

重庆缙云山典型林分土壤抗冲性的最佳土壤结构指标研究^①

郭平, 王云琦*, 王玉杰, 张会兰, 王冉, 胡波, 唐晓芬

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要:应用原状土冲刷法和 Le Bissonnais (LB)法中的快速湿润法(FW),对重庆缙云山针阔混交林、常绿阔叶林、楠竹林、灌木林和裸地5种样地的土壤抗冲系数、土壤结构以及两者之间的关系进行研究,以期找出表达不同林分土壤抗冲性的最佳土壤结构指标。结果表明:不同林分间土壤抗冲系数($L \cdot \min/g$)大小依次表现为:阔叶林(2.719) > 针阔混交林(2.431) > 灌木林(2.024) > 裸地(1.595) > 楠竹林(1.096),各林分土壤抗冲系数除楠竹林和裸地外均从表层到底层呈递减趋势;对于表达土壤结构常用的4个指标,>0.2 mm 团聚体累积量、平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和土壤分形维数(D)在表层(A层)土壤中均表现为:针阔混交林最优,阔叶林优于灌木林,楠竹林和裸地较差;对土壤抗冲系数和4个土壤结构指标作逐步回归分析,最终平均质量直径(MWD)被引入模型,在显著性水平为 $P < 0.05$ 的情形下,可以认为土壤抗冲系数与MWD存在线性关系,线性回归方程为: $y = -0.306 + 1.823x (R^2 = 0.406, n = 19, P = 0.003)$,即在研究地区平均质量直径(MWD)可作为表达土壤抗冲性的最佳土壤结构指标。

关键词:土壤抗冲系数;平均质量直径;几何平均直径;分形维数

中图分类号:S157.5

土壤水力侵蚀主要包括雨滴击溅和径流引起的土壤颗粒分散和转移^[1-2]。而稳定性团聚体受土壤透气性、水分渗透、径流、土壤侵蚀、微生物活动、植物生长、生物化学转化过程以及土壤有机质稳定机理的影响^[3-8],是重要的土壤结构单元,不仅能够减少雨滴击溅引起的土壤颗粒分散和地表径流对分散颗粒物的转运,也能减少土壤板结的形成^[9]。因此,在土壤侵蚀过程中,稳定性团聚体能够较强地抵制水力对其的瓦解作用^[10]。由于大量研究表明土壤团聚体数量和稳定性是衡量土壤可蚀性的重要指标,团聚体稳定性的测定能够间接地量化土壤可蚀性^[11-12],所以找出土壤结构最具代表性指标,为更好地反映某一地区土壤结构特性、土壤对水力侵蚀的抵抗能力就显得尤为重要。目前虽然对土壤抗冲性和土壤结构指标的研究较多,但是将两者结合,找出基于土壤抗冲性的最优土壤结构指标的报道不多,因此,本文根据重庆缙云山不同植被种类下具有不同的土壤结构等特性,选取不同林分林地作为研究对象,应用 Le Bissonnais (LB)法^[13-16]中的快速湿润法(FW)和原状土冲刷法对土壤团聚体稳定性和土壤抗冲性进行分析,最终指出不同林分土壤抗冲性的最佳土壤结构指标。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆北碚区嘉陵江小三峡之温塘峡西岸,地理位置:106°22'E, 29°45'N,海拔350~951.5 m。该保护区具有亚热带季风湿润性气候特征,年均气温13.6℃,年降水量1611.8 mm,年均日照1293.9 h。土壤是以三叠纪须家河组厚层石英砂岩、泥质页岩和灰质页岩为母质风化而成的酸性黄壤土。重庆缙云山植物资源丰富,主要植被类型为常绿阔叶林、常绿阔叶灌丛、暖性针叶林、竹林,另外还有水生植被和亚热带灌草丛。主要树种为马尾松(*Pinus massoniana*)、四川大头茶(*Gordonia acuminata*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、四川山矾(*Syraplocos setchuanensis*)、楠竹(*Phyllostachys pubescens*)、白毛新木姜子(*Neolitea aurata*)等。

1.2 试验材料

于2006年9月依据不同林分选取针阔混交林、常绿阔叶林、楠竹林、灌木林和裸地(对照)作为研究对象,样地大小为标准5 m × 20 m 径流小区,对这5种样地的基本情况进行详细调查,结果见表1。

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(TD2011-01)资助。

* 通讯作者(wangyunqi@bjfu.edu.cn)

作者简介:郭平(1987—),女,天津人,博士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail: 704214985@qq.com

表 1 样地基本情况
Table 1 Basic situation of plots

林地类型	海拔(m)	坡度(°)	坡向	母质	郁闭度	土壤层厚度(cm)	枯落物厚度(cm)	主要树种
针阔混交林	760	25	西北	泥质砂岩	0.8	123	3.5	四川大头茶、马尾松、四川山矾、四川杨桐
常绿阔叶林	825	30	西北	泥质砂岩	0.8	135	3.4	四川大头茶、白毛新木姜子、四川杨桐
楠竹林	800	10	北	泥质砂岩	0.7	110	1.5	楠竹
灌木林	860	8	北	泥质砂岩	0.85	130	4.5	山矾、广东山胡椒、白毛新木姜子、赤杨叶
裸地(对照)	860	10	西北	泥质砂岩	-	130	-	-

1.3 土壤抗冲性的样品采集、测定与计算

1.3.1 样品采集与测定 土壤抗冲性研究采用原状土冲刷法^[17]。于 2011 年 9 月在每个样地中均匀选取 3 个点作为采样点,用 10 cm × 10 cm × 25 cm 的自制取样器(图 1)^[18]采集表层原状土,带回实验室浸泡 24 h,使土样达到饱和,试验时静置 1 min 并称重。为和其他地区研究保持一致^[19],冲刷坡度调节为 25°,根据缙云山监测站实验测得最大林地坡面径流流速(480.85 L/h)将冲刷流量控制为 6.3 L/min。最后放置抗冲槽中冲刷 15 min,冲刷完毕,静置 1 min 进行称重。

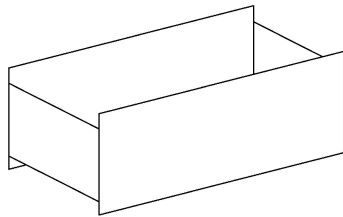


图 1 自制取样器
Fig. 1 Self-made sampler

1.3.2 土壤抗冲系数计算 现今国内外评价土壤抗冲性指标有 9 种之多^[20-22],但可比性差。因此,根据实验内容,选择冲掉 1 g 土,同时考虑需水量 Q (L) 和抗冲时间 t (min) 的抗冲性指标土壤抗冲刷系数来表示土壤抗冲性。公式如下:

$$C = \frac{Qt}{w} \tag{1}$$

式中, C 为土壤抗冲刷系数(L·min/g); w 为冲走的土重(g)^[23]。

1.4 团聚体稳定性的样品采集、测定与计算

1.4.1 样品采集与测定 于 2006 年 9 月在 5 种样地中呈 S 型曲线均匀布设 5 个样点,每个样点按照剖面自然形成层次分层(表 2)取原状土土样,将同一分层 5 个样点的土样混合均匀,按四分法分 3 袋带回实验室自然风干,全部土样先过 5 mm 筛,将小于 5 mm 的土样再过 3 mm 筛,最终将 3 ~ 5 mm 大小的干筛法获取的团聚体小心装入铝盒,置于 40℃ 烘箱中烘 24 h,使土壤含水量尽可能达到一致,减少湿度差异。

表 2 典型林分土壤物理性状^[18, 24]
Table 2 Soil physical properties under typical forests

林分	土壤层次	土壤厚度 (cm)	孔隙度(%)			土壤密度 (g/cm ³)	有机质 (g/kg)	自然含水量 (g/kg)
			总孔隙	非毛管	毛管			
针阔混交林	A	0 ~ 8	62.96	15.93	47.03	1.15	46.20	193.0
	AB	8 ~ 57	50.42	12.32	38.10	1.39	6.90	180.4
	B	57 ~ 99	49.43	12.27	37.16	1.51	3.90	163.2
	C	99 ~ 123	38.14	8.73	29.41	1.72	1.20	146.5
常绿阔叶林	A	0 ~ 11	55.92	12.40	43.52	1.18	31.80	174.6
	AB	11 ~ 33	44.60	10.26	34.34	1.49	3.00	149.4
	B	33 ~ 121	38.23	8.90	29.33	1.69	0.80	142.5
	C	121 ~ 135	42.44	9.80	32.64	1.53	1.00	139.6
楠竹林	A	0 ~ 6	58.50	14.48	44.02	1.14	20.80	188.2
	AB	6 ~ 56	47.11	12.70	34.41	1.46	11.00	174.5
	B	56 ~ 90	45.40	9.91	35.49	1.54	3.20	145.0
	C	90 ~ 110	43.91	9.99	33.92	1.64	2.00	137.8
灌木林	A	0 ~ 25	73.33	16.94	56.39	0.73	77.90	139.2
	AB	25 ~ 57	57.58	14.21	43.64	1.17	14.10	162.3
	B	57 ~ 130	45.29	11.43	33.86	1.46	2.90	131.4
	C	103 ~ 130	30.60	5.06	25.54	1.63	1.40	117.5

本实验于 2011 年 9 月选用 LB 法中的快速湿润法(FW)对土样进行如下处理：每个土样均称取团聚体 5 g 轻轻放入装有 50 ml 蒸馏水的烧杯中，静置 10 min，用吸管吸干水分，再用乙醇将团聚体洗入预先浸在乙醇中的套筛中，套筛从下至上筛孔大小依次为 0.05、0.15、0.25、0.5、1、2 mm，双手抓住套筛，均匀用力在乙醇中上下振荡 5 次，将各筛上的团聚体小心洗入蒸发皿中，最终烘干、称重。

1.4.2 土壤结构指标计算 一般评价土壤结构的指标包括 >0.2 mm 团聚体含量、平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和土壤团聚体分形维数(D)^[25-28]，因此本文选取这 4 个指标进行研究。其中平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)是两种表征土壤团聚体直径的方法，前者是对不同粒级的团聚体进行加权平均计算，减少因质量不均造成的影响；后者是对所有粒级团聚体的平均直径先取对数以此减小团聚体大小不均造成的影响。

计算公式如下：

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

$$GMD = \text{Exp} \frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (3)$$

式中， $\bar{x}_i$ 为土壤粒级平均直径(mm)； w_i 为不同土壤粒级团聚体占总团聚体的比例(%)。

土壤团聚体分形维数(D)计算公式如下^[29]：

$$W(r\langle R_i \rangle) / W_T = \left(\frac{\bar{R}_i}{R_{\max}} \right)^{3-D} \quad (4)$$

两边取以 10 为底的对数：

$$\lg W(r\langle R_i \rangle) / W_T = (3-D) \lg \bar{R}_i / R_{\max} \quad (5)$$

式中， D 为土壤水稳性团聚体各粒级分布的分形维数； W 为直径小于 R_i 累积质量(kg)； W_T 为总质量(kg)； $\bar{R}_i$ 为两相邻粒级 R_i 与 R_{i+1} 间土粒平均直径(mm)； $R_{\max}$ 为最大粒级土粒平均直径(mm)。

2 结果与分析

2.1 土壤抗冲特性

不同林分土壤在不同层次中的土壤抗冲系数见图 2。可以看出，阔叶林平均抗冲系数最大，达到了 2.719 L·min/g，其次为针阔混交林(2.431 L·min/g)和灌木林(2.024 L·min/g)，楠竹林(1.096 L·min/g)最小，

仅为裸地(1.595 L·min/g)的 0.688 倍，这与楠竹林 A 层抗冲系数(0.789 L·min/g)明显小于其他林地几个数量级有关。由于楠竹林表层土壤腐殖质层(6 cm)最薄，有机质含量(20.8 g/kg)低，以及楠竹林根系主要集中于 AB 层，A 层根系少，所以导致 A 层土壤抗冲系数小于其他林分。除楠竹林外，阔叶林、针阔混交林和灌木林土壤平均抗冲系数均高于裸地，表明相较于无植被土壤，植被对土壤抗冲性有显著影响，植物根系能够提高土壤抵抗水力侵蚀的能力，这与张建军等^[30]和王库^[31]研究相一致。

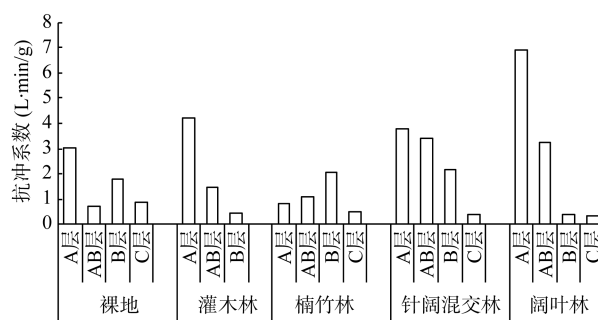


图 2 不同样地不同土壤层次土壤抗冲系数

Fig. 2 Soil erosion coefficients at different soil layers under different forest stands

除楠竹林和裸地外，不同样地土壤抗冲系数从表层到底层均呈递减趋势，尤以灌木林和阔叶林最为明显(图 2)。在土壤 A 层中，相较于其他林地，阔叶林表现出了最强的抗冲刷能力，而楠竹林最差。在土壤 AB 层中，裸地、灌木林和阔叶林抗冲系数相对 A 层急剧减少，有机质含量明显降低(从 49.28 g/kg 平均下降到 8.82 g/kg)。土壤 B 层为淀积层，该层楠竹林与针阔混交林抗冲系数最高，这与两种林分中有机质含量最高(分别为 3.2 g/kg、3.9 g/kg)有关；而阔叶林由于其有机质含量仅为 0.8 g/kg，故仍呈急剧下降趋势。最后一层 C 层，土壤受外界干扰较小，所以土壤抗冲刷能力主要与有机质含量和母质有关。总之，楠竹林林地所表现出的异于其他样地的规律表明，楠竹林林种单一，腐殖质层和凋落物层厚度偏低，抵抗水力侵蚀的能力较差，因而对土壤改良的作用较差。

2.2 土壤结构指标分析

2.2.1 土壤团聚体粒径分布特征 图 3 为经快速湿润法(FW)测定的土壤团聚体粒径分布图。由图 3 可知，各不同植被类型和土壤层次下，快速湿润法(FW)使得大部分团聚体崩解为小团聚体，且水稳性团聚体粒径分布也以小团聚体为主。5 种样地土壤 A 层、阔叶林 AB 层和 B 层主要集中在 5~2 mm 和 2~1 mm 之间，两者占 53% 以上；其余各样地不同土壤层次小

团聚体主要集中在 1~0.5 mm 和 0.5~0.25 mm 之间, 两者占 42% 以上。各样地 5~2 mm 和 2~1 mm 土壤

团聚体所占比例基本均从表层到底层呈递减趋势, 但在 1 mm 以下土壤团聚体所占比例基本均呈递增趋势。

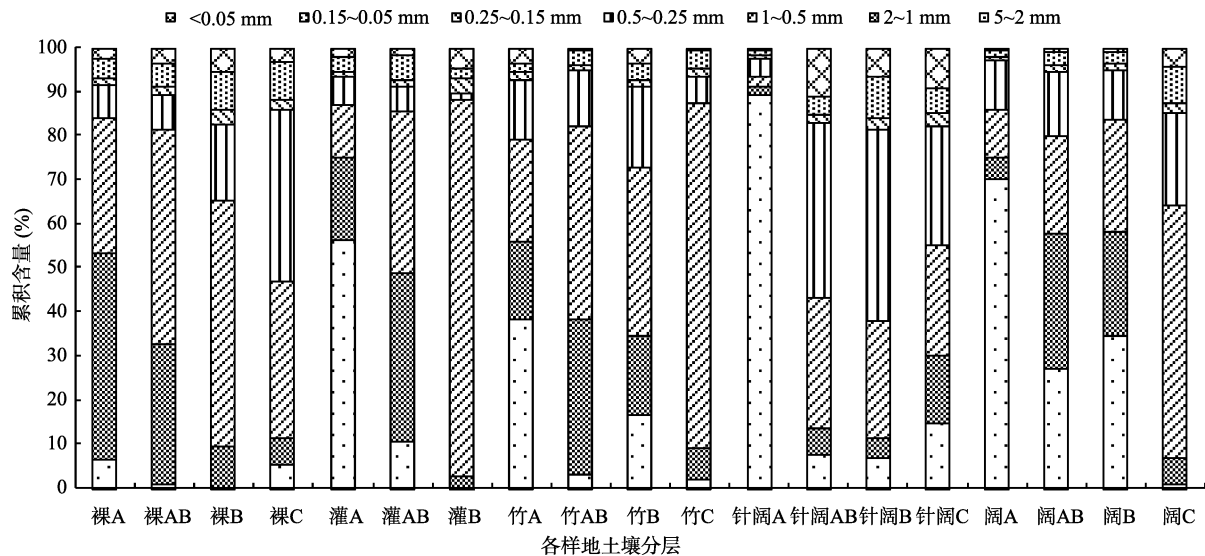


图 3 不同样地不同土层土壤团聚体粒径分布

Fig. 3 Size distributions of soil aggregates at different soil layers under different forest stands

2.2.2 >0.2 mm 稳定性土壤团聚体含量 高维森和王佑民^[32]于 1991 年提出>0.25 mm 水稳性团粒含量为最佳土壤抗蚀指标。但也有研究认为^[33], 在人工模拟降雨条件下, 30 min 后的径流深度和土壤侵蚀量与表层土壤稳定性大团聚体(>0.2 mm)含量呈负相关, 因此本试验就以>0.2 mm 稳定性土壤团聚体含量作为衡量团聚体稳定性的重要指标之一。由图 4 可以看出, 除楠竹林外不同样地从表层到底层>0.2 mm 团聚体累积量的变化规律基本一致。表层土壤中>0.2 mm 团聚体累积量顺序为: 针阔混交林>阔叶林>灌木林>楠竹林>裸地。差异显著性检验表明, 针阔混交林、阔叶林和灌木林之间, 裸地和针阔混交林之间以及楠竹林和阔叶林之间的差异性显著($P < 0.05$), 其余各样地差异性不显著($P > 0.05$)。

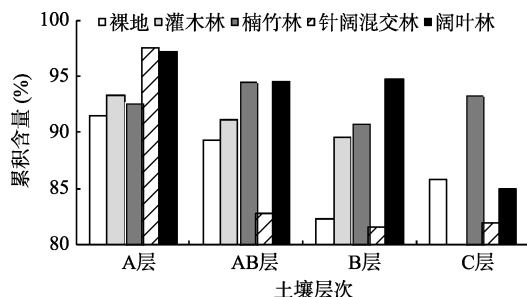


图 4 >0.2 mm 团聚体累积含量

Fig. 4 Cumulative amounts of >0.2 mm aggregates

2.2.3 土壤团聚体平均质量直径(MWD) 平均质量直径(MWD)越大, 土壤团聚体稳定性就越大^[16],

结果见图 5。除楠竹林的 B 层大于 AB 层、针阔混交林的 C 层大于 B 层, 其余各样地从表层到底层均呈递减趋势。其中, 表层土壤 MWD 表现出的规律为: 针阔混交林>阔叶林>灌木林>楠竹林>裸地, 说明针阔混交林团聚体水稳性最强, 团聚体最稳定。差异显著性表明, 裸地和阔叶林之间差异性不显著($P > 0.05$), 其余各样地间差异性显著($P < 0.05$)。

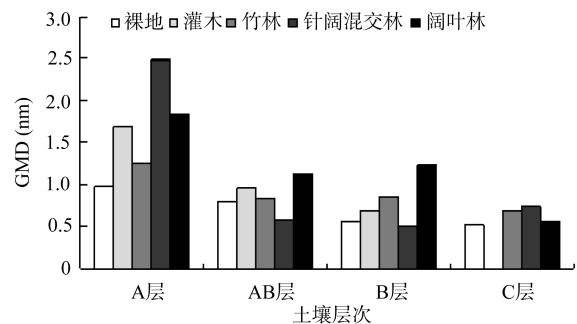


图 5 土壤团聚体平均质量直径

Fig. 5 Average mass diameters (MWD) of soil aggregates

2.2.4 土壤团聚体几何平均直径(GMD) 许多学者把几何平均直径(GMD)作为评价土壤团聚体稳定与否的指标^[15], 其值越大, 土壤团聚体稳定性就越大。图 6 给出了土壤水稳性团聚体 GMD 在不同林分不同土壤层次中的变化趋势, 结果表明与 MWD 变化趋势基本一致, 均是从表层到底层逐渐减少。其中, 表层土壤 GMD 在各样地间的顺序为: 针阔混交林>阔叶林>灌木林>楠竹林>裸地, 差异显著性表明, 楠竹林、阔叶林和裸地之间差异性不显著($P > 0.05$), 其

余各样地间差异性显著($P < 0.05$)。但阔叶林的 GMD 值明显高于裸地,说明阔叶林的团聚体水稳性大,在发生强降雨下,土壤团聚体不易分散为糊状,可有效减少土壤侵蚀。裸地之前为农耕地,于 2006 年停止耕作,土地利用类型改变,所以裸地为农耕地时,总孔隙度较高(表 2)。但经过土地利用类型改变后,土壤变得紧实、通透能力较差,因此导致 GMD 值偏小。

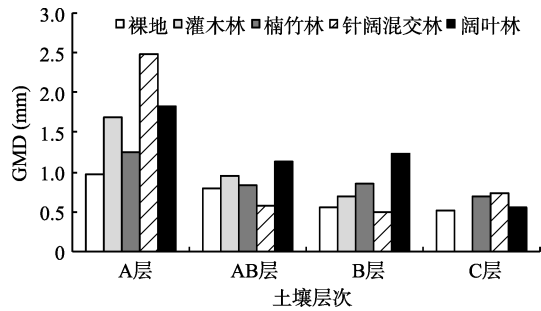


图 6 土壤团聚体几何平均直径(GMD)
Fig. 6 Geometric mean diameters (GMD) of soil aggregates

2.2.5 土壤团聚体的分形维数 从图 7 中可以看出,土壤水稳性团聚体各粒级分布的质量分形维数(D)在 1.939 ~ 2.595 之间,A 层土壤在 1.939 ~ 2.330 之间,AB 层、B 层、C 层在 2.079 ~ 2.595 之间。由于各林分不同土壤层次有机质与微生物含量及其分泌物的不同,导致个别土壤层次质量分形维数值逆于总体趋势,尤以楠竹林 AB 层最为明显(AB 层 < A 层),但总体上各样地从 A 层到 C 层仍呈现递增趋势。其中,针阔混交林 A 层的值最低,仅为 1.939,与针阔混交林 A 层土壤 >0.2 mm 稳定性土壤团聚体含量、MWD、GMD 最高相一致。这说明,该样地土壤水稳性大团聚体含量较高。差异显著性表明,灌木林、楠竹林、阔叶林和裸地之间差异性不显著($P > 0.05$),其余各样地间差异性显著($P < 0.05$)。裸地与灌木林、楠竹林和阔叶林间差异性不显著,而裸地 A 层 D 值高于灌木林和阔叶林,却低于楠竹林,说明裸地 A 层土壤较灌木林和阔叶林土壤结构紧实,质地稍黏重,通透能力较弱,但好于楠竹林。

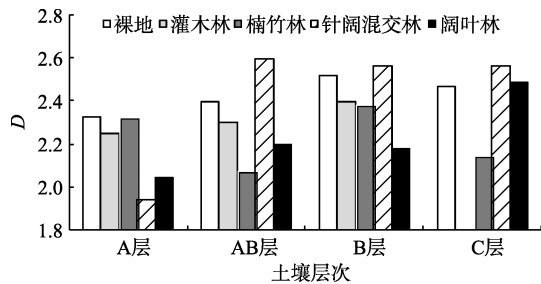


图 7 土壤团聚体分形维数(D)
Fig. 7 Fractal dimensions (D) of soil aggregates

2.3 土壤抗冲性与土壤结构指标的关系

为了解土壤抗冲性与土壤结构指标之间是否存在一定关系,分别对其进行回归分析,结果见表 3。从表 3 中可以看出,4 个指标和抗冲系数间均存在相关关系,尤以 MWD 与抗冲系数相关性最为明显,GMD、D 次之,>0.2 mm 团聚体含量与抗冲系数之间相关性最小。虽然>0.2 mm 团聚体含量与抗冲系数之间相关性最小,但随着>0.2 mm 团聚体含量的增加土壤抗冲系数也会随之增加。说明这 4 个指标均会对土壤抗冲系数大小产生影响,并反映土壤抗冲性强弱。

表 3 抗冲系数与土壤结构各指标间相关关系 Table 3 Correlations between soil erosion coefficient and soil structure indicators				
	抗冲系数- >0.2mm 团聚体含量	抗冲系数- MWD	抗冲系数- GMD	抗冲系数- D
R^2	0.128	0.406	0.383	0.148
P	0.132	0.003	0.005	0.104

2.4 最优土壤结构指标筛选

对土壤抗冲系数和>0.2 mm 团聚体含量、MWD、GMD、D 作逐步回归分析。结果表明,4 个被选择自变量仅有 MWD 进入了回归方程,其余变量被剔除。模型的 F 统计量的观察值为 11.625,概率 P 值为 0.003,在显著性水平为 0.05 的情形下,可以认为土壤抗冲系数与 MWD 存在线性关系,线性回归方程为 $y = -0.306 + 1.823x (R^2 = 0.406, n = 19, P = 0.003)$ 。这表明,只有 MWD 与抗冲系数最相关,且该值越大,团聚体稳定性越好,则土壤抗冲性能越强。这与 Nimmo 等^[34]的研究相一致,Nimmo 提出,MWD 随着大粒级团聚体含量的增加而增加,是各级团聚体的综合指标,其值越大,团聚体越稳定。因此,基于土壤抗冲性,MWD 能够作为土壤结构指标表征土壤结构性质。虽然不同学者提出不同的评价指标来表征土壤结构特性,其中 GMD 采用较多^[35],但由于实验方法和研究地土壤理化性质各异等情况,导致与本研究的结果存在一定差异。这说明在缙云山更适合把 MWD 作为评价土壤结构的最优指标。

为探明>0.2 mm 团聚体含量、GMD 和 D 3 个变量被剔除原因,对土壤抗冲系数和>0.2 mm 团聚体含量、MWD、GMD、D 作强制回归分析,使 4 个变量全部进入回归模型中进行共线性诊断。结果表明(表 4),4 个变量的容差(分别为 0.083、0.022、0.020、0.069)均小于 0.1,且方差膨胀因子(VIF)(分别为 12.093、45.008、50.901、14.461)均大于 10,说明自变量间存在严重共线性。虽然 4 个指标对抗冲系数都存在一定意义,但其之间存在严重共线性。由于删除不包含多余信息的自变量对回归方程没有过多影响,以及 MWD 的 Sig. 值(0.436)最小,所以保留 MWD 变量,剔除其他变量。

表 4 共线性诊断系数^①
Table 4 Collinearity diagnostic factor

变量	非标准化系数		标准系数 <i>Beta</i>	<i>t</i>	<i>Sig.</i>	共线性统计量	
	<i>B</i>	标准误差				容差	<i>VIF</i>
常量	16.180	36.510		0.443	0.664		
水稳性团聚体含量	-13.754	23.273	-0.413	-0.591	0.564	0.083	12.093
MWD	3.093	3.853	1.081	0.803	0.436	0.022	45.008
GMD	-1.026	4.823	-0.305	-0.213	0.835	0.020	50.901
D	-2.006	7.068	-0.217	-0.284	0.781	0.069	14.461

注：因变量为抗冲系数。

由式 2 可知，MWD 主要受不同土壤粒级团聚体占总团聚体比例的影响，比例增大，MWD 随之增加。根据图 2 和图 4 综合分析，除裸地外 4 种林地 A 层土壤均以 2~5 mm 粒级大团聚体为主，A 层以下均以 0.25~2 mm 为主，对应 MWD 值表现为 A 层大于其他土壤层。竹林由于表层土壤腐殖质层最薄，有机质含量低，导致抗冲系数偏小，所以除楠竹林外其余林地抗冲系数也呈现 A 层大于其他土层的规律。这正好验证了上面所阐述的结果，土壤抗冲系数与 MWD 存在正相关关系，MWD 增大，抗冲系数随之增大。

综上所述，小粒级土壤颗粒易被水流冲走，相对来说大粒级团聚体更稳定，能够较强地抵抗水力侵蚀。由于对土壤表层 MWD 起主导作用的是大粒级团聚体，因而把 MWD 作为基于土壤抗冲性的最优土壤结构指标。值得说明的是，有林地表层土壤大粒级团聚体所占比例比无林地多，且抗冲系数大，所以在土壤改良上应适当种植植物，林型以针阔混交林为优，以此减少水土流失危害。

3 结论

(1) 从不同林分角度来看，土壤抗冲系数大小依次表现为：阔叶林(2.719 L·min/g) > 针阔混交林(2.431 L·min/g) > 灌木林(2.024 L·min/g) > 裸地(1.595 L·min/g) > 楠竹林(1.096 L·min/g)；从土壤分层角度来看，土壤抗冲系数除楠竹林和裸地外均从表层到底层呈递减趋势。由于楠竹林腐殖质层薄、有机质含量少，表现出了最差的抗冲刷能力，而阔叶林恰好相反，因而在土壤改良方面应更多地考虑阔叶林和针阔混交林，以达到改良土壤、改善土壤侵蚀的目的。

(2) 各样地 5~2 mm 和 2~1 mm 土壤团聚体所占比例基本从表层到底层呈递减趋势；团聚体的 MWD 和 GMD 两者变化趋势基本一致，而 D 值与二者呈现相反的变化规律。

(3) 对土壤抗冲系数和>0.2 mm 团聚体含量、

MWD、GMD 和 D 作逐步回归分析，模型仅引入了变量 MWD，且概率 *P* 值为 0.003，在显著性水平为 0.05 的情形下，可以认为土壤抗冲系数与 MWD 存在线性关系，线性回归方程为： $y = -0.306 + 1.823x$ 。因此选定 MWD 作为评价缙云山土壤结构的最优指标。

参考文献：

[1] Shi ZH, Yan FL, Li L, Li ZX, Cai CF. Interrill erosion from disturbed and undisturbed samples in relation to topsoil aggregate stability in red soils from subtropical China[J]. Catena, 2010, 81(3): 240–248

[2] Martínez-Mena M, Williams AG, Ternan JL, Fitzjohn C. Role of antecedent soil water content on aggregates stability in a semi-arid environment[J]. Soil and Tillage Research, 1998, 48(1/2): 71–80

[3] Horn R, Smucker A. Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils[J]. Soil Tillage Research, 2005, 82(1): 5–14

[4] Cantón Y, Solé-Benet A, Asensio C, Chamizo S, Puigdefábregas J. Aggregate stability in range sandy loam soils-relationships with runoff and erosion[J]. Catena, 2009, 77(3): 192–199

[5] Young IM, Crawford JW, Nunan N, Otten W, Spiers A. Microbial distribution in soils: Physics and scaling[J]. Advances in Agronomy, 2008, 100: 81–121

[6] Chorover J, Kretzschmar R, Garcia-Pichel F, Sparks DL. Soil biogeochemical processes within the critical zone[J]. Elements, 2007, 3: 321–326

[7] Totsche KU, Rennert T, Gerzabek MH, Kögel-Knabner I, Smalla K, Spiteller M, Vogel H. Biogeochemical interfaces in soil: The interdisciplinary challenge for soil science[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2010, 173(1): 88–99

[8] Goebel M, Woche SK, Bachmann J. Do soil aggregates really protect encapsulated organic matter against microbial decomposition[J]? Biologia, 2009, 64(3): 443–448

[9] Martínez-Mena M, Deeks LK, Williams AG. An evaluation of a fragmentation fractal dimension technique to determine soil erodibility[J]. Geoderma, 1999, 90(1/2): 87–98

[10] Valmis S, Dimoyiannis D, Danalatos NG. Assessing interrill erosion rate from soil aggregate instability index,

- rainfall intensity and slope angle on cultivated soils in central Greece[J]. *Soil and Tillage Research*, 2005 80(1/2): 139–147
- [11] Amézqueta E. Soil aggregate stability: A review[J]. *Journal of Sustainable Agriculture*, 1999, 14(2/3): 83–151
- [12] Levy GJ, Miller WP. Aggregate stabilities of some southeastern U. S. Soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61: 1 176–1 182
- [13] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(4): 425–437
- [14] 卢升高, 竹蕾, 郑晓萍. 应用 Le Bissonnais 法测定富铁土中团聚体的稳定性及其意义[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 7–11
- [15] 董莉丽, 郑粉莉, 秦瑞杰. 基于 LB 法不同植被类型下土壤团聚体水稳性研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(2): 191–196
- [16] 张孝存, 郑粉莉. 基于 Le Bissonnais 法的东北黑土区土壤团聚体稳定性研究[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(5): 82–86
- [17] Zhou ZC, Shangguan ZP. Soil anti-scourability enhanced by plant roots[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2005, 47(6): 676–682
- [18] 王玉杰, 王云琦, 夏一平. 重庆缙云山典型林分的林地土壤抗蚀抗冲性能[J]. *中国水土保持科学*, 2006, 4(1): 20–27
- [19] 魏志琴, 李旭光, 郝云庆. 珍稀濒危植物群落主要种群生态位特征研究[J]. *西南农业大学学报: 自然科学版*, 2004, 26(1): 1–4
- [20] 吴钦孝, 李勇. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性能的研究: 草本植物根系提高表层土壤抗菌素冲刷力的试验分析[J]. *水土保持学报*, 1990, 4(1): 11–16
- [21] 周佩华, 武春龙. 黄土高原土壤抗冲性的试验研究方法探讨[J]. *水土保持学报*, 1993, 7(1): 29–34
- [22] 蒋定生, 李新华, 范兴科, 王继军, 张汉雄. 论晋陕蒙接壤地区土壤的抗冲性与水土保持措施体系的配置[J]. *水土保持学报*, 1995, 9(1): 1–7
- [23] 蒋定生, 范兴科, 李新华, 赵合理. 黄土高原水土流失严重地区土壤抗冲性的水平和垂直变化规律研究[J]. *水土保持学报*, 1995, 9(2): 1–8
- [24] 王云琦, 王玉杰. 缙云山典型林分森林土壤持水与入渗特性[J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(3): 102–108
- [25] Li ZX, Cai CF, Shi ZH, Wang TW. Aggregate stability and its relationship with some chemical properties of red soils in subtropical China[J]. *Pedosphere*, 2005, 15(1): 129–136
- [26] Pirmoradia N, Sepaskhah AR, Hajabbasi MA. Application of fractal theory to quantify soil aggregate stability as influences by tillage treatments[J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 90(2): 227–234
- [27] Zhou H, Lu YZ, Yang ZC, Li BG. Influence of conservation tillage on soil aggregates features in North China Plain[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 6(9): 1 099–1 106
- [28] 郭曼, 郑粉莉, 安韶山, 刘雨, 王彬, Darboux F. 应用 Le Bissonnais 法研究黄土丘陵区土壤团聚体稳定性[J]. *中国水土保持科学*, 2010, 8(2): 68–73
- [29] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. *科学通报*, 1993, 38(20): 1896–1 899
- [30] 张建军, 张宝颖, 毕华兴, 李笑吟. 黄土区不同植被条件下的土壤抗冲性[J]. *北京林业大学学报*, 2004, 26(6): 25–29
- [31] 王库. 植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响[J]. *土壤与环境*, 2001, 10(3): 250–252
- [32] 高维森, 王佑民. 土壤抗蚀抗冲性研究综述[J]. *水土保持通报*, 1992, 12(5): 59–63
- [33] Barthès B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: Validation at several levels[J]. *Catena*, 2002, 47(2): 133–149
- [34] Nimmo JM, Perkins KS. Aggregates stability and size distribution[A]//Dane JH, Topp C. *Methods of Soil Analysis, Part4-Physical*[M]. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, Inc. 2002: 317–328
- [35] 希勒尔. 土壤物理学概论[M]. 西安: 陕西人民教育出版社, 1988

Study on Best Soil Structure Indicators Based on Soil Anti-scourability Under Different Forests

GUO Ping, WANG Yun-qi*, WANG Yu-jie, ZHANG Hui-lan, WANG Ran, HU Bo, TANG Xiao-fen
(Institute of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Using undisturbed soil scour method and the fast wetting method (FW) of Le Bissonnais (LB), the coefficient of soil erosion, soil structure and the relationship between them were studied at mixed forest, broad-leaved forest, bamboo forest, shrub and bare land in Jin-yun Mountain in order to identify the best soil structure indicators under different forests. The results showed that: 1) the order of different forest soil erosion coefficient ($L \cdot \min/g$) was: broadleaf forest (2.719) > mixed forest (2.431) > shrub (2.024) > bare land (1.595) > bamboo forest (1.096). The stand soil erosion coefficient had a decreasing trend from the surface to the bottom except bamboo and bare land. 2) For four indicators of soil structure, the cumulative amount of >0.2mm aggregates, the average mass diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD) and soil fractal dimension (D) in the surface layer (A layer) soil showed: the mixed forest > broad-leaved forest > shrub > bare poor > bamboo; 3) the coefficient of soil erosion and the four soil structure indicators were conducted stepwise regression analysis. Finally, the average mass diameter (MWD) was introduced into the model. In the case with a significance level of $P < 0.05$, it was thought that soil erosion coefficient and MWD had linear relationship, and the linear regression equation was: $y = -0.306 + 1.823x$ ($R^2 = 0.406$, $n = 19$, $P = 0.003$). In the study areas, the average mass diameter (MWD) can be the best soil structure indicator as expression of soil erosion resistance.

Key words: Coefficient of soil anti-scourability, Mean weight diameter, Geometric mean diameter, Fractal dimension