

中国草地生态系统固碳现状、速率和潜力研究

白永飞* 陈世苹

中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093

白永飞, 陈世苹 (2018). 中国草地生态系统固碳现状、速率和潜力研究. 植物生态学报, 42, 261–264. DOI: 10.17521/cjpe.2018.0031

Carbon sequestration of Chinese grassland ecosystems: stock, rate and potential

BAI Yong-Fei* and CHEN Shi-Ping

State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

Bai YF, Chen SP (2018). Carbon sequestration of Chinese grassland ecosystems: stock, rate and potential. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 261–264. DOI: 10.17521/cjpe.2018.0031

中国草地面积约4亿 hm^2 , 占国土总面积的41.7%。作为中国面积最大的陆地生态系统类型, 草地不仅每年为畜牧业生产提供了3–4亿t优质饲草, 而且在防风固沙、水土保持、水源涵养、生物多样性保育和生态系统碳固持等方面具有极其重要的生态功能(白永飞等, 2014; 沈海花等, 2016)。草地是个巨大的碳库, 全球草地总碳储量约为308 Pg, 其中约92%储存在土壤中(Schuman *et al.*, 2002)。中国草地生态系统碳库大小为29.1 Pg C (方精云等, 2010), 约占世界草原总碳储量的10%。中国草地主要分布在干旱-半干旱区, 草地生产力对气候变化十分敏感, 年际波动大(Bai *et al.*, 2004)。已有研究表明, 近30年全球陆地碳汇的变化趋势和年际变异主要来自干旱-半干旱生态系统(Poulter *et al.*, 2014; Ahlström *et al.*, 2015)。因此准确地评估草地生态系统碳储量及其动态变化, 将有助于预测全球气候变化与草地生态系统之间的反馈调节作用。此外, 由于过度放牧、不合理的开发利用和气候变化等因素的影响, 我国90%的天然草地发生了不同程度的退化, 其中60%以上为中度 and 重度退化(白永飞等, 2016)。但是, 退化草地恢复过程中可以固持大量的碳。为了有效治理退化草地, 中国从2000年开始实施了一系列退化草地治理工程, 大大提升了草地生态固碳功能(Wang *et al.*, 2011)。目前, 森林作为碳固定的主体已经被重视, 但对中国最大的陆地生态系统——草地

碳汇功能的重视却明显不足(张英俊等, 2013; 白永飞等, 2014)。为了准确地评估中国草地生态系统的碳储量现状和变化, 实现草地资源合理利用和生态功能的可持续发挥, 中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”设立了“草地生态系统的固碳现状、速率、机制和潜力”课题。

根据草地类型的空间分异, 本课题将中国的草地分为7个片区(东北、内蒙古、华北与黄土、青藏、新疆、南方和荒漠), 按各片的草地面积、群落类型及其演替序列, 共选择具有代表性的4 200个面上采样点, 包括了900个主样地和3 300个辅助样地。主样地通常选择最具代表性的地带性草原类型, 而辅样地是对主样地的补充完善, 即根据草原利用方式、强度、退化沙化程度等在主样地周边区域设置的调查样地。所有样地均采用统一的取样标准和方法对中国草地植被和土壤碳储量进行调查取样(生态系统固碳项目技术规范编写组, 2015)。同时依托各片区野外台站和大型实验平台, 选择30个加强观测点, 对草地生态系统的固碳速率和动态变化进行研究。在此基础上, 采用多尺度数据整合和模型模拟相结合的手段, 在全国尺度上估算中国草地的固碳现状和潜力。

本课题汇集了24个中国科学院相关研究所、高校和地方科研单位的优势力量340余人, 经过5年的

收稿日期Received: 2018-01-31 接受日期Accepted: 2018-03-12

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050400)。Supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA05050400).

* yfbai@ibcas.ac.cn

艰苦工作, 完成了全国4 207个面上调查样点的野外调查和取样工作, 其中包括900个主样地和3 307个辅助样地(附件1)。调查样地包括了除高寒荒漠(地处无人区, 无法到达)外的17个草地类、31个亚类, 共计512个不同的草地型。所调查草地类型覆盖面积约3.8亿 hm^2 , 占全国草地面积的95%以上。弥补了以往草地碳储量的研究多集中在内蒙古、青藏高原和新疆等草地分布面积广的区域(Xie *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2010), 而对华北和南方草地很少关注的不足。全国7个片区共采集土壤和植物样品34.8万余份。全部样地采用统一的方法进行野外调查、采样和实验室测试分析, 确保了数据的准确性和精度。这一工作的完成对准确评估中国草地固碳现状、速率及其潜力是至关重要的, 也是本课题研究的重要基础。

通过对全国数据的集成分析, 本课题估算了中国草地植被和土壤的固碳现状, 揭示了国家尺度不同草地类型植被(地上生物量、凋落物、地下生物量)和土壤碳库(0–100 cm)的空间格局、各组分的分配比例及其关键驱动因子。本课题野外调查数据集成分析表明, 中国草地总碳储量为28.95 Pg C, 其中植被碳储量为1.82 Pg C, 土壤有机碳碳储量为27.13 Pg C。与以往研究相比, 本研究有三大特点: 1)本研究的地下根系生物量全部来自直接测量的结果, 取样深度达100 cm, 基本实现了对全部地下根系的取样。在此基础上, 我们可以更加准确地计算草地植被地下碳储量以及地上地下碳分配格局。而由于取样和测定难度, 以往研究通常仅测定表层根系或以根冠比经验值进行推算(Fan *et al.*, 2008), 这不仅增加了对草地植被碳储量估算的不确定性, 而且限制了对植被-土壤碳库周转关系和相关机理的研究。2)实现了对0–100 cm土壤剖面的取样, 大大提高了对深层(30–100 cm土层)土壤碳储量的估算精度。基于本课题的研究结果, 我们发现在0–100 cm的土壤碳储量中, 30–100 cm的土壤碳储量贡献了近43.4%。因此, 忽略深层土壤碳将会大大低估草地生态系统碳储量。同时, 在研究中发现对于某些草地类型如温性和高寒草甸草原、沙地草地等, 其土壤厚度可达数米, 因此对于更深层土壤碳储量的估算研究将有助于更准确地评估草地生态系统在全球陆地生态系统碳固持中的作用。3)通过主样地和辅助样地不同放牧利用强度样地的对比研究, 实现了对中国退化

草地恢复过程固碳潜力的评估, 提出并估算了中国主要草地类型可实现的固碳潜力。

本专辑主要介绍草地课题的相关研究成果。专辑共收录13篇研究论文, 均为片区尺度草地碳储量及加强点典型案例研究。内容包含了草地生态系统碳储量空间分布格局、草地管理方式对碳储量的影响以及草地生态系统碳循环关键过程研究等方面。岑宇等(2018)和李永强等(2018)分析了河北和山东不同草地类型植被和土壤碳库固碳现状。杨昊天等(2018)和王丽华等(2018)报道了腾格里荒漠和四川草地土壤碳库的垂直分布特征和空间分布格局。张静等(2018)研究了新疆北部草地13种典型灌木不同器官的碳氮含量特征。张璐等(2018)和闫宝龙等(2018)对比研究了不同草地管理方式对内蒙古典型草原和荒漠草原生物量和土壤碳密度的影响。在文献调研和本课题调查数据的基础上, 孙元丰等(2018)整合分析了中国不同草地类型根系周转的空间格局和驱动因子。基于本课题加强点长期控制实验研究, 张素彦等(2018)报道了凋落物添加和剔除对内蒙古典型草原生态系统碳通量的影响; 靳宇曦等(2018)比较了不同载畜率下荒漠草原生态系统净碳交换特征的变化; 胡毅等(2018)和王祥等(2018)分别研究了不同草地管理方式对新疆天山山地草甸生态系统碳通量及土壤呼吸的影响; 耿晓东等(2018)报道了青藏高原纳木错高寒草甸生态系统碳交换对增水处理的响应。

虽然本专辑并没有涵盖中国所有草地类型的研究结果, 但专辑涉及的从加强点到区域尺度的草地生态系统碳储量及其空间分布格局、生态系统碳交换关键过程及其对草地管理方式和气候变化的响应等方面的研究, 可以为全国尺度的整合分析奠定坚实的基础, 并有助于理解不同草地类型固碳现状和固碳速率的变化特征。

致谢 感谢“生态系统固碳现状、速率、机制和潜力”项目首席科学家方精云和于贵瑞对本课题给予的指导, 感谢项目办公室及各课题负责人和研究骨干在本课题实施过程中给予的支持, 感谢本课题所有参加人员的辛苦付出。本课题秘书为陈世革、万宏伟和王扬; 子课题负责人为周道伟、白永飞、上官周平、黄建辉、贺金生、王艳芬、盛建东、唐立松、李新荣、董鸣、吴宁、吴彦和周广胜。

参考文献

- Ahlström A, Raupach MR, Schurgers G, Smith B, Arneth A, Jung M, Reichstein M, Canadell JG, Friedlingstein P, Jain AK, Kato E, Poulter B, Sitch S, Stocker BD, Viovy N, Wang YP, Wiltshire A, Zaehle S, Zeng N (2015). The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO₂ sink. *Science*, 348, 895–899.
- Bai YF, Han XG, Wu JG, Chen ZZ, Li LH (2004). Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. *Nature*, 431, 181–184.
- Bai YF, Huang JH, Zheng SX, Pan QM, Zhang LX, Zhou HK, Xu HL, Li YL, Ma J (2014). Drivers and regulating mechanisms of grassland and desert ecosystem services. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 93–102. [白永飞, 黄建辉, 郑淑霞, 潘庆民, 张丽霞, 周华坤, 徐海量, 李玉霖, 马健 (2014). 草地和荒漠生态系统服务功能的形成与调控机制. 植物生态学报, 38, 93–102.]
- Bai YF, Pan QM, Xing Q (2016). Fundamental theories and technologies for optimizing the production functions and ecological functions in grassland ecosystems. *Chinese Science Bulletin*, 61, 201–212. [白永飞, 潘庆民, 邢旗 (2016). 草地生产与生态功能合理配置的理论基础与关键技术. 科学通报, 61, 201–212.]
- Cen Y, Wang CD, Zhang Z, Ren X, Liu MZ, Yang F (2018). Spatial distributions of biomass and carbon density in natural grasslands of Hebei, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 265–276. [岑宇, 王成栋, 张震, 任侠, 刘美珍, 杨帆 (2018). 河北省天然草地生物量和碳密度空间分布格局. 植物生态学报, 42, 265–276.]
- Fan JW, Zhong HP, Harris W, Yu GR, Wang SQ, Hu ZM (2008). Carbon storage in the grasslands of China based on field measurements of above- and below-ground biomass. *Climate Change*, 86, 375–396.
- Fang JY, Yang YH, Ma WH, Mohammat A, Shen HH (2010). Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grasslands. *Science China Life Science*, 53, 757–765. [方精云, 杨元合, 马文红, 安尼瓦尔·买买提, 沈海花 (2010). 中国草地生态系统碳库及其变化. 中国科学: 生命科学, 53, 757–765.]
- Geng XD, Xu-Ri, Liu YW (2018). Responses of ecosystem carbon exchange to multi-level water addition in an alpine meadow in Namtso of Qinghai-Xizang Plateau, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 397–405. [耿晓东, 旭日, 刘永稳 (2018). 青藏高原纳木错高寒草甸生态系统碳交换对多梯度增水的响应. 植物生态学报, 42, 397–405.]
- Hu Y, Zhu XP, Jia HT, Han DL, Hu BA, Li DP (2018). Effects of fencing on ecosystem carbon exchange at meadow steppe in the northern slope of the Tianshan Mountains. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 372–381. [胡毅, 朱新萍, 贾宏涛, 韩东亮, 胡保安, 李典鹏 (2018). 围栏封育对天山北坡草甸草原生态系统碳交换的影响. 植物生态学报, 42, 372–381.]
- Jin YX, Liu F, Zhang J, Han MQ, Wang ZW, Qu ZQ, Han GD (2018). Net ecosystem carbon exchange characteristics in *Stipa breviflora* desert steppe with different stocking rates. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 361–371. [靳宇曦, 刘芳, 张军, 韩梦琪, 王忠武, 屈志强, 韩国栋 (2018). 不同载畜率处理下短花针茅荒漠草原生态系统净碳交换特征. 植物生态学报, 42, 361–371.]
- Li YQ, Dong Z, Ding CX, Wang YM, Jia JW, Zhang JN, Jiao SY (2018). Carbon stock and seasonal dynamics of carbon flux in warm-temperature tussock ecosystem in Shandong Province, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 277–287. [李永强, 董智, 丁晨曦, 王雅楣, 贾继文, 张佳楠, 焦树英 (2018). 山东省暖性草丛生态系统碳库现状和碳通量季节变化特征. 植物生态学报, 42, 277–287.]
- Poulter B, Frank D, Ciais P, Myneni RB, Andela N, Bi J, Broquet G, Canadell JG, Chevallier F, Liu YY, Running SW, Sitch S, van der Werf GR (2014). Contribution of semi-arid ecosystems to interannual variability of the global carbon cycle. *Nature*, 509, 600–603.
- Schuman GE, Janzen HH, Herrick JE (2002). Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands. *Environmental Pollution*, 116, 391–396.
- Shen HH, Zhu YK, Zhao X, Geng XQ, Gao SQ, Fang JY (2016). Analysis of current grassland resources in China. *Chinese Science Bulletin*, 61, 139–154. [沈海花, 朱言坤, 赵霞, 耿晓庆, 高树琴, 方精云 (2016). 中国草地资源的现状分析. 科学通报, 61, 139–154.]
- Sun YF, Wan HW, Zhao YJ, Chen SP, Bai YF (2018). Spatial patterns and drivers of root turnover in grassland ecosystems in China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 337–348. [孙元丰, 万宏伟, 赵玉金, 陈世苹, 白永飞 (2018). 中国草地生态系统根系周转的空间格局和驱动因子. 植物生态学报, 42, 337–348.]
- Technical Manual Writing Group of Ecosystem Carbon Sequestration Project (2015). *Observation and Investigation for Carbon Sequestration in Terrestrial Ecosystems*. Science Press, Beijing. [生态系统固碳项目技术规范编写组 (2015). 生态系统固碳观测与调查技术规范. 科学出版社, 北京.]
- Wang LH, Xue JY, Xie Y, Wu Y (2018). Spatial distribution and influencing factors of soil organic carbon among different climate types in Sichuan, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 297–306. [王丽华, 薛晶月, 谢雨, 吴彦 (2018). 不同气候类型下四川草地土壤有机碳空间分布及影响因素. 植物生态学报, 42, 297–306.]
- Wang S, Wilkes A, Zhang Z, Chang X, Lang R, Wang Y, Niu H (2011). Management and land use change effects on soil carbon in northern China's grassland: A synthesis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 142, 329–340.
- Wang X, Zhu YQ, Zheng W, Guan ZX, Sheng JD (2018).

- Effects of soil biological properties and hydrothermal conditions on soil respiration in four mountain meadows with different land use types. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 382–396. [王祥, 朱亚琼, 郑伟, 关正翹, 盛建东 (2018). 昭苏山地草甸4种典型土地利用方式下土壤呼吸特征的研究. *植物生态学报*, 42, 382–396.]
- Xie ZB, Zhu JG, Liu G, Cadisch G, Hasegawa T, Chen CM, Sun HF, Tang HY, Zeng Q (2007). Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s. *Global Change Biology*, 13, 1989–2007.
- Yan BL, Wang ZW, Qu ZQ, Wang J, Han GD (2018). Effects of enclosure on carbon density of plant-soil system in typical steppe and desert steppe in Nei Mongol, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 327–336. [闫宝龙, 王忠武, 屈志强, 王静, 韩国栋 (2018). 围封对内蒙古典型草原与荒漠草原植被-土壤系统碳密度的影响. *植物生态学报*, 42, 327–336.]
- Yang HT, Wang ZR, Jia RL (2018). Distribution and storage of soil organic carbon across the desert grasslands in the southeastern fringe of the Tengger Desert, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 288–296. [杨昊天, 王增如, 贾荣亮 (2018). 腾格里沙漠东南缘荒漠草地不同群落类型土壤有机碳分布及储量特征. *植物生态学报*, 42, 288–296.]
- Yang YH, Fang JY, Ma WH, Smith P, Mohammad A, Wang SP, Wang W (2010). Soil carbon stock and its changes in northern China's grasslands from 1980s to 2000s. *Global Change Biology*, 16, 3036–3047.
- Zhang J, Liu YH, Sheng JD, Chai Q, Li RX, Zhao D (2018). Carbon and nitrogen traits of typical shrubs in grassland of northern Xinjiang, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 307–316. [张静, 刘耘华, 盛建东, 柴强, 李瑞霞, 赵丹 (2018). 新疆北部草地典型灌木的碳氮特征. *植物生态学报*, 42, 307–316.]
- Zhang L, Hao BT, Qi LX, Li YL, Xu HM, Yang LN, Baoyin T (2018). Dynamic responses of aboveground biomass and soil organic matter to grassland restoration. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 317–326. [张璐, 郝匕台, 齐丽雪, 李艳龙, 徐慧敏, 杨丽娜, 宝音陶格涛 (2018). 草原群落生物量和土壤有机质对三项改良措施的动态响应. *植物生态学报*, 42, 317–326.]
- Zhang SY, Jiang HZ, Wang Y, Zhang YJ, Lu SB, Bai YF (2018). Effects of litter removal and addition on ecosystem carbon fluxes in a typical steppe. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 349–360. [张素彦, 蒋红志, 王扬, 张艳杰, 鲁顺保, 白永飞 (2018). 凋落物去除和添加处理对典型草原生态系统碳通量的影响. *植物生态学报*, 42, 349–360.]
- Zhang YJ, Yang GW, Liu N, Chang SJ, Wang XY (2013). Review of grassland management practices for carbon sequestration. *Acta Prataculturae Sinica*, 22, 290–299. [张英俊, 杨高文, 刘楠, 常书娟, 王晓亚 (2013). 草原碳汇管理对策. *草原学报*, 22, 290–299.]

责任编辑: 杨元合 责任编辑: 谢 巍

附件 I 草地课题面上调查样地分布

Appendix I Field sampling sites across Chinese grasslands

<http://www.plant-ecology.com/fileup/PDF/cjpe.2018.0031-A1.pdf>