



# 水氮耦合对谷子拔节后生长、产量和水氮利用效率的影响

常闻谦<sup>1</sup>, 刘 鹏<sup>1</sup>, 赵世伟<sup>2,3</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘 要** 为给宁南山区不同降雨年限的谷子生产提供合理的水氮管理依据,以‘陇谷 11’为材料,采用水氮 2 因子 3 水平(谷子拔节后 50%、70%、90%的土壤田间持水量和拔节后追施氮肥  $0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  的施氮量)的完全随机组合盆栽试验,研究不同水氮条件对谷子拔节后生长、产量和水氮利用效率的影响。结果表明:在同一水分水平下,中氮处理显著提高谷子的净光合速率、总叶面积、籽粒产量、生物量、氮肥农学效率、氮肥偏生产力和氮肥生理利用率;在同一施氮量条件下,随着土壤含水量的增加,谷子籽粒产量、氮肥农学效率、氮肥偏生产力和氮肥生理利用率显著增加。中氮处理在不同土壤水分条件下均延缓谷子植株叶片的衰老,在生育后期维持较高的旗叶净光合速率,并且在充足水分条件下获得最高的籽粒产量、单株生物量、收获指数、氮肥农学效率和氮肥偏生产力。在适宜环境条件下,可通过增加谷子整体生物量和提高向籽粒的运输分配,来达到增加籽粒产量。

**关键词** 谷子;产量;生物量;净光合速率;总叶面积;水氮利用效率

中图分类号 S515;S158.3

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2018)09-1313-11

谷子(*Setaria italica*),古称粟,是起源于中国的传统种植作物,具有抗旱耐瘠、营养价值高的特点,在中国北方旱区农业中占据着重要的地位;经过近几十年的技术攻关,谷子单产和水肥利用效率有了极大地提高,但仍与国外存在着较大的差距<sup>[1-2]</sup>。宁南黄土丘陵区极端干旱天气频发<sup>[3]</sup>,给本地区的雨养农业带来了极大的不确定性。干旱胁迫会导致谷子严重减产,拔节期干旱胁迫严重影响谷子营养器官的干物质积累;谷子灌浆期对水分胁迫最为敏感,减产最严重<sup>[4-6]</sup>。合理地施用氮肥会协调植株水氮代谢,促进光合作用,延缓叶片衰老,有利于籽粒部位营养成分和光合产物的积累,从而提高谷子产量和品质<sup>[7-8]</sup>;低氮胁迫则会显著降低谷子叶面积指数和叶绿素含量,不利于谷子光合产物的形成、转运和积累<sup>[9]</sup>。关于水氮耦合对谷子产量的影响,前人的研究多集中于单一生育期的水氮胁迫对谷子生长发育和产量的影响,而关于谷子拔节后(生殖生长和产量形成的)整个过程中对水氮耦合的响应的关注则较少,并且宁南山区全年降雨主要分布在7、8、9月,与

谷子拔节后的生育时期相吻合。因此,本试验通过不同土壤含水量模拟不同降雨年限,利用盆栽试验研究拔节后不同水氮环境条件下谷子生长、产量和水氮利用效率的变化,以期对谷子的高产和水氮高效利用提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况和供试材料

试验地点为中国科学院固原生态试验站,位于黄土高原中部偏西、宁夏回族自治区南部的固原市原州区(E106°15′~E106°30′ N35°59′~N36°03′),海拔1534~1824 m,无霜期152 d,年平均气温7.0℃,年均降雨量472 mm,且主要集中在7、8、9月。以‘陇谷 11’为供试材料,盆栽试验用土采自固原市原州区河川乡上黄村农田0~20 cm耕层土壤,土壤类型为黄绵土,前茬玉米,土壤有机质质量分数为 $11.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全氮质量分数为 $1.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效磷质量分数为 $13.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾质量分数为 $142.11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。尿素、重过磷酸钙和硫酸钾为试验氮、

收稿日期:2018-04-14 修回日期:2018-06-24

基金项目:国家科技支撑计划(2015BAD22B04-04)。

第一作者:常闻谦,男,硕士研究生,研究方向为土壤生态、作物栽培。E-mail:changwenqian1991@163.com

通信作者:赵世伟,男,研究员,博士生导师,主要从事土壤生态、植被与土壤互动关系研究。E-mail:swzhao@ms.iswc

磷、钾的来源。

## 1.2 试验设计

采用水氮 2 因素 3 水平完全随机组合盆栽试验,共设 9 个处理。水分处理设置为在谷子拔节期之后将土壤含水量保持土壤田间持水量的 50% (W1, 水分胁迫处理, 模拟欠水年)、70% (W2, 正常水分处理, 模拟平水年)、90% (W3, 充足水分处理, 模拟丰水年)。所有处理的基础施肥一致, 为每千克风干土施纯氮 0.15 g、 $P_2O_5$  0.175 g、 $K_2O$  0.075 g (折合纯氮 90 kg·hm<sup>-2</sup>,  $P_2O_5$  105 kg·hm<sup>-2</sup>,  $K_2O$  45 kg·hm<sup>-2</sup>); 谷子拔节期时开始进行施氮处理, 每千克风干土施纯氮 0 g (N1, 低氮处理, 折合 0 kg·hm<sup>-2</sup>)、0.1 g (N2, 中氮处理, 折合 60 kg·hm<sup>-2</sup>)、0.2 g (N3, 高氮处理, 折合 120 kg·hm<sup>-2</sup>), 中氮处理和高氮处理的氮肥在拔节期和抽穗期各 50% 分别施入。

试验用盆为直径 28 cm, 高 27 cm 圆柱状塑料桶, 按每盆 20 kg 称取风干土, 与基础施肥量混匀装入桶内, 播前浇透水, 并自然落干至含水量达 70%, 于 5 月 20 日播种, 每盆播种 10 颗饱满的‘陇谷 11’种子, 并于桶口覆上薄膜保墒保温, 5 月 25 日出苗, 在三叶期进行间苗, 每盆定植 5 株, 并在土壤表面覆盖厚约 2 cm 的石子, 防止因浇水产生的土壤板结。土壤含水量采用称重法进行计算, 每 2 d 称量记录并补充散失的水分。拔节期前, 桶内一直保持土壤田间持水量的 70%。拔节期开始按试验设计进行水氮处理, 直至谷子成熟收获 (9 月 30 日)。试验在固原站干旱棚内进行, 全生育期排除自然降雨因素, 并记录全生育期盆栽补水量。

## 1.3 测定项目与方法

在抽穗期、灌浆前期、灌浆后期、成熟期, 利用 TPS-2 光合仪测定谷子旗叶净光合速率 ( $P_n$ ), 即于晴天 9:00—11:30 测定谷子旗叶的  $P_n$ , 每个处理 5 个重复, 每个生育期连测 3 d, 取平均值; 长宽系数法测定各时期总叶面积: 植株总叶面积 =  $\sum$  长 × 宽 × 0.75<sup>[10]</sup>。在谷子成熟期取样, 将采样植株分为茎秆、上三叶、其他叶、穗茎、籽粒 5 部分, 于 105 °C 杀青 30 min, 75 °C 烘干至恒质量, 称量法测定单株生物量、单株穗质量和单株穗粒质量,  $H_2SO_4-H_2O_2$  法测定各器官全氮质量分数, 产量按单株穗粒质量进行计算, 生物量按单株计算。

其余相关指标计算方法如下:

收获指数 = 籽粒干质量 / 植株生物量干质量;

籽粒系数 = 籽粒干质量 / (籽粒 + 穗茎) 干质量;

植株 (籽粒) 水分利用效率 = 植株生物量 (籽粒) 干质量 / 生育期总耗水量;

氮肥农学利用效率 = (拔节后施氮下的籽粒干质量 - 拔节后不施氮下的籽粒干质量) / 拔节后施氮量;

氮肥偏生产力 = 籽粒干质量 / 施氮量;

氮肥生理利用率 = (拔节后施氮的籽粒干质量 - 拔节后不施氮的籽粒干质量) / (拔节后施氮的植株吸氮量 - 拔节后不施氮的植株吸氮量)。

## 1.4 数据统计与分析

采用 Excel 2010 进行数据录入与处理, SPSS 18.0 进行数据分析, Duncan's 法显著性检验, Origin 8.5 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水氮水平对谷子 $P_n$ 的影响

由表 1 可知, 不同处理谷子旗叶  $P_n$  随着谷子抽穗后生育期的推进呈现先增加后降低的变化趋势 (W1N1、W2N1 除外), 并在灌浆前期达到最高。

在灌浆前期、灌浆后期和成熟期, 同一水分条件下, 拔节后施氮处理显著增加了谷子旗叶  $P_n$  (灌浆后期水分胁迫条件除外), 这表明谷子生育后期的氮素缺乏, 不利于谷子旗叶的光合作用。在灌浆前期和灌浆后期的正常水分条件下, 不同施氮处理间谷子旗叶  $P_n$  的差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ ), 且随着拔节后施氮量的增加而增加; 而灌浆后期和成熟期的充足水分条件下, 不同施氮处理间的谷子旗叶  $P_n$  的差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ ), 但在中氮处理下取得最高值。这表明, 在不同降雨年限谷子旗叶  $P_n$  对施氮量的响应不同, 依据水分条件合理的氮肥投入有助于谷子生育后期维持较高的谷子旗叶  $P_n$ 。在同一施氮量条件下, 与水分胁迫处理相比, 正常水分和充足水分处理显著增加了谷子旗叶  $P_n$  (灌浆后期低氮条件除外), 并且随着土壤水分条件的改善,  $P_n$  呈现增加的趋势。这表明良好的水分条件有利于生育后期谷子旗叶保持较高的净光合速率。方差分析表明, 水分对各生育期  $P_n$  有极显著影响; 施氮对灌浆前期、灌浆后期和成熟期的  $P_n$  有极显著的影响; 水氮互作对抽穗期和灌浆后期有极显著影响, 对灌浆前期有显著影响, 对成熟期无显著影响。

表 1 不同生育时期不同处理下谷子旗叶的净光合速率  
Table 1 Net photosynthetic rate of millet flag leaf at different growth stage under different treatment

水分处理 Water treatment	施氮处理 Nitrogen treatment	$P_n$			
		抽穗期 HS	灌浆前期 EFS	灌浆后期 LFS	成熟期 MS
W1	N1	14.20±0.89 d	13.33±1.36 e	10.73±1.07 d	5.93±1.01 f
	N2	13.90±0.92 d	15.17±0.72 d	11.53±0.38 d	9.57±1.33 d
	N3	11.83±1.70 e	15.07±0.91 d	10.07±0.85 d	8.33±1.29 de
W2	N1	16.00±0.61 bc	15.40±0.26 d	10.53±2.57 d	6.97±0.42 ef
	N2	17.00±0.98 b	18.90±1.30 b	15.23±0.57 c	12.17±0.84 bc
	N3	15.33±0.40 cd	20.83±0.42 a	17.83±0.42 ab	11.30±0.36 c
W3	N1	15.53±0.31 bcd	17.00±1.39 c	11.33±1.89 d	9.23±0.42 d
	N2	17.10±0.66 b	20.63±0.31 a	19.63±1.14 a	15.33±0.25 a
	N3	18.93±0.85 a	21.80±0.66 a	16.53±1.40 bc	13.03±0.47 b
F 值 F value	W	44.62**	79.99**	35.00**	71.99**
	N	1.83 <sup>ns</sup>	46.05**	31.44**	89.42**
	W × N	8.85**	3.55*	11.21**	2.36 <sup>ns</sup>

注:HS. 抽穗期;EFS. 灌浆前期;LFS. 灌浆后期;MS. 成熟期。数值为“平均值±标准差”,同列不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ );\*\*和\*分别表示1%和5%水平上的差异性,ns表示无显著差异性,下表同。

Note:HFS. Heading stage; EFS. Early filling stage; LFS. Late filling stage; MHS. Mature stage. Values were “means±standard errors”. Different lowercase letters in each column mean significant difference ( $P<0.05$ ); \*\* and \* indicate significant difference at 1% and 5% level respectively,ns indicates no significant difference. The same as following table.

## 2.2 不同水氮水平对谷子总叶面积的影响

所有处理下的谷子总叶面积均在抽穗期最大,随着谷子生育期的推进,呈现逐渐降低的变化趋势(表 2)。在同一水分条件下,不同时期中氮处理的总叶面积均显著高于低氮处理,而高氮处理则表现不一,这表明拔节后的施氮量在一定范围内,才有利于谷子总叶面积的增加,过量施氮的效果并不明显。在同一施氮量条件下,随着土壤水分条件的改善,谷子总叶面积呈增加趋势,不同时期充足水分处理的总叶面积均显著高于水分胁迫处理(灌浆后期高氮处理除外),而正常水分处理则表现不一,这表明充足的水分有利于谷子维持更高的总叶面积。在灌浆后期至成熟期这一阶段,所有处理总叶面积的降低幅度为17.21%~29.14%( $P<0.05$ ),降幅最高的是水分胁迫和低氮处理,降幅达到29.14%,可能是因为谷子生育后期水氮胁迫条件下叶片快速衰老导致的。在相同水分条件下,中氮处理的总叶面积在灌浆后期至成熟期这一阶段的下降幅度均低于其他施氮处理,并且在成熟期高于其他施氮处理,这说明中氮处理能够较好地延缓谷子植株叶片的衰老。不同

水分水平、不同氮肥水平对谷子各时期总叶面积影响极显著,水氮交互作用对灌浆前期的谷子总叶面积影响显著,对灌浆后期的总叶面积影响极显著。

## 2.3 不同水氮水平对谷子籽粒产量的影响

由图 1 可知,充足水分和中氮处理环境下的籽粒产量最高,为每株 13.20 g,水分胁迫和低氮处理环境下的籽粒产量最低,为每株 9.11 g。在同一水分条件下,籽粒产量均呈现中氮处理>高氮处理>低氮处理的趋势,在水分胁迫条件下,不同施氮处理的籽粒产量差异不显著;在正常水分条件下,中氮处理显著加谷子籽粒产量,比低氮处理高出 23.20% ( $P<0.05$ ),比高氮处理高出 9.91% ( $P<0.05$ ),同时高氮处理比低氮处理增产 12.09% ( $P<0.05$ );在充足水分条件下,中氮处理的籽粒产量比低氮水平高出 27.84% ( $P<0.05$ ),比高氮水平高出 5.58% ( $P>0.05$ )。这表明氮肥肥效的发挥与水分条件密切相关,土壤含水量的降低抑制了拔节后施用氮肥的增产效应。

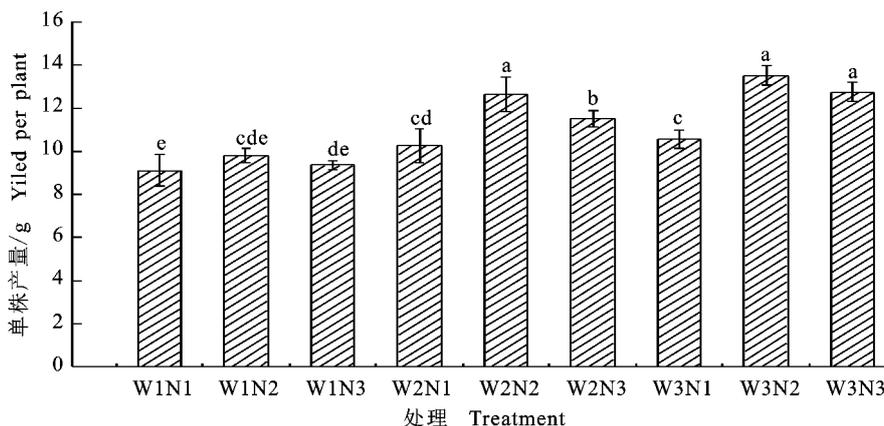
表 2 不同生育时期不同处理下谷子总叶面积

Table 2 Total leaf area at different growth stage under different treatment cm<sup>2</sup>

水分处理 Water treatment	施氮处理 Nitrogen treatment	总叶面积 Total leaf area			
		抽穗期 HS	灌浆前期 EFS	灌浆后期 LFS	成熟期 MS
W1	N1	505.40±16.45 e	463.90±5.44 c	376.37±13.30 d	266.62±10.59 e
	N2	544.80±20.35 d	482.74±9.06 bc	404.85±8.69 c	334.97±10.27 cd
	N3	562.25±10.82 cd	484.42±17.85 bc	437.27±3.48 b	321.61±15.93 d
W2	N1	537.51±6.55 d	478.85±7.25 bc	398.99±21.33 cd	304.98±11.33 d
	N2	593.70±18.36 b	523.54±11.74 a	474.68±15.99 a	379.15±33.99 ab
	N3	581.08±10.88 bc	482.47±8.41 bc	431.34±9.69 b	320.28±14.28 d
W3	N1	556.90±13.75 cd	499.74±19.73 b	421.22±9.09 bc	307.54±6.20 d
	N2	621.20±13.50 a	532.25±11.70 a	490.20±19.01 a	400.63±23.86 a
	N3	592.94±9.47 b	524.94±7.28 a	439.96±8.59 b	358.43±3.77 bc
F 值 F value	W	32.86**	28.27**	25.81**	18.03**
	N	38.10**	14.30**	43.75**	48.40**
	W × N	2.08 <sup>ns</sup>	3.87*	9.13**	2.05 <sup>ns</sup>

在同一施氮量条件下,籽粒产量呈现充足水分处理>正常水分处理>水分胁迫处理的趋势。与水分胁迫处理相比,提高土壤含水量显著增加谷子的籽粒产量,正常水分处理下的低氮、中氮、高氮处理均显著增产 12.62%、28.85%、22.86%,充足水分处理下的低氮、中氮、高氮处理均显著增产 15.92%、37.61%、36.22%;但是,只有在高氮处

理条件下,充足水分处理才比正常水分处理显著增产 10.87%,而在中低氮处理条件下的增产效应并不显著。这说明水分充足是氮肥增产效应的前提,合理地水氮条件才能显著增加谷子籽粒产量。不同水分水平、氮肥水平对谷子籽粒产量影响极显著,水氮交互作用对谷子籽粒产量影响显著。



不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同

Different lowercase letters mean significant difference(P<0.05). The same below

图 1 成熟期不同处理下谷子的单株产量

Fig. 1 Yield per plant of millet at mature stage under different treatment

2.4 不同水氮水平对谷子单株生物量的影响

单株生物量可以反映谷子植株干物质积累的情况,古世禄等<sup>[11]</sup>认为,干物质的积累是谷子高产高效和增产的基础。由图 2 可以看出,在水分胁迫条件下,中氮处理的谷子生物量显著高于低

氮处理和高氮处理,且高氮处理的增产效果不显著,这表明在水分胁迫的条件下适量施氮可以增加谷子植株的干物质积累;在正常水分和充足水分条件下,拔节后施氮显著增加谷子的单株生物量,且高氮处理的单株生物量均低于中氮处理,

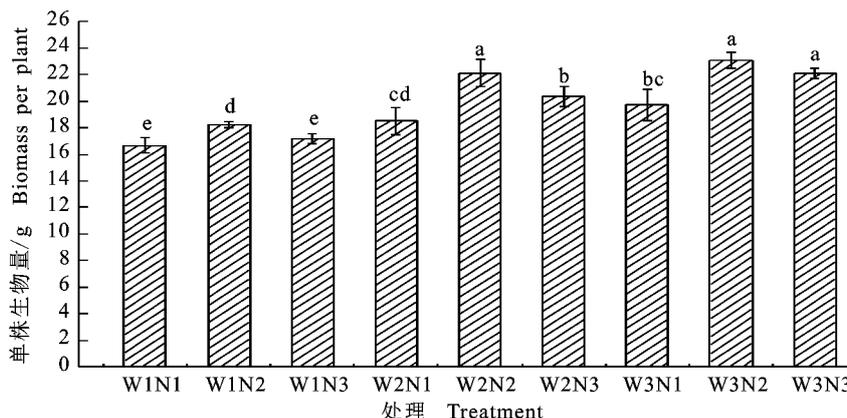


图 2 成熟期不同处理下谷子的单株生物量

Fig. 2 Biomass per plant of millet at mature stage under different treatment

这说明在无水分胁迫的条件下,高氮处理也对谷子植株的干物质积累产生抑制。所以,在谷子拔节后,只有在合理的施用量范围内追施氮肥才能提高谷子的干物质积累。在低氮条件下,与水分胁迫处理相比,正常水分和充足水分处理的单株生物量均显著增加 11.04%、18.36%,而正常水分和充足水分处理间的单株生物量并没有显著差异;在中氮条件下也呈现相同的规律。在高氮条件下,不同水分处理间的单株生物量的差异显著,且随着水分条件的改善而增加。这说明提高土壤水分条件有利于谷子的干物质积累,而适宜的水分和合理的施氮量之间的协调,才能使谷子植株干物质的积累的优势最大化。方差分析表明(表 3 和表 4),不同水分水平、不同氮肥水平和水氮交互作用均显著影响谷子的单株生物量。

2.5 不同水氮水平对谷子籽粒系数和收获指数的影响

籽粒系数是谷子籽粒产量与穗部干物质质量

的比值,反映了籽粒在穗部的分配比例;收获指数是谷子籽粒产量与单株生物量的比值,反映整株干物质质量向籽粒分配的比例。在同一水分水平下,拔节后增施氮肥只在充足水分条件下显著增加谷子的籽粒系数和收获指数;并且高氮处理均低于中氮处理,但未达到显著水平。在中氮水平条件下,与水分胁迫处理相比,只有正常水分处理下的籽粒系数显著高于水分胁迫处理,而收获指数却是只在充足水分处理下显著增加,并且籽粒产量和生物量也在充足水分和中氮处理环境下取得最高值。这表明在适宜的水分和合理的施氮量条件下,谷子是通过增加整体的生物量和提高向籽粒的运输分配,来达到增加籽粒产量的目的。这与许为钢等<sup>[12]</sup>关于关中小麦增产原因的研究结果相似。表 4 可知,不同水分水平、不同氮肥水平和水氮交互作用对谷子籽粒系数的影响均不显著;不同水分水平对谷子的收获指数影响显著,不同氮肥水平和水氮交互作用则影响不显著。

表 3 成熟期不同处理下谷子的籽粒系数和收获指数

Table 3 The grain percentage and harvest index of millet at mature stage under different treatment

水分处理 Water treatment	施氮处理 Nitrogen treatment	籽粒系数/% The grain percentage	收获指数/% Harvest index
W1	N1	82.37±2.27 abc	54.57±3.18 bc
	N2	81.96±0.90 bc	53.79±2.48 c
	N3	82.40±1.11 abc	54.40±1.02 bc
W2	N1	82.68±0.72 abc	55.40±1.80 abc
	N2	84.58±1.78 a	57.12±1.58 abc
	N3	82.82±1.14 abc	56.52±2.41 abc
W3	N1	81.43±0.30 c	53.53±1.20 c
	N2	83.98±1.60 ab	58.48±1.36 a
	N3	83.58±0.44 abc	57.76±1.26 ab

表 4 不同水氮处理下谷子产量、单株生物量、出谷率和收获指数的方差分析

Table 4 Variance analysis on effect of different water and nitrogen levels on millet yield, biomass, grain percentage, harvest index

因素 Factor	F 值 F Value			
	产量 Yield	单株生物量 Biomass	籽粒系数 The grain percentage	收获指数 Harvest Index
W	64.31**	78.73**	1.75 <sup>ns</sup>	3.96*
N	30.51**	33.33**	2.47 <sup>ns</sup>	2.75 <sup>ns</sup>
W×N	4.02*	3.12*	1.51 <sup>ns</sup>	1.85 <sup>ns</sup>

2.6 不同水氮水平对谷子水氮利用效率的影响

水分利用效率反映作物消耗水分与干物质积累之间的关系。由表 5 看出,同一水分水平下,拔节后增施氮肥显著提高植株的水分利用效率,且高氮处理始终低于中氮处理,并在水分胁迫和正常水分处理下表现出显著差异;而对于籽粒水分利用效率,拔节后增施氮肥只在正常水分和充足水分处理下显著增加,且中高氮处理间的差异并

不明显。在这说明在一定的范围内,拔节后增加施氮量可以提高谷子水分利用效率,并且在水分胁迫的条件下,氮肥对植株水分利用效率的调控效果要优于籽粒水分利用效率。方差分析表明,不同水分水平、不同氮肥水平和水氮交互作用均显著影响谷子的籽粒水分利用效率。不同水分水平、不同氮肥水平显著影响谷子植株水分利用效率,但水氮交互作用的影响并不显著。

表 5 不同水氮水平下谷子的水氮利用效率

Table 5 Water and nitrogen use efficiency of millet under different water and nitrogen levels

水分处理 Water treatment	施氮处理 Nitrogen treatment	氮肥农学效率/ (g·g <sup>-1</sup> ) Nitrogen agronomic efficiency	氮肥偏生产力/ (g·g <sup>-1</sup> ) Nitrogen partial factor productivity	氮肥生理利用率/ (g·g <sup>-1</sup> ) Nitrogen physiological efficiency	植株水分利用效率/ (g·kg <sup>-1</sup> ) Water use efficiency of plant	籽粒水分利用效率/ (g·kg <sup>-1</sup> ) Water use efficiency of grain
W1	N1	—	—	—	1.65±0.06 c	0.90±0.07 c
	N2	2.90±1.44 c	16.34±0.58 c	36.12±6.96 b	1.82±0.02 b	0.98±0.03 bc
	N3	0.51±0.48 d	11.14±0.27 e	8.71±8.30 c	1.69±0.04 c	0.92±0.02 c
W2	N1	—	—	—	1.66±0.09 c	0.92±0.07 c
	N2	9.90±3.40 b	21.06±1.36 b	51.41±0.9 a	1.97±0.09 a	1.12±0.07 a
	N3	5.19±1.57 c	13.7±0.45 d	30.36±3.87 b	1.83±0.07 b	1.03±0.03 ab
W3	N1	—	—	—	1.60±0.09 c	0.86±0.03 d
	N2	12.25±1.90 a	22.50±0.76 a	46.45±1.01 a	1.88±0.05 ab	1.10±0.04 a
	N3	9.14±1.82 b	15.18±0.52 c	34.71±2.39 b	1.80±0.03 b	1.04±0.04 ab
F 值 F value	W	32.20**	74.90**	28.80**	5.14*	8.59**
	N	13.46**	357.92**	77.78**	34.36**	28.62**
	W×N	0.55	4.13*	4.00*	1.75	2.96*

氮肥利用率反映作物氮素吸收能力与不同施氮量处理之间的关系。氮肥农学利用效率是作物增产量与增施氮肥的比值,用来表征氮肥的增产效应;氮肥偏生产力是作物产量与施肥量的比值,可以用来评价氮肥的投资效益;氮肥生理利用率则反映植株吸收利用氮肥的能力。由表 5 可知,在同一水分条件下,中氮处理的氮肥农学利用效率、氮肥偏生产力、氮肥生理利用率均显著高于高氮处理,这说明过量的施用氮肥不利于谷子对氮素的吸收利用。在同一氮肥水平下,随着谷子拔

节后土壤水分条件的改善,氮肥农学效率和氮肥偏生产力均显著增加;但是氮肥生理利用率的变化趋势却不同,谷子氮肥生理利用率在中氮水平下随着土壤含水量的升高呈现先上升后下降的趋势,在高氮水平下则呈现增长的趋势。氮肥农学利用效率、氮肥偏生产力、氮肥生理利用率均在水分胁迫和高氮处理环境下最低,为 0.51、11.14 和 8.71 g·g<sup>-1</sup>;氮肥农学利用效率、氮肥偏生产力在充足水分和中氮处理环境下最高,为 12.25、22.50 g·g<sup>-1</sup>,而氮肥生理利用率在正常水分和

中氮处理环境下最高,为  $51.41 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。这反映了籽粒和植株对氮肥的利用效果并不一致,提高土壤含水量可以显著增加籽粒的氮肥利用率和氮肥投资效益,在合理氮肥和充足水分条件下有利于籽粒的氮肥利用的提高,但是植株吸收利用氮肥的能力却不是土壤水分越高越好。

### 3 讨论

宁南山区土壤贫瘠,水资源匮乏,土壤养分和水分是制约本地区农业生产的主要环境因素。因此,提高水肥利用效率是获得作物高产稳产的主要途径之一。土壤养分的有效性和被作物利用的程度,取决于土壤含水量的高低<sup>[13]</sup>;合理的施肥有利于作物对土壤水分的利用<sup>[14-15]</sup>,梁银丽等<sup>[16]</sup>指出,在黄土区坡耕地等贫瘠土壤上,增加施肥可以促进谷子对土壤深层水分的利用,提高水分利用效率。前人关于水氮耦合对小麦的生长、产量和水氮利用效率的影响的研究,均发现土壤氮素和土壤水分密切相关,是相互影响和制约的,协调的水氮关系是获得作物高产和提高水氮利用效率的前提<sup>[17-19]</sup>。因此,协调的水肥关系是作物生长、高产和水肥利用效率提高的保证<sup>[20-21]</sup>。本研究结果表明,水氮耦合对谷子籽粒产量和水氮利用效率的影响明显不同。在同一施氮量条件下,随着土壤含水量的增加,谷子籽粒产量、氮肥农学效率、氮肥偏生产力和氮肥生理利用率均显著增加;在同一水分条件下,随着拔节后施氮量的增加,谷子籽粒产量和水氮利用效率均在中等氮处理条件下最高。这反映了水氮效应之间的交互作用,氮肥肥效的发挥依赖于水分条件,根据实际的降水条件,在合理的用量范围内施用氮肥才会有利于谷子拔节后的生长和增产。

干物质的积累是谷子高产高效和增产的基础<sup>[11]</sup>,在生产实践中,我们的调控手段都是为了提高谷子的经济产量,即提高光合同化物向谷子籽粒的分配运输和积累。本试验研究结果显示,在同一水分条件下,中氮处理显著增加谷子的净光合速率、总叶面积和单株生物量,且高氮处理的单株生物量均低于中氮处理,这表明合理的氮肥投入有助于谷子生育后期维持较高的谷子净光合速率、延缓谷子植株叶片的衰老,提高单株生物量的积累。在同一施氮量条件下,谷子单株生物量随着土壤含水量的升高而增加。单株生物量和收获指数均在充足水分和中等氮处理环境下最高,这

表明在适宜的水分和合理的施氮量条件下,谷子是通过增加整体生物量和提高向籽粒的运输分配,来达到增加籽粒产量。这与许为钢<sup>[12]</sup>等关于关中小麦是通过生物量和收获指数的提高而增产的研究结果相似。

综上所述,适宜的水分条件和合理的施用氮肥是谷子高产的保证,过量的施用氮肥不利于谷子产量、生物量和水氮利用效率的提高,水氮调控主要是通过增加整体生物量和提高向籽粒的运输分配,来达到增加籽粒产量的目的。所以,根据当地实际的降雨条件,充分利用土壤水分情况并合理施用氮肥,保证植株生长所需的最适条件,是实现谷子增产的主要途径。由于本试验是盆栽试验,还需进行大田试验进一步验证。

#### 参考文献 Reference:

- [1] 张雪峰. 中国谷子产业发展问题研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2013:1-7.  
ZHANG X F. Studies on the issues of millet industry development in China [D]. Harbin: College of Economics and Management, 2013: 1-7.
- [3] 李玉勤. 杂粮产业发展研究[D]. 北京:中国农业科学院,2009:33-40.  
LI Y Q. Study on the development of minor grain crop industry [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009: 33-40.
- [3] 刘学军,张煜明,刘平,等. 彭阳县姬阳洼小流域雨水资源高效利用实践[J]. 中国水土保持,2010(8):36-38.  
LIU X J, ZHANG Y M, LIU P, et al. Practice of efficient utilization of rain water resources in the small watershed of Jiyangyu in Pengyang county [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2010(8): 36-38.
- [4] 王永丽,王珏,杜金哲,等. 不同时期干旱胁迫对谷子农艺性状的影响[J]. 华北农学报,2012,27(6):125-129.  
WANG Y L, WANG J, DU J ZH, et al. Effects of drought stress at different periods on agronomic traits of millet [J]. *Journal of North China Agriculture*, 2012, 27(6): 125-129.
- [5] 张玉娜,杜金哲,王永丽. 干旱胁迫对夏谷干物质积累及产量影响[J]. 东北农业大学学报,2016,47(12):15-22.  
ZHANG Y N, DU J ZH, WANG Y L. Effect of drought stress on dry matter accumulation and yield of summer millet [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2016, 47(12): 15-22.
- [6] 刘佳,仪慧兰,郭二虎,等. 不同时期谷子对干旱胁迫的响应[J]. 山西大学学报(自然科学版),2015,38(1):160-164.  
LIU J, YI H L, GUO E H, et al. Responses to drought stress in foxtail millet at different stages [J]. *Journal of Shanxi University (Natural Science Edition)*, 2015, 38(1):

- 160-164.
- [7] 张亚琦,李淑文,付 巍,等. 施氮对杂交谷子产量与光合特性及水分利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(5):1119-1126.  
ZHANG Y Q,LI SH W,FU W,*et al.* Effects of nitrogen application on yield,photosynthetic characteristics and water use efficiency of hybrid millet[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*,2014,20(5):1119-1126.
- [8] 袁宏安,杨清华,闫 伟,等. 施氮量与留苗密度对春谷农艺性状及产量的影响[J]. 作物杂志,2015(4):138-141.  
YUAN H A,YANG Q H,YAN W,*et al.* Effects of nitrogen application and plant density on foxtail millet agronomic traits and yield[J]. *Crops*,2015(4):138-141.
- [9] 程 璐,陈 鑫,张 涵,等. 低氮胁迫对不同品种谷子生长及产量的影响[J]. 山东农业科学,2016,48(10):103-106.  
CHENG L,CHEN X,ZHANG H,*et al.* Effects of low nitrogen stress on growth and yield of different cultivars of foxtail millet[J]. *Shandong Agricultural Sciences*,2016,48(10):103-106.
- [10] 杨慧杰,原向阳,郭平毅,等. 油菜素内酯对阔叶玛胁迫下谷子叶片光合荧光特性及糖代谢的影响[J]. 中国农业科学,2017,50(13):2508-2518.  
YANG H J,YUAN X Y,GUO P Y,*et al.* Effects of brassinolide on photosynthesis,chlorophyll fluorescence characteristics and carbohydrates metabolism in leaves of foxtail millet (*Setaria italica*) under sigma broad stress[J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2017,50(13):2508-2518.
- [11] 古世禄,马建萍,刘子坚,等. 谷子(粟)的水分利用及节水技术研究[J]. 干旱地区农业研究,2001,19(1):40-47.  
GU SH L,MA J P,LIU Z J,*et al.* Study on water use and water-saving techniques in foxtail millet[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*,2001,19(1):40-47.
- [12] 许为钢,胡 琳,吴兆苏,等. 关中地区小麦品种产量与产量结构遗传改良的研究[J]. 作物学报,2000,26(3):352-358.  
XU W G,HU L,WU ZH S,*et al.* Genetic improvement of accumulation and distribution of assimilates and source sink constitution of wheat cultivars in mid-Shanxi area[J]. *Acta Agronomica Sinica*,2000,26(3):352-358.
- [13] 肖自添,蒋卫杰,余宏军. 作物水肥耦合效应研究进展[J]. 作物杂志,2007(6):18-22.  
XIAO Z T,JIANG W J,YU H J. Research progress on crop water and fertilizer coupling effect[J]. *Crops*,2007(6):18-22.
- [14] 信乃谗,侯向阳,张燕卿. 我国北方旱地农业研究开发进展及对策[J]. 中国生态农业学报,2001,9(4):58-60.  
XIN N Q,HOU X Y,ZHANG Y Q. Important progress on research development and countermeasures of dry land agriculture in North China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*,2001,9(4):58-60.
- [15] 关军峰,李广敏. 干旱条件下施肥效应及其作用机理[J]. 中国生态农业学报,2002,10(1):59-61.  
GUAN J F,LI G M. Effects and mechanism of fertilization under drought[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*,2002,10(1):59-61.
- [16] 梁银丽,康绍忠. 坡地施肥水平对谷子根系生长和生产力的作用[J]. 干旱地区农业研究,1998,16(2):53-57.  
LIANG Y L,KANG SH ZH. The act ion of nutrient level on root growth and productivity of millet (staria) on slope land[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*,1998,16(2):53-57.
- [17] 赵连佳,薛丽华,孙乾坤,等. 不同水氮处理对滴灌冬小麦田耗水特性及水氮利用效率的影响[J]. 麦类作物学报,2016,36(8):1050-1059.  
ZHAO L J,XUE L H,SUN Q K,*et al.* Effect of different irrigation and nitrogen application on water consumption characteristics and the water and nitrogen use efficiencies under drip irrigation in winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*,2016,36(8):1050-1059.
- [18] 李锁玲,孟瑞娟,卢 健. 水氮耦合对冬小麦不同生育期干物质积累量及水分利用效率的影响[J]. 山东农业科学,2013,45(7):87-90.  
LI S L,MENG R J,LU J. Effects of water-nitrogen coupling on dry matter accumulation and water use efficiency of winter wheat at different growth stages[J]. *Shandong Agricultural Sciences*,2013,45(7):87-90.
- [19] 沈荣开,王 康,张瑜芳,等. 水肥耦合条件下作物产量、水分利用和根系吸氮的试验研究[J]. 农业工程学报,2001,17(5):315-318.  
SHEN R K,WANG K,ZHANG Y F,*et al.* Field test and study on yield,water use and N uptake under varied irrigation and fert ilizer in crops[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2001,17(5):315-318.
- [20] 文宏达,刘玉柱,李晓丽,等. 水肥耦合与旱地农业持续发展[J]. 土壤与环境,2002,11(3):315-318.  
WEN H D,LIU Y ZH,LI X L,*et al.* Water and fertilizer coupling and dryland agricultural sustainable development [J]. *Soil and Environmental Sciences*,2002,11(3):315-318.
- [21] 翟丙年,李生秀. 冬小麦产量的水肥耦合模型[J]. 中国工程科学,2002,4(9):69-74.  
ZHAI B N,LI SH X. The model of water and nitrogen coupling in winter wheat yield[J]. *Engineering Science*,2002,4(9):69-74.

## Effects of Water and Nitrogen Coupling on Growth, Yield and Water and Nitrogen Utilization after Millet Jointing

CHANG Wenqian<sup>1</sup>, LIU Peng<sup>1</sup> and ZHAO Shiwei<sup>2,3</sup>

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS, MWR, Yangling Shaanxi 712100, China;

3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China)

**Abstract** In order to provide reasonable water and nitrogen management basis for millet production in different rainfall years in the mountainous area of Southern Ningxia, we took ‘Longgu 11’ as material, water and nitrogen two-factor and three-level complete combination pot experiment (soil water holding capacity in 50%, 70%, and 90% soils, and N application rates of topdressing N fertilizers of 0 g · kg<sup>-1</sup>, 0.1 g · kg<sup>-1</sup> and 0.2 g · kg<sup>-1</sup> after millet jointing) were used in this study to study the effects of growth, production and water and nitrogen use efficiency of different water and nitrogen conditions on millet after jointing. The results showed that the middle nitrogen treatment significantly increased the net photosynthetic rate, total leaf area, grain yield, plant biomass, nitrogen agronomic efficiency, nitrogen partial productivity and nitrogen physiological utilization rate of millet at the same water level. Under the same nitrogen application rate, with the increase of soil water content, the grain yield, nitrogen agronomic efficiency, nitrogen partial productivity and nitrogen physiological utilization rate of millet increased significantly. In this experiment, middle nitrogen treatment delayed the senescence of millet plants under different soil water conditions, and maintained a higher net photosynthesis rate of flag leaf at the late growth stage, and obtained the highest grain yield, plant biomass, harvest index, nitrogen agronomic efficiency, nitrogen partial productivity under a sufficient water condition. At the same time, the results also showed that, under the suitable environmental conditions, millet achieved the goal for higher grain yield by increasing the overall biomass and the transport distribution.

**Key words** Millet; Yield; Biomass; Net photosynthetic rate; Total leaf area; Water and Nitrogen use efficiency

**Received** 2018-04-14

**Returned** 2018-06-24

**Foundation item** National Key Technology R&D Program of China(No. 2015BAD22B04-04).

**First author** CHANG Wenqian, male, master student. Research area: soil ecology and crop cultivation. E-mail: changwenqian1991@163.com

**Corresponding author** ZHAO Shiwei, male, research fellow, doctoral supervisor. Research area: soil ecology and the interaction between vegetation and soil. E-mail: swzhao@ms.iswc

(责任编辑:成敏 Responsible editor: CHENG Min)