

侵蚀性风化花岗岩坡地土壤发育特性

邓龙洲, 张丽萍, 陈儒章, 邬燕虹, 范晓娟, 孙天宇, 费凯

(浙江大学环境与资源学院, 浙江省农业资源与环境重点实验室, 杭州 310058)

摘要: 采用CT扫描技术、X射线荧光光谱仪化学全量分析和实验室土壤理化特性测试方法, 对浙江省典型风化花岗岩坡地土壤发育的主要物理指标、化学风化系数及风化强度进行了测量计算, 分析了侵蚀环境下不同地貌部位的土壤发育特征。结果表明: 坡地土壤的发育程度较弱, 土壤分层不明显, 不同地貌部位的土壤风化发育程度排序为坡底<坡中<坡顶, 与坡面侵蚀强度的排序正好相反。土壤物理风化指标随土层深度增加的变化规律较强, 脱硅富铝化过程随着剖面深度的增加越来越弱, 物理风化指标和化学风化指标具有同等作用的表征效果, 不同于当地地带性土壤发育中以化学风化为主的特性。水力侵蚀强烈地区的最大风化强度位于20—40 cm处, 推得水力侵蚀对土壤发育的影响深度为0—40 cm。

关键词: 风化强度; 发育特性; 熵权重; 元素迁移; 均衡度

中图分类号: S151

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)01-0064-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.01.010

Characteristics of Soil Development on the Erosive Weathered Granite Slopes

DENG Longzhou, ZHANG Liping, CHEN Ruzhang,

WU Yanhong, FAN Xiaojuan, SUN Tianyu, FEI Kai

(College of Environmental and Resource Sciences of Zhejiang University,

Zhejiang Provincial Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Hangzhou 310058)

Abstract: To reveal the soil developmental characteristics on the erosive weathered granite slopes, soil samples of a typical weathering granite slope in Zhejiang Province were studied by the methods of CT scanning technique, X-ray fluorescence spectrometer and laboratory soil physicochemical properties test based on the principles of soil genesis and water erosion. The results showed that the total developmental degree of the soil samples was weak because the varying difference between the up and bottom layers was very small and the soil level-development was not obvious. The weathering intensity displayed an order of bottom profile < middle profile < top profile, which was just opposite to that in terms of the erosion intensity. The physical weathering indexes increased significantly with soil depth while the desilication process weakened. The varying range of chemical weathering intensity was not significant in the all soil profiles and it was different from the local zonal soil development which gave priority to chemical weathering features. Physical and chemical weathering indexes had the equal effect on describing the soil developmental characteristics. Water erosion affected the soil weathering processes and hindered the soil development to typical zonal soil. The maximum weathering intensity was between the surface layer of 20—40 cm, which indicated that the soil layer of 0—40 cm was greatly affected by water erosion.

Keywords: weathering intensity; developmental characteristics; entropy weight; element migration; balance degree

土壤的发育演化和分类是土壤科学研究的一个重要领域。自19世纪中期以来, 研究已经从概念框架发展到描述性研究, 再到更多的量化研究^[1]。最

早的国内外相关专家^[2]认为, 土壤是在风化和成土过程同时进行下形成的, 岩石和矿物的风化导致了土壤的形成, 并被提议作为土壤的综合地球化学性质^[3]。

土壤地球化学性质是地质时期土壤发育的重要参数^[4]。风化作用是通过在土壤和沉积物形成过程中重新分配原生和次生矿物元素,在地球(近)地表环境中进行地球化学分离作用的现象^[5]。许多基本的土壤性质,如矿物成分、分子含水量、粒径分布等都与土壤风化程度有关^[6-7]。由于剥蚀和风化过程控制着土壤的物理和化学性质,Ameijeiras等^[8]通过质量平衡法研究了两者之间的关系,发现剥蚀和风化过程是紧密相连的。李建武等^[9]运用质量平衡模型计算元素迁移与淋失,探讨了热带地区强风化条件下土壤元素的地球化学特征。土壤是岩石风化的结果,风化程度越深,土壤发育就会越加成熟,因此土壤的风化特性能反映土壤的演化发育程度^[10]。

土壤发育特性具体表现为土壤发生层的差异和土壤物质的迁移与转化。在不同的母质、不同的环境条件下,土壤的风化特性差异很大。强烈的侵蚀会导致地表物质组成粗化、颗粒大小混杂无规律、孔隙结构性较差^[11],致使土壤不断发生逆向演化,其形态、物理、化学、生物特征和矿物含量等内外属性也发生相应变化,土壤的发育特征明显不同于非侵蚀环境的地带性土壤^[10]。地球表面受侵蚀环境影响的土壤面积很广^[12],研究侵蚀环境下土壤发育的特征及其与土壤侵蚀之间的关系,对土壤侵蚀的控制和土壤可持续性利用至关重要^[13],同时能为土壤发育演化研究理论的进一步完善提供尝试。

目前关于土壤发育演化的研究,多采用地球化学的方法强调化学元素的运移^[14-15],关于人为活动影响下土壤发育过程的变异和逆转方面的研究较少,侵蚀环境下土壤发育过程中物理风化特征的研究尚无文献报道。基于此,本研究在总结前人工作的基础上,选择浙江省典型的侵蚀性风化花岗岩坡地发育的土壤作为研究对象,拟采用物理和化学风化强度多指标联动分析的方法揭示不同地貌部位土壤的发育特性,为侵蚀性坡地土壤发育演化的研究提供方法借鉴。

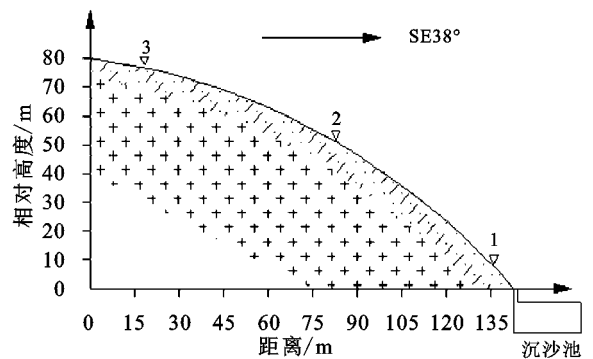
1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究所采集的土柱和土壤分层样品来自浙江省嵊州市上东水库水土保持监测站,采集时间为2015年6月,随后进行化学全量分析和物理特性测试。样品采集区气候类型为亚热带季风气候,年间的气候变化差异不大,多年平均气温为16.4℃,多年平均降水量1446.8 mm,年日照时间1988 h。地貌类型为浙东低山丘陵及台地,坡度22°左右,土壤发育母质为典型的风化花岗岩残积层,整个坡面属于典型的侵蚀性风化花岗岩坡地。

风化花岗岩坡地是南方土壤侵蚀的重要组成部分,在炎热气候和台风强降雨条件下,表层土壤极易被剥蚀并造成严重的养分流失现象^[16]。

研究区土壤分层不明显,碎屑物大小不均匀、棱角显著,无分选,粒度和成分受气候条件和母岩岩性控制。目前的土地利用类型为桃形李园地,是当地典型的经济林,植被覆盖度<45%。土壤侵蚀以溅蚀和片蚀为主,没有细沟形成,但在不同的地貌部位水力侵蚀强度差异很大。在南方水力侵蚀区,由于坡面不同地貌部位降雨汇流的差异,侵蚀性坡面基本上以微凸型坡为主(图1)。采样坡面长度约为160 m,坡度的变化为坡顶约12°、坡中约23°、坡底约28°,3个采样点坡面距离相隔约为75,70 m。这种坡型既体现了不同地貌部位的侵蚀特征,也能为合理布设水保措施提供依据。



注:图中1,2,3为坡底(28°)、坡中(23°)、坡顶(12°)采样剖面。

图1 样品采集剖面分布示意

1.2 样品采集与测定

土壤发育演化过程中物理风化和化学风化同时进行,但在发育演化的初期以物理风化为主。物理风化是土壤发育的先前作用,物理风化产生碎屑,为化学风化提供了条件^[17]。因此,物理风化特征是分析土壤发育演化阶段的基础,可以根据土壤的形态特征和结构特点来度量土壤的发育演化特征。在本研究中选择的主要物理风化指标有粉黏比、黏化率、总孔隙度、容重和土壤质地结构。不同深度土壤的化学风化特征主要体现在不同氧化物的化学含量变化及其重新组合上。研究区的地带性土壤为红壤,铁铝的富集与易溶性盐类的淋失是主要的化学风化过程,所选取的化学风化指标以体现铁铝富集和盐基淋失的指标为主:(1)硅铝比率 $Sa, SiO_2/Al_2O_3$; (2)硅铁系数 $Sf, SiO_2/Fe_2O_3$; (3)铝铁率 $Af, Al_2O_3/Fe_2O_3$; (4)硅铝铁率 $Saf, SiO_2/R_2O_3$; (5)土壤风化淋溶系数 $Ba, (RO+R_2O)/Al_2O_3$; (6)土壤风化淋溶指数 $\beta, (K_2O+Na_2O)/Al_2O_3/(底层(K_2O+Na_2O)/Al_2O_3)$; (7)土壤风化指数 $\mu, (每层的 K_2O/Na_2O)/(底层$

K₂O/Na₂O)7 个指标。在计算过程中,对各指标进行分子量计算,计算值越大说明风化强度越大。

根据实地勘查选择典型的侵蚀性地形坡面,在坡顶、坡中、坡底分别选取 3 个剖面(均属于侵蚀型剖面,土体中无堆积现象),综合对比后在每个地貌位置各选择 1 个最底层土壤风化程度目视相一致的剖面作为样品采集的位点,采样深度为 120 cm。采用等距离(20 cm)的样品采集设计从下至上进行取样。在每个剖面的相应层位各采集 1 个混合土样(同一层位平行位移后的 3 个重复,混合装于同一样品袋中),共采集 18 个混合土样,带回实验室风干后处理分析。采用环刀法测定容重,CT 扫描技术测定孔隙特征,粉黏比、黏化率和质地结构的计算基础为样品的粒度组成,采用比重计沉降法测定。用 X 射线荧光光谱仪进行化学全量分析,选择不同的主要氧化物含量作为计算相关化学风化指标的依据。

1.3 风化强度的计算

1.3.1 物理风化强度 I_p 为保证最大限度体现不同指标对物理风化强度的贡献,使用熵权法对各指标的权重进行赋值^[18]。由于各个指标的量纲、量级存在差异,首先对数据进行 Max—Min 极差标准化处理^[19]:

$$p_{ijk} = \frac{X_{ijk} - \min(X_k)}{\max(X_k) - \min(X_k)}$$

$(i=1, 2, 3; j=1, 2, \dots, 6; k=1, 2, \dots, 5)$

式中的: p_{ijk} 为标准化后的数值; X_{ijk} 为计算出来的各物理指标值。 i 为剖面位置(坡底、坡中、坡顶); j 为土壤层数; k 为指标项数。根据信息论中信息熵的定义,进行信息熵和熵权重的计算:

$$E_k = -\Phi \sum_{k=1}^5 (p_{ijk} \times \ln p_{ijk})$$

(2)

$$W_k = \frac{1 - E_k}{5 - \sum_{k=1}^5 E_k} \quad (k=1, 2, \dots, 5)$$

(3)

式中: E 为信息熵; W 为熵权重; $\Phi = \frac{1}{\ln 5}$ 。各物理指标的信息熵与熵权重见表 1。

表 1 物理风化指标的信息熵与熵权重

物理指标	粉黏比	容重	总孔隙度	质地结构	黏化率
信息熵	3.55	3.31	3.36	2.37	3.26
熵权重	0.23	0.21	0.22	0.13	0.21

为了比较不同层位土壤的风化强度,以剖面最底层为基数,采用归一化处理方法进行物理风化指标的相对性计算,最后进行物理风化强度值的计算:

$$Q = \frac{X_j}{X_6} \times 100\% \quad j=1, 2, \dots, 6$$

(4)

$$I_{p_{ij}} = S_{ij} \times a + Z_{ij} \times b + T_{ij} \times c + \frac{1}{C_{ij}} \times d + \frac{1}{R_{ij}} \times e$$

$(i=1, 2, 3; j=1, 2, \dots, 6)$

(5)

$$T = (\text{砂粒含量} + \text{黏粒含量}) \times 0.3 + \text{粉粒含量} \times 0.7$$

(6)

式中: X_j 为不同地貌部位各层的指标值; X_6 为该部位最底层的指标值; Q 为相对性数值; I_p 为物理风化强度(无量纲); S_{ij} 为黏化率(无量纲); Z_{ij} 为总孔隙度(无量纲); T_{ij} 为质地结构; C_{ij} 为容重; R_{ij} 为粉黏比; a, b, c, d, e 为相应各物理变量的熵权重值。

1.3.2 化学风化强度 I_c 首先计算不同地貌部位 3 种土壤各层次元素的迁移率^[18]:

$$M = \frac{M_j}{M_6} \times 100\% \quad (j=1, 2, \dots, 6)$$

(7)

式中: M 为化学元素的迁移率(%); M_j 为不同地貌部位各层某一化学元素的含量(%); M_6 为对应地貌部位最底层该元素的含量(%)。接着计算 3 个剖面土壤的化学元素迁移率的均衡度和各风化指标的均衡度及化学风化强度^[20]:

$$E_r \& E_m = \frac{e^{H(s)}}{N}$$

(8)

$$H(s) = -\sum (P_j \times \ln P_j) \quad j=1, 2, \dots, 6$$

(9)

$$I_c = (1 - \frac{E_r + E_m}{2}) \times 100\%$$

(10)

式中: I_c 为风化强度(%); E_r 为风化率均衡度; E_m 为元素迁移率均衡度; $H(s)$ 为信息熵函数; N 为样品个数(个); P_j 为每个样品占样品总数的百分比(%)。计算得不同地貌部位的土壤化学风化指标与均衡度值见表 2。

2 结果与分析

2.1 不同地貌部位土壤的物理风化特征

由图 2 可知,坡地不同地貌部位土壤容重的大小趋势为坡底>坡中>坡顶,纵向上随着土层深度的增加而递增,坡中的增幅最大,坡顶的增幅最小,最大容重值出现的层次不同。总孔隙度值则呈现相反变化趋势,随土层深度增加而减小,各层大小排序与容重值相反。粉黏比和质地结构也总体随土层深度增加而递增,而黏化率的变化规律性较为复杂。在坡顶,除表层(0—20 cm)外,黏化率随着土层深度的增加而减小,在 20—80 cm 的范围内都很大。坡中黏化率较大值的层位出现在 60—120 cm 处。坡底土壤的黏化率值都很小。总体来看,黏化率的排序为坡顶>坡中>坡底,黏化率较大的层位从坡顶到坡底纵向下移明显。

不同地貌部位土壤的物理发育程度差异较大(图 3),但总体上随着剖面深度的加深而递减。坡顶土壤

的发育程度随土层深度的增加而递减,规律性比较明显,风化强度极大值在 20—40 cm 处,极值相差 1.23。坡中土壤发育程度变化相对平缓,风化强度值在 1.00~1.19 波动,极大值在 60—80 cm 处,整个剖面极值相差 0.19。坡底土壤发育程度则变化极不规律,从表层到

底部呈现先增后减再增趋势,波动幅度较大,风化强度极大值在 20—40 cm 处,极值相差 0.74。总体而言,除了坡底 20—40 cm 处出现了一个较大畸点外,不同地貌部位土壤物理发育程度大小的总体趋势为坡顶>坡中>坡底。

表 2 不同地貌部位不同层次土壤化学风化指标与均衡度值

采样位置	土层 深度/cm	化学风化指标							元素迁移率	风化指标
		Sa	Sf	Af	Saf	Ba	β	μ	均衡度 E_m	均衡度 E_r
坡顶	0—20	1.59	5.66	3.56	1.24	0.27	1.59	5.66	0.96	0.68
	20—40	1.58	5.58	3.53	1.23	0.24	1.58	5.58	0.98	0.68
	40—60	1.82	6.35	3.50	1.41	0.22	1.82	6.35	0.99	0.67
	60—80	1.95	7.06	3.62	1.53	0.24	1.95	7.06	0.99	0.66
	80—100	2.07	7.71	3.73	1.63	0.26	2.07	7.71	1.00	0.66
	100—120	1.98	7.61	3.85	1.57	0.26	1.98	7.61	0.99	0.65
坡中	0—20	1.51	5.48	3.63	1.18	0.29	1.51	5.48	0.95	0.70
	20—40	1.69	5.98	3.53	1.32	0.27	1.69	5.98	0.97	0.69
	40—60	1.83	6.50	3.56	1.43	0.25	1.83	6.50	0.99	0.68
	60—80	2.16	7.59	3.52	1.68	0.26	2.16	7.59	1.00	0.67
	80—100	2.36	7.78	3.30	1.81	0.25	2.36	7.78	1.00	0.68
	100—120	2.43	7.87	3.24	1.86	0.25	2.43	7.87	1.00	0.68
坡底	0—20	2.00	7.54	3.77	1.58	0.31	2.00	7.54	0.96	0.69
	20—40	2.05	7.35	3.59	1.60	0.26	2.05	7.35	0.99	0.70
	40—60	2.24	7.84	3.51	1.74	0.26	2.24	7.84	1.00	0.70
	60—80	2.25	7.74	3.44	1.74	0.25	2.25	7.74	1.00	0.70
	80—100	2.48	8.10	3.26	1.90	0.27	2.48	8.10	1.00	0.70
	100—120	2.74	8.10	2.96	2.05	0.28	2.74	8.10	1.00	0.71

2.2 不同地貌部位土壤的化学风化特征

由图 4 可知,该区土壤的化学组分主要是 Si、Al 氧化物,占到了总量的 80%以上。剖面位置不同,土壤的化学元素迁移特征也各有差异。整体而言,土壤的脱硅富铝富铁化过程比较强,SiO₂在坡顶、坡中和坡底都随着土层深度的增加而明显递增。Al₂O₃、Fe₂O₃的含量则随着剖面深度的增加而减少,但表层含量都低于次表层。硅铝比、硅铁比和硅铝铁比的值都随着土层深度的增加而增加,铝铁比的值则随着土层深度的增加而递减,可说明铝的富集程度要大于铁。碱土金属(CaO、MgO)的含量少于碱金属的含量(K₂O、Na₂O),却都随着土层深度的增加而递减,表明淋溶作用比较弱。风化淋溶系数的值都很小,在 0.25 左右波动。风化淋溶指数与土壤风化指数是碱金属 K、Na 含量的相对比值结果,都随着土层深度的增加而增大,表明随着土层深度的增加 K、Na 的淋溶量逐渐减小,也说明表层的风化强度相对下层要大一些,而且 K 的相对淋失量要高于 Na。

化学风化强度是多个化学风化指标信息的综合,能体现土壤的化学风化特征^[7,20]。坡顶、坡中和坡底的化学风化强度总体上都随土层深度的增加而增大(图 5),但化学风化强度均不大,风化强度值以坡顶

最大为 50.36%,坡中为 50.09%,坡底为 50.00%。从剖面中各层的变化规律看,坡顶土壤的化学风化强度随土层深度的增加呈先减后增的趋势,但变幅不大,风化强度极大值在 100—120 cm 处,极值相差 16.94%。坡中土壤的化学风化强度随着剖面深度递增,规律性比较明显,风化强度极大值出现在最底层 100—120 cm 处,极值相差 19.89%。坡底土壤化学风化强度变化波动较大,波动幅度为 24.43%~50.00%,同样呈现为先减后增的变化趋势,极大值出也现在 100—120 cm 处,极值差为 25.57%。

2.3 不同地貌部位土壤总的风化特性比较

在土壤发育过程中,物理、化学和生物风化同时进行,但在不同的环境条件下各种风化作用的强度不同。引入地貌演化与气候特征相关分析思路^[2],结合土壤发育过程中与降雨和温度的关系分析,绘制图 6。从地带性土壤的发育过程来讲,在图 6 的左上角是高温少雨地区,土壤的发育演化过程以物理风化作用为主;近左下角的地区,风力作用强烈,土壤发育处于初始阶段,几乎只有物理风化作用;右上角是高温多雨地区,土壤发育过程以化学风化为为主。根据本研究区的气温和降水来看,应该处于图 6 的近右上角区域,以化学风化作用为主,而且距地表越深化学风化

的强度越大。由于水力侵蚀强度的加大,在侵蚀性风化母质上发育的坡地,土壤的发育演化过程和阶段不同于地带性土壤。

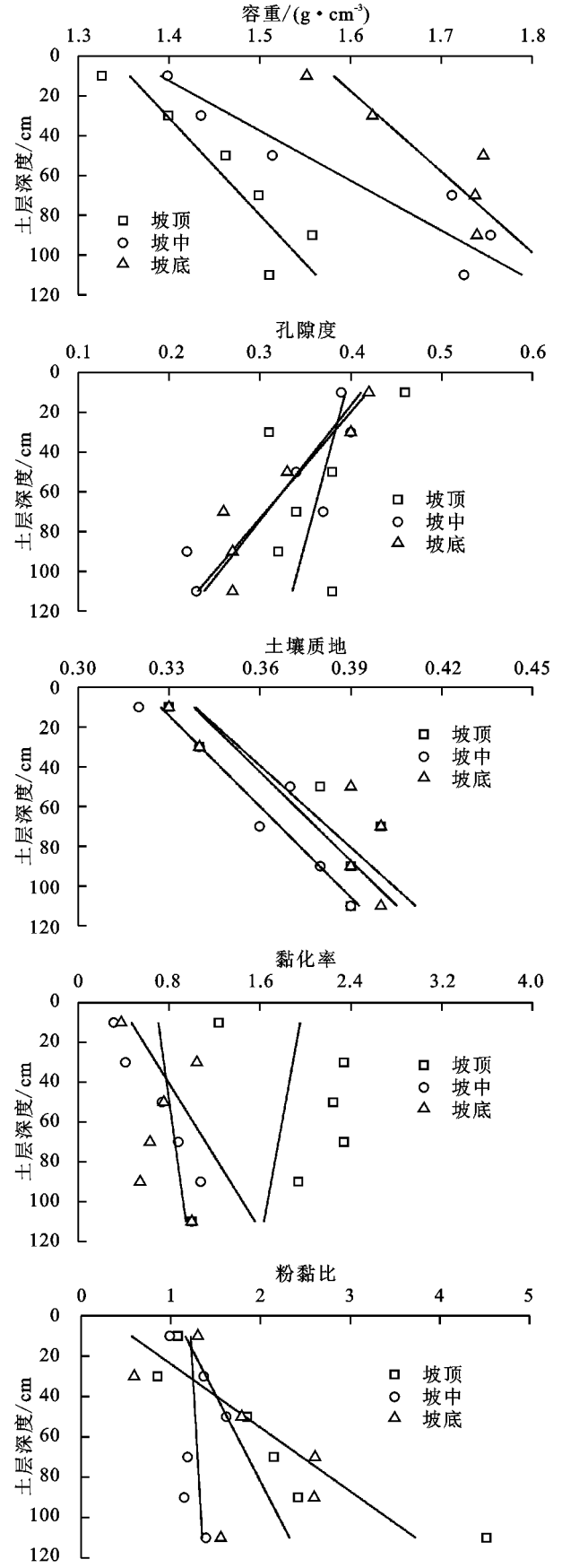


图 2 土壤物理特征值随土层深度的变化

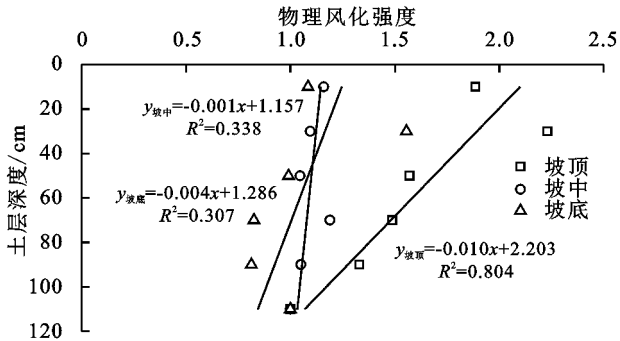


图 3 不同地貌部位土壤的物理风化强度随土层深度的变化

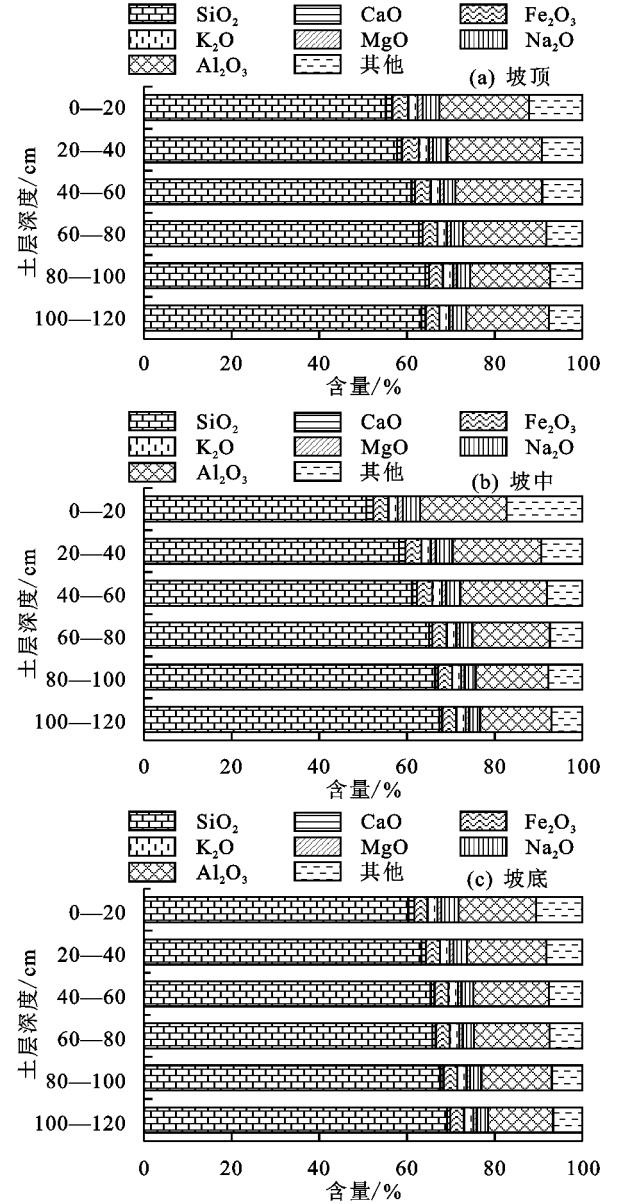


图 4 土壤化学特征值随土层深度的变化

为了进一步分析土壤发育过程中物理和化学风化强度在剖面中的相对变化,以各剖面最底层的风化强度为参照计算出了不同地貌部位土壤不同深度层次的土壤物理、化学相对风化强度(图 7)。土壤的风化特征整体上随土层深度变化的规律并不十分明显。坡底和坡顶的最大物理相对风化强度都出现在 20—40 cm 处。坡顶土壤的物理相对风化强度随土层深

度变化明显,极大值出现在 20—40 cm 处,极值差为 1.23,是 3 个剖面中最大的,而化学相对风化强度随剖面变化不明显,极值差为 0.34。坡中与坡顶正好相反,物理相对风化强度随剖面的加深变化并不明显,而化学相对风化强度的递增规律则明显,极值差为 0.40,在 3 个剖面中最大。在坡底,物理和化学相对风化强度变化随剖面深度的变化都不明显,物理相对风化强度在 20—40 cm 层位出现了一个最大畸值。化学风化强度与物理风化强度值的比值在坡顶剖面的 0—40 cm 处极大,往下逐渐减小,规律性较强。坡中的风化强度比值也呈现为递减规律。在坡底土壤中,二者比值的极大值出现在 20—40 cm 处,最小值位于 100—120 cm 处,表现为先增后减的变化规律。整体来看,物理相对风化强度随着土层深度的增加递减,而化学相对风化强度表现出相反的变化趋势。

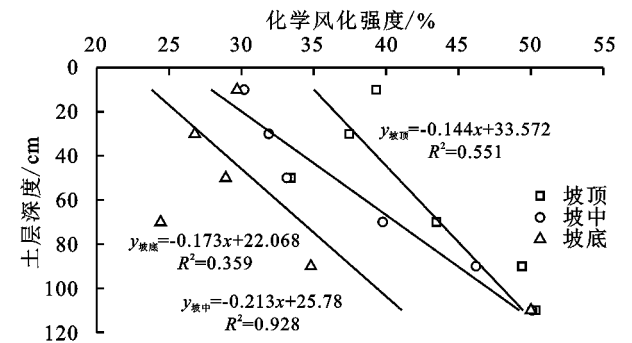


图 5 不同地貌部位土壤的化学风化强度随土层深度的变化

3 讨论

在本研究区,土壤发育演化的物理风化作用主要体现在降雨击溅和坡面径流的机械冲刷效应,造成坡面物质的迁移和土壤结构的变化^[21]。物理风化指标的高值都出现土壤剖面一定的深度而不在土壤上部

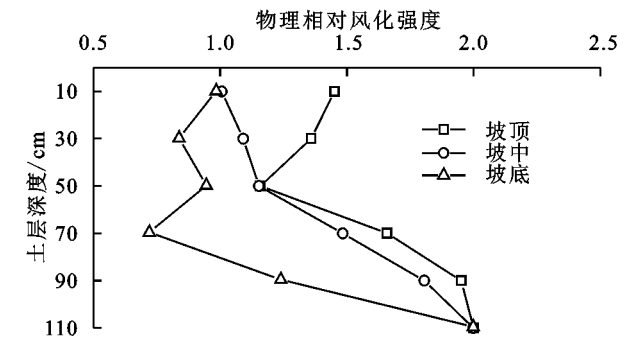


图 7 坡地不同地貌部位土壤相对风化强度变化趋势

土壤主要化学元素含量随剖面位置变化的趋势不明显,不同地貌部位土壤的化学风化强度都不大,而且化学风化强度的差异性明显不同于地带性土壤,这种特征与庞奖励等^[22]在渭北高原上关于土地利用变化对土壤发育影响的研究结论具有类似性,但研究对象的不同和地理位置的差异使得其形成原因不同。本研究区位于亚热带地区,温度和降水对化学风化促

的耕作层,尤其在次表层(20—40 cm)出现了物理风化强度高值。整个坡面表层遭受水力侵蚀明显,一些细粉粒和黏粒在重力作用下随降雨和坡面径流或向下渗流,或向坡下运移,致使表层的细颗粒物质减少,因而粉黏比和质地结构的计算值随剖面深度的增加而增大,进而影响了风化强度的计算值。在不同的地貌部位,坡面径流的汇流作用不同,大汇流面积导致坡面物质的运移强度增大,所以 3 个剖面土壤物理风化强度不同。位于坡底的土壤,细颗粒物质的下移明显大于坡顶和坡中,其在表层还接受上坡径流带来的细颗粒物质,同时坡底又由于处于沉沙池的上端,坡面径流在此处容易汇集,使得坡底汇流面积最大,其侵蚀的强度也最大,而物理风化强度表现为最低。坡底土壤的物理风化特征明显不同于坡地上部。坡中处于完全无法集汇水的位置,所以其物理风化强度值变化不规则,60—80 cm 处的极大值并不十分突出。坡顶土壤的汇水面积小,没有上方汇水所携带物质的补给,所以物理风化强度随剖面深度的纵向变化规律明显。从各剖面土壤的物理风化指标和综合风化强度值可知,水力侵蚀的影响深度主要分布在 0—40 cm 处。

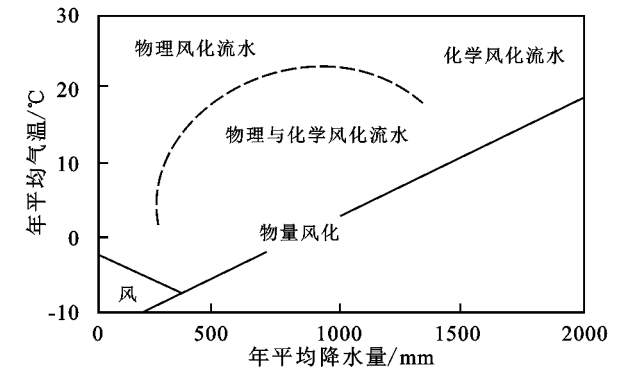
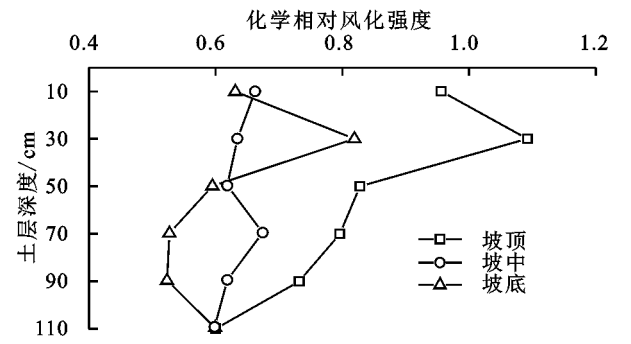


图 6 土壤发育风化作用与降雨及温度变化关系



进作用明显,但强烈的水蚀对土壤的化学风化过程起到了限制作用^[23]。碱金属和碱土金属活动性比较强,其含量理论上应该随着土层深度的增加而增加,由于坡地表层在水力侵蚀作用下物理风化快于化学风化,这些元素在淋失的同时也在释放,加之人为耕作和作物根系对化学元素的选择性吸收等因素的影响^[24],所以其在化学全量的百分比中不会减少,反而呈现增多的现象。根据

地带性条件,本研究区应该以化学风化作用为主,但由于所处地貌位置和母质岩性的影响,坡地土壤在强烈的侵蚀作用下以砂性为主,导致表层土壤以物理风化为主,而土壤深层主要为化学风化,使得化学风化强度值基本上出现在100—120 cm处。

总体来说,研究区的侵蚀性风化花岗岩坡地土壤整体发育的程度不大,层次发育不明显,而发育层次的变化规律明显区别于地带性土壤。从坡地整体而言,坡面水力侵蚀对土壤发育的影响深度约为20—40 cm,化学风化强度值对侵蚀强度指示的灵敏度具有迟缓性,而土壤物理风化特性的指示灵敏度高于化学风化特性。在侵蚀强度较小的坡顶,化学与物理风化强度值都是最大的,但在表层以物理风化强度较为优势,所以二者的比值在剖面的上部层位较大;坡中土壤的物理风化强度值和化学发育程度值的变化幅度都很小,二者的比值变化不大;坡底土壤的化学与物理风化强度的对应关系很复杂。物理和化学发育指标一致表明,不同地貌部位的土壤风化发育程度排序为坡底<坡中<坡顶,与采样坡面的水力侵蚀强度排序相反,表明水力侵蚀严重影响风化花岗岩土壤的演化发育特性^[25]。

4 结论

在强烈侵蚀的风化花岗岩坡地发育的土壤总体发育较弱,侵蚀过程严重影响了土壤的演化过程和进一步的层次划分,剖面0—40 cm处的土壤受侵蚀影响明显,发育于山地丘陵侵蚀性坡地的土壤层次划分应区别于地带性土壤层次的划分。侵蚀强度越大,则土壤发育程度越差,阻碍该区土壤向典型地带性土壤的演化。在侵蚀环境下,整个剖面中土壤化学发育程度值的变化差别于当地地带性土壤发育中以化学风化为主的特性。在土壤发育演化的过程中,物理风化指标和化学风化指标具有同等作用的表征功效。表层土壤以物理风化为主,而深层土壤主要表现为化学风化。

总之,在强烈侵蚀的花岗岩风化残积坡地发育的土壤,总体发育成熟过程较弱,其进一步的发育与典型的地带性土壤的发育有很大的差异,侵蚀过程严重影响土壤的进一步成熟。在土壤发育特征的研究中,采用了化学风化综合性指数和物理风化综合性指数的联合判断,实现了多要素的综合分析,可为土壤发育演化研究理论的进一步完善提供思路和尝试。

参考文献:

- [1] Hartemink A E, Bockheim J G. Soil genesis and classification [J]. *Catena*, 2013, 104: 251-256.
- [2] 方谦,洪汉烈,赵璐璐,等.风化成土过程中自生矿物的气候指示意义[J]. *地球科学*, 2018, 43(3): 753-769.
- [3] Norra S, Fjer N, Li F W, et al. The influence of differ-

ent land uses on mineralogical and chemical composition and horizonation of urban soil profiles in Qingdao, China [J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2008, 8(1): 4-16.

- [4] Chen M J, Liu C S, Li F B, et al. Correlations between soil geochemical properties and Fe(III) reduction suggest microbial reducibility of iron in different soils from Southern China [J]. *Catena*, 2014, 123: 176-187.
- [5] Banfield J F, Barker W W, Welch S A, et al. Biological impact on mineral dissolution: Application of the lichen model to understanding mineral weathering in the rhizosphere [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1999, 96(7): 3404-3411.
- [6] Hong H L, Fang Q, Cheng L L, et al. Microorganism-induced weathering of clay minerals in a hydromorphic soil [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, 184: 272-288.
- [7] 陈儒章,张丽萍,郭燕虹,等.侵蚀性花岗岩坡地不同地貌部位土壤剖面风化特征研究[J]. *土壤学报*, 2016, 53(6): 1380-1388.
- [8] Ameijeiras-Marino Y, Opfergelt S, Schoonejans J, et al. Impact of low denudation rates on soil chemical weathering intensity: A multiproxy approach [J]. *Chemical Geology*, 2017, 456: 72-84.
- [9] 李建武,张甘霖,李德成,等.强烈风化条件下玄武岩发育土壤的元素地球化学特征[J]. *地球与环境*, 2012, 40(4): 491-498.
- [10] 刘成禹,何满潮.对岩石风化程度敏感的化学风化指数研究[J]. *地球与环境*, 2011, 39(3): 349-354.
- [11] 范晓娟,张丽萍,邓龙洲,等.侵蚀程度差异诱发的坡面产流—产沙—总磷流失特征[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(2): 459-468.
- [12] Bookhagen B, Strecker M R. Spatiotemporal trends in erosion rates across a pronounced rainfall gradient: Examples from the southern Central Andes [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2012, S327/328(8): 97-110.
- [13] Moore O W, Buss H L, Green S M, et al. The importance of non-carbonate mineral weathering as a soil formation mechanism within a karst weathering profile in the SPEC-TRA Critical Zone Observatory, Guizhou Province, China [J]. *Acta Geochimica*, 2017, 36(3): 566-571.
- [14] 郭媛媛,莫多闻,毛龙江,等.澧阳平原岩板岩剖面地球化学特征与风化强度研究[J]. *地理科学*, 2013, 33(3): 335-341.
- [15] 张晓娟,季宏兵,冯晓静,等.岩溶盆地红土风化剖面的元素地球化学研究[J]. *地理科学*, 2017, 37(6): 944-951.
- [16] Deng L Z, Fei K, Sun T Y, et al. Phosphorus loss through overland flow and interflow from bare weathered granite slopes in Southeast China [J]. *Sustainability*, 2019, 11: e4644.

[2] 覃超,吴红艳,郑粉莉,等.黄土坡面细沟侵蚀及水动力学参数的时空变化特征[J].农业机械学报,2016,47(8):146-154.

[3] 赵光旭,王全九,张鹏宇,等.短坡坡长变化对坡地风沙土产流产沙及氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2016,30(4):13-18.

[4] 杨阳,朱元骏,安韶山.黄土高原生态水文过程研究进展[J].生态学报,2018,38(11):4052-4063.

[5] 李洪清.黄土高原地区水土流失问题[J].工程建设与设计,2016(18):97-99.

[6] 杨建霞,雷孝章,邱景,等.5°~25°坡耕地径流小区产流产沙规律[J].中国水土保持科学,2008,6(增刊 1):30-34,53.

[7] 马星,郑江坤,王文武,等.不同雨型下紫色土区坡耕地产流产沙特征[J].水土保持学报,2017,31(2):17-21.

[8] 裴峥,段喜明,侯礼婷.施加 PAM 和 PG 对坡地产流产沙的影响研究[J].中国水土保持,2017(4):59-62,69.

[9] 王丽,王力,王全九.PAM 对不同坡度坡地产流产沙及氮磷流失的影响[J].环境科学学报,2015,35(12):3956-3964.

[10] 周蓓蓓,陈晓鹏,吕金榜,等.纳米碳对不同植被覆盖下黄土坡地降雨侵蚀的抑制效果[J].农业工程学报,2017,33(2):116-124.

[11] 吴军虎,邵凡凡,刘侠.蚯蚓粪对土壤团聚体组成和入渗过程水分运移的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):81-87.

[12] Jouquet P, Thi P N, Hong H N, et al. Laboratory investigation of organic matter mineralization and nutrient leaching from earthworm casts produced by *Amyntas khami* [J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 47(1):24-30.

[13] Chaoui H I, Zibilske L M, Ohno T. Effects of earthworm casts and compost on soil microbial activity and plant nutrient availability [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35(2):295-302.

[14] Park S, Lee I, Cho C, et al. Effects of earthworm cast and powdered activated carbon on methane removal capacity of landfill cover soils [J]. *Chemosphere*, 2008, 70(6):1117-1123.

[15] 李彦需,邵明安,王娇.蚯蚓粪覆盖对土壤水分蒸发过程的影响[J].土壤学报,2018,55(3):633-640.

[16] 张佳崎,马悦,张瑞芳,等.不同种植模式和坡度对片麻岩山坡地氮素流失的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):8-13.

[17] Kumar R, Srivastava R S A K. Conservation efficiency of five common riparian weeds in movement of soil, water and phosphorus [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1992, 29(3):737-744.

[18] 张慧芸,章慧,董艳,等.基于重标极差(R/S)和小波分析的黄土坡耕地产流产沙特征研究[J].土壤学报,2017,54(6):1345-1356.

[19] Tao W H, Wang Q, Lin H. An approximate solution for describing surface runoff and sediment transport over hillslope [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 558:496-508.

[20] 王全九,赵光旭,刘艳丽,等.植被类型对黄土坡地产流产沙及氮磷流失的影响[J].农业工程学报,2016,32(14):195-201.

[21] Yang T, Wang Q, Su L J, et al. An approximately semi-analytical model for describing surface runoff of rainwater over sloped land [J]. *Water Resources Management*, 2016, 30:1-14.

[22] Mahmoodabadi M, Sajjadi S A. Effects of rain intensity, slope gradient and particle size distribution on the relative contributions of splash and wash loads to rain-induced erosion [J]. *Geomorphology*, 2015, 253:159-167.

[23] Shi Z H, Fang N F, Wu F Z, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 454/455(3):123-130.

[24] 吴军虎,朱端端,王海洋,等.不同腐殖酸类对黄土坡面侵蚀和养分流失的影响[J].水土保持学报,2017,31(1):24-29.

[25] 胡梓超,周蓓蓓,王全九.模拟降雨条件下纳米碳对黄土坡面养分流失的影响[J].水土保持学报,2016,30(4):1-6.

(上接第 70 页)

[17] 周俊.海螺沟冰川退缩迹地风化:成土过程与土壤磷形态研究[D].北京.中国科学院研究生院,2014.

[18] 邱陆畅,张丽萍,陆芳春,等.基于熵权法的林下土壤抗蚀性评价及影响因素分析[J].水土保持学报,2016,30(4):74-79.

[19] 孙蓓婷,高超,张燕.基于加权 Topsis 法综合评价典型滩涂围垦区土壤质量演变[J].中国生态农业学报,2018,26(2):284-293.

[20] 张丽萍,朱大奎,杨达源.长江三峡坝区花岗岩风化壳化学元素迁移特征[J].地理学报,2001,56(5):515-522.

[21] 邓龙洲,张丽萍,范晓娟,等.不同雨强和坡度下侵蚀性风化花岗岩母质坡地产流产沙特征[J].农业工程学报,2018,34(17):143-150.

[22] 庞奖励,张卫青,黄春长,等.渭北高原土地利用变化对土壤剖面发育的影响:以洛川—长武塬区耕地转为苹果园为例[J].地理学报,2010,65(7):789-800.

[23] 齐雁冰,常庆瑞,刘梦云,等.风蚀水蚀交错区黄土粘土矿物特征及环境意义[J].水土保持学报,2015,29(1):159-162.

[24] 杨慧.植物对金属离子胁迫的响应机制研究[D].北京.中国科学院研究生院,2010.

[25] 温美丽,杨龙,王钧,等.南岭森林的土壤保持功能[J].林业与环境科学,2018,34(2):127-134.