

# 三江平原环型湿地土壤溶解性有机碳的 时空变化特征\*

孔范龙<sup>1†</sup> 郝 敏<sup>1</sup> 吕宪国<sup>2</sup> 邹元春<sup>2</sup> 李 悦<sup>1</sup>

(1 青岛大学化学化工与环境学院, 山东青岛 266071)

(2 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012)

## SPATIAL AND TEMPORAL VARIATION OF DISSOLVED ORGANIC CARBON IN SOILS OF ANNULAR WETLANDS IN SANJIANG PLAIN, CHINA

Kong Fanlong<sup>1†</sup> Xi Min<sup>1</sup> Lü Xianguo<sup>2</sup> Zou Yuanchun<sup>2</sup> Li Yue<sup>1</sup>

(1 College of Chemical and Environmental Engineering, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China)

(2 Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS, Changchun 130012, China)

**关键词** 土壤溶解性有机碳; 时空变化; 环型湿地; 三江平原

**中图分类号** X144 **文献标识码** A

土壤溶解性有机碳(DOC)是指溶解于土壤水、且能通过 $0.45\mu\text{m}$ 微孔滤膜的有机态碳,是土壤有机碳中最活跃的组成部分<sup>[1-2]</sup>。一般认为,土壤DOC的产生源自有机物的不完全降解,因此冷湿或贫营养环境、土壤有机质和C/N摩尔比高的区域有利于DOC的产生<sup>[3]</sup>。自然湿地,尤其是位于中纬度地区的湿地,储存了大量的碳,是重要的DOC库和河流DOC的主要来源<sup>[4-5]</sup>。

环型湿地是三江平原湿地的重要组成部分,系指以明水面为中心,以岛状林为边界的碟形洼地<sup>[6]</sup>。由环型湿地中心到边缘,水位逐渐降低以至消失,土壤含水量及湿地冷湿作用逐渐降低<sup>[7]</sup>,通气性逐渐增强,土壤由还原环境逐渐变为氧化环境<sup>[8]</sup>,土壤上覆的植被也由沼生和湿生过渡到中生<sup>[9]</sup>。环型湿地以较丰富的生物多样性、较大的环境梯度变化和敏感的环境变化反应等特点,为研究湿地土壤DOC的时空变化特征提供了良好的实验对象。

本研究旨在揭示环型湿地土壤DOC的时空变化特征,其研究结果有助于深入理解湿地土壤DOC的环境化学行为特点及其控制因素,为追踪DOC在土壤中的迁移、转化和归趋等提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

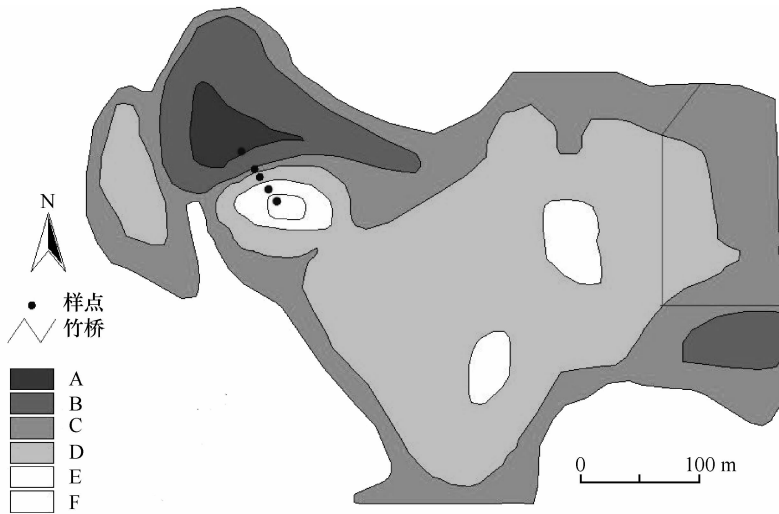
选取中国科学院三江平原沼泽生态试验站内的环型湿地,沿着一定的环境梯度,按照不同的植物群落进行样品采取,其水文情势由无积水、偶发积水逐渐增加为常年积水,具有代表性(图1)。植被群落由蒙古栎-白桦(*Ass. Quercus mongolica - Betula platyphylla*)群落、小叶章(*Doyeuxia augustifolia*)群落、乌拉苔草(*C. meyeriana*)群落、毛果苔草(*Carex lasiocapa*)群落,逐步过渡到漂筏苔草(*C. pseudocuraica*)群落。

\* 国家自然科学基金项目(41101080)、山东省自然科学基金项目(ZR2011QD009)、山东省高等学校科技计划项目(J12LC04)和青岛市公共领域科技支撑计划项目(12-1-3-71-nsh)资助

† 通讯作者, E-mail: kongfanlong@126.com

作者简介: 孔范龙(1979—), 男, 山东临沂人, 硕士, 讲师, 主要从事湿地生态过程研究。E-mail: kongfanlong@126.com

收稿日期: 2012-09-18; 收到修改稿日期: 2013-01-28



A: 蒙古栎白桦群落; B: 沼柳小叶章群落; C: 小叶章群落; D: 乌拉苔草群落; E: 毛苔草群落; F: 漂筏苔草群落

图1 环型湿地植被分布及样点布设

## 1.2 采样方法

本研究沿环型湿地中心到边缘设置1条样带,跨越5个植物群落,每个群落随机设定3个样点,分0~10、10~20、20~40、40~60 cm等4层采样,分层均匀混合后,代表该群落的土壤DOC剖面。挑净、风干、过100目筛后待测。土壤采集时间为2006年6月20日。土壤溶液水样采用中国科学院南京土壤研究所研制的陶土管土壤溶液定点实时采集装置,于2005年10月按A、B、C、D、E群落分别距地表10、20、40和60 cm预埋设陶土管。2006年6月20日(化冻后)、8月23日(完全解冻)和10月25日(上冻前)分3次采样。采样时利用真空泵抽气造成棕色集水瓶(预先以盐酸酸化处理)中负压,原位抽取24 h,个别难以抽取者二次加压。所采土壤溶液冷藏于采样箱中,1 h内送往实验室测定。另外采集各点同层土样送回实验室分析DOC的背景含量。

## 1.3 分析方法

土壤DOC含量测定:称取10 g风干土放入盛有40 ml蒸馏水的三角瓶中,常温下震荡浸提30 min,高速离心10 min,上清液用0.45 μm滤膜过滤,用岛津总有机碳分析仪(TOC<sub>VCPI</sub>)测定浸提液中的有机碳浓度,得到DOC浓度<sup>[10]</sup>。土壤溶液中DOC浓度用0.45 μm滤膜过滤后直接用岛津总有机碳分析仪(TOC<sub>VCPI</sub>)测定。

土壤全铁经HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub>消解0.5 h后

采用原子吸收光度法测定;土壤溶液不同价态铁依据GB/T 8538-1995中铁测定标准,其中加入盐酸羟胺还原后测得全铁,不加则测得Fe<sup>2+</sup>,二者之差为Fe<sup>3+</sup><sup>[6]</sup>。土壤溶液中总有机碳(TOC)、全氮(TN)和磷酸盐(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)等依据相关国家标准测定<sup>[11]</sup>。

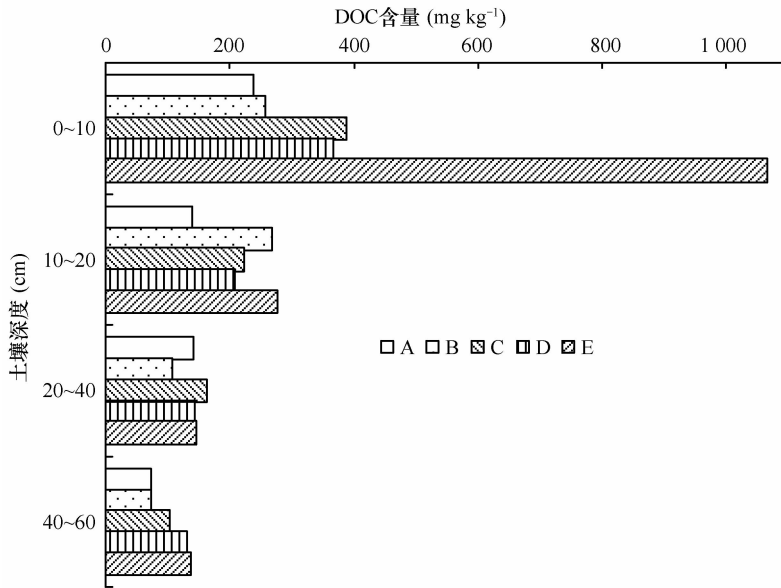
## 1.4 数据处理

方差分析采用SPSS 14.0提供的分析程序;土壤DOC浓度和含量分布图利用OriginPro 8.0绘制。

## 2 结果与讨论

### 1.5 环型湿地土壤DOC含量的空间分布

从环型湿地各群落土壤DOC含量的垂直分布特征(图2)可以看出,随着土壤深度的增加,土壤DOC含量呈递减的趋势。单因素方差分析表明,各层的DOC含量具有显著性差异( $p < 0.05$ )。将各土层DOC含量与土壤总有机碳(TOC)含量进行相关分析,结果发现DOC与TOC含量间存在着高度正相关关系,经线性拟合得到 $Y(\text{DOC含量}) = 64.3X(\text{TOC含量}) + 67.9 (R^2 = 0.897)$ (图3),表明环型湿地土壤DOC随TOC含量的降低由表层向下呈显著减少趋势。由此可见,土壤表层植被是土壤DOC垂直分布的一个重要的源,这与以往自然生态系统土壤DOC来源研究基本一致<sup>[12]</sup>。



A: 蒙古栎白桦群落; B: 沼柳小叶章群落; C: 小叶章群落; D: 乌拉苔草群落; E: 毛苔草群落

图2 环型湿地土壤 DOC 含量随深度的变化

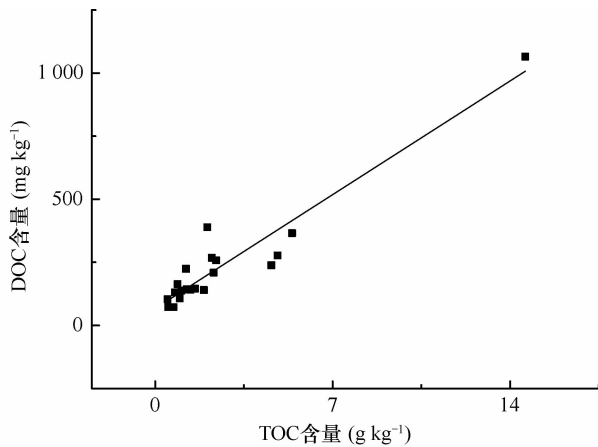


图3 环型湿地土壤 DOC 与 TOC 含量的线性关系拟合图

但是, E 和 ABCD 土壤 DOC 垂直分布又有明显的不同。E 中 DOC 明显集中在土壤表层(0~10 cm),其含量为  $1.06 \text{ g kg}^{-1}$ , E 和 ABCD 之间 DOC 含量差异显著( $p < 0.05$ )。随着土壤深度增加,从 0~10 cm 至 10~20 cm 层, E 中土壤 DOC 含量显著降低,降幅达到 65.7%。从 10~20 cm 向下 E 中土壤 DOC 含量随深度呈递减的分布规律,但 E 和 ABCD 之间土壤 DOC 含量的差异变得不显著。

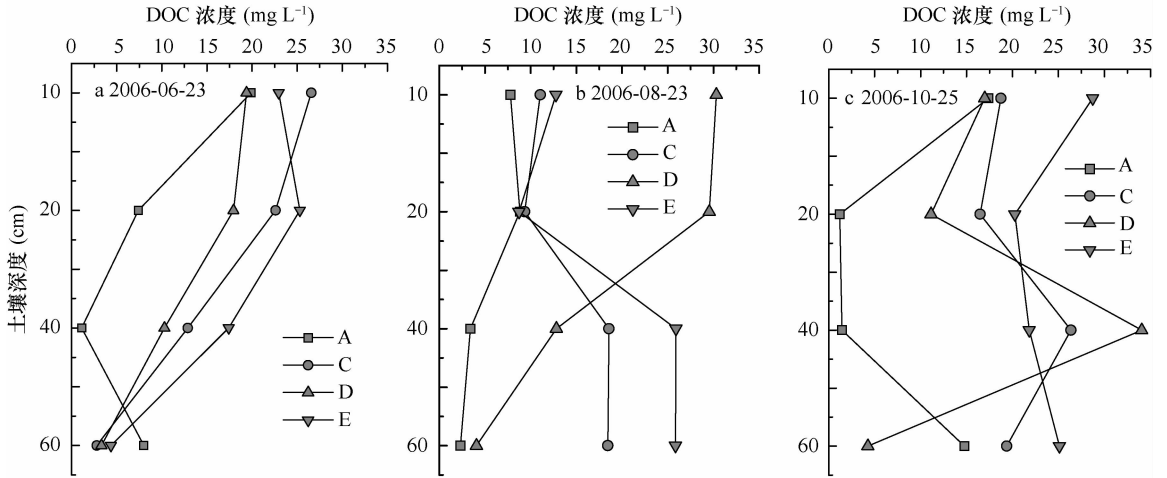
随着积水深度的减少,环型湿地各群落土壤 DOC 含量均值呈递减的趋势,具体表现为  $E > D > BC > A$ , E 中土壤 DOC 含量最高,其值达到  $0.406 \text{ mg kg}^{-1}$ , A 中土壤 DOC 含量最低,其值为  $0.148$

$\text{g kg}^{-1}$ 。通过单因素方差分析表明, E 和 ABCD 之间土壤 DOC 含量具有显著性差异, ABCD 之间没有显著性差异( $p < 0.05$ )。

与 ABCD 相比, E 土壤 DOC 含量明显高且集中于表层,主要原因与其所处的水文地貌条件密切相关。E 处于环型湿地地势最低洼的地方,常年积水且排水不畅<sup>[8]</sup>,湿地冷湿作用最强<sup>[7]</sup>。淹水可提高土壤有机碳的溶出,使土壤团聚体分散,进而增加土壤 DOC 含量<sup>[13-14]</sup>。冷和湿容易造成厌氧条件,而这样的条件极易产生较多量的 DOC<sup>[15]</sup>。排水不畅则使表层土壤 DOC 向下淋溶迁移的能力降低,因此 E 土壤 DOC 含量明显最高且集中于表层。A 处于环型湿地地势最高的地方,常年无积水且排水良好,土壤 DOC 含量最低且向土壤下层淋溶迁移的趋势明显。BCD 处于以上两种群落之间,土壤 DOC 含量和垂直分布情况也基本处于两者之间。

## 2.2 环型湿地土壤溶液中 DOC 浓度的季节变化

土壤溶液中的 DOC 浓度具有明显的季节变化特征(图4)。6 月份各群落的 DOC 浓度基本随采样深度增加而降低,最大值多出现在 10 cm 处,而最小值多出现在 60 cm 处。8 月、10 月与 6 月份的趋势不同,DOC 浓度呈现出先降低后升高然后再降低的趋势,最大值多出现在 40 cm 处,而最小值则分别出现在 20 cm 和 60 cm 处。



A: 蒙古栎白桦群落; C: 小叶章群落; D: 乌拉苔草群落; E: 毛苔草群落

图4 土壤溶液中 DOC 浓度的季节变化

随土壤深度的增加,环型湿地各季节土壤溶液中的 DOC 浓度均值呈阶段降低的趋势,即 20 cm 处土壤溶液中 DOC 的浓度低于 10 cm 处,而 60 cm 处土壤溶液中 DOC 的浓度低于 40 cm 处。就不同群落而言,A 土壤溶液中 DOC 浓度最低,平均值为  $7.8 \text{ mg L}^{-1}$ ,其次为 C 和 D,其土壤溶液 DOC 浓度均值为  $16.9 \text{ mg L}^{-1}$  和  $16.2 \text{ mg L}^{-1}$ ,E 土壤溶液中 DOC 浓度最高,平均值为  $19.98 \text{ mg L}^{-1}$ 。通过对各群落土壤溶液中 DOC 浓度均值的进一步分析,表明 E 和 ACD 之间土壤溶液 DOC 浓度差异显著,ACD 之间差异不显著。

从整个环型湿地 16 个采样点的 DOC 浓度均值的季节性变化中可以看出,自春季化冻开始,土壤 DOC 在不断增加,土壤溶液中 DOC 的浓度由 6 月的  $13.89 \text{ mg L}^{-1}$ ,上升到 8 月的  $14.36 \text{ mg L}^{-1}$ ,进而上升到 10 月的  $17.38 \text{ mg L}^{-1}$ ,如图 5 所示。从理论上讲,环型湿地 7、8 月的温度最高,降雨相对集中,积水最深,因此,促使 DOC 产生的微生物活性最强,土壤的还原性也最强,此时的 DOC 浓度应最高。然而,测定结果表明,10 月上冻前土壤溶液中 DOC 浓度高于 8 月。这种“反常”趋势很可能与环型湿地特殊的几何形状和秋季新鲜凋落物的分解密切相关。环型湿地属闭合洼地,没有地表排水,只有地下排水。从 8 月到 10 月,环型湿地静水环境中土壤溶液不断蒸发和浓缩,秋季又有新鲜凋落物分解和淋溶输入,最终使土壤溶液 DOC 浓度呈增加趋势<sup>[16]</sup>。8 月湿地处于夏季,降水丰富,湿地植物生长旺盛,吸收能力强。夏季降水量和径流量的增加使土壤 DOC 通量增加,

但同时水量增加也会稀释和降低 DOC 浓度<sup>[16]</sup>。湿地植物生长旺盛会促进 DOC 的产生和释放,但其对 DOC 的消耗也会有所增加,使夏季湿地土壤溶液中 DOC 浓度较低。

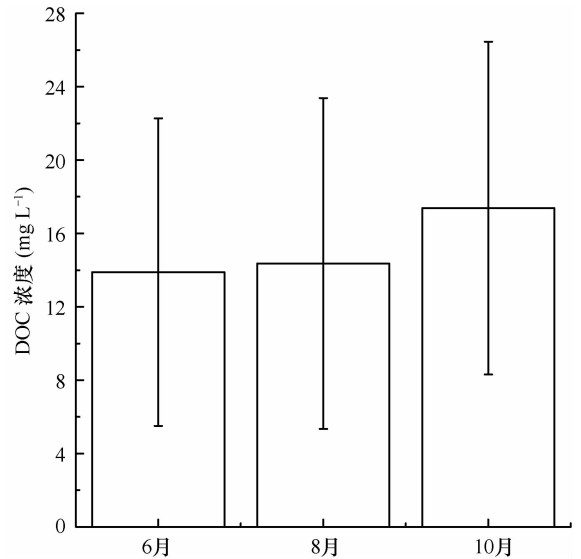


图5 环型湿地土壤溶液中 DOC 浓度(均值)的季节变化

### 2.3 环型湿地土壤溶液中 DOC 与土壤理化性质的关系

利用 Pearson 相关分析,可以发现土壤溶液中 DOC 浓度与 TOC、TC、TP、TN、 $\text{PO}_4^{3-}$ 、TFe、 $\text{Fe}^{3+}$  和  $\text{Fe}^{2+}$  均具有显著( $p < 0.05$ )和极显著( $p < 0.01$ )相关(表 1)。其中,DOC 与 TP、 $\text{PO}_4^{3-}$  的相关系数都为负数,表明随着 DOC 的浓度的升高,TP、 $\text{PO}_4^{3-}$  会降低,

这与以往研究一致<sup>[17]</sup>。例如,氧化环境下,大量好氧微生物将大量含磷有机物分解为  $\text{PO}_4^{3-}$  离子,使土壤溶液中  $\text{PO}_4^{3-}$  浓度升高,而同样的环境下,土壤溶液中 DOC 容易发生矿化反应,使土壤溶液中 DOC 浓度迅速降低<sup>[18]</sup>。由此可见,土壤溶液中 DOC 浓度和  $\text{PO}_4^{3-}$  呈负相关关系主要与两者释放环境不同有关。

表 1 环型湿地土壤溶液中 DOC 与其他理化指标的相关分析

项目	相关系数	双尾检验值	显著性水平	样本数
TOC ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0.755	0.000	0.01	50
TC ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0.522	0.000	0.01	50
Fe ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0.316	0.029	0.05	48
$\text{Fe}^{2+}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0.298	0.039	0.05	48
$\text{Fe}^{3+}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0.310	0.032	0.05	48
TP ( $\text{mg L}^{-1}$ )	-0.494	0.000	0.01	47
$\text{PO}_4^{3-}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	-0.543	0.000	0.01	51
TN ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0.453	0.001	0.01	51
$\text{NO}_3^-$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0.077	0.593	—	51
$\text{NO}_2^-$ ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	0.264	0.067	—	49
$\text{NH}_4^-$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0.154	0.318	—	44
pH (水土质量比为 10:1)	-0.202	0.159	—	50

一些学者研究发现,pH 的增大能够促进微生物的活性,从而促进 DOC 的释放。但是,本研究中 DOC 浓度与 pH 的相关系数为 -0.202,相关关系不显著,这说明土壤溶液中 pH 的增加不会引起 DOC 浓度的显著变化,这与以往部分研究结果一致<sup>[19]</sup>。在岛状林湿地研究中,土壤溶液中 DOC 浓度与  $\text{NO}_3^-$  呈显著相关关系,与  $\text{NH}_4^-$  有一定的相关性<sup>[17]</sup>。本研究中 DOC 与  $\text{NH}_4^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$  的相关系数分别为 0.154、0.077 和 0.264,相关关系不显著,可能与除岛状林以外的环型湿地所处的还原环境密切相关。

DOC 与 TOC、TC 呈极显著相关关系,说明土壤溶液中 DOC 浓度与总有机碳含量及其分布密切相关,而且 DOC 的变化可能会影响整个土壤碳库的分布<sup>[20]</sup>,也说明土壤 DOC 是土壤环境变化的重要活性有机碳组分<sup>[21]</sup>。DOC 与 TN、TFe、 $\text{Fe}^{3+}$  和  $\text{Fe}^{2+}$  的相关系数都为正数,表明 DOC 与铁、氮具有较好的共存性,特别是湿地土壤中氮含量的增加,土壤营养水平的提高,能够刺激微生物活性<sup>[22]</sup>,致使其新陈代谢加快,土壤溶液中 DOC 浓度升高。在 DOC 含量比较丰富的湿地土壤中,部分可溶性铁可能以有机物络合

态存在。因此,在厌氧实验中,DOM 的释放总是和铁的溶解同时发生<sup>[23]</sup>。

### 3 结 论

独特的水文地貌结构决定了环型湿地独特的土壤 DOC 空间分布规律。从环型湿地中心到边缘,随着地势升高,积水深度降低,冷湿作用减弱,土壤 DOC 含量和土壤溶液 DOC 浓度呈降低趋势。毛果苔草群落和环型湿地内其他群落之间土壤 DOC 含量及其垂直分布差异显著,其他群落之间差异不显著。特殊的几何形状使环型湿地土壤溶液 DOC 浓度随季节呈单一方向变化趋势。从春季化冻开始,土壤溶液 DOC 浓度在不断增加,到秋季土壤 DOC 浓度达到最高,这主要与环型湿地静水环境中土壤溶液的不断蒸发、浓缩和秋季新鲜凋落物的分解密切相关。此外,环型湿地土壤 DOC 的时空分布还受土壤理化性质影响,并与土壤碳、磷、铁的迁移转化相耦合。

### 参 考 文 献

- [1] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review. *Soil Science*, 2000, 165 (4): 277—304
- [2] Liang B C, Mackenzie A F, Schnitzer M, et al. Management-induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 26: 88—94
- [3] Aitkenhead J A, McDowell W H. Soil C: N ratio as a predictor of annual riverine DOC flux at local and global scales. *Global Biogeochem Cycles*, 2000, 14(1): 127—138
- [4] Song C C, Wang L L, Guo Y D, et al. Impacts of natural wetland degradation on dissolved carbon dynamics in the Sanjiang Plain, Northeastern China. *Journal of Hydrology*, 2011, 398 (1/2): 26—32
- [5] Xi M, Lu X G, Li Y, et al. Distribution characteristics of dissolved organic carbon in annular wetland soil-water solutions through soil profiles in the Sanjiang Plain, Northeast China. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(9): 1074—1078
- [6] 邹元春, 吕宪国, 姜明. 不同水文情势下环形湿地土壤铁的时空分布特征. *环境科学*, 2009, 30(7): 2059—2064
- [7] 张芸, 吕宪国, 倪健. 三江平原典型湿地冷湿效应的初步研究. *生态环境*, 2004, 13(01): 37—39
- [8] 田学智, 刘吉平. 孤立湿地研究进展. *生态学报*, 2012, 31(20): 6261—6269
- [9] 杨青, 刘吉平, 吕宪国, 等. 三江平原典型环型湿地土壤-植被-动物系统的结构及功能研究. *生态学杂志*, 2004, 23(4): 72—77
- [10] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系. *土壤学报*, 2004, 41(4): 544—552

- [11] 谢贤群, 王立军. 水环境要素观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 1998:56—57, 66—67, 89
- [12] Andrew J B, Robert L W. 赵文智, 王根绪, 译. 生态水文学 ~ 陆生环境和水生环境植物与水分关系. 北京: 海洋出版社, 2002
- [13] 韩琳, 张玉龙, 金烁, 等. 灌溉模式对保护地土壤可溶性有机碳与微生物量碳的影响. 中国农业科学, 2010, 43 (8): 1625—1633
- [14] Wang F L, Bettany J R. Influence of freeze-thaw and flooding on the loss of soluble organic carbon and carbon dioxide from soil. *Journal of Environment Quality*, 1993, 22:709—714
- [15] Christ M J, David M B. Temperature and moisture effects on the production of dissolved organic carbon in a spodosol. *Soil Biol Biochem*, 1996, 28:1191—1199
- [16] Waiser M J. Relationship between hydrological characteristics and dissolved organic carbon concentration and mass in northern prairie wetlands using a conservative tracer approach. *J Geophys Res-Bio-geo*, 2006, 11(G2): G02024
- [17] 郗敏, 孔范龙, 吕宪国, 等. 三江平原典型岛状林湿地土壤水 DOC 质量浓度分布特征. 辽宁工程技术大学学报, 2009, 28 (2): 322—325
- [18] 郗敏, 刘红玉, 吕宪国. 流域湿地水质净化功能研究进展. 水科学进展, 2006, 17(4): 566—573
- [19] 张娜, 张新昱, 高鲁鹏. 长期监测水体可溶性有机碳变化趋势与影响因子研究进展. 水土保持研究, 2009, 16(3): 286—290
- [20] 张雪, 李忠武, 申卫平, 等. 红壤有机碳流失特征及其与泥沙径流流失量的定量关系. 土壤学报, 2012, 49(3): 465—473
- [21] Wallage Z E, McDonald H J. A drain blocking: An effective treatment for reducing dissolved organic carbon loss and water discoloration in a drained peatland. *Science of the Total Environment*, 2006, 367(2/3): 811—821
- [22] 郭晓霞, 刘景辉, 张星杰, 等. 免耕对旱作燕麦田耕层土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响. 土壤学报, 2012, 49(3): 575—581
- [23] Gruau G, Dia A, Ollivié-Lauquet G, et al. Controls on the distribution of rare earth elements in shallow groundwaters. *Water Res*, 2004, 38: 3576—3586

(责任编辑: 汪枳生)