

人工施肥对草地生态系统碳循环过程影响机制的研究

范月君^{1,2}, 畅喜云², 邹华³, 德科加^{4*}, 李兰洁² (1. 中国农业科学院草原所, 内蒙古呼和浩特 010010; 2. 青海畜牧兽医职业技术学院, 青海湟源 812100; 3. 青海省草原总站, 青海西宁 810008; 4. 青海畜牧兽医科学院, 青海西宁 810016)

摘要 人类经营性活动对草地生态系统功能的影响已引起人们普遍关注。人工施肥作为草地改良和培育的重要手段, 其对草地生态系统碳循环过程已成为研究重点。揭示这一作用对准确理解碳循环的过程和草地保护、利用有重要的指导意义。本研究围绕人工施肥对草地生态系统碳循环2个主要过程, 即碳输入与碳输出的影响, 探讨了影响草地生态系统碳循环的生物、物理和化学过程, 并且简述了这些因素影响碳循环过程关键机制, 同时对今后施肥管理草地生态系统碳循环的研究进行展望。

关键词 草地生态系统; 施肥; 土壤呼吸; 碳循环

中图分类号 S181.3; Q948 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2015)05-095-02

草地生态系统是陆地生态系统碳循环重要的组成部分, 日益受到碳循环研究者的重视^[1]。地球表面土地面积的1/4~1/3被草地植被覆盖^[2], 其面积约为 $44.5 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 碳储量达761 Pg, 其中植被占总储量的10.6%, 土壤占总储量的89.4%^[3]。我国草原面积广大, 约占我国国土面积的40%以上, 是我国最大的陆地生态系统, 其固碳功能应得到充分的重视。据Ni^[4]的统计, 中国草地生态系统碳储量为44.09 Pg, 与世界草地碳储存的分布一样, 土壤中有41.03 Pg, 是植被层的13.5倍^[5]。从草原类型上分析, 草原和草甸类型草地蓄积了全国草地有机碳的2/3, 而其他类型草地的碳储量很低^[6]; 从生态系统来看, 我国草地生态系统的总碳储量约占全国陆地生态系统的16.7%^[7]。同时, 许多资料还表明, 我国的草地植被为一个碳汇, 而非碳源^[8]。

近年来, 草地在气候变化和过度放牧共同驱动下, 草地生态功能下降, 生产力衰减^[9]。研究认为, 诸如免耕技术, 提高施肥管理, 进行多年生牧草轮作, 实行保护播种等管理措施, 可以固定大量的大气CO₂^[10]。草地管理措施技术不仅为家畜增加牧草产量, 而且增加土壤有机碳含量。人工施肥作为一项常规的草地管理, 从维持草原生态系统养分平衡角度及退化草地恢复和重建方面在国内外得到大量应用^[11]。然而, 有关施肥特别是外源性N输入对于草地生态系统碳过程、机理的研究报道还不多, 而且研究结论也不尽相同。笔者通过施肥与碳循环2个过程(碳输入和碳输出)关系进行分析, 阐明外源性N输入对草地生态系统碳输出和碳输入过程的影响, 以期对草地生态系统碳库储量变化和调控机制及应对全球变化等科学问题提供一些理论参考。

1 碳循环和碳平衡

碳循环包括2个方面。一方面是光合作用过程中大气吸收C, 并且固定在陆地生态系统中; 另一方面是土壤呼吸中土壤C通过一系列化学和生物过程以CO₂的形式排放到大气中。地球上碳素在生物和非生物库中循环流动构成“碳

循环”。碳平衡包括碳输入和碳输出2个过程。输入和输出的差值为净生态系统生产力(Net ecosystem productivity, NEP)。当NEP为正值时, 表明该系统从大气中吸收CO₂, 为大气CO₂的“汇”; 当NEP为负值时, 表明该系统从大气中释放CO₂, 为大气CO₂的“源”^[12]。

2 施肥与碳循环关系

2.1 施肥对碳输入的影响 施肥与碳输入数量和质量、形式等有一定的关系, 但这种关系尚存在不确定性^[13]。其影响植物生长不同的肥料施入量、施肥的类型和比例及输入历史都对结果产生不同的影响。一种认为施肥增加草地上生物量^[14], 从而增加植物碳输入量, 其主要原因是施肥增加速生植物光合作用等, 虽然碳含量低, 但输入大量的碳, 从而增加土壤碳库^[15]。另一方面, 施肥改变植物群落组成和功能多样性, 进一步增加植物生产力、植物碳百分比、植物碳总量, 从而影响植物生态系统功能。David等^[16]研究认为, 施肥与特定植物功能群的增加和减少, 对生态系统碳循环功能有或更多的影响, 并且其循环过程可能由不同物种或功能群引起。另一种认为肥料输入减少了土壤碳库碳蓄积。研究表明, 通过20年长期氮施肥的苔原生态系统有机碳库损失2 kg/m², 减少了土壤有机碳^[17]。同时, 还有研究发现, 施肥对土壤碳输入的影响不大。Soussana等^[18]通过外源性N输入措施对法国温带草原进行研究, 认为适量或适度施肥对有机质分解的作用小, 但是对于有机质输入碳库的促进作用较大, 从而有利于土壤碳库的吸存能力, 但是高施肥的施肥对于土壤有机质分解和土壤碳库输入都有存进作用, 综合判断其对土壤碳库吸存能力无影响。

施肥同时影响草地生态系统微生物过程。当前对施肥对土壤活性炭和微生物碳的研究较少。综合研究文献, 主要存在2个方面的争议。Emmett等^[19]研究发现, 外源性N素对泥炭灰壤土酸性草地土壤可溶性有机碳含量的影响和形态、用量有关, 施加20 kg N/(hm²·年)硝酸钠肥料能显著增加土壤可溶性有机碳含量, 而施加相同剂量的硫酸铵则降低土壤可溶性有机碳浓度含量; 但是, 也有研究认为, 添加肥料使得土壤微生物活性增加, 并且通过增加土壤腐殖质的稳定性等途径来使得土壤可溶性有机碳含量降低^[20]。施肥对土壤微生物量碳的影响通常与施肥长短有关。Fisk等^[21]发现,

基金项目 农业部公益行业(农业)科研专项经费项目(201203007); 青海省自然科学基金项目(2012-Z-941Q)。

作者简介 范月君(1979-), 男, 青海海东人, 副教授, 博士, 从事草地生态、环境与资源方面的研究。*通讯作者, 研究员, 博士, 硕士生导师, 从事草地生态、环境与资源方面的研究。

收稿日期 2014-12-25

长期地添加 N 肥导致土壤微生物量碳含量降低,并且呈现负相关关系。相反,短期的施肥增加土壤微生物量碳^[22]。另外,施肥和草地土壤活性炭与底物水平,即草地土壤活性炭很大程度由草地碳素基础水平决定^[13]。

2.2 施肥对碳输出的影响 土壤碳输出的形式、数量和速度同样受到施肥的影响。施肥对于植物生长的周期、某些化学成分和物理成分有很大的影响,例如施肥对植物叶片含量和茎叶比例产生影响,导致生长植物枯落物的有效组成,进而影响枯落物分解速率、碳存留时间、碳浸入^[23]。周学东等研究发现,施用氮肥影响牧草结构,使其叶片数量增多,蛋白质含量增加。储祥云等^[24]研究发现,比较缺磷处理与完全肥料处理,部分地上的相对产量仅为 11%~17%,根茎比明显较高,施肥这种促进生长率与枯落物积累及成分的关系在维管束和非维管束植物中存在,并且存在于许多种子植物中,如施肥增加部分蕨类植物和苔藓植物的生产力,产生具有高碳含量及分解缓慢的枯落物,增加土壤碳蓄积能力^[15]和滞留时间,缩短碳输出周期。

植物中的木质素、单宁等含量决定了碳在植物中的滞留时间,增强系统的碳汇能力。施肥影响产生木质素分解酶等土壤真菌,尤其是分解木质素的白腐菌,从而影响碳输出的时间。研究表明,高氮浓度输入抑制白腐菌分解木质素酶活性下降,因此在高肥力环境下木质素含量高的草地植物组成和物种更难以分解^[25],使得碳输出下降,有利于碳贮存。虽然外源性 N 输入等施肥措施促进草地生态系统净初级生产力,但是施肥另一方面影响产生化学和生物酶的土壤微生物的种群和数量,延缓或阻滞土壤碳素向大气中的释放,加强土壤固碳能力。

土壤呼吸是碳输出的主要形式,包括土壤微生物呼吸、土壤无脊椎动物呼吸和植物根系呼吸 3 个生物学过程以及土壤中含碳物质的化学氧化过程^[1]。研究表明,添加有机肥明显提高土壤呼吸通量,化学肥料则对于土壤呼吸通量的变化没有显著性差异。Aerts 等^[26]采用肥料控制试验对大豆田 CO₂ 排放机理进行研究,发现施用氮肥降低了 CO₂ 排放。这可能是由于施用肥料导致土壤 pH 降低,土壤微生物活性降低,分解有机碳的速率下降。杨兰芳^[27]等研究发现,外源 N 的添加没有影响裸土呼吸速率,而施加低氮土壤呼吸速率比施加高氮土壤呼吸速率低 28%。毕建杰等^[28]通过施肥对不同品种麦田 CO₂ 通量的影响研究得出,在施氮肥处理水平下土壤 CO₂ 释放量最多,并且施肥增加土壤呼吸通量。王立刚等^[29]对玉米农田土壤呼吸的动态研究表明,配施氮磷肥的土壤呼吸量有所增加,氮磷钾肥促进小麦根系生长,且改善土壤结构,进一步增强根系呼吸速率。王永强^[30]研究了施肥对内蒙古武川县连续 7 年免耕土壤呼吸的关系,发现土壤呼吸年速率和季节速率与土壤有机质呈显著线性相关,和外源性 N、P、K 肥施加相关不显著,但是三者对土壤呼吸速率影响在 0.05 水平显著,单施 N、P、K 肥和混合配比施加土壤呼吸速率分别比不施加提高 14.9%、11.7%、5.2% 和 29%。由此可知,施肥对于土壤呼吸还有很大的不确定性,

并且土壤呼吸受建植或放牧历史、土壤性状以及耕作制度的影响。

3 研究展望

国外对于施肥对草地生态系统碳循环和碳平衡影响的研究较多。国内相关学者也从不同侧面开展了一些有意义的研究,并且取得相关有益结论。但是,由于碳循环研究的复杂性,涉及到生理学、地球化学、土壤学、生物学等,草地碳循环研究还存在一些问题有待进一步研究。

(1) 草地生态系统碳汇关系是一个动态平衡,与草地管理措施密切相关。对于施肥等人为管理措施对草地生态系统碳输入和碳输出的平衡稳定性的具体和主要影响机制以及寻找主要影响因素来建立草地生态系统碳汇关系动态平衡预测模型,并且预测变化趋势,有待进一步研究。

(2) 肥料输入对草地生态系统碳循环的影响尚存在着很大的不确定性,与氮肥种类、剂量、配比及周期等都有关系。这为研究、模拟与预测施肥与草地碳平衡和碳循环的过程带来困难。因此,加强研究化学肥料和有机肥料对典型草地生态系统碳循环和碳平衡影响的机理及其在空间尺度变异对草地生态系统功能影响,对合理评价和制定相关草原保护和开发工作具有重要意义。

参考文献

- [1] 范月君,侯向阳,石红霄,等. 气候变暖对草地生态系统碳循环的影响[J]. 草业学报,2012,21(3):294-302.
- [2] 耿元波,董云社,齐玉春. 草地生态系统碳循环评述[J]. 地理科学进展,2004,23(3):74-76.
- [3] 贾炳瑞,周广胜,王凤玉,等. 放牧与围栏羊草草原土壤呼吸作用及其影响因子[J]. 环境科学,2005,26(6):1-6.
- [4] NI J. Carbon storage in terrestrial ecosystems of China: Estimates at different spatial resolutions and their response to climate change[J]. Climatic Change,2001,49:339-358.
- [5] XIE Z B, ZHU J G, LIU G, et al. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s[J]. Global Change Biology,2007,13(9):1989-2007.
- [6] FAN Y, HOU X, SHI H, et al. Effects of grazing and fencing on carbon and nitrogen reserves in plants and soils of alpine meadow in the three headwater resource region[J]. Russian Journal of Ecology,2013,44(1):80-88.
- [7] 方精云,刘国华,徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳库[C]//王庚辰,温玉璞. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京:中国环境科学出版社,1996:109-127.
- [8] 陈佐忠,汪诗平. 中国典型草原生态系统[M]. 北京:科学出版社,2000:20-227.
- [9] ZUO X A, ZHAO H L, ZHAO X Y, et al. Vegetation pattern variation, soil degradation and their relationship along a grassland desertification gradient in Horqin Sandy Land, northern China[J]. Plant and Soil,2009,58:1227-1237.
- [10] PAUSTIAN K, ELLIOT E T, COLE C V, et al. Soil organic matter in temperate agro-ecosystems [M]. Florida: CRC Press, 1997:15-49.
- [11] UNLU K, OZENIRLER G, YURTERI C. Nitrogen fertilizer leaching from cropped and irrigated sandy soil in central Turkey[J]. European Journal of Soil Science,1999,50(4):609-620.
- [12] 徐海红. 不同放牧制度对短花针茅荒漠草原碳平衡的影响[D]. 北京:中国农业科学院,2010.
- [13] 肖生胜,董云社,齐玉春,等. 草地生态系统土壤有机碳库对人为干扰和全球变化响应研究进展[J]. 地球科学进展,2001,24(10):1138-1149.
- [14] 德科加,周青平,徐成体. 不同施肥量对天然草场牧草产量影响[J]. 青海畜牧兽医杂志,2001,31(3):12-15.
- [15] 王平,盛连喜,燕红. 植物功能性状与湿地生态系统碳汇关系的研究[J]. 生态学报,2010,30(24):6990-7000.

20%。

从烘烤结果看,第 1 批毕火的 4 座烤房(i)大体烘烤 144 h,湿筋比例较大,时隔 12 h 之后毕火的 10 座烤房(ii)湿筋比例明显减少,最后毕火的 5 座烤房(iii)湿筋比例很小(表 6)。由此说明,适当延长烘烤时长可有效减少散叶湿筋的比例。

表 6 湿筋比例与烘烤时长

烤房编号	烘烤时长//h	失筋比例//%
i	144	13
ii	156	8
iii	160	3

此外,部分烤房出炕时存在有烤红叶片,烟叶部位偏重于中上部烟叶,主要是干筋期温度超过了 70 ℃,其中 2 座烤房烟叶有烤红现象,分析烘烤过程数据可得其在干球 72 ℃、湿球 43 ℃ 温度下稳温时间过长。

3 结论与讨论

散叶密集烘烤后烟叶较常规挂杆橘黄烟增多、色度增强,成熟度、叶片疏松程度和油分明显提高,且减少了用工量,降低了燃料成本^[9-14]。

由试验结果分析可知,散叶高密度装烟在装烟量、用工、时效上均优于常规挂杆烘烤,符合当下烟叶生产工作的趋势,但高密度装烟烘烤在能源消耗方面尚且不如挂杆烘烤。由此可见,现行高密度装烟烘烤方式仍需要不断完善各方面工作,以求在能源消耗方面与常规装烟方式烘烤耗能持平,或低于常规烘烤耗能。对 2 种不同装烟方式烤后烟质量分析方面,高密度装烟烘烤略优于常规烘烤。在工艺对比上,试验烤房采用高密度装烟烘烤工艺,其工艺是对原有三段式烘烤工艺的改进和灵活运用,是三段式烘烤工艺的进一步发展,而常规烘烤工艺基本参照三段式烘烤工艺,烘烤操作工程中缺乏对三段式烘烤工艺的灵活运用,当然烘烤操作人员的自身水平也是影响试验效果的原因之一。试验过程中无

论是哪一种装烟方式均出现不同程度的烤坏烟,其中高密度装烟烘烤烤坏烟问题较常规烘烤突出,究其原因最终可归结为烟叶素质、烘烤工艺的不完善及温湿度的不准确。在实际操作过程中堆内外温度可作参考,但堆内的烟叶变化难以估测,烘烤时只能观察到烟叶表层现象。因此,建立堆内外温度和烟叶变化状态模型将更有助于工作人员通过表面现象看到内部烟叶变化,从而执行正确的烘烤操作,减少烤坏烟的发生^[15]。

参考文献

- [1] 中国烟草总公司郑州烟草研究院中国农业科学院农业资源与农业区划研究所. 中国烟草种植区划 单行本[M]. 中国烟草总公司郑州烟草研究院中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,2009.
- [2] 宫长荣. 烟草调制学[M]. 北京:中国农业出版社,2003:127-128.
- [3] 谢已书,姜均,李国彬,等. 散叶密集烘烤烟叶外观与主要化学成分变化规律初探[J]. 中国烟草科学,2009,30(3):45-48.
- [4] 罗勇,谢已书,李明海,等. DB 52/T 665-2010,烤烟散叶堆积烘烤技术规程[S]. 贵阳:中国烟草总公司贵州省公司,2010.
- [5] 中国农业科学院烟草研究所. 一种烤烟烘烤特性判定方法:中国,201110065170.4[P]. 2011-09-07.
- [6] 王学龙,宋朝鹏,宫长荣,等. 散叶烤房系列研究 2. 装炕技术研究[J]. 中国农学通报,2007(1):319-321.
- [7] 陈代荣,丁伟,阳显斌,等. 散叶烘烤和挂竿烘烤的烟叶质量和经济效益分析[J]. 作物研究,2014(2):180-196.
- [8] 赵高坤,崔国民,黄维,等. 装烟密度对多酚·类胡萝卜素及有机酸的变化规律研究[J]. 安徽农业科学,2012,40(29):14468-14469,14495.
- [9] 闫克玉,赵献章. 烟叶分级[M]. 北京:中国农业出版社,2003:63-69.
- [10] 周思瑾,杨虹琦,赖碧添,等. 福建武夷典型烤烟产区烟叶品质特征分析[J]. 中国农学通报,2011,27(20):103-108.
- [11] 范才银,曾慧宇,林志,等. K326 和云烟 87 在湘南烟区农艺特性及产质量差异性研究[J]. 湖南农业科学,2012(13):33-35.
- [12] 谢已书,邹焱,李国彬,等. 密集烤房不同装烟方式的烘烤效果[J]. 中国烟草科学,2010,31(3):67-69.
- [13] 蒋笃忠,唐 绅,成劲松,等. 烤烟散叶堆积式烘烤技术研究 I——不同堆积方式的烘烤效果[J]. 中国农学通报,2009,25(18):435-438.
- [14] 李明海,李智勇,罗勇,等. 烤烟散叶堆积式烘烤技术的研究与应用[C]//中国烟草学会 2004 年学术年会论文集. 中国烟草学会,2004:46-51.
- [15] 郑松锦,李斌,王宏生,等. 烟叶在高温湿度环境中平衡含水率的数学模型[J]. 烟草科技,2010(9):5-9.
- [16] DAVID T,JOHANNES K,DAVID W,et al. The Influence of functional diversity and composition on ecosystem processes [J]. Science, 1997, 277(29):1301-1302.
- [17] MACKM C,SCHUUR E A G,BRET-HARTE M S. Ecosystem carbon storage in arctic tundra reduced by long-term nutrient fertilization [J]. Nature,2004,431(7007):440-443.
- [18] SOUSSANA J F,LOISEAU P,VUICHARD N,et al. Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands [J]. Soil Use and Management,2004,20:219-230.
- [19] EMMETT B A,GORDON C,WILLIAMS D L,et al. Grazing/nitrogen Deposition Interactions in Upland Acid Grassland[R]. Report to the UK Department of the Environment,Transport and the Regions, Centre for Ecology and Hydrology, Bangor,2001.
- [20] GUNDERSEN P,EMMETT B A,KJONAASO J,et al. Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forests: A synthesis of N ITREX data [J]. Forest Ecology and Management,1998,101(1/3):37-56.
- [21] FISKM C,FAHEY T J. Microbial biomass and nitrogen cycling responses to fertilization and litter removal in young northern hard wood forests[J]. Biogeochemistry,2001,53(2):201-223.
- [22] RILLING M C,MUMMEY D L. Mycorrhizas and soil structure [J]. New Phytologist,2006,171:41-53.
- [23] 周学东,沈景林,高宏伟,等. 叶面施肥对高寒草地产草量及牧草营养品质的影响[J]. 草业学报,2000,9(4):27-31.
- [24] 储祥云,何振立,黄昌勇. 一些牧草的耐酸性及磷、钾、镁肥对牧草的影响[J]. 浙江大学学报,1999,25(4):383-386.
- [25] WALDROP M P,ZAK D R. Response of oxidative enzyme activities to nitrogen deposition affects soil concentrations of dissolved organic carbon [J]. Ecosystem,2006,9:921-933.
- [26] AERTS R,TOET S. Nutritional controls on carbon dioxide and methane emission from Carex-dominated peat soils [J]. Soil Biology and Biochemistry,1997,29:1683-1690.
- [27] 杨兰芳,蔡祖聪. 玉米生长中的土壤呼吸及其受氮肥施用的影响[J]. 土壤学报,2005,42(1):9-15.
- [28] 毕建杰,王琦,张衍华. 施肥对不同品种麦田 CO₂ 通量的影响[J]. 中国农学通报,2006,22(6):459-463.
- [29] 王立刚,邱建军,李维娟,等. 黄淮海平原地区夏玉米农田土壤呼吸的动态研究[J]. 土壤肥料,2006(6):13-17.
- [30] 王永强. 不同施肥下免耕土壤呼吸与土壤性状的关系[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.

(上接第 96 页)