

不同草田轮作模式对土壤养分动态的影响

刘沛松^{1,2}, 李军³, 贾志宽³, 郝卫平², 文祯中¹

(1. 平顶山学院 低山丘陵区生态修复重点实验室, 河南 平顶山 467000; 2. 农业部旱作节水农业重点开放实验室, 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 3. 西北农林科技大学 农学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 在宁南旱区 10 年生苜蓿草地上进行了为期 3 a 的 27 种不同草田轮作模式试验, 研究了土壤有机质、氮、磷的动态变化特征。结果表明, 与保持生长的对照苜蓿草地相比, 苜蓿草地实行草田轮作后, 有机质持续下降, 轮作第 1, 3 a 的马铃薯, 第 2 a 的春小麦对土壤有机质有明显影响, 马铃薯连作模式使土壤有机质降幅最大; 不同轮作模式的土壤全氮变化有较大差异, 谷子和春小麦等禾本科作物单一连作模式对土壤氮素造成偏耗; 不同轮作模式碱解氮总体上呈下降趋势, 轮作作物产量水平直接影响土壤碱解氮含量的高低。全磷呈先降后升又降趋势。作物轮作能够提高苜蓿草地土壤氮、磷有效性。为了高效、协调和可持续地利用水肥, 应选择合理的草田轮作模式。

关键词: 苜蓿草地; 草田轮作; 土壤养分动态; 宁南旱区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)03-0081-05

中图分类号: S158.3, S154.2

Effect of Different Alfalfa—Crop Rotation Patterns on Soil Nutrient Dynamic

LIU Pei-song^{1,2}, LI Jun³, JIA Zhi-kuan³, HAO Wei-ping², WEN Zhen-zhong¹

(1. *The Key Laboratory of Ecological Restoration in Low Mountain and Hilly Areas, Pingdingshan University, Pingdingshan, Ningxia 467000, China*; 2. *Key Laboratory of Dryland Agriculture, MOA, China, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, BeiJing 100081, China*; 3. *College of Agronomy, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: Three year experiment of 27 kinds of alfalfa—crop rotation was conducted on the 10-year-old alfalfa grassland in the arid region of Southern Ningxia Hui Autonomous Region. Dynamic characteristics of soil nitrogen, phosphorus and organic matter during the three years of alfalfa—crop rotation were studied. Results showed that in comparison with continuous alfalfa planting, organic matter continued to decline during 3 years of alfalfa—crop rotation. Potato in the first and third year planting and spring wheat in the second year planting influenced soil matter content obviously. The pattern of potato succession cropping made soil matter content to decline most seriously. Change in soil total nitrogen under different alfalfa—crop rotations was obvious, comparatively. The sole rotation patterns of cereal grain planting, such as millet or spring wheat pattern, was in preference to consume soil total nitrogen. As a whole, soil alkali-hydrolyzed nitrogen content under different rotation patterns tended to decline and was directly influenced by the level of rotation crop yield. Soil total phosphorus presented declining at first, then rising, and again declining. The alfalfa—crop rotation pattern can improve soil nitrogen and phosphorus effectiveness. So, the reasonable alfalfa—crop rotation pattern should be adopted for a highly efficient, harmonious and sustainable utilization of soil water and nutrient.

Keywords: alfalfa grassland; grass—crop rotation; soil nutrient dynamic; arid region of Southern Ningxia Hui Autonomous Region

苜蓿生长期间, 能够为土壤提供大量的氮素^[1-3] 失^[7-8]。所以, 苜蓿草地翻耕后是粮食作物上好的前
和有机质^[4-5], 改善土壤结构^[6], 减少碳、氮、磷淋 茬。但是不同作物轮作模式对苜蓿草地土壤氮磷素

收稿日期: 2011-06-11

修回日期: 2011-08-03

资助项目: 国家林业局林业行业公益性项目“低山丘陵区林草复合模式优化及水土保持效应研究”(201004044); 农业部旱作节水农业重点开放实验室开放基金课题“草粮间轮作系统土壤碳、氮、水高效利用模式研究”(BSRF201003); 河南省教育厅自然科学基金基础研究计划项目“豫西低山丘陵区坡耕地草粮间/轮作技术及模式研究”(2010C180007); 国家“十一五”旱农支撑计划“农田集雨保水关键技术研究”(2006BAD29B03)

作者简介: 刘沛松(1973—), 男(汉族), 陕西省武功县人, 博士, 副教授, 主要从事低山丘陵区生态恢复与旱作节水农业领域的研究。E-mail: peisongliu@163.com。

通信作者: 贾志宽(1962—), 男(汉族), 山西省朔州市人, 博士, 教授, 博士生导师, 长期从事旱区节水农业和生态农业领域的研究。E-mail: zhikuan@tom.com。

的吸收利用效率不同,表现出不同的土壤理化性状,从而形成差异较大的茬口特性。茬口特性是前茬作物通过对土壤理化性质的作用,影响后作作物的产量水平特性^[9]。在作物栽培上,如能以苜蓿草地为前茬,利用不同种类作物的茬口特性合理轮作,可以改善土壤中的水、肥、气热等环境状况,既能维持土壤能力,又能防止病虫害的危害,获得增产养地之效。

本文重点研究了苜蓿草地翻耕后 3 a 轮作期间土壤养分动态变化趋势,研究不同轮作模式对土壤养分的消耗利用规律和动态发展趋势,以期更好地为宁南旱区草田轮作和草地生态农业的可持续发展提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2003—2005 年在宁夏海原县贾塘乡西北农林科技大学宁南旱作农业试验区进行。地理位置东经 105°82′,北纬 36°50′,海拔约 1 820 m,属典型的北温带大陆性季风气候和半干旱偏旱丘陵沟壑区。土壤为黄绵土,质地轻壤。光热充足,雨热同季,作物一年一熟。农田凋萎湿度 6.10%。年均太阳总辐射 566 kJ/cm²,日照时数 2 706 h,年均气温 8.2℃,≥10℃有效积温 2 398℃,无霜期 146 d 左右。年均降水量 350 mm,年内降水分布极不平衡,大多集中在 7—9 月,约占全年降水量的 70%以上。年均蒸发量为 2 200 mm,为降水量的 6.3 倍。3 a 试验期间年降水量分别为 343.9, 243.7, 171.3 mm,呈逐年递减趋势,年均仅 253.0 mm,比历史平均值几乎少 100 mm。

1.2 试验设计

在试验区选取地势平坦的 10 年生紫花苜蓿草地 2 490 m²(包含小区隔离带),分为 3 个轮作区,即 3 个重复区,面积均为 830 m²。经测定,10 年生苜蓿草地 0—200 cm 土壤水分含量 203.89 mm,土壤容重平均 1.224 g/cm³;0—60 cm 土层有机质 14.83 g/kg,全氮 1.037 g/kg,碱解氮 55.071 mg/kg,全磷 0.660 g/kg,速效磷 5.167 mg/kg,速效钾 263.20 mg/kg,pH 值 8.16。另有面积为 90 m²的苜蓿不翻耕继续保持生长,作为对照区。

2003 年 3 月 29 日将轮作区翻耕后,连续进行 3 a 草田轮作试验。轮作作物为春小麦、马铃薯和谷子(分别以英文第一个大写字母 W,P,M 表示),春小麦为当地红芒品种,马铃薯为雪花白,谷子为大同 14 号。3 a 轮作期间,春小麦播期为 3 月 21—29 日,收获期为 7 月 12—17 日;马铃薯和谷子的播期和收获期相同,播期均在每年 4 月 21—28 日,收获期均在 10 月 5—12 日。肥料为尿素(46%N)和磷酸二铵(44%P₂O₅,16%N)搭配使用,播种前均匀撒施,统一翻埋作底肥,同一年中各轮作作物施肥水平均相同。轮作第 1 a 施纯 N 86.55 kg/hm²,纯 P₂O₅ 106.65 kg/hm²;第 2 a 施纯 N 45.74 kg/hm²,纯 P₂O₅ 114.07 kg/hm²;第 3 a 施纯 N 62.58 kg/hm²,纯 P₂O₅ 107.58 kg/hm²。对照区苜蓿不施肥,10,11 和 12 年生对照苜蓿鲜草产量分别为 4 500,4 000 和 3 000 kg/hm²。2005 年轮作完成后设置了 27 种不同草粮轮作模式。轮作区 2003—2005 年各年试验小区面积、小区个数及 27 种草田轮作模式如表 1 所示。

表 1 2003—2005 年轮作区不同草粮轮作方式田间设计(3 个重复小区之一)

轮作年份	10 年生紫花苜蓿茬地(830 m ²)									最小区面积/m ²
第 1 a	W				P				M	270
	WW				PW				MW	
第 2 a	WP				PP				MP	90
	WM				PM				MM	
	WWW	WWP	WWM	PWW	PWP	PWM	MWW	MWP	MWM	
第 3 a	WPW	WPP	WPM	PPW	PPP	PPM	MPW	MPP	MPM	30
	WMW	WMP	WMM	PMW	PMP	PMM	MMW	MMP	MMM	

注:W,P,M 分别表示轮作作物春小麦、马铃薯和谷子。下同。

1.3 土样采集与养分测定

土壤采样:每年轮作作物播期和收获期用对角线 5 点取样法采集各小区 0—60 cm 土层样品,重复 3 次。混匀自然风干,分别过 1 mm 和 0.25 mm 孔径的土壤筛备用。

土壤养分测定方法:有机质采用重铬酸钾外加热法,全氮采用开氏定氮法,全磷采用酸溶—钼锑抗比色法,碱解氮采用碱解扩散法,速效磷采用钼锑抗比色法。

2 结果与分析

图 1—6 分别表示苜蓿草地不同作物轮作模式土壤有机质、全氮、全磷、速效氮、速效磷含量在 3 a 轮作期间的动态变化,图 1 中各年作物收获期养分含量值均已减去了该年播期施肥量(速效磷除外)。由于同一年份不同作物播期各试验小区的施肥种类和施肥量均相同,所以,各养分含量变化也就反映了不同作

图轮作模式的土壤养分含量动态趋势。

2.1 土壤有机质变化

苜蓿地翻耕后 3 a 轮作期间,土壤有机质持续下降,且降幅较大,而对照苜蓿草地略有增加。图 1 显示,轮作第 1,2,3 a 的各类作物收获期土壤有机质含量分别为 13.67,12.44,11.00 g/kg,呈不断下降趋势;而对照苜蓿草地土壤有机质含量由原先的 14.86 g/kg 分别增加为 15.26,15.36 ,和 15.43 g/kg。与对照苜蓿草地相比,轮作 3 a 期间,有机质分别降低了 1.59, 2.92 和 4.43 g/kg,且降幅逐渐增大。说明苜蓿草地实行草粮轮作后,随着轮作年限的增加,有机质急剧下降,加速了对土壤结构的干扰,发生了生态退化。

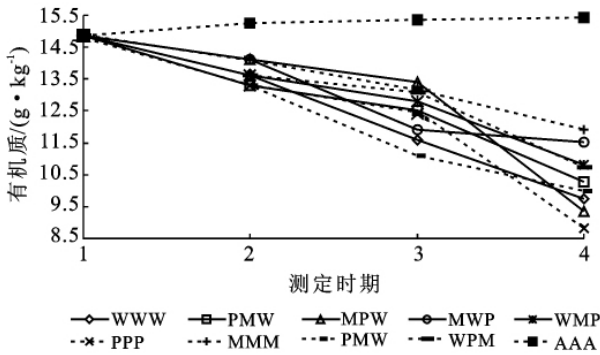


图 1 土壤有机质的动态变化

注:测定时期 1,2,3,4 分别代表轮作前苜蓿翻耕时,及第 1~3 a 轮作作物收获期。下同。

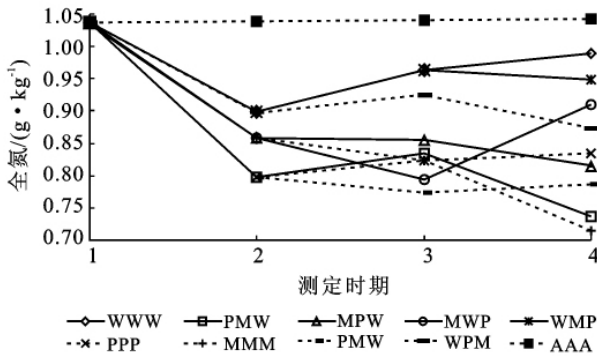


图 2 土壤全氮的动态变化

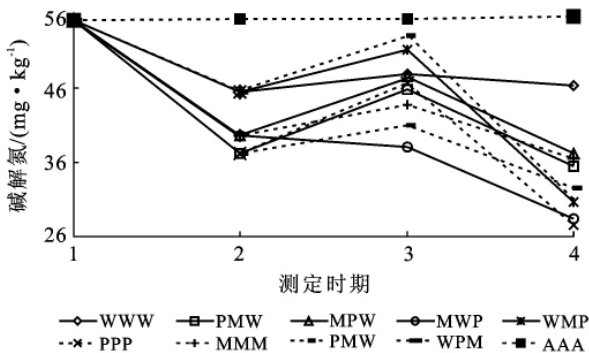


图 3 土壤碱解氮的动态变化

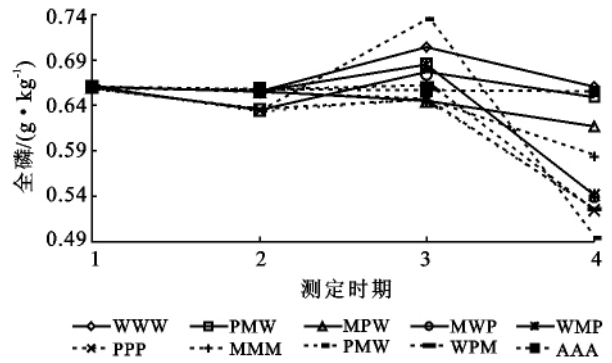


图 4 土壤全磷的动态变化

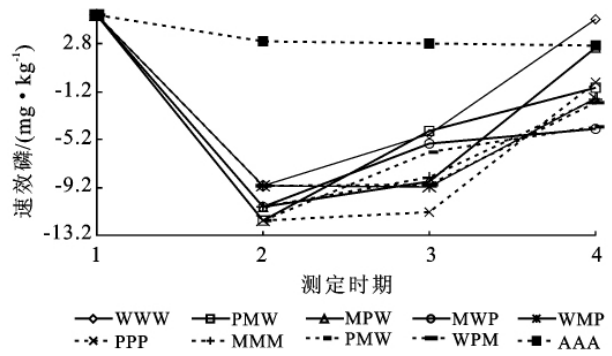


图 5 不计入施肥情况下土壤速效磷的动态变化

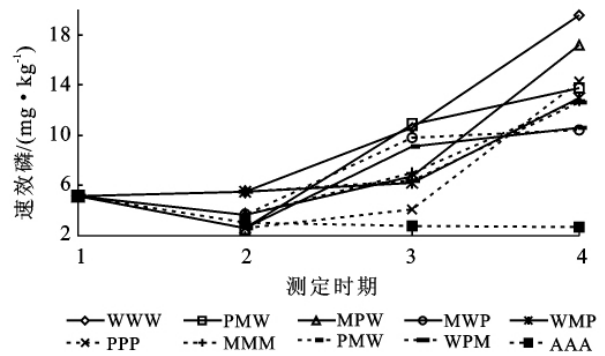


图 6 计入施肥情况下土壤速效磷的动态变化

土壤有机质含量还受当年轮作作物种类和产量的影响较大。第 1~3 a 轮作作物当年收获期的土壤有机质含量大小次序分别为:第 1 a, 谷子(14.1 g/kg) > 春小麦(13.6 g/kg) > 马铃薯(13.3 g/kg);第 2 a, 马铃薯(平均 12.97 g/kg) > 谷子(平均 12.83 g/kg) > 春小麦(平均 11.53 g/kg);第 3 a, 谷子(平均 11.47 g/kg) > 春小麦(平均 11.35 g/kg) > 马铃薯(平均 10.19 g/kg)。即轮作第 1 a 马铃薯、谷子、春小麦对土壤有机质的平均减小量分别是 1.56,0.76,和 1.26 g/kg,轮作第 2 a 分别是 0.33,1.27,和 2.07 g/kg,轮作第 3 a 分别是 2.78,1.36 和 0.18 g/kg。可见,苜蓿翻耕后,轮作第 1 a 和第 3 a 的马铃薯对土壤有机质影响最大;轮作第 2 a 春小麦对土壤有机质影响最大。据测定,3 a 试验

期间,同一年轮作作物中,均是马铃薯产量(5:1折粮计,下同)最高,谷子次之,春小麦最低。在 27 种轮作模式中,PPP 轮作模式产量最高,有机质下降幅度最大,由轮作前的 14.86 g/kg 下降到 8.82 g/kg,说明马铃薯连作导致土壤有机质降幅最大。

2.2 土壤全氮变化

苜蓿草地轮作后,若不计施入氮肥量,3 a 中轮作作物对土壤全氮影响很大,且明显受当年作物产量和降水的影响,对照苜蓿全氮有所增加,但不明显。图 2 中,第 1 a 轮作作物对 0—60 cm 土层全氮消耗最大,马铃薯、谷子和春小麦该层全氮含量由播种前苜蓿草地的 1.037 g/kg 分别下降到收获时的 0.798, 0.858 和 0.898 g/kg。

第 2 a 轮作收获期,以春小麦为前茬的各个作物土壤全氮均增加,这可能与第 1 a 春小麦产量较低并在土壤遗留较多的根系有关;以谷子为前茬的作物土壤全氮均减少;以马铃薯为前茬的作物除春小麦土壤全氮减少外,其他作物全氮均有所增加。所以,若是单纯追求春小麦产量而不考虑土壤养分平衡,则其适宜以马铃薯为前茬。

禾本科作物连作造成对氮素养分的偏耗,不同类型作物搭配组合的轮作模式对土壤不同层次氮素能够充分利用。第 3 a 轮作作物导致土壤全氮发生了很大变异,有增有减。其中 WMW, WWW, WPW 轮作模式的土壤全氮从轮作第 1 a 下降后,第 2, 3 a 一直保持增加趋势;MMM 和 PMW 轮作模式土壤全氮消耗最大,第 3 a 收获期分别仅为 0.714 g/kg 和 0.736 g/kg。

土壤全氮变化不仅与当年和上年作物种类有关,还与当年降水和上年作物遗留在土壤中的水分高低有关。如轮作模式 WWM, WWP, 第 2 a 轮作土壤全氮有较大涨幅,而第 3 a 急剧下降,说明第 1, 2 a 的春小麦收获后休闲期,正值雨季,土壤能够积蓄降水,促进了后作高产作物马铃薯和谷子对氮素养分的消耗利用,导致全氮含量有大幅度下降,所以要注意合理安排作物轮作顺序,保持水肥协调,增产增收。

2.3 土壤碱解氮变化

各个轮作模式土壤碱解氮动态变化如图 3 所示(不计每年轮作播期施入的氮肥量)。

苜蓿草地轮作后,3 a 轮作期间对土壤碱解氮影响很大,而对照苜蓿草地碱解氮略有增加,变化不大。

第 1 a 轮作作物对 0—60 cm 土层全氮消耗最大,马铃薯、谷子和春小麦该土层碱解氮含量由播种前苜蓿草地的 55.07 mg/kg 分别下降到收获时的 37.26, 39.56 和 45.41 mg/kg。马铃薯对碱解氮消耗最多,谷子次之,春小麦最少,说明苜蓿草地后轮作作物的

产量水平直接影响土壤碱解氮含量的高低。

第 2 a, 除 WMW 模式土壤碱解氮继续下降外,其他轮作模式的碱解氮均有所增加。本文认为是轮作提高了苜蓿草地土壤氮素的有效性,把难以被作物直接吸收利用的难溶态氮转化成易于利用的游离态氮。

第 3 a, 各轮作模式土壤碱解氮均表现出大幅度下降趋势,而保持连续生长的对照苜蓿草地碱解氮增加不明显。这是由于第 2 a 土壤氮素有效性得到提高,碱解氮含量增加,以致能被第 3 a 轮作作物充分利用的结果。而对照苜蓿土壤没有经过轮作处理,氮素未得到活化,所以碱解氮含量增加不明显。

2.4 土壤全磷变化

轮作期间各个轮作模式土壤全磷动态变化如图 4 所示(不计每年轮作作物播期施入的磷肥量)。

由图 4 可见,第 1 a 轮作马铃薯土壤全磷稍有减少,而轮作春小麦和谷子基本没有变化,说明禾本科作物轮作基本对苜蓿草地土壤全磷基本无影响;第 2 a 轮作作物中,除以谷子为前作的马铃薯土壤全磷下降外,其余所有轮作模式的土壤全磷均增加。说明马铃薯对磷素需求量较大;而到第 3 a 时,尽管气候干旱,全年降水仅 253 mm,而所有轮作作物土壤全磷均下降,表明第 3 a 轮作作物消耗了较多磷素。证明轮作提高了苜蓿草地磷素的有效性,在轮作第 3 a 被作物充分消耗利用。而第 2 a 全磷含量增加的原因还有待于进一步研究。

2.5 土壤速效磷变化

图 5 表示在不计每年轮作施入速效磷肥量的情况下,27 种草田轮作模式的土壤速效磷含量动态变化。在轮作第 1 a 下降幅度均较大,在第 2, 3 a 轮作后均持续升高,而对照苜蓿草地的速效磷含量逐年下降,进一步说明轮作能够提高土壤磷素的有效性。

另外,持续干旱导致土壤水分不足,影响了作物对氮磷的正常吸收利用,也是土壤速效磷逐年升高的原因之一。轮作第 1 a 降水较多,为 343.9 mm,与历年平均降水量 253.0 mm 接近,速效磷能被较充分利用;轮作第 2 a, 降水量仅 243.7 mm, 比历年平均值少约 100 mm, 作物对氮磷素的吸收利用受到抑制,特别在 2005 年大旱之年,降水量只有 171.3 mm, 作物对养分的正常吸收利用受到严重影响,轮作第 2, 3 a 施入的磷肥由于土壤干旱不能被作物充分利用,导致土壤速效磷残留量逐年增加。

图 6 表示计入施磷肥情况下,不同轮作模式的土壤速效磷动态变化。由于苜蓿生长过程中对磷素需求量较大,苜蓿翻耕时,土壤残留的速效磷含量极低,仅为 5.167 mg/kg。即使第 1 a 施纯 P_2O_5 量达

14.55 mg/kg, 轮作作物收获期土壤的速效磷分别为春小麦 5.5 mg/kg, 谷子 3.7 mg/kg, 马铃薯 2.6 mg/kg; 第 2 a 施纯 P_2O_5 量达 15.37 mg/kg, 收获期各轮作模式第 2 a 的春小麦土壤速效磷含量平均 9.83 mg/kg, 谷子 8.04 mg/kg, 马铃薯 5.73 mg/kg; 第 3 a 收获期 27 种轮作模式同一类作物土壤速效磷含量分别为: 春小麦平均 17.53 mg/kg, 谷子平均 14.18 mg/kg, 马铃薯平均 13.41 mg/kg, 可见, 无论何种降水年型下, 均为马铃薯对速效磷消耗最多, 谷子次之, 春小麦最少。

3 结论与讨论

(1) 苜蓿草地轮作后土壤养分动态变化差异较大, 但总体上是下降的。苜蓿草地实行草田轮作后, 随着轮作年份增加, 有机质持续下降; 不同轮作模式对土壤全氮影响有较大差异; 碱解氮总体上呈下降趋势; 全磷呈先降后升又降趋势; 苜蓿草地的作物轮作能够提高土壤氮、磷有效性。有研究^[10]认为, 由于耕作过程增加了对土壤的干扰, 苜蓿草地轮作为农田后土壤全氮和有机质会迅速下降, 土壤退化过程加速。王俊等^[11]通过多年生苜蓿草地轮作 2 a 农田的试验结果表明, 与苜蓿连作相比, 土壤耕层全氮、有机质下降, 轮作提高了土壤氮、磷养分有效性及其活化率。

大量研究表明^[12-15], 苜蓿茬口的养分效应可以维持 3.4 a 以上。而本试验认为, 10 年生苜蓿草地氮素含量并不高, 轮作作物时还需配施一定量肥料。据本试验前期测定, 苜蓿在 6 年生至 10 年生期间, 根瘤固氮的氮素增加不多, 磷素含量急剧下降^[16]。这也与有关结论一致^[17-18]。苜蓿生长过程根瘤固氮可能主要用于自身生长所需, 仅有少量枯枝落叶和根系的腐烂及微生物分泌物等提供少量氮源^[17]。苜蓿生长过程中需要大量消耗土壤水分和养分, 尤其是对土壤磷素消耗量较大, 而且刈草使生物量从田间生态系统不断带出, 导致土壤中速效氮、磷不断减少。因而, 退化苜蓿草地翻耕轮作作物时, 还需要增施一定量的氮磷肥。

(2) 不同轮作模式中作物产量水平对土壤养分动态变化影响较大。试验中不同轮作模式的作物产量高低顺序依次为: 马铃薯 > 谷子 > 春小麦, 也就导致了当年土壤养分的动态变化, 引起不同轮作模式间土壤养分含量的差异。27 种轮作模式中, 总产量较高的依次为: PPP > PPM > PMP > MPP > PMM > PPW, 均在 5 200.0 kg/hm² 以上, 其中 PPP 产量为 6 555.9 kg/hm²; 总产量较低的轮作模式依次为: WWW < WMW < MWW < WWM, 均在 2 300.0 kg/hm² 以下, 其中 WWW 轮作方式产量最低, 仅为 1 355.6 kg/hm²。轮作第 1, 3 a 的马铃薯, 轮作第 2 a 的春小麦对土壤有

机质有明显影响, 尤其马铃薯连作模式导致土壤有机质出现较大降幅; 谷子和春小麦等禾本科作物单一轮作模式对土壤氮素造成偏耗; 马铃薯对磷素消耗相对较多, 禾本科作物轮作对苜蓿草地土壤全磷影响不大, 这与王俊等^[11]试验结果一致; 若单纯追求春小麦产量而不考虑土壤养分平衡, 则春小麦适宜以马铃薯为前作, 这与有关结论一致^[19-20]。可见, 将不同种类作物合理组合后的轮作模式能够充分而全面利用土壤不同深度层次养分。因此, 有必要科学合理地安排草田轮作顺序, 确定适合当地气候条件的最佳轮作模式来维持土壤肥力平衡, 保持水肥协调、可持续利用, 达到增产增收。

[参 考 文 献]

- [1] Sanginga N. Role of biological nitrogen fixation in legume based cropping systems; A case study of West Africa farming systems[J]. *Plant and Soil*, 2003, 252(1): 25-39.
- [2] Hardarson G, Atkins C. Optimizing biological N₂ fixation by legumes in farming systems[J]. *Plant and Soil*, 2003, 252(1): 41-54.
- [3] O'Hara G W. The role of nitrogen fixation in crop production[J]. *Journal of Crop Production*, 1998, 1(2): 115-138.
- [4] Lal R. World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon[J]. *Advances in Agronomy*, 2001, 71: 145-191.
- [5] Hao Y, Lal R, Owens L B, et al. Effect of cropland management and slope position on soil organic carbon pool at the Appalachian Experimental Watersheds[J]. *Soil Tillage Research*, 2002, 68(2): 133-142.
- [6] Alvey S, Bagayoko M, Neumann G, et al. Cereal/legume rotations affect chemical properties and biological activities in two West African soils[J]. *Plant and Soil*, 2001, 231(1): 45-54.
- [7] Drinkwater L E, Wagoner P, Sarrantonio M. Legume based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses [J]. *Nature*, 1998, 396: 262-264.
- [8] Nuruzzaman M, Lambers H, Bolland M D A, et al. Phosphorus benefits of different legume crops to subsequent wheat grown in different soils of Western Australia [J]. *Plant and Soil*, 2005, 271(1/2): 175-187.
- [9] 张保烈. 提高草木樨在粮肥轮作中效益的探讨[J]. *土壤通报*, 1986(5): 211-213.
- [10] Yang X M, Kay B D. Rotation and tillage effects on soil organic carbon sequestration in a typic Hapludalf in Southern Ontario [J]. *Soil Tillage Research*, 2001, 59(3/4): 107-114.

(下转第 122 页)

- [J]. Kan. Agric. Exp. Sta. Tech. Bull., 1957, 92: 1-16.
- [6] May K R, Pomeroy N P, Hibbs S. Sampling techniques for large wind borne particles [J]. Journal of Aerosol Science, 1976, 7(1): 53-62.
- [7] Fryrear D W. A field dust sampler [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1986, 41(2): 117-120.
- [8] Goossens D, Offer Z Y. Wind tunnel and field calibration of six aeolian dust samplers [J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(7): 1043-1057.
- [9] Stout J E, Fryrear D W. Performance of a windblown-particle sample [J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(6): 2041-2045.
- [10] 荣姣凤, 高焕文, 李胜. 风蚀集沙仪的等动力性实验研究 [J]. 中国水土保持, 2004(5): 17-19.
- [11] 李长治, 董光荣, 石蒙沂. 平口式集沙仪的研制 [J]. 中国沙漠, 1987, 7(3): 49-56.
- [12] 李振山, 倪晋仁, 刘贤万. 垂直点阵集沙仪的集沙效率 [J]. 泥沙研究, 2003(1): 24-32.
- [13] 臧英. 保护性耕作防治土壤风蚀的实验研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2003.
- [14] Shao Y, McTainsh G H, Leys J E, et al. Efficiencies of sediment samplers for wind erosion measurement [J]. Australian Journal Soil Research, 1993, 31(4): 519-531.
- [15] Cornelis W M, Gabriels D. A simple low-cost sand catcher for wind-tunnel simulations [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2003, 28(9): 1033-1041.
- [16] 王铁成. 空气动力学实验技术 [M]. 修订版. 北京: 航空工业出版社, 1995: 168-169.
- [17] 高征锐, 赵爱国. 遥测集沙仪的研制 [J]. 中国沙漠, 1983(1): 32-36.
- [18] 王金莲. 布袋式集沙仪结构参数度集沙效率影响的试验研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.
- [19] 赵满全, 付丽宏, 王金莲, 等. 旋风分离式集沙仪在风洞内集沙效率的试验研究 [J]. 中国沙漠, 2009, 29(6): 1009-1014.
- [20] 海春兴. 河北坝上土地利用与土壤风蚀的动力学过程研究 [D]. 北京: 北京师范大学, 2003.

(上接第 50 页)

[参 考 文 献]

- [1] 樊有赋, 陈晔, 秦寿发, 等. 超累积植物与重金属污染的植物修复技术 [J]. 河北农业科学, 2007, 11(5): 73-75.
- [2] 李梅, 曾德华. 重金属污染的植物修复研究进展 [J]. 贵州农业科学, 2007, 35(3): 135-138.
- [3] 王新, 贾永锋, 杨树, 落叶松对土壤重金属的吸收及修复研究 [J]. 生态环境, 2007, 16(2): 432-436.
- [4] 国家环境保护局, 国家技术监督局, 中华人民共和国国家标准. GB/T17138—1997, GB/T17139—1997, GB/T17140—1997 [S]. 北京: 中国环境出版社, 1997.
- [5] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [6] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. Geojournal, 1969, 2(3): 108-118.
- [7] Forstner U, Muller G. Concentrations of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in river sediments: geochemical background, man's influence and environmental impact [J]. Geojournal, 1981, 2(5): 417-432.
- [8] 樊金柱. 中国北方煤矸石堆积地生态环境特征与植被建设研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [9] 张铨, 韩国才, 陈慧, 等. 黄土高原煤矿区矸石中重金属对土壤污染的研究 [J]. 煤炭学报, 2008, 33(10): 1141-1146.
- [10] 栾以玲, 姜志林, 吴永刚. 栖霞山矿区植物对重金属元素富集能力的探讨 [J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2008, 32(6): 69-72.

(上接第 85 页)

- [11] 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.
- [12] 袁宝财, 达海莉, 王琛. 宁夏经济的新亮点: 苜蓿 [J]. 内蒙古畜牧科学, 2001, 22(2): 33-35.
- [13] 杨改河. 旱区农业理论与实践 [M]. 北京: 世界图书出版社, 1993: 166-167.
- [14] 荆新海, 田魁祥. 河北省黑龙港地区苜蓿发展与水分生态系统分析 [J]. 农业现代化研究, 1992, 13(4): 218-222.
- [15] 杨文耀. 阴山丘陵旱农区豆科牧草在轮作周期中的用养培肥效应 [J]. 内蒙古草业, 1994(3): 30-33.
- [16] 刘沛松, 贾志宽, 李军, 等. 宁南旱区草粮轮作系统中紫花苜蓿适宜利用年限研究 [J]. 草业学报, 2008, 17(3): 31-39.
- [17] 刘孟雨, 但野利秋, 刘会灵. 苜蓿改良的盐碱土壤对小麦的效应研究: 对小麦生长及产量的影响 [J]. 生态农业研究, 1998, 6(2): 58-60.
- [18] 张春霞, 郝明德, 李丽霞. 黄土高原沟壑区苜蓿地土壤碳、氮、磷组分的变化 [J]. 草地学报, 2005, 13(1): 66-70.
- [19] 刘沛松, 贾志宽, 李军, 等. 不同轮作方式对退化苜蓿草地水分影响及产量效益比较研究 [J]. 西北农业学报, 2010, 19(10): 70-77.
- [20] 刘沛松, 贾志宽, 李军, 等. 宁南旱区不同草粮轮作方式中前茬对春小麦产量和土壤性状的影响 [J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 146-152.