

DOI: 10.11766/trxb201705030084

不同复垦方式排土场砾石对饱和导水率和 贮水能力的影响*

吕刚^{1,2} 王磊¹ 卢喜平³ 李叶鑫¹ 刘雅卓¹

(1 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

(2 辽宁工程技术大学水土保持生态修复研究院, 辽宁阜新 123000)

(3 四川省水利科学研究院, 成都 610072)

摘要 露天煤矿排土场是由矿井下采出的煤矸石, 露天矿剥离的表土、岩石及覆土共同组成的松散土石混合堆积体, 其内部含有的砾石对土体导水性能和贮水能力有重要影响, 以往关于砾石对土壤水分的影响多集中于自然土壤, 缺乏对排土场、弃渣场等土石混合工程堆积体的水文-侵蚀过程研究。以海州露天煤矿排土场为研究对象, 基于野外调查采样和室内定水头入渗试验, 研究了排土场不同复垦方式下土体砾石分布特征及其对饱和导水率和贮水能力的影响, 以期为提高矿区水土资源利用效率提供理论依据。结果表明, 不同复垦方式下排土场砾石总量随土层深度呈现增加的趋势, 并且土体剖面砾石总量的平均值表现为农用地最小, 这可能是由频繁耕作导致, 不同土层之间砾石总量无显著差异; 排土场土体不同粒径砾石相对含量平均值的大小顺序为(2~10 mm) > (>20 mm) > (10~20 mm), 表现为大粒径砾石在各种因素的综合作用下正逐渐变为细粒径; 排土场土体饱和导水率均表现为灌木林地最高, 农用地和荒草地较低; 饱和导水率与各粒径砾石含量之间呈极显著线性正相关, 且随着砾石粒径的增大其相关性越强; 排土场土体贮水能力各指标均以灌木林地和荒草地最强, 乔木林地和农用地最差, 并且饱和贮水量与各粒径的砾石含量之间均存在显著或极显著的相关关系, 最大滞留贮水量与各粒径的砾石含量之间均呈现显著的幂函数相关关系, 最大吸持贮水量与粒径2~10 mm砾石含量之间存在显著抛物线相关关系; 对于>20 mm的粒径而言, 影响土壤贮水能力的砾石含量阈值为14%。

关键词 砾石; 饱和导水率; 贮水能力; 露天煤矿; 排土场; 土地复垦

中国分类号 S152.7+1, S152.7+2 **文献标识码** A

砾石是粒径 ≥ 2 mm的岩石或矿物碎屑物, 因成土过程和人类活动的影响, 许多土壤含有一定量的砾石。我国不同地域的土壤中也存在大量砾石, 如北京山区属于粗骨褐土的荒草地土壤表层的砾石含量高达22%以上^[1], 紫色土不同土地利用类型土壤表层砾石含量大小顺序依次为林地>果园>耕地^[2-3], 砾石含量在5%~60%之间, 变异性较大, 黄土高原土石山区天水凤凰山坡下(山脚)的0~60 cm土层砾石含量最大可达39.0%左

右^[4], 六盘山香水河小流域不同植被类型下砾石体积含量位于0.64%~33.92%之间^[5], 桂西北喀斯特峰丛洼地撂荒地表层碎石体积含量在20%以上^[6], 而退耕坡面表层砾石质量含量更高达60%以上^[7]。砾石的存在会影响土壤水分物理性质, 从而对土壤入渗、蒸发、径流与土壤侵蚀等水文过程产生影响, 对此许多学者做了大量的研究。砾石对土壤水分物理性质的影响研究表明, 砾石含量与土壤容重、大孔隙特征存在正相关关系^[3-5],

* 国家自然科学基金项目(51474119)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.51474119)

作者简介: 吕刚(1979—), 男, 吉林九台人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与土壤水文学的教学和科研工作。

E-mail: lvgang2637@126.com

收稿日期: 2017-05-03; 收到修改稿日期: 2017-06-30; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-07-25

与总孔隙度和田间持水量呈负相关关系^[3], 但当砾石含量 < 10% 时, 饱和含水量和田间持水量与砾石含量关系不明显, 当砾石含量 > 10% 时, 饱和含水量和田间持水量与砾石含量变化趋势相反^[9]。砾石对土壤入渗的影响研究表明, 同一负压条件下, 稳定入渗率随砾石含量的增加而降低^[10-11], 并且随着砾石含量的增加, 相同入渗历时内, 累积入渗量减小^[10-12], 特别是粒径 2 ~ 3 mm 砾石与入渗过程成显著的负相关关系, 而 > 25 mm 砾石有利于入渗^[13], 但也有研究表明, 当砾石体积含量在一定范围内时, 稳渗速率随砾石含量增加而增大^[14], 当砾石含量为 10% 时, 土壤入渗率最大, 当碎石含量超过 10% 时, 入渗率反而降低。而砾石覆盖改变了地表性质如粗糙度、孔隙度与表土结构稳定性, 对土壤入渗过程影响显著, 稳定入渗速率及稳定入渗系数与砾石覆盖度呈正相关^[15]。砾石对地表径流的影响研究表明, 含砾石土壤的坡面径流流速大于不含砾石土壤^[16], 且当坡度 > 5° 时, 产流时间与砾石含量呈线性负相关^[17], 径流系数随砾石含量的增加先线性递减后线性递增, 并在 10% 砾石含量处存在一个阈值^[18-19], 这与砾石对入渗的影响存在阈值相同。砾石对土壤蒸发的影响研究表明, 地表砾石覆盖不仅能有效抑制土壤水分蒸发, 还能为作物生长持续提供有效水^[20], 在土壤砾石含量为 0 ~ 20% 时, 土壤蒸发速率随砾石含量增加而降低, 但在砾石含量超过 20% 时, 土壤蒸发速率基本保持稳定, 土壤蒸发速率随砾石粒径增大有升高的趋势^[14], 而土壤的累计蒸发量随砾石含量的增加而减小^[7]; 朱元骏和邵明安^[21]通过对黄土高原北部钙结石含量对土壤水分蒸发过程的影响研究表明, 土壤水分蒸发与钙结石含量之间的负相关关系与钙结石含量增加所导致的土壤含水率降低有关, 并且砾石影响土壤水分蒸发与时间存在一定的关系。此外, 砾石对土壤饱和导水率和贮水能力均有一定影响^[3-4, 14]。可见, 有关砾石对土壤水分、入渗、蒸发、径流等水文过程的影响方面均取得了一定的成果。

煤炭资源的开发对我国乃至世界的经济建设和社会发展起到了重要的支撑作用, 但煤炭的开采势必造成严重的环境破坏, 煤矿区已成为当今世界陆地生物圈最为典型、退化最为严重的生态系统, 其中以露天开采尤为严重, 挖损和压占使地表植被全部丧失, 造成原有土壤结构改变, 而形成的露

天采坑和排土场景观在坡度、坡向、坡型、地表物质组成等方面与原地貌景观要素存在巨大的差异^[22]。排土场是一个巨型松散土石混合堆积体, 具有坡度大、坡长长的松散坡面和岩土压实的平台, 具有物质成分复杂, 盘面沉陷不均衡, 植被恢复难等特点, 对自然环境产生了极为恶劣的影响, 是工矿建设区水土流失最为严重的区域^[23]。排土场松散堆积体主要由矿井下采出的煤矸石, 露天矿剥离的表土、岩石及覆土共同组成, 也称为“矿山工程扰动土”, 是石渣土的一种类型, 与自然状态下形成的土壤相比, 其基本特点是土体中含有较高的硬质砾石, 土层浅薄, 养分含量低, 硬质石块与泥土混杂, 结构性差或无结构, 内部存在较大的孔隙, 易发生优先流形式的降水入渗, 利于对深层土壤水分或地下水的补给^[24], 但当降水量少时又容易造成干旱, 有着比较特殊的水分特征^[25], 在一定程度上排土场土体的水分条件决定着土地的生产力水平。因此, 露天煤矿区排土场退化生态系统重建的关键要素在于土壤水资源的利用和保持。基于此, 本文拟采用野外现场调查采样和室内定水头入渗方法, 以辽宁省阜新市海州露天煤矿为研究对象, 研究排土场不同复垦植被下土体砾石的分布特征及其对饱和导水率和贮水能力的影响, 以期对露天煤矿排土场水土资源的有效利用和植被恢复提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

辽宁省阜新市海州露天煤矿的西排土场, 位于露天矿坑西南部 (121°40'12"E, 41°57'36"N), 总面积约为 13 km², 属北温带大陆性半干旱季气候, 夏季炎热, 年蒸发量 1 790 mm, 年均气温 7.3 °C, ≥10 °C 年积温 3 476 °C, 无霜期 154 d, 年均日照时数 2 865 h, 年均风速 3 m s⁻¹, 年均降水量 511.4 mm, 且多集中于 7、8 月份, 春秋两季干旱少雨, 造成一定程度上的土壤和植被水分亏缺。排土场区呈阶梯状, 分为十多个大盘面, 每个盘面矸石林立、沟壑纵横, 陡坎坡平均坡度 45°, 盘面海拔平均高度为 +270 m, 相对高差为 3 ~ 60 m, 最高处接近 +325 m, 最低处不低于 +240 m, 大部分盘面已停止排矸 13a 以上, 盘面地表矸石有风化, 但仍夹杂着碎石和少量大块矸石, 部分盘面近几年来

由于当地居民无序的挖掘捡采排土场内的弃煤而形成了大量不均匀的坑、沟等地貌状况。2004年,由国土资源部投资对该排土场开展了土地复垦工作。排土场复垦之初为大型的宝塔-阶梯状土石混合堆积体,在复垦前期,利用大型采矿复垦机械进行搬运、平整、压实工作,使“人造场地”恢复成较合理的地形地貌;之后再行客土回填工程,覆土厚度为30 cm,以此建立有利于植物生长的表层和生根层,为后期生物复垦奠定基础。

1.2 样地布设与样品采集

排土场客土均来源于附近的同一荒草地,土壤机械组成基本一致,综合考虑植被类型、地形状况、岩土排弃等因素,在保证立地条件基本一致的前提下,2014年4月在西排土场研究区内根据人工植被恢复现状,在排土场同一区域(复垦年限为10a)内选取相邻但相互之间无影响的4种不同复垦植被类型作为研究对象。具体采样地见表1。

在不同复垦植被下布设20 m × 20 m的代表性样

表1 各样地基本概况

Table 1 Basic situation of the plots

复垦方向 Reclamation direction	地理位置 Geographical position		海拔 Altitude (m)	优势种 Dominant species
	纬度Latitude	经度Longitude		
乔木林地 Arbor forest	41°56'60.00"N	121°39'06.40"E	265 ± 5	榆树 <i>Ulmus pumila</i> L.
灌木林地 Shrub land	41°57'00.20"N	121°39'00.03"E	240 ± 5	火炬树、胡枝子 <i>Rhus typhina</i> , <i>Lespedeza bicolor</i> Turcz.
农用地 Agricultural land	41°57'56.62"N	121°40'05.56"E	260 ± 4	玉米Corn
荒草地 Grassland	41°57'00.42"N	121°38'39.10"E	243 ± 5	狗尾草、白蒿、苦苣菜、猪毛菜等 <i>Setaria viridis</i> (L.) Beauv., <i>Herba artimisiae sieversiana</i> , <i>Ixeris denticulate</i> , <i>Salsolacollina</i> Pall.

地,在每个样地内布设3个取样点,取样点之间呈三角形分布,在每个样点处选取一个1 m × 1 m的样方,去除土壤表层约1~2 cm的枯枝落叶层后,在每个样点处挖60 cm深的剖面,从表层依次往下开始取样,共取7层:0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm、50~60 cm,每层取土样2~3 kg,同时采用100 cm³的环刀和铝盒在每一层各取3个样品,本次试验共采集土样84个,原状环刀土样84个,铝盒土样84个。

1.3 砾石体积含量测定

根据周蓓蓓等^[11]、党宏宇^[26]、张志蓉^[7]研究,结合实际情况,将<2 mm、2~10 mm、10~20 mm、>20 mm作为本次实验粒径分级标准。将所采集的土样风干后用木棍压碎,然后将每个土样取三份样品,每份样品重200 g左右,随后分别过20 mm、10 mm、2 mm筛,并用排水法测量其体积,从而获得各粒径级砾石及细土占总土体的

体积分数。排水法测量样品体积时,土体应在保持一定湿润的条件下进行测量,避免土壤水分或土壤吸水造成的误差。

1.4 土壤水分物理性质测定

土壤容重采用环刀法测定;总孔隙度: $\rho\% = 93.947 - 32.995d$ ^[27], d 为土石混合体容重;毛管孔隙度采用室内环刀原状土吸水法测定;非毛管孔隙度(包括大孔隙)为总孔隙度减去毛管孔隙度。

1.5 土壤饱和导水率测定和贮水能力计算

土壤饱和导水率(K_s):室内环刀定水头法,水头高控制在5 cm;土壤贮水能力计算^[33]:

$$W_c = P_c \times h \times r \times 1000 \quad (1)$$

$$W_{nc} = P_{nc} \times h \times r \times 1000 \quad (2)$$

$$W_t = P_t \times h \times r \times 1000 \quad (3)$$

式中, W_c 为土壤水分最大吸持贮水量,mm; P_c 为毛管孔隙度,%; W_{nc} 为土壤水分最大滞留贮水

量, mm; P_{nc} 为非毛管孔隙度, %; W_1 为土壤水分饱和贮水量, mm; P_1 为总孔隙度, %; h 为土层深度, m; r 为水的比重, $t\ m^{-3}$ 。

2 结 果

2.1 排土场土体剖面砾石分布特征

排土场是人工堆砌而形成的堆土体, 其基质大多与原地貌土壤不同, 主要为矸石、深层岩石等大粒径土壤颗粒, 其他小粒径土壤颗粒一部分为矸石风化而形成, 一部分为复垦的客土。停排若干年后, 排土场土壤在自然重力以及人为活动下进行了重新排序。

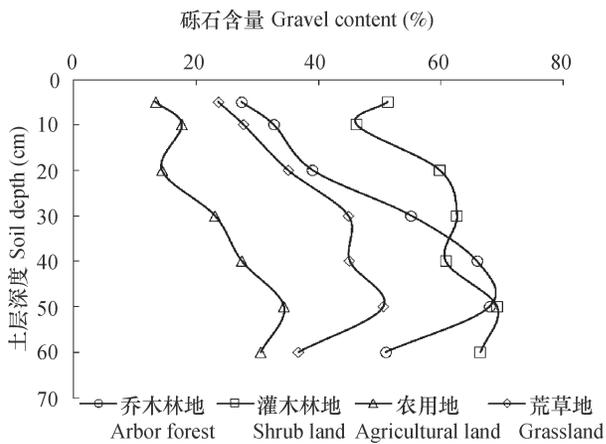


图1 排土场不同复垦植被下砾石含量随土层深度变化规律

Fig. 1 Variation of gravel content with soil depth in reclaimed dump relative to vegetation restored

从图1可以看出, 排土场4种复垦植被下土体中砾石总量 (> 2 mm砾石体积含量) 在0~50 cm深度内基本随土壤深度增加而增加, 但在50~60 cm深度内略有降低, 这与以往的研究并不一致^[2], 这是由于排土场为人工再造土体, 与自然状态下土壤发生层次和质地有着明显的差别, 一般而言, 排土场排土工艺是将大块岩石或碎石排弃在下方, 而细颗粒土体或表土排弃在上方。而且砾石总量随土壤深度的变化有一定规律, 其中乔木林地和荒草地可以用幂函数很好地拟合, 其拟合表达式分别为: ① $G=15.255H^{0.352}$, $R_{0.01}^2=0.805^{**}$, $F=25.739$, $Sig=0.004$, ② $G=15.706H^{0.268}$, $R_{0.01}^2=0.732^{**}$, $F=17.413$, $Sig=0.009$; 灌木林地可以用对数很好地拟合, 其拟合表达式为: ③ $G=7.913\ Ln(H)$

+34.582, $R_{0.01}^2=0.44^{**}$, $F=18.405$, $Sig=0.008$; 农用地可以用线性方程很好地拟合, 其拟合表达式为: ④ $G=0.369H+11.716$, $R_{0.01}^2=0.831^{**}$, $F=30.445$, $Sig=0.003$ 。式中, H 为土层深度 (cm), G 为砾石体积含量 (%)。

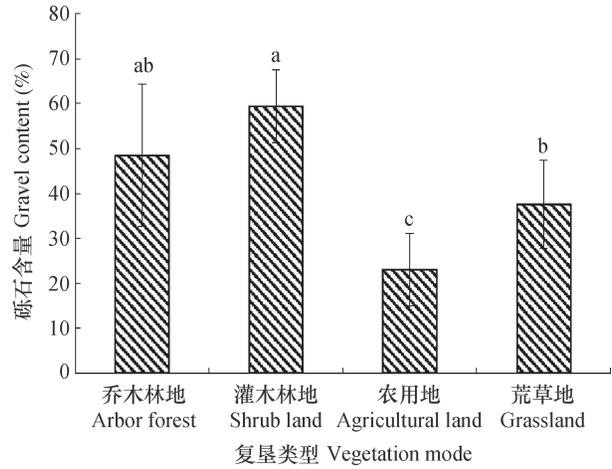


图2 排土场不同复垦植被下土体剖面砾石含量

Fig. 2 Gravel content in reclaimed dump relative to vegetation restored

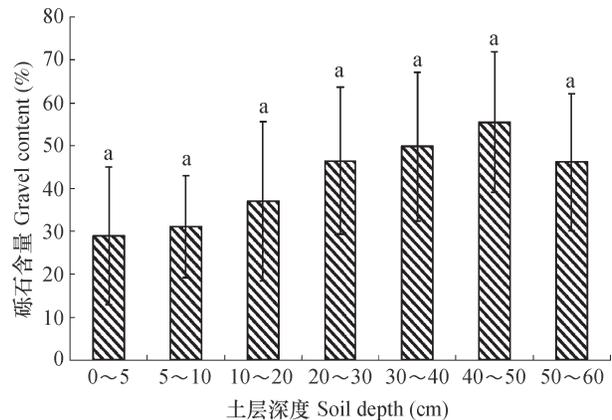


图3 排土场复垦区不同土层间砾石含量

Fig. 3 Gravel contents in different soil layers in reclaimed dump

由图2可知, 从排土场土体砾石总量的剖面平均值 (即以0~5、5~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60 cm这7个土层砾石总量的算术平均值) 来看, 农用地的最小, 平均值为23.04%, 其次为荒草地, 平均值为37.67%, 而乔木林地和灌木林地则分别达到了近50%和60%, 表现为林地 > 荒草地 > 农用地。从差异分析结果来看, 乔木林地和农用地之间差异显著 ($p < 0.05$); 灌木林地、农用地和荒草地之间均有

显著差异 ($p < 0.05$)。由图3可知,排土场复垦区砾石总量以表层0~20 cm深度内的砾石总量相对较低,其中0~5 cm深度内的砾石总量最低,为28.97%,以20~60 cm深度内的砾石总量相对较高,40~50 cm深度内的砾石总量最高,达到了55.48%,方差分析表明,不同土层之间砾石总量无显著差异 ($p > 0.05$),变异系数均在0.1~1之间,属于中等变异,说明排土场复垦区砾石总量在垂直空间分布较为均一。

2.2 排土场土体剖面相对砾石含量分布特征

排土场客土均来源于附近的同一荒草地地块,土壤机械组成基本一致,在停止排矸初期其砾石含量相对较为均一,但复垦后由于整地、耕作、植被生长、降水、风等综合因素的影响,使得不同复垦植被下土体砾石分布存在一定的空间异质性。由图4可以看出,4种复垦植被土体在0~10 cm土层内2~10 mm砾石相对含量较高,均超过了50%,并在10~60 cm土层范围内随着粒径的增大,砾石相对含量均呈下降趋势,这可能由于砾石受到雨水冲刷,可溶性物质和细微土粒遭到淋洗,团聚体形

成缓慢,加之冻融交替现象的存在,岩土中水冻结和融化,使得水分、盐分、土颗粒迁移,细小土粒和矿物的微裂隙中的水膜的楔开压力,导致细小土粒和矿物的破坏,粒径变小,促进了岩石的风化。不同复垦方式下砾石相对含量表现为乔木林地(58.72%) > 农用地(52.87%) > 灌木林地(51.15%) > 荒草地(50.79%)。这可能是因为乔木林枯落物和根系的作用,使得砾石在物理、化学和生物的综合作用下风化的垂直深度更深,而农用地由于频繁耕作,其土壤表层大粒径砾石逐渐减少,小粒径砾石含量相对增加。

从4种复垦植被下土体0~60 cm土层范围内不同粒径砾石的相对含量平均值来看,以粒径10~20 mm砾石的相对含量最低,不同复垦植被之间无显著差异 ($p > 0.05$),且均在30%以下。除乔木林地2~10 mm砾石的相对含量(35.32%)与>20 mm砾石相对含量(36.74%)基本持平外,其余3种复垦植被下均表现为粒径2~10 mm砾石的相对含量高于>20 mm砾石的相对含量。排土场复垦区土体0~60 cm剖面范围内不同粒径砾石相对含量的

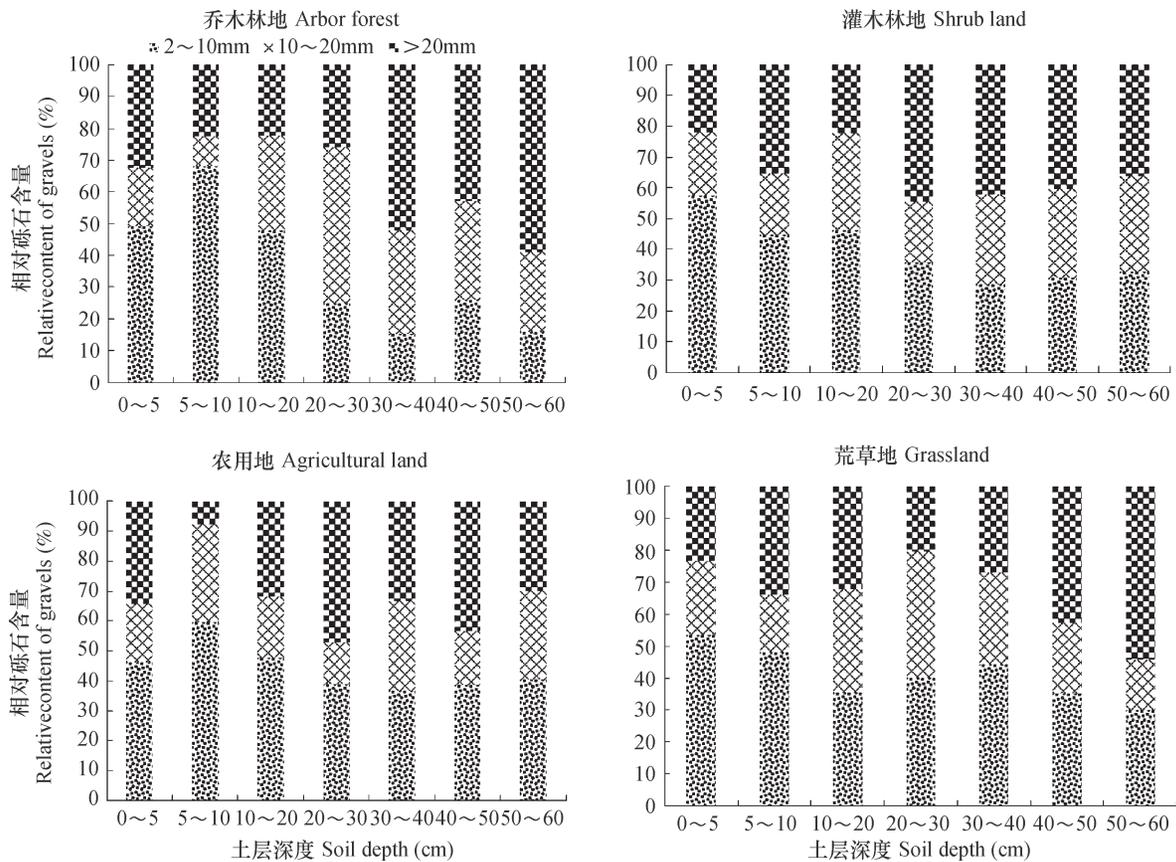


图4 排土场不同复垦植被下土体剖面不同粒径砾石相对含量

Fig. 4 Relative contents of gravels by particle size in reclaimed dump relative to vegetation restored

平均值大小顺序为 (2 ~ 10 mm, 39.94%) > (> 20 mm, 34.33%) > (10 ~ 20 mm, 25.72%)，说明排土场自从实施土地复垦工程以来，其土体大粒径砾石在各种因素的综合作用下正逐渐变为细粒径，但大粒径砾石所占比例仍较高，说明排土场这种特殊的人工再造“土体”形成为真正意义上的“土壤”是个极其缓慢的过程。

2.3 排土场土体砾石对饱和导水率的影响

饱和导水率是反映土壤水分运动的重要指标，在一定程度上体现了土壤的入渗能力和渗漏情况。由图5可以看出，土体饱和导水率大小为：乔木林

地位于0.15 ~ 0.36 mm min⁻¹之间，灌木林地位于0.30 ~ 0.41 mm min⁻¹之间，农用地位于0.16 ~ 0.23 mm min⁻¹之间，荒草地位于0.19 ~ 0.25 mm min⁻¹之间，不同复垦植被下土体饱和导水率随土层加深无明显变化规律，但均表现为土体下层（30 cm以下土层）的饱和导水率要高于上层（30 cm以上土层）的。排土场复垦区0 ~ 60 cm土层深度范围内土体饱和导水率均表现为灌木林地最高，在0.30 mm min⁻¹以上，而农用地和荒草地相对较低，在0.25 mm min⁻¹以下。从图6可以看出，排土场复垦区土体饱和导水率不同土层间无显著差异 (*p* >

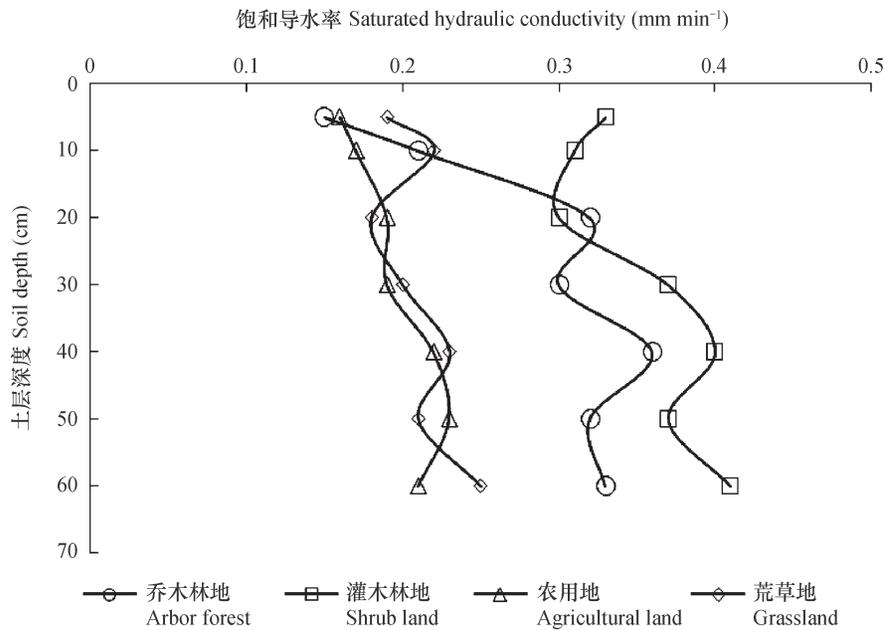


图5 不同复垦植被下饱和导水率随土层深度变化

Fig. 5 Variation of saturated hydraulic conductivity with soil depth in reclaimed dump relative to vegetation restored

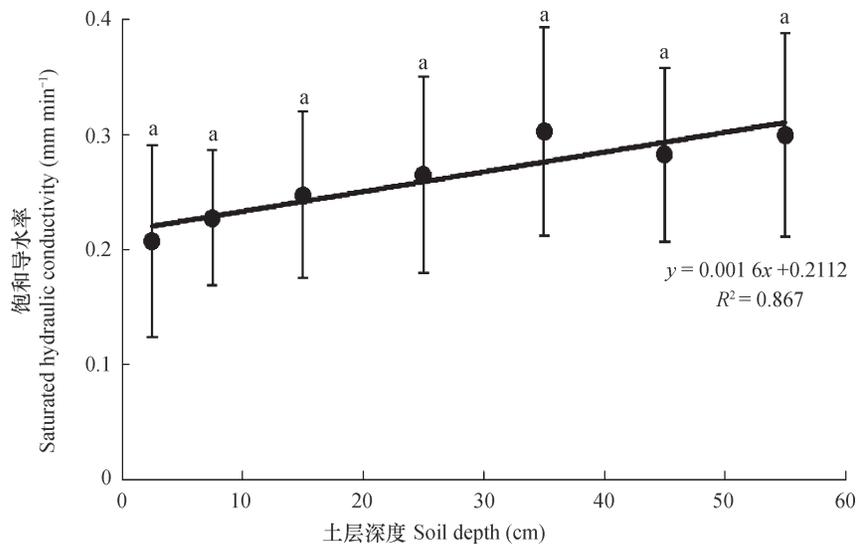


图6 不同复垦植被下饱和导水率均值随土层深度变化

Fig. 6 Variation of mean saturated hydraulic conductivity with soil depth in reclaimed dump relative to vegetation restored

0.05)，但在0~60 cm深度范围内呈极显著线性增加趋势 ($p < 0.01$)，这可能与砾石沿土体剖面分布及粒径大小有关。

砾石的存在使得原本均质的土壤的某些物理特性，如大孔隙数量、过水断面、土壤机械性能等发生改变。砾石一方面会增加水流弯曲度而限制水分入渗，另一方面会因有更多的大孔隙流通道而促进水分入渗和再分布，具体结果依赖于砾石类型、尺寸、含量及其在土层中的位置。已有的研究表明，砾石的存在对土壤饱和导水率的影响可能是正向的也可能是负向的，也可能存在一个阈值，所得出的结论有所差异。周蓓蓓和邵明安^[28]研究表明，土壤饱和导水率随碎石含量先增大后减小，且两者呈二项式关系；时忠杰等^[8]研究表明，在0~60 cm土层内，当砾石含量 < 15%时，稳定出流速率随砾石含量增大而增加，之后转而减少。由图7可知，本研究的海州露天煤矿排土场复垦区土体饱和导水率与 > 2 mm砾石总量呈极显著线性正相关 ($p < 0.01$)，其中在不同粒径中与2~10 mm砾

石含量 ($p < 0.01$)、10~20 mm砾石含量 ($p < 0.01$)、> 20 mm砾石含量 ($p < 0.01$) 也均呈极显著线性正相关，这说明砾石的存在，在一定程度上增加了排土场土体剖面水分的运移速度，且随着砾石粒径的增大其相关性越强，这可能主要归因于土壤中砾石的存在增加了非毛管孔隙的比例和大孔隙数量，有利于水分的下渗。针对土壤饱和导水率的研究，研究人员的试验结果并不一致：已有的研究表明，所得出的结论有所差异。Epstein等^[29]对田间土壤入渗研究认为，碎石的存在有利于入渗；Abrahams和Parsons^[30]针对未经扰动的小区进行研究，得出砾石含量与土壤水分入渗呈正相关，这些研究均认为砾石的存在有利于水分入渗。而周蓓蓓和邵明安^[31]对黄土区进行室内模拟研究砾石对土壤入渗的影响认为当砾石含量 < 10%有利于入渗，> 10%会降低入渗；刘建军等^[32]则认为这个阈值为30%。

参考国内外文献发现，室内模拟实验研究结果，在控制一定土壤物理特性的条件下，砾石含量

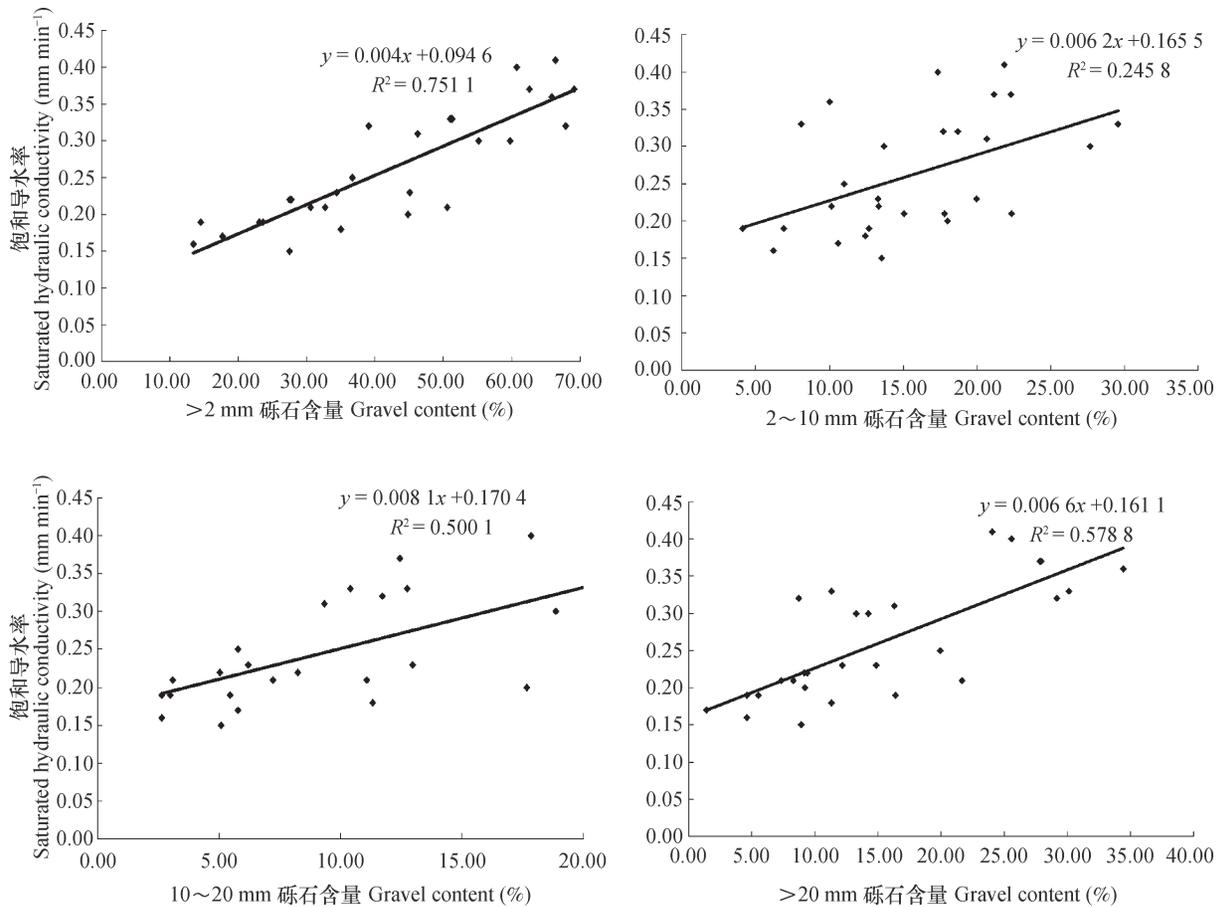


图7 砾石对饱和导水率的影响

Fig. 7 Effect of gravels on saturated hydraulic conductivity

与土壤饱和导水率关系复杂, 普遍认为存在某一阈值, 使得两者之间相关关系发生转折; 而原状土试验中, 大多数研究认为砾石有利于土壤水分入渗。本文认为排土场土石混合土体中的不同粒径砾石的不均匀分布, 使得大孔隙及土壤水通道数量增加, 粒径越大, 形成的通道半径更大, 促进了土壤水分的快速运移。

2.4 砾石对土壤贮水能力的影响

土壤孔隙的大小、数量及分配是土壤物理性质的基础, 在一定土壤厚度条件下土壤的贮水特征取决于土壤孔隙。土壤贮水量(即饱和贮水量)可分为最大吸持贮水量和最大滞留贮水量, 两者具有不同的作用, 土壤最大吸持贮水量主要提供植物所需水分, 土壤最大滞留贮水量反映了暴雨条件下土壤暂时贮存水分、减少地表径流的能力, 两者受到土壤容重及孔隙特征的影响, 进而影响土壤入渗和地表径流等水文过程^[33-34]。由图8可知, 排土场不同复垦植被下土体(0~60 cm)的饱和贮水量

位于260~360 mm之间, 以灌木林地最高, 农用地最低, 二者相差近100 mm; 最大吸持贮水量位于210~280 mm之间, 以灌木林地(273.10 mm)最高, 荒草地(231.55 mm)次之, 农用地(212.78 mm)和乔木林地(211.78 mm)最低, 说明排土场不同复垦植被下土体的持水能力相差不大; 最大滞留贮水量大小依次为荒草地(91.71 mm) > 灌木林地(86.70 mm) > 乔木林地(76.34 mm) > 农用地(46.59 mm)。综合分析可知, 排土场不同复垦植被下土壤贮水能力均以灌木林地和荒草地最强, 乔木林地和农用地最差。而辽西海棠山各林分下0~40 cm自然土体^[35]土壤贮水量为558~1 236 mm, 排土场(0~40 cm)的贮水量为178~240 mm, 前者为后者的2.3倍~6.9倍。这说明, 排土场土石混合土体的土壤涵养水源功能很差, 可能由于砾石大量存在且风化程度低, 使得土壤发育程度低, 土壤结构性差, 不利于生态环境的恢复。

由图9可知, 土壤饱和贮水量与>2 mm砾石

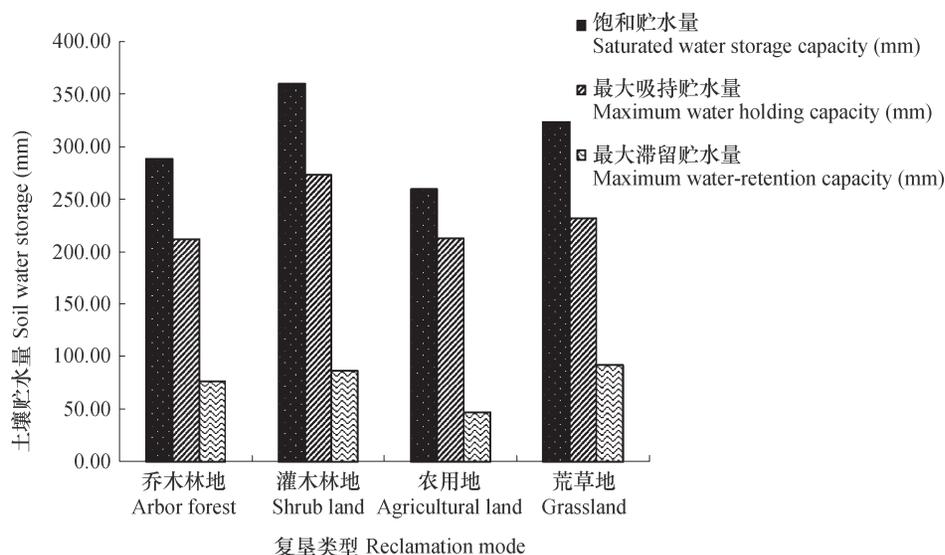


图8 排土场不同复垦植被下的土壤贮水量

Fig. 8 Soil water storage in reclaimed dump relative to vegetation restored

含量之间存在显著对数相关关系($p < 0.05$), 与2~10 mm砾石含量之间存在极显著线性正相关关系($p < 0.01$), 与10~20 mm砾石含量之间存在显著抛物线相关关系($p < 0.05$), 其中与>20 mm砾石含量之间, 当砾石含量在<14%范围内呈极显著线性相关关系($p < 0.01$), 当砾石含量在>14%范围内呈显著抛物线相关关系($p < 0.05$),

且相关性逐渐降低。这说明随着砾石含量的增加, 其对土壤饱和贮水量的影响逐渐减弱, 这与以往研究结论并不一致^[8], 可能是因为其他研究未考虑砾石粒径对土壤饱和贮水量的影响, 大粒径的砾石会使得大孔隙半径增大。研究结果显示, 土壤最大滞留贮水量与>2 mm、2~10 mm、10~20 mm砾石含量之间存在显著幂函数关系($p < 0.05$);

与 > 20 mm 砾石含量之间，当砾石含量在 < 14% 范围内呈显著幂函数相关关系 ($p < 0.05$)，当砾石含量在 > 14% 范围内也呈显著幂函数相关关系 ($p < 0.05$)。这是由于土壤最大滞留贮水量与非毛管孔隙度大小直接有关，而非毛管孔隙度大小主要受土壤中粗颗粒的影响较大，一般而言，土壤粗颗粒含量越高，则土壤非毛管孔隙度越多，土壤的通透性也越强，贮水能力也就越强，但粒径过大会直接影响土壤结构组成及分布，对土壤贮水量的提升可能会起到相反作用。已有研究表明，土壤砾石含量高，它作为非生物因素可能使土壤中的非毛管

孔隙度增加，从而使土壤最大滞留贮水量增强，是决定土壤最大滞留贮水量的关键因素之一 [3, 12]。土壤最大吸持贮水量与 > 2 mm 的砾石含量之间无显著相关关系，与 > 2 ~ 10 mm 砾石含量之间存在显著抛物线相关关系 ($p < 0.05$)，与 10 ~ 20 mm 的砾石含量之间无显著相关关系，与 > 20 mm 砾石含量之间，当砾石含量在 < 14% 范围内无显著线性相关关系，当砾石含量在 > 14% 范围内呈显著抛物线相关关系 ($p < 0.05$)。这是由于土壤最大吸持贮水量的大小直接受毛管孔隙度的影响，而毛管孔隙度反映土壤的保水能力 [36]，其大小主要受土壤

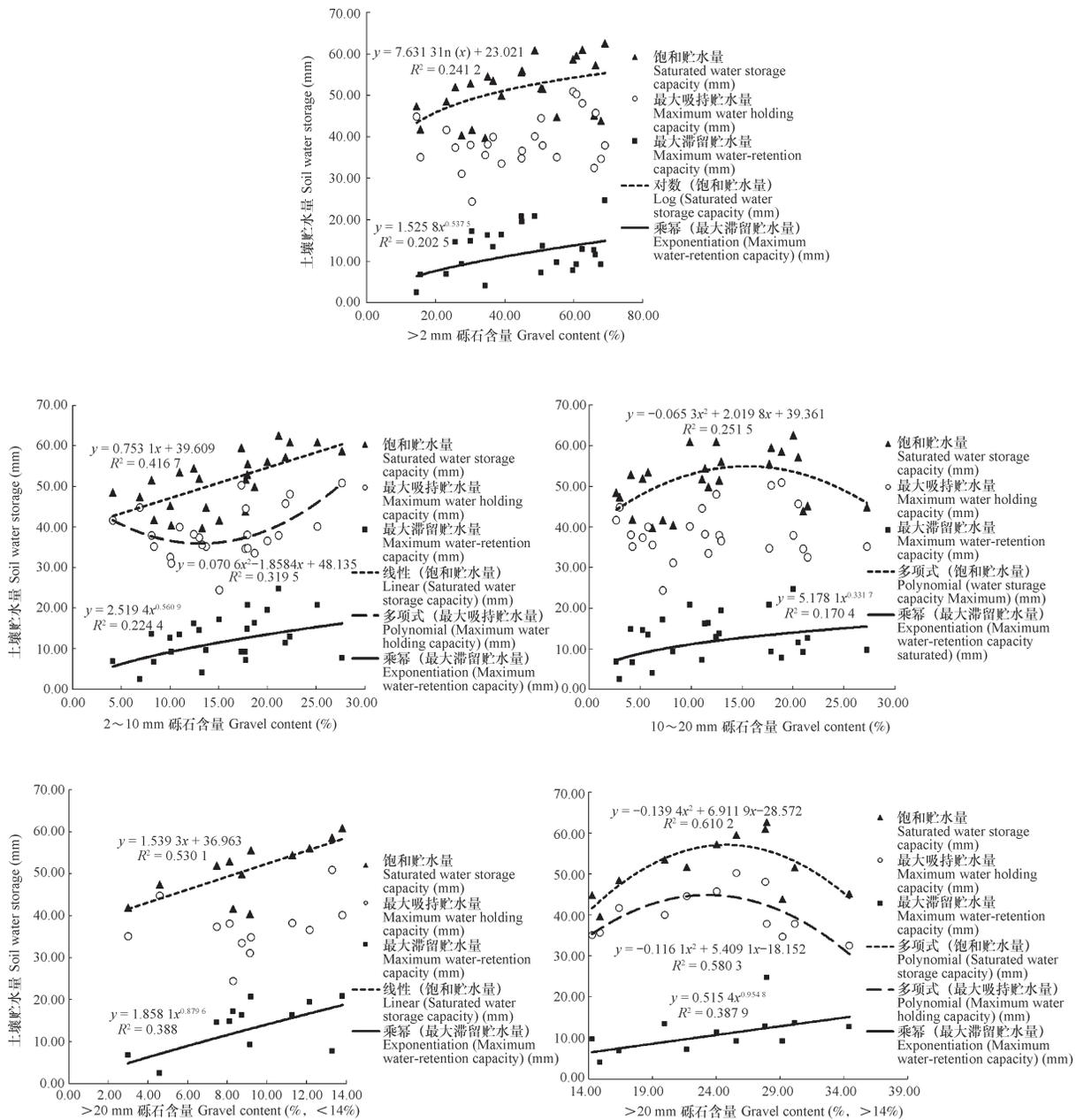


图9 砾石对土壤贮水能力的影响

Fig. 9 Effect of gravel on water storage capacity

中细颗粒的影响较大, 一般而言, 土壤中细颗粒所占比重大, 则土壤毛管孔隙度越多, 贮水能力也就越强。由此可见, 砾石含量和粒径均对土壤贮水能力有一定影响, 特别是对于 $> 20 \text{ mm}$ 的粒径而言, 14% 的砾石含量是影响土壤贮水能力的关键。

3 结 论

本研究基于野外调查采样和室内定水头入渗试验研究得出, 海州露天煤矿排土场复垦区土体中均含有一定量的砾石, 且随土体深度的加深呈现增加的趋势, 砾石总量的剖面平均值表现为林地 $>$ 荒草地 $>$ 农用地, 不同土层之间砾石总量变异性较小, 但大粒径砾石所占比例仍较高, 说明排土场这种特殊的人工再造“土体”形成为真正意义上的“土壤”是个极其缓慢的过程。而不同复垦方式对土壤形成过程的促进作用不同, 荒草地, 灌木林地有利于提高土壤的贮水能力, 乔木、农用地有利于土壤大颗粒物质风化。砾石对土体饱和导水率影响显著, 且随着砾石粒径的增大其相关性越强。粒径大小对土壤贮水能力均有一定影响, 并且在一定的粒径下, 饱和贮水量、最大吸持贮水量、最大滞留贮水量与砾石含量之间可以用相应函数进行较好地拟合, 特别是对于 $> 20 \text{ mm}$ 的粒径而言, 14% 的砾石含量是影响土壤贮水能力的关键。

参 考 文 献

- [1] 符素华, 段淑怀, 刘宝元. 密云石匣小流域土地利用对土壤粗化的影响. 地理研究, 2001, 20 (6) : 697—702
Fu S H, Duan S H, Liu B Y. The impact of land use on soil texture in Shixia watershed of Miyun County, Beijing (In Chinese). Geographical Research, 2001, 20 (6) : 697—702
- [2] 李燕, 魏朝富, 刘吉振, 等. 丘陵紫色土砾石的性质及其空间分布. 西南农业学报, 2008, 21 (5) : 1320—1325
Li Y, Wei C F, Liu J Z, et al. Characteristics and spatial distribution of rock fragments in hilly purple soils of Sichuan Basin (In Chinese). Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2008, 21 (5) : 1320—1325
- [3] 刘中. 三峡库区紫色土中砾石对土壤性质及优先流的影响. 武汉: 华中农业大学, 2014
Liu Z. Research of the impact of gravel in purple soil around the Three Gorges Reservoir on the soil properties and preferential flow (In Chinese). Wuhan: Central China Agricultural University, 2014
- [4] 王慧芳, 邵明安, 王国丽. 黄上高原上石山区碎石分布特征及其导水性质分析. 灌溉排水学报, 2010, 29 (3) : 115—119
Wang H F, Shao M A, Wang G L. Rock fragments distribution and hydraulic conductivity analysis of soil-stone mixture in the mountain area of Loess Plateau (In Chinese). Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29 (3) : 115—119
- [5] 时忠杰, 王彦辉, 熊伟, 等. 六盘山典型植被类型土壤中石砾对大孔隙形成的影响. 山地学报, 2007, 25 (5) : 541—547
Shi Z J, Wang Y H, Xiong W, et al. Effect of rock fragments on the formation of soil macroporosity of typical vegetation in Liupan Mountains of westnorth, China (In Chinese). Journal of Mountain Science, 2007, 25 (5) : 541—547
- [6] 刘建伟. 桂西北喀斯特峰丛洼地石质土壤入渗试验研究. 重庆: 西南大学, 2008
Liu J W. Water infiltration in soils containing rock fragments in Karst Peak-cluster depression area of Northwest Guangxi (In Chinese). Chongqing: Southwest University, 2008
- [7] 张志蓉. 桂西北石质土壤中砾石的分布规律及其对水分性质的影响. 武汉: 华中农业大学, 2008
Zhang Z R. The law of gravel distribution and its effect on water properties of stone soil in northwest of Guangxi (In Chinese). Wuhan: Central China Agricultural University, 2008
- [8] 时忠杰, 王彦辉, 徐丽宏, 等. 六盘山森林土壤的石砾对土壤大孔隙特征及出流速率的影响. 生态学报, 2008, 28 (10) : 4929—4939
Shi Z J, Wang Y H, Xu L H, et al. The influence of rock fragments on the characteristics of macropore and water effluent of forest soils in the Liupan Mountains, Northwest China (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2008, 28 (10) : 4929—4939
- [9] 李燕, 刘吉振, 魏朝富, 等. 丘陵紫色砾质土/砾石土持水性研究. 西南师范大学学报 (自然科学版), 2009, 34 (4) : 62—67
Li Y, Liu J Z, Wei C F, et al. Study on water retention capability of purple rock fragment soils in hills (In Chinese). Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2009, 34 (4) : 62—67
- [10] 李雪垠, 李朝霞, 王天巍, 等. 紫色土中砾石夹层对土壤水分入渗的影响. 水科学进展, 2016, 27 (5) :

- 662—668
Li X Y, Li Z X, Wang T W, et al. Rock interbed containment effect on infiltration processes in purple soil regions (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2016, 27 (5): 662—668
- [11] 周蓓蓓, 邵明安, 王全九. 不同碎石种类对土壤入渗的影响. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2011, 39 (10): 1—8
Zhou B B, Shao M A, Wang Q J. The effect of different types of gravel on soil infiltration (In Chinese). *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2011, 39 (10): 1—8
- [12] 李燕, 刘吉振, 魏朝富, 等. 砾石对土壤水分入渗 (扩散) 的影响研究. *土壤学报*, 2011, 48 (2): 435—439
Li Y, Liu J Z, Wei C F, et al. Effect of rock fragment content on water infiltration (diffusion) in purple soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (2): 435—439
- [13] 王慧芳, 邵明安. 含碎石土壤水分入渗试验研究. *水科学进展*, 2006, 17 (5): 604—609
Wang H F, Shao M A. Experimental study on water infiltration of soil containing rock fragments (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2006, 17 (5): 604—609
- [14] 时忠杰, 王彦辉, 于澎涛, 等. 六盘山森林土壤中的砾石对渗透性和蒸发的影响. *生态学报*, 2008, 28 (12): 6090—6098
Shi Z J, Wang Y H, Yu P T, et al. Effect of rock fragments on the percolation and evaporation of forest soil in the Liupan Mountains, China (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (12): 6090—6098
- [15] 王小燕, 李朝霞, 蔡崇法. 砾石覆盖紫色土坡耕地水文过程. *水科学进展*, 2011, 22 (6): 52—59
Wang X Y, Li Z X, Cai C F. Hydrological processes on sloped farmland in purple soil regions with rock fragment cover (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2011, 22 (6): 52—59
- [16] 吴冰, 朱元骏, 邵明安. 含砾石土壤坡面流速及产流产沙过程研究. *中国水土保持科学*, 2011, 9 (1): 99—103
Wu B, Zhu Y J, Shao M A. Flow velocity and processes of runoff and sediment generation on soils containing gravels (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9 (1): 99—103
- [17] 毛天旭, 朱元骏, 邵明安. 模拟降雨条件下含砾石土壤的坡面产流和入渗特征. *土壤通报*, 2011, 42 (5): 1214—1218
Mao T X, Zhu Y J, Shao M A. Characteristics of runoff and infiltration in stony soils under simulated rainfall conditions (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42 (5): 1214—1218
- [18] 康宏亮, 王文龙, 薛智德, 等. 陕北风沙区含砾石工程堆积体坡面产流产沙试验. *水科学进展*, 2016, 27 (2): 256—265
Kang H L, Wang W L, Xue Z D, et al. Experimental study on runoff and sediment yield from engineering deposition with gravel in the northern windy-sandy region, Shaanxi (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2016, 27 (2): 256—265
- [19] 史倩华, 王文龙, 郭明明, 等. 模拟降雨条件下含砾石红壤工程堆积体产流产沙过程. *应用生态学报*, 2015, 26 (9): 2673—2680
Shi Q H, Wang W L, Guo M M, et al. Runoff and sediment yielding processes on red soil engineering accumulation containing gravels by a simulated rainfall experiment (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26 (9): 2673—2680
- [20] Yuan C P, Lei T W, Mao L L, et al. Soil surface evaporation processes under mulches of different sized gravel. *Catena*, 2009, 78 (2): 117—121
- [21] 朱元骏, 邵明安. 钙结石含量对土壤水分蒸发影响的模拟试验. *农业工程学报*, 2010, 26 (2): 77—81
Zhu Y J, Shao M A. Simulation experiments on soil moisture evaporation affected by calcic nodule contents (In Chinese). *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26 (2): 77—81
- [22] 张莉, 王金满, 刘涛. 露天煤矿区受损土地景观重塑与再造的研究进展. *地球科学进展*, 2016, 31 (12): 1235—1246
Zhang L, Wang J M, Liu T. Landscape reconstruction and recreation of damaged land in opencast coal mine: A review (In Chinese). *Advances in Earth Science*, 2016, 31 (12): 1235—1246
- [23] 魏忠义, 白中科. 露天矿大型排土场水蚀控制的径流分散概念及其分散措施. *煤炭学报*, 2003, 28 (5): 486—490
Wei Z Y, Bai Z K. The concept and measures of runoff-dispersing on water erosion control in the large dump of opencast mine (In Chinese). *Journal of China Coal Society*, 2003, 28 (5): 486—490
- [24] 杨国敏, 王力. 黑岱沟矿区排土场土壤水的氢氧稳定性同位素特征及入渗规律. *煤炭学报*, 2015, 40 (4): 944—950
Yang G M, Wang L. Characteristics of stable isotopes and infiltration rule of soil water at dumping site in Heidaigou opencast coal mine (In Chinese). *Journal of China Coal Society*, 2015, 40 (4): 944—950

- [25] 吕国安, 蔡崇法, 陈明亮, 等. 丹江口库区石渣土土壤水分有效性研究. 水土保持学报, 2002, 16 (3) : 106—109
Lü G A, Cai C F, Chen M L, et al. Study on soil water availability of lithosol in Danjiangkou Reservoir Basin (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16 (3) : 106—109
- [26] 党宏宇. 桂西北喀斯特山区碎石对土壤水分入渗过程的影响的试验研究. 长沙: 中国科学院亚热带农业生态研究所, 2012
Dang H Y. Effects of rock fragments on soil infiltration processes in Karst mountains region of northwest Guangxi, China (In Chinese). Changsha: Institute of Subtropical Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, 2012
- [27] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法. 北京: 科学出版社, 1978
Department of Soil Physics, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Analytical methods of soil physical properties (In Chinese). Beijing: Science Press, 1978
- [28] 周蓓蓓, 邵明安. 土石混合介质饱和导水率的研究. 水土保持学报, 2006, 20 (6) : 62—66
Zhou B B, Shao M A. Study on saturated hydraulic conductivity of soil stone mixtures (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20 (6) : 62—66
- [29] Epstein E, Grant W J, Struchtemeyer R A. Effects of stones on runoff, erosion, and soil moisture. Soil Science Society of America Journal, 1966, 30 (5) : 638—640
- [30] Abrahams A D, Parsons A J. Hydraulics of interrill overland flow on stone-covered desert surfaces. Catena, 1994, 23 (1/2) : 111—140
- [31] 周蓓蓓, 邵明安. 不同碎石含量及直径对土壤水分入渗过程的影响. 土壤学报, 2007, 44 (5) : 801—805
Zhou B B, Shao M A. Effect of content and size of rock detritus on infiltration (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2007, 44 (5) : 801—805
- [32] 刘建军, 王全九, 王春霞, 等. 土石混合介质水分运动规律研究. 灌溉排水学报, 2010, 29 (1) : 109—112
Liu J J, Wang Q J, Wang C X, et al. Research on water movement law of stony-soil media (In Chinese). Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29 (1) : 109—112
- [33] 高茂盛, 廖允成, 李侠, 等. 不同覆盖方式对渭北旱作苹果园土壤贮水的影响. 中国农业科学, 2010, 43 (10) : 2080—2087
Gao M S, Liao Y C, Li X, et al. Effects of different mulching patterns on soil water-holding capacity of non-irrigated apple orchard in the Weibei Plateau (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43 (10) : 2080—2087
- [34] 刘霞, 张光灿, 李雪蕾, 等. 小流域生态修复过程中不同森林植被土壤入渗与贮水特征. 水土保持学报, 2004, 18 (6) : 1—5
Liu X, Zhang G C, Li X L, et al. Characteristics of soil infiltration and water-holding of different forest vegetation in ecological rehabilitation of small watershed (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18 (6) : 1—5
- [35] 吕刚, 曹小平, 卢慧, 等. 辽西海棠山森林枯落物持水与土壤贮水能力研究. 水土保持学报, 2010, 24 (3) : 203—208
Lü G, Cao X P, Lu H, et al. Study on water-holding capacity of forest litter and soil in Haitang Mountain of Western Liaoning Province (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24 (3) : 203—208
- [36] 胡建朋, 杨吉华, 罗明达, 等. 山东石灰岩山地不同林分类型土壤入渗特征研究. 水土保持学报, 2011, 25 (3) : 54—58
Hu J P, Yang J H, Luo M D, et al. Study on characteristics of soil infiltration of different forest types in limestone mountains (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25 (3) : 54—58

The Effect of Gravel on Saturated Hydraulic Conductivity and Water Storage Capacity in Reclaimed Dump Relative to Reclamation Mode

LÜ Gang^{1, 2} WANG Lei¹ LU Xiping³ LI Yexin¹ LIU Yazhuo¹

(1 College of Environment Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

(2 Research Institute of Soil and Water Conservation Ecological Rehabilitation, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

(3 Sichuan Hydraulic Research Institute, Chengdu 610072, China)

Abstract 【Objective】 In open mining, dump is generally a loose rock-earth accumulation body, consisting of coal gangue from mining, topsoil stripped for open mining, rocks and cover soil. The gravels contained in the dump have an important impact on soil hydraulic conductivity and water storage capacity. So far, studies on impact of gravels on soil water have focused mainly on gravels in nature soil, and little has been reported on soil hydrology and erosion of engineering accumulation bodies of mixed rock and soil like dump and dreg dumping site. 【Method】 This study was laid out on the Haizhou opencast coal mine. Field investigations were conducted and samples collected for in-lab water infiltration tests and analysis of distribution characteristics of gravels in dumps reclaimed with different vegetation and its impact on saturated hydraulic conductivity and water storage capacity of the soil in an attempt to provide certain theoretical basis for improving utilization efficiency of the water and soil resources. 【Result】 Results show that the total amount of gravels in dump increased with soil depth. The mean content of total gravels in soil profile was the lowest in agricultural land, which may be explained by frequent farming practices. No significant difference was observed in total amount of gravels between different soil layers; In terms of relative mean content of gravels by particle size, the gravels in the dump exhibited an order of (2 ~ 10 mm) > (> 20 mm) > (10 ~ 20 mm), which demonstrates a trend that large-sized gravels are gradually turning into fine ones as affected by a variety of factors. Saturated soil hydraulic conductivity was the highest in shrub land, which was followed by agricultural land and grassland, and it was significantly, positively and linearly related to gravel content. The relationship got closer with increasing particle size of the gravels. Soil water storage capacity was the highest in shrub land and grassland and the lowest in arbor forest land and agricultural land, and it exhibited a significant or extremely significant relationship with content of gravels by particle size; Maximum water-retention capacity was in significant power function relationship with content of gravels by particle size; maximum water-holding capacity was in significant parabolic relationship with the content of gravels 2 ~ 10 mm in particle size. For gravels > 20 mm in particle size, 14% was the threshold in content affecting soil water storage ability of the soil body. 【Conclusion】 The distribution of gravels in dump varies with reclamation mode; Gravel content has a positive effect on saturated hydraulic conductivity of the dump; and gravel content and particle size does too on soil water storage capacity.

Key words Gravel; Saturated hydraulic conductivity; Water storage capacity; Surface coal mine; Dump; Land reclamation

(责任编辑: 檀满枝)