

三峡库区消落带土壤抗蚀性研究^{*}

徐泉斌, 傅瓦利, 孙璐, 谭波, 王小阳

(西南大学 地理科学学院, 重庆 北碚 400715)

摘要:2009 年三峡大坝蓄水消落带形成后,其原始的生态环境本底状况不复存在,一些重要的生态环境参数,数据可能无法获得。通过对 2008 年 7 月在三峡库区消落带不同地段、不同高程(145 ~ 175 m)取的 28 个土样进行土壤理化性质分析。从选取的 15 个土壤抗蚀性指标中经过主成分分析变换后,提取 4 个主成分因子,能够反映特征根大部分信息(89.39%),分别为土壤水稳性团聚体类、土壤无机胶粒类、团聚类、有机质及水稳性指数 4 类因子。通过各主成分贡献率作为权重系数得到了三峡库区消落带土壤抗蚀性综合指数计算方程,从而求出土壤抗蚀性综合指数。根据几大类因子和抗蚀性综合指数进行相关分析,发现三峡库区的土壤有机质含量较低(平均 15.88 g/kg),其胶结物质主要是无机黏粒 < 0.001 mm,与抗蚀性综合指数相关系数为 0.629。这说明消落带无机黏粒 < 0.001 mm 的含量对土壤抗蚀性能影响较大。

关键词:三峡库区; 消落带; 土壤抗蚀性; 主成分分析; 相关分析

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2009)05-0013-06

Study on Soil Anti-erodibility for the Water Level-fluctuating Zone in Three Gorges Reservoir Area

XU Quan-bin, FU Wa-li, SUN Lu, TAN Bo, WANG Xiao-yang

(College of Geographic Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract:With the formation of water-level-fluctuating zone of the Three Gorges reservoir area in 2009, its original status of the ecological environment will no longer exists, a number of important parameters and data of the ecological environment may not be able to access. Based on the 28 soil samples which were taken from the different lots and different elevation (145 ~ 175 m) of the water level-fluctuating zone of the Three Gorges reservoir area in the July 2008, this article analyzed the soil anti-erodibility of 28 soil samples. 15 indexes were used to analyze the soil anti-erodibility by means of PCA and obtained the 4 categories of water-stable aggregate type, inorganic colloid type, aggregate type, and organic and index of soil water-stable type that reflect 83.39% of the information of the eigenvalues. Through the contribution rate of the four principal component factor as the principal component weighting coefficients, soil anti-erodibility comprehensive index calculation equation can be obtained and PCA comprehensive exponent of anti-erodibility index can be calculated. According to correlation analysis of the several soil anti-erodibility factor and PCA comprehensive exponent of anti-erodibility index, we can discover that the soil organic matter content in the water level-fluctuating zone of the Three Gorges reservoir area is very lower (an average of 15.88 g/kg), the main cement material is < 0.001 mm inorganic clay, its correlation coefficient is 0.629 with the PCA comprehensive exponent of anti-erodibility index. This shows that inorganic clay < 0.001 mm content of water-level-fluctuating have great influence on soil anti-erodibility.

Key words:Three Gorges reservoir area; water level-fluctuating zone; soil anti-erodibility; principal component analysis; correlation analysis

^{*} 收稿日期:2009-04-22

基金项目:国家自然科学基金项目(40701179)

作者简介:徐泉斌(1982-),男,湖南郴州人,硕士,主要从事土地生态与土壤环境方面研究。E-mail: xuqb@swu.edu.cn

通信作者:傅瓦利(1954-),女,重庆人,博士,教授,主要从事土地生态和土壤地理研究。E-mail: fuwali@swu.edu.cn

三峡水库消落带是因水库调度引起水库水位变动而使库区周围土地周期性地出露于水面形成垂直高差为 30 m 的一段湿地生态系统统和陆生生态系统交替控制的过渡地带^[1]。它是水、陆生态系统物质转换的活跃地带,是典型的生态脆弱区,其面积大约为 348.97 km²。由于此区面积大,每年周期性的水位涨落而使水土流失加剧,这对三峡库区的生态环境和长江航运产生较大的负面影响。土壤侵蚀的发生与土壤抗蚀性密切相关,土壤抗蚀性是指土壤抵抗水的分散和悬浮的能力,其强弱取决于土粒间的胶结力及土粒和水的亲和力^[2],即土壤对侵蚀的易损性或敏感性的倒数^[3],是与土壤理化性质密切相关的评定土壤抵抗侵蚀能力和治理水土流失必须具备的重要参数之一。2009 年三峡大坝蓄水消落带形成后,其原始的生态环境本底状况不复存在,一些重要的生态环境参数,数据可能无法获得,该文是在 2008 年 7 月通过对三峡水库消落带小江流域范围两个面积较大的区县(开县、云阳),根据不同的垂直高程(145 ~ 175 m)进行取样分析,这为今后研究消落带生态环境在受淹前后的变化情况,了解不同水淹情况对土壤抗侵蚀性的影响状况,为三峡水库进行生态环境建设,水土流失防治提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于重庆市云阳,开县小江流域境内,属亚热带季风气候,全年气候温和,雨量充沛,无霜期长,多年平均气温 18.2℃,平均降雨量 1 100 mm。三峡库区消落区土壤类型主要有冲积土和水稻土、紫色土、黄色石灰土和黄壤。

2 研究材料与方法

2.1 土壤样品的采集与测定

在三峡库区消落带不同的高程 145 ~ 175 m(垂直分布)地段上进行取样。土壤基本情况如表 1。按土壤剖面分为 A、B 层。土壤容重采用环刀法,土壤机械组成采用比重计法,土壤微团聚体采用吸管法,土壤有机质采用高温外热重铬酸钾氧化法,各级风干团聚体和水稳性团聚体含量采用干筛法、湿筛法^[4]。水稳性指数是选取 7 ~ 10 mm 的土壤团聚体 50 粒,均匀放在直径 5 mm 孔径的土壤筛上静置在水中,每隔 1 min 记录在静水中崩解的土粒数,连续记录 10 min,然后通过计算得到^[5]。

2.2 土壤抗蚀性评价指标选取

在室内实验的基础上并结合前人研究土壤抗蚀性常用的指标^[13-15],共选取 3 大类 15 个指标。

无机黏粒类:

- (1) <0.05 mm 粉黏粒含量 % (X_1);
- (2) <0.01 mm 物理性黏粒含量 % (X_2);
- (3) <0.001 mm 黏粒含量 % (X_3);
- (4) 结构性颗粒指数 (X_4) = 黏粒 (<0.001 mm) 含量 % / 粉粒 (0.001 ~ 0.05 mm) 含量 %;

团团聚体及微团聚体类:

- (5) >0.25 mm 水稳性团聚体含量 % (X_5);
- (6) >0.5 mm 水稳性团聚体含量 % (X_6);
- (7) >0.25 mm 团聚体破坏率 % (X_7) = (干筛 >0.25 mm - 湿筛 >0.25 mm) / (干筛 >0.25 mm) × 100;
- (8) >0.5 mm 团聚体破坏率 % (X_8) = (干筛 >0.5 mm - 湿筛 >0.5 mm) / (干筛 >0.5 mm) × 100;
- (9) 团聚体分散率 % (X_9) = 微团聚体 (<0.05 mm) 分析值 / 机械组成 (<0.05 mm) 分析值 × 100;
- (10) 分散系数 % (X_{10}) = 微团聚体 (<0.001 mm) 分析值 / 机械组成 (<0.001 mm) 分析值 × 100;
- (11) 团聚度 % (X_{11}) = (>0.05 mm 微团聚体分析值) - (>0.05 mm 机械组成分析值) / (>0.05 mm 微团聚体分析值) × 100;

$$(12) \text{水稳性指数} (X_{12}) = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i k_i) + p_j}{A}$$

式中: p_i ——第 i 分钟分散土粒数; k_i ——第 i 分钟的校正系数; p_j ——10 min 内没有分解的土粒数; A ——试验的总土粒数。

$$(13) \text{平均重量直径} (X_{13}) = \frac{\sum_{i=1}^n (r_i w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

式中: \bar{r}_i ——某粒级团聚体平均直径; w_i ——某粒级团聚体重量; 平均重量直径指各粒级水稳性团粒直径以其重量百分比为权数而求得的平均值(mm)。

$$(14) \text{几何平均直径} (X_{14}) = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^m (w_i \ln \bar{r}_i)}{\sum_{i=1}^m w_i} \right],$$

\bar{w}_i, \bar{r}_i 代表意义同(13)式;

有机胶体类:

$$(15) \text{有机质含量} (X_{15}) = \frac{\text{有机质质量(g)}}{\text{土壤样本质量(kg)}};$$

3 结果与讨论

土壤抗蚀性(Anti-erodibility)指土壤抵抗侵蚀营力对其分散和搬运作用的能力。土壤抗蚀性的强弱与土壤内在的物理和化学性质密切相关,包括

土壤的颗粒组成、团聚体的稳定性、有机质、渗透率、紧实度、黏土矿物的性质及化学成分等^[6-7]。

土壤中有有机质和无机胶体含量愈多,土壤抗蚀性愈强。抗蚀性大小主要取决于土壤对水的亲和力以及土粒间的胶结力。胶结力越小与水亲和力越大

的土壤容易被水分散和悬浮,土壤结构体易遭破坏并解体,形成细小颗粒堵塞土壤孔隙,降低渗透速度,引起地表泥泞,为径流汇集、冲击分散土粒发生侵蚀而创造了条件。抗蚀性是土壤侵蚀研究的重要内容之一^[8-9]。

表 1 各研究剖面基本特征

土样号	土层	采样地点	坡度/(°)	海拔/m	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	pH(水)
1	A	云阳县人和镇	3	149	1.59	13.53	7.96
	B		3	149	1.81	5.07	8.30
2	A		3	151	1.52	10.01	8.14
	B		3	151	1.69	2.73	8.27
3	A		10	160	1.16	19.11	8.02
	B		10	160	1.50	5.29	8.20
4	A	云阳县高阳镇五里坡	20	175	1.34	11.97	8.37
	B		20	175	1.45	8.75	7.99
5	A		16	149	1.68	40.47	6.52
	B		16	149	1.57	23.24	7.08
6	A		50	156	1.52	22.58	7.12
	B		50	156	1.61	14.94	7.52
7	A		10	160	1.79	4.55	7.52
	B		10	160	1.67	20.91	7.38
8	A		5	175	1.74	22.48	7.70
	B		5	175	1.64	13.99	8.15
9	A	开县渠口镇铺溪村	35	150	1.21	21.84	7.69
	B		35	150	1.34	14.94	7.95
10	A		5	156	1.02	22.12	7.76
	B		5	156	1.35	14.86	8.02
11	A		5	170	1.66	17.82	8.04
	B		5	170	1.36	19.25	8.17
12	A	云阳县养鹿乡同林坝	15	152	1.43	22.66	7.77
	B		15	152	1.10	19.80	7.88
13	A		5	156	1.26	17.25	8.06
	B		5	156	1.64	13.84	8.21
14	A		5	170	1.51	13.31	8.05
	B		5	170	1.59	7.28	8.24

3.1 三峡库区消落带土壤抗蚀性衡量指标的主成分分析

土壤抗蚀性的影响因素多而复杂,不同研究区域所选用的指标有一定的差异。单一指标只能反映土壤对侵蚀营力的相对敏感程度,无法定量求取一定侵蚀力下的土壤侵蚀量,因此,用多组指标组合更能全面地反映土壤的实际抗蚀能力。表 2 中的指标都不同程度地反映了土壤的抗蚀能力,虽然信息较丰富,但却显得冗繁复杂,且有些指标相互间表现出一定的关联性。因此,研究以土壤理化性质测定结

果为基础,采用 SPSS 软件主成分分析方法,进行土壤抗蚀性指标的主成分分析。以将冗繁的原始指标简化为少数的几个综合指标,且尽可能保存原有多指标的信息,以确定消落带影响土壤抗蚀性的关键指标并对土壤的抗蚀能力结果与讨论。

从表 3 可以看出,前三个主成分累积方差贡献率大于 80%,符合主成分分析要求。前四个主成分累积方差贡献率达 89.39%,表明所提取的 4 个主成分能反映土壤的抗蚀能力强弱。其中第一主成分的方差贡献率最大 46.98%,第二主成分的方差贡

表 2 不同高程土壤抗蚀性指标

土样号	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅
1-A	9.40	66.81	35.49	16.36	60.33	42.00	34.61	52.56	43.87	9.46	53.05	0.47	1.04	0.43	13.53
1-B	10.39	62.35	37.41	20.00	46.69	27.39	51.62	71.26	69.40	26.27	33.63	0.07	0.71	0.30	5.07
2-A	7.91	54.72	29.75	16.89	46.61	31.39	50.23	64.85	58.40	26.78	33.45	0.35	0.86	0.33	10.01
2-B	3.73	47.26	19.28	8.57	35.65	26.59	60.19	69.39	75.44	32.89	18.04	0.05	0.70	0.27	2.73
3-A	3.12	51.99	24.95	6.38	58.62	52.07	30.74	32.56	66.00	12.33	26.91	0.97	1.61	0.59	19.11
3-B	4.15	51.82	24.87	8.70	54.32	43.82	36.56	43.87	32.16	27.75	42.18	0.61	1.00	0.41	5.29
4-A	5.18	53.25	25.28	10.78	51.17	40.05	38.20	46.41	60.08	31.82	31.26	0.77	1.19	0.43	11.97
4-B	5.18	49.08	19.05	11.79	48.03	38.13	41.93	49.33	60.84	26.00	27.40	0.10	0.96	0.38	8.75
5-A	16.43	69.85	45.20	30.77	56.33	40.83	41.50	56.55	39.94	22.89	58.18	0.60	0.93	0.39	40.47
5-B	18.51	74.05	47.31	33.33	43.20	22.82	55.42	76.14	63.17	16.44	51.25	0.16	0.46	0.25	23.24
6-A	18.49	80.13	45.20	30.00	54.68	35.15	42.97	62.70	48.51	8.22	67.50	0.20	1.07	0.39	22.58
6-B	17.49	74.06	47.31	30.91	36.28	20.13	62.78	79.17	69.11	23.07	46.86	0.06	0.47	0.23	14.94
7-A	11.33	76.23	43.26	17.46	27.53	16.17	71.75	83.25	74.05	28.93	45.41	0.06	0.57	0.22	4.55
7-B	20.61	70.08	47.41	41.67	45.42	25.43	53.83	73.97	64.82	17.58	45.17	0.11	0.58	0.28	20.91
8-A	17.53	74.25	45.37	30.91	70.85	60.18	27.81	38.21	70.28	43.31	46.15	0.71	2.73	1.03	22.48
8-B	16.49	68.01	45.34	32.00	57.30	41.14	41.06	57.25	81.03	65.00	28.74	0.38	1.24	0.45	13.99
9-A	4.09	57.26	26.58	7.69	29.54	18.41	61.01	75.14	57.36	41.62	36.36	0.58	0.47	0.21	21.84
9-B	4.09	47.01	20.44	9.52	16.37	5.90	69.08	87.79	77.48	55.00	16.65	0.05	0.22	0.16	14.94
10-A	4.09	61.42	26.62	7.14	37.80	27.58	53.91	65.59	61.53	47.64	37.98	0.78	0.97	0.30	22.12
10-B	2.04	36.67	16.30	5.88	21.07	11.48	49.38	66.37	69.22	36.57	15.12	0.26	0.47	0.19	14.86
11-A	2.05	61.54	26.67	3.45	15.19	8.34	78.22	87.39	69.33	34.88	32.92	0.36	0.28	0.16	17.82
11-B	1.01	40.56	12.17	2.56	21.42	10.02	63.80	81.04	50.80	41.21	25.14	0.58	0.35	0.18	19.25
12-A	3.07	71.73	32.79	4.48	33.28	20.31	60.07	75.31	86.00	39.14	26.21	0.16	0.52	0.23	22.66
12-B	2.05	75.79	32.77	2.78	26.14	11.90	69.09	85.77	83.19	35.18	34.48	0.05	0.32	0.19	19.80
13-A	5.10	61.25	26.54	9.09	28.72	18.22	58.17	71.59	67.67	46.25	33.82	0.59	0.52	0.22	17.25
13-B	2.03	65.09	24.41	3.23	12.03	4.93	86.04	94.12	81.50	36.75	25.65	0.05	0.20	0.15	13.84
14-A	6.79	45.87	24.27	17.37	48.54	39.77	46.94	55.26	65.83	45.10	30.20	0.84	1.18	0.42	13.31
14-B	8.86	66.52	36.66	15.36	60.24	54.10	29.96	32.96	44.52	32.26	52.44	0.24	1.61	0.65	7.28

表 3 消落带土壤抗蚀性指标主成分分析(PCA)的(旋转后)因子负荷量、特征根和贡献率

主成分	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈		
Y ₁	- 0.073	0.125	0.222	0.252	0.877	0.955	- 0.918	- 0.953		
Y ₂	0.879	0.972	0.911	0.857	0.354	0.174	- 0.071	0.076		
Y ₃	- 0.010	- 0.054	- 0.120	- 0.096	- 0.253	- 0.185	0.271	0.227		
Y ₄	0.089	0.042	0.018	0.004	- 0.007	- 0.002	- 0.033	0.003		
主成分	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	特征根	累积贡献率/ %	
Y ₁	- 0.357	- 0.031	0.194	0.591	0.952	0.93	- 0.086	7.047	46.978	
Y ₂	0.078	- 0.293	0.707	- 0.358	0.166	0.212	0.313	3.711	71.719	
Y ₃	0.824	0.810	- 0.558	- 0.050	0.077	0.054	- 0.031	1.437	81.299	
Y ₄	- 0.219	0.160	0.215	0.617	0.058	0.049	0.883	1.214	89.393	

献率 24.74 % ,第三主成分的方差贡献率 9.58 % ,第四主成分的方差贡献率最小 8.10 % 。从第一主成分来看, X₅, X₆, X₇, X₈, X₁₃, X₁₄ 这 6 个因子负荷较大, 含量反映了水稳性土壤团聚体含量和破坏率对抗蚀性的显著。其中平均重量直径是指各粒级水稳性团粒直径以其重量百分比为权数而求出的平均值^[10], 它在一定程度上可以反映土壤水稳性团粒分

布状况的特征。平均重量直径增大, 土壤大团聚体含量就越高。团聚体破坏率越小, 主成分 Y₁ 值越大, 土壤抗侵蚀能力越强。从第二主成分来看, X₁, X₂, X₃, X₄, X₁₁ 这 5 个因子负荷较大反映了土壤无机胶粒因子对抗蚀性的影响, 其中 < 0.001 mm 胶粒含量最高, 说明黏粉粒含量越高, 第二主成分的值也就越大, 土壤抗侵蚀能力越强。从第三成分来看,

X_9, X_{10} 因子负荷较大,反映团聚类因子对土壤抗蚀性的影响,其中团聚体分散率最高,分散率为正,团聚度为负,两者含意相反,因此总体趋势相同。从第四成分来看, X_{15}, X_{12} 因子负荷较大,反映有机质、水稳性指数对土壤抗蚀性的影响负荷较大,其中有机质越高,土壤水稳性越好,抗蚀能力越强。但这部分对土壤抗蚀性的影响因子相对较小,因为有机质所占比重仅为 8.1%,这说明三峡消落带有机质对土壤胶结能力差,对土壤抗蚀性的影响相对较小。根据主成分分析结果可以看出,前 4 个主成分累积方差贡献率为 89.39%,可用主成分线性函数计算出消落带土壤各层次的 4 个主成分值。通过因子得分函数系数矩阵,因此可以得到 4 个主成分的表达式:

$$Y_1 = -0.046 X_1 - 0.01 X_2 + 0.005 X_3 + 0.017 X_4 + 0.142 X_5 + 0.17 X_6 - 0.154 X_7 - 0.172 X_8 + 0.031 X_9 + 0.086 X_{10} + 0.056 X_{11} + 0.091 X_{12} + 0.197 X_{13} + 0.189 X_{14} - 0.08 X_{15}$$

$$Y_2 = 0.228 X_1 + 0.244 X_2 + 0.22 X_3 + 0.207 X_4 + 0.042 X_5 + 0 X_6 + 0.036 X_7 + 0.07 X_8 + 0.122 X_9 + 0.002 X_{10} + 0.116 X_{11} + 0.135 X_{12} + 0.023 X_{13} + 0.034 X_{14} + 0.054 X_{15}$$

$$Y_3 = 0.079 X_1 + 0.081 X_2 + 0.042 X_3 + 0.054 X_4 - 0.029 X_5 + 0.006 X_6 + 0.063 X_7 + 0.047 X_8 + 0.496 X_9 + 0.503 X_{10} - 0.26 X_{11} + 0.027 X_{12} + 0.18 X_{13} + 0.166 X_{14} + 0.044 X_{15}$$

$$Y_4 = 0.048 X_1 - 0.006 X_2 - 0.032 X_3 - 0.043 X_4 - 0.078 X_5 - 0.069 X_6 + 0.04 X_7 + 0.064 X_8 - 0.121 X_9 + 0.179 X_{10} + 0.115 X_{11} + 0.475 X_{12} - 0.008 X_{13} - 0.017 X_{14} + 0.709 X_{15}$$

以各主成分所对应的方差贡献率 $\lambda_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 为权重,计算土壤抗蚀性的综合主成分指数,具体计算公式如下:

$$Y = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4} Y_1 + \frac{2}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4} Y_2 + \frac{3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4} Y_3 + \frac{4}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4} Y_4$$
$$Y = 0.526 Y_1 + 0.277 Y_2 + 0.107 Y_3 + 0.091 Y_4$$

表 4 三峡库区消落带土壤抗蚀性主成分分析综合指数

土样号	Y	土样号	Y	土样号	Y	土样号	Y
1-A	15.70	4-B	15.13	8-A	29.06	11-B	6.92
1-B	15.64	5-A	19.16	8-B	27.22	12-A	15.74
2-A	14.42	5-B	15.97	9-A	11.82	12-B	12.34
2-B	12.50	6-A	16.91	9-B	11.82	13-A	13.83
3-A	18.37	6-B	15.38	10-A	15.56	13-B	7.91
3-B	14.26	7-A	12.83	10-B	10.28	14-A	18.24
4-A	17.29	7-B	17.38	11-A	8.06	14-B	20.67

3.2 三峡库区消落带土壤抗蚀性指标相关分析

对其 15 个土壤抗蚀性指标与土壤抗蚀性综合指数进行相关性分析,计算出土壤抗蚀性综合指数各指标之间的相关系数,得出 Pearson 相关系数,相关分析的计算公式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

根据相关系数大小分析各指标之间的相互影响程度和各指标对土壤抗蚀性综合指数的影响状况。从表 5 可得,利用相关分析法分析几个主要因子:水稳性团聚体、黏粒状况、团粒类、有机质 4 大类抗蚀因子之间的关系,结果如表 5:黏粒类和水稳性团聚体和团聚类都和综合抗蚀指数呈现显著或极显著相关。 $>0.25 \text{ mm}$ 水稳性团聚体含量 X_5 、 $>0.5 \text{ mm}$ 水稳性团聚体含量(%) X_6 和综合抗蚀指数都呈极显著相关(相关系数 0.842** 和 0.815**, $n=28$), $>0.25 \text{ mm}$ 团聚体破坏率(%) X_7 、 $>0.5 \text{ mm}$ 团聚体破坏率(%) X_8 呈极显著负相关(相关系数 -0.738** 和 -0.680**, $n=28$)。说明大于 $>0.25 \text{ mm}$ 水稳性团聚体含量越高,土壤抗蚀性能越强,反之则弱。黏粒类 $<0.05 \text{ mm}$, $<0.001 \text{ mm}$ 和综合性抗蚀指数显著达到极显著相关(相关系数 0.598** 和 0.629**, $n=28$),说明黏粒含量 $<0.05 \text{ mm}$ 越高,土壤抗蚀性能越强,反之则弱。团聚类指标与土壤综合性抗蚀指数相关性不强。有机质和综合抗蚀性指数没有相关性。黏粒类 $<0.001 \text{ mm}$ 和 $>0.25 \text{ mm}$ 水稳性团聚体含量(%) X_5 、团聚度(%) X_{11} 达到极显著相关(相关系数 0.545** 和 0.709**, $n=28$),说明三峡库区黏粒类是水稳性团聚体的主要胶结物质。而有机质和抗蚀性综合指数和水稳性团聚体都没有相关性,这说明有机质不是库区主要的胶结物质,这与许多其它研究结果不同。可能是由于消落带土壤母质是冲积土和紫色土形成,土壤中的有机质含量偏低导致的。也就说明黏粒 $<0.001 \text{ mm}$ 含量越高,土壤的水稳性越好,土壤抗分散、抗侵蚀能力就越强。土壤水稳性指数 X_{12} 是表征土粒水稳性随时间变化的特征,是对土粒进行崩解试验计算的结果,是衡量土壤抗蚀指标之一。它与 $>0.5 \text{ mm}$ 水稳性团聚体含量(%) X_6 达到极显著相关(相关系数 0.506**, $n=28$),与 $>0.5 \text{ mm}$ 团聚体破坏率(%) X_8 呈极显著负相关(相关系数 0.576**, $n=28$),说明 $>0.5 \text{ mm}$ 水稳性团聚体含量越多,水稳性指数就越高,抗蚀性能就越好。水稳性指数 X_{12} 和有机质 X_{15} 表现出较低相关性,说明消落

带有机质对土壤抗性能影响较差。可能是因为库区土壤有机质含量偏低。表 5 中有机质含量只和全氮之间存在极显著的正相关关系(相关系数 0.808^{**}, $n=28$),但与其它抗蚀性指标并无相关性。

表 5 土壤各抗蚀性指标相关系数表

preason 相关系数	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	全氮
X ₁	1															
X ₂	0.877 ^{**}	1														
X ₃	0.648 ^{**}	0.903 ^{**}	1													
X ₄	0.543 ^{**}	0.848 ^{**}	0.986 ^{**}	1												
X ₅	0.246	0.470 [*]	0.545 ^{**}	0.558 ^{**}	1											
X ₆	0.112	0.303	0.369	0.386 [*]	0.963 ^{**}	1										
X ₇	0.041	-0.199	-0.323	-0.350	-0.919 ^{**}	-0.929 ^{**}	1									
X ₈	0.120	-0.064	-0.155	-0.181	-0.866 ^{**}	-0.948 ^{**}	0.955 ^{**}	1								
X ₉	0.106	-0.024	-0.154	-0.152	-0.479 ^{**}	-0.467 [*]	0.544 ^{**}	0.512 ^{**}	1							
X ₁₀	-0.278	-0.315	-0.327	-0.289	-0.339	-0.238	0.254	0.203	0.454 [*]	1						
X ₁₁	0.725 ^{**}	0.759 ^{**}	0.709 ^{**}	0.629 ^{**}	0.533 ^{**}	0.411 [*]	-0.344	-0.246	-0.569 ^{**}	-0.558 ^{**}	1					
X ₁₂	-0.293	-0.213	-0.159	-0.130	0.400 [*]	0.506 ^{**}	-0.510 ^{**}	-0.576 ^{**}	-0.395 [*]	0.125	0.035	1				
X ₁₃	0.123	0.266	0.326	0.325	0.845 ^{**}	0.915 ^{**}	-0.828 ^{**}	-0.862 ^{**}	-0.262	-0.047	0.305	0.529 ^{**}	1			
X ₁₄	0.166	0.306	0.358	0.354	0.841 ^{**}	0.906 ^{**}	-0.814 ^{**}	-0.842 ^{**}	-0.278	-0.078	0.343	0.472 [*]	0.987 ^{**}	1		
X ₁₅	0.324	0.304	0.283	0.260	0.051	-0.017	-0.026	0.075	-0.106	-0.054	0.342	0.292	0.017	0.038	1	
全氮	0.543 ^{**}	0.455 [*]	0.362	0.334	-0.006	-0.095	0.123	0.213	0.132	0.011	0.348	0.044	-0.065	-0.043	0.808 ^{**}	1
Y	0.382 [*]	0.598 ^{**}	0.629 ^{**}	0.641 ^{**}	0.842 ^{**}	0.815 ^{**}	-0.738 ^{**}	-0.680 ^{**}	-0.063	0.066	0.378 [*]	0.304	0.832 ^{**}	0.827 ^{**}	0.159	0.2

4 结 论

(1) 选用 15 项指标对研究区各地类土壤抗蚀性进行主成分分析,经主成分变换后,能够反映特征值的大部分信息(89.39%),得到 4 个主成分因子。第一主成分为水稳性团聚体因子,>0.5 mm 水稳性团聚体含量(%) X_6 、>0.5 mm 团聚体破坏率(%) X_8 、平均重量直径 X_{13} 最高;无机胶粒因子,<0.05 mm(%) X_1 、<0.01 mm(%) X_2 、<0.001 mm(%) X_3 最高;团聚类因子,团聚体分散率(%) X_9 、分散系数(%) X_{10} 最高;有机质类因子有机质 X_{15} 、水稳性指数 X_{12} 最高。

(2) 利用主成分分析法可以将 15 个土壤抗蚀性指标分为 4 类抗蚀因子,并通过各主成分贡献率作为权重系数组成三峡库区消落带土壤抗蚀性综合指数计算方程 $Y=0.526Y_1+0.277Y_2+0.107Y_3+0.091Y_4$ 。

(3) 三峡库区消落带土壤的胶结物主要以<0.001 mm 黏粒为主,而有机质对土壤胶结性较弱。土壤抗蚀性综合指数与>0.25 mm 水稳性团聚体含量 X_5 达到极显著相关(相关系数 0.842^{**}, $n=28$),与<0.001 mm 黏粒呈极显著相关(相关系数 0.629^{**}, $n=28$),而与团聚类因子、有机质含量呈现的相关性不强。因此认为>0.25 mm 水稳性团聚体含量、<0.001 mm 黏粒含量是反映消落带土壤抗蚀性较好的评价指标。综合分析表明各指标与土壤综合抗蚀能力和各指标之间有一定的规律性,各指标对土壤综合抗蚀能力有直接影响、间接影

响,又有各指标之间相互的影响,但难以简单描述,这与消落带地区土壤复杂情况有关。如与水淹情况,土壤母质,土壤地形,风化壳发育,土地利用情况等有关。土壤抗蚀性受土体固有特征和外界因素的综合影响,其规律还有待进一步研究。

参考文献:

[1] 牛志明,解明曙.三峡库区水库消落区水土资源开发利用的前期思考[J].科技导报,1998(4):61-621.

[2] 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(2):11-16.

[3] 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.

[4] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科技出版社,1978.

[5] 水利电力部农村水利水土保持司.水土保持试验规范[S].北京:水利电力出版社,1988.

[6] 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.

[7] Wu W D, Zheng S Z, Lu Z H,et al. Effect of plant roots on penetrability and anti-scourability of red soil derived from granite[J]. Pedosphere,2000,10(2):183-188.

[8] 胡建忠,张伟华,李文忠,等.北川河流域退耕地植物群落土壤抗蚀性研究[J].土壤学报,2004,41(6):854-863.

[9] 胡建忠,范小玲,王愿昌,等.黄土高原沙棘人工林地土壤抗蚀性指标探讨[J].水土保持通报,1998,18(2):25-30.

[10] 朱显谟.强化黄土高原土壤渗透及抗冲性的研究[J].水土保持学报,1993,7(3):1-10.