

三峡库区消落带土地利用转变对土壤线虫群落的影响

徐泓智¹ 王可洪^{1,2*}

1 重庆三峡科技大学环境与化学工程学院

2 重庆三峡科技大学三峡库区环境生态重庆市野外科学观测站

DOI:10.32629/eep.v9i3.3113

[摘要] 消落带作为水陆交错带的碳循环热点区域,其地下生物群落对环境波动的响应是评估生态恢复功能的关键。为解析土地利用类型转变与水文节律对消落带土壤线虫的影响,本研究以三峡库区澎溪河消落带为对象,采用“空间代替时间”的方法系统探讨了水位变化与植被恢复下土壤线虫群落的演变规律。冗余分析发现颗粒有机碳(POC)、土壤总有机碳(SOC)和易氧化有机碳(LOC)是驱动线虫群落演变的关键环境因子。

[关键词] 三峡库区; 土壤线虫; 土壤团聚体; 有机碳组分

中图分类号: P463.23 文献标识码: A

Impacts of land-use change on soil nematode communities in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir Area

Hongzhi Xu¹ Kehong Wang^{1,2*}

1 College of Environmental and Chemical Engineering, Chongqing Sanxia University of Science and Technology

2 Chongqing Observation and Research Station of Environment and Ecology in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing Sanxia University of Science and Technology

[Abstract] As a critical ecotone between terrestrial and aquatic ecosystems, the water-level-fluctuation zone (WLFZ) serves as a biogeochemical hotspot for carbon cycling. The response of belowground biotic communities to environmental fluctuations is essential for evaluating the effectiveness of ecological restoration. To elucidate the impacts of land-use transitions and hydrological rhythms on soil nematodes, this study focused on the WLFZ of the Pengxi River in the Three Gorges Reservoir Area, utilizing a "space-for-time" substitution approach to systematically explore the successional patterns of nematode communities under varying water levels and vegetation restoration. Redundancy analysis (RDA) revealed that particulate organic carbon (POC), total soil organic carbon (SOC), and labile organic carbon (LOC) are the primary environmental factors driving the evolution of nematode communities.

[Key words] Three Gorges Reservoir, Soil nematodes, Soil aggregates, Organic carbon fractions

1 绪论

消落带作为陆地与水生生态系统的边缘地带,因其剧烈的物质交换与能量流动,成为流域碳循环的热点区域^[1]。

三峡水库运行形成的周期性反季节干湿循环,打破了土壤原有的化学稳态,使得该区域表现出生态功能脆弱及演替路径不确定等特征。在库区人地矛盾的背景下,农业开垦与战略性植被恢复工程并存,驱动了消落带生境的高度破碎化与空间异质性。土壤线虫作为土壤微食物网的关键组分,因其丰富的多样性、多样的营养层级及对环境变化的高度敏感性,常被视为指示土壤健康与生态系统演替的重要生物指标^[2]。现有研究多聚焦于消落带水文变化对植物群落或土壤理化性质的影响,而对于地下线虫群落如何响应“反季节淹没+土地利用转变”双重压力的系统研究仍较为匮乏。特别是从陆地农田演变为自然湿地,

以及人为干扰形成的退化湿地与人工干预的恢复湿地之间,线虫群落的演变规律及其对有机碳组分的响应机制尚不明确。

本研究以三峡库区腹地地带的澎溪河流域为研究对象,通过选取陆地农田、自然湿地、退化湿地及恢复湿地四种典型生境,采用“空间代替时间”的野外调查方法,探讨不同演替阶段及干扰背景下土壤线虫群落组成与功能结构的异质性,评估反季节水文节律与植被恢复对线虫生物量及代谢足迹的缓冲效应。定量解析颗粒有机碳、易氧化有机碳等关键碳组分对线虫群落演变的驱动贡献。研究结果旨在阐明消落带地下生物群落的演替逻辑,为三峡库区消落带的保护、恢复、综合管理以及生态系统服务功能的提升提供新思路。

2 材料与方法

2.1 研究区域: 研究区域选择三峡库区腹地地带的澎溪河流

域。该区域属于亚热带季风气候区,年平均气温18.6℃,年平均降雨量1101 mm。受三峡大坝水位调控影响,消落带水位在145 m至175 m之间周期性波动。

本研究选择四种具有代表性的生境类型以表征土地利用演替序列: 陆地农田: 代表三峡水库消落带蓄水前的土地利用状况,位于海拔175 m以上的非淹水区。自然湿地: 三峡水库蓄水后形成的新生境,具有周期性淹露特征。退化湿地: 当地居民在自然湿地内零散开垦的作物地块,农业种植侵占自然湿地后形成以农作物为主的斑块化格局,分布在自然湿地中。恢复湿地: 通过生态工程重建植被群落,一般具有乔、灌、草立体植被结构。自然湿地、退化湿地、恢复湿地的高程一致。在每个生境类型随机选择3块独立样地,间距>100 m。

2. 土壤线虫的分离、鉴定: 于2023年7月、7月和2024年7月,采集表层(0-10 cm)土壤样品。土壤线虫的分离采用蔗糖梯度离心法从100 g鲜土中提取线虫。分离出的土壤线虫标本在显微镜下进行种类鉴定并计数,所有土壤线虫均被鉴定到属级水平,分类鉴定参考《De nematoden van Nederland》^[3],根据土壤线虫食性将其划分为食细菌线虫、食真菌线虫、植物寄生线虫、捕食性线虫、杂食性线虫5种功能类群。计算线虫个体数、属数、生物量、代谢足迹以及多样性指数(Shannon指数)、功能指数(NCR、EI、SI)。其中生物量与代谢足迹基于该属线虫的平均数据计算得出。

2. 3环境指标的取样与测定: 本实验中,采用电位法测定土壤pH,称量法测定土壤含水率(SWT),重铬酸钾氧化分光光度法测定土壤有机碳(SOC),碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定土壤总氮(TN),高锰酸钾氧化法测定易氧化有机碳(LOC),差值法计算非活性有机碳(NLOC),湿筛-重铬酸钾氧化-分光光度法测定颗粒有机碳(POC)和矿物结合有机碳(MAOC),干筛法测定土壤团聚体粒径比例。

2. 4数据分析: 采用R 4. 4. 1软件进行数据统计分析。利用嵌套设计的置换多元方差分析土地利用对土壤线虫群落组成的影响。针对线虫个体数、生物量、代谢足迹及生态指数等指标,采用Kruskal-Wallis检验配合Dunn's事后多重比较(经BH法校正p值)分析不同土地类型间的显著性差异。基于去趋势对应分析(DCA)结果(最大轴长为2. 2),选用冗余分析(RDA)及蒙特卡洛置换检验(显著性经Bonferroni法校正)定量解析环境因子对群落变异的解释贡献。

3 结果

3. 1采样点环境特征: 四种土地类型的土壤有机碳结构表现出显著差异,其中自然湿地和恢复湿地的土壤总有机碳含量显著高于陆地农田和退化湿地。具体而言,自然湿地的矿物结合有机碳和颗粒态有机碳含量最高,而恢复湿地的非活性有机碳含量显著高于其他土地利用类型。在植被特征方面,恢复湿地的植物种类数与植物高度均处于最高水平,自然湿地与恢复湿地的植物盖度也维持在较高水平。多样地的土壤含水率、土壤总氮、土壤pH以及大团聚体、中团聚体和微团聚体的分布比例在统计学上均未表现出显著的组间差异。

3. 2不同土地类型土壤线虫群落组成: 研究共鉴定出土壤线

虫17185只,隶33科49属,其中Paraphelenchus、Macroposthonia和Helicotylenchus是所有土地类型最主要的优势属。置换多元方差分析证实土地利用方式显著重构了线虫的群落组成($F=3.18$, $p=0.001$),这种差异在陆地农田与自然湿地、恢复湿地之间尤为显著。在不同生境中,Macroposthonia在自然湿地中呈现出极高的多度占比,陆地农田则发育有特有的Mononchus与Prionchulus等捕食性类群,退化湿地的线虫属数在四种生境中最低,而恢复湿地通过生态工程重建了包含Laimydots和Pseudoaulolaimus等属在内的复杂群落结构。

3. 3不同土地类型土壤线虫群落结构: 土地利用类型对线虫的个体数、生物量、代谢足迹及富集指数(EI)产生了显著的驱动作用($p<0.05$)。恢复湿地维持了所有土地类型最高的线虫生物量与代谢足迹,且个体数显著高于退化湿地,体现了植被恢复对地下食物网承载力的提升作用。退化湿地的shanno多样性指数、富集指数及结构指数均处于最低水平,反映出频繁的人为农业扰动导致了土壤食物网的功能性退化。时间动态监测显示,所有生境的线虫个体数与生物量均在7月达到峰值,而恢复湿地在临近蓄水期的9月仍能凭借良好的地表覆盖维持较高的群落稳定性。

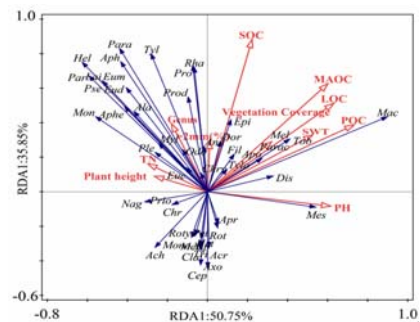


图1 土壤线虫群落和环境因素的RDA排序

3. 4功能群组成: 在三峡库区消落带土壤线虫群落中,植物寄生线虫为最优势的功能类群(占45.40%),其次为真菌食性线虫(26.34%)、细菌食性线虫(12.60%)和杂食性线虫(11.80%),而捕食性线虫所占比例最低(3.86%)。各功能类群的优势属表现为植物寄生线虫主要由Macroposthonia、Helicotylenchus和Paratylenchus组成,真菌食性线虫以Paraphelenchus为绝对主导,细菌食性线虫的核心属包括Protorhabditis和Plectus,而杂食性线虫则以Prodorylaimus为主。时空动态分析表明,自然湿地的植物寄生线虫相对多度在5月和7月处于最高水平,而退化湿地在此时期的植物寄生类群显著减少,并维持了较高比例的杂食性线虫以适应干扰生境。此外,所有土地类型的捕食性线虫多度在9月均表现出显著下降趋势,体现了高营养级类群对消落带复杂环境波动的高度敏感性。

3. 5土壤线虫与环境因素的关系: 冗余分析结果表明(图1),所选环境因子共同解释了线虫群落受约束变异信息的86.6%(前两轴累计)。颗粒态有机碳、土壤总有机碳和易氧化有机碳被识别为驱动线虫群落演变的显著环境因子($p<0.05$),其单独解释量分别为31.3%、30.7%和11.1%。

4 讨论

4.1 土地利用转变对土壤线虫群落组成与空间异质性的重塑: 土地利用方式的转变对三峡水库消落带土壤线虫群落产生了显著的环境过滤效应。原本受人为耕作影响的陆地农田在演替为受周期性水文扰动的自然湿地后, 原有陆生作物消亡导致的生境剧变促使线虫群落发生根本性重组, 其中Macroposthonia因能高效利用消落带草本植物发达的须根系统而跃升为绝对优势类群^[4]。受农业干扰形成的退化湿地由于地表植被单一及土壤侵蚀加剧, 导致线虫食物网向低营养级和广谱食性的杂食性类群退化, 体现了系统在压力环境下的被动适应^[5,6]。植被恢复工程则通过重建高度异质性的空间生境与多样化的凋落物输入, 有效降低了种群间的竞争压力, 使恢复湿地的群落组成与稳定性得以显著提升, 验证了消落带地下生物群落演变中自下而上的调节机制^[7,8]。

4.2 反季节水位变化与季节节律对线虫种群动态的协同驱动: 时间因子与反季节水文节律协同驱动了消落带土壤线虫的种群动态, 呈现出明显的资源脉冲响应。在7月的落干盛期, 消落带面临的高温高湿环境加速了水位降低后残留植物残体的腐解, 丰富的有机碎屑诱发了土壤细菌与真菌的激增, 从而为以微生物为食的线虫提供了充足的食物来源, 促使个体数与生物量达到年度峰值^[9]。进入9月临近蓄水期后, 尽管资源输入减少且水分开始亏缺, 导致退化湿地等生境的线虫属数发生显著下跌, 但恢复湿地凭借其乔、灌、草复合冠层的遮阴保水效应, 显著缓冲了极端气候与水位波动对地下生物群落的冲击。

4.3 植被恢复对土壤线虫生物量与代谢足迹的促进机制: 消落带的植被恢复不仅通过植物根系加固土壤以减少侵蚀, 更通过重构地下微食物网显著强化了生态系统的碳代谢与存储功能。在消落带生态系统中, 土壤线虫的生物量代表了该营养级所固定和储存的现存碳库, 而代谢足迹则是基于线虫体型和数量计算出的用于呼吸和生产的碳通量, 直接反映了线虫在调节土壤碳循环中的活跃程度^[10-12]。研究结果显示, 恢复湿地的土壤线虫生物量和代谢足迹在整个观测期间均稳定保持在最高水平, 显著优于退化湿地, 说明从消落带农田向恢复湿地的转变极大地扩充了地下生态系统的碳承载力。恢复湿地通过提供多样化的枯枝落叶层和纵横交错的根系网络, 为线虫创造了丰富的碳源补给与微观栖息空间^[13-14], 这种适宜的环境条件共同促进了土壤线虫高生物量的积累与旺盛的碳代谢过程, 从而有效提升了三峡水库消落带在剧烈水文波动下的长效固碳潜力。

[参考文献]

[1] Abriol G, Martinez J-M, Artigas L F, Moreira-Turcq P, Benedetto M F, Vidal L, Meziane T, Kim J-H, Bernardes M C, Savoye N. Amazon River carbon dioxide outgassing fuelled by wetlands [J]. NATURE, 2014, 505(7483): 395-8.

[2] Makeleni S, Manyevere A, Mashamaite C V, Ramatsitsi N. Soilborne nematodes as bioindicators of soil health in cropping systems: a systematic review [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2025, 71(1): 1-21.

[3] Bongers A M T. De nematoden van Nederland [J]. Pirota School 1 Bibliotheek Uitgave Knv Nr, 1988, (1988).

[4] Magnusson C. Nematodes as plant pathogens [M]. Plant pathology and plant diseases. CABI Wallingford UK, 2020: 132-63.

[5] Domínguez-Begines J, De Deyn G B, García L V, Eisenhauer N, Gómez-Aparicio L. Cascading spatial and trophic impacts of oak decline on the soil food web [J]. JOURNAL OF ECOLOGY, 2019, 107(3): 1199-214.

[6] Zhou Z, Krashevskaya V, Widayastuti R, Scheu S, Potapov A. Tropical land use alters functional diversity of soil food webs and leads to monopolization of the detrital energy channel [J]. Elife, 2022, 11.

[7] Wei C, Zheng H, Li Q, Lü X, Yu Q, Zhang H, Chen Q, He N, Kardol P, Liang W, Han X. Nitrogen Addition Regulates Soil Nematode Community Composition through Ammonium Suppression [J]. PLOS ONE, 2012, 7(8): e43384.

[8] Eisenhauer N. Aboveground-belowground interactions drive the relationship between plant diversity and ecosystem function [J]. Research ideas and outcomes, 2018, 4: e23688.

[9] LeSage C, Merritt R, Wipfli M. Headwater riparian invertebrate communities associated with red alder and conifer wood and leaf litter in southeastern Alaska [J]. NORTHWEST SCIENCE, 2005, 79(4): 218.

[10] Ferris H. Form and function: Metabolic footprints of nematodes in the soil food web [J]. European Journal of Soil Biology, 2010, 46(2): 97-104.

[11] Luo J, Zhang X, Kou X, Xie H, Bao X, Mahamood M, Liang W. Effects of residue mulching amounts on metabolic footprints based on production and respiration of soil nematodes in a long-term no-tillage system [J]. Land Degradation & Development, 2021, 32(7): 2383-92.

[12] Ciobanu M, Popovici I, Zhao J, Stoica I-A. Patterns of relative magnitudes of soil energy channels and their relationships with environmental factors in different ecosystems in Romania [J]. SCIENTIFIC REPORTS, 2015, 5(1): 17606.

[13] Mukamparirwa V, Maliondo S M S, Mugunga C P. Synergistic and Antagonistic Effects of Mixed-Leaf Litter Decomposition on Nutrient Cycling [J]. Plants (Basel), 2024, 13(22).

[14] Mao B, Cui T, Su T, Xu Q, Lu F, Su H, Zhang J, Xiao S. Mixed-litter effects of fresh leaf semi-decomposed litter and fine root on soil enzyme activity and microbial community in an evergreen broadleaf karst forest in southwest China [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, Volume 13-2022.

作者简介:

徐泓智(1997--),男,蒙古族,内蒙古赤峰市敖汉旗人,硕士,研究文章:土壤生态过程与重建。