

# 城市近郊土地利用变化对土壤团聚体及其结合有机碳的影响<sup>①</sup>

殷金忠<sup>1</sup>, 唐蛟<sup>1,2\*</sup>, 潘飞飞<sup>3</sup>, 石仁坤<sup>3</sup>, 郑会芳<sup>4</sup>, 权逸鹏<sup>1</sup>, 吴大付<sup>1,2</sup>

(1 河南科技学院资源与环境学院, 河南新乡 453003; 2 河南省生物药肥研发与协同应用工程研究中心, 河南新乡 453003; 3 河南科技学院园艺园林学院, 河南新乡 453003; 4 河南科技学院生命科学学院, 河南新乡 453003)

**摘要:** 通过采集河南省新乡市近郊区域传统耕地、设施菜地以及景观绿化林地和草地 0~20 cm 表层土壤, 利用湿筛法进行水稳性团聚体的分离及团聚体结合有机碳的测定, 分析和比较了土壤团聚体稳定性及其结合有机碳变化特征。结果表明: 城市化进程中土地利用类型变化对水稳性团聚体粒径组成和稳定性产生显著影响。相较于传统耕地, 进行 6 年设施蔬菜种植显著降低土壤水稳性大团聚体质量占比(WR<sub>0.25</sub>)、团聚体平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD), 降幅分别为 42.40%、54.84% 和 129.41%。而进行相同年限景观林、草地建设均能显著提高 WR<sub>0.25</sub>, 提升幅度分别为 33.65% 和 23.63%。景观绿化林地和草地团聚体 MWD、GMD 较耕地分别增加 0.64% 和 26.92%、83.87% 和 77.42%。此外, 虽然设施菜地和林草地各粒径团聚体结合有机碳含量较传统耕地均有不同程度提高, 但是其结合有机碳贡献率变化情况与团聚体各粒径质量占比有关。其中, 0.25~2 mm 粒径团聚体结合有机碳含量在设施菜地土壤中取得最大值, 为 35.02 g/kg, 但是其 >0.25 mm 各粒径团聚体结合有机碳贡献率均显著降低。草地建设显著降低 <0.053 mm 粒径黏粉粒结合有机碳贡献率, 但是显著增加 >0.25 mm 粒径大团聚体结合有机碳贡献率。因此, 城市化进程中近郊传统耕地转变为景观绿化林草地初期能促进水稳性大团聚体的形成及结合有机碳的积累, 并提高团聚体的稳定性, 在土壤有机碳固持方面表现出巨大潜力。

**关键词:** 城市化; 土地利用变化; 团聚体; 团聚体稳定性; 结合有机碳

**中图分类号:** S156 **文献标志码:** A

## Effects of Land Use Changes on Soil Aggregates and Associated Organic Carbon in Urban Suburbs

YIN Jinzhong<sup>1</sup>, TANG Jiao<sup>1,2\*</sup>, PAN Feifei<sup>3</sup>, SHI Renkun<sup>3</sup>, ZHENG Huifang<sup>4</sup>, QUAN Yipeng<sup>1</sup>, WU Dafu<sup>1,2</sup>

(1 School of Resources and Environment, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, Henan 453003, China; 2 Henan Engineering Research Center of Biological Pesticide & Fertilizer Development and Synergistic Application, Xinxiang, Henan 453003, China; 3 School of Horticulture and Landscape Architecture, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, Henan 453003, China; 4 School of Life Science and Technology, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, Henan 453003, China)

**Abstract:** Soil samples at a depth of 0–20 cm were collected from traditional croplands, facility-vegetable lands, landscape greening forests and grasslands in the suburbs of Xinxiang City of Henan Province, and soil water-stable aggregates were separated by wet-sieving method and their associated organic carbon were determined to compare the characteristics of aggregate stability and changes of organic carbon. The results showed that the aggregate mass proportion and stability were greatly impacted by land use types. Compared with traditional cropland, facility-vegetable plantation for 6 years significantly reduced macro-aggregate mass composition (WR<sub>0.25</sub>), values of mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) by 42.40%, 54.84% and 129.41%, respectively. While the values of WR<sub>0.25</sub> in the same years constructed forest and grassland were significantly increased by 33.65% and 23.63%, respectively. Furthermore, the values of MWD and GMD of forest and grassland were increased by 0.64% and 26.92%, 83.87% and 77.42%, respectively. Compared to traditional cropland, the concentrations of organic carbon associated within aggregates with various sizes were all increased in facility-vegetable plantation, forest and

①基金项目: 河南省重点研发与推广专项(232102320248)和河南省博士后基金项目(201903042)资助。

\* 通讯作者(tangjiaoviva1988@126.com)

作者简介: 殷金忠(1998—), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 主要从事土壤有机碳固持研究。E-mail: yjz2680@163.com

grassland, while their contribution rates of associated organic carbon depended on particle size. The highest organic carbon concentration was obtained in 0.25–2 mm aggregates from the facility-vegetable soil, being 35.02 g/kg, but the contribution rates of associated organic carbon within aggregate fractions >0.25 mm were both significantly reduced. Grassland greatly decreased the contribution rate of aggregates <0.053 mm but significantly increased the contribution rate of aggregates >0.25 mm. In conclusion, cropland converted to landscape greening forest and grassland could promote the water-stable macro-aggregate formation, stability and associated organic carbon accumulation during the early stages, Which indicates a great potential for soil organic carbon sequestration.

**Key words:** Urbanization; Land use change; Aggregates; Aggregate stability; Associated organic carbon

城市及其周边土壤虽然在陆地生态系统所占比例较小,但是其在全球碳循环过程中依然发挥关键作用<sup>[1]</sup>。土地城市化与城市面积的急剧扩张导致近郊土地利用类型发生明显变化,引起地上植物物种组成的改变和土地管理措施的相应调整,影响土壤结构稳定性及有机碳固持潜力。土壤团聚体是土壤颗粒利用黏结物质而形成的球状或块状结构,与土壤有机碳积累联系密切<sup>[2]</sup>。相关研究发现,团聚体是土壤有机碳固持的主要场所,其中约 90% 的有机碳被封存于团聚体中<sup>[3]</sup>。然而受空间层级结构的影响,各粒径团聚体对有机碳产生不同的保护机制,影响土壤有机碳的积累过程<sup>[4]</sup>。同时,土壤有机碳作为土壤颗粒发生团聚过程所需的主要胶结物质,有助于土壤团聚体形成和稳定性提高<sup>[5]</sup>。

土地利用类型变化影响土壤结构特性和有机碳库的循环和周转路径,改变土壤有机碳固持和矿化过程<sup>[6]</sup>。Zhong 等<sup>[7]</sup>研究发现在黄土高原,耕地转化为林地能够显著提高大团聚体质量占比及其结合有机碳含量,其中 0.25 ~ 2 mm 粒径团聚体结合有机碳含量最高。Qiu 等<sup>[8]</sup>对半干旱地区的研究也表明,草地转变为耕地或者灌丛降低大团聚体质量占比及其结合有机碳含量。然而,目前的研究多关注于传统农业用地之间的转变<sup>[9-11]</sup>,缺乏受城市化影响引起的土地利用类型变化对土壤团聚体及其结合有机碳研究的报道,限制了对城市化建设中土地固碳机制的理解<sup>[1]</sup>。河南省新乡市位于华北平原中部,是我国重要的优质农产品生产基地,随着区域城市化进程不断加快,其产业结构也相应发生调整,土地资源进行重新分配。处于城郊的耕地不断被转变为设施蔬菜用地或城市景观绿地。基于此,本研究以新乡市近郊区域不同土地利用类型表层土壤为研究对象,开展水稳性土壤团聚体及其结合有机碳变化特性研究,分析土壤团聚体粒径组成、稳定性和结合有机碳变化规律,以期在城市土地开发利用和土壤有机碳储量评估提供数据支撑和理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于河南省新乡市近郊红旗区小店镇境内(114°01' E, 35°06' N)。该区域受暖温带大陆性季风气候影响,四季分明,冬冷夏热,多年平均气温 14.2 °C,平均降水量 573.4 mm,主要集中在 6—9 月,无霜期达 220 d。区域地下水资源丰富,土层深厚,地势平坦,适合进行机械化农业生产。土壤类型为黄河冲积物沉积发育形成的典型潮土。根据国际制土壤颗粒分析方法,土壤砂粒(>0.02 mm)、粉粒(0.02 ~ 0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm)质量占比分别为 35.71%、44.72% 和 19.57%。该区域在 2015 年以前未受城市化进程影响,均为传统耕地,进行大田作物种植,其土壤基本理化性质如下: pH 7.36(土水比 1 : 2.5, *m/V*),容重为 1.31 g/cm<sup>3</sup>,有机碳含量为 7.23 g/kg,全氮、有效磷和速效钾含量分别为 0.72 g/kg、27.34 mg/kg 和 229.72 mg/kg。2016 年后,受城市规划调整和基础设施建设影响,土地利用类型发生变化,部分传统耕地转变为设施蔬菜用地和城市景观绿化林地和草地。

### 1.2 样品采集与测定

在研究区域内选择具有代表性的 4 种土地利用类型: ①传统耕地: 长期进行小麦—玉米轮作; ②设施菜地: 建设日光温室长期进行黄瓜和西红柿种植; ③林地: 主要栽种观赏桃树,栽植密度为 450 株/hm<sup>2</sup>,株高 3.5 m,冠幅 1.5 m×1.5 m,林龄 6 年; ④草地: 主要种植美国四季青,包括黑麦草、剪股颖和狗牙根,播种量为 125 kg/hm<sup>2</sup>。以上各土地利用类型均配套排水灌溉措施,水肥供应充足,植物生长状况良好,试验周期内年度水肥投入情况及具体管理措施如表 1 所示。

2022 年 9 月进行不同土地利用类型土壤样品采集。其中,每种土地利用类型随机选择 4 块样地作为重复,各样地面积约 0.4 hm<sup>2</sup>(100 m×40 m)。采用 5

点混合取样法采集各样地 0 ~ 20 cm 土层原状土样 0.7 kg, 装入硬质塑料盒带回实验室。去除肉眼可见的砾石、植物残体、根系和土壤动物, 同时将直径

>20 mm 的土块沿其自然缝隙轻轻掰开, 使其能通过 10 mm 孔径土壤筛。土样在阴凉干燥处风干后储存, 供团聚体分级测试使用。

表 1 不同土地利用类型水肥投入情况  
Table 1 Water and fertilizer inputs under different land use types

土地利用类型	年度肥料总投入(kg/hm <sup>2</sup> )	年度水分总投入(m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> )	具体管理措施
传统耕地	N(360) P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (180) K <sub>2</sub> O(150)	3 600	玉米季秸秆移除后旋耕种植小麦, 旋耕深度为 15 cm, 小麦季秸秆还田免耕种植玉米, 使用除草剂及农药防治杂草和病虫害
设施菜地	N(600) P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (360) K <sub>2</sub> O(250) 腐熟鸡粪(7 500)	6 000	每季拉秧后灭茬, 连根清除后进行土地深翻, 深度为 25 cm, 每年 7 月份进行高温闷棚, 施用农药进行病虫害防治
林地	0	1 800	无耕作措施, 不使用除草剂和农药, 秋季进行林木修剪, 叶片凋落物不清除
草地	0	1 800	生长季定期进行草地修剪, 但草屑不清除

采用调整后的湿筛法对风干原状土壤进行水稳性团聚体的分离<sup>[12]</sup>。主要步骤如下: 称取 50 g 风干土样置于土壤团聚体分析仪(TF-100 型, 浙江舜龙)套筛顶层, 套筛筛孔尺寸分别为 2、0.25 和 0.053 mm, 加入去离子水至完全浸没待测土样, 浸泡 10 min 后开启设备进行振荡, 频率设定为 30 次/min, 振荡幅度为 5 cm, 振荡时间为 5 min。筛分结束后将套筛拆开, 自上而下分别收集各孔径土壤筛上残留组分, 用水冲洗依次得到 >2 mm 粒径的大粒径大团聚体、0.25 ~ 2 mm 粒径的小粒径大团聚体、0.053 ~ 0.25 mm 粒径的微团聚体以及 <0.053 mm 粒径的黏粉粒组分。然后将各组分分别转移至铝盒中, 利用烘箱(温度设置为 50 °C)烘干至恒重后称量。各粒径团聚体结合有机碳含量采用重铬酸钾外加热法进行测定<sup>[13]</sup>。

### 1.3 数据处理与统计分析

本研究中, 获得的团聚体进行平均重量直径(MWD)<sup>[14]</sup>、几何平均直径(GMD)<sup>[14]</sup>和质量分形维数(D)<sup>[15]</sup>等稳定性指标的计算, 公式如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n m_i \times x_i \quad (1)$$

$$GMD = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i}\right) \quad (2)$$

$$D = 3 - \log \frac{m(r < x_i)}{m} / \log \frac{x_i}{x_{\max}} \quad (3)$$

式中:  $x_i$  为任意相邻粒级团聚体的平均直径(mm);  $m_i$  为某粒径团聚体质量占比;  $x_{\max}$  为最大团聚体粒径;  $m(r < x_i)$  为小于  $x_i$  粒径团聚体的总质量;  $m$  为各粒径团聚体总质量。

对各粒径团聚体组分进行结合有机碳贡献率计算, 公式如下:

$$\text{团聚体结合有机碳贡献率(\%)} = \frac{(\text{该粒径团聚体结合有机碳含量} \times \text{该粒径团聚体质量占比})}{\text{土壤团聚体结合总有机碳含量}} \times 100 \quad (4)$$

利用 Excel 2016 对获得的数据进行整理, 使用 SPSS 25.0 进行数据统计分析。试验结果均以平均值和标准差形式表示。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)并利用最小显著差异法(LSD)进行土壤团聚体及结合有机碳特征的比较, 显著性水平设置为 0.05。图表通过 Origin Pro 2021b 软件进行绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 土地利用类型对团聚体特征的影响

由表 2 知, 近郊土地利用类型对表层土壤水稳性团聚体质量组成比例产生显著影响。其中, 耕地及设施菜地土壤团聚体以 <0.053 mm 粒径占据优势, 分别占比 32.77% 和 42.84%; 林地和草地土壤团聚体则主要集中在 0.25 ~ 2 mm 粒径范围, 分别占比 42.75% 和 31.98%。相较于传统耕地, 设施菜地显著降低 >2 mm 和 0.25 ~ 2 mm 粒径团聚体质量占比, 降幅分别为 67.26% 和 25.58%。林地营造虽然降低 >2 mm 粒径团聚体质量占比, 但是显著提高 0.25 ~ 2 mm 粒径团聚体质量占比, 较耕地增加 75.98%。设施菜地、林地和草地均显著提高 0.053 ~ 0.25 mm 粒径团聚体质量占比, 提升幅度分别为 52.45%、25.57% 和 13.64%。各土地利用类型土壤 <0.053 mm 粒径黏

粉粒质量占比之间存在显著差异,其中林地土壤最低,设施菜地土壤最高,分别为 11.76% 和 42.84%。

>0.25 mm 粒径水稳性大团聚体含量(WR<sub>0.25</sub>)以林地土壤最高,其次为草地,显著高于耕地和设施菜地。

表 2 不同土地利用类型表层土壤水稳性团聚体质量占比(%)  
Table 2 Mass proportions of water-stable aggregates in topsoil under different land use types

土地利用类型	>2 mm	0.25 ~ 2 mm	0.053 ~ 0.25 mm	<0.053 mm	WR <sub>0.25</sub>
耕地	20.37 ± 4.22 b	26.85 ± 1.28 c	20.02 ± 2.26 c	32.77 ± 2.29 b	47.22 ± 3.79 b
设施菜地	6.67 ± 1.75 c	19.98 ± 1.66 d	30.52 ± 1.04 a	42.84 ± 1.22 a	26.64 ± 0.64 c
林地	15.86 ± 2.97 b	47.25 ± 0.78 a	25.14 ± 4.34 b	11.76 ± 2.35 d	63.11 ± 3.10 a
草地	26.40 ± 3.89 a	31.98 ± 1.68 b	22.75 ± 2.30 bc	18.88 ± 2.59 c	58.38 ± 2.69 a

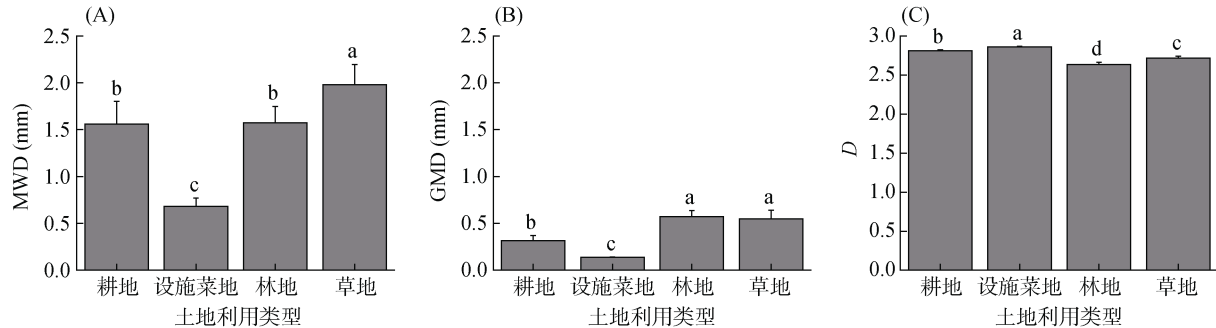
注: 同列不同小写字母表示不同土地利用类型间差异显著( $P < 0.05$ ), 下同。

由图 1 可知,土地利用类型对水稳性团聚体稳定性指标均产生显著影响。设施菜地表层土壤 MWD 和 GMD 最低,分别为 0.68 mm 和 0.14 mm,显著低于其他土地利用类型。开展城市景观林草地建设能够维持或提高土壤 MWD 和 GMD,其中草地较耕地分别增加 26.92% 和 77.42%。不同土地利用类型土壤  $D$  值之间存在显著差异,其中林地最低,为 2.63。

## 2.2 土地利用类型对团聚体结合有机碳的影响

由表 3 可知,土地利用类型显著影响各粒径水稳性团聚体结合有机碳含量,其中 >0.25 mm 粒径大团聚体结合有机碳含量均高于 <0.25 mm 各粒径土壤

组分。相较于传统耕地,各土地利用类型均不同程度提高 >2、0.25 ~ 2 和 <0.053 mm 粒径组分结合有机碳含量。其中,林地和设施菜地土壤 >2 mm 粒径大团聚体结合有机碳含量显著高于传统耕地和草地,分别为 16.21 g/kg 和 15.94 g/kg,较耕地增加 38.55% 和 36.23%。0.25 ~ 2 和 <0.053 mm 粒径土壤团聚体结合有机碳含量均在设施菜地土壤取得最大值,分别为 35.02 g/kg 和 13.54 g/kg,较耕地显著提高 201.90% 和 57.63%。设施蔬菜土壤 <0.053 mm 粒径黏粉粒结合有机碳含量显著高于耕地和草地,为 13.54 g/kg,但是与林地无显著差异。



(图中不同小写字母表示不同土地利用类型间差异显著( $P < 0.05$ ), 下同)

图 1 土地利用类型对表层土壤水稳性团聚体稳定性参数的影响

Fig. 1 Stability parameters of water-stable aggregates in topsoil under different land use types

表 3 不同土地利用类型表层土壤水稳性团聚体组分结合有机碳含量(g/kg)

Table 3 Concentrations of organic carbon associated within water-stable aggregates in topsoil under different land use types

土地利用类型	>2 mm	0.25 ~ 2 mm	0.053 ~ 0.25 mm	<0.053 mm
耕地	11.70 ± 1.77 b	11.60 ± 2.52 b	10.62 ± 0.87 b	8.59 ± 0.67 b
设施菜地	15.94 ± 1.83 a	35.02 ± 7.78 a	14.12 ± 2.49 a	13.54 ± 2.31 a
林地	16.21 ± 1.42 a	15.77 ± 2.97 b	13.41 ± 3.11 ab	11.02 ± 2.21 ab
草地	12.60 ± 2.01 b	11.81 ± 1.62 b	7.26 ± 0.85 c	9.18 ± 0.48 b

由图 2 可知,土地利用类型对各粒径水稳性团聚体结合有机碳贡献率产生显著影响。>2 mm 粒径大团聚体结合有机碳贡献率以景观草地土壤最高,为 31.46%,显著高于其他土地利用类型。设施菜地和林

地较耕地显著降低该粒径团聚体结合有机碳贡献率,降幅分别为 73.90% 和 22.64%。水稳性团聚体结合有机碳贡献率主要集中于 0.25 ~ 2 mm 粒径水稳性团聚体,其中以林地土壤中该粒径有机碳贡献率最高,

为 50.46%。 $0.053 \sim 0.25$  和  $<0.053$  mm 粒径土壤颗粒结合有机碳贡献率均在设施菜地土壤中取得最高值, 分别为 23.51% 和 32.11%, 较耕地增加 14.35% 和 18.14%; 然而草地土壤相同粒径团聚体结合有机碳贡献率显著降低, 较耕地分别降低 23.30% 和 38.26%。

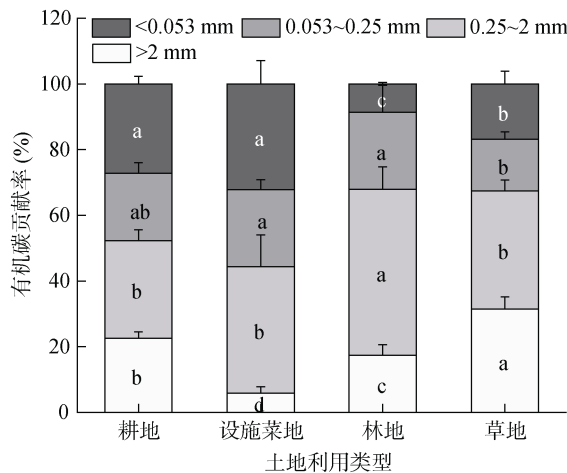


图 2 不同土地利用类型水稳性团聚体结合有机碳贡献率  
Fig. 2 Contribution rates of organic carbon associated within water-stable aggregates under different land use types

### 3 讨论

#### 3.1 土地利用类型对土壤团聚体特征的影响

土壤团聚体作为形成良好土壤结构的基本组成单元, 其粒径组成和数量分布是进行土壤质量评价的重要参数<sup>[16]</sup>。一般条件下, 可按照粒径大小划分为  $>0.25$  mm 粒径的大团聚体和  $<0.25$  mm 粒径的微团聚体<sup>[17]</sup>。水稳性团聚体是在各种自然条件下形成的抗水力分散的结构单位, 能够反映土壤抗水蚀能力, 常用于评估土壤结构的稳定性<sup>[18]</sup>。本研究表明, 城市化进程中土地利用类型改变对  $0 \sim 20$  cm 土层土壤水稳性团聚体组成产生显著影响。进行设施蔬菜种植显著降低  $>0.25$  mm 粒径大团聚体质量占比。由于连续进行设施蔬菜种植使得大棚内部常年保持高温高湿的环境, 有助于土壤有机碳的矿化与分解, 导致大团聚体失去胶结作用而破碎形成较小的土壤粒径组分, 降低土壤团聚体结构稳定性<sup>[19]</sup>。同时, 较高的土壤复种指数以及拉秧清理使表层土壤长期处于扰动状态也不利于大团聚体的形成<sup>[20-21]</sup>。此外, 土壤水稳性团聚体粒径组成也与植物种类、施肥类型和数量及土壤翻耕深度和频次有关<sup>[11]</sup>。当耕地转变为城市景观林草地后, 一方面土壤不再进行频繁耕作, 受到的人为扰动显著降低<sup>[22]</sup>; 另一方面沉积在土壤表层的植物凋落物在微生物的作用下不断被分解形成土壤

腐殖质, 其中多糖和多肽等短链化合物充当胶结物质, 将阳离子与土壤矿物颗粒紧密结合形成更稳定的土壤团聚体<sup>[23]</sup>。因此, 进行林草地营造与建设能显著提高表层土壤水稳性大团聚体含量。

平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和分形维数(D)是表征土壤团聚体稳定性的重要参数。MWD 和 GMD 数值越大表明形成的团聚体平均粒径越大, 稳定性越高<sup>[14]</sup>。林草地营造与建设有助于提高表层土壤水稳性团聚体 GMD 和 MWD 数值, 而进行设施蔬菜种植后土壤 GMD 和 MWD 数值显著降低。这表明城市化进程中, 景观林草地建设在提高土壤团聚体稳定性方面发挥积极作用。郑子成等<sup>[24]</sup>对川西低山丘陵地区的研究发现, 撂荒和退耕还林均提高  $0 \sim 20$  cm 土层土壤 GMD 和 MWD 数值, 说明降低土壤扰动, 增加土壤有机物料投入, 有助于改善土壤结构并提高其稳定性。土壤团聚体 D 值越小则表明土壤团粒结构越好, 土壤结构越稳定<sup>[15]</sup>。在  $0 \sim 20$  cm 土层, 林草地水稳性团聚体 D 值较耕地均呈现不同程度的降低趋势, 而设施蔬菜用地土壤 D 值显著增加。这可能与栽培植物地下部分根系作用有关。Fei 等<sup>[20]</sup>研究发现, 根系分泌的多糖等物质是形成土壤团聚体所需胶结物质的主要来源, 同时根系自身也可以将土壤颗粒进行物理缠绕进而促进土壤团聚体的形成。此外, 根系分泌物及其脱落物能够促进根际微生物大量繁殖, 其代谢产物也是土壤颗粒发生团聚过程的主要胶结物质<sup>[20,25]</sup>。

#### 3.2 土地利用类型对水稳性团聚体结合有机碳的影响

团聚体结合有机碳可以在一定程度反映土壤有机碳积累和矿化的微观过程, 对土壤肥力提升和有机碳固持具有重要意义<sup>[6]</sup>。不同粒径土壤团聚体对有机碳的结合能力具有一定差异, 并与土层深度有关<sup>[26]</sup>。Wei 等<sup>[26]</sup>指出较大程度的团聚体粒径分布变化以及团聚体稳定性改变出现在土壤表层。Lee 等<sup>[27]</sup>认为, 大团聚体结合有机碳含量虽然高, 但是其稳定性相对较弱, 易受外界扰动影响, 矿化分解速率高; 而粒径较小的微团聚体和黏粉粒, 其结合有机碳受物理化学以及生物化学保护机制影响, 其分解速率缓慢, 能够长期相对稳定存在<sup>[28]</sup>。此外, 相较于土壤总有机碳, 土壤团聚体结合有机碳对土地利用类型变化更为敏感<sup>[29]</sup>。本研究发现, 传统耕地进行 6 年的设施菜地和林草地利用后, 其  $0 \sim 20$  cm 表层土壤各粒径水稳性团聚体结合有机碳的含量均有不同程度的提高, 其中设施菜地土壤各粒径团聚体结合有机碳含量均显



著提高,且 0.25~2 mm 粒径团聚体结合有机碳含量的增幅最高。这主要是由于为获得较高的作物产量和经济价值,设施蔬菜生产过程中大量的有机肥投入提高了土壤有机碳含量,但是由于频繁耕作、灌溉等人为干扰活动也容易导致大粒径团聚体破碎分解为较小粒径团聚体,导致其在大粒径团聚体中积累。相较于传统耕地,进行 6 年的林地营造显著提高 >2 mm 粒径大团聚体结合有机碳含量。Qiu 等<sup>[8]</sup>研究也发现退耕还林后土壤有机碳增加主要是因为大团聚体中结合有机碳含量的增加。Wei 等<sup>[26]</sup>在对我国西北地区弃耕造林的研究中也发现,造林会引起大团聚体结合有机碳含量的增加。这可能是由于较多的木本植物凋落物以及庞大的植物根系为大团聚体的形成提供了丰富的胶结物质,同时由于进行林地营造后土壤所受人为扰动减少,也增强了大团聚体对有机碳的物理保护作用,降低微生物对土壤有机碳的矿化分解过程。而长期持续耕作对耕地土壤结构进行频繁扰动,降低了大团聚体质量占比,导致物理保护功能下降,不利于土壤有机碳的积累<sup>[30]</sup>。

团聚体结合有机碳贡献率受各粒径团聚体质量占比及其结合有机碳含量共同影响<sup>[16]</sup>。本研究发现,土地利用类型变化对 0.25~2 mm 和 <0.053 mm 粒径团聚体结合有机碳贡献率影响较大,林草地较耕地均能提高 0.25~2 mm 粒径大团聚体结合有机碳贡献率,而设施蔬菜种植则降低该粒径土壤团聚体结合有机碳贡献率,这与任荣秀等<sup>[31]</sup>对华北地区低丘山地弃耕造林区域 0.25~2 mm 粒径团聚体结合有机碳贡献率远大于农田土壤的结果基本一致。Kamran 等<sup>[32]</sup>也指出,大团聚体是土壤有机碳积累的主要区域,其结合有机碳含量的变化对土壤总有机碳波动反应最为敏感。本研究中导致不同土地利用类型下各粒径团聚体结合有机碳贡献率变化的原因有所差异。对于 0.25~2 mm 小粒径大团聚体,林草地主要通过提高该粒径团聚体质量占比而提高土壤有机碳贡献率,而设施蔬菜种植虽然提高了该粒径团聚体结合有机碳含量,但是其质量占比显著降低,因此导致其贡献率下降。林草地土壤由于 <0.053 mm 粒径黏粉粒团聚体质量占比降低,导致其结合有机碳贡献率下降,而设施菜地则同时提高该粒径团聚体质量占比和结合有机碳含量而增加其有机碳贡献率。

当前我国城市化进程不断加快,人口城市化和土地城市化现象凸显<sup>[1]</sup>。由于城市化进程导致大面积的农业耕地被其他土地利用类型替代,因此其植被类型、凋落物类型及土地管理措施也相应发生变化,进

而影响土壤有机碳的积累特征。本研究主要针对新乡市城市化进程中传统耕地向设施菜地、城市景观林草地转变后土壤团聚体粒径组成及结合有机碳参数进行量化比较,然而,针对不同粒径团聚体特征及结合有机碳组分稳定性随着持续年限的增加如何发生变化需要继续开展深入研究,以更好地揭示城市化进程中土地利用类型变化对土壤有机碳积累和转化的调节机制,发挥设施菜地和城市绿化在陆地生态系统碳固持方面的巨大潜力。

## 4 结论

1) 城市化进程中土地利用类型变化显著改变 0~20 cm 表层土壤水稳性团聚体组成。相较于传统耕地,进行 6 年的林草地营造较传统耕地显著提高大团聚体质量占比(WR<sub>0.25</sub>),增加水稳性团聚体 GMD 和 MWD 数值,降低 D 值,而进行相同年限的设施蔬菜种植则显著降低团聚体 WR<sub>0.25</sub> 数值。

2) 设施菜地土壤 0.25~2 mm 粒径团聚体结合有机碳含量在各土壤利用类型中最高,但是其 >0.25 mm 粒径团聚体结合有机碳贡献率较耕地显著降低。草地建设显著提高 >0.25 mm 粒径团聚体结合有机碳贡献率,降低 <0.053 mm 粒径黏粉粒结合有机碳贡献率。

3) 城市化进程中,景观林草地建设的初期阶段能提高土壤团聚体稳定性及其结合有机碳含量,有利于土壤有机碳固存。

## 参考文献:

- [1] 罗上华,毛齐正,马克明,等. 城市土壤碳循环与碳固持研究综述[J]. 生态学报, 2012, 32(22): 7177-7189.
- [2] 王清奎,汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 415-421.
- [3] Sarker T C, Incerti G, Spaccini R, et al. Linking organic matter chemistry with soil aggregate stability: Insight from <sup>13</sup>C NMR spectroscopy[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 117: 175-184.
- [4] 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.
- [5] Meng Q F, Sun Y T, Zhao J, et al. Distribution of carbon and nitrogen in water-stable aggregates and soil stability under long-term manure application in solonchic soils of the Songnen plain, northeast China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, 14(6): 1041-1049.
- [6] 张维理, Kolbe H, 张认连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展[J]. 中国农业科学, 2020, 53(2): 317-331.
- [7] Zhong Z K, Han X H, Xu Y D, et al. Effects of land use change on organic carbon dynamics associated with soil

- aggregate fractions on the Loess Plateau, China[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(9): 1070–1082.
- [8] Qiu L P, Wei X R, Zhang X C, et al. Soil organic carbon losses due to land use change in a semiarid grassland[J]. *Plant and Soil*, 2012, 355(1): 299–309.
- [9] 朱凯, 马茂华, 李文娟, 等. 三峡水库消落带不同土地利用对土壤团聚体稳定性及其碳氮分布的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(7): 1503–1513.
- [10] 张祎, 李鹏, 肖列, 等. 黄土高原丘陵区地形和土地利用对土壤有机碳的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(5): 1140–1150.
- [11] 张永慧, 李贝贝, 张紫妍, 等. 不同土地利用方式对哈尼梯田土壤肥力的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(6): 25–34.
- [12] 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.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] Kemper W D, Rosenau R C. Aggregate stability and size distribution[M]//SSSA Book Series. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, 2018: 425–442.
- [15] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(2): 362–369.
- [16] 唐蛟, 王威, 潘飞飞, 等. 沼液灌施对潮土土壤团聚体组成及稳定性的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(2): 10–17.
- [17] Ciric V, Manojlovic M, Nestic L, et al. Soil dry aggregate size distribution: Effects of soil type and land use[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 12(4): 689–703.
- [18] 徐香菇, 蔡岸冬, 徐明岗, 等. 长期施肥下水稻土有机碳固持形态与特征[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(4): 753–760.
- [19] 陈山, 杨峰, 林杉, 等. 土地利用方式对红壤团聚体稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(5): 211–216.
- [20] Fei C, Zhang S R, Li J L, et al. Partial substitution of rice husks for manure in greenhouse vegetable fields: Insight from soil carbon stock and aggregate stability[J]. *Land Degradation & Development*, 2021, 32: 3962–3972.
- [21] 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 等. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(8): 3816–3824.
- [22] Wang Y X, Ran L S, Fang N F, et al. Aggregate stability and associated organic carbon and nitrogen as affected by soil erosion and vegetation rehabilitation on the Loess Plateau[J]. *CATENA*, 2018, 167: 257–265.
- [23] Eynard A, Schumacher T E, Lindstrom M J, et al. Aggregate sizes and stability in cultivated South Dakota prairie ustolls and usterts[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(4): 1360–1365.
- [24] 郑子成, 王永东, 李廷轩, 等. 退耕对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(1): 119–127.
- [25] 郭鸿鑫, 孙崇玉, 孙立强, 等. 长期梨树种植土壤团聚体组成及有机碳分布特征[J]. *土壤*, 2022, 54(2): 351–357.
- [26] Wei X R, Li X Z, Jia X X, et al. Accumulation of soil organic carbon in aggregates after afforestation on abandoned farmland[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49(6): 637–646.
- [27] Lee S B, Lee C H, Jung K Y, et al. Changes of soil organic carbon and its fractions in relation to soil physical properties in a long-term fertilized paddy[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 104(2): 227–232.
- [28] 荣慧, 房焕, 张中彬, 等. 团聚体大小分布对孔隙结构和土壤有机碳矿化的影响[J]. *土壤学报*, 2022, 59(2): 476–485.
- [29] 董丽, 史学正, 徐胜祥, 等. 基于 Meta 分析研究不同管理措施对中国农田土壤剖面有机碳的影响[J]. *土壤*, 2021, 53(6): 1290–1298.
- [30] Islam K R, Weil R R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2000, 79(1): 9–16.
- [31] 任荣秀, 杜章留, 孙义亨, 等. 华北低丘山地不同土地利用方式下土壤团聚体及其有机碳分布特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(19): 6991–6999.
- [32] Kamran M, Huang L, Nie J, et al. Effect of reduced mineral fertilization (NPK) combined with green manure on aggregate stability and soil organic carbon fractions in a fluvo-aquic paddy soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 211: 105005.