

# 半干旱黄土区苜蓿草地轮作农田土壤氮、磷和有机质变化<sup>\*</sup>

王 俊<sup>1,2</sup> 李凤民<sup>2\*\*</sup> 贾 宇<sup>2</sup> 王亚军<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>西北大学环境科学系, 西安 710069; <sup>2</sup>兰州大学干旱农业生态国家重点实验室, 兰州 730000)

**【摘要】** 大田试验研究了多年生苜蓿草地轮作农田 2 年内的耕层土壤氮、磷养分和有机质变化。结果表明, 与苜蓿连作相比, 苜蓿草地轮作成农田后, 土壤 N 和有机质消耗增加, 2 年中耕层土壤全氮含量平均分别下降了 5.4% 和 19.5%、有机质下降了 46.8% 和 28.2%, 土壤全磷无显著变化; 轮作提高了土壤氮、磷养分有效性及其活化率, 土壤硝态氮含量 2 年分别提高了 15.5% 和 159.1%、速效磷含量提高了 44.5% 和 48.0%, 差异显著。不同轮作方式对土壤养分变化有显著影响。苜蓿草地轮作后第 2 年, 种植春小麦与种植玉米相比差异显著, 种植马铃薯和休闲处理土壤养分变化幅度处于二者之间。种植春小麦能够维持农田土壤肥力生长季平衡, 种植玉米增加了对土壤全氮、有机质和速效磷的消耗, 土壤养分含量出现季节性下降, C/N 和 C/P 降低。在半干旱地区多年生苜蓿草地向农田转变过程中, 以轮作春小麦为宜, 应避免种植玉米作物, 以维持农田肥力平衡。

**关键词** 草田轮作 苜蓿 土壤氮 土壤磷 土壤有机质 轮作方式

**文章编号** 1001-9332(2005)03-0439-06 **中图分类号** S158.3 **文献标识码** A

**Dynamics of soil nitrogen, phosphorus and organic matter in alfalfa-crop rotated farmland in semiarid area of Northwest China.** WANG Jun<sup>1,2</sup>, LI Fengmin<sup>2</sup>, JIA Yu<sup>2</sup>, WANG Yajun<sup>2</sup> (<sup>1</sup>Department of Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710069, China; <sup>2</sup>Laboratory of Arid Agro-ecology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2005, 16(3): 439~444.

Pasture-crop rotation is regarded as a key planting system in the semiarid area of China's Loess Plateau. This paper studied the dynamics of soil nitrogen, phosphorus and organic matter within the two years of alfalfa-crop rotation. The results showed that in comparing with continuous alfalfa planting, alfalfa-crop rotation induced a decline of soil total nitrogen and organic matter contents by 5.4% and 19.5%, and 46.8% and 28.2%, respectively, in the first and second year, but no significant difference was found in soil total phosphorus. Soil nutrient availability was improved due to the rotation. In the first and second year of rotation, soil nitrate nitrogen and available phosphorus contents increased by 15.5% and 159.1%, and 44.5% and 48.0%, respectively. Planting spring wheat could maintain soil fertility, the second was fallow and planting potato, while planting corn accelerated the depletion of soil total nitrogen, organic matter and available phosphorus. As a result, in the alfalfa-crop rotation, planting spring wheat could be more available to the maintenance of soil fertility.

**Key words** Pasture-crop rotation, *Medicago sativa*, Soil nitrogen, Soil phosphorus, Soil organic matter, Rotation pattern.

## 1 引 言

苜蓿 (*Medicago sativa*) 是一种优良的牧草, 在世界各地具有广泛的适应性<sup>[22]</sup>。苜蓿根瘤具有很强的生物固氮能力, 据估算, 当年生苜蓿固定到土壤中的 N 约 35~305 kg·hm<sup>-2</sup>, 比其他作物地和天然草地高。在我国半干旱地区, 1 hm<sup>2</sup> 苜蓿地一年可固定约 270 kgN, 相当于 825 kg 硝酸铵<sup>[28]</sup>。另一方面, 苜蓿种植后, 其根瘤菌和大量的须根给土壤留下的腐殖质可增加土壤有机质<sup>[27]</sup>, 改善土壤团粒结构<sup>[2]</sup>。黄土高原地区种植 2 年的苜蓿, 土壤有机质可达到 2.00~2.88 g·kg<sup>-1</sup>, 2 年生至 4 年生地苜蓿地, 土壤中留有大量根茬, 1 hm<sup>2</sup> 遗留地根茬中约含 214.5

kg N、34.5 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 90.0 kg K<sub>2</sub>O<sup>[29]</sup>。因此, 将苜蓿引入作物轮作系统, 实施草田轮作可以有效地改良土壤, 提高土壤肥力, 从而提高后茬作物的产量和品质<sup>[1~13, 17, 18, 23, 27]</sup>。研究表明, 与小麦连作系统相比, 苜蓿-小麦轮作可以显著提高土壤有机质和速效氮、速效磷含量<sup>[5, 13, 16]</sup>。利用苜蓿-作物轮作进行土壤改良, 积极推行草田轮作制度, 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<sup>[14, 19, 20, 24]</sup>。

<sup>\*</sup> 国家“十五”科技攻关项目(2001BA509B15)和国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000018603)。

<sup>\*\*</sup> 通讯联系人。E-mail: fml@lzu.edu.cn  
2004-04-20 收稿, 2004-07-14 接受。

在苜蓿-作物草田轮作系统中,由农田轮作为苜蓿草地一般不会存在土壤肥力障碍,并且土壤肥力水平会不断提高.由苜蓿草地轮作为农田,则土壤肥力下降,但对苜蓿草地轮作为农田后土壤肥力的消耗动态,以及不同作物对土壤肥力的影响目前还很少了解.本文系统地研究了半干旱黄土区苜蓿草地轮作农田后土壤 N、P 和有机质的变化,旨在阐明苜蓿草地轮作为农田后的土壤养分消耗机制,探求半干旱地区合理有效的草田轮作方式,实现农田生态系统的可持续利用.

## 2 研究地区与研究方法

### 2.1 研究地区概况

表 1 中连川试验地土壤的基本理化性质

Table 1 Basic soil properties of experimental site in Zhonglianchuan

土层 Layer (cm)	有机碳 Organic C (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total P (g·kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available P (mg·kg <sup>-1</sup> )	pH	机械组成 Partical size analysis(%)			阳离子交换量 CEC (c mol·100 g <sup>-1</sup> )	容重 Bulk density (g·cm <sup>-3</sup> )
						2.0~0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm		
0~20	0.53	0.065	0.063	7.0	8.5	33.72	48.15	17.32	9.1	1.20
20~40	0.44	0.056	0.067	6.0	8.4	33.80	48.85	27.97	6.8	1.21

### 2.2 研究方法

**2.2.1 实验设计** 在半干旱地区,苜蓿在生长 7~8 年后将进入生理衰退期.本文选择了一块已种植 10 年的紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 草地作为试验样地,由于管理良好,苜蓿尚未进入衰退期,生物产量仍维持在较高水平.2000 年秋季收获后,将部分面积(400 m<sup>2</sup>)的苜蓿草地翻耕,2001 年 4 月 30 日种植草谷子 (*Setaria italica*, 只收获谷草,不收籽粒),设为苜蓿-谷子处理(AM),未被翻耕部分作为苜蓿草地对照(AA).2002 年 AA 处理继续种植苜蓿,编号 AAA;AM 处理被均分 4 份,其中一份进行完全休耕(AMF),另 3 份分别种植玉米 (*Zea mays*)、马铃薯 (*Solanum tuberosum*) 和春小麦 (*Triticum aestivum*),编号分别为 AMC、AMP 和 AMW.小麦、玉米、马铃薯分别于 2002 年 4 月 4 日、5 月 1 日和 5 月 2 日播种,8 月 2 日、9 月 25 日和 9 月 28 日收获.所有处理均没有施肥,设有 3 个小区作为 3 次重复,随机区组设计,每小区面积 30 m<sup>2</sup>.

**2.2.2 测定方法** 分别于当年作物生长季初(4 月 15 日)、季中(7 月 15 日)和季末(10 月 15 日)在各处理小区采集耕层(0~20 cm)土壤样品,3 次重复,风干、过筛,测定土壤有机质和 N、P 养分.生长季养分平衡为 10 月份测定与 4 月份测定的养分含量之差.有机质测定用重铬酸钾容量法-外加热法;全氮测定用半微量凯氏定氮法,先用浓硫酸充分消煮样品后用凯氏定氮仪(Kjeltec Auto 1030 Analyzer,瑞典,FOSS TECATOR 公司制造)进行定氮分析;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 用 2MKCl 浸提后在流动注射分析仪(FIAstar 5000 Analyzer,瑞典,FOSS TECATOR 公司制造)上测定;全磷用钒钼黄比色法测定;速效磷用 0.5 M NaHCO<sub>3</sub> 浸提法测定.

本研究在我国甘肃省榆中县中连川乡中连川村进行(36°02' N, 104°25' E).该地区平均海拔 2 345 m;平均年光能辐射总量 5.0×10<sup>9</sup> J·m<sup>-2</sup>,年日照时数 2 500 h;年均气温 6.2℃;年平均降水量 328.1 mm,年际降水变率 22.5%,为中温带半干旱气候.作物一年一熟.该地区降水少,年降水变率大,且分布不均,作物生长水源主要为天然降水,为典型的旱地雨养农业.2001 年 8 月 18 日和 9 月 17 日出现 2 次 30 mm 左右的强降水过程,但全年降水偏少,较历年平均低 45.5 mm.2002 年为丰水年,超过 30 mm 的降水过程出现了 5 次,整个实验期内降水较历年平均增加了约 76 mm.试区为典型的半干旱黄土丘陵沟壑区,供试土壤为黄绵土,肥力中等,田间持水量为 21.18%,凋萎湿度为 7.17%.供试土壤其它基本性质见表 1.

试验数据采用 SAS(6.12)统计软件(PROC ANOVA)进行分析.

## 3 结果与分析

### 3.1 多年生苜蓿草地轮作农田耕层土壤氮变化

**3.1.1 土壤全氮** 由表 2 可以看出,2001 年 4 月、7 月和 10 月 3 次测定中,AM 土壤全氮含量均低于 AA 处理,其中 10 月份差异达到显著水平( $P < 0.05$ ).与 AA(0.400 g·kg<sup>-1</sup>)相比,AM 含氮量(0.378 g·kg<sup>-1</sup>)全年平均下降了 5.4%.生长季平衡中 AM 的单季增加量较 AA 处理低了 0.035 g·kg<sup>-1</sup>.

2002 年(苜蓿草地轮作后第 2 年),土壤全氮的消耗持续增加.4 月、7 月和 10 月 3 次测定中,轮作处理全氮含量(0.209~0.338 g·kg<sup>-1</sup>,平均 0.273 g·kg<sup>-1</sup>)显著低于 AAA(0.338 g·kg<sup>-1</sup>),全年平均下降了 19.5%.不同轮作农田中,AMC 和 AMP(0.252 g·kg<sup>-1</sup>和 0.256 g·kg<sup>-1</sup>)含氮量显著低于 AMW 和 AMF(0.288 g·kg<sup>-1</sup>和 0.294 g·kg<sup>-1</sup>).经过一个生长季,AMC 土壤全氮下降了 0.036 g·kg<sup>-1</sup>、AMP 基本持平、AMW 和 AMF 则分别增加了 0.061 g·kg<sup>-1</sup>和 0.055 g·kg<sup>-1</sup>.这表明与轮作春小麦和休闲相比,在苜蓿草地翻耕后第 2 年,轮作玉米不利于保持土壤全氮的平衡.

表2 中连川多年生苜蓿草地轮作农田耕层土壤(0~20 cm)N、P和有机质

Table 2 Soil total N, total P, available P and organic matter and its balance at 0~20 cm depth after the conversion of alfalfa grassland to cropland in Zhonglianchuan ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

处理 Treatment	4月15日 April 15				7月15日 July 15			10月15日 October 15				平均 Average				生长季平衡 Seasonal balance			
	A	B	C	D	A	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
2001AA	0.419	0.730	5.10	12.0	0.314	7.86	7.86	0.467	0.697	7.60	42.6	0.400	0.714	6.85	22.6	0.048	-0.033	2.50	30.6
AM	0.392	0.797	7.98	14.7	0.338	12.99	8.01	0.405	0.714	8.74	13.3	0.378	0.756	9.90	12.0	0.013	-0.083	0.76	-1.39
Lsd <sub>0.05</sub>	ns	ns	0.94	1.52	ns	3.33	ns	0.030	ns	ns	8.36	ns	ns	0.96	2.05	ns			
2002AAA	0.360	0.705	2.79	12.4	0.283	2.14	10.7	0.372	0.696	2.10	12.9	0.338	0.701	2.34	12.0	0.012	-0.009	-0.69	0.56
AMC	0.277	0.686	4.49	8.11	0.237	5.25	7.31	0.241	0.682	1.70	7.62	0.252	0.684	3.81	7.68	-0.036	-0.004	-3.14	-0.49
AMF	0.277	0.686	4.49	8.11	0.274	2.92	9.41	0.332	0.699	1.35	9.06	0.294	0.693	2.92	8.86	0.055	0.013	-3.14	0.95
AMP	0.277	0.686	4.49	8.11	0.209	3.83	7.95	0.281	0.675	1.32	8.60	0.256	0.681	3.21	8.22	0.004	-0.011	-3.17	0.49
AMW	0.277	0.686	4.49	8.11	0.249	4.85	9.66	0.338	0.686	2.44	11.26	0.288	0.686	3.93	9.67	0.061	0.000	-2.05	3.15
Lsd <sub>0.05</sub>	0.030	ns	1.68	1.60	0.042	1.53	1.34	0.045	ns	0.48	1.85	0.026	ns	0.30	0.86	ns			

A: 全氮 Total N; B: 全磷 Total P; C: 速效磷 Available P; D: 有机质 Organic matter.

表3 中连川多年生苜蓿草地轮作农田耕层土壤(0~20cm)矿质氮变化

Table 3 Soil mineral nitrogen at 0~20cm depth after the conversion of alfalfa grassland to cropland in Zhonglianchuan ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

处理 Treatment	4月 April			7月 July			10月 October			平均 Average			生长季平衡 Seasonal balance		
	$\text{NO}_3^-$ -N	$\text{NH}_4^+$ -N	$\Sigma$	$\text{NO}_3^-$ -N	$\text{NH}_4^+$ -N	$\Sigma$	$\text{NO}_3^-$ -N	$\text{NH}_4^+$ -N	$\Sigma$	$\text{NO}_3^-$ -N	$\text{NH}_4^+$ -N	$\Sigma$	$\text{NO}_3^-$ -N	$\text{NH}_4^+$ -N	$\Sigma$
2001AA	4.36	40.71	45.08	8.68	31.49	40.17	9.73	37.80	47.53	7.59	36.67	44.26	5.37	-2.91	2.45
AM	6.39	36.64	43.03	7.91	43.92	51.83	12.00	39.32	51.32	8.77	39.96	48.73	5.61	2.68	8.29
Lsd <sub>0.05</sub>	0.46	ns	ns	ns	4.95	5.26	1.96	ns	ns	0.93	ns	ns			
2002AAA	7.49	25.05	32.54	2.66	23.07	25.73	2.51	39.04	41.55	4.22	29.05	33.27	-4.98	13.99	9.01
AMC	18.52	25.85	44.37	2.70	29.40	32.10	2.87	42.96	45.84	8.03	32.74	40.77	-15.65	17.11	1.47
AMF	18.52	25.85	44.37	8.49	28.35	36.85	17.18	36.22	53.41	14.73	30.14	44.88	-1.34	10.37	9.04
AMP	18.52	25.85	44.37	7.20	29.11	36.31	7.42	35.09	42.51	11.05	30.02	41.06	-11.10	9.24	-1.86
AMW	18.52	25.85	44.37	3.37	28.55	31.92	7.89	46.26	54.15	9.93	33.55	43.48	-10.63	20.41	9.78
Lsd <sub>0.05</sub>	2.04	ns	4.41	0.45	3.38	2.99	1.70	5.79	4.35	0.93	2.83	3.72			

3.1.2 土壤矿质氮 2001年4月和10月测定中, AM硝态氮( $\text{NO}_3^-$ -N)含量显著高于AA, 7月份则差异不显著, 3次平均AM( $8.77 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )较AA( $7.59 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )提高了15.5%(表3). 铵态氮( $\text{NH}_4^+$ -N)和总矿质氮含量7月测定中AM显著高于AA, 4月和10月测定以及3次测定的平均值, 2个处理间均无显著差异. 经过一个生长季, 2个处理硝态氮增加量相近, 但由于AA铵态氮含量下降, 导致AM的单季总矿质氮积累量显著高于AA. AM总矿质氮增加量较AA提高了 $5.84 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

2002年除10月测定中AMP处理外, 其它轮作处理土壤硝态氮、铵态氮和总矿质氮含量均高于AAA处理. 全年平均轮作农田土壤硝态氮和总矿质氮较苜蓿草地(AAA)分别提高了159.1%和27.8%, 差异显著; 铵态氮提高了8.8%, 其中AMW、AMC与AAA差异显著, 苜蓿草地轮作农田后土壤硝态氮含量显著提高, 并可相应提高土壤总矿质氮水平. 不同轮作农田中, 3次测定平均土壤硝态氮和总矿质氮最高AMF( $14.73 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $44.88 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、AMC最低( $8.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $40.77 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); 而铵态氮AMW最高( $33.55 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、AMP最低( $30.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). 2002年生长季平衡中, 各处理土壤硝态氮含量均有不同程度的下降, 而铵态氮含量出现上升. 总矿质氮AMP有少量

降低、AMC少量增加, 而AMW、AMF和AAA则均有超过 $9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的季节性积累.

3.1.3 土壤N活化率 表4是以不同处理耕层土壤总矿质氮量与全氮量的比值来反映的土壤N活化率. 2001年AM处理土壤N活化率3次测定均高于AA, 其中7月和10月测定差异显著. 3次测定平均AM和AA的土壤N活化率分别为13.0%和11.2%. 2002年测定结果与前一年相同, 轮作农田土壤N活化率( $12.9\% \sim 19.7\%$ , 平均 $15.8\%$ )显著高于AAA( $9.78\%$ ). 不同轮作处理在7月和10月测定中差异显著, 7月份测定AMP( $17.6\%$ )显著高于其它3个处理, 而10月份测定则AMC处理最高( $19.7\%$ ).

表4 中连川多年生苜蓿草地轮作农田耕层土壤(0~20 cm)N、P活化率变化

Table 4 Soil N, P availability at 0~20 cm depth after the conversion of alfalfa grassland to cropland in Zhonglianchuan (%)

处理 Treatment	4月15日 April 15		7月15日 July 15		10月15日 October 15		平均 Average	
	N	P	N	P	N	P	N	P
2001 AA	10.7	0.70	12.8	1.09	11.2	0.90		
AM	11.0	1.00	15.4	1.22	13.0	1.11		
Lsd <sub>0.05</sub>	ns	0.10	1.78	ns	1.12	0.11		
2002 AAA	9.04	0.40	9.09	0.30	9.78	0.35		
AMC	16.1	0.66	13.7	0.25	16.5	0.45		
AMF	16.1	0.66	13.4	0.19	15.4	0.42		
AMP	16.1	0.66	17.6	0.20	16.3	0.43		
AMW	16.1	0.66	12.9	0.36	15.0	0.50		
Lsd <sub>0.05</sub>	1.72	0.06	2.69	0.06	3.58	0.04		

### 3.2 多年生苜蓿草地轮作农田耕层土壤磷变化

**3.2.1 土壤全磷** 由表 2 可见, 2001 年 AM 和 AA 土壤全磷含量在 4 月和 10 月测定中均无显著差异. 2002 年结果与 2001 年相同, 土壤全磷含量在所有处理间没有显著差异.

**3.2.2 土壤速效磷** 表 2 结果表明, 2001 年苜蓿草地翻耕后土壤速效磷含量增加. AM 耕层土壤速效磷含量在 3 次测定中均高于 AA, 其中 4 月和 7 月测定差异显著, AM 3 次平均速效磷含量 ( $9.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 较 AA ( $6.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 高 44.5%. 经过一个生长季, 2 个处理土壤速效磷含量均有增加, 但 AM 的增加量显著低于 AA.

2002 年轮作农田耕层土壤速效磷含量 4 月、7 月和 10 月 3 次测定平均为  $3.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 比 AAA ( $2.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 提高了 48.0%, 苜蓿草地轮作第 2 年, 土壤速效磷含量仍有显著提高. 但在 10 月份测定中, 除 AMW 外的其它 3 个轮作处理土壤速效磷含量均显著低于 AAA, 玉米、马铃薯等作物种植或休闲地均导致土壤速效磷含量迅速下降.

**3.2.3 土壤磷活化率** 以速效磷与全磷的比值计算的土壤磷活化率(表 4), 结果表明, 苜蓿草地在翻耕后土壤磷活化程度得到提高. 2001 年 AM 和 AA 的 P 活化率 2 次测定平均为 1.11% 和 0.90%. 2002 年 4 月测定轮作农田土壤磷活化率(0.66%)显著高于 AAA (0.40%). 10 月份测定 AMW 显著高于 AAA 处理 (0.30%), AMP 和 AMF 则显著低于 AAA 处理.

### 3.3 多年生苜蓿草地轮作农田耕层土壤有机质

2001 年 4 月测定中, AM 耕层土壤有机质含量显著高于 AA 处理(表 2), 可能是前一年的翻耕过程中将地表的大量枯落物埋入土壤, 增加了土壤耕

层的有机质含量. 在 7 月和 10 月测定中 AM 耕层有机质含量均低于 AA, 其中 10 月测定结果差异达到显著水平. 3 次测定平均 AM 有机质含量 ( $12.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 较 AA ( $22.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 下降了 46.8%. 从生长季平衡看, AA 土壤耕层有机质增加了  $30.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , AM 下降了  $1.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

2002 年除 10 月测定中 AMW 处理外, 轮作农田有机质含量(平均  $8.61 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 显著低于苜蓿草地(平均  $12.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 平均下降了 28.2%. 从不同轮作处理来看, AMC 和 AMP 在 7 月和 10 月测定中土壤有机质显著低于 AMW 和 AMF, 表明轮作第 2 年种植春小麦或休闲较种植玉米或马铃薯降低了对土壤有机质的消耗. 生长季平衡也有类似结果, AMW 有机质增加了  $3.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , AMC 则下降了  $0.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

### 3.4 土壤 C/N 与 C/P

图 1 结果表明, 2001 年除 4 月测定外, AA 具有更高的土壤 C/N, 尤其是在 10 月份测定中 AA 的 C/N 达到了 53, 而 AM 仅为 23.4. 2002 年 AAA 在 4 月测定中显著高于轮作处理, 后 2 次测定无显著差异. AMC 在 7 月测定中 C/N (17.9) 低于其它处理, 其中与 AMW (22.9) 差异显著.

从 C/P 来看, 2001 年 4 月份测定 AM 与 AA 之间无显著差异, AM 处理 C/P 为 11.7, 略高于 AA (8.7). 10 月测定 AA 处理 C/P 为 35.5, 而 AM 处理仅为 13.4. 2002 年延续了前一年的趋势, 轮作农田较苜蓿草地具有更低的土壤 C/P. 不同轮作处理中, 10 月测定 AMC 土壤 C/P 最低 (6.5), 显著低于 AMW (8.9), AMP、AMF 处于二者之间, 分别为 7.4 和 7.5.

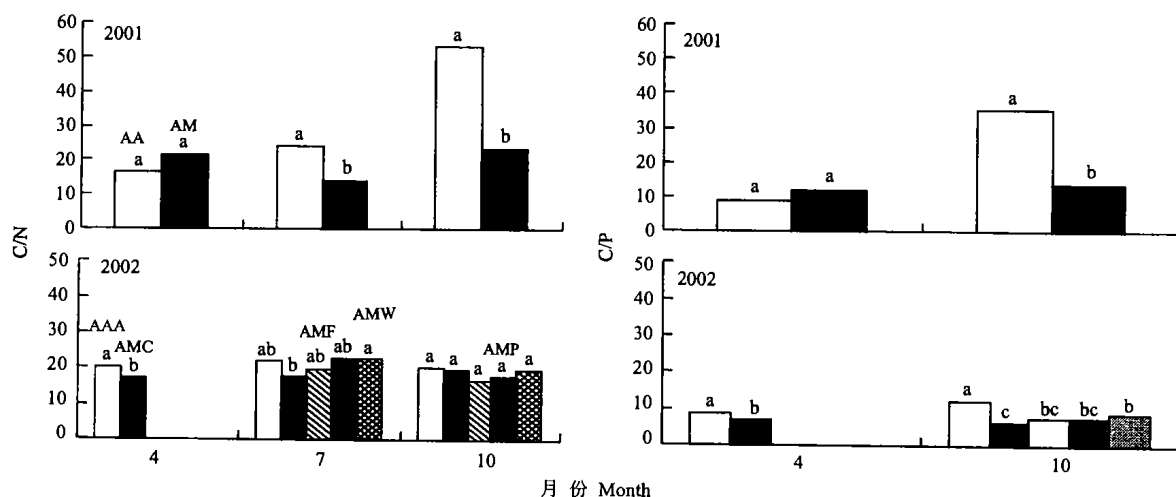


图 1 中连川多年生苜蓿草地轮作农田土壤 C/N 与 C/P 变化

Fig. 1 Soil C/N and C/P at 0~20 cm depth after the conversion of alfalfa grassland to cropland in Zhonglianchuan.

## 4 讨 论

Holford 等<sup>[9,10]</sup>、MaCallum 等<sup>[17]</sup>在澳大利亚对苜蓿-作物轮作的研究表明,苜蓿通过固氮作用可为后作小麦提供充足的土壤 N 供应,并提高土壤中有效氮水平。Li 等<sup>[13]</sup>对我国黄土高原半湿润地区的研究表明,与小麦连作种植相比,苜蓿-小麦-玉米循环后土壤全氮和速效氮含量均显著增加。本文中并没有选择相应的常规耕作方式进行比较,而是与苜蓿连作进行了对比。10 年生苜蓿地在翻耕后 2 年内土壤全氮含量显著下降,矿化氮( $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N)的积累量显著上升,土壤 N 活化率提高。这表明苜蓿草地轮作农田后土壤供氮能力提高,在半干旱地区进行苜蓿-作物轮作对提高后作作物土壤的 N 有效性具有积极作用。

党廷辉<sup>[5]</sup>研究表明,与小麦连作相比,苜蓿-小麦轮作模式土壤速效磷显著增加,而全磷则没有差异。而在 Li 等<sup>[13]</sup>的研究中,苜蓿-小麦种植土壤速效磷和全磷含量均显著低于小麦连作。本文中,苜蓿草地轮作 2 年中对土壤全磷没有影响,轮作后土壤速效磷含量较苜蓿草地显著增加,但其趋势并没有持续到第 2 年生长季结束,种植玉米、马铃薯或休闲均导致土壤速效磷含量迅速下降。这表明苜蓿草地向农田转换过程对土壤 P 的影响相对于土壤 N 和有机质要小得多,影响时间上也较短暂。

土壤有机质是农田生态系统可持续能力的关键指示因子<sup>[25~27]</sup>。多年生作物(或牧草)在向一年生作物轮作过程中,由于耕作过程增加了对土壤的干扰,土壤有机质迅速下降,土壤退化过程加速<sup>[2,11,27]</sup>。一般认为,种植苜蓿可以大幅度提高土壤的有机质含量<sup>[2,5,10,27]</sup>。本文结果证实了这一结论。与苜蓿连作相比,苜蓿草地轮作农田土壤有机质含量出现显著下降,表明苜蓿草地轮作过程加速了土壤有机质的分解,其机理可从 C/N 和 C/P 中得到进一步的解释。

C/N 比值可以暗示土壤生物分解过程中 C 和 N 转化作用之间的一种密切关系。在正常耕地中,土壤生物获得平衡营养的土壤 C/N 比大约为 25<sup>[21]</sup>。如果土壤 C/N 比值大于 25,即表示土壤中 N 的含量不能满足细菌的需要。这非但不会有 N 的积累,而且腐败菌类迅速繁殖,加速土壤有机质的分解。在这种情况下,土壤中没有多余的  $\text{NH}_4^+$ -N,不会产生硝化作用<sup>[29]</sup>。本文中 2001 年多年生苜蓿草地土壤在后 2 次测定中均大于 25,最高达到了 53,表明在

苜蓿生长季中后期,土壤微生物对土壤氮的固持大大强于矿化。与苜蓿草地相比,翻耕后土壤的 C/N 比显著下降,在 16~20 之间,表明土壤氮的矿化大于固持,直接导致土壤有机质的分解和矿质氮的增加。C/P 比也有类似结论。

多年生苜蓿草地翻耕后种植一季浅根系的草谷是当地常见的种植方式,以提供饲料和恢复农田水分。但是,苜蓿草地轮作农田第一年种植草谷子加速了土壤无机养分的矿化,草谷地土壤有机质含量也显著下降。本文在苜蓿草地轮作第 2 年选择了 4 种不同的种植方式探讨土壤矿化过程的影响。

与种植作物相比,轮作休闲主要提高了土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量,但这种夏季休闲的方式也有可能增加  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失的潜在危险<sup>[15]</sup>。不同作物中,轮作第 2 年种植玉米与种植春小麦对土壤养分的影响显著不同,种植马铃薯则处于二者之间。玉米与其他作物相比,生物学产量较高,对土壤养分消耗相应较大。种植玉米后土壤全氮、有机质含量、速效磷含量均迅速下降,C/N、C/P 降低,并出现季节性养分亏缺。从生长季平衡来看,种植春小麦维持了较高的土壤养分含量,土壤全氮、矿质氮和有机质均出现季节性增加。这表明在没有任何外源性养分输入情况下,从实现农田生态系统自身可持续性角度来看,多年生苜蓿草地轮作农田第 2 年以种植春小麦为宜,应避免种植玉米等耗肥量较大的作物。

## 参考文献

- 1 Anthony MW, Graeme JB, *et al.* 2000. Managing legume leys, residues and fertilizers to enhance the sustainability of wheat yields and nutrient balance 1. The effects on wheat yields and nutrient balances. *Soil Till Res*, **54**:63~75
- 2 Anthony MW, Graeme JB, *et al.* 2000. Managing legume leys, residues and fertilizers to enhance the sustainability of wheat yields and nutrient balance 2. Soil physical fertility and carbon. *Soil Till Res*, **54**:77~89
- 3 Benediktas J, Genovaite J. 2002. Erosion-preventive crop rotations for landscape ecological stability in upland regions of Lithuania. *Agric Ecosyst Environ*, **95**:1~14
- 4 Bruulsema TW, Christie BR. 1987. Nitrogen contribution to succeeding corn from alfalfa and red clover. *Agron J*, **79**:96~100
- 5 Dang T-H(党廷辉). 1998. Influence of crop rotation on soil fertility in arid-highland of Loess Plateau. *J Soil Erosion Soil Water Cons* (土壤侵蚀与水土保持学报), **4**(3):44~47(in Chinese)
- 6 Galantini JA, Landriscini MR, Iglesias JO, *et al.* 2000. The effects of crop rotation and fertilization on wheat productivity in the Pampean semiarid region of Argentina 2. Nutrient balance, yield and grain quality. *Soil Till Res*, **53**:137~144
- 7 Hesterman OB, Sheaffer CC, Barnes DK, *et al.* 1986. Alfalfa dry matter and nitrogen production, and fertilizer nitrogen response in legume-corn rotations. *Agron J*, **78**:19~23
- 8 Hobbs JA. 1987. Yields and protein contents of crop in various rotations. *Agron J*, **79**:832~836
- 9 Holford ICR, Crocker GJ. 1997. A comparison of chickpeas and

- pasture legumes for sustaining yields and nitrogen status of subsequent wheat. *Aust J Agric Res*, **48**:305~315
- 10 Holford ICR, Schweitzer BE, Crocker GJ. 1998. Comparative effects of subterranean clover, medic, lucerne, and chickpea in wheat rotations, on nitrogen, organic carbon, and moisture in two contrasting soils. *Aust J Soil Res*, **36**:57~72
  - 11 Karunatilake UP, van Es HM. 2002. Rainfall and tillage effects on soil structure after alfalfa conversion to maize on a clay loam soil in New York. *Soil Till Res*, **67**:135~146
  - 12 Latta RA, Cocks PS, Matthews C. 2002. Lucerne pastures to sustain agricultural production in southwestern Australia. *Agric Water Man*, **53**:99~109
  - 13 Li FR, Gao CY, Zhao HL, et al. 2002. Soil conservation effectiveness and energy efficiency of alternative rotations and continuous wheat cropping in the Loess Plateau of northwest China. *Agric Ecosys Environ*, **91**:101~111
  - 14 Li F-M(李凤民), Xu J-Z(徐进章), Sun G-J(孙国钧). 2003. Restoration of degraded ecosystems and development of water harvesting ecological agriculture in the semiarid Loess Plateau of China. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **23**(9):1901~1909(in Chinese)
  - 15 Li S-Q(李世清), Li S-X(李生秀). 2000. Leaching loss of nitrate from semiarid area agroecosystem. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **11**(2):240~243(in Chinese)
  - 16 Liu X-H(刘晓宏), Hao M-D(郝明德). 2001. Effects of long-term plant *Medicago sativa* L. on soil nitrogen nutrients. *Chin J Eco-Agric*(中国生态农业学报), **9**(2):82~84(in Chinese)
  - 17 MaCallum MH, Peoples MB, Connor DJ. 2000. Contributions of nitrogen by field pea(*Pisum sativum* L.) in a continuous cropping sequence compared with a Lucerne(*Medicago sativa* L.)-based pasture ley in the Victorian Wimmera. *Aust J Agric Res*, **51**:13~22
  - 18 Miglierina AM, Iglesias JO, Landriscini MR, et al. 2000. The effects of crop rotation and fertilization on wheat productivity in the Pampean semiarid region of Argentina 1. Soil physical and chemical properties. *Soil Till Res*, **53**:129~135
  - 19 Shan L(山 仑). 1988. Discussion on establishment of a good Agroecological model in the loess upland. *Bull Soil Water Cons*(水土保持通报)(1):1~7(in Chinese)
  - 20 Shan L(山 仑), Liu Z-M(刘忠民), Xin Y-Q(辛业权), et al. 1992. A study on the grass and field crops rotation in Mountain region of Southern Ningxia 1. The production and benefit of different rotation system. *J Soil Water Cons*(水土保持学报), **6**(4):60~68(in Chinese)
  - 21 Stevenson FJ. 1982. Nitrogen in Agriculture Soils. Madison: Am Soc Agron, Inc.; Crop Sci Soc Am, Inc.; Soil Sci Soc Am Inc.
  - 22 Sun J-H(孙建华), Wang Y-R(王彦荣). 2004. Yield characteristics and genetic diversity of main alfalfa varieties in China. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **15**(5):803~808(in Chinese)
  - 23 Wang Q-S(王庆锁), Su J-K(苏加楷), Zhang Y-F(张永亭), et al. 1999. Reviews on alfalfa-crop rotations. *Eco-Agric Res*(生态农业研究), **7**(3):35~38(in Chinese)
  - 24 Wu D-L(吴敦亮). 1989. Study of grassland development in farmland. *Pratacul Sci*(草业科学), **6**(4):41~44(in Chinese)
  - 25 Xie L-H(谢林花), Lü J-L(吕家珑), Zhang Y-P(张一平), et al. 2004. Influence of long term fertilization on phosphorus fertility of calcareous soil I. Organic matter, total phosphorus and available phosphorus. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **15**(5):787~789(in Chinese)
  - 26 Yang J-C(杨景成), Han X-G(韩兴国), Huang J-H(黄建辉), et al. 2003. Effects of land use change on carbon storage in terrestrial ecosystem. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **14**(8):1385~1390(in Chinese)
  - 27 Yang XM, Kay BD. 2001. Rotation and tillage effects on soil organic carbon sequestration in a typic Hapludalf in Southern Ontario. *Soil Till Res*, **59**:107~114
  - 28 Zhang S-H(张少华). 1997. Discussion of approach and aspect of grassland use in Loess Plateau of Longdong Region. *Pratacul Sci*(草业科学), **14**(5):4~7(in Chinese)
  - 29 Zhu X-M(朱显谟). 1989. Soil and Agriculture of Loess Plateau. Beijing: Agricultural Press. (in Chinese)

---

作者简介 王 俊,男,1974年11月生,博士.主要从事环境与生态学研究,发表论文20余篇,其中SCI收录4篇. Tel:029-88307315;E-mail:wangj@nwu.edu.cn

---