

# 水肥耦合效应研究的现状与前景

潘晓莹<sup>1,2</sup>, 武继承<sup>2,3\*</sup>

(1. 河南大学 生命科学学院, 河南 开封 475002; 2. 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; 3. 农业部作物高效用水原阳科学观测实验站, 河南 原阳 453514)

**摘要:** 我国是一个水资源短缺, 水资源时空分布不均, 土地资源较少以及化肥消费量较大的人口大国和农业大国。在有限的资源条件下, 充分利用水肥的增产效应对我国农业发展具有重要的意义。水肥耦合是研究水肥关系, 以达到更经济有效地利用水分和养分目的的一项重要技术。鉴于此, 从水肥耦合的含义及其对作物生理形态、产量、生态环境的影响等方面综述了水肥耦合的研究现状和发展前景。

**关键词:** 水肥耦合; 协同效应; 现状; 前景

中图分类号: S274 S143 文献标识码: A 文章编号: 1004-3268(2011)10-0020-04

## Current Situation and Prospects of Water and Fertilizer Coupling Effects

PAN Xiao ying<sup>1,2</sup>, WU Ji cheng<sup>2,3\*</sup>

(1. College of Life Science, Henan University, Kaifeng 475002, China; 2. Institute of Plant Nutrition & Resource Environment, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 3. Yuanyang Scientific Observatory of Crops Using Water of Ministry of Agriculture, Yuanyang 453514, China)

**Abstract:** China is a large agricultural country with shortage and uneven spatial and temporal distribution of water resources, fewer land resources, and greater fertilizer consumption. Full use of fertilizer is significant to agricultural development under limited resources in our country. Coupling of water and fertilizer is to study the relationship between water and fertilizer and achieve more cost effective use of water and nutrients. The meaning of water and fertilizer coupling, its research status and prospects are systematically reviewed from its effect on crop yield, crop physiology and ecological environment.

**Key words:** Water and fertilizer coupling; Synergy; Current situation; Prospects

水分和肥料是农业生产中影响作物生长发育的两大重要因素, 也是最容易控制的要素。但长久以来, 水分亏缺严重制约着我国经济作物生产力水平的提高, 而生产上大多采用的漫灌技术造成了大量水分流失, 对农业来说, 目前最大的挑战是开发提高水分利用率的技术<sup>[1]</sup>。就肥料利用而言, 化肥由过去的投入不足到目前部分地区施用过量, 结果导致肥料利用率降低、土壤板结、面源污染和地下水污染

等一系列环境问题。这种高耗低效的生产方式, 不仅造成资源浪费、生态退化、环境污染, 更制约我国农业的可持续发展。在当前我国干旱频繁, 水资源更加紧缺, 耕地不断减少的情况下, 实施水肥耦合, 推进农田水分和养分综合调控和一体化管理, 以肥调水、以水促肥, 对全面提升水肥利用效率, 促进农业增产增效具有重要意义。

水肥耦合包括时间、空间和数量三方面的耦

收稿日期: 2011-05-30  
基金项目: 河南省重大社会公益性科研项目(081100911600); 河南省杰出青年基金项目(1004100510024); 河南省省院科技合作项目(902106000009)  
作者简介: 潘晓莹(1989), 女, 河南商丘人, 在读硕士研究生, 研究方向: 农业生态和逆境生态。  
E-mail: yanmeipan\_pmy@163.com  
\*通讯作者: 武继承(1965), 男, 河南通许人, 研究员, 博士, 主要从事节水农业、农业生态、土壤养分资源利用与管理等方面的研究工作。E-mail: wujc2065@126.com  
©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

合<sup>[2]</sup>,其核心是强调影响作物生长的两大环境因素“水”及“肥”之间的有机联系,利用其间存在的协同效应,进行水肥及作物管理,以提高作物生产力和水肥利用效率。其中由 1947 年墨西哥引进的微灌技术发展起来的水肥一体化技术<sup>[3]</sup>使灌溉与施肥相结合,将肥料溶于灌溉水中同步输送至作物根部。这种水肥耦合方式将浇地变成浇作物,由向土地施肥变成向作物施肥,减少了对土壤结构的破坏以及肥料在作物间和地上的浪费,提高了水肥利用率,节省了肥料施用量,具有节水、节肥、省工、省药、高效、增产和环保等特点<sup>[4]</sup>。

## 1 水肥耦合含义

### 1.1 水肥耦合效应概念

水肥耦合效应是 20 世纪 80 年代提出的田间水肥管理的新概念,指在农业生态系统中,土壤矿质元素与水这 2 个体系融为一体,相互作用、互相影响而对作物的生长发育产生的结果或现象<sup>[5]</sup>。水肥的耦合效应对作物可产生 3 种不同结果或现象:协同效应、拮抗效应和叠加效应<sup>[67]</sup>。

1.1.1 协同效应 也称耦合正效应,即 2 个或 2 个以上体系相互作用,相互影响,互相促进,其多因素的耦合效应大于各自效应之和。如在施多元复合肥或增施氮磷的同时,也补充钾、微量元素,不仅作物产量增加,而且可以维持地力。

1.1.2 拮抗效应 2 个或 2 个以上体系相互制约,相互抵消或 1 个体系中各因素相互抵消,产生的各因素的耦合效应小于各个因素之和,称为拮抗效应或负效应。如锌有效性受 pH 值和石灰的影响,在 pH 值为 6.5 以上的石灰性土壤上,作物容易发生缺锌病。在这种土壤上,不但含锌的化合物溶解度低,而且石灰质具有强烈的吸附和固定锌的作用。若在此种土壤大量施用过磷酸钙等磷肥时,由于磷锌间的拮抗作用,可使土壤中锌有效性进一步降低。

1.1.3 叠加效应 2 个或 2 个以上体系的作用等于各自体系效应之和,体系间无耦合效应,称为叠加效应。

### 1.2 水肥的辩证关系

农业生产是一个结构复杂的体系,而水、肥是农业生产中的两大重要因素和主要调控手段。水分是作物的生命物质,是吸收、运转营养物质和一切生理机能必不可少的,肥料可以满足作物生长各时期对营养元素的需要,是提高其质量的关键,实现优质、高产、高效的必要措施,它们对作物生长发育的作用并非孤立存在,而是相互作用相互影响<sup>[810]</sup>。水分

一方面可加速肥料的溶解和有机肥料的矿化,促进养分的释放;另一方面可稀释土壤中养分的浓度,导致养分流失加速<sup>[1112]</sup>。而合理施肥可提高蓄水保墒的能力,抑制土壤蒸腾作用,从而提高水分利用率,增加作物产量<sup>[13]</sup>。

在农田土壤中,水是溶剂,肥多为溶质,肥多通过土壤矿化分解,转而与水发生耦合作用。尽管水和肥的作用和功能不同,但由于水肥间的协同效应,增水能够提高肥料增产效应,增肥能够增加灌水的产量效应,因此当两因子中有一项因子在量上不足时,可通过加强另一因子量而得到一定补偿<sup>[13]</sup>。通过合理灌溉和施肥,以肥调水、以水促肥,充分发挥水肥因子的增产作用,提高水肥利用率<sup>[14]</sup>,防止不合理施肥灌水造成的资源浪费、生态退化、环境污染。

## 2 水肥耦合效应研究现状

### 2.1 水肥耦合对作物生理形态的影响

受不同水肥耦合处理影响最直接的是作物的根系<sup>[15]</sup>,作为作物重要吸收器官的根系,其生长发育状况直接关系着地上部分的发育与产量形成<sup>[16]</sup>。水分、养分的不同,直接影响着根系活力及根系吸收作用的发挥,进而影响到作物的其他生理生态效应。不同水肥条件下,作物根系活力不同,致使作物对水分、养分吸收不同而导致叶水势、叶片气孔导度的差异,再加上植株光合速率、单位面积光合速率与籽粒产量间也存在一定程度的正相关,从而影响作物产量。尹光华等<sup>[17]</sup>认为,单叶光合速率高于  $7.5 \times 10^{-3} \mu\text{mol/s}$  的水肥优化管理方案是施氮量为  $323.4 \sim 399.9 \text{ kg/hm}^2$ 、施磷量为  $65.8 \sim 105.7 \text{ kg/hm}^2$ 、灌水量为  $276.1 \sim 353.2 \text{ mm}$ 。徐振剑等<sup>[18]</sup>对农田水肥关系研究表明,磷肥能促进作物根系的发达,增强作物抗寒抗旱能力。刘作新等<sup>[19]</sup>认为辽西春小麦生育期供水  $120.2 \text{ mm}$ ,最佳氮磷配比为  $\text{N } 58.5 \text{ kg/hm}^2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$   $123.0 \text{ kg/hm}^2$ ;玉米生育期灌水  $173.3 \text{ mm}$ ,最佳氮磷配比为  $\text{N } 256.5 \text{ kg/hm}^2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$   $85.5 \text{ kg/hm}^2$ ,覆秸秆量为  $8509.5 \text{ kg/hm}^2$ 。水分胁迫下增施磷肥可缓解干旱对产量的不利影响,作物缺磷时,植株矮小,各种代谢过程受到抑制,生长缓慢。钾是生物体内很多酶的活化剂,可促进茎秆健壮,增强抗倒伏能力<sup>[1418]</sup>。张凤祥等<sup>[20]</sup>就水肥耦合对冬小麦生长和产量的影响进行了研究,结果表明,成熟期冬小麦总节间长度在不同施肥处理下均随着土壤水分的增加而增加,在不同水分处理下,施肥对总节间长度的影响不显著。其土壤水分占田间持水量 75% 时,纯氮施用量

360 kg/hm<sup>2</sup> 为最适用量。邢维芹等<sup>[19]</sup> 对半干旱地区玉米的水肥空间耦合效应研究也证实了作物的光合速率与根系活力有关。适宜的土壤水肥条件,可促进根系的生长发育及其对水分、养分的吸收,获得理想的植株,以达到作物的增产效应,同时也提高了水肥利用率。

2.2 水肥耦合对作物产量的影响

水肥是影响作物生长发育及其产量的两大重要因素,不同的水肥条件下,作物的产量不同。同时,水肥又具有协同效应,选择适宜的灌溉与施肥方式,可充分发挥水肥互作的增产效应。水肥耦合的增产效应存在一个阈值,低于阈值,增加水肥投入对作物的增产效果明显;高于阈值,增加水肥的互作增产效应不明显,且造成水肥投入的浪费。由于研究条件、受试作物和分析方法等不同,水肥耦合增产效应的阈值不同<sup>[21]</sup>。张凤祥等<sup>[20]</sup> 就水肥耦合对冬小麦生长和产量的影响进行了研究,发现在不同的施肥处理下,产量随着土壤水分的增加而增加,并在土壤水分分为田间持水量的 75% 时产量最高,超过 75%,产量又降低。将施氮量为 11.2 g/盆、16.8 g/盆的处理与施氮量为 5.6 g/盆的处理相比,产量分别增加 4.17%~21.87%、5.50%~23.19%,其中以土壤水分分为田间持水量的 75% 时增产幅度最大,因此,在此试验范围内,土壤水分分为田间持水量的 75% 时,纯氮施用量 360 kg/hm<sup>2</sup> 为最适量。尹光华等<sup>[22]</sup> 对风沙半干旱区春玉米水肥耦合产量效应研究结果表明,获得最高产量 9374.0 kg/hm<sup>2</sup> 的施氮量为 281.7 kg/hm<sup>2</sup>、施磷量为 121.7 kg/hm<sup>2</sup>、灌溉量为 75.2 mm。王聪翔等对春玉米的研究表明,获得最高产量 14298.36 kg/hm<sup>2</sup> 的施氮量为 285.49 kg/hm<sup>2</sup>、施磷量为 128.79 kg/hm<sup>2</sup>,灌水下限为田间持水量的 69.29%<sup>[23]</sup>。

2.3 水肥耦合对土壤及环境的影响

当肥料大量施于农田时,作物并不能全部吸收利用,尤其 N 素经由各种途径而损失,导致地下水、大气的污染,水肥耦合可提高作物对其的吸收利用,减少 N 素引起的环境污染风险。不同的水肥空间耦合方式对速效 N 在土壤中的分布影响有很大不同。邢维芹等<sup>[24]</sup> 对土壤水分和速效氮的动态分布研究表明,水肥同区速效氮向土壤深层移动明显,同时也有一定的水平移动,水肥异区处理的速效氮向下移动较少且水平移动处于较低水平。邢维芹等<sup>[25]</sup> 对氮素的吸收和残留及其环境效应研究结果表明,常规灌水施肥在 40~60 cm 层次以下土壤速效 N 含量较高,从长远看,N 素淋溶至作物根系分

布较少的 100 cm 以下层次,不利于作物的吸收,地下水将存在一定的被污染风险。而灌水量相同的水肥空间耦合方式其 N 素最大残留量出现在 20~80 cm 处,有利于作物的吸收,提高肥料利用率,减少肥料污染底土和地下水的环境风险。

3 展望

从人们认识到水和肥料对作物生产的重要性以来,通过灌水、施肥来提高作物生产力的技术和方法不断进步发展,尤其 20 世纪 80 年代提出的田间水肥管理新概念以来,越来越多的研究表明,水肥耦合对作物的增产效应在我国水资源紧缺、可耕地减少、化肥过度使用的情况下,推广应用意义深远。但水肥耦合效应在以下几个方面还有待于进一步的研究:(1) 目前对干旱、半干旱地区水肥耦合效应研究较多,而对常有季节性干旱的湿润区的研究较少。(2) 在对作物水肥耦合关系中,多数是针对单一作物而进行的耦合效应研究,对农业生产中的间种及上、下两茬作物的水肥耦合效应需要进行研究。(3) 水肥耦合包括时间、空间和数量三方面的耦合,目前的研究多是针对水肥耦合数量方面,而时间和空间上的水肥耦合效应研究较少。(4) 水肥耦合效应多是研究其对作物的产量效应,对作物品质及水肥耦合对环境的影响研究较少。应从土壤-作物-环境这一系统研究水肥供给、分解转化、转移和互作对作物生长及其生长环境的影响,以高产、优质、环保为目的,对水肥耦合进行管理。(5) 受传统学科的限制,多从自身专业观点出发进行单项研究,随着科学技术的发展,应进一步开展多学科的试验研究,从不同层面更加系统地揭示水肥耦合效应机制。随着水土资源刚性减少趋势的加剧,水肥耦合对作物的增产效应受到越来越多的重视,结合不断发展的科学技术,尤其是计算机技术,将作物、水肥因子和环境进行多学科的统筹管理,建立高效的农田水肥管理系统,对促进我国农业向高产、优质、高效和环保方向发展意义深远。

参考文献:

[1] 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):156-158.  
[2] 邢维芹,王林权,李生秀.非充分灌溉下春玉米的水肥空间耦合效应研究[J].陕西农业科学,2001(3):1-3.  
[3] 刘建英,张建玲,赵宏儒.水肥一体化技术应用现状、存在问题与对策及发展前景[J].内蒙古农业科技,2006(6):32-33.

[ 4 ] 夏敬源, 彭世琪. 我国灌溉施肥技术的发展与展望[ J ]. 中国农技推广, 2006( 5 ): 4 6.

[ 5 ] 谢伟, 黄璜, 沈建凯. 植物水肥耦合研究进展[ J ]. 作物研究, 2007, 21( 5 ): 541 546.

[ 6 ] 穆兴民. 农田水肥耦合效应与协同管理[ M ]. 北京: 中国林业出版社, 1999.

[ 7 ] 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.

[ 8 ] 王丽学, 汪可欣, 吴琼, 等. 水肥耦合技术与辽宁旱地农业可持续发展[ J ]. 节水灌溉, 2007( 8 ): 10 11.

[ 9 ] 张依章, 张秋英, 孙菲菲, 等. 水肥空间耦合对冬小麦光合特性的影响[ J ]. 干旱地区农业研究, 2006, 24( 2 ): 57 60.

[ 10 ] 张广涛, 汪可欣, 王丽学, 等. 水肥耦合技术在辽宁地区农业可持续发展中的应用分析[ J ]. 安徽农业学报, 2007, 35( 24 ): 7531, 7555.

[ 11 ] 梁运江, 依艳丽, 许广波, 等. 水肥耦合效应的研究进展与展望[ J ]. 湖北农业科学, 2006 45( 3 ): 385 388.

[ 12 ] 于洲海, 孙西欢, 马娟娟, 等. 作物水肥耦合效应的研究综述[ J ]. 山西水利, 2009( 6 ): 45 47.

[ 13 ] 张秋英, 刘晓冰, 金剑, 等. 水肥耦合对玉米光合特性及产量的影响[ J ]. 玉米科学, 2001, 9( 2 ): 64 67.

[ 14 ] 谢小婷, 黄璜, 陈玉艳, 等. 作物水肥耦合产量效应模型研究进展[ J ]. 湖南农业科学, 2008( 3 ): 58 61.

[ 15 ] 邢维芹, 王林权, 骆永明, 等. 半干旱地区玉米的水肥空间耦合效应研究[ J ]. 农业工程学报, 2002 18( 6 ): 46 49.

[ 16 ] 梁银丽. 土壤水分和氮磷营养对冬小麦根系生长及水分利用的调节[ J ]. 生态学报, 1996, 16( 3 ): 258 264.

[ 17 ] 尹光华, 刘作新, 陈温福, 等. 水肥耦合条件下春小麦叶片的光合作用[ J ]. 兰州大学学报, 2006, 42( 1 ): 40 43.

[ 18 ] 徐振剑, 华珞, 蔡典雄, 等. 农田水肥关系研究现状[ J ]. 首都师范大学学报, 2007, 28( 1 ): 83 88.

[ 19 ] 刘作新, 郑昭佩, 王建. 辽西半干旱区小麦、玉米水肥耦合效应研究[ J ]. 应用生态学报, 2000, 11( 4 ): 540 544.

[ 20 ] 张凤祥, 周明耀, 徐华平, 等. 水肥耦合对冬小麦生长和产量的影响[ J ]. 水利与建筑工程学报, 2005, 3( 2 ): 22 24.

[ 21 ] 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 ): 35 38.

[ 22 ] 尹光华, 陈温福, 刘作新, 等. 风沙半干旱区春玉米水肥耦合产量效应研究初报[ J ]. 玉米科学, 2007, 15( 1 ): 103 106.

[ 23 ] 王聪翔, 孙文涛, 孙占祥, 等. 辽西半干旱区水肥耦合对春玉米产量的影响[ J ]. 灌溉排水学报, 2008, 27( 2 ): 102 105.

[ 24 ] 邢维芹, 王林权, 李立平, 等. 半干旱区玉米水肥空间耦合效应——土壤水分和速效氮的动态分布[ J ]. 土壤, 2003, 35( 3 ): 242 247.

[ 25 ] 邢维芹, 骆永明, 王林权, 等. 半干旱区玉米水肥空间耦合效应——氮素的吸收和残留及其环境效应[ J ]. 土壤, 2003( 2 ): 118 121.

( 上接第 19 页 )

[ 4 ] 马廉兰, 李娟, 刘志春, 等. 五味子等中草药对肠道致病菌和条件致病菌的抗菌作用[ J ]. 赣南医学院学报, 2003, 23( 3 ): 244 244.

[ 5 ] 吕清林, 沈永恕, 范琳. 五味子增蛋散的增蛋试验与临床观察[ J ]. 郑州牧业工程高等专科学校学报, 1999, 19( 2 ): 106 107.

[ 6 ] 马得莹, 单安山, 刘玉芹, 等. 中草药对正常和高温下蛋鸡生产性能和免疫功能的影响[ J ]. 畜牧兽医学报, 2005, 36( 3 ): 235 239.

[ 7 ] 马得莹, 单安山, 陈志辉. 女贞子、五味子、四君子汤和大豆黄酮对蛋鸡在热应激状态下抗氧化功能的影响[ J ]. 动物营养学报, 2005, 17( 2 ): 23 27.

[ 8 ] 唐光武, 王涛, 马晓海, 等. 五味子提取物对肉仔鸡生产性能的影响[ J ]. 中兽医医药杂志, 2007( 6 ): 51 52.

[ 9 ] 徐良梅, 李牧, 李满雨, 等. 五味子提取物对肉仔鸡生长性能和肠道微生物的影响[ J ]. 中国饲料, 2008( 13 ): 19 21.

[ 10 ] 李群道, 单安山, 马得莹, 等. 女贞子、五味子与寡糖配伍对肉鸡生产性能和免疫功能的影响[ J ]. 畜牧兽医学报, 2005, 36( 4 ): 343 347.

[ 11 ] 李群道, 单安山, 马得莹, 等. 女贞子、五味子与寡糖配伍对肉鸡抗氧化功能和血液生化指标的影响[ J ]. 动物营养学报, 2005, 17( 1 ): 45 48.

[ 12 ] 李莉, 吴若. 五味子酚对氧自由基损伤小鼠脾淋巴细胞的保护作用[ J ]. 药学报, 1997, 32( 3 ): 178 182.

[ 13 ] 漆兴桂, 颜军, 韦习会, 等. 几种中草药对肉仔鸡生长性能、抗病性能及血清、肝脏、腹脂中 SOD 活性和 MDA 含量的影响[ J ]. 畜牧与兽医, 1999, 31( 增刊 ): 42, 52 62.

[ 14 ] 李牧, 高鹏, 徐良梅, 等. 五味子提取物对断奶仔猪血液生化指标和抗氧化能力的影响[ J ]. 中国饲料, 2007( 20 ): 17 19.

[ 15 ] 李建平, 单安山, 陈志辉, 等. 五味子、柠檬酸对断奶仔猪生长性能和抗氧化功能的影响[ J ]. 东北农业大学学报, 2010 41( 2 ): 91 95.

[ 16 ] 韩占臣, 张永泉. 五味子提取物对肥育猪生产性能和免疫功能的影响[ J ]. 黑龙江畜牧兽医, 2010( 4 ): 79 81.

[ 17 ] 刘兴伟, 杨文凯, 姜雪梅. 五味子枝叶饲喂辽宁绒山羊采精公羊的效果观察[ J ]. 山东畜牧兽医, 2009( 9 ): 9 10.

[ 18 ] 王洛洋, 胡宗仁, 纪政, 等. 几种中草药对养殖水体水质的影响[ J ]. 饲料研究, 2010( 8 ): 64 65.