

## 西藏纳木错及其入湖河流溶解有机碳和总氮浓度的季节变化<sup>\*</sup>

开金磊<sup>1,3</sup>, 王君波<sup>1,2\*\*</sup>, 黄磊<sup>1,3</sup>, 汪勇<sup>1,4</sup>, 鞠建廷<sup>1</sup>, 朱立平<sup>1,2,3</sup>

(1: 中国科学院青藏高原研究所, 青藏高原环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100101)

(2: 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101)

(3: 中国科学院大学, 北京 100049)

(4: 安徽师范大学地理与旅游学院, 芜湖 241002)

**摘要:** 为深入理解纳木错湖水及入湖河流中溶解有机碳(DOC)和总氮(TN)浓度的季节变化特征及其影响因素, 于2012—2013年不同季节对纳木错2个站点及流域内21条主要入湖河流进行采样及分析, 采用统计学方法初步探讨纳木错水体和21条河流DOC和TN浓度季节变化特征。结果表明, 河流DOC平均浓度范围为0.763~1.537 mg/L, TN平均浓度范围为0.179~0.387 mg/L。21条入湖河流DOC浓度在春末夏初和夏季达到高值, 冬季为低值, TN浓度季节变化趋势大体上与DOC浓度相反。湖泊水体DOC和TN浓度范围分别为2.42~8.08和0.237~0.517 mg/L, 明显分别高于河水中的浓度。湖泊DOC浓度季节变化趋势与河流一致, 而TN浓度无明显的季节性变化。河水DOC浓度的季节变化和空间差异受控于河流的补给方式, 湖水DOC浓度受湖泊内部藻类等水生植物活动和河流外源输入的影响。DOC等有机质的分解是影响纳木错流域湖水和河水TN浓度的重要原因。

**关键词:** 溶解有机碳; 总氮; 季节变化; 纳木错; 入湖河流; 青藏高原

## Seasonal variations of dissolved organic carbon and total nitrogen concentrations in Nam Co and inflowing rivers, Tibet Plateau

KAI Jinlei<sup>1,3</sup>, WANG Junbo<sup>1,2\*\*</sup>, HUANG Lei<sup>1,3</sup>, WANG Yong<sup>1,4</sup>, JU Jianting<sup>1</sup> & ZHU Liping<sup>1,2,3</sup>

(1: *Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes (TEL), Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, P.R.China*)

(2: *Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, P.R.China*)

(3: *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China*)

(4: *School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241002, P.R.China*)

**Abstract:** Water samples were seasonally collected from two sites in Nam Co and twenty-one inflowing rivers around the lake in 2012 and 2013. Seasonal variations of dissolved organic carbon (DOC) and total nitrogen (TN) concentrations were investigated. Results indicated that DOC concentrations of the twenty-one inflowing rivers ranged from 0.763 to 1.537 mg/L, and TN concentrations ranged from 0.179 to 0.387 mg/L. Average DOC concentrations reached higher values in the late spring and summer, but lower values in winter. TN concentrations showed a contrasting seasonal variation with DOC concentrations. DOC and TN concentrations in Nam Co were 2.42–8.08 mg/L and 0.237–0.517 mg/L, respectively, and seasonal variability of DOC concentrations in lake had same trend as those in inflowing rivers, while TN concentrations showed slight seasonal changes. The seasonal and spatial variations pattern of river DOC concentrations were controlled by recharge modes, while these DOC concentration patterns in the lake are influenced by hydrophyte, algae and exogenous inputs. Meanwhile, the decomposition of DOC and other organic matter significantly influenced the TN concentrations of rivers and lake water column in Nam Co catchment.

**Keywords:** Dissolved organic carbon; total nitrogen; seasonal variations; Nam Co; inflowing rivers; Tibet Plateau

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(41571189, 41877168)、科技部基础性工作专项(2012FY111400)和国家重点基础研究发展计划“973”项目(2012CB956100)联合资助。2018-08-31 收稿; 2018-12-01 收修改稿。开金磊(1991~), 男, 硕士研究生; E-mail: kaijinlei@itpcas.ac.cn.

<sup>\*\*</sup> 通信作者; E-mail: wangjb@itpcas.ac.cn.

水体有机碳的存在形式主要包括溶解有机碳(DOC)和颗粒有机碳(POC)<sup>[1]</sup>. 其中 DOC 是主要的有机碳库, 占水体有机碳的较大比重<sup>[2]</sup>, 比如海洋中 DOC 碳库占海洋总有机碳库的 90% 以上<sup>[3]</sup>. DOC 是维系和影响水生生态系统的重要环境因子, 是湖泊生态系统结构和功能的重要调节器<sup>[4]</sup>. 一方面, DOC 为细菌生长、代谢等生命活动提供基质, 是所有水生生态系统异养微生物循环的基础<sup>[5-6]</sup>. 另一方面, 水体中的 DOC 会影响水下光场和酸碱度, 高浓度 DOC 会造成水体透光性的降低, 阻碍水体特别是深层水体对太阳辐射的吸收, 过量的 DOC 还会造成水体酸化, 进而影响整个水生生态系统<sup>[7-8]</sup>.

氮是水生植物和异养微生物需求量最大的营养元素之一, 其供应量对水生生态系统的初级生产力和有机质的微生物循环有着重要影响<sup>[9]</sup>. 随着人类活动影响的日益加剧, 陆地和水生生态系统氮负荷在全球范围内呈现增加的趋势<sup>[10]</sup>.

湖泊作为内陆水体的重要组成部分, 是流域内物质的主要汇集场所, 是区域碳氮循环重要的一部分. 国内外学者对不同地区湖泊水体的 DOC 浓度进行大量研究. 有的注重于湖泊 DOC 浓度空间差异、季节变化及其机制的研究<sup>[2, 4, 11-13]</sup>, 有的研究则侧重于 DOC 浓度长时间尺度的变化<sup>[14]</sup>, 比如 Evans 等<sup>[15]</sup>的研究显示增温和酸沉降的减少是导致水体 DOC 浓度增加的重要因素. TN 浓度作为湖泊富营养化的重要影响因素, 其浓度大小及其季节变化的研究为湖泊富营养化评价和水体治理提供依据<sup>[16-18]</sup>.

青藏高原地区是我国重要的湖泊分布区, 湖泊面积占全国湖泊总面积的 51.4%<sup>[19]</sup>. 同时, 青藏高原湖泊是一个巨大的溶解有机碳库, 其 DOC 含量占全国湖泊的 84.3%<sup>[8]</sup>. DOC 被认为是湖泊碳循环对气候响应研究的重要媒介<sup>[20]</sup>. 青藏高原作为全球气候变化的敏感区, 其分布的众多湖泊是研究碳氮循环及其对气候变化响应的重要载体. 但是目前在纳木错流域乃至整个青藏高原地区尚缺乏湖泊碳、氮循环研究. 仅有的关于 DOC 和 TN 浓度的研究, 也是作为水生生物群落研究的营养背景值. 如 Liu 等<sup>[21]</sup>在纳木错的研究结果表明, 纳木错表层水的细菌丰度受水体中藻类释放的 DOC 浓度的影响显著. Liu 等<sup>[22]</sup>在研究高原淡水湖普莫雍错细菌多样性时, 对该湖泊水体 DOC 和 TN 浓度做了初步的调查, 结果表明其 DOC 和 TN 浓度分别为 2.0~19.1 mg/L 和 90~1407  $\mu\text{g/L}$ . 但是此类研究缺乏对高原湖泊 DOC 和 TN 浓度的长期监测和时空分异的研究. 本文通过 DOC 和 TN 浓度季节变化和空间差异性的调查研究, 希望能为高寒区水生生态系统研究提供背景值, 以期为后续的纳木错水体碳氮循环提供前期基础依据.

## 1 研究区概况

纳木错流域(29°56'~31°7'N, 89°21'~91°23'E)位于藏北高原东南部, 冈底斯—念青唐古拉山脉北麓, 之间, 总面积 10610 km<sup>2</sup><sup>[23]</sup>. 整个流域处于高原亚寒带季风半干旱和半湿润气候区的过渡带, 印度夏季风一般暴发于 6 月初, 结束于 10 月初<sup>[24]</sup>. 季风期受南亚季风的影响, 非季风期受西风环流的控制. 年降水量为 281.8 mm, 主要集中在 5—10 月, 占全年降水量的 97.5%, 雨季干季分明. 年平均气温为 0℃, 其中 5—9 月份月平均气温在 0℃ 以上, 划为暖季, 其余月份为冷季<sup>[25]</sup>.

纳木错(30°30'~30°55'N, 90°16'~91°03'E, 图 1)是西藏第二大湖, 湖泊面积为 2020 km<sup>2</sup><sup>[26]</sup>, 湖面海拔 4718 m. 最大水深超过 95 m, 中部是一个平缓的盆地, 南北两岸坡度较大, 而东西两侧坡度较平缓<sup>[27]</sup>. 纳木错为典型高原封闭湖泊, 以地下水、大气降水和冰雪融水补给为主, 共有 60 余条河流汇入, 这些河流主要发源于南部和西部的冰雪覆盖区<sup>[28-30]</sup>. 流域内冰川分布总面积 182 km<sup>2</sup>, 且近 40 年来呈现出明显的退缩趋势, 年退缩率达到 1.12 km<sup>2</sup>/a. 另外, 流域年均积雪覆盖度约 20%, 于每年春末夏初开始消融补给纳木错, 年均冰川消融量达 2.99 亿 m<sup>3</sup>/a, 积雪融水径流量为 8.1 万 m<sup>3</sup>/a<sup>[31]</sup>.

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集

为研究纳木错及其补给河流的 DOC 和 TN 浓度的季节变化特征, 分别对纳木错 2 个固定点位(T1 和 T2)及 21 条主要入湖河流进行水样采集(图 1), T1 点位于东部湖盆区, 水深为 57 m, T2 点位于中央湖盆区, 水深为 93 m. 河流采样于 2012 年 6—9 月和 2013 年 5—12 月进行, 共采样 10 次. 其中 2013 年 12 月 29 日采样时大部分河流已结冰, 无法进行采样, 最后只采集到其中 8 条河流的水样. 湖水采样于 2012 年 5—11 月和

2013 年 6—9 月进行(表 1),利用水样器进行分层采样,采样间距依采样条件不同而有所差别,主要为 5 m 或 10 m,具体采样信息见表 1. 采集的水样用预先清洗的聚乙烯水样瓶封装,其中 DOC 浓度分析水样用 CHROMAFIL 滤膜(材质 PTFE,孔径 0.45 μm)进行过滤,所有水样在测定前冷藏保存. 降水量数据来自中科院青藏高原研究所纳木错多圈层综合观测研究站,测定精度为 0.1 mm.

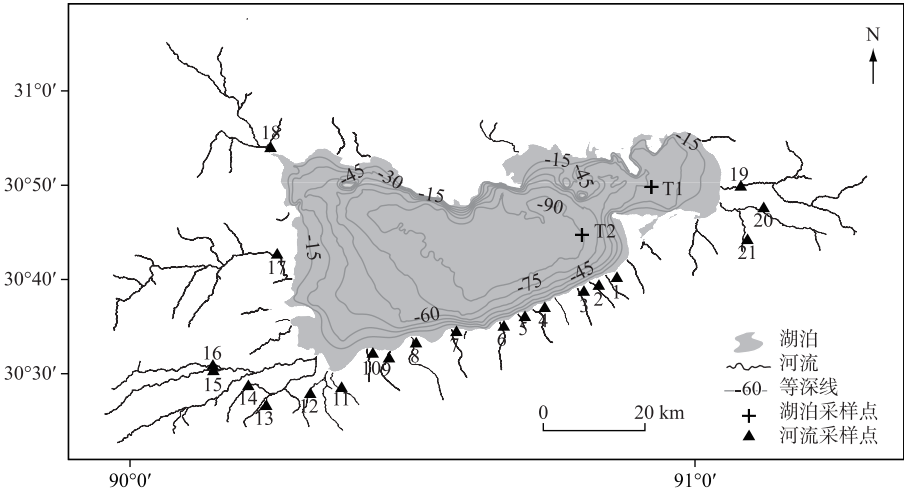


图 1 纳木错水深、入湖河流及采样点分布

Fig.1 Isobath of Nam Co and distribution of inflowing rivers and sampling sites

表 1 纳木错湖泊水样采集信息

Tab.1 Water sampling informations in Nam Co

采样点	水深/m	采样时间	采样间距/m	样品数
T1	57	2012-5-25	5	12
		2012-7-17	5	12
		2012-9-17	5	12
		2012-11-26	10	6
		2013-6-1	5	12
		2013-7-4	10	6
		2013-7-18	10	6
		2013-8-14	10	6
		2013-9-8	10	6
T2	93	2012-5-25	50 m 以上为 5 m, 以下为 10 m	15
		2012-7-17	60 m 以上为 5 m, 以下为 10 m	16
		2012-9-17	60 m 以上为 5 m, 以下为 10 m	16
		2012-11-26	60 m 以上为 5 m, 以下为 10 m	16
		2013-6-1	10	10
		2013-7-4	10	10
		2013-7-18	10	10
		2013-8-14	10	10
		2013-9-8	10	10

2.2 DOC 和 TN 浓度测试及分析

用日本岛津公司的 TOC-V<sub>CPH</sub> 型总有机碳分析仪测定水样 DOC 和 TN 浓度,测定相对标准偏差<1.5%. DOC 浓度采用直接测试法测定,即先在样品中滴加盐酸(HCl),吹气去除无机碳,然后催化氧化测定 DOC 浓

度,对于 DOC 浓度较低的纳木错流域水体而言,直接法较差减法测量产生误差的可能性更小<sup>[32]</sup>. TN 浓度测定先将水样在 720℃ 燃烧管中催化氧化为  $\text{NO}_x$ ,再进入化学发光检测器测定其浓度. 所有水样 DOC 和 TN 浓度测定均在样品采集结束后短期内完成. 所有统计图采用 Origin 2018 软件制作,相关性分析用 Rstudio 1.1.383 完成. 为更好地分析入湖河流及纳木错湖水 DOC 和 TN 浓度的季节变化,将多次采样的平均值作为月浓度值;如所在月份只有单次采样,则用具体日期浓度表示.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 主要入湖河流 DOC 和 TN 浓度的季节变化

2012 年河水采样时间为降水集中的季风期,图 2 结果显示大多数河流 DOC 和 TN 浓度在季风期有明显的波动,且 TN 较 DOC 浓度波动更为明显. 2013 年河水采样时间较为分散,主要为季风期前(5 月 30 日)、季风期(7、8 月)和季风期后(12 月 29 日). 分析表明,21 条入湖河流 DOC 浓度在季风期及其前后这段时期的变化趋势差异明显,主要存在 3 种变化形式,即季风期前出现高值(4、6~12、14 号河流),季风期出现高值(5、15~21 号河流)和无明显波动(1~3、13 号河流). 在冬季采集的 8 个河流水样中,5 条河流的 DOC 浓度为年内最低值,但另 3 条河流(3、5、7 号河流)的 DOC 浓度则同季风期相当甚至更高. 以上结果显示出来的差异可能与各河流补给方式有关. 由于冰雪融水对土壤和地表植物残体的淋洗作用,高原冰雪融水补给河流 DOC 浓度在冰川融水开始增加阶段出现高值. 而非冰雪融水补给的河流,DOC 浓度高值与径流量高值相符,出现在夏季<sup>[11,33-34]</sup>. 在纳木错流域内,冰雪融水补给河流主要发育在纳木错南岸. 根据前人研究结果,纳木错流域冰雪融水开始于 5 月底<sup>[30]</sup>,此时南岸河流 DOC 浓度出现高值,而非冰雪融水补给河流 DOC 浓度高值出现在径流量较大的季风期(图 2). 除 20、21 号河流外,在季风期前其他河流的 TN 浓度明显高于季风期或者与之持平. 另外,不同于 DOC,冬季采样的 8 条河流 TN 浓度均较高,甚至为年内最高值. 综上所述,在整个采样期,各河流间 DOC 和 TN 浓度季节变化趋势存在较明显差异.

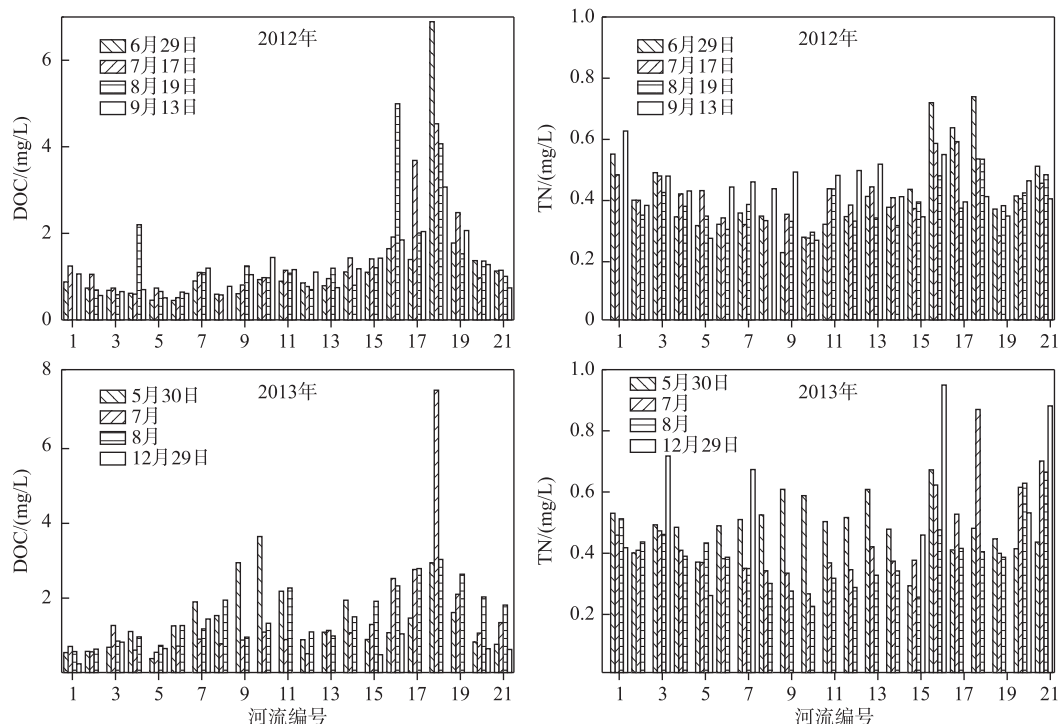


图 2 2012、2013 年纳木错 21 条入湖河流 DOC 和 TN 浓度季节变化

Fig.2 Seasonal variations of DOC and TN concentrations of 21 inflowing rivers around Nam Co in 2012 and 2013

通过对 2012—2013 年纳木错周边 21 条主要入湖河流 DOC 和 TN 浓度的综合比较(表 2)可以看出,河流间 DOC、TN 浓度差异明显,反映了不同流域植被生产力和营养盐水平的差异. 河流间 TN 浓度差异较 DOC 浓度要小,在同一时期,21 条河流中 DOC 浓度最低值是最高值的 3.22%~16.58%,变异系数(CV 值)在 0.524~1.021 之间. TN 浓度的最低值是最高值的 22.13%~43.68%,变异系数介于 0.179~0.310 之间. 另外,流域内 21 条入湖河流间 DOC 和 TN 浓度的变异系数有明显的季节性变化,其中 DOC 浓度的变异系数在 6—7 月达到年内高值,各河流间 TN 浓度的差异在 6—8 月最为显著.

从平均水平来看,流域内河流 DOC 平均浓度在季风期来临前的 5 月最高,7、8 月也较高,12 月为最低值. TN 平均浓度从 5—12 月呈现先减小后增加的趋势,8 月为最低值,随后逐渐增加并在 12 月达到最大值(表 2). 在 6—12 月河流 DOC 浓度和 TN 浓度表现为相反的季节变化趋势.

表 2 纳木错 21 条入湖河流 DOC、TN 浓度的季节变化统计量

Tab.2 Statistics of seasonal variations of DOC and TN concentrations from 21 inflowing rivers around Nam Co							
指标	统计量	5 月 30 日	6 月	7 月	8 月	9 月 13 日	12 月 29 日
DOC/(mg/L)	最小值	0.382	0.370	0.324	0.452	0.509	0.244
	最大值	3.649	6.892	10.07	4.994	3.071	1.443
	平均值	1.442	1.265	1.420	1.537	1.201	0.763
	CV 值	0.612	0.883	1.021	0.634	0.524	0.513
TN/(mg/L)	最小值	0.294	0.230	0.249	0.188	0.270	0.262
	最大值	0.673	0.739	1.125	0.775	0.627	0.950
	平均值	0.489	0.431	0.438	0.392	0.435	0.612
	CV 值	0.179	0.301	0.312	0.268	0.195	0.387

3.2 纳木错湖水 DOC 和 TN 浓度的剖面特征及季节变化

采样期间纳木错 T1、T2 点 DOC 浓度范围分别为 2.42~7.53 和 2.46~8.08 mg/L. 从图 3 可以看出,T1 和 T2 点 DOC 浓度呈现明显的季节性变化,并具有相同的变化趋势. 具体表现为,DOC 浓度在季风期前的 5 月和季风期的 8 月明显高于其他时期,T1、T2 点之间的 DOC 浓度差值也较大,在季风期后的 11 月 DOC 浓度为最低值. 此外,7、9、11 月 DOC 浓度在垂直方向上分布较均匀,而 5 月底、6 月、8 月在垂直方向上分布差异较大(图 4).

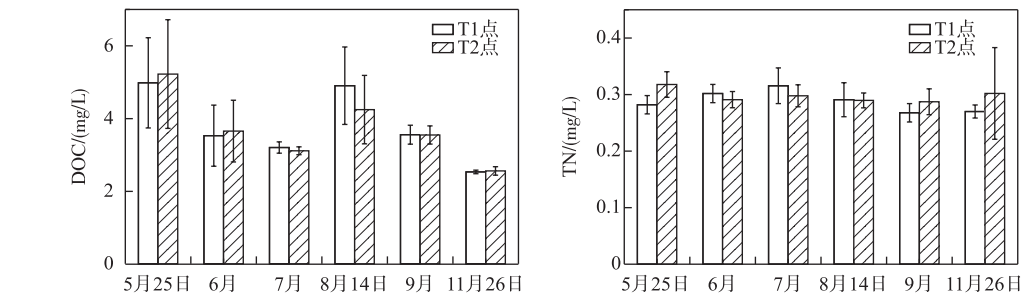


图 3 纳木错 T1、T2 点 DOC 和 TN 浓度的季节变化

Fig.3 Seasonal variations of DOC and TN concentrations at T1 and T2 sites in Nam Co

纳木错 T1、T2 点在采样期间 TN 浓度范围分别为 0.241~0.398 和 0.237~0.517 mg/L,与受人类活动影响较大的湖泊相比<sup>[16,18]</sup>,TN 浓度显著偏低,属于贫中营养化的水平<sup>[17]</sup>. 与 DOC 浓度不同,在整个采样期 TN 浓度分布较为平均,没有明显的季节变化趋势(图 3),但在 7 月 T1 点和 5 月 T2 点 TN 浓度分别最高,且 T1、T2 点 TN 浓度季节变化趋势不一致. 垂直剖面上,除了 11 月 T2 点 0~10 m 表层水体外,T1、T2 点的 TN 浓度分布较为均匀,且波动幅度并没有随季节的变化而出现明显的波动(图 3).

通过表 3 可以看出,在季风期,纳木错水体 DOC 和 TN 浓度在垂直方向上的分布基本没有相关关系,而

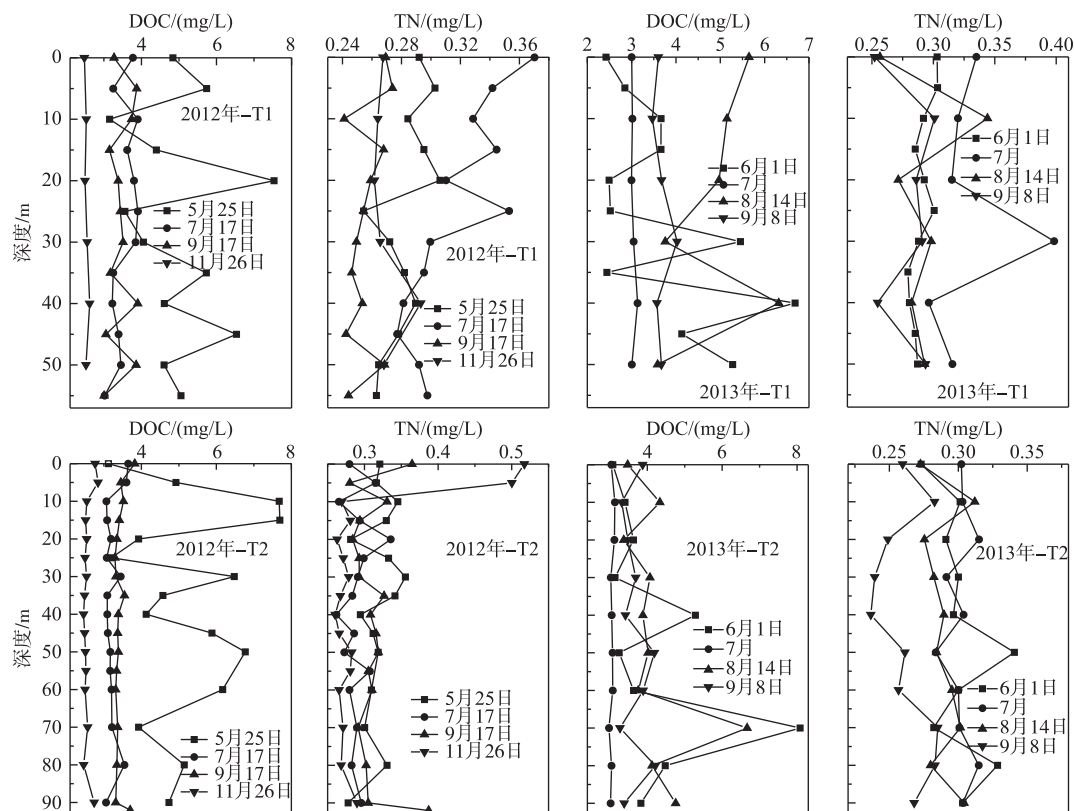


图4 纳木错 T1、T2 点 2012 年、2013 年 DOC、TN 浓度垂直剖面

Fig.4 Vertical profile of DOC and TN concentrations at T1 and T2 sites of Nam Co in 2012 and 2013

T1 和 T2 点在生产力微弱和外源输入缺乏的冬季(11 月)则表现出显著的正相关关系(表 3),说明控制 DOC 和 TN 浓度在垂直剖面分布的因素在季风期较为复杂,而在冬季二者的垂直分布可能受同一因素控制。

### 3.3 纳木错湖水与主要入湖河流 DOC 和 TN 浓度季节变化分析

湖泊水体中有机碳的时空变化在很大程度上受其来源的影响。湖泊有机碳来源主要包括陆源输入和内生有机碳,其中陆源有机碳受流域内植物的初级生产力和分解率的共同控制<sup>[5]</sup>,且与流域来水量密切相关。内生有机碳由浮游和大型水生植物光合作用生成<sup>[4]</sup>。在整个非季风期缺少降水、冰雪融水以及地表径流的补给,因此在 5 月份达到年内低水位<sup>[30]</sup>,导致湖水 DOC 浓度在此时出现峰值。另外,纳木错于每年 5 月中旬完全解冻<sup>[35]</sup>,并开始进入春末湖水翻转期<sup>[36]</sup>,加上风力作用在湖面解冻后重新开始作用于湖泊,整个湖泊内部水动力状况因而变得复杂,进而造成 DOC 浓度在 T1 和 T2 点在垂直剖面上均波动明显(图 4)。6、7 月随着冰雪融水和降水补给量(图 5)逐渐增加,由于稀释作用<sup>[2]</sup>,DOC 浓度有明显的下降趋势。8 月 DOC 浓度的显著增加,很可能与流域入湖河流携 DOC 输入有关(图 6)。此外,随着水温升高和地表径流带来营养盐的增多,促进藻类等浮游植物的生长,可能是湖水 DOC 浓度的增加的主要因素<sup>[7]</sup>。同时,T1 点 8 月 DOC 浓度在 0~30 m 范围内表现出从上层往下层减小的趋势,主要原因可能是受水温和透明度的限制,表层浮游藻类活动较为强烈<sup>[2,13]</sup>,而 T2 点 8 月份 DOC 浓度在 0~60 m 分布均匀,说明远离陆地深水湖盆区的 T2 点表层水生植物活动微弱。同时,纳木错 T1、T2 点水柱 DOC 浓度在均温层都出现了峰值,可能是由于底栖藻类活动的结果,加之纳木错较深,底部均温层处于厌氧、低温且无光照的环境,不利于沉降下来的有机碳的矿化。9 月之后,随着纳木错流域和湖泊内部生产力的逐渐下降,湖水 DOC 浓度逐渐降低,且 9 月湖水处于稳定的分层期,11 月中旬湖水为完全混合期<sup>[36]</sup>,因而水柱 DOC 浓度垂直分布均匀。

表 3 2012—2013 年纳木错 T1、T2 点垂直剖面 DOC、TN 相关关系分析

Tab.3 Correlation coefficients of DOC and TN in vertical profile at T1 and T2 sites of Nam Co in 2012 and 2013

采样点	2012-5-25	2012-7-17	2012-9-17	2012-11-26	2013-6-1	2013-7-4	2013-7-18	2013-8-14	2013-9-8
T1	0.491	0.514	0.336	0.843 *	-0.555	-0.029	0.438	-0.230	0.205
T2	0.415	0.131	0.534 *	0.668 **	0.018	0.311	-0.755 *	0.697 *	-0.004

\* 表示显著性  $P<0.05$ , \*\* 表示显著性  $P<0.01$ .

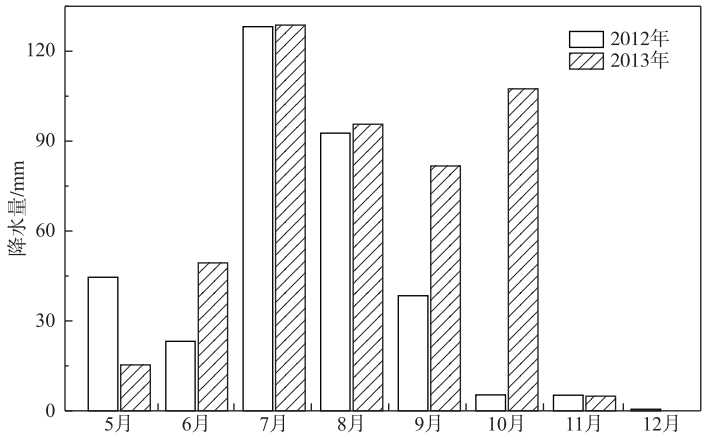


图 5 2012、2013 年采样期纳木错降水量

Fig.5 Precipitation in Nam Co during the sampling period in 2012 and 2013

湖泊营养盐来源主要有外部输入、湖泊内部有机质循环和底泥释放 3 个主要途径<sup>[37-38]</sup>. 河流在氮输送上扮演着非常重要的角色<sup>[10]</sup>, 在整个采样期, 纳木错湖水和入湖河水的 TN 浓度拥有相同的变化趋势(图 7), 表明外源输入补给, 是影响湖泊 TN 浓度的因素之一<sup>[39]</sup>, 但是湖水 TN 浓度的变化范围非常小(0.28~0.31 mg/L), 外源输入并没有显著影响纳木错的 TN 浓度. 从图 7 可以看出, 采样期纳木错 TN 浓度表现为先减少后增加的趋势, 其中在 8 月份出现最低值, 可能与季风期流域生产力增加加大了对无机氮的吸收固定作用. 而非季风期出现高值可能是由于有机质的矿化分解及底泥营养盐的释放造成 TN 浓度的升高<sup>[16,18]</sup>. 有研究表明, 河水温度增高, 水体微生物反硝化作用增强<sup>[16]</sup>, 这也可能是季风期纳木错入湖河流 TN 浓度降低的一个重要原因.

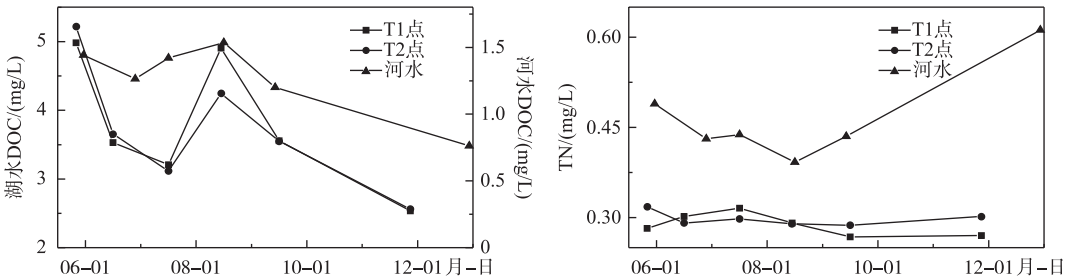


图 6 纳木错 T1、T2 点及其入湖河流 2012—2013 年 DOC 及 TN 月平均浓度季节变化

Fig.6 Seasonal variations of DOC and TN concentrations at T1 and T2 sites of Nam Co and inflowing rivers during 2012–2013



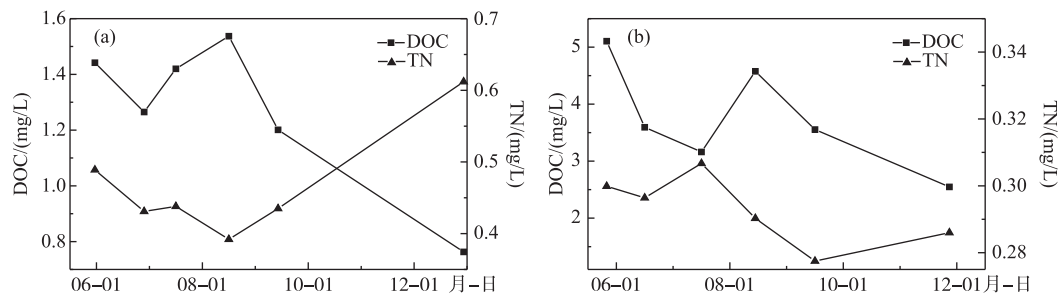


图7 纳木错(a)及入湖河流(b)2012—2013年DOC、TN月平均浓度季节变化比较

Fig.7 Comparison of seasonal variations of DOC and TN concentrations in Nam Co(a) and inflowing rivers(b) during 2012–2013

#### 4 结论与展望

1) 采样期内, 纳木错 21 条河流 DOC、TN 平均浓度分别为 0.763~1.537 和 0.179~0.387 mg/L. 各河流 DOC 和 TN 浓度存在显著空间变异性, 且季风期比非季风期差异性更为明显. 从季节变化来看, 21 条河流 DOC、TN 平均浓度季节变化显著, DOC 浓度在季风期高, 非季风期低, 而 TN 与 DOC 浓度表现出相反的季节变化趋势.

2) 采样期内, 纳木错水体 DOC 浓度为 2.42~8.08 mg/L, TN 浓度为 0.237~0.517 mg/L. T1、T2 点位间 DOC 和 TN 水柱平均浓度无显著差异性, 垂直剖面上, TN 浓度分布较为均匀, 而 DOC 浓度在季风期前和季风期的 8 月垂直分异明显. 从季节上来看, TN 浓度的季节差异不显著, 而 DOC 浓度季节变化显著, 季风期前的 5 月和季风期的 8 月为高值, 冬季为最低值.

3) 河流 DOC 浓度受河流补给方式、流域内植物生产力和微生物分解作用的影响. 湖泊 DOC 浓度季节变化主要受水文条件、水生植物和微生物活动的影响, 河流 DOC 的输入也是影响湖泊 DOC 浓度的重要因素. 湖泊 TN 浓度受河流 TN 输入的影响, 但并不显著.

目前, 针对纳木错流域水生生态系统的研究缺失, 为更好地理解高寒湖泊的水生生态和水质状态、变化特征及其影响因素, 同时为揭示纳木错流域水体的碳氮循环过程以及对气候条件的响应机制, 未来需要进行各形态碳氮含量及碳氮稳定同位素的持续监测研究.

致谢: 感谢马庆峰、杨瑞敏、陈锋、林晓、王明达、陈占仓等参与了部分野外考察工作, 高少鹏协助完成了分析测试工作, 感谢许腾在数据分析和图表绘制方面的帮助!

#### 5 参考文献

- [1] Guo W, Ye F, Lian ZL *et al.* Seasonal changes of organic carbon in the Pearl River estuary. *Journal of Tropical Oceanography*, 2016, **35**(4): 40-50. [郭威, 叶丰, 连忠廉等. 珠江口水体有机碳的季节性变化. 热带海洋学报, 2016, **35**(4): 40-50.]
- [2] Wang XJ, Fang CL, Yu ZT *et al.* Seasonal variations and sources of particulate and dissolved organic carbon in Lake Bosten, Xinjiang Province. *J Lake Sci*, 2014, **26**(4): 552-558. DOI: 10.18307/2014.0409. [王秀君, 房传苓, 于志同等. 新疆博斯腾湖水体颗粒和溶解有机碳的季节变化及其来源初探. 湖泊科学, 2014, **26**(4): 552-558.]
- [3] Xie SC, Chen JF, Wang FP *et al.* Mechanisms of carbon storage and the coupled carbon, nitrogen and sulfur cycles in regional seas in response to global change. *Science China: Earth Sciences*, 2014, **47**(3): 378-382. [谢树成, 陈建芳, 王凤平等. 海洋储碳机制及区域碳氮硫循环耦合对全球变化的响应. 中国科学: D 辑: 地球科学, 2017, **47**(3): 378-382.]
- [4] Sobek S, Tranvik LJ, Prairie YT *et al.* Patterns and regulation of dissolved organic carbon: An analysis of 7,500 widely distributed lakes. *Limnology and Oceanography*, 2007, **52**(3): 1208-1219. DOI: 10.4319/lo.2007.52.3.1208.



- [ 5 ] Wei XG. Progress in the study of biogeochemistry of riverine organic matter. *Ecology and Environment*, 2007, **16**(2): 1063-1067.[ 魏秀国. 河流有机质生物地球化学研究进展. 生态环境, 2007, **16**(2): 1063-1067.]
- [ 6 ] Mann CJ, Wetzel RG. Dissolved organic carbon and its utilization in a riverine wetland ecosystem. *Biogeochemistry*, 1995, **31**(2): 99-120. DOI: 10.1007/BF00000941.
- [ 7 ] Yang DT, Chen WM. The temporal and spatial distribution of dissolved organic carbon in lakes at the lower reach of Changjiang River. *Environmental Pollution and Control*, 2004, **26**(4): 275-277, 323.[ 杨顶田, 陈伟民. 长江下游湖泊中可溶性有机碳的时空分布. 环境污染与防治, 2004, **26**(4): 275-277, 323.]
- [ 8 ] Song K, Wen Z, Shang Y *et al.* Quantification of dissolved organic carbon (DOC) storage in lakes and reservoirs of mainland China. *Journal of Environmental Management*, 2018, **217**(2018): 391-402. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.03.121.
- [ 9 ] Kalff J ed. *Limnology: inland water ecosystems*. Beijing: High Education Press, 2011: 274.
- [ 10 ] Peterson BJ, Wollheim WM, Mulholland PJ *et al.* Control of nitrogen export from watersheds by headwater streams. *Science*, 2001, **292**(5514): 86-90. DOI: 10.1126/science.1056874.
- [ 11 ] Hood E, Mcknight DM, Williams MW. Sources and chemical character of dissolved organic carbon across an alpine/subalpine ecotone, Green Lakes Valley, Colorado Front Range, United States. *Water Resources Research*, 2003, **39**(7): 1-12. DOI: 10.1029/2002 WR001738.
- [ 12 ] Ejarque E, Khan S, Steniczka G *et al.* Climate-induced hydrological variation controls the transformation of dissolved organic matter in a subalpine lake. *Limnology and Oceanography*, 2018, **63**(3): 1355-1371. DOI: 10.1002/lno.10777.
- [ 13 ] Li W, Wu FC, Fu PQ *et al.* Profile characteristics and seasonal variation of dissolved organic matter in hongfeng Lake, Guizhou. *Environmental Science*, 2006, **27**(10): 1979-1985.[ 黎文, 吴丰昌, 傅平青等. 贵州红枫湖水体溶解有机质的剖面特征和季节变化. 环境科学, 2006, **27**(10): 1979-1985.]
- [ 14 ] Chow MF, Lai CC, Kuo HY *et al.* Long term trends and dynamics of dissolved organic carbon (DOC) in a subtropical reservoir basin. *Water*, 2017, **9**(7): 545-558. DOI: 10.3390/w9070545.
- [ 15 ] Evans C, Monteith D, Cooper D. Long-term increases in surface water dissolved organic carbon: observations, possible causes and environmental impacts. *Environmental Pollution*, 2005, **137**(1): 55-71. DOI: 10.1016/j.envpol.2004.12.031.
- [ 16 ] Li YF, Xia YQ, Li XB *et al.* Temporal and spatial variations of total nitrogen and total phosphorus in the typical reaches of Qinhuai River. *Environmental Science*, 2013, **34**(1): 91-97.[ 李跃飞, 夏永秋, 李晓波等. 秦淮河典型河段总氮总磷时空变异特征. 环境科学, 2013, **34**(1): 91-97.]
- [ 17 ] He YY, Jiangliu GY, Zhao JF. Temporal and spatial variations of total nitrogen and total phosphorus nutrients in the Bosten lake. *Journal of Shihezi University: Natural Science*, 2016, **34**(2): 259-264.[ 何杨洋, 江浏光艳, 赵景峰. 博斯腾湖总氮总磷的时空分布. 石河子大学学报: 自然科学版, 2016, **34**(2): 259-264.]
- [ 18 ] Shu FY, Liu YP, Zhao Y *et al.* Spatio-temporal distribution of TN and TP in water and evaluation of eutrophic state of Lake Nansi. *Environmental Science*, 2012, **33**(11): 3748-3752.[ 舒凤月, 刘玉配, 赵颖等. 南四湖水体氮、磷营养盐时空分布特征及营养状态评价. 环境科学, 2012, **33**(11): 3748-3752.]
- [ 19 ] Ma RH, Yang GS, Duan HT *et al.* China's lakes at present: Number, area and spatial distribution. *Sci China: Earth Sci*, 2011, **41**(3): 394-401.[ 马荣华, 杨桂山, 段洪涛等. 中国湖泊的数量、面积与空间分布. 中国科学: 地球科学, 2011, **41**(3): 394-401.]
- [ 20 ] Mladenov N, Sommaruga R, Morales-baquero R *et al.* Dust inputs and bacteria influence dissolved organic matter in clear alpine lakes. *Nature Communications*, 2011, **405**(2). DOI: 10.1038/ncomms1411.
- [ 21 ] Liu X, Yao T, Kang S *et al.* Bacterial community of the largest Oligosaline Lake, Namco on the Tibetan Plateau. *Geomicrobiology Journal*, 2010, **27**(8): 669-682. DOI: 10.1080/01490450903528000.
- [ 22 ] Liu Y, Yao T, Zhu L *et al.* Bacterial diversity of freshwater alpine lake Puma Yumco on the Tibetan Plateau. *Geomicrobiology Journal*, 2009, **26**(2): 131-145. DOI: 10.1080/01490450802660201.
- [ 23 ] Wu YH, Zhu LP, Ye QH *et al.* The response of lake-glacier area change to climate variations in Namco Basin, Central Tibetan Plateau, during the last three decades. *Acta Geographica Sinica*, 2007, **62**(3): 301-311.[ 吴艳红, 朱立平, 叶庆华等. 纳木错流域近 30 年来湖泊—冰川变化对气候的响应. 地理学报, 2007, **62**(3): 301-311.]
- [ 24 ] Qian WH, Ding T, Tang SQ. Some understanding of the seasonal march of Asian Monsoons. *Journal of Tropical Meteorology*, 2010, **26**(1): 111-116.[ 钱维宏, 丁婷, 汤帅奇. 亚洲季风季节进程的若干认识. 热带气象学报, 2010, **26**

- (1): 111-116.]
- [25] You QL, Kang SC, Li CL *et al.* Variation features of meteorological elements at Namco Station, Tibetan Plateau. *Meteorological Monthly*, 2007, **33**(3): 54-60. [游庆龙, 康世昌, 李潮流等. 青藏高原纳木错气象要素变化特征. 气象, 2007, **33**(3): 54-60.]
- [26] Zhu LP, Qiao BJ, Yang RM *et al.* New recognition of water storages and physicochemical property of the lakes on the Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Nature*, 2017, **39**(3): 166-172. [朱立平, 乔宝晋, 杨瑞敏等. 青藏高原湖泊水量与水质变化的新认知. 自然杂志, 2017, **39**(3): 166-172.]
- [27] Wang J, Zhu L, Daut G *et al.* Investigation of bathymetry and water quality of Lake Nam Co, the largest lake on the central Tibetan Plateau, China. *Limnology*, 2009, **10**(2): 149-158. DOI: 10.1007/s10201-009-0266-8.
- [28] Wang JB, Zhu LP, Wang Y *et al.* Spatial variability of recent sedimentation rate and variations in the past 60 years in Nam Co, Tibetan Plateau, China. *Quaternary Sciences*, 2011, **31**(3): 535-543. [王君波, 朱立平, 汪勇等. 西藏纳木错现代沉积速率的空间分布特征及近 60 年来的变化研究. 第四纪研究, 2011, **31**(3): 535-543.]
- [29] Keil A, Berking J, Mügler I *et al.* Hydrological and geomorphological basin and catchment characteristics of Lake Nam Co, South-Central Tibet. *Quaternary International*, 2010, **218**(1/2): 118-130. DOI: 10.1016/j.quaint.2009.02.022.
- [30] Zhou S, Kang S, Chen F *et al.* Water balance observations reveal significant subsurface water seepage from Lake Nam Co, south-central Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, 2013, **491**: 89-99. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.03.030.
- [31] Chen F, Cai QG, Sun LY. Estimation of meltwater runoff from glaciers and snow cover in Nam Co basin, Tibetan Plateau. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, **14**(2): 127-136. [陈飞, 蔡强国, 孙莉英. 青藏高原纳木错流域冰雪融水径流量估算. 中国水土保持科学, 2016, **14**(2): 127-136.]
- [32] Zhao BT, Shi YJ. Compared the measurement result of the total organic carbon in water by subtracion and direct method. *Arid Environmental Monitoring*, 2012, **26**(3): 129-132. [赵博韬, 施奕佳. 差减法 and 直接法对水中总有机碳测定结果比较. 干旱环境监测, 2012, **26**(3): 129-132.]
- [33] Lafrenière MJ, Sharp MJ. The concentration and fluorescence of dissolved organic carbon (DOC) in glacial and nonglacial catchments: Interpreting hydrological flow routing and DOC sources. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2004, **36**(2): 156-165. DOI: 10.1657/1523-0430(2004)036%5B0156:TCAFOD%5D2.0.CO;2.
- [34] Finlay J, Neff J, Zimov S *et al.* Snowmelt dominance of dissolved organic carbon in high-latitude watersheds: Implications for characterization and flux of river DOC. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**(10): L10401. DOI: 10.1029/2006GL025754.
- [35] Qu B, Kang SC, Chen F *et al.* Lake ice and its effect in the Nam Co Basin, Tibetan Plateau. *Progressus Inquisitines de Mutatione Climatis*, 2012, **8**(5): 18-24. [曲斌, 康世昌, 陈锋等. 2006—2011 年西藏纳木错湖冰状况及其影响因素分析. 气候变化研究进展, 2012, **8**(5): 18-24.]
- [36] Huang L, Wang JB, Zhu LP *et al.* Water temperature and characteristics of thermal stratification in Nam Co, Tibet. *J Lake Sci*, 2015, **27**(4): 711-718. DOI: 10.18307/2015.0420. [黄磊, 王君波, 朱立平等. 纳木错水温变化及热力学分层特征初步研究. 湖泊科学, 2015, **27**(4): 711-718.]
- [37] Zhang YY, Zhang HC, Chang FQ *et al.* Seasonal variation of water quality and its influencing factors in Lake Xingyun. *Journal of Water Resources Research*, 2017, **6**(5): 512-521. [张云鹰, 张虎才, 常凤琴等. 星云湖季节性水质变化及影响因素. 水资源研究, 2017, **6**(5): 512-521.]
- [38] Lin GE, Wang T, Lin QQ *et al.* Spatial pattern and temporal dynamics of limnological variables in Linxihe Reservoir, Guangdong. *J Lake Sci*, 2009, **21**(3): 387-394. DOI: 10.18307/2009.0312. [林国恩, 望甜, 林秋奇等. 广东流溪河水库湖沼学变量的时空动态特征. 湖泊科学, 2009, **21**(3): 387-394.]
- [39] Ni ZK, Wang SR, Zhao HC *et al.* The sources of organic carbon and nitrogen of suspended particulate matter in inflow river of Erhai Lake. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(3): 287-293. [倪兆奎, 王圣瑞, 赵海超等. 洱海入湖河流水体悬浮颗粒物有机碳氮来源特征. 环境科学研究, 2013, **26**(3): 287-293.]