

# 旱地长期覆盖下土壤团聚体有机碳及无机碳的变化规律

李萌<sup>1</sup>, 李彦<sup>1</sup>, 杨那<sup>1</sup>, 马子宗<sup>1</sup>, 王红丽<sup>2</sup>, 岳善超<sup>1,3</sup>, 翟丙年<sup>1</sup>, 王朝辉<sup>1</sup>, 李紫燕<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.甘肃省农业科学院 旱地农业研究所, 甘肃 兰州 730070; 3.西北农林科技大学 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] 研究不同覆盖方式对黄土高原土壤团聚体内部有机碳、无机碳分布的影响, 为研究覆盖条件下土壤团聚体碳固持机制提供理论依据, 推动旱地农田土壤的高效管理。[方法] 依据2012年起实施的长期定位试验, 以种植“先玉335”春玉米的耕作土壤为研究对象, 设置秸秆覆盖(SM)、地膜覆盖(FM)、无覆盖(CK)3个处理, 通过湿筛法分析不同粒径团聚体中碳分布特征及其酶活性。[结果] ①与无覆盖相比, 秸秆覆盖显著增加了各个粒径团聚体有机碳含量( $p < 0.05$ ), 增加幅度为4.8%~18.2%; 而地膜覆盖则显著降低了各粒径有机碳含量( $p < 0.05$ ), 降低幅度为1.2%~7.1%。同一处理下, 团聚体有机碳含量随着粒径的减小先上升后降低。各粒径中有机碳储量在秸秆覆盖下高于地膜覆盖和无覆盖处理。②地膜覆盖相较无覆盖显著增加了团聚体中的无机碳含量( $p < 0.05$ ), 增加幅度为4.3%~5.9%; 秸秆覆盖降低了无机碳含量, 但差异不显著。同一处理下团聚体各粒径中无机碳含量随着粒径的减小先上升后降低。地膜覆盖显著降低了 $> 2$  mm团聚体粒径的无机碳储量, 但显著提高了2~0.25 mm粒径的储量( $p < 0.05$ )。③秸秆覆盖显著增加了团聚体中的总碳含量, 增加幅度为7.1%~12.4%; 同时地膜覆盖和秸秆覆盖都显著提高了2~0.25 mm粒径的总碳储量( $p < 0.05$ )。④秸秆覆盖提高了团聚体中与碳循环相关酶的活性, 地膜覆盖则对其产生降低的影响。相关性分析表明有机碳、总碳含量与碳循环相关的酶活性呈显著正相关关系( $p < 0.05$ )。[结论] 秸秆覆盖和地膜覆盖显著影响碳库在团聚体中的变化, 其中秸秆覆盖在提升土壤地力, 增加土壤碳的固定方面优于地膜覆盖, 具有较大优势。

**关键词:** 春玉米; 秸秆覆盖; 地膜覆盖; 团聚体; 有机碳; 无机碳

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2023)03-0357-09

**中图分类号:** S153.6, S157.4

**文献参数:** 李萌, 李彦, 杨那, 等. 旱地长期覆盖下土壤团聚体有机碳及无机碳的变化规律[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 357-365. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230526.002; Li Meng, Li Yan, Yang Na, et al. Effects of different mulching measures on distribution of organic carbon and inorganic carbon in soil aggregates under spring maize cultivation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 357-365.

## Effects of Different Mulching Measures on Distribution of Organic Carbon and Inorganic Carbon in Soil Aggregates Under Spring Maize Cultivation

Li Meng<sup>1</sup>, Li Yan<sup>1</sup>, Yang Na<sup>1</sup>, Ma Zizong<sup>1</sup>, Wang Hongli<sup>2</sup>,  
Yue Shanchao<sup>1,3</sup>, Zhai Bingnian<sup>1</sup>, Wang Zhaohui<sup>1</sup>, Li Ziyang<sup>1</sup>

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

2. Institute of Dryland Agricultural, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of different mulching methods on the distribution of organic and inorganic carbon in soil aggregates on the Loess Plateau, and the mechanism under which soil aggregates sequester carbon under mulched conditions were determined in order to promote efficient management of dryland farm

收稿日期: 2023-03-20

修回日期: 2023-04-24

**资助项目:** 国家重点研发计划项目“陕甘黄土丘陵区适水改土与生态保育协同技术集成及示范(2021YFD1900704); 国家自然科学基金项目“旱地覆膜栽培土壤团聚体有机碳稳定性改变的微生物机制”(42177342); 陕西省重点项目(2022ZDLNY02; 2020zdzx03-02-01); 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-27); 西北农林科技大学试验示范站(基地)科技创新与成果转化项目(TGZX2020-18); 甘肃省旱作区水资源高效利用重点实验室资助项目(HNSIJ-2021)

**第一作者:** 李萌(1999—), 女(汉族), 黑龙江省哈尔滨市人, 硕士研究生, 主要研究方向为旱地农田土壤水肥管理。Email: 1457503248@qq.com。

**通信作者:** 李紫燕(1976—), 女(汉族), 山西省吕梁市人, 博士, 教授, 主要从事旱地作物水肥高效利用机制的研究。Email: liziyang0161@126.com。

soil. [Methods] The study was conducted on a long-term positioning experiment beginning in 2012. Soil characteristics were studied from plots on which spring corn (“Xianyu 335”) was grown under three treatments: straw mulching (SM), film mulching (FM), and no mulching (CK). Carbon distribution and enzyme activities in aggregates of different particle sizes were determined by the wet sieve method. [Results] ① Organic carbon contents of aggregates of each particle size were significantly greater for SM than for CK ( $p < 0.05$ ), with the increases ranging from 4.8% to 18.2%. However, the organic carbon contents for each particle size were significantly decreased for FM ( $p < 0.05$ ) compared with CK, with the decreases ranging from 1.2% to 7.1%. For any given treatment, the organic carbon content of aggregates initially increased and then decreased with decreasing particle size. Organic carbon storage under SM was greater than under FM and CK. ② Inorganic carbon content in aggregates was significantly greater for FM than for CK ( $p < 0.05$ ), with the increases ranging from 4.3% to 5.9%. SM reduced inorganic carbon content compared with CK, but the difference was not significant. For any given treatment, the inorganic carbon content in each particle size of aggregates initially increased and then decreased with decreasing particle size. FM significantly decreased the inorganic carbon reserves of aggregates  $> 2$  mm in size, but significantly increased the reserves of aggregates 2 mm to 0.25 mm in size ( $p < 0.05$ ). ③ SM significantly increased the total carbon content of aggregates by 7.1% to 12.4%. Both FM and SM significantly increased the total carbon storage of particles ranging from 2 mm to 0.25 mm ( $p < 0.05$ ). ④ SM increased the activity of carbon cycling-related enzymes in aggregates, while FM decreased the activity compared with CK. Correlation analysis showed that there was a significant positive correlation between organic carbon and total carbon content and carbon cycling-related enzyme activities ( $p < 0.05$ ). [Conclusion] SM and FM significantly affected changes in the carbon pool of aggregates. SM was superior to FM in improving soil fertility and increasing soil carbon fixation.

**Keywords:** spring maize; straw mulching; film mulching; aggregates; organic carbon; inorganic carbon

中国旱地农田面积约有  $5.00 \times 10^9$   $\text{hm}^2$ <sup>[1]</sup>,但是旱地农田土壤有机碳含量低且提升难,制约着旱地农业持续发展,因此防治或延缓土壤碳流失和旱地退化已成为当前面临的紧迫任务。近年来许多研究集中在不同施肥措施、不同土地利用方式等对土壤团聚体稳定性及其固碳机制的影响<sup>[2-3]</sup>。

土壤碳库包括有机碳库和无机碳库,其中土壤有机碳库是陆地生物圈中最大的有机碳库,约占陆地生态系统总储量的三分之二<sup>[4-5]</sup>。土壤团聚体是指由土粒胶结形成粒状和团块的土团,是土壤结构的基本单元<sup>[6-8]</sup>。团聚体是有机碳的主要存在场所,可以减少由于微生物矿化和水土流失导致的有机质损失,从而增加土壤有机碳的储量<sup>[8]</sup>。同时一些研究表明,土壤无机碳的转化在全球土壤固碳方面的作用不容小觑<sup>[9]</sup>。还有研究表明无机碳(碳酸钙)是黄土团聚体的主要胶结物质,参与了团聚体的形成<sup>[10-11]</sup>。因此研究团聚体内碳库的变化规律有助于理解土壤的固碳机制。

前人对于不同覆盖方式下团聚体内部有机碳的变化已有许多报道。秸秆的添加促进了团聚体的形成,增加了各级团聚体中有机碳含量<sup>[12-14]</sup>,也促进了有机碳在团聚体内部的转化;叶元生等<sup>[15]</sup>也发现秸

秆覆盖可以显著提高表层土壤团聚体有机碳含量。在地膜覆盖条件下各研究结果不尽相同。付鑫等<sup>[16]</sup>研究认为地膜覆盖措施显著提高了土壤团聚体有机碳含量,高健永等<sup>[17]</sup>研究发现地膜覆盖对粒径小于 0.053 mm 团聚体有机碳含量无显著影响。但是对于不同覆盖处理下团聚体内无机碳含量变化的研究较为薄弱。因此,本研究依托 10 a 长期定位试验,对土壤团聚体内的有机碳和无机碳的变化规律进行分析,研究不同覆盖方式对黄土高原土壤团聚体内部碳库分布的影响,对理解覆盖条件下团聚体内部的固碳机制提供理论依据,推动旱地农田土壤的高效管理与生产力的可持续提升。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

本研究依托的长期定位试验开始于 2012 年,在中国科学院黄土高原生态性农业试验站进行,具体位于黄土高原中南部陕甘交界处陕西省咸阳市长武县洪家镇王东村( $35^{\circ}12'N$ ,  $107^{\circ}40'E$ )。该地位于黄土高原南部—汾渭河谷落叶阔叶林农业生态区,地貌类型为典型的黄土高原沟壑区,属暖温带半湿润大陆性季风气候。塬面平均海拔  $1.20 \times 10^3$  m,年平均气温

9.1 °C, 年均降水 580 mm, 无霜期 171 d, 地下水位 50~80 m, 无灌溉条件, 为典型的旱作雨养农业区。

该地的地带性土壤类型为黑垆土。2022 年播前土壤基础理化性质见表 1 和表 2。

表 1 试验地 0—20 cm 土层土壤基础理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of 0—20 cm soil layer in experiment site

pH 值	容重/ (g · cm <sup>-3</sup> )	有机质/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g · kg <sup>-1</sup> )	速效氮/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效磷/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg · kg <sup>-1</sup> )
8.4	1.3	9.5	1.1	0.9	28.8	20.7	181.9

表 2 试验地土壤质地与团聚体初始含量

Table 2 Soil texture and initial aggregate content in experiment site

颗粒组成/%			团聚体含量/%			
砂粒	粉粒	黏粒	>2 mm	2~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm
28.50	47.80	23.70	18.30	49.10	12.00	20.60

## 1.2 试验设计

试验种植玉米品种为“先玉 335”。田间设置 3 种不同覆盖处理: 秸秆覆盖(SM)、地膜覆盖(FM)和无覆盖(CK)。其中: 地膜覆盖在春玉米播种前进行双垄沟全膜覆盖, 垄宽 40 cm, 垄高 15 cm, 垄间距 60 cm, 覆盖率达到 100%; 秸秆覆盖在春玉米生长至六叶期时将上一生育周期的秸秆切割至 20~30 cm 后均匀覆盖在地表, 覆盖量约为 9.00 × 10<sup>3</sup> kg/hm<sup>2</sup>。试验采用完全随机区组设计, 每个处理设置 3 个重复。小区面积为 6 m × 9 m, 种植密度约为 6.5 × 10<sup>4</sup> 株/hm<sup>2</sup>。

施肥种类为尿素(N 46%) 250 kg/hm<sup>2</sup>, 过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%) 40 kg/hm<sup>2</sup>, 硫酸钾(K<sub>2</sub>O 45%) 80 kg/hm<sup>2</sup>。其中尿素分 3 次施入: 播前期施入 40%, 六叶期施入 30%, 吐丝期施入 30%; 磷肥、钾肥作为基肥与种肥一次性施入。春玉米于 2022 年 4 月 25 日播种, 9 月 27 日收获。玉米全生育期不进行灌溉处理, 水分来源为自然降水; 杂草由人工去除, 其他田间管理方式参照当地农户。

## 1.3 样品采集与分析方法

在玉米生长吐丝期(R<sub>1</sub>)时进行田间采样, 具体方法是: 在田间试验小区内随机选择 3 个取样点, 采样深度为 0—20 cm, 取出的原状土去除石块、根系等杂质后装入一次性塑料盒中, 尽快带回实验室进行后续处理。将采集的原状土进行筛分用于后续试验。

本试验团聚体筛分方法为湿筛法<sup>[18-19]</sup>, 具体方法为: 将 100 g 提前过 8 mm 筛的鲜土样品筛分通过 2, 0.25, 0.053 mm 的套筛。在筛分之前, 先将土壤置于去离子水中浸泡 5 min。浸泡结束后, 启动团粒分析仪, 以 3 cm 的振幅, 30 次/min 的振动频率运行两分钟。筛分结束后, 将各粒径下的土壤样品冲洗至事先称重的铝盒内, 重复上述步骤直至收集到足够的土

壤样品, 得到 >2, 2~0.25, 0.25~0.053, <0.053 mm 4 个粒径的土壤样品。将收集到的土壤样品在 105 °C 下烘干至恒重后称重计算团聚体各粒级比例。

团聚体中的有机碳采用外加热—重铬酸钾氧化法测定; 总碳及无机碳采用全自动碳氮分析仪测定。土壤团聚体酶活性采用微孔板荧光法测定, 具体步骤如下: 取 1 g 筛分好的团聚体新鲜土壤, 置于 250 ml 白瓶中, 加入 125 ml 蒸馏水震荡 2 h。震荡后吸取 1 ml 悬浊液放置于小离心管中, 分别加入底物、标准物和蒸馏水, 在黑暗条件下培养 4 h。培养后吸取 250 μl 悬浊液于 96 微孔板中(微孔板设置样品孔、空白孔、淬灭孔), 使用酶标仪在 450 nm 的激发波长下测定胞外酶的荧光值计算酶活性。

## 1.4 数据处理与统计分析

(1) 团聚体质量比例计算公式如下:

$$\omega_i = \frac{m_i}{m_{\text{总}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $\omega_i$  为各级水稳性团聚体质量比例(%);  $m_i$  为各级水稳性团聚体质量(g);  $m_{\text{总}}$  为土壤样品总质量(g)。

(2) 有机碳、无机碳及总碳储量计算公式如下:

$$\text{SOCS} = H \times \text{BD}_i \times \text{SOC}_i \times (1 - \delta_i) / 100 \times 10 \quad (2)$$

$$\text{SICS} = \omega_i \times \text{BD}_i \times \text{SIC}_i \times H \times 10^{-1} \quad (3)$$

$$\text{SCS} = \text{SOCS} + \text{SICS} \quad (4)$$

式中: SOCS 为第  $i$  级团聚体的有机碳储量(t/hm<sup>2</sup>) (以 C 计); SICS 为第  $i$  级团聚体的无机碳储量(t/hm<sup>2</sup>) (以 C 计); SCS 为第  $i$  级团聚体总碳储量; SOC <sub>$i$</sub>  为第  $i$  级团聚体有机碳含量(g/kg); SIC <sub>$i$</sub>  为第  $i$  级团聚体无机碳含量(g/kg);  $H$  为土层厚度(cm); BD 为土壤容重(g/cm<sup>3</sup>);  $\delta_i$  为石砾含量。

(3) 酶活性的计算公式如下:

$$A_b = F \cdot V / (e \cdot V_1 \cdot t \cdot m) \quad (5)$$

$$F = [(f - f_b) / q] - f_s \quad (6)$$

$$e = f_r / (C_s \cdot V_2) \quad (7)$$

$$q = (f_q - f_b) / f_r \quad (8)$$

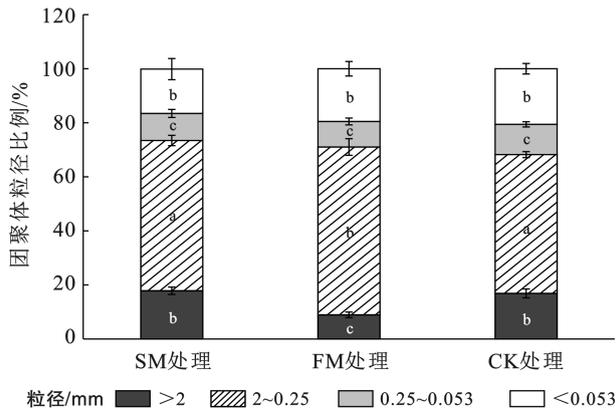
式中:  $A_b$  为土壤胞外酶活性[nmol/(g·h)];  $F$  为校正后的样品荧光值;  $V$  为样品悬浊液的总体积(ml);  $V_1$  为微孔板中每一个孔位中加入的样品悬浊液体积(ml);  $V_2$  为加入参考标准物质的体积(ml);  $f$  为读取的样品荧光值;  $f_b$  为读取的空白荧光值;  $f_q$  为读取的淬灭荧光值;  $f_s$  为读取的阴性对照荧光值;  $f_r$  为读取的参考对照荧光值;  $t$  为在黑暗中培养的时间(h);  $m$  为 1 g 鲜土换算成干土的质量(g);  $e$  为荧光释放系数;  $C_s$  为参考标准微孔位的溶液浓度( $\mu\text{mol/L}$ );  $q$  为淬灭系数。

利用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据整理; IBM SPSS Statistics 21.0 软件进行数据方差分析; OriginPro 2021 软件进行图表绘制。各个处理之间的差异显著均采用最小显著极差法(LSD)法检验,不同处理之间的显著水平采用 5% 水平。

## 2 结果与分析

### 2.1 水稳性团聚体粒径分布

在玉米生长发育的吐丝期,3种处理下 2~0.25 mm 的团聚体粒径均占主要地位,达到 50% 以上,其次是 <0.053 mm 以及 >2 mm,最后是 0.25~0.053 mm。吐丝期地膜覆盖提高了 2~0.25 mm 粒径所占比例,同时显著降低了 >2 mm 粒径的比例( $p < 0.05$ )。其他粒径含量比例在 3 种处理下差异不显著(图 1)。表明覆盖方式改变了大团聚体(>0.25 mm)的比例。



注:小写字母表示各处理之间存在显著差异( $p < 0.05$ );SM 为秸秆覆盖;FM 为地膜覆盖;CK 为无覆盖。下同。

图 1 吐丝期不同处理 0—20 cm 土壤水稳性团聚体组成

Fig.1 Composition of water-stable aggregates in 0—20 cm soil in different treatments during silking stage

### 2.2 土壤团聚体有机碳含量及储量

3 种处理对土壤全土及团聚体有机碳含量的影响见图 2。从图 2 中可以看出秸秆覆盖处理有机碳含量从 6.41 g/kg 变化至 8.67 g/kg;地膜覆盖处理有机碳含量从 5.22 g/kg 变化至 7.91 g/kg;无覆盖则是从 5.42 g/kg 变化至 8.27 g/kg。对于全土来说,3 种处理下有机碳含量由高到低为:秸秆覆盖>无覆盖>地膜覆盖。从团聚体的角度看,秸秆覆盖处理团聚体有机碳含量最高,其次是无覆盖处理,地膜覆盖处理下团聚体有机碳含量最低,与全土规律一致。相较于对照,在秸秆覆盖条件下 >2 mm, 2~0.25 mm, 0.25~0.053 mm 及 <0.053 mm 团聚体有机碳含量增加幅度分别为 8.4%, 4.8%, 12.3% 和 18.2%;而地膜覆盖处理则与秸秆覆盖处理相反,地膜覆盖降低了土壤团聚体有机碳含量,变化幅度分别为 1.2%, 4.4%, 7.1% 以及 3.7%。总体来说,秸秆覆盖显著增加土壤全土及团聚体的有机碳含量,地膜覆盖则呈现显著降低趋势( $p < 0.05$ )。

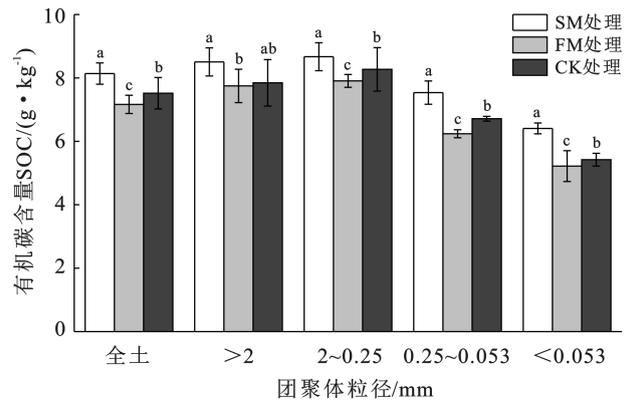


图 2 吐丝期不同处理 0—20 cm 土壤团聚体有机碳含量

Fig.2 Organic carbon content of 0—20 cm soil aggregates in different treatments during silking stage

同一处理下不同团聚体粒径中有机碳含量因粒径大小而产生差异(图 3)。3 种处理下,有机碳含量在 4 种粒径下的含量变化趋势均表现出的一致特点:2~0.25 mm 含量最高,其次是 >2 mm,再次是 0.25~0.053 mm,最后是 <0.053 mm。其中,>2 mm 和 2~0.25 mm 两组粒径有机碳含量差异不显著,0.25~0.053 mm 中显著低于前两组粒径( $p < 0.05$ ),而 <0.053 mm 粒径含量又显著低于 0.25~0.053 mm 粒径( $p < 0.05$ )。

对于团聚体各粒径有机碳储量来说,地膜覆盖显著降低了 >2 mm 粒径的有机碳储量( $p < 0.05$ ),同时显著增加了 2~0.25 mm 粒径中的有机碳储量( $p < 0.05$ ),其余两个粒径的有机碳储量在 3 种条件

下差异不显著,但总体变化趋势是秸秆覆盖高于地膜覆盖和无覆盖两种处理,这与有机碳含量变化趋势一致。

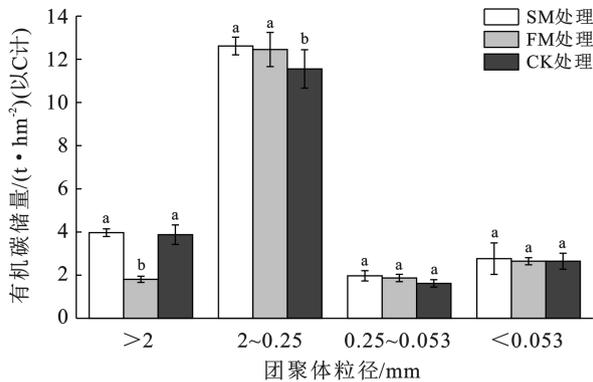


图3 吐丝期不同处理0—20 cm土壤团聚体有机碳储量

Fig.3 Organic carbon storage of 0—20 cm soil aggregates in different treatments during silking stage

### 2.3 土壤团聚体无机碳含量及储量

无机碳含量在3种处理下的变化为地膜覆盖显著增加土壤无机碳含量,秸秆覆盖则呈现相反的结果,但是差异并不显著。地膜覆盖显著增加了全土中的无机碳含量( $p < 0.05$ ),与秸秆覆盖相比增加幅度为5.1%。秸秆覆盖和地膜覆盖两种田间处理方式对团聚体中无机碳含量的影响则主要体现在0.25~0.053 mm及<0.053 mm粒径中(图4),在这两组粒径下的无机碳含量变化规律与土壤全土的变化趋势是相同的,即地膜覆盖显著增加了无机碳含量( $p < 0.05$ )。无机碳含量在秸秆覆盖下从8.74 g/kg变化至10.23 g/kg,地膜覆盖下由9.25 g/kg变化至10.63 g/kg,无覆盖则是由8.90 g/kg改变至10.37 g/kg。3种处理下无机碳含量与有机碳含量呈现相反的趋势,即无机碳含量高低顺序为地膜覆盖高于无覆盖高于秸秆覆盖。地膜覆盖相较于秸秆覆盖显著增加了小粒径中的无机碳含量( $p < 0.05$ )(图4),增加幅度为5.9%和4.3%。对于其他粒径而言,3种处理下差异并不显著。

同一处理下不同团聚体粒径的无机碳含量也表现出了相同的趋势(图4)。>2, 2~0.25, <0.053 mm 3组粒径中无机碳含量差异不显著,但显著降低了<0.053 mm粒径中的含量。总体来看,2~0.25 mm粒径中无机碳含量最高,其次是>2 mm,第三是0.25~0.053 mm,含量最低体现在<0.053 mm粒径中,这与有机碳含量表现出的总体趋势相同。

团聚体各粒径的无机碳储量变化趋势与有机碳储量不同(图5)。地膜覆盖显著降低了>2 mm团聚

体粒径的无机碳储量,但显著提高了2~0.25 mm团聚体粒径的储量( $p < 0.05$ ),其他粒径下3种处理之间差异不显著。

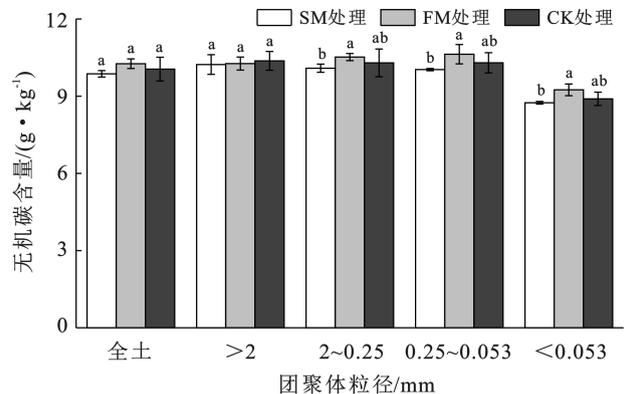


图4 吐丝期不同处理0—20 cm土壤团聚体无机碳含量

Fig.4 Inorganic carbon content of 0—20 cm soil aggregates in different treatments during silking stage

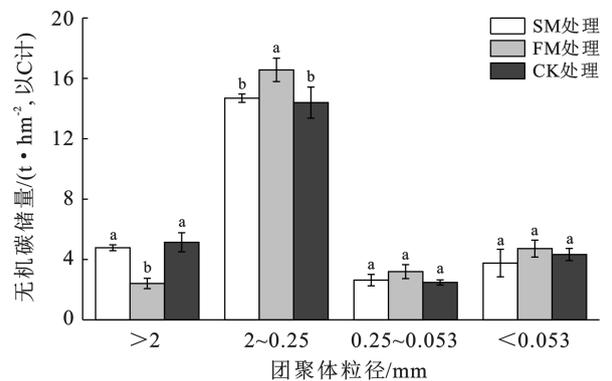


图5 吐丝期不同处理0—20 cm土壤团聚体无机碳储量

Fig.5 Inorganic carbon storage of 0—20 cm soil aggregates in different treatments during silking stage

### 2.4 土壤团聚体总碳含量及储量

土壤团聚体总碳含量的变化趋势见图6。秸秆覆盖提高了土壤中全碳含量,地膜覆盖对全土的总碳含量影响较小,3种处理间差异不显著。3种处理对团聚体内总碳含量的影响也主要体现在0.25~0.053 mm粒径中,但具体变化与无机碳不同,即地膜覆盖相较于秸秆覆盖显著降低了土壤团聚体中的总碳含量,降低幅度为11.63%。总体来说,3种处理下总碳含量由高到低分别为秸秆覆盖、地膜覆盖、无覆盖。

对于同一处理下不同团聚体粒径,3种处理下<0.053 mm粒径的总碳含量均显著降低( $p < 0.05$ ),其他3个粒径差异不显著。总体趋势与有机碳、无机碳相同,总碳含量由高到低的顺序为:2~0.25, >2, 0.25~0.053, <0.053 mm。

总碳储量变化趋势在  $>2$  mm 粒径中与有机碳和无机碳的情况相同(图 7),地膜覆盖显著降低了  $>2$  mm 粒径的总碳储量( $p < 0.05$ ),相对于无覆盖处理,地膜覆盖和秸秆覆盖都显著提高了  $2\sim 0.25$  mm 粒径的总碳储量( $p < 0.05$ ),但地膜覆盖与秸秆覆盖之间差异不显著,总体含量为地膜覆盖高于秸秆覆盖高于无覆盖。

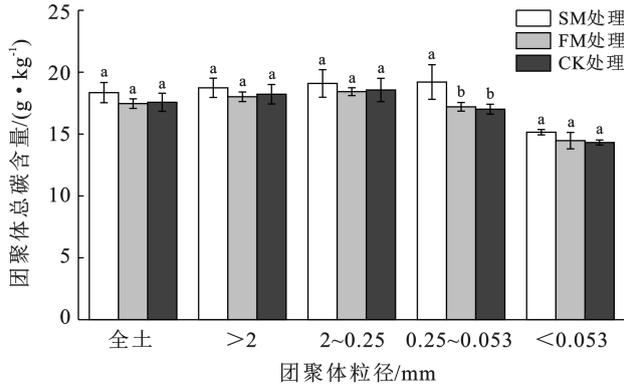
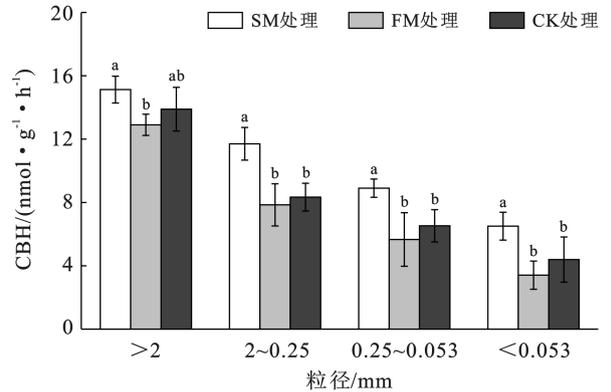
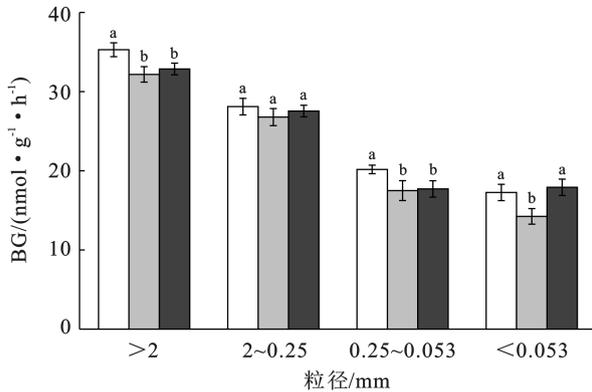


图 6 吐丝期不同处理 0—20 cm 土壤团聚体总碳含量  
Fig.6 Total carbon content of 0—20 cm soil aggregates in different treatments during silking stage



注:BG 为  $\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶;CBH 为  $\beta$ -D-纤维二糖水解酶。下同。

图 8 吐丝期不同处理土壤团聚体碳循环相关酶活性

Fig.8 Enzyme activities related to carbon cycle in soil aggregates in different treatments during silking stage

对于 CBH 酶活性来说,大致规律与 BG 酶相似。随着团聚体粒径的减小,CBH 酶活性随之降低。对于不同处理来说,秸秆覆盖增加了酶活性,其中  $2\sim 0.25, 0.25\sim 0.053, <0.053$  mm 3 组粒径下差异是显著的;地膜覆盖则降低了 CBH 酶活性,但没有差异比较显著的粒径。

## 2.6 土壤团聚体理化性质与有机碳、无机碳、酶活的关系

团聚体中,有机碳与 pH 值呈显著负相关关系,与速效磷、速效钾呈显著正相关关系;无机碳与有机

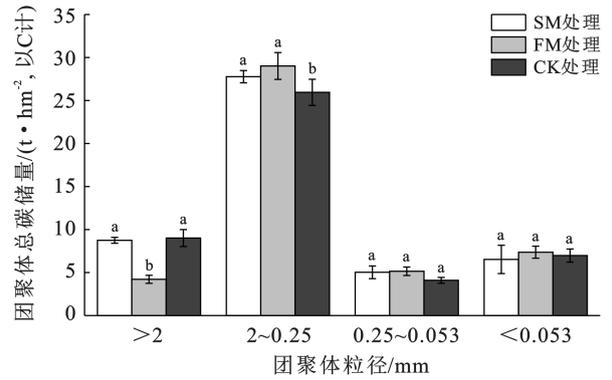


图 7 吐丝期不同处理 0—20 cm 土壤团聚体总碳储量  
Fig.7 Total carbon storage of 0—20 cm soil aggregates in different treatments during silking stage

## 2.5 不同覆盖措施对土壤团聚体酶活性的影响

土壤团聚体内与碳循环相关的两种胞外酶是  $\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶 (BG) 和  $\beta$ -D-纤维二糖水解脱酶 (CBH)。由图 8 可知,其中 BG 酶活性随着团聚体粒径的减小而呈现降低的规律, $>2$  mm 粒径下的 BG 酶活性最高。3 种覆盖措施处理下,总体来说秸秆覆盖增加了同一粒径下的 BG 酶活性, $>2$  mm 和  $0.25\sim 0.053$  mm 2 组粒径下差异比较显著;地膜覆盖降低了 BG 酶活性,但显著的差异仅出现在  $<0.053$  mm 粒径下。

碳、pH 值呈正相关关系,但差异并不显著;总碳与 pH 值呈显著负相关,与速效磷、速效钾正相关,与有机碳、无机碳呈显著正相关。对于与碳循环相关的酶来说,有机碳、总碳含量与 BG, CBH 的活性呈显著正相关关系,而无机碳含量与两种酶活性也呈现正相关关系,但是并不显著(图 9)。

## 3 讨论

### 3.1 覆盖对土壤团聚体有机碳和总碳的影响

大量研究发现覆盖方式对土壤碳库有着巨大的

影响<sup>[20-21]</sup>。本研究表明,秸秆覆盖措施下随着团聚体粒径的增大,有机碳含量也在升高。邓华等<sup>[22]</sup>研究发现秸秆还田措施增加了土壤团聚体的稳定性,并且有机碳含量随着团聚体稳定性的增加而增加,这与本研究得到的结果一致。这一现象的原因是秸秆中含有纤维素、半纤维素等营养物质,是土壤有机质和养分的重要来源,秸秆输入土壤后,将这些营养物质带入土壤中,因此秸秆覆盖提高了土壤团聚体中的有机质含量,这与本研究得到的结果相同(图 2)<sup>[23-24]</sup>。同时秸秆覆盖也增加了土壤团聚体内的有机碳储量(图 3),但集中体现在 2~0.25 mm 的粒径中。这可能是因为 2~0.25 mm 粒径的团聚体是本研究中团聚体的主要粒径,其含量比例均在 50% 以上,对有机碳的含量贡献最大;而覆盖措施对团聚体粒径比例的改变也主要发生在 2~0.25 mm 粒径下,因此有机碳的储量变化也主要存在于 2~0.25 mm 粒径中,其他粒径下的变化则并不显著<sup>[25]</sup>。

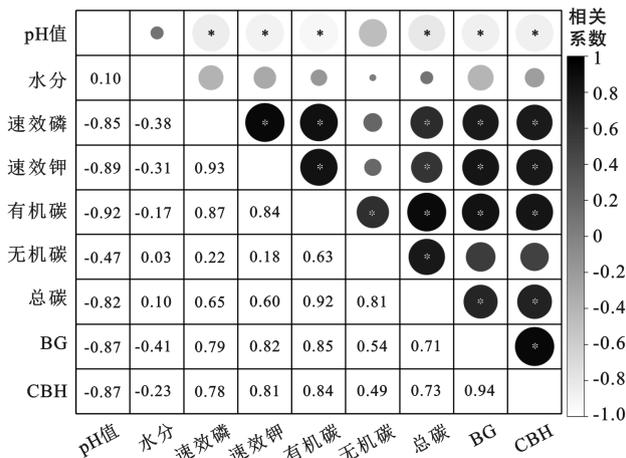


图 9 土壤理化性质及酶活性与有机碳、无机碳及总碳的相关性分析

Fig.9 Correlation analysis of soil physical and chemical properties and enzyme activities with organic carbon, inorganic carbon and total carbon

对于地膜覆盖来说,铺盖地膜增加了土壤蓄水保水能力,提高了土壤微生物的活性,并且加速了碳矿化速率<sup>[26]</sup>。地膜覆盖措施影响土壤中的微生物群落,进而对微生物活动分泌的胞外酶活性产生影响,最终导致覆盖条件下的土壤团聚体中的有机碳含量降低,这是导致土壤有机碳含量略有下降的原因,与杨凯等<sup>[27]</sup>的研究结果类似。作者前期一些工作也发现了秸秆覆盖和地膜覆盖两种措施下细菌和真菌群落之间存在差异,这也可能会导致不同覆盖措施下土壤全土以及团聚体中的有机碳含量存在差异<sup>[28]</sup>。地膜覆盖显著降低了团聚体中 > 2 mm 粒径的有机碳

储量,而显著提高了 2~0.25 mm 粒径的有机碳储量 ( $p < 0.05$ ),对其他粒径并没有显著性的差异。原因可能是地膜覆盖显著降低了团聚体 > 2 mm 的粒径比例而提高了 2~0.25 mm 粒径的比例,导致了有机碳储量在团聚体内的变化。也就是地膜覆盖条件下有机碳储量的变化与团聚体粒径比例的变化是成正比的。

对于土壤团聚体中的总碳来说,秸秆覆盖处理增加了土壤总碳含量,其中显著增加了 0.25~0.053 mm 粒径中的总碳含量 ( $p < 0.05$ )。这可能是由于秸秆是一种外源碳,当这种外源碳输入土壤中,会直接参与土壤生物化学转化过程,为微生物提供更多的碳源,导致大团聚体内的有机碳分解速率加快,促进碳向小团聚体中的聚集。

### 3.2 覆盖对土壤团聚体无机碳的影响

无机碳的变化主要发生在地膜覆盖的条件下。地膜覆盖增加了土壤无机碳的含量,其中显著变化发生在 0.25~0.053 mm 粒径中。可能的原因如下: ①由于地膜覆盖改变了土壤的水热条件,防止土壤水热散失,加速微生物对土壤有机物质的分解利用,从而加速土壤有机物质向无机物质的转化,导致覆膜条件下土壤无机碳含量上升<sup>[29]</sup>; ②有机碳分解过程中产生的  $\text{CO}_2$  影响了碳酸盐的溶解与沉淀,这一过程发生的反应如下为:  $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{CO}_3^{2-} + 2\text{H}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \leftrightarrow \text{CaCO}_3$  和  $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ , 导致团聚体中的无机碳库发生变化<sup>[30]</sup>; ③土壤无机碳库含量的变化主要取决于碳酸盐的溶解、迁移及再沉淀,地膜覆盖降低了土壤表层的  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  等离子随水分的流失,因而形成了更多的次生碳酸盐,导致地膜覆盖方式下无机碳含量的上升<sup>[10]</sup>,这与本研究得到的结果相同。并且由于地膜覆盖改善了土壤的水热条件,促进了土壤中微生物的活动,导致团聚体粒径分布改变,大粒径 (> 0.25 mm) 对地膜覆盖等耕作措施响应更敏感且稳定性也低于小粒径,因此地膜覆盖条件下无机碳含量变化主要发生在 0.25~0.053 mm 粒径中。目前对无机碳含量的变化研究也多集中在化学过程方面,即重点关注有机物质变为无机物质的矿化过程。地膜覆盖可以加速土壤有机物质的矿化过程,因而对无机碳含量来说其主要变化发生在地膜覆盖的处理之下。

秸秆覆盖条件下对土壤无机碳的影响不大,可能的原因是秸秆覆盖还田的过程中伴随着秸秆的腐解,其产生的有机酸以及发生的秸秆氮硝化和还原硫氧化产生质子<sup>[31-32]</sup>,促进碳酸盐的溶解,碳酸盐向大气

中释放 CO<sub>2</sub>, 导致无机碳含量的降低。但同时秸秆覆盖又增加了土壤的有机碳含量, 也会有一部分有机碳向无机碳发生转变, 最终导致秸秆覆盖条件下的土壤无机碳含量没有显著的变化<sup>[33]</sup>。

## 4 结论

(1) 与无覆盖相比, 秸秆覆盖显著增加了团聚体各个粒径下的有机碳含量, 增加幅度为 4.8%~18.2%; 而地膜覆盖则显著降低了有机碳含量, 降低幅度为 1.2%~7.1%。同一处理下, 有机碳含量在 4 种粒径中的含量最高值均在 2~0.25 mm 粒径中, 最低值则出现在 <0.053 mm 粒径中。有机碳储量在秸秆覆盖条件下高于地膜覆盖和无覆盖两种覆盖措施。

(2) 地膜覆盖相较无覆盖显著增加了团聚体中的无机碳含量, 增加幅度为 4.3%~5.9%; 秸秆覆盖降低了无机碳含量, 但差异不显著。同一处理下团聚体中无机碳含量最高的粒径为 2~0.25 mm, 最低含量出现在 <0.053 mm 粒径中。无机碳储量的变化主要在地膜覆盖措施下, 其显著降低了 >2 mm 团聚体粒径的无机碳储量, 但显著提高了 2~0.25 mm 团聚体粒径的储量。

(3) 秸秆覆盖显著增加了团聚体中的总碳含量, 增加幅度为 7.1%~12.4%; 同一处理下的总碳含量高低顺序与有机碳及无机碳规律相同。地膜覆盖和秸秆覆盖都显著提高了 2~0.25 mm 粒径的总碳储量。

(4) 秸秆覆盖提高了团聚体中与碳循环相关酶的活性, 地膜覆盖则对其产生降低的影响。同时相关性分析表明有机碳、总碳含量与碳循环相关的酶活性呈显著正相关关系 ( $p < 0.05$ )。

综上所述, 秸秆覆盖和地膜覆盖对土壤团聚体粒径中的碳的分布有着显著的影响, 其中秸秆覆盖在提升土壤地力, 增加土壤碳的固定能力方面具有较大优势。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Právalie R. Drylands extent and environmental issues: A global approach [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 161: 259-278.
- [2] 潘艳斌, 朱巧红, 彭新华. 有机物料对红壤团聚体稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 209-214.
- [3] 王富华, 吕盛, 黄容, 等. 缙云山 4 种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征[J]. *环境科学*, 2019, 40(3): 1504-1511.
- [4] Cardon Z G, Hungate B A, Cambardella C A, et al. Contrasting effects of elevated CO<sub>2</sub> on old and new soil carbon pools [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(3): 365-373.
- [5] Jastrow J D, Miller R M, Boutton T W. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60(3): 801-807.
- [6] Schmidt M W, Torn M S, Abiven S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property [J]. *Nature*, 2011, 478(7367): 49-56.
- [7] 周泉, 王龙昌, 邢毅, 等. 秸秆覆盖条件下紫云英间作油菜的土壤团聚体及有机碳特征[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1235-1242.
- [8] 刘杰, 马艳婷, 王宪玲, 等. 渭北旱塬土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(7): 3361-3368.
- [9] Falkowski P, Scholes R J, Boyle E, et al. The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system [J]. *Science*, 2000, 290(5490): 291-296.
- [10] 周建斌, 陶静静, 赵梦真, 等. 农业生产对石灰性土壤无机碳库损失的影响[J]. *土壤学报*, 2022, 59(3): 593-602.
- [11] 郭玉文, 加藤诚, 宋菲, 等. 黄土高原黄土团粒组成及其与碳酸钙关系的研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(3): 362-368.
- [12] 王仁杰, 强久次仁, 薛彦飞, 等. 长期有机无机肥配施改变了塿土团聚体及其有机和无机碳分布[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4678-4689.
- [13] 荣勤雷, 李若楠, 黄绍文, 等. 不同施肥模式下设施菜田土壤团聚体养分和微生物量特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(7): 1084-1096.
- [14] 孙宇婷, 周连仁, 孟庆峰, 等. 长期施用有机肥对草甸碱土水稳性团聚体及其碳氮分配的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2014(1): 6-10.
- [15] 叶元生, 黄彩霞, 柴守玺, 等. 秸秆带状覆盖对旱地冬小麦农田土壤特性及产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(6): 146-152.
- [16] 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.
- [17] 高健永, 刘菲, 王楚涵, 等. 减氮覆膜对黄土旱塬土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. *山西农业科学*, 2021, 49(9): 1081-1087.
- [18] Six J, Paustian K, Elliott E T, et al. Soil structure and organic matter (I): Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(2): 681-689.
- [19] 郑伟. 生草覆盖下不同施肥方式对苹果产量品质及水肥利用效率的影响及其机理研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [20] 付鑫, 王俊, 赵丹丹. 地膜覆盖对黄土高原旱作春玉米田土壤碳氮组分的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(3):

- 239-243.
- [21] 张彤勋,皮小敏,孙本华,等.秸秆与地膜覆盖对旱作矮土碳氮组分的影响[J].西北农业学报,2018,27(8):1225-1233.
- [22] 邓华,高明,龙翼,等.生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响[J].环境科学,2021,42(11):5481-5490.
- [23] 徐国伟,段骅,王志琴,等.麦秸还田对土壤理化性质及酶活性的影响[J].中国农业科学,2009,42(3):934-942.
- [24] 石丽红,李超,唐海明,等.长期不同施肥措施对双季稻田土壤活性有机碳组分和水解酶活性的影响[J].应用生态学报,2021,32(3):921-930.
- [25] Fonte S, Yeboah E, Ofori P, et al. Fertilizer and residue quality effects on organic matter stabilization in soil aggregates [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009,73(3):961-966.
- [26] 黄冬琳,同斯捷,岳良,等.原位酶谱技术分析旱地长期覆盖下根际酶活性空间分布[J].农业工程学报,2022,38(5):123-130.
- [27] 杨凯,胡庆兰,王金贵.青海东部地膜覆盖对土壤固碳能力和肥力水平的影响[J].中国农学通报,2021,37(33):105-111.
- [28] 马寰菲,胡汗,李益,等.秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系[J].环境科学,2021,42(9):4510-4519.
- [29] Mulvaney R L, Khan S A, Ellsworth T R. Synthetic nitrogen fertilizers deplete soil nitrogen: A global dilemma for sustainable cereal production [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009,38(6):2295-2314.
- [30] 李雨诺,樊媛媛,曹彬彬,等.关中平原麦玉轮作体系作物秸秆不同还田模式下土壤有机碳和无机碳库变化特征[J].应用生态学报,2021,32(8):2703-2712.
- [31] Huijin Shi, Wang Xiujun, Wang Yuanjie, et al. Relationship between soil inorganic carbon and organic carbon in the wheat-maize cropland of the North China Plain [J]. *Plant and Soil*, 2017,418(1):423-436.
- [32] 孙昭安,王方,张珊,等.秸秆添加对石灰性土壤有机与无机碳释放的影响[J].土壤学报,2021,58(6):1520-1529.
- [33] 曾骏,董博,张东伟,等.不同施肥方式对灌漠土土壤有机碳、无机碳和微生物量碳的影响[J].水土保持通报,2013,33(2):35-38.

(上接第356页)

- [17] 赵荣钦,张帅,黄贤金,等.中原经济区县域碳收支空间分异及碳平衡分区[J].地理学报,2014,69(10):1425-1437.
- [18] Xia Chang, Yeh A G O, Zhang Anqi. Analyzing spatial relationships between urban land use intensity and urban vitality at street block level: A case study of five Chinese megacities [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2020,193:103669.
- [19] Newbold T, Scharlemann J P W, Butchart S H M, et al. Ecological traits affect the response of tropical forest bird species to land-use intensity [J]. *Proceedings Biological Sciences*, 2013,280(1750):20122131.
- [20] Jiang Li, Deng Xiangzheng, Seto K C. The impact of urban expansion on agricultural land use intensity in China [J]. *Land Use Policy*, 2013,35:33-39.
- [21] 庄大方,刘纪远.中国土地利用程度的区域分异模型研究[J].自然资源学报,1997,12(2):105-111.
- [22] 四川省水利电力厅.沱江志[M].四川 成都:四川省水利电力厅,1991.
- [23] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual landcover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021,13(8):3907-3925.
- [24] 景勇,左玲丽,彭文甫.四川盆地西北部土地利用碳排放时空变化分析:以绵阳市为例[J].环境科学与技术,2021,44(6):172-185.
- [25] 彭文甫,樊淑云,潘荟交,等.区域土地利用变化的碳排放效应及时空格局研究[J].生态经济,2013,29(9):28-33.
- [26] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等.1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J].中国科学(D辑:地球科学),2007,37(6):804-812.
- [27] 肖红艳,袁兴中,李波,等.土地利用变化碳排放效应研究:以重庆市为例[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2012,29(1):38-42.
- [28] Chuai Xiaowei, Gao Runyi, Huang Xianjin, et al. The embodied flow of built-up land in China's interregional trade and its implications for regional carbon balance [J]. *Ecological Economics*, 2021,184:106993.
- [29] 卢鹤立.土地利用碳排放核定方法与案例分析[M].北京:科学出版社,2016.
- [30] 王淑佳,孔伟,任亮,等.国内耦合协调度模型的误区及修正[J].自然资源学报,2021,36(3):793-810.
- [31] 廖重斌.环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系:以珠江三角洲城市群为例[J].热带地理,1999,19(2):171-177.