

苏天燕,刘文杰,杨秋,等.土壤碳循环对地下水位的响应研究进展[J].中国沙漠,2020,40(5):180-189.

# 土壤碳循环对地下水位的响应研究进展

苏天燕,刘文杰,杨秋,毛伟

(海南大学 生态与环境学院,海南 海口 570228)

**摘要:** 地下水位通过影响土壤微生物活性、植物根系周转和土壤呼吸速率等改变凋落物和土壤有机质的分解速率与程度,进而影响土壤有机碳(SOC)的积累与损耗过程。过去研究集中在温度和降水等影响因素对土壤碳转化过程和碳储量动态等的影响,较少关注地下水位波动引起的变化,尤其缺乏在不同生态系统中地下水位变化后植物根系-微生物-SOC交互作用对土壤碳循环影响的研究。基于此,结合近年国内外土壤碳周转过程相关研究,总结地下水位变化对根系碳分配、微生物群落碳代谢以及土壤呼吸的影响,进一步探讨地下水位与土壤碳循环的动态关系;同时对比研究了地下水位变化后不同生态系统类型土壤有机碳的变化规律。研究将有助于揭示地下水位变化对土壤碳循环动态的调控机制,利于阐明未确定的陆地碳储量,完善陆地生态系统碳循环模型,为应对全球变化提供科学的理论基础。

**关键词:** 地下水位;土壤有机碳;土壤微生物;植物根系;土壤呼吸

**文章编号:** 1000-694X(2020)05-180-10

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00075

**中图分类号:** S153

**文献标志码:** A

## 0 引言

土壤碳库是全球最大的碳库,储量庞大<sup>[1-4]</sup>,是近年研究热点。土壤碳包括土壤有机碳(SOC)和无机碳。碳库最活跃的组成是土壤有机碳库<sup>[5]</sup>,它的细微改变将影响碳向大气的排放(如土壤养分的释放等),进而影响陆地生态系统的结构与功能<sup>[6-8]</sup>,在全球碳循环中有重要作用。因此,为更好预测土壤碳循环对未来气候变化的影响,有必要了解土壤碳积累和稳定的调控机制。

地下水作为水资源的重要组成部分,对维持生物多样性具有关键作用。在全球气候变化和人类活动双重因素的影响下,地下水位的升降不仅造成水量的变化,还会引起地表生态变化<sup>[9]</sup>,最终影响土壤生态系统的物质循环和能量流动。地下水对土壤水分的时空分布有极大影响,进而影响地上植被、地下根系和土壤微生物的分布<sup>[10]</sup>,而植物根系-微生物-土壤有机碳的交互作用在地下水位不同时会出现不一致的结果。过去研究多在升温 and 降水改变等因素对土壤碳转化和碳储量动态等方面,缺

乏地下水位不同时植物根系-微生物-SOC交互作用对土壤碳循环影响机制的研究。本研究以土壤碳周转为主线,分别综述地下水位对植物根系碳分配、微生物群落碳代谢以及土壤呼吸的影响,进一步探讨草原、湿地以及农田生态系统中地下水位深度与土壤碳循环的动态关系。

## 1 地下水位对土壤有机碳的影响机制

地下水位作用于土壤有机碳一般有3种形式。一是地下水位上升会提高土壤有机碳积累速率,而有机碳的增加又会增强土壤持水能力,增强土壤“碳源”“水文调节”等生态功能。当地下水位上升后进入土壤的O<sub>2</sub>减少,土壤缺氧后起分解作用的好氧微生物活动减弱或停止,使得土壤呼吸受到抑制<sup>[11]</sup>,有机质降解率及团聚体稳定性降低,最终土壤有机质的累积量增加<sup>[12-13]</sup>。二是地下水位下降会使得土壤含水量下降和通气量增加,二者协同加快有机质分解<sup>[11]</sup>。土壤含水量的减弱将影响土壤有机质的分解转化速率,加快氧化分解,造成土壤碳含量减少<sup>[11]</sup>,从而减弱土壤沉积物的持水能力和碳

收稿日期:2020-07-07; 改回日期:2020-08-19

资助项目:国家重点研发计划项目(2018YFD021105);国家自然科学基金项目(41671208);海南大学科研启动基金项目(KYQD20035)

作者简介:苏天燕(1995—),女,海南三亚人,硕士研究生,研究方向为生态系统生态学。E-mail: 1039244960@qq.com

通信作者:毛伟(E-mail: maow@lzb.ac.cn)

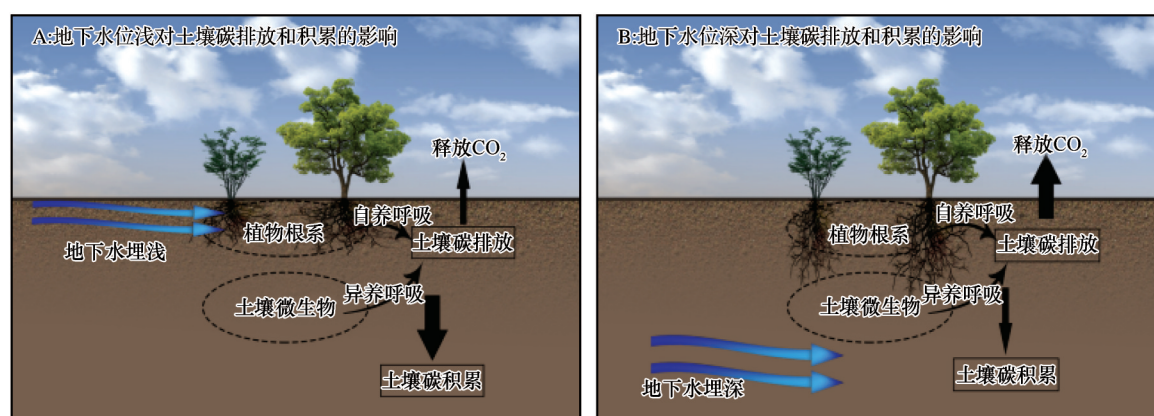
“汇”功能。三是影响土壤容重(地下水位降低后,土壤容重增大、土壤有机碳分解速率加快,有机碳含量减小<sup>[14]</sup>)、pH、土壤微生物以及植物根系等,进而影响土壤碳循环机制。Houghton等<sup>[15]</sup>研究表明地下水位下降后土壤将继续积累碳,但固碳能力将会因为长久的干旱而减小。也有研究表明地下水位下降会导致土壤有机碳的分解<sup>[16]</sup>和碳“汇”功能的减弱<sup>[17]</sup>。李丽等<sup>[18]</sup>认为地下水位是影响土壤有机碳含量的关键因素,在0~50 cm土层范围内SOC含量随着地下水位下降而显著降低<sup>[11]</sup>。土壤水分状况是影响SOC矿化过程的重要因素,土壤含水量通过影响通气状况<sup>[19]</sup>、土壤氧化还原电位(Eh)<sup>[20]</sup>、SOC<sup>[21]</sup>以及土壤微生物活性等<sup>[22]</sup>,进而影响SOC的矿化过程。万忠梅<sup>[23]</sup>研究表明土壤呼吸随着水位降低而增强,而杜紫贤等<sup>[24]</sup>指出,土壤呼吸对地下水位是一种负反馈机制。因此,就目前地下水位对土壤有机碳的影响研究结果尚未有统一的定论,特别是从微生物调控和催化剂驱动等方面上对地下水位与碳循环关系的研究罕见报道。

国内外学者在研究地下水位上升抑制土壤呼吸方面进行了大量讨论。在湿地生态系统中,地下水位升高,土壤容重增大,土温和Eh降低,会限制土壤中的植物残体及有机质的降解,导致土壤CO<sub>2</sub>通量下

降<sup>[24]</sup>;抑制土壤动物呼吸<sup>[25]</sup>,进而对土壤呼吸产生抑制作用,限制碳排放量;Ryan等<sup>[26]</sup>的研究也证明了水位上升会抑制植物根系呼吸,使得土壤呼吸通量减小并降低土壤微生物活性<sup>[22]</sup>,进而抑制土壤微生物对土壤有机碳的分解,同时也间接削弱土壤呼吸速率,有利于增加碳储量。综上所述,地下水位越高,土壤有机碳含量越高,土壤持水能力越强;同时使有机质分解速率与微生物利用效率受到抑制<sup>[27]</sup>,从而影响SOC矿化过程。较多研究主要关注水位上升后对土壤碳排放的影响,而对于地下水位下降后不同生态系统中土壤碳循环的机制变化研究较少涉及。

### 1.1 地下水位对土壤呼吸的影响

土壤呼吸是土壤碳库向大气释放CO<sub>2</sub>的重要途径<sup>[28]</sup>,主要由异养呼吸(土壤微生物呼吸)和自养呼吸(植物根系呼吸)构成<sup>[29]</sup>。地下水有两种作用于土壤呼吸的方式(图1)。首先,地下水位的上升和下降均会改变土壤含水量并影响土壤呼吸速率;其次,地下水位变化会对根系生长<sup>[30]</sup>和微生物生活环境均产生影响,从而使土壤呼吸相应发生变化。地下水较深,补给表层土壤水的量变小<sup>[31]</sup>,会抑制植物生长,使得根系结构发生改变<sup>[32-33]</sup>,对土壤有机碳及养分产生一定的影响<sup>[34]</sup>。



箭头粗细代表碳通量大小

图1 地下水位对土壤呼吸的影响示意简图

Fig.1 Schematic diagram of the influence of groundwater depth on soil respiration

塔里木河下游河道断流对土壤碳释放的影响研究表明土壤呼吸速率随着地下水位下降而逐渐降低<sup>[35]</sup>。水分参与土壤微生物以及酶活等生物过程,影响着养分等各种物质的迁移和转化<sup>[36]</sup>,同时影响着根系的生长和呼吸<sup>[37]</sup>,最终使得土壤碳循环发生动态变化。因此,土壤水分强烈影响着土壤呼

吸和土壤向大气排放的CO<sub>2</sub>数量。目前我们对不同地下水位条件下土壤碳排放特征认识不明确,尤其是根际碳含量与微生物群落组成对地下水位有怎样的影响,以及它们之间的相互作用如何调控SOC储量动态。目前就地下水位变化后植物根系、微生物以及植物根系-微生物-SOC交互作用对碳循环



的影响机制仍未有定论,因此还需进一步的研究。

## 1.2 地下水位对植物根系的影响

根系分解是陆地生态系统碳和养分循环的重要地下生态过程,在自然生态系统(如草地)中,细根主导着地下净第一生产力,根际碳贡献地下净第一生产力的40%~60%,如果不考虑根际沉积,地下净第一生产力将被大幅度低估<sup>[38]</sup>。地下水位变化影响植被生物量积累和水分利用效率等生理过程,间接影响生态系统的物种组成和群落结构<sup>[39-42]</sup>,进而影响到植物地下碳分配。Imada等<sup>[43]</sup>研究表明,地下水位通过影响植物根系的生长来影响整株的生物量分配。而生物量是植被积累能量的反映,其在各器官中的分配是植被适应环境的生长策略表现<sup>[44]</sup>。生物量分配会影响碳库间的碳周转,进而影响陆地生态系统碳循环。地下水位变化后,植物根系通过协调作物根冠比,改变了干物质的积累与分配<sup>[45]</sup>。地下水位下降,土壤水分可利用性降低,根系生长受抑制,趋于向深层土壤发展获取深层水<sup>[45]</sup>。这一阶段根系比根长变大,吸收水分和养分的能力增强;地下水位上升,表层土壤水分得到补给,根系分布趋于表层,各水平根系生物量均趋于减少<sup>[46]</sup>。

在草地生态系统中,根系活动可能是影响土壤碳积累的重要因素<sup>[47]</sup>。在植物生长季节初期,植物主要从上层土壤的春季融雪中吸收水分;在生长高峰期和生长后期,上层土壤的水越来越少,根系生长则进入深层土壤,这时深层水对植物根系具有重要作用<sup>[48]</sup>。一方面地下水越深,植物生长受到抑制,植物凋落物分解成有机质时间越晚,最终使得全球有机碳库评估出现差异;另一方面可能在次年使得土壤有机质积累量增加,原因可能是植物生长适应了地下水位变化,根系周转变快,使得土壤有机质转化加快。此外,由于生根深度一般遵循入水深度<sup>[49]</sup>,地下碳会随着根系分布而分配。

受地下水位变化影响,植物根系分布状况会发生改变,进而影响根系分泌物的分布范围、土壤酶活性大小及土壤微生物活性等<sup>[50]</sup>。其中,根分泌物产生的酚酸类化合物及有机酸<sup>[51]</sup>等通过对微生物数量和结构以及土壤酶活性的影响而间接影响到土壤碳循环过程。除土壤微生物直接参与各种生化反应外,土壤酶还参与土壤中各种代谢过程和能量转换<sup>[52]</sup>。吴旭东等<sup>[53]</sup>发现土壤酶与土壤微生物

以及SOC等理化性质有密切关系。总体上,过去对植物根系、酶和微生物与土壤碳循环影响研究较为深入,但是有关地下水位长期波动作用下植物根际活动对土壤碳的响应研究较少,特别缺乏系统性的在不同陆地生态系统(草原、湿地及农田等)中深入探讨根际-微生物-土壤碳交互作用的季节变化、年际变化以及碳循环(碳排放和碳吸收)响应的研究。

## 1.3 地下水位对土壤微生物的影响

作为陆地生态系统最大碳储库的土壤碳库<sup>[54]</sup>,虽拥有极丰富的碳储量<sup>[55]</sup>,但大部分都是难分解和不易利用的有机碳(如木质素和腐殖酸等),只有较少部分有机碳(如有机酸),易于被微生物摄取和同化<sup>[56]</sup>。土壤微生物是土壤碳循环关键过程的驱动者与调节者<sup>[57]</sup>。受地下水位变化影响,土壤微环境得以改变,间接影响微生物生命活动及其所参与的SOC矿化、凋落物分解等碳循环过程。

受水文过程影响而改变的土壤环境,可调节土壤微生物的生长和代谢功能<sup>[58]</sup>。如在湿地生态系统中,年际水文波动导致的土壤养分含量变化与土壤微生物活性密切相关<sup>[58]</sup>。地下水位升高后,土壤微生物生物量碳含量增加,表明土壤水分对土壤微生物丰度产生影响。较长淹水时间有利于土壤微生物的生长<sup>[59]</sup>以及土壤中可溶性有机碳含量的增加,并增强土壤微生物活性<sup>[60]</sup>。由此可见,长时间淹水状态会促进微生物对有机物质的循环转换。湿地长时间淹水会抑制微生物对有机质的分解和矿化进程,促进有机质积累<sup>[61]</sup>,而长时间退水则相反<sup>[62]</sup>。在一定范围内,较长时间淹水和短时间退水会使有机质积累<sup>[58]</sup>,进一步加快碳源物质向可溶性有机碳的转变,从而利于微生物活性的提高<sup>[58]</sup>。另外,也有研究发现长时间淹水阻碍真菌等微生物的生长<sup>[63-64]</sup>,在地下水位下降不久后出现较高的微生物活性<sup>[58]</sup>。可能的原因是地下水位下降后,短时间内土壤微生物群落在有氧环境下得已恢复,并且养分的积累也提高土壤微生物活性,进而使得土壤有机碳分解加快。

植被群落和水文条件可能会通过改变土壤养分影响土壤微生物功能活性<sup>[65]</sup>。湿地植被通常根系策略抵抗不利环境,间接影响土壤胞外酶的种类和土壤微生物活性<sup>[66]</sup>。在地下水位浅的地区会存在较高的地上初级生产力、稳定的群落结构和丰富的地下根系,能产生更多的凋落物、根系分泌物及

提供足够的 $O_2$ ,这有助于增加微生物丰度和提高代谢率<sup>[67]</sup>促进物质循环转化。那么,长时间的水淹状态在湿地生态系统中,到底碳是排放还是吸收?这中间的转换机制是什么?地下水位对土壤碳循环的贡献率是多少?目前尚未明确。

地下水位下降会影响土壤有机碳的固定作用<sup>[68]</sup>。易亚男等<sup>[69]</sup>在农田生态系统中研究不同地下水位红壤水稻土有机碳组分,发现地下水位浅(地表下20 cm)比地下水位深(地表下80 cm)更能促进SOC积累。地下水位会影响土壤Eh,多数情况下浅地下水位的土壤Eh小于深地下水位<sup>[70-71]</sup>。土壤Eh与土壤微生物活性息息相关,其对土壤碳循环过程具有一定的影响。张逸飞等<sup>[71]</sup>研究不同施肥模式和地下水位对红壤水稻土微生物群落的影响,发现长期施肥和地下水位管理显著影响土壤微生物生物量、微生物群落组成及生活环境,间接影响SOC分解速率。

地下水位通过影响土壤微生物群落结构、SOC分解速率和植被根系等直接或间接影响有机质分解和累积过程<sup>[72]</sup>,最终会在土壤碳循环进程上造成一定的影响。总体上,地下水位浅倾向于削弱土壤呼吸,降低SOC分解,使得SOC累积量增加<sup>[73]</sup>。在把水不同来源都忽略下仅以地下水位深度探讨土壤碳循环机制尚未明确,同时对土壤碳调控的生物化学和微生物学机理尚不明确,需要科研学者继续对其细化并深入研究。

#### 1.4 催化作用下土壤碳对地下水位的响应

地下水位变化改变了土壤环境,影响植物根系分布、微生物活性从而改变碳循环,除此之外,土壤中化学物质在地下水位变化后对碳排放催化的作用也发生改变。有机碳(OC)与铁水合物(Fh)的结合是调节土壤碳持久性的关键,且铁水合物的降低会降低铁水合物与有机碳结合的稳定性。Han等<sup>[74]</sup>研究Fh吸附和Fh共沉淀的OC在盐酸羟胺非生物还原Fh-OC缔合过程中的释放,以阐明OC在氧化还原过程中的稳定性调节过程。吸附OC和共沉淀OC在还原过程中表现出不同的释放模式。所有吸附OC在还原初期都是快速释放的,而共沉淀OC在还原过程中几乎整个还原过程都是缓慢的<sup>[74]</sup>。OC的还原性释放取决于碳铁比,高碳铁比抑制OC的释放。另外,氧气( $O_2$ )限制又是抑制土壤碳(C)分解的因素,在全球变化下影响陆地C储量的关键机

制。然而, $O_2$ 限制可能会不同程度地影响动力学或热力学和物理化学的C保护机制,这是我们理解土壤C如何响应气候调节变化下的 $O_2$ 动态的一项挑战。虽然 $O_2$ 限制可能抑制新近凋落物C输入的分解,但由于铁(Fe)还原而使受物理化学保护C的释放可能会维持土壤C损失。那么,在地下水位变化条件下, $O_2$ -Fe的交互作用又会对C循环机制带来什么响应?为了测试它们之间的权衡,Huang等<sup>[75]</sup>在有氧(对照)或厌氧条件下进行控制试验研究,结果表明,在厌氧条件下,物理化学和动力学/热力学C保护机制之间存在权衡,即厌氧从本质上保护了土壤C。

泥炭地储存着全球三分之一的土壤碳,干旱、气候变暖等是碳存储的主要威胁,而地下水位下降将加剧泥炭地干旱。Wang等<sup>[76]</sup>通过将田间试验和微观试验联系起来,展示了之前未被认识的机制如何调控酚类物质的积累,这些物质在短期干旱期间通过降低酚氧化酶活性直接保护碳储存,而在长期中度干旱后通过从低酚类泥炭/草本植物向高酚类灌木的转变间接保护碳储存。这意味着北方泥炭地因干旱/变暖而引起的灌木丛扩张可能是一种长期的自适应机制,不仅增加碳固存量,而且还潜在地保护历史土壤碳。鉴于此,我们认为干旱/变暖的加剧与泥炭地碳排放之间可能不会发生“正反馈关系”。所以,即使较多研究结果表明Fh-OC缔合物、 $O_2$ 和酚类物质等催化作用对土壤碳均有保护作用,但由于在地下水位深度不同、时长不一和立地条件差异等状态下,不同生态系统所呈现的土壤碳循环机制较为复杂,罕见相关报道。

## 2 地下水位对不同类型陆地生态系统土壤有机碳的影响

陆地生态系统按生境特点和植物群落生长类型可分为草原、湿地和农田生态系统等。在农田生态系统中,地下水位上升,造成厌氧呼吸,使得 $CO_2$ 和 $CH_4$ 呈排放状态<sup>[77]</sup>;在湿地生态系统中,地下水位下降,反而使得 $CO_2$ 和 $CH_4$ 呈排放状态;在草原生态系统中,地下水位与土壤有机碳呈负相关关系。由所述可知,不同生态系统中土壤呼吸对水分的响应程度和机制不同(表1)。因此,有必要区分研究不同类型陆地生态系统地下水位变化对土壤碳循环的影响,为全球碳循环模型提供详细精准的数据,提高模型预测未来气候变化的精度。



目前,草地生态系统正承受着全球气候变化带来的深刻影响,降水格局的改变对草地生态系统地表水分条件和地下水位有显著影响<sup>[78]</sup>。贡璐等<sup>[79]</sup>研究指出地下水位与土壤有机碳呈负相关关系,但相关性不大。地下水位增加伴随着可利用性氧的增加可以直接提高土壤有机质的分解速率<sup>[80]</sup>,除此之外,地下水还参与地表植被的光合作用、蒸腾作用、有效养分的吸收及净初级生产力过程,同时也改变土壤微生物活性和群落组成,间接影响草地SOC的分解和矿化速率<sup>[81-82]</sup>。草地生态系统碳循环受到降水和地下水位的共同影响,一方面,降水减少会造成地下水位变化,直接影响土壤呼吸通量的变化;另一方面,降水减少造成地下水位变化又影响着土壤根系对水分的吸收,影响植被生长,进而影响土壤有机碳输入的数量和质量<sup>[83-85]</sup>,最终共同影响全球土壤碳储量<sup>[86-88]</sup>,地下水位变化在土壤碳循环过程有至关重要的作用。在根系上,最大根系深度、根系形态特征和生理特性均受到水分的影响<sup>[83]</sup>。而这些特征又对根系向土壤的碳输入产生影响<sup>[83]</sup>。例如,较低的土壤水分利用率会提高根系栓质化作用,降低根系分泌物数量<sup>[89]</sup>和细根的周转,最终减缓根系对土壤的碳输入<sup>[90-91]</sup>。地下水位下降通过造成部分浅根系的植被死亡而逐渐改变草地群落的物种组成,进而对草地生态系统的碳循环过程造成影响<sup>[92]</sup>。近年来,草地生态系统对全球气候变化响应的研究发展迅速,并取得了一系列成果<sup>[93-94]</sup>,主要是通过地下水位对草地生态系统植物生物量及土壤盐渍化的影响<sup>[9,95]</sup>,而较少关注地下水位对土壤碳循环的影响<sup>[96]</sup>,并且地下水位对植被-土壤间碳周转的趋同和趋异的影响也鲜见报道。因此,探究地下水位变化对土壤碳循环的响应对弄清草地生态系统在未来全球气候变化下区域尺度碳循环具有重要意义。

被认为是“被间歇的或永久的浅水层所覆盖的土地”湿地,是介于陆地与水生生态系统之间的过渡地<sup>[97]</sup>。目前全球气候变化及人类活动影响水资源的时空分布,整体上会影响生态系统稳定性<sup>[98]</sup>。水文过程通过水淹深度和持续时间等对湿地生态系统产生一系列复杂的影响<sup>[99]</sup>,其中生物群落对水位变化的响应是最为显著。当前关于底栖动植物对水位波动的响应研究很多<sup>[100-101]</sup>,然而,关于土壤微生物与水位波动之间关系的研究很少,而湿地土壤微生物对水位波动的生态影响是决定湿地生态

系统土壤碳循环的关键<sup>[58]</sup>。除此之外,水位变化会使土壤理化环境发生改变,并在不同程度上对微生物群落产生影响,从而调节湿地C、N、P等物质循环的速率<sup>[102-104]</sup>。淹水和退水通过不同时间尺度对湿地碳平衡产生影响<sup>[105]</sup>,与短期水位变化相比,长期的水文过程对湿地生态系统的影响可能更彻底<sup>[106]</sup>。这表明,水淹时间更长会加快微生物对有机物质的循环转化<sup>[58]</sup>,但有研究发现长期的淹水环境更利于有机质积累<sup>[61]</sup>,长期退水则相反<sup>[62]</sup>。综上所述,在全球气候变化背景下,地下水位下降导致的大片湿地消失,使得湿地生态系统具有释放巨大温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>)的潜力,土壤固碳能力下降。比如,若尔盖湿地<sup>[15]</sup>、羊胡子草(*Eriophorum vaginatum*)泥炭地<sup>[107]</sup>以及欧洲泥炭地<sup>[108]</sup>等。未来可从土壤微生物、根系等生物过程去系统地研究湿地碳循环机制。

农田生态系统受人类活动影响,是全球碳储量中相对活跃的部分,与森林和草地等自然生态系统相比,农田土壤释放更多的二氧化碳<sup>[109]</sup>。长期以来,人们一直认为农田土壤长期淹水限制有机质分解,因为相比于好氧状态,木质素衍生的苯酚物质在厌氧状态下停留的时间更长和聚合的反应更多,从而使有机质分解更加困难<sup>[110]</sup>。然而,近年来,一系列研究表明,厌氧(淹水)条件促进SOC分解<sup>[111]</sup>,同时会释放更多的CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub><sup>[112]</sup>以及增加DOC含量<sup>[113-114]</sup>,提高土壤微生物活性和有效性底物,从而加快了碳矿化进程。综上所述,在地下水位不同条件下,对农田生态系统土壤碳循环的响应研究结果是趋于厌氧条件下短期促进土壤有机碳降解,较少涉及在季节变化和年际变化上探讨地下水位对农田生态系统土壤碳循环的响应,长期处于厌氧或好氧状态下,土壤碳积累量或排放速率有怎样变化趋势?据估计,在未来50~100 a内,全球农田生态系统可固碳20~30 Gt<sup>[115]</sup>,国内学者的研究也报道了其重要性。如,山西省农田生态系统碳吸收总量从2000年以来呈上升趋势<sup>[116]</sup>。因此,在未来研究方向上,可更深入探讨地下水位对农田生态系统土壤碳循环的响应机制。

### 3 问题与展望

地下水位对土壤有机碳的影响主要由土壤呼吸(根系呼吸和微生物呼吸)作用体现。当地下水位上升时,水分向土壤表层运移,分别作用于植物根系和土壤微生物,间接影响土壤呼吸,进而影响

表 1 地下水位对不同类型陆地生态系统土壤碳的影响

Table 1 Effects of groundwater depth on soil carbon in different terrestrial ecosystems

陆地生态系统类型	土壤碳动态变化	文献
草地	地下水位与土壤有机碳呈负相关关系	[79]
	地下水位增加,可利用性氧增加,土壤有机质的分解速率增大	[80]
湿地	地下水位下降使土壤固碳能力下降	[15, 107-108]
	长期水淹状态下会加快有机质的循环转化过程	[58]
	长期水淹会缓解有机质的分解和矿化速率,利于有机质积累	[61]
	长期退水状态会加快有机质分解和矿化速率,增加碳排放	[62]
农田	淹水处理下碳分解速率大于旱地处理,加快 SOC 矿化过程	[111, 113]
	淹水处理下大量 CH <sub>4</sub> 、CO <sub>2</sub> 排放,好气处理下大量 N <sub>2</sub> O 排放	[112]
	SOC 矿化速率和积累速率在淹水条件下比在好气条件下高	[114]

土壤碳循环进程。尽管关于水分与土壤呼吸之间关系的研究较多,但土壤呼吸对地下水位变化的响应却很复杂,不仅对根系和微生物呼吸产生影响,而且通过影响土壤理化性质等因素间接对土壤碳周转产生影响。

目前,研究地下水位对土壤呼吸的影响存在 3 个主要困难。在不干扰土壤的情况下,很难区分对根呼吸和微生物呼吸的影响;地下水来源不同,对土壤呼吸的作用机理尚不清楚;根系与微生物呼吸在陆地生态系统土壤碳循环中扮演的角色不清楚。很难判断土壤碳循环对地下水位的响应机制,这几方面还亟待我们深入探讨研究。

鉴于目前国内外研究现状,对未来研究提出如下展望。

立足重点区域,改进实验方法。研究区域上,今后应投入更多的关注在中纬度干旱区和高纬度沼泽区。探讨随纬度升高,地下水位变化对植物根系、土壤微生物和物质循环发挥的影响。研究方法上,采用室内长期模拟实验与野外试验相结合。目前的研究方法主导是室内控制实验,而室内环境与野外存在很大不同,对研究结果准确性造成影响。其次,碳周转对地下水位的响应周期很长,长期跟踪实验更能表达结论的准确性与完整性。

加强机制研究,深化研究内容。目前研究集中在地下水位对碳循环影响的“现象”上,缺乏机理深入研究,如地下水位驱动土壤动植物和微生物在碳循环中相互作用的机制。在长期监测系统中,土壤碳在地下水位的四季变化和年际变化的循环机制研究罕见报道,且现在对地下水位在土壤碳净固存方面的影响研究也是比较空白,定论尚不明确,需

要深入探讨。

结合热点问题,拓宽研究方向。目前全球变暖、温室气体排放和氮沉降等是生态研究的热点,结合这些热点问题,综合分析土壤碳循环、植物根系、土壤微生物对地下水位变化的反馈机制,更深入了解地下水位对土壤碳循环的影响。这对预测未来全球气候变化具有重要参考意义。

根系呼吸和微生物呼吸在地下水位变化中引起土壤碳周转的生物化学和微生物学机理尚不清楚,因此将土壤有机质化学与宏基因组学等方法结合起来,进一步探讨地下水位变化后微生物对碳循环的影响机制具有重要意义。

参考文献:

[1] 陈庆强,沈承德,易惟熙,等.土壤碳循环研究进展[J].地球科学进展,1998,13(6):555-563.

[2] Eswaran H, Van Den Berg E, Reich P.Organic carbon in soils of the world[J].Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(1): 192-194.

[3] Scharlemann J P, Tanner E V, Hiederer R, et al.Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool[J].Carbon Management, 2014, 5(1): 81-91.

[4] 张钊.呼伦贝尔草甸草原生态系统碳循环动态模拟与未来情景分析[D].北京:中国农业科学院, 2016.

[5] 郭洋,李香兰,王秀君,等.干旱半干旱区农田土壤碳垂直剖面分布特征研究[J].土壤学报, 2016, 53(6): 1433-1443.

[6] 郭振,王小利,段建军,等.长期施肥对黄壤性水稻土有机碳矿化的影响[J].土壤学报, 2018, 55(1): 225-236.

[7] 陈晓芬,刘明,江春玉,等.红壤性水稻土不同粒级团聚体有机碳矿化及其温度敏感性[J].土壤学报, 2019, 56(5): 1118-1127.

[8] 吴萌,李忠佩,冯有智,等.长期施肥处理下不同类型水稻土有机碳矿化的动态差异[J].中国农业科学, 2016, 49(9):

- 1705–1714.
- [9] 侯金鑫,王德,肖鲁湘,等.地下水埋深对土壤水盐、植被影响研究进展[J].鲁东大学学报(自然科学版),2019,35(2):150–156.
- [10] 史小红,李畅游,刘廷玺.科尔沁沙地坳间地区土壤水分空间分布特性分析[J].中国沙漠,2007,27(5):837–842.
- [11] 吴江琪,马维伟,李广,等.尕斯库勒湖周边不同地下水位土壤理化特征的比较分析[J].草地学报,2018,26(2):341–347.
- [12] Sahrawat K. Organic matter accumulation in submerged soils [J]. *Advances in Agronomy*, 2003, 81: 169–201.
- [13] 翟生强,史长光,杜乐山,等.若尔盖泥炭地地下水位和土壤温度对二氧化碳排放的影响[J].湿地科学,2015,13(3):332–337.
- [14] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [15] Houghton J E T, Ding Y H, Griggs J, et al. *Climate Change 2001: The Scientific Basis* [M]. Oxford, UK: Cambridge University Press, 2001.
- [16] Sulman B, Desai A, Cook B, et al. Contrasting carbon dioxide fluxes between a drying shrub wetland in Northern Wisconsin, USA, and nearby forests[J]. *Biogeosciences*, 2009, 6(6): 1115–1126.
- [17] Talbot J, Richard P, Roulet N, et al. Assessing long-term hydrological and ecological responses to drainage in a raised bog using paleoecology and a hydrosequence [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2010, 21(1): 143–156.
- [18] 李丽,高俊琴,雷光春,等.若尔盖不同地下水位泥炭湿地土壤有机碳和全氮分布规律[J].生态学报,2011,30(11):2449–2455.
- [19] 欧强,王江涛,周剑虹,等.滨海湿地不同水位梯度下的土壤CO<sub>2</sub>通量比较[J].应用与环境生物学报,2014,20(6):992–998.
- [20] 侯翠翠,宋长春,李英臣,等.不同水分条件沼泽湿地土壤轻组有机碳与微生物活性动态[J].中国环境科学,2012,32(1):113–119.
- [21] 徐广平,李艳琼,沈育伊,等.桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征[J].环境科学,2019,40(3):1491–1503.
- [22] 杨桂生,宋长春,王丽,等.水位梯度对小叶章湿地土壤微生物活性的影响[J].环境科学,2010,31(2):444–449.
- [23] 万忠梅.水位对小叶章湿地CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>排放及土壤微生物活性的影响[J].生态环境学报,2013,22(3):465–468.
- [24] 杜紫贤,曾宏达,黄向华,等.城市沿江芦苇湿地土壤呼吸动态及影响因子分析[J].亚热带资源与环境学报,2010,5(3):49–55.
- [25] 武海涛,吕宪国,杨青,等.三江平原湿地岛状林土壤动物群落结构特征及影响因素[J].北京林业大学学报,2008,30(2):50–58.
- [26] Ryan M G, Law B E. Interpreting measuring and modeling soil respiration[J]. *Biogeochemistry*, 2005, 73(1): 3–27.
- [27] 乔云发,苗淑杰,王树起,等.不同施肥处理对黑土土壤呼吸的影响[J].土壤学报,2007(6):1028–1035.
- [28] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus*, 1992, 44(2): 81–99.
- [29] 黄锦学,熊德成,刘小飞,等.增温对土壤有机碳矿化的影响研究综述[J].生态学报,2017,37(1):12–24.
- [30] 杨建锋,万书勤.地下水对作物生长影响研究[J].节水灌溉,2002(2):36–38.
- [31] 杨建锋,刘士平,张道宽,等.地下水浅埋条件下土壤水动态变化规律研究[J].灌溉与排水,2001,20(3):25–28.
- [32] Mao W, Felton A J, Ma Y H, et al. Relationships between aboveground and belowground trait responses of a dominant plant species to alterations in watertable depth [J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(11): 4015–4024.
- [33] 张爱良,苗果园,王建平.作物根系与水分的关系[J].作物研究,1997(2):4–7.
- [34] 杨轩.宁南山区典型植物根系生产力及根系分解对土壤有机碳和养分的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [35] 黄湘.塔里木河下游河道断流对土壤碳释放的影响[J].环境科学与技术,2018,41(5):133–137.
- [36] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995 (9): 23–26.
- [37] 尤龙凤.太原盆地玉米土壤呼吸与环境因子的关系研究[D].太原:山西大学,2006.
- [38] Martinez C, Alberti G, Cotrufo M F, et al. Belowground carbon allocation patterns as determined by the in-growth soil core <sup>13</sup>C technique across different ecosystem types [J]. *Geoderma*, 2016, 263: 140–150.
- [39] Li X Y, Lin L S, Zhao Q, et al. Influence of groundwater depth on species composition and community structure in the transition zone of Cele oasis [J]. *Journal of Arid Land*, 2010, 2(4): 235–242.
- [40] Chen Y P, Chen Y N, Xu C C, et al. Photosynthesis and water use efficiency of *Populus euphratica* in response to changing groundwater depth and CO<sub>2</sub> concentration [J]. *Environment Earth Science*, 2011, 62(1): 119–125.
- [41] Gui D W, Zeng F J, Liu Z, et al. Characteristics of the clonal propagation of *Alhagi sparsifolia* Shap. (Fabaceae) under different groundwater depths in Xinjiang China [J]. *Rangeland Journal*, 2013, 35: 355–362.
- [42] Li C J, Zeng F J, Zhang B, et al. Optimal root system strategies for desert phreatophytic seedlings in the search for groundwater [J]. *Arid Land*, 2015, 7: 462–474.
- [43] Imada S, Yamanaka N, Tamai S. Water table depth affects *Populus alba* fine root growth and whole plant biomass [J]. *Functional Ecology*, 2008, 22: 1018–1026.
- [44] 郭浩,庄伟伟,李进.古尔班通古特沙漠中4种荒漠草本植物的生物量与化学计量特征[J].植物研究,2019,39(3):421–430.
- [45] 杨青华,高尔明,马新明.干旱与渍涝对砂姜黑土玉米根系干



- 重变化及其分布的影响[J].生态学杂志,2000,19(3):28-31.
- [46] 刘波,曾凡江,郭海峰,等.骆驼刺幼苗生长特性对不同地下水埋深的响应[J].生态学杂志,2009,28(2):237-242.
- [47] 罗永清,赵学勇,王涛,等.沙地植物根系特征及其与土壤有机碳和总氮的关系[J].草业学报,2017,26(8):200-206.
- [48] Asbjornsen H, Shepherd G, Helmers M, et al. Seasonal patterns in depth of water uptake under contrasting annual and perennial systems in the Corn Belt Region of the Midwestern U.S [J]. Plant and Soil, 2008, 308(1/2): 69-92.
- [49] Fan Y, Miguez-Macho G, Jobbágy E G, et al. Hydrologic regulation of plant rooting depth [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2017, 114(40): 10572-10577.
- [50] 常二华,杨建昌.根系分泌物及其在植物生长中的作用[J].耕作与栽培,2006(5):13-16.
- [51] 肖辉林,彭少麟,郑煜基,等.植物化感物质及化感潜力与土壤养分的相互影响[J].应用生态学报,2006,17(9):1747-1750.
- [52] 和文祥,谭向平,王旭东,等.土壤总体酶活性指标的初步研究[J].土壤学报,2010,47(6):1232-1236.
- [53] 吴旭东,张晓娟,谢应忠,等.不同种植年限紫花苜蓿人工草地土壤有机碳及土壤酶活性垂直分布特征[J].草业学报,2013,22(1):245-251.
- [54] German D P, Chacon S S, Allison S D. Substrate concentration and enzyme allocation can affect rates of microbial decomposition [J]. Ecology, 2011, 92(7): 1471-1480.
- [55] Kirkby C A, Richardson A E, Wade L J, et al. Carbon-nutrient stoichiometry to increase soil carbon sequestration [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 60: 77-86.
- [56] Rinnan R, Bth E. Differential utilization of carbon substrates by bacteria and fungi in tundra soil [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2009, 75(11): 3611-3620.
- [57] 贺云龙,齐玉春,彭琴,等.外源碳输入对陆地生态系统碳循环关键过程的影响及其微生物学驱动机制[J].生态学报,2017,37(2):358-366.
- [58] 邹锋,李金前,韩丽丽,等.鄱阳湖湿地土壤微生物活性对年际水文变化的响应[J].湖泊科学,2019,31(2):551-559.
- [59] 郭佳,蒋先军,周雪,等.三峡库区消落带周期性淹水-落干对硝化微生物生态过程的影响[J].微生物学报,2016,56(6):983-999.
- [60] Geng Y, Wang D, Yang W. Effects of different inundation periods on soil enzyme activity in riparian zones in Lijiang [J]. Catena, 2017, 149: 19-27.
- [61] Rodriguez-Iturbe I, D'Odorico P, Laio F, et al. Challenges in humidland ecohydrology: interactions of water table and unsaturated zone with climate, soil, and vegetation [J]. Water Resources Research, 2007, 43(9): W09301.
- [62] Fenner N, Freeman C, Reynolds B. Hydrological effects on the diversity of phenolic degrading bacteria in a peatland: implications for carbon cycling [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2005, 37(7): 1277-128.
- [63] Schulze E D, Freibauer A. Environmental science: carbon unlocked from soils [J]. Nature, 2005, 437(7056): 205-206.
- [64] 牛佳,周小奇,蒋娜,等.若尔盖高寒湿地干湿土壤条件下微生物群落结构特征[J].生态学报,2011,31(2):474-482.
- [65] Ma Y, Li J, Wu J, et al. Bacterial and fungal community composition and functional activity associated with lake wetland water level gradients [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 760.
- [66] 闫春妮,黄娟,李祺,等.湿地植物根系及其分泌物对土壤脲酶、硝化-反硝化的影响[J].生态环境学报,2017,26(2):303-308.
- [67] 曾静,李旭,侯志勇,等.洞庭湖湿地3种典型植物群落土壤酶活性特征[J].湖泊科学,2017,29(4):907-913.
- [68] 王少先.施肥对稻田湿地土壤碳氮磷库及其相关酶活变化的影响研究[D].杭州:浙江大学,2011.
- [69] 易亚男,尹力初,张蕾.不同地下水位和施肥管理对水稻土有机碳组分的影响[J].生态学杂志,2014,33(5):1284-1289.
- [70] 刘若萱,贺纪正,张丽梅.稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征[J].环境科学,2014,35(11):4275-4283.
- [71] 张逸飞,徐婷婷,韩成,等.不同施肥模式和地下水位条件下红壤水稻土 PLFA 指纹特征[J].生态与农村环境学报,2017,33(6):533-538.
- [72] 程淑兰,方华军,徐梦,等.氮沉降增加情景下植物-土壤-微生物交互对自然生态系统土壤有机碳的调控研究进展[J].生态学报,2018,38(23):8285-8295.
- [73] 覃乾.黄土丘陵区侵蚀坡面土壤有机碳稳定性研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [74] Han L, Sun K, Keiluweit M, et al. Mobilization of ferrihydrite-associated organic carbon during Fe reduction: adsorption versus coprecipitation [J]. Chemical Geology, 2019, 503: 61-68.
- [75] Huang W, Ye C, Hockaday W C, et al. Trade-offs in soil carbon protection mechanisms under aerobic and anaerobic conditions [J]. Global Change Biology, 2020, 26: 3726-3737.
- [76] Wang H, Richardson C J, Ho M. Dual controls on carbon loss during drought in peatlands [J]. Nature Climate Change, 2015(5):584-587.
- [77] 周文昌,崔丽娟,王义飞,等.排水对若尔盖高寒沼泽 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 排放通量的影响[J].中国环境科学,2019(7):3040-3047.
- [78] Trenberth K E, Dai A G, Van Der Schrier G, et al. Global warming and changes in drought [J]. Nature Climate Change, 2014, 4(1): 17-22.
- [79] 贡璐,朱美玲,刘曾媛,等.塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性[J].环境科学,2016,37(4):1516-1522.
- [80] Straková P, Penttilä T, Laine J, et al. Disentangling direct and indirect effects of water table drawdown on above- and below-ground plant litter decomposition: consequences for accumulation of organic matter in boreal peatlands [J]. Global Change Biology, 2012, 18(1): 322-335.
- [81] Barreto C, Lindo Z. Drivers of decomposition and the detrital invertebrate community differ across a hummock-hollow microtopology in Boreal peatlands [J]. Ecoscience, 2018, 25(1): 39-48.



- [82] Xue Wei, Rui Cao, Xinwei Wu, et al. Effect of water table decline on the abundances of soil mites, spring tails, and nematodes in the Zoige peatland of eastern Tibetan Plateau [J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 77: 77–83.
- [83] Brunner I, Herzog C, Dawes M A, et al. How tree roots respond to drought [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 547.
- [84] Schlesinger W H, Dietze M C, Jackson R B, et al. Forest biogeochemistry in response to drought [J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(7): 2318–2328.
- [85] Liu Y, Liu S, Wan S, et al. Effects of experimental throughfall reduction and soil warming on fine root biomass and its decomposition in a warm temperate oak forest [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 574: 1448–1455.
- [86] Sotta E D, Veldkamp E, Schwendenmann L, et al. Effects of an induced drought on soil carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) efflux and soil CO<sub>2</sub> production in an Eastern Amazonian rainforest, Brazil [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(10): 2218–2229.
- [87] Davidson E A, Nepstad D C, Ishida F Y, et al. Effects of an experimental drought and recovery on soil emissions of carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and nitric oxide in a moist tropical forest [J]. *Global Change Biology*, 2008, 14: 2582–2590.
- [88] Schindlbacher A, Wunderlich S, Borken W, et al. Soil respiration under climate change: prolonged summer drought offsets soil warming effects [J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(7): 2270–2279.
- [89] 黄长权. 向日葵列当寄生机理的研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
- [90] Gaul D, Hertel D, Borken W, et al. Effects of experimental drought on the fine root system of mature Norway spruce [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(5): 1151–1159.
- [91] Pierret A, Maeght J, Clément C, et al. Understanding deep roots and their functions in ecosystems: an advocacy for more unconventional research [J]. *Annals of Botany*, 2016, 118(4): 621–635.
- [92] 陆海波. 降水减少对暖温带锐齿栎林土壤碳循环关键过程的影响 [D]. 北京: 中国林业科学院, 2017.
- [93] 赵东升, 吴绍洪, 尹云鹤. 气候变化情景下中国自然植被净初级生产力分布 [J]. *应用生态学报*, 2011, 22(4): 897–904.
- [94] 张腊梅, 刘新平, 赵学勇, 等. 科尔沁固定沙地植被特征对降雨变化的响应 [J]. *生态学报*, 2014, 34(10): 2737–2745.
- [95] 张存厚, 王明玖, 乌兰巴特尔, 等. 内蒙古典型草原地上净初级生产力对气候变化响应的模拟 [J]. *西北植物学报*, 2012, 32(6): 1229–1237.
- [96] Wang Y, Wang H, He J S, et al. Iron-mediated soil carbon response to water table decline in an alpine wetland [J]. *Nat. Commun*, 2017, 8: 1–9.
- [97] 曾希柏, 黄雪夏, 刘子刚, 等. 种植年限对三江平原农田土壤剖面性质及碳、氮含量的影响 [J]. *中国农业科学*, 2006, 39(6): 1186–1195.
- [98] 董李勤, 章光新. 全球气候变化对湿地生态水文的影响研究综述 [J]. *水科学进展*, 2011, 22(3): 429–436.
- [99] You H, Xu L, Liu G, et al. Effects of inter-annual water level fluctuations on vegetation evolution in typical wetlands of Poyang Lake, China [J]. *Wetlands*, 2015, 35(5): 931–943.
- [100] Qian K, Liu X, Chen Y. Effects of water level fluctuation on phytoplankton succession in Poyang Lake, China: a five year study [J]. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2016, 16(3): 175–184.
- [101] Carmignani J R, Roy A H. Ecological impacts of winter water level drawdowns on lake littoral zones: a review [J]. *Aquatic Sciences*, 2017, 79(4): 803–824.
- [102] Ye F, Wu S, Jiang Y, et al. Shifts of archaeal community structure in soil along an elevation gradient in a reservoir water level fluctuation zone [J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2016, 12(12): 1–12.
- [103] Ye C, Cheng X, Zhang K, et al. Hydrologic pulsing affects denitrification rates and denitrifier communities in a revegetated riparian ecotone [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2017, 115: 137–147.
- [104] Argiroff W A, Zak D R, Lanser C M, et al. Microbial community functional potential and composition are shaped by hydrologic connectivity in riverine floodplain soils [J]. *Microbial Ecology*, 2017, 73(3): 1–15.
- [105] Olefeldt D, Euskirchen E S, Harden J, et al. A decade of boreal rich fen greenhouse gas fluxes in response to natural and experimental water table variability [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(6): 2428–2440.
- [106] Moche M, Gutknecht J, Schulz E, et al. Monthly dynamics of microbial community structure and their controlling factors in three floodplain soils [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 90: 169–178.
- [107] Kasimir-Klemedtsson A, Klemedtsson L, Bergelund K, et al. Greenhouse gas emissions from farmed organic soils: a review [J]. *Soil Use and Management*, 1997, 13(S4): 245–250.
- [108] Koulainen V M, Tuittila E S, Vasander H, et al. Restoration of drained peatlands in southern Finland: Initial effects on vegetation change and CO<sub>2</sub> balance [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1999, 36: 634–648.
- [109] 李易麟. 西北干旱区黑河中游土壤有机碳含量的主要影响因素研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2008.
- [110] Shibu M E, Leffelaar P A, Van Keulen H, et al. Quantitative description of soil organic matter dynamics: a review of approaches with reference to rice-based cropping systems [J]. *Geoderma*, 2006, 137(1/2): 1–18.
- [111] 黄东迈, 朱培立, 王志明, 等. 旱地和水田有机碳分解速率的探讨与质疑 [J]. *土壤学报*, 1998, 35(4): 482–491.
- [112] 蔡祖聪. 水分类型对土壤排放的温室气体组成和综合温室效应的影响 [J]. *土壤学报*, 1999, 36(4): 484–491.
- [113] 张敬智, 马超, 郅红建. 淹水和好气条件下东北稻田黑土有机碳矿化和微生物群落演变规律 [J]. *农业环境科学学报*, 2017(6): 1160–1166.
- [114] 王媛华, 苏以荣, 李杨, 等. 水田和旱地土壤有机碳周转对水

- 分的响应[J]. 中国农业科学, 2012, 45(2): 266–274.
- [115] 赵荣钦, 秦明周. 中国沿海地区农田生态系统部分碳源/汇时空差异[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(2): 1–6, 11.
- [116] 王静, 冯永忠, 杨改河, 等. 山西农田生态系统碳源/汇时空差异分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(1): 195–200.

## Review on response of soil carbon cycle to groundwater level change

Su Tianyan, Liu Wenjie, Yang Qiu, Mao Wei

(College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou 570228, China)

**Abstract:** The fluctuation of groundwater tables affects the rate and degree of decomposition of litter and soil organic matter. It affects the microbial activity of soil, the turnover of plant root and the respiration rate of soil, and thus affects the accumulation and loss of SOC (soil organic carbon). The previous research mainly studied the influencing factors, e.g., temperature and precipitation, on the process of soil carbon conversion and the dynamic of carbon stock, lacking the understanding of how soil carbon cycle dynamics in different levels of underground water table due to the interaction of plant root system-microorganism-SOC. Based on this, this paper combined with the recent domestic and foreign soil carbon turnover process related research, summarizes the groundwater table effect on underground carbon distribution of plant roots, carbon metabolism of microbial communities and soil respiration in respective, and analyzes the dynamic relationship between groundwater depth and soil carbon cycle in-depth. The study benefit to reveal the soil carbon cycle dynamics in different groundwater depth, explain the uncertainty of regional terrestrial carbon sink assessment adequately, improve the terrestrial ecosystem carbon cycle model, and provide scientific theoretical support for terrestrial ecosystems to reply to the global changes.

**Key words:** groundwater depth; soil organic carbon; soil microorganisms; plant roots; soil respiration