

水蚀风蚀交错区土壤呼吸特征及其对水热因子的响应

王 胜^{1,2}, 樊 军^{1,3*}, 王建国³, 易彩琼³, 高 宇^{1,2}

(1.中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为研究黄土高原水蚀风蚀交错区不同土地利用方式下的土壤呼吸特征及其对水热因子的响应,于2012年5月至10月,采用动态密闭气室法(IRGA)对裸地、农地、苜蓿地、柠条地和撂荒地土壤呼吸速率进行连续日动态测定,基于小时测定结果,分析土壤呼吸特征及其与水热因子的关系。结果显示,土壤呼吸日动态变化为单峰曲线,土壤呼吸速率一般在5:00—7:00(UTC+8)最低,在13:00—15:00最高,9:00和19:00时土壤呼吸测量值最接近日平均值。土地利用方式显著影响土壤呼吸速率($P<0.01$),其均值大小顺序为:苜蓿地>柠条地>撂荒地>农地>裸地。温度是影响土壤呼吸的决定性因子,土壤呼吸速率与5 cm 土层温度相关程度最高($P<0.01$)。5月至8月中旬降雨促进土壤呼吸,8月下旬至10月下旬降雨抑制土壤呼吸;水分对土壤呼吸具有双向调节作用:当0~10 cm 土层含水量低于 $0.20 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,水分促进土壤呼吸,超过 $0.20 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 时抑制土壤呼吸。研究提出的E-P-Q (Exponential-Piecewise-Coefficient)模型能够合理解释区域内水热因子对土壤呼吸的响应规律。

关键词:土地利用方式;土壤水分;降雨;土壤温度;水蚀风蚀交错带

中图分类号:S153 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)09-1770-12 doi:10.11654/jaes.2014.09.015

Soil Respiration and Its Responses to Soil Temperature and Water in Interlaced Zone of Water-wind Erosions in China

WANG Sheng^{1,2}, FAN Jun^{1,3*}, WANG Jian-guo³, YI Cai-qiong³, GAO Yu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China; 2. University of China Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: It is of critical importance to evaluate the regional carbon cycling and balance more accurately as global warming is the key issue of the climate changes. This research is aimed to reveal the soil respiration (SR) and its responses to soil temperature and water in a water-wind erosion interlaced zone in the Loess Plateau, China. Hourly SR in bareland, cropland, alfalfa land, cartagena korshinkii land and abandoned land were measured automatically from May to October, 2012, using Infra-Red Gas Analysis (IRGA) method. Soil temperature at depth of 5 cm and 15 cm (T_5 and T_{15} , respectively) and volumetric water content of 0~10 cm and 10~20 cm soils (VWC_{0-10} and VWC_{10-20} , respectively) were also monitored. The SR diurnal dynamics was a single-peak curve, with the peak occurring between 13:00 (UTC+8, similarly hereinafter) and 15:00, and the trough between 05:00 to 07:00. The SR measured at 9:00 and 19:00 was equal to the daily average value. Land use patterns had significantly impacts on SR ($P<0.01$), with order of alfalfa land > cartagena korshinkii land > abandoned land > cropland > bare land. The SR had significant positive correlation with T_5 , T_{15} , VWC_{0-10} and VWC_{10-20} for five land use patterns, but the correlation with soil water was weaker than with soil temperature. The correlation coefficients were greater for T_5 than T_{15} and VWC_{0-10} than VWC_{10-20} . The precipitation increased SR during May to late August, but inhibited SR during September to late October. Soil SR increased with increasing soil water when VWC_{0-10} was less than $0.2 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, but decreased as soil water further increased when VWC_{10-20} was greater than $0.2 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. The E-P-Q (Exponential-Piecewise-Coefficient) model could rationally explain relationships between SR and soil temperature and/or soil water.

Keywords: land use pattern; soil water; precipitation; soil temperature; water-wind erosion interlaced zone

收稿日期:2014-02-26

基金项目:国家自然科学基金(51239009,41271239);中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-13)

作者简介:王 胜(1987—),男,湖北秭归人,硕士研究生,主要从事土壤生态和土壤物理研究。E-mail:200404280@163.com

*通信作者:樊 军 E-mail:fanjun@ms.iswc.ac.cn

土壤呼吸是陆地生态系统向大气排放碳的主要途径^[1],其微小变化就能够对大气中 CO₂ 浓度产生较大影响。作为全球气候变化关键生态过程,土壤呼吸已经成为全球碳循环研究的核心问题,国内外对其开展了广泛研究^[2-5]。土壤呼吸速率主要受土壤生物活动区 CO₂ 产生速率的控制,同时还受影响 CO₂ 在土壤中运动的环境因子控制^[1]。通常认为土壤温度和水分是影响土壤呼吸最重要的环境因子,它们影响着陆地生态系统生产力和土壤有机质的分解速率,驱动着土壤呼吸时空变异^[6-7]。相比土壤温度,土壤水分与土壤呼吸之间的关系具有复杂性和不确定性^[8-9],因此需要在不同区域开展更为细致的研究。

水蚀风蚀交错带位于内蒙古东部和南部、黄土高原北部沿长城一带,总面积 2600 万 hm²,属干旱半干旱地区,生态脆弱。水分是调控该地区生态系统生产力和物质迁移的重要因素,对土壤呼吸有着不可忽视的作用,但目前水分对该地区土壤呼吸及土壤碳库动态变化的影响尚需深入研究。周小刚等^[10]研究显示土壤温度能够解释黄土高原农地和草地土壤呼吸变异的 79%~82%,而土壤水分与土壤呼吸不存在关联性。Shi 等^[11]在黄土高原刺槐林和辽东栎林的研究发现,旱季降雨引起土壤干湿交替和温度变化,显著影响土壤呼吸,土壤呼吸强度与土壤含水量存在正相关性关系。水分和温度对土壤呼吸的影响是同时存在的,但水分对土壤呼吸的影响常被土壤温度的效应所掩盖,因而准确评估水分因子对土壤呼吸的影响非常必要。“暖干化”气候趋势背景下该地区增温明显,干旱和强降雨交替频发,温度和水分共同影响下土壤呼吸的响应机制有待深入探讨。本研究于 2012 年 5 月至 10 月运用动态密闭气室法(IRGA),采用自动土壤呼吸多路测量设备对水蚀风蚀交错区裸地、农地、苜蓿地、柠条地和撂荒地土壤呼吸速率和水热因子进行连续动

态测定,基于小时观测数据研究不同土地利用方式土壤呼吸特征和其对水热因子的响应机制,力求为该地区碳循环过程深入研究提供科学依据,同时为区域碳平衡估算提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究地概况和样地描述

试验观测点位于陕西省榆林市神木县六道沟小流域(东经 110°21'~110°23',北纬 38°46'~38°51')。该流域海拔 1094~1274 m,是黄土高原向毛乌素沙漠的过渡地带,处于流水侵蚀的黄土丘陵区向干燥剥蚀作用的鄂尔多斯高原过渡的水蚀风蚀交错带,是典型的生态脆弱区,属中温带半干旱气候。冬春季干旱少雨多风沙,夏秋多雨,多年平均降水量 437 mm,年均气温 8.4 °C,≥10 °C 活动积温 3 248.0 °C,无霜期 153 d,年太阳辐射总量 5922 MJ·m⁻²。地带性土壤为黑垆土,因长期强烈侵蚀,已被沙黄土、新黄土、红粘土及在沙地上发育起来的风沙土、坝地淤土取代。植被类型为干旱草原,因实行退耕还林(草)工程,植被覆盖度有所增加。紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、次生天然长芒草(*Stipa bungeana*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza dawurica*)、蒿类(*Artemisia capillaris*)等植物分布比较广泛;沙柳(*Salix psammophila*)、柠条(*Caragana korshinkii*)等灌木在该地区也有分布。

观测小区位于六道沟小流域内一块平坦的梯田上。2006 年在已经耕种 15 年以上的农地上,设立 5 个 200 m² 试验小区,包括裸地、农地、人工草地(紫花苜蓿)、人工灌木地(柠条)、撂荒地(农地弃耕后不进行人为干扰),土壤类型均为黄绵土,样地概况见表 1。土壤养分采样分析于 9 月中旬进行。裸地定期除草,控制杂草生长;农地为雨养旱地,种植作物为豆类或者谷子,播种前施肥翻耕,施肥量为 120 kg N·hm⁻²

表 1 试验样地概况

Table 1 Site conditions of five land use patterns

土地利用方式 Land use pattern	年限 Age/a	土壤(0~5 cm)容重 Soil bulk density/ g·cm ⁻³	有机质含量 Organic/ %	全氮含量 Nitrogen/ %	速效磷含量 Available P/ mg·kg ⁻¹	地上干生物量 Dry biomass/ kg·hm ⁻²	建群种 Community composition
裸地 Bare land (BL)	7	1.43	0.46	0.034	4.4	0	少量野韭 <i>Allium ramosum</i>
农地 Cropland (CL)	23	1.34	0.71	0.045	7.8	13 073	绿豆 <i>Vignaradiata</i>
苜蓿地 Alfalfa land (AL)	7	1.36	0.72	0.047	4.3	5862	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>
柠条地 Cartagena korshinkii land (CKL)	7	1.34	0.73	0.045	4.1	7339	柠条 <i>Caraganakorshinkii</i>
撂荒地 Abandoned land (ABL)	7	1.27	0.83	0.051	4.2	5416	长芒草 <i>Stipabungeana</i> 、硬质早熟禾 <i>Poasphondylodes</i> 、紫云英 <i>Astragalus sinicus</i> 、茵陈蒿 <i>Artemisiacapillaris</i>

和 $60 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$, 定期除草。2012 年度黄豆成熟期冠层高度为 40 cm ; 紫花苜蓿人工草地最大生物量时期株高约 65 cm ; 柠条灌木林最大生物量时期株高 110 cm 左右, 林下杂生蒿类; 撂荒地处于向长芒草群落演替的初级阶段。

1.2 土壤呼吸与土壤温度、含水量的连续测定

在每块样地内随机选取能代表样地平均生长情况的观测样点, 安放 PVC 呼吸底座。底座内径 18.5 cm 、高 10 cm 。为了减少安放底座对土壤的干扰, 底座下端设计成刀刃状, 底座尽可能安放在植被间的空隙处避开植株, 试验观测开始前用橡皮锤将底座轻轻水平敲入表层土壤中, 使底座出露地表 5 cm 。整个观测期间保持底座内无植物生长, 若 PVC 底座内有植物生长, 则将底座内植物齐地剪掉, 操作过程中尽可能减少土壤扰动。运用动态密闭气室法 (IRGA) 测定土壤呼吸速率, LI-840A CO_2 气体分析仪 (Li-COR Inc., Lincoln, NE, USA) 和全自动土壤呼吸测定气室在数据采集器 CR1000 (Campbell Scientific, Logan, UT, USA) 的控制下自动测定土壤呼吸。采用 TDT (Time Domain Transmissometry; Acclima, Inc., Meridian, ID, USA) 探头测定土壤温度与水分含量, 探头水平埋设在距离地表 5 cm 和 15 cm 处, 分别代表土壤 5 cm 与 15 cm 处温度及 $0\sim 10 \text{ cm}$ 与 $10\sim 20 \text{ cm}$ 土层平均体积含水量值, 利用烘干法对 TDT 探头含水量测量结果进行校准。土壤呼吸、温度和含水量同步测量, 5 个样地均每 1 h 整点测定 1 次, 每天测定 24 次。自动测量从 2012 年 4 月下旬持续至 2012 年 10 月下旬。

受限于设备数量和野外试验条件, 每块样地内仅安装一台自动测量呼吸气室。为检验土壤呼吸连续测定的准确性和代表性, 每块试验样地内另设置 5 个 PVC 呼吸环, 采用 LI-8100 (Li-COR Inc., Lincoln, NE, USA) 每周测定 1 次土壤呼吸, 并在 $9:00\sim 11:00$ 时段完成测量。试验结束后, 对比生长季土壤呼吸手动测量值和相同时段 ($9:00\sim 11:00$) 的连续测量值, 结果显示无重复的连续测量结果与多点平均值结果一致 (图 1)。

1.3 土壤呼吸与土壤温度、含水量的连续测定

试验运用 SPSS 16.0 分析不同土地利用方式土壤呼吸速率的差异显著性, 土壤呼吸速率与水热因子的相关性。采用 SigmaPlot 12.5 拟合水热因子对土壤呼吸的响应函数并作图。温度敏感性指数 Q_{10} 依据 Van't Hoff^[12] 指数函数模型求得:

$$R_s = \alpha \cdot e^{\beta T} \quad (1)$$

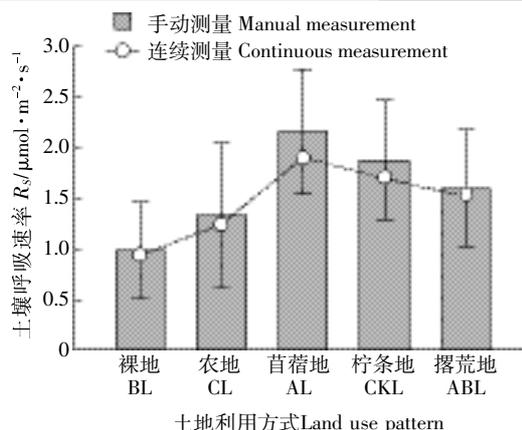


图 1 生长季土壤呼吸手动测量与连续测量平均值对比

Figure 1 Comparisons of manual and continuous measurements of soil respiration

$$Q_{10} = e^{10\beta} \quad (2)$$

式中: α 、 β 为拟合参数 (β 称为温度反应系数); R_s 为土壤呼吸速率, $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; T 为土壤温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式土壤呼吸特征

水蚀风蚀交错区土壤呼吸日动态变化呈单峰曲线, 生长季 (5 月至 10 月) 土壤呼吸速率达到峰值的时刻无明显季节差异 (图 2)。土壤呼吸速率一般在早晨 $5:00\sim 7:00$ (UTC+8, 下同) 最低, 随着土壤温度的升高, 在中午或午后 $13:00\sim 15:00$ 达到峰值, 在下午及夜间随温度的回落而持续降低。土壤呼吸与 5 cm 土层温度日变化趋势基本一致, 达到峰值的时刻几乎相同。 15 cm 土层温度一般在 $17:00\sim 19:00$ 达到峰值, 与土壤呼吸和 5 cm 土层温度相比存在明显的滞后。限于篇幅, 15 cm 土层温度未在图 2 中列出。

土壤呼吸具有明显的季节差异, 5 种土地利用方式土壤呼吸速率均在 7 月至 8 月达到最高, 春季和秋季较低。5 种土地利用方式土壤呼吸速率生长季平均值大小顺序为苜蓿地 > 柠条地 > 撂荒地 > 农地 > 裸地, 差异均达到极显著水平 ($P < 0.01$), 农地、裸地土壤呼吸变异系数大于苜蓿地、柠条地和撂荒地 (表 2)。

由于测量设备的限制, 田间土壤呼吸测定常使用快速测量技术, 即用最能代表土壤呼吸日均值的某个时刻测量值代替日平均值。本研究通过分析土壤呼吸速率日平均值与某时刻土壤呼吸的关系, 得出代表土壤呼吸速率日平均值的时刻, 结果表明 $9:00$ 和 $19:00$ 的土壤呼吸速率最接近日平均值 (图 3)。李志刚等^[13]对黄土高原封育草地研究发现, $9:04$ 和 $21:33$

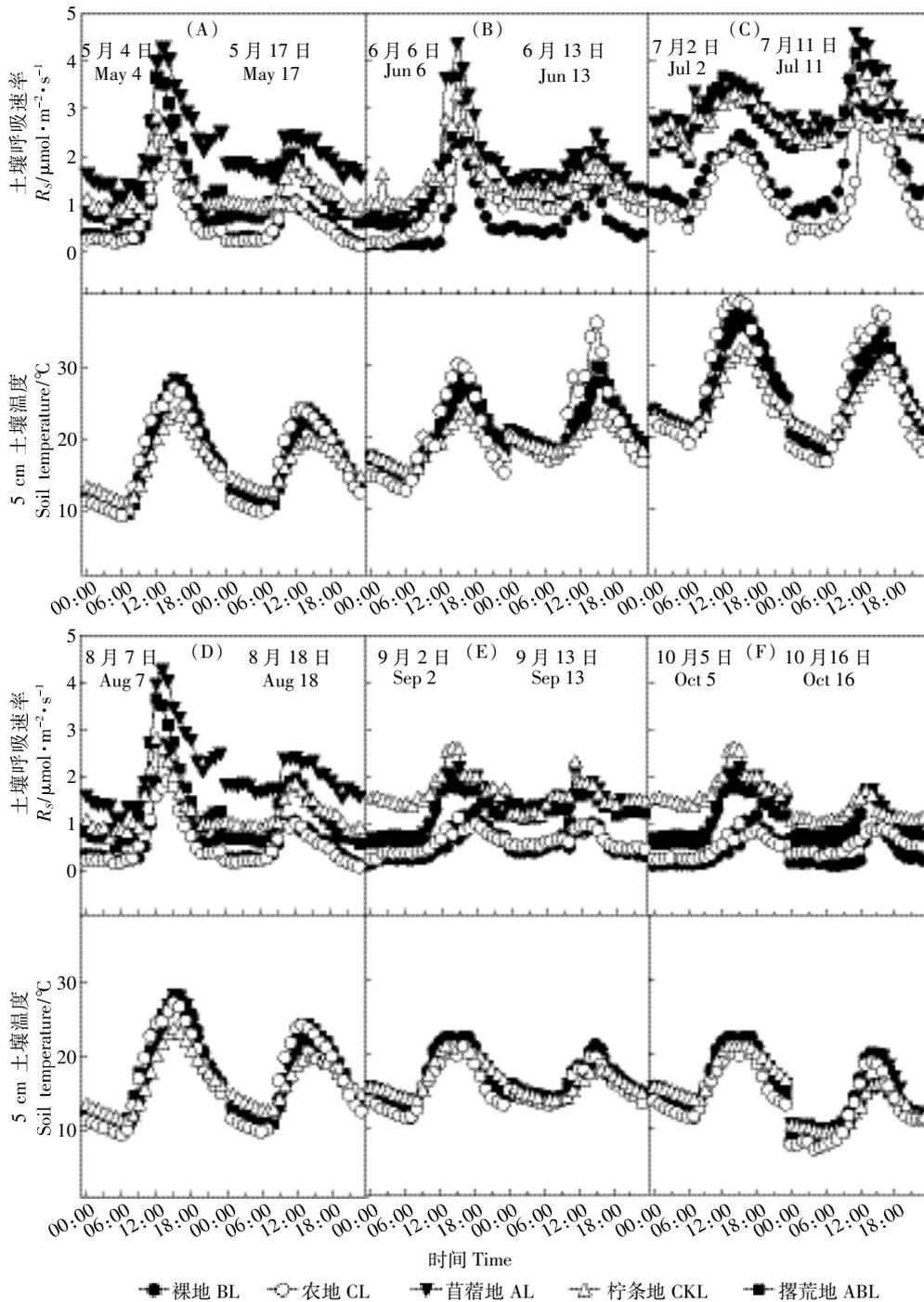


图2 生长季土壤呼吸速率和5 cm 土层温度日动态变化

Figure 2 Diurnal variations of soil respiration rates and soil temperature at 5 cm under different land use pattern during growing season

的土壤呼吸速率接近日平均值,与本研究结论相似。

2.2 土壤呼吸对水热因子的响应

温度是调控土壤呼吸的关键因子,生长季5种土地利用方式土壤呼吸速率和5、15 cm 土壤温度相关性均呈极显著水平($P < 0.01$),裸地、撂荒地土壤呼吸速率与5 cm 土层温度相关程度最高,而农地土壤呼吸速率与5 cm 土层温度相关程度最低;对于同种土

地利用方式,土壤呼吸速率与5 cm 土层温度相关系数均高于与15 cm 土层温度的相关系数(表3)。

土壤呼吸单因子响应模型中,土壤呼吸与土壤温度的关系常用指数函数表示,用公式(1)模拟温度对土壤呼吸的影响(表4), Q_{10} 由公式(2)求出。

除农地0~10 cm 土层外,土壤呼吸速率与其余土地利用方式0~10、10~20 cm 土层体积含水量相关性

表2 不同土地利用方式土壤呼吸速率($R_s/\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)和变异系数($C.V/\%$)Table 2 Soil respiration rates ($R_s/\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) and coefficients of variation ($C.V/\%$) under different land use patterns

土地利用方式 Land use pattern	裸地 Bare land	农地 Cropland	苜蓿地 Alfalfa land	柠条地 Caragana korshinskii land	撂荒地 Abandoned land	
5月 May	土壤呼吸 R_s	0.67dD cC	0.55eD eE	1.84aA bB	1.26bB eE	1.20cC eD
	变异系数 $C.V$	64.4	65.7	34.4	32.2	45.7
6月 Jun.	土壤呼吸 R_s	0.70eE cC	1.01dD cC	1.67aA cC	1.40bB dD	1.40cC cC
	变异系数 $C.V$	63.7	53.1	45.5	32.0	43.7
7月 Jul.	土壤呼吸 R_s	1.06dD aA	1.24cC bB	1.80bB bB	1.73bB bB	1.96aA aA
	变异系数 $C.V$	53.6	40.1	47.4	37.0	35.1
8月 Aug.	土壤呼吸 R_s	0.94dD bB	1.87cC aA	2.20aA aA	2.13bB aA	1.86cC bB
	变异系数 $C.V$	45.2	35.6	23.9	18.4	24.2
9月 Sep.	土壤呼吸 R_s	0.54eD dD	0.65dC dD	1.51bA dD	1.56aA cC	1.33cB dC
	变异系数 $C.V$	61.3	46.6	31.8	26.0	36.5
10月 Oct.	土壤呼吸 R_s	0.34eE eE	0.51dD eE	0.79bB eE	0.84aA fF	0.69cC fE
	变异系数 $C.V$	64.6	46.8	37.3	30.6	42.5
生长季 Growing season	土壤呼吸 R_s	0.73eE	0.98dD	1.69aA	1.53Bb	1.44cC
	变异系数 $C.V$	65.7	68.7	43.6	38.5	46.3

注:表中行内斜体字母表示不同土地利用方式在同一月份土壤呼吸速率差异显著性;列内正体字母表示同一土地利用方式在不同月份土壤呼吸速率差异显著性。不同的大写字母或小写字母分别代表差异为极显著水平($P<0.01$)或显著水平($P<0.05$)。

Note: The italic letters represent significant differences in soil respiration rates between different land use patterns in the same month; The normal letters represent significant differences in soil respiration rates between different months in the same land use pattern. The capital and small letters represent highly significant ($P<0.01$) and significant difference ($P<0.05$), respectively.

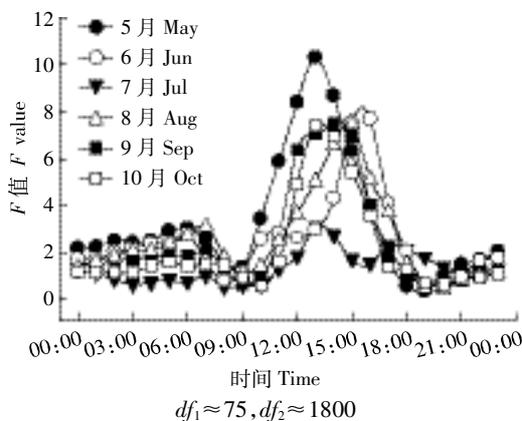


图3 土壤呼吸速率日变化平均值与具体时刻土壤呼吸速率齐性方差检验 F 值

Figure 3 Homogeneity test of variances between diurnal averages of soil respiration rates and soil respiration rates at the time of a day

均呈极显著水平($P<0.01$),但相关系数低于与土壤温度的相关系数(表3)。土壤水分对土壤呼吸的影响比较复杂,单纯的线性相关分析并不能完全揭示两者之间的关系。降水是研究区域土壤水分的主要来源,2012年生长季降水量总计463.5 mm。浅表层(0~10 cm)土壤直接与大气相通,直接承接降雨而且容易受到其他气象因素的影响,因而浅表层与10~20 cm土层相比土壤含水量波动更加剧烈。土壤呼吸速率与

0~10 cm 土层体积含水量密切相关(图4)。5月至8月中旬,土壤呼吸速率多随0~10 cm 土层体积含水量的增大而上升,随含水量的减小而下降,在因降雨事件引起的干湿变化周期内土壤呼吸速率与含水量动态的“峰”“谷”一致,仅5月9日连续两次降雨使日平均土壤含水量高达 $0.22\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 时,土壤呼吸骤然降低;8月下旬至10月,土壤呼吸速率随0~10 cm 土层体积含水量的增大而下降,随含水量的减小而上升,干湿变化周期内土壤呼吸速率与土壤含水量动态的“峰”“谷”相对,互成“镜像”。降雨或土壤含水量的剧烈变化还伴随着土壤温度的改变,具有强烈的水热耦合作用。

把生长季小时观测数据依照5 cm 土层温度排序,在固定温度下探究水分因子对土壤呼吸的响应规律(图5)。结果显示5 cm 土层温度为2~8℃时,当0~10 cm 土层含水量在 $0.19\sim 0.23\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 范围内,土壤呼吸速率随含水量的增加而下降;当低于 $0.19\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 时土壤呼吸速率相对发散,并且有下降的趋势(图5A)。土壤温度分别为10~11℃(图5B)、15~15.5℃(图5C)和21~21.5℃(图5D)时,土壤水分对土壤呼吸表现出双向调节作用,含水量在 $0.2\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 左右时土壤呼吸变化趋势发生明显转折。土壤温度为25~25.5℃时,当含水量低于 $0.19\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 时土壤呼

表3 不同土地利用方式 5、15 cm 土层温度和 0~10、10~20 cm 土层含水量与土壤呼吸速率相关分析
Table 3 Correlationship between soil respiration rates and soil temperature at 5 cm and 15 cm and volumetric water contents at 0~10 cm and 10~20 cm

土地利用方式 Land use pattern	裸地 Bare land		农地 Cropland		苜蓿地 Alfalfa land		柠条地 Cartagena korshinkii land		撂荒地 Abandoned land	
	平均值 Average	相关系数 <i>r</i>	平均值 Average	相关系数 <i>r</i>	平均值 Average	相关系数 <i>r</i>	平均值 Average	相关系数 <i>r</i>	平均值 Average	相关系数 <i>r</i>
5 cm 土壤温度 Soil temperature/°C	19.9	0.744**	20.0	0.587**	20.2	0.621**	18.9	0.614**	20.1	0.742**
15 cm 土壤温度 Soil temperature/°C	19.2	0.485**	19.0	0.536**	19.0	0.541**	20.4	0.570**	18.4	0.619**
0~10 cm 土层 含水量/cm ³ ·cm ⁻³	0.177	0.121**	0.143	-0.026	0.160	0.309**	0.110	0.392**	0.183	0.177**
10~20 cm 土层 含水量/cm ³ ·cm ⁻³	0.181	0.134**	0.185	0.401**	0.115	0.213**	0.130	0.467**	0.153	0.246**

注:5种土地利用方式样本量 $n=2200$; **表示相关性达到极显著水平 ($P<0.01$)。

Note: The sample size of each land use was approximately 2200; ** represents highly significance level ($P<0.01$).

表4 土壤呼吸速率与 5 cm 土层温度单因子响应函数拟合及温度敏感性指数 Q_{10}

Table 4 Functional fitting of soil respiration in response to soil temperature and index (Q_{10}) of temperature sensitivity

土地利用方式 land use patterns	拟合参数 Fitted parameters		温度敏感性指数 Q_{10}	相关系数 <i>r</i>	校准决定系数 Adjusted R^2	标准估计误差 Std. E.E	显著性 <i>P</i>	样本量 <i>n</i>
	α	β						
裸地 Bare land	0.15	0.073	2.08	0.74	0.55	0.33	<0.001	2179
农地 Cropland	0.44	0.037	1.45	0.52	0.27	0.54	<0.001	2256
苜蓿地 Alfalfa land	0.87	0.033	1.39	0.53	0.28	0.63	<0.001	2239
柠条地 Caragana korshinkii land	0.77	0.036	1.43	0.54	0.30	0.49	<0.001	2278
撂荒地 Abandoned land	0.70	0.035	1.42	0.59	0.35	0.54	<0.001	2270
平均 Average	0.57	0.039	1.48	0.65	0.42	0.42	<0.001	2302

吸速率随含水量的增加而上升,当含水量继续增加时土壤呼吸速率则有下降的趋势(图 5 E)。温度为 32~37 °C 时,含水量在 0.08~0.18 cm³·cm⁻³ 范围内,土壤呼吸速率随含水量的增加而上升(图 5 F)。当土壤温度过低时,如选取的 2~8 °C,常处于秋季或者有降雨事件发生,含水量普遍较高,故试验较少观测到低含水量数据;当土壤温度较高时,如选取的 25~25.5、32~37 °C,常处于夏季午间,太阳辐射强,土壤蒸发量大,土壤含水量普遍较低,试验较少观测到高含水量数据。综合分析认为,区域内土壤水分对土壤呼吸具有双向调节作用,含水量过高或不足均会抑制土壤呼吸,影响土壤呼吸的土壤含水量转折点约为 0.20 cm³·cm⁻³;固定温度下土壤呼吸速率可用土壤含水量的线性分段函数表示。

基于土壤呼吸对土壤温度和水分响应分析,进一步进行土壤呼吸的温度和水分双因子模型模拟。双因子模型由土壤温度 T 的简单指数函数 $\alpha \cdot e^{\beta T}$ 、土壤体积含水量 w 的线性分段函数 $f(w)$ 和纠正低温段

土壤呼吸被高估的函数 $\delta(T)$ 构成,称之为 E-P-C (Exponential-Piecewise-Coefficient) 模型:

$$R_s = \alpha \cdot e^{\beta T} f(w) \delta(T) \quad (3)$$

$$\text{其中: } f(w) = \begin{cases} a(w-w_0)+b, & w \leq w_0 \\ c(w-w_0)+b, & w > w_0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\delta(T) = 0.4849 + \frac{0.5158}{1 + e^{-\left(\frac{T-13}{0.7693}\right)^{0.1376}}} \quad (5)$$

式中: T 、 w 、 R_s 分别为 5 cm 土层温度(°C)、0~10 cm 土层含水量(cm³·cm⁻³)和土壤呼吸速率($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); α 、 β 、 w_0 、 a 、 b 、 c 均为拟合参数,其中 β 可表征土壤呼吸温度敏感性, w_0 是影响土壤呼吸的土壤含水量转折点。

结果显示(表 5), E-P-C 模型可以解释 5 种土地利用方式土壤呼吸变异的 41%~63%, 拟合参数 β 与 Van't Hoff 指数模型中的温度反应系数基本一致。为评估 E-P-C 模型拟合效果做出土壤呼吸预测值与观测值 1:1 直线图(图 6), 结果显示: 当土壤呼吸速率较低或适中时观测值与预测值大致吻合, 但当土壤呼吸

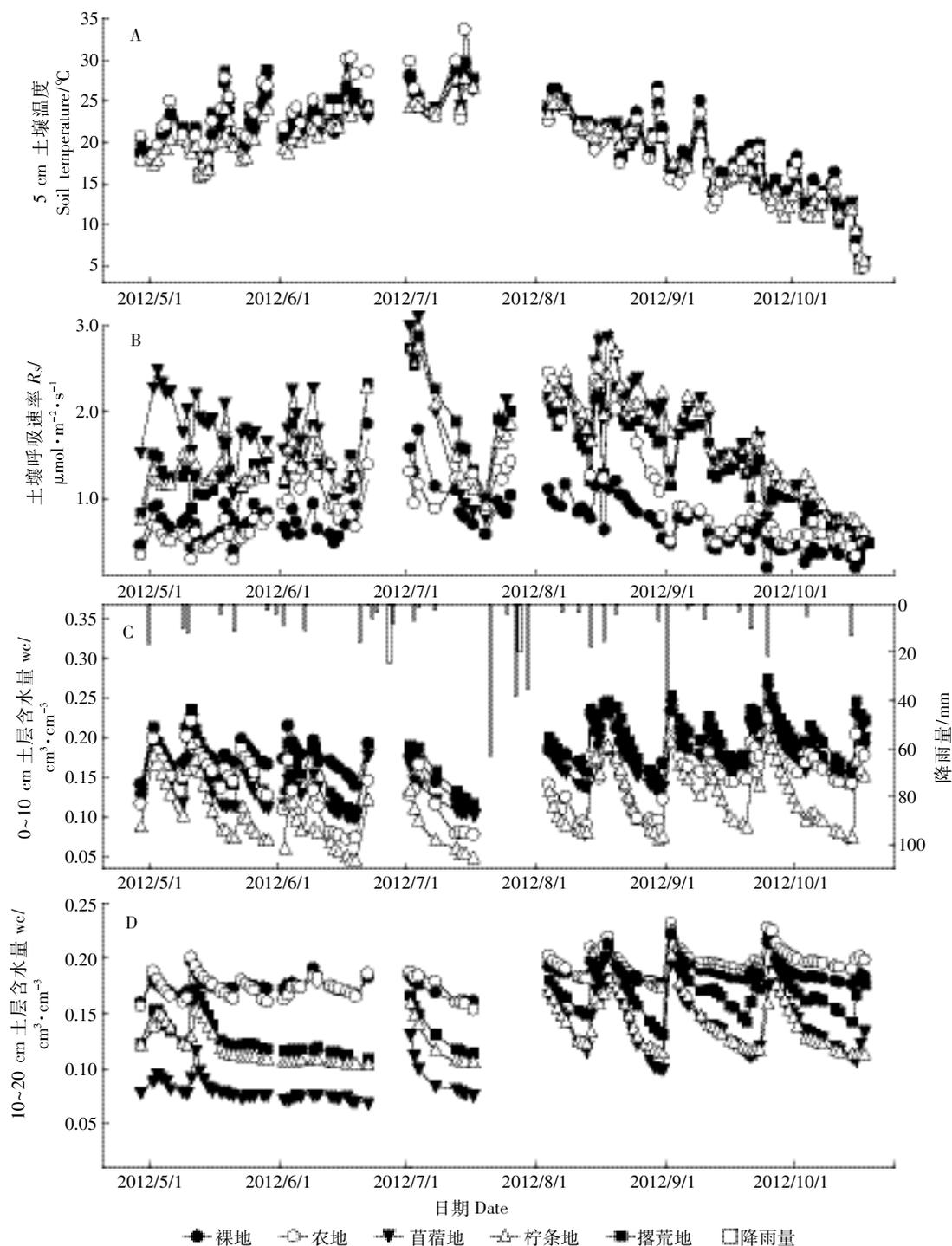


图4 不同土地利用方式5 cm 土层温度(A)与土壤呼吸速率(B),0~10、10~20 cm 土层含水量(C、D)及降雨(C)的关系
Figure 4 Relationship between soil respiration rates(A) and soil temperature at 5 cm(B), and average volumetric water contents (VWC, C & D) at 0~10 cm and 10~20 cm and precipitation(C) under different land use patterns

速率较高时预测值稍微偏大,可能的原因是当土壤温度或水分因子处于对土壤呼吸有利的状态时,其他影响因素成为土壤呼吸的限制因子。5块样地中农地的拟合效果最差,有较多的观测值与预测值偏离,可能是农地受耕作管理扰动、作物生长期短、季节差异大

等影响。

3 讨论

3.1 不同土地利用方式土壤呼吸特征

试验表明土壤呼吸日动态和季节格局均为单峰

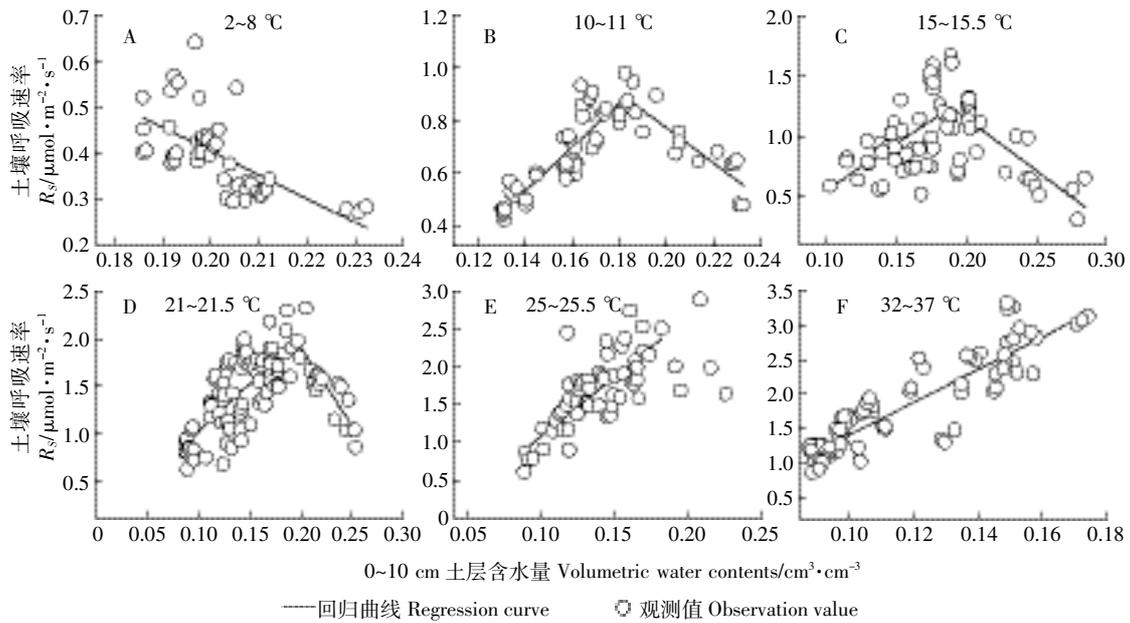


图5 固定5 cm 土层温度条件下土壤呼吸速率与0~10 cm 土层平均体积含水量的关系

Figure 5 Relationship between soil respiration rates and average volumetric water contents at 0~10 cm at fixed soil temperature at 5 cm

表5 不同土地利用方式土壤呼吸对水热因子响应函数

Table 5 Functional fittings of soil respiration in response to soil temperature and moisture under different land use patterns

土地利用方式 Land use patterns	拟合参数 Fitted parameters						校准决定系数 Adjusted R_2	标准估计误差 Std. E.E	显著性 P	样本量 n
	α	β	w_0	a	b	c				
裸地 Bare land	0.79	0.075**	0.203**	1.14	0.24	-4.71	0.63	0.30	<0.001	2179
农地 Cropland	0.24	0.035**	0.086**	99.12	2.59	-9.23	0.41	0.49	<0.001	2256
苜蓿地 Alfalfa land	0.51	0.043**	0.195**	10.47	1.99	-15.99	0.56	0.49	<0.001	2239
柠条地 Caragana korshinkii land	0.28	0.045**	0.191**	19.70	2.52	-17.21	0.54	0.40	<0.001	2278
撂荒地 Abandoned land	0.44	0.044**	0.213**	9.62	1.86	-23.06	0.61	0.42	<0.001	2270

注:**表示该拟合参数置信度达到99%。

Note: ** shows 99% fitting confidence.

曲线,土壤呼吸速率一般在每日13:00—15:00达到峰值,与Han等^[14]在滨海湿地、王铭等^[15]在松嫩平原草甸、Shi等^[11]在西北半干旱区等研究结果一致。土壤呼吸速率在夏季最高(7—8月),春秋季节较低,与胡宗达等^[16]在川西亚高山草甸、Tian等^[17]在亚热带森林、Qi等^[18]在内蒙古草原等众多研究结论一致,亦与多数文献^[19-20]类似。本研究认为温度是驱动土壤呼吸日变化和季节变化最重要的环境因子。

研究显示5种土地利用方式之间土壤呼吸日动态和季节格局没有差异,但是土壤呼吸强度差异均极显著($P<0.01$),土壤呼吸速率平均值为苜蓿地($1.69 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)>柠条地($1.53 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)>撂荒地($1.44 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)>农地($0.98 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)>裸地($0.73 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。试验统计了不同土地利用方式

之间土壤呼吸强度与土壤表层(0~5 cm)容重、有机质含量、氮含量、速效磷含量、地上生物量、0~20 cm 土层温度和含水量等指标的相关性,但相关性均未达到显著水平($P<0.05$)。土地利用方式对土壤呼吸的影响是综合而复杂的,不同土地利用方式影响土壤呼吸的主控因素也不尽相同。相比农地,裸地无植被生长,无人工扰动,地表板结,养分状况和土壤结构差,根系和微生物数量较少,土壤呼吸微弱。有研究表明,苜蓿和柠条能强烈改变土壤养分、微生物数量和水热循环过程,同时有更多的根系及地表残留物进入土壤,显著促进土壤呼吸^[21]。付微等^[22]指出柠条是固氮性植物,需要消耗较多来源于土壤呼吸产生的能量用于氮的吸收和同化,故根系维持较高的呼吸强度。苜蓿根系发达耗水剧烈,大面积种植苜蓿可能会加剧土壤干化^[23-25],亦

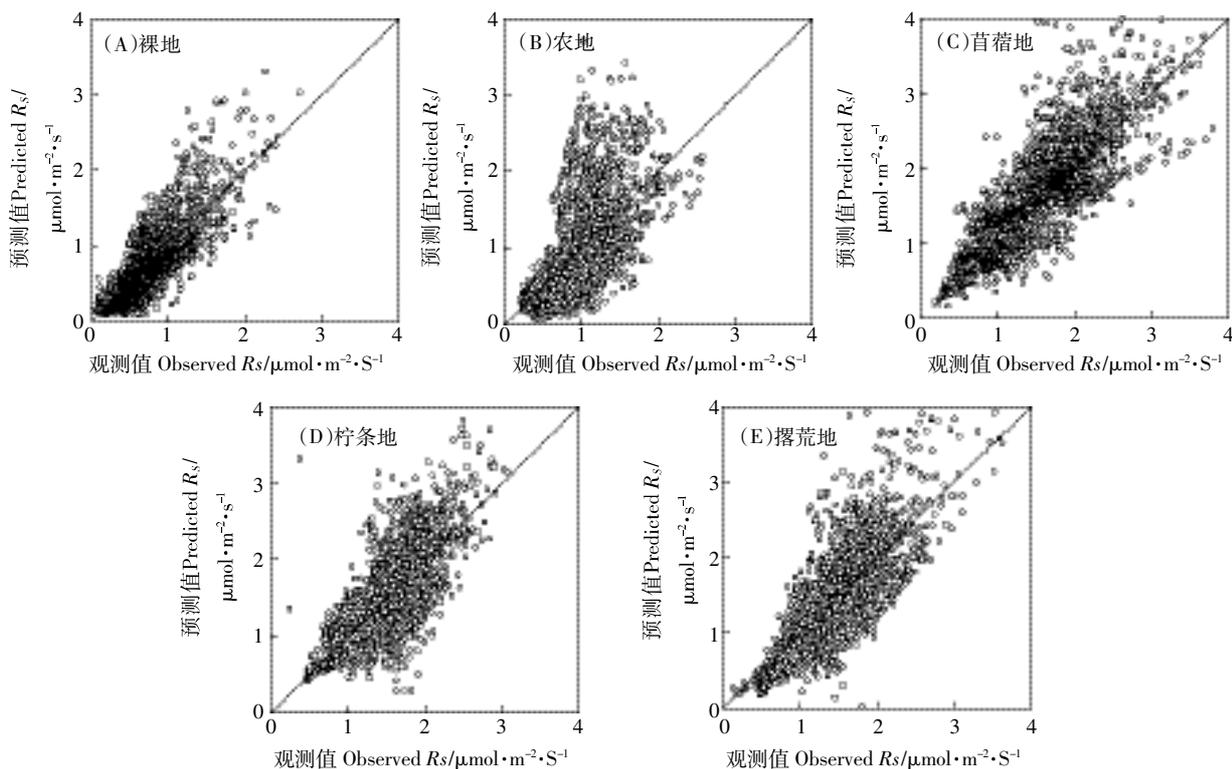


图6 土壤呼吸速率预测值与观测值 1:1 线图

Figure 6 Comparisons of predicted and observed soil respiration rates

有研究指出柠条也会导致土壤干层发生^[26],使生态环境恶化,植被恢复后期对土壤呼吸的影响需进一步研究。撂荒地处于植被演替阶段,土壤呼吸强度与撂荒年限及植被演替阶段有关。Zhou 等^[27]利用根系碳储量可以解释 5 种森林群落土壤碳排放差异的 77%,根系和凋落物碳总量可以解释 63%;郭明英等^[28]发现不同利用方式下草地土壤呼吸强度与微生物量碳存在高度一致性。土壤呼吸主要由根系呼吸和微生物呼吸组成,植物根系对土壤呼吸的贡献占 33%~66%^[29-31],在不同生态系统类型中差异较大,有研究指出根系呼吸与光合产物供应密切相关,而微生物呼吸与有机物的分解密切相关^[32-33],因而土壤呼吸不同组分对环境的响应机制也不尽相同。这为我们后期研究提供了思路,即通过研究根系和凋落物碳储量、土壤微生物量碳等指标,结合不同植被生长特性和区分土壤呼吸组分等方法进一步研究土地利用对土壤呼吸的影响机理。

3.2 土壤呼吸与环境因子的关系

目前普遍认为土壤温度和水分能够强烈影响土壤呼吸,但是对它们在干旱半干旱生态系统中的相对重要性仍然存在着争议^[34]。试验结果表明,土壤呼吸与 5、15 cm 土层温度呈极显著正相关($P < 0.01$),而且

相关程度远高于与土壤含水量的相关性,温度指数单因子模型可以解释土壤呼吸变异的 27%~55%,故温度是影响该地区土壤呼吸的关键环境因子。研究发现,与 15 cm 土层相比,5 cm 土层温度与土壤呼吸的相关程度更高,日动态分析亦显示 15 cm 土层温度变化滞后于 5 cm 土层温度和土壤呼吸变化,表明土壤呼吸对浅层土壤温度的响应更加敏感。试验区域生长季温度敏感性指数 Q_{10} 为 1.39~2.08,均小于全球各种生态系统 Q_{10} 中位值 2.4^[1],但与大多数文献的研究结果一致^[10,35]。研究区域为中温带半干旱地区,较差的水分条件导致区域生产力和土壤有机碳、养分含量低,增加了环境因子对土壤呼吸的制约,因而具有较低的 Q_{10} 值。

研究区域降雨量偏低并且主要集中在夏秋季,土壤含水量波动剧烈并导致土壤强烈干湿交替,试验发现土壤呼吸速率与浅表层(0~10 cm)土壤含水量密切相关,土壤水分对土壤呼吸具有双向调节作用,土壤水分影响土壤呼吸的转折点约为 $0.20 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。张红星等^[36]在黄土高原长武小麦田利用 5 月至 7 月的小时观测数据也得出相似的结论,但认为水分转折点为 $0.24 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,可能是因为两者土壤质地存在差异。然而,高宇等^[21]、许浩等^[37]在干旱半干旱地区没有发现土

壤水分与土壤呼吸存在相关性。这主要有两方面的原因:第一,降雨或土壤水分状况的变化会引起土壤温度的改变即水热耦合效应,在野外观测中剔除温度因素的影响非常具有挑战性;第二,通常温度对土壤呼吸速率的影响比较显著,水分对土壤呼吸的影响常被土壤温度的效应所掩盖。研究指出,当水分含量较低时土壤微生物活性降低,含水量增加有利于提高土壤养分的利用率,促进 N 矿化,激活了微生物活性,进而促进土壤呼吸^[38];当含水量较高时水分会填充土壤空隙,氧气或 CO₂ 的扩散随着含水量的增加而受阻,导致土壤呼吸减弱^[39]。Shi 等^[11]在黄土高原森林-草原过渡带的研究发现,降雨能显著增强干旱时期土壤呼吸强度,本研究则进一步发现降雨对土壤呼吸的影响主要取决于降雨对土壤水分状况的改变程度,当浅表层(0~10 cm)土壤含水量超过 0.20 cm³·cm⁻³ 时土壤呼吸受到不同程度抑制,没有超过时降雨不同程度促进土壤呼吸。

3.3 土壤呼吸温湿度双因子模型

迄今为止绝大多数土壤呼吸预测模型都是关于温度和水分的双因子或双因子模型,建立在不同区域不同时间和空间尺度上的模型,适用性也不同。本研究基于生长季小时观测数据建立的土壤呼吸 E-P-C 模型能够解释土壤呼吸变异的 41%~63%,比温度指数单因子模型解释度提高了约 20%。目前多采用指数-幂函数模型模拟土壤呼吸,高宇等^[21]在前期研究中发现该模型 $R_s = \alpha \cdot e^{\beta T} w^c$ 能够解释土壤呼吸变异的 35%~58%,但无法体现水分对土壤呼吸的双向调节作用。张红星等^[36]提出了体现水分双向调节作用的 E-Q 模型,但由于拟合参数的确定比较复杂,模型至今很少被采纳。王新源等^[34]指出,当温度过高或偏低时 Van't Hoff 指数模型拟合精度明显下降,我们分析发现温度偏低时土壤呼吸整体被高估,E-P-C 模型添加了一个温度函数 $\delta(T)$ 进行调节,使模型在低温段也有很好的拟合精度,而这是指数-幂函数模型和 E-Q 模型未曾考虑的。E-P-C 模型体现了温度对土壤呼吸的指数响应特性和水分的双向调节作用,在低温段也有很好的适用性,能够客观描述水蚀风蚀交错区干湿交替格局下土壤呼吸响应特征。

黄土高原水蚀风蚀交错区具有独特的区域特征和土壤温湿度变化特征,在全球变暖和区域“暖干化”气候背景下增温显著,加之退耕还林(草)增加土壤呼吸强度,有利于土壤向大气排放更多 CO₂。随着退耕还林(草)工程的实施,区域植被覆盖度有所增加,土壤

有机碳积累增加,有利于土壤固定更多的碳。在这种背景下研究环境因子特别是水热因子对土壤呼吸的影响并提出适合具体区域的经验模型,对认识该区域生态系统的碳水循环过程有一定理论意义。

4 结论

(1)黄土高原水蚀风蚀交错区生长季土壤呼吸速率日变化为单峰曲线,土壤呼吸速率一般在 5:00—7:00 最低,在 13:00—15:00 最高。1 d 之内,9:00 和 19:00 的土壤呼吸速率最接近日平均值。土地利用方式显著影响土壤呼吸速率($P < 0.01$),相关机理机制尚待进一步深入研究。

(2)温度是影响土壤呼吸的决定性因子,土壤呼吸速率与 5 cm 土层温度相关程度最高($P < 0.01$)。土壤水分对土壤呼吸具有双向调节作用,含水量过低或过高均不利于土壤呼吸,影响土壤呼吸的 0~10 cm 土层含水量转折点约为 0.20 cm³·cm⁻³。由温度指数函数、含水量线性分段函数和纠正低温下高估土壤呼吸的函数复合而成的 E-P-Q (Exponential-Piecewise-Coefficient) 模型能够合理解释该地区水热因子对土壤呼吸的响应规律。

参考文献:

- [1] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus B*, 1992, 44(2): 81-99.
- [2] 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[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5): 469-476.
- [3] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [4] 张耀鸿,楚岱蔚,谢晓金,等. 夜间增温对麦田土壤呼吸速率的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(7): 1389-1395.
ZHANG Yao-hong, CHU Dai-wei, XIE Xiao-jin, et al. Effect of nighttime warming on soil respiration in winter wheat soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(7): 1389-1395.
- [5] Beringer J, Livesley S J, Randle J, et al. Carbon dioxide fluxes dominate the greenhouse gas exchanges of a seasonal wetland in the wet dry tropics of Northern Australia[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 182: 239-247.
- [6] Qi Y, Xu M, Wu J. Temperature sensitivity of soil respiration and its effects on ecosystem carbon budget: Nonlinearity begets surprises[J]. *Ecological Modelling*, 2002, 153(1): 131-142.
- [7] Wiseman P E, Seiler J R. Soil CO₂ efflux across four age classes of plantation loblolly pine (*Pinus taeda* L.) on the Virginia Piedmont[J]. *Forest*

- Ecology and Management*, 2004, 192(2-3):297-311.
- [8] Martin J G, Bolstad P V. Annual soil respiration in broadleaf forests of Northern Wisconsin; Influence of moisture and site biological, chemical, and physical characteristics[J]. *Biogeochemistry*, 2005, 73(1):149-182.
- [9] 王春燕, 陈秋波, 袁坤, 等. 橡胶林土壤呼吸速率及其与土壤温湿度的关系[J]. *土壤学报*, 2013, 50(5):974-982.
WANG Chun-yan, CHEN Qiu-bo, YUAN Kun, et al. Soil respiration rate and its relationship with soil temperature and moisture in rubber plantations[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(5):974-982.
- [10] 周小刚, 张彦军, 南雅芳, 等. 黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素[J]. *环境科学*, 2013, 34(3):1026-1033.
ZHOU Xiao-gang, ZHANG Yan-jun, NAN Ya-fang, et al. Differences in soil respiration between cropland and grassland ecosystems and factors influencing soil respiration on the Loess Plateau[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(3):1026-1033.
- [11] Shi W Y, Tateno R, Zhang J G, et al. Response of soil respiration to precipitation during the dry season in two typical forest stands in the forest grassland transition zone of the Loess Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(7):854-863.
- [12] Van't Hoff J H. Lectures on theoretical and physical chemistry[M]// Leffeldt R A (Ed.), *Chemical Dynamics: Part 1*. Edward Arnold, London, UK, 1898:224-229.
- [13] 李志刚, 侯扶江. 黄土高原不同地形封育草地的土壤呼吸日动态与影响因子分析[J]. *草业学报*, 2010, 19(1):42-49.
LI Zhi-gang, HOU Fu-jiang. Analysis of soil respiration diurnal dynamics and factors influencing it in enclosed natural grasslands under different topographies in the Loess Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, 19(1):42-49.
- [14] Han G, Luo Y, Li D, et al. Ecosystem photosynthesis regulates soil respiration on a diurnal scale with a short-term time lag in a coastal wetland[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 68:85-94.
- [15] 王铭, 刘兴士, 李秀军, 等. 松嫩平原西部草甸草原典型植物群落土壤呼吸动态及影响因素[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(1):45-52.
WANG Ming, LIU Xing-tu, LI Xiu-jun, et al. Soil respiration dynamics and its controlling factors of typical vegetation communities on meadow steppes in the Western Songnen Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(1):45-52.
- [16] 胡宗达, 刘世荣, 史作民, 等. 川西亚高山草甸土壤呼吸的昼夜变化及其季节动态[J]. *生态学报*, 2012, 32(20):6376-6386.
HU Zong-da, LIU Shi-rong, SHI Zuo-min, et al. Diel variations and seasonal dynamics of soil respirations in subalpine meadow in Western Sichuan Province, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(20):6376-6386.
- [17] Tian D L, Wang G J, Yan W D, et al. Soil respiration dynamics in *Cinnamomum camphora* forest and a nearby *Liquidambar formosana* forest in Subtropical China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(8):736-743.
- [18] Qi Y C, Dong Y S, Liu L X, et al. Spatial-temporal variation in soil respiration and its controlling factors in three steppes of *Stipa* L. in Inner Mongolia, China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(5):683-693.
- [19] 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素[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[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18):5217-5224.
- [20] Yan J X, Li H J, Li J J, et al. Response of soil respiration to temperature and soil moisture; Effects of different vegetation types on a small scale in the Eastern Loess Plateau of China[J]. *Plant Biosystems*, 2013, 147(4):1191-1200.
- [21] 高宇, 樊军, 米美霞, 等. 水蚀风蚀交错区土壤呼吸影响因素及其对土地利用方式变化的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(5):1207-1217.
GAO Yu, FAN Jun, MI Mei-xia, et al. Influencing factors of soil respiration and their response to different land use types in the water-wind erosion crisscross region[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(5):1207-1217.
- [22] 付微, 黄明斌, 邵明安, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错带不同立地条件下土壤呼吸特征[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(13):74-80.
FU Wei, HUANG Ming-bin, SHAO Ming-an, et al. Soil respiration characteristics under different site conditions in wind-water crisscross erosion region on Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(13):74-80.
- [23] 樊军, 邵明安, 王全九. 陕北水蚀风蚀交错区苜蓿地土壤水分过耗与恢复[J]. *草地学报*, 2006, 14(3):261-264.
FAN Jun, SHAO Ming-an, WANG Quan-jiu. Soil water restoration of alfalfa land in the water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2006, 14(3):261-264.
- [24] Wang Z Q, Liu B Y, Liu G, et al. Soil water depletion depth by planted vegetation on the Loess Plateau[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(6):835-842.
- [25] 李文静, 王振, 韩清芳, 等. 黄土高原人工苜蓿草地固碳效应评估[J]. *生态学报*, 2013, 33(23):7467-7477.
LI Wen-jing, WANG Zhen, HAN Qing-fang, et al. Evaluation on carbon sequestration effects of artificial alfalfa pastures in the Loess Plateau area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(23):7467-7477.
- [26] 张晨成, 邵明安, 王云强. 黄土区坡面尺度不同植被类型下土壤干层的空间分布[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(17):102-108.
ZHANG Chen-cheng, SHAO Ming-an, WANG Yun-qiang. Spatial distribution of dried soil layers under different vegetation types at slope scale in loess region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(17):102-108.
- [27] Zhou Z, Zhang Z, Zha T, et al. Predicting soil respiration using carbon stock in roots, litter and soil organic matter in forests of Loess Plateau in China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57:135-143.
- [28] 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, CHAO Ke-tu, YOU Jin-cheng, et al. Soil microbial characteristic and soil respiration in grassland under different use patterns[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2012, 20(1):42-48.
- [29] Li P, Yang Y, Fang J. Variations of root and heterotrophic respiration

- along environmental gradients in China's forests[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2013, 6(5):358-367.
- [30] Ferréa C, Zenone T, Comolli R, et al. Estimating heterotrophic and autotrophic soil respiration in a semi-natural forest of Lombardy, Italy[J]. *Pedobiologia*, 2012, 55(6):285-294.
- [31] Atkin O K, Edwards E J, Loveys B R. Response of root respiration to changes in temperature and its relevance to global warming[J]. *New Phytologist*, 2000, 147(1):141-154.
- [32] Heinemeyer A, Hartley I P, Evans S P, et al. Forest soil CO₂ flux: Uncovering the contribution and environmental responses of ectomycorrhizas[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(8):1786-1797.
- [33] Höglberg P, Nordgren A, Buchmann N, et al. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration[J]. *Nature*, 2001, 411:789-792.
- [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 Xin-yuan, LI Yu-lin, ZHAO Xue-yong, 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] 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 the Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4):731-737
- [36] 张红星, 王效科, 冯宗炜, 等. 干湿交替格局下黄土高原小麦田土壤呼吸的温湿度模型[J]. *生态学报*, 2009, 29(6):3028-3035.
ZHANG Hong-xing, WANG Xiao-ke, FENG Zong-wei, et al. Modeling soil respiration using temperature and soil moisture under alteration of dry and wet at a wheat field in the Loess Plateau, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6):3028-3035.
- [37] 许 浩, 张源润, 潘占兵, 等. 黄土丘陵区苜蓿地的土壤呼吸[J]. *草业科学*, 2013, 30(4):535-540.
XU Hao, ZHANG Yuan-run, PAN Zhan-bing, et al. A study on the soil respiration of alfalfa field in the loess hilly region[J]. *Pratacultural Science*, 2013, 30(4):535-540.
- [38] Austin A T, Yahdjian L, Stark J M, et al. Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems[J]. *Oecologia*, 2004, 141(2):221-235.
- [39] Lin Z B, Zhang R D, Tang J, et al. Effects of high soil water content and temperature on soil respiration[J]. *Soil Science*, 2011, 176(3):150-155.



新书推荐

金属矿山尾矿钝化技术与原理

本书是一本关于金属矿山尾矿钝化研究的成果专著。全书共 6 章,在简单介绍矿山尾矿的分类与化学组成、尾矿的环境影响、尾矿的综合利用与处理技术的基础上,系统总结作者所在研究团队十多年来对金属矿山尾矿中金属硫化物的化学及生物氧化机理、钝化剂的筛选与合成以及钝化机理方面的研究成果。这些研究成果是从源头控制酸性矿山废水产生、防治金属硫化物矿区环境污染的重要依据。

本书由科学出版社出版,党志,刘云,卢桂宁,等著。定价 78.00 元。可供地球化学、环境科学、矿业工程等学科的研究人员,国土资源、矿产资源、环境保护等部门的工程技术与管理人员,以及高等院校相关专业的师生参考。

