柏凯栋,孙力扬,王晋峰,等.施用粪肥对我国北方农田土壤呼吸温度敏感性的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2024,44(1):70-78.
Bai K D, Sun L Y, Wang J F,et al.The impact of applying manure on the sensitivity of soil respiration temperature in cropland of northern China[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2024,44(1):70-78.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202306034

施用粪肥对我国北方农田土壤呼吸温度敏感性的影响

柏凯栋[1,2],孙力扬[1,2],王晋峰[2*],靳东升[2],李建华[2],徐明岗[1,2*]

(1.山西农业大学 资源环境学院,山西 晋中 030800;
2.山西农业大学 生态环境产业技术研究院/土壤环境与养分资源山西省重点实验室,山西 太原 030031)

摘　要:[目的]本研究旨在探明粪肥施用对我国北方农田土壤呼吸温度敏感性Q_{10}的影响及主要驱动因素,为制定合理的农业管理措施、减少农田土壤CO_2排放提供科学依据。[方法]本研究在中国知网、万方数据和Web of Science数据库收集国内外关于施用粪肥对土壤呼吸温度敏感性影响的相关文献,用关键词"粪肥"、"土壤呼吸"、"温度敏感性"和"中国北方"进行检索,共提取已公开发表的16篇文献中试验数据104组。采用整合分析(Meta-analysis)探讨不同粪肥施用条件下各因素对土壤呼吸温度敏感性的影响。[结果]粪肥施用可显著提高土壤呼吸温度敏感性,平均提升幅度为8.11%。施肥类型中,猪粪对土壤呼吸温度敏感性的增幅(12.72%)显著高于鸡粪的增幅(5.56%);粪肥施用量≤15 000 kg·hm^{-2}对土壤呼吸温度敏感性的增幅最大(11.48%);单施粪肥的增幅(11.96%)显著高于粪肥配施化肥的增幅(5.22%)。土壤有机碳含量≥12 g·kg^{-1}时土壤呼吸温度敏感性的增幅(7.17%)显著高于6~12 g·kg^{-1}水平(2.23%)时的增幅;土壤初始pH≥7的增幅((8.11%)显著高于pH<7的增幅(3.48%)。不同气候条件下,年均温≤5 ℃时土壤呼吸温度敏感性的增幅为8.49%,年降雨量为400~600 mm时的增幅(8.98%)显著高于≤400 mm(2.71%)和≥600 mm时的增幅(-3.13%)。此外,随机森林结果表明土壤有机碳含量是影响土壤呼吸温度敏感性变化的关键因素,其解释率达42.6%。[结论]综上,在我国北方农田鸡粪配施化肥且粪肥施用量>15 000 kg·hm^{-2}对土壤呼吸温度敏感性的增幅最小,可以有效减缓农田土壤的碳排放,以达到应对全球变暖现状的目的。此外,土壤有机碳含量是影响粪肥施用下中国北方农田土壤呼吸温度敏感性变化的主要驱动因素。

关键词:粪肥; 土壤呼吸; 温度敏感性; 北方; 整合分析
中图分类号:S156　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2024)01-0070-09

18世纪初以来,大气中CO_2等温室气体浓度增加远远超过自然增加速度,预计到21世纪末,全球平均温度将上升2 ℃[1]。农业生产作为CO_2的重要排放来源,占人类活动温室气体排放量的30%[2-3],因此,合理的农业管理措施对减少温室气体排放具有重要意义。土壤呼吸是农田土壤有机碳分解和释放CO_2的主要途径之一,也是影响大气CO_2浓度的关键环节之一。土壤呼吸温度敏感性可反映土壤呼吸对温度变化响应的剧烈程度,用温度每升高10 ℃土壤呼吸速率变化的倍数来表示,即温度敏感性(Q_{10})[2]。因此,准确评估不同农田管理措施下土壤呼吸温度敏感性Q_{10}变化的差异特征及其主要影响因素不仅为合理的农田管理措施提供科学依据,而且对于提高土壤固碳能力,减少农田土壤碳排放具有重要意义。

作为全球普遍施用的有机肥类型,畜禽粪便的施用会改变土壤呼吸对温度变化的响应,影响其温度敏感性Q_{10},其中粪肥类型和施用量均会改变土壤中微生物对有机物的代谢过程,进而影响土壤呼吸强度[3-5]。长期施肥投入的有机物料为土壤提供了丰富的外源碳,提高了土壤呼吸速率,增大了土壤呼吸温度敏感性[6]。其中,土壤有机碳组

收稿日期:2023-06-29　　**修回日期**:2023-08-26
基金项目:山西省重大研发计划项目(202201140601028)
作者简介:柏凯栋(ORCID:0009-0001-4422-1484),硕士,研究方向:土壤培肥与改良,E-mail:379240500@qq.com
* **通信作者**:徐明岗,研究员,博士,研究方向:土壤肥力演变与培肥,E-mail:xuminggang@caas.cn;王晋峰,博士,研究方向:土壤培肥与改良,E-mail: wjf202107@163.com

分特别是活性有机碳组分是影响土壤呼吸温度敏感性的一个重要因素[3],Davidson等[7]根据改良过的米-曼方程发现,最大的温度敏感性在易分解有机碳组分含量较多的土壤,而不是难分解有机碳组分含量较多的土壤。贺美等[8]发现,在东北中部地区施入土壤中的粪肥施用量由23 000 kg·hm^{-2}增加到34 500 kg·hm^{-2}时土壤呼吸的温度敏感性由1.39提升到了1.44,土壤呼吸温度敏感性随着施肥量增加而增加。但吴瑞娟等[9]对同一地区的研究结果与之相反,粪肥施用量从23 000 kg·hm^{-2}提升到30 000 kg·hm^{-2}后,土壤呼吸温度敏感性从3.30降低至2.71。此外,当土壤中施入不同类型的粪肥后也会造成不同的温度敏感性。芦思佳等[10]在东北地区进行试验后发现,与单施化肥相比,猪粪配施化肥后土壤呼吸温度敏感性由1.06提升到2.36,而Chen等[11]在同一地区进行试验后发现,与单施化肥相比,鸡粪配施化肥后土壤呼吸温度敏感性由2.76提升到3.24。目前关于粪肥施用类型和施用量对于土壤呼吸温度敏感性的影响结论尚不统一,阐明粪肥施用对土壤呼吸温度敏感性的影响具有重要意义。

在施用粪肥条件下土壤呼吸温度敏感性还受土壤性质和土壤环境因子的影响[8],王春新等[5]研究发现,在北方地区农田土壤pH不同会影响土壤中微生物的生活环境,影响土壤中微生物活性,使微生物呼吸速率发生变化,从而改变了土壤呼吸温度敏感性。土壤温度和水分是影响土壤呼吸温度敏感性关键环境驱动因子,土壤呼吸的主要组分如根系呼吸和微生物呼吸均是依赖于土壤温度和水分进行的生物学过程[12]。陈仕阳等[13]在我国北方地区进行温度和土壤呼吸的相关性试验后发现,在施用牛粪之后,随着土壤温度的变化,土壤呼吸温度敏感性也发生变化,且温度和土壤呼吸之间存在显著关系。但也有研究表明,在一定条件下土壤呼吸温度敏感性随温度增加呈指数增长[14];关于土壤水分对土壤呼吸温度敏感性影响的结论尚未统一,刘洪升等[4]通过研究发现,降雨量与土壤呼吸温度敏感性之间存在显著关系,但土壤受到干旱胁迫的情况下,土壤呼吸温度敏感性只受水分的影响。尽管已有关于土壤呼吸温度敏感性影响因子的研究,但对其研究结果还存在争议,其影响机制有待进一步探讨。

因此,为了探明施用粪肥对中国北方农田土壤呼吸温度敏感性Q_{10}的影响,应对中国北方范围内相对独立的研究进行大数据汇总分析。本研究运用Meta分析方法,通过收集现有相关文章中的数据,量化不同粪肥施用条件下农田土壤呼吸温度敏感性的差异特征,并从施肥措施、土壤性质以及气候因素出发明确粪肥施用下农田土壤呼吸温度敏感性差异的主要驱动因子,旨在为我国北方农田土壤固碳减排提供科学的技术与理论支持。

1　材料与方法

1.1　数据来源

在中国知网、万方、维普等多个数据库中,通过设置“粪肥(Manure)”、“土壤呼吸(Soil respiration)”、“温度敏感性(Temperature sensitivity)”、“华北”、“东北”、“西北”等关键词,检索2023年1月15日前发表的有关施用粪肥对土壤呼吸温度敏感性影响的文献,并进行筛选,筛选标准为:

(1)研究地区为中国北方(东北:吉林、黑龙江、辽宁;西北:青海、甘肃、宁夏、陕西、新疆;华北:内蒙古、山东、河北、河南、山西、北京、天津)。试验细节(如试验地点、时间、管理措施等)清楚;(2)文章中包含明确严格的处理和对照;(3)试验中不同处理最少3次重复;(4)数据要有平均值、样本数量和标准差/误;(5)采集土壤为0~20 cm的土壤。

对符合标准的文献提取区域、年均温、年降水、施肥年限、施肥方式、粪肥类型、温度敏感性Q_{10}等数据。共筛选出符合要求的文献16篇,包含172组数据样本。

1.2　数据分类

根据文献中粪肥的施用方式,对筛选的数据进行分类,将试验组分为单施粪肥和粪肥+化肥2类,对照组分为不施肥和施用无机肥,共收集了104组配对试验数据。考虑到本研究试验点数量的限制及分布在中国北方,因此将年均温划分为3类[15](≤5 ℃,5~10 ℃,≥10 ℃);年降雨划分为3类[16](≤400 mm,400~600 mm,≥600 mm);初始pH划分为2类[17](<7,≥7);有机碳含量划分为3类[18](≤6 g·kg^{-1},6~12 g·kg^{-1},≥12 g·kg^{-1});粪肥类型划分为3类(猪粪,牛粪,鸡粪);粪肥施用量划分为2类[19](≤15 000 kg·hm^{-2},>15 000 kg·hm^{-2})。

1.3 数据分析方法

土壤呼吸速率对温度的敏感性通常用Q_{10}来描述。Q_{10}是温度每升高10 ℃所造成的土壤呼吸速率增加的倍数。在不受其它因子限制的情况下可以用指数方程描述[20]:

$$Q_{10}=(V_2-V_1)^{(10/T_2-T_1)} \quad (1)$$

式中,V_1为增温前土壤呼吸速率/($\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$),$V_2$为增温后土壤呼吸速率/($\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$),$T_1$为增温前的土壤温度/℃,$T_2$为增温后的土壤温度/℃。

Meta分析是一种将多项研究结果进行定量合成分析的统计学方法,对不同影响因素的综合效应进行定量分析,综合探讨结果之间的关系,明确各影响因素的相对贡献大小[21]。本研究分析的数据来自所筛选文献中的文字、表格或图表,对于以图片的形式呈现出来的数据我们利用GetData Graph Digiti-zer 2.2.4软件从图片中提取数字数据,另外如果文献提供的数据为标准误差(SE),本文将按照下式将其转化为标准偏差,即标准差(SD):

$$SD=SE\sqrt{n} \quad (2)$$

本研究采用整合分析的方法,比较施用粪肥对土壤呼吸温度敏感性影响的效应大小。因此需要引入效应值指标,量化试验数据。在本研究中,土壤呼吸温度敏感性Q_{10}利用自然对数的响应比(response ratios,RR)作为效应值,并计算95%置信区间(95%CI)。如果纳入的研究结果之间没有异质性,即P≥0.1、I2<50%,选用固定效应模型(fixed effect model,FEM),反之则用随机效应模型(random effect model,REM)[22]。因此,本研究采用随机模型计算95%置信度下的置信区间(CI)、加权平均差和相关方差,以减少异质性的影响。其中,lnRR可通过式(3)进行计算[23]:

$$\ln RR=\ln(B/CK)=\ln B-\ln CK \quad (3)$$

式中,B代表处理组即粪肥/化肥配施粪肥施用后土壤呼吸温度敏感性Q_{10}值的平均值;CK代表对照组即不施肥$\ln RR=\ln(B/CK)$单施化肥的土壤呼吸温度敏感性Q_{10}值的平均值。此外,平均值的变异系数V(variance)、权重W_{ij}(weighted factor)、权重响应比RR_{++}(weighted response ration)、RR_{++}的标准误(S)以及其95%CI可按如下公式计算[24]:

$$V\ln RR=\frac{SDB^2}{nBB^2}+\frac{SDCK^2}{nCKCK^2} \quad (4)$$

$$W_{ij}=1/V \quad (5)$$

$$RR_{++}=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{k_i}W_{ij}RR_{ij}\Big/\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{k_i}W_{ij} \quad (6)$$

$$(RR_{++})=1\Big/\sqrt{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{k_i}W_{ij}} \quad (7)$$

$$S(RR_{++})=1\Big/\sqrt{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{k_i}W_{ij}} \quad (8)$$

式(4)中,SD_B^2和SD_{CK}^2分别代表处理组和对照组的标准差;nB和nCK分别表示处理组和对照组的样本数。效应值标准差越小,分配的权重越大,权重响应比(处理相对于对照增减的百分数)及其95%CI可以通过$(e^{RR++}-1)\times100\%$来转化。若95%的置信区间包含零值,表明施用粪肥对土壤呼吸温度敏感性Q_{10}无显著影响($P>0.05$)[25];若95%的置信区间大于零值,则表明施用粪肥能显著提高土壤呼吸温度敏感性Q_{10}($P<0.05$);若95%的置信区间小于零值,则表明施用粪肥能显著降低土壤呼吸温度敏感性Q_{10}($P<0.05$)。

为了便于理解和描述,使用如下公式,以相对于控制组的变化百分比来估计增幅效应:

$$变化百分比(\%)=[\exp(\ln RR_{++})-1]\times100 \quad (9)$$

随机森林方法则是运用R语言中的软件包“RandomForest”来计算各因素对施肥“增效”作用的贡献率。

1.4 正态分析

运用SPSS 26.0软件对土壤呼吸温度敏感性的变化数据进行单样本非参数检验,拟合曲线呈显著的正态分布($P<0.05$),柱形图代表了土壤呼吸温度敏感性响应比的频数分布(图1)。

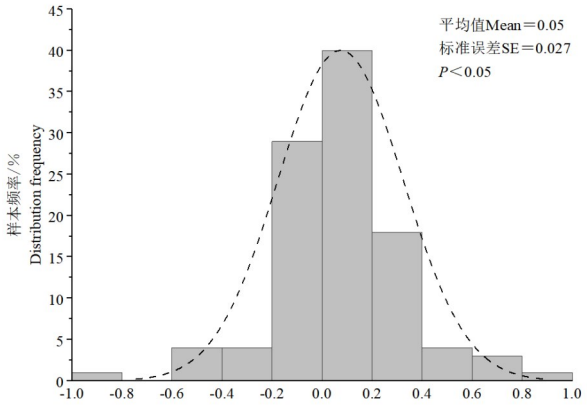
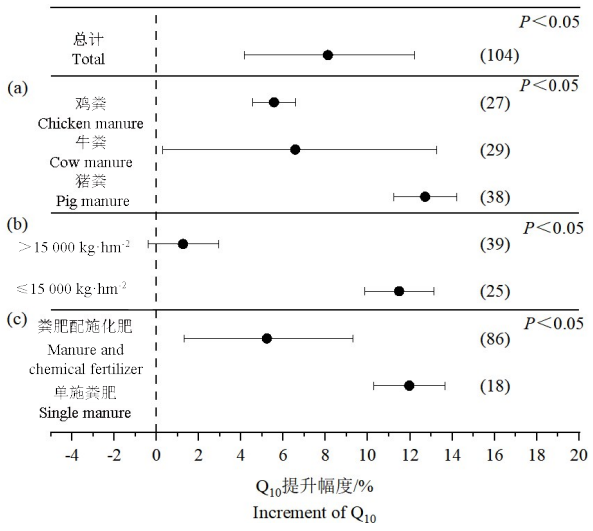


图1　粪肥施用后土壤呼吸温度敏感性变化的响应比

Fig. 1　Response ratio of soil temperature sensitivity to manure application



图右侧括号内数据为同一处理下的样本量

Data in the right parentheses in the figure is the sample size under the same treatment

图2　粪肥类型(a),粪肥施用量(b)和粪肥施用方式(c)对土壤呼吸温度敏感性的影响

Fig. 2　Effects of manure type (a), manure application amount (b) and the way of applying manure (c) on temperature sensitivity of soil respiration

2　结果与分析

2.1　施用粪肥对土壤呼吸温度敏感性的影响

由图2可见,施用粪肥对土壤呼吸温度敏感性变化有显著的影响,粪肥类型,粪肥施用量和粪肥施用方式均可显著增加土壤呼吸的温度敏感性(8.11%),其中施用猪粪土壤呼吸温度敏感性的增幅最大,为12.72%,且显著高于($P<0.05$)鸡粪(5.56%),牛粪增幅为6.57%,与猪粪和鸡粪之间差异均不显著。粪肥施用量也会对土壤呼吸温度敏感性产生影响,当粪肥施用量≤15 000 kg·hm^{-2}时土壤呼吸温度敏感性的增幅为11.48%。当粪肥施用量>15 000 kg·hm^{-2}时对土壤呼吸温度敏感性无显著影响($P>0.05$)。粪肥施用方式不同,对土壤呼吸温度敏感性也会造成不同的影响。当单施粪肥时土壤呼吸温度敏感性的增幅为11.96%,显著高于($P<0.05$)粪肥配施化肥时对土壤呼吸温度敏感性的增幅(5.22%)。

2.2　不同性质下土壤呼吸温度敏感性对施用粪肥的响应

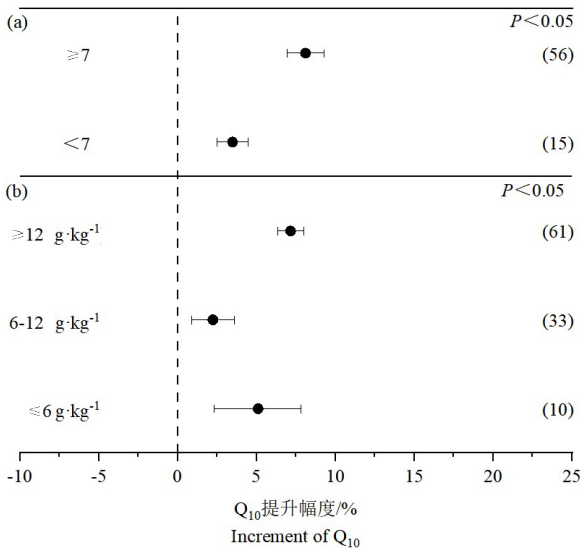
由图3可知,土壤初始有机碳和pH均对土壤呼吸温度敏感性有显著影响($P<0.05$)。当土壤有机碳初始含量≤6 g·kg^{-1}时,土壤呼吸温度敏感性增幅为5.11%;当有机碳含量为6~12 g·kg^{-1}时,对土壤呼吸温度敏感性的增幅为2.23%,当有机碳含量≥12 g·kg^{-1}时对土壤呼吸温度敏感性的增幅最大,为7.17%。且有机碳含量6~12 g·kg^{-1}和≥12 g·kg^{-1}时存在显著的组间差异($P<0.05$)。此外,当土壤初始pH≥7时土壤呼吸温度敏感性(8.11%)显著高于pH<7时(3.48%),且2组分类之间存在显著差异($P<0.05$)。

2.3　不同气候环境下土壤呼吸温度敏感性对施用粪肥的响应

由图4可见,气候因素的不同(年均温和年降雨)也会对土壤呼吸温度敏感性产生不同的影响,当年降雨量≤400 mm时,土壤呼吸温度敏感性的增幅为2.71%,年降雨量400~600 mm时,土壤呼吸温度敏感性的增幅最大,为8.98%,年降雨量≥600 mm对土壤呼吸温度敏感性的影响为负效应,增幅为-3.13%。且年降雨量≤400 mm和年降雨量≥600 mm时,土壤呼吸温度敏感性增幅显著低于年降雨量400~600 mm的增幅($P<0.05$)。当年均温≥10 ℃和年均温5~10 ℃时,对土壤呼吸温度敏感性无显著影响。此外,当年均温≤5 ℃时土壤呼吸温度敏感性增幅为8.49%。

2.4　土壤呼吸温度敏感性变化的驱动因素

气候因素(年均温与年降雨),施肥(施肥类型与施肥量)和土壤性质(pH和有机碳)共同影响着土壤呼吸温度敏感性的变化。在中国北方农田,影响土壤呼吸温度敏感性的主要因素是土壤有机碳(SOC)含量,其解释率为42.6%,其次是气候因

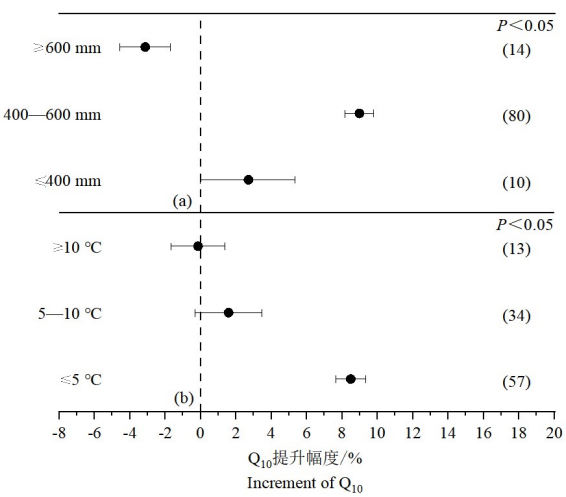


图右侧括号内数据为同一处理下的样本量

Data in the right parentheses in the figure is the sample size under the same treatment

图3 土壤初始pH(a)和土壤有机碳含量(b)对土壤呼吸温度敏感性的影响

Fig. 3 Effects of soil initial pH (a) and soil organic carbon content (b) on temperature sensitivity of soil respiration



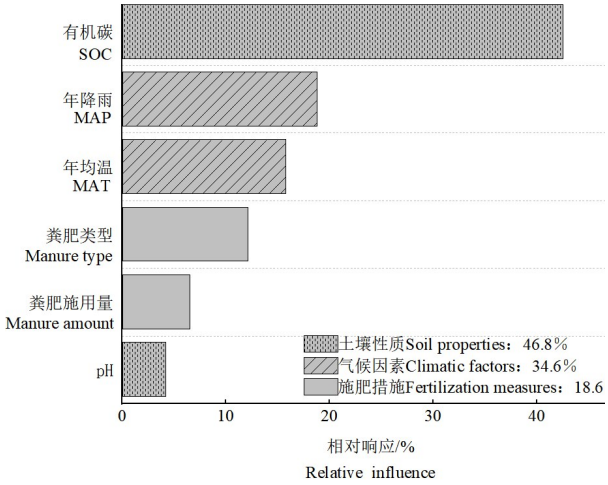
图右侧括号内数据为同一处理下的样本量

Data in the right parentheses in the figure is the sample size under the same treatment

图4 年降雨(a)和年均温(b)对土壤呼吸温度敏感性的影响

Fig. 4 Effects of annual rainfall (a) and annual temperature (b) on temperature sensitivity of soil respiration

素,如年降雨和年均温的解释率分别为18.8%和15.8%。此外,粪肥类型、粪肥施用量、土壤pH对土壤呼吸温度敏感性的解释率分别为12.1%、6.5%和4.2%(图5)。综上,土壤初始有机碳含量是影响中国北方农田中土壤呼吸温度敏感性变化



图右侧括号内数据为同一处理下的样本量

Data in the right parentheses in the figure is the sample size under the same treatment

图5 土壤呼吸温度敏感性变化的驱动因素

Fig. 5 Driving factors of temperature sensitivity of soil respiration

的关键驱动因素。

3 讨论

本研究结果表明,施用粪肥显著提高了土壤呼吸温度敏感性Q_{10}(图2),这与靳东升等[26]的研究结果一致,施用粪肥后提升了土壤中的有机质及氮、磷、钾含量,为土壤微生物提供了丰富的底物,加速了土壤微生物代谢过程,提高了土壤呼吸对温度变化的响应,从而提高了土壤呼吸的温度敏感性[4]。我国北方农田中施用的粪肥多为猪粪、牛粪和鸡粪,粪肥类型对土壤呼吸温度敏感性的影响存在显著差异,且施用猪粪的增幅大于牛粪和鸡粪。这可能由于猪粪、牛粪和鸡粪化学成分和结构不同,在腐解过程中释放的热量也不一样。一方面,与鸡粪相比,猪粪质地较细,蛋白质、脂肪类、有机酸、纤维素、半纤维素以及无机盐等含量较高,且碳氮比相对较高,一般容易被微生物分解利用[27],在分解过程中释放更多CO_2,高浓度CO_2可以提高土壤温度,增加呼吸活动速率,从而导致Q_{10}值较高[28]。另一方面,相较于猪粪,鸡粪有机质含量较低,施入土壤后土壤微生物活性较低,分解速率较慢,从而导致土壤呼吸的温度敏感性相对较低。当有机肥施用量≤15 000 kg·hm^{-2}时土壤呼吸温度敏感性增幅显著高于>15 000 kg·hm^{-2}时的增幅(图2),这与前人研究结论有所不同,贺美等[8]研究结果表明温度敏感性Q_{10}随着施肥量的增加

而增大。在有机肥施用量较少的土壤中有机碳数量和活性较低,有机碳分解速度慢,对温度变化响应也较小,因此土壤呼吸温度敏感性较低,而在有机肥施用量较多的土壤中,有机碳数量和活性高,有机碳分解速度快,对温度变化响应也更加明显[20,29]。导致本研究结果与之不同可能是因本研究收集的数据资料中,粪肥用量>15 000 kg·hm^{-2}时所用的粪肥大多为牛粪,有研究证明[30]牛粪中的养分含量偏低,且牛粪为冷性肥料,含水量大,通气性较差,分解速度慢,因此,施用后土壤呼吸的温度敏感性较低。

当土壤初始pH≥7时的土壤呼吸温度敏感性增幅(8.11%)比土壤初始pH<7时的土壤呼吸温度敏感性增幅(3.48%)高4.63%(图3),这与李海防等[31]的研究结果一致。李海防等研究结果显示如果pH低于6,微生物活性会受到影响,微生物呼吸速率降低,进而降低了土壤呼吸温度敏感性。Kowalenko等[17]的研究也认为土壤pH低于7时,CO_2的释放量随pH的增加而增加,土壤呼吸温度敏感性也会随pH的升高而增加。这是因为pH升高促进了土壤有机质的分解和CO_2的释放,进一步提高了土壤呼吸的速率,增加了土壤呼吸的温度敏感性。当土壤有机碳含量≤6 g·kg^{-1}时,土壤呼吸温度敏感性有所下降,降低幅度为5.11%。土壤有机碳含量≥12 g·kg^{-1}土壤呼吸温度敏感性增幅最高,为7.17%。这与王春新等[5]的研究结果一致。李永平等[32]研究发现,不同类型的粪肥基本理化性质不同,施入土壤中对土壤有机碳含量的影响不同,其组分中的易分解有机碳组分的含量也不相同。土壤有机质中易分解有机质组分含量越高,其分解速率越快,土壤呼吸温度敏感性越高[33],其原因正如Davidson等[34]在Nature上的综述所述,在自然情况下土壤有机质中难分解组分的总量比易分解组分多4~10倍。但由于易分解组分的分解速度比难分解组分快10 000倍。易分解组分对土壤呼吸通量的贡献比难分解组分大2~5个数量级,土壤有机质分解的温度敏感性取决于易分解有机质的有效性[35]。本研究中(图4)年均温≤5 ℃时土壤呼吸温度敏感性的增幅为8.49%,土壤呼吸温度敏感性的增幅随着年均温的上升而下降。Mark等[36]的研究也发现,不同气候条件下(北极、寒温带、温带和热带)种植56种作物的土壤呼吸强度随土壤温度的增加而降低。根据米-曼酶促化学反应方程可知,温度的升高会改变底物的有效性、呼吸酶与底物的亲和力和最大反应速度等过程,进而影响土壤呼吸对温度变化的响应[3];而温度降低也会导致植物光合作用减弱[37],导致光合同化物地下分配量减少,降低土壤呼吸速率来降低土壤呼吸的温度敏感性。同时,当温度降低时,导致细胞膜的流动性能减弱,减少了根系分泌物和渗漏物量,进一步减弱了土壤呼吸速率对温度的敏感性[4]。此外,年均温≤5 ℃时土壤呼吸温度敏感性的增幅最大(8.49%),这是由于年均温≤5 ℃的地区常年寒冷,影响土壤呼吸变化的主要是土壤微生物呼吸,其受到温度变化的影响更大[38],温度变化会改变土壤微生物的活性和呼吸速率,因此改变土壤呼吸的温度敏感性。

我国北方地区年均降雨量在400~800 mm之间,降雨量不同对土壤水分产生影响[16]。本研究结果显示,年降雨量400~600 mm的土壤呼吸温度敏感性增幅最大(8.98%),年降雨量≥600 mm的土壤呼吸温度敏感性增幅最小(-3.13%),这与王雪等[39]的研究一致,不同生态系统类型中水分对Q_{10}的影响方向和程度有很大的不同,土壤水分与土壤呼吸速率间呈倒"U"型相关关系,说明土壤含水量在适中水平时,土壤水分可以促进土壤呼吸作用,当土壤湿度到达一定程度后,土壤水分的增加会抑制土壤呼吸作用,降低土壤呼吸的温度敏感性[40]。当年均降雨量≥600 mm时,会降低土壤的通透性,减少向土壤输送氧气的能力,阻碍根系和好氧微生物的活动。此外,降雨量过高还会对土壤产生淋溶作用,影响可溶性有机碳在土壤中的扩散,降低表层土壤中微生物可以利用的可溶性有机碳含量[41-44]。

在我国北方农田中,土壤性质是粪肥施用下土壤呼吸温度敏感性的主要驱动因素。其中土壤pH和有机碳可以解释Q_{10}变化的46.8%,大于气候因素和施肥措施的影响,这与其他研究的结论不同,李晓菡等[45]发现气候因素对土壤呼吸增温效应的影响要大于土壤有机碳的影响,其原因可能是李晓菡等的研究对象不只包括了农田,还涵盖了森林,草地,灌丛和苔原,这些类型的土地在施肥措施上的要求和标准低于农田。因此土壤中有机碳库组分,特别是易分解有机碳组分的数量

不同。除此之外,不同土地类型中微生物的活性也不相同,导致Q_{10}有所差异。总之,在我国北方农田,土壤有机碳含量是影响土壤呼吸温度敏感性Q_{10}变化的主要驱动因素。

4 结论

在我国北方地区的农田土壤中粪肥的施用显著增加了土壤呼吸的温度敏感性(6.46%),其中鸡粪配施化肥且粪肥施用量>15 000kg·hm^{-2}时土壤呼吸温度敏感性的增幅最小,可以有效减缓农田土壤的碳排放,以达到应对全球变暖现状的目的。施用粪肥条件下,气候、施肥和土壤因素均会影响农田土壤呼吸温度敏感性,土壤性质对农田土壤呼吸温度敏感性的影响最大,尤其是土壤有机碳含量是影响土壤呼吸温度敏感性变化的主要驱动因素。

参 考 文 献

[1]姚群英,刘强,巩敬锦. 陇中旱地春小麦产量对主要气象因子变化和氮肥施用的响应[J]. 灌溉排水学报,2023,42(11):74-82.
Yao Q Y, Liu Q, Gong J J. Influence of meteorological factors and nitrogen fertilization on spring wheat yield in the Longzhong dryland region[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(11):74-82.

[2]The Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC publishes full report climate change 2013: the physical science basis [EB/OL]. The Intergovernmental Panel on Climate Change, [2022-10-08].https://www.ipcc.ch/2013/01/30/ipcc-publishes-full-report-climate-change-2013-the-physical-science-basis/.

[3]韩超跃,赵先超,胡艺觉,等. 湖南省县域农业碳收支时空差异及碳补偿潜力[J]. 水土保持通报,2023(5):343-354.
Han C Y, Zhao X C, Hu Y J, et al. Spatiotemporal differences of agricultural carbon income and expenditure, and carbon compensation potential of counties in Hunan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023(5):343-354.

[4]刘洪升,刘华杰,王智平,等. 土壤呼吸的温度敏感性[J]. 地理科学进展,2008,27(4):51-60.
Liu H S, Liu H J, Wang Z P, et al. The temperature sensitivity of soil respiration[J]. Progress in Geography, 2008, 27(4): 51-60.

[5]王春新,于鹏,张玉玲,等. 氮肥与有机肥配施对设施土壤呼吸的影响[J]. 土壤通报,2017,48(1): 146-154.
Wang C X, Yu P, Zhang Y L, et al. Effect of combined application of nitrogen fertilizer and manure on soil respiration in greenhouse cultivation [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(1): 146-154.

[6]Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. Nature, 2001, 413: 622-625.

[7]Davidson E A, Janssens I A, Luo Y Q. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q_{10} [J]. Global Change Biology, 2006, 12(2):154-164..

[8]贺美,王立刚,王迎春,等. 长期定位施肥下黑土呼吸的变化特征及其影响因素[J].农业工程学报,2018,34(4):151-161.
He M, Wang L G, Wang Y C, et al. Characteristic of black soil respiration and its influencing factors under long-term fertilization regimes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(4): 151-161.

[9]吴瑞娟,王迎春,朱平,等. 长期施肥对东北中部春玉米农田土壤呼吸的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2018,24(1):44-52.
Wu R J, Wang Y C, Zhu P, et al. Effects of long-term fertilization on soil respiration in spring maize field in the central part of northeast China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(1): 44-52.

[10]芦思佳,韩晓增. 施肥对土壤呼吸的影响[J]. 农业系统科学与综合研究,2011,27(3):366-370.
Lu S J, Han X Z. The effect of fertilization on soil respiration [J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2011,27(3) : 366-370.

[11]Chen Z M, Xu Y H, He Y J, et al. Nitrogen fertilization stimulated soil heterotrophic but not autotrophic respiration in cropland soils: a greater role of organic over inorganic fertilizer [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 116:253-264.

[12]Liang G P, Houssou A A, Wu H J, et al. Seasonal patterns of soil respiration and related soil biochemical properties under nitrogen addition in winter wheat field[J]. PLoS One, 2015, 10(12): e0144115.

[13]陈仕阳,杨荣,苏永中,等. 河西绿洲农田土壤呼吸特征及其对长期施肥的响应[J]. 中国沙漠,2022,42(3):178-186.
Chen S Y, Yang R, Su Y Z, et al. Characteristics of soil respiration in farmland of Hexi oasis and its response to long-term fertilization[J]. Journal of Desert Research, 2022,42(3): 178-186.

[14]Sun Z Z, Liu L L, Ma Y C, et al. The effect of nitrogen addition on soil respiration from a nitrogen-limited forest soil [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 197: 103-110.

[15]杨卓颖,张彦军,邹俊亮,等. 耕作方式影响旱作农田土壤呼吸的整合研究[J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版),2023,43(1):84-91.
Yang Z Y, Zhang Y J, Zou J L, et al. Integrated study on the effects of tillage method on soil respiration in dry farmland[J]. Journal of Baoji University of Arts and Sciences (Natural Science Edition), 2023, 43(1): 84-91.

[16]解欢欢,马文瑛,赵传燕,等. 祁连山亚高山草地土壤呼吸和生态系统呼吸对降雨的响应[J]. 生态学杂志,2016,35(11):2875-2882.
Xie H H, Ma W Y, Zhao C Y, et al. Rainfall effect on soil respiration and ecosystem respiration of a subalpine meadow in

Qilian Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(11): 2875-2882.

[17]Kowalenko C G, Ivarson K C, Cameron D R. Effect of moisture content, temperature and nitrogen fertilization on carbon dioxide evolution from field soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1978, 10(5): 417-423.

[18]Zhou R R, Liu Y, Dungait J A J, et al. Microbial necromass in cropland soils: a global meta-analysis of management effects [J]. Global Change Biology, 2023, 29(7): 1998-2014.

[19]吴会军,蔡典雄,武雪萍,等. 不同施肥条件下小麦田土壤呼吸特征研究[J]. 中国土壤与肥料,2010(6):70-74.
Wu H J, Cai D X, Wu X P, et al. The effect of fertilization on soil respiration in a winter wheat field[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2010(6): 70-74.

[20]何念鹏,刘远,徐丽,等. 土壤有机质分解的温度敏感性:培养与测定模式[J]. 生态学报,2018,38(11):4045-4051.
He N P, Liu Y, Xu L, et al. Temperature sensitivity of soil organic matter decomposition: new insights into models of incubation and measurement[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(11): 4045-4051.

[21]孙力扬,徐明岗,王晋峰,等. 北方地区土壤速效养分及容重对秸秆还田的响应[J]. 中国农学通报,2023,39(5):100-108.
Sun L Y, Xu M G, Wang J F, et al. response of soil available nutrients and bulk density to straw returning in North China [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(5): 100-108.

[22]肖婧,徐虎,蔡岸冬,等. 生物质炭特性及施用管理措施对作物产量影响的整合分析[J]. 中国农业科学,2017,50(10):1830-1840.
Xiao J, Xu H, Cai A D, et al. A meta-analysis of effects of biochar properties and management practices on crop yield[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(10): 1830-1840.

[23]高静,徐明岗,李然,等. 整合分析生物炭施用对土壤pH的影响[J]. 中国农业科技导报,2023,25(9):186-196.
Gao J, Xu M G, Li R, et al. Effects of biochar application on soil pH: a meta-analysis[J]. Chinese Journal of Agricultural Science and Technology, 2023, 25(9): 186-196

[24]张晨阳,徐明岗,王斐,等. 施用有机肥对我国大豆产量及土壤养分的影响[J]. 中国农业科技导报,2023,25(8):148-156.
Zhang C Y, Xu M G, Wang F, et al. Effects of manure application on soybean yield and soil nutrients in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023, 25(8): 148-156.

[25]Niu L G, Hao J M, Zhang B Z, et al. Influences of long-term fertilizer and tillage management on soil fertility of the North China Plain[J]. Pedosphere, 2011, 21(6): 813-820.

[26]靳东升,张强,郜春花,等. 不同施肥处理对工矿复垦区玉米农田土壤呼吸的影响[J]. 现代农业科技,2014(2):257-259.
Jin D S, Zhang Q, Gao C H, et al. Soil respiration in the corn field under different fertilization practice in the mining reclamation area [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2014(2): 257-259.

[27]李书田,刘荣乐,陕红. 我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析[J]. 农业环境科学学报,2009,28(1):179-184.
Li S T, Liu R L, Shan H. Nutrient contents in main animal manures in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(1): 179-184.

[28]张玉娇.不同施氮量和有机肥添加量对还田玉米秸秆腐解特性及土壤腐殖质含量的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2021.
Zhang Y J. Effects of different nitrogen application rates and organic fertilizer application rates on the decomposition characteristics of corn straw and soil humus content [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021.

[29]雷强.有机肥化肥配施对华北高产农田土壤温室气体排放的影响[D].太谷:山西农业大学,2015.
Lei Q. Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on emissions of greenhouse gases in the North China Plain [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2015.

[30]盛斌. 牛粪的处理与资源化利用[J].安徽农学通报,2019,25(11):132-134.
Sheng B. Treatment and resource utilization of cow manure [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2019, 25(11): 132-134.

[31]李海防,夏汉平,熊燕梅,等. 土壤温室气体产生与排放影响因素研究进展[J]. 生态环境,2007,16(6):1781-1788.
Li H F, Xia H P, Xiong Y M, et al. Mechanism of greenhouse gases fluxes from soil and its controlling factors: a review[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(6): 1781-1788.

[32]李永平,田艳,史向远,等. 施用畜禽粪肥对土壤呼吸和玉米产量的影响及其增效分析[J]. 华北农学报,2017,32(1):193-200.
Li Y P, Tian Y, Shi X Y, et al. Effects of animal manures on soil respiration and maize yield and economic analysis[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2017, 32(1): 193-200.

[33]仪明媛,彭畅,张会民,等. 长期施肥下黑土活性有机碳变化特征[J]. 土壤通报,2012,43(5):1139-1144.
Yi M Y, Peng C, Zhang H M, et al. Characteristics of active organic carbon in black soil under long-term fertilization[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(5): 1139-1144.

[34]Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change [J]. Nature, 2006, 440:165-173.

[35]Högberg P, Nordgren A, Buchmann N, et al. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration[J]. Nature, 2001, 411:789-792.

[36]Tjoelker M G, Oleksyn J, Reich P B. Modelling respiration of vegetation: evidence for a general temperature-dependent Q_{10} [J]. Global Change Biology, 2001, 7(2):223-230.

[37]Craine J M, Wedin D A, Chapin F S. Predominance of ecophysiological controls on soil CO_2 flux in a Minnesota grassland[J]. Plant and Soil, 1999, 207(1):77-86.

[38]张丁辰,蔡典雄,代快,等. 旱作农田不同耕作土壤呼吸及其对水热因子的响应[J]. 生态学报,2013,33(6):1916-1925.
Zhang D C, Cai D X, Dai K, et al. Soil respiration and its responses to soil moisture and temperature under different

tillage systems in dryland maize fields [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(6): 1916-1925.

[39]王雪,李景,汪俊玉,等. 免耕施肥条件下冬小麦季土壤呼吸速率及影响因素[J]. 中国土壤与肥料,2017(3):105-110.
Wang X, Li J, Wang J Y , et al. Seasonal change and effecting factors on soil respiration of winter-wheat farmland under no-tillage and fertilizing[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2017(3):105-110.

[40]朱新萍,贾宏涛,周建勤,等. 降雨对干旱半干旱区湿地和农田土壤CO_2短期释放的影响[J]. 农业资源与环境学报,2017,34(1):54-58.
Zhu X P, Jia H T, Zhou J Q, et al. Response of soil CO_2 short-term emissions to simulated rainfalls in arid and semi-arid area[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, 34(1): 54-58.

[41]Parr Chairman J F, Gardner W R, Elliott L F. Water potential relations in soil microbiology [M]. Wisconsin: Soil Science Society of America,1981,1-22.

[42]Linn D M, Doran J W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48(6):1267-1272.

[43]Doran J W, Mielk I N, Power J F. Microbial activity as regulated by soil water-filled pore space [C]//Kyoto: Transactions 14th International Congress of Soil Science, 1990:94-99.

[44]Skopp J, Jawson M D, Doran J W. Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil water content[J]. Soil Science Society of America Journal,1990,54(6):1619-1625.

[45]李晓菡,邹俊亮,武菊英,等. 土壤呼吸和有机碳对增温的响应及其影响因素分析[J]. 地球与环境,2022,50(4):471-480.
Li X H, Zou J L, Wu J Y, et al. Responses of soil respiration and organic carbon to warming and their influencing factors[J]. Earth and Environment, 2022, 50(4): 471-480.

The impact of applying manure on the sensitivity of soil respiration temperature in cropland of northern China

Bai Kaidong[1,2], Sun Liyang[1,2], Wang Jinfeng[2*], Jin Dongsheng[2], Li Jianhua[2], Xu Minggang[1,2*]

(*1.College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030800, China; 2.Shanxi Key Laboratory of Soil Environment and Nutrient Resources, Shanxi Institute of Ecological and Environmental Technology, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China*)

Abstract: [Objective] This study was designed to investigate the effect of manure application on the temperature sensitivity of soil respiration (expressed by Q_{10}) and its main driving factors in northern China's croplands. The objective was to develop appropriate agricultural practices to reduce CO_2 emissions from farmland. [Methods] Domestic and international literature on the influence of manure application on soil respiratory temperature sensitivity were collected from CNKI, Wanfang Data, and Web of Science databases. Using keywords like "manure", "soil respiration", "temperature sensitivity" and "Northern China", a total of 104 sets of experimental data were extracted from 16 published studies. Meta-analysis was used to investigate how various factors affected soil respiratory temperature sensitivity Q_{10} under different manure application conditions. [Results] The results indicated that manure application significantly increased soil respiration temperature sensitivity by 8.11%. Pig manure exhibited a significantly higher increase rate of 12.72% compared to chicken manure of 5.56%. The highest increase in soil respiration temperature sensitivity was observed at manure application rate≤15 000 kg·hm^{-2} (9.28%). Sole manure application showed a substantially greater increase(11.96%) than the combination of manure with chemical fertilizer (5.22%). In addition, the increase was significantly higher with soil organic carbon≥12 g·kg^{-1} (7.17%) compared to 6~12 g·kg^{-1} (2.23%), and initial pH≥7 (8.11%) versus pH<7 (3.48%). Under varied climatic conditions, the increase in sensitivity was significantly higher for annual mean temperature≤5 ℃ (8.83%) compared to 5~10 ℃ and ≥10 ℃. Similarly, an annual rainfall of 400~600 mm (8.98%) displayed a significantly higher increase than ≤400 mm (2.71%) and ≥600 mm (−3.13%). Furthermore, the results from random forest (RF) analysis highlighted soil organic carbon (SOC) content as the key factor affecting change in soil respiration temperature sensitivity, explaining 42.6% of the variance. [Conclusion] Overall, the application of chemical fertilizer combined with chicken manure at rates exceeding>15 000 kg·hm^{-2} not only exhibited the smallest increase in soil respiration sensitivity to temperature in farmland of northern China, but also effectively reduced soil carbon emission, potentially contributing to global warming mitigation efforts. Additionally, soil organic carbon content emerged as the main driving factors affecting soil respiration temperature sensitivity under manure application in northern China.

Keywords: Manure, Soil respiration, Temperature sensitivity, North China, Meta-analysis

(编辑:韩志强)