

小黑杨与紫穗槐人工林对退化典型 黑土土壤呼吸的影响

张 爽, 杨 佳, 刘清华, 谷会岩

(东北林业大学 林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要: [目的] 测定并比较种植小黑杨与紫穗槐的人工幼龄林在不同退化程度黑土上的土壤呼吸速率(R_s), 分析环境因子对人工幼龄林土壤呼吸的影响, 以揭示以小黑杨和紫穗槐为代表的乔木型与灌木型植被恢复措施在退化黑土土壤碳排放过程中的差异作用。[方法] 2024 年 5—10 月(不同退化程度土壤样地于 2022 年构建), 使用便携式土壤碳通量观测系统 LI-870, 在齐齐哈尔克山农场分别对轻度、中度和重度退化黑土上种植的小黑杨和紫穗槐的人工林及对应空白对照小区(各小区面积均为 $4\text{ m} \times 7\text{ m}$) 的土壤呼吸速率进行野外原位连续观测, 对比分析不同退化程度下种植小黑杨和紫穗槐人工林土壤呼吸速率的差异, 并基于 Pearson 相关分析、冗余分析(RDA)以及偏最小二乘法路径模型 PLS-PM 探究其作用机制。[结果] 植被类型、土壤退化程度及其交互作用均极显著影响土壤呼吸速率($p < 0.001$)。种植小黑杨和紫穗槐人工林的不同退化程度的黑土土壤呼吸速率均具有较强的季节变化特征, 最大值均出现在 7 月和 8 月。小黑杨、紫穗槐及对照组的平均土壤呼吸速率均随着黑土退化程度的增加显著降低($p < 0.05$)。在各退化土壤中, 紫穗槐种植地的平均土壤呼吸速率 [$2.31\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] (以 CO_2 计) 总体上高于小黑杨栽植地的平均土壤呼吸速率 [$1.96\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]。模型拟合结果表明, 5 cm 土壤温度与土壤呼吸速率呈显著指数相关关系。土壤呼吸速率与土壤体积含水量无显著关系, 但其交互作用显著影响了种植不同物种的土壤呼吸($p < 0.05$)。Pearson 相关分析表明 R_s 与 5 cm 土壤温度、碱解氮呈极显著正相关($p < 0.01$)。RDA 表明土壤呼吸速率与全氮、速效磷、全磷、碱解氮、5 cm 土壤温度、体积含水量显著正相关($p < 0.05$)。偏最小二乘法路径模型结果表明, 植物种类和土壤退化程度均可以直接和间接影响土壤呼吸速率。[结论] 种植小黑杨和紫穗槐的人工林能显著提高退化黑土土壤呼吸速率($p < 0.05$), 种植紫穗槐人工林的轻度退化土壤平均土壤呼吸显著高于小黑杨人工林($p < 0.05$)。土壤温度是影响呼吸速率时间变化的关键因子, 其通过与土壤养分的耦合作用, 直接与间接地介入了植物种类、土壤退化程度对土壤呼吸的影响。

关键词: 退化黑土; 小黑杨; 紫穗槐; 土壤呼吸; 温度敏感性; 土壤温度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)04-0286-11

中图分类号: S154.1, S714.2

文献参数: 张爽, 杨佳, 刘清华, 等. 小黑杨与紫穗槐人工林对退化典型黑土土壤呼吸的影响[J]. 水土保持通报, 2026, 46(4): 286-296. Zhang Shuang, Yang Jia, Liu Qinghua, et al. Effects of *Populus* $\times$ *xiaohei* and *Amorpha fruticosa* plantations on soil respiration in degraded typical black soils [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(4): 286-296.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.037

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.04.037

Effects of *Populus* $\times$ *xiaohei* and *Amorpha fruticosa* plantations on soil respiration in degraded typical black soils

Zhang Shuang, Yang Jia, Liu Qinghua, Gu Huiyan

(College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China)

Abstract: [Objective] Soil respiration rates (R_s) of young plantations of *Populus* $\times$ *xiaohei* and *Amorpha fruticosa* established on black soils with different degradation degrees were measured and compared, and the

收稿日期: 2025-11-04

修回日期: 2026-02-26

采用日期: 2026-02-27

资助项目: 国家自然科学基金项目“小黑杨根系对不同退化程度黑土土壤微生物群落恢复演替的影响机制”(32471697); 黑龙江省博士后基金(LBH-Z25057)与国家重点研发计划(2021YFD150070506)资助项目

第一作者: 张爽(2000—), 女(汉族), 黑龙江省齐齐哈尔市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤呼吸及退化黑土修复。Email: 1679512909@qq.com。

通信作者: 谷会岩(1970—), 男(汉族), 黑龙江省哈尔滨市人, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事退化黑土修复方面的研究。Email: ghuiyan@nefu.edu.cn。

effects of environmental factors on soil respiration of young plantations were analyzed, in order to clarify the differential roles of these tree-type and shrub-type restoration measures in soil carbon emission from degraded black soils. [Methods] From May to October 2024 (soil sample plots with different degradation degrees established in 2022), soil respiration rates were continuously measured in situ using a portable soil carbon flux system (LI-870) at Keshan Farm, Qiqihar. Lightly, moderately, and severely degraded black soils were planted with *P. × xiaohei* and *A. fruticosa* young plantations, with corresponding bare control plots. All plots had an area of 4 m × 7 m. Soil respiration rates of the two plantations and the controls were compared among degradation degrees, and the underlying mechanisms were further explored using Pearson correlation analysis, redundancy analysis (RDA), and partial least squares path modeling (PLS-PM). [Results] Vegetation type, soil degradation degree, and their interaction had highly significant effects on soil respiration rate ($p < 0.001$). For both plantations, soil respiration on all three degradation degrees showed pronounced seasonal dynamics, with maximum values in July and August. The average soil respiration rates of *P. × xiaohei*, *A. fruticosa*, and the control all decreased significantly with increasing degradation degree ($p < 0.05$). Across degradation degrees, the average soil respiration rate in *A. fruticosa* plantations [$2.31 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, calculated using CO_2] was generally higher than that in *P. × xiaohei* plantations [$1.96 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]. Model fitting results showed that soil temperature at 5 cm depth was exponentially and significantly related to soil respiration rate, whereas soil volumetric water content alone was not significantly correlated with soil respiration rate, but its interaction significantly affected soil respiration in the plantations of different species ($p < 0.05$). Pearson correlation analysis showed a highly significant positive correlation ($p < 0.01$) between R_s and 5 cm soil temperature and alkali-hydrolyzable nitrogen. RDA indicated that soil respiration rate was significantly and positively correlated with total nitrogen, available phosphorus, total phosphorus, alkali-hydrolyzable nitrogen, 5 cm soil temperature, and volumetric water content ($p < 0.05$). PLS-PM results further showed that plant species and soil degradation degree affected soil respiration rate both directly and indirectly. [Conclusion] Establishing young plantations of *P. × xiaohei* and *A. fruticosa* significantly increases soil respiration rates of degraded black soils compared with bare controls ($p < 0.05$), and in mildly degraded soils the average soil respiration under *A. fruticosa* plantations is significantly higher than under *P. × xiaohei* ($p < 0.05$). Soil temperature is the key factor driving the temporal variation of soil respiration, and through its coupling with soil nutrients, it directly or indirectly mediates the effects of plant species and soil degradation degree on soil respiration.

Keywords: degraded black soil; *Populus × xiaohei*; *Amorpha fruticosa*; soil respiration; temperature sensitivity; soil temperature

中国东北黑土区是全球四大黑土区之一,其土壤有机碳储量占全国耕地总量的25%以上,是中国重要的商品粮生产基地,对于保障中国乃至全球的粮食安全具有重要的战略意义^[1]。然而,由于长期高强度农业利用和不合理开垦,该区域正面临严重的土壤退化问题。研究表明,在过去30 a间,东北黑土区表层土壤有机碳含量下降了约20%~30%^[2],且黑土呈现出变薄、变硬、变瘦的综合退化特征。土壤退化不仅会威胁粮食产量,还会导致土壤结构恶化和生物活性降低,深刻影响陆地生态系统的碳循环过程^[3]。土壤呼吸是土壤碳库向大气输出的主要途径,是陆地生态系统碳循环的关键环节,其速率是反映土壤生物活性强弱和碳循环的关键指标,对生态系统功能的恢复至关重要^[4]。土壤呼吸受植物根系活动、土壤微生物群落及有机质供给等生物因素,以

及土壤温度、含水量等非生物因素的共同调控^[5]。在退化黑土的修复中,植被恢复是调控土壤碳循环的核心策略,在黑土修复和维持土壤碳平衡方面起着至关重要的作用。植被可以通过改变凋落物输入和根系活动,调节土壤有机碳的累积与分解过程,从而影响土壤呼吸和土壤碳库动态^[6-7]。同时,植被冠层及地表覆盖还可通过改变遮阴程度和土壤结构,间接影响土壤温度和含水量,对土壤碳排放过程产生进一步调节作用。

已有研究表明,土壤温度和土壤体积含水量可以解释土壤呼吸的大部分变异,其通过影响根系代谢活动和土壤微生物过程而对土壤呼吸产生重要作用。例如,张克胜的研究表明,土壤温度与土壤呼吸速率呈显著的指数关系^[8]。也有研究表明,土壤呼吸与土壤体积含水量的关系通常不显著,但土壤温度与土壤

体积含水量的交互作用可以显著影响土壤呼吸^[9]。在紫穗槐纯林和北方杨树人工林中土壤呼吸随土壤温度也呈现明显的季节变化,土壤温度是解释其变异的主要因子之一,土壤含水量多表现为次要或限制性因子。因此,准确监测退化黑土土壤呼吸及其对温度、含水量的响应,对于评估修复措施对土壤碳循环过程的影响至关重要。

尽管已有研究关注人工林对土壤呼吸的影响,但在东北退化黑土区沿退化梯度,系统比较以小黑杨和紫穗槐为代表的乔木型与灌木型人工幼龄林对土壤呼吸及其温度响应的研究仍相对有限。因此,探究黑土区不同退化程度下人工幼龄林土壤呼吸及其影响机制,以评估人工幼龄林对退化黑土土壤碳循环过程和土壤质量改善的作用,揭示退化黑土的质量改善效果以及土壤碳循环过程具有重要的理论和实践意义。

小黑杨(*Populus × xiaohei*)为东北黑土区主要防护林乔木树种,具有深根系和快速生长的特点,能显著改变土壤微环境;紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)为灌木,对土壤要求不高,可改善土壤结构,提高土壤肥力,还可通过根瘤固氮作用影响土壤氮循环^[10]。这种差异可能导致小黑杨与紫穗槐人工林在相同退化程度黑土中的土壤呼吸调控效应并不相同,且在不同退化程度黑土中对土壤呼吸的调控效应也有所不同。这限制了我们从土壤碳循环管理的角度,为不同退化程度黑土修复准确选择造林物种的能力。因此,本研究以轻度、中度和重度退化黑土为对象,采用野外原位连续测定的方法,对比分析种植小黑杨和紫穗槐人工幼龄林黑土的土壤呼吸速率差异,重点探讨:①对分别种植小黑杨和紫穗槐人工林的不同退化程度黑土土壤呼吸速率的影响;②土壤温度和湿度对退化黑土土壤呼吸速率的影响;③植被类型、土壤退化程度对土壤呼吸速率的潜在影响机制。研究结果旨在更好地理解乔木和灌木对退化黑土土壤呼吸、土壤碳排放与土壤碳循环过程的影响,从而为基于人工林的退化黑土碳管理及修复造林物种的选择提供科学依据,为实现黑土的可持续利用提供理论和决策支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省齐齐哈尔市克山农场(125°08′—125°37′E,48°12′—48°23′N)。克山农场为典型国有农场,自建场以来长期以机械化粮食作物种植为主,是松嫩平原重要商品粮基地之一。该

农场地处讷河市与克山县交界处,位于松嫩平原腹地,地势平坦,略有起伏^[11]。克山农场的地貌特征为漫川漫岗,平均海拔315 m,坡长而缓,坡长多为200~1 000 m,坡度平均3°~5°,土壤类型以黏化湿润均腐土为主。农场的主要土地利用类型包括耕地和林地:耕地主要用于农作物种植,林地则涵盖了人工经济林和农田防护林等。该地区夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。其中,年均降雨约为600 mm,且主要集中在6—8月;年平均气温约0.9℃。克山农场所属地区为典型黑土区,土质肥沃,黑钙土占土地面积的98%,适宜农作物生长。

1.2 试验地设计

2022年5月在克山农场科技园的一处农田开展试验,在距离农田地边5 m之处,选定3处长60 m,宽7 m的农田,基于“分层剥离和交错回填”方法设置退化样地。根据土壤有机质含量差异模拟不同退化程度土壤^[12-13]。分别收集垂直剖面的3层土层,即0—20,20—40,40—60 cm进行回填。回填0—20 cm土壤作为轻度退化土壤(lightly degraded, LD),20—40 cm土壤为中度退化土壤(moderately degraded, MD),40—60 cm土壤为重度退化土壤(severely degraded, SD)。退化程度以模拟土壤剖面构建方式并结合土壤有机质(SOM),土壤有机碳(SOC),全氮(TN)等理化指标的显著差异来界定(表1),从而形成由LD向SD逐渐加重的退化梯度。2023年5月,在每个退化黑土样地上设置大小相同(4 m×7 m)的区域分别实施小黑杨(两根一千苗,树高约为1.3 m)的种植和紫穗槐的行播,每个小区种植7行,3列,共91株苗,种植行、列距均为0.5 m,并设置与试验样地大小相同的空白对照样地(3种退化程度×3种处理×3个重复=27块小区),均为4 m×7 m。试验样地的基本信息见表1。

1.3 土壤样品采集及理化性质测定

于植物生长旺季,2024年9月10日,在种植小黑杨和紫穗槐的各小区以及空白对照小区内,使用铲子在每个小区沿对角线按5点取样法采集0—20 cm表层土壤,将5个点的土样混合为一个混合样,依次装入密封袋并做好标记带回实验室。土壤样品经过自然风干后,进行土壤理化性质测定。土壤pH值采用电位法测定;土壤容重采用环刀法测定;土壤有机碳含量采用重铬酸钾法测定;土壤碱解氮通过碱解扩散法测定;土壤全碳通过碳氮分析仪测定;土壤全氮质量分数通过凯氏法测定;土壤全磷质量分数采用硫酸-高氯酸消解钼锑抗比色法测定;土壤全钾含量测定采用原子吸收分光光度法;土壤速效磷采用

氟化铵浸提-钼锑抗比色法测定;土壤速效钾采用乙酸铵浸提-原子吸收仪测定^[14]。

1.4 土壤呼吸速率测定

首先在每个种植小区和空白小区内设置土壤呼吸环,具体为在每个小区的对角线交叉位置设置1个内径20 cm,高12 cm的PVC呼吸环作为固定样点,并在整个观测期内保持位置不变。将PVC呼吸环底端朝下垂直于地表插入土壤中约9 cm,保留环顶部距离土壤表面3 cm。随后,在2024年5月至10月分别对

土壤呼吸速率进行测定。测定时间为每月10日,若遇下雨则根据降雨量大小延迟2~3 d测定土壤呼吸速率。在测量前一天,贴地面清除土壤呼吸环内的杂草。在测定日的7:00—11:00,使用便携式土壤碳通量观测系统(LI-870)对土壤呼吸进行测定(测定时间3 min,包括30 s的预吹风,120 s的观测时间和30 s的换气)。同时,使用仪器配备的温湿度传感器测量呼吸环附近5 cm深处的土壤温度(T)和土壤体积含水量(W)。

表 1 试验样地土壤理化性质
Table 1 Soil physicochemical properties of experimental sample plots

植被类型	退化程度	pH值	TC	SOC	SOM	TN	AN	C:N	BD	AP
P.xh	LD	6.41±0.03 ^{Ba}	30.41±0.65 ^{Aa}	21.45±0.23 ^{Aa}	36.99±0.4 ^{Aa}	1.39±0.04 ^{Ac}	164.77±6.26 ^{Aa}	21.95±0.87 ^{Aa}	1.25±0.04 ^{Ba}	118.07±4.65 ^{Ab}
	MD	6.58±0.17 ^{Ba}	24.68±1.43 ^{Ab}	15.88±0.15 ^{Bb}	27.37±0.27 ^{Bb}	1.17±0.04 ^{Bc}	112.64±15.24 ^{Ba}	21.05±0.86 ^{Aa}	1.37±0.03 ^{Ab}	66.36±4.14 ^{Bb}
	SD	6.63±0.03 ^{Aa}	24.04±2.3 ^{Ba}	15.57±0.42 ^{Ba}	26.84±0.73 ^{Ba}	1.18±0.11 ^{Bc}	91.59±11.03 ^{Ba}	20.46±0.65 ^{Aa}	1.32±0.01 ^{Aa}	116.2±32.6 ^{ABa}
Af	LD	6.43±0.07 ^{Ba}	31.3±2.08 ^{Ba}	17.83±1.02 ^{Aa}	30.73±1.76 ^{Ab}	2.51±0.11 ^{Aa}	128.45±14.29 ^{Ab}	12.46±0.29 ^{Bb}	1.34±0.05 ^{Aa}	83.66±4.88 ^{Ac}
	MD	6.56±0.04 ^{Aa}	24.18±1.37 ^{Bb}	13.42±0.8 ^{Bc}	23.14±1.38 ^{Bc}	1.47±0.05 ^{Bb}	92.58±25.62 ^{Ba}	16.41±0.52 ^{Ab}	1.41±0.05 ^{Aab}	98.21±4.33 ^{Aa}
	SD	6.6±0.03 ^{Aa}	23.54±0.8 ^{Aa}	12.27±0.76 ^{Bb}	21.15±1.3 ^{Bb}	1.41±0.09 ^{Bb}	72.75±7.77 ^{Bb}	16.78±1.51 ^{Ab}	1.36±0.01 ^{Aa}	122.33±40.29 ^{Aa}
CK	LD	6.27±0.05 ^{Cb}	29.14±0.96 ^{Ba}	22.43±1.22 ^{Aa}	38.67±2.1 ^{Aa}	2.31±0.07 ^{Bb}	156.84±18.99 ^{Ba}	12.59±0.4 ^{Bb}	1.27±0.04 ^{Ba}	157.07±22.27 ^{Aa}
	MD	6.38±0.06 ^{Ba}	38.35±4.4 ^{Ba}	23.03±0.38 ^{Aa}	39.7±0.65 ^{Aa}	1.79±0.05 ^{Ca}	100.3±14.97 ^{Ba}	21.46±2.4 ^{Aa}	1.46±0.02 ^{Aa}	55.02±0.67 ^{Cc}
	SD	6.58±0.04 ^{Aa}	23.23±3.19 ^{Ba}	13.3±0.28 ^{Bb}	22.93±0.48 ^{Bb}	2.51±0 ^{Aa}	79.62±4.25 ^{Bab}	9.25±1.27 ^{Cc}	1.38±0.06 ^{Aa}	86.02±9.63 ^{Ba}

注:①表中数值为平均值±标准差,大写字母表示同一物种不同退化程度黑土下差异显著,小写字母表示相同退化程度黑土不同物种差异显著($p<0.05$)。②TC为全碳;SOM为土壤有机质;SOC为土壤有机碳;TN为全氮;AN为碱解氮;AP为速效磷;BD为土壤容重;C:N为碳氮比。

1.5 数据处理

首先建立土壤呼吸速率(以C计)与土壤温湿度之间的单变量模型。根据已有研究结果,使用公式(1)拟合^[15]土壤呼吸速率与土壤5 cm土壤温度间的关系:

$$R_s = a + R_0 e^{bT}$$
 (1)

式中: R_s 表示土壤呼吸速率[$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,以C计]; R_0 表示温度为0℃时的土壤呼吸速率[$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,以C计]; T 表示5 cm土壤温度(℃); a 和 b 为拟合参数。

在公式(1)的基础上,使用公式(2)^[16]推导土壤呼吸温度敏感性系数:

$$Q_{10} = e^{10b}$$
 (2)

式中: Q_{10} 表示土壤呼吸温度敏感性系数; a 、 b 为公式(1)中的拟合参数。

使用公式(3)探究土壤呼吸速率与土壤体积含水量间的关系:

$$R_s = aW + b$$
 (3)

式中: R_s 表示土壤呼吸速率[$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,以C计]; W 表示土壤体积含水量(cm^3/cm^3); a 和 b 为拟合参数。

使用公式(4)拟合土壤呼吸速率与5 cm土壤温度和土壤体积含水量间的多元回归模型:

$$R_s = a + bT + cW + dTW$$
 (4)

式中: R_s 表示土壤呼吸速率[$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]; T 表示5 cm土壤温度(℃); W 表示土壤体积含水量(cm^3/cm^3); a 、 b 、 c 和 d 为拟合参数。

1.6 数据分析

使用多因素方差分析探究月份、退化程度、植被类型及其交互作用对土壤呼吸速率、5 cm土壤温度和土壤体积含水量的影响。采用单因素方差分析研究不同土地退化程度间平均土壤呼吸速率的差异,如果方差分析显著,采用Duncan法进行多重比较。采用一元非线性回归分析探究土壤呼吸速率和5 cm土壤温度间的关系;采用一元线性回归分析探究土壤呼吸速率和土壤体积含水量间的关系;采用多元回归分析探究土壤呼吸速率与5 cm土壤温度和土壤体积含水量间的协同关系。采用Pearson相关分析探究土壤性质对土壤呼吸速率的影响。采用RDA分析探究土壤性质对土壤呼吸速率及 Q_{10} 的多元影响。采用偏最小二乘法路径模型(PLS-PM)探究植被类型、土壤因素对土壤呼吸速率的直接和间接影响。研究的数据分析均在R 4.0.1中完成,所有显著性水平平均设为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同退化程度黑土土壤呼吸速率、5 cm 土壤温度和土壤体积含水量变化

从表 2 中可以看出,月份、土壤退化程度、植被类型及其交互作用对土壤呼吸速率均有显著影响($p < 0.001$)。相比之下,月份、土壤退化程度、植被类型、月份与土壤退化程度交互作用及土壤退化程度与植被类型交互作用对 5 cm 土壤温度有显著影响($p < 0.05$);月份、植被类型及月份与植被类型交互作用对土壤体积含水量有显著影响($p < 0.001$)。从图 1 中可以看出,种植小黑杨和紫穗槐及对照组的黑土土壤呼吸速率、5 cm 土壤温度和土壤体积含水量在不同退化程度黑土中均呈现明显的季节动态。其中,小黑杨和紫穗槐的土壤呼吸速率均在 7、8 月达到

峰值,随后逐月下降。整体上,不同退化程度和植被措施下 5 cm 土壤温度均表现为先增加后降低的趋势,且均在 7 月份达到峰值。相比之下,种植小黑杨和紫穗槐的黑土土壤体积含水量在不同退化程度黑土中呈现先降低后增加再降低的趋势。在各退化土壤中,紫穗槐种植地的平均土壤呼吸速率 $2.31 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (以 CO_2 计,下同)总体上高于小黑杨栽植地的平均土壤呼吸速率 $1.96 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。从图 2 中可以看出,小黑杨、紫穗槐及对照组的平均土壤呼吸速率均随着退化程度的增加逐渐降低。在 LD 土壤中(图 2),紫穗槐的平均土壤呼吸速率显著高于小黑杨和对照组($p < 0.05$),且小黑杨和对照组间差异不显著。在 MD 和 SD 土壤中,小黑杨和紫穗槐平均土壤呼吸速率差异不显著,但均显著高于对照组($p < 0.05$)。

表 2 月份、土壤退化程度、植被类型及其交互作用对土壤呼吸速率、5 cm 土壤温度和土壤体积含水量影响

Table 2 Effects of month, soil degradation degree, vegetation type, and their interactions on soil respiration rate, 5 cm soil temperature, and soil volumetric water content

因子	土壤呼吸速率(R_s)		5 cm 土壤温度(T)		土壤体积含水量(W)	
	F	p	F	p	F	p
月份	416.355	<0.001	1 223.31	<0.001	245.997	<0.001
土壤退化程度	374.577	<0.001	40.715	<0.001	3.02	0.053
植被类型	309.019	<0.001	6.867	<0.05	9.727	<0.001
月份 $\times$ 土壤退化程度	16.079	<0.001	9.012	<0.001	1.854	0.06
月份 $\times$ 植被类型	48.727	<0.001	0.492	0.892	6.678	<0.001
土壤退化程度 $\times$ 植被类型	30.102	<0.001	4.09	<0.05	0.446	0.775
月份 $\times$ 土壤退化程度 $\times$ 植被类型	4.189	<0.001	0.673	0.845	0.552	0.936

注:“ $\times$ ”代表其交互作用; R_s 为土壤呼吸速率; T 为 5 cm 土壤温度; W 为土壤体积含水量。

2.2 土壤呼吸速率与 5 cm 土壤温度和土壤体积含水量的关系

从图 3 和表 3 中可以看出,土壤呼吸速率与 5 cm 土壤温度存在显著的指数关系。整体上,小黑杨、紫穗槐和对照组的土壤呼吸速率均随土壤温度的升高而增大。其中,MD 下对照组的 R^2 最大,为 0.656,SD 下对照组的 R^2 最低,为 0.143。由此可见,MD 下对照组的土壤温度对土壤呼吸速率的贡献最大,SD 下对照组的贡献最小。此外,不同处理下,土壤呼吸的 Q_{10} 值范围为 1.162~1.804。其中,种植紫穗槐的 MD 土壤呼吸速率对土壤温度最敏感(Q_{10} 为 1.804)。

相比之下,小黑杨、紫穗槐和对照组的土壤呼吸速率与土壤体积含水量的关系均不显著。从表 4 中可以看出,土壤呼吸速率与 5 cm 土壤温度和体积含水率的双因素复合模型显著提高了模型的预测精度。其中 MD 下小黑杨的 R^2 最大,为 0.863,SD 下紫穗槐的 R^2 最低,为 0.314。

2.3 土壤呼吸与各因子的关系

采用 Pearson 相关分析探究土壤理化性质与土壤呼吸速率(R_s)的关系(表 5)。结果表明, R_s 与 5 cm 土壤温度、碱解氮呈极显著正相关($p < 0.01$),与全钾、容重呈极显著负相关($p < 0.01$)。研究选择土壤理化性质(全碳、有机质、全氮、速效磷、全磷、碱解氮、5 cm 土壤温度、体积含水量、全钾和速效钾)和土壤呼吸速率及 Q_{10} 进行冗余分析(RDA)(图 4)。结果表明,RDA 第一轴和第二轴对土壤呼吸速率及 Q_{10} 总方差的解释度分别为 43.17% 和 12.20%。其中,土壤呼吸速率与全氮、速效磷、全磷、碱解氮、5 cm 土壤温度、体积含水量显著正相关; Q_{10} 与全碳、有机质、全钾、5 cm 土壤温度、体积含水量显著正相关。偏最小二乘法路径模型(见图 5),结果表明,植被类型、土壤退化程度和 5 cm 土壤温度均可以显著直接影响土壤呼吸。此外,植被类型和土壤退化程度可以通过改变土壤养分间接影响土壤呼吸。

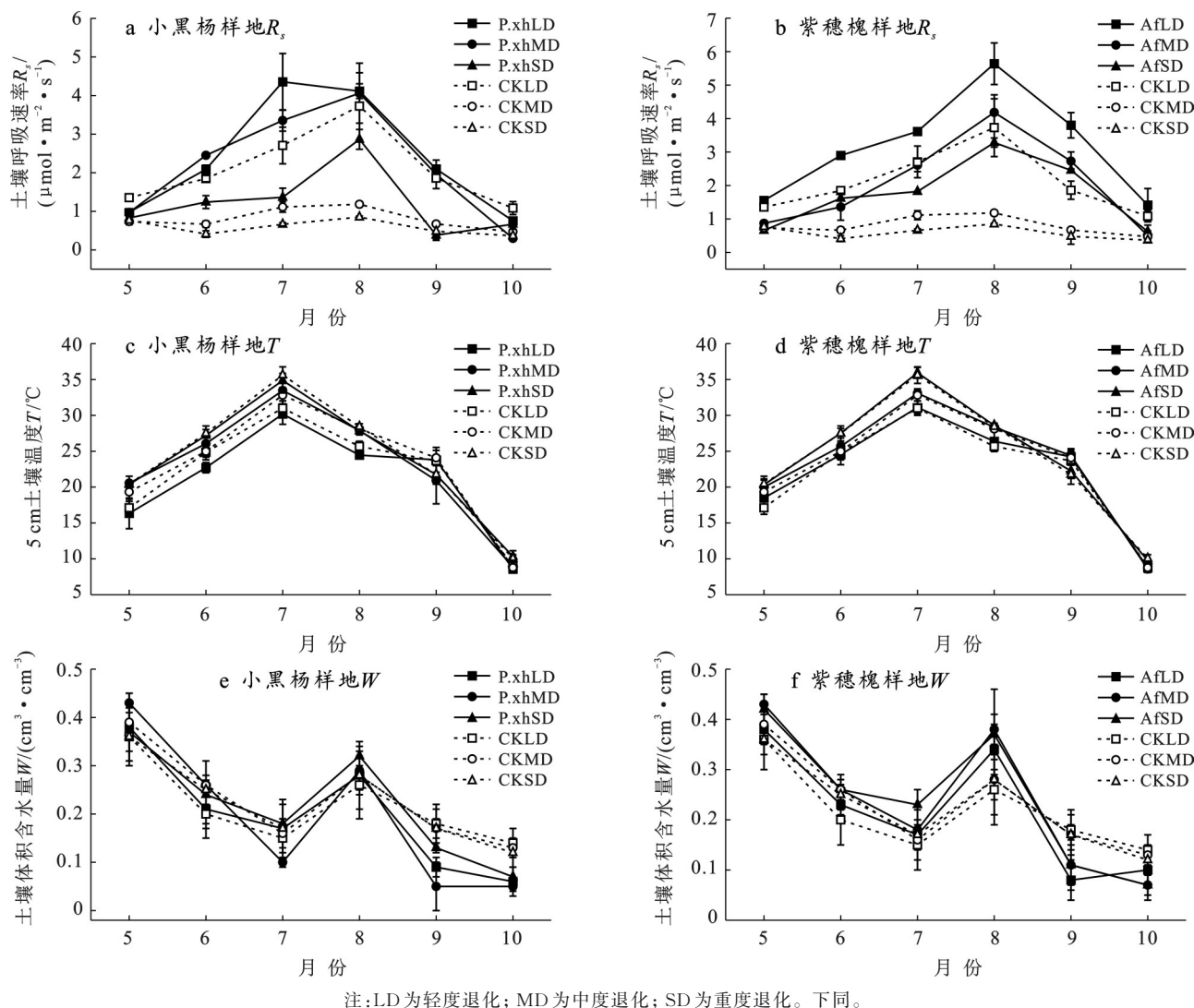
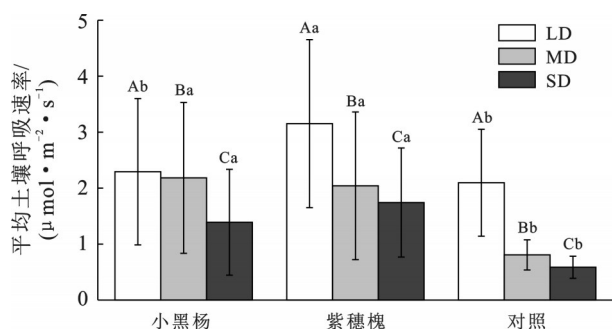
图1 不同退化程度黑土土壤呼吸速率(R_s)、5 cm土壤温度(T)和土壤体积含水量(W)的月动态变化Fig.1 Monthly dynamics of soil respiration rate (R_s), 5 cm soil temperature (T), and soil volumetric water content (W) in black soils with different degradation degrees注:大写字母表示同一物种不同退化程度黑土差异显著,小写字母表示相同退化程度黑土不同物种差异显著($p < 0.05$)。下同。

图2 不同退化程度黑土生长季平均土壤呼吸速率

Fig.2 Average soil respiration rates during growing season in black soils of different degradation degrees

3 讨论

3.1 不同退化程度黑土土壤呼吸的变化规律

种植小黑杨和紫穗槐人工林土壤呼吸都具有明

显的月变化规律,且最大值均出现在7月和8月。在同一退化程度下,种植小黑杨和紫穗槐人工林的峰值月份一致,但季节变化幅度和平均水平存在差异。这一结果与王旭等^[17]观测的山杨白桦次生林、原始阔叶红松林土壤呼吸季节变化规律基本一致。这可能是因为适中的土壤温度加快了微生物活动与根系代谢,进而导致呼吸速率骤增。相比之下,9月后呼吸速率下降不仅与温度降低有关,还可能与植物生长后期光合产物分配减少,根系分泌物输入下降相关^[18]。土壤呼吸包括土壤中植物根系、微生物和土壤动物等组分的呼吸,其中,根系呼吸和微生物呼吸占据主导地位^[19]。研究中种植小黑杨和紫穗槐的不同退化程度黑土土壤呼吸速率均随退化程度加剧逐渐降低,表现为:LD>MD>SD。这可能是因为LD土壤中保留了较高的活性碳库和相对较好的物理结构,支持旺盛的微生物活动。

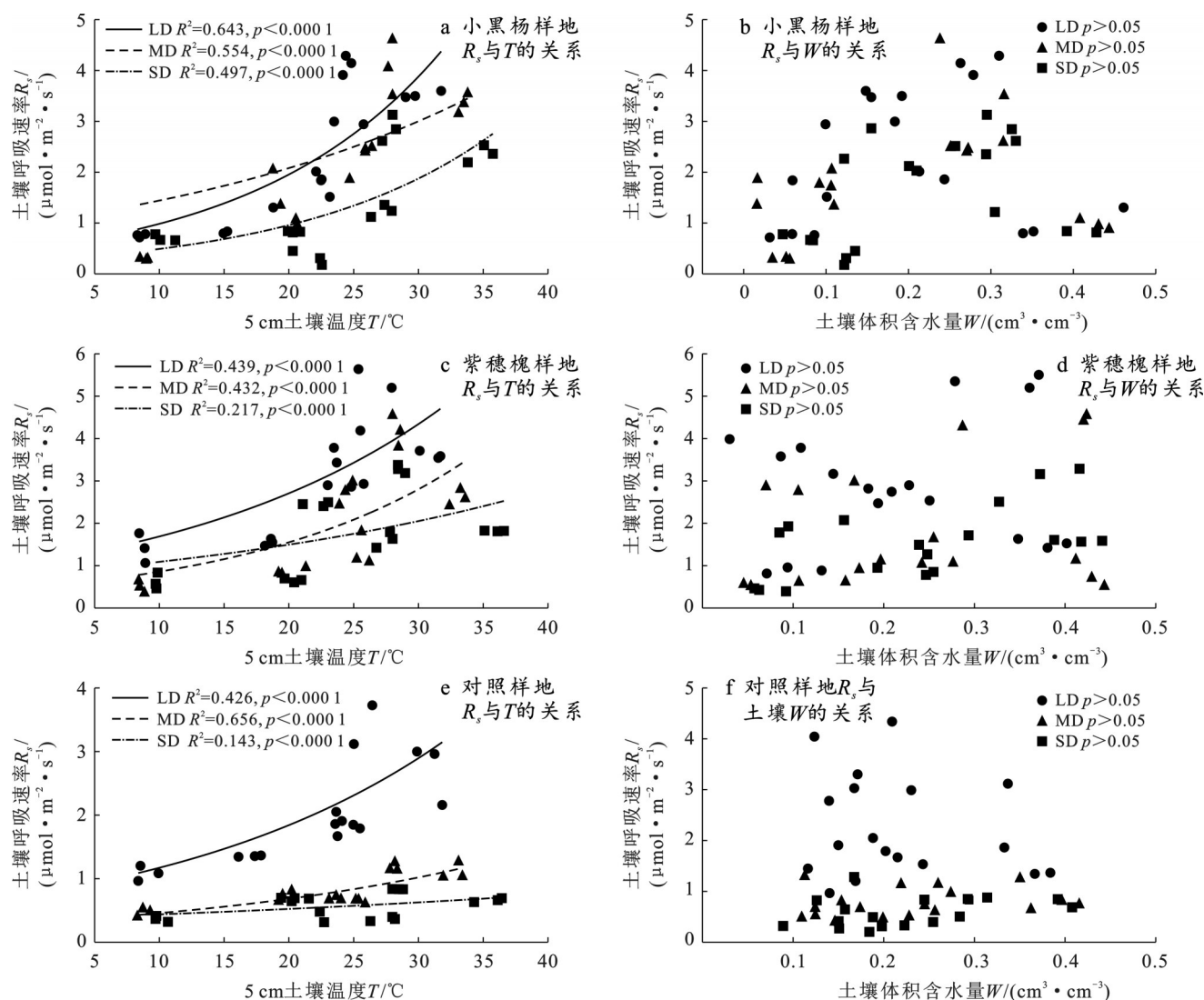


图3 不同退化程度黑土的土壤呼吸速率(R_s)与5 cm土壤温度(T)、土壤体积含水量(W)之间的关系

Fig.3 Relationship of soil respiration rate (R_s) with 5 cm soil temperature (T) and soil volumetric water content (W) in black soils with different degradation degrees

表3 不同退化程度黑土土壤呼吸速率与5 cm土壤温度的关系

Table 3 Relationship between soil respiration rate and soil 5 cm temperature in black soils with different degradation degrees

土壤呼吸速率	处理	拟合公式	Q_{10}
Af	LD	$R_s=1.054 e^{0.047 T}$	1.600
	MD	$R_s=0.476 e^{0.059 T}$	1.804
	SD	$R_s=0.796 e^{0.032 T}$	1.377
P.xh	LD	$R_s=0.496 e^{0.015 T}$	1.162
	MD	$R_s=1.000 e^{0.037 T}$	1.448
	SD	$R_s=0.251 e^{0.018 T}$	1.197
CK	LD	$R_s=0.745 e^{0.045 T}$	1.568
	MD	$R_s=0.307 e^{0.040 T}$	1.492
	SD	$R_s=0.366 e^{0.018 T}$	1.197

注: R_s 为土壤呼吸速率($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)(以 CO_2 计); T 为土壤温度($^{\circ}\text{C}$); $p<0.0001$ 。下同。

表4 不同退化程度黑土土壤呼吸速率与土壤5 cm温度和体积含水量的双因素复合模型

Table 4 Two-factor composite model of soil respiration rate with soil 5 cm temperature and volumetric water content in black soils with different degradation degrees

物种	处理	拟合公式 $R_s=a+bT+cW+dTW$					p
		a	b	c	d	R^2	
Af	LD	2.780	-0.001	-19.772	0.946	0.604	<0.01
	MD	1.240	0.011	-15.944	0.740	0.601	<0.05
	SD	1.524	-0.003	-9.763	0.421	0.314	<0.05
P.xh	LD	1.227	0.011	-18.205	1.040	0.835	<0.01
	MD	0.536	0.059	20.475	0.908	0.863	<0.01
	SD	1.570	-0.050	-16.656	0.853	0.730	<0.01
CK	LD	2.656	-0.055	-15.822	0.866	0.512	<0.05
	MD	0.441	0.011	-1.796	0.098	0.610	<0.01
	SD	0.148	0.007	1.059	0.005	0.339	<0.05

注: W 为土壤体积含水量(cm^3/cm^3); a, b, c, d 为模拟参数。

表 5 土壤呼吸速率与土壤理化性质 Pearson 相关性分析

Table 5 Pearson correlation analysis between soil respiration rate and soil physicochemical properties

项目	R_s	T	W	TC	SOM	TN	AN	TP	AP	TK	AK	pH 值	BD
R_s	1												
T	0.486**	1											
W	0.087	0.223**	1										
TC	0.023	-0.064	-0.009	1									
SOM	0.068	-0.099	-0.057	0.807**	1								
TN	0.005	-0.017	0.023	0.255**	0.197*	1							
AN	0.318**	-0.117	-0.066	0.412**	0.705**	0.169*	1						
TP	0.117	-0.053	0.001	0.496**	0.604**	0.199*	0.414**	1					
AP	0.106	-0.028	0.001	-0.196*	0.053	0.014	0.368**	0.201*	1				
TK	-0.376**	0.035	0.077	0.048	0.090	0.277**	-0.193*	0.166	0.049	1			
AK	-0.098	-0.006	-0.002	-0.027	-0.037	0.361**	0.110	-0.083	0.371**	0.197*	1		
pH 值	-0.129	0.089	0.060	-0.632**	-0.804**	-0.415**	-0.585**	-0.558**	-0.180	-0.114	0.032	1	
BD	-0.246**	0.074	0.082	0.182*	-0.262**	-0.007	-0.563**	0.058	-0.469**	0.176*	-0.149	0.303**	1

注: *表示显著相关($p<0.05$); **表示极显著相关($p<0.01$)。

而 MD 和 SD 土壤中由于有机质含量的显著降低和容重的增加可能限制了底物可用性与氧气扩散,导致呼吸速率降低。种植小黑杨与紫穗槐后,LD 土壤呼吸速率较对照提升 40%~60%,但 SD 土壤呼吸速率仅提升 10%~15%,这表明植被修复对轻度退化土壤的碳循环激活效应更显著。整体上,种植紫穗槐的土壤的呼吸速率高于种植小黑杨的呼吸速率,这可能是因为其土壤高氮含量($C/N\approx 13:1$)加速了微生物矿化过程^[20],且紫穗槐种植地凋落物较多,凋落物输入增加了土壤中的养分供给,促进了土壤生物对养分吸收的有效性,进而刺激土壤微生物的活动,提高了土壤的呼吸速率^[21]。而小黑杨土壤高木质素特性($C/N\approx 22:1$)可能抑制了短期碳释放。

率与土壤温度均呈现指数正相关(图 3,表 3),土壤温度可以解释土壤呼吸变异的 14.3%~65.6%,表明土壤温度是影响土壤呼吸的重要因素,这一结果得到了大量研究的支持^[22]。值得注意的是,研究中温度对种植小黑杨和紫穗槐的人工幼龄林不同退化程度黑土土壤呼吸的影响存在差异。从温度指数模型拟合结果看(表 3),小黑杨人工幼龄林在 LD, MD 和 SD 土壤中的 R^2 分别为 0.643, 0.554, 0.497, 整体高于紫穗槐人工幼龄林对应的 0.439, 0.432, 0.217。这说明在各退化程度下小黑杨人工幼龄林土壤呼吸对温度变化的响应较为稳定,而紫穗槐幼龄在重度退化黑土上的土壤呼吸对温度的解释力明显较弱。此外,紫穗槐幼龄在 MD 土壤中的 Q_{10} 值达到 1.804, 高于小黑杨的 1.448, 这说明中度退化土壤中紫穗槐人工林土壤呼吸对温度升高的敏感性更强。LD 土壤呼吸与土壤温度的相关性比 SD 土壤呼吸与土壤温度的相关性更大。相比之下,土壤体积含水量对土壤呼吸的影响较为复杂。目前,对于土壤含水量与土壤呼吸的关系得出的结论存在很大的差异。研究结果中土壤含水量与土壤呼吸速率的总体拟合效果较差,对土壤呼吸速率的影响不显著,这与郝龙飞等^[23]在东北地区白桦次生林及水曲柳、红松、长白落叶松人工林、全权等^[24]在辽东栎林、华北落叶松林和油松林的结果一致,上述研究均表明土壤温度是土壤呼吸变异的主要控制因子,而土壤水分的影响相对较小。相比之下,闫宝龙等^[25]以大兴安岭南段蒙古栎林、林缘草地、华北落叶松人工林、山杏灌丛和山荆子林 5 种植被类型为对象,发现土壤呼吸与土壤体积含水量和温度均呈显著正相关,表明在该区域水分是限制土壤呼吸的重要环境因子之一。这可能

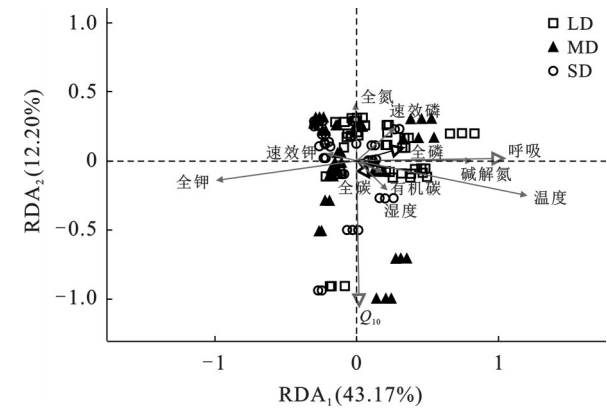


图 4 土壤理化性质对土壤呼吸速率影响的冗余分析

Fig.4 Redundancy analysis of effects of soil physicochemical properties on soil respiration rate

3.2 5 cm 土壤温度和体积含水量对土壤呼吸速率的影响

研究表明,不同退化程度黑土土壤呼吸速

是因为不同地区生长环境不一样。闫宝龙研究区域的土壤具有良好的持水性,土壤含水量位于微生物活性敏感区间,而本研究的退化黑土土壤孔隙度低导致有效持水能力下降,且由于研究期间土壤含水量变化较小,水分不是植物及微生物活动的胁迫因子^[16],土壤含水量对土壤呼吸速率的影响会被其他因素的影响所掩盖。目前也有多数研究者认为单独研究土壤含水量与土壤呼吸的关系很困难,但土壤含水量与土壤温度之间有交互作用,并且他们协同

作用对土壤呼吸的影响大于单独对土壤呼吸的影响。本研究显示,土壤呼吸速率与 5 cm 土壤温度和土壤含水量的交互作用显著相关($p < 0.05$)(表 4),相较于土壤温度与土壤呼吸速率间的单因子拟合模型,加入土壤体积含水量后的多元回归模型对土壤呼吸速率解释能力有一定提高,达到 31.4%~86.3%,这与马涛等^[26]研究结果一致,土壤呼吸变化都不能很好地用土壤体积含水量来解释,但是土壤体积含水量可以增强土壤温度对土壤呼吸的影响。

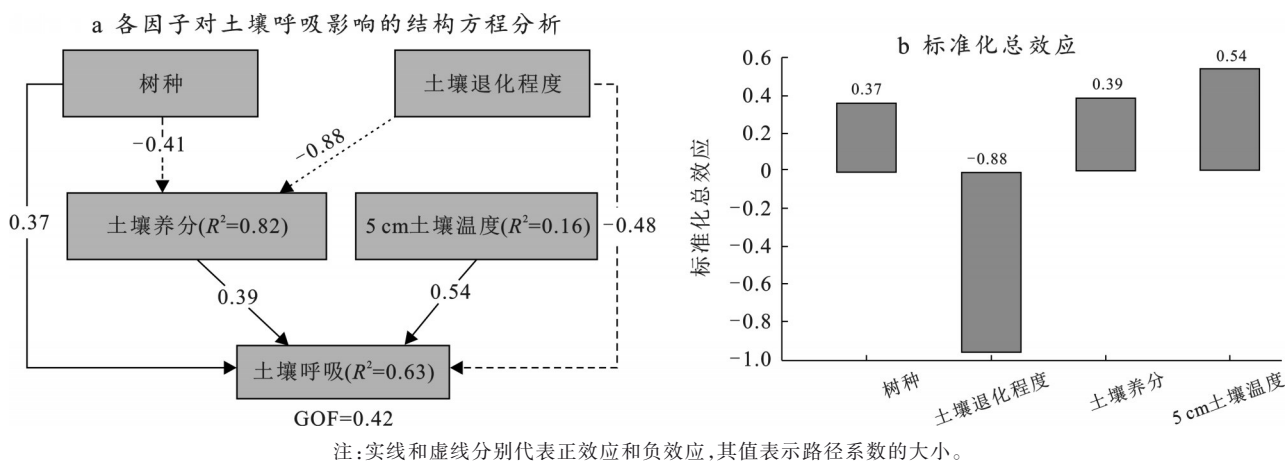


图 5 土壤呼吸速率与土壤理化性质的关系

Fig.5 Relationship between soil respiration rate and soil physicochemical properties

Q_{10} 值的范围在 1.162~1.804 之间,这与谭炯锐等^[27]在北京人工杨树林中得到的 Q_{10} 值 1.63 接近,小黑杨和紫穗槐在 SD 中 Q_{10} 值最低,原因是 Q_{10} 值大小取决于有机碳的含量和组分,SD 土壤中有机碳含量最低,进而导致 Q_{10} 值降低。在各退化黑土土壤中紫穗槐的 Q_{10} 值均高于小黑杨,唐夫凯等^[28]发现,生长季乔木的 Q_{10} 值高于灌木。这与本研究结果不同,这可能是因为紫穗槐属豆科固氮类植物,其根部共生的根瘤菌可以更好地将大气中的氮固定于土壤中,进而为微生物提供优质底物,增强微生物活性,促进易分解碳代谢,进而导致种植紫穗槐黑土土壤的 Q_{10} 值显著升高。

3.3 影响土壤呼吸速率因素的相关关系

偏最小二乘法路径模型结果表明,植被类型、土壤退化程度和土壤 5 cm 处温度不仅对土壤呼吸速率具有直接影响,植被类型和土壤退化程度还通过改变土壤养分产生显著的间接影响。具体而言, Pearson 相关性分析(表 5)及 RDA(图 4)的结果共同表明,土壤呼吸速率与土壤温度和碱解氮呈现极显著的正相关关系($p < 0.01$),而与全钾、容重呈现极显著负相关关系($p < 0.01$)。表明土壤养分有效性是调控呼吸过程的关键中间变量。紫穗槐作为一种固氮植物,可以提高土壤氮素含量,为微生物提供易分解

底物,进而增强了微生物活性和根系代谢。相关性分析中碱解氮与呼吸速率的极显著正相关($p < 0.01$),这可能是本研究中紫穗槐土壤呼吸速率显著高于小黑杨和对照组的原因。这一结果与郭明的研究一致,表明高氮环境可促进碳的快速矿化^[29],这与前文推测一致。相比之下,土壤退化程度通过改变土壤结构和土壤养分间接影响呼吸速率。土壤退化导致土壤团聚体破坏,孔隙度降低,容重与呼吸速率的显著负相关进一步从物理结构上解释了退化对呼吸的抑制机理,同时造成土壤有机质和养分含量下降,进而使得土壤呼吸速率随土壤退化程度增加均显著降低。这与赵慧丽等^[30]研究的结果一致,均强调退化程度抑制了土壤呼吸。最后需要客观指出的是,本研究仍存在一定的局限性。需在未来的工作中加以拓展。由于当前观测期尚处于植被恢复早期(小黑杨为两年生扦插苗,紫穗槐为种子直播形成的幼龄灌丛),本研究结论主要反映的是人工幼龄林对退化黑土土壤呼吸的短期调控响应。本阶段未能同步获取精细的林分生物量、冠层结构和根系分布等群落特征指标。因此现有结果实质上评估的是这两种造林物种作为整体群落在退化初期的综合宏观效应,长期的群落演替过程及其对土壤碳循环的深远

影响仍需后续持续跟踪。未来可在自然退化黑土背景下,结合更全面的退化诊断指标体系,增加群落和根系特征、土壤水热养分及微生物的长期联合监测,并通过增加呼吸测定点和引入控制模拟试验,进一步验证和拓展本研究的结论。

4 结 论

(1) 植被措施(采用小黑杨和紫穗槐修复黑土)均能显著提升退化土壤的呼吸速率,但这种提升效果随退化程度加剧而显著减弱。

(2) 土壤呼吸呈现明显的季节动态,峰值出现在7—8月高温期,且其变化主要受5 cm土壤温度驱动;土壤体积含水量未对土壤呼吸速率表现出显著影响,土壤含水量通过与温度的协同作用共同影响土壤呼吸。

(3) Pearson相关分析、RDA分析以及偏最小二乘法路径模型表明,植被类型、退化程度和5 cm土壤温度不仅直接影响土壤呼吸,还通过影响土壤养分(如碱解氮、全氮、速效磷)产生显著的间接影响。

(4) 研究从碳循环管理的角度揭示了小黑杨和紫穗槐在退化黑土修复中的差异作用机制,在退化黑土的植被修复实践中,轻度退化区域应优先选择种植紫穗槐等具有固氮能力的灌木,以更有效地激活土壤碳循环。

参考文献(References)

- [1] 杨青松,杨伟,彭珏,等.典型黑土区坡耕地土壤微生物多样性及群落结构对侵蚀-沉积的响应[J].土壤学报,2024,61(6):1741-1754.
Yang Qingsong, Yang Wei, Peng Jue, et al. Response of soil microbial diversity and community structure to erosion-deposition in slope farmland in typical black soil area of northeast China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2024,61(6):1741-1754.
- [2] Li Rui, Hu Wenyong, Jia Zhongjun, et al. Soil degradation: A global threat to sustainable use of black soils [J]. Pedosphere, 2025,35(1):264-279.
- [3] Shi Hailong, Jiang Lisha, Tan Xiaohong, et al. Changes in vegetation types alter soil respiration under the erosion and deposition topography in karst trough valley [J]. Catena, 2025,255:109027.
- [4] Muñoz-Rojas M, Lewandrowski W, Erickson T E, et al. Soil respiration dynamics in fire affected semi-arid ecosystems: Effects of vegetation type and environmental factors [J]. Science of the Total Environment, 2016, 572:1385-1394.
- [5] 赵爽,王邵军,杨波,等.西双版纳热带森林碳循环中土壤呼吸对次生演替的响应[J].南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(2):12-18.
Zhao Shuang, Wang Shaojun, Yang Bo, et al. Responses of soil respiration to tropical forest secondary succession in Xishuangbanna [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2022, 46(2):12-18.
- [6] 吴晞,赵雨森,辛颖.大兴安岭火烧迹地植被恢复过程中土壤氮素特征[J].森林工程,2022,38(2):8-13.
Wu Xi, Zhao Yusen, Xin Ying. Distribution characteristics of soil nitrogen during vegetation restorations of burned area in Greater Xing'an Mountains [J]. Forest Engineering, 2022,38(2):8-13.
- [7] 邹珊,段文标,王亚飞,等.阔叶红松林皆伐后不同恢复方式下土壤有机碳形态与矿化速率变化[J].森林工程,2024,40(6):79-90.
Zou Shan, Duan Wenbiao, Wang Yafei, et al. Changes of soil organic carbon morphology and mineralization rate under different recovery methods of broad-leaved Korean pine forest [J]. Forest Engineering, 2024,40(6):79-90.
- [8] 张克胜,尚晴,刘彦春,等.中国不同气候带人工林与天然林的土壤呼吸差异[J].生态科学,2017,36(6):49-56.
Zhang Kesheng, Shang Qing, Liu Yanchun, et al. Differences in soil respiration between plantation and natural forest among different climate zones in China [J]. Ecological Science, 2017,36(6):49-56.
- [9] Hu Shuidong, Li Yongfu, Chang S X, et al. Soil autotrophic and heterotrophic respiration respond differently to land-use change and variations in environmental factors [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 250:290-298.
- [10] 庄倩,赵晓娟,宋福强.紫穗槐丛枝菌根(AM)根系分泌物诱导根瘤菌结瘤因子及作用研究[J].西北林学院学报,2018,33(3):164-168.
Zhuang Qian, Zhao Xiaojuan, Song Fuqiang. *Amorpha fruticosa* arbuscular mycorrhizal (AM) root exudates induced nodulation factors of rhizobia and their interactions [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018,33(3):164-168.
- [11] 卜庆雨,王秀伟,陈桂兰,等.2种水土保持林土壤微团聚体组成及其在不同坡位和不同土层间的分布特征[J].东北林业大学学报,2024,52(3):119-124.
Bu Qingyu, Wang Xiuwei, Chen Guilan, et al. Composition of soil microaggregates in two kinds of soil and water conservation forests and their distribution characteristics in different slope positions and different soil layers [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024,52(3):119-124.
- [12] Zhang Lanlan, Huang Yong, Rong Li, et al. Effect of

- soil erosion depth on crop yield based on topsoil removal method: A Meta-analysis [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2021, 41(5):63.
- [13] Wang Zhiqiang, Liu Baoyuan, Wang Xuyan, et al. Erosion effect on the productivity of black soil in northeast China [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(7):1005-1021.
- [14] 刘可意, 杨佳, 姜淑娜, 等. 基于最小数据集的典型黑土区不同林龄小黑杨土壤质量差异[J]. *生态学报*, 2024, 44(9):3623-3635.
- Liu Keyi, Yang Jia, Jiang Shuna, et al. Evaluation of differences in soil quality of *Populus simonii* × *P. nigra* (*P. Xiaohei*) of different stand ages in typical black soil areas based on a minimum data set [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(9):3623-3635.
- [15] Yao Xiaomeng, Bowker M A, Xiao Bo. Estimation of annual CO₂ efflux of moss biocrust through measuring and simulating its respiration rate in a semiarid climate [J]. *Geoderma*, 2020, 376:114560.
- [16] 左强, 何怀江, 张春雨, 等. 采伐对蛟河阔叶红松混交林土壤呼吸的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(4):71-76.
- Zuo Qiang, He Huaijiang, Zhang Chunyu, et al. Effects of cutting on soil respiration in a mixed broad-leaf-Korean pine forest in western foothill of Changbai Mountain, northeast China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2016, 38(4):71-76.
- [17] 王旭, 周广胜, 蒋延玲, 等. 山杨白桦混交次生林与原始阔叶红松林土壤呼吸作用比较[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(3):348-354.
- Wang Xu, Zhou Guangsheng, Jiang Yanling, et al. Soil respiration in natural mixed (*Betula platyphylla* and *Populus davidiana*) secondary forest and primary broad-leaved Korean pine forest [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(3):348-354.
- [18] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 温带草原 11 个植物群落夏秋土壤呼吸对气温变化的响应[J]. *植物生态学报*, 2003, 27(4):441-447.
- Chen Quansheng, Li Linghao, Han Xingguo, et al. Responses of soil respiration to temperature in eleven communities in Xilingol grassland, Inner Mongolia [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2003, 27(4):441-447.
- [19] 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 Ping, Liu Guobin, Xue Sha. Review of soil respiration and the impact factors on grassland ecosystem [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(2):184-193.
- [20] 黄河, 王传宽, 张全智. 植物残体改变对东北 4 种典型林型土壤呼吸及其组分的影响[J]. *生态学报*, 2024, 44(23):10699-10712.
- Huang He, Wang Chuankuan, Zhang Quanzhi. Effect of plant detritus changes on soil respiration and its components for four typical forests in northeast of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(23):10699-10712.
- [21] 李浩天, 党晓宏, 高永, 等. 西乌珠穆沁草甸草地退化对植物群落结构与土壤特性的影响[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2025, 23(6):115-124.
- Li Haotian, Dang Xiaohong, Gao Yong, et al. The impact of grassland degradation on plant community structure and soil characteristics in Xiwuzhumuqin Grassland [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2025, 23(6):115-124.
- [22] Sivaranjani S, Sarkar M S, Panwar V P, et al. Modeling soil respiration: Seasonal variability and drivers in pine and broad-leaved forests of the lower Himalayas [J]. *Trees, Forests and People*, 2025, 20:100804.
- [23] 郝龙飞, 王庆成, 刘婷岩. 东北地区 4 种林分土壤呼吸及温、湿度敏感性对氮添加的短期响应[J]. *生态学报*, 2020, 40(2):560-567.
- Hao Longfei, Wang Qingcheng, Liu Tingyan. Short-term responses of soil respiration, temperature and humidity sensitivity to nitrogen addition in four forests of northeast China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(2):560-567.
- [24] 全权, 张震, 何念鹏, 等. 短期氮添加对东灵山三种森林土壤呼吸的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(3):797-804.
- Quan Quan, Zhang Zhen, He Nianpeng, et al. Short-term effect of nitrogen addition on soil respiration of three temperate forests in Dongling Mountain [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(3):797-804.
- [25] 闫宝龙, 赵清格, 张波, 等. 不同植被类型对土壤理化性质和土壤呼吸的影响[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(2):189-195.
- Yan Baolong, Zhao Qingge, Zhang Bo, et al. Effects of different vegetation types on soil physicochemical properties and soil respiration [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(2):189-195.
- [26] 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):82-88.
- 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):82-88.