

# 生物炭对重构土壤化学性质及苜蓿抗旱性的影响

王玲玲<sup>1</sup>, 曹银贵<sup>1,2</sup>, 王凡<sup>1</sup>, 黄雨晗<sup>1</sup>, 尚志<sup>3</sup>, 余长超<sup>3</sup>, 王党朝<sup>3</sup>, 白中科<sup>1</sup>

(1.中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083;

2.自然资源部土地整治重点实验室, 北京 100035; 3.神华北电胜利能源有限公司, 内蒙古 锡林浩特 026000)

**摘要:**为提升草原露天矿区干旱胁迫下生态修复效果,将内蒙古国家能源集团北电胜利露天煤矿矿区的表土、煤矸石、岩土剥离物及粉煤灰等原材料,按照不同配比构造 4 种不同的重构土壤组和表土对照组,以不同热解温度及不同用量的生物炭作为土壤改良剂,采用单因素方差分析法,开展了生物炭对土壤化学性质及苜蓿抗旱性的影响研究。结果表明:(1) 施用不同处理方式的生物炭对表土对照组和重构土壤组土壤化学性质的改良效果不同。 $D_1$  方案中, $D_{1-500-12}$  对土壤改良效果最优; $H_3$  方案中, $H_{3-500-6}$  对土壤改良效果最优; $H_{10}$  方案中, $H_{10-300-24}$  对土壤改良效果最优; $H_{11}$  方案中, $H_{11-500-24}$  对土壤改良效果最优; $H_{15}$  方案中, $H_{15-400-6}$  对土壤改良效果最优。(2) 在重构土壤组  $H_3$ ,  $H_{10}$  和  $H_{11}$  中,当生物炭热解温度为 300℃ 或 400℃,且添加的生物炭含量为 24 g 时,干旱胁迫下苜蓿存活率均得到了显著的改善,在整个盆栽试验中, $H_{3-400-24}$  在干旱胁迫下苜蓿存活率最高。(3) 结合不同处理方式的生物炭施用对土壤化学性质和苜蓿抗旱性的综合影响,最优的生物炭处理方式为  $H_{10-300-24}$ 。不同处理方式的生物炭施用对土壤化学性质的改善效果不同,对于干旱胁迫下植物抗旱性的提升作用也不同。

**关键词:**土地复垦; 土壤重构; 土壤化学性质; 生物炭; 抗旱性

**中图分类号:**S158; S541

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2021)06-0105-10

## Effect of Biochar on Reconstructed Soil Chemical Properties and Drought Resistance of *Medicago sativa*

WANG Lingling<sup>1</sup>, CAO Yingui<sup>1,2</sup>, WANG Fan<sup>1</sup>, HUANG Yuhan<sup>1</sup>,  
SHANG Zhi<sup>3</sup>, SHE Changchao<sup>3</sup>, WANG Dangchao<sup>3</sup>, BAI Zhongke<sup>1</sup>

(1.School of Land Science and Technology, China University of Geosciences,

Beijing 100083, China; 2.Key Lab of Land Consolidation, Ministry of Natural Resources,

Beijing 100035, China; 3.Shenhua Beidian Shengli Energy Co., Ltd., Xilinhot, Inner Mongolia 026000, China)

**Abstract:** The purpose of this study was to improve the effect of ecological restoration under drought stress in the grassland open-pit mining area. The topsoil, coal gangue, rock and soil stripping and fly ash from the Shengli open-pit mine area were constructed to reconstruct soil according to different proportions. Biochar with different pyrolysis temperatures was used as soil improver, and the variance analysis method was used to carry out the study on the effect of biochar on soil chemical properties and drought resistance of alfalfa. The results showed that: (1) application of biochar with different treatments had different effects on soil chemical properties in different schemes; in the  $D_1$  scheme,  $D_{1-500-12}$  had the best effect on soil improvement; in the  $H_3$  scheme,  $H_{3-500-6}$  had the best effect on soil improvement; in the  $H_{10}$  scheme,  $H_{10-300-24}$  had the best effect on soil improvement; in the  $H_{11}$  scheme,  $H_{11-500-24}$  had the best effect on soil improvement; in the  $H_{15}$  scheme,  $H_{15-400-6}$  had the best effect on soil improvement; (2) in the reconstructed soil group  $H_3$ ,  $H_{10}$  and  $H_{11}$ , the survival rate of alfalfa under drought stress was significantly improved when the biochar pyrolysis temperature was 300℃ or 400℃ and the application amount was 24 g; in the pot experiment,  $H_{3-400-24}$  had the highest survival rate of alfalfa under drought stress; (3) with respect to the comprehensive effects of biochar

收稿日期:2020-11-21

修回日期:2020-12-23

资助项目:国家重点研发计划项目“表土稀缺矿区土壤构建与改良技术”(2016YFC0501105~2)

第一作者:王玲玲(1998—),女,河北邢台人,硕士研究生,研究方向为土地复垦与生态修复。E-mail:wll\_1209@163.com

通信作者:曹银贵(1982—),男,湖南常德人,博士,教授,博士生导师,主要从事国土空间修复与土地利用管理研究。E-mail:caoyingui1982@126.com

applied in different treatment methods on soil chemical properties and drought resistance of alfalfa, the optimal biochar treatment method was H<sub>10-300-24</sub>. Application of biochar with different treatments has different effects on the improvement of soil chemical properties, and also has different effects on the improvement of plant drought resistance under drought stress.

**Keywords:** land reclamation; soil reconstruction; soil chemical properties; biochar; drought resistance

中国是世界上最大的煤炭生产国及消费国,2019 年中国煤炭产量达到 38.46 亿 t, 占全球总产量的 47.3%<sup>[1]</sup>, 其中对露天煤矿的开采是中国主要的采煤方式<sup>[2-3]</sup>。露天煤矿的大规模开采一方面满足了中国经济建设的需要, 另一方面带来了许多生态环境及社会问题<sup>[4-6]</sup>。露天煤矿大多分布在草原地区, 草原地区的水土流失和土地荒漠化问题本就严重, 因此对草原露天煤矿的开采使原本脆弱的草原生态系统遭到了更严重的破坏<sup>[7]</sup>。土壤重构是土地复垦的核心<sup>[8]</sup>, 重构土壤质量直接决定土地复垦状况。表土是土壤重构过程中的首要选择, 但矿区土壤发育不良等自然因素及采矿活动等人为因素导致许多矿区表土稀缺问题严重<sup>[9-12]</sup>, 在表土稀缺矿区, 表土替代物的选择是土壤重构过程的关键。表土替代物有效地解决了土壤重构过程中表土不足的问题, 同时实现了矿区固体废弃物的资源化利用<sup>[2]</sup>。

生物炭可以改善矿区重构土壤的化学性质, 促进矿区植物的生长和矿区生态修复进程<sup>[13]</sup>。Zheng 等<sup>[14]</sup>发现添加烟草秸秆生物炭可以提高土壤有机质含量、速效磷含量、速效钾含量等土壤化学性质。严陶稻等<sup>[15]</sup>发现生物炭可以提高土壤氮磷含量。李明等<sup>[16]</sup>研究水稻和玉米秸秆生物炭添加对红壤性水稻土 pH 值、有机碳和养分含量的影响, 结果表明秸秆生物炭的添加提高了土壤 pH 值, 土壤有机碳、速效磷和速效钾含量相比对照有所提高, 其中水稻秸秆炭对土壤速效钾含量的提升作用较大, 玉米秸秆炭则主要增加土壤速效磷含量。因此, 在土壤中添加生物炭可以提高土壤养分状况。生物炭可以显著改善土壤中的水分关系, 在提高农业系统对于干旱条件的适应能力方面发挥着重要的作用<sup>[17]</sup>。蒋太英等<sup>[18]</sup>发现生物炭表面的水溶活性分子可以提高水稻的耐旱性。赵君等<sup>[19]</sup>发现在土壤中施入一定量的玉米秸秆生物炭能缓解干旱胁迫对蓝盆花(又名轮锋菊, 松虫草)生长的影响。Artiola 等<sup>[20]</sup>研究发现以松林废弃物为原料的生物炭可以提高植物的抗旱性。目前生物炭对土壤化学性质影响的研究比较丰富, 但对于不同处理方式的生物炭而言, 筛选最优的生物炭处理方式的研究上还有所不足。

本文选取表土稀缺、气候干旱的内蒙古国家能源

集团北电胜利露天煤矿的表土(砂壤土)、煤矸石、岩土剥离物(母质与生土混合物)、粉煤灰作为原材料构建重构土壤, 以玉米秸秆生物炭为添加剂开展室内盆栽试验, 探索不同重构土壤及不同处理方式的生物炭施用下, 土壤化学性质的差异性及苜蓿(*Medicago sativa*)的抗旱性, 筛选最优的生物炭处理方式。本研究旨在提高干旱胁迫下矿区植被的存活率, 推进草原露天矿区的生态修复工程, 为后期矿区土壤重构问题的解决提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

盆栽试验所需的重构土壤材料有表土(砂壤土)、煤矸石、岩土剥离物(母质与生土混合物)、粉煤灰, 均来自于内蒙古国家能源集团北电胜利露天煤矿(115°30′—116°26′E, 43°57′—44°14′N), 其背景值见表 1。2018 年在中国地质大学(北京)校内温室大棚(116°21′09.0″E, 39°59′34.4″N)进行了第一期盆栽试验<sup>[21]</sup>, 将以上材料按不同配比重构土壤, 方案设计及地上生物量数据见表 2。依据第一批盆栽试验草木樨地上生物量数据, 筛选出植被生长状况最佳、中等及最差方案构成重构组(最佳方案 H<sub>11</sub>, 中等方案 H<sub>3</sub>, 最差方案 H<sub>10</sub> 和 H<sub>15</sub>), 同时设置纯表土对照组 D<sub>1</sub>, 所选 5 种方案土壤理化性质见表 3。

表 1 重构土壤材料背景值

材料	有机质/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g · kg <sup>-1</sup> )	有效磷/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	质地/ 粒径
表土	3.54	0.20	5.30	133.00	砂质壤土
煤矸石	4.39	0.07	2.63	145.83	2—5cm
岩土剥离物	0.36	0.02	2.90	35.00	砂质黏壤土
粉煤灰	—	—	—	—	砂粒

注: “—”代表未发现。

盆栽试验所用的生物炭原料为废弃的玉米秸秆, 制备前先将玉米秸秆风干, 切成 10 cm 左右后放入炭化炉。生物炭制备的热解温度控制采用“程序升温控制技术”, 按此制炭技术将废弃的玉米秸秆分别制成 300℃, 400℃ 和 500℃ 的生物炭, 高温热解结束后, 冷却至室温, 取出生物炭, 待盆栽试验施用。

### 1.2 试验设计

盆栽试验设置在中国地质大学(北京)校内温室

大棚,花盆高 11 cm,直径 10 cm,试验设定重构土壤厚度为 10 cm。依据现有的研究成果,盆栽试验花盆中生物炭施用量按梯度分别为 0,6,12,24 g。将各方案的供试土壤和不同热解温度的生物炭分别置于已铺设的帆布上,将其按比例充分混合后置于花盆中形成重构土壤,新方案以“原方案—生物炭热解温度—生物炭含量”命名,共计 50 种处理,每个处理重复 3 次。以表土对照组 D1 为例,当生物炭热解温度为 300℃时,施用生物炭含量分别为 0,6,12,24 g 时的方案命名分别为:D<sub>1</sub>,D<sub>1-300-6</sub>,D<sub>1-300-12</sub>,D<sub>1-300-24</sub>。

选取当地复垦地先锋植被黄花苜蓿作为本次盆栽试验的对象,每个花盆播种 25 粒种子。在温室大棚内模拟内蒙古矿区气候条件,本次试验周期为 3—6 月,前期进行苜蓿生长状况试验,后期于 5 月 5 日开始进行为期 20 d 的抗旱试验,分别于 5 月 5 日、5 月 10 日、5 月 15 日、5 月 20 日、5 月 23 日、5 月 24 日和 5 月 25 日记录各盆中未萎蔫的株数。为了在同样的干旱条件下,对比不同环境苜蓿的生长状况,各个方案于 5 月 10 日每盆分别浇水 50 ml。

表 2 盆栽试验方案设计及草木樨生物量数据

方案	表土/ %	煤矸石/ %	岩土 剥离物/%	粉煤灰/ %	生物量/ g
D <sub>1</sub>	100				3.48
H <sub>1</sub>	40		60		3.03
H <sub>2</sub>	25	15	60		2.58
H <sub>3</sub>	20	10	60	10	2.71
H <sub>4</sub>	60	10		30	2.45
H <sub>5</sub>	30	10	30	30	2.53
H <sub>6</sub>	30	20	50		2.32
H <sub>7</sub>	50	20	30		3.37
H <sub>8</sub>	50	30	20		2.67
H <sub>9</sub>	40	30	30		2.59
H <sub>10</sub>	40	40	20		2.06
H <sub>11</sub>	30	30	40		4.01
H <sub>12</sub>	30	50	20		3.41
H <sub>13</sub>	20	40	40		2.30
H <sub>14</sub>	40	20	40		2.61
H <sub>15</sub>	40			60	1.57

表 3 盆栽试验土壤理化性质

方案	pH 值	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	质地	砾石 含量/%
D <sub>1</sub>	7.37	32.85	2.03	51.79	740.05	74.92	10.33	14.75	砂质壤土	17.08
H <sub>3</sub>	6.88	107.32	1.54	23.83	464.80	65.73	16.83	17.44	砂质壤土	22.39
H <sub>10</sub>	7.08	179.18	3.20	113.91	900.96	68.74	14.28	16.98	砂质壤土	27.62
H <sub>11</sub>	6.91	71.52	2.10	91.71	1139.89	58.88	16.43	24.69	砂质黏壤土	36.46
H <sub>15</sub>	7.59	32.85	1.54	29.06	531.05	75.57	15.46	8.98	砂质壤土	9.15

抗旱试验结束后,测定土壤化学性质。将重构土壤进行自然风干,风干样品在实验室内磨碎过筛,利用 pH 计测定重构土壤 pH 值,利用重铬酸钾混合光度法测定土壤有机质,利用酸水解-蒸馏法测定土壤有效氮,利用 0.5 mol/L 的 NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼锑抗比色法测定土壤速效磷,利用乙酸铵提取法测定土壤速效钾。

1.3 数据分析

利用存活植株数求取存活率,采用 SPSS 22.0 软件对试验数据进行单因素方差分析( $p<0.05$ ),数据均用 3 次重复试验均值计算。

2 结果与分析

2.1 生物炭施用对土壤化学性质的影响

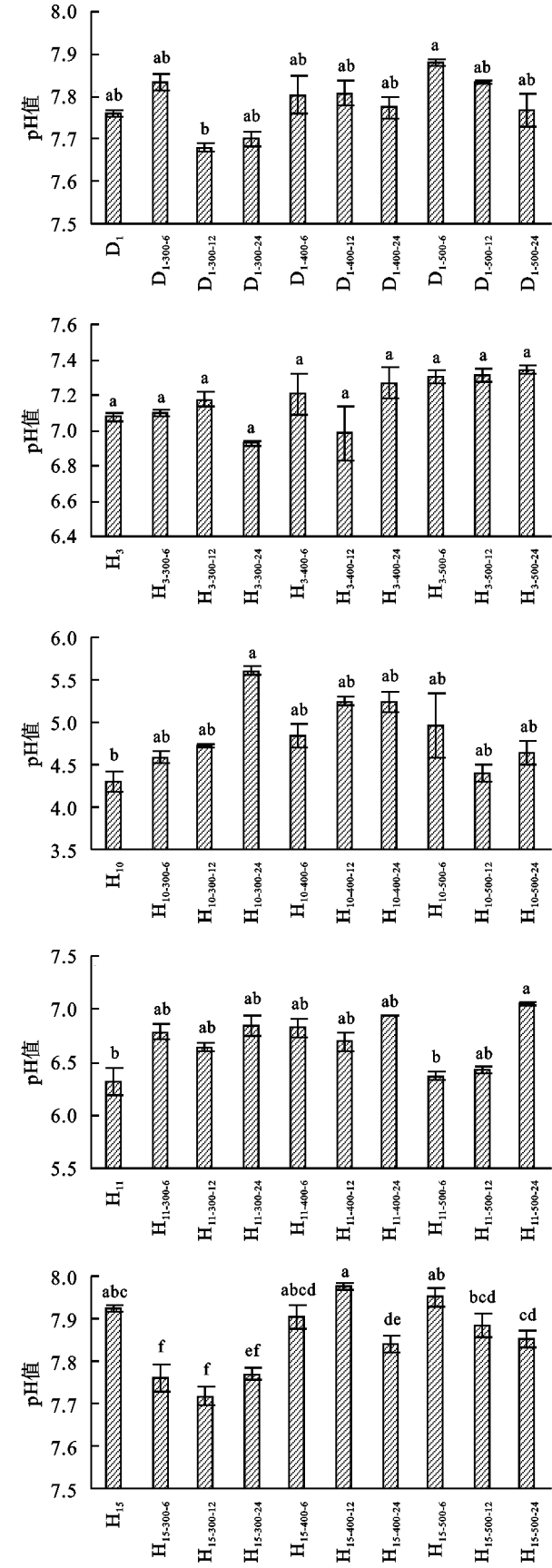
2.1.1 对土壤 pH 值的影响 生物炭本身呈碱性,将其施入土壤中对土壤 pH 值产生一定的影响(图 1)。在 D<sub>1</sub> 方案中,D<sub>1-500-6</sub> 处理土壤 pH 值最高,与 D<sub>1-300-12</sub> 处理存在显著性差异。在 H<sub>3</sub> 方案中,各处理之间均不存在

显著性差异。在 H<sub>10</sub> 方案中,H<sub>10-300-24</sub> 处理土壤 pH 值最高,与表土对照组 H<sub>10</sub> 处理存在显著性差异。在 H<sub>11</sub> 方案中,H<sub>11-500-24</sub> 处理土壤 pH 值最高,与 H<sub>11</sub>,H<sub>11-500-6</sub> 处理存在显著性差异。在 H<sub>15</sub> 中,H<sub>15-400-12</sub> 处理土壤 pH 值最高,与 H<sub>15-300-6/12/24</sub>,H<sub>15-400-24</sub>,H<sub>15-500-12/24</sub> 处理均存在显著性差异。

2.1.2 对土壤有机质含量的影响 在重构土壤中施入不同处理方式的生物炭对土壤有机质产生不同程度的影响(图 2)。在 D<sub>1</sub> 方案中,各处理之间均不存在显著性差异。在 H<sub>3</sub> 方案中,H<sub>3-500-6</sub> 处理土壤有机质含量最高,与 H<sub>3</sub>,H<sub>3-300-6</sub>,H<sub>3-300-12</sub> 处理存在显著性差异。在 H<sub>10</sub>,H<sub>11</sub> 和 H<sub>15</sub> 方案中,各方案组内处理之间均不存在显著性差异。

2.1.3 对土壤有效氮含量的影响 施用不同处理方式的生物炭对土壤有效氮含量的影响见图 3。在 D<sub>1</sub> 方案中,各处理之间均不存在显著性差异。在 H<sub>3</sub> 方案中,H<sub>3-500-6</sub> 处理土壤有效氮含量最高,与 H<sub>3</sub>,H<sub>3-300-6/12</sub> 处理存在显著性差异。在 H<sub>10</sub>,H<sub>11</sub> 和 H<sub>15</sub> 方

案中,各方案组内处理之间均不存在显著性差异。



注:同一幅图中直方柱上方英文小写字母不同表示存在差异显著 ( $p<0.05$ ),误差线表示标准误差,下同。

图 1 生物炭不同处理方式对土壤 pH 值的影响

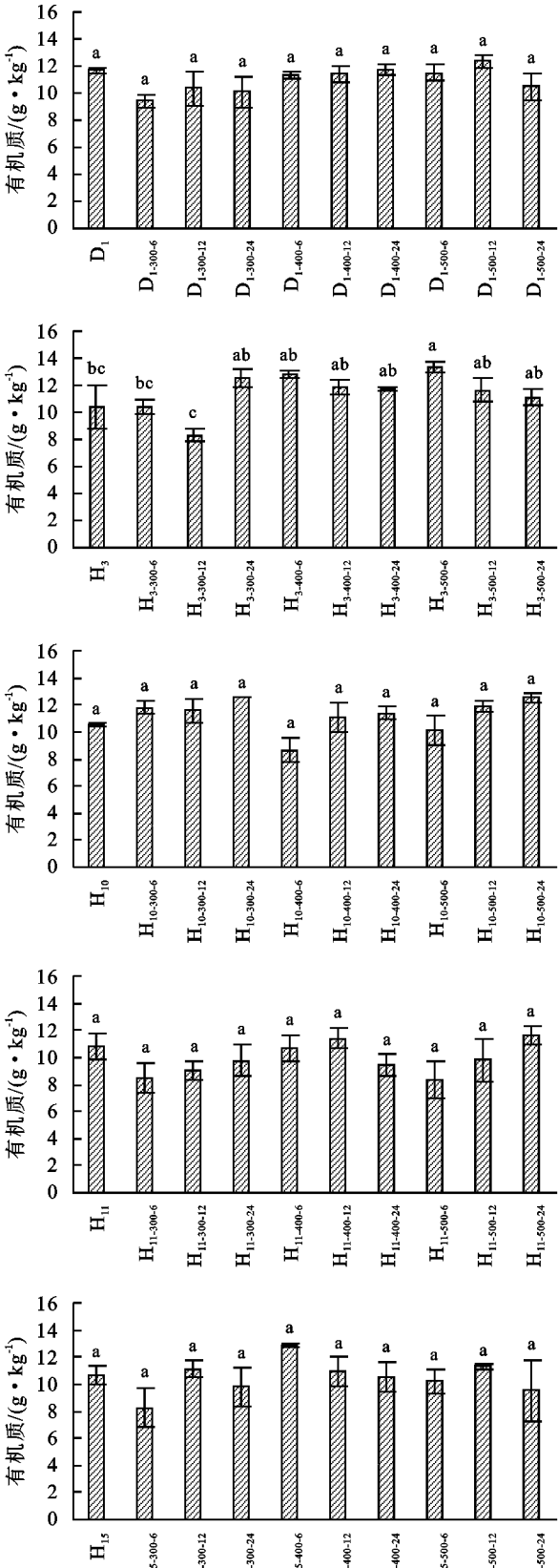


图 2 生物炭不同处理方式对土壤有机质含量的影响

2.1.4 对土壤速效磷含量的影响 施入不同处理方式的生物炭对土壤速效磷含量的影响见图 4。在 D<sub>1</sub> 方案中,各处理之间均不存在显著性差异。在 H<sub>3</sub> 方案中,H<sub>3-500-6</sub> 处理土壤速效磷含量最高,与 H<sub>3</sub>,



$H_{3-300-6/12}$  处理存在显著性差异。在  $H_{10}$ ,  $H_{11}$  和  $H_{15}$  方案中,各方案组内处理之间均不存在显著性差异。

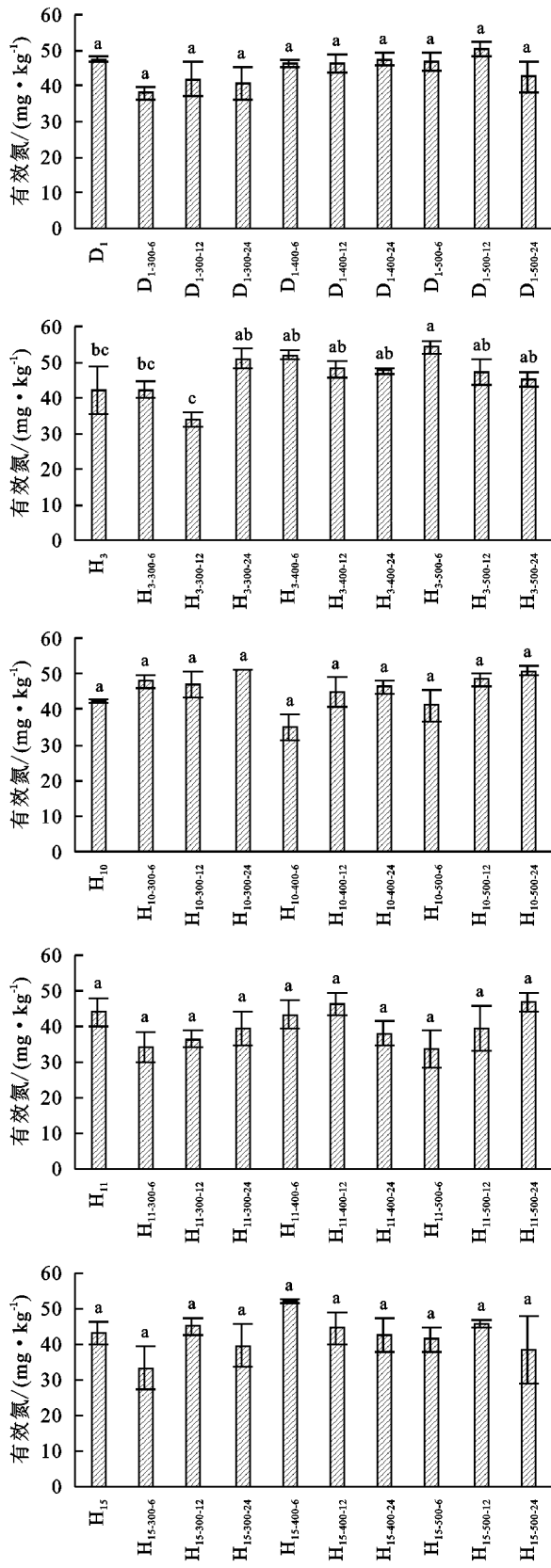


图 3 生物炭不同处理方式对土壤有效氮含量的影响

2.1.5 对土壤速效钾含量的影响 施入不同处理方式的生物炭对土壤速效钾含量的影响见图 5。在  $D_1$

方案中, $D_{1-400-24}$  处理土壤速效钾含量最高,与  $D_1$  处理存在显著性差异。在  $H_3$  方案中, $H_{3-400-24}$  处理土壤速效钾含量最高,与  $H_{3-500-6}$  处理存在显著性差异。在  $H_{10}$  方案中, $H_{10-400-24}$  处理土壤速效钾含量最高,与其余处理均存在显著性差异。在  $H_{11}$  方案中, $H_{11-400-24}$  处理土壤速效钾含量最高,与  $H_{11-500-6}$  处理存在显著性差异。在  $H_{15}$  方案中,各处理之间均不存在显著性差异。

## 2.2 生物炭施用对土壤化学性质影响的综合评价

由于盆栽土壤中 pH 值、有机质、有效氮、速效磷和速效钾的水平和排名不同,单一的化学指标只能反映土壤质量的某些方面,因此,采用主成分分析法对盆栽土壤养分状况进行综合评价。利用 SPSS 22.0 对上述土壤化学性质进行了分析。通过变量的预选择,本研究选取了两个主成分变量,对方差的贡献率分别为 60.71%,28.70%。累积贡献率为 89.41%,表明每个测试样本的信息量为 89.41%,信息丢失率为 10.59%。其中有机质、速效磷和有效氮在第一个主成分上具有较高的负荷,表明该成分反映了有机质、速效磷和有效氮的信息。相反,速效钾和 pH 值在第 2 个主成分上负荷较高,表明该成分反映了速效钾和 pH 值的信息。

利用下式计算各盆栽土壤化学性质综合得分:

$$U_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sqrt{\lambda_i}} \quad (1)$$

$$F_1 = U_{11}ZX_1 + U_{12}ZX_2 + U_{13}ZX_3 + U_{14}ZX_4 + U_{15}ZX_5 \quad (2)$$

$$F_2 = U_{21}ZX_1 + U_{22}ZX_2 + U_{23}ZX_3 + U_{24}ZX_4 + U_{25}ZX_5 \quad (3)$$

$$F = \frac{F_1\lambda_1 + F_2\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad (4)$$

式中: $U_{ij}$  为第  $i$  主成分  $j$  指标的荷载值; $A_{ij}$  为第  $i$  主成分  $j$  指标的初始因子荷载值; $\lambda_i$  为  $i$  成分的特征值。 $ZX_1, ZX_2, ZX_3, ZX_4$  和  $ZX_5$  为原始变量标准化的值,包括土壤有机质、速效磷、有效氮、速效钾和 pH 值; $F$  为综合得分; $F_1$  和  $F_2$  分别为主成分 1,2 的得分; $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为主成分 1,2 分别对应的特征值。

根据以上计算公式,得出在表土对照组  $D_1$  中, $D_{1-500-12}$  处理盆栽土壤化学性质综合最优,其综合得分为 1.61;在重构土壤组  $H_3$  中, $H_{3-500-6}$  处理盆栽土壤化学性质综合最优,其综合得分为 2.37;在重构土壤组  $H_{10}$  中, $H_{10-300-24}$  处理盆栽土壤化学性质综合最优,其综合得分为 1.46;在重构土壤组  $H_{11}$  中, $H_{11-400-6}$  处理盆栽土壤化学性质综合最优,其综合得分为 0.83;在重构土壤组  $H_{15}$  中, $H_{15-400-6}$  处理盆栽土壤化学性质综合最优,其综合得分为 2.12。

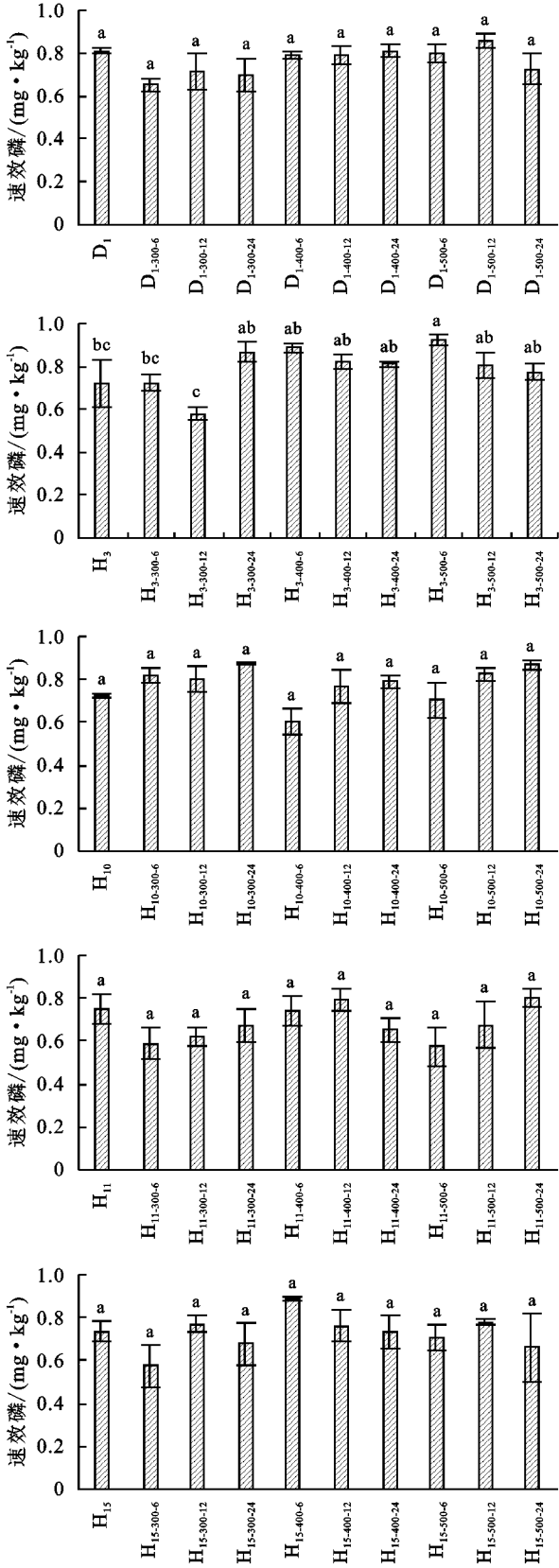


图 4 生物炭不同处理方式对土壤速效磷含量的影响

2.3 生物炭施用对干旱胁迫下苜蓿存活率的影响

干旱胁迫下各方案中生物炭不同处理方式对苜蓿存活率的影响见图 6。在 D<sub>1</sub> 方案中,抗旱试验开始 5 d 后,除 D<sub>1-300-24</sub> 处理外其余添加生物炭的处理苜

蓿存活率均低于 D<sub>1</sub>;抗旱试验开始 10 d 后,添加生物炭的处理苜蓿存活率均低于 D<sub>1</sub>。此后尽管添加生物炭后各盆中苜蓿存活率的下降速率不同,但在抗旱试验开始 20 d 后均降为 0%。

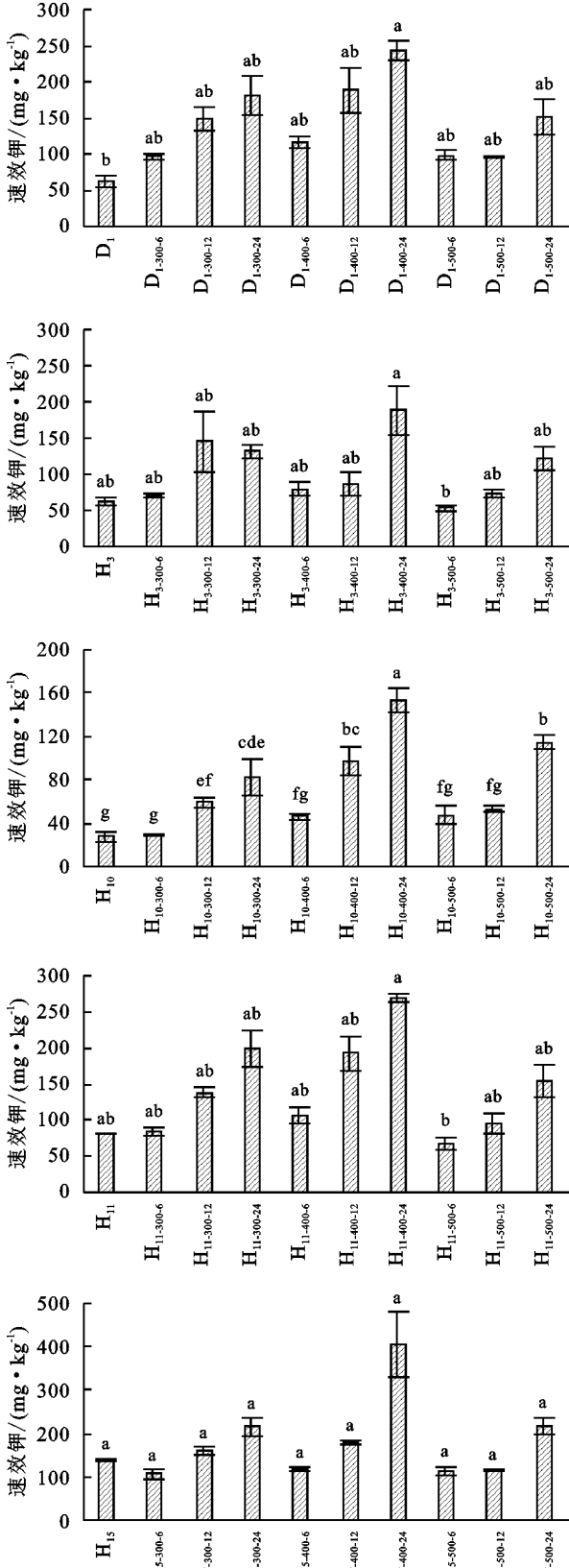


图 5 生物炭不同处理方式对土壤速效钾含量的影响

在  $H_3$  方案中,抗旱试验开始 5 d 后, $H_{3-400-24}$  处理苜蓿存活率最高;抗旱试验开始 10 d 后一直到第 15 d,除  $H_{3-400-6}$ ,  $H_{3-500-12/24}$  处理外,其余添加生物炭的处理苜蓿存活率均高于  $H_3$ ;抗旱试验开始 20 d 后,只有  $H_{3-400-12}$  处理苜蓿存活率低于  $H_3$ 。对于重构土壤组  $H_3$ ,在抗旱试验开始 10 d 后,添加生物炭的处理苜蓿存活率随时间的增加下降速率较慢,且  $H_{3-400-24}$  处理在整个抗旱试验中苜蓿存活率均能保持较高水平。

在  $H_{10}$  方案中,一直到抗旱试验开始 10 d 后,添加生物炭的处理苜蓿存活率均高于  $H_{10}$ ;抗旱试验开始 15 d 后一直到第 20 d,除  $H_{10-500-12}$  处理外其余添加生物炭的处理苜蓿存活率均高于  $H_{10}$ 。对于重构土壤组  $H_{10}$ ,苜蓿存活率随时间的增加下降速率较慢。在整个抗旱试验过程中, $H_{10-300-12/24}$ ,  $H_{10-400-24}$  处理苜蓿存活率均能保持较高水平。

在  $H_{11}$  方案中,抗旱试验开始 5 d 后,除  $H_{11-500-6/12}$  外其余添加生物炭的处理苜蓿存活率均高于  $H_{11}$ ;抗旱试验开始 10 d 后一直到试验结束,  $H_{11-300-24}$  处理苜蓿存活率一直保持较高水平。对于重构土壤组  $H_{11}$ ,  $H_{11-300/400/500-24}$  处理苜蓿存活率随时间的增加下降速率较慢;在整个抗旱试验过程中,  $H_{11-300-24}$  处理苜蓿存活率均能保持较高水平。

在  $H_{15}$  方案中,从抗旱试验开始一直到试验结束,  $H_{15}$  处理苜蓿存活率均最高,其次为  $H_{15-500-24}$  处理。对于重构土壤组  $H_{15}$ ,在整个抗旱试验过程中,添加生物炭的处理对苜蓿存活率均存在抑制作用。

综上所述,生物炭在一定条件下可以提高苜蓿的抗旱性。在重构土壤组  $H_3$ ,  $H_{10}$  和  $H_{11}$  处理中,当生物炭裂解温度为 300℃ 或 400℃,且添加的生物炭含量为 24 g 时,干旱胁迫下苜蓿存活率均得到了有效的改善,整个盆栽试验中  $H_{3-400-24}$  处理在干旱胁迫下苜蓿存活率最高。

干旱胁迫下不同方案中苜蓿在 5 月 25 日的存活率差异性见表 4。表土对照组  $D_1$  中,干旱胁迫下苜蓿在 5 月 25 日的存活率在不同处理方式的生物炭施用下均为 0%,无显著性差异。重构土壤组  $H_3$  中,  $H_{3-400-24}$  处理苜蓿存活率最高,为 86.67%,显著高于其余处理。重构土壤组  $H_{10}$  中,  $H_{10-300-24}$  处理苜蓿在 5 月 25 日的存活率最高,为 84.13%;  $H_{10-400-24}$  次之,苜蓿存活率为 80.16%;其次为  $H_{10-300-12}$ ,苜蓿存活率为 75.66%。干旱胁迫下以上 3 种处理方式的生物炭施用下苜蓿在 5 月 25 日的存活率均高于其余处理,且显著高于  $H_{10}$  和  $H_{10-500-12}$  处理,其中  $H_{10}$  和  $H_{10-500-12}$  处理苜蓿在 5 月 25 日的存活率均为 0%。重构土壤组  $H_{11}$  中,  $H_{11-300-24}$  处理苜蓿在 5 月 25 日的存活率最高,为 81.48%,显著高于除  $H_{11-400/500-24}$  外的其余处理,其中  $H_{11}$ ,  $H_{11-300/400/500-6}$ ,  $H_{11-400/500-12}$  处理苜蓿在 5 月 25 日的存活率均为 0%。重构土壤组  $H_{15}$  中,  $H_{15}$  处理苜蓿存活率最高,为 40.74%;显著高于除  $H_{15-500-24}$  外的其余处理。

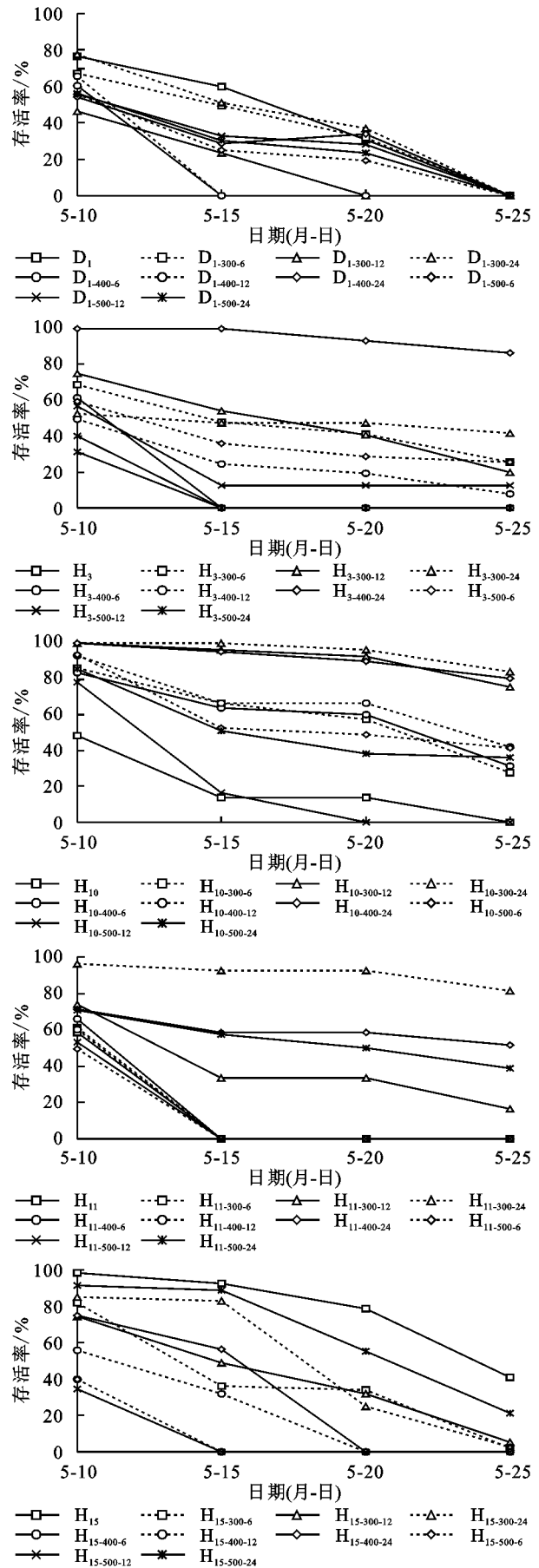


图 6 干旱胁迫下各方案中生物炭不同处理方式对苜蓿存活率的影响

表 4 干旱胁迫下不同方案中苜蓿存活率差异性

生物炭处理方式	H <sub>3</sub>	H <sub>10</sub>	H <sub>11</sub>	H <sub>15</sub>
0	12.50±21.65b	0.00±0.00b	0.00±0.00c	40.74±39.02a
300-6	25.71±29.00b	27.78±48.11ab	0.00±0.00c	2.08±3.61b
300-12	20.00±34.64b	75.66±22.52a	16.67±28.87b	5.56±9.62b
300-24	41.67±52.04b	84.13±16.72a	81.48±32.08a	2.78±4.81b
400-6	0.00±0.00b	31.34±8.30ab	0.00±0.00c	0.00±0.00b
400-12	7.79±7.23b	42.22±36.72ab	0.00±0.00c	0.00±0.00b
400-24	86.67±11.55a	80.16±21.60a	51.67±24.89ab	0.00±0.00b
500-6	25.76±25.03b	41.48±40.08ab	0.00±0.00c	0.00±0.00b
500-12	0.00±0.00b	0.00±0.00b	0.00±0.00c	0.00±0.00b
500-24	0.00±0.00b	36.15±36.37ab	38.89±53.58abc	21.27±19.25ab

注:表中生物炭处理方式表示在盆栽中添加的生物炭的热解温度和含量,如:0 表示不添加生物炭的处理,300-6 表示添加的生物炭热解温度为 300℃,含量为 6 g;表中同一列标有不同小写字母表示存在显著性差异( $p<0.05$ )。

综上所述,在 H<sub>10</sub> 方案中,H<sub>10-300-24</sub> 处理对土壤改良效果最优,且在整个抗旱试验过程中 H<sub>10-300-24</sub> 处理苜蓿均能保持较高的存活率,抗旱试验最后一天(5 月 25 日)H<sub>10-300-24</sub> 处理的苜蓿存活率仍最高,为 84.13%。因此结合不同处理方式的生物炭施用对土壤化学性质和苜蓿抗旱性的综合影响,最优的生物炭处理方式为 H<sub>10-300-24</sub>。

3 讨论

3.1 生物炭施用对土壤化学性质的影响

生物炭由于具有比表面积大、含碳量高、含有大量离子和碱性物质等特性,对土壤化学性质产生一定的影响<sup>[22]</sup>。本研究中施用不同处理方式的生物炭对土壤养分状况的促进作用大都较为明显。这与 Gonzaga<sup>[23]</sup>、高海英<sup>[24]</sup>等的研究结果一致。Gonzaga 等发现生物炭可以提高土壤养分含量。高海英等发现施用生物炭基氮肥可提高土壤 pH 值、有机碳、速效磷、速效钾和矿质态氮含量。

生物炭的施用提高了土壤 pH 值<sup>[25]</sup>,这是因为生物炭在制备过程中,随着有机物的不断热解使生物炭最终呈碱性,且生物炭中含有大量的 K<sup>+</sup>,Ca<sup>+</sup> 等盐基离子<sup>[26-27]</sup>,最终提高了土壤 pH 值。生物炭施用后未刺激碳的矿化,使其具有固碳效应,且生物炭可以促进作物生长,提高土壤中碳的利用率<sup>[28-29]</sup>,因此生物炭施用可以提高土壤有机质含量。对于土壤有效氮含量,生物炭的施用降低了土壤中氮的矿化作用,增强了土壤对氮的吸附<sup>[30-32]</sup>,且生物炭含有较多的矿质养分,可增加土壤中氮素含量<sup>[29]</sup>,生物炭的施用也可以减少土壤中氮的淋溶及消耗<sup>[33]</sup>,因此提高了土壤中的有效氮含量。高海英<sup>[24]</sup>、陈心想<sup>[34]</sup> 等发现土

壤速效磷和速效钾含量随生物炭用量的增加而显著提高。对土壤养分含量的促进作用而言,由于生物炭原料(秸秆)本身养分较高,因此施用生物炭明显增加了土壤中的有机碳、速效磷、速效钾等养分含量<sup>[35]</sup>,且其具有巨大的比表面积可以吸附一定的营养元素,提高土壤的保肥性能,因此生物炭的施用促进了土壤中养分含量的提升<sup>[36-37]</sup>。

3.2 苜蓿抗旱性对生物炭施用的响应

施用不同处理方式的生物炭对土壤理化性质产生影响<sup>[38]</sup>,进而对干旱胁迫下植物抗旱性产生影响。生物炭由于具有巨大的比表面积、良好的吸附能力,使其抗旱能力更强。Carvalho 等<sup>[39]</sup>发现生物炭作为土壤改良剂可以提高土壤的保水能力,为土壤提供抵御干旱的屏障。在养分、水分缺乏的条件下,生物炭的施用可以降低水分的淋失,提高土壤含水量,促进作物生长<sup>[40-41]</sup>。蒋太英等<sup>[18]</sup>发现生物炭浸提液能有效缓解干旱胁迫对幼苗生长造成的影响,提高干旱胁迫下水稻的抗氧化能力,最终提高水稻对干旱胁迫的耐受性。

在重构土壤组 H<sub>3</sub>,H<sub>10</sub> 和 H<sub>11</sub> 处理中,当生物炭裂解温度为 300℃或 400℃,且添加的生物炭含量为 24 g 时,干旱胁迫下苜蓿存活率均得到了最有效的改善,其中在整个盆栽试验中 H<sub>3-400-24</sub> 处理在干旱胁迫下苜蓿存活率最高。这是因为生物炭对干旱胁迫下植物存活率的影响与生物炭的热解温度及施用量有关<sup>[42]</sup>。研究表明,300~400℃制备的生物炭对养分的保留效果更明显,对土壤团聚体的改善效果更佳<sup>[43-44]</sup>,生物炭的施用同时提高了土壤孔隙度,进而对土壤保水能力的提升效果更优。

4 结论

(1) 施用不同处理方式的生物炭对表土对照组



和重构土壤组土壤化学性质的改良效果不同。 $D_1$ 方案中, $D_{1-500-12}$ 对土壤改良效果最优; $H_3$ 方案中, $H_{3-500-6}$ 对土壤改良效果最优; $H_{10}$ 方案中, $H_{10-300-24}$ 对土壤改良效果最优; $H_{11}$ 方案中, $H_{11-500-24}$ 对土壤改良效果最优; $H_{15}$ 方案中, $H_{15-400-6}$ 对土壤改良效果最优。

(2) 在重构土壤组  $H_3$ ,  $H_{10}$  和  $H_{11}$  中,当生物炭热解温度为  $300^{\circ}\text{C}$  或  $400^{\circ}\text{C}$ ,且添加的生物炭含量为  $24\text{ g}$  时,干旱胁迫下苜蓿存活率均得到了有效的改善,在整个盆栽试验中, $H_{3-400-24}$  在干旱胁迫下苜蓿存活率最高。

(3) 结合不同处理方式的生物炭施用对土壤化学性质和苜蓿抗旱性的综合影响,最优的生物炭处理方式 为  $H_{10-300-24}$ 。

#### 参考文献:

- [1] BP. Statistical Review of World Energy 2020[Z].69th edition. London: Statistical Review of World Energy,2020.
- [2] 荣颖,胡振琪,杜玉玺,等.露天矿区土壤基质改良材料研究进展[J].金属矿山,2018(2):164-171.
- [3] 张峰玮,甄选,陈传玺.世界露天煤矿发展现状及趋势[J].中国煤炭,2014,40(11):113-116.
- [4] 卞正富.我国煤矿区土地复垦与生态重建研究[J].资源·产业,2005,7(2):18-24.
- [5] Cao Y, Dallimer M, Stringer L C, et al. Land expropriation compensation among multiple stakeholders in a mining area: Explaining “skeleton house” compensation [J]. Land Use Policy, 2018,74:97-110.
- [6] Cao Y, Bai Z, Sun Q, et al. Rural settlement changes in compound land use areas: Characteristics and reasons of changes in a mixed mining-rural-settlement area in Shanxi Province, China[J]. Habitat International,2017, 61:9-21.
- [7] 韩煜,王琦,赵伟,等.草原区露天煤矿开采对土壤性质和植物群落的影响[J].生态学杂志,2019,38(11):3425-3433.
- [8] 白中科.黄土区大型露天矿复垦土地的土壤重构与土壤环境质量[C]//中国土壤学会土壤环境专业委员会,中国科学院土壤圈物质循环开放研究实验室.第七次“土壤与环境”学术研讨会论文摘要.厦门,2001.
- [9] Robson T, Golos P J, Stevens J, et al. Enhancing tailings revegetation using shallow cover systems in arid environments: Hydrogeochemical, nutritional, and eco-physiological constraints [J]. Land Degradation & Development, 2018,29(9):2785-2796.
- [10] Ghosh R, Ghosh D N. Biological reclamation of surface mined land without soil grafting: A working model[J]. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 1993,7(4):167-170.
- [11] Hu Z, Zhu Q, Liu X, et al. Preparation of topsoil alternatives for open-pit coal mines in the Hulunbuir grassland area, China[J]. Applied Soil Ecology,2020,147.DOI: 10.1016/j.apsoil.2019.103431.
- [12] 刘雪冉,胡振琪,许涛,等.露天煤矿表土替代材料研究综述[J].中国矿业,2017,26(3):81-85.
- [13] 陈芳,张康康,谷思诚,等.不同种类生物质炭及施用量对水稻生长及土壤养分的影响[J].华中农业大学学报,2019,38(5):57-63.
- [14] Zheng X, Song W, Guan E, et al. Response in physicochemical properties of tobacco-growing soils and N/P/K accumulation in tobacco plant to tobacco straw biochar[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2020,20(2):293-305.
- [15] 严陶韬,丁子菊,朱倩,等.生物质炭对黄棕壤理化性质及龙脑樟幼苗生长的影响[J].土壤,2018,50(4):681-686.
- [16] 李明,李忠佩,刘明,等.不同秸秆生物炭对红壤性水稻土养分及微生物群落结构的影响[J].中国农业科学, 2015,48(7):1361-1369.
- [17] Edeh I G, Mašek O, Buss W. A meta-analysis on biochar's effects on soil water properties-New insights and future research challenges[J]. Science of the Total Environment, 2020,714.DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.136857.
- [18] 蒋太英,徐凡,甄晓溪,等.生物炭表面水溶活性分子可以有效提高水稻的耐旱性[J].分子植物育种,2015,13 (6):1223-1232.
- [19] 赵君,姚彤,李明,等.生物炭对干旱胁迫下蓝盆花生长及根际土壤真菌丰度的影响[J].北方园艺,2019(14): 93-99.
- [20] Artiola J F, Rasmussen C, Freitas R. Effects of a biochar-amended alkaline soil on the growth of romaine lettuce and bermudagrass[J]. Soil Science, 2012,177 (9): 561-570.
- [21] 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.
- [22] 武玉,徐刚,吕迎春,等.生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J].地球科学进展,2014,29(1):68-79.
- [23] Gonzaga M I S, Mackowiak C L, Comerford N B, et al. Pyrolysis methods impact biosolids-derived biochar composition, maize growth and nutrition[J]. Soil and Tillage Research, 2017,165(1):59-65.
- [24] 高海英,何绪生,陈心想,等.生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤化学性质及作物产量的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(10):1948-1955.
- [25] Bass A M, Bird M I, Kay G, et al. Soil properties,

- greenhouse gas emissions and crop yield under compost, biochar and co-composted biochar in two tropical agronomic systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 550(1): 459-470.
- [26] 张俊叶, 刘晓东, 王林, 等. 生物质炭的土壤效应研究综述[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(9): 46-50.
- [27] 张崢嵘. 生物炭改良土壤物理性质的初步研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [28] Plaza C, Giannetta B, Fernández J M, et al. Response of different soil organic matter pools to biochar and organic fertilizers[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2016, 225: 150-159.
- [29] Liu X, Zheng J, Zhang D, et al. Biochar has no effect on soil respiration across Chinese agricultural soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 554: 259-265.
- [30] Gomez-Munoz B, Case S D C, Jensen L S. Pig slurry acidification and separation techniques affect soil N and C turnover and  $N_2O$  emissions from solid, liquid and biochar fractions[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 168: 236-244.
- [31] 李露, 周自强, 潘晓健, 等. 不同时期施用生物炭对稻田  $N_2O$  和  $CH_4$  排放的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 839-848.
- [32] Paneque M, José M, Franco-Navarro J D, et al. Effect of biochar amendment on morphology, productivity and water relations of sunflower plants under non-irrigation conditions[J]. *Catena*, 2016, 147: 280-287.
- [33] Lehmann J, da Silva J P, Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343-357.
- [34] 陈心想, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(20): 6534-6542.
- [35] 罗俊杰, 欧巧明, 叶春雷, 等. 重要胡麻栽培品种的抗旱性综合评价及指标筛选[J]. *作物学报*, 2014, 40(7): 1259-1273.
- [36] 吉贵锋, 王鹏泽, 位辉琴, 等. 生物炭对不同植烟土壤理化特性及烤烟根系发育的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2019, 21(10): 148-156.
- [37] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(4): 779-785.
- [38] Wacal C, Ogata N, Basalirwa D, et al. Growth, seed yield, mineral nutrients and soil properties of sesame (*Sesamum indicum* L.) as influenced by biochar addition on upland field converted from paddy[J]. *Agronomy*, 2019, 9(2): 55-75.
- [39] Carvalho M T D, Maia A D N, Madari B E, et al. Biochar increases plant-available water in a sandy loam soil under an aerobic rice crop system[J]. *Solid Earth*, 2014, 5(2): 939-952.
- [40] Usowicz B, Lipiec J, Łukowski M, et al. The effect of biochar application on thermal properties and albedo of loess soil under grassland and fallow[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 164: 45-51.
- [41] Caroline A, Debode J, Vandecasteele B, et al. Biological, physicochemical and plant health responses in lettuce and strawberry in soil or peat amended with biochar[J]. *Applied Soil*, 2016, 107: 1-12.
- [42] Sun J, He F, Zhang Z, et al. Temperature and moisture responses to carbon mineralization in the biochar-amended saline soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 569: 390-394.
- [43] Ahmad M, Ok Y S, Kim B Y, et al. Impact of soybean stover- and pine needle-derived biochars on Pb and As mobility, microbial community, and carbon stability in a contaminated agricultural soil[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 166: 131-139.
- [44] Xu G, Zhang Y, Sun J, et al. Negative interactive effects between biochar and phosphorus fertilization on phosphorus availability and plant yield in saline sodic soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 568: 910-915.