植物营养与肥料学报 2005,11(1):1-7
Plant Nutrition and Fertilizer Science

# 水肥配合对太行山山前平原高产区土壤矿质氮分布及作物产量的影响

杨莉琳，裴 冬，胡春胜，张喜英，毛任钊
（中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心，河北石家庄 050021）

**摘要**：在中国科学院栾城农业生态系统试验站的潮褐土上，通过水、肥 2 因子 3 水平的完全方案，研究冬小麦—夏玉米轮作下，水、肥对土壤矿质氮分布及作物产量的影响。试验表明，$NO_3^-$-N 在土壤剖面中的分布除受水、肥作用外，还与土壤质地，作物及雨季降水有关；$NO_3^-$-N 在土壤剖面中的累积则受水肥二因素的共同制约。高水高肥处理，在收获 2 季作物后，土壤剖面中 $NO_3^-$-N 明显积累；当水分或肥料不足，$NO_3^-$-N 的积累量减少；冬小麦全生育期旱作，不仅影响当季 $NO_3^-$-N 的形成转化和冬小麦对 N 素吸收，而且直接影响后季夏玉米的产量以及土壤 $NO_3^-$-N 的积累。土壤 $NO_3^-$-N 的累积量与土壤水分含量存在明显的耦合作用。$NH_4^+$-N 在土壤中所占比例很小，不同水、肥组合处理对其分布和累积无明显影响。肥料和水分都是冬小麦产量的限制因素，尤其水分不足，对当季和后季作物都有直接影响。针对该区地下水紧缺的矛盾，在有限水分供应时，应首先保证冬小麦季灌足底墒水和拔节水，每水至少灌 60mm，施肥量不宜太高，否则会造成 $NO_3^-$-N 在土壤中积累或淋失。本试验条件下该区适宜的水肥处理应为 W2MF。

**关键词**：施肥；轮作；灌溉；水肥耦合；矿质氮
**中图分类号**：S157.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1008-505X(2005)01-0001-07

# Effects of treatments with water and fertilization on nitrate leaching loss in the piedmont of Taihang mountain

YANG Li-lin, PEI Dong, HU Chun-sheng, ZHANG Xi-ying, MAO Ren-zhao
(*Agricultural Resources Research Center of Chinese Academy Science, Shijiazhuang, Hebei 050021, China*)

**Abstract**: The piedmont of Mt. Taihang, an important agricultural area in North China, is characterized by high crop production and large fertilizer input. Land rotated winter wheat with summer maize accounts for 85%—95% of the land used for agricultural purpose in this region. For maximizing grain yield, oversupplied irrigation and fertilization was a common practice here. According to our investigation on the farm field in 2001, the annual fertilizer N application was more than 450kg/hm$^2$ per year (more than N 250kg/hm$^2$ and N 200kg/hm$^2$ for winter wheat and summer maize, respectively). $P_2O_5$ input was 150—390 kg/hm$^2$. Potassium and micronutrients was imbalanced applying. Excessive fertilization brought about crop lodging or slow-maturing and enriched Nitrate in deep soil profile. Moreover, according to the observations from Luancheng station, CAS, groundwater level was continually decreasing during the last decade and many "ground-funnels" were formed due to time after time irrigations; therefore, agriculture was facing with a serious water deficiency. To co-ordinate the relationship among resources saving, environment safety and sustainable agriculture development, a field experiment on the coupling of water with fertilize was conducted in Luancheng station, CAS. The results showed that the concentration of $NH_4^+$-N was less than 5 mg/kg and different treatments had no effect on its distribution and accumulation, whereas distribution and accumulation of $NO_3^-$-N in the soil profile, the major form of mineral nitrogen, were strongly affected not only by irrigation and fertilization, but also by the soil texture, crop uptake and climate

**收稿日期**：2003-07-08　　**修改稿收到日期**：2004-03-19
**基金项目**：中国科学院知识创新项目(ZKCX2-404-3,ZKCX2-SW-317)；农业资源研究中心创新项目资助。
**作者简介**：杨莉琳(1962—)，女，河北张北人，副研，博士，主要从事植物营养与环境生态方面的研究。

condition. The accumulation of $NO_3^-$-N was restricted by water and fertilizer together. After the harvest of two seasonal crops, $NO_3^-$-N accumulated markedly in the soil profile for treatments with high level water and fertilizer. When water or fertilizer was deficient, the amount of accumulated $NO_3^-$-N reduced. Dryland crop of winter wheat throughout the period of duration affected not only the $NO_3^-$-N transformation and formation and N absorption of winter wheat, but also the yield of ersuing maize and the accumulation of $NO_3^-$-N. There was a coupled relationship between the amount of cumulated nitrate and soil moisture content. Both fertilizer and water are limited factor of winter wheat; especially water deficiency that had directly effect on current and ensuing crops. Therefore, aiming at the shortage of ground water of this region, supposing there is only insufficient water available, irrigation in the sowing and pre-jointing stage should have priority. For each irrigation, at least 60 mm should be applied. The dosage of fertilizer should not be very high; otherwise, it could bring about the accumulation and leaching of $NO_3^-$-N, The optimal treatment for this region was W2MF.

**Key words**: fertilization; crop rotation; irrigation; water fertilizer coupling; mineral nitrogen

水肥对作物生长发育及对环境的影响一直受到农学家和环境学家的高度重视[1-4]。华北太行山山前平原是全国重要的粮食高产区,但是,粮食高产的同时也付出了水肥过量投入的高昂代价。据栾城试验站多年观测,地下水严重超采,水量逐年下降;而化肥特别是氮肥投入量长期居高不下,平均高于N 450 kg/(hm²·a)。土壤硝态氮在根层以下大量积累并有连年下移的趋势[4]。水资源紧缺、化肥过量施用以及农田环境的健康稳定已经成为该区面临的严峻问题。然而,以往在该区的研究多侧重于农艺或工程节水技术,或施肥技术等单个过程,有关大田条件下不同水肥配合处理对土壤硝态氮影响的研究在西北旱作条件下资料较多[1-2],但少见关于该区的研究报道[3]。为此,利用中国科学院栾城农业生态系统试验站的水肥耦合试验,研究了不同水肥处理对土壤中矿质氮的积累和作物产量的影响,以期为本区合理运筹水肥、提高作物产量并确保生态环境安全和人类健康提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验站概况

中国科学院栾城农业生态系统试验站位于北纬37°50′,东经114°40′,海拔高度50.1 m。年平均气温12.2℃,降雨量536.8 mm,无霜期200 d左右。种植制为一年两熟,以冬小麦—夏玉米轮作为主,具有灌溉条件。供试土壤为潮褐土,试验开始前耕层(0—20 cm)土壤pH8.3,有机质16.7g/kg,全氮1.0g/kg,有效磷(P)7.35mg/kg,有效(K)130mg/kg。0—20、20—40、40—60、60—80、80—100、100—120、120—140cm土层容重分别为1.41、1.47、1.51、1.52、1.54、1.54、1.6g/cm³。

### 1.2 试验设计

水肥配合试验于2000年10月至2002年6月进行。冬小麦季设灌水次数和施肥量2因素,主处理为灌水,设高、中、低3水平,即分别为灌3水(W3:底墒水、越冬水和拔节水)、2水(W2:底墒水和拔节水)和1水(W1:底墒水),用水管分区组灌溉,每次灌水量为60mm。不同水分处理间用8m×2m的隔离区隔离,以防水分侧渗;夏玉米季追肥前(7月9日)统一灌水1次。副处理为施肥,设高、中、低3水平,即冬小麦季分别为高肥(HF:N 375、$P_2O_5$ 240、$K_2O$ 90 kg/hm²);中肥(MF:N 270、$P_2O_5$ 180、$K_2O$ 45 kg/hm²);低肥(LF:N 150、$P_2O_5$ 120 kg/hm²,不施钾)。氮肥用尿素,底追比按6:4,追肥时间为2001年4月3日,2002年4月4日;磷肥用过磷酸钙(含P10%),钾肥用硫酸钾(含$K_2O$ 33%),磷钾肥均做基肥与尿素一起于冬小麦播前施入(2000年10月6日,2001年10月8日)。夏玉米的施肥量,HF:N 225kg/hm²,MF:N 130 kg/hm²,LF:N 50 kg/hm²,作追肥。试验小区面积40m²,重复3次,每重复内的9个处理按灌水顺序排列,小区组内的3个施肥水平按相邻区组相同施肥水平排列,3个重复内的3个水分区组按相邻区组相同灌水水平排列。

### 1.3 样品采集和分析方法

分别于小麦灌水前后、追肥前后、收获后和夏玉米的生长盛期及收获后,分层次采取土样。越冬前和拔节前按0—10、10—20、20—40、40—60、60—80、80—100、100—140、140—180cm的层次取土,以后按每20cm一层取土,取样深度至180cm,3个重复土样按层次充分混匀后供分析用。

土壤$NO_3^-$-N和$NH_4^+$-N浓度:称取鲜土10g,Keeney法浸提[5],德国产AA2-型流动注射分析仪测定。同时称取另一份土样测定其含水量。

耕层基础土样风干后，用常规方法测定其理化性状[6]。

产量数据用 SPSS10.0 软件包分析[7]。

土壤剖面中各层矿质氮的累积量按下式计算：

$NO_3^-$-N(kg/hm$^2$) = ∑dPiCi/10

式中 Pi 为土壤容重，Ci 为硝态氮含量(mg/kg)，d 为土壤深度(cm)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水肥配合处理对土壤剖面中矿质氮分布的影响

收获冬小麦后，不同水肥配合处理的土壤剖面中 $NO_3^-$-N 在 0—60 和 120—180cm 有 2 个积累层，中间 60—120cm 含量较低(图 1A，1B)，这可能与供试土壤的质地有关[4]。随着灌水次数或施肥量增加，土壤 1m 以下的剖面中 $NO_3^-$-N 含量和累积均有增加的趋势，但增加量并不一定与灌水、施肥量成正比，而是 3 水和 2 水处理接近，且在这两个水分处理中，高水高肥(W3HF)和中水中肥(W2MF)的 $NO_3^-$-N 在下层累积明显偏多。灌 3 水对 1m 以上土层不同施肥处理的 $NO_3^-$-N 分布影响较大，表现为 HF > MF > LF；中水(W2)与低水(W1)相比，只有 W2MF 处理在 1m 以下的剖面中略高，其它各施肥处理结果接近，这与以前的研究结果一致[4]。夏玉米收获后，所有处理的 $NO_3^-$-N 在土壤剖面中均下降，但尤以下层(1m 以下)的 $NO_3^-$-N 含量下降明显，而这些减少的 $NO_3^-$-N 极可能是在雨热同期的夏玉米季产生了淋失。但仍以高水高肥处理(W3HF)的 $NO_3^-$-N 在土壤 0—180 cm 剖面中含量较高(图 1B)。

冬小麦收获后，不同水肥处理 $NH_4^+$-N 在 0—180 cm 土壤剖面中的分布无明显规律(图 2)，而且含量占土壤无机氮的比例很小，最大值不超过 5mg/kg。在北方旱地土壤的氮肥推荐中，可以被忽略不计。

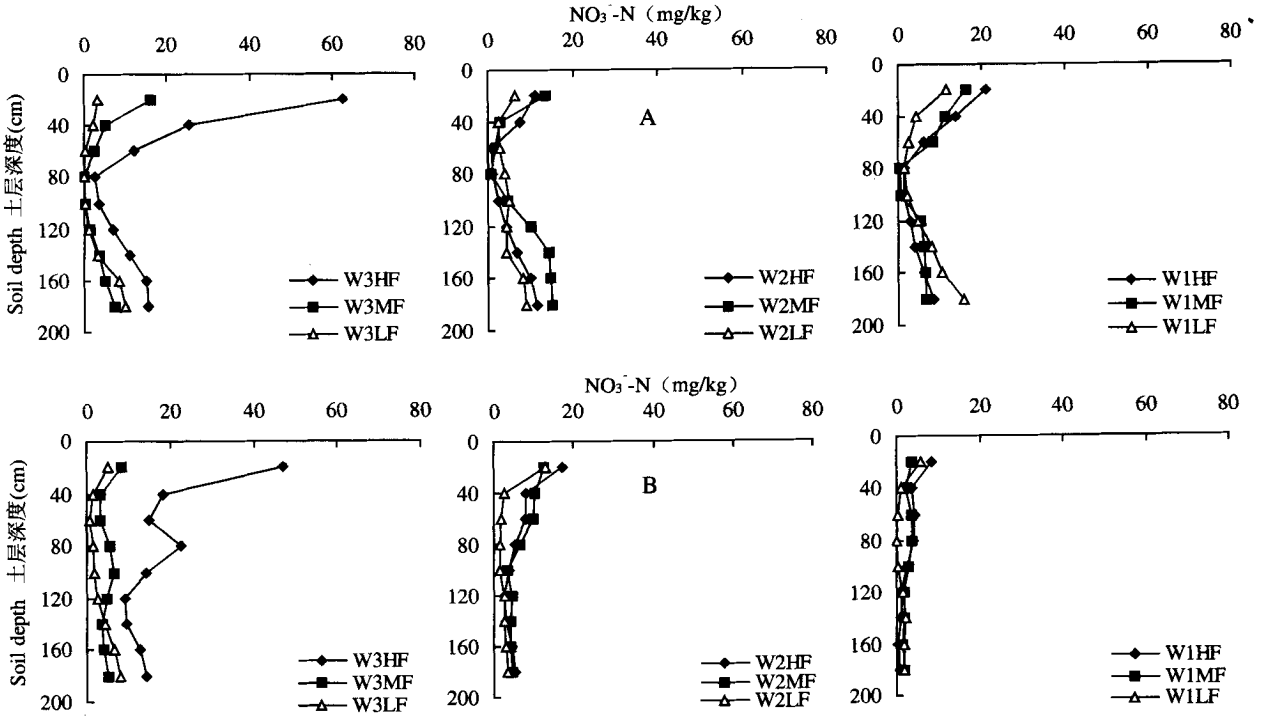


**图 1　水肥配合对冬小麦(A)和夏玉米(B)收获后土壤 $NO_3^-$-N 分布的影响**

**Fig.1　Effect of water and fertilizer combined application on $NO_3^-$-N distribution in soil profile after winter wheat and summer maize harvesting**

### 2.2 不同水肥配合处理对土壤剖面中矿质氮累积的影响

图 3 看出，$NO_3^-$-N 在 0—180 cm 土层中的累积受水、肥二因素的共同制约。高水高肥处理(W3HF)，无论冬小麦还是夏玉米收获后，其 $NO_3^-$-N 累积量均远远高出其它处理，说明水分是促进尿素

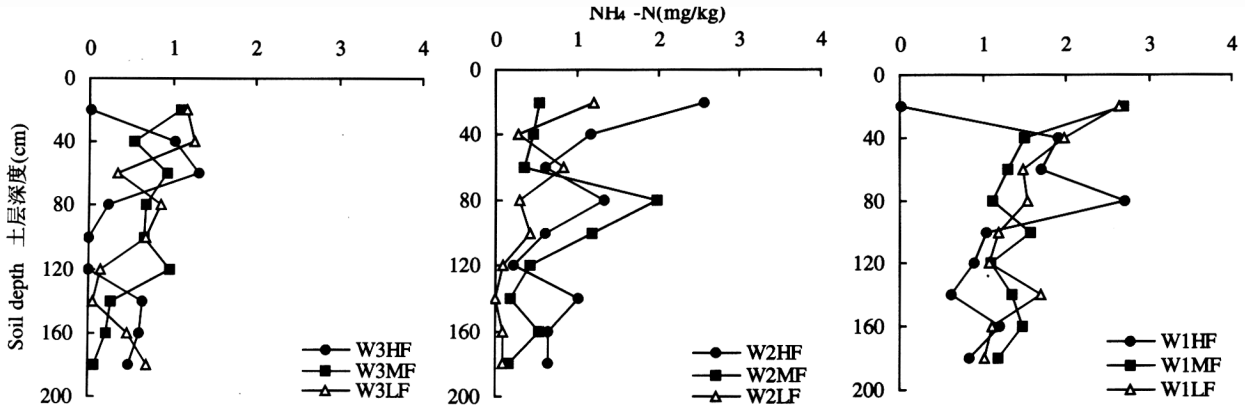


**图2 水肥配合对收获冬小麦后土壤剖面中 $NH_4^+$-N 分布的影响**

**Fig.2 Effect of water and fertilizer combined application on $NH_4^+$ N distribution in soil profile after winter wheat maize harvesting**

转化为 $NO_3^-$-N 的重要条件，$NO_3^-$-N 除作物吸收外，过量的会在土壤剖面中残留累积。其余水肥组合处理的 $NO_3^-$-N 在土壤中的累积量都显著下降。一方面，冬小麦季持续时间长，经历寒冷的冬季和干燥的春季，水分和温度不足限制了尿素水解向 $NO_3^-$-N 转化(如 W2 和 W1 下的所有肥料处理)；同时，水分亏缺(W2 和 W1)也限制了冬小麦对 $NO_3^-$-N 的吸收，表现为不同肥料处理间的 $NO_3^-$-N 累积无明显差异。相反，水分适宜或充足则有利于冬小麦对 N 素吸收，使 $NO_3^-$-N 在土壤中的累积量下降(如 W3 下的 MF 和 LF)。夏玉米季水分相对充足，而且雨热同期，为土壤有机质矿化和尿素水解转化为 $NO_3^-$-N 提供了有利条件，所以，夏玉米收获后的土壤 $NO_3^-$-N 普遍没有减少。但是，前茬水分极度亏缺的 W1 处理中，各施肥处理的 $NO_3^-$-N 都出现下降。说明残留在前季干旱土壤中的 $NO_3^-$-N 可能被雨季的夏玉米快速吸收。另外，由于4月至6月间水分胁迫的影响，低水处理(W1)的 N 素矿化和转化量都小于其它水分处理，表现为土壤中 $NO_3^-$-N 的累积量低于其它水分处理。可见，水分胁迫不仅影响当季 N 素的转化和分布，还对后季的 $NO_3^-$-N 产生影响。

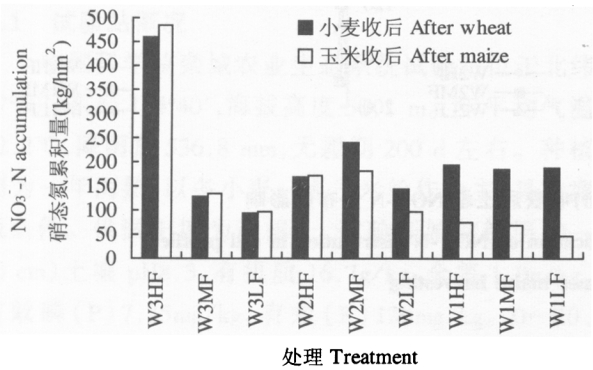


**图3 作物收获后0—180 cm 土壤剖面中 $NO_3^-$-N 的累积**

**Fig.3 Cumulative amount of $NO_3^-$-N in 0—180 cm soil layer after crops harvesting**

由于 $NH_4^+$-N 在土壤剖面中的含量极少，其累积量也远远低于 $NO_3^-$-N。尽管如此，水分对 $NH_4^+$-N 的形成和转化仍有一定影响，即随着水分由亏缺到适宜的增加，土壤中的 $NH_4^+$-N 累积有增加的趋势。而在相同灌水条件下，不同施肥处理对 $NH_4^+$-N 的累积无规律性差异(图4)。

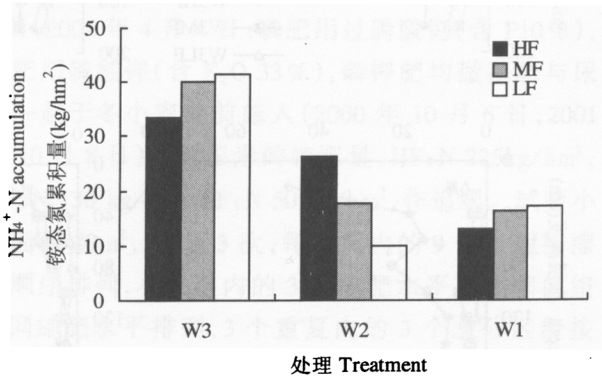


**图4 冬小麦收获后0—180cm 土壤剖面中 $NH_4^+$-N 的累积**

**Fig.4 Cumulative amount of $NH_4^+$-N in 0—180 cm soil layer after wheat harvesting**

## 2.3 不同水肥配合处理对土壤剖面中 $NO_3^-$-N 累积动态的影响

冬小麦—夏玉米轮作周期内 0—180 cm 土层 $NO_3^-$-N 累积量与土壤含水量的动态存在一定的耦合关系，见图5。在 W3MF、W3LF 和 W1HF 的处理中，土壤 $NO_3^-$-N 累积量与土壤含水量的动态几乎呈

平行的变化趋势(图 5 b、c、d)。按照传统习惯，施肥后必然灌水，为 $NO_3^-$-N 的形成提供了条件，所以在追肥后常常出现水分和 $NO_3^-$-N 的同时上升。紧接着是作物生长期对养分水分的大量吸收、消耗及无谓损失，到作物收获后(6 月 8 日和 10 月 2 日)，土壤水含量和 $NO_3^-$-N 累积量均下降到最低程度。

以 W3HF 处理为例(图 5a)，冬小麦季过量施肥并有相对充足的水分供应，为尿素转化成 $NO_3^-$-N 提供了有利条件，而拔节期追肥灌水使得土壤 0—180cm $NO_3^-$-N 累积量再次升高，之后的 4 至 6 月份，作物蒸腾和地面蒸发都非常强烈，降雨量少(仅 29.5mm)，由于氮肥的大量施用在土壤中转化成的 $NO_3^-$-N 累积量超出了作物的需要，灌水量或灌水次数又不足以使 $NO_3^-$-N 淋出 180cm 的土体，所以，冬小麦生长后期 $NO_3^-$-N 累积量仍持续增加。而且，气温从 4 月份回升至 7 月份达到全年最高值之后再逐渐下降(图 6)，这一期间正是冬小麦拔节后快速生长直至收获和夏玉米从种到收的全过程，也是土壤有机质强烈矿化作用时期，使原本已在土壤中大量积累的 $NO_3^-$-N 继续增加(图 5a)。

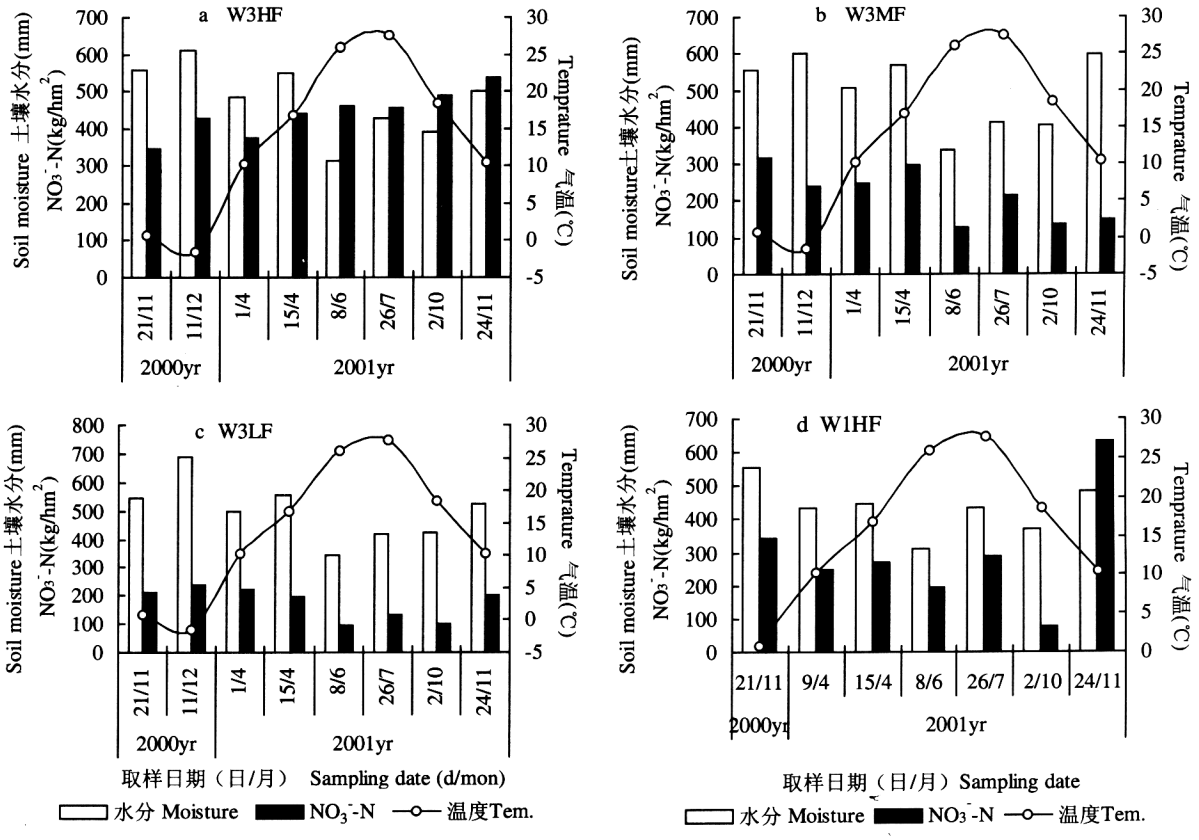


**图 5　试验期间气温、0—180cm 土壤水分和 $NO_3^-$-N 累积量的动态变化**

**Fig.5　Dynamics of air temperature, cumulative nitrate and soil moisture in 0—180 cm during experiment period**

## 2.4　不同水肥配合处理对作物产量的影响

田间试验结果(表 1)表明，施肥水平对 2 年冬小麦的产量差异均达到极显著，而在夏玉米季没有差异，说明肥料是冬小麦季增产的限制因素，夏玉米季的水分较多，促进了夏玉米对 $NO_3^-$-N 的形成和吸收，不同氮肥水平没有构成限制因素。水分对第一年的冬小麦和夏玉米产量都产生显著影响，说明冬小麦季的水肥管理直接影响后季夏玉米的产量。这和土壤矿质氮累积的结果一致。水分对第二年的冬小麦无作用，这是由于 2001 年冬季是历史上少有的暖冬(2001 年 11 月 1 日—2002 年 4 月 3 日的降水量为 25.1mm，≥10℃有效积温 643.3℃；而上年的同期分别为 23.9 mm 和 614.2℃)，造成早春气温高、旱情严重，冬小麦拔节前的各处理水分无差异，即使于 4

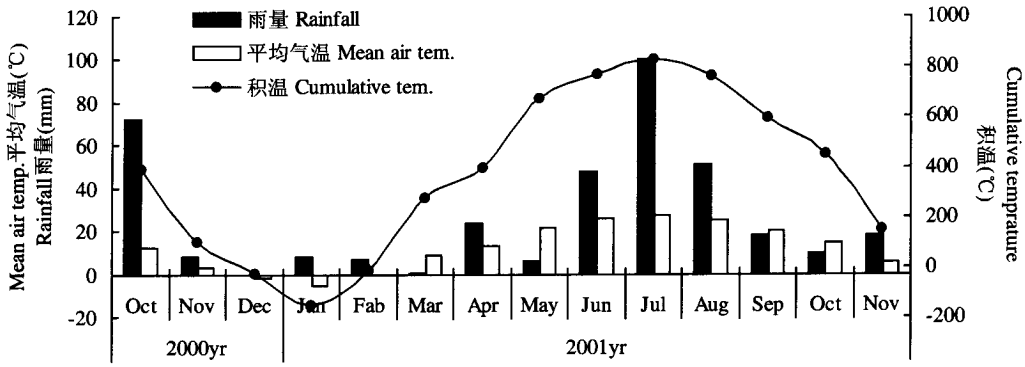


**图6 试验期间平均气温、积温和降水的变化**

**Fig.6 Change of mean air temperature, accumulation temperature and rainfall during the experiment period**

月5日立即灌拔节水,也已无法弥补,这与李玉山在黄土高原旱作小麦的研究结果一致[11]。肥料在华北高产区冬小麦季施用仍是非常必要的,但是必须注意其施用量,否则不仅对产量无益,还会产生$NO_3^-$-N淋失。另外,冬小麦季施肥的后作效应是夏玉米施肥必须考虑的因素。从表1还可看出,高水和中水之间差异不显著,所以,如果水分有限或考虑节水技术,减少灌水次数,越冬水可以不浇,但在拔节时务必灌水,同时还应考虑气象因素。

**表1 水肥配合产量差异及统计检验**

**Table 1 Test and compare of yield difference for the experiment of water with fertilizers**

| 项目 Items | | 2001年小麦 2001wheat | | 2001年玉米 2001maize | | 2002年小麦 2002wheat | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 因素 Factor | d.f. | F | *P* | F | *P* | F | *P* |
| F | 2 | 21.237 | <0.001 | 0.141 | 0.869 | 32.338 | <0.001 |
| W | 2 | 9.894 | 0.01 | 3.876 | 0.04 | 1.612 | 0.227 |
| F×W | 4 | 4.893 | 0.008 | 1.393 | 0.276 | 3.423 | 0.03 |
| 平均产量 | $W_3$ | 6654.7a | | 7764.4a | | 5559.6 | |
| (kg/hm²) | $W_2$ | 6672.6a | | 7712.8a | | 5773.3 | |
| Mean yield | $W_1$ | 6276.6b | | 7352.4b | | 5826.1 | |
| | HF | 6795.1a | | 7651.1 | | 6178.5a | |
| | MF | 6641.9b | | 7576.9 | | 5981.8b | |
| | LF | 6166.7c | | 7612.2 | | 4998.6c | |

注:F为肥力因素,W为水分因素,F×W为水肥的交互作用,d.f.为自由度。

Note: F—Fertilizer factor, W—Water factor, F×W—Interaction of F and W, d.f. Free degree.

## 3 小结

从2季作物收获后土壤0—180cm $NO_3^-$-N含量和累积量分析表明,连年过量施肥会导致$NO_3^-$-N在冬小麦季累积,而在盛雨的夏玉米季又可能会随水淋出根层0—60cm土体,灌水次数增加,加剧了$NO_3^-$-N向下层移动,这与已有的一些研究结果一致[4,8-10]。$NO_3^-$-N在土壤中累积量与土壤含水量之间存在耦合的动态关系,高水高肥处理无论灌水还是追肥后,均会引起$NO_3^-$-N增加。气温和水分条件会影响土壤$NO_3^-$-N的形成和转化。

不同水肥处理对2季作物收获后土壤0—180cm $NH_4^+$-N含量分布及累积没有影响。$NH_4^+$-N在土壤剖面中的含量总体较低,不足5 mg/kg。在推荐施肥中可以考虑忽略不计。

水肥是影响高产灌区土壤$NO_3^-$-N淋失的决定因素。但要评价水肥对$NO_3^-$-N淋失的综合影响及该区合理的水肥运筹,仅靠这2年3季作物的试验结果是不够的。而且,本试验设置的灌水次数相对偏少,还不能充分说明在干旱年型,或增加灌水次数或灌水量时$NO_3^-$-N的动态问题。所以,今后应结合

多年的,具有气候特征,特别是降水变异性结果进行综合研究。

## 参 考 文 献:


[1] 李生秀,李世清. 不同水肥处理对旱地土壤速效氮、磷养分的影响[J]. 干旱地区农业研究,1995,13(1):7-13.

Li S X, Li S Q. Effect of different treatment with water and fertilizer on available N and P in dryland[J]. Agricultural research in the arid areas, 1995, 13(1): 7-13.

[2] 李世清,李生秀. 半旱地区农田生态系统中硝态氮的淋失[J]. 应用生态学报,2000,11(2):240-242.

Li S X, Li S Q. Leaching loss of nitrate from semiarid area agroecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000,11(2): 240-242.

[3] 范丙全,胡春芳,平建立. 灌溉施肥对壤质潮土硝态氮淋溶的影响[J]. 植物营养与肥料学报,1998,4(1):16-21.

Fan B Q, Hu C F, Ping J L. Effect of irrigation and fertilization on nitrate leaching in loamy fluvo-aquic soil[J]. Plant Nutrition and fertilizer Science, 1998, 4(1): 16-21.

[4] 杨莉琳,胡春胜. 施肥对华北高产区土壤 $NO_3^-$-N 淋失与作物 $NO_3^-$-N 含量及产量的影响[J]. 应用与环境生物学报,2003,9(5):501-505.

Yang L L, HU C S. Effects of fertilization on nitrate leaching loss in soil profile and accumulation in crops and yield response in north China [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology. 2003, 9 (5): 501-505.

[5] Keeney D R, Nelson D W. Nitrogen-inorganic forms[A]. Page A L (Ed.) Method of soil analysis. part 2, Chemical and microbiological properties(2nd ed.)[M]. ASA-SSSAZ: Madison, WI, 1982. 643-698.

[6] 南京农业大学. 土壤农化分析(第二版)[M]. 北京:农业出版社,1992.

Nanjing agricultural university. Analysis for soil and agricultural chemistry (2th edition)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1992.

[7] SPSS inc.[S]. USA, 1998-1999.

[8] Jackson L E, Stivers LJ, Warden B T, Tanji K K. Crop nitrogen - utilization and soil nitrate loss in a lettuce field[J]. Fertilizer Research, 1994, 37(2): 93-105.

[9] 黄绍敏,皇甫湘荣,宝德俊,等. 小麦—玉米轮作制度下潮土硝态氮的分布及合理施肥研究[J]. 土壤与环境,1999,8(4):271-273.

Huang S M, Huangfu X R, Bao D J *et al* . Study on the distribution of nitrate N in Chao soil and reasonable application of N fertilizer under the crop rotation system of winter wheat and corn[J]. Soil and environment Science, 1999, 8(4): 271-273.

[10] 袁新民,王周琼. 硝态氮淋洗及其影响因素[J]. 干旱区研究,2000,17 (4):46-52.

Yuan X M, Wang Z Q. Nitrate leaching and factors influencing it[J]. Arid Zone Research, 2000, 17 (4): 46-52.

[11] 李玉山,张孝中,郭民航. 黄土高原南部作物水肥产量效应的田间研究[J]. 土壤学报,1990,27(1):1-7.

Li Y S, Zhang X Z, Guo M H. The experiment on the field-response of crops to water and fertility in the south of loess plateau[J]. Acta. Pedologica Sinica, 1990, 27 (1): 1-7.