

黄河泥沙充填复垦中土工布排水拦沙效果的模拟试验

王培俊^{1,2}, 邵芳¹, 刘俊廷¹, 李星宇¹, 胡振琪^{1*}, Russell S. Yost²

(1. 中国矿业大学(北京)土地复垦与生态重建研究所, 北京 100083; 2. Department of Tropical Plant and Soil Sciences, University of Hawai'i at Mānoa, Honolulu 96822, Hawaii, USA)

摘要: 为验证土工布用于加速引黄河泥沙充填采煤沉陷地的后期侧向排水及降低排水中泥沙含量的效果, 在室内进行了基于土工布的泥沙充填排水模拟试验。该试验在玻璃槽内完成, 设计3个试验处理, 分别为 ZT-250 (整个断面开口+铁丝网+ZW-250 土工布)、ZT-300 (整个断面开口+铁丝网+ZW-300 土工布) 以及 CK (断面中间部分开口+可调节高度的塑料板)。测定了3个处理的排水含沙量及泥沙粒径、玻璃槽内表层泥沙粒径以及充填表层和底层泥沙含水率随时间的变化。结果表明: 1) 3种处理排水含沙量整体差异较小, 但使用土工布处理的排水含沙量随时间的延长逐渐降低, 而对照处理排水含沙量随时间的延长逐渐增大; 2) 排水初期和中期, 对照 CK 的排水中泥沙的黏粒含量均高于使用土工布的2个处理。排水后期 CK 的黏粒含量介于处理 ZT-250 和 ZT-300 之间。随着试验的进行, 使用土工布的2个处理排水中泥沙的黏粒含量逐渐升高, 粉粒含量逐渐降低, 而对照处理呈现相反的变化趋势。使用土工布的2个处理拦沙效果较为稳定。3) 3种处理充填表层泥沙粒径级配无明显差异, 但使用土工布处理充填的表层泥沙的极细砂粒含量较高。4) 3种处理充填泥沙表层和底层含水率变化存在差异, 使用土工布可以加速泥沙中过饱和水的排除, 其中处理 ZT-250 排水效果最好。该研究可为中国东部高潜水位平原矿区采煤沉陷地引黄河泥沙充填复垦的快速排水工艺革新提供依据。

关键词: 土地复垦; 排水; 泥沙; 采煤沉陷地; 黄河; 土工布; 粒径; 含水率

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.010

中图分类号: TD88; TU411

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-17-0072-09

王培俊, 邵芳, 刘俊廷, 李星宇, 胡振琪, Russell S. Yost. 黄河泥沙充填复垦中土工布排水拦沙效果的模拟试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 72-80. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.010 http://www.tcsae.org

Wang Peijun, Shao Fang, Liu Juntong, Li Xingyu, Hu Zhenqi, Russell S. Yost. Simulated experiment on drainage and fine sediment retention effects of geotextiles in land reclamation with Yellow River sediments[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(17): 72-80. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.010 http://www.tcsae.org

0 引言

煤炭是中国最主要的能源, 占一次能源的70%左右^[1]。中国也是世界第一煤炭生产国, 2013年的煤炭产量达到36.8亿t, 占世界煤炭产量的47.4%^[2]。煤炭资源的开采在为国家经济发展提供充足能源的同时, 也对土地和生态环境造成了损伤, 尤以土地沉陷最为严重^[3]。由于中国90%以上的煤炭产量来自井工开采, 且多采用走向长壁全部垮落法开采, 造成大量土地的沉陷损坏^[1]。截止到2010年底中国由于煤炭资源开采累计沉陷面积超过100万hm², 且以每年7万hm²的速度增加^[4]。在高潜水位平原矿区的沉陷中心区域出现常年积水, 形成封闭的湖泊或沼泽; 在沉陷较浅的地方造成土壤盐渍化, 而在沉陷区边缘地带水土流失严重, 土地丧失了耕种能力^[5]。

大量失地农民无地可种, 影响了社会稳定。因此采煤沉陷地的复垦就成为中国煤矿区亟待解决的问题。由于高潜水位平原矿区采煤沉陷地的独有损毁特征, 传统的挖深垫浅等非充填复垦技术耕地恢复率低, 复垦后的耕地质量较差^[6], 而充填复垦技术由于充填物料(主要是粉煤灰、煤矸石)数量的有限性和潜在的污染性^[7-8], 使得这一技术的应用受到了限制。对于部分靠近湖区的采煤沉陷地, 一些矿山企业尝试利用湖泥进行充填复垦^[9-11], 但其使用范围有限, 且使用该技术复垦后的土地底部淤泥层厚, 容易形成沼泽, 排水固结时间也比较长, 充填复垦后两三年才能耕种, 故亟需寻找更合适的充填复垦材料。黄河是中国含沙量最高的河流, 河床逐年淤高, 威胁行洪安全。国家采取多种调沙措施, 试图减轻泥沙的淤积。由于许多矿区距离黄河较近, 因此, 如能将黄河泥沙作为充填材料充填复垦采煤沉陷地, 不仅可以恢复大量耕地, 而且可以化害为利, 对黄河河床的疏浚和行洪安全也有一定贡献。

目前国内已有部分地区开展了引黄河泥沙充填复垦坑塘洼地的试验, 其工艺^[12]包括: 1) 排走待充填区域的积水, 划分条带; 2) 剥离待充填区的表土和部分心土, 堆放在充填区域的边缘形成坝体; 3) 采用绞吸式挖沙船采集黄河泥沙; 4) 通过管道输送泥沙到复垦场地; 5) 泥沙充填沉淀, 清水排入附近的河道中; 6) 充填完成后

收稿日期: 2015-05-28 修订日期: 2015-07-16

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划课题(2012BAC04B03)

作者简介: 王培俊, 男, 安徽阜南人, 博士生, 主要从事矿山土地复垦与生态重建研究。北京 中国矿业大学(北京)土地复垦与生态重建研究所, 100083。Email: wangpeijun1227@163.com

*通信作者: 胡振琪, 男, 安徽五河人, 教授, 博士生导师, 主要从事土地复垦与生态修复研究。北京 中国矿业大学(北京)土地复垦与生态重建研究所, 100083。Email: huzq1963@163.com

在泥沙表面覆盖剥离的表土和心土，经过土地平整形成耕地。该试验的排水工艺是在复垦条带末端围堤上开挖排水口直接快速排水，一方面导致养分含量较高、持水性能较强的细粒径泥沙随排水流失，造成充填泥沙层透水性强^[13]、保水保肥性能差^[12]，且易导致排水沟渠淤积；另一方面后期充填泥沙中的过饱和水由于末端围堤的阻挡而无法侧向排水，只能垂向渗透排水，排水效率低，复垦工期长。土工布具有强度高、柔性好、整体性强等优点，在交通、水利、河流边坡防护及盐碱地暗管排水等工程中得到了广泛应用，具有反滤、排水、隔离、加固和防护等作用^[14-19]。Palmeira 和 Tatto^[17]的研究表明土工布过滤层能显著降低排水的浑浊度。Farias 等^[19]通过大尺度水槽试验评估了不同类型无纺土工布用作侵蚀控制拦沙网的效果，结果显示土工布能显著拦截泥沙并降低排水中的泥沙浓度，且实测效果好于预期。通过在充填复垦条带排水口前端布设土工布，并增大排水端面面积，或即可降低排水中的泥沙含量，又可以增大充填泥沙中过饱和水的侧向排水速率。为验证土工布用于增大引黄

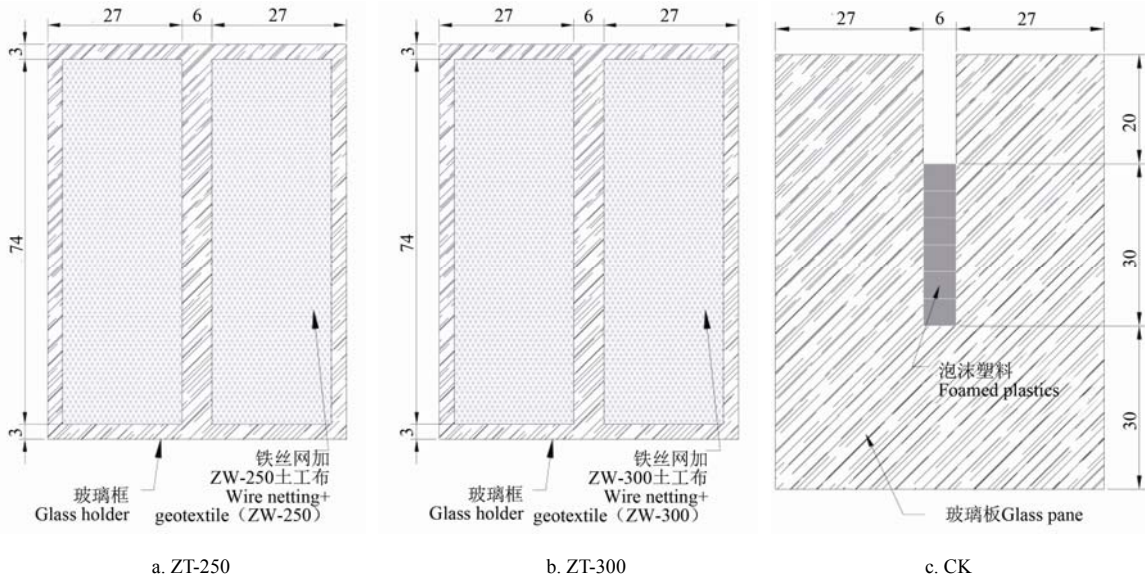
河泥沙充填采煤沉陷地的后期侧向排水速率及降低排水泥沙含量的效果，在室内使用土工布进行了充填泥沙的排水模拟试验。

1 材料与方法

1.1 试验设计及土工布筛选

1.1.1 试验设计

此次试验在室内玻璃槽内完成，试验用玻璃槽规格为 120 cm × 60 cm × 80 cm（长×宽×高）。排水断面共设 3 个处理。由于此次室内模拟试验的主要目的是检验土工布用于拦沙排水的有效性，又单次充填排水试验过程耗时较长，若为各处理设计重复，难以保证充填泥沙排水起始时间的统一且难以控制试验因素保持一致。因此，此次室内模拟试验每个处理只有 1 次重复。3 种处理分别为 ZT-250（整个排水断面开口+铁丝网+ZW-250 土工布）、ZT-300（整个排水断面开口+铁丝网+ZW-300 土工布）以及 CK（排水断面中间部分开口+可调节高度的泡沫板），其排水断面正视图如图 1 所示。



注：ZT-250 和 ZT-300 处理均为改进后的排水形式，即排水断面面积扩大，玻璃框和铁丝网起支撑作用，土工布起拦沙排水作用。CK 处理模拟传统复垦条带末端围堤开口排水方式，排水断面中间部分开口模拟传统围堤上的开口，可调节高度的泡沫板模拟传统围堤上的开口高度可高低变化；下同；单位为 cm。
Note: ZT-250 and ZT-300 are two kinds of improved drainage patterns with expanded area of discharge cross sections, in which glass holder and wire netting are for supporting and 250 and 300 g geotextiles are used for drainage and fine sediment retention. CK is traditional drainage method with narrow outlet in center of discharge cross section simulating outlet opened and height adjustable cystosepiment simulating height change of outlet opened in traditional earth dike; Same as below; Unit is cm.

图 1 3 种排水断面正视图

Fig.1 Front view of three discharge cross sections

1.1.2 黄河泥沙物理特性

试验所用黄河泥沙采自山东省梁山县陈垓引黄闸附近的浅滩，其物理特性如表 1 所示。泥沙粒径组成使用济南润之科技公司生产的激光粒度仪测定^[20]；泥沙渗透系数采用南京宁曦土壤仪器有限公司生产的 TST-70 型常水头土壤渗透仪测定^[21]；泥沙密度采用比重计测定。泥沙不均匀系数按式（1）计算：

$$C_u = \frac{D_{10}}{D_{60}} \tag{1}$$

式中：C_u 为不均匀系数，D₁₀、D₆₀ 为泥沙特征粒径。

表 1 黄河泥沙物理特性

Table 1 Physical properties of Yellow River sediments

参数 Parameters	值 Value
D ₁₀ /μm	101.42
D ₁₅ /μm	111.11
D ₅₀ /μm	162.70
D ₆₀ /μm	177.30
D ₈₅ /μm	231.97
D ₉₀ /μm	254.81
不均匀系数 Nonuniform coefficient C _u	1.75
渗透系数 Permeability coefficient k _g /(cm·s ⁻¹)	0.0044
密度 Density/(10 ⁶ g·m ⁻³)	2.46

注：D₁₀、D₁₅、D₅₀、D₆₀、D₈₅ 和 D₉₀ 表示小于这些粒径的泥沙体积百分比分别为 10%、15%、50%、60%、85% 和 90%，下同。
Note: D₁₀、D₁₅、D₅₀、D₆₀、D₈₅ and D₉₀ are diameter of soil particles whose volumetric fraction in soils smaller than 10%, 15%, 50%, 60%, 85% and 90%, respectively, same as below.

1.1.3 土工布筛选

试验选用的土工布需要满足保土性、透水性以及防淤堵等要求^[14, 16, 18, 22-23]。目前在土工织物滤层设计方面,中国常用的设计准则,是基于静荷载单向水流条件,可以概括为以下形式:

1) 保土性准则^[14, 23]: 被保护土体中构成骨架的较粗土粒不得流失或移动,只允许部分起填料作用的细土粒被水流带走。筛选标准为: $O_{95} \leq B_s \cdot D_{85}$ 。 O_{95} 为土工布的等效孔径, D_{85} 为黄河泥沙的特征粒径, B_s 为经验系数。由于此次试验用黄河泥沙的不均匀系数 C_u 为 1.75, B_s 的取值为 1.0。

2) 透水性准则^[14, 23]: 为保证稳定后的土体具有足够的渗透性,要求土工织物的渗透系数大于被保护土体渗透系数的若干倍,对于新土工织物,一般建议倍数取值为 10。筛选标准为: $k_g > 10k_s$ 。 k_g 和 k_s 分别为土工织物和被保护土的渗透系数。

3) 防淤堵准则^[23]: 在水流作用下,部分细土粒难免会停滞于织物表面或进入织物内部孔隙中,一定程度地影响织物的排水功能,但要求土粒迁移达到稳定后仍能保持水流畅通。土工材料不被淤堵(封闭、堵塞)性能是确保排水工程长期运用的重要条件。筛选标准为梯度比: $GR \leq 3$ 。

通过室内土工布等效孔径、垂直渗透以及淤堵试验等^[22]多轮筛选,选用了 2 种规格的土工布,其参数如表 2 所示。

表 2 针刺无纺土工布参数			
Table 2 Parameters of acupuncture non-woven geotextiles			
参数 Parameters	ZW-250	ZW-300	
单位面积质量 Mass per unit area/(g·m ⁻²)	249	294	
厚度 Thickness/(mm)	2.1	2.3	
等效孔径 Effective aperture O_{95} /mm	0.164	0.142	
垂直渗透系数 Vertical permeability coefficient k_v /(cm·s ⁻¹)	0.104	0.088	
不同水力坡度的梯度比 Gradient ratio (GR) for different hydraulic slope i	GR ($i=1$)	1.9	2.1
	GR ($i=2$)	2.3	2.4
	GR ($i=4$)	2.55	2.7
	GR ($i=10$)	2.82	2.97

1.2 试验步骤

1) 准备好黄河泥沙备用。需要经常翻晒泥沙,使其含水率达到常量,并用 2 mm 筛子仔细过筛,去除泥沙中的枯枝落叶。

2) 根据玻璃槽排水断面的尺寸,剪取相同尺寸的针刺无纺 250 和 300 g 土工布各 1 块,并分别称其质量。再分别剪取同样大小的铁丝网,使用螺丝钉将铁丝网和土工布固定在排水断面的玻璃框架上。为了实现对对照处理排水口高度可自由调节的目的,可用小刀截取 10 cm 一根的泡沫板,在每根泡沫板四周边缘中心用小刀等工具挖取凹槽或凸槽,用以镶嵌在玻璃板上以及相互之间卡住。充填开始初期,用泡沫板把排水口堵住,然后渐次拔掉泡沫板,逐次降低排水口高度。3 个处理排水断面的边缘缝隙用玻璃胶密封。

3) 按顺序摆放好玻璃槽,玻璃槽之间应有较大的间距。为了降低充填水沙在玻璃槽中的流动速度,充填前应垫高排水口的高度,形成-1°的坡度。待每个玻璃槽泥沙充填结束、明水排尽后,应设法去掉垫在排水口底部的垫子,降低排水口高度,加速侧向排水。在充填端的角落安装好漏斗并在其下部接好塑料软管,塑料软管的长度应满足垂直高度到达玻璃槽底部后再适当延长 10 cm,且软管出口方向应垂直于排水方向。

4) 本试验设计充填泥沙浓度为 200 kg/m³。称取计算好的黄河泥沙加入大塑料盆中,然后加满水进行搅拌。将在大塑料盆中搅拌好的水沙混合物通过小塑料盆倒入漏斗中,通过漏斗下接的塑料软管以较小的初速度流入玻璃槽中。待加入漏斗中的水沙全部流入玻璃槽后,应间隔一段时间,待明水基本排尽后,再继续往漏斗中加入水沙混合物。

5) 在充填试验开始后,沿着排水方向在玻璃槽中轴线上插入聚氯乙烯套管,各玻璃槽设 3 根套管,与排水断面的距离分别为 15、60 和 105 cm。布设完成后立即塞上管塞,试验结束明水排尽后在聚氯乙烯套管与泥沙结合部位放上密封圈。聚氯乙烯套管布设及充填排水情况如图 2 所示。

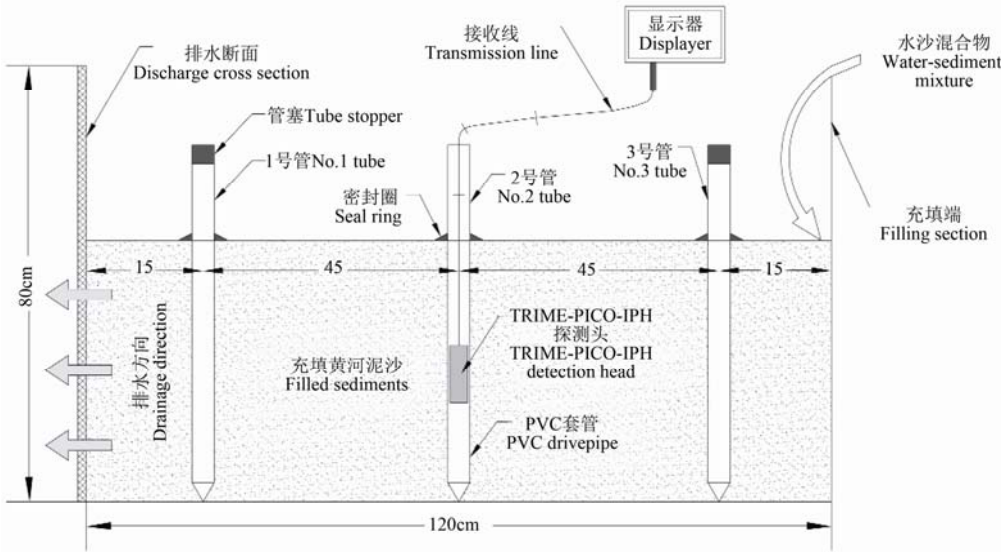


图 2 玻璃槽内泥沙充填排水沿排水方向左视图
Fig.2 Left view along drainage direction of process of filling and drainage in glass tank

1.3 采样方法

在每个玻璃槽充填排水稳定后 10 min（初期）、充填试验进行到一半（中期）以及充填排水结束前 10 min（后期）分别用小烧杯在排水断面下端取水样。每个玻璃槽 3 个阶段总共需要取 6 烧杯排水并分别编号，其中 3 杯用以测定排水含沙量，另外 3 杯用以测定排水泥沙粒径。经过 54 d，待完成充填泥沙中的含水率动态测试后，在每个玻璃槽内分别随机布设 3 个采样点。由于 3 种处理的玻璃槽底部都是快速沉降下来的大颗粒泥沙，不同处理之间粒径差异很小，此次试验只采集每个玻璃槽表层（0~2 cm）泥沙，分析其粒径差异。

1.4 测试方法

3 种试验处理的排水含沙量采用烘干称重法测定^[24]，每个阶段采集的烧杯排水含沙量分别测定 3 次，取其平均值作为该阶段排水含沙量的最终试验结果。排水中泥沙及玻璃槽内充填表层（0~2 cm）泥沙粒径采用济南润之科技公司生产的激光粒度仪测定^[20]，每烧杯排水及玻璃槽内每个表层泥沙样品的粒径分别测定 3 次，每次测定时激光粒度仪定时保存 10 组数据，取其平均值作为该次试验结果，3 次测定结果的平均值作为该烧杯排水或玻璃槽内表层泥沙样品粒径的最终试验结果。

充填泥沙表层及底层含水率采用德国 IMKO 公司生产的剖面土壤水分传感器（TRIME-PICO-IPH）测定^[25]。测量水分时，打开管塞，将剖面土壤水分传感器（TRIME-PICO-IPH）探测头放进聚氯乙烯套管内，通过接收线上预先标注的刻度控制探测头放进的深度，然后开始测量。本次试验初步设计泥沙充填高度为 30 cm，应测试距泥沙表层 15 和 30 cm 深度处的含水率。为减少聚氯乙烯套管蒸发误差，测量泥沙水分尽量选在傍晚进行，每次测完以后再重新放好管塞。分别测试第 1、3、5、7、15、19、24、29、39 和 54 d 的充填泥沙含水率。试验结束后，拆掉 ZT-250 和 ZT-300 2 种处理的土工布，清除表层泥沙，经烘干称质量后得出 ZW-250 和 ZW-300 2 种土工布淤堵后的单位面积质量，并按照下式计算 2 种土工布的泥沙截留率 T_p ^[26]，%：

$$T_p = \frac{V_s}{V_v} \quad (2)$$

$$V_s = \frac{M_s}{r_s \cdot T_g}, \quad V_v = n - \frac{m_g}{r_f \cdot T_g}$$

$$T_p = \frac{M_s}{T_g \cdot \rho_f - \mu_g} \left(\frac{\rho_f}{\rho_s} \right) \times 100 \quad (3)$$

式中： V_v 为土工布孔隙率，%； V_s 为每单位体积土工布截留的泥沙颗粒体积，%； ρ_s 为泥沙颗粒密度， $2.46 \times 10^6 \text{ g/m}^3$ ； ρ_f 为纤维密度， $1.37 \times 10^6 \text{ g/m}^3$ ； T_g 为土工布厚度，m； M_s 为每单位面积土工布截留的泥沙颗粒质量， g/m^2 ； μ_g 为每单位面积干净土工布的质量， g/m^2 。

2 结果与分析

2.1 排水中泥沙含量及其粒径分布

2.1.1 排水含沙量

不同试验处理排水含沙量如表 3 所示。3 种试验处理排水含沙量整体差异较小。排水初期，ZT-250 和 ZT-300 处理排水含沙量较大，中期和后期对照处理排水含沙量较大，且后期对照处理排水含沙量分别是 ZT-250 和 ZT-300 处理的 3.1 和 4.2 倍。

表 3 3 种试验处理排水含沙量

处理 Treatments	初期 First stage /(kg·m ⁻³)	中期 Medium-term /(kg·m ⁻³)	后期 Later stage /(kg·m ⁻³)	总平均 Overall mean /(kg·m ⁻³)	标准差 Standard deviation /(kg·m ⁻³)
CK	1.07	1.84	2.26	1.72	0.49
ZT-250	1.37	1.13	0.73	1.08	0.26
ZT-300	1.37	0.99	0.54	0.97	0.34

注：初期值、中期值和后期值分别为每个阶段采集的 3 个样品的平均值；总平均值和标准差是 3 期数值的平均值和标准差。

Note: Values of first stage, medium-term and later stage are means of three samples collected every stage, respectively. Overall means were the average of the means of first stage, medium-term and later stage; Standard deviation and mean are those of three stages.

ZT-250 和 ZT-300 处理的排水含沙量随着试验的进行逐渐降低。土工布在最初遇到水流时，都会有一些细小颗粒的流失，其中与土工布紧挨着的泥沙中的细小颗粒的流失最严重，从而在土工布上方留下一个由较大颗粒形成的一个拱桥。相比之下，较大的颗粒阻遏比其小的颗粒，而小颗粒又会阻遏更小的颗粒，从而导致在与土工布相邻的区域中形成了一个逐级过滤的机构，即渐次过滤层^[27-29]。Aydilek 和 Edil^[29]研究发现在土工布表面能形成 0.4~1.5 mm 的滤饼，有助于土工布拦截泥沙。此外，随着试验的进行，充填水沙对土工布的侧向压力逐渐增大，导致土工布的孔隙与垂直渗透系数逐渐减小^[30-32]，如速宝玉等^[32]研究发现当正压力为 50 kPa 时，无纺土工织物的渗透系数与无压时相比可减少一半左右，因此其拦截泥沙的能力逐渐提高。此外，ZT-250 和 ZT-300 2 个处理初期、中期及后期的排水含沙量差异均较小。虽然 ZW-250 土工布比 ZW-300 的厚度更薄，质量更轻，等效孔径和垂直渗透系数更大，但由于泥沙颗粒随水流透过土工布均需要沿着土工布的高度方向才能到达排水断面底部，在土工布表面的移动距离远大于土工布的厚度，在此过程中泥沙颗粒被土工布截留的机会大大增加，减弱了厚度等因素对土工布拦截泥沙能力的影响^[19]，导致 ZW-250 和 ZW-300 2 种土工布拦截泥沙的能力差异较小。

对照处理的排水含沙量随着试验的进行逐渐增大。可能是由于初期排水口高度较高，在充填过程中有足够的时间让泥沙沉降，因此排水含沙量较低。中期和后期随着排水口高度的逐渐降低，充填泥沙在玻璃槽内的沉降时间缩短，未沉降的泥沙随排水流失，导致排水含沙量增大。从排水含沙量的变化情况可以看出，随着试验的进行，土工布渐渐发挥作用，降低了排水中的泥沙含量。而传统的排水方式为了快速排水，导致部分未来得

及沉降的泥沙随排水流失，而流失的这部分泥沙基本都是粒径较细、养分含量较高的泥沙。

2.1.2 排水泥沙粒径

3 种处理排水泥沙粒径分布及特征粒径如表 4 所示。在排水初期和中期,对照 CK 的排水中泥沙各个特征粒径均小于使用土工布的 2 个处理 ZT-250 和 ZT-300,而黏粒含量均高于使用土工布的 2 个处理。排水后期 CK 的排水

泥沙特征粒径与处理 ZT-250 和 ZT-300 相当，黏粒含量介于处理 ZT-250 和 ZT-300 之间。对比表 1 和表 4 可以看出，排水中泥沙的特征粒径分布明显不同于试验前泥沙，例如 ZT-250 和 ZT-300 处理排水中泥沙的 D_{90} 分别为 18.75 和 19.16 μm ，而试验前泥沙的 D_{90} 为 254.81 μm 。由此推断，2 种土工布对泥沙中的大颗粒均有很好的拦截作用。

表 4 不同处理下排水泥沙粒径分布及特征粒径
Table 4 Grain size distribution and characteristic grain size of sediments in drainage of different treatments

处理 Treatments	变量 Variables	特征粒径 Characteristic grain size/ μm					粒径级配 Grain size distribution/%		
		D_{10}	D_{15}	D_{50}	D_{85}	D_{90}	黏粒 Clay ($<4\ \mu\text{m}$)	粉粒 Silt ($\geq 4\sim 62\ \mu\text{m}$)	砂粒 Sand ($\geq 62\sim 2000\ \mu\text{m}$)
ZT-250	初期值	2.87	3.54	9.54	18.05	20.18	18.98	81.02	0
	中期值	2.89	3.53	9.10	16.87	18.82	19.30	80.70	0
	后期值	2.59	3.16	7.89	15.28	17.25	23.15	76.85	0
	总平均值	2.79	3.41	8.84	16.74	18.75	20.48	79.52	0
	标准差	0.14	0.18	0.70	1.14	1.20	1.89	1.89	0
	变异系数/%	4.92	5.16	7.90	6.79	6.39	9.25	2.38	NA
ZT-300	初期值	2.37	2.92	9.02	17.33	19.28	23.91	76.09	0
	中期值	2.02	2.41	7.56	16.78	18.95	31.26	68.74	0
	后期值	1.65	1.96	6.99	16.88	19.25	36.69	63.31	0
	总平均值	2.01	2.43	7.86	17.00	19.16	30.62	69.38	0
	标准差	0.29	0.39	0.86	0.24	0.15	5.24	5.24	0
	变异系数/%	14.46	16.11	10.89	1.40	0.79	17.10	7.55	NA
CK	初期值	1.09	1.24	2.06	4.23	6.61	84.42	15.58	0
	中期值	1.73	2.03	5.54	14.90	17.31	39.54	60.46	0
	后期值	1.84	2.19	7.06	15.57	17.98	32.51	67.49	0
	总平均值	1.56	1.82	4.88	11.56	13.97	52.16	47.84	0
	标准差	0.33	0.41	2.09	5.20	5.21	22.99	22.99	0
	变异系数/%	21.33	22.80	42.88	44.93	37.29	44.09	48.06	NA

注：粒径分类参考《SL 42-2010 河流泥沙颗粒分析规程》；NA 代表不可用。
Note: Particles were classified according to texture classification system of technical standard for determination of sediment particle size in open channels (SL 42-2010). NA is not applicable.

随着试验的进行，使用土工布的 2 个处理排水中泥沙的黏粒含量逐渐升高，粉粒含量逐渐降低，这是由于土工布逐渐发生淤堵，内部的较大孔隙逐渐被堵塞，只有粒径更细的泥沙才能通过^[19, 23]，而在土工布表面也逐渐形成渐次过滤层^[27-29]，不但降低了泥沙的通过能力，而且导致只有粒径更细的泥沙才能通过。在试验的不同阶段，ZT-300 处理中的黏粒含量均高于 ZT-250 处理，这是由于 ZT-300 处理使用的土工布等效孔径比 ZT-250 处理的更小，能通过的泥沙粒径相对更小，导致排水中泥沙粒径更细，黏粒含量更高。

与土工布处理相反，对照处理排水中泥沙的黏粒含量逐渐降低，粉粒含量逐渐升高。这是由于在初期排水阶段，对照处理的排水口高度较高，在开始排水前有充足的时间沉降砂粒及绝大部分粉粒，排水中几乎都是未来得及沉降的黏粒。因此，初期排水泥沙中黏粒含量最高。随着试验的进行，为加速排水，排水口高度逐渐降

低，泥沙沉降时间缩短，未来得及沉降、随排水流失的粉粒越来越多，排水泥沙浓度逐渐增大，且排水中泥沙的粉粒含量逐渐升高，黏粒含量逐渐降低。此外，对照 CK 处理排水中的泥沙粒径变异性大，说明随着排水口高度的变化，排水中泥沙粒径变化较大。而使用土工布的 2 个处理排水中泥沙粒径变异性均较小，说明土工布拦沙效果较为稳定。

2.2 充填泥沙粒径分布及含水率

2.2.1 玻璃槽内充填表层泥沙粒径分布

3 种处理玻璃槽内充填表层（0~2 cm）泥沙粒径分布及特征粒径如表 5 所示。3 种处理表层泥沙的特征粒径无明显差异。3 种处理表层泥沙均以砂粒为主，粉粒含量很低，无黏粒。其中使用土工布的 2 种处理 ZT-250 和 ZT-300 的表层泥沙含砂粒 97%以上，而对照 CK 的表层泥沙含砂粒在 98%以上。3 种处理极细砂粒的含量存在一定差异，高低排序为 ZT-250>ZT-300>CK。

表 5 3 个不同处理的玻璃槽内充填表层（0~2 cm）泥沙粒径分布及特征粒径

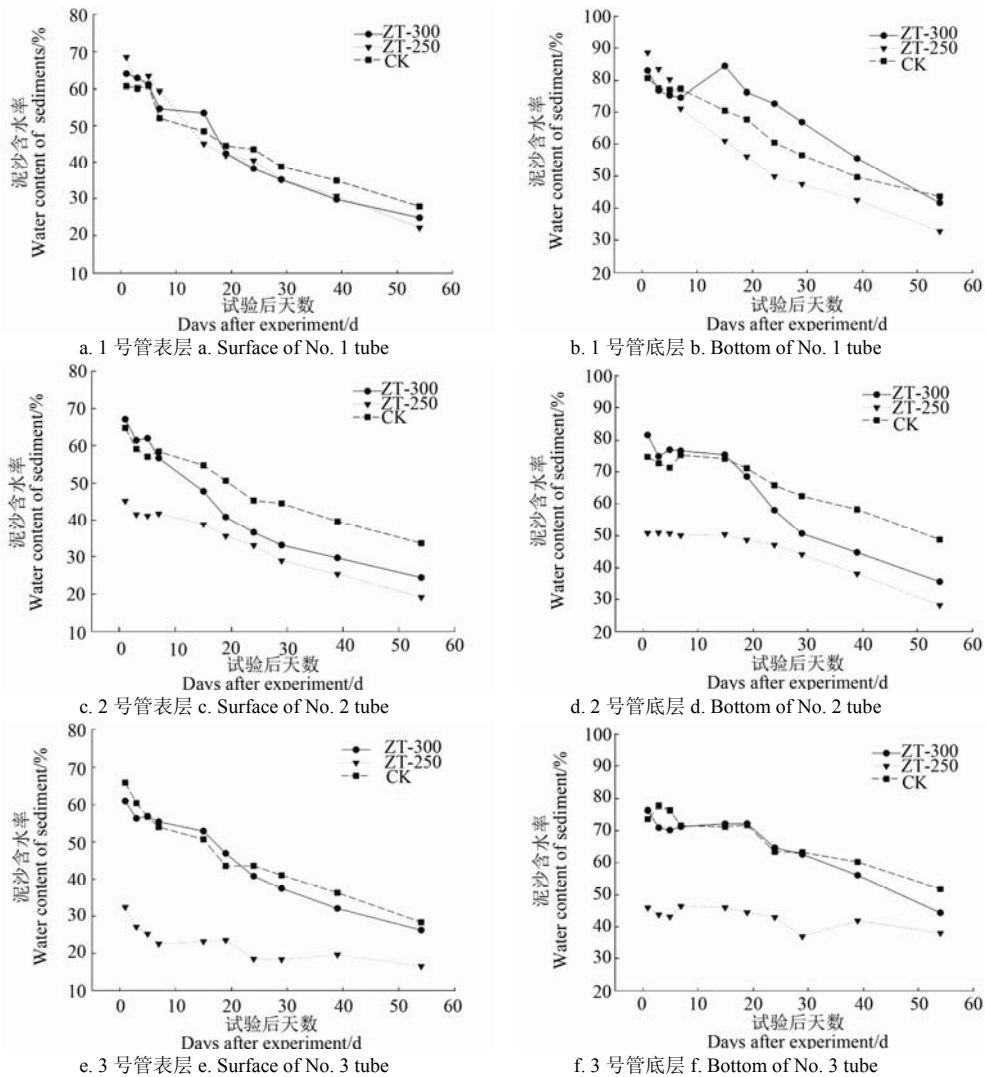
Table 5 Grain size distribution and characteristic grain size of surface sediments (0-2 cm) filled in 3 glass tanks with different treatments

参数 Parameters	ZT-250			ZT-300			CK		
	平均值 Means	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%	平均值 Means	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%	平均值 Means	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%
$D_{10}/\mu\text{m}$	75.23	1.94	2.58	76.34	4.21	5.51	80.24	2.38	2.97
$D_{15}/\mu\text{m}$	80.04	2.12	2.65	81.7	4.5	5.51	85.56	2.65	3.1
$D_{50}/\mu\text{m}$	105.8	4.61	4.35	111.82	8.27	7.4	116.63	5.49	4.71
$D_{85}/\mu\text{m}$	143.41	9.81	6.84	156.73	14.5	9.25	164.53	9.68	5.88
$D_{90}/\mu\text{m}$	154.43	11.34	7.34	169.54	15.97	9.42	178.31	10.5	5.89
黏粒 Clay ($<4\mu\text{m}$)	0	0	NA	0	0	NA	0	0	NA
粉粒 Silt ($\geq 4\sim 62\mu\text{m}$)	2.11	0.72	34.13	2.46	1.5	60.98	1.1	0.44	40.1
极细砂 Very fine ($\geq 62\sim 125\mu\text{m}$)	70.22	6.48	9.23	61.6	8.44	13.71	57.6	5.82	10.1
细砂 Fine ($\geq 125\sim 250\mu\text{m}$)	27.27	6.08	22.31	35.01	8.92	25.48	40.09	5.58	13.92
中砂 Medium ($\geq 250\sim 500\mu\text{m}$)	0.41	0.33	79.79	0.94	0.62	65.9	1.21	0.48	39.83
粗砂 Coarse ($\geq 500\sim 1000\mu\text{m}$)	0	0	NA	0	0	NA	0	0	NA
极粗砂 Very coarse ($\geq 1000\sim 2000\mu\text{m}$)	0	0	NA	0	0	NA	0	0	NA

2.2.2 充填泥沙含水率

3 种试验处理表层和底层泥沙含水率变化情况如图 3 所示。对于表层泥沙来说，1 号管测定的 3 种处理泥沙含水率差异较小。而 2 号管和 3 号管测定的 3 种处理泥沙含水率差异较大，尤其是 ZT-250 处理，从试验结束第 1 天开始表层泥沙含水率就一直低于对照处理，直至试验结束。而

ZT-300 处理的表层泥沙含水率与对照处理的差异较小。对于 2 号管，试验结束 7 d 以后 ZT-300 处理的表层泥沙含水率开始小于对照处理。对于 3 号管，试验结束前 3 d ZT-300 处理的表层泥沙含水率低于对照处理，然后从第 5~21 天高于对照处理，从第 22 天开始又低于对照处理。对于表层泥沙含水率来说，ZT-250 处理的排水效果最好。



注：1、2 和 3 号管分别测定表层（0~15 cm）和底层（15~30 cm）泥沙含水率。
Note: Water content of surface (0~15 cm) and bottom (15~30 cm) sediments of No. 1, 2 and 3 tubes was measured, respectively.

图 3 3 种处理玻璃槽内表层和底层泥沙含水率变化

Fig. 3 Water content change of surface and bottom sediments of three treatments in glass tank

对于底层泥沙来说, 1、2 和 3 号管测定的 3 种处理泥沙含水率差异均较大。对于 1 号管来说, 试验结束 7 d 以后, ZT-250 处理的底层泥沙含水率开始小于对照处理。对于 2 号和 3 号管来说, 试验结束第 1 天开始, ZT-250 处理的底层泥沙含水率就开始小于对照处理, 直至试验结束。而 ZT-300 处理的底层泥沙含水率与对照处理的差异较小, 且出现反复, 但整体排水效果仍优于对照处理。对于底层泥沙含水率来说, 仍然是 ZT-250 处理的排水效果最好。

传统的排水方式 (CK 处理) 在明水阶段排水较快, 但后期由于排水断面玻璃板 (实际复垦工程中相当于围堰土堤) 的阻隔, 侧向排水基本停止, 只能依靠垂向渗透排水, 排水效率低。而使用土工布不但可以拦截部分细粒径泥沙, 而且在后期可以持续侧向排水, 加速了充填泥沙中过饱和水的排除。本试验设计充填模型为玻璃槽, 底部密封, 排除了垂向渗透排水这一因素的影响, 而 3 种处理的蒸发排水速率基本一致, 因此表层与底层泥沙含水率变化的差异主要来自侧向排水能力的差异。其中使用土工布的 2 种处理排水能力的差异主要是 2 种土工布的渗透能力差异造成的。

Farias 等^[19]研究表明土工布越厚, 等效孔径越小, 对泥沙的拦截能力越强, 排水速率越慢。土工布在拦沙排水过程中均会发生不同程度的淤堵, 可以用泥沙截留率来反映其淤堵程度。Faure 等^[26]研究显示发生一定程度淤堵后的土工布的渗透能力与其泥沙截留率的对数成负线性相关关系, 而土工布的泥沙截留率可以按照式 (2) 和式 (3) 计算。ZW-250 和 ZW-300 2 种土工布的厚度及试验前干净时的单位面积质量如表 2 所示。试验结束发生淤堵后的 2 种土工布 ZW-250 和 ZW-300 烘干的单位面积质量分别为 400 和 472 g。将这些数值代入式 (3), 得到 ZW-250 和 ZW-300 2 种土工布的泥沙截留率分别为 8.48% 和 9.2%。根据文献^[26]的研究可以得出发生部分淤堵后的土工布的渗透能力大小关系为: ZW-250>ZW-300。本研究中, 试验前 ZW-250 土工布的等效孔径和垂直渗透系数均大于 ZW-300, 试验完成发生部分淤堵后的土工布的渗透能力仍然是 ZW-250 高于 ZW-300, 说明 ZW-250 土工布的长期排水速率持续优于 ZW-300, 这也正是使用土工布的 2 种处理排水能力差异的根本原因, 研究结论与文献^[19]的研究结果相一致。

3 结论与讨论

1) 3 种试验处理排水含沙量整体差异较小。排水初期, ZT-250 和 ZT-300 处理排水含沙量较大, 中期和后期对照处理排水含沙量较大, 且后期对照处理排水含沙量分别是 ZT-250 和 ZT-300 处理的 3.1 和 4.2 倍。使用土工布的 2 种处理的排水含沙量差异较小, 且随着试验的进行逐渐降低, 拦沙效果逐渐显现, 而对照处理排水含沙量随着试验的进行逐渐增大。

2) 排水初期和中期, 对照 CK 的排水中泥沙各个特征粒径均小于使用土工布的 2 个处理 ZT-250 和 ZT-300, 而黏粒含量均高于使用土工布的 2 个处理。排水后期 CK

的排水泥沙特征粒径与处理 ZT-250 和 ZT-300 相当, 黏粒含量介于处理 ZT-250 和 ZT-300 之间。随着试验的进行, 使用土工布的 2 个处理排水中泥沙的黏粒含量逐渐升高, 粉粒含量逐渐降低, 而对照处理呈现相反的变化趋势。使用土工布的 2 个处理拦沙效果较为稳定。

3) 3 种处理充填表层泥沙粒径级配无明显差异, 但使用土工布处理充填的表层泥沙的极细砂粒含量较高。

3 种处理充填泥沙表层和底层含水率变化存在差异, 使用土工布可以加速泥沙中过饱和水的排除, 其中使用 ZW-250 土工布的 ZT-250 处理排水效果最好, 但在实际工程中的应用效果还需要进一步验证。

[参 考 文 献]

- [1] 胡振琪, 肖武, 王培俊, 等. 试论井工煤矿边开采边复垦技术[J]. 煤炭学报, 2013, 38(2): 301—307.
Hu Zhenqi, Xiao Wu, Wang Peijun, et al. Concurrent mining and reclamation for underground coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(2): 301—307. (in Chinese with English abstract)
- [2] B P. BP Statistical Review of World Energy 2014[R]. United Kingdom: BP, 2014.
- [3] Hu Zhenqi, Wang Peijun, Li Jing. Ecological restoration of abandoned mine land in China[J]. Journal of Resources and Ecology, 2012, 3(4): 289—296.
- [4] Hu Zhenqi, Yang Guanghua, Xiao Wu, et al. Farmland damage and its impact on the overlapped areas of cropland and coal resources in the eastern plains of China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2014, 86: 1—8.
- [5] 张明亮, 史同广, 王海霞. 采煤沉陷对生态环境的影响及其修复措施——以邹城矿区为例[J]. 资源开发与市场, 2006, 22(5): 436—437.
Zhang Mingliang, Shi Tongguang, Wang Haixia. Effect of coal-mining subsidence and its ecological remediation: Taking Zhoucheng mine as an example[J]. Resource Development and Market, 2006, 22(5): 436—437. (in Chinese with English abstract)
- [6] 胡振琪, 卞正富, 成枢, 等. 土地复垦与生态重建[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008: 263—272.
- [7] 徐良骥, 黄璨, 章如芹, 等. 煤矸石充填复垦地理化特性与重金属分布特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 211—219.
Xu Liangji, Huang Can, Zhang Ruqin, et al. Physical and chemical properties and distribution characteristics of heavy metals in reclaimed land filled with coal gangue[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(5): 211—219. (in Chinese with English abstract)
- [8] 胡振琪, 戚家忠, 司继涛. 不同复垦时间的粉煤灰充填复垦土壤重金属污染与评价[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 214—218.
Hu Zhenqi, Qi Jiazhong, Si Jitao. Contamination and assessment of heavy metals in fly ash reclaimed soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(2): 214—218. (in Chinese with English abstract)

- [9] 薛世新. 湖泥充填沉陷区在张楼村土地复垦中应用[J]. 能源技术与管理, 2006(5): 58—59.
- [10] 邹朝阳, 时洪超, 孙国庆. 湖泥充填技术在采煤沉陷区复垦中的应用[J]. 中国煤炭, 2009, 35(12): 105—106, 122. Zou Zhaoyang, Shi Hongchao, Sun Guoqing. Application of lake mud stowing technology in the reclamation of subsided areas caused by coal mining[J]. China Coal, 2009, 35(12): 105—106, 122. (in Chinese with English abstract)
- [11] 时洪超. 湖泥充填采煤沉陷区复垦技术在大屯公司的应用[J]. 中国高新技术企业, 2010(3): 69—70.
- [12] 胡振琪, 王培俊, 邵芳. 引黄河泥沙充填复垦采煤沉陷地技术的试验研究[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 288—295. Hu Zhenqi, Wang Peijun, Shao Fang. Technique for filling reclamation of mining subsidence land with Yellow River sediment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(3): 288—295. (in Chinese with English abstract)
- [13] 邵芳, 王培俊, 胡振琪, 等. 引黄河泥沙充填复垦农田土壤的垂向入渗特征[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 54—58. Shao Fang, Wang Peijun, Hu Zhenqi, et al. Vertical infiltration characteristics of reclamation farmland soil filled with the Yellow River sediment[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(5): 54—58. (in Chinese with English abstract)
- [14] 周立华, 赵东辉. 土工织物在宁夏黄河段整治工程中的应用[J]. 宁夏工程技术, 2005, 3(4): 370—373. Zhou Lihua, Zhao Donghui. Application of geotextile in the Yellow River channel realignment in Ningxia[J]. Ningxia Engineering Technology, 2005, 3(4): 370—373. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘文龙, 罗纨, 贾忠华, 等. 黄河三角洲暗管排水土工布外包滤料的试验研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 109—116. Liu Wenlong, Luo Wan, Jia Zhonghua, et al. Experimental study on geotextile envelope for subsurface drainage in Yellow River Delta[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(18): 109—116. (in Chinese with English abstract)
- [16] Faure Y H, Ho C C, Chen R H, et al. A wave flume experiment for studying erosion mechanism of revetments using geotextiles[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28(4): 360—373.
- [17] Palmeira E M, Totto J. Behaviour of geotextile filters in armoured slopes subjected to the action of waves[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015, 43(1): 46—55.
- [18] Hong Y S, Wu C S. Filtration behaviour of soil-nonwoven geotextile combinations subjected to various loads[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, 29(2): 102—115.
- [19] Farias R J C, Palmeira E M, Carvalho J C. Performance of geotextile silt fences in large flume tests[J]. Geosynthetics International, 2006, 13(4): 133—144.
- [20] 张永栋, 王均平, 魏明建, 等. 北京市昌平区钻孔岩芯的磁化率与粒度组份变化的相关性研究[J]. 沉积学报, 2012, 30(3): 572—579. Zhang Yongdong, Wang Junping, Wei Mingjian, et al. Correlation between the content of different grain size and magnetic susceptibility in core Changping[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(3): 572—579. (in Chinese with English abstract)
- [21] 朱颖彦, 崔鹏, 陈晓晴. 泥石流堆积体边坡失稳机理的试验与稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3927—3931. Zhu Yingyan, Cui Peng, Chen Xiaoqing. Experiment on mechanism of slope failure of debris flow fan and stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3927—3931. (in Chinese with English abstract)
- [22] SL 235-2012, 土工合成材料测试规程[S].
- [23] 《土工合成材料工程应用手册》编写委员会. 土工合成材料工程应用手册[M]. 第二版, 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 271—321.
- [24] 高佩玲, 雷廷武, 赵军, 等. 坡面侵蚀中径流含沙量测量方法研究与展望[J]. 泥沙研究, 2004(5): 28—33. Gao Peiling, Lei Tingwu, Zhao Jun, et al. Evaluating the measuring methods to sediment concentration in the runoff of slope erosion[J]. Journal of Sediment Research, 2004(5): 28—33. (in Chinese with English abstract)
- [25] Gao Xiaodong, Wu Pute, Zhao Xining, et al. Effects of land use on soil moisture variations in a semi-arid catchment: implications for land and agricultural water management[J]. Land Degradation & Development, 2014, 25(2): 163—172.
- [26] Faure Y H, Farkouh B, Delmas P, et al. Analysis of geotextile filter behaviour after 21 years in Valcros dam[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1999, 17(5/6): 353—370.
- [27] 高翼强, 陈德锋. 非织造土工布的孔径分布及淤堵特性[J]. 产业用纺织品, 1995, 13(4): 23—25.
- [28] 辛选民, 全纪恩, 淮占科, 等. 土工布滤水管性能试验研究[J]. 地下水, 1991(4): 210—213.
- [29] Aydilek A H, Edil T B. Long-term filtration performance of nonwoven geotextile-sludge systems[J]. Geosynthetics International, 2003, 10(4): 110—123.
- [30] 崔中兴, 王志刚. 土工织物滤层的 P~K 与淤堵试验研究[J]. 西北水资源与水工程, 1995, 6(3): 36—39.
- [31] Palmeira E M, Gardoni M G. The influence of partial clogging and pressure on the behaviour of geotextiles in drainage systems[J]. Geosynthetics International, 2000, 7(4/5/6): 403—431.
- [32] 速宝玉, 刘圭念, 张祝添. 无纺土工织物在不同压力下孔径分布与透水性的研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1990, 18(2): 42—47. Su Baoyu, Liu Guannian, Zhang Zhutian. On relationship between porous size distribution and permeability for non-woven geotextile under pressure[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 1990, 18(2): 42—47. (in Chinese with English abstract)

Simulated experiment on drainage and fine sediment retention effects of geotextiles in land reclamation with Yellow River sediments

Wang Peijun^{1, 2}, Shao Fang¹, Liu Junting¹, Li Xingyu¹, Hu Zhenqi^{1*}, Russell S. Yost²

(1. Institute of Land Reclamation and Ecological Restoration, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Department of Tropical Plant and Soil Sciences, University of Hawai'i at Mānoa, Honolulu 96822, Hawaii, USA)

Abstract: Yellow River sediments have been used as filler for land reclamation in mining subsidence land nearby Yellow River. During the reclamation, water is often drained directly and rapidly from outlet excavated in the center of the cofferdam, leading to fine sediments (clay and most of silt) lost with drainage and deposited in ditch, poor lateral drainage of saturated sediments, low drainage efficiency by only vertical infiltration in reclamation strip. In this study, we tested the feasibility of geotextiles used in the Yellow River sediments to increase the lateral drainage velocity and reduce the sediment loss in drainage in a laboratory experiment. The Yellow River sediments were filed in glass tanks to simulate the land reclamation process. Two kinds of geotextiles including 250 (ZW-250) and 300 g (ZW-300) a piece were selected. In the treatments with geotextiles, the whole cross section was opened for drainage. A control without geotextile (CK) was designed with narrow outlet in the center of the cross section for drainage. Similarly, glass holder and wire netting were used for supporting in all the three treatments. Sediment content in the drainage, grain size distribution of sediments in the drainage, grain size distribution of surface sediments (0-2 cm) in the glass tank and water content of filled surface sediments (0-15 cm) and bottom sediments (15-30 cm) in the glass tank of the three treatments were measured by laser grain size analyzer and other conventional methods. The results showed that there was little difference on sediment content in drainage of the three treatments. In the first stage (10 min after drainage stabilization), the sediment content in drainage of ZT-250 and ZT-300 treatments was higher than that of CK, which was opposite for the medium and later stages. In the later stage (10 min before ending experiment), the sediment content in drainage of CK was 3.1 and 4.2 times as high as that of ZT-250 and ZT-300, respectively. During the experiment, the sediment content in drainage of the geotextiles treatments revealed a downward trend, but the CK had an upward trend. In the first and medium stages, the characteristic grain sizes of sediments in drainage of the treatments using geotextiles were higher than those of CK, while the clay content was lower than that of CK. In the later stage, the characteristic grain sizes of sediments in drainage of the treatments using geotextiles were comparable with those of CK, while the clay content of CK was between that of ZT-250 and ZT-300. Same as the trend of sediment content in drainage, the clay content of sediments in drainage of the geotextiles treatments increased, while CK decreased. The coefficient of variation of the clay content in drainage of the treatments using geotextiles was lower than that of CK, indicating that the geotextiles had stable effects on retaining sediments in glass tank. There was little difference in grain size distribution of filled surface sediments in the glass tank, but there was higher content of very fine sediments in ZT-250 and ZT-300 than that of CK. The geotextiles could increase the lateral drainage velocity of the saturated sediments and the treatment of ZT-250 had the best performance. However, the effectiveness of geotextiles on reducing sediment content in the drainage and increasing the lateral drainage velocity of the saturated sediments still need to be verified before used in the field. The research could provide valuable information for the innovation of quick drainage technology of filled Yellow River sediments in mining subsidence land located in the plain mining area with high groundwater level in Eastern China.

Key words: land reclamation; drainage; sediments; mining subsidence land; Yellow River; geotextiles; grain size; water content