

工程弃渣用作植物生长基质的研究

陈述悦, 顾卫, 戴泉玉

(北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘要:为资源化利用工程弃渣,对粒径 $<2\text{ mm}$ 的工程弃渣和自然土壤进行了不同体积配比生长实验,结果表明:粒径小于 2 mm 的工程弃渣与自然土壤混合后可以用作植物生长基质,工程弃渣的使用体积比例以 $50\%\sim 70\%$ 为宜;工程弃渣风化程度越高,其养分含量、pH 值及抗旱保墒能力越适合植物生长,但工程弃渣的养分含量一般比较贫乏,需额外添加肥料才能满足植物生长对养分的需求;工程弃渣与自然土壤不同体积配比的混合物的三相没有明显变化规律,但混合物的 pH 值、养分含量、土壤水分常数、种子发芽率、植株保存率等指标随工程弃渣的体积比例变化而规律变化。

关键词:工程弃渣;植物生长基质;配比

中图分类号:S152.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)03-0129-07

Experimental Study on the Use of Engineering Spoil for Plant Growth Substrate

CHEN Shu-yue, GU Wei, DAI Quan-yu

(State Key Laboratory of Earth Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In order to effectively utilize the engineering waste material, engineering spoil with particle size less than 2 mm was mixed with natural surface soil to form substrate for plant growth in this study. The result indicated that $50\%\sim 70\%$ volumetric ratio of engineering spoil was preferable; the spoil with higher weathering degree had better nutrient and pH condition, water retention capability and drought resistance that facilitate plant growth; however, the nutrient content in engineering spoil was relatively low, thus additional fertilizer was required to meet the needs of plant growth; there was no significant difference in three-phase composition among the substrates with different spoil and soil proportions, but obvious variation tendencies were observed in pH, nutrient contents, soil moisture constant, seed germination rate and plant survival rate.

Key words: engineering spoil; plant growth substrate; composition and proportion

工程弃渣是指施工过程中所产生的固体废弃物,根据施工对象的不同,其组成也不同。广义上的工程弃渣分为两类,一类是指当施工对象为建筑物、道路、桥梁等人造物体时,所产生的落地灰、石灰、砂石、碎砖头、混凝土块(包括混凝土熟料散落物)、废钢筋、铁丝、木材、塑料、沥青块、玻璃、陶瓷等混合物;另一类是指当施工对象为山体、河道、植被等自然物体时,所产生的石块、土壤和植物残体等混合物。本文所指工程弃渣为自然物体产生的工程弃渣。

据估算,修建山区高速公路每 1 km 弃渣量可高达 3.4 万 m^3 ^[1],在英国,每年处理的工程弃渣量要达到 $40\sim 50\text{ 万 t}$ 。尽管工程弃渣的再利用已经在建筑行业得到认可,但对其再利用成本、质量、数量以及是否适合作为建筑材料都没有深入研究,从而限制了工

程弃渣的利用。只有小部分工程弃渣被现场利用如景观、便利设施、填筑路堤等,大部分工程弃渣被运往垃圾填埋场^[2]或弃渣场堆置,引发滑坡、泥石流等水土流失问题并破坏了景观协调性,需要对工程弃渣堆实施植被恢复工程^[3]。由于弃渣场欠缺防护措施,弃渣场已经成为水土流失的重要来源和生态环境的主要新增污染点。无疑地,贮存工程弃渣要付出高额的经济和社会成本,最好的办法是发现更多的工程弃渣利用方式,如填充矿井^[4]、道路工程^[5-6]、基础水利工程^[7]、河道堤岸^[8]等,以降低处理成本和环境危害。

工程弃渣与工程创面(岩质坡面、岩质土坡面、土质坡面等)往往相伴而生,为了保护工程主体的安全,需要对工程创面进行植被恢复,为此,要从其他地点挖取大量的自然土壤用作创面植被生长的基质,这将

收稿日期:2011-10-08

修回日期:2011-11-11

资助项目:国家自然科学基金面上项目(30870467)

作者简介:陈述悦(1978—),男,河北邢台人,博士研究生,工程师,研究方向为公路路域生态恢复与重建技术。E-mail:chenshuyue@163.com

通信作者:顾卫(1956—),男,吉林长春人,博士,教授,博士生导师,研究方向为公路路域生态恢复与重建技术。E-mail:weigu@bnu.edu.cn

再次造成生态环境的破坏。

鉴于此,本文设想把工程弃渣改造为植物生长基质,用于工程创面—岩质坡面的生态恢复,这样做既可以变弃渣为资源,在减少弃渣水土流失等问题的同时,解决工程创面的生态恢复问题,还可以降低治理投入,避免二次环境破坏。工程弃渣是经过人为扰动的不成熟土壤,渣多土少、粗骨松散、稳定性差,而且缺乏养分,持水性能差,必须对其进行改造,以适应植物生长。为此,本文开展了工程弃渣与自然土壤的配比生长实验,以确定适合植物生长的工程弃渣与表土体积配比,为工程弃渣用于岩质坡面生态恢复实践提供理论依据和数据支持。

1 实验材料与方法

1.1 实验地点自然条件

实验在北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室房山试验基地(39°30′—39°55′N, 115°25′—116°15′E)进行。房山地处北京西南,属暖温带半湿润大陆性季风气候区。年平均气温 11.9℃,最冷月平均气温为-4.7℃,最热月平均气温为26.0℃;年平均降水量为 582.8 mm,其中 6—8 月降水量为 431.9 mm,占全年降水量的 74%;年平均相对湿度 61%,年平均蒸发量为 1 635.3 mm。

1.2 实验设计

实验于 2010 年 5 月—2010 年 11 月进行。将取

表 3 自然土壤、工程弃渣体积配比

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
工程弃渣比例/%	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
自然土壤比例/%	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

1.3 观测项目

(1) 养分含量:测量两次,分别是播种前和收获后。全氮采用半微量开氏法;有效磷采用化学浸提方法;速效钾采用 NH_4OAC 浸提,火焰光度法;有机质采用重铬酸钾容量法—外加热法。

(2) pH 值按《森林土壤 pH 值的测定》(GB7859—87)测定。

(3) 三相:测量两次,分别是播种前和收获后。取样前,各盆浇水至盆底有水渗出,2~3 d 后,用容积为 100 的环刀取样,在三相仪中测量其三相。收获后,直接用容积为 100 cm^3 的环刀取样,用三相仪测其三相,比较前后两次三相数据。

(4) 吸水性:用环刀取风干土样,下垫滤纸,放在瓷盘中的玻璃皿上,注水,水位略低于培养皿,滤纸浸入水中,每隔 20 min 称重,1 h 后,每隔 2 h 称重,直到第 8 h,停止称重。待到第 3 天,称重,此时含水量

自吉林蛟河、北京房山、内蒙古赤峰、河北徐水四地的工程弃渣(见表 1 和表 2)按照粒径分为 2 mm~1 cm 的工程弃渣和<2 mm 的工程弃渣两种类型,分别和四地的自然土壤按照 11 种不同体积配比(表 3)混合装盆,三次重复,每个盆中均匀撒播 30 粒高羊茅种子,并用遮阳网遮盖,定期浇水,种子发芽长到一定高度,撤去遮阳网,停止人为浇水(极端干旱除外)。限于篇幅,本文只分析粒径<2 mm 的自然土壤和工程弃渣不同体积配比的理化性质变化和对植物生长的影响,粒径为 2 mm~1 cm 的自然土壤和工程弃渣体积配比实验将在另一篇文章中讨论。

表 1 工程弃渣的性质

产地	气候	降雨量/mm	岩性	风化程度
内蒙赤峰	中温带半干旱大陆性季风气候	370.0	火山岩	中风化
北京房山	暖温带半湿润大陆性季风气候	582.5	石灰岩	中风化
河北徐水	暖温带半湿润大陆性季风气候	575.9	页岩	强风化
吉林蛟河	中温带湿润大陆性季风气候	708.8	花岗岩	强风化

表 2 工程弃渣的机械组成

地点	粒径比例/%				
	2 mm~1 cm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.28~0.5 mm	≤0.28 mm
内蒙赤峰	46	19	17	9	9
北京房山	30	15	23	15	16
河北徐水	46	22	14	9	10
吉林蛟河	43	24	17	8	8

为最大含水量。

(5) 持水性:吸水至饱和土样,即可进行持水实验,连续数天(10~12 d)每天定时称重,直到重量不再变化,用前一天重量减去当天称取的重量数,计算当天各配方土中水分的蒸发量。

(6) 土壤水分常数:田间持水量是采用吸水饱和土样,经 2~3 d 后,测其含水量,即得田间持水量;凋萎持水量用 K_2SO_4 法测定最大吸湿水,乘以系数 1.5~2.0 或 1.34,即得凋萎持水量的近似值;

(7) 植物生长状况:发芽率是在播种 15 d 后,开始统计发芽数,计算发芽数占撒播种子数的百分率;保存率是指收获时,测定在不同配方土壤上生长的草的数目,与总的播种数之比即为保存率;株高是指收获时,在每个重复选取有代表性的植株 5 株,用钢尺进行株高测定,求平均值;生物量指收获时,将每种配比的植株全部收获,用水冲洗干净放在通风处将植株

表面的水分吹干,测其鲜重,计算平均值;将茎、叶、根系在 105°C 杀青 30 min,然后在 70°C 下烘干至恒重后称其干重,计算平均值。

2 结果与分析

2.1 不同自然土壤和工程弃渣体积对比对机械组成的影响

土壤机械组成是指组成土壤的颗粒大小及各种大小的颗粒在土壤中的质量百分含量,不同直径的土壤颗粒有着不同的理化特性,确定土壤的机械组成对于评价土壤十分重要。在这里,引入机械组成的概念对植物生长基质进行评价,但为了在实际工程中使用方便,用体积百分含量替代质量百分含量。

根据我国土壤颗粒分级标准,粒径为 $3\text{ mm}\sim 1\text{ cm}$ 的颗粒为粗砾, $1\sim 3\text{ mm}$ 的颗粒为细砾, $0.25\sim 1\text{ mm}$ 的颗粒为粗砂粒, $<0.25\text{ mm}$ 的颗粒为细砂粒、

粉粒和黏粒。土壤不同粒径颗粒对土壤团粒结构的形成和保水保肥的贡献不同,黏粒的减少抑制了土壤的膨胀、可塑性及离子交换等物理性质^[9]。

如图 1 所示,各地工程弃渣与自然土壤机械组成差异较大的,混合后机械组成变化明显,如赤峰,细砾和粗砂粒比例呈下降趋势,而细砂粒、粉粒和黏粒比例呈上升趋势,蛟河工程弃渣与表土混合后,细砾变化不明显,粗砂粒比例呈上升趋势,而细砂粒、粉粒和黏粒呈下降趋势;工程弃渣与自然土壤机械组成相近的,混合后机械组成变化不大。显然,人为调节工程弃渣机械组成是可行的,工程弃渣与自然土壤混合后,粉沙和黏粒的含量呈明显上升趋势,这对于改善植物生长基质的结构和质地,有效增加养分含量具有重要的作用。但这种调节是被动的,受自然土壤机械组成影响巨大,不能够完全按照人们的意志去实现理想的机械组成。

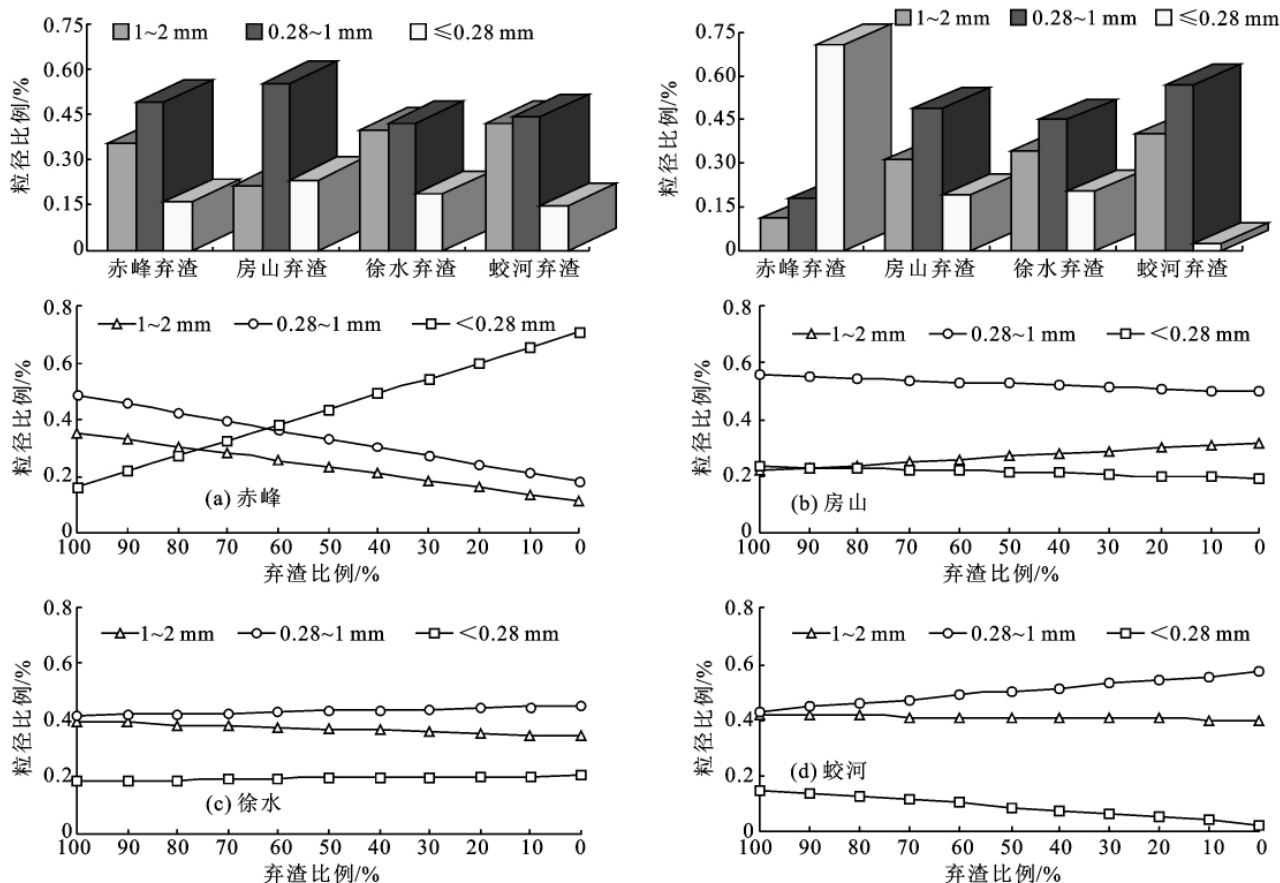


图 1 不同自然土壤和工程弃渣体积对比对机械组成的影响

2.2 不同自然土壤和工程弃渣体积对比对三相的影响

土壤是由固、液、气三相物质组成的一种介于固体和液体之间的颗粒性半无限介质,三相之间是相互联系、相互转化、相互制约、不可分割的有机整体。在任何尺度上,土壤结构的功能特点都是依赖于孔隙、基质在三维空间的连通、扭曲和异质性^[10-11],三相比

的变化决定土壤结构的差异,进而影响土壤功能与肥力水平。

工程弃渣与自然土壤混合后的三相普遍表现为一种规律性,即液相随着工程弃渣比例的降低,呈上升趋势,含水量较低时,上升趋势缓和,含水量较高时上升趋势显著。固相与气相呈轴对称变化,但固相的

变化与工程弃渣比例没有明显关系。在工程弃渣体积比例处于 30%~60% 范围时,固相、液相和气相比率与自然土壤的三相分布接近,即固相部分约占总体积的 1/2,液相和气相各占 1/4 左右^[12-13]。

种植前由松散的自然土壤和工程弃渣混合而成的植物生长基质,因为浇水而发生沉降,颗粒间的结合变

得紧密,固相率普遍较高,平均为 60%;种植后,浇水和降雨使植物生长基质颗粒变得紧密,而植物根系能把粘重的植物生长基质分割成小的颗粒,也能把分散的颗粒粘结成团粒结构,同时促进有机质和腐殖质的积聚形成土壤胶体,综合作用下,固相比率比种植前有所降低,且各配比植物生长基质间的差异缩小(图 2)。

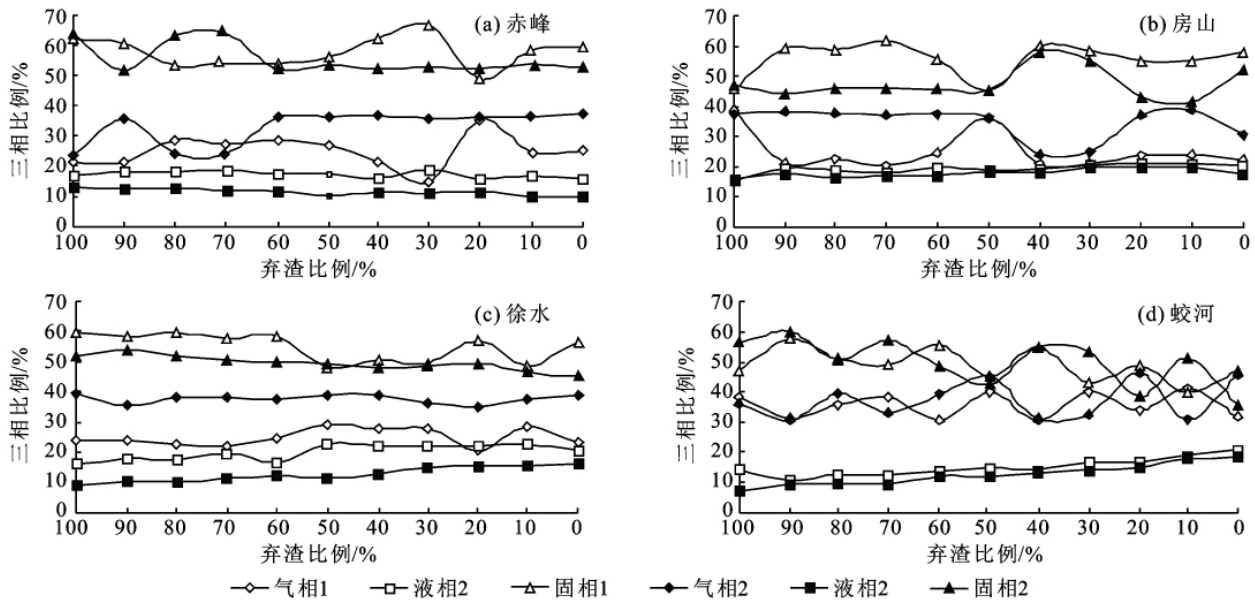


图 2 不同自然土壤和工程弃渣体积对比对三相的影响

2.3 不同自然土壤和工程弃渣体积对比对 pH 值的影响

土壤 pH 值是土壤的一个重要属性,是土壤在其形成过程中受生物、气候、地质、水文等因素综合作用所产生的重要属性^[14]。四地工程弃渣除蛟河属于碱性外(7.5~8.5),赤峰、房山、徐水三地的工程弃渣的 pH 值均属强碱性(>8.5),而四地自然土壤 pH 中,房山最大为强碱性(>8.5),赤峰和徐水为碱性(7.5~8.5),蛟河最小为酸性(5.5~6.5)。这跟四地的岩性、风化强度以及降雨量有关,盐基成分含量高的岩石(如房山的石灰岩等)风化后产生氢氧离子,就使土壤偏碱性或中性;酸性成分的岩石(如蛟河的花岗岩等)发育的土壤,多呈酸性。工程弃渣的 pH 值均高于自然土壤,因此配比后,植物生长基质的 pH 值随着工程弃渣的体积比例降低而降低。

除蛟河外,赤峰、房山、徐水三地的自然土壤与工程弃渣配比植物生长基质整体上仍呈碱性。种植植物后,房山植物生长基质的 pH 值略有下降,蛟河变化不大,而赤峰和徐水植物生长基质的 pH 值却显著升高,对植物的碱性危害反而增大。分析其原因,可能是赤峰和徐水的工程弃渣在浇水、降雨、植物根系生长影响下加速风化,但北方干旱,淋溶作用微弱,致使 pH 值上升。

2.4 不同自然土壤和工程弃渣体积对比对养分的影响

土壤 pH 值对微生物的活性、矿物质的有效性和有机质的分解起到重要作用,因而影响土壤养分的释放、固定和迁移等^[15]。土壤 pH 值和大部分养分元素的有效性存在较好的相关性^[14],但土壤是一个复杂的功能体,其 pH 值对有效养分的影响因土壤条件不同而不一致^[16]。这与本实验的结果基本相符,有机质和 N、P、K 等养分都随着植物生长基质的 pH 值升高而降低,整体呈负相关。北方高产旱作土壤的养分标准为:有机质含量一般在 15~20 g/kg 以上,全氮含量达到 1~1.5 g/kg,有效磷(P)含量 10 mg/kg 以上,速效钾含量 150~200 mg/kg 以上,而在四地中,只有强风化的蛟河工程弃渣能够满足此标准。种植后,由于降水携带和植物生长消耗,各种养分都比种植前有所下降,尤其是有机质、全氮和有效磷的消耗比较明显。

2.5 不同自然土壤和工程弃渣体积对比对土壤水分常数的影响

凋萎持水量反映了植物对干旱的最大忍受能力,凋萎持水量越小,植物抗旱能力越强,最有效的含水量是从田间持水量到凋萎持水量之间的水分。不同级配渣石组合及渣石压实均能提高渣石拦水能力,减小渗水系数^[17],工程弃渣与自然土壤配比意味着不同粒径的颗粒进行重新组合,从而导致植物生长基质

结构、养分含量和有机质含量等发生变化,影响田间持水量、凋萎持水量和有效水分。

研究表明,随着黏粒含量的增加,田间持水量和凋萎持水量呈增加趋势,且两者符合对数函数关系;干容重越大,田间持水量和凋萎持水量越小,且两者符合线性函数关系;有机质含量越多,田间持水量和凋萎持水量越大,且两者符合对数关系^[18]。随着工程弃渣体积比例减小,有机质增加,容重减小,田间持

水量呈增加趋势(表 4)。凋萎持水量变化要比田间持水量复杂,赤峰和房山的凋萎持水量变化与容重呈正相关,与有机质呈负相关,而徐水和蛟河凋萎持水量与容重呈负相关,与有机质呈正相关。由于本实验没有单独测量黏粒的含量,而是把细砂粒、粉粒和黏粒作为一个整体测算,并不确定黏粒对田间持水量和凋萎持水量的影响,因此还不能给出四地凋萎持水量变化趋势相反的原因。

表 4 不同自然土壤和工程弃渣体积比对土壤水分常数的影响 %

弃渣比 例/%	赤峰		房山		徐水		蛟河	
	田间持水量	凋萎持水量	田间持水量	凋萎持水量	田间持水量	凋萎持水量	田间持水量	凋萎持水量
0	26.12	6.28	27.36	8.78	23.68	7.42	36.19	7.53
10	23.68	6.93	28.44	9.03	22.72	7.62	31.87	7.13
20	21.85	6.78	26.91	9.32	23.70	6.63	30.49	6.84
30	20.25	6.95	25.49	9.96	22.49	7.22	28.24	6.62
40	20.01	7.00	22.30	9.36	23.39	6.66	26.24	6.25
50	17.00	6.96	23.25	10.08	23.89	6.86	23.25	5.85
60	17.09	7.19	22.45	10.13	23.11	6.59	22.40	5.92
70	16.26	7.02	21.88	10.23	22.38	6.29	20.87	5.60
80	15.94	7.31	20.53	10.17	22.70	6.29	19.40	5.42
90	16.17	7.50	20.37	11.33	20.87	6.01	16.93	5.03
100	16.00	7.17	18.38	11.12	21.81	5.94	16.71	5.35

2.6 不同自然土壤和工程弃渣体积比对吸水性的影响

土壤水分常数并不能充分说明植物生长基质水分的全部情况^[19],吸水性是一定时间内植物生长基质从外界获取水分补给量的多少,反映了植物生长基质对于水分的吸纳能力,是评价植物生长基质的重要指标^[20]。植物生长所需水分及水分蒸发都需要植物生长基质从降雨中迅速获取,否则,就不能平衡水分的消耗而导致植物生长不良、萎蔫死亡。

图 3 是固定体积(100 ml)风干植物生长基质吸水量随吸水时间的变化曲线,吸水 1 h,2 h,4 h,6 h 和 8 h 后,四地不同自然土壤和工程弃渣配比的植物生长基质含水量可以达到田间持水量的 30%,50%,80%,90%和 101%以上。植物生长基质的含水量为田间持水量的 65%时,植物吸水困难,生长受到阻滞,此时的含水量称为毛管破裂含水量,低于此含水量,植物生长基质处于干旱,高于此含水量,植物生长基质处于湿润^[21]。因此,大部分工程弃渣与自然土壤配比的植物生长基质要满足植物生长需要的水分,至少需要吸水时间在 2 h 以上。植物生长基质无法在短时间的降雨中获得足够的水分满足植物生长及其他消耗所需。

由图 3 可以看出,赤峰工程弃渣体积比例为 60%,房山工程弃渣体积比例为 50%,徐水工程弃渣

体积比例为 50%,70%,90%,蛟河工程弃渣体积比例为 60%和 30%时,植物生长基质可以在 40~60 min 内吸水达到田间持水量的 50%以上,说明对于短时间的降雨,这些配比的植物生长基质可以迅速补充水分。

总体上,吸水能力随着工程弃渣体积比例的降低而升高,吸水量的峰值在工程弃渣体积为 50%~70%之间时出现。四地中,以徐水的吸水速率最快,在 24 h 后达到最大持水量,房山次之,赤峰再次之,蛟河最慢,24 h 后并没有达到最大持水量。

2.7 不同自然土壤和工程弃渣体积比对持水性的影响

持水性是反映植物生长基质抗旱保墒性能优劣的一个重要指标。赤峰和蛟河的不同自然土壤和工程弃渣体积配比的植物生长基质随着自然土壤含量的增加,其持水量降低的越慢,而房山和徐水的植物生长基质持水量变化速率差别不大,这与四地的植物生长基质机械组成变化(图 1)基本一致,主要是粒径<0.25 mm 的土壤颗粒影响毛管系统从而导致毛管水变化。四地中,以蛟河不同自然土壤和工程弃渣体积配比的植物生长基质持水性最好,蒸发 18 d 还没有到达持水量最低点,赤峰和房山次之,蒸发 18 d 时已经到达持水量最低点,徐水最差,在蒸发 16 d 时已经到达持水量最低点。

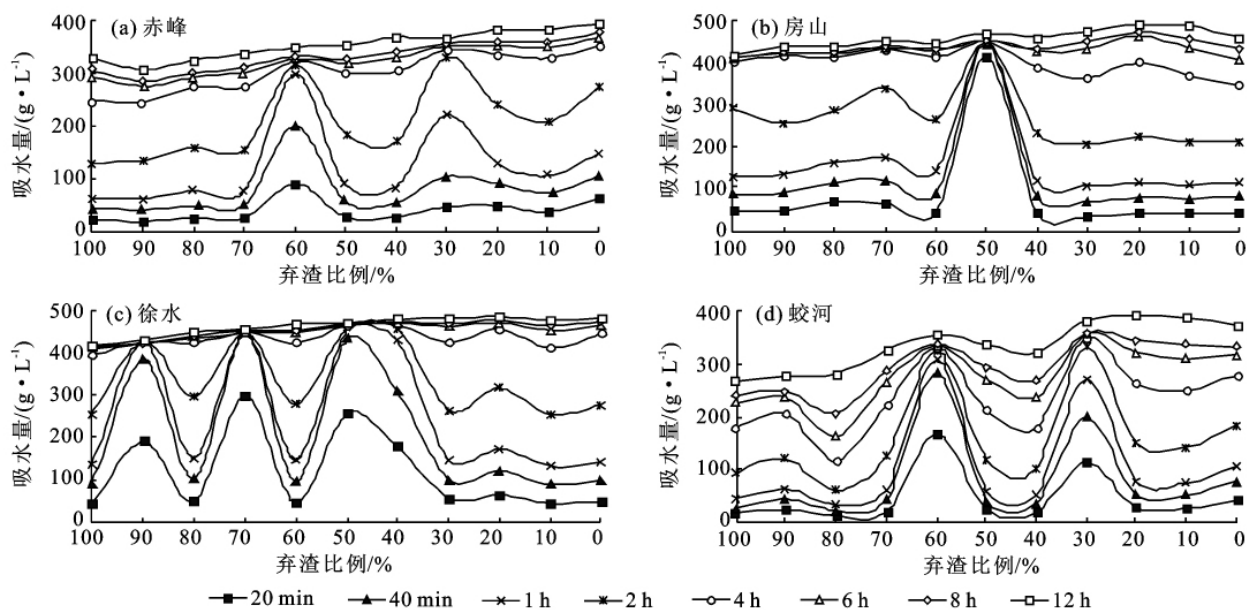


图 3 不同自然土壤和工程弃渣体积比对吸水性的影响

2.8 不同自然土壤和工程弃渣体积比对植物生长的影响

2.8.1 不同自然土壤和工程弃渣体积比对种子发芽率与植株保存率的影响 植物生长基质中矿物营养元素和有机质的含量,是植物持续健康生长的根本。pH 值过高或过低,不仅会直接影响植物生长,同时会使植物必需营养元素的生物有效性发生变化,从而导致植株某元素失调^[22]。工程弃渣与自然土壤的不同体积配比导致植物生长基质机械组成、三相、pH 值、养分和土壤水分常数的差异,从而影响植物的生长状况。

在工程弃渣与自然土壤配比后,高羊茅的种子发芽率随着工程弃渣体积比例降低而上升,工程弃渣体积比例为 70% 时,种子发芽率达到峰值 80%,此后直至工程弃渣体积比例降为 0,种子发芽率都没有大的变化。种子发芽后,在生长过程中植株会因降雨、干旱、养分缺乏等影响而死亡,最终的植株数会与种子发芽数有很大的差别,不能真实反映植物的生长效果。因此,引入植株保存率概念,以一段时期内植株的存活状况来反映植物生长基质对植物生长的影响。除工程弃渣体积比例为 100% 的植物生长基质植株

保存率较小外,其他处理的植物生长基质的植株保存率均在 60%~80% 范围内波动。

2.8.2 不同自然土壤和工程弃渣体积比对植物株高的影响 由实验可知,除了徐水植物株高会随着植物生长基质中工程弃渣体积比例降低而升高外,赤峰、房山和蛟河三地的植物株高变化与工程弃渣体积比例没有明显的关系。

2.8.3 不同自然土壤和工程弃渣体积比对植物生物量的影响 由图 4 可以看出,在赤峰、房山、徐水和蛟河四地植物生物量随工程弃渣体积比例降低而发生变化的趋势并不一致,赤峰植物生物量最高值出现在工程弃渣体积比例为 20% 时,在 20%~70% 工程弃渣体积比例范围内,鲜重变化较小;徐水和蛟河植物生物量均表现为随工程弃渣体积比例降低而上升的趋势,徐水工程弃渣体积比例在 20%~50% 范围时,鲜重小幅度增加,最后在工程弃渣体积比例为 10% 时达到峰值,蛟河工程弃渣体积比例在 30%~90% 范围时,鲜重小幅度波动,后在工程弃渣体积比例为 10% 时达到峰值。图 4b 中,工程弃渣体积比例为 20%~80% 范围时,四地干重在 0.5~1.0 g 范围波动,差别不大。

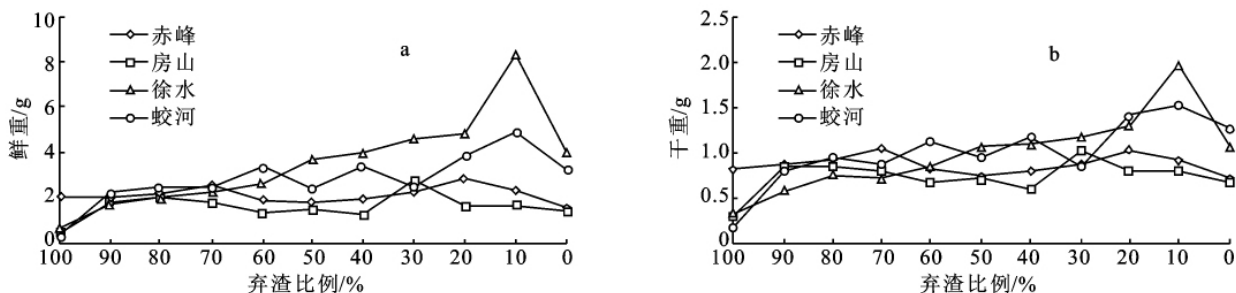


图 4 不同自然土壤和工程弃渣体积比对植物生物量的影响

3 结论

本文通过对赤峰、房山、徐水和蛟河四地的工程弃渣和自然土壤进行不同体积配比生长实验,以验证改造工程弃渣为植物生长基质思路的可行性,并确定工程弃渣的适合添加体积比例。以下结论并不一定具有普适性,作者更多地只是想通过这种设计和实验,为解决工程弃渣资源化利用问题提供一种参考。

(1) 小于 2 mm 的工程弃渣与自然土壤混合后可作为植物生长基质用于工程创面生态恢复,体积比例随工程弃渣和自然土壤理化性质的不同而有所差异,工程弃渣与自然土壤的体积比例以 1:1~7:3 为宜,在这种比例下,基本能够保证植物的生长需要,同时可减少对自然土壤的使用。

(2) 工程弃渣与自然土壤混合后三相没有表现出明显规律变化,但混合物的 pH、养分含量、土壤水分常数、抗旱保墒能力等指标随工程弃渣体积比例变化而规律变化。

(3) 工程弃渣与自然土壤混合物对植物生长发育影响主要表现为种子发芽率和植株保存率随工程弃渣体积比例降低而升高,徐水株高和植物生物量均随工程弃渣体积比例降低而升高,但赤峰、房山和蛟河三地的株高和植物生物量变化与工程弃渣体积比例没有明显规律。

(4) 要尽量选择风化程度较高的工程弃渣用于生态恢复,强风化工程弃渣的养分含量、pH 值及抗旱保墒能力都更适于植物生长。

(5) 工程弃渣的养分含量一般比较贫乏,必须添加肥料以满足植物生长对养分的需要。

参考文献:

- [1] 张华明,彭冬水,奚同行. 高速公路弃土弃渣防治技术探讨[J]. 水土保持研究,2005,12(4):235-237.
- [2] Kwan J C T, Jardine F M. Ground engineering spoil: practices of disposal and reuse[J]. Engineering Geology,1999,53(2):161-166.
- [3] Krystyna M Skarżyńska. Reuse of coal mining wastes in civil engineering-part2: utilization of minestone [J]. Waste Management,1995,15(2):83-126.
- [4] Leininger D, Erdmann W, Köhling R, et al. Recent development in the utilization of preparation refuse in the Federal Republic of Germany[M]. Symp. on the Utilization of Waste from Coal Mining and Preparation,1983,22.
- [5] BS-6543/1985. British Standards Guide to the Use of Industrial By-products and Waste Materials in Building and Civil Engineering[S]. London: British Standards Institute,1985.
- [6] BAST-E9. Verwendbarkeit des Nebengesteins der Steinkohle als Schüttermaterial für den Strassenbau[M]. Bundesanstalt für Strassenwesen,1971.
- [7] WKE-R-78156. De Toepasbaarheid van mijnsteen in de waterbouw[M]. Rijkswaterstaat: Deltadienst Werkgroep Keuring Bouwstoffen voor de Waterbouw,1982.
- [8] Čermák L. Wykorzystanie odpadów do budowy wałów ochronnych[J]. Projekty-Problemy,1972,12:4-9.
- [9] 朱志梅,杨持,曹明明,等. 多伦草原土壤理化性质在沙漠化过程中的变化[J]. 水土保持通报,2007,27(1):1-5.
- [10] Yong I M, Crawford J W, Rappoldt C. New methods and models for characterizing structure heterogeneity of soil[J]. Soil and Tillage Research,2001,61(1/2):33-45.
- [11] Letey J. The study of soil structure science or art[J]. Australian Journal of Soil Research,1991,29(6):699-707.
- [12] 黄必志,曹文波,陈佐忠. 草坪营养与施肥[M]. 北京:中国林业出版社,1999.
- [13] 中島宏. 道路緑化ハントブック[M]. 日本:山海堂株式会社,1999:52.
- [14] 师刚强,赵艺,施泽明,等. 土壤 pH 值与土壤有效养分关系探讨[J]. 现代农业科学,2009,16(5):93-94.
- [15] 许自成,王林,肖汉乾. 湖南烟区土壤 pH 分布特点及其与土壤养分的关系[J]. 中国生态农业学报,2008,16(4):830-834.
- [16] 袁可能. 植物营养元素的土壤化学[M]. 北京:科学出版社,1983:261-544.
- [17] 徐虹. 石碴料级配与渗透性的关系研究[J]. 四川水利,2004(4):45-47.
- [18] 贾芳. 农田有效水分的试验研究与预报[D]. 太原:太原理工大学,2008.
- [19] 宋海燕,汪有科,汪星,等. 保水剂用量对土壤水分的影响[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(3):33-36.
- [20] 张俊云,周德培,李绍才,等. 厚层基材喷射种植基的物理特性[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(增刊1):1010-1014.
- [21] 魏胜利. 田间持水量的测定与旱情分析[J]. 水科学与工程,2005(增刊):53-54.
- [22] Sims J T. Soil pH effects on the distribution and plant availability of manganese, copper, iron and zinc[J]. Soil Science Society of America Journal,1986,50(2):367-373.