

不同 N、P、K 配比对小麦、玉米光合生理 及周年水分利用的影响

杨永辉^{1,2}, 武继承^{1,2}, 潘晓莹^{1,2}, 张洁梅^{1,2}, 韩伟锋^{1,2},
王 喆^{1,2}, 王 越^{1,2}, 何 方^{1,2}

(1. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 河南 郑州 450002; 2. 农业部作物高效用水科学观测实验站, 河南 原阳 453514)

摘 要: 为探明不同 N、P、K 配比在等灌水量条件下对小麦、玉米光合生理特征及周年水分利用的机理, 采用大田实验, 研究了不同 N、P、K 配比对小麦、玉米光合生理、产量及水分利用等的影响。结果表明: 在小麦、玉米关键生育期进行适量灌水并进行追肥, 促进了小麦、玉米对水分和养分的吸收, 实现水肥同步, 改善其光合生理特征, 促进节水增产。不同处理均显著提高了小麦和玉米的光合速率和叶片水分利用效率, 且均以 N3P2K2 处理的光合速率和叶片水分利用效率最高(小麦分别为 $16.59 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $36.07 \mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$, 玉米分别为 $29.26 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $27.1 \mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$)。同时, 不同 N、P、K 配比均提高了小麦、玉米的成产要素。最终, 以 N2P2K2 和 N3P2K2 处理的增产和节水效果最佳, 其小麦、玉米单产和二者总产均高于其它处理, 其小麦、玉米总产量分别较对照提高了 30.3% 和 26.8%, 周年水分利用效率分别较对照提高了 30.5% 和 27.4%。而从经济的角度考虑, 本文推荐的 N、P、K 配比为 N2P2K2。

关键词: 养分配比; 等灌水量; 小麦; 玉米; 光合速率; 水分利用效率

中图分类号: S147.22 **文献标志码:** A

Photosynthetic parameters and water use efficiency of wheat and maize under different rates of N, P and K

YANG Yong-hui^{1,2}, WU Ji-cheng^{1,2}, PAN Xiao-ying^{1,2}, ZHANG Jie-mei^{1,2},
HAN Wei-feng^{1,2}, WANG Zhe^{1,2}, WANG Yue^{1,2}, HE Fang^{1,2}

(1. *Institute of Plant Nutrition & Resource Environment, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou, Henan 450002, China;*
2. *Yuanyang Experimental Station of Crop Water Use, Ministry of Agriculture, Yuanyang, Henan 453514, China*)

Abstract: Field experiment was conducted to explore the mechanism of photosynthesis and water use efficiency of wheat and maize, under different N, P, and K rates of the same irrigation condition. The results showed that: the reasonable irrigation and fertilization in key growth stage of wheat and maize can promote and synchronize the water and nutrient uptake, improve the photosynthetic physiological characteristics, promote water – saving and increase crop yield. Different N, P, and K treatments significantly increased photosynthetic rate and leaf water use efficiency, And the photosynthetic rate and leaf water use efficiency of N3P2K2 treatment was the highest. Meanwhile, different ratios of N, P, and K nutrition increased the yield component of wheat and maize. Finally, the water use efficiency and yield were the best for N2P2K2 and N3P2K2 treatments. However, the recommended NPK ratio for high profit was N2P2K2.

Keywords: nutrient ratio; irrigation amount; wheat; maize; water use efficiency

水、肥是农作物生长的必要条件。N、P、K 是作物生长发育所必需的营养元素, 其在很大程度上决定了作物的光合能力和产量。作物干物质 90% 以上来源于光合作用产物^[1]。冬小麦、夏玉米轮作是华北地区的典型种植方式, 两者是典型的 C₃ 作物和 C₄ 作物, 其对光照的吸收利用能力不同, 玉米较小麦具有更高的光合能力。光合作用特性通常以光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度及水分利

收稿日期: 2015-04-06
基金项目: 国家 863 计划项目(2013AA102904); 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201203077); 国家科技支撑计划(2013BAD07B07); 国家自然科学基金项目(U1404404); 河南省农业科学院优秀青年科技基金(2016YQ12)
作者简介: 杨永辉(1978—), 男, 陕西西安人, 博士, 副研究员, 主要从事节水农业技术与理论研究。E-mail: yangyongh@mails.qucas.ac.cn。

用效率等指标来反映^[2]。叶片蒸腾作用是作物耗水的主要形式,水分利用效率是评价作物耐旱能力的重要指标之一,反映了作物生产过程中单位水分的能量转化效率,其受蒸腾速率和光合速率共同影响^[3]。小麦和玉米的光合特性一直是作物生理生态领域研究的热点,前人的研究较多地集中于作物种植密度、光照、水分及养分供应、温度、病虫害及其它栽培措施等对小麦、玉米光合特性的影响^[4-6],得出高光合能力的作物品种,其产量也相对较高,但作物不同生育阶段光合能力的大小有所不同,Jorge^[7]研究发现过去 30 年玉米产量的提高主要是子粒灌浆时间延长的结果,建议把灌浆时间作为高产玉米选择的有效指标。

合理的 N、P、K 施用可有效提高作物的净光合速率、产量和肥料吸收利用率,改善作物的水分利用效率^[8-10],因此,肥料在提高作物水分利用效率和缓解干旱胁迫中的作用成为生理生态学研究的重点。N、P、K 施用不当不但对作物的生长和产量产生不利影响,而且过量施用会对环境造成影响^[11-13],肥力不足则影响水分的吸收和利用。水分不足影响作物营养物质的合成和转运,降低产量和品质。不同水肥条件对作物的生长、干物质分配及作物产量等产生重要影响^[14-17]。适量施用氮肥可提高作物叶片光合机构活性,增加干物质积累量,增强植物对干旱的适应能力^[18-20]。而氮素缺乏可影响作物生理代谢过程^[21-23],最终影响其产量。相关研究表明,在一定条件下,施肥可大幅度提高作物的水分利用效率^[24-28],但 Porver^[29]的研究结果相反。有关小麦、玉米 N、P、K 最佳配比的研究已有很多,但对于小麦-玉米周年养分管理的研究并不多见。

因此,针对河南潮土区小麦、玉米轮作过程中的养分配置及水肥高效利用等问题,笔者采用小麦、玉米关键生育灌水并追肥的方式,研究了小麦、玉米关键生育期的光合生理及周年水分利用特征,以期为该地区的小麦、玉米周年水分与养分合理配置提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在通许节水农业试验示范基地进行,海拔 62 m。该地区属温暖带半干旱型气候,年降水量 657.9 mm,其中 68.8%集中在 6—9 月份,年际变化大,地表径流丰枯年份非常悬殊,常有旱涝灾害发生,旱灾多于涝灾。试验地土壤属壤质潮土,肥力均

匀,地势平坦,耕层有机质 $11.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮 $0.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $74.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $19.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $90.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。该区种植方式为小麦、玉米轮作。

1.2 试验设计

本试验开始于 2013 年 10 月小麦播种开始至 2014 年 10 月玉米收获结束。试验养分设置: N1P1K1、N2P1K1、N3P1K1、N4P1K1、N1P2K1、N2P2K1、N3P2K1、N4P2K1、N1P2K2、N2P2K2、N3P2K2、N4P2K2、N0P0K0。N1、N2、N3、N4 分别表示氮肥用量 120、180、240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 360 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (当地氮肥用量为 300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), P1、P2 分别表示磷肥用量 90 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 135 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, K1、K2 分别表示钾肥用量 75 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。磷、钾肥和氮肥均为一次性底施(撒于小区内,先用小型拖拉机进行翻耕,然后进行旋耕、耙地),在拔节期和灌浆期进行灌水,灌水量为 450 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{次}^{-1}$ (当地常规灌水量过大,为 600 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{次}^{-1}$)。小麦品种为矮抗 58。

玉米试验在小麦小区内进行,养分设置: N1P1K1、N2P1K1、N3P1K1、N4P1K1、N1P2K1、N2P2K1、N3P2K1、N4P2K1、N1P2K2、N2P2K2、N3P2K2、N4P2K2、N0P0K0。N1、N2、N3、N4 分别表示氮肥用量 180、240、360 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 450 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (当地氮肥用量为 420 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), P1、P2 分别表示磷肥用量为 90 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 135 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, K1、K2 分别表示钾肥用量为 75 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。磷、钾肥和氮肥为一次性底施(人工开沟条施,沟深 5 cm),分别在拔节期和灌浆期进行灌水,灌水量 450 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{次}^{-1}$ (当地常规灌水量过大,为 600 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{次}^{-1}$)。玉米品种为郑单 958。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 光合作用测定 光合参数采用美国 Li-Cor 公司生产的 Li-6400 光合仪测定。在小麦灌浆期(2014 年 5 月 15 日)和玉米大喇叭口期(2014 年 7 月 25 日)选择晴朗无风的天气于 9:30—11:00 进行光合参数的测定。

测定叶片部位:小麦为旗叶,玉米为最新全展叶。

测定参数:净光合速率 $P_n(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ 、气孔导度 $G_s(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ 、蒸腾速率 $Tr(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ 。

叶片水分利用效率 $WUE(\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1})$ 计算公式^[30-31]:

$$WUE = P_n / Tr \quad (1)$$

1.3.2 各生育期生物量计算 收获时小麦以每小

区收获 4 m² 产量记产,玉米以每小区 3 行玉米产量记产,将其产量折合成每公顷产量。

1.3.3 水分生产效率计算

水分生产效率(kg·mm⁻¹·hm⁻²) = 子粒产量(kg·hm⁻²)/生育期耗水量(mm)

生育期耗水量 = 播种前 0 ~ 100 cm 土层土壤储水量(mm) + 生育期内降雨量(mm) - 收获时 0 ~ 100 cm 土层土壤储水量(mm)

1.4 数据处理

试验光合各参数值均为 9 次重复(每处理 3 个重复内分别测定 3 个样品)的算术平均值,其它结果为 3 次重复的算术平均值,且所得的数据应用统计学及相关的数理统计软件(DPS)进行处理。

2 结果与分析

2.1 小麦、玉米生育期内降雨量分析

从图 1 中可知,2013 年 10 月 17 日小麦播种到 2014 年 9 月 30 日玉米收获时的总降雨量为 548.9 mm。小麦生育期内降雨量为 191.7 mm,玉米生育期内降雨量为 357.3 mm。其中,2013 年 10 月 17 日小麦播种到 10 月底无降水,11 月降雨 47.4 mm,2013 年 12 月和 2014 年 1 月无降水,2014 年 2 月到 6 月 8 日小麦收获,逐月降雨量分别为 29.3、10.3、54.4、31.4、46.3 mm。说明小麦越冬期到返青期前旱情较为严重。从 2014 年 6 月 12 日玉米播种到 10 月 3 日收获,逐月降雨量分别为 27.4、21.7、82.4、225.6 mm。玉米灌浆后期的降雨量较高,不利于后期玉米子粒灌浆和收获。

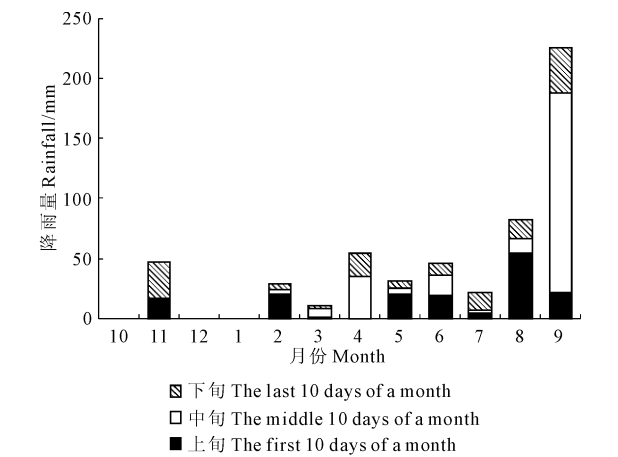


图 1 小麦、玉米生育期内降雨量分布
Fig.1 Precipitation distribution during wheat and maize growth period

2.2 不同处理对小麦光合生理特征的影响

在灌浆期测定了不同处理小麦的光合生理特征。从表 1 中可知,不同氮磷钾配比处理的光合速率均显

著高于对照(N0P0K0),而除 N1P1K1、N2P1K1、N2P2K1、N3P2K1、N4P2K1、N4P2K2 处理的蒸腾速率高于对照外,其它处理的蒸腾速率均较低,且以 N2P2K1 处理最高,N1P2K2 处理最低。各处理中,以 N3P2K2 处理的光合速率最高,其次为 N2P2K2 处理。在低磷低钾条件下,氮肥用量越高,其光合速率反而降低。在高磷低钾和高磷高钾条件下,小麦光合速率随氮肥用量的增加均表现为先增加再降低的趋势。小麦叶片的水分利用效率表现为:对照最低,N3P2K2 处理最高,其次为 N2P2K2 和 N1P2K2 处理,其它处理居中。

表 1 不同处理对小麦光合生理特征的影响
Table 1 Photosynthetic physiological characteristics of wheat under different treatments

处理 Treatment	光合速率 P_n /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 T_r /($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	叶片水分 利用效率 WUE /($\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$)
N1P1K1	15.02bc	0.59a	25.63e
N2P1K1	15.14bc	0.51b	29.69e
N3P1K1	14.01de	0.46c	30.43c
N4P1K1	13.65e	0.45c	30.33c
N1P2K1	14.49cd	0.48bc	30.28c
N2P2K1	14.90c	0.63a	23.82f
N3P2K1	15.10b	0.52b	29.04c
N4P2K1	13.82d	0.55b	25.29e
N1P2K2	12.93f	0.37c	34.96b
N2P2K2	15.37b	0.43c	35.74a
N3P2K2	16.59a	0.46c	36.07a
N4P2K2	15.18b	0.51b	29.76d
N0P0K0	11.32g	0.50b	22.64g

注:同列不同字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$),下同。
Note: Different letters in the same column mean significant difference at $P < 0.05$, the same as below.

2.3 不同处理对小麦成产要素及水分利用的影响

从表 2 中可知,不同氮磷钾配比处理均提高了小麦的株高、穗长、小穗数和穗粒数,而有效降低了小麦不孕穗,且最终提高了小麦的产量。除对照、N4P2K2、N2P1K1、N3P1K1、N4P1K1 处理外,其它处理的小麦产量均超过了 7 500 kg·hm⁻²。在磷钾用量均较低时,随氮肥用量的增加小麦产量呈增加的趋势。而在磷钾用量均较高时,增加氮肥用量,对于小麦产量的提高更为有利,但氮肥用量过大,产量反而降低。各处理中,以 N3P2K2 处理的增产效果最佳,较对照增产 29.0%。N4P1K1 处理的小麦全生育期耗水量最高,N2P1K1 处理耗水量最低。不同氮磷钾配比均提高小麦的水分利用效率。在磷钾相同条件下,小麦水分生产效率随氮肥用量的增加表现

为先降后增或先增后降的趋势。只有当高磷低钾 (P2K1)时,小麦水分生产效率随氮肥用量的增加而提高,但各处理中以 N2P2K2 和 N3P2K2 处理显著高于其它处理,分别较对照提高了 28.0% 和 27.2%。

表 2 不同处理对小麦成产要素及产量的影响
Table 2 Yield and yield components of wheat under different treatments

处理 Treatment	株高 Plant height /cm	穗长 Spike length /cm	小穗数 Number of spikelets /个	穗粒数 Number of grains per spike/个	不孕穗 Sterility spike /个	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	耗水量 Water consumption /mm	水分生产效率 Water production efficiency /(kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)
N1P1K1	61.9e	7.0a	19.0a	34.7b	2.9b	7917.0d	364.0de	21.75c
N2P1K1	65.1b	6.9a	20.0a	34.3bc	3.0b	6955.5g	333.6g	20.85d
N3P1K1	63.5cd	6.7a	19.6a	38.4a	1.6e	7287.0f	344.5f	21.15c
N4P1K1	65.4b	7.1a	20.0a	28.8g	2.7b	7482.0e	408.9a	18.30e
N1P2K1	61.8e	6.7a	19.0a	33.7c	2.5bc	8026.5c	387.8b	20.70d
N2P2K1	64.2b	7.1a	19.7a	25.3i	2.0cd	8142.0c	379.6c	21.45c
N3P2K1	60.2f	6.6a	18.3b	24.5j	3.9a	7986.0c	357.3e	22.35b
N4P2K1	61.4e	6.7a	18.6b	26.9h	2.0c	8473.5b	366.8d	23.10b
N1P2K2	62.4de	6.7a	19.2a	29.0fg	2.2c	7675.5d	376.3c	20.40d
N2P2K2	66.6a	6.7a	19.2a	32.0d	1.8d	8555.5b	352.3e	24.28a
N3P2K2	65.4b	7.0a	19.2a	30.8e	2.2cd	8605.5a	360.8de	23.85a
N4P2K2	62.8d	6.6a	18.2b	28.6g	2.2cd	7263.0f	336.3d	21.60c
N0P0K0	60.0f	6.6a	17.2c	29.8f	3.5ab	6673.5h	355.9e	18.75e

2.4 不同处理对玉米光合生理特征的影响

在玉米大喇叭口期测定了不同处理玉米的光合生理特征。从表 3 中可知,不同氮磷钾配比均提高了玉米叶片的光合速率和蒸腾速率。各处理中,以 N3P2K2 处理光合速率最高,其次为 N1P2K1。以 N1P2K2 处理的蒸腾速率最高,其次为 N4P2K1、N3P2K1 和 N4P2K2 处理。同时,除 N1P2K2 和 N4P2K1

处理外,叶片水分利用效率均高于对照,且以 N3P2K2 处理最高,其次为 N2P2K2、N1P2K1 和 N4P1K1 处理,其它处理居中。

2.5 不同处理对玉米成产要素及水分利用的影响

从表 4 中可知,不同氮磷钾配比提高了玉米的叶片数、茎粗、穗位、株高、行粒数、穗粗、有效穗长及玉米产量。各处理中,以 N4P2K1 和 N4P2K2 处理的叶片数最多,以 N1P2K2 处理的茎粗显著高于其它处理,以 N2P1K1 处理的穗位最高, N3P2K2 和 N4P1K1 处理较其它处理的株高高,达 233.4 cm。行数以 N3P1K1 处理最多,而行粒数以 N3P2K2 处理最多,N1P2K2 处理穗粗较其它处理粗。而有效穗长以 N1P1K1 处理最长。玉米全生育期耗水量仍以 N4P1K1 处理最高,而 N1P2K1 处理最低。最终玉米产量和水分生产效率均以 N3P2K2 和 N2P2K2 处理较其它处理高,分别较对照增产 31.4% 和 32.4%,水分生产效率提高了 34.5% 和 37.6%。

2.6 不同处理对小麦 – 玉米周年水分利用的影响

从表 5 中可知,N3P2K2 处理的小麦、玉米总产量最高,其次为 N2P2K2 处理。而小麦、玉米周年耗水量以 N4P2K1 最高,以 N2P2K2 和 N3P2K2 较其它处理低。最终,小麦、玉米总水分利用效率仍以 N3P2K2 处理最高,其次为 N2P2K2 处理,其分别较对照增产 30.3% 和 26.8%,水分利用效率分别提高了 30.5% 和 27.4%。

表 3 不同处理对玉米光合生理特征的影响
Table 3 Photosynthetic physiological characteristics of
maize under different treatments

处理 Treatment	光合速率 P_n /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 T_r /($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	叶片水分 利用效率 WUE /($\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$)
N1P1K1	25.58c	1.16c	22.1d
N2P1K1	25.43c	1.23c	20.6e
N3P1K1	21.86f	1.10cd	19.9e
N4P1K1	26.08bc	1.12c	23.2d
N1P2K1	28.36a	1.12c	25.3c
N2P2K1	23.84d	1.15c	20.8e
N3P2K1	22.20e	1.33b	16.6h
N4P2K1	24.15d	1.39b	17.4g
N1P2K2	26.82b	1.64a	16.4h
N2P2K2	26.26b	1.01c	26.0b
N3P2K2	29.26a	1.08c	27.1a
N4P2K2	25.85c	1.30b	19.9e
N0P0K0	20.20g	1.04c	19.5f

表 4 不同处理对玉米成产要素及产量的影响

Table 4 Yield and yield components of mize under different treatments

处理 Treatment	叶片数 Number of leaves /片	茎粗 Stem diameter /cm	穗位 Ear height /cm	株高 Plant height /cm	行数 Number of rows /行	行粒数 Grain number per row /粒	穗粗 (周长) Ear diameter /cm	有效穗长 (周长) Effective panicle length/cm	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	耗水量 Water consumption /mm	水分生产效率 Water production efficiency /(kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)
N1P1K1	12.4a	2.4b	93.0b	233.8a	14.8ab	34.4bc	15.7b	16.6a	9261.0d	273.2b	33.90h
N2P1K1	12.2a	2.1b	99.8a	226.0b	14.4b	34.2bc	15.4b	15.1b	9471.0d	273.3b	34.65h
N3P1K1	12.0a	2.1b	89.2b	233.2a	15.2a	34.0bc	15.7b	15.5b	9802.5c	261.4c	37.50f
N4P1K1	12.6a	2.0b	90.2b	224.2b	12.0d	34.7b	15.7b	16.0a	10069.5b	284.4a	35.40g
N1P2K1	12.0a	2.0b	85.8c	210.4c	13.2c	33.2d	15.3b	14.0c	9723.0c	223.5g	43.50c
N2P2K1	12.2a	2.0b	92.2b	226.0	12.8c	32.6e	15.4b	14.1c	10429.5a	244.0de	42.75d
N3P2K1	12.0a	2.1b	86.2c	221.4b	14.0bc	33.7cd	15.4b	15.5b	10605.0a	248.9de	42.60d
N4P2K1	12.8a	2.2b	92.2b	230.6a	14.4b	33.2e	15.3b	15.1b	10207.5b	241.3e	42.30d
N1P2K2	12.2a	3.2a	85.8c	223.2b	15.2a	33.6cd	16.2a	15.2b	9774.0c	229.4g	42.60d
N2P2K2	12.2a	2.3b	88.6bc	233.0a	14.4b	33.7cd	15.9a	15.9ab	10540.5a	236.6f	44.55b
N3P2K2	12.4a	2.3b	93.4b	233.4a	14.0b	36.5a	15.9a	16.5a	10909.5a	239.2ef	45.60a
N4P2K2	12.8a	2.5b	92.6b	223.4b	13.6c	34.5b	15.7ab	15.8ab	10398.0a	269.6b	38.57e
N0P0K0	12.1a	2.1b	81.8d	208.2d	13.6c	28.2f	15.2b	12.5d	8304.0e	250.5d	33.15h

表 5 不同处理对小麦 – 玉米周年产量及水分利用的影响

Table 5 Yield and annual water use efficiency on
wheat – maize under different treatments

处理 Treatment	小麦 – 玉米复合产量 Wheat – maize composite yield/(kg·hm ⁻²)	总耗水量 Total water consumption/mm	总水分利用效率 Total water use efficiency /(kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)
N1P1K1	17178.0c	637.2b	27.0f
N2P1K1	16426.5e	606.9d	27.1f
N3P1K1	17089.5d	605.9d	28.2e
N4P1K1	17551.5c	693.3a	25.3g
N1P2K1	17749.5c	611.3d	29.0d
N2P2K1	18571.5b	623.5c	29.8c
N3P2K1	18591.0b	606.3d	30.7b
N4P2K1	18681.0b	608.1d	30.7b
N1P2K2	17449.5c	605.7d	28.8e
N2P2K2	19096.0b	588.9e	32.4a
N3P2K2	19515.0a	600.1de	32.5a
N4P2K2	17661.0b	605.8d	29.2c
N0P0K0	14977.5f	606.4d	24.7h

2.7 周年耗水量、水分利用效率及产量相关性分析

对小麦、玉米周年耗水、水分利用效率及产量之间进行相关性分析得出:总耗水量与总水分利用效率呈显著负相关($P < 0.05$),与周年小麦、玉米总产量呈负相关,但差异不显著($P > 0.05$)。而小麦、玉米总产量与总水分利用效率呈极显著正相关($P < 0.01$)。说明在通过周年小麦、玉米水肥管理促进其水分利用的同时,也有利于其周年总产量的提高。

表 6 不同指标相关性分析

Table 6 Correlation analysis of different indexes

相关系数 Correlation coefficient	总耗水量 Total water consumption	总水分利用效率 Total water use efficiency
总水分利用效率 Total water use efficiency	- 0.5773 *	
总产量 Total yield	- 0.1465	0.8918 * *

注 Note: * $P < 0.05$, * * $P < 0.01$.

3 结 论

1) 不同 N、P、K 配比对小麦、玉米光合生理、产量及水分利用等产生重要影响。在小麦、玉米关键生育期进行适量灌水并进行追肥,可促进小麦、玉米对水分的吸收的同时,促进其养分的吸收,实现水肥同步。本研究发现,不同 N、P、K 配比处理均显著提高了小麦光合速率,且以 N3P2K2 处理最高,其次为 N2P2K2 处理。小麦叶片的水分利用效率 N3P2K2 处理最高,其次为 N2P2K2 和 N1P2K2 处理,对照最低。说明磷钾较高时施用氮肥更利于小麦叶片水分利用效率的提高。对玉米而言,各处理中,以 N3P2K2 处理光合速率和叶片水分利用效率均最高,而以 N1P2K2 处理的蒸腾速率最高,因此其叶片水分利用效率最低。说明在磷钾用量较高时,高氮更利于玉米叶片水分利用效率的提高。

2) 不同 N、P、K 配比处理均提高了小麦的株高、穗长、小穗数和穗粒数,且有效降低了小麦不孕

穗,且最终提高了小麦的产量。在磷肥用量较高时,施用氮肥增产幅度更大。而在磷钾肥用量均较高(P2K2)时,增加氮肥用量对于小麦产量的提高更为有利,但氮肥用量不宜过大(N4)。说明磷钾肥用量较高,而氮肥用量适宜时更有利于发挥肥效,促进小麦产量的提高。各处理中,以 N3P2K2 处理的增产效果最佳,较对照增产 29.0%。在高磷低钾条件下,小麦水分利用效率随氮肥用量的增加而提高,但各处理中以 N2P2K2 和 N3P2K2 处理显著高于其它处理,分别较对照提高了 28.0% 和 27.2%。同时,不同氮磷钾配比提高了玉米的叶片数、茎粗、穗位、株高、行粒数、穗粗、有效穗长及玉米产量。最终玉米产量和水分利用效率均以 N3P2K2 和 N2P2K2 处理较其它处理高,分别较对照增产 31.4%和32.4%,水分利用效率提高了 34.5% 和 37.6%。

3) 对于周年效应而言,在磷钾用量较高时,小麦、玉米周年耗水量明显低于低磷低钾和高磷低钾的条件,说明磷钾用量的提高促进了小麦、玉米对水分的消耗,提高了水分利用率。最终以 N3P2K2 处理的小麦、玉米总产量和周年水分利用效率最高,其次为 N2P2K2 处理,而从农业部提倡的减肥减药和经济效益的角度考虑,本研究推荐的氮磷钾配比为 N2P2K2。

参 考 文 献:

[1] 胡廷积,杨永光,马元喜,等.小麦生态与生产技术[M].郑州:河南科学技术出版社,1986:19-23.

[2] 郑盛华.水分胁迫对玉米生理生态特性影响的研究[C].北京:中国农业科学院,2007:2-10.

[3] 魏孝荣,郝明德,张春霞,等.土壤干旱条件下外源锌、锰对夏玉米光合特性的影响[J].作物学报,2005,(8):1101-1104.

[4] 张银锁,宇振荣,Driessen P M.环境条件和栽培管理对夏玉米干物质积累、分配及转运的试验研究[J].作物学报,2002,28(1):104-109.

[5] 徐世昌,戴俊英,沈秀瑛,等.水分胁迫对玉米光合性能及产量的影响[J].作物学报,1995,21(3):356-363.

[6] Colom M R, Vazzana C. Photosynthesis and PSII functionality of drought-resistant and drought-sensitive weeping loress grass plants[J]. Environmental Experimental Botany, 2003,49:135-144.

[7] Jorge B. Physiological bases for yield differences in selected maize cultivars from Central America[J]. Field Crops Research, 1995,42:69-80.

[8] Campbell C A, Cameron D R, Nicholaichuk W, et al. Effects of fertilizer N and soilmoisture on growth, N content and moisture use by spring wheat[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1997, 57: 289-310.

[9] Villalobos F J, Fereres E. Evaporation measurements beneath corn, cotton, and sunflower canopies[J]. Agronomy Journal, 1990, 82:

1153-1159.

[10] 张仁陟,李小刚,胡恒觉,等.施肥对提高旱地农田水分利用效率的机理[J].植物营养与肥料学报,1999,5(3):221-226.

[11] 张夫道.氮素营养研究中的几个热点问题[J].植物营养与肥料学报,1998,4(4):331-338.

[12] 黄明丽,邓西平,白登忠,等.N、P 营养对旱地小麦生理过程和产量形成的补偿效应研究进展[J].麦类作物学报,2002,22(4):74-78.

[13] 李淑文,文宏达,薛宝民,等.小麦高效吸收利用氮素的生理生化特性研究进展[J].麦类作物学报,2003,23(4):131-135.

[14] 成林,李树岩,刘荣花,等.限量灌溉下冬小麦水分利用效率模拟[J].生态学杂志,2009,28(10):2147-2152.

[15] 祁有玲,张富仓,李开峰.水分亏缺和施氮对冬小麦生长及氮素吸收的影响[J].应用生态学报,2009,20(10):2399-2405.

[16] 李志勇,陈建军,陈明灿.不同水肥条件下冬小麦的干物质积累、产量及水氮利用效率[J].麦类作物学报,2005,25(5):80-83.

[17] 杨书运,严平,梅雪英,等.土壤水分亏缺对冬小麦根系的影响[J].麦类作物学报,2007,27(2):309-313.

[18] Chaves M M, Maroco J P, Pereira J S. Understanding plant responses to drought from genes to the whole plant[J]. Functional Plant Biology, 2003,30(3):239-274.

[19] Hébert Y, Guingo E, Loundet O. The response of root/shoot partitioning and root morphology to light reduction in maize genotypes[J]. Crop Science, 2001,41(2):363-371.

[20] Shanguang Z P, Shao M A, Ren S J, et al. Effect of nitrogen on root and shoot relations and gas exchange in winter wheat[J]. Botanical Bulletin of Academia Sinica, 2004,45(1):49-54.

[21] Giompi S E, Gentill L G, Soldatini G F. The effect of nitrogen on leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters in sunflower[J]. Plant Science, 1996,18(2):177-184.

[22] 张福锁,李春俭,米国华.植物营养生理进展[C]//洪德元.21 世纪的生命科学展望.济南:山东教育出版社,2003:206-235.

[23] McDonald A J S, Davies W J. Keeping in touch: response of the whole plant to deficits in water and nitrogen supply[J]. Advances Botanic Research, 1996,22:229-300.

[24] 张仁陟,李小刚,胡恒觉.施肥对提高旱地农田水分利用效率的机理[J].植物营养与肥料学报,1999,5(3):221-226.

[25] 谷洁,刘存寿,方日尧.半湿润偏旱区施肥对冬小麦水分利用效率和产量的影响[J].西北农业学报,1997,6(4):62-64.

[26] 尹光华,刘作新,李桂芳,等.水肥耦合对春小麦水分利用效率的影响[J].水土保持学报,2004,18(6):156-162.

[27] 东先旺,刘树堂,陶世荣.不同肥水组合对夏玉米水分利用效率及经济效益的影响[J].华北农学报,2000,15(1):81-85.

[28] Brown P J. Water use and soil water deletion by dry land wheat as affected by nitrogen fertilization[J]. Agron J, 1971,3(1):43-46.

[29] Porver J F. Soil management for efficient water use soil fertility[C]// Taylor H M. Limitation to efficient water use in crop production. USA: ASA - CSSA - SSSA, 1983:87-113.

[30] Fischer R A, Turner N C. Plant production in the arid and semiarid zones[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1978,29:277-317.

[31] Powel S B. Photo inhibition of photosynthesis induced by visible light[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1984,35:15-44.