

半干旱区农田土壤无机氮积累与迁移机理

吴金水^{1,2}, 郭胜利^{1*}, 党廷辉¹

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学, 陕西杨凌 712100)

摘要:研究黄土旱塬区长期定位试验中 10 个典型处理土壤剖面(0~300 cm)水分和无机氮的季节变化, 探讨在半干旱区农田无机氮的积累与迁移机理。结果表明休闲处理除表层外土壤剖面的水分、硝态氮和铵态氮的含量分别稳定在 17%~20%、4~7 mgN/kg 和 6~10 mgN/kg 土的范围。种植作物显著地改变土壤剖面水分和硝态氮的分布状况, 并使其含量发生大幅度的季节变化。作物利用限制了农田土壤硝态氮向深层的迁移。小麦连作无化肥氮处理及苜蓿连作不施肥或氮、磷加有机肥处理土壤硝态氮主要集中在 0~40 cm 土层。小麦连作单施氮肥(120 kgN/(hm²·a))处理经 17 年后土壤剖面硝态氮积累总量达到施氮总量的 55%, 40~60 cm 和 140~220 cm 土层出现两个高峰, 并表现出随季节性变化向土壤深层迁移的趋势。氮肥与磷肥或有机肥施用大幅度减少了土壤剖面硝态氮积累, 并使其限制在 160 cm 以上的土层内, 200 cm 以下土层的硝态氮含量极低(<1 mgN/kg 土), 因而不具向深层迁移的条件。土壤剖面的铵态氮含量不受作物、施肥和季节性气候变化的影响。

关键词:无机氮; 积累; 迁移; 半干旱型农业区

Mechanisms in the accumulation and movement of mineral N in soil profiles of farming land in a semi-arid region

WU Jin-Shui^{1,2}, GUO Sheng-Li^{1*}, DANG Ting-Hui¹ (1. National Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and the Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Northwest Science & Technology University of Agriculture & Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2040~2049.

Abstract: Large accumulation of mineral nitrogen (N) in agricultural eco-systems is concerned to have potential risks to environment. This study was aimed toward better understanding on the mechanisms in the accumulation and movement of mineral N in cropping soils in semi-arid regions, based on a long-term field experiment established in 1984 to monitor semi-arid agro-systems in the Loess Plateau. The annual means of rainfalls at the experimental site were 580 mm (about 70% received between July and Oct.) and 9.3 °C, respectively. Between May, 2000 and April, 2001, the contents of water, NO₃-N, NH₄-N in soil profiles (0~300 cm) were monthly determined in 10 selected treatments (in triplicates), including permanent fallow (F), continuous winter wheat (W) without fertilizer and with N (at annually 120 kgN/

基金项目:中国科学院“引进海外杰出人才”经费资助项目; 国家杰出青年基金资助项目(49925102)

收稿日期:2002-06-08; **修订日期:**2002-12-10

作者简介:吴金水(1961~), 男, 湖北武穴人, 博士, 研究员, 主要从事土壤养分循环与土壤生态方面研究。E-mail: wujsh@ms.iswc.ac.cn

* 通信作者 Author for correspondence, E-mail: guosli@public.xa.sn.cn

Foundation item: The CAS Special Fund for Oversea-returned Prominent Scholars, and the National Science Foundation of China for Prominent Young Scholars (No. 49925102)

Received date:2002-06-08; **Accepted date:**2002-12-10

Biography: WU Jin-Shui, Ph. D., Main research field: soil biochemistry and ecology.

hm² as urea), NP (at annually 26 kgP/hm² as super-phosphate), farmyard manure (FYM, at annually 75 t/hm²), N+FYM, NP+FYM, and continuous legumes (L) without fertilizer and with NP+FYM. All fertilizers were applied at the time of sowing. For each plots, 3 soil scores were taken from 0~300 cm soil profiles, cut into 20cm sections, then mixed to give a combined sample for each 20 cm of soil layers. Water content was measured by drying soil sample at 105 C to a constant weight. For measuring NO₃-N and NH₄-N, two portions from a soil sample were extracted in 1mol KCl, and the extractants were analyzed by a dual-channel nitrogen analyzer system (FIAstar 5000, FOSS).

Data obtained showed that for the fallow treatment, water content fluctuated significantly with seasons in the top layer (0~20 cm) of the soil profile but little (17%~20%) in layers between 20 and 300 cm. For cropping treatments, water content in soil profiles decreased largely during the season when crop grew vigorously (from April to June), then recovered after crops were harvested and rainfalls increased (as determined from Aug. to Feb.). However, the scales of the changes decreased as the depth increased. In general, water content in the same soil layers was 2%~6% smaller under cropping systems than under fallow, with the smallest values generally found under continuous legume (L, L-NP-FYM). For all the treatments investigated, NH₄-N content in soil profiles was fairly small and constant (4~7 mgN/kg soil).

Under the fallow treatment, NO₃-N content in the soil profile remained relatively constant (6~10 mgN/kg soil), with the exception of some fluctuations in the top layer (varying from 10 mgN/kg soil in April and June to 22 mgN/kg soil in Aug. and Feb.). However, NO₃-N content and seasonal changes in soil profiles varied widely with different cropping and fertilizer practices. In general, seasonal changes in NO₃-N content in the soil profiles under cropping treatments occurred in similar patterns as to water content (decreased significantly from April to June, recovered by Aug.). Under cropping treatments without fertilizer (W and L), NO₃-N content in the top layer (2~12 mgN/kg soil, dependent on the time determined) was remarkably smaller than that under the fallow treatment, and decreased further to a minimal level (< 2 mgN/kg soil) in soil layers below 100 cm. For continuous wheat with FYM or P+FYM fertilizers (but no chemical N), NO₃-N content varied largely with the time determined (large increases in Aug.) in 0~40 cm layers, then decreased to a minimal level (also < 2 mgN/kg soil) by 60~100 cm deep in the soil profiles. A large amount of NO₃-N (1065 kgN/hm², accounted to 55% of total N applied during 14 years since the experiment was established) has accumulated in the soil profile under continuous wheat with N fertilizer alone. In difference from all of the other treatments where the highest NO₃-N content was present in the upper layers (20~140 cm, dependent on the types of crops and fertilizers used), the soil profile under continuous wheat with N fertilizer (W-N) had two NO₃-N peaks, the first present in the layers between 40 and 60 cm and the second between 140 and 220 cm. Both peaks increased significantly between June and Aug. (after the harvest of wheat), and shifted into 20~40 cm deeper layers in Feb. and April. It was also marked that the second peak was much wider and greater than the first one. When N fertilizer was applied with P fertilizer (W-N+NP) or farmyard manure (W-N+FYM, W-NP+FYM), the second peak as formed under W-N completely disappeared, and for a instead, NO₃-N content in the lower layers (below 160 cm) was minimal (< 2 mgN/kg soil). With continuous legume, NO₃-N content in the soil layers decreased sharply in the layers below 40 cm.

In conclusion, results presented suggest that cropping and fertilizer practices are the prime factor determining seasonal changes and differences in the contents of water and NO₃-N but have little effect on NH₄-N content in soil profiles under agro-systems in semi-arid regions. Continuous wheat with N fertilizer alone can result in a large accumulation of NO₃-N in the soil profile, particularly in the lower layers. In this case, NO₃-N accumulated moves into deeper layers during the wet season. The application of P

fertilizer and farmyard manure companied with N not only decreases in a large extent the accumulation of $\text{NO}_3\text{-N}$ but also effectively protects it from movement into deeper soil layers. Compared to continuous wheat systems, continuous legume consumes more soil water but can largely decrease $\text{NO}_3\text{-N}$ content in the soil profiles.

Key words: mineral N; accumulation; movement; semi-arid region

文章编号:1000-0933(2003)10-2040-10 中图分类号:S181 文献标识码:A

尽管施用化学氮肥是提高作物产量的必要措施,但长期大量施用能引起硝态氮在根区以下土层的无效累积^[1]。这不仅影响氮肥的经济效益,而且可能造成生态环境问题。大量研究表明,在年降水量 400~800 mm 的地区,种植禾本科作物且长期大量施用氮肥往往导致硝态氮在土壤深层的积累;其积累量不仅与氮肥用量有关,而且受气候和地理条件、土壤性质、耕作方式、作物和管理等因素的影响^[1~18]。MacGregor 在美国 Minnesota 的研究表明过量施用氮肥(大于作物吸收量)10a 后农田硝态氮淋溶到 6 m 深的土层,15a 达到 10 m^[8]。

黄土高原是典型的半干旱型农业区,大部分地区的年降雨量在 400~600 mm 之间。近 20a 来,该地区的氮肥使用量迅速增加。已有研究表明,黄土区大量施氮肥的农田土壤剖面出现了明显的硝态氮积累现象^[15~22]。例如,袁新民等报道了关中地区农田(包括蔬菜地)0~200 cm 土层的硝态氮积累问题比较突出,很可能成为地下水的潜在污染源^[16]。据杨学云等研究,关中地区冬小麦-玉米轮作农田在年施 120 kgN/hm² 化肥氮及有机肥的情况下,硝态氮在土壤剖面 0~100 cm 和 320~400 cm 土层分别出现两个高峰^[20]。樊军等研究了位于黄土旱塬区的长武站田间定位试验,发现硝态氮高峰出现在 100~180 cm 土层,其积累量随施氮量的增加而增加,氮与磷肥和有机肥配合施用使其减少^[21]。

目前国内外对半干旱区土壤剖面无机氮的季节性变化研究很少,因而对于硝态氮在土壤剖面迁移的时空规律缺乏全面了解。本文选择长武站长期试验典型作物和施肥处理,研究黄土旱塬农田在不同种植、施肥管理条件下土壤水分和无机氮的季节动态变化,为进一步了解土壤硝态氮积累机理提供依据。

1 材料与方法

1.1 田间试验

长武站为中国科学院生态研究网络 CERN 台站,位于陕西省长武县(东经 107°40',北纬 35°12'),属典型的黄土旱塬区。海拔高度 1200 m,年平均气温 9.3℃,半干旱半湿润性季风气候,1957~2000 年间年平均年降水量 584 mm,其中 7~9 月份降水量占年总量的 57%。土壤为粘壤质黑垆土,土壤有机碳含量 6.50 g/kg、全氮量 0.80 g/kg、pH 8.4、 CaCO_3 含量 10.5%、粘粒含量(<0.002 mm)24%,田间持水量 22.4%,凋萎湿度 9.0%,农田土壤 0~40、40~80、80~140、160~200、200~300 cm 土层容重取值依次为 1.3、1.4、1.35、1.32、1.30 g/cm³。定位试验起始于 1984 年 9 月,布置了 10 种作物种植方式与 7 种施肥制度的组合(不完全设计)共 36 个处理,3 次重复,随机区组排列。小区面积 10.3×6.5 m²;小区间距 0.5 m,区组间距和周边宽各 1 m。本研究选取其中的休闲、冬小麦连作和苜蓿(*Medicago sativa* L.)连作共 10 个处理(表 1)。供试小麦每年于 9 月撒播,品种、播量、播期及田间管理同当地大田。苜蓿于 1985 年撒播,此后一般每年收割 2 次。氮磷肥分别为尿素和三

表 1 从长武站长期定位试验选择的 10 个典型处理
Table 1 Treatments selected from the long-term field experiment

处理 Treatments	作物 Crops	肥料 Fertilizers		
		N ^① (kg/hm ²)	P (kg/hm ²)	FYM ^⑤ (t/hm ²)
F	休闲 ^①	0	0	0
W	小麦连作 ^②	0	0	0
W-N	小麦连作	120	0	0
W-NP	小麦连作	120	26	0
W-FYM	小麦连作	0	0	75
W-N+FYM	小麦连作	120	0	75
W-P+FYM	小麦连作	0	26	75
W-NP+FYM	小麦连作	120	26	75
L	苜蓿 ^③	0	0	0
L-NP+FYM	苜蓿	120	26	75

①Fallow, ②Wheat, ③Legume, ④1984~1986 年 N 的用量为 60 kg/hm². N rate at 60 kg/hm² from 1984 to 1986, ⑤Farmyard manure

料磷肥或过磷酸钙,有机肥(FYM)为牛粪。小麦处理的全部肥料作基肥于每年9月份一次翻入耕作层,苜蓿施肥撒入地表(不耕翻)。

1.2 采样与分析

在2000年5月至2001年4月,每月在选择的10个处理的每小区取0~300 cm土壤剖面样品。取样时间一般选在月中,并前5d内无降雨,以避免土壤水分受临时降雨影响而出现非季节性的波动。取样用直径3 cm的土钻,土壤原位完全取出后立即分成15个土层(每层20 cm),分别保存。样品混合均匀后取1份烘干法测定水分含量,其余样品过2 mm筛,分析前在4℃冷藏箱保持。

取干重为10 g的新鲜土样于150 mL塑料瓶中,加入100 ml 1 mol KCl提取液,振荡60 min,定量分析滤纸(Whatman 42)过滤。分析前提取液置于在-15℃冷藏箱保持。用双通道流动注射分析仪(FIAstar 5000)测定提取液的硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)和铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)含量。本文选用了2000年6月、8月及2001年2月、4月的测定结果,分别代表监测年内4个季节的土壤水分和无机氮动态变化状况。气象资料来源于距试验点东南约5 km的长武县气象站。数据统计分析采用SAS(6.12)软件。

2 结果分析

2.1 土壤剖面水分分布与季节变化

监测年内(2000年5月至2001年4月)降水总量为416 mm(图1),比历年平均年降水量(584 mm)少22%,属中等偏低降水量年份。2000年5~7月的月均降水量小于30 mm;8~10月份降水占监测年降水总量的62%;12月至翌年3月份降水很少(2~17 mm)。

休闲处理(F)表层土壤(0~20 cm)的水分含量有显著的季节变化(图2)。在夏季(2000年6月)最低(14%),冬季(2001年2月)最高(28%),8月份(2000年)和4月份(2001年)居中(18%~19%)。该处理20~300 cm土层的土壤水分含量分布较均匀(17%~20%),其季节变化也不大,一般未达到显著水平。按土层比较,水分含量以40~80 cm土层略低,100~140 cm土层略高,以下各层随着深度的增加逐渐降低。

7个小麦连作处理表层土壤(0~20 cm)水分含量的季节变化趋势与休闲处理(F)基本一致,但在6月份土壤水分含量比休闲处理低2~3个百分点(图2)。与休闲处理所不同的是,全部小麦连作处理土壤的表层以下各土层(20~300 cm)水分含量有显著的季节变化和土层差异。在4个月份中,小麦连作处理0~300 cm土层平均水分含量在6月份最低,2月份最高。在6月份,小麦连作不施肥(W)和单施氮肥(W-N)处理的土壤水分含量随土层深度增加呈上升趋势,其它5个处理(W-NP、W-FYM、W-N+FYM、W-P+FYM、W-NP+FYM)的土壤水分含量在100 cm以上随土层深度增加逐渐降低,在100 cm以下则逐渐上升。这5个处理的60~80 cm土层水分含量在6月份下降到10%以下,土壤剖面水分分布呈现出“凹”形状态。在8月份,全部小麦连作处理的0~80 cm土层的水分含量都显著上升,且升高幅度基本一致(4%~7%);但100 cm以下土层的水分含量一般无显著变化。至次年2月份,小麦连作处理的0~160 cm的水分含量比在8月份又有显著地提高,提高幅度最大的是表层(0~20 cm)和100~140 cm土层,一般达到5%~10%;底层(160 cm以下)的水分含量都没有显著变化。在4月份,全部小麦连作处理的土壤剖面水分含量都出现显著回落的趋势。其中不施肥处理(W)出现水分含量回落的土层较浅(0~80 cm),W-NP的较深(0~260 cm),其余处理基本在0~140 cm左右。

苜蓿连作处理(L、L-NP+FYM)土壤水分的土层差异和季节变化也很明显,但其变化趋势和幅度与相同施肥条件的小麦连作处理(W、W-NP+FYM)有明显的差别(图2)。两个苜蓿连作处理的土壤水分含量

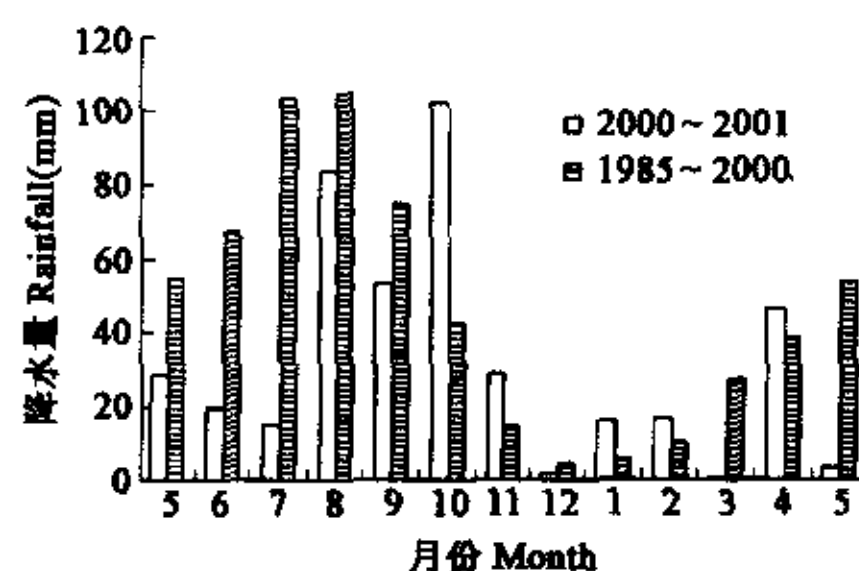


图1 试验期间(1985~2001年)年均及观测期间(2000年5月~2001年4月)各月降水量

Fig. 1 The monthly means of rainfall between 1985 and 2001, and the amount received during the observation period (from May, 2000 to April, 2001) at the experimental site.

水平和变化幅度都比较一致,其季节变化仅限于 0~140 cm 土层,140 cm 以下各土层的土壤水分含量相当稳定。在 6 月份和 8 月份,两个处理的 0~300 cm 土层的水分含量基本一致,并且在 40~60 cm 有一低谷。两个处理的土壤水分含量在 2 月份和 4 月份之间的差别明显小于小麦连作处理的。

图 2 结果所反映的另一个重要特征是各处理底层(200~300 cm)土壤水分含量都趋于一个比较稳定的水平。但不同处理这一水平有显著的差别。在所测定的 10 个处理中,底层土壤水分含量稳定水平以休闲处理(F)最高(18%±1%),其次为小麦连作不施肥(W)和施氮肥(W+N)处理(约 16%),其余 7 个处理(W-NP、W-FYM、W-N+FYM、W-P+FYM、W-NP+FYM、L、L-NP+FYM)较低(12~13%)。

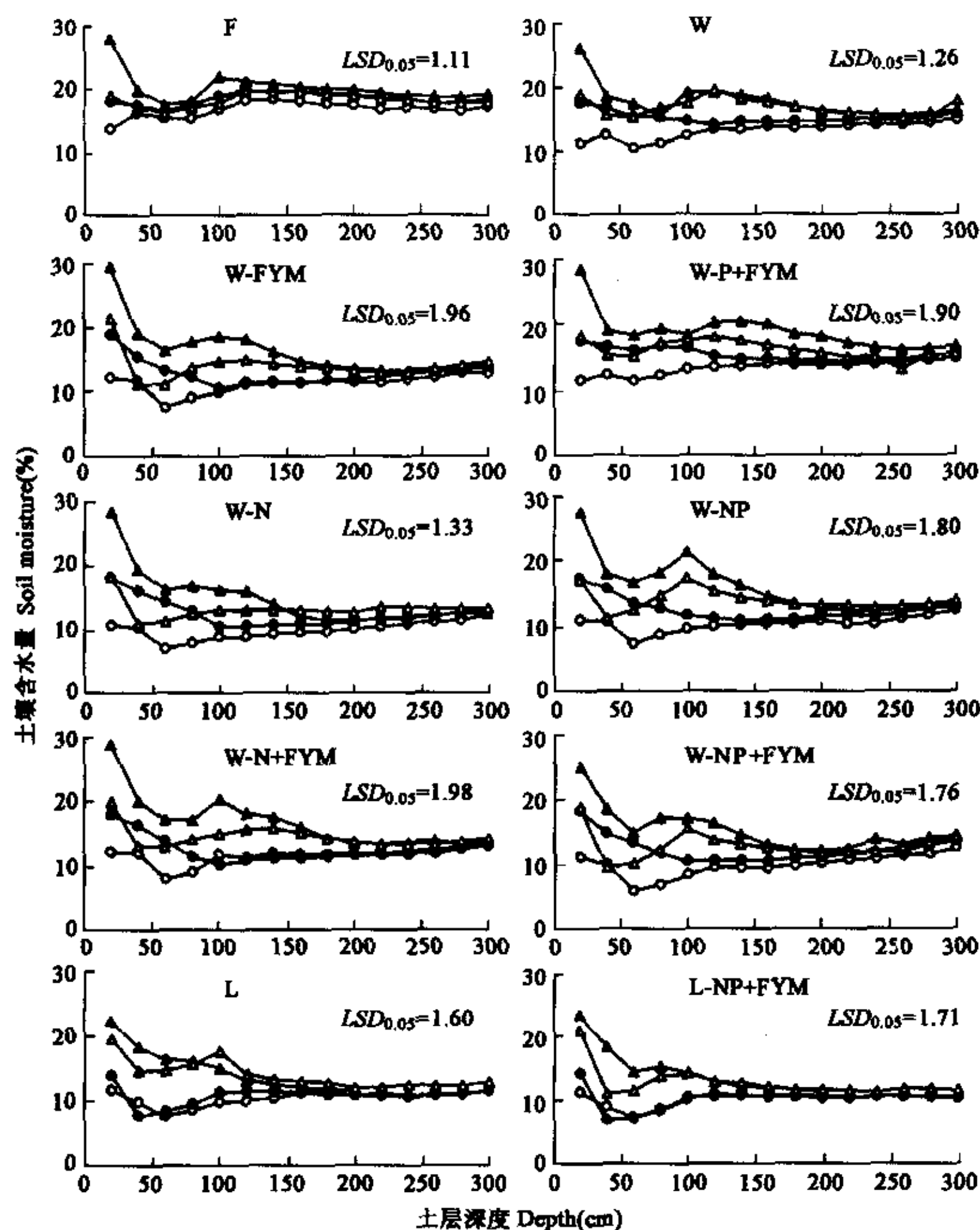


图 2 试验点选择处理土壤剖面水分含量(各处理英文符号见表 1)

Fig. 2 Water content in the soil profiles under the treatments selected from the experiment studied

See table 1 for the abbreviation of the treatments; ○: 6 月 Jun., ●: 8 月 Aug., ▲: 2 月 Feb., △: 4 月 Apr

2.2 土壤剖面硝态氮的分布与季节变化

休闲处理表层土壤(0~20 cm)硝态氮(NO_3^- -N)含量在 6 月份和 8 月份比在 2 月份和 4 月份大约高一倍(图 3)。20~60 cm 土层硝态氮含量在 4 月份和 8 月份大幅度下降。60 cm 以下土层硝态氮含量虽然随土壤深度的增加略有下降且在各月之间也有一些波动,但这些变化一般不显著,在 4 个月份基本稳定在 6~10 mg/kg 土之间。

小麦连作不施氮肥的 3 个处理(W、W-FYM、W-P+FYM)土壤剖面硝态氮含量变化状况基本一致(图 3);即表层土壤(0~20 cm)的硝态氮含量在 6 月份与 8 月份之间大幅度地升高(200%~500%),至次年 2 月份和 4 月份又逐渐降低;20~60 cm 土层的硝态氮含量除了 2 月份外都迅速下降;60 cm 以下土层的硝态氮含量在 4 个月份都很低(<2 mg/kg 土)。在 2 月份,3 个处理 40~100 cm 土层硝态氮含量显著比在其它 3 个月份的高。

小麦连作氮肥处理(W-N)土壤剖面(0~300 cm)硝态氮含量在 4 个月份都比较高,并且有两个明显的高峰(图 3)。在 4 个月份之间,硝态氮峰出现的土层位置和宽度有很大的变化。前一个峰比较狭窄,在 6 月份出现在 20~40 cm 土层,其它 3 个月份都在 40~60 cm 土层。因此,该处理 0~40 cm 土层的硝态氮含量在 6 月份(>30 mg/kg 土)显著比在其它月份高,但在 40~100 cm 土层则相反。在其它 3 个月份 0~100 cm 土层的硝态氮含量差异较小。后一个峰的宽度大约为 80 cm,在 6 月份和 8 月份出现在 140~220 cm 土层,在 2 月份下移至 160~240 cm 土层,但在 4 月份呈分散状态。该处理的另一个显著特点是后一个峰在 6 月份和 8 月份之间大幅度升高,至次年 2 月份又大幅度回落,2 月至 4 月份基本稳定。因此,该处理 100~220

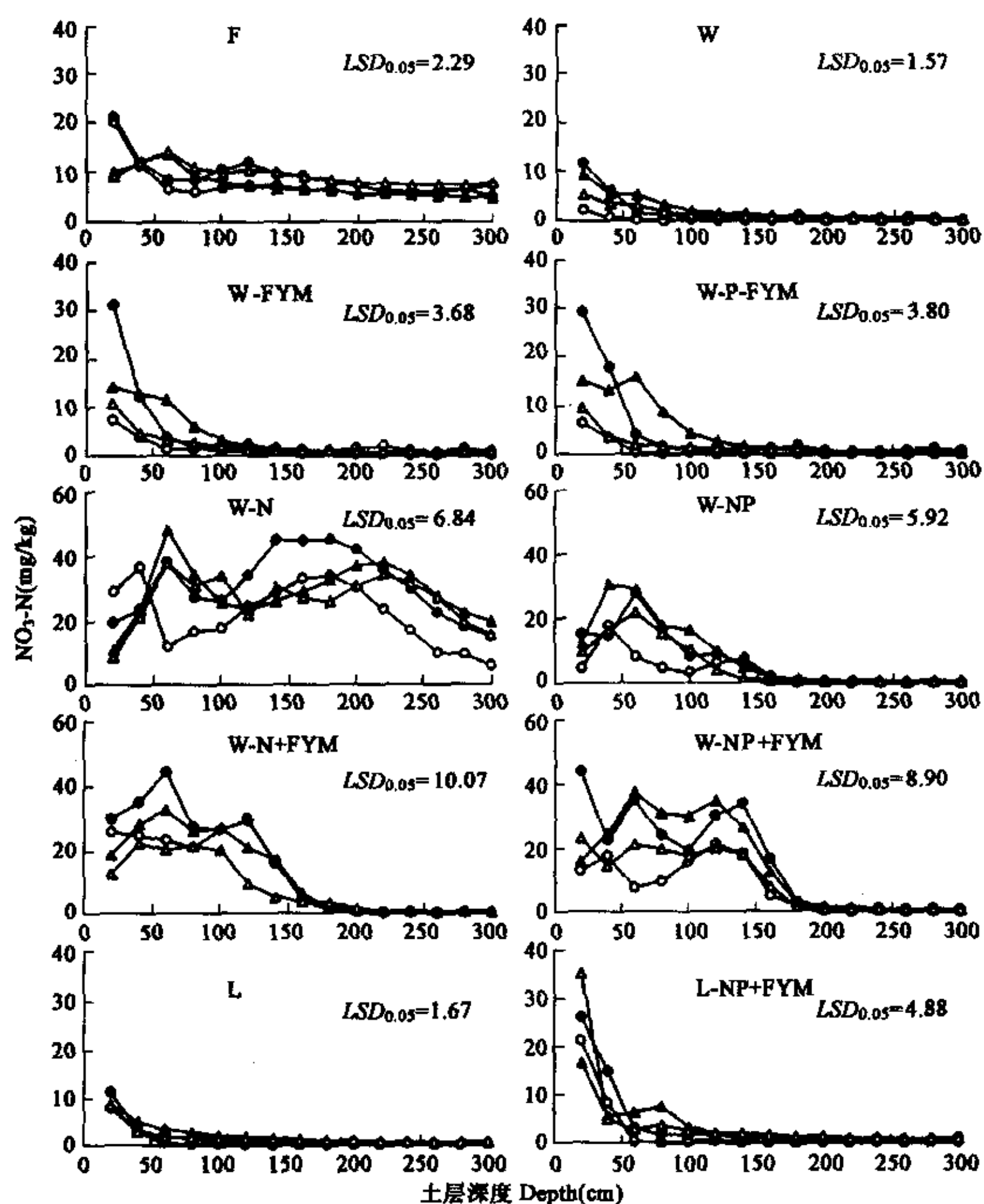


图 3 试验点选择处理土壤剖面 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量(各处理英文符号见表 1)

Fig. 3 $\text{NO}_3\text{-N}$ content in the soil profiles under the treatments selected from the experiment studied
See table 1 for the abbreviation of the treatments; ○: 6 月 Jun., ●: 8 月 Aug., ▲: 2 月 Feb., △: 4 月 Apr

cm 土层的硝态氮含量在 8 月份显著比在其它月份的高,而 220~300 cm 土层其含量在 6 月份又比在其它月份的低。

小麦连作氮磷处理(W-NP)100 cm 以上土层硝态氮变化趋势与单施氮肥(W-N)的基本类似,即在 20~40 cm 土层出现一个高峰(图 3)。但后者的土壤硝态氮含量在 4 个月份都显著比前者高。氮磷肥处理 100~160 cm 土层硝态氮含量除了在 6 月份出现了一个小峰(120~140 cm 土层)之外,在其它 3 个月份迅速下降;160 cm 以下各土层的含量都很低(<2 mg/kg 土)。小麦连作氮加有机肥(W-N+FYM)处理的 0~120 cm 土层和氮磷加有机肥(W-NP+FYM)处理 0~140 cm 土层硝态氮含量在 8 月份和 2 月份比在其它两个月高,4 个月份的平均值与氮肥处理(W-N)0~120 cm 土层的接近。尽管这两个处理上述土层的硝态氮含量有一定的波动,但没有出现明显的高峰土层;以下的两个土层(120~160 cm 或 140~180 cm)硝态氮含量大幅度下降,直达到很低的水平(<2 mg/kg 土)。

苜蓿连作处理(L、L-NP+FYM)土壤剖面硝态氮含量变化状况与小麦连作不施氮肥处理的基本类似,即土壤硝态氮含量都随土层深度的增加迅速下降,至 60 cm 以下土层的硝态氮含量都很小(<2 mg/kg;图 3)。苜蓿连作不施肥处理(L)表层土壤(0~20 cm)硝态氮含量比氮磷加有机肥(L-NP+FYM)低,前者在 4 个月份之间的差别较小。

2.3 土壤剖面铵态氮的分布与季节变化

10 个处理土壤铵态氮(NH_4^+-N)含量一般为 4~7 mg/kg 土,在各层的分布也很均匀(图 4)。休闲处理(F)土壤铵态氮含量有一定的季节性变化,以在 6 月份较高(平均为 7 mg/kg 土),2 月份较低(平均为 4 mg/kg 土)。小麦连作不施肥处理(W)的土壤铵态氮含量与休闲处理的基本一致;氮磷肥处理(W-NP)在 8 月份稍高;磷加有机肥处理(W-P+FYM)在 2 月份稍高,8 月份稍低。小麦连作施氮肥、有机肥、氮加有机肥、氮磷加有机肥 4 个处理(W+N、W-FYM、W-N+FYM、W-NP+FYM)和两个苜蓿连作处理(L、L-NP+FYM)的土壤铵态氮含量在 4 个月份的测定结果之间都无明显差异。

3 讨论

水分是无机氮在土壤剖面迁移的介质,土壤剖面的水分含量变化势必影响到无机氮的迁移和分布。据上述结果,黄土旱塬农田在休闲状态除了表层土壤(0~20 cm)的水分含量受降雨的季节变化影响外,土壤剖面各土层(20~300 cm)的土壤水分分布较均匀,含量一般(17%~20%)维持在田间持水量(22.4%)的 70%~80%的较高水平。但在种植小麦的情况下,土壤剖面(0~300 cm)水分总量普遍降低并且 160 cm 以上土层在作物生长旺盛时期(4~6 月份)迅速大幅度降低。降雨对小麦连作处理处理的土壤水分的补充作用仅限于 160 cm 以上的土层并且随土层深度的增加而逐渐减弱。除了不施肥和单施氮处理之外,其它小麦连作处理在小麦生长旺盛时期 60~80 cm 土层的水分含量下降到接近凋萎湿度(9.0%)的水平。苜蓿对土壤水分的消耗明显比小麦连作的更多。这些结果表明作物耗水是引起黄土旱塬农田土壤剖面水分分布的季节变化并出现严重水分亏缺的主要驱动因子,种植苜蓿比种植小麦消耗水分更大。

在长期休闲状态,黄土旱塬农田土壤剖面(0~300 cm)硝态氮含量保持在 6~10 mg/kg 土的水平,各土层中分布也相当均匀,除了表层以外也没有出现明显的季节性变化。在小麦连作和常规施肥(氮、磷化肥单施或共同施用,或与有机肥配合施用)条件下,土壤剖面硝态氮含量都出现了显著的季节变化,表现为在 6 月份较低,8 月份至次年 2 月份较高,4 月份又下降。这种变化与因降雨和作物生长引起的土壤水分含量季节变化和作物对硝态氮的吸收利用有密切关系。4~6 月之间是冬小麦的生长旺盛时期,需要吸收较多的氮素,其来源主要是硝态氮,因为土壤铵态氮含量低且没有表现出明显的季节变化。在这一时期严重的水分亏缺可能限制了土壤微生物对有机氮的矿化能力,使硝态氮的补充受到限制。由于小麦在 6 月底收获,在 8 月份土壤硝态氮不受作物吸收的影响,而高温和较充足的降雨(图 1)势必增强了土壤有机氮的矿化,形成硝态氮。在 2 月份土壤硝态氮较高的原因显然是由于前期硝态氮积累的结果。MacDonald 等也提出了类似的观点^[1]。

本研究结果说明半干旱农田土壤剖面硝态氮含量出现大幅度的季节变化是作物利用与季节性气候变化共同作用下的必然结果。作物利用使土壤剖面硝态氮含量暂时下降,相反季节性高温和降雨促进土壤有

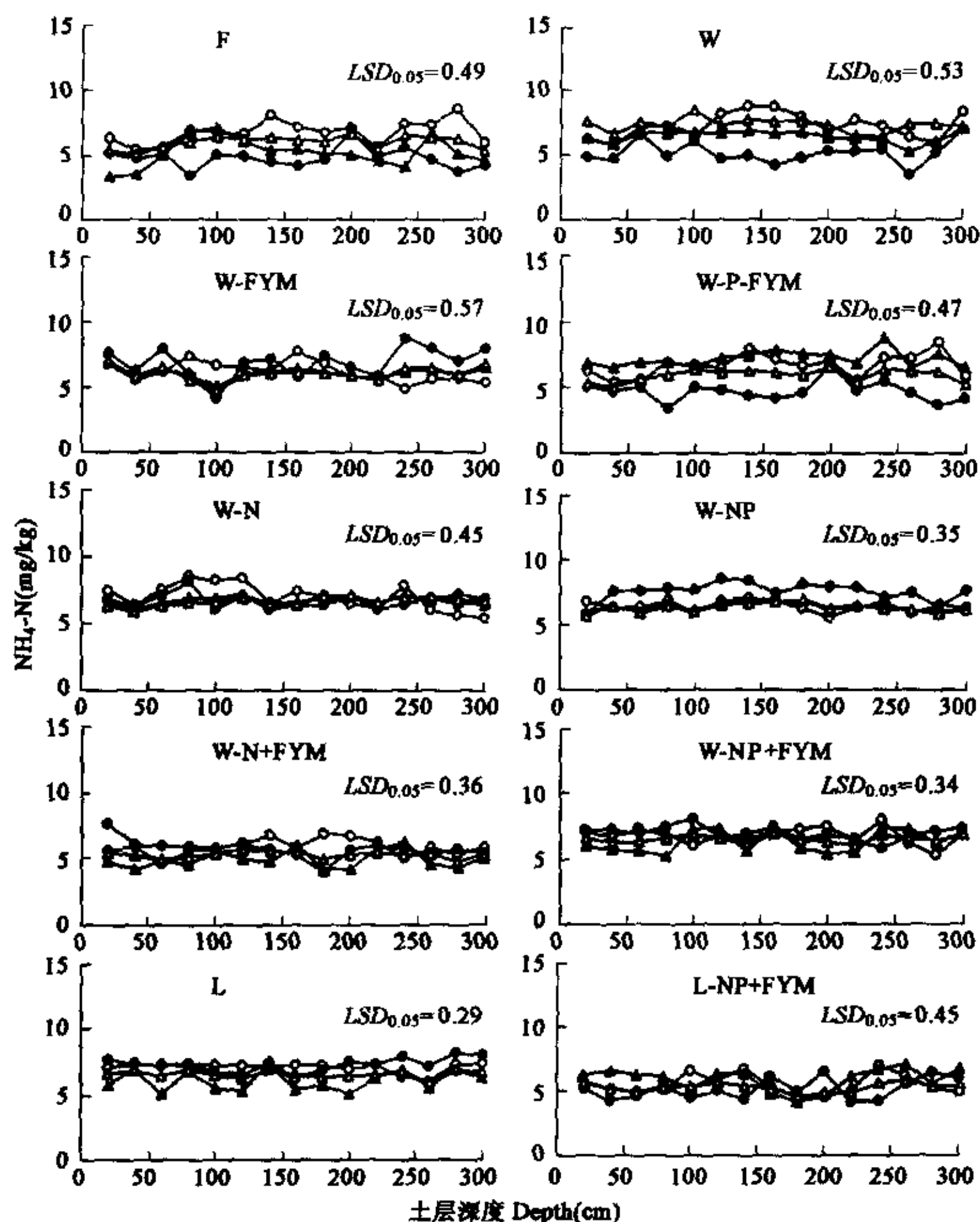


图4 试验点选择处理土壤剖面 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量(各处理英文符号见表1)

Fig. 4 $\text{NH}_4\text{-N}$ content in the soil profiles under the treatments selected from the experiment studied

See table 1 for the abbreviation of the treatments; ○: 6月 Jun., ●: 8月 Aug., ▲: 2月 Feb., △: 4月 Apr

机氮的矿化则使其回升。更值得注意的是,在作物生长旺盛时期(4~6月之间),土壤剖面硝态氮峰出现变小,变窄,同时向上移动的趋势,从而限制了农田硝态氮向土壤深层的迁移。在非作物生长的丰水季节,情况则相反。

黄土旱塬农田土壤剖面硝态氮含量及其分布状况与种植和施肥制度密切相关。在小麦连作不施氮肥(包括不施肥、施有机肥或磷加有机肥)条件下,除了表层(0~20 cm)以外,其它各土层的硝态氮含量都较长期休闲地处理有显著降低(图3,表2)。显然这一变化是由于作物对深层硝态氮吸收利用的结果。在单施氮肥的小麦连作处理,土壤剖面0~300 cm土壤都有相当高的硝态氮积累(图3)。按4个月份平均含量计算,其积累总量达1065 kg/hm²(表2),相当于前17a化肥氮累计用量(1920 kg/hm²)的55%。本研究揭示这一处理土壤剖面的硝态氮出现了两个峰。前一个峰出现的土层深度及其含量水平和季节变化动态与其它施肥制度基本相同。两个峰之间有含量较高、季节变化明显的硝态氮重叠层(80~120 cm)。后一个较宽的硝态氮峰,延续到作物根区以下(200 cm以下)。这一现象表明该处理土壤剖面硝态氮表现出随季节变化不断向下层推进的趋势。这些结果说明这一种植和施肥制度可能导致硝态氮在土壤剖面的过量积累,从而对环境构成潜在危害。在氮肥与磷肥和有机肥(包括二者结合)配合使用的施肥制度下,土壤剖面的硝态氮积累量比单施化肥氮有大幅度减少(表2),而且使其积累层变浅(0~160 cm;图3)。这与 Benbi 等^[5]在

Punjal 得到的结果类似。尽管在这些施肥制度下土壤剖面 0~200 cm 土层也有较高的硝态氮含量(表 2),但其变化与作物吸收利用密切相关(图 3),说明该土层的硝态氮对维持作物的氮素供应从而获得较高的产量起重要作用。其下部土层(200~300 cm)的硝态氮含量远低于无氮肥投入的长期休闲处理的水平(表 2)。可以认为,在该层段(0~200 cm)硝态氮的适当积累并不构成环境问题,相反还有利于作物生长并获得较高的产量。

苜蓿连作系统减少了表层以下土层的硝态氮含量(与休闲比较)。可见,控制氮肥使用和种植苜蓿可以消除农田土壤硝态氮的积累。Hartemink 等发现,大豆和田菁与禾本科作物轮作能够消除硝态氮在深层土壤的积累^[23]。

所研究的全部处理土壤剖面(0~300 cm)的铵态氮含量都很低(4~7 mg/kg 土),各土层间的分布相对均匀,且没有显著的季节性变化。据此可以推断控制黄土旱塬农田土壤铵态氮含量的主要因素是土壤粘土矿物对 NH_4^+ 离子的表面吸附和晶格固定作用。

因此,黄土旱塬农田在常规种植和施肥制度下土壤剖面不会出现大量的铵态氮积累,其迁移能力也不强。这与 Westerman 等在 Oklahoma 得到的结果类似^[6]。

4 结论

作物耗水是引起黄土旱塬农田土壤水分季节变化,产生土壤水分季节性严重亏缺的主要因素。常年生长的苜蓿对土壤水分消耗比小麦尤为突出。黄土旱塬土壤铵态氮积累量小,剖面分布基本均匀。长期单施 N 肥的小麦连作体系中,0~300 cm 土层的硝态氮积累量大(达化肥 N 累计施用量的 55%),并且主要出现深层(140~240 cm),表现出向更深的土层淋失的趋势,有引起环境问题的潜在危险性。适量氮肥与磷肥或有机肥配合施用可以使土壤硝态氮的积累限制在 160 cm 以上的土层,并且不出现深层淋失的现象。该层段(0~160 cm)土壤硝态氮的适当积累不构成潜在环境问题,而且对维持作物生长有利。作物利用是限制农田硝态氮向土壤深层迁移的主要因素。

References:

- [1] MacDonald A J, D S Powlson, P R Poulton, *et al.* Unused fertilizer nitrogen in arable soils: Its contribution to nitrate leaching. *J. Sci. Food Agric.*, 1989, **46**: 407~419.
- [2] Jolley V D, Pierre W H. Profile accumulation of fertilizer-derived nitrate and total nitrogen recovery in two long-term nitrogen rate experiments with corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1977, **41**: 373~378.
- [3] Hooker M L, R E Gwin, G M Herron, *et al.* Effects of long-term, annual applications of N and P on corn grain yields and soil chemical properties. *Agron. J.*, 1983, **75**: 94~99.
- [4] Smika D E. Fallow management practices for wheat production in the central great plains. *Agron. J.*, 1990, **82**: 319~323.
- [5] Benzi D K, C R Biswas and J S Kalkat. Nitrate distribution and accumulation in an Ustochrept soil profile in a long-term fertilizer experiment. *Fertilizer Research*, 1991, **28**: 173~200.
- [6] Westerman R L, Boman, R K, Raun, *et al.* Ammonium and nitrate nitrogen in soil profiles of long-term winter wheat fertilization experiments. *Agron. J.*, 1994, **86**(1): 94~99.
- [7] Halvorson A D, B J Wienhold, and A L Black. Tillage and nitrogen fertilization influence grain and soil nitrogen in an annual cropping system. *Agron. J.*, 2001, **93**: 836~841.

表 2 长武站 10 个典型处理的土壤剖面的硝态氮积累量 *
Table 2 $\text{NO}_3\text{-N}$ accumulation amount in the soil profiles

处理 Treatments	作物 Crops	硝态氮积累量 $\text{NO}_3\text{-N}$ accumulation amount			
		0~ 100cm	100~ 200cm	200~ 300cm	0~ 300cm
		(kg/hm ²)			
F	休闲 ^①	128.4	92.8	70.6	291.8
W	小麦连作 ^②	38.4	8.6	5.1	52.2
W-N	小麦连作	384.0	429.1	251.7	1064.8
W-NP	小麦连作	200.4	47.4	6.7	254.5
W-FYM	小麦连作	93.9	11.7	7.5	113.1
W-N+FYM	小麦连作	351.3	174.1	10.0	535.4
W-P+FYM	小麦连作	100.3	12.7	6.8	119.8
W-NP+FYM	小麦连作	325.5	177.8	8.8	512.1
L	苜蓿 ^③	44.2	9.3	4.9	58.4
L-NP+FYM	苜蓿	104.3	41.6	6.5	152.4

* 以 2、4、6 月份和 8 月份所测定的硝态氮平均值计算
The average of $\text{NO}_3\text{-N}$ measured in Feb., Apr., Jun. and Aug.; ①Fallow, ②Wheat, ③Legume

- [8] MacGregor J M, G R Black, and S D Evans. Mineral nitrogen movement into subsoils following continued annual fertilization for corn. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1974, **38**: 110~112.
- [9] Varvel G E and Peterson T A. Residual soil nitrogen as affected by continuous, two-year, and four-year crop rotation systems, *Agron. J.*, 1990, **82**: 958~962.
- [10] Tracy P W, Westfall D G, Elliot E T, *et al.* Carbon, nitrogen, phosphorus, and sulfur mineralization in plow and no-till cultivation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1990, **54**: 457~461.
- [11] Halvorson A D and Curtis A Reule. Nitrogen fertilizer requirements in an annual dryland cropping system, *Agron. J.*, 1994, **86**: 315~318.
- [12] Linville K W, and Smith G E. Nitrate content of soil cores from corn plots after repeated nitrogen fertilization. *Soil Science*, 1971, **112**(4): 249~255.
- [13] Raun W R, and Johnson G V. Soil-plant buffering of inorganic nitrogen in continuous winter wheat, *Agron. J.*, 1995, **87**: 827~834.
- [14] Sun K G, Li J H, Yao J, *et al.* Effects of fertilization on crop yields and $\text{NO}_3\text{-N}$ accumulation in a long-term experiment. *Soils and Fertilizers*, 1999, (6): 18~20.
- [15] Yuan X M, Tong Y A, Yang X Y, *et al.* Effects of phosphate fertilizer on $\text{NO}_3\text{-N}$ accumulation. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, **6**(4): 397~403.
- [16] Yuan X M, Tong Y A, Yang X Y, *et al.* Effects of organic manure on $\text{NO}_3\text{-N}$ accumulation. *Soil and Environmental Science*, 2000, **9**(3): 197~200.
- [17] Yuan X M, Yang X Y, Tong Y A, *et al.* Effects of nitrogen rates on $\text{NO}_3\text{-N}$ accumulation. *Agriculture Research in Arid Area*, 2001, **19**(1): 8~13.
- [18] Liu X H, Tian M X, Hao M D, *et al.* Effects of rotation and fertilization on $\text{NO}_3\text{-N}$ distribution and accumulation in soil profiles. *Soils and Fertilizers*, 2001, (1): 9~12.
- [19] Yang X Y, Zhang SH L, Liu X L, *et al.* Effects of inorganic fertilizer applied with organic manure on yields and $\text{NO}_3\text{-N}$ accumulation in soil profiles. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 1998, **7**(2): 63~66.
- [20] Yang X Y, Zhang SH L, Yuan X M, *et al.* Effects of fertilization on $\text{NO}_3\text{-N}$ distribution, accumulation and movement in soil profiles. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, **7**(2): 134~138.
- [21] Fan J, Hao M D, Dang T H. Effects of fertilization on $\text{NO}_3\text{-N}$ distribution in soil profiles. *Soil and Environmental Science*, 2000, **9** (1): 23~26
- [22] Guo SH L, Hao M D, Dang T H. Distribution of mineral N in soil profiles under different fertilizations in gully region of Loess Plateau. *Agriculture Research in Arid Area*, 2000, **18**(1): 22~27.
- [23] Hartemink A E, Buresh R J, Bashir Jama, *et al.* Soil Nitrate and water dynamics in Sesbania fallows, weed fallows, and maize, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, **60**: 568~574.

参考文献:

- [14] 孙克刚, 李锦辉, 姚建, 等. 不同施肥处理对作物产量及土体 $\text{NO}_3\text{-N}$ 积累的长期定位试验. *土壤肥料*, 1999, (6): 18~20.
- [15] 袁新民, 同延安, 杨学云, 等. 施用磷肥对土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积的影响. *植物营养与肥料学报*, 2000, **6**(4): 397~403.
- [16] 袁新民, 同延安, 杨学云, 等. 有机肥对土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积的影响. *土壤与环境*, 2000, **9**(3): 197~200.
- [17] 袁新民, 杨学云, 同延安, 等. 不同施氮量对土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 累积的影响. *干旱地区农业研究*, 2001, **19**(1): 8~13.
- [18] 刘晓宏, 田梅霞, 郝明德, 等. 黄土旱塬区长期轮作施肥土壤剖面硝态氮的分布与积累. *土壤肥料*, 2001, (1): 9~12.
- [19] 杨学云, 张树兰, 刘杏兰, 等. 有机-无机配施增产效应及土壤剖面硝态氮累积定位研究. *西北农业学报*, 1998, **7** (2): 63~66.
- [20] 杨学云, 张树兰, 袁新民, 等. 长期施肥对塬土硝态氮分布、积累和移动的影响. *植物营养与肥料学报*, 2001, **7** (2): 134~138.
- [21] 樊军, 郝明德, 党廷辉. 长期施肥条件下土壤剖面中硝态氮的分布. *土壤与环境*, 2000, **9** (1): 23~26.
- [22] 郭胜利, 郝明德, 党廷辉. 黄土高原沟壑区不同施肥条件下土壤剖面中矿质氮的分布特征. *干旱地区农业研究*, 2000, **18** (1): 22~27.