

护坡人工混凝土不同粒级团聚体分布特征及其抗蚀性研究

申 剑¹, 高家祯², 彭松涛³, 周明涛^{2*}, 张乃畅³

(1. 华电西藏能源有限公司, 西藏 拉萨 850000; 2. 教育部三峡库区生态环境工程研究中心/三峡大学, 湖北 宜昌 443002;
3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710000)

摘 要: 为了定量评价人工混凝土生态护坡基材的抗蚀性, 室内测定了其团聚体分布特征和各抗蚀性指标, 并与立地条件相似的自然土壤进行了对照分析。结果表明: 与自然土壤相比, 人工混凝土中 $> 0.25\text{ mm}$ 机械稳定性团聚体含量、 $> 0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量 $R_{0.25}$ 、平均重量直径 MWD 、几何平均直径 GWD 与有机质含量均显著提升, 可蚀性因子 K 、结构破坏率 PAD 、分形维数 D 与分散率均显著降低; 同时, 抗蚀性主成分值提高了 2.53 倍。这均证实人工混凝土团聚状况和团聚度有所改善, 抗蚀性较自然土壤有较大的提升。相关性分析表明 $> 0.25\text{ mm}$ 水稳性大团聚体含量 $R_{0.25}$ 和有机质含量与其他抗蚀性指标之间均存在极显著的相关性。综合分析可知, 由于添加了水泥和天然有机物料, 人工混凝土的水稳性大团聚体含量和有机质含量明显提升, 因此导致其稳定性与抗蚀性显著优于原材料之一的自然土壤。

关 键 词: 团聚体; 有机质; 主成分分析; 生态修复基材

中图分类号: S152.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2021)01-0157-08

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2019123101

申 剑, 高家祯, 彭松涛, 周明涛, 张乃畅. 护坡人工混凝土不同粒级团聚体分布特征及其抗蚀性研究 [J]. 土壤通报, 2021, 52(1): 157 - 164

SHEN Jian, GAO Jia-zhen, PENG Song-tao, ZHOU Ming-tao, ZHANG Nai-chang. Influence of Vegetation-growing Concrete on the Distribution and Anti-erodibility of Aggregates[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(1): 157 - 164

我国是世界上土壤侵蚀与水土流失最严重的国家之一, 其在边坡上的表现尤为明显。如何提高土壤的抗蚀性, 减轻水土流失, 一直是广大研究人员关注的热点。土壤的抗蚀性是土壤对侵蚀营力所表现出来的稳定性^[1], 是反映水土流失的重要指标, 除了与外在的气候条件、植被类型、耕作模式等有关外, 还与其内在的物理和化学性质密切相关, 如团聚体特性和有机质含量等^[2]。土壤团聚体是指原生细小土粒通过凝聚、胶结等作用而形成的基本结构单元, 其分布特征与土壤的侵蚀过程相关密切, 是衡量土壤抗蚀性的有效指示因子^[3-4]。人工混凝土由植生土、水泥、有机物料和绿化添加剂四种固相原材料按一定比例均匀混合后添加适量水而成。作为一种典型的人造复合土壤, 其可在裸露岩质坡体表面营造适宜的植被生境, 从而对边坡实施生态修复与浅层防护, 现已广泛应用于全国各地^[5]。现场应用实况已表明, 人工混凝土的抗蚀性明显要高于自

然土壤^[6], 但其提高的确切程度与本质, 尚缺乏具体的数据支撑与依据。

近年来, 针对不同地区和不同类型土壤的团聚体特征及抗蚀性, 前人已开展过众多研究, 并取得了一系列研究成果。白秀梅^[7]选用有机质含量、土壤颗粒组成、水稳性指数、分散系数等抗蚀性指标, 研究了关帝山林区土壤的抗蚀性能及内在影响因素。马帅等^[8]选取土壤团聚体平均重量直径、团聚体破坏率、团聚度等多个评价指标综合评价了不同植被类型下的土壤团聚体特征及其抗蚀性。唐骏等^[9]采用湿筛法测定了黄土区排土场土壤水稳性团聚特征, 表明植被恢复提高了土壤团聚性。曾全超^[10]对黄土高原典型草地的不同土壤团聚体分布特征与土壤可蚀性之间的关系进行了系统分析。谷忠元^[11]揭示了南方湘东地区土壤团聚体的分布规律及其影响稳定性的因素, 为土壤团聚体胶结机制和土壤侵蚀提供了理论依据。Delelegn^[12]认为任何土壤的退化首先表现

收稿日期: 2019-12-31; 修订日期: 2020-11-08

基金项目: 华电西藏能源有限公司科研基金 (12IJD201800018) 及国家重点研发计划基金项目 (2017YFC0504902-02) 资助

作者简介: 申 剑 (1973-), 男, 贵州毕节人, 硕士, 主要从事水电工程生态环境综合治理研究与管理。E-mail: Shenjian5588@sina.com

*通讯作者: E-mail: zmt@ctgu.edu.cn

于土壤团聚体结构的破坏。Tang^[13]运用土壤团聚体粒径参数和分形维数成功评估了土壤团聚体的稳定性。

众多研究为土壤抗蚀性的研究和评价提供了宝贵的经验,然而当前其研究对象多局限于自然土壤,鲜有在边坡上人造复合土壤团聚体及其抗蚀性定量分析的报道。因此,本文根据前人研究,针对人工混凝土土壤选取了若干个具有代表性的抗蚀性指标,测定分析了其团聚体分布特征和各抗蚀性指标的具体情况,并与原材料之一的自然土壤相对比。本文旨在深入了解人工混凝土土壤抗蚀性大小,期望为人造复合土壤团聚体的研究提供经验借鉴,为边坡生态修复中土壤的稳固提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

宜昌地处湖北省西南地区,介于 110°15′~112°04′E 和 29°56′~31°34′N 之间,属于中亚热带,年平均降雨量 992.1~1404.1 mm,多在夏季 6~7 月,雨热同期,全年积温较高,霜期较短,年平均气温 14~19℃。

试验选取宜昌地区峡州大道一侧的边坡为研究坡地,该边坡基岩为浅红色泥岩,2015 年夏末在坡面人工营造了一层厚约 15 cm 的人工混凝土土壤。边坡施工时,植生土取自该泥岩边坡附近的一自然土坡,水泥为强度等级 42.5 的普通硅酸盐水泥,有机物料为粒径小于 2 mm 的杉木锯末,绿化添加剂为三峡大学专利产品 LY-002 型绿化添加剂,四种固相原材料依次按干质量比 100:10:8:5 均匀混配^[5],再加入适量的水混合喷射在边坡上。经测定,制成的人工混凝土土壤容重为 1.45 g cm⁻³,天然含水率为 16.3%,孔隙率为 40.18%,pH 值为 7.4,对植物的生长无不良影响。试验同时选取植生土的取料场自然土坡为对照坡地,且所选取的对照坡地与人工混凝土土壤坡地的立地条件大体一致,即两边坡位均朝北,坡度约 58°,坡高约 2.6 m,植被覆盖度约 90%,植株高度变化幅度为 30~100 cm。

1.2 采样方法

2018 年 4 月分别在研究坡地与对照坡地中各选取 6 块植被生长良好的区域作为采样样地,单块样地大小设置为 1.5 m × 1.5 m,在样地土层深度 0~15 cm 范围内按 S 形随机采取 5 点组成一个样品,试验与

测量结果取平均值。取样时采集大土块,用塑料盒子盛装,小心搬运至实验室,风干至土壤塑限($\omega_p = 21.9\%$)以下后沿土壤自然结构面小心剥成直径为 10~12 mm 的小土块,同时剔除植物根系及小石粒。

1.3 评价指标

表征土壤团聚体特征及抗蚀性的指标很多,单一指标仅能反映土壤对侵蚀营力的相对敏感性,多种指标的组合则能较全面地反应土壤抵抗侵蚀作用的实际能力。因此,本文从 4 个方面选用如下多种评价指标。

(1) 机械稳定性团聚体类

$$M_{0.25} = W(r > 0.25) / W_T \quad (1)$$

式中: $M_{0.25}$ 表示 > 0.25 mm 机械稳定性团聚体含量(%), $W(r > 0.25)$ 表示粒径大于 0.25 mm 的机械稳定性团聚体质量, W_T 表示机械稳定性团聚体各粒径质量之和。

(2) 水稳性团聚体类

$$R_{0.25} = M(r > 0.25) / M_T \quad (2)$$

式中: $R_{0.25}$ 表示 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量(%), $M(r > 0.25)$ 表示粒径大于 0.25 mm 的水稳性团聚体质量, M_T 表示水稳性团聚体各粒径质量之和。

团聚体平均重量直径 MWD (mm) 和几何平均直径 GMD (mm) 计算公式如下:

$$MWD = \sum_i^n \bar{x}_i w_i \quad (3)$$

$$GMD = \exp \left(\sum_{i=1}^n \omega_i \ln x_i \right) \quad (4)$$

团聚体结构破坏率 PAD (%) 表示大团聚体 (> 0.25 mm) 通过湿筛破碎的程度。

$$PAD = \frac{> 0.25 \text{ mm 团聚体含量 (干筛-湿筛)}}{> 0.25 \text{ mm 干筛团聚体含量}} \times 100\% \quad (5)$$

土壤分形维数 D (Fractal dimension), 其计算公式为:

$$\lg \left[\frac{M(r < \bar{x}_i)}{M_T} \right] = (3 - D) \lg \left[\frac{\bar{x}_i}{x_{\max}} \right] \quad (6)$$

用 EPIC 方程来计算土壤可蚀性因子 K 值, 其公式为:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 S_a \left(1 - \frac{S_i}{100} \right) \right] \right\} \left[\frac{S_i}{C_1 + S_i} \right]^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \times \left[1 - \frac{0.7S_n}{S_n + \exp(-5.51 + 22.9S_n)} \right] \quad (7)$$

式中: $M(r < \bar{x}_i)$ 表示粒径小于 $\bar{x}_i$ 的水稳性团聚体质量; $\bar{x}_i$ 表示 i 粒级下水稳性团聚体的平均直径 (mm); $x_{\max}$ 表示水稳性团聚体的最大粒径, w_i 表示 i 粒径水稳性团聚体所占的比例。 S_a 为砂粒 (2 ~ 0.05 mm) 含量 (%); S_i 为粉粒 (0.05 ~ 0.002 mm) 含量 (%); C_i 为粘粒 (< 0.002 mm) 含量 (%); C 为有机碳含量 (%); S_n 为 $1 - S_a/100$ 。 K 为国际制单位 $t \cdot hm^2 \cdot h \cdot hm^{-2} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$ 。

(3) 微团聚体类

$$A_c = M_a(r > 0.05) - M_c(r > 0.05) \quad (8)$$

$$A_d = A_c / M_a(r > 0.05) \times 100\% \quad (9)$$

$$D_r = M_a(r < 0.05) / M_c(r < 0.05) \times 100\% \quad (10)$$

式中: A_c 表示团聚状况 (%), $M_a(r > 0.05)$ 表示 > 0.05 mm 微团聚体分析值, $M_c(r > 0.05)$ 表示 > 0.05 mm 土壤机械组成分析值; A_d 表示团聚度 (%); D_r 表示分散率 (%), $M_a(r < 0.05)$ 表示 < 0.05 mm 微团聚体分析值, $M_c(r < 0.05)$ 表示 < 0.05 mm 土壤机械组成分析值。

(4) 有机胶体类

有机质含量 (%), 为直接测得。

1.4 测定方法

机械稳定性团聚体粒径分布测定采用干筛法: 每次称 250 g 风干土样放置于套筛最上层, 套筛孔径依次为 7 mm、5 mm、3 mm、2 mm、1 mm、0.5 mm 和 0.25 mm, 将套筛放置在振筛机上振荡 10 min, 取筛上物称重。水稳性团聚体粒径分布测定采用 Yoder 湿筛法^[14]: 按干筛后各粒级土粒分布的质量百分比配制成 50 g 风干土样, 小心放入 5 mm、3 mm、2 mm、1 mm、0.5 mm 和 0.25 mm 的套筛最上层, 加水人工

振荡 10 min, 取筛上物, 烘干称重。土壤有机质采用重铬酸钾—外加热法测定, 土壤微团聚体与机械组成采用吸管法测定。

1.5 数据处理

数据统计分析使用 Excel 2013, 采用 SPSS 22.0 进行单因素方差分析 ($P < 0.05$) 和 Pearson 相关分析 (95% 水平以下)。

2 试验结果与分析

2.1 团聚体粒径分布特征

2.1.1 机械稳定性团聚体粒径分布特征 干筛法对土壤颗粒结构破坏较少, 主要测定的是土壤在自然状态下团聚体粒径的分布情况^[15]。自然土壤和人工混凝土土壤机械稳定性团聚体的粒径分布如图 1 所示。其中人工混凝土土壤 > 7 mm 团聚体含量最高, 占总数的 52.9%, 显著高于其他粒径 ($P < 0.05$); 其次为 7 ~ 5 mm 和 < 0.25 mm 团聚体含量, 分别约占总数的 15% 和 13%, 两者均显著高于 5 ~ 0.25 mm 团聚体的含量 ($P < 0.05$); 而 5 ~ 0.25 mm 含量中的 5 个不同粒径组之间差异不显著 ($P < 0.05$), 其中 3 ~ 2 mm 团聚体含量最少, 不足 2%。而自然土壤在粒径分布上同人工混凝土土壤具有一定的差异, 其中 > 7 mm 团聚体含量比人工混凝土土壤的含量少 11% 左右, < 0.25 mm 和 0.5 ~ 0.25 mm 两粒径团聚体的含量比人工混凝土土壤分别高约 8% 和 3% ($P < 0.05$); 但在 7 ~ 5 mm、5 ~ 3 mm、3 ~ 2 mm、2 ~ 1 mm、1 ~ 0.5 mm 这 5 个粒径团聚体的含量上, 人工混凝土土壤与自然土壤无显著差异。说明人工混凝土土壤相比自然土壤最主要的区别在于其 > 7 mm 机械大团聚体含量显著提高, 而 < 0.25 mm 小团聚体含量显著降低。

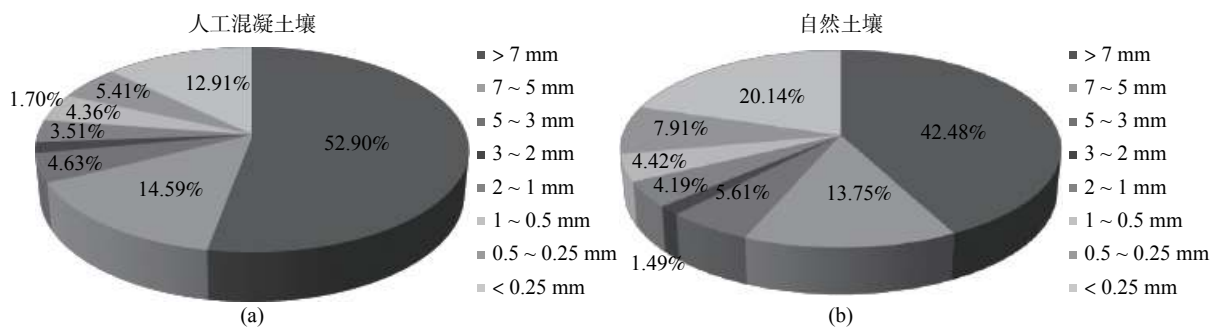


图 1 机械稳定性团聚体粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of mechanical stability aggregates

2.1.2 水稳性团聚体粒径分布特征 水稳性团聚体粒径的分布情况主要反映土壤在水力侵蚀破坏下的

稳定性^[16]。如图 2 所示, 人工混凝土土壤 > 5 mm 与 < 0.25 mm 两种水稳性团聚体粒径的含量较高, 分别

占到总数的 32% 与 50% 左右, 显著高于 5~0.25 mm 团聚体的含量 ($P < 0.05$); 中间 5 个粒径组团聚体的含量均不超过 5%, 相互之间无显著差异 ($P < 0.05$)。对比来看, 自然土壤水稳性团聚体的粒径分布同人工混凝土壤存在较大的区别, 其中 < 0.25 mm 团聚体含量最高, 达到 74% 左右, 显著高于人工混凝土壤的含量; 而 > 5 mm 团聚体的含量仅为 12%, 显著低

于人工混凝土壤含量 ($P < 0.05$); 但在 5~3 mm、3~2 mm、2~1 mm、1~0.5 mm、0.5~0.25 mm 这 5 个团聚体的含量上, 人工混凝土壤与自然土壤差异并不显著。表明相比自然土壤, 人工混凝土壤 > 5 mm 大粒径水稳性团聚体含量明显提高, 而小粒径团聚体含量降低。

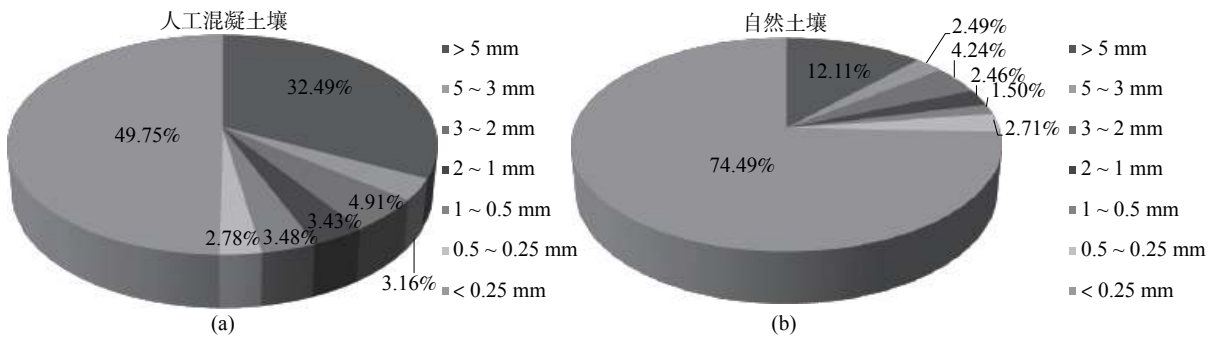


图 2 水稳性团聚体粒径分布
Fig.2 Particle size distribution of water stable aggregates

2.2 抗蚀性指标特征

经过测定, 人工混凝土壤与自然土壤两种不同土壤的各抗蚀性指标如表 1 所示。由表 1 可知, 人工混凝土壤与自然土壤的各抗蚀性指标间均存在差异显著 ($P < 0.05$)。在团聚体粒径分布上, 人工混凝土壤中 > 0.25 mm 机械与水稳团聚体的含量分别比自然土壤高 9.0% 和 97%。人工混凝土壤平均重量直径 MWD 和几何平均直径 GMD 分别比自然土壤高

1.24 和 1.59 倍。结构破坏率 PAD 和可蚀性因子 K 分别比自然土壤低 38.1% 和 71.4%。人工混凝土壤在干、湿筛下的分形维数 D 分别比自然土壤低 22% 和 24.4%。在微团聚体上, 团聚状况与团聚度分别比自然土壤高 63.9% 和 38.5%, 而分散率比自然土壤低 27.2%。此外, 人工混凝土壤的有机质含量比自然土壤高 65.2%。

表 1 人工混凝土壤与自然土壤抗蚀性特征
Table 1 Anti-erodibility characteristics of vegetation-growing concrete and natural soil

土壤类型 Soil type	> 0.25 mm团聚体含量 (%) Proportion of > 0.25 mm aggregate		结构破坏率 PAD Percentage	平均重量直径 Mean weight	几何平均直径 Geometric mean	K (t hm ² h hm ⁻² MJ ⁻¹ mm ⁻¹)
	机械 Mechanical	水稳 Water stability	aggregate disruption (%)	diameter (mm)	diameter (mm)	
人工混凝土壤	87.01 a	50.25 a	42.4 b	2.84 a	0.75 a	0.02 b
自然土壤	79.86 b	25.51 b	68.5 a	1.27 b	0.29 b	0.07 a
变化率	9.0%	97.0%	-38.1%	123.6%	158.6%	-71.4%

土壤类型 Soil type	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	分形维数 <i>D</i> Fractal dimension		团聚状况 Aggregate state (%)	团聚度 Aggregate degree (%)	分散率 Dispersion rate (%)
		干筛 Dry sieving	湿筛 Wet sieving			
人工混凝土壤	24.93 a	2.30 b	2.11 b	11.18 a	28.23 a	53.36 b
自然土壤	15.09 b	2.95 a	2.79 a	6.82 b	20.39 b	73.32 a
变化率	65.2%	22.0%	-24.4%	63.9%	38.5%	-27.2%

注: 不同小写字母表示同一抗蚀性指标的不同土壤之间差异显著 ($P < 0.05$), 样本量 $n = 60$ 。

结果表明, 与自然土壤相比, 人工混凝土壤的抗蚀性明显提升。如在团聚体粒径分布上, 人工混

凝土壤中 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量显著提升; 在水稳性团聚体指标中, MWD 与 GWD 均有较大提高,

说明人工混凝土颗粒间团聚程度有所提高, 土壤结构得以改善。可蚀性因子 K 、 PAD 、分形维数 D 和分散率有较明显下降, 说明人工混凝土抗分散能力得到了加强, 其抗蚀性与稳定性明显优于自然土壤。

2.3 抗蚀性指标间相关性分析

对本文前述的评价指标进行相关性分析, 其结果见表 2。结果显示, 人工混凝土 $> 0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量 $R_{0.25}$ (X_2) 和有机质含量 (X_{11}) 与其它各抗蚀性指标均关系密切, 是影响人工混凝土抗蚀性的两个最重要的指标。水稳性团聚体含量

$R_{0.25}$ (X_2) 与 MWD (X_3) ($r = 0.985^{**}$)、 GWD (X_4) ($r = 0.966^{**}$)、有机质 (X_{11}) ($r = 0.968^{**}$) 极显著正相关, 与可蚀性因子 K (X_5) ($r = -0.983^{**}$)、分形维数 D (X_6) ($r = -0.950^{**}$) 极显著负相关。而有机质含量 (X_{11}) 与 MWD (X_3) ($r = 0.982^{**}$)、 GWD (X_4) ($r = 0.974^{**}$) 极显著正相关, 与可蚀性因子 K (X_5) ($r = -0.950^{**}$) 极显著负相关, 与分形维数 D (X_6) ($r = -0.915^*$)、结构破坏率 PAD (X_7) ($r = -0.906^*$) 显著负相关。此外, 其它各个指标之间也存在着不同程度的相关性。

表 2 抗蚀性指标间的相关性
Table 2 Correlation between anti-erodibility indices

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}
X_1	1.000										
X_2	0.954**	1.000									
X_3	0.961**	0.985**	1.000								
X_4	0.957**	0.966**	0.974**	1.000							
X_5	-0.853	-0.983**	-0.864	-0.868	1.000						
X_6	-0.912*	-0.950**	-0.915*	-0.907*	0.879	1.000					
X_7	-0.907*	-0.923*	-0.921*	-0.913*	0.910*	0.864	1.000				
X_8	0.773	0.875	0.768	0.774	-0.562	-0.798	-0.865	1.000			
X_9	0.832	0.845	0.821	0.830	-0.764	-0.690	-0.675	0.903*	1.000		
X_{10}	-0.814	-0.891	-0.879	-0.871	0.745	0.619	0.902*	-0.921*	-0.911*	1.000	
X_{11}	0.914*	0.968**	0.982**	0.974**	-0.950**	-0.915*	-0.906*	0.865	0.871	-0.821	1.000

注: **为0.01水平上极显著相关, *为0.05水平上显著相关, 样本量 $n = 60$ 。 X_1 为 $> 0.25\text{ mm}$ 机械稳定性团聚体含量(%) ; X_2 为 $> 0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量 $R_{0.25}$ (%) ; X_3 为平均重量直径 MWD (mm) ; X_4 为几何平均直径 GWD (mm) ; X_5 为可蚀性因子 K ($\text{t hm}^2\text{ h hm}^{-2}\text{ MJ}^{-1}\text{ mm}^{-1}$) ; X_6 为湿筛下的分形维数 D ; X_7 为结构破坏率 PAD (%) ; X_8 为团聚状况(%) ; X_9 为团聚度(%) ; X_{10} 为分散率(%) ; X_{11} 为有机质含量(g kg^{-1})。下同。

2.4 抗蚀性指标主成分分析

衡量土壤抗蚀性的指标较多, 相互之间信息重叠且有一定的关联性, 为进一步揭示各抗蚀性指标对土壤抗蚀性的贡献, 采用 SPSS 软件对本文 2.3 所述的 11 个指标进行主成分分析, 结果见表 3。根据主成分个数提取原则, 上述 11 个指标可提取三个主

成分, 特征值分别为 6.305, 2.276 和 1.942, 其中主成分 Y_1 贡献率为 57.32%, 主成分 Y_2 贡献率为 20.69%, 主成分 Y_3 贡献率为 17.66%, 三者累积贡献率达 95.67%, 信息损失量仅为 4.33%, 满足主成分分析对信息损失量的要求。

表 3 抗蚀性指标 PCA 分析
Table 3 PCA analysis of anti-erodibility index

主成分 Principal component	各项指标因子载荷 Factor load of each index											特征根 Characteristic root	累积贡献率 Cumulative contribution rate (%)
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}		
Y_1	0.932	0.961	0.943	0.952	-0.858	-0.870	-0.822	0.231	0.425	-0.543	0.141	6.305	57.32
Y_2	-0.03008	-0.013	0.024	0.026	0.167	0.015	0.264	0.874	0.852	-0.828	-0.015	2.276	78.01
Y_3	-0.2103	0.254	0.289	0.249	-0.431	0.379	-0.469	-0.379	-0.142	0.086	0.983	1.942	95.67

由表 3 中各指标负荷量可知, 对主成分 Y_1 贡献较大的是 $> 0.25\text{ mm}$ 机械稳定性团聚体含量 (X_1)、 $> 0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量 $R_{0.25}$ (X_2)、平均重量直径 MWD (X_3) 与几何平均直径 GWD (X_4); 对主成分 Y_2 贡献较大的是团聚状况 (X_8)、团聚度

(X_9) 与分散率 (X_{10}); 对主成分 Y_3 贡献最大的是有机质含量 (X_{11})。其中 $> 0.25\text{ mm}$ 机械稳定性团聚体含量 (X_1)、 $> 0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量 $R_{0.25}$ (X_2)、平均重量直径 MWD (X_3)、几何平均直径 GWD (X_4)、团聚状况 (X_8)、团聚度 (X_9) 与有

机质含量 (X_{11}) 均为正向贡献, 仅有分散率 (X_{10}) 为负向贡献。情况表明, $> 0.25\text{ mm}$ 机械稳定性团聚体含量、 $> 0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量 $R_{0.25}$ 、平均重量直径 MWD 、几何平均直径 GWD 、团聚状况、团聚度与有机质含量越大, 分散率越小, 土壤的抗蚀性就越好。

由表 3 中的主成分载荷与特征根, 可分别得出第一、二、三主成分表达式, 具体如下:

$$Y_1 = 0.148X_1 + 0.152X_2 + 0.150X_3 + 0.151X_4 - 0.136X_5 - 0.138X_6 - 0.130X_7 + 0.037X_8 + 0.067X_9 -$$

$$0.086X_{10} + 0.022X_{11}$$

$$Y_2 = -0.017X_1 - 0.006X_2 + 0.011X_3 + 0.011X_4 + 0.073X_5 + 0.007X_6 + 0.116X_7 + 0.384X_8 + 0.374X_9 - 0.364X_{10} - 0.007X_{11}$$

$$Y_3 = -0.110X_1 + 0.131X_2 + 0.149X_3 + 0.128X_4 - 0.222X_5 + 0.195X_6 - 0.242X_7 - 0.195X_8 - 0.073X_9 + 0.044X_{10} + 0.506X_{11}$$

据此计算出人工混凝土与土壤抗蚀性的主成分值, 如表 4 所示。

表 4 不同土壤抗蚀性主成分值
Table 4 Main component values of soil anti-erodibility

土壤类型 Soil type	第一主成分 Y_1 First principal component	第二主成分 Y_2 Second principal component	第三主成分 Y_3 Third principal component	综合主成分 Y Comprehensive principal component
人工混凝土	0.249	0.006	0.361	0.617
自然土壤	-0.072	0.040	0.207	0.175

以每个主成分对应的特征值占所提取的主成分总特征值的比重作为权重得到综合主成分模型 $Y = 0.599 Y_1 + 0.216 Y_2 + 0.185 Y_3$, 据此计算人工混凝土与土壤抗蚀性的综合主成分值。从表 4 中可以得知, 通过综合主成分评价得出人工混凝土抗蚀性的综合主成分值为 0.617, 自然土壤抗蚀性的综合主成分值为 0.175。

3 讨论

已有众多学者对土壤抗蚀性的研究表明^[17-18], 土壤中大团聚体与有机质含量越多, 平均重量直径 MWD 与几何平均直径 GMD 越大, 团聚状况与团聚度就越好; 而结构破坏率 PAD 、可蚀性因子 K 、分形维数 D 及分散率越小, 土壤稳定性与抗蚀性就越强。本文中人工混凝土各抗蚀性指标与自然土壤的对比情况表明, 人工混凝土抗蚀性比自然土壤明显提升, 其抗蚀性综合主成分值更是自然土壤的 3.53 倍。分析原因, 人工混凝土在配制时添加了较多的有机物料和水泥。其一, 作为天然有机物料, 所加入的大量杉木锯末经过长时间的腐烂, 可转化为有机质, 使人工混凝土中有机质的含量大大高于其原材料之一的自然土壤。有机质中含有的有机胶体具有胶结和团聚作用^[19], 能够促进土壤中大团聚体的形成, 提高土粒之间的黏结力。而土壤的抗蚀性在很大程度上取决于有机胶结物质对土粒胶结的能力, 窦森^[20]曾指出大团聚体与有机质是土壤保持

结构稳定的基础, Wagner 和 Yao 等^[21-22]的研究也表明有机质含量越高, 越有利于土壤团聚体的形成与抗蚀性的增强。因此有机质含量的提升导致人工混凝土中机械稳定性大团聚体含量 (X_1) 和水稳性团聚体含量 $R_{0.25}$ (X_2) 提升, 土壤抗蚀性得到增强。同时, 有机质在微生物作用下分解产生有机酸, 可防止团聚体消散, 减少了团聚体破坏率 (X_7), 也会增强土壤的抗蚀性。

其二, 加入的水泥遇水发生水化反应, 会直接转化为水化硅酸钙、水化铝酸钙凝胶及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体等化合物, 这些结晶化合物在较强化学键的作用下, 将土壤微团聚体凝聚起来, 相互胶结成结晶网与坚固致密的结构体^[23], 使人工混凝土抗蚀性得到增强。这与张冠华^[24]的研究结果认为添加土壤固化剂能提高边坡土壤的抗侵蚀性相似, 人工混凝土中添加水泥后, 实质上已成为一种水泥土, 水泥与固化剂作用相似, 可改善土壤中的团聚状况 (X_8), 提高团聚度 (X_9), 减少分散率 (X_{10}), 提高土壤的抗蚀性。因此, 人工混凝土中的水泥和锯末均能显著提升抗蚀性, 导致其抗蚀性综合主成分值远高于自然土壤。有机质和水泥对比来看, 有机质含量的提升主要促进了大团聚体形成, 防止大团聚体消散; 而水泥生成的结晶化合物主要增强微团聚体的凝聚性。由于大团聚体对土壤抗蚀性贡献更高, 因此有机质对人工混凝土的抗蚀性贡献更大。

本研究还发现, 在相关性分析中 $> 0.25\text{ mm}$ 水稳

性团聚体含量 $R_{0.25}$ 和有机质含量两个指标与其他抗蚀性指标均存在显著相关性, 可最好的反映人工混凝土土壤的抗蚀性。吴鹏^[25]、Zhang^[26] 等通过对土壤抗蚀性的研究, 亦认为上述两指标分别与平均重量直径 MWD 、可蚀性因子 K 、分形维数 D 等抗蚀性指标之间存在极显著的相关性。本文研究结果表明在这一点上人工混凝土土壤与自然土壤基本一致。主成分分析也表明, 团聚体类指标对人工混凝土土壤抗蚀性的贡献率最高, 所以在以后的研究中可用 $> 0.25\text{ mm}$ 大团聚体含量和有机质含量两个指标来评价人工混凝土土壤这一生态基材的抗蚀性。

综上, 对裸露岩质坡体开展生态修复工作, 营造抗蚀能力强的植被生境是其前提条件, 人工混凝土土壤的抗蚀性显著高于自然土壤, 在水力作用下的破坏程度更小, 稳定性更好, 从而在日后的工程应用中具备广阔的前景。

4 结论

(1) 在团聚体粒径分布特征上, 相比自然土壤, 人工混凝土土壤的机械大团聚体和水稳性大团聚体含量均有显著提高, 而 $< 0.25\text{ mm}$ 小粒径团聚体含量显著降低, 且水稳性大团聚体含量提高更为明显。

(2) 与自然土壤相比, 人工混凝土土壤各抗蚀性指标均有显著改善, 表明其团聚程度提高, 抗分散能力增强, 抗蚀性与稳定性明显优于自然土壤。主成分分析表明, 人工混凝土土壤抗蚀性综合主成分值提高了 252.6%。

(3) 相关性分析表明, 人工混凝土土壤中的 $> 0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量 $R_{0.25}$ 和有机质含量与其他抗蚀性指标均存在显著相关性, 且这两个指标对抗蚀性的贡献率较高, 可较好反映和评价人工混凝土土壤的抗蚀性。

(4) 人工混凝土土壤在配制时所添加的有机物料和水泥使其水稳性团聚体含量和有机质含量有较大的提升, 导致其抗蚀性显著高于自然土壤, 因此其更适宜于在裸露岩质坡体表面营造抗蚀能力强的植被生境。

参考文献:

- [1] 王景燕, 胡庭兴, 龚伟, 等. 川南地区不同退耕地对土壤抗蚀性的影响[J]. 中国水土保持, 2010, 41(12): 30–33, 73.
- [2] 杨智, 兰雪, 戴全厚, 等. 黔中地区不同岩性土壤抗冲抗蚀性研究进展[J]. 水土保持研究, 2010, 17(4): 6–9.
- [3] An S, Mentler A, Mayer H, et al. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2010, 81(3): 226–233.
- [4] Liu X L, He Y Q, Zhang H L, et al. Impact of land use and soil fertility on distributions of soil aggregate fractions and some nutrients[J]. Pedosphere, 2010, 20(5): 124–131.
- [5] 许文年, 夏振尧, 周明涛, 等. 植被混凝土生态防护技术理论与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012: 55–64.
- [6] 杨奇, 丁瑜, 许文年, 等. 植被混凝土抗雨水冲刷性能试验研究[J]. 中国水土保持, 2013, 41(1): 54–56.
- [7] 白秀梅, 韩有志, 郭汉清. 关帝山不同植被恢复类型土壤抗蚀性研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 79–84.
- [8] 马帅, 赵世伟, 李婷, 等. 子午岭林区植被自然恢复下土壤剖面团聚体特征研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 157–161.
- [9] 唐骏, 党廷辉, 薛江, 等. 植被恢复对黄土区煤矿排土场土壤团聚体特征的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 1–11.
- [10] 曾全超, 李娅芸, 刘雷, 等. 黄土高原草地植被土壤团聚体特征与可蚀性分析[J]. 草地学报, 2014, 22(4): 743–749.
- [11] 谷忠元, 康黎, 罗梦娟, 等. 湘东地区典型土壤团聚体稳定性的影响因素[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 58–63, 69.
- [12] Delelegn Y T, Purahong W, Blazelevic A, et al. Changes in land use alter soil quality and aggregate stability in the highlands of northern Ethiopia[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1–12.
- [13] Tang Y, Li J, Zhang X, et al. Fractal characteristics and stability of soil aggregates in karst rocky desertification areas[J]. Natural Hazards, 2013, 65(1): 563–579.
- [14] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses[J]. American Society of Agronomy, 1936, 28(5): 337–351.
- [15] 祁迎春, 王益权, 刘军, 等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 340–347.
- [16] 田慎重, 王瑜, 李娜, 等. 耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(22): 7116–7124.
- [17] Wang H, Zhang G H, Li N N, et al. Variation in soil erodibility under five typical land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2019, 174(3): 24–35.
- [18] 张华渝, 王克勤, 宋娅丽. 滇中尖山河流域不同土地利用类型土壤抗蚀性[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 50–57.
- [19] 谈正鑫, 万福绪, 张波. 盱眙火山岩丘陵区不同林地土壤抗蚀性评价[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2): 7–11.
- [20] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 412–418.
- [21] Wagner S, Cattle S R, Scholten T. Soil-aggregate formation as influenced by clay content and organic-matter amendment[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2007, 170(1): 173–180.
- [22] Yao S H, Qin J T, Peng X H, et al. The effects of vegetation on

- restoration of physical stability of a severely degraded soil in China[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(5): 723 – 734.
- [23] 张齐齐, 王家鼎, 刘博榕, 等. 水泥改良土微观结构定量研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(3): 92 – 96.
- [24] 张冠华, 牛 俊, 孙金伟, 等. 土壤固化剂及其水土保持应用研究进展[J]. 土壤, 2018, 50(1): 28 – 34.
- [25] 吴 鹏, 朱 军, 崔迎春, 等. 黔中杠寨小流域不同植被类型土壤抗蚀性研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(8): 64 – 70.
- [26] Zhang B J, Zhang G H, Yang H Y, Zhu P Z. Temporal variation in soil erosion resistance of steep slopes restored with different vegetation communities on the Chinese Loess Plateau[J]. *Catena*, 2019, 182: 104170.

Influence of Vegetation-growing Concrete on the Distribution and Anti-erodibility of Aggregates

SHEN Jian¹, GAO Jia-zhen², PENG Song-tao³, ZHOU Ming-tao^{2*}, ZHANG Nai-chang³

(1. Huadian Tibetan Energy Co., Ltd., Lhasa 850000, China; 2. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Northwest Engineering Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: In order to quantitatively evaluate the erosion resistance of base materials on the ecological concrete protection slope, the aggregates distribution characteristics and various erosion resistance indices were analyzed in laboratory, compared with the natural soil with similar site conditions. The results showed that the proportions of > 0.25 mm mechanical stability aggregates and > 0.25 mm water-stable aggregates, mean weight diameter (*MWD*), geometric mean diameter (*GWD*), and organic matter in the vegetation-growing concrete were higher than those in the natural soil. However, the structural failure rate (*PAD*), erodibility factor (*K*), dispersion rate, and fractal dimension (*D*) in the vegetation-growing concrete were significantly lower than those in natural soil. The principal component value of anti-erodibility of vegetation-growing concrete was 2.5 times higher than that of natural soil, indicating that the vegetation-growing concrete improved aggregation degree, and increased its anti-erodibility. Correlation analysis showed that the proportion of > 0.25 mm water-stable macroaggregates and organic matter were closely related to the other anti-erodibility indicators. Hence, the addition of natural organic materials and cement significantly increased the content of organic matter and the proportion of water-stable macroaggregates of vegetation-growing concrete, resulting in significantly better aggregate stability and anti-erodibility compared with that of natural soil.

Key words: Aggregate distribution; Anti-erodibility; Organic matter; Ecological remediation material

[责任编辑: 韩春兰]