植物营养与肥料学报 2014,20(5):1119-1126
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0508

施氮对杂交谷子产量与光合特性及水分利用效率的影响

张亚琦[1], 李淑文[1], 付 巍[1], 文宏达[1,2*]
(1 河北农业大学资源与环境科学学院, 河北保定 071001; 2 河北省农田生态环境重点实验室, 河北保定 71001)

摘要:【目的】随着杂交谷子高产特性的凸显和栽培技术研究的不断深入,确立高产条件下的合理施肥方案具有重要现实意义。本文设定了不同氮素水平,研究施氮量对谷子生物量、产量、光合特性及水分利用效率(WUE)的影响,以确定杂交谷子高产的合理施氮方案。**【方法】**以"张杂5号"谷子为对象,采用田间小区试验,设施氮量0、100、200、300(分3次施)、300(分2次施)、400 kg/hm^{2}共6个氮素水平(N0～N5处理),通过测定杂交谷子籽粒产量、生物量、农田耗水量和光合特性,分析施氮与杂交谷子产量、光合特性及水分利用效率(WUE)之间的关系。**【结果】**谷子产量、光合特性及WUE与施氮水平密切相关。不同施氮处理谷子生物量比对照N0处理增加了26.33%～87.21%,处理间差异显著。谷子籽粒产量以N3(300 kg/hm^2,分3次施)和N5(400 kg/hm^2)处理较高,分别为8202 kg/hm^{2}和8537 kg/hm^2,两处理间差异不显著。各生育阶段谷子的耗水特征变化趋势不同。生育前期耗水变化不明显,拔节-抽穗期谷子农田耗水量以N0处理日均耗水量最大;在生育后期N0处理耗水量最小,N3耗水量最大。全生育期谷子总耗水量处理间差异较小,以N1(100 kg/hm^2)处理总耗水量最大。杂交谷子叶片的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度均以N0处理最小,N3处理为最大。籽粒水分利用效率、生物水分利用效率及单叶水分利用效率均以N3处理为最高。本试验条件下,施氮量为400 kg/hm^{2}时,虽获得了最高产量,但与施用N 300 kg/hm^{2}差异不显著,且水分利用效率较低,说明高量施氮的增产效果不明显。**【结论】**氮素的合理使用协调了水氮关系,提高了水分利用效率。同时,施氮还提高了杂交谷子的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度。施氮量相同,但施肥时期不同,产量和WUE也差异显著。谷子生育前期大量施肥降低了营养物质向籽粒的转移,产量较低。因此,推荐施氮300 kg/hm^2(分3次施)作为本地区杂交谷子高产高效的合理施氮量。

关键词: 杂交谷子; 施氮量; 产量; 光合特性; 水分利用效率
中图分类号: S515; S143.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)05-1119-08

Effects of nitrogen application on yield, photosynthetic characteristics and water use efficiency of hybrid millet

ZHANG Ya-qi[1], LI Shu-wen[1], FU Wei[1], WEN Hong-da[1,2*]
(*1 College of Resource and Environmental Science, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001, China;*
2 Key Laboratory for Farmland Eco-Environment of Hebei Province, Baoding, Hebei 071001, China)

Abstract:【Objectives】 The rational fertilization schedule has being required by the steadly increasing of yield of hybrid millet and intensive cultivation technique. A field experiment was conducted to study the influence of nitrogen application rate on biomass, yield, photosynthetic characteristics and water use efficiency (WUE) of hybrid millet for determining the rational nitrogen application scheme. **【Methods】** The field experiment was conducted with 'Zhangzagu No. 5' hybrid millet as research object. The study consisted of 6 nitrogen application rates, 0, 100, 200, 300 kg/ha (application for three times), 300 kg/ha (application for two times) and 400 kg/ha with the treatments code from N0 to N5 continuously. **【Results】** The yield, photosynthetic characteristics and water use efficiency of millet are significantly related to nitrogen application levels. The hybrid millet biomass

收稿日期: 2013-10-30 **接受日期:** 2014-06-10
基金项目: 国家科技支撑计划研究项目(2011BAD06B02-6)资助。
作者简介: 张亚琦(1988—),女,河北邢台人,硕士研究生,主要研究方向为水土资源与水环境。E-mail: zhang1988yaqi@163.com
* 通信作者 E-mail: wenhd@163.com

in the nitrogen application treatments are increased by 26.33%-87.21% than that in the control treatment (N0), and the variation of biomass in different treatments was significant. The higher millet grain yields are in the N3 (300 kg/ha) and N5 (400 kg/ha) treatments, which are 8202 kg/ha and 8537 kg/ha respectively, and the difference between N3 and N5 is not significant. The variation tendency of water consumption is different at the growing stages of millet. At the early growing stages the water consumption of hybrid millet is not changed significantly, and the maximum daily water consumptions are in the N0 treatment at the jointing and heading stages. The largest daily water consumption is in the N3 treatment at the late growth stage. The variation of total water consumption in whole growing period of millet is relatively small, the largest total water consumption is in the N1 treatment. The smallest net photosynthetic rates (Pn), transpiration rates (E) and stomatal conductances (C) of hybrid millet are separately in the N0 and and the largest in N3 treatments. The highest water use efficiencies of yield (WUE), of dry matter (WUE_{DM}) and of single-leaf (WUE_{SL}) are all in the N3 treatment. Under the highest nitrogen application amount, 400 kg/ha (N5), the highest yield of millet is obtained, while the water use efficiency is lower than that in the N3 treatment. **【Conclusions】** The rational use of nitrogen increases Pn, E and C of hybrid millet and coordinates the relationships between the water and nitrogen, improves the water use efficiency. The same amount of nitrogen application the yields and WUEs are significantly different when the fertilization are applied different periods. The larger amount of nitrogen application at the earlier growing period of millet decreases the nutrients translocation to grains, and has low yield. N 300 kg/ha (application for three times) is proposed as the rational amount of nitrogen application for higher yield of hybrid millet in the region.

Key words: hybrid millet; nitrogen application; yield; photosynthetic characteristics; water use efficiency

植物营养着重考察水分和养分的协调供应,在水分受限制的条件下,合理施用肥料可提高水分利用效率[1-2]。谷子是一种抗旱、节水、耐瘠薄土壤的作物,其根系发达,保水能力强,在干旱贫瘠的土壤上种植,具有良好的稳产性[3]。同时,其籽粒小米富含多种氨基酸和维生素,营养价值高于小麦、玉米,市场价格逐年增加,效益显著[4-5]。用谷子光(温)敏不育两系法研制成功的张杂谷系列品种比常规谷子更具有高产、抗旱、耐贫瘠、节水高产的优良品质,在河北省张家口市坝下地区表现出了显著的增产优势和增收效果,适应了农民求高产和高收益的心理[6-8]。谷子是北方地区主要杂粮作物,因张杂系列高产杂交种的育成,种植区域和产量均有了较大发展和提高。谷子合理施肥及水分利用效率的研究在旱作区较多。于亚军等[9]研究表明,在丰水年型(高补灌)水分供应条件下,高肥水平(N 180 kg/hm^2、P_2O_5 162 kg/hm^2)可使谷子产量达到最高,而中肥水平水分利用效率(WUE)却最高。施用化肥可提高作物产量及水分利用效率,在全生育期降水量354.7 mm条件下,施肥量为N 150 kg/hm^2、P_2O_5 120 kg/hm^2、K_2O 90 kg/hm^{2}时,谷子的WUE为最高,达到13.1 kg/(mm·hm^2)和21.1 kg/(mm·hm^2)(北坪),分别比当地农民习惯提高71.5%和37.7%[10]。郝洪波[11]、古世禄[12]等人研究得到了提高谷子产量的合理氮磷钾配比以及提高谷子水分利用效率(WUE)的品种、播期等措施。刘猛等[13]研究表明,科研投入少、消费产品需求单一、比较效益较低、谷子本身的生理特性等因素是影响谷子种植区域变迁的因素。李向文[14]等在片麻岩山地土壤研究发现,当施氮量在120 kg/hm^2 ~ 300 kg/hm^{2}范围时,谷子产量变化不大,土壤硝态氮含量有明显增加。国外谷子种植面积较小,有关谷子高产栽培的施肥研究较少。Soler等[15]运用CSM-CERES-Millet模型模拟确定了施氮条件下三种珍珠粟的最佳播期。谷子杂交种较常规谷子水分利用效率显著提高,表现出更好的节水增产效果。在不同水分梯度下,杂交谷子的水分利用效率平均值较常规种提高30.99%~41.00%,说明种植杂交谷子可在不同降雨年型大幅度提高水分利用效率,达到高效用水的目的[16]。

前人对谷子栽培技术、施肥效应等研究大多针对常规谷子品种,在集雨补灌、肥料配施、降水年型、施氮和收获时间、分根交替灌溉等方面[17-21]研究了谷子的生长发育变化。但在杂交谷子的合理施肥及其对水分高效利用方面的系统研究较少,张杂谷系列虽获得了高产,但其高产栽培的合理施肥技术

及其高效用水规律仍为系统研究。因此,本试验通过调查杂交谷子与常规谷子高产的施肥状况,设定了不同氮素供应水平,研究施氮对杂交谷子生物量、产量、水分利用效率及光合生理特性的影响,探索不同氮素水平下杂交谷子的水分利用特征,以找出高产高效的合理施氮方案,为杂交谷子水肥合理调控提供理论依据和技术支撑。

1　材料及方法

1.1　试验地概况

田间试验在河北省张家口市农科院谷子研究所试验基地进行。基地位于宣化县沙岭子镇,属中温带亚干旱气候,年降雨量 300 ～ 400 mm,无霜期 110 ～ 140 d,年均气温 7.7℃。一年一熟,主要种植春谷子、春玉米等。供试土壤(0—40 cm 土层)土壤理化性状如下: 土壤容重 1.57 g/cm^3,有机质 12.89 g/kg,全氮 0.96 g/kg,有效磷 22.28 mg/kg, 速效钾 78.46 mg/kg。谷子生育期当年总降水量 208.8 mm,其中播种至拔节期 38.3 mm、拔节至抽穗期 83.7 mm、抽穗至成熟期 86.8 mm。

1.2　试验设计与管理

试验共设 6 个施氮处理(表 1,通过生产调查谷子高产所需氮素用量在 225 ～ 300 kg/hm^2 之间,因此设定 300 kg/hm^2 为中等用量处理,设定施氮梯度以便研究确定杂交谷子氮素高效或高产的合理用量)。小区面积为 33 m^2(5.5 m ×6 m),每处理重复 3 次,随机区组排列。各处理均以磷钾肥为底肥,用量为 P_2O_5 180 kg/hm^2、K_2O 300 kg/hm^2。氮肥选用尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥使用氯化钾。每次追肥后,所有处理均灌水,每次灌水量 60 mm(所有处理遇旱时均灌水 60 mm,以保证谷子的水分需求)。供试谷子品种为张杂谷 5 号,于 2012 年 5 月 17 日播种,9 月 28 日收获。全部采用平作种植,密度为 27 万株/hm^2。

表 1　杂交谷子氮素用量试验设计

Table 1　Experimental design of nitrogen application rates for hybrid millet

处理 Treatment	氮素总用量 Total nitrogen application (kg/hm^2)	施肥时期 Fertilization period		
		底肥(kg/hm^2) Base fertilizer	拔节期(kg/hm^2) Jointing stage	抽穗期(kg/hm^2) Earring stage
N0	0			
N1	100	50	50	
N2	200	50	150	
N3	300	50	150	100
N4	300	50	250	
N5	400	50	250	100

1.3　项目测定

1.3.1 土壤含水量　分别在播期(5 月 17 日)、拔节期(6 月 23 日)、抽穗期(7 月 23 日)、成熟期(9 月 10 日)用土钻取 0 ～ 150 cm 土层土样,每 20 cm 为一层,置于铝盒,称鲜土重后于 105℃下烘至恒重,称干重,计算土壤质量含水量。

1.3.2 耗水量　测定 0—150 cm 土层的土壤容重,每 20 cm 为一层。根据土壤含水量计算出不同生育时期的土体贮水量,并记录全生育期的降水量,分析不同施氮水下平杂交谷子不同生育阶段的水分消耗与动态特征。

作物田间耗水量的确定[16, 17]。作物田间耗水量用水分平衡方程式计算:

$$ET = P + I + \triangle W$$

式中,ET 为阶段耗水量; P 为降水量。此试验从播种到收获,降雨量总值为 208.8 mm。I 为灌溉水量,拔节期抽穗期各灌水 60 mm; △W 为计算时段内土壤贮水量的变化。土壤贮水量:

$$W = 0.1 \times r \times v \times h$$

式中,W 为不同深度土壤贮水量(mm); r 为土壤相对含水量(%); v 为土层容重(g/cm^3); h 为土层深度(cm); 0.1 为换算系数。

1.3.3 水分利用效率　指单位面积消耗每毫米水生产的干物质量或籽粒产量[18]。

$$WUE = Y/ETi$$ [19-20]

式中：Y 为籽粒产量或生物产量；ETi 为谷子生育期间耗水量。

1.3.4 单叶片光合特性　在谷子抽穗期，选择天气晴朗的日子，于 9：00 ～ 10：00 用 CI-340 型光合仪测定不同处理旗叶叶片净光合速率（Pn）、气孔导度（C）和蒸腾速率（E）等光合特性指标。每隔 3 d 取每处理 3 株进行测定，共测定 3 次，结果取平均值。计算叶片水分利用效率（WUE）：

$$WUE = Pn/E$$

1.4 数据处理

以各个生育时期的土壤耗水量、谷子籽粒产量、生物产量、光合特性指标和各个水分利用效率数据为指标，采用 Microsoft Excel 2003 处理数据、绘制图表，用 SPSS 17.0 数据分析软件进行数据统计分析和差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同施氮处理谷子田耗水量变化

不同处理各生育阶段农田耗水量如图 1 所示。从阶段耗水特征看，谷子生育前期耗水量较低，处理间差异较小，耗水量变化于 26.02 ～ 29.76 mm 之间；生育后期耗水明显增多，且由于施氮量和施氮时期的不同，处理间表现各异。拔节 – 抽穗阶段，以 N0 和 N1 处理耗水量较大，分别为 302.90 mm 和 295.02 mm，N3 处理耗水最少，为 190.29 mm；谷子抽穗 – 成熟阶段的日均耗水量变化趋势与抽穗前明显不同，不施氮处理日均耗水量显著低于施氮处理，以 N3 处理日均耗水最多，达 7.74 mm/d，比 N0 处理日均多耗水 3.94 mm。由此说明，生育前期氮素不足或偏多，会增加杂交谷子的水分消耗量；抽穗之后进入生殖生长阶段，N3 处理在抽穗期追肥，延长了肥料氮的供应，耗水量增大，有助于谷子产量的形成。

2.2 施氮对谷子籽粒产量及水分利用效率的影响

由表 2 可知，杂交谷子产量随施氮量增加总体呈上升趋势。与对照 N0 相比，施氮处理谷子增产 7.71% ～29.00%，以 N5 处理为产量最高，N3 处理次之，但二者差异不显著。N3 与 N4 处理相比，二者施氮量相同，但产量却比 N4 高出 15.07%，说明 N4 处理随拔节期施氮量的加大，肥效呈现负效应，产量不仅低于 N3 处理，也低于其他施氮处理，其减产原因可能与前期生长过旺有关，其机制有待进一步研究。全生育期谷子耗水量均以施氮处理大于不施氮处理。与 N0 相比，施氮处理谷子多耗水 0.44%～9.5%。同时，施氮处理谷子的水分利用效率（WUE）均高于 N0 处理，WUE 提高幅度为 6.87% ～ 23.39%；以 N3 处理 WUE 值最高，达 15.16 kg/（mm · hm²）。这说明施氮明显促进了杂交谷子的生长，使得耗水量增大，单位耗水的产出效益也明显提高，尤其是合理追施氮肥，增加穗后肥的施用，优化了肥料供应的持续性，以肥调水，较好地提高了谷子产量和水分利用效率。

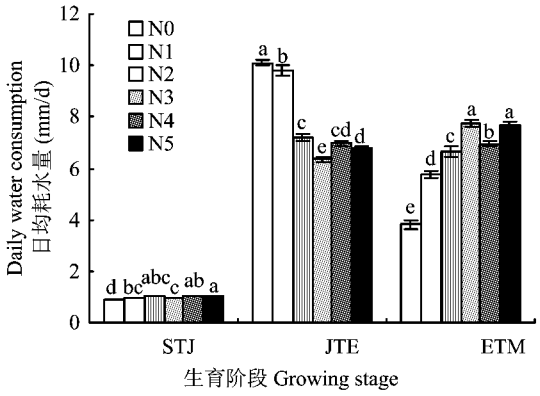

图 1　不同处理各生育阶段日均耗水量

Fig. 1　Daily water consumption of hybrid millet at the growing stages in different treatments

［注（Note）：STJ—出苗至拔节 From seedling to jointing；JTE—拔节至抽穗 From jointing to earring；ETM—抽穗至成熟 From earring to maturity. 方柱上不同小写字母者表示处理间差异显著（$P < 0.05$）Different small letters above the bars mean significant differences among the treatments at the 0.05 level.］

表 2　不同处理籽粒产量及水分利用效率

Table 2　Yields and WUEs of hybrid millet in different treatments

处理 Treatment	籽粒产量 Yield (kg/hm²)	耗水量 Water consumption (mm)	水分利用效率 WUE [kg/(mm · hm²)]
N0	6618 ±273 d	538.7 ±7.8 c	12.29 ±0.51 d
N1	7549 ±245 b	591.8 ±7.1 a	12.76 ±0.41 cd
N2	7644 ±70 b	556.1 ±10.1 bc	13.81 ±0.13 b
N3	8202 ±44 a	541.1 ±7.2 c	15.16 ±0.08 a
N4	7128 ±316 c	542.9 ±14.0 c	13.13 ±0.58 bc
N5	8537 ±269 a	575.6 ±8.7 ab	14.83 ±0.48 a

注（Note）：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著（$P < 0.05$）Values followed by different small letters in a column mean significant difference among treatments at the 0.05 level.

2.3　施氮对谷子生物量及水分利用效率的影响

在不同生育时期，谷子地上部干物重（生物量）和生物水分利用效率因施氮量的变化如表 3 所示。拔节期，谷子总生物量较低，变化范围在 631 ～ 843 kg/hm^2 之间，处理间差异不显著。到抽穗期谷子生物量大幅增加，以 N3 处理最高，N5 和 N0 处理次之。成熟期谷子生物量进一步提高，与对照 N0 相比，施氮处理生物量增产 26.33% ～ 87.21%，处理间差异显著，以 N3 处理的生物量最大。

在谷子不同生育期，按生物量计算的水分利用效率（Water use efficiency with dry matter，WUE_{DM}）差异较大，一般以抽穗期的生物水分利用效率较高。抽穗之后谷子进入灌浆期，光合产物向籽粒转移，植株消耗水分不断增多，谷子的 WUE_{DM} 值有所降低。不同施氮条件下，谷子不同生育期的生物水分利用效率均以对照 N0 处理最低，为 26.32 kg/(mm · hm^2)；N3 处理最高，达 46.09 kg/(mm · hm^2)。成熟期，施氮处理谷子的 WUE_{DM} 值比 N0 处理高出了 20.81% ～ 75.09%。

表 3　不同生育时期地上部干物重及生物水分利用效率

Table 3　Dry matter weight and water use efficiency-dry matter (WUE_{DM}) of hybrid millet at different growing stages

处理 Treatment	地上部干物重（kg/hm^2） Shoot dry matter weight			水分利用效率[kg/(mm · hm^2)] WUE_{DM}		
	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Earring stage	成熟期 Maturity stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Earring stage	成熟期 Maturity stage
N0	632 ± 20 c	13377 ± 75 c	19957 ± 363 f	9.83 ± 0.31 c	29.67 ± 0.16 e	26.32 ± 0.48 f
N1	676 ± 10 c	11698 ± 133 e	28342 ± 69 d	10.16 ± 0.15 c	26.27 ± 0.30 f	33.93 ± 0.08 d
N2	746 ± 12 b	11950 ± 349 de	25212 ± 603 e	11.09 ± 0.18 b	32.62 ± 0.67 d	31.81 ± 0.40 e
N3	787 ± 25 b	17024 ± 304 a	37361 ± 240 a	11.90 ± 0.38 ab	50.05 ± 0.63 a	46.09 ± 0.30 a
N4	843 ± 29 a	12326 ± 45 d	32648 ± 67 b	12.43 ± 0.42 a	34.20 ± 0.12 c	40.81 ± 0.08 b
N5	786 ± 27 b	14143 ± 209 b	29576 ± 640 c	11.55 ± 0.40 b	39.85 ± 0.59 b	35.81 ± 0.78 c

注（Note）：不同小写字母表示处理间差异显著（$P < 0.05$）Different small letters mean significant difference among treatments at the 0.05 level.

2.4　不同施氮处理谷子的光合特性变化

蒸腾作用是植物吸收和运输水分的动力之一。蒸腾强度越大，作物根部吸收的水分越多，养分通过质流到达根系表面的数量就越多，就越有利于作物对水分和养分的吸收[22]。叶片气孔导度表示气孔张开的程度，影响光合作用、呼吸作用及蒸腾作用，与蒸腾作用成正比。施肥促进作物对水分的吸收、转运和利用，光合速率的增加有利于光合产物的形成。

表 4 表明，施氮后叶片的光合速率、蒸腾速率和气孔导度均比 N0 处理有所增加。各处理间叶片净光合速率（Pn）差异性显著，以 N3 处理 Pn 值最大，不施氮处理 Pn 值最小。

与对照 N0 处理相比，各施氮处理的谷子净光合速率分别提高了 26.61% ～ 58.94%，叶片蒸腾速率分别增加 6.31% ～ 56.79%，气孔导度则增加了 38.03% ～ 66.40%。这充分说明施用氮素，改善了谷子叶片光合特性，有利于光合产物的形成，叶片蒸腾速率和气孔导度的增大，则加速了谷子养分物质的运输和传导，对于植物吸收土壤养分以及向籽粒进行营养物质转运具有很好的促进作用。

单叶水分利用效率是瞬时水分利用效率，它反映了各作物品种光合指标测定时的生长状况。施氮处理单叶水分利用效率均显著高于 N0 处理，WUE_{SL} 值提高了 16.97% ～ 35.76%，N3 处理单叶 WUE_{SL} 值显著大于其他施氮处理。这说明施氮提高了叶片单位耗水量的产出能力，但过量施氮则使 WUE_{SL} 值有所降低。

表4 不同处理光合特性及单叶片水分利用效率

Table 4 Photosynthetic characteristics and single-leaf WUEs (WUE_{SL}) of hybrid millet in different treatments

处理 Treatment	净光合速率 Pn [μmol/(m² · s)]	蒸腾速率 E [mmol/(m² · s)]	气孔导度 C [mmol/(m² · s)]	单叶片水分利用效率 WUE_{SL} (CO_2 μmol/mmol, H_2O)
N0	16.95 ±0.69 d	2.06 ±0.10 d	73.07 ±5.74 c	8.25 ±0.17 d
N1	21.46 ±0.72 c	2.19 ±0.05 c	100.86 ±3.48 b	9.78 ±0.13 c
N2	22.61 ±1.59 c	2.30 ±0.05 b	103.55 ±2.90 b	9.82 ±0.49 c
N3	26.94 ±0.56 a	2.41 ±0.01 a	121.59 ±7.10 a	11.20 ±0.19 a
N4	22.44 ±0.24 c	2.32 ±0.02 ab	102.35 ±1.36 b	9.65 ±0.06 c
N5	24.71 ±0.50 b	2.31 ±0.02 ab	109.04 ±2.57 b	10.68 ±0.11 b

注(Note):不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$) Different small letters mean significant difference among treatments at the 0.05 level.

3 讨论与结论

作物的合理施肥,不仅能满足作物对养分的需求提高产量,且在雨养农业条件下还可有效地提高水分利用效率[23]。水分和养分是影响谷子产量的重要环境因子。在水分供应充足的条件下,氮素用量及施肥时期对杂交谷子产量和水分利用效率影响巨大。本试验条件下,谷子籽粒水分利用效率(WUE)、生物水分利用效率(WUE_{DM})及单叶水分利用效率(Single-leaf WUE)均以N3处理最高,施氮量进一步增大(N5),谷子WUE有所较低,表明施氮有利于谷子水分利用效率的提高,起到了"以肥调水"的作用。过量施入氮肥会降低谷子水分利用效率,这与严昌荣[24]等的研究结果一致,但在施氮水平上有所差别。由此可说明,肥料的增产作用不仅在于其本身,更重要的是在于肥和水的协调互作。合理施用氮肥可增强杂交谷子对养分和水分的吸收,从而提高杂交谷子水分利用效率。有人研究认为,采用底肥和种肥一次开沟深施或盖施较分次施肥增产效果明显,采取"一炮轰"的施肥方法,不但可以使穗大株高,而且分蘖较多并且整体,成穗率提高,增加产量的效果好,同时这种方法方便省工,肥料的利用率高[10]。本试验结果表明,杂交谷子分期施肥,增加穗后肥的增产效果较好,这与前人研究结果不一致。

李伏生[25]、于亚军[9]等研究表明,随着氮肥用量增加光合速率相应增加,叶片水分利用效率也增加。过量施用氮肥,WUE提高不明显。杂交谷子较常规谷子产量有较大提高,水肥条件适宜时可以获得6000～8000 kg/hm² 的产量,因此所需养分较多。本试验条件下,最高施氮量为400 kg/hm² 时,虽然水分利用效率低于N3处理,但谷子产量最高,此氮素用量是否为谷子高产的最高限量(或过量)的标准还需要进一步深入研究。同时,杂交谷子高产的水肥耦合效应及其节水技术效应也需进一步研究。

氮素的施用可以促进杂交谷子的生长发育,生物量比N0对照提高了26.33%～87.21%,处理间差异显著,以N3处理生物量最大。N3和N5处理的籽粒产量最高,分别为8202 kg/hm² 和8537 kg/hm²,但处理间差异不显著。各生育阶段谷子的耗水特征变化趋势不同,全生育期谷子总耗水量差异较小。说明氮素的合理使用协调了水氮关系,提高了水分利用效率。各处理以N3处理水分利用效率最高达15.16 kg/(mm · hm²)。同时,施氮还提高了杂交谷子的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度。本试验条件下,N5处理施氮量最高,虽获得了最高产量,但与N3处理产量差异不显著,且水分利用效率较低,说明过量施氮的增产效果不明显。N3与N4处理施氮量相同,但因施肥时期的不同,产量和水分利用效率差异显著,谷子生育前期的大量施肥降低了营养物质向籽粒的转移,产量较低。因此,本试验条件下,推荐N3处理(300 kg/hm²,分底肥、拔节肥与抽穗肥施用)为兼顾产量、水分利用效率和效益的施氮方案。

参考文献:

[1] 王殿武,周大迈,臧士国,等. 太行山区旱地谷子推荐施肥量的确定及其水分利用效率研究[J]. 河北农业大学学报,1997,20(4):16-20.

Wang D W, Zhou D M, Zang S G *et al*. A research of determining the recommended amount of fertilizer application and precipitation use efficiency in cereal on dryland in Taihang Mountain area[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 1997, 20(4): 16

-20.

[2] 田霄鸿，聂刚，李生秀. 不同土壤层次供应水分和养分对玉米幼苗生长和吸收养分的影响[J]. 土壤通报，2002，33(4)：263-267.
Tian X H, Nie G, Li S X. Effect of water and nutrients supplying in different soil layers on growth and nutrition absorption of corn seedlings[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(4): 263-267.

[3] 张海金. 谷子在旱作农业中的地位和作用[J]. 安徽农学通报，2007，13(10)：169-170.
Zhang H J. The position and role of the millet in rainfed agriculture[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2007, 13(10): 169-170.

[4] 张超，张晖，李冀新. 小米的营养以及应用研究进展[J]. 中国粮油学报，2001，22(1)：51-58，78.
Zhang C, Zhang H, Li J X. Nutrition and application research progress of millet[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2001, 22 (1): 51-58,78.

[5] 王洋，周怀平，关春林，等. 旱地谷子水肥高效调控技术研究进展[J]. 山西农业科学，2012，40(5)：540-542.
Wang Y, Zhou H P, Guan C L *et al*. Research progress in water and fertilizer efficiency control technique of foxtail millet in dryland [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2012, 40(5): 540-542.

[6] 姚瑞. 杂交谷子种植情况调研报告[J]. 现代农业科技，2010，8：4-5.
Yao R. Survey report of hybrid millet planting[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2010, 8: 4-5.

[7] 王晓明，王德权，王峰，等. 杂交谷子在张家口市坝上地区种植试验初报[J]. 河北农业科学，2011，15(6)：12-14,17.
Wang X M, Wang D Q, Wang F *et al*. Hybrid corn at the beginning of the planting test report in Zhangjiakou Bashang region [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2011, 15(6): 12-14, 17.

[8] 张新仕. 张杂谷品种经济效益与推广影响因素的实证研究[D]. 河北农业大学硕士学位论文，2011.
Zhang X S. Empirical research an economic benefit and extension influencing factors of Zhang hybrid millet[D]. Thesis for Master's degree, Agricultural University of Hebei, 2011.

[9] 于亚军，李军，贾志宽，王蕾. 不同水肥条件对宁南旱地谷子产量、WUE 及光合特性的影响[J]. 水土保持研究，2006，13(2)：87-90.
Yu Y J, Li J, Jia Z K, Wang L. Effect of different water and fertilizer on yield, WUE and photosynthetic characteristics of millet in southern Ningxia semi-arid area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(2): 87-90.

[10] 王洋. 谷子高产高效水肥管理模式研究[D]. 太原：山西大学硕士学位论文，2012.
Wang Y. Study on the water and fertilizer management mode of high-yield and high-efficiency for millet[D]. Taiyuan: Ms thesis of Shanxi University, 2012.

[11] 郝洪波，李明哲. 配方施肥对成熟期谷子氮磷钾吸收及产量的影响[J]. 河北农业科学，2010，14(11)：62-64，72.
Hao H B, Li M Z. Effects of formula fertilization on the uptakes of nitrogen, phosphorus and potassium at maturity and yield of millet[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2010, 14 (11): 62-64, 72.

[12] 古世禄，马建萍，郭志利，等. 提高谷子水分利用效率的研究[J]. 生态农业研究，1999，7(4)：30-33.
Gu S L, Ma J P, Guo Z L *et al*. Study on the improvement of water use efficiency in foxtail millet [J]. Eco-agriculture Research, 1999, 7(4): 30-33.

[13] 刘猛，赵宇，刘斐，等. 河北省谷子种植区域变迁的影响因素分析[J]. 农学学报，2012，2(09)：59-67.
Liu M, Zhao Y, Liu F *et al*. Analysis of the influencing factor of foxtail millei planting area changes in Hebei Province [J]. Journal of Agriculture, 2012, 2(09): 59-67.

[14] 李向文，王红，张爱军，等. 供氮水平和有机无机配施对片麻岩土壤谷子生长及土壤硝态氮的影响[J]. 河北农业大学学报，2012,35(4)：13-18.
Li X W, Wang H, Zhang A J *et al*. Effect of nitrogen application rate and its combination with organic manure on millet growth and nitrate distribution in gneiss soil[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2012, 35(4): 13-18.

[15] Soler C M T, Maman N, Zhang X *et al*. Determining optimum planting dates for pearl millet for two contrasting environments using a modelling approach[J]. Journal of Agricultural Science, 2008, 146, 445-459.

[16] 姜净卫，刘孟雨，董宝娣. 谷子及杂交种的水分利用效率以及节水技术研究思考[J]. 节水灌溉，2013，(10)：63-66，70.
Jiang J W, Liu M Y, Dong B D. Study on water use efficiency and water saving technology for millet and hybrid millet[J]. Water Saving Irrigation, 2013, (10): 63-66, 70.

[17] 李兴，史海滨，程满金，等. 集雨补灌区谷子种植方式对产量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报，2012，27(2)：106-109.
Li X, Shi H B, Cheng M J *et al*. Effects of planting technique on millet yield and WUE in harvested rainwater irrigation areas[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 27(2): 106-109.

[18] 杨占平，杨稚娟，薛毅芳，等. 原状土柱模拟不同降水年型条件下冬小麦、夏谷子耗水量研究[J]. 河南农业科学，2011，40(9)：58-61.
Yang Z P, Yang Z J, Xue Y F *et al*. Study on water consumption of winter wheat and summer millet using undisturbed soil columns under different precipitation years [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2011, 40(9): 58-61.

[19] Leblanc V, Vanasse A, Belanger G *et al*. Sweet pearl millet yields and nutritive value as influenced by fertilization and harvest dates[J]. Agronomy Journal, 2012, 104(2): 542-549.

[20] Heidari Zooleh H, Jahansoozl M R, Yunusa I *et al*. Effect of alternate irrigation on root-divided Foxtail Millet (*Setaria italica*) [J]. Australian Journal of Crop Science, 2011, 5(2): 205

-213.

[21] Obeng E, Cebert E, Singh B P *et al*. Growth and grain yield of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) genotypes at different levels of nitrogen fertilization in the Southeastern United States [J]. Journal of Agricultural Science, 2012, 4(12): 155-163.

[22] 李生秀, 李世清, 高亚军, 等. 施用氮肥对提高旱地作物利用土壤水分的作用机理和效果[J]. 干旱地区农业研究, 1994, 12(1): 38-46.
Li S X, Li S Q, Gao Y J *et al*. The mechanism and effect of N fertilization in increasing water use efficiency[J]. Agricultural Research in The Arid Areas, 1994, 12(1): 38-46.

[23] 罗亚勇, 赵学勇, 黄迎新, 等. 植物水分利用效率及其测定方法研究进展[J]. 中国沙漠, 2009, 29(4): 648-655.
Luo Y Y, Zhao X Y *et al*. Research progress on plant water use efficiency and its measuring methods [J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(4): 648-655.

[24] 严昌荣, 梅旭荣, 居辉, 赤杰. 施肥对春谷子生长发育及水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(1): 142-144.
Yan C R, Mei X R, Ju H, Chi J. Effects of fertilization on the growth, development and water use efficiency of spring millet [J]. Chinese Journal Eco-Agriculture, 2006, 14(1): 142-144.

[25] 李伏生, 康绍. CO_2 浓度和氮素水平对春小麦水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2002, 28(6): 835-840.
Li F S, Kang S. Effects of CO_2 concentration and nitrogen level on water use efficiency in spring wheat [J]. Acta Agronomica Sinica, 2002, 28(6): 835-840.