

赵金安, 来雪慧. 集约化农业区不同土地利用方式的土壤呼吸温度敏感性差异研究[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(9): 281-285.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.09.067

集约化农业区不同土地利用方式的土壤呼吸温度敏感性差异研究

赵金安, 来雪慧

(太原工业学院环境与安全工程系, 山西太原 030008)

摘要:为揭示土地利用变化过程中农业活动对土壤呼吸的影响, 研究三江平原旱改水田(DL-PL)、湿改水田(WL-PL)、湿改旱地(WL-DL)和林改旱地(FL-DL)等4种土地利用方式的土壤呼吸温度敏感性及其土壤呼吸速率与温度、水分、碳含量的关系, 并在此基础上估算累积土壤呼吸量。结果表明, 4种土地利用方式的土壤呼吸速率随着土壤深度增加而呈降低的趋势, 平均土壤呼吸速率由高到低表现为 DL-PL > WL-PL > WL-DL > FL-DL。研究期土壤深度为 0~60 cm 时, 4种土地利用方式的累积土壤呼吸量由大到小依次为 DL-PL > WL-PL > FL-DL > WL-DL, 总体上水田的土壤呼吸量比旱地高。在不同土壤深度, 土壤呼吸速率与土壤温度、土壤含水量之间均存在极显著 ($P < 0.01$) 正相关关系, 土壤温度和含水量对土壤呼吸的解释能力分别在 71%、69% 以上。同时, 土壤呼吸速率与土壤碳含量呈正相关关系, 但土壤碳含量对土壤呼吸作用的解释能力较低 ($P > 0.05$)。本研究将为评估农业区域碳收支平衡以及制定科学有效的土壤管理措施提供依据, 同时补充完善土壤碳排放机制理论。

关键词:土壤呼吸速率; 土壤呼吸温度敏感性; 土壤含水量; 三江平原; 土地利用方式

中图分类号: S152 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)09-0281-04

土壤呼吸是生态系统碳循环的重要组成部分, 同时也是向大气输出碳的主要途径^[1]。土壤碳库的变化会引起大气中 CO₂ 的显著改变^[2]。土地利用方式变化引起的土壤呼吸改变, 决定着土壤在全球气候变化的影响程度^[3]。因此, 研究土壤呼吸的排放以及影响因素对于评价土壤碳平衡具有重要的理论意义。

影响土壤呼吸的因素复杂多样, 土地利用方式影响着土壤湿度、土壤肥力和土壤理化性质等, 并间接调控土壤呼吸作用^[4]。其中, 水热因子对土壤呼吸的影响已经被许多学者模拟研究, 发现土壤温度对土壤呼吸的影响是显著的^[5-6]。有学者通过野外观测发现, 在其他环境因子条件相似的情况下, 草地的土壤呼吸速率比林地高 20% 左右, 并发现导致土壤呼吸差异的主要因素是温度^[7]。同时诸多研究表明, 水分对土壤呼吸的作用具有不确定性, 两者之间的关系因生态系统类型的不同而不同^[8], 降水则通过对土壤微生物活性的直接影响而间接提高土壤呼吸速率^[9]。此外, 土壤有机质、生物因子和植被类型等因子对土壤呼吸也具有不同程度的影响^[10]。本研究探讨东北三江平原土地利用类型变化过程中的土壤呼吸温度敏感性差异, 以及影响土壤呼吸作用的关键因子, 以期研究农业活动和土地开垦对生态系统碳循环的影响提供数据基础。

收稿日期: 2017-09-06

基金项目: 山西省高等学校科技创新项目(编号: 2014151)。

作者简介: 赵金安(1964—), 男, 山西吕梁人, 硕士, 副教授, 从事水污染治理、土壤性质研究。Tel: (0351) 3569174; E-mail: zhaojia2005@126.com。

通信作者: 来雪慧, 博士, 副教授, 从事农业面源、环境规划研究。Tel: (0351) 3566125; E-mail: laixuehui@mail.bnu.edu.cn。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省东北部的三江平原(地理位置为 45°01'05"~48°27'56"N, 130°13'10"~135°05'26"E), 该区土壤以白浆土、黑土、草甸土和沼泽土为主, 土壤肥力较高。

自 20 世纪 50 年代以来, 三江平原经历了 4 次农业开发高潮, 均通过耕地开垦对土地进行大规模改造。为配合国家新增千亿斤粮食计划, 三江平原逐步成为了我国的重要粮食生产基地和集约化农业区。

1.2 土壤呼吸速率的测定

在 2014 年 4 月底至 6 月初选择旱地改水田(DL-PL)、湿地改水田(WL-PL)、湿地改旱地(WL-DL)、林地改旱地(FL-DL) 4 种土地利用类型, 每个类型选取 3 个样地作为平行样。测定土壤呼吸速率前将样地内的植物从根部剪除, 并去除表层生物。各样地内用环刀采取不同深度(0~15、16~30、31~60 cm)的原状土样各 3 个, 通过静态碱液吸收法^[11]测定土壤呼吸速率。

1.3 土壤理化因子的测定

利用长杆针式土壤温度计测定每个点 0~15、16~30、31~60 cm 深度的土壤温度; 采用烘干称量法测定土壤含水量。同时, 将每个样地不同深度的土壤样品带回实验室自然风干, 过 100 目筛后, 通过重铬酸钾法、凯氏定氮法和碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法分别测定土壤有机碳、全氮和有效磷的含量, 并用 pH 值计测定土壤的 pH 值。

1.4 研究方法

土壤呼吸温度敏感性 Q_{10} 通常用公式(1)、(2)进行拟合分析。

$$R_s = ae^{bT}; \quad (1)$$

$$Q_{10} = e^{10b}。 \quad (2)$$

式中: R_s 表示土壤呼吸速率[$\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$]; a 表示当土壤温度为 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 时的土壤呼吸速率[$\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$]; b 为温度响应系数; T 表示不同土地利用方式的土壤温度($^\circ\text{C}$)。

由2014年4月底至6月底测定的土壤呼吸速率估算累积土壤呼吸,公式为:

$$\text{累积土壤呼吸} = \sum_{i=\text{first}}^{\text{last}-1} \left[\frac{D_i + D_{i+1}}{2} \times (N_{i+1} - N_i - 1) + D_i \right] + D_{\text{last}}; \quad (3)$$

$$D_i = R_{s_i} \times 3600 \times 12 \times 10^{-6}。 \quad (4)$$

式中:first和last分别表示试验期间第1次和最后1次测定的土壤呼吸速率; $N_{i+1} - N_i - 1$ 为第1次与第2次测定土壤呼吸速率之间的间隔天数; R_{s_i} 表示测定日的土壤呼吸速率[$\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$]; D_i 表示测定日的累积土壤呼吸量(g/kg)。

2 结果与分析

2.1 不同土壤深度土壤呼吸速率的变化

研究期间4种土地利用方式的土壤呼吸速率在3个土壤深度呈现相同的变化规律,均表现为在 $0\sim 15\text{ cm}$ 深度土壤呼吸速率最大,在 $31\sim 60\text{ cm}$ 深度最小(图1)。对于DL-PL、WL-PL和FL-DL等3种方式,土壤呼吸速率在3个土壤深度之间差异显著。WL-DL在 $0\sim 15$ 、 $16\sim 30\text{ cm}$ 之间的呼吸速率差异不显著,在 $0\sim 15\text{ cm}$ 的呼吸速率变化范围为 $206.3\sim 565.3\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$, $31\sim 60\text{ cm}$ 深度的变化范围为 $137.5\sim 313.2\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ 。

在 $0\sim 15\text{ cm}$ 土层中,研究期间DL-PL方式土壤呼吸速率最大,其变化范围为 $290.3\sim 603.5\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$,FL-DL方式的土壤呼吸速率较小,变化范围为 $213.9\sim 504.2\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ 。在 $0\sim 15\text{ cm}$ 土层中,4种土地利用方式中除WL-DL和FL-DL间土壤呼吸速率间没有显著差异外,其他土地利用方式间均存在显著差异,尤其是DL-PL与FL-DL的差异极显著($P < 0.01$)。在 $16\sim 30\text{ cm}$ 土层中,4种土地利用方式的土壤呼吸速率由高到低依次表现为DL-PL > WL-PL > WL-DL > FL-DL。DL-PL方式的土壤呼吸速率变化范围为 $236.8\sim 496.5\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$,显著高于其他3种类型;WL-PL的土壤呼吸速率变化范围为 $221.5\sim 473.6\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$,与FL-DL有显著差异,FL-DL的变化范围为 $175.7\sim 381.9\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ 。在 $31\sim 60\text{ cm}$ 土层中,4种土地利用方式的土壤呼吸速率变化规律与其他2层相似,不同土地利用方式间的土壤呼吸速率均存在显著差异。DL-PL方式的土壤呼吸速率变化范围为 $198.6\sim 382.0\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$,FL-DL在 $129.9\sim 305.6\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ 范围内变化。

2.2 不同土地利用方式土壤呼吸温度敏感性的变化

通过公式(1)、(2)拟合土壤呼吸速率与土壤温度的关系,得到土壤呼吸的温度敏感性 Q_{10} 值。图2为4种土地利用方式在不同土壤深度的 Q_{10} 值,即温度每升高 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 土壤呼吸速率的变化程度。由图2可以看出,DL-PL、WL-PL、FL-DL类型的 Q_{10} 值在3个土壤深度间差异不显著,在研究期内的变化范围为 $1.19\sim 1.55$ 。而WL-DL的 Q_{10} 值在土壤表层($0\sim 15\text{ cm}$)显著高于 $16\sim 30$ 、 $31\sim 60\text{ cm}$,这说明湿改旱地类

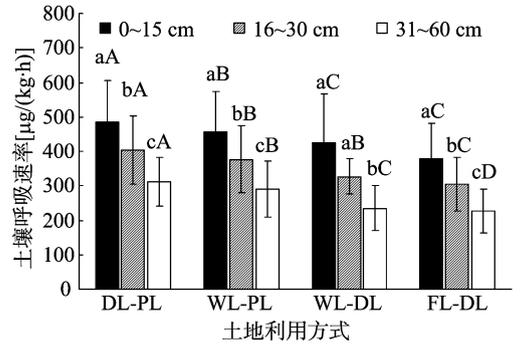


图1 研究区不同土地利用方式在不同土壤深度的土壤呼吸速率
柱上不同小写字母表示同一土地利用方式不同土壤深度间在0.05水平上差异显著;不同大写字母表示同一土壤深度不同土地利用方式间在0.05水平上差异显著。下图同

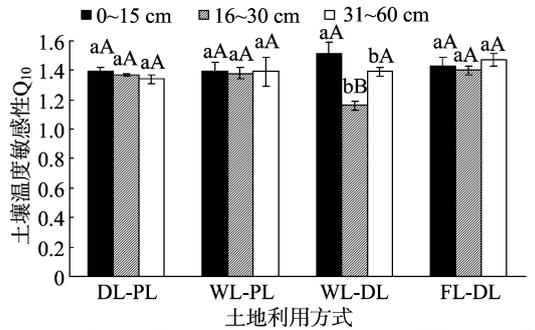


图2 研究区不同土地利用方式在不同土壤深度的土壤呼吸温度敏感性 Q_{10} 值

型土壤表层的土壤呼吸作用对温度变化更为敏感。

为了更好地描述土壤呼吸速率对温度的敏感程度,通过指数函数关系寻找不同土地利用方式的差异。由表1可以看出,在不同土壤深度土壤呼吸速率(y)与土壤温度(x)之间均存在极显著相关关系,说明土壤温度对土壤呼吸的解释能力较强。在4种土地利用类型中,解释能力由大到小依次为DL-PL > WL-PL > FL-DL > WL-DL。在3个土壤深度中,DL-PL类型随着土壤深度的增加相关系数逐渐减小,具有明显的梯度变化。对于其他3个类型,在土壤深度中没有出现明显的梯度变化,这可能与土壤含水量和其他因子有关。

表1 不同土地利用方式的土壤呼吸速率与土壤温度的关系

土地利用方式	土壤深度 (cm)	指数方程	相关系数 r	P 值
DL-PL	0~15	$y = 253.90e^{0.0316x}$	0.9564	<0.01
	16~30	$y = 240.38e^{0.0292x}$	0.8915	<0.01
	31~60	$y = 203.66e^{0.026x}$	0.8720	<0.01
WL-PL	0~15	$y = 247.89e^{0.0312x}$	0.8635	<0.01
	16~30	$y = 219.65e^{0.0306x}$	0.9163	<0.01
	31~60	$y = 175.67e^{0.0321x}$	0.8379	<0.01
WL-DL	0~15	$y = 183.28e^{0.0378x}$	0.9223	<0.01
	16~30	$y = 254.09e^{0.0136x}$	0.7190	<0.01
	31~60	$y = 140.04e^{0.0296x}$	0.8379	<0.01
FL-DL	0~15	$y = 199.94e^{0.0328x}$	0.8211	<0.01
	16~30	$y = 174.89e^{0.0326x}$	0.9007	<0.01
	31~60	$y = 127.40e^{0.0364x}$	0.8664	<0.01

2.3 不同土地利用方式的累积土壤呼吸估算

研究期内的累积土壤呼吸按照公式(3)、(4)进行估算。

由表2可以看出,4种土地利用方式在土壤深度为0~60 cm的累积土壤呼吸量由大到小依次为DL-PL>WL-PL>FL-DL>WL-DL。旱地改水田和湿地改水田的土壤呼吸量高于林地改旱地和湿地改旱地,总体上水田的土壤呼吸量比旱地的高。同时,在16~30、31~60 cm等2个土层中也呈现了相同的规律,水田的累积土壤呼吸量高于旱地。在0~15 cm土层中,FL-DL的土壤呼吸量为8.580 g/kg,高于其他土地利用方式。

表2 不同土地利用方式的累积土壤呼吸量

土地利用方式	累积土壤呼吸量(g/kg)			
	0~15 cm	16~30 cm	31~60 cm	0~60 cm
DL-PL	8.125	6.766	5.119	20.010
WL-PL	7.565	6.205	4.744	18.514
WL-DL	7.698	5.388	3.846	16.932
FL-DL	8.580	4.992	4.125	17.697

2.4 土壤呼吸作用的影响因子

2.4.1 土壤水分 在4种土地利用方式中,随着土壤深度的增加,土壤含水量增加。WL-PL和DL-PL的土壤含水量明显高于WL-DL和FL-DL,且2种水田类型和旱地类型之间

也具有极显著差异($P < 0.01$)。在3个土壤深度中,WL-PL和WL-DL之间的含水量差异极显著($P < 0.01$),在31~60 cm土壤深度时,WL-PL和WL-DL的含水量分别为32.23%、23.50%。FL-DL在16~30 cm土层的含水量明显高于其他2个深度($P < 0.05$),但在0~15、31~60 cm之间没有明显的差异,含水量分别为25.31%、25.17%。同时DL-PL的土壤含水量在3个土壤深度均没有明显差异。

由图3可以看出,在不同土壤深度4种土地利用类型的土壤含水量与土壤呼吸速率之间均呈现极显著相关($P < 0.01$)关系,且在土壤深度为0~15 cm时的土壤含水量与土壤呼吸速率之间的相关性高于16~30 cm;31~60 cm的相关性高于15~30 cm。DL-PL、FL-DL的土壤含水量与土壤呼吸速率之间的相关系数在土壤深度为31~60 cm时达到最高。其中,FL-DL在土壤深度为31~60 cm时两者之间的相关系数为0.979 4,是研究区土壤含水量对呼吸作用解释能力最强的;FL-DL在0~15、16~30 cm深度的相关系数分别为0.670 7、0.645 1。DL-PL、WL-PL和WL-DL等3种土地利用方式在不同深度土壤含水量对土壤呼吸速率的解释作用均达到69%以上。

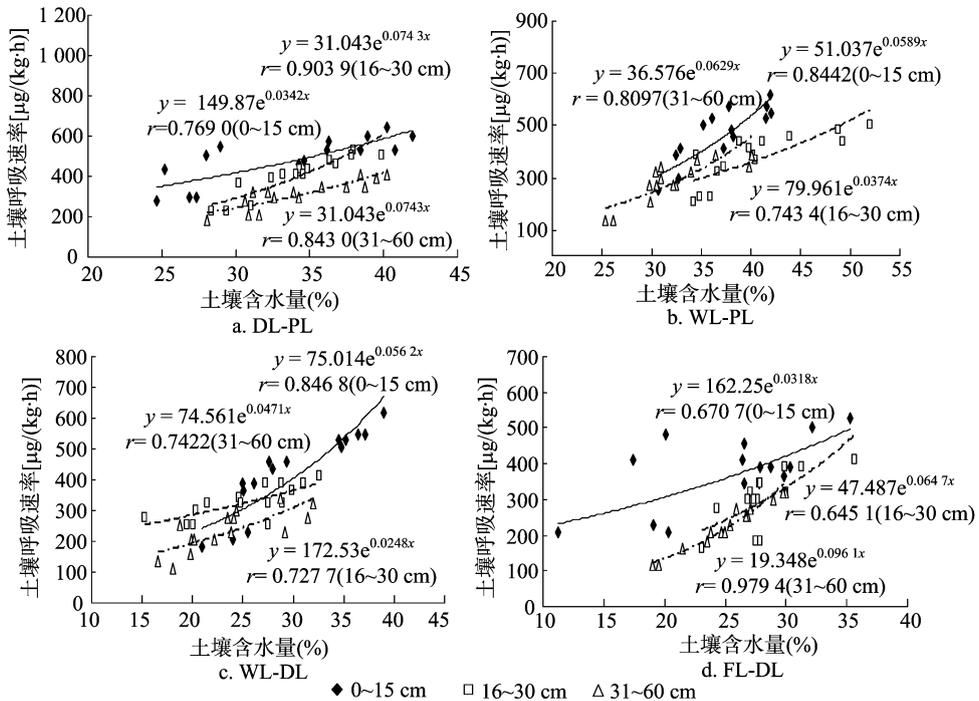


图3 4种土地利用方式在不同土壤深度含水量对土壤呼吸的影响

2.4.2 土壤碳含量 4种土地利用方式的土壤碳含量在12.81~21.93 g/kg范围变化,并且随着土壤深度的增加,土壤碳含量逐渐减少。WL-DL和FL-DL类型在0~15、16~30 cm的土壤碳含量显著高于31~60 cm($P < 0.05$),DL-PL和WL-PL类型在不同土壤深度间的碳含量差异不显著($P > 0.05$)。在0~15 cm土层中,土壤碳含量由高到低依次为WL-DL>FL-DL>DL-PL>WL-PL。在16~30 cm土层,WL-DL的土壤碳含量最高,为19.54 g/kg,WL-PL的最低,为14.17 g/kg。在31~60 cm土壤深度时,不同土地利用方式的土壤碳含量表现为WL-DL>DL-PL>WL-PL>

FL-DL,FL-DL的含量仅为12.81 g/kg。土壤碳含量与土壤呼吸速率之间的关系如图4所示。DL-PL和WL-DL在16~30 cm深度土壤碳含量与土壤呼吸速率呈现显著($P < 0.05$)的正相关关系,其他土地利用方式在不同土壤深度之间均无显著($P > 0.05$)的正相关关系。这说明土壤碳含量对土壤呼吸作用的解释能力较低。

3 结论与讨论

3.1 不同土地利用方式间的土壤呼吸速率差异

4种土地利用方式的土壤呼吸速率取3个不同土壤深度

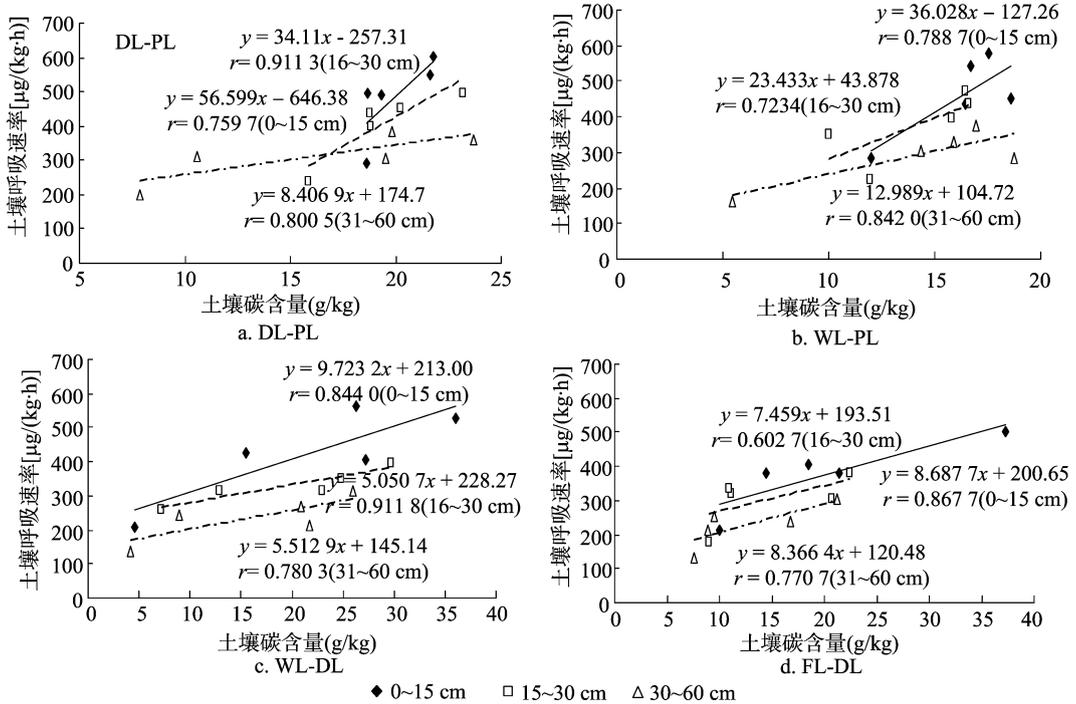


图4 4种土地利用方式在不同土壤深度碳含量对土壤呼吸的影响

的平均值,结果发现,DL-PL的土壤呼吸速率最大,FL-DL最小。其中,DL-PL的土壤呼吸速率为 $400.3 \mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$,WL-PL为 $374.8 \mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$,高于旱地土壤(WL-DL、FL-DL)。水田以种植水稻为主,在水稻生长期长期处于淹水状态,其土壤含水量高。旱地以种植玉米和大豆为主,土壤含水量较低。研究表明,土壤温度、含水量和微生物活性是引起土壤呼吸速率差异的主要因素^[11-12]。诸多研究发现,处在淹水状态的水田,土壤呼吸作用较弱,但本研究却表现出相反的结果^[13]。这可能与土壤有机质稳定性、土壤pH值等理化性质有关^[14]。同时,旱地和水田的耕作管理措施也不同,如施肥、排灌和翻耕等也会使土壤中电导率、盐分含量和pH值等不同,进而影响土壤呼吸速率。

3.2 土壤呼吸温度敏感性

本研究中4种土地利用方式的土壤呼吸速率最大值均出现在土壤温度最高的6月,这与我国东北草地生态系统土壤呼吸速率在6月初达到最大值的结论^[15]相似。同时,不同深度的土壤温度对土壤呼吸作用也会产生不同的影响。国内外诸多研究表明,表层土壤温度对土壤呼吸速率具有较大的影响^[16]。其原因主要有2个方面:一是采用针式土壤温度计测定温度,可能会造成读数不稳定;另一方面是随着气温的升高,土壤微生物活性对土壤水分的依赖性增强,不再单纯地依靠温度。

在研究期内DL-PL、WL-PL、FL-DL等3种类型的土壤呼吸温度敏感性 Q_{10} 在1.19~1.55范围内变化,在不同土地利用方式和土壤深度间均没有显著差异。这是因为本研究中不同类型的土地方式处于类似的土壤条件和气候环境,异氧呼吸相差不大, Q_{10} 值的差别主要是自养呼吸造成的。

3.3 其他因子

土壤碳含量对土壤呼吸速率的影响主要是通过土壤有机

质表现的。4种土地利用类型的土壤碳含量与土壤呼吸速率间也存在正相关关系,但除DL-PL和WL-DL在16~30cm深度土壤碳含量与土壤呼吸速率呈现显著($P < 0.05$)的正相关关系外,其他土地利用方式在不同土壤深度之间均无显著($P > 0.05$)的正相关关系。在土壤质地对土壤呼吸速率的影响研究中,黏土由于持水能力强,土壤有机质含量高,因此其土壤呼吸速率较高^[12]。本病区三江平原的土壤有机质含量较高,其土壤呼吸速率也较高。除此之外,植物的光合作用对土壤呼吸具有促进作用,同时温度和含水量的协同作用对土壤呼吸也具有明显的影响。在以后的研究中,有必要进一步验证温度和含水量的协同作用对土壤呼吸速率的影响程度。

4 结论

研究期估算的累积土壤呼吸量由高到低依次为DL-PL > WL-PL > FL-DL > WL-DL。总体上水田的土壤呼吸量比旱地的高。在不同土壤深度,土壤呼吸速率与土壤温度之间均存在显著相关($P < 0.01$)关系,土壤温度对土壤呼吸的解释能力较强。在不同土壤深度中,4种土地利用类型的土壤呼吸速率与土壤含水量均呈现极显著相关($P < 0.01$)关系,土壤碳含量对土壤呼吸作用的解释能力较低。

参考文献:

- [1] 鲍芳,周广胜. 中国草原土壤呼吸作用研究进展[J]. 植物生态学报,2010,34(6):713-726.
- [2] 王新源,李玉霖,赵学勇,等. 干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展[J]. 生态学报,2012,32(15):4890-4901.
- [3] Wei W, Fang J Y, Xiao X M, et al. Soil respiration and human effects on global grasslands[J]. Global and Planetary Change,2009,67(1/2):20-28.

李志,袁颖丹,张学玲,等. 不同干扰程度对山地草甸土壤有机质及酸度的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(9):285-288.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.09.068

不同干扰程度对山地草甸土壤有机质及酸度的影响

李志¹,袁颖丹²,张学玲¹,盛可银¹,牛德奎¹,张文元¹,龚霞¹,郭晓敏¹

(1. 江西农业大学林学院,江西南昌 330045; 2. 南京林业大学林学院,江苏南京 210037)

摘要:针对亚热带山地草甸生态系统极端脆弱性、敏感性和人为干扰严重等问题,选择武功山主峰(金顶)周围(海拔1 880~1 913 m)为研究区,依据因人为干扰所造成的植被覆盖度相对百分数的减少率(%),设置无干扰、轻度干扰、中度干扰、重度干扰等4种处理,运用土壤养分系统研究法(简称ASI),开展不同干扰程度下不同土层深度(0~20 cm和20~40 cm)土壤有机质及酸度含量测定与分析。结果表明:(1)武功山山地草甸土壤为强酸性或极强酸性土壤,随着干扰程度的增加,上、下层土壤活性酸度逐步增强;交换性酸含量范围为1.8~3.4 cmol/L,呈现与活性酸相似的分佈趋势;有机质含量丰富,不同处理土壤有机质含量范围为2.71%~4.15%,且上层土含量高于下层。(2)重度干扰土壤pH值与其他干扰水平具有显著差异($P < 0.05$);不同干扰水平土壤交换性酸含量无显著差异;重度和轻度干扰水平有机质含量在上层土壤中含量差异显著。不同深度土壤pH值无显著差异,在轻度干扰水平下不同土层深度土壤交换性酸及有机质差异显著。(3)土壤活性酸与有机质含量呈现负相关;土壤交换性酸则与有机质含量呈极显著正相关,二者之间的线性方程为 $y = 0.343x + 1.477$ ($r^2 = 0.444$)。

关键词:干扰程度;山地草甸;有机质;酸度

中图分类号: S153;X171.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)09-0285-04

在土壤当中含有碳的有机物质被称为土壤有机质,如动物或植物的残体,也包括微生物体以及被微生物分解、合成的所有有机物质,土壤的肥力、生态环境的保护,以及可持续发展

展等各个方面都受到土壤有机质的作用和影响^[1-3]。土壤酸碱度同样对土壤有机质周转有着十分重要的影响^[4-5],是土壤肥力和生产力的限制因子之一,而土壤酸化也是土壤退化的重要表现形式^[6]。在土壤酸度研究中,一般包含活性酸和潜性酸,土壤活性酸用pH值表示,土壤潜性酸通常用交换性酸度或者水解性酸度来表示^[7-9]。土壤pH值影响着土壤演化过程中的化学反应或过程,尤其对氧化还原、溶解沉淀以及配合反应起支配作用^[10]。地球上的三大碳库为草地、森林、大海,而在陆地生态系统中草地的面积最大^[11],具有很大的碳储存能力,是重要的可更新自然资源,所以如何保护并改良现有草地系统,使其能够保持健康、稳定的状态,是实现人类

收稿日期:2016-12-20

基金项目:国家自然科学基金(编号:31360177、31560150);国际植物营养研究所合作项目(编号:IPNI-JX29);江西省研究生创新专项资助项目(编号:YC2013-B029)

作者简介:李志(1987—),河南方城人,博士研究生,主要从事水土保持与生态修复、流域管理研究。E-mail:lizhi876@163.com。

通信作者:郭晓敏,博士,教授,博士生导师,主要从事植被修复、经济林栽培、林木养分管理等研究。E-mail:gxmjxau@163.com。

[4] Hu R G, Kusa K, Hatano R. Soil respiration and methane flux in adjacent forest, grassland, and cornfield soils in Hokkaido Japan [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2001, 47(3): 621-627.

[5] 高金芳,周波,马涛,等. 半干旱区不同土地利用方式下土壤呼吸特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 89-93.

[6] Kellman L, Beltrami H, Risk D. Changes in seasonal soil respiration with pasture conversion to forest in Atlantic Canada [J]. Biogeochemistry, 2007, 82(1): 101-109.

[7] 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.

[8] Jin Z, Qi Y C, Dong Y S. Diurnal and seasonal dynamics of soil respiration in desert shrub land of *Artemisia ordosica* on Ordos Plateau of Inner Mongolia, China [J]. Journal of Forestry Research, 2007, 18(3): 231-235.

[9] 张赛,王龙昌,周航飞,等. 西南丘陵区不同耕作模式下玉米田土壤呼吸及影响因素[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6244-6255.

[10] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: correlation and controls [J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 71-

90.

[11] 苏永红,冯起,朱高峰,等. 土壤呼吸与测定方法研究进展[J]. 中国沙漠, 2008, 28(1): 57-65.

[12] Wang W, Gao J X. The contribution of root respiration to soil CO₂ efflux in *Puccinellia tenuiflora* dominated community in a semi-arid meadow steppe [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(6): 697-703.

[13] Pavelka M, Acosta M, Marek M V, et al. Dependence of the Q₁₀ values on the depth of the soil temperature measuring point [J]. Plant and Soil, 2007, 29(1/2): 171-179.

[14] 马骏,唐海萍. 内蒙古农牧交错区不同土地利用方式下土壤呼吸速率及其温度敏感性变化[J]. 植物生态学报, 2011, 35(2): 167-175.

[15] 齐玉春,董云社,刘立新,等. 内蒙古锡林河流域主要针茅属草地土壤呼吸变化及其主导因子[J]. 中国科学(地球科学), 2010, 40(3): 341-351.

[16] 师广旭,耿浩林,王云龙,等. 克氏针茅(*Stipa krylovii*)草原土壤呼吸及其影响因素[J]. 生态学报, 2008, 28(7): 3408-3416.