

# 长江三峡库区不同坡段坡地土壤风化特征

何太蓉<sup>1,2</sup>, 杨达源<sup>3</sup>, 蔡运龙<sup>2</sup>

(1. 重庆师范大学地理科学学院, 重庆 400047; 2. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871;

3. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210093)

**摘要:** 通过野外采样和实验室 XRD 分析, 建立了基于 XRD 分析图谱的风化指标, 研究了三峡库区不同坡段坡地的风化程度。三峡库区草堂河流域不同坡段坡地风化特征有一定的共性, 如土壤中的主要特征矿物种类相同, 主要有高岭石、云母和蛭石; 所有样品中高岭石峰值均不高, 甚至个别样品图谱上几乎没有高岭石峰的出现; 3 种主要的特征粘土矿物中以蛭石峰值最高; 表层和底层的粘土矿物总量差异也不大。但是不同坡段土壤的风化程度仍存在一定差异。从顶部的分水岭山脊段到山坡上部直形坡崩塌段、山坡下部直形坡搬运段以及最下部的山坡麓洪冲积堆积段这 4 个坡段, 4 项风化指标均呈增加的趋势, 说明从坡上到坡下土壤的风化程度逐渐加大。

**关键词:** 风化; 坡段; XRD; 三峡库区

**中图分类号:** P931.91

**文献标识码:** A

坡地是长江三峡库区所占比例最大的地貌形态, 坡地稳定和生态安全关系到库区安全甚至国家安全。研究土壤风化的方法和指标很多, 既有物理方面的指标也有化学方面还有生物方面的指标。由岩石演变到风化壳再形成土壤的过程是非常复杂的, 受多种因素影响。本研究依据野外采样并进行 X 射线衍射分析, 通过分析图谱获得土壤中所含粘土矿物的种类和数量<sup>[1-5]</sup>, 以此建立指标并判断三峡库区坡地不同坡段土壤风化成土过程的强弱。

## 1 研究区概况

长江三峡库区是指长江三峡水库淹没涉及的湖北省和重庆市的共 20 个县(市、区), 总面积  $5.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 其中淹没陆地面积  $600 \text{ km}^2$ <sup>[6]</sup>。

本文以三峡库区的草堂河流域为研究区。草堂河是长江北岸的一级支流, 位于重庆市奉节县境内, 行政区划上包含奉节县的白帝、草堂和汾河三镇; 由汾河、石马河两大支流组成, 干流全长 33.3 km, 平

均比降 6.65‰, 流域面积  $394.8 \text{ km}^2$ , 平均流量  $7.51 \text{ m}^3/\text{s}$ , 年径流总量  $2.37 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。该流域水系十分发育, 河网密度大, 平均达  $0.79 \text{ km}/\text{km}^2$ 。本区岩层全为沉积岩, 以三叠系中统巴东组出露较多, 地貌类型主要为低山河谷。本区气候属中亚热带湿润型季风气候, 年均温  $15^\circ\text{C}$ , 年均降雨量 1200 mm。流域内大部分是陡坡旱地或灌丛草坡, 植被破坏严重, 造成大量水土流失, 滑坡与沟谷处的泥石流活动频繁, 河床逐年提高<sup>[7]</sup>。

## 2 采样与分析方法

### 2.1 野外采样

坡地是山地从山脊至山麓具有斜坡坡面的总称。郑度先生认为, 一个完整的山体, 其山坡可以分出既是相互联系又相互区别的 4 个坡段, 即分水岭山脊段、山坡上部直形坡崩塌段、山坡下部直形坡搬运段、山坡麓麓洪冲积堆积段这 4 个坡段, 具有迥然不同的物能结构和形成过程, 亦具有不同的生产潜

收稿日期 (Received date): 2009-06-12; 改回日期 (Accepted): 2009-12-21。

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (40272126) 和重庆市教委科技项目 (KJ080803)。[Funded by NSFC (40272126) and Science and Technology Research Project Supported by Chongqing Municipal Education Commission, No. KJ080803]

作者简介 (Biography): 何太蓉 (1973-), 女, 汉族, 重庆丰都人。副教授, 博士; 主要从事自然资源与环境的教学和研究。[He Tairong (1973-), associate Prof., main interested fields are natural resources and environment] E-mail: he\_tairong@263.net

力和不同的改造利用途径<sup>[8]</sup>。

依据郑度先生的坡地 4 分法, 在草堂河流域石马河支流设置采样线进行采样, 每个典型坡段选取 2 个采样点。具体采样过程为: 选定采样点后, 挖掘土壤剖面, 进行剖面性状描述、拍照等, 然后分层采样。采样深度为 40 cm, 每隔 10 cm 采样一个。对于分水岭山脊段, 由于土层太薄, 采样深度为 30 cm。

2.2 样品处理及实验分析方法

风干后的样品经过研磨, 过 100 目筛。所有样品经粉晶压片后进行 X 射线衍射分析。测试仪器为日本 Rigaku 公司生产的 D/max- RA 型旋转阳极 X 射线衍射仪, 采用 Cu 靶。工作电压为 40 kV, 工作电流为 100 mA, 滤波片为 Gr<sub>α</sub>。样品测试地点为南京大学现代分析中心。

本研究采用无定向粉末的制样方法, 即将通过 100 目标准筛的粉末直接压入衍射仪样品板孔中。注意样品表面一定要平整光滑, 且和样品板表面的高度一致。

2.3 风化特征指标的建立

为了研究坡地土壤风化成土过程的强弱, 本文建立了基于 XRD 分析图谱的 4 个指标。其基本原理是从衍射图谱上判断各种特征粘土矿物的种类和数量。其量的判定原理是每种矿物的 X 射线衍射强度与其含量成正比<sup>[3-5]</sup> (不是严格成立)。由于土壤中各种矿物的混合以及相互干扰, 因此准确的矿物定量有一定的困难。本文假设衍射峰高度与矿物含量为严格正比关系, 即以衍射峰的绝对计数值来代表该矿物的含量。对于单个土壤样品中不同矿物所占的百分比无法确定, 这里主要是比较不同样品中同类矿物量的差异。

为了对比分析不同坡段坡地土壤的风化成土强弱, 本文采用以下基于 XRD 分析的 4 个指标:

1. 高岭石峰值

在生物化学作用下, 土壤最终会朝着地带性土壤的方向演变。而亚热带地区的地带性土壤是黄壤或红壤, 是富铝化过程的结果, 其中代表性的粘土矿物为高岭石。因此以高岭石的峰值高低作为判断风化程度是一个有意义的指标。

2. 粘土矿物总量

随着风化成土过程的持续进行, 土壤中原生矿物不断分解演变为次生矿物, 其中很大部分为粘土矿物, 因此在母质相同的状况下, 粘土矿物总量越高说明风化成土作用越强。这里从 X 射线衍射图谱

中读出蛭石、云母和高岭石三种特征粘土矿物的峰值, 以三者之和代表粘土矿物总量。

3. 英长比 (石英与长石含量的比值)

英长比也可以反映风化成土的程度。岩石经过风化, 其英长比增大, 比值越大, 反映风化越深, 当然与母岩也有很大的关系。本文中的英长比即为衍射图谱中石英峰值与长石峰值的比值<sup>[9-10]</sup>。

4. 云母蛭石化

云母蛭石化即云母转化为蛭石的程度也能反映风化程度, 比值越大风化越深。本文中以蛭石峰值除以云母峰值与蛭石峰值之和<sup>[9-10]</sup>。

3 结果与分析

3.1 不同坡段坡地土壤的风化特征

3.1.1 分水岭山脊段坡地土壤风化特征

从分水岭山脊段 2 个采样剖面的样品 X 射线衍射分析数据 (表 1) 可以看出, 土壤中的特征矿物主要含有原生矿物石英、长石和方解石以及次生矿物蛭石、云母和高岭石。三种主要的粘土矿物以蛭石的峰值最高, 分别占本样品中三者之和的 46.3% 和 48.7%, 平均为 47.5%。高岭石含量相对较少, 唯有 A2-3 的含量较高, 峰值相对明显。每个点的不同层次各指标值均有一定差异, 由表层到比较深的层次, 除英长比变化不大之外, 其余三项指标均随深度增加而增加, 说明深层的风化程度比表层稍大。可见, 在山坡分水岭山脊段, 表层细颗粒物物质极易被风化剥蚀离开原地。

3.1.2 山地上部直形坡崩塌段坡地土壤风化特征

从山地上部直形坡崩塌段 2 个采样剖面的样品

表 1 分水岭山脊段坡地各剖面的风化特征

Table 1 Weathering characteristics of every profile on the top section of divide ridge

采样剖面	样品号	高岭石峰值	粘土矿物总量	英长比	云母蛭石化
A1	A1- 1	375	2 218	0.30	0.56
	A1- 2	438	2 318	0.29	0.62
	A1- 3	470	2 310	0.27	0.64
	平均	428	2 282	0.29	0.61
A2	A2- 1	433	2 341	0.25	0.53
	A2- 2	418	2 355	0.24	0.64
	A2- 3	528	2 726	0.25	0.62
	平均	460	2 474	0.25	0.60

X射线衍射分析数据 (表 2)可以看出,土壤中的特征矿物主要含有原生矿物石英、长石和方解石以及次生矿物蛭石、云母和高岭石。三种主要的粘土矿物以蛭石的峰值最高, 占本样品中三者之和的比例均为 51. 4%。高岭石含量不高, 但比分水岭山脊段样品的高岭石含量稍高, B2 高岭石含量比 B1高。每个点的不同层次各指标值均有一定差异, 由表层到深层, 各指标值变化规律不太明显。但高岭石的含量随深度增加而增加。可见, 在山地上部直形坡崩塌段, 物质运动方式仍以剥蚀为主, 表层以及整个土壤层次风化程度均不高。

表 2 山地上部直形坡崩塌段坡地各剖面的风化特征

Table 2 Weathering characteristics of every profile on the above section of line slope with collapse

采样剖面	样品号	高岭石峰值	粘土矿物总量	英长比	云母蛭石化
B1	B1- 1	450	2 275	0. 26	0. 63
	B1- 2	405	2 487	0. 39	0. 62
	B1- 3	528	2 391	0. 26	0. 65
	B1- 4	490	2 346	0. 25	0. 67
	平均	468	2 375	0. 29	0. 64
B2	B2- 1	515	2 649	0. 26	0. 71
	B2- 2	523	2 426	0. 29	0. 60
	B2- 3	557	2 580	0. 26	0. 64
	平均	532	2 552	0. 27	0. 65

3. 1. 3 山地下部直形坡搬运段坡地土壤风化特征

从山地下部直形坡搬运段 2个采样剖面的样品X射线衍射分析数据 (表 3)可以看出,土壤中的特征矿物主要含有原生矿物石英、长石和方解石以及次生矿物蛭石、云母和高岭石。三种主要的粘土矿物以蛭石的峰值最高, 分别占本样品中三者之和的 45. 5%和 48. 7%, 平均为 47. 1%。该坡段土壤中高岭石含量相比于前两个坡段有所提高, C1高岭石含量比 C2高。每个点的不同层次各指标值均有一定差异, 由表层到深层, 高岭石的含量和粘土矿物总量随深度增加而增加。可见, 在山地下部直形坡搬运段, 由于堆积物类型是以坡积物为主, 因此其平均风化程度稍高, 表层风化程度比底层稍低。

3. 1. 4 山地坡麓洪冲积堆积段坡地土壤风化特征

从山地坡麓洪冲积堆积段 2个采样剖面的样品X射线衍射分析数据 (表 4)可以看出,土壤中的特征矿物主要含有原生矿物石英、长石和方解石以及

次生矿物蛭石、云母和高岭石。三种主要的粘土矿物以蛭石的峰值最高, 分别占本样品中三者之和的 45. 8%和 48. 9%, 平均为 47. 4%。该坡段土壤中高岭石含量相对于前三个坡段而言有所提高, D1高岭石含量比 D2高。每个点的不同层次各指标值均有一定差异, 由表层到深层, 高岭石的含量和粘土矿物总量随深度增加而增加。但两个采样点的第四个样品 (深度 30~ 40 cm) 的高岭石峰值比第三个样品 (深度 20~ 30 cm) 低, 这与局部地貌部位和土地利用方式有关。可见, 在山地坡麓洪冲积堆积段, 由于堆积物类型是以各种冲积物为主, 因此其平均风化程度比其上的几个坡段都高。

表 3 山地下部直形坡搬运段坡地各剖面的风化特征

Table 3 Weathering characteristics of every profile on the below section of line slope with transportation

采样剖面	样品号	高岭石峰值	粘土矿物总量	英长比	云母蛭石化
C1	C1- 1	652	2 513	0. 24	0. 57
	C1- 2	572	2 519	0. 29	0. 65
	C1- 3	682	2 682	0. 23	0. 63
	C1- 4	715	2 770	0. 31	0. 58
	平均	655	2 621	0. 27	0. 61
C2	C2- 1	515	2 805	0. 28	0. 59
	C2- 2	550	2 946	0. 24	0. 61
	C2- 3	617	2 918	0. 30	0. 60
	C2- 4	560	3 117	0. 34	0. 59
	平均	561	2 945	0. 29	0. 60

表 4 山地坡麓洪冲积堆积段坡地各剖面的风化特征

Table 4 Weathering characteristics of every profile on the bottom section of foothill with alluviation and pluviation

采样剖面	样品号	高岭石峰值	粘土矿物总量	英长比	云母蛭石化
D1	D1- 1	560	3 193	0. 31	0. 54
	D1- 2	795	3 690	0. 27	0. 59
	D1- 3	850	3 554	0. 31	0. 61
	D1- 4	660	3 853	0. 29	0. 54
	平均	716	3 573	0. 29	0. 57
D2	D2- 1	608	3 281	0. 27	0. 55
	D2- 2	632	3 098	0. 25	0. 60
	D2- 3	688	3 745	0. 33	0. 63
	D2- 4	587	3 158	0. 29	0. 62
	平均	629	3 321	0. 29	0. 60

3.2 不同坡段坡地土壤风化特征的比较

为了比较不同坡段土壤风化程度的强弱,将 4 个指标先标准化处理后再进行加权求和即可得到综合风化指标。本文中以高岭石峰值、粘土矿物总量、英长比、云母蛭石化对风化程度影响的强弱给 4 个指标赋予的权重值分别为 0.4 0.3 0.2 0.1。其理由是由于本地区位于亚热带湿润气候条件下,其主导作用的化学风化过程是富铝化过程,因此高岭石含量的高低是判断风化成土作用的一个主要指标。其次,随着风化程度的深入,土壤中的粘土矿物总量会增加,而且英长比和云母蛭石化程度也会加大。但高岭石峰值和粘土矿物总量是影响风化程度的主要指标,因此按照各要素影响的强弱设定了以上权重值。将不同坡段坡地风化特征指标综合列表以进行比较(表 5)。

表 5 不同坡段坡地土壤风化特征比较

Table 5 Comparison of weathering characteristics among different slope sections

采样剖面	高岭石 峰值	粘土矿物 总量	英长比	云母蛭 石化	风化 强度
A1	428	2 282	0.29	0.61	0.86
A2	460	2 474	0.25	0.60	0.88
B1	468	2 375	0.29	0.64	0.91
B2	532	2 552	0.27	0.65	0.96
C1	655	2 621	0.27	0.61	1.05
C2	561	2 947	0.29	0.60	1.03
D1	716	3 573	0.29	0.57	1.20
D2	629	3 321	0.29	0.60	1.12

由以上表 5 分析数据可见,从坡地最上部的分水岭山脊段到最下部的坡麓洪冲积堆积段,除云母蛭石化外,其余各项风化指标呈增加的趋势,总风化强度也逐渐增加,说明风化程度是加大的。因此在三峡库区的坡地,其物质总的运动方向为自上而下,坡地下部比上部土层厚,风化强度大。

4 结论与讨论

1. 三峡库区草堂河流域不同坡段坡地风化特征有一定的共性。如土壤中的主要特征矿物种类相同,主要有高岭石、云母和蛭石;高岭石峰值均不高,甚至个别样品图谱上几乎没有高岭石峰的出现;三

种主要的特征粘土矿物中以蛭石峰值最高;表层和底层的粘土矿物总量差异不大等。这些特征说明三峡库区草堂河流域因坡地坡度大,同时人为活动强度大,侵蚀剥蚀程度严重<sup>[11]</sup>,其总的风化程度不高。为了改善坡地土壤发育条件,促进土壤形成,很有必要进行相应的水土保持措施。如果土壤能够长期保留在相应坡地上,则会形成较厚的土层,土壤风化程度也加大。

2. 不同坡段土壤的风化程度有一定差异。从顶部的分水岭山脊段到山坡上部直形坡崩塌段、山坡下部直形坡搬运段以及最下部的山坡坡麓洪冲积堆积段这 4 个坡段,4 项风化指标均呈增加的趋势,说明从坡地上段到下段其风化程度逐渐加大。当然由于微地貌条件以及不同土地利用方式的影响,个别点的个别层次土壤风化程度并不符合总体趋势。

致谢:南京大学现代分析中心叶宇达工程师协助进行样品 XRD 分析,野外采样得到唐继刚博士、任雪梅博士、蒋晓伟硕士、陈可峰博士的协助,在此作者致以诚挚的谢意。

参考文献 (References)

[1] Huang Chengmin, Gong Zitong Progress in quantitative research of soil occurred and development [J]. Soil 2000, (3): 145~ 150 (166) [黄成敏, 龚子同. 土壤发生和发育过程定量研究进展 [J]. 土壤, 2000, (3): 145~ 150(166)]

[2] Gong Zitong, Chen Hongzhaq, Li Liangwu. Environmental change of soils and sustainable development [J]. Scientia Geographica Sinica 2000, 20(6): 517~ 522 [龚子同, 陈鸿昭, 刘良梧, 等. 土壤环境变化与可持续发展 [J]. 地理科学, 2000, 20(6): 517~ 522]

[3] Tang Yanjie, Jia Jianye, Xie Xiande. Environment significance of clay minerals [J]. Earth Science Frontiers 2002, 9(2): 337~ 344 [汤艳杰, 贾建业, 谢先德. 粘土矿物的环境意义 [J]. 地质前缘, 2002, 9(2): 337~ 344]

[4] Li Xiaohu, Zhang Xinhu, Zheng Peng et al. Advance on the research of soil mineralogy [J]. Acta Geologica Gansu 2003, 12 (1): 37~ 42 [李小虎, 张新虎, 郑朋, 等. 土壤矿物学研究综述 [J]. 甘肃地质学报, 2003, 12(1): 37~ 42]

[5] Fan Dejiang, Yang Zuosheng, Mao Deng et al. Clay minerals and geochemistry of the sediments from the Yangtze and Yellow Rivers [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21(4): 7~ 12 [范德江, 杨作升, 毛登, 等. 长江与黄河沉积物中粘土矿物及地化成分的组成 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(4): 7~ 12]

[6] Chen Weili, Jiang Mingxi, Zhao Changming et al. The plants and vegetation in the valley of Three Gorges Reservoir Area [M]. Beijing: China Water Power Press 2008: 1~ 11 [陈伟烈, 江明喜, 赵常明, 等. 三峡库区谷地的植物与植被 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 1~ 11]

- [ 7 ] Committee of local records in Fengjie County, Sichuan. Local records of Fengjie County [ M ]. Beijing: Chronicles Press, 1995: 78 ~ 97 [四川省奉节县志编撰委员会. 奉节县志 [ M ]. 北京: 方志出版社, 1995: 78~ 97]
- [ 8 ] Zheng Du, Shen Yuancun. Studies on progress, restoration and management of the degrading slopelands—A case study of purple soil slopelands in the Three Gorges Areas [ J ]. *Acta Geographica Sinica*, 1998, 53( 2 ): 116~ 122 [郑度, 申元村. 坡地过程及退化坡地恢复整治研究——以三峡库区紫色土坡地为例 [ J ]. 地理学报, 1998, 53( 2 ): 116~ 122]
- [ 9 ] Soil Research Group, Chengdu Branch of Chinese Academy of Sciences. Chinese Purple Soil ( Partiv ) [ M ]. Beijing: Science Press, 1991: 102~ 121 [中国科学院成都分院土壤研究室. 中国紫色土 ( 上篇 ) [ M ]. 北京: 科学出版社, 1991: 102~ 121]
- [ 10 ] Xi Chenpan, Xu Qi, Ma Yijie *et al*. Soils in Yangtze River Basin and Ecological Environmental Construction [ M ]. Beijing: Science Press, 1994: 28~ 63 [席承藩, 徐琪, 马毅杰, 等. 长江流域土壤与生态环境建设 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1994: 28~ 63]
- [ 11 ] He Tairong, Jiang Hongtao, Yang Dayuan *et al*. Study on the modern slope denudation rate in the Three Gorges Reservoir Area of the Yangtze River [ J ]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24 ( 1 ): 89~ 93 [何太蓉, 姜洪涛, 杨达源, 等. 长江三峡库区现代坡地剥蚀速率研究 [ J ]. 地理科学, 2004, 24( 1 ): 89~ 93]

## Weathering Characteristics of Soil on Different Slope Sections in Three Gorges Reservoir Area Based on XRD

HE Tairong<sup>1, 2</sup>, YANG Dayuan<sup>3</sup>, CAI Yunlong<sup>2</sup>

( 1. School of Geography Science, Chongqing Normal University, Chongqing, 400047, China; 2. College of Urban & Environment, Peking University, Beijing 100871, China; 3. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China )

**Abstract** Three Gorges Reservoir Area is an important one in China due to its ecological and environmental conditions. Slope land is defined as that the land locates from top to bottom of slope, so it is a major kind of geomorphology classifications in this area. It accounts above 70 percentages in whole area. Division of four sections in Three Gorges Reservoir Area used in this paper is originally put forward by Zheng Du. From top to bottom, the whole slope can be divided into four sections such as top section of divide ridge, above section of line slope with collapse, below section of line slope with transportation, and bottom section of foothill with alluviation and pluviation. The research of weathering characteristics of soil on slope land is a very important issue in modern geomorphology and many fields of applied geography. Based on field sampling in Caotanghe River Basin and the X-ray diffraction testing of all samples, the paper analyses their XRD charts, and then builds four indexes to assess the weathering intensity of soil on different slope sections. The four indexes are peak value of kaolinite, total mass of clay minerals, ratio between quartz and feldspar, and percentage of vermiculite turned from mica. The results are as following. In general, there are some similar characteristics in the weathering intensity of soil on slope fields in Caotanghe River basin. They have same classifications of diagnostic clay minerals such as kaolinite, mica and vermiculite. The peak values of kaolinite in all samples are very low; even only one or two samples have no peak value. The peak value of vermiculite in every sample is highest among three diagnostic clay minerals. There is not much difference in gross clay mineral between surface layer and bottom layer. But there are general differences of weathering intensity among different slope sections. From top to bottom, four weathering indexes of the four sections have an obvious tendency to increase. So the total intensity of weathering from top section to bottom section shows a tendency to increase. And from above results, it is right that the mass transportation on slope land is always from top to bottom.

**Key words** weather; slope section; XRD; Three Gorges Reservoir