植物营养与肥料学报 2016, 22(5): 1240–1248
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer
doi: 10.11674/zwyf.15229
http://www.plantnutrifert.org

# 黄土高塬沟壑区农田土壤养分与作物产量变化的长期监测

徐 娜[1]，党廷辉[1,2]*，刘文兆[1,2]
（1 中国科学院水利部水土保持研究所，陕西杨凌 712100；
2 西北农林科技大学水土保持研究所，陕西杨凌 712100）

**摘要:**【**目的**】土壤养分含量是反映土壤肥力状况的重要指标，对农田肥料投入和土壤养分进行长期定位监测，有利于准确反映土壤养分变化趋势。利用黄土高塬沟壑区不同施肥监测区 10 年的长期监测资料，分析对比不同监测区土壤养分含量和作物产量的变化，分析土壤养分、产量与施肥的关系，为当地农田生产的施肥管理提供理论依据。【**方法**】本研究试验监测区的农田管理完全参照大田管理模式，共设置四大试验监测区，包括无肥监测区(CK)、化肥监测区(HF)、化肥有机肥监测区(HM)和农民地块监测区(NM)，肥料均于作物播种前作为基肥撒施。在每年冬小麦收获期 6 月中下旬，或玉米收获期 9 月中下旬，采集表层(0—20 cm)土壤样品，处理后进行土壤养分的分析，并且在作物收获期测算作物产量以及植株地上部分的氮、磷、钾含量。【**结果**】与试验前相比，CK 监测区土壤有机质降低 1.73 g/kg，HF监测区增加 1.97 g/kg，HM监测区增加 2.20 g/kg，NM 监测区增加 1.44 g/kg；CK 监测区土壤全氮减少 0.08 g/kg，其他施肥监测区增加 0.05～0.13 g/kg；HF 监测区土壤碱解氮增加 7.8 mg/kg，而其他监测区均不同程度地降低；HM 监测区土壤有效磷增加最为显著，增幅达到 11.86 mg/kg，HF 监测区增加 8.42 mg/kg，NM 监测区增加 3.06 mg/kg，CK 监测区增加 2.44 mg/kg；CK 监测区土壤速效钾明显下降，降低 38 mg/kg 左右，NM 监测区增加最为显著，增加量为 27.5 mg/kg。对冬小麦而言，相比于 CK 不施肥区，HF、HM 和 NM 监测区都能够显著提高产量，但各施肥监测区之间产量差异不显著。农田养分平衡分析表明，化肥和有机肥配施，可使土壤中 N、P、K 素均有盈余；只施化肥时会导致土壤 K 素亏缺严重；当土壤长期不施用任何肥料时，土壤各养分元素均出现亏缺。【**结论**】在黄土高塬沟壑区，作物生育期降水量及其分配、积温条件和肥力水平对小麦产量影响显著。施肥 10 年后，各施肥区土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量都有不同程度的提高，土壤碱解氮只有单施化肥的增加。无肥监测区由初始含量的最高水平最终降至最低，证明了长期施肥对于土壤肥力的维持具有重要意义。另外，该地区农民地块存在过量施肥现象。

**关键词:** 长期监测；土壤养分；小麦产量；变化趋势

**中图分类号:** S158.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008–505X(2016)05–1240–09

# Soil nutrient balance and crop yields after 10-years' fertilization in the gully area of the Loess Plateau

XU Na[1], DANG Ting-hui[1,2]*, LIU Wen-zhao[1,2]
( *1 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;*
*2 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China* )

**Abstract:**【**Objectives**】Soil nutrient contents are important indices of soil fertility, it is useful to reflect change trends of soil nutrients via monitoring amounts of farmland fertilizers and soil nutrients regularly. Based on a 10-year long-term monitoring experiment of different fertilization in the gully area of the Loess Plateau, the changes of soil nutrients and crop yields were investigated and the relationships among them were analyzed.【**Methods**】

**收稿日期:** 2015–05–06　　**接受日期:** 2015–08–16　　**网络出版日期:** 2016–04–01
**基金项目:** 中国生态系统研究网络（CERN）长武站长期监测项目（K318009703）资助。
**作者简介:** 徐娜（1990—），女，陕西西安人，硕士研究生，主要从事土壤化学方面的研究。E-mail：xunaxn@126.com
* 通信作者 Tel：029-87012875，E-mail：dangth@ms.iswc.ac.cn

All the treatments in monitoring areas were under the field management measures. There were four treatment areas, no fertilizer (CK), chemical fertilizer (HF), combined application of chemical fertilizer and organic fertilizer (HM) and local farmland (NM). All the fertilizers were basal applied before sowing of crops. Soil samples (0–20 cm) were collected in the middle June or September, and the crops yield and the NPK contents of aboveground plants were calculated at the harvest. 【**Results**】After 10 years' experiment, the contents of soil organic matter were decreased by 1.73 g/kg in CK, increased by 1.97 g/kg in HF, 2.20 g/kg in HM and 1.44 g/kg in NM, respectively. The soil total N contents were decreased by 0.08 g/kg in CK, and increased by 0.05–0.13 g/kg in the treatments with fertilization. The soil available N contents were increased in HF, but decreased in all the other treatments. The soil available P contents were increased obviously by 11.86 mg/kg in HM. The soil available K contents were decreased by 38 mg/kg in CK but increased significantly by 27.5 mg/kg in NM. All the fertilization treatments could increase the wheat yields significantly compared to CK, and there were no significant differences among the fertilization areas. Nutrient balance analysis showed that the combined application of chemical and organic fertilizer had N, P and K surplus, the chemical fertilizer would cause the deficiency of K, and all the nutrients would be in deficit without the fertilization. 【**Conclusions**】The precipitation, thermal condition and fertilization levels influence the wheat yield significantly. The contents of soil nutrients in the tillage layer(0–20 cm)are changed significantly after 10 years' fertilization. The initial soil nutrient contents of CK were the highest, however, they became the lowest after 10 years, which proved the extremely importance of fertilization to keep soil fertility. The fertilization can increase the contents of soil nutrients include organic matter, total N, available P and available K, the soil available N is reduced in all the treatments except the chemical fertilization. The waste of fertilizer exists in local farmlands. It is suggested for local farmers to reduce the amount of fertilizer appropriately.

**Key words:** long-term monitoring; soil nutrient; wheat yield; change trend

黄土高塬属于旱作农业区域，水资源短缺以及土壤贫瘠曾经是当地农业生产的主要限制因素[1−2]。随着社会经济的发展，大部分区域农田施肥量不断增多，虽然产量有了很大提高，但肥料利用率低下、土壤中肥料残留问题日益突出[3−5]。因此，对农田土壤养分状况进行长期监测，分析土壤养分变化趋势，研究当地施肥−产量−土壤肥力关系，对于指导科学施肥具有重要意义[6]。

截止目前，基于长期定位施肥试验，研究黄土高塬地区土壤养分变化的报道很多。由于长期定位施肥试验都属于控制性试验，其施肥、耕作、栽培等农田管理都实行严格控制标准，增加了因素的可比性和研究精度[7−8]，但同时与周边农田的实际情况存在一定的差距，研究结果在一定程度上不能很好地反映农田养分的实际变化，对于农田的适用也有一定的限制性。本研究以当地农田为监测地，对农田的施肥、作物、管理等措施没有统一的设置要求，完全采取当地的习惯模式，通过调查记录 10 年不同监测地的施肥、作物等信息，同时，在作物收获期每年测定土壤养分和产量，分析对比不同监测地的土壤养分含量和作物产量的变化，进一步分析土壤养分、产量与施肥的关系，以便为当地农田生产的施肥管理提供理论依据。

## 1　材料与方法

### 1.1　自然概况

监测地位于陕西省长武县中国科学院长武黄土高原农业生态站，地处黄土高塬中南部陕甘交界处的陕西省长武县洪家镇王东村，北纬 35°12′～35°16′，东经 107°40′～107°42′，海拔 940～1220 m，属暖温带半湿润大陆性季风气候。年均降水 580 mm (各年份小麦生育期年降雨量分布见图 1)，年均气温 9.1℃，无霜期 171 d，地下水埋深 50～80 m，地带性土壤为黑垆土，母质是深厚的中壤质马兰黄土，土体疏松，通透性好。该区属典型的旱作雨养农业区域，作物所需水分均依赖于自然降水，地貌属高塬沟壑区。

### 1.2　试验设计

设置四大试验监测区，分别为无肥区 (CK)、化肥区 (HF)、化肥有机肥区 (HM) 和 3 块农民地块范

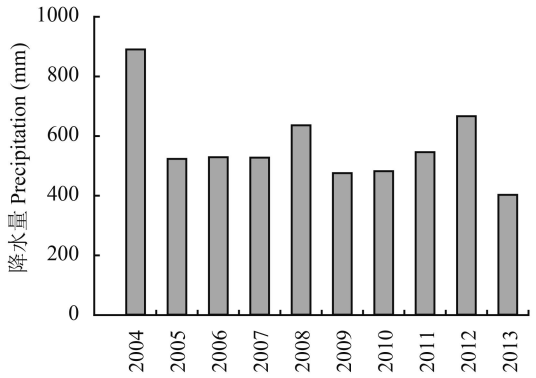


**图 1 2004～2013 年小麦生育期年降水量**

**Fig. 1 Precipitation during the wheat growth periods from 2004 to 2013**

围监测区 ($NM_1$、$NM_2$、$NM_3$)。无肥监测区不施用任何肥料，化肥监测区大约施用 N 138 kg/hm$^2$、$P_2O_5$ 90 kg/hm$^2$；化肥有机肥监测区大约施用 N 138 kg/hm$^2$、$P_2O_5$ 90 kg/hm$^2$、有机肥 65000 kg/hm$^2$。农民地块是在试验站周围农田选择有代表性的 3 个农户田块，施肥方式和用量遵循当地农民的习惯，以氮、磷和有机肥为主，每年的施肥量和肥料种类不定，各监测区肥料用量范围见表 1。试验所用氮肥以尿素为主、磷肥以过磷酸钙为主，有机肥料以农家肥为主，肥料基本上在作物播种前作为基肥施用。试验监测区的农田管理完全符合大田管理模式，所以，每年的肥料用量不完全一致，会有一定的波动。小麦品种为长旱 58 或长武 134，玉米品种为先玉 335 或沈丹 10，以小麦–玉米轮作为主，也有小麦连作种植。监测时段为 2004 年至 2013 年，共计 10 年。各监测区面积，CK 350 m$^2$，HF 2704 m$^2$，HM 350 m$^2$，$NM_1$ 1998 m$^2$，$NM_2$ 1332 m$^2$，$NM_3$ 666 m$^2$。2004 年土壤的各项指标含量为各监测区的基础肥力状况。

### 1.3 样品采集与测定分析

土壤样品采集：为了更加符合大田作物的实际生长情况，本试验并没有设置固定的作物轮作模式，而是根据实际情况采取小麦连作或小麦–玉米轮作的作物种植制度，所以，每年作物收获期采集土壤样品的时间会因此不同。2004、2007、2010 和 2013 年均在玉米收获期的 9 月中下旬采集土 壤样品，其他年份均在小麦收获期的 6 月中下旬 进行采样。采集土壤样品时，根据每个采样地的形状、大小和类型的不同，采集表层 (0—20 cm) 土壤样品。在采样区内，采用“W”型布点，每线段采 5 点混合，形成 3～6 个土壤表层样品。混合土样、晾干、混匀后取部分样品分别过 1 mm 和 0.25 mm 筛，用于土壤养分分析。土壤有机质采用重铬酸钾氧化—外加热法，全氮采用半微量凯氏法，碱解氮采用 NaOH 浸提—碱解扩散法，有效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法，速效钾采用乙酸铵浸提—火焰光度法[9]。

小麦收获期测产：在每个样地内选取 6 块生长较均匀的小麦样方 (1 m × 1 m)，先计算每个样方的小麦株数，再将每个样方的小麦全部收割，装入样品袋，编号。在实验室内计数得到穗数数据，然后再将小麦穗脱粒，将籽粒在 65℃ 下烘至恒重，计算出小麦产量。

试验数据处理采用 Sigmaplot 12.5 和 SPSS 16.0 软件进行统计分析。

**表 1 各监测区施肥水平**

**Table 1 Fertilization levels of the monitoring areas**

| 处理 Treatment | 化肥氮 Chemical N (kg/hm$^2$) | 化肥$P_2O_5$ Chemical $P_2O_5$ (kg/hm$^2$) | 有机肥 Manure (t/hm$^2$) |
|---|---|---|---|
| 无肥区 CK | 0 | 0 | 0 |
| 化肥区 HF | 100～150 | 38.7～90 | 0 |
| 化肥有机肥区 HM | 100～150 | 38.7～90 | 65 |
| 农民地 NM | 40～300 | 38.7～280 | 30～80 |

## 2 结果与分析

### 2.1 监测试验 10 年间土壤养分含量变化

2.1.1 土壤有机质含量变化 各监测区土壤有机质含量呈现出不同的变化趋势 (图 2)。CK 监测区由于长期不施用任何肥料，10 年间总体呈现出下降趋势，较试验前降低了 1.73 g/kg，这也说明长期不施肥会导致土壤有机质含量降低[10]。对于 HF 和 HM 监测区而言，其年份变化趋势基本一致，都呈现出增长趋势，但试验的前 5 年，增长趋势均不明显，这说明在短期内施肥对土壤有机质不会产生太大的影响；试验第 6 年开始，二者都开始处于稳步上升阶段，与试验前相比，HM 监测区上升幅度较大，增长 2.2 g/kg，增幅达到 18%；HF 监测区增长 1.97 g/kg，增幅 14.7%。NM 监测区在试验监测的 10 年间土壤有机质表现出稳定增长的趋势，较试验前增加 1.44 g/kg，增幅 10.6%，农民地处理的土壤有机质水平整体高于其他处理，这主要与农民地农家肥施用量高有密切关系。研究结果表明，长期不施肥必然会造成土壤有机质含量降低；长期施肥可以提高土壤有机质含量，但短期内效果不明显。

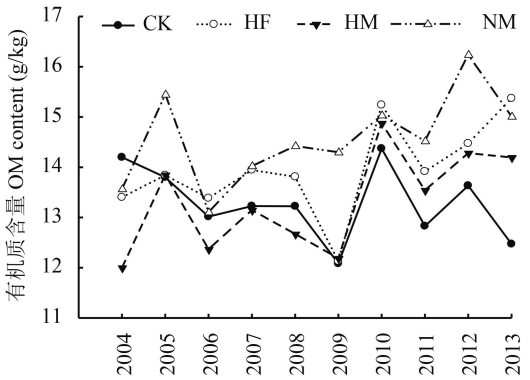


**图 2　不同监测区土壤有机质含量变化**

**Fig. 2　Soil organic matter (OM) as affected by the fertilizer treatments**

2.1.2 土壤全氮含量变化　各监测区土壤全氮含量表现出不同的年份动态变化 (图 3)。CK、HF、HM 和 NM 监测区变异系数分别为 6.4%、7.2%、8.3% 和 5.6%。CK 监测区总体呈现出下降趋势，其试验初始值最高，经过 10 年的不施肥处理，逐步降到最低，并且从试验的第 6 年开始，其土壤全氮含量已经处于各监测区中最低水平，这表明长期不施肥必然会导致土壤全氮含量降低。HF 和 HM 监测区变化趋势基本一致，总体上都呈现缓慢上升趋势，其全氮含量在试验的第 6 年均达到最高水平，随后降低，最终趋于稳定增长趋势；与试验前相比，分别增长 0.13 g/kg 和 0.06 g/kg，HF 监测区含量略高，这与其初始含量和土壤有机质水平略高有关。NM 监测区也呈现出波动增长的趋势，2012 年达到最高水平，与试验前相比，最终增长 0.05 g/kg，由于农民地块的肥料用量较其他监测区高，因此其全氮含量一直处于较高水平。经统计分析，施肥监测区的土壤全氮含量显著高于不施肥处理，这说明，单施化肥以

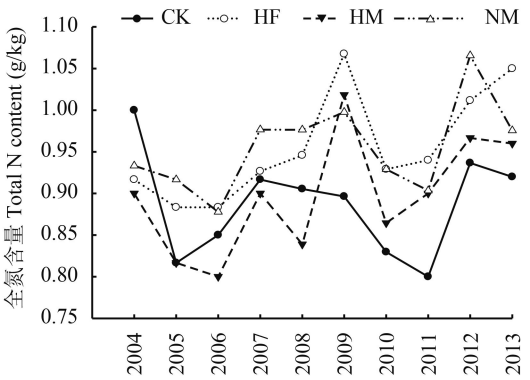


**图 3　不同监测区土壤全氮含量变化**

**Fig. 3　Soil total nitrogen as affected by the fertilizer treatments**

及化肥有机肥配施在增加土壤全氮含量方面均有很明显的作用，这与其他研究结果一致[11]。也有研究[12]表明，有机无机配施对于提高土壤氮素含量有着重要意义，既能快速提高土壤有效氮含量，又能持续地改善土壤氮素状况。

2.1.3 土壤碱解氮含量变化　各监测区土壤碱解氮含量呈现出不同的变化趋势，CK、HF、HM 和 NM 监测区的变异系数分别为 9.8%、7.2%、8.8% 和 10.8%，年际波动较大 (图 4)。试验前 3 年，都呈现出先升高后降低的趋势，2006 年到 2009 年各监测区缓慢平稳地上升，之后下降趋于稳定水平，各施肥监测区变化趋势基本一致。与试验前相比，CK、HM 和 NM 监测区分别降低了 11.9 mg/kg、14 mg/kg 和 0.4 mg/kg，降幅分别为 17%、19.9% 和 0.6%；HF 监测区比试验前增加了 7.8 mg/kg，增幅为 12.6%，显著高于其他监测区。总体来看，除了化肥监测区碱解氮含量有所增加外，其他都呈下降趋势，HM 和 NM 监测区下降较为明显，这可能与施用有机肥增加了表层土壤中可溶性有机态氮和微生物活性,促进了氮素的淋溶下移、硝化与反硝化损失有关。对于 CK 监测区来说，长期不施肥会导致土壤氮素严重缺乏。

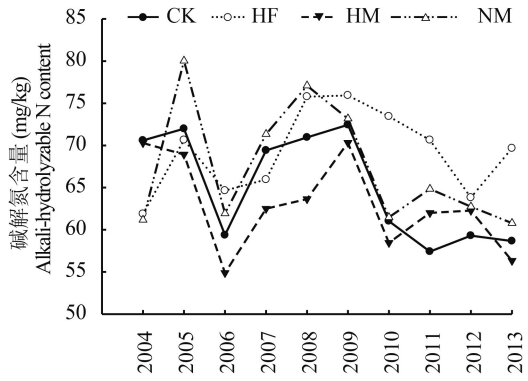


**图 4　不同监测区土壤碱解氮含量变化**

**Fig. 4　Soil alkali-hydrolyzable N as affected by the fertilizer treatments**

2.1.4 土壤有效磷含量变化　各试验监测区土壤有效磷年际动态变化不同。试验前7年间，CK、HF 和 HM 监测区都呈现出先波浪式增长后降低的趋势 (图 5)。试验第 8 年开始，各施肥监测区土壤有效磷含量开始稳定增长，这说明长期施肥可以逐步提高土壤有效磷含量。截止 2013 年，HF、HM 监测区有效磷水平均得到显著提高，较试验前分别增长了 8.42 mg/kg、11.86 mg/kg，增幅分别达到 61% 和

141%。NM 监测区增加了 3.06 mg/kg，增幅为 19.4%，HM 监测区增加幅度最大，这是因为有机肥本身就含有一定数量的有机磷，而且易于释放，可以有效地提高土壤的有效磷水平[13]，也有研究表明，施用化肥对提高土壤有效磷水平非常重要[14]。

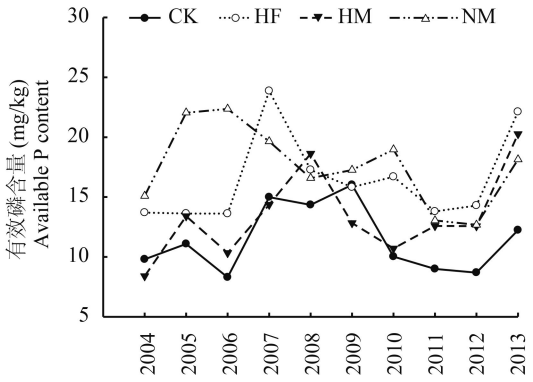


**图 5 不同监测区土壤有效磷含量变化**

**Fig. 5 Soil available P as affected by the fertilizer treatments**

2.1.5 土壤速效钾含量变化 各监测区土壤速效钾含量变化趋势基本一致，除了 CK 监测区呈现出下降趋势外，其他施肥监测区都呈现出缓慢升高趋势 (图 6)，其中 NM 监测区增加量最大，在 27 mg/kg 左右，增幅为 17% 左右，分析原因与当地农民大量施用农家肥以及秸秆还田有关；HF 和 HM 监测区增加量较少，分别为 8.4 mg/kg 和 0.9 mg/kg，增幅在 0.05%～6% 之间；CK 监测区速效钾含量明显降低，降低量为 38 mg/kg 左右。大量研究表明，长期单施无机化肥，尤其是氮磷肥，土壤速效钾含量呈下降趋势[15–16]，而本研究中，各施肥监测区土壤速效钾含量均有不同程度的提高，主要是因为有机肥施用以

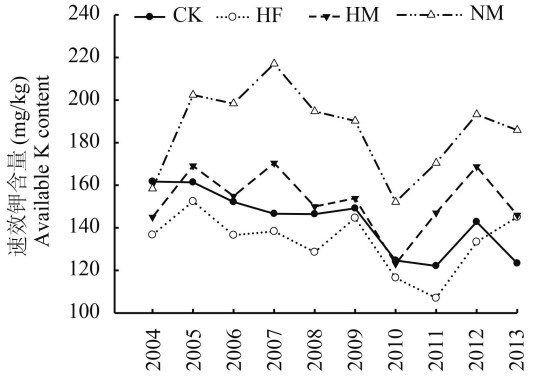


**图 6 不同监测区土壤速效钾含量变化**

**Fig. 6 Soil available K as affected by the fertilizer treatments**

及秸秆还田对其贡献率大。整体来看，HF 监测区土壤速效钾水平最低，这是因为土壤在没有钾肥或有机肥投入的基础上，作物每年还会从土壤中吸收一部分钾素，加上该区作物产量高，长期以来也会导致土壤钾素积累减少；CK 监测区的土壤钾库长期处于消耗状态下，土壤速效钾含量下降很正常[17]。NM 监测区的速效钾水平显著高于其他处理，这与当地农民长期大量施用农家肥关系密切[18]。

## 2.2 农田养分平衡分析

农田养分平衡本质上就是养分被作物吸收消耗和施肥投入之间的平衡。养分平衡的计算采用表观平衡法，即养分的投入量与支出量之差，正值表示盈余，负值表示亏缺。本研究区域农田养分输入主要包括降水、施肥和种子带入的养分，养分支出以作物收获物中的养分为主。在黄土高塬沟壑区农田生态系统中，其土层深厚，作物根系深，在塬地基本没有养分的淋失[19]。由于每年的作物根茬继续留在土壤中，因此它所吸收的养分既为输入项又为输出项，相互抵消，未计入养分平衡，所以，作物吸收带走的养分指的是地上部分。

不同施肥处理对土壤养分平衡的影响不同 (表 2)。1) 氮素：在不施肥 CK 监测区亏损 80% 以上，HF 监测区亏损 3%；对于 HM 和 NM 监测区，分别盈余 11% 和 19% 左右。2) 磷素：土壤磷素的变化差异较大，CK 监测区亏损 90% 以上，而其他施肥监测区盈余 300%～850% 之间。3) 钾素：在不施肥 CK 监测区和只施化肥的 HF 监测区分别都亏损 90% 以上，而在化肥和有机肥配施的 HM 和 NM 监测区分别盈余 62% 和 105% 左右。总体来看，在化肥和有机肥配施的条件下，氮、磷、钾素均有盈余；在只施化肥的条件下，钾素亏缺严重，磷素盈余，氮素基本处于平衡状态；当土壤不施用任何肥料时，氮、磷、钾素均亏缺。

## 2.3 不同施肥监测区对小麦产量的影响

由于本研究属于长期监测试验，完全采用大田管理模式，在作物轮作方面每个监测区域并不是按照特定的作物轮作方式进行耕种，这样符合农田的实际情况。为了增加可比性，本研究选取各监测区都种植小麦的 3 个年份 (2009、2011、2012)，通过综合对比 4 个不同施肥监测区的冬小麦产量差异，了解在当前的不同施肥模式下，哪种更有利于作物获得高产，为实际应用提供科学的指导。

**表 2　不同施肥土壤养分平衡(kg/hm²)**

**Table 2　Soil nutrient balance in different fertilizer treatments**

| 处理 Treatment | 输入量 Input | | | 输出量 Output | | | 盈亏 Balance | | | 盈亏 Balance(%) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | N | P | K | N | P | K | N | P | K | N | P | K |
| CK | 65.08 | 2.33 | 15.91 | 327.91 | 40.31 | 209.95 | –262.84 | –37.99 | –194.05 | –80.15 | –94.23 | –92.42 |
| HF | 755.08 | 452.33 | 15.91 | 782.00 | 102.09 | 482.35 | –26.92 | 350.23 | –466.45 | –3.44 | 343.05 | –96.70 |
| HM | 965.08 | 767.33 | 615.91 | 863.25 | 82.68 | 378.02 | 101.83 | 684.65 | 237.89 | 11.80 | 828.07 | 62.93 |
| NM | 1092.58 | 947.33 | 1295.91 | 914.39 | 135.89 | 629.86 | 178.18 | 811.44 | 666.05 | 19.49 | 597.14 | 105.75 |

通过对 3 个不同年份的小麦平均产量进行统计分析发现，不施肥 CK 监测区，3 年的小麦平均产量 1953.1 kg/hm²，HF 监测区小麦平均产量 4708.4 kg/hm²，HM 监测区小麦平均产量 3935.8 kg/hm²，NM 监测区小麦平均产量 4509.1 kg/hm²，分别比 CK 监测区增产 141.1%、101.5% 和 130.9%。施肥监测区小麦产量显著高于 CK 无肥区，而各施肥监测区之间小麦产量差异不显著 (图 7)。由此看出，化肥单施或化肥有机肥配施都能够显著提高当地的冬小麦产量。

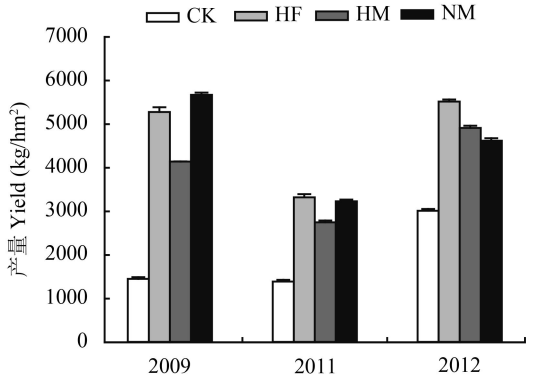


**图 7　2009、2011 和 2012 年各监测区冬小麦产量**

**Fig. 7　Winter wheat yields in different monitoring areas in 2009, 2011 and 2012**

由于受气象、施肥等因素的影响，试验监测所选取的 3 个年份小麦产量并不相同。由图 7 可以看出，2011 年各施肥监测区的小麦产量显著低于其他两个年份，分析原因，主要与各年份内小麦生育期降水量、>0℃ 积温以及施肥水平有密切关系：1) 小麦生育期 降水量　2009 年和 2011 年相比，小麦生育期间 (7 月至次年 6 月) 降水量基本相同，分别是 475 mm 和 545 mm，而 2012 年小麦生育期降水量为 667 mm，显著高于前两个年份。2011 年小麦生长前期和成熟后期的降水量分别偏低和偏高，这样会影响小麦的前期出苗和后期灌浆成熟情况，造成作物减产[20–21]。2) >0℃ 积温　相比于前后两个年份，2011 年小麦生长前期 (苗期～越冬) 积温相对偏高 (即暖冬)，这样容易造成小麦冬前旺长，遭遇冻害减产，即使在生长后期 (抽穗～灌浆) 积温略高，利于小麦灌浆，但由于苗期冻害已造成麦苗缺损，对产量的提高也没有明显的作用[22–23]。3) 施肥水平　2011 年和 2012 年所施磷肥用量 (40 kg/hm² 左右) 大约为 2009 年磷肥用量 (90 kg/hm² 左右) 的一半，2011 年又因小麦生育期降水分布严重不均以及冬暖现象，导致该年份小麦产量显著低于其他两个年份。对于 2012 年而言，在小麦生长前期降水充足，积温相对偏低，小麦生长后期灌浆成熟时期的降水量少，积温相对偏高，有利于小麦生长。所以，虽然该年份施肥量相对减少，但是，生育期间充足的降水及其合理的分配以及有效的积温条件使小麦产量维持在正常水平。整体看出，在半湿润易旱气候区农田的水肥条件对作物产量至关重要，而且有效积温也是维持作物高产的一个重要因素。

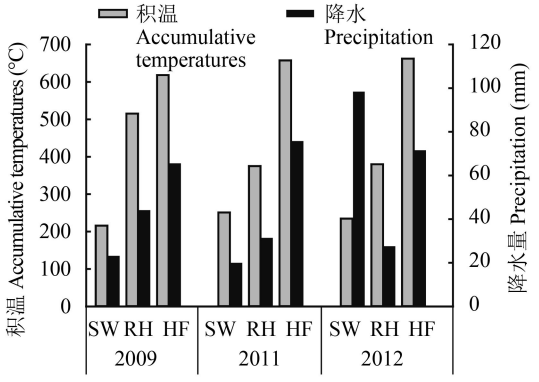


**图 8　2009、2011 和 2012 年小麦生育期降水及积温**

**Fig. 8　Precipitation and accumulative temperatures during wheat growth period in 2009, 2011 and 2012**

[注(Note)：SW—冬小麦苗期至越冬期 Seeding stage–wintering stage；RH—返青期至抽穗期 Returning green stage–heading stage；HF—抽穗期至灌浆期 Heading stage–filling stage of wheat.]

## 3 讨论与结论

1) 经过 10 年的试验监测发现，施肥能够明显改变耕层 (0—20 cm) 土壤的养分含量，这与大多数研究结果一致[24]。试验初始时 (2004 年) 各监测区土壤养分含量不同，CK 监测区的土壤有机质、全氮、速效氮和速效钾含量均高于其他施肥监测区。然而经过 10 年的试验监测后发现，无肥监测区各土壤养分含量在所有监测区中最低，而 HF、HM 和 NM 监测区土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量均得到不同程度的提高，这说明长期不施肥必然会导致土壤肥力降低，也在一定程度上表明长期施用肥料对于维持和提高土壤肥力具有重要意义。在本研究中，虽然农民地块监测区 (NM) 的各种肥料用量普遍高于试验监测区，但 10 年后发现，其除了土壤速效钾含量增加显著外，土壤全氮、有效磷和有机质含量增加都不明显，这在一定程度上反映出目前当地农田存在过量施肥的现象，虽然不会导致土壤肥力下降，但若长久如此，可能会造成土壤潜在污染，建议应适当减量施肥。农民地块土壤速效钾含量明显增加与农家肥以及草木灰的施用有关。

大量研究表明，单施化肥以及化肥有机肥配施均能够提高土壤碱解氮含量[25]，而本研究表层 (0—20 cm) 碱解氮监测结果却有所不同，除了 HF 监测区的碱解氮水平有所提高外，HM 和 NM 监测区均有所下降，经分析原因主要包括两方面：一是本研究区域属于旱作雨养农业区，年降水量基本处于 400～800 mm 之间，夏季 (6～9 月份) 降雨量占全年降雨量的 60%～80%，极容易造成土壤水溶性氮 (水溶性有机氮、$NO_3^-$-N 等) 向下淋溶[26–28]，氮肥施用量越多，$NO_3^-$-N 深层累积就越严重，累积深度一般在 100—300 cm 之间[29–30]。HM 和 NM 监测区的施肥量均大于 HF 监测区，有机肥的施入增加了土壤中水溶性氮素的含量，进一步增加了氮素淋失风险。二是化肥有机肥配施增加了土壤中氮素的反硝化作用。夏季 (6～9 月份) 的高强度降水量容易造成表层土壤局部或暂时性的厌氧环境，为氮素的反硝化提供了条件[31]；同时，有机肥的施入增加了微生物活性，也促进了反硝化作用的进行[32]。

2) 氮素在不施肥 CK 监测区亏损 80% 以上，HF 监测区亏损 3%，在 HM 和 NM 监测区分别盈余 11% 和 19% 左右；磷素在 CK 监测区亏损 90% 以上，其他施肥监测区盈余 300%～850% 之间；钾素在 CK 监测区和 HF 监测区分别都亏损 90% 以上，在 HM 和 NM 监测区分别盈余 62% 和 105% 左右。总体来看，化肥和有机肥配施，对于土壤肥力的维持最有利；单施化肥会造成土壤 钾素亏缺严重。值得注意的一点，在土壤养分变化趋势分析中，HM 和 NM 监测区表层土壤碱解氮含量降低，而在农田养分平衡分析中二者都表现出氮素盈余，这再次提醒我们化肥有机肥监测区表层土壤氮素的增加，可能存在氮素向深层淋溶带来的环境问题，因此建议当地适当地减少肥料用量，避免土壤氮素过多地向土壤深层积累。

3) 通过对比不同监测区小麦平均产量发现，相比于 CK 不施肥区，化肥单施或化肥有机肥配施都能够显著增加小麦产量，单施化肥比不施肥监测区增产 85%～260%，化肥有机肥配施比不施肥区增产 60%～290%，可以看出，氮磷配施与氮磷有机肥配施对小麦增产差异不显著，但都可以使土壤维持较高的生产力。大量研究报道，化肥和有机肥都对作物起到相同或持续的增产效果，连续使用化肥并没有影响土壤的生产力[33–35]。对于农民地块 (NM) 来说，其较高的肥料投入理应获得高于其他监测区的小麦产量，但研究结果表明，该监测区的小麦产量与 HF 监测区相比，没有呈现出显著差异性，说明该地区农民地的肥料用量可能高出了小麦生长需要，继续如此施肥或是增加肥料用量不但不能实现小麦产量的持续增长，而且还会造成肥料资源的浪费，甚至可能带来环境风险，应适当控制当地农民肥料的施用。

不同监测区之间，同一监测区不同年际之间的小麦产量波动很大，经分析这与施肥水平、作物生育期降水量以及生育期积温有关，当小麦生长前期气温较低，降水量偏高，后期气温较高，降水量偏少时，利于作物获得高产。从粮食生产经济效益方面分析，农民地的高施肥量不能获得小麦产量的显著增加，建议当地农民改变目前的施肥习惯，可考虑适当减少肥料用量，降低投入成本，以便获得更高的经济效益。

**参 考 文 献：**

[1] 摄晓燕, 谢永生, 郝明德, 等. 黄土旱塬长期施肥对小麦产量及养分平衡的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(6): 27–32.
She X Y, Xie Y S, Hao M D, *et al*. Effect of long-term fertilization on wheat yield and nutrient balance in dryland of the Loess Plateau [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(6): 27–32.

[2] 党廷辉, 高长青, 彭琳, 李玉山. 长武旱塬轮作与肥料长期定位试验[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 61–65.

Dang T H, Gao C Q, Peng L, Li Y S. Long-term rotation and fertilizer experiments in Changwu rainfed highland [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(1): 61–65.

[ 3 ] 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 field experiments on the field-responce of crops to water and fertility in the south of the Loess Plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 1990, 27(1): 1–7.

[ 4 ] 张仁陟, 李小刚, 胡恒觉. 施肥对提高旱地农田水分利用效率的机理[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(3): 221–226.
Zhang R Z, Li X G, Hu H J. The mechanism of fertilization in increasing water use efficiency [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1999, 5(3): 221–226.

[ 5 ] 成婧, 吴发启, 云峰, 等. 渭北旱塬坡耕地玉米–苜蓿间作对土壤养分和产量的影响[J]. 水土保持通报, 2013, 33(4): 228–232.
Cheng J, Wu F Q, Yun F, *et al*. Effect of intercropping corrn and alfalfa on soil nutrients and yield of sloping field in Weibei dryland [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(4):228–232.

[ 6 ] 高祥照, 马文奇, 崔勇, 等. 我国耕地土壤养分变化与肥料投入状况[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(4): 363–369.
Gao X Z, Ma W Q, Cui Y, *et al*. Changes of soil nutrient contents and input of nutrients in arable of China [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(4): 363–369.

[ 7 ] 戴健, 王朝辉, 李强, 等. 氮肥用量对旱地冬小麦产量及夏闲期土壤硝态氮变化的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 956–965.
Dai J, Wang Z H, Li Q, *et al*. Effects of nitrogen application rate on winter wheat yield and soil nitrate nitrogen during summer fallow season on dryland [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(5): 956–965.

[ 8 ] 曲环, 赵秉强, 陈雨海, 等. 灰漠土长期定位施肥对小麦品质和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(1): 12–17.
Qu H, Zhao B Q, Chen Y H, *et al*. Effect of long-term fertilization on wheat quality and yield in grey desert soil [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(1): 12–17.

[ 9 ] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil agricultural-chemical analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[10] 詹其厚, 陈杰. 基于长期定位试验的变性土养分持续供给能力和作物响应研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 124–132.
Zhan Q H, Chen J. Continual nutrient supplying capacity and crop responses based on long-term fertilizer experiment in vertisol [J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(1): 124–132.

[11] 何晓雁, 郝明德, 李慧成, 蔡志凤. 黄土高原旱地小麦施肥对产量及水肥利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1333–1340.
He X Y, Hao M D, Li H C, Cai Z F. Effects of different fertilization on yield of wheat and water and fertilizer use efficiency in the Loess Plateau [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(6): 1333–1340.

[12] 张夫道. 长期施肥条件下土壤养分的动态和平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 1996, 2(1): 39–48.
Zhang F D. Dynamic and balance of soil nutrients under long-term fertilization conditions [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1996, 2(1): 39–48.

[13] 关焱, 宇万太, 李建东. 长期施肥对土壤养分库的影响[J]. 生态学杂志, 2004, 23(6): 131–137.
Guan Y, Yu W T, Li J D. Effects of long-term fertilization on soil nutrient pool [J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(6): 131–137.

[14] 古巧珍, 杨学云, 孙本华,等. 长期定位施肥对塿土耕层土壤养分和土地生产力的影响[J]. 西北农业学报, 2004, 13(3): 121–125.
Gu Q Z, Yang X Y, Sun B H, *et al*. Effects of long-term fertilization on soil nutrition and land productivity in topsoil of Loess soil [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2004, 13(3): 121–125.

[15] Darusman M, Stone L R, Whitney D A, *et al*. Soil properties after twenty years of fertilization with different nitrogen sources [J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55: 1097–1100.

[16] Zhang Y P, Liu Z H, Li Y, *et al*. Effects of long-term located fertilization on wheat yield and soil nutrients of three types of soils in Shandong Province [J]. Agricultural Science & Technology, 2014, 15(3): 400–406, 426.

[17] 刘荣乐, 金继运, 吴荣贵, 梁鸣早. 我国北方土壤-作物系统内钾素循环特征及秸秆还田与施钾肥的影响[J].植物营养与肥料学报, 2000, 6(2): 123–132.
Liu R L, Jin J Y, Wu R G, Liang M Z. Study on the characteristics of potassium cycling in different soil-crop systems in northern China [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(2): 123–132.

[18] 劳秀荣, 孙伟红, 王真, 等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 618–623.
Lao X R, Sun W H, Wang Z, *et al*. Effect of matching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(4): 618–623.

[19] 王旭刚. 黄土高原旱地农田生态系统N、P、K平衡研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2004.
Wang X G. Study of nutrients balance of semi-arid ecosystem in loess plateau [D]. Yangling, Shanxi: MS Thesis of Northwest A &F University, 2004.

[20] 刘自成, 杨虓, 李浩. 气象因素对冬小麦生育和产量影响研究[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(34): 12180–12183.
Liu Z C, Yang X, Li H. Effects of meteorological factors on fertility and yield of winter wheat [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(34): 12180–12183.

[21] 蔡剑, 姜东. 气候变化对中国冬小麦生产的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1726–1733.
Cai J, Jiang D. The effect of climate change on winter wheat production in China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30 (9): 1726–1733.

[22] 蒲金涌, 姚玉璧, 马鹏里, 等. 甘肃省冬小麦生长发育对暖冬现象的响应[J]. 应用生态学报, 2007, 18(6): 1237–1241.
Pu J Y, Yao Y B, Ma P L, *et al*. Responses of winter wheat growth to winter warming in Gansu Province [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(6): 1237–1241.

[23] Guo R P, Lin Z H, Mo X G, Yang C L. Responses of crop yield and water use efficiency to climate change in the North China Plain [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97: 1185–1194.

[24] 陈磊, 郝明德, 戚龙海. 长期施肥对黄土旱塬区土壤–植物系统中氮、磷养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 1006–1012.

Chen L, Hao M D, Qi L H. Effects of long-term fertilization on nutrient variety of soil and plant systems in dry-land of Loess Plateau[J].Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(6): 1006–1012.

[25] Gong W, Yan X Y, Wang J Y, *et al*. Long-term applications of chemical and organic fertilizers on plant-available nitrogen pools and nitrogen management index [J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, 47: 767–775.

[26] Halvorson A D, Reule C A. Nitrogen fertilizer requirements in an annual dryland cropping system[J]. Agronomy Journal,1994, 86: 315–318.

[27] Westerman R L, Boman R K, Raun W R, Johnson G V. Ammonium and nitrate nitrogen in soil profiles of long-term winter wheat fertilization experiments [J]. Agronomy Journal, 1994, 86: 94–99.

[28] 郝明德, 樊军, 党廷辉. 黄土高原旱地定位施肥对产量与土壤硝态氮累积的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(增刊): 294–299.
Hao M D, Fan J, Dang T H. Effects of location applying fertilizer on grain yield of wheat and $NO_3^-$-N accumulation in soil profile in dry land of Loess Plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(Suppl.): 294–299.

[29] Halvorson A D, Wienhold B J, Black A L. Tillage and nitrogen fertilization influence grain and soil nitrogen in an annual cropping system [J]. Agronomy Journal, 2001, 93: 836–841.

[30] 郭胜利, 张文菊, 党廷辉, 等. 干旱半干旱地区农田土壤$NO_3$-N深层积累及其影响因素[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 584–591.
Guo S L, Zhang W J, Dang T H, *et al*. Accumulation of $NO_3$-N in deep layers of dry farmland and its affecting factors in arid and semi-arid areas [J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(4): 584–591.

[31] 施振香. 上海城郊土壤硝化、反硝化作用及其影响因素研究[D]. 上海: 上海师范大学硕士论文, 2010.
Shi Z X. Soil nitrification, denitrification and factors in Shanghai suburbs [D]. Shanghai: MS Thesis of Shanghai Normal University, 2010.

[32] Breuer L, Kiese R, Butterbach-Bahl K. Temperature and moisture effects on nitrification rates in tropical rain-forest soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66: 834–844.

[33] 王改玲, 郝明德, 李燕敏. 基于黄土旱塬区长期定位试验的施肥效益分析[J].干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 129–132.
Wang G L, Hao M D, Li Y M. Analysis of the benefit of fertilizer based on long-term fertilization in dry-land of Loess Plateau [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(3): 129–132.

[34] 林治安, 赵秉强, 袁亮, Hwat Bing-So.长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2809–2819.
Lin Z A, Zhao B Q, Yuan L, Hwat B S. Effects of organic manure and fertilizers long-term located application on soil fertility and crop yield [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(8): 2809–2819.

[35] 章孜亮, 刘金山, 王朝辉, 等. 基于土壤氮素平衡的旱地冬小麦监控施氮[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1387–1396.
Zhang Z L,Liu J S,Wang Z H, *et al*. Nitrogen recommendation for dryland winter wheat by monitoring nitrate in 1 m soil and based on nitrogen balance [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(6): 1387–1396.