

黄土区退耕草地合理放牧可减少 土壤 CO₂ 排放和土壤侵蚀

张肖林, 李勇*, 于寒青, 刘文祥

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要:【目的】在退耕草地实施合理放牧,有助于减少土壤 CO₂ 排放、减缓土壤侵蚀。为验证此假设,本研究选择黄土高原渭北旱原坡地,建立退耕草地放牧、退耕草地不放牧和传统农业耕作三种处理的对比试验小区,定量研究了退耕草地合理放牧相对于退耕草地在减少土壤 CO₂ 排放和土壤侵蚀的作用及其影响因素,为探寻在我国西部退耕还草区实施畜牧业生产与环境保护的协调发展模式提供科学依据。【方法】在建立的退耕草地放牧、退耕草地不放牧和传统农业耕作 3 种处理的试验小区,利用 LI-8100 碳通量自动测量仪原位监测植物生长期(4~8 月)和放牧前后土壤 CO₂ 排放速率的变化,同时利用时域反射仪(TDR)测定表层 0—10 cm 土壤含水量,用地温表测定土壤表层 2 cm 和 5 cm 的温度。利用环境放射性核素⁷Be 示踪技术监测较大降雨事件引起的土壤侵蚀速率,同时取样测定侵蚀区土壤有机碳含量,比较不同处理小区侵蚀导致的土壤有机碳流失量。【结果】观测期间,3 种处理 CO₂ 平均排放速率大小顺序为退耕草地[3.69 ± 0.39 μmol/(m²·s)] > 退耕草地放牧[3.00 ± 0.44 μmol/(m²·s)] > 传统农耕地[1.99 ± 0.22 μmol/(m²·s)],坡耕地退耕还草后土壤 CO₂ 排放增加了 85%,而合理放牧使退耕草地土壤 CO₂ 排放量减少了 19%。放牧后退耕草地土壤 CO₂ 排放速率平均减少了 11%,减少值在 2%~41% 之间。观测期内,退耕草地放牧后土壤侵蚀速率比农耕地和退耕草地分别减少了 93% 和 77%。坡耕地退耕还草后土壤 CO₂ 排放增加主要由于草被植物引起土壤有机碳储量增加和土壤侵蚀强度减小,放牧后退耕草地土壤 CO₂ 排放减少主要与动物踩踏引起土壤容重明显增加及草类植被地上部分向土壤中输入的有机碳的减少有关。水分、温度影响因素无法解释 3 种处理间土壤 CO₂ 排放差异。【结论】合理放牧不仅能显著减少退耕草地土壤 CO₂ 排放,而且可以有效控制退耕草地土壤和有机碳侵蚀流失。放牧期间动物的踩踏作用引起草地土壤容重显著增加是退耕草地土壤 CO₂ 排放量和土壤侵蚀速率减少的主要原因。本研究结果揭示,在我国黄土高原和类似的退耕还草地区实施合理放牧既可以促进当地畜牧业生产,又能控制土壤侵蚀和减少 CO₂ 的排放,是一种值得探究的草地可持续发展管理模式。

关键词: 退耕草地; 合理放牧; 土壤 CO₂ 排放; 土壤侵蚀

中图分类号: S153.6⁺1; S157 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2016)04-0988-10

Reasonable grazing on grain for green grassland on Loess Plateau can reduce soil CO₂ emission and soil erosion

ZHANG Xiao-lin, LI Yong*, YU Han-qing, LIU Wen-xiang

(Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: 【Objectives】 Reasonable grazing on grain for green grassland is considered helpful for reducing soil CO₂ emissions as well as soil erosion. In order to verify this hypothesis, we set up three treatments at our study site – a slope on the Weibei Loess plateau – in order to investigate the effect of reasonable grazing on soil CO₂ emissions and soil erosion. Additionally, we hope this study can provide a scientific basis for the coordinated development of livestock production and environmental protection in Chinese western grain for green grassland. 【Methods】 The

收稿日期: 2015-11-16 接受日期: 2016-01-11 网络出版日期: 2016-03-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41171231); 国际原子能机构项目(IAEA research contract No. 17908); “十二五”国家科技支撑计划课题(2013BAD11B03)资助。

作者简介: 张肖林(1991—), 女, 山西晋中人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与碳循环研究。E-mail: zx19911025@163.com

* 通信作者 E-mail: liyong@caas.cn

three treatments used in our study were 1) grain for green grassland with grazing (G + G), 2) grain for green grassland without grazing (G - G) and 3) conventional tillage (CT). Soil CO₂ emission rates were automatically monitored by a LI-8100 carbon flux measuring instrument *in situ*, with soil moisture content measured by TDR and soil temperature measured by a thermometer. The environmental radioactive nuclide, ⁷Be, was used as a tracer for the soil erosion rate following heavy rainfall. **[Results]** During the test period, average CO₂ emission rates of these 3 test plots were as follows: G - G [3.69 ± 0.39 μmol/(m²·s)] > G + G [3.00 ± 0.44 μmol/(m²·s)] > CT [1.99 ± 0.22 μmol/(m²·s)]. Soil CO₂ emission in G - G was 85% more than CT, whilst soil CO₂ emission rate in G + G was 23% less than G - G. Grazing activity was found to significantly reduce soil CO₂ emission rates in G + G by 2% - 41%, with the average of 11%. During the observation period, the soil erosion rate in the G + G plot was significantly less than that observed in both CT and G - G, by 93% and 77%, respectively. Compared to CT, the increased soil CO₂ emissions observed in G - G was due to increased SOC, whilst for G + G this was due to decreased soil erosion. Trampled ground as a result of animal grazing led to a significant increase in soil bulk density with a concomitant reduction in the amount of organic carbon entering the soil. Both of these factors led to the reduction of soil CO₂ emissions in G + G. However, the difference of soil CO₂ emissions among these three plots could not be explained by soil moisture and temperature. **[Conclusions]** Our study found that reasonable grazing activity would not only decrease the soil CO₂ emissions, but also could effectively control soil erosion and SOC loss, which would in turn facilitate the increase of the soil carbon reserve. Trampled ground from animal grazing can lead to an increase in soil bulk density, a major contributing factor for the reduction in soil CO₂ emissions and soil erosion rates. Our research revealed that in the Chinese Loess plateau or similar grain for green region, reasonable grazing can not only promote the local livestock production, but also help control soil erosion and reduce CO₂ emissions. Thus this has been a worthwhile study for investigating various models of sustainable development for grassland management.

Key words: grain for green grassland; reasonable grazing; soil CO₂ emission; soil erosion

植被是防治水土流失,改善侵蚀退化生态环境的重要措施^[1]。在陡坡地实施退耕还林(草)工程,可以在减少土壤侵蚀的同时改善生态环境^[2]。自1999年以来,在我国西部坡耕地实施的退耕种草及其配套的牛羊圈养,封山禁牧管理,有效地减少了该区的土壤侵蚀、增加了土壤碳汇、改善了生态环境^[3]。有大量的研究表明退耕还林(草)会增加土壤有机碳的含量^[4-5],并且对改变局部地区的小气候有一定的影响。但目前对退耕还林还草的生态环境效应仍有很大争议^[6]

黄土高原是我国主要的农牧区,退耕还林引起耕地减少,并且在退耕还林地区实施封山禁牧,使得该区面临的粮食需求和畜牧业生产问题越来越突出。另外,退耕还林后带来了一些环境问题,主要表现为土壤呼吸的增加。土壤呼吸(即土壤 CO₂ 排放)是陆地生态系统碳循环的重要过程,土壤 CO₂ 排放量约占全球 CO₂ 排放的 1/4^[7],是全球化石燃料 CO₂ 释放量的 10 倍以上^[8-9]。土壤呼吸的细微变化会显著地影响到大气中的 CO₂ 含量^[10],对全球温室效应产生影响。王建国等^[11]的研究发现退耕

还林(草)后土壤呼吸明显增加。因此在退耕还草区探索既能保障当地畜牧业生产,增加农民收入,又能减少退耕草地土壤 CO₂ 排放的措施是十分必要的。

贺金红等^[12]提出在黄土高原区因地制宜地推进生态退耕,退耕促林草,林草促畜牧,以畜牧保证致富,是保证黄土区粮食安全形成一条良性循环的主要思路。Zhang 等^[13]对青藏高原的放牧研究发现长时间的禁牧并不会显著增加土壤的固碳效应,放牧有助于促进草地生态系统对全球气候变化的适应。郭明英等^[14]对前人的研究结果进行总结,发现放牧会通过草地温度、湿度、土壤有机质、C/N等理化性质以及叶面积指数等生物因素产生影响,进而影响土壤呼吸;马涛等^[15]对内蒙古锡林河流域草地放牧的探究表明,在草木生长季节放牧会显著降低土壤呼吸;Wang 等^[16]在内蒙古四子王旗短花针茅草原研究发现,随着放牧程度的增加土壤呼吸强度降低。Wolf 等^[17]对内蒙古草原的放牧研究发现,动物踩踏可以减少 N₂O、CO₂ 等气体的排放。段敏杰等^[18]对西藏那曲地区不同程度的放牧

研究表明,适度放牧有利于草地种群多样性的建立,并且可以最大程度地提高土地利用效率,防治土地退化。Zhang 等^[19]的研究也表明长期禁牧不利于草地植物多样性和土壤养分含量的存储,有必要根据生态系统的动态响应对草地进行适度放牧。上述研究主要集中在草原放牧对土壤呼吸和温室气体排放等的影响,而关于退耕草地放牧对土壤侵蚀和土壤呼吸的研究却鲜有报道。

基于上述研究进展,我们提出如下假设:在退耕草地实施合理放牧,有助于减少土壤 CO₂ 排放、减缓土壤侵蚀。据此,本研究选择黄土高原渭北旱原典型坡耕地为研究区,建立退耕草地放牧,退耕草地不放牧和传统农业耕作 3 种处理的对比试验小区,定量研究了退耕草地合理放牧相对于退耕草地在减少土壤 CO₂ 排放和土壤侵蚀的作用及其影响因素,为探寻在我国西部退耕还草区实施畜牧业生产与环境保护协调发展模式提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于黄土高原渭北旱原陕西省渭南市西芋村(109.68°E,35.08°N),属于暖温带季风型大陆性气候区,海拔 665.42 m,年平均气温 13.2℃左右,年降雨量为 550mm 左右^[20]。所选实验地为一块有 200 多年耕种历史的坡耕地,面积为 0.53 hm²,坡长为 30 m,坡度在 4°~6°之间,坡向为西南方向,土壤类型为黄绵土。农作物种植主要是小麦与玉米轮作。

1.2 试验设计

2014 年 10 月在选定的坡耕地,沿顺坡断面分别建立 7 个全坡面小区,3 个试验处理,分别是:3 个传统耕作(农耕地)试验小区(Conventional tillage, CT),每个小区面积为 3 m × 30 m;4 个退耕小区,包括 2 个退耕草地放牧(放牧地)试验小区(Grassland + Grazing, G + G),每个小区面积为 3 m × 30 m;2 个退耕草地不放牧(草地)试验小区(Grassland-Grazing, G - G),每个小区面积为 6 m × 30 m。具体试验方案如下:

1) 农耕地(CT) 2014 年 10 月顺坡耕作,种植冬小麦,2015 年 5 月底收获;6 月顺坡耕种夏玉米。施肥量采用当地农民的施肥用量,为磷酸二铵复合肥 525 kg/hm² 和尿素 150 kg/hm²。

2) 放牧地(G + G) 不耕作,待原农耕地变为草地后进行合理的放牧活动,待退耕草地草木生长至 20 cm 左右时进行放牧,放牧羊数为 10 只,放牧

时长约 1 小时,即将草吃至 5~10 cm 即可,每月放牧 3~4 次^[21]。

3) 草地(G - G) 不耕作,待原农耕地变为草地后不进行放牧活动。

1.3 试验监测与采样

为了确定各小区的土壤理化性质和土壤有机碳含量的原始水平和空间变异性,在小区布设前,对土壤容重和有机碳含量进行了监测,其程序为:在每个小区上中下 3 个坡位分别采样,用原状根钻(直径 8cm)采集 0—60 cm 土壤剖面样品,然后切割为 0—15 cm、15—30 cm、30—45 cm、45—60 cm 4 个层次原状土。将土样带回实验室测定土壤容重,然后风干后过 0.15 mm 筛,用重铬酸钾-外加热法测定土壤有机碳含量^[22],从测定结果看出(表 1),各小区布设前土壤理化性质的原始水平无显著差异。

表 1 试验地初始土壤容重和 0—60 cm 层土壤有机碳储量
Table 1 The initial bulk density and soil organic carbon in 0—60 cm layer of experient plot

处理 Treatment	容重 Bulk density (g/cm ³)	有机碳储量 Organic carbon (t/hm ²)
农耕地 Conventional tillage	1.39 ± 0.02 a	41.75 ± 0.96 a
放牧地 Grassland + Grazing	1.36 ± 0.03 a	43.66 ± 0.99 a
草地 Grassland - Grazing	1.38 ± 0.03 a	44.01 ± 1.36 a

注(Note): 同列数据后字母相同表示在 $P = 0.05$ 概率水平无显著差异 Values followed by the same letter within a column are not significantly different at $P = 0.05$ probability.

土壤 CO₂ 排放速率的原位监测从 2015 年 4 月开始,其程序为:在每个小区设定 3 个监测点,分别为坡上部(upper)、中部(middle)、坡下部(lower);土壤 CO₂ 排放速率采用 Li-8100 开路式土壤碳通量测量仪测定^[23],在测定前 24 小时,将直径为 10 cm 的 PVC 环埋入样点较为平坦的地段,使 PVC 环顶端高出地面 2 cm,然后将环周围的草本和凋落物去除;在测定 CO₂ 排放速率的同时用地温表测定土壤表层 2 cm 和 5 cm 温度,用时域反射仪(TDR 300)测定 0—10 cm 深度的土壤含水量。将每天上午 9:00~11:00 测定的 CO₂ 排放值作为当日土壤 CO₂ 排放均值^[24],每隔 3 天测定一次,每月测定 8~10 次,监测时间从 2015 年 4 月 22 日至 8 月 10 日。6 月因小麦收获、玉米播种和当月下旬连续降雨,CO₂ 排放速率及土壤温度、含水量的测定只有 3 次。试验观测期间的降雨分布如图 1 所示。

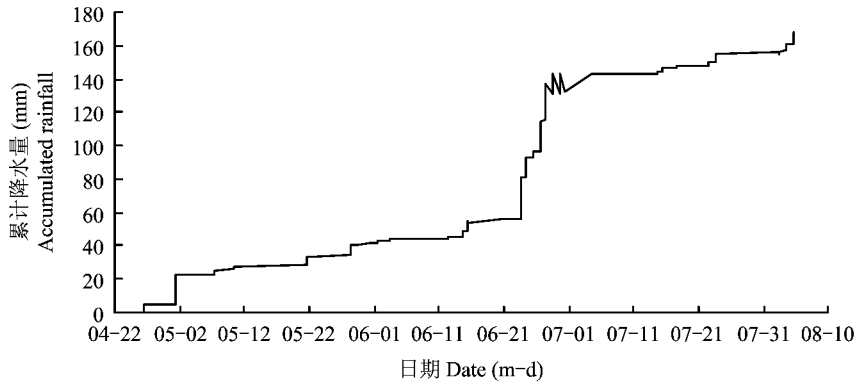


图1 试验地 2015 年 4 月 22 日~8 月 10 日累计降雨量

Fig. 1 The accumulated rainfall of test plot during April 22 to August 10 in 2015

基于⁷Be 示踪技术的土壤侵蚀速率确定:

参考点 为了消除侵蚀和堆积对测定土壤⁷Be 面积含量背景值的影响,在试验地顶部平坦部位建立 3 个 1 m × 1 m 的小区作为参考点,不作任何处理,在降雨期之前去除杂草,以防止杂草对⁷Be 的拦截;

⁷Be 样品采集 在 6 月 23 日之前,当地出现了严重的干旱,总降雨量不足 60 mm,6 月 23 日~7 月 4 日之间出现了连续性的降雨,且降雨量达到 87 mm(图 1),降雨产生的径流导致了土壤侵蚀,在此次降雨事件后采集土壤表层 2 cm 的土样,其程序为在产生侵蚀的次降雨事件后在每个处理小区的上中下 3 个坡位,利用土样采集器取 2 cm 表层土样,带回风干过 2 mm 筛后,用 HP Ge Gamma 谱仪测定⁷Be 比活度 (Bq/kg),并计算土壤⁷Be 面积含量(Bq/m²)。

1.4 数据分析

1.4.1 土壤有机碳储量 SOC_i (t/hm²) 的计算^[25] 如下:

$$SOC_i = C_i D_i E_i / 10 \quad (1)$$

式中, *i* 表示研究的土层; *C_i* 为土壤有机碳浓度 (g/kg); *D_i* 为土壤容重 (g/cm³); *E_i* 为土层深度 (cm); 10 为换算系数。

若某一剖面有 *K* 层组成,则该剖面的有机碳储量 SOC_{stock} 的计算公式为:

$$SOC_{stock} = \sum_{i=1}^k SOC_i = \sum_{i=1}^k C_i D_i E_i / 10 \quad (2)$$

1.4.2 土壤 CO₂ 排放速率的计算

用所测数据的平均值来表示,CO₂ 排放累计值的计算公式如下:

$$C_{\text{累计}} = \sum_{i=4}^8 C_i = \sum_{i=4}^8 CO_2 \text{flux} \times 10 \times 4.32 \times$$

$$10^{-4} \times T_i \quad (3)$$

式中, *C_{累计}* 为试验期内实验地呼吸 C 累积量 [CO₂ - C t/(hm² · s)]; CO₂ flux 为土壤排放 CO₂ 速率 [μmol/(m² · s)]; 10 为按每天土壤排放 CO₂ 10 小时计算 (h); 4.32 × 10⁻⁴ 为单位转换率,将 μmol/(m² · s) 转换为 CO₂ - C t/(hm² · s); *T_i* 为每个月的天数。

土壤表层 2cm 和 5cm 的温度及土壤含水量均为不同处理所测数据的平均值。

1.4.3 次降雨土壤侵蚀的计算

用⁷Be 作为示踪元素,利用 Walling 模型^[26-27] 来估算土壤侵蚀速率,其具体计算方法如下:

假设⁷Be 在表层土壤剖面中呈指数分布

$$C_{Be}(x) = C_{Be}(0) e^{-x/h_0} \quad (4)$$

式中, *x* 为质量深度 (kg/m²); *C_{Be}(x)* 为 *x* 处⁷Be 质量比活度 (Bq/kg); *C_{Be}(0)* 为地表 (即 *x* = 0) ⁷Be 质量比活度 (Bq/kg); *h₀* 为张弛质量深度 (kg/m²)。

土壤中⁷Be 背景值 *A_{ref}* (Bq/m²) 是无侵蚀无沉积平坦地面上土壤⁷Be 面积比活度:

$$A_{Be}(0) = A_{ref} = \int_0^{\infty} C_{Be}(x) dx = C_{Be}(0) h_0 \quad (5)$$

质量深度 *x* 以下⁷Be 面积比活度 *A_{Be}(x)* (Bq/m²) 可用下式表示:

$$A_{Be}(x) = \int_x^{\infty} C_{Be}(0) h_0 e^{-x/h_0} = A_{ref} e^{-x/h_0} \quad (6)$$

在侵蚀区模型假设侵蚀作用使表层一定厚度的整个薄层土壤流失掉。设 *h* (kg/m²) 为土壤侵蚀的质量深度,且 *h* = *R_{Be}*, 土壤侵蚀速率 *R_{Be}* (kg/m²) 可由下式求得:

$$R_{Be} = h = h_0 \ln(A_{ref}/A_{Be}) \quad (7)$$

次降雨侵蚀引起的土壤有机碳流失量 (t/hm²)

= 土壤侵蚀速率 (t/hm^2) \times 土壤有机碳含量 (g/kg)^[28]。

数据处理和制图均用 Excel 2013 完成。有关不同处理间的土壤 CO_2 排放速率、温度水分等的差异性分析 (ANOVA) 和土壤 CO_2 排放通量与温度水分之间的相关性分析均用 SAS 9.2 软件完成。

2 研究结果

2.1 植物生长期不同处理土壤 CO_2 排放通量差异

植物生长期 (4 ~ 8 月) 不同处理间的土壤

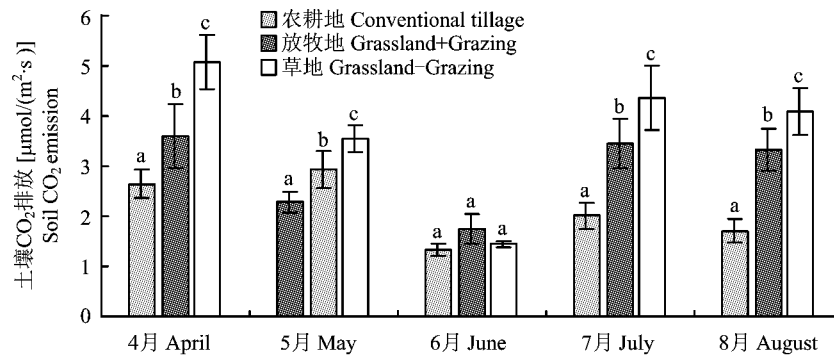


图2 2015年植物生长期不同处理间 CO_2 排放通量的差异

Fig. 2 The variation of soil CO_2 flux in treatments during plant growth period in 2015

[注 (Note): 柱上不同字母表示不同处理差异达到 5% 显著水平 Different letters above the bars mean significant at 5% level among different treatments.]

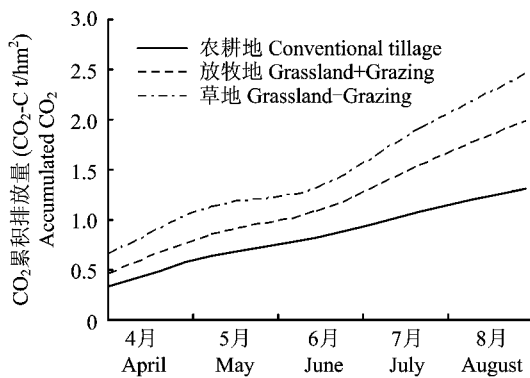


图3 2015年植物生长期不同处理 CO_2 累积排放量

Fig. 3 The accumulated CO_2 of different treatments during plant growth period in 2015

2.2 植物生长期不同处理间土壤温度和含水量的差异

表2为3种处理在植物生长期土壤表层 2 cm 和 5 cm 温度以及地表 10 cm 土壤含水量的平均值。

CO_2 排放通量除 6 月份外, 均有显著性差异 ($P < 0.05$), 其大小序列为: 草地 > 放牧地 > 农耕地 (图 2)。草地、放牧地和农耕地在植物生长期内 CO_2 累积排放量 (图 3) 分别为 $2.45 \pm 0.46 CO_2 - C t/hm^2$ 、 $1.99 \pm 0.29 CO_2 - C t/hm^2$ 和 $1.31 \pm 0.14 CO_2 - C t/hm^2$ 。放牧地和草地土壤 CO_2 累积排放量分别是农耕地的 1.51 和 1.87 倍, 且在植物生长的 5 个月里放牧地相对于草地土壤 CO_2 累积排放量减少了 19%。

测量结果表明, 土壤表层 2 cm 和 5 cm 的温度平均值大小序列为草地 > 放牧地 > 农耕地, 2 cm 土壤温度在不同处理间没有显著差异, 而 5 cm 土壤温度在农耕地和草地之间有显著性差异 ($P < 0.05$)。土壤含水量在不同处理间有显著差异 ($P < 0.05$), 且大小序列为放牧地 > 农耕地 > 草地。

2.3 不同处理样地土壤温度和含水量对土壤 CO_2 排放的影响

土壤温度和含水量对土壤 CO_2 排放速率的相关性分析结果 (表 3) 显示, 农耕地土壤 CO_2 排放速率与 2 cm 和 5 cm 温度均呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$), 与土壤含水量呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$)。放牧地和草地的土壤 CO_2 排放速率与土壤温度无显著相关性, 而与土壤含水量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。这说明在放牧地和草地, 土壤温度可能不是控制土壤呼吸的主要因素, 土壤呼吸主要受土壤含水量的影响。

表 2 植物生长期不同处理土壤温度和含水量变化比较
Table 2 Soil temperature and moisture of different treatments during plant growth period

处理 Treatment	土壤 2 cm 温度 Soil temperature in 2 cm depth (°C)	土壤 5 cm 温度 Soil temperature in 5 cm depth (°C)	土壤含水量 Soil moisture (V%)
农耕地 Conventional tillage	28.21 ± 0.79 a	23.88 ± 0.64 a	10.29 ± 1.13 a
放牧地 Grassland + Grazing	29.44 ± 0.71 a	26.30 ± 0.67 ab	13.11 ± 1.20 b
草地 Grassland - Grazing	30.54 ± 1.12 a	27.16 ± 0.8 b	10.08 ± 1.35 a

注 (Note): 同列数据后字母相同表示在 $P=0.05$ 概率水平无显著差异 Values followed by the same letter within a column are not significantly different at $P=0.05$ probability.

表 3 各处理土壤 CO₂ 排放速率与土壤温湿度的相关性
Table 3 Correlated coefficients between soil CO₂ emission and soil temperature and moisture in different treatments

参数 Parameter	农耕地 Conventional tillage		放牧地 Grassland + Grazing		草地 Grassland-Grazing	
	样本 Sample	相关系数 Coefficients	样本 Sample	相关系数 Coefficients	样本 Sample	相关系数 Coefficients
	土壤 2 cm 温度 Soil temperature in 2 cm depth	105	-0.454 **	78	-0.045	91
土壤 5 cm 温度 Soil temperature in 5 cm depth	105	-0.444 **	78	-0.073	91	-0.133
土壤含水量 Soil moisture	105	0.434 **	78	0.328 **	91	0.270 **

注 (Note): * $-P < 0.05$; ** $-P < 0.01$.

2.4 放牧活动对草地土壤呼吸和土壤温度及含水量的影响

从图 4 可以看出,与放牧前比较,合理放牧后草地土壤 CO₂ 排放速率明显减少。表 4 表明,除 5 月 7 日、7 月 10 日、7 月 17 日这 3 次放牧活动外,放牧活动均引起了草地土壤 CO₂ 排放速率减少,与放牧前比较土壤 CO₂ 排放通量平均减少了 11%。放牧后土壤含水量相对于放牧前明显减少,减少的次数占整个放牧活动的 63%;与放牧前比较,放牧活动未引起 2 cm 和 5 cm 土壤温度发生明显变化。放牧引起 CO₂ 排放通量减少与土壤含水量减少的规律并不完全一致。

2.5 放牧对土壤侵蚀和有机碳流失的影响

土壤容重是影响土壤侵蚀的重要因素,在试验观测期间 3 种处理的土壤容重大小序列依次是放牧地 > 草地 > 农耕地。与参考点⁷Be 的面积含量 (259.84 Bq/m²) 比较,农耕地、放牧地和草地的⁷Be 含量分别减少了 35.93%、3.30% 和 13.58%,说明 3 个处理样地内均产生不同程度侵蚀。土壤侵蚀速率计算结果显示,放牧地的土壤侵蚀速率最小,草地次之,农耕地最大;与农耕地相比,放牧地和草地土壤侵蚀速率分别减少了 93% 和 68%。侵蚀导致农

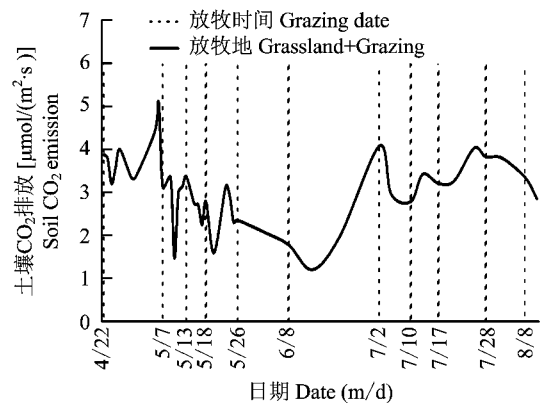


图 4 2015 年放牧对土壤 CO₂ 排放的影响
Fig. 4 The influence of grazing on soil CO₂ emission in 2015

耕地的土壤有机碳流失量最大,与其相比放牧地和草地分别减少了 92% 和 58%。

3 讨论

本研究发现,退耕草地合理放牧后土壤 CO₂ 排放速率显著降低。在植物生长的 5 个月,放牧使得退耕草地土壤 CO₂ 排放量减少了 0.69 t/hm²。这与马涛等^[15]的关于放牧会导致土壤呼吸减少的研究

表 4 放牧前、后土壤 CO₂ 排放通量及土壤温度和含水量的变化差异
Table 4 The variation of CO₂ emission, soil temperature and moisture after grazing

放牧日期 Date of grazing (y/m/d)	土壤 CO ₂ 排放 Soil CO ₂ emission		土壤 2 cm 温度 Soil temperature in 2 cm depth			土壤 5 cm 温度 Soil temperature in 5 cm depth			土壤含水量 Soil moisture			
	放牧前 Before grazing	放牧后 After grazing	差异百分数 Percentage difference	放牧前 Before grazing	放牧后 After grazing	差异百分数 Percentage difference	放牧前 Before grazing	放牧后 After grazing	差异百分数 Percentage difference	放牧前 Before grazing	放牧后 After grazing	差异百分数 Percentage difference
	[μmol/(m ² ·s)]	[μmol/(m ² ·s)]	(%)	(°C)	(°C)	(%)	(°C)	(°C)	(%)	(V %)	(V %)	(%)
2015/4/22	3.87	3.80	-2	17.95	22.65	26	15.68	19.35	23	22.08	22.95	4
2015/5/7	3.12	3.34	7	22.60	27.00	10	20.08	22.87	14	17.05	19.02	12
2015/5/13	3.37	2.73	19	27.58	27.12	-2	22.42	23.60	5	15.88	22.65	43
2015/5/18	2.78	1.58	-43	31.00	29.80	-4	25.72	26.82	4	11.05	9.75	-12
2015/5/26	2.34	2.05	-12	31.60	23.62	-25	27.23	22.38	-18	10.13	12.43	23
2015/6/8	1.76	1.18	-33	35.78	31.53	-12	29.47	28.27	-4	8.82	1.39	-84
2015/7/2	4.08	2.94	-28	28.75	27.35	-5	27.38	26.25	-4	30.85	24.47	-21
2015/7/10	2.78	3.42	23	29.88	33.43	12	28.33	30.77	9	14.69	14.05	-4
2015/7/17	3.20	3.26	2	26.17	31.38	20	25.07	28.57	14	15.94	11.74	-26
2015/7/28	3.82	3.80	-1	39.17	37.87	-3	33.47	35.30	5	0.21	0.00	-100
2015/8/8	3.34	2.84	-15	31.15	31.45	1	28.95	28.90	0	16.22	12.08	-25

注 (Note) : 表中的差异百分数为放牧后相对于放牧前土壤 CO₂ 排放通量变化的百分数, 负值表示减少, 正值表示增加 The percentage difference was the percentage change of soil CO₂ emission after grazing relative to before grazing, negative value represents reduced, positive value means increased.

结果相一致;Chen 等^[29]在黄土高原草地放牧的研究结果表明,在夏季草地土壤呼吸速率会随着载畜量的增加而减少;Wolf 等^[17]对内蒙古草原的放牧研究也表明,放牧会导致土壤中 N₂O、CO₂ 等温室气体的排放速率显著减小。退耕草地放牧后土壤呼吸的减少主要与放牧引起土壤容重增加和有机碳减少有关。与退耕草地比较,放牧后退耕草地土壤容重增加了 3% (表 5)。曹广民等^[30]也发现,在连续的放牧情况下,动物的踩踏作用会增加土壤紧实度,土壤孔隙度减小、容重变大,从而降低了土壤中 CO₂ 的释放速率。因此,动物踩踏作用引起土壤容

重的增加是导致退耕草地土壤呼吸减少的主要因素之一。有机碳也是影响土壤呼吸的重要因素,土壤有机质是微生物进行分解活动排放 CO₂ 的物质基础,张东秋等^[31]研究表明土壤呼吸与土壤有机碳含量成正相关。Wang 等^[32]对黄土高原草地的放牧研究也表明,禁牧会增加土壤呼吸,这主要与禁牧会增加地上、地下植被生物量有关。在本研究中,放牧导致退耕草地土壤有机碳含量减少了 17%。因此,放牧活动会引起草本植被向土壤输入的有机碳减少,从而导致草地土壤有机碳储量的降低,是放牧导致退耕草地土壤呼吸减少的又一重要因素。

表 5 次降雨事件导致的土壤和土壤有机碳侵蚀量

Table 5 Soil erosion rates and SOC erosion stock after rainfall event

处理 Treatment	容重 Bulk density (g/cm ³)	⁷ Be 含量 ⁷ Be inventory (Bq/m ²)	土壤侵蚀量 Soil erosion (t/hm ²)	有机碳含量 SOC contentc (g/kg)	土壤碳流失量 SOC erosion (t/hm ²)
农耕地 Conventional tillage	1.19 ± 0.07 a	166.47 ± 19.78 a	17.5 ± 4.52 a	7.01 ± 0.05 a	0.12 ± 0.22 a
放牧 Grassland + Grazing	1.35 ± 0.03 a	251.27 ± 24.02 c	1.3 ± 3.60 c	7.78 ± 0.56 a	0.01 ± 2.01 a
草地 Grassland - Grazing	1.31 ± 0.00 a	224.56 ± 19.63 b	5.6 ± 1.04 b	9.39 ± 0.22 b	0.05 ± 0.23 a

注 (Note): 同列数据后字母相同表示在 $P=0.05$ 概率水平无显著差异 Values followed by the same letter within a column are not significantly different at $P=0.05$ probability.

土壤水分和土壤温度是影响土壤呼吸的重要因素^[31]。但本研究显示,尽管土壤含水量与土壤 CO₂ 排放呈显著的正相关关系 ($P < 0.01$),但土壤温度与土壤 CO₂ 排放没有显著相关关系。这可能是因为干旱半干旱地区水分对于土壤呼吸的作用要大于温度^[31],尤其是当水分成为胁迫因子的时候^[33],在极端干旱且高温的情况下水分成为限制土壤呼吸的因素^[34],这与 Wang 等^[32]在黄土高原草地的放牧研究结果一致,Chen 等^[29]的研究也表明夏季湿度是影响黄土高原草地土壤呼吸的主要因素。另外,在干旱地区,阵发式的降水可以促进土壤微生物活性^[35],提高土壤呼吸效率,激发土壤 CO₂ 排放^[36]。如在本实验观测 6 月 23 日降水后,土壤呼吸明显增加 (图 3)。

合理放牧后退耕草地土壤呼吸的减少不能用土壤水分变化来解释。在干旱的条件下,土壤容重的增加会减少土壤的导气率^[37],进而减少土壤水分蒸发,使土壤含水量增加。例如,在本试验 5 个月的作物生长期间,当地累积降雨量不足 180 mm,属于干旱天气 (图 1),放牧的踩踏作用致使退耕草地土壤容重增加,土壤水分蒸发量减少,土壤含水量明显大

于退耕草地,但这并没有导致土壤呼吸增加。显然,合理放牧引起土壤容重增加而土壤有机碳储量减少是退耕草地土壤呼吸减少的主要控制因素。Chen 等^[6]和 Wang 等^[38]的研究也表明,由于草类植被增加了对土壤水分的利用和蒸腾,退耕草地相对于农耕地土壤含水量往往会下降。与农耕地比较,退耕草地土壤有机碳含量显著增加,土壤侵蚀减少,土壤呼吸增加。

本研究发现合理放牧可以有效减少草地土壤侵蚀。在本研究 4 ~ 8 月份的试验观测期间,与退耕草地比较,放牧后草地土壤和土壤有机碳侵蚀流失量分别减少了 77% 和 80%。合理放牧减少退耕草地土壤侵蚀的原因可以解释为动物的适度踩踏作用导致土壤容重有所增加,但并不会破坏表层及深层土壤的结构,因而土壤的抗侵蚀性相对于退耕草地会增加。这与徐志信等^[39]研究结果相一致;郑世清等^[40]的研究也表明,土壤容重和土壤抗蚀性密切相关,土壤侵蚀量随着土壤容重的增加而减少。

4 结论

本研究发现,在退耕草地实施合理放牧不仅减

少土壤 CO₂ 排放,而且能有效减少土壤和土壤有机碳的流失。放牧期间动物的合理踩踏作用引起的草地土壤容重显著增加是退耕草地土壤 CO₂ 排放量和土壤侵蚀速率减少的主要原因。放牧引起草地植被向土壤输入减少,进而导致土壤有机碳含量的降低也是导致退耕草地土壤呼吸减少的重要因素。因此,在黄土高原地区以及类似的退耕草地开展合理的放牧活动,既可以满足当地农民经济发展的需求,又可以减少土壤 CO₂ 排放量和控制土壤侵蚀,促进生态环境的改善,是一种值得提倡的可持续发展的退耕草地利用模式。但是由于本研究仅仅是基于实验小区的较短时间尺度的观测试验,关于合理放牧在减少退耕草地土壤呼吸和土壤侵蚀中的作用有待从流域和区域尺度进行长期定量评价。

参考文献:

- [1] 李勇. 黄土高原植物根系与土壤抗冲性[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- Li Y. The relationship between plant roots and soil erosion resistance on loess plateau[M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [2] Lu Q, Xu B, Liang F, *et al.* Influences of the Grain-for-Green project on grain security in southern China [J]. *Ecological Indicators*, 2013, 34: 616–622.
- [3] Zhou D, Zhao S, Zhu C. The grain for green project induced land cover change in the Loess Plateau: A case study with Ansai County, Shanxi Province, China [J]. *Ecological Indicators*, 2012, 23: 88–94.
- [4] Song X, Peng C, Zhou G, *et al.* Chinese grain for green program led to highly increased soil organic carbon levels: A meta-analysis [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(3): 528–528.
- [5] Cheng J, Lee X, Theng B K G, *et al.* Biomass accumulation and carbon sequestration in an age-sequence of *Zanthoxylum bungeanum* plantations under the grain for green program in karst regions, Guizhou province [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 203: 88–95.
- [6] Chen Y, Wang K, Lin Y, *et al.* Balancing green and grain trade [J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8: 739–741.
- [7] Bowden A, Gemon J. Special issue: Soils and climate change: Introduction [J]. *Biology & Fertility of Soils*, 1998, 27: 219.
- [8] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7–20.
- [9] Mielnick P C, Dugas W A. Soil CO₂ flux in a tallgrass prairie [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(2): 221–228.
- [10] Houghton R A. Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different? [J]. *Global Change Biology*, 2003, 9: 500–509.
- [11] 王建国, 樊军, 王力, 等. 退耕还林还草过程中不同土地利用方式土壤呼吸作用及其碳收支评估[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(10): 2024–2032.
- Wang J Q, Fan J, Wang L, *et al.* Soil respiration and assessment of the carbon budget in the process of returning farmland to forest and grassland under different land use patterns [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10): 2024–2032.
- [12] 贺金红, 廖允成, 胡兵辉, 等. 黄土高原退耕还林(草)的生态经济效应研究[J]. *农业现代化研究*, 2006, 27(2): 110–114.
- He J H, Liao Y C, Hu B H, *et al.* On relation between grain for green and grain safety in sloping land of Loess Plateau [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2006, 27(2): 110–114.
- [13] Zhang T, Zhang Y, Xu M, *et al.* Light-intensity grazing improves alpine meadow productivity and adaption to climate change on the Tibetan Plateau [J]. *Scientific Reports*, 2015, doi:1038/srep15949.
- [14] 郭明英, 卫智军, 运向军, 等. 放牧对草原土壤呼吸的影响[J]. *草业科学*, 2011, 28(5): 729–736.
- Guo M Y, Wei Z J, Yun X J, *et al.* The effects of grazing on grassland soil respiration [J]. *Pratacultural Science*, 2011, 28(5): 729–736.
- [15] 马涛, 董云社, 齐玉春, 等. 放牧对内蒙古羊草群落土壤呼吸的影响[J]. *地理研究*, 2009, 28(4): 1040–1046.
- Ma T, Dong Y S, Qi Y C, *et al.* Grazing effects on chinensis community soil respiration in Inner Mongolia [J]. *Geographical Research*, 2009, 28(4): 1040–1046.
- [16] Wang Z W, Jiao S Y, Han G D, *et al.* Soil respiration response to different stocking rates on stipa breviflora griseb. desert steppe [J]. *Journal of Inner Mongolia University*, 2009, 40(2): 186–193.
- [17] Wolf B, Zheng X, Ggemann N B, *et al.* Grazing-induced reduction of natural nitrous oxide release from continental steppe [J]. *Nature*, 2010, 8(464): 881–884.
- [18] 段敏杰, 高青竹, 万运帆, 等. 放牧对藏北紫花针茅高寒草原植物群落特征的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(14): 3892–3900.
- Duan M J, Gao Q Z, Wan Y F, *et al.* Effect of grazing on community characteristics and species diversity of *Stipa purpurea* alpine grassland in Northern Tibet [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(14): 3892–3900.
- [19] Zhang W N, Ganjurjav H, Liang Y, *et al.* Effect of a grazing ban on restoring the degraded alpine meadows of Northern Tibet, China [J]. *The Rangeland Journal*, 2015, 37(1): 57–65.
- [20] 耿肖臣. 坡耕地土壤 CO₂ 排放的时空变化[D]. 北京: 中国农业科学院硕士论文, 2012.
- Geng X C. Time space variation of soil CO₂ flux in the cultivated sloping land [D]. Beijing: MS Thesis of Chinese Academy of Agriculture Sciences, 2012.
- [21] 戎郁萍, 韩建国, 王培, 等. 放牧强度对牧草再生性能的影响[J]. *草地学报*, 2001, 9(2): 92–98.
- Rong Y P, Han J G, Wang P, *et al.* Effects of different grazing intensities on the regrowth characteristics of the Herbage [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2001, 9(2): 92–98.

- [22] NY/T85-1988, 土壤有机质测定法[S].
NY/T85-1988, Measurement of soil organic matter [S].
- [23] 赵广东, 王兵, 杨晶, 等. LI-8100 开路式土壤碳通量测量系统及其应用[J]. 气象科技, 2005, 33(4): 363-366.
Zhao G D, Wang B, Yang J, *et al.* LI-8100 open type soil carbon flux measurement system and its application [J]. Meteorological Science and Technology, 2005, 33(4): 363-366.
- [24] Molinillo M, Lasanta T, Garcia-Ruiz J M. Managing mountainous degraded landscapes after farmland abandonment in the central Spanish Pyrenees [J]. Environmental Management, 1997, 41(4): 587-598.
- [25] 李小宇, 李勇, 于寒青, 等. 退耕还林坡地土壤 CO₂ 排放的空间变化: 地形的控制作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1217-1224.
Li X Y, Li Y, Yu H Q, *et al.* Spatial changes in soil emission from re-forested hillslopes on the Loess Plateau: a geomorphic control[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(5): 1217-1224
- [26] Walling D E, He Q, Blake W H. Use of Be-7 and Cs-137 measurement to document short- and medium-term rates of water-induced soil erosion on agricultural land [J]. Water Resources Research, 1999, 35(12): 3856-3874.
- [27] 张凤宝, 杨明义, 王光谦. ⁷Be 示踪法估算土壤侵蚀速率模型计算结果比较[J]. 水土保持学报, 2010, 24(2): 52-57.
Zhang F B, Yang M Y, Wang G Q. Comparison of the models of using ⁷Be to estimate soil erosion rate [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(2): 52-57.
- [28] Li Y, Zhang Q W, Reicosky D C, *et al.* Changes in soil organic carbon induced by tillage and water erosion on a steep cultivated hillslope in the Chinese Loess Plateau from 1898-1954 and 1954-1998 [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112: G01021.
- [29] Chen J, Hou F, Chen X, *et al.* Stocking rate and grazing season modify soil respiration on the Loess Plateau, China [J]. Rangeland Ecology & Management, 2015, 68: 48-53.
- [30] 曹广民, 李英年, 张金霞, 等. 环境因子对暗沃寒冻锥形土壤 CO₂ 释放速率的影响[J]. 草地学报, 2001, 9(4): 307-312.
Cao G M, Li Y N, Zhang J X, *et al.* Effect of soil circumstances biogeochemical factors on carbon dioxide emission from Mollic-Gryic cambisols [J]. Acta Agraria Sinica, 2001, 9(4): 307-312.
- [31] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(7): 778-785.
Zhang D Q, Shi P L, Zhag X Z. The research progress of the main factors influencing soil respiration [J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(7): 778-785.
- [32] Wang D, Wu G, Liu Y, *et al.* Effects of grazing exclusion on CO₂ fluxes in a steppe grassland on the Loess Plateau (China) [J]. Ecological Engineering, 2015, 83: 169-175.
- [33] Wang Y S, Hu Y Q, Ji B M. An investigation on the relationship between emission/up take of greenhouse gases and environment factors in semiarid grassland [J]. Advance in Atmospheric Sciences, 2003, 20(1): 119-127.
- [34] 王新源, 李玉霖, 赵学勇, 等. 干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4890-4901.
Wang X Y, Li Y L, Zhao X Y, *et al.* Responses of soil respiration to different environment factors in semi-arid and arid areas [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(15): 4890-4901.
- [35] Parker W L, Millwe J, Steinberger Y, *et al.* Soil respiration in a Chihuahuan desert range land [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1983, 15(3): 303-309.
- [36] Saetre P, Stark J M. Microbial dynamics and carbon and nitrogen cycling following rewetting of soils beneath two semi-arid plant species [J]. Oecologia, 2005, 142(2): 247-260.
- [37] 朱敏, 张振华, 潘英华, 等. 土壤质地及容重和含水率对其导气率影响的实验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(2): 111-116.
Zhu M, Zhang Z H, Pan Y H, *et al.* Effects of soil texture, bulk density and moisture content on soil air permeability [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(2): 111-116.
- [38] Wang L, Wang Q J, Wei S P, *et al.* Soil desiccation for Loess soils on natural and regrown areas [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(7): 2467-2477.
- [39] 徐志信, 赵萌莉. 过度放牧对草原土壤侵蚀的影响[J]. 中国草地, 2001, 23(6): 59-63.
Xu Z X, Zhao M L. Influence of overgrazing on soil erosion of grassland [J]. Grassland of China, 2001, 23(6): 59-63.
- [40] 郑世清, 周佩华. 土壤容重和降雨强度与土壤侵蚀和入渗关系的定量分析[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988, (7): 53-57.
Zheng S Q, Zhou P H. Soil bulk density and the relationship between rainfall intensity and soil erosion and infiltration of quantitative analysis [J]. Memoir of NISWC Academia Sinica, 1988, (7): 53-57.