植物营养与肥料学报 2014,20(3):550-561
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0305

黄土区不同施肥对土壤颗粒及微团聚体组成的影响

孙彩丽[1], 薛 萐[1,2], 刘国彬[2*], 丁少男[1]
(1 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌 712100; 2 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 采用野外采样与室内分析方法,运用颗粒体积分形理论,研究了 15 年长期不同施肥处理对黄土区农田土壤颗粒组成、微团聚体分布及有机碳的影响。结果表明,施肥处理对 0—20 cm 土层影响较大,不同施肥处理土壤颗粒及微团聚体的优势粒级均为 0.02 ~ 0.05 mm。有机肥(M)、磷肥(P)、有机肥和氮肥配施(MN)、有机肥、氮肥和磷肥配施(MNP)处理可显著提高 0—20 cm 土层 0.1 ~ 0.2 mm 土壤颗粒的百分含量,有机肥和磷肥配施(MP)以及 MNP 处理有利于该土层大粒径土壤微团聚体的形成。氮肥和磷肥配施(NP)处理的土壤分散率最大,M 处理最小。不同施肥处理土壤颗粒体积分形维数差异不显著。相关性分析表明, 0—20 cm 及 20—40 cm 土层土壤颗粒体积分形维数与粘粒(<0.002 mm)和细粉粒 (0.002 ~ 0.02 mm) 呈极显著正相关,与粗粉粒 (0.02 ~ 0.05 mm) 和细砂粒 (0.05 ~ 0.2 mm)极显著负相关; 土壤团聚度与 <0.05 mm 各粒径土壤团聚体显著或极显著负相关,与 >0.05 mm 各粒径土壤团聚体显著或极显著正相关。0—20 cm 土层土壤有机碳与 0.01 ~ 0.05 mm 各粒径土壤团聚体显著或极显著负相关,与 0.1 ~ 0.5 mm 各粒径土壤团聚体极显著正相关。

关键词: 土壤颗粒; 微团聚体; 颗粒体积分形维数; 团聚度; 分散率
中图分类号: S152.3; S147.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)03-0550-12

Effects of long-term fertilization on soil particles and microaggregate distribution in the loess area

SUN Cai-li[1], XUE Sha[1,2], LIU Guo-bin[2*], DING Shao-nan[1]
(*1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau/College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: Based on the particle volume fractal theory, effects of 15 years fertilization on soil particle distribution, microaggregate distribution and organic carbon content of farmland in the loess area were studied using field sampling and experimental analysis. Results show that the fertilization has a significant effect on the particle and microaggregate distribution in 0-20 cm soil layer, and the fractions of 0.02-0.05 mm are predominant in different treatments. The organic fertilizer (M), phosphoric fertilizer (P), the combination of organic and nitrogen fertilizer (MN), and the combination of organic, nitrogen and phosphoric fertilizer (MNP) significantly improve the contents of 0.1-0.2 mm fractions, and the combination of organic and phosphoric fertilizer (MP) and MNP treatments are contribute to the formation of large soil microaggregate. Among the treatments, the biggest dispersion rate is found in the treatment of nitrogen and phosphoric combination (NP), the smallest in the M treatment. There are no significant differences among treatments. The soil particle fractal dimension is positively correlated with clay

收稿日期: 2013-07-04 **接受日期:** 2013-12-24
基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05060300); 陕西省科学技术研究发展计划项目(2011KJXX63); 西北农林科技大学基本科研业务费专项资金(ZD2013021)资助。
作者简介: 孙彩丽(1989—),女,河南平顶山人,硕士研究生,主要从事水土保持与荒漠化防治方面的研究。E-mail: suncaili2007@126.com
* 通信作者 E-mail: gbliu@ms.iswc.ac.cn

particle (<0.002 mm), and fine silt (0.002-0.02 mm) and negatively correlated with coarse silt (0.02-0.05 mm) and fine sand (0.05-2 mm). The soil aggregate degree is negatively correlated with <0.05 mm aggregate and positively correlated with >0.05 mm aggregate. The soil organic carbon is negatively correlated with in 0.01-0.05 mm microaggregate and positively correlated with 0.1-0.5 mm microaggregate in 0-20 cm layer.

Key words: soil particle distribution; microaggregate distribution; particle volume fractal dimension; aggregate degree; dispersion rate

土壤颗粒组成和土壤微团聚体组成是研究土壤质地和结构的基本物理属性[1-2]。土壤颗粒组成影响土壤的水力特性、肥力状况,并与土壤侵蚀和退化直接相关,是重要的土壤物理特性之一[3],许多研究用土壤颗粒体积分形维数来反映土壤结构、属性和肥力等[4-6]。土壤团聚体是土壤肥力的基础,其大小、含量及稳定性直接反映土壤结构性的优劣并成为评价土壤质量的重要指标[7]。有学者提出,土壤有机质和土壤结构相互作用紧密,有机质与矿物颗粒形成稳定的团聚体,而稳定团聚体又可对矿化的有机质进行物理保护[8-9]。土壤团聚状况可用团聚度和分散系数来衡量,土壤团聚度既受土壤团聚体含量的影响,又受土壤粘粒含量的影响[10],土壤分散率取决于土粒与水的亲和力和胶结力,在一定程度上反映土壤颗粒间的作用力[11]。

在土地利用方式、土壤质地、种植制度及环境条件相同时,不同的施肥管理措施是影响土壤团聚状况的关键因素[7,12]。国内外关于不同施肥措施对土壤团聚体、土壤颗粒组成及有机质影响的研究已有很多报道[13-14],Huang 等[15]研究表明,施有机肥可显著增加红壤有机碳和 >2 mm 团聚体的含量,减少 0.05 ~ 0.25 mm 微团聚体含量; 冷延慧等[1]研究表明,长期施用化肥及有机 - 无机肥配施能显著增加黑土有机碳、>2 mm 大团聚体和 0.05 ~ 0.25 mm 微团聚体含量。袁颖红等[16]研究表明,长期施用无机肥、有机肥及有机无机配施能显著增加红壤性水稻土壤 0.002 ~ 0.02 mm 微团聚体的含量,降低 <0.002 mm 微团聚体含量。近年来在黄土高原地区也有相关报道,霍琳等[17]对黑垆土的研究结果显示,单施有机肥、有机无机肥配施及秸秆还田可显著增加 >2 mm 团聚体含量,改善土壤团聚结构; 陈璐等[18]的研究也指出,在单施磷肥的基础上配施氮肥和有机肥有利于增加 >0.25 mm 土壤颗粒的比例。众多研究表明,施有机肥能有效提高土壤大团聚体,尤其是 >2 mm 大团聚体的含量、大粒径土壤颗粒比例和土壤有机碳含量,从而改善土壤结构,增加土壤肥力。但是,对于不同施肥对土壤微团聚体分布的影响,不同研究结果相差很大,这可能是由于土壤质地和结构不同所致。黄绵土是黄土母质经直接耕种发育而成的幼年土壤,土质松散,易受侵蚀,分布甚广,是黄土高原主要的土壤类型,占陕北土壤总面积的 52.5%,占耕地面积的 50% ~ 80%[19-20],目前的相关研究大都集中在土地利用方式改变和植被恢复对土壤团聚体和侵蚀状况的影响方面[17,21-22],不同施肥措施对土壤颗粒组成和微团聚体分布的影响报道尚少。

土壤颗粒组成及微团聚体分布与黄土肥力关系密切[23],本研究在土壤颗粒组成、微团聚体组成和有机质等数据的基础上,分别研究了土壤颗粒体积分形维数、土壤团聚度、土壤分散率,以期从土壤结构和肥力角度综合反映长期不同施肥处理对黄土区土壤质量的影响,为黄土高原合理培肥、农业和生态环境可持续发展提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

长期定位试验地设在陕西省延安市安塞县"安塞农田生态系统国家野外科学观测研究站"内,地处黄土高原中部 (109°19′23″E, 36°51′30″N),属暖温带半干旱气候区,海拔 1068 ~ 1309 m,年均气温 8.8℃,年平均降水量 500 mm 左右,年际变化大且年内分配不均。土壤类型以黄土母质上发育而成的黄绵土为主,其土壤质地为轻壤,基础肥力性状为有机质含量 15.54 g/kg,全氮 0.57 g/kg,全磷 0.63 g/kg,碱解氮 28.99 mg/kg,速效磷 2.49 mg/kg,速效钾 84.86 mg/kg; pH 8.6,容重 1.5 g/cm^3,孔隙度 52.7%。

1.2　试验设计

试验从 1997 年开始,已持续 15 年,小区面积 14 m^2,3 次重复,不同施肥处理小区随机排列,且 15 年来作物栽培及管理措施一致。各试验处理施用的

肥料量如表1。

试验地为玉米－玉米－黄豆轮作，2012年4月29日种玉米（品种为强盛101），播种量为52.5 kg/hm^2，每公顷留苗51000株，每区留苗72株（每区4行，每行18株）。玉米播种前施入全部磷肥和有机肥，并施入部分氮肥（42.36 kg/hm^2）作种肥，6月29日拔节期和7月29日喇叭口期分别追施氮肥（84.79 kg/hm^2），9月23日收获。有机肥用冬羊粪，氮肥为尿素，磷肥为过磷酸钙，玉米收获后用土钻法在处理小区采集土样，分0—20 cm，20—40 cm两层，每个小区取3个样点，混合均匀后带回实验室，自然风干后剔除大的植物残体和石块，一部分土样进行颗粒组成和微团聚体组成测定，另一部分土样过0.25 mm筛后进行有机质的测定。

表1 长期定位试验各处理施肥量（kg/hm^2）

Table 1 Fertilizer rates of the long-term experiment treatments

处理 Treatment	有机肥 Manure	氮肥 N	磷肥 P_2O_5
M	75000	0	0
P	0	0	166.65
N	0	211.95	0
MN	75000	211.95	0
MP	75000	0	166.65
NP	0	211.95	166.65
MNP	75000	211.95	166.65
BL	0	0	0
CK	0	0	0

注（Note）：BL—裸地 Bare land.

1.3 分析方法

有机质含量采用$K_2Cr_2O_7$氧化－外加热法测定，并换算成有机碳含量。土壤颗粒和微团聚体组成采用英国马尔文公司的MS2000型激光粒度仪测定。土壤颗粒体积分形维数采用王国梁等[4]提出的公式（1）计算，土壤团聚度和分散率分别采用公式（2）和（3）计算。

$$\frac{V(r<R)}{V_T}=\left(\frac{R}{\lambda_V}\right)^{3-D} \quad (1)$$

式中：r为土壤粒径；V为粒径大于或小于R的全部土壤颗粒总体积；V_T为土壤颗粒总体积；λ_V在数值上等于最大粒径数R_L；D为土壤颗粒体积分形维数。

$$Y_1=\left[\frac{(x_1-x_2)}{x_1}\right]\times 100\% \quad (2)$$

式中：Y_1为土壤团聚度；x_1为大于0.05 mm微团聚体测量值；x_2为大于0.05 mm土壤颗粒组成测量值。

$$Y_2=\left(\frac{x_3}{x_4}\right)\times 100\% \quad (3)$$

式中：Y_2为土壤分散率；x_3为小于0.05 mm微团聚体测量值；x_4为小于0.05 mm颗粒组成测量值。

1.4 数据处理

所测数据采用Microsoft Excel 2007和SPSS 18.0软件进行统计分析，多重比较采用Duncan法，采用Origin 9.0作图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥土壤颗粒组成和微团聚体分布

图1表明不同粒径土壤颗粒在同一土层差异较大，不同施肥处理均表现为在上层（0—20 cm）0.02～0.05 mm的颗粒分布最多（34.11%～35.43%），其次为0.05～0.1 mm（17.86%～18.90%）、<0.002 mm（16.675%～18.1%）、0.01～0.02 mm（15.01%～15.70%）、0.005～0.01 mm（5.84%～6.17%）、0.002～0.005 mm（4.22%～4.50%）和0.1～0.2 mm（2.95%～3.89%），0.2～0.25 mm、0.25～0.5 mm、和0.5～2 mm含量最少，均不到0.1%。下层（20—40 cm）土壤颗粒的粒径分布和上层相似。

不同施肥处理对表层土壤颗粒粒径分布的影响主要是0.01～0.02 mm和0.1～0.2 mm，对其余粒径没有显著影响（图1）。对于0.01～0.02 mm粒径颗粒，仅P处理显著低于裸地（BL）；不同施肥对0.1～0.2 mm粒径的影响较大，其中BL含量最低，但是和CK没有显著差异；与BL及CK处理相比，M、P、MN和MNP处理的0.1～0.2 mm颗粒的含量显著增加，但是它们之间差异不显著，另外3个处理的0.1～0.2 mm的颗粒含量没有显著变化。不同施肥处理对下层（20—40 cm）不同粒径的土壤颗粒分布的影响比上层小，仅表现在对0.002～0.005 mm、0.005～0.01 mm和0.02～0.05 mm粒径的颗粒上，且不同处理间的差异较小，仅NP和MNP处理之间有显著差异。

图2表明上层（0—20 cm）土壤微团聚体含量为0.02～0.05 mm粒径的最多（35.00%～

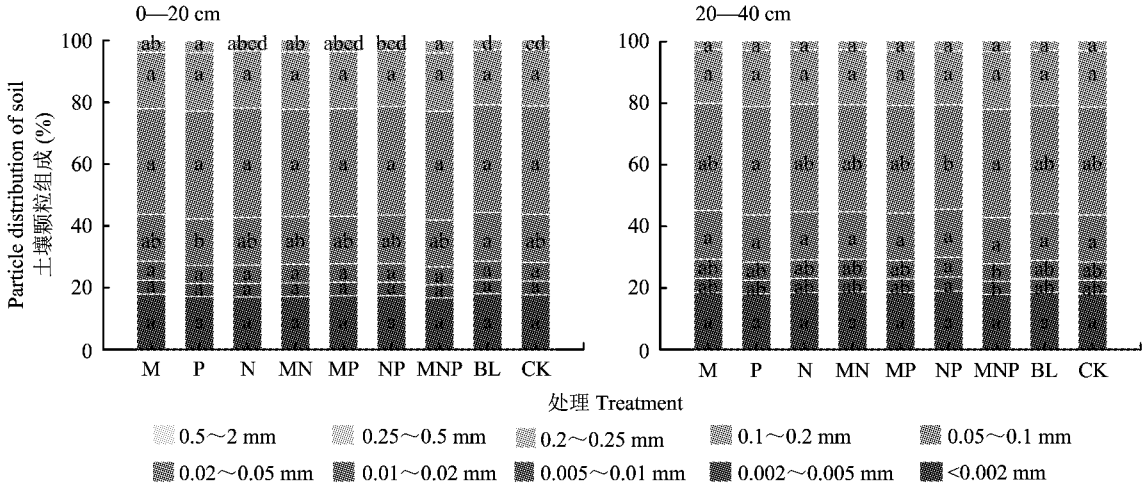

图 1　不同施肥处理土壤颗粒组成

Fig. 1　Particle distribution of soil under different fertilization treatments

[注(Note)：图中不同字母表示同一粒径处理间差异达 5% 显著水平 Different letters in the same fraction mean significant at 5% level.]

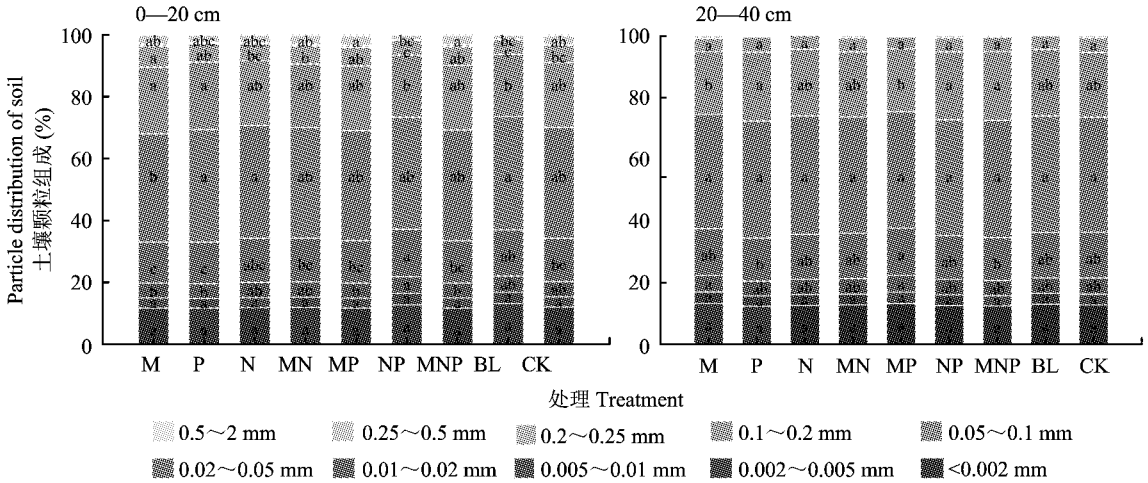

图 2　不同施肥处理土壤微团聚体组成

Fig. 2　Microaggregate distribution of soil under different fertilization treatmets

[注(Note)：图中不同字母表示同一粒径处理间差异达 5% 显著水平 Different letters in the same fraction mean significant at 5% level.]

36.50%)，其次为 0.05 ～ 0.1 mm (20.04% ～ 21.82%)、0.01 ～ 0.02 mm (13.28% ～ 15.31%)、<0.002 mm (11.66% ～ 12.75%)、0.1 ～ 0.2 mm (4.86% ～ 6.78%)、0.005 ～ 0.01 mm (4.76% ～ 5.47%) 和 0.002 ～ 0.005 mm 粒径 (3.18% ～ 3.62%)，0.2 ～ 0.25 mm、0.25 ～ 0.5 mm、和 0.5 ～ 2 mm 粒径最少，共占 1.60% ～ 4.06%。下层 (20—40 cm) 土壤微团聚体的粒径分布与上层相似。

不同施肥处理对上层 (0—20 cm) 土壤微团聚体粒径分布的影响较大，除 <0.002 mm 和 0.002 ～ 0.005 mm 粒径的微团聚体外，对其余粒径均有显著影响。对于 0.005 ～ 0.01 mm 和 0.01 ～ 0.02 mm 粒径的微团聚体，NP 处理和 M、P、MP 及 MNP 处理之间差异显著；和 CK 相比，NP 处理的 0.01 ～ 0.02 mm 微团聚体含量显著增加，而 M、P、MP 及 MNP 处理没有显著性变化。0.02 ～ 0.05 mm 粒径微团聚体，P、N 和 BL 处理的含量最大，但与 CK 没有显著差异，M 处理显著低于 BL。0.05 ～ 0.1 mm、0.1 ～ 0.2 mm 和 0.2 ～ 0.25 mm 粒径微团聚体，NP 和 BL 处理的含量均最小；和 BL 相比，M 和 P 处理的 0.05 ～ 0.1 mm 粒径的微团聚体含量显著增加，

0.1～0.2 mm 微团聚体在 M、P、MP 和 MNP 处理中含量显著增加,0.2～0.25 mm 微团聚体 在 MP 和 MNP 处理的含量显著增加。总之,MP 和 MNP 处理的大粒径土壤微团聚体含量较多,NP 和 BL 处理的小粒径土壤微团聚体含量较多。不同施肥处理对下层(20—40 cm)土壤微团聚体分布的影响较上层小,仅表现在对 0.002～0.005 mm、0.005～0.01 mm、0.01～0.02 mm 和 0.05～0.1 mm 粒径的微团聚体,且不同施肥处理间的差异较小,总体表现为 P、NP 和 MNP 处理的大粒径土壤微团聚体含量显著高于 M 和 MP 处理(图 2)。

2.2 土壤颗粒体积分形维数与颗粒组成的关系

土壤颗粒体积分形维数的计算过程说明分形维数的大小与土壤颗粒粒径由小到大的累积含量有关,据此分别对上层(0—20 cm)及下层(20—40 cm)土壤的体积分形维数和颗粒体积百分含量分别进行相关性分析(图 3)。结果表明,土壤颗粒体积分形维数与土壤粘粒(<0.002 mm)百分含量呈极显著正相关关系,与砂粒呈显著负相关关系;0—20 cm 土层土壤颗粒体积分形维数与粉粒(0.002～0.05 mm)相关性不显著,20—40 cm 土层分形维数与粉粒呈正相关。此外,0—20 cm 和 20—40 cm 土层粉粒、砂粒与分形维数回归方程的决定系数(R^2)都很小,说明分形维数与粉粒、砂粒体积百分含量之间的相关性较小。

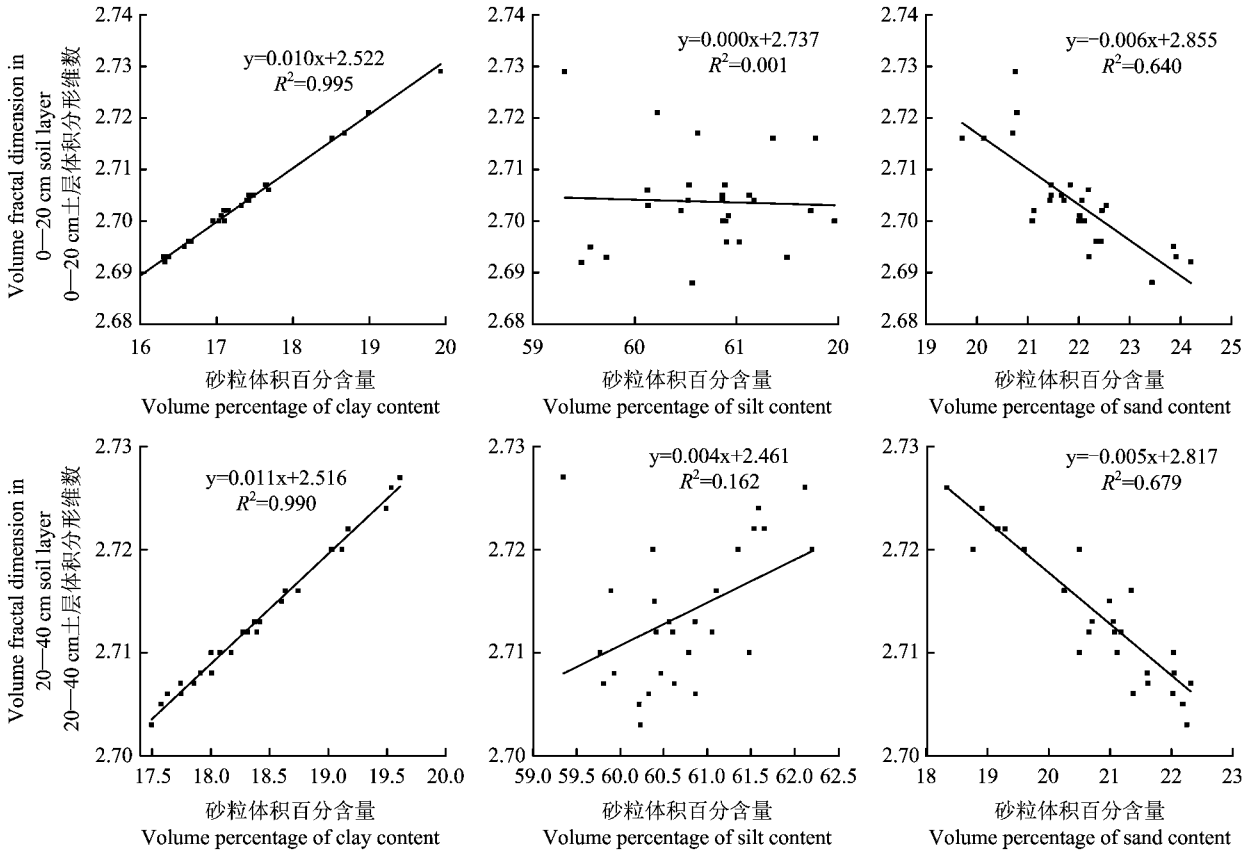

图 3 0—20 cm 和 20—40 cm 土层体积分形维数与不同粒径土壤颗粒体积百分含量的关系

Fig. 3 The correlation between soil volume fractal dimension and the volume percentage of soil particles in both 0–20 cm and 20–40 cm soil layers

2.3 不同施肥处理土壤团聚结构、土壤有机碳及分形维数

表 2 显示,上层(0—20 cm)土壤不同施肥处理的团聚度差异不大,仅 NP 和 M 处理之间差异显著。土壤分散率表现为 NP 处理的最大,但与 BL 没有显著差异,M 处理的最小且显著低于 BL。不同施肥处理土壤有机碳含量差异显著,BL 处理最小,但与 CK 没有显著差异,与 BL 和 CK 相比,M、MN、MP 和

MNP 处理的有机碳含量显著增大。表层土壤颗粒体积分形维数为 2.696 ～2.711,其中 MNP 处理的最小,且不同施肥处理之间差异不显著。

下层(20—40 cm)土壤团聚度及分散率在不同施肥处理之间差异不显著。不同施肥处理土壤有机碳含量差异较大,N、P、NP、BL 和 CK 处理最小,且他们之间没有显著差异；与 BL 和 CK 相比,M、MN、MP 和 MNP 处理的有机碳含量显著增加。土壤颗粒体积分形维数为 2.708 ～2.716,其中 MNP 处理的最小,不同施肥处理之间差异不显著。此外,下层土壤的团聚度和有机质含量均小于上层土壤,而土壤分散率和颗粒体积分形维数则大于上层。

表 2　0—20 和 20—40 cm 土层土壤团聚度、分散率、分形维数及有机碳含量

Table 2　The soil aggregate degree, dispersion rate, fractal dimension and organic carbon content of 0–20 and 20–40 cm soil layer

处理 Treatment	样本数(No.) Sample size	团聚度 Aggregate degree	分散率 Dispersion rate	有机碳(%) Organic carbon	分形维数 Fractal dimension
			0—20 cm		
M	3	31.018 ±2.23 a	87.278 ±0.68 b	0.975 ±0.04 a	2.709 ±0.01 a
P	3	25.503 ±1.96 ab	89.847 ±0.97 ab	0.671 ±0.01 c	2.701 ±0.00 a
N	3	25.496 ±2.77 ab	90.361 ±1.38 ab	0.627 ±0.03 cd	2.700 ±0.00 a
MN	3	25.845 ±2.59 ab	89.933 ±1.42 ab	0.898 ±0.01 ab	2.702 ±0.00 a
MP	3	28.723 ±1.31 ab	88.604 ±0.33 ab	0.932 ±0.04 ab	2.703 ±0.01 a
NP	3	19.465 ±4.40 b	93.222 ±1.84 a	0.671 ±0.03 c	2.705 ±0.00 a
MNP	3	25.622 ±1.82 ab	89.769 ±0.69 ab	0.873 ±0.01 b	2.696 ±0.00 a
BL	3	21.015 ±5.14 ab	92.818 ±2.00 a	0.577 ±0.03 d	2.711 ±0.01 a
CK	3	28.884 ±5.18 ab	88.905 ±2.34 ab	0.647 ±0.02 cd	2.707 ±0.00 a
			20—40 cm		
M	3	20.177 ±6.11 a	93.367 ±2.40 a	0.491 ±0.03 ab	2.716 ±0.01 a
P	3	23.457 ±1.34 a	91.762 ±0.76 a	0.420 ±0.00 c	2.710 ±0.00 a
N	3	21.456 ±5.73 a	92.982 ±1.90 a	0.423 ±0.00 c	2.715 ±0.01 a
MN	3	21.874 ±0.25 a	92.781 ±0.22 a	0.492 ±0.02 ab	2.716 ±0.00 a
MP	3	15.168 ±2.67 a	95.273 ±0.93 a	0.516 ±0.02 a	2.714 ±0.00 a
NP	3	24.132 ±2.40 a	91.739 ±0.89 a	0.428 ±0.02 c	2.720 ±0.00 a
MNP	3	19.616 ±2.36 a	93.077 ±0.94 a	0.454 ±0.02 bc	2.708 ±0.00 a
BL	3	19.097 ±5.69 a	93.714 ±1.97 a	0.423 ±0.02 c	2.714 ±0.01 a
CK	3	18.619 ±5.65 a	93.587 ±2.24 a	0.410 ±0.01 c	2.710 ±0.00 a

注(Note)：同列数据后不同字母表示同一土层不同处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant in same soil layer among treatments at the 5% level.

2.4　土壤颗粒、微团聚体组成与团聚结构、有机碳及分形维数之间的相关性分析

由表 3 可以看出,上层(0—20 cm)土壤团聚度和分散率与各粒径土壤颗粒相关性不显著。土壤颗粒体积分形维数与粘粒(<0.002 mm)和细粉粒(0.002 ～0.02 mm)极显著正相关,其相关系数分别为 0.998 和大于 0.625,与粗粉粒(0.02 ～0.05 mm)和细砂粒(0.05 ～0.2 mm)极显著负相关,相

表3 土壤颗粒组成与团聚度、分散率、有机碳含量及分形维数之间相关性分析

Table 3 Correlations between soil particle distributions, aggregate degree, dispersion rate, fractal dimension and organic carbon content

因子 Indicator	有机碳（%） Organic carbon	颗粒组成 Particle distribution（%）									
		<0.002 mm	0.002～0.005 mm	0.005～0.01 mm	0.01～0.02 mm	0.02～0.05 mm	0.05～0.1 mm	0.1～0.2 mm	0.2～0.25 mm	0.25～0.5 mm	0.5～2 mm
						0—20 cm					
团聚度 AD	0.455*	0.184	0.26	0.241	0.130	-0.177	-0.211	-0.049	-0.021	-0.134	0.18
分散率 DR	-0.515**	-0.064	-0.152	-0.127	0.019	0.136	0.064	-0.092	-0.048	0.054	-0.186
分形维数 FD	0.074	0.998**	0.963**	0.936**	0.625**	-0.816**	-0.936**	-0.420*	-0.225	-0.313	0.026
有机碳 OC	1	0.08	0.254	0.204	-0.214	-0.426*	-0.011	0.513**	0.054	0.036	0.225
						20—40 cm					
团聚度 AD	0.039	0.518**	0.531**	0.557**	0.593**	-0.339	-0.580**	-0.387*	—	—	—
分散率 DR	-0.011	-0.417*	-0.437*	-0.464*	-0.482*	0.307	0.466*	0.278	—	—	—
分形维数 FD	0.159	0.995**	0.939**	0.912**	0.825**	-0.747**	-0.920**	-0.463*	—	—	—
有机碳 OC	1	0.173	0.108	0.086	0.098	-0.068	-0.112	-0.147	—	—	—

注(Note)：AD—Aggregate degree；DR—Dispersion rate；FD—Fractal dimension；OC—Organic carbon. * 表示显著相关（$P<0.05$）Correlation is significant at the $P<0.05$ level (2-tailed)；** 表示极显著相关($P<0.01$) Correlation is significant at the $P<0.01$ level (2-tailed).

关系数为分别为 -0.816 和大于 -0.420。土壤有机碳与 0.02 ~ 0.05 mm 土壤颗粒显著负相关,相关系数为 -0.426,与 0.1 ~ 0.2 mm 土壤颗粒极显著正相关,相关系数为 0.513。此外,土壤有机碳与土壤团聚度显著正相关($P<0.05$),相关系数 0.455,与土壤分散率极显著负相关,相关系数 0.515。

下层(20—40 cm)土壤团聚度与 <0.02 mm 各粒径土壤颗粒极显著正相关,其相关系数大于 0.518,与 0.05 ~ 0.2 mm 各粒径土壤颗粒显著或极显著负相关,相关系数大于 0.387,土壤分散率反之。土壤颗粒体积分形维数与各粒径土壤颗粒的相关性同上层土壤。土壤有机碳与各粒径土壤颗粒相关性不显著。此外,土壤有机碳与土壤团聚度和分散率的相关性也不显著。

表 4 显示,上层土壤团聚度与 <0.05 mm 各粒径土壤微团聚体呈显著或极显著负相关,其相关系数大于 -0.482,与 >0.05 mm 各粒径土壤微团聚体呈显著或极显著正相关,相关系数大于 0.554,土壤分散率则相反。土壤颗粒体积分形维数与 <0.01 mm 各粒径土壤微团聚体显著或极显著正相关,相关系数大于 0.450,与 0.02 ~ 0.1 mm 各粒径土壤微团聚体显著或极显著负相关,相关系数大于 -0.413。土壤有机碳与 0.01 ~ 0.05 mm 各粒径微团聚体显著或极显著负相关,相关系数大于 -0.444,与 0.1 ~ 0.5 mm 各粒径土壤微团聚体极显著正相关,相关系数为 0.510。

下层土壤团聚度和分散率与各粒径土壤微团聚体的相关性与表土相似。除 0.02 ~ 0.05 mm 外,土壤颗粒体积分形维数与各粒径土壤微团聚体相关性均不显著。土壤有机碳与各粒径微团聚体相关性均未达到显著水平。

3　讨论

土壤颗粒组成影响土壤水分和养分的分布、迁移及利用,是重要的土壤物理特性之一[24]。图 1、图 2 结果表明不同施肥处理的土壤颗粒优势粒级为 0.02 ~ 0.05 mm,其次为 0.05 ~ 0.1 mm、<0.002 mm、0.01 ~ 0.02 mm、0.005 ~ 0.01 mm、0.002 ~ 0.005 mm 和 0.1 ~ 0.2 mm,0.2 ~ 0.25 mm、0.25 ~ 0.5 mm 和 0.5 ~ 2 mm 粒级含量最少。此试验结果说明黄绵土土壤颗粒以粉粒(0.002 ~ 0.05 mm)为主,而粉粒中粗粉粒(0.02 ~ 0.05 mm)又占绝对优势,这与黄自立[20]、陈俊杰[25]、贾恒义[26]等的研究结果相似。0—20 cm 土层,M、P、MN 和 MNP 处理的 0.1 ~ 0.2 mm 土壤颗粒的含量显著高于 BL 及 CK,且他们之间没有显著差异。该结果表明,此 4 种施肥方式可显著增加大粒径土壤颗粒含量,改善土壤质地,改良土壤结构,从而增加土壤通气透水能力,提高土壤肥力。这可能与磷肥和有机肥的施入有关,因为磷肥及有机肥增加了土壤磷素、氮素及有机养分含量,进而提高了土壤微生物的数量与活性,氮磷相互促进,改善了土壤理化性状,保持和提高了土壤肥力[27-28]。此外,裸地(BL)的 0.1 ~ 0.2 mm 粒径土壤颗粒含量最低,但与 CK 没有显著差异,说明耕作措施及作物根系对该粒径土壤颗粒含量的影响不明显,其原因可能是播种前 BL 和 CK 处理一样进行了翻地整平,破坏了其原来的土壤结构,使下层土壤暴露出来,在风化作用下,土壤含水量减少,导致大粒径土壤颗粒向小粒径转变;BL 无种植作物,CK 处理虽有种植玉米,但其长势不好,根系生长状况及根系分泌物对土壤大颗粒的保护作用很受限制。

土壤微团聚体的优势粒级为 0.02 ~ 0.05 mm,>0.2 mm 的微团聚体较少,仅占 1.60% ~ 4.06%,说明黄土高原地区以黄绵土为主的耕地土壤,其结构松散,团聚性较差,这可能是因为人类的耕作措施经常扰动土壤,破坏了作物根系的固结缠绕作用和土壤原有的团聚结构、减少了有机质等胶结物质含量,从而抑制了水稳性团聚体的形成[17, 29-30]。本研究中 0—20 cm 土层 MP 和 MNP 处理的大粒径微团聚体含量多,而 NP 和 BL 处理的小粒径微团聚体含量多,这可能是因为有机肥与磷肥配施一方面增加了土壤有机质和速效磷含量,显著提高了土壤的肥力水平[28, 31],且 P 肥可促进 Al^{3+} 和 Ca^{2+} 的粘结作用,促进团聚体的形成[32]。另一方面有机肥的施入增加了土壤的胶结物质,加大了土壤的团聚化作用,促进了微团聚体与胶结物质的胶结,从而更有利于大团聚体的形成[33-35]。此外,MP 和 MNP 处理土壤肥力均衡,作物根系发达,产生更多的根系分泌物,根系的穿插缠绕及根系分泌物的胶结作用也有利于大团聚体的形成和稳定[30]。宋日等[36]研究表明,作物根系分泌物能显著提高土壤有机碳矿化率,提高水稳性大团聚体的比例,增加水稳性团聚体稳定性。NP 处理的大粒径微团聚体含量少可能是因为氮肥和磷肥配施降低了土壤有机碳的含量[27],减少了土壤的胶结物质,不易形成大粒径微团聚体。裸地(BL)则是因为没有作物的生长及肥料施入,生物量归还少,土壤有机碳亏缺,不利于形成大粒径微团

表 4　土壤微团聚体组成与团聚度、分散率、分形维数及有机碳含量之间相关性分析

Table 4　Correlations between soil microaggregate distributions, aggregate degree, dispersion rate, fractal dimension and organic carbon content

因子 Indicator	有机碳(%) Organic carbon	微团聚体组成 Microaggregate distribution(%)									
		<0.002 mm	0.002～0.005 mm	0.005～0.01 mm	0.01～0.02 mm	0.02～0.05 mm	0.05～0.1 mm	0.1～0.2 mm	0.2～0.25 mm	0.25～0.5 mm	0.5～2 mm
						0—20 cm					
团聚度 AD	0.455*	-0.593**	-0.667**	-0.691**	-0.775**	-0.482*	0.554**	0.777**	0.708**	0.787**	0.574**
分散率 DR	-0.515**	0.696**	0.760**	0.781**	0.854**	0.449*	-0.651**	-0.834**	-0.741**	-0.847**	-0.626**
分形维数 FD	0.074	0.548**	0.496**	0.450*	0.248	-0.523**	-0.413*	0.036	0.152	-0.311	-0.33
有机碳 OC	1	-0.310	-0.274	-0.301	-0.444*	-0.670**	0.156	0.736**	0.804**	0.510**	0.292
						20—40 cm					
团聚度 AD	0.039	-0.468*	-0.587**	-0.588**	-0.639**	-0.383*	0.476*	0.787**	0.543**	0.558**	0.460*
分散率 DR	-0.011	0.550**	0.677**	0.678**	0.729**	0.369	-0.559**	-0.845**	-0.588**	-0.611**	-0.516**
分形维数 FD	0.159	0.287	0.239	0.218	0.143	-0.494**	-0.302	0.143	0.22	0.245	0.239
有机碳 OC	1	0.321	0.196	0.148	0.123	-0.369	-0.343	0.073	0.349	0.277	0.218

注(Note): AD—Aggregate degree; DR—Dispersion rate; FD—Fractal dimension; OC—Organic carbon. * 表示显著相关 ($P<0.05$) Correlation is significant at the $P<0.05$ level (2-tailed); ** 表示极显著相关 ($P<0.01$) Correlation is significant at the $P<0.01$ level (2-tailed).

聚体。

研究表明，土壤分形维数能够反映土壤结构、属性及肥力[37-38]。本研究中不同施肥处理土壤颗粒体积分形维数变化不显著，但 MNP 处理的土壤颗粒体积分形维数最小，CK 处理的最大，说明有机无机肥配施对改善土壤结构，提高土壤质量意义重大。土壤分散率反映土壤团聚状况，其值越大，土壤结构性越差[10-11]。本研究中 NP 处理的土壤分散率最大，但与 BL 没有显著差异，M 处理的最小且显著低于 BL，这可能归因于土壤中有机质的含量，施入有机肥直接提高了土壤有机质含量，改善了土壤结构；NP 处理加快了土壤中有机质的分解[27]，BL 处理没有施入有机肥，地上植物残体归还到土壤中的有机质也很少，不利于土壤结构的改良。

上下两土层均表现为土壤颗粒体积分形维数与粘粒（<0.002 mm）和细粉粒（0.002～0.02 mm）极显著正相关，与粗粉粒（0.02～0.05 mm）和细砂粒（0.05～0.2 mm）极显著负相关，这与文跃星等的研究结果相似[39]；土壤团聚度与 <0.05 mm 各粒径土壤微团聚体显著或极显著负相关，与 >0.05 mm 各粒径土壤团聚体显著或极显著正相关，这说明增加大粒径土壤团聚体含量并提高其稳定性对保持和改善土壤的团聚状况意义重大，对黄绵土来说，磷肥和有机肥配施可有效改善土壤肥力，提高大粒径微团聚体的含量及稳定性。上层土壤有机碳与 0.01～0.05 mm 各粒径土壤微团聚体显著或极显著负相关，与 0.1～0.5 mm 各粒径土壤微团聚体极显著正相关，下层土壤有机碳与各粒径土壤微团聚体相关性不显著，原因是耕作层主要在上层（0—20 cm），施肥及作物残体等进入土壤，增加了有机质含量，并且该层作物根系发达，土壤微生物活动频繁，其分解有机质过程中形成的腐殖胶结物质及根系分泌物通过粘结小粒径土壤颗粒形成微团聚体，微团聚体之间再通过胶结作用形成大团聚体，从而提高了土壤团聚度，改善了土壤结构[40-41]。同时该结果也说明有机质与团聚体之间相互作用紧密，增加土壤有机碳含量可提高大团聚体含量及稳定性，大团聚体的形成又有利于土壤有机碳的固定。

4　结论

1）施肥对 0—20 cm 土层土壤颗粒及微团聚体分布的影响较大，且不同施肥处理土壤颗粒及微团聚体的优势粒级均为 0.02～0.05 mm。

2）有机肥、磷肥或有机肥与磷肥配施、有机肥与氮磷肥配施均可显著提高 0—20 cm 土层 0.1～0.2 mm 土壤颗粒含量；有机肥与磷肥配施，有机肥与氮磷肥配施（MP 和 MNP）有利于该土层大粒径土壤微团聚体的形成。

3）氮磷配施处理的土壤分散率最大，有机肥处理最小；不同施肥处理土壤颗粒体积分形维数差异不显著，但有机肥与氮磷肥配施处理的最小，对照处理最大。

4）0—20 cm 和 20—40 cm 土层，土壤颗粒体积分形维数与粘粒（<0.002 mm）和细粉粒（0.002～0.02 mm）极显著正相关，与粗粉粒（0.02～0.05 mm）和细砂粒（0.05～0.2 mm）极显著负相关；土壤团聚度与 <0.05 mm 各粒径土壤微团聚体显著或极显著负相关，与 >0.05 mm 各粒径土壤微团聚体显著或极显著正相关。0—20 cm 土层有机碳与 0.01～0.05 mm 各粒径土壤微团聚体显著或极显著负相关，与 0.1～0.5 mm 各粒径土壤微团聚体极显著正相关。

参 考 文 献：

[1] 冷延慧，汪景宽，李双异. 长期施肥对黑土团聚体分布和碳储量变化的影响[J]. 生态学杂志，2008，27(12)：2171-2177.
Leng Y H, Wang J K, Li S Y. Effects of long-term fertilization on aggregates size distribution and carbon stock in black soil[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(12): 2171-2177.

[2] 张玉斌，曹宁，许晓鸿，苏晓光. 吉林省低山丘陵区水土保持措施对土壤颗粒组成和速效养分影响分析[J]. 中国农学通报，2009，25(20)：287-291.
Zhang Y B, Cao N, Xu X H, Su X G. The analysis of soil particle composition and available nutrient under different soil and water conservation measures inJilin low mountain and mound area[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(20): 287-291.

[3] 董莉丽，郑粉莉. 陕北黄土丘陵沟壑区土壤粒径分形特征[J]. 中国水土保持科学，2009，7(2)：35-41.
Dong L l, Zheng F L. Fractal characteristics of soil particles in the Hilly-gully Regions of the Loess Plateau, North of Shaanxi, China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(2): 35-41.

[4] 王国梁，周生路，赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J]. 土壤学报，2005，42(4)：545-550.
Wang G L, Zhong L S, Zhao Q G. Volume fractal dimension of soil particles and its applications to land use[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(4): 545-550.

[5] Su Y Z, Zhao H L, Zhao W Z, Zhang T H. Fractal features of soil particle size distribution and the implication for indicating desertification[J]. Geoderma, 2004, 122(1): 43-49.

[6] Wang X, Li M H, Liu S, Liu G C. Fractal characteristics of soils

under different land-use patterns in the arid and semiarid regions of the Tibetan Plateau, China[J]. Geoderma, 2006, 134(1): 56-61.

[7] 杜立宇, 李天来, 梁成华, 等. 长期不同施肥处理对设施土壤团聚体组成及其稳定性的影响[J]. 水土保持通报, 2012, 32(1): 38-41.
Du L Y, Li T L, Liang C H *et al*. Effects of long-term different fertilizations on composition and stability of soil aggregates in a greenhouse soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(1): 38-41.

[8] Pulleman M, Marinissen J. Physical protection of mineralizable C in aggregates from long-term pasture and arable soil[J]. Geoderma, 2004, 120(3): 273-282.

[9] 郭菊花, 陈小云, 刘满强, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土团聚体的分布及有机碳、氮含量的影响[J]. 土壤, 2007, 39(5): 787-793.
Guo J H, Chen X L, Liu M Q *et al*. Effects of fertilizer management practice on distribution of aggregates and content of organic carbon and nitrogen in red paddy soil[J]. Soils, 2007, 39(5): 787-793.

[10] 朱冰冰, 李占斌, 李鹏, 等. 土地退化/恢复中土壤可蚀性动态变化[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 56-61.
Zhu B B, Li Z B, Li P *et al*. Dynamic changes of soil erodibility during process of land degradation and restoration[J]. Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(2): 56-61.

[11] 陈安强, 张丹, 熊东红, 刘刚才. 元谋干热河谷坡面表层土壤力学特性对其抗冲性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 108-113.
Chen A Q, Zhang D, Xiong D H, Liu G C. Effects of mechanical properties of surface soil on soil anti-scourability in Yuanmou dry-hot valley[J]. Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(5): 108-113.

[12] 龚伟, 颜晓元, 蔡祖聪, 王景燕. 长期施肥对小麦-玉米轮作土壤微团聚体组成和分形特征的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(6): 1141-1148.
Gong W, Yan X Y, Cai Z C, Wang J Y. Effects of long-term fertilization on composition and fractal feature of soil micro-aggregates under a wheat-maize cropping system[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(6): 1141-1148.

[13] Zhou H, Peng X, Perfect E *et al*. Effects of organic and inorganic fertilization on soil aggregation in an Ultisol as characterized by synchrotron based X-ray micro-computed tomography[J]. Geoderma, 2013, 195: 23-30.

[14] Chenu C, Le Bissonnais Y, Arrouays D. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(4): 1479-1486.

[15] Huang S, Peng X, Huang Q, Zhang W J. Soil aggregation and organic carbon fractions affected by long-term fertilization in a red soil of subtropical China[J]. Geoderma, 2010, 154(3): 364-369.

[16] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土微团聚体有机碳汇的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2961-2966.
Yuan Y H, Li H X, Huang Q R *et al*. Effects of different fertilization on soil organic carbon distribution and storage in micro-aggregates of red paddy topsoil[J]. Acta Ecologica sinica, 2004, 24(12): 2961-2966

[17] 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, 19(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]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(3): 545-550.

[18] 陈璐, 党廷辉, 杨绍琼, 戚瑞生. 黄土旱塬施肥对土壤颗粒组成及其有效磷富集的影响研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 151-153.
Chen L, Dang T H, Yang S Q, Qi R S. Effects of fertilization on soil particle composition and phosphorus enrichment in dry highland of Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(3): 151-153.

[19] 朱显谟. 黄土高原土壤与农业[M]. 北京: 农业出版社, 1989. 36-53.
Zhu X M. The Loess Plateau soil and agriculture[M]. Beijing: Agriculture Press, 1989. 36-53.

[20] 黄自立, 张文孝. 陕北黄绵土的性质与改良利用[J]. 土壤通报, 1987, (3): 108-110.
Huang Z L, Zhang W X. The nature of Huangmian soils and improving utilization in northern Shaanxi[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1987, (3): 108-110.

[21] 安韶山, 黄懿梅, 李壁成, 杨建国. 黄土丘陵区植被恢复中土壤团聚体演变及其与土壤性质的关系[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 45-50.
An S S, Huang Y M, Li B C, Yang J G. Characteristics of soil water stable aggregates and relationship with soil properties during vegetation rehabilitation in a Loess hilly region[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(1): 45-50.

[22] 张超, 刘国彬, 薛萐, 余娜. 黄土丘陵区不同林龄人工刺槐林土壤抗蚀性演变特征[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(2): 1-7.
Zhang C, Liu G B, Xue S, Yu N. Fractal features of rhizosphere soil microaggregate and particle-size distribution under different vegetation types in the hilly-gully region of Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2010, 8(2): 1-7.

[23] 钟羡云. 黄土微结构与肥力的关系[J]. 土壤肥料, 1980, (6): 4-7.
Zhong X Y. Relationships between microstructure and fertilizer of the loess[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 1980, (6): 4-7.

[24] Stark J M. Causes of soil nutrient heterogeneity at different scales[A]. Caldwell M M, Pearcy R. Exploitation of environmental heterogeneity by plants: ecophysiological processes above and below ground[M]. New York: J. Wiley & Sons, 1994. 255-284.

[25] 陈俊杰，孙莉英，蔡崇法，等. 不同土壤坡面细沟侵蚀差异与其影响因素[J]. 土壤学报，2013，50(2)：281-288.
Chen J J, Sun L Y, Cai C F *et al*. Rill erosion on different soil slope and their affection frators [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(2): 281-288.

[26] 贾恒义. 黄土丘陵草地土壤营养元素含量迁移及分布[J]. 水土保持研究，1998，5(1)：119-125.
Jia H Y. The content movement and distribution characteristics of main soil types nutrient elements in hilly Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 1998, 5(1): 119-125.

[27] 郑剑英，赵更生，吴瑞浚. 黄绵土在连续施肥下的肥料效应[J]. 水土保持通报，1990，10(2)：8-15.
Zheng J Y, Zhao G S, Wu Y J. Fertilizer effect of Huangmian soils under continuous fertilization[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1990, 10(2): 8-15.

[28] 郑剑英,赵更生,吴瑞浚. 连续施用有机肥与化肥对黄绵土的培肥效应[J]. 水土保持研究，1996，3 (2)：18-22.
Zheng J Y, Zhao G S, Wu R J. Effect of sustained applying organic matter and chemical fertilizer on improving fertility of Loess Soil[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1996, 3(2): 18-22.

[29] Angers D, Samson N, Legere A. Early changes in water-stable aggregation induced by rotation and tillage in a soil under barley production [J]. Canadian Journal of Soil Science, 1993, 73 (1): 51-59.

[30] 李勇，朱显谟，田积莹，黄义端. 黄土高原土壤抗冲性机理初步研究[J]. 科学通报，1990，(5)：390-393.
Li Y, Zhu X M, Tian J Y, Huang Y D. Primary study on mechanism of anti-scorability on Loess Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 1990, (5): 390-393.

[31] 郭胜利，党廷辉，刘守赞，郝明德. 磷素吸附特性演变及其与土壤磷素形态、土壤有机碳含量的关系[J]. 植物营养与肥料学报，2005，11(1)：33-39.
Guo S L, Dang T H, Liu S Z, Hao M D. Changes in characterization of phosphorus sorption in relation to its forms and soil organic carbon [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(1): 33-39.

[32] Haynes R, Naidu R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1998, 51(2): 123-137.

[33] Oades J M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management [J]. Plant and Soil, 1984, 76(1-3): 319-337.

[34] Six J, Bossuyt H, Degryze S, Denef K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 79(1): 7-31.

[35] Six J, Elliott E, Paustian K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems [J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(5): 1350-1358.

[36] 宋日，刘利，马丽艳，吴春胜. 作物根系分泌物对土壤团聚体大小及其稳定性的影响[J]. 南京农业大学学报，2009，32(3)：93-97.
Song R, Liu L, Ma L Y, Wu C S. Effect of crop root exudates on the size and stability of soil aggregate [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2009, 32(3): 93-97.

[37] 赵文智，刘志民，程国栋. 土地沙质荒漠化过程的土壤分形特征[J]. 土壤学报，2002，39(6)：877-881.
Zhao W Z, Liu Z M, Chen G D. fractal dimension of soil particle for sand desertification [J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39 (6): 877-881.

[38] 胡云锋，刘纪远，庄大方，等. 不同土地利用/土地覆盖下土壤粒径分布的分维特征[J]. 土壤学报，2005，42(2)：336-339.
Hu Y F, Liu J Y, Zhuang D F *et al*. Fractal dimension of soil particles size distritution under different land use/land coverage [J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(2): 336-339.

[39] 文星跃，黄成敏，黄凤琴，黄艳娟. 岷江上游河谷土壤粒径分形维数及其影响因素[J]. 华南师范大学学报(自然科学版)，2011，(1)：80-86.
Wen X Y, Huang C M, Huang F Q, Huang Y J. Fractal dimenstion of soil particles and related affetion factors from the valley of upper minjiang river[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2011, (1): 80-86.

[40] Tisdall J, Oades J. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. Journal of Soil Science, 1982, 33(2): 141-163.

[41] 彭新华，张斌，赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. 土壤学报，2004，41(4)：618-623.
Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 618-623.