

# 夏玉米水肥异区交替灌溉施肥的产量 与环境效应研究进展

王林权<sup>1</sup>, 周春菊<sup>2</sup>

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2 西北农林科技大学生命学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 水资源缺乏、污染严重、肥料利用率不高是我国农业和农村面临的重要且亟待解决的问题。发展节水施肥技术是解决这些问题的关键环节。交替灌溉施肥技术是在亏缺灌溉或部分根区干燥灌溉技术的基础上发展起来的一种节水施肥技术, 可有效减少灌水量, 提高灌水利用效率, 防止灌溉过程中氮素淋失。在适宜的水氮配合条件下, 还可以减少氨挥发和氧化亚氮等气态氮损失, 增加作物产量。但是该技术的应用效果与环境条件、灌水定额、施肥量、种植密度等密切相关, 在应用过程中应该根据环境条件进行微调。另外水肥异区交替灌溉施肥条件下, 水分、养分在农田的时空分布规律, 转化特征, 以及植物对养分、水分吸收利用和调控机制等还有待于深入研究。

**关键词:** 水肥异区交替灌溉施肥; 淋溶; 氨挥发; 氮肥利用率; 水分利用率

## Advances in researches of yield and environmental effect of alternate furrow irrigation with separated water and N fertilizer supply on summer maize

WANG Lin-quan<sup>1</sup>, ZHOU Chun-ju<sup>2</sup>

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

2 College of Life Sciences, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Water shortage, lower fertilizer use efficiency, contaminant of ground and surface water have become serious issues in agricultural production and countryside ecosystem safety, needing to be worked out urgently in China now. Developing water saving and fertilization efficient techniques are attempted as effective solutions to these issues. In this paper, we introduced the origin, developing history of alternate furrow irrigation with separated water and N fertilizer (AFISWN), as well as the economic and environmental effects. AFISWN is one of water saving techniques, based on the deficit irrigation or part root drying irrigation. It effectively cuts down irrigating quota, increases water use efficiency and prevents nitrate deep leaching etc. It also mitigates the ammonia volatilization and N<sub>2</sub>O emission, and enhances yields under optima water and N rate. However, the effects of AFISWN are closely related with the irrigating quota, N rate, plant density and environmental conditions, such as rainfall and frost etc. The technique parameters need to be modified in the practices for specific area. For this purpose, temporal and spatial distribution and transformation of water and nutrients in soil need to be investigated more carefully; the mechanism of water and nutrient uptake and regulating by plants also needs to be comprehensive studied.

**Key words:** AFISWN; leaching; ammonia volatilization; N use efficiency; water use efficiency

水和肥是影响农作物生长的两个最重要因素, 共同决定作物的生长发育及产量和品质。营养水离不开肥、肥离不开水, 二者相互作用相互制约, 元素必须溶解于水中才能在土壤中迁移、扩散, 被

收稿日期: 2017-07-20 接受日期: 2017-10-19

基金项目: 国家行业(农业)科研专项(201503124)资助。

作者简介: 王林权(1964—), 男, 陕西凤翔人, 教授, 主要从事植物营养与施肥、水肥高效利用等研究。E-mail: linquanw@nwsuaf.edu.cn

作物吸收利用。营养元素是植物的结构物质和生长基础,作物在没有营养元素的纯水中不能生长发育或发育不良<sup>[1]</sup>。所以在植物营养生理研究和农业生产中水肥是不分家的,但是水分和养分的吸收过程又是相对独立的。由于水肥吸收利用的复杂性和供给的多变性使得二者往往很难协调供应,造成有限水肥资源的浪费和一系列不良的生态环境问题。

灌溉消耗了全球 70% 的淡水资源<sup>[2]</sup>,灌溉农田供应了全球 40% 的食物<sup>[3]</sup>。水资源总量不足、时空分布不均,水资源浪费严重,灌水利用率低下等严重影响我国农业生产的可持续发展。我国水资源总量为 28 亿 m<sup>3</sup>,人均水资源量约 2200 m<sup>3</sup>,约为世界平均值的 25%<sup>[4]</sup>。长江淮河以北地区的水资源只有全国的 20%,许多地方人均水资源量低于 1700 m<sup>3</sup> 的缺水警戒线。据统计我国农业灌溉水的利用效率只有 1.0 kg/m<sup>3</sup> 左右,旱地只有 0.60~0.75 kg/m<sup>3</sup>,全国平均水分利用效率为 0.8 kg/m<sup>3</sup>,远低于世界发达国家的水平<sup>[4]</sup>。Cai<sup>[5]</sup>模拟研究了美国里奥格兰德河 (Rio-Grande River) 和科罗拉多河 (Colorado River) 的河谷平原,中国长江、淮河和海河平原,印度的印度河 (Indus) 和恒河 (Ganges) 盆地等灌溉水资源供应及其对食物生产的效应,结果表明,由于水资源不足,基础设施落后,及快速增长的工业及居民生活用水,灌溉水资源不足及其对食物生产的影响会越来越严重,抵御严重干旱的能力下降。因此,发展节水农业、提高灌水效率,是我国乃至世界农业发展的必然趋势。

不合理灌溉的另一个负面效应是养分淋失与水源污染。作物生育期期间氮肥的淋溶损失达到 25%<sup>[6]</sup>,玉米和小麦田的氮肥淋失率分别达到 22% 和 15%<sup>[7]</sup>。在我国华北平原地区,由于过量施肥和不合理灌溉引起的土壤氮素淋失十分严重。灌溉和降雨是导致华北春玉米氮素淋失的主要因素,淋失量与施肥量成正比<sup>[8]</sup>。常规施肥灌水条件下,氮素损失量每季达到 4.6~74.2 kg/hm<sup>2</sup>,优化灌溉可大大降低氮素的淋溶损失<sup>[9]</sup>。保护地的肥料氮损失率达到 67.2%~94.7%,其中大水漫灌造成的淋溶损失是主要途径<sup>[10]</sup>。美国有些农业地区的溪流和地下水中也发现了高浓度的硝态氮,其与农田氮素总投入水平和灌溉等农业措施有关<sup>[11]</sup>。在集约化灌溉地区地下水中的硝酸盐每年增加 1 mg/L<sup>[12]</sup>;有 20% 的井水中硝态氮含量超过了饮用水最高限量标准 (10 mg/L)<sup>[13]</sup>。养分或溶质随灌溉水向地下水的迁移被认为是非点源污染或面源污染<sup>[14]</sup>。地表水和地下水中硝酸盐的增高趋势日益受到人们

的关注<sup>[15-16]</sup>。因此,优化灌溉和合理施肥是提高水、氮利用效率的重要途径,也是防止浅层地下水和饮用水源污染的重要举措。

## 1 交替灌溉施肥技术的起源

由于传统灌溉的水分利用率低、养分淋失严重,因此人们提出了许多新型节水灌溉技术,如滴灌 (膜下滴灌、痕量灌溉、微润灌溉和水肥一体化等)<sup>[17]</sup>、限水灌溉 (调亏灌溉、非充分灌溉)<sup>[4,21]</sup>、精准灌溉<sup>[4]</sup>等。传统的沟灌技术由于投入少,不需要特殊的设备,一直是农田灌溉的主要方式,但为节约水资源、提高水分利用效率、减少养分淋失,需要对其进行改进和完善。交替灌溉或控制性分根交替灌溉就是在传统沟灌技术上发展起来的一种田间节水灌溉技术。

沟灌常被用在干旱、半干旱和半湿润地区的条播作物,如玉米、大豆和棉花等。为了使末端作物根区得到充分湿润,过量灌水经常引起水分和养分的深层渗漏损失<sup>[18]</sup>。20 世纪 70 年代,交替沟灌作为减少深层渗漏<sup>[19]</sup>、增加雨水贮存、减少灌水定额、提高水分利用效率的策略被提出并研究<sup>[20]</sup>。康绍忠等<sup>[21]</sup>在交替灌溉的基础上,结合植物水分生理学原理,提出了控制性分根交替灌溉的概念。部分根区不灌溉,使其得到干旱锻炼,产生根源信号 (ABA),控制叶片气孔开度,在不降低光合效率的基础上,降低蒸腾速率,提高水分利用效率<sup>[22-23]</sup>。

在交替灌溉条件下,将氮肥施到非灌溉沟可以减少硝态氮的淋失<sup>[18,20]</sup>。在此基础上,我们提出交替灌溉施肥的概念,即在交替灌溉过程中,将氮肥施到非灌水沟,而在第二次灌溉施肥时,上一次的施肥沟变成灌水沟,而灌水沟变成施肥沟 (图 1)。既避免了氮肥淋失,也使得各沟的肥水供应均匀<sup>[24]</sup>。

## 2 交替灌溉施肥的水肥利用效率

1999 年我们比较了几种交替灌溉方式的产量效应 (表 1),结果表明:与常规灌水施肥方式相比,非充分灌溉条件下不同水肥空间耦合的灌水量减少一半,玉米籽粒产量下降 7%~16%,根系吸收养分能力、叶片光合速率、蒸腾效率则明显增加,而叶面积、蒸腾速率和硝酸还原酶活性均无明显变化。其中以水肥异区交替灌水的产量降低最少<sup>[24]</sup>。2000 年我们比较了不同灌水量下不同交替灌溉模式的产量效应 (表 1),结果表明在全生育期灌水量为 112.5 mm

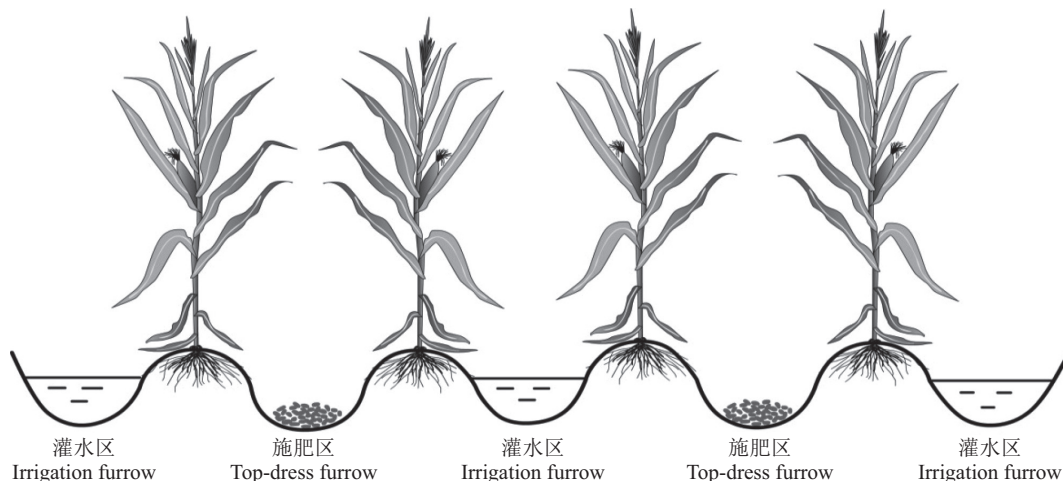


图 1 水肥异区交替灌溉施肥示意图

Fig. 1 Diagram of alternating furrow irrigation with separated water and N fertilizer supply

[注 (Note): 在夏玉米大喇叭口期和抽雄开花期追肥灌溉, 灌溉和追肥分别在相邻两个沟中进行, 两个时期灌溉和追肥沟位置互换 Topdressing and irrigation at V12 stage and tasselling stage of summer maize, and exchanging the topdressing and irrigation furrows in the two stages.]

和 60 mm 的水平下, 均匀施肥交替灌水、水肥同区交替灌水、水肥异区交替灌水 3 种水肥空间耦合方式的产量之间不存在显著差异 ( $P > 0.05$ ); 玉米全生育期灌水量从 225 mm 下降到 60 mm, 玉米产量下降幅度小于 15.26%; 在相同灌水量下, 水肥异区交替灌水和水肥同区交替灌水的根系活力、光合速率、产量和灌溉水利用效率较高。交替施肥灌溉的水分利用效率明显高于其他处理<sup>[25]</sup>。2003~2004 年, 我们通过遮雨微区试验研究了交替施肥灌水的产量及其水、氮利用效率 (表 1), 结果表明在低灌水量 (45 mm/次) 水平下水肥异区交替灌溉, 施肥区和灌水区之间存在水势梯度差异, 两区的  $\text{NO}_3^-$ -N 含量也有差异; 水肥异区交替灌溉的水分利用效率和肥料利用效率均高于均匀灌溉。在高灌水量 (90 mm/次) 水平下, 水肥异区交替灌水与常规均匀灌水差异不显著, 养分离子发生了强烈的淋洗<sup>[26]</sup>。低灌水量有利于提高水分利用效率<sup>[27]</sup>。在低灌水量条件下, 水肥异区交替灌溉能使夏玉米保持较高的根系活力和正常生理代谢 (硝酸还原酶活性、光合作用等), 提高了叶片水分利用效率, 从而达到节水增产的目的<sup>[28]</sup>。

由于交替灌溉施肥效应与灌水量、施肥水平和环境效应等有关, 2006~2011 年, 我们采用旋转组合设计研究了交替灌溉施肥条件下的灌水定额、施氮水平和种植密度等三因素的交互效应。在低密度条件下 (39000 株/hm<sup>2</sup>), 最高产量以及相应水氮最佳配比为 4076 kg/hm<sup>2</sup>、97.2 mm、N 230 kg/hm<sup>2</sup>。虽然产量略低于常规施肥灌水 (4698 kg/hm<sup>2</sup>), 但最高产

量的水氮投入量远低于当地生产中的常规灌水量 (180 mm) 和施肥水平 (300 kg/hm<sup>2</sup>), 水肥异区交替灌溉施肥水分利用率和氮肥利用率则高于常规灌溉施肥<sup>[29]</sup>。在高密度下 (66667 株/hm<sup>2</sup>), N 238~244 kg/hm<sup>2</sup>, 配合 95~106 mm 灌水能够取得最高产量<sup>[30]</sup>。氮肥对产量和水分利用率有正效应; 灌水可增加产量和氮素吸收利用, 但降低水分利用效率; 种植密度对产量、氮素吸收和水分利用效率具有正效应。在交替灌溉施肥条件下, 氮肥、灌水和密度的最佳配置为 N 245~255 kg/hm<sup>2</sup>, 灌水量 98~100 mm 和密度 58376~59467 株/hm<sup>2</sup><sup>[31]</sup>。

### 3 交替灌溉施肥的环境效应

#### 3.1 交替灌溉施肥对硝态氮淋失的影响

水氮在空间上的不均匀分布势必影响水分和养分在土壤剖面中的迁移和分布。将肥料施到非灌水沟的主要目的是防止氮素与灌溉水的接触, 减少养分的淋失风险<sup>[18, 20, 24]</sup>。Br<sup>-</sup> 示踪试验表明, 与常规灌溉 (每行均匀灌溉 ERFI) 相比, 交替灌溉施肥 (ARFI) 可以减少 Br<sup>-</sup> 的移动性, 在整个生育期, Br<sup>-</sup> 保持在 0~15 cm 耕层, 而常规灌溉条件下, Br<sup>-</sup> 下移到 0.6 m 处; 当生育期遇到降雨时, ERFI 处理的 Br<sup>-</sup> 下移到 1.22 m, 而 ARFI 处理的 Br<sup>-</sup> 只下移到 0.6 m 处<sup>[32]</sup>。与常规施肥灌水方式 (均匀施肥均匀灌水、全生育期灌水量为 250 mm) 相比, 全生育期灌水量为 112.5 mm 和 60 mm 的水平下, 均匀施肥交替灌水、水肥

表 1 交替施肥灌溉条件下的夏玉米产量及其水、氮肥利用效率

Table 1 Yields, water and fertilizer N use efficiency in AFISWN (alternating furrow irrigation with separated water and N fertilizer supply) practices

处理 Treatment	灌水量 (mm) Irrigation	施氮量 (kg/hm <sup>2</sup> ) N rate	产量 (kg/hm <sup>2</sup> ) Yield	WUE (kg/m <sup>3</sup> )	NUE (%)
1990 年大田试验 <sup>[24]</sup>					
1 常规灌溉施肥	60	165.4	5840.7		
2 均匀施肥交替灌水	30	165.4	5415.9		
3 水肥同区固定交替灌溉施肥	30	165.4	4927.5		
4 水肥同区交替灌溉施肥	30	164.5	5126.5		
5 水肥异区固定施肥灌水	30	165.4	5222.2		
6 水肥异区交替施肥灌水	30	165.4	5423.2		
2000 年大田试验 <sup>[25]</sup>					
1 自然降水不灌溉			3812.51		
2 均匀灌水施肥	60.00	248.1	5620.00	3.03	
3 均匀灌水施肥	112.5	248.1	6243.43	2.16	
4 均匀施肥交替灌水	60.00	248.1	5446.27	3.22	
5 均匀施肥交替灌水	30.00	248.1	5307.79	4.98	
6 均匀施肥交替灌水	56.25	248.1	5392.72	2.09	
7 水肥同区交替灌水	30.00	248.1	5446.24	5.46	
8 水肥同区交替灌水	56.25	248.1	5596.71	3.18	
9 水肥异区交替灌水	30.00	248.1	5451.49	5.47	
10 水肥异区交替灌水	56.25	248.1	5621.58	3.22	
2003 年微区试验 <sup>[26]</sup>					
1 均匀灌水施肥 (低水)	90	180	2898 ± 793	0.94	18.56
2 水肥异区交替灌水施肥 (低水)	90	180	4520 ± 541	2.74	35.56
3 均匀灌水施肥 (高水)	180	180	4758 ± 879	1.50	57.44
4 水肥异区交替灌水施肥 (高水)	180	180	5464 ± 1062	1.90	44.79
2004 年微区试验 <sup>[27]</sup>					
1 常规灌水施肥	120	180	4830	2.38	8.77
2 低量交替灌溉施肥	60	180	4920	4.87	9.81
3 中量交替灌溉施肥	90	180	4742	3.05	7.89
4 高量交替灌溉施肥	120	180	5639	3.03	17.57

注 (Note): AFISWN—Alternating furrow irrigation with separated water and N fertilizer supply.

同区交替灌水、水肥异区交替灌水 3 种不同水肥空间耦合方式玉米植株吸收氮量略有下降, 但增加了肥料氮在 60 cm 以上土壤中的残留量, 从而减小了氮向下层土壤淋溶的风险; 相同灌水量下, 60 cm 以上层次土壤氮素残留量大小顺序为水肥异区交替灌水处理 > 水肥同区交替灌水处理 > 均匀施肥交替灌水处理<sup>[32]</sup>。模拟试验表明, 水肥异区隔沟灌溉、水

肥同区隔沟灌溉两种处理方式的灌溉水在剖面上均以垂直运动为主, 同时也存在水平侧渗<sup>[33]</sup>。水肥同区隔沟灌溉处理的速效氮在剖面上垂直运动明显, 处理后 15 天速效氮基本均匀地分布于 0—100 cm 土层内, 速效氮含量在施肥区和未施肥区之间差异较小; 而水肥异区隔沟灌溉处理的速效氮垂直运动程度小, 速效氮主要分布在 60 cm 以上土层, 速效氮



水平运动不明显, 施肥区速效氮含量远高于未施肥区。水肥异区处理的养分淋溶深度较小, 淋失的可能性小, 有利于养分长期在剖面较浅层次中分布, 为作物吸收利用创造了条件<sup>[34]</sup>。微区试验表明, 在低灌水量 (45 mm/次) 水平下水肥异区交替灌溉, 施肥区和灌水区之间存在水势梯度差异;  $\text{NO}_3^-$ -N 含量也有差异, 施肥区的硝态氮主要分布 0—40 cm 土层, 灌水区的峰值出现在 160~180 cm; 在高灌水量 (90 mm/次) 水平下, 水肥异区交替灌水与常规均匀灌水差异不显著,  $\text{NO}_3^-$ -N 发生了强烈的淋洗, 说明交替灌溉已经失去意义。收获后, 交替灌溉施肥残留量比传统灌溉要高, 而水分残留量则相反<sup>[26, 48-49]</sup>。大田试验表明, 交替灌溉条件下, 玉米收获后土壤剖面中  $\text{NO}_3^-$ -N 的残留与施肥量、灌水量和灌溉施肥模式有关。在不施肥和低施肥和低灌水条件下 (施 N 100 kg/hm<sup>2</sup>, 灌水 40 mm), 土壤中的  $\text{NO}_3^-$ -N 呈耗竭状态。在中量施肥灌水 (施 N 230 kg/hm<sup>2</sup>, 灌水 90 mm) 和高量施肥灌水 (施 N 300 kg/hm<sup>2</sup>, 灌水 180 mm) 条件下, 土壤剖面有  $\text{NO}_3^-$ -N 残留; 施氮量越高, 残留越大。其中交替施肥灌溉的  $\text{NO}_3^-$ -N 主要残留在 0—60 cm 土层, 而常规施肥灌溉处理的  $\text{NO}_3^-$ -N 在 0.6—2 m 土层残留多<sup>[35]</sup>。说明交替灌溉施肥确实能减少氮素的淋溶风险。

尽管将肥料施在非灌水沟可降低氮素的淋失风险, 但有可能减少作物对硝态氮的吸收。像硝态氮这样移动性强的养分主要靠质流在土壤向根系迁移<sup>[36]</sup>, 因此在水分有效性低的条件下会减少  $\text{NO}_3^-$ -N 的吸收<sup>[37]</sup>。在干旱年份, 将肥料施在非灌水沟, 减少玉米吸氮量 50%; 在湿润年份, 交替灌溉与常规灌溉的吸氮量无显著差异。常规灌溉处理生殖生长期的吸氮量只有总吸氮量的 6%, 而交替灌溉处理生殖生长期的吸氮量达到 35%<sup>[38]</sup>。Skinner 等研究表明交替沟灌并将肥料施于干沟内, 可减少肥料淋溶的可能性, 但作物对氮的吸收也减少; 与普通灌溉相比, 交替沟灌施肥条件下, 土壤硝酸根含量在生殖生长期较高<sup>[39]</sup>。说明将肥料施到非灌水沟有延缓作物吸收的效应。

我们的研究并没有发现水肥异区交替灌溉施肥会显著减少植株氮素吸收。原因可能是施肥沟的水分有效性不会降低到影响氮素的运输和迁移的程度, 因为灌水沟的水分存在侧向迁移, 有部分水分可以侧渗到非灌水沟。为了验证这一假设, 我们进行了室内模拟实验 (图 2)。灌水在入渗的同时, 还发生了明显的侧渗过程, 经过 15 h 的入渗过程, 入渗

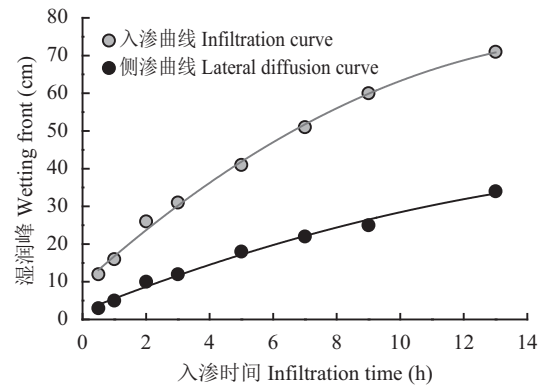


图 2 模拟灌水中的水分入渗与侧渗趋势 (灌水量为 378 mm)

Fig. 2 Infiltration and lateral diffusion trend of irrigation water in simulated irrigation (irrigation quota of 378 mm)

深度达到 70 cm, 侧渗距离达到了 30 cm 以上, 因此侧渗完全可以满足肥料的溶解与养分扩散需求。另外, 交替灌溉施肥后, 第一次施肥沟变成灌水沟, 也有利于施肥沟的养分吸收。不同试验结果差异的原因可能与灌水量、灌水方式和气候、土壤等条件的差异有关。例如早春低温潮湿, 秋季早霜冻使得玉米不能完成生育周期, 生殖生长缩短等会减少交替灌溉施肥的植株吸氮量<sup>[39]</sup>。而在湿热、没有霜冻影响的地区水氮异区隔沟灌溉是一种较好的水肥耦合模式<sup>[40]</sup>。

### 3.2 交替灌溉施肥对气态氮损失的影响

水肥空间分布的异质性和不均匀性势必造成土壤水分、养分、热量和微生物活性等的不均匀分布, 使得根系生长与活性<sup>[41-43]</sup>、土壤微生物活性和养分转化<sup>[44]</sup>等发生变化。水肥异区交替灌溉施肥, 肥料施在非灌水沟, 减少养分淋失的风险, 但是养分在耕层的聚集, 是否会造成氨挥发或其它气态氮的损失增加? 与常规灌水施肥处理相比, 水肥异区交替灌溉施肥可明显减少氨挥发损失<sup>[45]</sup>。但氨挥发受生育期及其气候条件、灌水量和施肥量的影响, 玉米拔节期追肥灌水的氨挥发量和损失率远远小于抽雄期。在水肥异区交替灌溉条件下, 当灌水量 35 mm、氮施用量 256 kg/hm<sup>2</sup> 时的氨挥发量最低<sup>[46]</sup>。

交替灌溉条件下, 2008 和 2009 年大田氨挥发通量分别为 N 4.8~17.0 kg/hm<sup>2</sup> 和 6.2~20.6 kg/hm<sup>2</sup>, 作物产量和氨挥发通量随施氮量的增加而增加, 反之亦然。在低灌水施肥条件下 (N 100 kg/hm<sup>2</sup>+40 mm 灌水), 交替灌溉施肥可以降低氨挥发, 中等灌水施肥条件下 (N 230 kg/hm<sup>2</sup>+90 mm 灌水), 交替灌溉施肥与常规灌溉施肥无差异, 而在高施肥灌溉条件下 (N 300 kg/hm<sup>2</sup>+180 mm 灌水), 交替灌溉施肥的氨挥发

量大于常规灌溉施肥<sup>[35]</sup>。原因是：低灌水量时侧渗到施肥沟的水分少，减少了尿素的水解，因此减少了氨挥发，而高灌水量时，侧渗水增加了尿素水解，但淋溶少，因此增加了氨挥发。氨挥发强度(单位籽粒产量氨挥发通量)是反映氮肥环境效应的一个指标，值越低说明生产单位粮食的环境效应越好，在交替灌溉施肥条件下，2008 和 2009 年的氨挥发强度分别为每吨籽粒产量产生  $\text{NH}_3\text{-N}$  1.2~3.0 kg 和 1.1~3.2 kg，模型模拟结果表明只要水氮配比适宜就可以降低氨挥发强度而维持产量不降低<sup>[46]</sup>，降低施肥对环境的负面影响。关于交替灌溉施肥条件下的硝化-反硝化研究较少。Han 等<sup>[47]</sup>报道交替灌溉施肥的氧化亚氮释放通量为  $\text{N}$  2.0~50.0  $\text{g}/(\text{hm}^2\cdot\text{d})$ ，累积释放量为  $\text{N}$  1277  $\text{g}/(\text{hm}^2\cdot\text{季})$ ，而常规灌溉施肥的释放通量  $\text{N}$  2.4~68.4  $\text{g}/(\text{hm}^2\cdot\text{d})$ ，累积释放量为  $\text{N}$  1695  $\text{g}/(\text{hm}^2\cdot\text{季})$ 。在交替灌溉施肥条件下，优化施肥和灌水可以显著降低氧化亚氮释放而不降低产量。

#### 4 交替灌溉施肥的适用性

交替灌溉作为一种节水灌溉方式，在节约一半灌水量的情况下，产量小幅度下降，因此可以大幅度提高灌水效率。水肥异区交替灌溉施肥可以减少氮肥淋溶损失的潜在风险，防止地下水污染。适宜的水氮配比不但不降低产量，还可以增加产量，提高水分及养分利用效率，减少氮素淋溶风险和气态氮损失，因此具有良好的应用前景。但是其效应受环境条件、气候条件和灌水定额等的影响，因此有一定适用范围与条件。由于肥料处于干沟，在干旱年份会影响作物对养分的吸收利用。另外，施肥区的水分有效性比较差，肥效迟缓，进入生殖生长期仍然有 35% 的吸收量，如果生育后期有霜冻等因素，缩短了玉米生育期，就会大大减少氮素的吸收利用。在小麦-玉米轮作中夏玉米无晚霜冻的影响，因此适宜于水肥异区交替灌溉的实施。另外在湿热的夏玉米生长季，交替灌溉施肥有利于吸纳雨水，减少肥料淋失，可以充分发挥水肥异区交替灌溉的优势。

交替灌溉施肥就是利用水分和肥料在空间上的错位与不均匀分布，实现减少养分淋失，将养分保留在根系吸收层<sup>[17, 33, 47-48]</sup>，增加养分吸收的可能性。在适宜的水肥配合条件下，可以提高产量、减少养分淋失，提高水分、养分利用效率。但是如果灌水过多，灌水沟的水分向施肥沟大量测渗，两沟失去水分差异，一方面起不到锻炼根系、产生根源信号

(ABA) 的作用，另一方面也起不到减少养分淋失的作用，反而增加施肥沟的氨挥发风险。因此水肥耦合尤为重要，找到适宜的灌水量是保证水肥异区交替灌溉效应的前提条件。在本研究区域(陕西关中冬小麦夏玉米一年两熟区)的适宜灌水量为每次不能超过 45~60  $\text{mm}$ <sup>[48]</sup>。在实行交替灌溉施肥的时候，还要充分考虑种植密度或降雨情况。

适宜的水肥配合条件下，水肥异区交替灌溉施肥可以产生良好的经济和环境效应，如增加玉米产量、提高水分和氮肥吸收利用效率，减少  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋溶、 $\text{N}_2\text{O}$  排放和氨挥发等。但模拟试验表明，经济效益和环境效应之间存在互蚀作用(trade-off)。当玉米收获后 0.6—2.0 m 土层中硝态氮最少，也就是说对地下水影响最小或肥料氮残留最少时，需要的灌水量比最佳经济效益的灌水量应该减少 32%~36%，收入降低 14%。采用农田氨挥发降到最低时的播种密度、灌水量和施肥量，经济收入将下降 35%~37%。相反，要使得产量或经济收入最大化，玉米收获后的 0.6—2.0 m 土层深度  $\text{NO}_3\text{-N}$  残留  $\text{N}$  38~40  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ，氨挥发增加 48%~56%<sup>[49]</sup>。因此如何才能使得交替灌溉施肥的经济效应与环境效应相一致，还需要做更多的工作。

另外也需要大量模拟实验与大田试验探寻水肥异区交替灌溉施肥条件下水分、养分吸收利用机理，为进一步优化肥水管理提供科学指导；实践上应进一步明确水肥异区交替灌溉施肥的适用范围，为大范围推广这一技术提供科学依据。

#### 5 结论

水肥异区交替灌溉施肥可以节约灌溉水，提高灌水利用效率和氮肥利用效率；增加肥料在耕层存留，有利于当季和下一季作物吸收利用，减少肥料随水流失的风险。在适宜的水氮耦合条件下水肥异区交替灌溉施肥具有增产效应，同时可以减少农田气态氮损失。该技术适宜于在没有霜冻、比较湿热的春/夏玉米地区推广应用。

#### 参考文献:

- [1] Epstein E, Bloom A J. Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives (Second Edition) [M]. Sunderland: Sinauer Associates Inc., 2005.
- [2] Hospido A, Núñez M, Antón A. Irrigation mix: How to include water sources when assessing fresh water consumption impacts associated to crops[J]. International Journal of Bio-Medical Computing, 2013, 42(1-2): 143-150.

- [3] Long S P, Marshall-Colon A, Zhu X. Meeting the global food demand of the future by engineering crop photosynthesis and yield potential[J]. *Cell*, 2015, 161(1): 56–66.
- [4] 康绍忠, 许迪. 我国现代农业节水高新技术发展战略的思考[J]. *中国农村水利水电*, 2001, (10): 25–29.  
Kang S Z, Xu D. Reflection on high-tech development strategies for water-saving of modern agriculture in China[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2001, (10): 25–29.
- [5] Cai M X. Risk of irrigation water supply and the effects on the crop production[J]. *Journal of American Water Resources Association*, 2005, 41(3): 679–692.
- [6] Brye K R, Norman J M, Bundy L G, *et al.* Nitrogen and carbon leaching in agro-ecosystem and their roles in denitrification potential[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(1): 58–70.
- [7] Cecon P, DallaCosta L, DelleVedove G, *et al.* A study in lysimeters[J]. *European Journal of Agronomy*, 1995, 4(3): 189–198.
- [8] 张亦涛, 王洪媛, 刘宏斌, 等. 基于大型渗漏池监测的褐潮土农田水、氮淋失特征[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(1): 110–119.  
Zhang Y T, Wang H Y, Liu H B, *et al.* Characteristics of filed water and nitrogen leaching in a haplicluvisols based on large lysimeter[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(1): 110–119.
- [9] 陈树峰, 吴文良, 胡克林, 等. 华北平原高产粮区不同水氮管理下农田氮素的淋失特征[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 65–73.  
Chen S F, Wu W L, Hu K L, *et al.* Characteristics of nitrate leaching in high yield farmland under different irrigation and fertilization managements in North China Plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(2): 65–73.
- [10] 李俊良, 朱建华, 张晓晟, 等. 保护地番茄养分利用及土壤氮素淋失[J]. *应用与环境生物学报*, 2001, 7(2): 126–139.  
Li J L, Zhu J H, Zhang X S, *et al.* Nitrate leaching loss from soil and nutrient utilization by tomato in protected field[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2001, 7(2): 126–139.
- [11] Wu L S, John L, Christine F, *et al.* Nitrate leaching hazard index developed for irrigated agriculture[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 60(4): 91–95.
- [12] Engberg R A, Spalding R F. Groundwater quality Atlas of Nebraska[R]. Lincoln: University of Nebraska-Lincoln, 1978.
- [13] Exner M E, Spalding R F. Occurrence of pesticides and nitrates in Nebraska's groundwater [R]. Lincoln: University of Nebraska-Lincoln, 1990.
- [14] Spalding R F, Gormly J R, Curtiss B H, *et al.* Nonpoint nitrate contamination of groundwater in Merrick County, Nebraska[J]. *Ground Water*, 1978, 16(2): 86–95.
- [15] Liu A, Ankumah M J, Ramble O. Nitrate contamination in private wells in rural Alabama, United States[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 346(1–3): 112–120.
- [16] Fang Q X, Ma L, Yu Q, *et al.* Quantifying climate and management effects on regional crop yield and nitrogen leaching in the North China Plain[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(5): 1466–1479.
- [17] 王旭, 孙兆军, 杨军, 焦炳忠. 几种节水灌溉新技术应用现状与研究进展[J]. *节水灌溉*, 2016, (10): 109–112.  
Wang X, Sun Z J, Yang J, Jiao B Z. The application and development of some new water saving irrigation techniques[J]. *Water Saving Irrigation*, 2016, (10): 109–112.
- [18] Benjamin J G, Havis H R, Ahuja L R, *et al.* Leaching and water flow patterns in every-furrow and alternate-furrow irrigation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1975, (58): 1511–1517.
- [19] Musick J T, Dusek D A. Alternate-furrow irrigation of fine textured soils[J]. *Transactions of the ASAE*, 1974, 17(2): 289–294.
- [20] Benjamin J G, Porter L K, Duke H R, *et al.* Nitrogen movement with furrow irrigation method and fertilizer band placement[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(4): 1103–1108.
- [21] 康绍忠, 张建华, 梁宗锁, 等. 控制性交替灌溉——一种新的农田节水调控思路[J]. *干旱地区农业研究*, 1997, 15(1): 1–5.  
Kang S Z, Zhang J H, Liang Z S, *et al.* The controlled alternative irrigation—A new approach for water saving regulation in farm land[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1997, 15(1): 1–5.
- [22] Kang S Z, Zhang J H. Controlled alternate partial root zone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(407): 2437–2446.
- [23] 康绍忠, 潘英华, 石培泽, 等. 控制性作物根系分区交替灌溉的理论及试验[J]. *水利学报*, 2001, (11): 80–86.  
Kang S Z, Pan Y H, Shi P Z, *et al.* Controlled root divided alternative irrigation theory and experiments[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, (11): 80–86.
- [24] 邢维芹, 王林权, 李生秀. 半干旱地区玉米的水肥空间耦合效应研究[J]. *农业现代化研究*, 2001, 22(3): 150–153.  
Xing W Q, Wang L Q, Li S X. Spatial coupling effect of water and fertilizer on corn (*Zea mays* L.) in semiarid area[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2001, 22(3): 150–153.
- [25] 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.  
Xing W Q, Wang L Q, Luo Y M, *et al.* Effect of spacial coupling between irrigation water and fertilizer on corn in semiarid area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(6): 46–49.
- [26] 谭军利, 王林权, 李生秀. 不同灌溉模式下水分养分的运移及其利用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 11(4): 442–448.  
Tan J L, Wang L Q, Li S X. Movement and utilization of water and nutrient under different irrigation patterns[J]. *Plant Nutrition and Fertilization Science*, 2008, 11(4): 442–448.
- [27] 谭军利. 水肥异区交替灌溉施肥和地面覆盖条件下土壤水分养分运移及其利用效率研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2005.  
Tan J L. The use efficiency of water and nitrogen and their movement in the soil profile under alternate irrigation and fertilization and mulching [D]. Yangling, Shaanxi: MS Thesis of Northwest A & F University, 2005.
- [28] 谭军利, 王林权, 王西娜, 等. 水肥异区交替灌溉对夏玉米生理指标的影响[J]. *西北植物学报*, 2010, 30(2): 344–349.  
Tan J L, Wang L Q, Wang X N, *et al.* Effect of alternate irrigation with water and fertilizer in different furrows on physiological indexes of summer maize[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2010, 30(2): 344–349.
- [29] 薛亮, 周春菊, 雷杨莉, 等. 夏玉米交替灌溉施肥的水氮耦合效应研

- 究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 91–94.
- Xue L, Zhou C J, Lei Y L, *et al.* Effect of water and nitrogen coupling under alternate furrow irrigation and fertilizer placement on summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(3): 91–94.
- [30] Han K, Zhou C J, Li N, *et al.* Separating nitrogen fertilizer and irrigation water application in an alternating furrow irrigation system for maize production[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2013, 96(1): 107–122.
- [31] Han K, Zhou C J, Sheng H Y, *et al.* Agronomic improvements in corn by alternating nitrogen and irrigation to various plant densities[J]. Agronomy Journal, 2015, 107(1): 1–11.
- [32] Francisco G. Alternate irrigation and fertilization to reduce leaching of nitrates [D]. Lincoln: PhD Dissertation, University of Nebraska-Lincoln, 2000.
- [33] 邢维芹, 骆永明, 王林权, 等. 半干旱区玉米水肥空间耦合效应: I. 氮素的吸收和残留及其环境效应[J]. 土壤, 2003, 35(2): 118–121.
- Xing W Q, Luo Y M, Wang L Q, *et al.* Effect of different water-fertilizer spatial couplings on corn in semiarid area: I. Uptake N residue and its environmental effect[J]. Soils, 2003, 35(2): 118–121.
- [34] 邢维芹, 王林权, 李立平, 李生秀. 半干旱区玉米水肥空间耦合效应: II. 土壤水分和速效氮的动态分布[J]. 土壤, 2003, 35(3): 242–247.
- Xing W Q, Wang L Q, Li L P, Li S X. Effect of different water-fertilizer spatial couplings on corn in semiarid area: II. Dynamic distribution of water and available nitrogen in soil[J]. Soils, 2003, 35(3): 242–247.
- [35] Han K, Yang Y, Zhou C J, *et al.* Management of furrow irrigation and nitrogen application on summer maize[J]. Agronomy Journal, 2014, 106(4): 1402–1410.
- [36] Barber S A, Walker J M, Vasey E H. Mechanism for movement of plant nutrients from soil and Fertilizer to the plant root[J]. Journal of Agricultural Food Chemistry, 1963, 11(3): 204–207.
- [37] Abreu J P, De M E, Flores I, *et al.* Nitrogen uptake in relation to water availability in wheat[J]. Plant and Soil, 1993, 154(1): 89–96.
- [38] Benjamin J G, Porter L K, Duke H R, *et al.* Corn growth and nitrogen uptake with furrow irrigation and fertilizer bands[J]. Agronomy Journal, 1997, 89(4): 609–612.
- [39] Skinner R H, Hanson J D, Benjamin J G. Root distribution following spatial of water and nitrogen supply in furrow irrigated corn[J]. Plant and Soil, 1998, 199(2): 187–194.
- [40] 刘小刚, 张富仓, 田育丰, 等. 水氮处理对玉米根区水氮迁移和利用的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 19–24.
- Liu X G, Zhang F C, Tian Y F, *et al.* Effects of irrigation and fertilization treatments on transfer and utilization of water and nitrogen in maize root zone soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(11): 19–24.
- [41] 何华, 康绍忠, 曹红霞. 限域供应 $\text{NO}_3^-$ 对玉米根系形态及其吸收的影响[J]. 西北农林科技大学学报, 2002, 30(1): 5–7.
- He H, Kang S Z, Cao H X. Effect of localized supply of nitrate on corn root morphology and  $\text{NO}_3^-$  uptake[J]. Journal of Northwest A & F University, 2002, 30(1): 5–7.
- [42] Mousavi S F, Soltani-Gerdefaramarzi S, Mostafazadeh-Fard B. Effects of partial root zone drying on yield, yield components, and irrigation water use efficiency of canola (*Brassica napus* L.)[J]. Paddy and Water Environment, 2010, 8(2): 157–163.
- [43] Kang S Z, Shi P, Pan Y H, *et al.* Soil water distribution, uniformity and water use efficiency under alternate furrow irrigation in arid areas[J]. Irrigation Science, 2000, 19(4): 181–190.
- [44] Wang J F, Kang S Z, Li F S, *et al.* Effects of alternate partial root-zone irrigation on soil microorganism and maize growth[J]. Plant and Soil, 2008, 302(1/2): 45–52.
- [45] 雷杨莉, 王林权, 薛亮, 等. 交替灌溉施肥对夏玉米土壤氨挥发的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 41–46.
- Lei Y L, Wang L Q, Xue L, *et al.* Effect of alternative irrigation and fertilization on soil ammonia volatilization of summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(4): 41–46.
- [46] Han K, Zhou C J, Wang L Q. Reducing ammonia volatilization from maize fields with separation of nitrogen fertilizer and water in an alternating furrow irrigation system[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(5): 1099–1112.
- [47] Han K, Zhou C J, Wang L Q, *et al.* Effect of alternating furrow irrigation and nitrogen fertilizer on nitrous oxide emission in corn field[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2014, 45(5): 1–17.
- [48] 谭军利, 王林权, 王西娜, 等. 不同灌水模式对土壤水分和硝态氮含量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(5): 29–33.
- Tan J L, Wang L Q, Wang X N, *et al.* Influence of different irrigation patterns on the distribution of soil moisture and nitrate[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(5): 29–33.
- [49] Kan H, Han X, Dell J, *et al.* Impact of irrigation, nitrogen fertilization, and spatial management on maize[J]. Agronomy Journal, 2016, 108(5): 1794–1804.