

· 研究报告 ·

土壤团聚体稳定性与有机碳对不同年限覆膜种植响应

黄銓岚^{1,2}, 黄爽兵¹, 程红光², 邢丹³, 吉波^{1,2}, Gratien Twagirayezu^{2,4}

(1.长江大学资源与环境学院, 武汉 430100;

2.中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;

3.贵州省农科院辣椒研究所, 贵阳 550006; 4.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:本试验对贵州遵义市新蒲区辣椒种植基地不同辣椒种植年限(0年、3年、5年和10年)的土壤团聚体组成与土壤有机碳(SOC)含量进行测定,发现薄膜使用形成的微塑料污染显著改变了土壤中团聚体组成分布。干筛结果表明,相比0年辣椒种植土壤,其余3组覆膜种植造成的微塑料污染均导致大于2mm的粒径团聚体增加30%以上。与此同时,湿筛结果显示,0年、3年、5年覆膜种植土壤的平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)呈现降低趋势,即微塑料污染降低了土壤结构稳定性,并且这种消极影响随着覆膜年限增加而逐渐恶化。此外,SOC测定结果表明,微塑料污染加速了土壤有机碳的流失,导致3年辣椒种植土和5年辣椒种植土的SOC含量分别减少5.17 g/kg和9.08 g/kg。

关键词: 微塑料; 有机碳; 团聚体; 土壤结构; 覆膜种植

中图分类号: S 641.3 文献标志码: A 文章编号: 1008-2239(2024)02-0001-06

DOI:10.13605/j.cnki.52-1065/s.2024.02.002

Soil Aggregate Stability and Organic Carbon Response to Different Years of Mulch Planting

HUANG Shenglan^{1,2}, HUANG Shuangbing¹, CHENG Hongguang²,XING Dan³, JI Bo^{1,2}, Gratien Twagirayezu^{2,4}

(1.College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China;

2.State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

3.Hot Pepper Research Institute of Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China;

4.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this study, soil samples from a chilli plantation in Xinpu District, Zunyi City, Guizhou Province, with different chilli planting years (0, 3, 5 and 10 years) were analysed to determine the composition of soil aggregates and soil organic carbon (SOC) content, and it was found that microplastic contamination caused by the use of films significantly altered the distribution of aggregates in the soil. The dry sieve results indicated that microplastic contamination from the remaining three groups of film planting resulted in an increase of more than 30% of aggregates with >2 mm particle size compared to the soil planted with chilli in 0 years. Meanwhile, the wet sieve results showed that the mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of the 0, 3 and 5 years mulched planted soils showed a decreasing trend, microplastic contamination reduced the structural stability of the soils, and this negative effect worsened with the increase in the number of years of mulching. In addition, SOC measurements showed that microplastic pollution accelerated the loss of

收稿日期: 2023-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(42373082)。

作者简介: 黄銓岚(1998—), 女(侗族), 硕士, 研究方向: 碳循环(E-mail: huangshenglan9666@163.com)。

· 1 ·

soil organic carbon, resulting in a decrease in SOC content of 5.17 g/kg and 9.08 g/kg in 3 years and 5 years chilli planting soils, respectively.

Key words: microplastics; organic carbon; soil aggregates; soil structure; mulch planting

土壤团聚体和土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)是评价土壤健康和价值的两个关键因素^[1]。在土壤中,团聚体作为最基本的结构单元^[2],扮演着连接矿物颗粒与有机物质的纽带,其组成状况与稳定性不仅决定着土壤的肥力水平,更是对土壤的抵抗侵蚀、环境质量优化与碳循环过程起着关键作用^[3-4]。同时,作为土壤中重要的有机成分,土壤有机碳是衡量土壤质量的关键指标,在团聚体形成与稳定性维护中有着至关重要的作用^[5-6]。土壤有机碳结合矿物颗粒形成团聚体^[7],其分布和稳定性影响土壤的物理性质,包括孔径分布、容重、土壤强度和土壤可蚀性^[8]。有机质的流失影响土壤结构和团聚体的形成,对生物多样性、土壤肥力、侵蚀控制、不同体系间的物质交换以及陆地生态系统的过滤、缓冲和转化能力均会产生消极影响^[9-10]。而不同粒级的团聚体中有机碳分布也有明显差异,并且随着粒级的减小,团聚体有机碳含量逐渐增加。主要是因为较小粒级团聚体能够保护有机碳,降低有机碳与微生物接触的几率^[11-13]。与此同时,部分学者指出较大粒级的团聚体能够更有效地固定有机碳,促进土壤结构稳定与碳储存^[14-15]。

过去30年,为保障粮食安全,促进作物增产,我国大面积使用农用地膜。据中国农村统计年鉴2000年至2021年数据显示,早在2015年全国农业塑料薄膜年用量就达260.4万t(图1)。这些不断添加的薄膜缺乏有效的回收,大量的宏观和微观塑料残留在土壤中逐渐积累^[16-17],并在土壤中破碎形成小片段,甚至小颗粒,重新进入土壤环境。据统计,72%的塑料颗粒参与了土壤团聚体的构建^[18],显著提高土壤团聚体水稳定性^[19]。但是,参与团聚体构建的同时也加强了土壤对塑料颗粒的物理保护,进一步加剧了微塑料污染。因此,针对土壤塑料污染对土壤团聚体的形成、团聚体稳定性与团聚体中有机碳的变化进行研究,探讨土壤团聚体与有机碳对微塑料污染的响应,不仅有助于加深对土壤结构稳定性的理解,还有望为有效管理土壤肥力、保护环境以及实现碳汇功能提供理论支持^[20-22]。

作为中国最早食用辣椒的地区,贵州省目前辣椒种植面积超过33.3万hm²,约占全国辣椒种植面积的1/6,位居我国国内辣椒种植面积第一^[23]。为保障辣椒产量,减少其他杂草对辣椒的营养竞争,贵州省规模化辣椒种植基本上采用地膜覆盖栽培,并且极少在生

产后进行回收,导致辣椒种植土壤中大量薄膜残留,微塑料污染极其严重。因此,本研究以贵州省辣椒种植土壤为研究对象,采用干筛法和湿筛法对不同年限辣椒种植样地的土壤团聚体进行分级,结合土壤有机碳含量测定,研究微塑料污染条件下土壤中土壤团聚体组成及其稳定性,以及各粒级团聚体有机碳含量对微塑料的响应,以期后续微塑料污染治理与农田土壤固碳提供理论支撑。

1 研究样地与测试

1.1 研究样地与土壤采集

以贵州省遵义市新蒲区辣椒种植基地(26°30' N, 106°39' E)为研究样地。新蒲区位于云贵高原向湖南丘陵和四川盆地的过渡地带,海拔870 m,属亚热带季风气候,平均气温14.7℃,年降水量1200 mm。研究中选取种植辣椒年限分别为0年、3年、5年、10年农田进行土壤采样,其中0年土壤采自辣椒种植地块周边空闲地块土壤。辣椒种植过程中每年均使用0.01 mm厚的地膜进行覆盖,并且收获后地膜几乎没有回收。每个地块按照蛇形法5点对表层0~20 cm土壤进行采集,混合均匀后带回实验室,去除土样中的石头、动植物残体后风干备用,研磨过筛,用于土壤理化性质测定。已有研究通过对2012—2016年的大塑料浓度与地膜平均质量作图,观察到显著的线性相关性,表明地膜覆盖是中国农田中大塑料的主要来源^[24]。故本研究中根据农用薄膜的实际使用量,以及相应的人工回收比例,推算不同辣椒种植年限中残留的塑料量(如图2所示)。

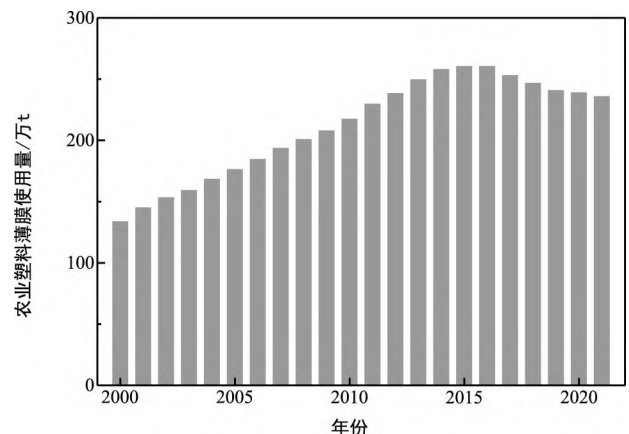


图1 2000—2021年农用塑料薄膜使用量
(数据来源于中国农村统计年鉴)

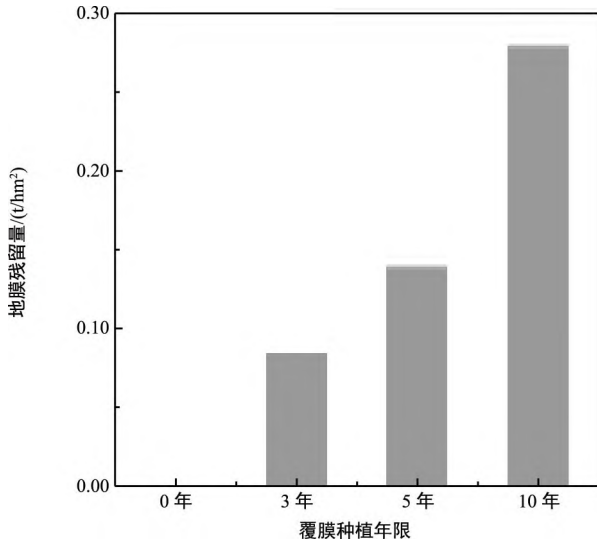


图 2 不同覆膜种植年限地膜残留量

1.2 测定方法

土壤 pH 值采用玻璃电极法(土水比 1:2.5)测定。土壤用 0.5 mol/L 的 NaHCO₃ 浸提后,测定速效磷,采用火焰光度法测定可溶钾。有机碳含量用重铬酸钾外加热法(全土及不同粒径团聚体有机碳的测量方法一致)^[25];土壤铵态氮,硝态氮用 0.5 mol/L 的 KCl 浸提后^[26-27],采用 Katrina M. Miranda 等^[28]在 2001 年提出的分光光度法测定。

土壤团聚体分组采用干筛法,筛分出机械稳定性团聚体。将每个处理的风干土通过四分法,称取风干土 100 g 置于套筛上,自上而下为孔径 2、0.5、0.25、0.054 mm 筛子,启动三维振动筛分仪(F-SW 200,湖南)振动 10 min,振动频率 3 000 次/min。最终得到大于 2 mm, 2~0.5 mm, 0.5~0.25 mm, 0.25~0.054 mm, 小于 0.054 mm 等 5 组粒级,分别称为大团聚体、中间团聚体、微团聚体、粉和黏团聚体。采用 Elliot 的土壤团聚体湿筛法^[29]称取 100 g 风干土样,用纯水覆盖浸润,再通过 2 mm、0.5 mm、0.25 mm 和 0.054 μm 的筛子,在纯水环境中进行湿筛(振幅 3 cm, 频率 50 次/min),得到大于 2 mm、0.5~2 mm、0.25~0.5 mm、0.054~0.25 mm 以及小于 0.054 mm 这 5 个粒径组分。不同级别的团聚体烘干称重,用于计算各组分的质量分数。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件对数据进行处理。采用 SPSS 26.0 软件对数据进行单因素方差分析比较处理间差异显著性(LSD 检验, $p < 0.05$)。采用 Origin 2021 软件作图,数据为平均值±标准偏差。

几何平均直径和平均质量直径分别用如下公式计算:

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

$$GMD = \text{Exp} \left[\frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln \bar{R}_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (2)$$

式中: W_i 为第 i 粒级团聚体占总团聚体比率; \bar{R}_i 为该粒径团聚体的平均直径。

2 结果

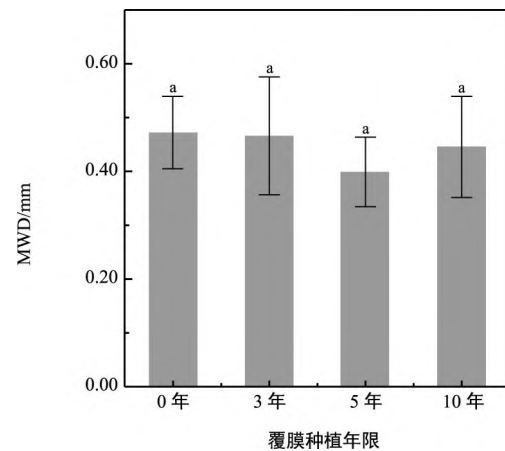
2.1 不同辣椒种植年限土壤团聚体分布特征

2.1.1 土壤团聚体的机械稳定性

不同覆膜种植年限下辣椒土的机械稳定性组成(表 1)。不同粒级团聚体分布趋势基本一致,随着粒径大于 2 mm, 2~0.5 mm, 0.5~0.25 mm, 0.25~0.054 mm, 小于 0.054 mm 逐渐递减,其中以大于 2 mm 的粒径团聚体为主。与未覆膜种植的 0 年土相比,其余 3 个处理的团聚体含量变化一致,大于 2 mm 的粒径团聚体均占比 70% 以上。同时, 2~0.5 mm, 0.5~0.25 mm, 0.25~0.054 mm, 小于 0.054 mm 的粒径团聚体随着粒径变小,团聚体含量减少。小于 0.054 mm 的团聚体组分存在微乎其微。

2.1.2 不同辣椒种植年限土壤团聚体的水稳定性

不同辣椒种植年限土壤团聚体的水稳定性如图 3 所示,相比 0 年土壤, 3 年、10 年辣椒种植土壤的 MWD 稍有下降,分别降低 0.67% 和 2.72%,但 5 年辣椒种植年限的土壤 MWD 明显下降(7.33%)。整体而言, 0 年土、3 年土、5 年土的 MWD 呈现降低趋势,即施用农业薄膜年限越长,土壤具有更低的 MWD。



注:图中不同小写字母表示不同年限间的差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 3 不同年限覆膜种植土壤团聚体的 MWD

表1 辣椒土壤机械稳定性团聚体粒径分布特征

年限/年	土壤团聚体质量分数/%				
	>2 mm	2~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.054 mm	<0.054 mm
0	45.59±2.58 ^b	39.87±2.27 ^a	10.15±0.48 ^a	3.89±1.27 ^a	0.12±0.02 ^a
3	80.48±2.19 ^a	17.41±2.28 ^c	1.50±0.40 ^b	1.18±0.39 ^b	0.04±0.04 ^b
5	75.41±1.84 ^a	24.53±2.66 ^b	2.21±1.49 ^b	1.11±0.39 ^b	0.02±0.01 ^b
10	75.45±5.74 ^a	22.06±4.13 ^{bc}	2.60±2.13 ^b	2.13±1.71 ^{ab}	0.06±0.01 ^b

注:表中数据为平均值±标准差,小写字母表示不同年限间的显著差异($p<0.05$)。下同。

表2 土壤的基本性质

年限/年	pH	EC	SOC/ (g/kg)	铵态氮/ (mg/kg)	硝态氮/ (mg/kg)	速效磷/ (mg/kg)	全钾/ (mg/kg)
0	7.9±0.04 ^a	185.73±5.83 ^b	16.33±0.52 ^b	15.14±0.72 ^b	41.34±1.18 ^b	16.86±0.44 ^d	6.95±0.59 ^b
3	7.81±0.03 ^b	125.28±3.08 ^a	11.14±0.69 ^c	10.65±0.43 ^c	28.89±1.06 ^c	22.30±0.32 ^c	10.17±0.66 ^a
5	7.27±0.04 ^c	247.25±10.97 ^b	7.24±0.55 ^d	11.75±0.55 ^c	45.88±2.72 ^a	44.56±1.35 ^a	11.30±1.05 ^a
10	6.20±0.04 ^d	273.75±5.85 ^a	17.80±0.81 ^a	22.79±1.09 ^a	40.71±2.34 ^b	31.03±0.77 ^b	6.64±0.94 ^b

由图4可知,土壤GMD较MWD有更直观的变化趋势。与0年土相比,3年土、5年土的GMD均下降显著,分别降低4.82%和5.19%;10年土变化不显著,仅下降了0.66%。整体而言,0年土、3年土、5年土的MWD和GMD呈下降趋势。表明使施用农业薄膜年限越长,土壤具有更低的MWD和GMD。10年土呈现出差异性,其MWD和GMD均显著大于5年土,甚至高于3年土,接近0年土。

2.2 不同年限覆膜种植下土壤团聚体有机碳分布

表2显示了0年、3年、5年、10年不同年限覆膜种植下的SOC含量,分别为16.33 g/kg、11.14 g/kg、7.24 g/kg、17.80 g/kg。整体来看,随着覆膜种植年限的增加,土壤有机碳含量递减,与0年土相比,3年土和5年土分别减少5.17 g/kg和9.08 g/kg,但10年土增加了1.48 g/kg。

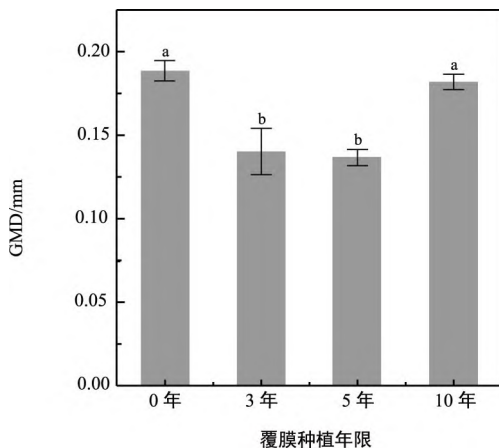


图4 不同年限覆膜种植土壤团聚体的GMD

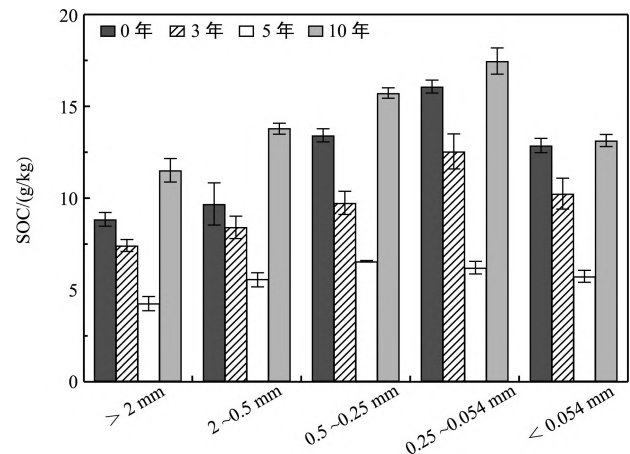


图5 不同年限覆膜种植土壤团聚体SOC含量特征

图5中,0年土、3年土、10年土的SOC含量在不同粒径的团聚体中有着显著的差异,其中0.25~0.054 mm粒级的团聚体拥有最高的有机碳含量,并且大于2 mm,2~0.5 mm,0.5~0.25 mm和0.25~0.054 mm粒径的团聚体有机碳含量呈递增趋势。结合不同处理下不同粒径团聚体特征,大于2 mm粒径团聚体中有机碳组成是塑料污染土壤中SOC的主要来源。

3 讨论

3.1 不同年限覆膜种植对土壤团聚体分布及稳定性的影响

据调查,该辣椒种植基地中使用的农业薄膜主要是PE膜,几乎不可生物降解^[30],尽管最新观点表明PE在环境中能够发生一定程度的降解,但降解缓慢^[31-32]。随着种植年限的增加,土壤中微塑料的含量会逐年增加,影响土壤团聚体的稳定性。研究中不同

年限覆膜种植的土壤团聚体分布数据显示,与0年土相比,3年、5年、10年土大于2 mm粒径团聚体组成增幅显著,分别为34.89%、29.82%、29.86%,表明微塑料污染土壤中大于2 mm团聚体增加而降低2 mm以下团聚体含量。主要原因是微塑料疏水性较高,在化学键或范德华力作用下促使土壤矿物与土粒发生胶结,容易形成较大粒级的团聚体^[22]。

团聚体的水稳定性是重要的土壤结构指标,用于评估土壤在经受与耕作、降雨或风蚀相关的破坏力时抵抗崩解的能力^[3]。同时,作为土壤物理特性的指标,团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)的组合可以更好地反映土壤团聚体的稳定性^[33]。MWD和GMD值越大,土壤团聚体的水稳定性越好。相反,较低的值意味着团聚体的水稳定性较差^[4]。研究表明,微塑料污染显著降低了土壤团聚体稳定性,并且伴随着土壤有机碳的流失,加剧了土壤团聚体稳定性的降低。相比0年土壤,3年土、5年土随覆膜种植年限的增加,尽管MWD统计结果差异不明显(图3),但GMD却呈现出下降趋势(图4)。随着土壤中微塑料含量的增加,土壤结构稳定性降低,容易导致土壤流失。

3.2 不同年限覆膜种植下土壤团聚体和全土的SOC差异

团聚体作为增加土壤有机碳稳定的重要机制之一,能为90%的有机碳提供物理保护作用,减缓甚至避免土壤有机碳的矿化,对土壤固碳和土壤肥力的发挥着关键作用^[34-35]。微塑料的存在通过对土壤团聚体结构的影响进而对土壤有机碳的固存和矿化产生影响。Cao等^[35]发现,大粒径团聚体容易流失土壤有机碳,小粒径团聚体则对土壤有机碳有着更强的固持能力。研究中3年土和5年土与0年土中的SOC含量相比呈现递减状态。并且伴随着大于2 mm粒级的团聚体组成增加,再次验证了微塑料会导致土壤中大粒径团聚体组成的增加,同时伴随着土壤有机碳降低的观点。

4 结论

本研究结果显示,随着微塑料污染程度的增加,土壤稳定性及有机质水平均降低。即在微塑料含量高的土壤中,土壤团聚体的稳定性降低,增加了土壤结构退化、板结的风险,影响土壤保水保肥性能,进而降低土壤肥力,使土壤呈现低有机质水平,导致农作物产物良莠不齐,产量下降。中国是农业大国,塑料地膜使用量极大,伴随其降解率极低的特性,造成农田土壤微塑料富集,导致土壤有机质含量普遍较低,土壤板结风险增

加。本研究结果可以提高在微塑料污染背景下土壤团聚体稳定性及有机碳变化的理解,并有助于制定农业地膜使用的管理策略。

参考文献:

- [1] Wang X, Zhang Y, Huang B, et al. Phthalate pollution and migration in soil-air-vegetable systems in typical plastic agricultural greenhouses in northwestern China[J]. *Science of the total environment*, 2022, 809: 151101.
- [2] Lynch J M, Bragg E. Microorganisms and soil aggregate stability[C]. *Advances in Soil Science: Volume 2*. Springer New York, 1985: 133-171.
- [3] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [4] Ma L, Wang Q, Shen S, et al. Heterogeneity of soil structure and fertility during desertification of alpine grassland in northwest Sichuan[J]. *Ecosphere*, 2020, 11(7): e03161.
- [5] 刘亚龙, 王萍, 汪景宽, 等. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2023, 60(3): 627-643.
- [6] Georgiou K, Jackson R B, Vinduškova O, et al. Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon[J]. *Nature communications*, 2022, 13(1): 3797.
- [7] Oades J M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure[M]. *Soil structure/soil biota interrelationships*. Elsevier, 1993: 377-400.
- [8] Tatarko J. Soil aggregation and wind erosion: processes and measurements[J]. *Annals of arid zone*, 2001, 40(3): 251-264.
- [9] Kirchmann H, Andersson R. The Swedish system for quality assessment of agricultural soils[J]. *Environmental monitoring and assessment*, 2001, 72: 129-139.
- [10] Huber S, Syed B, Freudenschuss A, et al. Proposal for a European soil monitoring and assessment framework[M]. EEA, 2001.
- [11] Bi X, Chu H, Fu M, et al. Distribution characteristics of organic carbon (nitrogen) content, cation exchange capacity, and specific surface area in different soil particle sizes[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 12242.
- [12] Liang A, Yang X, Zhang X, et al. Soil organic carbon changes in particle-size fractions following cultivation of Black soils in China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 105(1): 21-26.
- [13] Hewins D B, Lyseng M P, Schoderbek D F, et al. Grazing and climate effects on soil organic carbon concentration and particle-size association in northern grasslands[J]. *Scientific reports*, 2018, 8(1): 1336.
- [14] Mustafa A, Minggang X, Shah S A A, et al. Soil aggregation

- and soil aggregate stability regulate organic carbon and nitrogen storage in a red soil of southern China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 270: 110894.
- [15] Li J, Yuan X, Ge L, et al. Rhizosphere effects promote soil aggregate stability and associated organic carbon sequestration in rocky areas of desertification[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 304: 107126.
- [16] Sintim H Y, Bandopadhyay S, English M E, et al. Impacts of biodegradable plastic mulches on soil health[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 273: 36-49.
- [17] Yan C, He W, Xue Y, et al. Application of biodegradable plastic film to reduce plastic film residual pollution in Chinese agriculture[J]. *Sheng wu gong cheng xue bao/Chinese journal of biotechnology*, 2016, 32(6): 748-760.
- [18] Zhang G S, Liu Y F. The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 12-20.
- [19] Souza Machado A A, Kloas W, Zarfl C, et al. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems[J]. *Global change biology*, 2018, 24(4): 1405-1416.
- [20] Xiang Y, Jiang L, Zhou Y, et al. Microplastics and environmental pollutants: key interaction and toxicology in aquatic and soil environments[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 422: 126843.
- [21] Wang F, Wang Q, Adams C A, et al. Effects of microplastics on soil properties: current knowledge and future perspectives[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424: 127531.
- [22] Sajjad M, Huang Q, Khan S, et al. Microplastics in the soil environment: A critical review[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2022, 27: 102408.
- [23] 邱海峰. 小辣椒长成大产业[N]. *人民日报海外版*, 2023, 10-07(008).
- [24] Huang Y, Liu Q, Jia W, et al. Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 260: 114096.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [26] Maynard D G, Kalra Y P, Crumbaugh J A. Nitrate and exchangeable ammonium nitrogen [J]. *Soil sampling and methods of analysis*, 1993, 1: 25-38.
- [27] Mulvaney R L. Nitrogen-inorganic forms [J]. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 1996, 5: 1123-1184.
- [28] Miranda K M, Espey M G, Wink D A. A rapid, simple spectrophotometric method for simultaneous detection of nitrate and nitrite[J]. *Nitric oxide*, 2001, 5(1): 62-71.
- [29] 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.
- [30] Albertsson A C, Andersson S O, Karlsson S. The mechanism of biodegradation of polyethylene[J]. *Polymer degradation and stability*, 1987, 18(1): 73-87.
- [31] Krueger M C, Harms H, Schlosser D. Prospects for microbiological solutions to environmental pollution with plastics [J]. *Applied microbiology and biotechnology*, 2015, 99: 8857-8874.
- [32] Restrepo-Flórez J M, Bassi A, Thompson M R. Microbial degradation and deterioration of polyethylene-A review[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2014, 88: 83-90.
- [33] Huang R, Lan M, Liu J, et al. Soil aggregate and organic carbon distribution at dry land soil and paddy soil: the role of different straws returning[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24: 27942-27952.
- [34] 谭文峰, 许运, 史志华, 等. 胶结物质驱动下的土壤团聚体形成过程与稳定机制[J]. *土壤学报*, 2023, 60(2): 1297-1308.
- [35] Cao S, Zhou Y, Zhou Y, et al. Soil organic carbon and soil aggregate stability associated with aggregate fractions in a chronosequence of citrus orchards plantations[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 293: 112847.

国家南繁科研育种基地是国家宝贵的农业科研平台，
一定要建成集科研、生产、销售、科技交流、成果转化为
一体的服务全国的“南繁硅谷”。

——习近平