王坚强,闫素仙,李慧明,等.不同时期水氮调控下高粱根系生理特征[J].山西农业大学学报(自然科学版),2024,44(1):24-33.
Wang J Q, Yan S X, Li H M,et al.Physiological characteristics of sorghum root systems under water and nitrogen regulation at different stages[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2024,44(1):24-33.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202210044

不同时期水氮调控下高粱根系生理特征

王坚强,闫素仙,李慧明,李作一,史红梅

(山西农业大学 高粱研究所,山西 晋中 030600)

摘　要:[目的]水分和氮肥是影响干旱地区作物生长的关键因素。探究水氮互作对高粱根系的调控作用可以增加高粱产量,提高水肥利用效率。[方法]本文以2个高粱品种晋杂17和晋杂108为试验材料,通过设置重度干旱胁迫(W1,土壤含水量25%~35%)、中度干旱胁迫(W2,土壤含水量45%~55%)和正常供水处理(W3,土壤含水量65%~75%)3个水分处理及低氮(N1,尿素0 g•kg^{-1}土)、中氮(N2,尿素2 g•kg^{-1}土)和高氮(N3,尿素4 g•kg^{-1}土)3个氮素处理,分析不同水氮处理对各生育期的不同品种高粱根系生理特征的影响。[结果](1)水分处理对高粱根系各指标影响显著高于氮素处理,重度干旱胁迫下各指标降幅显著。(2)高粱的根重和根系活力在相同水分条件下随着施氮量的增加而升高,在中氮水平变化显著。可溶性糖、可溶性蛋白及脯氨酸含量随着施氮量的增加逐渐积累,在中氮和高氮下积累较快。(3)水氮处理对晋杂108抽穗期存在明显的互作效应,对晋杂17则无显著影响。(4)在不同水氮处理下,晋杂108根系的各项指标均高于晋杂17,具有较强的抗逆性。[结论]高粱根系各指标受供水量的影响较大。在干旱环境下,增施适量氮素可促进根系生物量,提高根系活力,维持较高的渗透调节功能,缓解水分胁迫对根系的损伤。不同高粱品种的水氮互作效应不同,晋杂108的抗旱、抗瘠薄能力更强。

关键词:高粱; 根系; 水氮调控; 生理特征
中图分类号:S514　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1671-8151(2024)01-0024-10

水分和氮素是粮食生产需求量最大的两大自然资源。近年来,由于经济快速发展,人为干扰和自然因素导致干旱气候频繁出现,大气氮沉降明显增加[1]。粮食作物的氮肥施用量过大,氮肥利用效率低下等问题日益突出。基于这些现状,我国农业生产也越来越注重节水、控肥的有机结合。

干旱胁迫是限制作物生长发育和产量的主要因素,受人们广泛关注。与其他非生物胁迫一样,植物的水分胁迫引起体内发生氧化应激反应,活性氧显著增加。大量研究表明,植物中抗氧化酶的活性、渗透调节能力与对干旱等胁迫的耐受性有关[2]。在逆境条件下,作物通过积累大量渗透调节物质,使组织水势下降,维持细胞膨压,进而保证体内代谢活动的正常运行,增强抗逆性。无机离子如K^+、Ca^{2+}等,有机物质如可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸等[3]均为渗透调节物质。邵艳军等[4]研究发现,高粱叶片水势较大,以可溶性糖和蛋白质为主要渗透调节物质,玉米则以K^+和脯氨酸为主。可溶性糖在苗期为高粱生长发育中氮同化提供碳骨架α-酮戊二酸,而α-酮戊二酸在调控植物碳氮代谢方面起到重要作用[5]。脯氨酸干旱胁迫下会快速积累,不仅能够保持细胞膨压,还具有猝灭自由基,保护亚细胞结构和缓冲细胞氧化还原电位的作用[6]。Rajasheker等[7]对高粱全基因组进行系统分析,鉴定出48个编码富含脯氨酸蛋白的相关基因,并发现这些基因在维持细胞结构及响应逆境胁迫方面发挥关键作用。水分胁迫还可能导致作物不同营养元素缺乏甚至失衡。其中,氮元素参与植物体内多种代谢过程,是植物正常生长发育所必需的关键元素。一定水平的氮可通过维持代谢活动来缓解干旱胁迫对植物的负面影响,有助于改善作物产量,提高籽粒蛋白质、脂肪等含量[8-10]。如有人发现提高氮素能

收稿日期:2022-10-26　　**修回日期:**2023-03-17
基金项目:山西旱作高粱产业集群项目(HZGL202101)
作者简介:王坚强(ORCID:0009-0001-0193-5719),副研究员,硕士,研究方向:高粱育种与栽培生理,E-mail: Wangjq128@163.com

通过增强NO_3^-、NH_4^+的同化和脯氨酸的合成等多种途径提高水稻对水分胁迫的适应[11]。合理的水氮配比还可增强土壤酶活性,改善土壤透气性,提高肥力[12]。Shuo等[13]通过建立甜高粱水肥耦合模型,确立了最佳的水肥配比,显著增加甜高粱干物质积累和产量,并发现灌溉是影响水利用效率和施氮的主要因素。水分和氮素之间存在复杂的交互作用,深入探究和揭示水氮交互作用对植物影响有助于农业上实现"以肥调水,以水促肥"目的。

根系生长是一个动态过程,且根系结构易随环境因素的变化而变化[14]。大量研究表明,根系性状与植株的抗旱性和养分吸收能力直接相关[15]。如干旱胁迫下,持绿型高粱比普通高粱能保持较好的根系形态和较高的根系活力,保证水分的吸收[16]。在低氮条件下,小麦根系形态、根系活力和氮代谢关键酶活性对氮素吸收具有重要的调控作用[17]。李文娆等[18]发现干旱虽会抑制棉花幼苗的根生物量,但根冠比、总根长增加,较高的根长和表面积可促进植株对水分的吸收,以应对干旱对冠层生长的影响。干旱条件下补充氮肥会促进根系表面积显著增加,以此提高根系形态对逆境的适应性。丁红等[19]发现干旱胁迫处理下增施氮肥,40 cm以下土层内花生的根长、根系生物量和根表面积均显著增加,促进根系伤流量,提高了花生产量。根系的渗透调节机制对植物适应不良环境具有重要意义。对甘薯不同生长期时期进行干旱胁迫,均会导致甘薯根长、根活力下降,纤维根和块根中的可溶性糖等渗透调节物质上升,且干旱胁迫时间越早,升高的幅度越大[20]。张楚等[21]通过低氮胁迫不同品种的苦荞发现苗期根系直径、表面积、根系活力显著下降,主根长、可溶性糖含量及游离脯氨酸含量显著升高,且不同的耐低氮性品种对低氮胁迫的响应存在明显差异。

水分和氮素既是影响旱地农业的主要胁迫因子,又是一对相互作用的因子[22]。然而,以往研究多数只关注水分或氮素的单一影响,有关二者的交互作用对高粱根系的影响迄今研究较少。山西地处半干旱地区,而高粱(*Sorghum bicolor* L.)作为北方重要的粮食作物,其根系发达,抗旱、耐盐碱、耐贫瘠,具有较强的抗逆性和较高的养分利用效率[23]。卢峰等对高粱幼苗进行不同水平的水分胁迫,发现不同梯度下根系受影响程度大于叶片[24]。因此,深入研究水氮互作对高粱根系生理特征的影响,对揭示高粱根系的抗逆性机制、提高水肥利用效率具有重要意义。本试验以前期筛选出的氮素利用率高的晋杂108和氮素利用率较低的晋杂17为试验材料,2个品种均为抗旱型品种。通过分析不同水分条件下施氮量对高粱不同生长期根系的生理特征的影响,探索水氮供应的最佳效果,以期为干旱地区对高粱进行合理水肥管理,提高作物产量提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

本研究选用氮素利用率不同的晋杂17和晋杂108高粱品种为试材,均由山西农业大学高粱研究所提供。试验于2021年5月-10月在晋中市榆次区修文基地棚内进行。试验土壤取自表层0～20 cm土壤,基础肥力状况为:土壤有机质11.07 g·kg^{-1},全氮0.76 g·kg^{-1},有效磷11.32 mg·kg^{-1},速效钾135.10 mg·kg^{-1},pH值8.1。

1.2　试验方法

试验针对水分和氮肥2因素分别设3个梯度,共计9个处理。3个水分水平:W1、W2和W3分别表示重度干旱胁迫(土壤含水量25%～35%)、中度干旱胁迫(土壤含水量45%～55%)和正常供水处理(土壤含水量65%～75%);3个氮肥水平:N1、N2和N3分别表示低氮(尿素0 g·kg^{-1}土)、中氮(尿素2 g·kg^{-1}土)和高氮(尿素4 g·kg^{-1}土)。每个处理进行3次重复。氮、磷、钾分别以尿素、过磷酸钙和硫酸钾为基肥施入,P_2O_5和K_2O施用量为0.2 g·kg^{-1}。本试验采取盆栽方式,高粱生长到4叶期(播种后14 d)开始控制土壤含水量,土壤含水量的测定采用称重法。盆栽盆上口径23 cm,高18 cm,选取饱满、均匀的高粱种子,5月19日每盆播种10粒,在三叶期定苗,每盆保留3株。于苗期(播种后19 d)、拔节期(播种后39 d)、抽穗期(播种后67 d)进行取样调查测定根系形态、根系活力和各渗透物质含量。

1.3　测定项目与方法

选取每处理具有代表性的植株进行取样,取样前先浇水使土壤变软,用清水冲洗干净,烘干称重,105 ℃杀青30 min,80 ℃烘干至恒重。剩余采集的新鲜根样放入液氮备用。采用氯化三苯基四氮唑法(TTC法)测定根系活力[25];采用蒽酮比色法测定

根系可溶性糖含量[26];采用考马斯亮蓝G-250染色法测定根系可溶性蛋白含量[27];采用茚三酮显色法测定根系游离脯氨酸含量[28]。

1.4 数据处理

用Excel 2007、Origin 9.1对数据进行处理并作图,SPSS 19.0软件进行单因素和双因素方差分析和差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同时期水氮互作下高粱根系干重

由表1可见,2品种高粱的根系干重在正常供水(W3)和高氮(N3)条件下达到最大值。在不同时期各处理下晋杂108的根系干重均高于晋杂17。低氮条件下,晋杂17根系干重W1和W2比W3减少25.24%、12.81%(苗期),13.31%、6.61%(拔节期),13.85%、4.34%(抽穗期);中氮下减少18.18%、17.25%(苗期),8.01%、8.31%(拔节期),5.28%、0.62%(抽穗期);高氮下减少19.29%、19.19%(苗期),9.07%、6.81%(拔节期),6.25%、3.76%(抽穗期)。晋杂108根系干重W1和W2比W3减幅4.64%~16.69%。在施氮条件相同时,水分的减少均可抑制根系干重的增加,W1降幅显著且苗期受水分影响较大。在各生育期不同水分水平下,增施氮肥亦可促进根系干重的积累。在中度干旱胁迫下,晋杂17与晋杂108的根系干重在不同处理下最大增幅为2.5%、2.7%,增长不明显,且不同氮素水平下差异不大。在重度干旱胁迫(W1)下,晋杂17根系干重在高氮(N3)与中氮(N2)下与不施氮相比分别增长-1.36%、12.79%(苗期),-1.23%、11.15%(拔节期),3.08%、7.64%(抽穗期);晋杂108增长4.42%、5.40%(苗期),0.43%、4.75%(拔节期),2.54%、3.71%(抽穗期)。可见,在重度干旱胁迫下适量的氮肥可以促进根系生物量的增长速度,但施氮过多会破坏根细胞膜功能,减缓甚至抑制根系生长,且在苗期和拔节期根系增长较快。

2.2 不同时期水氮互作下高粱根系活力

根系活力主要指脱氢酶活性,根系活力直接决定地上部分的生长和营养状况。由图1可见,总体变化趋势晋杂108的根系活力高于晋杂17。在相同氮素条件下,2品种各生育期W1和W2与W3相比,下降幅度14.91%~38.0%、4.98%~27.71%。高粱根系活力均随着水分的减少而降低,W1下降幅显著,2品种各生育期降幅差异不大。在不同生育期,晋杂108和晋杂17的根系活力在相同水分条件下随着施氮量的增加而升高,但增幅不同。2品种的根系活力在W1和W3下与W2相比,增施氮肥增幅较小。晋杂108在中度干旱胁迫(W2)下,N2和N3提高19.63%、15.57%(苗期)、10.35%和8.51%(拔节期)、11.71%和7.23%(抽穗期),苗期根系活力在中氮条件下增幅最大。晋杂17中度干旱胁迫下(W2),N2和N3提高14.79%和12.54%(苗期)、16.78%和9.55%(拔节期)、8.12%和11.24%(抽穗期),拔节期N2下增幅最大。可见,晋杂108受中度干旱胁迫时,在苗期适量施用氮肥能显著提高根系活力;晋杂17在拔节期受氮肥影响大。由此可知,不同高粱品种的根系活力对水氮互作的响应不同。

2.3 不同时期水氮互作下高粱根系渗透调节物质含量

2.3.1 可溶性糖含量

由图2可见,在相同氮素条件下,晋杂17和晋杂108各生育期在W1和W2下与W3相比,增长幅度为9.10%~28.50%、3.05%~19.17%。高粱根系可溶性糖含量均随着水分的减少而增加,W1下增长明显,2品种各生育期增幅差异不大。此外,重度干旱胁迫(W1)时,晋杂17根系可溶性糖含量N2和N3比N1增长51.58%、30.16%(苗期),10.80%、4.53%(拔节期),9.63%、5.36%(抽穗期);W2下增长52.99%、30.42%(苗期),9.71%、6.19%(拔节期),6.13%、3.32%(抽穗期);W3下增长56.71%、19.81%(苗期),11.29%、4.89%(拔节期),6.69%、3.63%(抽穗期)。晋杂108根系可溶性糖含量在相同供水条件下,N2和N3比N1增加11.76%~47.55%(苗期),3.20%~11.41%(拔节期),3.58%~6.05%(抽穗期)。可见,在供水相同情况下,晋杂17高粱根系的可溶性糖含量在苗期和拔节期受氮肥影响大,而晋杂108则是苗期变化显著。此外,晋杂17的可溶性糖含量在各种处理下均比晋杂108高。

2.3.2 可溶性蛋白含量

随着生育期的推进,高粱根系可溶性蛋白含量在抽穗期达到最高(图3)。在不同生育期,晋杂108比晋杂17的可溶性蛋白含量高。与高粱根系可溶

表1　水氮互作下不同时期高粱根重

Table 1　Sorghum root weight at different stages under water and nitrogen interaction　　**单位:g·株$^{-1}$**

品种 Cultivar	处理 Treatment	苗期 Seeding stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage
晋杂17	W1N1	3.91±0.29e	10.22±0.29e	23.81±0.17f
	W1N2	4.41±0.25cd	11.36±0.15bc	25.63±0.27e
	W1N3	4.35±0.26d	11.22±0.34c	26.42±0.71d
	W2N1	4.56±0.19c	11.01±0.71d	26.44±0.39d
	W2N2	4.46±0.34cd	11.25±0.24c	27.32±0.54bc
	W2N3	4.57±0.36c	11.50±0.32c	27.12±0.16c
	W3N1	5.23±0.16ab	11.79±0.33b	27.64±1.31b
	W3N2	5.40±0.30a	12.27±0.19ab	27.06±0.35c
	W3N3	5.39±0.11a	12.34±0.34a	28.18±0.63a
晋杂108	W1N1	5.74±0.51f	12.41±0.51e	25.79±1.33f
	W1N2	6.05±0.85e	13.42±0.50cd	26.69±0.73e
	W1N3	6.33±0.11d	13.04±0.37d	27.37±0.36d
	W2N1	6.57±0.19cd	13.66±0.75c	27.27±0.97d
	W2N2	6.70±0.22c	13.60±0.38c	27.34±2.33d
	W2N3	6.68±0.13c	14.07±0.75bc	28.02±0.13c
	W3N1	6.89±0.72bc	14.32±0.63b	28.34±0.29c
	W3N2	7.10±0.89b	15.26±0.51ab	30.30±1.33ab
	W3N3	7.61±0.54a	15.55±1.03a	30.77±1.31a

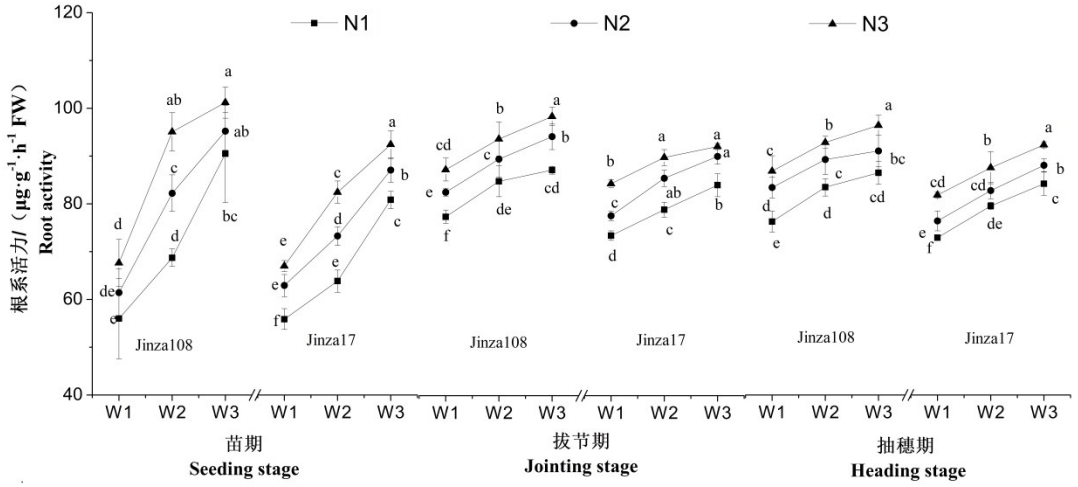
注:W1、W2、W3分别表示重度干旱、中度干旱、正常供水;N1、N2、N3分别表示低氮、中氮、高氮。数据为3次平均值±标准差。同一时期同一品种的数据中不同字母表示差异显著($P<0.05$)。处理同图1～图4

Note: W1, W2, W3 represented severe drought, slight drought, and normal irrigation, respectively. N1, N2, N3 represent low nitrogen level, medium nitrogen level, and high nitrogen level, respectively. Data were the means±standard deviation. Values followed by different letters in the data of the same cultivar at the same stage indicated a significantly different at $P<0.05$. Treatments were the same as those given in Table 1 to Table 4

性糖含量变化相似,在施氮量相同时,可溶性蛋白随着供水量的减少而显著增长,在W3下与W1比,抽穗期增幅达39.75%～43.97%,增幅最大。在相同水分条件下,高粱根系可溶性蛋白含量随施氮量的增加而增加。在抽穗期中度干旱胁迫时,晋杂17和晋杂108在中氮、高氮下分别上升－3.81%和7.76%、20.85%和8.01%,重度干旱胁迫时,晋杂17和晋杂108在中氮、高氮下分别下上升9.01%和7.78%、5.35%和4.84%。表明中度干旱胁迫下,高粱根系可溶性蛋白含量在高氮水平时增幅最大,重度干旱胁迫时中氮水平增幅较大。晋杂17在拔节期和抽穗期受氮素影响极明显。

2.3.3　脯氨酸含量

高粱根系的脯氨酸含量随着供水量的减少下整体增幅在33.6%～43.9%,与可溶性糖和可溶性蛋白含量相比增幅最大(图4)。这是因为植物细胞中脯氨酸含量一般较低,但受干旱胁迫时会快速积累,且积累越多,抗旱能力越强[6]。不同时期的水氮处理下,晋杂108根系的脯氨酸含量较高。方差分析结果表明水氮互作效应对晋杂108根系脯氨酸含量的影响达显著水平(表2～表3)。在相同水分条件下,增加施氮量可显著促进高粱根系脯氨酸的积累,尤其在重度缺水时。在重度干旱胁迫时,N2和N3水平下比N1,各时期晋杂108的根系脯氨酸含量增长6.11%和9.85%、8.83%和7.82%、9.29%和7.33%;晋杂17的根系脯氨酸含量增长10.83%和11.88%、8.70%和8.01%、6.01%和10.04%。晋杂17在苗期和拔节期重度干旱胁迫时受氮素影响较大,而晋杂108在抽穗期影响较大。施氮量一定时,高粱根系内脯氨酸含量随着供水量的增加而增加。在整个生长期,高粱根系的脯氨酸含量在抽穗期达到最大。

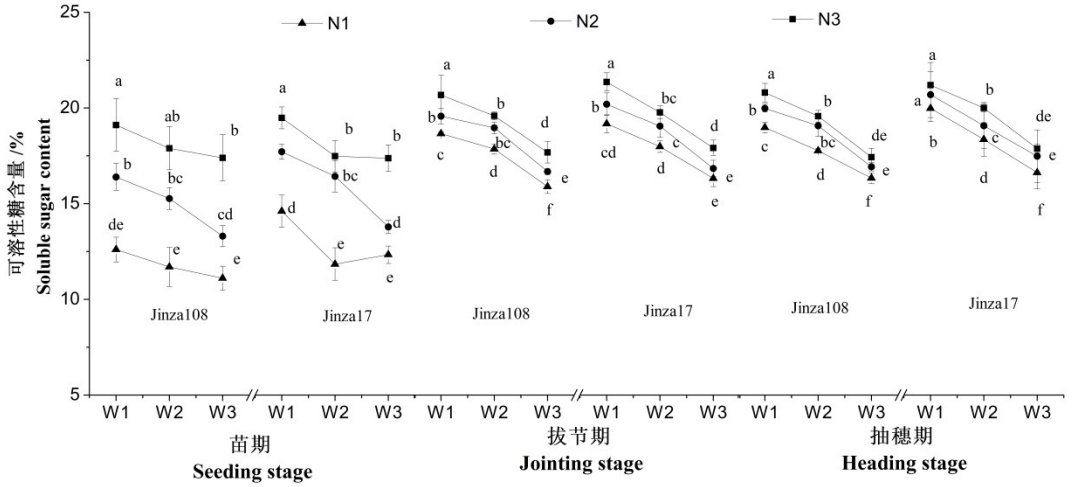


误差线表示3次重复标准差,同一时期同一品种的数据中不同字母表示差异显著($P<0.05$)

Error bars showed the standard deviations of three replicates. Different letters in the data of the same cultivar at the same stage indicated a significantly different at $P<0.05$

图1 水氮互作下不同时期高粱根系活力

Fig.1 Sorghum root activity of sorghum roots at different stages under water and nitrogen interaction



误差线表示3次重复标准差,同一时期同一品种的数据中不同字母表示差异显著($P<0.05$)

Error bars showed the standard deviations of three replicates. Different letters in the data of the same cultivar at the same stage indicated a significantly different at $P<0.05$

图2 水氮互作下不同时期高粱根系可溶性糖含量

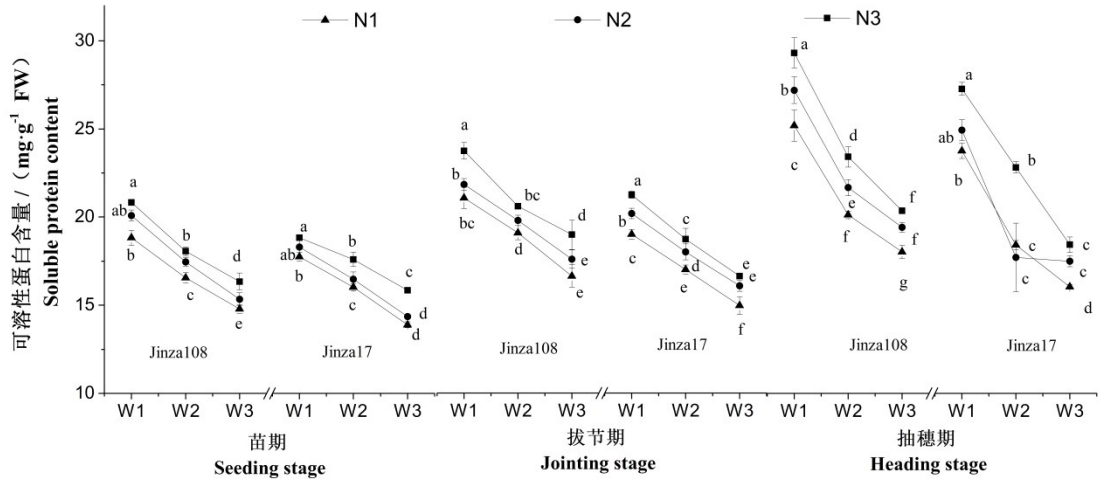
Fig.2 Soluble sugar content of sorghum roots at different stages under water and nitrogen interaction

2.4 各生理指标的水氮互作效应

水、氮单因素对不同时期高粱根系的各生理指标的影响不同。结果表明,水分处理对高粱根系生理指标的影响显著高于氮肥处理(表2～表3)。其中根系干重受水分变化的影响极显著,而氮素影响并不显著。这说明无论任何时期,水分都是高粱根系生长所需的关键因素。不同高粱对不同水氮处理的响应也存在差异。氮肥处理对晋杂17拔节期和抽穗期的根系各项生理指标(除根系干重)影响都极为显著,而对晋杂108则无显著影响。水氮互作效应对晋杂108抽穗期的影响最为显著,而且越到高粱生育后期,水氮互作效应越强。

3 讨论

本研究发现,高粱根系干重、根系各渗透物质含量随着生育期的推进逐渐增加,在抽穗期达到最

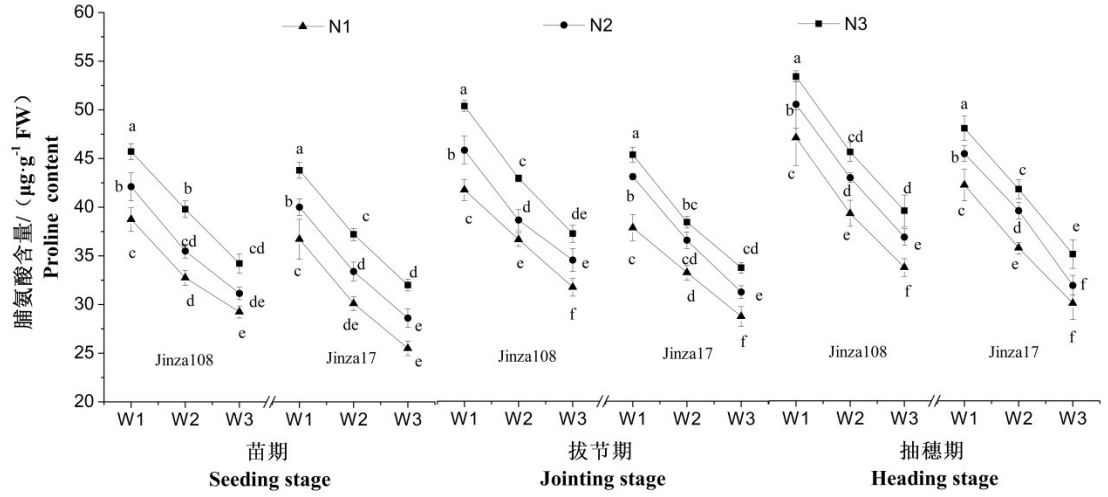


误差线表示3次重复标准差,同一时期同一品种的数据中不同字母表示差异显著($P<0.05$)

Error bars showed the standard deviations of three replicates. Different letters in the data of the same cultivar at the same stage indicated a significantly different at $P<0.05$

图3　水氮互作下不同时期高粱根系可溶性蛋白含量

Fig.3　Soluble protein content of sorghum roots at different stages under water and nitrogen interaction



误差线表示3次重复标准差,同一时期同一品种的数据中不同字母表示差异显著($P<0.05$)

Error bars showed the standard deviations of three replicates. Different letters in the data of the same cultivar at the same stage indicated a significantly different at $P<0.05$

图4　水氮互作下不同时期高粱根系脯氨酸含量

Fig.4　Proline content of sorghum roots at different stages under water and nitrogen interaction

大,根系活力逐渐降低,在抽穗期最小。

水分和氮素是影响高粱生长发育和产量形成的重要的环境因子,两者相互影响,相互制约。干旱会降低土壤水势,加速根系死亡,抑制植物氮吸收,而高效的氮营养能通过维持代谢活动来缓解干旱胁迫对植物的负面影响[29]。本研究中高粱根系各指标均受水分处理的影响较大,尤其脯氨酸含量变化幅度达33.6%~43.9%。这与李广浩等[30]认为的水氮耦合效应中水为主导效应,氮为次效应的结论一致。氮对植物抗旱能力的调节与氮水平和干旱胁迫强度有关[31]。此外还发现在不同生育期,2高粱品种的根系干重和根系活力在相同水分条件下随着施氮量的增加而升高,在水分胁迫时中氮(尿素2 g·kg^{-1}土)水平分别增长12.79%、19.63%

表2 晋杂17不同时期水氮处理的水氮互作效应分析(F值)

Table 2 Analysis of water and ffertilizer interaction effects in different water—nitrogen treatments at different stages of Jinza 17

处理 Treatment	生育期 Stage	根系干重 Root dry weight	根系活力 Root activity	可溶性糖 Soluble sugar	可溶性蛋白 Soluble protein	脯氨酸 Proline
水处理	苗期	28.626**	90.206**	8.516	133.966**	289.411**
	拔节期	17.745**	90.449**	113.874**	311.851**	321.635**
	抽穗期	12.289**	90.206**	26.702**	278.864**	261.002**
氮处理	苗期	1.085	30.845*	28.232*	25.635	66.904**
	拔节期	6.509	83.910**	37.659**	61.658**	113.083**
	抽穗期	3.443	50.961**	4.613*	54.984**	50.057**
水氮互作	苗期	0.691	0.104	4.795	2.610	0.091
	拔节期	0.849	2.225	0.578	0.665	0.624
	抽穗期	1.539	0.104	0.075	6.237*	0.556

注:*表示在0.05水平上差异显著,**表示在0.01水平上差异显著

Note:* and ** represented a significant difference at 0.05 and 0.01 level, respectively

表3 晋杂108不同时期水氮处理的水氮互作效应分析(F值)

Table 3 Analysis of water and fertilizer interaction effect in different water—nitrogen treatments at different stages of Jinza 108

处理 Treatment	生育期 Stage	根系干重 Root dry weight	根系活力 Root activity	可溶性糖 Soluble sugar	可溶性蛋白 Soluble protein	脯氨酸 Proline
水处理	苗期	12.114**	83.584**	11.794*	320.177**	6.952
	拔节期	12.726**	61.732**	54.117**	21.322**	6.334
	抽穗期	22.347**	71.537**	75.289**	17.075**	8.498*
氮处理	苗期	2.530	18.883**	107.253**	62.923**	3.227
	拔节期	6.087	6.808	0.385	0.100	3.830
	抽穗期	2.399	2.107	3.110	2.107	3.989
水氮互作	苗期	0.529	1.837	0.865	1.146	7.067*
	拔节期	7.077*	6.122*	2.273	4.179	7.151*
	抽穗期	2.097	10.015**	1.440	10.015**	8.657**

注:*表示在0.05水平上差异显著,**表示在0.01水平上差异显著

Note:* and ** represented a significant difference at 0.05 and 0.01 level, respectively

(晋杂17苗期),5.40%、14.79%(晋杂108苗期),增加较快。受水分胁迫时高氮(尿素4 g·kg^{-1}土)和中氮水平下与不施氮相比(以苗期为例,其余时期结果相似),根系可溶性糖含量(晋杂17苗期增长51.58%、30.16%,晋杂108苗期增长33.42%、21.36%)、可溶性蛋白含量(晋杂17苗期增长11.17%和6.71%、晋杂108苗期增长6.08%和3.10%)与脯氨酸含量(晋杂17增长10.83%和11.88%、晋杂108增长6.11%和9.85%),均上升显著。高粱根系在受干旱胁迫时,适量增加氮肥,可促进根系生长发育,提高根系的抗旱能力。这与前人研究结果相似[19,21,32-33]。但值得注意的是,相同水分条件下氮素对根系形态的影响目前存在争议。有研究认为在水分胁迫下增施氮素会造成玉米根部水势降低,抑制根的生长[34]。这可能是由于氮素条件不同和不同植物抗逆性不同造成的。

良好的根系形态和较高的根系生理活性是植物氮高效利用重要特征[35]。渗透调节物质含量可间接体现植物抗旱能力[36],其中脯氨酸能够保护细胞膜和细胞内酶系统,在干旱胁迫下,其含量增加会降低细胞水势,增强植物吸水能力。在各生育期水氮处理下,晋杂108根系干重(5.74~30.77 g)、根系活力(55.99~84.16 μg·g^{-1}·h^{-1})、可溶性蛋白含量(18.03~20.83 mg·g^{-1})和脯氨酸含量

(33.71～45.72 μg·g^{-1})均高于晋杂17。说明晋杂108对水分和氮肥的吸收能力更强,更能适应缺水缺氮环境,抗旱、抗瘠薄能力更强。在相同水分条件下,不同品种的高粱施氮效应不尽相同。晋杂17的施氮效应对于拔节期和抽穗期的根活力、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、脯氨酸含量影响显著,晋杂108在苗期较显著。可能是因为不同基因型背景下,高粱对氮素的吸收和利用效率存在时间差异,其生理和分子机制还需进一步试验证明。不同品种的高粱对于水氮互作效应存在明显差异。水氮互作效应对晋杂108抽穗期的影响最为显著,而且越到高粱生育后期,水氮互作效应越强。这是由于高粱生育后期生长需要大量水分和营养,使得水氮叠加效应逐渐显现。

4　结论

通过对不同水氮组合处理苗期、拔节期和抽穗期的高粱根系干重、根系活力和渗透调节物质的研究发现,高粱根系各指标受水分处理的影响大于氮素处理。在水分胁迫下,增施适量氮肥会促进高粱根系的生物量和根系活力的增长,促进可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸的积累,有效缓减干旱胁迫的负面影响。此外,水氮对晋杂108抽穗期的根系生长存在显著的互作效应。晋杂108具有较强的抗旱和耐低氮能力。

参　考　文　献

[1]陈晓娜,赵纳祺,段娜,等.植物响应水分和氮添加的研究进展[J].温带林业研究,2022,5(1):7-11.
Chen X N, Zhao N Q, Duan N, et al. Plant response to water and nitrogen addition: a review [J]. Journal of Temperate Forestry Research, 2022, 5(1): 7-11.

[2]万劲,汪安琳,陈嘉裔,等.植物抗逆生理研究概述[J].江苏林业科技,2013,40(1):42-45.
Wan J, Wang A L, Chen J Y, et al. Overview of plant stress resistance physiology research [J]. Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology, 2013, 40(1): 42-45.

[3]韩志平,张海霞,张巽,等.水分胁迫对黍子幼苗生长和生理特性的影响[J].中国农业气象,2019,40(8):502-511.
Han Z P, Zhang H X, Zhang X, et al. Effects of water stress on growth and physiological properties of millet seedlings [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2019, 40(8): 502-511.

[4]邵艳军,山仑,李广敏.干旱胁迫与复水条件下高粱、玉米苗期渗透调节及抗氧化比较研究[J].中国生态农业学报,2006,14(1):68-70.
Shao Y J, Shan L, Li G M. Comparison of osmotic regulation and antioxidation between sorghum and maize seedlings under soil drought stress and (water) recovering conditions [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(1): 68-70.

[5]Yuan Y Z, Ou J Q, Wang Z Q, et al. Regulation of carbon and nitrogen metabolisms in rice roots by 2-oxoglutarate at the level of hexokinase [J]. Physiologia Plantarum, 2007, 129 (2): 296-306.

[6]Ashraf M, Foolad M R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance [J]. Environmental and Experimental Botany, 2007, 59(2): 206-216.

[7]Rajasheker G, Nagaraju M, Varghese R P, et al. Identification and analysis of proline-rich proteins and hybrid proline-rich proteins super family genes from *Sorghum bicolor* and their expression patterns to abiotic stress and zinc stimuli [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 952732.

[8]Nematpour A, Eshghizadeh H R, Zahedi M. Drought-tolerance mechanisms in foxtail millet (*Setaria italica*) and proso millet (*Panicum miliaceum*) under different nitrogen supply and sowing dates [J]. Crop and Pasture Science, 2019, 70(5): 442-452.

[9]于肖,牛佳红,陈二影,等.施氮与不同时期水分胁迫对谷子生长及生理生化特性的影响[J].山东农业科学,2022,54(1):61-67.
Yu X, Niu J H, Chen E Y, et al. Effects of nitrogen application and water stress at different stages on growth and physiological and biochemical characteristics of foxtail millet [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2022, 54(1): 61-67.

[10]李昱,俞自仁,吴伟,等.水肥耦合对甜高粱新品种中科甜2号生物学特性和产量的影响[J].甘肃农业科技,2017(10):15-21.
Li Y, Yu Z R, Wu W, et al. Effects of water and fertilizer coupling on biological characteristics and yield of sweet *Sorghum* cultivar zhongketian 2 [J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2017(10): 15-21.

[11]Zhong C, Cao X C, Hu J J, et al. Nitrogen metabolism in adaptation of photosynthesis to water stress in rice grown under different nitrogen levels [J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 1079.

[12]樊吴静,杨鑫,何虎翼,等.水氮耦合对旱藕产量、生理特性和土壤理化性状的影响[J].西南农业学报,2022,35(5):1069-1078.
Fan W J, Yang X, He H Y, et al. Effect of water and nitrogen coupling on the yield and physiology characteristics of edible canna and the physical and chemical properties of soil [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35(5): 1069-1078.

[13]Shuo W, Chai C L, Liu H Q. Effects of water and nitrogen regulation on dry matter accumulation, yield and water use of sweet *Sorghum* [J]. World Scientific Research Journal, 2021, 7(5): 316-327.

[14]王岩,孙大为,李兆波,等.不同品种高粱根系形态特征与产量形成的关系[J].园艺与种苗,2011,31(3):84-86.
Wang Y, Sun D W, Li Z B, et al. Study on relationship of

root morphological characters and yeild formation in different Sorghum varieties[J]. Horticulture & Seed, 2011, 31(3): 84-86.

[15]Zhang Y J, Xu J N, Cheng Y D, et al. The effects of water and nitrogen on the roots and yield of upland and paddy rice[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(5): 1363-1374.

[16]王德权,周宇飞,陆璋镳,等.水分胁迫下持绿型高粱根系形态及其活力研究[J].干旱地区农业研究,2012,30(2):73-76,130.
Wang D Q, Zhou Y F, Lu Z B, et al. Root morphology and activity of stay green sorghum under water stress [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(2): 73-76, 130.

[17]海闯北,彭超军,李艳,等.高氮与低氮处理对不同氮效率小麦根系及相关生理特性的影响[J].麦类作物学报,2022,42(6):697-703.
Hai C B, Peng C J, Li Y, et al. Effect of high and low nitrogen treatments on roots and related physiological characteristics of wheat with different nitrogen efficiency [J]. Journal of Triticeae Crops, 2022, 42(6): 697-703.

[18]李文娆,范雨龙,冯士珍,等.水氮耦合对棉花幼苗根冠生长和水分利用效率的影响[J].河南农业科学,2017,46(9):18-24.
Li W R, Fan Y L, Feng S Z, et al. Effect of coupling of water and nitrogen on shoot and root growth and water use efficiency of cotton seedlings[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2017, 46(9): 18-24.

[19]丁红,张智猛,戴良香,等.水氮互作对花生根系生长及产量的影响[J].中国农业科学,2015,48(5):872-881.
Ding H, Zhang Z M, Dai L X, et al. Effects of water and nitrogen interaction on peanut root growth and yield [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(5): 872-881.

[20]张海燕,汪宝卿,冯向阳,等.不同时期干旱胁迫对甘薯生长和渗透调节能力的影响[J].作物学报,2020,46(11):1760-1770.
Zhang H Y, Wang B Q, Feng X Y, et al. Effects of drought treatments at different growth stages on growth and the activity of osmotic adjustment in sweet potato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.[J]. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(11): 1760-1770.

[21]张楚,张永清,路之娟,等.低氮胁迫对不同苦荞品种苗期生长和根系生理特征的影响[J].西北植物学报,2017,37(7):1331-1339.
Zhang C, Zhang Y Q, Lu Z J, et al. Effect of low nitrogen stress on the seedling growth and root physiological traits of *Fagopyrum tataricum* cultivars with different low-N treatments [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2017, 37(7): 1331-1339.

[22]张志远,李玉庆.我国水肥耦合研究热点及趋势探析[J].安徽农业科学,2022,50(5):220-223,227.
Zhang Z Y, Li Y Q. Analysis on the hotspots and trends of water-fertilizer coupling research in China[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(5): 220-223, 227.

[23]李顺国,刘猛,刘斐,等.中国高粱产业和种业发展现状与未来展望[J].中国农业科学,2021,54(3):471-482.
Li S G, Liu M, Liu F, et al. Current status and future prospective of Sorghum production and seed industry in China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(3): 471-482.

[24]卢峰,张飞.多水胁迫对高粱幼苗的生理影响[J].作物杂志,2015(4):92-96.
Lu F, Zhang F. Physiological responses of Sorghum seedlings under excessive water stress[J]. Crops, 2015(4): 92-96.

[25]闫江艳,张永清,冯晓敏,等.干旱胁迫及复水对不同黍稷品种根系生理特性的影响[J].西北植物学报,2012,32(2):348-354.
Yan J Y, Zhang Y Q, Feng X M, et al. Effect of drought stress and rewatering on physiological characteristics of roots in different proso millet varieties [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2012, 32(2): 348-354.

[26]孔祥生,易现峰.植物生理学实验技术[M].北京:中国农业出版社,2008:252-253.
Kong X S, Yi X F. Experiment technology of plant physiology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008: 252-253.

[27]李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000:59-60.
Li H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 59-60.

[28]张志良,瞿伟菁.植物生理学实验指导[M].3版.北京:高等教育出版社,2003:38-39.
Zhang Z L, Qu W J. Experimental guide for plant physiology [M]. 3rd edition. Beijing: Higher Education Press, 2003: 38-39.

[29]Yuan Y H, Liu L, Gao Y B, et al. Comparative analysis of drought-responsive physiological and transcriptome in broomcorn millet (*Panicum miliaceum* L.) genotypes with contrasting drought tolerance [J]. Industrial Crops and Products, 2022, 177: 114498.

[30]李广浩,赵斌,董树亭,等.控释尿素水氮耦合对夏玉米产量和光合特性的影响[J].作物学报,2015,41(9):1406-1415.
Li G H, Zhao B, Dong S T, et al. Effects of coupling controlled release urea with water on yield and photosynthetic characteristics in summer maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(9): 1406-1415.

[31]Fan J B, Zhang Y L, Turner D, et al. Root physiological and morphological characteristics of two rice cultivars with different nitrogen-use efficiency [J]. Pedosphere, 2010, 20 (4): 446-455.

[32]杜红霞,冯浩,吴普特,等.水、氮调控对夏玉米根系特性的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(1):89-94,100.
Du H X, Feng H, Wu P T, et al. Influence of water and N fertilizer regulation on root growth characteristics of summer maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(1): 89-94, 100.

[33]孙婷,张迪,王冀川,等.滴灌水氮运筹对南疆春小麦根系生长及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2020,38(2):10-20.

Sun T, Zhang D, Wang J C, et al. Effects of drip irrigation and nitrogen application on root growth and yield of spring wheat in Southern Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(2): 10-20.

[34]邢换丽,周文彬,郝卫平,等.水分胁迫下氮素增加对玉米生长的抑制作用[J].中国农业气象, 2020, 41(4): 240-252.
Xing H L, Zhou W B, Hao W P, et al. Inhibition of nitrogen increasing on maize growth under water stress[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2020, 41(4): 240-252.

[35]Tran T T, Kano-Nakata M, Takeda M, et al. Nitrogen application enhanced the expression of developmental plasticity of root systems triggered by mild drought stress in rice[J]. Plant and Soil, 2014, 378(1): 139-152.

[36]司瑞,刘冰,朱钊岑,等.西北干旱区甜高粱种植水肥配比模式研究[J].灌溉排水学报, 2021, 40(5): 54-61.
Si R, Liu B, Zhu Z C, et al. Optimal fertigation and irrigation for sweet Sorghum production in arid regions in Northwest China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(5): 54-61.

Physiological characteristics of sorghum root systems under water and nitrogen regulation at different stages

Wang Jianqiang, Yan Suxian, Li Huiming, Li Zuoyi, Shi Hongmei

(*Institute of Sorghum Research, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030600, China*)

Abstract: [Objective] Water and nitrogen fertilizers form an essential foundation for crop growth in arid regions. Examining the regulation of water-nitrogen interactions on sorghum root systems can enhance sorghum yields and improve water and fertilizer utilization efficiency. [Methods] Two sorghum varieties (Jinza 17 and Jinza 108) were used as experimental materials, subjected to varying water and nitrogen treatments. The water conditions comprised three levels: severe drought stress (W1, soil water content 25%~35%), moderate drought stress (W2, soil water content 45%~55%), and well-watered conditions (W3, soil water content 65%~75%). Nitrogen treatment included three levels: low nitrogen (N1, 0 g·kg^{-1} urea/soil), medium nitrogen (N2, 2 g·kg^{-1} urea/soil) and high nitrogen (N3, 4 g·kg^{-1} urea/soil). The aim was to investigate the impacts of these treatments on the physiological characteristics of sorghum roots during different growth stages. [Results] (1) The effects of water treatments on sorghum root indices were significantly higher than that of nitrogen treatments, with sorghum roots indices showing a significant decrease under severe drought stress. (2) Both cultivars exhibited increased root weight and activity with rising nitrogen application under similar water conditions, notably significant at the medium N level. Meanwhile, soluble sugar, soluble protein, and proline content accumulated faster at medium and high nitrogen levels. (3) A significant interaction effect between water and nitrogen were observed during the heading stage of Jinza 108 but had no significant effect on Jinza 17. (4) Across various water and nitrogen treatments, all root indices of Jinza 108 surpassed those of Jinza 17, showing strong stress resistance. [Conclusion] The present study reaffirms that sorghum root system metrics are greatly impacted by water availability. Optimal nitrogen application could promote root growth and activity, maintain higher osmotic regulatory functions, and mitigate root damage due to water stress. The water-nitrogen interaction effects vary among different sorghum varieties, with Jinza 108 demonstrating heightened resistance to drought and barrenness.

Keywords: Sorghum, Root, Water and nitrogen interaction, Physiological characteristics

(编辑:郭玥微)