

半干旱黄土丘陵区苜蓿人工草地土壤磷素 有效性及对生产力的响应

贾 宇¹, 徐炳成^{1,2}, 李凤民^{1,*}, 王晓凌^{1,3}

(1. 兰州大学生命科学学院 干旱与草地生态教育部重点实验室, 兰州 730000 2 中国科学院 水利部水土保持研究所, 土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100 3. 河南科技大学农学院, 洛阳 471003)

摘要: 研究了半干旱黄土丘陵区以垄沟集雨技术建成的紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 人工草地对土壤磷素的影响。土壤全磷在处理之间和采样期之间均无显著差异。但在各处理土壤中速效磷在试验期间的减少量和苜蓿的干草产量成正比, 垄上覆盖薄膜的 2 个垄沟处理 (M30 垄和沟宽度均为 30cm, M60 垄和沟宽度均为 60cm) 比平作 (CK) 的干草产量分别显著提高了 10.7% 和 40.3%, 两个未覆盖的垄沟处理 (B30 垄和沟宽度均为 30cm, B60 垄和沟宽度均为 60cm) 干草产量分别比平作对照下降了 14.2% 和 28.3%。相应地, 3a 试验期间速效磷的减少量为 M60 (55.5%) > M30 (51.5%) > CK (34.6%) > B30 (23.4%) > B60 (17.5%)。并且在 3 年试验后, 所有处理的土壤有机碳和速效磷的比值 (C/P 比) 均比播种前有显著增加, 其中 M30 和 M60 的 C/P 比分别达到 1165.1 和 1326.1 显著高于其他处理。试验还发现, 在干旱年份土壤有机碳和有效磷显著正相关, 而在湿润年份二者为显著负相关。要进一步提高苜蓿人工草地产草量或延长草地高产年限, 必须寻找增加土壤有效磷的途径或方法。

关键词: 黄土丘陵区; 集雨技术; 紫花苜蓿; 速效磷

文章编号: 1000-0933(2007)01-0042-06 中图分类号: Q142, Q948, S812 文献标识码: A

Availability and contributions of soil phosphorus to forage production of seeded alfalfa in semiarid Loess Plateau

Jia Yu¹, Xu Bingcheng^{1,2}, Li Fengmin^{1,*}, Wang Xiaoling^{1,3}

1 Education Ministry Key Laboratory of Arid and Grassland Ecology, School of Life Science, Lanzhou University, Lanzhou, 730000, China

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, 712100, China

3 Agronomy College Henan University of Sciences and Technology, Luoyang, 471003, China

Acta Ecologica Sinica 2007, 27(1): 0042~0047

Abstract In the semiarid loess hilly and gully region of Northwest China, the availabilities of water and phosphorus (P) are the main limitations on seeded alfalfa (*Medicago sativa* L.) production. The water-harvesting technique can improve the soil water condition. However, the contribution of availability of soil phosphorus to the production of seeded alfalfa established by this technique is unknown. In this research, we studied the availability of soil phosphorus in response to the production of seeded alfalfa established by the ridges and furrows water-harvesting technique. The following five treatments were set up in this study: 1) conventional cultivation in a flat plot without mulch (CK), 2) plastic mulched ridge with 30

基金项目: 教育部科技创新工程重大项目培育资金资助项目; 中国科学院百人计划项目和李嘉诚基金会西部资助项目

收稿日期: 2005-12-29 修订日期: 2006-06-29

作者简介: 贾宇 (1979~), 男, 河北人, 博士, 主要从事生态学和土壤学研究. E-mail: juy@lzu.edu.cn

* 通讯作者 Corresponding author E-mail: fl@lzu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by Key Scientific and Technical Innovation Project Ministry of Education of China, The One Hundred-Scientist Program of CAS and The West Program of Li Ka Shing Foundation

Received date: 2005-12-29 **Accepted date:** 2006-06-29

Biography: Jia Yu, Ph. D., mainly engaged in ecology and pedology. E-mail: juy@lzu.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

cm width of ridge and furrow (M30), 3) plastic mulched ridge with 60 cm width of ridge and furrow (M60), 4) bare ridge with 30 cm width of ridge and furrow (B30), and 5) bare ridge with 60 cm width of ridge and furrow (B60). The forage yield, evapotranspiration (ET), soil organic carbon (SOC), total phosphorus, available phosphorus and the ratio of soil organic C to available P (C/P) were measured in the experiment. Results showed that the total soil P was not significant different among treatments and sampling dates. However, the positive correlation relationship occurred between the decrease in soil available P and total forage yield of alfalfa after 3-year alfalfa stand. The forage yield of alfalfa in the two ridge mulched treatments (M30 and M60) were higher than that of conventional flat cultivation (CK) by 10.7% and 40.3%, respectively, while the yield of two bare treatments (B30 and B60) were lower than that of CK by 14.2% and 28.3%, respectively. After a 3-year alfalfa stand, the trend of the decreases in soil available P was in the order of M60 (55.5%) > M30 (51.5%) > CK (34.6%) > B30 (23.4%) > B60 (17.5%). Moreover, after 3-year alfalfa growth, the C/P ratio increased significantly in all of the treatments comparing to that before sowing. The C/P ratio of M30 (1165.1) and M60 (1326.1) were significantly higher than that of the other treatments. More interesting finding was that the increase in SOC in dry years promoted the accumulation of soil available P. However, in wet years, the increase of SOC limited the accumulation of soil available P. Therefore, to further increase the forage yield of alfalfa, the effective technique must be developed to increase the soil available P.

Key words hilly and gully regions; rainwater-harvesting technology; alfalfa; available phosphorus

苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 作为多年生豆科牧草, 对氮素不敏感而对磷素比较敏感^[1, 2]。在我国许多地方, 磷是制约苜蓿生产的主要营养元素^[1]。有关施磷对苜蓿鲜草产量和种子产量的影响, 国内外均有较为详细的报道^[3]。而这些研究主要集中在施用磷肥对苜蓿产量和品质方面, 但有关苜蓿对土壤磷素动态影响的报道很少。本文利用垄沟集雨技术建成具有不同生产力水平的苜蓿人工草地, 研究土壤磷素有效性对生产力的响应机制, 以及与土壤有机碳的关系, 为本地区发展草田轮作和草地植被、改善生态环境、土地的可持续利用提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 试验地点概况

试验地点位于兰州大学黄土高原半干旱生态系统定位研究站, 属于黄土高原西部丘陵沟壑区, 甘肃省中部, 榆中县中连川乡中连川村 (36°02'N, 104°25'E), 海拔 2400m。中温带半干旱气候, 年均气温 6.5°C, 最热月份 (7月份) 平均气温为 19.0°C, 最冷月份 (1月份) 为 -8.0°C, 年平均降水量为 314.1 mm (1999~2003年)。降水季节分布不均匀, 大约 56% 的降水发生在 7~9 月份。地下水位深度大于 20 m, 超过作物利用范围。

试验地点地貌沟壑纵横, 土壤为黄土母质上发育的黑麻土和黄绵土。本次试验之前, 2000年该大田所种植作物为春小麦, 小麦收获到春季试验开始之间有近 220d 的冬春休闲期。2001年春季布置试验。2001、2002、2003年和 2004年试验进行的 4a 间, 苜蓿生长旺季 (7~10月份) 降水分别为 226.5、323.4、294.6mm 和 150.7mm。3个冬春季休眠期降水分别为 52.1、44.0mm 和 25.4mm。显然, 2004年为干旱年份, 2002年为一湿润年份。试验期间降水的旬分布见图 1。

1.2 实验方法

1.2.1 试验设计

本次研究于 2001年 4月份开始, 本文所用数据截至 2003年 10月份, 该试验至今仍在进行。人工草地种植紫花苜蓿。田间垄沟集雨系统包括垄和沟两部分。垄作为集雨区, 沟作为种植区。垄沟宽度比为 1:1。试验设 5 个处理: (1) CK, 常规平作, 不起垄, 不覆膜 (对照); (2) M30 垄和沟的宽度都为 30cm, 垄上覆盖塑料薄膜; (3) M60 垄和沟的宽度都为 60cm, 垄上覆盖塑料薄膜; (4) B30 垄和沟的宽度都为 30cm, 不覆膜; (5) B60 垄和沟的宽度都为 60cm, 不覆膜。

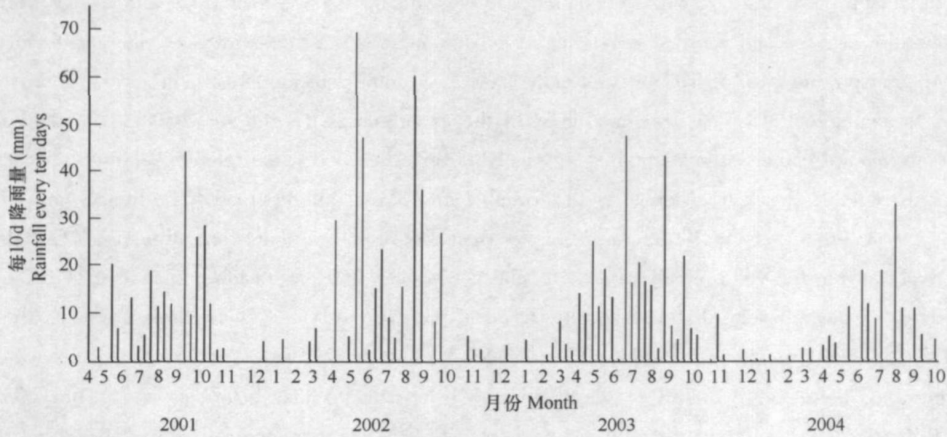


图 1 2001~2004年试验地点降雨旬(每10d)分布情况

Fig. 1 Distribution of rainfall every ten days during the alfalfa growing seasons in 2001~2004 at the experimental site

每个试验小区宽 3.6m、长 10m。垄沟处理沿长轴起垄,每处理 3 重复,试验小区随机排列。透明塑料薄膜为 PE 薄膜, 1.2m 宽,厚 0.007~0.008 mm,边缘用土压牢,以防被风损害。每年秋季收获后,整理沟垄,次年春季重新覆盖地膜。

2001年 4月中旬播种,苜蓿品种为“陇中苜蓿”,条播,所有试验小区的播种总量都相同,播种量 22.5 kg hm^{-2} ,播种深度为 2~3 cm,30cm 沟内种 2 行,60cm 沟内 4 行。播种前施肥,尿素 $34.5 \text{ kg N hm}^{-2}$,过磷酸钙 8.0 kg P hm^{-2} 。人工去除杂草,无灌溉。2001 年于 10 月中旬收获 1 次,2002 年和 2003 年每年收获 2 次,分别在 7 月中旬和 10 月中旬进行。紧贴地面刈割。

1.2.2 采样与测定

每年的 4 月、7 月、10 月中旬采集 0~20 cm 土样采用常规方法测定土壤全磷、速效磷和土壤有机碳,每个小区 3 次重复。土壤全磷用钒钼黄比色法测定;速效磷用 $0.5 \text{ mol/L NaHCO}_3$ 浸提法测定;有机碳用重铬酸钾容量法-外加热法进行测定^[4]。蒸发蒸散量(ET)由试验始末 0~500 cm 土层(每 20 cm 深度测定一次)土壤水分的差值加上试验期间降雨量计算得出,水分利用效率(WUE)为 ET 与干草产量的比值得出。

分别用 SAS 软件的 ANOVA 和 CANCORR 过程进行方差和相关分析^[5]。用 Excel 软件进行表格及图形绘制等工作。

2 结果与分析

2.1 苜蓿干草产量和水分利用效率

M30 和 M60 处理 3a 的总干草产量比对照 CK 显著提高了 10.7% 和 40.3% (表 1)。而 B30 和 B60 处理 3a 的总干草产量却分别比对照 CK 降低了 14.2% 和 28.3%, 并且 B60 和 CK 之间已经达到显著差异。

M60 和 M30 的水分利用效率比平作有显著提高,而 B60 的水分利用效率显著低于平作 CK。B30 水分利用效率介于 B60 和 CK 之间。

2.2 土壤全磷和速效磷

土壤全磷含量在试验 3a 中的不同采样时间和不同处理之间均无显著差异(数据未列出),而有效磷则完全不同。2001 年生长季始末相比, M30、M60 和

表 1 试验 3a 间各处理的干草产量、蒸发蒸散量(ET)和水分利用效率(WUE)

Table 1 Forage yield, evapotranspiration (ET) and water use efficiency (WUE) in the various treatments during the experimental period

处理 Treatments	干草产量 Forage yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	蒸发蒸散量 ET (mm)	水分利用效率 WUE ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)
CK	8555.0c	1187.9ab	7.20c
M30	9466.3b	1166.4b	8.11b
M60	12003.9a	1204.3a	9.97a
B30	7342.5cd	1173.1b	6.26cd
B60	6134.1d	1139.9c	5.38d

同一列中相同字母表示数据间无显著差异($p = 0.05$) Values within a column followed by the same letters do not differ significantly at $p = 0.05$

B60处理的土壤速效磷含量显著降低, 而 CK 和 B30的土壤速效磷则是在该年生长季中期前下降, 随后到生长季末期这段时间一直在上升。第 1 年生长季末, M 60的土壤速效磷含量显著低于 CK 和裸露处理 (B30 和 B60)。2002 年生长季开始时, 覆膜垄沟处理 (M 30和 M 60)的土壤速效磷含量显著高于其他处理。到该生长季的末期, 情况正好相反, 覆膜垄沟处理的土壤速效磷含量显著低于其他处理。2003 年生长季开始时, 所有处理的土壤速效磷含量之间无显著差异, 但到该生长季末期, 各个处理之间土壤速效磷的趋势是: 裸露处理 > CK > 覆膜处理。

土壤速效磷在 2001 年冬至 2002 年春和 2002 年冬至 2003 年春这两个休眠期有明显的增加 (表 3), 而在整个试验期间有下降的趋势。并且覆膜处理的土壤速效磷在每个生长季的下降幅度都显著大于其他处理。经过 3a 时间, CK、M 30、M 60、B30、B60 的土壤速效磷分别下降了 34.6%、51.5%、55.5%、23.4% 和 17.52%。

表 2 试验 3a 间不同处理对速效磷的影响 (kg P hm^{-2})

Table 2 The available P in various treatments over a three year period (kg P hm^{-2})

处理 Treatments	April 1	July 1	October 1	April 2	July 2	October 2	April 3	July 3	October 3
CK	17.1aAB	14.4bcDE	15.8aBC	17.3bA	15.2abCD	14.4aDE	15.3aCD	13.8aE	11.7bF
M 30	17.1aB	15.3bC	14.5abC	18.9aA	12.8dD	11.8bD	14.9aC	9.9dE	9.1dE
M 60	17.1aBC	15.5aAB	14.2bE	18.8aA	16.2cD	10.6cF	15.2aDE	10.2dF	8.4cG
B30	17.1aA	13.8dD	15.8aAB	16.0bAB	14.3bcCD	13.9aD	15.3aBC	12.1bE	13.2aDE
B60	17.1aA	15.0bBC	15.8aB	16.0bAB	13.7cdDE	14.7aCD	14.5aCDE	13.3abE	14.2aCDE

同一列数值后相同的小写英文字母和同一行数值后的相同的大写英文字母表示在无显著性差异 ($p = 0.05$) Value with in columns followed by the same letter (lower case) or with in the same row (upper case) are significantly different at $p = 0.05$

表 3 2001、2002 和 2003 年各处理土壤速效 P 的动态 (kg P hm^{-2})

Table 3 Dynamic of soil available P in the various treatments during various periods during three experimental years (kg P hm^{-2})

处理 Treatments	GP2001	Dor2001	GP2002	Dor2002	GP2003	Total	Total%
CK	-2.71a	3.27b	-6.73a	2.01c	-8.54b	-12.70a	-34.61a
M 30	-5.55b	9.44a	-15.91b	6.98ab	-13.88c	-18.91b	-51.53b
M 60	-6.17b	10.00a	-18.71b	10.44ab	-15.91c	-20.35b	-55.45b
B30	-2.80a	0.56b	-4.82a	3.22bc	-4.77ab	-8.60a	-23.43a
B60	-2.67a	0.43b	-3.06a	-0.42c	-0.71a	-6.43a	-17.52a

GP2001: 2001 年苜蓿生长季 The growth period in 2001; Dor2001: 2001 年冬季至 2002 年春季的苜蓿休眠期 The dormancy period from the last harvest in 2001 to the recommencement of the experiment in 2002; GP2002: 2002 年生长季 The growth period in 2002; Dor2002: 2002 年到 2003 年的休眠期 The dormancy period from the last harvest in 2002 to the recommencement of the experiment in 2003; GP2003: 2003 年生长季 The growing period in 2003; Total 前几个时段的总和 A sum over these five periods; Total%: 相对于 2001 年生长季初期的百分比 The percentage of the total relative to the value at the beginning of the experiment in 2001

2.3 土壤有机碳和磷素之间的关系

不同处理对土壤有机碳产生的影响也有所不同 (表 4), 而土壤有机碳含量变化直接影响到土壤的 C/P。2001 年生长季, CK 的 C/P 比在该生长季末期要显著低于播种前, 而其他处理无显著差异。2002 年生长季初

表 4 试验 3 年间不同处理对土壤有机碳的影响 (g C kg^{-1})

Table 4 The SOC content in various treatments over a three year period (g C kg^{-1})

处理 Treatments	April 1	October 1	April 2	October 2	April 3	October 3
CK	9.93aA	7.27bDE	6.95bE	7.25dE	8.17cBC	9.37dA
M 30	9.93aAB	8.68aCD	8.12aD	8.37bD	10.28aA	10.53bA
M 60	9.93aB	7.52bFG	7.85aEF	8.63abCD	9.45bB	11.10aA
B30	9.93aAB	8.52aC	7.80abE	8.43abCD	9.92abAB	10.30bcA
B60	9.93aA	8.92aC	8.15aD	8.98aC	9.72abAB	10.06cA

同一列数值后相同的小写英文字母和同一行数值后的相同的大写英文字母表示在无显著性差异 ($p = 0.05$) Value with in columns followed by the same letter (lower case) or with in the same row (upper case) are significantly different at $p = 0.05$

期, M 30的 C/P比显著低于 2001年生长季末期的 C/P比。2002年生长季前后相比, 所有处理的 C/P比都有显著提高, 到生长季末, 各处理之间 C/P比的趋势是: M 60> M 30> B30 (B60) > CK。2003年生长季初期, M 60的 C/P比显著低于 2002年生长季末, 但 B60却正好相反。2003年生长季末, 所有处理的 C/P比均比播种前显著提高, 并且 M 30和 M 60的 C/P比显著高于其他处理。

表 5 试验 3a间不同处理的土壤有机碳和速效磷之比 (C/P比)

Table 5 Ratio of soil organic C to available P (C/P ratio) in various treatments over a three year period

处理 Treatments	April 1	October 1	April 2	October 2	April 3	October 3
CK	583.46 ^{aBC}	459.94 ^{bEF}	401.73 ^{dF}	505.56 ^{dDE}	534.94 ^{cCD}	801.42 ^{aA}
M 30	583.46 ^{aDE}	602.37 ^{aDE}	429.88 ^{b^dF}	707.29 ^{bC}	690.04 ^{aC}	1165.13 ^{bA}
M 60	583.46 ^{aC}	531.38 ^{abCD}	417.18 ^{dD}	817.75 ^{aB}	624.00 ^{bC}	1326.07 ^{aA}
B30	583.46 ^{aBCD}	542.03 ^{abDE}	489.14 ^{abE}	608.29 ^{cBCD}	648.04 ^{abB}	779.37 ^{cA}
B60	583.46 ^{aC}	563.66 ^{aCD}	508.31 ^{aD}	615.00 ^{cC}	671.66 ^{aAB}	711.18 ^{cA}

同一列数值后相同的小写英文字母和同一行数值后的相同的大写英文字母表示在无显著性差异 ($p = 0.05$) Value within columns followed by the same letter (lower case) or with in the same row (upper case) are significantly different at $p = 0.05$

用 3a数据进行统计, 土壤全磷和土壤有机碳之间呈显著正相关(表 6)。2001年速效磷和土壤有机碳之间极显著正相关, 2002年则为显著负相关, 2003年二者相关不显著。3年总统计结果显示二者呈极显著负相关。速效磷与土壤全磷之比 (AP/TP)同土壤有机碳之间的相关性同速效磷和土壤有机碳之间的相关性趋势完全相同。

3 讨论

在苜蓿体内, 磷是组成核酸、磷脂、腺苷三磷酸及辅酶的必要元素, 参与许多物质的合成和植物的各种生理生化过程, 是植物体内的基本营养元素。苜蓿的生长对于土壤中磷素和氮素的影响是不同的, 苜蓿能够固定空气中的氮气供其生长使用, 却不能产成磷素, 苜蓿生长中所需的磷素只能从土壤中摄取。因此苜蓿草地生产力的不同势必会对土壤的磷素产生不同的影响。

垄沟集雨技术因其廉价、适应性强、简单、有效而在世界许多半干旱地区得以使用^[6]。研究也发现这种技术对农业、园艺和林业作物有明显的增产效果^[7-10]。试验发现, 覆膜的垄沟处理对紫花苜蓿有增产效果; 而裸露的垄沟处理反倒是减少了苜蓿的产量。并且宽垄覆膜处理的增产效果要好于窄垄的增产效果。不同处理之间在产量上的差异显然也对土壤中的速效磷产生了不同结果。5个处理土壤中速效磷在试验始末的减少量的顺序为: M 60> M 30> CK > B30> B60 这个趋势和 3年总的苜蓿干草产量的趋势完全相对应。可见苜蓿产量和土壤速效磷的消耗之间存在明显地相关性(图 2)。这也表明苜蓿生长的时间越长对土壤中速效磷的消耗也会越多, 因此在苜蓿生长过程中追施磷肥对保证苜蓿草地的生产力是十分有必要的。

表 6 土壤有机碳和土壤磷素之间的相关系数 (R)和显著性水平 (P)

Table 6 Correlation coefficient (R) and significant level (P) between SOC and soil phosphorus

年份 Year	相关水平 Correlation level	TP	AP	AP/TP
2001	R	0.149	0.493 ^{***}	0.434 ^{**}
	P	0.33	0.00058	0.0029
2002	R	0.179	-0.369 [*]	-0.390 ^{**}
	P	0.24	0.013	0.0081
2003	R	-0.151	-0.282	-0.247
	P	0.32	0.060	0.10
2001~2003	R	0.251 ^{**}	-0.290 ^{***}	-0.307 ^{***}
	P	0.0033	0.00065	0.00029

AP/TP表示速效磷和土壤全磷之比 The ratio of available P to total P; AP表示速效磷 Available P; TP表示土壤全磷 Total P

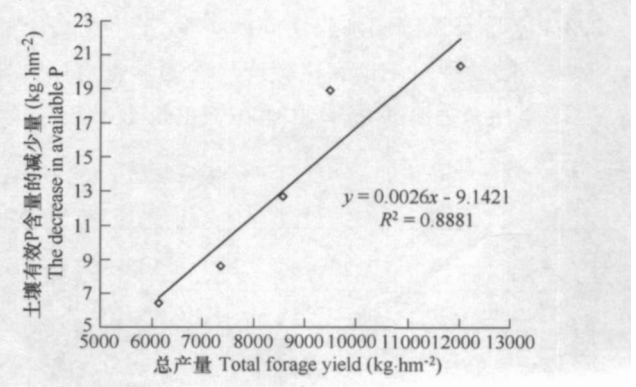


图 2 土壤有效 P 含量的减少量和苜蓿总产量之间的关系

Fig 2 The relationship between the decrease in available P and total forage yield of alfalfa

半干旱黄土丘陵区属石灰性土壤, 土壤全磷含量在 $0.52 \sim 0.77 \text{ g kg}^{-1}$ 之间, 一般说来该地区的土壤全磷含量比较充足, 但全磷中只有小部分被转化为有效磷能够被作物直接利用。因此全磷向植物可利用方向的转化对于作物至关重要, 而在转化过程中, 土壤有机质和土壤微生物起着关键作用。研究表明^[11, 12], 在 C/P 比低于 200 时, 将会出现土壤微生物体碳的短暂增加和有机磷的净矿化; 在 C/P 比高于 300 时, 微生物体碳大幅增加, 微生物竞争土壤中的速效磷, 出现有机磷的净固持现象。在本研究中, 所有处理的 C/P 比都要高于 300 表明土壤速效磷处于极低水平, 微生物和苜蓿之间在竞争速效磷。虽然所有处理的速效磷都有显著下降, 但 M30 和 M60 处理下降幅度最大, 分别达到了 51.5% 和 55.5%。同时, 这两个处理的速效磷在休眠期的恢复也比其他处理要快, 这可能是由于覆膜处理在冬季能够提高土壤温度, 增加微生物活性, 有利于活化土壤中处于固持状态的磷素, 有利于土壤可持续利用。

速效磷与土壤有机碳之间的相关性还与降雨量的多少有关。2001 是个偏早年份, 苜蓿生长期降雨量只有 226.5 mm, 速效磷和土壤有机碳之间显著正相关; 2002 年是个湿润年份, 苜蓿生长期降雨量 323.4 mm, 该年速效磷和土壤有机碳之间显著负相关。这些结果说明, 在干旱年份土壤有机碳的增加会促进土壤有效 P 的积累, 而湿润年份恰好相反, 土壤有机碳的增加会降低土壤有效 P 的积累。出现这种现象的原因可能在于不同降雨年份苜蓿对速效磷的吸收量不同。苜蓿与其他作物相比耗水量比较高^[13~15], 苜蓿的干物质产量和耗水量成线性正相关^[16~18], 相应地, 苜蓿在湿润年份由于产草量较高而消耗的速效磷就要比干旱年份多。这也进一步说明, 苜蓿草地速效磷对产草量反应极为敏感, 要进一步提高苜蓿草地的产草量, 应探讨提高土壤磷素活化率的有效途径。

References

- [1] Geng H Z, Wu Y F, Cao Z Z. Alfalfa in China. Beijing: China Agriculture Press, 1995. 25—58.
- [2] Sun Q Z, Gui R. Factors affecting alfalfa forage yield and quality. Grassland of China, 2000, 1: 57—63.
- [3] Singh V, Trivedi C P. Influence of levels and source of phosphate in fodder production. Madras Agricultural Journal, 1981, 68(2): 138—140.
- [4] Nanjing Agricultural University. Chemical Analysis Methods in Soil and Agriculture. Beijing: China Agricultural Press, 1996.
- [5] SAS Institute. SAS/STAT User's Guide, Version 6., vol 4., 4th ed. Cary, NC: SAS Institute, 1989.
- [6] Reiz C, Maulder P, Begemann L. Water harvesting for plant production. Washington, DC, USA: World Bank Technical Paper 91, 1988.
- [7] Boers Th M, De Groot M, Feddes R A, et al. A linear regression model combined with a soil water balance model to design micro catchments for water harvesting in arid zones. Agric Water Manage, 1986, 11: 187—206.
- [8] Cater D C, Miller S. Three years experience with on-farm water catchment water harvesting system in Botswana. Agric Water Manage, 1991, 19: 191—203.
- [9] Crichley W R S. Some lesson from water harvesting in sub-saharan Africa. Report from a workshop held at Baring, Kenya, 13—17 October 1986. Washington, DC, USA: World Bank, Eastern and Southern Africa Projects Department, 1987.
- [10] Finkel H J, Finkel M L. Engineering measures water harvesting. In: Finkel H J, Finkel M, et al. eds. Semi-arid Soil and Water Conservation. Florida, USA: CRC Press, 1987. 93—101.
- [11] Chen W X. Soil science and environmental microbiology. Beijing: Beijing Agriculture University Press, 1990.
- [12] Huang C Y. Soil science. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [13] Blad B L, Rosenberg N J. Evaluation of resistance and mass transport evapotranspiration models requiring canopy temperature data. Agron J, 1976, 68: 764—769.
- [14] Krognan K K, Hobbs E H. Evapotranspiration of irrigated alfalfa as related to season and growth stage. Can. J Plant Sci., 1965, 45: 310—313.
- [15] Othman M J, Ticks B R, Roth R L. Alfalfa yield and stand response to termination in an arid environment. Agron J, 1996, 88: 44—48.
- [16] Bauder J W, Bauder A, Ramirez J M, et al. Alfalfa water use and production on dryland and irrigated sandy land. Agron J, 1987, 70: 95—99.
- [17] Grimes D W, Wiley P L, Sheesley W R. Alfalfa yield and plant water relations with variable irrigation. Crop Sci., 1992, 32: 1381—1387.
- [18] Sheaffer C C, Tanner C B, Kirkham M B. Alfalfa water relations and irrigation. In: Hanson, A. A. ed. Alfalfa and alfalfa improvement. Agron Monogr. 29. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, Wis., 1988. 373—409.

参考文献:

- [1] 耿华珠, 吴永敷, 曹致中. 中国苜蓿. 北京: 中国农业出版社, 1995. 25~58.
- [2] 孙启忠, 桂荣. 影响苜蓿草产量和品质诸因素研究进展. 中国草地, 2000, 1: 57~63.
- [4] 南京农业大学. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 1996.
- [11] 陈文新. 土壤与环境微生物. 北京: 北京农业大学出版社, 1990.
- [12] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000.