

# 川南山地林分变化对土壤物理性质 和抗蚀性的影响

闰思宇 王景燕 龚伟 罗建跃  
苏黎明 舒正悦 赵昌平 蔡煜

(四川农业大学林学院, 水土保持与荒漠化防治四川省重点实验室, 四川成都 611130;  
平武县水土保持办公室, 四川绵阳 622550)

**【摘要】**以川南天然林(TRL)及其转变成的毛竹林(MZL)、擦木林(CML)、柳杉林(LSL)、杉木林(SML)和水杉林(SSL)为对象, 研究不同林分土壤物理性质和抗蚀性差异, 以主成分分析法(ZCFM)和隶属函数法(LSHM)分别计算的土壤抗蚀性综合值 I(KSX-I)和 II(KSX-II)评价林分变化对土壤抗蚀性的影响, 探索简便易行的土壤抗蚀性综合评价方法。结果表明, 天然林转变为人工林后土壤物理性质和抗蚀性变差, 呈现出有机质和 $>0.25\text{mm}$ 水稳性团聚体含量、水稳性团聚体平均重量直径、团聚度、孔隙度及物理稳定性指数降低, 而结构体破坏率、不稳定团粒指数、容重、分散率及侵蚀系数增加。各林分土壤 KSX-I 和 KSX-II 均呈现出  $\text{TRL}>\text{CML}>\text{SSL}>\text{LSL}>\text{MZL}>\text{SML}$  的规律变化。土壤抗蚀性指标间相关性均达到显著( $/K0.05$ )水平: 土壤 KSX-I 和 KSX-II 之间呈显著相关关系( $/K0.05$ ), 且两者均与各抗蚀性指标间呈显著相关( $/K0.05$ )。说明天然林植被变化后会使得土壤抗蚀性降低, 影响原有植被水土保持功能, 应该加强天然林及其生态功能保护: ZCFM 和 LSHM 均可作为计算土壤抗蚀性综合值的有效方法, 但考虑到计算过程的难易度, 后者更简便易行。结果为土壤抗蚀性综合评价新方法的建立提供了参考。

**【关键词】** 植被变化; 土壤物理性质; 土壤抗蚀性; 综合评价

**【中图分类号】** S157.1; S714.7 **【文献标识码】** A

**【文章编号】** 1004-8227(2016)07-1112-09

**【DOI】** 10.11870/cjlyzyyhj201607013

土壤抗蚀性是土壤为抵抗侵蚀营力分散和搬运作用表现出来的稳定性, 即土壤对侵蚀敏感性或易损性的倒数, 它与土壤内部的理化特性紧密相关, 其大小主要取决于土粒与水的亲和力及土粒间的胶结力。川南一带地处长江上游, 属亚热带湿润季风气候, 降雨丰富, 多年来由于人类对土地的不合理开垦与利用, 导致这一区域土地退化和水土流失严重。植被可以通过土壤-植被复合系统改善土壤物理结构, 提高土壤质量, 增强土壤抗蚀性, 但其改善效果因植被类型不同而异。因此, 研究植被变化对土壤物理性质和抗蚀性的影响及探索适宜的植被类型, 对加强川南地区生态环境建设具有重要意义。土壤抗蚀性通常采用分散率、分散系数、团聚度、结构体破坏率、水稳团聚体平均重、不稳定团粒指数等多个指标来评价, 研究方法主要有直接测定土壤性质、制作诺谟图估算、时空互代的形式结合主成分分析及从侵蚀动力学角度研究土壤理化性质等。另外, 土壤抗蚀性受地形气候、土壤状况、植被类型、肥力指数等因子综合影响。土壤抗蚀性的评价指标相对较多且直接评价体系尚未达成一致主要用主成分分析法计算和评价土壤综合抗蚀性高低。同时, 我国大多集中于对黄土区侵蚀环境下的土壤质量演变研究, 在土壤理化性质方面已有丰厚的成果, 但有关土壤抗蚀性的演变机理还不够成熟, 而且有关川南植被变化对土壤抗蚀性影响方面的研究相对较少, 难以满足该区植被建设的需要。因此, 本文以长江上游川南天然林及其皆伐后形成的人工林为对象, 研究林分变化对土壤物理性质和抗蚀性的影响, 采用主成分分析法和隶属函数法对土壤抗蚀性进行综合评价, 为该区域生态环境建设中林分类型的选择提供参考, 也为土壤抗蚀性综合评价提供简易方法。

## 1 研究区域概况

研究区位于四川省沐川县国有林场, 距沐川县城 19.5km( $103^{\circ}47' \sim 103^{\circ}49'$ ,  $28^{\circ}29' \sim 28^{\circ}54' \text{N}$ )。地处五指山东北尾部, 地形起伏大, 南北走向, 地势南高北低, 多陡坡、断岩, 海拔介于 1100~1550m, 坡度  $25^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 。属亚热带湿润季风气候, 地带性植被属亚热带常绿阔叶林, 土壤以黄壤为主, 部分地区有黄棕壤和紫色土。试验地林分为天然林、擦木林、柳杉

林和水杉林、毛竹林。天然林乔木层树种主要包括木荷、白毛新木姜子、润楠、总状山研等。毛竹林、擦木林、柳杉林、水杉林和杉木林分别是 1988、1988、1990、1992 和 1992 年天然林皆伐后于 1989、1989、1991、1993 和 1993 年人工植苗形成的纯林。天然林、毛竹林、擦木林、柳杉林、水杉林和杉木林林分密度分别为 525、6000、1100、2500、2500 和 2500 株  $hnT^2$ ，平均树高分别为 21.2、13.1、27.0、23.9、21.8 和 15.4m，平均胸径分别为 25.1、9.5、22.1、19.7、18.9 和 18.2cm，林分郁闭度分别为 0.9、0.8、0.9、0.8、0.8 和 0.8。

## 2 数据来源和研究方法

在调查试验地的基础上，根据典型性和代表性的原则分别在坡向、坡度、坡位和海拔高度基本一致的天然林及其人工更新后形成的毛竹林、擦木林、柳杉林、杉木林和水杉林中建立 20m 的标准地各 3 个。由于土壤抗蚀能力主要决定于表层土壤性质，因而于 2012 年 11 月中旬在每个标准地内采用蛇形 5 点取样法用环刀采集表层 (0~20cm) 土壤样品测定土壤水分物理性质 [211]，同时取表层土壤混合样测定土壤有机质、团聚体、微团聚体和颗粒组成。土壤有机质采用重铬酸钾氧化-外加加热法，团聚体组成采用机械筛分法，微团聚体和颗粒组成采用吸管法。根据以上测定结果计算各模式土壤结构体破坏率、水稳性团聚体平均重量直径 ( $\epsilon MWD$ )、不稳定团粒指数 ( $\epsilon IT$ )、结构性颗粒指数、团聚状况、团聚度、分散率、侵蚀系数、受蚀性指数和物理稳定性指数。

文中数据采用 SPSS10.0 软件进行统计和分析，表中数据均为平均值，不同模式土壤各变量之间的显著性检验采用单因子方差分析 (ANOVA) 和最小显著极差法 (SSR)。

表 1 不同林分土壤团聚体组成 ( $g \cdot kg^{-1}$ ) 及稳定性

Tab.1 Soil Aggregate Composition ( $g \cdot kg^{-1}$ ) and Stability under Different Forest Types

林分 类型	团聚体粒径(mm)							RSD (%)	$E_{MWD}$ (mm)	$E_{LT}$ (%)	有机质 ( $g \cdot kg^{-1}$ )	容重 ( $g \cdot cm^{-3}$ )	毛管孔 隙(%)	非毛管 孔隙(%)	总孔隙 度(%)
	>5	5~2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	>0.25	>0.5								
天然林	699.5a	111.6c	67.6d	37.8d	17.7d	934.1a	916.5a	5.0c	5.8a	6.6c	139.3a	0.49d	11.1a	66.0a	77.1a
擦木林	778.6a	92.5c	75.0ab	28.5d	8.7d	983.3a	974.6a	6.2d	5.4b	8.2d	118.6b	0.66c	10.6ab	61.1b	71.7b
水杉林	585.1c	153.4b	79.2d	57.7bc	26.3c	901.7c	875.4c	7.3c	5.1c	9.8c	111.3b	0.67c	8.7abc	60.6b	69.4b
柳杉林	463.3d	220.1a	95.6c	68.8b	33.2b	881.0d	847.8d	8.4b	4.5d	11.9b	78.7c	0.83a	7.5bc	52.6c	60.1c
毛竹林	345.8c	243.1a	139.6b	106.1a	36.2b	870.7d	834.6d	9.3b	3.7e	12.9b	72.0c	0.76b	7.3c	44.4d	51.7d
杉木林	303.8c	219.9a	167.1a	117.0a	42.7a	850.5e	807.8e	10.8a	3.4f	15.0a	62.8d	0.88a	6.4c	40.7e	47.1e

注：分子为湿筛条件、分母为干筛条件；同一列中数据后相同字母表示差异不显著 ( $p < 0.05$ )；RSD 为结构体破坏率； $E_{MWD}$  为水稳性团聚体平均重量直径； $E_{LT}$  为不稳定团粒指数。

## 3 结果与分析

### 3.1 林分变化对土壤水稳性团聚体稳定性的影响

由表 1 可知，天然林转变为人工林后土壤水稳性团聚体含量和  $\epsilon MWD$  降低、稳定性变差。与天然林相比，擦木林、水杉林、柳杉林、毛竹林和杉木林  $>0.25mm$  团聚体含量分别降低 0.5%、1.1%、2.2%、2.3% 和 3.0%，各人工林与天然林间均差异显著； $>0.5mm$  团聚体含量分别降低 1.2%、1.9%、3.6%、4.5% 和 5.6%，各人工林与天然林间均差异显著； $>0.25mm$  水稳性团聚体含量分别降低 1.7%、3.5%、5.7%、6.8% 和 8.9%，除擦木林外其他各人工林与天然林间均差异显著； $>0.5mm$  水稳性团聚体含量分别降低 2.1%、4.5%、7.5%、8.9% 和 11.9%，各人工林与天然林间均差异显著；RSD 分别增加 24%、46%、68%、86% 和 116%，各人工林与天然林间均差异显著； $\epsilon MWD$  分别降低 6.9%、12.1%、22.4%、36.2% 和 41.4%，各林分间差异显著；分别增加 24.2%、48.5%、80.3%、95.5% 和 127.3%，各人工林与天然林间均差异显著；土壤有机质含量分别降低 14.9%、20.1%、43.5%、48.3% 和 54.9%，各人工林与天然林间均差异显著；土壤容重分别增加 34.7%、36.7%、69.4%、55.1% 和 79.6%，各人工林与天然林间均差异显著；总孔隙度分别下降 7.0%、10.0%、22.0%、32.9% 和 38.9%，各人工林与天然林间均差异显著。说明天然林转变为人工林后容易导致土壤团聚体和水稳性团聚体含量降低及土壤结构稳定性变差，并降低了土壤有机质含量使土壤变紧实和孔隙变劣。

### 3.2 林分变化对土壤颗粒分散特性及物理稳定性指数的影响

天然林转变为人工林后使得土壤颗粒组成和微团聚体组成及相应的土壤理化性质发生变

化,从而使土壤结构性颗粒指数、团聚状况、团聚度、毛管持水量、持水当量和物理稳定性指数降低,而土壤分散率、侵蚀系数和受蚀性指数增加(表2)。与天然林相比,檫木林、水杉林、柳杉林、毛竹林和杉木林土壤团聚度分别降低8.0%、14.7%、26.5%、31.4%和43.0%,除檫木林外其他各人工林与天然林间均差异显著;分散率分别增加33.6%、67.6%、121.6%、138.6%和176.4%,各人工林与天然林间均差异显著;毛管持水量分别降低31.6%、32.4%、52.7%、56.4%和65.3%,各人工林与天然林间均差异显著;侵蚀系数分别增加0.5%、27.7%、22.0%、23.0%和22.0%,除檫木林外其他各人工林与天然林间均差异显著;持水当量分别减少28.4%、29.8%、52.1%、56.0%和61.5%,各人工林与天然林间均差异显著;受蚀性指数分别增加91.3%、152.2%、408.7%、504.3%和726.1%,各人工林与天然林间均差异显著;物理稳定系数分别降低7.7%、11.3%、34.0%、38.3%和42.7%,各人工林与天然林间均差异显著。说明天然林转变为人工林后使土壤的分散特性增强和物理稳定性变差,从而降低了土壤抗蚀性。

表2 不同林分土壤颗粒组成( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )及物理稳定性指数  
Tab.2 Soil Particle-Size Distribution ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) and Physical Stability Index under Different Forest Types

林分类型	颗粒粒径(mm)					结构性颗粒指数	团聚状况	团聚度(%)	分散率(%)	毛管持水量(%)	侵蚀系数	持水当量( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	受蚀性指数	物理稳定性指数
	2-0.25	0.25-0.05	0.05-0.02	0.02-0.002	<0.002									
天然林	619.5a 41.9d	173.7a 158.3b	69.8d 335.9a	113.8c 266.5a	23.2d 197.4a	0.328a	59.3a	74.8a	25.9e	134.4a	1.763b	121.2a	0.023c	3.00a
檫木林	595.1a 53.0cd	137.9c 175.7ab	88.0d 342.9a	147.2b 248.5ab	31.9c 179.9ab	0.305a	50.4b	68.8ab	34.6d	91.9b	1.772b	86.8b	0.044d	2.77b
水杉林	525.3b 59.4bc	146.4bc 183.7a	129.1c 338.7a	164.2b 242.3ab	35.0c 176.0ab	0.303a	42.9c	63.8b	43.4c	90.9b	2.252a	85.1b	0.058d	2.66b
柳杉林	408.7c 68.5ab	165.3ab 189.6a	177.9b 344.1a	205.9a 227.2bc	42.2b 170.6b	0.299a	31.6d	55.0c	57.4b	63.6c	2.151a	58.0c	0.117c	1.98c
毛竹林	387.1c 72.2ab	158.9abc 192.8a	196.3b 345.9a	209.1a 221.8bc	48.7a 167.3b	0.295a	28.1d	51.3c	61.8b	58.6d	2.168a	53.3c	0.139b	1.85cd
杉木林	311.0d 74.1a	169.6ab 200.4a	249.3a 360.4a	218.2a 209.8c	52.0a 155.4b	0.273a	20.6e	42.6d	71.6a	46.6e	2.150a	46.7d	0.190a	1.72d

注:分子为微团聚体分析值、分母为机械组成分析值;同一列中数据后相同字母表示差异不显著( $p<0.05$ )。

### 3.3 林分变化对土壤抗蚀性综合值的影响

目前,用于表征土壤抗蚀性的指标体系较全面,但繁冗复杂,且有些指标间信息相互重叠<sup>[25]</sup>。因此,采用主成分分析法及隶属函数法来评价土壤抗蚀性。为了揭示不同更新模式间土壤抗蚀性能的差异性及土壤各因子对抗蚀性的贡献,选用18个与土壤抗蚀性极其相关的变量因子:>0.25 mm水稳性团聚体含量( $X_1$ )、>0.5 mm水稳性团聚体含量( $X_2$ )、水稳性团聚体平均重量直径( $X_3$ )、结构体破坏率( $X_4$ )、不稳定团粒指数( $X_5$ )、有机质( $X_6$ )、容重( $X_7$ )、总孔隙( $X_8$ )、毛管孔隙( $X_9$ )、<0.001 mm粘

粒含量( $X_{11}$ )、结构性颗粒指数( $X_{12}$ )、团聚状况( $X_{13}$ )、团聚度( $X_{14}$ )、分散率( $X_{15}$ )、侵蚀系数( $X_{16}$ )、受蚀性指数( $X_{17}$ )和物理稳定性指数( $X_{18}$ )进行主成分分析。由表3可知,主成分1和主成分2的特征根分别为15.167和1.276,两者累计贡献率达91.351%,表明选用这两个主成分基本能反映土壤抗蚀性能。由表4可知,主成分1中: $>0.5$  mm水稳性团聚体含量( $X_2$ )贡献率最大,其次为 $>0.25$  mm水稳性团聚体含量( $X_1$ )、不稳定团粒指数( $X_5$ )、分散率( $X_{15}$ )等。主成分2中:贡献率最大的是结构性颗粒指数( $X_{12}$ ),其次为 $<0.001$  mm粘粒含量( $X_{11}$ )、侵蚀系数( $X_{16}$ )、物理稳定性指数( $X_{18}$ )等。说明水稳性团聚体在整个主成分分析中贡献率最大,以水稳性团聚体为基础的指标能很好地评价土壤抗蚀性。

表3 主成分贡献率

Tab.3 Principal Component Contributor Rate

主成分	特征根	贡献率/%	累计贡献率/%
1	15.167	84.262	84.262
2	1.276	7.089	91.351

根据以上主成分分析的结果,将经SPSS10.0软件获得的主成分矩阵(表4)中每列除以相应的主成分特征根,然后开方得主成分向量,并根据所得特征向量计算出第一( $F_1$ )、第二( $F_2$ )主成分和综合(F)主成分值<sup>[28]</sup>,结果见表5,计算式如下:

$$F_1=0.253ZX_1+0.255ZX_2+0.252ZX_3-0.250ZX_4-0.253$$

$$ZX_5+0.249ZX_6-0.232ZX_7+0.251ZX_8+0.248ZX_9+0.204ZX_{10}+0.202ZX_{11}+0.144ZX_{12}+0.252ZX_{13}+0.248ZX_{14}-0.252ZX_{15}-0.165ZX_{16}-0.251ZX_{17}+0.244ZX_{18};$$

$$F_2=0.028ZX_1+0.020ZX_2-0.032ZX_3+0.031ZX_4-0.028ZX_5-0.113ZX_6+0.031ZX_7-0.065ZX_8-0.048ZX_9-0.122ZX_{10}+0.523ZX_{11}+0.705ZX_{12}-0.115ZX_{13}-0.143ZX_{14}+0.121ZX_{15}-0.302ZX_{16}+0.127ZX_{17}-0.186ZX_{18},$$

式中 $ZX_i$ 是 $X_i$ 的标准化变量;

$$F=F_1 \times 0.84262 + F_2 \times 0.07089。$$

由表5可知,综合主成分与第一主成分排名一致,与第二主成分稍有不同,通过综合主成分评价得到各更新模式土壤抗蚀性顺序为:天然林>擦木林>水杉林>柳杉林>毛竹林>杉木林,除柳杉林与毛竹林间差异不显著外,其他各林分间差异显著。将综合主成分结果在等距下可分为三类抗蚀性(强、中和弱)。第一(强)、第二(中)和第三(弱)类抗蚀性综合主成分值取值范围为1.666~4.837、-1.505~1.667和-4.675~1.506。对各模式类型的综合主成分值取值可以

确定模式的抗蚀性类别，其中天然林和檫木林属于第一类，即强抗蚀性林分；水杉林和柳杉林属第二类，即中抗蚀性林分，毛竹林和杉木林属第三类，即弱抗蚀性林分。

表 4 不同林分类型土壤抗蚀性分析中的主成分矩阵

Tab.4 Principal Component Matrix of Soil Anti-Erodibility under Different Forest Types

抗蚀性指标	主成分1	主成分2	抗蚀性指标	主成分1	主成分2
>0.25 mm水稳性团聚体含量( $X_1$ )	0.987	0.031	非毛管孔隙( $X_{10}$ )	0.794	-0.138
>0.5 mm水稳性团聚体含量( $X_2$ )	0.992	0.023	<0.001粘粒含量( $X_{11}$ )	0.788	0.591
水稳性团聚体平均重量直径( $X_3$ )	0.981	-0.036	结构性颗粒指数( $X_{12}$ )	0.562	0.796
结构体破坏率( $X_4$ )	-0.973	0.035	团聚状况( $X_{13}$ )	0.981	-0.130
不稳定团粒指数( $X_5$ )	-0.987	-0.031	团聚度( $X_{14}$ )	0.965	-0.162
有机质( $X_6$ )	0.968	-0.128	分散率( $X_{15}$ )	-0.983	0.137
容重( $X_7$ )	-0.902	0.035	侵蚀系数( $X_{16}$ )	-0.641	-0.341
总孔隙( $X_8$ )	0.976	-0.074	受蚀性指数( $X_{17}$ )	-0.976	0.143
毛管孔隙( $X_9$ )	0.964	-0.054	物理稳定性指数( $X_{18}$ )	0.949	-0.210

表 5 主成分及综合主成分值

Tab.5 Principal Component and Synthetic Principal Component Score Value

林分类型	$F_1$	排名	$F_2$	排名	$F$	排名
天然林	4.816	1	0.021	2	4.837a	1
檫木林	2.775	2	-0.020	5	2.756b	2
水杉林	1.222	3	-0.045	6	1.177c	3
柳杉林	-1.482	4	0.017	3	-1.465d	4
毛竹林	-2.389	5	0.055	1	-2.334d	5
杉木林	-4.676	6	0.002	4	-4.675e	6

采用模糊数学的隶属函数法，对每个所选的抗蚀性指标数据进行转换(若指标与抗蚀性呈正相关，数据转换公式为： $X(u)=(X-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$ ；否则，数据转换公式为： $X(u)=1-(X-X_{min})/(X_{max}-$

$X_{min})$ )，然后将每个处理各抗蚀性指标的隶属度值累加后求其平均值，值越大抗蚀性就越强。由表 6 可知，天然林的综合值 16.429 最高，与天然林相比，檫木林、水杉林、柳杉林、毛竹林和杉木林分别下降 18.98%、33.66%、58.47%、69.35% 和 87.88%，且各林分间抗蚀性隶属度综合值差异显著。结果表明，林分变化改变了土壤抗蚀性能，各林分土壤抗蚀性大小顺序与综合主成分值得到的结果一致(表 6)。

表 6 抗蚀性隶属度综合值

Tab.6 Synthetic Membership Degree Score Value

林分类型	$F_1$	排名
天然林	16.429a	1
檫木林	13.311b	2
水杉林	10.899c	3
柳杉林	6.823d	4
毛竹林	5.035e	5
杉木林	1.992f	6

### 3.4 主要抗蚀性指标间相关性分析

将主成分 1 和主成分 2 中贡献较大的 14 个指标(>0.25mm 水稳性团聚体含量、>0.5mm 水稳性团聚体含量、水稳性团聚体平均重量直径、结构体破坏率、不稳定团粒指数、有机质、容重

、总孔隙、毛管孔隙、团聚状况、团聚度、分散率、侵蚀系数、物理稳定性指数)选出, 并进行相关性分析, 这 14 个指标之间均呈极显著相关性( $p < 0.01$ )。其中, 有机质与结构体破坏率、不稳定团粒指数、容重、侵蚀系数和分散率呈极显著负相关以外, 与其他指标均呈极显著正相关。结果说明, 有机质含量越高, 水稳性团聚体含量、孔隙度、水稳性团聚体平均重量直径、团聚度和物理稳定性指数越高, 而结构体破坏率、不稳定团粒指数、容重、侵蚀系数和分散率越低, 因此, 土壤有机质是改善研究区土壤理化性质、土壤结构及质地的关键。

将抗蚀性综合主成份值和抗蚀性隶属度值分别与主成分中 18 个指标进行相关性分析(表 7), 由表 7 可知, 抗蚀性综合主成份值和抗蚀性隶属度值分别与结构性颗粒指数呈显著正相关( $p < 0.05$ )以外, 分别与其他指标均呈极显著相关性(0.01), 并且两者分别与水稳性团聚体含量的相关性均高于其他指标。说明水稳性团聚体含量是影响土壤抗蚀性的重要因子, 其含量的增加能够有效地提高土壤结构稳定性, 且和抗蚀性隶属度及抗蚀性综合主成份值三者都能作为土壤抗蚀性的最佳评价指标。

表 7 抗蚀性综合值与主要抗蚀性指标间的相关性  
Tab.7 Correlation Coefficient between the Comprehensive Value and the Main Indexes in Soil Anti-Erodibility

抗蚀性指标	抗蚀性综合主成份值	抗蚀性隶属度值	抗蚀性指标	抗蚀性综合主成份值	抗蚀性隶属度值
>0.25 mm 水稳性团聚体含量( $X_1$ )	0.987**	0.987**	粘粒含量( $X_{11}$ )	0.804**	0.797**
>0.5 mm 水稳性团聚体含量( $X_2$ )	0.991**	0.992**	结构性颗粒指数( $X_{12}$ )	0.590*	0.575*
水稳性团聚体平均重量直径( $X_3$ )	0.974**	0.980**	团聚状况( $X_{13}$ )	0.974**	0.979**
结构体破坏率( $X_4$ )	-0.970**	-0.971**	团聚度( $X_{14}$ )	0.955**	0.962**
不稳定团粒指数( $X_5$ )	-0.987**	-0.987**	分散率( $X_{15}$ )	-0.976**	-0.980**
有机质( $X_6$ )	0.964**	0.967**	侵蚀系数( $X_{16}$ )	-0.641**	-0.649**
容重( $X_7$ )	-0.907**	-0.900**	受蚀性指数( $X_{17}$ )	-0.970**	-0.974**
总孔隙( $X_8$ )	0.971**	0.975**	物理稳定性指数( $X_{18}$ )	0.941**	0.947**
毛管孔隙( $X_9$ )	0.958**	0.963**	抗蚀性综合主成份值	1.000	0.998**
非毛管孔隙( $X_{10}$ )	0.789**	0.793**	抗蚀性隶属度值	0.998**	1.000

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

土壤抗蚀性是土壤质地、结构、通透性和团聚体稳定性等因素综合作用的结果。本研究区降雨量丰富, 细小的土壤颗粒更易流失, 导致其含量减少而粗粉粒含量增加, 使土壤向粗骨化方向发展, 土壤理化性质变差, 使得潜在的水土流失较为严重; 此外, 天然林转变为人工林后, 尤其是初期, 成土环境发生较大改变, 使 $< 0.05\text{mm}$ 微团聚体含量及分散率增加, 从而导致土壤抗分散能力降低, 土壤粘粒及粉粒含量降低, 土壤团粒结构稳定性减弱, 土壤孔隙度减小和抗蚀性降低。同时, 天然林转变成人工林后土壤总空隙和非毛管孔隙明显降低, 导致土壤持水能力下降、地表径流冲刷加剧和土壤抗蚀能力降低。本研究结果发现水稳性团聚体含量对土壤抗蚀性的贡献最大, 这与史晓梅等的研究结果一致, 而与丛曰亮等研究得到孔隙度对土壤抗蚀性贡献最大的结果有一定的差异, 出现差异的原因与各研究区的气候、地形、土壤类型、植被等因素不同有关。另外, 本研究还发现水稳性团聚体含量与其他指标均呈极显著相关, 并与抗蚀性综合值的相关性最强, 这进一步说明其稳定性和含量会影响土壤物理性质和抗蚀性。天然林转变为人工林后土壤团聚体稳定性降低且水稳性团聚体含量减少, 土壤物理性质也相应变差, 使土壤抵抗雨滴击溅和冲刷的能力及土壤渗透性减弱, 进而使土壤抗蚀能力降低。

团聚体的形成与有机质紧密相关。不同林分类型由于植物组成及其生态功能的差异使其对土壤的改良作用存在差异, 从而影响土壤的紧实度、通气透水性和养分转化, 导致土壤团聚体组成和抗蚀性不同。本研究结果发现, 天然林转变为人工林后, 有机质含量随相应的粘粒含量减少也不同程度的减少, 且有机质含量与其他抗蚀性指标和抗蚀性综合值均显著相关。主要是由于在相同的气候及管理条件下, 粘粒含量越高的土壤能保护有机物质免于生物降解的作用越强。天然林转变为人工林后土壤有机质含量的降低应该是导致土壤团聚体及水稳性团聚体含量、水稳性团聚体平均重量直径、团聚状况和物理稳定性指数降低, 土壤结构体破坏率和不稳定团粒指数增加的重要原因, 这与 131311 对地中海区域五种不同产谷区长期没有耕作与传统耕作两种模式研究所得出的土壤有机质含量直接影响土壤质地的结果相一致。因此, 保护好天然林或营造适宜的人工林是增加土壤有机质、改善土壤物理性质和提高土壤抗蚀性的关键。

天然林转变为人工林后成土母质及气候条件没有发生根本性改变, 导致不同林分土壤物理性质和抗蚀性差异原因应该与植被类型及其覆盖状况有关。本研究发现各林分土壤抗蚀性综合值, 天然林显著高于人工林, 且各人工林间总体也差异显著(除柳杉林与毛竹林间抗蚀性主成

分综合值差异不显著外), 呈现出檫木林>水杉林>柳杉林>毛竹林>杉木林。据调查, 天然林结构复杂且郁闭度较高, 具良好的林+灌+草结构, 且地表枯落物覆盖厚度和蓄积量均相对较大, 这就有利于对降水的截留及分配, 减少对地表的冲击和增加土壤抗蚀性; 相对而言, 人工林结构简单且郁闭度稍低, 多数只具有林+草结构, 且覆盖厚度和枯落物蓄积量也没有天然林大。枯落物归还量多, 土壤有机物的分解及腐殖质再合成的转化速率较快, 由腐殖质胶结形成的团聚体与水稳性团聚体含量及质量就越高, 土壤结构性和抗蚀性就越好, 这是本研究中天然林土壤物理性质和抗蚀性优于人工林的原因之一, 据调查, 枯落物层蓄积量天然林>檫木林>水杉林>柳杉林, 檫木和水杉均属于落叶树种, 每年都有大量的枯落物归还土壤, 大量的枯落物加速土壤有机物的分解及腐殖质再合成的转化速率, 而柳杉、毛竹及杉木属于常绿树种, 归还土壤的枯落物量较少, 有机质合成较少, 并且雨滴直接冲击地表, 粘粒及养分流失严重, 土壤抗蚀性降低; 其次, 阔叶林木根系发达, 固土能力比针叶林高, 有力地增强林地土壤抗冲刷能力; 由于毛竹根系在垂直生长到一定阶段后, 水平生长会大幅度增强, 并且毛竹根系中细小根系含量所占比例大, 固持土壤作用较强, 所以毛竹林的土壤抗蚀性高于杉木林, 这与从 H 亮 1331 和姜培坤等对毛竹林和杉木林土壤抗蚀性的研究结果相同。所以土壤抗蚀性天然林>檫木林>水杉林>柳杉林>毛竹林>杉木林。在地表径流形成与水土流失过程中, 土壤表层粘粒含量更易流失, 加剧粘粒向下淋溶和悬移, 致使土壤表层粘粒含量降低, 下层粘粒含量增多。然而, 下层过多的粘粒又会增大土壤紧实度, 使部分原有的通气孔隙被占用, 进而导致土壤持水能力降低, 使土壤水容量下降, 从而加剧土壤侵蚀, 这应该是天然林转变为人工林后土壤物理性质变差和抗蚀性降低的又一重要原因。

目前, 用于研究土壤抗蚀性的方法较多, 范川等采用了主成分分析法分别研究了四川省德阳市低效柏木林改造 8 年后 6 种模式的土壤抗蚀性; 薛菴等采用指标体系评价法对黄土丘陵区不同植被恢复模式土壤抗蚀性进行了定量评价; 朱冰冰等运用 EPIC 模型探讨了侧柏林与不同年限撂荒地之间土壤抗蚀性的差异。本研究采用了主成分分析法和隶属函数法对各林分抗蚀性综合值进行了研究, 结果发现两种方法所得的各林分的抗蚀性综合值的大小顺序是一致的, 两者之间具有显著的相关性, 且两者与其他指标间也显著相关。这说明两种计算方法都能用来计算土壤抗蚀性综合值, 并且土壤抗蚀性综合值可作为一项能较综合、全面和系统地评价土壤抗蚀性强弱的重要综合性定量指标。在计算操作方面, 隶属函数法更为简单方便, 所以在以后的研究实践中, 可以广泛采用隶属函数法来计算和综合评价土壤抗蚀性。

#### 4.2 结论

天然林转变为人工林后土壤水稳性团聚体含量和平均重量直径降低, 土壤结构体破坏率和不稳定团粒指数增加, 导致土壤结构稳定性降低; 土壤结构性颗粒指数、团聚状况、团聚度和物理稳定性指数降低, 土壤分散率、侵蚀系数和受蚀性指数增加, 导致土壤分散性增加和物理稳定性变差; 土壤抗蚀性综合值(主成分法和隶属度法)降低, 且不同林分间呈现出天然林>檫木林>水杉林>柳杉林>毛竹林>杉木林的变化规律。

土壤理化性质与土壤抗蚀性之间呈显著相关性。土壤抗蚀性主要受水稳性团聚体含量的直接影响和土壤有机质的间接影响, 所以增加土壤有机质和水稳性团聚体含量是增强土壤抗蚀性的关键。

土壤抗蚀性主成分综合值和抗蚀性隶属度综合值均可作为土壤抗蚀性的综合评价指标, 但后者较前者, 计算更简单方便。

#### 参考文献:

- [1] 丁文峰, 李占斌. 土壤抗蚀性的研究动态 [外水土保持科技情报, 2001(1):36-39.
- [2] 胡建忠, 范小玲, 王愿昌, 等. 黄土高原沙棘人工钵地土壤抗蚀性指标探讨 [J]. 水土保持通报, 1998, 18(2):25-30.
- [3] 刘彬, 张超, 等. 黄土丘陵区人工灌木林土壤抗蚀性演变特征 [J]. 中网农业科学, 2010, 43(15):3143-3150.
- [4] 王云琦, 王玉杰, 朱金兆. 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.

- [5] 王景燕, 胡庭兴, 龚伟, 等. 川南地 K 不同退拼地对土壤抗蚀性的影响[J]•中国水土保持, 2010(12):30-33.
- [6] 白秀梅, 韩有志, 郭汉清, 关帝山不同植被恢复类湖土壤抗蚀性研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2):79-84.
- [7] 刘旦旦, 张鹞辉, 五健, 等. 黄土坡曲不同土地利用类型土壤抗蚀性对比[J]. 林业科学, 2013, 49(9):102-106.
- [8] 并光花, 于兴修, 李振炜. 土壤可蚀性研究进展综述[J]. 中闻水土保持, 2011(10):4“7.
- [9] 王佩将, 戴全厚, 丁贵杰. 退化喀斯特植被恢复过程中的土壤抗蚀性变化[J]•土壤学报, 2014, 51(4):807-815.
- [10] 张水东, 吴淑芳, 冯浩, 等. 土壤侵蚀过程中坡面流体力学特性及侵蚀动力研究评述[J]. 土壤, 2013, 45(1):26-33.
- [11] 杨玉盛, 何宗明, 林光跃, 等. 不同治理模式对严重退化红壤抗蚀性影响的研究(1). 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(2):3642.
- [12] 范川, 周义贵, 李贤伟, 等. 柏木低效林改造不同模式土壤抗蚀性对比[J]•林业科学, 2014, 50(6):107-114.
- [13] 王云琦, 王玉杰, 刘楠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, 32(6):54~60.
- [14] 赵溪, 李君剑, 李洪建•关帝山不同植被恢复类用对土壤碳、氮含量及微生物数 ft 的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(11):2102-2110.
- [15] 李占斌, 李鹞, 等. 不同植被恢复模式对黄土&陵 K 土壤抗蚀性的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(Supp. 1):69-72.
- [16] 戴全厚, 薛芷, 刘彬, 等. 侵蚀环境撂荒地植被恢复与土壤质量: 的协同效应[J]. 中国农业科学, 2008, 41(5):1390-1399.
- [17] 卫晶, 丁德蓉, 何丙辉, 等. 三峡库区撑绿竹护岸林土壤抗蚀性能研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6)
- [18] 中怀准出版社. 中林业标准汇编(营造林卷) [M]. 北京•. 中国标准出版社, 1998.
- [19] 刘孝义, 依艳丽. 土壤物理学\*础及研究法[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1998.
- [20] 杨五盛, 何宗明, 陈光水, 等. 不同生物治理措施对赤红壤抗蚀性影响的研究[J]•土壤学报, 1999, 36(4):529-53
- [21] 宫阿都, 何毓蓉. 金沙江 T 热河谷典型区(云南)退化土壤的结构性与形成机制[几山地学报, 2001, 19(3):213-21.
- [22] 胡忠, 张伟华, 李文忠, 等. 北川河流域返拼地梢物群落土壤抗蚀性研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(6):854-863.
- [23] 腾兵. 贵州山 K 土壤物理性质对土壤侵蚀影响的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1995, 1(1):85-95.
- [24] 苏永中, 赵文智. 土壤有机碳动态: 风蚀效应[J]. 生态学报, 2005, 25(8):2049-2054.
- [25] 沐海明, 张文霖. 主成分分析与因子分析的异同和 SPSS 软件——兼与刘玉玫、卢纹岱等同志商几统计研究, 2005(3):65-69.



- [26]黎速强, 张洪江, 陈奇伯, 等. 长江上游不同棺物篱系统土壤抗冲、抗蚀特征[J]. 生态环境学报, 2012, 21(7):1223-1228.
- [27]奄小春, 唐克丽. 黄土丘陵休 K 开咳地人为加速侵蚀与土壤物理力学性质的时间变化[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3):20-23.
- [28]恁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [29]史晓梅, 史东梅, 文卓立. 紫色土丘陵 K 不同 t:地利用类型土壤抗蚀性特征研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(4):63~66.
- [30]丛口亮, 黄进, 张金池, 等. 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):1862-1867.
- [31]龚伟, 胡庭兴, 王景燕, 等. 川南天然常绿阔叶林人 T 更新后土壤微生物聚体分形特征研究[J]. 土壤学报, 2007, 44(3):571-575.
- [32]赵哈林, 周瑞莲, 苏永中, 等. 科尔沁沙地沙漠化过程中土壤打机碳和全氮含 M 变化[J]. 生态学报, 2008, 28(3):976~982.
- [33]黄茹, 黄林, 何丙辉, 等. 三峡库区不同林草措施土壤活性有机碳及抗蚀性研究[J]. 环境科学, 2013, 34(7):2800-2808.
- [34]杨秀清, 韩有志. 关帝山森林土壤有机碳和氮索的空间变异特征[J]. 林业科学研究, 2011, 24(2):223-229.
- [35]蔡培坤, 俞益武, 徐秋芳. 商品林地土壤物理性质演变的抗蚀性能[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 112-115.
- [36]宫阿都, 毓蓉. 金沙江干热河谷 K 退化土壤结构的分形特征研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3):112-115.
- [37]朱冰冰, 李占斌, 李鹞, 等. 土地化/恢复中土壤可蚀性动态变化[J]. 农业 I 程学报, 2009, 25(2):561.