

草地管理对土壤碳截获的影响

李 强, 周道玮 (中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林长春 130102)

摘要 综述放牧、开垦、施肥、补播等管理措施对草地土壤碳截获的影响。通过研究建议: ①优化放牧制度和牲畜饲养管理能够有效保护草地植被, 提高饲草资源利用效率, 直接或间接地增加土壤碳截获。②合理布置农牧业格局, 深化农副产品饲料化利用。对不适宜作物种植的土地果断退耕恢复草地植被, 发展草田轮作、间作, 在休耕期种植覆盖饲草作物, 可期待有效保护土壤地力和增加土壤有机碳储量。③施加有机肥料对提高草地土壤碳截获有巨大潜力。④草地补播, 尤其进行豆科植物补播可期待有效提高土壤碳截获。

关键词 土壤有机碳; 草地管理; 放牧; 施肥; 补播

中图分类号 S812.2 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)23-0001-05

Effect of Grassland Management on Soil Carbon Sequestration

LI Qiang, ZHOU Dao-wei (Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130102)

Abstract The effects of management measures such as grazing, reclamation, fertilization and reseeding on soil carbon storage dynamics were summarized. By this study, it was suggested: ①improved grazing regime and livestock feeding could effectively protect grassland vegetation, and enhance the forage utilization efficiency, which will directly or indirectly increase soil carbon sequestration. ② reasonable layout of agriculture and animal husbandry, and deep utilization of subsidiary agricultural products as fodder, and conversion from untillable land into grassland, and development of rotation and intercropping between grass and crop, and plantation of cover crop, all which could protect soil fertility and increase soil carbon storage. ③organic fertilizer could be greatly potential to be applied for increasing soil carbon sequestration. ④reseeding, in particular introduction of legume into grassland could be expected to enhance soil carbon sequestration.

Key words Soil organic carbon; Grassland management; Grazing; Fertilization; Reseeding

当前, 气候及土地利用变化已经导致包括草地在内的部分生态系统由大气的碳汇变成了碳源^[1], 增加的碳释放反馈到大气层, 可能进一步加快气候变化的步伐^[2]。全球陆地生态系统共存储 2 200 Pg (1 Pg = 10⁹ t) 碳^[3], 其中, 草地生态系统碳储量占 10% 以上^[4]。而在草地中, 超过 90% 的碳储存在土壤中, 草地土壤碳的微小变化将对全球碳平衡产生深刻的影响。草地土壤巨大的碳储存能力也表明其在抑制大气二氧化碳浓度增加上的潜在功能^[5], 增加草地土壤碳截获对缓解全球大气二氧化碳浓度增加及随之而来的温室效应意义重大^[1,6]。

土壤碳截获反映土壤碳储量在时间尺度上的变化, 数值上表现为土壤碳储量的净增加量或净减少量, 以单位面积土壤含碳数量的净变化计量。土壤碳截获潜力、速率由环境因子, 如气候、地形、土壤基质特性决定, 尤其受到生态系统管理的强烈影响^[6]。草地管理, 如放牧、施肥、开垦、补播等措施不同程度地改变草地植物地上和根系特征, 改变土壤理化和生物特性, 进一步改变土壤的养分输入和分解过程, 对草地土壤碳截获过程和结果有重要和复杂的影响^[6]。国内外已经对土壤碳截获机理, 及一系列草地管理对土壤碳截获的影响开展了大量研究, 但相关的综述研究较少, 尤其国内的综述研究更少。概述了草地土壤碳截获的过程及草地管理对土壤碳截获的作用, 旨在改善草地管理, 以为提高草地土壤碳截获、缓解全球变化提供理论和技术参考。

1 草地土壤碳截获过程和潜力

在草地生态系统中, 一部分碳以地上和根系凋落物的形

式从植物体进入土壤有机碳库, 另外, 一部分地上生物量被食草动物采食后, 会以动物排泄物的形式进入土壤有机碳库^[7]。这些植物凋落物, 或者动物排泄物, 在土壤表面或内部通过淋溶、光解、生物降解等途径逐渐分解并参与形成最后的有机质组分^[8-10]。此外, 植物活根组织通过分泌有机酸等含碳化合物向土壤输入碳^[11]。植物地上活体暴露环境中, 受降雨作用, 很可能直接将可溶性碳直接输入土壤, 但此过程对土壤碳输入的贡献未见研究报道。研究已经发现植物组织氮、磷含量从活体到枯落物呈现降低, 相关研究将其归结为植物的养分回收功能^[12-13], 但雨水的淋溶作用是否参与地上组织养分损失过程 (包括碳), 仍不得而知, 有待研究。土壤生物尤其土壤微生物在土壤碳截获过程中发挥着关键作用, 研究表明植物残体的大部分最终经微生物分解形成土壤有机质组分^[14]。

由微生物、植物碎屑、植物及微生物分泌物等形成的一部分有机质游离于土壤中, 活性最强, 分解迅速, 但其含量仅占土壤有机质总量的 3%~5%^[8], 这部分碳不仅为微生物生命活动提供能源, 还能与土壤黏粒、真菌菌丝、部分根组织在土壤中粘合剂多糖、土壤动物的作用下形成土壤团聚体, 土壤大小团粒围绕植物材料分解后的有机物质构建, 并将其中一部分深藏在黏壤内形成重有机质 (heavy organic matter)^[6,15]。绝大部分有机质吸附在土壤颗粒上, 密闭在不同大小的土壤团聚体内^[6]。这部分土壤有机质能依靠 3 种机制稳定于土壤中: 一是通过木质素、多酚等物质和土壤颗粒之间的化学耦合作用形成生化稳定性; 二是通过和土壤颗粒 (粉粒、黏粒) 之间的绑定形成化学稳定性; 三是通过土壤团聚体的物理保护隔绝微生物、酶和有机质的接触 (图 1)。任何有利于构建上述保护机制的草地管理措施对草地土壤碳的保护都会起到积极的作用^[16]。3 种保护机制下的碳库, 以

基金项目 科技部国家重点研究发展计划 (2016YFC0500606); 吉林省发改委省级产业创新专项资金 (2016C016)。

作者简介 李强 (1984—), 男, 吉林农安人, 助理研究员, 博士, 从事草地管理和土壤碳氮循环研究。

收稿日期 2018-03-29

受生化保护的碳库分解最慢,周转时间长达数百年,甚至数千年^[15,17];受团聚体保护的碳库分解相对容易,周转周期为10~15年,条件适合时还可脱离保护转化为活跃的有机质。

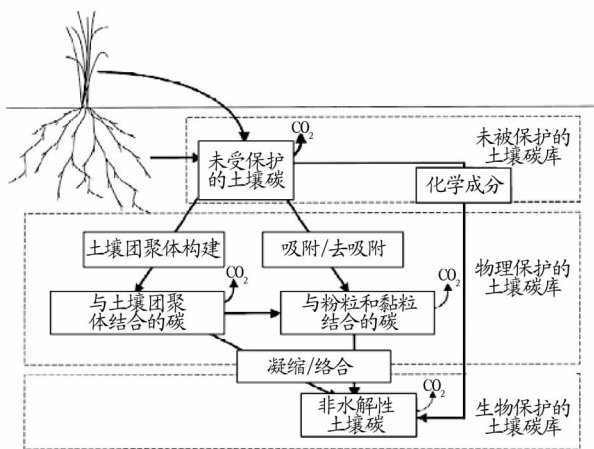


图1 土壤有机质库及其动态概念模型(改自文献[16])

Fig.1 Conceptual model of soil organic pools and its dynamics
(Adapted from reference [16])

大部分输入土壤的碳通过土壤的呼吸作用重新回到大气中,其他的碳损失途径包括淋溶、挥发、沉积、土壤侵蚀等。其中,淋溶输出指溶解在水中的有机碳随水流失,沉积输出指有机碳进入土壤深层形成矿物的过程。挥发输出指有机碳以气体的形式散失到大气中^[18]。因此,土壤碳截获是生态系统初级生产的碳输入和土壤有机质分解、淋溶、挥发等碳输出过程的平衡^[19],这种平衡所处的状态被用来量化土壤对大气二氧化碳的源汇功能^[20]。

尽管大量文献证明草地巨大的碳截获能力,但不同研究对草地土壤碳截获的速度和潜力的估计存在较大差异^[21]。一般随草地土壤碳含量增加,土壤的碳截获速率和潜力降低^[18]。Hassink^[22]进一步提出草地土壤的碳截获潜力和速率与草地土壤颗粒性质,尤其土壤粉粒和黏粒含量正相关,这种关系随土壤类型和土地利用类型而发生变化。改善草地管理对草地土壤碳截获有积极作用,但并不是所有施加在草地生态系统的管理都能引起土壤碳的快速增加,管理效果要视土壤碳的历史变化、现存量、基质条件和环境特点而定^[23]。Lal^[24]研究表明整个半干旱区,土壤碳截获速率在0~200 g/(m²·a)的较大范围内变动。Gifford等^[25]研究表明澳大利亚草场的土壤碳截获速率为50~60 g/(m²·a)。Conant等^[26]通过对美国北部的一个草地研究点的研究指出,通过改善草地管理,土壤碳截获速率可达到59 g/(m²·a),其后的研究表明美国东南部草地土壤碳截获速率平均为41 g/(m²·a)。戴尔阜等^[27]指出中国不同类型草地土壤碳截获速率为28~223 g/(m²·a),不同的研究中,植被、土壤、气候、管理方式、研究方法(估算方法、土层深度等)的差异是导致草地土壤碳截获速率估算结果不同的主要原因。

2 草地管理对土壤碳截获的影响

土壤有机碳不仅是维持草地生产力的关键因素^[26],也

是支撑全球生态和社会安全的战略性资源^[28]。而随着人口和人类需求的增加,人类施加在草地的管理强度和方式已经发生重大变革,如放牧强度的增加^[29]、大面积草地开垦、增加的施肥、人为补播等^[30-31],这些管理方式的改变通过影响土壤碳输入和释放,强烈影响草地的碳平衡,不仅决定草地的生产和生态功能,并可能通过生态反馈改变局域或全球的气候格局^[2]。如何正确地管理草地,增加草地土壤碳截获,对草地经济、生态效益有重要意义。增加草地土壤碳截获途径明确,首先是提高土壤碳输入量,其次是降低土壤碳分解输出,具体到实际的草地管理中,要注意调控碳输入和输出的平衡关系,实现草地土壤碳的净截获。

2.1 放牧对草地土壤碳截获的影响 草地属性决定放牧是其首要的利用方式。放牧对草地土壤碳的影响决定于草地气候环境、土壤类型、放牧强度、放牧周期等系列因素及其耦合作用。如研究发现:对于沙性土壤草地,放牧对土壤碳的作用随着降雨的增加由负向趋向正向,而对于黏性土壤草地,放牧对土壤碳的作用随着降雨的增加由正向趋向负向,这种差异作用归因于不同土壤质地下,土壤微生物和根系对降雨、放牧耦合作用的差异响应^[32]。生态系统本身对放牧干扰具有一定抵抗力和恢复力,草地植物,尤其是多年生草地植物,被动物采食后,能够刺激其补偿性生长或改变生物量分配^[33],适当强度的放牧可以促进地上部分补偿性生长、增加草地的地上生物量分配,进而增加向土壤的有机质输入,可能提高土壤碳储量^[34-35]。但是当放牧强度过大或放牧周期过长,放牧行为抑制植物的生长,就会降低生态系统生产力和碳输入,最终导致土壤碳截获的减少^[36-37]。最近的综述研究发现,不同草地类型土壤碳对放牧强度的响应存在差异,在C₄植物占优势的草地中,土壤碳随着放牧强度增加而提高,而相反的结果发生在C₃植物占优势的草地中^[32]。原因在于C₄植物相对C₃植物,在放牧干扰下能够提高地下生物量分配,进而增加土壤碳输入。放牧不仅改变草地生物量生产,也影响草地植物组成及其多样性^[38-39]。高强度放牧下,为适应食草动物的不断啃食,具有快速生长率的植物可能被环境优先选择并占据优势,但这些植物生长的同时自身的呼吸作用也强烈,而且快速生长植物获取养分能力强、组织养分含量相对较高、枯落物分解速率较快^[6],这对土壤碳截获是不利的;而适度放牧可能维持生长相对缓慢植物在草地中的比例,慢速生长的植物不仅呼吸消耗小、产生的枯落物养分含量低,而且还含有某些耐分解的次生代谢产物,分解过程缓慢,一些次生代谢产物如木质素、多酚等还能提高有机质和土壤颗粒的结合,起到保护有机质的作用,这对土壤碳截获有积极意义^[6,16,40]。草地植物多样性被发现能通过提高土壤氮素矿化和利用,进而增加生物量碳输入,促进土壤碳截获,因此,放牧可能通过改变草地植物多样性进一步影响土壤碳截获^[41]。

放牧在改变土壤碳输入的同时,也通过系列途径影响土壤有机质的分解过程。一是放牧采食刺激草原植物再生,草原植物生长过程中,需不断地从土壤中获取矿质营养,间接

加速了土壤有机质的分解。二是放牧能够改变土壤微生物组成,如增加细菌数量,降低真菌数量^[42-43]。在土壤中,真菌的碳利用效率要明显高于细菌,加之真菌本身也是重要的碳库^[44],而且真菌在土壤团聚体构建上有重要贡献^[45],这些因素都有利于土壤碳的固持。因此,放牧可能通过改变土壤微生物群落组成限制土壤碳截获而增加有机质分解。三是放牧可能导致地表植物覆盖降低,增加土壤温度,同样可能加速土壤有机质的分解^[2]。并且,放牧可能改变草地土壤有机质矿化对未来气候变化的响应,但相关的结论在不同的研究个例存在差异,如 Paz-Ferreiro 等^[46]在北英格兰草地的研究发现放牧增加土壤有机碳分解对温度增加的响应,而 Chuckran 等^[47]在北美草地的研究报道放牧降低土壤有机碳分解对温度增加的响应,许多因素,包括土壤类型、放牧历史、研究方法等都可能造成这些差异化的结论,这些也是未来研究需要关注的问题。放牧系统中,草食动物排放大量的甲烷(CH_4)、粪尿到大气和地表,这些排泄物的释放和分解直接或间接增加了大气中温室气体的浓度,可能加速大气的增温,反馈到土壤增加有机质的分解^[48]。

针对不同的草地状况采取合理的放牧策略对提高草地碳输入和土壤碳截获至关重要。一般在放牧过度的草地中实行休牧或轮牧、在利用效率低的草地中合理安排放牧强度和频次都能有效地维持或增加草地生物多样性和生产力,维持土壤微生物组成稳定性,增加土壤碳截获^[6]。通过合理放牧能有效地保护草地植被覆盖,控制土壤温度,可能降低微生物对有机质的分解^[2]。最近,He 等^[49]在中国北方典型草地不同强度的放牧研究发现,草地土壤由碳汇转变成成为碳源,二者转换的临界放牧强度为 3~5 个羊单位/ hm^2 (6~9 月放牧)^[49]。在牲畜生产过程中,除优化放牧制度以外,同时需要优化牲畜饲养管理,如:①饲喂精料,饮食中添加油脂,优化蛋白的摄入量,进而提高生长率;②饲料中使用添加剂如单宁、卤化物、益生菌、疫苗、生长素等抑制甲烷形成,降低牲畜摄取的能量以甲烷的形式排出;③提高动物福利水平,降低饮水限制、冷热应激、病虫害等对牲畜生长的限制作用,提高饲养效率;④改良牲畜生产品种,提高动物生长和繁殖性能,减少基础母畜。这些措施能够有效提高草地资源利用效率,降低单位动物的饲草需求,保护草地覆被,同时降低牲畜排泄物的温室气体排放,直接或间接减少土壤碳的分解释放^[50-52]。

2.2 开垦对草地土壤碳截获的影响 随着人口的增长和饮食中粮、肉需求的增加,现有的耕地产粮已经很难满足人类口粮及用于肉食生产的饲料粮需求,因此,全球草地中已有相当一部分被转化为耕地^[53]。然而,长期的农业耕作,降低草地自然的植被覆盖,减少草地枯落物数量及其向土壤的碳输入,增加土壤侵蚀威胁,同时改变草地土壤团聚体结构,破坏土壤有机碳的保护机制,加速土壤有机质的分解,释放大量的碳到空气和水体中^[30-31]。Wang 等^[53]报道,随着草地开垦年限的增加,0~30 cm 土层土壤有机碳含量逐渐降低,开垦 28 和 42 年后,0~30 cm 层土壤有机碳分别流失 10% 和

25%^[53]。Syswerda 等^[54]报道草地开垦加速了土壤有机质的微生物分解,长期耕作导致土壤碳损失 50% 以上。而通过休耕恢复、耕地转人工草地、草田轮作等措施,能够重新将碳固定回土壤中^[54]。Su^[55]的研究表明,将开垦后的农田转换成豆科人工草地后,0~20 cm 层土壤每年能够截获 0.57 mg 碳,Zhou 等^[56]报道相似的研究结果,指出从耕地到豆科人工草地,土壤有机碳显著增加 20% 以上。鉴于上述研究结果,为保护草地土壤碳储量,增加土壤碳截获,应当加强对草地及其周边土地资源利用的管理,尤其是在农牧交错区,应合理发展农牧业格局,在现有耕地上培育高产品种、高效农业,深入农业副产品如秸秆、谷糠的牲畜利用。在低产田或土壤质量差的边际土地果断退耕恢复草地植被或建植人工草地或饲草作物地。推动种地-养地结合,发展保护性耕作,发展草田轮作、间作,尤其发展作物与固氮豆科饲草的轮作和间作,在休耕期种植覆盖饲草作物,在提高作物种植效率的同时,提高饲草供给能力,保护土壤地力和有机碳储量。

2.3 施肥对草地土壤碳截获的影响 草地生态系统在长期放牧或割草后,土壤养分消耗巨大,尤其是氮的消耗,严重制约草地的生产力^[29],为增加草地肥力,施加氮肥是草场管理者普遍采取的措施^[26,57]。然而,氮肥的施加对土壤碳截获的作用一直存在争议,一些研究表明氮肥施加通过提高生物量碳输入增加土壤碳截获^[58],如 Conant 等^[26]总结美国和欧洲草地施肥的研究结果,发现施肥平均每年增加 2.2% 土壤有机碳^[26]。然而,氮肥添加提高了地上部分生产力的同时,可能也改变了群落的物种组成,减少群落中深根系植物的竞争能力,改变了根系在土壤中的分布,可能导致深层土壤碳输入的减少^[58];其次,氮肥的施加可能改变枯落物化学计量特征,加速枯落物的分解^[59],高的土壤和枯落物养分含量能够刺激土壤微生物的活动,激发土壤有机质的分解^[60-61],进而减少有机碳储量。Mack 等^[62]在《Nature》上报道长期施加氮肥增加枯落物质量和分解速率,减少根生物量在土壤深层的分布、增加土壤微生物活力,结果导致土壤碳损失^[62]。因此,施肥管理下,土壤最终的碳截获量取决于增加的初级生产的碳输入量和可能增加的有机质分解的碳输出量的差值,而这个差值是由植物-土-微生物之间复杂的互作关系决定的,不同的植被、土壤养分状况下,这种关系也随之发生变化,为增加土壤碳截获,管理策略也要做出相应调整。从草地持久的生产力和土壤有机质保护考虑,施加有机肥料是一个有前景的选择。因为有机肥料既可以缓解草地土壤的肥力限制,而且有机肥料分解缓慢,效应持久,有机肥中丰富的腐殖质还有助于土壤团粒的构建和稳定,能有效增加土壤的碳储量^[63-64],但有机肥料施加过程中也要考虑肥料中碳氮比例的因素,碳氮比过高,肥料分解缓慢,肥效慢;碳氮比过低会刺激微生物活动,增加土壤自身有机质的分解^[6]。而且某些有机肥料如牲畜粪便等的输入可能引起 N_2O 排放的增加,从抑制温室效应的角度看,抵消了碳截获的意义^[65]。

2.4 补播对草地土壤碳截获的影响 草地经长期利用后,生产力下降,物种多样性丧失,抑制土壤有机碳恢复。除合

理放牧和施肥外,草地中引入高生产力物种,补播多年生饲草恢复和保护草地多样性以增加功能群之间的互作、提高资源利用效率等措施也被报道能增加草地的初级生产,有效地增加土壤的碳截获^[6,26,66]。一般草地上层土壤的有机质含量普遍高于深层土壤^[29]。深层土壤虽然有机碳含量低,但却具有高的碳截获效率,因此,近年来逐渐引起人们的关注^[67-68]。深层土壤高的碳截获效率主要源于深层土壤和根中较低的养分含量,尤其是氮素含量,导致有机质微生物分解缓慢,自上层土壤转移或深层根输入的有机质不断得以积累^[69]。另外,深层土壤的有机质经常处于物理和化学保护的状态,与微生物接触较少,分解缓慢^[70]。鉴于深层土壤中有有机质分解相对缓慢,可在草地中合理发展深根系植物,将碳固定到土壤深层,也可增加土壤碳截获^[15,67]。众所周知,豆科植物一般为高产、优质饲草,同时多数豆科植物具有深根系的特征,尤其重要的是豆科植物根系能与根瘤菌共生,因此豆科植物普遍具有生物固氮能力^[71],文献报道全球饲用豆科植物每年能够固定 12~25 Tg 氮^[72]。豆科植物的高产、深根系特征及其生物固氮能力对提高土壤碳输入、增加土壤深层固碳、维持草地土壤肥力,进而增加土壤碳截获具有重要贡献。Conant 等^[26]广泛地综述已有研究发现草地中播种豆科植物明显提高北美草地土壤碳截获,经典的多样性-生态系统功能试验表明当草地中引入豆科植物,通过增加生产力和生物量养分归还,促使土壤碳截获速率显著增加^[41]。Li 等^[73]研究发现随草地中豆科植物相对密度的增加,土壤有机碳储量显著增加。因此,通过补播或混播,在草地中引入豆科植物能有效提高土壤碳截获^[73]。事实上,天然草地补播豆科植物或建植禾-豆混播人工草地已经是国际上进行土壤培肥和优质饲草生产的普遍管理措施。与畜牧业发达国家相比,我国草原中豆科植物数量较低^[74],笔者最近在松嫩平原、呼伦贝尔和锡林郭勒天然草地的调查研究发现,草地中豆科植物平均相对密度仅为 0.4%~1.8% (未发表数据)。此外,围绕豆科植物构建的人工、半人工草地在我国的发展与国外相差较远^[75],导致豆科植物在我国草地中发挥的经济和生态作用极大受限。为提高土壤碳截获和饲草生产,通过适当的措施在天然草地中混播豆科植物或建植禾-豆混播人工草地对于我国草地可持续利用是必要管理。

3 结语

人类工农业活动已经促使全球气候格局发生显著变化。采取有效措施降低大气 CO₂ 含量,延缓气候变化进程是当今生态研究的热点和难点问题。草地土壤碳动态对全球碳平衡影响深刻,优化草地管理,增加草地土壤碳截获,减少土壤碳排放对延缓全球变化进程具有重要意义。土壤碳截获是土壤碳输入和输出过程的平衡,过度放牧限制草地碳输入、增加土壤有机碳矿化,进而降低草地土壤碳截获,通过优化放牧制度和牲畜饲养过程管理能够有效保护草地覆被、提高饲草资源利用效率、降低饲草和动物生产过程的 CO₂ 和 CH₄ 等温室气体排放,直接或间接地增加土壤碳截获。草地开垦改变了地表植被覆盖,破坏土壤结构,增加土壤有机碳

的分解释放。合理发展农牧业格局,发展高效农业,深化农副产品饲料化利用。对不适宜作物种植的土地果断退耕恢复草地植被。发展草田轮作、间作,尤其发展作物与固氮豆科饲草的轮作和间作,在休耕期种植覆盖饲草作物,能有效保护土壤地力和增加土壤有机碳储量。施肥对草地土壤碳截获的作用决定于增加的初级生产和碳输入量与可能增加的有机质分解和碳释放的平衡。施加有机肥料对提高草地土壤碳截获有巨大潜力。草地补播,尤其进行豆科植物补播可期待有效提高土壤碳截获。

参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2001. Synthesis report; Third assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.
- [2] DAVIDSON E A, JANSSENS I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change [J]. *Nature*, 2006, 440 (7081): 165-173.
- [3] ESWARAN H, VAN DEN BERG E, REICH P. Organic carbon in soils of the world [J]. *Soil science society of America journal*, 1993, 57 (1): 192-194.
- [4] HUNGATE B A, HOLLAND E A, JACKSON R B, et al. The fate of carbon in grasslands under carbon dioxide enrichment [J]. *Nature*, 1997, 388 (6642): 576-579.
- [5] SMITH P, POWLSON D S, GLENDINING M, et al. Potential for carbon sequestration in European soils; Preliminary estimates for five scenarios using results from long-term experiments [J]. *Global change biology*, 2003, 3(1): 67-79.
- [6] JONES M B, DONNELLY A. Carbon sequestration in temperate grassland ecosystems and the influence of management, climate and elevated CO₂ [J]. *New phytologist*, 2004, 164(3): 423-439.
- [7] BOL R, AMELUNG W, FRIEDRICH C. Role of aggregate surfaces and core fraction in the sequestration of carbon from dung in a temperate grassland soil [J]. *European journal soil science*, 2004, 55(1): 71-77.
- [8] JOFFRE R, AGREN G I. From plant to soil: litter production and decomposition [M]//MOONEY H A. *Terrestrial global productivity*. San Diego, CA, USA: Academic Press, 2001.
- [9] AUSTIN A T, VIVANCO L. Plant litter decomposition in a semi-arid ecosystem controlled by photodegradation [J]. *Nature*, 2006, 442 (7102): 555-558.
- [10] WIEDER W R, CLEVELAND C C, TOWNSEND A R. Tropical tree species composition affects the oxidation of dissolved organic matter from litter [J]. *Biogeochemistry*, 2008, 88(2): 127-138.
- [11] REEDER J D, FRANKS C D, MILCHUNAS D. Root biomass and microbial processes [R]. The Potential of US Grazing Lands to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect, 2001: 139-166.
- [12] LÜ X T, FRESCHET G T, FLYNN D F B, et al. Plasticity in leaf and stem nutrient resorption proficiency potentially reinforces plant-soil feedbacks and microscale heterogeneity in a semi-arid grassland [J]. *Journal of ecology*, 2012, 100(1): 144-150.
- [13] MAO R, SONG C C, ZHANG X H, et al. Response of leaf, sheath and stem nutrient resorption to 7 years of N addition in freshwater wetland of Northeast China [J]. *Plant and soil*, 2013, 364(1/2): 385-394.
- [14] COTRUFO M F, WALLENSTEIN M D, BOOT C M, et al. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization; Do labile plant inputs form stable soil organic matter? [J]. *Global change biology*, 2013, 19(4): 988-995.
- [15] POST W M, KWON K C. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential [J]. *Global change biology*, 2000, 6(3): 317-327.
- [16] SIX J, CONANT R T, PAUL E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils [J]. *Plant and soil*, 2002, 241(2): 155-176.
- [17] PAUL E A, FOLLETT R F, LEAVITT S W, et al. Radiocarbon dating for determination of soil organic matter pool sizes and dynamics [J]. *Soil science society of America journal*, 1997, 61(4): 1058-1067.
- [18] KALBITZ K, SOLINGER S, PARK J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review [J]. *Soil science*, 2000, 165

- (4):277-304.
- [19] AMUNDSON R. The carbon budget in soils [J]. Annual review of earth and planetary sciences, 2001, 29:535-562.
- [20] SCHULZE E D, VALENTINI R, SANZ M J. The long way from Kyoto to Marrakesh: Implications of the Kyoto Protocol negotiations for global ecology [J]. Global change biology, 2002, 8(6):505-518.
- [21] FRANK A B. Carbon dioxide fluxes over a grazed prairie and seeded pasture in the Northern Great Plains [J]. Environmental pollution, 2002, 116(3):397-403.
- [22] HASSINK J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles [J]. Plant and soil, 1997, 191(1):77-87.
- [23] BRUCE J P, FROME M, HAITEES E, et al. Carbon sequestration in soils [J]. Journal of soil and water conservation, 1999, 54:382-389.
- [24] LAL R. Sequestering carbon in soils of arid ecosystems [J]. Land degradation and development, 2009, 20(4):441-454.
- [25] GIFFORD R M, CHENEY N P, NOBLE J C, et al. Australian land use, primary production of vegetation and carbon pools in relation to atmospheric carbon dioxide concentration [M] // Australia's renewable resources: Sustainability and global change. Canberra, Australia: IGBP, 1992.
- [26] CONANT R T, PAUSTIAN K, ELLIOTT E T. Grassland management and conversion into grassland: Effects on soil carbon [J]. Ecological applications, 2001, 11(2):343-355.
- [27] 戴尔阜, 黄宇, 赵东升. 草地土壤固碳潜力研究进展 [J]. 生态学报, 2015, 35(12):3908-3918.
- [28] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. Science, 2004, 304(5677):1623-1627.
- [29] HE N P, YU Q, WU L, et al. Carbon and nitrogen store and storage potential as affected by land-use in a *Leymus chinensis* grassland of northern China [J]. Soil biology and biochemistry, 2008, 40(12):2952-2959.
- [30] DAVIDSON E A, ACKERMAN I L. Change in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils [J]. Biogeochemistry, 1993, 20(3):161-193.
- [31] KERN J S, JOHNSON M G. Conservation tillage impacts on national soil and atmospheric carbon levels [J]. Soil science society of America journal, 1993, 57(1):200-210.
- [32] MCSHERRY M E, RITCHIE M E. Effects of grazing on grassland soil carbon: A global review [J]. Global change biology, 2013, 19(5):1347-1357.
- [33] DYER M I, TURNER C L, SEASTEDT T R. Mowing and fertilization effect on productivity and spectral reflectance in *Bromus inermis* plots [J]. Ecological applications, 1991, 1(4):443-452.
- [34] LECAIN D R, MORGAN J A, SCHUMAN G E, et al. Carbon exchange and species composition of grazed pastures and exclosures in the short-grass steppe of Colorado [J]. Agriculture, ecosystems and environment, 2002, 93(1):421-435.
- [35] REEDER J D, SCHUMAN G E. Influence of livestock grazing on C sequestration in semi-arid mixed-grass and short-grass rangelands [J]. Environmental pollution, 2002, 116(3):457-463.
- [36] CONANT R T, PAUSTIAN K. Potential soil carbon sequestration in overgrazed grassland ecosystems [J]. Global biogeochemical cycles, 2002, 16(4):901-909.
- [37] BAGCHI S, RITCHIE M E. Herbivore effects on above- and belowground plant production and soil nitrogen availability in the Trans-Himalayan shrub-steppes [J]. Oecologia, 2010, 164(4):1075-1082.
- [38] 刘颖, 王德利, 王旭, 等. 放牧强度对羊草草地植被特征的影响 [J]. 草业学报, 2002, 11(2):22-28.
- [39] 刘晓琴, 张翔, 张立峰, 等. 封育年限对高寒草甸群落组分和物种多样性的影响 [J]. 生态学报, 2016, 36(16):5150-5162.
- [40] AERTS R, CHAPIN F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: A re-evaluation of processes and patterns [J]. Advance ecology research, 2000, 30:1-67.
- [41] FORNARA D A, TILMAN D. Plant functional composition influences rates of soil carbon and nitrogen accumulation [J]. Journal of ecology, 2008, 96(2):314-322.
- [42] SIX J, FREY S D, THIET R K, et al. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems [J]. Soil science society of America journal, 2006, 70(2):555-569.
- [43] RÖNN R, MCCAIG A E, GRIFFITHS B S, et al. Impact of protozoan grazing on bacterial community structure in soil microcosms [J]. Applied and environmental microbiology, 2002, 68(12):6094-6105.
- [44] RILLIG M C, MUMMEY D L. Mycorrhizas and soil structure [J]. New phytologist, 2006, 171(1):41-53.
- [45] RILLIG M C, WRIGHT S F, NICHOLS K A, et al. Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils [J]. Plant and soil, 2001, 233(2):167-177.
- [46] PAZ-FERREIRO J, MEDINA-ROLDÁN E, OSTLE N J, et al. Grazing increases the temperature sensitivity of soil organic matter decomposition in a temperate grassland [J]. Environmental research letters, 2012, 7(1):14027.
- [47] CHUCKRAN P, FRANK D A. Herbivores regulate the sensitivity of soil organic carbon decomposition to warming [J]. Environmental research letters, 2013, 8(4):44013.
- [48] GERBER P J, HRISTOV A N, HENDERSON B, et al. Technical options for the mitigation of direct methane and nitrous oxide emissions from livestock: A review [J]. Animal, 2013, 7(S2):220-234.
- [49] HE N P, ZHANG Y H, YU Q, et al. Grazing intensity impacts soil carbon and nitrogen storage of continental steppe [J]. Ecosphere, 2011, 2(1):1-10.
- [50] LIU H, VADDELLA V, ZHOU D. Effects of chestnut tannins and coconut oil on growth performance, methane emission, ruminal fermentation, and microbial populations in sheep [J]. Journal of dairy science, 2011, 94(12):6069-6077.
- [51] LOVETT D K, O'MARA F P. Estimation of enteric methane emissions originating from the national livestock beef herd: A review of the IPCC default emission factors [J]. Tearmann, 2002, 2(1):77-83.
- [52] LOVETT D K, SHALLOO L, DILLON P, et al. A systems approach to quantify greenhouse gas fluxes from pastoral dairy production as affected by management regime [J]. Agricultural systems, 2006, 88(2):156-179.
- [53] WANG Q, ZHANG L, LI L, et al. Changes in carbon and nitrogen of Chernozem soil along a cultivation chronosequence in a semi-arid grassland [J]. European journal of soil science, 2009, 60(6):916-923.
- [54] SYSWERDA S P, CORBIN A T, MOKMA D L, et al. Agricultural management and soil carbon storage in surface vs. deep layers [J]. Soil science society of America journal, 2011, 75(1):92-101.
- [55] SU Y Z. Soil carbon and nitrogen sequestration following the conversion of cropland to alfalfa forage land in northwest China [J]. Soil and tillage research, 2007, 92(1):181-189.
- [56] ZHOU Z, SUN O J, HUANG J, et al. Soil carbon and nitrogen stores and storage potential as affected by land-use in an agro-pastoral ecotone of northern China [J]. Biogeochemistry, 2007, 82(2):127-138.
- [57] SCHELLBERG J, MOSELER B M, KUHBACH W, et al. Long-term effects of fertilizer on soil nutrient concentration, yield, forage quality and floristic composition of a hay meadow in the Eifel mountains, Germany [J]. Grass and forage science, 1999, 54(3):195-207.
- [58] FORNARA D A, TILMAN D. Soil carbon sequestration in prairie grasslands increased by chronic nitrogen addition [J]. Ecology, 2012, 93(9):2030-2036.
- [59] LIU P, HUANG J, SUN O J, et al. Litter decomposition and nutrient release as affected by soil nitrogen availability and litter quality in a semi-arid grassland ecosystem [J]. Oecologia, 2010, 162(3):771-780.
- [60] BERG B, MATZNER E. Effect of N deposition on decomposition of plant litter and soil organic matter in forest systems [J]. Environment review, 1997, 5(1):1-25.
- [61] KUZAYAKOV Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods [J]. Soil biology and biochemistry, 2006, 38(3):425-448.
- [62] MACK M C, SCHUUR E A G, BRET-HARTE M S, et al. Ecosystem carbon storage in arctic tundra reduced by long-term nutrient fertilization [J]. Nature, 2004, 431(7007):440-443.
- [63] MAILLARD É, ANGERS D A. Animal manure application and soil organic carbon stocks: A meta-analysis [J]. Global change biology, 2014, 20(2):666-679.
- [64] JONES S K, REES R M, KOSMAS D, et al. Carbon sequestration in a temperate grassland: management and climatic controls [J]. Soil use and management, 2006, 22(2):132-142.
- [65] JONES S K, REES R M, SKIBA U M, et al. Greenhouse gas emissions from a managed grassland [J]. Global and planetary change, 2005, 47(2):201-211.
- [66] WU G L, LIU Z H, ZHANG L, et al. Effects of artificial grassland establishment on soil nutrients and carbon properties in a black-soil-type degraded grassland [J]. Plant and soil, 2010, 333(1/2):469-479.

转化技术进行探索,对鼓槌石斛种属基因分子从分子生药学的角度进行研究,应该成为将来研究的方向之一。③在石斛成分研究中,多糖含量很高,常作为评价的依据,而忽略其他成分的测定,为此,在构建鼓槌石斛特征性图谱和多指标评价体系、保证鼓槌石斛的质量标准等方面可开展更进一步的研究。

参考文献

- [1] 秦路平,黄宝康,顺庆生.易混淆药用植物图鉴[M].上海:上海科学技术出版社,2015:116.
- [2] 唐玲,李戈,唐德英,等.鼓槌石斛的资源现状与保护利用研究[J].中国野生植物资源,2012,31(4):61-63.
- [3] 郑司浩,黄林芳,陈士林.鼓槌石斛特异性 PCR 分子鉴定[J].中草药,2013,44(6):744-748.
- [4] 唐玲,李戈,唐德英,等.鼓槌石斛的资源现状与保护利用研究[J].中国野生植物资源,2012,31(4):61-63.
- [5] 龚庆芳,周浩,王新桂,等.7种石斛多糖质量分数的测定及单糖组成分析[J].食品科技,2013,38(3):172-175.
- [6] 鲁芹飞,黄松,林培,等.5种不同石斛的多糖与氨基酸及甘露糖的含量比较[J].中国实验方剂学杂志,2014,20(2):59-62.
- [7] 曲继旭,贺雨馨,陈龙,等.3种石斛氨基酸组成及营养评价[J].辽宁中医药大学学报,2018,20(2):60-62.
- [8] 杜静,秦民坚,黄林芳,等.石斛中微量元素含量的测定及其安全性评价[J].中国药房,2012,23(47):4477-4479.
- [9] 陈佳江,郭力,许莉,等.叠鞘石斛与药典收载石斛品种鞣质含量对比[J].中国实验方剂学杂志,2013,19(2):61-63.
- [10] 罗方利,郭力,许莉,等.叠鞘石斛与石斛药典收载品种脂溶性成分 GC-MS 对比研究[J].时珍国医国药,2013,24(6):1419-1421.
- [11] 李崇晖,黄明忠,黄少华,等.4种石斛属植物花朵挥发性成分分析[J].热带亚热带植物学报,2015,23(4):454-462.
- [12] 李文静,李进进,李桂锋,等. GC-MS 分析 4 种石斛花挥发性成分[J].中药材,2015,38(4):777-780.
- [13] 张冬英,范黎明,龚舒静,等.鼓槌石斛花总黄酮及挥发性成分研究[J].食品科技,2014,39(10):198-202.
- [14] 余琪,毛培江,姜建民,等.4种药用石斛对增强小鼠免疫功能效果的比较研究[J].中国现代应用药学,2017,34(2):191-195.
- [15] 钱明雪,李胜利,李凡,等.6种石斛多糖抗亚急性酒精性肝损伤作用的比较[J].中国药理学杂志,2015,50(24):2117-2123.
- [16] 余增洋,盛雨辰,周玲玉,等.鼓槌石斛对小鼠非增殖性糖尿病视网膜病变的改善作用及其机制研究[J].中草药,2016,47(11):1908-1913.
- [17] 余增洋,陆宾,季莉莉,等.鼓槌石斛改善糖尿病性视网膜膜病活性及其机制[J].国际药学研究杂志,2016,43(2):301-306.
- [18] 崔名扬,康丹丹,和磊,等.鼓槌石斛毛兰素诱导人结肠癌 Caco-2 细胞凋亡[J].食品工业科技,2016,37(16):352-356.
- [19] 崔旭琴,苏鹏,朱启成,等.毛兰素诱导结肠癌 SW480 细胞凋亡的分子机制[J].应用与环境生物学报,2011,17(4):512-516.
- [20] 王冬梅,杜静,黄林芳.石斛抗氧化和滋阴作用的试验研究[J].安徽农业科学,2013,41(15):6655-6657.
- [21] 李婵娟.几种石斛粗提物抗凝抗血栓作用的对比研究[J].云南中医中药杂志,2012,33(12):61-62.
- [22] 国家药典委员会.中华人民共和国药典:一部[S].北京:中国医药科技出版社,2010:85.
- [23] 朱丽娜,刘贤武,朱红云,等.五种不同基源石斛对小鼠肠推进及胃排空的影响[J].中药与临床,2012,3(1):11-14.
- [24] 朱丽娜,刘贤武,徐芳,等.五种不同基源石斛对小鼠胃粘膜损伤的保护作用及机制研究[J].中药与临床,2012,3(1):7-10.
- [25] 唐德英,马洁,张丽霞,等.鼓槌石斛种质资源调查研究[J].中国中药杂志,2010,35(12):1529-1532.
- [26] 马雪亭,邢晓科,郭顺星.鼓槌石斛的地理分布与菌根真菌区系组成的相关性[J].菌物学报,2016,35(7):814-821.
- [27] 杨绍周,吴毅毅,邵德林,等.鼓槌石斛内生细菌分离、鉴定及功能分析[J].中国农学通报,2014,30(25):171-176.
- [28] 石媛慧,郭力,许莉,等.不同品种石斛的 HPLC-DAD-ELSD 指纹图谱研究[J].世界科学技术-中医药现代化,2013,15(6):1329-1332.
- [29] 廖格,张友源,宋希强,等.观赏石斛与药用石斛 HPLC 指纹图谱及生物活性的比较[J].热带生物学报,2015,6(4):420-425.
- [30] 郑司浩,黄林芳,陈士林.鼓槌石斛特异性 PCR 分子鉴定[J].中草药,2013,44(6):744-748.
- [31] 林榕燕,钟钦钦,叶秀仙,等.霍山石斛 PMM 基因的克隆及其表达分析[J].热带作物学报,2017,38(12):2326-2333.
- [32] 栗丹,李振坚,毛萍,等.基于 ITS 序列石斛材料的鉴定及系统进化分析[J].园艺学报,2012,39(8):1539-1550.
- [33] 彭小凤,何涛,淳泽,等.基于叶绿体 psbA-trnH 和核糖体 5S rRNA 基因间隔区序列的石斛种间和种内鉴别[J].应用与环境生物学报,2015,21(5):887-896.
- [34] 金建峰,朱思眉,蒋明,等.石斛属植物 rDNA ITS 序列的克隆与分析[J].浙江农业学报,2014,26(3):685-692.

(上接第 5 页)

- [67] JOBBÁGY E G, JACKSON R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. Ecological applications, 2000, 10(2): 423-436.
- [68] RUMPEL C, EUSTERHUES K, KÖGEL-KNABNER I. Location and chemical composition of stabilized organic carbon in topsoil and subsoil horizons of two acid forest soils [J]. Soil biology and biochemistry, 2004, 36(1): 177-190.
- [69] GORDON W S, JACKSON R B. Nutrient concentrations in fine roots [J]. Ecology, 2000, 81(1): 275-280.
- [70] AJWA H A, RICE C W, SOTOMAYOR D. Carbon and nitrogen mineralization in tallgrass prairie and agricultural soil profiles [J]. Soil science society of America journal, 1998, 62(4): 942-951.

- [71] LI Q, SONG Y T, LI G D, et al. Grass-legume mixtures impact soil N, species recruitment, and productivity in temperate steppe grassland [J]. Plant and soil, 2015, 394(1/2): 271-285.
- [72] HERRIDGE D F, PEOPLES M B, BODDEY R M. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems [J]. Plant and soil, 2008, 311(1/2): 1-18.
- [73] LI Q, YU P J, LI G D, et al. Grass-legume ratio can change soil carbon and nitrogen storage in a temperate steppe grassland [J]. Soil and tillage research, 2016, 157: 23-31.
- [74] JIN D, MA J, MA W, et al. Legumes in Chinese natural grasslands: Species, biomass, and distribution [J]. Rangeland ecology & management, 2013, 66(6): 648-656.
- [75] 李凌浩, 路鹏, 顾雪莹, 等. 人工草地建设原理与生产范式 [J]. 科学通报, 2016, 61(2): 193-200.

名词解释

平均作者数:指来源期刊每一篇论文平均拥有的作者数,是衡量该期刊科学生产能力的一个指标。

地区分布数:指来源期刊登载论文所涉及的地区数,按全国 31 个省市计(不包括港澳台)。这是衡量期刊论文覆盖面和全国影响力大小的一个指标。

机构分布数:指来源期刊论文的作者所涉及的机构数。这是衡量期刊科学生产能力的另一个指标。

海外论文比:指来源期刊中,海外作者发表论文占全部论文的比例。这是衡量期刊国际交流程度的一个指标。

基金论文比:指来源期刊中,各类基金资助的论文占全部论文的比例。这是衡量期刊论文学术质量的重要指标。

引用半衰期:指该期刊引用的全部参考文献中,较新一半是在多长一段时间内发表的。通过这个指标可以反映出作者利用文献的新颖度。