

## 三峡库区典型林分林地土壤抗蚀抗冲性研究

周利军, 齐 实, 王云琦

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

**摘 要:** 通过对三峡库区重庆缙云山四种典型林分(针阔叶混交林, 阔叶林, 楠竹林和灌木林)林地土壤的抗蚀抗冲特征研究表明, 林地土壤抗蚀指数为农地土壤的 1.3~1.9 倍。各林分林地土壤抗蚀指数的顺序为灌木林最大(78.4), 阔叶林最小(53.3)。抗蚀指数随着土层的增加而减弱。林地土壤抗蚀指数与其相关因子毛管孔隙度、稳渗率、非毛管孔隙度、 $<1\text{ mm}$  根长关系最密切。除楠竹林外, 各林分林地土壤抗冲系数大于农地(1.2~1.9 倍)。林地土壤抗冲性的强弱是其相关因子综合作用的结果。

**关键词:** 缙云山; 林地土壤; 抗蚀指数; 抗冲系数

**中图分类号:** S714.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2006)01-0186-03

## Research on Forest Soil Anti-erosion and Anti-scour of Typical Forests in Three Gorges Reservoir Areas

ZHOU Li-jun, QI Shi, WANG Yun-qi

(Soil and Water Conservation College of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The research on the forest anti-erosion and anti-scour characteristics of 4 typical forests (mixed wood, broadleaf forest, bamboo forest and shrub forest) in Jinyun mountain in Chongqing City in Three Gorges Reservoir areas shows that, the forest soil anti-erosion indexes is 1.3~1.9 times arable farmland, and the maximal is shrub forest (78.4), the minimal is broadleaf forest (53.3). The anti-erosion index is lessening with the soil layer deepening. The anti-erosion indexes have close relations with soil capillary porosity, non-solid permeability, capillary porosity, length of  $<1\text{ mm}$  root. Except bamboo forest soil, other forest soil anti-scour coefficients are more than one of arable land (be 1.2~1.9 times), the anti-scour capacity is the result of mutual function of related factors.

**Key words:** Jinyun mountain; forest soil; soil anti-erosion indexes; soil anti-scour coefficients

林地土壤抗蚀抗冲性的研究, 国内不少人做过这方面的报导, 但是集中在黄土区。土壤可蚀性并不是一个物理的或化学的定量可测指标, 而是一个综合因子。土壤抗蚀性研究涉及因素很多而又复杂, 目前对土壤抗蚀性的一些认识还局限于现象, 对其本质规律有待进一步研究。

国外对土壤抗蚀性的研究中, 美国研究的比较深入与广泛, 前苏联在土壤性状与土壤可蚀性关系方面也开展了较为广泛的研究, 日本对这些研究也取得了较多成果<sup>[1]</sup>。

土壤抗冲性的研究始于 50 年代, 进入 80 年代其研究更是十分活跃, 并取得了一些有价值的研究成果<sup>[2]</sup>。并且这些研究成果多是在将野外采集的土样置于槽中放水冲刷的条件下获得的。

我国对抗蚀抗冲性机理和影响因素研究方面, 黄土区开展的研究工作很多。三峡库区土壤抗侵蚀和抗冲性作用的研究尚鲜见报道。重庆缙云山位于三峡工程库区尾端, 拥有完整的亚热带常绿阔叶林群落类型, 并在一定程度上反映了中亚热带森林生态系统的天然本底, 是研究森林涵养水源和理水功能的天然实验室。因此有必要对三峡库区重庆缙云山典型林分林地土壤的抗蚀抗冲性进行研究。

### 1 研究区概况

选取位于重庆市北碚区境内, 嘉陵江小三峡之温塘峡西岸的缙云山自然保护区作为研究基地, 其地理坐标是东经  $106^{\circ}22'$ , 北纬  $29^{\circ}45'$ 。山上最高处海拔 951.5 m, 相对高差 600 m。缙云山的土壤以酸性(pH 4.0~4.5)黄壤及水稻土为主, 水平地带为典型的中亚热带常绿阔叶林生物气候带, 年均气温  $13.6^{\circ}\text{C}$ , 年平均降水量 1611.8 mm, 年平均蒸发量 777.1 mm。缙云山保护区内植物资源异常丰富, 植被类型较多, 有 6 个主要植被类型为常绿阔叶林, 暖性针叶林, 竹林, 常绿阔叶灌丛, 另外还有亚热带灌丛和水生植被<sup>[3]</sup>。主要优势树种为马尾松、杉木、香樟、丝栗、华山松、青杠、大头茶和山矾等。

在该自然保护区内选取主要的 4 个林分类型, 针阔叶混交林, 常绿阔叶林, 楠竹林和常绿阔叶灌丛对其林地土壤抗蚀抗冲特性进行研究, 并以农耕地作为对照。

### 2 实验方法

#### 2.1 标准地调查

对缙云山典型的 4 种主要林分进行调查。确定坡位、坡向和坡角, 林分的树种、林龄、郁闭度、胸径、树高、冠幅、下木

收稿日期: 2005-04-01

基金项目: 国家“十五”攻关课题“退耕还林工程区水源涵养型植被建设技术研究与示范”(2001BA510B02-01)

作者简介: 周利军(1976-), 男, 硕士, 主要研究方向: 流域管理。

种类和盖度、地被物种类和盖度、枯落物厚度和贮量。

2.2 土壤剖面特征和根系调查

通过挖土壤剖面确定土壤剖面特征和土壤质地。并对土壤根系含量进行了调查。由于实验主要测定根级小于 1 cm 的林木细根量, 所以调查采用土柱法。土柱法规格为 50 cm × 50 cm × 100 cm。土柱深度挖至母岩。每个标地内, 在林木的行间和株间均匀设置 12 个土柱。分层挖开土壤, 分层捞出全部根系, 然后进行分级称重。

2.3 土壤孔隙的测定

采用烘干法分层测土壤含水量, 用环刀法分层测定容重, 毛管孔隙度和总孔隙度。

2.4 土壤抗蚀性测定

在每块标准地中分层选取 4 个取土点, 共取 76 个土样, 用直径 5 mm 孔的筛子选取直径 5~7 mm 的土壤团粒体 100 粒, 进行水浸试验, 每次 25 粒, 4 次重复, 取平均值。每隔 1 min 记录崩塌的土粒数, 连续记录 10 min, 然后计算抗蚀指数。

2.5 土壤抗冲性测定

用自制取土器在土壤剖面各层取 5 cm × 5 cm × 10 cm 原状土块样, 取三个重复, 共取土块 57 个。试验前将原状土样浸水 24 h, 试验时静至 1 min 控去多余重力水, 称重, 置于长 100 cm, 宽 6.5 cm, 高 6.0 cm 的冲刷槽内, 为便于比较, 调节坡度统一为 25°, 以不同的流量放水冲刷, 冲刷水量由时间控制, 根据重庆缙云山监测站实验测最大林地坡面径流流速 (480.85 L/h), 共进行 1 min 7.69 L, 3 min 23.07 L, 6 min 46.14 L 三次实验。冲刷完毕, 静至 1 min 进行称重, 计算冲刷模数。

3 结果与分析

3.1 不同林分代表性标准地的基本情况及根系分布分析

通过对四种典型林分类型的现场调查, 其基本情况见表 1。

表 1 不同林分代表性标准地的基本情况

林分	立地因子			林分				
	海拔/m	坡向	坡度/°	起源	龄级	郁闭度	下木盖度/%	地被物盖度/%
针阔混交林	760	西北	16~25	天然	Ⅵ	0.9	40	30
阔叶林	825	西北	26	天然	Ⅵ	0.9	40	20
楠竹林	800	西北	11	天然	Ⅴ	0.85	10	80
灌木林	860	西北	10	天然	Ⅴ	0.95	60	50
林分	土壤质地	土壤厚度/cm	土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	土壤孔隙度/%			枯落物	
				总孔隙	非毛管	毛管	厚度/cm	储量/(t·hm <sup>-2</sup> )
针阔混交林	砂壤	123	1.44	47.57	11.62	35.94	3.5	31.57
阔叶林	砂壤	135	1.47	41.15	9.5	31.65	3.4	58.9
楠竹林	砂壤	110	1.45	42.35	11.31	31.04	1.4	29.11
灌木林	砂壤	130	1.21	53.78	13.17	40.6	4.5	86.85
农耕地	砂壤	130	1.49	42.52	6.5	36.02		

通过对缙云山砂壤土 4 种典型植被类型根系分布特征得出: (1) 根鲜重的分布特征: 针阔混交林 0~50 cm 的根系中, 占总重的 87%, 阔叶林在 0~40 cm 的根系占总重的 93%, 楠竹林在 10~30 cm 的根系占总重的 81%。灌木林在 5~25 cm 的根系占总重的 85%。(2) 直径 1 mm 根系的分布特征: 土壤剖面观测发现, 根系密度随土层深度的增加急剧减少, 1 mm 根鲜重和根长分布, 混交林占总根重的 2.69% 和 62.12%, 阔叶林只占 0.33% 和 37.50%, 楠竹林占 16.50% 和 22.74%, 灌木林占 10.29% 和 44.68%。(3) 随着根系的加粗, 根重比例显著增加, 但根长比例在减少。毛根长度的增加能有效地网络固结土壤, 增强土壤的抗蚀抗冲性能。

3.2 土壤抗蚀性能

表 2 不同林分林地土壤各层次抗蚀性能比较

S/%	针阔混交林	常绿阔叶林	楠竹林	灌木林	农地
A <sub>1</sub>	100.0	100.0	97.2	100.0	95.6
S <sub>林</sub> /S <sub>农</sub>	1.05	1.05	1.02	1.05	
A <sub>2</sub>	88.0	78.4	86.0	88.8	42.4
S <sub>林</sub> /S <sub>农</sub>	2.08	1.85	2.03	2.09	
B	46.8	24.4	52.4	46.4	15.6
S <sub>林</sub> /S <sub>农</sub>	3.00	1.56	3.36	2.97	
C	17.6	10.4	17.6		14.4
S <sub>林</sub> /S <sub>农</sub>	1.22	0.72	1.22		
平均	63.1	53.3	63.3	78.4	42.0
S <sub>林</sub> /S <sub>农</sub>	1.50	1.27	1.51	1.87	

水浸检验是检验水土保持林中, 土壤抗蚀性能的强弱, 也是土壤抗蚀性能的内在指标。

抗蚀指数 S (%) =  $\frac{\text{总土粒} - \text{崩塌土粒}}{\text{土粒总}} \times 100\%$  [4]。

各种林分林地土壤不同层次的抗蚀性能见表 2。可以看出, 林地土壤抗蚀指数为农地土壤的 1.3~1.9 倍。其中, 相对数灌木林最大 (1.87), 阔叶林最小 (1.27)。抗蚀指数随着土层的增加而减弱。在 A<sub>1</sub> 腐殖层, 林地土壤的抗蚀性能略大于农地土壤, 这与 A<sub>1</sub> 层有机质含量都很高有关。但是在 A<sub>2</sub>, B 层, 林地土壤的抗蚀性为农地土壤的 2~3 倍之多, 这与根系的作用和有机质含量直接有关。到了 C 层母质层, 其抗蚀性能差别又减低。

3.3 土壤抗蚀性能动态过程

抗蚀指数 S (%) 与时间 (t) 的动态关系进行二次多项式拟合其相关系数 R 就很高, 因此其关系式为: S (%) = at<sup>2</sup> + bt + c 式中: a, b, c 均为常数。

不同林分的抗蚀指数动态模拟关系式见表 3。由表 3 可以看出, 其相关系数相当高。其不同林分林地土壤抗蚀指数的变化见图 1。由图 1 可以看出, 灌木林的抗蚀性能最好。其次是针阔混交林和楠竹林, 但是, 在 8 min 以后, 阔叶林与它们抗蚀指数相接近。农地的抗蚀性能在前 2 min 略大于阔叶林, 但是其后其抗蚀性能迅速下降, 变为最低。

表 3 不同林分林地土壤抗蚀指数 S (%) 与时间 (t) 关系式

林分	关系式	R
针阔混交林	S (%) = 0.436t <sup>2</sup> - 10.373t + 103.38	0.994
常绿阔叶林	S (%) = 0.159t <sup>2</sup> - 5.134t + 75.3	0.989
楠竹林	S (%) = - 5.048t + 91.067	0.995
灌木林	S (%) = 0.222t <sup>2</sup> - 6.259t + 104.27	0.942
农地	S (%) = 1.057t <sup>2</sup> - 17.128t + 95.517	0.981

不同林分土壤不同层次的抗蚀指数动态模拟参数见表 4。由表 4 可以看出, 用二次多项式模拟各层土壤抗蚀指数动态过程其相关系数仍很高, 并对各种地类土壤层次的参数进行方差分析, 得出在 99% 的显著水平上, 不同层次各个参数 (a, b, c) 之间差异显著 F<sub>列</sub> = 176.755 > F<sub>0.01</sub> (2, 28) = 5.453。

3.4 土壤抗冲性能

现今国内外价土壤抗冲性的指标有 9 种之多 [5~7], 很是混乱, 可比性差。根据实验内容, 选择冲走 1 g 土, 同时考虑需水量 Q (L) 和冲刷时间 t (min) 的抗冲性指标土壤抗冲刷系数来表示土壤抗冲性。

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

式中: C——土壤抗冲刷系数, w——冲走的土重 (g) [8] 不同林分土壤在不同土壤层和不同冲水量下的抗冲系数见表 5。

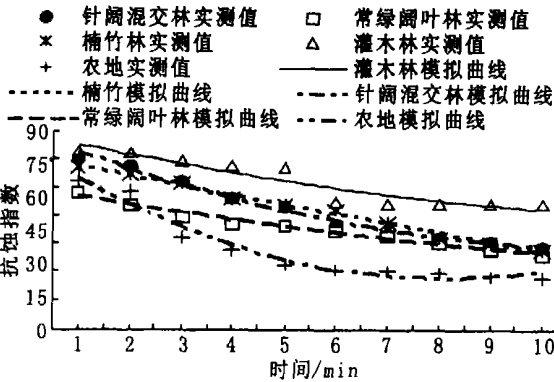


图 1 不同林分林地土壤抗蚀指数变化

表 4 不同林分林地土壤层次土壤抗蚀指数模拟参数

林分	层次	a	b	c	R
针阔混交林	A <sub>1</sub>	0.00	0.00	100.00	1.000
	A <sub>2</sub>	-0.76	3.73	96.67	0.994
	B	1.30	-25.36	136.13	0.973
	C	1.20	-19.86	80.73	0.989
常绿阔叶林	A <sub>1</sub>	0.00	0.00	100.00	1.000
	A <sub>2</sub>	-0.71	1.09	99.80	0.997
	B	0.86	-14.96	73.40	0.976
	C	0.48	-6.59	28.00	0.844
楠竹林	A <sub>1</sub>	0.11	-1.68	102.33	0.902
	A <sub>2</sub>	-0.94	4.78	95.87	0.959
	B	0.09	-10.09	104.40	0.995
	C	0.74	-13.21	61.67	0.983
灌木林	A <sub>1</sub>	0.00	0.00	100.00	1.000
	A <sub>2</sub>	0.12	-4.10	106.67	0.956
	B	0.55	-14.68	106.13	0.934
农地	A <sub>1</sub>	-0.17	0.35	100.07	0.972
	A <sub>2</sub>	1.65	-26.22	123.00	0.981
	B	1.73	-25.91	91.60	0.966
	C	1.05	-16.74	67.40	0.975

表 5 不同林分林地不同土壤层次和不同冲刷时间、水量土壤抗冲性比较

抗冲刷系数 C	针阔混交林	常绿阔叶林	楠竹林	灌木林	农地
A <sub>1</sub>	3.783	6.933	0.789	4.205	3.046
A <sub>2</sub>	3.425	3.246	1.069	1.453	0.689
B	2.162	0.352	2.041	0.414	1.787
C	0.354	0.346	0.486		0.856
1 min 7.69 L	0.579	1.383	0.190	0.279	0.947
3 min 23.07 L	1.789	1.692	0.821	1.473	1.176
6 min 46.14 L	4.925	5.084	2.277	4.319	2.661
平均	2.431	2.719	1.096	2.024	1.595

由表 5 可以看出,随着土层的加深,土壤抗冲刷系数基本减小。在 A<sub>1</sub> 层除楠竹林外,林地土壤的抗冲系数为农地的 1.2~2.3 倍,这与楠竹林其腐殖层薄,有机质含量少有关。A<sub>2</sub> 层林地土壤抗冲刷系数为农地的 1.6 到 5 倍,这与其根系的作用直接有关。到 B 淀积层,其针阔混交林和楠竹林抗冲性受根系影响仍较大,而灌木林和阔叶林基本不受根系影

表 6 各种林分林地土壤抗蚀指数与其相关因子的灰色关联分析结果

$\zeta_j(k)$	抗蚀指数	土壤		孔隙度		< 1 mm		1~3 mm		稳渗率	有机质含量
		厚度	容重	非毛管	毛管	根重	根长	根重	根长		
针阔混交林	0.685	1.000	0.730	0.834	0.783	0.795	0.708	0.743	0.742	0.797	0.779
阔叶林	0.414	0.409	0.452	0.888	0.793	0.835	0.774	0.803	0.838	0.723	0.658
楠竹林	0.530	0.538	0.707	0.961	0.660	0.476	0.706	0.477	0.484	0.806	0.744
灌木林	0.503	0.630	0.334	0.897	0.978	0.490	0.651	0.501	0.522	0.899	0.592
$\lambda_{ij}$	0.533	0.644	0.555	0.895	0.803	0.649	0.710	0.631	0.647	0.806	0.693

响,农地 B 层,由于耕作作用,变得比较紧实。而 C 层,土壤受外界影响较小,主要与有机质含量和母质状况有关。随着时间和冲刷水量的增加,可以看出各类土壤的抗冲性呈增加趋势,这说明,在 1 min, 7.69 L 的冲刷情况下,土壤就易被冲走了。但是,依然可以看出,除楠竹林外,各林分林地土壤在不同冲刷时间和冲刷水量下,其抗冲系数均大于农地(1.2~1.9 倍)。楠竹林由于树种单一,枯落物层和腐殖层最薄,根系集中分布较浅,因此,其对土壤的改良作用较差。

3.5 影响土壤抗蚀抗冲性能的主导因子判别

由于影响土壤抗蚀抗冲性能因子很多,而且各因子与抗蚀抗冲性之间关系比较复杂,因此,采用关联度来衡量各因子与抗蚀抗冲性之间的关系。灰色关联系数  $\zeta_j(k)$  的计算公式为:

$$\zeta_j(k) = \frac{\min_i \min_k \Delta_{ij}(k) + \rho \max_i \max_k \Delta_{ij}(k)}{\Delta_{ij}(k) + \rho \max_i \max_k \Delta_{ij}(k)}$$

式中:  $\Delta_{ij}(k) = |x_i(k) - x_j(k)|$  为比较数列与参考数列各点对应点的绝对差值;  $\max_i \max_k$  为各个因素绝对最小值;  $\min_i \min_k \Delta_{ij}(k)$  为各个因素绝对最大值;  $\rho$  为分辨系数,一般取  $\rho = 0.5$ 。

灰色关联度  $\lambda_{ij}$  的计算公式为:  $\lambda_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \zeta_j(k)$  [9]。

抗蚀指数与其相关因子的灰色关联度顺序为毛管孔隙度,稳渗率,非毛管孔隙度, < 1 mm 根长,土壤厚度,有机质含量, 1~3 mm 根长,抗蚀指数, 1~3 mm 根重, < 1 mm 根重,土壤容重。可以看出林地土壤抗蚀性的强弱是这些因子综合作用的结果。各个因子与抗蚀指数的关联度都大于 0.5,因此,林地土壤抗蚀性的强弱是这些因子综合作用的结果。其中,影响较大的是毛管孔隙度,稳渗率,非毛管孔隙度, < 1 mm 根长(见表 6)。

抗冲系数与其相关因子的关联度顺序为土壤厚度,土壤容重,毛管孔隙度,有机质含量, < 1 mm 根长, 1~3 mm 根重, < 1 mm 根重, 1~3 mm 根长,非毛管孔隙度,稳渗率,抗蚀指数。灰色关联度越大,说明比较数列与参考数列的发展趋势就越接近,可以看出,每个因子与抗冲系数的灰色关联度值都大于 0.5,说明这些因子对林地土壤的抗冲性影响都很大,林地土壤抗冲性的强弱是这些因子综合作用的结果。其中,影响较大还是土壤厚度、容重、毛管孔隙度和有机质含量(见表 7)。

4 结 论

(1) 林地土壤抗蚀指数为农地土壤的 1.3~1.9 倍。各林分林地土壤抗蚀指数的顺序为灌木林最大(78.4),阔叶林最小(53.3)。抗蚀指数随着土层的增加而减弱。

(2) 不同林分的抗蚀指数与时间(t)的动态模拟关系为,  $S(\%) = at^2 + bt + c$ , 相关系数 0.9 以上。其动态模拟过程可以看出,灌木林的抗蚀性能最好,其次是针阔混交林和楠竹林,但是,在 8 min 以后,阔叶林与它们抗蚀指数相接近。农地的抗蚀性能在前 2 min 略大于阔叶林,但是其后其抗蚀性能迅速下降,变为最低。

1993, 59: 991- 996

[51] Young, S, Wang C. Land-cover change analysis of China using global-scale Pathfinder AVHRR Landcover (PAL) data, 1982- 92[J]. Int. J. Remote Sensing, 2001, 22: 1457- 1477.

[52] Nelson R. Detecting forest canopy change due to insect activity using Landsat MSS[J]. PE&RS, 1983, 49: 1303- 1314

[53] Bruzzone, L., Fernandez Prieto, D. Automatic analysis of the difference image for unsupervised change detection[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000a, 38: 1171- 1182

[54] Bruzzone, L., Fernandez Prieto, D. A minimum-cost thresholding technique for unsupervised change detection[J]. Int. J. Remote Sensing, 2000b, 21: 3539- 3544

[55] Townshend R, Goff T, Tucker C. Multitemporal dimensionality of images of normalized difference vegetation index at continental scales[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, 23: 888- 895

[56] Johnson R, Kasischke E. Change vector analysis: a technique for the multispectral monitoring for land cover and condition[J]. Int. J. Remote Sensing, 1998, 19 (3): 411- 426

[57] Smits, P., Dellepiane, S., Schowengerdt R. Quality assessment of image classification algorithms for land-cover mapping: a review and a proposal for a cost-based approach[J]. Int. J. Remote Sensing, 1999, 20: 1461- 1486

[58] Foody, G. Status of land cover classification accuracy assessment[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 80: 185- 201.

[59] Congalton, R., Green, K. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: principles and Practices[M]. Boca Raton, FL, USA: CRC/Lewis Press, 1999

[60] Congalton, R., Plourde, L. Quality assurance and accuracy assessment of information derived from remotely sensed data [A]. In: Manual of Geospatial Science and Technology[M]. Edited by J Bossler. London: Taylor & Francis, 2002, 349- 361.

[61] Morissette, J., Khorram S., Mace T. Land-cover change detection enhanced with generalized linear models[J]. Int. J. Remote Sensing, 1999, 20: 2703- 2721.

[62] Lowell, K. An area-based accuracy assessment methodology for digital change maps[J]. Int. J. Remote Sensing, 2001, 22: 3571- 3596

[63] Biging, G., Chrisman N., Colby D., et al. Accuracy assessment of remote sensing-detected change detection [A]. Monograph Series[M]. Edited by S. Khorram, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), MD, USA, 1999

(上接第 188 页)

表 7 各种林分林地土壤抗冲系数与其相关因子的灰色关联分析结果

$\zeta_j(k)$	抗冲系数	土壤		孔隙度		< 1 mm		1~ 3 mm		稳渗率	有机质含量
		厚度	容重	非毛管	毛管	根重	根长	根重	根长		
针阔混交林	0.689	0.688	0.925	0.799	0.851	0.585	0.962	0.556	0.556	0.586	0.576
阔叶林	0.416	0.974	0.837	0.395	0.466	0.453	0.371	0.463	0.452	0.494	0.530
楠竹林	0.533	0.982	0.436	0.521	0.734	0.336	0.436	0.336	0.340	0.611	0.652
灌木林	0.505	0.717	0.500	0.536	0.511	0.957	0.692	1.000	0.938	0.478	0.773
$\lambda_j$	0.535	0.841	0.674	0.563	0.641	0.583	0.615	0.589	0.571	0.542	0.633

(3) 随着时间和冲刷水量的增加, 可以看出各类土壤的抗冲性呈增加趋势, 这说明, 在 1 min 7.69 L 的冲刷情况下, 土壤就易被冲走了。除楠竹林外, 各林分林地土壤在不同冲刷时间和冲刷水量下, 其抗冲系数均大于农地(1.2~ 1.9 倍)。

参考文献:

[1] 方学敏, 万兆惠, 徐永年. 土壤抗蚀性研究现状综述[J]. 泥沙研究, 1997, (2): 87- 91.

[2] 李勇, 吴钦孝, 朱显谟, 等. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性的有效性[J]. 水土保持学报, 1990, 4(3): 1- 5.

[3] 刘玉成, 钟章成, 等. 缙云山自然保护区植被概况[A]. 见: 钟章成. 常绿阔叶林生态学研究[M]. 重庆: 西南师范大学出版社, 1988. 315- 326.

[4] 王忠林, 李会科, 贺秀贤. 渭北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.

[5] 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.

[6] 周佩华, 武春龙. 黄土高原抗冲性的试验研究方法探讨[J]. 水土保持学报, 1993, 7(1), 29- 34.

[7] 蒋定生, 李新华, 范兴科, 等. 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.

[8] 蒋定生, 范兴科, 等. 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.

[9] 罗天成, 徐国新. 灰色关联度分析与应用[M]. 南京: 江苏科技出版社, 1989.

(4) 由土壤抗蚀抗冲性的相关因子的灰色关联度看出, 抗蚀指数与其相关因子毛管孔隙度, 稳渗率, 非毛管孔隙度, < 1 mm 根长关系最密切。每个因子与抗蚀指数、抗冲系数的灰色关联度值都大于 0.5, 林地土壤抗蚀抗冲性的强弱是这些因子综合作用的结果。