王波³, 字淑慧⁴, 段青松⁵

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 云南昆明 650201; 2. 大唐云南新能源有限公司, 云南昆明 655200; 3. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南昆明 650051; 4. 云南农业大学农学与生物技术学院, 云南昆明 650201; 5. 云南农业大学水利学院, 云南昆明 650201)

摘要: [目的] 研究道路开挖对亚高山草甸 4 种典型植物根系特征的影响, 为边坡植被恢复提供科学参考。[方法] 以西南委陵菜(*Potentilla fulgens*)、香青(*Anaphalis sinica*)、车前(*Plantago asiatica*)、圆舌黏冠草(*Myriactis nepalensis*) 4 种亚高山常见草本植物为研究对象, 测定扰动区(填方边坡)和未扰动区不同植物根系形态、生理特性、抗拉性能, 探讨道路开挖对根系特征的影响。[结果] ①道路开挖后, 车前和圆舌黏冠草根系变发达, 根长分别增加了 241.97% 和 106.97% ($p < 0.05$), 根表面积分别增加了 233.87% 和 71.03% ($p < 0.05$), 根体积分别增加了 174.52% 和 87.07% ($p < 0.05$), 而对西南委陵菜、香青影响较小。②道路开挖后, 车前和圆舌黏冠草过氧化物酶(POD)活性分别降低了 9.81% 和 7.23% ($p < 0.05$), 过氧化氢(H_2O_2)清除过程受阻, H_2O_2 含量分别升高了 8.33% 和 14.71% ($p < 0.05$), 根系易受损伤, 而西南委陵菜和香青则表现不明显。③道路开挖后, 植物根系单根抗拉力、抗拉强度、杨氏模量未发生显著变化, 且西南委陵菜和香青单根抗拉力明显大于其他 2 种。[结论] 直根型的西南委陵菜和香青对土壤扰动的耐受性及抗拉性能强于须根型的车前和圆舌黏冠草, 可在区域边坡植被恢复中优先选择。

关键词: 道路开挖; 亚高山草甸; 根系形态; 生理特性; 抗拉性能

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)01-0037-11

中图分类号: S157.1, S718

文献参数: 王忠良, 刘辉, 陈平平, 等. 道路开挖对亚高山草甸 4 种典型植物根系特征的影响[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 37-47. Wang Zhongliang, Liu Hui, Chen Pingping, et al. Effects of pavement excavation on root characteristics of four typical plant species in subalpine meadow [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 37-47.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.009

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.009

Effects of pavement excavation on root characteristics of four typical plant species in subalpine meadow

Wang Zhongliang¹, Liu Hui², Chen Pingping³, Li Jianxing³, Wang Bo³, Zi Shuhui⁴, Duan Qingsong⁵

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China; 2. Datang Yunnan New Energy Co., Ltd., Kunming, Yunnan 655220, China; 3. Power China Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming, Yunnan 650051, China; 4. College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China; 5. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China)

Abstract: [Objective] The effects of pavement excavation on the root characteristics of four typical plants in subalpine meadows were analyzed in order to provide references for slope vegetation restoration. [Methods] Four common subalpine herbaceous plants, *Potentilla fulgens*, *Anaphalis sinica*, *Plantago asiatica* and *Myriactis nepalensis*, were selected as the research objects. The root morphology, physiological characteristics and tensile

收稿日期: 2025-02-27

修回日期: 2025-09-16

采用日期: 2025-09-16

资助项目: 国家自然科学基金项目“三江并流区水库消落带草本植物根系水下固土机理研究”(42167046); 云南省水利科技项目“工程扰动亚高山草甸水土保持生态修复关键技术研究与示范”(2023BG204001)

第一作者: 王忠良(1998—), 男(彝族), 云南省禄丰市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与土壤侵蚀防控。Email: 3154534715@qq.com。

通信作者: 段青松(1971—), 男(白族), 云南省大理市人, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事水土保持及土地生态整治方面的研究。Email: 258437886@qq.com。

properties of different plants in the disturbed area (fill slope) and undisturbed area were measured, and the influence of pavement excavation on root characteristics was discussed. [Results] ① After pavement excavation, the root system of *P. asiatica* and *M. nepalensis* became more developed. The root length, root surface area, and root volume of them increased by 241.97% and 106.97% ($p < 0.05$), 233.87% and 71.03% ($p < 0.05$), and 174.52% and 87.07% ($p < 0.05$), respectively. However, it had a relatively small impact on the *P. fulgens* and *A. sinica*. ② After pavement excavation, the activity of peroxidase (POD) in *P. asiatica* and *M. nepalensis* decreased by 9.81% and 7.23% ($p < 0.05$), respectively. The scavenging process of hydrogen peroxide (H_2O_2) was blocked, and the content of H_2O_2 increased by 8.33% and 14.71% ($p < 0.05$), respectively. ③ After pavement excavation, the tensile force, tensile strength and Young's modulus of single root of plant roots did not change significantly, And the single root tensile force of *P. fulgens* and *A. sinica* was significantly greater than the other two. [Conclusion] The tolerance and tensile properties to soil disturbance of straight-rooted *P. fulgens* and *A. sinica* green to pavement excavation are stronger than those of fibrous-rooted *P. asiatica* and *M. nepalensis*, which can be preferentially selected in regional slope vegetation restoration.

Keywords: pavement excavation; subalpine meadow; root morphology; physiological characteristics; tensile properties

亚高山草甸主要分布于中国青藏高原东部、四川省西部,以及滇西北、滇东北和滇中地区^[1],其风能资源丰富,是风电开发的理想区域,但抗干扰能力弱^[2],植被和土层破坏后,恢复困难。亚高山风能资源的分布要比平原复杂,风机通常沿山脊线布置,风电场建设具有占地范围广,土方开挖量大等特点^[3]。在风电场建设中,沿线建设了大量的施工道路。其上边坡为挖方边坡,通过机械开挖,心土层暴露于地表,形成裸露坡面;下边坡为填方边坡,土质较上边坡松软,表土层较厚,若不及时恢复植被,易发生土壤侵蚀,给亚高山草甸带来了生态风险。

植被恢复是控制土壤侵蚀的有效方式。一方面根系能够在土壤中以缠绕、穿插、加筋、固锚等作用形式形成根系网络,利用根系物理作用对土壤进行机械固结;另一方面根系能够分泌形成大量的胶结物质,利用其化学作用将土壤颗粒胶结起来,提高土壤抗侵蚀能力^[4]。亚高山草甸土腐殖质层容重小、养分含量高、持水能力强,而底土容重大,养分含量低,持水能力弱。道路开挖过程中的重型机械碾压导致土壤紧实度增加,土方的开挖和回填降低了土壤养分和持水能力。研究^[5]表明,工程扰动对土壤理化性质起负向影响,与未扰动区相比,工程扰动区土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾、大团聚体含量显著降低,土壤黏粒含量、容重、pH值显著增加。土壤贫瘠与干旱共同制约着边坡植物生长发育。根系是植物吸收水分和矿质营养的主要器官,易受各种环境因素的影响。当外界环境改变时,根系首先感受并随之产生一系列形态及生理的变化^[6]。因此,理解土壤扰动对植物根系的影响对边坡植被恢复具有重要参考价值。

根系形态特征、生理特性、抗拉性能是反映根系资源获取、环境适应、固土性能的重要指标。国内外学者就不同干扰类型对根系特征的影响展开了一些研究,但主要集中在放牧和旅游干扰。根系形态特征通过根长、根表面积等决定了根系对水分和养分的空间获取能力。Huang Xiaoxia等^[7]指出,随着放牧强度的增加,植物采取增加地下生物量的生长策略;李佳成等^[8]研究表明,随着旅游干扰强度的增加,草甸植物地上、地下生物量及根冠比均有所降低;张彩军等^[9]研究指出随着高原鼯鼠种群密度增加,鹅绒委陵菜根冠比呈先减小后增大的趋势。根系生理特性通过抗氧化酶活性等指标反映植物对干旱、盐碱等逆境的适应能力。郑扬帆等^[10]模拟了践踏对早熟禾分蘖生长及生理特性的影响,指出践踏后早熟禾过氧化氢(H_2O_2)含量升高,过氧化物酶(POD)活性增加,超氧化物歧化酶(SOD)活性降低,分蘖数减少;董一桥^[11]也研究指出,随着人为践踏程度的增强,植物根系活力呈下降趋势,SOD活性出现降低趋势,POD活性在升高后出现降低趋势。根系抗拉性能是表征根系固土能力的重要指标,根系的抗拉强度与根系的固土能力成正比^[12]。在外力作用下土体产生变形时,穿插、缠绕在土体中的植物根系会将土体的剪应力转化为根的拉应力,发挥牵引作用,因此在一定程度上能减缓边坡土体变形^[13]。不同植物根系抗拉力差异较大,受根径、微观结构、化学成分、含水率等的影响,但根径的影响最大^[14-16]。通常认为,根径与抗拉力、抗拉强度呈线性、幂函数、指数函数关系^[17-18]。放牧、旅游通过践踏作用改变植物根系形态结构进而影响整株抗拉能力。

边坡植被恢复能够改善受扰动土壤的结构进而

实现土壤侵蚀防控,但土壤扰动对根系的影响尚不明确。为此,本研究以4种亚高山常见草本植物为研究对象,采用原位对比试验的方法,测定扰动区和未扰动区植物根系的形态、生理特性、抗拉性能,探究土壤扰动对根系的影响,旨在为边坡植被恢复提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省昆明市寻甸回族彝族自治县和东川区交界处的高本山(25°47'50"—25°54'26"N, 103°09'20"—103°11'59"E),海拔在3 040~3 200 m,属滇中红土高原区和滇东喀斯特高原区的接壤地带,具

有典型的低纬高原亚高山草甸景观特征。该区域夏秋多雨,冬春干旱,年平均降雨量1 020.9 mm。土壤类型为亚高山草甸土,气象灾害有霜冻、干旱、冰雹等。植物以羊茅(*Festuca ovina*)、西南委陵菜(*Potentilla fulgens*)、冷箭竹(*Arundinaria faberi*)等为主。

1.2 供试植物

选择西南委陵菜(蔷薇科委陵菜属)、香青(*Anaphalis sinica*,菊科香青属)、车前(*Plantago asiatica*,车前科车前属)、圆舌黏冠草(*Myriactis nepalensis*,菊科黏冠草属)4种常见的亚高山草本为研究对象,其中西南委陵菜和香青属于R型,有主根、侧根较为发达;车前和圆舌黏冠草属于M型,无主根、须根发达、呈团网状分布(图1)。

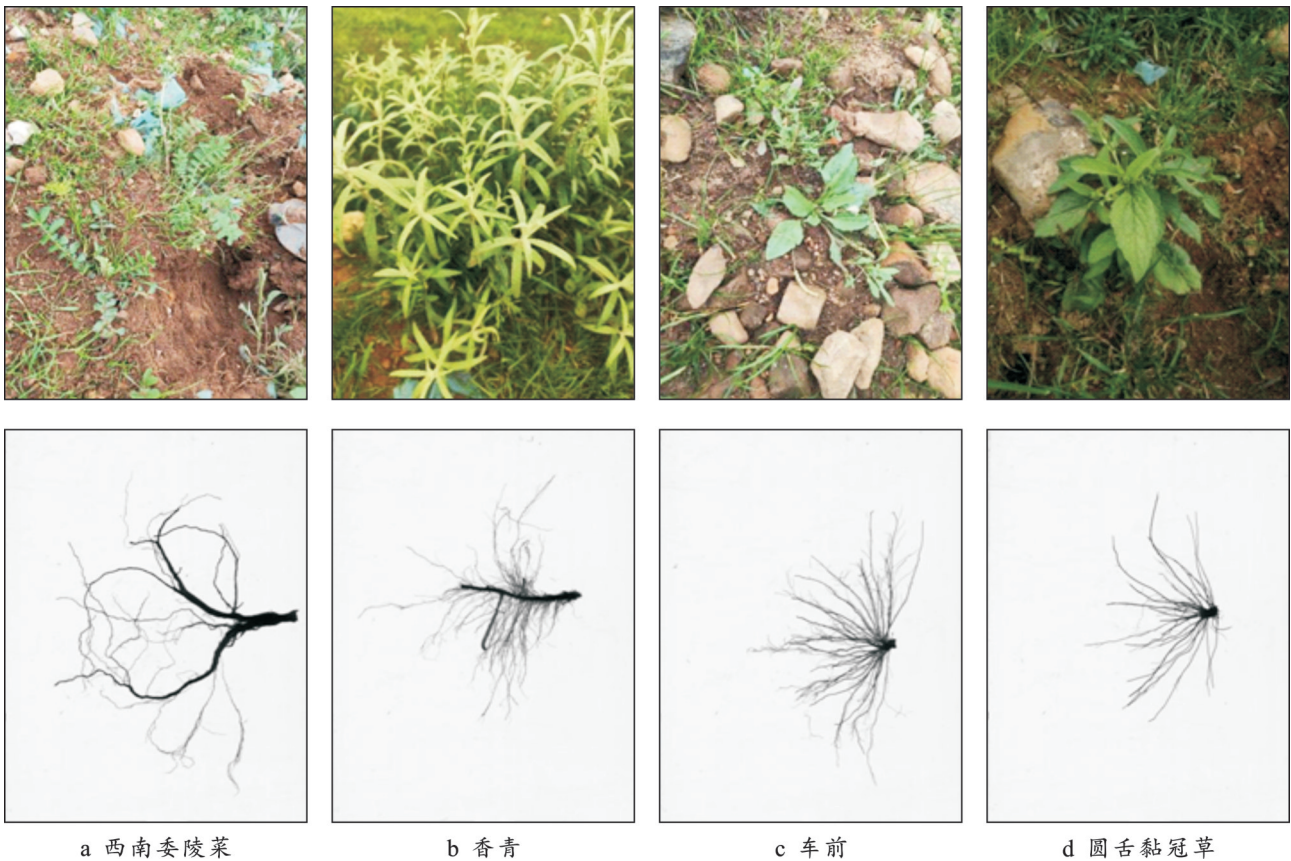


图1 4种植物生长现状及其根系形态(扰动区)

Fig.1 Growth status and root morphology of four kinds of plants (at disturbed zone)

取样区域(图2a)的取样点分为未扰动区(图2b)和扰动区(图2c)。①未扰动区:原生草甸,优势植物为羊茅、西南委陵菜、冷箭竹、香青等,植被覆盖度为100%;②扰动区:道路填方边坡,填方厚度约1 m,该路段建成运营4 a,优势植物为西南委陵菜、香青、黑麦草等,植物来源于道路开挖时所残留的根系以及种子的风力传播,植被覆盖度20%~50%。两区处于同一区域,背南朝北,取样区域远离村庄无放牧。

采用整株挖掘法进行取样,尽可能地避免根系损伤,带回实验室冲洗后保存在4℃的冰箱内。

1.3 根系形态

将取回的根系样品用细筛在流水下洗出,用吸水纸擦净水分(整个过程避免损伤根系)。将根系样本放置在干净的高透扫描盘上,用毛刷轻轻拨开根系,使根系最大限度延展在盘中。采用Epson Expression 12000XL根系扫描仪进行灰度扫描,采用

WinRHIZO(Pro.2019)根系分析系统分析根系形态指标,每个处理每种植物取 5 株。测定指标主要包括

平均直径、根长、根表面积、根体积、根尖数、根分支数、分形维数。

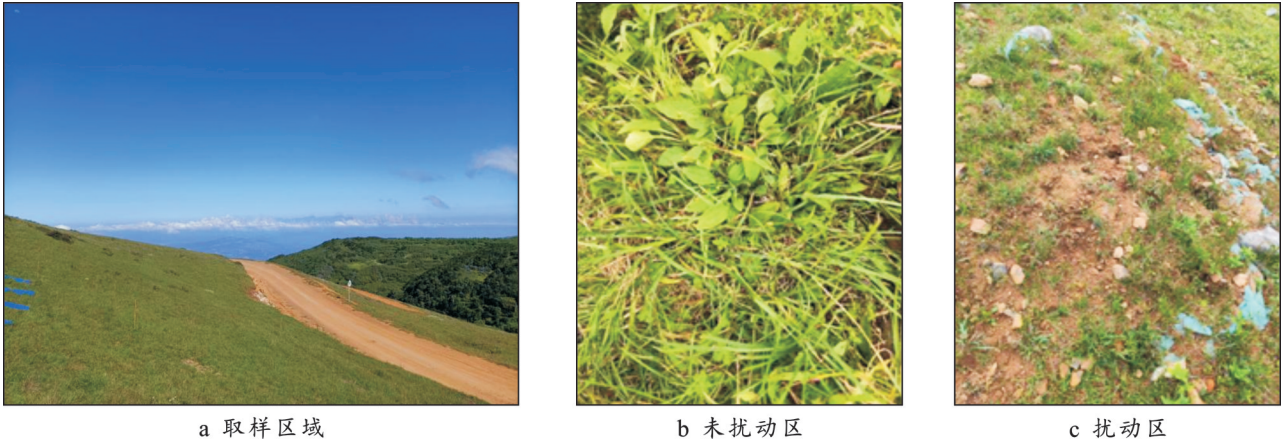


图 2 取样区域及未扰动区和扰动区植物特征

Fig.2 Sampling area and plants at undisturbed and disturbed zones

分形维数^[19]计算方法为先获得根系分布图上边长为 r 的小正方形和根系所截的小正方形数目 N_r 。随着小正方形边长 r 逐渐减小,根系所截 N_r 逐渐增大,得到不同边长水平 r 上相应 N_r 值后,分别以 $\lg r$ 和 $\lg N_r$ 为横坐标和纵坐标作图,得到直线方程:

$$\lg N_r = -F_D \lg r + \lg K \quad (1)$$

式中:直线斜率的负数即为分形维数(F_D)。

1.4 根系生理特性

根系生理指标包括根系活力、POD、过氧化氢酶(CAT)、丙二醛(MDA)、 H_2O_2 等。将采集的根系用干冰保存运输回实验室待测,根系活力采用氯化三苯基四氮唑法(TTC-脱氢酶还原法)测定,POD活性使用愈创木酚法测定,CAT活性使用紫外吸收法测定,MDA含量使用硫代巴比妥酸法测定, H_2O_2 含量使用硫酸钛沉淀法测定^[20]。

1.5 根系抗拉特征

抗拉试验能测定根系的抗拉力、抗拉强度和杨氏模量等根系抗拉指标。本试验以 50 mm 为标距,选取顺直、无损伤的单根进行抗拉试验。用电子数显游标卡尺测量根系两端及中间 3 个位置的直径,计算 3 个位置的直径作为所测根系的平均直径,用山度牌 SN100 数显拉力试验机(量程 100 N,精度为 0.05 N)测定单根最大抗拉力。试验前,在试验机夹具两端缠绕软布胶带以增加根系与夹具间的摩擦力,把上下夹具的间距调为 50 mm,夹紧根系,用手匀速转动试验机旋钮开始试验,拉伸速率控制在 10~15 mm/min。试验中,根系只有在根中间 1/3 处发生断裂时测得的数据视为成功。

根系抗拉强度^[21]计算公式为

$$T = 4F/\pi D^2 \quad (2)$$

式中: T 为抗拉强度(MPa); F 为根系最大抗拉力(N); D 为根系直径(mm)。

根系杨氏模量^[21]计算公式为

$$E_r = 200F/\pi D^2 \Delta L \quad (3)$$

式中: E_r 为杨氏模量(MPa); ΔL 为根系拉断时的伸长量(mm)。

1.6 土壤性质

在扰动区和未扰动区(0—20 cm)用环刀取土样带回实验室测定土壤含水率、容重,另取 2 kg 土壤样品带回实验室风干待测。烘干法测定土壤含水率、容重。pH值采用电位法(土水比 1:1),有机质采用重铬酸钾容量法-稀释热法,全氮采用半微量凯氏定氮法,有效磷采用 Olsen 法,速效钾采用中性醋酸铵浸提-火焰光度计法^[22]。

1.7 数据处理与分析

数据使用 Excel 2021, SPSS 20, Origin 2019 进行统计、分析和绘图,通过配对样本 T 检验比较同种植物不同生境间根系形态、生理指标以及土壤理化性质的差异性,采用单因素方差分析比较同种生境不同植物单根抗拉指标的差异性,利用非线性回归拟合根径与单根抗拉力、抗拉强度及杨氏模量之间的关系。

2 结果与分析

2.1 道路开挖对土壤理化性质的影响

土壤水分和养分是植物生存的物质基础。未扰动区和扰动区土壤理化性质详见表 1。由表 1 可知,道路开挖后,边坡土壤含水率显著降低($p < 0.05$),土

壤容重显著增加($p < 0.05$),具体表现为含水率降低了 15.65%,容重增加了 29.11%。亚高山草甸土表层土壤腐殖质含量丰富,疏松多孔的结构使得土壤容重较低而含水率较高,道路开挖过程中机械、车辆的碾压使得边坡土壤容重增大而含水率较低。同时因边坡植被覆盖度低而土壤水分蒸发强^[3]。道路开挖后,边

坡土壤有机质和全氮含量显著降低($p < 0.05$),具体表现为有机质降低了 78.68%,全氮降低了 83.94%。亚高山草甸土表层土壤有机质、全氮含量高,而底土有机质、全氮较低,道路开挖过程中底土和表土混合产生的稀释效应使得土壤有机质、全氮降低,同时大面积的植被破坏加速有机质分解和养分流失^[23]。

表 1 道路开挖对土壤理化性质的影响

Table 1 Effects of pavement excavation on soil physical and chemical properties

样品来源 土壤	含水率/%	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	pH 值	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
未扰动区	44.85±3.06 ^a	0.79±0.04 ^b	5.26±0.10 ^a	113.18±15.10 ^a	7.72±0.47 ^a	1.32±0.20 ^a	98.80±13.52 ^a
扰动区	29.20±2.52 ^b	1.02±0.06 ^a	5.58±0.07 ^a	24.13±9.02 ^b	1.24±0.21 ^b	0.62±0.09 ^a	95.53±9.76 ^a

注:数据为平均值±标准误;下同。不同小写字母代表不同状态下土壤理化性质差异显著($p < 0.05$)。

2.2 道路开挖对植物根系形态的影响

由表 2 可以看出,道路开挖对 4 种植物根径无显著影响,但根长分别增加了 53.20%, 25.82%, 241.97% 和 106.97%,根表面积分别增加了 42.13%, 21.17%, 233.87% 和 71.03%,根体积分别增加了 19.58%, 19.48%, 174.52% 和 87.07%,根尖数分别增加了 73.77%, 17.57%, 139.37% 和 29.42%,根分支数

分别增加了 335.00%, 39.90%, 261.31% 和 33.53%。总的来看,道路开挖后,车前的根长、根表面积、根体积、根尖数、根分支数显著增加,圆舌黏冠草的根长、根表面积、根体积显著增加,而西南委陵菜和香青根系指标则无显著变化,表明道路开挖对西南委陵菜和香青根系形态影响较小,对车前和圆舌黏冠草影响较大。

表 2 道路开挖对 4 种植物根系形态的影响

Table 2 Effects of pavement excavation on root morphology of four kinds of plants

植物名称	生境	平均直径/mm	根长/cm	根表面积/ cm^2	根体积/ cm^3	根尖数	根分支数
西南委陵菜	未扰动	1.17±0.17 ^a	224.54±31.36 ^a	81.66±11.80 ^a	12.87±1.05 ^a	762.50±211.42 ^a	380.00±70.71 ^a
	扰动	0.95±0.23 ^a	423.99±119.03 ^a	116.07±29.77 ^a	15.39±2.38 ^a	1 325.00±270.09 ^a	1 311.00±626.08 ^a
香青	未扰动	0.56±0.06 ^a	460.12±108.05 ^a	81.71±26.10 ^a	6.16±0.46 ^a	1 214.00±146.67 ^a	1 963.33±628.75 ^a
	扰动	0.52±0.09 ^a	578.90±222.78 ^a	99.04±28.86 ^a	7.36±1.60 ^a	1 427.33±348.24 ^a	2 746.67±886.91 ^a
车前	未扰动	0.46±0.12 ^a	258.25±73.40 ^b	41.51±14.86 ^b	2.08±0.18 ^b	464.00±86.07 ^b	713.33±374.55 ^b
	扰动	0.50±0.02 ^a	893.13±395.49 ^a	138.59±54.67 ^a	5.71±0.59 ^a	1 110.67±504.82 ^a	2 577.33±1 169.33 ^a
圆舌黏冠草	未扰动	0.65±0.08 ^a	215.09±56.09 ^b	52.56±11.27 ^b	2.94±0.16 ^b	539.67±67.16 ^a	616.33±366.15 ^a
	扰动	0.79±0.12 ^a	443.03±119.05 ^a	89.68±17.52 ^a	5.50±0.27 ^a	721.00±259.83 ^a	823.00±302.29 ^a

注:不同小写字母代表同一植物不同状态下根系形态差异显著($p < 0.05$)。下同。

分形维数是反映根系发达程度的重要指标,根的分形维数越大,表示根系越发达,其分支能力和发育程度越好^[19]。由图 3 可知,4 种植物分形维数分别为 1.52, 1.51, 1.41 和 1.48,根系均较为发达。道路开挖后,西南委陵菜、香青、车前、圆舌黏冠草分形维数分别增加了 0.05, 0.04, 0.11 和 0.04,其中车前达到显著水平($p < 0.05$)。

2.3 道路开挖对植物根系生理特性的影响

根系活力的高低可以反映出根系代谢能力的强弱,道路开挖后,植物根系活力均有所升高,但差异不显著。POD 活性能够表示植物根系适应逆境(干

旱、冷害等)能力的强弱,其含量越高适应逆境的能力越强,道路开挖后,车前和圆舌黏冠草 POD 活性显著降低,对于西南委陵菜和香青则无显著影响。CAT 活性表示植物根系抗逆及稳定细胞膜功能的能力,道路开挖后,4 种植物均无显著变化。MDA 能够反映细胞膜的抗逆性,道路开挖后,4 种植物均无显著变化。 H_2O_2 能够反映根系组织活性氧的代谢能力,道路开挖后,车前和圆舌黏冠草 H_2O_2 含量显著升高,其他 2 种则无显著影响。综上所述,道路开挖后,车前和圆舌黏冠草 POD 活性明显降低, H_2O_2 含量明显升高,而西南委陵菜和香青则表现不明显。

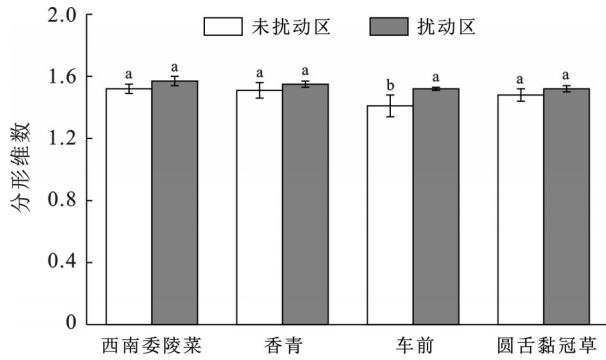


图3 道路开挖对4种植物根系分形维数的影响

Fig.3 Effects of pavement excavation on fractal dimension of four kinds of plant roots

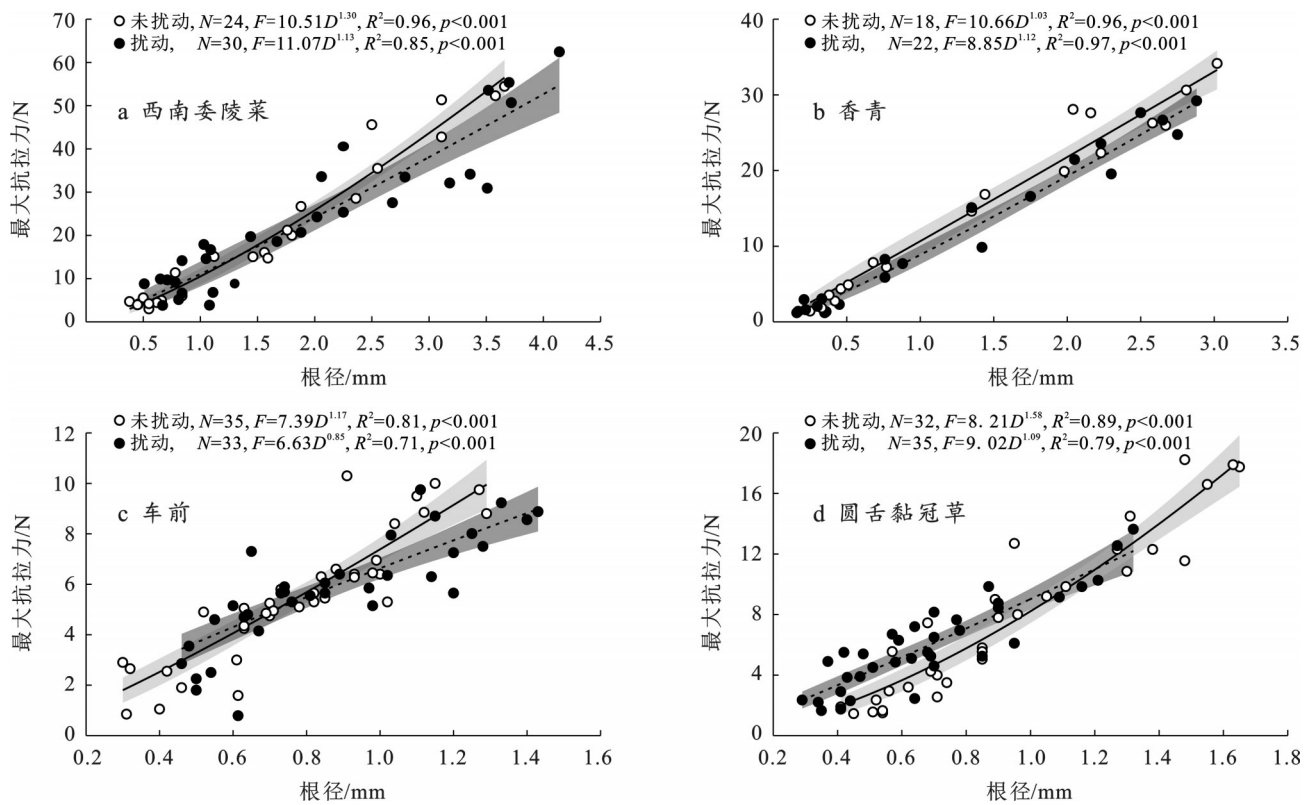
2.4 道路开挖植物根系抗拉性能的影响

由图4可以看出,4种植物有效单根试验229根,平均成功率为63.01%,测试成功的直径范围为0.25~4.14 mm,根系拉力范围为1.20~62.45 N。根系抗拉力随根径呈幂函数增加, R^2 在0.71~0.97,拟合效果较好。两条置信带重合度较高,可认为同种植物2种生境下单根抗拉力差异不显著。由表4可知,对于未扰动区,4种植物平均抗拉力表现为:西南委陵菜(20.49 N)≈香青(15.57 N)>圆舌黏冠草(7.77 N)≈车前(5.62 N);对于扰动区,4种植物平均抗拉力表现为:西南委陵菜(23.30 N)>香青(11.54 N)>圆舌黏冠草(6.06 N)≈车前(5.91 N)。

表3 道路开挖对4种植物根系生理特性的影响

Table 3 Effects of pavement excavation on physiological characteristics of four kinds of plant roots

植物名称	生境	根系活力/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$	POD/ $(\text{U} \cdot \text{g}^{-1})$	CAT/ $(\text{U} \cdot \text{g}^{-1})$	MDA/ $(\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1})$	H_2O_2 / $(\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1})$
西南委陵菜	未扰动	7.26 ± 0.33^a	62.38 ± 1.96^a	4.68 ± 0.22^a	7.98 ± 0.13^a	222.10 ± 4.23^a
	扰动	8.49 ± 0.39^a	57.48 ± 1.84^a	5.29 ± 0.25^a	8.58 ± 0.16^a	233.72 ± 4.64^a
香青	未扰动	10.28 ± 0.47^a	665.57 ± 13.22^a	7.89 ± 0.35^a	7.58 ± 0.12^a	135.13 ± 2.53^a
	扰动	10.22 ± 0.41^a	602.70 ± 21.40^a	7.73 ± 0.37^a	7.79 ± 0.14^a	141.45 ± 2.81^a
车前	未扰动	12.53 ± 0.74^a	$2\ 487.60 \pm 49.43^a$	9.20 ± 0.44^a	6.08 ± 0.11^a	108.59 ± 1.46^b
	扰动	14.71 ± 0.67^a	$2\ 243.40 \pm 42.59^b$	9.37 ± 0.39^a	6.74 ± 0.12^a	117.05 ± 1.86^a
圆舌黏冠草	未扰动	18.24 ± 0.84^a	$2\ 698.75 \pm 39.78^a$	9.34 ± 0.42^a	4.38 ± 0.08^a	102.60 ± 2.78^b
	扰动	20.25 ± 0.93^a	$2\ 503.07 \pm 52.75^b$	9.53 ± 0.46^a	4.55 ± 0.09^a	117.72 ± 3.05^a



注:图中线条表示回归拟合线,阴影部分表示95%置信带。下同。

图4 道路开挖对4种植物单根抗拉力的影响

Fig.4 Effects of pavement excavation on single root's tensile force of four kinds of plants

由图 5 可知,根系抗拉强度范围为 2.31~45.64 MPa,根系抗拉强度随根直径呈幂函数减小, R^2 介于 0.42~0.88 间,西南委陵菜和香青拟合效果较好,车前和圆舌黏冠草拟合效果不理想。两条置信带重合度较高,可认为同种植物 2 种生境下单根抗拉强度差异不显著。

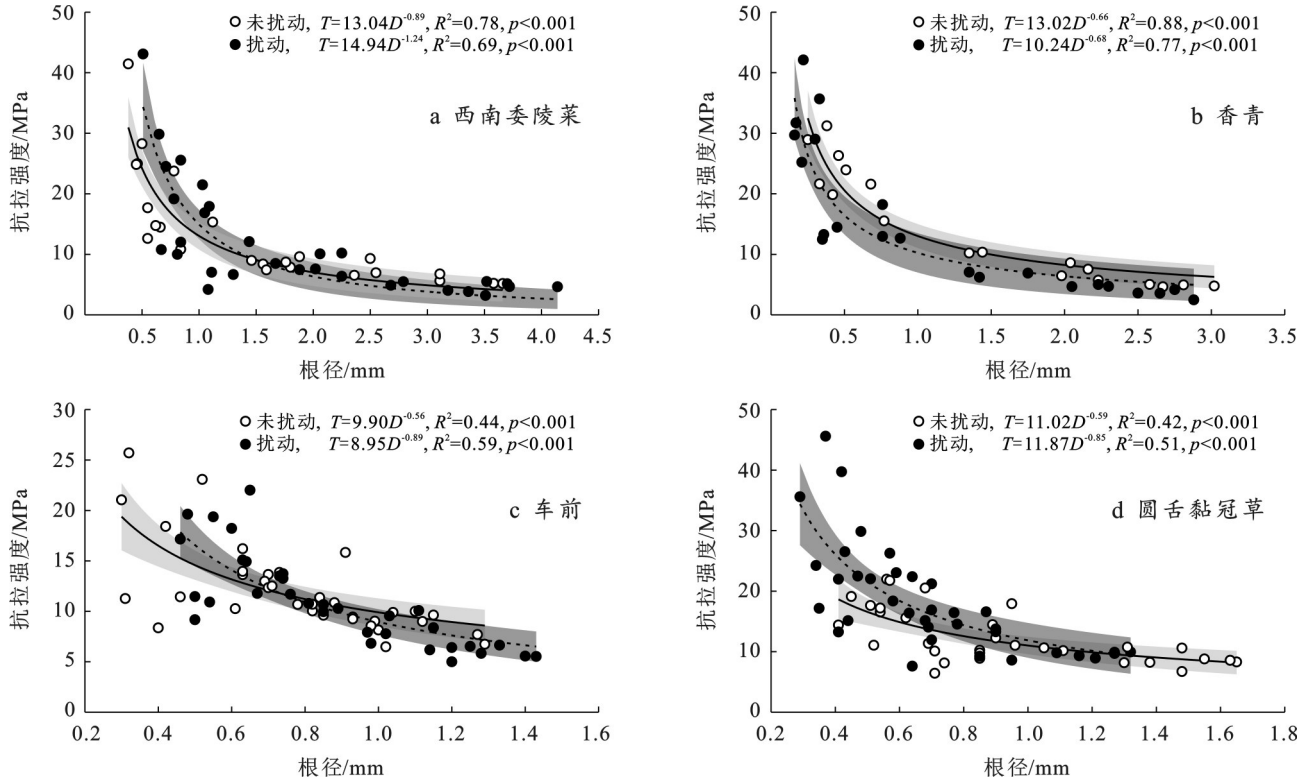


图 5 道路开挖对 4 种植物单根抗拉强度的影响

Fig.5 Effects of pavement excavation on single root's tensile strength of four kinds of plants

杨氏模量能够反映根系抵抗弹性变形的能力。由图 6 可知,根系杨氏模量范围为 9.98~236.71 MPa,根系杨氏模量随根直径呈幂函数减小, R^2 在 0.33~0.87,西南委陵菜、香青和车前拟合效果较好,圆舌黏冠草拟合效果不理想。两条置信带重合度较高,可认为同种植物 2 种生境下单根杨氏模量差异不显著。由表 4 可知,对于未扰动区,4 种植物平均杨氏模量表现为:圆舌黏冠草(78.66 MPa)≈香青(77.38 MPa)≈西南委陵菜(74.04 MPa)≈车前(66.88 MPa);对于扰动区,4 种植物平均杨氏模量表现为:香青(93.77 Pa)≈圆舌黏冠草(89.76 MPa)>西南委陵菜(58.79 MPa)≈车前(55.27 MPa)。

3 讨论

3.1 道路开挖对根系形态的影响

道路开挖使原地表长期发育形成的土壤变成不利于植物生长的裸土,土壤养分、含水率显著降低

由表 4 可知,对于未扰动区,4 种植物平均抗拉强度表现为:香青(14.30 MPa)≈西南委陵菜(13.57 MPa)≈圆舌黏冠草(12.41 MPa)≈车前(12.05 MPa);对于扰动区,4 种植物平均抗拉强度表现为:圆舌黏冠草(17.50 MPa)>香青(14.81 MPa)>西南委陵菜(11.76 MPa)≈车前(10.97 MPa)。

(表 1),4 种植物根长、根表面积、根体积、根尖数、根分支数增大。一方面,植物通过增加根长、根表面积等来提高对土壤水分、养分的有效利用,以应对水分养分胁迫^[24];另一方面扰动区植物种类较为单一(图 2c),大多独立成株,种间竞争小,雨季雨水充足,根系生长迅速,而在未扰动区植物种类丰富(图 2b),种间竞争激烈。

此外,道路开挖对西南委陵菜和香青影响较小,对车前和圆舌黏冠草影响较大。根系分布深度决定着植物吸收与利用土壤资源的能力,西南委陵菜和香青根系分布较深(0—40 cm),而车前和圆舌黏冠草根系主要分布于土壤表层(0—20 cm),西南委陵菜和香青比车前和圆舌黏冠草具有更强的吸收和利用土壤资源的能力^[25],因此当生境改变时西南委陵菜和香青具有更强的适应性。

放牧和道路开挖是亚高山草甸常见的两种扰动方式。放牧和道路开挖都会导致亚高山草甸土壤孔

隙度降低、容重增大、有机质等养分含量降低。与放牧相比,道路开挖对土壤的破坏更为剧烈、土壤侵蚀强度大,且恢复速度慢。须根型和主根型植物对放牧的响应与道路开挖类似,须根系主要分布于0—20 cm的表层土壤,形成密集的草毡层,放牧导致土

壤紧实,须根系形成更密集的细根网络,并被迫向土壤表层集中,对放牧更为敏感^[26];主根系主要分布于0—40 cm土层,依赖较深层次的水分和养分,放牧阻碍其主根延伸,其侧根通过增加分枝和细根数量获取水分和养分,对放牧的耐受性较强^[27]。

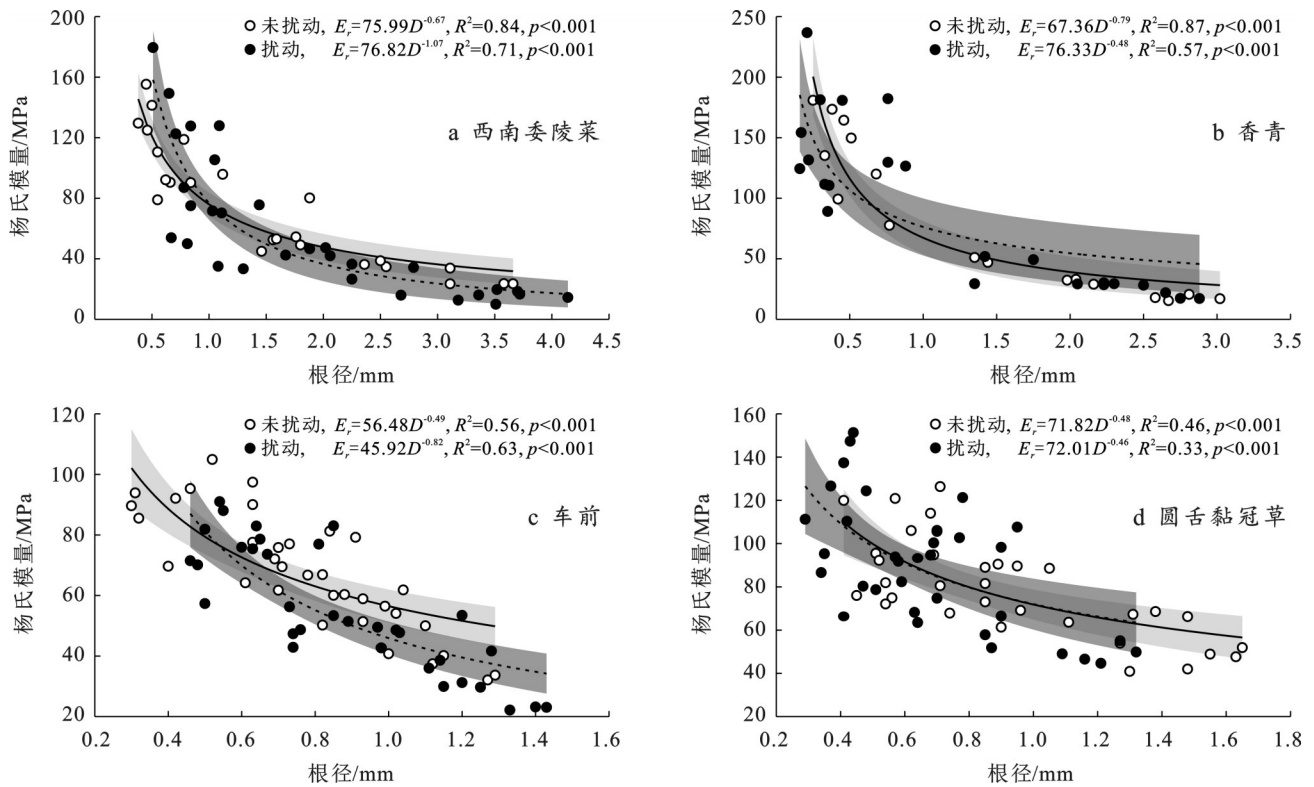


图 6 道路开挖对 4 种植物单根杨氏模量的影响

Fig.6 Effects of pavement excavation on single root's Young's modulus of four kinds of plants

表 4 4 种植物根系单根抗拉性

Table 4 Single root's tensile resistance of four kinds of plants

植物类型	生境	平均抗拉力/N	平均抗拉强度/MPa	平均杨氏模量/MPa
西南委陵菜	未扰动	20.49±17.52 ^a	13.57±9.10 ^a	74.04±43.53 ^a
香青		15.57±11.45 ^a	14.30±9.33 ^a	77.38±60.86 ^a
车前		5.62±2.45 ^b	12.05±4.41 ^a	66.88±19.63 ^a
圆舌黏冠草		7.77±5.35 ^b	12.41±4.50 ^a	78.66±22.82 ^a
西南委陵菜	扰动	23.30±16.79 ^a	11.76±9.34 ^b	58.79±45.31 ^b
香青		11.54±10.28 ^b	14.81±12.03 ^{ab}	93.77±66.86 ^a
车前		5.91±2.02 ^c	10.97±4.56 ^b	55.27±20.70 ^b
圆舌黏冠草		6.06±2.98 ^c	17.50±8.98 ^a	89.76±29.03 ^a

注:不同小写字母代表同一状态下不同植物单根抗拉性差异显著($p < 0.05$)。

道路开挖后,车前的分根维数显著增大,而其他 3 种植物则表现不明显。这可能与植物生长周期有关,车前为一年或二年生草本,其他 3 种为多年生草本。有研究^[28]表明,一年生草本根系形态较多年生草本表现出更强的可塑性。

3.2 道路开挖对根系生理特性的影响

根系活力是反映根系吸收、代谢能力的重要指

标,根系活力越高养分、水分吸收能力越强^[29]。道路开挖后,4 种植物根系活力升高,表明其通过提高水分养分的吸收以应对扰动。

POD 和 CAT 是植物体内重要的抗氧化酶,能够反映植物的抗逆性。正常情况下,植物体内的活性氧 ROS(如 H_2O_2)的产生和消除处于动态平衡。当植物遭受胁迫时,植物体内电子供需不平衡,在细胞内

会产生大量 ROS,引起氧化胁迫^[30]。MDA 作为膜脂过氧化的最终产物会在细胞内大量的积累,其含量越高植物受损伤程度越大^[31]。道路开挖后,4种植物根系细胞内氧化还原动态平衡遭到了破坏,MDA 含量上升。在此情况下,SOD 可将植物体内产生的伤害性物质超氧自由基(O_2^-)歧化为 H_2O_2 和 O_2 ,减轻植物体的受伤害程度^[32]。但是 H_2O_2 在植物体内积累之后会形成引起膜脂过氧化的 $\cdot OH$,而植物细胞内没有专一清除 $\cdot OH$ 的酶,积累的 H_2O_2 通过 CAT,POD 等其他抗氧化酶进行清除^[33]。相关性分析也发现 POD 和 CAT 活性与 H_2O_2 含量之间呈极显著负相关关系($r=-0.86$ 和 $r=-0.97$, $p<0.01$)。道路开挖后,车前和圆舌黏冠草 POD 活性分别降低了 9.81%,7.23% ($p<0.05$), H_2O_2 清除过程受阻, H_2O_2 含量分别升高了 8.33%,14.71% ($p<0.05$),根系易受损伤,而西南委陵菜和香青通过维持稳定的抗氧化酶系统实现了氧化还原稳态。

3.3 道路开挖对根系抗拉性的影响

根长、根表面积、根体积既能够反映植物根系对环境的适应能力,又能够影响植物根系的固土能力。根系整株抗拉力与根长、根径和单根抗拉力成正比。道路开挖后,车前和圆舌黏冠草根长显著增加,且根径和单根抗拉力无明显变化,可以推测车前和圆舌黏冠草整株抗拉拔能力得以提高,而西南委陵菜和香青的根长无明显变化,且根径和单根抗拉力无明显变化,可以推测对西南委陵菜和香青整株抗拉拔能力影响较小。虽然在扰动区植物整株的固土能力保持稳定或得以提升,但由于植被覆盖度较低(20%~50%),加之道路开挖致使土壤结构恶化、抗蚀性降低,边坡水土流失仍然较为严重。因此,积极恢复植被以增加植株密度对边坡水土流失防控显得尤为重要。未扰动和扰动 2 种生境下植物单根平均抗拉力表现为:西南委陵菜(20.49/23.30 N)>香青(15.57/11.54 N)>圆舌黏冠草(7.77/6.06 N)≈车前(5.62/5.91 N),西南委陵菜和香青单根抗拉力明显大于其他 2 种,可在区域植被恢复中优先选择。

4 结论

(1) 道路开挖诱导植物根系发生形态可塑性响应,其中车前和圆舌黏冠草表现出高度敏感型特征,根长分别增加了 241.97% 和 106.97% ($p<0.05$),根表面积分别增加了 233.87% 和 71.03% ($p<0.05$),根体积分别增加了 174.52% 和 87.07% ($p<0.05$),而西南委陵菜和香青则属于耐受型物种。

(2) 道路开挖后,敏感型物种车前和圆舌黏冠草

POD 活性分别降低了 9.81% 和 7.23% ($p<0.05$), H_2O_2 清除过程受阻, H_2O_2 含量分别升高了 8.33% 和 14.71% ($p<0.05$),根系易受损伤,而耐受型物种西南委陵菜和香青通过维持稳定的抗氧化酶系统实现了氧化还原稳态。

(3) 道路开挖后,4种植物根系抗拉性能(单根抗拉力、抗拉强度、杨氏模量)未发生显著变化,且西南委陵菜和香青单根抗拉力明显大于其他 2 种。

参考文献(References)

- [1] 倪璐,吴静,李纯斌,等.近 30 年中国天然草地物候时空变化特征分析[J].草业学报,2020,29(1):1-12.
Ni Lu, Wu Jing, Li Chunbin, et al. Temporal and spatial variations in natural grassland phenology in China over the last 30 years [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(1):1-12.
- [2] 邓远东,郭健,易鹏飞.亚高山草甸土浅层溜滑侵蚀的空间分布预测模型研究[J].安全与环境工程,2021,28(3):170-178.
Deng Yuandong, Guo Jian, Yi Pengfei. Spatial distribution prediction model of shallow slide erosion of subalpine meadow soil [J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(3):170-178.
- [3] 张力琛,范立张,马常威,等.山地风电场建设对土壤性质和植被覆盖的影响:以云南省将军山风电场为例[J].生态学杂志,2022,41(12):2397-2405.
Zhang Lichen, Fan Lizhang, Ma Changwei, et al. Influence of mountain wind farm construction on soil properties and vegetation cover: A case study of Jiangjunshan wind farm in Yunnan Province [J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(12):2397-2405.
- [4] Li Qiang, Liu Guobin, Zhang Zheng, et al. Relative contribution of root physical enlacing and biochemical exudates to soil erosion resistance in the loess soil [J]. Catena, 2017, 153:61-65.
- [5] 胡燕梅,张丽梅,陈正发,等.工程扰动对低纬高原亚高山草甸土壤质量的影响[J].水土保持研究,2025,32(5):122-131.
Hu Yanmei, Zhang Limei, Chen Zhengfa, et al. Impact of engineering disturbance on soil quality of subalpine meadows in low-latitude plateaus [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(5):122-131.
- [6] 王婷,焦健,李朝周,等.不同生境芦苇根际土壤性质与根系生理的比较研究[J].中国草地学报,2021,43(4):78-86.
Wang Ting, Jiao Jian, Li Chaozhou, et al. Comparative study on rhizosphere soil properties and root physiology of reed in different habitats [J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(4):78-86.

- [7] Huang Xiaoxia, Sheng Zhilu, He Kejian, et al. Functional diversity and redundancy of subalpine meadows subjected to anthropogenic disturbances [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2021, 14(5):870-883.
- [8] 李佳成, 陈炜昊, 侯钢, 等. 旅游干扰对芦芽山亚高山草甸植物生物量分配的影响[J]. *草地学报*, 2023, 31(11): 3492-3502.
Li Jiacheng, Chen Weihao, Hou Gang, et al. Effect of tourism disturbance on plant biomass allocation of subalpine meadows in Luya Mountain, China [J]. *Acta Agraria Sinica*, 2023, 31(11):3492-3502.
- [9] 张彩军, 杨晶, 康宇坤, 等. 高原鼯鼠扰动对鹅绒委陵菜无性系特征的影响[J]. *草原与草坪*, 2023, 43(1):59-64.
Zhang Caijin, Yang Jing, Kang Yukun, et al. Effects of disturbance of plateau zokor on asexual reproduction characteristics of *Potentilla anserina* [J]. *Grassland and Turf*, 2023, 43(1):59-64.
- [10] 郑扬帆, 奇凤, 宋桂龙. 模拟践踏下草地早熟禾分蘖与抗氧化酶系统[J]. *草业科学*, 2014, 31(5):858-862.
Zheng Yangfan, Ji Feng, Song Guilong. Effects of trample stress on tillering dynamics and antioxidant enzyme system of *Kentucky bluegrass* [J]. *Pratacultural Science*, 2014, 31(5):858-862.
- [11] 董一桥. 人为践踏对南京紫金山林下植被根系及土壤渗透性影响[D]. 江苏南京:南京林业大学, 2021.
Dong Yiqiao. Effects of human trampling on root system and soil permeability of understory vegetation in Zijin mountain, Nanjing [D]. Nanjing, Jiangsu: Nanjing Forestry University, 2021.
- [12] 姚怡宁, 宗桦, 周璐, 等. 川西大渡河干热河谷优势灌草植物根系特征及固土能力[J]. *生态学报*, 2025, 45(6): 2798-2810.
Yao Yining, Zong Hua, Zhou Lu, et al. Root characteristics and soil-fixing ability of the dominant shrubs and herbs in the dry and hot valley of Dadu River in west Sichuan [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(6):2798-2810.
- [13] 毛正君, 耿咪咪. 紫花苜蓿根系抗拉力学特性及其影响因素研究[J]. *干旱区研究*, 2023, 40(2):235-246.
Mao Zhengjun, Geng Mimi. Study on tensile mechanical properties of alfalfa roots and the influencing factors [J]. *Arid Zone Research*, 2023, 40(2):235-246.
- [14] Chen Yun, Tang Han, He Binghui, et al. Root tensile strength of terrace hedgerow plants in the karst trough valleys of SW China: Relation with root morphology and fiber content [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2022, 10(4):677-686.
- [15] 李可, 朱海丽, 宋路, 等. 青藏高原两种典型植物根系抗拉特性与其微观结构的关系[J]. *水土保持研究*, 2018(2):240-249.
Li Ke, Zhu Haili, Song Lu, et al. Relationship between tensile properties and microstructure of two typical plant roots in the Qinghai-Tibet plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018(2):240-249.
- [16] Mahannopkul K, Jotisankasa A. Influence of root suction on tensile strength of *Chrysopogon zizanioides* roots and its implication on bioslope stabilization [J]. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(2):275-284.
- [17] Kamchoom V, Boldrin D, Leung A K, et al. Biomechanical properties of the growing and decaying roots of *Cynodon dactylon* [J]. *Plant and Soil*, 2022, 471(1): 193-210.
- [18] Rossi R, Picuno P, Fagnano M, et al. Soil reinforcement potential of cultivated cardoon (*Cynara cardunculus* L.): First data of root tensile strength and density [J]. *Catena*, 2022, 211:106016.
- [19] 汪堃, 南丽丽, 郭全恩, 等. 干旱胁迫对不同根型苜蓿根系构型的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(20):8365-8373.
Wang Kun, Nan Lili, Guo Quan'en, et al. Effects of drought stress on root architecture of different root-type alfalfa [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(20):8365-8373.
- [20] 单皓, 罗海婧, 张松, 等. 不同抗旱性小豆根系对干旱-复水的生理生态响应[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(1):94-100.
Shan Hao, Luo Haijian, Zhang Song, et al. Physiological and ecological response of different drought-tolerant adzuki beans root system to drought-rehydration [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(1): 94-100.
- [21] 黄广杰, 段青松, 李建兴, 等. 三江并流区水库消落带 5 种草本根系形态及抗拉特性[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(3):389-395.
Huang Guangjie, Duan Qingsong, Li Jianxing, et al. Root morphology and tensile characteristics of five kinds of herbs in reservoir fluctuating zone of three parallel rivers [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(3):389-395.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000.
Bao Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [23] 李智兰. 风电场建设对周边扰动区域土壤养分和植被的影响[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(4):61-66.
Li Zhilan. Effect of wind power site construction on soil nutrients and vegetation of the surrounding disturbed region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(4):61-66.
- [24] 高鹏飞, 张静, 范卫芳, 等. 干旱胁迫对光叉委陵菜根系特征、结构和生理特性的影响[J]. *草业学报*, 2022, 31

- (2):203-212.
- Gao Pengfei, Zhang Jing, Fan Weifang, et al. Effects of drought stress on root characteristics structure and physiological characteristics of *Potentilla bifurca* var. *glabrata* [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(2): 203-212.
- [25] 孙佳慧,史海兰,陈科宇,等.植物细根功能性状的权衡关系研究进展[J].植物生态学报,2023,47(8):1055-1070.
- Sun Jiahui, Shi Hailan, Chen Keyu, et al. Research advances on trade-off relationships of plant fine root functional traits [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(8): 1055-1070.
- [26] 侯扶江,杨中艺.放牧对草地的作用[J].生态学报,2006,26(1):244-264.
- Hou Fujiang, Yang Zhongyi. Effects of grazing of livestock on grassland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(1): 244-264.
- [27] Qiao Jirong, Chen Xinli, Chang S X, et al. Grazing intensity changes root traits and resource utilization strategies of *Stipa breviflora* in a desert steppe [J]. Plant and Soil, 2024, 503(1): 475-488.
- [28] 杨春娇,陈玳汝,张大才.藏东南高寒草甸不同生境植物根系形态及分布特征[J].中国草地学报,2020,42(4):79-84.
- Yang Chunjiao, Chen Dairu, Zhang Dacai. Root morphology and distribution characteristics of plants in different habitats of alpine meadow in southeast Tibet [J]. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(4): 79-84.
- [29] 张翠梅,师尚礼,吴芳.干旱胁迫对不同抗旱性苜蓿品种根系生长及生理特性影响[J].中国农业科学,2018, 51(5):868-882.
- Zhang Cuimei, Shi Shangli, Wu Fang. Effects of drought stress on root and physiological responses of different drought-tolerant alfalfa varieties [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(5): 868-882.
- [30] Zaher A T, Boroomand N, Sadat-Hosseini M. Physiological and morphological response to drought stress in seedlings of ten citrus [J]. Trees, 2016, 30(3): 985-993.
- [31] 季杨,张新全,彭燕,等.干旱胁迫对鸭茅根、叶保护酶活性、渗透物质含量及膜质过氧化作用的影响[J].草业学报,2014,23(3):144-151.
- Ji Yang, Zhang Xinquan, Peng Yan, et al. Effects of drought stress on lipid peroxidation, osmotic adjustment and activities of protective enzymes in the roots and leaves of orchardgrass [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(3): 144-151.
- [32] 夏钦,何丙辉,刘玉民,等.高温胁迫对粉带扦插苗形态和生理特征的影响[J].生态学报,2010,30(19):5217-5224.
- Xia Qin, He Binghui, Liu Yumin, et al. Effects of high temperature stress on the morphological and physiological characteristics in *Scaevola albida* cutting seedlings [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(19): 5217-5224.
- [33] 赵文武,赵鑫,谢文辉,等.干旱胁迫下白刺花幼苗根系生长和生理特性的响应[J].草地学报,2023,31(1): 120-129.
- Zhao Wenwu, Zhao Xin, Xie Wenhui, et al. Response of root growth and development and physiological characteristics of *Sophora davidii* under drought stress [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(1): 120-129.

(上接第21页)

- [26] 张灿,徐涵秋,张好,等.南方红壤典型水土流失区植被覆盖度变化及其生态效应评估:以福建省长汀县为例[J].自然资源学报,2015,30(6):917-928.
- Zhang Can, Xu Hanqiu, Zhang Hao, et al. Fractional vegetation cover change and its ecological effect assessment in a typical reddish soil region of southeastern China: Changting County, Fujian Province [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(6): 917-928.
- [27] 张颂扬,张巍,杨鹏辉,等.模拟降雨条件下重构阻水层对坡面风化煤矸石产流产沙的影响[J].水土保持通报,2024,44(2):101-109.
- Zhang Songyang, Zhang Wei, Yang Penghui, et al. Effect of reconstructed water-blocking layers on sediment production from weathered coal gangue on slopes under simulated rainfall conditions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 101-109.
- [28] de Mello C R, Guo Li, Yuan Chuan, et al. Deciphering global patterns of forest canopy rainfall interception (FCRI): A synthesis of geographical, forest species, and methodological influences [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 358: 120879.
- [29] 张转敏,王彬,饶伟,等.初始含水率和降雨能量对黑土团聚体溅蚀特征的影响[J].水土保持学报,2024,38(2):68-75.
- Zhang Zhuanmin, Wang Bin, Rao Wei, et al. Impact of initial soil moisture and rainfall energy on splash erosion characteristics of black soil aggregate [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 68-75.