

# 黄土丘陵区不同土地利用类型土壤呼吸及其与温度和水分的关系

马涛<sup>1,2</sup>, 贾志清<sup>1</sup>, 周波<sup>2,3</sup>, 张峰<sup>2</sup>, 董彦丽<sup>2</sup>, 陈天林<sup>4</sup>

(1. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091; 2. 甘肃省水土保持科学研究所, 甘肃兰州 730020; 3. 西安理工大学, 陕西西安 710048; 4. 甘肃省水利厅水土保持局, 甘肃兰州 730000)

**摘要:** [目的] 分析黄土丘陵区不同土地利用类型土壤呼吸速率释放特征, 为揭示该区域不同立地类型 C 循环特征奠定基础。[方法] 采用 LI-8100 土壤碳通量测量系统于 2014 年 11 月至 2015 年 7 月, 对标准径流小区红豆草、苜蓿、撂荒地和梯田苜蓿、沙打旺 5 种地类土壤呼吸速率及其地表温度、土壤温度 (5 cm)、土壤含水量进行观测。[结果] ①土壤呼吸速率日变化表现为昼高夜低的单峰型曲线, 与温度的变化趋势一致, 年均土壤呼吸速率表现为: 沙打旺(梯田)  $2.27 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) >$  红豆草  $1.79 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) >$  苜蓿  $1.77 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) >$  苜蓿(梯田)  $1.62 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) >$  撂荒地  $0.77 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; ②土壤呼吸速率呈现明显的季节变化特征, 夏季最高, 春季和秋季次之, 冬季最低。夏季与春、秋、冬 3 季土壤呼吸速率差异显著 ( $p < 0.05$ ); ③土壤呼吸速率与地表温度和土壤温度 (5 cm) 的相关性均达到显著水平 ( $p < 0.05$ )。除撂荒地外, 各样地土壤呼吸速率与土壤温度 (5 cm) 的相关度均高于其与地表温度的相关度, 各样地土壤温度 (5 cm)  $Q_{10}$  值介于 1.94~3.00; ④土壤呼吸速率与土壤含水量之间线性相关不显著 ( $p > 0.05$ ), 但与土壤温度 (5 cm) 和土壤含水量的交互作用显著相关 ( $p < 0.01$ )。[结论] 梯田土壤呼吸速率总体表现优于坡地, 裸露地表在恢复植被的过程中, 土壤环境质量显著提升。

**关键词:** 土壤呼吸; 温度; 土壤水分; 土地利用类型; 黄土丘陵区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)01-0082-07

中图分类号: S154, Q948

**文献参数:** 马涛, 贾志清, 周波, 等. 黄土丘陵区不同土地利用类型土壤呼吸及其与温度和水分的关系 [J]. 水土保持通报, 2018, 38(1): 82-89. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.01.014. Ma Tao, Jia Zhiqing, Zhou Bo, et al. Soil respiration of different land uses and its relation to water and temperature in hilly area of Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(1): 82-89.

## Soil Respiration of Different Land Uses and Its Relation to Water and Temperature in Hilly Area of Loess Plateau

MA Tao<sup>1,2</sup>, JIA Zhiqing<sup>1</sup>, ZHOU Bo<sup>2,3</sup>, ZHANG Feng<sup>2</sup>, DONG Yanli<sup>2</sup>, CHEN Tianlin<sup>4</sup>

(1. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091,

China; 2. Soil and Water Conservation Institute of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730020,

China; 3. Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 4. The Soil and Water

Conservation Bureau of Water Resources Department of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** [Objective] The characteristics of soil respiration rates were studied in different land use types of the hilly region in the Loess Plateau in order to investigate the features of the carbon cycle of different land use types. [Methods] Soil carbon flux of five land use types such as *Onobrychis viciifolia*, *Medicago sativa*, abandoned land, *M. sativa* with terraces and *Astragalus adsurgens* in standard runoff plots were monitored by LI-8 100 system, the surface temperature, soil temperature at 5 cm and soil moisture were monitored. [Results] ① The diurnal variation of soil respiration rates showed peak curves with higher in the day time and lower in the night time, which showed the same trend with temperature. The annual soil respiration rates were as follows: *A. adsurgens* (terraced) [ $2.27 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]  $>$  *O. viciaefolia* [ $1.79 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]  $>$

收稿日期: 2017-06-23

修回日期: 2017-07-26

资助项目: 甘肃省科技支撑计划基金“黄土丘陵区沟壑区坡耕地、梯田土壤呼吸特征研究”(1204FKCA069); 甘肃省水利科研计划项目“陇中坡改梯土壤呼吸特征及水土保持优化技术研究”(2014-223-6)

第一作者: 马涛(1983—), 男(满族), 甘肃省天水市人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事半干旱区水土保持与土壤碳循环研究。E-mail: 27419389@qq.com.

通讯作者: 贾志清(1968—), 女(汉族), 内蒙古赤峰市人, 博士, 研究员。主要从事荒漠化防治与水土保持工作。E-mail: jiazhiqing@caf.ac.cn.

*M. sativa* [ $1.77 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] $>M. sativa$  (terraced) [ $1.62 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] $>$ abandoned land [ $0.77 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]. ② Soil respiration rates showed obvious seasonal variation, and the highest appeared in summer, followed by spring and summer, the lowest was in winter. There were significant differences of soil respiration rates between summer and other seasons ( $p < 0.05$ ). ③ The correlation between soil respiration rates, surface and soil temperature were significant in different land use types ( $p < 0.05$ ). The correlation between soil respiration rate and soil temperature was higher than that of surface temperature in all the land use types except abandoned land, soil temperature values (5 cm)  $Q_{10}$  of each site varied from 1.94 to 3.00. ④ No significant linear relationship was found between soil respiration rates and soil moisture ( $p > 0.05$ ), whereas significant correlation was exhibited between soil respiration rate and the interactions of soil temperature with soil moisture ( $p < 0.01$ ). [Conclusion] Soil respiration rates of terrace are better than slope land, and the soil quality was significantly improved by vegetation restoration.

**Keywords:** soil respiration; temperature; soil moisture; land use types; the hilly area of the Loess Plateau

陆地生态系统在全球碳平衡和碳循环中起着至关重要的作用。一方面,植被通过光合作用吸收大量的碳进入陆地生态系统;另一方面,土壤中的碳通过呼吸作用又以  $\text{CO}_2$  的形式释放到大气中。这两条途径是全球碳循环的重要环节。土壤呼吸作为陆地生态系统碳循环的第二大通量,是导致全球气候变化的关键性生态学过程<sup>[1]</sup>。每年因土壤呼吸产生的  $\text{CO}_2$  约占大气中  $\text{CO}_2$  总量的 10%<sup>[2]</sup>。因此,土壤呼吸速率的微小变化都可能引起大气中  $\text{CO}_2$  浓度的明显改变。在研究全球尺度的碳收支平衡时,土壤  $\text{CO}_2$  的释放特征引起了人们极大关注。中国“十三五”规划提出推动低碳循环发展,主动控制碳排放,牢固树立绿色的生产方式和生活方式,使低碳水平上升,生态环境质量总体改善。鉴于此,对陆地生态系统土壤呼吸的研究将是今后生态学研究的重要命题。

黄土丘陵沟壑区属典型的生态脆弱区,特有的地形地貌、土壤和气候条件使该区水土流失问题突出,严重制约了区域生态经济可持续发展。20 世纪 90 年代以来,开展的以退耕还林(草)为主的植被恢复工程遏制了当地严重的水土流失,也改变了生态系统的碳水循环。目前,在该区开展的土壤呼吸研究多以森林<sup>[3-5]</sup>和农田<sup>[6]</sup>生态系统为主,也有对坡面侵蚀程度<sup>[7]</sup>和坡位<sup>[8-9]</sup>土壤呼吸研究的报道,对草地生态系统而言主要以探寻退耕后植被恢复、演替过程中土壤呼吸变化规律<sup>[10-11]</sup>为主,对单一牧草(苜蓿)不同刈割时间处理下的土壤呼吸差异研究<sup>[12]</sup>也见有报道。

本研究拟选取兰州市小青山水土保持科技示范园 5 种土地利用类型,分析土壤呼吸日、季变化特征及其与温度、水分的关系,以期为揭示本区域不同立地类型 C 循环特征奠定基础,为当地土地利用与管理提供科学依据。

## 1 研究区概况

兰州市小青山水土保持科技示范园位于甘肃省兰州市,地理位置  $103^{\circ}56'37''\text{E}$ ,  $36^{\circ}01'40''\text{N}$ ,属黄土

丘陵沟壑区第 V 副区,地貌类型以梁状黄土丘陵为主,地势西南高,东北低,海拔 1 544.5~1 847.5 m。研究区属北温带半干旱大陆性气候,年均降水量 329.7 mm,蒸发量 1 377.2 mm,年平均气温  $6.6^{\circ}\text{C}$ ,平均风速 0.9 m/s,最大冻土深 103.0 cm;土壤类型以灰钙土为主,有机质含量 0.5%~1.5%,pH 值为 8~9,土壤容重 1.1~1.4;植被属半干旱草原植被类型,天然植被稀疏,以人工植被为主,主要树种有松、柏、槐、柳、云杉、月季、牡丹、榆叶梅、紫叶李、连翘等;草种有早熟禾、黑麦草等。

## 2 材料与方法

选取科技示范园标准径流小区红豆草、苜蓿、撂荒地,梯田苜蓿、沙打旺共 5 个样地,径流小区和梯田修建于 2011 年,径流小区坡度  $35^{\circ}$ 。每个样地设置 3 个测量环作为重复,径流小区样地测量环按 S 型布置,梯田测量环随机布置,进行土壤呼吸速率测定。将 PVC 土壤测量环(内径 20 cm)于测定前 1 d 打入土中 6—8 cm,出露地表 5—6 cm,将测量环内植被自土壤表层剪除干净,尽量做到不破坏地表原状土。测定时每个测量环分别测量 2 次,取平均值计为测量时间点该环的土壤呼吸速率值,3 个测量环测量结果的平均值记为测量时间点测量样地的土壤呼吸速率。每个测定周期 24 h,9:00 开始,次日 7:00 结束。具体为:9:00—17:00 每 2 h 测定 1 次,17:00 至次日 7:00 每 3 h 测定 1 次,共计 10 次。季节变化测定为秋季(2014 年 11 月)、冬季(2015 年 1 月)、春季(2015 年 3 月)、夏季(2015 年 7 月)。

### 2.1 土壤呼吸速率测定

土壤呼吸速率采用 LI-8100 土壤碳通量测量系统测定,呼吸室为便携式呼吸室 8 100~103。测定土壤碳通量的同时,用 LI-8100 自带的温度探针和土壤水分探头同步测定观测点附近土壤温度(5 cm)和土壤含水量,利用气温计同步观测地表温度。

### 2.2 数据统计与分析

试验数据用 Excel 2007 整理分析并绘图,采用 SPSS 21.0 完成相关性分析,检验土壤碳通量与温度、土壤含水量之间单因素和双因素的拟合程度。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤呼吸速率日变化

各样地土壤呼吸速率与温度日变化见图 1。

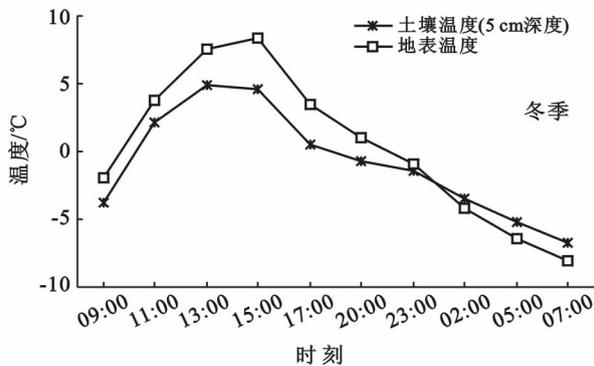
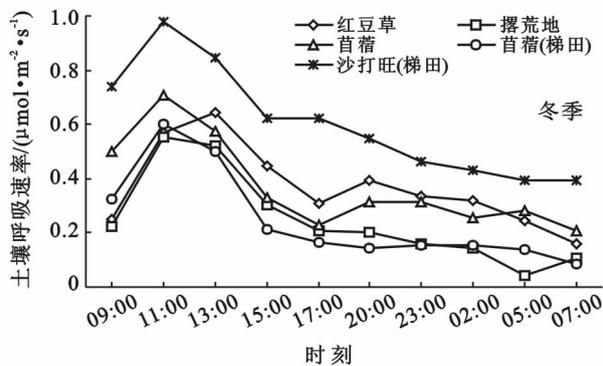
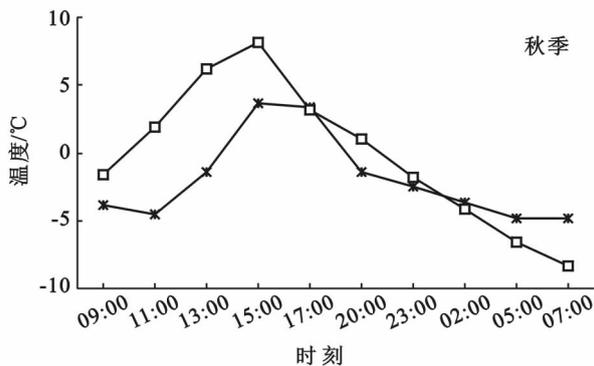
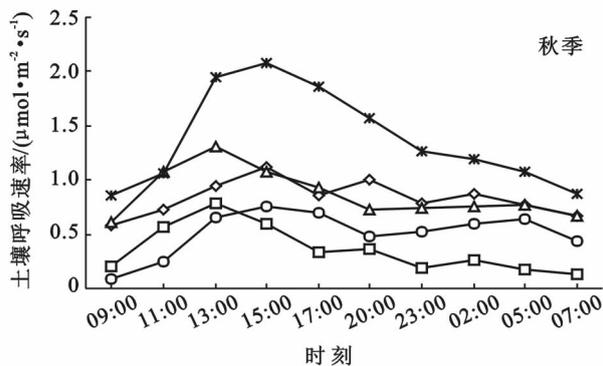
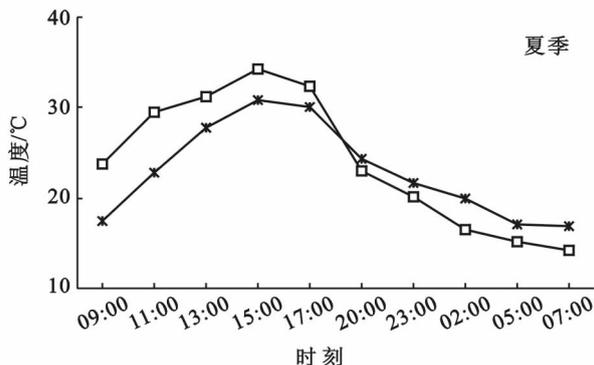
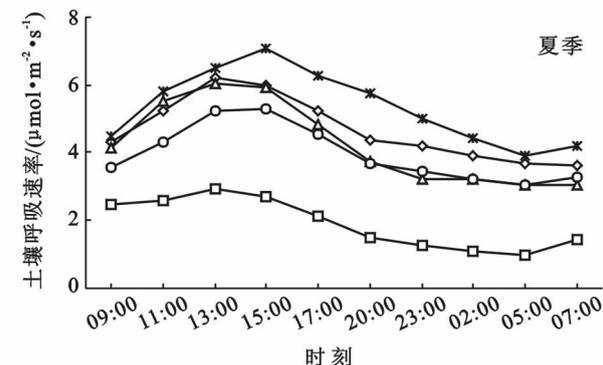
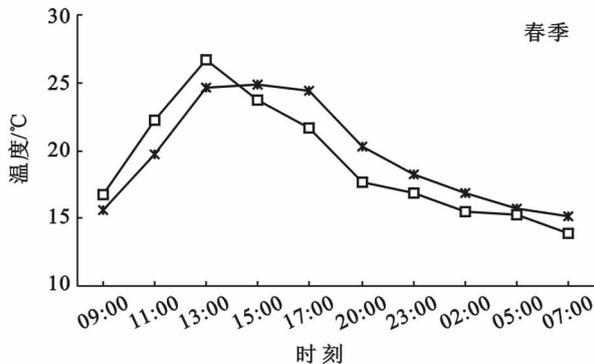
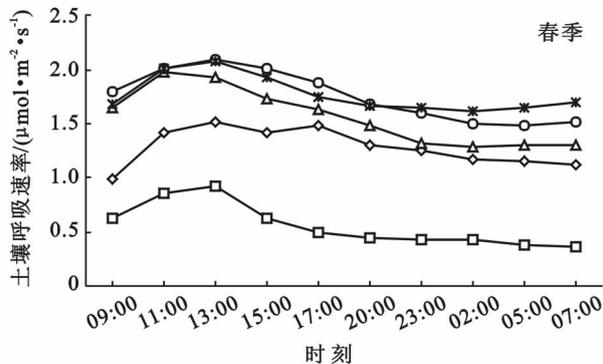


图 1 土壤呼吸速率与温度日变化特征

由图 1 可知,春、夏、秋、冬 4 季各样地土壤呼吸速率日变化规律基本一致,均表现为昼高夜低的单峰

型曲线,与温度的变化趋势一致。自上午 9 : 00 开始,土壤呼吸速率逐渐增大,冬季在 11 : 00 达到最大

值,春、夏、秋 3 季在 13:00—15:00 达到最大值,之后土壤呼吸速率逐渐减小,次日 5:00—7:00 出现最小值。可以看出,土壤呼吸速率在 4 季的日变化趋势基本与温度保持同步,仅在冬季呼吸速率最大值较温度提前出现。相比地表温度,土壤温度(5 cm)变化平缓、稳定。

春季各样地日均土壤呼吸速率大小排序为:沙打旺(梯田)>苜蓿(梯田)>苜蓿>红豆草>撂荒地,其值分别为 1.77, 1.76, 1.56, 1.28, 0.56  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。经多重分析,沙打旺(梯田)与苜蓿(梯田)、红豆草与苜蓿之间差异不显著( $p>0.05$ ),其他地类两两之间差异均显著( $p<0.05$ )。土壤呼吸速率日变幅大小依次为撂荒地>苜蓿>红豆草>苜蓿(梯田)>沙打旺(梯田),其值分别为 99.78%, 44.34%, 40.98%, 35.02%和 25.40%。

夏季日均土壤呼吸速率表现为沙打旺(梯田)最大,其值为 5.34  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;撂荒地最小,其值为 1.91  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。多重分析比较可知,苜蓿(梯田)与苜蓿之间差异不显著( $p>0.05$ ),其他地类之间差异均显著( $p<0.05$ )。土壤呼吸速率日变幅在 55.30%~100.75%,表现为撂荒地最大,红豆草最小。

秋季各样地日均土壤呼吸速率表现为:沙打旺(梯田)>苜蓿>红豆草>苜蓿(梯田)>撂荒地,其值分别为 1.38, 0.87, 0.83, 0.51, 0.36  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。经多重分析比较,苜蓿与红豆草、撂荒地均与苜蓿(梯田)之间差异不显著( $p>0.05$ ),其他地类之间差异显著( $p<0.05$ )。土壤呼吸速率日变幅表现为撂荒地>苜蓿(梯田)>沙打旺(梯田)>苜蓿>红豆草,其值分别为 183.17%, 132.13%, 88.59%, 81.17%和 64.52%。

冬季各样地日均土壤呼吸速率在 0.25~0.60  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  之间,沙打旺(梯田)最大,撂荒地最小。多重分析比较可知,沙打旺(梯田)与其他各地类之间差异均显著( $p<0.05$ )。土壤呼吸速率日变幅在 96.36%~206.48%,其中:撂荒地最大,沙打旺(梯田)最小。

### 3.2 土壤呼吸速率季节变化

各样地土壤呼吸速率均表现出明显的季节变化特征(图 2)。夏季土壤呼吸速率最高,春季和秋季次之,冬季最低。

对比各季节土壤呼吸速率特征可知,夏季土壤呼吸速率昼夜变幅大,而春、秋、冬 3 季土壤呼吸速率表现稳定。各样地年均土壤呼吸速率表现为:沙打旺(梯田) 2.27  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ >红豆草 1.79  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ >苜蓿 1.77  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ >苜蓿(梯田) 1.62  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ >撂荒地 0.77  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

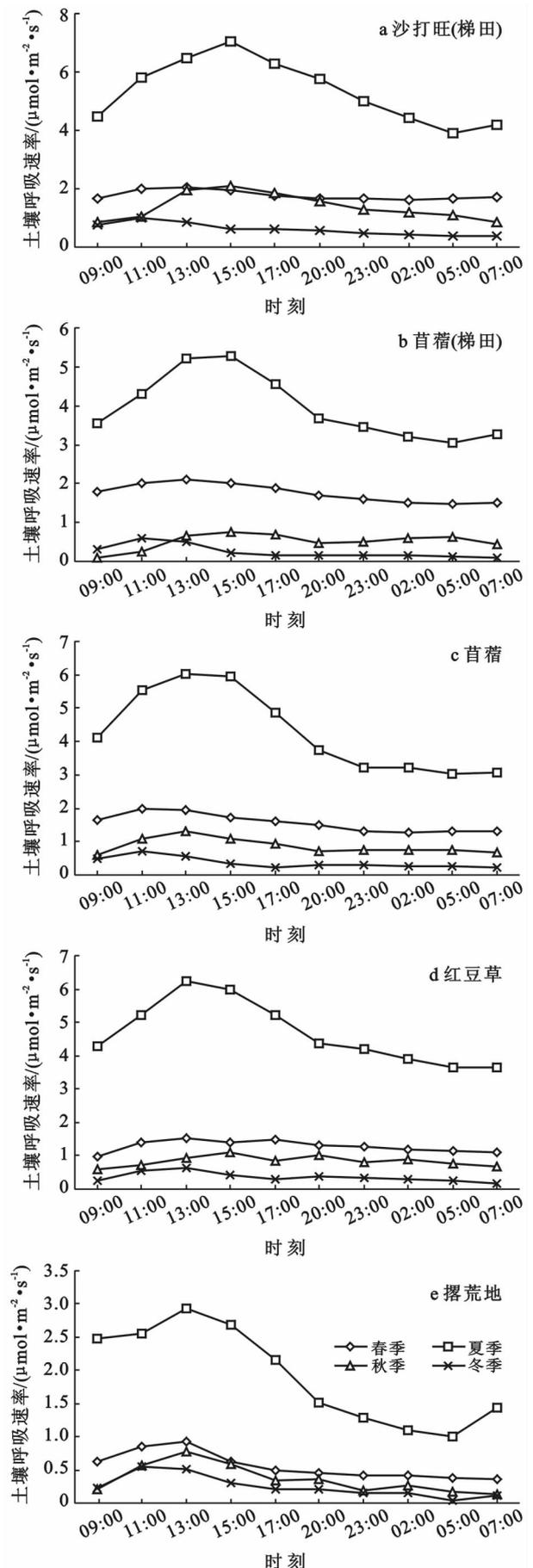


图 2 土壤呼吸速率季节变化特征

通过对各样地 4 季间多重分析比较可知(表 1),沙打旺(梯田)除春、秋两季间土壤呼吸速率差异不显著( $p>0.05$ )外,其他季节间差异均显著( $p<0.05$ );苜蓿(梯田)和苜蓿地除秋、冬两季间土壤呼吸速率差异不显著( $p>0.05$ )外,其他季节间差异均显著( $p<0.05$ );红豆草春、夏、秋、冬 4 季土壤呼吸速率差异显著( $p<0.05$ );撂荒地夏季土壤呼吸速率与春、秋、冬 3 季土壤呼吸速率差异显著( $p<0.05$ )。

表 1 土壤呼吸速率方差分析  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

土地类型	春季	夏季	秋季	冬季	均值
红豆草	1.28 <sup>Cb</sup>	4.67 <sup>Dbc</sup>	0.83 <sup>Bb</sup>	0.37 <sup>Aa</sup>	1.79 <sup>b</sup>
撂荒地	0.56 <sup>Aa</sup>	1.91 <sup>Ba</sup>	0.36 <sup>Aa</sup>	0.25 <sup>Aa</sup>	0.77 <sup>a</sup>
苜蓿	1.56 <sup>Bb</sup>	4.28 <sup>Cb</sup>	0.87 <sup>Ab</sup>	0.37 <sup>Aa</sup>	1.77 <sup>b</sup>
苜蓿(梯田)	1.76 <sup>Bd</sup>	3.95 <sup>Cb</sup>	0.51 <sup>Aa</sup>	0.25 <sup>Aa</sup>	1.62 <sup>b</sup>
沙打旺(梯田)	1.77 <sup>Bd</sup>	5.34 <sup>Cc</sup>	1.38 <sup>Bc</sup>	0.60 <sup>Ab</sup>	2.27 <sup>c</sup>

注:同行不同大写字母表示同一地类不同季节土壤呼吸速率差异显著;同列不同小写字母表示各季节不同地类之间土壤呼吸速率差异显著( $p<0.05$ )。

### 3.3 土壤呼吸速率与温度、水分的关系

3.3.1 土壤呼吸速率与温度的关系 各样地土壤呼吸速率与地表温度和土壤温度(5 cm)均呈现较好的指数关系,由图 3—4 可知,土壤呼吸速率与地表温度的相关系数  $R^2$  在 0.741 1(红豆草)~0.832 8(苜蓿)之间;土壤呼吸速率与土壤温度(5 cm)的  $R^2$  范围为 0.687 0(撂荒地)~0.882 4(苜蓿(梯田))。除撂荒地外,各样地土壤呼吸速率与土壤温度(5 cm)的相关度均高于其与地表温度的相关度。相关分析可知,土壤呼吸速率与地表温度和土壤温度(5 cm)的相关性均达到显著( $p<0.05$ )。

$Q_{10}$  值表示土壤呼吸对温度响应的敏感程度,本研究采用土壤呼吸速率( $y$ )与土壤温度(5 cm)( $T_s$ )之间的指数方程,利用公式  $Q_{10} = e^{10 \times \beta_1}$  计算土壤呼吸  $Q_{10}$  值,其中:  $\beta_1$  是土壤呼吸速率的温度指数曲线方程中  $y = \beta_0 \cdot e^{\beta_1 T_s}$  的温度反应系数,  $\beta_0$  为 0 °C 时的土壤呼吸速率。结果显示,苜蓿(梯田)的  $Q_{10}$  值最大(3.00),以下依次为红豆草(2.18)、苜蓿(2.17)、撂荒地(2.02),沙打旺(梯田)的  $Q_{10}$  值最小,为 1.94。

3.3.2 土壤呼吸速率与土壤水分的关系 将土壤呼吸速率与土壤体积含水量进行线性方程拟合(图 5),结果显示:土壤呼吸速率与土壤含水量之间的线性相关均不显著( $p>0.05$ ),土壤含水量仅可以解释土壤呼吸速率变化的 0.47%(苜蓿)~9.27%(撂荒地)。

3.3.3 土壤呼吸速率与土壤温度(5 cm)、水分的关系 选择土壤温度(5 cm)和土壤含水量作为变量,对土壤呼吸速率做多元线性回归分析(表 2)。结果表明,各样地土壤呼吸速率与土壤温度(5 cm)和土壤含水量的交互作用具有很好的相关性,均达到显著水平

( $p<0.01$ )。回归模型可共同解释土壤呼吸变异的 63.60%~80.60%。

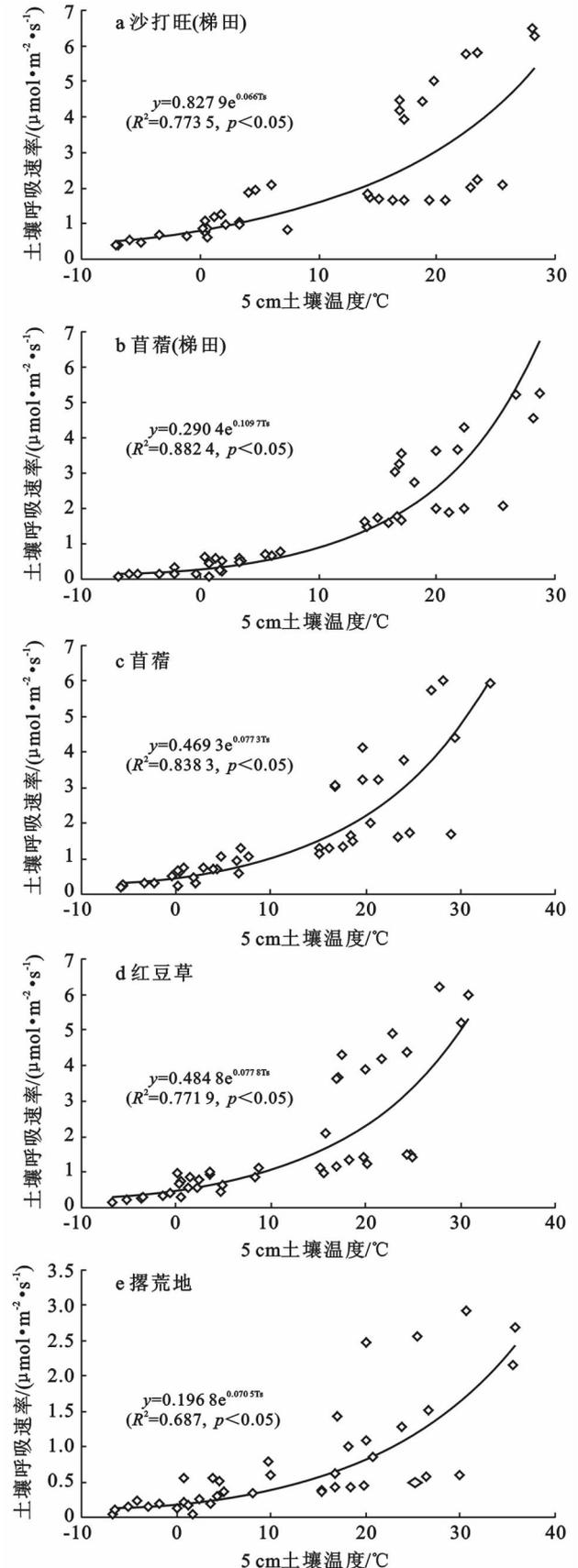


图 3 土壤呼吸速率与土壤温度的关系

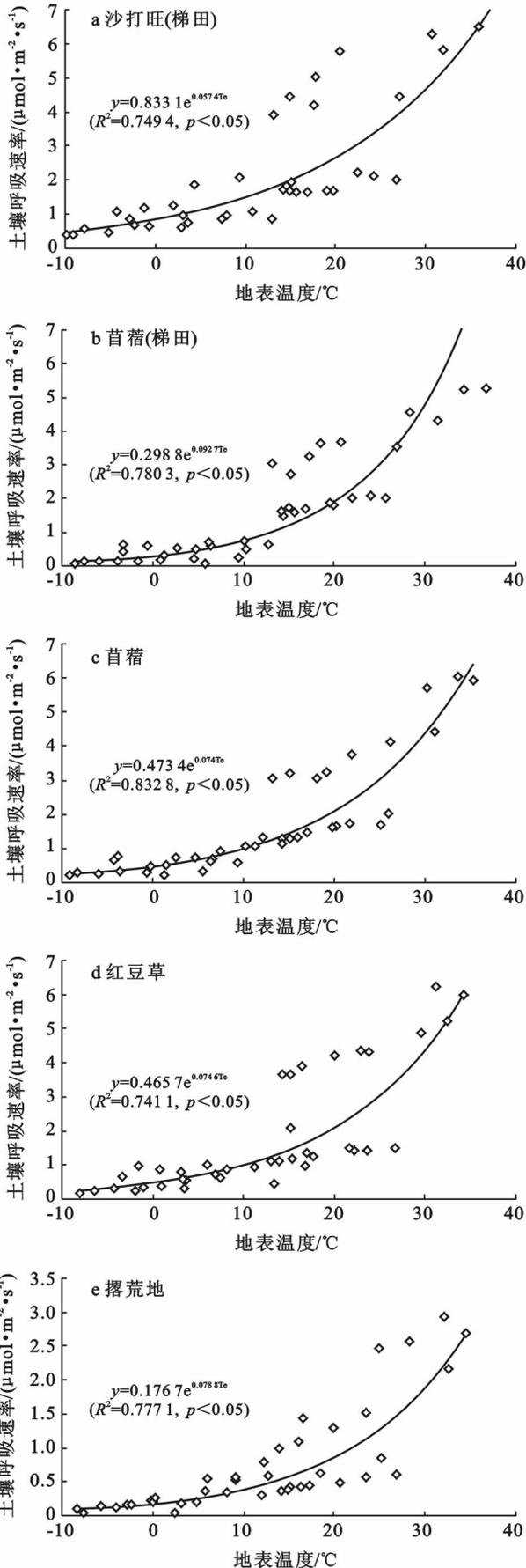


图 4 土壤呼吸速率与地表温度的关系

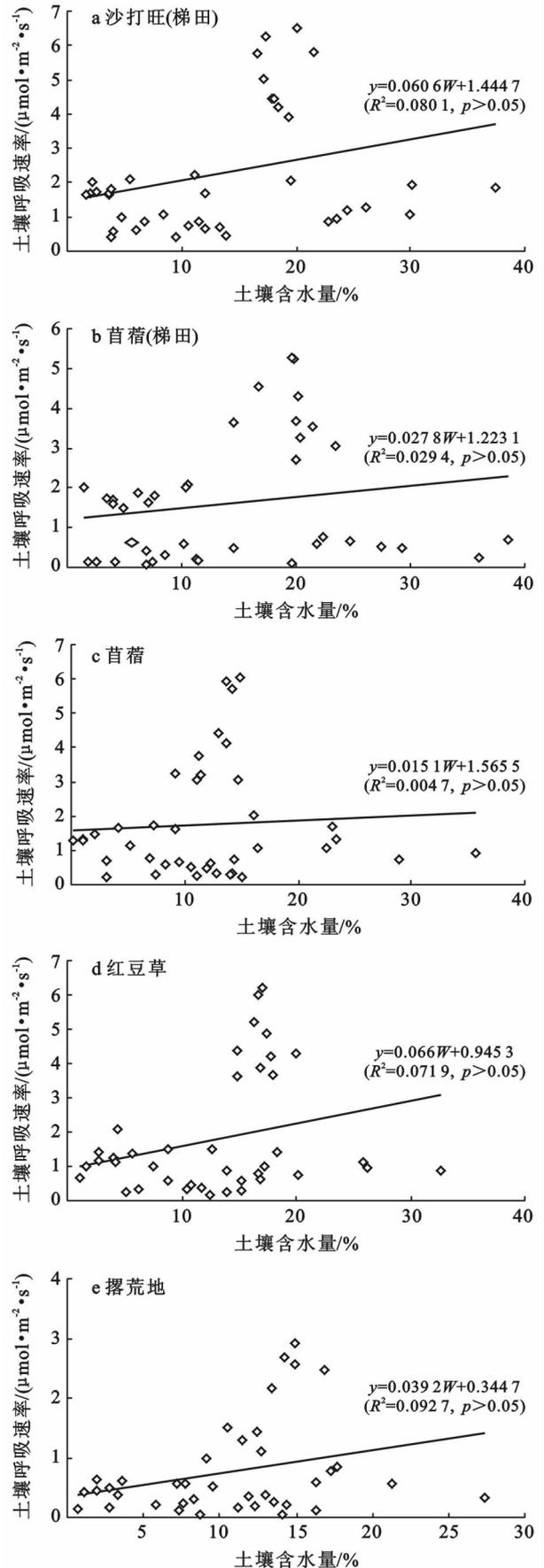


图 5 土壤呼吸速率与土壤含水量的关系

表 2 土壤呼吸速率与土壤温度(5 cm)、土壤含水量的回归关系

土地类型	线性回归方程	$R^2$	$P$
沙打旺(梯田)	$y = -0.109 + 0.147 T + 0.068 W$	0.717 0	0.00
苜蓿(梯田)	$y = 0.070 + 0.128 T + 0.017 W$	0.806 0	0.00
苜蓿	$y = 0.108 + 0.119 T + 0.023 W$	0.683 0	0.00
红豆草	$y = -0.374 + 0.123 T + 0.062 W$	0.674 0	0.00
撂荒地	$y = -0.219 + 0.047 T + 0.038 W$	0.636 0	0.00

注:  $T$  为温度;  $W$  为土壤水分含量。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

本研究结果表明,各样地土壤呼吸速率日变化均表现为昼高夜低的单峰型曲线,研究结果与陕西省安塞县混播草地土壤呼吸日变化特征<sup>[13]</sup>一致。土壤呼吸是表征土壤质量和肥力性状的重要生物学指标,4个季度中,沙打旺(梯田)日均土壤呼吸速率均最大,而撂荒地均最小。多重分析比较结果显示,沙打旺(梯田)、撂荒地基本表现为与其他各地类之间差异显著( $p < 0.05$ ),说明裸露地表在恢复植被的过程中,土壤环境质量显著提升。各样地中,改造成梯田的地类日均土壤呼吸速率总体表现为大于径流小区(坡地)的,可能与梯田的水热条件好于坡地有关,当然,种植的植物种类不同,表现亦存在差异。各样地中,撂荒地的土壤呼吸速率日变幅最大,为 99.78%~206.48%,主要由于地表植物可减少到达地面的太阳辐射,缓和了地表和土壤温度的变化幅度,其土壤呼吸速率表现为相对平缓的趋势,而裸露地表缺少拦挡,环境能量直接到达地面,使得土壤呼吸速率变幅相对剧烈。

土壤呼吸具有明显的季节性变化。本研究结果显示,各样地土壤呼吸速率均表现出明显的季节变化特征,夏季最高,春季和秋季次之,冬季最低,与谢慧慧等<sup>[14]</sup>和齐丽彬等<sup>[15]</sup>的研究结果一致。夏季与春、秋、冬 3 个季节土壤呼吸速率差异显著( $p < 0.05$ ),原因为夏季土壤水热条件优越,土壤生物活性高,植物处于旺盛生长阶段,促使土壤以较快的速度排放  $CO_2$ ,而本文研究对象是生长量相对较小的草类,因此其他 3 个季节之间差异较小。

温度是调节和控制许多生态学过程的关键因素,同时也是影响土壤碳通量的决定性因子之一<sup>[16]</sup>。本研究结果显示,土壤呼吸速率与地表温度和土壤温度(5 cm)的相关性均达到显著水平( $p < 0.05$ ),与土壤含水量之间线性相关不显著( $p > 0.05$ ),与许浩等<sup>[11]</sup>对宁夏彭阳退耕苜蓿、农田和天然草地的研究结果一致。本研究中,各样地土壤温度(5 cm) $Q_{10}$ 值在 1.94~3.00 之间,与陈吉等<sup>[13]</sup>的研究结果基本相同,在陆

地生态系统  $Q_{10}$  值(1.3~5.6)<sup>[17]</sup> 范围内。

土壤温度和水分不仅单独对土壤呼吸起作用,通常在自然环境中,土壤呼吸往往受二者共同作用。本研究结果显示,土壤呼吸速率与土壤温度(5 cm)和土壤含水量的交互作用显著相关( $p < 0.01$ ),与李学章等<sup>[18]</sup>和齐丽彬等<sup>[15]</sup>的研究结果一致。

### 4.2 结论

(1) 各样地土壤呼吸速率日变化均表现为昼高夜低的单峰型曲线,与温度的变化趋势一致。冬季在 11:00 达到最大值,春、夏、秋 3 季在 13:00—15:00 达到最大值,5:00—7:00 出现最小值。沙打旺(梯田)年均土壤呼吸速率最大  $2.27 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,是最小值撂荒地的 2.95 倍。

(2) 各样地土壤呼吸速率均表现出明显的季节变化特征,夏季最高,春季和秋季次之,冬季最低,夏季土壤呼吸速率为冬季的 7.75~15.94 倍。夏季与春、秋、冬 3 季土壤呼吸速率差异显著( $p < 0.05$ )。

(3) 土壤呼吸速率与地表温度和土壤温度(5 cm)的相关性均达到显著水平( $p < 0.05$ )。除撂荒地外,各样地土壤呼吸速率与土壤温度(5 cm)的相关度均高于其与地表温度的相关度。各样地土壤温度(5 cm) $Q_{10}$ 值介于 1.94~3.00。

(4) 土壤呼吸速率与土壤含水量之间线性相关不显著( $p > 0.05$ )。其与土壤温度(5 cm)和土壤含水量的交互作用显著相关( $p < 0.01$ )。回归模型解释土壤呼吸变异的 63.60%~80.60%。

### [参 考 文 献]

- [1] 吴庆标,王效科,郭然. 土壤有机碳稳定性及其影响因素[J]. 土壤通报,2005,36(5):743-750.
- [2] 方精云. 全球生态学:气候变化与生态响应[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [3] 谢育利,陈云明,唐亚坤,等. 黄土丘陵区油松、沙棘人工林土壤呼吸动态及其对土壤温度和湿度的响应[J]. 中国水土保持科学,2017,15(1):33-42.
- [4] 董莉茹,许明祥,孙会. 黄土丘陵区刺槐林土壤碳通量模拟研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2014,42(6):122-130.
- [5] 胡婵娟,刘国华,傅伯杰,等. 黄土丘陵沟壑区典型人工林土壤  $CO_2$  释放规律及其影响因子[J]. 生态学报,2009,29(9):4700-4709.
- [6] 董立国,许浩,张源润,等. 宁夏黄土丘陵区冬小麦农田土壤呼吸特征及影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(1):75-80.
- [7] 裴会敏,许明祥,脱登峰. 黄土丘陵区坡地侵蚀对土壤呼吸的影响[J]. 水土保持通报,2012,32(4):1-4,15.

(下转第 95 页)

- 地时空变化及成因分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(3): 435-442.
- [7] 杨帆, 章光新, 尹雄锐, 等. 松嫩平原西部土壤盐碱化空间变异与微地形关系研究[J]. 地理科学, 2009, 29(6): 869-873.
- [8] 李取生, 裘善文, 邓伟. 松嫩平原土地次生盐碱化研究[J]. 地理科学, 1998, 18(3): 268-272.
- [9] 林年丰, 汤洁. 松嫩平原环境演变与土地盐碱化、荒漠化的成因分析[J]. 第四纪研究, 2005, 25(4): 474-483.
- [10] 陈亚丽. 吉林省西部土地盐碱化的遥感监测[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [11] 李昌华, 何万云. 松嫩平原盐渍土主要类型、性质及其形成过程[J]. 土壤学报, 1963, 11(2): 88-101.
- [12] 洪彪, 宋洋, 潘杰. 松嫩平原盐碱化形成影响因素研究进展[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(30): 16895-16898.
- [13] 张学飞, 王清, 孔元元, 等. 吉林安农县盐渍土理化特性及水盐运移规律研究[J]. 人民长江, 2016, 47(12): 89-94.
- [14] 徐安凯, 姜健, 赵明清, 等. 吉林省西部草原的农业气候特点及土壤盐分动态规律[J]. 国外畜牧学: 草原与牧草, 1996(3): 27-31.
- [15] 邹滨, 董明辉, 杨令宾, 等. 松嫩平原西部土地盐碱化预测研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(6): 1022-1029.
- [16] 刘志明, 晏明, 何艳芬. 吉林省西部土地盐碱化研究[J]. 资源科学, 2004, 26(5): 111-116.
- [17] 江红南, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽. 新疆库车县灌区土地盐渍化时空演变影响因子分析[J]. 干旱区研究, 2009, 26(4): 514-518.
- [18] 张文渊. 滨海地区盐碱土类型与形成条件分析[J]. 水土保持通报, 1999, 19(1): 22-26.
- [19] 郝金标, 张福锁, 毛达如, 等. 新疆盐渍土分布与盐生植物资源[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 299-303.
- [20] 温利强. 我国盐渍土的成因及分布特征[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [21] 王晶, 肖延华, 朱平, 等. 松嫩平原盐渍土的发展演化与影响因素[J]. 吉林农业科学, 1995(2): 66-71.
- [22] 曹稳根. 安徽淮北地区盐碱土的成因及其改良措施[J]. 淮北煤师院学报: 自然科学版, 1997, 18(1): 73-76.
- [23] 张源沛, 胡克林, 李保国, 等. 银川平原土壤盐分及盐渍土的空间分布格局[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 19-24.
- [24] 张芳, 熊黑钢, 田源, 等. 区域尺度地形因素对奇台绿洲土壤盐渍化空间分布的影响[J]. 环境科学研究, 2011, 24(7): 731-739.
- [25] 褚冰倩, 乔文峰. 土壤盐碱化成因及改良措施[J]. 现代农业科技, 2011(14): 309-309, 311.
- [26] 卢长伟, 刘洪铤, 赵晓明, 等. 吉林省西部地区土壤盐渍化及防治简析[J]. 资源环境与工程, 2016, 30(3): 419-424, 463.

(上接第 88 页)

- [8] 陈盖, 许明祥, 张亚锋, 等. 黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征[J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3383-3392.
- [9] 马涛, 周波, 陈爱华, 等. 黄土丘陵沟壑区梯田、坡耕地土壤呼吸特征[J]. 人民黄河, 2015, 37(12): 84-87.
- [10] 郭慧敏, 张彦军, 刘庆芳, 等. 黄土高原半干旱区土壤呼吸对土地利用变化的响应[J]. 自然资源学报, 2014, 29(10): 1686-1695.
- [11] 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.
- [12] 康颖, 侯扶江. 黄土高原紫花苜蓿草地土壤呼吸对刈割的响应[J]. 草业科学, 2011, 28(6): 892-897.
- [13] 陈吉, 王京, 高志娟, 等. 黄土丘陵区白羊草与达乌里胡枝子混播草地土壤呼吸日变化特征[J]. 草业科学, 2015, 32(1): 19-27.
- [14] 谢慧慧, 樊军, 齐丽彬, 等. 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.
- [15] 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[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5428-5436.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 李学章, 邵明安, 魏孝荣, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错带水分和密度对人工草地土壤呼吸影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 207-211, 216.