

不同豆禾牧草混播对土壤质地及肥力的影响

霍雅媛^{1,2}, 曹宏^{2,3}, 柴守玺^{1,2}, 张述强³

(1. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070;
3. 陇东学院农林科技学院, 甘肃 庆阳 745000)

摘要:以豆科牧草(红豆草)和禾本科牧草(黑麦草、无芒雀麦、扁穗冰草)为材料,研究了2 a生不同豆禾牧草的混播种植方式对当地土壤物理结构及土壤有效养分分布与积累规律的影响。结果表明:在不同混播比例中,大多数豆禾组合以红豆草与无芒雀麦豆禾比为4:6和3:7作用效果较好,其中4:6的混播方式最好,与豆科单播相比较,其土壤容重减少了7.25%,土壤孔隙度和团聚体的含量增加了8.14%和13.56%,土壤有机质、速效氮、速效磷和速效钾含量分别增加了23.1%、20.1%、77.2%和13.5%;与禾草单播相比较,其土壤容重减少了9.86%,土壤孔隙度和团聚体的含量增加了10.81%和13.45%,土壤有机质、速效氮、速效磷和速效钾含量分别增加了15.5%、16.1%、66.5%和19.1%。双因素方差分析结果表明,混播种类及混播种类与混播比例的交互效应是影响土壤养分差异的主导因素。因此,不同豆禾牧草混播的种植方式有利于改善土壤物理结构,改善土壤养分供应,对提高土壤肥力具有重要意义。

关键词:豆科牧草;禾本科牧草;混播方式;土壤有效养分;土壤物理结构

中图分类号:S541⁺.4;S543 **文献标志码:**A

Effects of mixed sowing of different forage on soil texture and fertility

HUO Yayuan^{1,2}, CAO Hong^{2,3}, CHAI Shouxi^{1,2}, ZHANG Shuqiang³

(1. Key Laboratory of Arid Habitat Crop Science, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. College of Agriculture, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

3. College of Agriculture and Forestry, Longdong University, Qingyang, Gansu 745000, China)

Abstract: In this paper, the effects of mixed planting patterns of different grasses on the physical structure of soil and the distribution and accumulation of available nutrients in soil were studied. The results showed that with different mixing ratio, most bean curd combinations with red bean grass and brome grass bean curd ratio of 4:6 and 3:7 have better effect and 4:6 ratio was the best mixed seeding method. Compared with bean unicast, the soil bulk density decreased by 7.25%, soil porosity and aggregate content increased by 8.14% and 13.56%, respectively, and soil organic matter, available nitrogen, available phosphorus and potassium contents increased by 23.1%, 20.1%, 77.2%, and 13.5% respectively; Compared with grass unicast, soil bulk density decreased by 9.86%, soil porosity and aggregate content increased by 10.81% and 13.45%, and soil organic matter, available nitrogen, available phosphorus and available potassium contents increased by 15.5%, 16.1%, 66.5% and 19.1%, respectively. The results of two factor analysis of variance indicated that the interaction effect of mixed seeding and mixed seeding and mixed seeding ratio were the main factors influencing the difference of soil nutrients. Therefore, different planting methods of mixed soybean and grass not only improved soil physical structure, which was beneficial to drought resistance and moisture conservation, but also improved the supply of soil organic matter, available nitro-

收稿日期:2019-09-11

修回日期:2020-01-14

基金项目:甘肃省科技厅科技支撑计划项目“农牧交错地带豆科-禾草混播模式及产业化关键技术研究与应用”(1604NKCM054)

作者简介:霍雅媛(1996-),女,甘肃天水人,硕士生,研究方向为作物栽培。E-mail:2862732343@qq.com

通信作者:曹宏(1964-),男,甘肃庆阳人,教授,主要从事作物育种及栽培研究。E-mail:caoh207@163.com

柴守玺(1962-),男,甘肃会宁人,教授,主要从事小麦抗旱育种栽培、抗旱生态生理、宏观农业等研究。E-mail:sxchai@126.com

gen, available phosphorus and available potassium nutrients, which was of great significance to improve soil fertility.

Keywords: bean grass; gramineae; mixed seeding; soil effective nutrients; soil physical structure

建立人工草地是发展集约化草地畜牧业、实施生态恢复与系统重建和可持续发展战略的重要措施^[1]。从农业生产和家畜养殖角度考虑,建立人工草地不仅要获得高而稳定的牧草产量,还应使多种牧草(豆科、禾本科)有比例地均衡发展;从生态学方面考虑,群落结构与功能也应具有稳定性^[2]。合理的牧草品种组合是实现产量和组分双重稳定的前提,也是维系干扰稳定性的主要途径^[3-5]。因此,建立高产、优质和稳定的混播草地群落是降低人工草地建植与管理成本,提升其经济生态效益的关键^[2]。赵海新、Sturludottir 等^[6-7]研究表明,不同豆科与禾本科牧草混播草地具有高产、优质和稳定的特点,是栽培草地的重要发展方向。与单播草地相比,混播草地不仅可改善草地生态系统氮素营养平衡^[8-9],在提高草地质量或产量方面具有优势^[10-12],还在改善土壤肥力、实现系统可持续生产方面具有明显作用^[13-15]。因此,豆禾混播草地往往成为许多地区人工草地建植的首选类型^[16]。

陇东地区位于西北干旱半干旱地区,区域内干旱少雨,沟壑纵深,坡耕地面积大,属于农牧交错地区,也是甘肃省牧草种植和家畜养殖的传统区域。目前,关于豆禾混播草地的研究主要集中在混播后(与单播草地相比)牧草产量、牧草品质或生产性能的改善^[17-18],稳定性的提高^[19],种间竞争过程^[20],以及土壤氮、磷、碳等养分的变化上^[21-23],而对于混播群落自身结构对土壤养分影响的差异关注较少^[24]。因此,本文以庆阳市西峰区旱地人工建植牧草为例,研究了不同豆禾牧草混播组合及混播比例下土壤结构和有效养分的变化规律,旨在探索黄土高原地区不同类型人工草地对土壤肥力的影响,为旱地人工草地建植与持续利用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地位于甘肃省庆阳市西峰区陇东学院试验农场(107°40'E,35°44'N,海拔 1 421 m),属于黄土高原陇东半干旱气候区,年日照总数 2 400~2 600 h,年无霜期 160~180 d,年降水量 400~600 mm,降雨多集中在 7—9 月,年平均气温 10℃。试验地土壤类型以黑垆土为主,有机质含量为 1.33%,全氮含量为 0.9 g·kg⁻¹,速效氮含量为 51.2 mg·kg⁻¹,全

磷含量为 0.87 g·kg⁻¹,速效磷含量为 11.9 mg·kg⁻¹,速效钾含量为 179 mg·kg⁻¹,土壤肥力中下等,地势平坦,前茬作物为玉米。

1.2 试验材料及试验设计

试验采用双因素随机区组设计。A 因素为豆禾混播种类:豆科为红豆草,禾本科为黑麦草、无芒雀麦、冰草,设 3 个处理,其中 A1 为红豆草×黑麦草,A2 为红豆草×无芒雀麦,A3 为红豆草×冰草;B 因素为豆禾混播比例,设 7 个处理,其中豆禾比例 5 个,为 3:7、4:6、5:5、6:4、7:3,分别用 B1、B2、B3、B4、B5 表示,2 个对照为:红豆草单播、禾草单播,分别用 CK1、CK2 表示,共 17 个处理(见表 1),每处理重复 3 次。试验小区面积为 5 m²(2 m×2.5 m),行距为 20 cm,处理间距为 50 cm,重复间距为 100 cm。试验于 2017 年 3 月播种。每个处理均在自然条件下生长,无灌溉与施肥条件。

表 1 试验处理

Table 1 Trial treatments

处理 Treatment	红豆草× 黑麦草(A1) Sainfoin× Ryegrass	红豆草× 无芒雀麦(A2) Sainfoin× Awnless brome	红豆草× 冰草(A3) Sainfoin× Wheatgrass
3:7(B1)	A1B1	A2B1	A3B1
4:6(B2)	A1B2	A2B2	A3B2
5:5(B3)	A1B3	A2B3	A3B3
6:4(B4)	A1B4	A2B4	A3B4
7:3(B5)	A1B5	A2B5	A3B5
红豆草 单播(CK1) Sainfoin is unicomed	CK1	CK1	CK1
禾草单播(CK2) Grasses unicast	CK2	CK2	CK2

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤容重 2019 年 5 月 22 日于试验田 0~20 cm 处取样,采用环刀法^[25],在每个小区随机选取具有代表性的一整块土壤,剥去因土壤表面与土铧接触而变形的部分,用环刀取样,然后将环刀置于环刀盒内,运回实验室进行测定。

1.3.2 土壤孔隙度 一般不直接测量,可根据土壤容重和比重计算而得。计算公式:土壤孔隙度(%)=(1-容重/比重)×100(容重单位为 g·cm⁻³,比重一般为常值,为 2.65 g·cm⁻³)

1.3.3 土壤团聚体 取样时间和深度同上,采用随机取样法,在每个小区随机选取具有代表性的一整

块土壤,剥去土壤表面与土锹接触而变形的部分,均匀地取回未变形的土样(约 2 kg),置于封闭的铝盒内,运回实验室。将土块剥成 10~12 mm 直径的小块,除去粗根和石块,避免受机械压力而变形,然后将样品风干 2~3 d,至样品变干为止,采用机械筛分法^[25]测定土壤团聚体。

1.3.4 土壤有机质的测定 2019 年 3 月 21 日采用随机取样法于试验田取样,在每个小区随机选取具有代表性的 3 个点,用土钻分别在 0~10、10~20、20~40 cm 处取样,然后采用四分法除去多余的土样,把试验所需的土样做好标记带回实验室,自然风干 5~7 d 后将土样研磨,使其全部通过 18 目筛,采用重铬酸钾容量法^[26]测定土壤有机质含量。

1.3.5 土壤速效养分的测定 土壤速效氮、速效磷、速效钾的取样时间、方法和样品处理同上。土壤速效氮采用碱解扩散法测定(用 $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 处理土壤,使易水解态氮(潜在有效氮)碱解转化为 NH_3 , NH_3 扩散后为 H_2BO_3 所吸收,再用标准酸溶液滴定,算出土壤速效氮含量);土壤速效磷采用钼锑抗比色法测定(用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaHCO_3 浸提剂、无磷活性炭处理土壤,再加显色剂测吸光度,算出土壤速效磷含量);土壤速效钾采用火焰光度法测定^[26](用 $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NH_4OAc 作为浸提剂与土壤胶体阳离子交换, NH_4OAc 浸出液用火焰光度计直接测定,算出土壤速效钾含量)。

1.4 数据处理与分析

试验所得数据利用 SPSS 20.0 和 Excel 2010 进行处理分析。

2 结果与分析

2.1 不同豆禾牧草混播方式对土壤容重、土壤孔隙度的影响

土壤容重的大小反映土壤结构、透气性、透水性以及保水能力的高低,一般土壤容重越小说明土壤结构、透气透水性能越好;土壤孔隙度的作用是通气、通水和保水,也可贮存土壤有机质。二者对促进改善土壤疏松度的效果最好,进而改善土壤肥力^[27]。从表 2 可知,不同豆禾混播的组合及比例对 0~20 cm 耕作层土壤容重及孔隙度的影响表现各异,其中 A1B1、A1B2、A2B3、A3B2、A3B4 处理的结果较好,A2B2 处理的结果最好。与 CK1 相比,A2B2 土壤容重减少了 7.25%,土壤孔隙度含量增加了 8.14%;与 CK2 相比较,A2B2 土壤容重减少了 9.86%,土壤孔隙度含量增加了 10.81%。

表 2 不同混播方式对土壤容重、孔隙度的影响

Table 2 Effects of different mixing methods on soil bulk density and porosity

处理 Treatment	土壤含水量 Soil water content/%	土壤容重 Soil bulk density /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	土壤孔隙度 Soil porosity/%
A1B1	22.74ab	1.32efg	50.05abc
A1B2	23.22ab	1.32efg	50.19abc
A1B3	20.57cde	1.40abcd	47.14def
A1B4	16.63ef	1.29fg	51.08ab
A1B5	19.14cde	1.44abc	45.47fg
CK1	17.98ef	1.36bcd	48.60de
CK2	14.25f	1.45ab	45.09fg
A2B1	20.04cde	1.31ef	50.48abc
A2B2	27.39a	1.28g	51.65a
A2B3	24.06ab	1.34def	49.13abcde
A2B4	20.27cde	1.35bcd	48.73de
A2B5	20.68cde	1.35bcd	48.78de
CK1	19.30cde	1.35cd	48.85de
CK2	18.95def	1.43abc	46.00efg
A3B1	20.47cde	1.39abc	47.30defg
A3B2	22.78ab	1.30ef	50.94abc
A3B3	16.34ef	1.47a	44.36g
A3B4	25.44a	1.31efg	50.19abc
A3B5	20.40bcde	1.32ef	50.09abc
CK1	17.46ef	1.34def	49.42bc
CK2	16.58ef	1.38abc	47.69defg

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

2.2 不同豆禾牧草混播方式对土壤团聚体的影响

从表 3 可知,不同豆禾混播的组合及比例对 0~20 cm 耕作层中团粒结构($\geq 0.25 \text{ mm}$)的影响表现各不相同,其中 A2B3 和 A3B1 组合的总团聚体含量较高(11.10%和 8.65%),A2B2 组合总团聚体含量最高(17.13%)。与 CK1 相比较,A2B2 土壤总团聚体含量增加了 13.56%;与 CK2 相比较,A2B2 土壤总团聚体含量增加了 13.45%。由此可见,A2B2 组合对土壤团聚体的改善效果最好,即当红豆草:无芒雀麦=4:6 时对改善土壤团聚体的效果最明显,进而使土壤质地得到相应的改善。

2.3 不同豆禾牧草混播方式对土壤有机质的影响

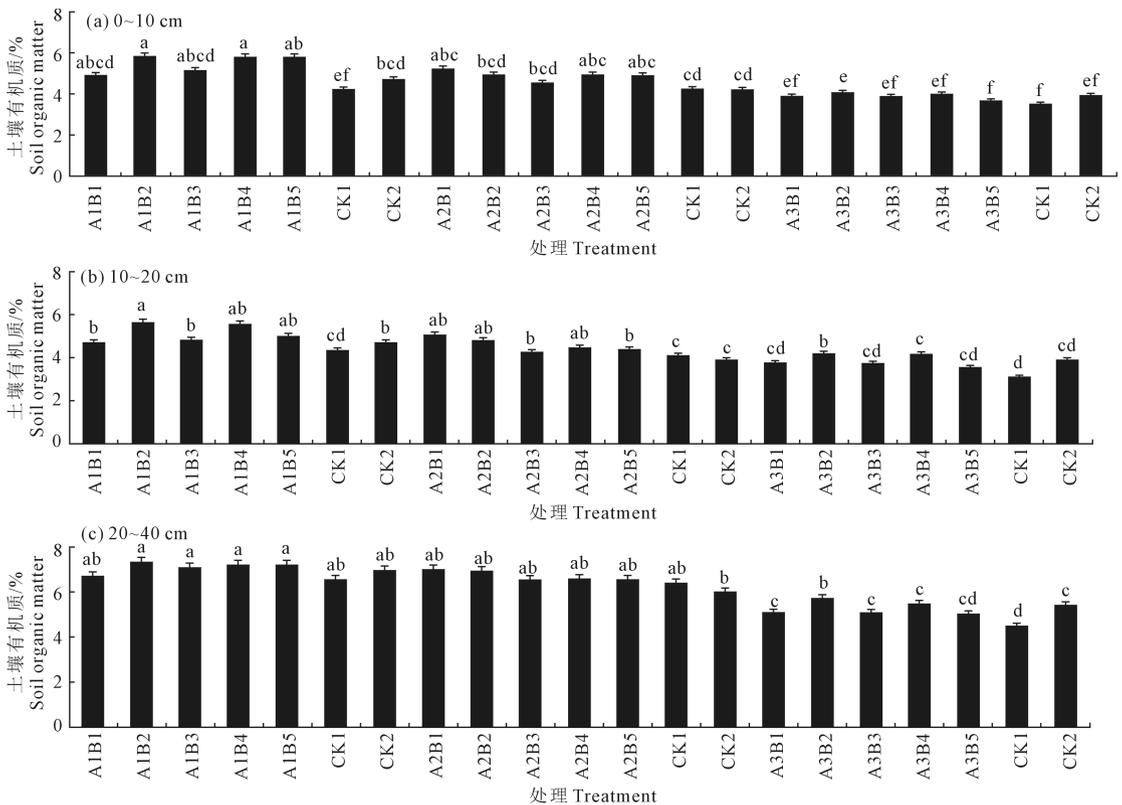
不同混播组合方式对土壤有机质含量的影响表现见图 1。在 0~10 cm 土层,A1C1、A1B1、A1B2、A1B3、A1B4、A1B5、A2B1、A2B2、A2B3、A2B4、A2B5 各处理表现差异显著($P<0.05$);A3B1、A3B3、A3B4、A3B5 显著低于其他处理($P<0.05$);在 20~40 cm 土层,A3B1、A3B3、A3B4、A3B5 与其余各处理相比,差异不显著($P>0.05$)。

由此可见,不同豆禾混播组合及混播比例能显著提高土壤有机质的含量,其中 A1B2 组合对土壤

表3 不同混播方式对土壤团聚体的影响/%

Table 3 Effects of different mixing methods on soil water stability

处理 Treatment	5 mm 团聚体含量 5 mm aggregate content	2 mm 团聚体含量 2 mm aggregate content	1 mm 团聚体含量 1 mm aggregate content	0.5 mm 团聚体含量 0.5 mm aggregate content	0.25 mm 团聚体含量 0.25 mm aggregate content	总团聚体含量 Total aggregate content
A1B1	0.25b	0.08hij	0.24h	1.02ghi	2.25fgh	3.84ijk
A1B2	0.20b	0.52bc	1.11bc	1.41f	2.06gh	5.30gh
A1B3	0.15c	0.64b	1.14bc	1.57e	1.98ghi	5.48fg
A1B4	0.10c	0.18fghij	0.92cd	1.07fghi	4.10d	6.37ef
A1B5	0.05d	0.19fghij	0.29gh	0.94hi	2.52fg	3.99ijk
CK1	0.01d	0.14ghij	0.35gh	1.09fgh	1.69hi	3.28k
CK2	0.04d	0.11hij	0.39fgh	1.59e	1.24i	3.37jk
A2B1	0.06d	0.13ghij	0.57fg	1.42f	2.05gh	4.23ij
A2B2	0.40a	0.94a	1.48a	3.52b	10.79a	17.13a
A2B3	0.14c	0.26fghi	0.69de	3.98a	6.03b	11.10b
A2B4	0.08d	0.28efgh	1.57a	1.37fg	5.03c	8.33c
A2B5	0.08d	0.25fghi	0.72d	2.16d	1.77ghi	4.98fg
CK1	0.12c	0.31efg	0.49efgh	1.35g	1.72hi	3.99ijk
CK2	0.05d	0.08ij	0.42efgh	1.15gh	1.70hi	3.40jk
A3B1	0.10c	1.04a	1.34ab	2.04d	4.13d	8.65c
A3B2	0.11c	0.46bcd	0.68ef	2.00d	4.17d	7.42d
A3B3	0.06d	0.37cd	0.53efgh	0.75i	2.96f	4.67hi
A3B4	0.16c	0.18fghij	0.26gh	2.08d	3.93d	6.61e
A3B5	0.03d	0.58b	0.93cd	2.50c	3.56de	7.60d
CK1	0.02d	0.05j	0.27gh	1.17gh	1.94ghi	3.45jk
CK2	0.03d	0.47bcd	0.26gh	1.40e	2.10gh	4.26gh



注:图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: The different lowercase letters in the figure indicate the significant difference among treatments ($P < 0.05$). The same below.

图1 不同混播方式对土壤有机质的影响

Fig.1 Effects of different mixing methods on soil organic matter

有机质的提升效果最好,其土壤有机质含量为 4.57%~5.83%,分别比 CK1、CK2 增加了 40.3%、31.0%,故而对增加土壤有机质含量的效果最明显,使土壤肥力得到相应的改善。

2.4 不同豆禾牧草混播方式对土壤主要养分的影响

2.4.1 不同豆禾牧草混播方式对土壤速效氮的影响

由图 2 可知,在 0~10 cm 土层内,不同豆禾混播处理对土壤速效氮的影响,相比于 CK1、CK2 都有所增加,增幅分别达 3.0%~27.7%、1.4%~41.3%,其中 A1B1、A2B1、A2B5、A3B2、A3B5 显著低于其余处理 ($P<0.05$);在 10~20 cm 土层内,A1B2、A1B3 显著低于其余处理 ($P<0.05$),但也比 CK1、CK2 高;在 20~40 cm 土层内,仅有 A2B2 显著高于其余处理 ($P<0.05$),其余处理间差异不显著 ($P>0.05$)。

总体来看,A2B2 在各个土层内与其它处理差异达到显著水平,其土壤速效氮含量为 51.42~81.75 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别比 CK1、CK2 增加了 20.1%、16.1%,即当红豆草:无芒雀麦=4:6 时对增加土壤速效氮含量的效果最好。

2.4.2 不同豆禾牧草混播方式对土壤速效磷的影响

由图 3 可知,在 0~10 cm 土层内,不同豆禾混

播组合方式对土壤速效磷的影响,A1B1、A3B2、A3B4 显著低于其余各处理 ($P<0.05$);在 10~20 cm 土层内,A2B4、A3B2、A3B4 显著低于其余各处理 ($P<0.05$);在 20~40 cm 土层内,A2B4、A3B2 显著低于其余各处理 ($P<0.05$)。综上可知,在 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm 土层中,各处理与 CK1、CK2 相比,其土壤速效磷含量都有所增加,增幅分别达 21.1%~93.3%、31.9%~91.1%。其中,A2B3 组合磷含量最高(31.39、27.08、27.87 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

2.4.3 不同豆禾牧草混播方式对土壤速效钾的影响

由图 4 可知,在 0~10 cm 土层内,不同混播组合方式对土壤速效钾的影响,A2B4、A2B5、A3B1 与其余各处理相比差异显著 ($P<0.05$),其中 A2B2 的土壤速效钾含量为 143 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,且最高,相比 CK1、CK2 分别提高了 13.5%、19.1%;在 10~20 cm 土层内,A2B5、A3B1 显著低于其它处理 ($P<0.05$);在 20~40 cm 土层内,各处理间无显著差异 ($P>0.05$),但土壤速效钾含量都比对照高。总体而言,A2B2 的土壤速效钾含量最高,即当红豆草:无芒雀麦=4:6 时对增加土壤速效钾含量的效果最明显。

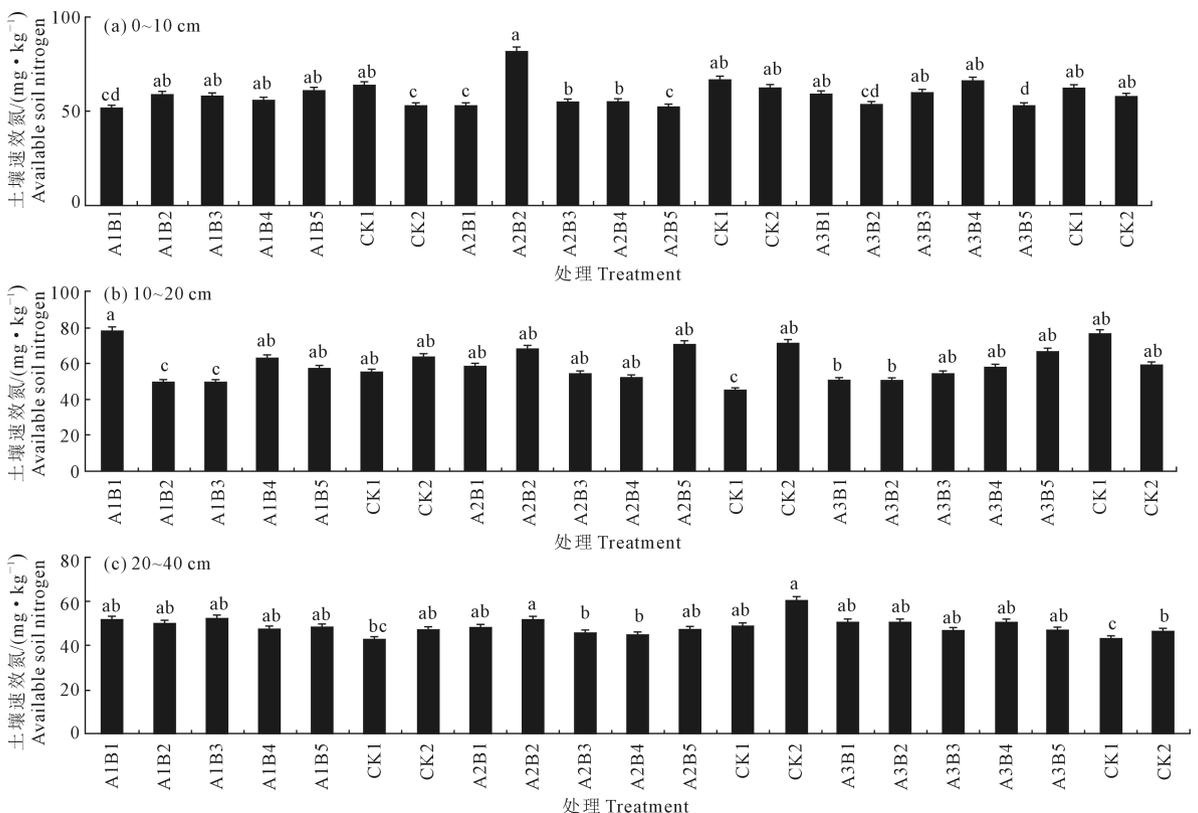


图 2 不同混播方式对土壤速效氮的影响

Fig.2 Effects of different mixing methods on available soil nitrogen

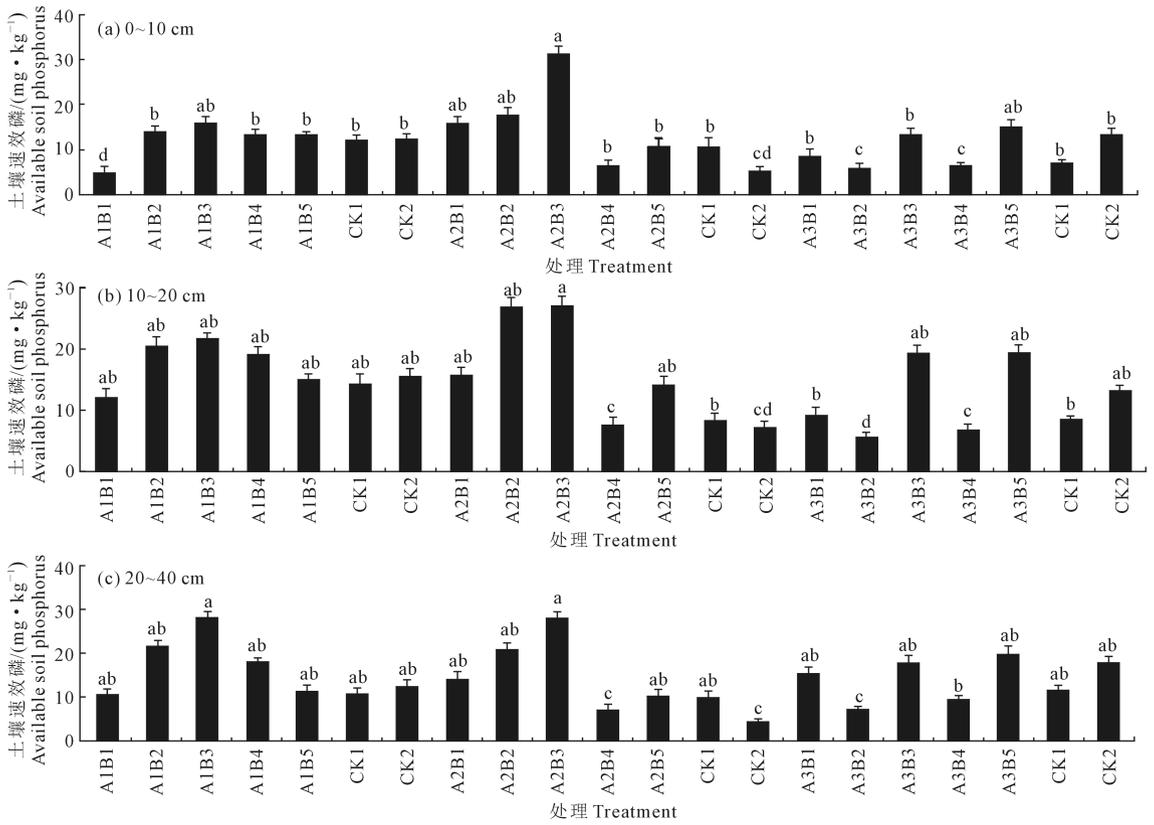


图 3 不同混播方式对土壤速效磷的影响

Fig.3 Effects of different mixing methods on available soil phosphorus

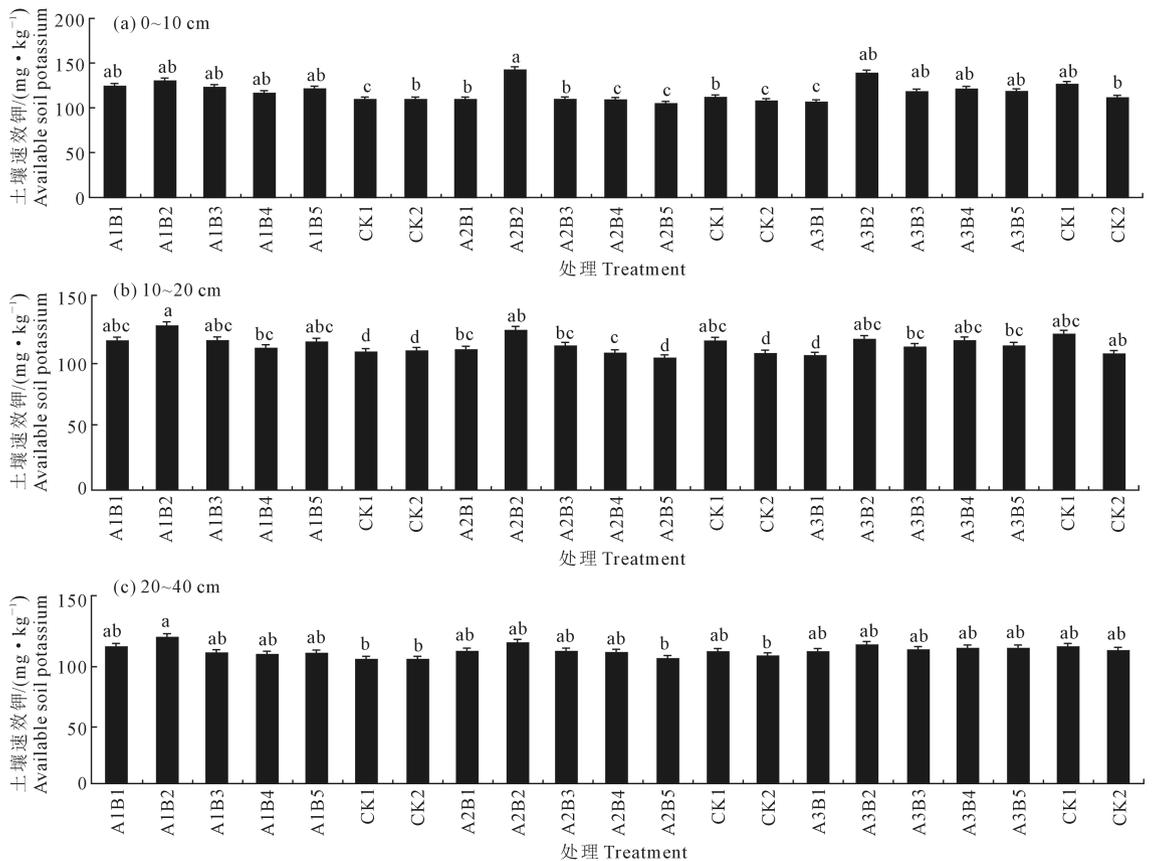


图 4 不同混播方式对土壤速效钾的影响

Fig.4 Effects of different mixing methods on available soil potassium

3 讨论与结论

3.1 不同豆禾牧草混播方式对土壤物理性质的影响

土壤结构通常是指土壤中形态各异的团聚体所占土壤的比重,也包括这些团聚体的机械稳定性和孔隙性等^[28]。土壤结构是土壤肥力的基础,相较于单播区,豆禾混播区土壤物理性质有较大的改善,土壤容重降低,孔隙度提高,土壤三相比则更加协调^[29]。本研究发现,在土壤浅层(0~20 cm),A2B2的结果是最好的,与CK1、CK2相比,土壤容重分别降低了7.25%、9.86%,总团聚体和孔隙度分别增加了13.56%、11.68%和13.45%、10.81%。因此,因地制宜地开展豆科与禾本科牧草混播,能显著改善土壤物理结构,有利于抗旱、保墒,不易产生地表径流,而且对提高土壤肥力具有重要意义。

3.2 不同豆禾牧草混播方式对土壤养分的影响

温仲明等^[30]研究表明,由表层向下土壤养分含量逐渐减少,0~10 cm 土层有机质、速效氮和速效钾含量最高,这与大多数草地土壤养分的垂直分布规律相似。本试验结果表明:(1)在不同土层,随着豆科牧草比例的增大和禾本科牧草比例的减少,土壤有机质、速效磷、速效钾都呈减少趋势,而豆禾比为4:6时值最大,方差分析表明对土壤肥力有显著影响。(2)土壤速效氮随着豆禾比例的增大呈先增后减趋势,在4:6时最大。因此,在豆禾混播草地中简单增加豆科或禾本科牧草的比例,可能并不能显著增加土壤养分供给,只有合理的豆禾比例与组合搭配才能显著改善土壤养分的供给。(3)土壤速效钾在合理的种植方式下含量都有所增加,其中A2B2(红豆草:无芒雀麦=4:6)的含量增加幅度最大,但相比土壤的基础肥力来说,含量还是有所下降。

参考文献:

[1] 韩德梁,何胜江,陈超,等.豆禾混播草地群落稳定性的比较[J].生态环境,2008,17(5):1974-1979.

[2] 石永红,符义坤,李阳春,等.半荒漠地区绿洲混播牧草群落稳定性与调控研究[J].草业学报,2000,9(3):1-7.

[3] 张全国,张大勇.生物多样性与生态系统功能研究与进展[J].生物多样性,2002,10(1):49-60.

[4] 樊江文,钟华平,杜占池,等.在不同压力和干扰条件下黑麦草和其他六种植物的竞争研究[J].植物生态学报,2003,27(4):522-530.

[5] 董世魁,胡自治,龙瑞军,等.高寒地区多年生禾草混播草地的群落学特征研究[J].生态学杂志,2003,22(5):20-25.

[6] 赵海新,朱占林,张永亮,等.混播草地之研究进展[J].中国农学通报,2015,21(11):38-41.

[7] Sturludottir E. Forage quality and yield in grass-legume mixtures in

Northern Europe and Canada [D]. Reykjavik: University of Iceland, 2011.

[8] Russelle M P. Nitrogen cycling in pasture and range[J]. Journal of Production Agriculture,1992,5(1):13-23.

[9] 常生华,侯扶江,于应文.黄土丘陵沟壑区三种豆科人工草地的植被与土壤特征[J].生态学报,2004,24(5):932-937.

[10] Berdahl J D, Kam J F, Hendrickson J R. Dry matter yields of cool-season grass monocultures and grass-alfalfa binary mixtures[J]. Agronomy Journal,2001, 93(2):463-467.

[11] Sheaffer C C, Miller D W, Marten G C. Grass dominance and mixture yield and quality in perennial grass-alfalfa mixtures[J]. Journal of Production Agriculture, 2014, 3(4):480-485.

[12] 王平,王天慧,周道玮.松嫩地区禾-豆混播草地生产力研究[J].中国科技论文在线,2007,2(2):121-128.

[13] 王平,周道玮,张宝田.禾-豆混播草地种间竞争与共存[J].生态学报,2009,29(5):2560-2567.

[14] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: a review[J]. Geoderma,2005,124(1):3-22.

[15] Six J, Paustian K, Elliott E T, et al. Soil structure and organic matter[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 64(2):681-689.

[16] 杨春华,李向林,张新全,等.扁穗牛鞭草+红三叶混播草地生物量及种间竞争的动态研究[J].四川农业大学学报,2006,24(1):32-36.

[17] 郑伟,朱进忠,加娜尔古丽.不同混播方式豆禾混播草地生产性能的综合评价[J].草业学报,2012,21(6):242-251.

[18] Jeon B T, Lee S M, Moon S H. Studies on the mixed cropping with forage rye (*Secale cereale* L.) and red clover (*Trifolium pre-tense* L.) [J]. Journal of Grassland Science, 1996, 16(3):199-207.

[19] 李莉,王元素,洪绂曾,等.喀斯特地区长期草地利用制度对群落稳定性的影响[J].生态环境学报,2011,20(8-9):1204-1208.

[20] 郑伟,朱进忠,库尔班,等.不同混播方式下豆禾混播草地种间竞争动态研究[J].草地学报,2010,18(4):568-575.

[21] 张永亮,范富,高凯,等.苜蓿、无芒雀麦单播与混播对土壤有机质和速效养分的影响[J].草地学报,2009,17(1):22-26.

[22] 包兴国,杨文玉,曹卫东,等.豆科与禾本科绿肥饲草作物混播增肥及改土效果研究[J].中国草地学报,2012,34(1):43-47.

[23] 潘多锋,申忠宝,王建丽,等.紫花苜蓿与无芒雀麦混播对松嫩平原盐碱化草地土壤改良效果研究[J].黑龙江农业科学,2012(10):127-131.

[24] 邵继承,杨恒山,范富,等.播种方式对紫花苜蓿+无芒雀麦人工草地浅剖面土壤C、N分布及储量的影响[J].草业学报,2010,19(6):41-45.

[25] 黄昌勇.土壤学(第三版)[M].北京:中国农业出版社,2010:108-116.

[26] 鲍士旦.土壤农化分析(第三版)[M].北京:中国农业出版社,2000:23-35.

[27] 马海霞,王柳英.7种混播组合对公路边坡土壤物理性质改善的比较[J].青海大学学报(自然科学版),2007,25(2):18-21.

[28] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: a review[J]. Geoderma,2005,124(1):3-22.

[29] 包兴国,杨文玉,曹卫东.豆科与禾本科绿肥饲草作物混播增肥及改土效果研究[J].中国草地学报,2012,34(1):43-47.

[30] 温仲明,焦峰,赫晓慧,等.黄土高原森林边缘区退耕地植被自然恢复及其对土壤养分变化的影响[J].草业学报,2007,16(1):16-23