

黄土高原半干旱区土壤呼吸对土地利用变化的响应

郭慧敏¹, 张彦军^{2a}, 刘庆芳^{2b}, 姜继韶¹, 李俊超^{2b}, 王蕊^{2b},
李娜娜^{2a}, 李如剑^{2a}, 郭胜利^{1,2a*}, 李春越³

(1. 中国科学院、水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 a. 水土保持研究所,
b. 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 西安 710119)

摘要: 明确土地利用方式变化条件下引起土壤呼吸差异性的因素, 对预测黄土区退耕还草条件下土壤碳循环变化有重要意义。基于建立于1984年的长期定位试验, 于2011年3月至2012年12月, 利用Li-8100系统(Li-COR, Lincoln, NE, USA)监测了退耕还草(苜蓿)处理和农田(冬小麦)土壤呼吸季节变化以及土壤表层(0~5 cm)温度和含水量, 研究了土地利用变化下土壤呼吸变化特征及其与土壤温度、水分以及有机碳特性之间的关系。结果发现, 退耕27 a来(自1984年麦地转化为苜蓿地), 土壤呼吸速率苜蓿地($3.55 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)达小麦地($1.36 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)的2.61倍, 累积呼吸量苜蓿地($981 \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)达小麦($357 \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)的2.75倍。土壤呼吸温度敏感系数(Q_{10})苜蓿地较小麦地2011年提高24.5%, 2012年提高2.4%。苜蓿地SOC含量($10.5 \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)较小麦地($6.5 \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)提高61.5%, 微生物量碳($204 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)较小麦地($152 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)提高34%, 0~5 cm土壤水分含量同期高于小麦地, 但二者土壤温度差异不显著。土壤水分、SOC、微生物量碳等是造成二者呼吸差异的因素。

关键词: 土壤呼吸速率; 农田; 草地; 土壤有机质; 土壤水分; 黄土高原

中图分类号: S152 文献标志码: A 文章编号: 1000-3037(2014)10-1686-10

DOI: 10.11849/zrzyxb.2014.10.005

全球每年土壤呼吸的碳通量达55 Pg, 是除植被冠层以外, 陆地生态系统碳收支中最大的通量^[1-2]。因此, 土壤呼吸的升高或降低会显著影响大气CO₂浓度变化^[3]。土壤呼吸主要由根系呼吸和土壤微生物呼吸两部分构成^[4-5], 其中土壤微生物呼吸约占土壤总呼吸的40%~70%^[6-7]。土壤呼吸变化不仅与生物因素(地表植被、土壤有机碳储量、土壤微生物)有关^[8-11], 而且也受制于非生物因素(土壤温度、土壤水分、土壤容重等)^[12-14]。研究土壤呼吸变化的过程及其影响因素对预测陆地生态系统碳循环具有重要意义。

土地利用变化是影响土壤呼吸的重要因素。随着土地利用方式的变化, 根系呼吸的来源发生显著变化^[4,15], 进而会显著影响SOC^[16-18]、土壤水分和温度^[19-22]的变化。在黄土高原地区, 农田退耕为林草地后土壤水分含量往往会显著降低, 出现土壤干化现象, 这不仅对黄土区退耕还林还草工程的实施带来严重隐患, 也制约了植被生态功能的发挥^[23-27]。在干旱和半干旱地区, 土壤水分含量的降低是抑制微生物活性、降低土壤呼吸的重要原因^[28-29]。植被变化后, 地表得到的太阳辐射会发生显著变化, 例如, 林地中5%~20%的太

收稿日期: 2013-10-10; 修订日期: 2014-02-27。

基金项目: 国家自然科学基金(41071338, 41371279); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050504)。

第一作者简介: 郭慧敏(1987-), 女, 山东淄博人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤侵蚀与呼吸。E-mail: guodami@163.com

*通信作者简介: 郭胜利(1969-), 男, 河北栾城人, 研究员, 主要从事土壤侵蚀与生态研究。E-mail: sl-guo@ms.iswc.ac.cn

阳短波辐射可到达地表^[30], 但转化为草地后地表的太阳辐射会显著提高。不同植被条件下土壤温度季节变化格局尽管相似, 但土壤温度高低为: 林地<草地<农田^[31-33]。因此, 土地利用方式的改变会从生物和非生物方面显著影响土壤呼吸。目前, 尽管已有大量研究报道了土地利用方式变化条件下土壤呼吸变化, 但从生物和非生物角度探讨土壤呼吸变化与土地利用关系的研究相对较少。

黄土高原地区水土流失严重, 为我国重要生态脆弱区之一, 为改善该地区脆弱的生态环境, 20世纪90年代以来, 以退耕还林还草为中心的水土流失治理开始实施, 大量农田退耕为林草地。土地利用方式变化显著地改变了SOC含量(草地可达农田的1.7倍)和水分动态, 但退耕后, SOC和CO₂排放的响应以及非生物因素变化对CO₂排放的影响知之甚少。本文基于长期定位试验, 研究了土地利用变化下土壤呼吸变化特征及其与土壤温度、水分以及有机碳特性之间的关系, 以期深入理解土地利用变化对土壤呼吸的影响。

1 材料与方 法

1.1 试验地自然条件

试验在长武农田生态系统国家野外科学观测研究站进行, 该站位于黄土高原南部高原沟壑区的陕西省长武县境内(35°12'N, 107°40'E, 海拔1 200 m), 为我国典型雨养农业区, 气候为暖温带半湿润大陆性季风气候。根据试验地东南5 km长武县气象站资料统计, 1957—2000年间平均年降水量584 mm, 其中最高年份为822 mm, 最低年份为327 mm, 7—9月降水量占年总量的57%左右; 年平均温度9.3 °C, 大于10 °C积温为3 029 °C; 年日照时数为2 230 h, 日照率为51%, 年辐射总量为484 kJ·cm⁻², 无霜期171 d, 无灌溉条件。土壤为粘壤质黑垆土, 母质为中壤质马兰黄土, 土层深厚, 土质疏松。试验开始年份(1984年)耕层土壤含有机碳6.50 g·kg⁻¹, 全氮含量0.62 g·kg⁻¹, 碱解氮37.0 mg·kg⁻¹, 速效磷3.0 g·kg⁻¹, 速效钾129.3 mg·kg⁻¹, CaCO₃ 10.5%, pH值8.4, 粘粒含量(<0.002 mm)24%。试验地N、P含量较低, 钾素丰富, 呈微碱性反应。土壤容重为1.3 g·cm⁻³, 土壤田间持水量21%~23.8%, 凋萎含水量9%~12%。

1.2 试验设计与管理

为研究黄土旱塬区土壤肥力的变化, 于1984年在长武站建立了长期定位试验, 包括10种作物轮作方式和7种施肥措施, 设置36个处理(含1个备用处理), 每个处理3个重复, 共108个小区。区组随机排列, 小区长10.26 m, 宽6.5 m, 小区间距0.5 m, 区组距1 m, 四周路宽1 m。本文依托长武生态试验站的长期定位试验(1984年至今), 选取了小麦和苜蓿(不施肥处理)两种土地利用方式, 研究土壤呼吸对其响应机制。在小麦生态系统中, 小麦品种采用长武县农业技术推广中心选育的89(1)3~4(*Triticum aestivum* L), 每年收获期在6月底, 7月中旬进行耕作, 用于控制杂草和保持水分, 9月下旬播种, 播种量150~190 mg·kg⁻²; 在苜蓿生态系统中, 苜蓿品种采用长武县种子分公司引入的紫花苜蓿(*Medicago sativa* L), 1984年9月下旬播种(撒播)至今, 一般每年在6月和8月各收割一次。

1.3 土壤呼吸、水分、温度及容重的测定

土壤呼吸速率测定采用闭路式土壤碳通量测量系统(LI-COR, Lincoln, NE, USA)。测定前在每个小区内安置基座, 同时去除基座内的一切活物, 为减少安置基座对土壤系

统的干扰从而引起短期呼吸速率波动,需要在基座安置24 h之后再行呼吸测定,测定时将土壤呼吸仪放在基座上密封。田间测定从2011年3月到2012年12月,测定时间在每天的08:00~12:00。每试验小区重复测定2次,每处理共计6个重复;6次平均作为当日该区的土壤呼吸速率值。试验观测期间,在作物生长旺盛季(6—8月),为准确获取土壤呼吸特征,每周测定一次,其余时间每月测定一次。2011年,土壤呼吸测定的具体时间为3月17日到12月21日,其中8月16日至8月21日连续降雨,无法进入田间,故未进行数据测定,小麦和苜蓿呼吸总计各测定17次;2012年,土壤呼吸测定的具体时间为3月16日到12月21日,小麦和苜蓿呼吸总计各测定19次。每次测定土壤呼吸的同时,测定每个小区0~5 cm土层的土壤温度和水分。土壤温度测定利用LI-8100自带的土壤温度计,土壤水分的测量利用烘干法,土壤容重采用环刀法。

1.4 SOC、微生物生物量碳的测定

小麦、苜蓿收获后,使用内径3 cm的土钻采集土样,深度为0~20 cm。每个处理均有3个重复,每小区各采集5钻均匀混合,土样风干磨细过筛后,测定SOC^[34]。微生物生物量碳的测定采用氯仿熏蒸硫酸钾浸提-碳自动分析仪法^[35]。

1.5 试验数据处理

测得数据用Excel 2007进行统计,利用SAS软件包中的PROC GLM(SAS 9.1, SAS Institute)程序对每一测定日分别进行土壤呼吸、土壤温度和土壤水分方差分析,处理为草地和农田,用以比较两种土地利用方式对土壤呼吸、温度和水分之间的差异。利用SAS 9.1软件对测定的土壤呼吸、土壤温度和土壤水分进行方差分析,用SigmaPlot 10.0绘制土壤呼吸速率、温度、水分的动态变化图,分别拟合土壤呼吸对温度、水分的响应模型;同时采用内插法计算每年各处理的累积呼吸量:

$$F = R_s \times 3600 \times 24 \times 44 \div 10^6 \quad (1)$$

$$M = \sum_{i=1}^n t = n(F_{i+1} + F_i) \div 2 \times (t_{i+1} - t_i) \div (t_{i+1} - t_i) \quad (2)$$

式中: F 为 CO_2 日排放通量; R_s 为土壤呼吸速率($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); M 为土壤呼吸日累积量; i 为土壤呼吸测定次数; t 为采样时间或呼吸测定对应天数。

土壤呼吸与土壤温度的关系采用指数关系^[36]:

$$R_s = \beta_0 e^{\beta_1 T} \quad (3)$$

式中: T 为土壤0~5 cm土层温度($^{\circ}\text{C}$); β_0 是反映土壤基础呼吸高低的参数,与土壤生物性状有关; β_1 是土壤呼吸温度敏感性参数。

土壤呼吸与土壤水分的关系采用二次函数关系^[37]:

$$R_s = \beta_2 \theta^2 + \beta_3 \theta + \beta_4 \quad (4)$$

式中: θ 为土壤水分(%), β_2 、 β_3 、 β_4 为常数。

温度敏感系数:

$$Q_{10} = e^{10\beta_1} \quad (5)$$

式中: Q_{10} 为温度敏感系数,表示温度每升高 10°C ,土壤呼吸所增加的倍数。

2 结果与分析

2.1 土壤温度和水分变化

试验期间,2011和2012年年降水量分别为644.2和480.8 mm,降水主要集中于7—9

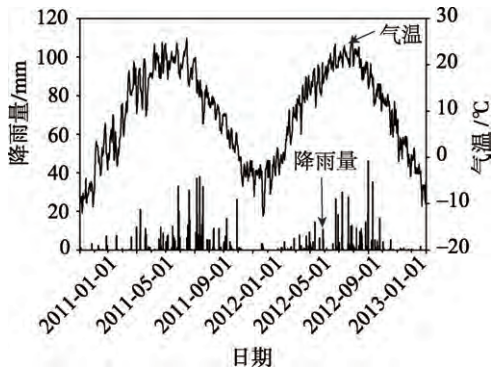


图1 试验地2011—2012年气温和降水变化

Fig. 1 Air temperature and precipitation at the experimental site from 2011 to 2012

持, 秋冬季, 因气温低, 作物生长缓慢, 土壤保持相对较高含水量, 但进入春季以后(3月)冻土融化, 小麦开始恢复生长, 进入返青期, 需水量持续增长, 土壤水分逐渐减少, 6月, 作物生长迅速, 而此时尚未进入雨季, 致使土壤水分下降至最低。7月开始进入雨季, 降雨量增多, 故土壤水分含量迅速回升[图2(b)]。苜蓿地和小麦地土壤水分含量呈现相似变化趋势, 但苜蓿地土壤水分含量高于同期小麦地, 2011年苜蓿地较小麦地平均高27%, 2012年高29%。

2.2 SOC、微生物量碳和土壤呼吸的变化

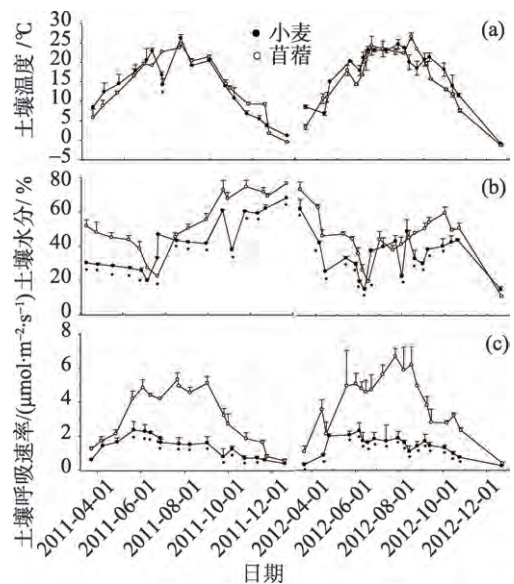
试验期间, 苜蓿地SOC含量为 $10.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 大约为小麦地($6.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的1.7倍。苜蓿地为1984年小麦地退耕而来, 农田退耕为草地后SOC含量提高。随着SOC含量的改善, 苜蓿地土壤容重($1.15 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)较农田($1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)降低, 土壤微生物量碳前者($204 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)较后者($152 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)提高34%(表1)。这可能与苜蓿地草根枯落物等大都留在原地, 而小麦秸秆被全部移走, 且农田耕作相对频繁, 导致农田有机碳分解较快有关。

小麦地和苜蓿地土壤呼吸随着季节呈现相似的变化。从3月开始, 土壤呼吸即开始升高; 7—8月间达到峰值, 但二者峰值出现的时间显著不同: 2011年小麦的呼吸峰值($2.3 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)出现在5月中旬, 苜蓿地则出现在7月中旬; 2012年小麦地峰值($2.27 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)出现在6月初, 而苜蓿地依然出现在7月中旬[图2(c)]。这与土壤水分、温度和作物生长有关, 小麦在5月中旬到6月初处在灌浆期, 生长旺盛, 呼吸达到

月, 分别占全年降水量的60.3%和63.5%; 气温在7—9月逐渐达到年最高气温, 这段时期积温分别达到了全年积温的49.3%、51.4%, 大气降水和气温基本同步升高与降低, 属于典型的雨热同期(图1)。

小麦地和苜蓿地土壤温度与气温变化一致, 呈现单峰趋势。土壤温度自3月开始升高, 至7—9月达到全年最高值, 之后开始下降, 上半年小麦地土壤温度略高于苜蓿, 10月之后, 苜蓿土壤温度高于小麦[图2(a)]。

土壤水分随着降水和植被生长而波动。作物耗水量主要通过降水量和土壤供水量维



注: 代表土壤呼吸、水分或温度差异达到显著水平($\alpha = 0.05$)。

图2 2011—2012年农田与草地土壤呼吸、温度、水分比较

Fig. 2 Seasonal changes in soil respiration, temperature and moisture in wheat and alfalfa cropping system in 2011 and 2012

表 1 试验期间 (2011—2012 年) 麦地和苜蓿地表层 (0~5 cm) 土壤性状

Table 1 Soil properties in the 0–5 cm depth in wheat and alfalfa cropping system from 2011 to 2012

土壤理化性质	麦地	苜蓿地
土壤温度/°C	15.7±7 ^a	15.2±7 ^a
土壤水分/%	38.3±13 ^a	48.8±6 ^b
土壤容重/(g·cm ⁻³)	1.30 ^b	1.15 ^a
土壤有机碳/(g·kg ⁻¹)	6.5±0.2 ^a	10.5±0.8 ^b
土壤微生物量碳/(mg·kg ⁻¹)	152±9 ^a	204±13 ^b
土壤微生物量碳与有机碳比值	23	19
土壤二氧化碳排放速率/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	1.36±0.6 ^a	3.55±1.7 ^b
土壤二氧化碳累积排放量/(g CO ₂ ·m ⁻²)	357±42 ^a	981±99 ^b

注: 数值后不相同字母表示处理间存在显著差异, 否则无显著差异; “±” 后为标准偏差; 样本数 $n=3$ 。

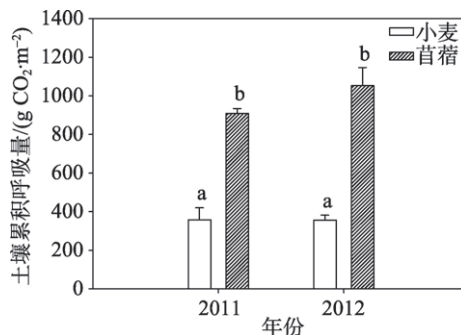


图 3 草地与农田累积呼吸量差异

Fig. 3 Cumulative soil respiration in wheat and alfalfa cropping system in 2011 and 2012

峰值, 6月底小麦进行收获, 之后呼吸下降, 而7月苜蓿处在生长旺盛期, 故出现呼吸峰值。

尽管土壤呼吸变化趋势相似, 但不同土地利用条件下, 土壤呼吸的大小存在显著差异。苜蓿平均呼吸速率达到了小麦的2.61倍, 3—5月呼吸速率升高初期, 二者差异很小, 5—10月间, 二者差异明显加大; 2012年7月19日, 苜蓿呼吸达到了小麦的3.5倍, 此时差异最为显著。小麦地和苜蓿地土壤呼吸速率和累积呼吸量存在显著差异 (图3)。

3 讨论

3.1 不同土地利用方式条件下温度、水分等非生物因素对土壤呼吸的影响

小麦地和苜蓿地土壤呼吸速率和累积呼吸量存在显著差异: 苜蓿的土壤呼吸速率和累积呼吸量分别达到了小麦的2.61和2.75倍 (表1)。温度和水分是影响土壤呼吸的重要环境因素^[38-39], 而土地利用方式的变化常会直接或间接导致土壤温度和土壤水分等环境因素发生变化。本研究中, 无论小麦地还是苜蓿地, 土壤呼吸季节变化都与土壤温度呈现指数相关 ($P<0.01$) (表2), 与已有研究结果相一致^[28]。尽管土壤呼吸速率和年累积量在小麦和苜蓿种植系统中都存在显著差异, 但本实验结果已显示, 小麦和苜蓿种植系统中土壤温度并不存在显著差异 [图2(a)]。土壤温度不仅可以直接影响酶的活性和土壤生物, 还可以通过间接的途径即底物供应对土壤呼吸温度敏感性产生影响^[40], 但是二者土壤温度相差不大, 故土壤温度对造成两种种植系统土壤呼吸差异的贡献并不显著。

水分也是影响土壤呼吸的重要非生物因素, 土壤含水量对土壤呼吸的影响较为复杂, 国内外对水分影响呼吸的研究较多^[13,41-42], Gupta等发现在土壤持水量范围以内二者呈显著的正相关关系^[43], Conant等则认为草地土壤呼吸通量主要随季节性温度的变化而变化, 在干旱季节才受到水分的限制^[44]。本研究结果显示, 周年监测期间苜蓿地表层土壤水分含量显著高于小麦地。土壤水分在雨季来临之前呈下降趋势, 待作物收获之后, 需水量减少, 雨季到来, 土壤水分逐渐上升 [图2(b)]。两种土地利用方式下, 土壤呼吸与土壤水分之间遵循显著的二次函数关系 (表2), 由于土地利用方式导致了土壤持水特性差异, 致使土壤呼吸的转折点出现不同, 小麦呼吸转折点的出现早于苜蓿, 并且在转折点处, 苜蓿的土壤呼吸速率均达到了小麦的3倍以上 (表2)。不同生态系统中水分对 Q_{10}

表 2 试验期间(2011—2012)农田与草地土壤呼吸与土壤温度、5 cm 土壤水分的关系

Table 2 Relationship of soil respiration rates to soil moisture and soil temperature in alfalfa and wheat cropping system from 2011 to 2012

年份	小麦地	苜蓿地
土壤呼吸与温度的关系	$y=0.681 5e^{0.046 6x}$	$y=1.063 2e^{0.068 3x}$
	$R^2=0.58 P<0.01$	$R^2=0.90 P<0.01$
	$Q_{10}=1.59$	$Q_{10}=1.98$
	$y=0.530 7e^{0.051 6x}$	$y=1.532 3e^{0.054 2x}$
2012	$R^2=0.55 P<0.01$	$R^2=0.77 P<0.01$
	$Q_{10}=1.68$	$Q_{10}=1.72$
土壤呼吸与水分的关系	$y=-0.000 2x^2-0.016x+2.41$	$y=-0.001 1x^2+0.056x+3.66$
	$R^2=0.64 P<0.01$	$R^2=0.42 P<0.05$
	拐点 (40, 1.45)	拐点 (25.45, 4.37)
	$y=-0.001 7x^2+0.1x+0.07$	$y=-0.003 9x^2+0.3x-0.86$
2012	$R^2=0.43 P<0.05$	$R^2=0.50 P<0.01$
	拐点 (29.41, 1.54)	拐点 (38.46, 4.91)

值的影响方向和程度有很大的差别, 据此可知水分高低对不同土地利用方式条件下土壤呼吸差异具有一定贡献。

黄土高原 20 cm 以下深层土壤有向干燥化发展的必然性^[45], 而且人工林草的参与加剧了土壤水分的缺失, 强化了干燥化的产生^[46], 且随年限增加逐渐向深层发展, 连年高产的小麦, 土壤湿度反而高于苜蓿^[47], 但是土壤呼吸主要受表层 0~20 cm 处土壤水分的影响, 所以, 深层土壤干燥化的发展对土壤呼吸影响不大。

3.2 不同土地利用方式条件下 SOC、微生物生物量碳等生物因素对土壤呼吸的影响

试验期间, 苜蓿地 SOC 含量 ($10.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 大约为小麦地 ($6.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的 1.7 倍。土壤微生物量碳前者 ($204 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 较后者 ($152 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 提高 34%。李裕元等也发现, 当土地利用方式由农田转变为人工草地以后, SOC 密度增加, 幅度最高可达 72%^[48]。SOC 是土壤微生物底物供应的主要来源, 其含量高低是影响土壤呼吸高低差异的重要因素之一。 β_0 是反映土壤基础呼吸高低的参数, 与土壤生物性状有关^[49-51]。表 2 显示, 苜蓿和麦地的 β_0 存在显著差异: 2011 年, 苜蓿 β_0 为麦地的 1.56 倍, 2012 年达 2.89 倍, 其高低差异与苜蓿地和小麦地土壤微生物生物量碳和 SOC 含量相一致: 苜蓿的 SOC、微生物量碳含量较高, 微生物呼吸较强。这一时期小麦收获, 根系呼吸不复存在, 而此时苜蓿处于旺盛生长期, 苜蓿的根系生物量大, 根系呼吸强烈。因此, 7—9 月两种土地利用方式下土壤呼吸的差异最大[图 2(c)]。

Q_{10} 是反映土壤呼吸的温度敏感性重要参数。表 2 结果显示, 小麦地和苜蓿地土壤呼吸温度敏感性存在差异: 2011 年, 苜蓿地的 Q_{10} 较小麦地提高 24.5%, 2012 年提高 2.4%。土壤呼吸温度敏感性包括表观温度敏感性(各种因素对土壤呼吸温度响应的综合反映)和固有温度敏感性(仅仅由底物分子结构决定的温度敏感性)^[52]。但截止到目前, 土壤呼吸温度敏感性与影响因素(底物、微生物群落等)间的关系仍有很大的不确定性。本研究中, 苜蓿和小麦土壤呼吸温度敏感性的不同可能与以下因素有关: ①底物因素, 本试验中, 苜蓿的 SOC 含量是小麦地的 1.7 倍(表 1), 所以苜蓿地底物供应较小麦地充足, 土壤呼吸强烈, 致使土壤呼吸 Q_{10} 显著提高^[53], 这可能是造成本研究两种生态系

统土壤呼吸温度敏感性差异的原因；②微生物群落，不同土地利用方式下微生物群落的大小和结构有所不同，苜蓿地微生物量比小麦地高34%（表1），表明苜蓿地土壤微生物群落要大于小麦地微生物群落，相似条件下微生物增加有助于提高土壤呼吸，改善其温度敏感性^[54]。

此外，不同植物的根系对温度的响应有所不同^[55]，这必然会造成温度呼吸敏感性的差异；植物根系的生长会影响到整个土壤呼吸的温度敏感性^[6]，当温度变化与土壤生物数量变化不一致时，温度敏感性会降低^[15]。因本研究中重点研究了土壤生物和非生物特性对土壤呼吸的影响，不同土地利用条件下根系对土壤呼吸及其温度敏感性还需进一步研究，这也是未来工作需要关注的方面。

4 结论

(1) 不同土地利用方式下，土壤呼吸存在差异：草地的土壤呼吸速率和累积呼吸量分别达到了农田的2.61和2.75倍。

(2) 两种土地利用方式条件下，土壤性状发生显著差异：草地的SOC、微生物生物量碳及表层（0~5 cm）土壤水分均不同程度高于农田，但二者土壤温度差异不显著。

(3) 土壤温度对农田与草地土壤呼吸的差异贡献不大，SOC、微生物生物量碳、土壤表层（0~5 cm）水分可能是影响二者土壤呼吸差异的原因。

参考文献(References):

- [1] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [2] Akbolat D, Evrendilek F, Coskan A, *et al.* Quantifying soil respiration in response to short-term tillage practices: A case study in southern Turkey [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B—Soil and Plant Science*, 2009, 59(1): 50-56.
- [3] 李玉宁, 王关玉, 李伟. 土壤呼吸作用和全球碳循环 [J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 351-357. [LI Yu-ning, WANG Guan-yu, LI Wei. Soil respiration and carbon cycle. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2): 351-357.]
- [4] Hanson P, Edwards N, Garten C, *et al.* Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 115-146.
- [5] Kuzyakov Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(3): 425-448.
- [6] Jia B, Zhou G, Wang F, *et al.* Partitioning root and microbial contributions to soil respiration in *Leymus chinensis* populations [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(4): 653-660.
- [7] Ding W, Cai Y, Cai Z, *et al.* Soil respiration under maize crops: Effects of water, temperature, and nitrogen fertilization [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(3): 944-951.
- [8] 章家恩, 刘文高, 胡刚. 不同土地利用方式下土壤微生物数量与土壤肥力的关系 [J]. 土壤与环境, 2002, 11(2): 140-143. [ZHANG Jia-en, LIU Wen-gao, HU Gang. The relationship between quantity index of soil microorganisms and soil fertility of different land use systems. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(2): 140-143.]
- [9] 孟磊, 丁维新, 蔡祖聪, 等. 长期定量施肥对土壤有机碳储量和土壤呼吸影响 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(6): 687-692. [MENG Lei, DING Wei-xin, CAI Zu-cong, *et al.* Storage of soil organic C and soil respiration as effected by long-term quantitative fertilization. *Advances In Earth Science*, 2005, 20(6): 687-692.]
- [10] 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 Dong-qiu, SHI Pei-li, ZHANG Xian-zhou. Some advance in the main factors controlling soil respiration. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(7): 778-785.]
- [11] 郭明英, 朝克图, 尤金成, 等. 不同利用方式下草地土壤微生物及土壤呼吸特性 [J]. 草地学报, 2012, 20(1): 42-48. [GUO Ming-ying, ZHAO Ke-tu, YOU Jin-cheng, *et al.* Soil microbial characteristic and soil respiration in grassland under different use patterns. *Acta Agrestia Sinica*, 2012, 20(1): 42-48.]

- [12] 崔骁勇, 陈佐忠, 陈四清. 草地土壤呼吸研究进展 [J]. 生态学报, 2001, 21(2): 315-325. [CUI Xiao-yong, CHEN Zuo-zhong, CHEN Si-qing. *Progress in Research on Soil Respiration of Grasslands*, 2001, 21(2): 315-325.]
- [13] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国. 水分对土壤呼吸的影响及机理 [J]. 生态学报, 2003, 23(5): 974-978. [CHEN Quan-sheng, LI Ling-hao, HAN Xing-guo. Effects of water content on soil respiration and the mechanisms. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 974-978.]
- [14] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国. 土壤呼吸对温度升高的适应 [J]. 生态学报, 2004, 24(11): 2649-2655. [CHEN Quan-sheng, LI Ling-hao, HAN Xing-guo. Acclimatization of soil respiration to warming. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2649-2655.]
- [15] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, *et al.* Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration [J]. *Nature*, 1998, 396(6711): 570-572.
- [16] 张金波, 宋长春. 土地利用方式对土壤碳库影响的敏感性评价指标 [J]. 生态环境, 2003, 12(4): 500-504. [ZHANG Jin-bo, SONG Chang-chun. The sensitive evaluation indicators of effects of land-use change on soil carbon pool. *Ecology and Environment*, 2003, 12(4): 500-504.]
- [17] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [18] 王清奎, 汪思龙, 高洪, 等. 土地利用方式对土壤有机质的影响 [J]. 生态学杂志, 2005, 24(4): 360-363. [WANG Qing-kui, WANG Si-long, GAO Hong, *et al.* Influence of land use on soil organic matter. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(4): 360-363.]
- [19] 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 [J]. 生态学报, 1997, 17(5): 469-476. [LIU Shao-hui, FANG Jing-yun. Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on soil respiration in the global scale. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5): 469-476.]
- [20] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水热条件对锡林河流域典型草原退化群落土壤呼吸的影响 [J]. 植物生态学报, 2003, 27(2): 202-209. [CHEN Quan-sheng, LI Ling-hao, HAN Xing-guo, *et al.* Influence of temperature and soil moisture on soil respiration of a degraded steppe community in the Xilin River Basin of Inner Mongolia. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(2): 202-209.]
- [21] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 典型温带草原群落土壤呼吸温度敏感性与土壤水分的关系 [J]. 生态学报, 2004, 24(4): 831-836. [CHEN Quan-sheng, LI Ling-hao, HAN Xing-guo, *et al.* Temperature sensitivity of soil respiration in relation to soil moisture in 11 communities of typical temperate steppe in Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4): 831-836.]
- [22] 王小国, 朱波, 王艳强, 等. 不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性 [J]. 生态学报, 2007, 27(5): 1960-1968. [WANG Xiao-guo, ZHU Bo, WANG Yan-qiang, *et al.* Soil respiration and its sensitivity to temperature under different land use conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 1960-1968.]
- [23] Shangguan Z P. Soil desiccation occurrence and its impact on forest vegetation in the Loess Plateau of China [J]. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 2007, 14(3): 299-306.
- [24] Chen H, Shao M, Li Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China [J]. *Geoderma*, 2008, 143(1/2): 91-100.
- [25] Li W, Wang Q, Wei S, *et al.* Soil desiccation for Loess soils on natural and regrown areas [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(7): 2467-2477.
- [26] Li J, Wang X C, Shao M A, *et al.* Simulation of biomass and soil desiccation of Robinia pseudoacacia forestlands on semi-arid and semi-humid regions of China's Loess Plateau [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(3): 330-339.
- [27] Wang Y, Shao M A, Zhu Y, *et al.* Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(4): 437-448.
- [28] 高会议, 郭胜利, 刘文兆. 黄土旱塬裸地土壤呼吸特征及其影响因子 [J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5217-5224. [GAO Hui-yi, GUO Sheng-li, LIU Wen-zhao. Characteristics of soil respiration in fallow and its influencing factors at arid highland of Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5217-5224.]
- [29] 周洪华, 李卫红, 杨余辉, 等. 干旱区不同土地利用方式下土壤呼吸日变化差异及影响因素 [J]. 地理科学, 2011, 31(2): 190-196. [ZHOU Hong-hua, LI Wei-hong, YANG Yu-hui, *et al.* Soil respiration variant and its effecting factors at different land use in arid land. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(2): 190-196.]
- [30] Beltrami H. On the relationship between ground temperature histories and meteorological records: A report on the Pomquet station [J]. *Global and Planetary Change*, 2001, 29(3/4): 327-348.
- [31] Wang C P, Liu M C, Lin K C, *et al.* Effects of fire and vegetation types on soil temperature and chemistry at Chihs-

- ing Mountain, Taiwan [J]. *Taiwan Journal of Forest Science*, 2003, 18(1): 43-54.
- [32] Smith D L, Johnson L. Vegetation-mediated changes in microclimate reduce soil respiration as woodlands expand into grasslands [J]. *Ecology*, 2004, 85(12): 3348-3361.
- [33] Jimenez C, Tejedor M, Rodriguez M. Influence of land use changes on the soil temperature regime of Andosols on Tenerife, Canary Islands, Spain [J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58(2): 445-449.
- [34] Nelson D W, Sommers L E, Sparks D, et al. Total carbon, organic carbon, and organic matter [M]// Sparks D, et al. Methods of soil analysis, Part 3. Chemical methods. Madison: Soil Science Society of America, Inc., 961-1010.
- [35] 吴金水. 土壤微生物生物量测定方法及其应用 [M]. 北京: 气象出版社, 2006. [WU Jin-shui. Soil Microbial Biomass—Methods and Application. Beijing: China Meteorological Press, 2006.]
- [36] Xu M, Qi Y. Spatial and seasonal variations of Q_{10} determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevada forest [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(3): 687-696.
- [37] Tang J, Qi Y, Xu M, et al. Forest thinning and soil respiration in a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada [J]. *Tree Physiology*, 2005, 25(1): 57-66.
- [38] Davidson E C, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest [J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 217-227.
- [39] 张舒, 申双和, 温学发, 等. 温度和水分对中亚热带人工林生态系统呼吸的调控作用 [J]. 自然资源学报, 2012, 27(12): 2057-2070. [ZHANG Shu, SHEN Shuang-he, WEN Xue-fa, et al. The regulation of soil temperature and water on ecosystem respiration of a subtropical plantation under the seasonal drought. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(12): 2057-2070.]
- [40] 杨庆朋, 徐明, 刘洪升, 等. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性 [J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2301-2311. [YANG Qing-peng, XU Ming, LIU Hong-sheng, et al. Impact factors and uncertainties of the temperature sensitivity of soil respiration. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(8): 2301-2311.]
- [41] Bauer J, Herbst M, Huisman J, et al. Sensitivity of simulated soil heterotrophic respiration to temperature and moisture reduction functions [J]. *Geoderma*, 2008, 145(1): 17-27.
- [42] 张宏, 黄懿梅, 祁金花, 等. 温度和水分对黄土丘陵区3种典型土地利用方式下土壤释放CO₂潜力的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 731-737. [ZHANG Hong, HUANG Yi-mei, QI Jin-hua, et al. Effects of temperature and moisture on soil CO₂ release potential under three typical land use types in the hill-gully area of Loess Plateau. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4): 731-737.]
- [43] Gupta S, Singh J. Soil respiration in a tropical grassland [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1981, 13(4): 261-268.
- [44] Conant R T, Klopatek J M, Malin R C, et al. Carbon pools and fluxes along an environmental gradient in northern Arizona [J]. *Biogeochemistry*, 1998, 43(1): 43-61.
- [45] 杨文治, 田均良. 黄土高原土壤干燥化问题探源 [J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 1-6. [YANG Wen-zhi, TIAN Jun-liang. Essential exploration of soil aridization. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 1-6.]
- [46] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2000. [YANG Wen-zhi, SHAO Ming-an. Soil Moisture Research on the Loess Plateau. Beijing: Science Press, 2000.]
- [47] 程立平, 刘文兆. 黄土塬区土壤水分分布特征及其对不同土地利用方式的响应 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 203-207. [CHEN Li-ping, LIU Wen-zhao. Soil moisture distribution in deep layers and its response to different land use patterns on Loess Tableland. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(9): 203-207.]
- [48] 李裕元, 邵明安, 郑纪勇, 等. 黄土高原北部草地的恢复与重建对土壤有机碳的影响 [J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2279-2287. [LI Yu-yuan, SHAO Ming-an, ZHENG Ji-yong, et al. Impact of grassland recovery and reconstruction on soil organic carbon in the northern Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(6): 2279-2287.]
- [49] 刘恩科, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期施肥对土壤微生物量及土壤酶活性的影响 [J]. 植物生态学报, 2008, 32(1): 176-182. [LIU En-ke, ZHAO Bing-qiang, LI Xiu-ying, et al. Biological Properties and enzymatic activity of arable soils affected by long-term different fertilization systems. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(1): 176-182.]
- [50] 黄懿梅, 安韶山, 刘连杰, 等. 黄土丘陵区土壤基础呼吸对草地植被恢复的响应及其影响因素 [J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(5): 862-869. [HUANG Yi-mei, AN Shao-shan, LIU Lian-jie, et al. Soil basal respiration to grass vegetation restoration and its affecting factors in the Loess Hilly-Gully Region. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(5): 862-869.]
- [51] 李国辉, 陈庆芳, 黄懿梅, 等. 黄土高原典型植物根际对土壤微生物生物量碳, 氮, 磷和基础呼吸的影响 [J]. 生态学报, 2010, 30(4): 976-983. [LI Guo-hui, CHEN Qing-fang, HUANG Yi-mei, et al. Soil microbial biomass C, N, P and basal respiration in rhizosphere soil of typical plants on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4):

976-983.]

- [52] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change [J]. *Nature*, 2006, 440(7081): 165-173.
- [53] Zheng Z M, Yu G R, Fu Y L, *et al.* Temperature sensitivity of soil respiration is affected by prevailing climatic conditions and soil organic carbon content: A trans-China based case study [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41 (7): 1531-1540.
- [54] Lauer F, Kösters R, Du Preez C C, *et al.* Microbial residues as indicators of soil restoration in South African secondary pastures [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(4): 787-794.
- [55] Loveys B R, Atkinson L J, Sherlock D J, *et al.* Thermal acclimation of leaf and root respiration: an investigation comparing inherently fast and slow growing plant species [J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(6): 895-910.
- [56] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, *et al.* Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 115-146.

Responses of Soil Respiration to Land Use Changes in a Semiarid Region of Loess Plateau

GUO Hui-min¹, ZHANG Yan-jun^{2a}, LIU Qing-fang^{2b}, JIANG Ji-shao¹, LI Jun-chao^{2b},
WANG Rui^{2b}, LI Na-na^{2a}, LI Ru-jian^{2a}, GUO Sheng-li^{1,2a}, LI Chun-yue³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, CAS and Ministry of Water Resource, Yangling 712100, China; 2. a. Institute of Soil and Water Conservation, b. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 3. College of Tourism and Environmental Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: Understanding the responses of soil respiration to land use changes becomes critical in predicting soil carbon cycling under conversion of arable land into grassland on the Loess Plateau. From March 2011 to December 2012, CO₂ efflux from the soil surface was measured from 8:00 to 12:00 am in clear days by a Licor-8100 closed chamber system (Li-COR, Lincoln, NE, US). Also, soil temperature and soil moisture at the 5 cm depth was measured using a Li-Cor thermocouple and a hand-held frequency-domain reflectometer (ML2x, Delta-T Devices Ltd, UK) at each PVC collar, respectively. Since returning cultivated land for 27 years, the mean grassland soil respiration (3.55 μmol·m⁻²·s⁻¹) was averaged 2.61 times higher than paired cropland soil respiration (1.36 μmol·m⁻²·s⁻¹) and the cumulative CO₂-C emission in grassland (981 g C·m⁻²) was 2.75 times higher than that in cropland (357 g C·m⁻²). In 2011, the temperature sensitivity of grassland (*Q*₁₀) improved by 24.5% compared with cropland, and in 2012 it reduced to 2.4%. We found marked differences in soil characteristics related to different land-use types: the mean grassland SOC (10.5 g·kg⁻¹) was averaged 61.5% higher than paired cropland SOC (6.5 g·kg⁻¹) and the SMBC (204 mg·kg⁻¹) was averaged 34% higher than cropland (152 mg·kg⁻¹). Soil moisture from 0–5 cm depth was much drier in cropland and significantly different between cropland and grassland except for winter. However, there were no clear differences between soil temperatures. SOC and soil moisture differences between cropland and grassland can explain the soil respiration difference caused by land-use change, which was confirmed by the validation results.

Key words: soil respiration; cropland; grassland; soil organic carbon; soil moisture; Loess Plateau