

文章编号: 1007-6301 (2003) 04-0342-11

我国草地生态系统碳循环研究进展

齐玉春¹, 董云社¹, 耿元波¹, 杨小红¹, 耿会立²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘 要: 文中首先分析了草地生态系统在碳循环研究中的地位和重要性, 进而对我国草地生态系统碳循环的研究现状作了较为详尽的阐述, 包括植物、凋落物、土壤三大碳库以及主要含碳温室气体通量等, 对其主要研究结论进行了深入的剖析。同时提出了今后我国草地生态系统碳循环的重点研究方向和研究领域。

关 键 词: 草地; 碳循环; 碳库; 温室气体

中图分类号: P467; X144

1 引言

自 18 世纪 50 年代 Joseph Black 发现空气中存在 CO_2 开始^[1], 人类就一直没有停止过对碳元素的探索和研究, 尤其是工业革命以后, 大气中含碳温室气体 CO_2 、 CH_4 等浓度始终以前所未有的速率增长, 温室气体浓度的升高强烈地影响着气候系统, 并导致人类生存环境的变化^[2,3]。因此, 近年来以 CO_2 、 CH_4 等为核心的碳元素循环过程研究更引起各国的高度重视, 目前, 碳循环的研究已成为四大国际全球变化研究组织 (IGBP, WCRP, IHDP, DIVERSITAS) 共同关注的三大科学研究目标之一^[4]。

陆地生态系统作为人类的居住环境和人类活动的主要场所, 其碳贮存量约为大气碳库的 2 倍^[5], 在大气、海洋、陆地和岩石圈等地球四大碳库中占据着重要地位, 是全球碳循环的重要组成部分。但由于其下垫面的复杂性以及人类活动的强烈干扰, 它同时也是目前研究中存在最不确定性的生态系统之一^[6], 对于陆地生态系统碳循环规律和机制的研究将是全球碳循环研究的关键环节。在各种陆地生态系统中, 又以草地生态系统的研究尤为重要。据统计, 我国现有不同类型草地面积约 4 亿 hm^2 , 约占我国土地总面积的 40% 以上, 是我国陆地最大的生态系统, 其面积约为我国耕地面积的 4 倍, 森林面积的 3.6 倍^[7-10]。草地

收稿日期: 2003-06; 修订日期: 2003-07

基金项目: 中国科学院知识创新重大项目 (KZCX1-SW-01-04)、中国科学院地理科学与资源研究所知识创新项目 (CXDG-E01-03-01 与 CXDG-A00-06)、国家重点基础研究发展规划项目 (2002 CB 412503)、国家自然科学基金项目 (49971005)

作者简介: 齐玉春 (1972-), 女, 山东茌平县人, 助理研究员, 在职博士。主要从事全球变化与温室气体排放以及碳、氮元素生物地球化学循环等方面的研究, 已发表论文近 20 篇。E-mail: qiyu@igsnrr.ac.cn

生态系统尤其是温带草地生态系统有着不同于其它生态系统的独特的生物地球化学过程^[11], 并在我国占据着特殊的生态地理位置(大部分位于生态脆弱带上)^[12], 对气候和环境变化反应十分敏感, 这些都决定了草地生态系统碳循环研究对于正确评估我国整个陆地生态系统的源汇贡献、研究碳循环过程对气候变化的响应, 完善碳循环的动态平衡机制等都具有十分重要的作用。

2 我国草地生态系统碳循环研究进展

在草地生态系统中, 绿色植物通过光合作用吸收大气中的二氧化碳合成有机物质, 植物枯死后凋落于土壤表面, 形成凋落物层, 其中一部分凋落物经腐殖化作用, 形成土壤有机碳固定在土壤中, 这部分有机碳经土壤动物和土壤微生物的矿化作用, 部分分解产物被植物再次利用, 构成了生态系统内部碳的生物循环。此外, 植物光合作用固定的有机碳还有一部分通过植物自身的呼吸作用(自养呼吸)、凋落物层的异养呼吸以及土壤的呼吸代谢作用将碳重新释放到大气中, 构成了系统与大气间的生物地球化学循环过程^[11, 13]。在草地生态系统中, 植物、凋落物、土壤腐殖质构成了系统的三大碳库, 对于各碳库碳贮量以及碳库间碳流量大小及其变化的研究是整个草地碳循环研究的核心。

2.1 草地植物碳库

绿色植物通过光合作用将大气中的 CO_2 转变为有机碳, 是草地生态系统碳的主要来源^[11, 14]。在国际地圈生物圈计划、全球气候变化、生物多样性以及陆地样带研究中, 草原生产力始终是一个重要的基础研究内容^[15]。我国草地生态系统对于生物量和初级生产力的研究早在 20 世纪 60 年代就已经开始了, 但最初对于草地生物量和生产力的研究一直是植物生理生态学的主要研究对象, 其研究目的是如何提高草地生态系统净生产力, 为畜牧业的稳定发展奠定基础, 研究的重点也主要是牲畜可直接采食的地面生物量部分, 研究内容也并没有与整个生态系统的碳循环过程联系起来。尽管如此, 长期积累的大量草原生物量和初级生产力数据还是为评估我国草地植物的固碳能力奠定了十分重要的基础。

2.1.1 草地生产力与植物固碳能力

草地初级生产力是反映群落固碳能力的重要指标。表 1 列举的是我国部分草地类型地上部分年初级生产力。

从表 1 可以看出, 不仅不同草地群落地上部年初级生产力差异较大, 分布在不同地区的同种植物群落地上部生产能力也存在较大差异, 年初级生产力的差异在一定程度上反映了不同草地群落类型光合固碳能力的差别。同时, 对于草原地上部同化器官生物量(F)和非同化器官生物量(C)比值的研究也进一步说明了这个差异。姜恕等人(1985)研究得出内蒙古锡林河流域羊草群落和大针茅群落在地上生物量最大时 F/C 值分别为 1.12 和 1.19^[16]; 而朱志诚等人(1998)对于陕北黄土高原白羊草群落、假苇拂子茅群落和黄背草群落 F/C 值的研究结果则分别为 0.444, 0.388, 0.867^[17]; 三江平原小叶樟典型草甸草原的 F/C 值为 0.720^[18]。植物种群的 F/C 值是衡量群落光合生产能力的主要指标, F/C 值越大, 净生产量占总生产量的比例也较大, 群落的光合生产效率也就越高^[16]。因此, 在碳循环研究中对于整个草地生态系统光合固碳能力估算时应充分考虑到这个差别, 不能只简单地用一个或几个参数来代表整个地区的状况, 以便使我们的估算结果更加接近现实状况。

表 1 不同草原类型地上部初级生产力比较

Tab. 1 The comparison of aboveground primary productivity in different grassland

| 草地类型 | | 地上部分干物质产量/ (g · m ⁻² · y ⁻¹) |
|-------|--------------|---|
| 林缘草甸 | | 250~ 500 |
| 草甸草原 | 根茎禾草草原 | 200~ 350 |
| | 丛生禾草草原 | 160~ 300 |
| | 杂草类草原 | 150~ 250 |
| 典型草原 | 丛生高禾草草原 | 100~ 170 |
| | 丛生小禾草草原 | 70~ 150 |
| | 根茎禾草草原 | 100~ 200 |
| 荒漠化草原 | 小半灌木草原 | 60~ 100 |
| | 丛生小禾草、小半灌木草原 | 20~ 50 |
| | 小灌木、小禾草草原 | 35~ 100 |
| 高寒草原 | | 30~ 100 |
| 高寒草甸 | | 150~ 300 |

注: 资料来源于文献 [7]

目前, 对于群落地下部植物碳库的研究要远弱于地上部, 现有的多是对地下生物量季节变化动态、垂直分布规律等的研究。与草地地上部相比, 草地地下生物量在总生物量占有较大比例, 观测得到的草原地下生物量与地上生物量的比值可高达 21. 59 (见表 2)。

表 2 部分草地类型地下生物量 (W₁) 与地上生物量 (W₂) 数量关系比较

Tab. 2 The comparison between aboveground biomass and belowground biomass of some grassland types

| 草地类型 | 研究地点 | W ₁ /W ₂ | 参考文献 |
|----------------|---------|--------------------------------|------|
| 羊草群落 | 内蒙古白音锡勒 | 4. 34 | [16] |
| 大针茅群落 | 内蒙古白音锡勒 | 2. 76 | [16] |
| 羊草群落 | 内蒙古正兰旗 | 4. 31 | [19] |
| 高寒小嵩草草原化草甸 | 青海海北生态站 | 15. 21 | [20] |
| 矮蒿草高寒草甸 | 青海海北生态站 | 7. 92 | [21] |
| 藏高草沼泽化草甸 | 青海海北生态站 | 21. 59 | [22] |
| 高寒草甸珠芽蓼草原群落 | 甘肃天祝 | 10. 29 | [23] |
| 线叶嵩高山草地群落 | 甘肃天祝 | 13. 65 | [23] |
| 苔草群落 (河漫滩低地草甸) | 山西宁武县 | 3. 19 | [24] |
| 羊草-丰富杂草类草原群落 | 内蒙古白音锡勒 | 14. 9 | [25] |
| 羊草-小禾草杂类草草原群落 | 内蒙古白音锡勒 | 9. 36 | [25] |
| 大针茅草原 | 内蒙古白音锡勒 | 5. 38 | [25] |
| 羊茅草原 | 内蒙古白音锡勒 | 4. 69 | [25] |
| 克氏针茅草原 | 内蒙古白音锡勒 | 12. 54 | [26] |
| 贝加尔针茅草原 | 内蒙古白音锡勒 | 12. 61 | [26] |
| 线叶菊草原 | 内蒙古白音锡勒 | 13. 76 | [26] |

群落生物量的这种分布格局决定了地下植物碳库是草原植物的主要碳库, 并且对于草原地下植物碳库, 研究发现它的垂直分布也是不均匀的。据黄德华等人 (1988) 对内蒙古贝加尔针茅、克氏针茅以及线叶菊草原的研究结果, 群落地下生物量主要分布于土壤表层, 土壤 0~ 30cm 土层的地下生物量分别占全剖面根系总量的 74. 40%, 71. 18%、68. 68%^[26];

对于青海小嵩草草原化草甸地下生物量垂直分布格局的研究更显示出地下生物量的这种表层集聚现象, 0~10cm 的草皮层中, 其地下生物量约占地下总生物量的 90.43%^[20]。由于植物有 20%~50% 左右的光合产物通过根系的分泌与死亡输入土壤^[27], 因此地下生物量的表层集聚现象也就决定了草原植物与土壤间碳的生物化学循环主要发生在土壤表层, 土壤表层物理化学性质和环境要素的变化将会对草地生态系统碳循环产生重要影响。

2.1.2 环境因子对植物固碳的影响

影响草地生态系统植被碳库变化的外部因素大致可概括为以下两个方面: (1) 环境因子, 主要包括降水量、温度、土壤水分等; (2) 人类活动的影响, 如: 放牧、农垦、割草、火烧等。上述因子主要通过影响群落的种群组成、结构特征及其生理生态特性等间接对草原生态系统的植物碳库产生重要影响。

草原植物群落的生物量是在一定气候生态条件下植物光合作用的产物^[32]。我国相关学者很早以前就对草地群落生物量和生产力与气候因子的关系进行了探讨, 大量研究表明: 草原生物量与温度、降水量的变化密切相关, 降水尤其是植物生长关键时期(6~8月)的降水量是决定草原生产力的重要因素^[29~31]。但研究结果也同时指出, 由于群落生物量对水热因子的反应具有一定的“时滞”性, 因此, 在利用生物量与水热因子的关系模式进行生物量预测时应采用降水量和温度的累加值^[28, 32]。此外, 作物的不同生长期, 影响生物量的水热主导因子也是不同的, 黄富祥对内蒙百里香-本氏针茅草地的研究表明, 光照时数只在5月份, 平均气温只在6月份对植物生长产生影响, 在其它月份都不是关键因子, 而降水量在植物生长各阶段都是重要因子, 但在不同植物生长阶段其影响的重要性也存在差异, 因此采用逐月回归模型与累积回归模型相结合将能够更准确地反映生物量与气候因子的定量关系, 预测在不同气候条件下生物量的变动^[28]。同时, 大量研究也表明, 对于处在不同气候带的草地植物群落, 某气候因子对群落生物量的影响存在较大差异甚至相反, 例如韩国栋对内蒙古小针茅草原的研究结果表明: 小针茅草原植物群落初级生产力与4~8月降水量有显著的直线相关关系, 而与年平均气温、5月的年积温没有明显的相关关系^[15]。而钟海民(1991)对青海矮嵩草高寒草甸的研究则证明, 气温是制约矮嵩草高寒草甸地上生物量的主要因子, 降水对群落生物量的影响不显著^[33]。不同气候因子在不同植物不同的生长阶段其影响程度存在较大差异, 并且生物量对水热因子的反应具有一定的“时滞”性, 这些研究结果为我们利用气候因子对未来草地植物碳库变化进行预测提供了有益的提示, 同时也使我们的研究更加复杂。

放牧是人类活动作用于草地生态系统的主要方式。放牧不仅会降低群落优势种的优势度, 使草原生态系统的群落组成发生变化, 进而对草原植物碳库产生直接影响, 而且长期的过度放牧还会导致草原土壤物理性状的变化, 导致植物个体生长发育受到抑制, 对草原植物碳库产生间接的影响^[34, 35]。但同时大量的相关研究也表明, 当适度放牧时, 牧草的地上现存量虽然随着放牧率的增大而线性下降, 但地上净初级生产力并非线性下降, 而是存在着补偿性生长现象^[36], 使得群落的年净初级生产力反而增加, 从而在一定程度上增加了草原植物的年固碳能力。因此, 确定合理的放牧强度不仅有利于草原畜牧业的稳定发展, 而且对整个系统的植物固碳能力的提高也具有重要影响。

2.2 草地凋落物碳库

草地凋落物碳库是联系草地植物碳库和土壤碳库的重要中间环节。在过去的二十年中,

我国对于森林生态系统凋落物碳库进行了大量细致的研究,但对于草地生态系统凋落物的研究目前的资料还很有限,大量的研究主要集中在凋落物量的季节变化动态和分解动态、气候及其它环境因子对凋落物形成与分解的影响以及凋落物层的生态效应等方面。草地凋落物碳库研究资料的贫乏是目前我国草地碳循环研究的薄弱环节。

凋落物的季节变化动态在一定程度上反映了草地植物碳库和土壤碳库之间碳交换的动态变化,凋落物的形成与分解通常与植物碳库碳贮量的减少和土壤碳贮量的增加过程相伴随。对于凋落物形成的季节变化动态,黄德华的研究结果表明:任意时刻地面凋落物的现存量都是由当年生长季形成的凋落物以及当年生长季以前形成的凋落物的残留两部分组成,草原任一时时刻地面凋落物量都取决于这两部分间的平衡关系^[37]。郭继勋等对草原凋落物的分解动态也作了一定的研究,并建立了枯枝落叶的分解和积累模型,研究指出,凋落物消失率的季节变化符合 logistic 曲线,分解活动在 5~9 月份最活跃,约占全年分解量的 90%,冬季分解作用几乎停止^[38]。凋落物的分解受土壤温度、降水、土壤有机质含量、土壤 C/N、凋落物本身的植物组成等多种内在和外在环境因素的影响,温度的升高和降水量的增加、适宜的 C/N 比将会加快凋落物层的分解^[39,40];对于凋落物层的生态环境效应,相关研究表明,枯枝落叶积累可以强烈影响草原的生态环境,枯枝落叶的存在可导致地表温度下降,土壤含水量增加,土壤 pH 值下降等,并进而对植物种子的萌发和群落生长产生影响^[38,41,42]。

2.3 草地土壤碳库

在草地生态系统中,草地土壤的碳贮量约占草地总碳贮量的 89.4%^[11]。因此,土壤碳库的微小变动都会对大气二氧化碳浓度产生重要影响,草地土壤碳库碳贮量及其变化和调控机制的研究是草地碳循环研究的核心。

2.3.1 土壤碳及其分布

综合以往对于土壤元素的研究成果,研究多集中于对土壤中部分微量元素以及氮元素等限制性元素上,部分对于土壤有机碳的研究也多是以考察草地土壤肥力为目的,将土壤有机碳同碳循环联系起来还是从近几年才开始的。根据以往对于草地土壤有机碳的研究,土壤中的有机碳量主要取决于土壤中的植物残体量以及土壤微生物作用下分解损失量的平衡状况。在草地生态系统中,土壤有机碳的来源主要是植物残根^[43],凋落物层的分解也向土壤输入一部分有机碳。草原中土壤碳主要以有机质的形式存在,而且主要集中于 0~20cm 的表层土壤中。土壤碳库主要包括活性碳库、缓性碳库以及钝性碳库三大类,三类碳的分配比例与土壤质地密切相关,其中活性碳和缓性碳在人类尺度的碳循环研究中十分重要^[6]。对于草地土壤碳的贮量与分布,王绍强等利用我国第二次土壤普查资料对我国北部地区部分草原土壤的碳密度进行了估算(见表 3)^[44]。从表 3 可以看出,各草地土壤类型随着水分递减梯度,土壤碳密度也在逐渐降低,土壤碳密度在 4.86~17.99 kg/m² 范围内变动,其中黑钙土、暗栗钙土、栗钙土与同纬度的森林土壤碳密度相当,甚至部分土壤碳密度还高于森林土壤,也高于中国土壤的平均碳密度 10.53。王艳芬等(1998)也对内蒙锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳的分布进行了实地观测,得出了与上述分布相似的结论,即:从草甸草原-黑钙土、典型草原-栗钙土到荒漠草原-棕钙土,土壤有机碳在土壤中的积累表现为黑钙土>栗钙土>棕钙土,且同一土壤类型的不同剖面层次上,土壤有机碳含量也差异较大,表层 0~1cm 土壤有机碳含量是深层土壤(80~100cm)的 4~10 倍^[45]。

表 3 我国北方地区部分草原土壤碳密度比较

Tab. 3 The comparison of soil organic carbon density in Northern China

| 土壤类型 | 厚度/cm | 容重/ (g/cm ²) | 碳密度/ (kg/m ²) |
|-------|-------|--------------------------|---------------------------|
| 黑 钙 土 | 115 | 1. 29 | 17. 99 |
| 暗栗钙土 | 112 | 1. 24 | 13. 61 |
| 栗 钙 土 | 129 | 1. 24 | 9. 37 |
| 淡栗钙土 | 123 | 1. 24 | 7. 25 |
| 棕 钙 土 | 95 | 1. 40 | 4. 86 |

注: 资料来源于文献 [44]

2.3.2 影响土壤碳库的主要因素

对于影响土壤有机碳含量的主要因子, 大体包括气候及其所决定的植物种类组成、土壤微生物的数量与分布以及开垦、放牧等人类活动等。

气候因子主要是通过影响植被进而影响进入土壤的有机质的数量, 同时气候因子又对土壤有机质的分解产生影响。据王淑平等人对包括东北草甸草原、内蒙古高原草甸草原、典型草原、荒漠草原在内的 IGBP 中国东北样带 (NECT) 的研究表明: 土壤有机碳含量与降水量之间呈显著正相关, 温度对有机碳的影响较复杂, 适宜的温度有利于土壤有机碳的积累, 否则对有机碳的积累具有负效应^[46]; 此外, 由气候等因素影响的植物种类组成对土壤有机碳贮量也有着重要的影响, 陈佐忠、王艳芬等在研究中发现植物种类组成可通过影响植物残体分解速率进而来影响土壤有机碳的含量及分布, 并对草甸草原、典型草原、荒漠草原植物种类组成与土壤有机质含量的关系作了详细的分析^[45]; 土壤微生物与土壤有机碳之间的关系则比较复杂, 土壤有机碳的固定与分解都离不开微生物的参与, 土壤微生物对土壤有机碳影响的方向主要取决于微生物的种类组成与数量关系。

对于草地开垦和放牧, 草地开垦为农田几乎在所有的情况下都会导致生态系统有机碳含量的降低^[45]。一方面草地开垦过程中会导致草地土壤有机碳的大量释放, 开垦为农田后, 收获作物时大量地上部分被移走从而大大减少了植被对草地土壤的归还量, 同时农田的烧荒措施也使固定在植被中的碳全部释放到大气中; 另一方面, 开垦使得土壤的温度和湿度条件也得到了改善, 在一定程度上促进了土壤的呼吸作用, 加速了土壤有机质的分解, 许多研究表明: 草地开垦为农田会使土壤碳素总量损失约 30% ~ 50%^[47]。而过度放牧是影响草地生态系统土壤有机碳含量的最主要因素。过度放牧同草地开垦对土壤有机碳的影响一样, 一方面由于牲畜采食减少了植物向土壤的碳素归还量, 据李永宏等人 (1992) 对内蒙古羊草草原的研究, 过度放牧导致初级生产力降低约 60%^[48], 另一方面, 过度放牧由于其对土壤物理化学性质的干扰将会加速土壤的呼吸作用, 造成土壤有机碳的损失。据研究, 内蒙古锡林河流域羊草草原 40 年来由于过度放牧已使土壤表层土壤 (0~ 20cm) 的碳贮量降低了 12. 4%^[49]。

2.4 草原含碳温室气体通量研究

CO₂、CH₄ 等温室气体的吸收与排放是近年来全球变化研究关注的热点之一, 也是草原生态系统碳循环研究最核心的研究内容, 它是自然状态下草地土壤碳素输出的主要环节。

2.4.1 温室气体通量的原位测定

我国对于草地温室气体通量的研究较国际上的相关研究要稍晚些, 同时也较国内对于

森林生态系统的相关研究开始要迟。但近几年来随着相关科研项目的启动,陆续获得了许多有关我国主要草地类型土壤温室气体通量日变化和季节变化动态的野外试验数据。杜睿在 1998 年~1999 年利用透明静态箱法研究了内蒙古天然羊草草原的 CO_2 日变化规律,并给出了羊草草原在不同生长发育期的日排放总量。研究得出:天然羊草草原在抽穗前期、开花期、结实期以及果后营养期 CO_2 日排放总量分别为 1.2、4.0、6.2、4.8 $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$, 日变化规律表现为 CO_2 排放高峰值在夜晚出现,白天则表现为负通量^[50],而崔骁勇在 1997 年利用了类似的方法对内蒙锡林河流域大针茅群落 CO_2 日变化规律研究则发现,土壤 CO_2 排放高峰出现在 13:00~17:00,最低值出现在夜间 2:00~4:00,表现为昼高夜低的特点^[51],这与董云社等人(2000)对内蒙羊草草原、张金霞等人(2001)对青海金露梅高寒草甸的研究结果十分吻合^[52,53],同时上述研究还进一步指出了 CO_2 通量日变化动态与气温和土壤温度日变化的正相关关系。对于土壤呼吸的季节变化规律,相关研究结果较多^[50,54,55],研究者对不同草地类型 CO_2 通量季节变化动态进行了各自的描述,这其中尽管各草地类型土壤呼吸的强度有所不同,峰值出现的时间也略有差别,但总的来说,各草地类型土壤呼吸的季节变化动态均表现为生长季高于非生长季,夏秋季呼吸强度较高,秋末、冬季与早春呼吸强度较低。此外,部分相关学者在研究土壤呼吸强度的同时,还对另一种主要含碳温室气体 CH_4 的日变化规律和季节变化规律进行了初步的探讨^[50,52,56~59],但目前的研究还是主要集中在内蒙锡林河流域及其附近地区,其它地区研究较少。已有的研究结果均表明天然草地生态系统是 CH_4 的吸收汇,同时多项研究也均得出了 CH_4 通量无明显的日变化和季节变化规律的结论,并且指出 CH_4 通量与诸环境因子单项指标的相关性均不显著,而对于各种水热因子如何协同配合并对 CH_4 通量进行影响则缺乏深入研究。

2.4.2 草地土壤温室气体通量影响因素研究

环境因子是自然状态下影响土壤温室气体排放的主要因素。总的来说,影响土壤呼吸的环境因子主要包括气温、土壤温度、土壤水分、土壤有机质含量、土壤中微生物的数量、土壤初级生产力等。对于气温与土壤温度对土壤呼吸速率的影响,目前已有的研究结果均表明气温与土壤温度特别是土壤表层温度(0~20cm),由于其对土壤微生物生物化学反应速率影响较大,因此是影响土壤呼吸速率的主要因子,而对于土壤水分则不同的研究者对不同草原群落的研究结果略有差别。陈四清、崔骁勇、王妮等人分别对内蒙古锡林河流域大针茅群落、克氏针茅群落以及松嫩平原羊草群落的研究表明,土壤呼吸速率与土壤含水量相关较好,尤其是与土壤 0~20cm 土壤平均含水量相关最好^[55,60,61],土壤 10~20cm 土层的含水量可以解释土壤呼吸变异的 80% 以上^[55]。而对于内蒙古羊草群落、羊草-冷蒿群落、冷蒿群落、青海海北金露梅高寒灌丛草甸的研究则表明:土壤水分与土壤呼吸的相关性较弱^[51,53,54]。这是因为这些群落在观测期内土壤水分状况较好,土壤含水量不是土壤呼吸的主要限制因子。同时我们也由此可以推知,不仅是在不同草原群落间,同一群落在不同的年份,如多水年、平水年、旱年,土壤水分与土壤呼吸量的相关程度也是不同的,这也使得我们利用土壤呼吸与环境因子的相关关系进行土壤呼吸量的预测变得更为复杂。但更多的情况下,土壤呼吸速率还是主要取决于温度与水分的配合情况,据李凌浩等对内蒙羊草群落的研究表明,土壤年呼吸量的总变异中有 70% 是由土壤温度和土壤含水量的协同效应引起的^[47]。此外,由于土壤呼吸主要是根系自养呼吸作用以及土壤微生物对有机质分解的异养呼吸作用,因此,土壤呼吸与土壤中微生物量和有机质含量相关关系密切,与根系生物

量也存在一定的相关性^[53], 但土壤呼吸与根系生物量的变化趋势并不完全一致, 更多的是取决于与其他环境因素的配合情况。

放牧、农垦对草地温室气体通量的影响目前的研究还基本上处在对观测结果的简单数值分析上^[56, 58, 59, 63], 对影响过程中主要物理、化学和生物机制的变化以及不同影响过程中的主导因子仍不十分了解, 且各学者对不同草原群落的研究结果也不尽相同, 甚至得到完全相反的结论。目前较为统一的研究结论是放牧不会改变土壤对于 CO_2 、 CH_4 的源汇性质, 放牧将会减弱土壤作为大气 CH_4 汇的功能, 农垦将会加大土壤 CO_2 的源强度, 但放牧对于 CO_2 源强度、农垦对于 CH_4 汇强度究竟是起到加强还是减弱的作用^[58, 59, 63], 目前的研究结果还存在较大分歧。

3 问题与展望

从以上的综述中可以看出, 我国的草地生态系统碳循环研究基本上还处于起步阶段, 以往的许多研究虽然为目前的碳循环研究奠定了一定的基础, 但其中的部分研究成果与碳循环的结合并不十分紧密, 要想将其应用到碳循环的研究中还需补充许多研究内容。已有的有针对性的碳循环研究也存在诸多薄弱环节, 综合起来, 我国草地碳循环研究今后应在以下几个方面进一步加强:

(1) 从整体和系统的角度来研究碳元素的循环和平衡。在已有的研究中, 对于植物、凋落物、土壤的研究多是局限于各个部分本身的时间变化动态、空间分布以及周围环境因素对其的影响研究, 各部分研究相对独立。而对于碳元素各个贮存库间的定量迁移、转化关系仍很少涉及, 缺乏整个系统的综合研究, 无法建立系统内部以及系统与大气间的动态循环模式。

(2) 进一步加强对影响草地碳源汇的物理、化学和生物过程的研究, 补充和完善草地生态系统的碳循环机制, 尤其是加强目前薄弱部分的细节研究, 减少循环研究过程中的不确定性。如: 活根与死根、土壤呼吸与根系呼吸的区分, 植物呼吸与凋落物呼吸的定量测定、土壤不同形态碳的垂直分布规律、测定期间土壤微生物区系组成的时空变化动态以及非生长季(冬春季)与生长季影响机制的异同等。

(3) 从不同的时间尺度和空间区域来探讨草地碳循环过程和强度, 加强草地碳源汇季节变化动态和区域分异的对比定位观测, 同时加强机制研究中的多因子综合评价, 增加研究和预测结果的可靠性。从前面对草地生态系统各个碳库已有的研究结果中我们可以看出, 无论是植物碳库的固碳能力还是土壤碳库的碳密度在不同草地群落间均存在较大差异, 并且不同环境因子在不同区域以及不同草地群落不同生长阶段影响程度与影响方向也有所不同。而目前我国草地碳循环过程的研究在地域范围上仍只局限于内蒙古和青藏高原的部分地区, 研究时段也主要集中于植物的旺盛生长季, 因此, 要想准确估计整个草地系统的碳源汇贡献就必须对不同区域不同草地群落类型进行详细的野外试验研究, 以扩充我国草地生态系统碳循环研究的数据基础。

(4) 加强对未来气候变化下碳循环过程和强度的预测性研究, 探讨不同人类活动强度影响下碳循环过程的可能变化, 定量分析气候变化、土地利用变化、人类活动强度与草地生态系统碳收支的相互作用机制, 以便确定合适的人类活动强度, 实现碳元素减排增汇与

社会经济的共同持续发展, 实现草地碳循环研究的最终目标。

(5) 制定统一的野外监测方法和试验技术, 以利于不同研究者研究数据结果的比较和整合。目前已有的相关研究多相对独立进行, 在研究方法、测定项目以及研究深度上均存在一定的差异, 从而导致数据间的可比性较差, 全国大尺度范围的数据汇总和耦合存在相当大的困难, 不利于对我国整个草地生态系统碳源汇功能的综合评估。

参考文献

- [1] 王凯雄, 姚铭, 许利君. 全球变化研究热点- 碳循环. 浙江大学学报, 2001, 27(5): 473~ 478.
- [2] 高峰, 孙成权, 曲建升. 全球变化研究的新认识—— IPCC 第三次气候评价报告第一工作组概要. 地球科学进展, 2001, 16(3): 442~ 445.
- [3] 刘慧, 成升魁, 张雷. 人类经济活动影响碳排放的国际研究动态. 地理科学进展, 2002, 21(5): 420~ 429.
- [4] 刘东生. 全球变化和可持续发展科学. 地学前缘, 2002, 9(1): 1~ 8.
- [5] 杨昕, 王明星. 陆地碳循环研究中若干问题的评述. 地球科学进展, 2001, 16(3): 427~ 435.
- [6] 陶波, 葛全胜, 李克让等. 陆地生态系统碳循环研究进展. 地理研究, 2001, 20(5): 564~ 574.
- [7] 李博, 雍世鹏, 李瑶等. 中国的草原. 北京: 科学出版社, 1990.
- [8] 陈佐忠, 汪诗平主编. 中国典型草原生态系统. 北京: 科学出版社, 2000.
- [9] 徐柱. 面向 21 世纪的中国草地资源. 中国草地, 1998, (5): 1~ 8.
- [10] 温明章. 草地资源开发在我国生态农业中的地位及前景. 农业环境与发展, 1996, 13(2): 14~ 18.
- [11] 李凌浩, 陈佐忠. 草地生态系统碳循环及其对全球变化的响应, I 碳循环的分室模型. 碳输入与贮存. 植物学通报, 1998, 15(2): 14~ 22.
- [12] 张新时. 草地的生态经济功能及其范式. 科技导报, 2000, (8): 3~ 5.
- [13] 梁福源, 宋林华, 王静. 土壤 CO_2 浓度昼夜变化及其对土壤 CO_2 排放量的影响. 地理科学进展, 2003, 22(2): 170~ 176.
- [14] 方精云, 朴世龙, 赵淑清. CO_2 失汇与北半球中高纬度陆地生态系统的碳汇. 植物生态学报, 2001, 25(5): 594~ 602.
- [15] 韩国栋. 降水量和气温对小针茅草原植物群落初级生产力的影响. 内蒙古大学学报, 2002, 33(1): 83~ 88.
- [16] 姜恕, 戚秋慧, 孔德珍. 羊草草原群落和大针茅草原群落生物量的初步研究. 见: 内蒙古草原生态系统定位站. 草地生态系统研究第 1 集. 北京: 科学出版社, 1985. 12~ 23.
- [17] 朱志诚, 贾东林, 岳明. 黄土高原中部草地群落生产. 西北大学学报, 1998, 28(6): 536~ 539.
- [18] 倪红伟, 张兴, 贾利等. 三江平原典型草甸小叶樟种群地上生物量动态. 植物研究, 1998, 18(3): 328~ 335.
- [19] 白永飞, 许志信, 李德新. 羊草草原群落生物量季节动态研究. 中国草地, 1994, 3: 1~ 5.
- [20] 王启基, 周兴民, 张宴青等. 高寒小嵩草草原化草甸植物群落结构特征及其生物量. 植物生态学报, 1995, 19(3): 225~ 235.
- [21] 杨福国. 矮嵩草草甸生物量季节动态与年间动态. 中国科学院西北高原研究所编. 高寒草甸生态系统国际学术讨论会论文集. 北京: 科学出版社, 1988. 61~ 71.
- [22] 李文华, 周兴民主编. 青藏高原生态系统及优化利用方式. 广州: 广东科技出版社, 1998.
- [23] 胡自治, 孙吉雄, 李洋等. 甘肃天祝主要高山草地的生物量及光能利用率. 植物生态学报, 1994, 18(2): 121~ 131.
- [24] 上官铁梁, 贾志力, 张红等. 汾河河漫滩三种草本植物群落的生物量研究. 草业科学, 2000, 17(6): 39~ 45.
- [25] 黄德华, 陈佐忠, 张鸿芳. 内蒙古锡林河中游不同类型草原根系生物量的比较研究. 植物学集刊, 1987, 第二集, 67~ 81.
- [26] 黄德华, 陈佐忠, 张鸿芳. 贝加尔针茅、克氏针茅、线叶菊草原地下生物量的比较研究. 见: 内蒙古草原生态系统定位站. 草地生态系统研究第 2 集. 北京: 科学出版社, 1988. 122~ 131.
- [27] 林伟宏, 张福锁, 白克智. 大气 CO_2 浓度升高对植物根际微生物系统的影响. 科学通报, 1999, 44(16): 1690~ 1696.
- [28] 黄富祥, 高琼, 傅德山等. 内蒙古鄂尔多斯高原典型草原百里香- 本氏针茅草地地上生物量对气候响应动态回归分析. 生态学报, 2001, 21(8): 1339~ 1346.
- [29] 刘钟龄, 李忠厚. 内蒙古羊草+ 大针茅草原植被生产力的研究 II, 种群地上现存生物量的研究. 干旱区资源与环境,

- 1988, 2(1): 1~ 19.
- [30] 马树岐 内蒙古大针茅、克氏针茅草原植物地上产量的分析 干旱区资源与环境, 1987, 1(2): 95~ 105.
- [31] 王义凤, 姜恕 干旱气候对大针茅草原的群落结构和地上部分生物量的影响 植物生态学和地植物学丛刊, 1982, 6(4): 333~ 338.
- [32] 张娜, 梁一民 干旱气候对白羊草群落土壤水分和地上部生长的初步观察 生态学报, 2000, 20(6): 964~ 970.
- [33] 钟海民, 杨福国, 陆国泉等 矮蒿草高寒草甸地上生物量与气候因子的关系 中国草地, 1991, (4): 7~ 11.
- [34] 王仁忠 干扰对草地生态系统生物多样性的影响 东北师大学报自然科学版, 1996, (3): 112~ 116.
- [35] 李政海, 鲍雅静, 寇香玉 不同人为干扰对草原植物与群落净初级生产力的影响 内蒙古大学学报, 1999, 30(6): 745~ 750.
- [36] 汪诗平, 王艳芬, 李永宏等 不同放牧率对草原牧草再生性能和地上净初级生产力的影响 草地学报, 1998, 6(4): 275~ 281.
- [37] 黄德华, 尹承军, 陈佐忠 内蒙古典型草原凋落物形成、分解与积累 见: 内蒙古草原生态系统定位站 草地生态系统研究第5集 北京: 科学出版社, 1997. 179~ 189.
- [38] 郭继勋, 祝廷成 羊草草甸枯枝落叶的分解、积累与营养物质含量动态 植物生态学和地植物学学报, 1988, 12(3): 197~ 203.
- [39] 郭继勋, 祝廷成 羊草草原生态系统的分解者与枯枝落叶分解的研究 草业学报, 1994, 3(1): 13~ 17.
- [40] 钟华平, 杜占池 川东中高山地区红三叶、鸭茅凋落物分解速率与气候因子之间的定量关系 中国草地, 1997, (6): 29~ 32.
- [41] 裴浩, 李云鹏, 敖艳红 草地枯草被与土壤含水量 中国草地, 1996, (1): 36~ 38.
- [42] 郭继勋 枯枝落叶对草原生态环境的影响 中国草地, 1989, (6): 17~ 20.
- [43] 金峰, 杨浩, 赵其国 土壤有机碳储量及影响因素研究进展 土壤, 2000, (1): 11~ 17.
- [44] 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 地理学报, 2000, 55(5): 533~ 544.
- [45] 王艳芬, 陈佐忠 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响 植物生态学报, 1998, 22(6): 545~ 551.
- [46] 王淑平, 周广胜, 吕育财等 中国东北样带(NECT)土壤碳、氮、磷的梯度分布及其与气候因子的关系 植物生态学报, 2002, 26(5): 513~ 517.
- [47] 李凌浩 土地利用变化对草原生态系统土壤碳贮量的影响 植物生态学报, 1998, 22(4): 300~ 302.
- [48] 李永宏 放牧空间梯度上和恢复演替时间梯度上羊草草原的群落特征 见: 内蒙古草原生态系统定位站 草原生态系统研究第4集 北京: 科学出版, 1992 1~ 8.
- [49] Li L, Chen Z Changes in soil carbon storage due to over-grazing in *Leymus chinensis* steppe in the Xilin river basin of Inner Mongolia Journal of Environmental Sciences, 1997, 9(4): 486~ 490.
- [50] 杜睿 内蒙古草原土壤-植被-大气间主要温室气体(N_2O 、 CH_4 和 CO_2) 交换过程的研究 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1999.
- [51] 崔晓勇, 王艳芬, 杜占池 内蒙古典型草原主要植物群落土壤呼吸的初步研究 草地学报, 1999, 7(3): 245~ 250.
- [52] 董云社, 章申, 齐玉春等 内蒙古典型草地 CO_2 、 N_2O 、 CH_4 通量的同时观测 科学通报, 2000, 45(3): 318~ 322.
- [53] 张金霞, 曹广民, 周党卫等 退化草地暗沃寒冻锥形土 CO_2 释放的日变化和季节变化动态 土壤学报, 2001, 38(1): 31~ 40.
- [54] 李凌浩, 王其兵, 白永飞等 锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子的研究 植物生态学报, 2000, 24(6): 680~ 686.
- [55] 崔晓勇, 陈四清, 陈佐忠 大针茅典型草原土壤排放规律的研究 应用生态学报, 2000, 11(3): 390~ 394.
- [56] 王艳芬, 纪宝明, 陈佐忠等 锡林河流域放牧条件下草原 CH_4 通量研究结果初报 植物生态学报, 2000, 24(6): 693~ 696.
- [57] 王庚辰, 杜睿, 王艳芬等 内蒙古草原 N_2O 和 CH_4 排放通量及其季节变化特征研究 草地学报, 1998, 6(4): 306~ 311.
- [58] 王跃思, 纪宝明, 黄耀等 农垦和放牧对内蒙古草原 N_2O 、 CO_2 排放和 CH_4 吸收的影响 2001, 22(6): 7~ 13.
- [59] 李玉娥, 林而达 天然草地利用方式改变对土壤排放 CO_2 和吸收 CH_4 的影响 农村生态环境, 2000, 16(2):

14~ 16, 44.

- [60] 陈四清, 崔晓勇, 周广胜等 内蒙古锡林河流域大针茅草原土壤呼吸和凋落物分解的CO₂ 排放速率研究 植物学报, 1999, 41(6): 645~ 650.
- [61] 王妮, 郭继勋 东北松嫩平原羊草群落的土壤呼吸与枯枝落叶分解释放CO₂ 贡献量 生态学报, 2002, 22(5): 655~ 660.
- [62] 李凌浩, 陈佐忠 草地群落的土壤呼吸 生态学杂志, 1998, 17(4): 45~ 51.
- [63] 张金霞, 曹广民, 周党卫等 放牧强度对高寒灌丛草甸土壤CO₂ 释放速率的影响 草地学报, 2001, 9(3): 193~ 190.

The Progress in the Carbon Cycle Researches in Grassland Ecosystem in China

Q I Yuchun¹, DONG Yunshe¹, GENG Yuanbo¹, YANG Xiaohong¹, GENG Huili²

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CA S, Beijing 100101, China

2. College of Resource and Environment, Northwestern Sci-tech U niversity of
Agriculture and Forestry, Yangling 712100)

Abstract: Carbon is one of the most important life elements on the earth. It distributes widely in the atmosphere, biosphere, hydrosphere and lithosphere. Together with the exchange of the substance and energy, the carbon element is transformed among different earth layers, as constitutes the most important biogeochemical cycle process of the earth. Atmosphere, ocean, terrestrial ecosystem and lithosphere are four main carbon pools. Among these carbon pools, the terrestrial ecosystem has the biggest uncertainty because of the complexity of underlying surface and the human activities. Study on the carbon cycle of the terrestrial ecosystem has become the focus of global change research.

As one of the important parts of terrestrial ecosystem, grassland ecosystem occupies particular eco-geographical place and has special biogeochemical cycling process, which make it important in the study of the terrestrial ecosystem carbon cycle and the sustainable development of eco-environment. In this paper, the importance of the carbon cycle in grassland ecosystem was discussed. Then, the research results of carbon cycle in the grassland ecosystem in China were summarized and analyzed, including the plant, the litter fall, the soil carbon pool and the greenhouse gases flux and so on. Additionally, some issues unsettled in grassland carbon cycle and the related research emphases in the future were put forward.

Key words: grassland; carbon cycle; carbon pool; greenhouse gas