

doi:10.11988/ckyyb.20180401

2019,36(9):6-11,22

# 长江源和怒江源区水体氮磷化学计量特征初探

叶玉适<sup>1,2</sup>, 陈进<sup>2</sup>, 许继军<sup>1,2</sup>, 王冬<sup>1,2</sup>, 殷大聪<sup>1,2</sup>

(1.长江科学院 水资源综合利用研究所, 武汉 430010;

2.长江科学院 流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室, 武汉 430010)

**摘要:**根据2016年长江源和怒江源区现场调查获取的水质监测资料,分析了长江源和怒江源区河湖水体的基本理化参数、氮磷含量和形态指标,并利用氮磷化学计量比( $m(\text{TN}) : m(\text{TP})$ ,氮磷质量比)特征评估了江源地区河湖水体的氮磷养分限制状态。结果表明:长江源和怒江源区河湖水体的总氮含量介于0.475~0.956 mg/L,满足地表水II—III类水质标准;总磷含量介于0.006~0.017 mg/L,满足地表水I—II类水质标准;硝态氮占总氮含量的43.5%~85.5%,是河湖水体氮素的主要组成部分,对江源地区水体总氮污染的贡献更大;氮磷比介于33.7~79.3,磷素是江源区河湖水体中浮游植物生长的限制性营养因子。研究成果可为揭示江源地区河湖水体的富营养化进程和水生态环境保护提供数据支撑。

**关键词:**水质;氮磷含量;化学计量特征;长江源;怒江源

中图分类号:X522;X524 文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2019)09-0006-06

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Stoichiometric Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Water Body in the Source Regions of the Yangtze River and Nujiang River

YE Yu-shi<sup>1,2</sup>, CHEN Jin<sup>2</sup>, XU Ji-jun<sup>1,2</sup>, WANG Dong<sup>1,2</sup>, YIN Da-cong<sup>1,2</sup>

(1. Water Resources Department, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;

2. Hubei Provincial Key Laboratory of Basin Water Resources and Ecological Environmental Sciences, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** According to the water quality monitoring data obtained from our field survey in the source regions of the Yangtze River and Nujiang River in 2016, we analyzed the physicochemical parameters, nitrogen and phosphorus content and form in water body of rivers and lakes in the source regions, and evaluated the nutrient limitations of nitrogen and phosphorus in rivers and lakes using stoichiometric approach. Results demonstrated that the total nitrogen (TN) content in water body of rivers and lakes in the study area ranged from 0.475 to 0.956 mg/L, ranking between class II and III of surface water quality standard; the total phosphorus (TP) content ranged from 0.006 to 0.017 mg/L, ranking between class I and II of surface water quality standard. Nitrate nitrogen ( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ) which accounted for 43.5%–85.5% of TN was the main component of nitrogen in water body of rivers and lakes and contributed more to TN pollution in the source regions of the Yangtze River and Nujiang River. The stoichiometric ratio of nitrogen and phosphorus ( $m(\text{TN}) : m(\text{TP})$ ) in water body of rivers and lakes of the Yangtze River and Nujiang River was between 33.7 and 79.3, indicating that phosphorus was the limiting nutrient for the growth of phytoplankton in water body of rivers and lakes in the source regions of the Yangtze River and Nujiang River. The research findings offer data support for revealing the eutrophication process and water eco-environment protection in the water body of rivers and lakes in the source regions in the Qinghai-Tibet Plateau.

**Key words:** water quality; nitrogen and phosphorus content; stoichiometric characteristic; source of the Yangtze River; source of the Nujiang River

收稿日期:2018-04-23;修回日期:2018-07-13

基金项目:国家自然科学基金项目(41501319);国家重点研发计划项目(2017YFC0404502);中央级公益性科研院所基金项目(CKSF2016004/SZ,CKSF2016269/SZ);湖北高端人才引领第一层次计划项目(2013—2017年)

作者简介:叶玉适(1987-),男,湖北武汉人,高级工程师,博士后,主要从事水资源高效利用与生态环境保护研究。E-mail:yeyushi@126.com

## 1 研究背景

青藏高原素有“世界屋脊”和“地球第三极”之称(平均海拔超过 4 000 m)<sup>[1-2]</sup>,是长江、黄河、澜沧江、怒江、雅鲁藏布江、恒河、印度河等大江大河的发源地<sup>[3]</sup>,被誉为“亚洲水塔”<sup>[4]</sup>,为全球超过 20%的人口提供水资源<sup>[5]</sup>,是我国和东南亚水资源和生态安全保障的战略基地<sup>[6-7]</sup>。青藏高原江河源头区分布着丰富多样、独具特色的特殊生态系统类型,尤其是高原冰冻圈以及高寒环境条件下的河流湖泊水生生态系统,对全球气候变化和人类活动响应非常敏感<sup>[2,6,8]</sup>,其水资源和生态环境质量承受能力十分脆弱<sup>[9]</sup>。开展江源地区水环境质量调查评价,是保护江源地区水资源与生态环境的重要基础工作,可为研究气候变化条件下江源地区水资源和生态环境演变提供科学依据。

近年来,生态化学计量学理论逐渐被应用于水生生态学研究。该理论自经典 Redfield 比率(海洋浮游植物碳、氮、磷摩尔比固定为 106:16:1,即质量比为 41.1:7.2:1)的首次提出<sup>[10]</sup>后,经 Elser 和 Hassett<sup>[11]</sup>、Sterner 等<sup>[12]</sup>学者的推进而不断完善。生态化学计量学主要研究生态过程中化学元素特别是碳、氮、磷等主要元素的比率关系<sup>[13]</sup>,为碳、氮、磷的生物地球化学循环和生态学过程研究提供了一种新思路<sup>[12]</sup>。其中,氮磷化学计量比不断成为评估水体营养结构的重要手段<sup>[14]</sup>,利用水体氮磷比指标,可以判断河湖水体的氮磷营养限制状态,有助于掌握河湖水体的富营养化进程<sup>[14-15]</sup>。

由于江源地区特殊的地理位置,其海拔高、高寒缺氧、气温日变幅大、自然环境条件十分恶劣<sup>[16]</sup>,同时受交通和技术条件限制,有关江源地区河湖水体氮磷营养盐含量、形态尤其是氮磷化学计量特征报道仍十分匮乏。本研究根据 2016 年长江科学院在长江源和怒江源区科学考察中获取的水质监测资料,分析了长江源和怒江源区河湖水体的基本理化

参数、氮磷营养盐的含量和形态指标,并利用氮磷化学计量比特征评估了江源地区河湖水体的氮磷养分限制状态,为揭示江源区河湖水体的富营养化进程和水生态环境保护提供数据支撑。

## 2 材料与方法

### 2.1 采样时间及采样位点

2016 年 6 月 1—6 日,长江科学院组织相关专业技术人员对长江源和怒江源区的河流、湖泊开展了水质现场调查采样工作。采样位点分别位于长江北源楚玛尔河流域的库赛湖断面、盐湖断面、楚玛尔河大桥断面、楚玛尔河河源断面,长江正源沱沱河流域的沱沱河大桥断面、沱沱河河源断面、布曲雁石坪断面,以及怒江源的那曲河段断面、那曲水文站断面共 9 处。2016 年长江源和怒江源区各采样位点坐标见表 1。

### 2.2 水样采集及样品测试方法

#### 2.2.1 现场水体理化指标监测

选取青藏高原河湖水体现场采样地点时尽量避免死水区、回水区,在顺直河段、河床稳定、水流平稳,且水面宽阔、无急流、无浅滩处断面位置进行采样,同时综合考虑采样的可行性,尽可能选择数量最少但可获取更多环境信息的代表性断面<sup>[17]</sup>。采样过程中,采用 2 L 容量的透明有机玻璃水样采集器,单次采集不少于 3 份水样,将水样置于清洁的有机玻璃桶中混匀<sup>[16]</sup>,利用 YSI EXO2 型多参数水质分析仪现场测定水体的各项理化参数指标,包括:pH 值、水温  $T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )、溶解氧 DO( $\text{mg/L}$ )、氧化还原电位 ORP( $\text{mV}$ )、电导率 EC( $\mu\text{S/cm}$ )和溶解性总固体 TDS( $\text{mg/L}$ ),合计 6 项。

#### 2.2.2 水样采集与处理

现场水质理化参数指标测定完成后,再次采集不少于 3 份水样,混合后置于洗净的 500 mL 聚乙烯塑料瓶中,加入 3~4 滴分析纯浓硫酸,使样品的 pH 值 $<2.0$ ,并密封保存于 4  $^{\circ}\text{C}$  的便携式冰箱中,待全部

表 1 2016 年长江源和怒江源区采样位点坐标

Table 1 Position coordinates of sampling sites in the source regions of Yangtze River and Nujiang River in 2016

采样位点	流域	河流	采样日期	东经	北纬	海拔/m
库赛湖	长江	楚玛尔河	2016-06-01	93°05'20.53"	35°39'18.98"	4 450
盐湖	长江	楚玛尔河	2016-06-01	93°28'42.14"	35°27'43.22"	4 440
楚玛尔河大桥	长江	楚玛尔河	2016-06-02	93°18'14.96"	35°18'22.56"	4 487
楚玛尔河河源	长江	楚玛尔河	2016-06-02	92°54'16.16"	35°14'24.87"	4 562
沱沱河大桥	长江	沱沱河	2016-06-02	92°26'37.02"	34°13'15.02"	4 531
沱沱河河源	长江	沱沱河	2016-06-03	90°59'12.55"	33°28'37.61"	5 202
布曲雁石坪	长江	布曲	2016-06-04	92°03'53.39"	33°35'32.67"	4 675
那曲河段	怒江	怒江	2016-06-04	91°45'21.01"	31°39'03.77"	4 565
那曲水文站	怒江	怒江	2016-06-05	91°58'47.95"	31°25'27.55"	4 480

水样采集完成后,运回实验室用于水体的氮、磷营养盐指标测定<sup>[16]</sup>。

### 2.2.3 水样氮磷含量测试方法

水样运送回实验室后,先用浓度 1 mol/L 的 NaOH 溶液将水样 pH 值调到 7.0 左右,再放入 4 °C 冰箱中静置 24 h 后,取上清液测定氮、磷营养盐含量<sup>[16]</sup>。

测试指标和方法:水样总氮 TN(mg/L),按照《水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》(HJ 636—2012)进行测定;水样铵态氮  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  (mg/L)和硝态氮  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  (mg/L),参照原国家环境保护总局《水和废水监测分析方法(第四版)》(2002年),分别采用纳氏试剂分光光度法和紫外分光光度法测定;水样总磷 TP(mg/L),采用《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB 11893—89)方法进行测定。

### 2.2.4 数据处理与评价方法

采用 Excel 2010 软件进行数据处理与制图。以《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)为依据,采用单因子评价方法对水质理化指标和氮磷含量指标结果进行评价。

## 3 结果与分析

### 3.1 现场水体理化指标

2016年长江源和怒江源区各采样位点现场水体的 pH 值、水温、溶解氧 DO、氧化还原电位 ORP、电导率 EC 和溶解性总固体 TDS 见表 2。

表 2 2016年长江源和怒江源区采样位点现场  
水体理化指标

Table 2 In-situ physicochemical parameters in water bodies at sampling sites in the source regions of Yangtze River and Nujiang River in 2016

采样位点	pH 值	水温/ °C	DO/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	ORP/ mV	EC/ ( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	TDS/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
库赛湖	8.96	9.84	6.41	76.0	16 154.2	22 738
盐湖	9.00	9.29	6.17	99.2	17 285.3	24 699
楚玛尔河 大桥	8.34	4.16	9.68	155.4	6 008.8	11 548
楚玛尔河 河源	8.44	9.42	7.18	195.2	318.6	453
沱沱河 大桥	8.31	7.40	7.83	148.3	1 869.4	2 817
沱沱河 河源	8.38	4.47	7.42	191.3	1 030.7	1 695
布曲雁 石坪	8.00	3.92	7.38	182.5	420.6	705
那曲河段	8.40	16.58	7.15	133.1	532.9	635
那曲 水文站	8.56	8.34	8.07	138.4	362.7	532
均值	8.49	8.16	7.48	146.6	4 887.0	7 313.6

由表 2 可见,长江源和怒江源区各采样位点水体 pH 值变化不大,介于 8.00~9.00 之间,平均为 8.49,与前期江源地区水质监测报道结果<sup>[16,18-19]</sup>相近。这可能是因为受河流水体泥沙含量的影响,江源地区水体呈弱碱性状态。各采样位点水温变化较大,在 3.92~16.58 °C 之间波动,平均为 8.16 °C,这是因为现场采样时间未能固定一致,不同采样位点的水温监测数据受采样时段的气温和日照影响而差异较大。

溶解氧(DO)含量是水体自净能力的一个重要指标,各采样位点水体的溶解氧在 6.17~9.68 mg/L 范围内波动,平均为 7.48 mg/L,满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) II 类水质标准(溶解氧  $\geq 6$  mg/L),且河流水体由于流动性好,其溶解氧含量要高于湖泊水体。

氧化还原电位(ORP)表征水溶液中的氧化还原特性,电位为正表明溶液具有氧化性,电位越高,溶液氧化性越强。反之,电位为负表明溶液为还原性,电位越低,溶液还原性越强。各采样位点水体的氧化还原电位介于 76.0~195.2 mV 之间,平均为 146.6 mV,与长江水利委员会 2010 年 10 月第三次长江源考察报道的数据(93.1~114 mV,平均为 104.1 mV)<sup>[18]</sup>相近,表明江源地区水体的氧化还原电位整体较高、氧化性较强,有助于水体中污染物尤其是有机污染物的降解。江源地区海拔相差较大,河流水体流速较快使得水体中溶解氧的含量较高是其氧化还原电位较高的主要原因。因此,现场调查中河流水体的氧化还原电位(133.1~195.2 mV)要高于湖泊水体(76~99.2 mV)。

电导率(EC)和溶解性总固体(TDS)是从不同侧面反映水体含盐量的指标,二者呈正相关性。电导率表征水体导电性的强弱,由水体中导电离子密度决定;溶解性总固体指水体中溶解组分的总量,包括溶解于水体中的各种离子、分子、化合物的总量,但不包括悬浮物和溶解气体。各采样位点水体的电导率和溶解性总固体主要受水体中泥沙含量和区域地质条件的影响<sup>[19]</sup>而变化较大:电导率介于 318.6~17 285.3  $\mu\text{S}/\text{cm}$  之间,平均为 4 887.0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ;溶解性总固体介于 453~24 699 mg/L 之间,平均为 7 313.6 mg/L。盐湖水体的电导率和溶解性总固体含量最高,表明其水体含盐量最高,而楚玛尔河河源水体电导率和溶解性总固体含量最低,其水体含盐量最低。

### 3.2 水体氮磷含量

#### 3.2.1 各采样位点水体的氮磷浓度

水体氮、磷营养盐浓度反映水体的污染状况,也

是水体富营养化的主要影响因素,氮、磷浓度过高会促进浮游植物快速增殖,加剧水体富营养化风险。2016年长江源和怒江源区各采样位点水体的氮、磷浓度见图1。

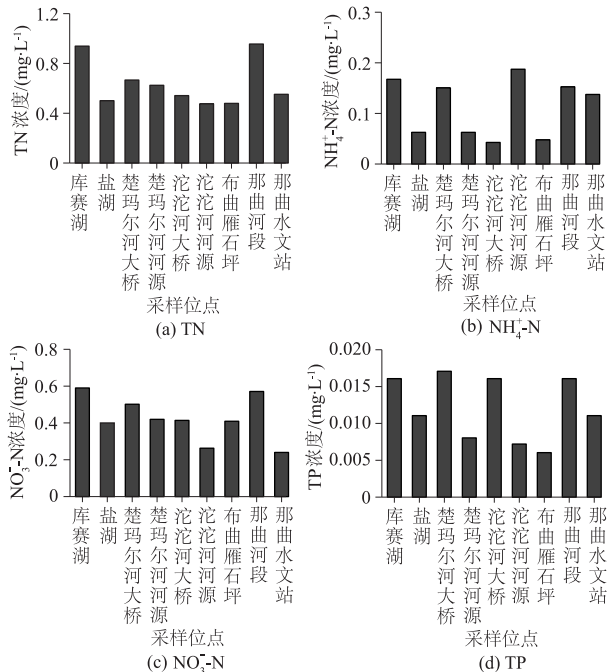


图1 2016年长江源和怒江源区各采样位点水体的氮、磷浓度

Fig.1 Concentrations of nitrogen and phosphorus in water bodies at sampling sites in the source regions of Yangtze River and Nujiang River in 2016

长江源和怒江源区各采样位点 TN 浓度介于 0.475~0.956 mg/L, 平均为 0.637 mg/L;  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度介于 0.043~0.187 mg/L, 平均为 0.112 mg/L;  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度介于 0.240~0.590 mg/L, 平均为 0.423 mg/L; TP 浓度介于 0.006~0.017 mg/L, 平均为 0.012 mg/L。

按照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)评价,长江源区的盐湖、沱沱河河源和布曲雁石坪 3 个采样位点 TN 浓度满足地表水 II 类水质标准,其余 6 个采样位点 TN 浓度满足地表水 III 类水质标准(河湖水体 TN 水质标准 I 类为  $\leq 0.2$  mg/L, II 类为  $\leq 0.5$  mg/L, III 类为  $\leq 1.0$  mg/L);长江源区的盐湖、楚玛尔河大桥、楚玛尔河河源、沱沱河大桥、布曲雁石坪和怒江源区的那曲水文站 6 个采样位点  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度满足地表水 I 类水质标准,其余 3 个采样位点  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度满足地表水 II 类水质标准(河湖水体  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  水质标准 I 类为  $\leq 0.15$  mg/L, II 类为  $\leq 0.5$  mg/L);长江源区的库赛湖和盐湖为湖泊水体,TP 浓度满足地表水 II 类水质标准(湖库水体 TP 水质标准 I 类为  $\leq 0.01$  mg/L, II 类为  $\leq 0.025$  mg/L),其余 7 个采样位点为河流水体,TP 浓度均

满足地表水 I 类水质标准(河流水体 TP 标准 I 类为  $\leq 0.02$  mg/L)。

综上,长江源和怒江源区河湖水体的 TN 含量指标满足地表水 II—III 类水质标准,TP 含量指标满足 I—II 类水质标准,表明江源地区河湖水体基本处于自然状态,地表水质状况优良,应加以保持和保护。

### 3.2.2 各采样位点水体的氮素形态

水体中的铵硝比( $m(\text{NH}_4^+-\text{N}) : m(\text{NO}_3^--\text{N})$ , 质量比)是表征水体氮素氧化还原状态的一个综合指标。2016年长江源和怒江源区各采样位点水体的铵硝比介于 0.10~0.71 之间,平均为 0.30(图 2(a)),表明长江源和怒江源区河湖水体的氮素更趋向于以氧化态的硝态氮形式存在,这与各采样位点现场水体监测的溶解氧含量和氧化还原电位较高(表 2)导致水体氧化性较强的结果相符合。

各采样位点水体中硝态氮占总氮的比例( $m(\text{NO}_3^--\text{N}) : m(\text{TN})$ , 质量比)介于 43.5%~85.5%,平均为 67.3%(图 2(b)),表明硝态氮对长江源和怒江源区河湖水体总氮污染负荷的贡献更大。

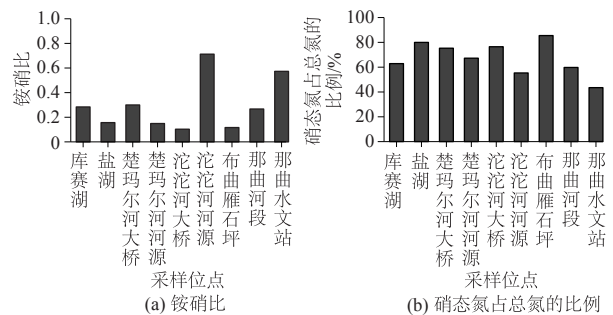


图2 2016年长江源和怒江源区各采样位点水体的铵硝比、硝态氮占总氮的比例

Fig.2 Ratios of ammonium nitrogen ( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ) content to nitrate nitrogen ( $\text{NO}_3^--\text{N}$ ) content and nitrate nitrogen ( $\text{NO}_3^--\text{N}$ ) content to total nitrogen (TN) content in water bodies at sampling sites in the source regions of Yangtze River and Nujiang River in 2016

### 3.3 水体氮磷化学计量特征

水体中的氮磷化学计量比( $m(\text{TN}) : m(\text{TP})$ , 氮磷质量比)对浮游植物生长具有重要意义,是浮游植物营养结构特点的重要反映。国内外学者<sup>[14,20-21]</sup>提出的水体中营养盐限制性划分标准为:①氮磷比 $<7\sim 10$ 时,水体中浮游植物生长受氮素限制,有可能发生生物固氮作用以调节氮磷比,消纳水体中相对丰足的磷素;②氮磷比 $>22.6\sim 30$ 时,磷素将成为浮游植物生长的限制性营养因子,较低的磷素含量水平可能使浮游植物对氮素的有机合成过程受到抑制;③氮磷比介于两者之间时,适宜浮游植物

的生长,会加速浮游植物对氮素有机合成的生态过程,促进浮游植物爆发性生长。

2016年长江源和怒江源区各采样位点水体的氮磷比介于33.7~79.3之间,平均为56.5(图3),表明相较于氮素,磷素的含量水平相对较低,磷素成为长江源和怒江源区河湖水体浮游植物生长的限制性营养因子。

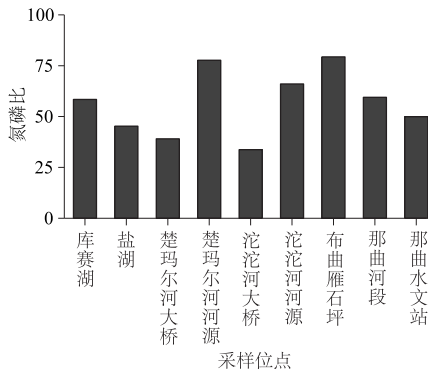


图3 2016年长江源和怒江源区各采样位点水体的氮磷比

Fig.3 Ratios of total nitrogen (TN) content to total phosphorus (TP) content in water bodies at sampling sites in the source regions of Yangtze River and Nujiang River in 2016

## 4 讨论

青藏高原具有海拔高、气温低、降水少、生态系统结构简单等特点<sup>[16]</sup>,地处青藏高原腹地的江源地区,生态系统较为敏感,抗干扰能力弱,容易受到外界干扰而导致生态系统功能的退化<sup>[6]</sup>。通过对长江源和怒江源区河流与湖泊地表水的采样监测分析,结果(表2)表明,目前长江源和怒江源区河湖水体的pH值介于8.00~9.00之间,平均为8.49,总体呈弱碱性状态;溶解氧在6.17~9.68 mg/L范围内波动,平均为7.48 mg/L,能够满足地表水Ⅱ类水质标准;氧化还原电位整体较高、氧化性较强,有助于水体中污染物尤其是有机污染物的降解;部分采样位点水体的电导率和溶解性总固体数值偏高,这主要是受江源地区地质条件导致的整体矿化度及总硬度背景值偏高影响<sup>[19]</sup>。河湖水体的TN浓度在0.475~0.956 mg/L之间,TP浓度在0.06~0.017 mg/L之间,氮磷营养盐总体含量相对较低(图1),表明江源地区河湖水体基本处于自然状态,地表水质状况优良,与殷大聪等<sup>[16]</sup>、黄茁等<sup>[19]</sup>和卢素锦等<sup>[22]</sup>对江源地区河湖水体水质现状的研究结果相一致。江源地区广袤无垠、面积巨大,特殊的地理位置和气候环境使得源区人口稀少,尤其在国家级三江源自然保护区内,人类生产生活干

扰程度小,污染物排放总量低,这些是江源地区河湖水质天然良好的重要原因。

水体中的氮素主要以有机氮、铵态氮、硝态氮、亚硝态氮4种形式存在。由于江源地区地表水几乎未受到有机污染<sup>[18-19,22]</sup>,其有机氮含量低,且河湖地表水体中亚硝态氮含量平均占总氮的2.3%~3.0%,一般忽略不计<sup>[23-24]</sup>,因此铵态氮与硝态氮成为江源区水体总氮含量的主要组成部分。本研究中,各采样位点水体的铵硝比(平均为0.30,图2(a))和硝态氮占总氮比例(平均为67.3%,图2(b))显示,长江源和怒江源区河湖水体的氮素更趋向于以氧化态的硝态氮形式存在,硝态氮对江源地区河湖水体总氮污染负荷的贡献更大。这与殷大聪等<sup>[16]</sup>和黄茁等<sup>[19]</sup>对江源地区河湖水体的水质监测结果相近。殷大聪等<sup>[16]</sup>的研究中,长江源和澜沧江源区各采样位点水体的铵态氮浓度介于0.070~0.113 mg/L,总氮浓度介于0.380~0.960 mg/L,铵态氮占总氮的比例仅为12.5%~29.7%,可见硝态氮为总氮的主要组成;黄茁等<sup>[19]</sup>的研究中,长江源区2012年和2014年不同河段的水体中,硝态氮占总氮的比例介于56.8%~98.4%,对源区河流水体总氮的污染贡献更大。江源地区河湖水体总氮污染源主要包括当地牧民过度放牧导致的畜禽粪便随雨水汇入水体<sup>[15]</sup>、大气降水导致的氮沉降、水体水生生物的生物固氮等。此外,近年来由于高原旅游业的兴起,江源地区游客量大幅增加<sup>[15-16]</sup>,游人产生的生活污水与生活垃圾一定程度上也增加了江源地区河湖水体的氮磷污染。由于江源地区河湖水体含氧量较高、氧化还原电位较高(表2),水体的氧化性较强,因而硝态氮成为江源地区河湖水体氮素的主要组成部分。

富营养化是指湖泊、水库等封闭水体及某些河流水体中的氮磷等营养物质含量过高所引起的水质污染现象<sup>[15]</sup>。由于氮磷是水体浮游植物生长的关键生源要素,在水体富营养化过程中,氮磷营养盐的大量输入和积累是造成浮游植物数量迅速提高的主要原因<sup>[18]</sup>。除氮磷营养盐的浓度外,由于不同浮游植物生长所需营养盐的比例关系各不相同<sup>[25]</sup>,氮磷的相对丰度(即氮磷化学计量比)变化将显著改变水体中营养盐的限制性状态,影响浮游植物间的竞争及种群的演替<sup>[26]</sup>,成为调控浮游植物生长的关键因素之一。本研究中长江源和怒江源区河湖水体的氮磷比介于33.7~79.3之间,平均为56.5(图3),根据国内外学者提出的水体营养盐限制性划分标准<sup>[14,20-21]</sup>,氮磷比>22.6~30时判断磷素为长江源和怒江源区河湖水体浮游植物生长的限制性营养因子。这与卢素锦等<sup>[15]</sup>

对青海省三江源保护区内星星海水体的氮磷计量特征研究结果相一致,该研究中星星海水体中 TN 含量为 0.326 mg/L, TP 含量为 0.014 mg/L, 氮磷比为 23.3, 认为磷素是星星海水体潜在富营养化的限制性因子。相对于氮素,磷素成为江源地区河湖水体限制性营养盐的主要原因是:氮素在自然界中易通过大气氮沉降、土壤有机质矿化及生物固氮等多种途径得到补充,而磷素在自然界中的迁移速率远小于氮素并主要以颗粒态形式流失<sup>[14,27]</sup>,且其在迁移过程中容易被土壤颗粒和胶体吸附,也易与土壤 Fe, Al, Ca, Mn 等金属离子形成沉淀而被截留<sup>[28]</sup>,故江源地区水体氮素的补充强度远高于磷素,监测结果显示江源地区河湖水体的磷素浓度水平远低于氮素浓度水平(图 1)。

## 5 结 论

青藏高原江河源区的水资源和生态环境状况一直以来备受全国乃至亚洲地区的关注。本文根据 2016 年长江源和怒江源区现场调查获取的水质监测资料,分析了长江源和怒江源区河湖水体的基本理化参数、氮磷含量和形态指标,并利用氮磷化学计量比特征评估了江源地区河湖水体的氮磷养分限制状态,得到以下结论:

(1) 长江源和怒江源区河湖水体总氮含量介于 0.475~0.956 mg/L, 平均为 0.637 mg/L, 满足地表水 II—III 类水质标准;总磷含量介于 0.006~0.017 mg/L, 平均为 0.012 mg/L, 满足 I—II 类水质标准。江源地区河湖水体基本处于自然状态,地表水质状况优良。

(2) 长江源和怒江源区河湖水体氮素含量以硝态氮为主要组成部分,硝态氮占总氮的比例介于 43.5%~85.5%, 平均为 67.3%。硝态氮对江源地区河湖水体总氮污染负荷的贡献更大。

(3) 长江源和怒江源区河湖水体的氮磷化学计量比介于 33.7~79.3 之间, 平均为 56.5。相较于氮素,磷素是长江源和怒江源区河湖水体浮游植物生长的限制性营养因子。

(4) 长江源和怒江源区河湖水体氮磷营养盐含量的调查评价以及氮磷化学计量比的特征分析结果,可为揭示江源地区河湖水体的富营养化进程和水生态环境保护提供基础数据支撑。

### 参考文献:

- [1] QIU J. China: The Third Pole[J]. *Nature*, 2008, 454: 393-396.  
 [2] CUI M M, MA A Z, QI H Y, *et al.* Warmer Temperature

Accelerates Methane Emissions from the Zoige Wetland on the Tibetan Plateau without Changing Methanogenic Community Composition [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11616.

- [3] 姚檀栋,姚治君. 青藏高原冰川退缩对河水径流的影响[J]. *自然杂志*, 2010, 32(1): 4-8.  
 [4] GUENTHER F, AICHNER B, SIEGWOLF R, *et al.* A Synthesis of Hydrogen Isotope Variability and Its Hydrological Significance at the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Quaternary International*, 2013, 313/314: 3-16.  
 [5] TONG Y D, CHEN L, CHI J, *et al.* Riverine Nitrogen Loss in the Tibetan Plateau and Potential Impacts of Climate Change [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 553: 276-284.  
 [6] 孙鸿烈,郑 度,姚檀栋,等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. *地理学报*, 2012, 67(1): 3-12.  
 [7] 陈 进. 长江源区水循环机理探讨[J]. *长江科学院院报*, 2013, 30(4): 1-5.  
 [8] CHEN H, ZHU Q A, PENG C H, *et al.* The Impacts of Climate Change and Human Activities on Biogeochemical Cycles on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(10): 2940-2955.  
 [9] HADDELAND I, HEINKE J, BIEMANS H, *et al.* Global Water Resources Affected by Human Interventions and Climate Change [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(9): 3251-3256.  
 [10] REDFIELD A C. The Biological Control of Chemical Factors in the Environment [J]. *American Scientist*, 1958, 46(3): 205-221.  
 [11] ELSER J J, HASSETT R P. A Stoichiometric Analysis of the Zooplankton-phytoplankton Interaction in Marine and Freshwater Ecosystems [J]. *Nature*, 1994, 370: 211-213.  
 [12] STERNER R W, ELSER J J. *Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere* [M]. Princeton: Princeton University Press, 2002.  
 [13] 贺金生,韩兴国.生态化学计量学:探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 2-6.  
 [14] 聂泽宇,梁新强,邢 波,等.基于氮磷比解析太湖苕溪水体营养现状及应对策略 [J]. *生态学报*, 2012, 32(1): 48-55.  
 [15] 卢素锦,武晓翠,侯传莹,等.三江源星星海水体中碳氮磷化学计量特征 [J]. *四川农业大学学报*, 2016, 34(2): 221-225.  
 [16] 殷大聪,许继军,金 燕,等.长江源与澜沧江源区浮游植物组成与分布特性研究 [J]. *长江科学院院报*, 2017, 34(1): 61-66.  
 [17] HJ/T 91—2002,地表水和污水监测技术规范 [S]. 北京:中国环境科学出版社,2003.  
 [18] 卓海华,刘云兵,郑红艳,等.长江源水环境调查分析 [J]. *人民长江*, 2012, 43(12): 23-26.  
 [19] 黄 苗,刘玥晓,赵伟华,等.长江源区近年水质时空分布特征探析 [J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(7): 46-50, 67.  
 [20] GUILDFORD S J, HEEKY R E. Total Nitrogen, Total Phosphorus, and Nutrient Limitation in Lakes and Oceans: Is There a Common Relationship? [J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45(6): 1213-1223.