

土壤呼吸的主要影响因素研究进展

孙赫奕, 王庆贵*

黑龙江大学现代农业与生态环境学院, 黑龙江 哈尔滨
Email: *qgwang1970@163.com

收稿日期: 2021年3月19日; 录用日期: 2021年4月21日; 发布日期: 2021年4月28日

摘要

了解陆地与大气之间碳循环具有重要的作用, 土壤呼吸由于环境条件的不同可能会随之改变。本文根据国内外文献, 综述分析土壤呼吸的主要影响因素, 这对于研究陆地生态系统碳通量的变化有所帮助, 并对该领域研究前景进行展望。

关键词

土壤呼吸, 生物因子, 非生物因子

The Main Influencing Factors of Soil Respiration: A Review

Heyi Sun, Qinggui Wang*

College of Modern Agriculture and Ecological Environment, Heilongjiang University, Harbin Heilongjiang
Email: *qgwang1970@163.com

Received: Mar. 19th, 2021; accepted: Apr. 21st, 2021; published: Apr. 28th, 2021

Abstract

Understanding the exchange of CO₂ between terrestrial ecosystems and the atmosphere is critical. Soil respiration is likely to change due to different environmental conditions. Therefore, based on domestic and foreign literature, this paper will focus on exploring the main factors affecting soil respiration, which is conducive to the study of carbon flux changes in terrestrial ecosystems, and on this basis, the research prospect in this field is prospected.

Keywords

Soil Respiration, Biotic Factor, Abiotic Factor

*通讯作者。



1. 引言

了解陆地和大气之间 CO_2 的交换有着至关重要的作用, 这是由于陆地生态系统吸收了大约三分之一的化石燃料燃烧和人类活动产生的 CO_2 排放量[1]。而土壤呼吸是继光合作用后全球碳循环中第二大通量[2]。土壤呼吸不仅占生态系统呼吸总量的 80%, 并且在全球碳循环、生物多样性保护和水土资源保护中发挥关键作用[3] [4] [5] [6]。土壤 CO_2 排放量的增加都有可能加剧大气 CO_2 的增加, 并对全球变暖产生影响[7]。由于时间与空间的变化, 土壤呼吸受到生物与非生物因素的影响也有所不同[8]。因此为了了解陆地生态系统的碳收支情况, 将在本文中明确土壤呼吸过程中的影响因素。

2. 影响土壤呼吸的非生物因子

2.1. 土壤温度

土壤温度作为影响土壤呼吸的主要非生物因子, 其变化会直接影响土壤呼吸的生物化学过程[9]。可利用线性函数、幂函数、指数函数和 Arrhenius 函数等研究土壤呼吸与土壤温度相关关系[10]。土壤温度一般影响植物本身、土壤微生物等因素而引起土壤呼吸的改变。Atkin 的研究发现, 在最适温度范围内, 随着土壤温度的增加, 根系呼吸也会随之增加, 超过最适温度后根系呼吸将会减弱[11] [12]。这是由于在适宜范围内温度促进了根系的生长、营养物质的输送及植物根系活性的增强, 但是当超过适宜温度, 根系的活性会减弱, 使得土壤呼吸减弱。Wang 在亚热带森林的红锥人工林土壤变暖实验中发现, 土壤温度增加促进了土壤异养呼吸, 异养呼吸对土壤变暖的响应随季节而变化, 在干冷季节比在湿暖季节更大。异养呼吸升高可能是由于温度升高和土壤变暖导致土壤湿度降低所致[13]。

Q_{10} 表征土壤呼吸对温度变化反应的敏感程度, 根据 Raich 和 Schlesinger 的研究显示它的变化范围一般为 1.3~3.3 之间[14], 温度变化会使土壤有机质分解速率产生影响, Q_{10} 值数值越大说明土壤有机质分解对温度变化越敏感。由于受到地理位置、环境因素的不同, 年平均温度、年平均降水、土壤性质等影响 Q_{10} 的因素也不相同, Q_{10} 也产生了不同的差异。Meyer 研究发现在温度高的地区比温度低的地区 Q_{10} 低[15], 总体上与温度呈现负相关。Yan 同样也发现在季节变化中冬季的 Q_{10} 比夏季的 Q_{10} 要高[16]。Li 发现根系活性显著增加了土壤呼吸的 Q_{10} , 特别是寒冷区域根系在草地和农田中的土壤呼吸 Q_{10} 显著增加, 而森林中土壤呼吸 Q_{10} 增加不显著, 并且还发现植物类型的差异也会对 Q_{10} 产生影响, 植物根系对温度的变化敏感程度不同都会影响着 Q_{10} 的变化[17]。从全球尺度上发现, 低纬度地区的 Q_{10} 低于高纬度地区的 Q_{10} [18]。也有研究发现土壤湿度小的地方比土壤湿度大的地方 Q_{10} 值高[19]。随着土壤深度的加深, Q_{10} 值也不断的增大[20]。 Q_{10} 的变化之大也就使得 Q_{10} 值的确定变得困难, 因此为确保实验的准确, 实验中应保证所测得的土壤深度一致。

2.2. 土壤湿度

土壤湿度是影响土壤呼吸的另一个关键非生物因子。为了明确两者之间的关系, 采用线性方程、二次方程等来探究分析[21]。当没超过最高土壤含水量时, 增加土壤湿度满足了植物所需水分, 可间接地促进土壤呼吸, 并且有利于土壤中气体的扩散。当超过最高土壤含水量时, 土壤孔隙中水分过多, 不利于气体的扩散, 生物的生长产生抑制作用[22]。土壤湿度对土壤呼吸的影响非常复杂, 受到地理位

置、植被等因素的影响可能导致土壤呼吸与土壤湿度的关系也存在差异。例如富利等人在荒漠-绿洲过渡区的研究中发现, 在荒漠梭梭林地和绿洲农田土壤发现土壤呼吸会随着土壤湿度的提高而增加, 而在人工杨树林中发现土壤湿度超过 6% 时土壤湿度对土壤呼吸呈现出负相关关系[23]。这是由于植被类型及植被覆盖情况等因素会影响土壤湿度对土壤呼吸的影响。Yang 在干旱地区实验中发现土壤呼吸与湿度呈现出正相关关系[24], 由于干旱导致含水量较少, 此时土壤湿度将代替温度成为主要的控制因子。此外, 测量深度的不同同样会导致土壤湿度与土壤呼吸之间产生差异, 例如甘镛易发现, 土壤湿度将随着土壤深度的变化而变化[25], 因此为准确了解土壤呼吸与湿度的关系, 在测量时应保证测量土壤深度保持一致。

2.3. 土壤理化性质

土壤理化性质包括土壤的物理状况与土壤的化学成分, 土壤的物理性质反映出土壤的颗粒组成, 研究发现, 土壤颗粒组成粗糙的土壤肥力和含水量比组成细致的低, 此外还会影响着土壤中根系和微生物 O_2 的获取, 并影响着生物呼吸产生的 CO_2 [26], 因此土壤质地会通过根系和微生物间接地影响着土壤呼吸。

土壤的化学成分中, 土壤有机质是土壤一个重要指标, 它在微生物分解释放 CO_2 过程中起到一定作用。随着土壤有机质的增减, 植物的根系、土壤微生物的活性都随之变化, 导致土壤呼吸也随之变化[27]。

土壤氮含量是土壤中的另一个重要指标, 植物生长过程中的光合作用和微生物参与分解凋落物的过程中都会受到氮的影响。Sinsabaugh 的实验发现, 凋落物分解前期, 可利用性氮的增加, 会加快凋落物的分解从而影响微生物呼吸, 而凋落物分解后期, 植物中的纤维素的分解会受到氮的抑制, 使得微生物呼吸减弱[28]。Grandy 发现过多的氮增加也会降低土壤中的氧化酶的活性, 从而抑制单宁及其衍生物的分解[29]。在全球 36 个氮沉降实验中发现, 外源添加氮到土壤会使土壤的异养呼吸降低, 并随着外源氮的增加而降低的更多, 间接使得土壤呼吸降低[30]。除此之外, 氮的添加还会促进植物产生有机质, 使得土壤呼吸增加, 但是当达到土壤氮饱和的时候, 土壤呼吸会受到抑制。

pH 会间接影响土壤呼吸, 这是由于土壤中微生物酶的多样性会受到 pH 的影响。当 pH 值过低时, 土壤呼吸也随着微生物的活性降低而减少, 当 pH 接近 7 时土壤呼吸随着 pH 值的增加而增加。张俊丽的研究发现, 深松耕、旋耕和翻耕处理中的 pH 变化范围为 7.67 到 7.83, 土壤呼吸与 pH 呈现负相关(相关系数的变化范围为-0.1 到-0.42) [31], 而 Garcia 发现 pH 与土壤呼吸无关[32]。因此, 根据实验地点不同 pH 与土壤呼吸的关系也不相同。

3. 影响土壤呼吸的生物因子

3.1. 植被类型

植物的活动影响着土壤呼吸, 由于所在区域植被的类型不同, 生态环境因子与植物根、叶的生长速率和周转方式也各不相同, 土壤呼吸的强弱也随之改变[33]。刘宝等人对同一区域的研究发现, 针叶林的土壤呼吸速率低于阔叶林的土壤呼吸速率[34]。然而严俊霞等人发现, 在小范围内植被类型的改变没有影响到土壤呼吸[35]。不同植被类型的根系差异、凋落物的差异(不同凋落物覆盖地面产生土壤温度和湿度的差异)都会影响着土壤呼吸的变化, 不同植被类型还会通过环境与土壤的差异间接地影响着土壤呼吸。在全球范围内发现土壤呼吸速率的变化如下, 热带森林、温带森林和热带草原的最高, 其次是农田、温带草原和寒带森林, 而苔原的土壤呼吸速率最低[36]。这可能是由于, 森林类型比其他区域的根系生物量大并且分布比较广, 而根系呼吸在土壤呼吸中所占比例高, 这可能是森林生态系统土壤呼吸强度高于其他区域的原因。

3.2. 细根生物量

土壤呼吸的主要组成之一为根系呼吸, 受到地上光合作用和地下碳分配的影响, 此外死根的分解产生的底物通过对土壤理化性质产生变化从而影响着土壤呼吸[37]。Tang 在实验中发现自养呼吸与细根生物量有关[38]。根系呼吸在土壤呼吸占比很大, 由于地点不同, 根系呼吸所占土壤呼吸的比例也各不相同, 所占比例的变化范围为 10%~65% [39]。Raich 发现在苔原带根系呼吸占比为 50%~93% [40], Ohashi 发现温带森林根系呼吸占比为 40%~50% [41], Kucera 发现草地的根系呼吸占比为 17%~60% [42]。

3.3. 凋落物

凋落物是陆地生态系统中碳循环的一个重要组成部分, 凋落物通过直接作用和间接作用影响着土壤呼吸[43]。森林中凋落物分解产生的有机质将会改变土壤性质并使环境产生变化[44]。张彦军关于凋落物的 Meta 分析发现, 随着地上凋落物的分解, 土壤中的 C、N、P 发生变化, 从而影响了微生物和有机质, 间接使土壤呼吸产生改变[45]。凋落物的种类和质量等因素的不同会对土壤呼吸产生差异。在控制实验中发现去除或者增加凋落物会改变土壤呼吸, Wu 等在针叶林生态系统中发现凋落物会对土壤呼吸有促进作用[46], 但是 Han 等发现在沙丘-草甸过渡带的人工杨树林由于土壤含水量的变化, 凋落物的增加会使土壤呼吸降低[47]。因此凋落物对土壤呼吸的影响还需要进一步的研究。

3.4. 叶面积指数

叶面积指数是衡量植被覆盖度的一个指标, 它反映了植物生产力的状况, 植被覆盖又可以影响土壤的微气候[48]。王西洋利用细根、温度、湿度和叶面积指数可以解释土壤呼吸变化的 76.4%, 并且发现土壤呼吸与这三个指标呈现正相关关系[49]。竹万宽等人在桉树人工林当中发现, 土壤呼吸与叶面积指数呈现出相关极显著[50]。对草地的实验发现, 叶面积指数与土壤呼吸呈指数关系[51]。

4. 总结与展望

由于土壤呼吸是碳循环中的一个重要组成部分, 因此在未来研究中占据重要地位。通常影响因子之间交互作用共同影响着土壤呼吸, 因此明确关键的影响因子对了解土壤呼吸有着重要的作用。通过加强控制实验和不同环境因素对土壤呼吸之间关系的测定, 可以明确主要因子对土壤呼吸的影响。

根据现有研究成果, 未来应着重注意以下方面工作: 1) 由于不同情况下生物环境因子与非生物环境因子对土壤呼吸影响不同, 因此加强对生物环境因子与非生物环境因子的测定, 了解不同实验地点生物环境因子与非生物环境因子和土壤呼吸的关系。2) 了解不同季节土壤呼吸的测定, 由于不同植物本身发育、生理代谢活动强度等因素对土壤呼吸的影响不同, 因此对不同群落的不同物候期土壤呼吸需要测定。3) 由于土壤呼吸实验地点多位于温带地区, 寒带和热带地区数据较少, 因此了解全球尺度上的土壤呼吸的响应与适应对全球碳循环有着重要的意义。

参考文献

- [1] Schimel, D.S., House, J.I., Hibbard, K.A., Bousquet, P., Ciais, P., Peylin, P., *et al.* (2001) Recent Patterns and Mechanisms of Carbon Exchange by Terrestrial Ecosystems. *Nature*, **414**, 169-172. <https://doi.org/10.1038/35102500>
- [2] Wang, Q., Yu, Y., He, T. and Wang, Y. (2017) Aboveground and Belowground Litter Have Equal Contributions to Soil CO₂ Emission: An Evidence from a 4-Year Measurement in a Subtropical Forest. *Plant and Soil*, **421**, 7-17. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3422-7>
- [3] Zirbel, C.R., Bassett, T., Grman, E. and Brudvig, L.A. (2017) Plant Functional Traits and Environmental conditions Shape Community Assembly and Ecosystem Functioning during Restoration. *Journal of Applied Ecology*, **54**, 1070-1079. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12885>

- [4] Thompson, M.E. and Donnelly, M.A. (2018) Effects of Secondary Forest Succession on Amphibians and Reptiles: A Review and Meta-Analysis. *Copeia*, **106**, 10-19. <https://doi.org/10.1643/CH-17-654>
- [5] Deng, Y., Cai, C., Xia, D., Ding, S. and Chen, J. (2017) Fractal Features of Soil Particle Size Distribution under Different Land-Use Patterns in the Alluvial Fans of Collapsing Gullies in the Hilly Granitic Region of Southern China. *PLoS ONE*, **12**, e0173555. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173555>
- [6] Zhou, G. and Yan, J. (2000) Theories and Practice of Compensation for Ecological Forests. China Meteorological Press, Beijing, 29.
- [7] Adachi, M., Ito, A., Yonemura, S. and Takeuchi, W. (2017) Estimation of Global Soil Respiration by Accounting for Land-Use Changes Derived from Remote Sensing Data. *Journal of Environmental Management*, **200**, 97-104. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.076>
- [8] Yan, M., Zhou, G. and Zhang, X. (2014) Effects of Irrigation on the Soil CO₂ Efflux from Different Poplar Clone Plantations in Arid Northwest China. *Plant and Soil*, **375**, 89-97. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1944-1>
- [9] Chen, S., Wang, J., Zhang, T. and Hu, Z. (2020) Climatic, Soil, and Vegetation Controls of the Temperature Sensitivity (Q₁₀) of Soil Respiration across Terrestrial Biomes. *Global Ecology and Conservation*, **22**, e00955.
- [10] 张娇, 郝龙飞, 王庆成, 付娇娇, 朱凯月. 模拟氮沉降对落叶松人工林土壤呼吸的影响[J]. 植物研究, 2016, 36(4): 596-604.
- [11] Atkin, O.K., Edwards, E.J. and Loveys, B.R. (2008) Response of Root Respiration to Changes in Temperature and Its Relevance to Global Warming. *New Phytologist*, **147**, 141-154. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00683.x>
- [12] Wang, Y., Mao, Z., Bakker, M.R., Kim, J.H., Brancheriau, L., Buatois, B., et al. (2018) Linking Conifer Root Growth and Production to Soil Temperature and Carbon Supply in Temperate Forests. *Plant and Soil*, **426**, 33-50. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3596-7>
- [13] Wang, H., Liu, S., Wang, J., Li, D., Shi, Z., Liu, Y., et al. (2017) Contrasting Responses of Heterotrophic and Root-Dependent Respiration to Soil Warming in a Subtropical Plantation. *Agricultural and Forest Meteorology*, **247**, 221-228.
- [14] Raich, J.W. and Schlesinger, W.H. (1992) The Global Carbon Dioxide Flux in Soil Respiration and Its Relationship to Vegetation and Climate. *Tellus B*, **44**, 81-99. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v44i2.15428>
- [15] Meyer, N., Welp, G. and Amelung, W. (2018) The Temperature Sensitivity (Q₁₀) of Soil Respiration: Controlling Factors and Spatial Prediction at Regional Scale Based on Environmental Soil Classes. *Global Biogeochemical Cycles*, **32**, 306-323. <https://doi.org/10.1002/2017GB005644>
- [16] Yan, T., Song, H., Wang, Z., Teramoto, M., Wang, J., Liang, N., et al. (2019) Temperature Sensitivity of Soil Respiration across Multiple Time Scales in a Temperate Plantation Forest. *Science of the Total Environment*, **688**, 479-485.
- [17] Li, J., Pei, J., Pendall, E., Fang, C. 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.
- [18] Li, J., Pendall, E., Dijkstra, F.A. and Nie, M. (2020) Root Effects on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration Depend on Climatic Condition and Ecosystem Type. *Soil and Tillage Research*, **199**, Article ID: 104574.
- [19] Zhang, Q., Phillips, R.P., Manzoni, S., Scott, R., Oishi, A.C., Finzi, A., et al. (2018) Changes in Photosynthesis and Soil Moisture Drive the Seasonal Soil Respiration-Temperature Hysteresis Relationship. *Agricultural and Forest Meteorology*, **259**, 184-195.
- [20] Janssens, I.A., Pilegaard, K.I.M. (2003) Large Seasonal Changes in Q₁₀ of Soil Respiration in a Beech Forest. *Global Change Biology*, **9**, 911-918. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00636.x>
- [21] Schlentner, R.E. and Cleve, K.V. (1985) Relationships between CO₂ Evolution from Soil, Substrate Temperature, and Substrate Moisture in Four Mature Forest Types in Interior Alaska. *Canadian Journal of Forest Research*, **15**, 97-106. <https://doi.org/10.1139/x85-018>
- [22] Hawkes, C.V., Waring, B.G., Rocca, J.D. and Kivlin, S.N. (2017) Historical Climate Controls Soil Respiration Responses to Current Soil Moisture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **114**, 6322-6327. <https://doi.org/10.1073/pnas.1620811114>
- [23] 富利, 张勇勇, 赵文智. 荒漠-绿洲区不同土地利用类型土壤呼吸对温湿度的响应[J]. 生态学杂志, 2018, 37(9): 2690-2697.
- [24] Yang, X.D., Ali, A., Xu, Y.L., Jiang, L.M. and Lv, G.H. (2019) Soil Moisture and Salinity as Main Drivers of Soil Respiration Across Natural Xeromorphic Vegetation and Agricultural Lands in an Arid Desert Region. *Catena*, **177**, 126-133.
- [25] 甘镠易. 西藏纳木错地区土壤湿度变化特征分析[J]. 自然科学, 2020, 8(4): 282-290.
- [26] Huuskonen, S., Domisch, T., Finér, L., Hantula, J., Hynynen, J., Matala, J., et al. (2020) What Is the Potential for Re-

- placing Monocultures with Mixed-Species Stands to Enhance Ecosystem Services in Boreal Forests in Fennoscandia? *Forest Ecology and Management*, **479**, Article ID: 118558.
- [27] 吴瑞娟, 王迎春, 朱平, 贺美, 黄诚诚, 王立刚, 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.
- [28] Sinsabaugh, R.L., Carreiro, M.M. and Repert, D.A. (2002) Allocation of Extracellular Enzymatic Activity in Relation to Litter Composition, N Deposition, and Mass Loss. *Biogeochemistry*, **60**, 1-24. <https://doi.org/10.1023/A:1016541114786>
- [29] Grandy, A.S., Sinsabaugh, R.L., Neff, J.C., Stursova, M. and Zak, D.R. (2008) Nitrogen Deposition Effects on Soil Organic Matter Chemistry Are Linked to Variation in Enzymes, Ecosystems and Size Fractions. *Biogeochemistry*, **91**, 37-49. <https://doi.org/10.1007/s10533-008-9257-9>
- [30] Janssens, I.A., Dieleman, W., Luysaert, S., Subke, J.-A., Reichstein, M., Ceulemans, R., *et al.* (2010) Reduction of Forest Soil Respiration in Response to Nitrogen Deposition. *Nature Geoscience*, **3**, 315-322. <https://doi.org/10.1038/ngeo844>
- [31] 张俊丽, Sikander, K.T., 温晓霞, 陈月星, 高明博, 刘杨, 等. 不同耕作方式下旱作玉米田土壤呼吸及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2012, 28 (18): 192-199.
- [32] Garcia, C., Hernandez, T. and Costa, F. (1994) Microbial Activity in Soils under Mediterranean Environmental Conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, **26**, 1185-1191.
- [33] 李典鹏, 姚美思, 韩东亮, 王丽萍, 胡保安, 王宁宁, 等. 新疆达坂城盐湖不同植物群落土壤呼吸研究[J]. 土壤, 2017, 49(3): 621-629.
- [34] 刘宝, 王民煌, 余再鹏, 林思祖, 林开敏. 中亚热带天然林改造成人工林后土壤呼吸的变化特征[J]. 林业科学, 2019, 55(4): 1-12.
- [35] 严俊霞, 李洪建, 汤亿, 张义辉. 小尺度范围内植被类型对土壤呼吸的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(11): 3121-3129.
- [36] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(7): 778-785.
- [37] 毕博远, 韩凤朋. 黄土高原不同种植年限紫花苜蓿根系分泌物 GC-MS 分析[J]. 草地学报, 2018, 26(3): 611-617.
- [38] Tang, X., Fan, S., Zhang, W., Gao, S., Chen, G. and Shi, L. (2019) Global Variability in Belowground Autotrophic Respiration in Terrestrial Ecosystems. *Earth System Science Data*, **11**, 1839-1852. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1839-2019>
- [39] Tang, X., Pei, X., Lei, N., Luo, X., Liu, L., Shi, L., *et al.* (2020) Global Patterns of Soil Autotrophic Respiration and Its Relation to Climate, Soil and Vegetation Characteristics. *Geoderma*, **369**, Article ID: 114339. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114339>
- [40] Raich, J.W. and Tufekciogul, A. (2000) Vegetation and Soil Respiration: Correlations and Controls. *Biogeochemistry*, **48**, 71-90. <https://doi.org/10.1023/A:1006112000616>
- [41] Ohashi, M., Gyokusen, K. and Saito, A. (2000) Contribution of Root Respiration to Total Soil Respiration in a Japanese Cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) Artificial Forest. *Ecological Research*, **15**, 323-333. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1703.2000.00351.x>
- [42] Kucera, C.L. and Kirkham, D.R. (1971) Soil Respiration Studies in Tallgrass Prairie in Missouri. *Ecology*, **52**, 912-915. <https://doi.org/10.2307/1936043>
- [43] 胡佰策, 梁东, 于化成, 张雪莹. 吉林龙湾国家级自然保护区凋落物分解主场效应研究[J]. 吉林林业科技, 2018(5): 14-16, 19.
- [44] 吕富成, 王小丹. 凋落物对土壤呼吸的贡献研究进展[J]. 土壤, 2017, 49(2): 225-231.
- [45] 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.
- [46] Wu, J., Zhang, Q., Yang, F., lei, Y., Zhang, Q. and Cheng, X. (2017) Does Short-Term Litter Input Manipulation Affect Soil Respiration and Its Carbon-Isotopic Signature in a Coniferous Forest Ecosystem of Central China? *Applied Soil Ecology*, **113**: 45-53.
- [47] Han, C., Liu, T., Lu, X., Duan, L., Singh, V.P. and Ma, L. (2019) Effect of Litter on Soil Respiration in a Man-Made *Populus L.* Forest in a Dune-Meadow Transitional Region in China's Horqin sandy Land. *Ecological Engineering*, **127**: 276-284.
- [48] 王希群, 马履一, 贾忠奎, 徐程扬. 叶面积指数的研究和应用进展[J]. 生态学杂志, 2005(5): 537-541.
- [49] 王西洋. 抚育间伐对华北落叶松人工林土壤呼吸的影响研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2017.

-
- [50] 竹万宽, 陈少雄, Arnold, R., 王志超, 许宇星, 杜阿朋. 不同种桉树人工林土壤呼吸速率时空动态及其影响要素[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(3): 412-421.
- [51] 林力涛, 孙学凯, 雷倩, 于占源, 曾德慧. 光合速率与光合条件对沙质草地土壤呼吸的调控作用[J]. 生态学杂志, 2018, 37(7): 2107-2113.