

中国旱作农田转为其它土地利用方式对土壤呼吸影响的整合分析研究

张彦军¹, 薛斯文¹, 邹俊亮^{2*}, 党水纳¹, 任媛媛¹, 梁婷¹

¹宝鸡文理学院地理与环境学院, 陕西 宝鸡

²北京市农林科学院北京草业与环境研究发展中心, 北京

Email: zhangyanjun@bjwlxy.cn, *jlzou@nwafu.edu.cn

收稿日期: 2021年2月25日; 录用日期: 2021年3月24日; 发布日期: 2021年3月31日

摘要

土地利用方式转化会通过影响土壤有机碳(SOC)、土壤碳氮比(C:N)、土壤温度和土壤水分等因素影响土壤呼吸, 但是这些因素之间存在着复杂的交互作用, 且它们对土壤呼吸的相对贡献目前并不清楚。本文综合国内已经发表的69篇研究论文, 利用Meta分析量化中国旱作农田转为果园、灌木林、自然草地、人工草地、天然林、人工林和混交林后对土壤呼吸的影响。研究结果显示, 旱作农田转化为其它土地利用方式后会导致土壤呼吸的显著增加($P < 0.05$), 增加幅度为12.2%~89.5%, 平均增加19.5%, 且中国旱作农田转为其它土地利用方式后土壤呼吸的增加幅度呈现50年(58.7%) > 20~50年(23.2%) > 10~20年(19.6%) > 10年(12.9%)的趋势。土壤水分在旱作农田转化为果园、天然草地、人工草地、人工林、天然林和混交林后增加了6.7%~24.0%, 但在转化为灌木林后降低了22.1%。土壤温度在旱作农田转化为果园、天然草地、灌木林、人工林、天然林和混交林后降低了2.8%~22.5%。SOC在旱作农田转化为天然草地、人工草地、人工林、天然林和混交林后增加了27.1%~352%。C:N在旱作农田转化为果园和混交林后降低了10.8%~42.1%, 但在转化为灌木林、天然草地、人工草地、人工林和天然林后增加了8.9%~79.5%。中国旱作农田转为其它土地利用方式后, 土壤呼吸的增加量与SOC、C:N、土壤温度和水分的变化量密切相关, 且这些因素对土壤呼吸的贡献呈现出C:N > 土壤温度 > 土壤水分 > SOC的趋势。因此, 中国旱作农田转为其它土地利用方式后, C:N是影响土壤呼吸增加的重要因素。

关键词

土地利用方式转化, 土壤呼吸, Meta分析, 土壤温度和水分, 土壤有机碳和土壤碳氮比

Integrated Analysis of the Effects of Dry Cropland Conversion into Other Land-Use Patterns on Soil Respiration in China

*通讯作者。

文章引用: 张彦军, 薛斯文, 邹俊亮, 党水纳, 任媛媛, 梁婷. 中国旱作农田转为其它土地利用方式对土壤呼吸影响的整合分析研究[J]. 土壤科学, 2021, 9(2): 19-30. DOI: 10.12677/hjss.2021.92004

Yanjun Zhang¹, Siwen Xue¹, Junliang Zou^{2*}, Shuina Dang¹, Yuanyuan Ren¹, Ting Liang¹

¹Geography and Environmental Engineering Department, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji Shaanxi

²Beijing Research & Development Centre for Grass and Environment, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing

Email: zhangyanjun@bjwlxy.cn, *jlzou@nwafu.edu.cn

Received: Feb. 25th, 2021; accepted: Mar. 24th, 2021; published: Mar. 31st, 2021

Abstract

Land-use conversion could affect soil respiration through soil organic carbon (SOC), soil carbon and nitrogen ratio (C:N), soil temperature and soil moisture. However, these factors are not independent but interact with each other, and their relative contribution to soil respiration in response to land-use conversion remains unknown. We synthesized 69 recently published papers in China using a meta-analysis approach to investigate the effect of dry cropland conversion into orchard, shrub, natural grassland, artificial grassland, woodland, forest and mixed forest on soil respiration. The results showed that in response to land-use conversion soil respiration increased by 12.2%~89.5%, with average increase of 19.5% in natural grassland, artificial grassland, shrub, woodland, forest and mixed forest, respectively. And the increase of soil respiration in response to dry cropland conversion into other land-use patterns showed the following patterns: 50 years (58.7%) > 20~50 years (23.2%) > 10~20 years (19.6%) > 10 years (12.9%). Soil moisture increased by 6.7%~24.0% in orchard, natural grassland, artificial grassland, woodland, forest and mixed forest, but decreased by 22.1% in shrub, respectively. Soil temperature decreased by 2.8%~22.5% in orchard, natural grassland, shrub, woodland, forest and mixed forest, respectively. SOC increased by 27.1%~352% in natural grassland, artificial grassland, woodland, forest and mixed forest, respectively. C:N ratio decreased by 10.8%~42.1% in orchard and mixed forest, but increased by 8.9%~79.5% in shrub, natural grassland, artificial grassland, woodland and forest, respectively. The increase of soil respiration in response to dry cropland conversion into other land-use patterns was closely related with the increase of soil temperature and moisture, SOC and C:N ratio. Moreover, the contribution to the increase of soil respiration in response to dry cropland conversion into other land-use patterns showed the order of C:N > soil temperature > soil moisture > SOC. Therefore, C: N ratio is an important factor affecting soil respiration in response to dry cropland conversion into other land-use patterns in China.

Keywords

Land-Use Conversion, Soil Respiration, Meta-Analysis, Soil Temperature and Moisture, SOC and C:N Ratio

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的一个重要组成部分, 据估计全球每年因为土壤呼吸释放到大气中的 CO₂ 浓度大约为 98 Pg C [1], 其比化石燃料燃烧释放到大气中的 CO₂ 浓度大了一个数量级[2], 因此土壤呼吸的微小变化将会对未来气候变暖产生重要的影响[3] [4]。在影响土壤呼吸的众多因素中, 土

地利用方式转化是影响土壤呼吸的一个重要因素[2] [5] [6], 且全球 25%的土壤呼吸与土地利用方式转化有关[5]。但是, 土地利用方式转化(例如旱作农田转化为果园、天然林、人工林、天然草地、人工草地、混交林以及灌木林)对土壤呼吸的影响目前存在较大的争议[7] [8] [9] [10] [11]。有研究得出旱作农田转化为其它土地利用方式后土壤呼吸呈现出增加的趋势[9] [12] [13] [14], 也有研究得出减少的趋势[10] [15] [16] [17] [18]。

旱作农田转化为其它土地利用方式后土壤呼吸的差异可能与土壤有机碳(SOC)、土壤碳氮比(C:N)、土壤温度和土壤水分等因素有关[8] [19] [20] [21]。例如, 旱作农田转化为其它土地利用方式后, 由于不同植被的遮阴效果不同和不同植被对土壤水分的需求不同以及不同植被蒸散发的差异会导致土壤温度和水分不同[10] [12] [16] [22]。此外, 不同植被类型条件下输入到土壤中的凋落物(地上和地下)数量和类型不同, 会导致 SOC 和 C:N 不同[4] [10] [12] [13] [14]。在自然条件下, 上述这些因素不会单独影响土壤呼吸, 而是彼此之间存在着复杂的交互作用[23]。例如, 随着土壤温度的增加土壤水分含量一般会呈现出减少的趋势, 其可能会导致可溶性底物的扩散速率降低, 结果使土壤呼吸速率降低[24]。但是, 在全国尺度上, 旱作农田转化为其它土地利用方式后, 这上述这些因素如何影响土壤呼吸及其潜在的机理, 以及它们对土壤呼吸的相对贡献目前尚不清楚, 这对准确全面理解中国陆地生态系统碳循环具有重要的现实意义。

“退耕还林还草”工程是中国政府为了抑制水土流失、提高生物多样性和恢复生态环境建设等为目标而在全国范围内实施的土地利用方式转化工程[25] [26]。该工程实施后对中国的陆地生态系统碳循环产生了重要的影响, 已有的 Meta 分析结果显示该工程显著的增加了中国的固碳能力[25] [26]。虽然在点位尺度上, 该工程实施后对土壤呼吸的影响进行了大量的研究[13] [14] [27], 但在全国尺度上该工程实施后对土壤呼吸的影响机理目前尚不清楚。基于此, 本研究综合已有的研究结果, 通过 Meta 分析, 试图阐述旱作农田转化为其它土地利用方式后 SOC、C:N、土壤温度和土壤水分等因素如何影响土壤呼吸, 以及这些因素对土壤呼吸的相对贡献, 以期对准确全面理解中国的陆地生态系统碳循环提供重要的支撑材料。

2. 材料方法

2.1. 数据的收集

利用中国知网(CNKI)、万方、维普和 Web of Science 等中英文数据库, 以“土地利用方式”、“植被恢复”、“退耕还林还草”、“土壤呼吸”、“land-use”、“land-use conversion”、“vegetation restoration”、“Grain-for-Green Program”和“soil respiration”等为关键词进行文献的检索, 收集筛选了 2020 年 5 月份以前发表的有关“中国常规旱作农田土地利用方式转化与土壤呼吸”的相关研究论文进行 Meta 分析。

为达到本研究的目的和减少文献筛选带来的偏差, 所筛选的文献必须满足以下几个条件: 1) 研究试验需为田间原位试验; 2) 田间原位试验中必须以中国常规旱作农田为对照组, 以非农田(果园、天然林、人工林、天然草地、人工草地、混交林以及灌木林)为处理组; 3) 研究论文所提供的土壤呼吸数据必须有试验的均值、重复数(至少可以从论文其它部分得知)、标准差或者标准误。基于以上筛选标准, 最终获得符合要求的研究论文 69 篇, 具体详见附表 1, 获取有效数据 1674 对。同时, 数据的预处理结果显示, 失安全数为 1,988,467, 远远大于 $5N + 10$ ($N = 1674$), 即不存在文献的偏倚[28] [29], 同时旱作农田转化为其它土地利用方式后土壤呼吸的效应值呈现出正态分布格局(图 1), 因此论文的数据结果是可信的。

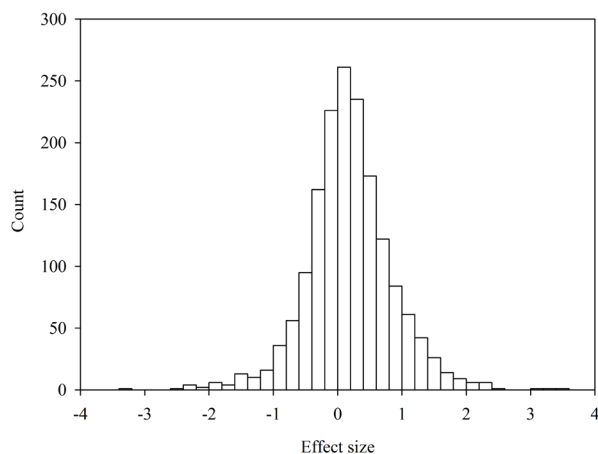


Figure 1. Normal distribution of the effect size for the effect of dry cropland conversion into other land-use patterns on soil respiration

图 1. 旱作农田转化为其它土地利用方式后影响土壤呼吸效应值的正态分布图

2.2. 数据处理

在获取数据的过程中，若已发表论文的数据以表格的形式呈现的话直接从表格中获取，若数据以图的形式呈现的话，则利用 GetData Graph Digitizer 2.24 软件(从官方网站免费下载：

<http://getdata-graph-digitizer.com>)来获取相关数据。为了达到本研究的目的，本研究在获取土壤呼吸速率的同时还会获取经纬度、海拔、年均降雨量和平均气温、土地利用方式类型(常规旱作农田、果园、天然林、人工林、天然草地、人工草地、混交林以及灌木林)、土地利用方式转化年限(≤ 10 年, $10\sim 20$ 年, $20\sim 50$ 年, ≥ 50 年)、土壤温度和水分、SOC、C:N 等信息。

如若研究论文提供的数据为标准误(SE)，则标准差(SD)可通过式(1)进行转换：

$$SD = SE\sqrt{N} \quad (1)$$

式中， N 为试验重复次数。

Meta 分析通过 MetaWin 2.1 软件(Sinauer Associates, Sunderland, USA)进行，需要输入的有效数据为处理组和对照组土壤呼吸的均值(Mean)、标准差(SD)和样本重复次数(N)、以及分类变量。在进行 Meta 分析时，同时需要引用效应值对试验数据进行量化。根据本试验所获取数据的特征，同时为提高效应值的准确性，本研究最终选取自然对数响应比(lnRR)来反映旱作农田转化为其它土地利用方式后对土壤呼吸的影响程度[28] [29]。

$$\ln RR = \frac{\ln X_t}{\ln X_c} = \ln X_t - \ln X_c \quad (2)$$

式中， RR 为响应比， $\ln RR$ 为效应值， X_t 非农田处理下(果园、天然林、人工林、天然草地、人工草地、混交林以及灌木林)的土壤呼吸均值， X_c 为常规旱作农田处理下的土壤呼吸均值。

在获取本研究有效试验数据的过程中，我们首先根据实际测定次数获取每一次测定试验数据(土壤呼吸、土壤温度、土壤水分、SOC 和 C:N)的均值、标准偏差和试验重复数，然后利用 MetaWin 2.1 软件(Sinauer Associates, Sunderland, USA)得到每一对数据的效应值，最后利用 MetaWin 2.1 软件的随机效应模型根据分类标准计算合并效应值/平均加权响应比(RR++)以及其 95% 的置信区间(CI)，具体相关计算公式见参考文献[30] [31]。RR++为正值则为正效应，RR++为负值则为负效应。若置信区间包括 0，则说明旱作农田转化为其它土地利用方式后对土壤呼吸没有显著影响($P > 0.05$)；若置信区间全部大于 0，则说明旱作农

田转化为其它土地利用方式后显著增加土壤呼吸($P < 0.05$); 若置信区间全部小于 0, 则说明旱作农田转化为其它土地利用方式后显著减少土壤呼吸($P < 0.05$)。

同时, 为了便于理解和描述, 本研究通过下式计算土壤呼吸增加量的变化百分数[32] [33]。

$$\text{土壤呼吸增加量} = (e^{RR^{++}} - 1) \times 100\% \quad (3)$$

旱作农田转化为其它土地利用方式后, 土壤呼吸的改变量与 SOC、C:N、土壤温度和土壤水分之间的回归分析利用 SigmaPlot 10.0 软件(Systat Software, Inc., San Jose, CA, USA)进行。利用 AMOS 20.0 (AMOS IBM, USA)软件的结构方程模型(the structural equation model)量化旱作农田转化为其它土地利用方式后 SOC、C:N、土壤温度和土壤水分对土壤呼吸改变量的相对贡献。

3. 结果分析

3.1. 土壤呼吸对土地利用方式转化类型和年限的响应

中国常规旱作农田转为其它土地利用方式对土壤呼吸的影响显著(图 1, $P < 0.05$), 且土壤呼吸在旱作

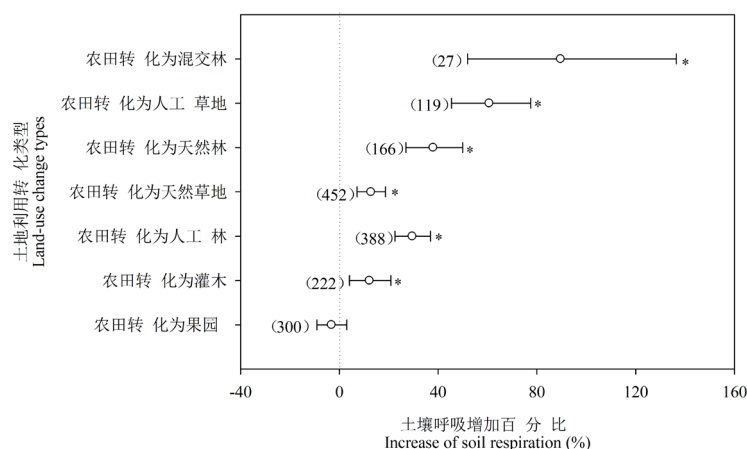


Figure 2. Effect of dry cropland conversion into other land-use patterns on soil respiration. *represent significant at $P < 0.05$
图 2. 旱作农田转化为其它土地利用方式后对土壤呼吸的影响。*代表统计达到显著水平($P < 0.05$)

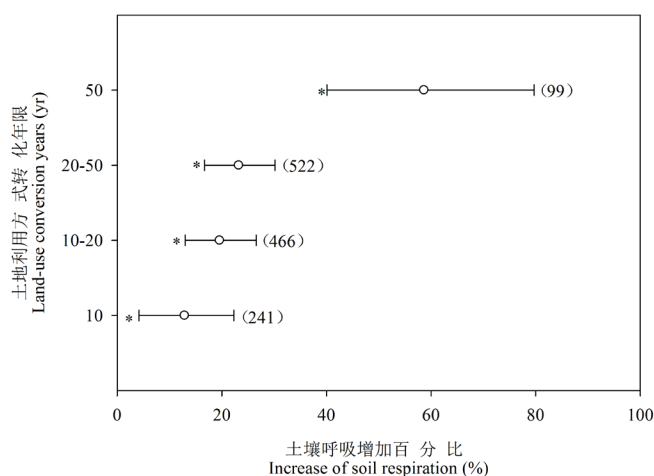


Figure 3. Effects of the years for dry cropland conversion into other land-use patterns on soil respiration. *represent significant at $P < 0.05$

图 3. 旱作农田转化为其它土地利用方式年限对土壤呼吸的影响。*代表统计达到显著水平($P < 0.05$)

农田转化为灌木林、人工林、天然草地、天然林、人工草地以及混交林后分别增加了 12.2%、29.5%、12.8%、38.0%、60.6%和 89.5%，但是在旱作农田转化为果园后变化不显著(图 2, $P > 0.05$)。除了中国常规旱作农田转为其它土地利用方式以外，土地利用方式转化年限对土壤呼吸的也具有显著的影响(图 3, $P < 0.05$)。中国常规旱作农田转为其它土地利用方式后，土壤呼吸的增加量呈现出随着土地利用方式转化年限的增加而增加的趋势，即 50 年(58.7%) > 20~50 年(23.2%) > 10~20 年(19.6%) > 10 年(12.9%) (图 3)。

3.2. 旱作农田转为其它土地利用方式对 SOC、C:N、土壤温度和土壤水分的影响

中国常规旱作农田转为其它土地利用方式后对 SOC、C:N、土壤温度和水分影响显著(图 4, $P < 0.05$)。土壤水分在旱作农田转化为果园、人工林、天然草地、天然林、人工草地以及混交林后分别增加了 7.5%、24.0%、10.8%、6.7%、17.3% 和 22.7%，但在旱作农田转化为灌木林后却降低了 22.1% (图 4(a), $P < 0.05$)。土壤温度在旱作农田转化为果园、灌木林、人工林、天然草地、天然林和混交林后依次降低了 2.8%、3.5%、16.3%、5.1%、16.2%和 22.5%，但是在旱作农田转化为人工草地后变化不显著(图 4(b), $P > 0.05$)。SOC 在旱作农田转化为人工林、天然草地、天然林、人工草地和混交林后分别增加了 64.2%、27.1%、352%、49.7%和 100.6%，但在旱作农田转化为果园和灌木林后却影响不显著(图 4(c), $P > 0.05$)。C:N 在旱作农田转化为果园和混交林后分别降低了 10.8%和 42.1%，但是在旱作农田转化为灌木林、人工林、天然草地、天然林和人工草地后依次增加了 33.7%、21.5%、8.9%、79.5%和 10.4% (图 4(d), $P < 0.05$)。

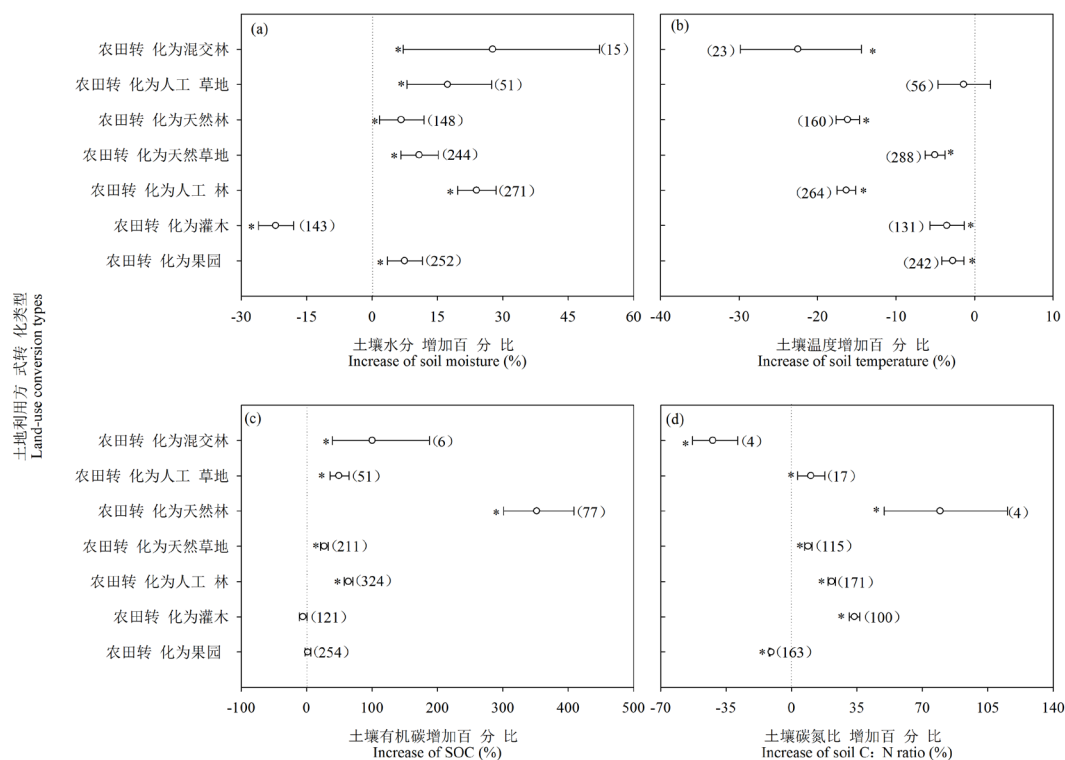


Figure 4. Effects of dry cropland conversion into other land-use patterns on soil temperature, soil moisture, SOC and C:N. *represent significant at $P < 0.05$

图 4. 旱作农田转化为其它土地利用方式后对土壤温度、土壤水分、SOC 和 C:N 的影响。*代表统计达到显著水平($P < 0.05$)

3.3. 旱作农田转为其它土地利用方式后土壤呼吸增加量的影响因素分析

中国常规旱作农田转为其它土地利用方式后土壤呼吸的增加量与 SOC、C:N、土壤温度和土壤水分

的变化密切相关(图 5)。中国常规旱作农田转为其它土地利用方式后,土壤呼吸的增加量与土壤温度、土壤水分、SOC 和 C:N 的变化量均呈现出抛物线关系模型,且这些因素的决定系数分别为 57%、74%、74% 和 43% (图 5(a)~(d))。此外,结构方程模型研究结果显示,中国常规旱作农田转为其它土地利用方式后对土壤呼吸增加量的贡献呈现出 C:N > 土壤温度 > 土壤水分 > SOC 的趋势(图 6)。因此,中国常规旱作农田转为其它土地利用方式后 C:N 可能是影响土壤呼吸增加的一个重要因素。

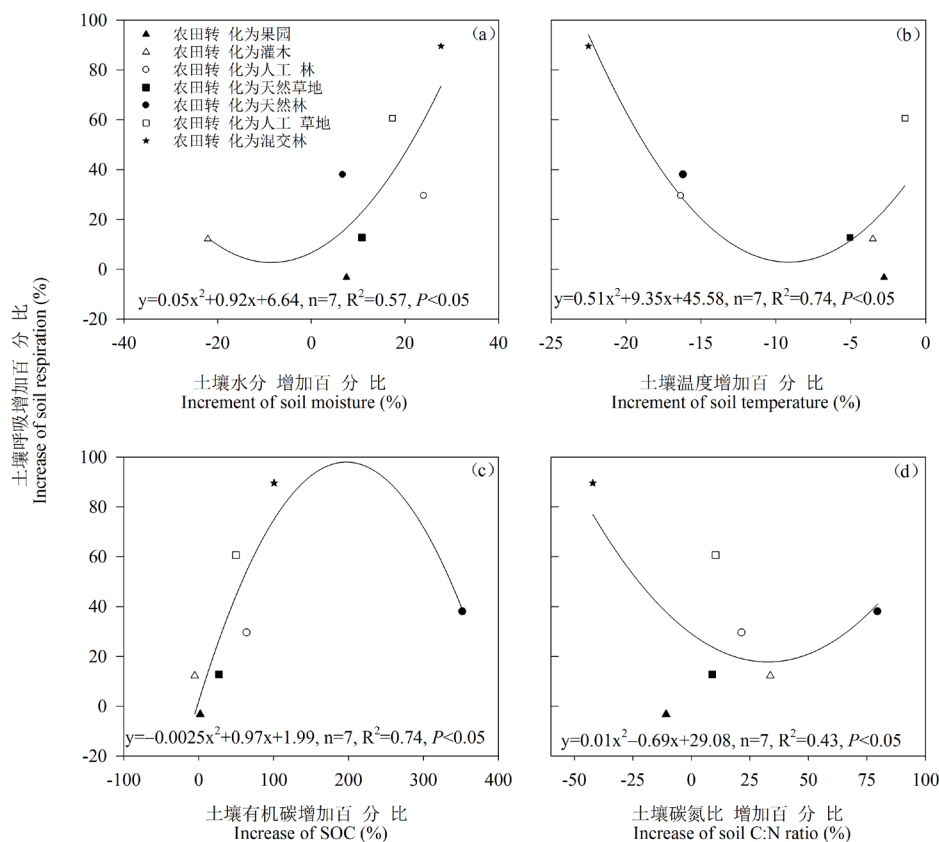


Figure 5. Regression analysis between the increase of soil respiration and changes of soil temperature, soil moisture, SOC and C:N after dry cropland conversion into other land-use patterns

图 5. 旱作农田转化为其它土地利用方式后土壤呼吸增加量与 SOC、C:N、土壤温度和土壤水分变化量的回归分析

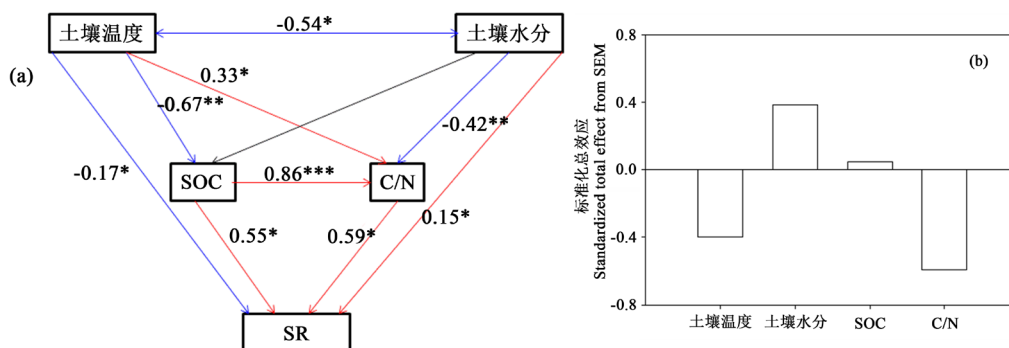


Figure 6. Analysis of factors affecting soil respiration after dry cropland conversion into other land-use patterns. *represent significant at $P < 0.05$, **represent significant at $P < 0.01$, ***represent significant at $P < 0.001$

图 6. 旱作农田转化为其它土地利用方式后影响土壤呼吸增加的因素分析。*代表统计达到显著水平($P < 0.05$), **代表统计达到显著水平($P < 0.01$), ***代表统计达到显著水平($P < 0.001$)

4. 讨论

中国常规旱作农田转为灌木林、人工林、天然草地、天然林、人工草地、混交林后, 土壤呼吸速率呈现出显著增加的趋势, 其增加幅度为 12.2%~60.6%, 这可能与下列因素有关: 1) 土地利用方式转化后, 由于受植被冠层的影响土壤温度和水分发生显著改变进而间接的影响土壤呼吸速率的变化[13] [14] [34]。例如, 中国常规旱作农田转为其它土地利用方式后, 土壤温度降低了 2.8%~22.5%, 这可能与植被冠层的遮阴作用有关, 且土壤呼吸的增加量与土壤温度的变化量密切相关(图 5(a))。大量的研究结果显示, 土壤温度是影响土壤呼吸的一个主要因素, 在较长的时间尺度上(季节尺度)土壤呼吸的动态变化趋势与土壤温度的变化趋势基本相一致, 土壤温度通过调控与植被和微生物相关的生命活动的季节变化而影响土壤呼吸, 且土壤温度对土壤呼吸的影响一般均利用指数关系模型进行拟合[13] [14] [15] [24]。本研究结果显示, 土壤呼吸的增加量与土壤温度的改变量可以用抛物线关系模型进行拟合, 其拐点为-9.2%, 在拐点的左侧, 土壤呼吸会随着土壤温度的减少的呈现出增加的趋势, 虽然随着土壤温度的减少会增加土壤温度对土壤呼吸的限制作用, 但是这种限制作用会受到底物有效性和土壤微生物学特性等因素的影响[13] [35] [36], 但具体原因有待进一步的研究进行佐证。在拐点的右侧, 土壤呼吸会随着土壤温度的增加而呈现出增加的趋势, 这是因为随着土壤温度的增加, 土壤温度对与土壤呼吸相关的生命活动过程(根系和与微生物相关的新陈代谢过程)的抑制作用在减弱, 土壤温度增加的越多, 这些代谢过程越强烈, 因此土壤呼吸越大[37] [38]。除了土壤温度以外, 土壤水分也是影响土壤呼吸的另外一个重要因素, 研究结果显示土壤呼吸的波动与土壤水分的波动密切相关, 且土壤呼吸对土壤水分的响应可以利用开口向下的抛物线关系模型进行拟合[13] [24] [39]。中国常规旱作农田转为其它土地利用方式后, 土壤水平平均增加了 6.7%~24.0%, 这可能是由于浓密冠层的存在导致土壤水分的蒸发减少, 且土壤呼吸的增加量与土壤水分的变化量也可以用抛物线关系模型进行拟合, 其拐点为-9.2% (图 5(b))。在拐点的左侧, 土壤呼吸会随着土壤水分含量的减少呈现出增加的趋势, 这可能是因为随着土壤水分含量的减少, 土壤中的孔隙度增加, 土壤空气中的氧气含量增加, 与氧气相关的需氧生物的新陈代谢增加, 导致土壤呼吸的增加[40] [41]。在拐点的右侧, 土壤呼吸会随着土壤水分含量的增加而呈现出增加的趋势, 这可能是因为土壤水分含量的增加会导致土壤中底物和养分的有效性增加(底物和养分的扩散必须以水分为载体进行), 而底物和养分有效性的增加会进一步导致与根系和微生物相关的新陈代谢活动过程增加, 最终导致土壤呼吸的增加[42] [43]; 2) 中国常规旱作农田转为其它土地利用方式后, 由于输入到土壤中的凋落物(地上和地下)的数量和类型均发生改变, 导致影响土壤呼吸的底物有效性和底物质量均发生显著改变, 进而导致土壤呼吸速率显著改变[14] [44]。中国常规旱作农田转为其它土地利用方式后, SOC 的增加幅度为 27.1%~352%, 这可能是因为与农业相比较而言, 其它非农业生态系统可能会拥有更加复杂的群落结构、较高的生物多样性以及较强的抵御不利环境因素干扰的能力等因素有关[45] [46]。同时, 中国常规旱作农田转为其它土地利用方式后, 土壤呼吸的增加量与 SOC 变化量之间呈现出开口向下的抛物线关系模型, 其拐点为 194% (图 5(c))。也就是说, 在 SOC 增加到 194%之前, 可能由于底物有效性的限制[13] [14], 土壤呼吸的增加量会随着 SOC 的增加而呈现出增加的趋势, 在 SOC 的增加超过 194%之后, 可能由于其它因素的制约(例如, 土壤温度、水分、土壤微生物、土壤理化性质) [15] [19] [20] [36], 土壤呼吸的增加量呈现出随着 SOC 的增加而减少的趋势。除了 SOC 以外, C:N 也是影响土壤呼吸的一个重要因素[13] [15], C:N 可以通过调节土壤微生物群落结构间接影响底物碳的有效性而影响土壤呼吸[14] [44]。中国旱作农田转化为其它土地利用方式后, C:N 在旱作农田转化为果园和混交林后降低了 10.8%~42.1%, 但在旱作农田转化为灌木林、人工林、天然草地、天然林以及人工草地后却增加了 8.9%~79.5%, 且土壤呼吸的增加量与 C:N 的改变量呈现出开口向上的抛物线关系模型(图 5(d)), 其拐点

为 34.5%。因此, 中国常规旱作农田转为其它土地利用方式后, C:N 增加到 34.5% 之前, 土壤呼吸的增加量会随着 C:N 的增加而呈现出减少的趋势, C:N 增加到 34.5% 以后, 土壤呼吸的增加量会随着 C:N 的增加而呈现出增加的趋势(图 5(d))。究其原因可能是因为, 不同的土壤微生物具有不同的底物碳使用策略[35] [47] [48], 其中细菌优先利用相对易分解的底物碳(例如, 较低的 C:N), 而真菌更倾向于利用难分解的底物碳(例如, 较高的 C:N), 或者可能是因为底物碳的有效性和土壤微生物之间存在着复杂的交互作用[49] [50] [51] [52], 但是具体的原因需要进一步的研究探索。

在自然条件下中国常规旱作农田转为其它土地利用方式后, 上述影响土壤呼吸增加的各因素通常不是单独影响土壤呼吸, 而是彼此之间相互影响最终导致土壤呼吸速率的增加[53] [54]。例如, 随着土壤温度的增加土壤水分含量一般会呈现出减少的趋势, 减少的土壤水分含量很有可能会导致可溶性底物碳的扩散速率降低, 结果使土壤呼吸速率降低[24]。在本研究中, 利用结构方程模型清楚地显示, 中国常规旱作农田转为其它土地利用方式后上述各因素如何驱动土壤呼吸的增加(图 6(a)), 且对土壤呼吸的贡献呈现出 C:N 最大, SOC 最小, 土壤温度和土壤水分居中(图 6(b))。因此, 中国常规旱作农田转为其它土地利用方式后 C:N 可能是影响土壤呼吸速率增加的重要因素。与之相类似, 利用结构方程模型, 在众多影响全球土壤呼吸温度敏感性的因素中(年平均降雨量、SOC 和年平均温度), 年平均温度是一个最重要的影响因素[23]。

在本研究中, 中国常规旱作农田转为其它土地利用方式后, 通过 Meta 分析量化了 SOC、C:N、土壤温度和土壤水分对土壤呼吸的影响, 这对准确全面理解中国陆地生态系统碳循环具有重要的理论和实际意义。中国常规旱作农田转为其它土地利用方式后, 土壤呼吸的增加不仅与 SOC、C:N、土壤温度和水分等因素有关, 还会受到土壤微生物学特性[15] [35] [36]和土壤理化性质[7] [10] [11] [13] [36] [55] [56]等因素的影响, 而这些因素之间也存在着复杂的交互作用, 且这些因素影土壤呼吸增加的机理以及它们对土壤呼吸的相对贡献目前尚不清楚。此外, 地形也是影响土壤呼吸的一个重要因素, 在地形条件复杂的地区, 地貌类型(坡地和平地)和地形特征参数(海拔、坡度、坡向等)如何调控中国常规旱作农田转为其它土地利用方式后土壤呼吸的变化特征以及内在的机理目前尚不清楚[53] [54], 这对准确理解中国陆地生态系统碳循环具有重要的限制意义。因此, 未来需要进一步全面深入的量化中国常规旱作农田转为其它土地利用方式后的影响因素分析以及它们的相对贡献, 这对进一步深入认识中国陆地生态系统碳循环具有重要意义。

5. 结论

- 1) 中国常规旱作农田转为其它土地利用方式后, 土壤呼吸呈现出显著增加的趋势。
- 2) 中国常规旱作农田转为其它土地利用方式后, 土壤呼吸的增加量与 SOC、C:N、土壤温度和土壤水分密切相关。
- 3) 中国常规旱作农田转为其它土地利用方式后, 对土壤呼吸增加量的贡献呈现出 C:N > 土壤温度 > 土壤水分 > SOC 的趋势。
- 4) 中国常规旱作农田转为其它土地利用方式后, C:N 是驱动土壤呼吸增加的重要因素。

基金项目

国家自然科学基金项目(41801069; 4190010300); 陕西省科技计划项目(2018JQ3023; 2019JQ-895); 宝鸡文理学院博士科研启动费(ZK2017041); 北京市农林科学院杰出科研人才引进青年英才项目和北京市退化土地生态系统修复成效长期定位监测站建设(KJCX20200302); 陕西省社会科学基金项目(2019E007); 北京市农林科学院创新能力建设专项(KJCX20170301)。

参考文献

- [1] Ben, B.L. and Allison, T. (2010) Temperature-Associated Increases in the Global Soil Respiration Record. *Nature*, **464**, 579-582. <https://doi.org/10.1038/nature08930>
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- [3] Wang, D., Liu, Y., Shang, Z.H., Tian, F.-P., Wu, G.-L., Chang, X.-F., *et al.* (2015) Effects of Grassland Conversion from Cropland on Soil Respiration on the Semi-Arid Loess Plateau, China. *Clean-Soil, Air, Water*, **43**, 1052-1057. <https://doi.org/10.1002/clen.201300971>
- [4] Zhang, Y., Zhao, W., Fu, L., Zhao, C. and Jia, A. (2020) Land Use Conversion Influences Soil Respiration across a Desert-Oasis Ecoregion in Northwest China, with Consideration of Cold Season CO₂ Efflux and Its Significance. *Catena*, **188**, Article ID: 104460. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104460>
- [5] Zheng, S., Rui, W., Glaeser, E.L. and Kahn, M.E. (2011) The Greenness of China: Household Carbon Dioxide Emissions and Urban Development. *Journal of Economic Geography*, **11**, 761-792. <https://doi.org/10.1093/jeg/lbq031>
- [6] Yue, C., Ciais, P., Houghton, R.A. and Nassikas, A.A. (2020) Contribution of Land Use to the Interannual Variability of the Land Carbon Cycle. *Nature Communications*, **11**, Article No. 3170. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16953-8>
- [7] Wang, X.G., Zhu, B., Gao, M.R., Wang, Y.Q. and Zheng, X.H. (2008) Seasonal Variations in Soil Respiration and Temperature Sensitivity under Three Land-Use Types in Hilly Areas of the Sichuan Basin. *Australian Journal of Soil Research*, **46**, 727-734. <https://doi.org/10.1071/SR07223>
- [8] Rong, Y., Lei, M., Johnson, D.A. and Yuan, F. (2015) Soil Respiration Patterns for Four Major Land-Use Types of the Agro-Pastoral Region of Northern China. *Agriculture Ecosystems & Environment*, **213**, 142-150. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.08.002>
- [9] Wang, X.G., Zhou, M.H., Li, T., Ke, Y. and Zhu, B. (2017) Land Use Change Effects on Ecosystem Carbon Budget in the Sichuan Basin of Southwest China: Conversion of Cropland to Forest Ecosystem. *Science of the Total Environment*, **609**, 556-562. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.167>
- [10] Xue, H. and Tang, H. (2017) Responses of Soil Respiration to Soil Management Changes in an Agropastoral Ecotone in Inner Mongolia, China. *Ecology & Evolution*, **8**, 220-230. <https://doi.org/10.1002/ece3.3659>
- [11] Sun, W.H., Zhao, X.N., Ling, Q., Li, H.C. and Gao, X.D. (2018) Revegetation Modifies Patterns of Temporal Soil Respiration Responses to Extreme-Drying-and-Rewetting in a Semiarid Ecosystem. *Plant and Soil*, **433**, 227-241. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3835-y>
- [12] Zhang, Q., Wu, J.J., Lei, Y., Yang, F., Zhang, D.D., Zhang, K.R., *et al.* (2018) Agricultural Land Use Change Impacts Soil CO₂ Emission and Its ¹³C-Isotopic Signature in Central China. *Soil & Tillage Research*, **177**, 105-112. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.11.017>
- [13] Zhang, Y.J., Guo, S.L., Liu, Q.F., Jiang, J.S., Wang, R. and Li, N. (2015) Responses of Soil Respiration to Land Use Conversions in Degraded Ecosystem of the Semi-Arid Loess Plateau. *Ecological Engineering*, **74**, 196-205. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.10.003>
- [14] Sheng, H., Yang, Y., Yang, Z., Chen, G., Xie, J., Guo, J., *et al.* (2010) The Dynamic Response of Soil Respiration to Land-Use Changes in Subtropical China. *Global Change Biology*, **16**, 1107-1121. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01988.x>
- [15] Wang, R., Sun, Q.Q., Wang, Y., Zheng, W., Yao, L.G., Hu, Y.X., *et al.* (2018) Contrasting Responses of Soil Respiration and Temperature Sensitivity to Land Use Types: Cropland vs. Apple Orchard on the Chinese Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, **621**, 425-433. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.290>
- [16] Liu, X., Zhang, W., Zhang, B., Yang, Q., Chang, J. and Hou, K. (2016) Diurnal Variation in Soil Respiration under Different Land Uses on Taihang Mountain, North China. *Atmospheric Environment*, **125**, 283-292. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.11.034>
- [17] 赵娜, 孟平, 张劲松, 陆森, 程志庆. 华北低丘山地不同土地利用条件下的土壤呼吸比较[J]. 林业科学, 2014, 50(2): 1-7.
- [18] 周志田, 成升魁, 刘允芬, 李家永. 中国亚热带红壤丘陵区不同土地利用方式下土壤 CO₂ 排放规律初探[J]. 资源科学, 2002, 24(2): 83-87.
- [19] 邵明玉, 张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 邵天杰, 曹建华, 等. 夏季黄土丘陵区不同土地利用方式土壤 CO₂ 分布特征及影响因素[J]. 中国岩溶, 2019, 38(1): 70-79.
- [20] 赵国庆, 刘梦云, 杨静涵, 刘欢, 张杰, 张萌萌, 等. 黄土台塬不同土地利用土壤温室气体通量空间变异及其环境解释[J]. 土壤通报, 2018, 49(2): 461-468.

- [21] Quijano, L., Álvaro-Fuentes, J., Lizaga, I. and Navas, A. (2017) Land Use and Rainfall Effect on Soil CO₂ Fluxes in a Mediterranean Agroforestry System. *EGU General Assembly Conference*, Vienna, 23-28 April 2017.
- [22] Lv, L.G., Wu, Z.P., Wang, J.X., Wu, S.H. and Zhou, S.L. (2016) Soil Carbon Dioxide Efflux Responds To Land-Use Changes in the Sub-Urban Regions of Nanjing, China. *Applied Ecology and Environmental Research*, **14**, 21-32. https://doi.org/10.15666/aeer/1403_021032
- [23] Li, J., Pei, J., Pendall, E., Fang, C.M. and Nie, M. (2020) Spatial Heterogeneity of Temperature Sensitivity of Soil Respiration: A Global Analysis of Field Observations. *Soil Biology and Biochemistry*, **141**, Article ID: 107675. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107675>
- [24] Davidson, E.A., Belk, E. and Boone, R.D. (1998) Soil Water Content and Temperature as Independent or Confounded Factors Controlling Soil Respiration in a Temperate Mixed Hardwood Forest. *Global Change Biology*, **4**, 217-227. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1998.00128.x>
- [25] Song, X., Peng, C., Zhou, G., Jiang, H. and Wang, W.F. (2014) Chinese Grain for Green Program Led to Highly Increased Soil Organic Carbon Levels: A Meta-Analysis. *Scientific Reports*, **4**, Article ID: 4460. <https://doi.org/10.1038/srep04460>
- [26] Deng, L., Liu, G.B. and Shangguan, Z.P. (2014) Land-Use Conversion and Changing Soil Carbon Stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: A Synthesis. *Global Change Biology*, **20**, 3544-3556. <https://doi.org/10.1111/gcb.12508>
- [27] Wen, J.Q., Chuai, X.W., Li, S.C., Song, S., Li, J.S., Guo, X.M., *et al.* (2018) Spatial-Temporal Changes of Soil Respiration across China and the Response to Land Cover and Climate Change. *Sustainability*, **10**, Article No. 4604. <https://doi.org/10.3390/su10124604>
- [28] Luo, Y., Hui, D. and Zhang, D. (2006) Elevated CO₂ Stimulates Net Accumulations of Carbon and Nitrogen in Land Ecosystems: A Meta-Analysis. *Ecology*, **87**, 53-63. <https://doi.org/10.1890/04-1724>
- [29] Hedges, L.V., Gurevitch, J. and Curtis, P.S. (1999) The Meta-Analysis of Response Ratios in Experimental Ecology. *Ecology*, **80**, 1150-1156. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1999\)080\[1150:TMAORR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(1999)080[1150:TMAORR]2.0.CO;2)
- [30] Zhou, L., Zhou, X., Shao, J., Nie, Y., He, Y., Jiang, L., *et al.* (2016) Interactive Effects of Global Change Factors on Soil Respiration and Its Components: A Meta-Analysis. *Global Change Biology*, **22**, 3157-3169. <https://doi.org/10.1111/gcb.13253>
- [31] Zhou, L., Zhou, X., Zhang, B., Lu, M., Luo, Y., Liu, L., *et al.* (2014) Different Responses of Soil Respiration and Its Components to Nitrogen Addition among Biomes: A Meta-Analysis. *Global Change Biology*, **20**, 2332-2343. <https://doi.org/10.1111/gcb.12490>
- [32] Liu, C., Lu, M., Cui, J., Li, B. and Fang, C. (2014) Effects of Straw Carbon Input on Carbon Dynamics in Agricultural Soils: A Meta-Analysis. *Global Change Biology*, **20**, 1366-1381. <https://doi.org/10.1111/gcb.12517>
- [33] 张彦军, 党水纳, 任媛媛, 梁婷, 郁科科, 邹俊亮, 等. 基于 Meta 分析的土壤呼吸对凋落物输入的响应[J]. 生态环境学报, 2020, 29(3): 447-456.
- [34] Shi, W.Y., Yan, M.J., Zhang, J.G., Guan, J.-H. and Du, S. (2014) 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. *Atmospheric Environment*, **88**, 74-82. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.01.066>
- [35] Nazaries, L., Tottey, W., Robinson, L., Khachane, A., Abu Al-Soud, W., Sørensen, S., *et al.* (2015) Shifts in the Microbial Community Structure Explain the Response of Soil Respiration to Land-Use Change But Not to Climate Warming. *Soil Biology & Biochemistry*, **89**, 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.06.027>
- [36] Iqbal, J., Hu, R., Feng, M., Lin, S., Malghani, S. and Ali, I.M. (2010) Microbial Biomass, and Dissolved Organic Carbon and Nitrogen Strongly Affect Soil Respiration in Different Land Uses: A Case Study at Three Gorges Reservoir Area, South China. *Agriculture Ecosystems & Environment*, **137**, 294-307. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.02.015>
- [37] 肖辉林, 郑习健. 土壤变暖对土壤微生物活性的影响[J]. 土壤与环境, 2001, 10(2): 138-142.
- [38] 刘敏, 李晓丽, 刘琦, 孟万忠, 徐满厚. 黄土高原林下草地模拟增温的短期响应[J]. 生态学报, 2020, 40(17): 6009-6024.
- [39] Zhang, Y.J., Guo, S.L., Zhao, M., Du, L.L., Li, R.J., Jiang, J.S., *et al.* (2015) Soil Moisture Influence on the Interannual Variation in Temperature Sensitivity of Soil Organic Carbon Mineralization in the Loess Plateau. *Biogeosciences*, **12**, 3655-3664. <https://doi.org/10.5194/bg-12-3655-2015>
- [40] Cook, F.J. and Knight, J.H. (2003) Oxygen Transport to Plant Roots: Modelling for Physical Understanding of Soil Aeration. *Soil Science Society of America Journal*, **67**, 1964. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1964>
- [41] Manzoni, S., Schimel, J.P. and Porporato, A. (2012) Responses of Soil Microbial Communities to Water Stress: Results from a Meta-Analysis. *Ecology*, **93**, 930-938. <https://doi.org/10.1890/11-0026.1>
- [42] Balogh, J., Pintér, K., Fóti, S., Cserhalmi, D., Papp, M. and Nagy, Z. (2011) Dependence of Soil Respiration on Soil

- Moisture, Clay Content, Soil Organic Matter, and CO₂ Uptake in Dry Grasslands. *Soil Biology & Biochemistry*, **43**, 1006-1013. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.01.017>
- [43] Wan, S., Norby, R.J., Ledford, J. and Weltzin, J.F. (2007) Responses of Soil Respiration to Elevated CO₂, Air Warming, and Changing Soil Water Availability in a Model Old-Field Grassland. *Global Change Biology*, **13**, 2411-2424. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01433.x>
- [44] Uchida, Y., Nishimura, S. and Akiyama, H. (2012) The Relationship of Water-Soluble Carbon and Hot-Water-Soluble Carbon with Soil Respiration in Agricultural Fields. *Agriculture Ecosystems & Environment*, **156**, 116-122. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.05.012>
- [45] Zheng, F. and Wang, B. (2013) Soil Erosion in the Loess Plateau region of China. In: Tsunekawa, A., Liu, G., Yamana, N. and Du, S., Eds., *Restoration and Development of the Degraded Loess Plateau, China*, Springer, Tokyo, 77-92. https://doi.org/10.1007/978-4-431-54481-4_6
- [46] Zhang, J.T. and Dong, Y. (2010) Factors Affecting Species Diversity of Plant Communities and the Restoration Process in the Loess Area of China. *Ecological Engineering*, **36**, 345-350. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.04.001>
- [47] Pinggera, J., Geisseler, D., Merbach, I., Georg Joergensen, R. and Ludwig, B. (2015) Effect of Substrate Quality on the N Uptake Routes of Soil Microorganisms in an Incubation Experiment. *European Journal of Soil Biology*, **69**, 17-23. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2015.04.002>
- [48] Pennanen, T., Caul, S., Daniell, T.J., Griffiths, B.S., Ritz, K. and Wheatley, R.E. (2004) Community-Level Responses of Metabolically-Active Soil Microorganisms to the Quantity and Quality of Substrate Inputs. *Soil Biology & Biochemistry*, **36**, 841-848. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.01.014>
- [49] Tong, D., Li, Z., Xiao, H., Nie, X., Huang, J., Liu, C., *et al.* (2020) How Do Soil Microbes Exert Impact on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity? *Authorea*. <https://doi.org/10.22541/au.158930918.80706788>
- [50] Tian, X.P., Wang, L., Hou, Y.H., Wang, H., Tsang, Y.F. and Wu, J. (2019) Responses of Soil Microbial Community Structure and Activity to Incorporation of Straws and Straw Biochars and Their Effects on Soil Respiration and Soil Organic Carbon Turnover. *Pedosphere*, **29**, 492-503. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(19\)60813-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(19)60813-1)
- [51] Shi, P., Qin, Y., Liu, Q., Zhu, T.T., Li, Z., Li, P., *et al.* (2019) Soil Respiration and Response of Carbon Source Changes to Vegetation Restoration in the Loess Plateau, China. *Science of the Total Environment*, **707**, Article ID: 135507. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135507>
- [52] Zhang, Y.J., Zou, J.L., Meng, D.L., Dang, S.N., Zhou, J.H., Osborne, B., *et al.* (2020) Effect of Soil Microorganisms and Labile C Availability on Soil Respiration in Response to Litter Inputs in Forest Ecosystems: A Meta-Analysis. *Ecology and Evolution*, **10**, 13602-13612. <https://doi.org/10.1002/ece3.6965>
- [53] Wang, Q., Zhao, X.C., Chen, L.C., Yang, Q., Chen, S. and Zhang, W. (2019) Global Synthesis of Temperature Sensitivity of Soil Organic Carbon Decomposition: Latitudinal Patterns and Mechanisms. *Functional Ecology*, **33**, 514-523. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13256>
- [54] Tian, Q., Wang, D., Tang, Y., Li, Y., Wang, M., Liao, C., *et al.* (2019) Topographic Controls on the Variability of Soil Respiration in a Humid Subtropical Forest. *Biogeochemistry*, **145**, 177-192. <https://doi.org/10.1007/s10533-019-00598-x>
- [55] Roychand, P. (2017) Addition of Clay to Sand-Effect of Clay Concentration, Water Content and Bulk Density on Soil Respiration. *Agrochimica-Pisa*, **61**, 1. <https://doi.org/10.12871/0021857201711>
- [56] Ji, L., Chen, Y., Wu, Y., Shi, P., She, J. and Zhou, P. (2012) Temporal-Spatial Variation and Controls of Soil Respiration in Different Primary Succession Stages on Glacier Forehead in Gongga Mountain, China. *PLoS ONE*, **7**, e42354. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0042354>