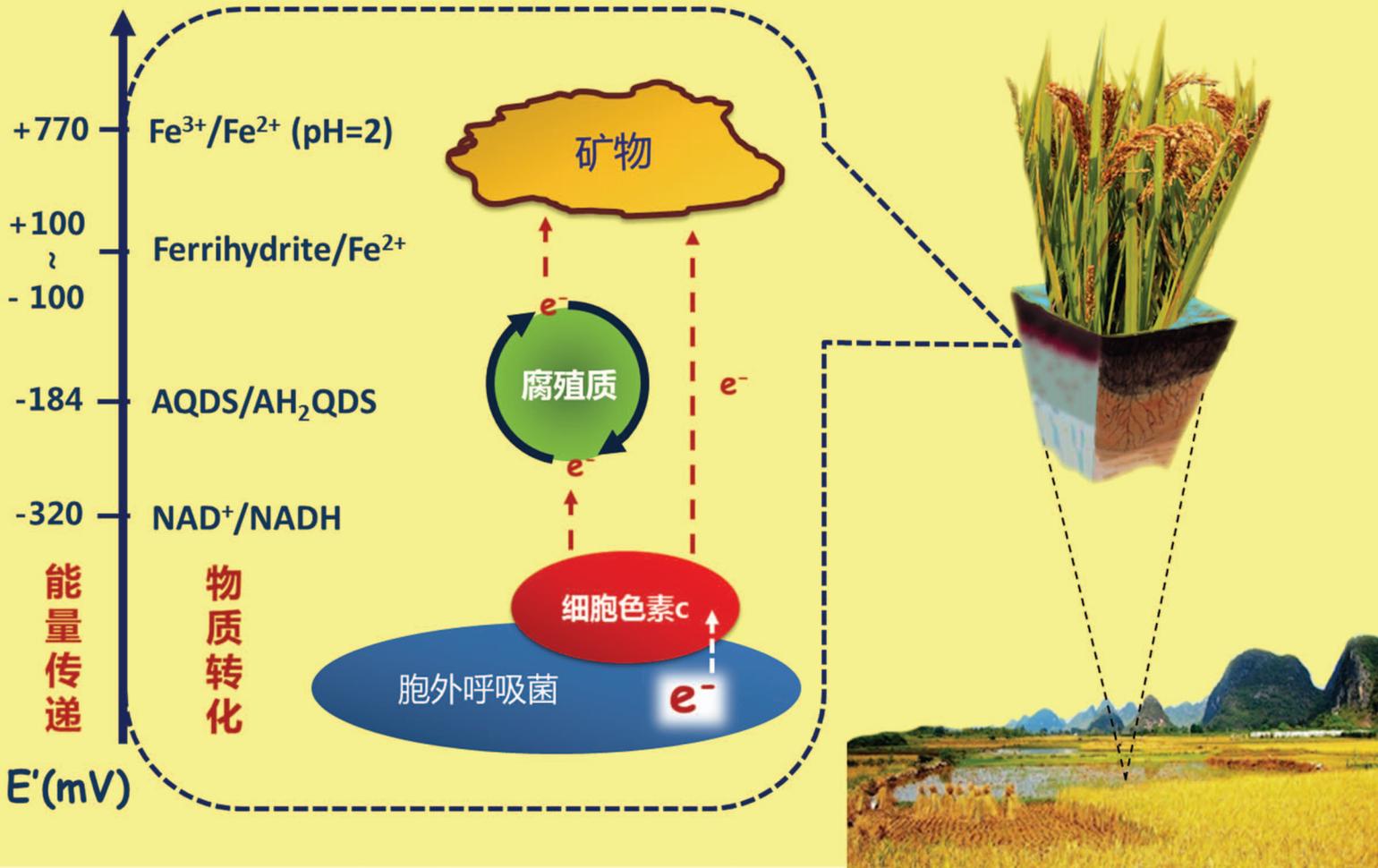


# Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao

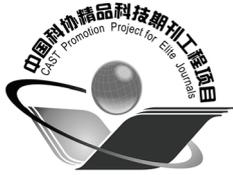


中国土壤学会 主办  
科学出版社 出版

2016

第53卷 第2期

Vol.53 No.2



# 土壤学报

(Turang Xuebao)



第 53 卷 第 2 期 2016 年 3 月

## 目 次

### 综述与评论

- 土壤微生物—腐殖质—矿物间的胞外电子传递机制研究进展····· 吴云当 李芳柏 刘同旭 (277)
- 长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响····· 王 敬 程 谊 蔡祖聪等 (292)

### 新视角与前沿

- 土壤学不应忽视对作物土传病原微生物的研究····· 蔡祖聪 黄新琦 (305)

### 研究论文

- 西安少陵塬黄土—古土壤序列 $S_3$ 剖面元素迁移及古气候意义····· 楚纯洁 赵景波 (311)
- 基于盲源分离的稀疏植被区土壤含盐量反演····· 刘 娅 潘贤章 石荣杰等 (322)
- 基于地类分层的土壤有机质光谱反演校正样本集的构建····· 刘艳芳 卢延年 郭 龙等 (332)
- 基于多分辨率遥感数据与随机森林算法的土壤有机质预测研究····· 王茵茵 齐雁冰 陈 洋等 (342)
- 鄂东南崩岗剖面土壤水分特征曲线及模拟····· 邓羽松 丁树文 蔡崇法等 (355)
- 放水冲刷对红壤坡面侵蚀过程及溶质迁移特征的影响····· 马美景 王军光 郭忠录等 (365)
- 汶川震区滑坡堆积体坡面土壤侵蚀率及水动力学参数研究····· 王仁新 何丙辉 李天阳等 (375)
- 咸水冻融灌溉对重度盐渍土壤水盐分布的影响····· 张 越 杨劲松 姚荣江 (388)
- 基于不同估算方法的贵州省土壤温度状况····· 陆晓辉 董宇博 涂成龙 (401)
- 拉萨灌丛草甸区土壤温度变化特征····· 巩玉玲 王兆锋 张德锂等 (411)
- 砂土和黏土的颗粒差异对土壤斥水性的影响····· 杨 松 吴珺华 董红艳等 (421)
- AQDS加速红壤性水稻土中DDT厌氧脱氯效应研究····· 刘翠英 王 壮 徐向华等 (427)
- 激发式秸秆深还对土壤养分和冬小麦产量的影响····· 赵金花 张丛志 张佳宝 (438)
- 臭氧污染对麦田土壤不同活性有机碳库的影响····· 寇太记 程相涵 张东亮等 (450)
- 黑土区水稻土有机氮组分及其对可矿化氮的贡献····· 丛耀辉 张玉玲 张玉龙等 (457)
- 水土保持措施对红壤缓坡地土壤活性有机碳及酶活性的影响····· 黄尚书 成艳红 钟义军等 (468)
- 祁连山青海云杉林叶片—枯落物—土壤的碳氮磷生态化学计量特征····· 赵维俊 刘贤德 金 铭等 (477)
- 基于核酸DNA/RNA同位素示踪技术的水稻土甲烷氧化微生物研究····· 郑 燕 贾仲君 (490)
- 适应玉米的溶磷细菌筛选及其对玉米生长的影响····· 梅新兰 闪安琪 蒋 益等 (502)
- 旱地红壤线虫群落对不同耕作年限的响应及指示意义····· 王明伟 刘雨迪 陈小云等 (510)
- 西藏“玉米田养鹅”模式下养分吸收与养分平衡特征····· 沙志鹏 张宇阳 王 超等 (523)
- 加工番茄连作对土壤理化性状及微生物量的影响····· 康亚龙 景 峰 孙文庆等 (533)

### 研究简报

- CTMAB对BS-12修饰膨润土的复配修饰模式····· 余 璐 孟昭福 李文斌等 (543)
- 不同机械改土方式对白浆土物理特性及酶活性的影响····· 孟庆英 张春峰 贾会彬等 (552)

### 信息

- 《土壤学报》2015年度审稿专家名录····· (560)

封面图片: 微生物胞外电子传递: 能量传递与物质转化 (由吴云当、李芳柏、刘同旭提供)

DOI: 10.11766/trxb201505280210

## 鄂东南崩岗剖面土壤水分特征曲线及模拟\*

邓羽松 丁树文<sup>†</sup> 蔡崇法 吕国安

(华中农业大学水土保持研究中心, 武汉 430070)

**摘要** 崩岗是我国南方花岗岩地区破坏性极强的水土流失类型。以鄂东南地区两个典型的崩岗剖面为对象, 探讨崩岗剖面包括表土层、红土层、斑纹层和碎屑层的土壤水分特征及方程拟合过程, 明确崩岗发生的水分运动机理。结果表明: 崩岗土壤释水量伴随吸力呈规律性变化, 其中斑纹层和砂土层低吸力时脱水能力大于表土层和红土层, 高吸力时各个层次土壤水分特征曲线趋于平缓。利用当量孔隙的计算发现不同土层的孔隙变化也存在变化规律, 均体现为由表土层至碎屑层土壤大孔隙比例增加而毛管孔隙减少。选取 van Genuchten 方程和 Gardner 方程对崩岗剖面土壤实测数据进行了曲线拟合, 同时进行了两个方程的拟合评价,  $R^2$  基本在 0.9 以上, 同时残差平方和的数量级在  $10^{-3}$  和  $10^{-5}$  之间。研究表明, van Genuchten 方程参数能够较好地拟合崩岗表土层和红土层土壤水分特征曲线的实测数据, 误差相对较小, 而 Gardner 方程适用于斑纹层和碎屑层土壤。

**关键词** 崩岗; 土壤剖面; 土壤水分特征曲线; 模型拟合

**中图分类号** S152.7; S157.1 **文献标识码** A

崩岗是发生在我国南方花岗岩地区相当严重的土壤侵蚀现象, 主要是山坡土体在水力和重力共同作用下受破坏致崩塌和冲刷而造成的<sup>[1-2]</sup>。崩岗广泛分布在广东、江西、福建和湖北等地。整个发生系统主要由集水坡面、崩壁、崩积堆、沟道和洪积扇等基本单元组成<sup>[3]</sup>, 尤其是崩壁的溯源侵蚀模数大, 后退的过程中严重破坏土地资源, 洪积物堆积导致泥沙掩埋山间梯田和绿地, 也严重影响了农田土壤理化性质<sup>[4-6]</sup>。探讨崩岗的发生机理与生态修复方式对农业生产有重要的实践指导意义, 近年较多专家学者聚焦于此, 尤其是从崩壁土层特性开展研究, 做了大量工作。吴志峰和王继增<sup>[7]</sup>对华南花岗岩地区崩岗各层次的粒度特征、土体微结构、化学成分和黏土矿物进行了分析, 揭示了各个层次的性质存在较大差异。王艳忠等<sup>[8]</sup>、Gong 和 Jia<sup>[9]</sup>开展了崩岗土壤可蚀性及其影响因子的对比研究, 并从垂直剖面分析了崩岗发育的物质

基础。对于崩岗水分方面的研究, 蒋芳市等<sup>[10]</sup>对崩岗崩积体渗透特性进行了分析, 揭示了崩积体土壤达到稳渗的时间较短; 林敬兰等<sup>[11]</sup>研究了崩岗不同土层的渗透性特征, 从初渗率、稳渗率、平均入渗率、入渗量角度分析可知, 各土层的入渗性能为红土层至碎屑层不断减弱。由此可见, 崩岗的发生与土壤本身的持水状况有一定关系, 而对崩岗剖面土壤水分运移方面的研究目前报道较少。

土壤水分特征曲线是定量研究土壤水分运动和溶质迁移的重要参数, 主要是用于表达土壤水吸力随土壤含水率变化的关系曲线, 能反映土壤水的能量与数量间的关系。目前对其进行研究的相关报道较多<sup>[12-18]</sup>。更为重要的是, 土壤水分特征曲线能反映土壤水分滞留、土壤侵蚀及溶质运移过程<sup>[19-20]</sup>。因此, 以土壤水分特征曲线表征中国南方花岗岩土层的水分运动及影响是研究崩岗侵蚀的一个重要内容, 而目前国内外文献中报道较

\* 国家科技支撑计划项目 (2011BAD31B04) 和国家自然科学基金项目 (41571258) 资助 Supported by the National Key Technology R & D Program of China (No. 2011BAD31B04) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41571258)

<sup>†</sup> 通讯作者 Corresponding author, E-mail: dingshuwen@mail.hzau.edu.cn

作者简介: 邓羽松 (1988—), 男, 广西桂林人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: dennys@163.com

收稿日期: 2015-05-28; 收到修改稿日期: 2015-11-04

少。目前,拟合土壤水分特征曲线的模型主要有: van Genuchten方程及其修正方程, Brooks-Corey方程、Dual-porosity方程、Gardner方程<sup>[21]</sup>等,其中 Gardner方程的计算简便, van Genuchten方程应用广泛。本文选择鄂东南通城县崩岗侵蚀区,通过测定土壤水分特征曲线、土壤容重、颗粒分布等性质,分析崩岗区不同土层水分特征曲线和孔隙性质的变化,同时对比Gardner方程和van Genuchten方程对各个层次的适用程度,旨在选择适合拟合崩岗地区水分特征的模型,深入分析崩岗各个层次的水分运动以及孔隙变化规律。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

鄂东南是我国崩岗发育的北缘区,尤其是位于湖北省东南部的通城县最为明显,通城县地跨东经113°36'~114°04',北纬29°02'~29°24',属于北亚热带季风气候区,气候温和,雨量充沛,平均气温15.5℃~16.7℃,日最高气温为39.7℃,最低气

温为-15.2℃, >10℃的积温为5 058℃,无霜期为260 d,年平均降水量1 550 mm左右。覆盖植被类型为常绿阔叶与落叶阔叶混交林为主。土壤类型为以花岗岩母质发育的红壤为主,结构比较松散。正是由于这样的气候地形条件,境内崩岗侵蚀严重,活动型崩岗的数量较多,同时形态各异,具有典型的南方花岗岩崩岗发育特点。通城境内崩岗发育最频繁的地区包括五里和杨垄,两地的成土条件和耕作环境等背景相似,两个崩岗均具有较为完整的剖面,同时剖面呈现清晰的层次性。

### 1.2 样品采集和处理

根据土壤剖面的植被根系、土壤颜色以及质地等特征来划分层次,将崩壁从上到下划分为表土层、红土层、斑纹层和碎屑层,土壤剖面的发育规律符合我国南方花岗岩地区崩岗的典型特征。同时,两处崩岗的形态发育具有系统性,遵循崩岗发生的普遍规律。本研究分别采集四个层次环刀土样和散状土样,用环刀法测定土壤容重,用吸管法测定土壤颗粒组成。崩岗剖面的土壤基本物理性质见表1。

表1 崩岗剖面土壤物理性质

Table 1 Soil physical properties of the profile of collapse mound

位置 Location	土壤层次 Soil layer	深度 Depth (m)	土壤颗粒组成 Soil particle composition (%)			容重 Bulk density (g cm <sup>-3</sup> )	孔隙度 Porosity (%)	饱和含水率 Saturated moisture content (%)
			砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay			
五里 Wuli	表土层 Surface soil layer	0~0.23	46.60	30.82	22.58	1.56	38.60	38.60
	红土层 Red soil layer	0.23~1.20	31.81	47.66	20.53	1.60	37.97	37.97
	斑纹层 Stripe layer	1.20~3.80	39.92	37.54	22.54	1.56	43.69	43.69
	碎屑层 Detritus layer	>3.80	72.21	12.87	14.93	1.60	38.81	38.81
杨垄 Yanglong	表土层 Surface soil layer	0~1.50	12.88	54.33	32.79	1.54	39.74	39.74
	红土层 Red soil layer	1.50~4.00	6.89	52.33	40.78	1.52	36.78	36.78
	斑纹层 Stripe layer	4.00~7.00	37.94	42.26	19.80	1.60	37.50	37.50
	碎屑层 Detritus layer	>7.00	41.54	38.02	20.44	1.53	47.84	47.84

使用HITACHI公司制造的CR21G高速恒温离心机，采取离心法测定土壤水分特征曲线，用离心机配置的环刀采集土样，水中浸泡24 h直至土样饱和，每个层次4次重复。设定30、100、500、1 000和1 500 kPa五个吸力段。设定离心机测定温度为恒温20℃，分别对崩岗不同层次的土样进行测定。

### 1.3 模型与数据处理

采用国内外学者使用较多、拟合较好的土壤水分特征曲线经验模型Gardner方程以及van Genuchten方程对实测数据进行拟合。

Gardner方程：

$$\theta = ah^{-b} \tag{1}$$

van Genuchten方程表达式：

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \tag{2}$$

式中， $\theta$ 为体积含水量（%）； $h$ 为土壤水吸力（100 kPa）； $\theta_s$ 和 $\theta_r$ 分别为土壤饱和含水量和剩余含水量（%）； $a$ 、 $b$ 、 $\alpha$ 、 $m$ 、 $n$ 为拟合参数， $m=1-1/n$ （ $n > 1$ ）。

数据处理采用Excel 2010进行基本的统计并绘制相应的图表，采用RETC软件求解参数值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 崩岗剖面土壤水分特征曲线

通过实验测定崩岗剖面的土壤水分特征曲线如图1所示。由图1可知，土壤释水量伴随吸力呈规律性变化：低吸力阶段，各层次土壤含水量呈快速降低的趋势，土壤水分特征曲线较陡，即土壤释

水量随着吸力的增大而显著增大，这一阶段排水主要在大孔隙中进行；随着吸力增大，水分特征曲线逐渐变缓，这个阶段主要为土壤体内中小孔隙排水；高吸力阶段，土壤的释水量主要是毛管孔隙中水分的变化，只有小孔隙能保留水分，土体对水分具有强吸持能力，水分变化幅度较小，曲线慢慢趋于平缓。图1a显示，五里崩岗崩壁各个层次的持水能力表现为红土层最强而碎屑层最弱，差异较明显。而经过治理的杨垄崩岗崩壁剖面的土壤相对于五里崩岗剖面土壤有着较强的释水能力。从不同层次的土壤看，斑纹层释水性明显大于其他土层，可能是由于颗粒组成中砂粒含量较多。低吸力阶段，斑纹层快速释水，之后趋于平稳。高吸力阶段，表土层、红土层以及碎屑层释水速度大于斑纹层。实验结果表明崩岗表土层和红土层水分变化最缓慢，对水分吸力极强，而疏松的斑纹层和碎屑层水分变化快，吸水能力弱。因此降雨后表土层和红土层水分向内传导缓慢，排水能力差，从而表层容易形成径流，而斑纹层和碎屑层之后由于吸水性差，大孔隙多，径流到达之后迅速侵入土体导致土体重力上升形成土层垮塌，形成内凹的跌坑，工程地质上称为“瓮”，瓮的形成与发育是崩岗形成的初步阶段<sup>[22]</sup>。

### 2.2 崩岗剖面的孔隙分布规律

土壤水分特征曲线可以间接反映土壤孔隙大小分布，而孔隙的形态和分布情况对于土壤中水分运动和溶质迁移有直接影响<sup>[23]</sup>。为了探讨崩岗剖面不同层次土壤孔隙的分布规律，从两个崩岗的水分特征曲线研究出发（图1），对崩岗剖面土壤孔隙大小分布进行分析。将崩岗土壤中的孔隙设想为各

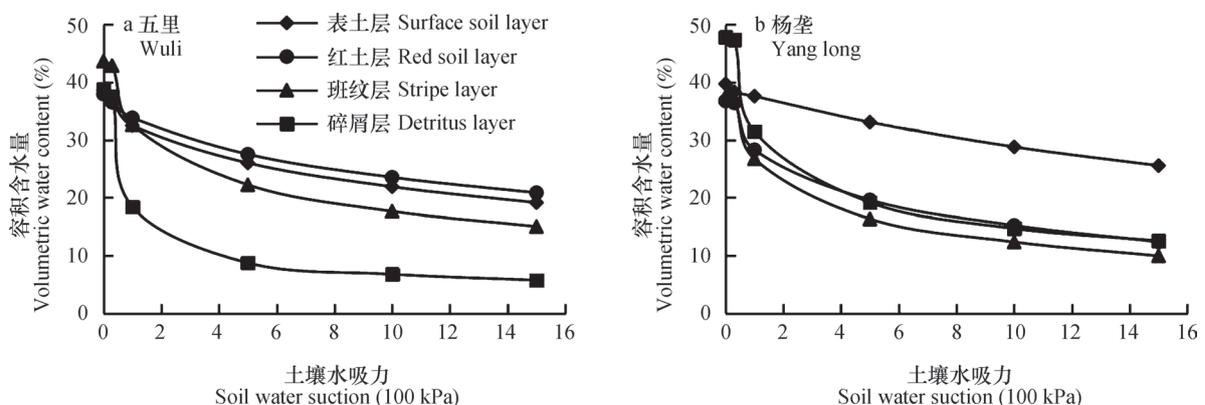


图1 五里和杨垄实测土壤水分特征曲线

Fig. 1 Measured soil moisture characteristic curves of the profiles of Wuli and Yanglong

种孔径的圆形毛管, 则吸力 $s$ 和毛管直径 $d$ 的关系可以表示为:

$$s = 4\delta / d \quad (3)$$

式中,  $\delta$ 表示水的表面张力系数, 室温条件中为 $75 \times 10^{-5} \text{ N cm}^{-1}$ 。如果土壤孔隙直径 $d$ 的单位为mm, 吸力 $s$ 的单位为Pa, 则孔隙直径 $d$ 和吸力 $s$ 的关系为 $d = 4\delta / s$ , 通过此式计算的孔径则为当量孔径。如果土壤吸力为 $s_1$ 对应的含水量和当量孔径为 $\theta_1$ 和 $d_1$ ,  $s_2$ 对应的含水量和当量孔径为 $\theta_2$ 和 $d_2$ , 则土壤中孔径在 $d_1$ 和 $d_2$ 之间的孔隙所占的体积与孔隙总体积之比为 $\theta_1 - \theta_2$  [20, 23]。

通过研究崩岗剖面的孔隙分布状况, 可以反映土层之间持水能力规律。本文土壤水吸力对应的当量孔径分别为10、3、0.6、0.3、0.2  $\mu\text{m}$ 。为了便于对崩岗剖面水分分析, 将当量孔径按试验土壤水吸力设定值分为低吸力段、中吸力段和高吸力段,

对应当量孔径为大于3、0.6~3、0.2~0.6  $\mu\text{m}$ 。从表2可知, 五里和杨垄崩岗剖面大于3  $\mu\text{m}$ 的当量孔径由表土层到碎屑层呈逐渐增加的趋势。五里崩岗剖面大于3  $\mu\text{m}$ 的当量孔径碎屑层占用的比例是表土层的3.36倍, 杨垄碎屑层则是表土层的7.68倍。当量孔径在0.6~3  $\mu\text{m}$ 范围的比例与大于类似, 杨垄崩岗变化趋势相同, 五里崩岗上层所占比例小于下层, 但是差异无3  $\mu\text{m}$ 明显。当量孔径在0.2~0.6  $\mu\text{m}$ 范围的比例也有一定规律, 五里碎屑层占的比例最低, 仅有3%, 其他方面并无明显的变化。从整体来看, 崩岗剖面由表土层向碎屑层大孔隙不断增加, 因此, 水分较容易侵入剖面的下土层, 引发掏蚀形成龛, 上层土壤水分饱和含水量多, 水分经过的时候重力不断变大, 容易导致下层土体先被冲蚀, 接着上层土体在重力作用下垮塌, 为崩岗形成创造了条件。

表2 不同土层当量孔径分布比例

Table 2 Distributions of equivalent soil pore size in different soil layers (%)

当量孔径 Equivalent aperture ( $\mu\text{m}$ )	五里Wuli				杨垄Yanglong			
	表土层	红土层	斑纹层	碎屑层	表土层	红土层	斑纹层	碎屑层
	Surface soil layer	Red soil layer	Stripe layer	Detritus layer	Surface soil layer	Red soil layer	Stripe layer	Detritus layer
> 3.00	6.07	4.11	11.05	20.37	2.13	8.47	10.77	16.36
0.60 ~ 3.00	6.50	6.32	10.40	9.69	4.50	8.68	10.39	12.28
0.20 ~ 0.60	6.87	6.66	7.20	3.00	7.53	7.24	6.37	6.62

### 2.3 土壤水分特征曲线的拟合

选择对鄂东南崩岗剖面土壤水分特征曲线拟合精度较好的方程, 对崩岗的水力侵蚀研究有重要意义。分别使用以上两种方程对五里崩岗和杨垄崩岗剖面实测得到的土壤水分含量进行土壤水分特征曲线拟合, 得到每个方程参数的拟合值及其决定系数(表3)。由其结果可知, 不同土层对两种土壤水分特征曲线的拟合精度存在差异。由表3可知, 对于五里崩岗的各个层次, van Genuchten方程对表土层和红土层的土壤拟合较好, 决定系数分别为0.995和0.997, 而对于碎屑层的土壤拟合精度相对稍低, 决定系数为0.975。Gardner方程对斑纹层和碎屑层的土壤拟合较好, 决定系数分别为0.992和0.994, 而对于表土层和红土层的土壤拟合精度

相对较低, 尤其是红土层决定系数为0.947。对于杨垄崩岗的各个层次, van Genuchten方程对表土层、红土层和斑纹层的土壤拟合较好, 而对碎屑层的土壤拟合精度稍低, 决定系数为0.984, Gardner方程对斑纹层和碎屑层的土壤拟合较好, 尤其是碎屑层决定系数达0.999, 而对于表土层拟合最差, 决定系数仅为0.867。

### 2.4 土壤水分特征曲线模型比较

以两地崩岗剖面土壤水分特征曲线实测值与采用van Genuchten方程和Gardner方程拟合所得的计算值进行比较(图2和图3), 观察计算值与实测值之间的异同, 同时以各方程拟合的决定系数以及残差平方和为依据, 挑选一个适用于崩岗剖面土壤的方程。崩岗剖面不同层次导致土壤水分特征曲线不

表3 土壤水分特征曲线方程拟合参数

Table 3 Fitting parameters of soil water characteristic curve equation

位置 Location	土壤层次 Soil layer	van Genuchten方程 van Genuchten equation				Gardner方程 Gardner equation		
		$a^{1)}$	$m^{1)}$	$n^{1)}$	$R^{2\ 2)}$	$a^{1)}$	$b^{1)}$	$R^{2\ 2)}$
五里 Wuli	表土层 Surface soil layer	1.202	0.184	1.226	0.995	0.315	-0.160	0.960
	红土层 Red soil layer	0.679	0.194	1.240	0.997	0.324	-0.140	0.947
	斑纹层 Stripe layer	1.635	0.250	1.334	0.992	0.321	-0.262	0.992
	碎屑层 Detritus layer	2.314	0.387	1.632	0.975	0.199	-0.475	0.994
	杨垄 Yanglong	表土层 Surface soil layer	0.191	0.255	1.342	0.994	0.359	-0.099
Yanglong	红土层 Red soil layer	1.357	0.259	1.349	0.991	0.276	-0.265	0.978
	斑纹层 Stripe layer	1.575	0.295	1.419	0.992	0.260	-0.328	0.990
	碎屑层 Detritus layer	1.940	0.294	1.416	0.984	0.318	-0.335	0.999

注：1)  $a$ 、 $b$ 、 $\alpha$ 、 $m$ 、 $n$ 为拟合参数；2)  $R^2$ 为决定系数 Note: 1)  $a$ ,  $b$ ,  $\alpha$ ,  $m$  and  $n$  are the fitting parameters; 2)  $R^2$  is determination coefficient

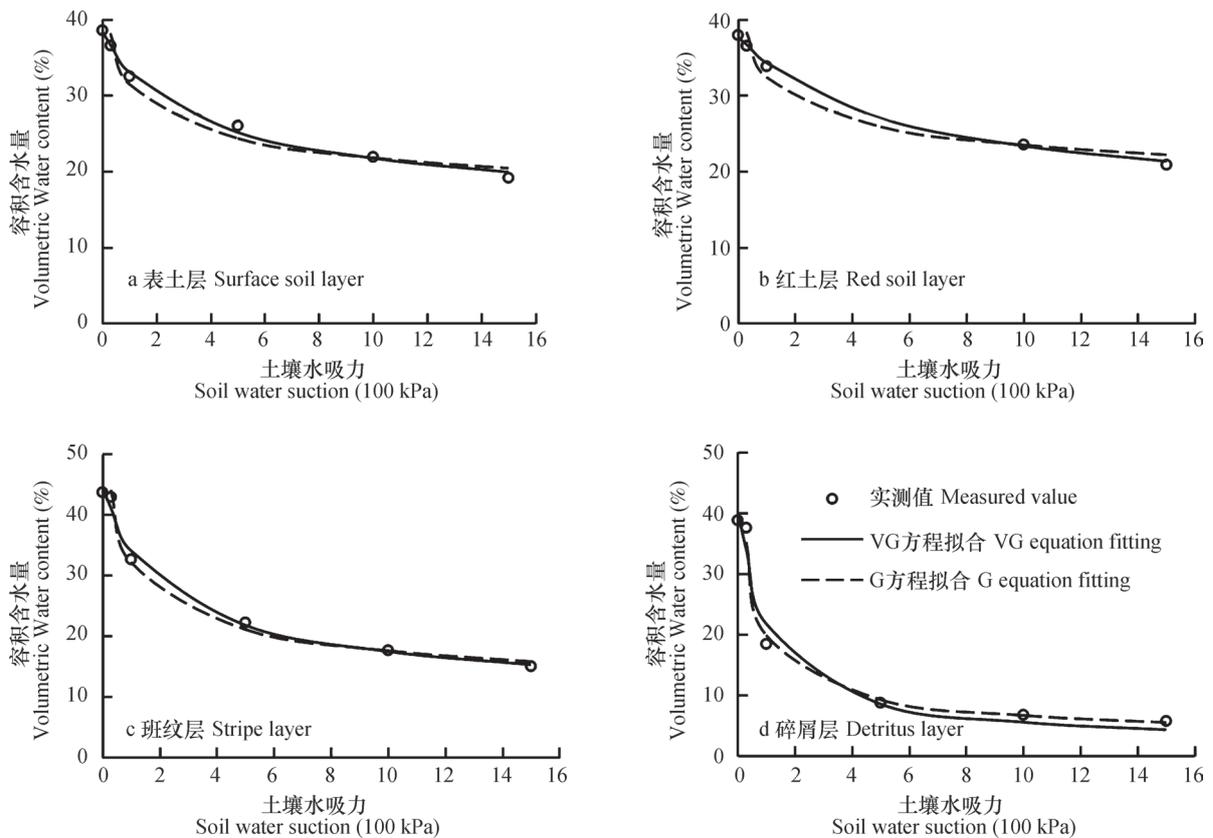


图2 五里崩岗剖面水分特征拟合曲线 (VG方程: van Genuchten方程 G方程: Gardner方程)

Fig. 2 Fitting curve of water content of the collapse mound profile of Wuli

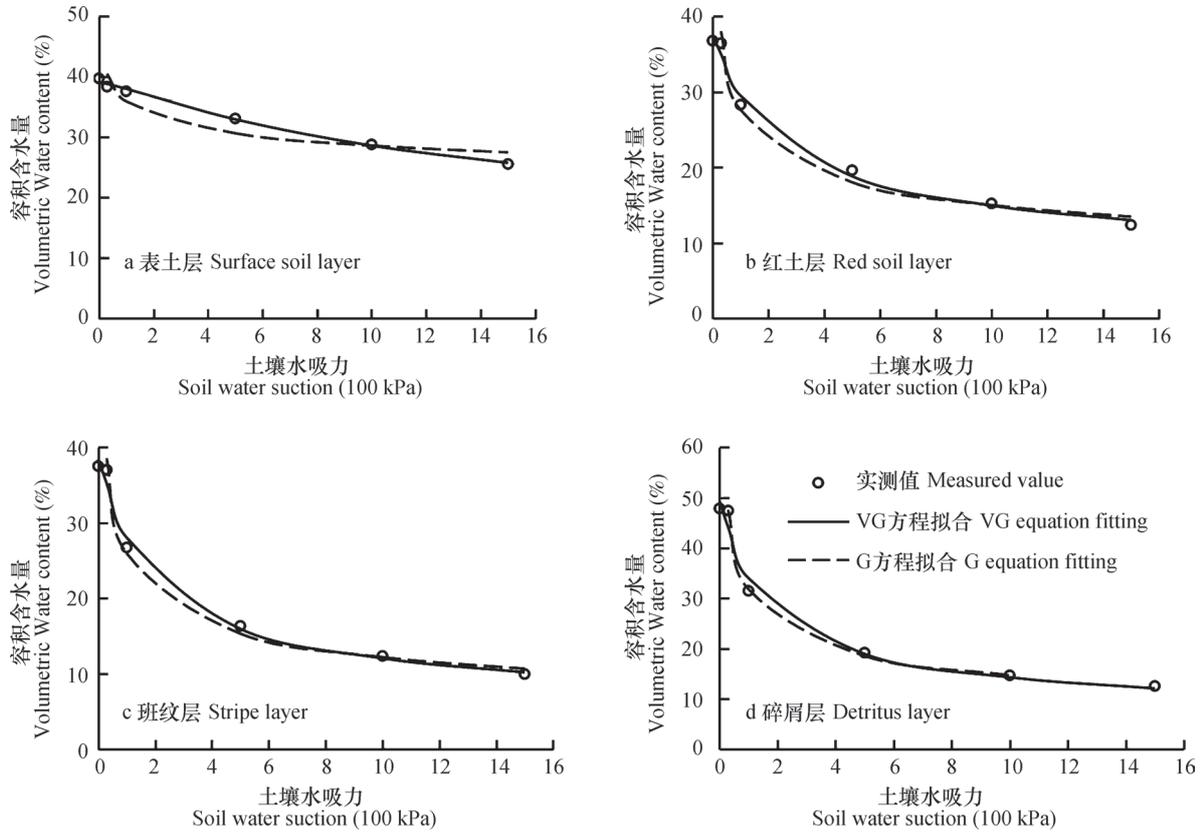


图3 杨垄崩岗剖面水分特征拟合曲线 (VG方程: van Genuchten方程 G方程: Gardner方程)

Fig. 3 Fitting curve of water content of the collapse mound profile of Yanglong

同,同时也影响两种方程的拟合结果。崩岗不同层次土壤水分特征曲线有较大差异,相同的水分吸力下,表土层和红土层能保留的水分含量显著高于其他三个土层,碎屑层持水能力则明显较小。这可能是因为红土层细颗粒物较多,团聚体形成稳定,而斑纹层和碎屑层石英和长石颗粒较大,难以风化,导致含水量下降。

对于崩岗剖面四个层次的土壤水分特征曲线进行拟合,两个方程表现出不同的拟合精度,从图2和图3可以发现,对于两地的崩岗, van Genuchten方程对表土层和红土层拟合精度显著高于Gardner方程, van Genuchten方程对五里的红土层拟合精度极高,决定系数 $R^2$ 为0.997,而Gardner方程对杨垄崩岗碎屑层的拟合精度最高,决定系数 $R^2$ 达到0.999。Gardner方程对崩岗斑纹层和碎屑层拟合精度优于表土层和红土层,决定系数均高于van Genuchten方程。对五里崩岗斑纹层土壤水分特征曲线的拟合,两个拟合的效果相同,小于500 kPa时Gardner方程拟合较好,而在500~1500kPa时van Genuchten方程拟合与实测值更加接近。对于碎屑

层的拟合, Gardner方程呈现了绝对的优势,决定系数 $R^2$ 分别达到0.994和0.999。

### 2.5 崩岗剖面土壤水分特征曲线方程的适用评价

拟取两个方程拟合决定系数的均值作图(图4),同时计算Gardner方程和van Genuchten方程残差平方和。计算时,由于Gardner方程表达式属于幂函数,对于饱和含水量(即水吸力为0)的点无法进行拟合,因而均不计吸力 $h=0$ 时的残差,表4为残差平方和的计算结果。由图4可知,崩岗剖面土层划分对于两个方程的拟合精度不同,尽管Gardner方程拟合斑纹层和碎屑层的精度优于van Genuchten方程,但拟合表土层和红土层的精度显著小于van Genuchten方程,而且标准差较大。从整个图看来, van Genuchten方程拟合决定系数的均值较高,同时稳定性也较好。同时,通过两个方程拟合的残差平方和,可知两拟合方程的误差均在允许的范围内,均能很好地拟合出各土层含水量与土吸力之间的关系。两处崩岗经过方程拟合之后,表土层和红土层经过van Genuchten方程的残差平方和较Gardner方程小,表明van Genuchten

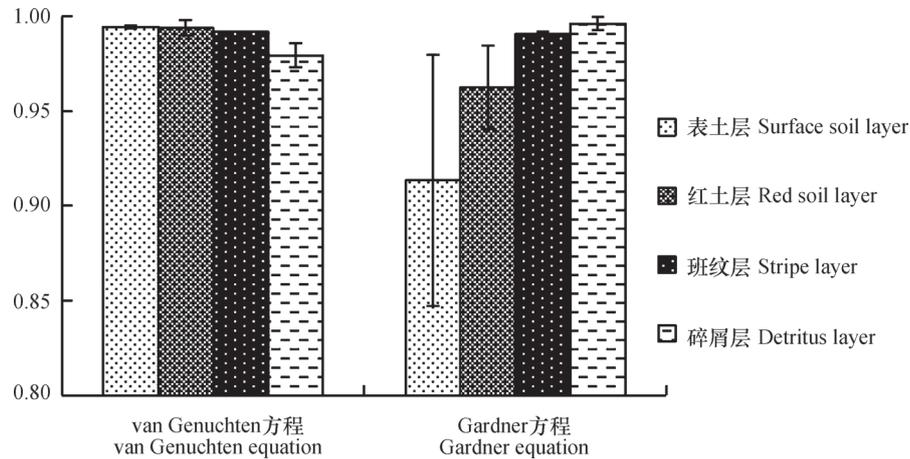


图4 不同方程拟合精度均值

Fig.4 Fitting accuracy relative to equation

表4 两个方程的残差分析

Table 4 Residual analysis of two equations

位置 Location	土壤层次 Soil layer	残差平方和 Sum of squared residuals	
		van Genuchten方程 van Genuchten equation	Gardner方程 Gardner equation
五里 Wuli	表土层 Surface soil layer	$1.675 \times 10^{-4}$	$8.406 \times 10^{-4}$
	红土层 Red soil layer	$7.930 \times 10^{-5}$	$9.816 \times 10^{-4}$
	斑纹层 Stripe layer	$5.731 \times 10^{-4}$	$3.525 \times 10^{-4}$
	碎屑层 Detritus layer	$2.718 \times 10^{-3}$	$8.005 \times 10^{-4}$
杨垄 Yanglong	表土层 Surface soil layer	$4.610 \times 10^{-5}$	$1.702 \times 10^{-3}$
	红土层 Red soil layer	$4.635 \times 10^{-4}$	$6.683 \times 10^{-4}$
	斑纹层 Stripe layer	$5.326 \times 10^{-4}$	$4.508 \times 10^{-4}$
	碎屑层 Detritus layer	$1.758 \times 10^{-3}$	$6.149 \times 10^{-5}$

方程对崩壁上层土壤的拟合效果优于Gardner方程。斑纹层和碎屑层van Genuchten方程的残差平方和较Gardner方程大，此时Gardner方程拟合效果较好。残差平方和的计算与拟合决定系数均值作图研究结果一致。通过两个方面的检验分析，整体而言，利用van Genuchten方程拟合崩岗剖面

土壤能够满足科研需求，但出于一定需求的情况下，上层土壤以van Genuchten方程，下层土壤以Gardner方程拟合，可达到最佳效果。对于两个方程本身而言，Gardner方程优点是形式简单，参数少，运算简便，求解方便，但拟合精度不如van Genuchten方程。van Genuchten方程的缺点是形

式较复杂, 参数较多, 常用软件无法满足求解需求, 目前常用美国农业部盐土实验室 (US Salinity Laboratory) 提供的RETC 软件中拟合实测试验数据。

### 3 结论

花岗岩崩岗剖面土壤释水量伴随吸力呈规律性变化, 其中斑纹层和砂土层低吸力的条件下释水能力强, 高吸力时各个层次土壤水分特征曲线趋于平缓。表土层和红土层持水能力强于斑纹层和碎屑层。利用水分特征曲线的实测值, 引入当量孔隙的计算结果, 研究崩岗剖面的孔隙分布情况。表明两个崩岗剖面的土壤孔隙变化存在一致规律, 均体现为由表土层至碎屑层土壤大孔隙比例增加而毛管孔隙减少, 为崩岗侵蚀创造了条件。选取van Genuchten方程和Gardner方程对实测数据进行了曲线拟合, 同时进行了两个方程的拟合评价。van Genuchten方程参数能够较好地拟合崩岗表土层和红土层土壤水分特征曲线的实测数据, 误差相对较小。而Gardner方程对于拟合斑纹层和碎屑层有较好效果。总体分析, van Genuchten方程对崩岗剖面土壤水分特征曲线拟合精度更好。

### 参考文献

- [ 1 ] 唐克丽. 中国水土保持. 北京: 科学出版社, 2004: 80—82  
Tang K L. Soil and water conservation in China (In Chinese). Beijing: Science press 2004: 80—82
- [ 2 ] 李双喜, 桂惠中, 丁树文. 中国南方崩岗空间分布特征. 华中农业大学学报, 2013, 32 (1): 83—88  
Li S X, Gui H Z, Ding S W. Features of special layout of hill collapse in South China (In Chinese). Journal of Huazhong Agricultural University, 2013, 32 (1): 83—88
- [ 3 ] Xu J X. Benggang erosion: The influencing factors. Catena, 1996, 27 (3): 249—263
- [ 4 ] 邓羽松, 丁树文, 邱欣珍, 等. 赣县崩岗洪积扇土壤肥力的空间分异规律. 中国水土保持科学, 2014, 13 (1): 47—53  
Deng Y S, Ding S W, Qiu X Z, et al. Spatial distribution of collapsing alluvial soil fertility in Ganxian County (In Chinese). Science of Soil and Water Conservation, 2014, 13 (1): 47—53
- [ 5 ] 龙莉, 丁树文, 蔡崇法, 等. 花岗岩红壤丘陵区崩岗侵蚀对农田的危害及治理. 中国水土保持, 2013 (12): 24—26  
Long L, Ding S W, Cai C F, et al. Damage and control of farmland collapsing gully in granite red soil hilly area (In Chinese). Soil and Water Conservation in China, 2013 (12): 24—26
- [ 6 ] 邓羽松, 丁树文, 蔡崇法, 等. 鄂东南崩岗洪积扇土壤物理性质空间分异特征. 中国农业科学, 2014, 47 (24): 4850—4857  
Deng Y S, Ding S W, Cai C F, et al. Spatial distribution of the collapsing alluvial soil physical properties in Southeastern Hubei (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47 (24): 4850—4857
- [ 7 ] 吴志峰, 王继增. 华南花岗岩风化壳岩土特性与崩岗侵蚀关系. 水土保持学报, 2000, 14 (2): 31—35  
Wu Z F, Wang J Z. Relationship between slope disintegration and rock-oil characteristics of granite weathering mantle in South China (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14 (2): 31—35
- [ 8 ] 王艳忠, 胡耀国, 李定强, 等. 粤西典型崩岗侵蚀剖面可蚀性因子初步分析. 生态环境, 2008, 17 (1): 403—410  
Wang Y Z, Hu Y G, Li D Q, et al. The preliminary investigation of soil erosive factors in granitic weathering rinds in western Guangdong province (In Chinese). Ecology and Environment, 2008, 17 (1): 403—410
- [ 9 ] Gong J G, Jia Y W. An experimental study on dynamic processes of ephemeral gully erosion in loess landscapes. Geomorphology, 2011, 125 (1): 203—213
- [ 10 ] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 崩岗崩积体土壤渗透特性分析. 水土保持学报, 2013, 27 (3): 49—54  
Jiang F S, Huang Y H, Lin J S, et al. Study on soil permeability of slumping deposits in benggang (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27 (3): 49—54
- [ 11 ] 林敬兰, 黄炎和, 蒋芳市, 等. 崩岗土体的渗透性能机理研究. 水土保持学报, 2013, 27 (2): 53—56  
Lin J L, Huang Y H, Jiang F S, et al. Study on the mechanism of different soil layer's permeability in benggang (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27 (2): 53—56
- [ 12 ] 刘建立, 徐绍辉. 根据颗粒大小分布估计土壤水分特征曲线分形模型的应用. 土壤学报, 2003, 40 (1): 46—52  
Liu J L, Xu S H. Figuring soil water characteristic curve based on particle size distribution data: Application of fractal models (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40 (1): 46—52

- [ 13 ] Thyagaraj T, Rao S M. Influence of osmotic suction on the soil water characteristic curves of compacted expansive clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136 ( 12 ) : 1695—1702
- [ 14 ] 程冬兵, 蔡崇法, 彭艳平, 等. 根据土壤粒径分形估计紫色土水分特征曲线. *土壤学报*, 2009, 46 ( 1 ) : 30—36  
Cheng D B, Cai C F, Peng Y P, et al. Estimating soil water retention curve based on fractal dimension of soil particle size distribution of purple soil ( In Chinese ) . *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 ( 1 ) : 30—36
- [ 15 ] 刘建立, 徐绍辉. 非相似介质方法在估计土壤水分特征曲线中的应用. *水利学报*, 2003, 34 ( 4 ) : 80—84  
Liu J L, Xu S H. Estimation of soil water retention characteristics with a non-similar media method ( In Chinese ) . *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 34 ( 4 ) : 80—84
- [ 16 ] 张磊, 齐瑞鹏, 张应龙, 等. 砒砂岩风化物对土壤水分特征曲线及蒸发的影响. *土壤学报*, 2015, 52 ( 1 ) : 77—86  
Zhang L, Qi R P, Zhang Y L, et al. Effects of amendment of aeolian sandy soil and loess with soft sandstone on soil water retention curve evaporation ( In Chinese ) . *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 ( 1 ) : 77—86
- [ 17 ] 张均华, 刘建立, 张佳宝. 估计太湖地区水稻土水分特征曲线的物理-经验方法研究. *土壤学报*, 2011, 48 ( 2 ) : 269—276  
Zhang J H, Liu J L, Zhang J B. Physico-empirical methods for estimating soil water retention curve of paddy soil in Taihu Lake area ( In Chinese ) . *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 ( 2 ) : 269—276
- [ 18 ] 李忠武, 蔡强国, 曾光明, 等. 基于GIS的黄土丘陵沟壑区土壤水分模型研究. *水利学报*, 2004, 35 ( 3 ) : 123—128  
Li Z W, Cai Q G, Zeng G M, et al. Soil moisture model for loess hilly region based on GIS ( In Chinese ) . *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35 ( 3 ) : 123—128
- [ 19 ] 邓羽松, 丁树文, 刘辰明, 等. 鄂东南花岗岩崩岗崩壁土壤水分特征研究. *水土保持学报*, 2015, 29 ( 4 ) : 132—137.  
Deng Y S, Ding S W, Liu C M, et al. Soil moisture characteristics of collapsing gully wall in granite area of Southeastern Hubei ( In Chinese ) . *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29 ( 4 ) : 132—137.
- [ 20 ] 邵明安, 王全九, 黄明斌. *土壤物理学*. 北京: 高等教育出版社, 2006: 102—116  
Shao M A, Wang Q J, Huang M B. *Soil physics* ( In Chinese ) . Beijing: Higher Education Press, 2006: 102—116
- [ 21 ] Kosugi K. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. *Water Resources Research*, 1996, 32 ( 9 ) : 2697—2703
- [ 22 ] 丁树文, 蔡崇法, 张光远. 鄂东南花岗岩地区重力侵蚀及崩岗形成规律的研究. *南昌水专学报*, 1995, S1: 50—54  
Ding S W, Cai C F, Zhang G Y. A study on gravitational erosion and the formation of collapse mound in the granite area of Southeast Hubei ( In Chinese ) . *Journal of Nanchang College of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 1995, S1: 50—54
- [ 23 ] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. *土壤水动力学*. 北京: 清华大学出版社, 1988  
Lie Z D, Yang S X, Xie S C. *Soil hydrodynamics* ( In Chinese ) . Beijing: Tsinghua University Press, 1988

## Characteristic Curves and Model Analysis of Soil Moisture in Collapse Mound Profiles in Southeast Hubei

DENG Yusong DING Shuwen<sup>†</sup> CAI Chongfa LÜ Guoan

( *Research Center of Water and Soil Conservation, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China* )

**Abstract** Collapse mound, a serious soil erosion phenomenon in granite areas of South China, occurs mainly on mound or hill slopes under the interaction of water and gravity, causing severe destructions and threats in a wide range, including Hubei, Hunan, Jiangxi, Anhui, Fujian, Guangdong, and Guangxi, mainly south to the Yangtze River, and hence a grave impact on the economy in these hilly regions. So far a lot of research work has been done on mechanisms of how mound collapses occur. In the aspect of water regime in collapse mounds, related scientists have analyzed permeability of the colluvial deposits from collapse

mounds, revealing that colluvial soil reaches the level of steady permeation in a relatively short time, and also studied soil permeability of collapse mounds at different depths. Analysis from the angle of initial infiltration rate, stable infiltration rate, average infiltration rate, and infiltration angle shows that permeability declines steadily from the red earth layer down to the detritus layer. Therefore, this article proceeds from collapsing of mounds and water regime of the soil per se, with a view to elaborating water movement processes during the collapse of mounds or cliffs, exploring soil water characteristic curves of collapse mound profiles, including topsoil layer, red earth layer, streaked layer, and detritus layer, and their fitting processes with equations, and analyzing the mechanisms of how collapse mounds occur from the angle of soil moisture and porosity. The study adopted field sampling and in-lab analysis together. Two typical profiles of collapse mounds in Southeast Hubei, Wuli and Yanglong were selected as subjects of the study. Soil water characteristic curves in various soil layers were plotted with the aid of a CR21G high-speed thermostat centrifuge of the Hitachi Corp. and on the basis of the soil water characteristic curves, soil porosities of the various soil layers were analyzed. Meanwhile, equations were screened for fitting the various soil water characteristic curves of the profiles. Results showed as follows: (1) In the Wuli and Yanglong profiles, soil release rate varied regularly with soil water suction rate. In the streaked soil layer and sandy soil layer, soil water release rate was high when their soil water suction was low, and the soil water characteristic curves in various soil layers all leveled off. The topsoil and the red earth layers were higher than the streaked and detritus soil layers. (2) Based on the field-measured values of the water characteristic curve and the calculated equivalent porosity, pore size distribution in the profiles of collapse mounds was studied. It was found that the two profiles followed a similar law in soil pore size distribution, that is, the proportion of large pores increased while that of capillary pores decreased with soil depth going down from the topsoil layer to the detritus layer. The increase in number of large pores created a favorable condition for water movement, thus enhancing the probability of collapsing soil erosion. (3) The van Genuchten equation and the Gardner equation were tested to fit the curves, and the fitting was evaluated. It was found that the van Genuchten equation was better to fit the measured data of the soil moisture characteristic curve of the topsoil and red earth layers with relatively little deviation, while the Gardner equation was better to fit those of the streaked soil layer and the debris layer. On the whole, the van Genuchten equation is higher in fitting accuracy. Evaluation using the residual square sum method indicates that generally speaking, it is advisable to use the van Genuchten equation to fit soil water characteristic curve of granite soil.

**Key words** Collapse mound; Soil profile; Soil moisture characteristic curve; Fitting model

(责任编辑: 汪枫生)

CONTENTS

**Reviews and Comments**

- Mechanism of Extracellular Electron Transfer among Microbe-Humic-Mineral in Soils: A Review ..... WU Yundang, LI Fangbai, LIU Tongxu ( 290 )  
 Effects of Long-term Fertilization on Key Processes of Soil Nitrogen Cycling in Agricultural Soil: A Review ..... WANG Jing, CHENG Yi, CAI Zucong, et al. ( 303 )

**Insights and Perspectives**

- Soil-borne Pathogens Should not Be Ignored by Soil Science ..... CAI Zucong, HUANG Xinqi ( 310 )

**Research Articles**

- Element Migration in S<sub>3</sub> Profile of the Shaolingyuan Loess-Paleosol Sequence in Xi'an and Its Paleoclimatic Implication ..... CHU Chunjie, ZHAO Jingbo ( 320 )  
 Estimation of Soil Salt Content over Partially Vegetated Areas Based on Blind Source Separation ..... LIU Ya, PAN Xianzhang, SHI Rongjie, et al. ( 330 )  
 Construction of Calibration Set based on the Land Use Types in Visible and Near-Infrared ( VIS-NIR) Model for Soil Organic Matter Estimation ..... LIU Yanfang, LU Yannian, GUO Long, et al. ( 340 )  
 Prediction of Soil Organic Matter based on Multi-resolution Remote Sensing Data and Random Forest Algorithm ..... WANG Yinyin, QI Yanbing, CHEN Yang, et al. ( 353 )  
 Characteristic Curves and Model Analysis of Soil Moisture in Collapse Mound Profiles in Southeast Hubei ..... DENG Yusong, DING Shuwen, CAI Chongfa, et al. ( 363 )  
 Research on Sediment and Solute Transport on Red Soil Slope under Simultaneous Influence of Scouring Flow ..... MA Meijing, WANG Junguang, GUO Zhonglu, et al. ( 373 )  
 Research on Soil Erosion Rate and Hydrodynamic Parameters of Landslide Accumulation Slope in Wenchuan Earthquake Area ..... WANG Renxin, HE Binghui, LI Tianyang, et al. ( 386 )  
 Effects of Saline Ice Water Irrigation on Distribution of Moisture and Salt Content in Coastal Saline Soil ..... ZHANG Yue, YANG Jingsong, YAO Rongjiang ( 399 )  
 Soil Temperature Regime in Guizhou Province Relative to Assessment Method ..... LU Xiaohui, DONG Yubo, TU Chenglong ( 409 )  
 Characteristics of Variation of Soil Temperature in Shrub Meadow Area of Lhasa ..... GONG Yuling, WANG Zhaofeng, ZHANG Yili, et al. ( 419 )  
 Soil Water Repellency of Sands and Clay as Affected by Particle Size ..... YANG Song, WU Junhua, DONG Hongyan, et al. ( 426 )  
 Effect of AQDS Accelerating Anaerobic Dechlorination of DDT in Hydragric Acrisols ..... LIU Cuiying, WANG Zhuang, XU Xianghua, et al. ( 436 )  
 Effect of Straw Returning via Deep Burial Coupled with Application of Fertilizer as Primer on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield ..... ZHAO Jinhua, ZHANG Congzhi, ZHANG Jiabao ( 448 )  
 Effects of Ozone Pollution on Different Active Organic Carbon Stocks in Wheat Farmland Soil ..... KOU Taiji, CHENG Xianghan, ZHANG Dongliang, et al. ( 455 )  
 Soil Organic Nitrogen Components and Their Contributions to Mineralizable Nitrogen in Paddy Soil of the Black Soil Region ..... CONG Yaohui, ZHANG Yuling, ZHANG Yulong, et al. ( 466 )  
 Effects of Soil and Water Conservation Measures on Soil Labile Organic Carbon and Soil Enzyme Activity in Gentle Slope Land of Red Soil ..... HUANG Shangshu, CHENG Yanhong, ZHONG Yijun, et al. ( 475 )  
 Ecological Stoichiometric Characteristics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Leaf-Litter-Soil System of *Picea Crassifolia* Forest in the Qilian Mountains ..... ZHAO Weijun, LIU Xiande, JIN Ming, et al. ( 488 )  
 The Application of Biomarker Genes for DNA/RNA-Stable Isotope Probing of Active Methanotrophs Responsible for Aerobic Methane Oxidation in Six Paddy Soils ..... ZHENG Yan, JIA Zhongjun ( 500 )  
 Screening of Phosphate-solubilizing Bacteria Adaptable to Corn and Effects of the Bacteria on the Growth of Corn ..... MEI Xinlan, SHAN Anqi, JIANG Yi, et al. ( 508 )  
 Response of Soil Nematode Community to Cultivation in Upland Red Soil Relative to Cultivation History and Its Significance as Indicator ..... WANG Mingwei, LIU Yudi, CHEN Xiaoyun, et al. ( 521 )  
 Nutrient Absorption and Nutrient Balance in an Agro-pastoral Compound Production Pattern of "Raising Geese in Corn Fields" in Tibet ..... SHA Zhipeng, ZHANG Yuyang, WANG Chao, et al. ( 531 )  
 Effects of Continuous Cropping of Processing Tomato on Physical-chemical Properties of and Microbial Biomass in the Soil ..... KANG Yalong, JING Feng, SUN Wenqing, et al. ( 542 )

**Research Notes**

- Mechanism of CTMAB Modifying BS-12 Modified Bentonite ..... YU Lu, MENG Zhaofu, LI Wenbin, et al. ( 550 )  
 Effects of Mechanical Soil Amelioration Method on Physical Properties of and Enzyme Activity in Planosol ..... MENG Qingying, ZHANG Chunfeng, JIA Huibin, et al. ( 559 )

**Cover Picture:** Microbial Extracellular Electron Transfer: Energy Transfer and Substance Transformation ( by WU Yundang, LI Fangbai, LIU Tongxu )

# 《土壤学报》编辑委员会

主 编：史学正

执行编委：(按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任：陈德明

责任编辑：卢 萍 檀满枝 陈荣府

## 土 壤 学 报

### Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 53 卷 第 2 期 2016 年 3 月

## ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 53 No. 2 Mar., 2016

编 辑 《土壤学报》编辑委员会  
地址：南京市北京东路 71 号 邮政编码：210008  
电话：025 - 86881237  
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica  
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China  
Tel: 025 - 86881237  
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正  
主 管 中 国 科 学 院  
主 办 中 国 土 壤 学 会  
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng  
Superintended by Chinese Academy of Sciences  
Sponsored by Soil Science Society of China  
Undertaken by Institute of Soil Science,  
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社  
地址：北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717

Published by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司  
总发行 科 学 出 版 社  
地址：北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717  
电话：010 - 64017032  
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company  
Distributed by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China  
Tel: 010 - 64017032  
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司  
地址：北京 399 信箱 邮政编码：100044

Oversea distributed by China International Book Trading Corporation  
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一连续出版物号：CN 32-1119/P

国内邮发代号：2-560

国外发行代号：BM45

定价：60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929

