

不同栽培年限日光温室土壤团聚体的组成及稳定性

裴中健, 梁成华, 尹岩

(沈阳农业大学 土地与环境学院, 辽宁 沈阳 110866)

摘要: [目的] 揭示不同栽培年限日光温室土壤团聚体分布及稳定性的变化趋势, 为探明设施蔬菜栽培土壤结构变化规律提供理论依据。[方法] 以辽宁省新民市设施蔬菜栽培基地温室土壤为研究对象, 并以温室外露地土壤为对照, 研究了栽培年限为 2, 5, 8, 16 a 的日光温室土壤团聚体不同粒级的组成分布、机械稳定性、水稳性和团聚体破坏率的变化趋势。[结果] 不同栽培年限的土壤 >0.25 mm 团聚体数量、机械稳定性和水稳性均呈降低趋势, 且低于露地土壤; 栽培时间长于 5 a 后, >0.25 mm 团聚体数量、机械稳定性和水稳性有所升高。供试土壤在栽培初期, 土壤有机质对团聚体的形成和稳定性维持没有起到促进作用, 随着栽培时间的增长, 有机质促进了团聚体的形成和稳定。[结论] 研究区域温室土壤团聚体稳定性随栽培年限的增长呈先降低后升高的趋势。

关键词: 日光温室; 团聚体; 栽培年限; 机械稳定性; 水稳性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)06-0070-05

中图分类号: S152.4⁺⁷

Size Hierarchy and Stability of Soil Aggregates in Solar Greenhouse Soils with Different Planted Years

PEI Zhongjian, LIANG Chenghua, YIN Yan

(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110866, China)

Abstract: [Objective] Changing trends of size hierarchy and stability of soil aggregates in solar greenhouse soils were illustrated along years of plantation to provide some theoretical bases for the change of soil structure in vegetable cultivation. [Methods] Soils with different plantation years in four vegetable greenhouses (with 2, 5, 8 and 16 years of plantation) in Xinmin City of Liaoning Province were selected as the research objects, and nearby soils in open fields outside of the greenhouses were selected for comparison. Indices of composition, mechanical stability, water stability and damage rate of soil aggregate were measured. [Results] Within 5 years of plantation, quantity of >0.25 mm, mechanical stability and water stability of soil aggregates showed a decreasing trend along plantation, and they were lower than that of the comparative soil in open fields; After 5 years of plantation, they all were elevated significantly. At the beginning of the cultivation of the tested soil, organic matter didn't play its role in the aggregate formation and stability maintenance; While, with the increase of planting time, organic matter began to promote the formation and maintain the stability of soil aggregates. [Conclusion] The stability of soil aggregate in the regional greenhouse decreased firstly and then increased with the increase of the planting years.

Keywords: solar greenhouse; aggregates; planted years; mechanical stability; water stability

设施蔬菜栽培土壤的质量退化问题近年来受到了土壤学者高度关注, 土壤结构的退化是其中一个重要因素。团聚体是土壤结构的基本单位, 是组成土壤的重要部分, 土壤中团聚体的含量和稳定性能够直接影响土壤结构质量的优劣, 是评价土壤结构质量的

要指标^[1-2]。在评价与调节土壤肥力、土壤抗侵蚀以及维持土壤功能等方面, 团聚体具有不同程度的影响^[3-5]。目前, 很多学者^[6-9]的研究集中在不同施肥条件、不同耕作模式和不同土地利用方式等因素对土壤团聚体组成分布及稳定性的影响。而对于日光温室

收稿日期: 2014-08-29

修回日期: 2014-10-27

资助项目: 国家自然科学基金项目“长期定位施肥对设施蔬菜栽培土壤团聚体稳定性的影响研究”(31171977); 辽宁环境科研教育 123 工程项目(CEPF2012-123-1-4)

第一作者: 裴中健(1989—), 男(汉族), 辽宁省抚顺市人, 硕士研究生, 研究方向为农业环境与生态。E-mail: jarvis198975@163.com。

通信作者: 梁成华(1958—), 男(汉族), 辽宁省铁岭市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事污染土壤修复与利用、农业生态与环境方面的研究。E-mail: liang110161@163.com。

条件下载培年限对土壤团聚体分布和稳定性的影响的研究还相对较少。与露地土壤不同,温室土壤施肥量大、无自然雨淋条件、耕作频率和集约利用程度都处于较高水平^[10],在温室条件下,随着栽培时间的增长土壤团聚体的组成和稳定性必然会受到一定的影响。本研究选取 4 组不同栽培年限的日光温室土壤作为研究对象,并以日光温室外露地土壤作对照,研究温室土壤团聚体各个粒级组成分布、机械稳定性、水稳性和团聚体结构破坏率的变化趋势,为探明设施蔬菜栽培土壤结构变化规律提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于辽宁省新民市大民屯镇设施蔬菜种植基地(北纬 41°32'N,东经 120°23'E),日光温室面积约 2 000 hm²,是辽宁省乃至全国具有代表性的

日光温室蔬菜种植区。试验选取的温室所在区域地势平坦,土壤类型主要为耕型淤黄壤质草甸土,主要种植作物为生菜、油麦菜等叶菜植物;试验所选用的温室外露地对照土壤种植作物为玉米。温室土壤所施用的有机肥主要以熟鸡粪和作物秸秆等物料,每年施用的有机肥约 80 t/hm² 左右,化肥施用量约为 3 000 kg/hm² 左右,其中尿素约 500 kg/hm²,磷酸氢二铵约 1 200 kg/hm²,硫酸钾约 1 000 kg/hm²^[11]。

1.2 样品采集

采样时间设在 2013 年 10 月,采集栽培年限为 2,5,8,16 a 的 4 组温室土壤样本,每个年限选取 3 个不同温室棚土作平行,对照组采集相邻露地旱田土壤 3 份。采集深度为 0—20 cm 的原状土壤,带回实验室,自然风干。待土壤含水量为 20% 左右时,将原状土掰成 1 cm 左右的小土块,室温下风干,尽量不破坏土壤自然结构。供试土壤基本理化性质详见表 1。

表 1 供试土壤的基本理化性质

栽培年限/a	pH 值	有机质/(g·kg ⁻¹)	电导率/(μs·cm ⁻¹)	磷全量/(g·kg ⁻¹)	TDS/(mg·l ⁻¹)	含水量/%
CK	6.31	16.90	49.32	0.76	24.60	19.46
2	5.95	16.46	333.83	0.86	166.90	21.50
5	5.93	18.53	719.33	1.30	359.28	19.60
8	6.18	19.55	520.70	2.03	261.00	19.82
16	7.04	21.71	272.33	1.87	136.08	18.96

1.3 测定方法

各级风干性团聚体分离和含量测定采用干筛法^[12]。用四分法取风干后的土样 500 g,放入 2,0.25 和 0.053 mm 孔径的筛组,振荡 90 s,分别得到 >2, 2~0.25, 0.25~0.053 和 <0.053 mm 这 4 个粒级的风干团聚体,称量各粒级团聚体干重,并计算各级团聚体所占比例。通过干筛法计算平均重量直径(MWD)来评价团聚体机械稳定性。

各级水稳性团聚体采用湿筛法^[13]测定。按风干团聚体所测得的团聚体比例配制 50 g 土样,在水中浸泡 30 min 放入 2,0.25 和 0.053 mm 孔径的筛组,用手紧抓筛组,上下匀速振荡 5 min 钟分别得到 >2, 2~0.25, 0.25~0.053 和 <0.053 mm 4 个粒级的水稳性团聚体,烘干后称重。通过湿筛法计算平均重量直径来评价团聚体水稳性。

1.4 数据处理

团聚体机械稳定性和水稳性采用平均重量直径(MWD)来评价,公式为:

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

式中: \bar{R}_i ——某级团聚体平均直径(mm); w_i ——某

级团聚体组分的干重(g)。

团聚体结构破坏率(PAD)计算公式为:

$$PAD = (\omega_d - \omega_w) / \omega_d \quad (2)$$

式中: ω_d ——干筛大于 0.25 mm 团聚体所占的比例; ω_w ——湿筛大于 0.25 mm 团聚体所占的比例。

利用 SPSS 18.0 软件对数据进行统计分析。采用 LSD 法对不同栽培年限日光温室土壤团聚体粒级组成及稳定性指标进行差异显著性检验。采用 Pearson 法进行相关性分析,确定不同粒级团聚体之间及其与稳定性指标之间的相关关系。

2 结果与分析

2.1 不同栽培年限土壤团聚体的组成

2.1.1 不同栽培年限风干团聚体的组成 由干筛法得到的团聚体是土壤风干团聚体,粒径 <0.25 mm 的团聚体为微团聚体,>0.25 mm 的团聚体称为土壤团粒结构,这部分团聚体是土壤中较为良好的结构体,其数量与土壤肥力呈现正相关关系^[14],因此更能反映土壤结构的优劣状况。从表 2 可以看出,与 CK 相比,当栽培年限为 2 和 5 a 时,>0.25 mm 的团聚

体含量均呈降低趋势,说明棚龄小于 5 a 的温室土壤其团粒结构有明显的破碎现象。随栽培时间的增长,这部分团聚体含量随栽培年限的延长呈显著升高趋势($p < 0.05$)。与露地土壤相比, >0.25 mm 的团聚体含量分别增加了 4.26%(8 a)和 4.43%(16 a)。温室栽培初期, <0.25 mm 的微团聚体含量随栽培年限的延长而显著升高;当棚龄高于 5 a 时, <0.25 mm 的微团聚体含量呈下降趋势,且降幅明显,较露地土壤分别降低了 24.63%和 25.71%,其变化趋势与 >0.25 mm 土壤团聚体含量的变化趋势相反,这说明该区域日光温室土壤团粒结构含量在种植初期阶段,随着栽培时间变长而逐步降低,破碎成微团聚体;种植年限达到一定时间后,随着有机质在土壤中的积累,微团聚体在胶结作用下,聚合成大团聚体。这与团聚体中大团聚体由微团聚体胶结而成的理论相吻合^[15]。

表 2 不同栽培年限土壤团聚体组成(干筛法) %

栽培年限/a	团聚体粒径/mm			
	>2	2~0.25	0.25~0.053	<0.053
CK	52.61 ^c	32.69 ^a	12.95 ^c	1.75 ^d
2	49.70 ^d	32.07 ^a	15.20 ^b	3.03 ^c
5	47.78 ^c	30.20 ^b	18.98 ^a	3.04 ^c
8	69.03 ^b	19.90 ^c	7.87 ^d	3.21 ^b
16	72.13 ^a	16.95 ^d	7.41 ^d	3.51 ^a

注:同一列中标有相同字母的数据表示在 $p=0.05$ 水平上无显著差异。下同。

2.1.2 不同栽培年限水稳性团聚体的组成 采用湿筛法获得的团聚体是水稳性团聚体,水稳性团聚体具有抗水侵蚀的能力,能够反映土壤的水稳性大小,这部分团聚体对于土壤结构稳定具有重要作用。由表 3 可以看出,2,5,8 和 16 a 中大于 0.25 mm 的水稳性团聚体所占比例均小于露地土壤,说明温室栽培对土壤大粒级水稳性团聚体的破坏较露地栽培严重。通过表 1—2 对比看出,温室土壤和露地土壤大于 0.25 mm 水稳性团聚体所占比例很少,最大值为 9.21%,远小于干筛处理所得的团聚体组成最小值 77.98%,优势粒级主要集中在 0.250~0.053 mm 范围内,这说明该土壤团聚体中大部分为非水稳性团聚体,水稳性团聚体含量较少,土壤结构性较差。

随栽培年限的增长,大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量呈先升高后降低的变化趋势,在温室使用前期,其土壤水稳性大团聚体随种植时间增长而降低;当种植年限大于 5 a 后,其含量开始随时间变化显著升高($p < 0.05$),其中 8 a 较 5 a 增长了 9.38%,16 a

较 8 a 增长了 12.08%。说明随着栽培时间的延长,团聚体水稳性有所好转,但仍低于露地土壤。当棚龄较小时,小于 0.25 mm 的水稳性微团聚体含量随年限显著升高($p < 0.05$),温室栽培时间延长后,其含量呈明显下降趋势。说明栽培初期的温室土壤,在外源水力的作用下,大粒级团聚体破碎成微团聚体;栽培时间大于一定年份后,微团聚体又胶结形成大团聚体。这表明日光温室的种植模式对土壤中水稳性团聚体的转化产生了一定影响。

表 3 不同栽培年限土壤团聚体组成(湿筛法) %

栽培年限/a	团聚体粒径/mm			
	>2	2~0.25	0.25~0.053	<0.053
CK	0.60 ^e	8.61 ^a	76.12 ^a	14.67 ^e
2	1.88 ^d	5.78 ^b	74.70 ^b	17.64 ^d
5	2.02 ^c	5.02 ^c	73.19 ^c	19.77 ^c
8	2.61 ^b	5.09 ^c	68.27 ^d	24.04 ^b
16	2.92 ^a	5.71 ^b	63.92 ^e	27.45 ^a

2.2 不同栽培年限温室土壤团聚体稳定性的变化

2.2.1 不同栽培年限团聚体 MWD 的变化 在土壤中,不同粒径的团聚体对于土壤保肥能力、通气性和水力性质等方面具有不同的作用,因此,不同粒级的团聚体的分布状况与土壤结构质量的好坏具有密切的关系^[16]。一般常用平均重量直径,即 MWD,来反映土壤团聚体的分布状况。

通过干筛法测得的平均重量直径(MWD)能够反映土壤团聚体的机械稳定性的大小,机械稳定性是指团聚体具有抵抗外力避免被压碎或抵抗外部环境变化而保持原有形态的能力。从图 1 可以看出,2~5 a,风干团聚体 MWD 降低了 3.84%,且均低于露地土壤;栽培年限大于 5 a 后,团聚体 MWD 呈升高趋势。其中,5~8 a 的升高幅度显著($p < 0.05$),升高幅度达到了 22.02%。说明在种植初期,温室土壤的机械稳定性较差,可能由于早期频繁的耕作,致使大粒径团聚体破碎成小粒径团聚体,随着种植时间的增长,温室土壤养分在土壤中积累,起到改善土壤结构的作用,进而促进了大团聚体的形成,团聚体的机械稳定性有所改善。这与表 1 中显示的风干团聚体中大于 0.25 mm 团聚体的变化趋势相一致。此外,棚龄为 8 和 16 a 的温室土壤平均重量直径较露地土壤分别高 12.28%和 14.23%,这表明栽培年限的延长,温室土壤的机械稳定性优于露地土壤。

与其相比,湿筛法测得的平均重量直径则定量地反映了团聚体水稳定性的大小,与水稳性团聚体的组

成相结合可以全面、客观地评价土壤结构抗水力侵蚀的能力。从表 4 中可以看出,风干团聚体 MWD 值明显高于水稳性团聚体 MWD 值,说明土壤团聚体中大部分非水稳性团聚体在湿筛过程中破碎,因此水稳性团聚体 MWD 值更能反映该土壤结构稳定性的状况。从表 3 湿筛 MWD 数据看出,随年限变化,MWD 值先降低后升高,这与大于 0.25 mm 水稳性团聚体的变化特征相同,说明研究区域土壤团聚体水稳定性与机械稳定性一样,在初期耕作过程中,稳定性下降,栽培时间增长后,其稳定性升高。但不同的是,水稳性团聚体 MWD 值变化幅度不明显,5 a 较 2 a 降低了 3.11%,8 a 和 16 a 较 5 a 分别升高了 3.67% 和 7.34%。除了 16 a,其余 3 个年限的 MWD 值均小于露地土壤,而 16 a 与露地土壤的差别并不明显,这说明日光温室土壤的水稳定性比露地土壤差,但随着栽培时间增长,温室土壤结构的水稳定性一定程度上得到了改善。

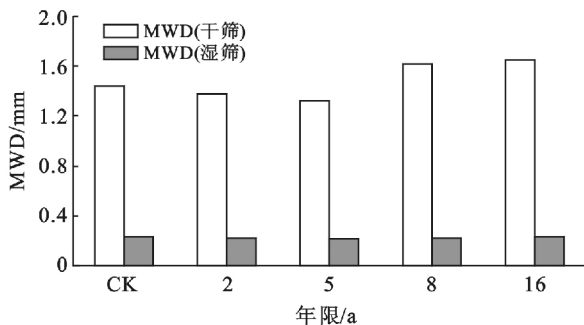


图 1 不同年限团聚体平均重量直径(MWD)

2.2.2 不同栽培年限团聚体破坏率(PAD)的变化
土壤团聚体破坏率(PAD)与土壤结构稳定性有显著的相关性,团聚体破坏率越高,表明土壤结构的稳定性越差;相反,其值越低,则土壤结构越趋于稳定^[17]。从图 2 的团聚体破坏率数据来看,无论是露地土壤还是温室土壤,其团聚体破坏率水平都很高,平均达到 90.49%,说明该土壤结构的抗水性较差,这与从湿筛团聚体的组成和 MWD 的变化趋势得出的结论一致。

不同年限的温室土壤的团聚体破坏率均高于露地土壤,升高幅度分别为 1.60%,1.98%,2.41% 和 1.24%。这可能由于日光温室的耕作频繁导致土壤结构的水稳性下降。从 2~16 a 的总体趋势看,2~8 a,温室土壤团聚体破坏率呈升高趋势,但变化不明显,8 a 较 2 a 只升高了 0.79%。栽培年限高于 8 a 后,破坏率有所降低,16 a 较 8 a 降低了 1.14%。表明随种植年限增加,团聚体水稳性有所增加。

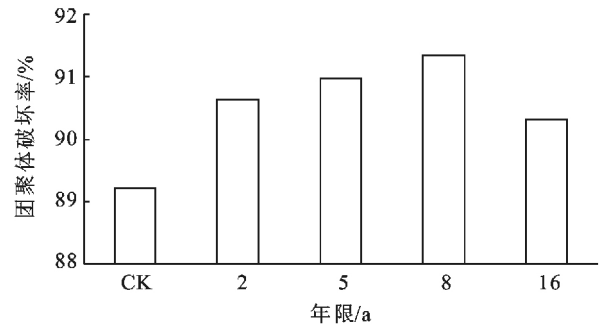


图 2 不同年限团聚体破坏率(PAD)

2.2.3 有机质与团聚体稳定性相关性分析
有机质是土壤团聚体的重要胶结物质,在团聚体形成和稳定过程中起到重要作用。本研究在干筛和湿筛条件下,分析了不同结合态有机质与平均重量直径和团聚体破坏率的相关性。如表 4 所示,轻组有机质与松结态有机质的含量与湿筛条件下的团聚体平均重量直径呈正相关关系,说明这两种形态的有机质对于团聚体的水稳定性起到了促进作用,其中,轻组有机质与团聚体破坏率有较高的负相关性,说明该形态有机质主要作用于水稳性维持方面。松结态有机质与干筛条件下的平均重量直径呈显著正相关,而其余 3 种有机质均为负相关,表明松结态有机质在维持团聚体机械结构稳定方面起到重要作用。

表 4 有机质与团聚体 MWD 和团聚体破坏率(PAD)的相关系数

团聚体稳定性指标	轻组有机质	松结态有机质	稳结态有机质	紧结态有机质
MWD(干筛)	-0.248	0.901*	-0.780	-0.878
MWD(湿筛)	0.353	0.381	-0.551	-0.469
PAD	-0.857	0.412	-0.172	-0.237

注: * 表示相关性在 0.05 水平上显著。

3 讨论

影响团聚体稳定性的因素很多,耕作与施肥是影响土壤团聚体稳定性的重要因素。长期的耕作扰动,可导致土壤中团聚体稳定性的降低^[18]。有学者^[19]研究指出,常规模式的耕作可以降低团聚体稳定性,其具体影响是使大团聚体破碎,从而使其含量降低,同时微团聚体的含量升高。土壤耕作强度的增加还可以促进土壤中有机质的周转速率,加速有机质的矿化分解^[20-21],从而对土壤的团聚作用产生不利影响。此外,施入有机肥可以增加土壤中有机质的含量。有机质是土壤团聚体的重要组成部分,在团聚体的形成过程中起重要作用^[22-23]。有机质含量的提高可以促进土壤团粒结构的形成,从而对土壤结构的稳定性产生有利的影响^[24]。

本研究结果显示,无论在干筛条件还是湿筛条件下,棚龄较小的温室土壤,其 >0.25 mm 团聚体含量随年限增长而降低, <0.25 mm 团聚体含量增加,团聚体的机械稳定性和水稳定性均呈降低趋势;随之栽培年限的增长, >0.25 mm 的团聚体含量有所升高,微团聚体聚合成大团聚体,团聚体稳定性得到一定改善。而从测得的数据发现,有机质中轻组有机质和松结态有机质与团聚体稳定性相关性较好,是主要起胶结作用的有机质,通过不同年限的团聚体稳定性指标来看,在栽培初期,虽然有机质总量呈升高趋势,但有机质并没有对团聚体的稳定性起到促进作用,说明轻组和松结态有机质并没有得到积累,这可能是由于采样区域是国家级蔬菜种植基地,耕作频率和耕作强度处于比较高的水平,高强度的耕作可能导致轻组和松结态有机质的矿化程度较高,分解速率较快,使得其胶结作用被削弱。同时,耕作的扰动也可导致 >0.25 mm的大团聚体破碎成微团聚体,从而降低了土壤团聚体的稳定性。种植年限升高后,团聚体水稳定性和机械稳定性都呈升高趋势,且与有机质的变化呈正相关关系,说明有机质含量的升高对团聚体稳定性起到了促进作用。日光温室蔬菜种植常常施入大量有机肥,再者由于温室高度集约化的利用模式,使得大量的腐枝烂叶以及根系残体等有机物质残留于温室土壤中,使有机质在土壤中大量富集。伴随栽培年限的延长,有机质富集量的升高,胶结作用较为明显,从而提高了土壤团聚体稳定性。但在本试验中,整体趋势显示露地土壤的机械稳定性和水稳性均好于温室土壤,并且露地土壤有机质的含量在 5 a 前高于温室土壤,这与前人相关研究的结果不同,具体原因有待进一步研究分析。

4 结论

(1) 温室土壤中大于 0.25 mm 风干团聚体占团聚体的主要部分,总体机械稳定性较好。随栽培年限增长,机械稳定性呈先降低后升高趋势。栽培初期,由于频繁的耕作扰动,温室土壤团聚体机械稳定性随年限变化而降低,且低于露地土壤;栽培年限超过 5 a 后,机械稳定性有所升高,且高于露地土壤。

(2) 温室土壤团聚体水稳定性较差,大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量所占比例很低。水稳定性随栽培年限增加呈先降低后升高的趋势,但变化不明显,并且除 16 a 外,其余年限的团聚体水稳性均小于露地土壤。

(3) 栽培年初期的温室土壤中,有机质对团聚体

稳定性并没起到促进作用,随着栽培年限的增长,有机质对团聚体稳定性的促进作用明显加强。

[参 考 文 献]

- [1] 杜立宇,李天来,梁成华,等.不同施肥处理对设施土壤团聚体组成及其稳定性的影响[J].水土保持学报,2012,32(1):38-41.
- [2] 刘文利,吴景贵,傅民杰,等.种植年限对果园土壤团聚体分布与稳定性的影响[J].水土保持通报,2014,28(1):129-135.
- [3] 赵红,袁培民,吕贻忠,等.施用有机肥对土壤团聚体的影响[J].土壤,2011,43((2)):306-311.
- [4] 石辉.转移矩阵法评价土壤团聚体的稳定性[J].水土保持通报,2006,26(3):91-95.
- [5] 李阳兵,谢德体.不同土地利用方式对岩溶山地土壤团粒结构的影响[J].水土保持学报,2001,15((4)):22-25.
- [6] 杨茹萍,郭贤仕,吕军峰,等.不同耕作和种植模式对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J].水土保持通报,2010,24(1):252-256.
- [7] 何淑勤,郑子成.不同土地利用方式下土壤团聚体的分布及其有机碳含量的变化[J].水土保持通报,2010,30(1):7-10.
- [8] Chan K Y, Heenan D P, Oates A. Soil carbon fractions and relationship to soil quality under different tillage and stubble management [J]. Soil and Tillage Research, 2002,63:133-139.
- [9] 李江涛,张斌,彭新华,等.施肥对红壤性水稻土颗粒有机质形成及团聚体稳定性的影响[J].土壤学报,2004,41(6):912-917.
- [10] 孙艳,王益权,刘军,等.日光温室蔬菜栽培对土壤团聚体稳定性的影响:以陕西省泾阳县日光温室土壤为例[J].土壤学报,2011,48(1):168-172.
- [11] 秦莹,姜翼来,周丹,等.沈阳市郊不同年限蔬菜温室土壤有效态微量元素分布特征[J].土壤通报,2009,40(3):648-652.
- [12] 黄丹丹.不同耕作方式下黑土团聚体及胶结物质组成的研究[D].吉林 长春:吉林农业大学,2012.
- [13] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils [J]. Soil Science Society America Journal, 1986,50:627-633.
- [14] 祁迎春,王益权,刘军,等.不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J].农业工程学报,2011,27(1):340-341.
- [15] Oades J M, Waters A G. Aggregate hierarchy in soils [J]. Soil Research, 1991,29(6):815-828.
- [16] 郑子成,李廷轩,张锡洲,等.不同土地利用方式下土壤团聚体的组成及稳定性研究[J].水土保持学报,2009,23(5):228-236.

(下转第 80 页)

- biological soil crusts' covering sand dunes in the western Negev Desert[J]. *Functional Ecology*, 1992, 13(6):519-527.
- [11] Britton A J, Fisher J M. Interactive effects of nitrogen deposition, fire and grazing on diversity and composition of low-alpine prostrate *Calluna vulgaris* heathland[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2007, 44(1):125-135.
- [12] Mäkipää R, Heikkinen J. Large-scale changes in abundance of terricolous bryophytes and macrolichens in Finland[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2003, 14(4):497-508.
- [13] 周晓兵, 张元明, 王莎莎, 等. 模拟氮沉降和干旱对荒漠尔盆地两种一年生荒漠植物生长和光合生理的影响[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(12):1394-1403.
- [14] Su Jie, Li Xinrong, Li Xiaojun, et al. Effects of additional N on herbaceous species of desertified steppe in arid regions of China: A four-year field study[J]. *Ecological research*, 2013, 28(1):21-28.
- [15] 明姣, 赵允格, 许明祥, 等. 黄土高原不同侵蚀类型区生物结皮固氮活性及对水热因子的响应[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(7):1849-1855.
- [16] Zaady E, Groffman P, Shachak M. Nitrogen fixation in macro- and microphytic patches in the Negev desert[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(4):449-454.
- [17] Bates B C, Kundzewicz Z W, Wu S, et al. *Climate Change and Water*[C]. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Secretariat: Geneva, Switzerland, 2008.
- [18] 黎兴江. 中国苔藓志: 第四卷·真藓目[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [19] 甲荣亮. 腾格里沙漠人工植被区苔藓类结皮光和生理生态学研[D]. 甘肃 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2009.
- [20] 吴福忠, 包维楷, 吴宁. 外源施 N 对干旱河谷白刺花 (*Sophora davidii*) 幼苗生长、生物量及 C, N, P 积累与分配的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(8):3817-3824.
- [21] Andrews M, Sprent J I, Raven J A, et al. Relationships between shoot to root ratio, growth and leaf soluble protein concentration of *Pisum sativum*, *Phaseolus vulgaris* and *Triticum aestivum* under different nutrient deficiencies[J]. *Plant, Cell & Environment*, 1999, 22(8):949-958.
- [22] Feng Wei, Zhang Yuqing, Wu Bing, et al. Influence of environmental factors on carbon dioxide exchange in biological soil crusts in desert areas[J]. *Arid Land Research and Management*, 2014, 28(2):186-196.
- [23] 张颖. 中国不同区域大气氮沉降的监测及华北大气氮沉降的模拟[D]. 北京: 中国农业大学, 2009.
- [24] Lange O L, Kidron G J, Budel B, et al. Taxonomic composition and photosynthetic characteristics of the 'biological soil crusts' covering sand dunes in the Western Negev Desert[J]. *Functional Ecology*, 1992, 6(5):519-527.

(上接第 74 页)

- [17] 姜灿烂, 何园球, 刘晓丽, 等. 长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响[J]. *土壤学报*, 2010, 47(4):715-722.
- [18] 李江涛, 钟晓兰, 赵其国. 耕作和施肥扰动下土壤团聚体稳定性影响因素研究[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(6):2354-2359.
- [19] Pikul J L, Chilom J G, Rice J, et al. Organic matter and water stability of field aggregates affected by tillage in South Dakota[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(1):197-206.
- [20] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(2):1367-1377.
- [21] 王丽, 李军, 李娟, 等. 轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(3):759-768.
- [22] Alagoz Z, Yilmaz E. Effects of different sources of organic matter on soil aggregate formation and stability: A laboratory study on a Lithic Rhodoxeralf from Turkey[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 103(2):419-429.
- [23] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. *土壤学报*, 2011, 48(2):412-418.
- [24] 闫靖华, 张风华, 谭斌, 等. 不同恢复年限对土壤有机碳组分及团聚体稳定性的影响[J]. *土壤学报*, 2013, 50(6):1183-1190.