第1卷 第1期
1995年3月

植物营养与肥料学报
PLANT NUTRITION AND FERTILIZER SCIENCES

Vol.1 No.1
Mar.1995

旱地土壤中的肥水激励机制*

汪德水　　程宪国　　张美荣　　周　涌

（中国农业科学院土壤肥料研究所，100081）

摘　要

本文阐述了养分和水分对作物产量及其增产潜力的交互影响。肥和水既是作物产量的决定因素，又是人为的可控因素。作物需要的营养离子从土壤向根表面的移动，受土壤水分含量的影响，特别是在旱地。肥是土水系统的物质基础，水是肥效发挥的关键，二者互为制约，又互相促进。肥水激励机制要求二者有一个适宜的匹配，这样，养分和水分才能发挥其最大经济效益。

关键词：　旱地，肥水激励机制，肥水协调效应，增产潜力

农业生物产量的形成，取决于作物本身的遗传特性和生理机能的内在因素和光、热、水、土、肥等外界环境因素的综合作用。在一定条件下，这些因素中只有养分和水分是最容易得到人为控制的。长期以来，植物营养学家从不同侧面研究了植物、土壤和肥料中营养物质的变化和关系[1-8]；气象、水利学家偏重从灌溉量、降水、蒸散等方面研究土壤水分平衡、作物需水量、耗水量及水分与产量的关系[9-12]。然而，大多研究结果都是在某一特定因子变化的影响下获得的，而对在综合因素条件下，这些结论就很难说明问题[5]。随着科学研究的深入，对养分和水分的协同关系问题已引起人们的极大重视。Viets (1972)指出，尽管根系吸收养分和水分是两个相对独立的过程，但由于水分的有效性影响着整个土壤的微生物作用、物理化学作用及植物体的生理生化过程，使得土壤养分和水分密切而复杂地联系在一起[13]；Vrnon (1975)认为，在旱地农业中，植物营养的基本问题是如何在水分胁迫下，合理使用肥料，提高水分利用效率[14]。国际干旱农业研究中心(ICARDA，1981)指出：在雨养农业中，气候、土壤养分和水分因素对作物生长和产量的影响是十分复杂的，研究它们之间的相互关系，对于干旱地区农业生产力的提高是极其重要的[15]。近十年来，国内一些学者也开始重视肥水关系问题。他们认为，合理施用化肥，提高肥料和水分利用效率问题，是北方旱农地区水土控制措施中有待进一步研究和探讨的问题[16,17]。为此国家科委将"旱地农田水肥交互作用和耦合模式的研究"列为1991-1995年国家重点攻关课题。本文为该项研究的部分结果，重点探讨肥水激励机制及其协同效应。

一、　材料与方法

（一）地点和土壤

试验分布在陕西、河南、河北、北京、辽宁、内蒙古和宁夏等省(市)、横跨干旱、半干旱、半湿润易旱等3种类

* "八 五"国家重点攻关项目

型区的栗钙土、潮土、褐土和娄土共4种土壤。

（二）试验设计和处理

试验采用盆栽、微区和田间相结合方法进行，并辅以人工控制条件下的旱棚模拟试验。

旱棚试验采用回归正交和饱和最优设计，设N、P和水分三因素五水平。在洛阳的旱棚试验又将水分按4个生育期供水，以"628"设计为主，合阳、喀左以"311－A"设计为主。

盆栽试验采用肥料(NP)和水分二个因素六个水平的正交设计。肥料用量按亩施尿素0、15、22.5、30、37.5和45公斤，过磷酸钙0、40、60、80、100、120 公斤折算；土壤水分分别为占干土重的5、10、15、20、25、30%六个水平。微区试验为裂区设计，重复3次。主区分为无肥(对照)、高量、中量和低量三种施肥水平。肥料用量以当地平均亩施肥量作为中量，中量的一半为低量，中量加倍为高量；水分按亩供水量350、450、550和650mm折算。田间试验于旱地和水浇地进行，共设10个处理：N_0P_0、N_1P_0、N_0P_1、N_1P_1、N_1P_2、N_2P_1、N_2P_2、N_2P_3、N_3P_2、N_3P_3。重复3－4次。N_1为亩施尿素12.5kg，N_2为15kg、N_3为17.5kg；P_1为亩施过磷酸钙5kg，P_2为7.5kg、P_3为10kg。

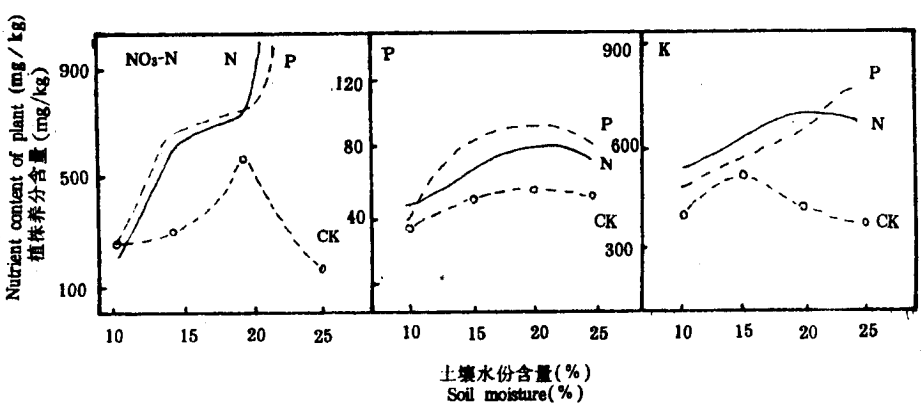
（三）采样和分析

田间试验均按小区取基础土样，取样深度0-100cm，20cm为一层，共取五层。盆栽和微区试验取耕层混合土样，分析基础养分和物理参数。收获后按上述方法取土，部分以小区和处理取土测定变化后的土壤养分；植株分茎、叶、子粒测定全量N、P、K。分析方法均用常规法测定。土壤水分测定用中子仪和张力计，表层用烘干法。盆栽采用称重法控制水分变化。

二、结果与分析

（一）水分对提高肥效的作用

试验表明，就养分而言，其扩散距离与土壤含水量关系十分密切，随含水量的增加，磷、钾的扩散距离随之增大。当土壤含水量从15%增加到25%时，钾的最大扩散距离由7mm增加到12mm；磷的扩散距离从2mm增大到6mm。土壤水分升高有利于磷、钾养分向根表面迁移，从而提高养分有效性。同时土壤水分含量也影响到肥料的释放率。把肥料与水分含量分别为田间持水量的0、25、50、70、100%的土壤混合培养，发现土壤含水量高的，肥料释放量也高。当土壤含水量为田间持水量的25%时，养分释放缓慢，这主要在于干旱情况下，土体中空气孔隙增加，水分从土体到根表面的移动受阻，允许水分扩散的横断面积减小，从而降低了扩散速率。在干中(-1.5MPa)离子扩散速率几乎等于零。



-·-N处理　---P处理　—0—对照　(无肥区)

图 1　土壤水分含量与冬小麦拔节期吸收养分的关系

Fig.1 Relationship between soil moisture and nutrient uptake at elongation stage of Wheat

土壤含水量不同，对植株养分的吸收也有明显影响。图1表明，无肥区其冬小麦拔节期植株中NO_3-N含量随土壤水分的增加而增加，高峰值出现在土壤含水量18%左右。施用N、P肥以后，植株体内的NO_3—N含量随水分提高而增加，到含水量为20%以后，NO_3—N几乎垂直上升。冬小麦对P的吸收，在无肥区中，随水分增加略有上升，但明显低于施肥处理；施N后植株速效P在土壤含水量为15%以上均呈上升趋势，但较平缓。施P后，植株吸P曲线与施N处理变化一致，但P肥对水的反应不如N肥敏感。对K的吸收，在无肥区其吸收高峰出现在土壤含水量13%左右，施N、P后仍是随土壤水分的增加而上升。反映到生物产量，不同土壤含水量对其影响也很大(图2)，说明低土壤湿度(低水势)时与高土壤湿度(高水势)时不同，表现为一反向曲线。进一步用米氏(Mitscherlich)方程处理，发现C值已不再表现为一个常数，而随缺水程度的增加而增加。同时在同一养分水平上，水分亏缺程度越大，产量越低；在同一产量水平上，水分亏缺越多，养分也应适当增加，才能得到相同的产量水平[18]。从不同水分条件下，施肥处理对土壤速效养分影响的试验中看出，水分对土壤N素的矿化，肥料中NH_4^+—N的硝化，都有促进作用。李生秀(1993)研究表明，在土壤水分适宜范围内，水分越高，硝化越快，土壤中NO_3^-—N含量越大。土壤硝化的A值与水分含量有明显的线性关系：

$$y = 70.6 + 77x, \quad r = 0.9961^{**}$$

当水分低于12%时，严重抑制肥料中NH_4^+—N的硝化；水分高于15%时，NO_3—N含量与水分之间近似直线关系。

表 1 不同水肥条件下的小麦产量(干物重g/盆)

Table 1 Wheat yield under different soil moisture and fertilizer rate condotions (Dry weight g/pot)

土壤水分处理 Soil moisture (%)	高肥条件 High fertilizer rate				低肥条件 low fertilizer rate			
	CK	P	N	NP	CK	P	N	NP
5	0.2	0.3	0.0	0.4	0.15	0.3	0.0	0.3
10	2.7	3.5	3.3	4.0	1.2	1.5	0.8	3.0
15	3.6	4.6	10.2	13.5	1.75	2.0	3.0	6.75
20	5.3	6.2	15.8	16.5	2.0	2.4	5.8	11.0
25	6.8	10.3	20.2	20.5	2.7	3.2	7.0	15.5
30	8.5	10.8	24.5	25.0	3.5	4.3	10.0	22.8

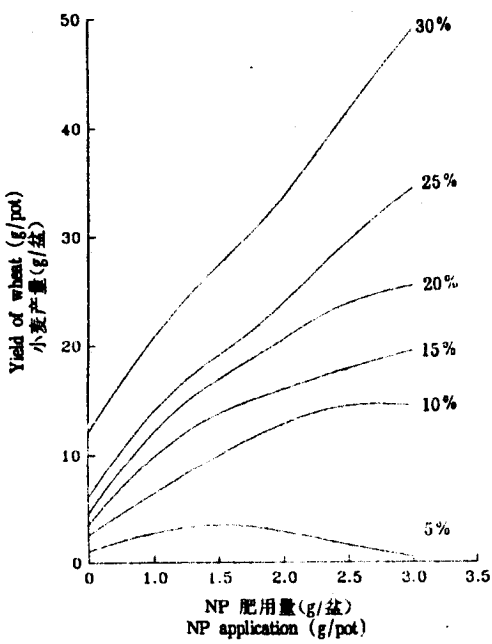


图 2 不同肥水条件下小麦的产量曲线

Fig.2 Wheat yield under different fertilizer and water conditions

旱地小麦对施肥的反应取决于土壤水分含量和土壤水分的有效供应时期。保证一定的土壤水分含量是施肥形成经济效益的基础。壤质土一般以土壤含水量10%作为施肥效应的临界值，在此临界值以上，肥效随水分含量的增加而增加；反之，磷肥仍有增产作用，而氮肥则表现为负效应(表1、图3)。说明水分亏缺，使植物生长受阻，降低了对养分的吸收利用。因此，在缺水的情况下，如化肥用量不适当提高则会重

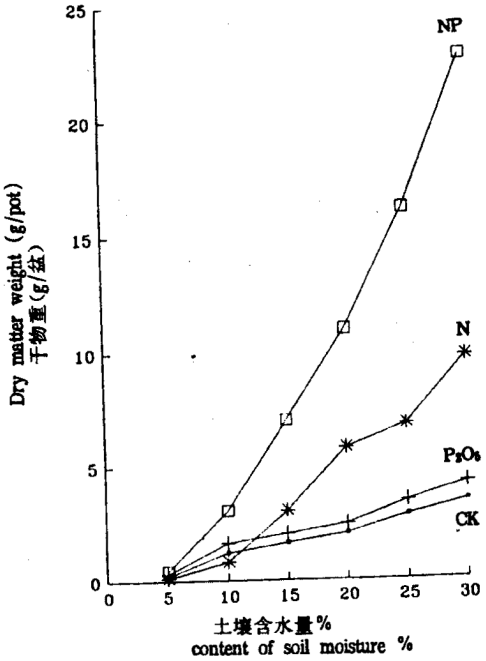


图 3　土壤水分与施肥效应

Fig.3 Response of crop to fertilizers and soil moisture

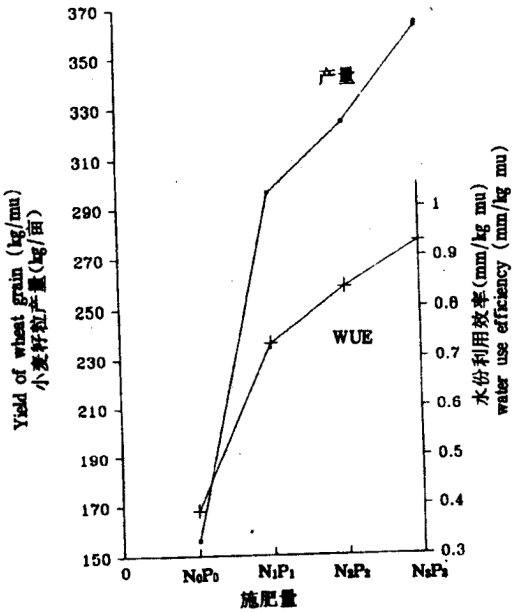


图 4　施肥对水分利用率的影响(洛阳点)

Fig.4 Effect of fertilization on water use effeciency

干旱危害。但适时适量补充化肥,可以促进作物根系生长,对充分利用土壤深层水分,提高作物抗干旱能力有利。

(三) 施肥与水分利用效率关系

在能形成经济产量的水分条件下,施肥能增加土壤的蓄水保墒能力。试验证明,亩施有机肥5000kg亩旱麦田,2米土体内蓄水量比对照增加45mm,并促进了根系的发育,增强了对深层水分的利用。施肥明显增加了小麦的根重和根长。据测定,施P后2米土体内每亩根量比对照提高1.4倍。施肥有利于作物对土壤水分的利用,尤其是对100cm土层以下深层水的利用。中量施肥区小麦吸收水量比对照提高了84.2%,高量施肥区比对照提高159.4%。根系活力的增强,使原先不易被作物吸收利用的土壤水分成为有效水,大大提高了土壤水分的利用效率(表2)。

表 2　施肥对小麦利用土壤水的影响

Table 2　Influence of fertilization on soil water used by wheat

土壤深度 Soil layer (cm)	对照区 CK		中肥区 Middle fentilizer rate		高肥区 High fertilizer rate	
	利用量(mm) Rate	利用率(%) Efficiency	利用量(mm) Rate	利用率(%) Efficiency	利用量(mm) Rate	利用率(%) Efficiency
0-50	100.3	70.7	102.6	72.3	105.7	74.2
50-100	80.0	52.5	100.4	66.0	107.1	70.4
100-150	43.6	32.2	80.3	59.3	113.1	83.6

在相同条件下,水分的利用效率与施肥数量成正相关[19]。表3资料表明,施肥促进了水分的

表 3 不同施肥处理的水分利用效率(田间试验区,威县)

Table 3 Water use Efficiency of different fertilization treatments

处理 treatment	小麦生长期灌水量 Watering in wheat growth duration		水分利用效率 (kg/mm.mu) Water use efficienty
	降水 Precipitation	灌水 Irrigation	
N_0P_0	23	120	0.720
N_1P_0	23	120	0.760
N_0P_1	23	120	0.997
N_1P_1	23	120	1.035
N_1P_2	23	120	1.164
N_2P_1	23	120	1.242
N_2P_2	23	120	1.417
N_2P_3	23	120	1.650
N_3P_2	23	120	1.608
N_3P_3	23	120	1.303

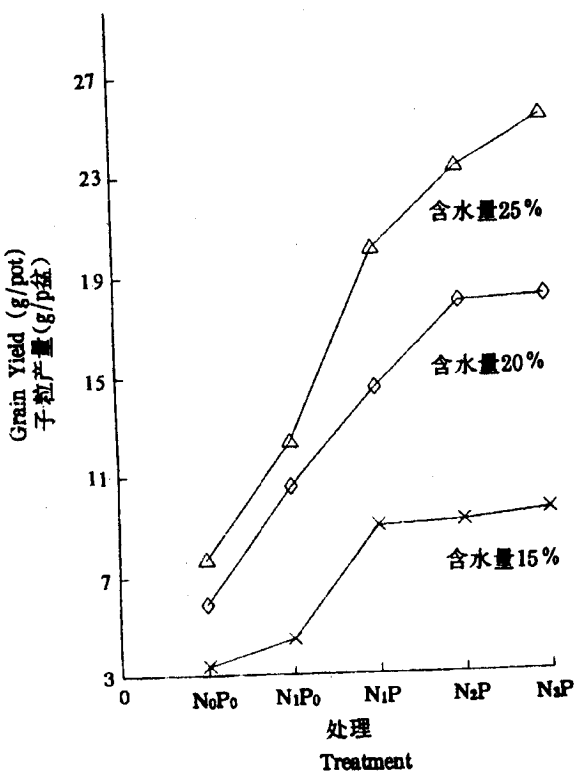


图 5 不同水分条件下小麦对N的反应

Fig.5 Response of wheat to N under different soil moisture conditons

利用,提高了水分的利用效率。特别是旱地增施P肥,对抗旱增产具有特殊意义。同时要注意N、P肥的适当比例。当N:P = 1:0.67(N_2P_3)处理时产量最高,水分利用效率达到了1.65。洛阳的试验同样说明,水分的利用效率随施肥水平的提高而增加(图4)。

在半湿润易旱地区的屯留试区进行旱地玉米的施肥试验同样表明,水分的利用效率与肥料施用量,可用多元一次关系式表达:

$$WUE = 0.6619 + 0.0196N + 0.0172P + 0.00156M$$

在不施肥情况下,每毫米水可生产玉米子粒0.6619kg。而每增施1公斤N肥可使每毫米水多生产玉米子粒0.0196kg,每增1公斤P_2O_5,可使每毫米水分多生产玉米子粒0.0172kg,而每增100kg有机肥可多生产0.0156kg玉米。

(三) 肥水的激励机制与协同效应

作物对N肥的反应,高度依赖于生育期土壤有效水的含量,较高的土壤水分有利于施N量较高时获得高产。在水分适宜范围内,N的有效性高;而在干旱条件下,小麦对施N的反应年际间差异却很大。将限制水分条件下小麦产量(Yw)与限制氮肥施用量的产量(Yn)加以比较发现,生育期降水50mm,不补充灌水的冬麦田,每亩施N 8.5kg,P_2O_5 5kg的处理,小麦产量(Yw)为80.6kg/亩;而只施P_2O_5 5kg/亩,不施N肥,补水180mm的处理亩

产(Yn)达172.3kg，冬小麦产量的主要限制因子为水分，即Yw＜Yn；而生育期降水130.8mm的年份，亩施N7.5-10kg，P_2O_5 5kg，其产量(Yw)达到186.7kg/亩；不施N，只施P_2O_5 5 kg，补水180 mm的冬小麦产量(Yn)为170.1kg/亩，冬小麦产量的主要限制因素为N营养不足，即Yw＞Yn[20]。可见，在不同降水年型下，水分和肥料对作物产量的影响是不同的。干旱年份主要受水分限制，而在湿润年份主要受肥料的限制。但是不论何种年型，只要水分和肥料协调得好，就会产生激励机制，得到更加理想的效果。不同水分条件下，小麦对肥料的反应研究表明，当土壤水分为15%时，施N量为每亩7.5kg，并配合一定的磷肥，产量达到最高，如再增加N肥量，其增产效果并不显著，这主要是因肥水不协调，而影响了N肥的效果。当土壤水分为20%时，施N量需提高到11.25kg/亩，才能过到最高产量；而土壤含水量达到25%时，N素化肥增至15kg(纯N)，产量呈近似直线上升趋势(图5)。充分表明了肥水的协调效应。

三、讨　论

1. 作物种类、环境条件和管理措施是影响作物产量的三大环节。作物本身的遗传特征，相对来说是稳定的；环境因素中光、热、降雨及土壤等在特定区域内也是相对稳定的，只有土壤水分和养分及农业技术措施对作物产量产生直接的影响。瓦格宁根(Wageningen)提出的计算光温生产潜力的公式　Yme＝K·CH·CT·G·Y·ETm/(ea-ed)　中，只提到作物、天气、辐射能等因素[11,21,22,23]，而实践生产中，水分和养分对作物生产影响很大，因此对Yme需进行水分和养分订正，才能正确地反映实际产量(Ya)。应用水分和养分平衡原理，我们认为对Yme应作如下订正：

$$Ya=\frac{(R+W_1+W_2)}{ETm}\cdot\frac{U(1+Sn)}{Fr}\cdot Yme$$

式中R为有效降水，W_1为土壤供水，W_2为补充供水，ETm为最大可能蒸散量，U为养分利用率，I为养分投入量，Sn为土壤速效养分量，Fr为作物达到现实产量时的需肥量。

2. 过去许多研究工作，不论是从肥的角度还是从水的角度都提出了不少有价值的理论。但大多是假设其它因素不变条件下，监测某一因素的作用，得出产量与某限制因素的关系曲线。但是生产实践证明，环境中一个因素起了变化，就会引起其他环境因素的一系列变化，各因素之间都是相互作用的。农业技术体系无一不与环境系统相互作用而产生综合经济效益的。因此，在施肥实践中，应充分利用水分和养分间的激励机制和协同效应，使之在不增加或少增加肥料的情况下，提高其利用率和最大的经济效益。这是旱地农业获高产高效的重要途径。

参考文献

[1] 李比希著,刘更另译，1983：化学在农业和生理学上的应用。农业出版社。
[2] 贺锡萍，1980：报酬递减律和农业生产。北京农业大学学报,第2期。
[3] 彭克明，1979：有关农业化学几个定律的介绍。南京农化讲习班资料
[4] E.W.腊塞尔著,谭世文译，1979：土壤条件与植物生长。科学出版社。
[5] X.L.阿沙洛夫，1959：农业化学讲义(上册)。高等教育出版社。
[6] 陈伦寿，1982：报酬递减律与合理施用。北京农业大学学报,8:1。
[7] 陕西农科院土肥所，1977：土壤中N、P营养状况与P肥肥效的关系。中国农业科学,第2期。
[8] 陈伦寿,李仁岗，1989：农田施肥原理与实践。农业出版社。
[9] S.A泰勤，1983：物理的土壤学。农业出版社。
[10] R.J. 汉克斯，1984：应用土壤物理。水利电力出版社。
[11] 李克煌，1990：气候资源学。河南大学出版社。
[12] 施成熙,粟宗嵩，1984：农业水文学。农业出版社。
[13] Viets F.G., 1972: Water deficits and nutrient availability. in Kozlowski, T.T. (ed), Water deficits and plant growth Vol.Ⅲ P217-236.
[14] Arnen I., 1975: Physiological principles of dryland crop production. in Gupta, U.S. (ed), Physiological aspects of dryland farming, P3-124.
[15] Peter Cocper et al., 1981: The effect of nitrogen supply on growth, water use and yields of bartey (cv.beecher) at five location in northern Syria. in Soil water and nutrient yearth 1979-1980. P1-57.
[16] 山仑,1983:我国西北地区植物水分研究和旱地农业增产。中国干旱半干旱农业科技资料选集,第2集。
[17] 华孟,1987:在国际旱农会议上的报告。
[18] K.蒙格尔，E.A. 克尔克贝著， 张宜春译，1987：植物营养原理。农业出版社。
[19] 汪德水等，1994： 半干旱地区麦田水肥效应研究。土壤肥料,第5期。
[20] 刘晓楠等，1991：黑龙港地区冬小麦生产中水肥关系的研究。土壤肥料,第4期。
[21] 齐来福编译，1982：作物最高气候产量及计算方法。气象,第4期。
[22] 张家诚，1981：粮食生产的气候资源潜力及其开发问题。全国气候变化学术讨论会文集。科学出版社。
[23] FAO，1979：产量与水的关系。粮农组织灌溉与排水丛书,Vol.33。

THE EXCITATION MECHANISM BETWEEN FERTILIZER AND WATER UNDER DRYLAND CONDITION

Wang Deshui Cheng Xianguo Zhang Meirong Zhou Yong
(Soil and Fertilizer Inst. CAAS, 100081)

Summary

This paper described the interactive effects of fertilizer and water on yield and potential yield increase of crops. Fertilizer and water are decisive and controllable factors in agricultural production. The efficiency of fertilizer is siginificantly affected by soil moisture, escapcially in dryland. Fertilizer is the material base in water-soil system and water is a key factor in increasing fertilizer use efficiency. They are promotive and restrictive to each other. An excitation mechanism exists between fertilizer and water, which require a good management and proper balance of fertilizer and water, for the maximum economic benefit from use of these two limited resources.

Key words Dryland, Excitation mechanism of fertilizer and water, Interaction effect, Yield potential