

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2018.01.015

## 三峡库区消落带不同淹水期 土壤可溶性碳氮的研究<sup>①</sup>

黄 哲, 江长胜, 雷利国,  
柴雪思, 范志伟, 郝庆菊

西南大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室/资源环境学院, 重庆 400716

**摘要:** 以位于涪陵区珍溪镇王家沟的三峡库区消落带不同淹水期土壤为研究对象, 设置 180 m 高程为永不淹水对照点, 175 m(短期淹水, 90 d), 165 m(中期淹水, 175 d)和 155 m(长期淹水, 260 d)高程消落区内不同淹水期取样点, 研究消落带不同淹水期土壤可溶性有机碳(DOC)和可溶性有机氮(DON)的变化特征。结果表明, 对照点土壤有机碳(SOC)及全氮(TN)均无明显的季节变化, 而短期淹水则表现为春夏季显著高于秋冬季( $p < 0.05$ ); 对照点和短期淹水的 DOC 及 DON 季节变化明显, DOC 表现为春夏季显著高于秋冬季( $p < 0.05$ ), 而 DON 则表现为冬夏季高于春秋季节( $p < 0.05$ ), 在相同时间段内(2011 年 5 月 22 日至 2011 年 9 月 3 日), 与对照点相比, 中短期淹水的 SOC 质量分数显著增加( $p < 0.05$ ), 而长期淹水处的 SOC, TN, DOC 及 DON 均显著降低( $p < 0.05$ ), 表明消落带高程越低, 淹水时间越长, 越容易造成土壤碳氮及可溶性碳氮的损失。消落带 3 个淹水期的 DOC 分配比及 SOC/TN 与对照点相比差异不明显, 中长期淹水的 DON 分配比显著低于对照点( $p < 0.05$ ), 而 DOC/DON 则显著高于对照点( $p < 0.05$ ), 表明淹水对土壤有机碳氮矿化作用和土壤有机碳的周转速率不明显, 但中长期淹水抑制土壤氮周转速率和可溶性氮的矿化作用。相关分析表明, 土壤可溶性碳氮主要受 SOC、TN、土壤湿度、地下 5 cm 温度以及 pH 的影响和调控。

**关键词:** 三峡库区; 消落带; 不同淹水期; 土壤可溶性碳; 土壤可溶性氮

**中图分类号:** X52; X53

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9868(2018)01-0098-09

土壤可溶性碳、氮(DOC 和 DON)虽然仅占土壤有机碳、氮很小的一部分, 但它是土壤有机碳、氮库中最活跃的组分之一, 同时也是微生物生长和分解过程中的重要能量来源, 在土壤生态系统碳、氮循环过程中具有重要作用<sup>[1]</sup>, 作为土壤活性组分指标, 对环境变化非常敏感, 对自然和人为干扰的响应快速且具有指示作用<sup>[2]</sup>。目前, 国内对森林、草原、湿地及农田生态系统的土壤可溶性碳氮开展了大量的研究, 得出土壤 DOC 和 DON 变化受生物因素(植物和微生物)、非生物因素(温度、湿度、土壤理化性质和水文情势等)和人为因素(土地利用方式和土地管理方式)的影响<sup>[3-9]</sup>, 而三峡库区消落带作为一类特殊的湿地生态系统, 周边水、陆生态系统物质、能量和信息转移与转化的活跃地带, 具有缓冲带的功能和植物护岸功能, 同时对外界环境的变化很敏感<sup>[10]</sup>, 但对不同淹水期造成 DOC 和 DON 质量分数变化的相关研究还非常匮乏。最高水位为 155 m 时, 对已淹区(145~155 m)、未淹区(155~175 m)和对照区(175~185 m)研究发现, 有机质、全氮、水解性氮和 pH 等土壤养分差异性无统计学意义<sup>[11-12]</sup>。三峡水库完成蓄水后, 形成了最高水位 175 m、最低水位 145 m、垂直落差 30 m、总面积约 348.93 km<sup>2</sup> 的消落带。目前有学者进行了消落带土

① 收稿日期: 2016-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41275160, 40975095); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2015A013, XDJK2013A009)。

作者简介: 黄 哲(1991-), 男, 重庆长寿人, 硕士, 主要从事生态系统碳、氮循环的研究。

壤中有机质,全氮和微生物量碳、氮等土壤养分和微生物活性研究,并且得出不同淹水期有明显的季节变化和高程差异等结论<sup>[13-15]</sup>,但对不同淹水期内消落带土壤可溶性碳、氮的研究还较少.本文以三峡库区的涪陵区珍溪镇王家沟典型消落带土壤为研究对象,通过 1 年的野外实验观测和室内分析,主要探讨消落带内不同淹水期土壤 DOC 及 DON 的季节变化特征及其差异,揭示水库高水位运行后消落带土壤碳、氮的变化趋势,为研究消落带土壤环境质量和水土变化提供新的认识和理论依据.

## 1 实验材料和方法

### 1.1 研究区域概况

研究区位于重庆市涪陵区珍溪镇王家沟(北纬 29°54′,东经 107°27′),该地区具有三峡库区典型的山地、丘陵夹沟谷的地形、地貌特征,地貌类型以低山丘陵为主.其消落带地势平坦,人为干扰因素较少,属于三峡水库典型流域开阔河段冲积土型消落区.年平均气温为 17.9℃,月气温最高月在 8 月,平均为 28.6℃,最低月在 1 月,平均为 7.1℃,年平均降水量为 1 006.8 mm,太阳辐射量年平均 3 360.02 MJ/m<sup>2</sup>.

### 1.2 土壤样品采集和测定方法

#### 1.2.1 样品采集

在研究区域内选择开阔河段冲积土型消落带为研究对象,180 m 高程为对照点,而 175,165 和 155 m 处于消落带内,表现为季节性淹水.在实验期间内,175 m 高程为短期淹水(约 90 d),但由于淹水较浅,在淹水期间通过搭设栈桥的方式仍然进行了土壤样品的采集;165 m 高程为中期淹水(约 175 d),155 m 高程为长期淹水(约 260 d),由于这 2 个高程淹水较深,故没有进行土壤样品的采集.土壤样品每周采集 1 次.在每个高程上分别随机设置 3 个面积为 1 m×1 m 的样方,每个样方内设置 3 个采样点,采样深度为 0~20 cm,在每个采样点内采用蛇形采样法采集土样,充分混合后去杂,分成两部分:一部分土壤样品风干过筛,测定土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)等;另一部分鲜土样放置于冰箱中并于 4℃下保存,用来测定土壤含水率、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、DOC 及溶解性总氮(TDN)等.

#### 1.2.2 测定方法

可溶性碳氮的测定<sup>[16]</sup>:称取 10g 鲜土壤样品放入 100 mL 离心管中,按照土水比 1:2 在离心管里加入 20 mL 去离子水,常温下振荡 1 h,用离心机高速离心 10 min,转速为 4 000 r/min,取上清液用 0.45 微孔滤膜过滤,用 Multi N/C 2100(德国耶拿)分析仪测定滤出液测定 DOC 和 TDN 的质量分数.土壤铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)<sup>[17]</sup>和硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)<sup>[18]</sup>采用氯化钾溶液浸提后,利用流动注射分析仪(FIAstar 5000)测定.DON 的测定主要是差减法,即用总的溶解氮减去铵态氮与硝态氮之和,如下式:

$$\text{DON} = \text{TDN} - (\text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N})$$

采用重铬酸钾氧化法测定土壤有机碳质量分数<sup>[19]</sup>,凯氏定氮法测定全氮<sup>[19]</sup>.在采集样品的同时用 JM624 型便携式测温计测定地下 5 cm 处土壤的温度,采用烘干法测定土壤含水率<sup>[19]</sup>,采用土:水=1:2.5 水浸提酸度计法测定土壤 pH<sup>[19]</sup>.

### 1.3 数据处理

用 SPSS 17.0 软件对各个淹水期在相同时间段内(2011 年 5 月 22 日至 2011 年 9 月 3 日)以及同一淹水期不同季节的 SOC, TN, DOC 和 DON 质量分数及其分配比和碳氮比进行单因素方差分析(ANOVA),变量间的相关关系采用 Pearson 相关统计方法进行分析.采用 Origin 8.5 作图.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同淹水期 SOC 和 TN 分布特征

实验期间按 9—11 月划分为秋季,12—次年 2 月为冬季,3—5 月为春季,6—8 月为夏季来进行四季的划分.由图 1 可知,短期淹水与对照点 SOC 质量分数的变化趋势大致相同,变化范围分别为 6.07~16.31 g/kg 和 6.43~11.01 g/kg.中期淹水的 SOC 缓慢下降再逐渐升高后下降,变化范围为 8.56~13.41 g/kg.长期淹水先呈波浪形缓慢上升后下降,其最大值为 8.48 g/kg.

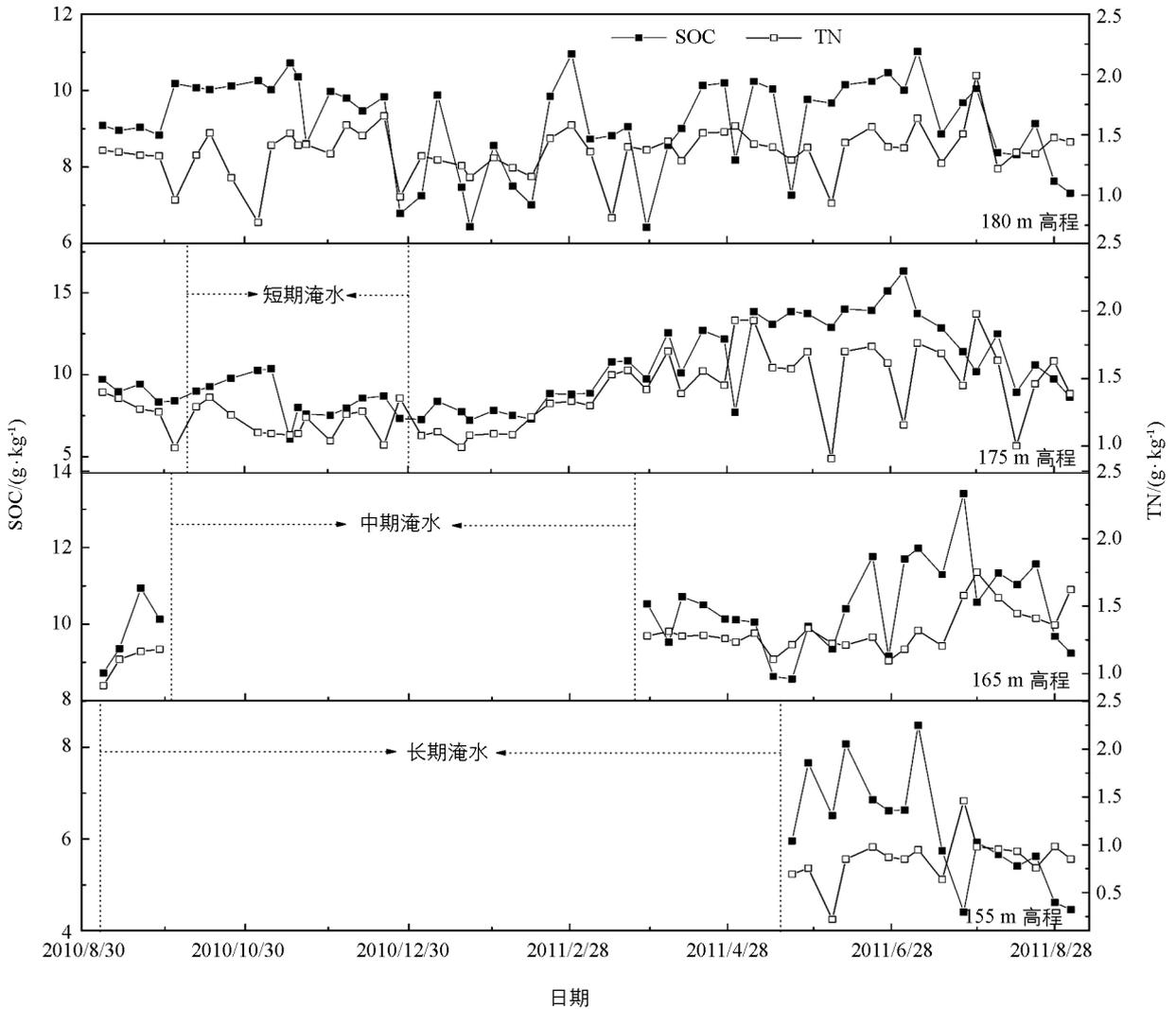


图 1 不同淹水期 SOC 和 TN 的季节变化

对照点土壤 TN 变化趋势比较稳定,多数在 1.5 g/kg 上下波动,变化范围为 0.77~1.99 g/kg. 短期淹水 TN 的季节变化呈现出现先下降后上升、再下降的趋势,变化范围为 0.99~1.98 g/kg. 中长期淹水与短期淹水变化趋势相似,变化范围为 0.91~1.75 g/kg 和 0.64~1.46 g/kg. 由表 1 可知,对照点的春、夏、秋、冬 SOC 和 TN 质量分数差异无统计学意义,而短期淹水表现为春夏明显高于秋冬季节 ( $p < 0.05$ ),经过短期淹水后, SOC 和 TN 春夏明显上升.

表 1 消落带不同淹水期不同季节 SOC, TN 的质量分数

季节	SOC 质量分数/(g·kg <sup>-1</sup> )				TN 质量分数/(g·kg <sup>-1</sup> )			
	对照点	短期淹水	中期淹水	长期淹水	对照点	短期淹水	中期淹水	长期淹水
春	9.10±0.33a	11.35±0.35a	9.87±0.24b		1.38±0.05a	1.57±0.05a	1.26±0.02a	
夏	9.35±0.30a	12.20±0.63a	11.17±0.38a	6.17±0.27	1.42±0.07a	1.52±0.09a	1.39±0.06a	0.86±0.06
秋	9.71±0.19a	8.86±0.33b			1.30±0.06a	1.21±0.04b		
冬	8.44±0.39a	7.86±0.15b			1.32±0.05a	1.15±0.03b		

注:对照点、短、中、长期淹水样本数分别为 54, 54, 27 和 16; 同列不同小写字母表示同一淹水期不同季节 SOC 和 TN 的质量分数差异有统计学意义 ( $p < 0.05$ ), 下同.

由表 2 可知,在相同时间段内,中短期淹水 SOC 质量分数显著高于对照点 ( $p < 0.05$ ),而长期淹水 SOC 含量则显著低于对照点 ( $p < 0.05$ ),即淹水时间明显影响了 SOC 的分布,中短期淹水能够促进 SOC 的积累,而长期淹水则导致 SOC 降低,使碳素流失. 中短期淹水 TN 质量分数与对照点之间无明显差异,但长期淹水 TN 质量分数显著低于对照点 ( $p < 0.05$ ),表明中短期淹水对土壤 TN 影响不明显,而长期淹

水却导致土壤 TN 降低,使得氮素流失。

表 2 消落带各淹水期相同时间段内 SOC, TN 的质量分数

淹水期	SOC 质量分数/( $g \cdot kg^{-1}$ )	TN 质量分数/( $g \cdot kg^{-1}$ )
对照点	$9.25 \pm 0.29b$	$1.41 \pm 0.06a$
短期淹水	$12.40 \pm 0.56a$	$1.53 \pm 0.07a$
中期淹水	$10.68 \pm 0.33a$	$1.36 \pm 0.05a$
长期淹水	$6.17 \pm 0.27c$	$0.86 \pm 0.06b$

注: 同列不同小写字母表示相同时间段不同高程 SOC 和 TN 的质量分数差异有统计学意义 ( $p < 0.05$ ,  $n = 16$ )。

## 2.2 不同淹水期 DOC 和 DON 分布特征

图 2 描述了不同淹水期 DOC 和 DON 质量分数的季节变化。由图可以看出, 对照点和 3 个淹水期土壤 DOC 质量分数具有相似的季节变化趋势, 其中对照点和短期淹水的全年时间曲线呈现出双峰形态, 变化范围分别为  $26.29 \sim 178.91 \text{ mg/kg}$  和  $36.12 \sim 215.05 \text{ mg/kg}$ ; 中长期淹水变化范围分别为  $10.10 \sim 213.81 \text{ mg/kg}$  和  $7.32 \sim 115.37 \text{ mg/kg}$ 。

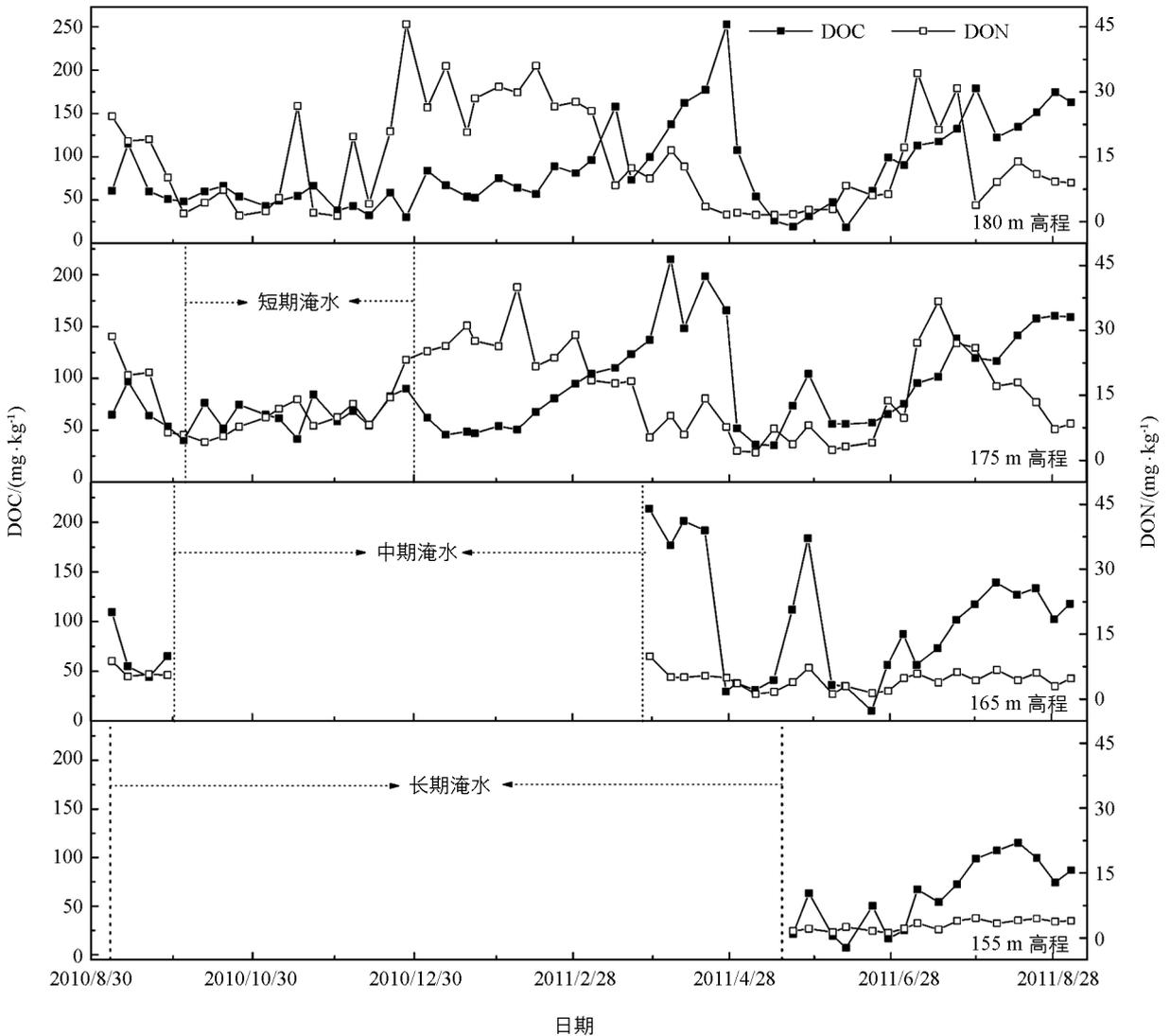


图 2 不同淹水期 DOC 和 DON 的季节变化

由图 2 可以看出, 对照点和短、中期和长期淹水下的 DON 质量分数具有相同的季节变化趋势, 其中对照点和短期淹水在全年内的时间曲线大致呈现出双峰形态, 变化范围分别为  $1.36 \sim 45.65 \text{ mg/kg}$  和  $1.19 \sim 36.71 \text{ mg/kg}$ , 中长期淹水 DON 的时间变化比较平稳, 变化范围分别为  $1.12 \sim 9.90 \text{ mg/kg}$  和

1.20~3.98 mg/kg. 各淹水期不同季节 DOC, DON 的质量分数如表 3 所示, 对照点和短期淹水 DOC 质量分数在春夏明显高于秋冬季节 ( $p < 0.05$ ), 而 DON 质量分数冬夏高于春秋季节 ( $p < 0.05$ ); 中期淹水 DOC, DON 在春夏差异无统计学意义。

表 3 消落带不同淹水期不同季节 DOC, DON 的质量分数

季节	DOC 质量分数/(mg · kg <sup>-1</sup> )				DON 质量分数/(mg · kg <sup>-1</sup> )			
	对照点	短期淹水	中期淹水	长期淹水	对照点	短期淹水	中期淹水	长期淹水
春	105.49±17.75a	114.20±14.85a	21.91±2518a		10.60±2.19b	10.71±2.09b	4.84±0.81a	
夏	110.95±13.18a	103.23±10.82a	99.44±9.66a	61.24±8.81	14.62±2.67b	15.82±2.99b	4.72±0.49a	2.89±0.30
秋	60.83±5.36b	64.56±4.84b			10.75±2.59b	11.86±2.26b		
冬	57.41±5.14b	62.32±4.07b			25.25±3.34a	22.37±2.48a		

注: 对照点、短、中、长期淹水样本数分别为 54, 54, 27 和 16; 同列不同小写字母表示同一淹水期不同季节 DOC 和 DON 的质量分数的差异性有统计学意义 ( $p < 0.05$ )。

在相同时间内, 通过单因素方差分析表明, 如表 4 所示, 对照点、中短期淹水 DOC 三者之间差异性无统计学意义, 而长期淹水 DOC 质量分数显著低于对照点 ( $p < 0.05$ ), 表明中短期淹水对土壤 DOC 质量分数无明显影响, 而长期淹水导致土壤 DOC 减少. 短期淹水和对照点 DON 间差异不明显, 但中长期淹水显著低于对照点 ( $p < 0.05$ ), 表明短期淹水对土壤 DON 质量分数无明显影响, 但中长期淹水会导致 DON 质量分数的大幅下降。

表 4 消落带各淹水期相同时间段内 DOC, DON 的质量分数

淹水期	DOC 质量分数/(mg · kg <sup>-1</sup> )	DON 质量分数/(mg · kg <sup>-1</sup> )
对照点	103.52±13.48a	12.72±2.41a
短期淹水	104.94±9.63a	14.11±2.59a
中期淹水	93.10±11.46a	4.31±0.48b
长期淹水	61.24±8.81b	2.89±0.30b

注: 同列不同小写字母表示相同时间段内不同淹水期 DOC 和 DON 的质量分数差异有统计学意义 ( $p < 0.05$ ,  $n = 16$ )。

## 2.3 DOC 和 DON 的分配比及碳氮比

DOC 或 DON 分配比指其占 SOC 或 TN 的大小, 表征土壤生物活性有机碳库周转的敏感指标, 土壤中 DOC 和 DON 分配比越高, 土壤有机碳氮周转也就越快<sup>[20]</sup>. 由表 5 可知, 各淹水期 DOC 分配差异无统计学意义; 短期淹水 DON 分配比和对照点差异无统计学意义, 而中长期显著低于对照点 ( $p < 0.05$ ). 对照点的 SOC/TN 比消落带上的 3 个淹水期低, 但差异无统计学意义. 对照点和短期淹水间 DOC/DON 差异无统计学意义, 但均显著低于中期淹水和长期淹水 ( $p < 0.05$ ).

表 5 各淹水期相同时间段内 DOC, DON 的分配比 (%) 和 C/N

淹水期	DOC 分配比/%	DON 分配比/%	DOC/DON	SOC/TN
对照点	1.16±0.18a	0.87±0.15a	10.51±1.38b	6.66±0.32a
短期淹水	0.93±0.13a	0.92±0.16a	11.52±1.78b	8.45±0.62a
中期淹水	0.90±0.11a	0.31±0.03b	23.47±1.80a	7.95±0.30a
长期淹水	1.09±0.17a	0.35±0.03b	20.70±1.87a	8.53±1.48a

注: 同列不同小写字母表示相同时间段内不同淹水期分配比和 C/N 差异有统计学意义 ( $p < 0.05$ ,  $n = 16$ )。

## 2.4 土壤可溶性碳氮与土壤理化性质的关系

由表 6 可知, DOC 与 SOC, TN 的正相关极有统计学意义, 与土壤含水率的负相关极有统计学意义; DON 与 TN 的正相关有统计学意义, 与土壤含水率、地下 5 cm 温度以及 pH 均的负相关极有统计学意义。

表 6 土壤 DOC、DON 和土壤基本理化特征的相关性分析

	DOC	DON	SOC	TN	土壤含水率	地下 5 cm 处温度	pH
DOC	1	0.120	0.221**	0.388**	-0.285**	-0.017	-0.012
DON		1	0.024	0.191*	-0.224**	-0.408**	-0.441**

注: \* 表示分析有统计学意义 ( $p < 0.05$ ,  $n = 142$ ); \*\* 表示分析极有统计学意义 ( $p < 0.01$ ,  $n = 142$ )。

## 3 讨 论

### 3.1 不同淹水期对 SOC 和 TN 的影响

研究发现,对照点 SOC 无明显季节变化,但短期淹水为春夏季高于秋冬季( $p < 0.05$ ). 由于背景值、监测时间和生态系统类型等不同导致 SOC 的季节变化存在差异<sup>[21-24]</sup>. 相关性表明 SOC 质量分数与地下 5 cm 土壤温度的正相关有统计学意义( $p < 0.05$ ),因此,春季温度回暖,土壤温度的升高一方面使 SOC 分解速率加快<sup>[25]</sup>,另一方面也会促进土壤中有机残体的分解<sup>[4]</sup>,但短期淹水植物残体未随水流失,植物残体分解从而提高 SOC 质量分数<sup>[26]</sup>. 夏季植物生长茂盛,通过光合作用合成的有机物传输到根部,然后再以根际沉积、根系分泌和根皮脱落等形式进入到土壤中,从而补充 SOC 质量分数<sup>[14]</sup>. 另外,在秋季节,175 m 高程处于淹水期,江水的浸泡冲刷会导致部分土壤碳的流失,冬季植物生长较差,进入土壤的碳源减少,从而导致短期淹水 SOC 质量分数在春夏季高于秋冬季.

三峡水库蓄水后,中短期淹水促进 SOC 的积累,而长期淹水造成 SOC 损失. 周期性淹水一方面使土壤对营养物质的机械性吸收、阻留、理化吸附、沉淀、生物吸收等过程会更加活跃,另一方面加速了土壤养分的释放、运动和扩散过程<sup>[27]</sup>,土壤营养成分是增加还是减少,还要结合流域水文变化、消落带地势特征和植被状况来定. 本研究所选择的消落带坡度比较平缓,中短期淹水植物残体仍然保留在原地,增强水土保持和截留作用,降低江水对土壤的冲刷浸泡侵蚀,从而增加了外源有机质对 SOC 的补充. 虽然有研究认为干湿交替能够促进 SOC 的分解速率<sup>[28]</sup>,但不同水位高程土壤淹没的时间和落干的时期不同, SOC 累积和分解的速率及程度均会受到影响. 由消落带 3 个落干时间不同,夏季对照、短、中和长期淹水生物量分别为 256.5, 329.0, 236.4 和 150.3 g/m<sup>2</sup>,短中期淹水植物繁茂,因此中短期淹水 SOC 来源充足. 而长期淹水影响植物生长,减少对土壤碳的供给,高温和地表裸露可能促进了干湿交替对土壤有机质的分解速率<sup>[10]</sup>. 研究发现在三峡库区长期淹水的土壤会导致软化、泥化现象,表层土壤容易受浪击和雨水的侵蚀,导致土壤表层丧失<sup>[29]</sup>,使得其中的碳随之流失. 与对照相比,消落带中短期淹水土壤 TN 质量分数并无明显差异,但长期淹水土壤 TN 质量分数显著降低( $p < 0.05$ ). 土壤中氮素主要以有机态存在,土壤氮的积累和消耗程度取决于土壤有机质的积累和分解<sup>[30]</sup>,相关分析表明, TN 与 SOC 的质量分数正相关极有统计学意义( $r = 0.547$ ,  $p < 0.01$ ),与三峡库区已有的相关研究结果相一致<sup>[10,31-32]</sup>,说明库区消落带 TN 和 SOC 具有相同的消长趋势,土壤全氮质量分数的消长在很大程度上取决于土壤有机质质量分数的变化.

### 3.2 不同淹水期对 DOC 和 DON 的影响

三峡库区对照点和短期淹水土壤 DOC 的变化趋势相同,春夏季显著高于秋冬季( $p < 0.05$ ),和 SOC 季节变化趋势一样. 由表 5 可知, DOC 与 SOC 正相关极有统计学意义,这与 SOC 季节变化的原因相类似. DON 与 DOC 的季节变化有所不同,表现为秋冬季显著高于春秋季节( $p < 0.05$ ),2011 年 1 月水位下降,而对照点和短期淹水的土壤 DON 出现第一个峰,冬季植物生长较弱,新陈代谢不高,土壤微生物的繁衍有限,受到温度的制约,微生物数量和活性远不及夏季高,而 DON 上升,可能 DOC 和 DON 在土壤中的迁移转化等方面存在着差异. 韩建刚等<sup>[33]</sup>研究表明,含水量从 35% 降低到 5% 以下时,  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NO}_2^-$  质量分数从 50 mg/kg 左右下降到 3 mg/kg 左右,而 DON 却从 24 mg/kg 上升到 65 mg/kg,说明土壤中可能有大量的  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NO}_2^-$  转化为 DON,又 Rückauf 等<sup>[34]</sup>的研究表明沉积物变干过程中  $\text{NO}_3^-$ -N 的减少主要是转化为有机氮,这可能导致与 DOC 季节变化不一致,造成这个特殊现象的其他原因,还需要进一步的观测和研究.

研究发现,中短期淹水对土壤 DOC 无明显影响,长期淹水导致土壤 DOC 显著降低( $p < 0.05$ );短期淹水对土壤 DON 无明显影响,而中长期淹水导致土壤 DON 显著降低( $p < 0.05$ ). 贾国梅等<sup>[20]</sup>研究三峡库区发现消落带长期淹水 DOC 质量分数明显低于对照点,与本文结果类似. 由表 6 可知,土壤可溶性碳氮除了受到有机物质的影响还与无机环境紧密相关. 由前文可知,长期淹水造成 155 m 其来源减少,土壤 SOC 和 TN 质量分数低于另外 3 个高程,又 DOC 与 SOC, TN 正相关极有统计学意义, DON 与 TN 正相关有统计学意义,导致长期淹水土壤的 DOC 和 DON 减少. 王媛华分 3 个水分梯度(45%, 75%, 105% WHC, WHC 为土壤饱和持水量)研究 DOC 质量分数的变化,培养超过 40 d 后发现 105% WHC 明显低于其他两个水分梯度<sup>[35]</sup>. 而在本研究区域,长期淹水达 260 d,土壤中的 DOC 随水浸泡而流失;同样 DON 移动性相对较强,可随水分运移而发生径流或淋溶流失<sup>[36]</sup>,也导致中长期淹水 DON 减少. 土壤 pH 影响土壤微生物

物的种类及活性, 微生物的繁殖生存需要一个适宜的土壤 pH 值范围, 有学者认为土壤 pH 超过 8.0 或低于 3.0 都会抑制土壤微生物量<sup>[37]</sup>. 由表 7 可知, 在本研究中, 随着淹水时间的增加, 土壤环境由弱酸性演变成偏碱性. 相关性分析表明, DOC, DON 均与 pH 呈负相关(表 6), 且 DON 与 pH 的负相关水平极有统计学意义( $p < 0.01$ ), 表明该研究区域土壤微生物可能更适应酸性土壤环境, 淹水可能会导致微生物生存环境恶化. 综上所述, 中、长期淹水土壤的 DOC 和 DON 流失可能与江水的浸泡侵蚀有关; 同时, 淹水时间的增加会导致地面生物量减少, 土壤碳氮的供给受限; 另外, 淹水造成的不利于微生物生长的土壤环境可能也是导致中、长期淹水土壤的 DOC 和 DON 较低的原因之一.

表 7 消落带各高程相同时间段内 pH、土壤含水率和温度的值<sup>6)</sup>

淹水期	pH	土壤含水率/%	地下 5 cm 温度/°C
对照点	6.74 ± 0.71d	17.23 ± 2.08a	26.43 ± 0.80a
短期淹水	7.76 ± 0.11c	20.00 ± 1.94a	26.19 ± 0.58a
中期淹水	8.12 ± 0.37b	22.34 ± 1.95a	26.80 ± 0.67a
长期淹水	8.35 ± 0.03a	21.83 ± 1.59a	26.12 ± 0.46a

注: 同列不同小写字母表示相同时间段内不同季节高程 pH、土壤含水率和地下 5 cm 温度差异有统计学意义( $p < 0.05$ ,  $n = 16$ ).

### 3.3 不同淹水期对 DOC、DON 的分配比和碳氮比的影响

研究表明, 相比于对照点, 消落带各淹水期对 DOC 分配比的影响均不明显, 短期淹水土壤 DON 分配比差异无统计学意义, 但中长期淹水显著降低( $p < 0.05$ ), 表明期淹水对土壤有机碳的周转影响不明显, 而中长期淹水抑制土壤有机氮周转. 土壤碳氮比是土壤质量的敏感指标, 可用于衡量土壤碳氮营养平衡状况, 反应土壤生物分解过程中碳和氮转化作用的密切关系. 土壤生物在土壤碳氮比约为 25 时获得平衡营养, 低的碳氮比会加快微生物的分解和氮的矿化速率, 当土壤碳氮比小于 25 时, 土壤有机氮则会出现净矿化, 是微生物分解的最佳值<sup>[38]</sup>. 本研究各个淹水期 SOC/TN 小于 25 且较低, 表明土壤有机质腐殖化程度较高, 易于有机氮矿化, 但各个淹水期差异性无统计学意义, 表明淹水时间长短对土壤生物分解过程中碳和氮转化作用不明显, 这与郭劲松等<sup>[31]</sup>在三峡库区消落带的研究一致. 中长期淹水 DOC/DON 明显高于对照点和短期淹水且都小于 25, 表明 DON 矿化作用在对照点和短期淹水下较强, 而在中长期淹水下则较弱, 中长期淹水影响土壤生物分解过程中土壤可溶性碳氮转化作用.

## 4 结 论

三峡库区完成蓄水后, 短期淹水的 SOC 及 TN 有明显的季节变化, 表现为春夏季显著高于秋冬季, 对照点和短期淹水土壤 DOC 呈现出与之相似的季节变化趋势, 而 DON 季节变化为冬夏季高于春秋. 在相同时间段内, 相比于对照点, 中短期淹水 SOC 质量分数显著升高, TN 及 DOC 质量分数无明显差异, 而长期淹水的 SOC, TN 及 DOC 质量分数则显著降低, 短期淹水 DON 质量分数无明显变化, 而中长期淹水则明显降低. 表明中短期淹水对土壤有机碳有富集作用, 而长期淹水导致土壤质量变差, 土壤碳氮流失. 消落带各淹水期 DOC 分配比及 SOC/TN 差异不明显, 短期淹水的 DON 分配比及 DOC/DON 无明显变化, 中长期淹水的 DON 分配比显著低于对照, 而 DOC/DON 则显著高于对照, 表明淹水对土壤有机碳的周转速率和碳氮的矿化无影响, 却抑制土壤有机氮周转和可溶性氮的矿化.

### 参考文献:

- [1] 汪景宽, 李 丛, 于 树, 等. 不同肥力棕壤溶解性有机碳、氮生物降解特性 [J]. 生态学报, 2008, 28(12): 6165—6171.
- [2] MAGILL A H, ABER J D. Dissolved Organic Carbon and Nitrogen Relationships in Forest Litter as Affected by Nitrogen Deposition [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(5): 603—613.
- [3] 肖 焯, 黄志刚, 武海涛, 等. 三江平原不同湿地类型土壤活性有机碳组分及含量差异 [J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7625—7633.
- [4] 吴 艳, 江长胜, 郝庆菊. 西南地区紫色水稻土活性碳库的季节动态 [J]. 环境科学, 2012, 33(8): 2804—2809.
- [5] 杨青青, 陈小花, 余雪标, 等. 滨海台地典型森林类型土壤可溶性有机碳季节变化 [J]. 热带作物学报, 2016, 37(1):

30—35.

- [6] 齐玉春, 彭 琴, 董云社, 等. 温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应 [J]. 环境科学, 2014, 35(8): 3073—3082.
- [7] 吴健敏, 郝 敏, 孔范龙, 等. 土壤溶解性有机碳(DOC)动态变化影响因素研究进展 [J]. 地质评论, 2013, 59(5): 953—961.
- [8] 苏冬雪, 王文杰, 邱 岭, 等. 落叶松林土壤可溶性碳、氮和官能团特征的时空变化及与土壤理化性质的关系 [J]. 生态学报, 2012, 32(21): 6705—6714.
- [9] 沈玉芳, 陶武辉, 李世清. 有机物料输入对干润砂质新成土可溶性有机碳、氮的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(1): 139—145.
- [10] 王晓荣, 程瑞梅, 肖文发, 等. 三峡库区消落带初期土壤养分特征 [J]. 生态学杂志, 2010, 29(2): 281—289.
- [11] 常 超, 谢宗强, 熊高明, 等. 三峡水库蓄水对消落带土壤理化性质的影响 [J]. 自然资源学报, 2011, 26(7): 1236—1244.
- [12] 高 洁, 江 韬, 李璐璐, 等. 三峡库区消落带土壤中溶解性有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征 [J]. 环境科学, 2015, 36(1): 151—162.
- [13] 毛文韬, 李堂中, 辜夕容, 等. 三峡库区消落带不同高程柳树林地养分特征 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(3): 119—125.
- [14] 柴雪思, 雷利国, 江长胜, 等. 三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨 [J]. 环境科学, 2016, 37(8): 2979—2988.
- [15] 李 飞, 张文丽, 刘 菊, 等. 三峡水库泄水期消落带土壤微生物活性 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(4): 968—974.
- [16] 黄靖宇, 宋长春, 宋艳宇, 等. 湿地垦殖对土壤微生物量及土壤溶解有机碳、氮的影响 [J]. 环境科学, 2008, 29(5): 1380—1387.
- [17] 宋海星, 李生秀. 根系的吸收作用及土壤水分对硝态氮、铵态氮分布的影响 [J]. 中国农业科学, 2005, 38(1): 96—101.
- [18] CROOKE W M, SIMPSON W E. Determination of Ammonium in Kjeldahl Digests of Crops by an Automated Procedure [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1971, 22(1): 9—10.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [20] 贾国梅, 牛俊涛, 席 颖. 三峡库区消落带湿地土壤有机碳及其组分特征 [J]. 土壤, 2015, 47(5): 926—931.
- [21] 陈涵贞, 苏德森, 吕 新, 等. 武夷山常绿阔叶林土壤有机碳和微生物量碳的动态特征 [J]. 农学学报, 2011, 1(10): 38—42.
- [22] 侯翠翠, 宋长春, 李英臣, 等. 不同水分条件下小叶章湿地表土有机碳及活性有机碳组分季节动态 [J]. 环境科学, 2011, 32(1): 290—297.
- [23] 赖建东, 田 昆, 郭雪莲, 等. 纳帕海湿地土壤有机碳和微生物量碳研究 [J]. 湿地科学, 2014, 12(1): 49—54.
- [24] 马维伟, 王 辉, 李 广, 等. 甘南尕斯湖湿地不同植被退化阶段土壤有机碳含量及动态 [J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 254—259.
- [25] 潘新丽, 林 波, 刘 庆. 模拟增温对川西亚高山人工林土壤有机碳含量和土壤呼吸的影响 [J]. 应用生态学报, 2008, 19(8): 1637—1643.
- [26] 顾克军, 张传辉, 顾东祥, 等. 短期不同秸秆还田与耕作方式对土壤养分与稻麦周年产量的影响 [J]. 西南农业学报, 2017, 30(1): 1408—1414.
- [27] 范小华, 谢德体, 魏朝富. 水、土环境变化下消落区生态环境问题研究 [J]. 农业资源与环境科学, 2006, 22(10): 374—379.
- [28] 白军红, 邓 伟, 朱颜明, 等. 霍林河流域湿地土壤碳氮空间分布特征及生态效应 [J]. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1494—1498.
- [29] 王 晶, 张旭东, 解宏图, 等. 现代土壤有机质研究中新的量化指标概述 [J]. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1809—1812.
- [30] DECAU M L, SIMON J C, JACQUET A. Nitrate Leaching Under Grassland as Affected by Mineral Nitrogen Fertilizer and Cattle Urine [J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33(2): 637—644.
- [31] 郭劲松, 黄轩民, 张 彬, 等. 三峡库区消落带土壤有机质和全氮含量分布特征 [J]. 湖泊科学, 2012, 24(2): 213—219.
- [32] 王业春, 雷 波, 张 晟. 三峡库区消落带不同水位高程植被和土壤特征差异 [J]. 湖泊科学, 2012, 24(2): 206—212.
- [33] 韩建刚, 曹 雪. 典型滨海湿地干湿交替过程氮素动态的模拟研究 [J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2383—2389.
- [34] RÜCKAUF U, AUGUSTIN J, RUSSOW R, et al. Nitrate Removal from Drained and Reflooded Fen Soils Affected by

Soil N Transformation Processes and Plant Uptake [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(1): 77–90.

- [35] 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.
- [36] 李成芳, 曹湊贵, 汪金平, 等. 稻鸭、稻鱼共作生态系统土壤可溶性有机 N 的动态和损失 [J]. *生态学报*, 2009, 29(5): 2541–2550.
- [37] SRIVASTAVA S C. Microbial C N and P in Dry Tropical Soils; Seasonal Changes and Influence of Soil Moisture [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1992, 24(7): 711–714.
- [38] PRESCOTT C E, CHAPPELL H N, VESTERDAL L. Nitrogen Turnover in Forest Floors of Coastal Douglas-Fir at Sites Differing in Soil Nitrogen Capital [J]. *Ecology*, 2000, 81(7): 1878–1886.

## Soil Dissolved Organic Carbon and Nitrogen in the Water-Level-Fluctuating Zone with Different Flooding Durations in the Three Gorges Reservoir Region

HUANG Zhe, JIANG Chang-sheng, LEI Li-guo,  
CHAI Xue-si, FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju

*Key Laboratory of Eco-Environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education)/  
School of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China*

**Abstract:** Sampling points were set in a typical drawdown area located in Wangjiagou of Fuling in the Three Gorges Reservoir region of Chongqing at an elevation of 180 m (control, never flooded), 175 m (short-term flooding, 90 days), 165 m (medium-term flooding, 175 days) or 155 m (long-term flooding, 260 days) to study the effect of different flooding durations on soil dissolved organic carbon (DOC) and soil dissolved organic nitrogen (DON). Soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) showed no obvious seasonal variations at the sampling point of 180 m (control). However, they were significantly higher in spring and summer than in autumn and winter at the sampling point of 175 m (short-term flooding,  $p < 0.05$ ). As for DOC and DON, there were remarkable seasonal variations in the control and the short-term flooding treatment, the DOC in spring and summer being significantly higher than in autumn and winter ( $p < 0.05$ ), while DON in winter and summer was higher than in spring and autumn ( $p < 0.05$ ). In the same observing period (May 22nd 2010 to Sept. 3rd 2011), compared with that of the control, SOC significantly increased with medium-and short-term flooding ( $p < 0.05$ ), but SOC, TN, DOC and DON significantly decreased with long-term flooding ( $p < 0.05$ ), indicating that lower elevation and longer flooding time were likely to result in the loss of soil dissolved organic carbon and nitrogen in the drawdown area. Compared with the control, there were no obvious differences in DOC/SOC ratio and SOC/TN ratio in the three different flooding durations in the fluctuating zone, but the DON/TN ratios of medium and long-term flooding were significantly lower and the DOC/DON ratios were higher than the control ( $p < 0.05$ ), which suggested that mineralization of soil organic carbon and nitrogen and turnover rate of SOC were not obvious in the drawdown area, meanwhile medium-and long-term flooding diminished turnover rate of nitrogen and mineralization of DON. Correlations analyses showed that the soil dissolved organic carbon and nitrogen were influenced and regulated mainly by TN, soil moisture, pH and soil temperature at 5 cm soil depth.

**Key words:** Three Gorges Reservoir region; water-level-fluctuating zone; different flooding durations; soil dissolved organic carbon; soil dissolved organic nitrogen

