

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.05.025

史艺杰, 王美艳, 徐胜祥, 等. 太湖流域典型设施蔬菜地土壤结构特征研究. 土壤, 2020, 52(5): 1050–1056.

太湖流域典型设施蔬菜地土壤结构特征研究^①

史艺杰^{1,2}, 王美艳^{1*}, 徐胜祥¹, 史学正¹, 徐灵颖^{1,2}, 于全波^{1,2}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:以太湖地区稻田、露天菜地和设施菜地为研究对象,采集耕层和犁底层土壤进行理化分析,以土壤大孔隙(>50 μm)和水稳性团聚体表征土壤结构,通过与当地传统的稻田和露天蔬菜地两种土地利用方式进行对比,研究设施菜地土壤结构的变化特征,并分析其影响因子。结果表明:设施蔬菜种植显著增加了土壤大孔隙,并提高了土壤团聚体的稳定性,大孔隙方面主要增加了耕层(0~15 cm)50~500 μm 和>500 μm 团聚体的孔隙度,其孔隙度与稻田土壤相比分别提高了 133% 和 141%,与露天菜地土壤相比分别提高了 120% 和 50.4%;土壤团聚体表现为小团聚体减少,大团聚体增加,相比于稻田和露天菜地,耕层水稳性团聚体平均重量直径(MWD)提高了 72.3% 和 26.6%,团聚体破坏率(PAD)降低了 46.5% 和 37.8%;犁底层 MWD 分别提高了 83.9% 和 78.1%, PAD 降低了 42.9% 和 44.8%。相关分析表明,土壤结构参数与有机质含量和砂粒粉粒含量显著相关。研究区土壤质地为粉砂壤土,质地轻,设施菜种植中有机肥施用量倍增,有机质含量显著提高,有利于增加设施菜地土壤的大孔隙,增加大团聚体含量,提高团聚体稳定性。轻质粉砂壤土进行设施蔬菜种植后每茬施用有机肥 11.3 t/hm² 能改善土壤结构,有效避免集约化种植后土壤板结现象。

关键词:设施菜地;土壤孔隙;团聚体;土壤有机质

中图分类号: S152 **文献标志码:** A

Study on Soil Structure Characteristics of Typical Greenhouse Vegetable Field in Taihu Lake Region

SHI Yijie^{1,2}, WANG Meiyang^{1*}, XU Shengxiang¹, SHI Xuezheng¹, XU Lingying^{1,2}, YU Quanbo^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Traditional paddy fields, open vegetable fields and greenhouse vegetable fields in Taihu Lake region were taken as study objects. The topsoil and subsoil were collected and the physical and chemical properties were determined. Soil macropores (>50 μm), soil aggregates were chosen to characterize soil structure. The variation characteristics of soil structure were studied and the impact factors were analyzed. The results showed that greenhouse vegetable planting significantly increased soil macropores and improved the stability of soil aggregates. In terms of macroporosity, the greenhouse vegetable planting increased 50–500 μm and >500 μm porosity of the topsoil (0–15 cm), which was 133% and 141% higher than those of the paddy field, respectively, and increased by 120% and 50.4% compared with open vegetable field. The greenhouse soil showed a decrease in small aggregates and an increase in large aggregates, compared to paddy field and open vegetable field, the mean weight diameter (MWD) of water-stable aggregates in the topsoil increased by 72.3% and 26.6%, the percentage of aggregate destruction (PAD) decreased by 46.5% and 37.8%, the MWD of the subsoil increased by 83.9% and 78.1%, and the PAD decreased by 42.9% and 44.8%, respectively. Correlation analysis showed that soil structural parameters were significantly correlated with the contents of organic matter, sands and silts. Soil texture of the study area was silty loam, the application of organic fertilizer (11.3 t/hm²) for greenhouse vegetable crop significantly improved soil macropores and increased large aggregates, thus, improved soil structure and effectively avoided soil compaction after intensive planting.

Key words: Greenhouse vegetable; Soil macropores; Soil aggregates; Soil organic matter

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41401240, 41571209)和中科院南京土壤研究所“一三五”领域前沿项目(ISSASIP1627)资助。

* 通讯作者(mywang@issas.ac.cn)

作者简介: 史艺杰(1994—), 女, 河北保定人, 硕士研究生, 主要从事土壤资源演变与高效利用研究。E-mail: yjshi@issas.ac.cn

20世纪80年代以来,设施菜地因高产、高集约化、高经济效益等优势,在我国种植面积迅速扩大,至2017年我国设施蔬菜栽培面积已达370万 hm^2 ,产业产值超过9800亿元^[1-2]。与传统农田相比,设施蔬菜栽培是一种高温高湿、无降水、高复种指数和高肥料投入的集约化种植方式,易造成设施蔬菜地土壤板结退化,导致设施菜地减产,甚至绝产^[3-7]。因此,改良和维持设施菜地土壤结构是保证设施菜地生产力和可持续发展的重要措施。

目前关于设施菜地土壤结构的研究主要集中于土地利用方式、施肥和耕作管理措施的影响上。设施菜地转变前的土地利用方式不同导致其土壤结构变化方向不同。研究表明,南京谷里粉砂黏土水田转变为设施菜地后土壤孔隙半径整体变小,土壤结构恶化^[5];山东寿光砂质潮土传统旱地转变为设施菜地后土壤孔隙度以每年0.26%的速度递增^[8]。施用有机肥可以显著改善设施菜地土壤结构。申思雨等^[9]研究表明,河北曲周潮土有机种植(施用鸡粪堆肥)和无公害种植(施用有机肥加少量化肥)的设施菜地0~10 cm土层>0.1 mm的孔隙较常规种植(施用化肥)分别高30.4%和10.9%。Xu等^[10]研究发现,长期有机肥投入显著增加了设施蔬菜地的有机质含量,有机质含量的增加促进了土壤的透气性,有机质含量增加1.00%,大孔隙(>50 μm)增加1.70%。耕作措施也影响设施菜地土壤结构的变化。Herencia等^[11]在壤土设施菜地的研究发现,施肥之前浅耨耕作比施肥前不耕作更有助于有机质和土壤颗粒结合,促进有机质改良土壤结构的效果。可见,设施菜地土壤结构已经引起了学者们的普遍关注,强烈人为作用下设施菜地土壤结构一般表现为板结退化,但仍有部分研究结论恰恰相反,是否与土壤本身性质和后期的管理措施密切相关,也还需进一步的研究探索。

太湖地区是我国东部典型稻麦轮作区,也是长三角地区重要的蔬菜生产基地,20世纪90年代以来大面积的水田和露天菜地改为设施蔬菜种植。本文以太湖地区长期种植的稻田、露天菜地和设施菜地为研究对象,采集耕层和犁底层土壤进行理化分析,以土壤大孔隙(>50 μm)、水稳性团聚体表征土壤结构,将设施菜地与当地传统的稻田和露天菜地两种土地利用方式进行对比,探究设施菜地土壤结构变化特征,分析其影响因子,为设施菜地土壤资源的合理利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江苏省宜兴市周铁镇太湖滨区

(31°25′13.74″N, 120°1′18.00″E),为亚热带季风气候,年平均温度和降水量分别为15.6℃和1210 mm,约有231 d无霜期^[12]。该地区毗邻太湖,夜潮性明显,水稻土为湖白土,菜地土壤为潮土^[13]。研究选取的长期设施菜地、露天菜地、稻田距离小于1 km,各选5个面积约为333 m^2 的地块作为重复。稻田是典型稻麦轮作制,每年6—9月种植水稻,11月至次年6月种植小麦,种植前施用3.38 t/hm^2 尿素作基肥。菜地作物种类有番茄、黄瓜、白菜、生菜和芹菜等。露天菜地平均每年种植2~3茬,平均每年施用有机肥(砻糠灰:鸡粪稻壳 1:2)27 t/hm^2 ,复合肥1.35 t/hm^2 。设施菜地从9月到次年7月平均种植4茬,最多能种6茬,7月到9月休耕,每茬施用有机肥(砻糠灰:鸡粪稻壳 1:2)11.3 t/hm^2 ,复合肥0.53 t/hm^2 ,一般不追肥。

1.2 样品采集与处理

2017年6月底采集土壤样品。按耕作深度和土壤紧实程度划分耕作层(0~15 cm)和犁底层(15~30 cm),各层分别采集100 cm^3 原状环刀土柱(直径50.46 mm,高50 mm)3个,五点混合取土采集各层土样2 kg装入塑封袋内带回,在室内风干、研磨,分别过10目、60目、100目筛用于土壤理化性质分析。同时,在耕层和犁底层分别采集2 kg土壤样品带回室内,沿土壤自然结构将土样掰成直径约1 cm的小块,去除石砾、根系等杂质,在阴凉处风干后供后续水稳性团聚体分析。

1.3 测定项目与方法

土壤容重采用环刀法(100 cm^3)测定,总孔隙度根据容重计算获得,土壤密度采用平均密度值2.65 g/cm^3 。土壤颗粒组成采用吸管法测定(以质量分数计),质地分级采用美国制。土壤有机质测定采用重铬酸钾氧化法^[14]。

土壤大孔隙(>50 μm)孔隙度测定采用Eijkelkamp Sandbox(08.01)沙箱法^[15-16]。根据Greenland^[17]将土壤大孔隙区分为两个主要的类型:①50~500 μm 的传输孔隙;②>500 μm 的孔隙,即裂隙。当量孔径(d , mm)与压力水头(H , cm)的计算公式为: $d(\text{mm})=3/H$ 。将原状土壤环刀置于水中浸泡至饱和(24 h)后称重,再放入沙箱中,分别设置沙箱水头为6 cm和60 cm,饱和含水量与6 cm压力水头下的含水量差值即为>500 μm 孔隙度,>50 μm 的孔隙度对应的是饱和含水量与60 cm水头下含水量差值。

土壤水稳性团聚体测定采用湿筛法^[18]。取200 g风干土样,放入孔径依次为5、2、1、0.5、0.25、0.053

mm 的套筛上层,置于振荡式机械筛分仪中筛分得到干筛土壤团聚体,按干筛各级团聚体比例配成 50 g 混合土样,放置在孔径依次分别为 5、2、1、0.5、0.25、0.053 mm 的套筛最上层,将套筛放入团粒分析仪中,加水没过套筛最上层团聚体,静置 10 min 后,开机将套筛上下振荡 10 min,分离出各级套筛上的水稳性团聚体置于铝盒内烘干称重,得到不同粒径水稳性团聚体含量(以质量分数计)。

团聚体平均重量直径(mean weight diameter, MWD)计算公式为:

$$\text{MWD}(\text{mm}) = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (1)$$

式中: MWD 为团聚体平均重量直径(mm); X_i 为任意粒径范围内的团聚体平均直径(mm); W_i 为对应于 X_i 的团聚体质量分数。

团聚体破坏率(percentage of aggregate destruction, PAD)计算公式为:

$$\text{PAD} = \frac{R_{0.25\text{D}} - R_{0.25\text{W}}}{R_{0.25\text{D}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: PAD 为团聚体破坏率(%), $R_{0.25\text{D}}$ 为 >0.25 mm 机械稳定性团聚体含量(%), $R_{0.25\text{W}}$ 为 >0.25 mm 水稳

性团聚体含量(%)。

1.4 数据处理

采用 SPSS 24.0 对数据进行分析,单因素 ANOVA 进行方差分析, Duncan 法进行多重比较,显著性水平 $P < 0.05$; 相关分析用双变量相关中的 Spearman 法,显著性水平 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$; 应用 Excel 绘制图表。

2 结果

2.1 设施菜地土壤有机质含量增加,容重降低

表 1 显示,研究区土壤质地比较均一,以粉砂为主,为粉砂(壤)土,粉粒含量基本高于 80%,比较适宜蔬菜种植。与稻田和露天蔬菜地相比,设施菜地耕层土壤容重分别降低了 12.0% 和 8.30%,总孔隙度分别增加了 10.8% 和 6.90%; 但 3 种利用方式下犁底层容重和孔隙度均无显著差异。说明设施蔬菜种植显著改善了土壤耕层结构。设施菜地土壤有机质积累明显,耕层有机质含量分别比稻田和露天菜地高 108% 和 78.7%,且犁底层有机质含量也分别比稻田和露天菜地高 44.7% 和 79.8%。这可能得益于该区设施蔬菜种植中大量有机肥料的投入。

表 1 3 种土地利用方式的基本理化性质
Table 1 Basic physical and chemical properties under three land use types

土层	土地利用方式	容重(g/cm ³)	总孔隙度(%)	有机质(g/kg)	砂粒(%)	粉粒(%)	黏粒(%)	质地(USDA)
耕层	稻田	1.25 ± 0.01 a	52.9 ± 0.00 b	22.2 ± 3.25 b	5.07 ± 0.95 b	85.6 ± 1.41 a	9.33 ± 1.18 b	粉砂土
	露天菜地	1.20 ± 0.01 a	54.8 ± 0.00 b	25.8 ± 7.64 b	5.07 ± 1.11 b	84.5 ± 3.65 a	10.4 ± 2.60 ab	粉砂土
	设施菜地	1.10 ± 0.06 b	58.6 ± 0.02 a	46.1 ± 0.99 a	7.83 ± 1.17 a	78.6 ± 1.14 b	13.5 ± 0.27 a	粉砂壤土
犁底层	稻田	1.36 ± 0.03 a	48.6 ± 0.01 a	12.3 ± 1.89 ab	3.16 ± 0.88 ab	88.2 ± 2.12 a	8.68 ± 1.39 a	粉砂土
	露天菜地	1.29 ± 0.04 a	51.5 ± 0.02 a	9.90 ± 4.04 b	2.19 ± 0.16 b	85.4 ± 3.26 a	12.4 ± 3.42 a	粉砂壤土
	设施菜地	1.28 ± 0.05 a	51.6 ± 0.02 a	17.8 ± 4.77 a	3.85 ± 0.32 a	84.3 ± 1.30 a	11.9 ± 1.60 a	粉砂土

注: 同列小写字母不同表示同一土层不同土地利用方式间差异显著($P < 0.05$), 下表同。

2.2 设施菜地土壤传输孔隙明显增加

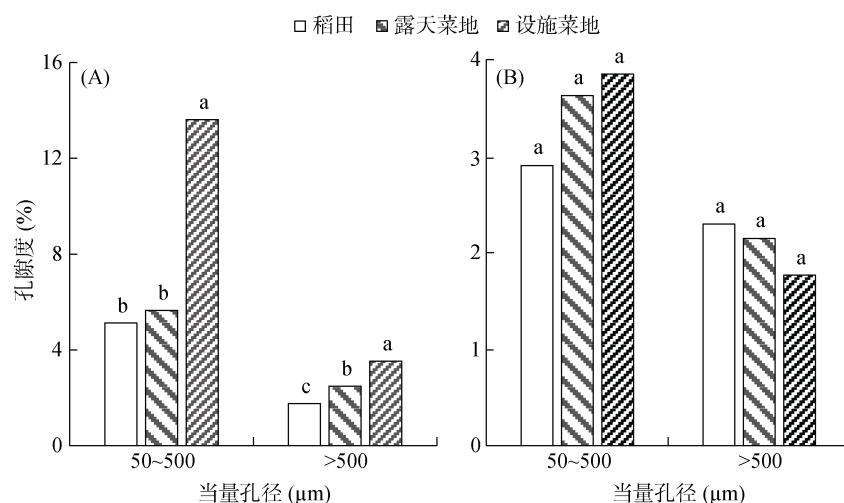
研究区 3 种土地利用方式的土壤大孔隙度(当量孔径 $>50 \mu\text{m}$)分布情况如图 2 所示。设施菜地耕层土壤各级孔隙度都有明显增加,与稻田相比, $50 \sim 500 \mu\text{m}$ 和 $>500 \mu\text{m}$ 的孔隙度分别增加了 133% 和 140%; 与露天菜地相比, $50 \sim 500 \mu\text{m}$ 和 $>500 \mu\text{m}$ 的孔隙度分别增加了 120% 和 50.4%,说明设施菜地土壤孔隙结构明显改善。3 种利用方式下犁底层各级孔隙均无显著差异,犁底层土壤孔隙没有受到土地利用方式改变的影响。

2.3 设施菜地土壤大团聚体和团聚体稳定性明显增加

土壤团聚体含量分布如图 3 所示,在耕层土壤

中,相比于稻田和露天菜地,设施菜地 $<0.053 \text{ mm}$ 的小团聚体含量分别减少了 49.0% 和 41.4%, $0.25 \sim 0.5 \text{ mm}$ 的大团聚体含量分别减少了 36.6% 和 24.4%,但 $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ 大团聚体含量分别增加了 54.6% 和 31.1%, $1 \sim 2 \text{ mm}$ 大团聚体含量分别增加了 300% 和 117%,即设施菜地大团聚体含量总体是增加的。 $0.25 \sim 0.5 \text{ mm}$ 团聚体含量的减少可能是因为形成了更大的团聚体。在犁底层土壤中也有相似的趋势,设施菜地 $0.053 \sim 0.25 \text{ mm}$ 小团聚体含量较稻田和露天菜地减少了 31.2% 和 34.9%, $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ 大团聚体含量分别增加了 89.7% 和 142%。综上,设施菜地对小团聚体向大团聚体转变具有明显的促进作用。

设施蔬菜种植对土壤水稳性团聚体平均重量直



(图中小写字母不同表示同一当量孔径下不同土地利用方式间差异达 $P < 0.05$ 显著水平, 下同)

图 1 3 种土地利用方式下耕层(A)和犁底层(B)土壤大孔隙分布

Fig. 1 Topsoil(A) and subsoil(B) macropore distribution under three land use types

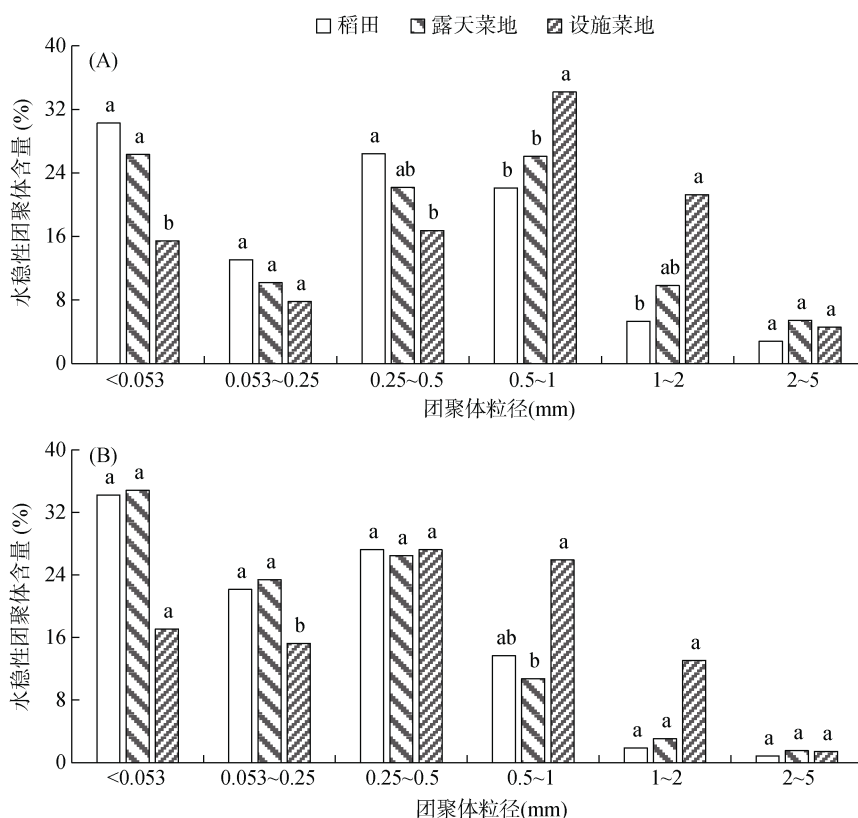


图 2 3 种土地利用方式下耕层(A)和犁底层(B)水稳性团聚体含量分布

Fig. 2 Topsoil(A) and subsoil(B) water-stable aggregate size distribution under three land use types

径(MWD)和破坏率(PAD)影响显著(表 2), 相比于稻田和露天菜地, 设施菜地耕层土壤中 MWD 分别提高了 72.3% 和 26.6%, PAD 分别降低了 46.5% 和 37.8%; 犁底层土壤中 MWD 分别提高了 83.9% 和 78.1%, PAD 分别降低了 42.9% 和 44.8%。结果表明, 设施蔬菜种植促进土壤形成更稳定的团聚体结构。

3 讨论

3.1 设施蔬菜种植土壤结构明显改善

一般情况下, 结构良好的耕地, 耕作层的容重大约在 $1.14 \sim 1.26 \text{ g/cm}^3$ ^[19], 大孔隙度不低于 10%^[20]。本研究中设施蔬菜地耕层容重仅为 1.10 g/cm^3 , 大孔隙度高达 19.4%, 传输孔隙达 14.9%, 说明当地设

表 2 3 种土地利用方式下团聚体平均重量直径和破坏率
Table 2 MWDs and PADs of soil water stable aggregates under three land use types

土层	土地利用方式	MWD(mm)		PAD(%)
		机械性团聚体	水稳性团聚体	
耕层	稻田	2.06 ± 0.07 a	0.47 ± 0.06 c	0.43 ± 0.05 a
	露天菜地	2.26 ± 0.31 a	0.64 ± 0.06 b	0.37 ± 0.04 a
	设施菜地	2.41 ± 0.30 a	0.81 ± 0.18 a	0.23 ± 0.05 b
犁底层	稻田	1.99 ± 0.12 a	0.31 ± 0.08 b	0.56 ± 0.12 a
	露天菜地	2.17 ± 0.14 a	0.32 ± 0.04 b	0.58 ± 0.16 a
	设施菜地	2.11 ± 0.06 a	0.57 ± 0.25 a	0.32 ± 0.09 b

施菜地种植后土壤孔隙结构并未发生退化。另外,耕层土壤结构结果显示,设施菜地具有较高的大团聚体含量,其团粒结构发育更稳定,结构最好。虽然一些研究也证实了设施种植后土壤孔隙结构有所改善,例如,河北曲周褐土上长期种植的设施菜地土壤容重比当地传统农田显著降低了 16.5%^[21]。但是,许多研究认为常规设施蔬菜种植会导致土壤结构退化。例如,孔超等^[5]研究江苏南京粉砂质黏壤土水稻田转化为的设施蔬菜地土壤容重增加了 8.80%,总孔隙度减少了 20.8%,结构恶化;蔡彦明等^[22]和沃飞等^[23]研究天津壤土设施菜地也发现,长期种植后其土壤容重增大了 19.5%,总孔隙度减小了 12.4%。万毅林和高明^[7]研究发现,重庆紫色土设施菜地 1~0.25、>3 和>5 mm 水稳性团聚体含量均表现为 1 a>5 a>10 a,土壤团聚体破坏率也呈逐年增加趋势,种植 1 a 的土壤团聚体破坏率为 27.8%,5 a 和 10 a 分别高达 49.9% 和 58.7%。造成这种差异的原因可能有以下两方面:一

方面,耕作土壤板结的主要原因来源于有机质含量的降低^[24]。本研究露天菜地和设施菜地为保证蔬菜生产施用了大量有机肥,每茬施用有机肥高达 11.3 t/hm²,有效增加了有机质含量,进而维持了土壤结构。研究表明,鸡粪类有机肥施入能提高土壤中的微生物代谢进而促进团粒结构发育,改良土壤结构^[24];土壤大团聚体含量及大团聚体稳定性随有机肥施用量增加而增加^[25]。其他设施菜地土壤结构退化可能是大量施用化肥、有机肥施用量不足造成的。另一方面,通过对比发现,设施种植后土壤结构退化地区其土壤黏粒含量都在 30% 以上,质地黏重,黏粒在灌溉和耕作过程中易受扰动而压实,填充孔隙^[26-27]。而本研究中的土壤质地为粉砂土和粉砂壤土,黏粒含量在 10% 左右,不易在耕作和灌溉后将原有的大孔隙填压,而且当地土壤耕层疏松犁底层紧实,既通气透水又保水保肥,有利于团粒结构发育。综上,该地区设施菜地能维持良好的土壤孔隙结构,可能与大量施用有机肥和粉砂壤土质地有关。

3.2 土壤质地和有机质对维持土壤传输孔隙和团聚状态起决定作用

表 3 显示,土壤有机质含量与 50~500 μm 传输孔隙孔隙度和团聚体水稳性均呈极显著正相关($P<0.01$),土壤砂粒含量也与传输孔隙孔隙度、大团聚体含量和水稳性呈极显著正相关,另外,土壤粉粒含量与传输孔隙孔隙度和大团聚体水稳性呈极显著负相关。可见,对土壤孔隙和团聚体性质影响最大的主导因素是土壤有机质和土壤质地。

表 3 土壤大孔隙、水稳性团聚体与土壤基本性质的相关性
Table 3 Correlation between soil macropores, water-stable aggregates and soil basic properties

		容重	有机质	土壤质地			当量孔径(μm)		水稳性 MWD	PAD
				砂粒	粉粒	黏粒	50 ~ 500	>500		
容重							-0.83**	-0.17		
有机质		-0.88**					0.77**	0.22		
土壤质地	砂粒	-0.74**	0.86**				0.60**	0.24		
	粉粒	0.72**	-0.67**				-0.67**	-0.00		
	黏粒	-0.43	0.34				0.41	-0.11		
水稳性团聚体 (mm)	<0.053	0.56*	-0.52*	-0.38	0.81**	-0.78**	-0.52*	-0.08	-0.69**	0.86**
	0.053 ~ 0.25	0.82**	-0.77**	-0.80**	0.54*	-0.16	-1.80**	-0.19	-0.91**	0.87**
	0.25 ~ 0.5	0.48*	-0.39	-0.37	0.17	0.12	-0.50*	-0.51*	-0.56*	0.41
	0.5 ~ 1	-0.68**	0.73**	0.74**	-0.62**	0.35	0.62**	0.33	0.80**	-0.85**
	1 ~ 2	-0.88**	0.78**	0.65**	-0.63**	0.31	0.81**	0.14	0.95**	-0.80**
	2 ~ 5	-0.73**	0.53*	0.59*	-0.29	-0.07	0.56*	0.23	0.71**	-0.52*
水稳性 MWD		-0.88**	0.82**	0.71**	-0.68**	0.38	0.78**	0.04		-0.92**
PAD		0.75**	-0.71**	-0.67**	0.74**	-0.51*	-0.69**	-0.04		

注:表中*、**分别表示在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 水平显著相关。

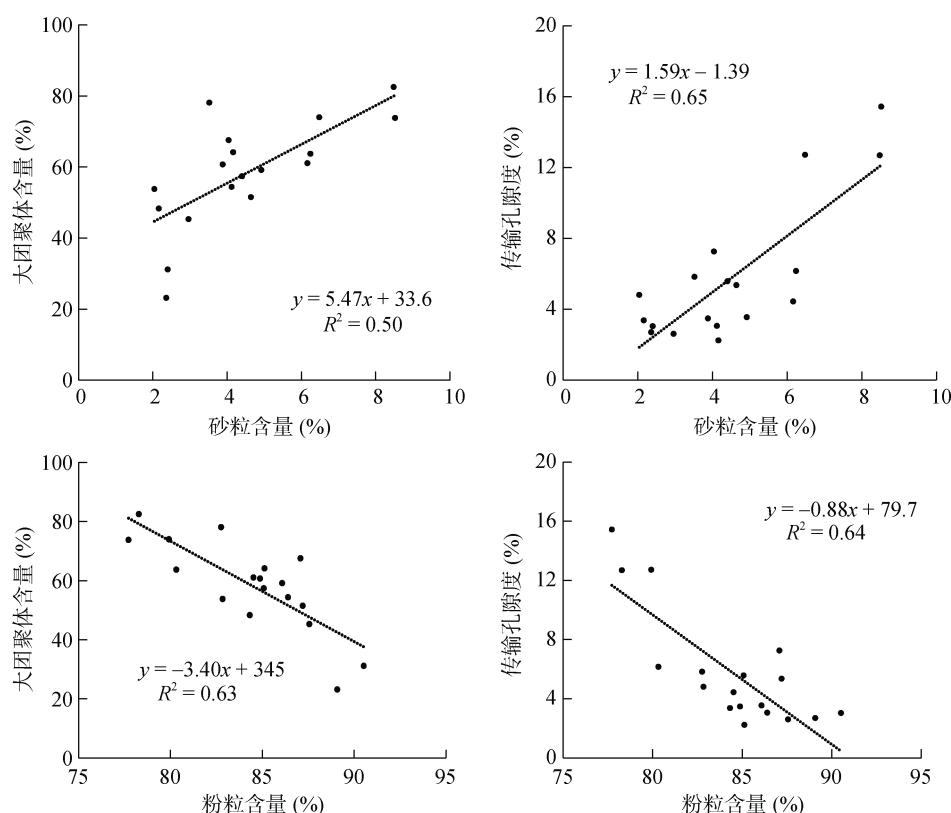


图3 大团聚体含量和传输孔隙度与砂粒和粉粒含量的线性关系

Fig. 3 Linear relationship between soil aggregates (>0.25 mm), transmission pores with contents of sands and silts

依据相关性分析结果,对土壤大团聚体(>0.25 mm)含量、传输孔隙(50~500 μm)度与粉、砂粒含量分别建立线性关系(图4),砂粒含量增加1.00%,大团聚体含量增加5.47%,传输孔隙度增加1.59%;粉粒含量增加1.00%,大团聚体含量减少3.40%,传输孔隙度减少0.88%。结果表明,土壤容重、有机质和土壤质地对维持土壤传输孔隙结构和土壤团聚状态具有重要作用。

4 结论

本研究区轻质粉砂壤土进行设施蔬菜种植后,每茬施用有机肥11.3 t/hm²,有效避免了集约化种植后的土壤板结现象,土壤耕层结构得以改善,土壤大孔隙,尤其是传输孔隙(50~500 μm)显著增加;并促进了小团聚体结构向大团聚体的转化,大团聚体(>0.25 mm)总含量增加,团聚体稳定性增强,土壤结构参数与有机质含量和砂粉粒含量显著相关。研究区土壤质地为粉砂壤土,质地轻,设施种植中有机肥施用量倍增,有机质含量显著提高,有利于加强设施菜地土壤结构的改善。因此,质地轻的土壤更适合设施蔬菜的种植,有机肥的施用对保持设施菜地土壤结构非常重要。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴: 1984[M]. 北京: 中国统计出版社, 1984.
- [2] 蔡祖聪. 我国设施栽培养分管理中待解的科学和技术问题[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 36–43.
- [3] Fan Z B, Lin S, Zhang X M, et al. Conventional flooding irrigation causes an overuse of nitrogen fertilizer and low nitrogen use efficiency in intensively used solar greenhouse vegetable production[J]. Agricultural Water Management, 2014, 144: 11–19.
- [4] Liang H, Hu K L, Batchelor W D, et al. Developing a water and nitrogen management model for greenhouse vegetable production in China: Sensitivity analysis and evaluation[J]. Ecological Modelling, 2018, 367: 24–33.
- [5] 孔超, 王美艳, 史学正, 等. 基于低场核磁技术研究土壤持水性能与孔隙特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1130–1137.
- [6] 闫立梅, 王丽华. 不同龄温室土壤微形态结构与特征[J]. 山东农业科学, 2004, 36(3): 60–61.
- [7] 万毅林, 高明. 不同种植年限对菜地土壤结构的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(13): 236–243.
- [8] 高新昊, 张英鹏, 刘兆辉, 等. 种植年限对寿光设施大棚土壤生态环境的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1452–1459.
- [9] 申思雨, 刘哲, 吕贻忠. 不同种植方式对温室土壤微形态的影响[J]. 土壤, 2016, 48(2): 355–360.

- [10] Xu L Y, Wang M Y, Shi X Z, et al. Effect of long-term organic fertilization on the soil pore characteristics of greenhouse vegetable fields converted from rice-wheat rotation fields[J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 631–632: 1243–1250.
- [11] Herencia J F, García-Galavís P A, Maqueda C. Long-term effect of organic and mineral fertilization on soil physical properties under greenhouse and outdoor management practices[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(4): 443–453.
- [12] 谢文明, 于飞, 冯晓宇, 等. 太湖流域农村地区典型村镇土壤养分和水体污染现状调查[J]. *土壤*, 2014, 46(4): 613–617.
- [13] 高砚芳, 段增强, 郇恒福. 宜兴市温室土壤理化性质的调查和分析[J]. *土壤*, 2007, 39(6): 968–972.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [15] Moret D, Arrue J L. Dynamics of soil hydraulic properties during fallow as affected by tillage[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 96(1): 103–113.
- [16] 王红兰, 唐翔宇, 鲜青松, 等. 紫色土水分特征曲线室内测定方法的对比[J]. *水科学进展*, 2016, 27(2): 240–248.
- [17] Greenland D J. Soil damage by intensive arable cultivation: temporary or permanent?[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 1977, 281(980): 193–208.
- [18] 刘晓利, 何园球, 李成亮, 等. 不同利用方式旱地红壤水稳性团聚体及其碳、氮、磷分布特征[J]. *土壤学报*, 2009, 46(2): 255–262.
- [19] 李成亮, 孔宏敏, 何园球. 施肥结构对旱地红壤有机质和物理性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 116–119.
- [20] 沈其荣. 土壤肥料学通论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [21] Zhang G, Zheng C Y, Wang Y, et al. Soil organic carbon and microbial community structure exhibit different responses to three land use types in the North China Plain[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science*, 2015, 65(4): 341–349.
- [22] 蔡彦明, 沃飞, 方堃, 等. 不同种植年限蔬菜地土壤导水性能及影响因素[J]. *灌溉排水学报*, 2009, 28(6): 5–8.
- [23] 沃飞, 蔡彦明, 方堃, 等. 天津市不同种植年限蔬菜地土壤水分特征对比研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(3): 236–240.
- [24] 王笃超, 吴景贵. 不同有机物料对连作大豆土壤养分及团聚体组成的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55(4): 825–834.
- [25] 刘振东, 李贵春, 周颖, 等. 无机肥配施粪肥对华北褐土团聚体分布及有机碳含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(11): 2239–2245.
- [26] 张北赢, 陈天林, 王兵. 长期施用化肥对土壤质量的影响[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(11): 182–187.
- [27] 钟攀, 李建勇, 张玉霞, 等. 菜园土壤蔬菜死苗原因初探[J]. *土壤通报*, 2008, 39(6): 1483–1485.