

不同秸秆还田方式对黄土高原坡耕地土壤呼吸的影响

李英臣, 侯翠翠, 李小宇, 王奇博, 张芳, 李勇

(河南师范大学, 河南 新乡 453007)

摘要:选取豫西黄土高原典型玉米坡耕地,设置常规耕作+秸秆不还田(CT),常规耕作+秸秆还田(TSI)和常规耕作+秸秆覆盖(TSM)3种处理,采用 LI-8100A 土壤碳通量测定系统,研究非生长季不同秸秆还田方式对土壤呼吸时空变化的影响。结果表明:CT,TSI,TSM 处理下土壤呼吸速率随时间变化趋势基本一致,变化范围分别为 $0.22 \sim 1.23, 0.29 \sim 1.35, 0.26 \sim 0.91 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,在温度和水分较低时段 3 者差异不显著,在温度和水分较高的时段 3 种处理土壤呼吸差异显著,表现为 $\text{TSI} > \text{CT} > \text{TSM}$ 。3 种处理不同坡位土壤呼吸有明显差异,总体表现为坡下 > 坡中 > 坡上,TSM 处理下土壤呼吸空间异质性明显低于其他两种处理;不同坡位土壤温度和水分呈现明显的差异性,表现为坡下 > 坡中 > 坡上,并随温度和水分的升高,空间差异性增大。不同处理下土壤呼吸与温度和水分都呈现出显著的线性相关关系($p < 0.01$)。秸秆覆盖在非生长季能有效减少土壤呼吸量,而秸秆还田增加土壤呼吸量,因此秸秆覆盖从减少温室气体排放的角度是较合理的秸秆还田方式。

关键词:坡耕地; 秸秆覆盖; 秸秆还田; 土壤呼吸; 空间异质性

中图分类号:S154; S513

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)05-0122-05

Effects of Different Straw Returning Patterns on Soil Respiration in Sloping Cropland of the Loess Plateau

LI Yingchen, HOU Cuicui, LI Xiaoyu, WANG Qibo, ZHANG Fang, LI Yong

(He'nan Normal University, Xinxiang, He'nan 453007, China)

Abstract: The typical maize sloping cropland was selected in the Loess Plateau of west He'nan to investigate the effect of different straw returning patterns on soil respiration using LI-8100A soil carbon fluxes measuring system. Three patterns of straw returning were set up: conventional tillage with no straw returning (CT), conventional tillage with straw incorporation into the soil (TSI) and conventional tillage with straw mulch on soil surface (TSM). The results indicated that the tendency of soil respiration in the studied period was similar under different straw returning patterns, and soil respiration varied from $0.22 \sim 1.23, 0.29 \sim 1.35, 0.26 \sim 0.91 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, respectively. The difference of soil respiration rates among three patterns was significant when the soil temperature and moisture was high, and soil respiration decreased in the order: $\text{TSI} > \text{CT} > \text{TSM}$; Soil respiration rates under different slope position were obviously different in all three treatments, decreasing in the order: lower position > middle position > upper position. The spatial difference of soil respiration was less under TSM treatment than other treatments, and the difference was significant as the soil temperature and moisture was higher. Soil temperature and moisture were significant different under different positions, decreasing in the order: lower position > middle position > upper position. There was significant linear relationship between soil respiration and soil temperature and moisture ($p < 0.01$) under all three treatments. Straw mulching decreased soil respiration in non-growing season, therefore, straw mulching was a rational method of straw returning from the point of reducing greenhouse gas emission.

Keywords: sloping cropland; straw mulching; straw incorporation; soil respiration; spatial difference

土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的一个重要组成部分,每年释放的 CO_2 量约为 $80\sim 100 \text{ Pg}^{[1]}$,成为仅次于光合作用的第二大碳通量。农田生态系统土壤呼吸作为土壤碳排放的一个重要组成部分,同时也是受人类活动干扰最大的生态系统类型,其对全球碳循环的影响不容忽视。作物秸秆中含有丰富的营养元素,是一种良好的有机肥资源,同时,秸秆饲料是饲草食家畜粗饲料的重要来源之一^[2]。目前,秸秆还田是农业生产中普遍采用的作业方式,但是随着保护性农业的发展,秸秆覆盖作为一种重要的农业措施,因其在减少土壤侵蚀、保持土壤水分,增加土壤质量等方面的重要作用被越来越多的应用于农业生产中^[3]。

土壤侵蚀已经成为农业可持续发展的最大威胁之一,特别是在坡度比较大的山区及丘陵地区^[4]。秸秆覆盖被认为是控制土壤侵蚀的有效措施^[5]。黄土高原地区是我国粮食主产区,农业活动历史悠久。由于其独特的地形条件和密集的农事活动,成为世界上土壤侵蚀和退化最为严重的地区^[6]。鉴于秸秆覆盖措施在减少土壤侵蚀、提高水分利用效率、改变土壤理化性质等方面的作用,正被越来越多的应用于黄土高原地区农业生产中^[7]。现有研究主要集中在不同的秸秆还田量和不同覆盖方式对土壤呼吸的影响^[2],坡耕地不同处理下土壤呼吸空间变异性的相关研究较少^[8],而对冬季非生长季的研究更为少见。因此,本研究选取豫西黄土高原典型坡耕地,研究秸秆还田和秸秆覆盖措施对坡耕地非生长季土壤呼吸的影响,为精确估算黄土高原不同秸秆处理措施下土壤呼吸排放量提供数据支持,并为黄土高原旱作农业区发展合理的农业措施提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

野外监测试验依托河南师范大学灵宝土壤侵蚀与景观生态试验点。该试验点位于河南省灵宝市阳店镇柿子湾村($34^{\circ}31'N$, $110^{\circ}59'E$),该区属典型豫西黄土高原区域,气候为暖温带大陆性季风气候,平均气温约为 14.4°C ,无霜期约 206 d,年降水量为 $400\sim 900 \text{ mm}$,年际变化大, $60\%\sim 70\%$ 降水集中于夏季,春季降水少,雨季多暴雨,雨强大,是造成研究区土壤侵蚀的重要原因。土壤为典型的黄绵土。

1.2 试验设计

在试验点周围选取典型坡耕地,平均坡度 12° ,种植模式为一年一熟,种植作物为玉米,品种为中金 368,每年 4 月下旬耕种,10 月中旬收获,然后土地休

闲至次年玉米耕种。试验于 2013 年 5 月开始,试验随机做 3 个处理:常规耕作(CT)、常规耕作+秸秆还田(TSI)、常规耕作+秸秆覆盖(TSM),每个处理设 3 个重复。常规耕作按照当地的耕作习惯,各样地全年不灌溉,在种植玉米前肥料一次施入,施入量折合纯氮 100 kg/hm^2 (尿素,含氮 46%),施纯 P_2O_5 100 kg/hm^2 (过磷酸钙,含 P_2O_5 14%)。秸秆覆盖为秸秆打碎后均匀覆盖于土壤表层,常规耕作秸秆还田为秸秆打碎后随翻耕与土壤均匀混合,秸秆还田量为 $4\ 500 \text{ kg/hm}^2$ 。每块样地面积约 $5 \text{ m}\times 30 \text{ m}$,每块样地都与坡向平行,沿坡向侵蚀区和堆积区(即坡上、坡中和坡下)分别设置观测小区,每个小区设置 3 个重复,各小区的平均值代表整个样地土壤温室气体的排放通量,各个处理不同坡位对比研究秸秆处理措施下土壤呼吸的空间变异特征。

1.3 土壤呼吸测定

土壤呼吸速率采用 LI-8100A 土壤碳通量测定系统测定。测定基座为直径 20 cm、高 10 cm 的 PVC 管,测定前 24 h 嵌入土中约 8 cm,并将管内的杂草齐地面剪掉,每个小区 3 个重复,测定土壤呼吸的同时,采用 LI-8100A 自带的土壤温度探针插入呼吸环附近土壤 5 cm 测定土壤温度,采用 LI-8100A 自带的土壤水分探头插入呼吸环附近土壤 5 cm 测定土壤水分。土壤呼吸测定于 2013 年 11 月 17 日开始,2014 年 3 月 16 日结束,观测期间每半月左右测定 1 次,每次的测定时间为上午 9:00—12:00。

1.4 数据处理

采用 Origin Pro 9 进行作图,Excel 和 SPSS 19.0 软件进行数据统计和分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理下土壤温度和水分变化

不同处理土壤温度整个监测期呈相同的变化趋势,但 3 种处理之间温度有明显差异,表现为 $\text{TSI}>\text{CT}>\text{TSM}$,特别是在温度较高的时段差异更加明显;同种处理不同坡位之间温度总体表现为坡上<坡中<坡下,温度越高差异越显著。TSM 处理坡上部明显小于坡中部和坡上部,但是坡中部和坡下部差异不明显(图 1)。

3 种处理方式下土壤水分整个监测期整体都呈“V”型变化趋势,在 1 月下旬土壤含水量最低(图 2)。3 种处理土壤水分在监测开始阶段 TSM 明显大于其他两种处理,CT,TSI 差异不大;在其余时间段 TSM 略小于其他两种处理,但是差异不显著。TSM 处理不同坡段之间仅在 2013 年 11 月 17 日和

2014 年 3 月 2 日时间点坡上含水量明显低于坡中和坡下处理,其余时间土壤含水量基本无差异。CT 和 TSI 处理除 2014 年 3 月 16 日土壤含水量表现为坡下小于坡上和坡中处理外,整体都呈现坡上<坡中<坡下处理,而且大部分时间段(除 2014 年 1 月 3 日和 2014 年 1 月 19 日)不同坡位之间含水量差异较大。

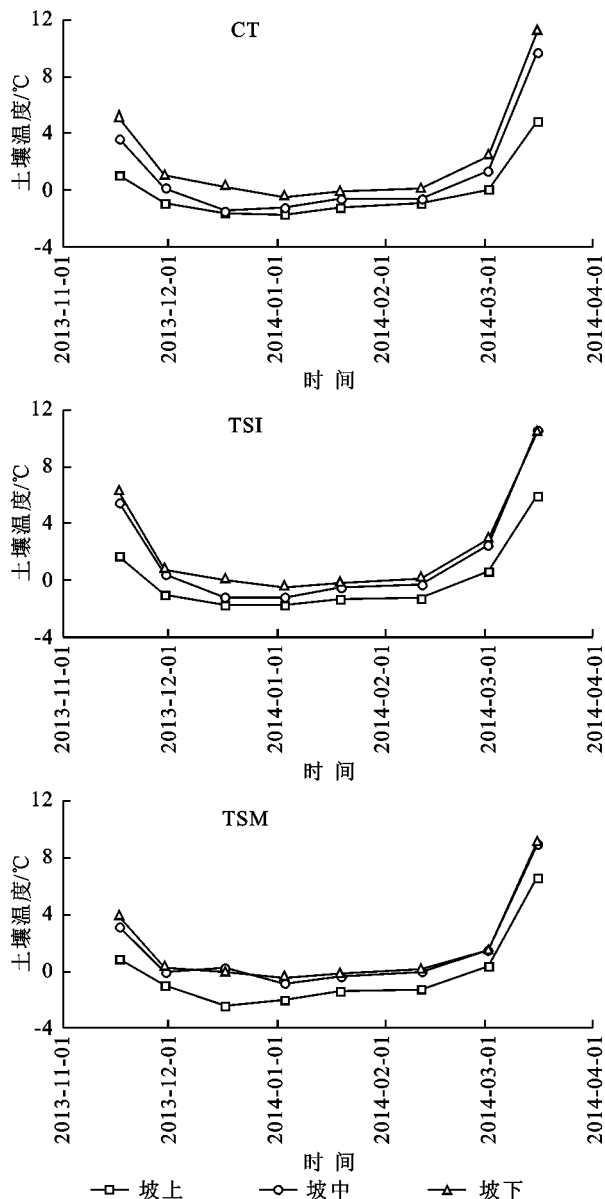


图 1 不同秸秆还田处理方式下不同坡段土壤温度变化

2.2 不同处理下土壤呼吸随时间变化

3 种不同处理条件下不同坡位土壤呼吸差异明显,除个别时间点之外(TSI 处理 2013 年 11 月 30 日),均表现为坡下>坡中>坡上,而且温度越高,差异越明显,3 种处理在 2013 年 11 月 17 日、2014 年 3 月 16 日两个时间点坡中和坡下显著高于坡上处理,处理间差异达到显著水平(图 3)($p<0.05$)。CT,TSI,TSM 处理坡上土壤呼吸量随时间变化不大,且处理间差异不显著,波动范围分别为 0.18~

0.34,0.18~0.42,0.18~0.46 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。坡中和坡下土壤呼吸季节波动大,相比较之下,CT,TSI 比 TSM 随时间变异系数大,3 者的变异系数在坡中分别为 88%,81%,54%,坡下分别为 100%,77%,44%。

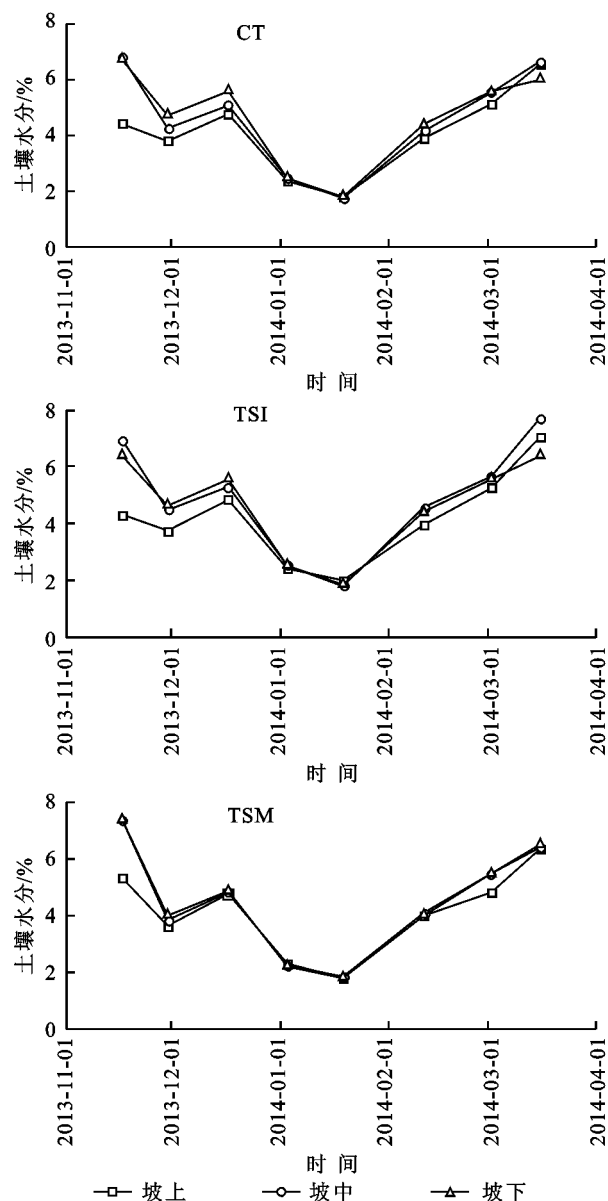


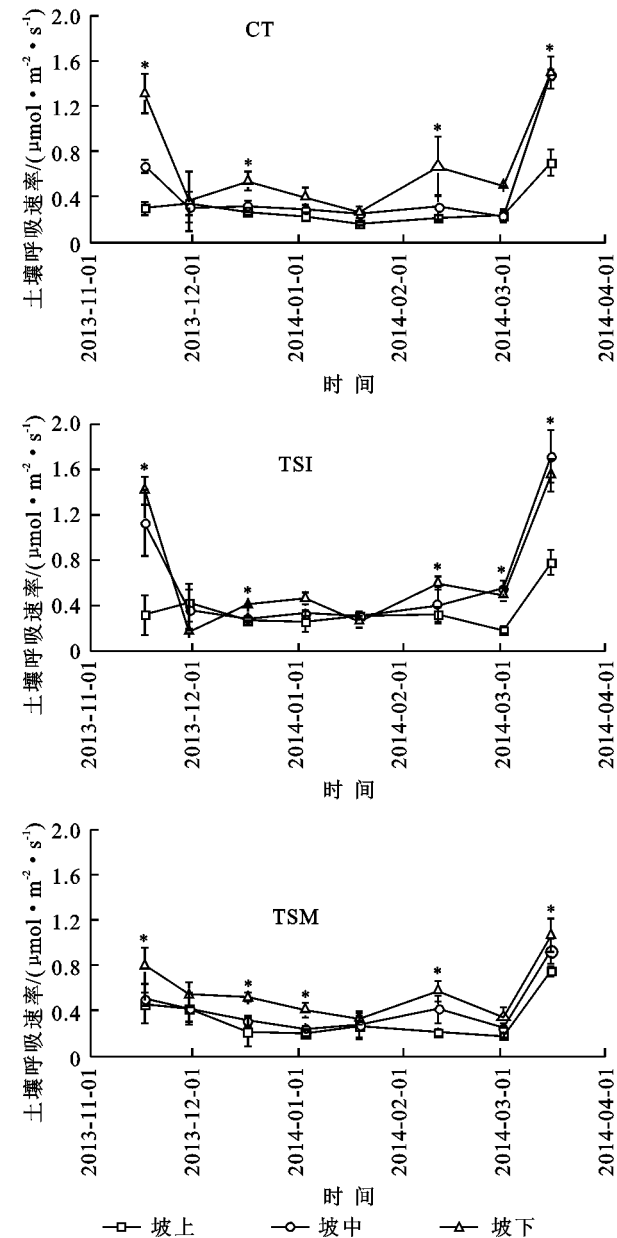
图 2 不同秸秆还田处理方式下不同坡段土壤水分变化

3 种处理土壤呼吸平均值随时间变化趋势基本一致,都呈两端高,中间低的变化趋势,在温度较低的时段(12 月、1 月、2 月)3 者的差异不显著,但是在温度较高的时间 3 者差异显著,分别为 TSI>CT>TSM(图 4)。

2.3 土壤呼吸和温度、水分的关系

不同处理之间土壤呼吸与土壤温度、水分都存在极显著的线性相关关系。CT,TSI,TSM 三种处理土壤呼吸与土壤温度的相关系数分别为 0.922,0.926,0.880。TSM 处理土壤呼吸随温度升高增长较慢,TSI 处理土壤呼吸随温度升高增长较快。3 种处理

土壤呼吸与土壤水分也有显著的相关关系,相关系数分别为 0.640,0.680,0.619。



注: * 表示不同坡位之间土壤呼吸差异达到显著水平($p<0.05$)。

图 3 不同秸秆还田处理方式下不同坡段土壤呼吸速率变化

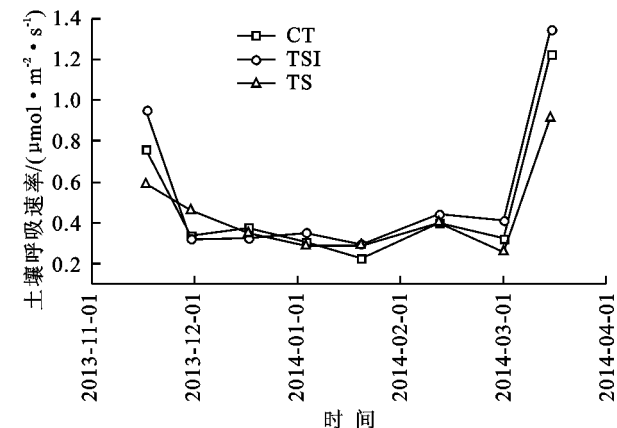


图 4 不同秸秆还田处理土壤呼吸速率平均值

3 讨论与结论

3.1 讨论

农田生态系统土壤呼吸受土壤理化性质、土地利用方式、温度、水分、施肥、耕作制度等多种因素的影响。大部分研究认为秸秆覆盖增加土壤呼吸,并随着秸秆覆盖量的增加 CO_2 排放量增大^[9-10],但本研究发现 TSM 处理降低土壤呼吸速率,TSI 处理增加土壤呼吸(图 3—4)。究其原因主要有以下 3 方面:首先 TSM 处理土壤温度有所降低,TSM 处理比 CT,TSI 处理监测期平均温度下降了 0.66,0.69℃,温度与土壤呼吸有重要的相关关系(表 1),其次,TSM 处理土壤水分的空间变异性减小(图 2),监测期除监测初期平均土壤水分值高于其他两种处理之外,其余阶段土壤水分明显低于 TSI,CT 处理,原因可能为冬季该区域降雨较少,而秸秆覆盖对降雨下渗有一定的阻挡作用,因此秸秆覆盖处理冬季平均水分含量较低,这可能也是造成土壤呼吸降低的原因;最后,TSM 处理可有效减少土壤侵蚀^[5],并进一步减少土壤表层活性有机碳 CO_2 释放,减少土壤呼吸的空间排放差异(图 3),最终降低总的土壤呼吸量。与 CT 处理相比,TSI 处理明显增加土壤呼吸,直接原因为秸秆本身会释放一部分 CO_2 ^[10-11],另外秸秆还田对土壤温度和水分影响不大(图 1—2),而秸秆作为土壤重要的有机质来源,可以通过改变土壤中微生物量和微生物群落,增加土壤总孔隙度,最终增加土壤呼吸量^[12]。

土壤温度和水分是土壤重要的物理性质,影响土壤中所进行的所有反应和进程、土壤微生物活性、土壤养分的迁移变化等。有些学者用指数函数、线性函数、二次函数等形式拟合了土壤呼吸与二者之间的关系^[12-14],得出不同的拟合关系,可能是由于研究区域和研究时间的不同造成的。本研究中土壤温度和土壤水分都与土壤呼吸有极显著的线性相关关系(表 1),主要原因为本研究监测期主要在非生长季,土壤温度相对较低,降水较少,土壤水分也较低,温度和水分都为土壤呼吸的限制性因子,土壤呼吸量都随温度和水分的增加而增加。明确这种关系对正确评估非生长季黄土高原地区土壤呼吸具有重要的指导意义。

本研究中,不同处理下土壤呼吸都表现出明显的空间异质性,总体都表现为坡上侵蚀区土壤呼吸较低,坡下堆积区土壤呼吸速率较高,这与其他大部分研究结果相同^[15-16]。土壤侵蚀引起土壤有机碳和营养空间再分布可能是引起土壤呼吸空间异质性的重要原因^[17]。坡耕地上部土壤有机碳减少,微生物呼吸基质减少,下部土壤有机碳增加,微生物可利用基

质增多,进而影响土壤呼吸强度^[8];另外土壤侵蚀可引起土壤容重、土壤孔隙度等物理性质改变也会引起土壤呼吸的空间差异性^[15-16]。以后研究应加强坡耕地土壤微生物和土壤理化性质空间变异性研究,以便从机理上揭示土壤呼吸空间差异性的机理。

另外,本研究认为坡地土壤温度和水分差异是造

成土壤呼吸空间差异性的另一个重要原因,3 种不同处理的坡地土壤温度和水分都有较明显的差异,尤其是在温度较高的监测期差异更加显著,秸秆覆盖通过改变侵蚀堆积速率,影响土壤温度,并进一步影响土壤呼吸(图 1—2),这与 Bajracharya 等^[18]研究结论相似。

表 1 土壤呼吸与土壤温度和土壤水分的关系

处理	土壤温度				土壤水分			
	拟合方程	R	p	df	拟合方程	R	p	df
CT	$y=0.105x+0.359$	0.922	0.000	23	$y=0.153x-0.184$	0.640	0.001	23
TSI	$y=0.112x+0.384$	0.926	0.000	23	$y=0.174x-0.242$	0.680	0.000	23
TSM	$y=0.067x+0.367$	0.880	0.000	23	$y=0.084x+0.073$	0.619	0.001	23

本研究发现不同秸秆还田处理对土壤呼吸空间异质性有一定的影响,其中 TSM 处理土壤呼吸空间差异性明显低于 CT,TSI 处理,尤其是在温度和水分条件较高的时期,而后面两种处理差异不显著(图 3)。我们认为不同秸秆还田处理主要是通过影响土壤温度和土壤水分进而影响土壤呼吸,CT,TSI 处理与土壤温度和土壤水分的相关系数更高,而且随温度和水分的变化,土壤呼吸速率变化更快,而 TSM 处理下随温度和水分的变化,土壤呼吸变化更小(表 1),表明秸秆覆盖处理下土壤温度和水分对土壤呼吸空间差异性的影响变小,究其原因一方面秸秆覆盖下土壤侵蚀速率降低,土壤空间差异性变小,另一方面秸秆覆盖下土壤温度和湿度的时空变异小(图 1—2),最终导致秸秆覆盖下土壤呼吸的时空变异性小于其他两种处理。未来在评估坡耕地温室气体排放时要加强土壤呼吸空间异质性研究,并注意耕作和秸秆覆盖对这种空间异质性的影响,使估算更加准确。

3.2 结 论

(1) 不同的秸秆还田方式下土壤呼吸存在差异,秸秆覆盖降低土壤呼吸,秸秆还田促进土壤呼吸,特别是在温度水分较高的时段表现更为明显。

(2) 不同处理下土壤呼吸都存在空间异质性,不同坡位表现为坡下>坡中>坡上,秸秆覆盖使土壤呼吸空间异质性程度降低。

(3) 土壤温度和水分存在空间差异性,且都与土壤呼吸存在显著的线性相关关系。

(4) 通过对比研究,在黄土高原非生长季,秸秆覆盖还田是较理想的降低 CO₂ 排放的方式,既降低温室气体排放,减少土壤呼吸空间异质性,又增加了土壤有机碳的输入,是一种合理的农作方式,应积极加以推广。

参考文献:

bility in global soil respiration, 1980—94[J]. *Global Change Biology*,2002,8(8):800-812.

[2] 王如芳,张吉旺,董树亭,等. 我国玉米主产区秸秆资源利用现状及其效果[J]. *应用生态学报*,2011,22(6):1504-1510.

[3] 唐涛,郝明德,单凤霞. 人工降雨条件下秸秆覆盖减少水土流失的效应研究[J]. *水土保持研究*,2008,15(1):9-11.

[4] Hassouni K, Bouhlassa S. Estimate of soil erosion on cultivated soils using ¹³⁷Cs measurements and calibration models: A case study from Nakhla watershed, Morocco[J]. *Canadian Journal of Soil Science*,2006,86(1):77-87.

[5] Lal R, Reicosky D C, Hanson J D. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007,93(1):1-12.

[6] Feng J, Chen C, Zhang Y, et al. Impacts of cropping practices on yield-scaled greenhouse gas emissions from rice fields in China: A meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*,2013,164:220-228.

[7] 孙利军,张仁陟,黄高宝,等. 黄土高原半干旱区保护性耕作适应性评价[J]. *中国生态农业学报*,2008,16(5):1122-1126.

[8] 耿肖臣,李勇,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):0543-0551.

[9] Lenka N K, Lal R. Soil aggregation and greenhouse gas flux after 15 years of wheat straw and fertilizer management in a no-till system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013,126:78-89.

[10] Bavin T K, Griffis T J, Baker J M, et al. Impact of reduced tillage and cover cropping on the greenhouse gas budget of a maize/soybean rotation ecosystem[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*,2009,134(3):234-242.

[11] Oorts K, Merckx R, Gréhan E, et al. Determinants of annual fluxes of CO₂ and N₂O in long-term no-tillage and conventional tillage systems in northern France [J]. *Soil and Tillage Research*,2007,95(1):133-148.

[1] Raich J W, Potter C S, Bhagawati D. Interannual varia-

- 上生物量及其空间分布[J]. 生态学报, 2006, 26(6): 1818-1824.
- [7] 李刚, 赵祥, 刘碧荣. 晋北4种灌木地上生物量预测模型的构建[J]. 林业资源管理, 2014(1): 71-76.
- [8] 翟晓江, 郝红科, 麻坤, 等. 基于TM的陕北黄龙山森林生物量模型[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(1): 41-45.
- [9] 鲁绍伟, 陈波, 潘青华, 等. 北京山地不同林分乔木层生物量和生产力研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(4): 155-159.
- [10] 杨昊天, 李新荣, 刘立超, 等. 荒漠草地4种灌木生物量分配特征[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1340-1348.
- [11] 金铭, 李毅, 王顺利, 等. 祁连山高山灌丛生物量及其分配特征[J]. 干旱区地理, 2012, 35(6): 952-959.
- [12] 陈生云, 刘文杰, 叶柏生, 等. 疏勒河上游地区植被物种多样性和生物量及其与环境因子的关系[J]. 草业学报, 2011, 20(3): 70-83.
- [13] 雷蕾, 刘贤德, 王顺利, 等. 祁连山高山灌丛生物量分配规律及其与环境因子的关系[J]. 生态环境学报, 2011, 20(11): 1602-1607.
- [14] 张佳, 温仲明, 杨尚斌. 基于自然植被的延河流域生物量空间分布格局评估[J]. 水土保持研究, 2010, 17(3): 35-39.
- [15] 王淑元, 林升寿. 我国森林生态系统定位研究的进展[J]. 世界林业研究, 1995(4): 44-49.
- [16] McConnaughay K D M, Coleman J S. Biomass allocation in plants: Ontogeny or optimality? A test along three resource gradients[J]. Ecology, 1999, 80(8): 2581-2593.
- [17] Schenk H J, Jackson R B. Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems[J]. Journal of Ecology, 2002, 90(3): 480-494.
- [18] Bloom A J, Chapin F S, Mooney H A. Resource limitation in plant: An economic analogy[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1985, 16: 363-392.
- [19] Ryser P, Eek L. Consequences of phenotypic plasticity vs. interspecific differences in leaf and root traits for acquisition of aboveground and belowground resources[J]. American Journal of Botany, 2000, 87(3): 402-411.
- [20] Chapin F S, Bloom A J, Field C B, et al. Plant responses to multiple environmental factors[J]. BioScience, 1987, 37: 49-57.
- [21] Bloom R G, Mallik A U. Indirect effects of black spruce (*Picea mariana*) cover on community structure and function in sheep laurel (*Kalmia angustifolia*) dominated heath of eastern Canada[J]. Plant & Soil, 2004, 265(1/2): 279-293.
- [22] 陆平, 严庚雪. 新疆森林[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1989.
- [23] 黎磊, 周道玮, 盛连喜. 密度制约决定的植物生物量分配格局[J]. 生态学杂志, 2011, 30(8): 1579-1589.
- [24] 牛存洋, 阿拉木萨, 宗芹, 等. 科尔沁沙地小叶锦鸡儿地上—地下生物量分配格局[J]. 生态学杂志, 2013, 32(8): 1980-1986.
- [25] 黎燕琼, 郑绍伟, 龚固堂, 等. 不同年龄柏木混交林下主要灌木黄荆生物量及分配格局[J]. 生态学报, 2010, 30(11): 2809-2818.



(上接第126页)

- [12] 王丙文, 迟淑琦, 田慎重. 不同玉米秸秆还田方式对冬小麦田土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1374-1380.
- [13] 李元, 时伟宇, 闫美杰, 等. 土壤呼吸影响因素概述及展望[J]. 水土保持研究, 2013, 20(5): 311-316.
- [14] 马涛, 周金星. 滩地人工杨树林土壤呼吸变化规律与环境因子的关系研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(6): 31-36.
- [15] Fiener P, Dlugob V, Korres W, et al. Spatial variability of soil respiration in a small agricultural watershed: Are patterns of soil redistribution important[J]. Catena, 2012, 94: 3-16.
- [16] Van Hemelryck H, Govers G, Van Oost K, et al. Evaluating the impact of soil redistribution on the in situ mineralization of soil organic carbon[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2011, 36(4): 427-438.
- [17] Li Y, Zhang Q W, Reicosky D C, et al. Changes in soil organic carbon induced by tillage and water erosion on a steep cultivated hillslope in the Chinese Loess Plateau from 1898—1954 and 1954—1998[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(G1): 531-532.
- [18] 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.