

# 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

邢维芹<sup>1,2</sup> 王林权<sup>2</sup> 李立平<sup>1</sup> 李生秀<sup>2</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** 在灌水量为  $300\text{m}^3/\text{hm}^2$ 、施 N 肥量为  $248.1\text{kg}/\text{hm}^2$  的条件下, 模拟大田条件研究了两种水肥空间耦合方式下的土壤水分、速效 N 的动态运移规律。试验表明, 在半干旱地区隔沟灌溉水肥异区、隔沟灌溉水肥同区两种处理方式的灌溉水在剖面上均以垂直运动为主, 同时存在水平运动。隔沟灌溉水肥同区处理的速效 N 在剖面上垂直运动明显, 处理后 15 天速效 N 基本均匀地分布于  $0\sim 100\text{cm}$  土层内, 速效 N 含量在施肥区和未施肥区之间差异较小; 而隔沟灌溉水肥异区处理的速效 N 垂直运动程度小, 速效 N 主要分布在  $60\text{cm}$  以上土层, 速效 N 水平运动不明显, 施肥区速效 N 含量远高于未施肥区。水肥异区养分的淋溶深度较小, 淋失的可能性小, 有利于养分长期在剖面较浅层次中分布, 为作物吸收创造了条件。

**关键词** 半干旱地区; 水肥空间耦合; 水分; 速效 N; 运动

**中图分类号** S147.265

在我国的干旱和半干旱地区, 一方面水资源十分短缺, 另一方面农业生产中存在着灌溉水利用率低、浪费严重等问题。为了节约有限的灌溉水、保护干旱半干旱地区的生态环境、提高作物产量, 国内外许多专家和学者做了大量的工作, 在传统的灌溉原理和方法的基础上, 提出了多种方法, 并对其进行了研究<sup>[1~4]</sup>。康绍忠等<sup>[5, 6]</sup>提出的“控制性分根交替灌溉”的方法是非充分灌溉的一种形式, 该方法具有节水明显而产量下降很少的效应。潘英华等<sup>[7]</sup>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  $20\sim 40\text{cm}$ 。

在交替灌溉的基础上, 邢维芹等对夏玉米水肥空间耦合的研究表明, 在亏缺灌溉条件下, 水肥异区交替灌溉产量最高<sup>[8]</sup>。但该研究对试验处理期间水分及速效 N 在土壤中的动态分布过程并未涉及。不同的水肥空间耦合方式势必对肥料中易溶性养分的分布有不同的影响。因此对水肥空间耦合下的水分、养分的动态运移进行研究, 有助于揭示不同耦合方式下土壤中水分和养分的运移规律及残留情况, 进一步阐明其造成产量效应的原因。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验处理

供试土壤为红油土, 其基本性状为: 有机质

$13.60\text{ g}/\text{kg}$ , 全 N  $0.85\text{ g}/\text{kg}$ , 碱解 N  $69.98\text{ mg}/\text{kg}$ , 速效 P (P)  $24.90\text{ mg}/\text{kg}$ , 速效 K (K)  $125.34\text{ mg}/\text{kg}$ , pH 7.72。N 肥为尿素, 含 N 量为 46%。

试验于 2001 年在西北农林科技大学西农校区农作一站裸地上进行。设 3 个处理:(1) 隔沟灌溉水肥同区;(2) 隔沟灌溉水肥异区;(3) 对照 (CK), 未灌水未施肥。1 次重复。试验前先将试验用地翻耕(深度约  $10\text{cm}$ ), 打碎土块, 耙平整。小区面积为  $4.8\text{m}^2$  ( $2.4\text{m}\times 2.0\text{m}$ )。每小区 4 行, 行距为  $0.6\text{m}$ , 未种植作物, 每行所在位置起垄, 垄宽  $30.0\text{cm}$ , 高  $15.0\text{cm}$ 。于 4 月 3 日进行处理, 肥料开沟(深度约  $10\text{cm}$ ) 施于垄的一侧, 之后覆土、灌水。灌水量为  $300\text{ m}^3/\text{hm}^2$ , 肥料用量为  $\text{N } 248.1\text{ kg}/\text{hm}^2$ 。处理后用塑料布覆盖, 周围用细土压实, 每次采样时揭开塑料布, 采完后重新覆盖好。

具体处理方法为: 隔沟灌溉, 即相邻两沟一沟灌水, 另一沟不灌水; 水肥同区, 即在施肥沟灌水; 水肥异区, 即在不施肥沟灌水。分别于 4 月 8 日、13 日和 18 日采样, 各处理分别在距施肥点的不同位置采集 4 个点。采样深度为  $2.0\text{m}$ , 每  $20\text{cm}$  土层取一个样。每样点重复 3 次。

处理 1 和处理 2 的采样点分布如下: 处理 1: 样点 T1-1 和 T1-2 位于湿沟(施肥区), T1-3 和 T1-4 位于干沟(未施肥区)。T1-1、T1-2、T1-3、T1-4

从湿沟到干沟依次排列, T1-1 和 T1-4 分别位于湿沟和干沟的中心位置。4 个采样点距肥点的距离分别为: 15cm、0cm、30cm 和 45cm。处理 2: 样点 T2-1 和 T2-2 位于干沟(施肥区), T2-3 和 T2-4 位于湿沟(未施肥区)。T2-1、T2-2、T2-3、T2-4 从干沟到湿沟依次排列, T2-1 和 T2-4 分别位于干沟和湿沟的中心位置。4 个点距施肥点的距离分别为: 15cm、0cm、30cm 和 45cm。

## 1.2 测定项目与方法:

土壤含水量: 烘干法;

土壤速效 N: 1 mol/L KCl 浸提, 用流动注射分析仪测定  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量, 速效 N 含量用二者之和表示。

第 1 次采样后同时测定土壤尿素含量, 发现土壤中已无尿素态 N, 以后两次不再测定。

每点数值用 3 个重复的平均值表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 水分在土壤剖面中的运动

2.1.1 垂直运动 由图 1 可以看出, 对照(CK)的土壤含水量从上到下逐渐增加, 0~20cm 土壤含水量最低, 20~40cm 土壤含水量明显增加, 其它层次变化幅度不大。从整个剖面看, 表层土壤与底层土壤含水量差异较大。3 次采样后, CK 的土壤含水量在整个剖面上的分布规律基本相同, 只是 15 天后, 其表层含水量有所增大, 原因可能是土表被不透水的塑料布覆盖, 下层向上运动的水分到土表汽化后, 在塑料布上凝结, 重新进入表土, 表层土壤含水量增加所致。

处理 1 和 2 灌水后, 其灌水沟的表层土壤完全为水所饱和, 土壤水吸力降至零, 土壤水主要发生向下的垂直流。

处理后 5 天内水分向下运动了约 60~80cm, 但最大含水量层仍位于 0~40cm 层。

10 天后, 土壤最大含水量层移动到 60~80cm 土层。随着水分在土壤中的再分布过程的继续, 不同深度间水势梯度也越来越小, 水分的再分布过程减慢。干沟的最大含水量层也基本运动了相同的距离。但与湿沟相比, 干沟最大含水量层的水分含量小于湿沟。湿沟表层水分由于向下运动, 含水量已继续减小。在这一时期, 100cm 以下土层的含水量受到的影响较小。

15 天后, 最大含水量层次仍位于 60~80cm, 土壤水分在各个层次的分布曲线更加平滑, 表明各层

土壤含水量的分布更加趋于一致, 土壤水分向下运动减慢。另外, 这一时期, 表层土壤含水量已大幅度减小, 处理 1 的 4 个取样点最大含水量层(60~80cm)含水量基本相同。处理 2 湿沟 2 个取样点(T2-3、T2-4)表层含水量略低于最大含水量层(60~80cm), 而 20~60cm 层次含水量更低。

2.1.2 水平运动 处理 1 和 2 灌水后, 水分除了向下的垂直运动以外, 还存在一定程度的水平侧向运动。

处理后 5 天内: 水分的水平运动主要发生在 60cm 以上层次, 并且最大侧向运动量发生在 40~60cm 深度, 从这个深度向上, 水分的侧向运动量变小。表明灌溉水主要通过土壤表层以下运动。

10 天后, 随着土壤水分在土壤中的再分布过程的继续, 处理 1 和处理 2 湿沟与干沟含水量的差异越来越小, 水分的水平运动减慢, 累积侧向运动量进一步加大。与前 5 天相比, 水分水平运动范围已扩大到 0~100cm 深度范围内, 两个处理相比, 处理 1 的深度范围稍大。15 天后, 土壤水分在水平方向上的运动已接近结束, 因为各处理同一深度上不同测定点之间含水量已经比较接近。从两个处理的水分分布图来看, 在 15 天内, 水分在 0~100cm 的范围内发生了水平运动, 导致同一层次不同点之间的水分含量趋于相同。

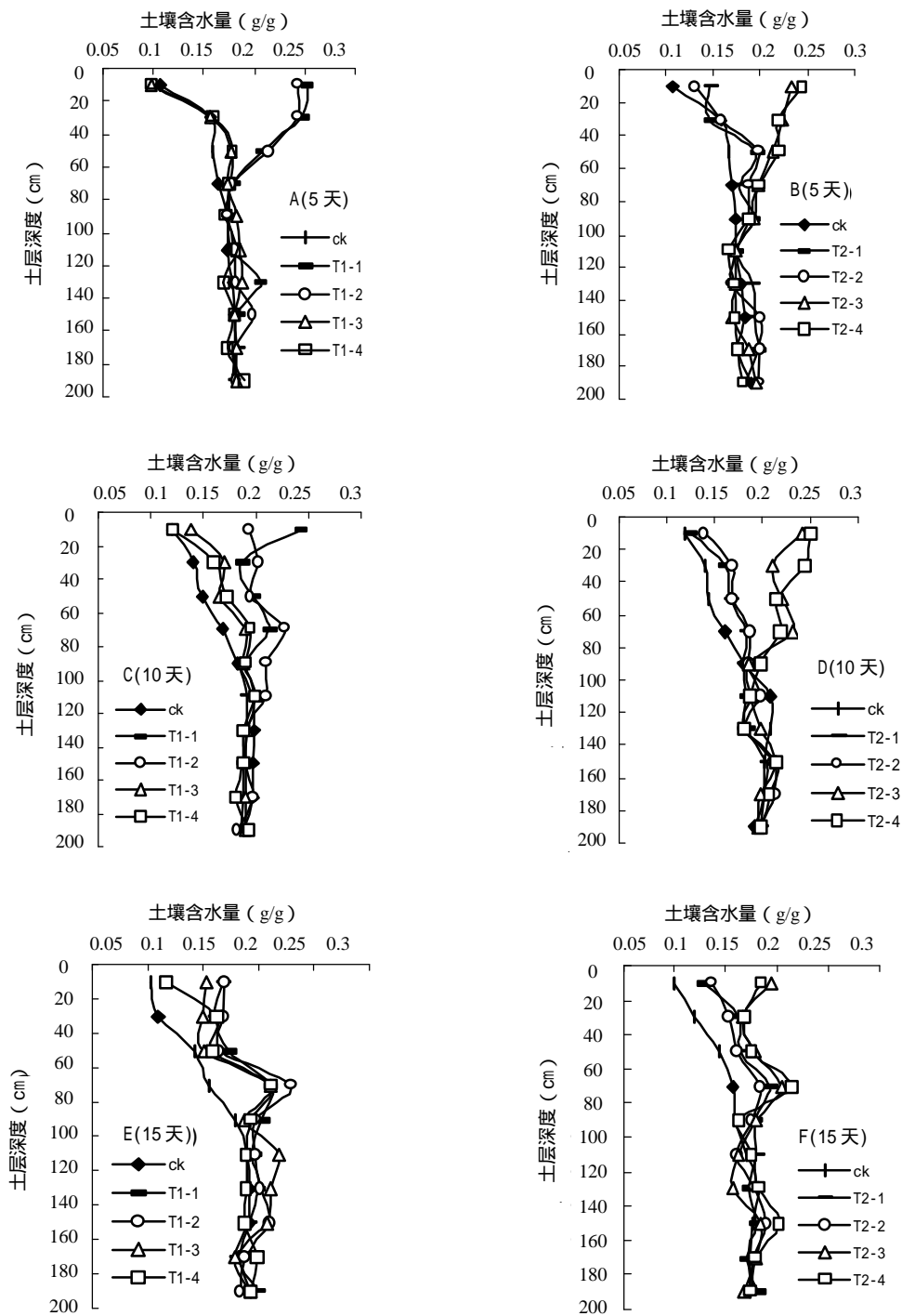
### 2.2 速效 N 在土壤剖面中的运移

2.2.1 垂直运移 由图 2 可以看出, 对照(CK)剖面上的速效 N 含量变化不大, 而不同水肥空间耦合方式对养分的运动产生了显著不同的影响。

处理 5 天后, 处理 1 速效 N 垂直运移明显, 深度可达 60~80cm 土层。而处理 2 的速效 N 主要分布在施肥点周围, 垂直运移深度较浅, 大约在 20~40cm 土层。处理 1 与处理 2 相比, 前者施肥区取样点(T1-1、T1-2)速效 N 含量低于处理 2 施肥区取样点(T2-1、T2-2), 这是由于处理 1 施肥点位于灌水区, N 素垂直运动距离大于处理 2。

10 天后, 处理 1 施肥点 0~40cm 深度范围内的速效 N 明显减少, 而 40~80cm 各土层的速效 N 明显增加; 而处理 2 的土壤剖面中速效 N 的垂直运移不明显。

15 天后, 处理 1 速效 N 在各个层次的分布更加趋于均匀: 20~40cm 土层速效 N 含量有所减少, 40~60cm 土层速效 N 含量增加, 但与其它层次差异减小, 速效 N 基本均匀地分布于 0~100cm 土层内, 且在 100cm 以下土层内也有少量速效 N 的分布。处



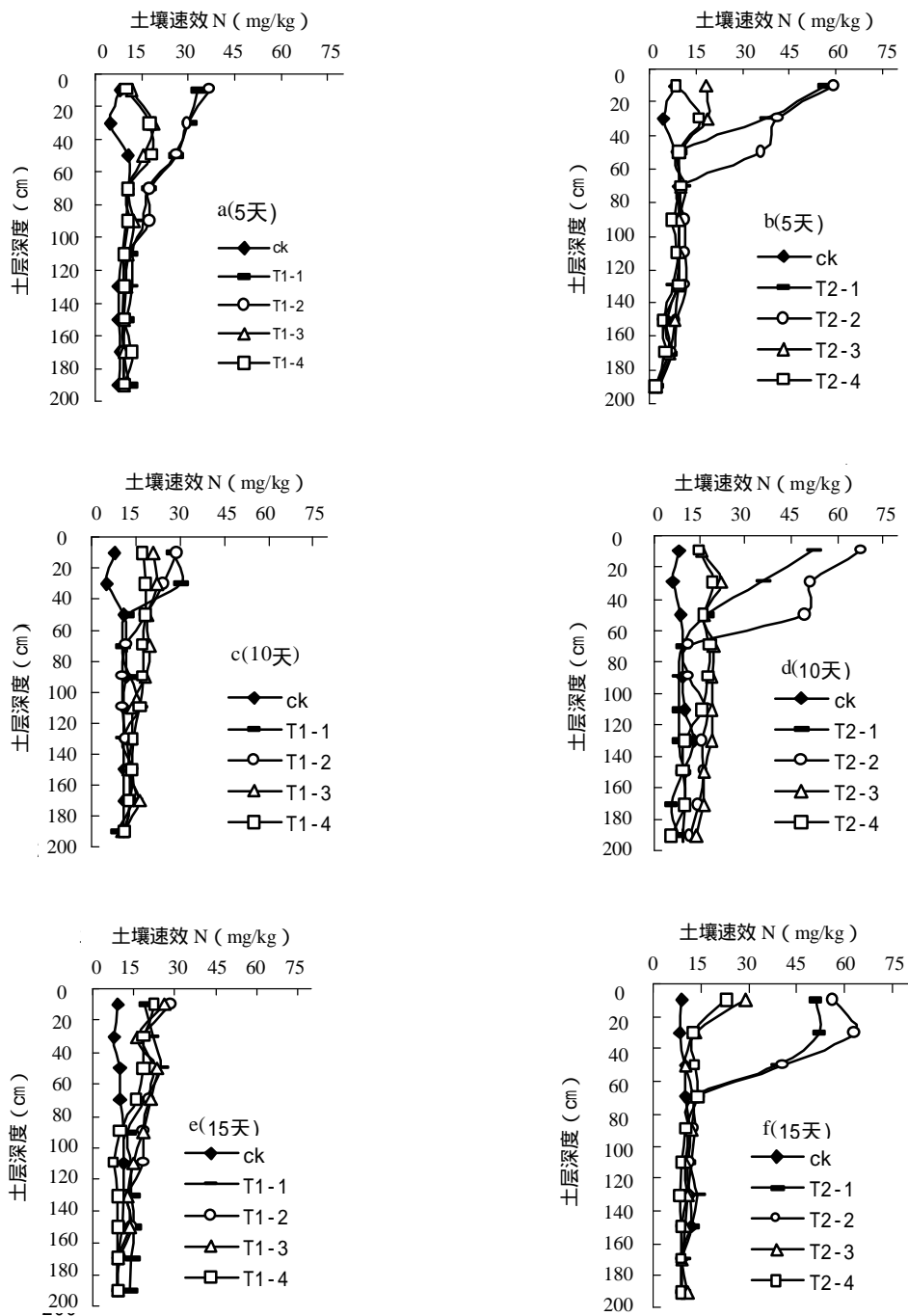
(图 A、C、E 分别表示处理 1 在处理 5、10、15 天各点的土壤含水量；  
图 B、D、F 分别表示处理 2 在处理 5、10、15 天各点的土壤含水量。)

图 1 不同采样时期土壤含水量

Fig. 1 Soil water contents at different sampling times

理 2 的各土层速效 N 分布与上一次采样时相比也有一定的变化：施肥点 0~20cm 土壤速效 N 含量变小；

而在施肥点以下 20~80cm 范围内的速效 N 增加，80cm 以下土层无明显变化。



(图 a、c、e 分别表示处理 1 在处理 5、10、15 天各点的土壤速效 N 含量；  
 图 b、d、f 分别表示处理 2 在处理 5、10、15 天各点的土壤速效 N 含量。)

图 2 不同采样时期土壤速效 N 含量

Fig. 2 Soil available nitrogen contents at different sampling times

以上结果表明，隔沟灌溉水肥异区处理有利于速效 N 长期在土壤剖面较浅层次中分布，而隔沟灌溉水肥同区处理的速效 N 在土壤中的运动深度较大，在垂直方向上有利于养分的均匀分布。

2.2.2 水平运移 速效 N 的水平运移受溶质浓度梯度、土壤基质势及水势梯度的多重影响。由图 2 可以看出，处理后 5 天内，处理 1 在 0~80cm 土层距施肥点较远的 2 个采样点 (T1-3、T1-4)，与 CK

相比,速效 N 含量增加,而施肥点附近的 2 个点 (T1-1、T1-2) 速效 N 含量逐渐降低。表明处理 1 在 80cm 以上各土层速效 N 有一定距离的水平运移。处理 2 的速效 N 也有一定距离的水平运移,在 0~60cm 土层表现出与水肥同区处理类似的规律,但速效 N 水平运移量小于处理 1。

10 天后,处理 1 施肥点 0~40cm 土层的速效 N 明显减少,距离施肥点较远采样点 (T1-3、T1-4) 的相同土层速效 N 含量增加。与上一次测定结果相比,处理 2 在距离施肥点较远采样点 (T2-3、T2-4) 的 0~60cm 各土层速效 N 含量增加幅度不大,说明这一时期速效 N 水平运移不明显。但是处理 2 在距离施肥点较远采样点 (T2-3、T2-4) 100cm 以下层次速效 N 含量略有增加,而同期土壤含水量的测定结果(图 1D)表明水分并未运动到这一深度;且 15 天后测定的这几个点的速效 N 含量也低于这一时期的测定值,这可能是由于误差所致。

15 天后,处理 1 速效 N 在距离施肥点不同的采样点的 0~100cm 各土层内已基本均匀分布,故其水平运移可看作已基本停止。处理 2 施肥点各土层速效 N 含量仍高于未施肥点的相同土层。

在 60~80cm 以上土层,隔沟灌溉水肥异区处理施肥区取样点的速效 N 含量比相同土层的未施肥区取样点高 30 mg/kg 左右,其速效 N 分布深度比隔沟灌溉水肥同区处理浅约 40cm;未施肥区取样点的速效 N 含量比隔沟灌溉水肥同区低约 7mg/kg (60~80 cm 以上土层)。

### 3 讨论

尿素施入土壤后,在土壤脲酶的作用下首先分解为碳酸铵,后者又可进一步分解产生铵。在旱地土壤中,铵很快被氧化为  $\text{NO}_3^-$ -N。试验中发现,在处理 5 天后测定,土壤中已经没有尿素的存在。在  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 两种类型的速效 N 中,以  $\text{NO}_3^-$ -N 占优势。 $\text{NO}_3^-$ -N 不易被土壤胶体所吸附,易随水运动。这是灌水对土壤 N 分布产生影响的主要原因。

该试验结果表明,隔沟灌水后,土壤水分以垂直运动为主,同时也有水平运动。灌水处理后头 5 天,水分的垂直入渗距离可达 60~80cm;处理后 10 天,水分的运动明显减慢,第 2 个 5 天入渗距离在 20cm 左右;处理 15 天后,水分在剖面上的垂直运动基本停止。水分的入渗深度达 80~100cm 以上。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的不同。水肥同区处理的速效 N 向土壤

深层移动明显,15 天后,速效 N 的运移深度可达 100~120cm;同时速效 N 也有一定的水平移动,15 天后,施肥区和未施肥区速效 N 已基本均匀分布。水肥异区处理的速效 N 向下运移较少,速效 N 在整个处理期间主要累积在土壤 60cm 以上土层,在施肥区和未施肥区速效 N 含量差异也较大。

水肥异区处理速效 N 在施肥点附近的较长时间内处于较高水平,这就为作物根系的吸收较多的 N 创造了条件,这可能是亏缺灌溉条件下水肥异区处理产量较高的原因。Benjamin 等<sup>[9]</sup>通过模拟试验发现,对于玉米,施肥于垄上,而在沟内灌水可减少养分的淋溶损失,而水肥异区交替沟灌的节肥效果更明显。

随着工农业生产的发展,土壤的环保功能显得日益重要。如何在有效、充分利用半干旱地区灌溉水的条件下,提高肥料利用率,争取把肥料对环境的危害作用降到最小,已成为农业生产过程中必须要考虑的问题。在半干旱地区进行非充分灌溉,并实行水和肥料不同位置的空间耦合,可减少肥料在灌溉水作用下的下渗深度,有利于作物吸收、减少肥料对环境的危害。

由以上分析可以得出以下结论:

(1) 隔沟灌溉水肥异区、隔沟灌溉水肥同区处理的土壤水分在剖面上均以垂直运动为主,同时存在水平运动。

(2) 与隔沟灌溉水肥同区处理相比,隔沟灌溉水肥异区处理速效 N 的淋溶深度较小,并且速效 N 在施肥区和未施肥区之间的运动也不明显,施肥灌水处理 15 天后施肥区速效 N 的含量仍然较高;隔沟灌溉水肥同区处理的速效 N 垂直运动和水平运动都比较明显,处理 15 天后,施肥区和未施肥区在相同深度速效 N 含量基本接近,速效 N 在土壤剖面上层和下层之间差异也较小。

(3) 隔沟灌溉水肥异区处理可能有利于作物对养分的吸收。

致 谢 本文写作过程中承蒙骆永明研究员指正,特此感谢。

### 参考文献

- 1 高亚军,王喜庆,杜建军等. 施肥对提高水分利用效率的影响. 见:汪德水主编. 旱地农田肥水关系原理与调控技术. 北京:中国农业科技出版社,1995,191~194
- 2 李生秀,李世清,高亚军等. 使用氮肥对提高旱地作物

- 利用土壤水分的作用机理和效果. 干旱地区农业研究, 1994, 12 (1): 38~46
- 3 梁宗锁, 康绍忠, 李新有. 有限供水对夏玉米产量及其水分利用效率的影响. 西北植物学报, 1995, 15 (1): 26~31
- 4 Skinner RH, Hanson JD, Benjamin JG. Root distribution following spatial separation of supply in furrow irrigated corn. *Plant and Soil*, 1998, 199: 187~194
- 5 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. 干旱地区农业研究, 1997, 15 (1): 1~5
- 6 梁宗锁, 康绍忠, 胡炜. 控制性分根交替灌水的节水效应. 农业工程学报, 1997, 13 (4): 58~63
- 7 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
- 8 邢维芹, 王林权, 李生秀. 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
- 9 Benjamin JG, Havis HR, Ahuja LR, et al. Leaching and water flow patterns I every-furrow and alternate-furrow irrigation. *Soil Sci. Soc. Amer.*, 1994, 58, 1511~1517

## EFFECT OF WATER-FERTILIZER SPATIAL COUPLINGS ON CORN IN SEMIARID AREA:

### II. DYNAMIC DISTRIBUTION OF WATER AND AVAILABLE NITROGEN IN SOIL

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

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

**Abstract** Dynamic distribution of available nitrogen and soil water under different spatial couplings of irrigating water and fertilizer nitrogen was studied. The results revealed that after fertilization and irrigation the water mainly moved downward. The treatment of fertilizer application in the irrigated furrow had a deeper distribution of available nitrogen. 15 days after the treatment, the fertilizer nitrogen nearly distributed in the soil evenly from the surface to a depth of 100 cm and, however, mainly existed in the soil layer less than 60 cm deep in the treatment of fertilizer application and irrigation conducted in alternate furrows. The latter made it possible for plants to absorb more nutrition because less nitrogen would be leached.

**Key words** Semiarid area, Spatial coupling of irrigation water and fertilizer, Water, Available nitrogen, Movement

\*\*\*\*\*

(上接第 235 页)

## CHOEROSPONDIAS AXILLARIS AND PEANUT (*ARCHIS HYPOGAEA*) ALLEY CROPPING SYSTEMS ON UDIC FERROSOL IN SUBTROPICAL CHINA III. Soil moisture

Wang Xingxiang He Yuanqiu Zhang Taolin Zhang Bin Wang Mingzhu

(*Institute of Soil science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

**Abstract** Soil moisture increased with soil depth in Udic ferrosol profile, providing possibility of synergistic utilization of soil water in agro-forest cropping system. Analysis of soil water dynamics, however, shows no obvious synergy in utilization of or competition for water in soil between *Choerospondias axillaris* and peanut in alley cropping system. Change in soil moisture in the alley cropping system was not a key factor for decline in peanut yield and increase in *Choerospondias axillaris* biomass.

**Key word** Udic Ferrosol, Alley cropping, Soil moisture