

# 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

邢维芹<sup>1</sup> 骆永明<sup>1</sup> 王林权<sup>2</sup> 李生秀<sup>2</sup> 李立平<sup>1</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所 南京 210008; 2西北农林科技大学资源环境学院 陕西杨凌 712100)

**摘 要** 通过田间试验研究了半干旱地区不同灌水量和水肥空间耦合方式下玉米对 N 素的吸收及玉米收获后 N 素在 1.0m 土体中的残留。结果表明,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 2500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)相比,在全生育期灌水量为 1125 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>和 600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>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 种不同水肥空间耦合方式在玉米植株吸收 N 略有下降的情况下,增加了肥料 N 在 60cm 以上土壤中的残留量,从而减小了 N 向下层土壤淋溶的可能;相同灌水量下,60cm 以上层次土壤 N 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。

**关键词** 半干旱地区;水肥空间耦合;N 素残留;环境效应

中图分类号 S147.265

养分和水分是作物生长的重要物质基础。在干旱和半干旱地区,一方面存在着灌溉水不足的问题,灌溉水只能满足部分农田的用水需要;另一方面,这些地区还存在着化学肥料利用率低的问题。因此,充分利用水肥之间的相互作用,提高有限的灌溉水的利用率和肥料的利用率,是提高半干旱地区的作物产量以及降低生产成本的重要手段<sup>[1,2]</sup>。此外,在提高现有灌溉水的利用率的同时,如何减小肥料对环境的污染,也越来越受到人们的关注<sup>[3,4]</sup>。

根据近年来的研究看,水肥耦合是在半干旱地区较有前景的一项措施,水肥空间耦合是水肥耦合的重要方式<sup>[5,6]</sup>。另外,亏缺灌溉是近年来在干旱半干旱地区发展起来的一种重要节水灌溉方式<sup>[7,8]</sup>。已有的研究表明,二者结合将有利于进一步改善这些地区的农业生产状况<sup>[9]</sup>。作者利用大田试验对亏缺灌溉条件下水肥空间耦合对夏玉米的影响进行了系统的研究。本文总结了不同水肥空间耦合处理玉米对 N 素的吸收、N 素在土壤中的残留及其环境效应。

### 1 材料与方 法

#### 1.1 试验处理

试验于 2000 年在西北农林科技大学农作一站进行。供试作物为玉米(*Zea mays* L.),品种为陕单 9

号,供试土壤为红油土,其基本性状为:有机质 11.19g/kg,全 N 0.72 g/kg,碱解 N 56.24 mg/kg,速效 P 23.93 mg/kg,速效 K 100.27 mg/kg,pH7.78。N 肥为尿素,含 N 量为 46%。共设 9 个处理(表 1),重复 3 次,随机区组排列,小区面积 18.0m<sup>2</sup>(4.0m × 4.5m)。

6 月 11 日播种,7 月 4 日定苗,10 月 4 日收获。种植密度为 0.6m × 0.3m,保护行宽 1.0m。玉米全生育期共施纯 N 248.1kg/hm<sup>2</sup>。将 N 肥的 1/3 在播种时作基肥施入,剩余部分平分为两份,用作追肥。

分别于 7 月 21 日(拔节期)和 8 月 12 日(抽雄期)进行施肥灌水处理:开沟施肥,沟深 15cm 左右,施后覆土。施肥后即进行灌水处理。各处理方式如下:均匀施肥:小区内每一沟都施肥;均匀灌水:每一沟都灌水;交替灌水:拔节期和抽雄期均为隔沟灌溉,但两次处理灌水沟和干沟交换;水肥同区:同一次处理时灌水沟和施肥沟相同;水肥异区:同一次处理时灌水沟和施肥沟相邻。

玉米收获后采取土壤和植株样。土壤采样深度为 0~100cm,分层采样(每 20cm 为一层),每个小区随机采 5 个点,相同深度的土壤充分混匀后留约 0.5kg 作为一个样,风干、过 1mm 筛后进行各项目的测定。每小区随机采取 5 株玉米,根系洗净泥土,

各部分分开,相同部分混合,烘干,粉碎后用于各项目测定。

### 1.2 测定项目与方法

土壤速效 N:土样用 1mol/L 的 KCl 浸提、振荡 0.5h 后,用流动注射分析仪测定铵态 N、硝态 N 含量,速效 N 含量用二者之和表示。

植物全 N:凯氏法。

### 1.3 数据处理:

每处理的测定结果为 3 个重复的平均值。

表 1 试验处理

Table 1 Designing of the experiment

处理	处理方法
1	自然肥力自然降水(CK)
2	均匀施肥均匀灌水,每次灌水 562.5 m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup>
3	均匀施肥均匀灌水,每次灌水 1125 m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup>
4	均匀施肥交替灌水,每次灌水 300 m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup>
5	均匀施肥交替灌水,每次灌水 562.5 m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup>
6	水肥同区交替灌水,每次灌水 300 m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup>
7	水肥同区交替灌水,每次灌水 562.5 m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup>
8	水肥异区交替灌水,每次灌水 300 m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup>
9	水肥异区交替灌水,每次灌水 562.5 m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup>

## 2 结果与讨论

### 2.1 玉米收获期植株各器官吸 N 量

由表 2 可以看出,玉米收获期茎叶吸 N 量以水肥异区交替灌水处理最低,而均匀施肥(处理 2、3、4、5)的各处理较高。根系吸 N 量的规律与此基本相似,但各处理间差别相对较小。籽粒吸 N 量以充分灌水下的均匀施肥均匀灌水处理最高,水肥异区交替灌水处理次之,而较高灌水量下的均匀施肥交替灌水最低。

表 2 玉米收获期植株各器官吸 N 量

Table 2 N contents in different organs of the corn at the harvest stage

处理号	茎叶	根系 (kg/hm <sup>2</sup> )	籽粒	总量	籽粒 N/ 总量(%)
1	27.52	2.05	67.93	97.50	69.67
2	42.91	4.74	99.47	147.12	67.61
3	35.82	4.15	121.02	160.99	75.17
4	34.60	3.86	101.81	140.27	72.58
5	39.88	4.92	90.70	135.70	66.84
6	39.64	3.51	101.14	144.29	70.09
7	33.14	3.88	101.13	138.15	73.20
8	32.05	3.68	103.92	139.65	74.41
9	28.61	3.54	111.09	143.24	77.56

有研究表明,作物对肥料 N 的吸收受水分吸收

的影响,减少对作物的水分供应可减少其对 N 素的吸收<sup>[10]</sup>。本试验表明,玉米植株吸 N 量不仅与灌水量有关,也与不同水肥空间耦合方式有关。灌水量高(1125 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)时,玉米籽粒、茎叶和根吸 N 量都较高,作物总吸 N 量明显高于灌水量少的处理。因此充分灌水条件下,单位面积作物从土壤携出的 N 较多。灌水量低(562.5 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>和 300 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)时,不同处理方式玉米吸 N 量差异较小,但作物籽粒吸 N 量占作物吸 N 总量的比例却以水肥异区交替灌水处理为最高,说明这种耦合方式玉米总吸 N 量不太高,但有利于 N 在籽粒中积累。

### 2.2 玉米收获后土壤速效 N 残留及其环境效应

玉米收获后 1.0m 土体内速效氮含量如图 1 所示。

2.2.1 常规灌水施肥处理(处理 3) 处理 3 为均匀施肥均匀灌水,可代表试验地区较高灌水水平下种植玉米的水肥管理方式。其 N 素残留明显呈现出土层下部多、上部少的情况。造成该处理 N 素分布的原因之一可能是在灌水量较大的均匀灌水情况下,水分的垂直运动较强,N 素随水向底土运动较多,因此 40~60cm 层次以下土壤速效 N 含量较高。上部土层中 N 素较少的另外一个原因可能是高灌水量条件下玉米蒸腾总量大,植株吸收的 N 素较多。玉米收获后植株各器官总吸 N 量结果也证实了这种处理方式作物吸 N 量多的特点。

对于当季作物来说,常规灌溉施肥条件下,作物可吸收较多的 N,但从长远看,N 淋溶至 100cm 以下层次,而作物的根系在这个层次分布相对较少,不利于作物吸收,也不利于土壤养分水平的提高。在试验地区,由于地下水埋深大(地下水位一般都在 10 多米或几十米以下),故短期内这种分布对地下水污染的可能性不大,但长期使用这种施肥灌水方式将存在一定的环境风险。

2.2.2 灌水量相同的水肥空间耦合方式 处理 2、5、7、9 在所测定层次其 N 素最大残留量出现在 20~80cm 处,但具体情况仍有较大区别。与对照相比,在 100cm 以下深度,处理 2 和 7 仍有一定的 N 素淋溶。表明在这一灌水量下,均匀施肥均匀灌水和水肥同区交替灌水有利于 N 素的淋溶。交替灌水的 3 个处理中,水肥同区和均匀施肥的 N 素分布差异较小,而水肥异区的 N 素残留最多,并且出现的层次较浅,残留量最大的层次在 20~60cm。根据玉米各器官所吸收 N 的总量来看,其大小顺序为处理 9>处理 7>处理 5,表明处理 9 虽然在土壤中 N 素残留较多,但这并不是由于玉米植株吸收少造成的,

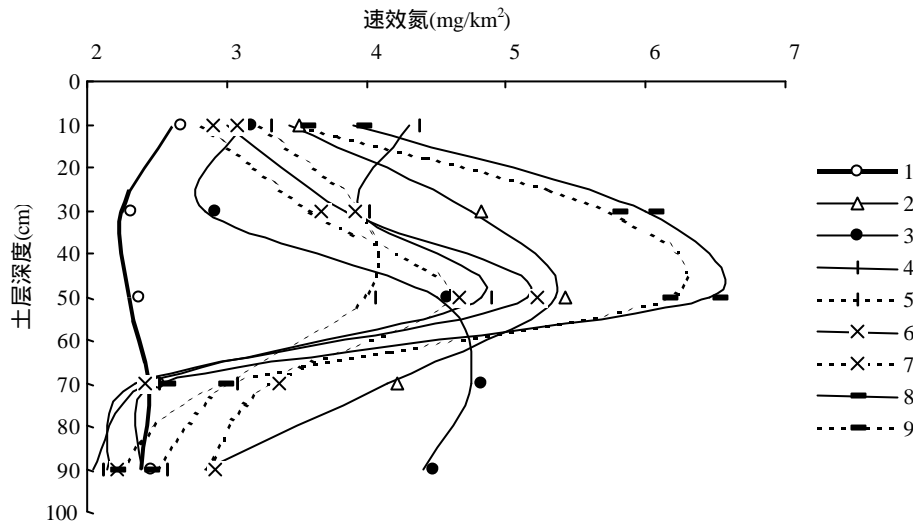


图 1 土壤速效 N 含量  
Fig. 1 Soil readily available N

而是 N 素的淋溶减少所致。

处理 4、6、8 与其它处理相比灌水量小，N 素的淋溶深度也减小，其土壤残留 N 的差异主要存在于 60cm 以上层次。表明在 300m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 灌水量下的各种水肥耦合方式中，肥料 N 可运动到 60cm 的深度。在 60cm 以上层次，处理 8 的残留量远大于处理 4 和 6，而后两者的差异较小，在 60cm 以下层次，三者的肥料 N 在土壤中的残留差异不大。

因此，亏缺灌溉条件下，水肥异区交替灌水可节约用水，有利于养分在上部土层积累，减少肥料污染底土和地下水的环境风险。

### 2.2.3 灌水量不同的交替灌水处理

(1) 均匀施肥交替灌水：处理 4、5 相比，灌水量大者表现出表层 N 少、低层 N 多的特点。试验表明，一次灌水量较多，硝态 N 的淋洗损失越多，另外过量的灌溉会造成 NH<sub>4</sub>-N 或酰胺态 N 的直接淋洗而来不及吸附和转化<sup>[11]</sup>。这两个处理灌水量均集中在一半的面积上，但处理 5 的灌水量几乎是处理 4 的 2 倍，故前者 N 素的淋溶深度大于后者。

(2) 水肥同区交替灌水：在 60cm 以上各层次，灌水量大者土壤速效 N 含量均低于灌水量小者；在 60cm 以下层次，则相反。表明在水肥同区处理下，300 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 的灌水量只能使肥料 N 运动到 60cm 左右深度，而 562.5m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 的灌水量可使 N 运动到 100cm 以下。与均匀施肥交替灌水 N 素的淋溶规律相似，水肥同区交替灌水也表现出灌水量大 N 素淋溶深的特点。

(3) 水肥异区交替灌水：在所有试验处理中，处理 8、9 在 60cm 以上层次的 N 残留最为明显，几乎在 60cm 以上的每个层次，处理 8、9 的残留量都大于其它处理。在 20~60cm，处理 8 的残留量大于处理 9。表明水肥异区处理有利于肥料 N 在 60cm 以上层次残留。对比玉米收获期植株总吸 N 量，发现这两个处理并非最低，表明这种空间耦合方式并不是通过减少玉米对 N 的吸收来达到增加 N 在上部土层的残留。

另外试验过程中还发现，与均匀灌水处理相比，交替灌水处理由于一半面积并未灌水，因此给水分在土壤表层以下的侧向运动提供了很大的空间，这种运动可大大减少灌水区水分向下运动，尤其是在水肥异区处理中，施肥区并未灌水，因此灌水区向施肥区的水分侧向运动明显，从而也大大减少了肥料 N 的淋溶。潘英华等研究发现，对玉米进行交替隔沟灌溉，其水分的垂直入渗深度较常规灌溉浅 20~40cm<sup>[12]</sup>。该结果与我们的结论基本相似。

## 3 小 结

在半干旱有灌溉条件的地区进行水肥空间耦合，可明显影响 N 素在玉米各器官的吸收、分配及在土壤中的残留。

每次灌水量为 1125 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 的处理玉米吸收 N 明显高于其它处理，但与其它处理相比，N 素在 1.0m 以下深度的含量较高，可能引起 N 素的损失，引起肥料的累积利用率降低。在每次 562.5 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 和 300

$\text{m}^3/\text{hm}^2$ 的灌水量下,不同水肥耦合方式对玉米吸N量的影响较小,但不同处理玉米籽粒吸收的N素占植株总吸N量的比例以水肥异区交替灌水处理为最高。

不同处理对土壤N素残留的影响不同。在 $562.5\text{m}^3/\text{hm}^2$ 和 $300\text{m}^3/\text{hm}^2$ 两种灌水量下,不同处理的土壤N素残留量大小顺序为:水肥异区交替灌水>均匀施肥交替灌水>水肥同区交替灌水。并且水肥异区交替灌水处理的土壤N素残留量远大于后两个处理,后两个处理间差异较小。

当处理方式相同时, $562.5\text{m}^3/\text{hm}^2$ 的灌水量处理的N素残留量< $300\text{m}^3/\text{hm}^2$ 的灌水量处理。

#### 参考文献

- 1 兰晓泉. 半干旱黄土丘陵区农田水肥效应研究. 土壤通报, 1998, 29(4):161~163
- 2 吕世华, 张福锁等. 重视土壤、水和肥料资源利用与保护新技术研究促进农业可持续发展. 西南农业学报, 1999, 12(高新专辑): 26~31
- 3 汪建飞, 邢素芝. 农田土壤施用化肥的负效应及其防治对策. 农业环境保护, 1998, 17(1):40~43
- 4 Benjamin J G, Ahuja L R and Allmaras R R. Modeling corn rooting patterns and their effects on water uptake and nitrate leaching. *Plant Soil*, 1996, 179:223~232
- 5 穆兴民. 水肥耦合效应与协同管理. 北京:中国林业出版社, 1999, 8~11, 3~5, 157~175
- 6 汪德水. 旱地农田肥水协同效应与耦合模式. 北京:气象出版社, 1999, 44, 85
- 7 David A G, Elias Fereres, Merce Mata, et al. Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water status monitoring in peach trees subjected to deficit irrigation. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 1999, 124(4): 437~444
- 8 Flavio H, Gutierrez-Boem and Grant WT. Phosphorus nutrition and water deficits in field-grown soybeans. *Plant and Soil*, 1999, 207:87~96
- 9 邢维芹, 王林权等. 半干旱区夏玉米的水肥空间耦合效应. 农业现代化研究, 2001, 22(3):150~153
- 10 樊小林, 李玲等. 氮肥、干旱胁迫、基因型差异对冬小麦吸氮量的效应. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 131~137
- 11 袁锋明, 陈子明等. 土壤中的氮素淋洗. 见: 陈子明主编. 氮素产量环境. 北京:中国农业科技出版社, 1996, 191~208
- 12 潘英华, 康绍忠. 交替隔沟灌溉水分入渗特性. 灌溉排水, 2000, 19(1): 1~4

## EFFECT OF DIFFERENT WATER-FERTILIZER SPATIAL COUPLINGS ON CORN IN SEMIARID AREA I. N UPTAKE, N RESIDUE AND ITS ENVIRONMENTAL EFFECT

Xing Weiqin<sup>1</sup> Luo Yongming<sup>1</sup> Wang Linqun<sup>2</sup> Li Shengxiu<sup>2</sup> Li Liping<sup>1</sup>

(1 *Institute of Soil Science, CAS, Nanjing Jiangsu 210008*; 2 *College of Resource and Environment, Northwest Sci-tech Univ. of Agriculture and Forestry, Yangling Shaanxi 712100*)

**Abstract** Field experiments were conducted to study effect of irrigation and water-fertilizer spatial coupling on corn N uptake and N residue in the solum (1.0m) after corn was harvested in the semi-arid region. The results show that in comparison with the conventional pattern of fertilization and irrigation (even fertilizer application and even irrigation at a rate of  $2500\text{m}^3/\text{hm}^2$  during the entire growing period), at the irrigation rate of  $1125\text{m}^3/\text{hm}^2$  and  $600\text{m}^3/\text{hm}^2$ , three different patterns of water-fertilizer spatial coupling, i.e. even fertilization and alternate irrigation, fertilization and alternate irrigation in the same field, and fertilization and alternate irrigation in different fields, slightly decreased N uptake by corn, but increased fertilizer N residue in the soil (0~60 cm in depth), thus reducing the possibility of N leaching down to the deeper layers; when the irrigation rates were kept the same, the three treatments were in a decreasing order of even fertilization and alternate irrigation> fertilization and alternate irrigation in the same field>fertilization and alternate irrigation in different fields.

**Key words** semi-arid region, water-fertilizer spatial coupling, N residue, environmental effect.