

贵州红枫湖水体溶解有机质的剖面特征和季节变化

黎文^{1,2}, 吴丰昌^{1*}, 傅平青¹, 刘丛强¹, 王静^{1,2}, 梅毅^{1,2}, 王立英^{1,2}, 白英臣^{1,2}

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 溶解有机氮(dissolved organic nitrogen, DON)与溶解有机碳(dissolved organic carbon, DOC)相结合在湖泊水体溶解有机质(dissolved organic matter, DOM)的研究中少有报道. 本研究对贵州喀斯特地区高原性湖泊——红枫湖水体 DOC 和 DON 的含量进行了近 2a 的测定, 研究了 DOM 的剖面特征和季节变化, 并探讨了 DOM 垂向分布和季节变化的影响因素. 结果表明, 红枫湖 DOC 的浓度范围为 1.60~3.08 mg·L⁻¹, DON 的浓度范围为 0.10~0.37 mg·L⁻¹. 在湖水混合期表层和底层的 DOC 和 DON 的浓度基本一致, 在湖水分层期 DOC 和 DON 浓度表现出从表层往底层减小的趋势. 表层水体(0~2m 或 3m) DOC 的浓度在春末夏初或夏季达到最大, DON 的浓度在春末夏初稍高于其它月份. 结合叶绿素和降雨的数据分析认为, 藻类活动和陆源输入直接导致了表层水体 DOM 的季节变化模式. DOM 的 C/N 在一般情况下向下增大, 但在夏季南湖的垂向水柱上, DOC 和 DON 的浓度在 12m 以下增大, C/N 从 12m 的 18.1 下降为 14m 的 14.9, 并向下持续减小, 这很有可能是颗粒态有机质发生降解释放出 C/N 较低的 DOM, 成为水体 DOM 的一个内源.

关键词: 溶解有机质; 剖面特征; 季节变化; 红枫湖

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)10-1979-07

Profile Characteristics and Seasonal Variation of Dissolved Organic Matter in Hongfeng Lake, Guizhou

LI Wen^{1,2}, WU Feng-chang¹, FU Ping-qing¹, LIU Cong-qiang¹, WANG Jing^{1,2}, MEI Yi^{1,2}, WANG Li-ying^{1,2}, BAI Ying-chen^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Dissolved organic carbon (DOC) and dissolved organic nitrogen (DON) are rarely measured together when studying dissolved organic matter (DOM) in lake water. DOC and DON concentrations were measured for a Karst plateau lake——Hongfeng Lake water for nearly two years. Profile characteristics and seasonal variation of dissolved organic matter were studied, and influencing factors were discussed. The results indicate that DOC concentration ranges from 1.60 mg·L⁻¹ to 3.08 mg·L⁻¹, DON ranges from 0.10 mg·L⁻¹ to 0.37 mg·L⁻¹ during studying period. DOC and DON concentrations change little from upper layer water to bottom during mixed periods, but show a general tendency for an upward increase during stratification periods. DOC concentration in the surface layer water(0~2 meters or 3 meters) of Hongfeng Lake is greatest from late spring to early summer or in summer, DON concentration is a little higher from late spring to early summer. Comparing the seasonal variation trend of DOC with that of chl *a* and rainfall we draw a conclusion that the bioactivity of algae and DOM input from the watershed directly result in the seasonal variation mode of DOM in surface layer water. The C/N ratio of DOM generally increases with the increase of depth, but this trend changes at HF-S site in summer. At the depth of 12m, DOC and DON concentrations increase with the increase of depth; the C/N ratio of DOM decreases from 18.1 at the depth of 12m to 14.9 at the depth of 14m, and decreases continually with the increase of depth. A possible cause is the decomposition of POM, which forms an autochthonous source of DOM.

Key words: dissolved organic matter; profile characteristics; seasonal variation; Hongfeng Lake

天然的溶解有机质(dissolved organic matter, DOM)普遍存在于湖泊及水库水体. 研究表明, DOM 具有很强的反应活性和迁移活性, 对水体中的微量金属离子和有机污染物的形态毒性, 生物有效性及其迁移转化有重要影响^[1~4]. 同时, DOM 也是饮用水消毒过程中生成有毒副产物例如三卤代甲烷的母质^[5]. 因此, DOM 在环境科学和地球科学研究中日益受到重视. 尽管目前已有大量 DOM 的研究数据, 但研究对象多为海洋, 即使有关湖泊的 DOM

的研究, 也多集中于 DOM 的常见元素组分溶解有机碳(dissolved organic carbon, DOC)上, 而对 DOM 的另一常见元素组分溶解有机氮(dissolved organic nitrogen, DON)的报道很少, 主要表现为大量的关

收稿日期: 2005-11-17; 修订日期: 2006-01-20

基金项目: 国家杰出青年基金项目(40525011); 国家青年科学基金项目(40403011); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412300)

作者简介: 黎文(1979~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为环境地球化学.

* 通讯联系人, E-mail: wufengchang@vip.skleg.cn

于湖泊 DOC 的分布、动态变化和循环的研究^[6~10]而缺少相关的 DON 的数据^[11], 从而缺乏相关 C/N 变化信息, 而 C/N 是了解 DOM 来源和降解的有效参数^[12, 13]. 本研究正是从这个认识角度出发, 对贵州红枫湖水体的 DOC 和 DON 含量进行了近 2a 的剖面及季节变化监测, 一方面了解这个喀斯特地区高原湖泊所具有的 DOC 和 DON 的剖面及季节变化特征; 另一方面通过对他们的变化特征、C/N 特征和湖泊物理化学参数等的对比讨论, 来深化对 DOM 在湖泊水体中的迁移转化行为的认识.

1 材料与方法

1.1 样品的采集

红枫湖是位于云贵高原贵阳市郊的一个人工水库, 其主要水源是入湖河水. 它的主要功能有发电、防洪、工农业用水和旅游, 并作为贵阳市饮用水源. 前人对这一湖泊水体已进行了较多的研究^[14~16], 为进一步研究提供了基础. 湖泊水文特征见表 1. 湖泊沿岸分布着农田和较多的工矿企业, 其中 2 座中大型化肥厂, 每年向红枫湖输入大量废水.

表 1 红枫湖主要水文特征

Table 1 Hydrology features of Hongfeng Lake

流域面积/ km ²	湖面面积/ km ²	库容/ m ³	水力停留 时间/d	海拔 /m	平均水深/ m
1 596	57.2	6.01 × 10 ⁸	119	1 227	10.5

沿水流方向, 由南向北, 分别于南湖和北湖选取了具代表性的 1 个采样点, 采样点分布见图 1. 采样于 2003-01 至 2004-08 进行, 每 2 个月在月底采样 1 次, 各采样点用 Niskin 采样器分层采集水样, 采样间距在不同的季节稍有不同, 一般为 2m 或 3m. 采

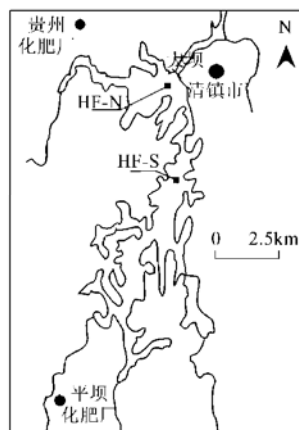


图 1 红枫湖采样点分布

Fig. 1 Sampling sites of Hongfeng Lake

样现场测温度, 回实验室后立即用电极法测定 pH 和用碘量法测溶解氧 (dissolved oxygen, DO), 用预先于 450 °C 灼烧 4~6 h 的玻璃纤维滤膜 (Whatman GF/F) 过滤水样, 1 份滤液装于聚乙烯瓶中, 用于各形态无机氮及磷和硅的测定, 在 4 °C 条件下保存并尽快测定. 另 1 份水样装于棕色玻璃瓶中用于 DOC 含量的测定, 于 4 °C 条件下保存并尽快测定. 固定过滤 750 mL 水后的滤膜用丙酮萃取分光光度法测定 Chl a 的含量^[17].

1.2 分析方法

NO₃-N 含量的测定方法为色谱法, 检测限为 0.08 mg·L⁻¹; NH₄⁺-N 含量的测定方法为靛酚蓝法^[18], 检测限为 0.007 mg·L⁻¹; NO₂-N 含量的测定方法为重氮偶合分光光度法^[19], 检测限为 0.003 mg·L⁻¹; TDN 的测定采用过硫酸钾消解紫外分光光度法^[19], 检测限为 0.05 mg·L⁻¹; DON 由 TDN 值差减溶解无机氮值 (NO₂-N、NH₄⁺-N 和 NO₃-N) 获得. 溶解性总磷 (total dissolved phosphate, TDP) 和溶解性硅酸盐含量的测定分别采用过硫酸钾消解钼锑抗分光光度法和硅钼黄分光光度法 (结果以 SiO₂ 表示). DOC 含量的测定采用高温催化氧化法, 所用仪器为德国生产的总有机碳分析仪 (ELEMENTAR, high TOC II), 检测限为 0.2 mg·L⁻¹.

2 结果与讨论

2.1 湖泊物理和化学参数的季节性变化特征

以 HF-S 采样点为例, 水体剖面从 3 月底开始上下出现温度和水化学性质的不均一性. 从 5 月底到 7 月底出现热分层, 水温从上层向下层逐渐下降, 上下温差约为 10 °C, 没有明显的温跃层. 到 9 月底上下层水体的温差已经不大, 到 11 月底水体的热分层完全消失 (图 2). pH 也呈现从上向下减小的趋势, 在 7 月底的变化最大, 整个剖面 pH 的变化为 1.4 个单位, 到 11 月底上下层的 pH 相差不大 (图 2). DO 也是从 3 月开始出现从上层向下层减小的变化趋势, 在 5, 7, 9 月月底下层的溶解氧都在 1 mg·L⁻¹ 以下, 到 11 月底上下层的 DO 又恢复一致 (图 2). HF-N 采样点处的情况与 HF-S 处相似. 可见红枫湖为季节性分层湖泊. 为讨论方便, 以下将温度的明显分层期称为物理分层期 (5 月底~7 月底), 将 DO 的明显分层期称为化学分层期 (5 月底~9 月底), 并将物理和化学分层期统称为分层期.

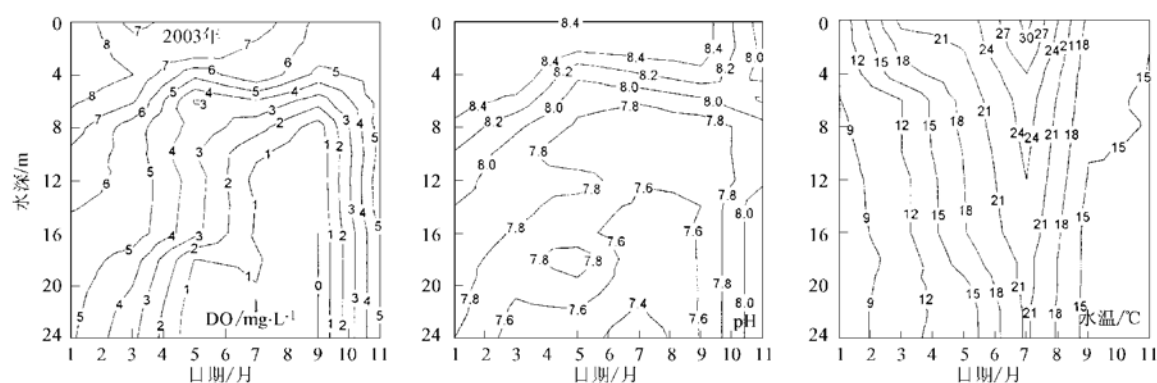


图 2 红枫湖(HF-S)水体物理和化学性质的垂向和季节变化

Fig. 2 Vertical and seasonal variation of physical and chemical nature in Hongfeng Lake(HF-S) water

2.2 DOC 和 DON 的剖面特征

红枫湖 DOC 的浓度范围为 $1.60 \sim 3.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. DOC 浓度的剖面变化可由图 3 看出. 在湖水混合期上下层 DOC 的浓度基本一致, 在湖水化学

分层期 DOC 浓度表现出从上层往下层减小的趋势, 例外的是在 2003 年夏季(7 月底 8 月初) HF-S 处中下层水体出现浓度增大的现象. Sugiyama 报道在分层期湖泊水体表层 DOC 的浓度比底层高^[8], 这与本

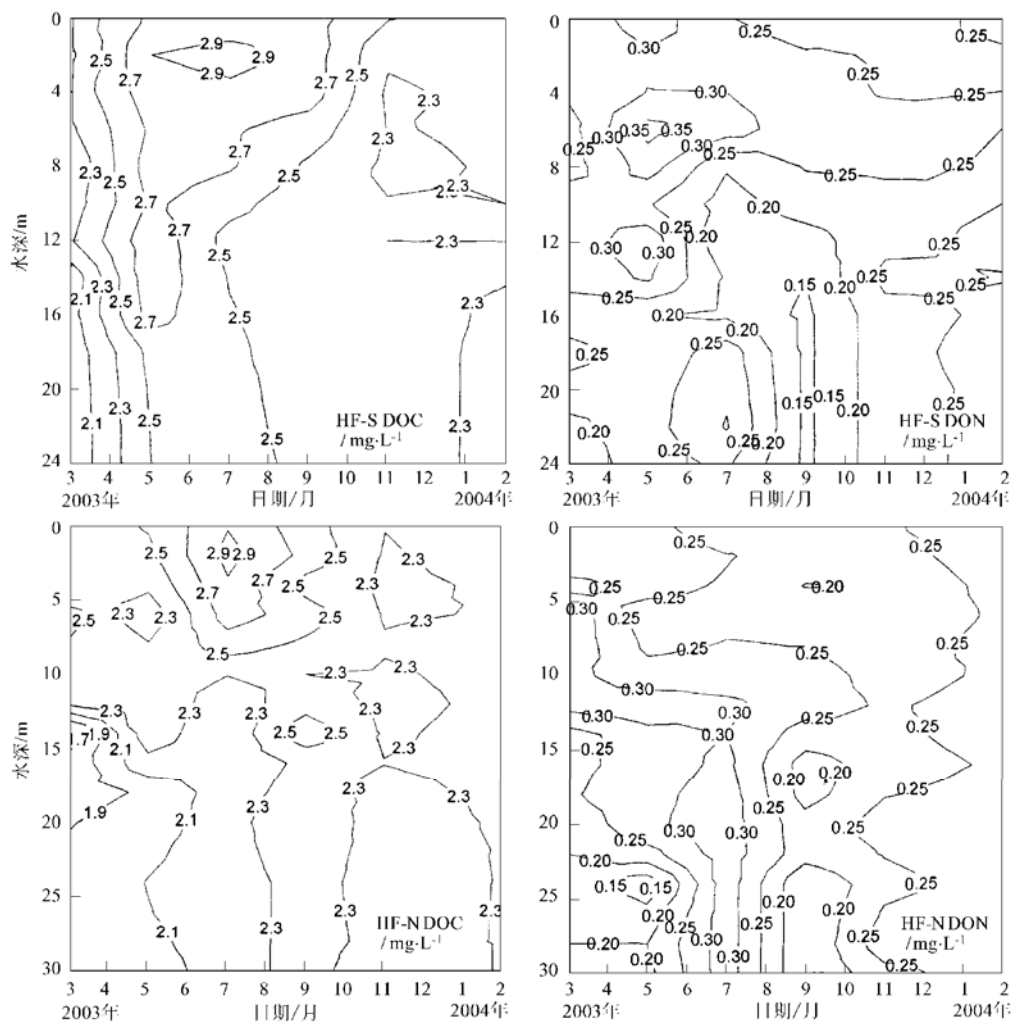


图 3 红枫湖 DOC 和 DON 浓度的垂向分布

Fig. 3 Vertical distribution of DOC and DON concentrations in Hongfeng Lake water

研究的结果一致. 研究表明, 藻类活动和陆源输入都可能使得湖泊水体的 DOC 浓度升高^[7, 20]. Sugiyama^[8] 认为是流域的输入和水体中的生物活动使得表层湖水的 DOC 浓度升高. 在红枫湖, 藻类活动和陆源输入也都可能是引起上层水体 DOC 浓度升高的原因. 红枫湖所在的地理区域为雨热同期的气候, 湖泊的物理分层期正好是降雨集中的季节, 同时也是藻类生长旺盛的季节. 受湖水透明度 ($< 4\text{ m}$) 的影响^[21], 藻类的生长局限于上层, 而由入湖河流输入的 DOC 可能也是从中上层进入湖泊, 受到湖泊水体热分层的阻隔, 因此 DOC 浓度表现出从上层往下层减小的趋势.

红枫湖 DON 的浓度范围为 $0.10 \sim 0.37\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 在整个采样期间红枫湖 DON 占 TDN 的比例为 $5\% \sim 22\%$, 平均为 12% . 在不少天然水体中, DON 占 TDN 的绝大部分约为 $60\% \sim 69\%$ ^[22], 但也有 DON 所占比例较小的情况 (12%)^[23]. 从图 3 可以看出, 红枫湖水体中 DON 浓度在垂向剖面上基本表现出与 DOC 相同的变化趋势, 即大致从上层向下层减小. 但 DON 的浓度变化幅度比 DOC 大. 以 2003-07 为例, HF-S 处整个垂向剖面 DOC 和 DON 浓度数据的变异系数分别为 6% 和 24% , HF-N 处分别为 14% 和 19% . 在 2003 年夏季 (7 月底 8 月初), HF-S 处 DON 与 DOC 一样在水体中下层表现出浓度增大的趋势. 关于 DON 浓度在湖泊水体垂向变化的研究不多. 在海洋水体中, 一般的变化趋势是表层 DON 的浓度比底层高^[13, 23]. 据报道, 天然水体中的 DON 主要由水体内部的生物过程产生, 另一内源是沉积物的释放^[22, 24]. DON 与 DOC 的来源有相同之处, 但可能引起 DON 变化的生物化学过程比 DOC 更为复杂. 因此, 虽然 DON 与 DOC 的垂向剖面变化趋势有一致性, 但 DON 的变化更大, 两者的浓度在剖面上没有显著相关关系.

2.3 DOM 的季节变化

2.3.1 DOC、DON 以及 Chl a 浓度的季节变化

在 HF-S 采样点处表层水体中 ($0 \sim 2\text{ m}$ 或 3 m) DOC 浓度在每年的春末夏初或夏季达到最大值 (图 4). 2003-05 底达到最大值并持续到 9 月底; 2004 年则在 6 月份有峰值. HF-N 采样点处表层水的 DOC 浓度在 2003-07 底达到最大值; 2004 年在 6 月底达到最大值. 无论是在 HF-S 还是 HF-N 采样点, 底层水体中 DOC 的浓度比表层低, 表现出与表层大致相同的季节变化趋势. 在红枫湖表层水体中 DON 的浓度在春末夏初稍高于同年其它月份 (图 4). HF-S

采样点处 DON 的浓度在 2003 年 5 月底和 2004 年 6 月底稍高于同年的其它月份. HF-N 采样点处 DON 的浓度在 2004 年 6 月底稍高于同年的其它月份. 底层水体中 DON 的浓度一般比表层低, 在夏季较高, 季节变化趋势跟表层存在差别, 这与 DOC 的情况不一样, 可能是由于引起 DON 变化的生物化学过程比 DOC 更为复杂. 红枫湖底层 DOC 和 DON 浓度也有一定的季节变化, 这与 Hayakawa^[10] 在 1 个深水湖泊中观察到的 DOC 浓度在底层的季节波动很小的结果不一致, 这可能说明了红枫湖的水动力较强, 上下层存在着一定的交换作用.

在 HF-S 采样点处表层水体中 Chl a 含量的最大值在 2003 年和 2004 年分别出现在 5 月底~ 7 月底和 8 月底 (图 4). HF-N 采样点处 Chl a 含量的最大值在 2003 年和 2004 年分别出现在 7 月底和 8 月底. 可见在红枫湖 Chl a 含量与 DOC 浓度的季节变化有一定的同步性, 这暗示着藻类对表层水体 DOC 库作出贡献的可能性. 同时在红枫湖地区, 2003 年和 2004 年的降雨集中在 4~ 9 月 (图 5), 每年的第 1 次强降雨均出现在 4 月或 5 月. HF-S 表层水体 DOC 浓度的最大值正好出现在第 1 次强降雨之后, 这也暗示降雨后形成的地表径流向红枫湖输送大量陆源有机质的可能性. 尽管有报道初级生产总量的 $5\% \sim 46\%$ 以 DOC 的形式释放到水体中^[25], 但 Kim 等^[7] 在一大型水库中未发现 DOC 与 Chl a 浓度显著相关; Cosovic 等^[9] 在研究 1 个小的超营养湖泊时也发现 DOC 与 Chl a 浓度的相关系数低. 虽然 HF-S 采样点处表层水体 ($0 \sim 2\text{ m}$ 或 3 m) 中的 DOC 浓度与 Chl a 浓度 (各个采样月份的值) 有显著正相关关系 ($R^2 = 0.78$, $p < 0.01$), 但不能由此认为藻类的贡献是主要的, 因为在本研究中无法估算藻类活动对红枫湖表层水体 DOC 库贡献的比例有多大, 另外以 2004-08 为例, 红枫湖主要入湖河流表层水 DOC 浓度等于或稍高于湖泊表层水体 DOC 的浓度 (未发表数据), 而此时的 Chl a 含量是全年最高的. 2 种贡献究竟以哪种为主还有待进一步研究. 但有一点可以肯定, 降雨向湖泊输入陆源有机质的同时, 也带来无机的营养盐使得藻类可能大量繁殖, 这 2 种作用使得这时期 DOC 的浓度升高. HF-N 采样点处 DOC 浓度和 Chl a 浓度未出现相关关系.

2.3.2 季节动态变化

DOM 在水体内部的迁移转化行为及影响因素一直不清楚. 图 6 展示了红枫湖 HF-S 处化学分层期 (7~ 9 月) 和混合期 (11 月) 湖泊水体中 DOC、

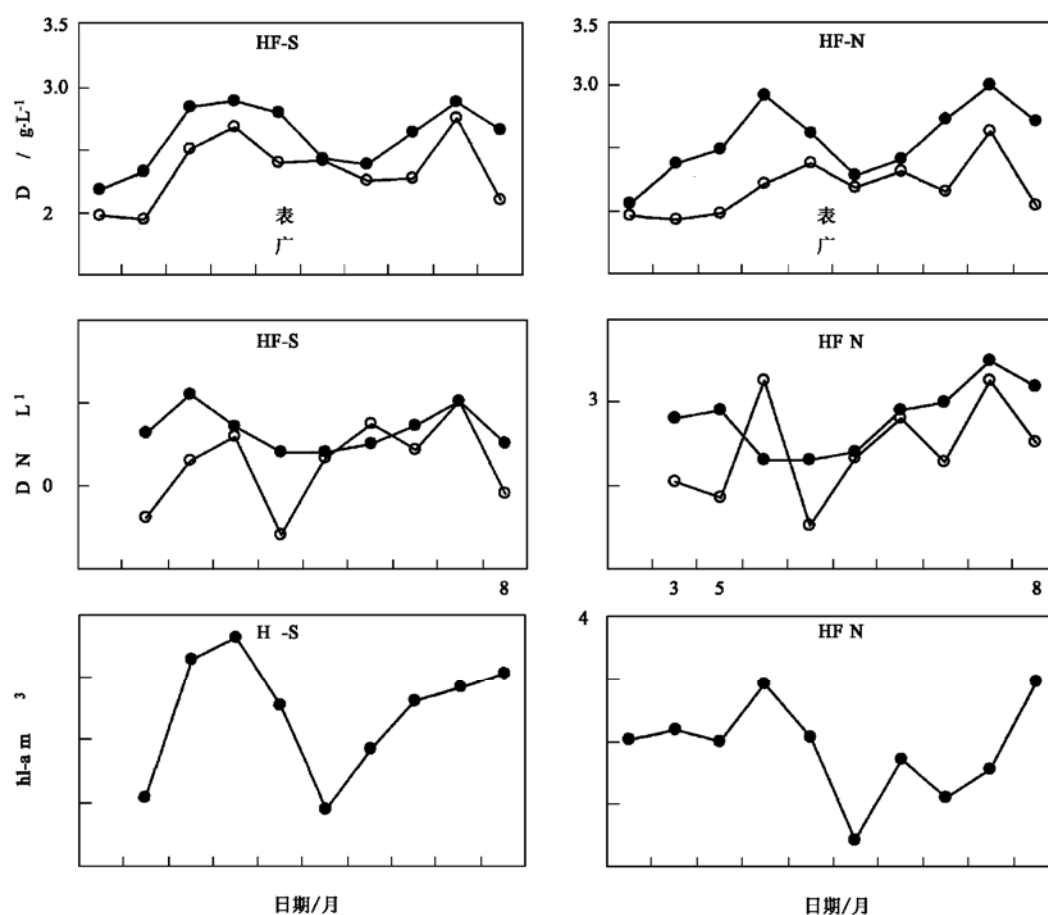


图 4 红枫湖表层水体(0~ 2m 或 3m)和底层水 DOC、DON 浓度以及表层水体 Chl-a 含量的季节性变化(2003-01~ 2004-08)

Fig. 4 Seasonal variation of DOC and DON concentrations in surface layer water and bottom layer water and Chl-a concentration in surface layer water of Hongfeng Lake(2003-01~ 2004-08)

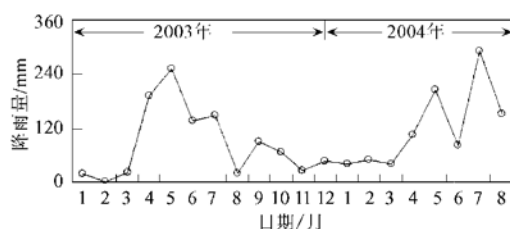


图 5 2003-01~ 2004-08 月降雨量的月份分布
(数据来自清镇水文站)

Fig. 5 Rainfall of each month from 2003-01 to 2004-08
(data from Qingzhen hydrometric station)

DON、各形态无机氮及 TDP 和 Si 的垂向剖面变化。7 月底 DOC 的浓度从表层向下减小至 12 m 又平稳地增大, DON 浓度的垂向变化与 DOC 相似。溶解性总磷从 12 m 向下迅速增大, NH_4^+ 的浓度在 12 m 以上保持很小的值($< 0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 从 12 m 向下平稳增大, NO_3^- 的浓度则从 12 m 向下平稳减小, 见图 6(a)。从以上各个参数的变化情况来看, 12 m 似乎

是 1 个关键的转折点。从溶解氧的变化来看, 从表层下降到 12 m 后基本维持在同一浓度水平, 温度在 12 m 处并未发生突变。据报道, 红枫南湖在这段时间从河流入湖口向采样点处形成回流水体, 使得在此处形成上升水流(但不足以破坏湖泊的温度分层)^[16]。12 m 以下 C/N 降低, 这可能是上升水流携带的 C/N 较低的水生有机质降解释放出 DOM 引起的, 降解的同时释放出无机营养组分, 例如氮、磷和硅, 使得这些无机的营养组分的浓度同时升高。而无机氮主要以氨氮的形态存在, 这是由于在溶解氧低的条件下有机质氨化后不易发生硝化作用。到 9 月底红枫湖水体温度的上下变化已不大, 但从 7 m 向下 DO 的浓度降到很小。此时循环的上升水流已经消失, DOC 和 DON 浓度在水体内呈现从上层向下层减小的趋势, 在 9 m 以下 C/N 迅速增大, 见图 6(b)。有研究报道 DOM 的降解将使 C/N 升高^[13], 这说明 DOM 本身发生了降解。11 月底水体已完全混合均匀, 从图 6(c)可以看出各个参数在垂向剖面

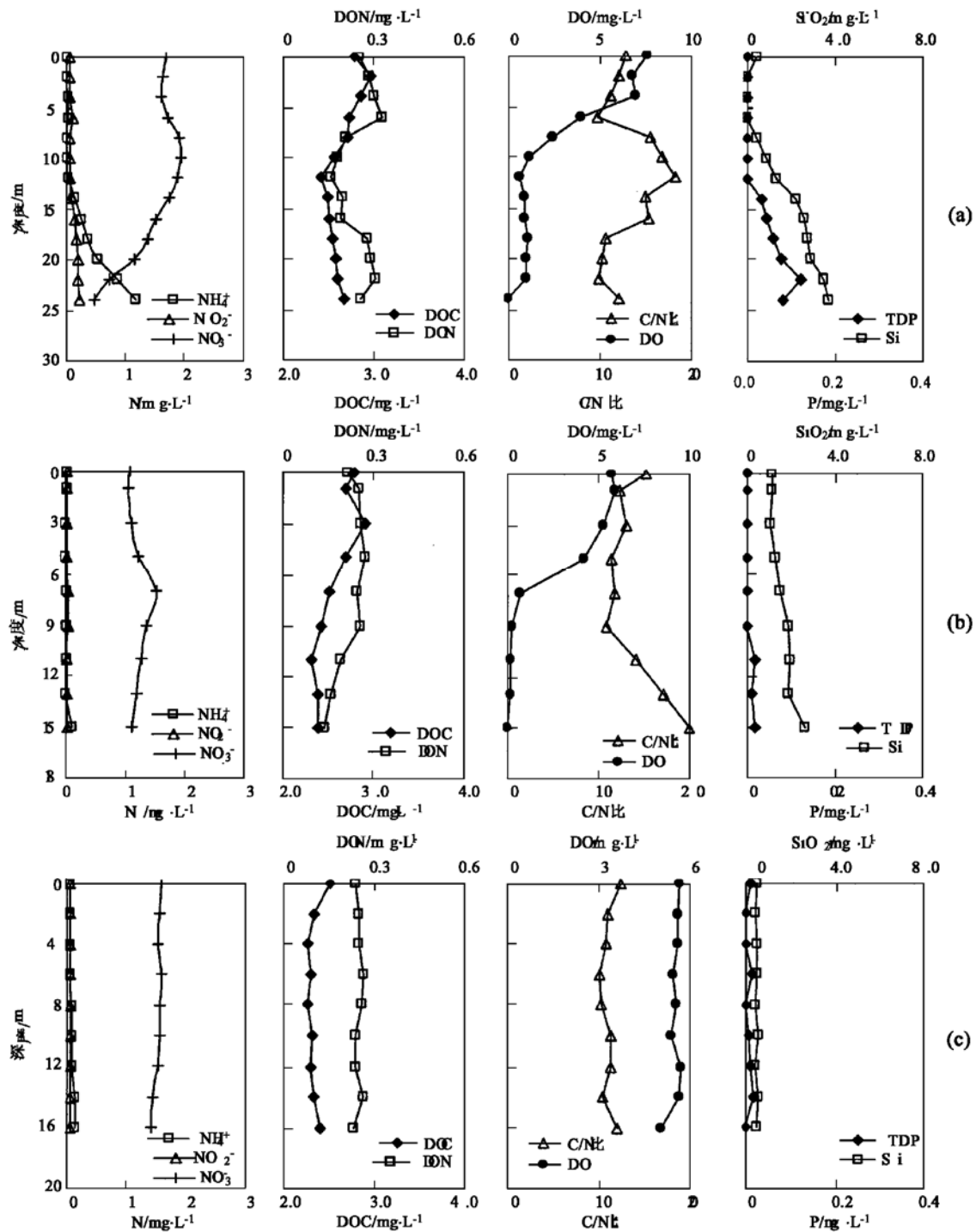


图 6 HF-S 处 2003 年化学分层期 7 月底(a), 9 月底(b)和混合期 11 月底(c)湖泊水体内 DOC、DON、C/N 比、各形态无机氮及 TDP 和 Si 的垂向剖面变化

Fig. 6 Vertical changes of DOC, DON, C/N ratio, inorganic nitrogen species, TDP and Si during chemical stratification period July(a) and September(b) and during mixed period November(c) in 2003 at HF-S site

上没有多大的变化。

从湖泊分层期到混合期这段时间 DOM 以及 C/N 比值剖面变化演变的过程可以得到以下结论: 由于 HF-S 处特殊的水动力条件, 在 7 月底水生的

颗粒态有机质可能在中下层发生降解, 成为 DOM 的内源, 而在无此内源的混合期, DOM 主要在水体内降解, 尤其是在夏末秋初(9 月底), 与 DOM 相关的这些过程也会影响到无机营养盐的分布与变化。

由此可以看出湖泊水体分层对 DOM 迁移转化的影响以及 POM 所起的作为 DOM 内源的作用. DOM 的 C/N 比值在垂向剖面上表现出与 DON 相反的变化趋势.

3 结论

(1) 湖水混合期上下层 DOC 和 DON 的浓度基本一致, 在湖水分层期 DOC 和 DON 浓度表现出从上层往下层减小的趋势. 这与 DOM 从水体上层输入并受水体分层的阻隔有关. DON 在垂向剖面上的变化程度比 DOC 更大.

(2) 红枫湖表层水体中(0~ 2m 或 3 m) DOC 的浓度在春末夏初或夏季达到最大, DON 的浓度在春末夏初稍高于其他季节. 这可能是由于降雨后形成的地表径流向红枫湖输送了一些陆源有机质, 而藻类的生长也在这个时期最为旺盛(Chl-a 达到高值), 因此藻类也可能贡献了部分 DOM 到湖泊水体中.

(3) 一般情况下在湖泊的分层期, DOM 在湖泊水体的中下部矿化, 使得 DOC 和 DON 的浓度在中下部减小, DOM 的 C/N 比值增大, 因此 DOM 的化学组成和性质发生变化. 由于 HF-S 处特殊的水动力条件, 在 7 月底水生的颗粒态有机质可能在中下层发生降解, 成为 DOM 的内源, 同时也可能是其他无机营养组分的内源.

致谢: 采样和试验过程中得到黄荣贵高工和安宁工程师的帮助, 在此一并表示诚挚感谢.

参考文献:

- [1] Wu F C, Tanoue E. Isolation and partial characterization of dissolved copper-complexing ligands in streamwaters [J]. *Environmental Science and Technology*, 2001, **35**: 3646 ~ 3652.
- [2] Barber L B, Leenheer J A, Noyes T I, *et al.* Nature and transformation of dissolved organic matter in treatment wetlands [J]. *Environmental Science and Technology*, 2001, **35**: 4805 ~ 4816.
- [3] Kalbitz K, Wennrich R. Mobilization of heavy metals and arsenic in polluted wetland soils and its dependence on dissolved organic matter [J]. *The Science of the Total Environment*, 1998, **209**(1): 27~ 39.
- [4] Ohlenbusch G, Kumke M U, Frimmel F H. Sorption of phenols to dissolved organic matter investigated by solid phase microextraction [J]. *The Science of the Total Environment*, 2000, **253**: 63~ 74.
- [5] Palmstrom N S, Carlson R E, Cooke D G. Potential links between eutrophication and the formation of carcinogens in drinking waters [J]. *Lake and Reservoir Management*, 1988, **4**: 1~ 15.
- [6] Parks S J, Barker L A. Sources and transport of organic carbon in an Arizona river-reservoir system [J]. *Water Research*, 1997, **31**(7): 1751~ 1759.
- [7] Kim B, Choi K, Kim C, *et al.* Effects of the summer monsoon on the distribution and loading of organic carbon in a deep reservoir, lake Soyang, Korea [J]. *Water Research*, 2000, **34** (14): 3495~ 3504.
- [8] Sugiyama Y, Aneqawa A, Kumagai T, *et al.* Distribution of dissolved organic carbon in lakes of different trophic types [J]. *Limnology*, 2004, **5**: 165~ 176.
- [9] Čosović B, Ciglenečki I, Vilčić D, *et al.* Distribution and Seasonal Variability of Organic Matter in a Small Eutrophicated Salt Lake [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, **51**: 705~ 715.
- [10] Hayakawa K. Seasonal variations and dynamics of dissolved carbohydrates in Lake Biwa [J]. *Organic Geochemistry*, 2004, **35**: 169~ 179.
- [11] Mash H, Westerhoff P K, Baker L A, *et al.* Dissolved organic matter in Arizona reservoirs: assessment of carbonaceous sources [J]. *Organic Geochemistry*, 2004, **35**: 831~ 843.
- [12] Lobbes J M, Fitznar H P, Kattner G. Biogeochemical characteristics of dissolved and particulate organic matter in Russian rivers entering the Arctic Ocean [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, **64** (17): 2973~ 2983.
- [13] Charles S, Hopkinson J R, Fry B, *et al.* Stoichiometry of dissolved organic matter dynamics on the continental shelf of the northeastern U. S. A [J]. *Continental Shelf Research*, 1997, **17** (5): 473~ 489.
- [14] Wu F C, Qing H R, Wan G J, *et al.* Geochemistry of HCO₃⁻ at the sediment-water interface of lakes from the southwestern Chinese plateau [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1997, **99**: 381~ 390.
- [15] 王雨春, 万国江, 尹澄清, 等. 红枫湖、百花湖沉积物全氮、可交换态氮和固定铵的赋存特征 [J]. *湖泊科学*, 2002, **14** (4): 301~ 309.
- [16] 肖化云, 刘从强, 李思亮, 等. 强水动力湖泊夏季分层期氮的生物地球化学循环初步研究: 以贵州红枫湖南湖为例 [J]. *地球化学*, 2002, **31**(6): 571~ 576.
- [17] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范 [M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 268~ 270.
- [18] Koroleff F. Determination of ammonia. In: Grasshoff K, Ehrhardt M, Kremling K (eds). *Methods of Seawater Analysis* [M]. (2nd). Weinheim; Deerfield Beach, Florida; Basel: Verlag Chemie, 1983. 150~ 157.
- [19] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 255~ 274.
- [20] Mague T H, Friberg E, Hedges D J, *et al.* Extracellular release of carbon by marine phytoplankton; a physiological approach [J]. *Limnology and Oceanography*, 1980, **25**: 262~ 279.
- [21] 张维. 红枫湖、百花湖环境特征及富营养化 [M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1999. 58.
- [22] Bronk D A. Dynamics of DON. In: Hansell D A, Carlson C A (eds). *Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter* [M]. San Diego: Academic Press, 2002. 153~ 249.
- [23] Ogawa H, Fukuda R, Koike I. Vertical distributions of dissolved organic carbon and nitrogen in the Southern Ocean [J]. *Deep-Sea Research I*, 1999, **46**: 1809~ 1826.
- [24] Burdige D J, Zheng S L. The biogeochemical cycling of dissolved organic nitrogen in estuarine sediments [J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, **43**: 1796~ 1813.
- [25] Søndergaard M, Riemann B, Jørgensen N O G. Extracellular organic carbon (EOC) released by phytoplankton and bacterial production [J]. *Oikos*, 1985, **45**: 323~ 332.