

高寒地区苜蓿人工草地建植技术

张文浩^{1,2,3*}, 侯龙鱼¹, 杨杰^{1,2}, 宋世环^{1,3}, 毛小涛¹, 张强强⁴, 白文明^{1,3},
潘庆民^{1,3}, 周青平^{2,5}

1. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093;

2. 中国科学院大学生命科学学院, 北京 100049;

3. 中国科学院内蒙古草业研究中心, 北京 100093;

4. 新疆生产建设兵团第九师畜牧科学研究所, 额敏 834601;

5. 西南民族大学青藏高原研究院, 成都 610041

* 联系人, E-mail: whzhang@ibcas.ac.cn

2017-12-13 收稿, 2018-01-03 修回, 2018-01-04 接受, 2018-03-19 网络版发表

中国科学院科技服务网络计划(STS 计划)重点项目(KFJ-STZ-ZDTP-004)资助

摘要 高寒地区占我国国土面积近1/3, 也是我国天然草地的主要分布区和传统的畜牧业基地, 由于不合理利用和全球气候变化等因素, 导致天然草地退化严重, 草地的生产和生态功能低下, 草畜矛盾突出. 优质人工草地种植规模小和产业化水平低是我国草牧业发展的瓶颈. 因此, 大力发展优质苜蓿(*Medicago sativa* L.)人工草地是破解我国目前草牧业可持续发展瓶颈的重要途径和抓手. 本文结合国内外苜蓿生产和市场现状, 探讨了我国苜蓿种植和产业发展的不足与解决办法. 同时, 通过文献资料分析和高寒地区调研等, 明确高寒地区发展苜蓿人工草地在促进当地环境友好型草牧业发展中的作用. 针对我国优质抗寒苜蓿品种少、越冬技术不足等问题, 归纳总结出高寒地区品种选择、选地与整地、播种技术、密度控制、根瘤菌(*Rhizobium*)接种、水肥管理和刈割等一整套技术与相应理论, 为我国高寒地区优质苜蓿种植与生产提供技术支撑, 更好地推进我国草牧业又快又好的发展.

关键词 苜蓿, 人工草地, 草牧业, 高寒地区

我国传统畜牧业基地主要分布在内蒙古、新疆、青海和西藏等高纬度、高海拔寒冷地区. 高寒地区占我国国土面积的近1/3, 高寒草甸和高寒草原占我国草地面积近1/2 (47.3%)^[1], 是我国草牧业发展的重要组成部分. 传统、粗放的天然草地放牧仍然占有较大的比重, 导致草地生产力越来越低, 严重影响当地畜牧业的发展, 也造成生态环境的恶化.

人工草地种植规模和生产水平是衡量一个国家和地区畜牧业发达程度的标志^[2]. 世界上草牧业发达国家人工草地面积占草地总面积比重较高, 新西兰超过70%, 欧洲超过50%, 美国达到15%^[3,4], 相比之

下, 我国仅为5%左右^[1]. 与此同时, 我国草业长期以来粗放的生产经营方式, 导致草地退化严重、生产力水平低下, 草产品产量远不能满足畜牧业发展的市场需求^[5]. 集约化的人工草地可以使优质饲草产量提高10倍以上, 发展人工草地是大幅提升我国草地生产功能的有效途径^[5].

苜蓿作为分布广泛的人工草地牧草品种, 是世界上栽培历史最悠久、种植面积最大、营养价值高、兼有固氮和提高土壤肥力的多年生豆科牧草, 从40°S到60°N的地区均有种植, 而且在温带、寒温带地区种植最为广泛^[6]. 随着我国草牧业的发展, 国内市

引用格式: 张文浩, 侯龙鱼, 杨杰, 等. 高寒地区苜蓿人工草地建植技术. 科学通报, 2018, 63: 1651–1663

Zhang W H, Hou L Y, Yang J, et al. Establishment and management of alfalfa pasture in cold regions of China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 1651–1663, doi: 10.1360/N972017-01181

场苜蓿产量和质量逐步提高,但苜蓿商品草的缺口仍逐年增加,对国外苜蓿市场依存度较高,进口苜蓿产量占到国内苜蓿市场的1/2^[6,7]. 2014年我国成为世界上苜蓿草进口最多的国家,且进口量逐年增加(http://www.hesitan.com/nnyw_gjny/2015-04-13/147168.shtml). 苜蓿产业发展滞后不仅影响我国草牧业的发展,而且制约着奶业等的国际国内竞争能力. 由低生产力和生态不友好的天然草地放牧畜牧业生产方式,向以优质高产人工草地为基础的现代化草牧业生产方式转型是我国高寒地区畜牧业发展的必由之路^[8].

1 国内外苜蓿发展现状

1.1 世界苜蓿发展

世界苜蓿种植面积相对稳定,约2380万 ha. 北美洲是全球种植面积最大的洲,其次是南美洲和欧洲,亚洲也占有一定的面积. 世界前5位苜蓿种植的国家按面积依次为美国、中国、阿根廷、俄罗斯和意大利. 美国种植面积占到全球总面积的1/3(36%),中国、阿根廷和俄罗斯占1/3,其他国家占1/3(http://www.hesitan.com/nnyw_gjny/2015-04-13/147168.shtml).

当前,全球苜蓿干草产量和市场规模均持续增加. 全球苜蓿干草产量达到13795万 t (2014),其中北美洲(45.9%)、南美洲(20.0%)和欧洲(23.8%)占比总和达到89.7% (图1). 美国是当前最大的苜蓿草生产国,2014年生产6145万 t苜蓿干草,占世界总产量的44.5%(http://www.hesitan.com/nnyw_gjny/2015-04-13/

147168.shtml). 全球苜蓿草市场规模由2010年的189.64亿美元增加到2016年的288亿美元,其中美国苜蓿干草产值占总市场规模1/2以上(<http://www.chyxx.com/industry/201511/357918.html>).

进口方面,亚洲是最大的买方市场,亚洲占比达99%. 世界进口前3位的国家为中国、日本和阿联酋. 2014年,我国成为世界上苜蓿草进口最多的国家^[8]. 2016年我国进口苜蓿草146.31万 t, 88.05%来自美国. 出口方面,北美洲和欧洲出口最多. 美国是当前最大的、最稳定的苜蓿草供应国,出口量占世界出口总量的1/2以上^[9]. 西班牙是苜蓿第二大出口国,苜蓿出口约100万 t (<http://www.chinadairyindustry.org.cn/view.asp?id=9629>).

1.2 我国苜蓿产业发展

我国是苜蓿属植物主要分布地区之一,已有2000多年的栽培历史. 苜蓿在我国的发展大致经历4个阶段:自产自用的平衡稳定阶段、退耕还草支持下的急速发展阶段、国家粮食直补政策导致的低迷徘徊阶段和商品化产业化的振兴上升阶段(表1). 因三聚氰胺事件以及振兴奶业市场需求,我国政府加大了对苜蓿种植的资助. 2012年国家启动“振兴奶业苜蓿发展行动”,2013年农业部制定《2013年高产优质苜蓿示范建设项目实施指导意见》,2014年继续实施“振兴奶业苜蓿发展行动”,2015年中央1号文件明确提出加快发展草牧业,支持青贮玉米和苜蓿等饲草料的种植,2016年中央一号文件进一步提出发展草食畜牧业. 我国“十三五”规划中提到农业部要启动易垦草原的开发并鼓励种植优质人工牧草和饲草,促进畜牧

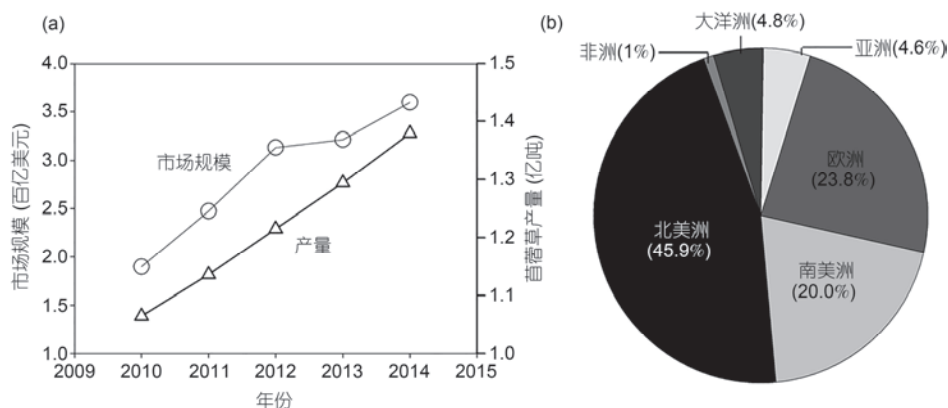


图1 世界苜蓿市场情况(a)和苜蓿草产品产量占比(2014) (b)

Figure 1 Alfalfa budget (a) and the percentage of production distribution (b) in the world (2014)

业的优质和高产发展. 全国累计支持种植苜蓿150万亩(1亩=0.067 ha), 优质苜蓿种植面积达300万亩, 比2010年增加5倍, 2015年流通的商品苜蓿草总产量达到123万 t. 甘肃省苜蓿留床面积达到994万亩, 居全国第一位. 内蒙古人工苜蓿草地面积888万亩, 居全国第二位(http://www.hesitan.com/nnyw_gjny/2015-04-13/147168.shtml).

我国苜蓿进口量逐年增加. 随着我国苜蓿草市场需求的持续增加, 进口苜蓿草总量不断增加. 目前进口的和国产的商品苜蓿草大致相当(图2). 2006年, 我国苜蓿干草进口量只有0.03万 t, 2016年迅速增加到141万 t. 全国草食畜牧业发展规划(2016~2020年)指出到2020年优质苜蓿种植面积由2015年的300万亩增加到800万亩^[10]. 到2020年, 我国商品苜蓿干草需求为400万 t, 国内将要达到200万 t, 还需进口200万 t^[11].

1.3 我国苜蓿产业发展存在的问题

(i) 种植环境差. 长期以来, 我国对人工草地的重视程度不够, 牧草种植一直处于边缘化地位. 以苜蓿为代表的人工草地主要建植在一些瘠薄山地, 荒地、退化草地、沙地和盐碱地等不适合种植传统农作物的边际土地上^[8,12,13]. 在国家风沙源治理、退耕还草项目资助下, 一些山地、丘陵地、梯台田、无灌溉设施的广种薄收地用来种植苜蓿^[14]. 因种植条件差, 加上种植技术、管理模式、收获加工技术均比较落后, 因此苜蓿产量和质量均较低^[15,16].

(ii) 种植分散、规模化小. 苜蓿种植在我国北方的农区和牧区普遍存在, 个体户农牧民均有种植. 商品化前, 苜蓿种植主要以贴补饲用和改良土地为目的, 到20世纪末, 我国苜蓿种植在133~200万 ha^[15].

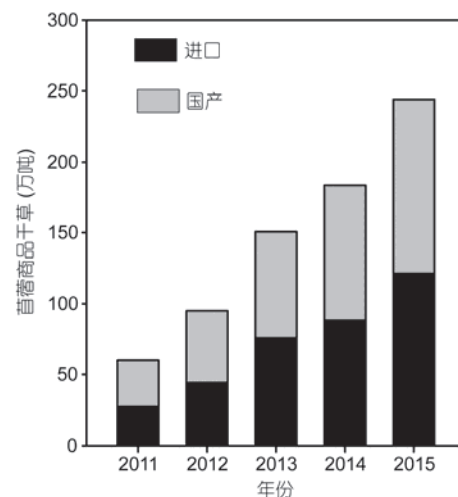


图2 我国商品苜蓿干草市场

Figure 2 Alfalfa hay market in China

在国家西部大开发工程的带动下, 退耕地多以个体农牧民的草地比重大, 当时我国苜蓿种植面积达到386.67万 ha (表1). 随着近年来我国城镇化发展, 劳动力进城造成农区劳动力不足, 一些不易耕作和管理的土地也种植苜蓿, 用于饲草或苜蓿种子生产^[17]. 尽管我国苜蓿种植面积近年来持续增加, 2013年种植面积增加到497万 ha, 而高品质规模化苜蓿种植面积仅20万 ha, 占4%^[10,18].

(iii) 收获加工技术落后. 受传统种植粮食作物观念影响, 大多数苜蓿种植者在苜蓿草田种植与管理上照搬农作物生产模式, 严重影响了我国苜蓿草的产量和品质^[15]. 作物的栽培以收获籽实为主要目标, 而牧草的栽培管理以收获地上营养体为主要目标, 因此播种技术、水肥管理、病虫害防治、收获技术等均存在不同, 甚至有些技术措施相反(表2). 例

表1 我国苜蓿种植与发展历程^{a)}

Table 1 Alfalfa planting and development in China^{a)}

苜蓿发展阶段	时间	起因	特点	面积
平衡稳定阶段	~1998	种植传统	(1) 未产业化; (2) 自种自用	133~200万 ha
急速发展阶段	1998~2004	西部大开发	(1) 退耕还草; (2) 生态工程; (3) 商品草	386.67万 ha (2004年)
低迷徘徊阶段	2004~2007	粮食补贴	改草种粮	259.5万 ha (2005年)
振兴上升阶段	2008~	三聚氰胺事件	(1) 产业化; (2) 政策支持	497万 ha (2013年)

a) 参考文献[15]整理

如,草产品收获田间损失率(20%)、贮藏损失率(15%)均远高于畜牧业发达国家(均低于5%)^[2].畜牧业发达国家草产品加工有成套的技术,包括干草、青贮饲料、草块、草粉、叶蛋白等,增加了科技附加值.我国多数还停留在原始的草捆阶段^[19].

2 高寒地区苜蓿人工草地种植

2.1 高寒地区发展苜蓿人工草地的意义

我国主要牧区多分布在高寒地区,对优质牧草的需求量较大.高寒地区占我国国土面积近1/3,包括内蒙古、新疆、青海、西藏等.草原面积比例大,高寒草原(22.4%)和高寒草甸(24.9%)面积占我国草地面积的近1/2 (47.3%)^[1].高寒地区无霜期短,年际变化大,地理位置偏僻,种植以收获籽粒为主的粮食作物

产量低、风险高.苜蓿草质优良,为各种家畜所喜食,而且苜蓿干草营养价值高,用来饲喂家畜可以代替粮食^[2].苜蓿的能量替代率为1.6:1,即1.6 kg苜蓿干草相当于1 kg的粮食.据资料显示,我国的粮食安全已变成饲料粮的安全,2014年我国饲料用粮消耗量占我国粮食总产量的40%^[5,20].因此,在我国高寒地区发展苜蓿人工草地,具有得天独厚的资源优势.

苜蓿为多年生豆科牧草,环境和生态意义大.高寒地区生长季相对较短,全年风沙较大.苜蓿在防风固沙、培肥土壤、保护和改良生态环境方面有着重要的作用.首先,苜蓿为多年生植物,地表植被盖度全年均较高、地表基本无裸露,可以起到防风固沙,保持水土作用.其次,生长季苜蓿地上植株高、分枝多、叶量大,不仅可以减少地表蒸发,还能控制雨水冲刷,防止水土流失.再次,苜蓿具有发达的根系,播

表2 作物籽实收获和牧草生产技术对比

Table 2 Production technologies for crops and forages

	作物	牧草
物种选择	(1) 越冬性(秋播); (2) 生育期长短; (3) 满足籽实生产和收获的气候条件	(1) 越冬性(一年生秋播和多年生); (2) 高的地上生物量(营养体); (3) 满足营养生长的气候条件
整地	标准整地	(1) 精细整地,牧草种子较小; (2) 免耕(特殊地区)
种子处理	(1) 包衣技术; (2) 菌根接种(豆科); (3) 快速整齐出苗	(1) 包衣技术; (2) 菌根接种(豆科); (3) 快速整齐出苗
播种方式	(1) 点播、条播; (2) 株行距较大,密度相对低; (3) 地膜等技术使用多	(1) 条播、撒播; (2) 株行距较小或无行距,密度相对高; (3) 地膜等技术使用少
苗期管理	(1) 间苗、定苗; (2) 考虑结实期株间竞争,保证未来最大籽实产量	(1) 快速地表郁闭度; (2) 保证地上最大光合效率
水肥管理	(1) 抑制过剩的营养生长; (2) 促进籽实发育和成熟高产; (3) 结实期追肥使用多	(1) 促进地上生物量高产; (2) 促进地下根系生长(多年生); (3) 刈割后需要追肥(多年生或多次刈割)
病虫害防治	(1) 正常的营养生长; (2) 减少籽实损失	保证地上地下生长免受损失
除草松土	(1) 杂草不影响营养生长和生殖生长; (2) 杂草不影响籽实收获	尽可能去除所有杂草
收获期	(1) 籽实成熟以后皆可; (2) 历时时期相对较长	(1) 地上生物量高产、高品质; (2) 历时时间较短(保证品质); (3) 兼顾越冬性(多年生)
收获物及加工	(1) 籽实为主; (2) 籽实产量高; (3) 籽实养分含量高; (4) 收获后达到贮藏条件即可	(1) 所有地上生物量(营养体); (2) 牧草养分含量高; (3) 收获后需要精细加工,降低养分损失
收获后管理	无	(1) 提高越冬性的措施(多年生); (2) 水肥管理,促进根系生长(多年生)

种当年入土可达1~2 m, 多而发达的侧根主要分布在浅层土壤中, 可以有效地固定土壤^[6]。另外, 苜蓿是优良的豆科牧草, 根瘤菌可以利用大气中的氮转化为植物所需的铵态氮, 增加土壤肥力水平。因此, 高寒地区苜蓿人工草地建植, 不仅能够促进牧区草牧业的快速发展, 也能保障高寒地区乃至全国的生态环境。

实践证明高寒地区可以有效种植苜蓿。通过多年的引种试验, 开展了一系列适合我国高寒地区的苜蓿人工草地种植(表3)^[21~39]。研究表明, 紫花苜蓿种植可推广到50°N, 年均温-2.2℃, 年降雨量300~400 mm的地区苜蓿生长良好^[40]。内蒙古的呼伦贝尔盟1998年开始对引进的紫花苜蓿品种开展小区实验^[40]。黄花苜蓿在呼伦贝尔市(53.4°N)可安全越冬, 亩产苜蓿干草400 kg^[32]。引进的品种越冬率随着生长年限增加而增加, 适应环境的能力增强^[37]。在海拔600~1500 m美国北加州的落基山脉高原上种植生产的苜蓿是质量最高的苜蓿草之一。加州大学苜蓿

草专家Steve指出高原苜蓿质量好与干爽的气候条件有关(<http://www.westernfarmpress.com/alfalfa/northern-california-alfalfa-yields-higher-quality-hay>)。高原夜间气温低, 苜蓿草茎秆长得更细、更短, 更高的草叶与草茎比例意味着更高质量的苜蓿草。早期引进的国外苜蓿品种, 因越冬问题曾经在阿鲁科尔沁旗、通辽、吉林和黑龙江等地区造成巨大损失。因此, 我国苜蓿育种多年来一直以抗旱、抗寒、耐盐碱和持久力为主要育种目标^[41]。先后培育出公农系列、东苜系列、草原系列和龙牧系列等耐寒、抗旱苜蓿品种。在西北主要育成品种有甘农、新牧等系列优良品种^[6]。近年来, 引进的俄罗斯杂花苜蓿在呼伦贝尔地区表现优异, 亩产干草300~400 kg^[32,33]。这些品种为我国高寒地区苜蓿人工草地建植提供了重要保障。

高寒地区自然条件恶劣、生态环境脆弱、长期的自由放牧导致天然草地退化。因此, 在该区域发展优质苜蓿人工草地可以减轻天然草地的放牧压力, 既

表3 我国高寒地区苜蓿引种试验品种^{a)}

Table 3 The alfalfa varieties for introduction in alpine regions in China^{a)}

引种地区	品种	试验年限	亩产(kg)	海拔(m)	纬度(°N)	年平均气温(℃)	最低气温(℃)	无霜期(d)	来源
巴音布鲁克	图牧1号	4	300	4100	43.5	-4.8	-47.0	120	邹莹 ^[21]
察右前旗	中苜1号	1	200	1270	41.2	4.5	-34.4	110	黄新善等人 ^[22]
大庆市	WL323	1	231	172	46.9	4.2	-39.2	143	石杰等人 ^[23]
鄂尔多斯市	阿尔冈金	2		1556	38.9	6.2	-35.0	130	于辉等人 ^[24]
甘南藏族自治州	GNKH-3	2	383	3050	35.6	2.6	-25.0	56	魏双霞 ^[25]
甘南藏族自治州	金皇后	2	267	2792	36.0	3.9	-25.0	88	祁娟等人 ^[26]
甘孜藏族自治州	美标403	3	900	3500	37.3	4.5	-25.6	100	张瑞珍等人 ^[27]
根河市	黄花苜蓿	2	560	1000	50.4	-4.0	-49.6	75	尤华林和王丽宏 ^[28]
海北藏族自治州	寒牧6号	2	741	3280	39.0	-0.6	-37.0	0	温小成和杨国柱 ^[29]
海拉尔区	BL203	1	309	700	49.2	-3.0	-48.0	95	金晓明等人 ^[30]
海晏县	甘农1号	6	738	4500	36.9	-0.3	-32.5	34	沈景林等人 ^[31]
呼伦贝尔市	黄花苜蓿	3	400	900	53.4	-2.3	-46.2	113	刘英俊等人 ^[32]
呼伦贝尔市	俄罗斯杂花苜蓿	6	350	700	49.3	-2.4	-48.2	100	吕绪清等人 ^[33]
佳木斯市	草原3号	2		111	46.5	3.0	-35.0	129	李如来等人 ^[34]
芒康县	爱菲尼特	2	835	4200	30.3	3.5	-21.0	90	张建华等人 ^[35]
天祝县	普拉蒂尼	1	750	2677	37.2	-0.1	-29.1	0	陈新辉等人 ^[36]
天祝县	大富豪	4	253	2677	37.2	-0.1	-29.1	0	姬万忠等人 ^[37]
天祝县	普拉蒂尼	3	941	2677	37.2	-0.1	-29.1	0	潘正武等人 ^[38]
夏河县	巨人201	3	200	3050	35.2	1.6	-29.8	0	曹国顺等人 ^[39]

a) 品种选择引种产量最高; 亩产选择最高产量, 文献中只有鲜草产量时, 干草产量根据鲜:干=4:1换算, 文献中均未给出鲜草和干草产量时, 空白表示; 无霜期中0表示无绝对无霜期

可以为牲畜提供优良的饲草,又可以使生态环境得到改善.

2.2 高寒地区种植苜蓿存在的问题

(i) 缺少高产苜蓿品种,未形成完善的高产优质苜蓿生产管理技术.截至2014年,我国已育成紫花苜蓿、黄花苜蓿和杂花苜蓿共72个.其中育成品种33个,引进品种17个,地方品种18个,野生栽培种4个^[13].但是我国高寒地区气候变异大,极端气象事件(如极寒天气)频发,目前的品种远不能满足生产的需求.引种和栽培实验均证明一些抗逆性强的苜蓿品种可以在我国高寒地区安全越冬、正常生长,但产量较低,干草亩产在200~400 kg (表3).在高寒地区优质苜蓿种植、抚育管理、收获加工技术方面仍然存在一些不足,严重制约着苜蓿人工草地的发展.

(ii) 越冬率制约高寒地区优质苜蓿生产.苜蓿是多年生牧草,保证其顺利越冬和返青是生产管理中非常重要的环节.我国北方的高寒地区冬季寒冷(极端低温)、大风、干燥少雪以及倒春寒(温度的骤升骤降)给苜蓿越冬带来极大的挑战.苜蓿不能越冬表现类型包括三个方面:(1) 风蚀作用导致苜蓿根颈生长点裸露干枯死亡;(2) 播种时间晚或灌溉不合理,导致苜蓿根系细弱、入土较浅,抗冻能力差,整个苜蓿根系受冻害死亡;(3) 苜蓿根颈部1 cm左右受倒春寒冻害后冻伤腐烂^[42].越冬失败既有环境、品种选择方面的原因,也有包括播种技术、播种密度、播期、施肥时期和施肥量、灌溉、刈割与留茬等管理方面的原因.我国北方,尤其是高纬度地区相对寒冷,晚霜较迟且早春气温变化剧烈,春季苜蓿返青生长不久后常会遇到0℃以下的低温而造成的霜冻伤害现象,称为倒春寒现象.早春短暂的气温回升(如3~7 d)会打破苜蓿的休眠,促进萌动和生长,导致苜蓿根颈中贮存的碳水化合物的利用增加,从而降低苜蓿的抗寒能力.气温急剧下降,处于萌动和刚萌发阶段的苜蓿造成细胞的受损冻伤,导致苜蓿死亡.当年春播且出苗的苜蓿抵御倒春寒危害的能力最差,上年秋播苜蓿倒春寒抵抗能力也很差.播种当年苜蓿根颈短而细,入土较浅,很容易冻死.中老年苜蓿根颈较长,入土较深,即便地表部分茎叶芽基被冻伤死亡后,其下的芽基还可萌生新芽.

(iii) 栽培模式单一,过分依赖少数品种.高寒地区无霜期短,年际变化大,当地农牧民根据传统作

物模式种植与管理苜蓿,模式单一,影响了苜蓿的正常生长,产量和质量均较低.例如,一些地区采用免耕模式种植管理苜蓿,造成了苜蓿根系难以深入较深土层,降低了苜蓿的抗寒抗旱性.照搬农作物栽培管理模式造成一些品种引种试验失败,从而失去一些适宜品种引种的机会.在当地相关农业监督与管理技术部门倡导下,多年前引进一些适宜当地的品种,连年种植,造成品种的退化,产量较低.

(iv) 苜蓿种植生态安全问题的思考.作为全世界种植面积和交易量最大的牧草,苜蓿品种选育、种植、管理、收获和加工已经形成了较为完备的技术体系.尽管目前生产上种植的苜蓿都是以人工选育的品种为主,但其近缘野生种在世界范围内广泛分布.在我国高寒地区,也分布着野生苜蓿,如我国野生黄花苜蓿在新疆和内蒙古分布十分广泛,常集中连片分布,是我国野生黄花苜蓿的主要地理分布区.黄花苜蓿的原变种(*M. falcata* var. *falcata*)在新疆、内蒙古中东部、黑龙江、辽宁等均有分布^[43].中国草地学科奠基人王栋1951年在内蒙古考察时发现了锡林郭勒草原上大面积分布的野生黄花苜蓿.我国高寒地区种植的国审黄花苜蓿品种“呼伦贝尔”黄花苜蓿是当地野生苜蓿30年的栽培驯化培育而成,“草原1号”和“草原2号”是内蒙古草原上野生黄花苜蓿与紫花苜蓿进行种间杂交育成.国内一些主要的新牧和甘农苜蓿品种均是由当地野生品种和紫花苜蓿杂交培育而成^[43].在振兴奶业计划的资助下,我国高寒地区已经大规模地种植苜蓿.但是由于气候恶劣,缺乏针对苜蓿种植、生产的专业田间技术体系,苜蓿产量、品质和效益均有待提高.如果把大量的现有种植收获籽实为主的农田种植苜蓿等牧草,是否会给这些地区带来生物入侵等问题?苜蓿较高的光合效率、生产力以及现有品种抗逆抗寒能力的提高,经过多年的种植和推广,能否对当地的生态系统产生一定的干扰机制?这种干扰对于草地生态系统的稳定与变化机制如何?这些都将是需要关注的科学问题.苜蓿种业和产业发达的美国、加拿大苜蓿种植主要集中在40°~55°N的地区,与我国高纬度地区45°~50°N一致,美国和加拿大的经验值得借鉴.同时,我们也应该考虑我国的国情和自然生态环境,在大力发展苜蓿产业的同时,开展相关的生态环境方面的研究.目前,我们已经建立了多点的模拟试验来评价和衡量高寒地区苜蓿人工草地种植对当地草地生态系统的影响.

3 我国高寒地区苜蓿生产关键技术

3.1 品种选择

优良品种是苜蓿产业化发展的物质基础,更是提高科技贡献率的关键体现。根据联合国粮食与农业组织和发达国家的科学评估,在影响农业生产的众多因素中,品种贡献率超过30%,品种改良作用居各项技术之首^[6]。不同苜蓿品种的抗寒性存在较大差异,欧洲、北美洲和亚洲各国均十分重视抗寒和超抗寒苜蓿品种,许多品种可以耐受-40℃左右的酷寒^[44,45]。高寒地区品种确定主要综合考虑以下4点。(1) 秋眠级。秋眠级描述苜蓿在秋季温度降低和日照缩短后的生长能力。寒冷地区主要选择秋眠级1~4的品种,国内推荐龙牧系列、图牧系列、新牧系列、工农系列、草原系列、新疆大叶苜蓿等,国外推荐俄罗斯杂花苜蓿等。(2) 越冬指数。越冬指数评价苜蓿安全越冬的能力,越冬指数由1级到6级越冬能力下降。高寒地区种植苜蓿应当选择越冬指数1~2级的品种。(3) 根系类型。苜蓿根系类型分轴根性(直根型)、侧根型(杂花苜蓿)和根蘖型。一般来说,根蘖型具匍匐根,母株可通过根蘖产生分枝,耐寒性强。也有试验表明,根系类型会随环境的改变而改变,如直根型工农1号、中苜1号,越冬性好于许多引进的根蘖型品种。(4) 其他抗逆性。根据种植地区土壤类型和环境类型,如土壤盐碱性、病虫害高发区等选择适宜抗性品种。在综合考虑以上4点的前提下,尽可能选择优质高产高抗性品种。高寒地区推荐工农1号、东苜1号、龙牧808、新牧3号、草原3号和俄罗斯杂花苜蓿等。

3.2 选地与整地

苜蓿种植选地应满足地势高、平坦、排水良好、土层深厚、中性或微碱性、富含钙质的沙壤土和壤土^[1]。苜蓿是深根植物,选择土层深厚的土地,能促进根系向下生长,促进持水性和抗旱能力。板结地、多年免耕地影响根系呼吸和水分的下渗,不利于根系的生长,因此不适合优质苜蓿种植。选择地势平坦的土地,不仅能保证良好排水,也是机械化作业的前提。苜蓿土壤地下水位应在1.5 m以下。土壤pH在6~8,最适宜pH为6.8~7.5。盐分超过0.3%时,严重影响种子发芽及幼苗生长^[44]。酸性土壤需至少提前一年施入石灰。前茬种植苜蓿的土地需进行轮作。苜蓿种植不能连作,要适当与一年生作物或者牧草轮作,

如燕麦(*Avena sativa* L.)等。轮作一方面可以更充分地利用土壤营养,另一方面,可以抑制多年生苜蓿土壤中的病原菌,打破土壤害虫与苜蓿的寄生关系,减轻害虫发生量。

整地是优质高产苜蓿种植中的关键因子之一。高寒地区冬季的风沙易造成水土流失,建议在播种当年的春夏整地,夏季整地有利于杂草的清除。首先,选定的土地需要深翻,一般大于30 cm为宜,为主根深入创造良好的土壤环境,有利于抗旱抗寒。其次,整地地表要平整,土粒细碎,且要压实保墒,为苜蓿种子快速整齐萌发创造条件^[45]。苜蓿种子小、芽顶土力弱、苗期生长缓慢,整地不细易造成缺苗、断条和草荒等。另外,整地时进行杂草防除及喷施除草剂,避免苜蓿种子萌发和幼苗期杂草的竞争^[45]。缺苗和出苗不整齐影响后期苜蓿生长,影响苜蓿产量和品质。

3.3 播种技术

播种时间决定着苜蓿的越冬情况。苜蓿的耐寒性与其越冬前根冠和根的发育状况密切相关,根冠越粗壮、根越深、贮藏的碳水化合物越多,苜蓿的耐寒性越强^[46]。播种期对苜蓿的生长发育影响很大。苜蓿生长期对温度非常敏感,最适宜的温度为25~30℃。播期越早(早春),生长期越长,根系入土越深,根颈越粗,可以贮存足够的碳水化合物以利于苜蓿越冬,但播期太早,高寒地区幼苗易遭受倒春寒危害^[47]。播期(秋季)太晚,8月份以后,高寒地区昼夜温差较大,夜间温度较低,幼苗植株基本上不生长。由于生长期短,植株根颈细嫩,根系入土较浅,木质化程度低,抗寒能力差。再者,播期晚导致苜蓿植株没有足够的生长期为根部合成和输送充足的贮藏性营养物质,冬季根贮营养物质含量较低,而且苜蓿没有足够的生长发育期实现横向膨胀和纵向收缩,无法充分退入土中。因此,高寒地区苜蓿播种期推荐晚春至初夏或早秋播种为宜。

播种方法对高寒地区苜蓿播种也有重要影响。高寒地区沙性土采用深开沟浅覆土技术,一方面浅覆土能够保证早期降水资源更好地分配到垄沟处,保证水分的供应。另一方面,垄沟深度5 cm,随着风力、降水等作用,垄沟逐渐填平,则苜蓿根冠的覆土深度增加,减少冬季冷风对苜蓿根冠的伤害,促进越冬的成功率。采用一年生短期生长的燕麦、大麦

(*Hordeum vulgare* L.)的牧草轮作方式也能提高高寒地区苜蓿的播种成功率和越冬率. 因一年生燕麦等幼苗抗寒性强、生长期短, 早春或秋季播一茬燕麦, 割后或来年在茬地里免耕播种苜蓿, 能起到挡风、减少地表沙尘移动以及冬季固定雨雪, 进而增加苜蓿的越冬性. 播后镇压技术在高寒地区对于幼苗的萌发和生长也有重要作用. 一方面, 镇压可以减少地表风沙等尘土的移动; 另一方面, 镇压可以减少风蚀, 保水保墒.

多品种栽培技术. 采用适宜当地气候的多个苜蓿品种的栽培, 可以发挥品种间的优势互补, 增加生长季光能利用率和光合效率, 高效利用土壤中的养分和水分, 降低病虫害的发病率, 提高对异常气候的抗性, 保证增产和稳产.

3.4 密植技术

合理的种植密度是确保苜蓿获得高产的重要条件. 密度太大, 不利于植株间对光、热、水、肥等因素的竞争. 密度过小, 竞争减少, 单位空间植株数量少, 影响生物产量^[48,49]. 合理密植主要通过以下3点提高苜蓿的产量和质量. (1) 合理密植能够使群体叶面积尽快达到最适宜程度, 提高苗期盖度, 尽快封陇. 叶面积的增多促进了光合效率, 促进了地上生物量的快速生长^[49]. 快速封陇有助于抑制杂草的萌发和生长, 同时也能保证地表水分的蒸发, 减少风沙扬尘等^[50]. (2) 生长期由于个体间对光的竞争, 导致更多叶片的生长, 植株向更高的空间生长. 苜蓿叶片中蛋白质含量远高于茎, 叶片数目和叶面积的增加有利于改善品质, 且叶面积增加光合作用, 促进地上生物量的积累^[49]. (3) 密植导致个体植株对地下养分和水的竞争, 促使根系往深处生长, 根深有助于高寒地区苜蓿安全越冬. 高寒地区推荐苜蓿种植行距15~20 cm.

3.5 根瘤菌接种技术

根瘤菌是与豆科植物共生的革兰氏阴性菌, 在常温下, 能够把从空气游离氮转化成植物直接利用的氮素. 紫花苜蓿在播种前应进行根瘤菌接种, 特别是未种过苜蓿的田地更需要接种. 接种根瘤菌能够保证形成足够的根瘤, 有助于实现苗齐、苗壮和提高苜蓿的固氮量.

选择适宜的根瘤菌剂. 影响根瘤菌共生固氮效率的主要因素包括根瘤菌种类、植物基因型、土壤因

素、宿主植物、固氮酶基因等^[51]. 选择菌剂时需综合考虑高的固氮能力, 能与相应宿主迅速形成有效根瘤、适应各种田间条件、迅速有效的结瘤能力, 与土壤中土著根瘤菌竞争结瘤的能力, 具有在无宿主条件下较强的存活能力, 在载体基质中的生长能力, 在载体里和种子上的存活能力; 具有对酸碱、化肥和农药的耐受能力; 具有相对的遗传稳定性等^[52]. 许多根瘤菌接种效果不佳, 主要原因是筛选获得的根瘤菌抗逆性不强, 接种到土壤中后存活率不高; 大量适应土壤环境的土著根瘤菌与接种根瘤菌互相竞争, 土著根瘤菌在大多数情况下明显占优势, 可往往其结瘤固氮能力不强^[52]. 在高寒地区苜蓿种植选择根瘤菌时, 应考虑根瘤菌的极端低温适应性.

根瘤菌剂接种方法主要包括拌种和丸衣接种技术. 拌种包括粉状根瘤菌剂加水(可加黏合剂)与种子充分拌匀, 在菌剂干燥前播种. 丸衣接种即将水溶性的或易分解的黏着剂和根瘤菌剂调匀, 再与种子拌匀, 然后加固体丸衣材料拌至每粒种子都被固体丸衣材料包裹, 晾干. 将根瘤菌剂接种在丸衣里可延长菌的存活时间, 并减轻土壤干旱、盐分、酸度等不利因素对根瘤菌的危害, 有利于根瘤菌的侵入和结瘤. 高寒地区推荐选择根瘤菌剂丸衣化的苜蓿种子.

根瘤菌接种促进植株对磷的吸收利用. 在有效磷缺乏的土壤上, 豆科植物接种根瘤菌通过多种解磷机制, 促进植株对磷的吸收利用, 增加植株磷含量, 保证植物在低有效磷土壤上正常生长^[53]. 马其东等人^[54]研究指出根系发育能力越强, 接种效果越明显, 结瘤量与根系发育能力密切相关. 接种根瘤菌不仅能提高苜蓿的产量和品质, 还能起到增加土壤有机质含量, 改良土壤结构和提高土壤肥力等作用.

3.6 水肥管理技术

合理施肥是苜蓿优质、高产、稳产、优质的关键. 施肥不仅能改善苜蓿的生长状况, 还能增强苜蓿对逆境胁迫的抗性. 苜蓿的施肥主要包括磷钾肥和有机肥. 磷肥不易移动, 需要提前施入. 钾肥最好定期施用.

苜蓿的生长需要充足的磷肥供应, 缺磷不仅限制植株的生长, 还会影响苜蓿根瘤氮的固定与吸收. 苜蓿播种时, 适当的磷肥作为基肥, 能够显著改善苜蓿的生长, 促进分枝, 改善根系生长. 一般每亩有效磷供应在15 kg时, 根系结瘤数和根瘤的固氮效率高,

苜蓿生长良好。春季和秋季补施磷肥也很关键。秋季补施磷肥处理能够提高苜蓿结瘤率,促进刈割后苜蓿的再生长,增加植株磷含量,提高苜蓿抗寒能力,提高越冬率^[55]。高寒地区推荐播种时作为基肥施入,施入量每亩过磷酸钙100~150 kg。

钾肥既是苜蓿高产稳产的关键因素,又能提高植株抗寒性。苜蓿是典型的喜钾植物,钾能增加根长和根重,使苜蓿更大限度地利用土壤中的营养和水分,促进生长。苜蓿每生产1 t干物质约要带走相当于25 kg氧化钾(K_2O)。苜蓿体内的钾含量可一定程度上反映植株的抗寒性。充足的磷和钾等矿质养分供应可以促进苜蓿严冬之前的正常生长发育和根贮营养物质积累,提高根部抗逆元素钾的含量。充足的磷钾肥还可以降低苜蓿根腐病的发病率和镰刀菌的侵入率,而根腐病的发生会降低苜蓿的越冬性^[45]。高寒地区钾肥与磷肥播种时一起施用,使用量每亩50 kg。

此外,有机肥施用对高寒地区苜蓿优质高产也有重要作用。增施有机肥既能增加土壤养分,又可提高地表覆盖度,改善土壤的温度、水分环境,提高苜蓿的越冬率。高寒地区厩肥刈割后施入,每亩施肥量1000~2000 kg。

实际生产中,种植者施用氮肥过多,对苜蓿的越冬产生不利的影响。一方面,过多施用氮肥,会造成苜蓿的徒长,消耗过多的能量,消耗根系中贮存的养分,降低根系的抗寒性。另一方面,过多氮肥的施用,不利于根瘤的形成,降低苜蓿根部自身的固氮能力,相对减弱苜蓿的越冬性。因此,在生产中要严格控制氮肥的施用量。高寒地区苜蓿播种时推荐每亩施用纯氮2~3 kg,建植成功后,少施或者不施氮肥。

苜蓿浇水遵循深灌、少浇的原则。幼苗发育生长期深灌有助于苜蓿形成发达的根系,提高抗寒抗旱能力。冬灌可以增加土壤水分,提高土壤保温能力,减缓地温下降,利于苜蓿抵御严寒,而且灌水有助于土壤冻结、增强土壤抗风蚀能力,从而利于苜蓿安全越冬。冬灌时选择灌水量大的漫灌,能够提高春季土壤墒情,减小倒春寒的影响,促进苜蓿返青。如果冬灌后气温没有迅速下降、导致地表变干,需要在喷灌设备上冻前及时补充灌溉。一般来说,黏性土壤越冬前深灌一次即可,沙性土壤一般需要补充灌溉。严重干旱会导致位于地表附近的苜蓿根颈脱水死亡,致使苜蓿失去再生能力,不能越冬返青。春季浇返青水宜晚不宜早,一定要浇透。春季降温期间浇水会加剧

苜蓿的冻害程度。春季连续高温导致苜蓿根颈部失水萎蔫,此时浇水根系会迅速吸水膨胀,如果夜间温度骤降至零度以下,会造成根系膨胀部分不可逆冻伤,腐烂而死。苜蓿年均冬季需水量为68 mm^[56]。海拉尔苜蓿引种试验证明积雪覆盖明显提高紫花苜蓿的越冬率,有利于返青后的良好生长。而未下雪的年份导致苜蓿大面积受冻,未返青^[40]。封冻前灌水处理显著提高了阿尔冈金苜蓿的越冬成功率^[24],冬灌显著提高了赤峰地区苜蓿的越冬率^[56]。灌溉方式对苜蓿抗寒性也有显著影响。科尔沁右翼前旗的研究表明,封冻前漫灌比喷灌苜蓿越冬率高,倒春寒影响小^[40]。有灌溉条件的高寒地区,推荐苗期、生长期和封冻期3次浇水,封冻水要深灌。生长期结合自然降雨,保证苜蓿生长不受旱,保证高的光合效率。

3.7 刈割技术

刈割技术主要包括刈割时间和留茬高度两方面。刈割时期影响苜蓿生长期和根系对营养物质的存贮准备。根贮营养物质是苜蓿越冬期间维持生命和早春再度发育的物质和能量基础。冬季根贮营养物质含量越高,抗寒能力就越强,越有利于越冬返青^[56]。留茬高度影响苜蓿地上的高度和盖度,进而影响到地表以及土壤环境,如降雪的分配、风沙、温度和水分等。这些对苜蓿越冬和翌年春天再返青生长都有重要的作用。

刈割时期对苜蓿冬季根贮营养物质含量具有重要影响。这里的刈割时期主要是指封冻前的末次刈割时间。初霜日指秋冬季节地面最低温度 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 的最初日期,生长季末最低气温第一次降至 -4°C 以下的日期成为杀霜日^[46]。初霜日前4~6周或杀霜日前6周刈割,给苜蓿留下足够的越冬准备时间,使根部能够获得充足的贮藏性营养物质,可以保障苜蓿冬季根贮营养物质含量处于较高水平,对越冬和翌年春季萌生有良好的作用^[57]。如果在越冬准备期前苜蓿已经比较高了,也可以选择等霜冻后刈割,霜冻后刈割苜蓿根系内贮藏的越冬能量会达到最高,存活率也高。

留茬高度选择。最后一次刈割高度不仅直接影响再生草的生长速度,而且留茬高度与越冬率成正比。留茬过高会影响前茬草的产量,高寒地区留茬高度在8~10 cm为宜。留茬高度影响苜蓿越冬性主要有3个方面。(1) 高的留茬可以更好地保护根冠,有助于来年返青,而低的留茬尤其是齐地面刈割对根冠保

护不利,导致寒冷、干旱和冬春温度变化剧烈时,根冠丧失再生能力。(2)高的留茬能够保证地表上面的植被高度,减少风蚀对地表的影响,更好地保持水土,有助于成功越冬。(3)高的留茬以及植株高度,可以固留冬季积雪。冬季积雪可阻隔地上空气与土壤直接接触,抵御冬季气温改变,同时雪层融化增加土壤含水量,影响土壤温度、肥力等,提供了理化性质稳定的土壤环境,促进苜蓿根颈、主根的横向生长及根颈入土深度的增加,间接对牧草越冬产生影响^[34]。积雪覆盖保证了土壤水分,有利于苜蓿的春季返青。高寒地区推荐一年收割一茬,在8月中旬为宜,留茬高度10 cm。

4 展望

近年来,随着苜蓿草产业的快速发展,我国苜蓿种植在产量和品质上均取得了很大的成效。苜蓿种植面积和优质苜蓿草田种植面积均连年扩大,优质苜蓿草产量提高。国际上先进的苜蓿种植、生产、加工等技术引入国内,出现了一批从事苜蓿草生产、加工和销售大型的商业苜蓿草公司。尽管如此,我国苜

蓿人工草地高产建植技术研究仍然需要关注以下3个方面的内容。(1)国内商用苜蓿种子产量和质量水平亟需提升。我国育成的耐寒耐旱的苜蓿品种有十几个,种子本身具有竞争优势。种子的产量,收获后的清选、加工、包装等过程缺少规范的集约化加工技术,限制了与苜蓿发达国家进口的经过包衣等加工的苜蓿种子的市场竞争,制约着国产苜蓿品种的推广。(2)苜蓿播期的选择。目前多是根据传统或多年来积累的经验选择苜蓿的播种时期,尤其是在高寒地区,早春种植倒春寒,晚秋种植越冬难等问题一直制约着苜蓿的播期选择。苜蓿播期对越冬性及以后苜蓿产量的影响缺少定量的数据支撑。(3)微肥的合理利用技术。微肥的利用在国外发达国家应用广泛,效果较好。国内也有硼、锌、钙、锰、硒等微肥对苜蓿产量和品质的研究报道,缺少后续大面积苜蓿人工草地种植时的推广应用。例如,硼肥在苜蓿根系抗寒方面有显著的作用,这一技术在高寒地区的推广应用很少,造成了试验结果和生产技术的脱节。微肥和根瘤菌配比施入技术,在苜蓿种植生产中取得了较好的实验结果,在田间技术的推广上未见应用。

参考文献

- Shen H H, Zhu Y K, Zhao X, et al. Analysis of current grassland resources in China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 139–154 [沈海花, 朱言坤, 赵霞, 等. 中国草地资源的现状分析. 科学通报, 2016, 61: 139–154]
- Li L H, Lu P, Gu X Y, et al. Principles and paradigms for developing artificial pastures (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 193–200 [李凌浩, 路鹏, 顾雪莹, 等. 我国人工草地建设原理与范式. 科学通报, 2016, 61: 193–200]
- Hong F Z, Wang Y S. The strategical thinking of grassland agriculture in southern China (in Chinese). *Chin J Grassland*, 2006, 28: 71–75, 78 [洪绶曾, 王元素. 中国南方人工草地畜牧业回顾与思考. 中国草地学报, 2006, 28: 71–75, 78]
- Putnam D. Envisioning the future of alfalfa in the United States. In: *The Fifth China Alfalfa Development Conference*. Beijing: China Animal Agriculture Association, 2013
- Fang J Y, Bai Y F, Li L H, et al. Scientific basis and practical ways for sustainable development of China's pasture regions (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 155–164 [方精云, 白永飞, 李凌浩, 等. 我国草原牧区可持续发展的科学基础与实践. 科学通报, 2016, 61: 155–164]
- Yang Q C, Kang J M, Zhang T J, et al. Distribution, breeding and utilization of alfalfa germplasm resources (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 261–270 [杨青川, 康俊梅, 张铁军, 等. 苜蓿种质资源的分布、育种与利用. 科学通报, 2016, 61: 261–270]
- Zhang Y J. New challenges for the pasture industry in China (in Chinese). *Agric Knowl*, 2013, 12: 16 [张英俊. 我国牧草产业面临新的挑战. 农业知识, 2013, 12: 16]
- Zhang X S, Tang H P, Dong X B, et al. The dilemma of steppe and its transformation in China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 165–177 [张新时, 唐海萍, 董孝斌, 等. 中国草原的困境及其转型. 科学通报, 2016, 61: 165–177]
- Jiang Y Z, Zhang J B, Nan Z B, et al. Competitiveness analysis of alfalfa international trade in China (in Chinese). *Pratacul Sci*, 2016, 33: 322–329 [江影舟, 张洁冰, 南志标, 等. 中国苜蓿国际贸易竞争力分析. 草业科学, 2016, 33: 322–329]
- The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Development planning of herbivore husbandry in China (2016–2020) [中华人民共和国农业部. 全国草食畜牧业发展规划(2016–2020)]
- Work Bulletin of National Forage Industry Technology System. 2016, 1: 9–13 [国家牧草产业技术体系工作简报. 2016, 1: 9–13]
- Sun Q Z, Yu Z, Xu C C. Urgency of further development alfalfa industry in China (in Chinese). *Pratacul Sci*, 2012, 29: 314–319 [孙启忠, 玉柱, 徐春城. 我国苜蓿产业亟待振兴. 草业科学, 2012, 29: 314–319]

- 13 Ni C S, Yang Z M. Advance in the study of symbiotic nitrogen fixation of alfalfa rhizobium and comment on it (in Chinese). *Feed Res*, 2015, 39: 63–67 [倪长生, 杨苗萌. 中美苜蓿产业对比分析. 饲料研究, 2015, 39: 63–67]
- 14 Xie K Y, He F, Li X L, et al. Analysis of soil and plant nutrients in alfalfa fields in China (in Chinese). *Acta Pratacul Sin*, 2016, 25: 202–214 [谢开云, 何峰, 李向林, 等. 我国紫花苜蓿主产田土壤养分和植物养分调查分析. 草业学报, 2016, 25: 202–214]
- 15 Lu X S. Problems with the development of alfalfa industry in China (in Chinese). *Chin J Grassland*, 2013, 35: 1–5 [卢欣石. 中国苜蓿产业发展问题. 中国草地学报, 2013, 35: 1–5]
- 16 Liu Y F, Wang M L, Shi Z Z, et al. Analysis of technical efficiency and technical progress contribution of alfalfa production (in Chinese). *Pratacul Sci*, 2014, 31: 1990–1997 [刘玉凤, 王明利, 石自忠, 等. 我国苜蓿产业技术效率及科技进步贡献分析. 草业科学, 2014, 31: 1990–1997]
- 17 Mao P S, Hou L Y, Wang H, et al. The seed production of alfalfa in Gansu Province (in Chinese). *China Dairy Cattle*, 2015, 33: 12–15 [毛培胜, 侯龙鱼, 汪辉, 等. 甘肃省苜蓿种子生产现状分析与展望. 中国奶牛, 2015, 33: 12–15]
- 18 Li X Y, Luo J, Tian S X, et al. Analysis of the overall situation of alfalfa production in China (in Chinese). *China Dairy Cattle*, 2015, 33: 58–64 [李新一, 罗峻, 田双喜, 等. 我国苜蓿总体形势分析. 中国奶牛, 2015, 33: 58–64]
- 19 Huang J H, Xue J G, Zheng Y H, et al. Principles of modern forage products processing and the technology development (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 213–223 [黄建辉, 薛建国, 郑延海, 等. 现代草产品加工原理与技术发展. 科学通报, 2016, 61: 213–223]
- 20 Ren J Z, Xu G, Li X L, et al. Trajectory and prospect of China's prataculture (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 178–192 [任继周, 胥刚, 李向林, 等. 中国草业科学的发展轨迹与展望. 科学通报, 2016, 61: 178–192]
- 21 Zou Y. Successful introduction of alfalfa in alpine region (in Chinese). *Chin J Animal Husbandry Veter Med*, 1998, 8: 5 [邹莹. 高寒地区引种紫花苜蓿成功. 畜牧兽医科技信息, 1998, 8: 5]
- 22 Huang X S, Zhang D H, Liu X X. Introduction experiment of alfalfa in alpine and arid regions (in Chinese). *Grassland China*, 2002, 24: 70–72 [黄新善, 张东鸿, 刘晓霞, 等. 高寒干旱地区紫花苜蓿引种试验. 中国草地, 2002, 24: 70–72]
- 23 Shi J, Gao Y, Yin Y H, et al. Study on introduction of alfalfa varieties in alpine and saline-alkaline regions (in Chinese). *J Anhui Agric Sci*, 2012, 40: 9274–9275 [石杰, 高宇, 阴玉华, 等. 高寒盐碱地区紫花苜蓿引种研究. 安徽农业科学, 2012, 40: 9274–9275]
- 24 Yu H, Liu H Q, Wang J. Effects of cover and irrigation on winter surviving rate, soil temperature and soil moisture of Algonquin alfalfa (in Chinese). *Chin J Grassland*, 2015, 37: 107–111 [于辉, 刘惠青, 王静. 灌水、覆盖对阿尔冈金苜蓿越冬率及田间土壤温湿度的影响. 中国草地学报, 2015, 37: 107–111]
- 25 Wei S X. Evaluation on adaptability and production performance of 3 cold resistance strains of alfalfa in Gannan cold area (in Chinese). Master Dissertation. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2016 [魏双霞. 3个抗寒苜蓿新品系在甘南高寒地区的适应性及生产性能评价. 硕士学位论文. 兰州: 甘肃农业大学, 2016]
- 26 Qi J, Shi S L, Yao T, et al. Effects of combined application of phosphate and microbial fertilizer on soil fertility and alfalfa growth in cold and arid regions (in Chinese). *Grassland Turf*, 2013, 33: 48–53 [祁娟, 师尚礼, 姚拓, 等. 复合菌肥与化肥配施对寒旱区苜蓿生长特性及土壤养分的影响. 草原与草坪, 2013, 33: 48–53]
- 27 Zhang R Z, Zhang X Y, He G W, et al. Varietal selection of alfalfa introduced to the alpine pastoral areas in Sichuan Province (in Chinese). *Pratacul Sci*, 2006, 23: 43–45 [张瑞珍, 张新跃, 何光武, 等. 四川高寒牧区紫花苜蓿引进品种的筛选. 草业科学, 2006, 23: 43–45]
- 28 You H L, Wang L H. Study on introduction of sickle alfalfa in alpine regions of Genhe city (in Chinese). *Inner Mong Pratacul*, 2008, 20: 21–22 [尤华林, 王丽宏. 根河市高寒地区引种呼伦贝尔黄花苜蓿栽培实验报告. 内蒙古草业, 2008, 20: 21–22]
- 29 Wen X C, Yang G Z. Growth characteristics and nutrient contents in new alfalfa varieties of Hanmu (in Chinese). *Heilongjiang Animal Sci Veter Med*, 2015, 9: 141–144 [温小成, 杨国柱. 寒牧系列苜蓿新品系牧草生长特性与营养成分分析. 黑龙江畜牧兽医, 2015, 9: 141–144]
- 30 Jin X M, Tuo Y, He Y. Selection of different alfalfa varieties in alpine and arid regions (in Chinese). *J Hulunbeier Coll*, 2010, 18: 89–91 [金晓明, 托娅, 贺宇. 高寒干旱地区不同品种苜蓿的筛选. 呼伦贝尔学院学报, 2010, 18: 89–91]
- 31 Shen J L, Zhang J H, Tan G, et al. Studies on screening and productiveness of fine forages in alpine region (in Chinese). *Pratacul Sci*, 2000, 17: 18–21 [沈景林, 张娟华, 谭刚, 等. 高寒地区优良牧草的筛选及生产性能研究. 草业科学, 2000, 17: 18–21]
- 32 Liu Y J, You J C, Zhang M, et al. Suitable alfalfa varieties in Hulunbuir alpine region (in Chinese). *Grassland Pratacul*, 2015, 27: 49–52 [刘英俊, 尤金成, 张明, 等. 适宜呼伦贝尔高寒地区大面积种植的苜蓿品种. 草原与草业, 2015, 27: 49–52]
- 33 Lü X Q, Lü X L, Yiru G, et al. Preliminary study on the introduction and cultivation of Russian variegated alfalfa (in Chinese). *Grassland Turf*, 2008, 28: 52–55 [吕绪清, 吕新龙, 义如格勒图, 等. 俄罗斯杂花苜蓿引种栽培实验初报. 草原与草坪, 2008, 28: 52–55]
- 34 Li R L, Shen X H, Jiang C, et al. Effects of snow cover on alfalfa over-wintering and turning green (in Chinese). *Chin J Grassland*, 2016, 38: 1–11 [李如来, 申晓慧, 姜成, 等. 积雪覆盖对苜蓿越冬及返青生长的影响. 中国草地学报, 2016, 38: 1–11]
- 35 Zhang J H, Han Q F, Jia Z K, et al. Comparative study on growth characteristics of six alfalfa varieties at different altitudes (in Chinese). *J Anhui Agric Sci*, 2007, 35: 4792–4793 [张建华, 韩清芳, 贾志宽, 等. 不同海拔条件下6种紫花苜蓿品种的生长特性比较研究. 安徽农业科学, 2007, 35: 4792–4793]

- 36 Chen X H, Fu X N, Pan Z W, et al. Multiple analysis of relationship of agronomic traits and yield formation in *Medicago Sativa* L. in alpine area (in Chinese). J Animal Sci Veter Med, 2014, 33: 18–23 [陈新辉, 富新年, 潘正武, 等. 高寒地区紫花苜蓿农艺性状与产量形成关系的多重比较. 畜牧兽医杂志, 2014, 33: 18–23]
- 37 Ji W Z, Zhao X, Liu H X. Suitability of several alfalfa varieties to alpine regions in the Qinghai-Tibetan Plateau (in Chinese). Pratacul Sci, 2012, 29: 1137–1141 [姬万忠, 赵旭, 刘慧霞. 不同紫花苜蓿品种在青藏高原高寒地区的适应性. 草业科学, 2012, 29: 1137–1141]
- 38 Pan Z W, Fu X N, Zhang Q R, et al. Adaption of *Medicago sativa* to the alpine pastoral area in Tianzhu County (in Chinese). Pratacul Sci, 2013, 30: 1589–1593 [潘正武, 富新年, 张起荣, 等. 天祝高寒地区紫花苜蓿引种试验. 草业科学, 2013, 30: 1589–1593]
- 39 Cao G S, Ma L X, Xia Y. Adaption of four alfalfa varieties to the alpine pastoral area in Xiahe county, Gansu Province (in Chinese). Pratacul Sci, 2012, 29: 636–639 [曹国顺, 马隆喜, 夏燕. 甘肃夏河高寒牧区紫花苜蓿引种试验. 草业科学, 2012, 29: 636–639]
- 40 Sun Q Z, Wang Y Q, Hou X Y. Alfalfa winter survival research summary (in Chinese). Pratacul Sci, 2004, 21: 21–25 [孙启忠, 王育青, 侯向阳. 紫花苜蓿越冬性研究概述. 草业科学, 2004, 21: 21–25]
- 41 Shi S L, Nan L L, Guo Q E. Achievements and prospect of alfalfa breeding in China (in Chinese). J Plant Genet Res, 2010, 11: 46–51 [师尚礼, 南丽丽, 郭全恩. 中国苜蓿育种取得的成就及展望. 植物遗传资源学报, 2010, 11: 46–51]
- 42 Zhang C Z, Gao M W. A survey on over-winter rate of alfalfa crop in Aluhoeqin Banner (in Chinese). Grassland Pratacul, 2014, 26: 28–29 [张彩枝, 高明文. 阿鲁科尔沁旗牧草地苜蓿越冬情况调查与分析. 草原与草业, 2014, 26: 28–29]
- 43 Wang J J. Studies on wild germplasm resources of sickle alfalfa in China (in Chinese). Doctor Dissertation. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008 [王俊杰. 中国黄花苜蓿野生种质资源研究. 博士学位论文. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008]
- 44 Hong F Z. Alfalfa Science (in Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2009 [洪绶曾. 苜蓿科学. 北京: 中国农业出版社, 2009]
- 45 Yang Q C. Guide for Alfalfa Planting Zone and Cultivar (in Chinese). Beijing: China Agricultural University Press, 2012 [杨青川. 苜蓿种植区划及品种指南. 北京: 中国农业大学出版社, 2012]
- 46 Fang Q E. Study on the rules of alfalfa crown bud developing into shoot and its winter hardiness in the state of dormancy (in Chinese). Doctor Dissertation. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2016 [方强恩. 紫花苜蓿根颈芽发育成枝及越冬休眠特性研究. 博士学位论文. 兰州: 甘肃农业大学, 2016]
- 47 Zeng Q F, Sun Z M, Jia Z K, et al. Effects of sowing dates on alfalfa productivity and winter ability (in Chinese). Acta Botan Boreali-Occidentalia Sin, 2005, 25: 1007–1011 [曾庆飞, 孙兆敏, 贾志宽, 等. 不同播期对紫花苜蓿生长性状及越冬性的影响研究. 西北植物学报, 2005, 25: 1007–1011]
- 48 Mu H B, Hou X Y, Mi F G. Analysis of growing conditions and economic benefits of alfalfa planted in different densities (in Chinese). China Dairy Cattle, 2008, 26: 16–18 [穆怀彬, 侯向阳, 米富贵. 苜蓿不同密度种植生长状况及经济效益分析. 中国奶牛, 2008, 26: 16–18]
- 49 Guan J W, Ji M F, Wang Z Q, et al. The research of growth curve for monoculture and mixture planting crops grown under different density conditions (in Chinese). Pratacul Sci, 2015, 32: 1243–1251 [关佳威, 姬明飞, 王志强, 等. 不同种植密度条件下单混种作物的生长曲线. 草业科学, 2015, 32: 1243–1251]
- 50 Wang Z. The effects of plant densities on the development *Medicago varia* Martin. Cv. Caoyuan No.3 (in Chinese). Master Dissertation. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008 [王钊. 种植密度对草原3号杂花苜蓿生长发育的影响. 硕士学位论文. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008]
- 51 Shi S L, Liu J R, Zhang B, et al. Stress-tolerance evaluation of alfalfa nodule bacteria in the cold and drought regions of Gansu Province (in Chinese). Acta Agrest Sin, 2007, 15: 1–6 [师尚礼, 刘建荣, 张勃, 等. 甘肃寒旱区苜蓿根瘤菌抗逆性评价. 草地学报, 2007, 15: 1–6]
- 52 Shi S L. Advance in the study of symbiotic nitrogen fixation of alfalfa rhizobium and comment on it (in Chinese). Grassland China, 2005, 27: 63–68 [师尚礼. 苜蓿根瘤菌固氮研究进展及浅评. 中国草地, 2005, 27: 63–68]
- 53 Liu L S, Wang Y X, Guo L, et al. Utilization of different forms of phosphorus by *Sinorhizobium meliloti* (in Chinese). Acta Pratacul Sci, 2015, 24: 60–67 [刘卢生, 王永雄, 郭蕾, 等. 苜蓿根瘤菌对不同形态磷利用效率的研究. 草业学报, 2015, 24: 60–67]
- 54 Ma Q D, Liu Z X, Hong F Z, et al. Effects of inoculating rhizobium to alfalfa cultivars with different levels of root regeneration ability (in Chinese). Acta Pratacul Sci, 1999, 8: 36–45 [马其东, 刘自学, 洪绶曾, 等. 不同根系发育能力的苜蓿品种接种根瘤菌的效果. 草业学报, 1999, 8: 36–45]
- 55 Zhu G S. Effects of fertilization on hay yield of overwintering Alfalfa (in Chinese). Modernizing Agric, 2006, 28: 13 [朱广石. 施肥对越冬之星苜蓿干草产量的影响. 现代化农业, 2006, 28: 13]
- 56 Sun H R, Wu R X, Li P H, et al. The key reason of success or failure of overwintering and reviving of alfalfa in China forage capital (in Chinese). China Dairy Cattle, 2015, 33: 58–64 [孙洪仁, 武瑞鑫, 李品红, 等. 中国草都紫花苜蓿越冬返青成败的关键原因. 中国奶牛, 2015, 33: 58–64]
- 57 Wang J M, Li Y Q, Zhang D M, et al. Effect of cutting alternation on alfalfa forage yield, quality and over-wintering rate (in Chinese). J Agric Univ Hebei, 2006, 29: 86–90 [王金梅, 李运起, 张凤明, 等. 刈割间隔时间对苜蓿产量、品质及越冬率的影响. 河北农业大学学报, 2006, 29: 86–90]

Summary for “高寒地区苜蓿人工草地建植技术”

Establishment and management of alfalfa pasture in cold regions of China

Wenhao Zhang^{1,2,3*}, Longyu Hou¹, Jie Yang^{1,2}, Shihuan Song^{1,3}, Xiaotao Mao¹, Qiangqiang Zhang⁴, Wenming Bai^{1,3}, Qingmin Pan^{1,3} & Qingping Zhou^{2,5}

¹ State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China;

² College of Life Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ Inner Mongolia Research Center for Prataculture, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China;

⁴ Institute of Animal Sciences, the Ninth Division of Xinjiang Production and Construction Corps, Emin 834601, China;

⁵ Institute of Qinghai-Tibetan Plateau, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China

* Corresponding author, E-mail: whzhang@ibcas.ac.cn

Grasslands occur naturally in cold regions in China, and are the traditional animal husbandry base. Natural grasslands have degraded severely due mainly to heavy use and global climate change, distinguished with low productivity and poor ecological function. The small scales and low-industrialization levels of alfalfa (*Medicago sativa* L.) pasture are bottlenecks for development of modern animal husbandry in China. Therefore, forage production from natural grasslands cannot fully meet the demands for animal husbandry. Development of high-yield alfalfa pasture is an effective way to solve these problems. In this review, we systematically analyzed both domestic and international markets for alfalfa. Currently, alfalfa hay production in China can only supply less than 50% of total alfalfa demands, and more than 50% of alfalfa hay has to be imported from overseas countries, mainly from USA. On the one hand, the lack of forage supply greatly restricts development of animal husbandry in the alpine regions of China, which is a traditional base of animal husbandry in China. On the other hand, there are large areas of lands that can be used to develop alfalfa pasture in these regions. As a key component of “Grass-based Animal Husbandry”, establishment of alfalfa pasture with high yield and quality as well as high resource efficiency is of importance for the successful development of “Grass-based Animal Husbandry” in China. The development of large scale of alfalfa pasture in the alpine regions is hindered by the lack of alfalfa varieties adapted to the alpine regions and poor alfalfa establishment and management technologies. In practice, the management regimes of crops are often copied to manage alfalfa pasture. However, the crop and pasture systems differ markedly. For example, crops and alfalfa are used for harvesting grains and above-ground biomass, respectively. Moreover, crops are often annual, while alfalfa is perennial. To solve these problems, we developed comprehensive technologies in alfalfa pasture in the alpine regions. More specifically, we selected several elite alfalfa varieties that exhibited high yield and were capable of surviving the cold winters. We further developed planting methodologies that allowed for the rapid establishment of seedlings, facilitation of leaf growth, and minimizing weeds and water evaporation. Our results showed that production of alfalfa hay in the alpine region of Hulunbeir, Inner Monogolia Autonomous Region, China, was 5000 kg ha⁻¹ in the first year of planting, and it reached 9000 kg ha⁻¹ in the second year of planting. The crude protein contents of the alfalfa were as high as 20%. These achievements highlight that the development of high yield alfalfa pasture is feasible, and that it provides technical support and theoretical guidance in development and management of high quality alfalfa pasture in these regions.

alfalfa, artificial pasture, grass-based animal husbandry, cold regions

doi: 10.1360/N972017-01181