

# 三峡库区消落带土壤动物群落构建及其对碳循环的调控功能研究进展

朱轶华 梁姝 王可洪

重庆三峡学院 环境与化学工程学院

DOI:10.32629/eep.v9i2.3063

**[摘要]** 消落带是受周期性水文过程影响的脆弱生态系统,三峡大坝形成的独特反季节性水文节律,深刻塑造了消落带生物群落的结构与功能。土壤动物作为消落带内数量大、类群多样的生物类群,既是环境变化的敏感指示生物,也是生态系统物质循环与能量流动的关键驱动者。本文综述了消落带土壤动物多样性及其碳调控功能的研究进展,明确了当前研究的不足:缺乏对土壤动物群落的长期原位监测、对腐食性动物的碳调控机制等相关研究不足;并提出了未来的研究重点:建立固定样地对土壤动物群落开展长期连续监测,揭示关键功能类群的碳调控机制,尤其需关注三峡库区干湿交替生境下,腐食性关键类群土壤动物的生态适应策略。

**[关键词]** 消落带; 土壤动物; 群落多样性; 碳调控功能

**中图分类号:** Q142.3 **文献标识码:** A

## Cycling Research Progress of Soil Fauna Community Assembly and Carbon Cycle Regulation in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir Area

Yihua Zhu Shu Liang Kehong Wang

Chongqing Three Gorges University, College of Environment and Chemical Engineering

**[Abstract]** The riparian zone, a fragile ecosystem affected by periodic hydrology, has its biotic community structure and functions shaped by the anti-seasonal hydrological regime of the Three Gorges Dam. As a highly abundant and diverse biotic group in riparian zone, soil fauna are sensitive environmental bioindicators and key drivers of material cycling and energy flow. This paper reviews advances in riparian zone soil fauna diversity and their carbon regulation functions, identifies core research gaps (lack of long-term in-situ monitoring of soil fauna communities, insufficient research on carbon regulatory mechanisms of saprophagous fauna), and proposes future research priorities: establishing permanent plots for long-term continuous monitoring of soil fauna communities, and unraveling carbon regulation mechanisms of key functional groups, especially the ecological adaptation strategies of key saprophagous soil fauna under dry-wet alternation in the Three Gorges Reservoir.

**[Key words]** Riparian zone; Soil animals; Community diversity; Carbon regulation function

### 1 引言

消落带是典型的脆弱性生态系统,容易受到水利水电工程建设、土地利用变化、污染排放等高强度人为活动干扰<sup>[1,2]</sup>。三峡大坝是世界上最大的水利水电工程,水库水位在夏季(5-9月)145 m至冬季(10-4月)175 m之间波动,形成了面积达349.8 km<sup>2</sup>的消落带。三峡水库水文节律与自然河流截然相反。水库运行对自然水位波动的控制将对沿岸生态系统产生重大影响。消落带作为流域内生物地球化学循环的关键区域<sup>[3]</sup>,动态、多样的生物群落对其生态功能的发挥具有重要意义。

土壤动物是消落带土壤中数量最多、种类丰富、活动频繁的动物类群之一<sup>[4]</sup>,参与土壤的形成和发展,调节土壤的基本理化性质和结构,并在生态系统物质循环和能量流动中起着重要的作用。消落带栖息地是研究生物和生物地球化学的热点区域<sup>[5]</sup>,从生物多样性保护角度来看,三峡库区消落带栖息地的质量和生态组成具有重要意义。消落带土壤动物的动态可以反映退化和恢复过程中生态功能的变化,对生态系统功能也至关重要,因此,它们是维持生物多样性和生态平衡的指标。

土壤动物对土壤碳循环具有重要的调控作用已得到广泛证

实<sup>[6,7]</sup>, 土壤动物作为消落带的重要组成部分, 也是消落带土壤有机碳过程的重要参与者。对土壤碳循环的影响过程主要有凋落物分解过程、碳稳定性、植物和微生物调节以及土壤呼吸等过程<sup>[8]</sup>。其可以通过自身取食、消化、分泌、呼吸和扰动掘穴等活动直接或间接的对土壤碳循环产生影响。土壤动物在有机质分解中起着重要作用, 对植物残渣的稳定和周转具有重要意义<sup>[9]</sup>。

## 2 消落带土壤动物群落影响因素研究进展

### 2.1 水文情势

已有多项研究阐明消落带土壤动物群落组成、结构和分布格局, 揭示了水文情势(洪水)是消落带土壤动物群落的核心影响因素之一<sup>[10,11]</sup>。土壤动物为了适应消落带的环境, 有许多独特的生存策略。洪水通过有选择地淘汰不耐淹的物种以及周期性地破坏和重建栖息地斑块的方式触发了适应性迁移行为。大部分的物种会随水位上升向高地进行迁移, 水位下降后再次定殖<sup>[12]</sup>。Tanja Lessel等<sup>[10]</sup>对莱茵河的研究表明生态洪水可通过改变生境特性, 显著影响步甲和弹尾虫的时空分布及种群数量, 这种动态变化正是迁移行为对干扰的响应。

周期性洪水导致的水位变化是驱动消落带土壤动物群落形成与维持的核心动力。对受水坝调控的消落带区域中土壤群落组成的研究强调了环境筛选的作用, 尤其是洪水压力所施加的选择性压力<sup>[13,14]</sup>。改变的水文状况施加了严格的生理过滤机制, 排除了不耐受的物种, 从根本上重新构建了群落组成。由周期性的水文波动、资源可用性、栖息地异质性驱动的生态位分化, 塑造了土壤动物群落。Wang等<sup>[15]</sup>在三峡库区消落带的研究表明, 随着海拔降低、淹水时间延长, 土壤动物多度和类群丰富度显著下降, 群落组成趋于简化。这种筛选作用具有选择性, Xiao等<sup>[12]</sup>的研究表明周期性水位变化不仅为跳虫、步甲等喜湿且扩散能力强的土壤动物提供了关键栖息地, 还驱动其群落组成在时间和空间上产生显著分异, 呈现出沿高程梯度的带状分布。

### 2.2 植被与栖息地特征的影响

植被密度也是影响消落带土壤动物群落的重要因素。植被通过提供食物资源、调节微气候条件和影响凋落物输入, 直接或间接影响土壤动物的定殖与分布。当植物群落多样性减少且栖息地质量下降时, 会对各种土壤动物获取适宜资源和避难所的能力产生负面影响。植物入侵的影响在地栖土壤动物中比在水生土壤动物中更为明显。Yoshioka等<sup>[16]</sup>的研究揭示了具有特定栖息地的蛭螭物种受到垂枝爱草入侵的影响比那些具有更广适应性栖息地偏好的物种更为严重。

### 2.3 人类活动

人类活动对消落带土壤动物群落产生了不可忽视的影响。在受到河流工程影响的河段中, 土壤动物的数量和种类显著减少<sup>[17]</sup>, 这种减少是由于水生和陆生生态系统之间存在物理屏障所致, 扰乱了这两个生态系统之间能量和生物流动。大坝建设还会导致生物同质化, 造成土壤动物群落组成发生变化以及食物网内部相互作用的动态变化<sup>[18]</sup>。

## 3 消落带土壤动物碳调控功能研究进展

### 3.1 土壤动物对消落带碳过程的调控功能

土壤是地球最大的陆地碳库, 全球土壤碳储量约为2500 Pg, 是大气碳库的3.3倍、植被碳库的2.5倍。这一巨大碳汇每年吸收约三分之一的人为碳排放, 在减缓气候变化中发挥着不可替代的作用。消落带作为水陆生态系统的过渡区域, 由于周期性的水文节律, 使其土壤碳库具有独特的动态特征<sup>[19]</sup>。周期性淹水-出露过程显著影响消落带土壤有机碳的组成与稳定性, 研究表明水淹持续时间增加会提高微生物残体碳对土壤有机碳的贡献率, 同时降低植物源碳的贡献。而消落带土壤动物作为消落带生态系统的重要组成部分, 其群落组成和生态功能受到水文情势的调控, 并进而直接或间接地影响土壤碳的转化与稳定过程。

作为土壤生态系统中的“居民”, 土壤动物广泛参与了土壤有机碳分解、转化、固定和释放等过程<sup>[20-22]</sup>。土壤动物对土壤碳的形成具有多方面的影响, 一方面通过破碎凋落物、肠道消化等途径加速有机质分解, 调控有机碳动态<sup>[23]</sup>; 另一方面通过取食活动改变微生物群落结构与功能, 进而影响碳循环过程<sup>[24]</sup>。因此, 土壤动物群落组成的变化将直接或间接影响土壤碳动态, 不同功能类群通过差异化的生态策略对碳循环产生调控作用。土壤动物对土壤碳的调控并非单一方向, 土壤动物通过破碎作用增加底物表面积, 促进微生物定殖和酶分泌, 产生正激发效应(positive priming effect), 加速有机碳矿化。随着分解过程推进, 土壤动物通过肠道转化和排泄活动促进微生物残体与矿物结合, 形成稳定的矿物结合态有机碳。这种调控在消落带特殊的干湿交替环境尤为关键。

### 3.2 不同土壤动物的差异化调控功能

已有众多学者研究了土壤动物对植物和微生物调节、枯落物分解过程、土壤碳库、土壤呼吸的影响<sup>[4,25,26]</sup>。凋落物分解是陆地生态系统碳循环的关键环节, 土壤动物通过粉碎、取食、排泄等作用加速凋落物的分解速率, 其贡献率可达20%-40%<sup>[27]</sup>。这一调控功能也体现在不同的类群中, 原生动、线虫等主要通过捕食细菌和真菌, 间接影响有机质分解过程。螨虫、跳虫等则通过取食凋落物表面微生物, 调控微生物群落; 蚯蚓主要通过物理破碎增大微生物作用表面积。Kou等<sup>[28]</sup>揭示了土壤动物通过捕食-被捕食关系促进微生物残体积聚, 使32%的外源碳以稳定形式存在于土壤中, 体现了其在碳库稳定性维持中的关键作用。当这种调控强度达到临界阈值时, 甚至可将碳汇转变为碳源或反之。此外, Wu等<sup>[29]</sup>发现白蚁、蚂蚁和蚯蚓等生态系统工程师通过改善土壤结构、提升养分有效性, 显著影响植物碳输入和土壤呼吸。

目前关于土壤动物对土壤碳调控功能的研究, 主要集中在大型土壤动物, 特别是蚯蚓上<sup>[30]</sup>。由于蚯蚓活动能力强, 其掘穴、取食和排泄活动能够直观改变土壤物理结构、促进有机质混合, 并在短期内影响碳的稳定与矿化过程<sup>[31]</sup>。研究表明, 蚯蚓通过形成团聚体、促进矿物结合有机质形成以及改变微生物群

落结构,影响土壤碳动态。Bossuyt等<sup>[32]</sup>发现蚯蚓通过稳定团聚体显著增加土壤碳储量;Zhang等<sup>[21]</sup>揭示蚯蚓通过调控微生物群落功能促进碳固持。

#### 4 研究不足与展望

在新建的消落带生态系统中,土壤动物群落的长期动态仍然知之甚少,因为大多数研究依赖于受大坝影响和未受大坝影响的地点之间的空间比较,而不是在永久性观察地块内进行连续监测,缺乏对土壤动物群落长期连续演变轨迹的系统监测。在消落带这一特殊生境的研究之中,鼠妇和马陆等腐食性动物的碳调控机制研究尚有不足,特别是鼠妇、马陆等腐食性动物。针对不足,未来研究应从以下两个方面展开:(1)在典型消落带区域建立永久性观测样地,开展土壤动物群落组成、多样性和功能的年际连续跟踪调查。(2)深化关键功能类群的碳调控机理研究。

#### [参考文献]

[1]JARIF M,JIE Z,TAHIR M,et al. The impact of stress factors on riparian and drawdown zones degradation around dams and reservoirs[J].Land Degradation & Development,2022,33(12):2127-41.

[2]HUANG C, HUANG X, PENG C, et al. Land use/cover change in the Three Gorges Reservoir area, China: Reconciling the land use conflicts between development and protection[J].Catena,2019,175:388-99.

[3]NAIMAN R J,ROGERS K H. Large Animals and System-Level Characteristics in River Corridors:Implications for river management[J].BioScience,1997,47(8):521-9.

[4]ANGST G,POTAPOV A,JOLY F-X, et al. Conceptualizing soil fauna effects on labile and stabilized soil organic matter [J].Nature Communications,2024,15(1):5005.

[5]BATZER D P, WU H. Ecology of terrestrial arthropods in freshwater wetlands[J].Annual Review of Entomology,2020, 65(1):101-19.

[6]GUIDI C,FREY B,BRUNNER I,et al.Soil fauna drives vertical redistribution of soil organic carbon in a long-term irrigated dry pine forest[J].Global Change Biology,2022,28(9):3145-60.

[7]WYATT K H, MCCANN K S, ROBER A R, et al. Letter: Trophic interactions regulate peatland carbon cycling[J].Ecology Letters,2021,24(4):781-90.

[8]GARCÍA-PALACIOS P,MAESTRE F T,KATTGE J,et al. Climate and litter quality differently modulate the effects of soil fauna on litter decomposition across biomes[J].Ecology Letters,2013,16(8):1045-53.

[9]FROUZ J.Effects of soil macro- and mesofauna on litter decomposition and soil organic matter stabilization [J].Geoderma,2018,332:161-72.

[10]LESSEL T, MARX M, EISENBEIS G. Effects of ecological flooding on the temporal and spatial dynamics of carabid beetles (Coleoptera, Carabidae) and springtails (Collembola) in a polder habitat[J].ZooKeys,2011,100:421-46.

[11]GRUPPE A, KILG M, SCHOPF R. Restoration of a Danube floodplain forest: what happens to species richness of terrestrial beetles?[J].Restoration Ecology,2018,26(4):729-39.

[12]XIAO H, LI B, WILLISON J H M, et al. Habitat change and interspecific associations mediate the response of riparian ground-dwelling arthropod assemblages to flooding in the Three Gorges Reservoir [J]. Ecological Engineering, 2022, 185: 106812.

[13]LOOY K V, JOCHEMS H, VANACKER S, et al. Hydropeaking impact on a riparian ground beetle community[J].River Research and Applications,2007,23(2):223-33.

[14]LAMBEETS K,HENDRICKX F,VANACKER S, et al. Assemblage structure and conservation value of spiders and carabid beetles from restored lowland river banks[J].Biodiversity and Conservation,2008,17(13):3133.

[15]WANG K,YUAN X,WU S,et al. Effects of river damming on ground-dwelling arthropods along riparian-upland habitats [J].Ecohydrology,2019,12:e2073(3).

[16]SATO H, YOSHIOKA E, NUMATA H. Entrainment of the circatidal activity rhythm of the mangrove cricket, *Apterone mobius asahinai*, to periodic inundations [J]. Animal Behaviour, 2009,78(1):189-94.

[17]MUTSHEKWA T,CUTHBERT R N,WASSERMAN R J,et al. Macro invertebrate colonisation associated with native and invasive leaf litter decomposition[J].Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems,2020,(421).

[18]ARAUJO B R,PINTO Â P,PADIAL A A.Influence of landscape homogenization due to river damming on dragonfly (Odonata)community structuring in a subtropical forest in the southern Atlantic Forest[J].Ecohydrology,2022,15(3).

[19]LI K,SONG L, RAN Q, et al. Global meta-analysis reveals differential effects of climate and litter quality on soil fauna-mediated litter decomposition across size classes[J].Geoderma,2024,450:117042.

[20]JOHNSON D,KRSEK M,WELLINGTON E M H,et al.Soil Invertebrates Disrupt Carbon Flow Through Fungal Networks[J].Science,2005,309(5737):1047.

[21]ZHANG W, HENDRIX P F,DAME L E,et al.Earthworms facilitate carbon sequestration through unequal amplification of carbon stabilization compared with mineralization [J]. Nature Communications,2013,4(1):2576.

[22]ZHANG K, MALTAIS-LANDRY G, LIAO H-L. How soil biota

regulate C cycling and soil C pools in diversified crop rotations[J].*Soil Biology and Biochemistry*,2021,156:108219.

[23]WICKINGS K,GRANDY A S.The oribatid mite *Scheloribates moestus* (Acari: Oribatida) alters litter chemistry and nutrient cycling during decomposition[J].*Soil Biology and Biochemistry*,2011,43(2):351–8.

[24]BLOUIN M,ROBIN A,AMANS L,et al.A meta-analysis reveals earthworms as mutualists rather than predators of soil microorganisms[J].*Geoderma*,2025,455.

[25]GAVIN-CENTOL M P,SERRANO-CARNERO D, MONTERRAT M, et al.Drought impairs detritivore feeding activity more strongly in northern than in southern European latitudes[J].*Soil Biology and Biochemistry*,2024,199.

[26]LUBBERS I M,VAN GROENIGEN K J,FONTE S J,et al. Greenhouse-gas emissions from soils increased by earthworms [J].*Nature Climate Change*,2013,3(3):187–94.

[27]LIU Y, WANG L, HE R, et al. Higher soil fauna abundance accelerates litter carbon release across an alpine forest-tundra ecotone[J].*Scientific Reports*,2019,9(1):10561.

[28]KOU X,MORRIËN E,TIAN Y,et al.Exogenous carbon turnover

within the soil food web strengthens soil carbon sequestration through microbial necromass accumulation[J].*Global Change Biology*,2023,29(14):4069–80.

[29]WU D,DU E,EISENHAEUER N,et al.Global engineering effects of soil invertebrates on ecosystem functions [J]. *Nature*, 2025,640(8057):120–9.

[30]FILSER J, FABER J H, TIUNOV A V, et al. Soil fauna: key to new carbon models[J].*SOIL*,2016,2(4):565–82.

[31]IRSHAD S,FROUZ J.How the effect of earthworms on soil organic matter mineralization and stabilization is affected by litter quality and stage of soil development[J].*Biogeochemistry*,2024.

[32]BOSSUYT H, SIX J, HENDRIX P F. Interactive effects of functionally different earthworm species on aggregation and incorporation and decomposition of newly added residue carbon[J].*Geoderma*,2006,130(1):14–25.

#### 作者简介:

朱轶华(2000--),男,汉族,湖北黄冈人,硕士,研究方向:生物多样性。