

DOI: 10.5846/stxb201502120343

阳小成, 阿舍小虎, 苗原, 刘银占. 川西北高寒草甸不同放牧模式对土壤呼吸的影响. 生态学报, 2016, 36(17): - .

Yang X C, Ashe X H, Miao Y, Liu Y Z. Response of soil respiration rate to grazing patterns in an alpine meadow, Northwestern Sichuan, China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(17): - .

川西北高寒草甸不同放牧模式对土壤呼吸的影响

阳小成¹, 阿舍小虎^{1,2}, 苗原³, 刘银占^{2,3,*}

¹ 成都理工大学材料与化学化工学院, 成都 610059

² 中国科学院成都生物研究所生态恢复重点实验室, 成都 610041

³ 河南大学生命科学学院植物逆境实验室, 开封 475004

摘要: 采用土壤二氧化碳 (CO₂) 通量自动测量系统, 对不同放牧模式 (全年禁牧、夏季放牧、冬季放牧和自由放牧) 下川西北高寒草甸的土壤呼吸进行监测, 比较了不同放牧模式下土壤呼吸的季节动态和温度敏感性。研究发现: 1) 放牧模式可以改变高寒草甸土壤呼吸的季节动态变化。禁牧、夏季放牧以及自由放牧样地的土壤呼吸在季节上的变化趋势基本相似, 而冬季放牧样地的土壤呼吸最大值与前者相比明显向后推迟; 2) 放牧模式并不改变高寒草甸年平均土壤呼吸速率, 但对不同季节土壤呼吸速率的影响不同; 3) 不同放牧模式可以改变土壤呼吸对温度的敏感性 (Q₁₀)。不同放牧模式下土壤呼吸 Q₁₀ 值大小依次为: 禁牧一年 (8.13) > 冬季放牧 (7.49) > 禁牧三年 (5.46) > 夏季放牧 (5.20) > 自由放牧 (4.53)。该地区土壤呼吸的 Q₁₀ 值均明显高于热带和其它温带草地土壤呼吸的 Q₁₀ 值。结果表明, 放牧模式是影响高寒草甸土壤碳排放的一个重要因素。此外, 在未来全球气候变暖背景下, 在生长季节无放牧干扰的高寒草甸可能比放牧干扰的高寒草甸释放出更多的 CO₂ 到大气中。

关键词: 草地生态系统; 放牧; 青藏高原; Q₁₀ 值; 土壤碳通量

Response of soil respiration rate to grazing patterns in an alpine meadow, Northwestern Sichuan, China

YANG Xiaocheng¹, ASHE Xiaohu^{1,2}, MIAO Yuan³, LIU Yinzhan^{2,3,*}

¹ College of Material and Chemistry & Chemical Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

² ECORES Lab, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

³ Key Laboratory of Plant Stress Biology, College of Life Sciences, Henan University, Kaifeng 475004, China

Abstract: In this study, an automated soil CO₂ flux system was used to measure soil respiration rates from 2008 to 2009 in an alpine meadow subjected to different grazing patterns (no grazing, grazing in summer, grazing in winter, and free grazing). We compared the seasonal dynamics and temperature sensitivity of soil respiration under the different grazing patterns, and found that 1) the seasonal dynamics of soil respiration were affected by grazing patterns. Soil respiration peaked later in the year in meadows subjected to winter grazing than in those in the no grazing, grazing in summer, and free grazing treatments; 2) the grazing pattern used affected seasonal variations in the rate of soil respiration, but not that of the mean annual rate of soil respiration; and 3) the sensitivity of soil respiration to soil temperature (Q₁₀) at a depth of 5 cm was affected by variations in grazing pattern. The Q₁₀ value was the highest under the no grazing for one year treatment, followed by, in descending order, the winter grazing, no grazing for three years, grazing in summer, and free grazing treatments. The Q₁₀ value of the alpine meadow was higher than that of the tropical and other temperate grasslands. These

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31000232, 31200375); 国家博士后科学基金 (2012M520066, 2013T60699); 河南大学优秀青年培育基金 (0000A40385)

收稿日期: 2015-02-12; **网络出版日期:** 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuyinzhan.1@163.com

results suggest that grazing pattern plays an important role in carbon release from soils in alpine meadows. Additionally, in the future, global warming may cause more carbon to be released from non-grazed meadows than from those under grazing pressure during the growing season.

Key Words: grassland ecosystem; grazing; Qinghai-Tibetan plateau; Q_{10} value; soil carbon flux

土壤呼吸 (Soil respiration) 是土壤向大气中释放 CO_2 的过程。它是陆地生态系统第二大碳通量^[1]。同时, 土壤呼吸速率的改变也是反映生态系统对环境变化响应的一个重要指标^[2-3]。因此, 土壤呼吸已成为全球变化和陆地生态系统碳循环的重要研究内容之一。

草地是陆地生态系统的一个重要组成部分(约占陆地面积的 30%), 其碳贮量高达 761 Pg, 其中约 90% 贮存在土壤中^[4-5]。草地生态系统的碳贮量和年均碳通量均占陆地生态系统总量的 23% 左右^[6-7]。因此, 草地土壤呼吸对陆地生态系统碳平衡和大气 CO_2 浓度变化具有重要贡献。放牧是最主要的草地利用方式, 也是草地生态系统碳储量变化的重要影响因素之一。在过度放牧下地上净初级生产力中仅有 20%—50% 能够以凋落物和粪便的形式归还土壤^[8]。关于放牧对草地土壤呼吸影响的研究, 不同研究者在不同草原群落的研究结果不尽相同, 甚至得到完全相反的结论。有研究表明, 在内蒙古温带草原自由放牧增加了土壤呼吸的年排放量, 而且土壤呼吸通量与放牧强度呈正相关关系^[9]; 在青藏高原也有研究发现了类似趋势^[10]。然而, 青藏高原东北部高寒草甸的土壤呼吸在非生长季重度放牧之后较轻度放牧降低了近一倍, 尽管两种不同处理下的土壤呼吸时间动态趋势相似^[11]。此外, 在内蒙古高原羊草草地围封后的土壤呼吸是自由放牧条件下土壤呼吸的 2.7 倍^[12]。尽管如此, 还有的研究发现放牧没有影响内蒙古草地的土壤呼吸^[12]。目前, 关于放牧对草地土壤呼吸影响的研究中, 较为统一的结论是放牧不会改变土壤对于 CO_2 的源汇性质, 但放牧对于 CO_2 源汇强度究竟是起到加强还是减弱的作用, 目前的研究结果还存在较大分歧。

过去大多数关于放牧对草地土壤呼吸影响的研究主要关注放牧强度的影响^[9-20], 而关于不同季节放牧模式(夏季放牧、冬季放牧、自由放牧、禁牧)的影响目前还鲜有报道。在我国主要牧区不同季节的放牧模式是普遍存在的现象, 而且不同季节的放牧模式对地上植被和土壤养分循环的影响也不相同, 进而可能会改变草地土壤碳排放速率。因此, 开展放牧模式对草地土壤呼吸影响的野外观测是非常必要的。这方面的研究不仅可以为我国草地生态系统碳储量的准确估算提供数据支持, 还可以为牧区草场的科学管理决策提供理论支持。

青藏高原地区的高寒草甸是我国草地生态系统的一个重要组成部分, 约占青藏高原总面积的 35%^[11], 是该地区的典型植被。川西北高寒草甸位于青藏高原东部, 是青藏高原高寒草甸的重要组成部分, 也是我国主要的牧区之一。该地区一直存在不同的季节放牧模式。据我们调查, 现在该地区普遍存在着四种不同的放牧模式, 即: 夏季放牧、冬季放牧、自由放牧、全年禁牧。因此我们设计了一项实验, 通过调查不同放牧模式下土壤呼吸及其温度敏感性的变化, 探讨不同季节放牧模式对草地土壤碳通量的影响及其后果。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本研究选择四川省红原县($N31^{\circ}50'—33^{\circ}22'$, $E101^{\circ}51'—103^{\circ}23'$) 作为研究区域, 探讨该地区不同放牧模式对高寒草甸土壤 CO_2 排放的影响。该研究地气候类型属大陆性高原寒温带季风气候, 年平均气温 $1.4^{\circ}C$, 最冷月平均气温 $-10.3^{\circ}C$, 最热月平均气温 $10.9^{\circ}C$, 年均降水量 749.1mm, 80% 集中在 5—10 月。选择该研究区域作为研究地主要基于以下两个原因: 第一, 红原地处青藏高原东部, 平均海拔在 3600m 以上, 由于特殊的地理和气候环境, 使其成为典型的生态环境脆弱区和气候变化的敏感带, 是研究陆地生态系统对气候变化和人为干扰响应机制的理想场所; 第二, 由于生长季较高的生产力和非生长季低温导致的低分解速率, 该地区土壤

有机质含量较高(65—280g/kg),而这将有利于探讨该地区土壤 CO₂ 释放与放牧干扰之间的关系。

1.2 样地选择

通过访问调查和实地考察方式,在四川省红原县县城东北 12 公里处(32°48' N, 102°33' E)选择全年禁牧、夏季放牧、冬季放牧和自由放牧(公共牧场)的草场作为研究对象,其中全年禁牧的样地包括禁牧一年和禁牧三年两种类型。四种不同放牧模式的样地均位于较平坦的高寒草甸上,每两块样地间最远距离不超过 6 公里。除禁牧模式的样地外,其它三种放牧模式的样地放牧强度为 3—5 头牦牛/ha²。由于两种禁牧模式的样地均在冬季放牧样地内建立围栏,因此它们的群落组成是相似的,群落主要优势种有:嵩草(*Kobresia sp. 1*)、瑞苓草(*Saussurea nigrescens*)、蓬子菜(*Galium verum*)、翻白委陵菜(*Potentilla discolor*)。禁牧样地的总盖度均达到 95%以上,平均高度为 23.7cm,冬季放牧样地的总盖度为 90%,群落平均高度 16.8cm。自由放牧样地常年都有放牧干扰,因此其群落总盖度和平均高度都较低,总盖度为 75%,平均高仅为 2 cm,主要优势种包括:翻白委陵菜、嵩草、车前(*Plantago asiatica*)、发草(*Deschampsia caespitosa*)、鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)、矮蔗草(*Scirpus pumilus*)等。夏季放牧样地总盖度 85%左右,群落平均高 10cm,主要优势种包括:发草、翻白委陵菜、草玉梅(*Anemone rivularis*)等。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤呼吸测定

土壤呼吸采用土壤 CO₂ 通量自动测量系统(LI-8100,美国 LI-COR 公司生产)测定。每块样地选取五个点,每个点设置三次测量重复。在每次测量的前一天,将预先制好的 PVC 环垫(ID = 10.4cm, H = 5cm)打入每块样地内的待测点,打入土壤中的深度大约 1—2cm,将 PVC 环垫内的活体植物地上部分剪掉并移出,而地表的凋落物层保持原地不动。每次土壤呼吸测量的同时,在靠近 PVC 环垫处进行地下 5cm 土层的温度测量。土壤呼吸测量在 2008 年 4 月开始到 2009 年 4 月结束,每 2 个月测量一次。每次测量时选择一个晴天,测量时间参照其它草地土壤呼吸研究的方案^[10],定在 11:00—15:00 之间。

1.3.2 土壤有机质含量测定

在 2008 年生长季中期,采用五点混合法在每块样地使用直径 5cm 土钻,各取一次土样,取样深度为 20cm,每次三个重复。所有土样带回实验室风干后,采用硫酸-重铬酸钾法(GB7857-87)进行有机质含量测定。

1.3.3 植物地上生物量测定

采用室内烘干法进行植被地上部分生物量测定。在草盛期(8 月 25 号—9 月 5 号),在不同放牧模式样地的每个待测样点周围选择一个样方(大小为 50cm × 50cm),将样方内所有植物地上部分收割带回实验室,在 75℃ 下烘至恒重后(48 小时),取出称量其干重,并记录。

1.3.4 数据分析

所有的实验数据在 Excel 2003 里整理后,利用单因素多重比较分析不同放牧模式间土壤呼吸速率、地上生物量、以及土壤元素含量的差异。采用指数方程 $Y = a \cdot e^{bT}$ (其中, T 为土壤温度, Y 为土壤呼吸速率, a、b 为参数)拟合土壤呼吸和温度之间的关系,并计算出土壤呼吸的温度敏感性(即 Q₁₀ 值, $Q_{10} = e^{10b}$)。以上统计过程采用 SPSS 16.0 (SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA) 完成。

2 结果与分析

2.1 不同放牧模式下高寒草甸土壤呼吸的季节动态

整个实验期间夏季放牧、自由放牧以及禁牧样地的土壤呼吸的季节上变化趋势基本相似。各群落的土壤呼吸 6 月份最高,12 月份最低。冬季放牧样地的土壤呼吸也是 12 月最低,但最大值出现在 8 月份最高(图 1)。生长季(5—10 月)初期,随着温度增加土壤呼吸速率迅速增大,并在随后达到全年最大值;在非生长季(10 月至第二年的 4 月)初期,随着温度的下降各样地土壤呼吸速率迅速减小,直至达到全年最低值(图 1)。

这是由于该地区进入生长季节后,温度逐渐升高,降水充沛,有利于牧草返青、生长和微生物活动。而在非生长季节,由于温度的下降牧草逐渐枯死,土壤微生物活性降低,而且季节性冻土开始形成,阻碍土壤中 CO_2 的排放,土壤呼吸速率也随之减小。

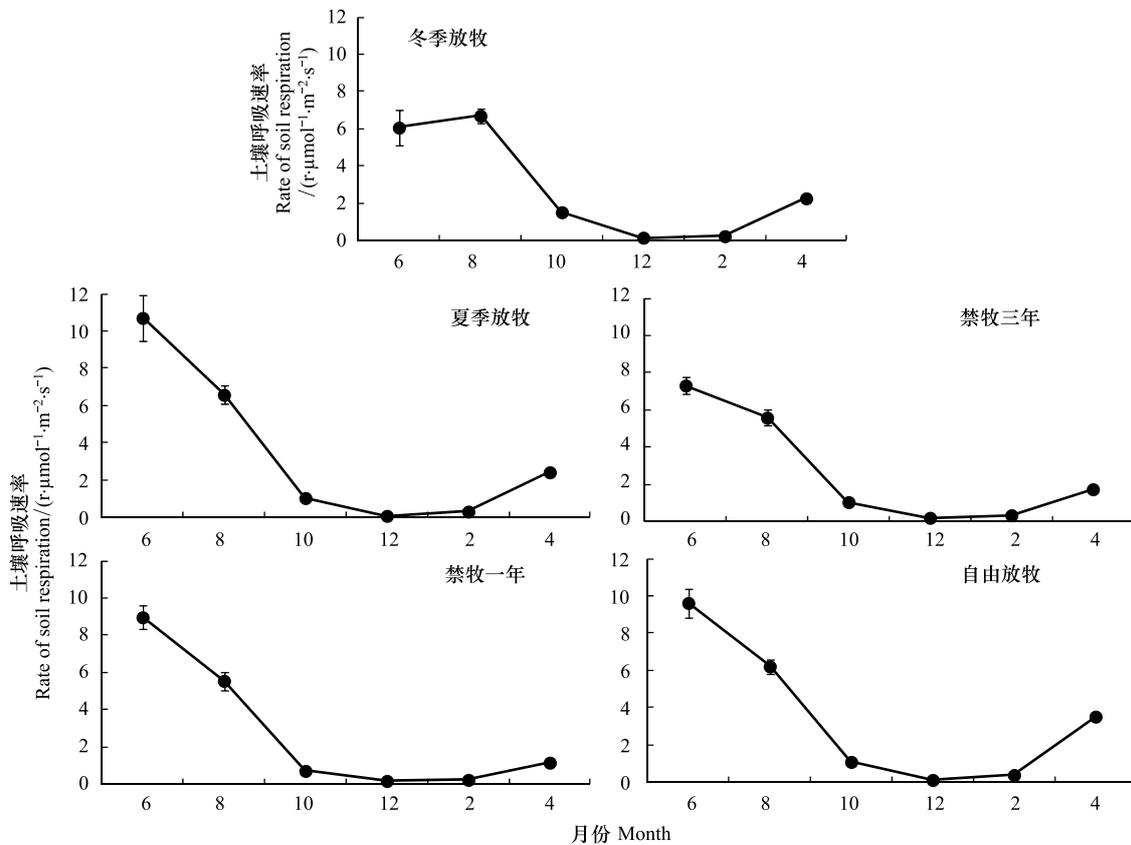


图1 2008—2009年,不同放牧模式下高寒草甸土壤呼吸(平均值±标准误)的季节变化动态

Fig.1 Seasonal dynamics of soil respiration (Mean ± SE) in an alpine meadow with different grazing patterns from 2008 to 2009

放牧模式并没有改变高寒草甸年平均土壤呼吸速率($P > 0.05$),但对不同时期土壤呼吸速率的影响显著不同(图2)。不同样地的土壤呼吸速率在2008年6月份、10月份和2009年4月份差异显著(所有 $P < 0.05$,图2),然而在2008年8月份、12月份和2009年2月份不同放牧模式下的高寒草甸土壤呼吸无显著性差异(图2)。如果不考虑放牧模式,只比较放牧和不放牧条件下的土壤呼吸通量,年均土壤呼吸值在放牧条件下(3.29 ± 0.13)比不放牧条件下(2.77 ± 0.09)增加了18.7% ($P < 0.05$)。

2.2 高寒草甸土壤呼吸的温度敏感性

在实验期间,不同放牧模式下高寒草甸群落地下5cm处土壤温度的变化范围分别为:冬季放牧样地 $-0.15\text{—}20.36^\circ\text{C}$ 、自由放牧样地 $-0.45\text{—}25.78^\circ\text{C}$ 、禁牧三年样地 $-0.25\text{—}21.14^\circ\text{C}$ 、禁牧一年样地 $-0.90\text{—}26.02^\circ\text{C}$ 、夏季放牧样地 $0.14\text{—}25.23^\circ\text{C}$ 。相应的土壤呼吸速率变化范围依次是: $0.08\text{—}7.36\mu\text{mol CO}_2\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ 、 $0.03\text{—}11.53\mu\text{mol CO}_2\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ 、 $0.08\text{—}8.44\mu\text{mol CO}_2\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ 、 $0.14\text{—}10.53\mu\text{mol CO}_2\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ 、 $0.04\text{—}12.07\mu\text{mol CO}_2\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ 。本研究采用指数方程对不同放牧模式下高寒草甸群落土壤呼吸速率与地下5cm处的土壤温度进行拟合,得到不同放牧模式下高寒草甸土壤呼吸速率与土壤温度之间的相关关系(所有 $P < 0.001$,图3)。基于各指数方程,计算出冬季放牧、夏季放牧、禁牧三年、禁牧一年和自由放牧模式下高寒草甸群落土壤呼吸的 Q_{10} 值分别为:7.49、5.20、5.46、8.13、4.53。

2.3 地上生物量和土壤有机质

在生长季四种放牧模式下高寒草甸群落的植被地上生物量最高值出现在禁牧一年样地,高达 759g/m^2 ,

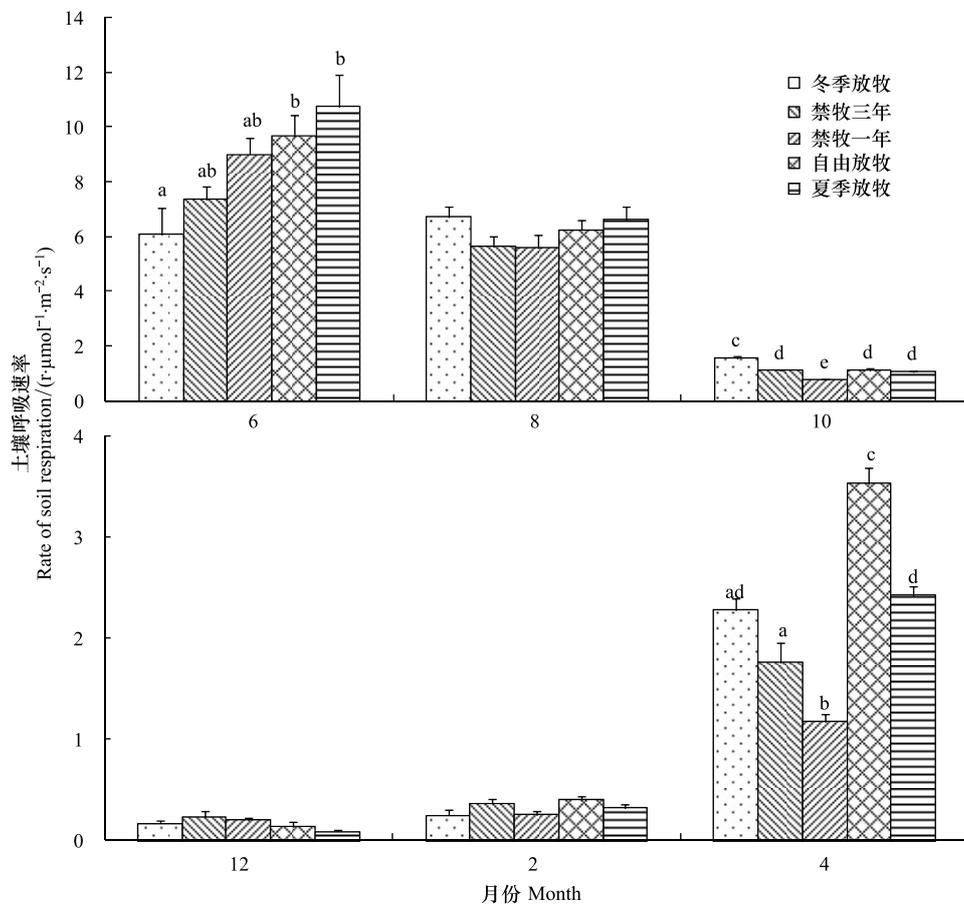


图2 放牧模式对不同时期高寒草甸土壤呼吸(平均值±标准误)的影响(a、b、c、d、e表示同一时期内土壤呼吸在 $P < 0.05$ 水平上的显著差异)

Fig.2 Impact of grazing patterns on soil respiration rate (Mean \pm SE) at different measuring periods in an alpine meadow (a, b, c, d and e showed the significant difference among soil respiration rates in the same period)

其次是禁牧三年样地、冬季放牧样地和夏季放牧样地,最低值出现在自由放牧样地,低至 $113\text{g}/\text{m}^2$ (表1)。各草甸群落中土壤有机质含量特征为:禁牧样地(禁牧三年、禁牧一年)土壤有机质含量显著地高于自由放牧、冬季放牧样地和夏季放牧样地的土壤有机质含量,而后三种样地之间有机质含量差异不显著(表1)。

表1 不同放牧模式下高寒草甸群落地上生物量和土壤有机质含量

Table 1 Aboveground plant biomass and soil organic matter of alpine meadow with different grazing patterns

放牧模式 Grazing pattern	地上生物量 Aboveground plant biomass/($\rho/\text{g m}^{-2}$)	土壤有机质 Soil organic matter/($w/\text{g kg}^{-1}$)
夏季放牧 Grazing in summer	163.90 ± 13.34 c	65.55 ± 1.19 b
冬季放牧 Grazing in winter	382.73 ± 42.37 ac	74.57 ± 5.46 ab
自由放牧 Free grazing	113.16 ± 6.64 c	78.87 ± 4.61 ab
禁牧三年 No grazing for three years	596.80 ± 162.80 ab	91.18 ± 12.72 ac
禁牧一年 No grazing for one year	759.17 ± 176.23 b	106.39 ± 10.53 c

3 讨论与结论

3.1 放牧模式对高寒草甸土壤呼吸的影响

放牧模式并没有改变高寒草甸年平均土壤呼吸速率,但对不同时期土壤呼吸的影响显著不同。总体来

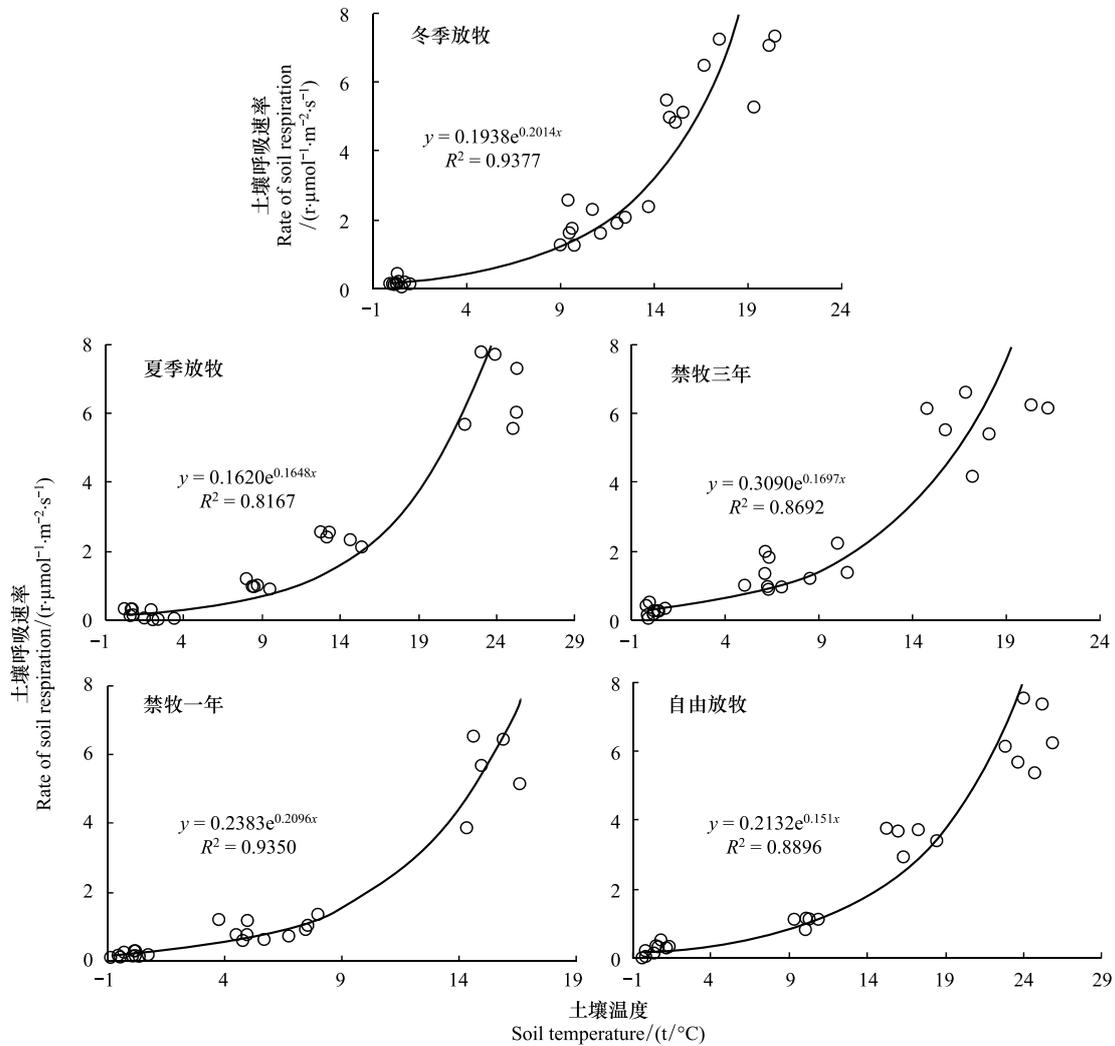


图3 不同放牧模式下高寒草甸土壤呼吸与土壤温度(地面下5 cm处)的关系

Fig.3 Relationships between the rate of soil respiration and soil temperature at 5 cm depth in the alpine meadow with different grazing patterns

看,生长季放牧样地(夏季放牧和自由放牧)的土壤呼吸速率显著地高于未放牧样地(冬季放牧与禁牧)的土壤呼吸速率。Frank 等人在美国北部混合草原通过对放牧与未放牧草地连续五年的土壤呼吸观测,研究发现放牧草地在生长季的日平均土壤 CO₂通量和正午最大土壤 CO₂通量值均高于未放牧草地^[21]。我们的研究结果与之一致。

过去的大多数研究表明,草地的根系呼吸是生长季节土壤呼吸的主要贡献者^[22-23],且植物地下根系生物量与地上生物量成正比例^[11,24]。本研究中自由放牧和夏季放牧样地的地上生物量均较冬季放牧和禁牧样地的地上生物量低,因此其地下根系生物量与冬季放牧和禁牧样地的相比应该较低。然而,自由放牧和夏季放牧样地的土壤呼吸速率却显著高于后者。这主要的原因在于自由放牧和夏季放牧样地在生长季节具有较高的土壤温度(夏季放牧 18.9℃、自由放牧 19.6℃,而禁牧三年 12.2℃、禁牧一年 12.4℃、冬季放牧 14.3℃)。这是由于草食性动物的啃食减少草地植被的冠层和凋落物对其下面土层的覆盖,使土壤接受的太阳辐射增加,从而使土壤温度升高。该地区土壤呼吸与温度之间存在着显著的指数相关关系,因而较高的土壤温度使自由放牧和夏季放牧群落因土壤微生物数量和活性的增加而导致的土壤呼吸增量,大于因其根系生物量较小而造成的土壤呼吸的减少量。此外,草甸群落的地上与地下生物量比值在高放牧强度的情况下比低放牧强度情况

下小^[10]。即放牧活动干扰将改变草甸群落植被的地上与地下生物量的分配,使植物倾向于增加地下生物量分配以减弱放牧对其造成的损害程度。再者,由于放牧条件下监测到的地上生物量只是现存量,远小于实际生产力。虽然夏季放牧和自由放牧样地群落的地上生物量与冬季放牧和禁牧样地群落的相比小的多(表 1),但是其地下根系生物量的差异可能没有地上生物量的差异那么大。因此,自由放牧和夏季放牧样地的土壤呼吸速率要高于冬季放牧和禁牧样地的土壤呼吸速率。该研究结果表明,在生长季节长期放牧活动的干扰将会增加草甸土壤向大气中释放 CO₂ 的速度,加速土壤碳库中碳的流失。同时由于放牧干扰本身也会降低地上凋落物产量,减少了有机质的补充。因此生长季放牧活动最终会加剧草甸土壤有机质含量下降。在本研究中夏季放牧样地土壤有机碳含量明显低于禁牧样地(表 1),也证实了这一点。

从不同放牧样地土壤呼吸的季节动态来看,冬季放牧样地土壤呼吸达到最大值的时间与其它样地群落相比要晚一些(图 1)。这主要是由于生长季初期在该草场放牧的影响。该草场的冬季放牧时间为每年 11 月底到第二年 5 月中下旬,因此在 4、5 月份刚刚长出地面的植物很容易被牲畜啃食。受此干扰下,该样地草甸植物的物候期整体向后推迟,因而该群落植物生长最旺盛的时期较其他群落要迟些。这与我们对围栏内外的植物群落物候的观察结果是一致的。因此,其他四种群落在土壤温度最高、降水最大的 6 月达到草盛期,而冬季放牧样地在随后的 8 月份达到草盛期。在禁牧一年和禁牧三年样地在生长季的土壤呼吸比较中,尽管统计学上检验结果显示差异不显著($P = 0.065$),但是禁牧三年的样地土壤呼吸在生长季明显低于禁牧一年的样地土壤呼吸速率。这表明随着禁牧时间的增加,高寒草甸土壤向大气中释放 CO₂ 的速率逐渐减慢。这可能是由于土壤呼吸受到呼吸底物限制的原因。

3.2 土壤呼吸的 Q₁₀ 值

不同的放牧模式可以改变草甸群落土壤呼吸对温度的敏感性。本研究中,基于地面下 5 cm 的土壤温度推算的 Q₁₀ 值大小依次为:禁牧一年>冬季放牧>禁牧三年>夏季放牧>自由放牧。与该地区的其它研究相比,本研究中基于全年土壤呼吸和相应温度测量值的 Q₁₀ 值在同地区其它研究报道的 Q₁₀ 值范围之内(2.1—15.3)^[11,25],但较温带和热带草地的 Q₁₀ 值高(温带草地平均 Q₁₀ 值 2.23 热带草地平均 Q₁₀ 值 1.94)^[26]。这表明,在未来全球变暖的条件下,高寒草甸比温带和热带草地释放更多的 CO₂ 到大气中。这主要是由于两方面的原因:一是本研究中高寒草甸常年气温较低,年平均气温为 1.4℃,比温带和热带地区平均温度(均大于 10℃)要低的多。过去的研究证明,温度较低地区土壤呼吸的 Q₁₀ 值要比温度较高地区土壤呼吸的 Q₁₀ 值较高^[27-28]。二是高寒草甸地区具有较高的土壤有机质含量,这就为土壤呼吸提供了丰富的基质。据此推测,在未来全球气候变暖背景下,该地区生长季节无放牧干扰的样地比放牧干扰的草地释放更多的 CO₂,从而减少未放牧样地的土壤碳含量;此外,高寒草甸将比热带和其它温带草地对大气 CO₂ 浓度增加的贡献大,进而可能改变高寒草甸的碳源汇功能。

总之,放牧模式并不改变高寒草甸年平均土壤呼吸速率,但对不同时期的土壤呼吸影响不同。在生长季内,长期放牧活动干扰将会增加土壤向大气中释放 CO₂ 的速度,可以促使土壤碳库中碳的流失。但是生长季节放牧模式可以降低土壤呼吸的温度敏感性,进而降低土壤呼吸对温度升高的响应。因此在未来全球变暖背景下,不同放牧模式对土壤呼吸的影响还有待于进一步研究。此外,与其它放牧模式相比,冬季放牧明显推迟了高寒草甸生长季土壤呼吸速率的峰值时间。

致谢:本研究在野外调查及文章修改中,得到了河南大学李国勇老师的热情帮助,作者对此表示感谢。

参考文献 (References):

- [1] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature*, 2010, 464(7288): 579-582.
- [2] Tucker C L, Bell J, Pendall E, Ogle K. Does declining carbon-use efficiency explain thermal acclimation of soil respiration with warming?. *Global Change Biology*, 2013, 19(1): 252-263.
- [3] 王斌,李洁,姜微微,赵亮,古松. 草地退化对三江源区高寒草甸生态系统 CO₂ 通量的影响及其原因. *中国环境科学*, 2012, 32(10):

1764-1771.

- [4] Mielnick P C, Dugas W A. Soil CO₂ flux in a tallgrass prairie. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(2): 221-228.
- [5] Lal R, Griffin M, Apt J, Lave L, Morgan M G. Managing soil carbon. *Science*, 2004, 304(5669): 393-393.
- [6] DeFries R S, Field C B, Fung I, Collatz G J, Bounoua L. Combining satellite data and biogeochemical models to estimate global effects of human-induced land cover change on carbon emissions and primary productivity. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(3): 803-815.
- [7] White R P, Murray S, Rohweder M. *Pilot Analysis of Global Ecosystems: Grassland Ecosystems*. Washington DC: World Resources Institute, 2000: 11-29.
- [8] 耿元波, 董云社, 齐玉春. 草地生态系统碳循环研究评述. *地理科学进展*, 2004, 23(3): 74-81.
- [9] 王跃思, 纪宝明, 黄耀, 胡玉琼, 王艳芬. 农垦与放牧对内蒙古草原 N₂O、CO₂排放和 CH₄吸收的影响. *环境科学*, 2001, 22(6): 7-13.
- [10] Cui S, Zhu X, Wang S P, Zhang Z H, Xu B, Luo C, Zhao L, Zhao X. Effects of seasonal grazing on soil respiration in alpine meadow on the Tibetan plateau. *Soil Use and Management*, 2014, 30(3): 435-443.
- [11] Cao G M, Tang Y H, Mo W H, Wang Y S, Li Y N, Zhao X Q. Grazing intensity alters soil respiration in an alpine meadow on the Tibetan plateau. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(2): 237-243.
- [12] Jia B R, Zhou G S, Wang F Y, Wang F Y, Weng E S. Effects of grazing on soil respiration of *Leymus chinensis* steppe. *Climatic Change*, 2007, 82(1/2): 211-223.
- [13] 贾丙瑞, 周广胜, 王凤玉, 王玉辉. 放牧与围栏羊草草原生态系统土壤呼吸作用比较. *应用生态学报*, 2004, 15(9): 1611-1615.
- [14] Chen W W, Wolf B, Zheng X H, Yao Z S, Butterbach-Bahl K, Brüggemann N, Han S H, Liu C Y, Han X G. Carbon dioxide emission from temperate semiarid steppe during the non-growing season. *Atmospheric Environment*, 2013, 64: 141-149.
- [15] Wei D, Ri X, Wang Y H, Wang Y S, Liu Y W, Yao T D. Responses of CO₂, CH₄ and N₂O fluxes to livestock enclosure in an alpine steppe on the Tibetan Plateau, China. *Plant and Soil*, 2012, 359(1/2): 45-55.
- [16] Muñoz M A, Faz A, Zornoza R. Carbon stocks and dynamics in grazing highlands from the Andean Plateau. *CATENA*, 2013, 104: 136-143.
- [17] Thomas A D. Impact of grazing intensity on seasonal variations in soil organic carbon and soil CO₂ efflux in two semiarid grasslands in southern Botswana. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological sciences*, 2012, 367(1606): 3076-3086.
- [18] Chen H J, Wang M J, Han G D, Wu Z Y. Effect of different grazing intensities on soil respiration and soil microorganism in *Stipa baicalensis* steppe. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 24(4): 165-169. (本条文献为中文文献)
- [19] Milchunas D G, Lauenroth W K. Quantitative effects of grazing on vegetation and soils over a global range of environments. *Ecological Monographs*, 1993, 63(4): 327-366.
- [20] Liebig M A, Kronberg S L, Hendrickson J R, Dong X, Gross J R. Carbon dioxide efflux from long-term grazing management systems in a semiarid region. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 164: 137-144.
- [21] Frank A B, Liebig M A, Hanson J D. Soil carbon dioxide fluxes in northern semiarid grasslands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1235-1241.
- [22] Dugas W A, Heuer M L, Mayeux H S. Carbon dioxide fluxes over bermudagrass, native prairie, and sorghum. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 93(2): 121-139.
- [23] 崔晓勇, 陈佐忠, 陈四清. 草地土壤呼吸研究进展. *生态学报*, 2001, 21(2): 315-325.
- [24] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, Andrews J A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 115-146.
- [25] 陈四清, 崔晓勇, 周广胜, 李凌浩. 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.
- [26] Kato T, Hirota M, Tang Y H, Cui X Y, Li Y N, Zhao X Q, Oikawa T. Strong temperature dependence and no moss photosynthesis in winter CO₂ flux for a *Kobresia* meadow on the Qinghai-Tibetan plateau. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(10): 1966-1969.
- [27] Wang W, Fang J Y. Soil respiration and human effects on global grasslands. *Global and Planetary Change*, 2009, 67(1/2): 20-28.
- [28] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(6): 753-760.