

黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征

陈盖¹, 许明祥^{1, 2*}, 张亚锋², 王超华¹, 樊会敏², 王闪闪³

(1. 西北农林科技大学林学院 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学资源环境学院 杨凌 712100)

摘要: 以黄土丘陵区 5 个不同有机碳背景的坡面 S 型小区(坡顶为对照区、坡中为侵蚀区、坡脚为沉积区)为研究对象,通过对土壤呼吸速率的动态观测,分析坡面不同类型区土壤呼吸特征及其与土壤温湿度、有机碳和坡位的关系。结果表明,土壤温度的变化对沉积区土壤呼吸影响较大,土壤湿度的变化对侵蚀区土壤呼吸影响较大。有机碳是影响土壤呼吸的首要因子,可解释土壤呼吸变异的 54.72%;其次是土壤湿度、坡位和土壤温度,分别可解释土壤呼吸变异的 18.86%、16.13% 和 10.29%。侵蚀对坡面土壤呼吸的影响具有明显的原位和异位效应,侵蚀导致坡面侵蚀区土壤呼吸减小了 21.14%,沉积区土壤呼吸增大了 21.93%。侵蚀坡面土壤碳排放的源汇效应与有机碳水平有关,当土壤有机碳含量大于 $6.82 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,坡面侵蚀趋向于碳汇过程;当有机碳含量小于 $3.03 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,坡面侵蚀趋向于碳源过程。文中模型可以较好地反映有机碳和土壤温湿度与土壤呼吸的关系。

关键词: 土壤呼吸; 侵蚀; 坡面; 有机碳; 土壤温湿度

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3383-10 DOI: 10.13227/j.hjcx.2015.09.034

Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau

CHEN Gai¹, XU Ming-xiang^{1, 2*}, ZHANG Ya-feng², WANG Chao-hua¹, FAN Hui-min², WANG Shan-shan³

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 3. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: This study aimed to characterize soil respiration along eroded sloping land at erosion and deposition area under different soil organic carbon (SOC) levels, and linked the relationship between soil respiration and soil temperature, soil moisture, SOC and slope position. Experiments were carried out in the plots of S type slopes include five different soil organic carbon levels in the Loess Hilly Region. The S type slopes were divided into control area at the top of the slope, erosion area at the middle of the slope and deposition area at the toe of the slope. We found that soil temperature had a greater impact on soil respiration in the deposition area, whereas soil moisture had a greater impact on soil respiration in the erosion area compared among control area, erosion area and deposition area. In addition, SOC was the most important factor affecting soil respiration, which can explain soil respiration variation 54.72%, followed by soil moisture, slope position and soil temperature, which explain soil respiration variation 18.86%, 16.13% and 10.29%, respectively. Soil respiration response to erosion showed obvious on-site and off-site effects along the eroded sloping land. Soil respiration in the erosion area was reduced by 21.14% compared with control area, and soil respiration in the deposition area was increased by 21.93% compared with control area. Erosion effect on source and sink of carbon emission was correlated with SOC content of the eroded sloping land. When SOC content was higher than $6.82 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, the slope erosion tended to be a carbon sequestration process, and when SOC content was lower than $3.03 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, the slope erosion tended to be a process of the carbon emission source. The model could reflect the relationship between soil respiration and independent variables of soil organic carbon content, soil temperature and moisture.

Key words: soil respiration; erosion; slope position; SOC; soil temperature and moisture

大气中 CO_2 是影响气候变化的重要温室气体,而土壤是其来源之一^[1, 2]。全球有机碳储量约为 $14 \times 10^{17} \sim 15 \times 10^{17} \text{ g}$, 约是陆地生物总碳量 ($5.6 \times 10^{17} \text{ g}$) 的 2.5 ~ 3 倍; 每年因土壤呼吸向大气释放碳约 75 ~ 120 Pg, 因焚烧燃料释放到大气中的碳仅为 $6 \times 10^{15} \text{ g}$, 是土壤呼吸释放碳的 8% ~ 9%^[3~5]。由此可见,土壤碳库的较小变化可对大气碳库产生较大影响。因此,加强土壤 CO_2 释放的研究,对估计

大气 CO_2 浓度及全球气候变化具有重要意义^[6]。

土壤呼吸是土壤中碳排放到大气中的重要途径,受土壤温度、土壤含水量、降雨、凋落物、有机

收稿日期: 2015-02-04; 修订日期: 2015-04-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171228, A0971174); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050504)

作者简介: 陈盖(1990~),男,硕士研究生,主要研究方向为土地利用变化及其环境效应, E-mail: 10chen01@sina.cn

* 通讯联系人, E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn

碳含量、C/N 及 C/P 比等非生物因子和植被类型、根系生物量等生物因子与人类活动等因子的影响^[7-9]。土壤侵蚀可通过多种途径来影响土壤呼吸,首先通过搬运和沉积导致有机碳分布在不同坡位的差异来影响土壤呼吸,其次通过影响土壤温度和土壤湿度来影响土壤呼吸^[10-13]。关于侵蚀对土壤 CO₂ 通量的影响相关研究结果存在较大争议。例如,以 Lal^[14] 为代表的学者认为土壤侵蚀导致土壤有机碳流失而在全球每年产生 1 Pg 的碳源,而以 Van Oost 等^[12] 为代表的学者认为土壤侵蚀过程导致侵蚀区可供分解的有机碳不断减少,沉积区埋藏的有机碳分解受到抑制,最终全球每年形成 0.56 ~ 1 Pg 的碳汇。由此可见,全球尺度上侵蚀土壤碳排放的源汇效应问题尚未形成一致的认识,而从坡面尺度研究揭示侵蚀土壤碳排放特征可望为科学评估区域乃至全球尺度侵蚀土壤碳排放提供依据。

国外有学者认为沉积泥沙对土壤呼吸的影响决定于侵蚀强度和土壤肥力^[15],而且具有明显的空间异质性^[16,17]。进入沉积区的有机碳分解受到抑制,致使土壤呼吸速率降低^[12,15],而位于侵蚀区的有机碳由于土壤团聚体结构的破坏易矿化^[14]。在我国关于坡面侵蚀的研究主要集中在对土壤质量的影响方面^[7,18],而关于土壤呼吸的研究主要集中在影响因素方面,如根呼吸、土壤微生物及其土壤温湿度等^[6,9,19],有关研究侵蚀对土壤呼吸的影响较少。黄土丘陵区是世界上水土流失最严重的地区之一,对该区侵蚀坡面土壤呼吸特征尚缺乏深入理解,侵蚀土壤碳排放的源汇效应问题也鲜见研究报道。为此,本研究以黄土丘陵区不同有机碳背景的侵蚀坡面为对象,对土壤 CO₂ 排放进行野外监测,分析坡面不同部位土壤呼吸动态特征及其影响因素,以期侵蚀条件下土壤呼吸的源汇关系研究以及区域土壤侵蚀的环境效应评价提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2014 年 8 月在中国科学院安塞水土保持综合试验站(108°51′~109°26′E,36°31′~37°19′N)山地试验小区进行。研究区位于陕北黄土高原中部,具有典型的梁峁状丘陵沟壑区特征。年均气温 8.8℃,极端最高温度为 36.8℃,极端最低气温为 -23.6℃。该地区日照丰富,年均日照时数 2 397.3 h^[20]。多年均降水量 500 mm,7~9 月为该地区雨季,年蒸发量大于 1 463 mm。该区陡坡地占耕地总

面积大于 70%。侵蚀主要是细沟和浅沟侵蚀,平均侵蚀模数达 2 180 t·(km²·a)⁻¹^[21]。土壤类型主要是黄土母质上发育来的黄绵土。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

试验小区在 2011 年修建,共 10 个,小区面积 4 m×18 m,坡向朝东,坡度 19°,共设 5 个土壤有机碳水平。小区设计为“S”型坡,坡顶、坡中、坡脚依次为对照区、侵蚀区和沉积区(图 1)。其中侵蚀区和沉积区又分为上部和下部两个部位,代表不同的侵蚀和沉积深度。为了提高研究结果的可靠性,将试验小区划分为 3 个微小区,形成 5 个有机碳背景(C5 有机碳含量 10.33 g·kg⁻¹,C4 有机碳含量 9.69 g·kg⁻¹,C3 有机碳含量 6.82 g·kg⁻¹,C2 有机碳含量 3.03 g·kg⁻¹,C1 有机碳含量 0.88 g·kg⁻¹、3 坡位、6 重复试验设计。试验小区在试验前均匀翻耕。为了减少植被因素对土壤呼吸的影响,试验期间定期除草,保持小区为裸地状态。

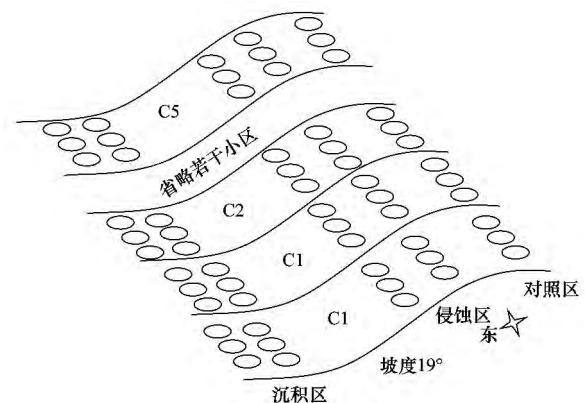


图 1 样地设置示意

Fig. 1 Figure of sample plots

1.2.2 数据采集与测定

采用 Li-COR 公司的 LI-8100A 开路式土壤碳通量自动测量系统测量土壤呼吸速率。在测定土壤呼吸速率前两天在试验小区埋设直径为 20 cm 的专用 PVC 管。为了不影响坡面土壤侵蚀沉积过程,将 PVC 管埋入地表 2 cm 之下。除此之外,每个小区的沉积区、侵蚀区和对照区埋设土壤温度和水分采集器(Em50,DECAGON 公司),全天候对表层土壤 0~5 cm 温度和 0~5 cm 水分进行观测。

试验在 2014 年 8 月总共观测了 6 次,分别为 8 月 1 日、8 月 10 日、8 月 12 日、8 月 15 日、8 月 24 日。其中在 8 月 5~9 日、8 月 16~17 日和 8 月 22 日有降雨。在观测日内,观测的时间从当天 09:00 ~

16:00, 每个样点持续的时间为 90 s, 重复一次。同时用时代反射仪 (TDR-300) 测量土壤湿度和数显地温计测定 0~5 cm 的土壤温度。

1.3 数据分析

目前, 国内外学者对土壤呼吸速率、温度和土壤湿度进行拟合基本都选择: 线性模型 $Y = a + b(TW)$, $Y = a + bT + cW$ 和非线性模型 $Y = aT^bW^c$, $Y = ae^{bT}W^c$ [22~24]。其中, 非线性模型最能反映土壤温湿度与土壤呼吸之间的关系 [25, 26]。因此, 本试验采用 MATLAB R2008b 对土壤呼吸速率、温度和土壤湿度按照非线性模型 ($Y = ae^{bT}W^c$) 进行拟合。式中, Y 是土壤呼吸 CO_2 速率 [$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], a 、 b 、 c 是拟合系数, T 、 W 分别是土壤温度和土壤湿度。

拟合时, 将 6 次观测的数据汇总, 相同有机碳水平下相同坡位下的数据样本为一组 (共 15 组)。不同有机碳水平下的对照区有 33 个样本, 不同有机碳水平下的侵蚀区和沉积区有 66 个样本。每一组数据按照非线性模型进行拟合, 总共可以拟合 15 个公式。用拟合出的公式将土壤呼吸速率校正为当天 09:00~11:00 的数值, 因为土壤呼吸在该时间段内基本达到当天最为稳定的水平 [27]。同时也可使不

同时间测定的多点位土壤呼吸特征具有可比性。用来校正的温度采用 Em50 土壤温度和水分采集器观测的数据。

采用 Excel 对数据进行预处理。采用 MATLAB R2008b 对不同有机碳背景下坡面侵蚀沉积区土壤呼吸与温湿度进行拟合。采用 SPSS 18.0 对不同有机碳背景下坡面侵蚀沉积区土壤呼吸进行 ANOVA 分析, LSD 法进行差异显著性检验, 对土壤呼吸以及影响因子进行相关性分析, 用一般线性回归模型 (GLM) 中的方差成分估计计算影响因子在土壤呼吸变异中所占的比例。

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸与土壤温湿度的拟合结果

不同有机碳水平下坡面土壤呼吸与土壤温湿度拟合结果基本上达到显著水平 ($P < 0.05$) 或极显著水平 ($P < 0.01$) (表 1), 可以描述土壤呼吸对土壤温湿度的综合响应。在每个有机碳水平下, 侵蚀区土壤呼吸对土壤温湿度的响应均达到极显著水平 ($P < 0.01$), R^2 值在 0.626~0.700 之间, 明显高于沉积区 (R^2 : 0.173~0.471) 和对照区 (R^2 : 0.158~0.439)。

表 1 基于土壤温度和土壤湿度的土壤呼吸模型¹⁾ (0~5 cm)

Table 1 Soil respiration models based on soil temperature and soil moisture (0~5 cm)

有机碳水平	坡位	样本数	拟合结果	R^2	P
C1	对照区	66	$Y = 0.2104 \times e^{0.0359T} \times W^{0.4712}$	0.260	> 0.05
	侵蚀区	66	$Y = 0.0729 \times e^{0.0082T} \times W^{1.1909}$	0.666	< 0.01
	沉积区	33	$Y = 0.0081 \times e^{0.0860T} \times W^{1.2857}$	0.566	< 0.01
C2	对照区	66	$Y = 0.0019 \times e^{0.1027T} \times W^{1.4997}$	0.439	< 0.05
	侵蚀区	66	$Y = 0.0181 \times e^{0.0280T} \times W^{1.4986}$	0.667	< 0.01
	沉积区	33	$Y = 0.0034 \times e^{0.1035T} \times W^{1.3699}$	0.567	< 0.01
C3	对照区	66	$Y = 0.0242 \times e^{0.0681T} \times W^{1.2177}$	0.434	< 0.05
	侵蚀区	66	$Y = 0.1139 \times e^{0.0161T} \times W^{1.1416}$	0.626	< 0.01
	沉积区	33	$Y = 0.0425 \times e^{0.0649T} \times W^{0.9421}$	0.280	< 0.05
C4	对照区	66	$Y = 0.389 \times e^{0.0404T} \times W^{0.4687}$	0.158	> 0.05
	侵蚀区	66	$Y = 0.0097 \times e^{0.0345T} \times W^{1.9550}$	0.670	< 0.01
	沉积区	33	$Y = 0.0381 \times e^{0.0731T} \times W^{0.9954}$	0.388	< 0.05
C5	对照区	66	$Y = 1.1737 \times e^{0.0299T} \times W^{0.1113}$	0.283	> 0.05
	侵蚀区	66	$Y = 0.0238 \times e^{0.0371T} \times W^{1.6487}$	0.700	< 0.01
	沉积区	33	$Y = 2.6037 \times e^{0.0179T} \times W^{0.0487}$	0.173	> 0.05
综合	对照区	165	$Y = 0.0784 \times e^{0.0471T} \times W^{0.9103}$	0.191	< 0.05
	侵蚀区	330	$Y = 0.0089 \times e^{0.0341T} \times W^{1.9148}$	0.676	< 0.01
	沉积区	330	$Y = 0.2250 \times e^{0.0377T} \times W^{0.6644}$	0.298	< 0.01
	C1	165	$Y = 0.0068 \times e^{0.0751T} \times W^{1.4230}$	0.409	< 0.01
	C2	165	$Y = 0.0006 \times e^{0.1234T} \times W^{1.6982}$	0.390	< 0.01
	C3	165	$Y = 0.0628 \times e^{0.0484T} \times W^{1.0014}$	0.428	< 0.01
	C4	165	$Y = 0.0646 \times e^{0.0527T} \times W^{1.0262}$	0.333	< 0.01
	C5	165	$Y = 0.7609 \times e^{0.0163T} \times W^{0.5069}$	0.316	< 0.01

1) Y : 土壤呼吸速率 [$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], T : 土壤温度 (°C), W : 土壤湿度 (%)

综合分析 相同有机碳水平下,侵蚀区拟合方程决定系数 $R^2 = 0.676$ ($P < 0.01$) 明显高于沉积区 $R^2 = 0.298$ ($P < 0.01$) 和对照区 $R^2 = 0.191$ ($P < 0.05$). 说明侵蚀区土壤呼吸对土壤温湿度的响应较沉积区和对照区明显. 综合分析,不同有机碳背景下,土壤呼吸对土壤温湿度的响应明显. 不同有机碳水平下土壤呼吸对土壤温湿度的响应均达到极显著水平 ($P < 0.01$), 拟合方程的决定系数 R^2 值在 0.316~0.428 之间. 说明不同有机碳背景下土壤呼吸对土壤温湿度的响应差别不大.

为了验证参数模型的合理性及预测值的可靠性,对预测值和测定值进行了残差分析(图2). 测定值与通过参数模型得出的预测值的残差均在 $\pm 0.9 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 范围内. 其中,侵蚀区土壤呼吸测定值与预测值的残差在 $\pm 0.2 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 范

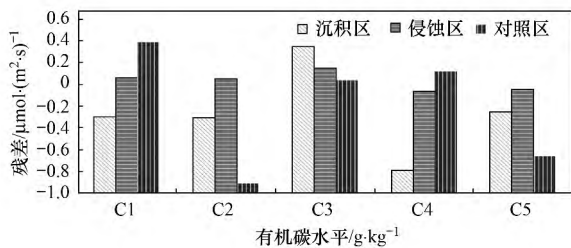


图2 不同有机碳水平下土壤呼吸速率与土壤温湿度拟合精度

Fig. 2 Fitting precision of soil respiration and soil temperature and moisture with different SOC background

围内,较沉积区和对照区土壤呼吸测定值与预测值的残差范围小.

2.2 侵蚀坡面土壤呼吸的差异

在相同有机碳水平下,平均土壤呼吸速率表现为沉积区大于对照区,对照区大于侵蚀区(表2).

在不同有机碳水平下,随着有机碳水平的升高,不同坡位土壤呼吸均逐渐增大(表2). 侵蚀区土壤呼吸随着有机碳水平的升高较对照区减小幅度呈现先减小后增大的趋势. 在 C3 有机碳水平下,侵蚀区土壤呼吸较对照区减小的幅度最大为 34.24%. 沉积区土壤呼吸随着有机碳水平的升高较对照区未出现规律性变化. 侵蚀区土壤呼吸变异系数明显大于沉积区和对照区. 侵蚀区土壤呼吸变异系数,随着有机碳水平的升高,表现为先较小后增大的趋势. 在 C3 有机碳水平下,土壤呼吸变异系数最小为 35.86%. 对照区土壤呼吸变异系数随着有机碳水平的升高,表现为先增大后减小的趋势. 在 C2 有机碳水平下,土壤呼吸变异系数最大为 25.00%. 沉积区土壤呼吸变异系数未出现规律性变化.

在土壤有机碳水平较低时(C1和C2),沉积区和侵蚀区土壤呼吸差异显著(表2). 随着有机碳水平的升高,沉积区和侵蚀区土壤呼吸之间差异不显著. 在不同有机碳背景下,中等有机碳水平 C3 土壤呼吸与其它有机碳水平下土壤呼吸差异显著.

表2 侵蚀坡面土壤呼吸的差异¹⁾

Table 2 Difference of soil respiration along eroded sloping land

有机碳水平	坡位	样本数	最小值 $/\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$	最大值 $/\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$	平均值 $/\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$	变幅/%	标准差	变异系数/%
C1	对照区	33	1.59	2.73	2.20 Cb	—	0.30	13.64
	侵蚀区	66	0.25	3.49	1.63 Cc	-25.91	0.79	48.47
	沉积区	66	1.12	4.52	2.95 Ca	34.09	0.89	30.17
C2	对照区	33	1.18	3.3	2.32 Cb	—	0.58	25
	侵蚀区	66	0.42	3.17	1.59 Cc	-31.47	0.66	41.51
	沉积区	66	1.47	7.07	3.82 Ca	64.66	1.2	31.41
C3	对照区	33	2.67	5.98	4.41 Ba	—	0.99	22.45
	侵蚀区	66	0.72	5.16	2.90 Bb	-34.24	1.04	35.86
	沉积区	66	2.06	6.62	4.52 Ba	2.49	0.76	16.81
C4	对照区	33	3.26	6.23	4.88 Aa	—	0.65	13.32
	侵蚀区	66	0.88	9.27	4.50 Aa	-7.79	2.16	48.00
	沉积区	66	1.59	9.85	5.11 Aa	4.71	1.45	28.38
C5	对照区	33	3.02	6.72	5.14 Aa	—	0.47	9.14
	侵蚀区	66	1.22	11.22	4.84 Aa	-5.84	2.49	51.45
	沉积区	66	4.37	6.24	5.33 Aa	3.70	0.45	8.44

1) 大写字母表示有机碳背景之间土壤呼吸差异显著 ($P < 0.05$), 小写字母表示同等有机碳背景下不同坡位之间土壤呼吸差异显著 ($P < 0.05$)

2.3 侵蚀坡面土壤呼吸的影响因素

2.3.1 不同坡位土壤呼吸与有机碳的关系

在相同有机碳水平下,不同坡位有机碳和土壤

呼吸均表现为下部的沉积区高于上部的对照区,对照区高于中部的侵蚀区(表3). 说明坡面侵蚀导致侵蚀区土壤呼吸减小而沉积区土壤呼吸增大,且不

同坡位土壤呼吸的差异与有机碳水平有关. 综合 5 个有机碳水平, 侵蚀区土壤呼吸相对于对照区平均减小了 21.14%, 沉积区土壤呼吸平均增大了 21.93%. 反映了侵蚀对坡面土壤呼吸的影响具有明显的原位和异位效应.

在不同有机碳水平下, 侵蚀坡面土壤呼吸收支水平有差异性. 在有机碳含量大于 C3 时, 侵蚀导致坡面土壤呼吸减小, 说明侵蚀是碳汇过

程. 在有机碳含量小于 C2 时, 侵蚀导致坡面土壤呼吸增大, 说明侵蚀是碳源过程. 由此说明, 侵蚀坡面土壤碳排放的源汇效应与有机碳水平有关.

在不同坡位下, 土壤呼吸与有机碳水平符合指数模型 $Y = ae^{bC}$, $P < 0.01$ (表 4). 其中, 侵蚀区土壤呼吸与有机碳的指数模型决定系数 ($R^2 = 0.992$) 大于沉积区 ($R^2 = 0.967$) 与对照区 ($R^2 = 0.952$).

表 3 侵蚀坡面土壤呼吸与有机碳的关系¹⁾

Table 3 Relation between soil respiration and SOC along eroded sloping land

有机碳水平	坡位	有机碳/ $g \cdot kg^{-1}$	呼吸量/ $\mu mol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$	有机碳变化/%	呼吸量变化/%	呼吸量收支/%
C1	对照区	0.94	2.20	—	—	7.37
	侵蚀区	0.66	1.62	-29.79	-26.36	
	沉积区	1.05	2.95	11.70	34.09	
C2	对照区	2.04	2.32	—	—	33.19
	侵蚀区	1.51	1.59	-25.98	-31.47	
	沉积区	5.54	3.82	171.57	64.66	
C3	对照区	6.94	4.41	—	—	-31.75
	侵蚀区	6.43	2.90	-7.35	-34.24	
	沉积区	7.08	4.52	2.02	2.49	
C4	对照区	9.85	4.88	—	—	-3.07
	侵蚀区	9.30	4.50	-5.58	-7.79	
	沉积区	9.93	5.11	0.81	4.71	
C5	对照区	10.34	5.14	—	—	-2.14
	侵蚀区	9.98	4.84	-3.48	-5.84	
	沉积区	10.67	5.33	3.19	3.70	
综合(平均值)	对照区					0.79
	侵蚀区			-14.44	-21.14	
	沉积区			37.86	21.93	

表 4 侵蚀坡面土壤呼吸与有机碳的指数模型¹⁾

Table 4 Soil respiration exponential models based on SOC along eroded sloping land

坡位	样本数	指数模型	R^2	P
对照区	165	$Y = 2.0139 \times e^{0.0942C}$	0.952	< 0.01
侵蚀区	330	$Y = 1.4531 \times e^{0.1186C}$	0.992	< 0.01
沉积区	330	$Y = 2.8181 \times e^{0.0576C}$	0.967	< 0.01

1) C: 有机碳 ($g \cdot kg^{-1}$)

2.3.2 土壤呼吸与土壤温湿度的关系

侵蚀区土壤呼吸对土壤温度变化的响应不敏感 ($Q_{10} < 1$) 在相同有机碳水平下, 明显高于沉积区和对照区(表 5). 随着有机碳水平升高而增大, 侵蚀区 Q_{10} 从 0.16 增大到 0.94. 沉积区土壤呼吸对土壤温度变化的响应随着有机碳水平的升高对土壤温度变化的响应由不敏感 ($Q_{10} < 1$) 到敏感 (Q_{10} 为 2.88, 3.12), 在有机碳水平 C5 时达到极度敏感 ($Q_{10} = 50.81 > 20$). 对照区土壤呼吸对土壤温度变化的响应随着有机碳水平的升高土壤温度敏感性指数 Q_{10} 先降低后升高, 在有机碳为 C3 时敏感性指数最低 ($Q_{10} = 1.25$), 在有机碳为 C5 时土壤呼吸对土壤温

度极度敏感 ($Q_{10} = 29.22 > 20$).

侵蚀区土壤呼吸受土壤湿度影响较大 ($R^2 > 0.9$) 在相同有机碳水平下, 明显高于沉积区和对照区(表 5). 随着有机碳水平升高, 侵蚀区土壤呼吸受土壤湿度的影响逐渐减小, R^2 从 0.997 减小到 0.907. 沉积区和对照区土壤呼吸受土壤湿度的影响基本相同, 在有机碳水平较高 (C4 和 C5) 或较低 (C1) 时受土壤湿度影响大于有机碳适中水平 (C2 和 C3).

由此可见, 土壤温度的变化对沉积区和对照区土壤呼吸影响大于侵蚀区; 土壤湿度的变化对侵蚀区土壤呼吸的影响大于沉积区和对照区.

表 5 不同有机碳水平下土壤呼吸与土壤温度和湿度的关系方程(0~5 cm)¹⁾

Table 5 Regression relations between soil respiration and soil temperature and moisture with different SOC background (0~5 cm)

有机碳水平	坡位	样本数	与土壤温度关系(0~5 cm)			与土壤湿度关系(0~5 cm)		
			关系方程	R ²	Q ₁₀	关系方程	R ²	
C1	对照区	66	$Y = 21.009 \times e^{0.2226T}$	0.131	9.26	$Y = 8.099W^2 - 29.939W + 37.033$	0.136	
	侵蚀区	66	$Y = 42.821 \times e^{-0.1806T}$	0.625	0.16	$Y = -0.1023W^2 + 6.4943W + 0.5705$	0.997	
	沉积区	33	$Y = 36.539 \times e^{-0.0601T}$	0.120	0.82	$Y = -1.0682W^2 + 10.388W - 7.3434$	0.571	
C2	对照区	66	$Y = 23.52 \times e^{0.1457T}$	0.192	4.29	$Y = -1.48W^2 + 6.1851W + 6.1357$	0.026	
	侵蚀区	66	$Y = 43.961 \times e^{-0.1964T}$	0.445	0.14	$Y = 0.0747W^2 + 5.6599W + 1.5988$	0.941	
	沉积区	33	$Y = 22.34 \times e^{0.1057T}$	0.339	2.88	$Y = 0.4292W^2 - 4.0184W + 21.85$	0.048	
C3	对照区	66	$Y = 28.373 \times e^{0.0225T}$	0.012	1.25	$Y = -0.0992W^2 + 2.601W + 3.1417$	0.182	
	侵蚀区	66	$Y = 45.571 \times e^{-0.1302T}$	0.449	0.27	$Y = 0.1525W^2 + 3.0641W + 0.7001$	0.967	
	沉积区	33	$Y = 19.82 \times e^{0.1137T}$	0.234	3.12	$Y = 0.5415W^2 - 3.4054W + 18.881$	0.046	
C4	对照区	66	$Y = 8.2931 \times e^{0.2749T}$	0.775	15.63	$Y = -2.2925W^2 + 18.097W - 18.782$	0.326	
	侵蚀区	66	$Y = 42.821 \times e^{-0.0585T}$	0.388	0.56	$Y = -0.062W^2 + 2.5318W + 2.845$	0.940	
	沉积区	33	$Y = 29.829 \times e^{0.0043T}$	0.001	1.04	$Y = -0.2112W^2 + 4.5945W - 2.432$	0.339	
C5	对照区	66	$Y = 8.1056 \times e^{0.3375T}$	0.959	29.22	$Y = -3.9511W^2 + 26.225W - 28.561$	0.384	
	侵蚀区	66	$Y = 29.323 \times e^{-0.0058T}$	0.003	0.94	$Y = -0.0336W^2 + 2.1272W + 3.4609$	0.907	
	沉积区	33	$Y = 3.9447 \times e^{0.3928T}$	0.976	50.81	$Y = -7.3426W^2 + 69.193W - 142.56$	0.522	

1) Y: 土壤呼吸速率 [$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], T: 土壤温度(°C), W: 土壤湿度(%)

2.3.3 土壤呼吸与有机碳和土壤温湿度的逐步回归分析

鉴于有机碳与土壤呼吸有明显的指数关系,而且非线性模型 $Y = ae^{bT}W^c$ 可以较好地反映土壤温湿度与土壤呼吸的关系(图1)。因此,可以得到如下

模型 $Y = ae^{bC+cT}W^d$, 可以较好地反映有机碳和土壤温湿度与土壤呼吸的关系 $P < 0.01$ (表6)。式中, Y 是土壤呼吸 CO₂ 速率 [$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], a、b、c、d 是拟合系数, C 是有机碳 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), T 是土壤温度, W 是土壤湿度。

表 6 侵蚀坡面土壤呼吸与有机碳和土壤湿度的模型¹⁾

Table 6 Soil respiration models based on SOC and soil temperature and moisture along eroded sloping land

坡位	样本数	模型	P
对照区	165	$Y = 0.0801 \times e^{0.0730C+0.0510T}W^{0.6677}$	<0.01
侵蚀区	330	$Y = 0.0116 \times e^{0.1030C+0.0279T}W^{1.6224}$	<0.01
沉积区	330	$Y = 0.1222 \times e^{0.0467C+0.0487T}W^{0.0633}$	<0.01

2.3.4 土壤呼吸与影响因子的相关性分析

在不同有机碳水平下,坡位对土壤呼吸的影响随着有机碳水平的提高而减弱;土壤湿度对土壤呼吸的影响在不同有机碳水平下都很明显(表7);土壤温度对土壤呼吸影响在不同有机碳水平下未表现

出规律性变化。

在不同坡位下,土壤呼吸与有机碳水平有极显著的相关性;土壤湿度对土壤呼吸影响显著,尤其是侵蚀区;土壤温度对土壤呼吸的影响在不同坡位下未表现出规律性变化。

表 7 不同有机碳背景下的土壤呼吸与影响因子的相关性¹⁾

Table 7 Correlation of soil respiration with different factors with different SOC background

项目	有机碳水平					坡位		
	C1 (n=135)	C2 (n=135)	C3 (n=135)	C4 (n=135)	C5 (n=135)	对照区 (n=135)	侵蚀区 (n=270)	沉积区 (n=270)
有机碳水平	—	—	—	—	—	0.621**	0.625**	0.632**
坡位	0.614**	0.741**	0.464**	0.160°	0.128	—	—	—
土壤温度(0~5 cm)	-0.436**	0.202**	-0.035	-0.330**	0.11	0.059	-0.409**	0.193**
土壤湿度(0~5 cm)	0.737**	0.279**	0.540**	0.645**	0.422°	0.155°	0.768**	0.283**

1) * 和 ** 分别表示显著 (P < 0.05) 及极显著 (P < 0.01) 相关

2.4 不同因素对土壤呼吸空间变异的贡献
将有机碳水平、坡位、土壤温度和土壤湿度

这 4 个影响土壤呼吸的因子用 GLM 模型进行方差成分估计分析(表8)。结果表明,有机碳对土

壤呼吸的贡献最大,可以解释土壤呼吸变异的 54.72%; 其次是土壤湿度和坡位,可以解释土壤呼吸变异的 18.86% 和 16.13%; 土壤温度可

以解释土壤呼吸变异的 10.29%。因此,土壤肥力是影响土壤呼吸的首要因子,其次是土壤湿度、坡位和土壤温度。

表 8 不同因素对土壤呼吸空间变异的贡献率(GLM 分析)¹⁾

Table 8 Contribution of different factors to the spatial variance of soil respiration(GLM)

项目	方差来源			
	有机碳	坡位	土壤温度(0~5 cm)	土壤湿度(0~5 cm)
方差	1.398	0.412	0.263	0.482
所占比例/%	54.72	16.13	10.29	18.86

3 讨论

侵蚀是全球性的环境问题,由侵蚀引起的土壤有机碳迁移和再分布强烈影响碳循环过程,是区域及全球碳循环研究的一个热点问题。一些学者认为侵蚀导致土壤碳排放加剧,使土壤成为一个碳源,每年侵蚀土壤向大气释放的 CO₂ 量可达 0.37 ~ 1 Pg^[28]; 另一部分学者认为侵蚀导致土壤成为一个 0.56 ~ 1 Pg 的碳汇^[29]。Lal^[14] 认为土壤侵蚀造成侵蚀区富含有机碳的表层土壤大量流失,泥沙搬运过程中团粒的破碎又加剧了有机碳矿化作用,最终在全球尺度上每年产生 0.8 ~ 1.2 Pg 的碳源。Van Oost 等^[12] 在全球尺度上研究认为在土壤颗粒的分离和搬运过程中虽然增加了土壤有机碳的分解,但土壤可能从植物中吸收碳,使土壤从大气中固存的碳比它释放的碳多,而且每年在全球耕作农田土壤中侵蚀可引起一个 0.12 Pg 的碳汇。这些争议的产生,一方面可能与已有研究的尺度、侵蚀强度和侵蚀土壤有机碳水平等差异有关; 另一方面,也可能因现阶段对侵蚀过程中土壤有机碳库动态及其影响因素认识不足,从而不能在侵蚀土壤碳排放的源汇效应上形成一致的认识。本研究从坡面尺度研究不同土壤有机碳背景下侵蚀对坡面土壤呼吸的影响,将有助于理解侵蚀条件下土壤碳排放的影响因素及碳源汇效应转化条件。

3.1 土壤呼吸速率与有机碳水平的关系

本研究结果显示,随着土壤有机碳水平升高,坡位对土壤呼吸的影响逐渐减小(表 7)。这是土壤有机碳对土壤呼吸的影响逐渐增大所致。冯书珍等^[30] 认为坡位在一定程度上可以通过引起坡面土壤物理性质的变化而影响有机碳水平。冯腾等^[31] 研究发现沉积坡位由于泥沙的沉淀富集,结构性好,土壤湿度和有机碳水平较侵蚀区高。因此,坡位对土壤呼吸的影响是有机碳含量、土壤结构和土壤湿度等综合作用的结果。尽管如此,侵蚀坡面不同坡

位对土壤呼吸空间变异总的贡献率达到 16.13%,在评价侵蚀对坡地土壤呼吸的影响时,应当考虑不同坡位的影响。

土壤有机碳是土壤呼吸的首要影响因子,对土壤呼吸空间变异的贡献率达 54.72%,对土壤呼吸的影响远大于土壤湿度、土壤温度和坡位(表 8),与陈书涛等研究的结果一致^[32]。有机碳是土壤呼吸的底物,有机碳的矿化是土壤呼吸的来源,而土壤温湿度是控制有机碳矿化的外界因子。杜丽君等研究表明有机碳含量的变化与土壤呼吸速率的变化基本相同^[33]。而且土壤之间有机碳含量的差异会造成土壤呼吸的差异^[34]。本试验结果表明在相同有机碳背景下土壤呼吸在侵蚀坡面具有明显的原位和异位效应,沉积区的土壤呼吸速率大于侵蚀区(表 2 和表 3)。这是由于径流将侵蚀区有机碳运输到沉积区,导致侵蚀区和沉积区有机碳含量差异的结果。

3.2 土壤呼吸速率与土壤温湿度的关系

许多研究表明,土壤温度与土壤呼吸具有显著性关系^[35,36]。但特定条件下,土壤温度可能对土壤呼吸无显著影响^[37]。本研究发现在部分小区土壤温度与土壤呼吸无显著相关性(表 7),这可能是由于本试验在 8 月进行,与全年相比 8 月土壤温度较高且变幅不大,土壤呼吸对土壤温度的敏感性较低,表现出土壤温度对土壤呼吸影响较小。试验条件下侵蚀坡面土壤温度对土壤呼吸空间变异的贡献率明显小于土壤湿度的贡献率(表 8),与孟春等研究结果一致^[38]。这可能由于 8 月多次降雨的影响,土壤湿度变幅较大且较快,导致该时期的土壤呼吸表现出了对土壤湿度较强的依赖性——土壤呼吸与土壤湿度关系极显著(表 7)。然而,Reith 等^[39] 认为土壤湿度对裸地土壤呼吸没有显著影响。这可能与试验的季节及土壤湿度有关。本研究结果表明夏季土壤湿度对土壤呼吸的影响较土壤温度明显,这与许多学者的研究结果一致^[40]。

不同坡位的土壤呼吸对土壤温湿度的响应具有

明显差异. 受侵蚀坡面水分迁移和汇聚的影响, 侵蚀区和沉积区水分差异较大, 而且侵蚀区土壤质量较差、保温性及持水性较低^[41]. 所以, 侵蚀区土壤温度变化较大且较高, 土壤湿度变化较大且较低(表9). 沉积区则相反, 土壤质量较高, 土壤保温及持水性较强、湿度较大^[42]. 所以, 沉积区土壤温度变化小且较低, 土壤湿度变化小且较高(图2). 相对侵蚀区而言, 沉积区土壤微生物活性受限于温度. 同时, 沉积区较侵蚀区有较多的微生物数量, 较小的温度变化可以影响微生物酶的活性^[43].

表9 侵蚀坡面不同部位土壤温湿度(0~5 cm)¹⁾

Table 9 Soil temperature and moisture at different position of the eroded slope(0-5 cm)

坡位	土壤温度/℃	土壤温度变异系数/%	土壤湿度/%	土壤湿度变异系数/%
对照区	30.92	17.17	12.65	34.23
侵蚀区	31.74	18.97	11.62	38.64
沉积区	30.81	17.23	14.47	29.92

3.3 侵蚀坡面的源汇效应与有机碳水平的关系

侵蚀坡面不同部位土壤呼吸量差异以及由此产生的土壤碳排放的源汇效应与坡面土壤有机碳水平有关(表3). 在本试验条件下, 土壤有机碳含量小于 $3.03 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 坡面侵蚀整体上表现为碳源过程. 在有机碳含量大于 $6.82 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 坡面侵蚀整体上表现为碳汇过程. 当土壤有机碳水平较低时, 土壤微生物作用的底物不足, 有机碳成为土壤呼吸的限制性因素. 相对而言, 与对照区相比, 沉积区因有机碳含量增加而导致土壤呼吸量的增加量大于侵蚀区呼吸量的减少量. 当土壤有机碳水平较高时, 土壤微生物活性受有机碳的影响较小. 此时, 沉积区增加的有机碳对微生物活性影响有限, 侵蚀区土壤呼吸量的减少幅度大于沉积区土壤呼吸量的增加幅度. 此外, 不同土壤有机碳背景下侵蚀区和沉积区土壤环境的差异可能也是侵蚀坡面土壤源汇效应差异的重要原因. 当土壤有机碳水平较低时, 土壤结构稳定性较差, 侵蚀区土壤团聚体破碎并迁移到沉积区, 加速了土壤有机碳的矿化; 当有机碳含量较高时, 土壤结构较稳定, 且沉积区土壤温湿度变化较小, 有利于沉积区有机碳的封存, 相对降低了沉积区土壤呼吸的增幅^[45]. 因此, 当土壤有机碳含量较高时, 坡面侵蚀趋向于碳汇过程; 在有机碳含量较低时, 坡面侵蚀趋向于碳源过程. 对于目前学术界关于土壤侵蚀的源汇问题持有两种观点的原因, 推测可能与全球尺度上所选的研究样点土壤有机碳水平差别较大有关.

本研究初步明确了不同有机碳背景下坡面侵蚀

因此, 土壤温度对沉积区土壤呼吸影响较侵蚀区明显(表9). 相对沉积区而言, 侵蚀区土壤湿度更有可能成为土壤微生物活动的限制因素. 特别是遇到降雨, 侵蚀区土壤呼吸由于“激增效应”短时间内会变很高, 导致侵蚀区变异系数的大于沉积区^[44]. 本试验由于部分数据是在雨后48 h内测定的, 受降雨“激增效应”的影响, 导致部分数据特别是侵蚀区土壤呼吸值较未发生降雨的条件下的呼吸值偏大. 但这也符合该地区在8月多雨时期土壤呼吸的特征.

沉积区土壤呼吸特征, 建立了不同有机碳背景下土壤呼吸与土壤温湿度之间的定量关系, 解决了在不同土壤温度下测定的土壤呼吸速率不具有比较性的问题. 辨析了有机碳、坡位和土壤温湿度对土壤呼吸的影响. 但由于试验结果只限于8月, 所得结论有其局限性. 因此, 尚需对侵蚀坡面土壤呼吸进行较长时间动态监测, 进一步明确侵蚀坡面土壤呼吸的原位-异位效应.

4 结论

(1) 侵蚀坡面不同部位土壤呼吸对温湿度的响应不同. 土壤温度对沉积区土壤呼吸影响较大, 土壤湿度对侵蚀区土壤呼吸影响较大.

(2) 侵蚀坡面土壤呼吸主要受有机碳含量的影响, 可以解释坡面土壤呼吸变异的54.7%, 土壤湿度可解释土壤呼吸变异的18.9%, 坡位可解释土壤呼吸变异的16.13%, 土壤温度可解释土壤呼吸变异的10.3%.

(3) 侵蚀对坡面土壤呼吸的影响具有明显的原位和异位效应. 侵蚀导致坡面侵蚀区土壤呼吸减小了21.14%, 沉积区土壤呼吸增大了21.93%. 侵蚀坡面土壤碳排放的源汇效应与有机碳水平有关. 当土壤有机碳含量较高时, 坡面侵蚀趋向于碳汇过程; 当有机碳含量较低时, 坡面侵蚀趋向于碳源过程.

参考文献:

- [1] Wohlfahrt G, Anfang C, Bahn M, et al. Quantifying nighttime ecosystem respiration of a meadow using eddy covariance, chambers and modelling [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 128(3-4): 141-162.

- [2] Högborg P, Read D J. Towards a more plant physiological perspective on soil ecology [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2006, **21**(10): 548-554.
- [3] 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 [J]. *环境科学*, 2003, **24**(6): 23-32.
- [4] Houghton R A. Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different? [J]. *Global Change Biology*, 2003, **9**(4): 500-509.
- [5] Regina I S, Tarazona T. Nutrient return to the soil through litterfall and throughfall under beech and pine stands of Sierra de la Demanda, Spain [J]. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 2000, **14**(3): 239-252.
- [6] 史晶晶, 耿元波. 内蒙古羊草草原根呼吸和土壤微生物呼吸区分的研究 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 341-347.
- [7] 聂小东, 李忠武, 王晓燕, 等. 雨强对红壤坡耕地泥沙流失及有机碳富集的影响规律研究 [J]. *土壤学报*, 2013, **50**(5): 900-908.
- [8] Heimann M, Reichstein M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks [J]. *Nature*, 2008, **451**(7176): 289-292.
- [9] 杨晶, 黄建辉, 詹学明, 等. 农牧交错区不同植物群落土壤呼吸的日动态观测与测定方法比较 [J]. *植物生态学报*, 2004, **28**(3): 318-325.
- [10] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 坡耕地黑土活性有机碳空间分布及生物有效性 [J]. *水土保持学报*, 2006, **20**(2): 59-63.
- [11] 耿肖臣, 李摇勇, 于寒青, 等. 坡耕地侵蚀区和堆积区初春土壤呼吸的变化 [J]. *核农学报*, 2012, **26**(3): 543-551.
- [12] Van Oost K, Quine T A, Govers G, *et al.* The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle [J]. *Science*, 2007, **318**(5850): 626-629.
- [13] Bajracharya R M, Lal R, Kimble J M. Erosion effects on carbon dioxide concentration and carbon flux from an Ohio alfisol [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, **64**(2): 694-700.
- [14] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget [J]. *Environment International*, 2003, **29**(4): 437-450.
- [15] Van Hemelryck H, Fiener P, Van Oost K, *et al.* The effect of soil redistribution on soil organic carbon: an experimental study [J]. *Biogeosciences*, 2010, **7**: 3971-3986.
- [16] Martin J G, Bolstad P V. Variation of soil respiration at three spatial scales: Components within measurements, intra-site variation and patterns on the landscape [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(3): 530-543.
- [17] Vincent G, Shahriari A R, Lucot E, *et al.* Spatial and seasonal variations in soil respiration in a temperate deciduous forest with fluctuating water table [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(9): 2527-2535.
- [18] 张雪, 李忠武, 申卫平, 等. 红壤有机碳流失特征及其与泥沙径流流失量的定量关系 [J]. *土壤学报*, 2012, **49**(3): 465-473.
- [19] 张芳, 郭胜利, 邹俊亮, 等. 长期施氮和水热条件对夏闲期土壤呼吸的影响 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(11): 3174-3180.
- [20] 朱会利, 杨改河, 韩新辉. 陕北安塞县水文要素变化特征分析 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2011, **39**(8): 178-184.
- [21] 赵景波. 黄土形成与演变模式 [J]. *土壤学报*, 2002, **39**(4): 459-466.
- [22] 姜艳, 王兵, 汪如玉, 等. 亚热带林分土壤呼吸及其与土壤温湿度关系的模型模拟 [J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(7): 1641-1648.
- [23] Jia B, Zhou G, Wang Y, *et al.* Effects of temperature and soil water content on soil respiration of grazed and ungrazed *Leymus schinensis* steppes, Inner Mongolia [J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, **67**(1): 60-76.
- [24] Flanagan L B, Johnson B G. Interacting effects of temperature, soil moisture and plant biomass production on ecosystem respiration in a northern temperate grassland [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, **130**(3-4): 237-253.
- [25] Epron D, Ngao J, Granier A. Interannual variation of soil respiration in a beech forest ecosystem over a six year study [J]. *Annals of Forest Science*, 2004, **61**(6): 499-505.
- [26] 严俊霞, 秦作栋, 张义辉, 等. 土壤温度和水分对油松林土壤呼吸的影响 [J]. *生态学报*, 2009, **29**(12): 6366-6376.
- [27] 张丽华, 陈亚宁, 赵锐锋, 等. 温带荒漠中温度和土壤水分对土壤呼吸的影响 [J]. *植物生态学报*, 2009, **33**(5): 936-949.
- [28] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, **304**(5677): 1623-1627.
- [29] Renwick W H, Smith S V, Slezee R O, *et al.* Comments on "managing soil carbon" (II) [J]. *Science*, 2004, **305**(5690): 1567.
- [30] 冯书珍, 苏以荣, 秦新民, 等. 喀斯特峰丛洼地土壤剖面微生物特性对植被和坡位的响应 [J]. *生态学报*, 2013, **33**(10): 3148-3157.
- [31] 冯腾, 陈洪松, 张伟, 等. 桂西北喀斯特坡地土壤¹³⁷Cs的剖面分布特征及其指示意义 [J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(3): 593-599.
- [32] 陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 等. 不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 1017-1025.
- [33] 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 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(7): 1607-1613.
- [34] 李洪键, 高玉凤, 严俊霞, 等. 不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4313-4320.
- [35] 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.
- [36] 张赛, 张晓雨, 王龙昌, 等. 西南丘陵区保护性耕作下小麦农田土壤呼吸及影响因素分析 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(7): 2815-2820.
- [37] Keith H, Jacobsen K L, Raison R J. Effects of soil phosphorus

- availability, temperature and moisture on soil respiration in *Eucalyptus pauciflora* forest [J]. *Plant and Soil*, 1997, **190** (1): 127-141.
- [38] 孟春, 罗京, 庞凤艳. 落叶松人工林生长季节土壤呼吸通量各组分的变化 [J]. *应用生态学报*, 2013, **24** (8): 2135-2140.
- [39] Reth S, Reichstein M, Falge E. The effect of soil water content, soil temperature, soil PH-value and the root mass on soil CO₂ efflux-A modified model [J]. *Plant and Soil*, 2005, **268** (1): 21-33.
- [40] 邓东周, 范志平, 王红, 等. 土壤水分对土壤呼吸的影响 [J]. *林业科学研究*, 2009, **22** (5): 722-727.
- [41] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 土壤侵蚀对农田中土壤有机碳的影响 [J]. *地理科学进展*, 2004, **23** (2): 77-87.
- [42] 陈尚红, 牛忠麟, 吴婕, 等. 紫色土丘陵区秸秆还田的腐解特征及对土壤肥力的影响 [J]. *水土保持学报*, 2006, **20** (6): 141-144.
- [43] 王才斌, 郑亚萍, 梁晓艳, 等. 施肥对旱地花生主要土壤肥力指标及产量影响 [J]. *生态学报*, 2013, **33** (4): 1300-1307.
- [44] 王旭, 闫玉春, 闫瑞瑞, 等. 降雨对草地土壤呼吸季节变异性的影响 [J]. *生态学报*, 2013, **33** (18): 5631-5635.
- [45] 肖胜生, 郑海金, 杨洁, 等. 土壤侵蚀/水土保持与气候变化的耦合关系 [J]. *中国水土保持科学*, 2011, **9** (6): 106-113.