

渭北旱塬管理措施对冬小麦地土壤剖面物理性状的影响

王欢¹, 付威¹, 胡锦昇², 樊军^{1,2*}, 郝明德^{1,2}

(1 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)

摘要: 【目的】研究黄土高原旱作农业区不同施肥覆盖措施对冬小麦地 0—40 cm 土壤剖面物理性质的影响, 可为保持良好的土壤物理性状, 探求适合渭北旱塬可持续的田间管理措施提供参考。【方法】基于设在渭北旱塬 15 年的田间定位试验, 选取 NP (N 150 kg/hm² + P 75 kg/hm²)、NPK (NP + K 30 kg/hm²)、NPB (NP + biochar 14.0 t/hm²)、NPFFT (NP 配合地膜夏闲期覆盖)、NPFGT (NP 配合地膜生育期覆盖) 和 NPFWT (NP 配合地膜全年覆盖) 共 6 个处理。于 2017 年冬小麦收获期采集剖面土样, 对 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm 和 30—40 cm 土层土壤含水量、土壤容重、饱和导水率和水稳定性团聚体等相关土壤物理性质进行测定与分析。【结果】与 NP 相比, NPK 处理降低了收获期 0—20 cm 土壤容重, 增加了耕层土壤总孔隙度和 0—40 cm 土层 > 2 mm 水稳定性团聚体含量, 0—10 cm 土层 > 2 mm 水稳定性团聚体含量显著提高了 1.3 倍 ($P < 0.05$); NPB 处理, 收获期耕层土壤容重降低, 土壤总孔隙度增加, 表层土壤饱和导水率显著降低 27.9%, 剖面土壤含水量和 > 2 mm 水稳定性团聚体含量均增加, 且表层 > 2 mm 水稳定性团聚体含量显著提高了 1.0 倍; NPFFT 处理收获期剖面土壤含水量降低, 耕层土壤容重增加, 总孔隙度降低; NPFGT 处理收获期耕层土壤容重和剖面土壤含水量均增加, 耕层总孔隙度降低, 剖面土壤饱和导水率降低, 尤其表层显著降低 60.2%; NPFWT 处理收获期耕层土壤容重增加, 总孔隙度降低, 表层土壤饱和导水率降低, 但 10—40 cm 土壤饱和导水率平均提高 57.5%, 剖面土壤含水量、> 2 mm 水稳定性团聚体含量、平均重量直径和几何平均直径均增加。受当地传统耕作深度的影响, 不同施肥覆盖措施对土壤容重、饱和导水率和孔隙度的影响主要集中在 0—20 cm 土层, 对 20—40 cm 土层影响较小。【结论】在氮磷肥配施的基础上, 增施钾肥、生物炭和地膜全年覆盖均有利于改善试验农田土壤物理性质, 但从经济投入和对土壤物理性状改良程度方面考虑, 增施钾肥和地膜全年覆盖这两种处理是保持渭北旱塬良好土壤剖面物理性质的有效措施。

关键词: 施肥; 覆盖; 容重; 饱和导水率; 水稳定性团聚体

Effects of agricultural measures on soil profile physical properties of winter wheat field in Weibei highland, China

WANG Huan¹, FU Wei¹, HU Jin-sheng², FAN Jun^{1,2*}, HAO Ming-de^{1,2}

(1 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2 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)

Abstract: 【Objectives】 This study aimed to compare the effects of long-term different fertilization and mulching methods on physical properties in 0–40 cm soil layer of winter wheat field in arid farming area of Loess Plateau, to provide the guideline for maintaining good soil physical properties and seeking for suitable and sustainable development agricultural measures of the Weibei Highland. 【Methods】 A 15-years' winter wheat field experiment, started in 2002 and located in Weibei Highland, was used in this study. Six treatments were setup, NP (N 150 kg/hm² + P 75 kg/hm²), NPK (NP + K 30 kg/hm²), NPB (NP + biochar 14.0 t/hm²), NPFFT

收稿日期: 2018-07-24 接受日期: 2018-11-15

基金项目: 中科院西部青年学者 A 类项目 (XAB2015A03); 国家自然科学基金项目 (41571224)。

联系方式: 王欢 E-mail: huanwang1216@qq.com; * 通信作者 樊军 Tel: 029-87010162, E-mail: fanjun@ms.iswc.ac.cn

(NP + film mulching during summer fallow period), NPFGT (NP + film mulching during growth period) and NPFWT (NP + whole year film mulching). After winter wheat harvested in 2017, samples were collected in 0–10 cm, 10–20 cm, 20–30 cm, and 30–40 cm soil profiles, and the soil moisture, bulk density, saturated hydraulic conductivity (SHC) and water-stable aggregate contents were determined. **【 Results 】** Compared with NP treatment, NPK treatment decreased the 0–20 cm soil bulk density, increased the 0–20 cm soil total porosity and the > 2 mm size water-stable aggregate content in 0–40 cm profiles. The > 2 mm size water-stable aggregate content in 0–10 cm layer increased by 1.3 times ($P < 0.05$). NPB treatment decreased the soil bulk density, increased the soil total porosity, but decreased the SHC significantly by 27.9% in 0–20 cm layer. Both water content and > 2 mm size water-stable aggregate contents increased in the profile, and the > 2 mm size water-stable aggregate contents in the surface layer increased by 1.0 times significantly. NPFPT reduced the water content in the profile, but increased the soil bulk density and decreased the soil total porosity of tillage layer at harvest time. NPFGT reduced the water content of the profile, increased the soil bulk density but reduced the soil total porosity of tillage layer, meanwhile reduced the SHC of the profile, among which especially in the surface layer it was reduced by 60.2% significantly. NPFWT increased soil bulk density but decreased the total soil porosity of tillage layer, decreased the SHC in surface layer, but increased it in 10–40 cm layers by an average of 57.5%, meanwhile the water content, > 2 mm size water-stable aggregates content, MWD and GMD of profile were all increased. Affected by the local traditional tillage depth, the effects of different fertilization and mulch measures on soil bulk density, saturated hydraulic conductivity and porosity were mainly concentrated in 0–20 cm soil layer, while little effect had in the 20–40 cm soil layer.

【 Conclusions 】 Based on the combination of N and P fertilizations, the application of potash, biochar and film mulching around whole year could effectively improve soil physical properties. From the perspective of economic input and degree of improvement in soil physical properties, the addition of potash and whole year film mulching were effective measures to maintain the good physical properties of soil profile in Weibei Highland.

Key words: fertilization; mulching; soil bulk density; saturated hydraulic conductivity; water-stable aggregates

冬小麦是渭北旱塬主要的粮食作物, 降水不足且时空分布不均以及土壤贫瘠是影响该地区冬小麦产量的主要因素^[1-2]。因此, 通过合理施肥和采取蓄水保墒等农耕措施来改善土壤性状是提高该地区作物产量的有效措施。合理的肥料配施可以有效改善土壤物理状况, 提高地力水平, 进而提高作物产量^[3-8]。研究表明, 氮磷肥配施能够显著提高小麦产量^[3-4]。氮磷肥配施钾肥可以显著提高作物产量和品质^[5], 降低收获期土壤容重, 增加土壤总孔隙度, 提高土壤水分利用效率, 增加耕层土壤有机质含量^[5]。生物炭的施加, 可以降低土壤容重^[6], 增加土壤饱和导水率^[5], 增强土壤持水性能^[7], 增加土壤大团聚体含量^[8]。地膜覆盖能够减少土壤地表无效蒸发^[9], 具有良好的蓄水保墒效果^[10], 是旱作农田提高水分利用效率的有效措施^[11]。但有大量研究发现, 地膜覆盖下作物耗水量增加, 土壤墒情有所下降, 在覆膜后期经常会出现因作物过度耗水而导致的“青干现象”^[12-14]。地膜覆盖时期不同, 对土壤物理性质也会产生不同的影响, 其主要表现在土壤水分变化上。

对旱地冬小麦研究发现, 夏闲期覆膜可显著提高播种前土壤储水量^[15], 而生育期覆膜则会增加土壤的耗水量^[16], 与夏闲期覆膜相比, 全年覆膜水分利用效率更高^[17]。到目前为止, 关于施肥或覆盖对小麦增产及耕层土壤理化性质影响的研究较多, 但施肥和不同地膜覆盖时期对土壤剖面物理性质影响的研究较少。针对这一现状, 本文依托长武农业生态试验站长期不同施肥覆盖措施定位试验, 对试验区 2016—2017 年冬小麦收获期 0—40 cm 土壤含水量、容重、总孔隙度、饱和导水率和水稳定性团聚体进行测定与分析, 比较不同施肥覆盖措施下土壤剖面相关物理性质的差异, 旨在探索适合该区域保持良好土壤物理性质的措施, 为旱作农业区高效用水提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 试验区概况

试验区位于陕西省长武县长武农业生态试验站 (35°14' N、107°40' E), 为暖温带半湿润大陆性季风

气候, 农作物以一年一熟小麦和玉米为主。年均降雨量 578.5 mm, 且季节分布不均, 降水主要分布在 7—9 月。平均海拔 1200 m, 日照时数 2226 h, 年均气温 9.1℃, 1 月份平均气温 -4.7℃, 7 月份平均气温 22.1℃。地处黏黑垆土地带, 母质为深厚的马兰黄土。0—40 cm 土层容重为 1.23~1.44 g/cm³, 颗粒组成以 0.01~0.05 mm 粗颗粒为主, 孔隙度 50% 左右。

1.2 试验设计

田间定位试验始于 2002 年, 各处理每年均保持不变, 供试作物为一年一熟冬小麦, 品种均为长航 1 号, 行播种植, 行距 20 cm。本季冬小麦于 2016 年 9 月 26 日播种, 2017 年 6 月 24 日收获。小区采用随机区组设计, 面积为 35 m² (5 m × 7 m), 每个小区周边有 10 cm 高的田埂与邻近小区隔开。本文选取 2016—2017 一季作物的 6 个处理进行研究 (表 1), 其中 NP、NPB 两个处理设 4 次重复, 其它处理设 3 次重复, 共 20 个小区。试验用地膜为宽 60 cm、厚 0.015 mm 的聚乙烯薄膜。生物炭基本性质见文献[5]。

1.3 试验方法

冬小麦收获后, 在各小区相同对角线中点及 1/4 点共 3 点 (除 NP、NPB 处理为 12 次重复, 其余处理皆为 9 次重复) 挖阶梯状土壤剖面进行取样

(2017 年 7 月 7 日至 10 日)。剖面共分为四层, 即 0—10、10—20、20—30 和 30—40 cm。分别在每个土层中部进行取样, 用于测定土壤含水量、土壤容重、饱和导水率和水稳定性团聚体。

土壤饱和导水率测定采用定水头自下供水法, 土壤容重和土壤含水量测定采用烘干法^[18]。

土壤水稳定性团聚体组成采用湿筛法^[19]测定。采集每个土层原状土, 自然风干后, 将原状土壤样品沿土壤结构的自然剖面分成直径约为 1 cm 的土壤颗粒, 过 8 mm 筛, 去除动植物残体和石块备用。将孔径为 2、0.25 和 0.053 mm 的筛子按孔径由大到小叠放成一组套筛, 称取 200 g 风干土样, 筛分成不同粒级团聚体, 称重并计算其各组分重量比例, 按照比例配 50 g 土样用于湿筛测定。将 50 g 土样置于团聚体分析仪套筛最上层 (套筛孔径自上而下依次为 2、0.25 和 0.053 mm), 沿桶壁缓慢加入去离子水至水没过土样, 浸泡 10 min, 竖直震荡 30 min, 30 次/min, 振幅为 4 cm。按次序收集各级筛子及铁桶中土样于 100 mL 烧杯中, 依次为大团聚体 (> 2 mm)、较大团聚体 (2~0.25 mm)、微团聚体 (0.25~0.053 mm) 和粘粉粒组分 (< 0.053 mm), 然后于 60℃ 下烘干至恒重, 称量各粒径的质量, 计算出各粒级团聚体的质量分数。

表 1 具体试验处理措施

Table 1 Details of experimental treatments

代码 Code	处理 Treatment	耕作管理 Tillage management
NP	N150 kg/hm ² + P 75 kg/hm ²	冬小麦播种前与收获后各翻耕一次, 深度约为 20 cm, 无覆盖, 播种前施氮、磷肥作基肥 Twice 20-cm-plough before sowing and after harvest of winter wheat, basal applying N 150 kg/hm ² and P 75 kg/hm ²
NPK	NP + K 30 kg/hm ²	基施 N 150 kg/hm ² 、P 75 kg/hm ² 、K 30 kg/hm ² Basal applying N 150 kg/hm ² , P 75 kg/hm ² and K30 kg/hm ²
NPB	NP + 生物炭 NP + biochar 14.0 t/hm ²	基施 N 150 kg/hm ² 、P 75 kg/hm ² 、生物炭 14.0 t/hm ² Basal applying N 150 kg/hm ² , P 75 kg/hm ² and biochar 14.0 t/hm ²
NPFFT	NP + 地膜夏闲期覆盖 NP + fallow period film mulching	收获后翻耕, 夏闲期内地表全部覆盖地膜, 降水仅从膜间隙进入土壤, 播种小麦前清除地膜, 基施 N 150 kg/hm ² 、P 75 kg/hm ² After harvest, whole soil area mulched with plastic film during summer fallow, allowing rainfall entered soil through film gaps. Clearing film before sowing and basal applying N 150 kg/hm ² , P 75 kg/hm ²
NPFGT	NP + 地膜生育期覆盖 NP + growing season film mulching	基施 N 150 kg/hm ² 、P 75 kg/hm ² , 地表全部覆盖地膜, 打孔种冬小麦, 降水可以由种植孔进入土壤, 收获后清除地膜 Basal applying N 150 kg/hm ² , P 75 kg/hm ² , whole plot mulched with plastic film during growth season, wheat planted into drilled holes, and rainfall entering soil through holes. Film cleared away after harvest
NPFWT	NP + 地膜全年覆盖 NP + whole year film mulching	基施 N 150 kg/hm ² 、P 75 kg/hm ² , 生育期管理同 NPFGT 处理, 夏闲期管理同 NPFFT 处理 Basal applying N 150 kg/hm ² , P 75 kg/hm ² , the management during growing period was the same as NPFGT treatment, and summer fallow was the same as NPFFT treatment

土壤团聚体稳定性指标采用平均重量直径 (MWD, mm) 和几何平均直径 (GMD, mm) 来描述。计算公式分别为:

$$MWD = \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i \cdot W_i) \quad (1)$$

$$GMD = \exp \left[\sum_{i=1}^n (W_i \cdot \ln \bar{x}_i) \right] \quad (2)$$

式中, \bar{x}_i 为某级团聚体平均直径, W_i 为第 i 级团聚体的质量。

1.4 数据分析

数据基础处理使用 Excel 2013, 不同处理之间的方差分析和多重比较使用 SPSS 18.0 软件, 绘图用 Origin 9.3 软件。

2 结果与分析

2.1 不同处理对收获期土壤含水量的影响

不同施肥覆盖措施对冬小麦收获后剖面土壤含水量有一定影响 (图 1)。与 NP 相比, NPB、NPFGT 和 NPFWT 处理 0—40 cm 土壤含水量分别平均增加了 7.0%、20.7% 和 10.1%, 且 NPFWT 在 0—10 cm 差异达显著水平 ($P < 0.05$)。NPFWT 处理 0—40 cm 土壤含水量平均降低 4.2%。NPFGT 和 NPFWT 处理表层土壤含水量最高, 随着土壤深度的增加含水量降低。

2.2 不同处理对收获期土壤容重和总孔隙度的影响

6 种不同处理均表现出随着土层深度增加, 容重增加、孔隙度降低的趋势 (图 2, 表 2)。与 NP 处理

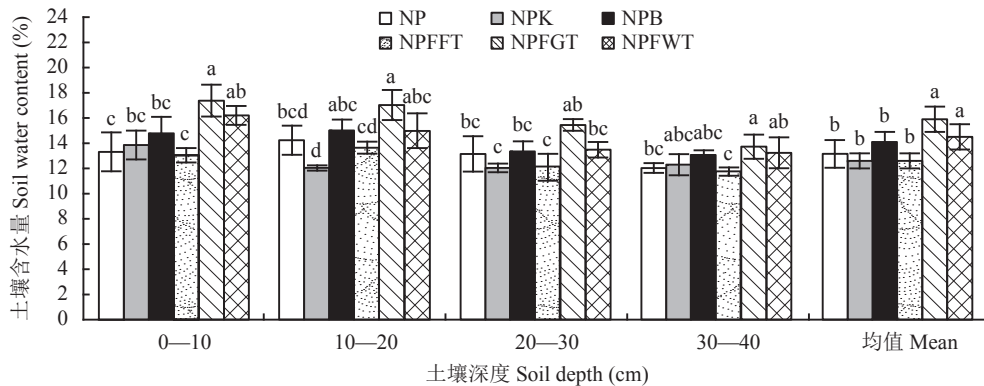


图 1 不同施肥覆盖措施下收获期各层土壤含水量

Fig. 1 Soil water content in each layer under different fertilization and mulching measures at harvest

[注 (Note): 方柱上不同字母表示同层不同处理间在 0.05 水平差异显著]

Different letters above the bars indicate significant difference among treatments for the same soil layer at 0.05 level.]

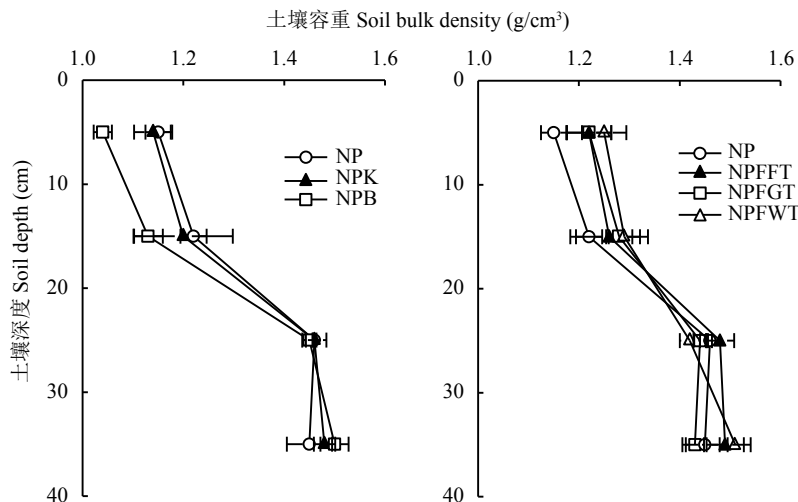


图 2 不同施肥覆盖措施下收获期各层土壤容重

Fig. 2 Soil bulk density in each layer under different fertilization and mulching measures at harvest

相比, NPK 和 NPB 处理使耕层 (0—20 cm) 土壤容重分别降低了 1.3% 和 8.5%; NPFFT、NPFGT 和 NPFWT 处理三种覆膜处理使耕层土壤容重分别增加了 4.7%、5.5% 和 7.3%。

在 0—10 cm 土层, 与 NP 处理相比, NPK 和 NPB 处理土壤总孔隙度分别增加了 0.7% 和 7.3%, NPB 处理达到极显著水平 ($P < 0.01$), NPFFT、NPFGT 和 NPFWT 处理土壤总孔隙度分别显著降低了 5.1%、4.9% 和 6.7%, NPFWT 处理达到极显著水平 ($P < 0.01$)。在 10—20 cm 土层, 与 NP 处理相比, NPK 和 NPB 处理土壤总孔隙度分别增加了 1.4% 和 6.6%, NPFFT、NPFGT 和 NPFWT 处理土壤总孔隙度分别降低了 2.7%、4.2% 和 4.8%, 但均未达到显著水平 (表 2)。

2.3 不同处理对收获期土壤饱和和导水率的影响

不同施肥覆盖措施对剖面土壤饱和和导水率有一定的影响 (表 3)。与 NP 处理相比, NPK 处理土壤饱和和导水率在 0—10 cm 显著降低 29.5%; NPB 处理土壤饱和和导水率在 0—10 cm 显著降低 27.9%, 在

10—40 cm 平均提高 31.2%, 但在各个土层均未达到差异显著水平; NPFGT 处理在 0—40 cm 土壤饱和和导水率平均降低 32.0%, 且在 0—10 cm 显著降低 60.2%, 并达到极显著水平 ($P < 0.01$), 其余土层均未达到显著水平; NPFWT 处理土壤饱和和导水率, 在 0—10 cm 下降 21.0%, 差异未达到显著水平, 在 10—40 cm 平均提高 57.5%, 且 10—20 cm 达到极显著水平 ($P < 0.01$)。

2.4 不同处理对收获期土壤水稳性团聚体的影响

2.4.1 水稳定性团聚体分布 不同施肥覆盖措施下各粒级团聚体的分布表现出类似的规律 (图 3), 在各个土层各处理团聚体主要集中在 2~0.25 mm 和 < 0.053 mm, 且 > 2 mm 的团聚体含量最低。在 0—40 cm 土层, 与 NP 处理相比, NPK、NPB 和 NPFWT 处理 > 2 mm 的团聚体含量分别平均增加了 45.9%、59.5% 和 92.1%, 其中 NPK 和 NPB 处理在 0—10 cm 土层分别显著提高了 1.3 倍和 1.0 倍, NPFWT 处理在 20—30 cm 和 30—40 cm 土层分别显著提高了 2.4 倍和 1.0 倍。NPFWT 处理在 0—10

表 2 不同施肥覆盖措施收获期各层土壤总孔隙度 (%)

Table 2 Soil porosity in each layer under different fertilization and mulching measures at harvest

处理 Treatment	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—40 cm
NP	56.75 ± 0.96 bB	53.99 ± 1.00 abAB	44.84 ± 0.17 bcAB	45.26 ± 1.69 abA
NPK	57.12 ± 1.45 bB	54.75 ± 3.72 abAB	44.98 ± 0.91 bcAB	44.26 ± 0.79 abcA
NPB	60.91 ± 0.70 aA	57.54 ± 1.11 aA	45.14 ± 0.26 abcAB	43.49 ± 1.05 bcA
NPFFT	53.88 ± 1.70 cBC	52.54 ± 2.92 bB	44.01 ± 1.04 cB	43.64 ± 1.41 abcA
NPFGT	53.95 ± 1.68 cBC	51.70 ± 0.97 bB	45.51 ± 0.49 abAB	45.89 ± 0.69 aA
NPFWT	52.94 ± 1.65 cC	51.40 ± 1.16 bB	46.30 ± 0.75 aA	42.85 ± 1.17 cA

注 (Note): 同列数据后不同小写字母和大写字母分别表示不同施肥覆盖措施之间土壤总孔隙度在 0.05 水平和 0.01 水平上差异显著。Different small and capital letters after values in a column are significant differences among treatments at 5% and 1% levels, respectively.

表 3 不同施肥覆盖措施收获期剖面土壤饱和和导水率 (cm/d)

Table 3 Soil saturated hydraulic conductivity of profile under different fertilization and mulching measures at harvest

处理 Treatment	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—40 cm
NP	7.91 ± 0.32 aA	5.04 ± 0.84 bcB	5.43 ± 0.73 aA	4.36 ± 0.18 bcAB
NPK	5.58 ± 0.38 bAB	9.38 ± 1.15 abAB	5.32 ± 0.53 aA	7.47 ± 1.60 aA
NPB	5.70 ± 0.92 bAB	5.85 ± 1.45 bcAB	7.09 ± 0.48 aA	6.84 ± 1.26 abAB
NPFFT	6.82 ± 0.55 abA	6.34 ± 1.59 bcAB	6.63 ± 0.39 aA	2.63 ± 0.76 cB
NPFGT	3.15 ± 0.88 cB	4.85 ± 0.39 cB	3.77 ± 0.44 aA	2.91 ± 0.53 cB
NPFWT	6.25 ± 2.02 abA	11.61 ± 3.02 aA	6.31 ± 1.33 aA	5.51 ± 0.47 abcAB

注 (Note): 同列数据后不同小写字母和大写字母分别表示不同施肥覆盖措施间土壤总孔隙度在 0.05 水平和 0.01 水平差异显著。Different small and capital letters after values in a column are significant differences among treatments at 5% and 1% levels, respectively.

cm 和 10—20 cm 土层 < 0.053 mm 粘粒含量分别显著降低了 34.7 和 15.2%。

2.4.2 水稳定性团聚体稳定性 不同施肥覆盖措施对剖面土壤水稳定性团聚体稳定性有一定的影响，

MWD 和 GMD 可反映土壤团聚体的稳定性状况 (图 4)。相较于 NP 处理，NPK 和 NPB 处理各层土壤水稳定性团聚体 MWD 和 GMD 除 10—20 cm 土层外均呈增加趋势。其中 0—10 cm 土层 MWD 分别增加

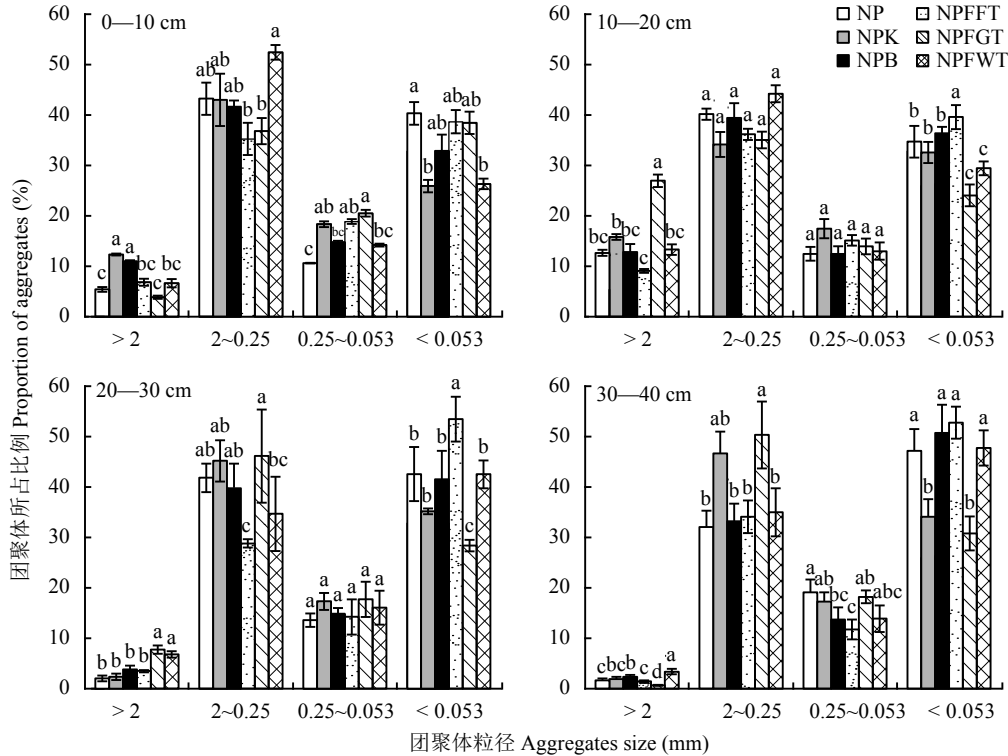


图 3 不同施肥覆盖措施下收获期剖面水稳性团聚体的分布

Fig. 3 Water-stable aggregates distribution of profile under different fertilization and mulching measures at harvest

[注 (Note) : 方柱上不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著

Different letters above the bars indicate significant difference among treatments at 0.05 level.]

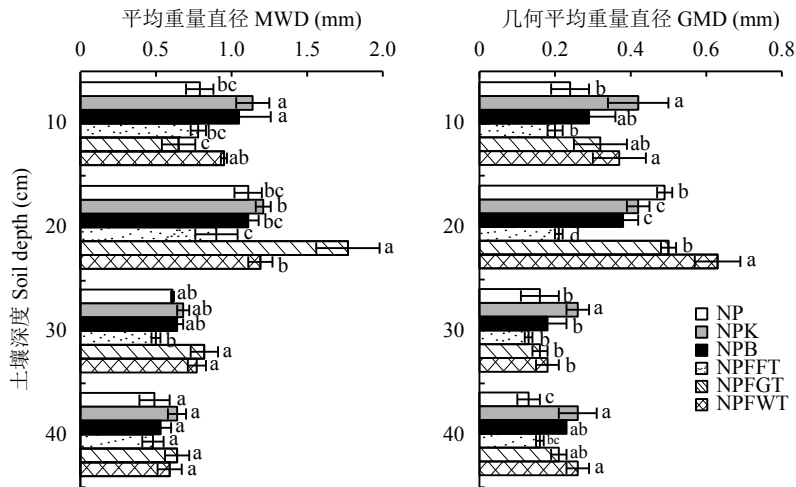


图 4 不同施肥覆盖措施下收获期剖面水稳性团聚体的平均重量直径和几何平均重量直径

Fig. 4 Mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of water-stable aggregates in each layer under different fertilization and mulching measures at harvest

[注 (Note) : 方柱旁不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著

Different letters right by the bars indicate significant difference among treatments at 0.05 level.]

了 44.3% 和 32.9%, 均达到显著水平 ($P < 0.05$); GMD 分别增加了 75.0% 和 20.8%, 但仅 NPK 处理达到显著水平 ($P < 0.05$)。20—30 cm 土层 MWD 分别增加了 11.5% 和 4.9%, 均未达到显著水平; GMD 分别增加了 62.5% 和 12.5%, NPK 处理达到显著水平 ($P < 0.05$)。30—40 cm 土层 MWD 分别增加了 30.6% 和 8.2%, GMD 分别增加了 100% 和 76.9%, 且两个处理的 GMD 均达到显著水平 ($P < 0.05$)。较 NP 处理, NPFWT 处理在 0—40 cm 各土层土壤水稳定性团聚体稳定性均有不同程度的提高, MWD 平均提高 18.5%, 在各土层分别提高了 20.2%、7.2%、26.2% 和 20.4%, 但均未达到显著水平; GMD 平均提高 48.8%, 在各土层分别提高了 54.2%、28.6%、12.5% 和 1.0 倍, 且除 20—30 cm 外其余土层皆达到显著水平 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 不同管理措施对收获期土壤含水量的影响

在本研究中, 冬小麦收获后与 NP 处理相比, NPB、NPFGT 和 NPFWT 处理在 0—40 cm 各土层土壤含水量均增加, 而 NPFPT 处理土壤含水量均降低 (图 1)。主要是由于生物炭的施加能够改善土壤孔隙状况, 提高土壤保水性, 在探索生物炭对黄土区土壤水分入渗影响的相关试验^[20]中也印证了这一观点。地膜覆盖可以有效抑制地表土壤水分蒸发^[15], 生育期覆膜能够促进植物根系对下层土壤水分的利用, 促进下层土壤水分向土体上层迁移^[16], 夏闲期覆膜能够在播种前为土壤储存大量水分供作物生育期使用^[21]。因 NPFGT 和 NPFWT 处理在生育期均有地膜覆盖, 所以收获期 0—40 cm 各土层土壤含水量均高于 NP 处理, 而 NPFPT 处理生育期没有地膜覆盖, 且上一休闲期储存的水分已经在生育期消耗, 因此土壤水分含量较低。柴守玺等^[16]研究指出, 冬小麦收获期 0—200 cm 平均土壤含水量覆膜处理较对照有所降低, 这与本研究结果不同, 可能是由于两个试验研究的土层深度不同, 覆膜有利于改善表层土壤墒情, 而下层土壤含水量却会降低, 一方面因为无法受到降雨入渗补充, 另一方面覆膜会增加冬小麦生育期耗水及对下层土壤水分的利用。

3.2 不同管理措施对收获期土壤容重和孔隙度的影响

施钾肥会促进冬小麦生长, 增加地下部分小麦根系残留量^[21], 进而增加土壤中有机质含量, 改善土

壤结构。本研究与付威等^[5]对耕层土壤的研究结果一致, 在氮磷肥配施的基础上施加钾肥, 0—10 cm 和 10—20 cm 土壤容重分别降低 0.9% 和 1.6%。但 20—30 cm 土层容重基本无变化, 30—40 cm 土层容重增加 2.1%, 导致犁底层土壤容重增加的原因可能是, 钾肥主要施加在耕层, 促进了上层根系的生长, 对下层根系生长有一定抑制作用。

施加生物炭后, 0—20 cm 的土壤容重降低, 土壤总孔隙度显著增加, 这与相关研究^[22-25]对耕层土壤探究中得出的结果一致。施加生物炭有利于降低土壤容重, 增加土壤总孔隙度, 达到改良土壤物理性状的作用^[7], 其主要原因是加入的生物炭本身容重低于矿质土壤, 加入土壤后产生稀释作用, 从而降低了土壤容重^[5]。因当地耕作深度为 20 cm 左右, 生物炭无法到达深层, 所以 20—40 cm 土层容重并未降低。

降雨和小麦生长耗水的时空分布不均衡及土壤水分蒸发损失是目前制约黄土塬区小麦生长的主要因素。夏闲期和生育期覆膜可以有效缓解这个问题, 但是长期地膜覆盖却增加了 0—20 cm 土壤容重, 降低土壤总孔隙度 (图 2、表 2), 导致土壤质量的下降。由于地膜材质以聚乙烯为主, 不易降解, 经长期覆盖后会残留在耕层土壤中, 阻塞土壤孔隙, 导致耕层土壤总孔隙度下降, 土壤容重增大^[23]。虽然本研究开展过程中播种前和收获后均人工清除地膜, 减少了土壤中塑料薄膜残留, 但依旧产生了塑料垃圾, 增加了工作量, 不利于持续发展。因此, 今后若在该地区使用可降解地膜, 可达到既促进小麦增产又保护生态环境的双重目的。

3.3 不同管理措施对收获期土壤饱和和导水率的影响

相关研究显示, 生物炭的施用可以显著降低土壤容重, 增加土壤总孔隙度, 提高土壤水分入渗能力, 增加表层土壤饱和和导水率^[22, 26]。本研究发现施加生物炭后 0—10 cm 饱和和导水率下降, 可能是由于生物炭的施加在土壤表层累积, 堵塞了部分大孔隙, 因而会减少土壤大孔隙的数量, 增加中小孔隙的数量^[27], 小孔隙的增加降低了土壤水分传导能力, 导致表层土壤饱和和导水率降低。10—40 cm 各层土壤饱和和导水率较 NP 处理均呈增加趋势, 但均未达到显著水平, 主要受土壤总孔隙度的影响, 生物炭具有增加土壤总孔隙度的作用, 在本研究中 10—40 cm 各层土壤总孔隙度较 NP 处理均增加, 但均未达到显著水平。

聚乙烯薄膜因其难降解性, 导致覆膜后表层土壤的孔隙度和透水性降低, 进而降低土壤饱和和导水率^[5]。本试验也反映出这一规律, 在 0—10 cm 土层, NPFFT、NPFGT 和 NPFWT 三种覆膜处理土壤饱和和导水率分别降低 13.8%、60.2% 和 21.0%, 且 NPFGT 处理在 10—40 cm 土层饱和和导水率也降低。然而, 在本试验中, NPFWT 处理增加了 10—40 cm 土层饱和和导水率。出现这种现象的原因可能是全年覆膜会促进冬小麦生长并产生大量的根系分泌物, 增加了土壤有机质含量^[5], 但因地膜残留主要集中在土壤表层, 所以地膜覆盖下 10—40 cm 土层饱和和导水率增加。

3.4 不同管理措施对收获期土壤水稳定性团聚体的影响

本研究中, NPK 处理 0—40 cm 各土层 > 2 mm 的大团聚体含量均增加, 且除 10—20 cm 土层其余土层的 MWD 和 GMD 值均增加。说明钾肥的施加可促进土壤中大团聚体的形成^[28]并增加水稳定性团聚体稳定性。付威等前期研究显示, 施加钾肥可提升耕层土壤全氮和有机质含量^[5], 而有机质中的多糖、胡敏酸和蛋白质等均为良好的胶结剂, 可促进土壤团聚体的形成。

施加生物炭后, 0—40 cm 各土层 > 2 mm 的大团聚体含量均增加, 且除 10—20 cm 外, 其余土层的 MWD 和 GMD 值均增加。说明施加生物炭可促进土壤中大团聚体的形成并增加土壤水稳定性团聚体稳定性。Glaser 等^[7]研究发现, 生物炭具有促进土壤颗粒形成土壤团聚体和有机无机复合体的作用, 同时能够提高土壤团聚体稳定性。一方面由于生物炭本身为大分子结构^[29], 比表面积较大, 具有胶结和团聚作用, 能够促进微团聚体向较大团聚体和大团聚体转化^[30]; 另一方面, 土壤微生物能够分泌增加土壤团聚性的胶结物质, 施加生物炭后, 土壤有机质含量增加^[31], 可促进微生物生长发育和胶结物质的产生^[32]。

氮磷肥配合地膜全年覆盖, 0—40 cm 各土层 > 2 mm 的大团聚体含量、MWD 和 GMD 值均增加。表明地膜全年覆盖可促进土壤中大团聚体的形成和土壤水稳定性团聚体稳定性的提高。付鑫等^[33]研究显示, 地膜覆盖可提高 0—10 cm 土壤团聚体稳定性并能够促进小团聚体向大团聚体转化。主要原因是, 地膜覆盖可以提高土壤温度^[11], 促进微生物的生长繁殖, 分泌更多的胶结物质^[34], 进而促进土壤大团聚体形成, 增加其稳定性。

本研究发现, 不同施肥覆盖措施对土壤容重、土壤总孔隙度和饱和导水率的影响主要在 0—20 cm 土层, 对 20—40 cm 土层影响较小, 这可能是受到当地耕作习惯的影响, 一般的耕作深度在 20 cm 以内。浅层耕作会影响作物根系下扎, 导致根系分泌物主要分布在上层土壤, 下层土壤有机质较少, 不利于改善土壤物理性质, 影响降水向下层土壤入渗。因此, 应该开展深耕对旱塬土壤剖面理化性质影响的研究。此外, 土壤地力水平的提高需要改善土壤物理、化学和生物学性质, 本文仅从土壤物理性质方面提出了适宜该地区的管理措施, 今后应开展关于该地区土壤物理、化学和生物学三方面属性的综合研究, 全面评价不同管理措施的效果。

4 结论

在氮磷肥配施的基础上增施生物炭, 能够降低收获期耕层土壤容重, 增加耕层土壤总孔隙度, 促进土壤大团聚体形成, 增强土壤持水性和降低表层土壤饱和和导水率, 提高下层土壤饱和和导水率, 但生物炭经济投入较大, 不利于长期使用。氮磷肥配合地膜夏闲期覆盖会降低土壤持水性, 增加耕层土壤容重, 降低耕层土壤总孔隙度。氮磷肥配合地膜生育期覆盖能够增加土壤持水性, 但会增加耕层土壤容重, 降低耕层土壤总孔隙度, 降低土壤饱和和导水率。

在氮磷肥配施的基础上增施钾肥, 能够降低收获期耕层土壤容重, 增加耕层土壤总孔隙度, 促进土壤大团聚体形成。氮磷肥配合地膜全年覆盖能够促进土壤大团聚体形成, 增加水稳定性团聚体稳定性, 增强土壤持水性, 且能够提高 10—30 cm 土壤饱和和导水率。这两个处理综合效应较好, 是适宜该地区保持良好土壤剖面物理性状的有效措施。

参 考 文 献:

- [1] Hao M D, Fan J, Wang Q J, *et al.* Wheat grain yield and yield stability in a long-term fertilization experiment on the Loess Plateau[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(2): 257–264.
- [2] 樊军, 郝明德, 邵明安. 黄土旱塬农业生态系统土壤深层水分消耗与水分生态环境效应[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 61–64.
Fan J, Hao M D, Shao M A. Water consumption and eco-environmental effects in deep soil layers of agro-ecosystem in Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(1): 61–64.
- [3] 姜东, 戴廷波, 荆奇, 等. 氮磷钾肥长期配合施用对冬小麦籽粒品质的影响[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(4): 566–571.
Jiang D, Dai T B, Jing Q, *et al.* Effects of long-term combined

- application of N, P and K fertilizer on grain quality in winter wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(4): 566–571.
- [4] 惠晓丽, 王朝辉, 罗来超, 等. 长期施用氮磷肥对旱地冬小麦籽粒产量和锌含量的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(16): 3175–3185.
Hui X L, Wang Z H, Luo L C, *et al.* Winter wheat grain yield and Zn concentration affected by long-term N and P application in dryland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(16): 3175–3185.
- [5] 付威, 樊军, 胡雨彤, 等. 施肥和地膜覆盖对黄土旱塬土壤理化性质和冬小麦产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(5): 1158–1167.
Fu W, Fan J, Hu Y T, *et al.* Effects of fertilization and film mulching on soil physical and chemical properties and winter wheat yield on the Loess Plateau[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(5): 1158–1167.
- [6] 房彬, 李心清, 赵斌, 等. 生物炭对旱作农田土壤理化性质及作物产量的影响[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(8): 1292–1297.
Fang B, Li X Q, Zhao B, *et al.* Influence of biochar on soil physical and chemical properties and crop yields in rainfed field[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(8): 1292–1297.
- [7] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4): 219–230.
- [8] 徐国鑫, 王子芳, 高明, 等. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(1): 355–362.
Xu G X, Wang Z F, Gao M, *et al.* Effects of straw and biochar return in soil on soil aggregate and carbon sequestration[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(1): 355–362.
- [9] Zhou L M, Li F M, Jin S L, *et al.* How two ridges and the furrow mulched with plastic film affect soil water, soil temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China[J]. *Field Crops Research*, 2009, 113(1): 41–47.
- [10] 毛红玲, 李军, 贾志宽, 等. 旱作麦田保护性耕作蓄水保墒和增产增收效应[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(8): 44–51.
Mao H L, Li J, Jia Z K, *et al.* Soil water conservation effect, yield and income increments of conservation tillage measures on dryland wheat field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(8): 44–51.
- [11] 涂纯, 王俊, 刘文兆. 不同覆盖条件下旱作农田土壤呼吸及其影响因素[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(5): 1103–1110.
Tu C, Wang J, Liu W Z. Variation in soil respiration and its driving factors in rained winter wheat fields with different mulching measures[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(5): 1103–1110.
- [12] 王敏, 王海霞, 韩清芳, 等. 不同材料覆盖的土壤水温效应对玉米生长的影响[J]. *作物学报*, 2011, 37(7): 1249–1258.
Wang M, Wang H X, Han Q F, *et al.* Effects of different mulching materials on soil water, temperature, and corn growth[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(7): 1249–1258.
- [13] 李凤民, 鄢珣, 王俊, 等. 地膜覆盖导致春小麦产量下降的机理[J]. *中国农业科学*, 2001, 34(3): 330–333.
Li F M, Yan X, Wang J, *et al.* The mechanism of yield decrease of spring wheat resulted from plastic film mulching[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, 34(3): 330–333.
- [14] 王俊, 李凤民, 宋秋华, 等. 地膜覆盖对土壤水温和春小麦产量形成的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(2): 205–210.
Wang J, Li F M, Song Q H, *et al.* Effects of plastic film mulching on soil temperature and moisture and on yield formation of spring wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(2): 205–210.
- [15] 邓妍, 高志强, 孙敏, 等. 夏闲期深翻覆盖对旱地麦田土壤水分及产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(1): 132–138.
Deng Y, Gao Z Q, Sun M, *et al.* Effects of deep plowing and mulch in fallow period on soil water and yield of wheat in dry land[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(1): 132–138.
- [16] 柴守玺, 杨长刚, 张淑芳, 等. 不同覆膜方式对旱地冬小麦土壤水分和产量的影响[J]. *作物学报*, 2015, 41(5): 787–796.
Chai S X, Yang C G, Zhang S F, *et al.* Effects of plastic mulching modes on soil moisture and grain yield in dry land winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(5): 787–796.
- [17] 马浩, 郝明德, 郭慧慧, 等. 渭北旱塬不同覆盖措施对小麦产量和水分利用效率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(6): 51–57.
Ma H, Hao M D, Guo H H, *et al.* Effects of different mulching treatments on yield and water use efficiency of winter wheat in Weibei highland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(6): 51–57.
- [18] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. 84–85.
Shao M A, Wang Q J, Huang M B. *Pedophysics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. 84–85.
- [19] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 627–633.
- [20] 肖茜, 张洪培, 沈玉芳, 等. 生物炭对黄土区土壤水分入渗、蒸发及硝态氮淋溶的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(16): 128–134.
Xiao Q, Zhang H P, Shen Y F, *et al.* Effects of biochar on water infiltration, evaporation and nitrate leaching in semi-arid loess area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(16): 128–134.
- [21] He G, Wang Z H, Li F C, *et al.* Soil water storage and winter wheat productivity affected by soil surface management and precipitation in dryland of the Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 171: 1–9.
- [22] Laird D A, Fleming P, Davis D D, *et al.* Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3–4): 443–449.
- [23] Eastman C M. Soil physical characteristics of an Aeric Ochraqualf amended with biochar[D]. Ohio State, USA: MS Thesis of The Ohio State University, 2011.
- [24] 王艳阳, 魏永霞, 孙继鹏, 等. 不同生物炭施加量的土壤水分入渗及其分布特征[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(8): 113–119.
Wang Y Y, Wei Y X, Sun J P, *et al.* Soil water infiltration and distribution characteristics under different biochar addition amount[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(8): 113–119.
- [25] 潘雅文, 樊军, 郝明德, 等. 黄土塬区长期不同耕作、覆盖措施对表层土壤理化性状和玉米产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1558–1567.

- Pan Y W, Fan J, Hao M D, *et al.* Effects of long-term tillage and mulching methods on properties of surface soil and maize yield in tableland region of the Loess Plateau[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(6): 1558–1567.
- [26] 王红兰, 唐翔宇, 张维, 等. 施用生物炭对紫色土坡耕地耕层土壤水力学性质的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 107–112.
- Wang H L, Tang X Y, Zhang W, *et al.* Effects of biochar application on tilth soil hydraulic properties of slope cropland of purple soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(4): 107–112.
- [27] Jones B E H, Haynes R J, Phillips I R. Effect of amendment of bauxite processing sand with organic materials on its chemical, physical and microbial properties[J]. *Journal of Environment Management*, 2010, 91(11): 2281–2288.
- [28] 张亚丽, 吕家珑, 金继运, 等. 施肥和秸秆还田对土壤肥力质量及春小麦品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2): 307–314.
- Zhang Y L, Lü J L, Jin J Y, *et al.* Effects of chemical fertilizer and straw return on soil fertility and spring wheat quality[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(2): 307–314.
- [29] 尚杰, 耿增超, 赵军, 等. 生物炭对壤土水热特性及团聚体稳定性的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(7): 1969–1976.
- Shang J, Geng Z C, Zhao J, *et al.* Effects of biochar on water thermal properties and aggregates stability of Lou soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(7): 1969–1976.
- [30] Brodowski S, John B, Flessa H, *et al.* Aggregate-occluded black carbon in soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57(4): 539–546.
- [31] 花莉, 张成, 马宏瑞, 等. 秸秆生物质炭土地利用的环境效益研究[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(10): 2489–2492.
- Hua L, Zhang C, Ma H R, *et al.* Environmental benefits of biochar made by agricultural straw when applied to soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(10): 2489–2492.
- [32] Liang B Q, Lehmann J, Sohi S, *et al.* Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil[J]. *Organic Geochemistry*, 2010, 41(2): 206–213.
- [33] 付鑫, 王俊, 刘全全, 等. 不同覆盖材料及旱作方式土壤团聚体和有机碳含量的变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1423–1430.
- Fu X, Wang J, Liu Q Q, *et al.* Soil aggregate and organic carbon contents with different surface mulching under dryland farming system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6): 1423–1430.
- [34] 史奕, 陈欣, 沈善敏. 有机胶结形成土壤团聚体的机理及理论模型[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(11): 1495–1498.
- Shi Y, Chen X, Shen S M. Mechanisms of organic cementing soil aggregate formation and its theoretical models[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(11): 1495–1498.