

不同土壤有机碳含量对玉米 光合生理及生长发育的影响

郭占强¹, 肖国举², 李秀静¹, 胡延斌³

(1. 宁夏大学地理科学与规划学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学生态环境学院, 宁夏 银川 750021;
3. 兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州 730020)

摘 要:采用农田生态系统大田取样的方法,通过棋盘式布点法定点确定样点位置,按不同土壤有机碳含量选取 5 种有代表性的土壤有机碳 T1(2.44 g · kg⁻¹), T2(3.70 g · kg⁻¹), T3(4.95 g · kg⁻¹), T4(6.14 g · kg⁻¹), T5(7.51 g · kg⁻¹),探究不同土壤有机碳(SOC)含量对玉米光合生理特性、水分利用效率、干物质积累和生长发育的影响。结果表明:玉米净光合速率与土壤有机碳呈显著正相关关系,在抽丝期从 T1 到 T5,净光合速率由 31.22 μmol · m⁻² · s⁻¹增加到 54.22 μmol · m⁻² · s⁻¹;蒸腾速率在各个生育期表现为先减后增的趋势;气孔导度与土壤有机碳呈正相关关系,在开花期从 T1 到 T5,气孔导度由 0.06 mol · m⁻² · s⁻¹增加到 0.28 mol · m⁻² · s⁻¹;胞间 CO₂浓度与土壤有机碳呈负相关关系,在拔节期从 T1 到 T5,胞间 CO₂浓度由 491.57 μmol · mol⁻¹波动减少到 112.79 μmol · mol⁻¹;在拔节期从 T1 到 T5,叶片水分利用效率由 1.62 μmol · mmol⁻¹波动增加到 10.22 μmol · mmol⁻¹;在大喇叭口期叶绿素随着土壤有机碳含量的增加波动升高,而在开花期、抽丝期和成熟期两者无显著相关关系;在开花期从 T1 到 T5,株高增加 20.37%,茎粗增加 23.70%,单株叶面积增加 13.83%,叶面积指数增加 13.70%;从 T1 到 T4,玉米单穗穗重从 156.13 g · kg⁻¹增加到 236.18 g · kg⁻¹,地上部分干重从 235.7 g 增加到 380.22 g。土壤有机碳对玉米的光合特性和生长发育状况的影响是积极的,但不是土壤有机碳含量越高越好,土壤有机碳含量 6.14 g · kg⁻¹效果较好。

关键词:土壤有机碳;光合生理;生长发育;叶片水分利用效率;玉米

中图分类号:S513;S158.3 **文献标志码:**A

Effects of different soil organic carbon contents on photosynthetic physiology and growth of maize

GUO Zhanqiang¹, XIAO Guojun², LI Xiujing¹, HU Yanbin³

(1. Institute of environmental engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;
2. School of Ecological Environment, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;
3. School of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730020, China)

Abstract: Using the field sampling method of farmland ecosystem, the sample location was determined by the checkerboard distribution method. Five representative soil organic carbon T1(2.44 g · kg⁻¹), T2(3.70 g · kg⁻¹), T3(4.95 g · kg⁻¹), T4(6.14 g · kg⁻¹), T5(7.51 g · kg⁻¹) were selected according to different soil organic carbon contents to explore the effects of different soil organic carbon (SOC) contents on the photosynthetic physiological characteristics of maize water use efficiency, dry matter accumulation and growth. The results showed that net photosynthetic rate of maize was positively correlated with SOC, which increased from T1 to T5 in the tapping stage. The net photosynthetic rate increased from 31.22 μmol · m⁻² · S⁻¹ to 54.22 μmol · m⁻² · s⁻¹. Transpiration rate decreased first and then increased in each growth period. Stomatal conductance increased from 0.06 mol · m⁻² · s⁻¹ to 0.28 mol · m⁻² · s⁻¹ from T1 to T5 at flowering. There was a negative correlation between intercellular CO₂ concen-

收稿日期:2020-12-20 修回日期:2021-06-20
基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0501302);国家自然科学基金项目(41665009);宁夏科技创新领军人才计划(KJT2016006)
作者简介:郭占强(1978-),男,黑龙江逊克人,硕士研究生,主要从事全球气候变化及农田土壤碳循环研究。E-mail: 1143379301@qq.com
通信作者:肖国举(1972-),男,甘肃通渭人,博士,研究员,主要从事全球气候变化及其对农业生态系统的影响研究。E-mail: xiaoguoju1972@163.com

tration and SOC, which increased from T1 to T5 at jointing and decreased from 491.57 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ to 112.79 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$. At jointing, the leaf water use efficiency increased from 1.62 $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ to 10.22 $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ from T1 to T5. In the opening, chlorophyll increased with the increase of SOC, but there was no significant relationship between them in the flowering, silking and maturing. In flowering, the plant height increased by 20.37%, stem diameter increased by 23.70%, leaf area per plant increased by 13.83%, leaf area index increased by 13.70%. From T1 to T4, single ear weight increased from 156.13 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ to 236.18 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, and aboveground dry weight increased from 235.7 g to 380.22 g. The effect of SOC on photosynthetic characteristics and growth and development of maize was positive, but it was not necessarily that the more, the better. T4 (6.14 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) was the most ideal, which could be used as an important reference value for the study of carbon storage, carbon neutralization and carbon peaking in farmland ecosystem.

Keywords: soil organic carbon; photosynthetic physiological; growth and development; leaf water use efficiency; maize

世界气象组织不断发布全球气温持续变暖的信息^[1],预估到 21 世纪末,全球地表平均气温将波动升高 1℃~4℃^[2]。在全球碳循环中,土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库,对陆地生态系统碳排放乃至温室效应有重要影响^[3-5]。研究表明,过去 30 年间全球土壤呼吸释放的碳以 0.10 Pg · a⁻¹ 的速率增加,说明全球气候变暖条件下土壤有机碳分解的速率在加快^[6],土壤碳包括土壤有机碳和无机碳。土壤有机碳库是碳库中最活跃的组成部分^[7],它的细微变化都将影响碳向大气的排放,进而影响陆地生态系统的结构与功能^[8-10],陆地碳循环总碳量中约五分之四的碳量以有机碳形式存在于土壤中^[11]。土壤有机碳是农作物生长发育的根基,也是土壤有机质和各种养分良性循环的基础^[12-13],土壤有机碳是陆地重要的碳汇,它能够将大气中的 CO₂ 矿化并储存到土壤中,土壤有机碳在全球碳平衡中起着关键的作用。

政府间气候变化专门委员会(IPCC)已给出警告,一旦升温突破 1.5℃,气候灾害发生的频率和强度将大幅度上升。联合国环境规划署(UNEP)发布的《排放差距报告》^[14]警告如果全球温室气体不能在 2020—2030 年以每年 7.6%的水平下降,世界将难以实现 1.5℃的控温目标。自 1750 年以来,大气中 CO₂ 浓度不断增加,到 2011 年达到 391 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。按照典型浓度目标中低排放情景(RCP 4.5),辐射强迫稳定在 4.5 W · m⁻²,2100 年后 CO₂ 当量浓度稳定在约 650 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ^[15-16]。宁夏回族自治区近 60 a 以来,各地气温平均升高 0.95℃。升温最明显的地区为宁夏平原引黄灌区,温度平均升高 1.10℃左右^[17-18]。土壤有机碳对玉米的光合特性和生长发育状况的影响是积极的,玉米植株 95%左右的质量来自光合作用,干物质是籽粒产量

形成的物质基础^[19]。深入研究不同土壤有机碳含量对玉米光合生理特征及生长发育的影响具有重要意义,对于研究农田生态系统碳贮存与碳中和等具有重要参考价值。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在宁夏平原引黄灌区,暖温带干旱、半干旱大陆性气候,年平均降水量约 200 mm,年平均蒸发量 2 000 mm 以上。试验地耕层土壤 SOC 含量为 2.44~7.51 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,K-S 检验表明,渐进显著性为 0.20,服从正态分布;变异系数为 22.84 %,偏度和峰度分别为 0.49 和 0.66。采样样品土壤有机碳含量统计分析见表 1。

表 1 采样样品土壤有机碳(SOC)含量统计分析
Table 1 Statistical analysis of SOC content of samples

耕层土壤 有机碳含量 Plough layer SOC content/(g · kg ⁻¹)	样品数/个 Number of samples	占总样品比例 Proportion of total samples/%	平均土壤 有机碳含量 Average SOC content/(g · kg ⁻¹)
2.00~3.00	2	5.55	2.63±0.06e
3.00~4.00	9	25.00	3.60±0.12d
4.00~5.00	14	38.88	4.44±1.08c
5.00~6.00	9	25.00	5.53±1.15c
6.00~7.00	1	2.77	6.14±0.19b
7.00~8.00	1	2.77	7.51±0.07a
合计 Total	36	100	4.54±1.03

注:同列中不同字母代表在 $P<0.05$ 水平差异显著,下同。
Note: Different letters in a column indicate significant differences ($P<0.05$), the same below.

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计与样品采集 选取科玉 15 号玉米品种,利用旱地直播技术,大田种植密度 7.50 万株

· hm⁻²。在 2019 年 4 月 28 日播种,9 月 10 日收获。试验地玉米全生育期进行 4 次灌水:蒙头水(4 月 17 日)、拔节水(6 月 14 日)、孕穗水(6 月 30 日)、灌浆水(7 月 17 日)。其中 6 月 9 日混合施用化肥磷酸氢二胺((NH₄)₂HPO₄) 380 kg·hm⁻², 碳酰胺(CH₄N₂O)250 kg·hm⁻², 硝酸钾(KNO₃) 125 kg·hm⁻²。7 月 17 日随灌浆水施入尿素 225 kg·hm⁻²。

采用大田调查取样的研究方法,在 2 km×4 km 农田生态系统范围内,通过棋盘式布点法定点确定 36 个样点位置,用手持 GPS 仪标记并确定采样点的地理坐标,排除落在沟、渠、路的取样点,使样点位置均匀落在农田内。于 2019 年 8 月 29、30 日在玉米植株生长位置取 0~20 cm 土层土样。取样时,利用四分法去除多余的土壤,去除土壤样品中的砾石、枯枝落叶、植物根系等杂物,把选好的土样装袋标记。

1.2.2 测定项目与测定方法 玉米生长发育和光合数据测定分别在 2019 年 6 月 12、13 日,6 月 28、29 日,7 月 22、23 日,8 月 7、8 日,8 月 29、30 日,大约每隔 20 d 左右的 8:00—14:00 进行。对玉米不同生育期的株高、茎粗进行测量;对成熟期玉米单穗重、秃尖长进行测量。成熟期玉米的根、茎、叶放入烘箱,在 105℃杀青 30 min 后,将烘箱温度调至 70℃烘干至恒重,分别对其称重并计算地上部分干重和根冠比。

利用美国产的 LI-COR6400 便携式光合仪,在玉米的各个重要生育阶段,选择晴朗天气,利用自然光源对引黄灌区采样点的玉米棒三叶进行光合测量,每次测量 36 个采样点位置的玉米叶片,3 次重复并取平均值,主要测量指标有净光合速率、蒸腾速率、胞间 CO₂ 浓度、气孔导度。利用叶绿素测定仪 SPAD—502Plus,选择晴朗天气,分别在各个重要的生育期对玉米的棒三叶测量叶绿素,3 次重复并取平均值。

叶片水分利用效率 $WUE(\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1})=P_n/T_r$ 。土壤有机碳采用重铬酸钾容量法,全氮(TN)采用半微量凯氏定氮法,全磷(TP)采用钼酸铵分光光度法。

长宽系数法测量单株叶面积(LA),并计算叶面积指数(LAI)。

$$\text{单株叶面积}(LA)=L\times W\times r$$

$$\text{叶面积指数}(LAI)=LA\times D/S$$

式中,L 为叶长,W 为叶宽,r 为系数(完全展开叶 r 为 0.75,未完全展开叶 r 为 0.50),D 为单位面积内的植株数,S 为面积(hm²)。

1.2.3 试验设计与数据整理 在相同试验样方区域、相同农田管理方式、相同施肥和灌溉等条件下,在获得试验基地众多基本数据之后,按不同土壤有机碳含量选取有代表性的土壤有机碳 T1(2.44 g·kg⁻¹),T2(3.70 g·kg⁻¹),T3(4.95 g·kg⁻¹),T4(6.14 g·kg⁻¹),T5(7.51 g·kg⁻¹),并挑选出与 T1、T2、T3、T4、T5 相对应的各项数据,对比分析 5 个不同土壤有机碳含量对其他指标的影响。

采用 Excel 2019 对图表进行绘制,应用 SPSS 24.0 软件对试验结果进行统计分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同土壤有机碳含量对玉米光合生理的影响

2.1.1 叶片净光合速率(P_n)与蒸腾速率(T_r) 在玉米的整个生长期,净光合速率呈 M 型或马鞍状变化,其中大喇叭口期和抽丝期是高峰值,开花期数值略低;在大喇叭口期净光合速率为 T5>T4>T2>T3>T1,在抽丝期净光合速率为 T5>T4>T2=T3>T1;由于处在干旱半干旱地区,叶片内部保卫细胞过度失水,叶片因自我保护而关闭,因而净光合速率在开花期未达到峰值。T1 到 T5 处理,随着土壤有机碳的增多,净光合速率的数值在各个生育期也随之升高(图 1A)。在抽丝期数值达到了最大,为 54.22 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,没有显示达到光饱和状态。

在玉米的整个生长期,T1 到 T5 处理,随着土壤有机碳的增多,蒸腾速率在各个生育期体现为先减后增的趋势(图 1B)。T5 出现的峰值晚于 T1,说明土壤有机碳含量越高,蒸腾速率的最高值出现的越晚,这样有利于光合作用的水气交换,有利于有机物质的富集。蒸腾速率的峰值均出现在大喇叭口期和开花期,说明该阶段玉米蒸腾速率旺盛,净光合速率的增强能引起叶片气孔的开放,减少了气孔的阻力。拔节期和大喇叭口期蒸腾速率与土壤有机碳呈负相关,后期两者呈不明显的正相关,成熟期 T5 的蒸腾速率较低。

2.1.2 玉米气孔导度(G_s)与胞间二氧化碳浓度(C_i) 在玉米的不同生育期气孔导度与土壤有机碳呈正相关关系,随着土壤有机碳的增加,平均气孔导度也随之增加(图 2A),峰值出现在开花期,气孔导度在开花期为 T5>T4>T3>T2>T1,土壤有机碳对气孔导度的影响较明显,在开花期气孔导度的整体数值大,净光合速率也高,从图 1B、图 2A 对比可以看出气孔导度与蒸腾速率在相同生育期呈正相关。

胞间 CO₂ 浓度在整个玉米生育期有波动下降趋势,随着土壤有机碳的增大,胞间 CO₂ 浓度在不同的

生育阶段都有减小的趋势,两者呈负相关(图 2B)。在抽丝期 $T1>T3>T2>T4>T5$,在其他 4 个生育阶段胞间 CO_2 浓度的数值都很低,说明光合活性很高。

2.1.3 叶片水分利用效率(WUE)和叶绿素(Chl)含量 在玉米的拔节期、大喇叭口期和成熟期随着土壤有机碳含量的增加,叶片水分利用效率也波动增加,三个生育期中大喇叭口期增加最显著,但在抽丝期叶片水分利用效率波动减少。在开花期,叶片水分利用效率先减后增,整体数值不大。抽丝期叶片水分利用效率为 $T1>T2>T3>T5>T4$,土壤有机碳含量与叶片水分利用效率呈现负相关,叶片水分利

用率达到最大值,说明在抽丝期叶片的水分利用效率达到了理想状态(图 3A)。

拔节期,叶绿素含量随着土壤有机碳的增加而增加,到达一定数值后变化很小(图 3B),说明土壤有机碳在拔节期影响玉米叶绿素是有一定范围的。在玉米的大喇叭口期叶绿素含量随着土壤有机碳的增加波动升高,而在开花期、抽丝期和成熟期两者的关系不明显。 $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 、 $T5$ 在开花期叶绿素达到整个生长期的最大值,而 $T4$ 在大喇叭口期和成熟期都出现了峰值,在玉米的生长后期表现为较高的含量,也为高产打下基础。

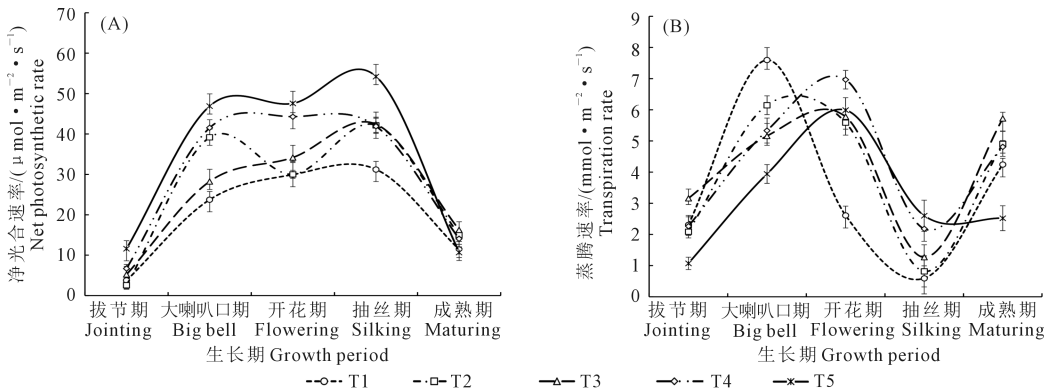


图 1 不同土壤有机碳含量下玉米叶片的净光合速率和蒸腾速率

Fig.1 Effects of different SOC contents on net photosynthetic rate and transpiration rate of maize leaves

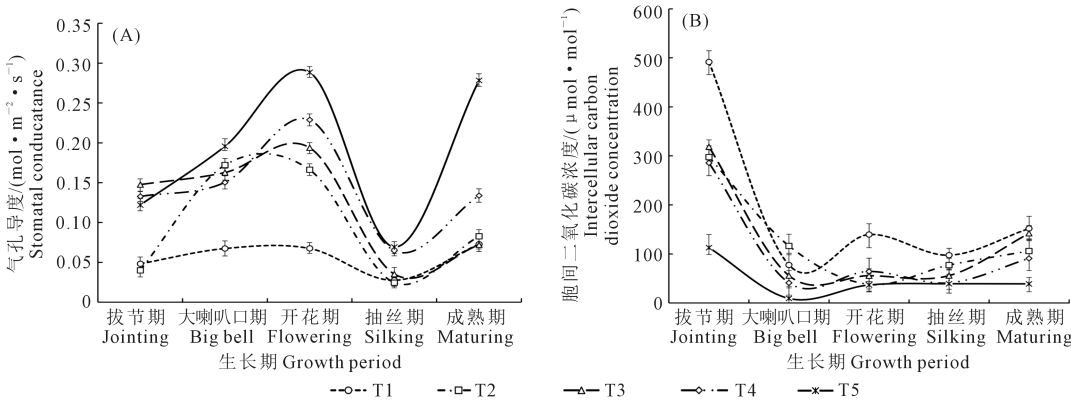


图 2 不同土壤有机碳含量下玉米叶片的气孔导度和胞间二氧化碳浓度

Fig.2 Effects of SOC contents on stomatal conductance and intercellular carbon dioxide concentration in maize leaves

2.2 不同土壤有机碳含量对玉米生长发育的影响

2.2.1 株高和茎粗 在开花期前,玉米的株高保持较高的增长速率(表 2),说明在开花期前光合作用主要供应给植株的营养器官;开花期之后, $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 玉米株高的增长速率缓慢增长,说明光合作用主要供应给植株的生殖器官。

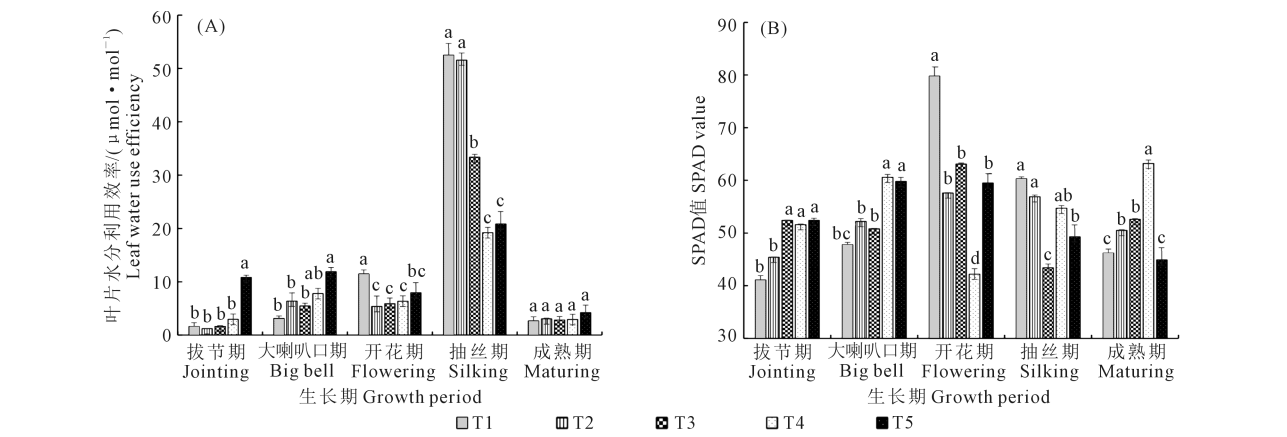
土壤有机碳对玉米茎粗的影响体现在开花期

之前快速生长,开花期之后缓慢生长,但 $T4$ 在拔节期、大喇叭口期均大于其他处理, $T4$ 在大喇叭口期之前快速增长,之后缓慢增长,在玉米生长后期达到一定的恒定值(表 2)。在拔节期、大喇叭口期和开花期,土壤有机碳与茎粗呈显著正相关,在抽丝期二者呈显著负相关,在成熟期,二者呈显著正相关,说明土壤有机碳对茎粗的影响在不同生育期有

差异,但大多数时期是正相关(表 3)

2.2.2 单株叶面积(LA)和叶面积指数(LAI) 玉米单株叶面积越大,理论上可接收太阳辐射能的面积越大,合成的有机质越多。在开花期之前,单株叶面积增长率最大(表 2),在开花期,单株叶面积达到了最大值,在开花期之后,单株叶面积略有下降,说明后期叶片衰老,而新生叶片较少。在拔节期和大

喇叭口期,土壤有机碳与单株叶面积呈显著正相关,在开花期二者负相关,在抽丝期和成熟期,二者无相关性。叶面积指数越高,群体光合速率就越高,在开花期之前,叶面积指数增长率最大,在开花期,叶面积指数达到了最大值;在开花期之后,叶面积指数略有下降。大喇叭口期,土壤有机碳与叶面积指数呈负相关,但未达显著水平(表 3)。



注:不同小写字母代表同一生育期不同处理间在 5%下差异显著。
Note: Different lowercase letters represent significant differences between different treatments at 5% in same growth stages.

图 3 不同土壤有机碳含量下玉米叶片的水分利用效率和叶绿素含量

Fig.3 Effects of different soil organic carbon contents on WUE and Chl of maize leaves

表 2 不同土壤有机碳含量下玉米不同生育期的生长发育状况

Table 2 Effects of different SOC contents on growth and development of maize in different growth stages

项目 Item	处理 Treatment	拔节期 Jointing	大喇叭口期 Big bell	开花期 Flowering	抽丝期 Silking	成熟期 Maturing
株高/cm Plant height	T1	26.35±3.84d	57.18±9.78e	216.23±11.60d	271.54±8.46b	272.81±29.65b
	T2	38.31±5.93d	88.02±10.55d	270.71±10.57a	283.38±19.51b	284.16±8.65b
	T3	42.14±4.08c	150.44±13.58b	282.63±9.45a	317.83±33.70a	318.71±12.66a
	T4	72.84±11.45a	190.80±15.77a	240.32±23.86c	241.85±21.12c	242.96±16.49c
	T5	56.93±6.44b	135.03±22.87c	260.57±37.43b	261.34±16.76b	262.77±34.08b
茎粗/cm Stem diameter	T1	1.27±0.05b	2.23±0.06b	2.70±0.07b	3.34±0.03a	3.36±0.06a
	T2	1.27±0.04b	2.22±0.14b	2.73±0.03b	3.02±0.18b	3.05±0.04b
	T3	1.91±0.06ab	2.86±0.06a	3.50±0.28a	3.50±0.02a	3.51±0.25a
	T4	2.23±0.27a	3.18±0.17a	3.18±0.07ab	3.19±0.04ab	3.20±0.33a
	T5	1.91±0.09ab	2.87±0.03a	3.33±0.06a	3.34±0.05a	3.34±0.07a
单株叶面积 LA/cm ² Leaf area	T1	861.31±16.55d	2430.28±37.94d	9240.54±33.57d	9261.62±17.67c	9702.81±23.54c
	T2	913.50±18.45d	2808.55±27.11d	9240.26±28.03d	11694.38±14.75a	11576.25±12.87a
	T3	2025.74±26.20c	6435.49±28.87c	12375.28±39.66a	10568.25±35.52b	10972.50±54.34b
	T4	4320.55±22.07a	7897.50±19.98a	11088.26±41.46b	10337.25±38.82b	10510.25±19.66b
	T5	2640.22±17.23b	7215.79±22.63b	10518.75±28.06c	9562.50±45.70c	9562.51±24.87c
叶面积指数 LAI Leaf area index	T1	0.64±0.36c	1.82±0.15c	6.93±0.89b	6.94±0.87ab	7.27±0.34b
	T2	0.68±0.52c	2.10±0.33b	6.93±0.45b	8.77±0.27a	8.68±0.61a
	T3	1.51±0.45b	4.82±0.54ab	9.28±1.16a	7.92±1.31a	8.22±1.55a
	T4	3.24±0.28a	5.92±0.63a	8.31±1.35ab	7.75±0.89a	7.88±0.40a
	T5	1.98±0.77ab	5.41±1.27a	7.88±0.24ab	7.17±0.14b	7.17±0.38b

表 3 玉米不同生育期土壤有机碳含量与生长发育状况的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between SOC contents and maize growth and development at different growth stages

	土壤有机碳含量 Soil organic carbon content				
	拔节期 Jointing	大喇叭口期 Big bell	开花期 Flowering	抽丝期 Silking	成熟期 Maturing
株高 Plant height/cm	0.82	0.81	0.75	0.75	0.76
茎粗 Stem diameter/cm	0.81	0.90*	0.90*	-0.78	0.75
单株叶面积 LA Leaf area/cm ²	0.51	0.51	-0.34	0.01	-0.13
叶面积指数 LAI Leaf area index	-0.13	-0.34	0.01	-0.25	-0.25

注: * 在 0.05 级别 (双尾) 相关性显著。
Note: * The correlation is significant at 0.05 level (two tailed).

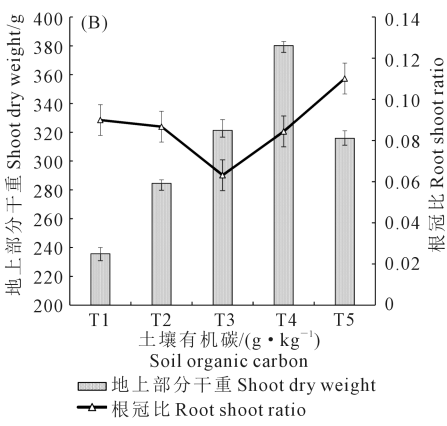
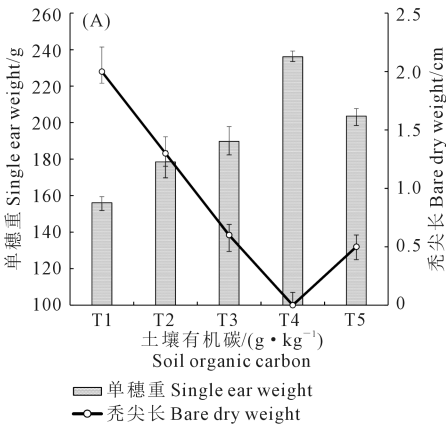


图 4 土壤有机碳含量对玉米生物量的影响

Fig.4 Effects of soil organic carbon contents on maize biomass

2.3.2 玉米地上部分干重及根冠比 玉米地上部分干重随着土壤有机碳的增多先增后减,T4 达到最大,为 380.22 g(图 4B),由 T1 到 T2,玉米的地上部分干重增长率为20.74%,由 T4 到 T5,玉米的地上部分干重下降率为 20.37%。随着土壤有机碳的增加,玉米单穗重和玉米地上部分干重增加。由 T1 到 T3 根冠比减小,T3 到 T5 根冠比增大(图 4B),根冠比随着土壤有机碳的增多先减后增;由 T3 到 T4,玉米的根冠比增长率为33.71%;T4 地上部分干重最大,说明土壤有机碳6.14 g · kg⁻¹,玉米的生长发育达到理想状态。

3 讨 论

土壤有机碳不断分解,减少了土壤碳储存,同时植被碳库向土壤碳库的流动增加,从而增加了土壤碳库,农田生态系统正是这两种作用的结果,体现了土壤碳的收入和支出的平衡关系。农田生态系统固碳潜力巨大,一定条件下,土壤有机碳在微生物的作用下分解,一部分被农作物及时吸收,另一部分以 CO₂ 的形式释放到大气中,而大气中的 CO₂ 又被农作物光合吸收,碳以干物质的形式保存,干物质又以有机碳的形式回归土壤,这样土壤有机碳的收入大于支出,形成了新的碳汇并促进了碳的良性循环。

本试验是在相同试验样方区域、相同农田管理方式、相同施肥和灌溉等条件下进行的。施用各种农家肥、有机肥和秸秆还田等都会增加土壤有机碳的含量。在渭北合阳试验基地,随着有机肥施用量的增加,各生育时期的叶片光合速率和气孔导度显著增大,胞间 CO₂ 浓度逐渐减小^[20]。在等量氮肥条件下,有机肥可显著提高玉米整个生育期的光合速率^[21],这与本研究一致。有机肥的合理配施能显著增加玉米的净光合速率^[22-24]。秸秆还田使玉米叶片的光合速率和蒸腾速率持续出现高值,同时提高了水分利用效率^[25]。秸秆还田处理与常量化肥相比,增加了叶绿素含量,显著提高叶面积指数,半量秸秆还田处理显著提高产量^[26]。沼肥与化肥配施提高了东北玉米的光合速率、蒸腾速率、气孔导

度和叶绿素含量并且提高了玉米的品质^[27]。生物炭、有机肥与化肥配施促进叶绿素含量和叶片的净光合速率、气孔导度、水分利用效率提高,而胞间CO₂浓度、蒸腾速率则分别降低^[28]。半施有机肥可以改善叶肉细胞的光合能力,并可提高生育后期叶片的光合强度,延长高光合持续期^[29]。灌水和氮、磷、钾及有机肥施用对番茄叶片光合速率的影响既相互促进,又相互制约,只有合理的水肥管理措施才能提高番茄叶片的光合速率^[30]。由此可见,不同地区由于自然条件和人类活动的影响不同,土壤有机碳对玉米生理的影响也有很大差异。

刘强等^[31]认为在黄土高原半干旱区以有机肥配施氮磷肥作物产量增加最显著。高飞等^[25]研究表明秸秆还田使玉米株高、茎粗和单株叶面积显著增加。施用生物有机肥对玉米株高、苗干重、次生根和产量均有提高作用^[32],与本研究一致。余海兵等^[23]认为配施有机肥可显著提高春玉米整个生育期的LAI、株高,使生物产量增加。本研究得出玉米不同生长阶段株高、茎粗、叶面积的增长速率是不同的。化肥与有机肥配合施用可显著提高玉米植株叶面积指数、干物质积累量^[33]。张影等^[34]研究表明添加生物质炭和有机物料提高了土壤有机质含量,增加了砂土玉米株高和生物量。土壤有机碳能够提高玉米干物质的积累量。但是本研究认为玉米不同生育期土壤有机碳达到一定阈值时,能够持续不断为玉米供应养料,相较而言T4处理最理想。

随有机肥用量的增加,玉米百粒重、穗行数、籽粒干物质积累显著增加,光合作用明显改善^[35]。秸秆深翻还田可促进玉米根冠比提高,改良玉米群体光合叶面积和净光合速率,显著地提高全生育期的生物积累量和产量^[36]。在内蒙古典典型草原,氮添加显著抑制了根冠比^[37]。随秸秆还田年限增加,玉米地上株高及穗位高相应增加,大喇叭口期、开花期玉米根重、总根长增加^[38]。施用生物有机肥对玉米根长、根干重、苗干重、次生根和产量均有提高作用^[32]。研究表明黑龙江海伦市和吉林德惠市两种不同的气候条件下,土壤有机质含量与玉米产量间不存在显著相关关系,产量差异不显著^[39]。说明土壤有机碳对玉米产量的影响在不同气候条件下是波动变化的。

4 结 论

土壤有机碳含量达到一定阈值范围时对玉米的生理特征和生长发育具有积极的促进作用,但在不同的生育期其结果不同。土壤有机碳含量与玉

米净光合速率呈正相关关系;随着土壤有机碳含量的增多,蒸腾速率在玉米各个生育期表现为先减后增的趋势;气孔导度在玉米的不同生育期与土壤有机碳呈正相关关系;胞间CO₂浓度在玉米不同的生育期与土壤有机碳呈负相关关系;在玉米的拔节期,大喇叭口期和成熟期随着土壤有机碳含量的增加,叶片水分利用效率也波动增加;在玉米的拔节期,叶绿素随着土壤有机碳的增加先增加,到达一定数值后保持不变;在开花期之前,土壤有机碳对玉米的株高、茎粗、单株叶面积、叶面积指数都有积极的影响,此时的增长率也较大,开花期之后,土壤有机碳对其影响变弱。

参 考 文 献:

[1] World Meteorological Organization. The global climate in 2015–2019 [R]. Geneva: World Meteorological Organization, 2020: 1-50.

[2] XIA L L, LAM S K, CHEN D L, et al. Can knowledge-based N management produce more staple grain with lower greenhouse gas emission and reactive Nitrogen pollution? A meta-analysis [J]. Global Change Biology, 2017, 23(5): 1917-1925.

[3] 熊正琴, 张晓旭. 氮肥高效施用在低碳农业中的关键作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1433-1440.

XIONG Z Q, ZHANG X X. Key role of efficient nitrogen application in low carbon agriculture [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2017, 23(6): 1433-1440.

[4] 张智起, 张立旭, 徐炜, 等. 气候变暖背景下土壤呼吸研究的几个重要问题[J]. 草业学报, 2019, 28(9): 164-173.

ZHANG Z Q, ZHANG L X, XU W, et al. Several important issues of soil respiration under climate warming [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(9): 164-173.

[5] LIU S W, JI C, WANG C, et al. Climatic role of terrestrial ecosystem under elevated CO₂: a bottom-up greenhouse gases budget [J]. Ecology Letters, 2018, 21(7): 1108-1118.

[6] BOND-LAMBERTY B, THOMSON A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record [J]. Nature, 2010, 464(7288): 579-582.

[7] 郭洋, 李香兰, 王秀君, 等. 干旱半干旱区农田土壤碳垂直剖面分布特征研究[J]. 土壤学报, 2016, 53(6): 1433-1443.

GUO Y, LI X L, WANG X J, et al. Profile distribution of soil inorganic and organic carbon in farmland in arid and semi-arid areas of China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(6): 1433-1443.

[8] 吴萌, 李忠佩, 冯有智, 等. 长期施肥处理下不同类型水稻土有机碳矿化的动态差异[J]. 中国农业科学, 2016, 49(9): 1705-1714.

WU M, LI Z P, FENG Y Z, et al. Dynamic differences of organic carbon mineralization in different types of paddy soil under long-term located fertilization [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(9): 1705-1714.

[9] 陈晓芬, 刘明, 江春玉, 等. 红壤性水稻土不同粒级团聚体有机碳矿化及其温度敏感性[J]. 土壤学报, 2019, 56(5): 1118-1127.

- CHEN X F, LIU M, JIANG C Y, et al. Mineralization of soil organic carbon and its sensitivity to temperature in soil aggregates, relative to particle size in red paddy soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (5): 1118-1127.
- [10] 郭振, 王小利, 段建军, 等. 长期施肥对黄壤性水稻土有机碳矿化的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55(1): 225-235.
- GUO Z, WANG X L, DUAN J J, et al. Long-term fertilization and mineralization of soil organic carbon in paddy soil from yellow earth [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(1): 225-235.
- [11] 张维理, KOLBE H, 张连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(2): 317-331.
- ZHANG W L, KOLBE H, ZHANG R L. Research progress of SOC functions and transformation mechanisms [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(2): 317-331.
- [12] WILDING L P, LIN H. Advancing the frontiers of soil science towards a geoscience [J]. *Geoderma*, 2005, 131(3/4): 257-274.
- [13] SCHLESINGER W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils [J]. *Nature*, 1990, 348(6298): 232-234.
- [14] 巢清尘, 胡婷, 张雪艳, 等. 气候变化科学评估与政治决策[J]. *阅江学刊*, 2018, 10(1): 28-45+145.
- CHAO Q C, HU T, ZHANG X Y, et al. Scientific assessment and political decision-making of climate change [J]. *Yuejiang Academic Journal*, 2018, 10(01): 28-45+145.
- [15] IPCC. Climate change 2013-the physical science basis: working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [16] 秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(7): 874-883.
- QIN D H. Climate change science and sustainable development [J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(7): 874-883.
- [17] 陈豫英, CHEN N, 郑广芬, 等. 近45a宁夏气温、降水及植被指数的变化分析[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(4): 626-634.
- CHEN Y Y, CHEN N, ZHENG G F, et al. Change of temperature, precipitation and NDVI in recent 45 years in Ningxia [J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(4): 626-634.
- [18] 郑广芬, 陈晓光, 孙银川, 等. 宁夏气温、降水、蒸发的变化及其对气候变暖的响应[J]. *气象科学*, 2006, 26(4): 412-421.
- ZHENG G F, CHEN X G, SUN Y C, et al. The changes of temperature, precipitation, evaporation and their response to the climate warming [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2006, 26(4): 412-421.
- [19] 陈国平. 玉米的干物质生产与分配(综述) [J]. *玉米科学*, 1994, (1): 48-53.
- CHEN G P. Production and distribution of dry matter in maize (review) [J]. *Journal of Maize Sciences*, 1994, (1): 48-53.
- [20] 王晓娟, 贾志宽, 梁连友, 等. 不同有机肥量对旱地玉米光合特性和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(2): 419-425.
- WANG X J, JIA Z K, LIANG L Y, et al. Effects of organic fertilizer application rate on leaf photosynthetic characteristics and grain yield of dryland maize [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23 (2): 419-425.
- [21] WUD F. Effects of combined organic-inorganic fertilization on quality and water use efficiency of spring maize under equal nitrogen fertilization [J]. *Asian Agricultural Research*, 2020, 12(5): 42-46.
- [22] 肖凯, 张荣铎, 钱维朴. 氮素营养调控小麦旗叶衰老和光合功能衰退的生理机制[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(4): 371-378.
- XIAO K, ZHANG R X, QIAN W P. The physiological mechanism of senescence and photosynthetic function decline of flag leaf in wheat regulated by nitrogen nutrition [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(4): 371-378.
- [23] 余海兵, 刘正, 苏佩佩. 人工腐熟的粪肥配施对糯玉米光合特性及产量构成的影响[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(4): 268-272.
- YU H B, LIU Z, SU P P. Effects of applying artificial maturity of manure on the photosynthetic and yield of waxy maize [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(4): 268-272.
- [24] 杨玉玲, 刘文兆, 王俊, 等. 配施钾肥、有机肥对旱地春玉米光合生理特性和产量的影响[J]. *西北农业学报*, 2009, 18(3): 116-121.
- YANG Y L, LIU W Z, WANG J, et al. Effects of potassium and organic fertilizer on photosynthetic physiological characteristics and yield of spring maize in dry lands [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2009, 18(3): 116-121.
- [25] 高飞, 贾志宽, 路文涛, 等. 秸秆不同还田量对宁南旱区土壤水分、玉米生长及光合特性的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(3): 777-783.
- GAO F, JIA Z K, LU W T, et al. Effects of different straw returning treatments on soil water, maize growth and photosynthetic characteristics in the semi-arid area of southern Ningxia [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(3): 777-783.
- [26] 王宁, 闫洪奎, 王君, 等. 不同量秸秆还田对玉米生长发育及产量影响的研究[J]. *玉米科学*, 2007, 15(5): 100-103.
- WANG N, YAN H K, WANG J, et al. Research on effects of different amount straws return to field on growth development and yield of maize [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2007, 15(5): 100-103.
- [27] 艾俊国, 孟瑶, 于琳, 等. 沼肥与化肥配施对东北春玉米光合生理特性及产量品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2015, (4): 59-65.
- AI J G, MENG Y, YU L, et al. Effects of combined application of biogas manure and chemical fertilizer on leaf photosynthesis, yield and quality of spring maize in northeast of China [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2015, (4): 59-65.
- [28] 彭辉辉, 刘强, 荣湘民, 等. 生物炭、有机肥与化肥配施对春玉米光合特性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(7): 132-135.
- PENG H H, LIU Q, RONG X M, et al. Effects of combined application of biochar, organic fertilizer and chemical fertilizer on photosynthetic characteristics of spring maize [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(7): 132-135.
- [29] 李潮海, 刘奎, 周苏政, 等. 不同施肥条件下夏玉米光合对生理生态因子的响应[J]. *作物学报*, 2002, 28(2): 265-269.
- LI C H, LIU K, ZHOU S M, et al. Response of photosynthesis to eco-physiological factors of summer maize on different fertilizer amounts [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(2): 265-269.
- [30] 周振江, 牛晓丽, 李瑞, 等. 番茄叶片光合作用对水肥耦合的响应

[J].节水灌溉,2012,(2):28-32,37.

ZHOU Z J, NIU X L, LI R, et al. Coupling effects of irrigation and fertilizers on photosynthetic rate of tomato leaves[J]. Water Saving Irrigation, 2012,(2): 28-32, 37.

[31] 刘强,穆兴民,王新民,等.长期不同施肥方式对旱地轮作土壤养分和作物产量的影响[J].干旱地区农业研究,2021,39(3):122-128.

LIU Q, MU X M, WANG X M, et al. Effects of different long-term fertilization on crop yield and soil nutrients under rotation planting in arid region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(3): 122-128.

[32] 李北齐,王倡宪,孟瑶,等.生物有机肥对盐碱土壤养分及玉米产量的影响[J].中国农学通报,2011,27(21):182-186.

LI B Q, WANG C X, MENG Y, et al. Effects of microbial organic fertilizer on saline-alkalisoil nutrient and maize production [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(21): 182-186.

[33] 刁生鹏,高宇,张雄,等.有机肥施用对玉米生长发育及水分利用的影响[J].北方农业学报,2018,46(4):58-63.

DIAO S P, GAO Y, ZHANG X, et al.Effects of organic fertilizer on growth and development and water use of maize[J]. Journal of North-ern Agriculture, 2018, 46(4): 58-63.

[34] 张影,刘星,焦瑞锋,等.生物质炭与有机物料配施的土壤培肥效果及对玉米生长的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(9):1287-1297.

ZHANG Y, LIU X, JIAO R F, et al. Effects of combined biochar and organic matter on soil fertility and maize growth[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(9): 1287-1297.

[35] 党翼,张建军,赵刚,等.不同用量的有机肥对陇东旱地春玉米生长特性及产量的影响[J].中国土壤与肥料,2015,(3):62-67.

DANG Y, ZHANG J J, ZHAO G, et al. Effect of different amount of manure on growth characteristics and yield of spring maize in calcic kastanozems soil of eastern Gansu's Loess Plateau[J]. Soils and Fer-tilizers Sciences in China, 2015,(3): 62-67.

[36] 岳杨,董本春,李岩,等.不同秸秆还田方式对春玉米生长特性及产量的影响[J].农业科技通讯,2020,(10):41-43,48.

YUE Y, DONG B C, LI Y, et al.Effects of different straw returning methods on growth characteristics and yield of spring maize[J]. Bul-letin of Agricultural Science and Technology, 2020,(10): 41-43, 48.

[37] 景明慧,贾晓彤,张运龙,等.长期氮添加对内蒙古典型草原植物地上、地下生物量及根冠比的影响[J].生态学杂志,2020,39(10):3185-3193.

JING M H, JIA X T, ZHANG Y L, et al. Effects of long-termnitrogen addition on community aboveground and belowground biomass and their ratio in a typical steppe of Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(10): 3185-3193.

[38] 慕平,张恩和,王汉宁,等.不同年限全量玉米秸秆还田对玉米生长发育及土壤理化性状的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(3):291-296.

MU P, ZHANG E H, WANG H N, et al. Effects of continuous straw return to soil on maize growth and soil chemical and physical charac-teristics[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(3): 291-296.

[39] 张兴义,隋跃宇,王其存,等.土壤有机质含量与玉米生产力的关系[J].土壤通报,2007,38(4):657-660.

ZHANG X Y, SUI Y Y, WANG Q C, et al. Relationship between blacksoil organic matter content and corn productivity[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(4): 657-660.

(上接第 212 页)

[26] 徐跌珣,同小娟,张劲松,等.太行山南麓刺槐人工林土壤呼吸与土壤温度间的滞后关系[J].北京林业大学学报,2019,41(4):78-87.

XUY X, TONG X J, ZHANG J S, et al. Time lag between soil respi-ration and soil temperature in a *Robinia pseudoacacia* plantation in the south of the Taihang Mountains[J]. Journal of Beijing Forestry Uni-versity, 2019, 41(4): 78-87.

[27] ZHENG Z M, YU G R, FU Y L, et al. Temperature sensitivity of soil respiration is affected by prevailing climatic conditions and soil organic carbon content: a trans-China based case study[J]. Soil Biol-ogy and Biochemistry, 2009, 41(7): 1531-1540.

[28] RAICH J W, POTTER C S. Global patterns of carbon dioxide emis-sions from soils[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1995, 9(1): 23-36.

[29] VANHALA P, KARHU K, TUOMI M, et al. Old soil carbon is more temperature sensitive than the young in an agricultural field[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(11): 2967-2970.

[30] 沙志鹏,张宇阳,王超,等.西藏“玉米田养鹅”模式下养分吸收与养分平衡特征[J].土壤学报,2016,53(2):523-532.

SHA Z P, ZHANG Y Y, WANG C, et al.Nutrient absorption and nu-trient balance in an agro-pastoral compound production pattern of “raising geese in corn fields” in Tibet[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(2): 523-532.

[31] 曹舰艇,关法春,仝淑萍,等.玉米田养鹅对土壤理化性状、杂草多样性及玉米生长的影响[J].中国农业大学学报,2018,23(2):20-28.

CAO J T, GUAN F C, TONG S P, et al. Effects of raising geese in cornfield on soil physical and chemical properties,weed diversity and maize growth[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(2): 20-28.