

龚镇洪, 余彬彬, 黄盼盼, 等. 罗红霉素对小麦硝态氮和铵态氮吸收动力学的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(4): 882-888.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.04.003

罗红霉素对小麦硝态氮和铵态氮吸收动力学的影响

龚镇洪¹, 余彬彬^{1, 2, 3}, 黄盼盼⁴, 汪晓丽¹, 钱晓晴¹

(1.扬州大学农业农村部耕地质量监测与评价重点实验室, 江苏 扬州 225127; 2.南开大学环境污染过程与基准教育部重点实验室, 天津 300071; 3.农业部产地环境污染防治重点实验室/天津市农业环境与农产品安全重点实验室, 天津 300071; 4.山东省东营市生态环境局, 山东 东营 257100)

摘要: 为明确在抗生素胁迫下小麦对不同形态无机氮的吸收特性, 通过水培的方式, 以硝态氮(NO_3^- -N)、铵态氮(NH_4^+ -N)分别作为单一氮源, 设置7个浓度水平的 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N和5个质量浓度水平的罗红霉素(Roxithromycin, ROX)组合, 以不含ROX处理为对照(CK), 探究在ROX胁迫下小麦根系对 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N的吸收动力学特征的变化。结果表明: (1)在不同质量浓度ROX胁迫下, 小麦对 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N的最大吸收速率随氮浓度的增高而增加, 吸收特征符合Michaelis-Menten动力学模型; 与CK相比, 不同质量浓度ROX胁迫对2种形态无机氮的最大吸收速率均表现为促进作用; (2)随着ROX胁迫质量浓度的增加, 小麦对 NO_3^- -N的最大吸收速率(V_{\max})持续增加, K_m 值持续降低, 吸收能力(α)持续增加; 对 NH_4^+ -N的 V_{\max} 、 K_m 值均持续增加, α 值先增后降; (3)在10.0 mg/L ROX胁迫下, 小麦对 NO_3^- -N的吸收能力高于对 NH_4^+ -N的吸收能力, 而在0.1 mg/L、0.5 mg/L和1.0 mg/L ROX胁迫下, 小麦对 NH_4^+ -N的吸收能力超过对 NO_3^- -N的吸收能力。

关键词: 罗红霉素; 小麦; 硝态氮; 铵态氮; 吸收动力学

中图分类号: X592 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2022)04-0882-07

Effects of roxithromycin on the absorption kinetics of nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in wheat

GONG Zhen-hong¹, YU Bin-bin^{1, 2, 3}, HUANG Pan-pan⁴, WANG Xiao-li¹, QIAN Xiao-qing¹

(1. Key Laboratory of Arable Land Quality Monitoring and Evaluation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2. Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria, Nankai University, Tianjin 300071, China; 3. Key Laboratory of Original Agro-Environmental Pollution Prevention and Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Tianjin Key Laboratory of Agro-environment and Safe-product, Tianjin 300071, China; 4. Dongying City Ecological Environment Bureau, Shandong, Dongying 257100, China)

Abstract: To clarify the absorption characteristics of different forms of inorganic nitrogen under antibiotic stress, hydroponics was used to cultivate wheats. Nitrate nitrogen (NO_3^- -N) and ammonium nitrogen (NH_4^+ -N) were used as single nitrogen

sources, respectively. Seven concentration levels of NO_3^- -N, NH_4^+ -N and five concentration levels of roxithromycin (ROX) were established, and the treatment without ROX was used as control (CK). The absorption kinetics characteristics of NO_3^- -N and NH_4^+ -N in wheat roots were explored under ROX stress. The results revealed that the maximum absorption rate of NO_3^- -N and NH_4^+ -N in wheat increased with the increase of nitrogen concentration under different mass concentrations of ROX, and the absorption characteristics conformed to Michaelis-Menten equation. Compared with CK, different

收稿日期: 2021-10-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(31500425); 江苏省自然科学基金青年科技人才项目(BK20150452); 农业部产地环境污染防治重点实验室/天津市农业环境与农产品安全重点实验室开放基金课题(16nybedhj-4); 环境污染过程与基准教育部重点实验室(南开大学)开放基金课题(KL-PPEC-2016-3)

作者简介: 龚镇洪(1998-), 男, 江苏常熟人, 硕士研究生, 主要从事植物生态毒理学研究。(E-mail) 1441905782@qq.com

通讯作者: 余彬彬, (E-mail) bbyu@yzu.edu.cn

concentrations of ROX had a promoting effect on the maximum absorption rate of the two forms of inorganic nitrogen. With the increase of ROX concentration, the maximum adsorption rate (V_{\max}) and absorptive capacity (α) of wheat to NO_3^- -N increased continuously, and the K_m value decreased continuously. In addition, the V_{\max} and K_m values of wheat to NH_4^+ -N increased continuously, and the α value increased firstly and then decreased. Under the stress of 10.0 mg/L ROX, the absorption capacity of wheat to NO_3^- -N was higher than that to NH_4^+ -N. On the contrary, under the stress of 0.1 mg/L ROX, 0.5 mg/L ROX and 1.0 mg/L ROX, the absorption capacity of wheat to NH_4^+ -N was higher than that to NO_3^- -N.

Key words: roxithromycin; wheat; nitrate nitrogen; ammonium nitrogen; absorption kinetics

近年来,畜牧业经营越来越集约化,兽用抗生素被大量用于预防或治疗动物疾病,其中约有 60%~90%的抗生素及其代谢产物由于无法被动物完全吸收,通过排泄的形式排出,畜禽粪便又作为有机肥施入土壤,从而导致土壤中抗生素的高残留^[1]。抗生素在世界各国的使用量急剧上升,2030 年预计将达到 2.0×10^5 t^[2],中国、俄罗斯、南非、巴西、和印度的抗生素使用量估计将增加 99%,几乎是这些国家预计人口增长的 7 倍^[3]。世界范围内,不同土壤环境中被广泛检出喹诺酮类^[4]、四环素类^[5]、磺胺类^[1]和大环内酯类^[6]等抗生素,抗生素进入土壤环境后,植物的吸收作用是抗生素重要的迁移转化步骤。即使暴露在低剂量的受污染的土壤中,植物也会积累抗生素,最后通过食物链的方式影响人类健康^[7]。大环内酯类抗生素是仅次于 β -内酰胺类抗生素的第二大常用抗生素。2013 年,中国大环内酯类抗生素使用量为 4.22×10^4 t,占抗生素总消费量的 26%^[8]。罗红霉素作为一种典型的大环内脂类抗生素被添加到畜禽饲料中作为畜禽的促生长剂,有研究者对珠江口水产养殖区的水和沉积物中抗生素残留进行检测,发现脱水红霉素质量浓度范围为 0.97~85.25 ng/g^[9],另外有研究者发现鸡粪、牛粪中罗红霉素质量分数范围分别为 1.21~1.77 mg/kg 和 1.23~1.52 mg/kg^[10]。

小麦是中国第二大农作物,影响农作物产量和品质的一个重要因素就是作物本身对氮素的吸收利用^[11]。氮素中 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N是作物吸收氮素的主要形式^[12]。目前已有多项研究通过 Michaelis-Menten 酶动力学模型(米氏方程)来表示稳态时植物根系养分吸收特征^[13-14],发现不同的培养环境^[15]、不同小麦品种^[16]、不同小麦根系形态^[17]均会对其根系养分吸收造成影响。然而,抗生素胁迫对小麦根系氮吸收动力学影响的研究较少。因此,探究在不同浓度抗生素胁迫下小麦对营养盐的吸收动力学特征,对明确小麦

最适营养盐的生态幅度具有重要的科学意义。

本研究根据养分吸收动力学原理,以抗生素罗红霉素为胁迫压力物质,研究小麦对 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N的吸收特性,探讨罗红霉素胁迫对小麦根系 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N吸收动力的影响,为研究抗生素胁迫对小麦生长发育的影响提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试验方法

供试小麦(*Triticum aestivum* L.)品种为徐麦 33,由江苏省连云港市种子站提供。罗红霉素(Roxithromycin, ROX)购于上海生工生物工程公司,纯度 98%。小麦种子用 3%的双氧水浸泡,消毒 20 min,经去离子水反复冲洗后,将种子放在铝盘中,盖上去离子水润湿的滤纸,放入培养箱中催芽,培养箱温度设置为 (25 ± 1) °C。

待种子完全露白后,移入 ROX 质量浓度为 0 mg/L、0.1 mg/L、0.5 mg/L、1.0 mg/L、10.0 mg/L 5 个水平的 1/4 霍格兰氏营养液中培养,待培养到两叶一心后,用含相同 ROX 质量浓度的 1/2 霍格兰氏营养液培养。全霍格兰氏营养液配方为:Ca(NO_3)₂ 4.0 mmol/L, KNO₃ 5.0 mmol/L, NH₄NO₃ 1.0 mmol/L, KH₂PO₄ 1.0 mmol/L, MgSO₄ 2.0 mmol/L, Fe-EDTA 0.5 mmol/L, KI 2.5×10^{-5} mmol/L, HBO₃ 5×10^{-4} mmol/L, MnSO₄ 7.4×10^{-4} mmol/L, ZnSO₄ 5×10^{-5} mmol/L, Na₂MoO₄ 1×10^{-6} mmol/L, CuSO₄ 1.6×10^{-7} mmol/L, CoCl₂ 1×10^{-7} mmol/L, pH 为 5.5。每 3 d 更换一次营养液,并且每小时间歇通气 20 min。

吸收试验采用质量浓度梯度法^[18]:小麦苗长到 3 叶 1 心时,将培养液换为含 5 个质量浓度水平 ROX (0 mg/L、0.1 mg/L、0.5 mg/L、1.0 mg/L 和 10.0 mg/L) 的无氮营养液,将不含 ROX 的无氮营养液作为对照,在其中耗竭 2 d,使植株处于氮素养分饥饿状态,支持电解质为 0.2 mmol/L CaSO₄。

1.2 ROX 胁迫下 NO_3^- -N 吸收动力学试验

NO_3^- -N 吸收动力学试验以霍格兰营养液为基础,采用 KNO_3 浓度梯度法配制,其中 NO_3^- -N 浓度分别设为 0.05 mmol/L、0.10 mmol/L、0.20 mmol/L、0.40 mmol/L、0.60 mmol/L、1.00 mmol/L 和 2.00 mmol/L 7 个水平,支持电解质为 0.20 mmol/L 的 CaSO_4 。取 3 株经过氮饥饿处理的小麦苗作为一组,冲洗干净后用滤纸吸干,将其根系全部浸入 40 ml 上述系列浓度溶液中吸收 2 h,此过程放入光照度为 6 000 lx、温度为 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的光照培养箱中。待吸收完毕后,将小麦根系剪下用滤纸吸干水分后测其鲜质量。吸收前、后溶液中 NO_3^- -N 的浓度利用紫外分光光度计测定,根据变化量计算出单位鲜根系在单位时间内的 NO_3^- -N 净吸收量,即根系对 NO_3^- -N 的净吸收速率^[19]。重复 3 次试验。

1.3 ROX 胁迫下 NH_4^+ -N 吸收动力学试验

根系对 NH_4^+ -N 的净吸收速率测定同方法 1.2,采用 NH_4Cl 浓度梯度法和 0.2 mmol/L CaSO_4 配制。同时加入 7.0 $\mu\text{mol/L}$ 双氰胺(DCD)作为硝化抑制剂防止 NH_4^+ 转化为 NO_3^- 。溶液中 NH_4^+ -N 浓度测定采用靛酚蓝比色法^[20]。

1.4 数据分析

养分吸收速率 $v = (C_0 - C_t) \times V / (m \times t)$, 式中 C_0 、 C_t 分别表示吸收前、后营养液中 NO_3^- -N 或 NH_4^+ -N 的离子浓度, V 表示营养液的体积, m 为根系鲜质量, t 为吸收时间。吸收动力学数据按照 Michaelis-Menten 方程的 LB 转换式进行处理^[15]。

采用 SPSS 软件进行数据分析, Duncan 法进行多重比较, Origin 软件进行作图。图、表中所有数据均为平均值 \pm 标准差, 显著水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 ROX 胁迫对小麦苗吸收 NO_3^- -N 的影响

由图 1 可知, 所有处理组中小麦对 NO_3^- -N 的吸收速率均随营养液 NO_3^- -N 浓度的增高而增加, NO_3^- -N 吸收曲线特征符合 Michaelis-Menten 酶动力学模型的描述。在 0.1~10.0 mg/L ROX 胁迫下, 小麦对 NO_3^- -N 的吸收速率明显高于 CK (104.56% ~ 1 116.71%)。在 NO_3^- -N 浓度为 0.05~0.40 mmol/L 时, 0.1 mg/L 和 0.5 mg/L ROX 胁迫处理间的吸收速率没有明显差异, 而在 NO_3^- -N 浓度为 0.4~2.0

mmol/L 时, 与 0.5 mg/L ROX 胁迫处理相比, 0.1 mg/L ROX 胁迫处理的吸收速率则明显增加 (11.40%~33.55%), 1.0 mg/L 和 10.0 mg/L ROX 胁迫处理的吸收速率明显高于其他处理 (128.23%~416.44%)。10.0 mg/L ROX 胁迫处理的小麦对 NO_3^- -N 的吸收速率增加最明显, 且幅度随着 NO_3^- -N 浓度的增高而增大 (140.79%~1 116.71%)。说明 ROX 胁迫能够提高小麦对 NO_3^- -N 的吸收速率, 且随着 ROX 浓度的增高而增加, 其中高浓度 ROX (10.0 mg/L) 胁迫下吸收效率提高更明显。

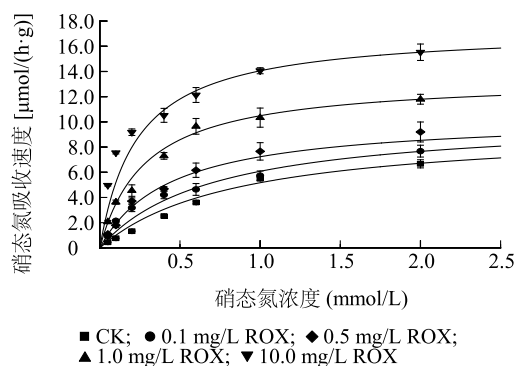


图 1 不同罗红霉素(ROX)质量浓度下小麦根系的硝态氮吸收动力学曲线(平均值 \pm 标准差)

Fig.1 Absorption kinetics of nitrate nitrogen in wheat roots under different concentrations of roxithromycin (ROX)

2.2 ROX 胁迫对小麦苗吸收 NH_4^+ -N 的影响

由图 2 可知, 所有处理组中小麦对 NH_4^+ -N 的吸收速率均随营养液 NH_4^+ -N 浓度的增高而增加, 吸收曲线大致符合 Michaelis-Menten 方程。与 CK 相比, 在 NH_4^+ -N 浓度为 0.05 mmol/L 的营养液中, 在 0.1 mg/L、0.5 mg/L 和 1.0 mg/L ROX 胁迫下, 小麦对 NH_4^+ -N 的吸收速率无明显差异, 10.0 mg/L ROX 胁迫下小麦的吸收速率则表现为明显降低 (30.51%)。随着营养液 NH_4^+ -N 浓度的进一步增高, 在 0.1~2.0 mmol/L 时, 0.1 mg/L、0.5 mg/L 和 1.0 mg/L ROX 胁迫处理的吸收速率呈上升的趋势且明显高于 CK (26.11%~77.45%), 其中在 NH_4^+ -N 浓度为 0.05~0.40 mmol/L 时, 1.0 mg/L ROX 胁迫处理的吸收速率最大。在 NH_4^+ -N 浓度为 0.1 mmol/L 的营养液中, 与 CK 相比, 10.0 mg/L ROX 胁迫下小麦的吸收速率则表现为无明显差异。随着 NH_4^+ -N 浓度的增高, 在 0.2~2.0 mmol/L 时其吸收速率明显高于 CK (22.74%~122.01%), 另外在

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为 0.6~2.0 mmol/L 时,与其他处理相比,10.0 mg/L ROX 胁迫处理的吸收速率最大。说明 ROX 胁迫能够提高小麦对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收速率,在营养液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为 0.05~0.40 mmol/L 时,中质量浓度 ROX (1.0 mg/L) 胁迫处理对提高小麦吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的效果明显,而在营养液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为 0.6~2.0 mmol/L 时,高质量浓度 ROX (10.0 mg/L) 胁迫处理的提高效果明显。

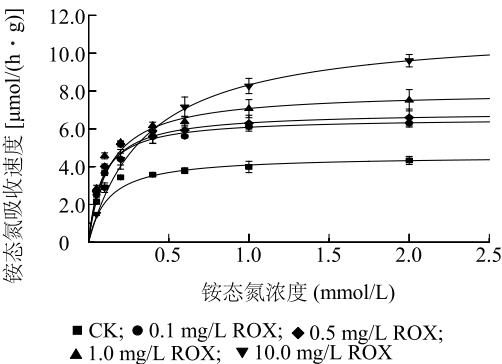


图2 不同罗红霉素 (ROX) 质量浓度下小麦根系对铵态氮的吸收动力学曲线 (平均值±标准差)

Fig.2 Absorption kinetics of ammonium nitrogen in wheat roots under different concentrations of ROX

表1 不同罗红霉素 (ROX) 质量浓度下小麦吸收 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的动力学参数 (平均值±标准差)

ROX 质量浓度 (mg/L)	最大吸收速率 (V_{\max}) [$\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$]	K_m 值 (mmol/L)	吸收能力 (α)	拟合优度 (R^2)
CK	8.06±0.49c	0.89±0.08a	9.16±0.22d	0.99
0.1	9.46±0.88bc	0.44±0.05b	21.45±0.63c	0.96
0.5	10.98±1.68bc	0.48±0.10b	23.70±1.09c	0.95
1.0	12.14±1.14ab	0.25±0.03c	49.46±2.74b	0.95
10.0	14.36±0.45a	0.10±0.004c	151.34±2.19a	0.97

同列不同字母表示在 0.05 水平差异显著。

从表 2 中可以看出,与 CK 相比,在 0.1~1.0 mg/L ROX 胁迫下,小麦根系吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的 K_m 值和 α 值无显著差异,而 V_{\max} 显著提高。在 10.0 mg/L ROX 胁迫下,小麦吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的 K_m 值和 V_{\max} 显著提高,而 α 值显著降低,说明 ROX 胁迫提高了小麦吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的最大速率,但是对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的亲合力以及吸收能力无提高作用。不同质量浓度 ROX 胁迫处理间相比,0.1 mg/L、0.5 mg/L、1.0 mg/L ROX 胁迫处理下小麦吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的 V_{\max} 、 K_m 值和 α 值均无显著差异,而 10.0 mg/L ROX 胁迫处理的小麦吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的 V_{\max} 和 K_m 值显著提高, α 值显著降低,

2.3 ROX 胁迫对小麦吸收 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 动力学参数的影响

从表 1 中可以看出,与 CK 相比,在 ROX 胁迫下,小麦根系吸收 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的 V_{\max} 和 α 值均显著提高,而 K_m 值均显著降低,说明不同质量浓度 ROX 胁迫均提高了小麦根系吸收 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的最大速率,同时也提高了小麦根系对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的亲合力以及吸收能力。0.1 mg/L和 0.5 mg/L ROX 胁迫下,小麦吸收 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的 V_{\max} 、 K_m 值和 α 值均无显著变化。与 0.1 mg/L 和 0.5 mg/L ROX 胁迫处理相比,在 1.0 mg/L ROX 胁迫下,小麦吸收 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的 α 值显著提高,而 K_m 值显著降低。与 1.0 mg/L ROX 胁迫处理相比,在 10.0 mg/L ROX 胁迫下,小麦吸收 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的 α 值显著提高,而 V_{\max} 和 K_m 值无显著差异。说明 0.1 mg/L ROX 胁迫处理与 0.5 mg/L ROX 胁迫处理的小麦吸收 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 最大速率、对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的亲合力以及吸收能力无明显差异。随着 ROX 质量浓度的增高,1.0 mg/L 和 10.0 mg/L ROX 胁迫处理显著提高小麦吸收 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的最大速率、吸收能力,以及对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的亲合力。

说明不同质量浓度 ROX 胁迫对小麦吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 动力学特征影响不同。差异主要体现在 10.0 mg/L ROX 胁迫下小麦吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的能力显著降低,这可能与高质量浓度 ROX (10.0 mg/L) 胁迫显著降低了小麦对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的亲合力有关。

综合比较表 1、表 2 可以看出,在单一氮源的情况下,10.0 mg/L ROX 胁迫处理小麦根系吸收 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的 V_{\max} 显著高于其他处理,说明该处理下小麦对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均有较强的喜好性。小麦对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的 V_{\max} 大于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的 V_{\max} , K_m 值则相反,说明高质量浓度 ROX (10.0 mg/L) 胁迫下小麦

对 NO_3^- -N 的亲性和吸收潜力均高于 NH_4^+ -N。在 0.1~1.0 mg/L ROX 胁迫下,小麦对 NO_3^- -N 的 V_{\max} 和 K_m 值均高于 NH_4^+ -N,说明中低质量浓度 ROX (0.1 mg/L、0.5 mg/L、1.0 mg/L) 胁迫下小麦对 NO_3^- -N 的吸收潜力高于 NH_4^+ -N,但小麦对 NO_3^- -N 的亲性和低于 NH_4^+ -N。

表 2 不同 ROX 质量浓度下小麦吸收 NH_4^+ -N 的动力学参数 (平均值±标准误差)

Table 2 Kinetic parameters of NH_4^+ -N uptake by wheat under different concentrations of ROX

ROX 浓度 (mg/L)	最大吸收速率 (V_{\max}) [$\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$]	K_m 值 (mmol/L)	吸收能力 (α)	拟合优度 (R^2)
CK	4.19±0.17c	0.05±0.005b	89.59±5.83a	0.94
0.1	6.45±0.22b	0.08±0.01b	82.42±7.11a	0.92
0.5	6.80±0.42b	0.08±0.003b	90.36±3.14a	0.93
1.0	7.59±0.60b	0.08±0.01b	96.98±11.42a	0.92
10.0	10.71±1.73a	0.27±0.05a	45.32±9.31b	0.97

3 讨论

3.1 ROX 胁迫对小麦根系 NO_3^- -N 吸收的影响

一般认为养分浓度是影响植物根系养分吸收的一个重要因素。汪晓丽等^[19]研究发现小麦根系 NO_3^- -N 吸收速率随介质 NO_3^- -N 浓度的增高而增加。李诗奇等^[21]也发现大叶藻对氮、磷的吸收速率随营养盐浓度的增高而增加。本研究所有处理的小麦对 NO_3^- -N 的吸收速率均随营养液中 NO_3^- -N 浓度的增高而增加。另一方面环境条件、营养元素和信号物质等因素^[22]也会影响植物吸收 NO_3^- -N。丁效东等^[23]发现高盐胁迫下大麦根系的 NO_3^- -N 高亲和力系统受到了激活,从而促进了对 NO_3^- -N 的吸收。本研究中在相同氮水平下,不同质量浓度 ROX 胁迫下小麦吸收 NO_3^- -N 的速率均高于 CK,说明 ROX 胁迫能够促进小麦根系吸收 NO_3^- -N,这可能与 ROX 胁迫激活了小麦根系的 NO_3^- -N 亲和力系统有关。相比于其他处理,10.0 mg/L ROX 胁迫处理的小麦根系吸收 NO_3^- -N 的速率明显提高,表明在 NO_3^- -N 作为单一氮源的情况下,高质量浓度 ROX (10.0 mg/L) 胁迫对于提高小麦根系吸收 NO_3^- -N 的效果最明显,与张天莹^[24]在磺胺二甲基嘧啶和环丙沙星对小麦幼苗生态毒性效应试验中的研究结果相似。

3.2 ROX 胁迫对小麦根系 NH_4^+ -N 吸收的影响

应蓉蓉等研究发现植物对 NH_4^+ -N 的吸收达到其吸收阈值后吸收将趋于饱和^[25]。本研究中,在 0.1~1.0 mg/L ROX 胁迫下小麦吸收 NH_4^+ -N 的速率随着 NH_4^+ -N 浓度的增高先持续增加,在 NH_4^+ -N 浓

度达到 1.0~2.0 mmol/L 时吸收速率趋于饱和,与张超一等^[26]的试验结果相类似。研究发现当以 NH_4^+ -N 作为唯一的氮源培养时,对大部分植物有致毒作用,一般出现在外部 NH_4^+ 浓度高于 0.1~0.5 mmol/L 时^[27]。然而,也有研究者发现通过缓冲根系外部的 pH 能够减轻 NH_4^+ 的毒性,抵消与 NH_4^+ 吸收相关的根际酸化^[28]。另一方面植物受到外界不利影响时会通过提高对营养物质的吸收来改善营养状况^[2]。因而本研究中不同质量浓度 ROX 胁迫下 NH_4^+ -N 吸收速率高于 CK,可能与 ROX 水解后改变了根系外部的 pH,抵御了 NH_4^+ 的毒性有关。在 NH_4^+ -N 浓度为 0.05~0.40 mmol/L 时,1.0 mg/L ROX 胁迫下的吸收速率最大,当浓度达到 0.60~2.00 mmol/L 时,10.0 mg/L ROX 胁迫下的吸收速率最大且仍有增长趋势。由此推测当小麦根系受到中高质量浓度 ROX (1.0 mg/L、10.0 mg/L) 的不利影响时,小麦可能通过增加根系对 NH_4^+ -N 的吸收速率来改善营养状况。表明在 NH_4^+ -N 作为单一氮源的情况下,ROX 胁迫能够促进小麦吸收 NH_4^+ -N,而中高质量浓度 ROX (1.0 mg/L、10.0 mg/L) 胁迫下的促进效果更明显。

3.3 ROX 胁迫对小麦吸收 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 动力学特征的影响

V_{\max} 表示最大吸收速率,反映植物根系吸收某种离子的最大运转潜力^[29], V_{\max} 越大,离子吸收进入根系的速度越快。 K_m 值为米氏常数,主要体现离子与离子载体吸附位点之间的亲和性, K_m 值越大,亲和性越小。 $\alpha = V_{\max}/K_m$,表示小麦吸收 NO_3^- -N 和

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的能力^[30]。

小麦吸收 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的试验结果表明,与CK相比,0.1~10.0 mg/L ROX胁迫能够提高小麦对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的最大吸收速率和亲和力,且不同质量浓度ROX胁迫的影响幅度不同。 V_{\max} 和 α 值随ROX质量浓度的增高而增加,而 K_m 值随ROX质量浓度的增高而降低。10.0 mg/L ROX胁迫下,小麦吸收 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的 V_{\max} 最大,而 K_m 值最小, α 值显著高于其他处理,说明高质量浓度ROX(10.0 mg/L)胁迫下小麦对外界的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 有较强的喜好性和竞争能力,这可能与ROX胁迫增强了 NO_3^- 载体蛋白合成基因的表达,进而增加了细胞膜上载体蛋白的总量有关^[31]。也可能是植物为了最大限度地减少外界胁迫的影响,因而激活了特定的基因或途径来增加对氮素的吸收^[32]。另一方面,有研究者发现各种酶的微观调控也能够影响植物对 NO_3^- 、 NH_4^+ 的亲亲和性和转运速度^[33],因此也可能是在ROX胁迫下小麦通过相关酶调控继而提高了离子载体的运转速度以及离子载体吸附位点的亲和力。

小麦吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的试验结果表明,与CK相比,不同质量浓度ROX胁迫下小麦吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的 V_{\max} 均显著增加, K_m 值由无显著差异变为显著降低, α 值由无显著差异变为显著降低。说明不同质量浓度ROX胁迫对小麦吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 动力学特征的影响主要体现在能够提高离子吸收的最大速度上。林咸永等^[34]发现在铝胁迫下,扬麦5号能够对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 保持较大的吸收速度和亲和力,与本研究的结果相类似。另外有研究者发现蔗糖、光照等因素对植物的铵转运蛋白基因 AMT 转录调节均有促进作用^[35],因而本研究中ROX的存在可能促进了 AMT 基因转录,提高了 NH_4^+ 转运能力。

植物根部对抗生素的吸收过程决定了整个植物受抗生素的污染程度^[36]。在实际环境条件中,ROX的质量浓度为0~1.77 mg/kg^[9-10]。本研究中对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 作为单一氮源时,在环境质量浓度(0.1 mg/L、0.5 mg/L、1.0 mg/L)的ROX胁迫下小麦对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的最大吸收速率、离子亲和力和吸收能力均增加,而在高质量浓度(10.0 mg/L)的ROX胁迫下促进作用最明显。在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 作为单一氮源时,不同质量浓度ROX胁迫仅对小麦吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的最大吸收速率有促进作用,实际环境ROX质量浓度胁迫对

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 亲和力和吸收能力无明显促进作用,高质量浓度(10.0 mg/L)ROX胁迫则降低了小麦对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收能力。

4 结 论

在 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 分别作为单一氮源的情况下,不同质量浓度ROX胁迫对小麦吸收 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 都有促进作用,且均符合Michaelis-Menten酶动力学模型的描述,其吸收速率随营养液氮浓度的增高而增加。实际环境质量浓度(0.1 mg/L、0.5 mg/L、1.0 mg/L)ROX胁迫下小麦对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸收潜力高于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,但亲和力低于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,而高质量浓度ROX(10.0 mg/L)胁迫下的亲和力和吸收潜力均高于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 。不同质量浓度ROX胁迫对小麦不同形态氮素吸收动力学的影响研究结果,为今后研究抗生素对小麦生长发育的影响提供了基础。

参考文献:

- [1] 成玉婷,吴小莲,向 垒,等. 广州市典型有机蔬菜基地土壤中磺胺类抗生素污染特征及风险评价[J]. 中国环境科学, 2017, 37(3): 1154-1161.
- [2] VAN BOECKEL T P, GLENNON E E, CHEN D, et al. Reducing antimicrobial use in food animals [J]. Science, 2017, 357(6358): 1350-1352.
- [3] YASMIN K K, BARKAT A, ZHANG S, et al. Effects of antibiotics stress on growth variables, ultrastructure, and metabolite pattern of *Brassica rapa* ssp. *chinensis* [J]. Science of the Total Environment, 2021, 778: 14633.
- [4] 朱宇恩,苗佳蕊,郑静怡,等. 汾河沿岸农田土壤喹诺酮类抗生素残留特征及风险评估[J]. 环境科学学报, 2019, 39(6): 1989-1998.
- [5] GERD H, SILKE S, HEINRICH H, et al. Determination of persistent tetracycline residues in soil fertilized with liquid manure by high-performance liquid chromatography with electrospray ionization tandem mass spectrometry [J]. Analytical Chemistry, 2002, 74(7): 1509-1518.
- [6] 赵英姿,徐 振,颜冬云,等. 大环内酯类抗生素在土壤中的迁移转化与毒性效应分析[J]. 土壤, 2014, 46(1): 23-28.
- [7] 王晓洁,赵 蔚,张志超,等. 兽用抗生素在土壤中的环境行为、生态毒性及危害调控[J]. 中国科学: 技术科学, 2021, 51(6): 615-636.
- [8] LI J, MIN Z, LI W, et al. Interactive effects of roxithromycin and freshwater microalgae, *Chlorella pyrenoidosa*: Toxicity and removal mechanism [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 191(C): 110156.
- [9] 梁惜梅,施 震,黄小平. 珠江口典型水产养殖区抗生素的污

- 染特征[J]. 生态环境学报, 2013, 22(2): 304-310.
- [10] 罗庆, 孙丽娜, 胡筱敏. 固相萃取-高效液相色谱法测定畜禽粪便中罗红霉素和3种四环素类抗生素[J]. 分析试验室, 2014, 33(8): 885-888.
- [11] 欧立军, 康林玉, 赵激, 等. 作物氮素吸收与利用研究进展[J]. 北方园艺, 2018(7): 151-156.
- [12] 熊淑萍, 吴克远, 王小纯, 等. 不同氮效率小麦品种苗期根系氮代谢及其吸收能力差异分析[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(3): 325-331.
- [13] XU G W, JIANG M M, LU D K, et al. Nitrogen forms affect the root characteristic, photosynthesis, grain yield, and nitrogen use efficiency of rice under different irrigation regimes[J]. Crop Science, 2020, 60(5): 2594-2610.
- [14] 田霄鸿, 李生秀, 王清君. 几种作物 NO_3^- 吸收动力学参数测定方法初探[J]. 土壤通报, 2001(1): 16-18, 31.
- [15] MATT P, GEIGER M, WALCH-LIU P, et al. Elevated carbon dioxide increases nitrate uptake and nitrate reductase activity when tobacco is growing on nitrate, but increases ammonium uptake and inhibits nitrate reductase activity when tobacco is growing on ammonium nitrate[J]. Plant, Cell & Environment, 2001, 24(11): 1119-1137.
- [16] 王晓冬, 王成, 马智宏, 等. 短期 NaCl 胁迫对不同小麦品种幼苗 K^+ 吸收和 Na^+ 、 K^+ 积累的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(10): 2822-2830.
- [17] 陈旭, 杨习文, 李文, 等. 不同氮素利用效率小麦苗期的根系形态数量性状分析[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(2): 174-182.
- [18] 华海霞, 梁永超, 娄运生, 等. 水稻硅吸收动力学参数固定方法的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(3): 358-362.
- [19] 汪晓丽, 陶玥玥, 盛海君, 等. 硝态氮供应对小麦根系形态发育和氮吸收动力学的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(1): 129-134.
- [20] INGRID I, DANILO D. An optimal manual procedure for ammonia analysis in natural waters by the indophenol blue method[J]. Pergamon, 1984, 18(9): 1143-1147.
- [21] 李诗奇, 张彦浩, 李政, 等. 大叶藻对氮磷营养盐的吸收动力学特征[J]. 植物生态学报, 2020, 44(7): 772-781.
- [22] 张鹏, 张然然, 都韶婷. 植物体对硝态氮的吸收转运机制研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 752-762.
- [23] 丁效东, 张士荣. NaCl 对大麦硝态氮吸收动力学特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(11): 1423-1428.
- [24] 张天堂. 两种典型抗生素对小麦幼苗生态毒性效应的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2020.
- [25] 应蓉蓉, 杜锁军, 胡鹏杰, 等. 长柔毛委陵菜对锌的吸收动力学特性[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1349-1354.
- [26] 张超一, 樊小林. 铵态氮及硝态氮配比对香蕉幼苗氮素吸收动力学特征的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(14): 2777-2784.
- [27] HEISW T, SMOLDERS A J P, RIJKENS B G A, et al. Toxicity of reduced nitrogen in eelgrass (*Zostera marina*) is highly dependent on shoot density and pH[J]. Oecologia, 2008, 158(3): 411-419.
- [28] BRITTO D T, KRONZUCKER H J. NH_4^+ toxicity in higher plants: A critical review[J]. Journal of Plant Physiology, 2002, 159(6): 567-584.
- [29] 王波, 赖涛, 沈其荣. 不同铵硝配比营养液对典型生菜硝酸盐吸收动力学的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 1098-1104.
- [30] 蒋廷惠, 郑绍建, 石锦芹, 等. 植物吸收养分动力学研究中的几个问题[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(2): 11-17.
- [31] 童依平, 蔡超, 刘全友, 等. 植物吸收硝态氮的分子生物学进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(4): 433-440.
- [32] HE M Z, DIJKSTRA F A. Drought effect on plant nitrogen and phosphorus: a meta-analysis[J]. New Phytologist, 2014, 204(4): 924-931.
- [33] 赵越, 马凤鸣, 张多英. 甜菜对不同氮素吸收动力学的研究[J]. 东北农业大学学报, 2006, 37(3): 294-298.
- [34] 林咸永, 章永松, 罗安程, 等. 铝胁迫下不同小麦基因型根际 pH 的变化、 NH_4^+ 和 NO_3^- 吸收及还原与其耐铝性的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(3): 330-334.
- [35] NICOLAUS V W, SONIA G, ALAIN G, et al. The molecular physiology of ammonium uptake and retrieval[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2000, 3(3): 254-261.
- [36] YU X L, CHEN J H, LIU X X, et al. The mechanism of uptake and translocation of antibiotics by pak choi (*Brassica rapa* subsp. *chinensis*). [J]. The Science of the Total Environment, 2021, 810: 151748.

(责任编辑: 张震林)