

# 不同放牧管理措施下张掖草地土壤有机碳储量 时空统计分析

王晨<sup>1</sup>,张美玲<sup>1\*</sup>,田景<sup>1</sup>,张锐祺<sup>1</sup>,李钊<sup>1</sup>,徐玉娟<sup>2</sup>,黄山枫<sup>2</sup>,高志文<sup>2</sup>

(1. 甘肃农业大学理学院,数量生物学研究中心,甘肃 兰州 730070;2. 环保桥(上海)环境技术有限公司,上海 200120)

**摘要:**【目的】研究不同放牧管理措施对张掖草地土壤有机碳储量的影响,为实现草地可持续发展提供基础数据和科学依据。【方法】使用本地化DAYCENT模型模拟1970—2022年张掖草地在无放牧管理措施和不同放牧管理措施(休牧围栏、轮牧围栏和退化草地改良)下土壤有机碳储量(SOCR)的时空分布。【结果】参数本地化的DAYCENT模型有效模拟了张掖土壤有机碳的动态变化。草地土壤有机碳随时间推移而显著增加,不同放牧管理措施对土壤有机碳积累起到积极作用。空间上土壤有机碳储量呈现自西南向东北递增的分布格局,其中民乐县、高台县、肃南县东北部是土壤有机碳储量的高值区。【结论】从长期发展来看,休牧围栏固碳能力强于轮牧围栏、退化草地改良,轮牧围栏以轻微的固碳优势高于退化草地改良。张掖草地管理可通过合理的放牧措施实现土壤长期固碳。

**关键词:**草地;管理措施;土壤有机碳储量;DAYCENT模型;时空统计

**中图分类号:**S812.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2025)01-0052-09

**DOI:**10.13817/j.cnki.cyycp.2025.01.007



草地是陆地生态系统的重要组织部分,约占全球陆地总面积的20%,在全球碳循环以及土壤固碳中起到重要作用<sup>[1]</sup>。然而,近几十年,由于人类对草地的过度利用和气候变化,高寒草甸退化严重,导致了显著的土壤有机碳损失<sup>[2]</sup>。中国政府相应实施了生态恢复计划,如“退牧还草”计划<sup>[3]</sup>。这些方案的主要目的是扭转过度放牧造成的负面影响,重建退化草地的生态功能。放牧管理已成为防止草地退化和维持可持续放牧的有效策略。有报道称,将退化的公共放牧区围起来建立牧场围栏可以保护土壤资源,减少连续放牧

带来的负面影响,从而积累之前丢失的有机碳<sup>[4]</sup>。在东非,休牧围栏已被公认为控制草地退化的成功工具<sup>[5]</sup>。此外,Zeng等<sup>[6]</sup>研究表明在西北半干旱草原施行改良措施使植被盖度和生物量显著增加,增强了对土壤有机碳的抵抗能力,从而引起土壤有机碳增加。

由于土壤有机碳变化是一个复杂的过程,模型被认为是最适合估算土壤有机碳演化的方法。目前,国内外广泛应用的生态系统模型有CENTURY模型<sup>[7]</sup>、RothC模型<sup>[8]</sup>和DNDC模型<sup>[9]</sup>等。其中CENTURY模型能够模拟农田、草原或森林等各种尺度生态系统下有机碳动态,是最全面的生态系统模型<sup>[7]</sup>,已对俄罗斯<sup>[7]</sup>、英格兰<sup>[10]</sup>、爱尔兰<sup>[10]</sup>、美国<sup>[11]</sup>、中国的新疆天山山区<sup>[12]</sup>和内蒙古等<sup>[13]</sup>地区不同草地类型的土壤有机碳动态变化做了广泛验证,结果表明模型基于点尺度和区域尺度的适应性较好。DAYCENT模型是在CENTURY模型基础上使用长期的试验观察结果对土壤有机质模块进行了贝叶斯校准<sup>[14]</sup>,模型开发者在DAYCENT应用之初基于俄罗斯Kursh地区的草甸开展了校准和验证<sup>[7]</sup>,无论是在自然生态系统下还是

**收稿日期:**2024-01-01;**修回日期:**2024-02-02

**基金资助:**横向基金项目(GSAU-JSFW-2022-20);国家自然科学基金项目(32260353);科技部高端外国专家引进计划(G2022042009L)

**作者简介:**王晨(1999-),女,甘肃庆阳人,硕士研究生。

E-mail:13809344633@139.com

\*通信作者,研究方向为环境与生态统计。

E-mail:zhangml@gsau.edu.cn

人为管理生态系统中, DAYCENT 模型模拟的有机碳、植物净初级生产力等与实测值均有良好的一致性。Brilli 等<sup>[15]</sup>在法国国家保护区和意大利国家牧场建立本地化的 DAYCENT 模型可以模拟多种草原类型土壤有机碳动态变化过程( $R^2$  为 0.66~0.83)。Quemada 等<sup>[16]</sup>在欧盟 8 554 个草地土壤采样点使用 DAYCENT 模型, 量化气候智能型土壤对草地 0~30 cm 土壤有机碳储量变化的影响。Mayer 等<sup>[17]</sup>探索未来潜在气候变化对一年生草地生态系统中土壤有机碳的长期影响, 指出 DAYCENT 模型模拟值有效地解释了实测有机碳变异的 71%~88%。依托我国黄土高原, Zhang 等<sup>[18]</sup>验证了 DAYCENT 模型适用于不同草地管理措施下土壤的有机碳动态变化和固碳潜力。Yue 等<sup>[19]</sup>比较了 DAYCENT 模型与其他基于过程的模型估算草地  $N_2O$  排放量。陈磊等<sup>[20]</sup>利用 Day-Cent 模型模拟了东北黑土区长期施肥下土壤碳氮变化。本研究使用张掖地区的气象数据和野外实测数据, 对 DAYCENT 模型进行参数校准, 利用本地化后

的 DAYCENT 模型估算休牧围栏、轮牧围栏、退化草地改良下土壤有机碳储量时空分布, 并对其进行统计分析, 为张掖地区实施合理的草地放牧管理措施提供理论数据和科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

张掖(97°20'~102°12' E, 37°28'~39°57' N)地处甘肃省西北部, 辖五县一区, 分别是临泽县、高台县、山丹县、民乐县、肃南裕固族自治县及甘州区。总面积为 38 600 km<sup>2</sup>, 占甘肃省总面积的 8.67%, 其中天然牧草 7 020.373 8 km<sup>2</sup>, 占草地总面积的 36.40%<sup>[21]</sup>。张掖平均海拔 3 633 m, 属于大陆性干旱半干旱性气候, 冬寒夏热, 降水稀缺且分布不均, 气温年差较大, 年平均气温和年平均降水量(1970—2022年)分别为 7.8 °C、174.9 mm。大约 70% 的总降水量发生在 6—9 月。本研究中实测站点土壤类型及草地类型信息如表 1 所示。

表 1 实测站点土壤类型及草地类型信息

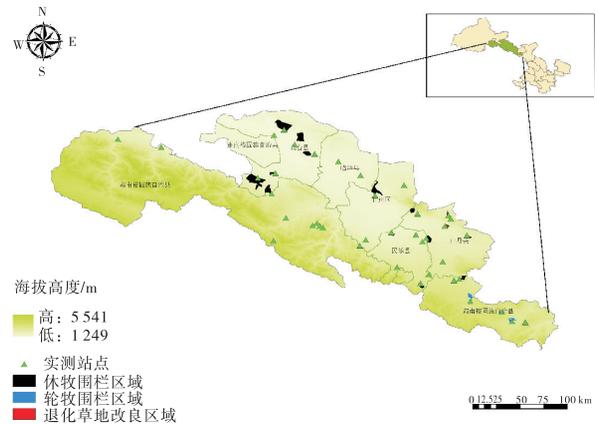
Table 1 Information on soil types and grassland types at the measured sites

站点	民乐县	山丹县	高台县	肃南县	甘州区
土壤类型	沙壤土	壤土	壤土	沙土	壤土
草地类型	荒漠草原	山地草原	荒漠草原	山地草原	荒漠草原

### 1.2 数据来源与处理

1.2.1 实测数据 野外试验于 2022 年 6—7 月进行。选取 12 个休牧围栏样地, 7 个轮牧围栏样地, 8 个退化草地改良样地和 20 个无放牧管理措施样地共 45 个采样点(图 1)。采样的样地面积为 5 m×5 m, 采用框架样方确定<sup>[22]</sup>。剔除可见植物根系和石砾等杂质, 用土钻(内径 5 cm)分别采集 0~10、10~20 cm 土层土样, 每层取 3 个重复, 将每个土壤剖面中同一土层的土样混合均匀, 取 200 g 左右的混合样品作为土壤指标测试样品, 放入自封袋带回实验室。将土壤自然风干, 研磨后过 100 目筛网, 并保存在干燥器内, 取 1 g 左右筛后土样用 10% 盐酸酸化去除无机碳后再烘干至恒重。用元素分析仪(Vario TOC Germany)测定土壤有机碳含量<sup>[23]</sup>。

1.2.2 土壤数据处理 本研究采用 IPCC Tier2 方法, 根据土壤有机碳密度和草地面积估算逐年土壤有



审图号: GS(2019)1822

图 1 研究区域及实测站点

Fig. 1 Study area and measured site

机碳储量, 公式如下<sup>[14]</sup>:

$$SOC_t = \sum_{i=1}^k (SOC_{REF} \times F_{LU} \times F_{MGI} \times A_i) \quad (t = 0, 1, \dots, 53) \quad (1)$$

式中: $SOC_t$ 为第 $t$ 年草地碳储量( $t$ ), $SOC_{REF}$ 为土壤有机碳密度( $g/m^2$ )。  $F_{LU}$ 为土地利用或土地利用变化的碳库变化因子(无量纲),本研究 $F_{LU}=1^{[17]}$ 。  $A_i$ 为第 $i$ 种管理措施的草地面积( $hm^2$ )。  $k$ 为草地管理措施数。  $F_{MGi}$ 为第 $i$ 种管理措施的碳库变化因子。 由于《2006年IPCC国家温室气体清单指南》中没有给出休牧围栏、轮牧围栏与退化草地改良措施的土壤碳库变化因子,本研究根据土壤有机碳密度,利用公式(2)估算休牧围栏、轮牧围栏、退化草地改良的土壤碳库变化因子 $^{[17]}$ 。

$$F_{MGi} = [(DSOC_n - DSOC_0) / DSOC_0] / n \quad (2)$$

式中: $DSOC_0$ 为土壤有机碳密度初始值( $g/m^2$ ); $DSOC_n$ 为 $n$ 年后土壤有机碳密度值( $g/m^2$ )。

1.2.3 基础数据 气象数据使用1970—2022年日降水量、日最低气温和日最高气温,数据下载自谷歌搜索引擎(google earth engine)和WorldClim网站(<https://worldclim.org>)。草地土壤质地数据来源于世界土壤数据库(<http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/>)。放牧管理区域和措施数据来源于张掖市政府的退牧还草项目。

### 1.3 研究方法

1.3.1 DAYCENT模型 DAYCENT是模拟大气、植被和土壤中碳(C)和氮(N)通量的生物地球化学模型(CENTURY模型每日时间步长版本),广泛用于模拟不同生态系统中的碳氮动态 $^{[7]}$ 。它最初是为草原开发的,后来用于农田和森林生态系统 $^{[7,14-17]}$ 。该模型包含土壤有机碳循环、水流、反硝化、硝化等子模型。在20 cm土层,土壤有机碳被模拟为死亡植物物质(由两个凋落物库表示)和3个土壤有机质库(称为主动、缓慢和被动的总和) $^{[7]}$ 。所需的模型输入包括天气(日最高气温、日最低气温、日降水量)、每个模拟场景基于现场的事件管理时间表(例如,施肥、有机质添加、耕作、种植、收获、灌溉)和作物特定参数。模型中有超过1 000个相互作用的参数,但只需很小的一部分来准确模拟以适应特定的场地条件 $^{[25]}$ 。结合Brilli $^{[16]}$ 、Guruny等 $^{[26]}$ 、Santos等 $^{[27]}$ 及闫琪等 $^{[28]}$ 关于DAYCENT模型适应性相关文献,针对张掖地区站点,对关键参数进行调整,主要取值如表2所示。

模型模拟所需文件有:根据实测站点的基本信息如土壤质地数据、经纬度创建soil.in文件和site.100

文件;根据站点施肥、有机质添加和耕作等管理信息建立各种管理文件,具体有crop.100、omad.100、cult.100、fert.100、harv.100、irri.100和fix.100;建立模型运行文件(.sch)。其中soil.in文件中所需数据有土层最小深度、土层最大深度、土层容重、土层田间容量、土层萎蔫点及土层中砂砾、粉粒和粘粒的含量。

表2 控制土壤有机碳主要参数值

Table 2 Values of main parameters for controlling soil organic carbon

模型参数	参数描述	取值范围
dec1(2)	最大土壤结构分解率	4.9~7.0
dec2(1)	最大表面代谢分解率	14.8~17.0
dec2(2)	最大土壤代谢分解率	18.5~20.0
dec4	土壤有机质最大分解速率	7.3~9.0
fwiose	潜在蒸发比例因子	0.2~0.75
omlech(3)	最大速率滤出有机碳所需水量	1.9~2.0
dces2(2,1)	中周转期土壤有机质初始碳氮比	16~20.0
dces3(1)	缓慢周转条件下土壤有机质初始碳氮比	7~10.0

1.3.2 模型验证 本研究采用线性回归方程,均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)判断模型模拟结果准确性和可行性。具体计算公式有:

$$X_{obs} = a + bX_{sim} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs} - X_{sim})^2}{N}} \quad (4)$$

式中: $X_{obs}$ , $X_{sim}$ 分别为实测值与模拟值, $a$ 反映模型整体对实测值高估或低估程度, $a$ 越接近1,认为模拟值与实测值之间的一致性较好; $RMSE$ 反映模拟值相对于实测值的绝对误差。

### 1.4. 统计分析

利用Excel 2017进行数据整理,计算土壤有机碳储量;利用SPSS 23进行回归分析;采用ArcGIS 10.8进行数据正态分布检验、异常值剔除、插值方法选取、趋势效应分析和空间分布图绘制。具体采用经验贝叶斯克里金进行空间插值分析;采用Origin 2021绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型验证

经参数调试后,DATCENT模型对土壤有机碳密

度模拟结果与实测值相关性较好,二者线性相关关系通过了显著检验( $P < 0.05$ ) (图2)。这表明运用参数本地化的DATCENT模型对草地土壤有机碳储量进行模拟是可行的。

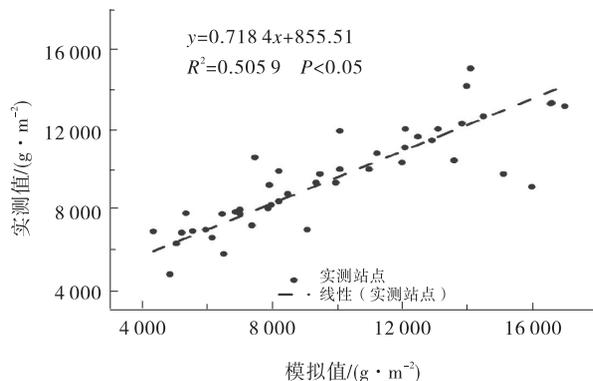


图2 实测值与模拟值的回归分析

Fig. 2 Regression analysis of measured and simulated values

## 2.2 土壤有机碳储量的时间动态变化

民乐县中休牧围栏下平均土壤有机碳储量增长速率远大于退化草地改良和无管理措施,1970—2022年内变动了 $6.6 \times 10^{-3} \text{ Tg/hm}^2$ ,而退化草地改良与无管理措施下平均土壤有机碳储量间存在微小的差值,53年内仅变动了 $1.6 \times 10^{-3} \text{ Tg/hm}^2$  (图3-A)。在肃南县,轮牧围栏站点与无管理措施区域平均土壤有机碳储量的差值随时间推移逐渐扩大,2018年后维持在 $0.17 \times 10^{-3} \text{ Tg/hm}^2$  (图3-B)。高台县的休牧围栏与无管理措施下平均土壤有机碳储量差值随时间推移呈正负交替,直到2006年后,休牧围栏强于无管理措施,差值逐年扩大,2018年差值达到最大值 (图3-C)。休牧围栏与无管理措施下平均土壤有机碳储量差值随时间推移呈正负交替,直到2018年后,休牧围栏有强于无管理措施趋势 (图3-D)。在山丹县,休牧围栏下平均土壤有机碳储量增长趋势远大于其余两种措施,2022年达到 $1.36 \times 10^{-3} \text{ Tg/hm}^2$ ,退化草地改良与轮牧围栏的波动趋势基本一致,2018年后上升趋势均强于无管理措施 (图3-E)。

## 2.3 土壤有机碳储量的空间分布

空间分布显示,土壤有机碳储量呈现出自西南向东北递增的空间分布格局。民乐县、山丹县和肃南县东北部是土壤有机碳储量的高值区,甘州区是土壤有机碳储量的低值区 (图4-A)。休牧围栏措施实施后,高台县、民乐县土壤有机碳储量低值区范围缩减 (图4-C)。肃南县土壤有机碳储量高值区由西南部 (图4-

D) 转变为东北部 (图4-E), 变化趋势贴合整体有机碳储量空间分布格局。康乐草原位于肃南县东北部,在轮牧围栏管理下,土壤有机碳储量稳步增长。山丹马场坐落于山丹县与民乐县接壤区域,该区域实施退化草地改良后,土壤有机碳储量稳步上升,高值区域范围扩大 (图4-F)。民乐县土壤有机碳储量高值区也向东北方向扩张 (图4-G)。

## 3 讨论

本研究利用DAYCENT模型模拟张掖草地土壤有机碳动态变化过程。首先,在本研究中实测站点均匀分布在张掖市山丹县、高台县、民乐县、肃南县和甘州区草地生态系统中,DAYCENT模型是基于点尺度的模型,为避免研究区域内存在较大的空间异质性,模型运行时采用手动控制每个站点的模拟进程;其次,DAYCENT模型在草地生态系统运用时,土壤有机碳的精度会受到测定方法、土壤质地和土壤养分的影响。Zhu等<sup>[29]</sup>研究发现,使用干式燃烧法测定有机碳含量要比使用重铬酸钾氧化法的测定值更加接近模拟值。在模型校准研究中,肃南县红石窝村的站点DAYCENT模拟值要明显小于观测值,分析发现在模型其他参数不变时,站点土壤质地的差异导致了模拟结果的差异。因此,在实际应用中根据站点的实际情况对模拟结果进行相关订正,以有效地用于土壤有机碳的预报工作。本研究中,模拟值与实测值比较吻合,依托实测值建立了适用于张掖草地土壤有机碳估算的模型参数,DAYCENT模型在我国草地生态系统的应用主要集中在东北黑土区<sup>[20]</sup>、华北地区<sup>[28]</sup>,研究结果可将模型应用扩展到更大的研究区域。

本研究表明,草地土壤有机碳随着时间推移显著增加,这与王鑫婧等<sup>[30]</sup>研究结果一致。尽管不同放牧管理措施对土壤有机碳积累起到积极作用,但长期实施后的影响存在差异。例如在民乐县和山丹县,休牧围栏平均土壤有机碳储量增加速率远大于其余措施;山丹县退化草地改良以微弱的差值低于轮牧围栏;肃南县轮牧围栏与无管理措施的差值逐年扩大且2018年后出现最大差距;从长期发展来看,休牧围栏优势逐渐扩大,休牧围栏避免了不合理的人为干扰,更有利于土壤长期稳定固碳<sup>[31]</sup>。

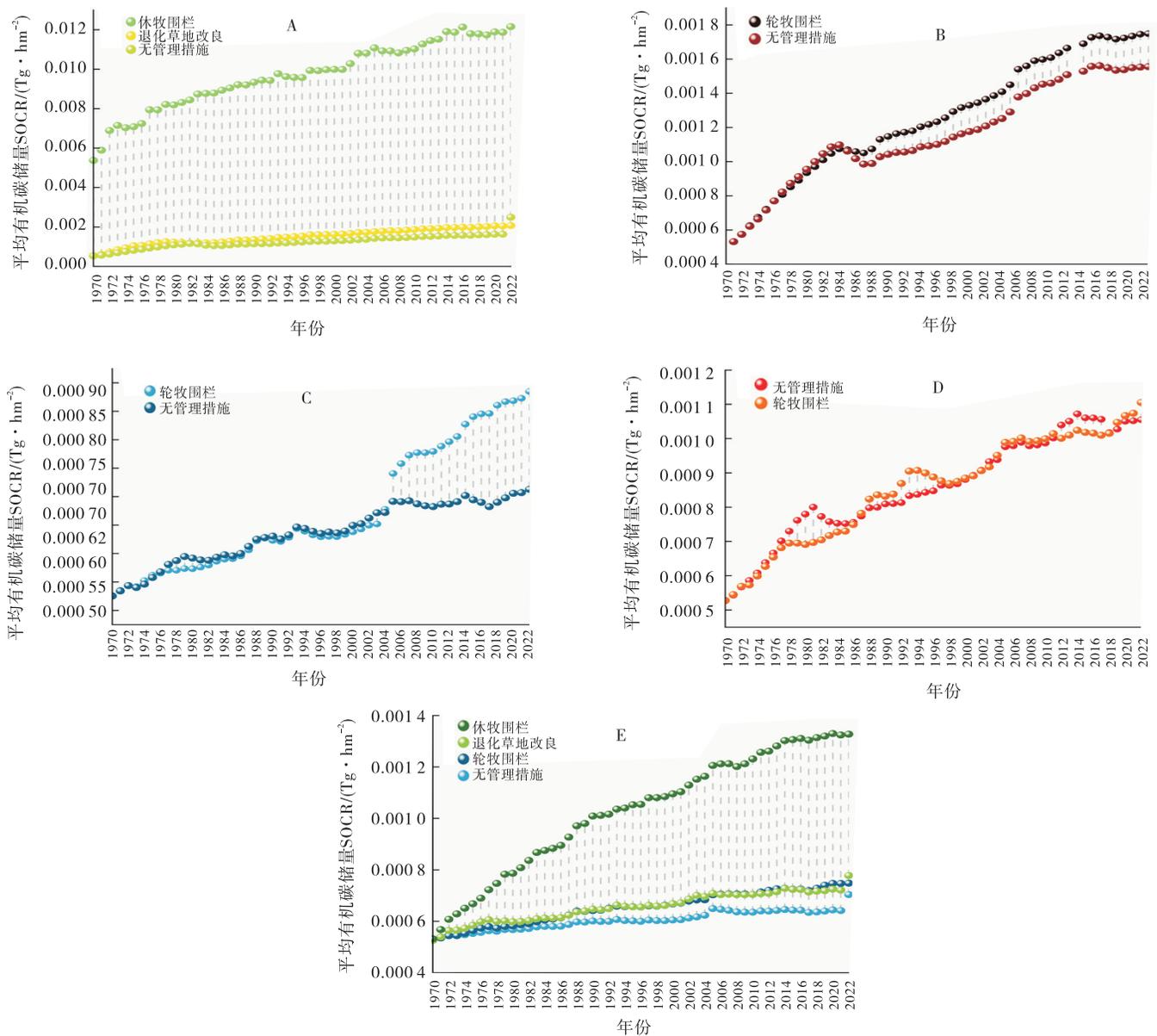


图3 土壤有机碳储量时间动态变化

Fig. 3 Temporal dynamics of soil organic carbon storage

注:图3的A、B、C、D、E分别代表民乐县、肃南县、高台县、甘州区、山丹县的平均土壤有机碳储量时间动态变化。

张掖草地整体上呈现自西南向东北递增的空间分布格局,这与李春亮等<sup>[32]</sup>研究的黄土高原西段表层土壤有机碳储量分布空间格局相同。张掖草地大部分地区都表现出碳汇能力,土壤有机碳储量总体呈上升趋势,其中民乐县、山丹县、肃南县东北部土壤有机碳储量增加趋势明显。但不同地区变化趋势存在一定差异,其中民乐县的高值区随时间推移范围不断扩大且高值区重心保持不变。休牧围栏能够使植物盖度<sup>[31]</sup>、物种多样性<sup>[31]</sup>、凋落物和土壤养分<sup>[33]</sup>等增加,极大地提高草地生态系统碳储量。康乐草原位于肃南

县东南部,在轮牧围栏帮助下缓解草地压力使得肃南县土壤有机碳储量高值区由西南区域转变至东北区域。轮牧围栏减少家畜践踏、土壤紧实度降低,从而使水分养分等得以流通<sup>[34]</sup>,土壤中有有机碳的含量随之增加。土壤有机碳的增加可以通过实施恢复性放牧管理措施来实现。山丹马场在实施退化草地改良后缓解牲畜啃食,草地利用率大于牲畜采食率,土壤有机碳源充足。因此必须对草地进行适当的管理,以最大限度地发挥土壤固碳的潜力。

由于野外实测站点多数集中在草地面积分布广

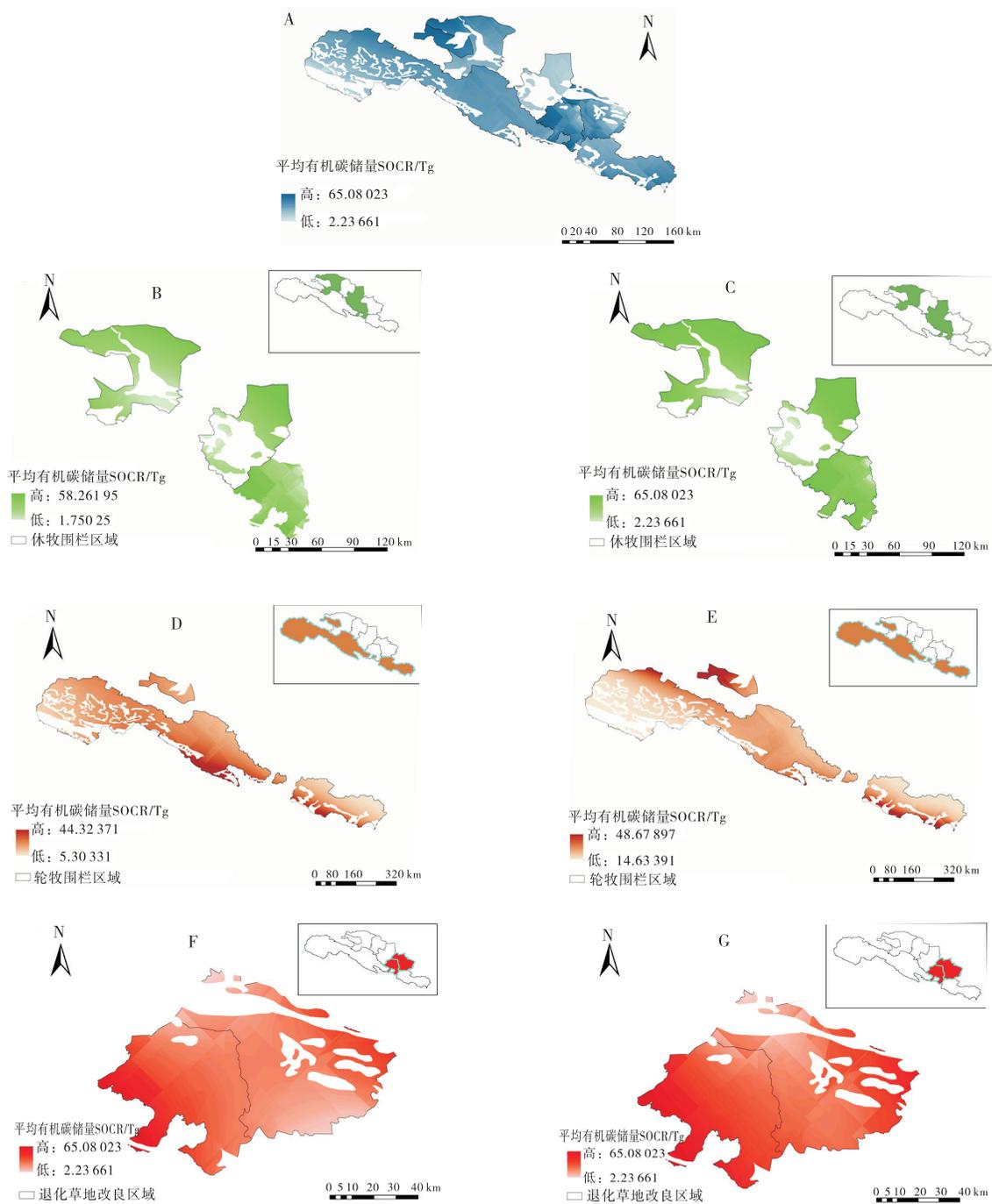


图 4 土壤有机碳储量空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution map of soil organic carbon storage

注:A表示2018—2022年研究区土壤有机碳储量;B、C、D分别表示1970—2017年未实施休牧围栏、轮牧围栏和退化草地改良的研究区土壤有机碳储量;E、F、G分别表示2018—2022年实施休牧围栏、轮牧围栏和退化草地改良的研究区土壤有机碳储量。

泛区域,山区等草地贫瘠地区实测站点受到现实原因限制,采集数目较少。因此,仅通过实测站点土壤有机碳储量进行空间插值一定程度上忽略空间异质性,造成土壤碳库估计过高,这也是未来进一步运用模型需要改进的地方。

#### 4 结论

本研究基于张掖地区45个实测站点数据,对DAYCENT模型进行参数校准,并验证模型模拟结果。实测值与模拟值吻合良好,表明参数本地化后的

DAYCENT 模型能够较好模拟土壤有机碳动态变化。不同放牧管理措施对土壤有机碳积累起到积极作用,随着时间推移休牧围栏下土壤有机碳储量增加速率远大于其余措施,轮牧围栏下土壤有机碳储量以微弱的差值高于退化草地改良。土壤有机碳储量呈现出自西南向东北递增的空间分布格局,其中民乐县、高台县、肃南县东北部是土壤有机碳储量的高值区,甘州区则是土壤有机碳储量低值区。在休牧围栏措施下,土壤有机碳储量高值区范围扩大。肃南县土壤有机碳储量变化趋势与整体土壤有机碳储量空间分布格局一致。山丹县实施退化草地改良后,土壤有机碳储量稳步上升。

#### 参考文献:

- [1] 王乐,朱求安,杜灵通. 草地碳循环主要影响因素及研究方法进展[J]. 草原与草坪,2023,43(4):144—156.
- [2] 王灵艳,杜岩功,许庆民,等. 放牧对青藏高原高寒草地土壤有机碳含量的影响[J]. 草原与草坪,2023,43(3):21—27.
- [3] Oduor C O, Karanja N K, Onwonga R N, *et al.* Enhancing soil organic carbon, particulate organic carbon and microbial biomass in semi-arid rangeland using pasture enclosures[J]. BMC Ecol,2018(118):
- [4] Liu S, Sun Y, Dong Y, *et al.* The spatio-temporal patterns of the topsoil organic carbon density and its influencing factors based on different estimation models in the grassland of Qinghai-Tibet Plateau[J]. PLoS One, 2019, 14(12):22—39.
- [5] Li W, Liu C, Wang W, *et al.* Effects of different grazing disturbances on the plant diversity and ecological functions of alpine grassland ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Front Plant Sci,2021,13(12):65—73.
- [6] Zeng Q, Liu Y, Xiao L, *et al.* How fencing affects the soil quality and plant biomass in the grassland of the loess plateau[J]. Public Health,2017,33(14).
- [7] Parton W J, Stewart J W B, Cole C V. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model[J]. Biogeochemistry, 1988,5(1):109—131.
- [8] 赵雅雯,王金洲,王士超,等. 潮土区小麦、玉米残体对土壤有机碳的贡献——基于改进的RothC模型[J]. 中国农业科学,2016,49(21):4160—4168.
- [9] 马露露,徐婷,李泽森,等. 基于DNDC模型分析降水变化对黄土丘陵区草地生物量和土壤有机碳的影响[J]. 草业科学,2023,40(1):25—36.
- [10] Sakrabani R, Hollis J. Evaluating changes in Soil Organic Matter with Climate Using CENTURY in England and Wales[J]. J Environ Qual,2018,47(4):695—703.
- [11] Ogle S M, Breidt F J, Del Grosso S, *et al.* Counterfactual scenarios reveal historical impact of cropland management on soil organic carbon stocks in the United States[J]. Sci Rep,2023,13(1):14564.
- [12] 郭燕云,刘艳,李秋月,等. CENTURY模型在新疆天山山区的适用性分析[J]. 草地学报,2020,28(1):252—258.
- [13] 秦豪君,韩永翔. 近56a蒙古高原草原地上净初级生产力变化[J]. 干旱区地理,2019,42(4):914—922.
- [14] Gurung R B, Ogle S M, Breidt F J, *et al.* Modeling nitrous oxide mitigation potential of enhanced efficiency nitrogen fertilizers from agricultural systems[J]. Sci Total Environ,2021,20(801):149342.
- [15] Brilli L, Martin R, Argenti G, *et al.* Uncertainties in the adaptation of alpine pastures to climate change based on remote sensing products and modelling [J]. J Environ Manage,2023,15(336):117575.
- [16] Quemada M, Lassaletta L, Leip A, *et al.* Integrated management for sustainable cropping systems: Looking beyond the greenhouse balance at the field scale [J]. Glob Chang Biol,2020,26(4):2584—2598.
- [17] Mayer A, Silver W L. The climate change mitigation potential of annual grasslands under future climates [J]. Ecol Appl,2022,32(8):e2705.
- [18] Zhao F, Wu Y, Hui J, *et al.* Projected soil organic carbon loss in response to climate warming and soil water content in a loess watershed [J]. Carbon Balance Manag, 2021,16(1):24.
- [19] Yue Q, Cheng K, Ogle S, *et al.* Evaluation of four modeling approaches to estimate nitrous oxide emissions in China's cropland [J]. Sci Total Environ, 2019, 20(652):1279—1289.
- [20] 陈磊,王金洲,郝小雨,等. DayCent模型模拟黑土长期施肥下土壤碳氮变化[J]. 黑龙江农业科学,2021(10):23—31.
- [21] 白羽萍,王佳斌,刘恋,等. 黑河流域生态系统服务价值预测及权衡分析——以张掖市为例[J]. 生态学报,

- 2022,42(13).
- [22] 杨冲,王文颖,刘攀,等. 高寒草地土壤理化性质特征及质量评价[J]. 草原与草坪,2022,42(1):1-12.
- [23] Jian ZJ, Lei L, Ni YY, *et al.* Effects of gravel on the evaluation of soil organic carbon density in *Pinus massoniana* plantations. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao*, 2023, 34(8):2073-2081.
- [24] 于双,许冬梅,许爱云,等. 不同恢复措施对宁夏荒漠草原土壤碳氮储量的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(3): 12-19.
- [25] Chang, C, C. M. Cho, *et al.* Nitrous oxide from long-term manured soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62:677-682.
- [26] Gurung R B, Ogle S M, Breidt F J, *et al.* Modeling nitrous oxide mitigation potential of enhanced efficiency nitrogen fertilizers from agricultural systems[J]. *Sci Total Environ*, 2021, 20(801): 149342.
- [27] Santos R S, Zhang Y, Cotrufo M F, *et al.* Simulating soil C dynamics under intensive agricultural systems and climate change scenarios in the Matopiba region, Brazil[J]. *J Environ Manag*, 2023, 347:119149.
- [28] 闫琪,张淑鑫,侯文姬,等. 气候变化下基于DayCent的旱地玉米农田温室气体排放通量模拟[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11):128-136.
- [29] Zhu D, Ciais P, Krinner G, *et al.* Controls of soil organic matter on soil thermal dynamics in the northern high latitudes[J]. *Nat Commun*, 2019, 10(1):3172.
- [30] 王鑫婧,张美玲,杨敏聪,等. 基于CENTURY模型的张掖草地土壤有机碳模拟及影响因素研究[J]. 草地学报, 2023, 31(4).
- [31] 张慧东,尤文忠,魏文俊,等. 辽东山区原始红松林土壤理化性质及其与土壤有机碳的相关性分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(1):
- [32] 李春亮,王翔,张炜,等. 黄土高原西段表层土壤有机碳储量及时空变化规律[J]. 现代地质, 2022, 36(2): 655-661.
- [33] 张旭博,李雄,徐梦,等. 不同土地利用方式下我国北方土壤有机、无机碳库的变化趋势及原因分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(8).
- [34] 张光茹,李文清,张法伟,等. 退化高寒草甸关键生态属性对多途径恢复措施的响应特征[J]. 生态学报, 2020, 40(18):6293-6303.

## Spatiotemporal statistical analysis of soil organic carbon storage in Zhangye grassland under different grazing management measures

WANG Chen<sup>1</sup>, ZHANG Mei-ling<sup>1\*</sup>, TIAN Jing<sup>1</sup>, ZHANG Rui-qi<sup>1</sup>, LI Zhao<sup>1</sup>, XU Yujuan<sup>2</sup>, HUANG Shan-feng<sup>2</sup>, GAO Zhi-wen<sup>2</sup>

(1. Center for Quantitative Biology/College of Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. Climate Bridge (Shanghai) Ltd, Shanghai 200120, China)

**Abstract:** [Objective] The objective of this study is to investigate the effects of different grazing management measures on soil organic carbon storage in Zhangye grassland and to provide essential data and scientific support for the sustainable development of grassland. [Method] The spatiotemporal distribution of soil organic carbon storage (SOCR) in Zhangye grassland from 1970 to 2022 was simulated by using the localized DAYCENT model. Simulation was conducted no grazing management measures and various grazing management practices, including fallow

grazing fence, rotational grazing fence, and degraded grassland improvement. 【Result】 The DAYCENT model with parameter localization effectively simulated the dynamic changes in soil organic carbon in Zhangye. Soil organic carbon (SOC) increased significantly over time, and different grazing management practices positively influenced SOC accumulation. Spatially, soil organic carbon storage showed an increasing distribution pattern from southwest to northeast, with high-value areas of organic carbon storage were found in the northeast of Minle County, Gaotai County and Sunan County. 【Conclusion】 From the perspective of long-term development, the carbon sequestration capacity of fallow grazing fences is stronger than that of rotational grazing fences and degraded grassland improvement. The carbon sequestration advantage of rotational grazing fences is slightly higher than that of degraded grassland improvement. In terms of grassland management in Zhangye, long-term soil carbon sequestration can be achieved through reasonable grazing measures.

**Key words:** meadow ; management measures ; soil organic carbon stocks ; DAYCENT MODEL ; spatiotemporal statistics

(责任编辑:新奇峰)