

文章编号: 1674-9057(2017)03-0444-07

doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2017.03.008

# 三峡库岸红层土体饱水失水过程中 水土化学作用研究

彭三曦<sup>1,2b</sup>, 单慧媚<sup>2a,2c</sup>, 梁和成<sup>1</sup>, 蔡鹤生<sup>1</sup>, 李义连<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074; 2. 桂林理工大学 a. 广西环境污染控制理论与技术重点实验室; b. 地球科学学院; c. 岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林 541004;)

**摘要:** 三峡库区水位波动下, 岸坡广泛分布的红层土体长期处于“饱和-失水-再饱和”过程, 边坡稳定性受到显著影响, 其中复杂的水土化学作用被认为是引起土体结构和力学变化的关键因素。选取石榴树包滑坡红层土体为研究对象, 设计反复饱水-失水试验, 分析水、土化学成分和土体矿物组成变化特征, 结合热力学模拟, 揭示其反复饱水-失水过程中水土化学作用规律。结果发现: 饱水-失水过程显著影响库岸边坡水土化学作用, 饱水过程主要发生方解石矿物溶解, 该作用随着饱水-失水过程次数的增加而增强; 其次该过程发生阳离子交换, 以溶液中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  置换出红层土体中  $\text{Na}^{+}$ , 溶液中  $\text{K}^{+}$  置换出红层土体中  $\text{Mg}^{2+}$  反应为主, 其中  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{Na}^{+}$  的交换反应随饱水-失水过程次数的增加而减弱。

**关键词:** 红层土体; 饱水-失水过程; 热力学模拟; 水土化学作用

**中图分类号:** P641.3

**文献标志码:** A

## 0 引言

三峡库区广泛分布紫红、棕红、褐红色的陆相碎屑岩, 统称为“红层”, 具有特殊的工程性质, 遇水易崩解、软化(泥化)和膨胀<sup>[1-2]</sup>。三峡水利工程自2003年开始运行, 库区水位分期阶段式上升, 2006年后库水位在145~175 m周期性涨落, 库岸边坡红层土体反复处于“饱和-失水-再饱和”过程<sup>[3]</sup>, 边坡稳定性受到显著影响<sup>[4-5]</sup>。统计资料显示, 三峡库区崩滑灾害点中高达69.5%的滑坡属于红层滑坡<sup>[1]</sup>。

实验和理论研究发现水岩土相互作用是导致边坡岩体破坏的关键<sup>[6-7]</sup>, 由此, 众多学者针对边坡岩体中的水岩土相互作用开展了大量的研究。周翠英等对红色砂岩、泥岩和黑色炭质泥岩

进行了饱水试验, 测定水岩作用后岩体的抗压、抗拉、抗剪强度变化, 揭示其指数变化规律<sup>[8]</sup>。胡新丽等对边坡稳定性进行计算评价, 建立了水岩土力学相互作用模型<sup>[9]</sup>。汤连生等研究了不同循环流速, 不同水化学溶液下花岗岩、红砂岩和灰岩的单轴抗压性能, 揭示出水化学反应显著影响岩土体的力学性质<sup>[7, 10]</sup>。徐则民等发现边坡岩体演化形成垂向分带主要受到地下水-岩(土)体之间的化学相互作用影响<sup>[11]</sup>。

三峡库区水位波动下边坡水岩土相互作用研究显示, 红层岩土体遇水性质发生变化是水土化学作用引起微观内部结构和宏观力学性质变化的结果<sup>[3, 12]</sup>。边坡土体在饱水-失水过程中, 化学成分发生改变, 引起土体物理结构和力学作用的改变, 宏观上发生红层土体变形, 由致密有序的斑块

收稿日期: 2017-05-16

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41502232; 407002059); 广西矿冶与环境科学实验中心项目(KH2012ZD004); 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目(002401013001)

作者简介: 彭三曦(1984—), 男, 博士研究生, 研究方向: 地质工程及地下水科学与工程, heiyingpsxq@163.com。

通讯作者: 单慧媚, 博士, 讲师, shanhuimei@glut.edu.cn。

引文格式: 彭三曦, 单慧媚, 梁和成, 等. 三峡库岸红层土体饱水失水过程中水土化学作用研究[J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(3): 444-450.

状结构变成松散杂乱的絮凝状结构，进而改变了边坡的稳定性<sup>[3, 13]</sup>。然而，当前针对库水位波动下库岸边坡水岩土相互作用的研究主要集中在土体结构变化机制及力学作用效应，较少关注该过程中水土化学作用特征及其机理<sup>[3, 14-18]</sup>。笔者选取三峡库区库岸边坡广泛分布的松散红层土体作为研究对象，开展室内饱水-失水试验，分析临江红层土体和水溶液的化学成分的变化特征，结合热力学模拟计算，揭示反复饱水-失水过程中水土化学作用机理，旨在为三峡库区边坡稳定性研究和工程治理提供参考，为库区水-岩（土）相互作用研究提供新的认识。

1 研究区概况

石榴树包滑坡是黄蜡石滑坡群的主要组成部分，位于巴东县城东 1.5 km 的长江北岸，下距三峡坝址 66 km，总体积  $400 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，是长江三峡河段中大型滑坡之一，也是现代活动性滑坡体，其前缘直抵长江(图 1)。岸坡后缘高程 820 ~ 840 m，由于崩塌而形成陡壁。岸坡上部坡角  $25^\circ \sim 30^\circ$ ，大部分被崩坡积物质覆盖，岸坡中部坡角  $35^\circ \sim 40^\circ$ ，大多基岩裸露。滑体段坡面呈阶梯状，坡角  $20^\circ \sim 25^\circ$ 。在黄蜡石一带临江最大坡角可达  $40^\circ \sim 60^\circ$ 。总体地势呈上缓下陡趋势，不利于边坡稳定。

区内降雨丰富，但受地形条件和堆积物严重覆盖的限制，大气降水渗入补给较差，集中的降雨多沿陡峻的岸坡汇集于冲沟排入长江。而下渗部分径流途径短，排泄条件良好。滑坡后缘处主要为松散堆积岩(土)，由碎石块和黏性土组成，松散软弱，透水性强，易于沿着基岩面产生坍塌、

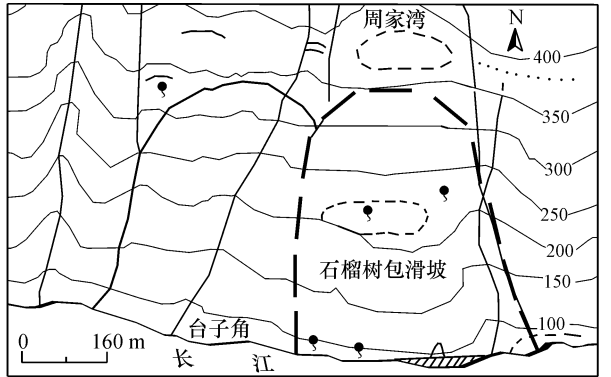


图 1 石榴树包滑坡平面位置  
Fig. 1 Location of Shiliushubao land slides

崩滑或者携带细粒物质沿下伏基岩面富集，并形成软弱面。三峡水库水位在 145 ~ 175 m 周期涨落时，临江岩(土)体将反复经历库水饱和-失水-再饱和的过程。

2 试验与模拟

2.1 试验装置与操作

库水模拟液以  $1 \text{ cm}^3/\text{s}$  的速度从柱底泵入装填土样的有机玻璃柱中(图 2)，出水溶液从柱顶流出后导回库水模拟液。试验过程控制土水比(g:mL)为 1:4，以保证土体处于充分饱水状态。设计 3 次饱水-失水过程，每个过程中饱水时间为 30 d，在 1、3、7、14、30 d 采集水样测定常规阴阳离子含量，失水时间为 10 d，失水后采集土样测定矿物和化学成分含量。为保证试验结果的代表性，设置两组平行试验。

2.2 样品与测试

试验土样取自石榴树包滑坡 172 m 高程处临江堆积的松散红层土体，水样为配制的库水模拟液，其化学组成见表 1。

水样的 pH 值利用 pH 计(Docu-pH Meter sartorius)测定， $\text{HCO}_3^-$  含量利用化学滴定法测定。采集的水样利用  $0.45 \text{ }\mu\text{m}$  微孔滤膜过滤后，取 10 mL 直接用离子色谱仪(ICS 900，戴安)测试阴离子含量，另取 10 mL 用高纯硝酸酸化至  $\text{pH} < 2$  后利用电感

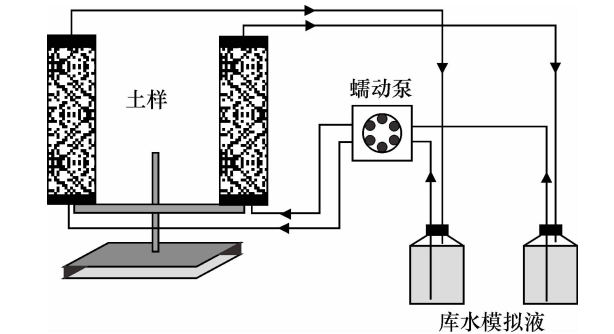


图 2 试验装置示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of laboratory experiments

表 1 库水模拟液的化学组成  
Table 1 Chemical compositions of synthetic surface water

mg/L			
指标	数值	指标	数值
pH	7.49	K <sup>+</sup>	2.26
Cl <sup>-</sup>	18.41	Na <sup>+</sup>	10.09
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	37.74	Ca <sup>2+</sup>	38.92
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	110.02	Mg <sup>2+</sup>	8.00

耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES) (Optima 7000, 美国 PE) 测试常规阳离子含量。采集的土样经自然风干, 研磨过 150  $\mu\text{m}$  筛, 一部分进行化学成分分析, 一部分用 X 射线衍射仪 (日本理学 D-max/33) 测试矿物含量, 扫描速度  $5^\circ/\text{min}(2\theta)$ 。

2.3 热力学模拟

水土化学作用热力学模拟的基本原理是: 在一定温度、压力和浓度条件下, 化学反应总是沿着一定的方向趋于平衡。对于封闭体系, 在恒温、恒压和只作膨胀功时, 体系组成的变化只能向反应自由能减小的方向进行。运用热力学方法来研究水土化学作用, 有两大优点: 一是不考虑参与化学反应的物质结构; 二是不考虑化学反应过程和途径<sup>[19-21]</sup>。

2.3.1 目标函数的建立 按照能量最低原则, 对于水土化学作用过程可建立如下方程

$$\begin{aligned} \min Z &= \Delta G_{r1}X_1 + \Delta G_{r2}X_2 + \cdots + \Delta G_{rm}X_m \\ &= \sum_{i=1}^n \Delta G_{ri}X_i, \end{aligned} \tag{1}$$

式中:  $X_i$  为第  $i$  个化学反应发生的量 (mmol), 当  $X_i > 0$  时, 表示反应往正方向进行,  $X_i < 0$  时, 表示反应往逆方向进行,  $X_i = 0$  时, 表示该系统中没有发生此反应或者该反应在所研究的系统中处于平衡状态;  $\Delta G_{ri}$  为第  $i$  个化学反应对应的吉布斯自由能变 (J/mmol), 是化学反应的驱动力, 当  $\Delta G_{ri} < 0$  时, 反应在恒温恒压下可以自发进行,  $\Delta G_{ri} > 0$  时, 反应在恒温恒压条件下不能自发进行, 但逆反应可自发进行,  $\Delta G_{ri} = 0$  时, 反应处于平衡状态。

2.3.2 约束条件 应用质量守恒原理建立约束条件, 水土化学作用过程中, 从  $A$  时刻到  $B$  时刻, 溶液的化学组分必须满足:  $A$  时刻化学组分 + 反应相 =  $B$  时刻化学组分 + 生成相, 计算公式

$$\sum_{i=1}^n (\alpha_{ij} - \beta_{ij})X_i = \Delta m_j, \tag{2}$$

式中:  $\alpha_{ij}$  为第  $i$  个化学反应中反应相中第  $j$  种组分的化学计量数;  $\beta_{ij}$  为第  $i$  个化学反应中生成相中第  $j$  种组分的化学计量数。

氧化还原反应必须满足电子守恒原理

$$\Delta RS = \sum u_i X_i, \tag{3}$$

式中:  $u_i$  为第  $i$  种反应物的实用化合价;  $RS$  为水溶液的氧化还原状态, 定义  $RS = \sum u_j m_j$  ( $m_j$  为第  $j$  种组分的摩尔浓度;  $u_j$  为第  $j$  种组分的实用化合价)。

阳离子交换反应, 需满足电中性方程

$$\sum r_i X_i = 0, \tag{4}$$

式中:  $r_i$  是第  $i$  种发生阳离子交换作用的离子的化合价。

3 结果与分析

3.1 土样化学和矿物成分

三峡库区石榴树包滑坡临江松散红层土体中化学和矿物成分及含量如表 2 所示。土体中主要化学成分为  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$  和  $\text{K}_2\text{O}$ , 另外含有少量的  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  和  $\text{MnO}$  ( $<1\%$ )。此外, 烧失量 (LOI) 表征土壤加热分解的气态产物 ( $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$  等) 和有机质含量, 表 2 显示其含量较高。土体中主要矿物成分为方解石 25% ~ 30%、绿泥石 25% ~ 35%、伊利石 15%、石英 15% ~ 17%、高岭石 10% ~ 25%、赤铁矿 2% ~ 3%、长石 2% ~ 3%、白云石 0% ~ 3%。方解石和白云石属于碳酸盐矿物, 遇水易溶解释放  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  等离子从而影响水溶液的化学性质。绿泥石、伊利石和高岭石属于粘土矿物, 具有较强的亲水性, 遇水易引起土体工程性质的改变。石英、赤铁矿、长石等矿物成分的物理、化学性质一般比较稳定, 不易风化和参与水土化学作用。

3.2 饱水失水过程对红层土体矿物和化学成分的影响

(1) Si、Fe、Al、K 含量变化。经过饱水 - 失水过程后, 土体中主要化学成分  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{K}_2\text{O}$  含量上升 (图 3)。 $\text{SiO}_2$  的含量主要与

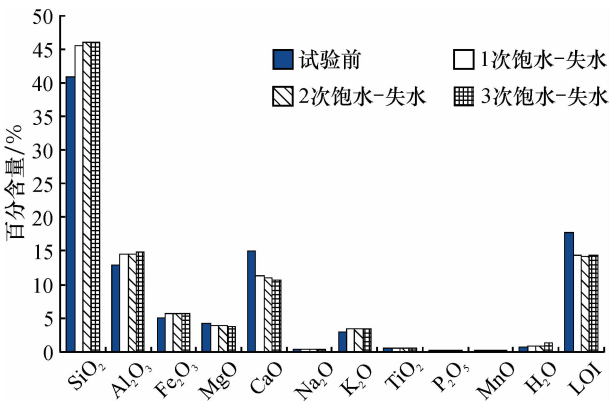


图3 饱失水过程中红层土体化学成分含量变化  
Fig. 3 Variations of chemical composition contents of red soil in SS and SD processes

石英矿物含量有关，而石英是抵抗风化能力很强且化学性质比较稳定的碎屑矿物； $\text{Al}_2\text{O}_3$  主要赋存于粘土矿物中，其含量高意味着粘土矿物成分含量高，风化作用程度低； $\text{K}_2\text{O}$  含量主要反映伊利石矿物的含量。分析认为，饱水过程中，大量细小的碎屑土颗粒附着在红层土体孔隙中发生沉降或胶结，导致石英矿物、粘土矿物成分的含量增加，表 2 显示石英矿物含量平均增加了 1.5%，粘土矿物绿泥石和伊利石均增加了 5%。然而，当土体处于失水过程时，大部分碎屑矿物不能随水流排出，因此，经过一次饱水－失水过程后，松散土体中  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  含量显著上升。水土相互作用的过程中，低价铁容易被氧化成为不溶的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，因此饱水后  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  成分的含量略微上升。

(2) Ca、Mg 含量变化。饱水－失水过程后，土体中 CaO 含量显著降低，MgO 含量略微降低(图 3)。CaO 主要赋存于碳酸盐矿物如方解石和白云石中，饱水过程中，这类矿物发生溶解作用释放出  $\text{Ca}^{2+}$ ，失水过程中  $\text{Ca}^{2+}$  被排入溶液中，因此，饱水－失水过程后土体中 CaO 成分的含量显

著降低(图 3)。方解石矿物含量在 1 次饱水－失水过程后平均降低 5%，进一步验证了方解石溶解作用的发生(表 2)。MgO 主要赋存于绿泥石和白云石中，绿泥石蒙脱化可以保持土体中 MgO 的含有量，但白云石的溶解却往往导致其含量的降低，MgO 含量的降低意味着白云石溶解作用占主导。

(3)其他成分含量变化。饱水－失水过程后  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  和  $\text{TiO}_2$  的平均含量略微升高，MnO 的平均含量保持不变(图 3)。由于这些化学成分的含量总体水平较低( $<1\%$ )，难以反映饱水－失水过程对土体的影响。反复饱水－失水过程中，由于饱水时间比失水时间长，因此土体中结合水的含量逐渐增加(图 3)。通常情况下 LOI 的含量减少时，土体中有机质含量降低。有机质比粘土矿物有更强的胶体特性和亲水性，当土体浸泡于水中时，有机质将使土粒结合膜剧烈增厚，削弱土的粒间连结，导致土强度显著降低，然而当含有机质的土体失水时，有机质则可以起到较强的粒间连结作用。经过饱水－失水过程后，LOI 含量显著降低，暗示土体强度和颗粒间连接作用将受到显著影响。

Table 2 Chemical and mineral compositions and contents of soil samples													$w_B/\%$
成分	土样 A 饱水－失水过程				土样 B 饱水－失水过程				平均值				
	试验前	1 次	2 次	3 次	试验前	1 次	2 次	3 次	试验前	1 次	2 次	3 次	
$\text{SiO}_2$	35.58	45.85	45.36	45.79	46.29	45.20	46.70	46.38	40.94	45.53	46.03	46.09	
$\text{Al}_2\text{O}_3$	11.53	14.21	14.72	14.18	14.23	14.97	14.34	15.63	12.88	14.59	14.53	14.91	
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	4.45	5.50	5.91	5.37	5.54	5.93	5.57	6.04	5.00	5.72	5.74	5.71	
MgO	4.33	4.22	3.44	4.06	4.24	3.44	4.20	3.40	4.29	3.83	3.82	3.73	
CaO	19.35	11.23	11.41	11.11	10.51	11.40	10.70	10.34	14.93	11.32	11.06	10.73	
$\text{Na}_2\text{O}$	0.22	0.37	0.35	0.38	0.43	0.35	0.39	0.34	0.33	0.36	0.37	0.36	
$\text{K}_2\text{O}$	2.60	3.34	3.52	3.24	3.35	3.46	3.31	3.56	2.98	3.40	3.42	3.40	
$\text{TiO}_2$	0.46	0.59	0.59	0.58	0.60	0.60	0.60	0.60	0.53	0.60	0.60	0.59	
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.12	0.16	0.17	0.14	0.14	0.18	0.16	0.15	0.13	0.17	0.17	0.15	
MnO	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	
$\text{H}_2\text{O}$	0.82	0.70	1.06	1.72	0.62	0.94	0.66	0.82	0.72	0.82	0.86	1.27	
LOI	21.26	14.46	14.36	15.20	14.20	14.36	13.94	13.50	17.73	14.41	14.15	14.35	
绿泥石	25	35	35	35	35	35	35	25	30.0	35.0	35.0	30.0	
伊利石	15	20	25	15	15	20	25	20	15.0	20.0	25.0	17.5	
高岭石	10	0	0	0	25	0	0	0	17.5	0.0	0.0	0.0	
石英	15	19	16	23	17	16	16	25	16.0	17.5	16.0	24.0	
长石	2	2	2	3	3	2	2	3	2.5	2.0	2.0	3.0	
方解石	30	20	20	20	25	25	20	20	27.5	22.5	20.0	20.0	
白云石	0	2	0	2	3	0	0	0	1.5	1.0	0.0	1.0	
赤铁矿	3	2	2	2	2	2	2	2	2.5	2.0	2.0	2.0	

3.3  饱水失水过程对溶液化学性质的影响

多次饱水－失水过程中，溶液中常规阴阳离子含量随时间的变化曲线如图 4 所示。可以发现：随着饱水－失水过程和时间的增加，常规阴阳离子含量的变化存在显著差异。第 1 次饱水过程中，溶液中  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Mg^{2+}$  和  $HCO_3^-$  浓度在饱水初期显著降低，之后随着饱水时间的增加趋于稳定； $Ca^{2+}$  浓度在饱水初期显著增加，之后逐渐减小； $SO_4^{2-}$  和  $Cl^-$  在饱水初期少量增加后趋于稳定。第 2 次和第 3 次饱水－失水过程中，随着时间的增加，溶液中  $Na^+$ 、 $HCO_3^-$  和  $Ca^{2+}$  浓度显著增加后趋于稳定； $Mg^{2+}$  浓度略微增加后逐渐降低。这些差异性变化暗示着反复饱水－失水过程中发生着复杂的水土化学作用。结合红层土体的化学和矿物成

分含量变化，可能发生的化学反应见表 3。整体上，随着饱水－失水过程次数的增多，溶液中常规阴阳离子的浓度增加，表明水土化学作用增强。

3.4  饱水失水过程中水土化学作用特征

利用式(1)～(4)对反复饱水－失水过程中水土化学反应(表 3)进行热力学模拟计算，结果如表 4 所示。可以发现，边坡松散红层土体在反复饱水－失水过程中， $X_2$ 、 $X_{11}$  和  $X_{12}$  的值较大，意味着主要发生方解石溶解作用，以及  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  与  $Na^+$  的阳离子交换作用。 $X_7$  和  $X_8$  的值较低，表明白云石和赤铁矿的溶解作用较弱。 $X_{10}$  的值为负值且较低，意味着发生  $K^+$  与  $Mg^{2+}$  的阳离子交换作用，且该反应较弱。 $X_1$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_6$  和  $X_9$  的值均为 0，说明表 3 中反应 1、3～6 和 9 达到平衡或者

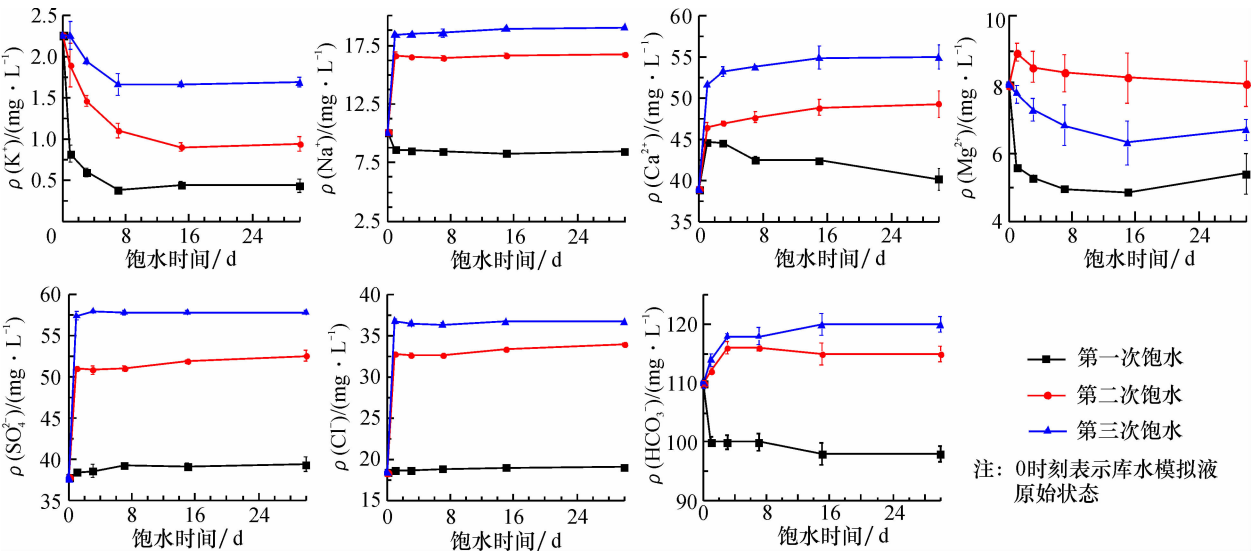


图 4  饱水失水过程中溶液常规阴阳离子的浓度变化曲线

Fig. 4  Variations of anion and cation concentrations of aqueous solutions in SS and SD processes

表 3  边坡土体在饱水失水过程中水土化学作用

Table 3  Chemical reactions between red soil and aqueous solution in SS and SD processes

类别	反应物	化学反应	$\Delta G_i/(kJ/mol)$
溶解作用	$i_1$ 石英	1. $SiO_2 + 2H_2O \rightarrow H_4SiO_4$	17. 20
	$i_2$ 方解石	2. $CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$	24. 56
	$i_3$ 高岭石	3. $Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 6H^+ \rightarrow 2H_4SiO_4 + 2Al^{3+} + H_2O$	562. 30
	$i_4$ 伊利石	4. $KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + H^+ + 2.5H_2O \rightarrow 1.5Al_2Si_2O_5(OH)_4 + K^+$	722. 20
	$i_5$ 钾长石	5. $KAlSi_3O_8 + CO_2 + 5.5H_2O \rightarrow 0.5Al_2Si_2O_5(OH)_4 + K^+ + 2H_4SiO_4 + HCO_3^-$	100. 32
	$i_6$ 钠长石	6. $NaAlSi_3O_8 + CO_2 + 5.5H_2O \rightarrow 0.5Al_2Si_2O_5(OH)_4 + Na^+ + 2H_4SiO_4 + HCO_3^-$	81. 87
	$i_7$ 白云石	7. $CaMg(CO_3)_2 + 2CO_2 + 2H_2O \rightarrow Ca^{2+} + Mg^{2+} + 4HCO_3^-$	53. 56
	$i_8$ 赤铁矿	8. $Fe_2O_3 + 6H^+ \rightarrow 2Fe^{3+} + 3H_2O$	10. 10
阳离子交换	$i_9$	9. $Ca^{2+} + 2KX(s) \rightarrow CaX(s) + 2K^+$	- 11. 46
	$i_{10}$ 游离	10. $Mg^{2+} + 2KX(s) \rightarrow MgX(s) + 2K^+$	- 110. 20
	$i_{11}$ 离子	11. $Ca^{2+} + 2NaX(s) \rightarrow CaX(s) + 2Na^+$	29. 76
	$i_{12}$	12. $Mg^{2+} + 2NaX(s) \rightarrow MgX(s) + 2Na^+$	- 69. 00

表4 水土化学作用热力学模拟结果  
Table 4 Thermodynamic simulation results of water-soil chemical interactions

SS-SD 过程/次	$X_1$ / mol	$X_2$ / mol	$X_3$ / mol	$X_4$ / mol	$X_5$ / mol	$X_6$ / mol	$X_7$ / mol	$X_8$ / 10 <sup>-3</sup> mol	$X_9$ / 10 <sup>-4</sup> mol	$X_{10}$ / mol	$X_{11}$ / 10 <sup>-5</sup> mol	$X_{12}$ / mol
1	0	4.115	0	0	0	0	4.768	3.87	0	-5.2	1.210	0.335
2	0	4.154	0	0	0	0	4.768	44.8	0	-18	1.155	0.254
3	0	4.539	0	0	0	0	4.768	9.38	0	-6.5	1.035	0.535

基本上不发生。随着饱水-失水过程次数的增多， $X_2$  逐渐增大而  $X_{11}$  逐渐减少，意味着方解石溶解反应增强， $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{Na}^{+}$  阳离子交换作用减弱； $X_7$  无变化，表明白云石溶解作用不受饱水-失水过程的影响。

4 结论与展望

三峡库区库岸边坡松散红层土体在反复饱水-失水过程中，土体中矿物和化学成分、水溶液化学性质均发生变化，水土之间发生复杂的化学反应，主要结论如下：

(1) 饱水-失水导致土体中  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{K}_2\text{O}$  含量上升， $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  和  $\text{LOI}$  含量减少，对土体中其他化学成分的影响相对较小。

(2) 随着饱水-失水过程的次数增多，溶液中主要阳离子  $\text{K}^{+}$ 、 $\text{Na}^{+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$ ，主要阴离子  $\text{Cl}^{-}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^{-}$  均增加。每次饱水-失水过程中，各离子浓度随饱水时间的增加，浓度变化存在显著差异。

(3) 库岸边坡松散红层土体与库水相互作用的过程中，溶解反应主要以红层土体中方解石矿物溶解为主，该作用随着饱水-失水过程的增多而增强。此外，伴随着少量的白云石和赤铁矿溶解作用。阳离子交换反应主要以溶液中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  置换出土体中  $\text{Na}^{+}$  反应为主，其次是溶液中  $\text{K}^{+}$  置换出土体中  $\text{Mg}^{2+}$  的反应，其中， $\text{Ca}^{2+}$  置换  $\text{Na}^{+}$  的反应随着饱水-失水过程的次数增多而减弱。

库区水位上升、下降的周期性变化对库岸边坡土体的矿物和化学组成，以及周边水化学环境均产生影响，其中伴随着各种复杂的水土化学反应，这些化学反应在不同饱水-失水过程中反应强度存在显著差异，这种差异性进一步加剧了土体化学组成的改变，影响其结构和力学性能。研究边坡土体在饱水-失水过程中的水土化学作用特征与规律，尝试通过改变水化学环境控制饱水

-失水过程中水土化学作用及其强度，从而针对性地增加或减少边坡表层土体中某些化学或矿物成分，降低饱失水过程对边坡土体结构的破坏，增强土体的力学性能，可以为未来治理滑坡灾害提供一种新的思路和解决方法。

参考文献：

[1] 柴波,殷坤龙,简文星,等. 红层水岩作用特征及库岸失稳过程分析 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40 (4): 1092-1098.

[2] 殷跃平,胡瑞林. 三峡库区巴东组(T<sub>2</sub>b)紫红色泥岩工程地质特征研究 [J]. 工程地质学报, 2004, 12 (2): 124-135.

[3] 梁和成,单慧媚. 天然饱水-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.

[4] 罗红明,唐辉明,章广成,等. 库水位涨落对库岸滑坡稳定性的影响 [J]. 地球科学, 2008, 33 (5): 687-692.

[5] 向玲,王世梅,王力. 动水压力型滑坡对库水位升降作用的响应——以三峡库区树坪滑坡为例 [J]. 工程地质学报, 2014, 22 (5): 876-882.

[6] 汤连生. 水-土化学作用的力学效应及机理分析 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2000, 39 (4): 104-109.

[7] 汤连生,张鹏程,王思敬. 水-岩化学作用的岩石宏观力学效应的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21 (4): 526-531.

[8] 周翠英,邓毅梅,谭祥韶,等. 软岩在饱水过程中水溶液化学成分变化规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (22): 3813-3817.

[9] 胡新丽, Potts M D, Zdravkovic L, 等. 三峡水库运行条件下金乐滑坡稳定性评价 [J]. 地球科学, 2007, 32 (3): 403-408.

[10] 汤连生,张鹏程. 水化学损伤对岩石弹性模量的影响 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2000, 39 (5): 126-128.

[11] 徐则民,黄润秋,杨立中. 斜坡水-岩化学作用问题 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (16): 2778-2787.

[12] 单慧媚,梁合诚,刘佳伟,等. 饱水过程中松散土体渗透性变化研究 [J]. 水文地质工程地质, 2010, 37 (5):



97-101.

[13] 刘镇,唐朝晖,彭兰,等. 水-岩作用下赵树岭滑坡松散岩土体细观结构演化的 SEM 测试分析 [J]. 安全与环境工程, 2009, 16 (2): 1-4.

[14] 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 (S2): 45-51.

[15] 汪发武,张业明,王功辉,等. 三峡库区树坪滑坡受库水位变化产生的变形特征 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (3): 509-517.

[16] 杨超. 库水位变化时边坡稳定性分析 [D]. 西安: 西安理工大学, 2009.

[17] 张岩,陈国庆,张国峰,等. 库水位变化对观音坪滑坡稳定性影响的数值分析 [J]. 工程地质学报, 2016, 24 (4): 501-509.

[18] 周美玲. 考虑水-岩作用的三峡库区红层软岩蠕变特性研究 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2016.

[19] 何丽,周从直,谢有奎,等. Excel 规划求解水-岩作用模型 [J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4 (2): 265-268.

[20] 童海涛,宋汉周. 水-岩作用系统的随机水文地球化学模拟 [J]. 水科学进展, 2004, 15 (2): 211-215.

[21] 王锦国,周志芳,汤瑞凉. 水-岩作用的线性规划模型与应用研究——以溪洛渡水电工程为例 [J]. 水科学进展, 1999, 10 (2): 19-23.

Study on chemical reactions during red soil soaked and dehydrated processes in Three Gorges Reservoir area

PENG San-xi<sup>1,2b</sup>, SHAN Hui-mei<sup>2a,2c</sup>, LIANG He-cheng<sup>1</sup>, CAI He-sheng<sup>1</sup>, LI Yi-lian<sup>1</sup>

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. a. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology; b. College of Earth Sciences; c. Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** In the Three Gorges Reservoir area, red soil is widely distributed and its stability is significantly influenced by fluctuation of river water level. Complicated chemical reactions between water and red soil are the key factors caused changes of soil structure and mechanical property. In this study, red soil samples were collected from the Shiliushubao landslides of the Three Gorges Reservoir area. They were repeatedly soaked by water and dehydrated for three times. In these processes, water samples were collected for analysis of conventional anionic and cationic contents, and soil samples were collected for analysis of mineral and chemical compositions and contents. Thermodynamic models were then established to identify the critical chemical reactions of red soil and water. Results show that in the soil soaked (SS) and soil dehydrated (SD) processes, the major chemical reaction is calcite dissolution and will be enhanced with the increased SS and SD processes. Then follows the cation exchange reaction, mainly including of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  exchanged  $\text{Na}^{+}$  from red soil,  $\text{K}^{+}$  exchanged  $\text{Mg}^{2+}$  from red soil, in which,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Na}^{+}$  will be weakened with the increased SS and SD processes.

**Key words:** red soil; soil soaked and dehydrated processes; thermodynamic model; water-soil chemical reaction