

# 施氮和覆膜对旱作春玉米农田土壤微生物量和土壤酶活性的影响

朱利霞<sup>1,2</sup>,岳善超<sup>1</sup>,沈玉芳<sup>1</sup>,李世清<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西杨凌712100;

2.西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌712100)

**摘要:**为研究长期不同施氮水平和覆膜对黄土高原旱作春玉米高产体系土壤微生物活性的影响,设置田间试验包含施氮水平和覆膜2个因子,施氮量分别为0(N0)、100 kg·hm<sup>-2</sup>(N100)、250 kg·hm<sup>-2</sup>(N250)和400 kg·hm<sup>-2</sup>(N400),每个施氮水平下分别有覆膜(F)与不覆膜(B)处理,供试玉米品种为先玉335。2014年采集0~10 cm和10~20 cm土层土壤样品,测定土壤微生物量和酶活性,分析微生物量计量学特征并进行综合评价。结果表明,无论覆膜与否,土壤微生物量碳、氮和磷均随施氮量的增加而增加(除不覆膜时N400处理),施氮量高于250 kg·hm<sup>-2</sup>时土壤微生物量增加不显著。覆膜对土壤微生物量碳、氮无显著影响,而显著增加土壤微生物量磷;覆膜在一定程度上降低N0、N100和N400处理土壤微生物量碳氮比,施氮则显著增加微生物量碳氮比和微生物量氮磷比。0~10 cm土层脲酶活性随施氮量的增加而增加,但覆膜对脲酶活性无显著影响。覆膜和施氮均显著增加碱性磷酸酶活性,0~10 cm和10~20 cm土层覆膜N400处理碱性磷酸酶活性在相应土层最大,分别为1.49 mg·g<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>和1.61 mg·g<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>。主成分分析结果表明施氮量为250 kg·hm<sup>-2</sup>时土壤微生物活性最强。研究表明无论覆膜与否,250 kg·hm<sup>-2</sup>的施氮量是该地区适宜的施氮量。

**关键词:**氮肥;地膜覆盖;旱作春玉米;土壤微生物量;土壤酶活性

中图分类号:S154; S143.1 文献标志码:A

## Effects of nitrogen fertilization and film mulching on soil microbial biomass and enzyme activity of spring maize in semi-arid cropland

ZHU Li-xia<sup>1,2</sup>, YUE Shan-chao<sup>1</sup>, SHEN Yu-fang<sup>1</sup>, LI Shi-qing<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest

A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** To explore effects of long-term N fertilization and film mulching on soil microbial activities in high-yield and high-efficiency dryland maize system on the Loess Plateau and provide microbial basis for reasonable fertilization and agronomic management in this region, a field study with two main treatments of film mulching (F) and N fertilization (N) were conducted. Nitrogen fertilization rates were 0 (N0), 100 (N100), 250 (N250), and 400 (N400) kg·hm<sup>-2</sup>. The maize variety used was Xianyu 335. Soil samples from layers of 0~10 cm and 10~20 cm were collected in 2014 and soil microbial biomass and enzyme activities were determined. Ecological stoichiometry of soil microbial biomass and comprehensive evaluation of microbial activities were analyzed using principal component analysis. Whether mulched with plastic film or not, soil microbial biomass C, N, and P increased with increasing N fertilization rates except for microbial biomass N in N400 without film mulching, and the increase effect of N fertilization disappeared when N fertilization rate was above 250 kg·hm<sup>-2</sup>. Film mulching had no effect on soil microbial biomass C and N, but significantly increased microbial biomass P. Film mulching decreased ratios of mi-

icrobial biomass C to N in treatments of N0, N100, and N400. N fertilization significantly increased the values of microbial biomass C/N and microbial biomass N/P. Urea activity increased with increasing N fertilization rate in 0~10 cm soil layer, but it was not affected by film mulching in both layers. Both film mulching and N fertilization significantly increased alkaline phosphatase activity, and the highest values were observed in FN400 ( $1.49 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  in 0~10 cm layer and  $1.61 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ , respectively). The principal component analysis results indicated that  $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  of N fertilization treatment shared the highest soil microbial activities whether with or without plastic film mulching. Overall, N fertilization at a rate of  $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  in soil with or without film mulching was optimal for soil sustainability in this region.

**Keywords:** nitrogen fertilization; film mulching; dryland spring maize; soil microbial biomass; soil enzyme activity

黄土高原是我国典型的半干旱地区,但当地早春较低的温度和缺水的现状不利于作物的生长和产量的形成<sup>[1]</sup>。近年来,地膜覆盖因其可以增加土壤温度、保持土壤水分、提高作物产量而被广泛应用<sup>[2]</sup>。然而地膜覆盖在增产的同时,也会增加土壤养分的消耗,减少有机物料在土壤中的残留<sup>[3]</sup>。覆膜与施氮等可以通过改变土壤通透性、温度、水分和养分状况进而影响土壤的微生物过程<sup>[4]</sup>,而土壤微生物量和酶活性对土壤状况的响应更为敏感<sup>[5]</sup>。目前有研究表明地膜覆盖显著增加土壤微生物量碳和酶活性,从而有利于土壤养分的有效化<sup>[6]</sup>,然而张成娥等<sup>[7]</sup>研究发现地膜覆盖显著降低土壤微生物量。因此,土壤类型、肥力差异及地表植物的不同均可能引起地膜覆盖对土壤微生物量和酶活性影响的差异。

化肥施用在粮食作物生产中有举足轻重的作用,然而施肥条件下土壤微生物会通过改变自身基因表达等对其做出响应<sup>[8]</sup>。研究表明氮肥可能增加<sup>[9]</sup>或降低<sup>[10]</sup>土壤微生物量或者对土壤微生物量没有影响<sup>[11]</sup>,土壤酶活性的变化则与施氮量有密切的关系<sup>[12]</sup>。

由此可知,地膜覆盖与施氮对土壤微生物量和酶活性影响的研究结论不尽一致,因此有必要进一步开展地膜覆盖和不同施氮量对土壤微生物影响的研究。另外,土壤碳、氮、磷的耦合在养分循环和利用中非常关键,土壤微生物通过对环境资源的消耗与自身元素的释放对碳、氮、磷的比值产生影响<sup>[13]</sup>。为此本文在长期定位试验的基础上,以连续种植春玉米的农田土壤为对象,分析地膜覆盖和施氮对土壤微生物量及相关酶活性的影响,并采用主成分分析法进行评价,从生态化学计量学的角度研究土壤微生物量对长期地膜覆盖和施肥的响应,以期为该地制定合理的施肥措施和覆膜栽培下维持土壤微生态环境可持续性提供一定的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 田间定位试验

田间定位试验位于西北农林科技大学长武国家农业生态试验站,地处黄土高原中南部陕甘交界处(北纬 $35^{\circ}12'$ ,东经 $107^{\circ}40'$ ,海拔1200 m)。该地气候为暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水量584 mm,年均温9.1℃,全年无霜期171 d,地下水埋深50~80 m。该地区属典型旱作农业区,地带性土壤为黑垆土,土体结构疏松均匀。

田间定位试验从2009年开始,包括施氮和覆膜2个因子。施氮量分别为0(N0)、100(N100)、 $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N250)和 $400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N400),每个施氮水平下,分别有覆膜(F)与不覆膜(B)处理,共8个处理,各处理三次重复。供试玉米为先玉335,于每年4月下旬播种,9月下旬收获,采用宽窄行、双垄沟法种植。覆膜处理为周年全膜覆盖,整个生育期不进行灌溉。氮肥分三次施入,基肥在播种前施入,拔节期和抽雄期分别追肥,三次施肥按照4:3:3的比例施用,氮肥为含氮量46%的尿素。磷肥和钾肥在播种前一次施入,磷肥选用12% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>的过磷酸钙,以纯磷量40 kg·hm<sup>-2</sup>的量施入土壤,钾肥选用含45% K<sub>2</sub>O的硫酸钾,以纯钾80 kg·hm<sup>-2</sup>的量施入土壤。

### 1.2 样品采集与分析

于2014年7月中旬按照五点取样法采集不同处理耕层(0~10 cm和10~20 cm)的土壤混合样品,去除石砾、植物根系等可见杂物,混匀后带回实验室并在4℃保存,一周内测定土壤微生物量和土壤酶活性。

土壤微生物量碳氮用氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>浸提法测定,微生物量碳(MBC)和微生物量氮(MBN)分别用以下公式计算:

$$\text{MBC} = E_{\text{C}} / 0.45, \text{MBN} = E_{\text{N}} / 0.54$$

其中,  $E_C$  和  $E_N$  分别为熏蒸土样和未熏蒸土样的碳、氮差值。

微生物量磷(MBP)采用氯仿熏蒸-NaHCO<sub>3</sub>浸提法测定。脲酶用靛酚蓝比色法测定,以 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N mg·g<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>表示;碱性磷酸酶用磷酸苯二钠比色法测定,以 mg·g<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>表示<sup>[14]</sup>。

### 1.3 数据分析

试验数据采用 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析,并采用最小显著差法进行差异性检验,采用主成分法分析较有利于土壤微生物活性的管理方式。

## 2 结果与分析

### 2.1 施氮和覆膜对旱作春玉米农田土壤微生物量的影响

由表 1 可知,不覆膜条件下,与 N0 相比,0~10 cm 和 10~20 cm 土层 N100、N250 和 N400 处理微生物量碳均显著增加。与 N0 相比, N100 土壤微生物量氮在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层分别增加 77.22% 和 38.79%, N250 土壤微生物量氮在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层分别增加 174.30% 和 169.16%, 而 N400 对微生物量氮无显著影响。N100 和 N400 显著增加 0~10 cm 土层微生物量磷, 分别增加 28.33% 和 22.78%; N400 处理 10~20 cm 土层微生物量磷显著增加 23.92%, 而 N100 和 N250 无显著变化。

在覆膜条件下,施氮显著增加两土层微生物量

碳且随施氮量的增加而增加,但 N250 与 N400 无显著差异。两土层微生物量氮随施氮量的增加而增加,与 N0 相比, 0~10 cm 土层 N100 处理增加 40.22%, 而 10~20 cm 土层无显著差异; N250 与 N400 均显著增加两土层微生物量氮, 但二者无显著差异。施氮显著增加两土层中微生物量磷, 0~10 cm 土层中微生物量磷的大小为 N250 > N400 > N100 > N0; 与 N0 相比, 10~20 cm 土层中 N100、N250 和 N400 均显著增加微生物量磷, 而施氮处理间无显著差异。统计结果表明, 覆膜显著影响微生物量磷, 施氮显著影响微生物量碳、氮和磷, 二者的交互作用显著影响土壤微生物量氮和微生物量磷。

### 2.2 施氮和覆膜处理下土壤微生物量生态化学计量学特征

如表 2 所示, 不覆膜条件下, 与 N0 相比, 0~10 cm 土层 N100 和 N250 处理显著降低微生物量碳氮比, N400 处理微生物量碳氮比增加 24.20%; 10~20 cm 土层 N250 处理微生物量碳氮比显著降低而 N400 处理增加 42.32%。与 N0 相比, 0~10 cm 土层 N250 和 N400 处理微生物量碳磷比分别增加 61.63% 和 29.52% ( $P<0.05$ ), 而 N100 无显著变化; 10~20 cm 土层 N100 和 N250 微生物量碳磷比分别增加 44.22% 和 42.78% ( $P<0.05$ ) 而 N400 无显著变化。与 N0 相比, N100 和 N250 均显著增加 0~10 cm 和 10~20 cm 土层微生物量氮磷比, 而 N400 无显著差异。

表 1 不同施氮和覆膜处理对土壤微生物量的影响

Table 1 Effects of N fertilization and film mulching on soil microbial biomass

处理 Treatment	微生物量碳 MBC/(mg·kg <sup>-1</sup> )		微生物量氮 MBN/(mg·kg <sup>-1</sup> )		微生物量磷 MBP/(mg·kg <sup>-1</sup> )	
	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm
不覆膜 No film mulching	N0	100.01±2.36c	88.90±5.54b	8.21±0.63c	6.42±0.67c	5.40±0.83b
	N100	139.65±6.52b	130.14±6.34a	14.55±1.89b	8.91±0.25b	6.93±0.19a
	N250	154.28±4.81a	128.23±6.89a	22.52±1.85a	17.28±1.32a	5.07±0.21b
	N400	161.93±11.23a	131.19±5.63a	10.69±1.19c	6.71±1.16c	6.63±0.27a
覆膜 Film mulching	N0	111.71±3.88c	97.73±11.93c	10.22±1.34c	6.42±1.25b	4.21±0.15d
	N100	146.80±6.78b	120.90±2.61b	14.33±1.30b	9.67±0.75b	5.84±0.02c
	N250	156.99±9.64ab	134.21±5.55a	18.66±1.33a	13.37±1.57a	8.91±0.11a
	N400	167.73±4.81a	138.25±4.20a	20.80±3.32a	14.72±3.26a	8.41±0.43b
变异来源 Source of variance						
覆膜 Film mulching (F)	N.S.		N.S.		*	
施氮 N fertilization (N)	***		***		***	
覆膜×施氮 (F×N) Film mulching×N fertilization	N.S.		***		***	

注: 同列不同字母表示处理间差异达到显著性水平 ( $P<0.05$ )。表中数据为平均值±标准差 ( $n=3$ )。\*\*\*, \*\*, \* 分别表示在  $P<0.001$ ,  $P<0.01$ ,  $P<0.05$  水平上差异显著, N.S. 表示差异不显著。下同。

Note: different letters in the same column under B or F treatment indicate significant difference at  $P<0.05$ . values with means±standard deviation ( $n=3$ ). \*\*\* , \*\* and \* indicate significant difference at  $P<0.001$ ,  $P<0.01$  and  $P<0.05$ , respectively. N.S. indicates no difference. MBC—microbial biomass C; MBN—microbial biomass N; MBP—microbial biomass P. The same below.

覆膜条件下,与N0相比施氮在一定程度上降低微生物量碳氮比,0~10 cm土层N100和N400处理微生物量碳氮比分别降低28.66%和25.95%(P<0.05),10~20 cm土层N250和N400处理显著降低微生物量碳氮比而N100无显著差异。与N0相比,N250和N400显著降低0~10 cm土层微生物量碳磷比而N100无显著差异,10~20 cm土层施氮对微生物量碳磷比无显著影响。与N0相比,0~10 cm土层N100微生物量氮磷比增加31.69%,N250降低33.75%而N400无显著差异;10~20 cm土层各处理微生物量氮磷比无显著差异。统计分析结果表明,覆膜显著影响土壤微生物量碳氮比,施氮则显著影响土壤微生物量碳氮比和微生物量氮磷比,二者的交互作用对土壤微生物量计量比均有显著影响。

表2 不同施氮与覆膜处理对土壤微生物量生态化学计量特征的影响

Table 2 Effects of N fertilization and film mulching on ecological stoichiometry of soil microbial biomass

处理 Treatment	微生物量碳氮比 MBC/MBN		微生物量碳磷比 MBC/MBP		微生物量氮磷比 MBN/MBP	
	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm
不覆膜 No film mulching	N0	12.23±0.98b	13.94±1.42b	18.87±3.34c	19.38±2.99b	1.55±0.30c
	N100	9.68±0.84c	14.61±0.56b	20.18±1.28c	27.95±3.54a	2.10±0.30b
	N250	6.90±0.79d	7.45±0.73c	30.50±1.97a	27.67±3.02a	4.44±0.30a
	N400	15.19±0.76a	19.84±2.47a	24.44±1.67b	22.81±0.99ab	1.61±0.14bc
覆膜 Film mulching	N0	11.06±1.53a	15.77±4.62a	26.58±1.83a	24.83±3.13ab	2.43±0.28b
	N100	7.89±0.60b	12.55±0.74ab	25.16±1.23a	19.07±2.09b	3.20±0.23a
	N250	10.98±0.34a	10.11±0.85b	17.61±0.88b	25.52±2.04a	1.61±0.13c
	N400	8.19±1.21b	9.64±1.70b	19.98±0.14b	23.54±4.76ab	2.47±0.36b
变异来源 Source of variance						
覆膜 Film mulching (F)	*			N.S.		N.S.
施氮 N fertilization (N)	* * *			N.S.		* * *
覆膜×施氮 (F×N)		* * *		* * *		* * *
Film mulching×N fertilization						

表3 不同施氮和覆膜处理对土壤脲酶和碱性磷酸酶活性的影响

Table 3 Effects of N fertilization and film mulching on soil urease and alkaline phosphatase activities

处理 Treatment	脲酶 Urease activity/(mg·g <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )		碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase activity/(mg·g <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )		
	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	
不覆膜 No film mulching	N0	0.027±0.004c	0.021±0.003b	1.23±0.04a	1.28±0.06b
	N100	0.031±0.006c	0.021±0.005b	1.32±0.08a	1.13±0.03c
	N250	0.042±0.006b	0.034±0.005a	1.29±0.08a	1.35±0.04b
	N400	0.065±0.002a	0.025±0.003b	1.37±0.07a	1.46±0.08a
覆膜 Film mulching	N0	0.029±0.003b	0.028±0.002a	1.29±0.05ab	1.33±0.03b
	N100	0.029±0.006b	0.025±0.008a	1.46±0.31a	1.32±0.03b
	N250	0.036±0.005ab	0.027±0.001a	1.24±0.10b	1.43±0.02b
	N400	0.040±0.004a	0.026±0.001a	1.49±0.17a	1.61±0.15a
变异来源 Source of variance					
覆膜 Film mulching (F)		N.S.		* * *	
施氮 N fertilization (N)	* *			* *	
覆膜×施氮 (F×N)		N.S.		* *	
Film mulching×N fertilization					

性磷酸酶活性。综上所述,覆膜对土壤脲酶活性无显著影响而显著影响碱性磷酸酶活性,施氮可以显著影响土壤脲酶活性和碱性磷酸酶活性,二者的交互作用显著影响碱性磷酸酶活性。

#### 2.4 土壤微生物活性的综合评价

相关性分析结果表明土壤微生物量碳与微生物量氮呈显著正相关( $r=0.888, P<0.01$ ),微生物量碳与碱性磷酸酶呈显著正相关( $r=0.414, P<0.05$ ),微生物量氮和微生物量磷呈显著负相关( $r=-0.734, P<0.01$ )。由此可知,不同变量之间还存在信息上的交叠,需进行主成分分析。

由表4可知,不覆膜条件下,第一主成分的方差贡献率为49.08%,第二主成分的方差贡献率为22.78%,累积贡献率为71.86%,可以用前两个主成分反映土壤微生物活性的信息。第一主成分主要综合了微生物量碳和脲酶的变异信息;第二主成分主要综合了微生物量氮的信息。覆膜条件下,第一主成分的方差贡献率为63.44%,第二主成分的贡献率为21.26%,累计贡献率为84.70%。第一主成分综合了土壤微生物量碳、氮和磷及脲酶的信息,第二主成分则综合了碱性磷酸酶的信息。根据第一、二主成分特征值和载荷系数计算得到不同施氮量土壤微生物活性的综合得分(表5)。不覆膜与覆膜条件下,根据主成分综合得分值(FS)可知土壤微生物活性的顺序均为N250>N400>N100>N0,覆膜在一定程度上降低了低施氮量土壤微生物的活性而对高施氮量土壤微生物活性有一定的促进。

### 3 讨论

#### 3.1 覆膜及施氮对土壤微生物量及其计量学特征的影响

作为土壤物质和能量循环转化的动力,土壤微生物量的变化可以反映土地利用方式的差异。本研究中覆膜对土壤微生物量碳、氮均无影响,这与树等<sup>[15]</sup>的研究一致。覆膜后土壤微生物量较不

覆膜有所增加,这表明覆膜后微生物对氮的固定作用相对增强。覆膜后土壤水热状况发生变化,提高了土壤养分的活性,覆膜减少了雨水等对土壤的直接冲击使其保持相对较好的透气性和透水性。土壤微生物处于一种相对有利的环境中,生长繁殖相对较快,而适宜的条件也降低了微生物的矿化,另外作物生长过程中对营养元素的竞争作用,使有机质的消耗增加,从而抑制微生物的活动<sup>[16]</sup>,最终土壤微生物量碳氮保持相对稳定的水平<sup>[15]</sup>。与侯慧芝等<sup>[17]</sup>的结果一致,本试验中覆膜显著增加土壤微生物量磷,这可能是由于覆膜后改善的土壤条件使土壤微生物大量繁殖,促进了微生物对土壤中磷素的固定,从而提高了微生物量磷的含量。覆膜后N400处理微生物量氮有所增加而N250处理则有所降低,微生物量磷则表现出与微生物量氮不一致的趋势,这表明覆膜后土壤微生物对氮和磷的固定作用发生改变,氮肥的激发效应使得氮磷的固定与矿化作用更为明显。然而,也有研究发现覆膜可以显著增加土壤微生物量氮<sup>[16]</sup>或降低微生物量碳、氮和

表4 覆膜与不覆膜条件下主成分分析中各因子的载荷矩阵、特征根及其方差贡献率

Table 4 Component matrixes, eigen value, and contribution rate in principal components analysis in soil with or without film mulching

项目 Items	不覆膜(B)		覆膜(F)	
	No film mulching F1	F2	Film mulching F1	F2
微生物量碳 MBC	0.896	-0.190	0.958	0.108
微生物量氮 MBN	0.565	-0.721	0.928	0.104
微生物量磷 MBP	0.628	0.545	0.893	-0.174
脲酶 Urease	0.853	-0.012	0.751	-0.289
碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	0.458	0.535	0.179	0.963
特征根 Eigenvalue	2.454	1.139	3.172	1.063
方差贡献率/% Variance contribute rate	49.08	22.78	63.44	21.26
累积方差贡献率/% Cumulative variance contribute rate		71.86		84.70

表5 不覆膜与覆膜条件下各处理的因子得分及其土壤质量综合指数

Table 5 Factor scores and comprehensive evaluation analyzed by principal component analysis in soil with or without film mulching

处理 Treatment	第一主成分得分 Score of the first principal component/FS1		排名 Rank	第二主成分得分 FS2 Score of the second principal component		排名 Rank	综合得分 FS Score of cumulative principal component		综合排名 Comprehensive rank
不覆膜 No film mulching	N0	-1.35	4	-0.04	2		-1.04		4
	N100	-0.20	3	-0.18	3		-0.52		3
	N250	0.92	1	1.41	1		0.97		1
	N400	0.08	2	-0.62	4		-0.12		2
覆膜 Film mulching	N0	-1.82	4	-0.91	4		-1.63		4
	N100	-0.52	3	-0.25	3		-0.60		3
	N250	0.91	1	1.35	1		0.99		1
	N400	0.08	2	0.24	2		0.13		2

磷<sup>[7]</sup>。目前关于覆膜对土壤微生物量的影响还没有一致的结论,这可能与土壤类型、采样时间、作物种类等的不同有关。

施氮可以增加植物的生物量,从而有更多的凋落物返还到土壤中,为微生物的活动提供充足的物质和能量来源<sup>[18]</sup>。与 Shen 等<sup>[8]</sup>的结果一致,本研究表明覆膜与不覆膜条件下土壤微生物量碳、氮均随施氮量增加而增加,这可能是由于施氮促进了作物的生长进而促进土壤中有机碳的降解,为微生物提供充足的营养物质,养分矿化作用增强,从而增加微生物的同化作用增加了微生物量。然而氮肥降低土壤微生物量<sup>[19]</sup>或长期施用化肥对微生物量无显著影响<sup>[20]</sup>的结果也有报道,这些研究结果的不一致可能与土壤类型、肥料用量和采样时间等有关。本研究中施氮量为  $400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时,土壤微生物量增加不显著或下降,可能是由化肥对土壤微生物的直接毒害作用引起的<sup>[21]</sup>。

土壤微生物量碳氮比反映了土壤的氮素供应能力,一般与氮素的生物有效性成反比。本试验中微生物量碳氮比略高于黄土高原农田土壤微生物碳氮比(一般为 6.13~8.45)<sup>[22]</sup>,这表明试验地土壤的氮素有效性较低。本研究中施氮与覆膜均显著降低了土壤微生物量碳氮比,不覆膜条件下,N250 处理微生物量碳氮比最低,表明土壤具有较高的氮素有效性,有利于作物对氮素的吸收;而覆膜条件下 N400 处理微生物量碳氮比显著降低,表明覆膜改变了土壤中微生物的活性。另外,微生物量碳氮比还可以反映土壤微生物种类和组成,细菌、放线菌和真菌的碳氮比分别为 5、6 和 10<sup>[23]</sup>,因此本研究土壤中真菌的含量可能相对丰富。微生物量碳磷比和微生物量氮磷比与微生物群落结构的相关性还不十分明确,但是微生物碳磷比可用于评价土壤微生物对磷素的释放或吸收<sup>[24]</sup>。本研究中覆膜和施氮对微生物量碳磷比均无显著影响,然而施氮显著增加了土壤微生物量碳,这表明施氮条件下土壤微生物对碳源的固定和对磷的同化作用及与作物竞争磷的作用保持相对稳定的水平<sup>[25]</sup>。

### 3.2 覆膜及施氮对土壤酶活性的影响

本研究表明覆膜对脲酶活性无显著影响,这与吴宏亮等<sup>[26]</sup>的研究一致,覆膜条件下土壤水热条件的改变使得土壤不能为脲酶提供充足的物质与能量来源,因此土壤脲酶活性无显著变化。然而,王静等<sup>[27]</sup>发现地膜覆盖可以显著提高脲酶活性。本研究还表明覆膜显著降低碱性磷酸酶活性,碱性磷酸酶活性的强弱与土壤的 pH 值有关,研究发现覆

膜后土壤 pH 值显著下降,而 pH 值的下降利于土壤中磷的释放,从而增加土壤中无机磷的含量并抑制碱性磷酸酶的活性,这与前人研究结果基本一致<sup>[28]</sup>。然而关于覆膜可以增加碱性磷酸酶活性<sup>[27]</sup>的结果也有报道。由于脲酶和碱性磷酸酶的特殊性,土壤养分、水热状况和作物生长等可能引起其活性的差异,从而导致覆膜对其活性影响的研究结果不一致。覆膜后,在高施氮量下土壤酶活性显著降低,而在不施氮和低施氮量下土壤酶活性降低不显著。由此可见,覆膜对土壤酶活性的影响比较复杂,酶活性降低的原因可能是覆膜后土壤湿度增加,降低了尿素的浓度<sup>[29]</sup>。

脲酶是唯一对尿素的转化作用有重要影响的胞外酶,其活性可以指示土壤的氮素状况。本研究中脲酶和碱性磷酸酶均受到氮肥的显著影响,且氮肥的施用均提高了土壤的酶活性。脲酶活性表现出随施氮量增加而增加的趋势,这可能是由于氮肥的施用为脲酶提供了充足的底物,但过量施用氮肥会增加氨挥发的风险<sup>[30]</sup>。本研究中与脲酶活性相似,碱性磷酸酶的活性也呈现出随施氮量的增加而增加的趋势,但是施氮处理间碱性磷酸酶活性增加不显著,可能是由于化肥用量的增加一方面加快了土壤有机质的矿化,影响了土壤微生物的生长,另一方面提高了土壤的盐分含量,在一定程度上抑制了碱性磷酸酶活性<sup>[31]</sup>。

### 3.3 覆膜和施氮处理下土壤微生物活性综合评价

对土壤微生物活性的综合评价表明,相同施氮量下土壤覆膜与否对微生物活性呈现出相同的变化规律:N250>N400>N100>NO,即施氮量为  $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时土壤微生物活性最大,而不施氮时土壤微生物活性最小。施氮量为  $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时土壤微生物活性高于施氮量为  $400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,表明适量施氮对土壤微生物活性的提高最为有利,而过量施氮则无法取得较为理想的激活效果,这可能是由于高量施氮使土壤酸化<sup>[32]</sup>,进而降低土壤的微生物活性。我们以前的研究表明施氮量为  $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时玉米产量最高,且  $N250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  的温室气体增温潜势显著低于其他施氮水平<sup>[33]</sup>,综合考虑经济与环境效益,施氮量为  $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  是该地区适宜的施氮水平。

## 4 结 论

1) 覆膜和不覆膜条件下,土壤微生物量基本上随施氮量的增加而增加,施氮量高于  $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时,土壤微生物量碳、氮的差异不显著。覆膜显著

增加土壤微生物量磷,且以0~10 cm土层覆膜条件下施氮 $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加最为显著。

2) 覆膜和不覆膜条件下,土壤脲酶和碱性磷酸酶均随施氮量的增加而增加,施氮量高于 $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时碱性磷酸酶活性有所下降。覆膜与否,施氮量 $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 是该地区适宜的氮肥用量,且有利于土壤肥力的维持和土壤的可持续利用。

#### 参 考 文 献:

- [1] Liu C A, Jin S L, Zhou L M, et al. Effects of plastic film mulch and tillage on maize productivity and soil parameters[J]. European Journal of Agronomy, 2009, 31(4): 241-249.
- [2] Zhou L M, Li F M, Jin S L, et al. How two ridges and the furrow mulched with plastic film affect soil water, soil temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China[J]. Field Crops Research, 2009, 113(1): 41-47.
- [3] Li Y S, Wu L H, Zhao L M, et al. Influence of continuous plastic film mulching on yield, water use efficiency and soil properties of rice fields under non-flooding condition [J]. Soil & Tillage Research, 2007, 93(2): 370-378.
- [4] Zhou L M, Jin S L, Liu C A, et al. Ridge-furrow and plastic-mulching tillage enhances maize-soil interactions: Opportunities and challenges in a semiarid agroecosystem[J]. Field Crops Research, 2012, 126(1): 181-188.
- [5] Cusack D F, Firestone M K. Changes in microbial community characteristics and soil organic matter with nitrogen additions in two tropical forests[J]. Ecology, 2011, 92(3): 621-632.
- [6] 井大炜. 地膜覆盖对杨树林下土壤生物学特征的影响[J]. 水土保持通报, 2013, 33(6): 269-273.
- [7] 张成娥, 梁银丽, 贺秀斌. 地膜覆盖玉米对土壤微生物量的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(04): 508-512.
- [8] 张洋. 不同施肥条件下黄瓜连作土壤微生物多样性分析[D]. 扬州: 扬州大学, 2016.
- [9] Shen S M, Hart P B S, Powlson D S, et al. The nitrogen cycle in the broadbalk wheat experiment: 15 N-labelled fertilizer residues in the soil and in the soil microbial biomass[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1989, 21(4): 529-533.
- [10] Liu Y, Shi G, Mao L, et al. Direct and indirect influences of 8yr of nitrogen and phosphorus fertilization on Glomeromycota in an alpine meadow ecosystem[J]. New Phytologist, 2012, 194(2): 523-535.
- [11] 李东坡, 陈利军, 武志杰, 等. 不同施肥黑土微生物量氮变化特征及相关因素[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1891-1896.
- [12] 郭天财, 宋晓, 马冬云, 等. 施氮量对冬小麦根际土壤酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1): 110-114.
- [13] 邵梅香, 草林, 谭玲. 我国生态化学计量学研究综述[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(11): 6918-6920.
- [14] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [15] 于树, 汪景宽, 高艳梅. 地膜覆盖及不同施肥处理对土壤微生物量碳和氮的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2006, 37(4): 602-606.
- [16] 史建国, 刘景辉, 贾利欣, 等. 连续覆盖地膜对土壤微生物量氮的影响[J]. 作物杂志, 2014, (6): 120-123.
- [17] 侯慧芝, 吕军峰, 郭天文, 等. 西北黄土高原半干旱区全膜覆土穴播对土壤水热环境和小麦产量的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(19): 5503-5513.
- [18] 王月, 刘兴斌, 韩晓日, 等. 不同施肥处理对连作花生土壤微生物量和酶活性的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2016, 47(5): 553-558.
- [19] Liu Y, Shi G, Mao L, et al. Direct and indirect influences of 8 yr of nitrogen and phosphorus fertilization on Glomeromycota in an alpine meadow ecosystem[J]. New Phytologist, 2012, 194(2): 523-535.
- [20] 梁斌, 周建斌, 杨学云, 等. 栽培和施肥模式对黄土区旱地土壤微生物量及可溶性有机碳、氮的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 132-137.
- [21] Hopkins D W, Shiel R S. Size and activity of soil microbial communities in long-term experimental grassland plots treated with manure and inorganic fertilizers[J]. Biology and Fertility of Soils, 1996, 22(1): 66-70.
- [22] 蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 等. 黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤微生物量碳氮磷的影响[J]. 水土保持通报, 2013, 33(6): 62-68.
- [23] Wardle D A. Controls of temporal variability of the soil microbial biomass: A global-scale synthesis[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1998, 30(13): 1627-1637.
- [24] 吴金水, 葛体达, 祝贞科. 稻田土壤碳循环关键微生物过程的计量学调控机制探讨[J]. 地球科学进展, 2015, 30(9): 1006-1017.
- [25] 吴金水. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [26] 吴宏亮, 许强, 陈阜, 等. 不同覆盖措施对旱区农田土壤酶活性及西瓜产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(3): 173-178.
- [27] 王静, 张天佑, 徐万海, 等. 旱地全膜覆盖种植模式对土壤酶活性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(6): 738-741.
- [28] 王静, 王廷璞, 张明莉, 等. 全膜覆土穴播种植技术对旱地冬小麦土壤微生物活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(2): 108-112.
- [29] 周礼恺. 土壤的脲酶活性与尿素肥料在土壤中的转化[J]. 土壤学进展, 1984, (1): 3-11.
- [30] 贾伟, 周怀平, 解文艳, 等. 长期有机无机肥配施对褐土微生物生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 700-705.
- [31] 姜培坤, 徐秋芳. 施肥对雷竹林土壤活性有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(2): 253-256.
- [32] Mcandrew D W, Malhi S S. Long-term N fertilization of a solonetzic soil: effects on chemical and biological properties[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1992, 24(7): 619-623.
- [33] 李晓莎. 覆膜与施氮对旱作春玉米农田温室气体排放的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.