地膜覆盖和有机肥施用对农田土壤和作物 C、N、P 化学计量学的影响

王庆鲁 祝鹏飞 丁 凡*
(沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110016)

摘 要 为了解长期地膜覆盖和施用有机肥对农田土壤和作物 C、N、P 化学计量学的影响,于 2015 年采集沈阳农业大学长期地膜覆盖和施肥定位试验(建于 1987 年)土壤和玉米植株不同组织(根、秸秆、叶片、籽粒),测定了土壤和作物 C、N、P 含量。结果表明:长期地膜覆盖和施用有机肥均对土壤 pH 产生显著影响($P<0.01$),且两者存在显著的交互作用($P=0.001$);地膜覆盖对土壤全碳、全氮、全磷、碱解氮、有效磷,以及土壤 C∶N∶P 化学计量学均没有显著影响($P>0.05$),而施用有机肥会显著增加土壤全碳、全氮、全磷含量以及碱解氮和有效磷含量($P<0.01$),降低土壤 C/P 和 N/P($P<0.01$);除了叶片 N 含量和籽粒 P 含量及 C/P 以外,地膜覆盖对玉米各组织中 C、N、P 含量及 C∶N∶P 化学计量均没有显著影响($P>0.05$);而有机肥施用显著增加了玉米各组织中 N 含量($P<0.05$),从而降低 C/N($P<0.05$),但只增加了根和籽实中 P 含量($P<0.05$),降低了玉米籽实的 C/P($P<0.001$)。综上所述,土壤和作物的 C、N、P 化学计量学随长期施用有机肥而变化,但受地膜覆盖的影响较小。

关键词 地膜覆盖; 有机肥; 土壤; 玉米器官; 化学计量学

Effects of plastic film mulching and organic manure application on C, N, P stoichiometry of soil and crop. WANG Qing-lu, ZHU Peng-fei, DING Fan* (*College of Land and Environment*, *Shenyang Agricultural University*, *Shenyang* 110086, *China*).

Abstract: To examine the effects of plastic film mulching and organic manure application on C, N, and P stoichiometry of soil and crop, we collected soil and corn tissues (root, stem, leaf, and seed) in 2015 from a long-term experiment at Shenyang Agricultural University, which was initiated in 1987. We measured C, N and P concentrations in soil and crop tissues. Results showed that the main and interactive effects of long-term film mulching and manure application on soil pH were statistically significant. Film mulching did not affect soil C, N, P, available N and P concentrations, and soil C∶N∶P ratios ($P>0.05$). Manure application significantly increased soil total C, N, P, available N, and available P concentrations ($P<0.01$), and significantly decreased soil C/P and N/P ratios ($P<0.01$). Film mulching did not affect the stoichiometry of C, N, and P in all plant tissues except for leaf N and seed P concentration and C/P ratio. Organic fertilizer application significantly increased N concentration and decreased C/N ratios in all tissues ($P<0.05$). Manure application increased root and seed P concentrations ($P<0.05$) and decreased seed C/P ratio ($P<0.001$). In conclusion, soil and crop C, N, and P stoichiometry could be affected by long-term organic fertilizer application but not by plastic film mulching.

Key words: film mulching; organic fertilization; soil; corn tissue; stoichiometry.

地球上的一切生物都是由分子组成的,从较小单位的分子到较大的生态系统元素都是按照一定比率构成,因此构建统一的化学计量学理论框架十分必要(Elser *et al.*,2000;贺金生等,2010;张婷婷等,2018)。化学计量学的兴起为研究多重化学元素平衡关系提供了科学依据,从元素比率的角度把这些不同层次的研究结果统一起来(Schindler,2003)。

国家自然科学基金项目(41601307)资助。
收稿日期: 2019-08-26 接受日期: 2019-12-30
* 通讯作者 E-mail: dingfan1985@syau.edu.cn

生态化学计量学通过综合生物学、化学和物理学的基本原理,探究生物系统能量和多重元素平衡关系,是当今研究的热点(蒋利玲等,2017;林永静等,2018)。一方面,氮(N)和磷(P)是生物生长的限制性养分,碳(C)又是结构性物质,另一方面各养分之间的比值N∶C、C∶P、N∶P可预测有机质分解速率、养分限制及C的固存和分解,并为研究C、N、P元素在生态系统过程中的耦合关系提供了一种综合方法(王绍强等,2008;王维奇等,2010;丁凡等,2011;王维奇等,2012;林诚等,2014;曾全超等,2015)。

不同耕作措施和田间水肥管理都会影响元素进入土壤(杜宁宁等,2017;白一茹等,2019),进而影响作物产量。常菲等(2018)研究表明,有机肥施用会增加作物产量。由于地膜覆盖有利于农作物增产,因而从20世纪八、九十年代就被大面积应用于多种农作物栽培,如玉米、棉花、蔬菜等。地膜覆盖是人为地为作物生长创造一个密闭的小环境,它能够阻止土壤中水分的蒸发,还能一定程度的积累地温,以及促进土壤有机质矿化而释放N、P、K等养分,因而促进农作物的生长、发育和成熟,达到增产效果。以前学者关于地膜覆盖栽培技术的研究主要集中在作物产量、土壤物理组成(Zhang *et al.*,2011)、土壤表层有机碳(Shen *et al.*,2004)及全氮(Gao *et al.*,2009)等方面。地膜覆盖保温保墒能够提高土壤微生物的活性,有利于加快土壤中养分的循环。

在农业上,农民为了追求农作物高产,大量施用化肥,造成了土壤酸化、农作物品质下降、面源污染等一系列环境问题。为实现农业可持续发展和提高农产品品质,积极探索有机和绿色农业势在必行。有机肥能够改良土壤,促进土壤团粒结构的形成和提高保水保肥的能力,还能促进难溶物质的溶解,提高作物的吸收能力(付小猛等,2017)。由于有机肥的添加会增加土壤中C、N、P含量,农作物可能会从土壤中吸收更多的N和P,进而改变植物体内的C、N、P化学计量学。目前,关于长期施用有机肥对农田土壤和作物的C、N、P化学计量学的影响已有一些研究,如宇万太等(2009)在潮棕壤上进行5年定位试验,发现施用有机肥具有明显的增产作用,并显著提高了土壤中有机碳、全磷、速效磷以及K含量,李世朋等(2009)认为长期施用有机肥减缓了土壤酸化,使土壤中C、N、P含量增加。然而,关于长期地膜覆盖和施用有机肥的交互作用对农田生态系统的C、N、P化学计量学的影响鲜有报道。本研究基于沈阳农业大学长期施肥和覆膜定位试验平台,探讨长期地膜覆盖和施用有机肥对土壤和玉米C、N、P含量和化学计量学的影响。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区域概况

供试土壤采自辽宁省沈阳市沈阳农业大学长期施肥和覆膜定位试验站(41°50′N、123°34′E),海拔75 m。该地区属于温带湿润-半湿润季风气候,年降雨量为730 mm,年平均气温7.0~8.1 ℃,年平均日照为2445.7 h,无霜期为148~180 d。土壤属中厚层棕壤。耕地试验前(1987年)耕层土壤基本理化性状为:有机质15.60 g·kg^{-1},全氮1.00 g·kg^{-1},全磷0.52 g·kg^{-1},全钾21.56 g·kg^{-1},碱解氮67 mg·kg^{-1},速效磷8.4 mg·kg^{-1},速效钾98.3 mg·kg^{-1},pH值6.39(汪景宽等,2006)。

1.2 田间定位施肥试验设计

沈阳农业大学施肥与覆膜定位试验开始于1987年,长期进行单一栽培玉米和传统耕种方式。试验是裂区实验设计,覆膜和不覆膜是主区,各3次重复。每个主区内又包含3个水平的有机肥处理,分别是不施有机肥(M0);低量有机肥(M1),年施有机肥9000 kg·hm^{-2},含N量135 kg·hm^{-2};高量有机肥(M2),年施有机肥18000 kg·hm^{-2},含氮量270 kg·hm^{-2},随机排列,每个小区面积69 m^2。施用的有机肥(M)为猪厩肥,是由猪粪尿混合堆与垫料混合堆沤腐解而成的有机肥料,其中有机质含量为200 g·kg^{-1}左右,全氮10~15 g·kg^{-1},全磷4~6 g·kg^{-1}。根据东北气候,每年5月初施肥、播种、覆膜,后期按常规进行田间管理,10月初收获,玉米品种为沈单13。农作物生育期内,没有进行人工灌溉,具体田间管理措施见Ding等(2019)。在不同处理条件下,玉米产量如表1所示。

1.3 样本采集

植物和土壤样品采集于2015年10月,在每个实验小区随机采集三株玉米,将植株分成茎、叶、根、籽粒四部分。根系采样是用铁锹挖开植株周围直径40 cm和深度40 cm的土方,取出整个根系,拿回实验室清洗。将植物组织放在60 ℃烘箱中,直至重量不再变化。每种植物组织取约30~50 g、粉碎、测定C、N、P含量。土壤样品用螺旋土钻取0~20 cm的

表 1 2015 年各处理下玉米产量

Table 1 Corn yield for different treatments in 2015

处理 Treatment		重量 Weight ($g \cdot m^{-2}$)
不覆膜	M0	895
No film mulching	M1	1715
	M2	2155
覆膜	M0	580
Film mulching	M1	1295
	M2	1440

注:M0、M1、M2 分别表示不施肥、中量有机肥、高量有机肥处理。

Note: M0, M1, M2 represent no manure, low amount and high amount of manure treatments, respectively.

耕层土壤,每个小区按 S 型取 5 钻,混合均匀,拿回实验室自然风干后,挑选出植物根须,砾石等杂质,然后研磨过 100 目的筛,测定 C、N、P 含量。

1.4 测定项目与方法

土壤 pH 的测定方法是将土水按 1∶2.5 的比例混合均匀,用玻璃电极测定。植物和土壤样品的 C 和 N 含量通过 Vario El III 元素分析仪(德国)测定,P 含量用浓 H_2SO_4 和 $HClO_4$ 消解的钼锑抗分光光度法测定。土壤有效氮和有效磷的测定方法分别是碱解扩散法和 Mo-Sb-Vc 比色法(鲁如坤,2000)。

1.5 数据处理

采用 SPSS 15.0 软件中裂区方差分析(split-ANOVA)验证覆膜处理和有机肥处理是否影响植物和土壤的 C、N、P 含量及其比值,当 $P<0.05$ 表示显著影响,$P>0.05$ 无显著影响。

2 结果与分析

2.1 土壤 pH 和元素含量

地膜覆盖、有机肥施用及其交互作用对土壤 pH 均有显著影响($P<0.01$,图1)。不覆膜条件下,有机

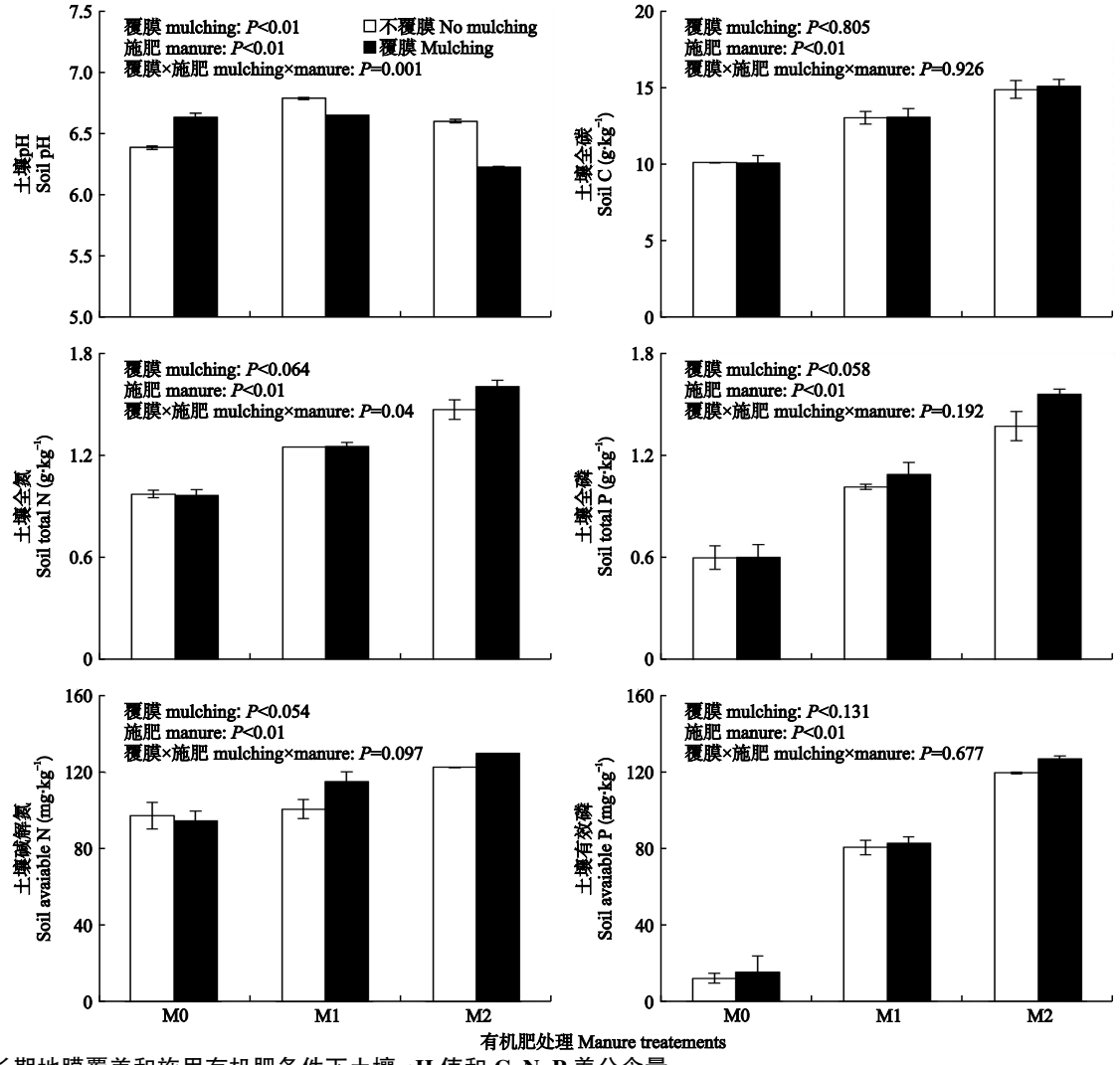


图 1 长期地膜覆盖和施用有机肥条件下土壤 pH 值和 C、N、P 养分含量

Fig.1 Soil pH and C, N, and P concentrations under different plastic film mulch and manure treatments

注:M0、M1、M2 分别表示不施肥、低量有机肥、高量有机肥处理。P 值表示方差分析结果。误差棒表示标准差($n=3$)。

Note: M0, M1, M2 represent no manure, low amount and high amount of manure treatments, respectively. The value of P represents the results of ANOVA. Error bars mean standard deviation ($n=3$).

肥施用会增加土壤 pH;而覆膜条件下,有机肥施用后土壤 pH 有降低的趋势。不施用有机肥(M0)时,覆膜会增加土壤 pH;而施用有机肥(M1、M2)时,覆膜会降低增加土壤 pH。

地膜覆盖对土壤全碳、全氮、全磷、碱解氮和有效磷含量均无显著影响($P>0.05$,图 1)。有机肥施用对土壤中 C、N、P 含量以及碱解氮和有效磷含量均有显著影响($P<0.01$)。随着施肥量的增加,土壤中碳、全氮、全磷含量以及碱解氮和有效磷含量均增加。

2.2 土壤 C∶N∶P 化学计量学

覆膜对土壤 C/N、C/P、N/P 均无显著影响($P>0.05$,图 2)。然而,有机肥施用对土壤 C/N、C/P、N/P 均有显著影响($P<0.05$),施用低量有机肥(M1)不改变土壤 C/N,但施用高量有机肥(M2)会降低土壤 C/N。施用低量和高量有机肥均会降低土壤 C/P 和 N/P,且降低的程度随有机肥施用量而增加。

2.3 玉米组织 C、N、P 含量

地膜覆盖对玉米茎、叶、籽实中 C 含量均没有显著影响($P>0.05$,表 2),但显著增加根系中碳含量($P=0.027$);除了叶片之外,地膜覆盖对玉米各组织中N 含量均没有影响($P>0.05$);除了籽实之外,地膜覆盖对玉米各组织中 P 含量的影响均不显著($P>0.05$)。

长期施用有机肥显著增加玉米根中 C 含量($P=0.012$),而对其它玉米组织 C 含量没有显著影响($P>0.05$,表 2)。有机肥施用显著增加玉米茎、叶、根、籽实中 N 含量($P<0.05$),并随着有机肥施用量的增加而增大。长期施用有机肥显著增加根和籽实中 P 含量($P<0.05$),但对茎和叶中 P 含量没有显著影响($P>0.05$)。

2.4 玉米 C∶N∶P 化学计量学

地膜覆盖对玉米茎、叶、根和籽实组织 C/N、C/P 和 N/P 均无显著影响($P>0.05$,表 3),除籽实 C/P 以外($P=0.001$)。有机肥施用显著降低了玉米茎、叶、根、籽实组织的 C/N($P<0.05$);有机肥施用仅降低了玉米籽实中 C/P($P<0.001$),而对茎、叶、根 C/P 没有显著影响($P>0.05$);有机肥施用均显著增加了玉米茎、叶、根 N/P($P<0.05$),而对籽实的 N/P 没有影响($P=0.065$)。

地膜覆盖和有机肥施用的交互作用对茎和籽实中的 C/N 均没有影响($P>0.05$),但对叶和根的 C/N 有显著影响($P<0.05$);交互作用仅对籽实的 C/P 影响显著($P=0.008$),而对于茎、叶、根的 C/P 均没有影响;覆膜和施肥交互作用对于玉米茎、叶、根、籽实 N/P 均没有影响($P>0.05$)。

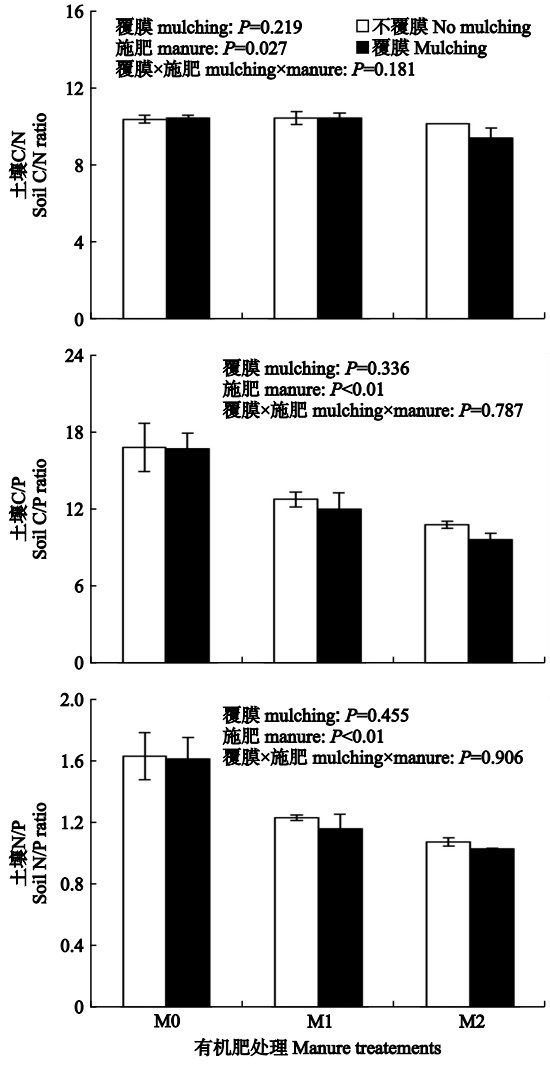


图 2 长期地膜覆盖和施用有机肥条件下土壤 C∶N∶P 化学计量学

Fig.2 Soil C∶N∶P ratios under different plastic film mulch and manure treatments

注:M0、M1、M2 分别表示不施肥、中量有机肥、高量有机肥处理。P 值表示方差分析结果。误差棒表示标准差($n=3$)。

Note: M0, M1, M2 represent no manure, low amount and high amount of manure treatments, respectively. P values represent the results of ANOVA. Error bars mean standard deviation ($n=3$).

3 讨 论

3.1 覆膜对土壤和植株 CNP 化学计量学影响

连续 30 年覆膜处理对土壤 pH 有显著影响,其影响情况与李世朋等(2009)研究一致。不施用有机肥时,覆膜会增加土壤 pH(图 1),可能是因为覆膜对土壤水分蒸发的影响进而改变土壤 pH,地膜覆

表 2 玉米各器官 C、N、P 含量及方差分析结果

Table 2 The concentrations of C, N and P in maize organs and results of ANOVA

玉米器官 Corn tissues	元素 Element ($g \cdot kg^{-1}$)	不覆膜 No film mulching			覆膜 Film mulching			P 值 P value		
		M0	M1	M2	M0	M1	M2	覆膜 Mulching	施肥 Manure	覆膜×施肥 Mulching× Manure
茎	C	445±2	436.2±3.3	449.8±0.1	439.8±1.2	447.9±1.3	442.1±0.4	0.361	0.673	0.004
Stem	N	3.5±0.8	4.4±1.5	9.41±0.1	2.9±0.1	3.6±0.3	8.1±0.1	0.160	0.000	0.877
	P	3.8±1.3	5.8±0.8	4.4±0.0	5.7±0.1	3.4±0.1	3.8±0.1	0.963	0.461	0.157
叶	C	413±0.8	396.5±0.0	406.9±0.3	403.5±1.7	412.1±2.5	410.9±0.3	0.378	0.636	0.013
Leaf	N	4.7±0.1	7.0±0.0	17.5±0.2	5.1±0.3	6.6±0.5	10.7±0.1	0.000	0.000	0.000
	P	1.0±0.0	1.7±0.9	2.4±0.2	2.2±0.8	1.3±0.1	1.3±0.0	0.784	0.784	0.149
根	C	355±5	417.5±10.3	425.2±1.1	411.6±10.9	420.3±14.4	-	0.027	0.012	0.038
Root	N	4.9±0.1	6.2±1.1	17.7±0.1	4.6±0.0	7.2±0.7	-	0.562	0.000	0.277
	P	1.4±0.3	3.4±0.6	2.9±0.0	2.6±0.7	3.4±0.3	-	0.258	0.047	0.296
籽实	C	440±7	435.5±5.5	444.6±0.7	445.2±1.7	444.9±1.4	446.2±1.7	0.121	0.437	0.607
Seed	N	9.1±1.4	12.6±2.0	15.6±1.7	10.8±0.2	10.9±0.8	14.9±0.3	0.865	0.014	0.420
	P	2.9±0.1	3.4±0.0	3.4±0.0	3.2±0.1	3.4±0.0	3.7±0.1	0.001	0.000	0.066

注:M0、M1、M2 分别表示不施肥、中量有机肥、高量有机肥处理。*P* 值表示方差分析结果。误差棒表示标准差($n=3$)。"-"表示数据未检测。

Note: M0, M1, M2 represent no manure, low amount and high amount of manure treatments, respectively. *P* values represent the results of ANOVA. Data shows as means±standard deviation ($n=3$).

表 3 玉米各器官 C/N、C/P、N/P 及方差分析结果

Table 3 The C/N, C/P, N/P ratios in maize organs and results of ANOVA

玉米器官 Corn tissues	化学计量比 Element ratio	不覆膜 No film mulching			覆膜 Film mulching			P 值 P value		
		M0	M1	M2	M0	M1	M2	覆膜 Mulching	施肥 Manure	覆膜 * 施肥 Mulching * Manure
茎	C/N	133±31	112.1±38.8	47.8±0.3	151.1±5.6	126.8±12.3	54.9±0.3	0.463	0.012	0.968
Stem	C/P	131±43	76.7±10.6	102.0±0.0	76.8±1.0	131.7±4.9	116.9±3.3	0.916	0.754	0.185
	N/P	1.1±0.6	0.8±0.4	2.1±0.0	0.5±0.0	1.1±0.1	2.1±0.1	0.508	0.008	0.520
叶	C/N	87±2.0	56.5±0.0	23.3±0.3	79.7±4.0	62.8±4.3	38.5±0.2	0.110	0.000	0.015
Leaf	C/P	423.4±3.0	333.1±175.1	171.6±11.1	216.1±81.5	331.2±32.1	328.7±0.2	0.783	0.579	0.169
	N/P	4.9±0.1	5.9±3.1	7.4±0.6	2.7±0.9	5.3±0.9	8.5±0.0	0.689	0.049	0.494
根	C/N	72.2±2.3	69.7±10.3	24.0±0.2	89.8±1.9	58.8±3.6	-	0.538	0.001	0.038
Root	C/P	273.1±54.4	126.4±26.4	148.6±0.7	172.7±42.7	126.9±16.6	-	0.206	0.070	0.203
	N/P	3.8±0.9	1.9±0.7	6.2±0.02	1.9±0.5	2.2±0.4	-	0.236	0.012	0.125
籽实	C/N	49.7±7.1	35.5±6.1	28.5±3.0	41.1±1.0	41.0±3.1	23.0±0.8	0.850	0.025	0.312
Seed	C/P	153.8±1.9	129.6±1.2	131.2±0.2	138.7±1.7	129.7±1.9	121.9±2.0	0.001	0.000	0.008
	N/P	3.2±0.4	3.8±0.6	4.6±0.5	3.4±0.1	3.2±0.2	4.1±0.2	0.425	0.065	0.543

注:M0、M1、M2 分别表示不施肥、中量有机肥、高量有机肥处理。*P* 值表示方差分析结果。误差棒表示标准差($n=3$)。"-"表示数据未检测。

Note: M0, M1, M2 represent no manure, low amount and high amount of manure treatments, respectively. *P* values represent the results of ANOVA. Data shows as means±standard deviation ($n=3$).

盖具有保墒,降低蒸散作用,但是促进了深层水向地表富集(王喜庆等,1998;刘顺国等,2006),同时覆膜降低了淋溶作用,导致可溶性盐基离子在表层土壤积累(祖蓉等,1995;李毅等,2005),造成土壤 PH 升高。地膜覆盖降低了 M1 和 M2 处理的土壤 pH,可能是因为在土壤有机质充足的条件下,覆膜增加了土壤温度和土壤微生物活性,加速了有机质的分解。地膜覆盖对土壤全碳、全氮、全磷、碱解氮、有效磷,以及土壤 C∶N∶P 化学计量学均没有显著影响($P>0.05$),说明地膜覆盖不改变土壤养分含量。由于地膜覆盖主要影响土壤温度和水分(Ding *et al.*, 2019),这意味着环境温度和水分的变化可能对生态系统化学计量学的影响有限。

总的来说,地膜覆盖不影响玉米根茎叶组织中 C、N、P 含量(表 1)。然而,地膜覆盖增加籽实中磷的含量(表 2),这与 Ding 等(2019)结果一致,说明地膜覆盖促进了植株对磷的吸收,提高玉米粮食的品质。这可能是因为覆膜增加地温促进土壤中有机磷的矿化,有效磷被释放出来,从而提高了植株对磷营养物质的吸收。此外,覆膜能提高土壤湿度,促进作物对磷的吸收,Dijkstra 等(2012)报道植株中磷含量与土壤水分呈正比。

3.2 施用有机肥对土壤和植株化学计量学的影响

不覆膜条件下,长期施用有机肥会增加土壤pH(图1),对土壤酸化有一定的延缓作用,这是由于猪厩肥中富含的矿物质,可以补充土壤中损失的阳离子。长期施用有机肥增加了土壤全碳、全氮、全磷的含量,并且随着有机肥量的增加而增加(图1)。这是由于有机肥本身就含有大量的C、N和P元素。土壤C/P、N/P随有机肥施用量的增加而降低,原因可能有两个,一是可能有机肥中的C/P、N/P比较低,二是可能植株对P的吸收达到饱和,相对于C和N来说,更多的P元素保留在土层中。

长期施用有机肥使所有玉米组织中N含量都增加(表2),这与李世朋等(2009)的结果一致。这是因为施用有机肥增加了土壤中N的供应量(图1),从而促进了玉米植株对土壤中N元素的吸收。再加上玉米组织中C含量不变,因此有机肥施用降低了玉米各组织的C/N(表3)。虽然有机肥施用也增加了土壤中P的供应量(图1),但只增加了根和籽实中P含量,而但对茎和叶中P含量没有影响(表2)。周鹏等(2010)也报道了有机肥施用能增加作物籽实中P含量,主要原因是籽粒能够合成蛋白质消耗大量的三磷酸腺苷(ATP)使P元素储存下来(Chapin,1985;Gusewell *et al.*,2002)。Ding等(2019)也报道了P元素会优先供应籽实生长。因此,有机肥施用仅降低了玉米籽实中C/P,而对茎、叶、根C/P没有显著影响(表3)。

综上所述,土壤和作物的C、N、P化学计量学随长期施用有机肥而变化,但受地膜覆盖的影响较小。这意味着,养分添加条件下,生态系统化学计量学内稳态(stoichiometric homeostasis)假设并不成立;而环境(比如温度,水分)变化条件下,生态系统可能会保持化学计量学内稳态。但本实验还存在不足之处,即未能测定表层土壤可溶性盐基离子含量,在以后的实验中需增加该部分的测定。

参考文献

白一茹, 张 兴, 包维斌, 等. 2019. 黄土丘陵区不同土地利用方式土壤碳氮磷及其生态化学计量特征.干旱地区农业研究, **37**(4): 117-123. [Bai YR, Zhang X, Bao WB, *et al*. 2019. The soil carbon nitrogen and phosphorus contents and their stoichiometry under different land uses in loess hilly region. *Agricultural Research in the Arid Areas*, **37**(4): 117-123.]

常 菲, 郜翻身, 红 梅, 等. 2018. 施肥措施对河套灌区氮素淋溶和玉米产量影响, 生态学杂志, **37**(10): 2951-2958. [Chang F, Gao FS, Hong M, *et al*. 2018. Effects of fertilization regimes on nitrogen leaching and maize yield in Hetao Irrigation Area. *Chinese Journal of Ecology*, **37**(10): 2951-2958.]

丁 凡, 廉培勇, 曾德慧. 2011. 松嫩平原草甸三种植物叶片N、P化学计量特征及其与土壤N、P浓度的关系. 生态学杂志, **30**(1): 77-81. [Ding F, L PY, Zeng DH. 2011. Characteristics of plant leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry in relation to soil nitrogen and phosphorus concentrations in Songnen Plain meadow. *Chinese Journal of Ecology*, **30**(1): 77-81.]

杜宁宁, 邱丽萍, 张兴昌, 等. 2017. 半干旱区土地利用方式对土壤碳氮矿化的影响. 干旱地区农业研究, **35**(5): 73-78. [Du NN, Qiu LP, Zhang XC, *et al*. 2017. Effect of land use on mineralization of soil carbon and nitrogen in semi-arid grasslands. *Agricultural Research in the Arid Areas*, **35**(5): 73-78.]

付小猛, 毛加梅, 沈正松, 等. 2017. 我国生物有机肥的发展现状及趋势. 湖北农业科学, **56**(3): 401-404. [Fu XM, Mao JM, Shen GS, *et al*. 2017. Development status and trend of bio-organic fertilizer in China. *Hubei Agricultural Sciences*, **56**(3): 401-404.]

贺金生, 韩兴国. 2010. 生态化学计量学:探索从个体到生态系统的统一化理论. 植物生态学报, **34**(1): 2-6. [He JS, Han XG. 2010. Ecological stoichiometry: Searching for unifying principlesfrom individuals to ecosystems. *Acta Phytoecologica Sinica*, **34**(1): 2-6.]

蒋利玲, 曾从盛, 邵钧炯, 等. 2017. 闽江河口入侵种互花米草和本地种短叶茳芏的养分动态及植物化学计量内稳性特征. 植物生态学报, **41**(4): 450-460. [Jiang LL, Zeng CS, Shao JJ, *et al*. 2017. Plant nutrient dynamics and stoichiometric homeostasis of invasive species *Spartina alterniflora* and native *Cyperus malaccensis* var. *brevifolius* in the Minjiang River estuarine wetlands. *Chinese Journal of Plant Ecology*, **41**(4): 450-460.]

李 毅, 王全九, 王文燕, 等. 2005.覆膜开孔土壤蒸发的水盐分布特征及运移规律研究. 植物营养和肥料学报, **11**(5): 87-193. [Li Y, Wang QJ, Wang WY, *et al*. 2005. Distribution and movement characteristics of soil water and soil salt during evaporation from perforated plastic mulch. *Plant Nutrition and Fertitizer Science*, **11**(5): 187-193.]

李世朋, 蔡祖聪, 杨 浩, 等. 2009. 长定位施肥与地膜覆盖对土壤肥力和生物学性质的影响. 生态学报, **29**(5): 2489-2498. [Li SP, Cai ZC, Yang H, *et al*. 2009. Effects of long-term fertilization and plastic film covering on some soil fertility and microbial properties. *Acta Ecologica Sinica*, **29**(5): 2489-2498.]

林 诚, 王 飞, 李清华. 2014. 石砌深窄沟长期排水对冷浸田土壤C、N、P化学计量及酶活性影响. 福建农业学报, **29**(10): 1010-1014. [Lin C, Wang F, Li QH. 2014. Nutrient content and enzyme activity of cold-waterlogged soil in fields with open drainage ditches. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, **29**(10), 1010-1014.]

林永静, 武梦娟, 卢同平, 等. 2018. 中国生态化学计量学研究热点的可视化分析. 生物学杂志, **35**(2): 63-66. [Lin YJ, Wu MJ, Lu TP, *et al*. 2018. The visualization analysis of the ecological stoichiometry research based on the CiteSpace. *Journal of Biology*, **35**(2): 63-66.]

刘顺国, 付时丰, 汪景宽, 等. 2006. 长期地膜覆盖对棕壤水分含量和储量动态变化影响. 沈阳农业大学学报, (5): 725-730. [Liu SG, Fu SF, Wang JK, *et al*. 2006. Effect of long-term covering with plastic film on dynamic changes of soil water in brown earth. *Journal of Shenyang Agricultural University*, (5): 725-730.]

鲁如坤. 2000. 土壤农化分析方法. 北京: 中国农业科学技术出版社. [Lu RK. 2000. Analysis Methods of Agrochemistry for Soils. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press.]

汪景宽, 刘顺国, 李双异. 2006. 长期地膜覆盖及不同施肥处理对棕壤无机氮分布和有机氮矿化率的影响. 水土保持学报, **20**(6): 107-110. [Wang JK, Liu SG, Li SY. 2006. Effect of long-term plastic film mulching and fertilization on inorganic n distribution and organic N mineralization in brown earth. *Journal of Soil and Water Conservation*, **20**(6): 107-110.]

汪景宽, 张旭东, 张继红, 等. 1995.覆膜对有机物料的腐解及土壤有机质特性的影响. 植物营养和肥料学报, (Z1): 22-28. [Wang J K, Zhang XD, Zhang JH, *et al*. 1995. Effects of covering with plastic film on decomposition of organic materials and characteristics of soil organic matter. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, (Z1): 22-28.]

王绍强, 于贵瑞. 2008. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量特征. 生态学报, **28**(8): 3937-3947. [Wang SQ, Yu GR. 2008. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements. *Acta Ecologica Sinica*, **28**(8): 3937-3947.]

王维奇, 曾从盛, 钟春棋, 等. 2010. 人为干扰对闽江河口湿地碳氮磷生态化学计量特性的影响. 环境科学, **31**(10): 2411-2416. [Wang WQ, Zeng CS, Zhong CQ, *et al*. 2010. Effect of human disturbance on ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in Minjiang River Estuarine Wetland. *Environmental Science*, **31**(10): 2411-2416.]

王维奇, 王 纯, 曾从盛, 等. 2012. 闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量学研究. 生态学报, **32**(13): 4087-4093. [Wang WQ, Wang C, Zeng CS, *et al*. 2012. Soil carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry of *Phragmites australis* wetlands in different reaches in Minjiang River estuary. *Acta Ecologica Sinica*, **32**(13): 4087-4093.]

王喜庆, 李生秀, 高亚军. 1998. 覆盖对旱地春玉米生理生态和产量的影响. 作物学报, (3): 348-353. [Wang XQ, Li SX, Gao YJ. 1998. Effects of mulching on physiology, ecology and yield of spring maize in upland. *Acta Agronomica Sinica*, (3): 348-353.]

宇万太, 姜子绍, 马 强, 等. 2009. 施有机肥对土壤肥力的影响. 植物营养与肥料学报, **15**(5): 1057-1064. [Yu WT, Jiang ZS, Ma Q, *et al*. 2009. Effect of application of manure on soil fertility. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, **15**(5): 1057-1064.]

曾全超, 李 鑫, 董扬红. 2015. 黄土高原不同纬度土壤的生态化学计量特性及理化性质.自然资源学报, **30**(4): 870-879. [Zeng QC, Li X, Dong YH. 2015. Ecological stoichiometry characteristics and physical-chemical properties of soils at different latitudes on the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, **30**(4): 870-879.]

张婷婷, 刘文耀, 黄俊彪, 等. 2018. 植物生态化学计量内稳性特征. 广西植物, **39**(5): 701-702. [Zhang TT, Liu WY, Huang JB, *et al*. 2018. Characteristics of plant ecological stoichiometry homeostasis. *Guihaia*, **39**(5): 701-712.]

周 鹏, 耿燕, 马文红, 等. 2010. 内蒙古草原优势种植物器官功能特征的联系. 植物生态学报, **34**(1): 7-16. [Zhou P, Geng Y, Ma WH, *et al*. 2010. Linkages of functional traits among plant organs in the dominant species of the Inner Mongolia grassland, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, **34**(1): 7-16.]

祖 蓉, 汪景宽, 张继宏, 等. 1995. 地膜覆盖影响对棕壤离子平衡规律的研究. 沈阳农业大学学报, (4): 408-411. [Zu R, Wang JK, Zhang JH, *et al*. 1995. Effect of plastic film mulching on ion balance in brown earth. *Journal of Shenyang Agricultural University*, (4): 408-411.]

Chapin FS. 1980. The mineral-nutrition of wild plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **11**: 233-260.

Dijkstra FA, Pendall E. 2012. Climate change alters stoichiometry of phosphorus and nitrogen in a semiarid grassland. *New Phytologist*, **196**: 807-815.

Ding F, Li SY, Lü XT. 2019. Opposite effects of nitrogen fertilization and plastic film mulching on crop N and P stoichiometry in a temperate agroecosystem. *Journal of Plant Ecology*, **12**: 682-692.

Elser JJ, Sterner RW, Gorokhova E, Fagan WF. 2000. Biological stoichiometry from genes to ecosystems. *Ecology Letters*, **3**: 540-550.

Gao YJ, Li Y, Zhang JC, *et al*. 2009. Effects of mulch, N fertilizer, and plant density on wheat yield, wheat nitrogen uptake, and residual soil nitrate in a dryland area of China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **85**: 109-121.

Gusewell S, Koerselman M. 2002. Variation in nitrogen and phosphorus concentrations of wetland plants. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, **5**: 37-61.

Schindler DW. 2003. Ecological stoichiometry: The biology of elements from molecules to the biosphere. *Nature*, **423**: 225-226.

Shen J, Li R, Zhang F. 2004. Crop yields, soil fertility and phosphorus fractions in response to long-term fertilization under the rice monoculture system on a calcareous soil. *Field Crops Research*, **86**: 225-238.

Zhang SL, Li PR. 2011 . Effects of tillage and plastic mulch on soil water, growth and yield of spring-sown maize. *Soil & Tillage Research*, **112**: 92-97.

作者简介 王庆鲁,男,1993 年生,硕士研究生主要研究方向为化学计量学。E-mail: 602428209@qq.com

责任编辑 李凤芹