

沼泽湿地恢复对土壤有机碳组分和碳通量的影响研究进展

赵千慧^{1,2} 张超凡² 马琼芳² 燕红² 宋丽文² 曲同宝¹

(1. 吉林农业大学 吉林 长春 130118; 2. 吉林省林业科学研究院 吉林 长春 30033)

摘要: 在人类活动和气候变化影响下, 湿地生态系统功能退化, 导致储存在湿地中的有机碳大量流失、温室气体排放增加, 沼泽湿地的生态恢复研究显得至关重要。湿地恢复模式主要包括人工恢复模式和自然恢复模式, 不同恢复模式对植物群落的物种组成和结构、土壤的温度、湿度、有机质含量等理化性质造成不同程度的影响, 因此对湿地生态系统物质循环和能量流动过程影响产生不同效果。目前, 在不同恢复模式下沼泽湿地的植被个体性状差异、土壤有机质变化特征、微生物群落结构变化特征方面已经取得了诸多重要成果。但是, 对于不同恢复模式下湿地土壤有机碳组分和碳通量的变化特征研究较少。本文阐述了不同湿地恢复模式与差异特征, 探讨湿地生态系统碳循环机制, 综述了不同恢复模式对沼泽湿地土壤有机碳组分、碳库稳定性及碳通量的影响, 为沼泽湿地恢复措施及管理提供科学依据。未来研究中有待加强的相关研究有以下几个方面: (1) 人为干扰是导致不同湿地恢复模式对土壤有机碳组分与碳通量特征差异的主要原因之一, 退耕还湿前的土地利用方式、耕种年限、不同管理措施都会使恢复湿地的碳通量具有高时空变异性的特点。(2) 湿地生态系统的退化使恢复湿地相比于天然湿地在固碳能力上显著降低。因此, 在气候变化和人类活动双重影响下, 在维持现有恢复湿地的碳储存库功能上提高其碳汇功能是亟待解决的科学问题。

关键词: 湿地恢复; 有机碳稳定性; 碳循环; 温室气体排放

Research progress on the effects of wetland restoration on soil organic carbon components and carbon fluxes

Abstract: Under the influence of human activities and climate change, the ecosystem of peat swamps has been rapidly degraded, resulting in a large loss of organic carbon stored in the wetlands and an increase in greenhouse gas emissions. Therefore, the ecological restoration research of swamps is of great importance. Wetland restoration modes mainly include artificial restoration mode and natural restoration mode. Different restoration modes have different effects on the species composition and structure of plant community, soil temperature, humidity, organic matter content and other physical and chemical properties, and therefore have different effects on the material circulation and energy flow process of wetland ecosystem. At present, many important results have been achieved in terms of vegetation individual character difference, soil organic matter change characteristics and microbial community structure change characteristics of wetland under different restoration modes. However, there are few studies on the changes of soil organic carbon components and carbon flux in peat bogs under different restoration modes. In this paper, the restoration strategies and different characteristics of different wetland restoration modes were described, the carbon cycle mechanism of wetland ecosystem was discussed, and the effects of different restoration modes on soil organic carbon components, carbon pool stability and carbon flux of swamp wetland were reviewed, providing scientific basis for restoration measures and management of swamp wetland. Future studies need to be strengthened in the following aspects: (1) Human disturbance is one of the main reasons for the differences in soil organic carbon components and carbon flux characteristics of different wetland restoration models. Under the influence of different management measures, the land use and cultivation years before returning farmland to wet land have the characteristics of high spatial and temporal variability. (2) The change of wetland ecosystem significantly reduces the carbon sequestration capacity of restored wetlands compared with natural wetlands. Therefore, under the dual influence of climate change and human activities, it is an urgent scientific issue to improve the carbon sink function while maintaining the existing carbon storage function of restored wetlands.

Key words: wetland restoration; organic carbon stabilization; carbon cycling; Greenhouse gas emissions

湿地虽然只占地球陆地面积的 4~6%，但湿地生态系统中土壤有机碳却能占世界土壤有机碳的 20~25%。沼泽湿地作为最主要的湿地类型之一，其对全球生态平衡与安全都产生深远的影响。由于湿地生态系统对环境因子响应敏感，细微的改变都会对大气 CO₂ 浓度造成很大的影响。在全球气候变暖的背景下，沼泽湿地生态系统碳循环过程的研究具有重要意义。

东北地区沼泽湿地退化显著，自 1958 年开始，东北地区大片沼泽地被开垦为耕地，1980~2015 年间，东北沼泽湿地面积减少了 30.81%。湿地退化和生态环境恶化，储存在湿地中的有机碳大量流失，增加了温室气体排放，加剧了全球增温的潜在风险，对全球气候产生不确定的影响。因此，沼泽湿地的生态恢复研究显得至关重要。

湿地恢复模式主要包括人工恢复模式和自然恢复模式，其中自然恢复是指由自然演替为主导的湿地恢复，而人工恢复是通过人为改善生态系统结构和理化形式干预自然系统恢复。不同恢复模式对植物群落的物种组成和结构、土壤的温度、湿度、有机质含量等理化性质造成不同程度的影响，因此对湿地生态系统物质循环和能量流动过程影响产生不同效果。目前，在不同恢复模式下沼泽湿地的植被个体性状差异、土壤有机质变化特征、微生物群落结构变化特征方面已经取得了诸多重要成果。但是，对于不同恢复模式下泥炭沼泽土壤有机碳组分和碳通量的变化特征研究较少。

在此基础上，本文阐述不同湿地恢复模式恢复策略与差异特征，探讨湿地生态系统碳循环机制，综述了不同恢复模式对沼泽湿地土壤有机碳组分、碳库稳定性及碳通量的影响，为沼泽湿地恢复措施及管理提供科学依据。

1 湿地恢复研究进展

湿地恢复的模式主要有自然恢复法、人工辅助法、工程技术法。自然恢复以减弱或移除导致湿地退化的干扰因子为主要措施，由自然演替主导湿地恢复。人工辅助恢复是通过改善生态系统结构和理化环境促进生态系统恢复，反馈影响生态系统的自我设计。人工辅助恢复又运用了湿地生物技术、湿地生态系统结构与功能恢复技术。湿地生物恢复技术主要包括物种选育、物种培植、物种引入、物种保护、种群调控、群落结构优化配置与组建等。生态系统结构与功能恢复技术是从一个更高的层面上着眼于恢复整个湿地生态系统的物质、能量与功能的特征与自我维持机制。工程技术法是直接调控目标种群、群落或重建生态系统，主要运用的是湿地生境恢复技术。湿地生境恢复的目标是通过各类技术手段，提高生境的异质性和稳定性，主要包括湿地基底恢复、湿地水状况恢复和湿地土壤恢复等。

不同的湿地类型，恢复的指标体系及相应策略亦不同，目前湿地恢复重建的研究主要集中在沼泽、湖泊、河流、滨海湿地。不同恢复模式主要通过影响土壤的水文条件、土壤结构、土壤营养条件、群落物种多样性和物种丰富度进而通过植物根系分泌物及凋落物土壤细菌的多样性和群落组成等因素影响土壤有机碳组分和有机碳库稳定性。其中，人为干扰还会影响水文条件进而影响种子库组成。

天然湿地总体上比恢复湿地有更多的物种，但是相比于人工草地植被类型单一，加之在恢复过程中，通常通过移除表层土壤，种子库中存活的种子大量的被移走。自然恢复湿地生态系统的物种多样性相比于人工恢复湿地更接近于天然植物群落，种子库的物种数和种子密度均高于人工恢复。自然恢复湿地可以在 10 年内发展出多样化的原生湿地植物群落，但与天然湿地仍然存在差异。自然恢复湿地与天然自然湿地不同其原因可能在于土壤的理化性质遭到了破坏而且破坏了原有植物的种子库，部分植物在这区域失去了重新生长发育的基础。另一方面农业耕作过程中，所兴修的沟渠等水利工程极大地改变了受损湿地的水文条件，植物对水位的变动的生态适应能力不同，水位的周期性变动会显著影响湖滨带植物群落的组成和分布。自然恢复的湿地通常具备更完善的生态功能及更丰富的生物多样性，但自然恢复措施对植物生长的限制严重。

人工恢复模式在一定程度上可以加快植物群落的恢复进程，增强植物群落稳定性。人工恢复模式在植

物恢复成效方面优于自然恢复模式,能提高植物群落高度、覆盖度和总生物量。人工恢复可以有效改善土壤质地,提高土壤养分含量,有助于有机碳的积累。土壤有机碳含量取决于有机物的输入与输出量,土壤有机碳的输入受植物本身(植物种类,枯落物和根系)的影响,输出量受到分解、侵蚀、各种生物和非生物条件(温度、湿度等)的影响。人工恢复模式下植物结构丰富,地上部和地下部凋落物量高,从而提高了土壤有机物的输入。

2 湿地有机碳组分研究进展

2.1 湿地土壤有机碳概念

土壤有机质(Soil Organic Matter, SOM)是由一系列存在于土壤中组成和结构不均一、主要成分为碳和氮的有机化合物所组成。土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)实为土壤有机质(soil organic matter, SOM)中所含的碳。在已有的研究中,国际上通常将微生物作用所形成的腐殖质、动植物残体和微生物体合称为土壤有机质,而土壤有机质中的碳被称为土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)。湿地土壤有机碳的稳定性对于其能否在湿地中被长期保存具有重要意义。土壤矿化潜力和周转时间是衡量土壤有机碳稳定的重要指标,其意义是代表土壤对碳的储存能力,稳定性高的不易通过矿化和淋溶等途径释放碳。随着对土壤碳库研究的深入,Parton等按照土壤有机质的分解速率将土壤有机碳库分为活性碳库、慢性碳库及惰性碳库等。

土壤活性有机碳虽然只占土壤有机碳总量的一小部分,但在维持土地生产力和反映土壤碳储量变化方面具有重要作用。土壤活性有机碳在国内受到普遍认可的定义是:土壤活性有机碳指在一定的时空条件下,受植物、微生物影响强烈、具有一定溶解性、在土壤中移动比较快、不稳定、易氧化、分解、易矿化,其形态,空间位置对植物、微生物来说活性比较高的那一部分土壤碳素。活性有机碳根据定义和测定方法主要包括溶解性有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)、易氧化有机碳(Easily Oxidized Carbon, EOC)、微生物量碳(Soil Microbial Biomass Carbon, MBC)、轻组有机碳(Light Fraction Organic Carbon, LFOC)等。

2.2 不同恢复模式对湿地土壤有机碳组分及碳库稳定性的影响

DOC是指在用水、稀盐等提取剂提取后,用0.45 μm孔径滤膜过滤出来的有机碳,具有较高的微生物有效性。DOC主要来源于近期枯枝落叶等凋落物、根系分泌物、土壤有机质的水解以及土壤微生物的代谢产物等。它既是土壤生物化学过程的产物,又是土壤微生物生长和分解有机质的重要能源,且对土壤环境的变化敏感。在特定的空间范围内,DOC极易受到外界环境变化的影响,植物和微生物作用会显著影响土壤中DOC的数量和质量,其在土壤中具有极强的流动性,DOC也是土壤碳迁移和淋失的主要形式。土壤DOC含量的影响因素主要包括凋落物的数量和组成、分解者群落等生物因素,还有土壤pH、环境温度、土壤水分及土地利用方式等非生物因素,而土壤中的DOC输入与输出之间的平衡是决定其含量的关键。

MBC是指土壤中体积<5000 μm³活的和死的微生物(细菌、真菌、藻类)和土壤微动物体内所含的碳的总和。MBC是土壤有机质中最为活跃最易变化的组分。MBC作为土壤有机质和土壤养分转化的动力因子,参与有机质的分解、腐殖质的形成、养分的转化和循环等生化过程。MBC是土壤微生物生物量的主要表达,是控制生态系统中碳和其他养分流动的关键。MBC也受到人为活动影响,其中施肥对土壤中MBC影响极为显著,这与施肥量、肥料类型和配比相关。蔡华研究表明植被恢复引起土壤微生物生物量、多样性和活性改变,进而驱动土壤微生物“碳泵”,对MBC产生影响。黄卫丽指出土壤表层和根系凋落物产量,为微生物提供有机碳源和较好的水热条件,刺激土壤微生物活性,使其活动和繁殖相对旺盛,MBC所占比例随恢复演替年限延长逐渐增加。Song等认为湿地恢复减少了土壤扰动,增加了凋落物输入,促进了土壤微生物的发育。较高的土壤有机质水平可能有利于微生物种群的生长,并导致更大的微生物生物量。

SOC的主要来源是地表的植被覆盖、草本生物量和多样性、地下根系分泌物和细根的周转碎屑。黄郡

指出枯落物分解对土壤有机碳的增加呈正效应其分解的有机质通过淋溶作用进入土壤,土壤中的碳也会在微生物的矿化作用下损失,但分解过程中微生物的矿化作用相对较弱,损失的碳较少,使土壤中的碳积累。SOC 不但受植物本身(植物种类,枯落物和根系)也受温度、湿度等环境因素影响。王春光研究表明 SOC 随着土壤含水量的增加,土壤渗透性变弱,抑制了土壤呼吸抑制了 SOC 的分解,提高了碳固定。罗娜娜认为表层土壤中腐殖质含量较多、有机质输入丰富、微生物生长与繁殖强烈造成的结果,是 SOC 含量和活性有机碳各组分的含量总体随着土层的增加而降低的原因。黄卫丽研究表明随着恢复演替时间增加,植物通过光合作用、凋落物以及代谢产物改善了土壤微环境,持续稳定地将碳不断返还土壤,促进了 SOC 的转化与累积枯枝落叶及根系脱落、腐烂、分解,使得 SOC 含量呈逐渐上升趋势向下延申根系逐渐减少。

EOC 是指能被 333mmol/L 高锰酸钾氧化的活性有机碳,该组分可基本区别土壤稳定性碳占土壤有机碳总量的 13%~28%,是土壤有机碳库中易于分解和氧化的有机碳组分,而土壤有机质的波动主要发生于易氧化有机碳库。EOC 在土壤有机碳中周转最快,是土壤养分的潜在来源,为土壤微生物活动提供重要能源,因此,土壤 EOC 能够有效的反映土壤环境特征和碳稳定性状况,常作为土壤质量重要的指示因子。蔡华研究表明不同类型植被有机物料的输入量不同生物群落组成和多样性存在差异和不同种类植物输入碳所含的蛋白质、纤维素和木质素等物质组成比例不同,导致 EOC 土壤含量不同。黄卫丽认为演替初期植被组成、结构及多样性较简单,群落内微环境不稳定,地上植被向土壤输入的有机物数量偏少,故 EOC 含量较低。随着恢复演替年限延长,灌木与草本植物盖度增加,微环境趋于稳定且复杂,EOC 含量显著提升。庞丹波指出养分循环和物质转化速率较快,导致土壤有机碳稳定性差,不利于土壤有机碳的积累。Song 等人认为 EOC 受到土壤湿度的影响,土壤在干湿交替期间 EOC 含量最高。

EOC 作为活性 SOC 中的一种不稳定成分,已发现其对环境变化的敏感性高于 SOC,被认为是土壤健康的最佳单一预测因子,且是一种简单、低成本的方法,利于评价土壤碳库的稳定性。通常用碳库活度($A = EOC/SOC - EOC$)来衡量 SOC 的稳定性,碳库活度(A)的值越大,即存在活性有机碳较多,微生物优先分解利用活性有机碳,因此 SOC 稳定性也更低。

Lefroy 等首次提出土壤碳库管理指数(CPMI)的概念,随后 Blair 等人也认为引起土壤碳库变化的原因是易氧化碳库含量的变化,并提出了 CPMI 的算法。CPMI 能敏感全面监测的作用和表征土壤碳库含量变化及变化水平,表征土壤有机碳组分的变化,反映外界环境变化对土壤碳库的影响。有学者研究表明,CPMI 相对于碳库活度(A)、碳库活度指数(CPI)对土壤有机碳库变化更敏感,可以良好指示土壤有机碳库的变化。

不同恢复模式还会影响土壤有机碳的周转速率。林枫研究表明,退耕还林显著提升了土壤有机碳固存量,且不同植被类型在不同降雨带下的土壤碳固存存在显著差异。张富荣研究表明,不同植被恢复年限土壤有机碳的周转速率差异显著。随着植被恢复年限的增加,土壤有机碳的周转速率变慢。Suir 等研究表明,天然湿地的碳积累率高于人工恢复湿地,但大多数人工恢复的碳积累速率随时间的推移而增加。一般情况,活性有机碳组分本身作为不稳定或快速分解的组分,其各组分含量的增加,促进了 SOC 的不稳定性。

3 湿地碳通量研究进展

3.1 生态系统碳交换过程

湿地生态系统碳循环的过程主要包括:生态系统光合作用和呼吸作用,即陆地植物通过光合作用同化 CO_2 ,将碳转化为有机化合物,这些有机物主要通过植物自身呼吸和凋落物及土壤的分解返回大气,形成大气-植被-土壤-大气整个陆地生态系统的循环过程。一方面,植物通过光合作用将大气循环中的 CO_2 固定形成湿地生态系统中的初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)。另一方面,由于植物自养呼吸(Autotrophic respiration, R_a)消耗部分有机物并释放 CO_2 ,剩余的有机物叫做生态系统净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP),NPP 的积累形成陆地植被生物量碳库。生物量在异氧呼吸(Heterotrophic respiration, R_h)作用下分解部分有机碳并释 CO_2 ,生态系统呼吸(Ecosystem respiration, ER)包括 R_h 和 R_a 。由于湿地的环境影响,使湿地长期处在水淹的厌氧环境之中,植物分解缓慢,在与大气 CO_2 的交换

过程中碳固化能力表现较好为净吸收,即净生态系统交换量(Net ecosystem exchange, NEE),被认为是碳固定的重要场所之一。因此湿地 NEE 能力是碳源汇的关键性指标。

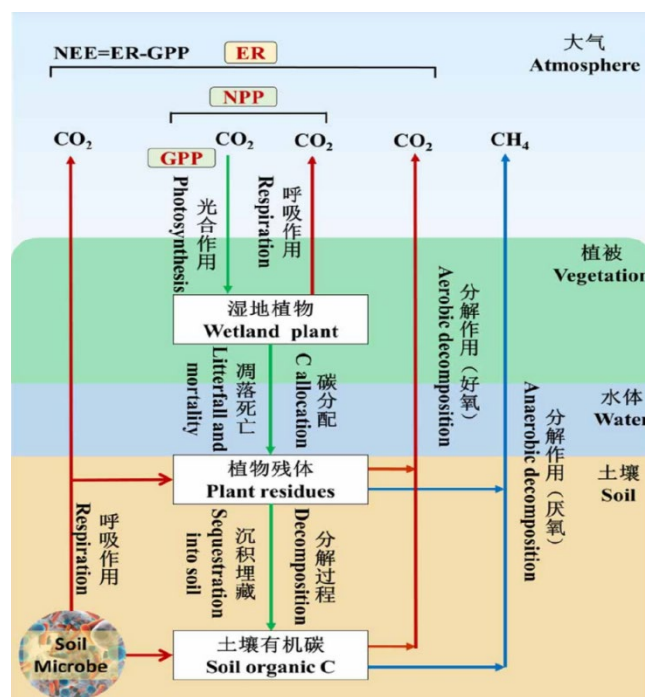
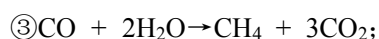
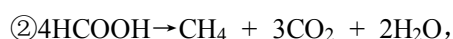
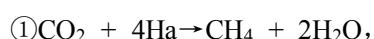


图 1 湿地生态系统碳循环主要过程示意图 (资料来自[56])

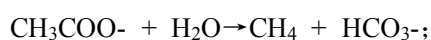
Fig. 1 Schematic diagram of main processes of carbon cycle in wetland ecosystem

3.2 CH₄ 的排放过程及机制

甲烷是在严格厌氧条件下由产甲烷菌作用于产甲烷底物的结果,因此甲烷只能在极端还原条件下才能产生。底物在产甲烷菌的作用下被转化为甲烷,目前已知的主要有两条途径:一是在专性矿质营养产甲烷菌的参与下,以 H₂ 作为电子供体还原 CO₂ 或者直接利用 HCOOH 和 CO 形成 CH₄, 反应式为:



二是在甲基营养产甲烷菌的参与下,对含有甲基的化合物进行脱甲基作用,底物主要是乙酸,因为乙酸是有机物厌氧分解的主要中间产物,典型反应式为:



这是土壤中甲烷形成的主要途径,约占产甲烷总量的 70%。只有活性有机物供应较少的环境,CO₂ 还原产甲烷作用才显得较为重要。在还原环境条件下,底物的数量和有效性在甲烷形成过程中起着决定性作用。

3.3 不同恢复模式下沼泽湿地碳通量研究进展

湿地恢复手段主要是对湿地植物的恢复。湿地植被与其他陆地植被均可通过光合作用和蒸腾作用储存和释放碳素;而且由于湿地植物本身的内部构造,其内部器官可以在一定程度对碳进行转化和固定。不同恢复模式会导致土壤养分不同,形成不同的微生物群落与微生物量。在动态环境下,土壤微生物的微小变化可能导致植物-土壤系统养分转化的显著变化。从而对温室气体的产生及排放造成影响。

李丽研究表明,湿地恢复可显著增加碳汇效应。人工恢复湿地表现为 CH₄ 碳汇。自然湿地表现为 CH₄ 强源,排水和放牧显著降低了 CH₄ 排放,但是同时增加了 CO₂ 排放量。姚允龙等研究表明,自然湿地与退耕恢复湿地都是 CH₄ 的排放源,二者的 CO₂ 排放通量差异不大;但降低退耕恢复湿地的水位可以降低其碳排放量。肖玉研究结果表明,人工湿地的 CH₄ 通量均为正值,即表现为 CH₄ 的源。赵月琴研究结果表明,

人工恢复湿地 CO_2 和 CH_4 随着恢复年限的增加, 温室气体的季节变化趋势逐渐与天然沼泽湿地相似。生长季 CO_2 通量均值在恢复前期增加, 在恢复后期减少; CH_4 通量均值随着恢复年限的增加而增加, 但通量始终低于天然沼泽湿地。刘思琪研究表明, 辽河口人工修复区盐沼湿地表现为碳汇, 并且具有长期的碳增汇潜力。

4 结论与展望

湿地生态系统是大气 CO_2 的重要“碳汇”, 在陆地及全球碳循环中起着重要作用, 而且与全球气候变化有着直接而紧密的联系。但大量原生湿地被开发利用, 导致其失去原有能效, 因此探讨不同恢复模式下湿地固碳能力有深远的意义。不同恢复模式会干扰土壤的温度、湿度等理化性质, 对植物群落的物种组成和结构造成不同程度的影响, 从而改变凋落物和根系的数量和成分, 改变土壤微生物群落结构, 影响湿地生态系统循环过程。自然恢复模式下湿地生态系统更接近于天然湿地, 种子库的物种丰富度和种子密度均高于人工恢复模式, 但在快速有效改善改善土壤质地, 提高土壤养分含量方面并不理想。在固碳视角下, 人工恢复更有助于提高土壤碳库稳定性增强土壤固碳能力。然而目前有待加强的相关研究有以下几个方面:

(1) 人为干扰是导致不同湿地恢复模式对土壤有机碳组分与碳通量特征差异的主要原因之一, 退耕还湿前的土地利用方式、耕种年限、不同管理措施都会使恢复湿地的碳通量具有高时空变异性的特点。

(2) 湿地生态系统的退化使恢复湿地相比于天然湿地在固碳能力上显著降低, 因此, 在气候变化和人类活动双重影响下, 在维持现有恢复湿地的碳储存库功能上提高其碳汇功能是亟待解决的科学问题。