

土壤有机碳库的影响因素及调控措施研究进展*

曹丽花¹, 赵世伟^{1,2}

(1 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2 中国科学院 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

[摘要] 对土壤有机碳储量的变化和影响土壤有机碳库的主要因素进行了分析, 提出了增加土壤有机碳储量的调控措施, 并对土壤有机碳库今后的研究方向进行了展望。

[关键词] 土壤有机碳库; 碳储量; 调控措施

[中图分类号] S158.5

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)03-0177-06

Progress of study on factors of affecting the SOC pool and measures for its regulating and controlling

CAO Li-hua¹, ZHAO Shi-wei^{1,2}

(1 College of Resources and Environmental Science, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The change in soil organic carbon (SOC) storage and the main factors influencing SOC pools were summarized in this paper, measures for the regulating and controlling of SOC were put forward and future research needs were suggested.

Key words: soil organic carbon pool; storage of carbon; regulation and control measures

全球的碳储量大约为 1.0×10^{18} Pg, 其中约 1 500 Pg 是以有机质形态储存于土壤中, 全球土壤有机碳库储量约为大气碳库 (750 Pg) 的 2 倍^[1]。有研究表明^[2], 土壤有机碳不仅为植被生长提供碳源, 而且在很大程度上影响着土壤结构的形成、土壤稳定性、土壤持水性、土壤缓冲性和土壤生物多样性等。此外, 由于土壤有机碳的库容巨大, 其较小的变幅即能导致大气 CO₂ 浓度有较大的波动, 因而其对大气质量的影响较大。据 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 报告显示^[3]: CO₂ 浓度对全球变暖贡献率为 63.7%。1997-12-11, 为使 21 世纪地球免受气候变暖的威胁, 149 个国家和地区的代表在日本东京召开了《联合国气候变化框架公约》缔约方第 3 次会议, 通过了限制发达国家温室气体排放量以抑制全球变暖的《京都议定书》, 其规定至

2010 年, 所有发达国家 CO₂ 等 6 种温室气体的排放量较 1990 年应减少 5.2%。

由于土壤有机碳库的巨大库容和在陆地生态系统碳循环中的重要作用, 无论是从维护生态环境, 还是保护土地资源、维持农业的可持续性发展, 均需要人们对土壤有机碳库的变化及其关键控制因子进行深刻的认识。本文综述了土壤有机碳储量变化及其主要影响因素, 提出增加了有机碳储量的调控措施, 以期增加土壤有机碳库库容、提高土壤有机碳稳定性、改善土壤质量、减少土壤 CO₂ 排放量提供理论依据和参考价值。

1 土壤有机碳储量的变化

土壤中的碳包括有机碳 (Organic Carbon) 和无机碳 (Inorganic Carbon), 其中以有机碳为主。土壤

* [收稿日期] 2006-03-01

[基金项目] 国家“十一五”科技支撑计划重大项目“半干旱黄土丘陵区退化生态系统综合管理技术和模式”(2006CA01A07); 中国科学院水土保持研究所知识创新领域前沿项目“植被恢复百年尺度下黄土丘陵区侵蚀土壤发育”(SW 04102)

[作者简介] 曹丽花(1980-), 女, 河南濮阳人, 在读硕士, 主要从事有机物质对土壤结构改良研究。

[通讯作者] 赵世伟(1962-), 男, 四川荣县人, 教授, 主要从事土壤与水分管理研究。

无机碳主要以碳酸盐的形式存在。土壤有机碳主要包括动、植物残体以及微生物的排泄物、分泌物等,是土壤有机质的重要组成部分。土壤有机碳不仅能稳定和改善土壤结构、减少土壤侵蚀、提高土壤生产力及农产品质量,而且能为土壤生产力、土壤水文特性及以碳为基础的温室气体收支研究提供非常重要的信息。

近几十年来,由于森林的大面积砍伐、土地利用方式的改变和不科学的土壤管理措施,如耕作、过度放牧、林草地开垦、秸秆燃烧等,大量的土壤有机碳被氧化并以 CO_2 等形式释放到大气中,破坏了土壤

有机碳与大气碳间的平衡。Lal 等^[4]估计,由于森林的砍伐,1850~1980 年中国森林和草地损失了 9.0 Pg 有机碳,平均每年释放 0.07 Pg 有机碳到大气中;Lal^[5]指出,在热带地区,土地利用方式改变 5 年后,土壤损失了 50% 有机碳;Bowman 等^[6]提出,在温带森林生态系统 50 年里也流失了同样数量的土壤有机碳。IPCC 推算,历史上从土地利用变化过程中流失的土壤有机碳约为 55 Pg^[3]。

在对全球土壤有机碳储量的估计中,由于不同研究者采用不同的估算方法及估算中存在各种不确定性,导致估计值之间存在较大的差异(表 1)。

表 1 不同研究者估算的全球土壤有机碳储量^[7]

Table 1 Different researcher's estimate on global soil organic storages

作者(年份) Authors (years)	储量 Storages	作者(年份) Authors (years)	储量 Storages
Rubey(1951)	710	Smith et al (1992)	1 158.5
Schlesinger(1977)	1 456	Sombroek(1993)	1 200
Bolin(1979)	1 672	King(1995)	1 537.2
Post(1982)	1 395.3	Foley(1995)	1 373.2
Moore, et al(1989)	1 200	Jingyun Fang(1996)	1 472
Prentice & Fung(1990)	1 143	Mingui et al(1998)	1 358
Adam et al(1990)	1 395	Crammer et al(1999)	850~120

2 影响土壤碳库的主要因素

土壤有机碳蓄积量是一个动态平衡,是输入土壤的光合固碳速率与土壤有机碳分解速率之间平衡的一个数学函数^[7]。不同的土地利用方式、土壤管理措施、土壤自身的条件以及地表植被的光合利用率等均影响土壤有机碳库的动态平衡。

2.1 不同土地利用方式对土壤有机碳库的影响

据 IPCC 的统计报告显示^[3],由于土地利用变化引起的土壤有机碳年排放量为 1.1 Pg,不同的土地利用方式,由于其在空间和时间上的植被差异性,使土壤中有有机碳的积累和释放也有很大的差异。

2.1.1 森林 森林在其生长过程中,通过光合作用吸收和固定大气中的 CO_2 ,形成光合产物把碳储存在植物体内,增加森林植被的碳储量,从而也能消减大气中日益增加的 CO_2 ,在稳定全球气候,减缓温室效应方面发挥着重要作用。森林生态系统的生物种群种类多、数量大,大量的植物根茎叶及其他生物残体分泌物等增加了土壤中的有机碳含量,在全球范围内,森林土壤有机碳储量占陆地土壤有机碳储量的 40%^[7]。当土层厚度为 1 m 时,我国森林土壤有机碳总储量为 17.3 Gt,约占我国土层厚度为 1 m 土壤有机碳储量的 25%,而其覆盖面积仅占国土面积的 15.8%^[8]。

不同类型森林对土壤有机碳储量的影响不同。常绿阔叶林、马尾松林、杉木林和毛竹林是我国亚热带最主要的 4 种森林类型。徐秋芳等^[9]研究了以上 4 种森林植被对土壤水溶性有机碳含量的影响,结果表明,土壤总有机碳含量为:常绿阔叶林和毛竹林高于杉木林和马尾松林;土壤水溶性有机碳含量为:毛竹林显著高于杉木林,极显著高于马尾松林,常绿阔叶林和杉木林均显著高于马尾松林。在 25 和 100 时,水溶性有机碳占总有机碳比率以杉木林最高,分别为 1.26% 和 1.82%,马尾松林最低,分别为 0.78% 和 1.30%^[9]。

2.1.2 草地 草原面积占陆地生态系统面积的 16.4%,草地土壤有机碳储量为 3.08×10^{11} t,当草地转化为农田时,土壤有机碳损失量达 30%~50%^[10]。我国草甸和草本沼泽地面积占我国国土面积的 8.64%,其有机碳储量占国土有机碳储量的 10.8%^[8]。

由于人口增加及其对粮食需求量的增长,大量草地被开垦成农田。Kimble 等^[11]指出,至 1998 年,全球已有 6.6 亿 hm^2 草地被开垦,使草地的土壤碳储量从 11.6 万 kg 减少到 8.7 万 kg。

2.1.3 农田 目前,全球植被总面积为 87.6 亿 hm^2 ,其中耕地面积占 17%,草地面积占 37%,林地面积占 46%,因此全球农田生态系统面积在全球生

态系统碳循环中占有重要的地位^[7]。农田土壤有机碳的积累量和损失量不仅取决于有机物质的年生成量和分解量的相对大小,而且还受农田管理措施和各种自然环境因子的制约。合理的施肥、灌溉、秸秆还田以及降低耕作强度等措施,均可以减少土壤有机碳损失,提高土壤有机碳的含量。据估计,在未来的50~100年,全世界农田能固定20~30 Pg土壤有机碳^[12]。

2.1.4 荒漠 荒漠化是当今全球面临最严重的生态环境和社会经济问题之一。土地荒漠化造成的生态环境退化和经济贫困,已成为21世纪人类面临的巨大威胁。一方面荒漠化使表层土壤侵蚀加剧,土壤中富含碳酸盐物质或钙积层在表土裸露,加快表层土壤有机碳矿化;另一方面土壤荒漠化减少了地表生物量,几乎没有或很少有植物残余物返回土壤。

我国是土地荒漠化较为严重的国家之一。Feng等^[13]研究指出,我国沙漠化面积达1.49亿 hm^2 ,占全国土地面积的15.5%,从50年代末到70年代中,北方沙漠面积每年的增长速度达0.157亿 hm^2 ,导致大量土壤有机碳释放。Duan等^[14]研究表明,1950~1990年我国土壤沙漠化导致的碳排放总量为2.812 Pg。

2.1.5 温室 温室栽培技术具有增产幅度大、经济效益高和适应范围广的特点,目前已成为我国农业中最有活力的新兴产业之一。但温室栽培改变了土壤环境中的温度、湿度、光照等条件,使土壤经常处于高温、高湿、高蒸发、无雨水淋溶的环境中。赵凤艳等^[15]研究表明,与露地相比,温室土壤中的水稳性团聚体(0.25~2 mm)含量增加,容重降低,总孔隙度增加,土壤物理结构性能得到改善,有利于土壤有机碳含量的提高。

但也有研究表明^[16],温室栽培管理精细,踏踩镇压频繁,土壤结构破坏严重,存在不同程度的土壤板结。较高的土壤温度增强了土壤微生物的活性,从而加快了有机物质的分解速度,不利于土壤有机质的积累^[17],使土壤有机碳含量降低。

2.2 土壤管理措施对土壤有机碳库的影响

2.2.1 耕作 耕作主要是通过机械作用,改变耕层土壤理化条件,协调土壤主要肥力因素之间的关系,对土壤有机碳的影响较大。长期耕作的土壤,其土壤表层、亚表层中的有机碳储量较自然植被土壤减少40%~60%^[18]。全球每年因耕作损失的土壤有机碳为0.8 Gt^[19],这首先是因为长期耕作,扰动土壤的正常结构,使土壤结构松散,通透性增大,提高了土

壤氧气含量及温度,从而使有机质氧化或矿化分解速度加快,并且还促进了土壤的呼吸作用,使土壤有机碳含量降低;其次,耕作使土壤中的大团聚体被破坏,土壤结构稳定性变差,土壤易遭受水或风的侵蚀,从而导致土壤有机碳损失。

2.2.2 草地放牧或过度刈割 放牧对土壤有机碳的影响主要是改变了土壤有机碳输入、土壤结构和环境条件。Trumbore等^[20]研究发现,过度放牧不仅使草地初级生产固定碳素的能力降低,而且还促进草地土壤的呼吸作用,加速碳素从土壤向大气的释放。董全民等^[21]研究草地放牧率对0~5 cm土层中有机碳含量的影响,结果表明,无放牧、轻度放牧(牧草利用率30%)、中度放牧(牧草利用率50%)和重度放牧(牧草利用率70%),土壤有机碳含量分别为111.03, 105.19, 90.99和86.98 g/kg。由此可见,草地中的有机碳含量随放牧强度增加而明显下降。

草地刈割后,大量的植物体被带出土壤,一方面减少了土壤有机碳的来源,另一方面还增强了土壤的呼吸作用,从而使土壤中的部分碳以 CO_2 形式排出,使土壤有机碳含量降低。

2.2.3 施肥 在土壤中施入肥料的种类、用量、配比、方式等均可影响土壤有机碳含量的变化。研究表明^[22],有机肥或与无机肥配合施用,既能补充有机碳源又能改善土壤物理性状,不仅使土壤有机碳总量增加,而且也使活性有机碳含量增加;长期单独施用无机肥,尤其是无机氮肥,虽然促进了植物根系生长,增加了植物根茬等的残留量,但由于土壤C/N下降,土壤微生物活性提高,加速了土壤原有碳和新鲜有机碳的分解矿化,使土壤有机碳总量下降。因此,施用有机肥处理的土壤有机碳含量明显高于仅施用无机肥的土壤。刘小虎等^[23]进行了的N、P、K及有机肥不同用量的配方施肥试验,结果表明,N、P、K、低量有机肥和高量有机肥处理的土壤,平均有机碳含量分别为:11.05, 12.03和14.20 g/kg,较对照(10.22 g/kg)均有不同程度的提高,且施用有机肥处理的土壤有机碳含量明显高于对照。

2.2.4 灌溉 全球灌溉土地面积大约为2.50亿 hm^2 ,且还有进一步增加的趋势。适宜灌溉有利于土壤有机碳的固存,这是因为灌溉改善了土壤的湿度,增加了干旱土壤的生物量。Kimmelshue等^[24]研究表明,合理灌溉可以提高生物生产力,降低盐化程度并增加土壤有机碳含量,固碳潜力大约为0.1 M g/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)。

2.2.5 森林砍伐 全球森林总面积为33.3亿

hm^2 , 森林植被的碳储量为 374 Pg , 森林土壤碳储量为 372 Pg ^[25]。我国森林总面积为 1.0582 亿 hm^2 , 森林植被碳储量为 4.75 Pg ^[26]。森林砍伐一方面带走了大量植物残体, 减少了土壤有机质的输入量, 降低了土壤有机碳储存量; 另一方面使土壤失去了植物保护, 导致水土流失, 使大量的土壤有机碳随之流失。此外, 森林砍伐还改变土壤的温度、湿度, 影响土壤中微生物的数量、种类及其活性, 对土壤有机碳的矿化分解有很大影响。据估计, 1980 年全球有 $18\sim 47 \text{ 亿 t}$ 碳从植被生态系统被释放到大气中^[27], 减少了植被归还土壤的有机碳量。

2.2.6 轮作 轮作不仅能提高土壤固碳量, 而且还可减少连作危害^[28]。李忠佩等^[29]通过长期田间试验, 观测不同恢复利用模式下物质循环和瘠薄红壤中有机碳、全氮的积累特征, 结果表明, 林粮轮作且配合合理的施肥措施, 可以使地上部植物生物量达到纯生态型恢复利用模式(纯林)的 $75\% \sim 100\%$, 不仅增加了有机物质的归还量和土壤有机碳含量, 而且提高了系统的稳定性。

2.3 土壤自身条件的影响

土壤 pH 值、温度、湿度、粘粒含量、黏土矿物种类、土壤 C/N、微生物量等因素均影响土壤有机碳含量及其在土壤中的稳定性。其中强酸性土壤环境能抑制微生物的活动而使有机碳分解速率减小^[30]。土壤 C/N 对土壤微生物的活动能力有一定的影响, 当土壤氮素增加时, 可以促进微生物的活动, 提高土壤有机质的分解速率^[31], 从而降低土壤有机碳含量。研究表明^[32], 粘粒含量和有机碳含量呈显著的正相关性; 黏土矿物的种类对有机碳含量也有很大影响, 2-1 型矿物较 1-1 型矿物有更高的 CEC 值和比表面积, 故 2-1 型矿物对土壤有机碳的吸附强度较高, 提高了土壤中有机碳的稳定性。高温、高湿条件使土壤有机碳矿化分解速率加快, 累积量减少。

3 提高土壤有机碳储量的措施

对于整个地球生态系统而言, 土壤有机碳循环是一个大而重要的系统, 对土壤生产力、农业生态的发展、全球气候变化均有较大的影响。因此, 加强土壤有机碳的积累, 减少土壤有机碳损失及其在空气的滞留量, 对提高土壤生产力、维护大气碳平衡、净化空气有重要意义。据 IPCC^[3]估计, 合理的管理措施可以使世界碳库每年增加 $0.4\sim 0.9 \text{ Pg}$ 碳, 在 50 年内使全世界碳的累积量增加 $24\sim 43 \text{ Pg}$ 。Lal^[33]指出, 已经损失的 $60\% \sim 70\%$ 土壤有机碳, 可通过合

理的农业管理措施和退化土壤弃耕恢复制度而重新固定。因此, 可采取合理的农业管理措施来增加土壤有机碳储量。

3.1 植被恢复

植被恢复就是充分利用土壤—植物复合系统的功能改善局部环境, 促进生物物种多样性的形成, 随着植被恢复的进程, 植被覆盖度增加, 植物生长产生的枯枝落叶和根系腐解物在土壤中积累、矿化。对于不同生态系统的土壤, 其中植物凋落物数量和质量均不同, 故在土壤中积累的有机碳含量也不同, 其中在 $0\sim 10 \text{ cm}$ 表层土壤中, 不同林地和农田的土壤有机碳含量高低依次为: 山杏林 > 沙棘荒草地 > 柠条 > 农田^[34]。在农田向林地的转化过程中, 土壤有机碳含量也逐渐上升, 且增长幅度较大^[35]。因此, 要选择碳含量较高的植物进行退化土壤的植被恢复, 以提高有机碳的含量。

3.2 免耕

免耕既能维持作物产量又能维持土壤肥力, 是一种可持续经营的土壤管理措施^[36]。由于不扰动土层, 因此免耕不仅使土壤大团聚体的数量和稳定性增加, 减少了团聚体内部有机质的分解作用^[37], 而且还可有效抑制土壤的过度通气, 减少有机碳的氧化降解, 避免土壤有机碳的大量损失^[38]。由此可知, 免耕土壤较传统耕作管理土壤的有机碳含量高。West 等^[39]研究发现, 免耕代替传统耕作后, 土壤有机碳储存量平均每年增加 $(57 \pm 14) \text{ g/m}^2$ 。

3.3 合理轮作

轮作是保持和提高农业生态系统持续性的重要管理措施^[40]。在农田进行粮草、林粮轮作时, 选择具有较高生物量和 C/N 植物物种与作物轮作, 可以用养结合, 减少土壤有机碳的损失。Gregorich 等^[41]通过 35 年的试验结果表明, 在玉米与豆科作物轮作模式下的土壤有机碳含量比玉米单作高 20 mg/hm^2 。

3.4 合理施肥

施肥是农田管理中的一项重要措施, 能够增加土壤中的 N、P、K 和其他元素的含量。增施农家肥可改善土壤结构, 增加团粒数量, 使土壤入渗量增加, 水土流失减轻, 从而减少表层土壤有机碳流失^[42-45]。王晶等^[42]研究表明, 有机肥与化肥配施, 能使土壤活性碳含量增加, 同时也提高了土壤碳库管理指数。Gijssels 等^[43]发现, 在施用鸡积肥后, 土壤团聚体中 $1.2\% \sim 3.1\%$ 的土壤有机碳易于被分解, 小于 0.8% 的土壤有机碳被团聚体结构物理保护, 约 97% 的土壤有机碳较稳定。

有研究者^[22-23, 44-45]对不同土壤类型、气候条件、土地利用方式下的施肥方式进行了研究, 结果表明, 有机肥或有机肥和化肥配合施用, 能显著提高土壤有机碳含量, 而单独施化肥所得的结果则不相同; 马成泽等^[44]认为, 施用化肥能使土壤有机碳保持现有水平或略有下降; 张付申^[45]认为, 施用化肥在一定程度上可提高有机碳含量。

3.5 秸秆还田

我国每年产生上亿吨的秸秆, 1990 和 1995 年秸秆生产量分别为 68 432 1 万和 79 484 万 t。作为土壤改良物的秸秆含有作物所需的 N、P、K 以及微量元素^[46]。秸秆本身含有大量的碳, 其还田后形成的有机碳储存在土壤中。目前, 大部分地区的秸秆利用率均不高, 大部分秸秆被废弃和焚烧, 这不仅浪费有机肥源, 而且还污染了环境。关于如何利用秸秆还田以及对后熟作物产量、土壤肥力和环境影响的报道已有不少^[47-49]。腐烂的稻草能与土壤完全相融, 使有机胶体与土壤矿质粘粒复合, 从而促进土壤团粒结构的形成, 改善土壤的结构^[50], 减少因水土流失而损失的土壤有机碳量。Joseph 等^[51]认为, 秸秆还田能显著增加表层土壤的轻组有机碳含量。

3.6 施用人工合成的高分子聚合物

土壤侵蚀严重的黄土高原地区平均土壤有机碳密度为 2.49 kg/m²^[52], 处于全国(平均土壤有机碳密度为 10.53 kg/m²)最低水平^[53]。贾松伟等^[54]研究黄土丘陵区土壤侵蚀对土壤有机碳流失的影响, 结果表明, 土壤有机碳流失主要以泥沙为载体被带走, 泥沙中有机碳含量与侵蚀强度呈递减的对数关系; 土壤有机碳流失程度与侵蚀强度呈明显的线性关系, 相关系数达 0.989。

施用高分子材料一方面提高了土壤入渗率, 改善了植物的生活环境, 增加了生物生长量; 另一方面能够稳定土壤结构, 减少土壤的侵蚀和径流, 从而避免了土壤有机碳的流失。目前, 高分子聚合物已被认为是改良土壤结构的一种主要化学措施。吴淑芳等^[55]采用人工模拟降雨试验研究坡面施加高分子聚合物对防治土壤侵蚀的效果, 结果表明, 高分子聚合物能推迟坡面产流时间, 降低产流速率; 与对照坡面相比, 径流量减少 42.05%, 土壤侵蚀量减少 58% 以上。Liu 等^[56]提出, 土壤侵蚀对陆地生态系统与大气之间的碳交换有很大影响, 对平衡全球大气中 CO₂ 浓度有重大作用。

4 展望

土壤有机碳库动态平衡直接影响着土壤肥力的

大小, 进而影响土壤质量的优劣和作物产量的高低, 土壤有机碳库的变化最终会影响土壤乃至整个陆地生态系统的可持续性^[44]。土壤理化性质、土壤管理措施、土地利用方式等均影响土壤碳库的动态平衡。其中, 土壤利用方式的转变对大气碳库起着重要的调节作用, 已经成为当前碳循环及气候变化问题研究的热点和难点。

我国是一个资源匮乏的农业大国, 如何保护和提高土壤有机碳, 这不仅对我国农业的可持续发展具有重要意义, 而且对全球气候变化也有着举足轻重的作用。近年来, 各种调控措施不断得到发展, 特别是高分子聚合物的使用, 其可以提高土壤入渗率^[57], 降低土壤侵蚀量^[58]、保护土壤耕层, 避免养分流失^[59]等。但对高分子材料改良土壤结构的研究机理以及对土壤结构的综合评价指标研究还较少, 做好这方面的研究将为稳定土壤结构及减少碳的损失提供理论依据。

[参考文献]

- [1] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soil [J]. *Nature*, 1990, 348 (15): 232-234
- [2] Karlen D L, Rosek M J, Gardner J C. Conservation reserve program effects on soil quality indicators [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1999, 54(1): 439-444
- [3] IPCC. Climate change 1995-impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific-technical analyses [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 35-48
- [4] Lal R, Kimbke J, Levine E. Soil and global change [M]. Boca Raton: CRC Press, 1995: 45-65
- [5] Lal R. Soil management and restoration for C sequestration to mitigate the accelerated greenhouse effects [J]. *Progress in Environment Science*, 1999, 1(4): 307-326
- [6] Bowman R A, Vigi M F, Nielsen D C, et al. Soil organic matter changes in intensively cropped dryland system [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63: 186-191
- [7] 于贵瑞, 李海涛, 王绍强. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳积蓄 [M]. 北京: 气象出版社, 2003: 123-187
- [8] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子 [J]. *土壤学报*, 2004, 41(5): 687-699
- [9] 徐秋芳, 姜培坤. 不同森林植被下土壤水溶性有机碳研究 [J]. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 84-87
- [10] 周广胜. 全球碳循环 [M]. 北京: 气象出版社, 2003: 89-96
- [11] Kimbke R J, Folett R, Stewart B A. Management of carbon sequestration in soil [C]. Boca Raton: CRC Press, 1998: 1-10
- [12] Watson R T, Zinyowera M C, Moss R H. Climate change 1995-impacts, adaptations and mitigation of climate change: intergovernmental panel on climate change [C]. Cambridge:

- Cambridge University Press, 1996: 1-7.
- [13] Feng Q, Cheng G D, Mikami M. The carbon system of sandy lands in China and its global significance [J]. *Climatic Change*, 2001, 48: 535-549.
- [14] Duan Z H, Xiao H L, Dong Z B, et al. Estimate of total CO₂ output from desertified sandy land in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35: 5915-5921.
- [15] 赵凤艳, 吴凤芝, 刘德, 等. 大棚菜地土壤理化特性研究 [J]. *土壤肥料*, 2000(2): 11-13.
- [16] 吴凤芝, 赵凤艳, 刘元英. 设施蔬菜连作障碍原因分析与防治措施 [J]. *东北农业大学学报*, 2000, 31(3): 241-247.
- [17] 蒋端生. 南岳森林土壤有机质的研究 [J]. *湖南农业科学*, 2001(2): 26-29.
- [18] 张金波, 宋长春. 土壤利用方式对土壤碳库影响的敏感性评价指标 [J]. *生态环境*, 2003, 12(4): 500-504.
- [19] Aguilar R E, Kelly F, Hei R D. Effects of cultivation on soils in northern great plains range land [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52: 1081-1085.
- [20] Trumbore S E, Davidson E A, Barbosa D E, et al. Below-ground cycling of carbon in forests and pastures of eastern Amazonia [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9: 515-528.
- [21] 董全民, 赵新全, 李青云, 等. 小嵩草高寒草甸的土壤养分因子及水分含量对牦牛放牧率的响应 II: 冬季草场土壤营养因子及水分含量的变化 [J]. *土壤通报*, 2005, 36(4): 493-500.
- [22] 沈宏, 曹志洪. 长期施肥对不同农田生态系统土壤有效碳库及碳素有效率的影响 [J]. *热带亚热带土壤科学*, 1998, 7(1): 1-5.
- [23] 刘小虎, 许艳花, 杨劲峰, 等. 不同施肥处理对土壤几个肥力指标的影响 [J]. *土壤通报*, 2005, 36(4): 474-478.
- [24] Kimmelshue J E, Gilliam J W, Volk R J. Water management effects on mineralization of soil organic matter and corn residue [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59: 1156-1162.
- [25] Emily M, Richard P, Mark R, et al. Plot Analysis of global ecosystem-forest ecosystem [J]. *World Resources Institute*, 2000, 20: 146-150.
- [26] 方精云. 中国森林生产力及其对全球气候变化的影响 [J]. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 513-517.
- [27] Woodwell G M, Hobbie J E, Houghton R A, et al. Global deforestation: contribution to atmospheric carbon dioxide [J]. *Science*, 1983, 222(4628): 1081-1086.
- [28] Havlin J L, Kisel D E, Maddux L D, et al. Crop rotation and tillage effects of tillage and rotations on soil organic C and total N in a clay soil in southwestern Saskatchewan [J]. *Canadian Journal*, 1990(54): 448-452.
- [29] 李忠佩, 唐永良, 石华, 等. 不同轮作措施下瘠薄红壤中碳氮积累特征 [J]. *中国农业科学*, 2002, 35(10): 1236-1242.
- [30] Ayanaba A, Jenkinson D S. Decomposition of carbon-14 labeled ryegrass and maize under tropical conditions [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54: 112-115.
- [31] Liao L P, Gao H, Wang S L. The effect of nitrogen addition on soil nutrient leaching and the decomposition of Chinese fir leaf litter [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(1): 34-39.
- [32] Nichols J D. Relation of organic carbon to soil properties and climate in the southern great plain [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48: 1382-1384.
- [33] Lal R. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland [J]. *Environmental Pollution*, 2002, 116: 353-362.
- [34] 苏静, 赵世伟. 植被恢复对土壤团聚体分布及有机碳、全氮含量的影响 [J]. *水土保持研究*, 2005, 12(3): 44-46.
- [35] Jenkinson D S, Adam S D E. Model estimated of CO₂ emissions from soil in response to global warming [J]. *Nature*, 1991, 351(23): 304-306.
- [36] Hemanz J L, Lopez R. Long-term effects of tillage systems and rotations on soil structural stability and organic carbon stratification in semiarid central Spain [J]. *Soil & Tillage Research*, 2002, 66: 129-141.
- [37] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用化肥对土壤微生物量碳、氮、磷的影响 [J]. *土壤学报*, 2002, 39(1): 89-96.
- [38] 黄昌勇. *土壤学* [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [39] West T O, Post W M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66: 1930-1946.
- [40] Studdert G A, Echeverria H E. Crop rotation and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 1495-1503.
- [41] Gregorich E G, Drury C F, Baldock J A. Change in soil carbon under long-term maize in monoculture and legume-based rotation [J]. *Canadian Journal Soil Science*, 2000(80): 179-192.
- [42] 王晶, 朱平, 张男, 等. 施肥对黑土活性有机碳和碳库管理指数的影响 [J]. *土壤通报*, 2003, 34(5): 394-396.
- [43] Gijón A J, Sanz J I. Variation in soil organic matter pools in a volcanic ash soil under fallow or cultivation with applied chicken manure [J]. *European Journal of Soil Science*, 1998, 49: 427-436.
- [44] 马成泽, 周勤, 何方. 不同肥料配合施用土壤有机碳盈亏分布 [J]. *土壤学报*, 1994, 31(1): 34-41.
- [45] 张付申. 不同施肥处理对壤土和黄绵土有机质氧化稳定性的影响 [J]. *河南农业大学学报*, 1996, 30(1): 80-84.
- [46] Edmonds D C. The long-term effects of manures and fertilizers on soil productivity and quality: a review [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 66: 165-180.
- [47] 王小彬, 蔡典雄, 张镜清, 等. 旱地玉米秸秆还田对土壤肥力的影响 [J]. *中国农业科学*, 2000, 33(4): 54-61.
- [48] 金天寿, 孔芳珍, 潘梦堂. 旱地多熟间套秸秆还地覆盖的效果 [J]. *浙江农业科学*, 2000(4): 167-170.
- [49] 张淑香, 吕庭宏, 杨建林, 等. 旱塬农区秸秆还田对土壤理化性质的影响 [J]. *土壤肥料*, 1999(4): 15-17.
- [50] 周江明, 徐大连, 薛才余. 稻草还田综合效益研究 [J]. *中国农学通报*, 2002, 18(4): 7-10.
- [51] Joseph O D, Schjonning P, Sibbesen E, et al. Aggregation and organic matter fractions of three Nigerian soils as affected by soil disturbance and incorporation of plant material [J]. *Soil and Tillage Research*, 1999, 50: 105-114.

(下转第 187 页)

的提高, 中国沙棘克隆种群个体数量随年龄级(或高度级)降低而增加的速率呈先增后降的趋势, 但种群生物量、个体大小以及种群冠幅总面积和地径总面积却一直在上升。由此表明, 土壤水分的增加促进了种群的发育进程, 提高了种群的竞争能力, 有益于种群效益的尽早发挥和持续利用。另一方面, 随着土壤水分有效性的提高, 种群分化程度加剧, 这无疑有利于种群长期动态的形成, 可提高种群的稳定性和基株持久性。本研究还表明, 在种群增长阶段, 不同高度级的分株数量符合直线分布。这种合理的大小等级结构, 能够降低因克隆内混乱竞争所导致的负作用, 有利于种群动态的形成, 进而促进基株的持久性^[17-18]。

本研究结果证实了文中提出的假设, 即中国沙棘通过克隆生长调节来适应土壤水分的有效性, 这种可塑性调节最终影响克隆种群的数量和结构特征。

[参考文献]

- [1] 阮成江, 李代琼. 半干旱黄土丘陵区沙棘林地土壤水分及其对沙棘生长影响研究[J]. 水土保持通报, 1999, 19(5): 27-30
- [2] 杨文治, 马玉玺, 韩仕峰, 等. 黄土高原地区造林土壤水分生态分区研究[J]. 水土保持学报, 1994, 8(1): 1-9
- [3] 李根前, 黄宝龙, 唐德瑞, 等. 毛乌素沙地中国沙棘无性系生长格局与生物量分配[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2001, 29(2): 51-55
- [4] 刘 庆, 钟章成. 斑苦竹无性系生长与水分供应及其适应对策的研究[J]. 植物生态学报, 1996, 20(3): 245-254
- [5] Luo X G, Dong M. Architecture plasticity in response to soil moisture in the stoloniferous herb, *Duchesnea indica* [J]. Acta Botanica Sinica, 2002, 44(1): 97-100
- [6] 刘 庆, 钟章成. 无性系植物种群生态学研究进展及有关概念[J]. 生态学杂志, 1995, 14(3): 40-45
- [7] 何维明, 董 鸣. 分蘖型克隆植物分株和基株对异质养境的等级反应[J]. 生态学报, 2002, 22(2): 169-175
- [8] 朱志红, 王 刚, 王孝安. 克隆植物矮蒿草对放牧的等级性反应[J]. 生态学报, 2006, 26(1): 281-290
- [9] 任安芝, 高玉葆, 梁 宇, 等. 白草和赖草无性系生长对干旱胁迫的反应[J]. 中国沙漠, 1999, 19(1): 30-34
- [10] Slade A J, Hutchings M J. The effects of nutrient availability on foraging in the clonal herb *Glechoma hederacea* [J]. J of Ecol, 1987, 75: 95-112
- [11] Lovett D L. Population dynamics and specialization in a clonal perennial (*Ranunculus repens*) I: The dynamics of ramets in contrasting habitats [J]. J of Ecol, 1981, 69: 743-755
- [12] 王昱生, 李景信. 羊草种群无性系生长格局的研究[J]. 植物生态学与地植物学学报, 1992, 16(3): 234-242
- [13] 王昱生, 盖晓春. 羊草无性系植物种群觅养生长格局与资源分配的研究[J]. 植物生态学报, 1995, 19(4): 293-301
- [14] 杨允菲, 郑慧莹, 李建东. 放牧干扰对根茎冰草无性系种群年龄结构的影响[J]. 植物生态学报, 2001, 25(1): 71-75
- [15] 田 迅, 杨允菲. 西辽河平原不同利用条件下羊草无性系种群结构的研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(3): 465-466
- [16] 杨允菲, 郑慧莹, 李建东. 不同生态条件下羊草无性系种群分蘖植株年龄结构的比较研究[J]. 生态学报, 1998, 18(3): 302-308
- [17] 李根前, 黄宝龙, 唐德瑞, 等. 毛乌素沙地中国沙棘无性系种群年龄结构动态与遗传后果研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(3): 347-350
- [18] 李根前, 黄宝龙, 唐德瑞, 等. 毛乌素沙地中国沙棘无性系生长调节[J]. 应用生态学报, 2001, 12(5): 682-686
- [52] 徐香兰, 张科利, 徐宪立, 等. 黄土高原地区土壤有机碳估算及其分布规律分析[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 13-15
- [53] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 533-544
- [54] 贾松伟, 贺秀斌, 陈云明, 等. 黄土丘陵区土壤侵蚀对土壤有机碳流失的影响研究[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 88-90
- [55] 吴淑芳, 吴普特, 冯 浩, 等. 高分子聚合物防治坡地土壤侵蚀模拟试验研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 19-22
- [56] Liu S, Bliss N, Sundquist E, et al. Modeling carbon dynamics in vegetation and soil under the impact of soil erosion and deposition [J]. Global Biogeochemistry Cycles, 2003, 17(2): 1074-1078
- [57] 张淑芬. 坡耕地施用聚丙烯酰胺防治水土流失试验研究[J]. 水土保持科技情报, 2001(2): 18-19
- [58] 黄占斌, 张国桢, 李秧秧, 等. 保水剂特性测定及其在农业中的应用[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 22-26
- [59] 肖厚军, 刘友云, 徐大地. 坡地黄壤施用保水剂的效果研究[J]. 耕作与栽培, 2000(1): 51-52

(上接第 182 页)