水土保持学报
Journal of Soil and Water Conservation

苗期干旱胁迫下施氮对玉米氮素吸收和土壤生物化学性质的影响

朱 琳，李玉玺，王 寅，王缘怡，张馨月，陈安吉，侯文峰，高 强
(吉林农业大学资源与环境学院，吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室，长春 130118)

摘要： 研究苗期干旱胁迫下施氮对东北春玉米氮素吸收利用和土壤生物化学性质的影响，为区域玉米养分管理与逆境调控提供依据。研究设置水、氮二因素盆栽试验，土壤水分包括 3 个水平：田间持水量的 30%(W0)，50%(W1)和 70%(W2)；施氮量包括 2 个水平：不施氮(N0)和施氮 0.24 g/kg(N1)，测定不同水氮条件下玉米苗期的植株干重和氮素吸收、根际和非根际土壤的化学性质、微生物量碳、氮(MBC、MBN)及土壤酶活性。结果表明：干旱胁迫显著降低玉米苗期植株干重和氮素吸收量，其中 W0 条件降幅最大(分别为 51.1%，43.8%)。施氮促进各水分条件下植株生长，且与水分存在显著交互作用，W2 条件下施氮后植株干重和氮素吸收量的增幅最高(分别为 53.7%，83.2%)。干旱胁迫提高植株的水分利用效率，但降低氮肥利用效率。施氮显著提高 W2 条件植株的水分利用效率，但干旱条件下则无显著影响。水、氮及其交互作用对土壤性质的影响较为复杂。总体上，苗期干旱胁迫暂时提高了根际和非根际土壤 pH，显著增加根际土壤的铵态氮和硝态氮含量。MBC、MBN 对干旱胁迫的响应在根际与非根际土壤之间存在相反趋势，根际土壤随干旱程度增加而提高，非根际土壤则随之下降。土壤酶活性方面，干旱胁迫显著影响根际土壤的硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性。施氮增加所有水分条件下根际和非根际土壤的 pH 和铵态氮、硝态氮含量，其中根际土壤的增幅高于非根际土壤。施氮显著增加各水分条件下根际和非根际土壤的 MBC、MBN、脲酶和硝酸还原酶活性，但显著降低根际和非根际土壤亚硝酸还原酶活性。水氮交互作用显著影响根际土壤的亚硝酸还原酶、非根际土壤的脲酶、亚硝酸还原酶和 FDA 水解酶活性。根际、非根际土壤各生物化学性质之间均存在显著的相关关系，而且根际土壤除土壤亚硝酸还原酶外的各指标均与植株氮素吸收和氮肥利用效率呈正相关。苗期干旱显著抑制玉米植株生长和氮素吸收，并对土壤生物、化学性质造成显著影响。施氮对植株和土壤性质的影响在不同水分条件下存在差异，而且植株表现与土壤生物、化学性质之间存在显著相关关系。

关键词： 玉米；干旱胁迫；施氮；养分吸收；土壤酶活性

中图分类号： Q945.78　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1009-2242(2021)04-0267-08

DOI： 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.04.037

Effects of Nitrogen Application on Maize Nitrogen Uptake and Soil Biological and Chemical Properties Under Drought Stresses at Seedling Stage

ZHU Lin, LI Yuxi, WANG Yin, WANG Yuanyi, ZHANG Xinyue,
CHEN Anji, HOU Wenfeng, GAO Qiang
(*College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Key Laboratory of Sustainable Utilization of Soil Resources of Jilin Commodity Grain Base, Changchun* 130118)

Abstract: The objective of this study was to explore the effects of nitrogen application on spring maize nitrogen uptake and soil biological and chemical properties under drought stresses at seedling stage in Northeast China. The results might provide a basis for regional maize nutrient management and adversity regulation. In this study, a pot experiment was conducted with two factors of water and nitrogen. The soil water level included 30%, 50% and 70% of field capacity (W0, W1 and W2), respectively, and nitrogen application included 0 and 0.24 g/kg soil (N0 and N1), respectively. The shoot dry matter and nitrogen uptake of maize

收稿日期： 2021-01-28
资助项目： 国家自然科学基金青年项目(31501829)；吉林省优秀青年人才基金项目(20180520036JH)；国家重点研发计划项目(2016YFD0200101)
第一作者： 朱琳(1996—)，女，在读硕士研究生，主要从事作物养分管理研究。E-mail：15754368685@163.com
通信作者： 王寅(1986—)，男，博士，副教授，主要从事作物养分管理研究。E-mail：wy1986410@163.com

at the seedling stage, soil chemical properties, microbial biomass carbon, nitrogen (MBC, MBN) and soil enzymes activities in the rhizosphere and bulk soil were measured in different water and nitrogen conditions. The results showed that drought stresses significantly reduced maize shoot dry matter and nitrogen uptake at seedling stage, and W0 condition decreased the most (51.1%, 43.8% respectively). Nitrogen application promoted plant growth under different water conditions and had significant interaction with water. The increase in shoot dry matter and nitrogen uptake was the highest (53.7%, 83.2% respectively) under W2 condition. Drought stresses increased water use efficiency (WUE), but decreased nitrogen use efficiency (NUE). Nitrogen application significantly increased WUE under W2 condition, but had no significant effect under drought conditions. The effects of water, nitrogen and their interaction on soil properties were complex. In general, drought stresses at seedling stage temporarily increased the pH value in rhizosphere and bulk soil, and significantly increased the contents of ammonium and nitrate nitrogen (NH_4^+ and NO_3^-) in rhizosphere soil. The responses of MBC and MBN to drought stresses were opposite between rhizosphere and bulk soil. Rhizosphere soil increased with the increase of drought degree, while bulk soil decreased. In terms of soil enzyme activity, drought stresses significantly affected nitrate reductase (NR) and nitrite reductase (NiR) activities in rhizosphere soil. Nitrogen application increased the pH, NH_4^+ and NO_3^- contents in rhizosphere and bulk soils under all water conditions, and the increase rate of rhizosphere soil was higher than that of bulk soil. Nitrogen application significantly increased MBC, MBN, urease (UR) and NR activities in rhizosphere and bulk soil under various water conditions, but significantly reduced NiR activity in rhizosphere and bulk soils. The interaction of water and nitrogen significantly affected NiR activity in rhizosphere soil, UR, NR and FDA activities in bulk soil. There was a significant correlation between the biological and chemical properties in rhizosphere and bulk soil, and the indexes of rhizosphere soil except NiR activity were positively correlated with plant nitrogen uptake and NUE. Drought at seedling stage significantly inhibited maize plant growth and nitrogen uptake, and significantly affected soil biological and chemical properties. The effects of nitrogen application on plant and soil properties were different under different water conditions, and there was a significant correlation between plant performance and soil biological and chemical properties.

Keywords: maize; drought stress; nitrogen application; nutrient uptake; soil enzyme activity

东北地区是我国北方春播玉米的主要产区,2019年辽宁、吉林和黑龙江3省玉米播种面积和产量分别占全国的30.9%和34.0%,在保障国家粮食安全方面发挥着重要作用[1]。东北地区玉米种植以"雨养"为主,不同地区和年份间降水差异较大,导致玉米生育期内易遭受干旱影响,其中以春旱的频率最高,影响范围最大[2]。未来北方春玉米区的干旱风险日益增加,将进一步影响玉米生长和产量[3]。施用氮肥作为重要的农业增产措施,其施用的数量和方式极大影响着土壤的生物、化学等性质,进而影响土壤养分的转化与供应以及作物的养分吸收与生长发育[4-5]。因此,研究明确玉米苗期氮素吸收和土壤生物、化学性质对干旱胁迫及施氮的响应特征,对指导玉米抗旱增产及减肥增效具有重要意义。干旱条件下,玉米植株发育、形态和生理等多方面发生变化。一方面,干旱胁迫增加干物质向根系的分配比例,提高根冠比,促进根系生长和下扎[6];另一方面,叶片气孔关闭以减少水分蒸散,导致CO_2吸收下降,减弱光合作用,同化物累积减少[7]。而且干旱也影响土壤微生物数量、活性及对养分的转化过程,进而影响土壤养分供应和作物吸收利用,特别是沙土、沙壤土等低肥力土壤的养分供应对干旱更为敏感[8-9]。根际作为植物根系生长发育、养分吸收和新陈代谢的场所,是生态系统中最活跃的界面[10]。植物根系通过吸收作用、根系分泌物以及与根际微生物发生的互馈活动导致根际土壤的物理、化学和生物学特征显著不同于非根际土壤[4,11],而水分、养分供应也对植株生长和根际过程产生显著影响[12-13]。玉米土壤碳氮转化过程受土壤水分和施氮的影响,申鹏举[14]的研究结果表明,灌溉对土壤微生物量碳的影响不显著,施氮则显著影响土壤微生物量碳,且随施氮量增加而逐渐提高。已有研究[15-16]结果表明,施用氮肥可提高玉米、稻田根际土壤MBC、MBN;田幼华等[17]研究发现,土壤含水量增加可提高根际土壤脲酶和磷酸酶活性,但非根际土壤酶活性受到抑制,而根系分泌物是导致根际、非根际土壤微环境对水分变化产生差异的主要原因;Kivlin等[18]研究结果表明,土壤水分的变化会引起土壤酶活性的变化,土壤含水量过高或过低均抑制土壤酶活

性。施氮能促使植物根系和土壤微生物分泌出更多与碳氮分解转化有关的酶；有研究[19-20]表明，施氮可显著提高土壤纤维素酶和脲酶活性。

目前，针对干旱胁迫或施氮条件下玉米生长发育、生理变化和根系形态的研究已有较大进展，但对土壤性质变化的研究还相对较少，尤其是对根际和非根际土壤生物、化学性质的变化及其与植物养分吸收之间的关系还鲜有研究。通过设置水、氮二因素盆栽试验，研究玉米植株生长和氮素吸收、根际和非根际土壤生物、化学性质对干旱胁迫和施氮的响应特征，并探讨相关指标之间的关系，以期为气候变化条件下东北玉米抗旱增产和减肥增效提供依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

盆栽试验于 2016 年 6 月在吉林农业大学资源与环境学院实验温室内开展，供试土壤为黑土，pH 6.6，碱解氮含量为 93 mg/kg，速效磷含量为 13.8 mg/kg，速效钾含量为 130.9 mg/kg，有机质含量 26 g/kg，玉米品种为“郑单 958”。试验所用塑料桶高 45 cm，直径 42 cm，每桶装入 55 kg 过 5 mm 筛干土，在桶底铺 1 层石子，并用纱布将土和石子隔开，防止桶底滞水并保证透气性，桶内边缘等距垂直放置 3 根直径 2 cm 的 PVC 管用于灌水。

1.2　试验设计

盆栽试验设计 3 个土壤水分和 2 个施氮量，土壤水分包括田间持水量的 30%（W0）、田间持水量的 50%（W1）和田间持水量的 70%（W2），施氮量分别为不施氮（N0）和施氮（0.24 g/kg，N1）。水分控制前共有 32 桶，其中 N0、N1 处理各 16 桶，水分控制当天，N0、N1 处理各取 4 桶进行破坏性取样，剩余 24 桶设置 3 个土壤水分，形成 6 个处理，分别为 W0N0、W0N1、W1N0、W1N1、W2N0 和 W2N1，每个处理 4 次重复。土壤水分控制前采用称重法使土壤含水量维持在田间持水量的 70%，玉米生长到 4 叶期开始为期 2 周的控水试验。同时，设置相同土壤水分和施氮量的塑料桶，不种植玉米，用于采集非根际土。每个塑料桶均加入等量的磷、钾和锌肥，用量分别为 P_2O_5 0.15 g/kg，K_2O 0.15 g/kg，$ZnSO_4$ 0.02 g/kg，氮、磷、钾肥分别采用尿素（N 46%）、重钙（P_2O_5 46%）和氯化钾（K_2O 60%）。玉米于 6 月上旬播种，每个桶内播种 2 粒种子，幼苗生长至 2 叶期时，每桶留 1 株。土壤水分控制期间，通过称重法维持各处理的土壤含水量，试验期间玉米始终在遮雨棚下生长，桶的位置随机排列，定期进行调换。

1.3　样品采集与测定

1.3.1　*土壤和植株样品采集*　土壤水分控制开始和结束当天，将地下部根系整株取出并抖动根系，去除根系外围松散的土壤，用无菌刷收集紧密附着根系的土壤以获取根际土壤。同时，在不种植玉米的塑料桶中采集非根际土壤。将土壤样品挑出可见的杂质和植物根系，过 2 mm 筛后，一部分放入 4 ℃冰箱保存用于测定土壤无机氮、微生物量碳、氮和土壤酶活性；另一部分风干用于测定土壤 pH。水分控制结束当天，将地上部植株收获装入网兜带回实验室用于测定植株干重和氮素吸收。

1.3.2　*测定方法*　土壤 pH 采用电位计法测定，土水质量比为 1∶2.5；土壤铵态氮、硝态氮含量采用流动分析仪测定；土壤微生物量碳、氮含量采用氯仿熏蒸法测定；土壤脲酶采用靛酚蓝比色法测定；土壤硝酸还原酶、亚硝酸还原酶、FDA 水解酶采用科铭科技有限公司提供的试剂盒进行测定。地上部植株样品于 105 ℃下杀青 0.5 h，75 ℃烘干至恒重获得地上部干重。将烘干样品粉碎后，用凯氏定氮法测定植株的氮素吸收。

1.4　数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2019 进行数据处理，采用 SPSS 16.0 软件进行双因素方差分析和显著性检验，用 Origin 9.0 软件作图。

2　结果与分析

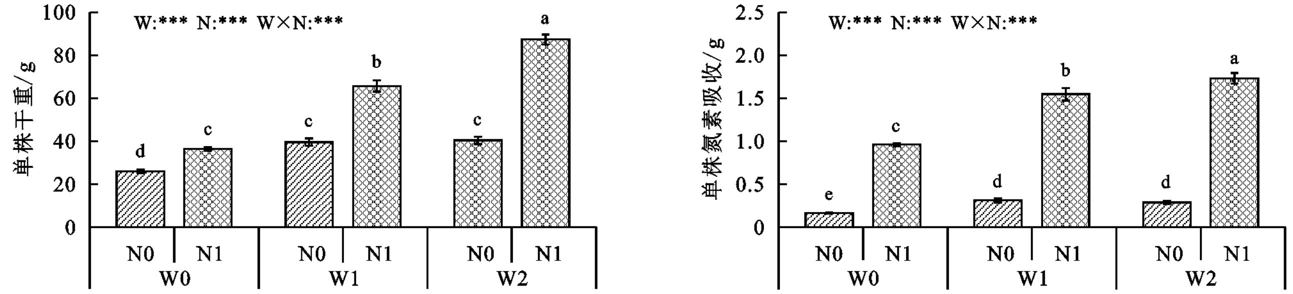
2.1　苗期干旱胁迫下施氮对植株干重、氮素吸收的影响

干旱胁迫和施氮对苗期玉米的植株干重、氮素吸收均有显著影响，且 2 因素表现出显著的交互作用（图 1）。随干旱胁迫程度的增加，植株干重和氮素吸收量均显著下降。与 W2 条件相比，W0 和 W1 条件下干重平均分别降低 51.1%和 17.6%，氮素吸收量平均分别减少 43.8%和 7.4%。施氮促进各水分条件下植株干重和氮素吸收量，W0、W1 和 W2 条件下干重分别增加 10.5，26.1，46.9 g/株（40.4%，65.9%，115.9%），氮素吸收量分别增加 0.95，1.48，1.73 g/株（475%，389%，494%）。可见，施氮后植株干重和氮素吸收的增幅在不同水分条件下存在明显差异，其中增幅均以 W2 条件最高，表明干旱胁迫条件下施氮的效果相比水分适宜条件较差。

2.2　苗期干旱胁迫下施氮对玉米水、氮利用效率的影响

水分、施氮显著影响玉米的水分利用效率，且 2 因素表现出显著的交互作用（图 2）。干旱条件下水分利用效率显著提高，W0 和 W1 条件相比于 W2 条件分别增加 39.2%和 31.6%。施氮显著提高 W2 条件下的水分利用效率，增幅为 38.6%，但 W0、W1 条件下水分利用效率无显著差异。所有水、氮处理中，W1N1 处理水分利用效率最高（3.5 g/L），W2N0 处理最低（2.1 g/L）。氮肥利用率方面，总体呈现随土

壤水分的减少而降低的趋势，W0、W1 条件较 W2 条件相比分别减少 5.9，1.9 个百分点。



注：方差分析结果中，*、**和***分别表示处理间在 $P=0.05$、$P=0.01$ 和 $P=0.001$ 水平上存在显著差异；ns 表示差异不显著($P>0.05$)；不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 不同水、氮条件下对玉米植株干重和氮素吸收的影响

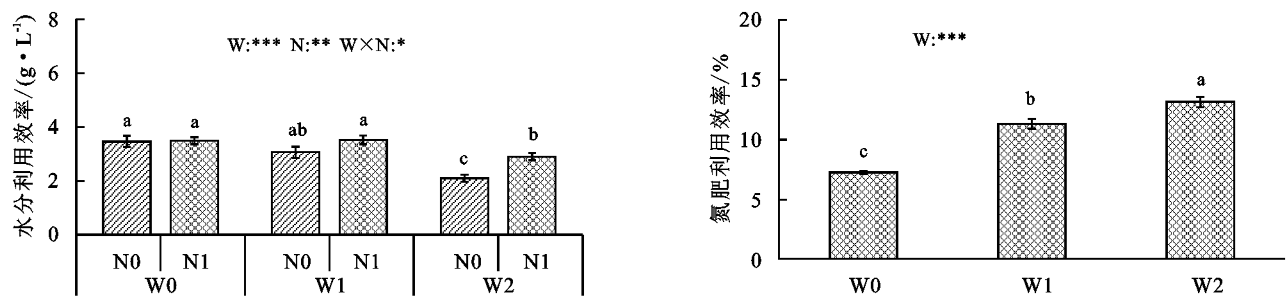


图 2 不同水、氮条件下对玉米水分利用效率和氮肥利用效率的影响

2.3 苗期干旱胁迫下施氮对土壤 pH、铵态氮和硝态氮的影响

水分控制前，施氮显著增加根际和非根际土壤的 pH、铵态氮和硝态氮(表 1)。施加水分控制后，根际土壤的 pH、铵态氮和硝态氮受到水分、施氮及其交互作用的显著影响。干旱胁迫显著增加根际土壤铵态氮和硝态氮含量，W0、W1 条件与 W2 条件相比分别平均增加 56.3% 和 75.4%，3.0% 和 30.8%。施氮显著增加所有水分条件下的非根际土壤的 pH、铵态氮和硝态氮含量，不同水分条件下差异不显著。施氮、水分和施氮的交互作用均显著影响非根际土壤的铵态氮含量，所有水分条件下施氮处理均显著高于不施氮处理，其中 W0 条件的增幅高于 W1、W2 条件。非根际土壤的硝态氮受到水分的显著影响，W0 与 W2 条件相比平均减少 10.9%，但 W1 与 W2 条件间却无明显差异。

表 1 不同水氮条件下对根际和非根际土壤 pH、铵态氮和硝态氮的影响

水分条件	处理	根际土			非根际土		
		pH	铵态氮/(mg・kg⁻¹)	硝态氮/(mg・kg⁻¹)	pH	铵态氮/(mg・kg⁻¹)	硝态氮/(mg・kg⁻¹)
水分控制前	N0	6.50±0.11	3.51±0.29	14.01±1.58	6.37±0.02	3.39±0.10	17.52±2.00
	N1	6.94±0.07	49.21±5.00	40.35±5.30	6.81±0.03	48.95±6.30	37.35±4.32
方差分析	N	**	***	**	***	**	***
水分控制结束	W0N0	6.57±0.06b	0.82±0.07c	2.56±0.34d	6.36±0.09	4.18±0.69c	11.29±1.37
	W0N1	6.84±0.10a	42.39±3.99a	25.26±3.33a	6.59±0.19	38.82±3.36a	38.60±2.99
	W1N0	6.65±0.05b	1.51±0.19c	5.50±0.40c	6.35±0.11	3.42±1.07c	13.18±2.61
	W1N1	6.82±0.08a	26.96±5.11b	15.23±0.47b	6.67±0.19	33.86±3.41b	37.08±1.15
	W2N0	6.60±0.05b	1.81±0.28c	2.61±0.38d	6.36±0.08	4.68±0.23c	12.97±2.71
	W2N1	6.67±0.06b	25.86±4.65b	13.25±2.21b	6.54±0.08	31.49±4.85b	43.00±2.76
方差分析	W	*	***	***	ns	ns	*
	N	***	***	***	***	***	***
	W×N	*	***	***	ns	*	ns

注：方差分析中，*、**和***分别表示处理间在 $P=0.05$、$P=0.01$ 和 $P=0.001$ 水平上存在显著差异；ns 表示差异不显著($P>0.05$)；不同小写字母表示各处理之间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.4 苗期干旱胁迫下施氮对土壤微生物量碳、氮的影响

施氮显著增加水分控制前根际和非根际土壤 MBC 和 MBN 含量，根际土分别增加 84.8%，55.3%，非根际土分别增加 144.2%，161.3%(表 2)。水分控制结束后，水分、施氮均显著影响根际和非根际土壤

MBC 和 MBN 含量，且 2 因素显示出显著的交互作用。干旱胁迫显著增加根际土壤 MBC 和 MBN 含量，W0、W1 与 W2 条件相比分别平均增加 22.6%和 22.8%，6.0%和 5.9%。然而，干旱胁迫却显著减少非根际土壤 MBC 和 MBN 含量，W0、W1 条件分别平均减少 17.0%和 30.1%，8.0%和 21.9%。不同的是，施氮显著增加所有水分条件下根际和非根际土壤 MBC 和 MBN 含量，根际和非根际土壤的增幅差异较大，其中根际土壤 W0 条件增幅最大，而非根际土壤 W1、W2 条件增幅较大。

表 2　不同水氮条件下对根际和非根际土壤微生物量碳、氮的影响　　单位：mg/kg

水分条件	处理	根际土		非根际土	
		MBC	MBN	MBC	MBN
水分控制前	N0	51.1±2.35	17.1±2.01	49.9±2.50	16.0±2.33
	N1	94.4±2.02	26.5±1.77	121.7±2.09	44.2±1.57
方差分析	N	* * *	* * *	* * *	* * *
水分控制结束	W0N0	22.5±2.75c	6.9±1.55d	29.6±1.97d	5.9±0.58f
	W0N1	117.8±6.57a	45.5±2.89a	135.9±4.53b	44.2±1.23c
	W1N0	19.1±1.02cd	4.3±0.25f	32.4±1.96d	5.2±0.47f
	W1N1	102.1±2.17b	41.0±1.41b	151.1±2.32b	50.7±2.11b
	W2N0	16.1±0.91d	4.3±0.11f	43.2±2.18c	11.4±0.87d
	W2N1	98.3±1.76b	38.4±1.58c	156.0±1.88a	60.3±1.69a
方差分析	W	* * *	* * *	* * *	* * *
	N	* * *	* * *	* * *	* * *
	W×N	* *	*	* *	* * *

2.5　苗期干旱胁迫下施氮对土壤酶活性的影响

水分控制前，施氮后根际和非根际土壤脲酶、硝酸还原酶活性显著增加，亚硝酸还原酶活性显著减少，FDA 水解酶活性略有增加，但是无统计学差异（表 3）。水分控制结束后，水分、施氮对根际土壤硝酸还原酶、亚硝酸还原酶和非根际土壤亚硝酸还原酶有显著影响，且 2 因素对根际土壤亚硝酸还原酶和非根际土壤脲酶、亚硝酸还原酶、FDA 水解酶表现出显著的交互作用。施氮均显著增加根际和非根际土壤脲酶活性，W0、W1 和 W2 条件下根际土分别增加 81.8%，41.7%和 23.1%，非根际土分别增加 46.7%，107.7%和 133.3%。重度干旱胁迫下，根际土壤硝酸还原酶活性显著增加，其中 W0 条件与 W2 条件相比平均增加 16.9%。不同水分条件下，施氮均显著减少根际和非根际土壤亚硝酸还原酶活性，根际土壤 W0、W1 和 W2 条件分别减少 57.7%，66.5%和 9.8%，非根际土壤分别减少 69.3%，53.5%和 51.0%。可以看出，W0 处理的亚硝酸还原酶活性减少的更为明显。水分显著影响非根际土壤 FDA 水解酶活性，W0 条件显著高于 W1、W2 条件，但 W1 和 W2 条件间并无显著差异。

表 3　不同水氮条件下对根际和非根际土壤酶活性的影响

水分条件	处理	根际土				非根际土			
		脲酶/(mg·g^{-1})	硝酸还原酶/(μmol·g^{-1})	亚硝酸还原酶/(μmol·g^{-1})	FDA 水解酶/(μmol·g^{-1})	脲酶/(mg·g^{-1})	硝酸还原酶/(μmol·g^{-1})	亚硝酸还原酶/(μmol·g^{-1})	FDA 水解酶/(μmol·g^{-1})
水分控制前	N0	0.12±0.03	0.61±0.10	6.97±0.58	20.87±2.30	0.15±0.01	0.80±0.05	8.18±0.35	21.33±1.59
	N1	0.32±0.04	1.53±0.11	3.14±0.22	24.30±2.15	0.45±0.02	1.46±0.13	3.27±0.27	22.75±0.61
方差分析	N	* * *	* * *	* * *	ns	* * *	* * *	* * *	ns
水分控制结束	W0N0	0.11±0.02	0.75±0.10A	5.48±0.21a	21.47±1.05	0.15±0.01c	0.74±0.04	5.24±0.33b	21.70±1.91ab
	W0N1	0.20±0.04	1.04±0.10A	2.32±0.14e	27.30±1.19	0.22±0.04b	1.61±0.08	1.61±0.13d	23.58±1.24a
	W1N0	0.12±0.01	0.67±0.02B	4.71±0.06b	21.71±0.86	0.13±0.02c	0.69±0.06	5.53±0.35ab	17.08±1.52d
	W1N1	0.17±0.01	0.84±0.11B	1.58±0.11f	25.88±0.44	0.27±0.06a	1.66±0.07	2.57±0.19c	21.06±2.16bc
	W2N0	0.13±0.02	0.64±0.03B	2.85±0.15c	21.69±1.92	0.12±0.02c	0.79±0.05	5.73±0.34a	19.09±1.07cd
	W2N1	0.16±0.03	0.91±0.05B	2.57±0.24d	24.84±1.48	0.28±0.01a	1.68±0.14	2.83±0.15c	20.15±1.29bc
方差分析	W	ns	* *	* * *	ns	ns	ns	* * *	* *
	N	* * *	* * *	* * *	* * *	* * *	* * *	* * *	ns
	W×N	ns	ns	* * *	ns	*	ns	*	* * *

2.6　不同水氮条件下各指标之间的相关性

从表 4 和表 5 可以看出，无论根际土还是非根际土，土壤 pH、铵态氮、硝态氮间都存在极显著正相关，MBC、MBN 间也存在极显著正相关。根际土壤的脲酶和硝酸还原酶间存在极显著正相关，而脲酶和亚硝酸还原酶间存在显著负相关。非根际土壤脲酶

和硝酸还原酶间存在极显著正相关,FDA 水解酶和硝酸还原酶间存在显著正相关,而和亚硝酸还原酶间存在显著负相关,表明不同苗期干旱胁迫和施氮条件下,土壤生物化学性质间密切相关。

表 4 根际土壤化学性质、微生物量碳、氮和酶活性之间的相关性

根际土	pH	铵态氮	硝态氮	MBC	MBN	脲酶	硝酸还原酶	亚硝酸还原酶	FDA 水解酶
pH	1								
铵态氮	0.815**	1							
硝态氮	0.714**	0.897**	1						
MBC	0.677**	0.884**	0.728**	1					
MBN	0.586**	0.790**	0.572**	0.972**	1				
脲酶	0.793**	0.842**	0.856**	0.604**	0.470**	1			
硝酸还原酶	0.741**	0.856**	0.872**	0.620**	0.474**	0.910**	1		
亚硝酸还原酶	−0.635**	−0.619**	−0.305	−0.599**	−0.623**	−0.434*	−0.415*	1	
FDA 水解酶	0.672**	0.703**	0.484**	0.787**	0.782**	0.374*	0.450**	−0.639**	1

注:* 表示显著相关($P<0.05$);** 表示极显著相关($P<0.01$)。下同。

表 5 非根际土壤化学性质、微生物量碳、氮和酶活性之间的相关性

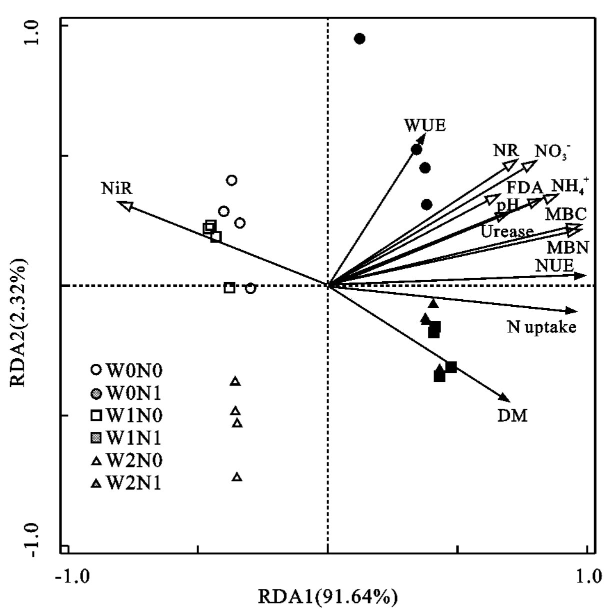
非根际土	pH	铵态氮	硝态氮	MBC	MBN	脲酶	硝酸还原酶	亚硝酸还原酶	FDA 水解酶
pH	1								
铵态氮	0.790**	1							
硝态氮	0.718**	0.896**	1						
MBC	0.692**	0.881**	0.969**	1					
MBN	0.676**	0.864**	0.969**	0.988**	1				
脲酶	0.879**	0.840**	0.739**	0.691**	0.710**	1			
硝酸还原酶	0.667**	0.880**	0.952**	0.984**	0.970**	0.680**	1		
亚硝酸还原酶	−0.626**	−0.821**	−0.808**	−0.828**	−0.774**	−0.568**	−0.853**	1	
FDA 水解酶	0.533**	0.485**	0.428*	0.387*	0.386*	0.461**	0.411*	−0.366*	1

冗余分析结果表明,根际土壤生物化学性质对植株氮素吸收和利用的第 1 轴解释率为 91.64%,第 2 轴解释率为 2.32%。从图 3 可以看出,植株性状各指标均与根际土壤 pH、铵态氮、硝态氮、MBC、MBN、脲酶、硝酸还原酶、FDA 水解酶呈正相关,与亚硝酸还原酶呈负相关。

3 讨 论

3.1 不同处理对植株养分和水、氮利用效率的影响

干旱是目前限制我国北方春玉米生长的主要环境因素。土壤水分极大影响土壤养分的转化及作物吸收,本研究中,重度干旱胁迫显著抑制植株干重和氮素吸收,相比水分适宜条件减少 51.1% 和 43.8%。适宜的水分和氮素措施可发挥耦合效应,能够促进玉米生长发育和提高水、氮利用效率[21],而且施氮对植株生长的影响取决于土壤水分的有效性[22]。本试验结果表明,植株干重随土壤水分增加而显著增加,施氮增加所有水分条件下植株干重,不同水分条件下施氮的效果不同,其中 W2 条件增幅最高,其次是 W1 条件,W0 条件最低。万文亮等[23]的研究结果表明,调亏灌溉可以减少作物耗水量,进而提高水分利用效率。本研究表明,干旱胁迫条件下的水分利用效率明显高于水分适宜条件,但氮肥利用效率随土壤水分提高而显著增加,由此表明,水、氮利用效率较难兼顾,需要进一步探究适宜的水氮管理模式。



注:DM 为植株干重;N uptake 为氮素吸收;WUE 为水分利用效率;NUE 为氮肥利用效率;NH_4^+ 为铵态氮;NO_3^- 为硝态氮;MBC 为微生物量碳;MBN 为微生物量氮;Urease 为脲酶;NR 为硝酸还原酶;NiR 为亚硝酸还原酶;FDA 为 FDA 水解酶。

图 3 不同水氮条件下土壤性质和玉米植株性状的冗余分析

3.2 不同处理对土壤化学性质的影响

土壤水分和氮素对土壤养分的吸收利用、微生物的活性及群落结构产生一定的影响[24]。例如,在北方草原

不同降水和氮素条件下,土壤化学性质、酶活性和微生物群落显著不同[25]。同样,本研究中也发现,短期的不同土壤水分及施氮也显著改变土壤生物和化学性质。本研究结果表明,短期干旱叠加施氮条件下显著增加根际土壤 pH,这与一些长期定位试验的结果不同。长期施氮会导致土壤酸化[26],造成不同结果的原因可能是施用尿素后水解释放 NH_3 的过程暂时使土壤 pH 增加。水分控制前根际土壤铵态氮含量高于非根际土壤,这是由于根际分泌物中微生物量氮的矿化,以及土壤黏粒对矿化产物铵态氮的吸附,进而会造成根际土壤铵态氮富集[27]。本试验结果表明,在重度干旱条件下,施氮后根际土壤铵态氮和硝态氮显著高于水分适宜条件,这与韩希英等[27]研究结果相似。

3.3　不同处理对土壤 MBC、MBN 的影响

土壤微生物量对土壤中的能量循环和养分的转移运输过程至关重要,是评价土壤质量的重要指标[28]。土壤水分、养分供应等变化直接或间接影响土壤微生物的生长、活性和群落结构,进而改变土壤微生物量[29-30]。本研究中,土壤 MBC、MBN 对水分变化的响应在根际和非根际土壤上明显不同,其中根际土壤 MBC、MBN 在水分适宜条件下较低,而非根际土壤 MBC、MBN 在干旱条件下较低。造成这种现象的原因可能是在水分适宜条件下,植物从根际土壤中获取的养分需求增多,植物与土壤微生物之间的养分竞争加剧,植物在竞争过程中获取更多的养分,因此土壤 MBC、MBN 含量下降,而非根际土壤中没有植物的参与,不存在竞争关系。江晶等[31]的研究结果表明,添加氮素能够提高土壤 MBC、MBN。本研究结果表明,施氮显著提高根际土壤 MBC、MBN,是由于施氮后土壤养分供应充足,缓解植物和土壤微生物的竞争,因此土壤 MBC、MBN 显著增加。

3.4　不同处理对土壤酶活性的影响

土壤水分对土壤酶活性有一定的影响,但由于气候条件、土壤类型、作物种类的不同,土壤酶活性对水分和施氮的响应可能存在差异[32]。周芙蓉等[33]研究表明,一定程度的水分胁迫对土壤酶活性有激活作用,能增加土壤酶活性,干旱条件下根际土壤硝酸还原酶、亚硝酸还原酶显著增加,与本研究结果类似。本研究结果表明,施氮显著增加土壤脲酶、硝酸还原酶等土壤酶活性,与孙瑞莲等[34]研究结果相似。这是由于氮肥施入土壤后,促进作物根系生长,根系分泌物增加,进而提高根际土壤酶活性。施氮显著增加土壤脲酶活性,本研究的相关性分析结果显示,土壤铵态氮、硝态氮含量与脲酶活性呈显著正相关,这与以往的研究结果一致。邢肖毅等[35]研究指出,土壤脲酶活性与铵态氮、硝态氮含量呈正相关,说明土壤脲酶在土壤氮素转化过程中有重要作用,与土壤供氮能力密切相关。FDA 水解酶能够反映土壤中微生物活性,是土壤质量研究中的重要生物学指标之一[36]。本试验结果表明,根际土壤 FDA 水解酶活性高于非根际土壤,这是由于根系分泌物为微生物提供碳源,促进土壤中微生物的生长和酶活性的增加。

本研究发现,短期的水分和氮素变化对土壤生物、化学性质产生复杂影响,未来还需开展更为深入的研究,以探讨干旱胁迫下施氮对土壤性质影响及其与植物互馈效应的作用机制。

4　结论

(1)通过盆栽试验表明,苗期干旱胁迫和施氮对玉米苗期植株干重和养分吸收表现出显著的交互作用,干旱胁迫条件下施氮提高植株干物质累积和氮素吸收与利用,但增幅不及水分适宜处理。

(2)施氮有利于加快土壤氮素转化过程,提高土壤铵态氮、硝态氮、MBC 和 MBN,土壤铵态氮、硝态氮和土壤脲酶活性之间存在显著相关。

(3)干旱胁迫和施氮显著影响根际和非根际不同土壤酶活性,施氮在不同水分条件下对不同土壤酶活性的效果存在明显差异。

(4)通过对东北春玉米苗期干旱胁迫下施氮对土壤性质影响的研究,明确根际土壤生态过程及其对干旱胁迫响应规律,为气候变化下东北春玉米苗期抗旱增产和减肥增效提供依据。

参考文献:

[1]　中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2020.

[2]　杨晓晨,明博,陶洪斌,等.中国东北春玉米区干旱时空分布特征及其对产量的影响[J].中国生态农业学报,2015,23(6):758-767.

[3]　徐昆,朱秀芳,刘莹,等.气候变化下干旱对中国玉米产量的影响[J].农业工程学报,2020,36(11):149-158.

[4]　Murugan R, Parama V R R, Madan B, et al. Short-term effect of nitrogen intensification on aggregate size distribution, microbial biomass and enzyme activities in a semi-arid soil under different crop types[J]. Pedosphere,2019,29(4):483-491.

[5]　Cai S M, Wang J J, Lv W G, et al. Nitrogen fertilization alters the effects of earthworms on soil physicochemical properties and bacterial community structure[J/OL]. Applied Soil Ecology, 2020, 150. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103478.

[6]　Wang Y, Zhang X Y, Chen J, et al. Reducing basal nitrogen rate to improve maize seedling growth, water and nitrogen use efficiencies under drought stress by optimizing root morphology and distribution[J]. Agricultural Water Management,2019,212:328-337.

[7] Khan K S, Mack R, Castillo X, et al. Microbial biomass, fungal and bacterial residues, and their relationships to the soil organic matter C/N/P/S ratios[J].Geoderma,2016,271:115-123.

[8] Preece C, Farré-armengol G, Peñuelas J. Drought is a stronger driver of soil respiration and microbial communities than nitrogen or phosphorus addition in two Mediterranean tree species[J/OL].Science of the Total Environment,2020,735. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139554.

[9] Kocsis M, Dunai A, Makó A, et al. Estimation of the drought sensitivity of Hungarian soils based on corn yield responses[J].Journal of Maps,2020,16(2):148-154.

[10] Nannipieri P, Trasar-cepeda C, Dick R P. Soil enzyme activity: A brief history and biochemistry as a basis for appropriate interpretations and meta-analysis[J].Biology and Fertility of Soils,2018,54:11-19.

[11] Li F S, Yu J M, Nong M L, et al. Partial root-zone irrigation enhanced soil enzyme activities and water use of maize under different ratios of inorganic to organic nitrogen fertilizers[J]. Agricultural Water Management,2010,97(2):231-239.

[12] Zhou S M, Zhang M, Zhang X W, et al. Effects of reduced nitrogen and suitable soil moisture on wheat (*Triticum aestivum* L.) rhizosphere soil microbiological, biochemical properties and yield in the Huanghuai Plain, China[J]. Journal of Integrative Agriculture,2020,19(1):234-250.

[13] Mickan B S, Abbott L K, Fan J W, et al. Application of compost and clay under water-stressed conditions influences functional diversity of rhizosphere bacteria[J]. Biology and Fertility of Soils,2018,54(5):55-70.

[14] 申鹏举.补充灌溉和雨养条件下施氮对玉米碳氮转运分配的影响[D].南宁:广西大学,2020.

[15] 石柯,董士刚,申凤敏,等.小麦播量与减氮对潮土微生物量碳氮及土壤酶活性的影响[J].中国农业科学,2019,52(15):2646-2663.

[16] 唐海明,李超,肖小平,等.有机肥氮投入比例对双季稻田根际土壤微生物生物量碳、氮和微生物熵的影响[J].应用生态学报,2019,30(4):1335-1343.

[17] 田幼华,吕光辉,杨晓东,等.水盐胁迫对干旱区植物根际土壤酶活性的影响[J].干旱区资源与环境,2012,26(3):158-163.

[18] Kivlin S N, Treseder K K. Soil extracellular enzyme activities correspond with abiotic factors more than fungal community composition[J]. Biogeochemistry,2014,117(1):23-37.

[19] 梁国鹏, Albert H A,吴会军,等.施氮量对夏玉米根际和非根际土壤酶活性及氮含量的影响[J].应用生态学报,2016,27(6):1917-1924.

[20] 闫丽娟,王海燕,李广,等.黄土丘陵区4种典型植被对土壤养分及酶活性的影响[J].水土保持学报,2019,33(5):190-196,204.

[21] 张馨月,王寅,陈健,等.水分和氮素对玉米苗期生长、根系形态及分布的影响[J].中国农业科学,2019,52(1):34-44.

[22] Gheysari M, Mirlatifi S M, Bannayan M, et al. Interaction of water and nitrogen on maize grown for silage[J].Agricultural Water Management,2009,96(5):809-821.

[23] 万文亮,郭鹏飞,胡语妍,等.调亏灌溉对新疆滴灌春小麦土壤水分、硝态氮分布及产量的影响[J].水土保持学报,2018,32(6):166-174.

[24] Zhang M Y, Riaz M, Zhang L, et al. Response of fungal communities in different soils to biochar and chemical fertilizers under simulated rainfall conditions[J]. Science of the Total Environment,2019,691(15):654-663.

[25] Ma W J, Li J, Gao Y, et al. Responses of soil extracellular enzyme activities and microbial community properties to interaction between nitrogen addition and increased precipitation in a semi-arid grassland ecosystem[J/OL]. Science of the Total Environment,2020,703. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134691.

[26] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science,2010,327:1008-1010.

[27] 韩希英,宋凤斌.干旱胁迫对玉米根系生长及根际养分的影响[J].水土保持学报,2006,20(3):170-172.

[28] Xiao L, Huang Y M, Zhao J F, et al. Effects of planting structure on soil water-stable aggregates, microbial biomass and enzyme activity in a catchment of Loess Plateau terraces, China[J/OL]. Applied Soil Ecology,2021,159. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103819.

[29] Guo W, Andersen M N, Qi X B, et al. Effects of reclaimed water irrigation and nitrogen fertilization on the chemical properties and microbial community of soil[J].Journal of Integrative Agriculture,2017,16(3):679-690.

[30] 王宁,罗佳琳,赵亚慧,等.不同麦秸还田模式对稻田土壤微生物活性和微生物群落组成的影响[J].农业环境科学学报,2020,39(1):125-133.

[31] 江晶,武均,张仁陟,等.碳氮添加对雨养农田土壤全氮、有机碳及其组分的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):215-220,227.

[32] 边雪廉,赵文磊,岳中辉,等.土壤酶在农业生态系统碳、氮循环中的作用研究进展[J].中国农学通报,2016,32(4):171-178.

[33] 周芙蓉,王进鑫,杨楠,等.水分和铅胁迫对土壤酶活性的影响[J].草地学报,2013,21(3):479-484.

[34] 孙瑞莲,赵秉强,朱鲁生,等.长期定位施肥田土壤酶活性的动态变化特征[J].生态环境,2008,17(5):2059-2063.

[35] 邢肖毅,黄懿梅,黄海波,等.黄土丘陵区子午岭不同植物群落下土壤氮素及相关酶活性的特征[J].生态学报,2012,32(5):1403-1411.

[36] 马星竹.长期施肥土壤的FDA水解酶活性[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2010,36(4):451-455.