

DOI: 10.11686/cyxb2015579

<http://cyxb.lzu.edu.cn>

周贵尧, 吴沿友. 放牧对草原生态系统不同气候区碳库影响的 Meta 分析. 草业学报, 2016, 25(10): 1-10.

ZHOU Gui-Yao, WU Yan-You. Meta-analysis of effects of grazing on carbon pools in grassland ecosystems in different climatic regions. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(10): 1-10.

## 放牧对草原生态系统不同气候区 碳库影响的 Meta 分析

周贵尧<sup>1,2</sup>, 吴沿友<sup>1,3\*</sup>

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 江苏 镇江 212013; 2. 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海 200241;  
3. 中国科学院地球化学研究所, 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002)

**摘要:** 草原生态系统碳库变化对全球碳平衡有着重要作用。近年来, 尽管在全球尺度上开展了大量关于放牧对草原生态系统碳循环影响的独立研究, 但放牧活动对草原生态系统不同碳库影响的一般规律认识仍然存在广泛争议。本研究采用整合分析方法对全球 105 篇关于放牧干扰对草原生态系统碳循环影响的文献进行系统研究。结果表明, 放牧活动显著减少了植物地上和地下以及相关碳库的大小, 而对土壤呼吸通量有明显的促进作用; 不同类型碳库在不同气候带上响应存在明显差别, 放牧对半湿润/湿润区地下植物碳库和土壤碳库减少幅度分别为 15.21% 和 15.35%, 显著高于干旱/半干旱地区响应比; 植物地上部分碳库与土壤碳库之间没有显著关系, 而植物地下部分碳库与土壤碳库之间呈显著正相关; 土壤碳库响应比与年平均降水量呈正相关关系, 而与年平均温度呈显著负相关; 植物地下碳库响应比与年平均降水量和年平均温度均呈现显著负相关关系; 放牧活动不仅显著地减少了植物地上和地下以及相关碳库的大小, 还改变了植物的碳库分配。

**关键词:** 放牧活动; 草地生态系统; 地下碳循环; Meta 分析

### \* Meta-analysis of effects of grazing on carbon pools in grassland ecosystems in different climatic regions

ZHOU Gui-Yao<sup>1,2</sup>, WU Yan-You<sup>1,3\*</sup>

1. Key Laboratory of Modern Agriculture Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2 School of Ecological and Environmental Science of East China Normal university, Shanghai 200241, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550002, China

**Abstract:** Changes in carbon stocks in grassland ecosystems are an important factor in the global carbon balance. Although many individual studies have been conducted around the world on the effects of grazing on carbon cycling, there is still some controversy regarding the general effects of livestock grazing on different carbon pools. In this study, 105 individual studies on the effects of grazing on carbon cycling were subjected to a meta-analysis. Our results revealed several general trends, which can be summarized as follows. Grazing activities significantly decrease the size of above-belowground and related carbon pools, but increase soil respiration. The types of carbon pools vary significantly among climate types. Grazing activities decrease the size of plant below-

\* 收稿日期: 2015-12-29; 改回日期: 2016-02-16

基金项目: 中国科学院“百人计划”择优项目, 国家自然科学基金(31070365)和江苏省高校优势学科[苏政办(2014)37号]资助。

作者简介: 周贵尧(1991-), 男, 四川雅安人, 在读硕士。E-mail: jdzhouguyiao@163.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: wuyanyou@mail.gyig.ac.cn

ground carbon pools and soil carbon pools in semi-humid/humid climate regions (by 15.21% and 15.35%, respectively), but have smaller effects on these carbon pools in arid/semi-arid climate regions. There is no significant relationship between plant aboveground carbon pools and soil carbon pools, but there is a significant positive correlation between plant belowground carbon pools and soil carbon pools. The response ratio of soil carbon pools is positively correlated with mean annual precipitation, and significantly negatively correlated with mean annual temperature. Both mean annual precipitation and mean annual temperature are significantly negatively correlated with the response of plant belowground carbon pools. Grazing activities not only significantly decrease the size of plant aboveground and belowground carbon pools, but also alter carbon distribution in the plant.

**Key words:** grazing activates; grassland ecosystem; belowground carbon pools; Meta-analysis

全球草地面积约为 5000 万  $\text{km}^2$ , 占全球陆地总面积的 33.5% 左右<sup>[1]</sup>。作为陆地生态系统中的一个重要子系统, 草原生态系统在全球变化及生态系统功能等方面发挥着重要的作用<sup>[2-3]</sup>。由于人类活动加剧和全球气候变化的共同作用, 全球草原生态系统正遭受着不同程度的破坏, 其中, 仅中国正处于不同程度退化之中各类型的草地就达 90% 左右<sup>[4]</sup>。退化的草地, 不仅严重威胁着草原生态系统的稳定性和生物多样性, 同时对整个陆地生态系统的过程和功能也产生着重要影响<sup>[5-7]</sup>。对于这些退化草地的恢复和重建, 其关键点和难点就在于土壤的恢复, 而土壤恢复的重点在于对草原生态系统碳循环过程的系统性认识。碳元素的生物地球化学循环过程作为陆地生态系统最基本的物质循环过程, 对全球变化及人类活动存在敏感响应, 并且与氮等其他元素的生物地球化学循环过程密切耦合<sup>[2]</sup>。迄今为止, 对放牧干扰下草原生态系统地上碳循环过程取得了相对一致性的认识, 但由于地下碳过程的复杂性和高度异质性, 至今未有对草地生态系统地下碳过程的共识性报道。因此, 从全球尺度上整合探讨放牧干扰对草原生态系统不同碳过程的一般性规律, 对于评价草原生态系统在陆地生态系统碳收支平衡中的作用、草原生态系统对全球变化的响应以及科学管理和利用草原生态系统具有重要作用。

气候变化、人类活动和生态系统的反应方面的研究一直是一个热点和重大问题<sup>[8]</sup>。近二十年有数千篇关于草原生态系统碳循环的实验性文章发表, 相关综述也有上百篇左右发表, 但多数综述类文章也仅仅停留在定性描述水平上。在影响放牧对草原生态系统碳循环过程的诸多因素中, 气候通过调控物理和生物环境, 直接或者间接作用制约着生态系统碳循环对放牧活动的响应<sup>[9]</sup>。不同的单个研究对不同气候区草原生态系统碳循环过程的结论差异很大, 例如, Bai 等<sup>[10]</sup>在中蒙过渡带的半干旱气候区上发现放牧活动显著减少了 3 种草原类型的土壤碳库, 高永恒<sup>[11]</sup>在位于湿润气候区的红原县发现, 放牧干扰下植物根系生物量碳显著高于禁牧草地。而 Bagchi 等<sup>[12]</sup>表明, 放牧在半湿润区对土壤固碳能力没有明显的改变。因此, 在评估草原生态系统碳循环过程中, 全球尺度的反馈比独立个体研究重要得多。因此, 需要充分整合这些单个研究, 从而找到普遍的结论并发现差异, 对于解释全球碳平衡具有重要作用。

整合分析(Meta-analysis)正是这样一种专门对单个研究进行统计综合的技术<sup>[13]</sup>, 自提出以来, 整合分析方法已在社会学、经济学、心理学、教育学、医学领域获得充分的应用和发展<sup>[8]</sup>, 并且从 20 世纪 90 年代初成功引入到生态学和进化生物学领域。近年来, 整合分析方法发展迅速, 并且在全球变化生态学、入侵生态学、功能生态学等热点问题中表现出了很高的应用价值, 但是整合分析方法在国内, 尤其在草原生态碳动态研究中还鲜有报道。基于此, 本研究采用整合分析方法, 着重探讨如下两个问题: (1) 放牧活动对地下碳循环的全球格局是什么? (2) 环境条件是否会影响到或者改变草原生态系统碳对放牧活动的响应?

## 1 材料与方法

### 1.1 整合分析方法

为了系统比较分析碳循环相关参数在放牧组和对照组之间的差异, 本研究主要采用了 Hedges 等<sup>[13]</sup>和 Luo 等<sup>[14]</sup>使用的方法。对于选择的参数, 使用响应比(RR, 实验组和对照组的平均值比值的对数值)反映实验处理的

影响效应,计算公式具体如下:

$$RR = \ln \frac{X_t}{X_c} = \ln(X_t) - \ln(X_c)$$

式中,  $X_t$  和  $X_c$  分别为实验组和对照组的平均值。如果  $RR$  等于 0, 说明放牧活动并未引起实验组和对照组参数之间的差异, 如果  $RR$  小于 0, 说明放牧活动对所选参数产生了负效应, 如果  $RR$  大于 0, 则反映出放牧活动对所选参数产生了正效应。而方差 ( $v$ ) 采用以下公式:

$$v = \frac{S_t^2}{n_t X_t^2} + \frac{S_c^2}{n_c X_c^2}$$

其中,  $n_t$  和  $n_c$  分别为放牧组和对照组的样本量,  $S_t$  和  $S_c$  分别为放牧组和对照组所选变量的标准差。

在整合分析中, 通过单个的  $RR_{ij}$  ( $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, ki$ ) 值加权计算出所有研究的加权响应比值 ( $RR_{++}$ ), 具有更小的变异性 and 较高的精确性, 从而能够提高统计精度。加权响应比采用如下公式进行计算:

$$RR_{++} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k W_{ij} RR_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k W_{ij}}$$

其中,  $k$  是第  $i$  个值的组别数, 而  $m$  为级别组数, 如生态系统类型, 气候类型、放牧密度类型等。

标准误差采用如下公式计算:

$$S(RR_{++}) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k W_{ij}}}$$

其中,  $W_{ij}$  是整合效应大小的加权系数, 是样方差的倒数, 即:

$$W_{ij} = \frac{1}{v}$$

为了进一步反映不同研究之间的变异性, 本文利用高斯函数拟合出不同参数的频度分布。所采用的拟合分布方程为:

$$y = \alpha \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

式中,  $x$  为  $RR$  各组中的平均值,  $y$  是参数出现的频度 (每组  $RR$  的数量),  $\alpha$  是当  $x = \mu$  时,  $RR$  的理论预期值, 而  $\mu$  和  $\sigma^2$  分别是响应比  $RR$  高斯分布的平均值以及变异系数,  $e(2.718282)$  是自然常数。此外, 本研究采用  $[\exp(RR_{++}) - 1] \times 100\%$  公式计算关注参数响应比的改变百分比值。

## 1.2 数据来源与数据库建立

本文通过 Web of Science (1900—2014) 以及中国知网数据库, 数据搜集截止日期为 2014 年 12 月。初步从大约 2500 篇文献中搜索出放牧对草原生态系统碳循环影响的相关文献。通过仔细分析文献的研究目的、研究方法和研究结果, 同时结合本次研究目的, 避免在数据取舍与搜集过程中出现遗漏和偏差, 设立了 5 条数据的搜集筛选标准: (1) 实验方式为野外实验, 同时设置有实验组 (放牧) 和对照组, 土壤碳库参数测定范围均在地下 0~100 cm 之间; (2) 在野外实验中, 实验组和对照组必须在实验场所、植被覆盖类型、土壤质地以及气候特征等方面保持一致; (3) 为避免因短期实验带来的不确定性, 实验时间至少在一年以上; (4) 实验对象为草原生态系统, 同时放牧类型、放牧持续时间和土层深度等必须严格标明, 实验组和对照组中与碳循环相关的所有参数的测定必须在相同的时间和空间尺度上获得; (5) 实验组和对照组中与碳循环相关的参数的平均值、标准差以及样本量能够直接从图、表或者文字中直接进行提取, 或者以上数据可以直接从文献中通过计算而获得。

通过筛选, 最终确定了 105 篇与草原生态系统碳循环相关的文献 (图 1)。结合筛选出的文献, 建立碳循环分析数据库。结合研究目的, 本文中不同碳库数据库主要包括植物地上部分碳库 (APCP, above-ground plant carbon pools)、植物地上生物量库 (ABP, above-ground biomass pool)、植物地下部分碳库 (BPCP, below-ground plant carbon pools)、植物地下生物量库 (BBP)、凋落物碳库 (LCP, litter carbon pools)、土壤碳库 (SCP, soil carbon pools)、微生物碳库 (MBC, microbial carbon pools) 及土壤呼吸通量 ( $R_s$ , soil respiration) 等 6 个库。同时,

在数据库中,我们也详细记录了所选实验点的纬度(latitude)、经度(longitude)、年平均温度(MAT, mean annual temprature)以及年平均降雨量(MAP, mean annual precipitation)。如果所选参考文献中没有给出实验点的年平均降水和年平均温度信息时,根据实验点的经纬坐标信息,通过全球气候数据库(<http://www.worldclim.org/>)直接进行查询获得。同时,结合研究需要,本研究将年平均降雨量 $<400$  mm的区域定义为干旱/半干旱区,将年平均降雨量 $\geq 400$  mm的区域定义为半湿润/湿润区。

### 1.3 统计分析

与碳循环相关的6个参数对放牧的响应特征,不同参数之间的响应频率分布直方图以及年平均温度、年平均降水与土壤碳库和植物地下部分碳库之间关系,土壤碳库与植物地上部分和地下部分碳库之间的关系均采用 Sigmaplot 10.0 进行分析绘图;放牧干扰下不同碳库与环境变量之间的相关关系采用 SPSS 13.0 进行分析处理。显著性水平为  $P < 0.05$ 。

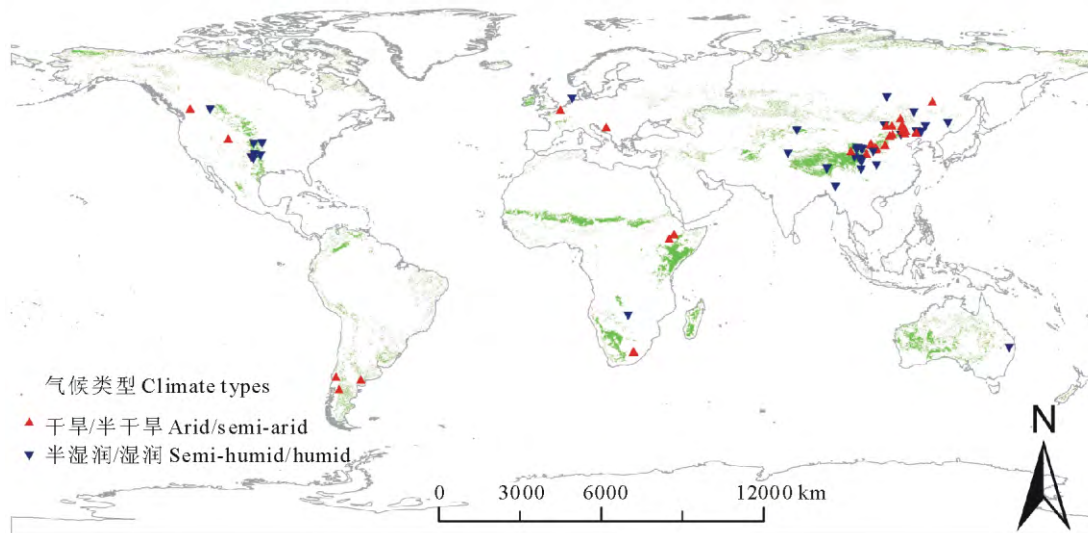


图1 研究点所处的位置分布

Fig. 1 Location distribution of study sites

## 2 结果与分析

### 2.1 放牧对碳循环的影响

从全球105个点的数据分析显示,放牧活动显著减少了植物地上部分碳库、凋落物碳库、土壤碳库、植物地下部分碳库以及微生物碳库,而对土壤呼吸具有显著的促进作用(图2,图3)。当放牧活动对草原生态系统产生干扰后,植物的地上部分碳库的减少量显著高于植物的地下部分,但植物地下部分生物量库减少幅度显著高于地上生物量库;土壤碳库对放牧活动的响应与植物地下碳库的响应总体上变化趋势相同;微生物碳库相对于其他地下碳库而言,对放牧活动敏感性相对较大。以上结果表明,放牧活动不仅显著减少了植物地上和地下以及相关碳库的大小,还改变了植物的碳库分配。

### 2.2 不同气候带碳循环的响应

表1为两种气候类型中与碳循环相关的6个参数对放牧响应变化的百分比,从表中我们可以看到,放牧活动在全球尺度上对干旱/半干旱地区植物地下部分碳库和土壤碳库分别减少了2.34%和9.15%,两者减少幅度均小于半湿润/湿润区。放牧活动对干旱/半干旱区凋落物碳库和微生物碳库的减少幅度均明显高于半湿润/湿润区,减幅分别为46.92%和41.05%。另外,放牧活动对土壤呼吸的增加量在不同的气候带上也存在明显差异,其中,干旱/半干旱区土壤呼吸增加量为1.13%,而半湿润/湿润地区土壤呼吸增加量高达10.42%。因此,综合这些信息来看,放牧活动对两种气候区不同碳库的影响作用机制如图4所示。

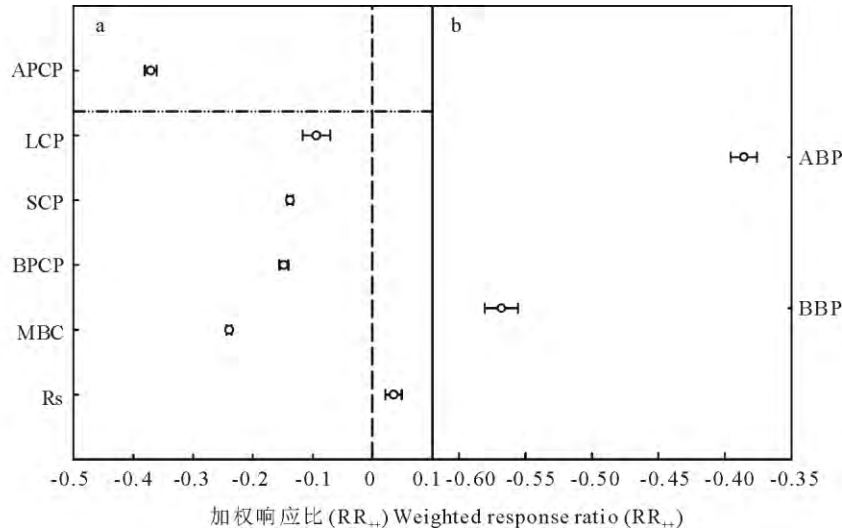


图 2 草原生态系统中与碳循环相关的参数对放牧活动的加权响应比

Fig. 2 The weighted response parameters related to carbon cycling of grassland ecosystem in response of grazing

a: 不同碳库; b: 不同生物量库。a: Different carbon pools; b: Different biomass pools. APCP: 植物地上部分碳库 Above-ground plant carbon pools; LCP: 凋落物碳库 Litter carbon pools; SCP: Soil carbon pools 土壤碳库; BPCP: 植物地下部分碳库 Below-ground plant carbon pools; MBC: 微生物碳库 Microbial carbon pools; Rs: 土壤呼吸通量 Soil respiration; ABP: 植物地上生物量库 Above-ground biomass pool; BBP: 植物地下生物量库 Below-ground biomass pool.

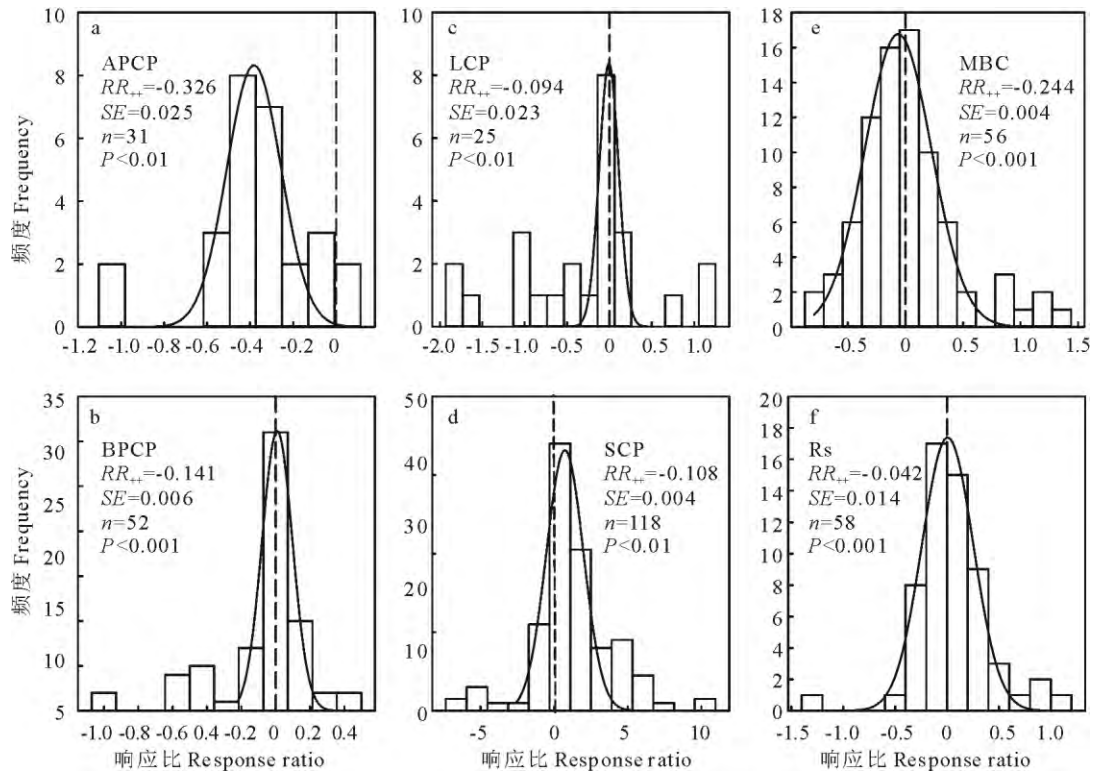


图 3 草原生态系统中与碳循环相关的 6 个参数对放牧活动的响应比的频度分布

Fig. 3 Frequency distributions of response ratios (RR) of 6 parameters related to carbon cycling of grassland ecosystem

### 2.3 环境条件对碳循环的调控

从全球 105 个点的数据分析中可知,放牧活动在全球尺度上显著降低草原生态系统的碳库(图 5,表 2)。通过对植物地上碳库和地下碳库与土壤碳库之间的关系,植物地上碳库、土壤碳库、植物地下部分碳库与纬度,年平

均降水和年平均温度之间的一元线性回归分析以及相关分析,结果表明:植物地上部分碳库与土壤碳库之间没有显著关系,而植物地下碳库与土壤碳库之间呈显著正相关;土壤碳库与年平均降水之间呈正相关,而与年平均温度呈显著负相关;植物地下碳库与年平均降水和年平均温度之间均呈现显著负相关关系。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 放牧对不同碳库的影响

放牧对草原生态系统植被群落结构、物种丰富度、生物量分配以及微环境等方面产生着重要影响<sup>[15-17]</sup>。本研究表明,放牧活动在全球尺度上明显减少了植物地上碳库以及地下各组分碳库的大小。这主要是因为:(1)植物生理生态影响。动物的取食或者践踏作用

表 1 两种气候类型中与碳循环相关的 6 个参数对放牧响应变化的百分比

Table 1 Percent of change value of 6 parameters related to carbon cycling in two climate types %

参数 Variable	干旱/半干旱区 改变值 Percent of change value in arid/semi-arid	样本量 Sample size	半湿润/湿润区 改变值 Percent of change value in semi-humid/humid	样本量 Sample size
APCP	-17.97±3.45	14	-42.22±2.4	17
BPCP	-2.34±1.76	7	-15.21±0.89	45
SCP	-9.15±0.48	62	-15.35±1.22	56
LCP	-46.92±7.72	14	-7.30±212	11
MBC	-41.05±0.56	36	-11.60±1.13	20
Rs	1.13±1.68	41	10.42±2.33	23

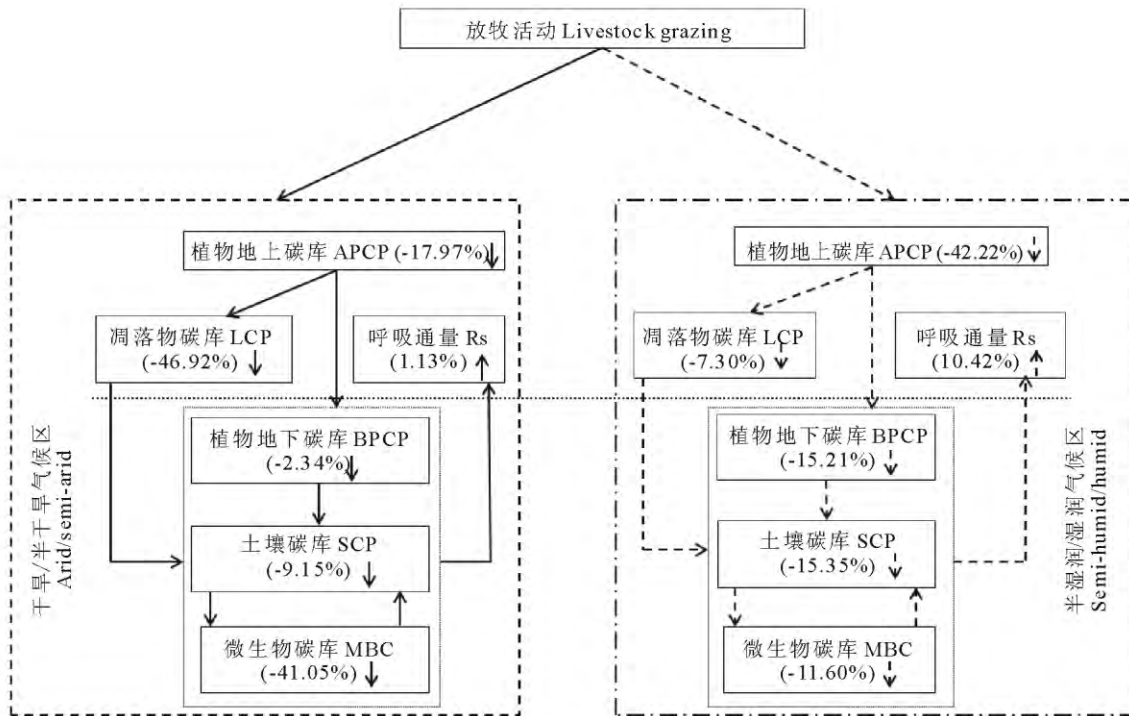


图 4 放牧对两个气候区不同碳库的影响过程机制

Fig. 4 Potential mechanisms of different carbon pools under two climate regions in response to livestock grazing

APCP: Above-ground plant carbon pools; LCP: Litter carbon pools; Rs: Soil respiration; BPCP: Below-ground plant carbon pools; SCP: Soil carbon pools; MBC: Microbial carbon pools.

改变了植物的群落结构,减少了植物的地上部分、表层凋落物以及根的生物量,降低了地上和地下碳的输入<sup>[18-20]</sup>;反复的放牧活动降低了植物的光合速率,同时改变了根的形态特征,如减小植物根长以及根表面积<sup>[21-22]</sup>,进而影响到地上地下光合碳的分配<sup>[23]</sup>; (2)土壤养分有效性的改变。放牧活动通过降低土壤养分的有效性减少了植物的地上和地下生物量,间接改变了植物地上地下生物量碳; (3)微生物活性改变。微生物活动能够加速植物残留物,如植物体,凋落物以及根等分解的分解过程,增加了土壤有机碳的丢失,而这种丢失效应与植物的残留物质量有关<sup>[24-25]</sup>,另外,减少的根系分泌物和凋落物能够降低有机质的输入,减少土壤中微生物碳含量。(4)物理环境

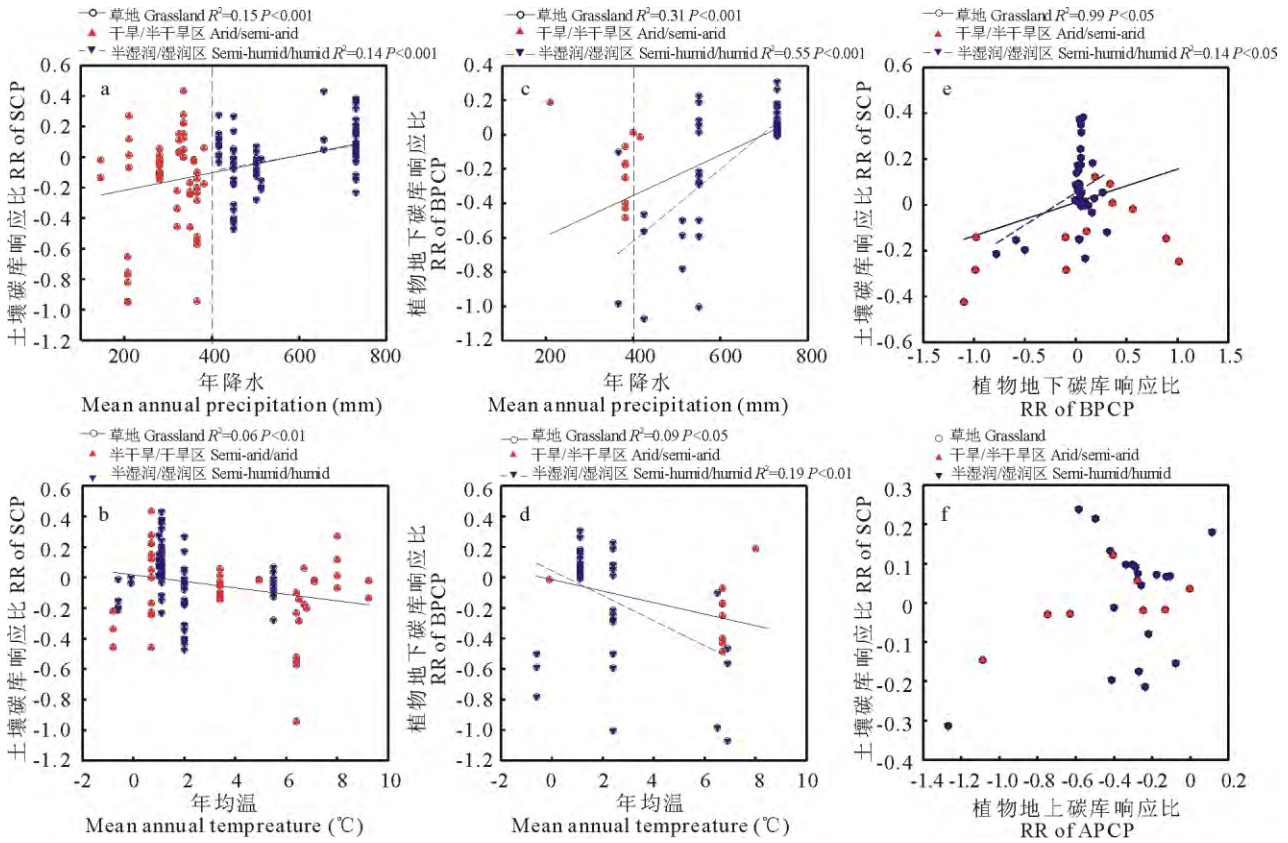


图 5 植物碳库、土壤碳库与环境变量之间关系

Fig. 5 Relationship between plant carbon pools, soil carbon pools and environmental variables

表 2 不同碳库与环境变量之间的相关系数

Table 2 Correlation coefficient of several carbon pools with environmental variables

参数 Variable	皮尔逊相关系数 Pearson correlation coefficients				年降水 MAP	年均温 MAT
	地上碳库响应比	地下碳库响应比	土壤碳库响应比	纬度		
	RR of APCP	RR of BPCP	RR of SCP	Latitude		
地上碳库响应比 RR of APCP		-0.149	0.220	0.262	0.532**	-0.241
地下碳库响应比 RR of BPCP	0.372		0.515**	0.628**	-0.561**	-0.437**
土壤碳库响应比 RR of SCP	0.413	0.003		0.362**	0.187*	-0.498**
纬度 Latitude	0.112	$P < 0.001$	$P < 0.001$		-0.052	-0.589**
年降水 MAP	0.001	$P < 0.001$	0.046	0.535		0.057
年均温 MAT	0.150	0.001	$P < 0.001$	$P < 0.001$	0.504	

的改变。不当的放牧活动对土壤稳定性和生物土壤结皮具有显著的负效应<sup>[26-28]</sup>，能够增强风和水的侵蚀效应<sup>[29]</sup>，从而加速土壤有机质的分解以及碳库的流失。Neff 等<sup>[28]</sup>在犹他州研究发现由于放牧导致的风蚀效应显著减低了土壤养分，相对于禁牧区而言，长期放牧减少了 60%~70% 的土壤表层碳。

土壤呼吸作为陆地生态系统碳循环的关键环节，是陆地土壤碳库输出的唯一途径和大气二氧化碳重要的源，往往被当作指示土壤碳库变化的指标<sup>[30-32]</sup>。土壤呼吸受到生物和非生物因素的共同调控作用<sup>[33-35]</sup>，影响土壤呼吸的主导因子具有明显的时空和生态系统差异<sup>[36]</sup>。放牧活动通过改变植物-土壤系统中的生物(如植被覆盖、植被类型、根系生物量以及植物光合特性)和非生物因素(如温度、含水量和孔隙度等)来影响土壤呼吸，从而使得植物的碳分配模式和土壤微生物代谢过程发生改变，进而影响草原生态系统碳动态过程<sup>[35]</sup>。在本研究中，

放牧活动在全球尺度上显著增强了土壤呼吸,反映出在全球尺度上非生物因子对土壤呼吸的主导效应强于生物因子。放牧条件下非生物因子如温度和土壤水分的改变,直接或者间接影响着土壤微生物以及其他土壤动物的新陈代谢作用<sup>[37]</sup>。此外,放牧导致增强的温度和土壤湿度等能够促进地表表层凋落物和土壤有机质的分解,增加土壤呼吸底物的可利用性<sup>[38]</sup>。

### 3.2 气候对不同碳库的调控

土壤水分的有效性通过生理生态和物理等效应影响着生态系统的新陈代谢,直接或间接地调控着生态系统的碳循环过程<sup>[34]</sup>。从本研究中可以看到,放牧对半湿润/湿润区的植物地下部分生物量碳库以及土壤碳库的减少幅度均高于干旱和半干旱区,这可能是因为湿润区较快的根系周转率向土壤中释放出了大量的碳,增加了土壤碳库<sup>[39-40]</sup>。较快的根系周转向土壤中提供了更多的呼吸底物,增强了半湿润/湿润区的呼吸强度。在两个气候带中凋落物碳库和微生物量碳库也保持着相同的减少趋势,反映出凋落物是微生物量碳库的一个重要来源。从图5中可以看到,放牧干扰下,土壤碳库与植物地下部分碳库有着极显著的正相关关系,这主要是因为植物地下生物量是土壤碳的重要来源<sup>[41]</sup>,但从图中并未发现地上植物碳库与土壤碳库的显著关系,说明植物地上部分碳库对土壤碳库没有直接的贡献作用。从图5和表2中可以看到,在全球尺度上,土壤碳库和年平均降水量相关关系较弱,这可能因为随着土壤水分的增多,植物生产力和微生物活性均增强<sup>[30,42]</sup>,导致因降水引起的土壤碳库的输入和输出具有相似的反馈效应。年平均温度和土壤碳库之间有显著的负相关关系,这可能是年平均温度对土壤碳库的输出效应强于输入。而从图5中还可以看到,年平均温度以及年平均降雨量之间与植物地下部分碳库均有明显的负相关关系,这可能是因为放牧干扰下,高温和多雨等气候条件能促进地下根系的周转分解,降低根系生物量碳含量。

### 3.3 未来研究展望

本文从放牧对碳循环影响、不同气候带碳循环响应以及环境变量对碳循环调控3个方面进行了分析论述,研究结果对草原生态系统碳收支平衡、恢复管理和实现可持续发展等方面提供一定的理论依据。但是受到研究方法限制,我们还无法区分出在长期放牧过程中不同时间段地下碳库的变化过程,同时,不同植被类型(如C<sub>3</sub>和C<sub>4</sub>植物),不同土壤类型,不同放牧类型中地下碳过程对放牧活动的响应也存在差异<sup>[9]</sup>。受研究方法的限制,目前还无法充分区分出放牧在全球尺度上对土壤组分组成变化的具体影响机制。Liu等<sup>[18]</sup>报道轻度放牧能够增强土壤中的碳固定,董全民等<sup>[43]</sup>则认为,在中度干扰下,草原生态系统中的物种丰富度、多样性指数、均匀度指数都是最高的,增强的地上生物量与生态系统碳循环存在密切联系<sup>[18-19,41-43]</sup>。另外,由于地上和地下是一个完整但又存在显著差别的生态系统,但目前的研究多数偏重单一地上或者地下循环过程研究,而单一过程并不能充分反映出整个循环过程,因此,未来的研究需要进一步将地上和地下过程结合起来,才能更好地揭示放牧对整个生态系统碳循环的影响机制,为机理和过程模型预测提供更多参考依据。

### References:

- [1] Li B. Grassland resources status, problems and countermeasures of our country. *Bulletin of Chinese Academy of Science*, 1997, 1: 49-51.
- [2] Yan Z Q, Qi Y C, Dong Y S, *et al.* Nitrogen cycling in grassland ecosystems in response to climate change and human activities. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(6): 279-292.
- [3] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304: 1623-1627.
- [4] Yan Y C, Wang X, Yang G X, *et al.* Review on mechanism of fine soil particles increase in enclosed grassland. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(5): 1162-1166.
- [5] Stavi I, Eugene D U, Hanoch L, *et al.* Grazing induced spatial variability of soil bulk density and content of water moisture, organic carbon and calcium carbonate in a semiarid rangeland. *Catena*, 2008, 75(3): 288-296.
- [6] Fornara D A, Bardgett R, Steinbeiss S, *et al.* Plant effects on soil N mineralization are mediated by the composition of multiple soil organic fractions. *Ecology Research*, 2011, 26: 201-208.
- [7] Knops J M H, Bradley K L, Wedin D A. Mechanisms of plant species impacts on ecosystem nitrogen cycling. *Ecology Letters*, 2002, 5(3): 454-466.



- [8] Lei X D, Peng C H, Tian D L, *et al.* Meta-analysis method and its application in global change. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(22): 2587-2597.
- [9] McSherry M E, Ritchie M E. Effects of grazing on grassland soil carbon: a global review. *Global Change Biology*, 2013, 19(5): 1347-1357.
- [10] Bai Y F, Wu J G, Clark C M, *et al.* Grazing alters ecosystem functioning and C : N : P stoichiometry of grasslands along a regional precipitation gradient. *Journal of Applied Ecology*, 2012, 49(6): 1204-1215.
- [11] Gao Y H. Study on Carbon and Nitrogen Distribution Pattern and Cycling Process in an Alpine Meadow Ecosystem under Different Grazing Intensity[D]. Chengdu: Institute of Chengdu Biology of Chinese Academy of Science, 2006
- [12] Bagchi S, Ritchie M E. Introduced grazers can restrict potential soil carbon sequestration through impacts on plant community composition. *Ecology Letters*, 2010, 13(8): 959-968.
- [13] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. *Ecology*, 1999, 80: 1150-1156.
- [14] Luo Y Q, Hui D F, Zhang D Q. Elevated CO<sub>2</sub> stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in land ecosystems: a meta-analysis. *Ecology*, 2006, 87(1): 53-63.
- [15] Yuan J L, Jiang X L, Huang W B, *et al.* Effects of grazing intensity and grazing season on plant species diversity in alpine meadow. *Acta Prataculturae Sinica*, 2004, 13(3): 16-21.
- [16] Zhang T, Wong Y, Yao F J, *et al.* Effect of grazing intensity on ecological stoichiometry of *Deyeuxia angustifolia* and meadow soil. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(2): 20-28.
- [17] Wu H, Wiesmeier M, Yu Q, *et al.* Labile organic c and n mineralization of soil aggregate size classes in semiarid grasslands as affected by grazing management. *Biology & Fertility of Soils*, 2011, 48(3): 305-313.
- [18] Liu N, Kan H M, Yang G W, *et al.* Changes in plant, soil, and microbes in a typical steppe from simulated grazing: explaining potential change in soil C. *Ecological Monographs*, 2015, 85(2): 269-286.
- [19] Knops J M H, Tilman D. Dynamics of soil nitrogen and carbon accumulation for 61 years after agricultural abandonment. *Ecology*, 2000, 81(1): 88-98.
- [20] Schuman G E, Reeder J D, Manley J T, *et al.* Impact of grazing management on the carbon and nitrogen balance of a mixed-grass rangeland. *Ecological Applications*, 1999, 9(1): 65-71.
- [21] Detling J K, Dyer M I, Winn D T. Net photosynthesis, root respiration and regrowth of *Boutelous gracilis* following simulated grazing. *Oecologia*, 1979, 41(2): 127-134.
- [22] Davidson R L. Root Systems—the Forgotten Component of Pastures[M]. Australia: CSIRO, East Melbourne, 1978: 86-94.
- [23] Holland E A, Detling J K. Plant response to herbivory and belowground nitrogen cycling. *Ecology*, 1990, 71(3): 1040-1049.
- [24] Montane F, Romanya J, Rovira P, *et al.* Aboveground litter quality changes may drive soil organic carbon increase after shrub encroachment into mountain grasslands. *Plant and Soil*, 2010, 337: 151-165.
- [25] Thiessen S, Gleixner G, Wutzler T, *et al.* Both priming and temperature sensitivity of soil organic matter decomposition depend on microbial biomass: an incubation study. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 739-748.
- [26] Belnap J, Gillette D A. Vulnerability of desert biological soil crusts to wind erosion: the influences of crust development, soil texture, and disturbance. *Journal of Arid Environments*, 1998, 39: 133-142.
- [27] Belnap J, Lange O L. Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management[M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2001.
- [28] Neff J C, Reynolds R L, Belnap J, *et al.* Multi-decadal impacts of grazing on soil physical and biogeochemical properties in southeast Utah. *Ecological Applications*, 2005, 15(1): 87-95.
- [29] Caravaca F A L, Albaladejo J. Organic matter, nutrient content and cation exchange capacity in fine fractions from semiarid calcareous soils. *Geoderma*, 1999, 93: 161-176.
- [30] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*, 1992, 44: 81-99.
- [31] Liu S H, Fang J Y. Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on soil respiration in the global scale. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17: 469-476.
- [32] Chen Q S, Li L H, Han X G, *et al.* Effects of water content on soil respiration and the mechanisms. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23: 972-978.
- [33] Zhang Z H, Duan J H, Wang S P, *et al.* Effects of land use and management on ecosystem respiration in alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Soil and Tillage Research*, 2012, 124(4): 161-169.
- [34] Landsberg J J, Gower S T. Applications of Physiological Ecology to Forest Management[M]. San Diego, CA, USA: Aca-

demic Press, 1997.

- [35] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 71-90.
- [36] Tu L H, Hu T X, Huang L H, *et al.* Response of soil respiration to simulated nitrogen deposition in *pleioblastus amarus* forest, rainy area of west China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33: 728-738.
- [37] Thomey M L, Collins S L, Vargas R, *et al.* Effect of precipitation variability on net primary production and soil respiration in a Chihuahuan Desert grassland. *Global Change Biology*, 2011, 17: 1505-1515.
- [38] Deng Q, Liu S Z, Liu X J, *et al.* Contributions of litter-fall to soil respiration and its affecting factors in southern subtropical forests of China. *Advances in Earth Science*, 2007, 22: 976-986.
- [39] Chapin III F S, Matson P A, Mooney H A. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*[M]. New York, NY, USA: Springer, 2002.
- [40] Gong J R, Wang Y, Liu M, *et al.* Effects of land use on soil respiration in the temperate steppe of Inner Mongolia, China. *Soil & Tillage Research*, 2014, 144(4): 20-31.
- [41] Gill R A, Burke I C, Milchunas D G, *et al.* Relationship between root biomass and soil organic matter pools in the shortgrass steppe of eastern Colorado. *Ecosystems*, 1999, 2: 226-236.
- [42] Luyssaert S, Inglima I, Jung M, *et al.* CO<sub>2</sub> balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. *Global Change Biology*, 2007, 13: 2509-2537.
- [43] Dong Q M, Zhao X Q, Ma Y S, *et al.* Effects of yak grazing intensity on quantitative characteristics of plant community in a two-seasonal rotation pasture in *Kobresia Parva* meadow. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(10): 2233-2239.

#### 参考文献:

- [1] 李博. 我国草地资源现状问题及对策. *中国科学院院刊*, 1997, 1: 49-51.
- [2] 闫钟清, 齐玉春, 董云社, 等. 草地生态系统氮循环关键过程对全球变化及人类活动的响应与机制. *草业学报*, 2015, 24(6): 279-292.
- [4] 闫玉春, 王旭, 杨桂霞, 等. 退化草地封育后土壤细颗粒增加机理探讨及研究展望. *中国沙漠*, 2011, 31(5): 1162-1166.
- [8] 雷相东, 彭长辉, 田大伦, 等. 整合分析(Meta-analysis)方法及其在全球变化中的应用研究. *科学通报*, 2006, 51(22): 2587-2597.
- [11] 高永恒. 不同放牧强度下高山草甸生态系统碳氮分布格局和循环过程研究[D]. 成都: 中国科学院成都生物所, 2006.
- [15] 袁建立, 江小蕾, 黄文冰, 等. 放牧季节及放牧强度对高寒草地植物多样性的影响. *草业学报*, 2004, 13(3): 16-21.
- [16] 张婷, 翁月, 姚凤娇, 等. 放牧强度对草甸植物小叶章及土壤化学计量比的影响. *草业学报*, 2014, 23(2): 20-28.
- [31] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响. *生态学报*, 1997, 17: 469-476.
- [32] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理. *生态学报*, 2003, 23: 972-978.
- [36] 涂利华, 胡庭兴, 黄立华, 等. 华西雨屏区苦竹林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应. *植物生态学报*, 2009, 33: 728-738.
- [38] 邓琦, 刘世忠, 刘菊秀, 等. 南亚热带森林凋落物对土壤呼吸的贡献及其影响因素. *地球科学进展*, 2007, 22: 976-986.
- [43] 董全民, 赵新全, 马玉寿, 等. 牦牛放牧强度对小嵩草草甸两季轮牧草场植物群落数量特征的影响. *生态学杂志*, 2011, 30(10): 2233-2239.