

黄土塬区三种豆科牧草的土壤养分剖面分布特征与平衡*

张晓红^{1,2} 徐炳成¹ 李凤民^{1,3**}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 杨凌 712100;
2 山西师范大学城市环境学院 临汾 041004; 3 兰州大学干旱与草地生态教育部重点实验室 兰州 730000)

摘要 为了解豆科牧草短期种植对土壤养分环境影响的进程和规律,通过田间试验对沙打旺、苜蓿和胡枝子等3种豆科牧草以不同密度单播、混播对土壤有机质、全氮、全磷剖面分布和平衡输出的影响进行了定性和定量分析。所有处理土壤全氮和有机质含量在土壤剖面2 m深度范围内均呈典型的“S”形分布,全磷呈抛物线形分布。单播牧草固氮能力与播种密度呈正相关;苜蓿固氮能力最强,高密度下表观生物固氮量达507.5 kg·hm⁻²。沙打旺生长1年可使土壤有机质平均净增3.51%。沙打旺和苜蓿全磷平均输出比率分别为43.14%和40.24%,显著高于胡枝子(23.74%);胡枝子与沙打旺、苜蓿的两两混播处理和3种牧草混播处理平均全磷输出比率分别为20.73%、26.33%、25.83%。试验结果表明,3种豆科牧草均可显著提高土壤有机质累积,沙打旺和苜蓿对土壤全氮和全磷的消耗显著大于胡枝子,但前两者的固氮能力也强于后者。以适当密度进行的不同牧草混播处理由于种间良性竞争和共生协调作用可优化混播群体对土壤养分的消耗利用。

关键词 黄土旱塬 豆科牧草 播种方式 播种密度 土壤养分剖面分布 土壤养分平衡

中图分类号: S153.6; S352; S504 **文献标识码**: A **文章编号**: 1671-3990(2008)04-0810-08

Nutrient equilibrium and distribution along soil profile of three legumes on highland Loess Plateau

ZHANG Xiao-Hong^{1,2}, XU Bing-Cheng¹, LI Feng-Min^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;

2. College of Urban and Environment Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041004, China;

3. Key Laboratory of Arid and Grassland Ecology, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract In order to understand the short-term impact of legumes on soil nutrient condition, three types of legumes: *Astragalus adsurgens* (A), *Medicago sativa* (B) and *Lespedeza davurica* (C) were seeded at different densities either alone or mixed, and the distribution and equilibrium of soil organic matter (SOM), total nitrogen (STN) and total phosphorus (STP) were qualitatively and quantitatively analyzed along soil profile and treatment types. SOM and STN of all treatments exhibit an S-shaped curve within 2 m depth soil profile while STP follows a parabolic curve. N fixation ability of the three legumes seeded alone improves with increasing seeding density, and the Apparent Biological Nitrogen Fixation (ABNF) of *M. sativa* is 507.5 kg·hm⁻²—the highest for the monoculture treatment. After a year of growth, *A. adsurgens* SOM averagely increases by 3.51%. Average STP output ratios of *A. adsurgens* and *M. sativa* are 43.14% and 40.24%, significantly higher than that of *L. davurica* (23.74%), and those of mixture of *A. adsurgens* and *L. davurica*, mixture of *M. sativa* and *L. davurica*, and mixture of *A. adsurgens*, *M. sativa* and *L. davurica* are 20.73%, 26.33% and 25.83% respectively. All the three legumes significantly enhance SOM. Though *A. adsurgens* and *M. sativa* consume much more STN and STP than *L. davurica*, they have a stronger nitrogen fixation ability. Utilization of soil resources by mixed legume community can be optimized by appropriate seeding density due to increased competition and symbiosis among the different species of the community.

Key words Highland Loess Plateau, legume, Seeding mode, Seeding density, Nutrient distribution along soil profile, Nutrient equilibrium

(Received March 22, 2007; accepted July 11, 2007)

中国科学院百人计划择优支持项目(C23013500)资助

通讯作者:李凤民(1962~),男,汉,研究员,主要从事植物/作物生态学研究。E-mail: fnli@lzu.edu.cn

张晓红(1976~),女,满,在读博士,主要从事农业生态与土壤学研究。E-mail: zhx_1976@163.com

收稿日期:2007-03-22 接受日期:2007-07-11

豆科植物与根瘤菌共生具有很强的固氮能力^[1],因此多年生豆科牧草不仅能够和土壤微生物相互作用,促进土壤特性改善,增加地表覆盖度,减少风季和雨季土壤侵蚀,而且能够显著增加土壤碳、氮、磷等养分含量和有效性^[2-5]。利用豆科牧草-作物轮作进行土壤改良,推行草田轮作制度,对我国黄土高原半干旱地区的生态恢复和重建,实现农业可持续发展具有重要意义^[6]。在草-田轮作系统中,牧草种植年限不宜过长,李玉山^[7]曾指出多年生牧草生长期过长不仅生产力下降,且多年连续种植会导致土壤干燥化,形成生物性土壤下伏干层甚而对陆地水分循环发生影响,并提出黄土高原草地生产要改高产目标为适度生产,缩短草地生长年限。近年在黄土高原地区对苜蓿、沙打旺等多年生牧草的研究很多,主要集中在连续多年生长的牧草对土壤水分和养分消耗与影响、草地施肥管理效果、退化草地恢复及草-田轮作的土壤效果等方面^[8,9-13],缺乏对中短期草地的研究。本研究特在

典型黄土塬区设立了苜蓿、沙打旺和达乌里胡枝子 3 种豆科牧草以不同密度和单播、混播的定位试验,以系统了解短期种植豆科牧草对土壤养分环境影响的进程和规律,以期为黄土高原半干旱地区草-田轮作系统中更好地发挥豆科牧草的作用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区自然条件

试验在中国科学院水利部水土保持研究所所长武农业生态试验站进行。该站位于黄土高原中南部的陕甘交界处,地处 N35°12', E107°40',海拔 1 200 m。暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水 584 mm,平均气温 9.1℃,无霜期 171 d,地下水埋深 50~80 m,属典型旱作农业区。试验田土壤基本性质见表 1。

1.2 供试材料

供试的沙打旺 (*Astragalus adsurgens* Pall) 为中国科学院水利部水土保持研究所培种的“彭阳早熟

表 1 试点土壤养分基本状况

Tab 1 Soil nutrients of experimental site

土层 Soil layer (cm)	全氮 Total N ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全磷 Total P ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有机质 Organic matter ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷 Available P ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH 0.01 mol·L ⁻¹ CaCl ₂ (1:1)
0~30	1.01 ±0.04	0.73 ±0.01	14.40 ±0.41	5.85 ±0.62	7.57 ±0.07
30~60	0.70 ±0.05	0.61 ±0.01	9.10 ±0.63	2.65 ±0.25	7.63 ±0.09
60~100	0.57 ±0.04	0.52 ±0.02	9.10 ±0.47	2.12 ±0.20	7.62 ±0.02

型”(千粒重 1.943 g),苜蓿 (*Medicago sativa* L.)为引自加拿大的“阿尔冈金”(千粒重 1.285 g),二者在黄土高原地区均为典型牧草当家品种;达乌里胡枝子 (*Lespedeza davurica* Schind)为野生种(千粒重 1.874 g),属黄土高原森林草原地带的代表性群落建群种之一。

1.3 试验方法

试验设单播(A:沙打旺,B:苜蓿,C:达乌里胡枝子)和混播(AB、AC、BC、ABC)各 3 个密度(1: 7.5 万株·hm⁻², 2: 22.5 万株·hm⁻², 3: 67.5 万株·hm⁻²)共 21 个处理和 1 个裸地对照(CK),每个处理 3 次重复,小区面积 4 m (EW) × 2.5 m (SN),完全随机区组排列。撒播播种(与干土混和播种,出苗后去杂苗),播深 2~3 cm; 2004 年 5 月 27 日播种,当年保苗为主,冬前刈割 1 次不计产,次年 4 月中旬返青后开始每月定期观测土壤水分,测量株高,分别于 5 月、7 月、9 月中下旬牧草生长盛期刈割,称鲜重,烘干法测干鲜比,计算牧草的干、鲜生产力; 10 月份冬前刈割后用土钻分取 0~30 cm、30~60 cm、

60~100 cm、100~150 cm、150~200 cm 的土壤样品,风干后过 1 mm 和 0.25 mm 筛,进行室内化学分析。整个试验过程不施用任何肥料,适时去除杂草。

土壤全磷用 H₂SO₄-HClO₄ 消煮,钼蓝比色,UV-2300 spectro photometer 测定;土壤全氮用 H₂SO₄ + (Cu-Se) 催化剂消煮,2300 Kjeltex Analyzer Unit 定氮仪测定;土壤有机质测定采用 H₂SO₄-K₂C₂O₄ 外加热容量法^[14]。

数据用 SAS 统计分析软件和 Excel 2000 进行分析处理。

2 结果分析

2.1 不同处理土壤有机质的剖面分布与平衡

2.1.1 土壤有机质剖面分布

所有处理 3 个密度下土壤有机质剖面分布与对照裸地相同,在 2 m 深度范围内均呈典型的“S”形分布(图 1)。这与该地区土壤形成条件及多年土地利用方式有关。试验开始前作物种植以冬小麦-夏玉米轮作为主,连续多年很少施用有机肥,土壤

有机质的来源主要为归还的植物根茬和枯落物。60 cm 以上由于根茬输入较多,土壤有机质处于向上相对积累状态;60~150 cm 根系相对上层较少,土壤有机养分的物质循环在这一深度范围内处于相对稳定平衡状态;150 cm 以下随着根生物量补充的减少,土壤有机质基本上处于不断消耗状态,这与彭令发等的长期定位试验结果^[18]相符。

低密度种植时(图 1a),单播、混播处理上层 0~30 cm 土壤有机质均高于对照,胡枝子草地有机质含量最高(16.30 g·kg⁻¹),比对照高 16%;底层 200 cm 除胡枝子外各处理土壤有机质含量均比对照高;

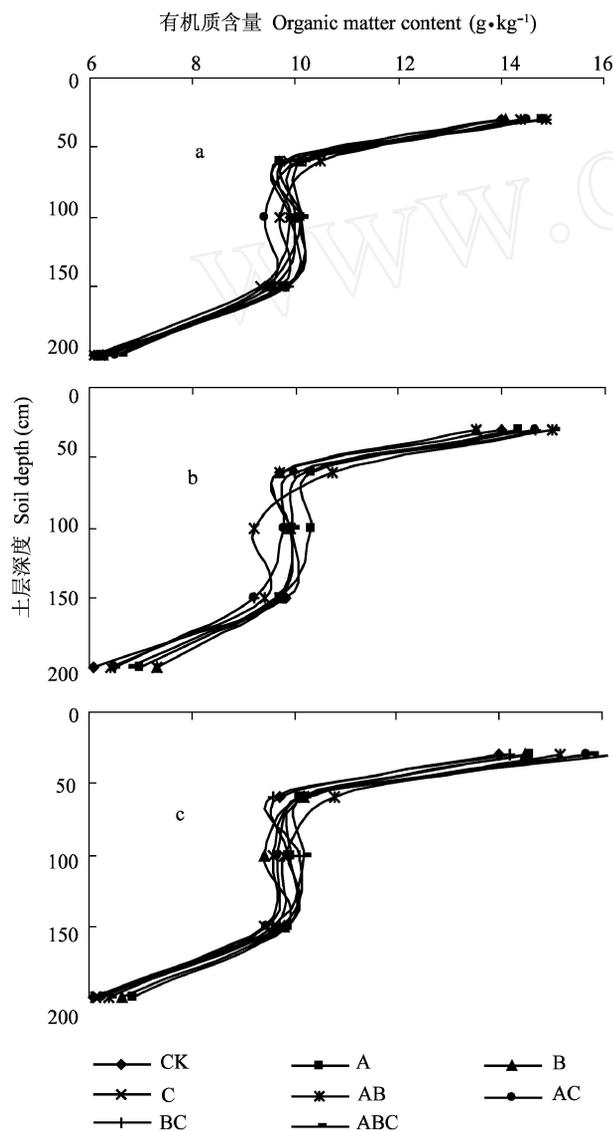


图 1 低密度(a)、中密度(b)和高密度(c)下不同牧草播种方式对土壤有机质剖面分布的影响

Fig 1 Soil organic matter (SOM) distribution along soil profile under different seeding modes with low (a), medium (b) and high (c) seeding densities
A 沙打旺 *Astragalus adsurgens* Pall; B 苜蓿 *Medicago sativa* L.; C 达乌里胡枝子 *Lespedeza davurica* Schind 下同 The same below.

60~150 cm 苜蓿与沙打旺混播(AB)及与胡枝子混播(BC)土壤有机质含量均比对照低,单播沙打旺(A)、胡枝子(C)与对照相近,单播苜蓿(B)含量偏高。中等密度(图 1b)下 3 种牧草混播(ABC)处理土壤有机质含量在整个剖面均较高,单播沙打旺(A)和苜蓿(B)在 60 cm 深度以下高于对照,其他混播处理变化趋势与低密度相似,即在中部土层比对照低。高密度(图 1c)下所有处理底层和 60 cm 以上土层有机质含量均高于对照,但中部土层偏低,只有混播 AB、ABC 有机质含量高于对照。结果表明 3 种豆科牧草在上层和底层由于枯落物和根茬的输入对土壤有机质的积累作用均很明显,在 60~150 cm 深度范围内受种类、播种密度和播种方式的影响较大。苜蓿对土壤有机质的累积贡献作用高于沙打旺和胡枝子,与后两者混播后这种作用可得到加强。

2.1.2 土壤有机质平衡与输出

以对照为基础,计算了 3 种牧草在不同密度下单播、混播时对 2 m 内土壤有机质累积的影响(表 2)。无论单播还是混播,3 种牧草土壤有机质累积量均随播种密度增加而增大,但单播和 3 种牧草混播(ABC)高密度与中密度差异不显著,两两混播(AB、AC、BC)低密度与中密度相差也不显著。低密度处理沙打旺单播(A)和 3 种牧草混播(ABC)有机质累积最多,净增均达 2.18%;其次为苜蓿与沙打旺和胡枝子混播(AB、BC),分别净增 1.47%和 1.95%;胡枝子对土壤有机质累积贡献最小,只有 242 kg·hm⁻²,净增比率为 0.11%。中密度下仍是单播 A 和混播 ABC 土壤有机质净增最多,不同的是单播苜蓿(B)和胡枝子(C)土壤有机质净增率都提高到 2%以上,接近甚至超过混播 BC 和 AB,而 AC 的累积依旧不多。高密度下所有处理土壤有机质累积量都较大,最小净增比率为 2.07%,最大达 4.52%。不同播种方式下 3 种牧草的地上干生物量输出差异极显著,各处理土壤有机质的累积量也不同,但地上干物质量与土壤有机质累积量无显著相关关系。从土壤有机质累积角度看,沙打旺无论播种密度大小均能显著提高土壤有机质的积累,生长 1 年可以使土壤有机质平均净增 3.51%;苜蓿较差,单播时土壤有机质平均净增只有 1.61%,但加大种植密度或与胡枝子、沙打旺混播,苜蓿对土壤有机质积累的贡献有所提高,而据报道 7 年生苜蓿可使土壤有机碳含量增加 25%^[17]。

表 2 3种豆科牧草以不同密度单播、混播土壤有机质的累积与消耗

Tab 2 Accumulation and consumption of soil organic matter (SOM) with three legumes seeded alone or mixed in different densities

项目 Item	密度 Density (万株·hm ⁻²)	处理 Treatment							
		A	B	C	AB	AC	BC	ABC	CK
总累积量	7.5	235.18a(b)	231.64c(b)	230.38c(b)	233.53b(b)	231.56c(b)	234.62ab(b)	235.14a(b)	230.14
Total SOM	22.5	240.19a(a)	234.98d(a)	235.20d(a)	233.29e(b)	231.79f(b)	236.74c(ab)	238.37b(a)	-
(t·hm ⁻²)	67.5	239.30ab(a)	234.91c(a)	236.32c(a)	238.61b(a)	235.95c(a)	237.84b(a)	240.55a(a)	-
净增量	7.5	5.039	1.495	242	3.388	1.422	4.477	5.000	0
Net increment	22.5	10.043	4.840	5.058	3.146	1.651	6.595	8.228	0
(kg·hm ⁻²)	67.5	9.153	4.772	6.181	8.470	5.808	7.701	10.406	0
净增比率	7.5	2.18	0.65	0.11	1.47	0.62	1.95	2.18	0
Increment	22.5	4.36	2.10	2.20	1.37	0.72	2.87	3.58	0
percent (%)	67.5	3.98	2.07	2.69	3.68	2.52	3.35	4.52	0
地上干物质量	7.5	7.98bc(c)	15.35a(b)	2.41d(c)	11.92ab(b)	5.07cd(c)	10.30ab(b)	12.35ab(b)	0
Over ground part dry	22.5	16.44ab(b)	20.63a(a)	5.27c(b)	19.00a(a)	10.09b(b)	21.80a(a)	15.72ab(ab)	0
matter(t·hm ⁻²)	67.5	21.05a(a)	21.53a(a)	7.01b(a)	20.72a(a)	16.89ab(a)	22.11a(a)	21.06a(a)	0

括号外不同小写字母表示同行内数据在 $P=0.05$ 水平上差异显著,括号内不同小写字母表示同列内数据在 $P=0.05$ 水平上差异显著,下同。Different letters outside parentheses mean significant difference at $P=0.05$ among one row data, and those in parentheses mean significant difference at $P=0.05$ among one column data. The same below.

2.2 不同处理土壤全氮的剖面分布与平衡

2.2.1 土壤全氮剖面分布

土壤全氮剖面分布与有机质相似,呈典型的“S”变化(图 2)。土壤有机质和氮素的消长主要取决于生物积累和分解作用的强弱、气候、植被、耕作制度等,尤其是水热条件。试验所在的黄土塬区属干旱半湿润气候,蒸发大于降水,淋溶作用不强,土层深厚,地下水不参与土壤水分循环^[15],这样的自然条件加上多年农业利用,使得 2 m 深度范围内土壤有机质和全氮的“S”形剖面变化较为典型^[17,18]。

试验期间没有施肥,土壤氮素变化主要受植物生长和利用的影响。豆科植物均有固氮作用,对土壤氮素的影响与其生长需求和固氮能力的相对强弱有关。3种密度下,单播沙打旺和苜蓿底层土壤氮含量均极显著低于对照和其他处理,1 m 以上含量明显偏高,说明这两种牧草上层根系固氮能力强于下层,原因可能是下层根系多为当年的新生根,根瘤菌形成较少,固氮能力较弱,主要起吸收水分和养分的作用。胡枝子草地土壤剖面含氮量与对照接近,说明胡枝子生物固定的氮素与其本身的生长消耗量大致相抵,仅低密度下略有剩余(图 2a)。混播处理土壤含氮量均为上层偏高,在中层 60~150 cm 深度范围内显著低于单播和对照,这可能与混播种群的竞争生长有关。竞争的存在可能导致

竞争个体对资源的抢夺性消耗,在资源紧张时,种群密度越大这种竞争表现越明显,这可能也是中、高密度时 1 m 以下各处理土壤含氮量低于对照的主要原因。上层土壤混播草地含氮量偏高说明混播种群的生物固氮能力较单播种群高。土壤氮素过高对根瘤固氮有明显的抑制作用^[19],上层土壤本底氮素含量最高,可能对 3 种牧草的固氮作用起到了某种程度的抑制,而混播情况下这种抑制可能得到缓解,有利于混播草地固氮能力的提高。

2.2.2 土壤全氮平衡与输出

在未施用任何肥料情况下,试验系统内土壤氮素循环主要在土壤-植物-微生物间进行,土壤全氮的消耗去向可以归为随地上收获生物量的支出与枯落物和地下根茬回归、土壤微生物的地下有机转化贮存两大部分。由于地下根系生物量和微生物量难以准确测量,故只根据地上生物量和植株含氮量计算地上支出部分,把这部分支出与土壤全氮消耗量的差值定义为表观生物固氮量(ABNF, Apparent Biology Nitrogen Fixation),以此来比较 3 种豆科牧草对土壤全氮的消耗及其固氮能力。

从表 3 可以看出,各牧草单播 2 m 土体全氮累积量在 3 个密度下变化一致,胡枝子显著高于沙打旺和苜蓿($P=0.05$);混播处理中,沙打旺与苜蓿的混播处理(AB)偏少。各处理全氮累积量与对照之差所得土壤全氮消耗量因密度和播种方式而异。单

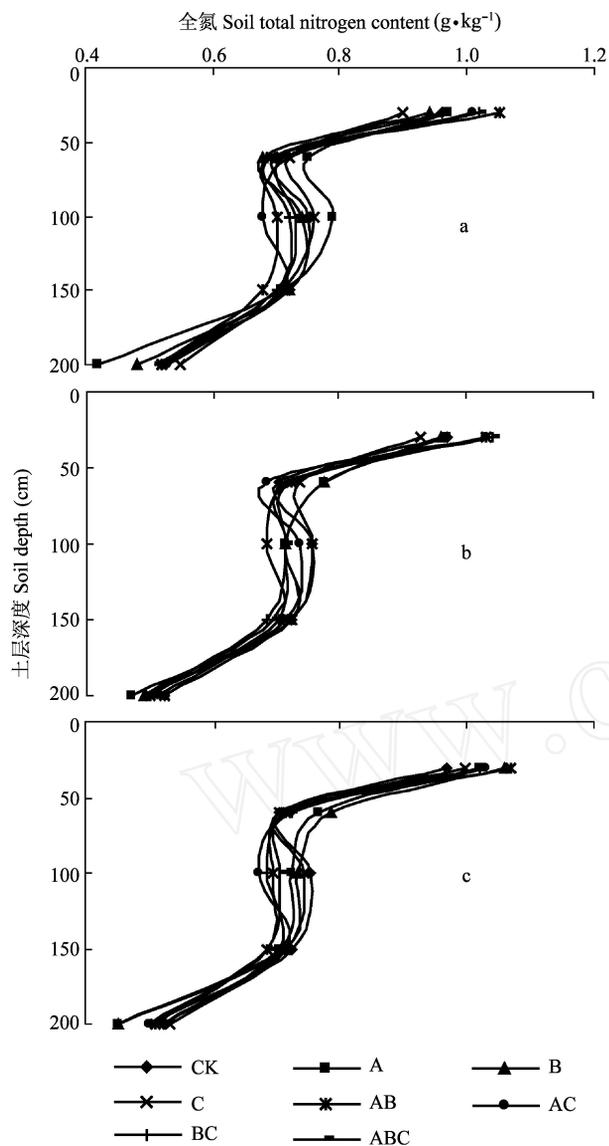


图 2 低密度 (a)、中密度 (b)和高密度下不同牧草播种方式对土壤全氮剖面分布的影响

Fig 2 Soil total nitrogen (STN) distribution along soil profile under different seeding modes with low (a), medium (b) and high (c) seeding densities

播时沙打旺高密度处理显著 ($P = 0.05$) 高于中密度和低密度;苜蓿随密度加大而减小;胡枝子中密度最多,高密度最小。混播下全氮消耗量随密度变化复杂,ABC、AC、BC 高密度最多,AB 却是中密度最多。单播、混播处理间比较,单播沙打旺和苜蓿对土壤全氮消耗量较多,其中沙打旺 3 个密度下均在 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上,苜蓿低密度和高密度下全氮消耗量达 $300 \sim 400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,胡枝子在所有处理中全氮消耗量最少,高密度与对照相比甚至还增加 $71.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;混播处理土壤全氮消耗量在低密度下显著低于单播苜蓿和沙打旺,但中密度和高密度情况下这种趋势不明显。氮素地上支出量与干生物量显著相关 ($P < 0.05$),胡枝子生产力最低,氮素支出在 3 个密度下均为最低值 ($74.3 \sim 218.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$);其他各处理高密度下差异不明显,其中 AC 支出最少 ($552.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),BC 最多 ($707.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),其余在 $650 \sim 700 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 不等。从表观生物固氮量来看,单播牧草固氮能力与播种密度呈正相关,其中苜蓿固氮能力最强,高密度下表观生物固氮量达 $507.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。苜蓿与沙打旺和胡枝子混播的处理 ABC、BC 和 AB 在 3 种密度下均有较高的固氮能力,平均表观固氮量分别为 $320.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $388.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $314.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

2.3 不同处理土壤全磷的剖面分布与平衡

2.3.1 土壤全磷剖面分布

图 3 为 3 种密度下 3 种牧草单、混播时土壤全

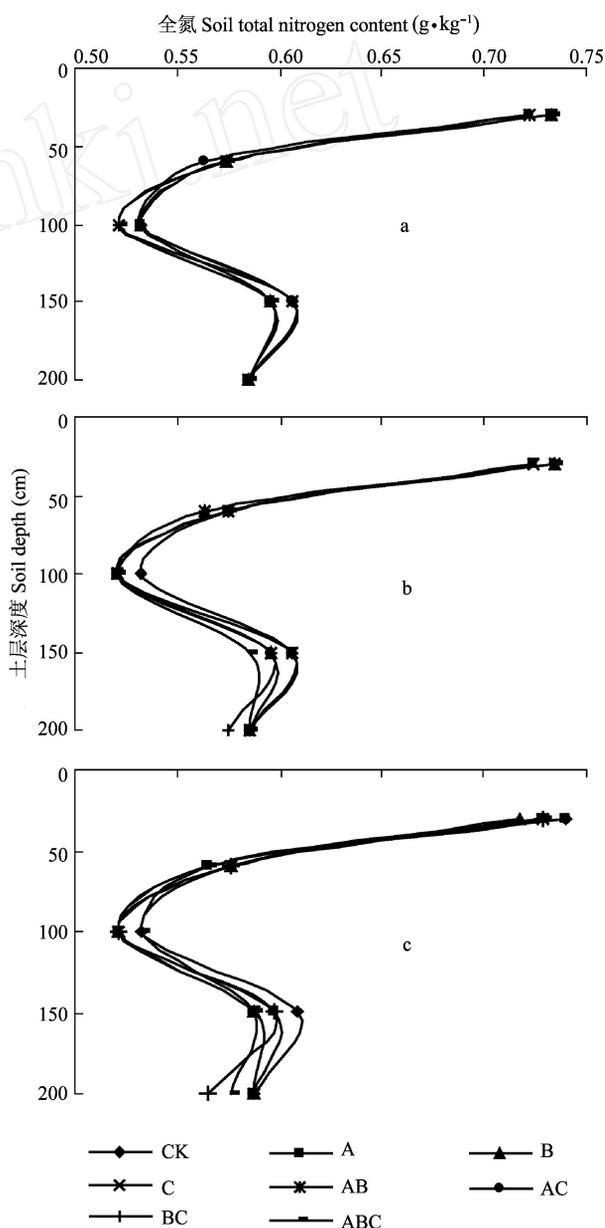


图 3 低密度 (a)、中密度 (b)和高密度 (c)下不同牧草播种方式对土壤全磷剖面分布的影响

Fig 3 Soil total phosphorus (STP) distribution along soil profile under different seeding modes with low (a), medium (b) and high (c) seeding densities

磷剖面分布情况。所有处理变化趋势相同,上层 0~30 cm 全磷含量最高,平均 0.70~0.72 g·kg⁻¹;最低含量出现在 1 m 深度上,平均 0.52 g·kg⁻¹;向下随深度增加全磷含量有所回升,150 cm 处增加到 0.60 g·kg⁻¹左右后又开始下降。沿剖面土壤全磷含量的整体变化呈抛物线形。总体来说,各处理土壤剖面全磷含量均略低于对照,但不显著,且混播比单播表现明显,高密度比低密度明显。在无外加磷情况下,土壤磷素循环主要在土壤、植物和微生物间进行^[20],其过程为植物吸收土壤有效磷,动植物残体磷返回土壤再循环以及土壤有机磷和各种形态无机磷之间的转换。由于测定指标为全磷,无法反映系统内发生的活跃循环过程,但可以很好地反映循环结果。全磷剖面分布结果表明各处理上层土壤磷库变化微小,中下层库存均有不同程度减

少,说明牧草在无外加磷源情况下吸收了下层土壤磷素,并对土壤磷有表聚作用。杨玉海等^[4]也曾报道,连续 4 年种植苜蓿且没有任何施肥情况下 0~30 cm 耕层土壤全磷含量比每年施肥的传统耕作土壤高。这可能是深根性豆科牧草的又一优势,即在不施肥情况下可以吸收利用深层土壤养分并通过生物表聚改善耕层土壤养分条件;而在传统耕作模式小麦-玉米轮作中,尤其是长期施肥情况下,作物吸磷量 90%来自 0~20 cm 土壤^[21]。

2.3.2 土壤全磷平衡与输出

各处理 2 m 土体土壤全磷累积量随密度增大而减小,且高密度与低密度差异显著 (P=0.05),但不同密度下各单播、混播处理间差异不显著 (P=0.05,表 4)。全磷消耗量随密度变化特征与全磷累积量相反,各处理均随密度增大而显著升高 (P=

表 3 3 种豆科牧草以不同密度单播、混播土壤全氮的累积与消耗

Tab 3 Accumulation and consumption of soil total nitrogen (STN) with three legumes seeded alone or mixed in different densities

项目 Item	密度 Density (万株·hm ⁻²)	处理 Treatment							
		A	B	C	AB	AC	BC	ABC	CK
总累积量	7.5	16 903.4b	16 722.2b	17 154.1a	16 964.2b	17 067.1ab	17 073.1ab	17 141.6ab	17 157.8
Total accumulation	22.5	16 915.8b	16 782.7b	17 121.5a	16 867.4b	17 102.1ab	16 916.4ab	17 136.0ab	-
(kg·hm ⁻²)	67.5	16 867.4b	16 976.3b	17 228.9a	16 964.2b	16 879.5ab	16 916.4ab	16 789.0ab	-
消耗量	7.5	254.4b(b)	435.6a(a)	3.7f(b)	193.6c(b)	90.8d(b)	84.7d(b)	16.2f(c)	0
Total consumption	22.5	242.0c(b)	375.1a(b)	36.3e(a)	290.4b(a)	55.7e(c)	241.4c(a)	229.9c(b)	0
(kg·hm ⁻²)	67.5	290.4b(a)	181.5d(c)	-71.1e(c)	193.6d(b)	278.3c(a)	241.4b(a)	368.8a(a)	0
地上支出	7.5	262.5d(c)	491.2a(b)	74.3f(c)	382.6b(c)	165.9e(c)	329.2c(b)	396.1b(c)	0
Over ground	22.5	540.9b(b)	660.3a(a)	162.3d(b)	575.2b(b)	329.9c(b)	697.4a(a)	503.9b(b)	0
output (kg·hm ⁻²)	67.5	692.7ab(a)	689.0ab(a)	218.7c(a)	663.6ab(a)	552.7b(a)	707.6a(a)	675.3ab(a)	0
表观生物固氮量	7.5	8.1f(c)	55.6e(c)	70.6e(c)	189.0c(c)	110.2d(b)	244.5b(b)	379.9a(b)	0
ABNF	22.5	298.9b(b)	285.2b(b)	126.0d(b)	284.8b(b)	239.1c(a)	456.0a(a)	274.0bc(a)	0
(kg·hm ⁻²)	67.5	402.3b(a)	507.5a(a)	289.8c(a)	470.0a(a)	274.4c(a)	466.3a(a)	306.5c(c)	0

表 4 3 种豆科牧草以不同密度单播、混播土壤全磷的累积与消耗

Tab 4 Accumulation and consumption of soil total phosphorus of three legumes seeded alone or mixed in different densities

项目 Item	密度 Density (万株·hm ⁻²)	处理 Treatment							
		A	B	C	AB	AC	BC	ABC	CK
总累积量	7.5	14 347.2(a)	14 318.6(a)	14 354.4(a)	14 302.2(a)	14 315.3(a)	14 285.5(a)	14 278.0(a)	14 380.8
Total accumulation	22.5	14 309.7(ab)	14 217.4(ab)	14 321.6(a)	14 241.7(a)	14 278.0(ab)	14 181.2(ab)	14 217.5(ab)	-
(kg·hm ⁻²)	67.5	14 205.4(b)	14 144.9(b)	14 181.2(b)	14 108.6(b)	14 205.4(b)	14 120.7(b)	14 132.8(b)	-
消耗量	7.5	33.5d(c)	62.1c(b)	26.3d(c)	78.6b(c)	65.5c(c)	95.3a(c)	102.8a(c)	0
Consumption	22.5	71.1e(b)	163.3b(a)	59.1e(b)	139.1c(b)	102.8d(b)	199.6a(b)	163.3b(b)	0
(kg·hm ⁻²)	67.5	175.3b(a)	235.8b(a)	199.5b(a)	272.2a(a)	176.4b(a)	260.1a(a)	248.0a(a)	0
地上支出	7.5	17.6d(c)	39.9a(b)	8.0f(b)	30.5b(b)	11.6e(c)	27.1c(b)	31.7b(c)	0
Over ground	22.5	36.2b(b)	53.6a(a)	17.4d(ab)	54.3a(a)	23.3c(b)	56.8a(a)	40.5b(b)	0
output (kg·hm ⁻²)	67.5	46.3b(a)	56.0a(a)	23.4d(a)	53.4a(a)	38.3c(a)	57.5a(a)	54.2a(a)	0
输出比率	7.5	52.54	64.23	30.41	38.85	17.74	28.47	30.87	0
Output ratio	22.5	50.91	32.82	29.44	39.06	22.69	28.47	24.82	0
(%)	67.5	26.80	23.75	11.73	19.63	21.85	22.12	21.86	0

0.05)。不同处理间比较,低密度和中密度下单播土壤全磷消耗量为苜蓿(B) > 沙打旺(A) > 胡枝子(C),但沙打旺和胡枝子间差异不显著;高密度时单播胡枝子耗磷量略高,但与沙打旺和苜蓿的差异不显著;低密度和高密度下苜蓿与沙打旺和胡枝子的混播处理(AB、BC、ABC)全磷消耗量均显著高于各牧草单播处理,但中密度下ABC消耗量与单播苜蓿(B)差异不显著,AB全磷消耗量显著低于单播苜蓿(B, $P=0.05$);沙打旺与胡枝子混播处理(AC)在低密度和中密度下全磷消耗量显著高于单播沙打旺(A)和胡枝子(C),但高密度时与单播沙打旺(A)差异不显著($P=0.05$)。

各单播、混播处理全磷地上支出量随密度增加而增大。其中苜蓿较多,平均为 $49.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;沙打旺平均 $33.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,居中;胡枝子最少,为 $16.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。沙打旺与胡枝子混播处理(AC)支出较少,平均 $24.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,苜蓿与沙打旺和胡枝子的混播处理(AB、BC、ABC)支出较接近单播苜蓿,分别为 $46.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $47.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、和 $42.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。输出比率是地上支出与土壤全磷消耗量之比,其值越大表明土壤全磷损失越多,而根茬残留返还部分越少。计算结果表明,3种豆科牧草单播时输出比率均随播种密度加大而减小,沙打旺和苜蓿平均输出比率分别为 43.14% 和 40.24%,显著高于胡枝子(23.74%)。混播时,除ABC处理输出比率随密度增加而减少外,其他混播处理均为中密度最大;总体而言,混播输出比率较小,AC、BC和ABC平均为 20.73%、26.33%、25.83%,与胡枝子较接近,AB略大些,平均 32.47%,但也显著低于苜蓿和沙打旺单播。结果表明沙打旺和苜蓿耗磷量较高,根茬返还率低,胡枝子生产力低,但耗磷量也少。3种牧草以适当的密度混播时,种间的良性竞争和协调作用可使混播群体对土壤磷的消耗减少,相反,密度过大或过小却很可能导致混播群体对土壤磷的争夺浪费。加大种植密度或者混播可降低土壤全磷输出比率,提高根茬枯落物残留返还率。与无机磷相比,有机磷在土壤中具有较大的移动性,被土壤无机矿物的固定程度低,即使是难溶于水的有机磷,经矿化后可持续释放出无机磷,对作物生长也极为有利^[21,22],因此提高根茬返还率实际上对土壤磷库的活化具有重要意义。

3 结论

3种牧草在不同密度下单播、混播处理土壤剖面有机质和全氮含量均呈典型的“S”形分布,全磷

呈抛物线形分布。各处理土壤有机质在上层均不同程度的累积,底层含量除胡枝子外也均比对照高;在 60~150 cm 之间土壤有机质累积与分解变化受不同种群生长利用的影响很复杂,与单、混播方式和密度关系密切。土壤全氮含量受不同处理种群生长对氮素的需求和本身固氮能力双重影响,土壤上层混播固氮能力强于单播,土壤含氮量偏高;单播沙打旺和苜蓿在 60~100 cm 的中上层土壤固氮能力最强,底层较弱;胡枝子剖面全氮含量与对照较接近。各处理土壤全磷含量全剖面均比对照略低,混播比单播降低明显,高密度比低密度突出。

土壤有机质的累积与种植密度呈正相关,不同牧草对其贡献不同,沙打旺表现最好,3种密度下均能显著提高土壤有机质的累积量,苜蓿和胡枝子低密度种植对土壤有机质的积累作用不明显;混播有利于提高有机质的累积。混播处理不仅能够降低对土壤氮素的消耗,还能显著提高群体固氮能力。3种牧草以适当的密度混播时,种间的良性竞争和协调作用可使混播群体对土壤磷的消耗减少,相反,密度过大或过小却很可能导致混播群体对土壤磷的争夺浪费;提高种植密度或混播可降低土壤磷输出比率,有利于土壤磷素的活化和有效利用。

致谢 诚挚感谢试验共同完成人王会梅的合作;感谢长武实验站站长刘文兆老师以及站上工作人员的支持和帮助;感谢中国科学院水利部水土保持研究所及黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室提供的良好科研环境条件。

参考文献

- [1] Frame J. Advances in forage legume technology [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2001, 10(4): 1-17
- [2] 张少华. 陇东黄土高原干旱草地利用方向和途径的探讨 [J]. 草业科学, 1997, 14(5): 4-7
- [3] 陈文新. 豆科植物根瘤菌-固氮体系在西部大开发中的作用 [J]. 草地学报, 2004, 12(1): 1-2
- [4] 杨玉海, 蒋平安, 艾尔肯, 等. 种植苜蓿对土壤肥力的影响 [J]. 干旱区地理, 2005, 28(2): 248-251
- [5] 杜天庆, 苗果园. 豆科牧草根际土壤脲酶活性的研究 [J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 25-27
- [6] 李凤民, 徐进章, 孙国钧. 半干旱黄土高原退化生态系统的修复与生态农业发展 [J]. 生态学报, 2003, 9(23): 1901-1909
- [7] 李玉山. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应 [J]. 土壤学报, 2002, 39(3): 404-411
- [8] 王俊, 李凤民, 贾宇, 等. 半干旱黄土区苜蓿草地轮作农田土壤氮、磷和有机质变化 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 439-444

- [9] 樊军,郝明德,邵明安. 黄土高原沟壑区草地土壤深层干燥化与氮素消耗 [J]. 自然资源学报, 2004, 19(2): 201- 205
- [10] 郝明德,张春霞,魏孝荣,等. 黄土高原地区施肥对苜蓿生产力的影响 [J]. 草地学报, 2004, 12(3): 195- 198
- [11] 王志强,刘宝元,路炳军. 黄土高原半干旱区土壤干层水分恢复研究 [J]. 生态学报, 2003, 23(9): 1944- 1950
- [12] 郭忠升,邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力 [J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1641- 1647
- [13] 温仲明,焦峰,刘宝元,等. 黄土高原森林草原区退耕地植被自然恢复与土壤养分变化 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2025- 2029
- [14] 南京农业大学. 土壤农化分析 [M]. 北京:农业出版社, 1996
- [15] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林 [J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 433- 438
- [16] Gupta U. C., Reuszer H. W. Effect of plant species on the amino acid content and nitrification of soil organic matter[J]. Soil Sci, 1967, 104: 395- 412
- [17] 李丽霞,郝明德,彭令发. 长期施肥人工草地土壤养分的剖面变化 [J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 50- 52
- [18] 彭令发,郝明德,来璐,等. 黄土旱塬区长期施氮对土壤剖面养分分布的影响 [J]. 西北植物学报, 2003, 23(8): 1475- 1478
- [19] 黄昌勇. 土壤学 [M]. 北京:中国农业出版社, 2000
- [20] 刘建玲,张福锁. 小麦-玉米轮作长期肥料定位试验中土壤磷库的变化. I 磷肥产量效应及土壤总磷库、无机磷库的变化 [J]. 应用生态学报, 2000, 11(3): 360- 364
- [21] Tare K. B. The biological transformation of phosphorus in soil[J]. Plant and Soil, 1984, 76: 245- 256
- [22] Dalai R. C. Soil organic phosphorus[J]. Advan Agron, 1977, 29: 83- 119

www.cnki.net