

# 长期施用化肥对黄土丘陵区坡地土壤物理性质的影响

李强<sup>1</sup>, 许明祥<sup>1,2</sup>, 齐治军<sup>2</sup>, 王恒威<sup>2</sup>

(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西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 研究了 17 年长期定位施用化肥对黄土丘陵区坡耕地土壤物理性质的影响。结果表明: 长期施用化肥, 表层 (0—15 cm) 土壤物理性状没有明显退化, 中层 (15—30 cm) 和下层 (30—45 cm) 土壤物理性质有不同程度的改善; 长期施用化肥对水稳性团聚体影响大于土壤容重和孔隙度; 团聚体含量和稳定性在表层、中层和下层土壤中均得到不同程度地提高; 容重和孔隙度在表层和下层土壤中略有恶化, 在中层土壤上得到改善。长期不同水平化肥单施对土壤物理性状无显著影响, 而氮磷配施交互作用明显高于单施处理, 且施肥效果为氮磷配施 > 氮肥处理 > 磷肥处理。处理 N2P1 最有利于改善研究区土壤物理性状, 提高土壤的稳定性。

**关键词:** 黄土丘陵区; 长期定位试验; 化肥; 坡耕地; 土壤物理性质

中图分类号: S152 文献标识码: A 文章编号: 1008-505X(2011)01-0103-07

## Effects of long-term chemical fertilization on soil physical properties of slope lands in the Loess Hilly Region

LI Qiang<sup>1</sup>, XU Ming-xiang<sup>1,2</sup>, QI Zhi-jun<sup>2</sup>, WANG Heng-wei<sup>2</sup>

(1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau / 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** Based on 17 years field experiments, the effects of long-term located application of chemical fertilizer on soil physical properties were studied in cultivated slope lands in the hilly Loess Plateau of China. The results indicate that under the condition of long-term chemical fertilization, soil physical properties in the surface layer (0—15 cm) do not show a trend of degradation, and those in the middle layer (15—30 cm) and lower layer (30—45 cm) are improved in different degrees. The influence of chemical fertilizer on soil water-stable aggregate is stronger than that on soil density or soil porosity. Soil aggregate content and aggregate stability are improved in all the three soil layers, while the soil density and soil porosity are slightly degraded in the surface and lower soil layer, but are improved in the middle layer. The long-term different levels of single-applying fertilization have no significant effect on the soil physical properties, however, the interaction of combined applying of nitrogen and phosphorus is obviously higher than that of the single-applying. The rank of the effects of chemical fertilizer on soil physical properties under different fertilizer treatments is combined applying > single-nitrogen > single-phosphorus. The N2P1 is the optimal fertilizer treatment in improving soil properties as well as sustaining soil stability in the research region.

**Key words** loess hilly region; long-term field experiment; chemical fertilizer; slope cultivated land; soil physical property

收稿日期: 2010-03-15 接受日期: 2010-04-17

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2007CB407205); 中科院知识创新重要方向项目 (KZCX2-YW-443); 中科院“西部之光”人才培养计划项目资助。

作者简介: 李强 (1986—), 男, 陕西子洲人, 硕士研究生, 主要从事侵蚀环境土壤质量演变研究。E-mail: mrlqiang@163.com

\* 通讯作者 Tel: 029-87012411, E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn

土壤质量是农业生产的物质基础,土壤物理性质是土壤质量的重要组成部分。土壤物理性质不仅影响土壤保持和供应水肥的能力,对调控土壤气热状况和地表径流的产生也有重要作用。长期不合理的土地利用及土壤侵蚀导致黄土丘陵区土壤质量明显退化,水肥俱缺严重制约着该区农业生产<sup>[1]</sup>。改善土壤物理形状,提高土壤蓄水保肥能力对当地农业生产至关重要。近年来,由于该区有机肥肥源不足、新型肥料推广困难以及基本农田建设加强等现象使得化肥在一定时期内仍将是当地的首选肥料<sup>[2-3]</sup>。因此,研究长期施用化肥对土壤质量的影响以及选择科学的施肥方案对该区农业可持续发展具有特殊意义。国外研究表明,长期单施化肥可使土壤容重增加,土壤孔隙度和水分含量降低,而氮磷配施可改善土壤理化性质<sup>[4-6]</sup>。国内由于试验条件有别,各地试验结果不完全一致<sup>[1]</sup>。如在栗褐土<sup>[1]</sup>、红壤<sup>[7]</sup>上研究发现,长期施用化肥导致土壤物理性质恶化;而在黄潮土<sup>[8]</sup>、棕壤<sup>[9]</sup>上的研究却发现土壤物理性质得到改善。其原因可能是土壤肥力基础、施肥水平以及作物生长状况不同而造成。同时,大多研究主要集中在平地 and 表层土壤<sup>[8-10]</sup>,而关于黄土区坡耕地长期施用化肥对不同层次黄绵土物理性质的影响研究报道较少<sup>[1-11]</sup>。因此,本试验基于 17年谷子—糜子—谷子—黄豆轮作基础上,进行了长期施用化肥对黄土丘陵区坡耕地 0—45 cm 土层土壤容重、孔隙度和水稳性团聚体等物理性状的影响研究,旨在为当地合理施肥,提高土壤质量,促进农业可持续生产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于 1992年在中国科学院安塞水土保持综合试验站进行。研究区属典型的黄土丘陵沟壑区,气候属暖温带半干旱季风气候。平均海拔 1200 m,相对高差 100~300 m,年均气温 8.8℃,年均降水量 505.3 mm,无霜期 160 d 左右。地带性土壤为黑垆土,由于严重的水土流失,黑垆土损失殆尽,土壤以黄土母质上发育的黄绵土(钙质干润锥形土)为主,土壤质地为粉砂壤土,耕层土壤容重 1.15~1.35 g/cm<sup>3</sup>,pH 8.4~8.6,有机质含量 3.5~4.8 g/kg。

试验设在安塞站坡耕地上,坡度为 19°,坡向正东。采用 2×3 两因素三水平完全随机设计,共 10 个处理,即: BL、NOPQ、NOP1、NOP2、N1PQ、N1P1、N1P2、N2PQ、N2P1、N2P2,2次重复,小区面积为 34

m×20 m。BL为裸地,不种作物也不施肥。氮肥为尿素, N0 为不施氮, N1 每年施 N 55.2 kg/hm<sup>2</sup>, N2 每年施 N 110.4 kg/hm<sup>2</sup>。磷肥为三料磷肥, P0 为不施磷肥, P1 每年施 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 45 kg/hm<sup>2</sup>, P2 每年施 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg/hm<sup>2</sup>。作物为谷子—糜子—谷子—黄豆轮作,采样年度种植谷子。

### 1.2 样品采集与测定

土壤样品于 2009 年 10 月谷子收割前采集,为了提高研究结果的可靠性,分别将每个小区划分为两个微区,每个微区挖取土壤剖面,然后将每个剖面按 15 cm 间隔从上到下分为 3 层,即 0—15、15—30、30—45 cm,每一处理挖 4 个剖面。土壤容重和孔隙度测定采用常规方法<sup>[12]</sup>,土壤团聚体利用沙维诺夫湿筛法测定<sup>[11]</sup>。

团聚体平均质量直径(MMD)和几何平均直径(GMD)的计算采用如下公式<sup>[13]</sup>:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

$$GMD = \text{Exp} \left[ \frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln R_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right]$$

式中:  $R_i$  为某级团聚体的平均直径;  $w_i$  为该级别团聚体占土壤样品总量的质量百分含量。

氮磷配合的交互效应用连应值来表示:

$$\text{连应值} = \frac{[(N + P) - \text{NOP0}] / [(N - \text{NOP0}) + (P - \text{NOP0})]}{1}^{[14]}$$

其数值为正(负)值,表示氮磷交互作用为正(负)效应,且数值越大表示正(负)效应越大。

数据采用 SPSS 13.0 软件分析,差异显著性检验采用 LSD 法 ( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 长期施用化肥对土壤容重的影响

与裸地(BL)相比,长期种植作物但未施肥处理(NOP0)0—15、15—30和 30—45 cm 土层容重分别下降了 2.4%、1.6% 和 7.2%,但未达到显著水平(图 1),反映了种植作物在一定程度上可以降低土壤容重,具有疏松土壤的作用。

与 NOP0 相比,长期施用化肥表层(0—15 cm)土壤容重均有不同程度的增加,增幅为 0.8%~3.2%,平均增加 1.6%。其变化虽未达到显著水平,但表明长期施用化肥表层土壤有硬化趋向。类似的研究结果在南方丘陵区已有报道<sup>[15]</sup>,但部分地区长期施用化肥降低了土壤(0—20 cm)容重<sup>[8-15]</sup>,这可能与研究区地形、土壤性质及施肥水平等不同

有关。就中层(15—30 cm)土壤而言,除 N1P0处理容重有所增大外,其他施肥处理土壤容重均有不同程度的减小,减幅为 0.8% ~ 5.5%,平均减小 2.4%,其中以 N2P1 配施处理土壤容重下降最大,降幅达 8.4%,与处理 N0P0相比达到了显著水平。不同施肥处理对降低中层土壤容重的效应依次为 N2P1 > N1P2 > N2P2 > 其它。表明氮磷配施对疏松中层土壤效果好于单施,可能与氮磷配施促进根系发育有关<sup>[16]</sup>。对于下层(30—45 cm)土壤,与 N0P0

处理相比, N1P2和 N2P1处理都不同程度地增加了该层土壤容重。

可见,与裸地相比,长期种植作物能降低土壤容重。长期施用化肥后表层和底层土壤容重略有增加,而中层土壤容重减小,其中氮磷单施在每个土层均随着施肥量的增加,土壤容重先增大后减小,但差异均不显著;而氮磷配施,尤其是 N2P1 与 N0P0处理相比,显著降低了中层土壤容重。

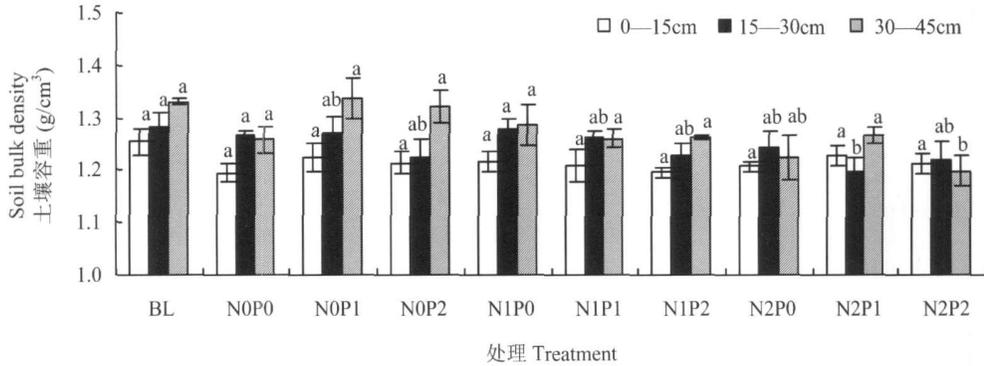


图 1 长期施用化肥对坡耕地土壤容重的影响

Fig 1 Influences of long-term chemical fertilization on soil bulk density in slope cultivated lands

[注 (Note): 柱上不同字母表示差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars mean significant at 5% level BL—裸地 Bare land.]

2.2 长期施用化肥对土壤孔隙度的影响

图 2看出,与裸地 (BL)处理相比, N0P0处理,表层、中层和底层土壤孔隙度均略有增加(增幅分别为 4.3%、1.2% 和 5.4%),可能是作物根系疏松土壤,而土壤容重的下降进一步引起土壤孔隙度的增加<sup>[17-18]</sup>。

长期施用化肥后,与 N0P0处理相比,0—15和 30—45 cm 土层孔隙度略有下降(0.8% 和 0.7%);而 15—30 cm 土层则略有增加(1.0%)。化肥单施,表层土壤孔隙度随着施肥量(N 或 P)的增加均

呈现出先下降后增高的趋势,可能与不同化肥施用量下作物生长及有机质的积累有关<sup>[5]</sup>;氮磷配施处理下,与单施处理相比,孔隙度略有增加(0.3%)。以上差异均未达到显著水平。

总之,长期种植作物和施用化肥能够通过影响孔隙组成而改变土壤物理环境<sup>[19]</sup>。单施化肥会略微降低表层土壤孔隙度,而化肥配施土壤孔隙度略有增加。对中层和底层土壤,施用化肥后土壤孔隙度整体保持稳定或增加趋势,这一现象在肥料配施,尤其是 N2P1 处理下表现最为突出。

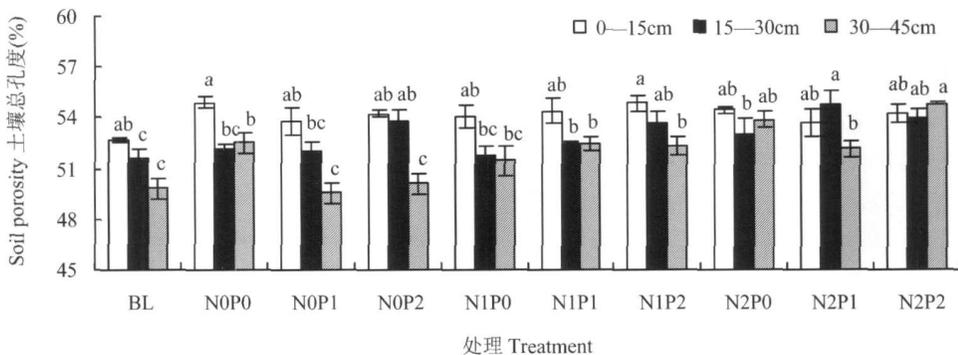


图 2 长期施用化肥对坡耕地土壤孔隙度的影响

Fig 2 Influences of long-term chemical fertilization on soil porosity in slope cultivated lands

[注 (Note): 柱上不同字母表示差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars mean significant at 5% level BL—裸地 Bare land.]

## 2.3 长期施用化肥对土壤团聚体的影响

2.3.1 土壤团聚体数量特征 > 0.25 mm 的团聚体被称为土壤团粒结构体,是土壤中最好的结构体,土壤退化首先将表现出团粒结构的破坏和消失。图 3 看出,与裸地 (BL)相比,NOPO处理下团聚体含量在

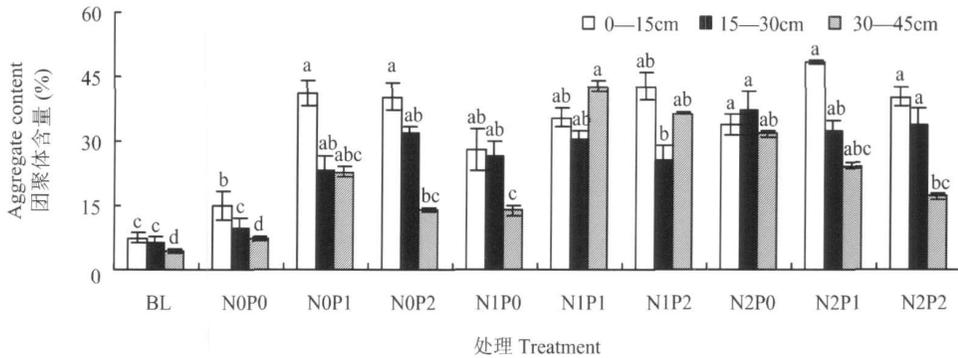


图 3 长期施用化肥对坡耕地土壤团聚体的影响

Fig 3 Influences of long-term chemical fertilization on soil aggregate in slope cultivated lands

[注 (Note): 柱上不同字母差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars mean significant at 5% level] BL—裸地 Bare land ]

与处理 NOP0相比,长期施用化肥后, > 0.25 mm 水稳性团聚体在 0—15、15—30和 30—45 cm 土层分别增加了 88.6% ~ 225.5%, 142.7% ~ 288.5% 和 87.8% ~ 480.9%, 平均增幅 160.5%、214.6% 和 245.8%。不同施肥处理对表层土壤团聚体含量的增加效果依次为 N2P1> N1P2> 其它,其中 N2P1对团聚体含量的增加达到极显著水平。就中层和下层土壤, N2P1处理团聚体含量分别为 NOP0处理的 3.4和 3.3倍,差异显著。说明氮磷配施,尤其是处理 N2P1或 N1P2在土层 0—15 cm 内对增加团聚体含量比单施处理 (N 或 P)效果好,如 N2P1与氮、磷单施 (N2P0或 NOP1)相比,土壤团聚体含量分别增加约 1.4和 1.2倍。同时,在单施化肥的条件下,不同施肥水平土壤团聚体含量在表层土壤中也表现出差异,如处理 N2P0比 N1P0增加了 20.6%,而处理 NOP2比 NOP1降低了 1.0%。可能是氮肥施用量与土壤中的有机质积累有关<sup>[10]</sup>。而长期单施磷肥容易引起氮素亏缺,土壤结构退化<sup>[5,20]</sup>,这一结果与赵云英等<sup>[21]</sup>的研究相吻合。

团聚体质量好坏主要是通过各级团聚体比例来反映<sup>[11]</sup>,良好的土壤结构往往依赖于 1~ 10 mm 水稳性团聚体<sup>[22]</sup>。图 4可见,相同粒级团聚体在不同处理间存在差异,相对于裸地 (BL),NOP0处理土壤 > 5和 5~ 2mm 大粒级团聚体含量分别增加了 118.7% 和 42.8%; 而粒径 2~ 1、1~ 0.5、0.5~ 0.25mm 团聚体含量有不同程度的下降,降幅分别为 4.3%、16.7% 和 21.7%。反映了作物对土壤结构

土壤剖面 (0—45 cm)表现出显著增加趋势,尤以 0—15 cm 土层增幅最大,达 97.3%。主要是作物不仅通过根系及其残留物培肥土壤而且作物本身对阻碍径流冲刷表层土壤起着重要作用<sup>[5,20]</sup>,反映了生物在培肥土壤、保持水土中的重要性。

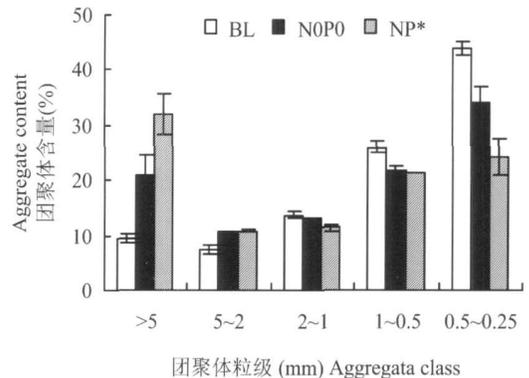


图 4 不同处理下各级团聚体分布

Fig 4 The distribution of different class aggregate under various treatments

[注 (Note): 各级团聚体含量按照深度权重转化得到 The aggregate contents came from weight value according to the soil depth NP\* 为 8种施肥处理的平均值 Average value of eight fertilization treatments BL—裸地 Bare land ]

的改善主要是作物根系及其残留物通过增加有机质含量将小粒径团聚体胶结为大粒径团聚体的过程<sup>[15,23]</sup>。

施用化肥对不同粒级团聚体的影响与上述规律一致。 > 5和 5~ 2mm 团聚体含量分别增加了 54.2% 和 3.4%; 而粒径 2~ 1、1~ 0.5、0.5~ 0.25mm 团聚体分别下降 13.03%、0.47%、29.23%,但均未达到显著水平。可见,长期施用化肥后,水稳性团聚体以小团聚体为主改变为大团聚体占绝对优势,说明施用化肥改善了土壤结构,使团聚体的稳定性增强。

综上所述, 长期种植作物和施用化肥主要是通过提高大粒径团聚体含量 ( $> 2 \text{ mm}$ ), 降低其他级别 ( $2 \sim 0.25 \text{ mm}$ ) 团聚体含量而使土壤结构得到改善。单施不同水平化肥对土壤团聚体数量的影响未达到显著差异, 而肥料配施处理, 尤其是处理 N2P1 显著地增加了水稳性团聚体含量。

2.3.2 土壤团聚体大小 不同粒径团聚体对土壤养分的保持、供应、孔隙组成等具有不同的作用, 因此在团聚体总量的基础上, 团聚体大小分布状况与土壤质量关系更加密切。平均质量直径 (MMD) 和几何平均直径 (GMD) 是反映土壤团聚体大小分布的常用指标。土壤 MMD 是基于不同粒径团聚体的质量和大小而拟定的; 土壤 GMD 反映团聚体大小分布状况, MMD 和 GMD 值越大表示土壤团聚体团聚度越高, 稳定性越好<sup>[20]</sup>。表 1 看出, 与裸地相比, 处理 NOP0 显著增加了 0—15 cm 土层 MMD 和 GMD; 15—30 和 30—45 cm 土层 MMD、GMD 分别增大 16.5% 和 20.3%、17.8% 和 34.8%, 反映了长期种植作物可以

增大团聚体 MMD 和 GMD, 改善土壤结构<sup>[11]</sup>。

与 NOP0 处理相比, 长期施用化肥 0—15、15—30、30—45 cm 土层的 MMD 和 GMD 分别增加 11.5% 和 55.0%、110.8% 和 121.1%、84.9% 和 62.9%。方差分析表明, 长期施用化肥的处理表层与下层土壤 MMD、GMD 差异均达到显著水平, 而表层与中层, 中层与下层土壤 MMD、GMD 间无明显差异。与单施化肥相比, 配施处理 0—15 cm 土层 MMD 和 GMD 分别增大 26.1% 和 36.6%, 而相对于表层土壤, 中层土壤 MMD 和 GMD 均有下降趋势, 但高于下层土壤 MMD 和 GMD, 体现了团聚体大小在土壤剖面上递减的分布规律<sup>[11]</sup>。可见, 长期种植作物和施用化肥能增大土壤团聚体粒径。单施化肥不同水平对团聚体粒径的影响无显著差异, 但化肥配施处理, 尤其是 N2P1 与 NOP0 处理相比, 显著增加了表层土壤 MMD 和 GMD, 中层土壤上 MMD 和 GMD 分别增大了约 83.3%、93.0%, 下层土壤变化较小, 但整体趋于改善。

表 1 长期施用化肥对土壤剖面团聚体平均质量直径 (MMD)、几何平均直径 (GMD) 的影响 (mm)

Table 1 The effect of long-term chemical fertilization on the MMD and GMD in soil profiles

处理 Treatment	0—15 cm		15—30 cm		30—45 cm	
	MMD	GMD	MMD	GMD	MMD	GMD
BL	2.0 ± 0.62 d	1.02 ± 0.18 c	1.03 ± 0.08 c	0.59 ± 0.01 c	0.9 ± 0.02 b	0.46 ± 0.39 c
NOP0	2.44 ± 0.25 bc	1.20 ± 0.06 b	1.20 ± 0.00 bc	0.71 ± 0.05 c	1.06 ± 0.02 b	0.62 ± 0.01 bc
NOP1	3.09 ± 0.10 ab	1.82 ± 0.14 ab	2.31 ± 0.04 ab	1.36 ± 0.57 bc	2.07 ± 0.01 a	1.24 ± 0.39 ab
NOP2	2.80 ± 0.23 b	1.47 ± 0.01 ab	2.73 ± 0.05 a	1.71 ± 0.01 a	1.08 ± 0.11 b	0.63 ± 0.06 bc
N1P0	2.06 ± 0.21 cd	1.83 ± 0.24 ab	2.99 ± 0.00 a	1.90 ± 0.10 a	1.25 ± 0.01 b	0.49 ± 0.06 c
N1P1	2.39 ± 0.06 c	2.26 ± 0.23 a	2.52 ± 0.15 ab	1.51 ± 0.27 b	2.96 ± 0.15 a	0.90 ± 0.04 b
N1P2	3.24 ± 0.40 a	1.99 ± 0.02 a	2.02 ± 0.04 b	1.20 ± 0.27 bc	1.60 ± 0.11 ab	1.20 ± 0.16 ab
N2P0	1.68 ± 0.34 d	1.82 ± 0.55 ab	2.55 ± 0.01 ab	1.60 ± 0.51 ab	3.10 ± 0.05 a	1.02 ± 0.39 ab
N2P1	3.71 ± 0.26 a	2.36 ± 0.14 a	2.20 ± 0.05 ab	1.37 ± 0.50 bc	2.29 ± 0.12 a	1.47 ± 0.12 a
N2P2	2.80 ± 0.83 b	1.29 ± 0.06 b	2.90 ± 0.06 a	1.87 ± 0.10 a	1.29 ± 0.03 b	0.87 ± 0.12 b
均值 Avg <sup>1)</sup>	2.72 ± 0.30 b	1.86 ± 0.19 a	2.53 ± 0.00 ab	1.57 ± 0.29 ab	2.04 ± 0.07 a	0.85 ± 0.12 b

注 (Note): 1) 8 个施肥处理的平均值 Average values of eight fertilizer treatments MMD—平均质量直径 Mean mass diameter GMD—几何平均直径 Geometric mean diameter BL—裸地 Bare land 同列数据后不同字母差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters are significant at 5% level

### 3 讨论

1) 黄土丘陵区坡耕地面积广大, 但是肥沃的地带性土壤基本被侵蚀殆尽, 现存风成黄绵土肥力低下, 自上世纪 80 年代以来, 人们主要使用化肥来维持

和提高粮食生产及土壤肥力。化肥对土壤物理性质的影响主要包括作物对肥料中不同电荷的离子的选择性吸收、土壤对不同离子的吸附作用差异、离子的移动性, 肥料中的杂质离子的作用可能会导致土壤物理性质恶化<sup>[24]</sup>, 但是施肥能够促进作物生长发育、增

加了有机物的归还量,进而改善了土壤物理性质<sup>[5]</sup>。长期施用化肥对土壤物理性质的影响是以上两种作用的综合结果,而这种结果可能因土壤类型、管理措施、作物种类等不同而异<sup>[21]</sup>。因此,在土壤肥力偏低、产量不高的土壤上,由于原来的有机质循环量很低,施用化肥可大大改善作物的生长状况,从而增加了有机质的循环,提高了有机质含量,改善了土壤物理性质<sup>[8-9]</sup>;而在高肥力土壤上,施用化肥增加的有机质归还量就可能不足以维持原来的有机质循环量,从而导致土壤有机质含量下降与土壤物理性质变差<sup>[7]</sup>。如在低肥力的黄绵土上长期施用化肥,土壤有机质比 N0P0处理平均增加 4.7% (表 2);而有机质循环量的提高促进了土壤物理性质的改善<sup>[1]</sup>。所以,单施化肥是提高土壤肥力还是造成土壤退化,不能一概而论,而应该根据土壤基础条件、施肥与作物生长状况等条件进行具体分析,不同地区的不同研究结果可能正是这个原因所造成。

2) 随着人口的持续增长和经济的快速发展,粮

食安全和耕地资源安全已经成为管理者和科学家共同关注的问题<sup>[2]</sup>,保障基本农田的数量和质量已经提高到战略高度。然而,近年来黄土丘陵区出现有机肥肥源不足、新型肥料推广困难以及基本农田建设加强等使得化肥在未来一定时期内仍将是当地农民的首选肥料<sup>[3]</sup>,而不合理的施用肥料,特别是长期施用化肥可能会带来土壤酸化、结构退化等潜在危害<sup>[10-16]</sup>。因此在研究区农田建设、土地整理,尤其是基本农田肥料投入时,必须注意肥料种类搭配的合理性和量的科学性。本研究在 17年单施化肥后作物的产量随施肥量的增加出现先增加后下降的趋势,而氮磷组合处理 N1P1、N1P2、N2P1 和 N2P2 的交互作用的连应值分别是 0.61、1.31、1.12 和 1.08 均表现出正效应,且以 N1P2 和 N2P1 处理最大。说明肥料配施增产效果大于肥料单施<sup>[6]</sup>,处理 N1P2 和 N2P1 单位粮食产量的土壤侵蚀量分别为 1.90 和 1.85 (表 2)。可见,从粮食生产和土壤保育角度出发,N2P1 处理在研究区效果最佳。

表 2 不同施肥处理土壤有机质含量、作物产量与侵蚀量 (2003年)<sup>[25]</sup>

Table 2 Soil organic matter (SOM) content, yield and soil erosion amount under different fertilizer treatment plots

项目 Item	BL	N0P0	N0P1	N0P2	N1P0	N1P1	N1P2	N2P0	N2P1	N2P2
产量 Yield (kg/hm <sup>2</sup> )	0	432.0	1096.5	957.0	1320.0	1378.5	2013.5	1179.0	2116.0	1804.5
侵蚀量 Erosion amount (t/km <sup>2</sup> )	10.31	2.25	1.54	23.67	5.00	1.70	3.82	1.03	3.93	5.99
土壤有机质 SOM content (g/kg)	3.70	4.04	4.08	4.37	4.17	4.28	4.60	4.17	4.76	4.22

注 (Note): 侵蚀量是 2003年 8月 7日和 8月 24日两次产沙量之和 The soil erosion amount is the sum of sediment amount on Aug 7th and Aug 24th, 2003. BL—裸地 Bare land

3) 评价长期施肥对土壤质量影响的物理指标很多<sup>[8]</sup>,本研究选取土壤容重、孔隙度和水稳性团聚体来评价土壤物理性质的变化虽有一定的局限性,但从土壤结构角度出发,以上指标可以反映土壤物理性状变化趋势<sup>[26]</sup>。此外,该区坡耕地种植制度为一年一熟制,每年除了耕种、收割作物扰动表层 (0—15 cm) 土壤外,作物生长期间除草、追肥等活动也会影响表层土壤结构,因此长期施用化肥对表层土壤物理性质带来的微小变化可以忽略<sup>[1]</sup>。要综合评价该区长期施用化肥对土壤质量的影响,需继续研究施用化肥的原位效应 (包括物理、化学、生物学指标)<sup>[6]</sup>,同时要重视施用化肥引起的异位效应研究 (如富营养化),真正实现该区土壤的肥力质量、环境质量和健康质量的有机结合。

#### 参考文献:

[1] 王改兰, 段建南, 贾宁凤, 廖建平. 长期施肥对黄土丘陵区土

壤理化性质的影响 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(4): 82-89.

Wang G L, Duan J N, Jia N F, Liao J P. Effects of long term fertilization on soil physical and chemical property in Loessilly area [J]. J Soil Water Conserv., 2006, 20(4): 82-89.

[2] 吴飞, 濮励志, 许艳, 朱明. 耕地入选基本农田评价与决策 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 270-276

Wu F, Pu L Z, Xu Y, Zhu M. Evaluation and decision-making for selecting cultivated land into prime farmland [J]. Trans CSAE, 2009, 25(12): 270-276

[3] 赵秉强, 张福锁, 廖宗文, 等. 我国新型肥料发展战略研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(5): 536-545

Zhao B Q, Zhang F S, Liao Z W *et al*. Research on development strategies of fertilizer in China [J]. Plant Nutr Fert Sci, 2004, 10(5): 536-545

[4] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management [J]. Geoderma, 2005, 12(2): 3-22

[5] Haynes R J, Naidu R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: A review [J]. Nutr Cycl Agroecosys., 1998, 51: 123

- 137

- [ 6 ] Masto R E, Chhonkar P K. A ltemative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping fertilization and manure for 31 years in the semi-arid soils of India[ J]. Environ. Monit Ass., 2007, 10: 1777-1785
- [ 7 ] 赖庆旺, 李茶苟, 黄庆海. 红壤性水稻土无机肥连施与土壤结构特性的研究[ J]. 土壤学报, 1992, 29(2): 168-173  
Lai Q W, Li C G, Huang Q H. Effect of continuous application of inorganic fertilizer on soil structure properties of Paddy soil derived from red soil[ J]. Acta Pedol Sin, 1992, 29(2): 168-173
- [ 8 ] 龚伟, 颜晓元, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对华北小麦-玉米轮作土壤物理性质和抗蚀性影响研究[ J]. 土壤学报, 2009, 46(3): 520-525.  
Gong W, Yan X Y, Cai Z C *et al.* Effects of long-term fertilization on soil physical properties and erosion-resistance under wheat-maize rotation system in north China Plain[ J]. Acta Pedol Sin., 2009, 46(3): 520-525.
- [ 9 ] 杨果, 张英鹏, 魏建林, 等. 长期施用化肥对山东三大土类土壤物理性质的影响[ J]. 中国农学通报, 2007, 23(12): 244-250  
Yang G, Zhang Y P, Wei J L *et al.* Effects of long-term chemical fertilization on soil physical properties of three soils in Shandong Province[ J]. Chin. Agric Sci Bull., 2007, 23(12): 244-250
- [ 10 ] Yong Z S, Wang F, Suo R D *et al.* Long-term effect of fertilizer and manure application on soil-carbon sequestration and soil fertility under the wheat-wheat/maize cropping system in northwest China[ J]. Nutr. Cycl. Agroecosys., 2006, 75: 285-295
- [ 11 ] 霍琳, 武天云, 蔺海明, 等. 长期施肥对黄土高原旱地黑垆土水稳性团聚体的影响[ J]. 应用生态学报, 2008, 9(3): 545-550.  
Huo L, Wu T Y, Lin H M *et al.* Effects of long-term fertilization on water-stable aggregates in calcic kastanozem of Loess Plateau [ J]. Chin. J Appl Ecol, 2008, 9(3): 545-550
- [ 12 ] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[ M]. 北京: 科学出版社, 1978 77-88  
Institute of Soil Science, CAS. The determination method of soil physical properties[ M]. Beijing: Science Press, 1978 77-88.
- [ 13 ] 邱莉萍, 张兴昌, 张晋爱. 黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布[ J]. 生态学报, 2006, 26(2): 364-372.  
Qiu L P, Zhang X C, Zhang J A. Distribution of nutrients and enzymes in Loess Plateau soil aggregates after long-term fertilization[ J]. Acta Ecol Sin., 2006, 26(2): 364-372
- [ 14 ] 索东让. 长期定位实验中化肥与有机肥结合效应研究[ J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 71-75.  
Suo D R. Combined fertilization of chemical and organic fertilizers in a long-term position experiment[ J]. Agric. Res. Arid Areas, 2005, 23(2): 71-75
- [ 15 ] Haynes R J, Naidu R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review[ J]. Nutr. Cycl. Agroecosys., 1998, 51: 123-137.
- [ 16 ] 王慎强, 李欣, 徐富安, 钦绳武. 长期施用化肥与有机肥对潮土物理性质的影响[ J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(2): 77-78  
Wang S Q, Li X, Xu F A, Qin S W. Effect of long-term use of organic manure and chemical fertilizers on fluvo-aquic soils physical quality[ J]. Chin. J Eco-Agric., 2001, 9(2): 77-78
- [ 17 ] 郑子成, 李廷轩. 不同土地利用方式下土壤团聚体的组成及稳定性研究[ J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 228-231  
Zhen Z C, Li T X. Study on the composition and stability of soil aggregates under different land use[ J]. J. Soil Water Conserv., 2009, 23(5): 228-232
- [ 18 ] 任伟, 谢世友, 谢德体. 喀斯特山地典型植被恢复过程中的土壤水分生态效应[ J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 128-132.  
Ren W, Xie S Y, Xie D T. Changes of soil moisture ecoeffects during process of typical ecosystem restoration in Karst Mountain [ J]. J. Soil Water Conserv., 2009, 23(5): 128-132
- [ 19 ] 刘杏兰, 高宗. 有机-无机肥配施的增产效应及对土壤肥力影响的定位研究[ J]. 土壤学报, 1996, 33(2): 138-147.  
Liu X L, Gao Z. Effect of combined application of organic manure and fertilizer on crop yield and soil fertility in a located experiment[ J]. Acta Pedol Sin., 1996, 33(2): 138-147
- [ 20 ] Mahboubi A A, Lal R. Long-term tillage effects on changes in structural properties of two soils in central Ohio[ J]. Soil Till Res., 1998, 45: 107-118
- [ 21 ] 赵云英, 谢永生, 郝明德. 施肥对黄土旱塬区黑垆土土壤肥力及硝态氮累积的影响[ J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(6): 1273-1279  
Zhao Y Y, Xie Y S, Hao M D. Effect of fertilization on fertility and nitrate accumulation of black bessial soil of dry land in Loess Plateau[ J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(6): 1273-1279
- [ 22 ] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[ J]. J. Soil Sci., 1982, 33: 141-163
- [ 23 ] Majumder B, Mandal B. Soil organic carbon pools and productivity relationships for a 34 year old rice-wheat jute agroecosystem under different fertilizer treatments[ J]. Plant Soil, 2007, 297: 53-67.
- [ 24 ] 吕家珑, 张一平. 长期单施化肥对土壤性状及作物产量的影响[ J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 570-572  
L J L, Zhang Y P. Effect of long-term single application of chemical fertilizer on soil properties and crop yield[ J]. Chin. J Appl Ecol., 12(4): 570-572
- [ 25 ] 赵护兵, 刘国彬, 吴瑞俊. 黄土丘陵区不同类型农地的养分循环平衡特征[ J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 58-64.  
Zhao H B, Liu G B, Wu R J. Nutrient cycling and balance characteristics of different farm land types in the loess hilly region[ J]. Trans. CSAE, 2006, 22(1): 58-64
- [ 26 ] Kaur T, Bar B S, Dhillon N S. Soil organic matter dynamics as affected by long-term use of organic and inorganic fertilizers under maize-wheat cropping system [ J]. Nutr. Cycl. Agroecosys, 2008, 81: 59-69.