植物营养与肥料学报 2012,18(6):1387-1396
Plant Nutrition and Fertilizer Science

基于土壤氮素平衡的旱地冬小麦监控施氮

章孜亮,刘金山,王朝辉*,赵护兵,杨 宁,杨 荣,曹寒冰
(西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌 712100)

摘要: 提高作物产量,平衡土壤氮素携出,培肥土壤,避免过多肥料氮残留造成淋溶,是旱地作物施氮的主要目标。本研究通过1 m土层硝态氮监控,从土壤氮素的输入和携出平衡计算氮肥用量,并在陕西永寿不同肥力水平的地块上连续2年布置田间试验进行验证。结果表明,与习惯施肥相比,监控施肥的氮肥用量减少41.2%,籽粒平均增产17.0%,氮肥偏生产力平均增加188.3%,产投比平均提高28.9%。监控施肥处理在收获期1 m土层硝态氮残留量平均为37.0 kg/hm^2,较习惯施肥(112.1 kg/hm^2)降低66.9%。经过降雨集中的夏季休闲期后,监控施肥处理1 m土层的硝态氮平均增加15.4 kg/hm^2,习惯施肥则减少27.4 kg/hm^2。这说明通过对1 m土层硝态氮的监控,依据土壤养分平衡,计算旱地小麦氮肥用量,可以提高产量,有效减少氮肥投入,降低成本,增加农户收入,提高氮肥效率,减少旱地土壤硝态氮残留和淋溶。

关键词: 旱地;冬小麦;氮肥;硝态氮;氮平衡
中图分类号: S153.6$^+$1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)06-1387-10

Nitrogen recommendation for dryland winter wheat by monitoring nitrate in 1 m soil and based on nitrogen balance

ZHANG Zi-liang, LIU Jin-shan, WANG Zhao-hui*, ZHAO Hu-bing, YANG Ning, YANG Rong, CAO Han-bing
(*College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: To achieve the purpose of increasing crop yield, improvement of soil fertility by balancing nitrogen (N) output from soil, and preventing N leaching due to too fertilizer N residue in soil on dryland, recommendation of N fertilizer based on monitoring nitrate N residual in 1 m soil layer (RNBM) and the balance of soil N input and output was studied, and effects of this N fertilizer recommendation method were tested by two-year field experiments on six fields with different soil fertility in Yongshou Shaanxi. Obtained results showed that, compared to the farmer's practice (FP), the RNBM method reduced the nitrogen application rate by 41.2%, but increased the grain yield of winter wheat by 17.0%, fertilizer N partial factor productivity by 188.3%, and the output/cost ratio (OCR) by 28.9%. Nitrate N residual in 1 m soil layer was 37.0 kg/ha for the RNBM method at harvest time, which was 66.9% lower than that of 112.1 kg/ha for the FP. After intensively rainy summer fallow, nitrate N residual in 1 m soil layer was increased by 15.4 kg/ha for the RNBM method, while that was decreased by 27.4 kg/ha for the FP treatment. These results indicated that N fertilization recommendation based on monitoring the nitrate N residue in 1 m soil layer and soil N balance was able to effectively increase crop yield, reduce N input and fertilizer cost, improve N efficiency, and minimize nitrate N residue and leaching in dryland soil.

Key words: dryland; winter wheat; nitrogen fertilizer; nitrate N; nitrogen balance

收稿日期: 2012-03-22　　**接受日期:** 2012-05-06
基金项目: 由国家自然科学基金(30871596, 30971866);现代农业产业技术体系建设专项资金;农业公益性行业科研专项经费项目(201103003);西北农林科技大学"创新团队建设计划"资助。
作者简介: 章孜亮(1984—),男,甘肃民乐人,硕士研究生,主要从事旱地小麦营养与施肥方面的研究。E-mail: 520zhangziliang@163.com
*通讯作者 Tel: 029-87082234, E-mail: w-zhaohui@263.net

养分平衡法是农业生产中确定作物肥料用量的一种基本方法,其原理是作物吸收的养分来源于土壤和肥料两部分,在作物目标产量的养分需求中土壤养分供应不能满足的部分则由施肥来补充,即施肥量等于作物目标产量养分需求量与土壤养分供应量的差值除以含该养分的肥料利用率之商[1-2]。这一方法由 Truog 于 1960 年提出,上世纪 70 年代末传入我国,并得到广泛应用,成为指导我国施肥的主要方法,目前仍广泛应用。

但从计算公式来看,该方法并没有体现"养分归还学说"基本理念,即"通过施肥归还作物从土壤带走的养分",以实现"土壤养分平衡和通过施肥培肥土壤"的目标。原因在于,首先根据这一方法,通过施肥所补充的养分只是作物目标产量养分需求中"土壤养分供应不能满足的部分",而土壤供应的那部分养分又由谁以及如何来补充呢? 其次,从表面上来看,这一方法中用到了"养分利用率"这个参数,但是通过施肥进入土壤的养分并不能完全被作物吸收利用,暗示着这部分没有被作物吸收而残留在土壤中的养分可以补充由土壤向作物提供的那部分养分,但实际情况如何呢? 能否补充土壤的养分损失取决于残留肥料养分量,当肥料养分利用率较低、肥料养分残留量大于土壤养分供应量时,有可能得到补充,还可能使这种养分过剩,导致在土壤中残留和累积,反之,则不能补充土壤的养分损失。从目前的情况来看,在我国多属于前一种情况。肥料的利用率较低,如小麦、玉米、水稻氮肥的利用率分别为 10.8% ~ 40.5%、25.6% ~ 26.3% 和 27.1%~35.6%[3],土壤残留了大量肥料养分,不仅补充了由土壤向作物提供的养分,还导致土壤中养分过量残留,如黄土高原中部旱塬地区,0—100 cm 土层累积的硝态氮可达 90 ~ 135 kg/hm^2[4],华北平原小麦收获后 0—90 cm 土层土壤硝态氮含量平均达 127 kg/hm^2[5];山东惠民县大棚蔬菜 0—90 cm 土层硝态氮累积量高达 1165 kg/hm^2[6]。这不仅造成了肥料资源的严重浪费,还对生态环境造成直接或潜在危害,影响农业生产的可持续发展。可见,目前的养分平衡法并没有真正关注土壤的养分平衡,难以提高肥料利用效率,更无法兼顾残留肥料养分的环境效应和土壤培肥问题。

因此,本文以维持土壤氮素平衡为依据,而不是由"土壤养分供应不能满足的部分"与肥料利用率比值,来确定氮肥用量,并进行了 2 年多点试验,通过无机氮测试[7-8],监控旱地冬小麦 1 m 土层的氮素残留和累积情况,调控氮肥施用量,目标在于通过施肥来平衡作物生产等各种从土壤中携出的氮素,并在保持土壤肥力的同时,避免过多的肥料氮残留和造成氮素淋溶等环境危害。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于陕西省永寿县养马庄村(34°49′2.9″N,108°10′45.0″E),该地海拔 1100 m,属于温带大陆性气候,无霜期 210 d,年平均气温 10.2℃,2009 年 10 月~2010 年 9 月降水量为 766.1 mm,其中 2010 年夏季 7、8、9 三个月的降水量 473.6 mm。2010 年 10 月~2011 年 9 月降水量 976.7 mm,其中 2011 年夏季 7、8、9 三个月的降水量 780.1 mm。本试验选用肥力水平不同、分属不同农户的 6 个地块,其土壤基本养分状况如表 1 所示。

表 1 供试地土壤基本养分状况

Table 1 Nutrition properties of soils in experimental fields

供试地块 Sites	有机质 Organic matter (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	速效磷 Available P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)	0—100 cm 硝态氮 0-100 cm NO_3^--N (kg/hm^2)	pH
农户 1 Farmer 1	10.17	0.70	9.6	117.1	44.2	7.42
农户 2 Farmer 2	12.35	0.83	14.4	123.1	162.7	7.55
农户 3 Farmer 3	10.75	0.71	15.3	109.1	104.8	7.51
农户 4 Farmer 4	11.20	0.70	11.4	93.1	88.7	7.54
农户 5 Farmer 5	12.12	0.84	20.6	107.1	64.5	7.73
农户 6 Farmer 6	11.89	0.83	13.4	149.1	129.8	7.83

1.2 试验设计与管理

试验于 2009 年 9 月至 2011 年 7 月进行,为两个小麦生长季,均设置 2 个处理,即习惯施肥(FP)和监控施肥(STBF),同时在 6 个地块上进行试验,每块地为一个重复,根据每个农户地块实际大小均分为 2 个小区(FP 区和 STBF 区),农户 1 至 6 的地块设置的小区面积分别为 660、280、146、119、98、318 m^2。播种冬小麦,品种为当地主栽品种晋麦 47,采用常规的不起垄种植方式。因第二年农户 2 自行提前施肥播种,未能继续试验。

施肥量的确定:习惯施肥处理施肥量由农户根据自己的经验确定,通过跟踪调查农户当年施肥得到表 2,磷肥用量采用磷素恒量监控技术确定[9],由于黄土区土壤中钾素含量高,没有施用钾肥。具体施肥量见表 2。

表 2　2009 ~ 2011 年不同试验地小麦施肥量(kg/hm^2)

Table 2　Fertilizer application rate for winter wheat at different experimental fields from 2009 to 2011

供试地块 Site	习惯施肥 FP		监控施肥 STBF	
	N	P_2O_5	N	P_2O_5
2009 ~ 2010 生长季 2009-2010 growing season				
农户 1 Farmer 1	161	90	91	65
农户 2 Farmer 2	130	147	14	58
农户 3 Farmer 3	123	90	72	54
农户 4 Farmer 4	196	62	67	67
农户 5 Farmer 5	203	64	70	20
农户 6 Farmer 6	139	54	47	65
2010 ~ 2011 生长季 2010-2011 growing season				
农户 1 Farmer 1	193	90	153	93
农户 3 Farmer 3	203	144	162	107
农户 4 Farmer 4	176	124	153	113
农户 5 Farmer 5	183	128	143	104
农户 6 Farmer 6	154	98	123	118

注(Note):FP—Farmer's practice; STBF—Soil test based fertilization.

氮肥施用量采用 1 m 土层硝态氮监控施氮技术确定,用量见表 2。原理与方法如下:根据养分归还学说,要保持土壤的养分平衡,至少应将作物从土壤带走的养分归还土壤;要使土壤肥力提升,就必须给土壤归还更多的养分。因此,归还给土壤的养分,除考虑作物吸收带走的氮素以外,还应考虑氨挥发、反硝化、氮淋失造成的氮损失携出。对土壤的氮素投入,除肥料氮以外,还有干湿沉降、秸秆还田带入、种子带入、播前土壤累积的矿质氮,以及作物生长过程中土壤有机氮的矿化释放。经矿化作用形成矿质氮是消耗土壤有机氮的过程,这个过程受土壤中矿质氮浓度的反馈调节。只有补充矿化消耗而减少的有机氮,才可以保证土壤肥力平衡或有所提升,因此土壤中应保持一定数量的矿质氮,但又不应有过多的矿质氮残留和累积,以避免造成氮素淋溶等环境风险。因此,这一能平衡土壤有机氮矿化消耗,又不会因过多残留或累积造成淋溶等环境风险的矿质氮数量,称为土壤矿质氮安全阈值。由于这部分矿质氮是需要存在于土壤中、平衡土壤有机氮矿化消耗的氮素,所以应归于氮素携出范畴。因此,基于维持土壤养分平衡,可得到公式:氮素输入 = 氮素携出,即:

氮肥用量 + 干湿沉降带入氮素量 + 秸秆还田带入氮素量 + 种子带入氮素量 + 播前土壤矿质氮 + 生长季土壤氮素矿化量 = 作物目标产量需氮量 + 肥料氮素损失量 + 土壤矿质氮安全阈值。

因此,氮肥用量 = 目标产量需氮量 + 肥料氮素损失量 + 土壤矿质氮安全阈值-干湿沉降带入氮素量-秸秆还田带入氮素量-种子带入氮素量-生长季土壤氮素矿化量-播前土壤矿质氮,其中:

目标产量需氮量 = 目标产量 × 小麦单位产量需氮量,单位为 N kg/hm^2。

目标产量的确定根据调查当地农户产量,在此基础上增加 10% ~ 15%[10],小麦单位产量(100 kg)需氮量为 2.8 kg[11]。

肥料氮素损失量包括:氨挥发、反硝化、氮素淋溶。在旱地,小麦生长季节正值旱季,降水小,难以发生氮素淋溶。小麦收获时,残留氮素主要分布在 1 m 以上的土壤剖面,这部分氮素在理论上没有脱离可被作物吸收利用和土层深度,因此,旱地小麦生长季的氮素淋溶可不计。通过分析以往旱地肥料氮素氨挥发、反硝化损失的试验结果[12-14],结合旱地小麦常用的施肥量[15-17],将公式当中肥料氮素损失量设为 25 kg/hm^2。

土壤矿质氮安全阈值:这里指能平衡小麦生长季有机氮矿化消耗,维持土壤肥力平衡或有所提升,又不造成过多矿质氮残留和累积、避免小麦收后降雨集中的夏季出现氮素淋溶等环境风险,土壤本身

应当含有的矿质氮素数量。由于在旱地土壤中的矿质氮主要是硝态氮[18-19]，因此，用1 m土层硝态氮总量表示。由多点的取样测定结果（表3）发现，当小麦播前1 m土层硝态氮总量超过110 kg/hm²时，硝态氮会明显地被淋溶到1 m以下，因此，这一安全阈值在小麦播前设为110 kg/hm²。由于这一区域夏闲季节1 m土层的有机氮素矿化可使累积的硝态氮增加55 kg/hm² 左右（尚未发表），因此，为使下季小麦播前1 m土层硝态氮总量不超过110 kg/hm²，这一阈值在小麦收获时应设为55 kg/hm²。在西欧国家把防止氮肥造成水体污染，作物收获后1 m土层的肥料氮残留量定为不超过50 kg/hm²，年施氮量安全上限定为225 kg/hm²[20]。

表3 不同农户2009年小麦播前1 m土层硝态氮累积量（kg/hm²）

Table 3 Accumulation of NO_3^--N in 1 m soil layer in different farmer's fields before winter wheat seeding in 2009

土层深度（cm）Soil depth	农户1 Farmer 1	农户2 Farmer 2	农户3 Farmer 3	农户4 Farmer 4	农户5 Farmer 5	农户6 Farmer 6
0—20	16.9	24.6	33.4	20.1	24.0	19.9
20—40	22.5	56.2	53.5	43.2	30.7	47.0
40—60	3.9	41.6	14.3	11.3	6.6	26.4
60—80	0.2	28.4	1.8	10.3	3.1	7.8
80—100	0.7	11.9	1.9	3.7	0.0	28.7
总和 Total	44.2	162.7	104.8	88.7	64.5	129.8

干湿沉降带入氮素量：主要是降水带入的氮素量，总结前人试验结果[21]设为20 kg/hm²。

秸秆还田带入氮素量：主要按秸秆还田量×秸秆含氮量（0.4%）确定，单位为kg/hm²。

种子带入氮素量：根据播种量×籽粒含氮量（2.0%）确定，单位为kg/hm²。

土壤氮素表观矿化量：总结前人试验结果[22]，公式中设为N 50 kg/hm²。

播前土壤矿质氮：在小麦收获或播前1～2周测定1 m土层硝态氮，单位为kg/hm²。

1.3 取样及测定方法

在2010年，小麦收获期、播种前采集0—100 cm的土样，2011年采集0—200 cm的土样。每个小区用直径4.5 cm的土钻采3个点，每20 cm为一层混合均匀，将新鲜土样带回实验室。称新鲜土样5 g，用1 mol/L KCl溶液浸提，震荡60 min后过滤，滤液中的硝态氮和铵态氮用连续流动分析仪测定；同时测定土壤水分，再结合土壤容重计算出0—100 cm和0—200 cm土层硝态氮累积量；用Olsen法测定土壤速效磷，用乙酸铵浸提—火焰光度计法测定土壤速效钾含量。

成熟期（2010、2011年6月20日），于收获前每小区随机选取4个1 m长的样段，将小麦植株连根系拔起，从根茎结合处将根剪除，将地上部分为茎叶和穗两部分，装入编号的网袋里，称其鲜重，样品自然风干后麦穗脱粒，进一步分为颖壳、籽粒两部分，称其风干重。茎叶、穗、颖壳、籽粒样品各取部分，65℃烘至恒重。以各部分烘干重计算不同处理的小麦收获指数。烘干样用不锈钢旋风粉碎机粉碎，$H_2SO_4-H_2O_2$消解，AA3连续流动分析仪测定消解液中的氮，进而换算为植株茎叶、颖壳、籽粒的全氮含量，计算吸氮量。

于采样结束的当天，用机械全区收获小麦计产，用以计算小麦籽粒产量，方法为现场称量小麦籽粒鲜重，取样烘干测定含水量，籽粒产量以烘干重表示，茎叶生物量由籽粒产量和收获指数计算。

1.4 收获指数与养分利用效率的计算

收获指数（%）= 籽粒产量/地上部分生物量×100

氮肥偏生产力（kg/kg）= 籽粒产量/施氮量

1.5 经济效益计算

产值（Yuan/hm²）= 小麦籽粒产量（kg/hm²）× 当年小麦市场价格（Yuan/kg）

成本（Yuan/hm²）= 施氮量（N kg/hm²）× 价格（Yuan/kg，N）+ 施磷量（P_2O_5 kg/hm²）× 价格（Yuan/kg，P_2O_5）+ 播种（Yuan/hm²）+ 旋地、犁地（Yuan/hm²，次）× 2次 + 小麦种子价格（Yuan/kg）× 播种量（kg/hm²）+ 农药（Yuan/hm²）

+ 收割(Yuan/hm^2)

纯收入(Yuan/hm^2) = 产值(Yuan/hm^2)-成本(Yuan/hm^2)

产投比 = 产值(Yuan/hm^2)/成本(Yuan/hm^2)

式中:2009～2010 年小麦市场价格为 2 Yuan/kg,N、P_2O_5 的价格分别为 4.5 Yuan/kg、5.0 Yuan/kg;2010～2011 年小麦市场价格为 2.1 Yuan/kg,N、P_2O_5 的价格分别为 4.5 Yuan/kg、5.2 Yuan/kg,播种 450 Yuan/hm^2,旋地、犁地 375 Yuan/hm^2,农药 175 Yuan/hm^2,收割 750 Yuan/hm^2,小麦种子价格 4 Yuan/kg,播种量 180 kg/hm^2。

1.6 数据分析

数据采用 Microsoft Excel 软件进行处理,SAS (v8.2, SAS Institute Inc.)做方差分析,显著性检验水平为 $P \leqslant 0.05$。

2 结果与分析

2.1 冬小麦产量、生物量、收获指数及产量构成要素

与习惯施肥相比,监控施肥的小麦籽粒产量、生物量和收获指数差异不显著,但监控施肥处理有明显提高籽粒产量和生物量的趋势(表 4)。2009～2010 年,监控施肥小麦籽粒产量、生物量较习惯施肥处理平均分别提高 21.3% 和 20.5%;2010～2011 年,分别提高 12.6% 和 12.5%。

2.2 冬小麦氮素吸收及利用效率

2009～2010 年,监控施肥处理小麦吸氮量变幅为 54.5 ～ 139.6 kg/hm^2(表 5),平均为 91.4 kg/hm^2;2010～2011 年为 118.5～158.8 kg/hm^2,平均 144.4 kg/hm^2。与农户习惯施肥相比,两年的结果均没有达到差异显著水平。2009～2010 年监控施肥小麦的氮肥偏生产力变幅为 54.4～233.9 kg/kg,平均 104.8 kg/kg;2010～2011 年为 30.5～43.1 kg/kg,平均 35.1 kg/kg,比习惯施肥平均分别增加 314.1% 和 38.3%。

表 4　不同施肥处理对冬小麦产量、生物量、收获指数的影响

Table 4　Effects of different fertilization managements on winter wheat yield, biomass and harvest index

供试地块 Site	产量 Grain yield(kg/hm^2)		生物量 Biomass(kg/hm^2)		收获指数 Harvest index(%)	
	习惯施肥 FP	监控施肥 STBF	习惯施肥 FP	监控施肥 STBF	习惯施肥 FP	监控施肥 STBF
2009～2010 生长季 2009-2010 growing season						
农户 1 Farmer 1	2384	4949	5332	10510	44.7	47.1
农户 2 Farmer 2	3245	3275	7248	7185	44.8	45.6
农户 3 Farmer 3	3083	4309	7224	9047	42.7	47.6
农户 4 Farmer 4	4575	4821	9291	10439	49.2	46.2
农户 5 Farmer 5	5358	5191	10499	10717	51.0	48.4
农户 6 Farmer 6	5173	6313	11017	13081	47.0	48.3
平均值 Mean	3970 a	4810 a	8435 a	10163 a	46.6 a	47.2 a
2010～2011 生长季 2010-2011 growing season						
农户 1 Farmer 1	4198	4678	9139	10815	45.9	43.3
农户 3 Farmer 3	3531	5321	7351	10886	48.0	48.9
农户 4 Farmer 4	4994	4971	10919	10213	45.7	48.7
农户 5 Farmer 5	5025	5278	10576	11418	47.5	46.2
农户 6 Farmer 6	4931	5281	10919	11687	45.2	45.2
平均值 Mean	4536 a	5106 a	9781 a	11004 a	46.5 a	46.4 a

注(Note):FP—Farmer's practice;STBF—Soil test based fertilization. 数据后不同字母表示 2 个处理之间差异性达 5% 显著水平 Values followed by different letters are significantly different between the two treatments at the 0.05 level.

表5 不同施肥处理对冬小麦氮素吸收及利用效率的影响

Table 5 Effects of different fertilization managements on winter wheat nitrogen uptake and nitrogen use efficiency

供试地块 Site	吸氮量 N uptake (kg/hm²)		氮肥偏生产力 PFP_N (kg/kg)	
	习惯施肥 FP	监控施肥 STBF	习惯施肥 FP	监控施肥 STBF
2009～2010 生长季 2009-2010 growing season				
农户1 Farmer 1	42.3	94.4	14.8	54.4
农户2 Farmer 2	58.9	54.5	25.0	233.9
农户3 Farmer 3	68.2	70.5	25.1	59.8
农户4 Farmer 4	92.7	99.0	23.3	72.0
农户5 Farmer 5	118.0	90.5	26.4	74.2
农户6 Farmer 6	128.3	139.6	37.2	134.3
平均值 Mean	84.7 a	91.4 a	25.3 b	104.8 a
2010～2011 生长季 2010-2011 growing season				
农户1 Farmer 1	120.7	118.5	21.8	30.5
农户3 Farmer 3	82.2	143.3	17.4	32.7
农户4 Farmer 4	124.7	151.0	28.4	32.4
农户5 Farmer 5	123.8	158.9	27.5	36.9
农户6 Farmer 6	145.0	150.4	32.0	42.9
平均值 Mean	119.3 a	144.4 a	25.4 b	35.2 a

注(Note): PFP_N— Partial factor productivity from applied nitrogen; FP—Farmer's practice; STBF—Soil test based fertilization. 数据后不同字母表示2个处理之间差异性达5%显著水平 Values followed by different letters are significantly different between the two treatments at the 0.05 level.

2.3 收获期和下季小麦播前1 m土层硝态氮残留

在2010年小麦收获期,监控施氮处理1 m土层硝态氮残留量变幅为6.3～64.6 kg/hm²(图1-A),平均21.4 kg/hm², 较习惯施肥处理的残留量(44.0～302.9 kg/hm²,平均141.5 kg/hm²)显著降低84.7%。经夏季7、8、9三个月休闲期土壤有机氮矿化和降雨(473.6 mm)淋溶后,到下季小麦播前,监控施氮处理1 m土层平均硝态氮残留量为54.2 kg/hm²,有所增加(图1-B); 而习惯施肥处理1 m土层的硝态氮由收获期的141.5 kg/hm²减少到105.3 kg/hm²,说明在降雨较多的夏季休闲期,该处理至少有36.2 kg/hm²的硝态氮,被473.6 mm的降雨淋到了1 m以下的土层。2011年收获期,监控施氮处理1 m土层硝态氮残留量37.0～75.8 kg/hm²(图2-A),平均为55.8 kg/hm²,较习惯施肥(49.1～120.5 kg/hm², 平均76.8 kg/hm²)平均降低27.3%。经过夏季休闲后,监控施氮处理硝态氮残留量为50.3 kg/hm²,稍有下降(图2-B),而习惯施肥处理1 m土层硝态氮残留量则由76.8 kg/hm²减少到59.9 kg/hm²,下降幅度明显高于监控施氮处理。可见,监控施氮能降低收获期土壤硝态氮残留,减少夏季休闲期的硝态氮淋溶。

2.4 不同施肥处理对冬小麦经济效益的影响

2009～2010年和2010～2011年监控施肥处理较习惯施肥处理纯收入平均分别增加2209和1402元/hm²(表6); 产投比变幅分别为2.03～3.86和2.44～2.76,较农户平均增加39.3%和17.7%。说明监控施氮能减少肥料投入,降低成本,增加收入,提高冬小麦种植的经济效益。

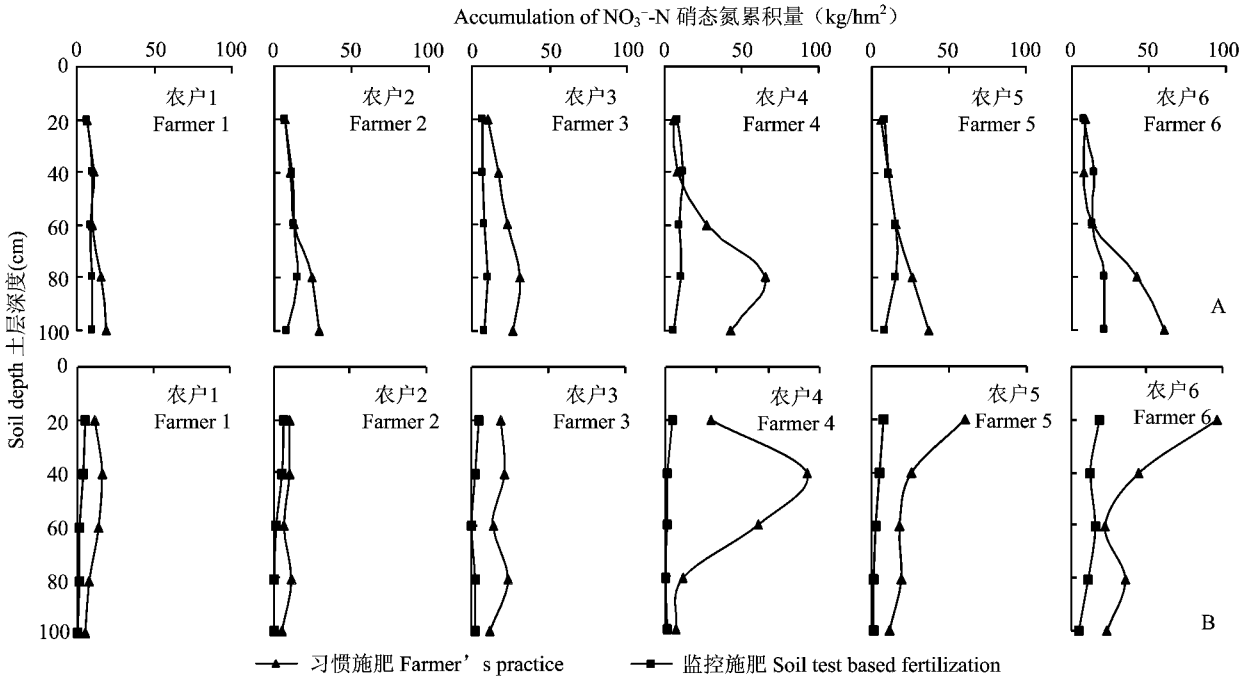

图 1　2009～2010 年收获期(A)及下季小麦播前(B)土壤 1 m 土层硝态氮累积量

Fig. 1　Accumulation of NO_3^--N in 1 m soil layer in harvest time (A) in 2009－2010 and before sowing in next year (B)

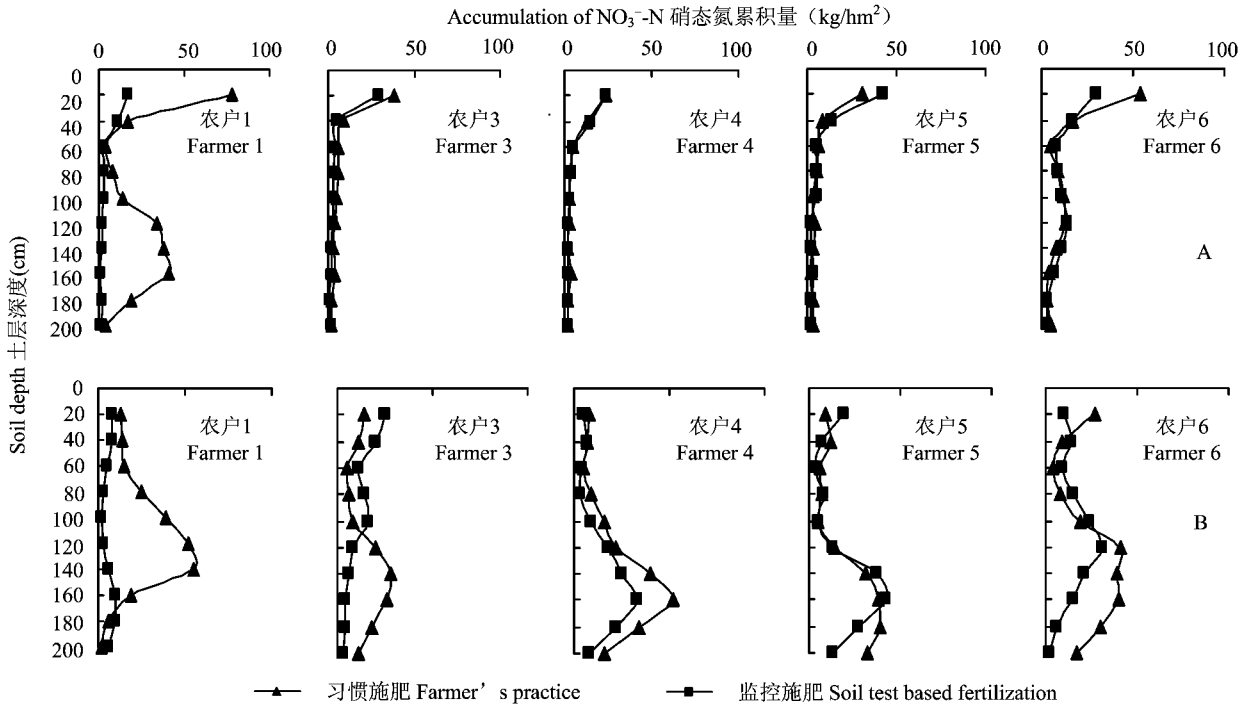

图 2　2010～2011 年收获期(A)及下季小麦播前(B)土壤 2 m 土层硝态氮累积量

Fig. 2　Accumulation of NO_3^--N in 2 m soil layer in harvest time (A) in 2010－2011 and before sowing in next year (B)

3　讨论

在旱地,土壤有机氮矿化后生成的铵态氮会立即被硝化细菌氧化成硝态氮,难以反映土壤的供氮水平,所以硝态氮可作为旱地农田土壤的供氮指标[23-24]。由于硝态氮能在土壤剖面一定深度上下

运动[25]，因此需用作物播前一定深度土层的硝态氮储量作为当季作物的供氮指标。对北京地区0—100 cm土壤剖面残留无机态氮的动态观察表明，施氮量低时，NO_3^--N主要在0—60 cm土层上下移动；施氮量高时，在0—80 cm土层上下移动[26-27]，1 m以上土层的NO_3^--N含量可表征旱地无机态氮动态及土壤有效氮水平。在陕西永寿25个田块的研究区域采样分析，发现0—100 cm土层NO_3^--N含量与作物吸氮量呈极显著正相关，可作为旱地土壤供氮指标[28]。在美国中部大平原地区的研究也表明，作物播种前0—100 cm土层硝态氮可反映前茬作物的氮肥残效，作为土壤对后季作物的供氮指标[29]。可见，0—100 cm是作物吸收利用氮素的主要土层，这也和作物根系在土壤中的分布状况基本一致[30]，但如何用1 m土层的硝态氮累积量推算氮肥施用量，并无确切的方法，因此本研究通过对1 m土层硝态氮的测定与监控，以土壤氮素平衡为目标，从氮素的投入与携出平衡进行施氮量计算，结果表明，这种方法有效减少了施氮量，并在一定程度上提高了小麦产量和农户的经济收入。在河北省吴桥县的研究发现，冬小麦收获后0—100 cm土层盈余氮高达199.8 kg/hm^2，盈余氮主体是硝态氮[31]；在英国洛桑试验站的田间试验也发现，冬小麦收获后有76%的肥料氮残留在1 m土体，且大部分是硝态氮[32]。硝态氮易随水向下迁移产生淋溶，过量施用氮肥不仅是肥料的浪费，也会污染环境。本试验两年的结果表明，2010年监控施氮处理收获期1 m土层硝态氮的残留量平均为21.4 kg/hm^2，2011年收获期为59.8 kg/hm^2，而习惯施肥处理两年分别达141.5 kg/hm^{2}和83.1 kg/hm^2。经夏季休闲期土壤氮素矿化和降水淋溶后，监控施氮处理2010年播前1 m土层硝态氮残留量由收获期的21 kg/hm^{2}增加到54.2 kg/hm^2；习惯施肥处理残留硝态氮则由收获期的141.5 kg/hm^{2}减少到105.3 kg/hm^2，硝态氮产生了

表6 不同施肥处理对冬小麦经济效益的影响

Table 6 Effects of different fertilization managements on wheat economic benefit

供试地块 Site	产值 Value (Yuan/hm^2)		成本 Cost (Yuan/hm^2)		纯收入 Net income (Yuan/hm^2)		产投比 Output/cost ratio	
	习惯施肥 FP	监控施肥 STBF	习惯施肥 FP	监控施肥 STBF	习惯施肥 FP	监控施肥 STBF	习惯施肥 FP	监控施肥 STBF
2009～2010生长季 2009-2010 growing season								
农户1 Farmer 1	4768	9898	4020	3485	749	6414	1.19	2.84
农户2 Farmer 2	6490	6550	4165	3228	2325	3322	1.56	2.03
农户3 Farmer 3	6166	8618	3849	3584	2318	5034	1.60	2.40
农户4 Farmer 4	9150	9642	4037	3657	5113	5986	2.27	2.64
农户5 Farmer 5	10716	10382	4079	3490	6638	6892	2.63	2.97
农户6 Farmer 6	10346	12626	3741	3272	6606	9355	2.77	3.86
平均值 Mean	7939 a	9619 a	3982 a	3452 b	3958 a	6167 a	2.00 a	2.79 a
2010～2011生长季 2010-2011 growing season								
农户1 Farmer 1	8815	9824	4182	4020	4616	5804	2.11	2.44
农户3 Farmer 3	7415	11174	4502	4135	2913	7040	1.65	2.70
农户4 Farmer 4	10487	10439	4279	4123	6207	6316	2.45	2.53
农户5 Farmer 5	10552	11083	4334	4029	6218	7054	2.43	2.75
农户6 Farmer 6	10356	11089	4048	4011	6308	7078	2.56	2.76
平均值 Mean	9525 a	10722 a	4269 a	4063 b	5256 a	6658 a	2.24 a	2.64 a

注(Note)：FP—Farmer's practice；STBF—Soil test based fertilization. 数据后不同字母表示2个处理之间差异性达5%显著水平 Values followed by different letters are significantly different between the two treatments at the 0.05 level.

明显的淋溶。2011 年播前，虽然监控施氮处理 1 m 土层硝态氮残留量由收获期的 55.8 kg/hm^2，小幅下降到 50.3 kg/hm^2，但习惯施肥处理却由收获时的 76.8 kg/hm^2 显著下降到了 59.9 kg/hm^2。可见，监控施氮能降低土壤硝态氮残留，减少硝态氮淋溶。

基于土壤氮素平衡，通过对 1 m 土层硝态氮进行监控，从氮素的投入与携出平衡进行施氮量计算，可有效控制氮肥投入、保证作物产量、提高氮肥利用效率、减少土壤氮素残留和淋溶。本文是两年的多点试验结果，作为一种方法或初步思考提出来，希望对旱地测土施肥工作中确定氮肥用量有一定的参考作用。

4　结论

两年的田间试验结果表明，与习惯施肥相比，通过 1 m 土层硝态氮监控施氮可使冬小麦平均增产 17.0 %，氮肥偏生产力平均增加 188.3%，产投比平均提高 28.9%，收获期 1 m 土层硝态氮残留量平均为 37.0 kg/hm^2，较农户习惯施肥降低 66.9%。经过降雨集中的夏季休闲期后，监控施肥处理 1 m 土层的硝态氮含量平均增加 15.4 kg/hm^2，习惯施肥则减少 27.4 kg/hm^2。可见，通过 1 m 土层硝态氮监控施氮可以提高小麦产量，有效减少氮肥投入，降低成本，增加农户的经济收入，提高氮肥的利用效率，减少土壤硝态氮残留和淋溶。

参 考 文 献：

[1] 谭金芳. 作物施肥原理与技术[M]. 北京：中国农业大学出版社，2003. 40-53.
Tan J F. The principle and technology of crop fertilization[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003. 40-53.

[2] 高祥照，马常宝，杜森. 测土配方施肥技术[M]. 北京：中国农业出版社，2005. 111-114.
Gao X Z, Ma C B, Du S. Technology of soil testing and fertilizer recommendation[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005. 111-114.

[3] 张福锁，王激清，张卫峰，等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报，2008，45(5)：915-924.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F *et al*. Nutrient use efficiencies of major cereal in China and measures for improvement [J]. Acta Pedol. Sin., 2008, 45(5): 915-924.

[4] 胡田田，李生秀. 土壤供氮能力测试方法的研究 IV. 土壤剖面中的起始 NO_3^--N—土壤氮素有效性指标[J]. 干旱地区农业研究，1993，11(增刊)：74-82.
Hu T T, Li S X. Studies on methods determining soil nitrogen-supplying capacities IV. A reliable soil N availability index: Initial NO_3^--N in soil profile[J]. Agric. Res. Arid Areas, 1993, 11 (Supp.): 74-82.

[5] Cui Z L, Zhang F S, Chen X P *et al*. In-season nitrogen management strategy for winter wheat: maximizing yields, minimizing environmental impact in an over-fertilization context [J]. Field Crops Res., 2010, 116: 140-146.

[6] 寇长林. 华北平原集约化农作区不同种植体系施用氮肥对环境的影响[D]. 北京：中国农业大学博士论文，2004.
Kou C L. Effects of nitrogen fertilization of different intensive cropping systems on environment in north China Plain [D]. Beijing: PhD dissertation, China Agricultural University, 2004.

[7] 陈世勇，谭庆军，赵荣芳，等. 应用土壤无机氮测试优化青贮玉米氮素管理[J]. 草业学报，2008，17 (3)：156-161.
Chen S Y, Tan Q J, Zhao R F *et al*. Optimization of the N fertilizer management of silage corn based on soil mineral nitrogen test [J]. Acta Pratacul. Sin., 2008, 17 (3): 156-161.

[8] Olfs H W, Blankenau K, Brentrup F *et al*. Soil and plant-based nitrogen fertilizer recommendations in arable farming [J]. J. Plant Nutr. Soil Sci., 2005, 168: 414-431.

[9] Hochmuth G J, Hanlon E A. Principles of sound fertilizer recommendations[J]. Fla. Coop. Ext. Serv. Cir., 2010, SL315.

[10] 郭绍铮，彭永欣，钱维朴，陈子威. 江苏麦作科学[M]. 南京：江苏科学技术出版社，1994. 121-313.
Guo S Z, Peng Y X, Qian W P, Chen Z W. Wheat crop science and technology in Jiangsu province [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1994. 121-313.

[11] 朱新开，郭文善，封超年，等. 不同类型专用小麦氮肥施用参数研究[J]. 麦类作物学报，2009，29 (2)：308-313.
Zhu X K, Guo W S, Feng C N *et al*. Study on N application parameters in wheat for different end uses [J]. J. Triticeae Crops, 2009, 29(2): 308-313.

[12] Ju X T, Xing G X, Chen X P *et al*. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. PNAS, 2009, 106: 3041-3046.

[13] Mosier A R, Guenzi W D, Schweizer E E. Soil losses of dinitrogen and nitrous oxide from irrigated crops in northeastern Colorado [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1986, 50: 344-348.

[14] 王朝辉，刘学军，巨晓棠，张福锁. 北方冬小麦/夏玉米轮作体系土壤氮挥发的原位测定[J]. 生态学报，2002，22(3)：359-365.
Wang Z H, Liu X J, Ju X T, Zhang F S. In situ determination of ammonia volatilization from wheat maize rotation system field in North China[J]. Acta Ecol. Sin., 2002, 22(3): 359-365.

[15] 王春阳，周建斌，郑险峰，李生秀. 不同栽培模式对小麦-玉米轮作体系土壤硝态氮残留的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2007，13(6)：991-997.
Wang C Y, Zhou J B, Zhen X F, Li S X. Effects of different cultivation methods on soil residual nitrate under winter wheat-summer maize cropping system [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(6): 991-997.

[16] 樊虎玲，郝明德，李志西. 黄土高原旱地长期施用化肥对小麦品质的影响[J]. 麦类作物学报，2005，25(5)：51-55.
Fan H L, Hao M D, Li Z X. Effect of long term fertilization on

wheat quality in semiarid land of the Loess Plateau [J]. J. Triticeae Crops, 2005, 25(5): 51-55.

[17] 李华,王朝辉,李生秀. 地表覆盖和施氮对冬小麦干物质和氮素积累与转移的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(6): 1027-1034.
Li H, Wang Z H, Li S X. Effect of soil surface mulching and N rate on dry matter and nitrogen accumulation and translocation of winter wheat[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2008, 14(6): 1027-1034.

[18] 卢红玲, 李世清, 金发会. 对间隙淋洗长期通气培养条件下黄土高原土壤供氮能力的评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(6): 1083-1091.
Lu H L, Li S Q, Jin F H. Evaluation of soil N-supplying capacity on the Loess Plateau under long-term alternate leaching aerobic incubation conditions [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2008, 14(6): 1083-1091.

[19] 赵坤, 李世清, 李生秀. 原状土通气培养法测定黄土高原土壤供氮能力的研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(7): 2397-2406.
Zhao K, Li S Q, Li S X. Study on undisturbed soil sample incubation for estimating soil nitrogen supplying capacity in Loess Plateau[J]. Sci. Agric. Sin., 2009, 42(7): 2397-2406.

[20] 高超, 张桃林. 欧洲国家控制农业养分污染水环境的管理措施[J]. 农村生态环境, 1999, 15(2): 50-53.
Gao C, Zhang T L. Environmental management options practiced in Europe mitigate agricultural nutrient pollution of ground and surface water [J]. Rur. Eco-Environ., 1999, 15(2): 50-53.

[21] 李生秀, 寸待贵, 高亚军, 等. 黄土旱塬降水向土壤输入的氮素[J]. 干旱地区农业研究, 1993, 11(增刊): 83-91.
Li S X, Cun D G, Gao Y J *et al.* Mineral nitrogen introduced into soil by precipitation on Loess dryland [J]. Agric. Res. Arid Areas, 1993, 11(Suppl.): 83-91.

[22] 王西娜, 王朝辉, 李生秀. 黄土高原旱地冬小麦/夏玉米轮作体系土壤的氮素平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6): 759-764.
Wang X N, Wang Z H, Li S X. Soil nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system on dryland of Loess Plateau[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(6): 759-764.

[23] Chen X P, Zhang F S, Romheld V *et al.* Synchronizing N supply from soil and fertilizer and N demand of winter wheat by an improved N_{min} method [J]. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 2006, 74: 91-98.

[24] Mengel K, Hutsch B, Kane Y. Nitrogen fertilizer application rates on cereal crops according to available mineral and organic soil nitrogen [J]. Eur. J. Agron., 2006, 24: 343-348.

[25] 吴金水, 郭胜利, 党廷辉. 半干旱区农田土壤无机氮累积与迁移机理[J]. 生态学报, 2003, 23(10): 2040-2049.
Wu J S, Guo S L, Dang T H. Mechanisms in the accumulation and movement of mineral N in soil profiles of farming land in a semiarid region [J]. Acta Ecol. Sin., 2003, 23(10): 2040-2049.

[26] 邵则瑶, 杨海顺, 朱明仪, 刘连贵. 作物根层土壤剖面无机态氮的研究[J]. 北京农业大学学报, 1988, (4): 420-429.
Shao Z Y, Yang H S, Zhu M Y, Liu L G. Study on the plant root profile mineral nitrogen[J]. J. Beijing Agric. Univ., 1988, (4): 420-429.

[27] 邵则瑶, 杨海顺, 朱明仪, 刘连贵. 小麦根层土壤剖面残留无机态氮的研究[J]. 土壤, 1988, 20(2): 97-98.
Shao Z Y, Yang H S, Zhu M Y, Liu L G. Study on the wheat root profile residual mineral nitrogen [J]. Soil, 1988, 20(2): 97-98.

[28] 胡田田, 李生秀, 郝乾坤. 旱地土壤矿质氮和可矿化氮与土壤供氮能力的关系[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 83-86.
Hu T T, Li S X, Hao Q K. The relationship between mineral N, mineralizable N and soil nitrogen-supplying capacity [J]. J. Soil Water Conserv., 2000, 14(4): 83-86.

[29] Westcott M, Engel R, Jacobsen J *et al.* Residual soil nitrated responses to early and late-season nitrogen applications to irrigated spring wheat[J]. Fert. Facts, 1997, 13: 145-150.

[30] 王涌清, 孙昭荣, 刘秀奇. 潮土及盐化潮土中的微团聚体及有机质在各组微团聚体中的分布[J]. 土壤肥料, 1983, (4): 10-13.
Wang Y Q, Sun Z R, Liu X Q. Distributions of micro-aggrecates and aggregate-associated organic matter in fluvo-aquic and salinized fluvo-aquic soils[J]. Soils Fert., 1983, (4): 10-13.

[31] 周顺利, 张福锁, 王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈余研究[J]. 生态学报, 2001, 21(11): 1781-1784.
Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. Studies on the spatio-temporal variations of soil NO_3^--N and apparent budget of soil nitrogen [J]. Acta Ecol. Sin., 2001, 21(11): 1781-1784.

[32] Macdonald A, Poulton P, Stockdale E *et al.* The fate of residual ^{15}N-labelled fertilizer in arable soils: its availability to subsequent crops and retention in soil [J]. Plant Soil, 2002, 246(1): 123-137.