

周期性淹水对水库消落带根土复合体抗剪性能的影响

郑晓岚^{1,2,3}, 鲍玉海¹, 贺秀斌¹, 谢航宇^{1,2}, 王英培⁴

(1.中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所,山地表生过程与生态调控重点实验室,成都 610299;
2.中国科学院大学,北京 100049;3.重庆大足工业园区管理委员会,重庆 402368;4.重庆市大足区农业农村委员会,重庆 402360)

摘要: 为了探究三峡水库消落带根土复合体抗剪性能的影响机制,以狗牙根根土复合体为研究对象,利用三轴试验,定量分析含水率、干湿交替次数以及含根量对根土复合体抗剪性能的影响。结果表明:(1)随着干湿交替次数和含水率的增加,土壤抗剪性能逐渐劣化,含水率 13% 的根土复合体抗剪强度依次比含水率 18%、含水率 23% 的土壤抗剪强度提高 0.12%~14.76%,12.47%~21.14%;经历干湿交替 6 次与 3 次的根土复合体抗剪强度比经历 1 次的降低 6.31%~14.71%与 2.41%~8.19%。(2)根系含量能显著影响土壤抗剪性能,含根量为 1.5 mg/cm³ 的土壤抗剪强度比含根量为 0.5 mg/cm³ 的土壤抗剪强度提高 0.86%~21.10%,内摩擦角增长 0.09%~16.31%,黏聚力增长 2.27%~30.55%。(3)含水率是影响土壤抗剪性能最主要的因素,对抗剪强度的贡献程度排序上为含水率(61.30%)>干湿交替次数(21.17%)>含根量(8.28%)。研究结果为消落带固土护岸的物种筛选、群落构建、水土保持生态建设、生态系统重建以及水库岸线管理等提供科学依据。

关键词: 根土复合体; 土壤抗剪性能; 干湿交替; 水库消落带

中图分类号: X171.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)05-0111-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.05.014

Effects of Periodic Flooding on Shear Resistance of Root-Soil Composite in the Water-level Fluctuation Zone

ZHENG Xiaolan^{1,2,3}, BAO Yuhai¹, HE Xiubin¹, XIE Hangyu^{1,2}, WANG Yingpei⁴

(1.Key Laboratory of Mountain Supergene Processes and Ecological Regulation,

Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Science, Chengdu 610299;

2.University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049; 3.Management Committee of Chongqing Dazu

Industrial Park, Chongqing 402368; 4.Agriculture and Rural Committee of Chongqing Dazu District, Chongqing 402360)

Abstract: In order to explore the impact mechanism of the shear resistance of root-soil composite in the Three Gorges Reservoir's water-level fluctuation zone, this study took root-soil composite of *Cynodon dactylon* as the research object, and used the triaxial test to quantitatively analyze the influence of water content, dry-wet alternate times and root content on the shear resistance of root-soil composite. The results showed that: (1) With the increasing of dry-wet alternate times and water content, the soil shear resistance gradually deteriorated. The shear resistance of the root-soil composite with 13% water content was 0.12%~14.76% and 12.47%~21.14% higher than that of the soil with 18% water content and 23% water content, respectively. The shear resistance of the root-soil composite subjected to 6 and 3 cycles of dry-wet alternation was 6.31%~14.71% and 2.41%~8.19% lower than that subjected to one cycle of dry-wet alternation. (2) Root content could significantly affect the soil shear resistance, and the soil shear resistance with root content of 1.5 mg/cm³ was 0.86%~21.10% higher than that with root content of 0.5 mg/cm³. The internal friction angle increased by 0.09%~16.31%, and the cohesion increased by 2.27%~30.55%. (3) Water content was the dominant factor affecting the soil shear strength. The order of contribution to the shear resistance was water content (61.30%) > dry-wet alternate times (21.17%) > root content (8.28%). This

收稿日期: 2023-02-02

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(41977075); 国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目(U2040207); 四川省科技计划重点研发项目(2022YFS0471)

第一作者: 郑晓岚(1997—), 女, 重庆奉节人, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: 842597583@qq.com

通信作者: 鲍玉海(1981—), 男, 山东武城人, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: byh@imde.ac.cn

study provided scientific reference for species screening, community construction, ecological construction of soil and water conservation, ecosystem reconstruction, and reservoir management in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir.

Keywords: root-soil composite; soil shear resistance; dry-wet alternation; water-level fluctuation zone

土壤抗剪强度作为表征土体力学性质与评价抗侵蚀性的重要指标,与土壤侵蚀过程紧密相关^[1-2],受到土壤理化性质^[3-5]、植物根系^[6]、干湿交替^[7]等多种因素影响。国内外研究^[8-9]表明,土壤含水率和干密度的交互作用对黏聚力的影响大于内摩擦角,土壤黏聚力随含水率的增加先增大后减小,随干密度的增大而增大,而内摩擦角随含水率增加而明显减小,含水率对抗剪强度的影响大于对干密度的影响。此外,干湿交替循环对土壤抗剪性能具有较大影响^[10],抗剪强度随着干湿循环次数的增加而不断下降,首次干湿循环下土壤抗剪强度的差异比反复干湿循环下土壤抗剪强度的差异更显著,且后者在剪切过程中具有更低的延展性和更高的刚度。根系含量与土壤抗剪强度呈正比^[11],当根系含量增多时,根系加筋作用增强,有效制约土体变形,增强土体稳定性与抗剪性能;同时,根系能增加根土界面的摩擦力,根系含量越多,增强效果越明显,当根土界面的摩擦力增加时,土体中的剪应力部分转化为根系内的拉应力,使土体中所受的剪应力减小,根土相互作用明显,土壤抗剪强度及其参数得到提高^[12]。

水库消落带受库水位周期性涨落影响,土体长期处于干湿循环变化中,土壤经历饱和—失水—再饱和的交替过程,这种交替变化过程导致土壤物理结构、化学组分和力学特性显著变化,造成库岸土体发生变形,最终增加库岸边坡安全的不确定性^[13-14]。目前,关于消落带特殊淹水环境对土壤抗剪性能的影响研究多集中于探究干湿交替循环过程中,如库岸边坡土体尤其是滑带土体理化性质、微观结构、力学特性的改变^[13,15]等,但定量表达干湿交替次数、土壤含水率等因子对根土复合体抗剪性能的影响研究较少。因此,本研究以三峡水库消落带狗牙根根土复合体为研究对象,利用重塑土进行室内模拟试验,定量分析含水率和干湿交替次数,以及含根量对根土复合体抗剪性能的影响,结合方差分析进行主效应分析,明晰以上因子对根土复合体抗剪性能的贡献率,揭示周期性淹水过程中消落带根土复合体抗剪性能的演变机制,以期三峡水库消落带水土保持措施优化和土壤抗侵蚀能力提升提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于三峡水库忠县石宝镇库段消落带

(107°32′—108°14′E, 30°03′—30°35′N),该区域属于暖湿亚热带东南季风区,雨热同期,四季分明,降雨多集中在 6—8 月,年均降水量为 1 150 mm,年平均气温 19.2 °C^[16]。区域内出露岩层为第四纪残积土层及侏罗系中统沙溪庙组砂泥岩,区内土壤为中性紫色土,在中国土壤系统分类中属于正常新成土,养分含量丰富,但易侵蚀。淹水前土地利用方式主要有旱地、水田和林地,现存阶地较为广泛^[17]。消落带优势物种为 1 年生的农田杂草(如狗尾草、苍耳)和耐水淹的多年生草本(如狗牙根、双穗雀稗、扁穗牛鞭草)^[18]。

1.2 样地布设与采样

狗牙根是目前消落带上自然恢复最好、覆盖最广泛和最具代表性的主要草本植物,因此植被覆盖类型选取狗牙根覆盖度 90% 以上的草地。2021 年 8 月在三峡水库忠县石宝镇共和村库段海拔 165 m 处(坡度 5°~8°),布设 3 块典型草本狗牙根样地,土壤类型选取三峡库区分布最广泛的紫色土,样地盖度为 93%,利用 1 m×1 m 的样方调查方法对观测样地的狗牙根高度、盖度等进行记录观测。每个样地选 3 个重复样方,去除地上植株和上覆泥沙后按 0—10, 10—20 cm 分层取样,在每个采样点采集 10 kg 散土后进行混合,挑去其中的石块和粗根等杂物,自然风干后进行研磨、过筛等前处理,同时利用完全挖掘法在典型样地采取完整狗牙根根系若干用于重塑土配制。

1.3 试验方法与指标测定

选用南京智龙科技开发有限公司生产的 TSZ-1 型全自动三轴试验仪进行三轴不固结不排水试验(UU 试验),每组试验包括 3 个围压,分别为 100, 200, 300 kPa。利用专用橡皮膜将土样套住后放入三轴试验仪中,并在土样内上下放置不透水石,利用橡皮圈将两端分别与底座和试样帽扎紧,用外罩使活塞与试样中心对准,打开顶部排气孔螺丝并拧紧外罩后开始注入纯水,观察顶部有水溢出时停止注水,拧紧排气孔,检查无漏水情况后在电脑上设置试验参数,剪切速率控制为 0.8 mm/min,轴向应变每 0.2 mm 记录 1 次,观察实际压力值与设定围压值,当轴向应变为 18% 时结束剪切过程。试样在 3 个围压下测试完成后,以主应力差为纵坐标,轴向应变为横坐标,绘制应力—应变曲线,取曲线上的峰值主应力差作为试样在相应围压下的抗剪强度,若无峰值,则取轴向应变量为 15% 时的主应力差作为破坏强度。以破坏时

的主应力差为纵坐标,围压为横坐标,在横坐标轴上以破坏时的 $(\sigma_{1f} + \sigma_{3f})/2$ 为圆心, $(\sigma_{1f} - \sigma_{3f})/2$ 为半径,在应力平面上绘制莫尔应力圆,在同一坐标系中绘制同组试样在其他围压下的莫尔应力圆,绘出 3 个不同围压下莫尔应力圆的包线即为库仑强度线。

根据消落带土壤天然质量含水率(6.2%~17.8%)和干密度(1.29~1.74 g/cm³),以及土样饱和状态下的质量含水率(30.7%),将干密度设置为 1.5 g/cm³,干湿循环设置为 3 个幅度(13%~31%,18%~31%,23%~31%)。根据目标含水率计算所需风干土样,利用小型喷水壶将计算出的需水量均匀喷洒在土样表面,将盛土容器用保鲜膜封住,密封静置 8 h,然后放入恒温 40 °C 的烘箱中脱湿,每 1 h 称取 1 次试件的质量,当待脱湿土样质量接近设定含水率点时,每 5 min 称取 1 次土样质量,直到土样质量与目标含水率土样质量之差在 1% 以内时停止脱湿,此为干燥过程;随后采用喷壶喷水,喷水的过程中不断称量土样质量,直到土样质量与含水率为 31% 土样质量之差在 1% 以内时停止增湿,将试件用保鲜膜进行完全密封,密封静置 8 h,此为增湿过程,而 1 次干燥过程加 1 次增湿过程即为 1 次干湿交替循环。由于土体的孔隙结构和力学参数变化在 3 次循环后趋于稳定^[19],因此将干湿交替循环次数设置为 1,3,6 次,含根量为 0.5,1.5 mg/cm³ 2 个水平。重塑土在环刀中进行制作,将 0.50~1.00 mm 径级的狗牙根进行分类,每个土样包含 0.5~0.7,0.7~0.9,0.9~1.00 mm 3 种径级的根系,将鲜根质量之和为预定含根量的若干根系分为 1 组,每次试验前先称量鲜根重,待试验结束后,对根系清洗、烘干并分别测定含根量。制作土样时将配制好的扰动土分成 3 等份,第 1 份土装入环刀后将根系均匀、垂直插入土中,对土样进行击实直至土层厚度达到环刀高度的 1/3 处,然后依次装入剩下土样并击实。本次试验共涉及 3 个含水率水平、3 种干湿交替幅度、2 个含根量水平下的交互试验,每组试样分别施加 100,200,300 kPa 的围压,每次试验重复 3 次,共 162 组试验,试验结果取平均值。

1.4 影响因素分析

采用方差分析(ANOVA)对干湿交替次数、含水率、含根量进行因子主效应分析和显著性检验,根据显著性水平,统计评估各因子与抗剪强度、内摩擦角和黏聚力之间的关系,方差分析的结果可估算不同因子的贡献率,每个因子 ρ_F 的贡献百分比计算公式为^[20-22]:

$$\rho_F = \frac{SS_F - (DF \cdot V_{Er})}{SS_T} \times 100\% \quad (1)$$

式中:DF 为每个因子的自由度,是通过从每个因子的水平数中减去 1 而得到的;SS_F 表示各因子平方

的阶乘和,计算方法为:

$$SS_F = \frac{mn}{L} \sum_{k=1}^L (\bar{Y}_k^F - \bar{Y}_T)^2 \quad (2)$$

式中: \bar{Y}_k^F 为某一因素在第 k 级上的测量结果的平均值, \bar{Y}_T 值计算公式为

$$\bar{Y}_T = \frac{\sum_{j=1}^m (\sum_{i=1}^n Y_{ij})}{mn} \quad (3)$$

式中:m 为本研究中进行的试验次数;n 为相同试验条件下的重复次数。此外,误差的方差(V_{Er})为:

$$V_{Er} = \frac{SS_T - \sum_{F=A}^D SS_F}{m(n-1)} \quad (4)$$

SS_T 为总平方和,计算公式为:

$$SS_T = \sum_{j=1}^m (\sum_{i=1}^n Y_{ij}^2) - mn(\bar{Y}_T)^2 \quad (5)$$

F 值是 F 检验的统计量,即组间和组内的离差平方和与自由度的比值,在方差分析的体系中,F 值越大,说明组间方差是主要方差来源,F 值越大的因子其产生的影响越显著;F 值越小,说明随机方差是主要的方差来源,对应的因子产生的影响越不显著。因此,可以结合 F 值和贡献率来确定因子对土壤抗剪性能的影响程度大小,本次研究中 F 值以置信区间 99.0% 为选取依据。

2 结果与分析

2.1 土壤含水率变化对土壤抗剪性能的影响

2.1.1 不同土壤含水率的土壤抗剪强度 土壤抗剪强度与含水率呈负相关(图 1),各含水率水平上土壤抗剪强度大小依次为 13% > 18% > 23%,抗剪强度随含水率的增加而逐渐减小。在各干湿交替次数和含根量水平下,含水率 13% 的土壤抗剪强度在 100,200,300 kPa 3 个围压下分别比含水率 18% 的土壤抗剪强度提高 1.67%~14.76%,0.12%~9.42%,7.74%~14.64%;比含水率 23% 的土壤抗剪强度分别提高 12.47%~14.37%,13.53%~20.91%,16.57%~21.14%。

2.1.2 不同土壤含水率的土壤抗剪强度参数 根土复合体在不同含水率的内摩擦角(φ)与黏聚力(c)结果见图 2。由图 2 可知,当干湿交替次数一定时,内摩擦角和黏聚力在 3 个含水率下的大小依次为 13% > 18% > 23%,即抗剪强度参数随着含水率的增加而减小。当土壤含水率为 13% 时,内摩擦角依次比含水率为 18% 和含水率为 23% 的内摩擦角分别增大 14.15%~24.73%,35.89%~51.71%。含水率为 13% 时的土壤黏聚力依次比含水率为 18% 和含水率为 23% 的黏聚力分别增大 7.12%~12.98%,15.92%~47.97%。内摩擦角变化幅度大于黏聚力,即含水率对内摩擦角的影响更为显著。

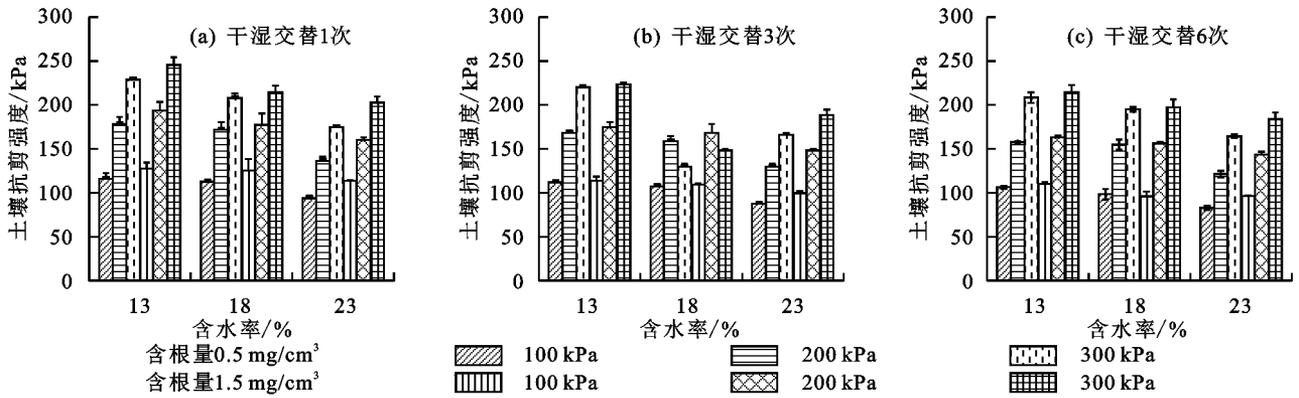


图 1 土壤抗剪强度随含水率的变化特征

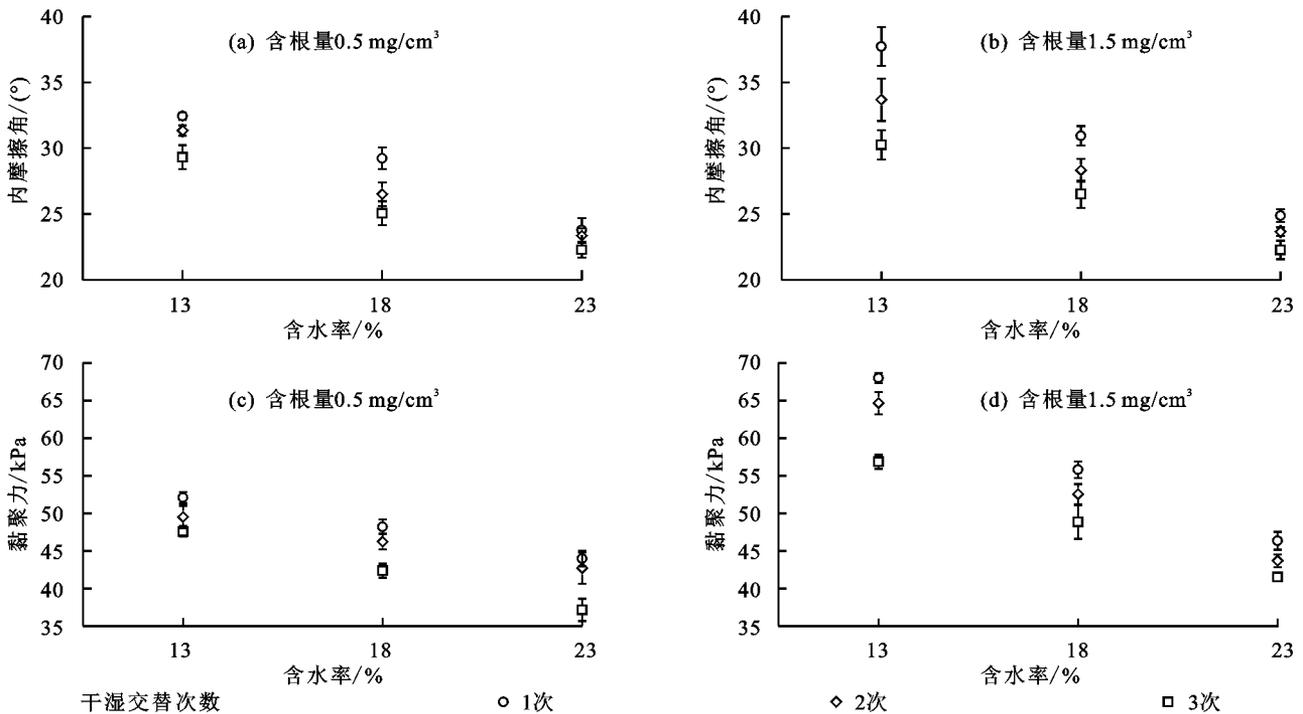


图 2 土壤抗剪强度参数随含水率的变化特征

2.1.3 不同土壤含水率的土壤应力—应变特性 随着含水率的增加,土壤应力值变小(图 3)。100 kPa 围压下,当根系含量为 0.5 mg/cm³时,不同含水率的最大应力值依次为含水率 13%(418.9 kPa)>含水率 18%(394.1 kPa)>含水率 23%(329 kPa),含水率 13%的最大应力值依次比含水率 18%和含水率 23%的最大应力值分别增长 6.29%,27.33%;200 kPa 围压下,依次增长 28.57%,62.47%;300 kPa 围压下,依次分别增长16.14%,77.40%。根系含量为 1.5 mg/cm³的根土复合体在不同含水率下,其应力—应变关系同样符合以上规律,100 kPa 围压下,含水率 13%的最大应力值(535.9 kPa)依次比含水率 18%(477.5 kPa)和含水率 23%(385.2 kPa)的最大应力值分别增长 12.23%,39.12%;200 kPa 围压下,依次分别增长 9.17%,26.77%;300 kPa 围压下,依次增长 15.52%,22.86%。

2.2 含根量对根土复合体抗剪性能的影响

2.2.1 不同含根量土壤抗剪强度 土壤抗剪强度在

不同含根量水平下差异显著(图 4),但均表现为随着含根量的增大而增大。含水率为 13%时,含根量为 1.5 mg/cm³的土壤抗剪强度在 100,200,300 kPa 3 个围压下分别比含根量 0.5 mg/cm³提高 13.42%~21.10%,14.55%~18.44%,11.89%~16.07%;含水率为 18%时,分别提高 1.55%~10.20%,3.48%~8.55%,1.51%~7.36%;含水率为 23%时,分别提高 1.93%~11.17%,0.86%~5.90%,1.13%~3.06%。

2.2.2 不同含根量土壤抗剪强度参数变化 含根量 1.5 mg/cm³的内摩擦角均大于含根量 0.5 mg/cm³的内摩擦角(图 5),其中当含水率为 13%时,经历 1,3,6 次干湿交替后含根量为 1.5 mg/cm³土体的内摩擦角分别比含根量 0.5 mg/cm³增大 16.31%,7.47%,3.21%;当含水率为 18%时,含根量 1.5 mg/cm³土体的内摩擦角分别比含根量 0.5 mg/cm³的内摩擦角增大 5.89%,6.87%,5.79%;当含水率为 23%时,含根量 1.5 mg/cm³的土体内摩擦角分别比含根量

0.5 mg/cm³的内摩擦角增大 4.63%,1.28%,0.09%。 0.5 mg/cm³ 的差异随含水率和干湿交替次数增加整体来看,内摩擦角在含根量 1.5 mg/cm³与含根量 而减小。

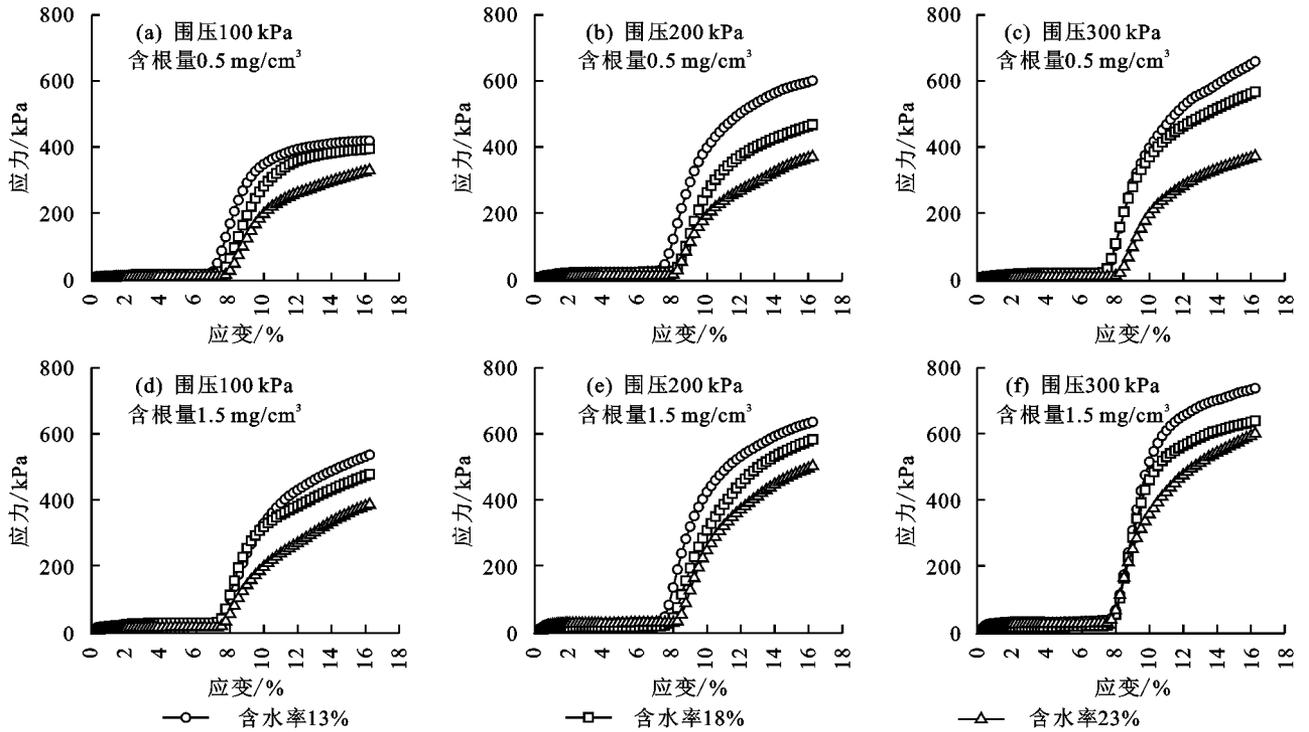


图 3 各含水率下土壤应力—应变关系

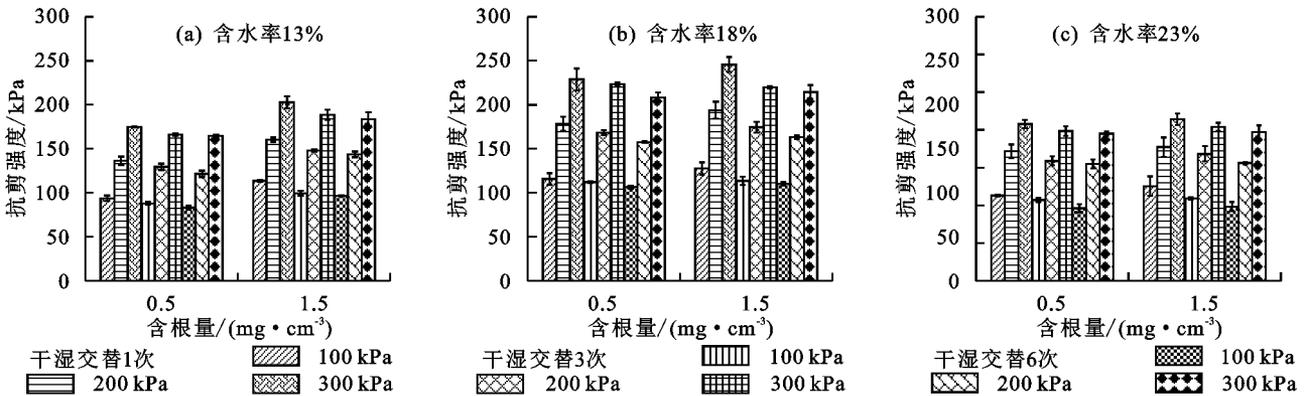


图 4 干湿循环下土壤抗剪强度随含根量的变化特征

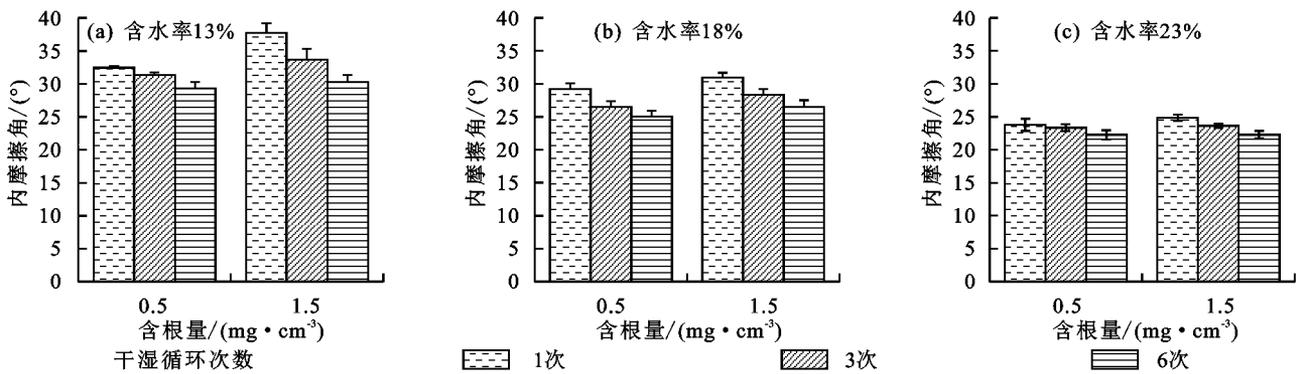


图 5 干湿循环下不同含根量的土壤内摩擦角变化特征

不同含根量土壤黏聚力的变化规律见图 6。含根量 1.5 mg/cm³的土壤黏聚力大于含根量 0.5 mg/cm³的土壤黏聚力。当含水率为 13%时,含根量 1.5 mg/cm³的黏聚力对含根量 0.5 mg/cm³的增长幅度为 19.48%~30.55%;当含水率为 18%时,增长幅度为

13.71%~15.72%;当含水率为 23%时,增长幅度为 2.27%~11.76%。整体来看,土壤黏聚力在 2 个含根量水平下的差异随着含水率和干湿交替次数的增加而逐渐减小。

2.2.3 不同含根量土壤应力—应变特性 经历干湿

交替循环的根土复合体在不同含根量下的应力—应变特性见图 7。其中含根量为 0.5 mg/cm³ 的土壤最大应力值范围为 453.3~658.5 kPa, 含根量为 1.5 mg/cm³ 的最大应力值范围为 477.5~863.3 kPa。在

100, 200, 300 kPa 3 个围压下, 含根量为 1.5 mg/cm³ 的最大应力值分别比含根量为 0.5 mg/cm³ 提高 5.34%~31.10%, 5.87%~37.62%, 15.84%~36.45%。随着围压增加, 根系增加效益越明显。

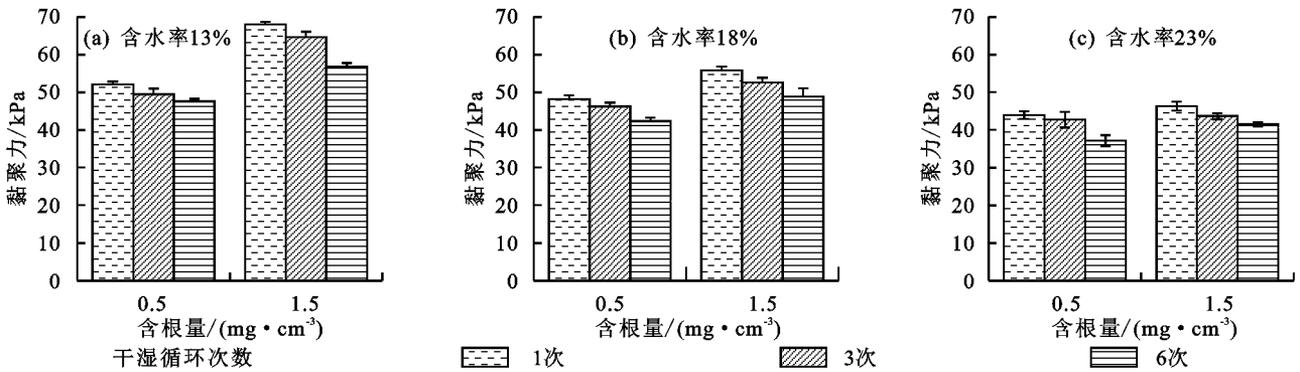


图 6 干湿循环下不同含根量的土壤黏聚力变化特征

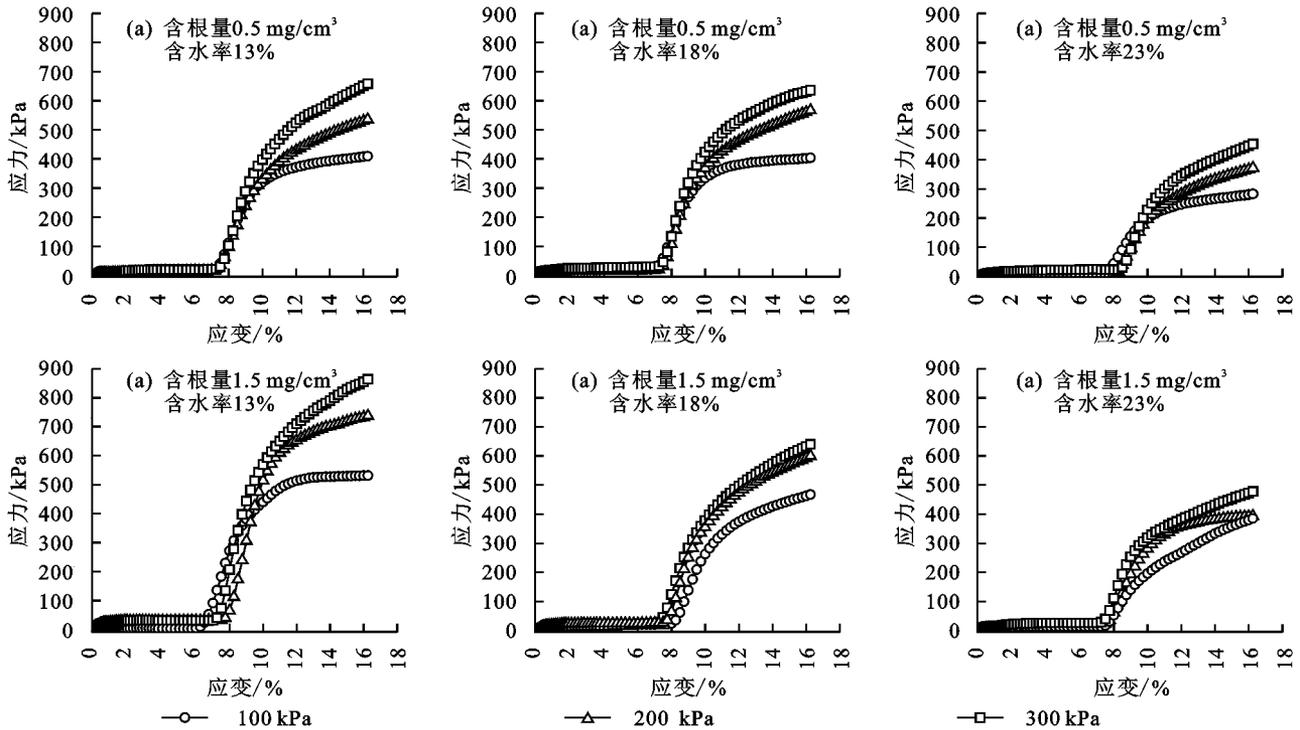


图 7 干湿循环下不同含根量的土壤应力—应变关系

2.3 干湿循环次数对土壤抗剪性能的影响

2.3.1 不同干湿交替次数下土壤抗剪强度 不同干湿交替次数下土壤抗剪强度有所差异, 土壤抗剪强度与干湿交替次数呈负相关(图 8), 在各含水率和含根量水平下, 经历干湿交替 1 次的土壤抗剪强度在 100, 200, 300 kPa 3 个围压下分别比干湿交替 3 次的土壤抗剪强度提高 3.49%~6.81%, 2.41%~8.19%, 2.45%~5.18%; 比干湿交替 6 次的土壤抗剪强度分别提高 8.81%~14.71%, 11.00%~13.27%, 6.31%~9.79%。

2.3.2 不同干湿交替次数下土壤抗剪强度参数 不同干湿交替次数下的土壤内摩擦角(φ)与黏聚力(c)结果见图 9。内摩擦角与干湿交替次数呈负相关, 随着干湿交替次数的增加, 土壤内摩擦角逐渐减小,

干湿交替 1 次循环后的内摩擦角分别比交替 3 次、交替 6 次提高 5.16%~13.08%, 11.70%~24.73%。黏聚力变化与干湿交替次数呈负相关, 随着循环次数的增加而逐渐减小, 干湿交替 1 次循环后的黏聚力分别比交替 3 次、交替 6 次后的黏聚力提高 6.09%~12.10%, 11.58%~23.93%。内摩擦角的变化幅度大于黏聚力, 内摩擦角对含水率和干湿交替次数的变化响应更为敏感。

2.4 土壤抗剪性能影响因素综合分析

通过对试验数据进行方差分析, 计算不同因子对土壤抗剪强度、黏聚力和内摩擦角的贡献率(表 1)。根据方差结果可知, 干湿交替次数、含水率、含根量对土壤抗剪强度、黏聚力、内摩擦角均有显著影响($p <$

0.01)。结合 F 值和贡献率整体来看,3 个指标对抗剪强度的贡献程度排序上为含水率(61.297%)>干湿交替次数(21.165%)>含根量(8.284%);对黏聚力的贡献程度依次为含水率(76.399%)>干湿交替次数(13.297%)>含根量(3.475%);对内摩擦的贡献程度依

次为含水率(51.740%)>含根量(23.146%)>干湿交替次数(10.906%)。结果表明,含水率是影响土壤抗剪性能最主要的因素,且对于黏聚力的贡献比>抗剪强度>内摩擦角;根系对土壤抗剪性能的作用随着干湿交替次数和含水率的增加受到弱化。

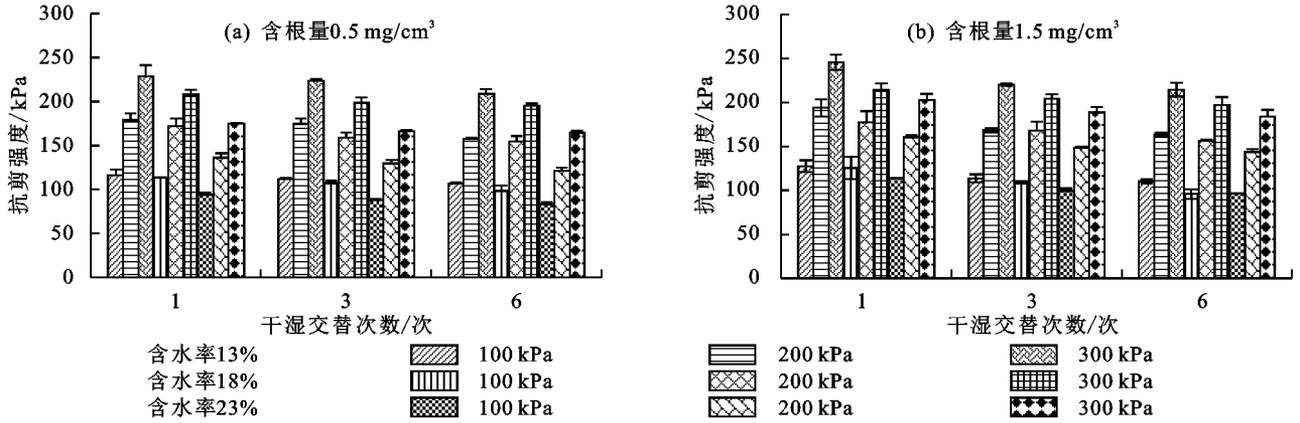


图 8 土壤抗剪强度随干湿交替次数的变化特征

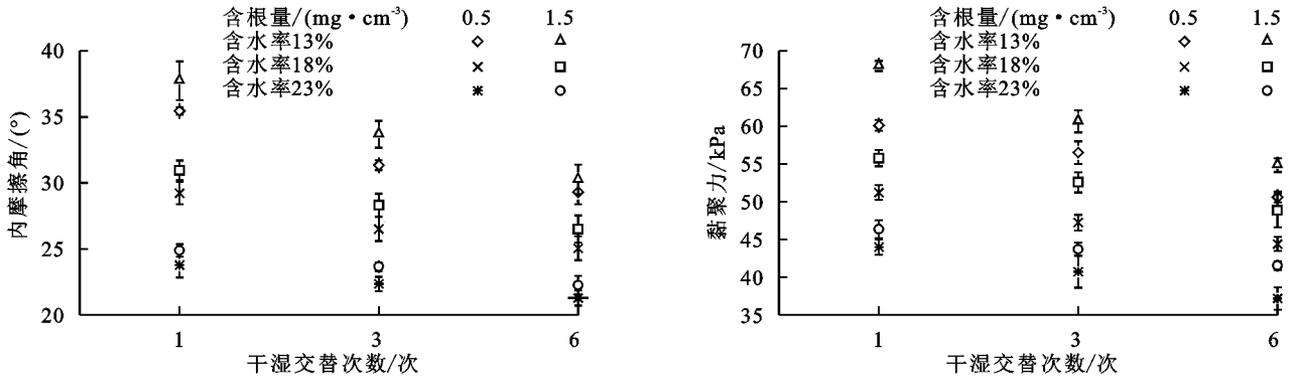


图 9 土壤抗剪强度参数随干湿交替次数的变化特征

表 1 基于方差分析的各因子对土壤抗剪强度、黏聚力和内摩擦角的显著性及贡献率

因变量	因子	SS_F	DF	V_{Er}	P	F	$\rho_F/\%$
抗剪强度	干湿交替次数	779.782	2	389.891	0**	389.891	21.165
	含水率	2185.993	2	1092.997	0**	1092.997	61.297
	含根量	309.341	1	309.341	0.002**	309.341	8.284
	误差	228.891	12	19.074		19.074	9.254
	SS_T	3504.009					
黏聚力	干湿交替次数	13970.118	2	22.672	0.008**	22.672	13.297
	含水率	45.343	2	124.127	0**	124.127	76.399
	含根量	248.254	1	12.467	0**	12.467	3.475
	误差	12.467	12	1.292		1.292	6.830
	SS_T	321.562					
内摩擦角	干湿交替次数	136.283	2	68.142	0**	68.142	10.906
	含水率	578.719	2	289.360	0**	289.360	51.740
	含根量	259.844	1	259.844	0.009**	259.844	23.146
	误差	108.666	12	9.056		9.056	14.209
	SS_T	1083.513					

注: ** 表示因子对因变量在 $p < 0.01$ 水平上有显著影响。

对干湿交替次数、含水率、含根量与抗剪性能参数分别进行多元线性回归分析,可得到 3 个回归拟合方程:

$$\begin{aligned} \tau f &= 165.172 - 7.98x_1 - 13.334x_2 + 8.291x_3, \\ R^2 &= 0.915, p < 0 \\ \varphi &= 38.344 - 1.943x_1 - 4.547x_2 + 1.664x_3, \end{aligned} \quad (6)$$

$$R^2 = 0.951, p < 0 \quad (7)$$

$$c = 58.494 - 3.336x_1 - 6.938x_2 + 7.599x_3,$$

$$R^2 = 0.896, p < 0 \quad (8)$$

式中： τ_f 为土壤抗剪强度(kPa)； φ 为内摩擦角(°)； c 为黏聚力(kPa)；而 x_1 、 x_2 、 x_3 分别为干湿交替次数(次)、含水率(%)、含根量(mg/cm³)。

回归分析结果表明，干湿交替次数、含水率均与土壤抗剪强度、黏聚力、内摩擦角呈负相关，含根量与土壤抗剪强度、黏聚力、内摩擦角呈正相关。本次试验结果与以往研究结论一致，随着干湿交替次数和含水率的增加，土壤结构被破坏，土壤抗剪性能劣化；而根系对土体具有加筋作用和锚固作用，随着含根量的增加，根系固土效应更加显著。

3 讨论

20 世纪 30 年代，“干湿交替”概念被首次提出，主要用于植物生长发育调控，后于 1985 年由 Birch^[23] 将其发展到土壤研究中。有研究^[24] 发现，干湿循环对土壤理化性质具有显著影响，由于天然饱水—失水过程使得土体裂纹、裂隙反复张开闭合，不断发育，导致土样由密实状态转为内部裂纹发育的松散状态，土体结构由致密的斑块状结构逐渐变成散乱的絮凝状结构，土体颗粒也由原先大小差异明显的颗粒逐渐变成均匀细小的碎屑颗粒。其中，土壤容重随着颗粒间的内聚力增强而增大^[25]，而团聚体孔隙结构在干湿交替下发生收缩和膨胀，团聚体粒径改变，从而影响团聚体形成发育过程以及结构稳定性^[26-27]。土壤中有机质的分解过程、氮元素的矿化以及磷元素的吸附—解析等过程在一定程度上都受到干湿交替作用的影响。干湿交替影响土壤微生物活性，改变土壤碳素的周转速率，扰动土壤呼吸模式；土体中 SiO₂、Al₂O₃、Na₂O 等化学组分含量在干湿交替过程中不断增多，而 CaO、MgO 和 H₂O 的含量则不同程度地减少^[13,25]。除此以外，干湿交替对土壤抗冲性、抗剪性和抗崩解性等土壤抗侵蚀性能都有一定影响。本研究结果表明，经历干湿交替次数越多，土体抗剪强度越小，土壤结构发生累计损坏，造成土壤抗剪强度劣化，且抗剪强度随含水率的增加而逐渐减小；同时，内摩擦角和黏聚力随着含水率及干湿交替循环次数的增加而减小，结合野外实测数据来看，淹水环境下的抗剪强度及其参数均小于未淹水环境，消落带库水位大幅度反复升降变化，特殊的水文节律使得消落带紫色土经历“疲劳作用”^[28]，即在库水周期性涨落下库岸土壤经历周期性高压淹水与高幅度干湿交替作用，库水位上升阶段，水位上升速率大于水分子渗入岩体和发生水化学反应的速率，水—岩作用主要表现对岩体的物理和力学作用，水分子通

过土壤裂隙渗入土体内部，在渗入过程中，孔隙水压增加，裂隙结构面上的有效应力减小，同时水分子的润滑和软化作用减小土粒间的摩擦系数，降低岩体黏聚力，进而导致边坡失稳。从短期效应来看，库岸边坡向不稳定方向发展；从长期效应来看，土体力学参数发生劣化^[15,29]。以往研究^[10] 也得出，干湿交替循环对土壤抗剪特性具有较大影响，首次干湿循环下土壤抗剪强度的差异比反复干湿循环下土壤抗剪强度的差异更显著，且后者在剪切过程中具有更低的延展性及更高的刚度。反复干湿循环对应力—应变曲线没有明显影响，但对土体抗剪强度的劣化具有明显效果，其劣化程度与土体的初始干密度和初始含水率有关，相同干湿循环次数下，抗剪强度与初始干密度正相关，而初始含水率对经历干湿循环后的土体抗剪特性影响较小。干湿交替循环对黏聚力的影响程度大于对内摩擦角的影响程度，随着干湿循环次数的增加，黏聚力劣化程度逐渐减小并趋于一个稳定值，而干湿循环对内摩擦角的影响较小。因此，边坡稳定性降低通常是黏聚力劣化的结果^[30]。对于不同类型的土体，干湿交替对土体力学性能的作用机制和影响程度不同，对于砂质岩体，干湿交替下土壤孔隙、裂隙等微观结构发生聚集、扩展等变化，造成土体抗压强度、凝聚力和内摩擦角均逐渐劣化，且劣化程度随着循环次数的增多而加深，这一变化过程中水—岩理化、力学作用起着重要作用^[31]。而在干湿交替下黏性土的黏聚力随着土壤含水率的增大表现出先增大后减小再趋于平稳的趋势，且土壤含水率与土壤抗剪强度指标还存在一定数量关系，由于土体安全系数与黏聚力值正相关，当土体经历干湿循环情况时土体安全系数值变化大，土体稳定性较弱^[32]。

本研究结果与以往研究^[33] 结论一致，即含水率与干湿交替过程对紫色土抗剪性能影响显著，在一定含水率范围内，含水率对紫色土强度和刚度有显著影响，土壤的抗剪强度主要受内摩擦角影响，抗剪强度随含水率的增加而急剧降低，而黏聚力随含水率的增加呈增大趋势。同时干湿交替下土体经历不同的库水压力荷载，在蓄水初期，由于孔隙水压力的突然增大，原库水位线以下岩体的抗剪强度经历先降低到一个较小值，然后随水压力的耗散和有效应力的增大再逐渐恢复，且长期浸泡使得土壤被库水溶蚀、冲刷带走大量细小颗粒，导致紫色土黏粒和胶体物质迁移，颗粒组成发生变化^[34-35]。土壤孔隙被压缩固结，由于不可逆的范德华力的作用，黏粒含量和比表面积减小，孔隙率增大，渗透性增强，加之黏粒和胶体物质迁移等，都可能导致土壤抗剪强度降低，从而改变水库消落带土壤的抗侵蚀能力和整体稳定性^[36]。

含根量显著影响土壤抗剪强度，以往研究^[37] 表明，

陆生环境中含根量越多的根土复合体,其土壤稳定性越高,但在三峡水库消落带特殊淹水环境下,根系特性发生明显变化,植物可通过形成肥大的皮孔、产生不定根、增强树干基部、增大细胞间隙、形成气生根或膝根等裂生性通气组织来扩大地上部分与地下部分的空气传导,从而缓解因淹水缺氧所造成的胁迫影响^[38-39]。当水淹过后根系短期内能恢复生长,并表现出很强的恢复生长能力,快速产生叶片,总叶片数的相对生长速率显著提高,相对于未经历水陆生境变化的植株,经历干湿环境交替变化的植株根系其恢复时间较短,能快速完成萌芽、展叶、生长过程,培养健壮的根系,并延长根系以吸收到大量的养分和水分以维持地上部分的快速生长,植物生长方式从而得到优化^[40]。通过根系加筋作用,土粒间的黏聚强度以及根土间的摩擦强度得到有效提高^[41],但除此因素外,根系提高土壤抗剪强度还与根系本身特性及其根系加筋作用有关,为探究此问题,有关学者对根土复合体中根系形态特征、根系类型、布根方式等因素进行定量研究,其中李建兴等^[42]对不同护坡草本植物根系特征进行定量分析指出,草本植物根系形态特征显著影响土壤内摩擦角和黏聚力,且根径 ≤ 5 mm的根系根长密度和根表面积密度可作为评价土壤抗剪性能的重要参数;陈终达等^[43]探究根系直径和根系分布方式对土壤抗剪强度的影响研究发现,不同根系分布方式下根系对土壤抗剪性能的增强效应具有差异,垂直和斜交等量布根时抗剪强度最高,且当有效根径为1 mm时,土壤抗剪强度达到最大值。国外学者^[44-45]对根系形态特征和生理参数分析发现,根系对土壤抗剪强度的提高有显著的促进作用,随着根长密度、根表面积密度等形态特征值的提高,土壤黏聚力和内摩擦角迅速增加,且根系形态特征对于土壤黏聚力的影响大于对内摩擦角的影响。但根系对土壤抗剪性能的增强效应是否受淹水环境的影响,本研究还未进行深入探讨,目前国外研究学者^[46-47]针对根系增强效应进行大量研究,普遍采用 Wu-Waldron 模型用于量化由于根的存在而增加的土壤剪切强度,但针对于三峡库区消落带的根系增强模型的研究较少,今后在探讨三峡消落带土壤侵蚀问题上可以在此方面开展研究。

4 结论

(1)干湿循环下土壤含水率、干湿交替次数及含根量均对根土复合体抗剪性能产生显著影响。土壤抗剪强度及其参数与土壤含水率、干湿交替次数均呈负相关,含水率13%的土壤抗剪强度分别比含水率18%和含水率23%的土壤抗剪强度提高0.12%~14.76%,12.47%~21.14%;经历干湿交替1次的土壤抗剪强度比干湿交替3次的土壤抗剪强度提高2.41%~8.19%;比干湿交替6次的土壤抗剪强度提高6.31%~

14.71%。内摩擦角比黏聚力对土壤含水率和干湿交替次数的变化响应更为敏感。

(2)土壤抗剪强度及其参数与含根量呈正相关,含根量为 1.5 mg/cm^3 的土壤抗剪强度比含根量为 0.5 mg/cm^3 的土壤抗剪强度提高0.86%~21.10%,内摩擦角增长0.09%~16.31%,黏聚力增长2.27%~30.55%。根系含量对黏聚力的影响大于内摩擦角,土壤内摩擦角与黏聚力在不同含根量水平下的差异随着含水率和干湿交替次数的增加而逐渐减小。

(3)结合 F 值和贡献率来看,土壤含水率是影响土壤抗剪性能最主要的因素,对抗剪强度和黏聚力贡献程度表现为含水率 $>$ 干湿交替次数 $>$ 含根量;对内摩擦角的贡献程度表现为含水率 $>$ 含根量 $>$ 干湿交替次数。干湿交替次数、含水率均与土壤抗剪强度、黏聚力、内摩擦角呈负相关,含根量与土壤抗剪强度、黏聚力、内摩擦角呈正相关。

参考文献:

- [1] 肖培青,姚文艺,王国庆,等.植被作用下土壤抗剪强度和径流侵蚀力的耦合效应[J].水科学进展,2016,27(2):224-230.
- [2] 左小锋,王磊,郑粉莉,等.冻融循环和土壤性质对东北黑土抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2020,34(2):30-35,42.
- [3] 陈晨,杨苑君,陈奇伯,等.典型石漠化区土壤理化性质对其抗剪性能的影响[J].西部林业科学,2020,49(2):91-98.
- [4] 申紫雁,刘昌义,胡夏嵩,等.黄河源区高寒草地不同深度土壤理化性质与抗剪强度关系研究[J].干旱区研究,2021,38(2):392-401.
- [5] Kokusho T, Hara T, Hiraoka R. Undrained shear strength of granular soils with different particle gradations[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2004,130(6):621-629.
- [6] 周霞,魏杨,李东嵘,等.黄土区紫花苜蓿根系对土体抗剪性能的影响[J].中国水土保持科学,2019,17(2):53-59.
- [7] 倪九派,高明,魏朝富,等.干湿循环条件下重庆地区三种土壤抗剪强度的动态变化[J].土壤学报,2013,50(6):1090-1101.
- [8] 倪九派,高明,魏朝富,等.土壤含水率对浅层滑坡体不同层次土壤抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2009,23(6):48-50.
- [9] Hossne G, Américo J, Mayorga J, et al. Savanna soil water content effect on its shear strength-compaction relationship[J].Revista Científica Udo Agrícola,2013,12:324-337.
- [10] Goh S, Rahardjo H, Leong E. Shear strength of unsaturated soils under multiple drying-wetting cycles[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2014,140:11-15.
- [11] 廖博,刘建平,周花玉.含根量对秋枫根-土复合体抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2021,35(3):104-

- 110,118.
- [12] 刘定辉,李勇.植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J].水土保持学报,2003,17(3):34-37,117.
- [13] 梁和成,单慧媚.天然饱水一失水对三峡库岸边坡土体的影响研究[J].岩土力学,2014,35(7):1837-1842,1848.
- [14] 江强强,刘路路,焦玉勇,等.干湿循环下滑带土强度特性与微观结构试验研究[J].岩土力学,2019,40(3):1005-1012,1022.
- [15] 邓华锋,李建林.库水位变化对库岸边坡变形稳定的影响机理研究[J].水利学报,2014,45(增刊2):45-51.
- [16] 徐文秀,鲍玉海,韦杰,等.水库消落带典型草本植物根系对土壤抗冲性能的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):65-71,109.
- [17] 徐文秀,杨玲,鲍玉海,等.大型水库消落带 2 种典型耐淹草本植物单根抗拉力学特性[J].水土保持研究,2020,27(5):259-264,272.
- [18] 王强,袁兴中,刘红,等.三峡水库初期蓄水对消落带植被及物种多样性的影响[J].自然资源学报,2011,26(10):1680-1693.
- [19] Tang C S, Cui Y J, Shi B, et al. Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting-drying cycles[J].Geoderma,2011,166(1):111-118.
- [20] Zhang F B, Wang Z L, Yang M Y. Assessing the applicability of the Taguchi design method to an interrill erosion study[J].Journal of Hydrology,2015,521:65-73.
- [21] Aber S, Salari D, Parsa M R. Employing the Taguchi method to obtain the optimum conditions of coagulation-flocculation process in tannery wastewater treatment [J]. Chemical Engineering Journal,2010,162(1):127-134.
- [22] Sadeghi S H, Moosavi V, Karami A, et al. Soil erosion assessment and prioritization of affecting factors at plot scale using the Taguchi method [J]. Journal of Hydrology,2012,448/449:174-180.
- [23] Birch H F. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability [J]. Plant and Soil, 1958,10(1):9-31.
- [24] 邓华锋,胡玉,李建林,等.循环荷载的频率和幅值对砂岩动力特性的影响[J].岩土力学,2017,38(12):3402-3409,3418.
- [25] 张素,熊东红,校亮,等.干湿交替对土壤性质影响的研究[J].土壤通报,2017,48(3):762-768.
- [26] Horn R, Taubner H, Wuttke M, et al. Soil physical properties related to soil structure[J].Soil and Tillage Research,1994,30(2/3/4):187-216.
- [27] Singer M J, Southard R J, Warrington D N, et al. Stability of synthetic sand-clay aggregates after wetting and drying cycles[J].Soil Science Society of America Journal,1992,56(6):1843-1848.
- [28] 王士天,刘汉超,张倬元,等.大型水域水岩相互作用及其环境效应研究[J].地质灾害与环境保护,1997,8(1):69-89.
- [29] 朱冬林,任光明,聂德新,等.库水位变化下对水库滑坡稳定性影响的预测[J].水文地质工程地质,2002,29(3):6-9.
- [30] 于靖涵.干湿循环条件下非饱和土强度劣化特征分析[D].辽宁 鞍山:辽宁科技大学,2020.
- [31] 邓华锋,李建林,朱敏,等.饱水一风干循环作用下砂岩强度劣化规律试验研究[J].岩土力学,2012,33(11):3306-3312.
- [32] 王军,宗全利,岳红艳,等.干湿交替对长江荆江段典型断面岸滩土体力学性能的影响[J].农业工程学报,2019,35(2):144-152.
- [33] 吕发友,鲍玉海,贺秀斌,等.三峡水库消落带淹水:落干交替下紫色土力学特性变化模拟[J].水土保持学报,2017,31(3):79-84.
- [34] 万勇,薛强,吴彦,等.干湿循环作用下压实黏土力学特性与微观机制研究[J].岩土力学,2015,36(10):2815-2824.
- [35] 李妍,彭义.干湿循环条件下紫色土抗剪强度与膨胀率研究[J].西南师范大学学报(自然科学版),2015,40(4):70-73.
- [36] 曹玲,罗先启.三峡库区千将坪滑坡滑带土干一湿循环条件下强度特性试验研究[J].岩土力学,2007,28(增刊1):93-97.
- [37] 徐宗恒,黄丽苹,杨正辉,等.不同根系含量对山原红壤抗剪强度的影响[J].水土保持通报,2019,39(5):54-59,66.
- [38] 靖元孝,陈兆平,程惠青,等.淹水时水翁幼苗光合特性与不定根的关系[J].热带亚热带植物学报,2000,8(4):361-364.
- [39] Kozłowski T T, Pallardy S G. Acclimation and adaptive responses of woody plants to environmental stresses[J].The Botanical Review,2002,68(2):270-334.
- [40] 裴顺祥,洪明,郭泉水,等.三峡库区消落带水淹结束后狗牙根的光合生理生态特性[J].生态学杂志,2014,33(12):3222-3229.
- [41] 程谅,占海歌,郭忠录.3 种草本植物根系对土壤抗蚀特性的响应[J].草业科学,2019,36(2):284-294.
- [42] 李建兴,何丙辉,湛芸,等.不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J].农业工程学报,2013,29(10):144-152.
- [43] 陈终达,肖宏彬,张春晓,等.根系分布方式对根-土复合体抗剪强度的影响[J].中南林业科技大学学报,2016,36(8):130-135.
- [44] Ali F H, Osman N. Shear strength of a soil containing vegetation roots [J]. Soils and Foundations, 2008, 48(4):587-596.
- [45] Hamidifar H, Keshavarzi A, Truong P. Enhancement of river bank shear strength parameters using Vetiver grass root system[J].Arabian Journal of Geosciences, 2018,11(20):e611.
- [46] Pollen N. Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strength and moisture[J].Catena,2007,69(3):197-205.
- [47] Docker B B, Hubble T C T. Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species[J].Geomorphology,2008,100(3/4):401-418.