
试验研究

岩石边坡植被恢复成坪期人工土壤抗蚀性研究

潘树林^{1,2}, 辜彬², 杨晓亮²

(1. 宜宾学院 矿业与安全工程学院, 四川 宜宾 644007; 2. 四川大学 生命科学学院, 四川 成都 610064)

摘要: 以浙江省丹山市普陀区朱家尖机场周边岩石边坡植被恢复施工现场为研究对象, 通过添加鸡粪 (CM) 和泥炭土 (PS) 两种有机物, 组成两组不同配比成坪期人工土壤各 12 种。通过分析土壤机械组成、团聚体含量等指标, 计算了人工土壤的无机黏粒类、微团聚体类、水稳性团聚体类、有机胶体类 4 大类 11 小类的抗蚀性因子。然后利用主成分分析法分析各因子对土壤抗蚀性的贡献, 并据此对人工土壤抗蚀性和添加不同配比有机物的抗蚀效果进行了评价。结果表明: (1) 人工土壤抗蚀性指标可压缩为微团聚类、无机胶粒类和水稳性团聚类 3 大类, 其中团聚度、团聚状况、分散率为最佳抗蚀性评价指标; (2) 由于 PS 组不能满足主成分分析, 无法定量评价不同配比的抗蚀性效果; (3) 通过相关主成分线性函数及综合指标函数分析, CM 组处理质量比为: 原土/CM=2.41 时, 人工土壤抗蚀性能最佳。

关键词: 岩石边坡; 人工土壤; 成坪期; 主成分分析; 抗蚀性; 指标

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)06-0001-05

中图分类号: S157.1

Anti-erodibility of Synthetic Soils During Turf Stage of Rocky Slope Revegetation

PAN Shu-lin^{1,2}, GU Bin², YANG Xiao-liang²

(1. School of Mining and Safety Engineering, Yibin University, Yibin, Sichuan 644007, China;

2. College of Life Science, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract: Construction site of rocky slope surrounding Zhujiajian airport of Zhejiang Province was selected as the study site. Synthetic soils were constructed by adding chicken manure (CM) and peat soil (PS) with 12 different ratios. Based on the analyses of soil texture and aggregate composition, 11 anti-erodibility parameters, which can be further classified into four groups including inorganic clay, micro-aggregate, water-stable aggregate and organic colloid, were calculated and compared. Principal component analysis was then applied to determine the contribution of each anti-erodibility factor. Furthermore, the anti-erodibility of the synthetic soils with organic amendments was evaluated. The results showed that the anti-erodibility indicators should be re-grouped into three categories: microaggregate, inorganic clay, water-stable aggregate, in which aggregation degree, aggregation status, dispersal rate were the best indicators for assessing anti-erodibility. As the PS group could not meet the minimum requirement of principal component analysis, no quantitative evaluation of anti-erodibility was conducted for the synthetic soils with different mixing ratios. Linear function analysis of the principal components and composite indicators showed that synthetic soils of the CM group have the best anti-erodibility with soil : CM ratio of 2.41 (weight basis).

Keywords: rocky slope; synthetic soils; turf stage; principal component analysis; anti-erodibility; indicator

边坡植被恢复成坪期是指在工程中把人工土壤喷射到坡面后, 先锋草本植物成功生长的约 7~15 d 的时间。这时坡面几乎没有植被存在, 缺少植被层的根系锚固和冠层缓冲^[1]等保护作用, 在降雨或常规养护时, 尽管有一定人工防护措施, 但仍难抵抗坡面径流的侵蚀, 导致仅有 5~15 cm 厚人工土壤层的土壤

基质流失严重, 影响后期植被恢复。土壤抗蚀性是指土壤抵抗径流和降水的分散及悬浮能力, 是重要的土壤抵抗侵蚀力参数之一^[2]。所以, 只有保证人工土壤成坪期内的抗蚀性能, 并辅以人工防护措施, 才能有效减弱边坡植被恢复受降雨和坡面径流的不利影响。衡量土壤抗蚀性的指标很多, 由于研究区域及其

收稿日期: 2011-11-22

修回日期: 2012-02-09

资助项目: 国家自然科学基金项目“岩石边坡植被恢复人工土壤动态特征与调控机制研究”(40971057)

作者简介: 潘树林(1970—), 男(汉族), 四川省宜宾市人, 硕士, 副教授, 主要从事生态环境研究。E-mail: pslytq@yahoo.com.cn.

通信作者: 辜彬(1959—), 男(汉族), 四川省成都市人, 博士, 教授, 主要从事边坡生态工程研究。E-mail: amakusa@126.com.

它相关条件存在一定差异,因此抗蚀性指标的选用也多种多样。目前多数采用室内实验来评价土壤抗蚀性^[3-4]。究竟选用哪种指标合适,取决于许多因素组合。因为影响因素多,所以选择多种指标组合才能更全面地反映土壤实际抗蚀能力。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

选择浙江省舟山市普陀区朱家尖机场的宕口边坡施工工程现场作为试验地(29°55′40″—29°55′48″N,122°21′16″—122°21′28″E),地属北亚热带南缘季风海洋气候,年均气温 16.2℃,年均降雨量 1 292.5 mm,年均风速 3.4 m/s。

1.2 试验设计

将试验地产鸡粪有机肥(CM)和泥炭土(PS)作为单一影响因素添加到原料土壤中,各原料基本理化性质详见表 1。在人工土壤有机质含量 10~100

g/kg 区间内设置 12 个级差,以此设计原土与有机添加物配比(干重比),并设置不添加任何有机质的对照组(CK),具体配比详见表 2。对所有处理均设置 3 个重复。

选取的岩石边坡坡度为 65°,坡面面积为 10 m²。坡面放置 2 组由 36 个 0.30 m×0.10 m×0.10 m 规格组成的联合土槽,利用 5~5.5 m³/h 混凝土喷射机和 12 m³ 空压机,将人工土壤采用干喷法喷满土槽,常规养护 18 d,然后采集土壤样品进行分析比较。

表 1 原料土基本理化指标

材料	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	pH 值	容重/ (g·cm ⁻³)
原土	10.34	2.61	2.44	4.83	1.90
PS	659.70	23.50	7.10	4.82	0.56
CM	353.60	37.70	16.50	8.62	0.86

注:原料土是红壤,质地是壤质砂土(按国际制土壤质地分类法)。CM 表示鸡粪有机肥,PS 表示泥炭土。下同。

表 2 原土与有机添加物试验处理的配比

处理	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CM	43.62	16.12	14.06	8.80	7.45	5.19	3.68	3.28	2.94	2.41	2.01	1.70
PS	91.68	65.34	34.89	30.15	26.52	19.42	17.81	14.73	11.81	10.87	9.58	8.55

注:配比采用重量比。

1.3 研究方法

采用 Yoder 法分析土壤结构、吸管法分析机械组成和微团聚体、K₂Cr₂O₇ 外加热法分析有机质含量^[5];团聚度值等^[6-7]计算公式为:

团聚状况 = (>0.05 mm 微团聚体分析值 - >0.05 mm 机械组成分析值) × 100%

团聚度 = (>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%

分散率 = (<0.05 mm 微团聚体分析值 / <0.05 mm 机械组成分析值) × 100%

分散系数 = (<0.001 mm 微团聚体分析值 / <0.001 mm 机械组成分析值) × 100%

结构性颗粒指数 = [黏粒含量(<0.001 mm) / 粉粒含量(0.001~0.05 mm)] × 100%

结构体破坏率 = (>0.25 mm 干筛团聚体分析值 - >0.25 mm 湿筛团聚体分析值) / >0.25 mm 干筛团聚体分析值 × 100%

1.4 数据处理

利用 SPSS 13.0 软件进行方差分析、相关分析和回归分析处理,利用 Excel 软件处理一般数据。

2 抗蚀指标选择

近些年来,许多学者将多项抗蚀性指标总结为无机黏粒类、微团聚体类、水稳性团聚体类、有机胶体类这 4 大类来评价土壤抗蚀性^[8-9]。由于条件所限,本研究选用了 4 类指标中 11 个重要的指标。其中无机黏粒类有: <0.05 mm 粉黏粒含量(X_1), <0.01 mm 物理性黏粒含量(X_2), <0.001 mm 胶粒含量(X_3),结构性颗粒指数(X_4);水稳性团聚体类有: >0.25 mm 水稳性团聚体含量 WSA(X_5),结构体破坏率(X_6);微团聚体类有:团聚状况(X_7),团聚度(X_8),分散率(X_9),分散系数(X_{10});有机胶体类:有机质(X_{11})。各指标计算值详见表 3。

3 评价方法选择

成坪期人工土壤抗蚀性评价指标确定后,就要分析各指标之间的相互作用和相互联系,指出它们的相对地位和相对影响,也就是所占的权重。目前采用的权重处理方法主要有专家评估法(德尔菲法)、频数统计分析法、等效益替代法、指标值法、因子分析法、相对系数法和层次分析法等^[10]。

在本研究中,虽然抗蚀指标体系比较全面,但繁

冗复杂,使用很不方便,而且有些指标相互间具有一定的关联性,信息重叠^[7],所以,考虑把原来的多个指标使用较少的新指标来综合反映,原指标的物理信息以线性组合形式来保存^[9]。

主成分分析法(principal component analysis, PCA)就是设法将原来变量重新组合成一组新的相互

间无关的几个综合变量,也就是数学上的一种降维方法,即从实际需要出发,选取几个较少的总和变量来更多反映原来变量信息的统计方法^[11]。

选用主成分分析法确定成坪期内岩石边坡植被恢复人工土壤抗蚀性综合指标,能够更好地评价成坪期人工土壤的抗蚀性。

表 3 成坪期人工土壤抗蚀性指标计算值

g/kg

处理	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}
Y_1	0.45	0.38	0.19	0.79	0.07	0.06	0.12	0.87	0.09	0.93	19.53
Y_2	0.54	0.43	0.17	0.68	0.08	0.10	0.22	0.82	0.14	0.92	24.57
Y_3	0.56	0.46	0.20	0.72	0.09	0.11	0.24	0.79	0.13	0.91	27.25
Y_4	0.54	0.45	0.16	0.56	0.08	0.16	0.35	0.71	0.09	0.91	30.96
Y_5	0.51	0.42	0.15	0.57	0.07	0.12	0.24	0.77	0.21	0.93	36.85
Y_6	0.52	0.43	0.14	0.55	0.07	0.18	0.38	0.65	0.20	0.93	49.00
Y_7	0.48	0.39	0.14	0.59	0.07	0.16	0.31	0.65	0.41	0.93	54.87
Y_8	0.48	0.40	0.14	0.58	0.06	0.21	0.40	0.57	0.44	0.93	63.32
Y_9	0.50	0.40	0.14	0.56	0.08	0.20	0.40	0.60	0.41	0.92	67.51
Y_{10}	0.46	0.36	0.09	0.40	0.07	0.21	0.39	0.54	0.75	0.93	79.55
Y_{11}	0.45	0.36	0.11	0.42	0.09	0.18	0.34	0.59	0.65	0.91	85.99
Y_{12}	0.42	0.34	0.08	0.38	0.05	0.17	0.30	0.59	0.74	0.95	97.16
N_1	0.56	0.48	0.22	0.81	0.03	0.05	0.11	0.91	0.02	0.97	17.32
N_2	0.56	0.47	0.21	0.78	0.04	0.07	0.17	0.87	0.10	0.96	21.87
N_3	0.56	0.46	0.23	0.79	0.04	0.05	0.12	0.90	0.09	0.95	29.77
N_4	0.55	0.46	0.22	0.90	0.06	0.06	0.13	0.89	0.09	0.94	32.79
N_5	0.54	0.46	0.20	0.83	0.04	0.03	0.07	0.94	0.09	0.96	36.25
N_6	0.57	0.47	0.22	0.85	0.05	0.04	0.09	0.94	0.06	0.95	50.89
N_7	0.58	0.49	0.23	0.94	0.06	0.10	0.23	0.83	0.07	0.93	56.77
N_8	0.60	0.50	0.24	0.91	0.05	0.10	0.25	0.83	0.08	0.95	63.78
N_9	0.51	0.44	0.18	0.89	0.05	0.06	0.12	0.89	0.07	0.95	68.36
N_{10}	0.43	0.37	0.17	0.78	0.04	0.01	0.01	0.98	0.08	0.95	76.40
N_{11}	0.51	0.44	0.20	0.80	0.05	0.03	0.06	0.95	0.12	0.95	88.70
N_{12}	0.52	0.44	0.20	0.79	0.04	0.05	0.11	0.90	0.08	0.96	94.64

注: X_{1-11} 表示 11 个抗蚀性评价指标。 Y_{1-12} 表示 CM 组的处理编号; N_{1-12} 表示 PS 组处理编号。下同。

4 抗蚀性指标的主成分分析

成坪期岩石边坡人工土壤抗蚀性分析总方差结果详见表 4—5。表中“原始相关矩阵特征值”有 3 项,一是各成分总的特征值;二是各因子方差占总方差的百分比;三是自上而下各因子方差占总方差的累积百分比。当主成分累积百分比不小于 80%,且各累积因子主成分特征值不小于 1 时,主成分分析有效。

4.1 抗蚀性指标筛选

4.1.1 CM 组抗蚀性指标筛选 如表 4 所示,主成分 1 和 2,2 和 3 之间的特征值差都比较明显,后面各主成分之间相差不明显,且前 5 个主成分的特征值都大于 1,其中旋转后的前 3 个主成分方差累积百分比占 96.32%,信息损失量仅为 4.68%,完全满足主成

分分析对信息损失量的要求。

通过主成分分析,可以用 3 个主成分代表原来的 11 个指标,且 3 个主成分分别有各自新的数值,主成分的重要部分由其中主成分系数较大的几个指标构成。此外,从表 5 得知 CM 组各主成分内各指标的系数还没能拉开,所以采用 SPSS 软件的最大方差法(Varimax 方法)进行旋转,使各指标系数向 0 和 1 两极分化^[7]。旋转后的主成分矩阵详见表 6。

如表 6 所示,通过主成分系数旋转后,各主成分的分量两极分化明显,因此,对主成分内涵分析更加方便。在第一主成分中 X_8 (团聚度), X_7 (团聚状况), X_9 (分散率)系数明显较高,且极为接近,其中团聚度和团聚状况为正,分散系数为负,由于分散率与前者含义相反,因此反映出的该主成分总体趋势相同,

说明第一主成分为微团聚因子。在第二主成分中, X_1 (<0.05 mm 粉黏粒含量) 和 X_2 (<0.01 mm 物理性黏粒含量) 系数明显较高, 故称为无机胶粒类因子。在第三主成分中, X_5 (>0.25 mm 水稳性团聚体含量 WSA) 和 X_6 (结构体破坏率) 系数明显较高, 其中 WSA 为正, 结构体破坏率为负, 但所表达的变化趋势一致, 故称为水稳性团聚类因子。

经过主成分分析, 可将衡量成坪期内 CM 组人工土壤抗蚀性的 11 个指标压缩为微团聚类、无机胶粒类和水稳性团聚类 3 大类。由于第一、二、三主成分的贡献率分别为 66.05%, 20.95% 和 9.32% (表 4), 第一主成分对于抗蚀性的影响远大于其他两主成分, 所以本研究选择团聚度、团聚状况、分散率 3 种微团聚类因子作为 CM 组最佳抗蚀性评价指标。

表 4 添加 CM 组与 PS 组人工土壤抗蚀性分析的主成分分析结果

类别	主成分	原始相关矩阵特征值			未旋转的因子载荷的平方和			旋转后的因子载荷的平方和		
		全部	所占比例/%	累积比例/%	全部	所占比例/%	累积比例/%	全部	所占比例/%	累积比例/%
CM 组	1	7.27	66.05	66.05	7.27	66.05	66.05	4.64	42.15	42.15
	2	2.30	20.95	87.01	2.30	20.95	87.01	3.74	33.98	76.13
	3	1.02	9.32	96.32	1.02	9.32	96.32	2.22	20.19	96.32
	4	0.28	2.53	98.86						
	5	0.08	0.74	99.60						
	6	0.03	0.31	99.91						
	7	0.01	0.07	99.99						
	8	0.00	0.01	100						
	9	0.00	0.00	100						
	10	0.00	0.00	100						
	11	0.00	0.00	100						
PS 组	1	6.04	54.91	54.91	6.04	54.91	54.91	5.91	53.75	53.75
	2	2.58	23.45	78.36	2.58	23.45	78.36	2.71	24.61	78.36
	3	0.90	8.18	86.54						
	4	0.78	7.10	93.63						
	5	0.44	3.99	97.63						
	6	0.19	1.73	99.36						
	7	0.05	0.46	99.81						
	8	0.02	0.14	99.96						
	9	0.00	0.04	100						
	10	0.00	0.00	100						
	11	0.00	0.00	100						

表 5 添加 CM 与 PS 人工土壤抗蚀性分析中未旋转的主成分矩阵

CM 组				PS 组		
抗蚀性指标	主成分 1	主成分 2	主成分 3	抗蚀性指标	主成分 1	主成分 2
X_3	0.979	-0.020	0.062	X_8	0.942	-0.014
X_{11}	-0.969	0.073	-0.139	X_7	0.936	0.001
X_{10}	-0.943	0.001	-0.269	X_9	-0.919	-0.023
X_9	0.912	-0.374	-0.096	X_2	0.899	-0.344
X_4	0.901	-0.204	0.032	X_1	0.880	-0.371
X_7	-0.810	0.528	0.204	X_3	0.814	-0.265
X_2	0.785	0.460	0.388	X_4	0.760	0.381
X_1	0.744	0.541	0.312	X_6	-0.498	-0.811
X_5	0.531	0.675	-0.510	X_5	0.516	0.798
X_8	-0.653	0.671	0.316	X_{11}	-0.284	0.698
X_6	-0.548	-0.655	0.519	X_{10}	-0.112	0.570

表 6 添加 CM 人工土壤抗蚀性分析中旋转后的主成分矩阵

抗蚀性指标	主成分 1	主成分 2	主成分 3
X_8	0.987	0.057	0.005
X_7	0.971	-0.173	-0.061
X_9	-0.911	0.369	0.120
X_4	-0.755	0.514	0.139
X_{11}	0.687	-0.680	-0.172
X_3	-0.681	0.655	0.262
X_2	-0.139	0.937	0.286
X_1	-0.078	0.891	0.377
X_{10}	0.585	-0.778	-0.121
X_5	-0.076	0.260	0.962
X_6	0.104	-0.258	-0.960

4.1.2 PS 组抗蚀性指标筛选 如表 4 所示, PS 组中主成分 1 和 2 之间的特征值差均比较明显, 后面各

主成分之间相差不明显;前 2 个主成分的特征值都大于 1,但旋转后的前 2 个主成分方差累积百分比占 78.36%,无法满足主成分分析对信息损失量的要求,因此,对于 PS 组,无法通过主成分分析法对其最佳抗蚀性指标筛选及抗蚀性评价,但通过分析结果,可以初步了解影响 PS 组人工土壤抗蚀性主要指标构成。

由表 5 可知,其两主成分各指标系已经拉开,且向 0 和 1 两极分化,无需运用最大方差法(varimax 方法)进行旋转。因此,PS 组抗蚀性指标筛选可参照分析结果(表 5)中的 2 个主成分各指标系数数值水平。在第一主成分(贡献率为 54.91%)中, X_8 (团聚度)、 X_7 (团聚状况)、 X_9 (分散率)系数较高,其中除分散率外都为正值,其三指标反映主成分趋势一致。在第二主成分(贡献率为 23.45%)中, X_6 (结构体破坏率)和 X_5 (>0.25 mm 水稳性团聚体含量 WSA)系数明显较高,其中结构体破坏率为负值,WSA 为正,两者反映出的该主成分趋势相同,即结构体破坏率越低,WSA 越高,抗蚀性越强。结合两主成分贡献率,可以初步认为,相对于其他指标,从第一主成分筛选出来的 3 个微团聚类指标可作为 PS 组人工抗蚀性评价主要参考指标,从第二主成分筛选出来的 2 个水稳性团聚类指标作为辅助参考指标,但其评价精度无法得到保障。

4.2 综合抗蚀性指标

根据表 4 可以得到 CM 组 3 个主成分(C_1, C_2, C_3)线性函数表达式:

$$C_1 = 0.979X_3 - 0.969X_{11} - 0.943X_{10} + 0.912X_9 + 0.901X_4 - 0.810X_7 + 0.785X_2 + 0.744X_1 + 0.531X_5 - 0.653X_8 - 0.548X_6$$

$$C_2 = -0.020X_3 + 0.073X_{11} + 0.001X_{10} - 0.374X_9 - 0.204X_4 + 0.528X_7 + 0.460X_2 + 0.541X_1 + 0.675X_5 + 0.671X_8 - 0.655X_6$$

$$C_3 = 0.062X_3 - 0.139X_{11} - 0.269X_{10} - 0.096X_9 + 0.032X_4 + 0.204X_7 + 0.388X_2 + 0.312X_1 - 0.510X_5 + 0.316X_8 + 0.519X_6$$

将各指标计算值直接代入 3 个方程式中,可以得到每一个鸡粪有机肥配比人工土壤抗蚀性的第一、二、三主成分值,通过这 3 个指标评价土壤的抗蚀性。从第一主成分来看,团聚度越大,团聚状况越好,分散率越低,第一主成分值越低,人工土壤抗蚀性越强;从第二主成分来看,无机胶粒含量越高,分散系数越低,第二主成分值越高,人工土壤抗蚀性越强;从第三主成分来看,结构体破坏率越低, >0.25 mm 水稳性团聚体含量水平越好,第三主成分值越低,人工土壤抗蚀性越强。

将 3 个主成分按其贡献率的大小计算综合指数,以综合指数评价土壤的抗蚀状况。具体计算为:

$$C = 0.661C_1 + 0.230C_2 + 0.093C_3$$

综合来看,综合评价指数越低,人工土壤抗蚀性越强,以此作为成坪期内人工土壤抗蚀性评价依据。

5 成坪期人工土壤抗蚀性评价

根据主成分分析结果,计算 CM 组各处理的 3 大主成分值及综合指数。从第一主成分值来看,处理 Y_{10} 和 Y_{12} 明显低于其他处理,其中以 Y_{10} 最低,其抗蚀性最好;从第二主成分值来看,处理 Y_9 和 Y_{10} 明显高于其他各处理,其中 Y_{10} 最高,该处理抗蚀性最好;从第三主成分值来看,处理 Y_{10} 和 Y_{11} 明显低于其他各处理,其中以 Y_{12} 最低,但 3 个处理数值水平相差不大,可以认为抗蚀性能相似。由此基本可以推出,处理 Y_{10} 抗蚀性能最强,这与综合指数评价结果一致,即当原土:CM=2.41 时,人工土壤抗蚀性最好。

从图 1 可以看出,主成分 2 和 3 数值变化曲线趋势较缓,与综合指数曲线相似度差,而主成分 1 数值变化曲线与综合指数曲线趋势一致,因此可将微团聚类因子作为成坪期内人工土壤最佳评价指标类,结合表 6 可知,团聚度、团聚状况和分散率这 3 个指标最佳,这与前面 CM 组抗蚀性指标筛选结果一致。

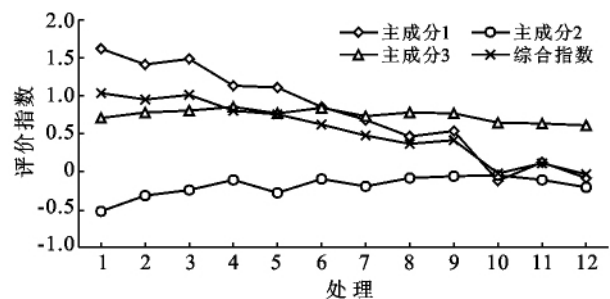


图 1 CM 组人工土壤抗蚀性指标曲线

6 结论

(1) 主成分分析能在成坪期人工土壤抗蚀性指标筛选与评价中起到很好的作用。

(2) 应用主成分分析,可以将 CM 组人工土壤抗蚀性的 11 个指标压缩为微团聚类、无机胶粒类和水稳性团聚类 3 大类,其中团聚度、团聚状况、分散率为最佳抗蚀性评价指标;

(3) PS 组人工土壤抗蚀评价可主要参考团聚度、团聚状况、分散率 3 种微团聚类因子,由于 PS 组不能满足主成分分析,其评价精度无法保障。

(下转第 10 页)

趋势,而 100 mm/h 降雨强度下,其变化趋势表现为先快速增加后缓慢上升趋势,也反映了降雨强度和雨滴打击对土壤团聚体破碎的影响。

(4) 流失团聚体平均重量直径(MWD)随降雨强度的增加而减小,反映了雨滴打击对团聚体的拆分作用。

[参 考 文 献]

- [1] 闫峰陵,史志华,蔡崇法,等. 红壤表土团聚体稳定性对坡面侵蚀的影响[J]. 土壤学报, 2007,44(4):577-583.
- [2] Amezketa E, Singer M J, Le Bissonnais Y. Soil aggregate stability: A review[J]. Journal of Sustainable Agriculture, 1999,14(2/3): 83-151.
- [3] 史奕. 有机胶结形成土壤团聚体的机理及理论模型[J]. 应用生态学报,2002,11(11):1495-1498.
- [4] 党亚爱,李世清,王国栋,等. 黄土高原典型土壤剖面土壤颗粒组成分形特征[J]. 农业工程学报, 2009,25(9): 74-78.
- [5] 张琪,方海兰,史志华,等. 侵蚀条件下土壤性质对团聚体稳定性影响的研究进展[J]. 林业科学, 2007, 43(10):77-82.
- [6] Legout C, Leguedois S, Le Bissonnais Y, et al. Splash distance and size distributions for various soils[J]. Geoderma, 2005,124(3/4):279-292.
- [7] Young R A, Wiersma J L. The role of rainfall impact in soil detachment and transport[J]. Water Resources Research, 1973,9(6):1629-1636.
- [8] Kinnell P I A. The mechanics of raindrop induced flow transport [J]. Australian Journal of Soil Research, 1990,28(4):497-516.
- [9] 周一杨,王恩姮,陈祥伟. 模拟降雨条件下黑土溅蚀与团聚体分选特征[J]. 水土保持学报, 2008,22(6):176-179.
- [10] 申艳,张晓平,梁爱珍,等. 黑土坡耕地土壤流失形态分析:以一次降雨为例[J]. 干旱地区农业研究, 2008,26(6):224-229.
- [11] 陈晓燕,牛青霞,周继,等. 人工模拟降雨条件下紫色土陡坡地土壤颗粒分布空间变异特征[J]. 水土保持学报, 2010,24(5):163-168.
- [12] 黄健,张惠琳,傅文玉,等. 东北黑土区土壤肥力变化特征的分析[J]. 土壤通报, 2005,36(5):659-663.
- [13] 王睿强,张志丹. 东北黑土水土流失研究概述[J]. 农业与技术, 2006,26(6):106-108.
- [14] 王玉玺,解运杰,王萍. 东北黑土区水土流失成因分析[J]. 水土保持科技情报, 2002(3):27-29.
- [15] 周佩华,张学栋,唐克丽. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀模拟试验大厅降雨装置[J]. 水土保持通报, 2000,20(4):27-30.
- [16] 张晓平,梁爱珍,申艳,等. 东北黑土水土流失特点[J]. 地理科学, 2006,26(6):687-692.
- [17] 詹敏,厉占才,信玉林. 黑土侵蚀区降雨参数与土壤流失关系[J]. 黑龙江水专学报, 1998(1):40-43.
- [18] 张奎奎,许靖华,卢秀琴,等. 黑龙江省土壤流失方程的研究[J]. 水土保持通报, 1992,12(4):9-18.
- [19] 史奕,陈欣,闻大中. 东北黑土团聚体水稳性研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2005,13(4):95-98.
- [20] Edwards A P, Bremner J M. Micro-aggregates in soils [J]. Journal of Soil Science, 1967,18(1):64-73.

(上接第 5 页)

(4) 由于 CM 和 PS 两种有机质添加物对于人工土壤抗蚀性评价指标筛选不同,所以其他种类有机质添加物种类作用效果有待于进一步研究。

(5) 通过各主成分线性函数和综合指标函数分析,CM 组中处理 Y_{10} 抗蚀性能最好,即质量比为原土/CM=2.41 时,人工土壤抗蚀性最好。

[参 考 文 献]

- [1] 李绍才,孙海龙,杨志荣,等. 岩石边坡喷播植草护坡工程的抗侵蚀效应[J]. 北京林业大学学报,2006,28(1):43-47.
- [2] 杨晓亮,李杰华,彭婷婷,等. 两种有机添加物对岩石边坡植被恢复人工土壤抗蚀性的影响[J]. 水土保持学报, 2009,23(1):21-25.
- [3] 阮伏水. 关于土壤可蚀性指标的讨论[J]. 水土保持通报,1996,16(6):68-72.
- [4] 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,2000,14(4):38-42.
- [5] 中国农学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业出版社,2000:150-172.
- [6] 李占斌,鲁克新,丁文峰. 黄土坡面土壤侵蚀动力过程试验研究[J]. 水土保持学报,2002,16(2):5-7.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 史晓梅,史东梅,文卓立. 紫色土丘陵区不同土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.
- [10] 沈慧,姜凤岐. 水土保持林土壤改良效益评价指标体系的研究[J]. 北京林业大学学报,2000,22(5):96-98.
- [11] 张文霖. 主成分分析在 SPSS 中的操作应用[J]. 市场研究,2005(12):31-34.