

# 太行山南麓不同植被类型土壤呼吸特征及其温度敏感性

陈 玮

(山西农业大学 资源环境学院, 山西 太谷 030801)

**摘 要:** [目的] 探讨不同植被类型土壤呼吸特征及其温度敏感性, 为陆地生态系统碳循环研究提供理论支持。[方法] 以太行山南麓裸地、草地、灌丛、林地为研究对象, 采用长期定位观测和室内化验分析相结合的方法, 研究不同季节土壤水热因素、呼吸特征及其温度敏感性。[结果] 不同植被类型的土壤温度变化较大, 均表现为 1 月初最低, 8 月下旬最高, 8 月以后土壤温度呈逐渐降低模式, 相同月份土壤温度大致表现为: 裸地 > 草地 > 灌丛 > 林地, 局部有所波动。不同植被类型的土壤呼吸速率具有明显差异, 季节变化特征一致; 其中, 土壤呼吸、异养呼吸和自养呼吸速率季节变化特征一致(倒 V 形变化规律), 大致表现为: 夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季。不同植被类型的土壤呼吸湿度敏感性大致表现为: 裸地 < 草地 < 灌丛 < 林地。由此说明植被类型是影响土壤呼吸温度敏感性的重要因素, 并且夏季和秋季土壤呼吸  $Q_{10}$  显著高于春季和冬季。相关性分析表明土壤 pH 值与温度敏感性( $Q_{10}$ )呈显著负相关( $p < 0.05$ ), 与有机碳含量呈显著正相关( $p < 0.05$ )。不同植被类型土壤异养呼吸夏季的贡献率最高, 春季的贡献率最低, 贡献率依次表现为: 夏季 > 秋季 > 冬季 > 春季, 自养呼吸贡献率随季节的变化呈逐渐增加趋势。[结论] 异养呼吸对土壤总呼吸的贡献率大于自养呼吸, 微生物参与下的异养呼吸成为土壤呼吸中最主要的组成部分。

**关键词:** 土壤呼吸; 季节动态; 温度敏感性; 太行山南麓

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)02-0092-07

中图分类号: S714

**文献参数:** 陈玮. 太行山南麓不同植被类型土壤呼吸特征及其温度敏感性[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 92-98. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.02.012; Chen Wei. Soil respiration and its temperature sensitivity of different vegetation types at southern foothill of Taihang Mountains [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 92-98.

## Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity of Different Vegetation Types at Southern Foothill of Taihang Mountains

Chen Wei

(College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China)

**Abstract:** [Objective] Soil respiration and its temperature sensitivity of different vegetation types were studied, in order to provide theoretical support for the assessment of terrestrial ecosystem carbon cycle. [Methods] Soil hydrothermal factors, respiration characteristics and temperature sensitivity in different seasons were studied in bare land, grassland, shrub and woodland at the southern foothill of Taihang Mountains by long-term location observation and laboratory analysis. [Results] Soil temperature of different vegetation types varied greatly with seasons, with the lowest value in the early January and the highest value in the late August. After August, soil temperature gradually decreased with time. The soil temperature in the same month was generally showed an order of bare land > grassland > shrubland > forestland, with the local fluctuations. Soil respiration rate of different vegetation types was significantly different and the seasonal variation characteristics were consistent. Among them, soil respiration, heterotrophic respiration and autotrophic respiration had the same seasonal variation characteristics (inverted V-shaped variation), which roughly

收稿日期: 2020-10-15

修回日期: 2020-12-31

资助项目: 山西农业大学科技创新基金项目“基于 RS 的太原矿山环境动态监测与评价研究”(2017007)

第一作者: 陈玮(1987—), 女(汉族), 山西省沁源县人, 讲师, 硕士, 主要从事 3S 技术及其应用方面的工作。Email: chenwei\_dls@126.com。

showed as follows: summer > autumn > spring > winter. Soil respiration humidity sensitivity of different vegetation types was as follows: bare land < grassland < shrubland < forestland, indicating that vegetation types were the important driving factor for soil respiration temperature sensitivity.  $Q_{10}$  in summer and autumn was significantly higher than that in spring and winter. Correlation analysis showed that  $Q_{10}$  was significantly negatively correlated with pH value ( $p < 0.05$ ), and negatively correlated with the bulk density; Soil organic carbon was positively correlation with  $Q_{10}$  ( $p < 0.05$ ). Moreover, the contribution rate of soil heterotrophic respiration was the highest in summer and the lowest in spring. The contribution rate of soil heterotrophic respiration was as follows: in summer > in autumn > in winter > in spring, and the contribution rate of autotrophic respiration gradually increased with season. [Conclusion] Heterotrophic respiration contributed more to soil respiration than autotrophic respiration, and soil heterotrophic respiration with microbial participation is the most important component of soil respiration.

**Keywords:** soil respiration; seasonal dynamics; temperature sensitivity; southern foothill of Taihang Mountains

森林是陆地生态系统最大的碳库,在全球碳动态平衡中起着重要的调节作用<sup>[1-3]</sup>。森林土壤呼吸作为全球碳循环的重要流通途径之一,其动态变化将直接影响全球的碳平衡。土壤呼吸是指未扰动的土壤中产生  $CO_2$  的所有代谢过程,主要由 1 个化学氧化过程和 3 个生物学过程(土壤微生物呼吸、根系呼吸、土壤动物呼吸)组成<sup>[4-5]</sup>。由于化学氧化过程和土壤动物呼吸所释放的  $CO_2$  往往较少,在实际的估算中常常忽略<sup>[6]</sup>。因此土壤根系呼吸(自养呼吸)和土壤呼吸(异养呼吸)通常被认为是森林土壤呼吸的主要部分。当前普遍认为根际生态系统(主要由土壤微生物和土壤根系组成)是土壤微生物活动最活跃的区域,而土壤根系呼吸和土壤微生物呼吸的碳排放量及其所占比例还有很大的不确定性<sup>[7-8]</sup>。因此分离和量化不同组分的土壤呼吸是研究全球碳循环模拟的热点问题之一<sup>[9-10]</sup>。

在土壤呼吸的过程中,氧气消耗的同时也产生了大量  $CO_2$ ,最终大部分进入大气层,直接参与大气碳循环;据不完全统计,全球范围内土壤呼吸所产生的碳排放量达到近 100 Pg,相当于化石燃料碳排放的 10 倍<sup>[11-12]</sup>,由此可知,土壤呼吸在碳循环过程中的起着关键作用,其微小变化将直接影响全球碳的平衡,进而对气候变化产生反馈效应<sup>[13-14]</sup>。土壤呼吸包括自养呼吸和异养呼吸,前者由植被根系产生,后者主要由土壤微生物产生,但二者均明显受外界环境的变化,尤其是土壤水分及温度的变化<sup>[15-17]</sup>。不同的呼吸组分对于气候的制约效应并不完全一致,因此,研究土壤呼吸组分是探究全球碳循环的关键过程之一<sup>[18-19]</sup>;土壤温度敏感性  $Q_{10}$  常常作为其对气候变化的反馈参数,由于其具有较强的动态变化性,对其量化研究具有一定难度,其中植被的影响效应尤为突出。近年来大量学者对森林生态系统开展了  $Q_{10}$  的

相关研究,分别从温度及湿度等角度开展了连续的观测研究分析<sup>[20]</sup>,但是对于植被类型的影响研究较少,受制于植被类型的差异,土壤的养分也会出现较大差异,最终影响着土壤呼吸和碳循环。因此,研究不同植被类型土壤呼吸特征及温度敏感性对评估生态系统碳收支和评测我国植被在全球碳循环中的功能和地位具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

选择黄河小浪底森林生态区为研究区。该区属于国家林业局研究站之一,坐落于太行山南麓,受地理位置的影响,其大陆季风气候特征突出,呈现出较为明显的大陆暖温带特征,该区域海拔约为 400 m,年均温度为 15 °C;该区域褐土广泛分布,砂岩和页岩构成了其主要的母岩组分,受地形地貌的影响,主要植被类型有乔木、灌木和草本,大量分布着荆条(*Vitex negundo*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等灌木,还有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等乔木,以及白草(*Pennisetum centrasiticum*)等草本植被,此外还有大面积的裸露地,主要是自然环境及人为的不合理开发利用所致。

### 1.2 土壤呼吸测定方法

本研究所选取的植被类型包括裸地、草地(白草)、灌丛(荆条)、林地(刺槐),各类型分别选择 5 个重复样地(100 m × 100 m)。在每个样地内设置 5 个重复样方(5 m × 5 m),采取随机方式,并将 PVC 环(直径、高度分别为 20 和 30 cm)垂直固定于地下 15 cm 深度。试验开始于 2018 年 1 月,2019 年重复上述试验;每月至少进行两个观测日的连续观测,选择晴朗天气,最佳的测量时间为上午 10:00—12:00,观测日间隔 15 d。为了提升测量的准确性,在正式测量的 24 h 之前,去除 PVC 环内的植物,之后采用温室气体监测仪(AZG-300)测定土壤呼吸速率。土壤

呼吸速率的计算公式为<sup>[21]</sup>：

$$R_s = \frac{H}{V_0} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T_a} \times \frac{dC_a}{dt}$$

式中： $R_s$  表示土壤呼吸速率； $V_0$  为摩尔体积(0.022 4 m<sup>3</sup>/mol)； $P_0$  为标准状态下的气压(1 013.25 hPa)； $T_0$  标准温(273.15 K)； $P$  代表呼吸室实际气压(hPa)； $T_a$ 、 $C_a$  分别代表呼吸室内实际温度和 CO<sub>2</sub> 气体浓度。

土壤温度的测定：包括地表温度，地下 10 cm 深度土壤温度，土壤温度的测定采用手持电子温度探针；土壤湿度的测定采用 TDR，从地表开始，每间隔 5 cm 进行 1 次土壤湿度的测定，直至地表下 10 cm 深度。测完以后在每个样方采用五点混合法采集土壤样品，并混合均匀，带回实验室进行 15 d 的自然风干，然后过 2 mm 筛后进行土壤养分的测定；另取一份新鲜土壤样品置于 4 ℃ 保温冰箱，用于测定土壤速效养分。

土壤呼吸速率( $R_s$ )与温度( $T$ )，湿度( $W$ )的拟合关系分别为<sup>[15-17]</sup>：

$$R_s = a e^{KT}$$

$$R_s = aW^2 + bW + c$$

拟合参数分别用  $a, b, c, K$  表示。

$$Q_{10} = e^{10K}$$

土壤呼吸速率的影响因素众多，其中土壤温度与湿度是关键的影响因子，为了探究土壤呼吸速率的影响因素，采用温度自动记录仪测量土壤温度，最终计算呼吸速率，同时测量土壤 CO<sub>2</sub> 通量<sup>[15]</sup>：

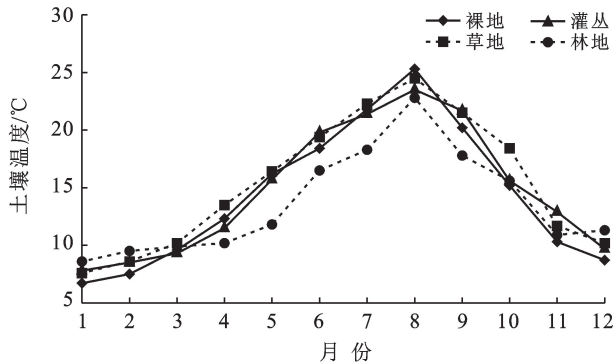


图 1 研究区不同植被类型土壤水热特征

## 2.2 不同植被类型土壤呼吸速率季节变化特征

对于土壤呼吸速率，其影响因素多样，其中温度与湿度被认为是关键的影响因素。通过图 2 可知，不同植被土壤呼吸速率变化趋势相一致。对于裸地而言，土壤自养、异养呼吸速率均呈现出较为一致的变化规律，随着季节呈先增加后降低趋势，整体上呈倒

$$R_d = \sum_1^{24} R_i \cdot 3.6 \times 10^7 \times 12 \times 10^{-6} \times 10^{-6}$$

$$R_y = \sum_1^{24} R_d$$

式中： $R_i$  为土壤呼吸速率[mol/(m<sup>2</sup>·s)]； $R_d$  为呼吸日通量[t/(m<sup>2</sup>·d)]； $R_y$  为年通量[t/(hm<sup>2</sup>·a)]。

土壤温度和湿度是土壤呼吸的关键影响因子，采用指数回归方程研究二者之间的关系。

### 1.3 土壤养分的测定

土壤有机碳、全氮、全磷、全钾的测定分别采用重铬酸钾外加热法、凯氏定氮法、钼锑抗比色法和分光光度法。土壤微生物碳、氮和磷含量采用氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提法测定<sup>[16]</sup>。

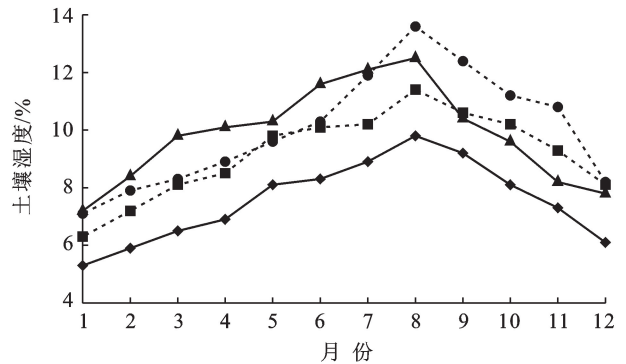
### 1.4 数据统计

利用 Excel 2010 对数据进行整理，统计值采用 2018 和 2019 年的平均值，然后利用 SPSS 21.0 开展统计分析和差异性检验，并对土壤呼吸进行线性回归分析；Pearson 相关系数法判定土壤呼吸与各指标的相关性，作图采用 Origin 9.0。

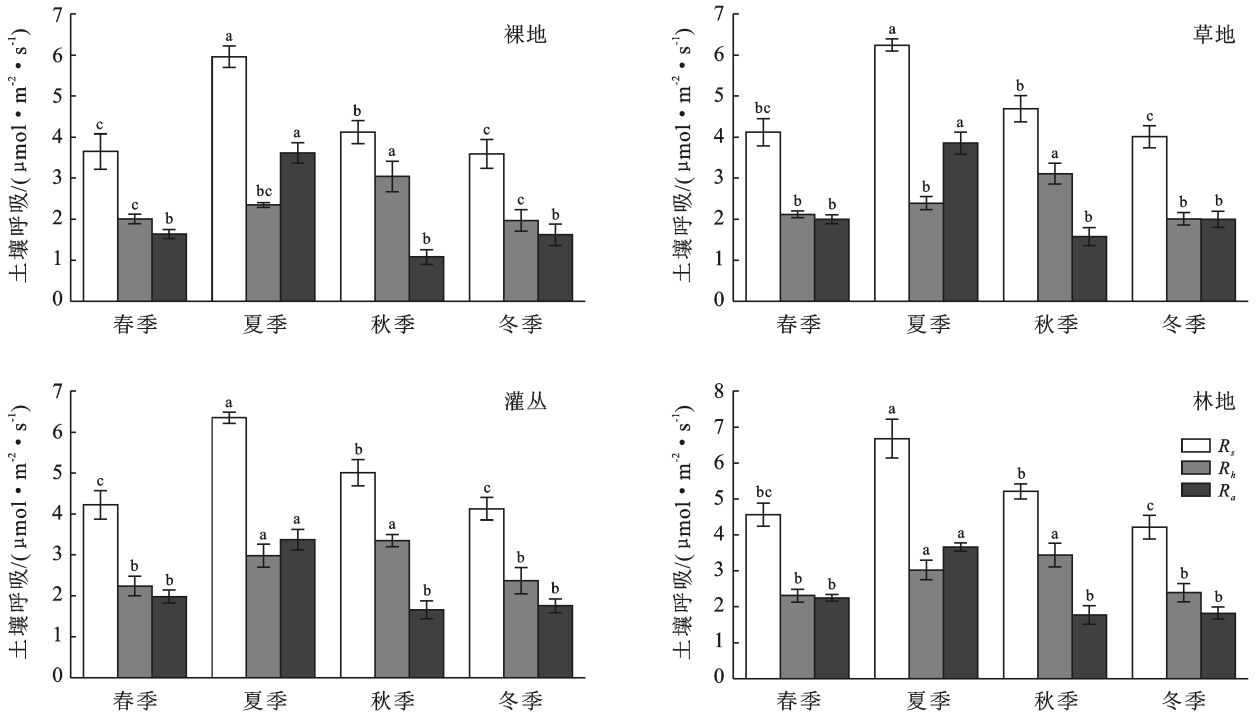
## 2 结果与分析

### 2.1 不同植被类型土壤水热特征

从图 1 可知，对于不同植被类型而言，土壤温度与湿度呈一致的变化规律，整体呈先增加后降低趋势。对于土壤温度，8 月下旬后逐步下降，即使是相同月份，其温度变化也因植被的不同而呈现明显的差异，其中最高的裸露地，其次是草地，而林地最低，局部出现波动。



V 形变化规律。对于草地、灌丛和林地，土壤自养和异养呼吸速率呈现出较为一致的变化规律，随着季节呈先增加后降低趋势，整体上呈倒 V 形变化规律。相同季节，无论是土壤自养呼吸还是异养呼吸，其速率最高的是林地，其次是灌丛，而裸地最低，局部有所波动。



注:不同小写字母表示呼吸组分在不同季节差异显著( $p < 0.05$ )。R<sub>s</sub>表示土壤呼吸;R<sub>n</sub>表示异养呼吸;R<sub>a</sub>表示自养呼吸。下同。

图 2 研究区不同植被类型土壤呼吸速率季节变化特征

### 2.3 不同植被类型土壤呼吸其组分的年通量

通过图 3 可知,与土壤呼吸速率的变化特征相比,土壤呼吸通量与土壤呼吸速率变化趋势相一致,不同植被类型土壤呼吸通量受到季节的显著影响( $p < 0.05$ )。对于草地和林地,土壤自养、异养呼吸通

量均呈现出较为一致的变化规律,随着季节呈先增加后降低趋势,呈倒 V 形变化规律;灌丛和裸地土壤呼吸通量表现出一致的变化规律。整体而言,相同季节土壤自养和异养呼吸通量最高的是林地,其次是灌丛,而裸地最低,局部有所波动。

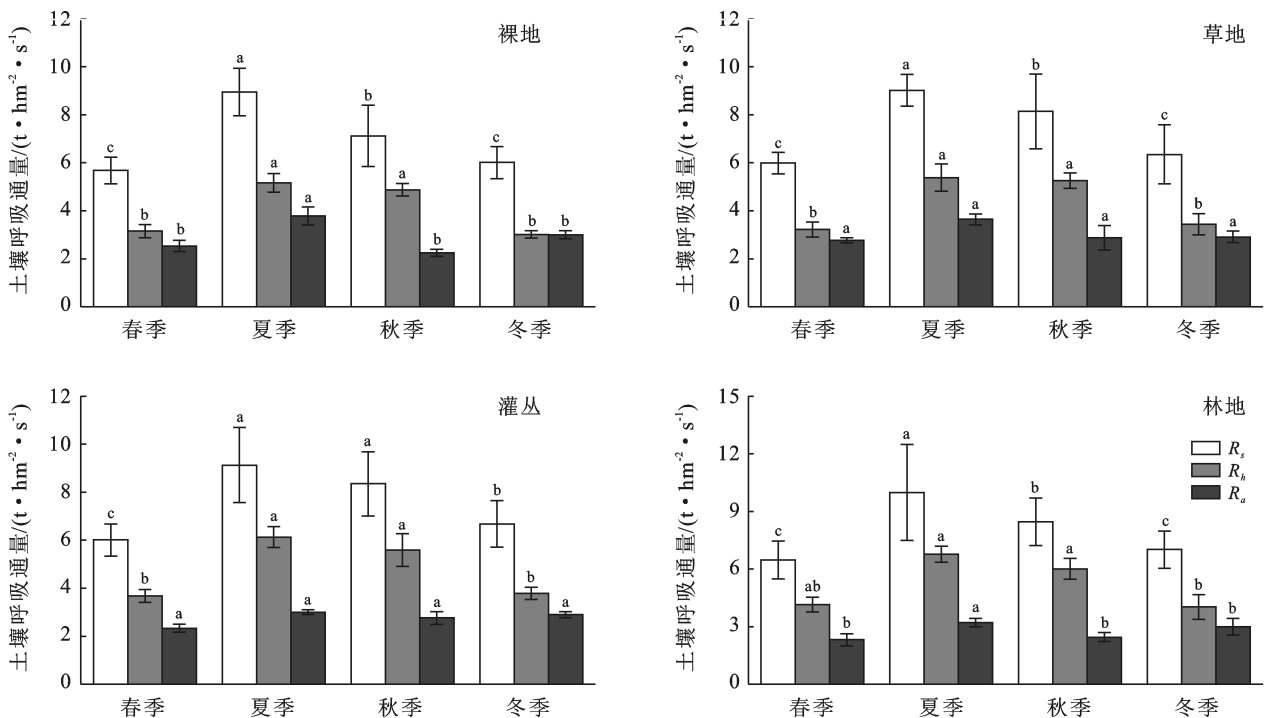


图 3 研究区不同植被类型土壤呼吸及其组分的年通量

## 2.4 不同植被类型下土壤呼吸对温度敏感性分析

本研究采用回归分析探究土壤呼吸与土壤温度的指数关系,拟合参数详见表 1。由表 1 可知,土壤温度在土壤呼吸过程中起着关键作用,二者拟合关系较好( $p < 0.05$ )。由此可知,土壤温度的变化对土壤呼吸速率具有较强的解释性( $p < 0.05$ )。在模型中,参数  $b$  和  $c$  分别表示土壤呼吸温度敏感性因子和湿度敏感性因子,不同植被类型的温度敏感性因子都是正值,说明土壤呼吸速率与土壤温度呈正相关关系;不同植被类型的湿度敏感性因素均为负值,说明在温度相差不大的情况下,土壤呼吸速率与土壤湿度呈现负相关关系(表 2),不同植被类型的土壤呼吸湿度敏感性表现为:裸地 < 草地 < 灌丛 < 林地,说明植被是影响土壤呼吸温度敏感性的重要因素,并且夏季和秋季土壤呼吸  $Q_{10}$  显著高于夏季和秋季。

表 1 土壤呼吸和组分与土壤温度的指数关系

呼吸组分	植被类型	$p$	$F$	拟合参数		
				$K$	$a$	$Q_{10}$
$R_s$	裸地	<0.05	214.56	0.056	1.063	1.51
	草地	<0.05	203.17	0.036	0.985	1.56
	灌丛	<0.05	198.36	0.025	1.027	1.64
	林地	<0.05	169.87	0.058	1.255	1.83
$R_h$	裸地	<0.05	203.45	0.024	0.986	1.64
	草地	<0.05	215.78	0.016	0.995	1.74
	灌丛	<0.05	196.30	0.019	1.223	1.88
	林地	<0.05	185.02	0.027	1.147	1.91
$R_a$	裸地	<0.05	214.78	0.028	0.954	1.42
	草地	<0.05	203.65	0.014	1.057	1.46
	灌丛	<0.05	215.89	0.034	1.066	1.57
	林地	<0.05	211.77	0.028	1.058	1.63

表 2 土壤呼吸和组分与土壤湿度的指数关系

呼吸组分	植被类型	0—5 cm 土壤湿度( $W$ )			5—10 cm 土壤湿度( $W$ )		
		关系方程	$p$	$F$	关系方程	$p$	$F$
$R_s$	裸地	$R_s = -0.075W^2 + 0.478W - 1.471$	<0.05	156.38	$R_s = -0.247W^2 - 0.523W + 1.410$	<0.05	168.32
	草地	$R_s = 0.047W^2 - 0.675W + 0.217$	<0.05	189.55	$R_s = -0.244W^2 + 0.136W - 2.178$	<0.05	195.20
	灌丛	$R_s = -0.014W^2 + 0.327W - 0.074$	<0.05	203.14	$R_s = 0.625W^2 + 0.110W - 0.377$	<0.05	203.30
	林地	$R_s = 0.047W^2 - 0.017W + 0.247$	<0.05	215.46	$R_s = -0.178W^2 + 0.207W - 0.096$	<0.05	231.47
$R_h$	裸地	$R_h = -0.077W^2 + 0.355W - 1.471$	<0.05	204.59	$R_h = -0.096W^2 - 0.244W + 1.023$	<0.05	215.78
	草地	$R_h = 0.145W^2 - 0.653W + 0.378$	<0.05	198.33	$R_h = -0.311W^2 + 0.247W - 2.424$	<0.05	214.51
	灌丛	$R_h = -0.074W^2 + 0.403W - 0.102$	<0.05	203.55	$R_h = 0.217W^2 + 0.240W - 0.217$	<0.05	265.93
	林地	$R_h = 0.025W^2 - 0.041W + 0.277$	<0.05	214.78	$R_h = -0.145W^2 + 0.244W - 0.546$	<0.05	198.77
$R_a$	裸地	$R_a = -0.079W^2 + 0.124W - 0.355$	<0.05	196.65	$R_a = -0.175W^2 - 0.577W + 2.013$	<0.05	203.14
	草地	$R_a = 0.075W^2 - 0.624W + 0.177$	<0.05	217.78	$R_a = -0.342W^2 + 0.157W - 2.147$	<0.05	257.01
	灌丛	$R_a = -0.065W^2 + 0.311W - 0.074$	<0.05	213.56	$R_a = 0.238W^2 + 0.056W - 0.433$	<0.05	199.36
	林地	$R_a = 0.049W^2 - 0.032W + 0.237$	<0.05	204.77	$R_a = -0.125W^2 + 0.357W - 0.219$	<0.05	208.77

## 2.5 不同植被类型土壤呼吸影响因子分析

因子相关分析得知(表 3),土壤 pH 值和容重与土

壤呼吸呈显著负相关( $p < 0.05$ );而有机碳与土壤呼吸之间呈正相关( $p < 0.05$ );与全磷没有显著相关性( $p > 0.05$ )。

表 3 不同植被类型土壤呼吸影响因子分析

植被类型	pH 值	容重	有机碳	全氮	全磷	速效磷	碱解氮	速效钾
裸地	-0.786**	-0.422	0.622*	0.512*	0.068	0.322	0.045	0.162
草地	-0.685*	-0.321	0.756**	0.623*	0.154	0.403	0.069	0.057
灌丛	-0.623*	-0.424	0.712**	0.745**	0.032	0.414	0.142	0.096
林地	-0.856**	-0.056	0.754**	0.801**	0.247	0.501*	0.157	0.175

注: \* 表示在  $p < 0.05$  水平显著相关; \*\* 表示在  $p < 0.01$  水平显著相关。

## 2.6 土壤呼吸各组分对土壤总呼吸的贡献

通过表 4 可知,对于异养呼吸,不同植被类型对土壤总呼吸的贡献率不尽一致,其中贡献率最高的是林地,其次是灌丛与草地,而裸地最低,其贡献率分别为 62.7%,61.9%,60.3%,58.7%;对于土壤异养呼吸而言,其贡献率的季节变化不尽一致,其中夏季最高。

对于自养呼吸而言,不同植被类型对于土壤总呼吸的贡献率不尽一致,其中贡献率最高的是林地,其次是灌丛与草地,而裸地最低,其贡献率分别为 36.2%,35.7%,32.7%,31%;对于自养呼吸,自养呼吸贡献率随季节的变化呈逐渐增加趋势。总体来看,异养呼吸对于土壤总呼吸的贡献率更高,是主要的土壤呼吸组分。

表 4 土壤呼吸各组分对土壤总呼吸的贡献

项目	生长季对土壤呼吸的贡献/%				生长季对土壤呼吸的总贡献/%
	春季	夏季	秋季	冬季	
裸地 $R_s$	100	100	100	100	100
裸地 $R_h$	49.6	65.1	56.7	48.2	58.7
裸地 $R_a$	35.6	25.7	31.4	42.8	31.0
草地 $R_s$	100	100	100	100	100
草地 $R_h$	51.8	67.2	58.3	49.1	60.3
草地 $R_a$	38.7	26.4	32.7	44.3	32.7
灌丛 $R_s$	100	100	100	100	100
灌丛 $R_h$	53.9	69.8	60.2	50.2	61.9
灌丛 $R_a$	40.1	27.5	34.6	45.9	35.7
林地 $R_s$	100	100	100	100	100
林地 $R_h$	56.3	71.3	61.2	51.7	62.7
林地 $R_a$	41.9	28.6	35.7	46.7	36.2

## 3 讨论

### 3.1 不同植被类型土壤呼吸

通过连续的观测试验可知,受不同植被类型的影响,土壤自养和异养呼吸均呈现出较为一致的变化规律,随季节呈先增加后降低的变化趋势,其高峰出现在夏季,而最低值出现在春季和冬季,主要原因在于夏季大气温度和湿度较高,利于土壤微生物的生存和繁殖,进而增强了土壤微生物代谢以及土壤呼吸。从植被类型来看,不同植被类型土壤呼吸敏感度具有明显差异,其中林地具有较强的敏感性,其次是灌丛,裸地最低。相关性分析表明,在多种影响因子中,植被类型是直接影响土壤呼吸的关键因子<sup>[22-23]</sup>,同时季节变化对土壤呼吸也有显著的影响,主要表现为夏季土壤呼吸  $Q_{10}$  明显高于秋冬季节。土壤异养呼吸与土壤总呼吸的月变化趋势相一致,但董彬、张艳在分别对鲁南杨树林、浙江天童阔叶林发现自养呼吸的月变化态势与土壤总呼吸较为接近,与本研究存在差异。这主要是由于土壤温度、湿度和微生物活性等差异所致<sup>[22-23]</sup>。

### 3.2 不同植被类型土壤呼吸组分

自养呼吸和异养呼吸在土壤呼吸中起着关键作用,通过对比分析可知,受不同植被类型等因素的影响,土壤异养呼吸存在较大的季节差异,其中最高的是夏季,其次是秋季,而春季最低,是自养呼吸的 2 倍左右。张金池等人<sup>[24]</sup>通过对杨树和水杉的对比分析发现,自养呼吸和异养呼吸均维持在 25% 左右,二者之间的差异并不明显;张俊兴<sup>[25]</sup>通过对温带森林连续 3 a 的对比监测分析得知,根呼吸贡献率在 23% 左右;吕海燕<sup>[26]</sup>通过对刺槐及侧柏林分析得知,其根系呼吸

的贡献率达到 40%;大多数学者研究得知,异养呼吸具有更高的贡献率,这主要是由于土壤微生物的活动,不同微生物对土壤呼吸的贡献不同,比如自养微生物利用自身的养分提供呼吸,而异养微生物在资源匮乏的生态系统无法进行呼吸作用,本文中与自养呼吸对比,异养呼吸是总呼吸中的主要组分<sup>[24]</sup>。说明研究区养分资源充足,能够为异养微生物提供大量的能量和资源。此外,不同植被类型的土壤呼吸湿度敏感性大致表现为:裸地 < 草地 < 灌丛 < 林地,由此说明植被类型是影响土壤呼吸温度敏感性的重要因素,并且夏季和秋季土壤呼吸  $Q_{10}$  显著高于春季和冬季,主要是由于夏季和秋季是土壤湿度和温度有利于土壤微生物活动,进而导致较高的温度敏感性。

### 3.3 土壤呼吸各组分对土壤总呼吸的贡献

相关性分析可知,土壤 pH 值和容重与土壤呼吸呈显著负相关( $p < 0.05$ );而有机碳与土壤呼吸之间呈正相关( $p < 0.05$ );与全磷没有显著相关性( $p > 0.05$ )。主要受到土壤微生物代谢的影响<sup>[22-23]</sup>;大量学者通过研究发现,土壤呼吸速率的影响因素具有多样性,其中温度与湿度是关键影响要素,且二者交互影响效应尤为突出。通过拟合分析得知,虽然植被类型存在较大差异,但是土壤呼吸都受到温度的突出制约,其指数关系尤为突出,这可以通过本研究的拟合分析看出;虽然植被类型不一致,但是温度与土壤呼吸之间的指数关系极显著<sup>[21-25]</sup>,主要原因在于植被生长受制于温度,微生物新陈代谢也受制于温度,进而制约有机质分解,对有机碳含量施加关键影响,从而制约了土壤呼吸;通过相关性分析得知,土壤湿度对土壤呼吸影响并不大,主要原因在于该区域具有良好的土壤排水性,湿度变异并不明显,土壤水分变化较小,因此土壤湿度对土壤呼吸的贡献并不大<sup>[25-26]</sup>。

## 4 结论

(1) 不同植被类型的土壤呼吸速率具有显著差异( $p < 0.05$ ),季节变化趋势相一致;其中,土壤呼吸、异养呼吸和自养呼吸速率季节变化特征一致(倒 V 形变化规律),大致表现为:夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季。不同植被类型的土壤呼吸湿度敏感性大致表现为:裸地 < 草地 < 灌丛 < 林地,由此说明植被类型是影响土壤呼吸温度敏感性的重要因素,并且夏季和秋季土壤呼吸  $Q_{10}$  显著高于春季和冬季,主要是由于夏季和秋季是土壤湿度和温度有利于土壤微生物活动,进而导致较高的温度敏感性。

(2) 土壤 pH 值与  $Q_{10}$  呈显著负相关( $p < 0.05$ );有机碳含量与  $Q_{10}$  呈显著正相关( $p < 0.05$ )。说明土

壤酸碱性和有机碳含量是土壤呼吸敏感性的主控因子。对于土壤呼吸组分。不同植被类型土壤异养呼吸夏季的贡献率最高,春季的贡献率最低,自养呼吸贡献率随季节的变化呈逐渐增加趋势,异养呼吸对土壤总呼吸的贡献率大于自养呼吸,由此说明异养呼吸是土壤呼吸中最主要的组成部分,对温度具有较强的敏感性。因此,未来可以用异养呼吸来表征土壤呼吸中速率,进而提升和精确全碳模型评估的参数,为实现全球碳平衡的定量评估提供数据支持。

#### [参 考 文 献]

- [1] Olsson P, Linder S, Giesler R, et al. Fertilization of boreal forest reduces both autotrophic and heterotrophic soil respiration [J]. *Global Change Biology*, 2010, 11(10):1745-1753.
- [2] Allison S D, Czimczik C I, Treseder K K. Microbial activity and soil respiration under nitrogen addition in Alaskan boreal forest [J]. *Global Change Biology*, 2010, 14(5):1156-1168.
- [3] Nocentini A, Monti A. Comparing soil respiration and carbon pools of a maize-wheat rotation and switchgrass for predicting land-use change-driven SOC variations [J]. *Agricultural Systems*, 2019, 4(6):209-217.
- [4] Wen Li, Wang Jinlan, Zhang Xiaojiao, et al. Effect of degradation and rebuilding of artificial grasslands on soil respiration and carbon and nitrogen pools on an alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Ecological Engineering*, 2018, 111(21):134-142.
- [5] Wertin T M, Young K, Reed S C. Spatially explicit patterns in a dryland's soil respiration and relationships with climate, whole plant photosynthesis, and soil fertility [J]. *Oikos*, 2018, 3(5):12-18.
- [6] Tian Qiuxiang, Wang Dongya, Tang Yanan, et al. Topographic controls on the variability of soil respiration in a humid subtropical forest [J]. *Biogeochemistry*, 2019, 145(1/2):177-192.
- [7] Zhao Fazhu, Wang Jieying, Zhang Lu, et al. Understory plants regulate soil respiration through changes in soil enzyme activity and microbial C, N, and P stoichiometry following afforestation [J]. *Forests*, 2018, 9(7):436-441.
- [8] Wang Dong, Chen Xinli, Chen Han, et al. Contrasting effects of thinning on soil CO<sub>2</sub> emission and above-and belowground carbon regime under a subtropical Chinese fir plantation [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 690(10):361-369.
- [9] Yu Haiqing, Li Yong, Oshunsanya S O, et al. Re-introduction of light grazing reduces soil erosion and soil respiration in a converted grassland on the Loess Plateau, China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 280(8):43-52.
- [10] 张成芳,李德生,魏佳宇,等.3种城郊防护林土壤呼吸与温湿度的关系[J].*江苏农业科学*,2020,48(5):243-249.
- [11] 刘顺,杨洪国,罗达,等.川西亚高山不同森林类型土壤呼吸和总硝化速率的季节动态[J].*生态学报*,2019,39(2):550-560.
- [12] 李新鸽,韩广轩,朱连奇,等.降雨量改变对黄河三角洲滨海湿地土壤呼吸的影响[J].*生态学报*,2018,39(13):4806-4820.
- [13] 王新友,马全林,靳虎甲,等.石羊河下游人工梭梭林土壤呼吸变化特征及其与水热因子的关系[J].*干旱区地理*,2019,42(3):570-580.
- [14] 陈毅,闫文德,郑威,等.模拟氮沉降凋落物管理对樟树人工林土壤呼吸的影响[J].*生态学报*,2018,38(21):313-322.
- [15] 徐丽,杨雁茹,张军辉,等.模拟氮沉降增加对中国陆地生态系统土壤呼吸的影响[J].*生态学杂志*,2019,38(5):1560-1569.
- [16] 温超,单玉梅,晔蕾罕,等.氮和水分添加对内蒙古荒漠草原放牧生态系统土壤呼吸的影响[J].*植物生态学报*,2019,43(2):80-92.
- [17] 马志良,赵文强,刘美,等.土壤呼吸组分对气候变暖的响应研究进展[J].*应用生态学报*,2018,29(10):321-330.
- [18] 李新鸽,韩广轩,朱连奇,等.降雨引起的干湿交替对土壤呼吸的影响:进展与展望[J].*生态学杂志*,2019,38(2):567-575.
- [19] 康静,任海燕,王悦骅,等.短花针茅荒漠草原土壤呼吸对长期增温和氮素添加的响应[J].*干旱区资源与环境*,2019,33(5):153-159.
- [20] 徐映晖,同小娟,张劲松,等.太行山南麓刺槐人工林土壤呼吸与土壤温度间的滞后关系[J].*北京林业大学学报*,2019,41(4):78-87.
- [21] 丁梦凯,胡晓农,曹建华,等.桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征[J].*环境科学*,2019,40(2):924-933.
- [22] 贾洪雷,李森森,王刚,等.玉米立茬与粉碎秸秆覆盖对生长季土壤呼吸的影响[J].*农业工程学报*,2018,34(8):154-163.
- [23] 王红,王邵军,李霁航.西双版纳高檐蒲桃群落土壤呼吸的季节动态及主要影响因子分析[J].*中南林业科技大学学报*,2018,38(1):111-116.
- [24] 赵龙飞,李德生,滕达,等.城市绿化景观土壤呼吸变化规律及影响因素[J].*生态与农村环境学报*,2019,35(7):885-891.
- [25] 吴夏,潘谋成,曹建华,等.典型岩溶区土壤呼吸作用的昼夜变化特征及其影响因素[J].*中国岩溶*,2019,38(2):157-163.
- [26] 胡同欣,胡海清,孙龙.中度火干扰对兴安落叶松林土壤呼吸的影响[J].*生态学报*,2018,15(8):2915-2924.