

黄土丘陵区4种植被类型土壤呼吸季节及年际变化*

张艳如^{1,2} 陈秋文^{1,2} 孙美美^{2,3} 时伟宇⁴ 杜盛^{2,3**}

¹西北农林科技大学林学院 杨凌 712100

²西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 杨凌 712100

³中国科学院水利部水土保持研究所 杨凌 712100

⁴西南大学地理科学学院 重庆 400715

摘要 土壤碳库是陆地生态系统中的最大碳库,通过土壤呼吸向大气排放CO₂是土壤碳固存的重要支出项.以黄土丘陵区4种典型植被类型(天然辽东栎林、人工刺槐林、天然侧柏林、天然灌丛)为研究对象.在各植被类型中设置20 m × 20 m的样方,在每个样方的四角和中心分别设立一个PVC环,测定分析3个生长季(2011、2013、2014年)林地土壤呼吸特征及其对主要环境因子的响应.结果表明,各林地生长季内土壤呼吸表现出明显的季节变化规律,前期较低,中后期达到较高水平,4种植被类型呈现大致相同的变化趋势.不同植被类型间土壤呼吸水平存在一定差异,总体表现为辽东栎林>侧柏林>灌丛>刺槐林.3个生长季土壤呼吸速率在植被类型间的变异系数较年际的变异系数低.4种植被类型的土壤温湿度与土壤呼吸的相关关系都极显著($P < 0.01$),但土壤呼吸速率对土壤湿度的响应更敏感,刺槐林尤为突出.用土壤温度和土壤湿度共同拟合土壤呼吸速率效果良好,可以较好地解释某种植被类型对环境条件的响应规律.综上,在黄土丘陵区,4种植被类型土壤呼吸具有明显的季节性;就年际变化来看环境因素对其影响大过植被类型间的影响;干旱半干旱地区土壤湿度对土壤呼吸的影响更显著,且土壤温度与土壤湿度共同拟合对土壤呼吸解释性更强.(图1 表6 参29)

关键词 土壤呼吸;土壤湿度;土壤温度;黄土丘陵区;生长季

CLC S714

Seasonal and interannual variation of soil respiration in four vegetation types in the loess hilly region*

ZHANG Yanru^{1,2}, CHEN Qiuwen^{1,2}, SUN Meimei^{2,3}, SHI Weiyu⁴ & DU Sheng^{2,3**}

¹ College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

² State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

³ Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling 712100, China

⁴ School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract Soil carbon (C) stock is the largest C pool in terrestrial ecosystems, and the emission of CO₂ through soil respiration contributes to the majority of soil C expenditure and atmospheric C. Soil respiration is also one of the major processes controlling the C budget of terrestrial ecosystems. A slight change in soil CO₂ emission might cause drastic variations in global C balance. Therefore, it is of great significance to investigate the characteristics of soil respiration of soils growing different types of vegetation over a long period, and determine its relationship with variables such as soil temperature and moisture. The rate of soil respiration was measured each month in the growing seasons (from April to October) of 2011, 2013, and 2014 using the Li-8100 CO₂ flux measurement system in the central Loess Plateau. Four types of vegetation (*Quercus liaotungensis*, *Platycladus orientalis*, *Robinia pseudoacacia*, and a natural shrub) were chosen for the periodical measurements. A permanent sample plot was established for each type of vegetation, and five polyvinyl chloride (PVC) collars were placed in each plot for the measurements. The temperature and water content of the soil in the upper 12 cm near the collar were measured using a digital soil temperature probe and a TDR 200 soil moisture meter at the same time when the soil respiration was measured. The soil respiration rates were fitted to the soil temperature and moisture with an exponential function, power function, linear function, and an equation combining the two variables. The results showed that: (1) the seasonal variation in the rates of soil respiration in the soils growing the four types of vegetation were almost the same, and were lower in the earlier period and

收稿日期 Received: 2017-09-20 接受日期 Accepted: 2017-11-08

*国家自然科学基金项目(41171419, 41201258, 41411140035, 41471440)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (41171419, 41201258, 41411140035, 41471440)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: shengdu@ms.iswc.ac.cn)

then increased to high levels in the middle and later periods; (2) the rates of soil respiration in the same month varied with the type of vegetation grown, and were in the descending order: *Q. liaotungensis* > *P. orientalis* > shrub > *R. pseudoacacia*; (3) the average values of the rates of soil respiration in 2011, 2013, and 2014 were 2.77, 3.48, and 5.08 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectively. The variation in soil respiration was higher across the three years than the variation for the types of vegetation grown; and (4) the rate of soil respiration was positively correlated to soil temperature and moisture for all the types of vegetation. A better fit was obtained by using the equation that included both the variables, soil temperature and moisture, than by an equation that included a single factor. Our results suggested that both seasonal and inter-annual variations of soil respiration occurred in the soils growing the four types of vegetation in the region. The temperature and water content of soils are the major regulating factors, and soil respiration in the Loess Plateau is more greatly affected by environment factors than by the type of vegetation.

Keywords soil respiration; soil moisture; soil temperature; loess hilly region; growing season

工业革命以来大气中温室气体(CO_2 、 CH_4 等)的浓度持续增长,对人类生存环境造成严重威胁。有资料显示1750年至今的260多年间大气中 CO_2 浓度已从278.0 mg/L上升至406.8 mg/L^[1]。除燃烧化石燃料外,土壤呼吸也是向大气排放 CO_2 的重要来源。全球约有1 400-1 500 Pg碳以有机形式储存于土壤中,是陆地生态系统中最大的碳库^[2]。土壤呼吸是陆地生态系统碳循环中的最大输出项,土壤碳库发生的微小变动,都会导致大气中 CO_2 总量的剧烈变化^[3-5]。因此,研究生态系统土壤呼吸,估测不同植被类型土壤 CO_2 的排放量,探明其动态特征及相关机理,不仅可以揭示生态系统的生物地球化学过程,而且对于预测全球气候变化具有重要作用。

土壤呼吸是土壤向大气释放 CO_2 的一个较为复杂的过程,受土壤生物因子和环境因子等多种因素的影响,因而具有很大的时间和空间异质性^[6-8]。各种因子对土壤呼吸的影响程度不固定,并相互影响和制约。因生物因子(植被和土壤生物)的不同,环境因子对土壤呼吸的影响也不尽相同^[9-10]。其中土壤温度与土壤湿度是对土壤呼吸影响最主要的两大环境因子,Shi等在黄土丘陵区刺槐(*Robinia pseudoacacia*)与辽东栎(*Quercus liaotungensis*)林雨后土壤呼吸研究^[10]中认为土壤温湿度与土壤呼吸关系显著;牛莉平等的温带森林不同演替阶段下土壤呼吸研究^[11]表明,在环境因子中0-5 cm土壤温度与土壤 CO_2 排放通量相关系数最高,土壤温度监测对土壤呼吸的估算作用明显。

地处半湿润半干旱地区的黄土丘陵区生态环境脆弱,是生态恢复的重点区域。近年来,各种类型的天然植被通过保护得以恢复,人工林草植被也被广泛种植,在发挥水土保持作用的同时,也发挥固碳释氧等生态功能。关于黄土丘陵区不同植被类型土壤碳循环的研究报道大都侧重于单一植被类型或较短的时间尺度。例如周正朝和上官周平一次性测定并分析了4个地区刺槐人工林土壤呼吸与土壤温湿度、土壤空隙度以及土壤有机碳的关系,发现土壤空隙度和有机碳对土壤呼吸速率影响最大^[12]。李红生等研究了侧柏(*Platycladus orientalis*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)4种林地土壤呼吸在一个生长季的6-9月份的变化特征,表明相同自然条件下不同植被类型土壤呼吸差异较大,且4种植被类型土壤呼吸与土壤湿度关系并不显著^[13]。Shi等研究了侧柏林地土壤呼吸4-10月份的日变化及季节变化特征,认为土壤温湿度对土壤呼吸的影响都不显著,尤其是土壤湿度的影响^[14]。周

小刚等研究分析^[15]得到在刺槐林地添加地表凋落物的量使土壤呼吸速率增加26%,不同土地利用类型土壤呼吸对土壤温度的影响存在本质差异,而土壤湿度不能解释土壤呼吸在不同土地利用类型间的显著差异。此外Shi等还对几种典型植被类型的冬季 CO_2 排放进行估算和模拟分析^[16],发现冬季 CO_2 排放量为生长季的11%-25%,土壤温度及土壤湿度对土壤呼吸共同作用效果更好。上述研究大多基于土壤温度和湿度等环境因子的影响分析了土壤呼吸的日变化或季节变化特征,多数研究周期较短,有些研究仅为临时样地。对于不同植被类型在较长时间尺度上的研究亟待深入开展。

本研究以黄土丘陵区4种常见植被类型为对象,通过长时间定期测定以揭示该区域典型植被类型土壤碳排放动态特征及其影响因素,为较大尺度上的碳排放估算和模拟提供理论支持。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区及实验地概况

研究区位于陕西省延安市南郊公路山林区(36°25'N, 109°25'E, 海拔1 353 m)。属于森林-森林草原区的过渡地带,温带半干旱气候,冬春寒冷干旱,夏秋温暖多雨。根据延安市气象台(距实验地约15 km)的统计资料(1988-2007),该地区平均年降水量为498 mm,其中6-9月份降水量约占全年降水量的71%。年平均气温为10.6 °C。

在实验地选择该区的4种主要植被类型人工刺槐林、天然辽东栎林、天然侧柏林和天然灌丛为研究对象。其中天然辽东栎林除优势种辽东栎外,伴生树种有山杏(*Ameniaca sibirica*)、侧柏等;人工刺槐林为刺槐纯林,林下灌草稀疏杂生;天然侧柏林为侧柏纯林;天然灌丛主要由紫丁香(*Syringa oblata*)、黄蔷薇(*Rosa hugonis*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)等组成。各类型样地大小均为20 m × 20 m,相距100-300 m,气候环境相近。土壤均属微碱性,pH值从8.18(侧柏林)到8.45(刺槐林)不等。实验林地基本信息及土壤化学性状均于2014年取样测定,结果见表1和表2。

1.2 样点布设及测定方法

各植被类型在前期设置的样地内设置了5个PVC环作为土壤呼吸测定气室。PVC环高度为13 cm,插入土壤内深度7 cm即气室高度为6 cm,直径为20 cm,与土壤碳通量自动测量系统(LI-8100, LI-COR, USA)所配备的测量气室(Model

表1 研究地基本信息

Table 1 Basic status of the study area

植被类型 Vegetation type	林龄 Age (t/a)	坡度 Slope (a°)	坡向 Aspect	郁闭度 Canopy density ($P\%$)	平均树高 Mean height (h/m)	株数密度 Stand density (n/hm^2)
辽东栎林 Oak	60	22	东北 Northeast	70	10.4	1800
刺槐林 Black locust	35	26	东南 Southeast	60	9.5	3000
侧柏林 Oriental arborvitae	55	10	东南 Southeast	40	9.2	1250
灌丛 Shrub	> 60	10	西 West	80	-	-

表2 各植被类型土壤化学性质

Table 2 Soil chemical properties of the four vegetation types (mean \pm SE)

植被类型 Vegetation type	有机碳 Organic C (w/%)	全氮 Total N (w/%)	pH	C/N
辽东栎林 Oak	2.86 \pm 0.42	0.26 \pm 0.02	8.23 \pm 0.11	11.07 \pm 0.93
刺槐林 Black locust	1.08 \pm 0.09	0.11 \pm 0.00	8.45 \pm 0.04	9.51 \pm 0.50
侧柏林 Oriental arborvitae	1.88 \pm 0.24	0.17 \pm 0.02	8.18 \pm 0.06	11.08 \pm 0.15
灌丛 Shrub	2.26 \pm 0.27	0.23 \pm 0.02	8.27 \pm 0.03	9.84 \pm 0.23

8100-103) 相匹配。

测定选择普通天气的上午(8:00-12:00)进行, 雨后由于激发效应土壤呼吸会显著增高, 测定前一周应无降雨。呼吸环内的小草等活体物质定期应予剪除, 较大的凋落物也定期移除, 保持气室体积固定不变。每个月对各植被类型土壤呼吸测定1次, 每次每个呼吸环测量1次。本研究数据包括2011、2013和2014年生长季(4-10月)的测定值, 由于降雨等天气原因, 2012年的数据有所缺失, 因而未予采用。

在对每个PVC环进行土壤 CO_2 排放测定的同时同步测定呼吸环旁边的土壤温湿度。土壤温度的测量采用热电偶探头温度计, 插入土壤12 cm深度测量; 土壤湿度测量采用便携式土壤水分速测仪(TDR-200, Spectrum, USA), 插入土壤深度也是12 cm, 显示数值代表0-12 cm内土壤平均容积含水量。

1.3 数据处理

数据统计分析使用SPSS 20.0软件, 植被类型年际间土壤呼吸的差异显著性采用单因素方差分析(One-way ANOVA); 分别用指数方程(Q_{10} 方程)和线性方程对土壤温度的影响规律进行拟合; 对土壤湿度的影响规律则采用线性和幂函数进行拟合; 此外, 还用土壤温度及土壤湿度的混合函数进行了拟合分析。方程如下(线性函数省略):

$$SR = \alpha \times e^{\beta T} \quad (1)$$

$$SR = \alpha \times W^\beta \quad (2)$$

式中, SR为土壤呼吸速率, T 为土壤温度, W 为土壤湿度, α 、 β 为常数。

土壤呼吸的温度敏感性指数 Q_{10} 依据式(1)计算:

$$Q_{10} = e^{10\beta} \quad (3)$$

此处的 β 为式(1)中的 β 。

整合土壤温度与土壤湿度两个因子的拟合关系采用下列方程:

$$SR = \alpha \times T^\beta \times W^\gamma \quad (4)$$

此处的 α 、 β 和 γ 都为常数。

2 结果与分析

2.1 生长季内4种植被类型土壤呼吸变化特征

4种植被类型在3个生长季土壤呼吸呈现大致相同的变化趋势(图1), 前期较低, 在生长季中后期(7月之后)达到较高水平。除2013年土壤呼吸到10月份仍保持在较高的水平外, 2011年及2014年在8月份达到最高水平后都开始下降。在2011及2013年6月份各植被类型均呈现一个低谷值。就月变化来看最低月出现在2011年4月($1.27 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), 最高月出现在2014年的8月($8.26 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)。不同植被类型在同一时段的土壤呼吸速率虽然存在差异, 但其在生长季内相同的变化趋势显示环境条件和物候期的影响可能更为显著。

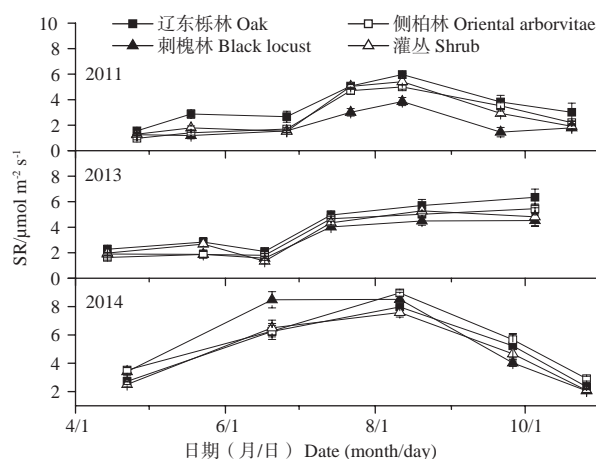


图1 3个生长季内4种植被类型土壤呼吸速率(SR)变化趋势(平均数 \pm 标准误差)。

Fig. 1 Variations in soil respiration rates (SR) of the four vegetation types in the three growing seasons (mean \pm SE).

2.2 不同植被类型土壤呼吸速率的年际变化特征

表3是4种植被类型在各测定年份中土壤呼吸速率的平均值。在植被类型之间, 年均呼吸速率有一定差异, 但是差异并不显著, 其中最小出现在2011年刺槐林($2.01 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), 最大为2014年辽东栎林($4.12 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)。3个生长季4种植被类型土壤呼吸在2014年最高, 其次是2013年, 而植被类型间大致顺序为辽东栎林($4.12 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) > 侧柏林($3.88 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) > 灌丛($3.64 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) > 刺槐林($3.46 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)。方差分析表明刺槐林及侧柏林在2011年和2014年间土壤呼吸差异显著, 而其他植被在年际间差异并不显著。由变异系数看刺槐林土壤呼吸量变化最大, 辽东栎林的变化最小, 植被类型之间的变异系数较年际间的变异系数略低。

2.3 各植被类型土壤呼吸与土壤温湿度的关系

由表4、表5可知在土壤温度与土壤呼吸速率的拟合关系中, 虽然两种拟合方程的 R^2 相近, 但是在各植被类型中指数拟合方程均达到极显著水平($P < 0.001$), 拟合效果更好。在土壤湿度与土壤呼吸速率的拟合关系中发现, 幂函数拟合方程的 R^2 与 P 值均优于线性拟合。采用综合土壤温湿度的混合

表3 各植被类型3个生长季内土壤呼吸速率 (SR/ $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 均值Table 3 Averaged soil respiration rates (SR/ $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) of different vegetation types in the three growing seasons

年份 Year	辽东栎林 Oak	刺槐林 Black locust	侧柏林 Oriental arborvitae	灌丛 Shrub	平均值 Average	变异系数 Coefficient of variation
2011	3.42a	2.01a	2.79a	2.84a	2.77 ± 0.58	0.21
2013	4.04a	3.06ab	3.40ab	3.41a	3.48 ± 0.41	0.12
2014	4.90a	5.30b	5.46b	4.67a	5.08 ± 0.36	0.07
平均值 Average	4.12 ± 0.74	3.46 ± 1.68	3.88 ± 1.40	3.64 ± 0.94	-	-
变异系数 Coefficient of variation	0.18	0.48	0.36	0.26	-	-

同列不同小写字母表示不同年份之间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters within the same column indicate significant differences among different years ($P < 0.05$).

表4 土壤温度 (T) 湿度 (W) 与土壤呼吸 (SR) 拟合方程

Table 4 The equations of soil respiration (SR) against soil temperature (T) and soil volumetric water content (W)

方程 Equation	辽东栎林 Oak	刺槐林 Black locust	侧柏林 Oriental arborvitae	灌丛 Shrub
$SR = \alpha \times e^{\beta T}$	$SR = 1.27e^{0.07T}$	$SR = 2.09e^{0.03T}$	$SR = 1.26e^{0.07T}$	$SR = 1.17e^{0.07T}$
$SR = a \times T + b$	$SR = 0.27T - 0.18$	$SR = 0.05T + 2.26$	$SR = 0.23T + 0.19$	$SR = 0.24T - 0.17$
$SR = \alpha \times W^{\beta}$	$SR = 1.37W^{0.47}$	$SR = 0.52W^{0.72}$	$SR = 0.96W^{0.59}$	$SR = 0.93W^{0.57}$
$SR = a \times W + b$	$SR = 0.19W + 1.89$	$SR = 0.19W + 0.67$	$SR = 0.22W + 1.18$	$SR = 0.20W + 1.21$
$SR = \alpha \times T^{\beta} \times W^{\gamma}$	$SR = 0.04T^{0.62} \times W^{1.2}$	$SR = 0.003T^{1.42} \times W^{1.22}$	$SR = 0.01T^{0.89} \times W^{1.4}$	$SR = 0.02T^{0.72} \times W^{1.35}$

表中 α 、 β 、 γ 、a和b为常数。 α , β , γ , a and b are constants in the table.

表5 土壤温度 (T)、湿度 (W) 与土壤呼吸 (SR) 间关系拟合的 R^2 和P值Table 5 Comparison of coefficients of determination (R^2) and P value of different regression equations on soil respiration (R) against soil temperature (T) and soil volumetric water content (W)

方程 Equation	辽东栎林 Oak		刺槐林 Black locust		侧柏林 Oriental arborvitae		灌丛 Shrub	
	R^2	P	R^2	P	R^2	P	R^2	P
$SR = \alpha \times e^{\beta T}$	0.235	< 0.001	0.017	0.002	0.133	< 0.001	0.202	< 0.001
$SR = a \times T + b$	0.230	0.044	0.010	0.691	0.129	0.144	0.209	0.057
$SR = \alpha \times W^{\beta}$	0.408	< 0.001	0.317	< 0.001	0.480	< 0.001	0.418	< 0.001
$SR = a \times W + b$	0.363	0.008	0.307	0.017	0.437	0.003	0.402	0.005
$SR = \alpha \times T^{\beta} \times W^{\gamma}$	0.823	< 0.001	0.560	< 0.001	0.826	< 0.001	0.845	< 0.001

表中 α 、 β 、 γ 、a和b为常数。

α , β , γ , a and b are constants in the table.

方程进行拟合的 R^2 值除刺槐为0.56外, 其他植被类型都在0.8以上, 均达到极显著水平, 即用土壤温度和土壤湿度共同解释生长季土壤呼吸状况的解释性更强。对土壤温湿度与土壤呼吸进行相关性分析发现, 两者与土壤呼吸都具有显著的相关关系 ($P < 0.01$), 但较之土壤温度的影响, 4种植被类型的土壤呼吸速率对土壤湿度的响应更大, 刺槐林更为突出。

采用3个生长季的全部测定数据计算各植被类型土壤呼吸的 Q_{10} 值(表6)表明, 刺槐林温度敏感性最低(1.72), 辽东栎林和灌丛(2.01)相对较大。该结论与拟合方程的结果相对应。

表6 各植被类型在3个生长季土壤呼吸的温度敏感性 (Q_{10})Table 6 The Q_{10} values of the four vegetable types in the three growing seasons

植被类型 Vegetation type	辽东栎林 Oak	刺槐林 Black locust	侧柏林 Oriental arborvitae	灌丛 Shrub
Q_{10}	2.01	1.72	1.97	2.01

3 讨论与结论

在整个生长季中, 4种植被类型土壤呼吸速率均在生长季前期(4-6月份)较低, 中期(7-8月份)大幅度增加, 后期

(9-10月份)除2013年其他两年都呈下降趋势, 这种季节性变化特征与前人研究结果^[17-18]基本一致, 认为土壤呼吸在生长季呈先增后减的单峰曲线。2013年土壤呼吸在后期仍维持较高水平, 这可能因为在生长季前期降雨较少, 土壤含水量较低, 7-10月份该地区降雨丰富, 土壤水分得到有效补充, 有利于土壤微生物活动^[19]。在森林-森林草原地带, 水分是微生物活动的主要限制性因子, 所以在土壤水分条件较好的时候, 土壤呼吸速率会显著提高。2011年及2013年6月份各植被类型均呈现一个低谷值, 这可能是因为在这两年的6月份土壤温度都有所降低, 使得土壤呼吸速率减小。

本研究中各植被类型在生长季平均土壤呼吸速率在3.2-4.0 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 之间, 与该地区其他研究报道相近。例如李红生等对几种人工植物群落土壤呼吸的研究结果^[13]为1.34-3.90 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。各植被类型土壤呼吸存在一定差异, 总体表现为辽东栎林>侧柏林>灌丛>刺槐林, 即相同自然条件下天然林土壤呼吸速率比人工林高, 这可能与植被群落土壤碳源及微生物群落的差异有关, 如田琴等在对黄土丘陵区4种植被的研究^[20]中指出, 天然林地土壤微生物生物量碳、氮的总体趋势以及真菌含量高于人工林。由植被间变异系数可以知道, 刺槐林对外界环境变化响应更为强烈, 而天然植被群落保持相对稳定的水平。从年际变化来看, 各植被类型在3年间

土壤呼吸差异较大,且年际间的变异系数大于植被类型之间的变异系数,相比植被类型差异的影响,土壤呼吸速率更易受到环境条件的影响。

由于土壤呼吸过程中微生物活动起着关键作用,土壤温度历来都被认为是影响土壤呼吸速率的主要环境因子而受到广泛关注^[10, 21]。本研究中4种典型植被类型的土壤呼吸速率与土壤温湿度都呈显著正相关关系,但与土壤湿度的相关性更高,这可能与该地区土壤的干燥化倾向有关,较为干旱的环境会导致土壤水分因子的作用更为突出。Shi等在对黄土丘陵区刺槐与辽东栎雨后土壤呼吸研究^[10]中也认为土壤温湿与土壤呼吸关系显著,尤其是在干旱半干旱地区土壤湿度的影响更显著;谢育利等在2015年及2016年对油松和沙棘人工林土壤呼吸研究^[22]中发现,土壤呼吸与土壤温度有显著的正相关关系,与土壤湿度有显著的负相关关系,但当其对两种植被类型模拟分别选定土壤水分的阈值点发现,只有在两种植被类型土壤水分分别>13%和>12%时,土壤呼吸与土壤温度才达到显著的相关性而与土壤湿度无显著关系。也有研究表明,土壤温度对土壤呼吸的影响是有限的,在土壤温度偏低时,土壤呼吸主要受土壤温度影响,温度较高时,土壤温度对土壤呼吸的控制非常小,主要受土壤水分等因素的影响^[23],滞后效应也可能导致土壤呼吸速率对温度响应不显著的现象^[14, 24]。因此,对土壤温湿度与土壤呼吸的研究还需要我们从更小级别进一步研究。

本研究中,用指数函数拟合土壤温度与土壤呼吸速率关系和用幂函数拟合土壤湿度与土壤呼吸速率关系均优于线性函数的拟合效果;用土壤温度与土壤湿度双因素拟合比用土壤温度或土壤湿度的单因素拟合效果更好。这与孟春等^[25]和韩春雪等^[26]的研究结果相同,即采用两个因素共同拟合与土壤呼吸速率的关系时,对土壤呼吸的解释性更强。本研究中采用土壤温度和土壤湿度两个因素可解释土壤呼吸变化情况的56.0%-84.5%。4种植被类型土壤呼吸的 Q_{10} 值在1.72-2.01之间,与其他一些研究报道^[15, 27-29](1.43-5.60)相比处于较低水平,但也属于正常值范围之内。刺槐林温度敏感性最低,表明刺槐林土壤可能较为干旱,从而导致水分因子的作用更为突出。

综上所述,本研究中的4种植被类型土壤呼吸速率在生长季前期较低,中后期升高,具有明显的季节性。4种植被类型土壤呼吸速率整体水平大致为辽东栎林(4.12 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) >侧柏林(3.88 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) >灌丛(3.64 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) >刺槐林(3.46 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$);土壤呼吸受环境及物候条件的影响超过植被类型的影响。4种典型植被类型的土壤呼吸速率与土壤温湿度都呈显著的相关关系,但与土壤湿度的相关性更高。土壤温度和土壤湿度共同拟合土壤呼吸速率的效果较好,解释性更强。

参考文献 [References]

- NOAA-ESRL (National Oceanic & Atmospheric Administration-Earth System Research Laboratory). Global Greenhouse Gas Reference Network. 2016 [2016-07-08]. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
- 汪业勛, 赵士洞, 牛栋. 陆地土壤碳循环的研究动态[J]. 生态学杂志, 1999, **18** (5): 29-35 [Wang YX, Zhao SD, Niu D. Research state of soil carbon cycling in terrestrial ecosystem [J]. *Chin J Ecol*, 1999, **18** (5): 29-35]
- Raich JW, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48** (1): 71-90
- Kuzyakov Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods [J]. *Soil Biol Biochem*, 2006, **38** (3): 425-448
- Shi XH, Zhang XP, Yang XM, Yang XM, Drury CF, McLaughlin NB, Liang AZ, Fang RQ, Jia SX. Contribution of winter soil respiration to annual soil CO₂ emission in a mollisol under different tillage practices in northeast China [J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2012, **26**: 205-210
- Xu M, Ye Q. Spatial and seasonal variations Q_{10} determine by soil respiration measurements at a Sierra Nevadan forest [J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2001, **15** (3): 687-696
- 闫美杰, 时伟宇, 杜盛. 土壤呼吸测定方法述评与展望[J]. 水土保持研究, 2010, **17** (6): 148-152 [Yan MJ, Shi WY, Du S. Review and prospect on the methods of soil respiration measurement [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2010, **17** (6): 148-152]
- 李元, 时伟宇, 闫美杰, 杜盛, 毕润成, 李华. 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 [Li Y, Shi WY, Yan MJ, Du S, Bi RC, Li H. Review and prospect on impact of soil respiration [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2013, **20** (5): 311-316]
- Gough CM, Seiler JR. The influence of environmental, soil carbon, root and stand characteristics on soil CO₂ efflux in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation located on the south Carolina Coastal Plain [J]. *For Ecol Manage*, 2004, **191**: 353-363
- Shi WY, Tateno R, Zhang JG, Wang YL, Yamanaka N, Du S. Response of soil respiration to precipitation during the dry season in two typical forest stands in the forest-grassland transition zone of the Loess Plateau [J]. *Agric For Meteorol*, 2011, **151**: 854-863
- 牛莉萍, 许嘉巍, 靳英华, 尹海霞, 王媛林, 刘羽霞, 张英洁. 温带森林不同演替阶段下的土壤CO₂排放通量昼夜变化[J]. 生态学报, 2017, **37** (8): 2673-2683 [Niu LP, Xu JW, Jin YH, Yin HX, Wang YL, Liu YX, Zhang YJ. Diurnal variation in soil CO₂ emission flux at different stages of temperate forest succession [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37** (8): 2673-2683]
- 周正朝, 上官周平. 黄土高原人工刺槐林土壤呼吸及其与土壤因子的关系[J]. 生态环境学报, 2009, **18** (1): 280-285 [Zhou ZC, Shangguan ZP. Soil respiration of plantation *Robinia Pseudoacacia* L. forest and its relationship with soil factors in the Loess Plateau [J]. *Ecol Environ Sci*, 2009, **18** (1): 280-285]
- 李红生, 刘广全, 王鸿喆, 李文华, 陈存根. 黄土高原四种人工植物群落土壤呼吸季节变化及其影响因素[J]. 生态学报, 2008, **28** (9): 4099-4106 [Li HS, Li GQ, Wang HZ, Li WH, Chen CG. Easonal changes in soil respiration and the driving factors of four woody plant communities in the Loess Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28** (9): 4099-4106]
- Shi WY, Zhang JG, Yan M J, Guan JH, Du S. Diurnal and seasonal dynamics of respiration in a *Platycladus orientalis* forest stand on the semiarid Loess Plateau, China [J]. *J Earth Environ*, 2012, **3** (6): 1144-1148
- 周小刚. 黄土区不同生态系统土壤呼吸特征及其影响因素[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012 [Zhou XG. Soil respiration of different ecosystems and its influencing factors in Loess Plateau [D]. Yangling: carbon cycling in terrestrial ecosystem [J]. *Chin J Ecol*, 1999, **18** (5): 29-35]

- Northwest A&F University, 2012]
- 16 Shi WY, Yan MJ, Zhang JG, Guan JH, Du S. Soil CO₂ emissions from five different types of land use on the semiarid Loess Plateau of China, with emphasis on the contribution of winter soil respiration [J]. *Atmos Environ*, 2014, **88**: 74-82
 - 17 Rayment MB, Jarvis PG. Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest [J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, **32**: 35-45
 - 18 Epron D, Nouvellon Y, Rouspard O, Mouvondy W, Mabilia A, Saint-Andre L, Joffre R, Jourdan C, Bonnefond J M, Berbigier P. Spatial and temporal variations of soil respiration in a *Eucalyptus* plantation in Congo [J]. *For Ecol Manage*, 2004, **202**: 149-160
 - 19 尹秋龙, 焦菊英, 寇萌. 极端强降雨条件下黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤水分特征[J]. 自然资源学报, 2015, **30** (3): 459-469 [The soil moisture characteristics under different vegetation types after extremely heavy rainfall on the hilly-gullied Loess Plateau [J]. *J Nat Res*, 2015, **30** (3): 459-469]
 - 20 田琴, 牛春梅, 谷口武士, 山中典和, 时伟宇, 杜盛. 黄土丘陵区植被类型与土壤微生物区系及生物量关系[J]. 生态学报, 2017, **37** (20): 6847-6854 [Tian Q, Niu M, Taniguchi T, Yamanaka N, Shi WY, Du S. Relationship among vegetation types and soil microbial biomass in the Loess Hilly region of China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37** (20): 6847-6854]
 - 21 Niklinska M, Maryanski R. Effect of temperature on humus respiration rate and nitrogen mineralization: implications for global climate change [J]. *Biogeochemistry*, 1999, **44**: 239-257
 - 22 谢育利, 陈云明, 唐亚坤, 吴旭, 温杰. 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水分的响应[J]. 中国水土保持科学, 2017, **15** (1): 33-42 [Xie YL, Chen YM, Tang YK, Wu X, Wen J. Soil respiration dynamics and its response to soil temperature and water content of *Pinus tabulaeformis* and *Hippophae rhamnoides* plantations in the Loess Hilly region [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2017, **15** (1): 33-42]
 - 23 周萍, 刘国彬, 薛蕊. 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 GB, Xue S. Review of soil respiration and the impact factors on grassland ecosystem [J]. *Acta Pratacul Sin*, 2009, **18** (2): 184-193]
 - 24 Phillips CL, Nickerson N, Risk D, Bond BJ. Interpreting diel hysteresis between soil respiration and temperature [J]. *Global Change Biol*, 2011, **17** (1): 515-527
 - 25 孟春, 王立海, 沈微. 针阔混交林择伐作业后土壤呼吸与土壤温度和湿度的关系[J]. 东北林业大学学报, 2008, **36** (5): 33-35 [Meng C, Wang LH, Shen W. Relationship between soil respiration and soil temperature, soil moisture in coniferous-broadleaved mixed forest after selective cutting [J]. *J NE For Univ*, 2008, **36** (5): 33-35]
 - 26 韩春雪, 刘廷玺, 段利民, 吕杨, 闫雪, 李凯旋. 科尔沁沙地两种植被类型土壤呼吸动态变化及其影响因素[J]. 生态学报, 2017, **37** (6): 1994-2004 [Han CX, Liu TX, Duan LM, Lü Y, Yan X, Li KX. Dynamic changes in soil respiration of two vegetation types and their influencing factors in Horqin Sandy Land [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37** (6): 1994-2004]
 - 27 Davidson EA, Belk E, Boone RD. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest [J]. *Global Change Biol*, 1998, **4**: 217-227
 - 28 Yuste JC, Janssens IA, Carrara A, Ceulemans R. Annual Q_{10} of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity [J]. *Global Change Biol*, 2004, **10**: 161-169
 - 29 Han GX, Yu JB, Li HB, Yang LQ, Wang JM, Mao PL, Gao YJ. Winter soil respiration from different vegetation patches in the Yellow River Delta, China [J]. *Environ Manage*, 2012, **50**: 39-49