

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.024; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.024.

张巍, 麦宝妍, 陆建君, 等. 香根草枯萎对根-土复合体抗剪强度的影响[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1):383-391.

Zhang Wei, Mai Baoyan, Lu Jianjun, et al. Effect of vetiver root withering on shear strength of root-soil composites[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1):383-391.

# 香根草枯萎对根-土复合体抗剪强度的影响

张巍<sup>1</sup>, 麦宝妍<sup>1</sup>, 陆建君<sup>2</sup>, 王克俭<sup>1</sup>, 徐东<sup>3</sup>, 徐文秀<sup>3</sup>

(1. 华南农业大学 水利与土木工程学院, 广州 510640;

2. 广东粤水电勘测设计有限公司, 广东 佛山 528000; 3. 广东省粤东三江连通建设有限公司, 广州 510000)

**摘要:** [目的] 研究根系枯萎对根-土复合体抗剪性能的影响, 为植被斜坡滑坡灾害防治提供理论依据。[方法] 以香根草和花岗岩风化土为研究对象, 采用应变控制式直剪仪进行试验, 分析了活根-土复合体和枯萎根-土复合体的黏聚力及内摩擦角与根系直径、含水率等因素的关系。[结果] (1) 第 0 天与第 56 天相比, 枯萎根根系直径缩小了 10.4%~15.8%, 枯萎 90 d 后的根系在外观和结构上与活根存在显著差异。(2) 抗剪强度特征总体呈现素土试样 < 根-土复合体试样, 在含水率为 15% 时, 活根-土复合体试样与枯萎根-土复合体试样的抗剪强度差异较小, 仅为 5.51 kPa, 但随着含水率的增加, 枯萎根-土复合体试样的抗剪强度显著低于活根-土复合体试样。(3) 活根-土复合体在四级含水率下仍有较高的黏聚力, 而枯萎根-土复合体试样的黏聚力随着含水率上升而大幅下降。在含水率较低时, 活根-土复合体与枯萎根-土复合体的根系黏聚力差距较小, 但随着含水率增加, 枯萎根-土复合体的根系黏聚力大幅下降, 两者差距加大。[结论] 在土壤含水率较低时, 根系枯萎对固土效应的影响较小, 但随着含水率的增加, 枯萎根的固土效应逐渐减弱, 当根-土复合体接近饱和时, 枯萎根的固土效应几乎消失, 需特别关注植物枯萎导致的根系固土效应降低及其可能引发的降雨诱发滑坡灾害。

**关键词:** 根系固土; 抗剪强度; 枯萎根; 活根; 香根草

中图分类号: TU411.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0383-09

## Effect of vetiver root withering on shear strength of root-soil composites

Zhang Wei<sup>1</sup>, Mai Baoyan<sup>1</sup>, Lu Jianjun<sup>2</sup>, Wang Kejian<sup>1</sup>, Xu Dong<sup>3</sup>, Xu Wenxiu<sup>3</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, South China Agricultural University,

Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong YSD Surveying & Designing Co., Ltd., Foshan,

Guangdong 528000, China; 3. Guangdong Yuedong Sanjiang Connection Construction Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to investigate the effect of root withering on the shear strength of root-soil composites, providing a theoretical basis for the prevention and control of landslide disasters on vegetated slopes. [Methods] Using vetiver and weathered granite soil as the research objects, tests were conducted using a strain-controlled direct shear apparatus. The relationships of cohesion and internal friction angle of living root-soil composites and withered root-soil composites with factors such as root diameter and moisture content were analyzed. [Results] (1) Compared with that on day 0, the diameter of the withered roots on day 56 decreased by 10.4% to 15.8%. After 90 days of withering, significant differences in appearance and structure were observed between the withered roots and the living roots. (2) The overall shear strength characteristics followed the order: plain soil specimens < root-soil composite specimens. At a moisture content of 15%, the difference in shear strength between the living root-soil composite specimens and the withered root-soil composite specimens was small, being only 5.51 kPa. However, with increasing moisture content, the shear strength of the withered root-soil composite specimens became significantly lower than that of the living root-soil composite specimens. (3) The

收稿日期: 2024-10-21

修回日期: 2025-04-03

接受日期: 2025-04-20

资助项目: 国家自然科学基金(52379101); 广东省普通高校重点科研项目(NO.2022KTSCX013)

第一作者: 张巍(1983—), 男, 湖北天门人, 教授, 博士, 主要从事岩土灾害防治与生态岩土工程方面的研究。E-mail: zhangwei@scau.edu.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

living root-soil composites maintained high cohesion across four moisture content levels, while the cohesion of the withered root-soil composites decreased significantly with increasing moisture content. At low moisture content, the difference in root cohesion between the living root-soil and withered root-soil composites was small. However, as the moisture content increased, the cohesion of the withered root-soil composite decreased significantly, widening the gap between the two. [Conclusion] When the soil moisture content is relatively low, root withering has little effect on root reinforcement. However, the root reinforcement effect of withered roots gradually weakens with increasing moisture content. As the root-soil composites approach saturation, the reinforcement effect of withered roots becomes almost negligible. Therefore, special attention should be paid to the reduction in root reinforcement caused by plant withering and its potential to trigger rainfall-induced landslide disasters.

**Keywords:** root reinforcement; shear strength; withered roots; living roots; vetiver

植物的固土护坡作用主要由其根系实现。根系通过在土壤中向多个方向生长,形成一个锚定系统,从而帮助植物在土壤中稳定生长。根系能够根据土壤的密实程度、深浅和水分状况等条件扩展其生长范围并不断萌发更多细根进一步增强固土护坡能力。

研究表明植物根系在生长过程中由于季节变化等因素会逐渐死亡,同时也会长出新根,枯萎根与活根在土壤中难以分开<sup>[1-3]</sup>。枯萎后的根系仍对土壤具有重要影响,枯萎根在腐烂前仍留在土壤中,腐烂后留下的空隙会增加土壤的孔隙度。关于枯萎根作用的研究,Ghestem等<sup>[4]</sup>研究发现,植物根系对地下水流动有显著影响,水流优先在枯萎根或腐烂根形成的通道、腐烂根新被活根占据的通道以及活根周围的通道中流动。Zhang等<sup>[5]</sup>在研究活根和枯萎根对水分入渗速率和土壤孔隙度的影响时发现,活根和枯萎根均能增加土壤的入渗速率,并提高土壤的蓄水能力,其中枯萎根土壤的蓄水能力最大。Yamase等<sup>[6]</sup>的研究表明,树木死亡后根系的固土作用会下降,但如果被砍伐后的树木重新发芽,根系的固土强度只会暂时下降。此外,该研究区发生滑坡的破坏区附近的树种均死亡,也证实了植物枯萎对固土效果的影响。Johnson等<sup>[7]</sup>研究发现,根系强度降低会导致土壤黏聚力下降,从而使边坡稳定性降低。对枯萎根的研究除前文所述外,还有根系识别<sup>[8-9]</sup>、树木<sup>[10-11]</sup>方面。

香根草(*Vetiveria zizanioides*)因其良好的气候适应性、耐寒耐瘠薄和发达的根系,广泛用于水土保持领域。花岗岩风化土是广东省边坡的代表性土样,约占省总面积的40%<sup>[12]</sup>。由于其独特的风化特性,花岗岩风化土易形成最大可达70 m厚的土层,其主要组成成分包括石英、钾长石、云母及泥质。这些成分决定了花岗岩风化土的水敏性和遇水软化、崩解的特点<sup>[13-14]</sup>。

植物根系固土作用的研究已涉及含水率、密度、根系形态等方面<sup>[15-18]</sup>,其中不乏草本植物方面的研究,但针对枯萎根的固土作用研究仍较为匮乏。鉴于此,本文拟通过室内应变控制式直剪仪进行试验,以香根草-花岗岩风化土组成的根-土复合体为研究对象,通过直剪方式研究活根与枯萎根的抗剪强度、黏聚力和内摩擦角与根系直径、含水率等因素关系,为植物根系固土护坡机理研究提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

(1) 花岗岩风化土。试验所用的土壤为花岗岩风化土,取自广东省梅州市五华县,地理位置为23°23′50″N, 115°26′49″E,地貌类型主要为山地和丘陵。为减少腐殖质对试验的影响,选择在挖掘机挖开的半山处取试验土。测定土样的基本物理性质见表1,土样粒径级配见图1。

表1 土样基本物理性质参数  
Table 1 Basic physical properties of soil samples

天然含水率/%	天然干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	液限/%	塑限/%	最大干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	最优含水率/%
24.72	1.285	37.51	30.62	1.533	20.3

(2) 香根草。购入的香根草带有大部分泥土,每丛香根草用一个盆种植,放在室内使用植物灯每天照射12 h并定时浇水。使用活根时提前一天将香根草连盆一起放入水池浸泡,第二天将香根草根系上

的泥土冲洗干净。

枯萎根的制作:考虑到香根草耐旱耐寒能力高,广东寒冷气候极少且雨水充沛,一般情况下不会死亡。为使获得的枯萎根尽可能完整,将活香根

草放入水池中,加水至完全淹没根系部分后浸泡一天,第二天将粘在根系上的泥土用水冲洗干净后晾干至没有水滴落状态,在室内阴凉通风环境下放置 90 d 后使用。

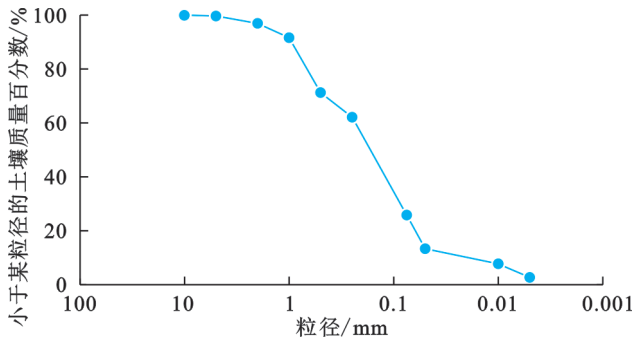


图 1 土样粒径级配曲线图

Fig. 1 Particle size distribution curve of soil samples

在制作枯萎根过程中随机挑取 4 丛生状况良好的香根草进行记录,每丛香根草选取 9~11 个根系,使用记号笔在根系上做好标记,每隔 7 d 使用数显卡尺进行测量。记录时共选定 40 个根系,其中 1

个根系在后续的测量过程中因操作不当导致断裂,实际可用数据为 39 个。

试验时按照试验要求选取根段较直无弯曲、表面无损伤的根系,将根毛去除,用游标卡尺每隔 1 cm 测量一次根系直径后取平均值,误差±0.05 mm 内即可使用。

1.2 试验方案

使用南京土壤仪器厂生产的 ZJ 型应变控制式直剪仪进行试验,试验研究因素见表 2,布根方式为间隔 1 cm,按正方形放置 4 个根在试样中央。由于本次试验中直径为 0.5~2 mm 的根系数量最多,将根系直径 0.5~2 mm 的根系以 0.5 mm 为一级,分为四级。试验方法依据中国土工试验方法标准(GB/T50123-2019)进行。考虑到天然状态下土体发生位移时速率较快,因此本试验采用不固结不排水(UU)快剪试验。其中,15% 含水率对应的工况为未发生降雨,表层土体处于天然含水率状态;30% 含水率对应的工况为降雨强度较大,表层土体处于饱和含水率状态。

表 2 试验研究因素

Table 2 Experimental factors

根系直径/mm	根系状态	土壤密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	剪切速率/(mm·s <sup>-1</sup> )	垂直载荷/kPa	含水率/%
0.5	素土(无根)	1.533	1.2	50	15
1				100	20
1.5	活根			150	25
2	枯萎根			200	30

1.3 试样制作

首先,按照预定密度和含水率称取所需质量的土壤和水,将其搅拌均匀,搅拌完成后使用密封袋装好,放置在保湿缸一晚使其水分均匀;其次,称取好所需土的质量,先放环刀再垫一张滤纸,将土倒入环刀压样器后再放入一张滤纸,随后进行压样,压样时先不完全压制完成,如图 2A 所示留 3 mm 左右高度;

再次,取出试样,掀开上层滤纸,用尺子找到试样中心,间隔 10 mm,按正方形用铁签在 4 个角垂直穿入,取出铁签时注意不要带出土壤如图 2B 所示,将准备好的根放入铁签穿出的孔中如图 2C 所示;最后垫上滤纸,将含根的试样放入环刀压样器压制尺寸为 61.8 mm×20 mm 的标准试样,如图 2D、2E 所示。制作的样本量为 56 组,共 224 个试样,每组重复 2 次。

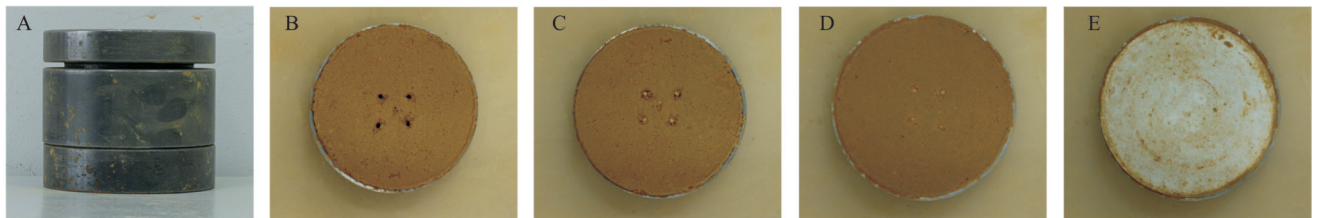


图 2 试样制作过程

Fig. 2 Preparation process of specimens

1.4 抗剪强度确定

剪切应力和剪切位移使用数采软件记录,根据试验结果以剪应力为纵坐标,剪切位移为横坐标,剪应力与剪切位移曲线图,选取曲线图上的峰值点或稳定值作为抗剪强度,当无明显峰值点时,取剪切位移为 4 mm 时所对应剪应力为抗剪强度。内摩擦角

和黏聚力根据下面的摩尔·库伦公式推求。

$$\tau = \sigma_n \tan \varphi + c \tag{1}$$

式中:τ为土体的抗剪强度(kPa);σ<sub>n</sub>为法向应力(kPa);φ(°)为土体的内摩擦角;c为土的黏聚力(kPa)。

根系的黏聚力(c<sub>r</sub>)按照下面公式推求。

$$c_r = c - c_s \tag{2}$$

式中: $c_r$ 为根系的黏聚力(kPa); $c_s$ 为素土的黏聚力(kPa)。

## 2 结果与分析

### 2.1 根系枯萎过程中直径随时间的变化

将每丛香根草上做了标记的根记录后取平均值,绘制根系直径与时间关系图,如图3所示。在香根草枯萎过程中,根系因为丧失水分导致其直径收缩,四丛香根草根系枯萎收缩过程的曲线趋势相似,根系直径在第7天下降程度最剧烈,其次为第14天,在28 d后根系直径变化较小,趋于平稳。第56天的香根草根系直径与第0天相比,根系直径减少了10.4%~15.8%,第56天后的香根草根系直径不再发生变化。

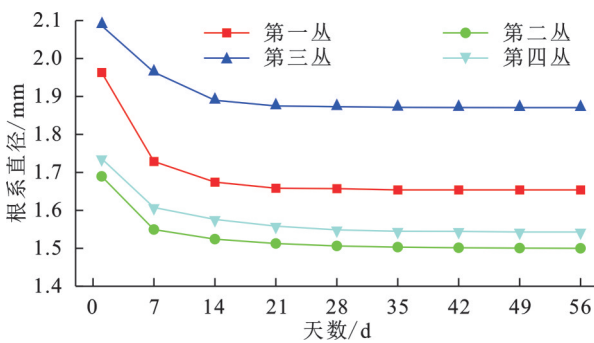


图3 根系直径与天数的关系曲线

Fig. 3 Relationship curves between root diameter and number of days

### 2.2 不同含水率下试样的抗剪强度

不同垂直载荷下试样的抗剪强度如图4所示,土壤含水率为15%时活根试样与枯萎根试样的抗剪强

度差值不大,差值最大为200 kPa垂直载荷下直径2 mm的根系,枯萎根-土复合体试样的抗剪强度比活根-土复合体试样高5.51 kPa;土壤含水率为20%时,100 kPa和200 kPa垂直载荷下活根-土复合体试样的抗剪强度明显大于枯萎根,差值最大为22.39 kPa;土壤含水率为25%时,枯萎根-土复合体试样的抗剪强度与素土试样的抗剪强度很接近,而活根-土复合体试样仍有明显的抗剪力。土壤含水率为30%时,50 kPa和100 kPa垂直载荷下枯萎根-土复合体试样的抗剪强度与素土试样无异,垂直载荷为150 kPa和200 kPa时部分枯萎根-土复合体试样的抗剪强度略比活根-土复合体试样高,差值最大的为直径2 mm的带根土试样,枯萎根-土复合体试样的抗剪强度比活根-土复合体试样高5.99 kPa。

因本次设置15%含水率对应的工况为未发生降雨,表层土体处于天然含水率状态,30%含水率对应的工况为降雨强度较大,表层土体基本处于饱和含水率状态,15%含水率图中可知四级垂直载荷下,带根土试样的抗剪强度均远比素土高;含水率为30%时,垂直载荷较小的50 kPa、100 kPa条件下活根-土复合体试样的抗剪强度明显优于枯萎根-土复合体试样,随着垂直载荷增大,活根-土复合体试样的抗剪强度与素土试样的抗剪强度差值越来越小,枯萎根-土复合体试样在较低垂直载荷下的抗剪强度与素土试样很相近。

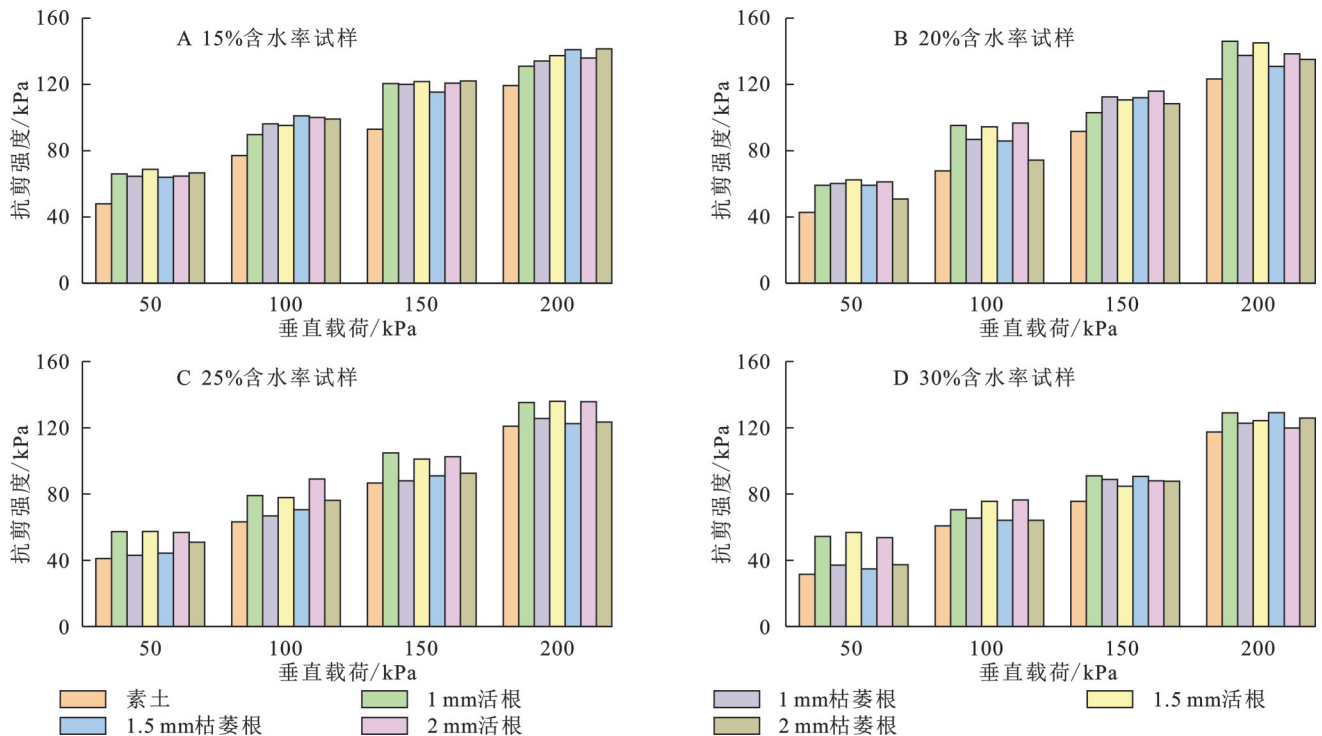


图4 不同垂直载荷下试样的抗剪强度

Fig. 4 Shear strength of specimens under different vertical loads

试样的抗剪强度特征如表 3 所示, 四级垂直载荷下活根-土复合体试样平均抗剪强度比枯萎根-土复合体试样的高, 垂直载荷为 100 kPa 时两者平均抗剪强度差异最显著, 垂直载荷为 150 kPa 和 200 kPa 时平均抗剪强度差异较小。三级直径下两种试样的平均抗剪强度差异不大, 但活根-土复合体试样的平均抗剪强度仍比枯萎根-土复合体试样的高。

**2.3 根-土复合体的黏聚力**

由图 5 可知, 根系直径相同情况下, 随着含水率上升, 试样的黏聚力整体呈下降趋势, 四级含水率下根-土复合体试样的黏聚力有显著差异, 这与骆丕昭<sup>[19]</sup>、郑晓岚<sup>[20]</sup>、海龙<sup>[21]</sup>等的结论一致, 枯萎根-土复合体试样的黏聚力与活根-土复合体试样相比, 下降幅度最大, 在含水率为 30% 时枯萎根-土复合体试样的黏聚力与素土试样相近, 但在含水率为 15% 时与活根-土复合体试样相近。在含水率相同情况下大部分活根-土复合体试样的黏聚力大于枯萎根-土复合体试样, 随着含水率增加, 活根-土复合体试样与枯萎根-土复合体试样的黏聚力差值进一步增大。

**表 3 根-土复合体试样抗剪强度特征统计结果**  
**Table 3 Statistical results of shear strength characteristics of root-soil composite specimens**

垂直载荷	直径/mm	活根试样/kPa	枯萎根试样/kPa
50 kPa	1	59.155±4.90	51.148±13.27
	1.5	61.290±5.54	50.528±13.38
	2	59.035±4.75	51.383±11.95
100 kPa	1	83.620±11.02	78.845±15.16
	1.5	85.735±10.52	80.388±16.53
	2	90.534±10.53	78.425±14.74
150 kPa	1	104.828±12.15	102.295±16.41
	1.5	104.535±15.68	102.208±13.25
	2	106.773±14.76	102.675±15.66
200 kPa	1	135.306±7.59	129.983±6.98
	1.5	135.623±8.59	130.852±7.63
	2	132.470±8.52	131.44±8.34
总计	1	95.728±30.10	90.568±32.35
	1.5	96.796±29.65	90.994±32.57
	2	97.204±29.00	90.981±32.68

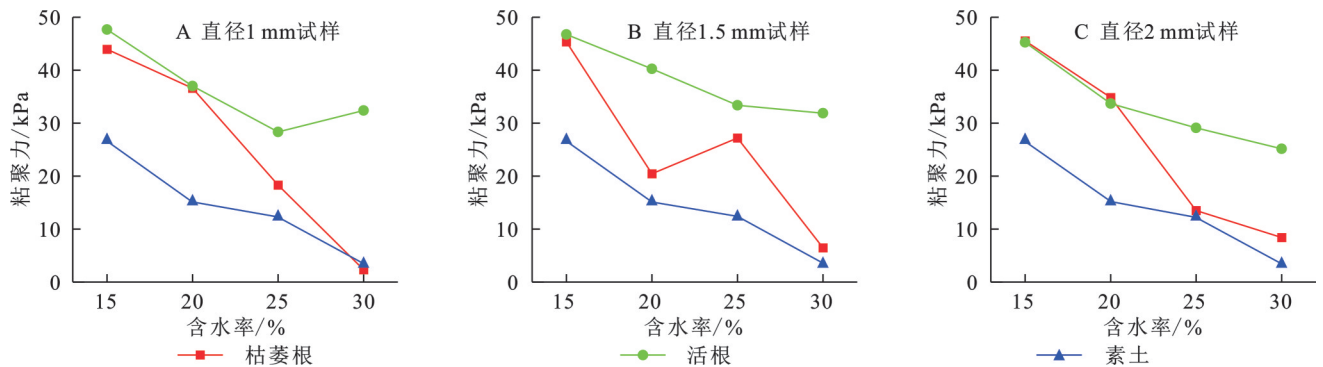


图 5 试样的含水率与黏聚力关系

Fig. 5 Relationship between moisture content and cohesion of specimens

含水率为 15% 时试样的黏聚力最高, 活根-土复合体试样与枯萎根-土复合体试样间的黏聚力差值很小, 根系直径 1 mm 试样、根系直径 1.5 mm 试样、根系直径 2 mm 试样的黏聚力差值分别为 0.285 kPa, 3.7 kPa, 1.385 kPa, 三级直径下枯萎根-土复合体试样的黏聚力均略低于活根-土复合体试样; 含水率为 20% 时, 根系直径 1 mm 和 1.5 mm 试样的黏聚力差值不大, 约为 1 kPa 左右, 但在根系直径 2 mm 时活根-土复合体试样与枯萎根-土复合体试样的黏聚力差值为 19.8 kPa, 差值为 1 倍; 含水率为 30% 时枯萎根-土复合体试样与活根-土复合体试样的黏聚力差值最大, 其中根系直径 1.5 mm 试样差值最大为 30.1 kPa, 约 14 倍。

除素土试样外, 土壤含水率与根系直径相同时视为一组试验, 一级根系直径为 4 组, 共 12 组试验, 由图 5 可知, 枯萎根-土复合体试样的黏聚力比活根-土复

合体试样高的试样仅有 2 个, 占总数的 16.67%。

活根-土复合体在四级含水率下仍有较高的黏聚力, 枯萎根-土复合体试样则随着含水率上升, 黏聚力大幅下降, 最后枯萎根-土复合体试样的黏聚力与素土无异。

**2.4 根-土复合体的内摩擦角**

由图 6 可知, 素土试样的内摩擦角随着含水率增加, 呈先上升后略微下降, 随后再上升趋势; 素土试样的内摩擦角在含水率为 20%, 25% 和 30% 时变化较小, 内摩擦角的最大与最小差值为 0.68°; 三级直径中活根-土复合体试样的内摩擦角随着含水率增加, 呈先上升后下降趋势; 直径 1 mm 和 1.5 mm 的枯萎根-土复合体试样的内摩擦角随着含水率增加呈上升趋势, 直径 2 mm 的枯萎根-土复合体试样的内摩擦角曲线波动较大; 枯萎根-土复合体试样的内摩擦角

波动范围最小为含水率 15% 的试样,为 1.15°,波动范围最大为含水率 25% 的试样,为 3.29°。

内摩擦角差值最大和差值最小的活根-土复合体与枯萎根-土复合体试样均为根系直径 1.5 mm 的试

样,其中含水率 30% 时差值最大,为 7.16°;含水率为 25% 时差值最小,为 0.28°。从整体来看含水率为 15% 与 30% 时试样的内摩擦角均有显著差异,含水率为 20% 与 25% 时试样的内摩擦角均差异较小。

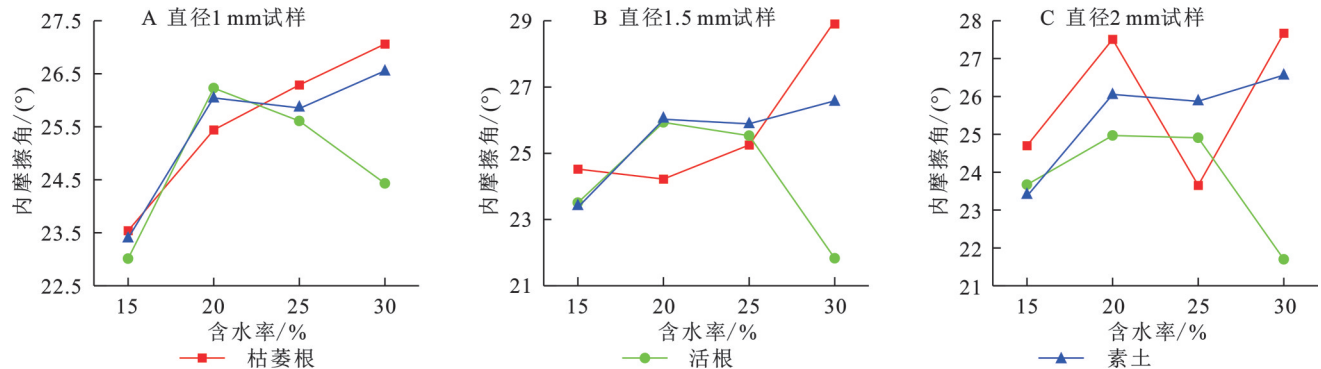


图 6 试样的含水率与内摩擦角关系

Fig. 6 Relationship between moisture content and internal friction angle of specimens

## 2.5 根系黏聚力特征

固定不同直径下根-土复合体的内摩擦角,根据公式(2)计算根系黏聚力,结果见图7。不同直径下根系黏聚力随含水率的变化趋势相似。随着含水率上升,活根的根系黏聚力变化不大,而枯萎根的根系黏聚力下降趋势明显。根系直径 1 mm 的根-土复合体,含水率为 15% 和 20% 时,活根的根系黏聚力比枯萎根的根系黏聚力分别大 0.285 kPa 和 1.155 kPa。随着含水率的进一步增加,枯萎根的根系黏聚力大幅下降,含水率为 25% 枯萎根的根系黏聚力最低,仅为 1.345 kPa;根系直径 1.5 mm,含水率为 20% 时活根和枯萎根的根系黏聚力差距最小,活根的根系黏聚力高于枯萎根的根系黏聚力 0.425 kPa,含水率为 30% 时

枯萎根的根系黏聚力为 -0.905 kPa,表明此时枯萎根的存在反而降低了土体强度;根系直径 2 mm,含水率为 15% 时两种根系的黏聚力差距最小,枯萎根的根系黏聚力低于活根的根系黏聚力 1.385 kPa。

在含水率较低时,活根与枯萎根的根系黏聚力差距较小,随着含水率增加,枯萎根的根系黏聚力大幅下降,含水率为 30% 时活根与枯萎根的根系黏聚力差距最大。在土壤含水率与根系直径相同时视为一组试验,一级根系直径为 4 组,共 12 组试验,枯萎黏聚力比活根高的试样仅有 2 个,占总数的 16.67%。从整体来看四级含水率下枯萎根的根系黏聚力均有显著差异,活根的黏聚力在含水率为 15%,20% 与 25% 时差异较小。

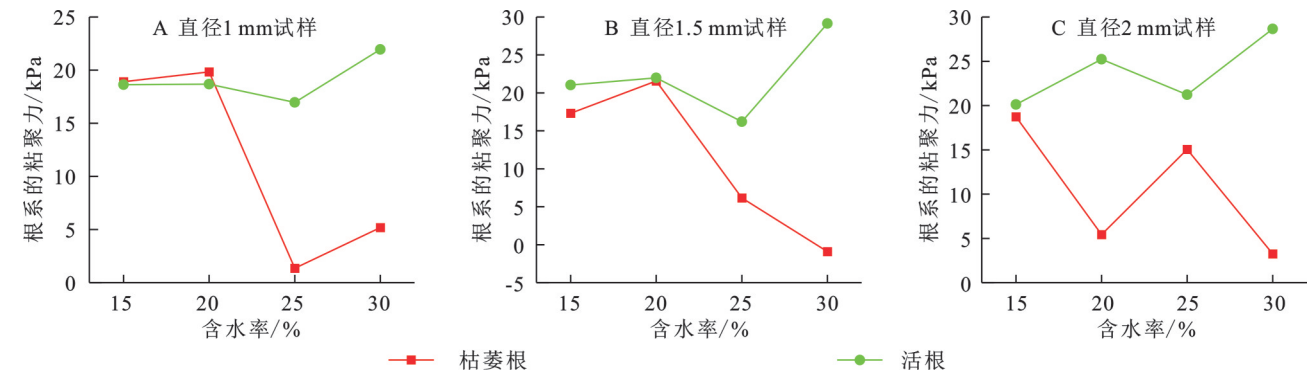


图 7 试样的含水率与根系黏聚力的关系

Fig. 7 Relationship between moisture content and root cohesion of specimens

## 3 讨论

在对根系进行拉伸强度测试的研究中,Lauris 等<sup>[22]</sup>发现,直径大于 1.5 mm 的枯萎根在抗拉强度方面优于活根。此外,刘亚斌<sup>[23]</sup>和张乔艳<sup>[24]</sup>等的研究表明,根系表面的微观结构特征对根土界面的摩擦强度有显著影响,根系表面凹凸度较大的情况下,摩

擦强度相对较高。观察发现(图 8),活根的颜色较亮,根系呈肿胀饱满状态,表面沟槽较少且根毛较多,弯折时具有一定弹性;而枯萎根的颜色较灰,表面坚硬且有许多细长的纵向沟槽,大部分须根已脱落。活根的横截面上可见细小根毛,网状层中充满水分和其他物质,根芯呈浅色圆形,各部分结合紧密;相比之下,枯萎根的横截面外层的根毛大部分已

经脱落,网状层中的水分和物质流失,仅留下网状结构,中间根芯内部有细小孔洞,呈椭圆形,根芯与网状层结合部分脱落。由于根系枯萎后表面沟槽较多,理论上在其他条件相同的情况下枯萎根的抗剪强度会比活根高,但由于根系内部水分和物质流失形成的空隙,土体剪切时根系内的空隙可能会像“安全气囊”提供缓解和降低抗剪强度的作用。若土体内含水率较高,则水分可能会软化枯萎根网状层部分,也会降低根系的抗剪强度。

在不同垂直载荷下的抗剪强度关系图中,部分枯萎根-土复合体试样的抗剪强度略高于活根-土复合体试样。这可能由于枯萎根在水分丧失后,保留了根系的组织结构,使其在土壤含水率较低(如 15%)时,仍能通过物理结合发挥一定的抗剪能力<sup>[25]</sup>;随着土壤含水率的增加,枯萎根内失去的水分被土壤中的水分填充,导致根系变软<sup>[5]</sup>,同时土颗粒之间的黏结作用减弱,从而降低了枯萎根的抗剪强度。在饱和含水率状态下,活根在浅层土体中仍表现出较强的固土作用,而枯萎根的固土作用则较为有限;在干燥条件下,

活根与枯萎根在固土作用上相当,均具有明显的加固效果。同时,试样的抗剪强度与垂直载荷基本呈线性关系,这与许桐<sup>[26]</sup>、郭欢<sup>[27]</sup>、储怡鑫<sup>[28]</sup>等的研究结论相同;同一垂直载荷下,随着含水率不断上升,试样的抗剪强度呈下降趋势,这与已有<sup>[18-21,29-30]</sup>的研究结论相同;四级含水率下素土的抗剪强度均为最低,枯萎根也对抗剪强度有贡献;枯萎根-土复合体试样的抗剪强度普遍低于活根-土复合体试样。

在较低垂直载荷(如 50 kPa 和 100 kPa)下,大多数枯萎根-土复合体试样的抗剪强度低于活根-土复合体试样。然而,在较高垂直载荷(如 150 kPa 和 200 kPa)和 30% 含水率条件下,部分枯萎根-土复合体试样的抗剪强度略高于活根-土复合体试样。根据图 8 的观察,垂直载荷较低时,土颗粒未能完全挤压枯萎根内部空隙,这些空隙在剪切过程中起到了缓冲作用。垂直载荷较高时,土颗粒完全挤压枯萎根,导致根系表面沟槽增多。结合 Lauris 等<sup>[24]</sup>的研究结论,即相同直径下枯萎根的抗拉强度大于活根,可以推测在这种压力下,枯萎根的抗剪强度高于表面圆滑的活根。

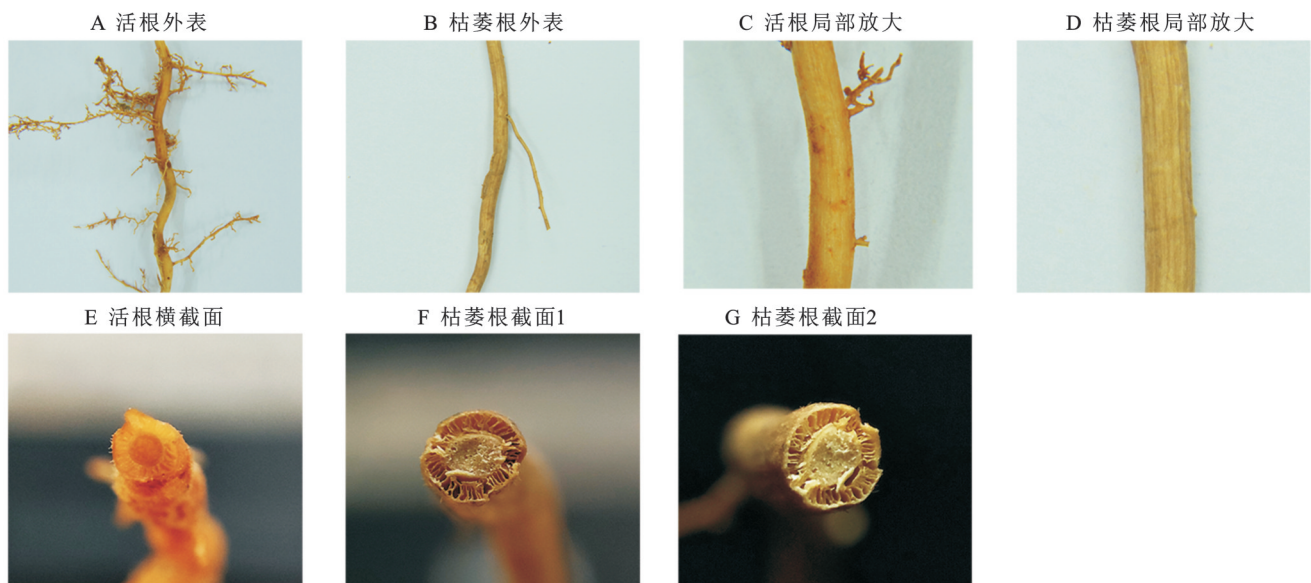


图 8 活根与枯萎根根系

Fig. 8 Root systems of living and withered roots

## 4 结论

(1) 素土试样的抗剪强度最低,而枯萎根虽然对抗剪强度有一定贡献,但不及活根。

(2) 在根系枯萎过程中,根径逐渐收缩。经过 90 d 的枯萎,根系的外观和结构与活根存在显著差异。

(3) 在土壤含水率较低时,植物根系的枯萎对土壤固结效果的影响较小。然而,随着含水率的增加,枯萎根的影响逐渐显现,其固土效果显著低于活根。

以上试验结果显示,香根草的根系枯萎对土壤

加固作用具有显著影响。在降雨导致边坡含水率较高的情况下,枯萎根的固土贡献明显低于活根,这可能会引发滑坡灾害。因此,在边坡工程管理与灾害防治中,应特别关注植物枯萎对边坡稳定性和滑坡风险的潜在影响。

### 参考文献(References):

- [1] Persson H Å, Stadenberg I. Fine root dynamics in a Norway spruce forest (*Picea abies* (L.) Karst) in eastern Sweden[J]. *Plant and Soil*, 2010, 330(1):329-344.
- [2] Yuan Z Y, Chen H Y H. Fine root dynamics with stand

- development in the boreal forest[J]. *Functional Ecology*, 2012,26(4):991-998.
- [3] Picon-Cochard C, Pilon R, Revaillet S, et al. Use of near-infrared reflectance spectroscopy to predict the percentage of dead versus living grass roots[J]. *Plant and Soil*, 2009,317(1):309-320.
- [4] Ghestem M, Sidle R C, Stokes A. The influence of plant root systems on subsurface flow: implications for slope stability[J]. *Bioscience*, 2011,61(11):869-879.
- [5] Zhang D S, Dai Y, Wang L L, et al. Influence of living and dead roots of Gansu poplar on water infiltration and distribution in soil[J]. *Applied Sciences*, 2020,10(10):3593.
- [6] Yamase K, Todo C, Torii N, et al. Dynamics of soil reinforcement by roots in a regenerating coppice stand of *Quercus serrata* and effects on slope stability[J]. *Ecological Engineering*, 2021,162:106169.
- [7] Johnson A C, Wilcock P. Association between cedar decline and hillslope stability in mountainous regions of southeast Alaska[J]. *Geomorphology*, 2002,46(1/2):129-142.
- [8] Makkonen K, Helmisaari H S. Assessing fine-root biomass and production in a Scots pine stand-comparison of soil core and root ingrowth core methods[J]. *Plant and Soil*, 1999,210(1):43-50.
- [9] Guo D L, Li H, Mitchell R J, et al. Fine root heterogeneity by branch order: exploring the discrepancy in root turnover estimates between minirhizotron and carbon isotopic methods[J]. *New Phytologist*, 2008,177(2):443-456.
- [10] Preti F. Forest protection and protection forest: tree root degradation over hydrological shallow landslides triggering[J]. *Ecological Engineering*, 2013,61:633-645.
- [11] Imaizumi F, Sidle R C, Kamei R. Effects of forest harvesting on the occurrence of landslides and debris flows in steep terrain of central Japan[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2008,33(6):827-840.
- [12] 杨培星. 广东省花岗岩类岩石风化土的工程地质特征[J]. *人民珠江*, 1988,9(3):17-21.  
Yang P X. Weathering-soil's engineering geology speciality of granite rock in Guangdong[J]. *Renmin Zhujian*, 1988,9(3):17-21.
- [13] 颜波, 汤连生, 胡辉, 等. 花岗岩风化土崩岗破坏机理分析[J]. *水文地质工程地质*, 2009,36(6):68-71, 84.  
Yan B, Tang L S, Hu H, et al. The mechanism of disintegration damage of granite weathered soil[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2009,36(6):68-71, 84.
- [14] 周援衡, 王永和, 卿启湘, 等. 全风化花岗岩改良土路基的长期稳定性试验研究[J]. *岩土力学*, 2011,32(S1):596-602.  
Zhou Y H, Wang Y H, Qing Q X, et al. Experimental study on long-term stability of fully weathered granite improved soil subgrade[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011,32(S1):596-602.
- [15] Ng C W W, Kamchoom V, Leung A K. Centrifuge modelling of the effects of root geometry on transpiration-induced suction and stability of vegetated slopes[J]. *Landslides*, 2016,13(5):925-938.
- [16] Liang T, Knappett J A, Bengough A G, et al. Small-scale modelling of plant root systems using 3D printing, with applications to investigate the role of vegetation on earthquake-induced landslides[J]. *Landslides*, 2017,14(5):1747-1765.
- [17] 格日乐, 刘艳琦, 左志严, 等. 土壤水分对植物根-土界面相互作用特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2018,32(1):135-140.  
Ge R L, Liu Y Q, Zuo Z Y, et al. Effect of soil moisture on the characteristics of root-soil interface interaction[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018,32(1):135-140.
- [18] 王涵, 周成, 刘伟, 等. 植物根系倾角对土体抗剪强度影响试验研究[J]. *工程科学与技术*, 2017,49(S1):81-88.  
Wang H, Zhou C, Liu W, et al. Experimental study on the influence of plant root inclination angle on soil shear strength[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017,49(S1):81-88.
- [19] 骆丕昭, 王云琦, 李通, 等. 基于三轴 UU 试验的土体含水率对根土复合体强度特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2023,37(6):153-160.  
Luo P Z, Wang Y Q, Li T, et al. Effect of soil moisture content on strength characteristics of root-soil complex based on triaxial UU test[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023,37(6):153-160.
- [20] 郑晓岚, 鲍玉海, 贺秀斌, 等. 周期性淹水对水库消落带根土复合体抗剪性能的影响[J]. *水土保持学报*, 2023,37(5):111-120.  
Zheng X L, Bao Y H, He X B, et al. Effects of periodic flooding on shear resistance of root-soil composite in the water-level fluctuation zone[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023,37(5):111-120.
- [21] 海龙, 谭世林, 徐博. 紫花苜蓿和通奶草根土复合体的力学特性[J]. *水土保持通报*, 2023,43(6):57-64.  
Hai L, Tan S L, Xu B. Mechanical properties of *Medicago sativa* and *Euphorbia hypericifolia* root-soil complex[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(6):57-64.
- [22] Hollis L O, Turner R E. The tensile root strength of five emergent coastal macrophytes[J]. *Aquatic Botany*, 2018,146:39-47.
- [23] 刘亚斌, 胡夏嵩, 余冬梅, 等. 西宁盆地黄土区 2 种灌木植物根-土界面微观结构特征及摩擦特性试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018,37(5):1270-1280.  
Liu Y B, Hu X S, Yu D M, et al. Microstructural features and friction characteristics of the interface of shrub roots and soil in loess area of Xining Basin[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018,37

- (5):1270-1280.
- [24] 张乔艳,唐丽霞,冉洁,等.多花木蓝和双荚决明根-土界面摩擦特性[J].长江科学院院报,2023,40(1):161-164,175.  
Zhang Q Y, Tang L X, Ran J, et al. Frictional characteristics of root-soil interface of *Indigofera amblyantha* and *Cassia bicapsularis*[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023,40(1):161-164,175.
- [25] Wang B, Zhang G H. Quantifying the binding and bonding effects of plant roots on soil detachment by overland flow in 10 typical grasslands on the Loess Plateau[J]. Soil Science Society of America Journal, 2017,81(6):1567-1576.
- [26] 许桐,刘昌义,胡夏嵩,等.柴达木盆地4种盐生植物根系力学特性及根-土复合体抗剪强度研究[J].水土保持研究,2021,28(3):101-110.  
Xu T, Liu C Y, Hu X S, et al. Study on the mechanical properties of roots and the shear strengths of four halophytic plants in Qaidam Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(3):101-110.
- [27] 郭欢,唐丽霞,戴全厚,等.土壤粒径对灌木植物根-土摩擦特性影响[J].水土保持学报,2021,35(6):83-87,94.  
Guo H, Tang L X, Dai Q H, et al. Effect of soil particle size on root-soil friction characteristics of shrub plants [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(6):83-87,94.
- [28] 储怡鑫,薛凯喜,冯国建,等.昆明市3种草本植物根系及茎秆的力学特性试验研究[J].森林工程,2022,38(1):15-26.  
Chu Y X, Xue K X, Feng G J, et al. Experimental study on mechanical properties of roots and stems of three herbaceous plants in Kunming [J]. Forest Engineering, 2022,38(1):15-26.
- [29] 毛正君,耿咪咪,毕银丽,等.紫花苜蓿-黄土复合体抗剪强度时间效应研究[J].煤炭科学技术,2023,51(11):234-247.  
Mao Z J, Geng M M, Bi Y L, et al. Study on the time effect of shear strength of alfalfa-loess composite [J]. Coal Science and Technology, 2023,51(11):234-247.
- [30] 王余靖,周利军,王云琦,等.直剪试验中土体含水率对根系失效方式的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(2):43-51.  
Wang Y J, Zhou L J, Wang Y Q, et al. Effect of soil moisture content on root failure mode in direct shear test [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021,19(2):43-51.

(上接第 371 页)

- [26] 冯景华,马国强,李婧,等.基于人口密度与布局适宜性的农村居民点整理策略:以甘肃省华亭市为例[J].土壤通报,2022,53(4):768-776.  
Feng J H, Ma G Q, Li J, et al. Strategies of rural settlement consolidation based on population density and adaptability of layout: a case of Huating, Gansu Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022,53(4):768-776.
- [27] 张岚岚,孙建伟,邓玲玲,等.基于“三生”空间的岩溶山地农村居民点发展势能测度:以撒拉溪镇为例[J].安徽农业科学,2024,52(23):192-196.  
Zhang L L, Sun J W, Deng L L, et al. Measurement of the development potential energy of rural settlements in karst mountainous areas based on the “three lives” space: a case study of salaxi town[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2024,52(23):192-196.
- [28] 杨宇豪,乔家君,王卫雯,等.乡村振兴背景下村庄分类与发展策略研究:以河南省封丘县3个乡镇为例[J].地域研究与开发,2024,43(4):154-160.  
Yang Y H, Qiao J J, Wang W W, et al. Research on village classification and development strategies in the context of rural revitalization: a case study of three townships in Fengqiu County, Henan Province [J]. Areal Research and Development, 2024,43(4):154-160.

(上接第 382 页)

- [25] Wei H J, Zheng J X, Xue D, et al. Identifying the relationship between livelihoods and land ecosystem services using a coupled model: a case study in the “one river and two tributaries” region of Tibet [J]. Land, 2022,11(9):1377.
- [26] Zhang X B, Du H C, Feng H Y, et al. Spatial and temporal variations in the coupled relationship between ecosystem services and human well-being in Gansu Province Counties and the factors affecting them[J]. Sustainability, 2024,16(13):5816.
- [27] 梁秀琴,冯强,段宝玲.晋西黄土高原矿区生态系统服务与居民福祉空间耦合特征[J].水土保持通报,2022,42(6):400-408.  
Liang X Q, Feng Q, Duan B L. Spatial coupling characteristics of ecosystem services and residents' well-being at mining area of Loess Plateau in western Shanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(6):400-408.
- [28] Cao H, Zhu Q C, Bai H, et al. Analysis of coupled coordination and driving factors of urbanization, ecosystem services, and human well-being in the high and coarse sediment yield in the middle Yellow River [J]. Land, 2025,14(1):100.