

黄土高原水蚀风蚀交错带不同土地利用类型 土壤呼吸季节变化及其环境驱动

齐丽彬^{1,3}, 樊军^{1,2}, 邵明安^{1,2,*}, 王万忠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, 杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学, 杨凌 712100; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:以黄土高原水蚀风蚀交错区神木县六道沟小流域为研究区,采用动态密闭气室法对植物生长季节(2007年5~10月)5种土地利用方式的土壤呼吸速率进行了测定,并结合水热因子,对不同土地利用方式间土壤呼吸速率的差异性以及其与温度、含水量之间的关系进行了分析。结果表明:5种土地利用类型土壤呼吸速率季节性变化均呈现单峰型曲线,与气温变化趋势一致,其7、8月份土壤呼吸速率均显著高于其它月份($P < 0.05$);生长季节土壤 CO_2 平均释放速率顺序为:长芒草地 > 苜蓿地 > 柠条地 > 农地 > 沙柳地,草地在生长前期和旺盛期土壤呼吸强度均显著高于农地和灌木林地;除沙柳地和苜蓿地以外,在土壤呼吸与所有温度指标的关系中,与10 cm深度的土壤温度相关性最好,且除沙柳地外,其它4种土地利用类型均与之达到显著相关;农地土壤呼吸对温度的响应最敏感(Q_{10} 值为2.20),除沙柳地(Q_{10} 值为1.48)外,其它4种土地利用类型 Q_{10} 值均在2.0左右,接近于全球 Q_{10} 的平均水平;通过Van't Hoff模型估算,2007年植物整个生长季节(5~10月份),5种土地利用类型土壤呼吸量从高到低依次为:苜蓿地 $259 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$,长芒草地 $236 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$,柠条地 $226 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$,农地 $170 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$,沙柳地 $94 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$;水分对农地和沙柳地的土壤呼吸影响不大;长芒草地、柠条地和苜蓿地土壤呼吸的双变量模型关系显著($P < 0.05$),比相应的单变量模型更好地解释了土壤呼吸变异。

关键词:水蚀风蚀交错带;土壤呼吸速率;季节变化;土地利用;土壤温度;土壤含水量

文章编号:1000-0933(2008)11-5428-09 中图分类号:S154,Q145,Q948,Q945 文献标识码:A

Seasonal changes in soil respiration under different land use patterns in the water-wind erosion crisscross region of the Loess Plateau

QILi-Bin^{1,3}, FAN Jun^{1,2}, SHAO Ming-An^{1,2,*}, WANG Wan-Zhong²

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, the Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, China

2 Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi Province 712100, China

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(11): 5428 ~ 5436

Abstract: Soil respiration rates under five land use patterns in the water-wind erosion crisscross region of the Loess Plateau were measured by the closed-chamber IRGA method during the growing season of 2007. Differences in soil respiration under the five land use patterns and the relationships between soil respiration and soil temperature and soil water contents were

基金项目:国家自然科学基金资助项目(90502006,40601041);中国科学院西部之光资助项目(2005YB01)

收稿日期:2008-03-02; 修订日期:2008-07-31

作者简介:齐丽彬(1977~),女,陕西杨凌人,博士生,主要从事生态系统通量研究。E-mail: lbqi04@163.com

*通讯作者 Corresponding author E-mail: mashao@ms.iswc.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 90502006, 40601041); West Light Foundation of Chinese Academy of Sciences (No. 2005YB01)

Received date: 2008-03-02; **Accepted date:** 2008-07-31

Biography: QILi-Bin, Ph.D. candidate, mainly engaged in ecosystem fluxes E-mail: lbqi04@163.com

<http://www.ecologica.cn>

analyzed. The results showed that seasonal changes of soil respiration presented single peak curves, and that of air temperature followed a similar trend, which had the highest values in July and August. The order of average soil respiration rates under the land use types during the growing seasons was: bunge needlegrass land > alfalfa land > Korshinsk Peashrub land > cropland > sand willow land. The soil respiration rate of the grassland was significantly higher than that of the crop and shrub lands. Except for sand willow and alfalfa lands, soil respiration rates were better correlated with soil temperature at 10 cm depth than with other temperature indexes. According to Q_{10} values (temperature sensitive index), soil respiration under cropland was the most sensitive to temperature ($Q_{10} = 2.20$) and Q_{10} of the other land use patterns, except for sand willow land, were around 2.0, which is close to the global average Q_{10} value. Estimating the soil respiration flux using the Van t Hoff model gave CO_2 effluxes from alfalfa land, bunge needlegrass land, Korshinsk Peashrub land, crop land, and sand willow land, during the growth period, of $259 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, $236 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, $226 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, $170 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, and $94 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively. Soil moisture did not significantly affect soil respiration under crop and sand willow lands. A two-variable (soil temperature and soil moisture) soil respiration model best explained the variance of soil respiration under alfalfa land, bunge needlegrass land, and Korshinsk Peashrub land.

Key Words: water wind erosion crisscross region; soil respiration rate; seasonal changes; land use pattern; soil temperature; soil moisture

全球气候变暖及其影响已成为当前全世界关注的焦点,各国政府采取措施努力遏制温室气体的排放。其中最重要的温室气体 CO_2 ,其在大气中含量以每年 0.4% 的速度在增长^[1]。土壤呼吸作为土壤碳库的主要输出途径和大气 CO_2 的重要来源,其在数量上的微小改变可能对大气中 CO_2 含量的变化具有相当大的影响^[2,3],因此对于不同陆地生态系统下土壤 CO_2 排放通量时空波动及其对影响因子响应分析,已成为碳循环和全球变化研究中热点问题之一。

黄土高原地区是世界水土流失最严重的地区之一,陕北黄河中游多沙粗沙区又是黄土高原地区乃至我国生态环境最脆弱、破坏最严重的地区^[4]。长期严重的土壤侵蚀使得该区土壤有机碳密度显著低于黄土高原中部,处于全国最低水平^[5,7]。自 20 世纪 50 年代以来,国家和各级政府投资进行了大规模的水土保持工作,特别是实施西部大开发战略以来,退耕还林(草)等一系列植被恢复和建设措施显著遏制了当地严重的水土流失,黄土高原北部植被覆盖显著增加^[6],土地利用方式也因此发生了巨大的变化。植被恢复重建和农地撂荒使土壤容重减小,孔隙度增大,有机质含量增加^[7,8]。不同的土地利用方式不仅改变了地表植被,而且改变了土壤透气性,从而使土壤有机质含量,微生物的组成和活性、根系生物量等都发生了变化^[9,10],相应的土壤呼吸也应该发生了变化。IPCC^[11]报告曾指出:土地利用方式改变会影响大气 CO_2 浓度。但目前为止,国内土壤呼吸方面研究大多集中在东北、内蒙古草原、青藏高原等典型生态系统^[12-16](如森林、草原、农田等),而对黄土高原地区土壤呼吸研究则较少^[17],尤其对于生态环境非常脆弱的水蚀风蚀交错区。

本研究选取黄土高原北部水蚀风蚀交错带 5 种典型的土地利用方式,通过比较不同土地利用方式下土壤呼吸强度及其对主要环境因子的响应,试图为深入研究该区土地利用类型对碳循环的影响以及国家退耕还林(草)所引起的生态环境效应提供科学依据。

1 研究地区概况

本研究在中国科学院水利部水土保持研究所神木侵蚀与环境试验站所在的六道沟小流域(110°21' ~ 110°23' E, 38°46' ~ 38°51' N)进行。该流域是黄土高原向毛乌素沙漠、森林草原向典型干旱草原的过渡地带,也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。海拔 1081 ~ 1274 m,属中温带半干旱气候,气候变化剧烈,年平均气温 8.4℃,1 月平均最低温度 -9.7℃,7 月最高温度 23.7℃。年平均降水量 437.4 mm,其中 6~9 月份的降水占全年降水量的 77.4%。地面组成物质以第四纪黄土沉积物为主,主要土壤类型有绵沙土、黄绵土、风沙土以及坝淤土。流域表层土壤容重为 1.26 ~ 1.52

g/cm^3 ,总孔隙度一般在 50.0%以下,土壤 pH一般在 8.50以上,分析代表性样地土壤主要理化性质,结果显示土壤有机质含量低,其养分状况总体上较差^[4,7]。

该区植被类型属于灌丛草原类型,然而天然植被大部分已遭破坏,后经人工整治,形成的部分天然草场也多由人工草地退化演替而来,主要有紫花苜蓿 (*Medicago sativa*)和长芒草 (*Stipa bungeana*)等草地群落。土地利用方式多以坡耕地为主,作物以糜子 (*Panicum miliaceum*)、谷子 (*Setaria italica*)、洋芋 (*Solanum tuberosum*)、大豆 (*Glycine max*)居多。还分布有一定面积的人工灌木林,主要有沙柳 (*Salix psammophila*)、沙蒿 (*Artemisia ordosica*)、柠条 (*Caragana korshinskii*)等群落^[18]。

2 研究方法

2.1 样地选择与试验设计

本研究选取该区 5种典型的土地利用方式。其中坡耕农地,为雨养旱地,当年种植作物为大豆,种植前经过翻耕,土壤较为疏松,种植密度为 6000株/666.7 m^2 ;紫花苜蓿人工草地(已种植 7a)最大生物量时期株高 45cm左右,植被总体盖度为 60%左右;次生天然长芒草草地最大生物量时期株高 15cm左右,植被总体盖度为 30%左右;柠条人工灌木林林下草类繁茂,表层土壤疏松;沙柳人工灌木林地处于沙地,林下有沙蒿等植物,地表有生物结皮,结皮下为细沙。沙柳地、柠条地属于灌木林地,长芒草地和苜蓿地属于草地。农地、草地和灌木林地的表层土壤养分之间具有一定的差异性。其中农地、草地土壤有机碳、全氮含量较高,灌木地最低,特别是沙柳地的土壤养分最差;土壤 pH值均在 8.45以上,呈弱碱性(表 1)。

表 1 不同土地利用类型 0~10 cm 土层理化性质

Table 1 Soil physicochemical properties at 0~10cm layer of different land use patterns

土地类型 Land use pattern	有机质 Organic matter ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮 Total N ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碳氮比 C/N ratio	容重 Bulk density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	总孔隙度 Total porosity (%)	pH
农地 Crop land	8.89	0.47	11.0	1.37	46.8	8.48
苜蓿地 Alfalfa land	6.77	0.40	9.8	1.40	47.1	8.48
长芒草地 Bunge Needlegrass land	6.74	0.34	11.5	1.39	45.6	8.47
柠条地 Korshinsk Peashrub land	3.54	0.19	10.8	1.42	46.6	8.83
沙柳地 Sand Willow land	2.31	0.11	12.2	1.51	43.0	8.62

2.2 土壤呼吸测定

土壤呼吸速率观测在 2007年植物生长季(5~10月)进行,于每月中旬选择天气状况比较稳定日期进行测量,每次测量在 9:00~11:00之间进行,这一时间土壤呼吸速率测量值与日平均值基本一致^[12],每月测两次,每次测量重复 3d,取平均值代表当月土壤呼吸速率。

采用动态密闭气室法测量土壤 CO_2 排放通量。将 CF301PS红外 CO_2 气体分析仪(美国 CD公司)和自制的便携式土壤呼吸测量室相连进行土壤呼吸的测定。为了减少安放底座对土壤的干扰,底座下端被削为刀刃状,测量前一天,在每个样地内随机选取样方 3个,分别剪除地表以上的植物活体部分(沙柳地需轻轻铲除地上结皮部分),并把有机玻璃底座用橡皮锤轻轻水平敲入表层土壤中,深度约 3~5 cm,尽量不破坏原来土壤物理结构。测量时,用一中空有机玻璃壳体(250 mm)做密闭箱,将其紧密扣合到前一天设置在土壤表面的底座上,在底座外圈水槽中灌清水密封,形成密闭气室。打开箱内顶部风扇平衡 CO_2 气体浓度,每间隔 10 s,红外 CO_2 气体分析仪测量一次箱体内空气 CO_2 浓度值,测量时间持续 180 s,每个测量点重复测量 3~5次。

2.3 土壤温度和含水量测定

在进行土壤呼吸测定的同时,利用曲管温度计测量 0、5、10 cm 深度土壤温度;采用 FDR (ML2x, Delta-T Devices Ltd UK)测量 0~6 cm和 6~12 cm 深度土壤平均体积含水量;气温数据由研究区内全自动气象站获取。

2.4 数据分析

将每次测定的土壤呼吸数据先平均各采样点,再平均同一月份不同测定时间,从而得到土壤呼吸的季节变化。数据分析采用 EXCEL2003和 SPSS15.0 统计分析软件分析作图。用 ANOVA (SPSS统计软件)检验不同植被类型土壤呼吸和同一植被类型下土壤呼吸季节变化差异显著性及 Duncan 多重比较。应用 SPSS 软件统计分析土壤呼吸与温度和水分之间的关系,建立土壤呼吸与温度的指数模型,并应用此模型反演出当月每日土壤呼吸速率,通过累加估算出当年生长季节土壤呼吸量^[12,19,20]。采用 EXCEL 软件做图分析。

3 结果与分析

3.1 土壤呼吸速率季节动态

5种土地利用方式土壤呼吸速率的季节变化趋势均呈现出单峰型曲线,在7、8月份达到高峰(图1),与气温变化趋势一致,而与土壤水分的季节变化趋势有差异。土壤呼吸季节变异率较大,均在55%以上,而气温季节变异仅为30%左右,表明土壤呼吸的季节变化不仅受外界温度条件的影响,还受到植物生长状态和水分等因素的影响。相关研究也表明^[22],根系呼吸占土壤总呼吸的比例具有较明显的季节变化,与根系生物量的季节动态十分接近。土壤呼吸是很多生物因素和环境因素影响的复杂过程,这些影响因素具有很大的时空变异,由此而造成土壤呼吸变异性增大。

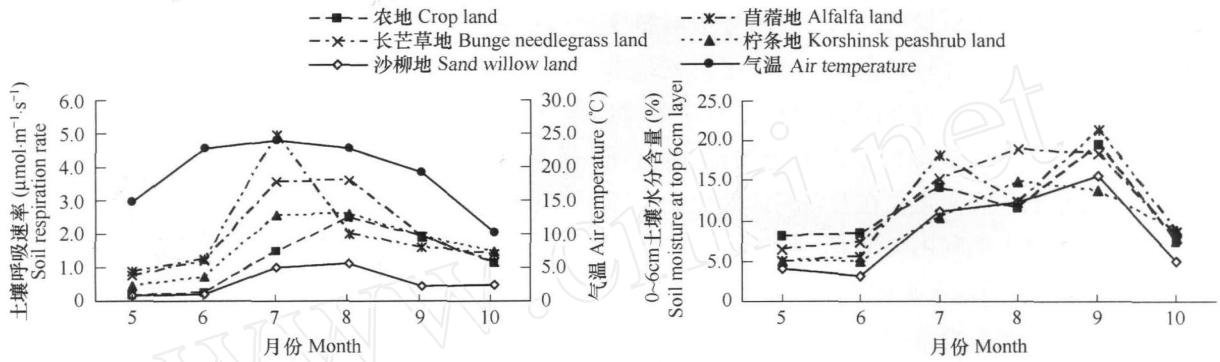


图1 不同土地利用方式下土壤呼吸速率及其水热因子的季节动态比较

Fig 1 Seasonal dynamic changes of soil respiration rate, air temperature and soil moisture under different land use patterns

方差分析结果(表2)表明,生长季节土壤CO₂平均释放速率顺序依次为:长芒草地 > 苜蓿地 > 柠条地 > 农地 > 沙柳地。崔晓勇等对内蒙古典型草原植物群落土壤呼吸研究结果指出,沙蒿群落土壤呼吸速率在各月都低于其它群落^[15],这和本文对沙柳地的研究结果相同。

表2 不同土地利用方式土壤呼吸速率季节变化方差分析

Table 2 The seasonal variance of soil respiration rate under different land use patterns(μmol·m⁻²·s⁻¹)

土地利用方式 Land use pattern	5月 May	6月 June	7月 July	8月 August	9月 September	10月 October	平均值 Average
农地 Crop land	0.1Aa	0.16Aa	1.00Ca	1.66Ebc	1.27Da	0.75Bb	0.82
苜蓿地 Alfalfa land	0.58Ac	0.84Ac	3.31Cd	1.32Bb	1.06ABb	0.93ABc	1.34
长芒草地 Bunge Needlegrass land	0.51Ac	0.80Ac	2.38Cc	2.39Cd	1.28Bb	0.77Abc	1.36
柠条地 Korshinsk Peashrub land	0.33Ab	0.49Ab	1.70Cb	1.73Cc	1.28Bb	0.99Bc	1.09
沙柳地 Sand Willow land	0.11Aa	0.15Aa	0.66Ca	0.75Ca	0.30ABa	0.32Ba	0.38

表中行内相同大写字母表示同一土地利用方式在不同月的土壤呼吸速率差异不显著,列中相同小写字母表示不同土地利用方式在同一月土壤呼吸速率差异不显著(P < 0.05), The same capital in row presents the soil respiration monthly difference in the same land use is not significant, the same small letter in column presents the soil respiration difference of 5 land uses in the same month is not significant(P < 0.05)

经方差分析(表2),生长季节前期5、6月份,草地的土壤呼吸速率显著高于农地和灌木地(P < 0.05)。生长旺盛期,不同土地利用方式间土壤呼吸差异很大,8月份长芒草地土壤呼吸速率达到2.39

$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,而沙柳地仅有 $0.75 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。生长季节后期 9、10月份,柠条地和草地土壤呼吸速率差异不明显,这可能是由于植物根系生长均达到最大生物量后,土壤呼吸受温度等外界条件影响较大(表 2和图 1)。而沙柳地土壤呼吸在整个生长季节均显著低于其它土地利用方式,这和土壤养分含量低(表 1)有关。

3.2 土壤呼吸速率与环境因子关系

3.2.1 土壤呼吸与温度

土壤呼吸速率与温度呈指数函数关系时,研究者大多采用 Van 't Hoff模型进行研究,也常用 Q_{10} 描述土壤呼吸速率与温度之间的关系,即温度每升高 10 时土壤呼吸增加的倍数。计算公式为:

$$Q_{10} = e^{10b} \tag{3}$$

为与其它相关研究对比分析温度敏感性指数 Q_{10} ,本文对土壤呼吸速率与 10 cm 土壤温度进行指数关系分析 ($P < 0.05$),结果如图 2 所示。可以看出,随着温度的升高,沙柳地的土壤呼吸速率变化较为平缓,其温度敏感性相对较差 (Q_{10} 值为 1.48),而同是灌木林地的柠条地 Q_{10} 值达到 2.07,这与沙柳地土壤养分含量较低有关,因为基质的数量和质量可以调控土壤呼吸对温度的响应^[28]。农地 Q_{10} 值最高,为 2.20,与其它研究结果一致^[10,12,20],这是由于农田生态系统植被类型简单,结构单一,与植被类型结构复杂的生态系统相比,更宜受外界影响,从而对于气候变化存在着较高的敏感性。除沙柳地外,其它 4 种土地利用类型 Q_{10} 值均在 2.00 左右(图 2),与全球 Q_{10} 的平均水平接近^[29]。本研究种草地的 Q_{10} 值稍高于温带草原群落 (1.47 ~ 1.84)^[25],造成这种差别的主要原因可能是温带草原群落 Q_{10} 值是基于一地区气温变化。

3.2.2 土壤呼吸与土壤温度和含水量

在植物生长发育相对稳定的情况下,土壤呼吸主要影响因素就是土壤温度和水分^[9]。很多研究工作证实,在土壤水分不成为限制因素的条件下,土壤呼吸与土壤温度成正相关,描述它们之间关系最为普遍的是指数函数^[23]。而土壤水分与土壤呼吸之间的关系比较复杂^[24],很多研究采用幂函数表示,建立的水分和温度共同影响的土壤呼吸双因素关系模型为^[19~21]:

$$R = ae^{bT} \cdot W^c \tag{1}$$

或者: $\ln(R) = m + bT + c \ln(W) \tag{2}$

式中, R 为 CO_2 释放速率, T 为温度, W 为土壤水分含量, a, b, c 和 m 为常数。

(1) 土壤呼吸与温度水分的相关分析

不同土地利用类型植物生长发育达到相对稳定状态下,首先比较检验 R 与 T, W 的相关性(表 3),以验证模型的可行性。表 3 结果显示:5 种土地利用类型土壤呼吸与水热因子均呈正相关^[25]。土壤温度要比土壤水分对土壤呼吸作用的影响更明显^[24],这是因为在较适的水分条件下,并不足以影响微生物和植物根系的活动,则很难明显地测出水分对土壤呼吸的影响,此时土壤水分的影响很可能被其它因子的影响所掩盖^[26]。在土壤呼吸与所有温度指标之间的关系中,农地、柠条地和长芒草地与土壤 10 cm 温度的相关性最好,且除沙柳地以外,均达到显著相关 ($P < 0.05$),基本上以指数关系较好。除苜蓿地以外,土壤呼吸与气温、地表温度的相关性普遍相对较差,这可能是由于其它 4 种土地利用类型气温和地表温度易受外界条件(如风速、辐射等)

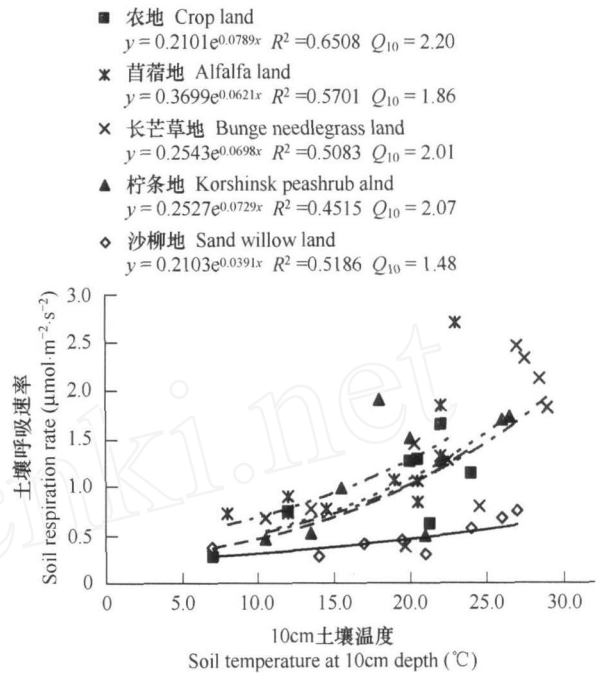


图 2 不同土地利用类型土壤呼吸与 10 cm 土壤温度关系
Fig 2 The relationship between soil respiration and soil temperature at 10cm depth under different land use patterns

影响波动较大^[15],且土壤呼吸速率具有一定的温度适应性所导致的^[27]。而苜蓿地土壤呼吸与地表温度相关性最好,且与10 cm土壤温度相关性也达到显著水平,但与气温相关性最差,很可能是由于苜蓿地植被覆盖度大,其地表温度不易受外界影响造成土壤呼吸与其极显著相关。柠条地和长芒草地土壤呼吸速率与0~6 cm土壤平均含水量显著相关($P < 0.05$),且以幂函数关系较好,而与6~12 cm土壤水分的关系相对较差。究其原因,这是因为土壤呼吸主要发生在土壤表层,土壤表层含水量不仅可以影响到土壤的透气性,还可以通过影响微生物的活动而影响土壤呼吸^[26]。综合以上分析,采用10 cm土壤温度和0~6 cm土壤水分来研究土壤呼吸较好。

表3 不同土地利用类型土壤呼吸速率(R)与温度(T)和土壤水分(W)的相关性

Table 3 Correlation coefficients of soil respiration with soil temperature and water contents

土地利用类型 Land use pattern	T_a	$T_{0\text{ cm}}$	$T_{5\text{ cm}}$	$T_{10\text{ cm}}$	$W_{0\sim6\text{ cm}}$	$W_{6\sim12\text{ cm}}$
农地 Crop land	0.533	0.441	0.581	0.737*	0.409	0.254
苜蓿地 Alfalfa land	0.493	0.811**	0.723*	0.671*	0.641	0.536
长芒草地 Bunge Needlegrass land	0.498	0.430	0.552	0.756*	0.773*	0.769*
柠条地 Korshinsk Peashrub land	0.501	0.110	0.521	0.763*	0.877*	0.649
沙柳地 Sand Willow land	0.377	0.478	0.605	0.589	0.646	0.645

为了消除水热因子间的相互影响,更好反映呼吸与温度以及呼吸与水分之间的关系,可进行呼吸和水热因子的偏相关分析。长芒草地土壤呼吸和温度、水分均偏相关达到显著($R_{\text{温度}} = 0.846$, $R_{\text{水分}} = 0.877$; $P < 0.05$),水热因子共同影响其土壤呼吸强度。其它4种土地利用类型,土壤呼吸与温度值的偏相关系数,要高于和水分的偏相关系数,由此更进一步说明,温度对土壤呼吸的影响要明显高于水分影响。农地和沙柳地土壤呼吸和水分偏相关系数均很低,这说明水分对其土壤呼吸的影响可基本忽略,双变量关系模型不适用于农地和沙柳地。因此,本研究认为,不同土地利用方式的土壤呼吸对温度水分响应差异很大。

(2) 土壤呼吸双变量模型

本文采用前面分析结果(表3),对柠条地、长芒草地和苜蓿地,根据公式(1),建立双变量温度和水分对土壤呼吸速率的关系,其关系显著($P < 0.05$) (式(4)~(6)):

$$R_{\text{苜蓿地}} = 0.1512 e^{0.053T_{10\text{cm}}} \cdot W_{0\sim6\text{cm}}^{0.427} \quad R^2 = 0.763^* \quad (4)$$

$$R_{\text{长芒草地}} = 0.0668 e^{0.051T_{10\text{cm}}} \cdot W_{0\sim6\text{cm}}^{0.702} \quad R^2 = 0.910^* \quad (5)$$

$$R_{\text{柠条地}} = 0.0494 e^{0.040T_{10\text{cm}}} \cdot W_{0\sim6\text{cm}}^{0.960} \quad R^2 = 0.904^* \quad (6)$$

由式(5)、(6)看出,柠条地和长芒草地的模型相关系数达到0.90以上,土壤温度和水分的变化可以共同解释90%以上的土壤呼吸变异,而相应的单变量模型只能解释土壤呼吸变异的45%~51%(图2),这说明在本研究区域内,土壤水分对柠条地和长芒草地的土壤呼吸也有显著影响。经前面分析,农地和沙柳地这种双因素模型关系不显著。水分对沙柳地影响可忽略,这和崔骁勇等对沙蒿群落研究的结果有着一致性,即水分对沙蒿群落的影响不大,由于沙地持水性能差,不同季节土壤水分含量相差不大,因此土壤呼吸与土壤水分状况相关性差^[15]。

根据公式(4)~(6),可利用土壤温度和水分数据,来进行土壤 CO_2 通量的季节变化模拟。但在极端条件,土壤含水量达到土壤微生物永久萎蔫点或超过了田间持水力的情况下,或者土壤温度过低时,则会出现土壤呼吸受到抑制的情况^[26]。

3.3 植物生长季节土壤呼吸量的估算

国内外研究者结合观测数据,根据已有的认识,发展了不同形式的土壤呼吸模型,希望通过环境变量(如温度、水分)的变化,来估算不同生态系统的土壤呼吸及其对外界条件变化的响应^[29]。本文为了与其它相关研究对比分析土壤碳排放量,通过对测定当日的气象资料气温与同步观测的10 cm土壤温度进行线性回归,对每日气温进行转换,推算出对应10 cm土壤温度,再根据Van't Hoff模型(图2)反演出日土壤呼吸量,从而

粗略估算出整个生长季节土壤 CO₂ 通量。

经分析,气温与不同土层温度(地表、5 cm 和 10 cm)均呈极显著线性关系(P < 0.01),与 10 cm 土壤温度的关系如图 3 所示。显然,这种极显著相关性是由于太阳辐射同时影响着两者的高低而导致的。根据图 2、图 3 的研究结果,对生长季节日平均土壤呼吸速率进行模拟,结果(图 4)与图 1 比较显示:对 5、6 月份的日均土壤呼吸速率模拟值偏高,这是由于本研究中的土壤呼吸指数模型是在植物生长发育相对稳定阶段建立的,而 5、6 月份正值植物生长发育前期,与所建立的模型适用范围不符,故造成模拟结果的偏高。

经估算,植物整个生长季节(5~10 月份),土壤呼吸总量草地最高(苜蓿地 259 gC·m⁻²,长芒草地 236 gC·m⁻²),其次为柠条地 226 gC·m⁻²,农地 170 gC·m⁻²,沙柳地最低 94 gC·m⁻²。草地较高呼吸量,可能由于草地生长年限较长,盖度较大,地下生物量较高,积累了大量异养微生物呼吸基质而造成^[30]。结果说明:退耕还林(草)后,该区土壤 CO₂ 排放量会增加,另一方面地上生物量增加又会增加 CO₂ 的吸收,促使土壤有机碳密度增加,土壤表现为明显的碳汇^[7],因此退耕还林(草)后该区 CO₂ 的收支平衡值得进一步研究。

- 农地 Crop land
 $y = 0.8149x + 2.6318 \quad R^2 = 0.7663^{**}$
- × 苜蓿地 Alfalfa land
 $y = 0.8712x + 4.2983 \quad R^2 = 0.7804^{**}$
- × 长芒草地 Bunge needlegrass land
 $y = 0.9135x + 5.0744 \quad R^2 = 0.8653^{**}$
- ▲ 柠条地 Korshinsk peashrub land
 $y = 0.686x + 8.0798 \quad R^2 = 0.8207^{**}$
- ◇ 沙柳地 Sand willow land
 $y = 0.9458x + 3.9916 \quad R^2 = 0.7444^{**}$

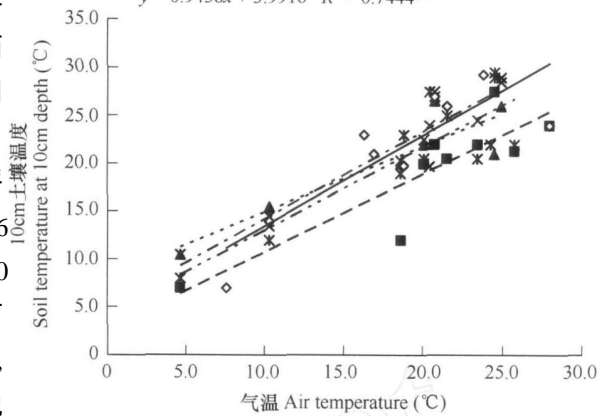


图 3 不同土地利用类型气温与 10 cm 土壤温度关系

Fig 3 The relationship between air temperature and soil temperature at 10cm depth under different land use patterns

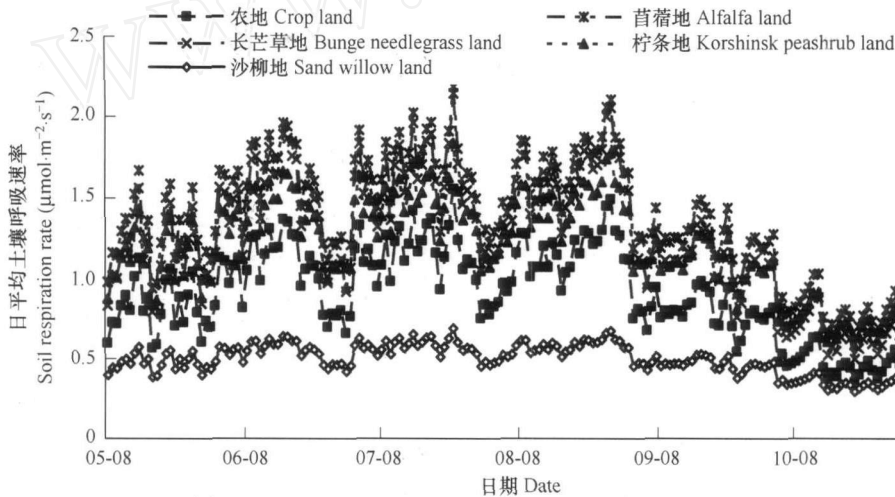


图 4 不同土地利用类型生长季节日平均土壤呼吸速率模拟

Fig 4 Simulation of daily average soil respiration rate under different land use patterns

上述土壤 CO₂ 排放通量估算方法,可粗略估计土壤碳排放量,但模型仅仅考虑了土壤温度对土壤呼吸作用的影响,未分析土壤水分对呼吸的影响,因此如果较准确估算不同土地利用类型土壤 CO₂ 排放量,则需综合考虑各因素。

4 结论

(1) 5 种土地利用方式植物生长季节期间土壤 CO₂ 排放通量季节变化均呈现出单峰型曲线,与土壤温度和大气温度的季节变化趋势相同。7、8 月份的土壤呼吸作用显著高于其它月份。沙柳地呼吸速率、生长季节

土壤 CO₂排放量和土壤呼吸温度敏感性均最低,其基质条件是其土壤呼吸作用的限制性因子。

(2) 5种土地利用方式土壤 CO₂排放通量,受温度影响比受水分影响更为明显,土壤水分不成为限制因素,与 10 cm土壤温度相关性较好,且除沙柳地以外,其它 4种土地利用类型均与之呈显著指数关系 ($P < 0.05$)。根据 Van 't Hoff模型估算出植物整个生长季节(5~10月份)的土壤呼吸总量和温度敏感性指数 Q_{10} 。

(3) 柠条地和长芒草地土壤 CO₂排放通量与 0~6 cm土壤含水量显著相关 ($P < 0.05$)。对柠条地、长芒草地和苜蓿地进行分离变量建立温度与水分对土壤呼吸速率的双变量关系模型,其模型关系显著 ($P < 0.05$),明显高于其指数模型的决定系数 R^2 ,综合考虑影响土壤呼吸的最主要因素土壤温度和水分,可以显著提高土壤 CO₂季节排放通量的估算准确程度。

References:

- [1] Lin E D, Li Y E, Guo L P, *et al* Agricultural soil organic carbon sequestration and climate change of China Beijing: Science Press, 2005, 12
- [2] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO₂ emission from soil in response to global warming Nature, 1991, 351: 304-306
- [3] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle Biogeochemistry, 2000, 48: 7-20
- [4] Tang K L, Hou Q C, Wang B K, *et al* Environment background and administration way of wind-water erosion crisscross region and Shennu experimental area on the Loess Plateau Memoir Northwestem Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources 1993, 12 (18): 2-15.
- [5] Xie X L, Sun B, Zhou H Z, *et al* Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis Acta Pedologica Sinica, 2004, 41 (1): 35-43.
- [6] Xin Z B, Xu J X. Response of vegetation cover time-space evolution on the Loess Plateau to the climate Progress in Natural Science, 2007, 17 (6): 770-778.
- [7] Li Y Y, Shao M A, Zheng J Y, *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.
- [8] Peng W Y, Zhang K L, Chen Y, *et al* Research on soil quality change after returning farmland to forest on the Loess sloping croplands Journal of Natural Resources, 2005, 20 (2): 272-278.
- [9] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls Biogeochemistry, 2000, 48: 71-90.
- [10] Du L J, Jin T, Ruan L L, *et al* CO₂ fluxes from red soil under four land use types in mid-subtropical, China Environmental Science, 2007, 28 (7): 1607-1613.
- [11] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, *et al* Climate change 2001: The scientific basis intergovernmental panel on climate Change Cambridge: Cambridge University Press, 2001, 185-237.
- [12] Wang X, Zhou G S, Jiang Y L, *et al* Comparison of soil respiration in broad-leaved Korean pine forest and reclaimed cropland in Changbai Mountains, China Acta Phytocologica Sinica, 2006, 30 (6): 887-893.
- [13] Zhang J X, Cao G M, Zhou D W, *et al* Diel and seasonal changes of carbon dioxide emission from mollic-cryic cambisols on degraded grassland Acta Pedologica Sinica, 2001, 38 (1): 32-40.
- [14] Liu Y F, Ou Y H, Zhang X Z, *et al* Carbon balance in agro-ecosystem in Qinghai-Tibet Plateau Acta Pedologica Sinica, 2002, 39 (5): 636-642.
- [15] Cui X Y, Wang Y F, Du Z C. Primary study on soil respiration of main plant communities in typical grasslands in Inner Mongolia Acta Agrestia Sinica, 1999, 7 (3): 245-250.
- [16] Lu D R, Chen Z Z, Chen J Y, *et al* Soil-Vegetation-Atmosphere interaction in the semi-arid steppe in Inner Mongolia Beijing: China Meteorological Press, 2005, 281-373.
- [17] Wu J G, Zhang X Q, Xu D Y. The temporal variations of soil respiration under different land use in Liupan Mountain forest zone Environmental Science, 2003, 24 (6): 23-32.
- [18] Li Y Y, Shao M A, Shang G Z, *et al* Study on the degrading process and vegetation succession of Medicago sativa grassland in North Loess Plateau, China Acta Prataculturae Sinica, 2006, 15 (2): 85-92.
- [19] Yang Y S, Chen G S, Wang X G, *et al* Response of soil CO₂ efflux to forest conversion in subtropical zone of China Acta Ecologica Sinica, 2005, 25 (7): 1684-1690.
- [20] Wang X G, Zhu B, Wang Y Q, *et al* Soil respiration and its sensitivity to temperature under different land use conditions Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (5): 1960-1968.

- [21] Chen Q S, Li L H, Han X G, *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.
- [22] Li L H, Han X G, Wang Q B, *et al* Separating root and soil microbial contributions to total soil respiration in a grazed grassland in the Xilin River basin. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(1): 29-32.
- [23] Xu L K, Dennis D B. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over Mediterranean annual grassland in California. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 123(2): 79-86.
- [24] Davidson E A, Verchot L V, Cattaneo J H, *et al* Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 53-69.
- [25] Chen Q S, Li L H, Han X G, *et al* Response of soil respiration to temperature in eleven communities in Xilingol grassland, Inner Mongolia. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(4): 441-447.
- [26] Qi Y C, Dong Y S, Liu J Y, *et al* Characteristics of the daily dynamic of CO₂ emission flux in the semi-arid steppe in Inner Mongolia and influence of environmental factors. *Science in China, Ser. D*, 2005, 35(6): 493-501.
- [27] Zhang L H, Chen Y N, Li W H, *et al* Seasonal variation of soil respiration under different land uses/vegetative cover types in arid desert area. *Science in China, Ser. D*, 2006, 36(suppl 1): 68-76.
- [28] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, *et al* Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature*, 2001, 413: 622-625.
- [29] Yu G R, Sun X M, *et al* The principle and method of terrestrial ecosystem flux measurement. Beijing: Higher Education Press 2006, 316-334.
- [30] Yu G R, Wen X F, Li Q K, *et al* Seasonal pattern and environment response characteristic of typical forest ecosystem respiration in Chinese subtropics and temperate zone. *Science in China, Ser. D*, 2004, 34(suppl 1): 84-94.

参考文献:

- [1] 林而达, 李玉娥, 郭李萍, 等. 中国农业土壤固碳潜力与气候变化. 北京: 科学出版社, 2005, 12.
- [4] 唐克丽, 侯庆春, 王斌科, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错带和神木试区的环境背景及整治方向. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊, 1993, 12(18): 2-15.
- [5] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析. 土壤学报, 2004, 41(1): 35-43.
- [6] 信忠保, 许炳心. 黄土高原地区植被覆盖时空演变对气候的响应. 自然科学进展, 2007, 17(6): 770-778.
- [7] 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. 生态学报, 2007, 27(6): 2279-2287.
- [8] 彭文英, 张科利, 陈瑶, 等. 黄土坡耕地退耕还林后土壤性质变化研究. 自然资源学报, 2005, 20(2): 272-278.
- [10] 杜丽君, 金涛, 阮雷雷, 等. 鄂南 4 种典型土地利用方式红壤 CO₂ 排放及其影响因素. 环境科学, 2007, 28(7): 1607-1613.
- [12] 王旭, 周广胜, 蒋延玲, 等. 长白山红松阔混交林与开垦农田土壤呼吸作用比较. 植物生态学报, 2006, 30(6): 887-893.
- [13] 张金霞, 曹广民, 周党卫, 等. 退化草地暗沃寒冻雏形土 CO₂ 释放的日变化和季节动态. 土壤学报, 2001, 38(1): 32-40.
- [14] 刘允芬, 欧阳华, 张宪洲, 等. 青藏高原农田生态系统碳平衡. 土壤学报, 2002, 39(5): 636-642.
- [15] 崔晓勇, 王艳芬, 杜占池. 内蒙古典型草原主要植物群落土壤呼吸的初步研究. 草地学报, 1999, 7(3): 245-250.
- [16] 吕达仁, 陈佐忠, 陈家宜, 等. 内蒙古半干旱草原土壤 植被-大气相互作用. 北京: 气象出版社, 2005. 281-373.
- [17] 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式土壤呼吸时间格局. 环境科学, 2003, 24(6): 23-32.
- [18] 李裕元, 邵明安, 上官周平, 等. 黄土高原北部紫花苜蓿草地退化过程与植被演替研究. 草业学报, 2006, 15(2): 85-92.
- [19] 杨玉盛, 陈光水, 王小国, 等. 中国亚热带森林转换对土壤呼吸动态及通量的影响. 生态学报, 2005, 25(7): 1684-1690.
- [20] 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. 生态学报, 2007, 27(5): 1960-1968.
- [21] 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. 植物生态学报, 2003, 27(2): 202-209.
- [22] 李凌浩, 韩兴国, 王其兵, 等. 锡林河流域一个放牧草原群落中根系呼吸占土壤总呼吸比例的初步估计. 植物生态学报, 2002, 26(1): 29-32.
- [25] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 温带草原 11 个植物群落夏秋土壤呼吸对气温变化的响应. 植物生态学报, 2003, 27(4): 441-447.
- [26] 齐玉春, 董云社, 刘纪远, 等. 内蒙古半干旱草原排放通量日变化特征及环境因子的贡献. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35(6): 493-501.
- [27] 张丽华, 陈亚宁, 李卫红, 等. 干旱荒漠区不同土地利用 覆盖类型土壤呼吸速率的季节变化. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36(增刊): 68-76.
- [29] 于贵瑞, 孙晓敏, 等著. 陆地生态系统通量观测的原理与方法. 北京: 高等教育出版社, 2006. 316-334.
- [30] 于贵瑞, 温学发, 李庆康, 等. 中国亚热带和温带典型森林生态系统呼吸的季节模式及环境响应特征. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(增刊): 84-94.