基于煤矸石改良的西北某矿区土壤重构研究*

曹珊[1,2],汪天宇[1,2],徐万茹[1,2],刘衡秋[1,2]

(1.美丽华夏生态环境科技有限公司, 北京 100176;
2.自然资源部高寒干旱区矿山地质环境修复工程技术创新中心, 甘肃 兰州 730099)

摘要:针对西北矿区表土稀缺和固废资源化不足的问题,开展以矿区煤矸石为基质的土壤重构技术研究。选用陕西铜川某煤矿的煤矸石(CG)、岩土剥离物(RS)和表土(TS)为原料,按不同比例混合配制成重构土壤进行苜蓿盆栽试验。结果表明,不同配比条件下的重构土壤理化性质有所差异,总体上重构土壤增加了土壤的养分和含水率,更有利于苜蓿的生长发育。与TS相比,重构土壤的pH减小,有机质、全氮和速效钾均有所增加,而有效磷有所降低。CG 40%和RS 15%的处理对苜蓿的生长最有利,苜蓿最高株高为54.60 cm,最长根长为23.20 cm,最大鲜重和干重分别为14.814 g和4.849 g。以上结果说明以CG为基质形成的重构土壤对开展西北地区矿山植物修复具有可行性,为CG综合利用提供了新的选择。

关键词:煤矸石;岩土剥离物;重构土壤;西北矿区;苜蓿

中图分类号:TD88 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)06-0192-08

Study on Soil Reconstruction in a Mining Area of Northwest China Based on Coal Gangue Improvement

CAO Shan[1,2], *WANG Tianyu*[1,2], *XU Wanru*[1,2], *LIU Hengqiu*[1,2]

(1.Beautiful China Ecological Environment Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China;
2.Technology Innovation Center for Mine Geological Environment Restoration in the Alpine and Arid Regions of Ministry of Natural Resources, Lanzhou, Gansu 730099, China)

Abstract: In view of the scarcity of topsoil and the shortage of solid waste resources in the northwest mining area, the soil reconstruction technology based on coal gangue in the mining area was studied. The coal gangue (CG), rock and soil stripping (RS) and topsoil (TS) from a coal mine in Tongchuan, Shaanxi Province were selected as raw materials, and the reconstructed soil was mixed in different proportions to carry out the pot experiment of alfalfa. The results show that the physical and chemical properties of the reconstructed soil under different proportions were different. In general, the reconstructed soil increases the nutrient and moisture content of the soil, which is more conducive to the growth and development of alfalfa. Compared with TS, the pH of the reconstructed soil decreases, the organic matter, total nitrogen and available potassium increase, while the available phosphorus decreases. The treatment of CG 40% and RS 15% is the most favorable for the growth of alfalfa. The highest plant height of alfalfa is 54.60 cm, the longest root length is 23.20 cm, and the maximum fresh weight and dry weight are 14.814 g and 4.849 g, respectively. The above results indicate that the reconstructed soil formed by CG is feasible for the phytoremediation of mines in Northwest China, and provides a new choice for the comprehensive utilization of CG.

Key words: Coal gangue, Rock and soil stripping, Reconstructed soil, Northwest mining area, Alfalfa

0 引言

矿产资源的不合理开采严重破坏了土壤结构,引起土壤质量下降,使土壤的功能降低[1]。据调查,我国由于采矿活动而被毁坏的土壤高达15 000 km^2,并以每年467 km^2的速度增长[2]。土壤重构是通过选用不同材料构建人工土壤从而实现提升矿山土壤质量、提高土地生产力的目的,是一项有效的

* **收稿日期**:2024-08-09
基金项目:自然资源部高寒干旱区矿山地质环境修复工程技术创新中心开放基金项目(HHGCKK2207)
作者简介:曹珊(1996—),女,山西大同人,硕士研究生,主要从事矿区生态修复、固废综合利用等方面的研究。E-mail:CSZMDY@163.com
通信作者:刘衡秋(1975—),男,湖南衡阳人,博士,教授级高级工程师,主要从事岩土工程勘察、矿山环境治理等方面的研究。E-mail:liuhengqiu@bceet.com

矿山土壤修复手段[3]。为了降低成本,尽可能在矿区周边选择能构成重构土壤的低廉材料。煤矸石(CG)是在煤矿开采和洗选过程中分离出来的矿物岩石,具有良好的孔隙结构、丰富的养分组成,可以有效恢复被损害的土壤功能[4]。岩土剥离物(RS)是矿山开采过程中形成的固体废物,它主要由矿体上方的岩石和土壤混合形成,可用作土壤重构的材料[5]。因此,考虑选用 CG 和 RS 作为重构材料,利用它们本身的特性提升重构土壤的质量,实现资源再利用。

苜蓿(*Medicago sativa* L.)是一种多年生豆科植物,根系发达,耐寒耐旱,耐盐碱,经济价值高,能够改善种植区周围的土壤条件[6]。在重构土壤中种植苜蓿,通过苜蓿的生长状况,探究重构土壤对植物的影响。西北地形复杂,矿产资源丰富,干旱少雨、土壤贫瘠、植被分布稀疏,生态系统脆弱,一旦遭到破坏,后期难恢复。此外,西北矿区表层土主要以风沙土为主,结构粗糙,难以蓄水积肥,使得植物生长不良。因此,研究采矿固废对矿区损害土地的修复情况,可以提高固废的资源利用率和解决西北矿区存在的生态问题。

矿区的重构土壤一般需适合植被生长。土壤 pH 会影响重构土壤的物理化学结构,进而影响土壤养分的存储形态[7]。土壤有机质含量的高低反映土壤的肥力大小[8]。氮磷钾是植物生长发育必需的元素,多方面参与植物的生长代谢[9]。土壤含水率影响植物从土壤中吸收养分的多少[10]。因此,测定土壤 pH、有机质、全氮、有效磷、速效钾和含水率对了解重构土壤理化性质具有重要意义。植物的株高、根长以及生物量是反映植物生长的重要指标,在一定程度上能够直接判断重构土壤对植物生长的影响。

本研究选择西北矿区固废 CG 和 RS 与表土(TS)按不同比例混合调配成重构土壤,同时利用苜蓿耐寒耐旱、耐盐碱的特点以重构土壤为基质开展苜蓿盆栽试验。种植 75 d 后,通过重构土壤理化性质的变化和植物生长发育的状况,筛选出最佳的重构土壤配比,以期解决 CG 等矿区固废堆积问题,增强 CG 的资源化利用,为扩展矿区土壤重构领域和矿区修复领域的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料包括 CG、RS 和 TS,均来自陕西省铜川某煤矿,供试植被为紫花苜蓿。CG、RS 和 TS 的理化性质见表 1。

表 1 不同材料的理化性质

Table 1 Physicochemical properties of different materials

材料	pH	有机质/(g/kg)	全氮/(g/kg)	有效磷/(mg/g)	速效钾/(mg/g)
CG	8.04	308.40	0.85	3.07	183.70
RS	4.36	129.41	0.76	1.24	38.56
TS	7.83	45.03	0.37	4.45	103.96

1.2 试验方法

将收集的 CG 和 RS 自然风干、去除杂质并粉碎过筛后与 TS 按一定比例混合组成重构土壤,共设 16 个处理组(C1 至 C16),材料具体配比见表 2,同时设纯 CG、纯 RS 和纯 TS 作为试验对照组(分别对应 CK1、CK2、CK3)。具体操作为:取 2 kg 混合均匀的重构土壤置于花盆(口径 15.5 cm,高 14 cm,底径 12 cm)后,每个花盆内种植 50 粒苜蓿种子,试验周期为 75 d,室温控制在 25 ℃左右,期间间隔固定时间、固定量浇水。同时,每组均加入 500 mL 稻壳炭作为补充肥料。

表 2 重构土壤中不同材料的质量占比

Table 2 Mass ratios of different materials in reconstructed soil

处理	CG/%	RS/%	TS/%
C1	10	10	80
C2	10	15	75
C3	10	20	70
C4	10	25	65
C5	20	10	70
C6	20	15	65
C7	20	20	60
C8	20	25	55
C9	30	10	60
C10	30	15	55
C11	30	20	50
C12	30	25	45
C13	40	10	50
C14	40	15	45
C15	40	20	40
C16	40	25	35
CK1	100	0	0
CK2	0	100	0
CK3	0	0	100

1.3 指标测定

土壤指标:种植苜蓿 75 d 后,测定重构土壤 pH、有机质、全氮、有效磷、速效钾以及土壤含水率。土壤 pH 采用便携式 pH 计测定,有机质含量通过重铬酸钾氧化稀释热法测定,全氮含量采用凯氏定氮法测定,有效磷含量采用钼锑抗比色法测定,速效

钾含量采用乙酸铵浸提火焰光度法测定,以上指标均按照 LI 等[11]提供的方法测定。土壤含水率通过计算烘干前后土壤的质量差值而获得。

植物指标:苜蓿种植 75 d 后,收取苜蓿植株,洗净擦干,室温无光照晾 1 d 去除表面水分,测定每组植株的株高、根长、鲜重 3 个指标。随后,将植株置于 65 ℃鼓风干燥箱中烘干至恒重,测定每组植株的干重指标。

1.4 数据处理及分析

利用 Excel 进行数据处理,采用 SPSS 26 软件对试验数据进行单因素方差分析,采用 Origin Pro 8.5 进行数据绘图。为保证数据的重复性和可靠性,每组设 3 个平行试验。

2 试验结果

2.1 不同配比重构土壤的理化性质分析

种植苜蓿 75 d 后,对照组中 CK1、CK2、CK3 的各理化性质指标均表现出明显的差异性,具体数据见表 3。

表 3 对照组中土壤的理化性质变化情况

Table 3 Changes of physical and chemical properties of soil in the control group

编号	pH	有机质/(g/kg)	全氮/(g/kg)	有效磷/(mg/g)	速效钾/(mg/g)	含水率/%
CK1	8.66	193.0	1.21	1.97	169.00	4.67
CK2	3.97	83.3	1.10	1.10	37.73	23.47
CK3	8.37	8.6	0.26	3.53	75.63	7.88

2.1.1 pH

由表 3 可知,CK1 和 CK3 的 pH 均大于 8,偏碱性,CK2 的 pH 小于 4,呈酸性。图 1 显示将 RS、CG 与 TS 按照一定比例混合后,重构土壤的 pH 相比 CG 和 TS 略有下降,整体在 7.5 上下浮动。

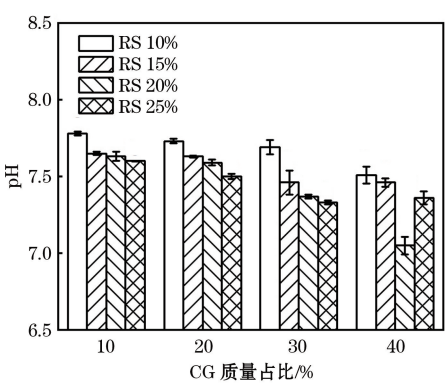


图 1 不同配比重构土壤的 pH

Fig.1 The pH of reconstructed soil with different proportions

RS 呈酸性,其质量占比的增加会导致重构土壤 pH 的下降。在 CG 10%、CG 20%、CG 30%时,重构土壤的 pH 均随着 RS 质量占比的增加而降低,且均在 RS 25%时 pH 最低;CG 40%处理时,重构土壤 pH 随着 RS 质量占比的增加呈现出先降低后升高的趋势,在 RS 20%时 pH 最低,为 7.05。

2.1.2 有机质含量

由表 3 可知,CK1、CK2、CK3 的有机质含量分别为 193.0, 83.3, 8.6 g/kg,其中 CK1 的最高,CK3 的最低,仅为 CK1 的 0.045 倍。由表 3 和图 2 可知,各个处理组的有机质含量明显高于纯 TS,并且不同配比重构土壤的有机质含量之间具有明显差异。在 CG 10%、CG 20%处理时,重构土壤有机质含量随 RS 质量占比的增加而增加。重构土壤有机质在 CG 30%时随 RS 质量占比的升高而呈现出先增加后降低再增加的趋势,而在 CG 40%处理时,重构土壤有机质的变化与 CG 30%时呈相反趋势。此外,在 CG 10%、CG 20%、CG 30%处理时,重构土壤的有机质含量均在 RS 10%处理时最低,在 RS 25%时最高;在 CG 40%处理时,重构土壤有机质含量则在 RS 10%处理时最高,在 RS 25%时最低。

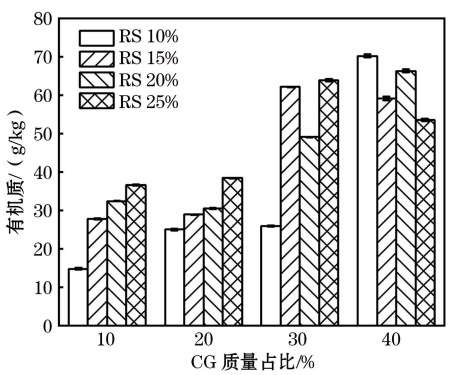


图 2 不同配比重构土壤的有机质含量

Fig.2 Organic contents of reconstructed soil with different proportions

2.1.3 全氮含量

由表 3 可知,对照组中 CK1 和 CK2 组的全氮含量均大于 1 g/kg,CK3 组的全氮含量为 0.26 g/kg。由表 3 和图 3 可知,重构土壤处理组的全氮含量明显低于 CK1 和 CK2,由此可知,添加一定比例的 CG 或 RS 能有效改善 TS 含氮量较低的问题。由图 3 可知,CG 质量占比分别为 10%、20%、30%时,重构土壤全氮含量随着 RS 质量占比的增高呈上升的趋势,且均在 RS 质量占比为 25%时最大,在 RS

质量占比为10%时最小。CG质量占比为40%时,重构土壤全氮含量随RS质量占比的增加变化并不显著,其值波动范围为0.47～0.55 g/kg。

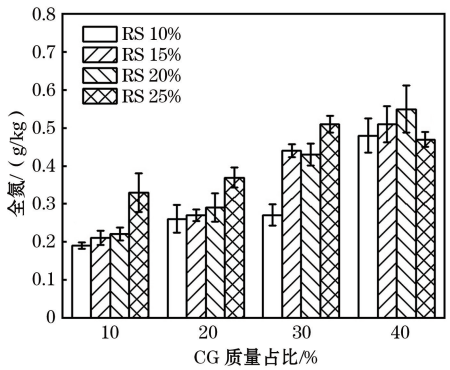


图3 不同配比重构土壤的全氮含量

Fig.3 Total nitrogen content of reconstructed soil with different proportions

2.1.4 有效磷含量

表3中数据显示,对照组中CK1组和CK2组的有效磷含量均低于CK3组。由表3和图4可知,各重构土壤处理中仅在CG 20%和CG 30%处理中的RS 15%组有效磷含量高于CK3处理,同时发现所有处理组的有效磷含量均大于CK1组和CK2组。图4显示,在CG 10%、CG 20%处理时,随着RS质量占比的增高,重构土壤有效磷含量先增加后下降;在CG 30%处理时,重构土壤有效磷含量随着RS质量占比的增高呈先上升后下降再上升的趋势;在CG 40%条件下,重构土壤有效磷含量随着RS质量占比的增高而增加。其中在CG 20%、CG 30%处理时,RS 15%的重构土壤有效磷含量最大,在CG 10%、CG 40%条件下,均为RS 20%组的重构土壤有效磷含量最高。

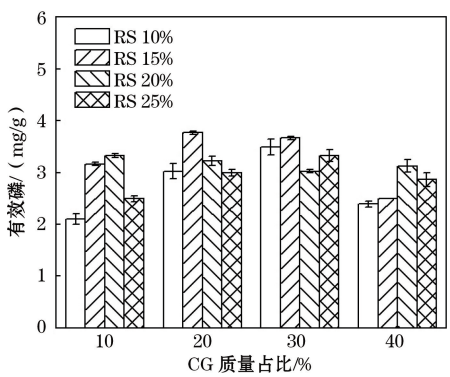


图4 不同配比重构土壤的有效磷含量

Fig.4 Available phosphorus content of reconstructed soil with different proportions

2.1.5 速效钾含量

表3显示CK1组的速效钾含量为169.00 mg/g,远高于CK2组与CK3组,约为CK2组的4.5倍,CK3组的2.2倍。由图5可知,CG与RS和TS按一定比例混合后,各组的速效钾含量低于CK1组,但均高于CK2组和CK3组。图5显示,CG 10%处理时,重构土壤速效钾含量随着RS质量占比的增加呈先上升后下降的趋势;CG 20%处理时,重构土壤速效钾含量随着RS质量占比的增加逐渐增加;CG 30%与CG 40%处理时,随RS质量占比的增加,重构土壤速效钾含量先降低后升高。重构土壤在CG 20%、CG 40%处理时,均在RS 25%处理时速效钾含量最高;CG 10%处理时,重构土壤速效钾含量在RS 20%处理时最高;CG 30%处理时,重构土壤速效钾含量在RS 10%时最高。

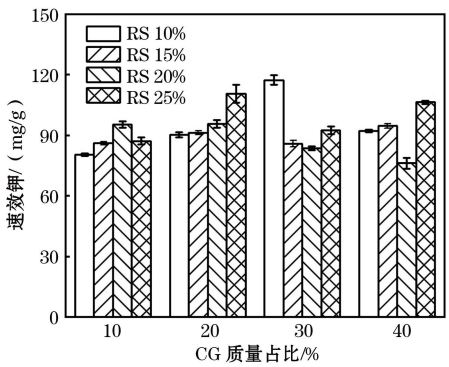


图5 不同配比重构土壤的速效钾含量

Fig.5 Available potassium content of reconstructed soil with different proportions

2.1.6 不同配比重构土壤的土壤含水率

由表3可知,对照组中CK1组的含水率为4.67%,CK3组的含水率略比CK1组高3.21个百分点,CK2组的土壤含水量为23.47%,远高于CK1组与CK3组。从图6可以看出,CG和RS与TS混合后引起了重构土壤含水率的改变,除CG 40%和RS 25%的处理组外,其他处理组均高于CK1组和CK3组。在CG 10%处理时,随着RS质量占比的增加,重构土壤的含水率呈上升趋势,在RS 25%时达到最大值16.76%。CG质量占比分别为20%和30%处理时,随着RS质量占比的增加,重构土壤的含水率波动变化,但变化趋势并不显著。在CG 40%处理时,重构土壤的含水率随RS质量占比的增加表现出下降的趋势,在RS 25%时达到最低,其值为6.46%。

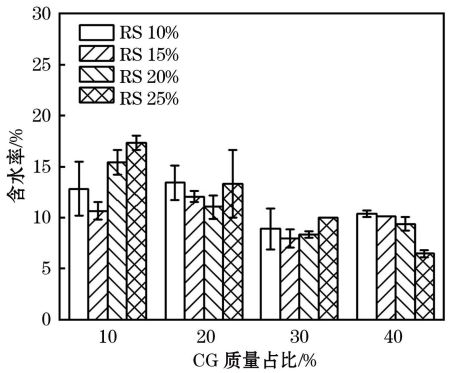


图 6 不同配比重构土壤的含水率

Fig.6 Moisture content of reconstructed soil with different proportions

2.2 不同配比的重构土壤对苜蓿指标测定结果分析

种植 75 d 后,对照组苜蓿的生长状况见表 4。由表 4 可知,对照组中 CK2 组苜蓿长势最差,CK3 次之,CK1 最优。

表 4 对照组中苜蓿生长指标变化情况

Table 4 Alfalfa growth index changes in the control group

编号	株高/cm	根长/cm	鲜重/g	干重/g
CK1	36.80	23.40	10.780	3.878
CK2	15.92	6.67	3.115	0.940
CK3	28.47	15.80	4.688	1.774

2.2.1 对苜蓿株高的影响

由表 4 可知,CK1 组的植株生长较对照组的其他两组更好,其株高为 36.80 cm。CK3 组苜蓿长势略差,其株高为 28.47 cm。CK2 组的苜蓿株高仅为 15.92 cm,明显低于其他两组。由表 4 和图 7 可知,经 CG、RS 以及 TS 混合处理后,各处理组的株高均高于 CK2 组和 CK3 组。

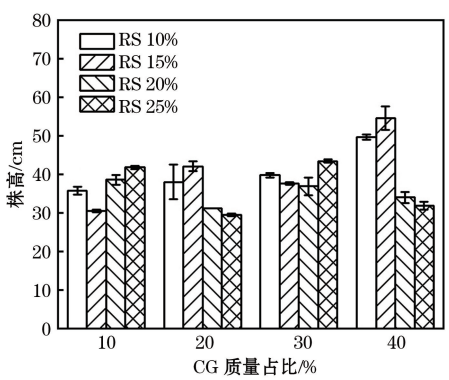


图 7 不同重构土壤对苜蓿株高的影响

Fig.7 Effects of different proportions of reconstructed soil on alfalfa plant height

图 7 显示,在 CG 10%处理时,苜蓿植株的株高随着 RS 质量占比的增加呈现出先降低后增加的趋势,而在 CG 20%处理时,苜蓿植株的株高在 RS 15%时增到最大值 42.10 cm,随后开始降低。在 CG 30%条件下,苜蓿株高随 RS 质量占比的增加而降低,在 RS 20%时降低至 36.90 cm,随后在 RS 25%增加了 6.57 cm。在 CG 40%处理时,苜蓿在 RS 15%时植株最高,其株高为 54.60 cm,在 RS 25%时植株最矮,为 31.90 cm。

2.2.2 对苜蓿根长的影响

由表 4 和图 8 可知,相比于其他处理组,苜蓿种植在 CK1 组时根长最长,其值为 23.40 cm。在 CK2 组的根长仅为 6.67 cm。CK3 组的苜蓿根长为 15.8 cm,略低于各处理组。由图 8 可知,当 CG 10%处理时,苜蓿植株的根长随着 RS 质量占比的增加呈现出先降低后增加的趋势,在 RS 25%时根长最长,为 17.35 cm。在 CG 20%处理时,苜蓿植株的根长随 RS 质量占比的增加先增加后降低,在 RS 20%时增到最大值。在 CG 30%处理时,苜蓿植株的根长在 RS 20%时达到最大值 19.75 cm。在 CG 40%处理时,在 RS 15%时苜蓿表现出最长根长值 23.20 cm,而 RS 10%、RS 20%和 RS 25%处理时苜蓿植株根长并没有明显变化。对比所有处理组,苜蓿在 CG 40%、RS 15%处理时根长最长,为 23.20 cm,在 CG 10%、RS 20%处理时根长最短,为 12.53 cm。

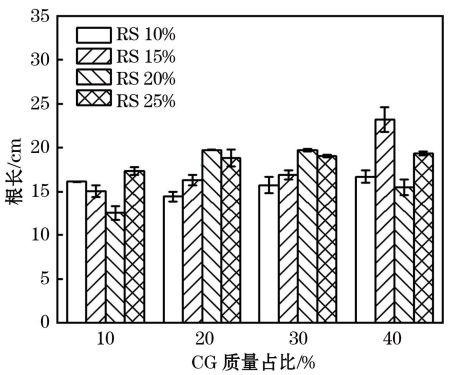


图 8 不同重构土壤对苜蓿根长的影响

Fig.8 Effects of different proportions of reconstructed soil on alfalfa root length

2.2.3 对苜蓿生物量的影响

鲜重和干重是表示植株生物量常用的方法,可用于评估植物在不同条件下生长发育的状况。由表 4 可知,种植在 CK1 组中的苜蓿生物量较高,而 CK2 组和 CK3 组的生物量较低。由图 9、图 10 可

知,CK2 组和 CK3 组的生物量均低于各处理组,这表明一定比例的 CG、RS 和 TS 混合有利于苜蓿的生长发育。

由图 9 可知,在 CG 10%处理时,随着 RS 质量占比的增加,苜蓿植株的鲜重呈现先增加后降低的趋势,在 RS 20%时达到最大值 10.887 g。在 CG 20%处理时,苜蓿植株的鲜重随 RS 质量占比的增加而降低。在 CG 30%处理时,不同 RS 质量占比之间的苜蓿鲜重差异显著。在 CG 40%处理时,苜蓿最高鲜重值为 14.814 g。

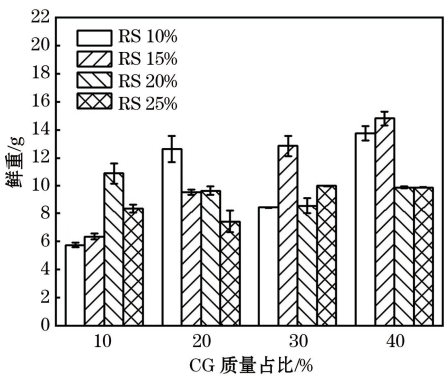


图 9 不同重构土壤对苜蓿鲜重的影响

Fig.9 Effects of different proportions of reconstructed soil on alfalfa fresh weight

由图 10 可知,在 CG 10%处理时,苜蓿植株的干重值由 RS 10%增至 RS 15%时无明显变化,在 RS 20%达到最高值,随后降低。在 CG 20%处理时,随 RS 占比的增加,各处理组间苜蓿植株干重的差异性显著,呈现先降低后增加再降低的趋势。在 CG 30%处理时,苜蓿干重值在 RS 15%时最大,与其他处理组有显著性差异。在 CG 40%处理时,苜蓿干重在 RS 15%处理下达到最大值 4.849 g。

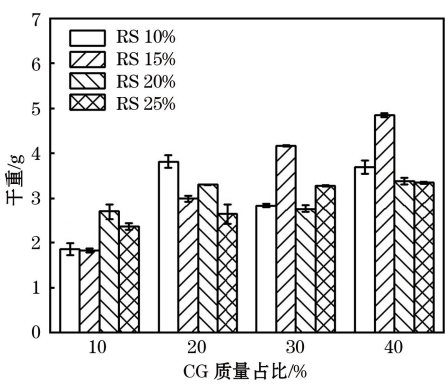


图 10 不同重构土壤对苜蓿干重的影响

Fig.10 Effects of different proportions of reconstructed soil on alfalfa dry weight

3 讨论

3.1 不同配比重构土壤对土壤养分的影响

土壤 pH 变化可刺激土壤中植物可利用养分的有效性发生改变,进而影响植物生长发育。据调查,苜蓿生长最佳 pH 范围为 6.5～7.5[12],本次研究重构土壤的 pH 在 7.5 左右波动,对苜蓿的生长有利。植物的生长发育不仅与土壤 pH 有关,还与土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾以及土壤水分有着极其重要的联系。研究发现 CG 含有较高的有机质含量,以及丰富的铁、钾、锌等有益元素,有助于植物生长发育和满足微生物群落新陈代谢[13-14]。本试验中测得 TS 的有效磷含量较高,有机质、全氮和速效钾的含量较低,而测定的 CG 具有较高的有机质、全氮和速效钾,较低的有效磷含量,因此将 CG 与 TS 混合,形成的重构土壤的土壤养分将更全面,更有利于植物生长。CG 呈颗粒状,基质孔隙大,持水能力比较弱,长期影响下会减弱土壤保水保肥的能力[15]。RS 是岩石和矿体上覆土的混合体,岩石之间的孔隙结构使其具有较强的渗水能力[16-17],同时矿体的上覆土又可以将水分保留,故 RS 含有较强的渗水能力和保水能力。RS 的添加弥补了 CG 和 TS 含水率相对较低的缺陷,有利于植物的生长。但本研究中的 RS 呈酸性,其占比的增加使重构土壤的 pH 下降,当 pH 下降到一定范围后会抑制苜蓿生长。

3.2 不同配比重构土壤对植物生长的影响

通过植物的生长指标的变化,能够清晰地观察植物发育状况。本试验中各组之间苜蓿的株高、根长和生物量有较大的差异,说明不同比例的处理会对苜蓿的生长产生影响。相比 TS,添加 CG 和 RS 后苜蓿的株高、根长和生物量有所提高,这与何宪波等[18]通过添加 CG 改善盐碱地的土壤质量并促进马铃薯生长的研究结果一致。植物株高和根长是植物生长状况最直观的反映。对种植在不同配比的重构土壤中的苜蓿进行测量,发现在 CG、RS 的质量占比分别为 40%、15%时,苜蓿株高和根长明显优于其他处理组。植物的生长发育与土壤的养分有密切的联系,土壤的营养物质不均衡会影响植物的生长状况,进而引起生物量的差别。不同配比处理组中苜蓿的生物量之间有较大的差异,总体上看,CG 质量占比为 40%的 4 组处理中苜蓿的生物量较其他处理组高,这证实了 CG 所含植物所需的营养较

为丰富。

4 结论

(1) CG 和 RS 的添加能够影响土壤的理化性质,二者与 TS 混合形成的重构土壤与原土相比,pH 减小,有机质、全氮和速效钾的含量以及土壤含水率增加,但有效磷含量有所降低。

(2) CG 和 RS 的添加可通过增强 TS 的养分以及改善土壤含水率而促进苜蓿的生长发育,但 RS 含量过高也会抑制苜蓿的生长。

(3) 重构土壤在 CG 40%和 RS 15%的处理情况下,苜蓿的株高、根长和生物量达到最大值,该配比形成的重构土壤对苜蓿的生长最有利。

(4) 本试验所重构的土壤适用于西北某矿区植被生长,有利于西北矿区煤矸石的综合利用,并为矿区土壤重构和生态修复实践提供指导。

参考文献(References):

[1] ADATOR S W, LI J F. Evaluating the environmental and economic impact of mining for post-mined land restoration and land-use: a review[J]. Journal of Environmental Management,2020,279:111623.

[2] 阮彦楠,吕本春,王志远,等.云南某区典型农田土壤重金属污染和潜在生态风险评价[J].安徽农业科学,2023,51(21):65-72.
RUAN Yannan, LYU Benchun, WANG Zhiyuan, et al. Pollution and potential ecological risk assessment of heavy metal in typical farmland soil in a certain area of Yunnan province[J]. Anhui Agricultural Sciences, 2023, 51(21): 65-72.

[3] 张玉锴,阎凯,李博,等.中国土壤重构及其土水特性研究进展[J].农业资源与环境学报,2023,40(3):511-524.
ZHANG Yukai, YAN Kai, LI Bo, et al. Research progress on soil reconstruction and soil-water characteristics in China [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023,40(3):511-524.

[4] 徐万茹,汪天宇,刘衡秋,等.基于熵权-VIKOR 法的重构土壤配比筛选研究[J].矿业研究与开发,2024,43(3):159-163.
XU Wanru, WANG Tianyu, LIU Hengqiu, et al. Study on the screening of reconstructed soil ratio based on entropy Weight-GVIKOR method [J]. Mining Research and Development,2024,43(3):159-163.

[5] 孙俊东,韩兴,黄月军,等.草原露天矿区重构土壤含水率差异性分析[J].中国矿业,2023,31(4):86-95.
SUN Jundong, HAN Xing, HUANG Yuejun, et al. Analysis on the difference of reconstructed soil moisture content in grasslandopen-pit mining area[J]. Chinese Mining Industry,2022,31(4):86-95.

[6] HE F, WANG G L, WANG L X, et al. Effects of organic base fertilizer and inorganic topdressing on alfalfa productivity and the soil bacterial community in saline soil of the Huanghe River delta in China[J].Agronomy,2022,12(11):2811.

[7] 唐琨,朱伟文,周文新,等.土壤 pH 对植物生长发育影响的研究进展[J].作物研究,2013,27(2):207-212.
TANG Kun, ZHU Weiwen, ZHOU Wenxin, et al. Research progress on effects of soil pH on plant growth and development[J]. Crop Research,2013,27(2):207-212.

[8] 王多伽,刘笑笑,齐宝林,等.不同栽培措施下松嫩盐碱区苜蓿生产性能及土壤特性[J].分子植物育种,2023,21(24):8265-8274.
WANG Duojia, LIU Xiaoxiao, QI Baolin, et al. Production performance of alfalfa and soil properties under different cultivation patterns in songnen saline-alkaline region[J]. Molecular Plant Breeding,2023,21(24):8265-8274.

[9] 何晗颖,赵俊福,吴欣宇,等.适宜氮磷钾用量和配比协同促进盆栽牡丹营养和生殖生长[J].植物营养与肥料学报,2024,30(5):1043-1052.
HE Hanying, ZHAO Junfu, WU Xinyu, et al. Appropriate application rate and ratio of N, P, and K fertilizers for synergistic enhancement of vegetative and reproductive growth of potted peonies[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2024,30(5):1043-1052.

[10] 佟长福,侯洪飞,李瑞平,等.保水剂和蒸腾抑制剂对玉米生长和水肥耦合的影响[J].节水灌溉,2024(6):63-68.
TONG Changfu, HOU Hongfei, LI Ruiping, et al. Effects of water-holding agent and transpiration inhibitor on growth and water-fertilizer coupling in maize[J]. Water Saving Irrigation,2024(6):63-68.

[11] LI C M, ZHANG D R, XU G C, et al. Effects of alpine grassland degradation on soil microbial communities in Qilian mountains of China[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition,2022,23(1):912-923.

[12] 王皓仟,孙甜甜,吴展,等.紫花苜蓿对垃圾渗沥液污染土壤 pH 与酶活性的影响研究[J].环境卫生工程,2018,26(1):26-30.
WANG Haoqian, SUN Tiantian, WU Zhan, et al. Effects of alfalfa on pH and enzyme activity in soil contaminated by landfill leachate[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2018,26(1):26-30.

[13] MOTESHAREZADEH B, AHMADIYAN E, ALIKHANI A H, et al. The use of coal gangue as a cultivation bed conditioner in forage maize inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis,2017,48(11):1266-1279.

[14] 任晓玲,周蕙昕,高明,等.煤矸石肥料的研究进展[J].中国煤炭,2021,47(1):103-109.
REN Xiaoling, ZHOU Huixin, GAO Ming, et al. Research progress of coal gangue fertilizer[J]. Chinese Coal,2021,47(1):103-109.

[15] 韩湘,张超英,耿玉清,等.添加粉煤灰对煤矸石基质有效水和持水性能的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2023,51(10):89-96.

HAN Xiang, ZHANG Chaoying, GENG Yuqing, et al. Effect of adding fly ash on available water and water holding properties of coal gangue matrix[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition),2023,51(10):89-96.

[16] 况欣宇,曹银贵,罗古拜,等.基于不同重构土壤材料配比的草木樨生物量差异分析[J].农业资源与环境学报,2019,36(4):453-461.
KUANG Xinyu, CAO Yingui, LUO Gubai, et al. Analysis of biomass difference in Melilotus suaveolens ledeb. based on different ratios of reconstructed soil material[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(4): 453-461.

[17] 严子循,吴大为,吴静,等.内蒙古草原矿区重构土壤典型理化性质差异分析[J].露天采矿技术,2022,37(4):34-40.
YAN Zixun, WU Dawei, WU Jing, et al. Difference analysis of typical soil physicochemical properties in Inner Mongolia grassland mining area[J]. Surface Mining Technology,2022,37(4):34-40.

[18] 何宪波,乔俊,李紫薇,等.煤矸石改良盐碱土对马铃薯生长的影响[J].农业工程学报,2023,39(14):145-154.
HE Xianbo, QIAO Jun, LI Ziwei, et al. Effects of improved saline-alkaline soil with coal gangue on potato growth[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2023,39(14):145-154.