

赣县稀土采矿区巨桉林地土壤抗蚀性评价

涂淑萍¹, 周桂香¹, 郭晓敏^{1,2}, 张文元^{1,2}, 胡冬南¹, 牛德奎^{1,2}

(1. 江西农业大学园林与艺术学院, 江西 南昌 330045; 2. 江西农业大学林业生态工程研究中心, 江西 南昌 330045)

摘要:通过野外调查与室内分析相结合,应用主成分分析法,从衡量土壤抗蚀性的16个指标中,优化得到赣县稀土采矿区巨桉林地土壤抗蚀性7个最佳评价指标:分散系数(X_1)、团聚度(X_2)、 >0.25 mm水稳性团聚体含量(X_3)、 >0.5 mm水稳性团聚体含量(X_4)、 <0.05 mm粉黏粒含量(X_5)、 >0.25 mm团聚体破坏率(X_6)和 <0.001 mm黏粒含量(X_7),并以此为变量分析比较不同林龄巨桉林地土壤抗蚀性变化规律。结果表明:不同林龄巨桉林地土壤抗蚀性综合指数大小为:1年生林地 $>$ 2年生林地 $>$ 4年生萌芽1 a林地 $>$ 裸露地。在此基础上,以上述7个评价指标为自变量,以土壤抗蚀性综合指数(Y)为因变量,进行回归分析,得出稀土采矿区土壤抗蚀性综合评价方程为: $Y = 0.309 X_1 + 0.038 X_2 - 0.161 X_3 - 0.643 X_4 + 0.491 X_5 - 0.0328 X_6 + 0.129 X_7 + 41.637$,因子决定系数 $R^2 = 0.9915$, $F = 49.84$,各因子间显著相关,方程拟合较好,可为构建稀土采矿区土壤抗蚀性评价指标体系提供依据。

关键词:赣县;稀土采矿区;巨桉林地;土壤抗蚀性;评价

中图分类号:S792.39

文献标识码:A

Evaluation of Soil Anti-erodibility of *Eucalyptus grandis* Forest Land in Rare Earth Mining Area

TU Shu-ping¹, ZHOU Gui-xiang¹, GUO Xiao-min^{1,2}, ZHANG Wen-yuan^{1,2},
HU Dong-nan¹, NIU De-kui^{1,2}

(1. College of Landscape and Art, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, Jiangxi, China;

2. Forest Ecological Engineering Research Center, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, Jiangxi, China)

Abstract: Soil anti-erodibility is one of the important parameters for evaluating the ability of soil resistance to soil erosion. Based on the comprehensive investigation on soil physical and chemical properties, and incorporated into bioindicator, by using principal component analysis, all the 16 anti-erodibility indices could be optimized to 7 indices which were water-stable aggregates at size >0.5 mm and >0.25 mm, destructive rate of aggregates at size >0.25 mm, coefficient of dispersion, degree of aggregation, viscous grain powder at size 0.05 mm and viscous grain at size <0.001 mm. The laws of soil anti-erodibility variation of different aged *Eucalyptus grandis* are discussed and the result showed that the soil anti-erodibility index followed the order of one-year-old stand $>$ two-year-old stand $>$ four-year-old sprout stand $>$ bare land. Taking the 7 indexes (X) as independent variables and soil erodibility index (Y) as dependent variable, the soil erodibility model equation in the rare earth mining area is: $Y = 0.309X_1 + 0.038X_2 - 0.161X_3 - 0.643X_4 + 0.491X_5 - 0.0328X_6 + 0.129X_7 + 41.637$. The correlations among factors are significant and the model fits well.

Key words: Ganxian County; rare earth mining field; *Eucalyptus grandis* forest; soil anti-erodibility; evaluation

收稿日期:2013-05-07

基金项目:加拿大国际植物营养研究所(IPNI)资助项目(jiangxi-28)

作者简介:涂淑萍(1963—),女,江西南昌人,副教授,主要从事经济林培育等研究。

通讯作者:教授,博士,博士生导师,主要从事水土保持与植物恢复研究。E-mail:ndk2157@163.com

我国是世界上水土流失最严重的国家之一,目前水土流失面积约360万 km^2 ,其中,土壤侵蚀最为严重,每年土壤侵蚀面积超过国土面积的三分之一^[1-2]。水土流失降低了当地土地生产力,造成土壤质量退化,严重制约了区域资源、经济和社会的可持续发展^[3]。土壤抗蚀性是指土壤抵抗水(包括降水和径流)的分散和悬浮的能力,其强弱取决于土粒间的胶结力和水的亲和力,是评定土壤抵抗侵蚀力的重要参数之一^[4],历来为研究者所重视^[5-10]。土壤抗蚀性不是一个物理或化学的定量可测指标,而是一个综合因子^[11],它不仅与土壤理化性质有着密切联系,而且还与植被状况有着重要关系^[12]。目前,关于土壤抗蚀性的研究报道颇多,但主要集中在黄土高原区、南方红壤丘陵区及川中丘陵区,且以单项指标研究为主^[13-16],对矿区废弃地和沙地等土壤抗蚀性的综合研究甚少。本文以江西赣县稀土采矿区不同林龄巨桉(*Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden)林地土壤为研究对象,在野外实地调查及土壤理化性质综合分析基础上,筛选土壤抗蚀性的重要指标,建立土壤抗蚀性评价指标体系,可为巨桉人工林的

推广和赣县稀土采矿区水土保持治理提供依据,同时也为生态脆弱区生态环境的保护和管理提供参考。

1 研究区概况

试验区位于江西省南部的赣县,地处中亚热带丘陵山区季风湿润气候区,年平均气温 $19.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,7月(最热)平均气温 $30.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,1月(最冷)平均气温 $6.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端最低气温 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$;无霜期 $287\sim 300\text{ d}$,年平均日照时数 $1\ 822.8\text{ h}$;年降水量 $1\ 392.4\sim 2\ 168.9\text{ mm}$,多集中在4—6月,约占总降水量的50%。采用原地浸矿法开采稀土后的山头有效土层和风化层全部剥离,基岩裸露,土壤严重沙化,有机质含量极低,水土流失严重。

试验区1年生巨桉林地位于赣县阳埠乡稀土采矿区,2年生巨桉林地位于该县韩坊乡稀土采矿区,4年生萌芽1a巨桉林地位于该县大田乡稀土采矿区;此外,于该县阳埠乡稀土采矿区,另设一无植被生长的裸露地作对照。试验地基本情况见表1。

表1 试验地基本情况

林地类型	东经(E)	北纬(N)	海拔/m	株行距/ (m×m)	平均胸径/mm	平均树高/m	土壤有机质含量/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
1年生林	114°54'	25°35'	214	2×2	66.74	6.2	0.33
2年生林	115°05'	25°27'	267	2×1.5	76.88	7.8	0.27
4年生萌芽1a林	115°57'	26°05'	210	2×2	54.33	7.8	1.21
裸露地(对照)	114°54'	25°35'	214	-	-	-	0.26

2 研究方法

2.1 土壤样品采集

于2011年7月中旬,在野外调查的基础上,根据树龄、地形等因素进行样方的选择,每个处理(林龄)设置3个样方($30\text{ m}\times 30\text{ m}$),样方内按条状3点随机布点,多点取样,用直径 2 cm 取土器钻取 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层,用于土壤机械组成、微团聚体、有机质含量的测定。同时,利用环刀采集原状土,用于土壤体积质量、团聚体等指标的测定。

2.2 测定项目及方法

土壤密度、孔隙度和渗透性采用环刀法测定;水稳性团聚体含量和风干团聚体含量采用干-湿筛法测定;抗蚀指数和水稳性指数采用崩解法测定;土壤微团聚体采用吸管法测定;机械组成采用比重计法测定;有机质含量采用重铬酸钾容量法——外加热

法测定^[17]。上述指标的测定均重复3次。

2.3 土壤抗蚀性指标的选取及计算方法

衡量土壤抗蚀性的指标很多,一般分成水稳性团聚体类、无机黏粒类、微团聚体类和有机胶体类4大类^[18];也有学者在此基础上增加了土壤生物类,而分成5大类^[19]。关于土壤抗蚀性最佳指标的选择,黄义端^[20]研究表明,反映土壤抗蚀性能的指标主要有侵蚀率、分散率、分散系数、团聚度等;郭培才等^[21]研究表明,黄土区土壤的最佳抗蚀性指标是水稳性团粒含量,其次是土壤有机质含量,但风干砂壤土除外,不能很好反映该地区土壤抗蚀性的是用微团聚体含量作为基础所表示的各类指标;王佑民等^[22]研究表明,影响黄土高原土壤抗蚀性主导因子是腐殖质和黏粒含量,水稳性团粒是最佳指标。在对已有研究成果综合分析的基础上,结合试验区特点,本研究共选取4大类16个指标用于评价稀土采

矿区土壤抗蚀性(表2)。各指标的计算均采用常规方法^[2,15,23-26]。

$$\text{结构性颗粒指数} = \frac{<0.001 \text{ mm 黏粒含量}}{0.001 \sim 0.050 \text{ mm 粉黏粒含量}} \quad (1)$$

$$\text{团聚状况} = >0.05 \text{ mm 微团聚体} - >0.05 \text{ mm 机械组成} \quad (2)$$

$$\text{团聚度} = \frac{\text{团聚状况}}{>0.05 \text{ mm 微团聚体}} \quad (3)$$

$$>0.05 \text{ mm 微团聚体} = 1 - <0.05 \text{ mm 粉黏粒含量} \quad (4)$$

$$\text{分散率} = \frac{<0.05 \text{ mm 微团聚体}}{<0.05 \text{ mm 机械组成}} \quad (5)$$

$$\text{水稳性指数 } K = (\sum P_i K_i + P_j) / A \quad (6)$$

式(6)中: P_i 为第 i 分钟内分散的土粒数, K_i 为第 i 分钟的校正系数, $i=1, 2, \dots, 10$, P_j 为 10 min 内没有分散的土粒数, A 为供试的土粒总数。

$$\text{抗蚀性指数} = \frac{(\text{总土粒} - \text{崩塌土粒})}{\text{总土粒}} \quad (7)$$

$$\text{水稳性团聚体平均质量直径 (mm)} = \sum X_i W_i \quad (8)$$

式(8)中: X_i 为各粒径水稳性团聚体的平均直径, W_i 为各粒径水稳性团聚体的质量百分比。

$$>0.25 \text{ mm 团聚体破坏率} = \frac{(>0.25 \text{ mm 干筛} - >0.25 \text{ mm 湿筛})}{>0.25 \text{ mm 干筛}} \quad (9)$$

$$\text{分散系数} = \frac{<0.001 \text{ mm 微团聚体}}{<0.001 \text{ mm 机械组成}} \quad (10)$$

$$\text{结构系数} = 1 - \text{分散系数} \quad (11)$$

表2 土壤抗蚀性指标分类

类别	编号	指标
水稳性团聚体类 (I)	I ₁	>0.5 mm 水稳性团聚体含量
	I ₂	>0.25 mm 水稳性团聚体含量
	I ₃	水稳性团聚体平均质量直径
	I ₄	>0.25 mm 团聚体破坏率
	I ₅	水稳性指数
	I ₆	抗蚀性指数
微团聚体类 (II)	II ₁	分散系数
	II ₂	结构系数
	II ₃	团聚度
	II ₄	分散率
	II ₅	团聚状况
无机黏粒类(III)	III ₁	<0.05 mm 粉黏粒含量
	III ₂	<0.01 mm 物理性黏粒含量
	III ₃	<0.001 mm 黏粒含量
	III ₄	结构性颗粒指数
有机胶体类(IV)	IV ₁	有机质含量

2.4 数据统计分析

试验数据采用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 软件进行统计分析。

3 结果与分析

3.1 土壤抗蚀性差异分析

土壤抗蚀性主要取决于表层土壤性质,故研究表层土壤抗蚀性显得尤为重要。赣县稀土采矿区不同林龄巨桉林地土壤抗蚀性指标测定结果见表3。从表3中可看出:各指标对土壤侵蚀营力反应的敏感程度不同。从水稳性团聚体类指标来看, >0.5 mm 水稳性团聚体含量和 >0.25 mm 水稳性团聚体含量均表现为以2年生林地最高,但与1年生林地之间差异不显著,与4年生萌芽1a林地之间差异极显著,4年生萌芽1a林地与裸露地之间差异不显著;水稳性团聚体平均质量直径与水稳性指数均表现为各林地及裸露地之间无显著差异; >0.25 mm 团聚体破坏率则表现为4年生萌芽1a林地显著高于1年生林地,且极显著高于2年生林地,而与裸露地之间差异不显著。从微团聚体类指标看,分散系数以裸露地最高,裸露地与4年生萌芽1a林地的差异不显著,而与1年生及2年生林地的差异达极显著,1年生林地与2年生林地的差异不显著;结构系数则以1年生林地最高,1年生林地与2年生林地的差异不显著,而与4年生萌芽1a林地及裸露地的差异极显著;团聚度也以1年生林地最大,与2年生林地的差异显著,与4年生萌芽1a林地和裸露地的差异极显著;分散率和团聚状况,各林地及裸露地之间均无显著差异。从无机黏粒类看, <0.05 mm 粉黏粒含量以1年生林地最高,与其它林地及裸露地的差异均极显著; <0.01 mm 物理性黏粒含量也以1年生林地最高,与4年生萌芽1a林地的差异不显著,但与2年生林地及裸露地的差异极显著; <0.001 mm 黏粒含量和结构性颗粒指数均以1年生林地最高,与其它林地及裸露地的差异极显著。土壤有机质含量则以4年生萌芽1a林地最高,与其它林地及裸露地的差异均极显著。由此可见,各指标反映在不同林龄巨桉林地的变化规律不尽一致,单一指标难以全面真实地反映土壤的抗蚀能力。

3.2 土壤抗蚀性指标优化

土壤抗蚀性的影响因素多且繁杂,评价指标也呈现多样化。从表3可看出:单一指标虽然可在一定程度上反映土壤受侵蚀的相对状况,但难以反映

土壤抗侵蚀的实质,制约了土壤抗蚀性研究。因此,根据各指标测定值对各样地土壤抗蚀性指标进行主成分分析,以优化表征该区土壤抗蚀性的指标。

表3 不同林龄巨桉林地土壤抗蚀性指标测定值

土壤抗蚀性指标	林地类型			
	1年生林	2年生林	4年生萌芽1a林	裸露地(对照)
I ₁	32.03abAB	40.66aA	11.70cB	17.32bcB
I ₂	49.07aA	51.17aA	22.31bB	27.91bAB
I ₃	0.82a	1.05a	0.35a	0.55a
I ₄	49.08bcAB	38.89cB	71.09aA	61.34abAB
I ₅	0.30a	0.51a	0.22a	0.47a
I ₆	44.58bAB	52.98aA	35.31cB	16.31dC
II ₁	18.05cC	28.52bcBC	39.40abAB	48.03aA
II ₂	81.95aA	71.48abAB	60.60bcBC	51.92cC
II ₃	57.50aA	33.28bAB	31.31bB	30.33bB
II ₄	52.53a	51.01a	77.45a	65.48a
II ₅	8.29a	9.07a	7.54a	3.36a
III ₁	17.46aA	4.83bB	3.05bB	4.08bB
III ₂	74.67aA	51.38cB	67.37abAB	55.24cB
III ₃	45.91aA	23.07bB	27.90bB	24.53bB
III ₄	30.56aA	10.40bB	5.03cB	8.11bcB
IV ₁	0.33bB	0.27bB	1.21aA	0.26bB

注:同一行不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著,不同大写字母表示在 $P < 0.01$ 水平上差异显著。

从表4可看出:第1主成分的方差贡献率最大(52.710%),加上第2主成分、第3主成分的方差贡献率,其累计方差贡献率为87.483%,且前3个主成分的特征值均大于1,达到了主成分分析的要求。因此,前3个主成分基本能反映该区各样地土壤抗蚀性的变异信息,可用所提取的3个主成分来衡量土壤抗蚀性的强弱。第1主成分的方差贡献率最大,对土壤抗蚀性的影响明显,第2主成分、第3主成分的方差贡献率小,对土壤抗蚀性的影响程度较小。

表4 土壤抗蚀性指标的总方差分析结果

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
第1主成分	8.434	52.710	52.710
第2主成分	3.804	23.776	76.486
第3主成分	1.760	10.997	87.483

经主成分方差分析后,土壤抗蚀性指标虽然可简化为3个综合指标,且每一指标均赋有新的数值,但每一综合指标内仍包括多项因子,运用不便,需要对多指标进一步优化。由于各主成分的初始因子负荷系数距离未拉开,主成分所表达的实际意义不明

显差异,因此,采用方差最大旋转法进行分析(表5),以进一步优化表征土壤抗蚀性的指标。

从表5可看出:第1主成分中, I₁(>0.5 mm 水稳性团聚体含量)、I₂(>0.25 mm 水稳性团聚体含量)、I₃(水稳性团聚体平均质量直径)、I₄(>0.25 mm 团聚体破坏率)、I₅(水稳性指数)、II₄(分散率)、IV₁(有机质含量)的负荷系数较大,其中, >0.25 mm 团聚体破坏率、分散率和有机质含量对第1主成分有逆向效应,其值越大,第1主成分值越小,抗蚀能力越弱;第2主成分中, II₁(分散系数)、II₂(结构系数)、II₃(团聚度)、III₁(<0.05 mm 粉黏粒含量)、III₂(<0.01 mm 物理性黏粒含量)、III₃(<0.001 mm 黏粒含量)和 III₄(结构性颗粒指数)的负荷系数较大;第3主成分中, I₆(抗蚀性指数)、II₁(分散系数) II₂(结构系数)、II₅(团聚状况)的负荷系数较大,其中,仅分散系数对第2主成分和第3主成分有逆向效应。

表5 土壤抗蚀性主成分分析旋转后的因子负荷矩阵

土壤抗蚀性指标	第1主成分	第2主成分	第3主成分
I ₁	0.899	0.148	0.385
I ₂	0.851	0.334	0.383
I ₃	0.885	0.112	0.295
I ₄	-0.929	-0.103	-0.304
I ₅	0.777	-0.172	-0.241
I ₆	0.344	0.149	0.908
II ₁	-0.267	-0.655	-0.658
II ₂	0.267	0.655	0.658
II ₃	0.382	0.867	0.144
II ₄	-0.870	-0.242	-0.153
II ₅	-0.070	0.119	0.844
III ₁	0.216	0.918	0.149
III ₂	-0.319	0.835	0.113
III ₃	0.008	0.969	0.101
III ₄	0.270	0.871	0.146
IV ₁	-0.770	-0.136	0.191

3.3 土壤抗蚀性效应分析

根据所提取的3个主成分的特征值和旋转后的各因子载荷矩阵进行相关计算,可以得到不同林龄巨桉林地土壤抗蚀性的综合表达式:

$$Y = 0.603Z_1 + 0.272Z_2 + 0.126Z_3$$

式中:Y为土壤抗蚀性综合指数(表7同);Z₁、Z₂、Z₃分别代表第1主成分、第2主成分和第3主成分。各样地土壤抗蚀性综合指数见表6。

表6 不同林龄巨桉林地土壤抗蚀性综合指数

项目	林地类型			
	1年生林	2年生林	4年生萌芽1a林	裸露地(对照)
第1主成分	76.754	55.828	10.855	8.775
第2主成分	89.209	50.434	80.387	63.201
第3主成分	-24.288	24.648	8.790	-5.420
土壤抗蚀性综合指数	67.487	50.488	29.518	21.799

土壤抗蚀性强弱与植物类型、林分类型及植被覆盖度有关^[27]。从表6可看出:各样地土壤抗蚀性强弱表现为:1年生林地>2年生林地>4年生萌芽1a林地>裸露地,即种植巨桉后林地土壤抗蚀性较裸露地增强,但随着巨桉林种植年限的延长,土壤抗蚀性减弱。这可能与当地巨桉林每年冬季均发生冻害有关。1年生巨桉仅尾梢受冻害,2年生巨桉受冻害较1年生巨桉严重,4年生巨桉受冻害较1年生、2年生巨桉严重,该林地巨桉地上部枝梢全部冻死,当年春季从根颈部重新萌芽生长,林分郁闭度比其它2个样地小,对雨水的抗冲击能力小,所以土壤抗蚀性弱。

3.4 土壤抗蚀性指标相关关系

对4大类16个土壤抗蚀性指标之间的相关性及其与土壤抗蚀性综合指数之间的相关性进行了分析(表7)。从表7中可看出:微团聚体类、水稳性团

聚体类以及无机黏粒类指标均与土壤抗蚀性综合指数显著相关或极显著相关;其中, $>0.25\text{ mm}$ 团聚体破坏率、分散系数和分散率与土壤抗蚀性综合指数呈负相关(相关系数分别为 -0.711^* 、 -0.931^{**} 、 -0.712^*),说明 $>0.25\text{ mm}$ 团粒破坏得越快,土粒分散的速度越快,土壤抗蚀性能越差,反之则强。 $>0.5\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量和 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量与土壤抗蚀性综合指数呈显著正相关(相关系数分别为 0.773^* 和 0.869^*),说明 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量越高,土壤抗蚀性能越好。团聚度和结构系数与土壤抗蚀性综合指数也均呈正相关(相关系数分别为 0.875^* 和 0.931^{**}),说明土壤颗粒分散得越快,抗蚀性能越差,团聚程度越强,抗蚀性越强。 $<0.05\text{ mm}$ 粉黏粒含量、 $<0.001\text{ mm}$ 粘粒含量和结构性颗粒指数均与土壤抗蚀性综合指数显著相关(相关系数分别为 0.766^* 、 0.685^* 、 0.754^*),说明 $<0.05\text{ mm}$ 粉黏粒含量和 $<0.001\text{ mm}$ 黏粒含量越高,土壤抗蚀性越强,反之则弱。土壤有机质含量与土壤抗蚀性综合指数无显著相关,这与其他学者的相关研究存在差异^[28-29],作者分析可能是由于稀土采矿区土壤有机质含量过低的缘故。

表7 土壤抗蚀性指标及其与土壤抗蚀性综合指数(Y)之间的相关系数

项目	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	I ₆	II ₁	II ₂	II ₃	II ₄	II ₅	III ₁	III ₂	III ₃	III ₄	IV ₁	Y
I ₁	1																
I ₂	0.977**	1															
I ₃	0.948**	0.922**	1														
I ₄	-0.966**	-0.954**	-0.927**	1													
I ₅	0.579*	0.493	0.598*	-0.584*	1												
I ₆	0.683*	0.695*	0.590*	-0.628*	0.041	1											
II ₁	-0.602*	-0.705*	-0.520	0.502	0.120	-0.764*	1										
II ₂	0.602*	0.705*	0.520	-0.502	-0.120	0.764	-1.000**	1									
II ₃	0.524	0.666*	0.490	-0.474	0.219	0.389	-0.774*	0.774*	1								
II ₄	-0.863*	-0.853*	-0.759*	0.837*	-0.677*	-0.461	0.508	-0.508	-0.620	1							
II ₅	0.231	0.261	0.117	-0.193	-0.179	0.743*	-0.519	0.519	0.184	-0.126	1						
III ₁	0.370	0.528	0.314	-0.348	-0.097	0.352	-0.727*	0.727*	0.835*	-0.409	0.281	1					
III ₂	-0.098	0.078	-0.082	0.173	-0.273	0.126	-0.536	0.536	0.712*	0.075	0.168	0.605*	1				
III ₃	0.191	0.373	0.129	-0.139	-0.109	0.252	-0.664*	0.664*	0.860*	-0.255	0.261	0.897**	0.848*	1			
III ₄	0.413	0.558	0.336	-0.395	-0.075	0.366	-0.705*	0.705*	0.788*	-0.442	0.275	0.991**	0.511	0.854	1		
IV ₁	-0.599*	-0.616	-0.577*	0.715*	-0.397	-0.078	0.156	-0.156	-0.270	0.587	0.078	-0.367	0.318	-0.100	-0.430	1	
Y	0.773*	0.869*	0.701	-0.711*	0.177	0.753	-0.931**	0.931**	0.875*	-0.712*	0.406	0.766*	0.477	0.685*	0.754*	-0.329	1

注: **和*分别表示该行与对应列二者在 $P<0.01$ 和 $P<0.05$ 水平上差异显著。

根据上述分析,综合前人研究成果,并依据当地实际情况,可以得出赣县稀土采矿区土壤抗蚀性最佳评价指标为:分散系数、团聚度、 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量、 $>0.5\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量、 $<0.05\text{ mm}$ 粉黏粒含量、 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体破坏率

和 $<0.001\text{ mm}$ 黏粒含量。

3.5 土壤抗蚀性评价模型构建

为了更好地反映各指标与土壤抗蚀性之间的关系,以上述7个土壤抗蚀性最佳评价指标 $I_1(X_1)$ 、 $I_2(X_2)$ 、 $I_4(X_3)$ 、 $II_1(X_4)$ 、 $II_3(X_5)$ 、 $III_1(X_6)$ 、 III_3

(X_7)为自变量,以土壤抗蚀性综合指数(Y)为因变量进行回归分析,得出稀土采矿区土壤抗蚀性综合评价方程为:

$$Y = 0.309X_1 + 0.038X_2 - 0.161X_3 - 0.643X_4 + 0.491X_5 - 0.0328X_6 + 0.129X_7 + 41.637$$

因子决定系数 $R^2 = 0.9915$, $F = 49.84$,各因子间显著相关,方程拟合较好。由此可看出: >0.5 mm 水稳性团聚体含量、 >0.25 mm 水稳性团聚体含量、 >0.25 mm 团聚体破坏率、分散系数、团聚度、 <0.05 mm 粉黏粒含量和 <0.001 mm 黏粒含量 7 个指标可以较好地反映赣县稀土采矿区土壤的抗蚀性。

4 结论与讨论

4.1 赣县稀土采矿区土壤抗蚀性的最佳评价指标

用于反映赣县稀土采矿区巨桉林地土壤抗蚀性的指标可分为 3 大类:水稳性团聚体类、微团聚体类和无机黏粒类;其中,分散系数、团聚度、 >0.25 mm 水稳性团聚体含量、 >0.5 mm 水稳性团聚体含量、 <0.05 mm 粉黏粒含量、 >0.25 mm 团聚体破坏率和 <0.001 mm 黏粒含量为土壤抗蚀性最佳评价指标,但本研究未考虑土壤生物学指标。郑子成等^[19]的研究表明,土壤酸性磷酸酶可在一定程度上反映研究区土壤抗蚀性的强弱,在进行土壤抗蚀性评价时,可引入部分土壤生物学指标。

4.2 种植巨桉可以提高稀土采矿区土壤的抗蚀性

赣县稀土采矿区各样地土壤抗蚀性存在较大差异,土壤抗蚀性强弱表现为:1 年生林地 $>$ 2 年生林地 $>$ 4 年生萌芽 1 a 林地 $>$ 裸露地,即通过种植巨桉,可以提高稀土采矿区土壤的抗蚀性。因此,在赣县稀土采矿区可继续加强巨桉林的营造,进一步发挥其保持水土,改善生态环境的作用。

4.3 土壤抗蚀性随着巨桉林种植年限延长而减弱

赣县稀土采矿区种植巨桉后提高了土壤抗蚀性,但随着巨桉林种植年限的延长,土壤抗蚀性减弱,这可能与当地巨桉林每年冬季均发生冻害有关。本试验所选择的 3 个林龄中,林龄越长,冻害程度越严重,4 年生林地巨桉地上部枝梢全部冻死,当年春季从根颈部重新萌芽生长,故树冠覆盖度较小,造成水土冲刷较严重,土壤抗蚀性减弱。因此,建议在稀土采矿区进行桉树生态恢复林营造时,应尽量选择耐寒性相对较强的桉树品种,如韦赤桉 3 号 (*E. wetarensis* \times *E. camaldulensis*)。

4.4 构建了稀土采矿区土壤抗蚀性评价模型

以赣县稀土采矿区 7 个土壤抗蚀性最佳评价指

标,即 >0.5 mm 水稳性团聚体含量 (X_1)、 >0.25 mm 水稳性团聚体含量 (X_2)、 >0.25 mm 团聚体破坏率 (X_3)、分散系数 (X_4)、团聚度 (X_5)、 <0.05 mm 粉黏粒含量 (X_6) 和 <0.001 mm 黏粒含量 (X_7) 为自变量,以土壤抗蚀性综合指数 (Y) 为因变量进行回归分析,得出稀土采矿区土壤抗蚀性综合评价方程为:

$$Y = 0.309X_1 + 0.038X_2 - 0.161X_3 - 0.643X_4 + 0.491X_5 - 0.0328X_6 + 0.129X_7 + 41.637$$

可为构建稀土采矿区土壤抗蚀性评价指标体系提供依据。

4.5 土壤有机质含量不能很好反映该区土壤的抗蚀性

土壤有机质是土壤的重要组成部分,不仅能提供植物需要的养分,增强土壤的保肥能力,而且还是土壤水稳性结构的胶结剂,能增加土壤疏松度和通透性,促进团粒结构的形成,从而增强土壤的抗蚀能力^[18];但由于本试验区土壤有机质含量甚少,致使土壤有机质含量不能很好地反映该区土壤的抗蚀性。因此,在评价土壤抗蚀性时,必须结合研究区实际情况,构建本地区土壤抗蚀性评价模型,不能单独以某个因子来评价。此外,土壤抗蚀性与抗冲性关系密切,本文未开展土壤抗冲性的研究,这有待今后进一步研究。

参考文献:

- [1] 杨玉梅. 不同土地利用方式下土壤抗蚀性与抗冲性研究[D]. 雅安:四川农业大学, 2010
- [2] 史小梅. 紫色土丘陵区不同土地利用类型土壤抗蚀性特征研究[D]. 重庆:西南大学, 2008
- [3] 张振国, 黄建成, 焦菊英, 等. 安塞黄土丘陵沟壑区退耕地植物群落土壤抗蚀性分析[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 28-31
- [4] 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
- [5] 沈慧, 姜凤岐, 杜晓军, 等. 水土保持林土壤抗蚀性能评价研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(3): 345-348
- [6] 于东升, 史学正. 低丘红壤区旱地土壤渗透性与可蚀性定量关系的研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(3): 316-322
- [7] 周利军, 齐实, 王云琦. 三峡库区典型林分林地土壤抗蚀抗冲性研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(1): 186-188, 216
- [8] 朱立安, 李定强, 魏秀国, 等. 广东省土壤可蚀性现状及影响因素分析[J]. 亚热带水土保持, 2007, 19(4): 4-7, 16
- [9] Martha M B, Gerard G, Anne V D, et al. The response of soil erosion and sediment export to land-use change in four areas of Europe: the importance of landscape pattern[J]. Geomorphology, 2008, 98

- (3-4): 213-226
- [10] 赵洋毅,周运超,段旭. 黔中石灰岩喀斯特表层土壤结构性与土壤抗蚀抗冲性[J]. 水土保持研究,2008,15(2):18-21
- [11] 王玉杰,王云平,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
- [12] 陈瑜. 四川盆周山地杉木人工混交林土壤的抗蚀性能[D]. 雅安:四川农业大学,2010
- [13] 卢喜平,史东梅,蒋光毅,等. 两种果草模式根系提高土壤抗蚀性的研究[J]. 水土保持学报,2004,18(5):64-67,124
- [14] 何毓蓉,廖超林,张保华. 长江上游人工林与天然林土壤结构质量及保水抗蚀性研究[J]. 水土保持学报,2005,19(5):1-4
- [15] 张金池,陈三雄,刘道平,等. 浙江安吉主要植被类型土壤抗蚀性指标筛选及评价模型构建[J]. 亚热带水土保持,2006,18(2):1-5
- [16] 张振国,范变娥,白文娟,等. 黄土丘陵沟壑区退耕地植物群落土壤抗蚀性研究[J]. 中国水土保持科学,2007,5(1):7-13
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000
- [18] 潘树林,辜彬,杨晓亮. 土壤抗蚀性及评价研究进展[J]. 宜宾学院学报,2011,11(12):101-104
- [19] 郑子成,杨玉梅,李廷轩. 不同退耕模式下土壤抗蚀性差异及其评价模型[J]. 农业工程学报,2011,27(10):199-206
- [20] 黄义端. 我国几种主要地面物质抗侵蚀性能的初步研究[J]. 中国水土保持,1980(1):41-43
- [21] 郭培才,王佑民. 黄土高原沙棘林地土壤抗蚀性及其指标的研究[J]. 中国水土保持,1992(4):27-30
- [22] 王佑民,郭培才,高维森. 黄土高原土壤抗蚀性研究[J]. 水土保持学报,1994,8(4):11-16
- [23] 牛德奎,郭晓敏. 土壤可蚀性研究现状及趋势分析[J]. 江西农业大学学报,2004,26(6):936-940
- [24] 付允,贾亚男,蓝家程. 岩溶区不同土地利用方式土壤抗蚀性分析[J]. 水土保持研究,2011,18(5):5-9
- [25] 任改,张洪江,程金花,等. 重庆四面山几种人工林地土壤抗蚀性分析[J]. 水土保持学报,2009,23(3):20-24
- [26] 徐泉斌,傅瓦利,孙璐,等. 三峡库区消落带土壤抗蚀性研究[J]. 水土保持学报,2009,16(5):13-18
- [27] 刘洋,李春阳,龙翼. 岷江源头区农林复合景观变化对土壤侵蚀强度的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(7):232-236
- [28] 郭培才,王佑民. 黄土高原沙棘林地土壤抗蚀性及其指标的研究[J]. 西北林学院学报,1989,4(1):80-87
- [29] 安和平. 北盘江中游地区土壤抗蚀性及预测模型研究[J]. 水土保持学报,2000,4(4):38-42