

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.23773

## 水氮协同对河西走廊青贮玉米土壤氮含量及酶活性的影响

张建喜<sup>1</sup>, 李广<sup>1\*</sup>, 王钰焯<sup>1</sup>, 袁建钰<sup>1</sup>, 徐国荣<sup>1</sup>, 张武清<sup>2</sup>(1. 甘肃农业大学林学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃林业职业技术学院  
建筑工程学院, 甘肃 天水 741020)

**摘要:** 为探讨水氮协同对河西走廊青贮玉米土壤氮组分含量和相关酶活性的影响, 以及土壤氮组分含量和相关酶活性间的关系。2022 与 2023 年, 以青贮玉米为研究对象, 设置 2 种滴灌量 (5535、6150 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>), 记为 W<sub>1</sub> 和 W<sub>2</sub>; 3 个施氮水平 (249、280、311 kg/hm<sup>2</sup>), 记为 N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>, 分析不同水氮协同处理下全氮 (TN)、铵态氮 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、硝态氮 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、微生物量氮 (MBN) 含量的变化特征, 以及与脲酶 (URE)、蛋白酶 (PRO)、碱性磷酸酶 (ALP)、过氧化氢酶 (CAT) 活性之间的相关关系。结果表明: (1) 氮组分含量及相关酶活性均随土层深度的增加而降低。(2) 节水滴灌较传统滴灌显著提高青贮玉米土壤 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、MBN 含量及 URE、PRO、ALP 和 CAT 活性; 随着施氮量的增加, 土壤 TN、MBN 含量增加, 同时 URE、PRO 活性增强, 而 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量以及 ALP、CAT 活性呈先升后降的变化趋势。(3) 两年内, 除 W<sub>1</sub>N<sub>3</sub> 处理外, W<sub>1</sub>N<sub>2</sub> 处理下青贮玉米产量显著 ( $P<0.05$ ) 高于其他处理 5.76% ~ 24.78% 与 9.26% ~ 37.35%, 但 W<sub>1</sub>N<sub>2</sub> 与 W<sub>1</sub>N<sub>3</sub> 处理间产量无显著差异。(4) TN 与 URE、PRO 和 CAT 呈极显著 ( $P<0.01$ ) 或显著 ( $P<0.05$ ) 正相关; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 与 URE、PRO 和 CAT 均呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ), 与 ALP 呈显著正相关 ( $P<0.05$ ); MBN 与 URE 呈显著正相关 ( $P<0.05$ ); 土壤氮组分、酶活性与产量间均存在极显著 ( $P<0.01$ ) 或显著 ( $P<0.05$ ) 正相关关系。综上, 滴灌量和施氮量分别为 5535 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>、280 kg/hm<sup>2</sup> 是理想的水氮协同模式, 可显著提高河西走廊青贮玉米土壤氮组分含量及相关酶活性。

**关键词:** 滴灌量; 施氮量; 氮组分; 酶活性; 青贮玉米

氮是陆地生态系统中影响植物生长和发育的主要限制性因子, 其含量直接影响着植物的生长和发育<sup>[1]</sup>。土壤中氮素存在形式主要分为有机氮和无机氮<sup>[2]</sup>。有机氮需要通过微生物的矿化作用转化为无机氮才能被植物直接吸收利用; 而植物通过生长和代谢释放的有机物又成为微生物分解的底物<sup>[3]</sup>。这种有机氮与无机氮之间的转化和循环组成了土壤-植物氮素循环系统, 维持着土壤肥力平衡并促进作物的生长和发育<sup>[4]</sup>。土壤酶作为土壤生物活性的重要组成部分, 其活跃程度直接影响着生化反应的强度及方向, 同时也是农田生态系统氮素转化的重要因素<sup>[5]</sup>。

农田管理措施直接影响着土壤中氮组分含量和相关酶活性, 尤其是灌溉和施肥措施<sup>[6]</sup>。水分变化对土壤氮组分含量及相关酶的影响是一个复杂的过程, 受氮素形态转化、淋失、植物吸收利用以及微生物活动等因素的综合作用<sup>[7-8]</sup>。研究表明, 过量灌溉会导致土壤中氮元素的淋失, 形成水层, 降低土壤的通气透水能力, 从而影响土壤中微生物和酶的活性<sup>[9]</sup>; 曹飞<sup>[10]</sup>研究发现, 适宜的灌溉量改善了土壤的水分状况, 提高氮肥利用率, 并对土壤中的微生物和酶活性产生了积极影响, 从而促进有机氮向铵态氮 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N) 和硝态氮 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N) 方向的转化。此外, 氮肥的施用量是影响土壤氮成分含量及相关酶活性的重要因素, 过量施氮会导致土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 积累在深层土壤 (20 ~ 40 cm) 中, 从而增加了土壤中无机氮淋失的风险<sup>[11]</sup>。适宜的施氮量能有效提升蔗糖酶、碱性磷酸酶 (ALP) 和脲酶 (URE) 活性, 且施氮量为 240 kg/hm<sup>2</sup> 时, 酶活性达到峰值<sup>[12]</sup>。因此, 亟须探究适宜的灌溉和施肥模式, 以提高农田土壤

收稿日期: 2023-12-15; 录用日期: 2024-04-28

基金项目: 甘肃省重点研发计划 (22YF7FA116); 甘肃省财政专项 (GSCZZ-20160909); 甘肃省高等学校产业支撑项目 (2021CYZC-15)。

作者简介: 张建喜 (1998-), 硕士研究生, 主要研究方向为水氮利用效率。E-mail: 1837887457@qq.com。

通讯作者: 李广, E-mail: lig@gsau.edu.cn。

养分含量及相关酶活性。目前, 基于水肥一体的耦合管理技术体系已开展了大量研究, 但能否通过优化滴灌和施氮模式来增加土壤养分的管理措施却少见报道。

河西走廊因其独特的气候、水肥条件, 已成为我国重要的玉米生产基地和优势产区<sup>[13]</sup>。青贮玉米具有适口性好、消化率高、保存方便等特点<sup>[14]</sup>。近年来, 由于该地区大水漫灌、施氮过量, 导致玉米的增产弹性降低、养分失衡, 从而在一定程度上影响农业生产的可持续性<sup>[15]</sup>。因此, 在实际种植过程中, 优化水氮配比、提高氮肥利用率迫在眉睫。本研究以张掖市青贮玉米土壤氮组分含量及其相关酶活性为突破口, 在不同的水氮协同条件下, 探讨增加土壤养分的可行性, 旨在为提高青贮玉米增产潜力、优化试区高产高效的青贮玉米种植管理模式提供理论依据。

式提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验于2022—2023年4月至9月下旬于甘肃省张掖市华瑞牧场(37° 56' —38° 48' N, 100° 22' —101° 13' E)进行。该地区海拔1592.2 m, 属温带大陆性荒漠草原气候, 无霜期140 d, 具有丰富的日照时长和光热资源, 年平均日照时间为2794 h。年温差大, 年平均气温3.4 ~ 5.6℃, 年平均降水量290 mm。供试青贮玉米品种为青贮金岭67。2022与2023年降水量分别为181.42、193.20 mm, 该地区完全依赖于地下水灌溉, 供试土壤类型为风沙土, 试验前样地0 ~ 30 cm土壤基础肥力见表1。

表1 土壤基础肥力

土层 (cm)	土壤容重 (g/cm <sup>3</sup> )	土壤含水量 (%)	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	铵态氮 (mg/kg)	硝态氮 (mg/kg)	微生物量氮 (mg/kg)	pH
0 ~ 10	0.92	13.80	11.43	0.91	0.65	7.48	3.03	48.07	7.31
10 ~ 20	1.16	14.42	10.00	0.60	0.43	5.10	5.13	28.14	7.91
20 ~ 30	1.45	15.03	9.40	0.58	0.27	3.46	7.55	16.69	7.42

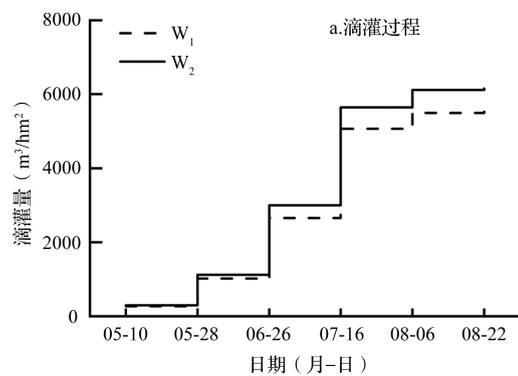
### 1.2 样地设置

基于对当地青贮玉米种植习惯的调查和走访, 以及对前人研究数据进行分析总结<sup>[16-17]</sup>, 参照当地传统滴灌量(6150 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)和习惯施氮量(311 kg/hm<sup>2</sup>), 采用随机区组试验, 设节水和减氮两因素。灌水量设定为W<sub>1</sub>(较传统滴灌量节水10%, 5535 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>), W<sub>2</sub>(传统滴灌量, 6150 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>); 施氮水平设定为:N<sub>1</sub>(较习惯施氮量减氮20%, 249 kg/hm<sup>2</sup>), N<sub>2</sub>(较习惯施氮量减氮10%, 280 kg/hm<sup>2</sup>), N<sub>3</sub>(习惯施氮量, 311 kg/hm<sup>2</sup>); 共6个处理, 3次重复, 共计18个小区。小区长25 m, 宽1.6 m, 面积40 m<sup>2</sup>。为防止小区间的相互干扰, 各小区设1 m的隔离带。青贮玉米采用覆膜播种, 株距25 cm, 行距50 cm。

### 1.3 水肥管理方法

灌溉采用膜下滴灌, 滴灌带选用内镶贴片式, 毛管直径16 mm, 壁厚0.2 mm, 滴头间距300 mm, 滴头流量2.2 L/h, 滴灌带与青贮玉米种植方向平行, 间距为60 cm。当土壤含水量低于各处理

体积含水量下限的60%时开始灌水; 播种前均匀施牛粪肥4500 kg/hm<sup>2</sup>作为底肥, 使用液压泵装置进行施肥, 并随灌水施入, 试验所用氮肥为尿素(N 46%), 同时在不同生育期根据传统方案, 所有处理均施磷、钾肥, 磷、钾肥采用磷酸脲(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 44.06%)和氯化钾(K<sub>2</sub>O 57%), 施入总量分别为146和107 kg/hm<sup>2</sup>, 同氮肥一起分别在拔节期前(拔节期前2周)(5.9%)、拔节期(64.7%)、抽雄期(29.4%)施入, 具体灌溉和施氮见图1, 其他管理措施同大田一致。



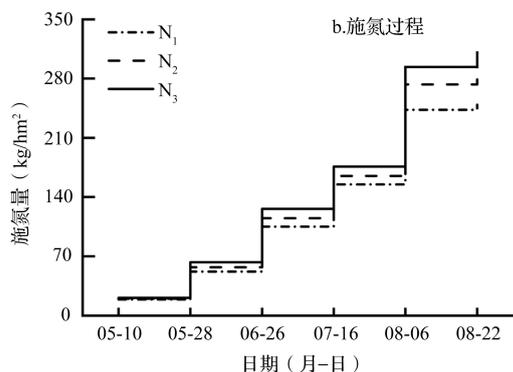


图1 水氮协同青贮玉米生育期滴灌和施氮量

#### 1.4 样品采集

于青贮玉米成熟期(9月25日)各处理分别取0~10、10~20、20~30 cm土层土样,采用“S”形五点法取样,将相同处理下3个小区土样混匀,去除碎石、杂草等杂物,装入密封袋内,将其中一部分新鲜土经2 mm筛网进行过滤,以测定 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N和微生物量氮(MBN)。另外一部分土样则平铺在干净的白纸上,在室内整洁的通风环境下自然风干,严禁曝晒。在风干过程中,需要定期翻动土样,待其完全风干后,经0.25 mm筛网进行过滤,以测定全氮(TN)和酶活性。

#### 1.5 指标测定

采用环刀法测定土壤容重(BD),用TRIME-T<sub>3</sub>管式水分仪测定土壤含水量(WC);采用半微量凯氏法测定土壤TN含量;土壤 $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N用MgO-代氏合金蒸馏法测定;MBN采用氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>浸提法测定<sup>[18]</sup>;URE活性采用靛酚蓝比色法测定;ALP活性采用磷酸苯二钠法测定;蛋白酶(PRO)活性采用干酪素比色法测定;过氧化氢酶活性(CAT)采用高锰酸钾滴定法测定<sup>[19]</sup>。

于青贮玉米成熟期各小区随机选取(1.6 m×1 m)的3个样地,保证各样地有相同数量植株(12株),称取地上部分鲜重,换算成公顷鲜重作为青贮玉米公顷产量<sup>[20]</sup>。

#### 1.6 数据处理与分析

采用Origin 2022绘图,SPSS 27.0进行数据统计分析。针对不同水氮协同条件下各变量之间的差异显著性( $\alpha=0.05$ )进行了三因素方差分析和多重比较(LSD)分析,同时,利用Pearson相关分析描述各因子之间的相关关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 水氮协同下青贮玉米土壤氮组分含量变化特征

水氮协同对土壤氮组分含量的影响如图2所示。2022与2023年,不同处理下青贮玉米土壤TN、 $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N和MBN含量均随土层深度的增加而降低。在相同滴灌条件下,随着施氮量的增加,0~30 cm土层土壤TN、MBN含量也随之增加,而 $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N含量呈先增加后降低的变化趋势。2022与2023年,随着施氮量的增加,W<sub>1</sub>相较W<sub>2</sub>土壤TN含量分别增加了13.79%、19.73%、23.27%与7.33%、21.43%、20.86%,土壤 $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_3^-$ -N含量分别增加了14.46%、29.01%、15.79%和20.47%、25.79%、20.30%与24.60%、24.30%、24.63%和20.32%、32.97%、22.57%,MBN含量分别增加了59.13%、43.51%、43.44%与39.20%、44.19%、28.25%。可见,在0~30 cm土层土壤中,W<sub>1</sub>N<sub>3</sub>处理有效提高TN、MBN含量,W<sub>1</sub>N<sub>2</sub>处理有效提高 $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N含量。

三因素方差分析表明(表2),滴灌量对氮组分存在极显著影响( $P < 0.01$ );滴灌量和施氮量交互对TN、 $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N和MBN存在极显著( $P < 0.01$ )或显著( $P < 0.05$ )影响。土层和滴灌量的交互作用对MBN有极显著影响;土层和施氮量的交互作用对 $\text{NH}_4^+$ -N、MBN和 $\text{NO}_3^-$ -N有极显著( $P < 0.01$ )或显著( $P < 0.05$ )的影响;土层、滴灌量和施氮量的交互作用与土层和施氮量的交互作用一致。

### 2.2 水氮协同下青贮玉米土壤酶活性变化特征

水氮协同对土壤酶活性的影响如图3所示。2022与2023年,不同处理下青贮玉米土壤URE、PRO、ALP和CAT活性均随土层深度的增加而降低。在相同滴灌条件下,随着施氮量的增加,0~30 cm土层土壤URE、PRO活性也随之增加,而ALP、CAT活性呈先升高后降低的变化趋势。2022与2023年,随着施氮量的增加,W<sub>1</sub>相较W<sub>2</sub>土壤URE活性分别增加了18.60%、15.56%、12.00%与19.57%、16.33%、18.00%,PRO活性分别增加了22.35%、20.10%、21.71%与21.67%、19.14%、21.72%,ALP和CAT活性分别增加了25.00%、37.73%、37.50%和6.38%、7.68%、5.16%与9.20%、34.04%、25.84%和9.40%、9.30%、8.45%。可见,在0~30 cm土层土壤中,W<sub>1</sub>N<sub>3</sub>处理有效提高URE、PRO活性,W<sub>1</sub>N<sub>2</sub>处理有效提高ALP、CAT活性。

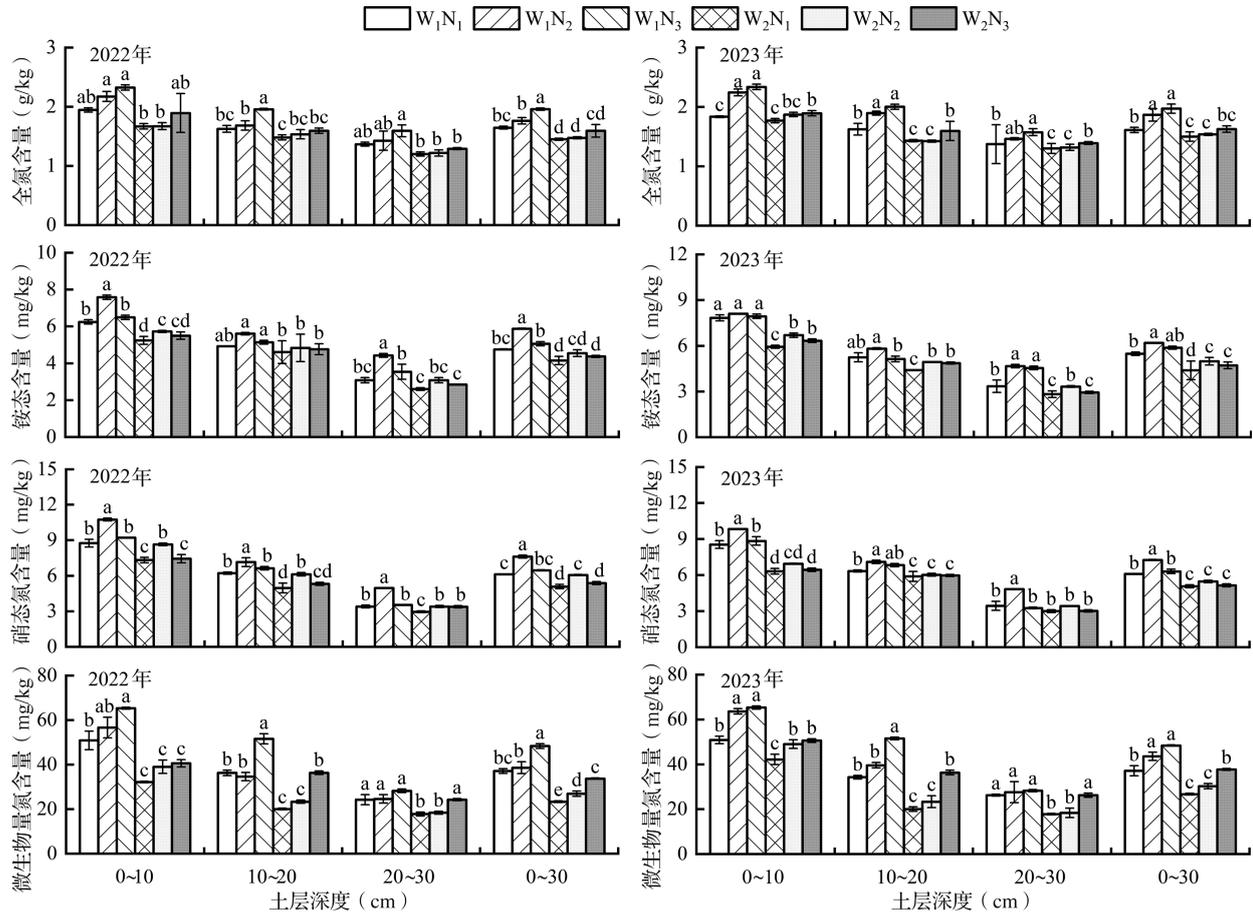


图2 水氮协同条件下土壤氮组分含量

注：不同小写字母表示不同水氮协同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )，下同。

表2 水、氮和土层交互作用下土壤0~30 cm 氮含量方差分析

因素	项目	全氮	铵态氮	硝态氮	微生物量氮
滴灌量	<i>df</i>	1	1	1	1
	<i>F</i>	46.305	91.310	195.191	148.540
	<i>P</i>	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
施氮量	<i>df</i>	2	2	2	2
	<i>F</i>	6.046	26.324	37.048	17.033
	<i>P</i>	0.015	< 0.01	< 0.01	< 0.01
滴灌量 × 施氮量	<i>df</i>	2	2	2	2
	<i>F</i>	5.850	12.795	37.594	19.009
	<i>P</i>	< 0.01	0.03	0.04	< 0.01
土层 × 滴灌量	<i>df</i>	2	2	2	2
	<i>F</i>	1.381	0.787	2.654	6.117
	<i>P</i>	0.261	0.461	0.081	< 0.01
土层 × 施氮量	<i>df</i>	10	10	10	10
	<i>F</i>	0.917	5.351	2.554	7.765
	<i>P</i>	0.528	< 0.01	0.019	< 0.01
土层 × 滴灌量 × 施氮量	<i>df</i>	10	10	10	10
	<i>F</i>	0.674	5.113	2.207	6.897
	<i>P</i>	0.740	< 0.01	0.041	< 0.01

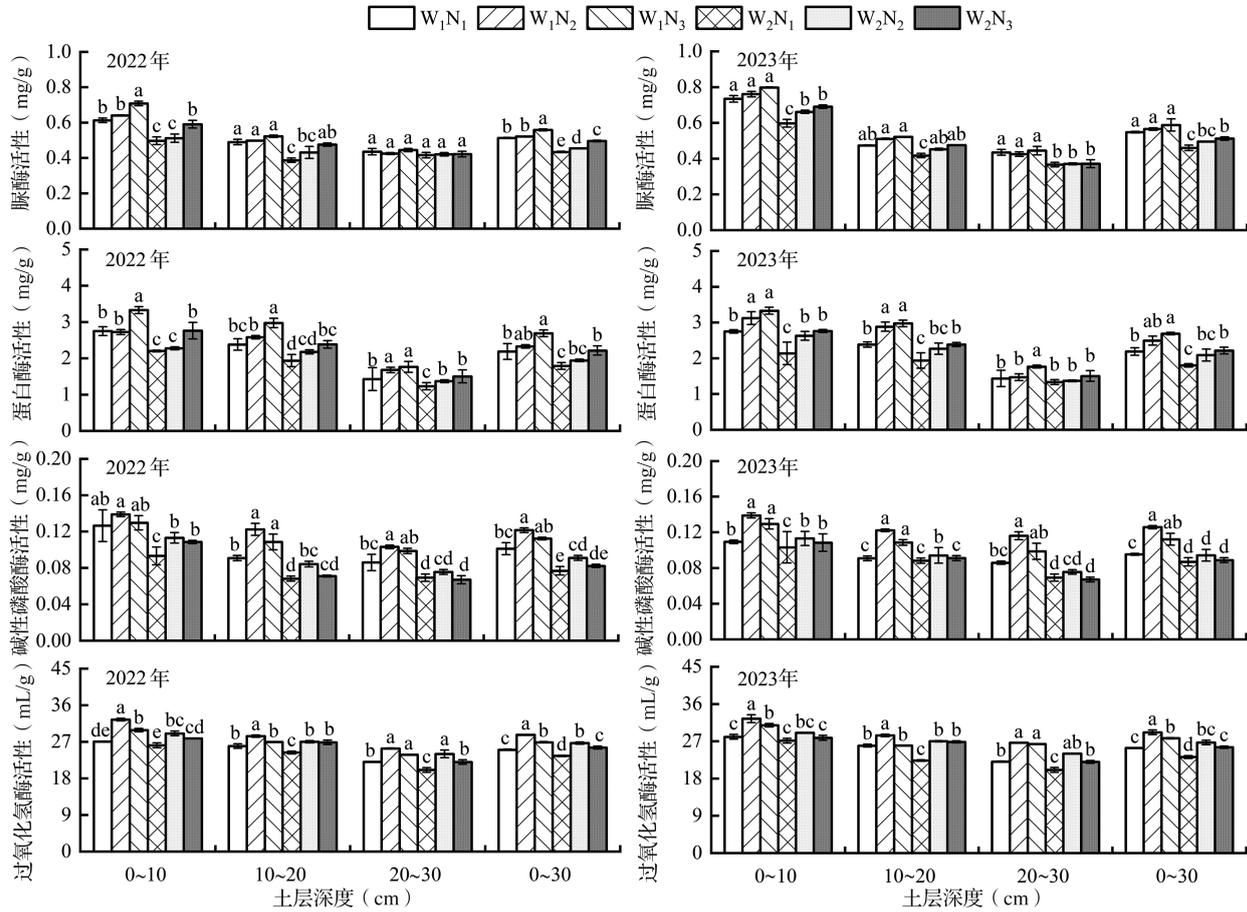


图3 水氮协同条件下土壤酶活性

三因素方差分析表明(表3),滴灌量和施氮量对土壤酶活性产生极显著( $P < 0.01$ )或显著( $P < 0.05$ )影响。由 $F$ 值可知,滴灌量对URE、PRO和CAT活性的影响程度大于施氮量。水氮交

表3 水、氮和土层交互作用下土壤0~30cm酶活性方差分析

因素	项目	脲酶	蛋白酶	碱性磷酸酶	过氧化氢酶
滴灌量	<i>df</i>	1	1	1	1
	<i>F</i>	814.478	18.881	44.973	150.232
	<i>P</i>	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
施氮量	<i>df</i>	2	2	2	2
	<i>F</i>	110.866	4.514	60.524	122.969
	<i>P</i>	< 0.01	0.035	0.042	< 0.01
滴灌量 × 施氮量	<i>df</i>	2	2	2	2
	<i>F</i>	130.407	12.620	8.939	7.482
	<i>P</i>	< 0.01	< 0.01	0.013	0.044
土层 × 滴灌量	<i>df</i>	2	2	2	2
	<i>F</i>	8.503	0.631	0.317	0.472
	<i>P</i>	< 0.01	0.536	0.730	0.627
土层 × 施氮量	<i>df</i>	10	10	10	10
	<i>F</i>	11.816	0.285	0.737	1.565
	<i>P</i>	< 0.01	0.981	0.685	0.157
土层 × 滴灌量 × 施氮量	<i>df</i>	10	10	10	10
	<i>F</i>	10.857	0.280	0.513	1.509
	<i>P</i>	< 0.01	0.982	0.870	0.178

互对酶活性存在极显著 ( $P<0.01$ ) 或显著 ( $P<0.05$ ) 的交互作用。土层与滴灌量、土层与施氮量、土层和滴灌量及施氮量间的交互作用仅对 URE 产生极显著交互作用 ( $P<0.01$ )。

### 2.3 水氮协同下青贮玉米产量变化

由图 4 可知, 2022 与 2023 年, 不同处理下青

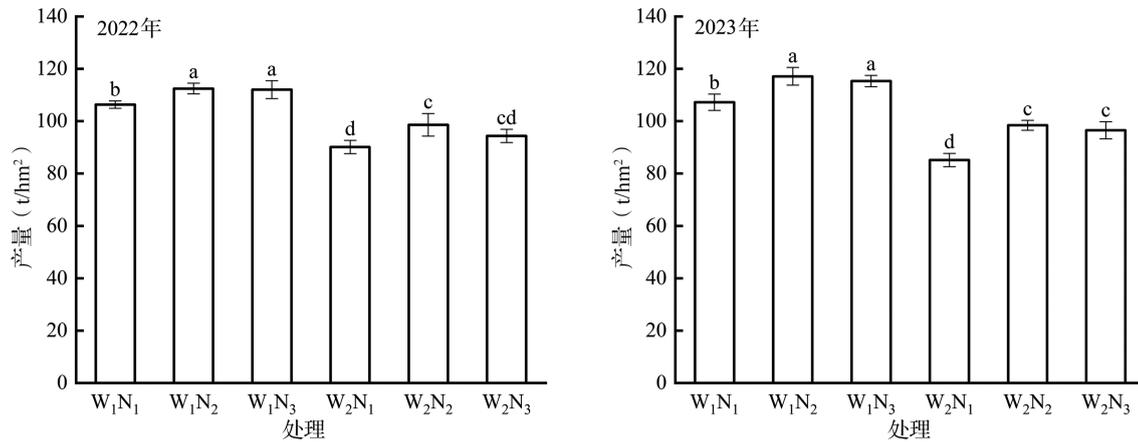


图 4 水氮协同下青贮玉米产量

注: 不同小写字母表示处理间产量差异显著 ( $P<0.05$ )。

### 2.4 土壤氮组分含量、酶活性及产量间的相关性分析

由图 5 可知, 氮组分间、酶活性间均呈极显著 ( $P<0.01$ ) 或显著 ( $P<0.05$ ) 正相关关系; 除 TN 和 MBN 外,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  与 4 种酶之间均呈极显著 ( $P<0.01$ ) 或显著 ( $P<0.05$ ) 正相关关系; 氮组分、酶活性与产量之间均存在极显著 ( $P<0.01$ ) 或显著 ( $P<0.05$ ) 正相关关系。

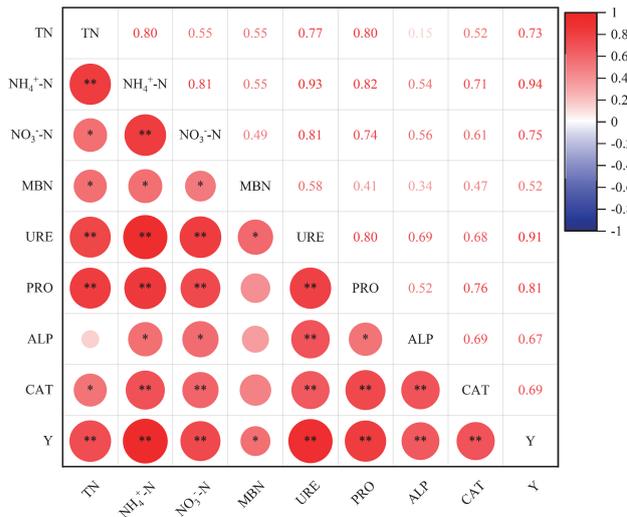


图 5 土壤氮含量、酶活性及产量间的相关性分析

注: TN: 全氮;  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ : 铵态氮;  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ : 硝态氮; MBN: 微生物量氮; URE: 脲酶; PRO: 蛋白酶; ALP: 碱性磷酸酶; CAT: 过氧化氢酶; Y: 青贮玉米产量。\*\* 表示极显著相关 ( $P<0.01$ ), \* 表示显著相关 ( $P<0.05$ )。

贮玉米产量在 90.13 ~ 112.46 t/hm<sup>2</sup> 之间与 85.16 ~ 117.14 t/hm<sup>2</sup> 之间; W<sub>1</sub>N<sub>2</sub> 处理下青贮玉米产量最高, 而 W<sub>2</sub>N<sub>1</sub> 处理最低; 除 W<sub>1</sub>N<sub>3</sub> 处理外, W<sub>1</sub>N<sub>2</sub> 处理下青贮玉米产量显著 ( $P<0.05$ ) 高于其他处理 5.76% ~ 24.78% 与 9.26% ~ 37.35%, 而 W<sub>1</sub>N<sub>2</sub> 与 W<sub>1</sub>N<sub>3</sub> 处理间产量无显著差异。

### 2.5 土壤理化性质对土壤氮组分及酶活性的相关性分析

由表 4 可知, 土壤 BD 与 TN、MBN 呈极显著负相关关系 ( $P<0.01$ ), 与 URE、PRO 呈显著正相关关系 ( $P<0.05$ ); 土壤 WC 与土壤氮组分呈极显著负相关关系 ( $P<0.01$ ), 与酶活性呈不同水平的显著正相关 ( $P<0.05$ ); pH 与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  呈极显著负相关关系 ( $P<0.01$ ), 与 URE、PRO、CAT 呈极显著正相关关系 ( $P<0.01$ )。

表 4 土壤理化性质对土壤氮组分及酶活性的相关性分析

指标	BD	WC	pH
TN	-0.775**	-0.903**	-0.433
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	-0.371	-0.762**	-0.815**
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	-0.293	-0.734**	-0.861**
MBN	-0.725**	-0.847**	-0.321
URE	0.525*	0.837**	0.817**
PRO	0.507*	0.922**	0.782**
ALP	0.414	0.612*	0.207
CAT	0.347	0.659*	0.802**

注: BD: 容重; WC: 含水量; \*\* 表示极显著相关 ( $P<0.01$ ), \* 表示显著相关 ( $P<0.05$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 水氮协同对土壤氮组分含量的影响

氮是植物从土壤中获取量最大的营养元素之一,在灌溉农业中,水、肥、气、热等环境因子显著影响土壤氮素含量<sup>[21]</sup>。MBN是土壤氮素矿化势的重要组成部分,适宜的灌溉和施肥条件可以改善土壤微生物的种群结构,提升土壤中微生物的数量和碳、氮含量<sup>[22]</sup>。本研究发现,  $W_1N_3$  处理显著提升 0 ~ 30 cm 土层土壤 TN、MBN 含量。这是由于节水滴灌提高水分利用效率、降低土壤 BD、减少氮素损失,从而促进土壤氮素积累<sup>[23]</sup>,同时节水灌溉改善了土壤水分环境和通气状况,有利于植物生长和微生物繁殖,促进有机物质的分解,从而增加了土壤 TN、MBN 含量<sup>[24]</sup>。相反,过量滴灌会降低土壤通气性,限制微生物活动和腐殖质分解,导致微生物数量减少、影响氮素循环,从而降低土壤 TN、MBN 含量<sup>[25]</sup>。在传统施氮条件下,除被植物吸收部分外,过量的氮素积累并贮存在土壤中,这有助于弥补氮素的消耗,增强土壤对氮素的固持,从而提高微生物活性,进而增加土壤 TN、MBN 含量<sup>[26]</sup>。

土壤  $NH_4^+-N$  和  $NO_3^--N$  均为水溶性无机态氮可直接被植物吸收利用,二者之间可以相互转化,受到水氮管理模式、土壤环境、微生物等多方面因素的共同影响<sup>[27]</sup>。本研究发现,  $W_1N_2$  处理显著提升 0 ~ 30 cm 土层土壤  $NH_4^+-N$ 、 $NO_3^--N$  含量。这与雒文鹤等<sup>[28]</sup>的研究结果一致,这可能是因为适宜的滴灌和施氮有助于氮肥溶解,提高了肥料利用率,增加了土壤肥力;同时土壤中的微生物活性增强,有机物质更容易被微生物分解,从而释放出更多的  $NH_4^+-N$  和  $NO_3^--N$ <sup>[29]</sup>。而过量滴灌和施氮会使土壤孔隙度减小,通气性变差,耕性降低,地面支持能力减弱,抑制土壤呼吸作用和微生物活性,从而减缓了有机氮的矿化速率,导致  $NH_4^+-N$ 、 $NO_3^--N$  含量降低<sup>[30]</sup>。

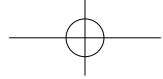
本研究中,土壤 TN、 $NH_4^+-N$ 、 $NO_3^--N$ 、MBN 均随土层深度的增加而降低,这可能是由于外源氮的表层输入导致养分在土壤表层富集,形成了明显的养分梯度<sup>[31]</sup>。此外,各氮组分间均呈极显著 ( $P<0.01$ ) 或显著 ( $P<0.05$ ) 正相关关系(图 5),这表明表层氮含量的提高促进了微生物活性的增强,进一步促进氮组分的累积。

#### 3.2 水氮协同对土壤酶活性的影响

URE 在土壤中起到了分解尿素、供应植物可利用氮源以及调节土壤氮素循环的重要作用<sup>[32]</sup>,URE 受土壤水分、养分及其他因素的多重影响<sup>[33]</sup>。PRO 是土壤中分解有机氮化合物的关键水解酶,对调节土壤中氮素矿化速率和反映土壤环境状况至关重要<sup>[34]</sup>。本研究发现,  $W_1N_3$  处理显著提升 0 ~ 30 cm 土层土壤 URE、PRO 活性。这可能是因为滴灌量对土壤 URE、PRO 具有极显著影响 ( $P<0.01$ ) (表 3),表明适宜的滴灌量有利于提升了土壤的通气性,增加微生物数量,从而提高 URE、PRO 活性<sup>[35]</sup>。相反,过量滴灌导致土壤过湿,降低土壤通气性,限制氧气供应,影响微生物代谢活动,从而抑制 URE、PRO 活性<sup>[36]</sup>;同时过量滴灌还会改变土壤 pH,使其偏向酸性或碱性,由于 URE 和 PRO 对于 pH 敏感,当环境 pH 偏离最适范围时,它们的活性受到影响<sup>[37]</sup>;相关性分析也表明,URE、PRO 与 pH 呈极显著正相关关系 ( $P<0.01$ ) (表 4) 也证实了这一结论。在传统施氮条件下,过量氮肥为土壤 URE、PRO 提供大量的基质,刺激了 URE、PRO 活性<sup>[38]</sup>,同时土壤 URE、PRO 与 TN 之间呈极显著正相关关系 ( $P<0.01$ ),这表明增施氮肥还能促进作物根系生长,增加土壤中微生物数量,进而增强 URE、PRO 活性。

土壤 ALP 是一种具有催化作用的水解酶,其作用直接影响土壤中有有机磷的降解和转化,并对其生物有效性产生直接影响<sup>[39]</sup>。生物呼吸过程和有机物的生物化学氧化反应产生的过氧化氢对生物和土壤均具有一定毒性,而土壤中的 CAT 则能酶促过氧化氢分解为水和氧气,从而减少或解除过氧化氢的毒害作用<sup>[40]</sup>。本研究发现,  $W_1N_2$  处理显著提升 0 ~ 30 cm 土层土壤 ALP、CAT 活性。这与肖新等<sup>[41]</sup>的研究结果相似,这是由于适宜的滴灌和施氮会提高土壤中有有机质的分解速率,促进土壤微生物的活动,在有机物分解过程中,微生物产生的 ALP、CAT 等酶类活性也会随之增强<sup>[42]</sup>。而过量滴灌和施氮会导致土壤中氧气含量降低、氮素竞争加剧、酸碱度和微生物群落发生改变,从而在一定程度上影响土壤 ALP、CAT 活性<sup>[43]</sup>。

本研究中,土壤 URE、PRO、ALP、CAT 均随土层深度的增加而降低,这主要是由于随着土层深度的增加,氮含量和养分供应通常会减少(图 2),



导致微生物数量和酶活性降低。此外，深层土壤温度较低、湿度较高，这会导致有机物分解速度减慢，从而对土壤中的微生物数量和酶活性产生负面影响<sup>[44]</sup>。

### 3.3 水氮协同对青贮玉米产量的影响

青贮玉米生长除受品种、气候条件影响之外，土壤水分和养分含量也是影响青贮玉米生长及产量形成的关键因素<sup>[45]</sup>。本研究中，W<sub>1</sub>N<sub>2</sub>处理下青贮玉米产量最高，而W<sub>2</sub>N<sub>1</sub>处理下青贮玉米产量最低；W<sub>1</sub>N<sub>2</sub>与W<sub>1</sub>N<sub>3</sub>处理间产量差异不显著，且显著高于其他水氮协同处理。这表明适宜的节水、减氮并未降低青贮玉米产量，反而相对于其他水氮协同处理而言，对青贮玉米产量具有一定促进作用。这主要是因为W<sub>1</sub>N<sub>2</sub>处理下青贮玉米土壤氮组分和相关酶活性的提高，不仅改善了土壤的养分环境，还提高了养分利用率<sup>[46]</sup>。这有助于促进植物生长发育、调解植物代谢，进而提升青贮玉米产量。

## 4 结论

通过对河西走廊青贮玉米土壤水氮协同条件下土壤氮组分含量及相关酶活性的特征性分析，结论如下：

(1) W<sub>1</sub>N<sub>2</sub> (节水 10%、减氮 10%) 处理有效提高 0 ~ 30 cm 土层土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量及 ALP、CAT 活性；W<sub>1</sub>N<sub>3</sub> (节水 10%、传统施氮) 处理有效提高 0 ~ 30 cm 土层土壤 TN、MBN 含量及 URE、PRO 活性。

(2) 表层 (0 ~ 10 cm) 土壤氮含量和酶活性最高，随着土层深度的增加，氮含量和酶活性相应下降。

(3) W<sub>1</sub>N<sub>2</sub> 处理下青贮玉米产量最高，但 W<sub>1</sub>N<sub>2</sub> 与 W<sub>1</sub>N<sub>3</sub> 处理间产量无显著差异。

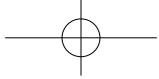
(4) 相关性分析表明，土壤氮组分、酶活性与产量间均存在不同水平的显著正相关关系 ( $P < 0.05$ )。因此，适宜的水氮协同模式 (W<sub>1</sub>N<sub>2</sub>) 可以改善青贮玉米土壤养分状况，促进植物生长发育，进而提高青贮玉米产量。

### 参考文献：

[1] 白岚方. 施氮水平对青贮玉米根系空间微生物组成及氮素利用影响机制的研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021.  
[2] 董姝含, 贺章咪, 王婉琦, 等. 土壤有机氮组分的年际变

化及其对秸秆还田的响应 [J]. 应用生态学报, 2022, 33 (11): 2963-2970.

[3] 李越, 王颖, 熊子怡, 等. 有机肥配施生物质炭对根际/非根际土壤氮赋存形态的影响 [J]. 土壤学报, 2023, 61(2): 1-12.  
[4] 米智勇. 不同放牧强度和管理方式下短花针茅荒漠草原土壤的氮矿化作用 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.  
[5] 朱海云, 柯杨, 李勃, 等. 种植年限对猕猴桃园土壤养分、酶活性的影响 [J]. 中国农学通报, 2018, 34 (22): 97-102.  
[6] Farrer E C, Suding K N. Teasing apart plant community responses to N enrichment: the roles of resource limitation, competition and soil microbes [J]. Ecology Letters, 2016, 19 (10): 1287-1296.  
[7] 吴汉卿, 杜世宇, 王丹阳, 等. 设施土壤有机氮组分及番茄产量对水氮调控的响应 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (5): 805-813.  
[8] Sardans J, Peñuelas J. Drought decreases soil enzyme activity in a Mediterranean *Quercus ilex* L. forest [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 37 (3): 455-461.  
[9] 李佳帅, 杨再强, 王明田, 等. 水氮耦合对苗期葡萄叶片氮素代谢酶活性的影响 [J]. 中国农业气象, 2019, 40 (6): 368-379.  
[10] 曹飞. 不同水肥管理下华北露地菜田氮淋溶特征及阻控措施研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2019.  
[11] 毛兵, 曾悦, 赖彩婷, 等. 减氮施肥对甘蔗生物量及土壤硝态氮、铵态氮的影响 [J]. 生态学杂志, 2023, 42 (11): 2604-2612.  
[12] 白岚方, 张向前, 张德健, 等. 不同施氮水平下青贮玉米农田土壤酶活性时空分布特征 [J]. 土壤通报, 2022, 53(5): 1088-1097.  
[13] 张雪婷, 杨文雄, 柳娜, 等. 甘肃西部抗旱型玉米品种的综合评价及筛选 [J]. 核农学报, 2018, 32 (7): 1281-1290.  
[14] 游永亮, 李源, 赵海明, 等. 播期和种植密度对青贮玉米生产性能和饲用品质的影响 [J]. 草地学报, 2021, 29 (11): 2615-2624.  
[15] 闫丽娟, 谈燕, 马维伟, 等. 节水减氮对甘肃河西灌区青贮玉米生长及水氮利用效率的影响 [J]. 草地学报, 2023, 31 (8): 2545-2553.  
[16] 雷晨雨, 冯德枫, 王猛, 等. 滇中地区典型人工林土壤活性碳组分特征 [J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27 (6): 1563-1569.  
[17] 张喜军, 魏廷邦, 樊志龙, 等. 绿洲灌区水氮减施密植玉米的光合源动态和产量表现 [J]. 核农学报, 2020, 34 (6): 1302-1310.  
[18] 赵建华, 樊廷录, 王淑英, 等. 施氮与灌水对河西制种玉米产量及水氮利用效率的影响 [J]. 核农学报, 2016, 30(5): 997-1004.  
[19] 乔文静, 戴银月, 张伟, 等. 黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系 [J]. 环境科

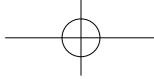


- 学, 2018, 39 (12): 5687-5698.
- [20] 蒋宇新, 郑旭荣, 王振华. 滴灌时长对伊犁河流域土壤理化性质及作物产量的影响 [J]. 干旱区研究, 2020, 37 (3): 645-651.
- [21] Achat L D, Pousse N, Nicolas M, et al. Nutrient remobilization in tree foliage as affected by soil nutrients and leaf life span [J]. *Ecological Monographs*, 2018, 88 (3): 408-428.
- [22] 刘振香, 刘鹏, 贾绪存, 等. 不同水肥处理对夏玉米田土壤微生物特性的影响 [J]. 应用生态学报, 2015, 26 (1): 113-121.
- [23] 何海锋, 吴娜, 刘吉利, 等. 不同施肥处理对柳枝稷土壤理化性质及细菌多样性的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2022 (3): 164-172.
- [24] 杨雪艳, 蒋代华, 杨钙仁, 等. 甘蔗水肥一体化种植对土壤微生物量碳氮和酶活性的影响 [J]. 土壤通报, 2018, 49 (4): 889-896.
- [25] 李明, 徐涛, 俞湾青, 等. 不同灌溉模式和施肥处理对受涝稻田土壤酶活性的影响 [J]. 节水灌溉, 2022 (9): 24-29.
- [26] 蔡雅梅, 冯民权. 汾河河岸带土壤氮、磷的时空分布规律及其影响因素研究 [J]. 水土保持学报, 2021, 35 (4): 222-229, 236.
- [27] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 等. 三峡库区不同林龄马尾松土壤养分与酶活性的关系 [J]. 应用生态学报, 2012, 23 (2): 445-451.
- [28] 雒文鹤, 师祖姣, 王旭敏, 等. 节水减氮对土壤硝态氮分布和冬小麦水氮利用效率的影响 [J]. 作物学报, 2020, 46 (6): 924-936.
- [29] 刘朋召, 王旭敏, 宁芳, 等. 减量施氮对渭北旱地春玉米产量、氮素利用及土壤硝态氮含量的影响 [J]. 应用生态学报, 2020, 31 (8): 2621-2629.
- [30] 刘腾. 涌泉根灌条件下陕北山地苹果树水氮耦合效应研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- [31] 蒋宇新, 郑旭荣, 王振华. 滴灌时长对伊犁河流域土壤理化性质及作物产量的影响 [J]. 干旱区研究, 2020, 37 (3): 645-651.
- [32] 赵孝丹, 赵建宁, 红雨, 等. 转抗旱基因棉对土壤酶活性及速效养分含量的影响 [J]. 中国农学通报, 2016, 32 (12): 77-83.
- [33] 谭施北, 习金根, 郑金龙, 等. 剑麻麻茎还田及配施不同水平氮肥对土壤肥力和剑麻生长的影响 [J]. 热带作物学报, 2019, 40 (5): 839-849.
- [34] 运翠霞, 严昌荣, 徐明泽, 等. 不同消毒方式对土壤酶活性及土传病原真菌消减的影响 [J]. 中国农业大学学报, 2020, 25 (12): 86-96.
- [35] 朱同彬, 诸葛玉平, 刘少军, 等. 不同水肥条件对土壤酶活性的影响 [J]. 山东农业科学, 2008 (3): 74-78.
- [36] 徐欣, 郑利远, 周珂, 等. 长期施肥对不同有机质水平黑土蛋白酶活性及氮素的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2019 (1): 44-48.
- [37] 李爽, 张玉龙, 范庆锋, 等. 不同灌溉方式对保护地土壤酸化特征的影响 [J]. 土壤学报, 2012, 49 (5): 909-915.
- [38] 汪梦寒, 董利利, 李富翠, 等. 不同有机/无机氮添加对草原土壤氮素分配和转化特征的影响 [J]. 草业学报, 2022, 31 (1): 36-46.
- [39] 李佳川, 杨瑞平, 张显. 灌水高温闷棚处理对温室连作土壤修复效果的影响 [J]. 北方园艺, 2016 (15): 172-175.
- [40] 韩召强, 陈效民, 曲成闯, 等. 生物炭对黄瓜连作土壤理化性状、酶活性及土壤质量的持续效应 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (5): 1227-1236.
- [41] 肖新, 朱伟, 肖靛, 等. 适宜的水氮处理提高稻基农田土壤酶活性和土壤微生物量碳氮 [J]. 农业工程学报, 2013, 29 (21): 91-98.
- [42] 张俊丽, 高明博, 温晓霞, 等. 不同施氮措施对旱作玉米地土壤酶活性及 CO<sub>2</sub> 排放量的影响 [J]. 生态学报, 2012, 32 (19): 6147-6154.
- [43] Wang J, Wang J, Rhodes G, et al. Adaptive responses of comammox *Nitrospira* and canonical ammonia oxidizers to long-term fertilizations: implications for the relative contributions of different ammonia oxidizers to soil nitrogen cycling [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 668: 224-233.
- [44] 张彦军, 郭胜利. 环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响 [J]. 环境科学, 2019, 40 (3): 1446-1456.
- [45] 受娜, 高玮, 沈禹颖, 等. 不同施氮量对青贮玉米产量及水分利用效率的影响 [J]. 草业科学, 2021, 38 (7): 1351-1361.
- [46] 姜丽伟, 谢英荷, 李廷亮, 等. 不同有机替代对黄土旱塬土壤碳、氮组分及冬小麦产量的影响 [J]. 水土保持学报, 2022, 36 (3): 286-293.

**Effects of water and nitrogen synergies on soil nitrogen content and enzyme activity of maize silage in Hexi Corridor**

ZHANG Jian-xi<sup>1</sup>, LI Guang<sup>1\*</sup>, WANG Yu-ying<sup>1</sup>, YUAN Jian-yu<sup>1</sup>, XU Guo-rong<sup>1</sup>, ZHANG Wu-qing<sup>2</sup> (1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu 730070; 2. School of Architecture and Engineering, Gansu Forestry Vocational and Technical College, Tianshui Gansu 741020)

**Abstract:** The effects of water and nitrogen synergy on soil nitrogen component content and related enzyme activities of silage maize in Hexi Corridor were investigated, and the relationship between soil nitrogen component content and related enzyme activities was studied. In 2022 and 2023, two kinds of drip irrigation (5535, 6150 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>), recording as W<sub>1</sub> and W<sub>2</sub>, and three nitrogen application levels (249, 280, 311 kg/hm<sup>2</sup>), recording as N<sub>1</sub>, N<sub>2</sub> and N<sub>3</sub>, were conducted, with silage maize as the research object. The variation characteristics of total nitrogen (TN), ammonium nitrogen (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N), nitrate nitrogen (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N) and microbial biomass nitrogen (MBN) under different water and nitrogen synergistic treatments were



analyzed, as well as the correlation with urease( URE ), protease( PRO ), alkaline phosphatase( ALP )and catalase( CAT ) activities. The results showed that: ( 1 ) The content of nitrogen components and related enzyme activities decreased with the increase of soil depth. ( 2 ) Compared with traditional drip irrigation, water-saving drip irrigation significantly increased the contents of TN,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ , MBN and the activities of URE, PRO, ALP and CAT in silage maize soil. With the increase of nitrogen application rate, the contents of TN and MBN in soil increased, the activities of URE and PRO also increased, while the contents of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  and the activities of ALP and CAT increased first and then decreased. ( 3 ) In 2022 and 2023, except for  $\text{W}_1\text{N}_3$  treatment, the yield of silage maize under  $\text{W}_1\text{N}_2$  treatment was significantly ( $P < 0.05$ ) higher than that of other treatments by 5.76%–24.78% and 9.26%–37.35%, respectively, but the yield difference between  $\text{W}_1\text{N}_2$  and  $\text{W}_1\text{N}_3$  treatments was not significant. ( 4 ) TN was extremely significantly ( $P < 0.01$ ) or significantly ( $P < 0.05$ ) positively correlated with URE, PRO and CAT.  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  were extremely significantly positively correlated with URE, PRO and CAT ( $P < 0.01$ ), and significantly positively correlated with ALP ( $P < 0.05$ ). MBN was significantly positively correlated with URE ( $P < 0.05$ ). There were extremely significant ( $P < 0.01$ ) or significant ( $P < 0.05$ ) positive correlations between soil nitrogen fractions, enzyme activities and yield. In summary, the drip irrigation and nitrogen application rates of  $5535 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  and  $280 \text{ kg}/\text{hm}^2$  were the ideal water and nitrogen synergistic mode, which could significantly improve the soil nitrogen content and related enzyme activities of silage maize in Hexi Corridor.

**Key words:** drip irrigation amount; nitrogen application rate; nitrogen component; enzyme activity; silage maize