

矿山废弃地植物种植模式对土壤改良效果

杨帅^{1,2}, 高照良^{1,3}, 白皓³, 罗珂³, 李玉婷婷³, 齐星圆³

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为探讨不同植物种植模式对矿山废弃地土壤肥力快速改良的效果, 选取8种典型的植物种植模式(黑麦草、草木樨、沙打旺、小冠花、紫穗槐、紫穗槐+小冠花、紫穗槐+黑麦草和草木樨+黑麦草)。通过野外土壤采样与室内养分测定并结合主成分分析方法, 对不同植物及种植模式下的土壤肥力进行了相关分析。结果表明: 不同种植模式均能较好的改善土壤水分状况, 土壤含水率平均值比对照高8.7%; 不同种植模式下土壤含水率随着土层深度的增加, 总体呈增加—减少—增加—稳定的变化趋势; 植物对土壤蓄水保水效果的改良主要体现在0—40 cm的土层; 土壤中的各养分指标质量分数总体表现为0—10 cm土层大于10—20 cm土层, 呈现出一定的表聚效应; 植物生长初期, 不同种植模式对矿山废弃地土壤的改良效果依次为沙打旺>草木樨>黑麦草>草木樨+黑麦草>紫穗槐+小冠花>紫穗槐+黑麦草>紫穗槐>小冠花, 单播种植模式相对优于混播种植模式。研究结果可为今后矿山废弃地重构土壤的水分变化研究、优良种植模式选择及土壤肥力的快速改良提供参考。

关键词: 矿山废弃地; 植物种植模式; 土壤肥力改良; 主成分分析

中图分类号: S157.4⁺31

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)03-0134-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.03.024

Soil Improvement Effects of Planting Patterns on Mining Abandoned Lands on the Loess Plateau

YANG Shuai^{1,2}, GAO Zhaoliang^{1,3}, BAI Hao³, LUO Ke³, LI Yutingting³, QI Xingyuan³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water

Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to study the effects of different plant cultivation patterns on soil fertility of mining abandoned lands, eight typical plant cultivation patterns were selected in this paper (*Lolium perenne* L., *Melilotus suaveolens* Ledeb., *Astragalus adsurgens*, *Coronilla varia* L., *Amorpha fruticosa* Linn., *Amorpha fruticosa* Linn. + *Coronilla varia* L., *Amorpha fruticosa* Linn. + *Lolium perenne* L., and *Melilotus suaveolens* Ledeb. + *Lolium perenne* L.). Soil fertility of different plants and planting patterns were analyzed by soil sample collection, lab analysis and principal component analysis. The results showed that different planting patterns could improve soil water conditions, the average soil water content was 8.7% higher than that of the control. With the increase of soil depth, soil water content under different planting modes showed an increase-decrease-increase-stable development trend. The improvement effect of plants on soil water retaining was mainly reflected in the 0—40 cm soil layer. The total quality score of each nutrient in the soil was larger in the 0—10 cm than the 10—20 cm soil layer, which showed a certain aggregation effect. In the early stage of plant growth, the effects of different planting patterns in the soil of mining abandoned land followed the order of *Astragalus adsurgens* > *Melilotus suaveolens* Ledeb. > *Lolium perenne* L. > *Melilotus suaveolens* Ledeb. + *Lolium perenne* L. > *Amorpha fruticosa* Linn. + *Coronilla varia* L. > *Amorpha fruticosa* Linn. + *Lolium perenne* L. > *Amorpha fruticosa* Linn. > *Coronilla varia* L. Unicast planting patterns were better than mixed cropping patterns. The results can provide a reference for the study of soil moisture change, the selection of good planting patterns, and the rapid improvement of soil fertility in the future.

Keywords: mining abandoned land; planting patterns; soil fertility improvement; principal component analysis

收稿日期: 2016-12-01

资助项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目“农田水土保持关键技术研究及示范”(2011BAD31B01)

第一作者: 杨帅(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事工程建设区土壤侵蚀与改良研究。E-mail: 1024539637@qq.com

通信作者: 高照良(1969—), 男, 博士, 主要从事农业水土工程和荒漠化防治。E-mail: gzl@ms.iswc.ac.cn

矿山开采过程中露天尾矿场、采矿场、排土场、塌陷区以及受重金属污染而失去经济利用价值的土地统称为矿山废弃地^[1]。自改革开放以来,中国的采矿业迅速发展,极大助推了中国的社会和经济水平^[2]。然而,采矿业在给中国带来巨大经济利益的同时,也给生态环境带来了极大的破坏和污染,影响最为深刻的是矿区土壤环境^[3]。土壤是许多生态过程的载体^[4],土壤水分和养分状况是度量退化生态系统功能恢复与维持的关键指标^[5]。长期的实践表明,通过覆土并种植适宜的植物是快速改良矿山废弃地土壤质量的重要指导思想之一。豆科和禾本科植物抗性强,根系发达,在贫瘠的土地上也能快速生长,豆科和禾本科植物混播具有提高植物量,降低病虫害、减少土壤侵蚀及提升改土培肥等优势^[6];而且豆科植物在矿区植被恢复中对环境适应性强,具有较强的固氮能力^[7],可有效保持水土、改良土壤性质,增加土壤中碳、氮、磷及微生物等,提升土壤肥力^[8-9]。在黄土高原地区,土壤水分是植被恢复与重建的主要限制因子,也是决定土壤肥力的重要因素^[10]。植物的生长与土壤水分的动态变化有密切关系,而土壤剖面结构和土壤质地分层等性质都会对土壤水分运动产生影响,而煤矸石的填充改变了土壤的剖面结构,必然会影响土壤水分的垂直运动^[11]。

先前的研究大多数集中于对豆科植物的不同种植年限^[12-13]和种植密度^[14]对矿山废弃地土壤的改良效果的研究,而对禾本科植物与豆科植物种植模式改良矿山废弃地土壤效果的对比分析研究相对较少;本文以野外定位观测试验数据为基础,以黄土高原典型沟壑区矿山废弃地为研究对象,开展植物种植模式对土壤改良的研究,对比分析植物种植模式对土壤水分和土壤养分等方面的影响,探讨矿山废弃地上不同植物及种植模式与土壤肥力改良关系,旨在为黄土高原地区矿山废弃地重构土壤的水分变化研究、适宜植物

种类筛选、优良种植模式及土壤肥力的快速改良提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原中南部陕甘交界处的中国科学院长武黄土高原农业生态试验站(35°14′24.5″N,107°41′21.2″E),海拔1 107 m,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水量584 mm,降雨季节分布不均匀,多集中于夏季和秋季,年均气温9.1℃,年积温2 994℃,光照资源充沛,昼夜温差大,无霜期171 d,地下水位50~80 m。地带性土壤为黑垆土,其田间持水量、凋萎湿度、稳定土壤湿度分别为22%,9%和15%^[15],母质为深厚的中壤质马兰黄土,土体疏松且通透性良好,具有良好的“土壤水库”效应,地貌类型属于黄土高原高塬沟壑区,塬、梁和沟3大地貌单元各占总面积的35.0%,35.5%和29.5%^[16]。

1.2 研究方法

野外种植试验小区长×宽×高为2 m×2 m×0.85 m,共计27个,小区底部填充50 cm厚且粒径小于5 cm的煤矸石,煤矸石顶部覆未熟化的生土35 cm;同时,在每个小区内中央插2 m长中子管。本次模拟矿山废弃地覆土种植试验选择的植物种类是通过黄土高原地区植物种类的广泛调查以及查阅相关资料而确定,于2013年11月进行单播(黑麦草、草木樨、沙打旺、小冠花、紫穗槐)和混播(紫穗槐+小冠花、紫穗槐+黑麦草、草木樨+黑麦草),以未播种植物的裸地为对照(CK),每种处理设置3个试验小区,种植前测定小区土壤背景值(表1)。为充分模拟矿山废弃地植物改良土壤的自然条件,保证试验条件的一致性,本试验在植物种植时进行一次人工灌溉以保证植物的出苗率,植物出苗后,不再进行灌溉、除草等其他人为措施,以保证植物在自然条件下生长。

表1 样地土壤背景值

土层深度/cm	容重/(g·cm ⁻³)	孔隙度/%	土壤水分/%	有机质/(g·kg ⁻¹)	铵态氮/(mg·kg ⁻¹)	硝态氮/(mg·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)
0—10	1.32	50.06	21.68	4.50	4.86	2.76	2.75	121.22
10—20	1.39	47.55	21.74	4.29	4.89	2.21	2.46	113.46

试验采用野外种植和实验室土壤养分指标测定相结合的研究方法。于2015年7月分别进行土壤水分和养分的测定。土壤水分测定深度为0—120 cm。土壤养分样按“S”形,设计5个取样点,深度为0—10,10—20 cm,同一层的土样充分混合,剔除石块和植物残根等杂物,装入自封袋,带回实验室后将土样摊平、风干,磨细过筛备用。

土壤水分用中子仪测定;土壤养分含量测定^[17]:土壤有机质采用K₂Cr₂O₇-H₂SO₄外加热法测定;

土壤速效氮采用流动分析仪测定的方法;土壤速效磷采用0.5 mol/L NaHCO₃浸提—钼锑抗比色法;土壤速效钾用NH₄OAc浸提—火焰光度法测定。

运用Origin 9.0和Excel软件进行数据处理,运用SPSS 21.0软件进行主成分分析等。

2 结果与分析

2.1 不同植物种植模式下土壤含水率的垂直分布特征

不同种植模式下土壤含水率在垂直方向上表现出明显的变异性。就其整体而言,5种单播植物和3

种混播植物模式下的土壤含水率均表现出随着土层深度的增加,呈增加—减少—增加—平稳的变化趋势。由图 2 可知,在 0—35 cm 土层中,土壤含水率呈增加型,这是因为表层土壤受到太阳直射,水分蒸发量大,而且越接近地表蒸发量;35—80 cm 土层中,土壤水分呈降低型,这是由于该土层填充了煤矸石,而煤矸石层结构性差、非毛管孔隙多,导致其持水能力差、渗透率较高,田间持水量和饱和持水量都远低于黄土,35—85 cm 土层的水分大量渗漏到底层^[18],煤矸石影响了土壤水分的垂直分布;85—110 cm 土层中土壤含水率逐渐增加,这是由于煤矸石层渗透的水分在其底部向下运动并累积所致;而 110—120 cm 土层中土壤含水率值趋于稳定,这是因为该土层受环境的影响较小,土壤含水率变化幅度较小。

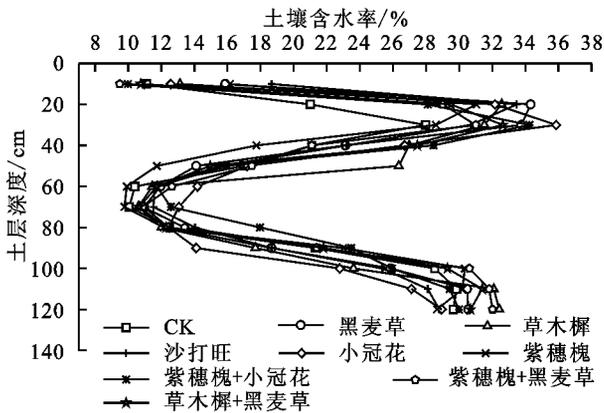


图 1 不同植物种植模式不同土层深度土壤含水率的变化

由表 2 可知,不同种植模式下植物对不同深度土层的蓄水保水效果差异明显。在 0—40 cm 土层中,对土壤蓄水保水效果较好的植物种植模式为单播种植小冠花和黑麦草,分别比对照(CK)高 32.2%和 31.9%;

表 2 不同植物种植模式下不同土层土壤含水率

单位: %

土层 深度/cm	土壤含水率								
	对照	黑麦草	草木樨	沙打旺	小冠花	紫穗槐	紫穗槐+小冠花	紫穗槐+黑麦草	草木樨+黑麦草
0—10	11.10	15.86	13.13	18.66	12.57	16.14	9.98	9.49	10.75
10—20	21.00	34.32	32.57	33.48	32.16	31.04	28.10	29.01	29.50
20—30	27.97	33.76	31.53	30.69	35.86	28.59	34.25	31.00	32.64
30—40	21.10	23.13	26.98	23.20	26.70	17.75	28.45	21.10	27.47
40—50	17.00	14.11	26.35	15.58	17.19	11.73	15.93	17.47	14.95
50—60	10.40	11.94	11.45	11.59	14.18	9.91	11.73	12.64	11.73
60—70	10.05	10.96	10.61	11.52	13.06	9.77	12.57	10.89	10.68
70—80	12.50	12.43	12.01	14.04	12.43	12.15	17.96	13.41	12.29
80—90	21.31	18.66	17.68	18.66	14.11	22.99	23.48	21.38	21.80
90—100	28.52	25.86	23.62	25.37	22.78	30.34	25.93	30.62	29.29
100—110	29.85	30.48	32.09	28.10	27.12	30.20	29.43	31.81	31.39
110—120	29.64	30.55	32.43	28.80	28.94	28.66	29.99	32.02	30.69

由表 3 可知,在 0—20 cm 土层中,单播植物小区有机质含量平均值为 5.13 mg/kg,比对照(CK)高 2.4%;混播植物小区为 5.50 mg/kg,比对照(CK)高 4.8%;单播植物小区有机质含量低于混播植物小区。

单播和混播植物小区平均土壤含水率分别比对照(CK)高 27.7%和 19.8%,单播植物小区土壤含水率高于混播植物小区;植物小区 0—40 cm 土层中含水量比对照(CK)高 24.7%,50—120 cm 土层比对照(CK)高 0.5%,表明各植物对土壤表层含水率的改善效果优于深层土壤,植物对土壤蓄水保水改良的效果主要体现在 0—40 cm 的土层中。在 0—120 cm 土层,黑麦草、草木樨、沙打旺、小冠花、紫穗槐、紫穗槐+小冠花、紫穗槐+黑麦草、草木樨+黑麦草的平均土壤含水率与对照分别为 21.84%,22.54%,21.64%,21.42%,20.77%,22.32%,21.74%,21.93%,20.04%,植物小区的土壤含水率平均值比对照(CK)高 8.7%,表明各植物均可改善土壤水分状况。

2.2 不同植物种植模式下土壤养分变化特征

2.2.1 土壤有机质 由表 3 可知,0—10 cm 土层有机质含量平均为 5.32 g/kg,10—20 cm 土层有机质含量平均为 5.15 g/kg,植物对 0—10 cm 土层中有机质含量的提升效果更为显著。这是由于植物生长主要影响表层土壤,表层土壤团粒结构的改善加速了有机质的积累,此外随着土壤深度的增加土壤孔隙度下降,土壤孔隙度的降低影响了微生物的活动,从而不利于土壤有机质的形成。由表 4 可知,黑麦草、草木樨和紫穗槐在 0—10 cm 土层有机质含量均小于 10—20 cm 土层,这是由于土壤中有机质含量变化主要取决于有机物质输入量和输出量的相对大小,小冠花的根系主要集中在 0—10 cm 土层^[19],而黑麦草、草木樨和紫穗槐的根系主要集中在 10—20 cm 土层中^[20],植物根系主要集中在的有机质输入量小于输出量所致。

由表 4 可知,在 0—20 cm 土层中,有机质含量大小为草木樨>草木樨+黑麦草>紫穗槐+小冠花>空白>沙打旺>小冠花>紫穗槐>紫穗槐+黑麦草>黑麦草。与对照相比,草木樨、草木樨+黑麦草、紫

穗槐+小冠花使土壤有机质含量增加了 16.38%, 11.24%, 8.57%, 草木樨、草木樨+黑麦草、紫穗槐+小冠花对土壤有机质的积累量大于植物有机质的消

耗量, 而沙打旺、小冠花、紫穗槐、紫穗槐+黑麦草和黑麦草与对照相比, 分别减少了 1.14%, 4.19%, 7.05%, 10.48%, 16.00%。

表3 不同植物种植模式土壤养分状况

种植模式	土层深度/cm	有机质/ (g · kg ⁻¹)	硝态氮/ (mg · kg ⁻¹)	铵态氮/ (mg · kg ⁻¹)	全氮/ (mg · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)
黑麦草	0—10	4.30	0.47	5.42	0.20	6.76	172.58
	10—20	4.52	0.30	3.38	0.19	6.19	149.50
	平均值	4.41	0.38	4.40	0.19	6.48	161.04
草木樨	0—10	5.64	1.30	4.99	0.23	6.00	179.08
	10—20	6.58	0.61	2.79	0.21	4.36	153.35
	平均值	6.11	0.95	3.89	0.22	5.18	166.22
沙打旺	0—10	5.30	1.77	2.03	0.26	5.38	178.56
	10—20	5.07	1.08	4.21	0.27	4.19	160.37
	平均值	5.19	1.42	3.12	0.26	4.78	169.47
小冠花	0—10	5.19	0.37	0.92	0.22	3.79	115.38
	10—20	4.88	0.36	2.00	0.24	4.04	105.57
	平均值	5.03	0.36	1.46	0.23	3.91	110.47
紫穗槐	0—10	4.72	0.51	0.54	0.24	7.87	137.02
	10—20	5.05	0.42	1.23	0.19	5.69	135.85
	平均值	4.88	0.47	0.89	0.22	6.78	136.44
紫穗槐+小冠花	0—10	5.65	1.15	3.65	0.22	5.90	158.08
	10—20	5.74	0.67	3.74	0.21	4.12	122.86
	平均值	5.70	0.91	3.70	0.21	5.01	140.47
紫穗槐+黑麦草	0—10	5.23	0.48	3.07	0.18	11.04	136.28
	10—20	4.17	0.41	3.72	0.17	10.09	136.87
	平均值	4.70	0.44	3.39	0.18	10.57	136.57
草木樨+黑麦草	0—10	6.38	0.58	6.49	0.23	6.44	147.95
	10—20	5.30	0.55	4.78	0.20	7.44	120.77
	平均值	5.84	0.56	5.63	0.21	6.94	134.36
对照	0—10	5.43	0.56	1.75	0.22	10.20	131.89
	10—20	5.07	0.35	1.66	0.19	12.55	116.28
	平均值	5.25	0.45	1.70	0.20	11.38	124.08

表4 不同植物种植模式下土壤养分与对照的比较

种植模式	土层深度/cm	较对照增减/%					
		有机质	全氮	铵态氮	硝态氮	速效磷	速效钾
黑麦草	0—20	-16.00	-5.00	158.82	-15.56	-43.06	29.79
草木樨	0—20	16.38	10.00	128.82	111.11	-54.48	33.96
沙打旺	0—20	-1.14	30.00	83.53	215.56	-58.00	36.58
小冠花	0—20	-4.19	15.00	-14.12	-20.00	-65.64	-10.97
紫穗槐	0—20	-7.05	10.00	-47.65	4.44	-40.42	9.96
紫穗槐+小冠花	0—20	8.57	5.00	117.65	102.22	-55.98	13.21
紫穗槐+黑麦草	0—20	-10.48	-10.00	99.41	-2.22	-7.12	10.07
草木樨+黑麦草	0—20	11.24	5.00	231.18	24.44	-39.02	8.28

2.2.2 土壤全氮 由表3可知, 在0—20 cm土层中, 单播植物小区全氮含量平均值为0.23 mg/kg, 比对照(CK)高12.5%; 混播植物小区为0.20 mg/kg, 与对照(CK)相同, 单播植物小区全氮含量高于混播植物小区。由表4可知, 全氮的质量分数大小表现为沙打旺>小冠花>草木樨=紫穗槐>紫穗槐+小冠

花=草木樨+黑麦草>空白>黑麦草>紫穗槐+黑麦草, 沙打旺、小冠花、草木樨、紫穗槐、紫穗槐+小冠花和草木樨+黑麦草, 较CK分别增加了30.00%, 15.00%, 10.00%, 10.00%, 5.00%, 5.00%。表明各植物及其种植模式基本都使硝态氮的质量分数增加, 豆科植物增加硝态氮的效果较为明显, 这是因为豆科

植物在生长过程中,其根部形成的根瘤能固定土壤和空气中的氮素,固定的氮素除了满足植物生长外,还能增加土壤全氮含量^[21-22]。

由表 3 可知,土壤中的全氮质量分数表现为 0—10 cm 土层大于 10—20 cm 土层,呈现出一定的表聚效应,这是由于表层受土壤植物固氮作用的影响较强,其含量随时间增加而逐步提高,而深层土壤的全氮含量主要由土壤母质决定,有机质分解作用也较弱。

2.2.3 土壤速效氮 在 0—20 cm 土层中,单播植物小区硝态氮含量平均值为 0.72 mg/kg,比对照(CK)高 60.0%;混播植物小区为 0.64 mg/kg,比对照(CK)高 42.2%;单播植物小区硝态氮含量高于混播植物小区。硝态氮的质量分数大小表现为沙打旺>草木樨>紫穗槐+小冠花>草木樨+黑麦草>紫穗槐>CK>紫穗槐+黑麦草>黑麦草>小冠花(表 3);表明各植物及种植方式整体使硝态氮的质量分数增加,沙打旺、草木樨、紫穗槐+小冠花、草木樨+黑麦草和紫穗槐,分别增加了 215.56%,111.11%,102.22%,24.44%,4.44%(表 4);在 0—20 cm 土层中,单播植物小区铵态氮含量平均值为 2.75 mg/kg,比对照(CK)高 61.8%;混播植物小区为 4.24 mg/kg,比对照(CK)高 149.2%;混播植物小区铵态氮含量显著高于单播植物小区;铵态氮的质量分数表现为草木樨+黑麦草>黑麦草>草木樨>紫穗槐+小冠花>紫穗槐+黑麦草>沙打旺>CK>小冠花>紫穗槐(表 3);与对照相比,草木樨+黑麦草、黑麦草、草木樨、紫穗槐+小冠花、紫穗槐+黑麦草和沙打旺土壤中铵态氮的质量分数分别增加了 231.18%,158.82%,128.82%,117.65%,99.41%,83.53%,小冠花和紫穗槐分别减少了 47.65%和 14.12%(表 4)。

由表 3 可知,土壤中的铵态氮和硝态氮质量分数均表现为 0—10 cm 土层大于 10—20 cm 土层,这是由于植物对 0—10 cm 土层的影响比 10—20 cm 土层强烈,而且硝酸盐(NO_3^-)带负电荷,是最易被淋洗的氮形态,易随土壤水分运动向下进入深层土壤,同时 0—10 cm 土层土壤在植物固氮作用下不断熟化,铵态氮含量随时间增加而逐步提高,而深层土壤的铵态氮含量则主要由土壤母质铵态氮含量水平决定,其含量增加一部分来自上层土壤的铵态氮迁移和一部分氮素的分解转化,因此含量较小。

2.2.4 土壤速效磷 在 0—20 cm 土层中,单播植物小区速效磷含量平均值为 5.43 mg/kg,比对照(CK)低 52.3%;混播植物小区为 7.51 mg/kg,比对照(CK)低 34.1%;单播植物小区速效磷含量低于混播植物小区。速效磷的平均质量分数在 3.91~10.57 mg/kg 之间,对照的速效磷平均质量分数为 11.38

mg/kg,其大小表现为空白>紫穗槐+黑麦草>草木樨+黑麦草>紫穗槐>黑麦草>草木樨>紫穗槐+小冠花>沙打旺>小冠花(表 3)。紫穗槐+黑麦草、草木樨+黑麦草、紫穗槐、黑麦草、草木樨、紫穗槐+小冠花、沙打旺和小冠花土壤速效磷的质量分数分别较 CK 减少了 7.12%,39.02%,40.42%,43.06%,54.48%,55.98%,58.00%,65.64%。

由表 3 可知,土壤中速效磷的质量分数均表现为 0—10 cm 土层大于 10—20 cm 土层,这是由于土壤矿质胶体的性质、有机质含量、氧化还原条件及干湿交替过程等均能对土壤速效磷含量产生影响。0—10 cm 土层有机质含量较深层土壤含量高,可以为土壤微生物的生长和繁殖提供良好的营养环境,促进土壤中难以利用的磷转化为有效磷,从而提高其含量,而更深层次土壤速效磷含量的增加主要来自土壤磷素的释放和上层速效磷的迁移,含量较低,这与王小彬等^[23]研究结论相同。

2.2.5 土壤速效钾 在 0—20 cm 土层中,单播植物小区速效钾含量平均值为 148.7 mg/kg,比对照(CK)高 19.8%;混播植物小区为 137.1 mg/kg,比对照(CK)高 10.5%;单播植物小区速效钾含量高于混播植物小区。速效钾的平均质量分数在 110.47~169.47 mg/kg 之间,除单播种植小冠花的土壤速效钾质量分数略微减少之外,其他种植模式均增加,沙打旺、草木樨、黑麦草、紫穗槐+小冠花、紫穗槐+黑麦草、紫穗槐和草木樨+黑麦草速效钾质量分数分别增加了 36.58%,33.96%,29.79%,13.21%,10.07%,9.96%,8.28%,植物生长虽然不能增加土壤中钾的绝对含量,但植物生长、根际微生物活动及有机残体腐解等会形成大量的有机酸、酚类物质和无机酸,这些物质能加速难溶性钾转化为速效钾,增加土壤中的速效钾含量^[24]。土壤速效钾的质量分数表现为 0—10 cm 土层大于 10—20 cm 土层,这主要是因为表层土壤受植物枯枝落叶等影响较深层土壤更强烈所致。

2.3 不同植物种植模式下土壤肥力特征分析

土壤肥力是指土壤为植物生长提供水分、养分以及优良环境条件的能力。本研究运用主成分分析法对植物改良土壤的效果进行综合分析,选取土壤水分、有机质、全氮、铵态氮、硝态氮、速效磷、速效钾等指标,对数据进行标准化处理(表 5)。

提取主成分后,第 1 主成分主要反映了硝态氮和全氮对矿山废弃地土壤的改良效果,第 2 主成分能较好的反应铵态氮和有机质对矿山废弃地土壤的改良效果,第 3 主成分能较好的反应速效钾对矿山废弃地土壤的改良效果,通过对主成分载荷矩阵进行转换可得出系数及表达式为:

$$F_1 = 0.39x_1 + 0.21x_2 + 0.49x_3 + 0.46x_4 + 0.12x_5 + 0.40x_6 - 0.43x_7$$

$$F_2 = -0.43x_1 + 0.52x_2 + 0.17x_3 - 0.26x_4 + 0.63x_5 + 0.18x_6 + 0.13x_7$$

$$F_3 = 0.36x_1 - 0.52x_2 - 0.08x_3 - 0.37x_4 + 0.36x_5 + 0.54x_6 + 0.20x_7$$

式中: F_1 为第1主成分; F_2 为第2主成分; F_3 为第3主

成分; x_1 为标准化的土壤水分; x_2 为标准化的有机质; x_3 为标准化的全氮; x_4 为标准化的铵态氮; x_5 为标准化的硝态氮; x_6 为标准化的速效磷; x_7 为标准化的速效钾。

根据标准化数据可得3个主成分得分表(表6), 植物对矿山废弃地土壤养分改良的综合效果依次为沙打旺>草木樨>黑麦草>草木樨+黑麦草>紫穗槐+小冠花>紫穗槐+黑麦草>紫穗槐>小冠花。

表5 煤矸石条件下8种植物种植模式土壤养分数据标准化处理

种植模式	土壤水分	有机质	全氮	铵态氮	硝态氮	速效磷	速效钾
黑麦草	1.14752	-1.47925	-0.77989	0.83029	-0.99494	0.95478	-0.11636
草木樨	0.39641	1.57095	0.80774	0.49657	0.28427	1.21624	-0.61874
沙打旺	1.52307	-0.07974	2.11684	-0.00727	1.98987	1.38029	-0.77332
小冠花	0.20864	-0.36682	-0.83559	-1.09348	0.71067	-1.59778	-1.10952
紫穗槐	0.58419	-0.63596	-0.52921	-1.46645	0.28427	-0.28693	-0.00043
紫穗槐+小冠花	-1.10579	0.83532	0.69633	0.37225	-0.14213	-0.08351	-0.68443
紫穗槐+黑麦草	-1.10579	-0.95892	-0.61277	0.1694	-1.42134	-0.28036	1.46419
草木樨+黑麦草	-0.73024	1.08651	-0.27853	1.63513	-0.14213	-0.39192	0.0614

表6 主成分得分

种植模式	第1主成分 F_1	排名	第2主成分 F_2	排名	第3主成分 F_3	排名	综合得分	排名
黑麦草	-0.17	4	-0.46	5	2.40	1	1.78	3
草木樨	1.82	2	1.16	3	-0.13	4	2.85	2
沙打旺	3.41	1	-0.71	6	0.27	3	2.98	1
小冠花	-0.37	7	-1.73	8	-1.41	8	-3.51	8
紫穗槐	-0.32	6	-1.72	7	-0.20	5	-2.25	7
紫穗槐+小冠花	0.33	3	1.20	2	-0.88	7	0.64	5
紫穗槐+黑麦草	-2.31	8	0.49	4	0.88	2	-0.94	6
草木樨+黑麦草	-0.25	5	1.84	1	-0.36	6	1.23	4

3 讨论

本试验条件下, 矿山废弃地土壤种植植物后, 土壤含水率表现为除35—85 cm 土层土壤含水率降低, 土壤含水率整体为增加型。植物可以改善土壤含水率, 这是由于植物及其枯枝落叶覆盖表土, 可以增加降雨入渗, 减少水分蒸发, 同时植物根系能够疏松表层土壤, 提高土壤的持水性, 这与大多数黄土高原的研究结果一致^[25]; 而35—85 cm 土层中土壤含水率迅速降低, 这是因为35—85 cm 土层中填充煤矸石, 煤矸石层结构性差、非毛管孔隙多, 导致其持水能力差、渗透率较高, 田间持水量和饱和持水量都远低于黄土, 35—85 cm 土层的水分大量渗漏到底层^[26-27]。

煤矸石复垦0—10 cm 表土层中土壤有机质、土壤全氮、硝态氮、铵态氮、速效磷和速效钾平均值均分别比10—20 cm 土层高, 这可能是因为表层土壤受植物生长和根系活动的影响较深层土壤强烈^[28]; 种植区单播植物小区的土壤养分改良效果要优于混播植物小区, 这可能是因为植物种植年限较短, 植物群落尚未稳定, 植物混播不能显著改良提高土壤肥力, 但

随着种植年限增加, 混播植物群落逐渐稳定, 植物对水分和养分的利用互补作用增强, 植物混播改良土壤肥力的效果会逐渐增强。为了更好的研究豆科与禾本科植物混播的理论及技术, 还应该加强混播的种间交互作用机理研究, 为豆科与禾本科植物混播的进一步发展提供理论依据。

4 结论

(1) 植物生长初期, 与对照相比, 不同种植模式下植物能有效的改善土壤水分和增加土壤养分; 不同种植模式下植物对土壤水分和土壤养分的影响, 对土壤肥力的改良效果存在差异。

(2) 从改善土壤水分来看, 不同种植模式下土壤含水率平均值比对照高8.7%; 不同种植模式下土壤含水率随着土层深度的增加, 总体呈增加—减少—增加—稳定的变化趋势; 植物对土壤蓄水保水效果的改良主要体现在0—40 cm 的土层中, 不同种植模式下0—40 cm 土层中含水量比对照高24.7%, 50—120 cm 土层比对照高0.5%; 在0—40 cm 土层中, 对土壤蓄水保水效果最好的植物为小冠花和黑麦草, 种植

模式单播种植模式平均土壤含水率高于混播模式,植物单播对土壤蓄水保水效果的改良更加显著。

(3)从改善土壤养分来看,不同种植模式的土壤有机质、土壤全氮、硝态氮、铵态氮和速效钾含量平均值均明显高于对照,但速效磷略微降低(速效磷含量为 3.91~10.57 mg/kg,对照为 11.38 mg/kg);土壤中的各养分指标质量分数总体表现为 0—10 cm 土层大于 10—20 cm 土层,呈现出一定的表聚效应;草木樨改良土壤有机质效果最好,沙打旺改良土壤全氮、硝态氮和速效钾的效果最好,草木樨+黑麦草改良铵态氮效果最好,紫穗槐+黑麦草改良土壤速效磷的效果最好。单播植物小区土壤有机质、铵态氮和速效磷含量低于混播植物小区,全氮、硝态氮和速效钾含量平均值均明显高于混播植物小区。

(4)植物生长初期对矿山废弃地土壤肥力的综合改良效果依次表现为沙打旺>草木樨>黑麦草>草木樨+黑麦草>紫穗槐+小冠花>紫穗槐+黑麦草>紫穗槐>小冠花。不同植物及种植模式下单播种植植物沙打旺改良土壤肥力综合效果最佳,混播种植植物草木樨+黑麦草改良土壤肥力综合效果最佳。

参考文献:

- [1] 李永庚,蒋高明. 矿山废弃地生态重建研究进展[J]. 生态学报,2004,24(1):95-100.
- [2] 王存存,陈东田,王永佼. 矿区废弃地生态恢复和可持续发展研究[J]. 生态农业科学,2007,15(5):25-27.
- [3] 赵默涵. 矿山废弃地土壤基质改良研究[J]. 农业基础科学,2008,24(12):128-131.
- [4] Oyonarte C, Aranda V, Durante P. Soil surface properties in Mediterranean mountain ecosystems: effects of environmental factors and implications of management[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 254(2): 156-165.
- [5] Kang B, Liu S R, Cai D X, et al. Soil physical and chemical characteristics under different vegetation restoration patterns in China south subtropical area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(10): 2479-2486.
- [6] 王旭,曾昭海,胡跃高,等. 豆科与禾本科牧草混播效应研究进展[J]. 中国草地学报,2007,29(4):92-98.
- [7] 宁晓萍,段宗亮. 景洪森林公园旁采矿废弃地植被群落恢复技术[J]. 水土保持应用技术,2013(6):6-7.
- [8] 牛书丽,蒋高明. 豆科植物在中国草原生态系统中的地位及其生理生态研究[J]. 植物学通报,2004,21(1):9-18.
- [9] 王从彦,曹震,王磊,等. 豆科植物对根际土壤微生物种群及代谢的影响[J]. 生态环境学报,2013,22(1):85-89.
- [10] 马祥华,白文娟,焦菊英,等. 黄土丘陵沟壑区退耕地植

被恢复中的土壤水分变化研究[J]. 水土保持通报,2004,24(5):19-23.

- [11] 王辉,韩宝平,卞正富. 充填复垦土壤水分垂直运动模拟研究[J]. 中国矿业大学学报,2007,36(5):690-695.
- [12] 李婷,赵世伟,李晓晓,等. 宁南山区不同年限苜蓿地土壤有机质官能团特征[J]. 应用生态学报,2012,23(12):3266-3272.
- [13] 邵继承,张丽妍,杨恒山. 种植年限对紫花苜蓿栽培草地草产量及土壤氮、磷、钾含量的影响[J]. 草业科学,2009,26(12):82-86.
- [14] 张晓红,徐炳成,李凤民,等. 密度对三种豆科牧草生产力和水分利用率的影响[J]. 草地学报,2007,15(6):593-598.
- [15] 王学春,李军,郝明德. 长武旱塬草粮轮作田土壤水分可持续利用模式模拟[J]. 农业工程学报,2011,27(增刊1):257-266.
- [16] 徐斌. 不同植物对黄土高原沟壑区弃土场土壤培肥效应研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京:农业出版社,1999:25-109.
- [18] 张锐,张成梁,李美生,等. 煤矸石山风化堆积物水分动态研究[J]. 水土保持通报,2008,28(1):124-129.
- [19] 李会科,郑秋玲,赵政阳,等. 黄土高原果园种植牧草根系特征的研究[J]. 草业学报,2008,17(2):92-96.
- [20] 杜天庆,苗果园,郝建平,等. 黄土母质生土上 4 种牧草根系生长特征的研究[J]. 草地学报,2012,20(1):17-22.
- [21] 赵叶舟,王浩铭,汪自强. 豆科植物和根瘤菌在生态环境中的地位和作用[J]. 农业环境与发展,2013,30(4):7-12.
- [22] Guo Z B, Wang D Z. Effects of introduction of two kinds of legume species on soil quality in semiarid loess plateau[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2013, 14(2): 384-388.
- [23] 王晓彬,蔡典雄,张镜清,等. 旱地玉米秸秆肥还田对土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学,2000,33(4):54-61.
- [24] 张俊华,常庆瑞,贾科利,等. 黄土高原植被恢复对土壤肥力质量的影响研究[J]. 水土保持学报,2003,17(4):39-41.
- [25] 罗珠珠,牛伊宁,李玲玲,等. 陇中黄土高原不同种植年限苜蓿草地土壤水分及产量响应[J]. 草业学报,2015,24(1):31-38.
- [26] 王伟,张洪江,张成梁,等. 煤矸石山植被恢复影响因子初探[J]. 水土保持通报. 2008,28(2):147-151.
- [27] 冯慧敏,胡振华,王电龙,等. 煤矸石垂直入渗规律模拟研究[J]. 山西水土保持科技,2009(1):11-13.
- [28] 郭芝源,张丽萍,李先恩,等. 豆科植物对复垦区土壤理化性状的影响[J]. 山西农业科学,2015,43(6):723-726.