

水氮条件对南亚热带玉米产量及农田土壤有机碳氮组分的影响

刘涌鑫, 毛祥敏, 周勋波*

(广西大学农学院, 南宁 530004)

摘要:为探究水氮条件对玉米产量及农田土壤碳氮的影响, 试验于2018年在广西一年两季玉米种植区春玉米和秋玉米生长季进行。玉米品种为万川1306, 种植密度为59 524株/hm², 行株距为60 cm × 28 cm, 小区面积为16.8 m²。试验采用裂区试验设计, 主处理水分条件分别为雨养和灌溉, 副处理施氮量分别为0 kg/hm²(N₀)、150 kg/hm²(N₁)、200 kg/hm²(N₂)、250 kg/hm²(N₃)和300 kg/hm²(N₄)。在玉米成熟期采集土壤耕层(0~20 cm)样品, 测定土壤有机碳、土壤微生物量碳、土壤有机氮组分。试验结果表明: 同一处理条件下, 土壤有机氮各组分含量表现为酸解铵态氮≈氨基酸态氮>酸解未知氮>氨基糖态氮。春玉米, 灌溉结合N₃的产量达到最大, 为7 806 kg/hm², 秋玉米, 灌溉与雨养产量基本持平。施氮量与作物产量呈极显著正相关($P < 0.01$), 但当施氮量超过250 kg/hm²时, 产量不再显著增加。酸解总氮与作物产量呈极显著正相关($P < 0.01$)。广西春玉米在阶段性干旱条件下, 适时合理补水结合250 kg/hm²施氮量, 具有较好的土壤供碳氮潜力, 并获得较高产量。

关键词:水分; 氮素; 有机碳; 有机氮; 产量

中图分类号: S513

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2022)01-0066-06

Effects of Water and Nitrogen Conditions on Subtropical Maize Yield and Soil Organic Carbon and Nitrogen Components in Sub-Tropical Soils

LIU Yongxin, MAO Xiangmin, ZHOU Xunbo*

(Agricultural College, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to investigate the effects of water and nitrogen conditions on maize yield and soil carbon and nitrogen, the experiment was carried out in 2018 in maize and autumn maize growing season in the maize growing region of Guangxi. The variety is Wanchuan 1306, the planting density is 52,500 plants/ha, row spacing was 60 cm, and the plot area is 16.8 m². Split plot design was used in the experiment. The main treatment water conditions were rain-fed and irrigation, and the nitrogen application rates were 0 kg/ha (N₀), 150 kg/ha (N₁), 200 kg/ha (N₂), 250 kg/ha (N₃), 300 kg/ha (N₄). Soil organic carbon, soil microbial biomass carbon and soil organic nitrogen components were measured in soil surface layer (0-20 cm) at maize maturity stage. The result showed that the order of soil organic nitrogen was amino acid nitrogen ≈ ammonia nitrogen > acid hydrolysis unknown nitrogen > amino sugar nitrogen. In spring maize, the yield of irrigation combined with N₃ reached the highest value, which was 7,806 kg/ha, and in autumn maize, the yield of irrigation and rain-fed was basically the same. There was a significant positive correlation between nitrogen application rate and crop yield ($P < 0.01$), but excessive nitrogen application could not significantly increase crop yield. Soil microbial biomass carbon was positively correlated with crop yield ($P < 0.01$). Under the condition of periodic drought, spring maize in Guangxi had better soil potential of carbon and nitrogen supply and higher yield with proper water supply and nitrogen application rate of 250 kg/ha.

Key words: Water; Nitrogen; Organic carbon; Organic nitrogen; Yield

收稿日期: 2019-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(31760354); 广西壮族自治区自然科学基金(2017GXNSFAA198036、2019GXNSFAA185028)

作者简介: 刘涌鑫(1997-), 男, 在读硕士, 主要从事玉米栽培研究。

通讯作者: 周勋波, 男, 博士, 教授, E-mail: xunbozhou@163.com

玉米是我国重要的粮食作物, 是目前种植面积最广、产量最高的禾谷类作物, 位居三大粮食作物之首^[1]。当前, 世界粮食安全问题面临土壤退化的巨大挑战, 土壤退化与土壤侵蚀、土壤肥力下降、土壤管理和耕作系统等密切相关^[2]。田

间管理措施能改变土壤的理化性状,直接或间接影响土壤有机碳,最终影响土壤肥力^[3],因此,农艺措施对作物生产有重要影响。

施肥能促进根系生长,是作物生长发育过程中必不可少的农艺措施^[4]。氮素是植物生长发育过程所必需的元素之一,是土壤肥力中最活跃的因素,适量施氮可以促进作物生长^[5],施氮量与作物干物质积累量相关,增施氮肥对玉米实现较高产量有重要作用^[6]。土壤有机碳含量是土壤肥力的一部分,施氮能丰富土壤有机碳含量^[7],加速产生作物根系分泌物^[8],同时土壤微生物活性数量和酶活性提高,加速土壤有机碳分解^[9];外源氮素投入也影响土壤-植物系统中碳氮的积累与分配^[10]。长期施肥能够提高土壤有机氮组分含量,单施化肥处理中酸解铵态氮含量最高,酸解氨基糖态氮含量最低^[11]。水分是维持作物生长的重要因子,土壤水可以影响土壤理化性质,进而影响作物生长^[12]。适当供水可明显提高地上部干物质重,最终增加玉米的产量^[13];适宜的水分条件使土壤氮和碳的矿化速率加快,从而固定更多的碳素,增加土壤有机碳含量,但在缺水或过量灌溉的条件下土壤氮和碳的矿化速率将会下降,氮和碳损失增加^[14]。降雨量高能降低酸解铵态氮含量,增加酸解氨基糖态氮含量^[15]。广西玉米种植区光热资源丰富,日照时间长,降雨充沛,但由于多年连种,导致土壤养分不平衡^[16]。

本试验在南亚热带广西一年两作玉米种植区进行,研究在阶段性干旱条件下适当灌溉和不同

氮处理对土壤有机碳氮组分及产量的影响,通过改善水分和氮素条件确定土壤供碳氮潜力最大的农艺栽培措施,在达到高产的同时又减少对环境的压力,为作物生产活动提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于2018年在广西壮族自治区南宁市广西大学农学试验田(22°50'N, 108°17'E)进行。该区域属于玉米一年两季种植区,为湿润的亚热带季风气候,年平均气温22.0℃,年均降雨量为1300~2000mm,平均相对湿度为79%。2018年月降雨量、月均最高温度和最低温度如图1所示。玉米试验地的土壤类型为黏土,土壤理化性质见表1;2018年月灌溉量如图2所示。

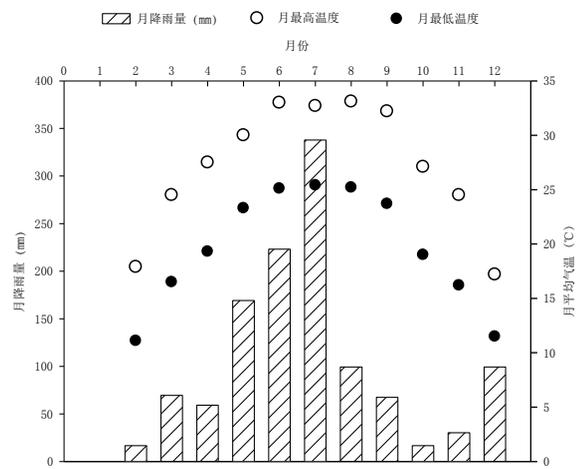


图1 2018年月降雨量、月均最高温度及最低温度

表1 试验前0~20 cm耕作层土壤基本理化性质

pH	速效氮(mg/kg)	速效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	土壤容重(g/cm ³)	土壤有机质(g/kg)	田间持水量(V%)
5.4	126.2	40.0	124.5	1.50	17.5	37.2

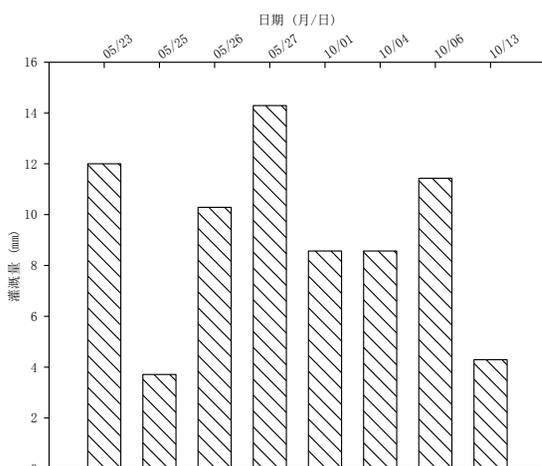


图2 2018年月灌溉量

1.2 试验设计

试验玉米品种为万川1306,行株距为60cm×28cm,小区面积为16.8m²。试验分为春玉米和秋玉米两季进行,春秋玉米分别于2018年3月22日和8月11日使用播种机按2~3株/穴播种,深度为2~3cm,分别于2018年4月15日和8月26日间苗,保证试验地基本苗数为59524株/hm²。试验设置两因素,主因素为水分(雨养和灌溉),雨养玉米全生育期所需水分均来自自然降雨;灌溉根据降雨和土壤含水量情况采用软管补水滴灌,任何生育时期土壤含水量均保持不低于田间最大持水量的60%,TDR100土壤水分测定仪测定土壤含水量,生长季灌溉量如图2所示。副因素为五个

纯氮施用量,分别为 0 kg/hm² (N₀)、150 kg/hm² (N₁)、200 kg/hm² (N₂)、250 kg/hm² (N₃) 和 300 kg/hm² (N₄),其中播前基肥占总施氮量的 2/3,大喇叭口期追加剩余的 1/3 氮肥。磷(P₂O₅)、钾(K₂O)肥均作为基肥按 100 kg/hm² 一次施入。春秋玉米分别于 2018 年 7 月 12 日和 12 月 16 日收获测产,每个小区选取 2 m² (约 11 株)用于测产。

1.3 测定项目与方法

于 2018 年 7 月 10 日和 11 月 30 日玉米成熟期采用 5 点取样法取土样,每个处理 3 次重复,将土壤分成 2 份,一份鲜土用于土壤微生物量碳的测定;另一份风干土用于土壤有机碳和有机氮组分的测定。风干的土样采用四分法磨土,过 100 目筛,塑封袋保存用于后期土壤相应指标的测定。

1.3.1 土壤微生物量碳

采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提的方法测定^[17]。鲜土过 2 mm 筛,称取 11.0 g 过筛土于培养皿,再放入干燥罐封闭黑暗预培养 7 d。预培养的土壤取 3 份加入氯仿抽提熏蒸 24 h 再取出浸提滴定,3 份不熏蒸的可直接取出浸提滴定。

$$\text{有机碳量}(\mu\text{g C/g})=12\times 10^3\times(V_0-V)\times M\times f/W$$

式中, M 为 FeSO₄ 浓度(mol/L), V、V₀ 分别为空白和样品消耗的 FeSO₄ 体积(mL), f 为稀释倍数, W 为烘干土壤重量(g)。

土壤微生物量碳: $Bc=Ec/k_{EC}$, $Ec=$ 熏蒸-未熏蒸, $k_{EC}=0.38$ 。

1.3.2 土壤有机碳

称取 0.20 g 风干土,参考鲍士旦^[18]土壤农化分析重铬酸钾容量法-外加热法测定。

1.3.3 土壤有机氮组分

称取 2.50 g 风干土于水解瓶中,参考 Evans 等^[19]、鲁如坤^[20]以及刘延美等^[21]的方法进行测定。

1.3.4 数据统计分析

试验数据采用 SPSS Statistics 21.0 进行统计分析(Duncan 法)。用 Origin 8.0 和 SigmaPlot 10.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 成熟期土壤有机碳和土壤微生物量碳

从表 2 可以看出,春玉米雨养的土壤有机碳(SOC)含量较灌溉显著提高 18.36% ($P<0.05$),雨养的土壤微生物量碳(MBC)含量较灌溉显著增加 158.34% ($P<0.05$)。秋玉米雨养的 SOC 含量显著高于灌溉 1.09% ($P<0.05$),雨养的 MBC 含量较灌溉增加 13.33%。灌溉条件下,秋玉米的 MBC 含量较春玉米显著增加 25.00% ($P<0.05$)。两季玉米试验结果表明,灌溉的 SOC 和 MBC 含量均值均显著低于雨养 8.46% 和 45.83% ($P<0.05$),水分显著影响 SOC 和 MBC 含量。

表 2 玉米成熟期水分条件和施氮量对土壤有机碳及微生物量碳的影响

处理	土壤有机碳(g/kg)			微生物量碳(mg/kg)		
	春玉米	秋玉米	平均值	春玉米	秋玉米	平均值
水分						
雨养	16.57±0.18a	15.83±0.05a	16.20±0.08a	0.31±0.11a	0.17±0.38a	0.24±0.14a
灌溉	14.00±0.23b	15.66±0.07b	14.83±0.10b	0.12±0.23b	0.15±0.68a	0.14±0.46b
施氮						
N ₀	15.12±0.32b	14.68±0.04e	14.90±0.14c	0.19±0.51c	0.07±0.11d	0.13±0.36d
N ₁	14.27±0.28c	16.36±0.02b	15.32±0.12b	0.21±0.49c	0.12±0.30c	0.16±0.42c
N ₂	16.15±0.08a	16.66±0.03a	16.41±0.04a	0.22±0.55b	0.13±0.24c	0.18±0.44c
N ₃	16.61±0.02a	15.89±0.03c	16.25±0.02a	0.25±0.41a	0.18±0.08b	0.21±0.27b
N ₄	14.28±0.22c	15.13±0.08d	14.70±0.07c	0.21±0.27bc	0.31±0.21a	0.26±0.11a
水分	0.029 3	0.011 4	0.026 5	0.000 1	0.178 4	0.000 4
施氮	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1
水分×施氮	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1

注: 同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),表中数据为平均值±标准误,下同

春玉米, N₃ 的 SOC 含量最大(16.61 g/kg),且较 N₀、N₁、N₂ 和 N₄ 处理的 SOC 含量分别提高 9.85%、16.40%、2.85% 和 16.32%,随着施氮量的增加, MBC 含量呈现先升高后下降的趋势,在 N₃ 达

到最大值 0.25 mg/kg,且显著高于其他施氮处理 ($P<0.05$), N₃ 的 MBC 含量分别高于 N₀、N₁、N₂、N₄ 水平 31.58%、19.05%、13.64%、19.05%。秋玉米,随着施氮量的增加 SOC 呈先上升后下降的趋势,而

MBC 含量则呈直线上升趋势。两季玉米 SOC 含量均值表现为 $N_2 > N_3 > N_1 > N_0 > N_4$, MBC 含量则表现为 $N_4 > N_3 > N_2 > N_1 > N_0$, 与 N_0 相比, N_3 处理的 SOC 含量和 MBC 含量分别提高 9.06% 和 61.54%。氮素显著影响 SOC 和 MBC 含量 ($P < 0.05$)。

水氮互作显著影响 SOC 和 MBC 含量 ($P < 0.05$), 不同施氮量均能影响 SOC 和 MBC 含量, 雨养结合 N_3 处理有利于 SOC 的积累。

2.2 有机氮组分含量

由图 3 可知, 春玉米, 灌溉的氨基糖态氮

(ASN) 和酸解未知氮 (UAN) 均值分别较雨养显著增加 13.37% 和 14.89% ($P < 0.05$), 雨养的氨基酸态氮 (ANN) 和酸解铵态氮 (AN) 均值分别较灌溉显著上升 0.93% 和 1.55% ($P < 0.05$)。ASN 随施氮量的增加呈先上升后下降的趋势, 在 N_3 达到最大值 123.16 mg/kg, 并显著高于 N_0, N_1, N_2 ($P < 0.05$)。 N_4 的 ANN 均值分别较 N_0, N_1, N_2 和 N_3 显著增加 23.97%、17.59%、3.68%、2.92%。UAN 呈先下降后上升再下降的趋势, 在 N_3 达到最大值为 185.72 mg/kg, 并显著高于 N_1, N_2 和 N_4 ($P < 0.05$)。

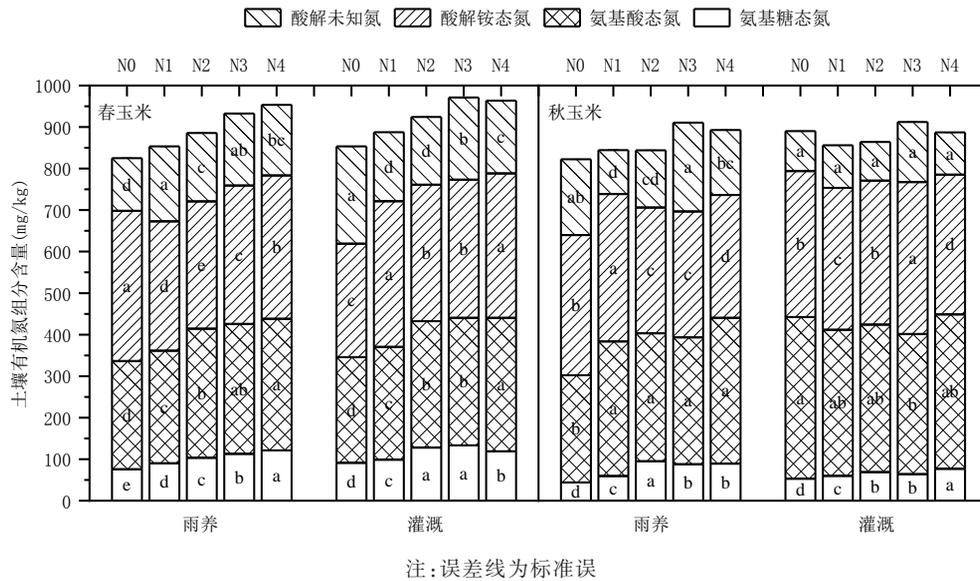


图 3 玉米成熟期水分条件和施氮量对有机氮组分的影响

秋玉米, 灌溉的 ANN 和 AN 均值分别较雨养显著增加 16.68% 和 9.31% ($P < 0.05$)。AN 均值在 N_4 达到最大值 346.84 mg/kg。ANN 随着施氮量的增加呈直线上升且在 N_4 取得最大值 318.98 mg/kg, 但各施氮处理间无显著差异 ($P > 0.05$)。两季玉米表明, 雨养和灌溉的酸解总氮 (THAN) 均值分别为 900.98 和 876.46 mg/kg, 灌溉的 THAN 均值较雨养显著提高 2.80% ($P < 0.05$)。灌溉的 ASN、ANN、AN 和 UAN 均值均高于雨养, N_3 的 UAN 和 THAN 均值显著高于其他施氮处理, 这表明灌溉结合 N_3 利于 UAN 提高, 最终提高 THAN。土壤有机氮各组分均值含量为: $AN \approx ANN > UAN > ASN$, ANN 和 AN 占酸解总氮的 72.65%, ANN 和 AN 是主要的酸解氮形态 (图 3)。THAN 均值含量变化范围 822.27~971.19 mg/kg。

2.3 水分条件和施氮量对产量的影响

由表 3 可知, 春玉米, 雨养和灌溉的产量均值分别为 5 165 kg/hm² 和 7 015 kg/hm², 灌溉较雨养显著提高 35.82% ($P < 0.05$)。 N_4 的产量 (6 998 kg/hm²)

分别较 N_3, N_2, N_1 和 N_0 显著提升 3.80%、10.57%、21.09% 和 52.03% ($P < 0.05$)。灌溉结合 N_3 春玉米的产量 (7 806 kg/hm²) 高于其他处理。

表 3 玉米成熟期不同水分条件和施氮量对产量的影响

处理	产量(kg/hm ²)		
	春玉米	秋玉米	平均值
水分条件			
雨养	5 165±0.18b	5 687±0.23a	5 426±0.80a
灌溉	7 015±0.12a	5 555±0.27b	6 285±0.18a
施氮水平			
N_0	4 603±0.21e	3 448±0.20e	4 025±0.03e
N_1	5 779±0.11d	4 654±0.11d	5 216±0.15d
N_2	6 329±0.14c	6 195±0.01c	6 262±0.07c
N_3	6 742±0.16b	6 798±0.01b	6 770±0.08b
N_4	6 998±0.10a	7 011±0.03a	7 005±0.04a
水分	0.000 3	0.015 2	0.000 6
施氮	0.000 1	0.000 1	0.000 1
水分×施氮	0.000 1	0.000 1	0.000 1

秋玉米,雨养的产量较灌溉显著增加 2.38% ($P<0.05$)。N₄产量(7 011 kg/hm²)显著高于其他施氮处理($P<0.05$),其产量约为 N₀的两倍。

两季试验结果表明,灌溉的产量较雨养增长 15.83%,产量随施氮量的增加而上升。N₀、N₁、N₂、N₃和 N₄的产量均值分别为 4 025、5 216、6 262、6 770、7 005 kg/hm²。施氮量与作物产量呈显著正相关($P<0.05$)。各施氮处理间差异显著($P<0.05$)。但在灌溉条件下,N₃和 N₄间的产量差异显著($P>0.05$),表明在灌溉条件下,适当减少施氮量仍能保持较高产量。

2.4 土壤有机碳氮组分与施氮量及产量的相关性分析

从表 4 可以看出,施氮量与酸解总氮和产量呈极显著正相关($P<0.01$),与氨基糖态氮呈显著正相关($P<0.05$)。氨基糖态氮与酸解总氮和产量呈极显著正相关($P<0.01$),与酸碱未知氮呈显著正相关($P<0.05$)。氨基酸态氮与酸碱未知氮呈极显著正相关($P<0.01$)。酸解铵态氮与酸碱未知氮呈极显著正相关($P<0.01$)。酸解总氮与产量呈极显著正相关($P<0.01$)。

表 4 灌溉参数与施氮量及产量之间的相关分析

变量	氮素	有机碳	微生物量碳	氨基糖态氮	氨基酸态氮	酸解铵态氮	酸碱未知氮	酸解总氮	产量
氮素	1.000	0.032	0.432	0.525*	0.420	-0.031	0.092	0.734**	0.778**
有机碳		1.000	-0.281	-0.079	0.142	0.142	-0.287	-0.105	-0.161
微生物量碳			1.000	0.294	-0.001	-0.158	0.054	0.132	0.051
氨基糖态氮				1.000	-0.216	-0.261	0.526*	0.730**	0.660**
氨基酸态氮					1.000	0.265	-0.675**	0.269	0.083
酸解铵态氮						1.000	-0.578**	0.109	-0.191
酸碱未知氮							1.000	0.311	0.352
酸解总氮								1.000	0.699**
产量									1.000

注:“**”表示相关系数显著水平为 $P<0.01$,”*”表示相关系数显著水平为 $P<0.05$

3 讨论

施氮能增加凋落物的产生,从而促进碳素归还土壤^[22-23];施用无机氮肥使土壤有机碳分解加快,土壤微生物减少、土壤碳氮比减小,进而土壤有机碳和土壤微生物量碳含量降低^[24-25];当氮素施用量超过 140 kg/hm²时,土壤有机碳含量和施氮量呈负相关^[14]。本试验结果表明,当施氮量超过 200 kg/hm²(N₃)时,土壤有机碳含量降低,可能是由于施氮改变土壤理化性质,使土壤微生物活性上升,促进土壤中微生物活动,加快有机质分解,土壤有机碳含量降低^[14];亚热带高温高湿条件下灌溉会导致土壤有机碳含量下降^[14],两季玉米试验结果表明,灌溉处理的土壤有机碳和土壤微生物量碳含量显著低于雨养($P<0.05$)。

土壤中酸解氨基酸态氮的含量及其分配比例受水氮的调控影响较为复杂^[26]。单施化肥处理耕作层酸解铵态氮含量增加显著^[11]。适宜的水分条件能改善土壤中有机氮组分分配比例^[27]。相同土层有机氮均以酸解氮为主要存在形式,灌溉和施肥处理的有机氮各比例表现为酸解未知态氮>酸解铵态氮>氨基酸态氮>氨基糖态氮^[28]。本试验结果进一步证实,水分和施氮均能影响有机氮组分

总含量,并且灌溉结合 N₃利于酸解未知氮提高,最终提升酸解总氮含量。

水氮互作显著提高玉米的产量,在一定范围内,产量随灌溉和施氮量的增加而显著上升,但水氮过量时产量下降,施氮(243.27 kg/hm²)结合灌溉(土壤含水量>田间持水量的 65.6%)时,获得最高产量^[29-30]。本试验表明,秋玉米,灌溉和雨养的产量差异显著($P>0.05$),可能是由于秋玉米生长季的降雨量较高,自然降雨量已能满足玉米的水分需求,水分不再是影响产量的主要因素。在不同类型土壤中作物对养分的需求不同,在广西的赤红壤区,施氮量超过 240 kg/hm²时,秋玉米的产量不增反降^[31]。本试验结果表明,在亚热带玉米一年两作种植区,春玉米发生阶段性干旱时,适量灌溉结合 N₃获得最高产量。

4 结论

灌溉的土壤有机碳和土壤微生物量碳显著低于雨养,N₃的土壤微生物量碳含量达到最大,雨养结合 N₃有利于促进土壤积累碳素。土壤有机氮各组分含量表现为酸解铵态氮≈氨基酸态氮>酸解未知氮>氨基糖态氮,酸解总氮中的绝大部分(72.65%)为氨基酸态氮和酸解铵态氮。酸解

总氮含量变化范围 822.97~971.19 mg/kg。灌溉结合 N₃ 处理有利于提升土壤有机氮各组分含量。因此适量灌溉结合施氮能显著提高春玉米产量,而水分对秋玉米的影响机制还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 张宇飞,刘立志,马昱萱,等.耕作和秸秆还田方式对玉米产量及钾素积累转运的影响[J].作物杂志,2019(2):122-127.
- [2] Lal R. Enhancing ecosystem services with no-till[J]. Renewable Agriculture and Food Systems, 2013, 28(2): 102-104.
- [3] Al-Kaisi M M, Yin X, Licht M A. Soil carbon and nitrogen changes as influenced by tillage and cropping systems in some Iowa soils [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2005, 105(4): 635-647.
- [4] 褚天铎.简明施肥技术手册[M].北京:金盾出版社,2014:1-20.
- [5] 张俊华,张家宝,贾科利.氮素和盐碱胁迫下作物与土壤光谱特征研究[M].银川:宁夏人民出版社,2016:1-35.
- [6] 宁芳.施氮量对渭北旱地春玉米田土壤水肥利用、玉米生长和产量的影响[D].咸阳:西北农林科技大学,2019.
- [7] Zhang X B, Sun Z G, Liu J, et al. Simulating greenhouse gas emissions and stocks of carbon and nitrogen in soil from a long-term no-till system in the North China Plain[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 178: 32-40.
- [8] Gärdenäs A I, Ågren G I, Bird J A, et al. Knowledge gaps in soil carbon and nitrogen interactions—From molecular to global scale[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 43(4): 702-717.
- [9] Russell A E, Cambardella C A, Laird D A, et al. Nitrogen fertilizer effects on soil carbon balances in midwestern U.S. agricultural systems.[J]. Ecological Applications, 2009, 19(5): 1102-1113.
- [10] 刘畅,唐国勇,童成立,等.不同施肥措施下亚热带稻田土壤碳、氮演变特征及其耦合关系[J].应用生态学报,2008,19(7):1489-1493.
- [11] 徐阳春,沈其荣,菲泽圣,等.长期施用有机肥对土壤及不同粒级中酸解有机氮含量与分配的影响[J].中国农业科学,2002,35(4):403-409.
- [12] 陈亚,代先强,袁玲,等.水氮耦合对土壤理化性状及作物生长的影响研究进展[J].河南农业科学,2009,38(5):11-15.
- [13] 张富仓,严富来,范兴科,等.滴灌施肥水平对宁夏春玉米产量和水肥利用效率的影响[J].农业工程学报,2018,34(22):111-120.
- [14] 俞华林,张恩和,王琦,等.灌溉和施氮对免耕留茬春小麦农田土壤有机碳、全氮和籽粒产量的影响[J].草业学报,2013,22(3):227-233.
- [15] Tian J H, Wei K, Condon L M, et al. Effects of elevated nitrogen and precipitation on soil organic nitrogen fractions and nitrogen-mineralizing enzymes in semi-arid steppe and abandoned cropland[J]. Plant and Soil, 2017, 417: 217-229.
- [16] 廖东声,万艳.广西玉米产业生产成本控制问题分析[J].经济研究参考,2016(29):75-79.
- [17] 李振高,骆永明,滕应.土壤与环境微生物研究法[M].北京:科学出版社,2008:60-83.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析(第三版)[M].北京:中国农业出版社,2000:25-30.
- [19] Evans D D, Ensminger L E, White J L, et al. Methods of soil analysis Part 2 Chemical and microbiological Properties[M]. Madison: American society of agronomy Inc, 1965: 1238-1255.
- [20] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000:146-163.
- [21] 刘延美,刘小虎.土壤酸水解氨基酸和氨基糖态氮测定方法的比较研究[J].吉林农业科学,2010,35(2):19-23.
- [22] Schuma G E, Janzen H H, Herrick J E. Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands[J]. Environmental Pollution, 2002, 116(3): 391-396.
- [23] Li C X, Ma S C, Shao Y, et al. Effects of long-term organic fertilization on soil microbiologic characteristics, yield and sustainable production of winter wheat[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(1): 210-219.
- [24] 金兰淑,郑佳,徐慧,等.施氮及灌溉方式对玉米地土壤硝化潜势及微生物量碳的影响[J].水土保持学报,2009,23(4):218-220,226.
- [25] 薛仁风,丰明,赵阳,等.不同生物有机肥对绿豆生长与生理特性的影响[J].东北农业科学,2019,44(4):9-12,71.
- [26] 张玉树,丁洪,王飞,等.长期施用不同肥料的土壤有机氮组分变化特征[J].农业环境科学学报,2014,33(2):1981-1986.
- [27] 姬景红,张玉龙,黄毅,等.灌溉方法对保护地土壤有机氮组分及剖面分布的影响[J].水土保持学报,2007,2(2):99-104.
- [28] 孙文涛,孙占祥,王聪翔,等.滴灌施肥条件下玉米水肥耦合效应的研究[J].中国农业科学,2006,39(3):563-568.
- [29] 詹其厚,陈杰.水肥配合对玉米产量及其利用效率的影响[J].土壤肥料,2005(4):14-18.
- [30] 尚文彬,张忠学,郑恩楠,等.水氮耦合对膜下滴灌玉米产量和水氮利用的影响[J].灌溉排水学报,2019,38(1):49-55.
- [31] 黄金生,周柳强,曾艳,等.广西红壤区玉米氮肥效应及适宜施氮量研究[J].西南农业学报,2019,32(3):551-558.

(责任编辑:王昱)