一种测定土壤崩解动态的方法①

陈 东[1, 2, 3]，王道杰[1, 2*]，陈晓艳[1, 2]，陈 舜[1, 2, 3]

(1 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室，成都 610041；2 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所，成都 610041；3 中国科学院大学，北京 100049)

摘 要：土壤崩解性是土壤抗侵蚀能力研究的重要内容。蒋定生设计的土壤崩解仪，极大地促进了土壤崩解研究进程，但在实际应用中，存在浮筒校正难、不能完全反映土壤崩解的动态过程等问题。针对原有测试方法中存在的局限性，本文在北川震裂带土壤抗侵蚀能力测试研究中，提出了一种改进的土壤崩解性测试方法，改进后的测试方法操作简单、应用范围广，且能比较准确地反映整个崩解动态过程，崩解系数计算物理意义明确，并且可以根据实验需求设置相应的测试精度。

关键词：土壤崩解仪；测试改进；动态过程

中图分类号：S157.1

土壤崩解性能是指土壤在静水中发生分散破碎塌落和强度减弱的现象，是评价土壤侵蚀严重程度的一项重要土壤物理指标[1]。土壤崩解速率的大小与土壤含水量、土壤结构密切相关，此外还具有明显的边界效应。已有学者研究表明，在其他条件不变的情况下，黄土的崩解速率随着土壤天然含水量的增大而减小，当含水量增大到一定程度后，土壤崩解性几乎消失。影响土壤崩解速率的土壤结构(结构性)主要是土壤颗粒结构和土壤孔隙、裂隙结构。土壤颗粒结构主要是指土壤组成中大小颗粒的成分，一般粗粒越多崩解得越快，黏粒越多崩解得越慢。而原状土壤的孔隙和裂隙结构则决定了土壤崩解方式，最终决定了崩解性强弱。孔隙、裂隙不发育的黄土，以崩离为主，崩解过程缓慢均匀；孔隙裂隙发育的黄土，以迸离和解离为主，崩解过程快[2]。

朱显谟[3]在研究黄土水蚀时，发现土壤分散和冲刷同时进行，而且冲刷过程非常强烈，常常掩盖了分散的强度。随后，朱显谟将土壤抗侵蚀能力分为抗蚀性和抗冲性，认为抗蚀性是土壤颗粒抵抗水的分散和悬浮的能力，其能力大小主要取决于土壤颗粒、水的亲和能力及土壤颗粒之间的胶结力。由于土壤崩解性与土壤抗蚀性密切相关，也有学者直接将土壤崩解性作为土壤抗蚀性指标[4]。

从侵蚀机理角度，将土壤抗侵蚀能力划分为抗冲性和抗蚀性，具有重要意义。但从实验角度，我们无法将土壤抗冲性和抗蚀性分开，只是人为规定某些实验观测结果为土壤抗冲性或抗蚀性指标值，以方便对土壤抗侵蚀能力进行测定和评价[5]。土壤崩解性与土壤抗侵蚀能力的划分也有相似之处，规定以崩解脱落的量为评价标准，而未脱落部分土壤强度的降低很难在计算崩解量时反映出来。本文以北川震裂带为研究背景，在魏家沟流域土壤抗侵蚀能力的研究过程中，综合考虑前人对土壤崩解性研究方法的优缺点，提出一种改进的研究方法，能有效地拓展实验装置的应用范围，并能较好地反映土壤崩解的整个动态过程。

1 常规土壤崩解性研究方法

蒋定生设计的土壤崩解仪由玻璃缸、浮筒、网板等 3 部分组成[6]，装置如图 1 所示。网板孔径 1 cm×1 cm，与浮筒用细线或挂钩相连；浮筒上有刻度，最大为 100，最小为 0，单位刻度为 1；实验前将网板和浮筒置于玻璃缸中校正，在浮筒齐水面处读数标为 0；实验时先将土壤样品(5 cm×5 cm×5 cm)置于网板上，连同浮筒一起放入有水的玻璃缸中，并将浮筒的读数校正至 100。最大崩解时间设计为 30 min，崩解速率计算公式如下：

①基金项目：国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2011CB409903)、国家科技支撑计划课题项目(2012BAC06B02)和中国科学院知识工程重要方向项目(KZCX2-YW-332)资助。

* 通讯作者(wangdj@imde.ac.cn)

作者简介：陈东(1985—)，男，陕西安康人，硕士研究生，主要从事水土保持与生态修复研究。E-mail: yuhu05c@163.com

$$V = \mathrm{a}\frac{L_0 - L_t}{t} \quad (1)$$

式中，V 为试样单位时间内崩解的体积(cm^3/min)；L_0 为浮筒起始读数或浮筒稳定时的最大读数；L_t 为试样完全崩解或未完全崩解第 30 min 时浮筒读数；t 为试样完全崩解所需时间或试样未完全崩解的实验终止时间(以 30 min 计)(min)；a 为体积换算系数。

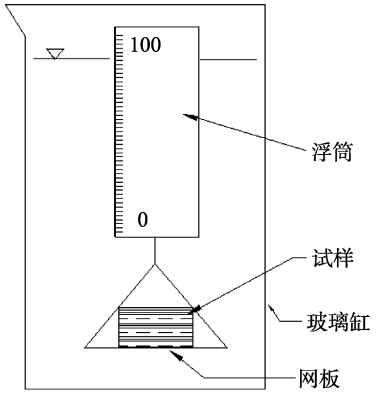


图 1 常规土壤崩解仪装置示意图
Fig. 1 Traditional soil disintegration equipment

杨勤科等改进了蒋定生土壤崩解仪，考虑到浮筒界面大小对实验精度的影响[7–8]，实验装置相同，计算崩解速率时加入了浮筒截面面积和土壤体积质量两个参数，计算式如下：

$$B = \frac{S}{Y} \times \frac{L_0 - L_t}{t} \quad (2)$$

式中，B 为单位时间内所崩解的试样的体积(cm^3/min)；S 为浮筒截面面积(cm^2)；Y 为土壤体积质量(g/cm^3)；L_0 为浮筒起始读数或浮筒稳定时的最大读数；L_t 为试样完全崩解或未完全崩解第 30 min 时浮筒读数；t 为试样完全崩解所需时间或试样未完全崩解的实验终止时间(以 30 min)计(min)。

也有学者直接根据浮筒的读数来确定土壤的抗蚀性[9]。

$$A_t = \frac{R_0 - R_t}{R_0} \quad (3)$$

式中，A_t 为土壤抗蚀指数；R_t 为 t 时刻浮筒读数(mm)；R_0 为试样开始时浮筒读数(mm)。

此外，还有选用一定数量的直径基本相同的土壤颗粒，放在金属网上浸入水中，观察记录一定时间内土壤颗粒崩解的粒数，来计算土壤抗蚀性 S[10–14]，计算公式如下：

$$S = \frac{\text{总土粒数} - \text{崩解土粒数}}{\text{总土粒数}} \times 100\% \quad (4)$$

以上方法，定量地研究了土壤颗粒在水中的崩解过程，在土壤抗侵蚀能力研究方面取得了较多成果。但实验过程中也存在一些问题，如浮筒进入水中不容易校正，达到比较稳定的状态比较难，土壤刚进入水中的崩解量和崩解过程很难反映出来，精度控制较难，而用土粒的崩解数量来描述土壤的崩解过程比较粗糙等。

2 改进的崩解性测定方法

基于提高实验精度、展现崩解动态、方便实验操作的目的，本文对实验装置进行了改进，改进后的实验装置主要由天平(精确到 0.1 g)、崩解槽、崩解盒、秒表、支架等部分组成，如图 2。崩解盒底部金属网网孔的大小分别设计为 10 mm × 10 mm、5 mm × 5 mm、2 mm × 2 mm、1 mm × 1 mm、0.5 mm × 0.5 mm 4 种规格，崩解盒大小可根据实验目的自行确定(本实验设计为 9 cm × 9 cm)，崩解盒与支架之间用可以自由取下和挂上的细线相连。

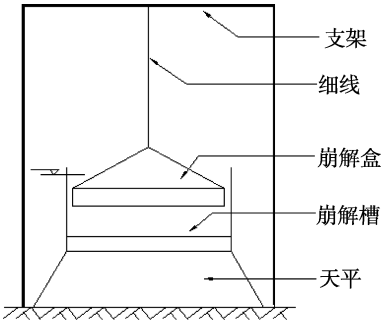


图 2 改进的土壤崩解装置示意图
Fig. 2 Improved soil disintegration equipment

实验前将盛适量水的崩解槽放在天平上归零，悬挂、调整好崩解盒的位置，并测出不同规格的空崩解盒完全浸入水中(不与崩解槽发生任何接触)后天平的读数 $M(x)$；实验时将已知质量为 M_s 的土壤崩解样品均匀放置在崩解盒的金属网上，悬挂好崩解盒后(此时崩解槽在天平上，并归零)，将崩解盒缓慢浸入水中，细线自然绷直(崩解盒完全浸没于水中)，秒表开始计时，此时天平的读数为 $M(T_0)$；以后每 30 s 计一次天平读数，分别计为 $M(T_1)$、$M(T_2)$…，崩解时间可依据实际情况而定，实验原理为：当悬挂的空崩解盒完全浸没在水中(不与崩解槽发生任何接触)时，以崩解盒为受力分析对象，细线向上的拉力、崩解盒自身的重力、崩解盒受到的浮力三力平衡，细线的拉力等于崩解盒自身的重力与其所受浮力之差，而浮力则传递到崩解槽的底部，以质量 $M(x)$的形式表现出来，

且有：

$$M(x)g = \rho_{\mathrm{w}} g V_{\text{排}} \tag{5}$$

式中，$V_{\text{排}}$ 是崩解盒排开水的体积(cm^3)；$M(x)$ 是孔径为 x mm 的空崩解盒浸没在水中时天平的读数，如 $M(5)$ 表示孔径为 5 mm 的崩解盒在水中的读数(g)；ρ_{w} 是水的密度(1.0 $\mathrm{g/cm}^3$)；g 是重力与质量之比(9.8 N/kg)。并且崩解盒排开水的体积就等于崩解盒自身的体积，即

$$V_{\text{盒}} = V_{\text{排}} \tag{6}$$

崩解盒中装入已知质量为 M_{s} 的土壤样品，完全浸入水中崩解，当天平读数不再变化时认为崩解达到终点(土壤样品分为崩解部分和未崩解部分)，以天平和崩解槽界面为受力分析平面，受力关系式和土壤样品重力关系式如下：

$$M(T_x)g = M_{\text{崩}} g + \rho_{\mathrm{w}} g V_{\text{盒}} + \rho_{\mathrm{w}} g V_{\text{未崩}} \tag{7}$$

$$M_{\mathrm{s}} g = M_{\text{崩}} g + M_{\text{未崩}} g \tag{8}$$

式中，$M(T_x)$是天平读数(g)；M_{s}是崩解土壤样品总质量(g)；$M_{\text{崩}}$ 是发生崩解部分土壤样品质量(g)；$V_{\text{未崩}}$ 是未崩解部分土壤体积(cm^3)；$V_{\text{盒}}$ 是崩解盒的体积(cm^3)；$M_{\text{未崩}}$ 是未崩解部分土壤质量(g)。

公式(8)+(5)–(7)得：

$$M_{\mathrm{s}} g + M(x)g - M(T_x)g = M_{\text{未崩}} g - \rho_{\mathrm{w}} g V_{\text{未崩}} \tag{9}$$

(9)式经约分和改写得：

$$V_{\text{未崩}} = \frac{M_{\mathrm{s}} + M(x) - M(T_x)}{\rho_{\text{未崩}} - \rho_{\mathrm{w}}} \tag{10}$$

天平读数不再变化时，认为水分基本上填充了全部孔隙，上式中 $\rho_{\text{未崩}}$ 表示未崩解土壤颗粒密度(2.65 $\mathrm{g/cm}^3$)。则土壤的崩解系数 $P(T_x)$为：

$$P(T_x) = 1 - \frac{M_{\text{未崩}}}{M_{\mathrm{s}}} \tag{11}$$

将(10)式两端乘以土粒密度得出未崩解土壤样品质量，并代入(11)式得：

$$P(T_x) = 1 - \frac{2.65 \times [M_{\mathrm{s}} + M(x) - M(T_x)]}{(2.65-1)M_{\mathrm{s}}} \approx 1 - 1.6061 \times \frac{M_{\mathrm{s}} + M(x) - M(T_x)}{M_{\mathrm{s}}} \tag{12}$$

3　应用实例

3.1　材料与方法

土壤含水量越低，土壤崩解越快，为了检测改进的实验方法对土壤崩解动态的反映能力，崩解样品为风干后的土壤团聚体。以北川魏家沟流域震裂区柳杉林样地、茶+荒草样地土壤为研究对象，分别取距地表 20、80、160 cm 处土壤约 3 kg，除去石头和根系枝叶等有机物，把大块土壤掰成直径 1 cm 左右的小土粒后风干(室内 2 周，风干后含水量在 2% ~ 4%)称重，并过 5、2、1、0.5 mm 筛，得出不同粒级组的土壤团聚体样品。然后按照下述实验方法进行实验测试，同一粒径土壤团聚体做 3 次重复实验，用其崩解系数的均值来描述该粒径土壤团聚体的崩解性，各粒径团聚体的崩解盒孔径与粒径对应。方法如下：

(1) 实验前称量各崩解盒的质量，并测定各崩解盒挂在支架上并完全浸入水中后天平读数(崩解盒浸入水中之前，崩解槽在天平上归零，崩解盒与崩解槽无接触)，整个实验过程中只需做一次。

(2) 添加样品，称崩解盒和样品的总质量(目的在于计算出样品的质量)，并使样品均匀铺设在崩解盒中。

(3) 崩解盒浸入水中，开始计时并读数记录。

(4) 天平读数不再变化时，结束实验。

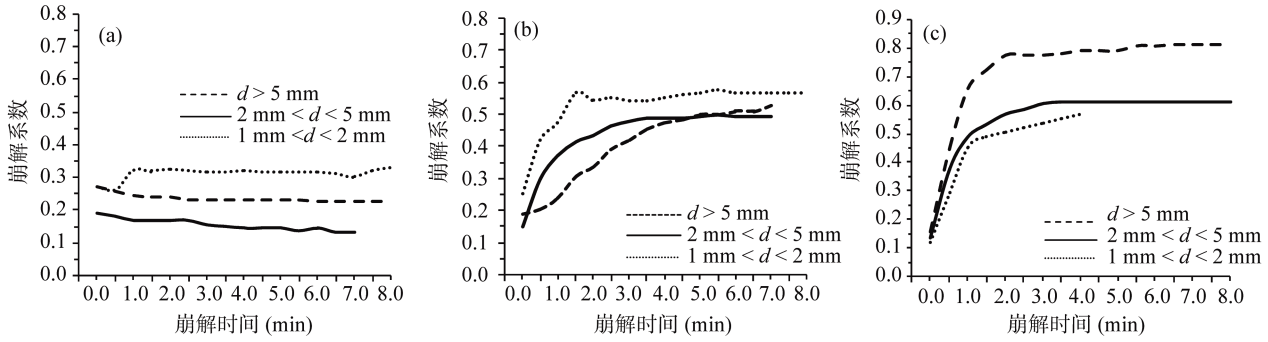
3.2　实验结果

图 3 表示林地同一剖面不同深度处土壤样品的崩解过程，图中的 d 表示土壤团聚体的粒径，崩解盒完全浸入水中、细线自然绷直为记时零点。从图中可以明显看出，团聚体崩解总体上呈现先快后慢的特征，刚开始土壤的崩解速率(崩解系数曲线的斜率)很大，随崩解时间的延长崩解速率迅速降低，最终不再发生崩解。在本次崩解实验中，大约 3 min 就基本完成了崩解过程。可见，至少在土壤含水量很低的情况下，土壤崩解的最初阶段在整个崩解过程中占有重要地位。因此，要准确地反映土壤的崩解特性，就必须抓住崩解初期这一关键环节。若用常规崩解实验方法，校正浮筒位置或等待浮筒达到比较稳定的状态这一过程将浪费宝贵的观测时间，且忽略了浮筒达到稳定状态以前的崩解过程和崩解量。应用改进的实验方法，只要试样完全浸没于水中，细线绷直后就能立刻反映出该时刻的崩解量，且这一过程所消耗的时间很短；其次，改进的实验方法能准确地计算出样品最终的崩解量，而常规实验方法忽略了初始阶段的崩解量。

从图 3 还可以看出，表层土壤的崩解系数小，随着土壤深度的增加土壤崩解系数增大，且不同粒径土壤团聚体的崩解过程不同。表层土壤崩解系数小，可能与表层土壤有机质丰富、根系含量较大有关。此外，20 cm 深度处土壤崩解系数曲线有缓慢下降的现象，说明崩解样品刚进入水中，需要一定的时间，孔隙才能被完全填满；在土壤孔隙未被水完全填满前，未崩解土壤样品排开水的体积大于其实际体积，在崩

解率上表现为表观崩解率大于实际崩解率。随着实验时间的增加，水逐渐充满全部孔隙，这种因孔隙而造成的偏差逐渐减小；当孔隙全部被水填充时，这种影响消失。

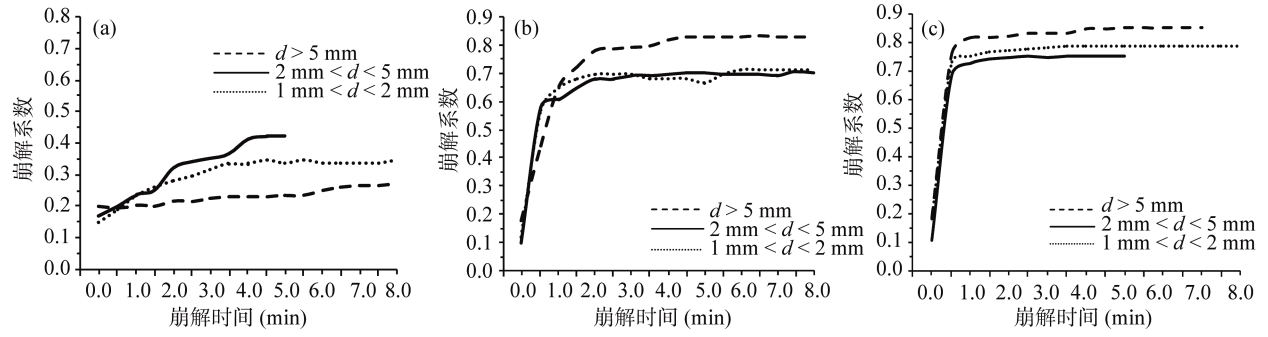
图 4 表示茶+荒草样地同一剖面不同深度处土壤样品的崩解过程。从图中可以看出，不同粒径的土壤团聚体的崩解过程明显不同，崩解量也具有很大的差别，与图 3 揭示的规律相同。20 cm 深度处粒径大于 5 mm 的土壤团聚体崩解得最慢，崩解系数也最小；粒径为 2 ~ 5 mm 的崩解得较快，崩解系数最大。土壤深度增大，土壤团聚体的崩解系数增大，达到崩解终点所需要的时间越短，崩解初期的崩解速率越大。



(a：20 cm；b：40 cm；c：160 cm)

图 3　林地不同土壤深度处土壤团聚体崩解特征

Fig. 3　Disintegrations of soil aggregates in different depths of forest soil



(a：20 cm；b：40 cm；c：160 cm)

图 4　茶+荒草样地不同深度土壤团聚体崩解特征

Fig. 4　Disintegrations of soil aggregates in different depths of tea + weed plot soil

综合图 3 和图 4 可知，表层土壤的崩解系数明显小于其他各层，随深度增加，崩解初期的速率增大，崩解系数也相应增大，土壤抗侵蚀能力减弱。从不同类型样地比较来看，森林土壤样地的抗蚀性大于茶+荒草样地；表层 20 cm 处抗蚀性最大，可能是植物根系细根的表聚现象及细根的缠绕、串联、网络等作用改变了土壤的性质[15–16]，影响了土壤的崩解性。

由此可见，改进的测试方法扩大了土壤崩解装置的使用范围，应用该方法进行不同粒级土壤团聚体的崩解实验，能反映出更多的有用信息，能对土壤的崩解动态和最终崩解量做出比较准确的测试，可能会有助于我们对土壤崩解特性的认识。

4　小结与讨论

与常规研究土壤崩解实验方法相比，改进的测试方法有以下特点：

(1) 实验的测试精度主要取决于天平的精度，可以根据实验设计需要自行选择合适的天平，以满足实验精度要求。

(2) 克服了常规实验浮筒读数受水波动的影响，最终崩解量的计算囊括了崩解部分样品的总量。

(3) 实验过程中，天平读数间接地反映样品的崩解动态过程，崩解系数随时间的变化情况可以较好地揭示试样瞬时崩解速率的大小。

(4) 天平读数不再变化时，即可结束实验，实验观测时间长短依据实际情况而定，操作灵活方便。

(5) 根据浮力和重力的关系计算崩解量，物理意义比较明晰。

对原有实验方法加以改进后，可以进行不同粒级样品的崩解实验，在应用实例中实验样品是风干的土

壤团聚体，实验结果比较理想。风干土壤，水分含量低、崩解速度快，对实验装置的灵敏性要求较高，本实验装置能较好地反映其崩解的动态过程；对于水分含量较高、崩解速度慢的试样，本实验装置应该能更好地反映其动态崩解过程(实际情况有待进一步的实验验证)。该实验方法仍存在有待改进之处：如崩解盒中的土样在完全浸入水中之前的崩解过程不能被反映出来；网孔小于 1 mm 的崩解盒在进行 1 ~ 2 mm 颗粒的崩解实验过程中，土壤已经崩解的部分颗粒可能仍然留在金属网上，影响了实验观察结果；对于孔隙比大的土壤样品，崩解最初时刻土壤孔隙未被水分充分填充，造成表观崩解率大于实际崩解率。同时，本方法操作过程中崩解盒完全浸入水中所需的时间很短，实验现象也表明在完全浸入前的崩解量很小，对实验结果的影响不大；而对于孔隙比大的样品，可通过试验得出土壤孔隙完全被水充满的程度与浸没时间的关系来校正实际的崩解量，从而使开始崩解阶段的表观崩解率更加接近于实际崩解率。

参考文献：

[1] 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997: 60

[2] 李喜安, 黄润秋, 彭建兵. 黄土崩解性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009 (S1): 3 207–3 213

[3] 朱显谟. 黄土地区植被因素对于水土流失的影响[J]. 土壤学报, 1960(2): 110–121

[4] 蒋定生, 李新华, 范兴科, 张汉雄. 黄土高原土壤崩解速率变化规律及影响因素研究[J]. 水土保持通报, 1995(3): 20–27

[5] 刘宝元, 张科利, 焦菊英. 土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用[J]. 自然资源学报, 1999(4): 345–350

[6] 邹翔, 张平仓, 陈杰. 小江流域土壤抗崩性实验研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 244–246

[7] 曾光, 杨勤科, 姚志宏. 黄土丘陵沟壑区不同土地利用类型土壤抗侵蚀性研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(1): 6–9

[8] 袁勇, 高华端, 孙泉忠. 黔中喀斯特地区不同地类土壤侵蚀研究[J]. 中国水土保持, 2010(6): 50–51

[9] 蔡秀丽. 花岗岩残积土的崩解特性研究[J]. 水利科技与经济, 2010, 16(8): 882–883

[10] 王云琦, 王玉杰, 刘楠. 三峡库区典型林分土壤抗侵蚀性能及评价[J]. 北京林业大学学报, 2010(6): 54–60

[11] 王忠林, 李会科, 贺秀贤. 渭北旱塬花椒地埂林土壤抗蚀抗冲性研究[J]. 水土保持研究, 2000,7 (1): 33–37

[12] 王云琦, 王玉杰, 朱金兆. 重庆缙云山典型林分林地土壤抗蚀性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(6): 775–780

[13] 赵洋毅, 周运超, 段旭. 黔中喀斯特地区不同岩性土壤的抗蚀抗冲性研究[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(29): 9 311–9 313

[14] 丛日亮, 黄进, 张金池, 王如岩, 田月亮. 苏南丘陵区主要林分类型土壤抗蚀性分析[J]. 生态环境学报, 2010, 19(8): 1 862–1 867

[15] 郭灵辉, 王道杰, 张云红, 矫震, 陈东. 泥石流源区新银合欢细根质量动态与垂直分布特征[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(6): 41–46

[16] 郭灵辉, 王道杰, 张云红, 陈东. 蒋家沟新银合欢人工林土壤养分分布及其与细根的关系[J].中国水土保持, 2010(12): 46–49

Method to Show Dynamic Process of Soil Disintegration

CHEN Dong[1, 2, 3], WANG Dao-jie[1, 2*], CHEN Xiao-yan[1, 2], CHEN Shun[1, 2, 3]

(1 *Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes*, *Chinese Academy of Sciences*, *Chengdu* 610041, *China*; 2 *Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment*, *Ministry of Water Resources*, *Chinese Academy of Sciences*, *Chengdu* 610041, *China*; 3 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract: Soil disintegration is one of very important section in soil erosion study and the testing instrument of soil disintegration developed by Jiang Ding-sheng has facilitated and pushed soil erosion study greatly, however, it has some disadvantages, such as unable to reflect the dynamic process of disintegration which leads to lose the optimal observation chance of soil disintegration because it needs time to adjust water level at the beginning of the experiment. Based on the long time researching work of the soil resistance to erosion in Beichuan rupture zone, the method was improved and a new equipment was designed to recognize soil disintegration process. The new method could be widely used to help us to study the disintegration dynamics with higher convenience and efficiency. Moreover, the formulation which demonstrated the amount of the disintegrated soil has a firm physical foundation, and scholars could set up the experiment accuracy by changing balance.

Key words: Soil disintegration equipment, Revised testing method, Dynamic process