

# 青藏高原草地生态系统土壤有机碳动态特征<sup>\*</sup>

张永强<sup>①②\*\*</sup> 唐艳鸿<sup>①</sup> 姜 杰<sup>①</sup>

(① 日本国立环境研究所生物环境研究部, 筑波市, 305-8506, 日本; ② 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要** 青藏高原草地碳动态对区域乃至全球碳循环都有非常重要的影响. 采用生态系统碳循环模型——CENTURY 模型 4.5 版本探讨了青藏高原草地生态系统土壤有机碳(0~20 cm)在 1960~2002 年间的年际动态变化特征及其区域分异特征. CENTURY 模型模拟的地上部分生物量与土壤表层有机碳与实测结果有较好的一致性. 从 1960~2002 年, 8 个典型草地生态系统土壤有机碳含量表现出明显年际的波动, 变化幅度随生态系统土壤有机碳含量增加而增大; 青藏高原草地有机碳总量和主要草地生态系统有机碳总量也呈现出明显的年际变化, 而以 1990~2000 年期间的年际变化幅度最大, 在这期间主要生态系统有机碳总量都呈现出先上升而后迅速下降的变化. 土壤有机碳含量的区域分布特征表现出从东南向西北降低的地带性分异, 同时在东北和东南表现出非地带性分异特征. 该研究表明: 近 40 年来青藏高原典型草地生态系统随气候变动有比较敏感的反应, 同时, 在假定生态系统生理特性不变的条件下, 近 10 年来的气候变动增加了青藏高原草地土壤有机碳的积累和排放速度.

**关键词** 草原生态系统 CENTURY 模型 气候变动 碳循环 温暖化

全球陆地生态系统碳循环的研究是全球气候变动研究的前沿和焦点之一. 据 IPCC 的估算, 全球陆地土壤和植被的碳含量分别为 1750 和 550 Pg(1 Pg =  $10^{15}$  g), 其总量相当于全球大气碳总量的 3 倍左右<sup>[1]</sup>. 青藏高原由于其独特的地理位置, 广泛分布着高寒草甸、高寒草原与高寒草甸草原等典型高寒草地植被, 这些草地占据了 60% 以上的高原面积<sup>[2]</sup>, 由此发育的高山草甸土、亚高山草甸土以及高山草原草甸土等高

山土壤富含有机质, 土壤碳密度明显高于其他地域土壤<sup>[3]</sup>. 人们认为青藏高原草地生态系统是一个巨大碳库, 因其独特的地理环境和生态构造, 这一碳库对全球变化极为敏感, 同时也可能对全球变化具有重要的反馈作用<sup>[4~6]</sup>. 所以, 要正确评价青藏高原生物地球化学循环在全球变化中的作用就必须探讨青藏高原草地生态系统碳循环; 同时, 了解青藏高原草地这样一个世界上独一无二的生态系统与气候变化的

收稿日期: 2005-08-29; 接受日期: 2006-01-26

<sup>\*</sup> 日本环境省地球推进国际合作项目(S1)和中国科学院地理科学与资源研究所海外客座研究基金资助

<sup>\*\*</sup> E-mail: [zhangyq@igsrr.ac.cn](mailto:zhangyq@igsrr.ac.cn)

关系可能为生态学研究提供有益的发现<sup>[4,5]</sup>。

生态系统碳源、碳汇的动态变化由植物光合与呼吸、土壤有机物的积累与分解以及人类活动和自然扰动等因素共同制约和决定<sup>[7]</sup>。因此, 生态系统机理模型是估算生态系统碳蓄积和排放的重要手段之一, 其中CENTURY模型是探讨草地生态系统碳循环最有代表性的机理模型<sup>[8~10]</sup>。国内最近几年陆地生态系统碳蓄积和排放的模型研究已经取得了较大的进展, 有许多研究利用模型探讨了全国范围的森林、草地、农田等生态系统的碳循环<sup>[11~15]</sup>, 这些研究极大地推进了中国的碳循环研究。同时碳循环实验观测方面, 中国也取得了明显的进展, 在不同生态系统进行了土壤有机碳、土壤呼吸以及CO<sub>2</sub>通量的测定<sup>[16,17]</sup>。

CENTURY模型是模拟植被和土壤营养物质长期动态变化的生态系统模型, 其特色在于模拟土壤有机质的分解以及碳、氮在不同碳库之间的转化, 同时也可以模拟不同人为管理措施对生态系统碳蓄积和排放的影响。CENTURY模型已被广泛应用于各种生态系统, 包括草地生态系统、农田生态系统和森林生态系统, 其中包括高山草地生态系统, 显示了该模型具有广泛的适应性<sup>[18~21]</sup>。我们把该模型应用于青藏高原草地生态系统, 模拟气候变化条件下青藏高原不同草地生态系统的碳动态特征。我们的主要目标是利用CENTURY模型估算青藏高原草地生态系统植被和土壤碳蓄积及排放的时空动态变化及其气候变化对该高原草地土壤有机碳贮量的影响。

## 1 模型描述

CENTURY模型最初主要应用于模拟美国大平原草地碳的长期动态变化(100~10000 a)<sup>[8,9]</sup>, 后逐步发展用于模拟草地、森林和作物碳、氮、磷的动态变化。该模型主要包括植被生产、营养循环、水循环和土壤有机质等子模型。其中根据周转期的长短将土壤有机质子模型分为3个库, 即活性库、慢性库和被动态库, 这些库的周转期分别为数月到数年、20~50 a以及400~2000 a。模型运行的时间步长为月; 模型的气候驱动变量为月降水量、月平均最高温度和月最低平均温度; 模型的土壤驱动变量为土壤容重、土壤田间持水量、凋萎系数和pH值等。模型可根据植被类型

的不同, 定义不同植被的生理生态参数。CENTURY模型模拟草地的碳动态已得到了广泛的应用<sup>[8~10,18,19]</sup>, 模型包括了人为管理措施及自然条件变化如放牧和火灾对草地生态系统碳循环的影响, 也包括了大气CO<sub>2</sub>浓度变化对生态系统碳循环的影响。该模型的草地放牧子模型根据放牧强度的不同分为轻度、中度和重度放牧条件。本文采用的是未公开版——CENTURY4.5版本, 此版本与CENTURY4.0的结构基本相同, 但对植被光合、外部氮固定、水量平衡等部分子模块进行了改进。与CENTURY4.0相比, CENTURY4.5版本采用年蒸散取代年降水量计算非共生性土壤氮固定量, 采用双正切曲线取代指数曲线计算温度对植被生长的影响。CENTURY4.5增加了维持呼吸子模型, 也考虑了太阳光周期的变化对潜在产量的影响; 同时以根系碳量在总生物碳量的比例取代根冠比来计算地上、地下部分生物量分配比例, 以及采用大气外层的太阳辐射和基于温度变化的云覆盖量计算潜在蒸发。

## 2 获取数据及模型参数化

本文所需的气象数据来自于国家气象局数据中心。我们利用西藏、青海、四川、甘肃4个省青藏高原区内共74个站点1960~2002年的日降水量、日最高温度、日最低温度数据(图1), 将日降水量累积转化为月数据, 日最高温度和日最低温度分别平均为月最高温度和月最低温度。土壤质地、土壤容重和土壤有机质含量数据来自于青海土壤资源和西藏土壤资源调查成果<sup>[22,23]</sup>。植被类型数据来自于中国科学院数据中心根据1:100万中国草地资源图集数字化的1:100万草地类型图<sup>[24]</sup>(图1)。草地生物量数据来源于西藏自治区草地资源调查成果<sup>[25]</sup>, 其地上部分生物量为风干后的生物重量, 乘以0.5折算为生物碳量。

CENTURY模型的参数化过程包括3个步骤: (1) 将模型需要的月气象数据按固定的格式建立数据库文件; (2) 建立站点信息文件, 包括站点经、纬度, 土壤质地、土壤容重、pH值、凋萎系数和田间持水量等站点控制参数, 外部营养输入参数和有机质初始值参数; (3) 对青藏高原区各类草地分布建立生理生



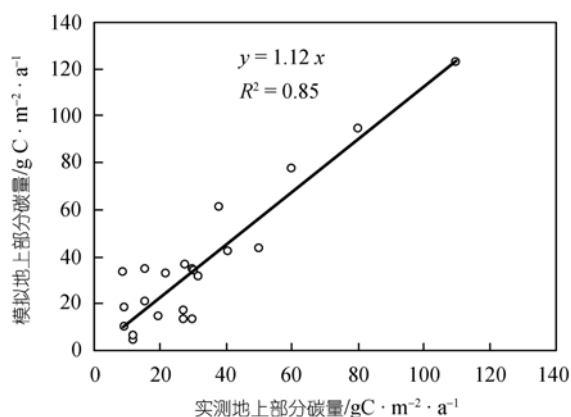


图 2 CENTURY 模型模拟青藏高原典型草地生态系统地上部分生物碳量与实测结果比较

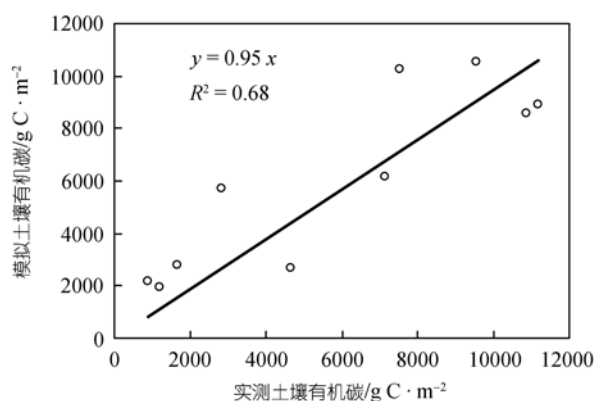


图 3 CENTURY 模型模拟青藏高原典型草地生态系统有机碳与实测有机碳比较(0~20 cm)

的植被生物量和土壤表层有机碳含量。

### 3.2 青藏高原草地植被和土壤有机碳的区域分布

青藏高原土壤有机碳含量具有明显的地带性分异特征(图 4), 整体呈现出东南高西北低, 由东南向西北逐渐降低。这主要由于青藏高原独特的地貌结构和大气环流条件决定的植被类型所决定, 从东南向西北形成了山地森林—高寒草甸—高寒草原—高寒荒漠的地带性分布特征<sup>[26]</sup>。土壤有机碳的高值区主要为高寒草甸和山地草甸分布区, 高寒荒漠为低值区, 这一分布特征与实测结果非常一致<sup>[4]</sup>。此外, 在东南部和东北部土壤有机碳含量表现出明显的非地带性分异特性, 这与区域内土壤类型和草地类型的非地带性分布一致(图 1)。

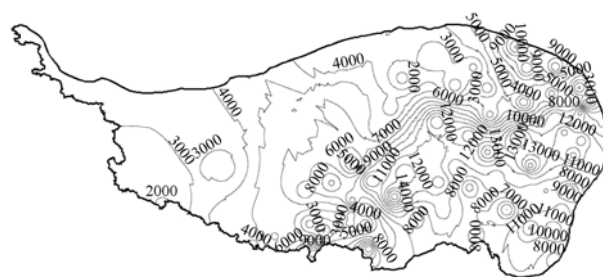


图 4 青藏高原草地均衡态 0~20 cm 土壤有机碳(gC·m<sup>-2</sup>) 的分布特征

### 3.3 青藏高原草地生物量、土壤呼吸量和土壤碳贮量的估算

本文统计的青藏高原草地面积共  $147.74 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 高寒草甸的分布面积最大, 约占总草地面积的 42.3%, 高寒草原次之, 约占总草地面积的 28.8%, 其他类型草地都未超过  $10 \times 10^4 \text{ km}^2$ (表 1)。均衡态草地年生物量累积量为  $132.63 \times 10^6 \text{ TC}$ , 其中地上部分年累积量为  $46.54 \times 10^6 \text{ TC}$ , 地下部分年累积量为  $86.09 \times 10^6 \text{ TC}$ 。各类草地地上部分和地下部分均衡态生物量大小排列与其分布面积排列大小基本一致, 高寒草甸类碳的蓄积量最大, 约为总草地碳年蓄积量的 54.2%, 高寒草原次之, 约为总草地碳年蓄积量的 20.0%, 山地草甸类面积小于高寒荒漠草原, 但其年生物量年蓄积量列第三。均衡态各草地类年呼吸量大小排列与均衡态年生物蓄积量大小排列顺序一致, 且年总生物蓄积碳量略高于草地年总土壤呼吸量。青藏高原均衡态土壤有机碳总量(0~20 cm)为  $97.19 \times 10^8 \text{ T}$ , 各类草地土壤有机碳的排列大小顺序与生物蓄积量的大小排列顺序一致, 高寒草甸土壤有机碳量(0~20 cm)约占其土壤有机碳量的 54.9%。

### 3.4 典型草原生态系统土壤有机碳的时间动态

选择 8 个典型的草地生态系统站点分析土壤有机碳近 40 多年的动态变化(图 1)。这 8 个站点从东南向西北分布, 代表了青藏高原主要的草地生态系统类型。8 个站点土壤有机碳含量( $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ )随年际变化表现出明显的年际波动特征(图 5)。变化幅度有随生态系统土壤有机碳增加而增大的趋势, 高寒荒漠草原变幅最小, 山地草甸变幅最大。与 1960 年比, 2002 年多数站点土壤有机碳减少, 即生态系统呈现

表 1 青藏高原各类草地均衡态生物碳量、土壤呼吸量及土壤有机碳量(0~20 cm)

|        | 分布面积/ $10^4 \text{ km}^2$ | 地上碳量/ $10^6 \text{ T} \cdot \text{a}^{-1}$ | 地下碳量/ $10^6 \text{ T} \cdot \text{a}^{-1}$ | 土壤呼吸量/ $10^6 \text{ T} \cdot \text{a}^{-1}$ | 土壤有机碳/ $10^8 \text{ T}$ |
|--------|---------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------|
| 低地草甸   | 1.53                      | 0.17                                       | 0.32                                       | 0.44                                        | 0.52                    |
| 山地草甸   | 8.22                      | 4.59                                       | 7.98                                       | 12.12                                       | 8.14                    |
| 干热稀疏灌丛 | 0.0007                    | 0.0008                                     | 0.0008                                     | 0.0014                                      | 0.0006                  |
| 改良草地   | 0.03                      | 0.01                                       | 0.02                                       | 0.03                                        | 0.03                    |
| 温性灌草丛  | 0.46                      | 0.31                                       | 0.49                                       | 0.76                                        | 0.41                    |
| 温性草丛   | 0.10                      | 0.07                                       | 0.11                                       | 0.17                                        | 0.09                    |
| 沼泽     | 0.33                      | 0.17                                       | 0.32                                       | 0.45                                        | 0.35                    |
| 温性草原荒漠 | 0.11                      | 0.01                                       | 0.02                                       | 0.02                                        | 0.03                    |
| 温性草原   | 4.78                      | 1.36                                       | 2.56                                       | 3.65                                        | 2.40                    |
| 温性草甸草原 | 0.15                      | 0.07                                       | 0.12                                       | 0.19                                        | 0.13                    |
| 温性荒漠   | 2.73                      | 0.29                                       | 0.58                                       | 0.82                                        | 0.90                    |
| 温性荒漠草原 | 0.64                      | 0.08                                       | 0.16                                       | 0.23                                        | 0.24                    |
| 热带灌丛   | 0.50                      | 0.50                                       | 0.55                                       | 0.91                                        | 0.42                    |
| 热性草丛   | 0.08                      | 0.07                                       | 0.09                                       | 0.15                                        | 0.07                    |
| 高寒草原   | 42.56                     | 9.09                                       | 17.49                                      | 21.86                                       | 19.65                   |
| 高寒草甸   | 62.57                     | 25.27                                      | 46.68                                      | 66.09                                       | 53.37                   |
| 高寒草甸草原 | 6.51                      | 1.93                                       | 3.70                                       | 4.60                                        | 3.88                    |
| 高寒荒漠   | 6.50                      | 1.06                                       | 2.04                                       | 2.56                                        | 2.70                    |
| 高寒荒漠草原 | 9.96                      | 1.47                                       | 2.85                                       | 3.53                                        | 3.85                    |
| 合 计    | 147.74                    | 46.54                                      | 86.09                                      | 118.58                                      | 97.19                   |

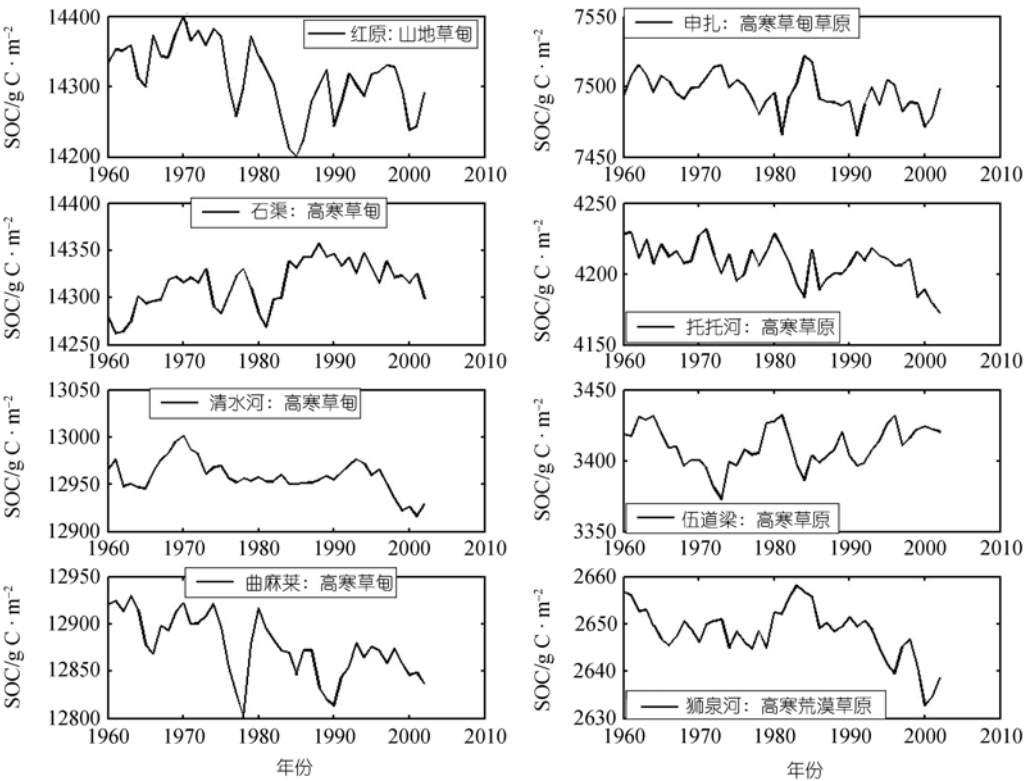


图 5 CENTURY 模型模拟典型草地生态系统 0~20 cm 土壤有机碳(SOC)的时间动态(1960~2002)

为明显的微弱的碳源,而在石渠高寒草地站点呈现为明显的碳汇.不同草地生态系统土壤有机碳含量的年际变化特征是由各生态系统不同的气候变化特征决定的,40 多年不同站点的气候变化趋势各不相同,使土壤有机碳含量表现出各自特有的变化特征,且土壤有机碳含量高的生态系统对气候变化更为敏感.

青藏高原草地总有机碳量( $10^8$  T)和主要草地生态系统总有机碳量表现出明显的年际动态变化(图 6).与 1960 相比 2002 年草地总有机碳变化不明显,但期间有明显的变化,1990~2000 年间有机碳总量呈现出先增加而后迅速下降的趋势.这一变化趋势与区域内第一大草地类型—高寒草甸有机碳总量的变化趋势基本一致;青藏高原第二大草地类型—高寒草原有机碳总量在 1990~2000 年间也呈现出先增加而后迅速下降的趋势.山地草甸有机碳总量在 1970~1986 年呈现出明显的下降趋势,1990 年之后也有明显先上升而后下降的年际波动特征,但总体呈上升趋势.40 年间高寒

荒漠草原和高寒荒漠有机碳总量在波动中总体下降,20 世纪 90 年代中期以后更为明显.青藏高原总有机碳表现出的明显年际波动特征是由青藏高原气候年际波动造成的.不同站点土壤有机碳含量对气候变化的响应趋势不同,有的站点呈现增加趋势,有点站点呈现减少趋势,减小了草地总有机碳量的年际变幅.草地生态系统草地总有机碳量与单个站点土壤有机碳含量的变化趋势有很大差异,如山地草甸(图 5 和 6),显示了同种生态系统不同站点之间气候年际变化有很大的差异性.

#### 4 结论和讨论

本文采用生态系统碳循环模型——CENTURY 模型模拟了青藏高原草地生态系统的生物碳量、土壤呼吸量以及表层土壤有机碳贮量.模拟的地上部分生物量和土壤有机碳量与实测结果具有较好的一致性,显示该模型可以用于研究青藏高原草地生态系

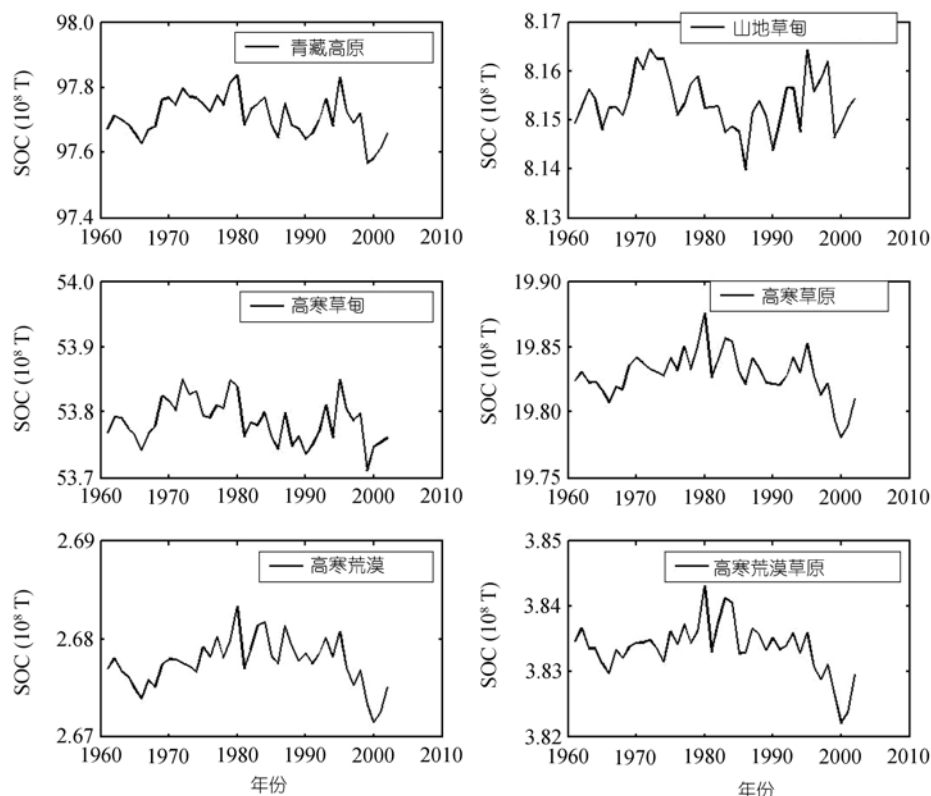


图 6 青藏高原草地 0~20 cm 土壤有机碳(SOC)总量以及主要草地生态系统土壤有机碳总量的时间动态(1960~2002)

统的有机碳动态. 在随机气候条件驱动、中等放牧条件下, 模型估算的青藏高原草地生态系统均衡态土壤有机碳(0~20 cm)总含量约为  $97.19 \times 10^8$  T, 平均有机碳密度为  $65.78 \text{ t C /hm}^2$ . 这高于水稻土的平均有机碳密度, 全国水稻土 0~20 cm 平均有机碳密度约为  $44 \text{ tC/hm}^2$  [27]. 这可能暗示青藏高原草地生态系统经历了一个缓慢的、长期的碳积累过程. 本文模拟的结果显示青藏高原草地土壤有机碳主要贮存于高寒草甸中, 其面积为总草地面积的 42.3%, 但其土壤有机碳含量为区域土壤有机碳总量的 54.9%.

1960~2002 年间, 青藏高原主要草地生态系统土壤有机碳含量呈现出明显的年际动态特征, 且不同站点土壤有机碳含量变化趋势有一定的差别, 多数站点呈总体上下降趋势. 1960~2002 年间, 青藏高原草地有机碳总量以及主要生态系统有机碳总量都表现出明显的年际动态变化, 1990~2000 年间变幅最大, 主要草地生态系统有机碳总量都呈现出先上升而后迅速下降的趋势. 青藏高原土壤有机碳呈现出的这种年际变化, 显示了本区域对全球气候变化的敏感性.

1960~2002 年间, 部分草地生态系统土壤有机碳含量下降与青藏高原气候有一定的温暖化趋势有密切联系 [28,29], 温暖化可能会造成高寒草地土壤有机碳量的减小, 本文的模拟显示在不同类型的生态系统或同一类生态系统的不同站点土壤有机碳含量对气候变化的响应有明显的差别.

与传统碳密度法比, 本文采用的方法估算土壤有机碳比具有以下几种优点: (1)可模拟均衡态生态系统生物量、土壤呼吸量以及土壤有机碳量等不同的碳源和碳汇; (2)本方法可以模拟生物量、土壤呼吸量以及土壤有机碳量随年际的长期动态变化, 可以揭示气候变化以及管理措施对生态系统碳动态的影响; (3)通过 CENTURY 模型与 GIS 内插方法结合模拟生态系统碳变量的区域分异特征. 以上几种特点都是传统碳密度法所不能实现的, 且大大提高了估算精度和估算的范围, 这有助于我们进一步研究青藏高原的碳动态和气候变动.

本文采用方法的一个缺点是在站点模拟的基础上通过空间内插计算青藏高原各类草地均衡态生物

量、土壤呼吸量及土壤有机碳量, 没有结合地形因素进行分析, 可能导致碳贮量估算不准确. 但我们的主要目标是探讨青藏高原土壤有机碳在空间上的异质性、随时间的变化趋势以及有机碳在不同生态系统中的分配比例, 重点不在准确评估土壤有机碳的总储量. 青藏高原气象站点分布东部密集, 而在广大的西部无人居住区, 气象站点分布稀疏, 对空间内插的精度有一定的影响, 且内插的空间分辨率大小对区域碳量的计算有一定的影响. 但气象站点分布稀疏的地区正好大多也是高海拔、植被稀疏、终年积雪的地区, 这对我们估算整个青藏高原碳动态的影响实际上可能不会很大, 尤其是对表层碳动态的影响可能更小.

我们没有考虑土地利用变化对生态系统碳蓄积和土壤碳排放的影响. 本文采用的草地资源图为 1993 年编制的《1:1000000 中国草地资源图》研究成果, 本研究采用的遥感制图与实地调查成图技术绘制而成的, 反映了中国 20 世纪 80 年代后期 90 年代初的草地资源现状. 实际上本区域从上世纪 60 年代以来耕地面积逐渐增加, 20 世纪 60 年代以来近 30 年来形成的耕地面积占总耕地面积的 54%, 但与典型高寒草地面积比, 耕地总面积比例很小 [4]. 所以, 耕地变化可能对我们目前得出的结论影响不会太大. 草地本身的退化也是一个必须考虑的问题, 草地退化对碳循环有一定的影响, 由于长期放牧使高寒草甸和山地草甸等草地有不同程度的退化, 高寒草甸退化势必使生态系统生物碳累积量减少, 土壤有机碳贮量减少. 草地退化对生态系统碳积累的影响需要另文作详细探讨. 本文将不同地区的放牧强度都设为中等放牧条件, 这是理想化的设定, 实际上不同地区放牧条件各不相同, 轻度、中度和重度的放牧条件都可能存在. 上述因素可能会使我们目前结果与实际情况有较大的出入, 但正好可以研究气候变动条件下土壤有机碳的变化特征, 同时为研究土地利用和放牧强度对青藏高原碳动态影响提供了一面在“标准状态下”镜子, 以便今后作为参照.

**致谢** 感谢美国科罗拉多州立大学 CENTURY 模型项目组 Cindy Keough 女士和 William J. Parton 教授的大力帮助, 推荐并提供 CENTURY4.5 版本.

## 参 考 文 献

- 1 IPCC. Summary for policy makers. In: Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. eds., *Climate change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the - of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
- 2 孙鸿烈. 青藏高原的形成演化. 上海: 上海科学技术出版社, 1996. 168—192
- 3 王绍强, 周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算. *地理研究*, 1999, 18(4): 349—356
- 4 王根绪, 程国栋, 沈永平. 青藏高原草地土壤有机碳库及其全球意义. *冰川冻土*, 2002, 24 (6): 693—700
- 5 Ni J. Carbon storage in grasslands of China. *J Arid Environments*, 2002, 50: 205—218[DOI]
- 6 Klein J A, Harte J, Zhao X Q. Experimental warming causes large and rapid species loss, dampened by simulated grazing, on the Tibetan Plateau. *Ecol Lett*, 2004, 7: 1170—1179[DOI]
- 7 Evrendileka F, Celikb I, Kilic S. Changes in soil organic carbon and other physical soil properties along adjacent Mediterranean forest, grassland, and cropland ecosystems in Turkey. *J Arid Environ*, 2004, 59: 743—752[DOI]
- 8 Parton W J, Schimel D S, Cole C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Sci Soc Am J*, 1987, 51: 1173—1179
- 9 Parton W J, Stewart J W B, Cole C V. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model. *Biogeochemistry*, 1988, 5: 109—131[DOI]
- 10 Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, et al. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. *Glob Biogeochem Cycle*, 1993, 7: 785—809
- 11 季劲钧, 余莉. 地表面物理过程与生物地球化学过程耦合反馈机理的模拟研究. *大气科学*, 1999, 23(4): 439—448
- 12 延晓冬, 赵士洞, 于振良. 中国东北森林生长演替模拟模型及其在全球变化研究中的应用. *植物生态学报*, 2000, 24(1): 1—8
- 13 吕建华, 季劲钧. 青藏高原大气-植被相互作用的模拟试验 II. 植被叶面积指数和净初级生产力. *大气科学*, 2002, 26(2): 255—262
- 14 黄耀, 刘世梁, 沈其荣, 等. 农田土壤有机碳动态模拟模型的建立. *中国农业科学*, 2001, 34(5): 532—536
- 15 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量. *中国科学 D辑: 地球科学*, 2003, 33 (1): 72—80[摘要]
- 16 Gu S, Tang Y H, Du M Y, et al. Short-term variation of CO<sub>2</sub> flux in relation to environmental controls in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau. *J Geophy Research-Atmospheres*, 2003, 108(D21), 4670, doi: 10.1029/2003JD003584
- 17 张永强, 沈彦俊, 刘昌明, 等. 华北平原典型农田水、热与 CO<sub>2</sub> 通量的测定. *地理学报*, 2002, 57 (3): 333—342
- 18 Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, et al. Impact of Climate-Change on Grassland Production and Soil Carbon Worldwide. *Global Change Biology*, 1995. 1: 13—22[DOI]
- 19 Xiao X, Ojima D S, Parton W J, et al. Sensitivity of Inner Mongolia grasslands to climate change. *J Biogeography*, 1995, 22: 643—648[DOI]
- 20 Peng C H, Apps M J, Price D T, et al. Simulating carbon dynamics along the Boreal Forest Transect Case Study (BFTCS) in central Canada - 1. Model testing. *Global Biogeochem Cycles*, 1998, 12: 381—392[DOI]
- 21 Foereid B, Høgh-Jensen H. Carbon sequestration potential of organic agriculture in northern Europe—a modelling approach. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 68: 13—24[DOI]
- 22 青海省农业资源区划办公室. 青海土壤. 北京: 中国农业出版社, 1997
- 23 西藏自治区土地管理局. 西藏自治区土地利用. 北京: 科学出版社, 1992
- 24 1: 1000000 中国草地资源图编制委员会. 1: 1000000 中国草地资源图集. 北京: 中国地图出版社, 1993
- 25 西藏自治区土地管理局和西藏自治区畜牧局. 西藏自治区草地资源. 北京: 科学出版社, 1994
- 26 Zheng D, Zhang Q S, Wu S H. *Mountain Geoecology and Sustainable Development of the Tibetan Plateau*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2000, 1—17
- 27 Pan G X, Li L Q, Wu L S, et al. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils. *Global Change Biology*, 2003, 10: 79—92[DOI]
- 28 Thompson L G, Yao T, Mosley-Thompson E, et al. A high-resolution millennial record of the South Asian Monsoon from Himalayan ice cores. *Science*, 2000, 289: 1916—1919. [DOI]
- 29 Liu X D, Chen B D. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades. *Int J Climatol*, 2000, 20: 1729—1742[DOI]