

西北半干旱区农田土壤有机碳和全氮分布特征及其对地膜玉米产量的影响

胡延斌¹, 肖国举¹, 仇正跻², 戴君丽³, 李永平⁴

(1.宁夏大学, 资源环境学院 环境工程研究院, 银川 750021; 2.宁夏六盘山花卉研究所, 宁夏 隆德 756302;
3.宁夏彭阳县科学技术局, 宁夏 固原 756500; 4.宁夏农林科学院固原分院, 宁夏 固原 756000)

摘要:探究西北半干旱区农田土壤碳氮含量以及不同碳氮含量对作物产量的影响, 以期为保障国家粮食安全和耕地可持续发展提供决策依据。于 2017—2018 年连续两年在西北半干旱区彭阳县白阳镇、城阳乡和草庙乡, 采用农田生态系统调查取样的研究方法, 在地膜玉米的成熟期进行整株取样, 围绕耕层土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)及碳氮比(C/N)变化趋势, 开展土壤碳氮对玉米产量的影响展开研究。测定玉米籽粒的产量组成和实际产量, 深入理解农田土壤碳氮含量变化及其对作物产量的影响机理。对指导农田生态系统合理培肥、提高土壤养分利用和生产水平有着重要指导意义。结果表明: 调查区域耕层土壤 SOC, TN 含量及 C/N 分别分布于 4.00~14.00 g/kg, 0.80~1.30 g/kg, 5.00~13.00 之间, 且 TN 随 SOC 呈上升趋势。总体看, 一定阈值内, 土壤 SOC, TN 含量及 C/N 增加, 对玉米增产呈现积极的正效应。耕作层土壤 SOC 含量为 4.00~14.00 g/kg, SOC 含量每增加 1 g/kg, 玉米增产 0.79%~12.20%。耕作层土壤 TN 0.80~1.10 g/kg 时, TN 含量, 每增加 0.1 g/kg, 玉米增产 4.6%~12.40%; TN 含量 1.10~1.30 g/kg 时, TN 含量, 每增加 0.1 g/kg, 玉米减产 11.86%~20.05%。耕层土壤 C/N 在 5.00~13.00 时, 玉米增产 1.55%~24.09%。在其他既定条件不便的情况下, 西北半干旱区存在通过提高土壤碳氮含量来增加作物产量的潜力。一定阈值内, 保持较高水平的土壤碳氮含量对西北半干旱地区节本增效具有十分显著的作用。因此, 研究土壤碳氮含量对作物产量的影响, 对保障国家粮食安全和耕地可持续利用具有十分重要的意义。

关键词:半干旱区; 土壤有机碳; 全氮; 地膜玉米; 产量

中图分类号: F301.21

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)01-0058-07

Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen and Its Influence on Film-Mulched Maize in Farmland in Northwest Semiarid Region

HU Yanbin¹, XIAO Guoju¹, QIU Zhengji², DAI Junli³, LI Yongping⁴

(1. College of Resources and Environment & Institute of Environmental Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Ningxia Liupanshan Flower Research Institute, Longde, Ningxia 756302, China; 3. Science and Technology Bureau of Pengyang County, Pengyang, Ningxia 756500, China; 4. Guyuan Branch of Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Guyuan, Ningxia 756000, China)

Abstract: This research was conducted to explore the soil carbon and nitrogen contents of farmland soil and the influence of different carbon and nitrogen contents on crop yield in the semiarid region of northwest China, so as to provide theoretical basis for national food security and sustainable development of arable land. A two-year field research method of farmland ecosystem survey sampling was persistently performed in the semiarid area of northwest China. In 2017—2018, the survey areas were the towns such as Baiyang, Chengyang and Caomiao Town. The whole plant sampling was carried out at the mature stage of mulch maize, and the influence of soil carbon and nitrogen on maize yield was studied by centering on the variation trend of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN) and carbon nitrogen ratio (C/N) in the topsoil. The yield composition and actual yield of maize seeds were determined to understand the change of the SOC and TN

收稿日期: 2020-03-07

修回日期: 2020-04-09

资助项目: 国家重点研发计划(2016YFC0501302); 国家自然科学基金(41665009); 宁夏科技创新领军人才计划(KJT2016006)

第一作者: 胡延斌(1991—), 女, 河北邢台人, 硕士研究生, 研究方向为气候变化与农田生态系统碳循环。E-mail: 985327920@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

contents of farmland soils and their impacts on crop yield, which has important guiding significance for farmland ecosystem in fertilizer application, soil nutrient utilization and production. The results showed that the SOC, TN and C/N of the cultivated soil in the survey area were between 4.00~14.00 g/kg, 0.80~1.30 g/kg and 5.00~13.00, and the TN increased with the increase of SOC; overall, within a certain threshold, the increases in SOC, TN and C/N have the positive effect on rise of maize yield; when the surface SOC content is 4.00~14.00 g/kg, the SOC content increases by 1 g/kg, the maize yield increases by 0.79%~12.20%; when the surface TN content is 0.80~1.10 g/kg, the TN content increases by 0.1 g/kg, the maize yield increases by 4.60%~12.40%; when the surface TN content is 1.10~1.30 g/kg, the TN content increases by 0.1 g/kg, the maize yield decrease by 11.86%~20.05%; when the surface C/N content is 5.00~13.00, the maize yield increases by 1.55%~24.09%. In the case that other established conditions are unchanged, the semi-arid region in northwest China has the potential to increase crop yield by increasing soil carbon and nitrogen content. Within a certain threshold, maintaining a high level of soil carbon and nitrogen content has a very significant effect on cost-saving and efficiency in northwest semi-arid area. Therefore, it is very important to study the influence of soil carbon and nitrogen contents on crop yields to ensure national food security and sustainable use of cultivated land.

Keywords: semiarid district; SOC; TN; film-mulched maize; crop yield

粮食安全一直是中国农业发展面临的首要任务^[1],特别是近年来,伴随城市化进程加快,我国耕地面积不断减少,中国粮食安全的挑战越发严峻,水稻、小麦、玉米播种面积急剧下降。西北半干旱区是我国地膜玉米主产区之一,有超过 20% 的玉米用于口粮和食品加工,这就提要求我们必须不断提高玉米生产水平。土壤碳氮是作物生长不可或缺的物质基础,合理增加土壤碳氮含量可有效提高地膜玉米产量^[2]。明确作物产量的需求规律可以为地膜玉米的合理和精准施肥提供理论依据,对实现西北地区地膜玉米的优质、高效生产具有重要意义。目前,国内外对土壤质量变化与作物生产的影响主要从微观和宏观两个层面展开。微观层面是系统整合足够多的试验数据,形成适合一定生态区域的数学模型;宏观层面是利用一定的土壤碳库变化模型,如 RothC, CQESTR, CENCURY, NCSOIL, Rothamsted, CANDY, DNDC 模型等,进行土地质量变化对作物生产力的定量模拟^[1,3-6]。这些碳循环模型在设计、技术和机制上存在差别,模拟碳循环对作物生态系统的影响也各不相同。大量研究表明^[3-4,7],合理提高土壤碳氮含量可以显著提高耕地生产水平。我国土壤有机碳密度分别低于世界平均水平的 30% 和欧洲国家的 50%,有机碳含量不足严重阻碍作物稳产高产^[8-9]。我国东北地区土壤有机碳在 1.00%~1.50%,华北地区在 0.50%~0.80%,南方地区集中在 0.80%~1.20%,而西北大部分在 0.50% 以下,碳含量不足已成为制约西北地区粮食生产的重要因素之一。尽管中国目前对于不同区域和不同土地利用方式下土壤质量变化对作物

生产的影响已有一些研究,但由于试验资料不足,或者引用模型的适用性不强,在广度和深度上与国外研究还存在明显差距,远远不能满足国家需求。西北干旱半干旱区面积占全国陆地面积的 30%,是我国生态环境最为脆弱的区域之一,干旱、贫瘠是影响区域农业可持续发展的主要因素。分布有大面积的黄绵土,是我国西北地区主要粮食、果蔬基地之一。目前,农业生产中施肥大多数仍采用经验法,存在盲目性,与精准农业的发展要求不适应。

近年来,玉米(*Zea mays* L.)全膜双垄沟播种技术已在西北旱作农业区广泛推广。该技术集抑蒸、垄沟集雨和种植于一体,有效实现了保墒蓄水、增加积温、减小侵蚀、减轻盐碱化的效果,农田土壤环境显著改善。在相同条件下,玉米全膜双垄沟播种比半膜平覆种植增产 35% 以上,抗旱增产优势显著^[10]。本文选择西北典型半干旱区农田生态系统,利用 2017—2018 连续生态系统调查取样及观测数据,在区域尺度上定量模拟耕地质量变化对地膜玉米生产力的影响。基施农家肥和一定数量的化肥是固原半干旱区多年来的传统耕作方式,本研究为传统耕作方式下的农田土壤理化性状特征及变化规律。在分析土壤有机碳和全氮变化的同时,系统分析土壤碳氮含量对地膜玉米产量的影响。为进一步分析半干旱区土壤碳氮固定潜力及作物生产管理提供数据支持。

1 材料与amp;方法

1.1 研究区概况

调查研究在西北半干旱区彭阳县白阳镇、城阳乡和

草庙乡进行(106°43′48″—106°43′46″48′E, 35°45′36″—35°51′N)。海拔介于 1 577.00~1 629.00 m,大陆性气候。年均温在 6.3~10.2℃,多年平均气温 7.9℃,年降雨量在 282.10~765.70 mm,多年平均降水量 450 mm,平均无霜期 125 d。土壤为黄土高原黄绵土,土层深厚,耕性良好。主要种植作物有小麦、马铃薯、地膜玉米,熟制为一年一熟,属于典型的半干旱雨养农业区^[11]。

1.2 供试品种及田间管理

本研究以紧凑型耐密高产“先玉 335”为供试材料,采用机覆全膜双垄等距种植方式播种春玉米,覆膜宽为 1.1 m,玉米种植行距 55 cm,密度 6.75 万株/hm²。按照梅花型用 GPS 确定采样点,每个采样点面积控制在 1 m×1 m 范围内。2016 年起,调查区域三年连作地膜玉米,春季结合机耕犁地或旋耕整地,基施农家肥 52.50 t/hm²,磷酸二铵 200 kg/hm²(合 P₂O₅ 172.5 kg)。大喇叭口追施磷酸二铵 225 kg/hm²,氮肥 225 kg/hm²(尿素),旱地无灌溉。

表 1 研究区土壤基本理化性质

pH 值	全盐/%	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (mg·kg ⁻¹)	全磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
7.50~8.15	0.36~0.37	6.18~10.82	0.89~1.27	0.68~0.79	35.59~55.54	1.50~5.20	101.80~247.42

研究数据分析和绘图在 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 19.0 中完成。应用 SPSS 19.0 软件,选择 One—Way ANOVA 进行单因素方差分析,采用最小显著性差异法(LSD,α=0.05)进行多重比较,采用 Pearson 法进行变量间相关性分析。应用 Microsoft Excel 2010 进行分析和绘图。图表中数据为平均值±标准误。

2 结果与分析

2.1 农田土壤碳氮分布特征

2.1.1 土壤有机碳分布特征 从调查来看(表 2),玉米耕层土壤有机碳在 4.00~14.00 g/kg,K-S 检验表明,渐进显著性为 0.11,变异系数分别为 18.46%,偏度和峰度分别为 0.08,1.26。耕层土壤有机碳含量在 4.00~6.00 g/kg,6.00~8.00 g/kg,8.00~10.00 g/kg,10.00~12.00 g/kg,12.00~14.0 g/kg 分别占样本采集的 2.94%,41.18%,17.65%,35.29%,2.94%。其中 94.12%的集中在 6.00~12.00 g/kg,变异系数为 18.46%。

2.1.2 土壤 TN 分布特征 调查区域地膜玉米农田耕层土壤全氮含量在 0.30~1.30 g/kg,K-S 检验表明,渐进显著性为 0.08,变异系数为 10.53%,偏度和峰度分别为 3.86,22.89。耕层土壤全氮含量在 0.80~0.90 g/kg,0.90~1.00 g/kg,1.00~1.10 g/kg,1.10~1.20 g/kg,1.20~1.30 g/kg 分别占样本采集

1.3 作物考种与测产

2017—2018 年玉米收获期,确定采样点后人工采集土壤样品,去除土壤样品中的砾石、动植物残体等杂质,测定土壤有机碳与全氮。人工收获地膜玉米,实打实收,测定百粒重、每棒粒数、每棒重量以及实际产量。用百分位电子天平测定玉米籽粒百粒重,重复 5 次,取平均值。测定耕层土壤有机碳、全氮等养分指标。有机碳采用重铬酸钾外加热法;全氮采用微量凯氏定氮法。

1.4 数据处理分析

在土壤样品采集点,用内径 5 cm 的土钻人工采集耕层土壤(0—20 cm),各样方(1 m×1 m)选取 5 个点,充分均匀混合为一个土样。2017 年、2018 年每年分别取样 36 个与 32 个,两年共 68 个样品(表 1)。两年取样采集点彼此是独立的,同样两年间样品间观测值也独立的。鉴于国内外关于土壤养分状况与作物生产关系的研究中多采用 g/kg 土壤有机碳与全氮的贡献量作为研究对象,因此,本文将土壤有机碳与全氮以 1 g/kg 与 0.1 g/kg 等距划分。

的 33.82%,48.53%,11.77%,2.94%,2.94%,其中有 94.12%集中分布在 0.80~1.10 g/kg,变异系数为 10.53%(表 3)。

从两者关系来看,土壤全氮伴随有机碳含量的增加呈上升趋势。土壤有机碳和全氮在 0.05 水平上显著相关性为 0.29。

2.1.3 土壤 C/N 变化特征 通常认为土壤 C/N 是土壤质量的敏感指标,其演变趋势对土壤碳氮循环有着重要影响。调查区域地膜玉米耕层土壤 C/N 在 5.00~13.00 之间,变异系数为 17.12,偏度和峰度分别为 0.23,1.26。C/N 在 5.00~6.00,6.00~7.00,7.00~8.00,8.00~9.00,9.00~10.00,10.00~11.00,11.00~12.00,12.00~13.00 分别占样本采集的 2.94%,2.94%,23.53%,22.06%,5.88%,19.12%,17.65%,5.88%,其中 89.71%的集中在 7.00~12.00,变异系数为 17.12%(表 4)。

2.2 土壤碳氮含量水平对玉米产量的影响

2.2.1 土壤有机碳对玉米产量及产量组成的影响 玉米产量由每棒粒数、百粒重、收获棒数决定。从表 5 看,土壤有机碳含量增加,总体有利于玉米产量的提高。调查区域耕层土壤有机碳含量 4.00~14.00 g/kg 时,有机碳含量每增加 1 g/kg,玉米每棒重量增加 13.26~22.18 g,增产 6.60%~13.12%;有机碳含量 6.00~12.00

g/kg 时,有机碳含量每增加 1 g/kg,玉米每棒重量增加 13.25~22.18 g,增产 7.10%~13.12%。

表 2 2017—2018 年调查区域农田耕层土壤 SOC 样品统计分析

耕层土壤 SOC/ (g·kg ⁻¹)	2017 年			2018 年			2017—2018 年		
	样品数/ 个	占总样品 比例/%	土壤 SOC/ (g·kg ⁻¹)	样品数/ 个	占总样品 比例/%	土壤 SOC/ (g·kg ⁻¹)	样品数/ 个	占总样品 比例/%	土壤 SOC/ (g·kg ⁻¹)
4.00~6.00	2	5.55	5.46±0.40	—	—	—	2	2.94	5.46±0.40
6.00~8.00	28	77.78	7.27±0.09	—	—	—	28	41.18	7.27±0.09
8.00~10.00	6	16.67	8.51±0.17	6	18.75	9.73±0.06	12	17.65	9.12±0.20
10.00~12.00	—	—	—	24	75.00	10.48±0.09	24	35.29	10.48±0.09
12.00~14.00	—	—	—	2	6.25	12.59±0.08	2	2.94	12.59±0.08
合计	36	100	7.37±0.13	32	100	10.47±0.13	68	100	8.83±0.21

注: SOC 表示 Soil organic carbon; “—”表示该阈值内样品缺失。

表 3 2017—2018 年调查区域农田耕层土壤 TN 样品统计分析

耕层土壤 TN/ (g·kg ⁻¹)	2017 年			2018 年			2017—2018 年		
	样品数/ 个	占总样品 比例/%	土壤 TN/ (g·kg ⁻¹)	样品数/ 个	占总样品 比例/%	土壤 TN/ (g·kg ⁻¹)	样品数/ 个	占总样品 比例/%	土壤 TN/ (g·kg ⁻¹)
0.80~0.90	13	36.11	0.86±0.01	9	31.25	0.88±0.01	22	33.82	0.88±0.01
0.90~1.00	18	50	0.94±0.01	16	46.87	0.95±0.01	34	48.53	0.95±0.01
1.00~1.10	3	8.33	1.02±0.01	5	15.62	1.02±0.01	8	11.77	1.02±0.01
1.10~1.20	1	2.78	1.14	1	3.13	1.17	2	2.94	1.15±0.01
1.20~1.30	1	2.78	1.25	1	3.13	1.29	2	2.94	1.27±0.02
合计	36	100	0.94±0.01	32	100.00	0.96±0.02	66	100	0.95±0.01

表 4 2017—2018 年调查区域农田耕层土壤 C/N 样品统计分析

耕层 土壤 C/N	2017 年			2018 年			2017—2018 年		
	样品数/ 个	占总样品 比例/%	土壤 C/N	样品数/ 个	占总样品 比例/%	土壤 C/N	样品数/ 个	占总样品 比例/%	土壤 C/N
5.00~6.00	2	5.56	5.86±0.11	—	—	—	2	2.94	5.86±0.11
6.00~7.00	1	2.78	6.64	—	—	6.65	2	2.94	6.81±0.18
7.00~8.00	17	47.22	7.66±0.05	—	—	—	16	23.53	7.69±0.05
8.00~9.00	13	46.11	8.31±0.06	2	6.25	8.29±0.09	15	22.06	8.31±0.04
9.00~10.00	3	8.33	9.21±0.18	1	3.13	9.83	4	5.88	9.36±0.20
10.00~11.00	—	—	—	13	40.62	10.59±0.08	13	19.12	10.59±0.08
11.00~12.00	—	—	—	12	37.5	11.42±0.09	12	17.65	11.42±0.09
12.00~13.00	—	—	—	4	12.5	12.56±0.11	4	5.88	12.56±0.11
合计	36	100	7.90±0.12	32	100	10.98±0.18	68	100	9.35±0.22

随土壤有机碳含量的提高,每棒粒数显著上升。土壤有机碳 4.00~10.00 g/kg,每棒粒数增加 28.81~56.49 粒;土壤有机碳 6.00~14.00 g/kg,每棒粒数增加 9.81~87.40 粒,其中有机碳在 12.00~14.00 g/kg 时,每棒粒数最高,为 770.00 粒。

随土壤有机碳含量的提高,玉米百粒重呈现波动上升趋势(图 1)。土壤有机碳 4.00~10.00 g/kg,玉米百粒重增加 0.16~1.75 g;土壤有机碳 6.00~12.00 g/kg,百粒重下降 1.55~1.59 g;土壤有机碳 6.00~14.00 g/kg,百粒重增加 0.16~2.18 g。

2.2.2 土壤全氮对玉米产量及产量组成的影响 从氮含量对玉米产量组成的影响来看,耕层土壤氮含

量对收获棒数无显著性差异,而百粒重、每棒粒数、每棒重量以及实际产量差异性明显。从表 6 可以看出,玉米实际产量与每棒粒数和每棒重量的变化趋势一致。土壤全氮含量 0.80~1.10 g/kg 时,全氮含量每增加 0.10 g/kg,每棒粒数和每棒重量分别增加 28.13~89.24 粒和 14.41~20.92 g;全氮含量 1.10~1.30 g/kg 时,产量开始出现下降趋势。

从氮含量与玉米产量的关系来看,一定阈值内,氮含量越高,玉米增产越明显,而超出这个阈值,则会出现减产趋势。氮含量 0.80~1.10 g/kg 时,玉米增产 4.60%~12.40%;氮含量 1.00~1.30 g/kg 时,玉米减产 11.86%~20.05%。

表 5 土壤有机碳含量与玉米产量及产量组成的影响

土壤有机碳/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	收获棒数 /(万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$)	百粒重/g	每棒 粒数/g	每棒 重量/g	实际产量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	增产/%
4.00~6.00	6.75a	37.08±0.54b	405.00±27.00c	147.89±8.61c	8990.00±632.87c	—
6.00~8.00	6.75a	40.58±0.64a	462.61±16.16c	186.70±7.01c	10533.92±377.90b	17.17
8.00~10.00	6.75a	37.40±0.82b	575.58±21.89b	213.21±8.16b	11699.22±579.20b	1.57
10.00~12.00	6.75a	34.30±0.47c	750.38±8.20a	257.56±4.21a	14554.22±265.16a	24.40
12.00~14.00	6.75a	38.66±4.43ab	770.00±41.00a	291.55±23.62a	15570.06±1065.67a	6.98
平均	6.75a	37.65±0.48	591.46±18.20	218.33±5.69	12261.16±314.61	10.02

注:每列中字母代表在 5% 下差异显著, a 相对于 b 有显著性差异。

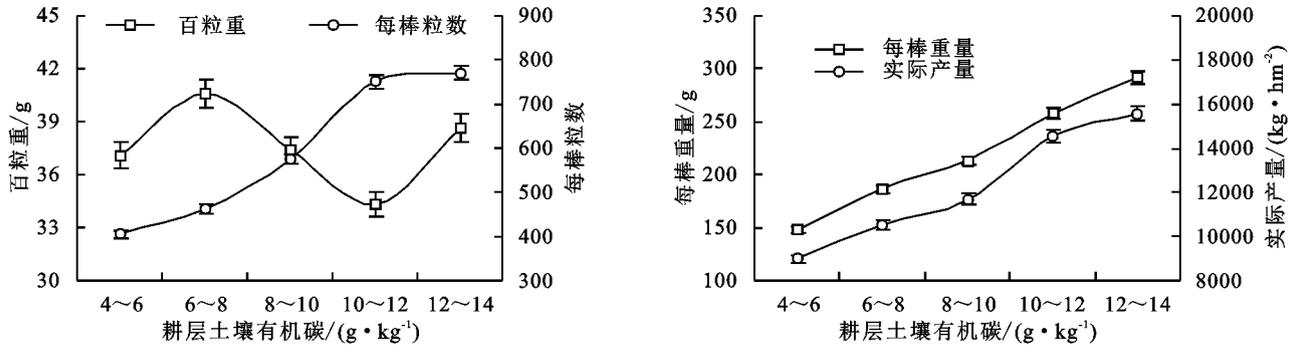


图 1 土壤有机碳对玉米产量及产量组成的影响

表 6 土壤全氮含量与玉米产量及产量组成的影响

土壤全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	收获棒数/ (万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$)	百粒重/g	每棒 粒数/g	每棒 重量/g	实际产量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	增产/%
0.80~0.90	6.75a	37.07±0.57b	564.26±33.70b	208.88±10.54b	11816.53±573.31b	—
0.90~1.00	6.75a	38.38±0.75a	592.39±24.83b	223.29±6.94b	12385.68±400.23ab	4.60
1.00~1.10	6.75a	37.70±1.31ab	681.63±54.85a	244.21±17.80a	13921.43±1066.58a	12.40
1.10~1.20	6.75a	35.13±1.51ab	533.50±46.29c	193.94±12.689cd	11129.83±813.53bc	-20.05
1.20~1.30	6.75a	34.30±6.43c	566.00±106.00a	175.12±19.98d	9810.10±1317.35c	-11.86
平均	6.75a	37.65±0.48	590.87±18.31	218.60±5.55	12261.16±314.61	-2.98

注:每列中字母代表在 5% 下差异显著, a 相对于 b 有显著性差异。

2.2.3 土壤 C/N 对作物产量及产量组成的影响 从表 7 看, 耕层土壤 C/N 对作物产量及产量组成影响显著。随耕层土壤 C/N 升高, 棒粒数和每棒重量呈上升趋势, 平均百粒重呈波动上升趋势(图 2)。土壤 C/N 6.00~9.00 时, 玉米平均百粒重最高, 为 38.82~40.50 g。土壤 C/N 5.00~9.00, 棒粒数增加 18.53~

30.47 粒, 实际产量增加 4.15%~12.24%; 土壤 C/N 9.00~13.00, 棒粒数增加 48.75~134.75 粒, 实际产量增加 1.55%~24.09%。土壤 C/N 9.00~13.00 时, 棒粒数最高, 为 620.75~770.75 粒。土壤 C/N 5.00~13.00 时, C/N 增加有利于玉米产量及产量组成的增长, 但增加趋势速度显著降低。

表 7 土壤 C/N 对玉米产量及产量组成的影响

土壤 C/N	收获棒数/ (万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$)	百粒重/g	每棒 粒数/g	每棒 重量/g	实际产量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	增产/%
5.00~6.00	6.75a	37.62±1.56a	446.00±14.00c	155.82±0.68d	9058.16±565.41c	—
6.00~7.00	6.75a	38.82±2.28ab	437.00±99.00b	186.04±28.76b	10166.73±1808.86b	12.24
7.00~8.00	6.75a	40.50±0.80a	455.53±19.81c	187.06±9.30c	10588.80±510.55b	4.15
8.00~9.00	6.75a	38.84±1.38b	486.00±31.07c	187.00±9.48b	10524.27±517.08b	-0.61
9.00~10.00	6.75a	37.25±1.16b	620.75±61.85b	229.38±20.91b	13059.69±1319.62b	24.09
10.00~11.00	6.75a	35.59±0.59b	729.77±19.47a	255.19±6.59a	14065.03±630.98a	7.70
11.00~12.00	6.75a	34.49±0.52b	722.00±13.85a	253.04±4.42a	14282.87±245.61ab	1.55
12.00~13.00	6.75a	35.96±1.60b	770.75±17.50a	270.38±16.53a	14828.73±713.76a	3.82
平均	6.75a	37.65±0.48	590.87±18.32	218.60±5.55	12261.16±314.61	10.59

注:每列中字母代表在 5% 下差异显著, 每列中字母代表在 5% 下差异显著, "a" 相对于 "b" 有显著性差异。

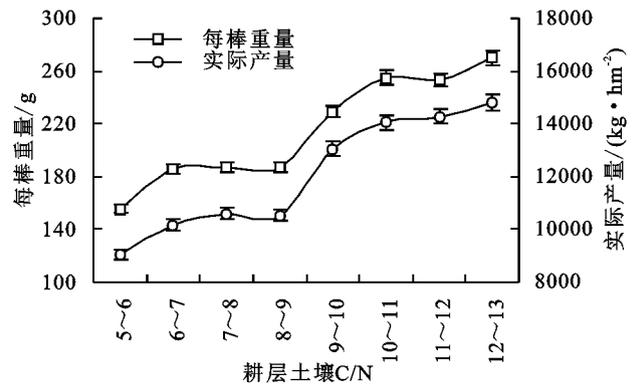
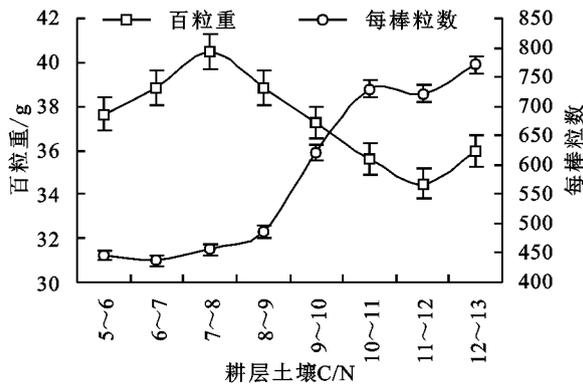


图 2 土壤 C/N 对玉米产量及产量组成的影响

3 讨论

农田土壤碳氮作为土壤肥力的核心和农业可持续发展的基础,与作物产量密切相关,且二者之间有明显的协同效应^[1]。长期以来,关于半干旱区农田土壤碳氮固定与作物产量方面的研究基本处于空白状态,尤其是碳氮含量与作物生产的协同效应研究不足。本文研究发现,我国西北半干旱区农业施肥仍采用经验法,存在盲目性,尤其是氮肥用量高和施用时期不合适现象突出,土壤氮含量过高,一定程度上限制了作物产量的提高。因此,如何精准施肥,成为研究者关注的科学问题。

Pan 等^[12]发现土壤有机质含量与谷物产量呈直线显著相关、曲线相关和无显著相关性。但多个长期定位试验表明,耕层土壤有机碳增加对作物单产和稳产的提高均呈现积极地正效应^[4-6,9,13-16]。邱建军等^[4]通过模拟改变有机碳本底值对作物产量的影响,结果表明土壤有机碳每增加 1 g/kg,产量增加 176~454 kg/hm²。潘根兴等^[9]研究表明,土壤有机质增加幅度越大,水稻单产变率越低。王卫等^[7]研究表明,有机质含量较低的省份,土壤有机质每增加 1 g/kg,单产增加 84.40 kg/hm²,明显高于有机质含量较高省份的 22.20 kg/hm²。这与邱建军等^[4]研究的土壤有机碳含量每增加 1 g/kg,低有机质省区和高有机质省区春玉米产量分别增加 328 kg/hm²,176 kg/hm²的趋势相同。本研究表明,伴随耕层土壤有机碳含量增加,玉米产量和产量组成显著增加,其中有机碳含量 4.00~12.00 g/kg 时,实际产量增速最快,超出这个阈值后,产量增速明显下降,与前人研究结果基本一致。

贺美等^[3]利用 DNDC 模型发现在相同氮水平情况下,东北黑土区作物产量随土壤有机碳含量的升高持续上升,但在较高有机碳水平下,产量的增幅大大降低。巨晓棠和彭显龙分别发现,在维持氮平衡的前提下,100 kg 籽粒的氮素需求量约为 2.4 kg 和 1.4

kg,据此计算出黑龙江作物纯 N 施用水平约为 180 kg/hm²,105 kg/hm²^[17-18]。杨宪龙等^[19]研究发现,关中地区玉米施氮量在 180 kg/hm² 时,生产水平最高。俄胜哲等^[20]研究表明,玉米产量与土壤全氮含量呈显著正相关。本文研究发现,耕层土壤全氮含量在 1.00~1.10 g/kg 时,地膜玉米生产水平最高,超出这个阈值后,玉米生产水平开始呈显著下降趋势。说明,常规施氮虽然可以维持较高的生产水平,但是从节氮角度考虑,减量施氮具有更高的现实意义。研究结果与前人研究略有差异,造成结果差异的原因可能是气候、土壤类型、种植制度以及农田管理措施不同,对于减量施氮对作物增产的长期效应仍有待进一步研究。

土壤 C/N 水平也决定于土壤碳素和氮素的平衡状况,当碳素含量高于氮素水平时,土壤 C/N 水平就会提高。对某一特定土壤,C/N 基本为一常数,这意味着土壤有机碳水平在某种程度上取决于土壤中能够同化成腐殖质的有效氮含量水平^[21]。C/N 较高的土壤,在分解初期为了满足微生物对氮素的需求,从土壤中吸收矿物质氮,与植物竞争养分,影响作物产量^[22]。因此,土壤有机碳与产量的关系仍存在很大不确定性,制定农业适应性对策是确保粮食安全的关键^[23]。

黄土高原表层土壤有机碳含量为 14.52 g/kg^[24],而本研究中土壤有机碳含量明显低于全区平均水平。土壤养分水平低,已对区域粮食生产产生了重要影响^[12]。深入理解半干旱地区农田土壤碳氮含量与增产的协同效应,在一定程度上填补半干旱区土壤养分含量相关研究的欠缺,为指导区域合理施肥、增加生物量和作物产量、提升土壤肥力提供数据支持,为实现农业可持续发展打下坚实基础^[1]。虽然本文就西北半干旱区土壤碳氮含量与作物生产的影响做了相关分析,但并未明确外界因子对土壤碳氮与作物生产协同效应的贡献量。今后研究中需要采用结构模型,量化外界因子对土壤碳氮固定机制及与作物生产协同效应的研究,才能更全面地回答半干旱区土壤碳氮与作物生产协同效应的阈值^[25]。

4 结论

本调查研究区域耕层土壤有机碳、全氮含量以及 C/N 分别分布于 4.00~14.00 g/kg, 0.80~1.30 g/kg, 5.00~13.00 之间。参照全国第二次土壤调查养分分级标准, 样本中 2.94% 的有机碳含量属于极度缺乏水平, 58.83% 属于缺乏水平, 38.23% 属于中等偏下水平, 变异系数为 18.46%; 样本中 83.25% 的全氮含量属于中等偏下水平, 17.65% 属于中等偏上水平, 变异系数为 10.53%; 89.71% 的 C/N 集中在 7.00~12.00, 变异系数为 17.12%。

总体看, 一定阈值内, 耕层土壤碳氮含量以及 C/N 增加, 对作物增产呈积极的正效应。耕层土壤有机碳含量 4.00~14.00 g/kg 时, SOC 含量每增加 1 g/kg, 玉米增产 0.79%~12.20%; SOC 含量 6.00~12.00 g/kg 时, SOC 含量每增加 1 g/kg, 玉米增产 8.59%~12.20%。耕层土壤全氮含量 0.80~1.10 g/kg 时, TN 含量每增加 0.1 g/kg, 玉米增产 4.6%~12.40%; TN 含量 1.10~1.30 g/kg 时, TN 含量每增加 0.1 g/kg, 玉米减产 11.86%~20.05%。耕层土壤 C/N 在 5.00~13.00 时, 玉米增产 1.55%~24.09%。C/N 在 5.00~10.00 时, 玉米增产 4.15%~24.09%; C/N 10.00~13.00 时, 玉米增产 1.55%~7.70%, 呈明显减缓趋势。产量组成中, 每棒粒数与土壤有机碳相关性高于平均百粒重与土壤有机碳的相关性。

参考文献:

- [1] 徐明岗, 张旭博, 孙楠, 等. 农田土壤固碳与增产协同效应研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1441-1449.
- [2] 于宁宁, 任佰朝, 赵斌, 等. 施氮量对夏玉米籽粒灌浆特性和营养品质的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(11): 3771-3776.
- [3] 贺美, 王迎春, 王立刚, 等. 应用 DND 模型分析东北黑土有机碳演变规律及其与作物产量之间的协同关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 9-19.
- [4] 邱建军, 王立刚, 李虎, 等. 农田土壤有机碳含量对作物产量影响的模拟研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(1): 154-161.
- [5] 姜勇, 庄秋丽, 梁文举. 农田生态系统土壤有机碳库及其影响因子[J]. 生态学杂志, 2007, 26(2): 278-285.
- [6] 赵雅雯, 王金洲, 王士超, 等. 潮土区小麦、玉米残体对土壤有机碳的贡献—基于改进的 RothC 模型[J]. 中国农业科学, 2016, 9(21): 4160-4168.
- [7] 王卫, 李秀彬. 中国耕地有机质含量变化对土地生产力影响的定量研究[J]. 地理科学, 2002, 22(1): 24-28.
- [8] 潘根兴, 曹建华, 周运超. 土壤碳及其在地球表层系统碳循环中的意义[J]. 第四纪研究, 2000, 20(4): 325-334.
- [9] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家粮食安全[J]. 地球科学进展, 2005, 20(4): 384-393.
- [10] 李来祥, 刘广才, 杨祁峰, 等. 甘肃省旱地全膜双垄沟播技术研究与应用进展[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1): 114-118.
- [11] 肖国举, 仇正路, 张峰举, 等. 增温对西北半干旱区马铃薯产量和品质的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 830-836.
- [12] Pan G X, Smith P, Pan W N. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 129(1/3): 344-348.
- [13] Oelofse M, Markussen B, Knudsen L. Do soil organic carbon levels affect potential yields and nitrogen use efficiency? An analysis of winter wheat and spring barley field trials[J]. European Journal of Agronomy, 2015, 66: 62-73.
- [14] 黄彩变, 曾凡江, 雷加强, 等. 开垦对绿洲农田碳氮累积及其与作物产量关系的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5113-5120.
- [15] 蒋龙, 谭波. 亚热带 3 种常绿森林土壤和植物叶片 C、N、P 化学计量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(4): 1-16.
- [16] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [17] 巨晓棠. 理论施氮量的改进及验证—兼论确定作物氮肥推荐量的方法[J]. 土壤学报, 2015, 52(2): 249-261.
- [18] 彭显龙, 王伟, 周娜, 等. 基于农户施肥和土壤肥力的黑龙江水稻减肥潜力分析[J]. 中国农业科学, 2019, 52(12): 2092-2100.
- [19] 杨宪龙, 路永莉, 同延安, 等. 长期施氮和秸秆还田对小麦—玉米轮作体系土壤氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 19(1): 68-77.
- [20] 俄胜哲, 丁宁平, 李利利, 等. 长期施肥条件下黄土高原黑垆土作物产量与土壤碳氮的关系[J]. 应用生态学报, 2018, 29(12): 4047-4055.
- [21] Brady N C, Weil R R, Weil R R. The nature and properties of soils[M]. Upper Saddle River, Nj: Prentice Hall, 2008.
- [22] 王德营, 姚艳敏, 司海青, 等. 黑土有机碳变化的 DNDC 模拟预测[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(3): 277-283.
- [23] 方恒, 李援农, 谷晓博, 等. 覆膜与施氮组合下夏玉米籽粒灌浆过程拟合分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 245-252.
- [24] 付东磊, 刘梦云, 刘林, 等. 黄土高原不同土壤类型有机碳密度与储量特征[J]. 干旱区研究, 2014, 31(1): 44-50.
- [25] Xiao G J, Hu Y B, Zhang Q, et al. Impact of cultivation on soil organic carbon and carbon sequestration potential in semiarid regions of China[J]. Soil Use and Management, 2019, 16: 189-198.