

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

谢慧慧¹, 樊军^{1,2*}, 齐丽彬^{2,3}, 郝明德^{1,2}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 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; 3. 三门峡职业技术学院, 河南 三门峡 472000)

摘要:运用红外气体分析仪测定了黄土高原水蚀风蚀交错区典型植被下土壤呼吸, 分析了不同土地利用方式下土壤呼吸与土壤温度、水分和土壤养分的关系. 结果表明, 不同植被下土壤呼吸季节变化特征区别明显, 主要受水分和温度的影响. 裸地、农地、苜蓿地、柠条地、撂荒地、长芒草地、荒草地、退化苜蓿地、坡地苜蓿地、坡地撂荒地、坡地农地、梯田农地的土壤呼吸季节变化范围分别为 0.32~0.82、0.41~2.83、0.74~2.81、0.76~3.07、0.67~2.79、0.51~2.12、0.56~2.05、0.59~1.66、0.42~2.09、0.31~1.86、0.32~1.93 和 0.41~3.17 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 土壤呼吸速率的季节变化幅度以农地 (167%~203%) 最大, 依次为撂荒地 (117%~154%)、柠条地 (134%)、长芒草地 (129%)、苜蓿地 (119%~120%)、裸地 (94%), 最小是退化苜蓿地 (92%). 裸地和退化苜蓿地的土壤呼吸季节变化幅度不大, 苜蓿地和柠条地月平均土壤呼吸强度显著高于其他土地利用方式, 农地在 7、8 月土壤呼吸强度显著高于其它土地利用方式, 且其温度敏感性 (Q_{10}) 也最大, 达 1.86. 不同植被下, 土壤呼吸和土壤有机质及速效钾含量呈显著正相关关系, 有机质和全氮主要在水热条件好的 7、8 月影响土壤呼吸, 而在温度与水分条件不优越的条件下, 土壤铵态氮的含量与土壤呼吸强度呈负相关.

关键词:土壤呼吸; 土壤碳平衡; 土壤养分; 年内变化; 水蚀风蚀交错区; 土地利用方式

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)12-2995-09

Seasonal Characteristics of Soil Respiration and Affecting Factors Under Typical Vegetations in the Water-Wind Erosion Crisscross Region of the Loess Plateau

XIE Hui-hui¹, FAN Jun^{1,2}, QI Li-bin^{2,3}, HAO Ming-de^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and the Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 3. Sanmenxia Polytechnic, Sanmenxia Henan 472000, China)

Abstract: By the soil respiration system, the characteristics of soil respiration were investigated to explore the correlations between soil respiration and soil temperature, soil water and soil nutrient under different land use patterns in the water-wind erosion crisscross region of the Loess Plateau. The results indicated that the seasonal changing characteristics of soil respiration were distinguished significantly among different vegetations, and soil water content and temperature were the main influencing factors. Soil respiration seasonal changing ranges, such as bare land, crop land, *Medicago sativa* land, *Caragana korshinskii* land, abandoned wild grass land, *Stipa bungeana* land, wild grass land, degraded *Medicago sativa* land, sloping *Medicago sativa* land, sloping abandoned wild grass land, sloping crop land and terraced crop land, were 0.32-0.82, 0.41-2.83, 0.74-2.81, 0.76-3.07, 0.67-2.79, 0.51-2.12, 0.56-2.05, 0.59-1.66, 0.42-2.09, 0.31-1.86, 0.32-1.93 and 0.41-3.17 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$. Comparing seasonal changing magnitudes of soil respiration, crop land was the biggest (167%-203%), abandoned wild grass land (117%-154%), *Caragana korshinskii* land (134%), *Stipa bungeana* land (129%), *Medicago sativa* land (119%-120%) and bare land (94%) followed crop land. The smallest was degraded *Medicago sativa* land (92%). Bare land and degraded *Medicago sativa* land had small seasonal variation during the study period. Monthly average values of soil carbon flux (soil respiration) of *Medicago sativa* land and *Caragana korshinskii* land were maximal, but the maximum values under crop land were observed in July and August. Besides Q_{10} of crop land was also maximal, which reached 1.86. There were significant correlations between soil respiration and soil organic matter and available K. Moreover, soil respiration was affected by soil organic matter and total nitrogen in July and August when the water and heat condition were plentiful, but soil ammonium nitrogen had negative impact on soil respiration in the seasons when water and heat were not optimal.

Key words: soil respiration; soil carbon balance; soil nutrients; annual variation; water-wind erosion crisscross region; land use pattern

收稿日期: 2010-01-12; 修订日期: 2010-03-19

基金项目: 中国科学院、国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划项目; 西北农林科技大学青年科研基础项目

作者简介: 谢慧慧 (1984~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态系统通量, E-mail: xiehui3108hh@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: fanjun@ms.iswc.ac.cn

人类活动和全球变化在一定程度上改变了地球植被分布和全球碳循环^[1]. 为了解全球碳循环如何对人类干扰和气候变化产生响应,就必须了解碳循环过程的不同方面,其中包括土壤呼吸^[2]. 土壤呼吸是碳循环的重要环节,在陆地生态系统中,通过土壤呼吸排放到大气的 CO₂ 高达 68 Pg·a⁻¹,该值仅次于陆地植被总光合作用所固定的碳量^[3]. 土壤呼吸也是陆生植物固定的 CO₂ 返回大气的主要途径,大气中近 10% 的 C 由土壤产生,其微小变化就有可能对全球碳平衡产生重要的影响^[4,5]. 因此对于不同陆地生态系统下土壤 CO₂ 排放通量时空波动及其影响因子响应分析,已成为碳循环和全球变化研究中热点问题^[6].

土壤呼吸是一个复杂的生物学过程,受到多种因素的影响,主要因素有温度、水分、有机质、土壤质地等^[7]. 土壤呼吸在一定范围内表现为随温度和水分增加而增加的趋势,在极端的温度和水分条件下则受到抑制^[8]. 在干旱半干旱区土壤中的有机质含量较低,土壤呼吸对温度和水分响应易受到土壤碳源的限制^[9]. 目前有关土壤呼吸作用的研究在国内外较多,而对黄土高原北部水蚀风蚀交错区典型植被下的土壤呼吸的研究相对缺乏.

黄土高原水蚀风蚀交错区实行退耕还林还草以来,该区土地利用方式发生了一定变化. 在植被类型转变过程中,土壤呼吸的年内变化特征、影响变化机制急需进一步研究明确. 由此,本研究选取本区几种典型植被,对其土壤呼吸的年内变化规律及变化影响机制进行了初步分析,以期能深入了解黄土高原土壤碳循环过程.

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

本试验设在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 1 094~1 274 m,是黄土高原向毛乌素 i 森林草原向典型干旱草原的过渡地带. 本区属于中温带半干旱气候,年平均气温 8.4℃,月平均最低温 -9.7℃(1 月),最高温 23.7℃(7 月);极端最高温 38.9℃,极端最低温 -28.1℃,最高最低较差 67℃,年均日较差 13.8℃,≥10℃ 活动积温为 3 232℃,无霜期 169 d,全年日照时数 2 836 h,年总太阳辐射量为 5 922 MJ·m⁻². 多年平均降水量 437 mm,其中 6~9 月的降水占全年降水量的 70% 左右. 该区属于森林草原生物气候带,干旱、霜冻、暴雨、大风、冰雹、水

蚀风蚀等灾害频繁发生,加之强烈的人类活动影响,生态环境极为脆弱^[10].

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,作物主要有糜子(*Panicum miliaseum*)、谷子(*Setaria italica*)、大豆(*Glycine max*)、洋芋(*Solanum tuberosum*)等. 而且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^[11].

1.2 样地选择与试验设计

本试验选取的土地利用方式包括裸地、撂荒地(农地弃耕后不进行人为干扰)、人工草地、农地、荒草地(多年生草地,生产力很低)和人工灌木地等. 所选土地利用类型为该研究流域的主要土地利用类型,立地条件见表 1.

表 1 试验样地的立地条件					
Table 1 Site conditions of the selected land use patterns					
样地 编号	土地利用方式	年限 /a	海拔 /m	坡度 /(°)	坡向
1	裸地	4	1 224	0	—
2	农地	20	1 224	0	—
3	苜蓿地	4	1 224	0	—
4	柠条地	4	1 224	0	—
5	撂荒地	4	1 224	0	—
6	长芒草地	50	1 219	0	—
7	荒草地	15	1 223	0	—
8	退化苜蓿地	20	1 215	7	NE36°
9	坡地苜蓿地	7	1 183	14	NW36°
10	坡地撂荒地	7	1 183	14	NW72°
11	坡地农地	20	1 183	14	NW72°
12	梯田农地	20	1 183	0	—

裸地地上部分定期除草,保证无植物生长;农地为雨养旱地,当年种植作物为谷子,谷子成熟期冠层高度为 90 cm;紫花苜蓿人工草地最大生物量时期株高 45 cm 左右;次生天然长芒草草地最大生物量时期株高 15 cm 左右;柠条灌木林最大生物量时期株高 100 cm 左右,林下杂生蒿类;荒草地内杂草丛生. 1~5 号试验样地之前是种植约 20 a 以上的农地,无坡度,土壤水分养分条件相对较好. 9~11 号样地在试验之初也是种植约有 20 a 以上的坡耕农地. 于植物生长季末采集 0~10 cm 土壤样品分析其理化性质,土壤基本理化性质见表 2.

表 2 不同土地利用类型 0~10 cm 土层理化性质
Table 2 Soil physic and chemical properties at 0-10 cm
of different land use patterns

土地类型	容重 /g·cm ⁻³	有机质 /%	总氮 /%	C/N	全磷 /%
裸地	1.47	0.467	0.031	8.87	0.042
农地	1.39	0.558	0.038	8.54	0.045
苜蓿地	1.30	0.686	0.041	9.82	0.043
柠条地	1.38	0.649	0.037	10.04	0.044
撂荒地	1.20	0.613	0.038	9.47	0.043
长芒草地	1.54	0.406	0.029	8.07	0.037
荒草地	1.51	0.501	0.027	10.74	0.024
退化苜蓿地	1.52	0.578	0.036	9.22	0.052
坡地苜蓿地	1.40	0.613	0.033	10.69	0.057
坡地撂荒地	1.38	0.618	0.034	10.52	0.059
坡地农地	1.31	0.595	0.035	9.79	0.061
梯田农地	1.41	0.898	0.046	11.28	0.068

1.3 土壤呼吸测定

采用动态密闭气室法测定土壤 CO₂ 排放通量. 将 CI-301PS 红外 CO₂ 气体分析仪(美国 CID 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 1 d,在每个样地内随机选取样方,将有机玻璃底座嵌入土壤中. 同时将基座内的植物齐地剪掉,并尽可能不扰动地表的凋落物. 经过 24 h 的平衡后,土壤呼吸速率会恢复到基座放置前的水平,从而避免了由于安置气室对土壤扰动而造成的短期内呼吸速率的波动. 测量时,用一中空有机玻璃壳体做密闭箱,将其紧扣到前 1 d 设置在土壤表面的底座上,同时打开箱内顶部风扇平衡 CO₂ 气体浓度,每间隔 10 s,红外 CO₂ 气体分析仪测量一次箱内空气 CO₂ 浓度值,测量时间持续 180 s,每个测量点重复测量 3~5 次^[6]. 土壤呼吸从 2009 年 4 月初开始测定,于 2009 年 11 月底结束,试验期间每隔 4~6 d 测定一次,每次测量在 09:00~11:00 之间进行,这一时间土壤呼吸速率测定值与日平均值基本一致^[12].

1.4 土壤温度和水分的测定

测定土壤呼吸速率的同时利用热电偶温度读表(HH509R)连接热电偶探头测量土体 5 cm 和 10 cm 深度的土壤温度;采用 Hydra Probe II (SDI-12/RS485)测量 0~6cm 深度土壤平均体积含水量.

1.5 数据分析与处理

为分析土壤温度和土壤湿度对土壤呼吸的共同影响,选择双因素关系模型进行拟合^[13,14]:

$$R_s = a \cdot e^{bt} \cdot W^c \tag{1}$$

式中, R_s 为土壤呼吸速率, t 为土壤 5cm 处温度, W

为土壤 0~6 cm 平均体积含水量, a 、 b 、 c 为待定参数.

用 Q_{10} 值来表示土壤呼吸速率对温度变化的敏感程度,并采用指数关系模型进行计算^[15]:

$$R_s = a \cdot e^{bt}, \quad Q_{10} = e^{10b} \tag{2}$$

式中, a 、 b 为待定参数.

将每次测定的数据利用 EXCEL 2003 进行整理并分析作图,应用 SPSS11.0 统计软件分析土壤呼吸与各影响因子之间的关系.

2 结果与分析

2.1 环境变量变化过程

降水和温度是影响土壤呼吸的主要因子,本年度测定期的降水量为 425 mm. 不同土地利用方式下土壤 5 cm 温度和大气温度变化趋势基本相同,处理之间有一定区别,但是总体趋势一致. 而土壤 0~6 cm 湿度受降水影响明显,波动较大,试验后期温度呈降低趋势,但是土壤水分含量高于试验前期,主要受降水的影响(图 1).

2.2 不同土地利用方式下土壤呼吸年内变化

不同土地利用方式的土壤呼吸速率变化与温度变化趋势基本一致(图 1、2),土壤呼吸速率在 8 月达到最大值(图 2),而土壤 5cm 温度在 7 月达到最大值,8 月下降,土壤水分 8 月达到全年最高(图 1),主要是 8 月较多的阴雨天气,影响了土壤温度. 这些结果表明土壤呼吸受土壤温度和土壤水分的共同影响. 裸地、农地、苜蓿地、柠条地、撂荒地、长芒草地、荒草地、退化苜蓿地、坡地苜蓿地、坡地撂荒地、坡地农地、梯田农地的土壤呼吸速率季节变化范围分别为 0.32~0.82、0.41~2.83、0.74~2.81、0.76~3.07、0.67~2.79、0.51~2.12、0.56~2.05、0.59~1.66、0.42~2.09、0.31~1.86、0.32~1.93 和 0.41~3.17 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,土壤呼吸速率的季节变化幅度(最大值与最小值之差除以平均值)以农地(167%~203%)最大,依次为撂荒地(117%~154%)、柠条地(134%)、长芒草地(129%)、苜蓿地(119%~120%)、裸地(94%),最小是退化苜蓿地(92%).

方差分析结果(表 3)表明,土壤 CO₂ 平均释放速率顺序依次为:苜蓿地>柠条地>撂荒地>坡地苜蓿地>梯田农地>荒草地>长芒草地>农地>退化苜蓿地>坡地撂荒地>坡地农地>裸地,其中裸地土壤呼吸显著低于其他土地利用类型($p < 0.05$),这与裸地内无植物生长有关.

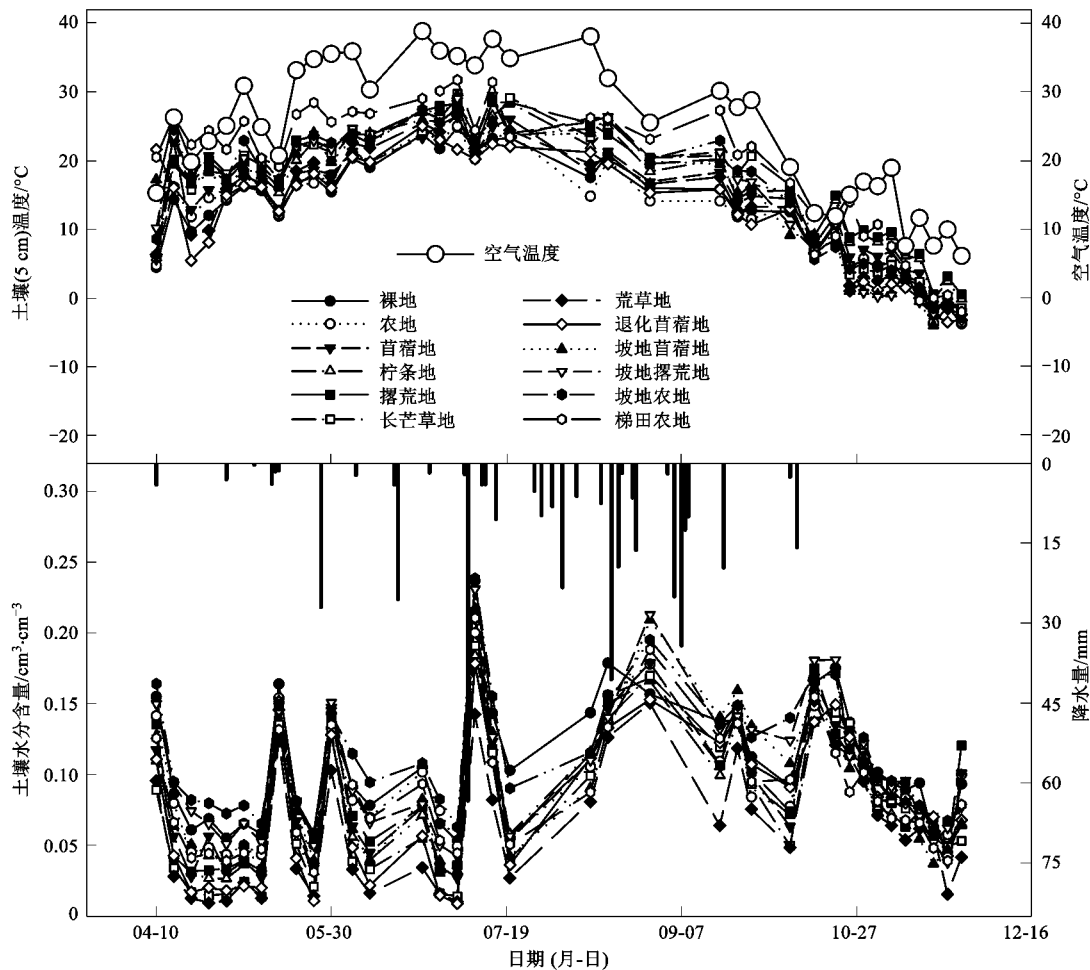


图 1 研究区内降水量、气温、土壤温度和湿度变化

Fig. 1 Precipitation, air temperature, soil temperature at the depth of 5 cm and soil water content of 0-6 cm during the study period

经方差分析(表 3),生长季节前期 4、5、6 月,苜蓿地的土壤呼吸速率明显高于其他土地类型($p < 0.05$). 植物生长旺盛期,不同土地利用类型间土壤呼吸速率差异显著,8 月裸地仅为 $0.82 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,而农地可达到 $3.17 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,原因是 8 月农地种植的谷子达到生长旺盛期,根系生长旺盛,土壤温度和水分处于最佳状态,所以土壤呼吸速率达到全年最高. 生长季节后期 9、10 月,柠条地与其他土地利用方式间差异显著. 11 月柠条地的 CO_2 平均释放速率可达 $0.76 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,而裸地仅有 $0.32 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$. 方差分析和多重比较结果发现,退耕还草还灌(苜蓿地、柠条地和坡地苜蓿地)显著地改变了土壤呼吸强度,耕地撂荒没有显著改变土壤呼吸,可能是撂荒地植物属于自然演替生长,没有种植柠条和苜蓿那样显著地改变土壤的水热循环过程.

2.3 土壤呼吸的温度敏感性状况

土壤呼吸过程对温度变化的敏感性通常用 Q_{10} 来描述, Q_{10} 是温度增加 10°C 所造成的呼吸速率改变的商. 当温度和土壤呼吸之间的关系用一个指数函数拟合时, Q_{10} 就可以通过式(2)中的系数 b 计算出来. 陆地生态系统土壤呼吸的 Q_{10} 值变化在 $1.3 \sim 5.6$ 之间,这取决于生态系统的类型及其地理分布^[3].

为与其它相关研究对比分析温度敏感性 Q_{10} ,本研究对土壤呼吸速率与土壤温度进行指数关系分析,结果表明温度对土壤呼吸有极显著的影响(表 4),土壤呼吸速率均随土壤温度的增加而呈上升趋势(图 3),指数模型能够较好地描述他们之间的这种关系(R^2 为 $0.471 \sim 0.729$, $p < 0.001$), Q_{10} 值均在合理范围之内,整体处于较低水平,农地 Q_{10} 最高,柠条地和裸地最低,其它土地利用类型之间 Q_{10} 差异不大. 模型在低温时的拟合效果明显好于高温时的拟合效果,温度较低时,所有土地利用类型土壤呼

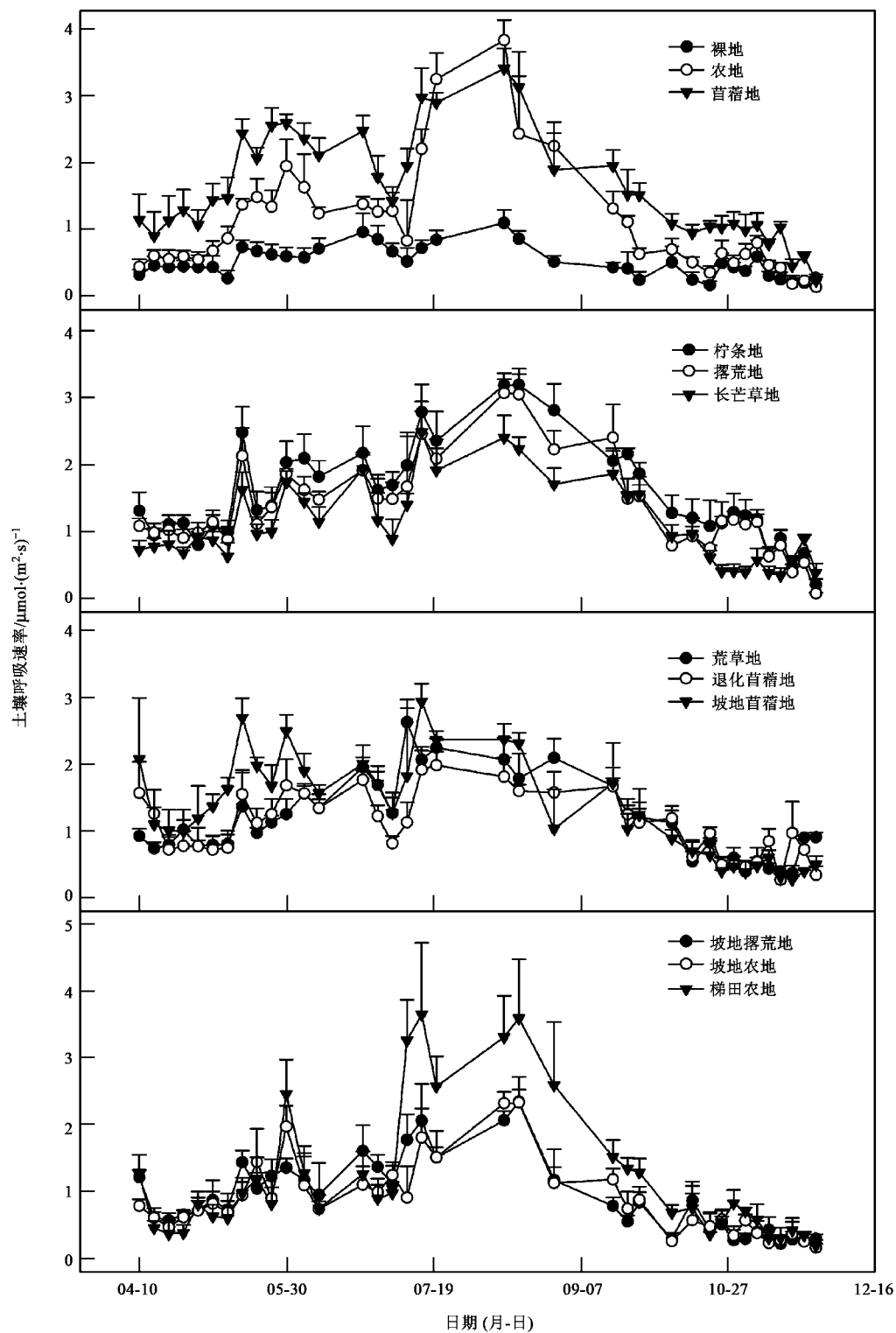


图 2 不同土地利用方式下土壤呼吸速率的季节变化比较

Fig.2 Seasonal dynamic changes of soil respiration rate under different land use patterns

吸速率的散点聚集在拟合曲线附近,随着温度的升高,土壤呼吸速率的散点却渐渐发散开来^[16].由此可以说,温度相对较低时,根系和土壤微生物的代谢活动主要受到温度变化的控制;温度较高时,温度

不再是唯一限制因子,根系和土壤微生物的生命活动很容易受到其它因素的影响和制约^[15,17],特别是黄土高原水蚀风蚀交错区这种脆弱的生态环境条件,水热同季,但降水量变异很大.土地利用类型的

表 3 不同土地利用方式土壤呼吸速率季节变化方差分析¹⁾/ $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$

Table 3 Seasonal variance of soil respiration rate under different land use patterns / $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$									
土地利用类型	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	均值
裸地	0.44	0.56	0.77	0.69	0.82	0.36	0.37	0.32	0.54
	Ce	BCe	ABf	ABg	Ad	Cf	Ce	Ce	h
农地	0.57	1.28	1.38	1.38	2.83	1.02	0.54	0.41	1.24
	Dde	Ccd	Ccd	Bbcde	Aab	Cede	Dde	Dde	cde
苜蓿地	1.10	2.09	2.18	2.31	2.81	1.66	1.04	0.74	1.74
	CDb	Ba	Ba	Bab	Aab	Cbc	CDab	Dabc	a
柠条地	1.00	1.55	1.93	2.21	3.07	2.03	1.20	0.76	1.72
	Eb	Cb	Bab	Babc	Aa	BCa	Da	DEa	a
撂荒地	0.97	1.42	1.63	1.93	2.79	1.81	0.96	0.67	1.52
	Dbe	Cbc	BCbc	Bbcde	Aab	BCb	Dbe	Dab	abc
长芒草地	0.80	1.14	1.43	1.67	2.12	1.65	0.67	0.51	1.25
	Dbed	Cd	BCcd	Bedef	Abc	BCb	Dcd	Dd	def
荒草地	0.83	1.05	1.63	2.05	1.98	1.37	0.70	0.56	1.27
	DEbed	CDd	Bbc	Abcd	ABc	Cbed	DEcd	Ecd	cde
退化苜蓿地	0.88	1.17	1.47	1.45	1.66	1.34	0.75	0.59	1.16
	CDEb	BCDd	ABcd	Aef	ABc	Cbed	Dcd	Dbed	efg
坡地苜蓿地	1.07	1.97	1.79	2.09	1.90	1.32	0.61	0.42	1.40
	BCa	Aa	ABb	Abcd	ABc	Cbed	Dcd	Dde	ab
坡地撂荒地	0.64	1.11	1.28	1.62	1.86	0.73	0.48	0.33	1.00
	Cbcde	Bd	Bde	Adef	Ac	Ce	De	De	fg
坡地农地	0.60	1.13	0.98	1.37	1.93	0.94	0.45	0.32	0.97
	DEde	BCd	CDef	Bf	Ac	CDde	Ee	Ee	g
梯田农地	0.50	1.11	1.05	2.62	3.17	1.38	0.63	0.41	1.36
	BCcde	BCd	BCef	Aa	Aa	Bb	BCcd	Cde	bed

1) 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的土壤呼吸速率差异不显著($p < 0.05$)

表 4 不同土地利用类型土壤呼吸速率与温度之间的关系以及 Q_{10} 值¹⁾

Table 4 Relationship between soil respiration rate and temperature as well as Q_{10} values under different land use patterns

土地类型	关系方程	相关系数 R^2	Q_{10} 值
裸地	$R_s = 0.197e^{0.039t}$	0.623 **	1.48
农地	$R_s = 0.220e^{0.062t}$	0.590 **	1.86
苜蓿地	$R_s = 0.470e^{0.047t}$	0.713 **	1.60
柠条地	$R_s = 0.559e^{0.038t}$	0.532 **	1.46
撂荒地	$R_s = 0.447e^{0.039t}$	0.576 **	1.48
长芒草地	$R_s = 0.385e^{0.040t}$	0.578 **	1.49
荒草地	$R_s = 0.442e^{0.040t}$	0.611 **	1.49
退化苜蓿地	$R_s = 0.456e^{0.042t}$	0.591 **	1.52
坡地苜蓿地	$R_s = 0.317e^{0.048t}$	0.729 **	1.62
坡地撂荒地	$R_s = 0.248e^{0.041t}$	0.583 **	1.51
坡地农地	$R_s = 0.221e^{0.043t}$	0.656 **	1.54
梯田农地	$R_s = 0.253e^{0.044t}$	0.471 **	1.55

1) 测定次数 $n = 37$, ** 表示 $p < 0.001$

改变会显著改变土壤呼吸的关键生物化学过程,从而最终影响土壤碳通量.

2.4 不同土地利用方式下土壤呼吸速率对温度和

湿度的响应

多数研究表明,土壤呼吸速率的变化受温度与水分的共同调控^[18],特别是在野外条件下的土壤呼吸测定,所测定的土壤呼吸实际上是包括土壤温度和土壤水分在内的众多因子联合作用的结果,每个因子都以各自独特的方式影响土壤呼吸.土壤呼吸与土壤温度和土壤水分的偏相关系数均大于土壤呼吸与土壤温度、水分的单因子的关系系数^[19],说明土壤呼吸受到二者的共同作用.在土壤水分不成为限制因素的条件下,土壤呼吸和土壤温度成正相关,描述它们之间关系最为普遍的是指数函数^[20],而土壤水分与土壤呼吸之间的关系比较复杂^[21].目前有关土壤呼吸与土壤温度或土壤湿度的单因素关系模型报道较多,而揭示土壤温度和土壤湿度与土壤呼吸关系的双变量模型较少^[13,22,23].本研究采用双因素模型 $R_s = a \cdot e^{bt} \cdot W^c$ 对土壤温度和土壤湿度与土壤呼吸的关系进行回归分析,结果表明土壤温度和水分共同解释了土壤呼吸速率季节变化的 40% ~

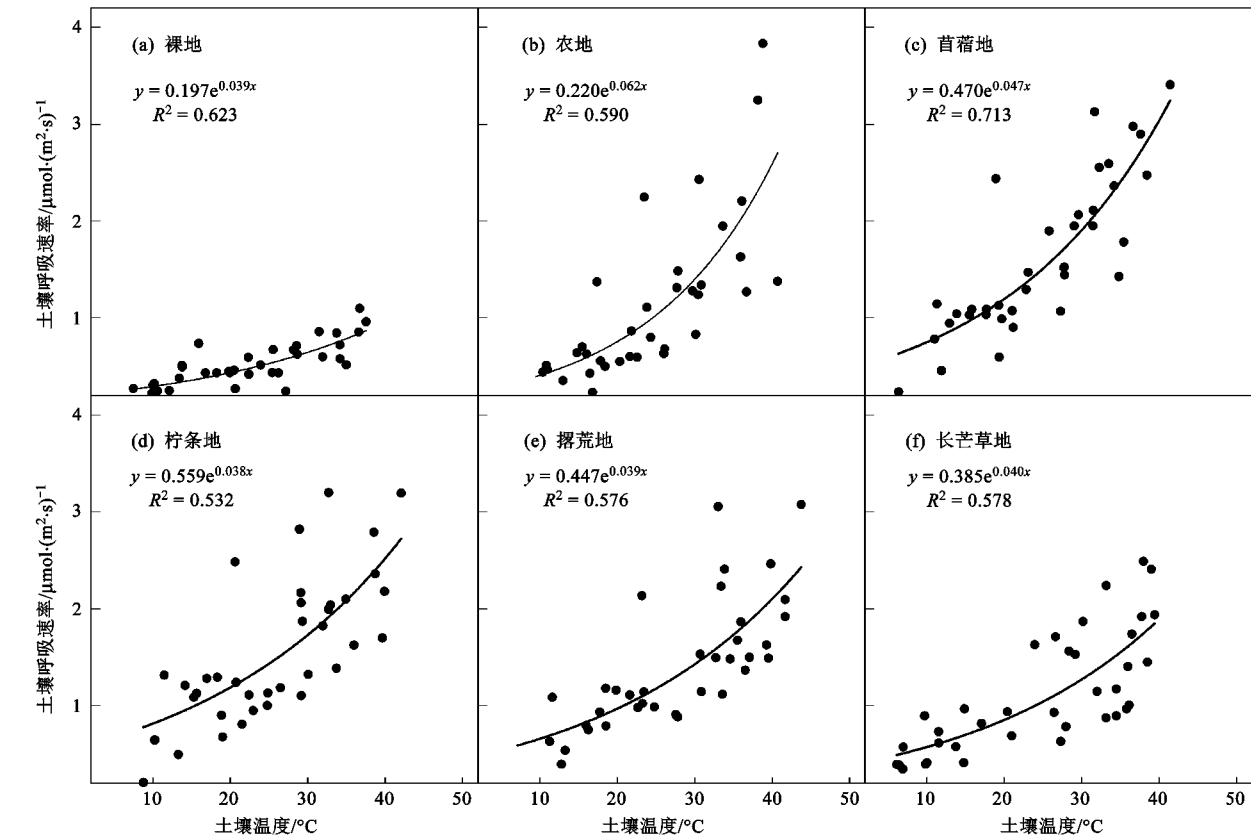


图3 典型土地利用类型土壤呼吸速率与土壤温度关系

Fig. 3 Relationship between soil respiration rate and air temperature under typical land use patterns

83% (表5),说明本地区不同土地利用方式下的土壤呼吸速率主要受到土壤温度和湿度的共同影响。

表5 土壤呼吸(R_s)与土壤温度(t)和湿度(W)关系模型

Table 5 Relation model of soil respiration with soil temperature and moisture

土地利用类型	参数 a	参数 b	参数 c	相关系数 R^2
裸地	0.231 1	0.044 9	0.072 0	0.541 4 **
农地	0.239 1	0.060 9	0.301 7	0.399 1 **
苜蓿地	0.402 9	0.054 7	0.263 5	0.684 5 **
柠条地	0.272 9	0.048 2	0.449 4	0.827 3 **
撂荒地	0.216 1	0.051 5	0.438 7	0.754 1 **
长芒草地	0.205 8	0.058 5	0.338 0	0.802 2 **
荒草地	0.314 2	0.058 4	0.252 7	0.705 4 **
退化苜蓿地	0.417 8	0.047 0	0.171 7	0.730 0 **
坡地苜蓿地	0.338 7	0.052 9	0.222 8	0.684 3 **
坡地撂荒地	0.105 3	0.067 6	0.404 9	0.759 9 **
坡地农地	0.114 3	0.062 6	0.365 4	0.615 2 **
梯田农地	0.029 5	0.070 5	0.981 0	0.665 4 **

在本研究区域内,土壤温度和土壤水分对不同土地利用方式下的土壤呼吸均有极显著影响(表5),说明土壤温度和水分是土壤呼吸的重要影响因

素. 此双因素模型中,参数 b 称为温度敏感性因子,参数 c 称为湿度敏感性因子,农地的温度和湿度敏感性因子均高于其它土地类型,表明人为扰动强烈的旱作农地土壤呼吸对温度和湿度的变化敏感,这也是导致农地土壤呼吸速率变幅最大的原因之一,同时也预示着未来气温升高或降雨量减少将对雨养旱作农地的土壤呼吸产生更大的影响^[14]. 裸地因为没有植物生长,水热敏感性最差;退化苜蓿地因为植被的严重退化,对水热条件也相对不敏感,预示着未来温度和水分的变化对这两类土地利用类型的土壤呼吸的影响也相对较弱。

2.5 土壤养分与土壤呼吸

土壤养分也是影响土壤呼吸的重要因素,有研究认为,影响土壤呼吸的主要理化因子是土壤持水量、有机质,速效氮等^[24]. 在温度和水分相对稳定的情况下,土壤有机碳含量是决定土壤 CO_2 释放通量变化的重要因素^[25,26]. 土壤有机质是微生物进行分解活动排放 CO_2 的物质基础,也是陆地生态系统中的最大的碳库,因而对土壤呼吸至关重要^[27]. 本研究表明土壤呼吸与土壤有机碳含量存在正相关关

系,这和 Maestre 等^[28]的结果一致.且与土壤速效 K 含量呈极显著正相关关系,与全 N 也有一定的正相关关系,但未达显著水平(表 6).进一步分析养分含量和各月呼吸强度之间的关系显示:土壤呼吸和土壤有机质及全氮在 7 月与 8 月关系密切,这是因为这 2 个月的温度水分条件相对较好,养分条件成为土壤呼吸的主要限制因子,随着有机质含量或者全氮含量的增加,土壤呼吸强度增加.速效钾在植物生长的前期,水分温度均处于较低水平时,也限制了土

壤呼吸强度.而土壤的铵态氮含量在雨季(7~9 月)之外和呼吸之间有显著甚至极显著的负相关关系,说明在温度水分条件不优越的条件下,土壤铵态氮的含量会抑制土壤呼吸强度,原因有待进一步深入研究.土壤碳酸钙含量尽管和土壤呼吸之间的关系没有达到显著水平,但是雨季较高的负相关系数也显示,本区无机碳酸盐对土壤碳通量也会发生影响,而磷素、硝态氮含量和容重并没有显著影响土壤呼吸.

表 6 试验区土壤因子与土壤呼吸的相关性分析¹⁾

Table 6 Correlation analysis between soil respiration and soil properties at the study site

月份	容重	有机质	全氮	C/N	全磷	速效磷	速效钾	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	碳酸钙
4	-0.156	0.008	-0.023	0.114	-0.286	-0.566	0.657 *	-0.849 **	-0.314	-0.003
5	-0.430	0.336	0.339	0.236	0.075	-0.209	0.635 *	-0.584 *	0.165	0.139
6	-0.125	0.095	0.091	0.134	-0.355	-0.538	0.495	-0.788 **	-0.273	-0.106
7	-0.143	0.675 *	0.545	0.555	0.104	0.187	0.229	-0.205	0.161	-0.363
8	-0.413	0.627 *	0.694 *	0.231	0.113	0.292	-0.053	-0.109	0.008	-0.238
9	-0.143	0.234	0.252	0.081	-0.244	-0.199	0.224	-0.558	-0.404	-0.337
10	-0.250	0.258	0.314	0.087	-0.297	-0.310	0.246	-0.650 *	-0.455	-0.111
11	-0.112	0.105	0.196	-0.035	-0.460	-0.434	0.190	-0.658 *	-0.510	-0.154
年均值	-0.272	0.358 *	0.300	0.315	-0.001	-0.145	0.453 **	-0.306	0.011	-0.128

1) ** 表示 $p < 0.01$, * 表示 $p < 0.05$

3 结论

(1)不同土地利用方式下的土壤呼吸速率季节变化与温度变化趋势基本一致,土壤呼吸速率在 8 月达到最大值,土壤 5cm 温度在 7 月达到最大值,8 月下降,而土壤水分 8 月达到全年最高,黄土高原水蚀风蚀交错区脆弱生态环境条件下土壤呼吸同样受土壤温度和水分的影响.

(2)土壤呼吸速率随大气温度的增加而呈上升趋势,指数模型能够较好地描述他们之间的这种关系.采用双因素模型对土壤温度和土壤水分与土壤呼吸的关系进行回归分析($p < 0.05$),土壤温度和土壤水分对不同土地利用方式下的土壤呼吸均有显著影响.

(3)干旱半干旱地区土壤贫瘠,土壤呼吸和土壤有机质及速效 K 含量有显著正相关关系;有机质和) 影响土壤呼吸主要发生在水热条件好的季节,而速效钾主要在生长季节的初期影响土壤呼吸,铵态氮在水热条件差的季节也显著影响土壤呼吸强度.

参考文献:

[1] John S K,Paul J H,Emily B,*et al.* A multiyear synthesis of soil respiration responses to elevated atmospheric CO₂ from forest

FACE experiments [J]. *Global Change Biology*,2004,**10**:1027-1042.

[2] 骆亦其,周旭辉. 土壤呼吸与环境[M]. 北京:高等教育出版社,2007. 19-20.

[3] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tell Us*,1992,**44B**:81-99.

[4] Raich J W, Tufekciogul A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls [J]. *Biogeochemistry*,2000,**48**:71-90.

[5] Dave R, Kellman L, Beltrami H. Are soil respiration processes geographically invariant? [R]. *Canadian Geophysical Union Meeting*,2002. 18-21.

[6] 齐丽彬,樊军,邵明安,等. 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分析[J]. *生态学报*,2008,**28**(12):1-9.

[7] Dilustro J J, Collins B, Duncan L, *et al.* Moisture and soil texture effects on soil CO₂ efflux components in southeastern mixed pine forests[J]. *Forest Ecology and Management*,2005, **204**:85-95.

[8] Oomes M J M, Kuikman P J, Jacobs F H H. Nitrogen availability and uptake by grassland in mesocosms at two water levels and two water qualities[J]. *Plant and Soil*,1997,**192**(2):249-259.

[9] Gallardo A, Schlesinger W H. Carbon and nitrogen of soil microbial biomass in desert ecosystems [J]. *Biogeochemistry*, 1992,**18**:1-17.

[10] 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.

[11] 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[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2006, **15**(2):85-92.

[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 [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006, **30**(6):887-893.

[13] 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[J]. *生态学报*, 2005, **25**(7):1684-1690.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 不同土地利用下土壤呼吸温度敏感性差异及影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(11):1537-1542.

[18] Davidson E A, Verchot L V, Cattanio J H, *et al.* Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern [J]. *Amazonia Biochemistry*, 2000, **48**:53-69.

[19] 李洪建, 王孟本. 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, 2008.

[20] Xu L K, Dennis D B. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over Mediterranean annual grassland in California[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, **123**:79-86.

[21] Davidson E A, Verchot L V, Cattanio J H, *et al.* Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia[J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**:53-69.

[22] Schlentner R E, Cleve K V. Relationships between CO₂ evolution from soil, substrate temperature, and substrate moisture in four mature forest types in interior Alaska [J]. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestier*, 1985, **15**:97-106.

[23] Qi Y, Xu M. Separating the effects of moisture on soil CO₂ efflux in a coniferous forest in the Sierra Nevada mountains[J]. *Plant and Soil*, 2001, **237**(1):15-23.

[24] 孙铁, 魏晶, 吴钢, 等. 长白山高山冻原土壤呼吸及其影响因素分析[J]. *生态学杂志*, 2005, **24**(6):603-606.

[25] Fang C, Moncrieff J B. A model for soil CO₂ production and transport: model development [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, **95**:225-236.

[26] Priess J A, Koning G H, Veldkam A. Assessment of interactions between land use change and carbon and nutrient fluxes in Ecuador [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2001, **85**:269-276.

[27] 朱宏, 赵成义, 李君, 等. 干旱区荒漠灌木林地土壤呼吸及其影响因素分析[J]. *干旱区地理*, 2006, **29**(6):856-860.

[28] Maestre F T, Cortina J F. Small-scale spatial variation in soil CO₂ efflux in a Mediterranean semiarid steppe [J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, **23**:199-209.