植物营养与肥料学报 2013,19(5):1207-1217
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2013.0521

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

高 宇[1,2], 樊 军[1*], 米美霞[2,3], 王 力[1], 彭小平[3]
(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 西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌 712100)

摘要: 为准确评估黄土高原水蚀风蚀交错区土壤呼吸速率季节变化影响因素及其对不同土地利用方式的响应,于2009～2012年植物生长季节,选取6种当地典型的土地利用类型,应用红外气体分析法对土壤呼吸速率进行测定,并结合土壤水、热与养分因子进行分析。结果表明, 水蚀风蚀交错区退耕会显著改变土壤呼吸强度,该区典型农地的土壤呼吸速率为1.06～1.39 μmol/(m^2·s),农地转变为裸地的过程中,土壤呼吸速率下降为原来的42%～63%,尤其在植物生长旺季的7、8、9三个月下降明显。农地弃耕后建设人工草(灌木)地使土壤呼吸速率提高了109%～200%,农田撂荒样地土壤呼吸速率约为农地的79%～179%,农地略高于长芒草地和荒草地。该区土壤呼吸速率变化的主导因子为土壤温度,尤其与10 cm土层的土壤温度相关性最好,土壤呼吸速率与土壤含水量之间拟合优度较差, 但土壤温度与含水量双因子指数模型 $Rs = a \cdot e^{bT} \cdot \theta^c$ 对该地区土壤呼吸速率的拟合均优于相应的单因子模型。10 cm土层的土壤呼吸温度敏感性系数(Q_{10}值)排序为:无植被生长样地(裸地,2.09)>农地(农地、坡地农地,2.07～1.69)>撂荒地(坡地撂荒地、撂荒地、梯田撂荒地,1.71～1.53)>草(灌木)地(柠条地、苜蓿地、长芒草地、荒草地,1.51～1.42),可见随着未来气温的升高,在生态系统土壤呼吸整体有可能增加的背景下,退耕还林(草)会降低土壤呼吸对温度的敏感性,且 Q_{10} 值随土壤含水量降低而降低。土壤呼吸速率与土壤有机质、全氮之间有极显著的正相关关系。因此,水蚀风蚀交错区土壤呼吸受到土壤温度、水分、养分及土地利用方式的显著影响。

关键词: 土壤呼吸; 水蚀风蚀交错区; 土地利用方式; 土壤温度; 土壤水分含量
中图分类号: S154 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2013)05-1207-11

Influencing factors of soil respiration and their response to different land use types in the water-wind erosion crisscross region

GAO Yu[1,2], FAN Jun[1*], MI Mei-xia[2,3], WANG Li[1], PENG Xiao-ping[3]
(*1 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources/ State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China;*
2 University of China Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3 College of Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to assess the impact of different land-use types with different soil moisture and temperature on seasonal soil respiration, we chose 6 kinds of typical land-use plots in the water-wind erosion crisscross region of the Loess Plateau at Liudaogou Watershed during growth seasons of the year 2009-2012. Soil respiration was measured by the Closed-Dynamic-Chamber Infrared gas analyzer (IRGA), and the relationships between soil respiration and soil temperature, soil moisture, soil nutrient were analyzed. The results showed that the management of land conversion from farm-lands to grass-lands or shrub-lands would cause significant changes to soil respiration in the water-wind erosion crisscross region. The soil respiration of farmlands is 1.06-1.39 μmol/(m^2·s), and soil

收稿日期: 2013-01-08 **接受日期:** 2013-04-01
基金项目: 国家自然科学基金项目(51239009,41271239);中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-13)资助。
作者简介: 高宇(1986—),男, 河北唐山人,硕士研究生,主要从事退化生态系统恢复研究。E-mail:supergaoyu@yeah.net
* 通信作者 Tel: 029—87012210, E-mail:fanjun@ms.iswc.ac.cn

respiration is decreased to 42%-63% in the management of land conversion from farm-lands to bare lands, especially in July, August and September. The annual soil respiration rate is increased by 109%-200% following the conversion of abandoned plough-lands to artificial grass (shrubs) lands, and is about 79%-179% of farm land to abandoned lands. The annual soil respiration rate of farm-lands is a little higher than those of grass lands or *S. bungeana* lands. The soil respiration is dominantly controlled by the soil temperature, and 10 cm soil temperature has the best correaltion with soil respiration, while there is a poor correlation between soil respiration and soil moisture. The index model of the double-factors (soil respiration fitting with soil temperature and soil moisture, $Rs = a \cdot e^{bT} \cdot \theta^{c}$) is better than those of the single factor ones. The Q_{10} values in 10 cm soil layers are in the order of: plot with no plants (bare land, 2.09) > farm lands (crop lands and crop lands on slope, 2.07-1.69) > abandoned lands (abandoned lands on slope, abandoned lands and abandoned lands on terrace, 1.71-1.53) > grass (shrubs) lands (*C. Korshinkii* land, alfalfa land, *S. bungeana* land, alfalfa land on slope and wild grass land, 1.51-1.42). In case of the temperature increasing, the management of land conversion from farm-lands back to grass-lands or shrub-lands could reduce the sensitivity of soil respiration to temperature under the background of increasing soil respiration in the ecological system, and the Q_{10} would decrease with the decrease of soil moisture. Soil respiration could be significantly related with soil organic matter and total nitrogen. Therefore, soil respiration in water-wind erosion crisscross regions is significantly affected by soil temperature, soil moisture, soil nutrients and land use patterns.

Key words: soil respiration; water-wind erosion crisscross; land-use pattern; soil temperature; soil moisture

政府间气候变化专门委员会(IPCC)的研究报告表明,土壤碳储量的微量变化将对大气碳库产生较大的影响[1-4]。人类活动引起的土地利用和管理方式的改变是土壤碳储量产生波动的重要原因[5-7]。土壤呼吸主要源自三个生物学过程和一个非生物学过程,这些过程分别是植物根呼吸、凋落物分解、根际微生物呼吸以及土壤有机质的氧化。土壤水热因子影响到该过程的各个方面,当水热因子较适宜时,土壤呼吸速率主要受到生物化学反应的限制,与土壤水、热单因子之间呈线性、指数、幂函数关系,但响应模式不尽相同[8];而且土地利用方式变化造成的土壤养分质与量的变动,也会造成土壤呼吸对水热因子响应机制的改变[9-12]。由此可见,由于受到多种生物和非生物因素的影响,土壤呼吸在不同时间、空间尺度上变异较大[13]。因此,在较长时间尺度上、同一区域不同土地利用方式下土壤呼吸动态变化研究显得极为重要,尤其对黄土高原典型区域不同土地利用方式下土壤呼吸速率的长期观测研究尚不充分。

水蚀风蚀交错区是黄土高原水土流失最严重的区域[14],是典型的生态环境脆弱区,土壤贫瘠,温度日较差和年较差大,空气湿度与土壤含水量较低;植被类型多以耐旱的灌木和草本为主。近年来,在该区域实施了退耕还林还草的生态修复工程,以遏制当地严重的水土流失。退耕还林(草)显著改变了该区的土地利用方式,土壤水热、养分因子也随之改变[15]。本文以位于水蚀风蚀交错区的六道沟小流域为研究区,通过分析4年观测数据,旨在明确多年降水差异条件下,该区域土壤呼吸主要影响因素及其对土地利用方式变化的响应。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

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′,海拔1094~1274 m)面积6.9 km^2,属于中温带半干旱气候,是水蚀风蚀交错带的强烈侵蚀中心[16]。植被类型由森林草原向典型干旱草原过渡,亦是黄土高原向毛乌素沙漠过渡的地带[17]。该区年平均气温8.4℃,≥10℃活动积温3232℃,年总太阳辐射量5922 MJ/m^2;多年平均降水量为437 mm,其中5~10月份的降水约占全年降水量的85%。

该地区由于滥砍滥伐、过度放牧,加之严重的土壤侵蚀,天然植被破坏严重,取而代之的是近30~40年间建造的人工植被。人工植被主要的树(草)种有紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、草木樨(*Melilotus mill*)等;天然植被中常见的建群种和优势种有长芒草(本氏针茅)(*Sitpa bungeana*)、短花针茅(*Stipa breviflora Griseb*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaris Thunb*)等;草本植物在该地区

生态环境中占有比较重要的地位[17]。

1.2 试验设计

野外观测试验于 2009 ～ 2012 年进行，在前期对六道沟小流域主要土地利用类型实地调查的基础上，试验小区共选择了裸地、农地、人工草（灌）地、退化人工草地、荒草地，代表了当地退耕还林（草）过程中比较典型的土地利用和管理方式。

本研究共涉及 11 块样地（土地利用类型），其中，平坦样地 8 块，包括裸地、农地、苜蓿地、柠条地、撂荒地、梯田撂荒地、长芒草地以及荒草地小区各一块，试验小区面积均不小于 200 m^2，由于无重复样地面积较大，具有一定的代表性；另修建 9 个面积为 60 m^2 的坡地径流小区，设置 3 个处理为坡地苜蓿地、坡地撂荒地和坡地农地，每个处理 3 次重复。各小区土壤均为侵蚀砂壤质新成土，样地立地条件、土壤物理性质接近，具有可比性。样地基本信息如表 1。本试验于 2009 年 4 月初开始，至 2012 年 10 月中旬结束。

表 1　试验样地的基本信息

Table 1　Basic information of the plots investigated

土地利用类型 Land use type	年限(a) Land usage term	坡度(°) Slope gradient	坡向 Direction	0—10 cm 总孔隙度 Total porosity	主要植物 Vegetation
裸地 Bare land	7	0		0.48	少量野韭 *A. ramosum*
农地 Crop land	23	0		0.49	谷子、绿豆、大豆 *S. italica*, *V. fabam*, *G. max*
苜蓿地 Alfalfa land	7	0		0.49	紫花苜蓿 *M. sativa*
柠条地 *C. Korshinkii* land	7	0		0.50	柠条 *C. korshinkii*
撂荒地 Abandoned land	7	0		0.49	长芒草、硬质早熟禾、茵陈蒿 *S. bungeana*, *P. sphondylodes*, *A. capillaries*
坡地苜蓿地 Alfalfa land on slope	10	14	NW36°	0.47	紫花苜蓿 *M. sativa*
坡地撂荒地 Abandoned land on slope	10	14	NW72°	0.50	拂子茅、硬质早熟禾、茵陈蒿 *C. epigeios*, *P. sphondylodes*, *A. capillaries*
坡地农地 Crop land on slope	23	14	NW72°	0.48	谷子、绿豆、大豆 *S. italica*, *V. fabam*, *G. max*
梯田撂荒地 Abandoned land on terrace	11	0		0.48	赖草 *L. secalinus*
长芒草地 *S. bungeana* land	23	0		0.44	长芒草、紫花苜蓿、达乌里胡枝子 *S. bungeana*, *M. sativa*, *L. davurica*
荒草地 Wild grass land	20	0		0.40	赖草、阿尔泰狗娃花、茵陈蒿 *L. secalinus*, *H. altaicus*, *A. capillaries*

注（Note）：土地利用年限计算截止到 2012 年试验结束 The land usage term is enumerated until the end of the experiment in 2012.

1.3 观测项目和测定方法

1）前期处理　在每块样地内选择可代表该样地平均生长情况的 5 个 1.0 × 1.0 m^2 样方，首次测定前，在样方内将直径 25 cm 的 PVC 底座嵌入土壤 5 cm，以减少 CO_2 的泄漏。PVC 底座尽可能安放在植被间的空地；如 PVC 底座内生长植物，则将底座内植物齐地剪掉，保证每次测量前 PVC 底座内无植物生长，并尽可能少扰动凋落物以及地表结皮。

2)土壤呼吸速率的测定　采用密闭式动态气室法(Closed Dynamic Chamber,CDC)测定土壤呼吸速率;使用 CI-301PS(美国 CID 公司生产)以及体积为 15.8L 的便携式透明土壤呼吸测量室进行测定。测定时间通常设定为 2 min,在呼吸速率较低的季节,延长至 4 min。土壤呼吸速率季节变化每隔 5～10 d 测定一次,每次测量在上午 8:00～11:00 之间进行,这段时间内土壤呼吸速率的测定值与日平均值近似[7,18]。

3)土壤水分及温度的测定　在测定土壤呼吸速率的同时,采用 Hydra Probe Ⅱ(SDI-12/RS485)测量 0—6 cm 土层土壤平均体积含水量。利用热电偶探头测量 5 cm 和 10 cm 土层土壤温度;此外,在 2010、2012 年试验期间增测 15 cm 土层土壤温度,在 2012 年试验期间增测 20 cm 土层土壤温度。

4)土地管理方式　裸地定期除草,以保证其上无植被生长;农地于每年 5 月中下旬开始种植农作物,于 10 月初收获;苜蓿每年度整个地块刈割 2 次,分别于 8 月初和 10 月中下旬进行;柠条地、撂荒地、长芒草地、荒草地不进行人工管理。

1.4 数据分析

采用 SPSS 19 统计分析软件检验不同土地利用方式下土壤呼吸速率差异的显著性以及土壤呼吸速率与土壤养分的相关性。应用 SigmaPlot 12.0 进行土壤呼吸速率与土壤水热因子拟合分析并作图。

2 结果分析与讨论

2.1 土地利用方式对土壤呼吸的影响

黄土高原水蚀风蚀交错区土壤呼吸速率的季节变化趋势与土壤温度变化趋势一致(图 1)。土壤呼吸速率季节间和由土地利用方式不同产生的土壤呼吸速率均存在显著差异($P<0.05$)。对生长季土壤 CO_2 平均释放速率排序得出,苜蓿地 > 柠条地 > 撂荒地 > 荒草地≈长芒草地 > 农地 > 裸地(表 2)。人工草(灌木)地和荒草地、长芒草地的结果排序与齐丽彬等[19]研究结论相反,与谢慧慧等[20]、王建国等[18,21]研究结果部分一致,说明不同土地利用类型下的土壤呼吸受到多个因素的共同影响,需要较长时段的观测数据才能得出更可靠的结论。

5～9 月,两块苜蓿地与柠条地土壤呼吸速率月平均值较高,这与本试验区域苜蓿、柠条生理特性密切相关,苜蓿和柠条于每年 4 月中下旬开始生长,是本区域萌发最早、全年生长速率最快的植物,其根系生长迅速、呼吸作用强烈。8 月中下旬对苜蓿的刈割会降低土壤呼吸的强度。进入 10 月份,伴随着气温降低、植物枯萎,土壤呼吸迅速下降。

土地利用方式转变对土壤呼吸影响明显(表 2),农地转变为裸地的过程中,土壤呼吸速率下降为原来的 42%～63%,尤其在植物生长旺季的 7、8、9 三个月下降明显;农地转变为人工草(灌木)地,包括农地退耕为苜蓿地与柠条地及坡地农地退耕为苜蓿地,土壤呼吸速率提高了 109%～200%,显著地促进了土壤 CO_2 的释放速率,主要与人工草(灌)植物生物学特性有关,该类植物能强烈地改变土壤的养分与水热循环过程,同时有更多的根系及地上残留物进入土壤;而农地转变为撂荒地,包括农地撂荒、梯田撂荒及坡耕地撂荒,对土壤 CO_2 的释放速

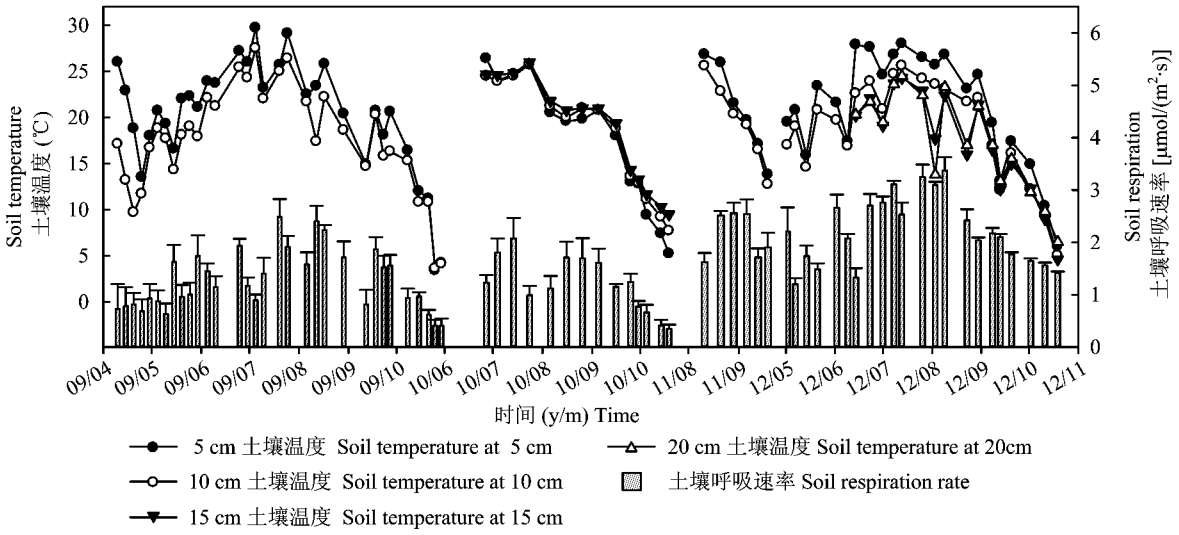

图 1　长芒草地土壤温度以及土壤呼吸速率季节变化

Fig.1　The seasonal distributions of soil temperature and soil respiration in *S. bungeana* lands

表 2　不同土地利用方式下土壤呼吸速率的季节性变化[μmol/(m²·s)]

Table 2　The seasonal variation of soil respiration rate under different land use patterns

土地利用类型 Land use type	5 月 May	6 月 Jun.	7 月 Jul.	8 月 Aug.	9 月 Sep.	10 月 Oct.	平均值 Mean
裸地 Bare land	0.55 BCd	0.79 ABf	0.81 AB c	1.00 Ae	0.58 BCd	0.33 Cd	0.67 f
农地 Crop land	1.30 BCc	1.30 BCcde	1.81 ABab	2.29 Aabc	1.10 Cbcd	0.52 Dbcd	1.39 cd
苜蓿地 Alfalfa land	2.09 Aa	2.04 Aa	2.25 Aa	2.54 Aab	2.19 Aa	0.98 Ba	2.03 a
柠条地 *C. Korshinkii* land	1.55 CDabc	1.82 BCab	2.16ABCb	2.62 Aa	2.22 ABa	1.13 Da	1.96 ab
撂荒地 Abandoned land	1.42 BCbc	1.53 Bbcd	1.85 Bab	2.50 Aab	1.75 Bab	0.93 Ca	1.70 bc
坡地苜蓿地 Alfalfa land on slope	1.97 Aab	1.67 Aabc	2.11 Aab	2.07 Aabcd	1.76 Bab	0.66 Bb	1.70 bc
坡地撂荒地 Abandoned land on slope	1.11 Ccd	1.19 BCdef	1.51ABab	1.65 Ad	0.96 Ccd	0.44 Dbcd	1.14 de
坡地农地 Crop land on slope	1.13 BCcd	0.88 Cf	1.37ABbc	1.65 Ad	0.92 Ccd	0.38 Dcd	1.06 e
梯田撂荒地地 Abandoned land on terrace	1.12 Ccd	1.03 Cef	2.09AB ab	2.53 Aab	1.40 BCbc	0.60 Cbc	1.51 e
长芒草地 *S. bungeana* land	1.14 Ccd	1.39 BCcde	1.65AB ab	1.84 Acd	1.48 BCbc	0.60 Dbc	1.37 cde
荒草地 Wild grass land	1.05 BCcd	1.51 ABbcd	1.91 Aab	1.91 Abcd	1.67 Abab	0.65 Cb	1.47 c

注(Note): 同行不同大写字母表示同一土地利用方式在不同月份土壤呼吸速率具有显著性差异;同列不同小写字母表示同一月份内不同土地利用方式土壤呼吸速率具有显著性差异($P<0.05$) The different capital letters in the same row mean the soil respiration monthly difference of the same land-use is significant; while, different lowercases in the same column mean the land-use soil respiration difference of the same month is significant ($P<0.05$).

率影响并不确定,与撂荒年限和撂荒地所处的植被演替阶段相关。荒草地和长芒草地这两类天然草地虽然历经多年演替,物种丰度、植被密度高于农地,土壤动物也较农地多,但由于不进行人工管理,土壤水分条件较差,因此土壤 CO_2 释放速率受限于土壤水分因子而低于农地。

2.2　土壤温度与含水量单因素对土壤呼吸的影响

以往研究已证实,土壤呼吸速率与土壤温度之间多呈指数函数关系,研究者通常采用方程(1),即 Van't Hoff 模型进行拟合;用温度敏感性指数 Q_{10} 描述温度每升高 10℃时土壤呼吸所增加的倍数,即公式 (2)。

$$Rs = a \cdot e^{bT} \quad (1)$$

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

式中: Rs 为土壤呼吸速率[μmol/(m²·s)]; T 为土壤温度(℃); a、b 为待定参数,其中 a 为 0℃时的土壤呼吸速率[22],或称之为基础呼吸, b 为温度反应系数。

在土壤温度未超过 20℃时,土壤呼吸速率的散点分布聚集在拟合曲线附近,随着温度升高散点分布开始远离拟合曲线,呈发散状。说明该区域土壤呼吸速率在温度低于 20℃时,根系以及根际微生物活性受土壤温度限制,可能对土壤水分反应不敏感;当温度超过 20℃后,呼吸过程对其他影响因子响应更为显著,使得土壤 CO_2 的释放过程更为复杂(图 2)。应用以上模型分析得出: 土壤温度显著影响土壤呼吸速率,10 cm 处土壤温度对土壤呼吸速率的解释能力最强(表 3)。马骏等[7]、崔骁勇等[23]的试验结果与本试验类似;王建国等认为模型对单一年度观测数据的拟合与土地利用情况相关,具有一定的不确定性[18,21]。

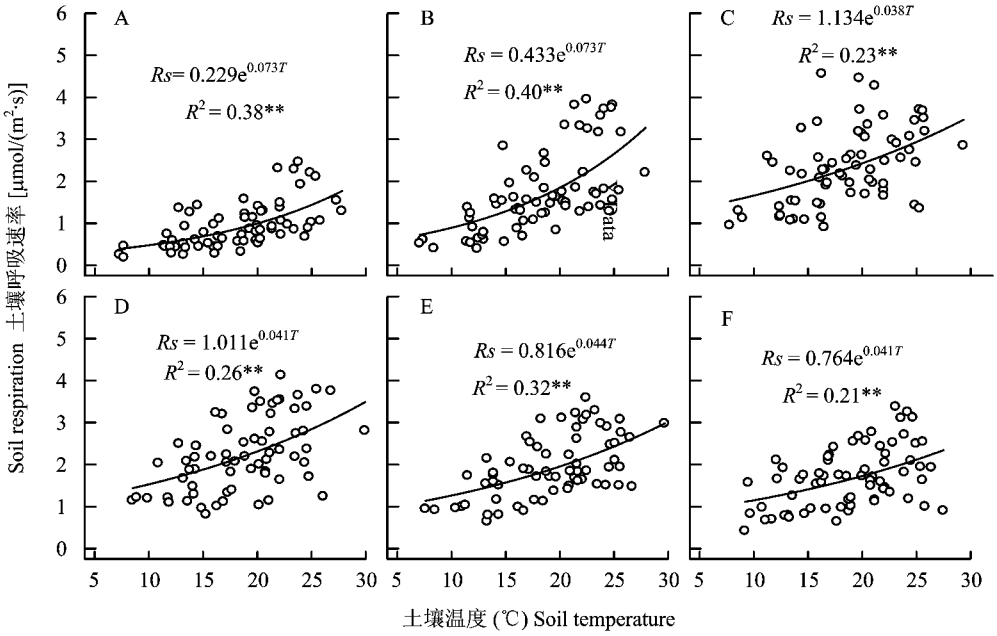

图2 土壤呼吸速率与10 cm土层土壤温度之间的关系

Fig. 2 Relationship between soil respiration rate and soil temperature at 10 cm soil layer

[注(Note): A—裸地 Bare land; B—农地 Crop land; C—苜蓿地 Alfalfa land; D—柠条地 *C. Korshinkii* land; E—撂荒地 Abandoned land; F—长芒草地 *S. bungeana* land.]

采用10 cm土层的Q_{10}值综合排序得出:无植被生长样地(裸地,2.09) > 农地(农地、坡地农地,2.07 ~ 1.69) > 撂荒地(坡地撂荒地、撂荒地、梯田撂荒地,1.71 ~ 1.53) > 草(灌)地(柠条地、苜蓿地、长芒草地、荒草地,1.51 ~ 1.42),可见退耕还林(草)降低了土壤呼吸对温度的敏感性,这与张丽华等的研究结论一致[24]。黄土高原水蚀风蚀交错区土壤呼吸Q_{10}值范围与温带草原群落的Q_{10}范围接近(1.47 ~ 1.84)[25],Q_{10}排序规律与王建国等[18]的结果相近,但与谢慧慧等[20]不同。一方面,可能由于谢慧慧等对该区域土壤呼吸的观测是在土地利用方式改变的前期,土壤水、热和养分因子处在向新的土地利用方式转变的过渡时期,不具有代表性;另一方面不同年份之间Q_{10}值不尽相同,导致多年观测数据计算出的Q_{10}值与单一年份的不同。因此,多年观测数据计算出的Q_{10}值在估算升温对土壤碳排放的影响时更具可信性。

涂纯等认为,Q_{10}值越高表明土壤呼吸对温度的依赖性越大[26]。本文中裸地条件下由于无植物生长,土壤水分条件相对较好;农地受到长期的耕作熟化影响,水分和养分条件亦优于其他有植被生长的样地,因此土壤温度成为该地区裸地、农地土壤呼吸速率的主要限制因子。农地退耕之后,随着田间生物量的增加,一般土壤呼吸速率会有显著升高[19-22]。但本研究结果显示,虽然农地撂荒或者种植人工草(灌)后,土壤呼吸速率会有所提升,但由于该类样地土壤水分含量的降低,导致土壤呼吸的温度敏感性会随之降低。

土壤呼吸速率与土壤含水量的关系较为复杂,本文采用方程(3)对试验数据进行分析。

$$Rs = a \cdot \theta + b/\theta + c \quad (3)$$

式中:Rs为土壤呼吸速率[μmol/(m²·s)];θ为土壤体积含水量(cm³/cm³);a、b、c为待定参数。

结果表明,除坡地撂荒地之外,其余土地利用类型土壤含水量与土壤呼吸速率之间非线性回归决定系数均达到显著或极显著水平,但拟合优度不及土壤温度(表4)。在黄土高原水蚀风蚀交错区,土壤含水量经常成为限制土壤呼吸强度的重要因子,虽然降水能解除限制土壤CO_2排放速率的水分因子的制约,但每次降水前,土壤前期含水量的不同,导致植物与土壤微生物生长发育情况不同,使得降水对半干旱区域土壤呼吸强度的激发程度不尽相同,掩盖了土壤呼吸与土壤含水量之间的直接关系,导致土壤呼吸与土壤含水量的模型拟合优度不及土壤温度。以裸地、农地、苜蓿地为例,降水发生之后3 d左右,土壤呼吸速率的观测值较高,随着时间的延续,呼吸值会有一定的降低(图3)。这与Curiel Yuste等[27]的研究结论类似。马骏等认为,干旱、半

表 3　不同土地利用方式下土壤呼吸速率与不同土层温度的关系以及温度敏感性指数

Table 3　Relations between soil respiration rate and soil temperature at different soil depths and Q_{10} under different land-use patterns

土地利用类型 Land use type	土壤深度 Soil depth											
	5 cm			10 cm			15 cm			20 cm		
	方程 Equation	R^2	Q_{10}	方程 Equation	R^2	Q_{10}	方程 Equation	R^2	Q_{10}	方程 Equation	R^2	Q_{10}
裸地 Bare land	$R_S=0.158e^{0.084T}$	0.54**	2.31	$R_S=0.229e^{0.073T}$	0.38**	2.09	$R_S=0.508e^{0.045T}$	0.17*	1.57	$R_S=0.858e^{0.036T}$	0.31*	1.44
农地 Crop land	$R_S=0.390e^{0.070T}$	0.46**	2.01	$R_S=0.433e^{0.073T}$	0.40**	2.07	$R_S=0.576e^{0.065T}$	0.34**	1.92	$R_S=0.680e^{0.070T}$	0.53**	2.02
苜蓿地 Alfalfa land	$R_S=1.088e^{0.036T}$	0.27**	1.43	$R_S=1.134e^{0.038T}$	0.23**	1.46	$R_S=1.063e^{0.0041T}$	0.30**	1.50	$R_S=1.303e^{0.041T}$	0.47**	1.50
柠条地 *C. Korshinkii* land	$R_S=1.143e^{0.031T}$	0.19**	1.36	$R_S=1.011e^{0.041T}$	0.26**	1.51	$R_S=1.203e^{0.036T}$	0.26**	1.44	$R_S=1.184e^{0.047T}$	0.49**	1.60
撂荒地 Abandoned land	$R_S=0.805e^{0.039T}$	0.33**	1.47	$R_S=0.816e^{0.044T}$	0.32**	1.55	$R_S=0.959e^{0.036T}$	0.29**	1.43	$R_S=1.017e^{0.043T}$	0.56**	1.53
坡地苜蓿地 Alfalfa land on slope	$R_S=1.276e^{0.023T}$	0.10**	1.26	$R_S=1.080e^{0.035T}$	0.19**	1.42	$R_S=0.935e^{0.044T}$	0.33**	1.55	$R_S=1.065e^{0.046T}$	0.67**	1.58
坡地撂荒地 Abandoned land on slope	$R_S=0.569e^{0.041T}$	0.26**	1.51	$R_S=0.495e^{0.053T}$	0.34**	1.71	$R_S=0.692e^{0.0041T}$	0.26**	1.50	$R_S=0.870e^{0.040T}$	0.55**	1.49
坡地农地 Crop land on slope	$R_S=0.582e^{0.043T}$	0.16**	1.54	$R_S=0.539e^{0.053T}$	0.19**	1.69	$R_S=0.600e^{0.055T}$	0.23**	1.72	$R_S=0.458e^{0.085T}$	0.67**	2.34
梯田撂荒地 Abandoned land on terrace	$R_S=1.011e^{0.023T}$	0.08*	1.26	$R_S=0.738e^{0.043T}$	0.20**	1.53	$R_S=0.869e^{0.034T}$	0.18*	1.40	$R_S=0.893e^{0.046T}$	0.49**	1.58
长芒草地 *S. bungeana* land	$R_S=0.714e^{0.040T}$	0.23**	1.50	$R_S=0.764e^{0.041T}$	0.21**	1.50	$R_S=0.963e^{0.034T}$	0.17*	1.40	$R_S=1.228e^{0.036T}$	0.40**	1.43
荒草地 Wild grass land	$R_S=0.942e^{0.027T}$	0.14**	1.31	$R_S=0.837e^{0.035T}$	0.17**	1.42	$R_S=0.885e^{0.032T}$	0.22**	1.38	$R_S=1.285e^{0.022T}$	0.16	1.24

注(Note)：* — $P<0.05$；** — $P<0.01$

表4 不同土地利用方式下土壤呼吸速率与土壤含水量的关系回归方程参数

Table 4 Parametersin relation equations between soil respiration rate and soil moisture under different land-use patterns

土地利用类型 Land use type	a	b	c	R^2
裸地 Bare land	-4.554	-0.078	2.226	0.12**
农地 Crop land	-10.11	-0.132	4.29	0.12**
苜蓿地 Alfalfa land	-5.748	-0.071	3.818	0.16**
柠条地 *C. Korshinkii* land	-2.349	-0.061	3.264	0.26**
撂荒地 Abandoned land	-2.968	-0.06	2.963	0.20**
坡地苜蓿地 Alfalfa land on slope	-2.379	-0.087	-1.694	0.09*
坡地撂荒地 Abandoned land on slope	1.858	-0.002	1.06	0.04
坡地农地 Crop land on slope	-7.568	-0.132	3.531	0.06*
梯田撂荒地 Abandoned land on terrace	5.536	-0.015	1.214	0.17**
长芒草地 *S. bungeana* land	2.279	-0.012	1.639	0.21**
荒草地 Wild grass land	-4.039	-0.034	-1.251	0.15**

注(Note): * — $P<0.05$; ** — $P<0.01$.

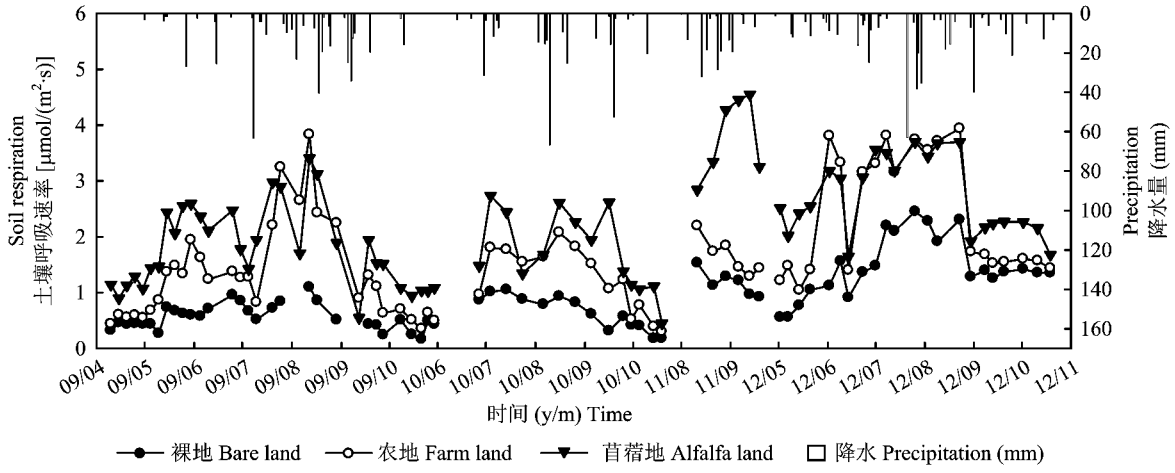

图3 降水以及不同土地利用方式下土壤呼吸速率季节变化

Fig. 3 The seasonal distributions of precipitation and soil respiration under different land-use patterns

干旱地区土壤含水量变化较小,也可能是两者间无极显著相关的原因[7]。

2.3 土壤温度、土壤含水量双因子对土壤呼吸的影响

已有的研究结果表明,土壤温度和土壤含水量的双因子模型对土壤呼吸的解释能力要强于单因子的解释能力[28],土壤呼吸与土壤温度或土壤含水量的单因子关系模型往往只能解释某一观测年度特定的土壤呼吸速率变化规律,在揭示存在降水差异的多年数据上并不理想。因此,本研究采用方程(4)、(5)、(6)对观测数据进行拟合,以探索最优拟合模型。

$$Rs = a \cdot T + b \cdot \theta + c \quad (4)$$

$$Rs = a \cdot (T \cdot \theta) + b \quad (5)$$

$$Rs = a \cdot e^{bT} \cdot \theta^{c} \quad (6)$$

式中: Rs 为土壤呼吸速率[μmol/(m²·s)]; T 为土壤温度(℃); θ 为土壤体积含水量(cm³/cm³); a、b、c 为待定参数。

结果与以上单因子拟合相比,拟合优度有显著的提高(表5)。在受降雨影响明显、土壤含水量波动较大的区域,虽土壤呼吸速率与土壤含水量单因子之间相关关系较差,但与土壤温度结合起来能解

表 5　土壤呼吸速率与 10 cm 土壤温度、0—6 cm 土壤含水量的不同模型拟合优度(n = 68)

Table 5　R^2 between soil respiration rate and soil temperature at 10 cm and soil moisture at 0 – 6 cm (n = 68)

土地利用类型 Land use type	$Rs = a \cdot T + b \cdot \theta + c$	$Rs = a \cdot T \cdot \theta + b$	$Rs = a \cdot e^{bT} \cdot \theta^c$
裸地 Bare land	0.40**	0.23**	0.43**
农地 Crop land	0.40**	0.14**	0.53**
苜蓿地 Alfalfa land	0.35**	0.24**	0.41**
柠条地 *C. Korshinkii* land	0.49**	0.38**	0.58**
撂荒地 Abandoned land	0.52**	0.38**	0.56**
坡地苜蓿地 Alfalfa land on slope	0.30**	0.22**	0.36**
坡地撂荒地 Abandoned land on slope	0.44**	0.27**	0.47**
坡地农地 Crop land on slope	0.23**	0.14**	0.35**
梯田撂荒地 Abandoned land on terrace	0.47**	0.44**	0.50**
长芒草地 *S. bungeana* land	0.48**	0.40**	0.54**
荒草地 Wild grass land	0.44**	0.28**	0.48**

注(Note): ** —$P < 0.01$.

释该区域土壤呼吸速率变化的 20% ~ 60%。将结果对比后发现,指数模型 $Rs = a \cdot e^{bT} \cdot \theta^c$ 更适合黄土高原水蚀风蚀交错区土壤呼吸速率与土壤温度、水分之间关系的拟合。

2.4　土壤养分对土壤呼吸的影响

土壤有机质、全氮含量与土壤呼吸速率之间正相关性达到显著或极显著水平,7、8 月份铵态氮含量与土壤呼吸速率之间呈现显著负相关;其它土壤养分含量与土壤呼吸速率之间有一定的相关性,但未达到显著水平(表 6),这与以往研究结果类似[21, 29]。土壤全氮和有机质含量在水热条件适宜的 7、8 月份,与土壤呼吸速率之间关系更为密切。前文述及当土壤温度高于 20℃时,土壤呼吸速率与温度之间的相关性降低(图 2),结合养分相关性结果,证实土壤呼吸的主要限制因子已经由简单的土壤水热因子,转变为包含养分等多因子的综合因素。而随着土壤有机质、全氮含量的增加,土壤呼吸速率上升也说明土壤呼吸强度与生态系统生产力相关,有机质与氮素含量都能刺激植物的初级生产[8],进而间接影响土壤呼吸。

表 6　土壤因子与土壤呼吸的相关性分析

Table 6　Correlation analysis between soil properties and soil respiration

项目 Item	5 月 May (n = 22)	6 月 Jun. (n = 22)	7 月 Jul. (n = 30)	8 月 Aug. (n = 41)	9 月 Sep. (n = 41)	10 月 Oct. (n = 30)
有机质 Organic matter	0.405	0.448*	0.476**	0.443**	0.311*	0.314
全氮 Total nitrogen	0.552**	0.558**	0.612**	0.497**	0.320*	0.453*
硝态氮 Nitrate	−0.011	0.254	0.297	0.096	−0.216	0.096
铵态氮 Ammonium	−0.241	0.292	−0.368*	−0.356*	−0.273	−0.354
全磷 Total phosphate	−0.025	0.158	0.286	0.154	−0.183	0.029
速效磷 Available phosphorus	−0.252	0.099	0.099	−0.034	−0.293	0.190

注(Note): n—测定样本数 Sample numbers determined; * — $P < 0.05$; ** —$P < 0.01$.

3 结论

1）水蚀风蚀交错区农地土壤呼吸速率与天然草地相差不大，退耕还林（草）后，人工种植的高产、深根性植物，如苜蓿、柠条会显著提高土壤呼吸速率，而农地撂荒后，土壤呼吸速率变化具有不确定性。退耕还林（草）会减弱升温对土壤 CO_2 释放的影响程度，且土壤呼吸的温度敏感性系数（Q_{10}）随土壤含水量降低而降低。

2）与土壤含水量相比，土壤呼吸受土壤温度影响更为显著，10 cm 深度土壤温度与土壤呼吸速率之间拟合优度最高。土壤温度与土壤含水量双因子指数模型对土壤呼吸速率的拟合均优于相应单因子模型，应用 $Rs = a \cdot e^{bT} \cdot \theta^{c}$ 模型能很好地模拟该区土壤温度、水分含量对土壤呼吸速率的影响，可以解释土壤呼吸变异的35%～58%。

3）在水热条件较好的6～8月，土壤呼吸速率受土壤有机质、土壤全氮含量的显著影响，说明养分贫瘠地区土壤呼吸控制因素中包含养分因子。

参 考 文 献：

[1] IPCC Climate change. The IPCC scientific assessment [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1990.

[2] IPCC Climate change 1994. Radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1995.

[3] IPCC Climate change 2001. The scientific basis. Contribution of working group i to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2001.

[4] IPCC Climate change 2007. The physical science basis. contribution of working group Ⅰ. in fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.

[5] Houghton R A, Hackler J L, Lawrence K T. The U. S. carbon budget: contributions from land-use change[J]. Science, 1999, 285 (5427): 574-578.

[6] Wang W, Fang J Y. Soil respiration and human effects on global grasslands[J]. Glob. Planet. Change, 2009, 67(1-2): 20-28.

[7] 马骏，唐海萍. 内蒙古农牧交错区不同土地利用方式下土壤呼吸速率及其温度敏感性变化[J]. 植物生态学报，2011，35(2)：167-175.
Ma J, Tang H P. Variations of soil respiration rate and its temperature sensitivity among different land use types in the agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia[J]. Chin. J. Plant Ecol., 2011, 35 (2): 167-175.

[8] Luo Y Q, Zhou X H. Soil respiration and the environment[M]. Burlington: Elsevier, 2006.

[9] 陈全胜，李凌浩，韩兴国，阎志丹. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. 生态学报，2005，26(5)：972-978.
Chen Q S, Li L H, Han X G, Yan Z D. Effects of water content on soil respiration and the mechanisms[J]. Acta Ecol. Sin., 2005, 26 (5): 972-978.

[10] Xu W H, Wan S Q. Water- and plant-mediated responses of soil respiration to topography, fire, and nitrogen fertilization in a semiarid grassland in northern China[J]. Soil Biol. Biochem., 2008, 40 (3): 679-687.

[11] 周萍，刘国彬，薛萐. 草地生态系统土壤呼吸及其影响因素研究进展[J]. 草业学报，2009，18(2)：184-193.
Zhou P, Liu G B, Xue S. Review of soil respiration and the impact factors on grassland ecosystem[J]. Acta Pratac. Sin., 2009, 18 (2): 184-193.

[12] Sheng H, Yang Y S, Yang Z J *et al*. The dynamic response of soil respiration to land-use changes in subtropical China[J]. Glob. Change Biol., 2010, 16 (3): 1107-1121.

[13] 冯文婷，邹晓明，沙丽清，等. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林土壤呼吸季节和昼夜变化特征及影响因子比较[J]. 植物生态学报，2008，32(1)：31-39.
Feng W T, Zou X M, Sha L Q *et al*. Comparisons between seasonal and diurnal patterns of soil respiration in a montane evergreen broad-leaved forest of Ailao Mountains, China[J]. Chin. J. Plant Ecol., 2008, 32(1): 31-39.

[14] 唐克丽. 黄土高原水蚀风蚀交错区治理的重要性与紧迫性[J]. 中国水土保持，2000，11(224)：11-17.
Tang K L. Importance and urgency of harnessing the interlocked area with both water and wind erosion in the Loess Plateau[J]. Soil Water Conserv. China, 2000, 11 (224): 11-17.

[15] 李裕元，邵明安，郑继勇，李秋芳. 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 Y Y, Shao M A, Zheng J Y, Li Q F. Impact of grassland recovery and reconstruction on soil organic carbon in the northern Loess Plateau[J]. Acta Ecol. Sin., 2007, 27 (6): 2279-2287.

[16] 唐克丽，侯庆春，王斌科，张平仓. 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[J]. 西北水土保持研究所集刊，1993，18(2)：1-15.
Tang K L, Hou Q C, Wang B K, Zhang P C. The environment background and administration way of wind-water erosion crisscross region and Shenmu experimental area on the Loess Plateau[J]. Res. Soil Water Conserv., 1993, 18 (2): 1-15.

[17] 于贵瑞，谢高地，王秋凤，牛栋. 西部地区植被恢复重建中几个问题的思考[J]. 自然资源学报，2002，17(2)：216-220.
Yu G R, Xie G D, Wang Q F, Niu D. Considerations to some issues on vegetation rehabilitation in western China[J]. J. Nat. Resour., 2002, 17 (2): 216-220.

[18] 王建国. 黄土高原水蚀风蚀交错区土壤呼吸及其影响因素研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学硕士学位论文，2011.

Wang J G. Affecting factors of soil respiration in the water-wind erosion crisscross region[D]. Yangling: Ms thesis of Northwest A&F University, 2011.

[19] 齐丽彬，樊军，邵明安，王万忠. 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[J]. 生态学报，2008，28(11)：5428-5436.
Qi L B, Fan J, Shao M A, Wang W Z. Seasonal changes in soil respiration under different land use patterns in the water-wind erosion crisscross region of the Loess Plateau[J]. Acta Ecol. Sin., 2008, 28(11): 5428-5436.

[20] 谢慧慧，樊军，齐丽彬，郝明德. 黄土高原水蚀风蚀交错区典型植被下土壤呼吸季节变化特征与影响因素[J]. 环境科学，2010，31(12)：2995-3003.
Xie H H, Fan J, Qi L B, Hao M D. Seasonal characteristics of soil respiration and affecting factors under typical vegetations in the water-wind erosion crisscross region of the Loess Plateau[J]. Chin. J. Environ. Sci., 2010, 31 (12): 2995-3003.

[21] 王建国，樊军，王力，石占飞. 退耕还林还草过程中不同土地利用方式土壤呼吸作用及其碳收支评估[J]. 农业环境科学学报，2011，30(10)：2024-2032.
Wang J G, Fan J, Wang L, Shi Z F. Soil respiration and assessment of the carbon budget in the process of returning farmland to forest and grassland under different land use patterns [J]. J. Agro-Environ. Sci., 2011, 30 (10): 2024-2032.

[22] Graice J, Rayment. Respiration in the balance[J]. Nature, 2000, 404: 819-820.

[23] 崔骁勇，陈四清，陈佐忠. 大针茅典型草原土壤 CO_2 排放规律的研究[J]. 应用生态学报，2000，11(3)：390-394.
Cui X Y, Chen S Q, Chen Z Z. CO_2 release from typical *Stipa grandis* grassland soil[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2000, 11 (3): 390-394.

[24] 张丽华，陈亚宁，李卫红，赵锐锋. 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[J]. 中国科学 D 辑，2006，36(增刊)：68-76.
Zhang L H, Chen Y N, Li W H, Zhao R F. Seasonal variation of soil respiration under different land use/vegetation cover types in arid desert area[J]. Sci. China(Ser. D), 2006, 36(Suppl. Ⅱ): 68-76.

[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[J]. 植物生态学报，2003，27 (4)：441-447.
Chen Q S, Li L H, Han X G *et al*. Response of soil respiration to temperature in eleven communities in Xilingolgrassland, Inner Mongolia[J]. Chin. J. Plant Ecol.,2003, 27 (4): 441-447.

[26] 涂纯，王俊，刘文兆. 不同覆盖条件下旱作农田土壤呼吸及其影响因素[J]. 植物营养与肥料学报，2012，18(5)：1103-1110.
Tu C, Wang J, Liu W Z. Variation in soil respiration and its driving factors in rainfed winter wheat fields with different mulching measures[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2012, 18 (5): 1103-1110.

[27] Curiel Yuste J, Janssens I A, Carrara A *et al*. Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperature maritime pine forest[J]. Tree Physiol., 2003, 23 (18): 1263-1270.

[28] 李洪建. 不同生态系统土壤呼吸与环境因子的关系研究[D]. 山西：山西大学博士学位论文，2008.
Li H J. Studies on soil respiration and its relations to environmental factors in different ecosystems[D]. Shanxi: PhD dissertation of Shanxi University, 2008.

[29] Priess J A, Koning G H, Veldkam A. Assessment of interactions between land use change and carbon and nutrient fluxes in Ecuador[J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2001, 85 (1-3): 269-276.