

张立成 章 申 著  
董文江 王立军

# 长江河源区水环境地球化学

中国环境科学出版社

(京)新登字 089 号

## 内 容 简 介

本书介绍了我国有关的科技人员对长江河源区水环境进行了较系统的地球化学和生物地球调研,将获得的大量翔实的第一手资料,通过计算机数理统计检验,取得了长江河源区水环境 30 余个微量元素的背景值,初步弄清了水的理化性状和功能。全书分八章详细系统地叙述了长江河源区:①环境特征;②水环境的理化性状及其特征;③水环境分区与数据表征;④天然水体元素的浓度及其水环境背景值;⑤风化作用的地球化学特征;⑥水环境化学元素的来源;⑦水环境元素的赋存形态;⑧水环境元素形成的影响因素。揭示了长江河源区水体环境地球化学条件,探讨了水环境元素发生、来源和形成因素,揭示了人为活动影响甚少的青藏高原区水环境地球化学特征。

该书可供环保工作者、地球化学科研人员及有关院校师生参考。

## 长江河源区水环境地球化学

张立成 章 申 著

董文江 王立军

责任编辑 李静华

\*

中国环境科学出版社出版

北京崇文区北岗子街 8 号

冶金印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经售

\*

1992 年 4 月第 一 版 开本 787 × 1092 1/32

1992 年 4 月第一次印刷 印张 6 1/2 插页 2

印数 1—2 000 字数 166 千字

ISBN 7-80093-046-7/X · 540

定价:4.00 元



沱沱河中游景观



楚玛尔河青藏公路桥



布 曲 (雁石坪)



巴 斯 错 湖

## 前 言

长江河源区位于世界海拔最高、面积超过200万  $\text{km}^2$  的青藏高原腹地,由于四季如冬、高寒缺氧的气候,生态环境条件十分恶劣,被称为“人类生活禁区”,世界“第三极”,我国最大河流——世界第三大河“万里”长江就发源于这里。约在14万  $\text{km}^2$  的面积上,发育沱沱河、楚玛尔河、布曲、杂儿曲等10余条较大河流,汇集了100多亿  $\text{m}^3$  的水,成为长江河水、水体物质组分的最初部分,为长江水体水资源的形成奠定了基础。

由于长江河源区自然环境条件十分恶劣,工作和技术条件困难,尽管人们希望揭开这里水环境因素的许多谜点,探索水体化学元素和其化合物的发生发展过程,但至今对它的研究甚少。

随着人类环境意识的发展和环境分析测试技术的提高以及青藏高原开发的需要,揭示长江河源水环境地球化学之迷势在必行。结合国家《七五》科技攻关项目《长江水系水环境背景值研究》的目标内容,中国科学院国家计委地理研究所、中国科学院水生生物研究所和中国科学院高能物理研究所的环境科学科技人员对长江河源区水环境进行了较系统的地球化学和生物地球化学调研,获得了大量翔实的第一手资料,通过计算机数理统计检验,取得了长江河源区水环境30余个微量元素的背景值,初步弄清了水的理化性状和功能,揭示了长江河源区水体环境地球化学条件,探讨了水环境元素发生、来源和形成因素,揭示了人为活动影响甚少的青藏高原区水环境地球化学特征,是环境科学和化学地理领域一项意义广泛的

基础研究。

本书编写过程中得到有关专家教授的指导和领导的支持。野外调研工作得到青海省格尔木水文站的帮助,特此致谢。参加本书编写和提供资料的人员还有徐小清、赵桂久、郑建勋、钱杏珍、李岫霞、陈皓、王明远、张秀梅、陈喜保、周克准、王李平等。

著 者

1991. 5

# 目 录

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| 前言 .....                         | (I)   |
| 第一章 长江河源区环境特征 .....              | (1)   |
| 一、自然环境 .....                     | (1)   |
| 二、社会与经济环境 .....                  | (18)  |
| 第二章 长江河源区水环境的理化性状及其特征 .....      | (21)  |
| 一、pH 值 .....                     | (22)  |
| 二、水温 .....                       | (24)  |
| 三、溶解氧含量 .....                    | (27)  |
| 四、天然水的离子组成与矿化度 .....             | (28)  |
| 五、天然水的化学类型 .....                 | (35)  |
| 六、天然水的硬度 .....                   | (36)  |
| 七、天然水的化学耗氧量 .....                | (38)  |
| 八、天然水的化学稳定性 .....                | (39)  |
| 九、天然水的缓冲能力 .....                 | (42)  |
| 十、离子径流量和化学侵蚀系数 .....             | (44)  |
| 十一、天然水的化学地理特征 .....              | (46)  |
| 第三章 长江河源区水环境分区与数据表征 .....        | (49)  |
| 一、水环境分区与水体类型 .....               | (49)  |
| 二、数据表征 .....                     | (55)  |
| 第四章 长江河源区天然水体元素的浓度及其水环境背景值 ..... | (61)  |
| 一、长江河源区各类水体元素的天然浓度 .....         | (62)  |
| 二、长江河源区河流水体元素的背景值 .....          | (84)  |
| 三、长江河源区河水氮和磷的背景值 .....           | (112) |

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 四、长江河源区大气降水元素的背景值·····       | (116) |
| 五、长江河源区河流水生生物(鱼体)元素的背景值····· | (120) |
| 第五章 长江河源区风化作用的地球化学特征·····    | (129) |
| 一、风化作用的主导因素·····             | (129) |
| 二、风化程度及其标志·····              | (130) |
| 三、沉积物重矿物的地球化学特征·····         | (135) |
| 四、沉积物和土壤次生矿物风化作用特征·····      | (138) |
| 第六章 长江河源区水环境化学元素的来源·····     | (145) |
| 一、风化作用产物·····                | (145) |
| 二、大气降水补给·····                | (154) |
| 第七章 长江河源区水环境元素的赋存形态·····     | (158) |
| 一、河流水相元素的赋存形态·····           | (159) |
| 二、长江河源区河流沉积物元素的赋存形态·····     | (166) |
| 三、长江河源区河流中鱼体 Hg 的形态·····     | (171) |
| 第八章 长江河源区水环境元素形成的影响因素·····   | (173) |
| 一、影响水环境元素迁移的水文因素·····        | (173) |
| 二、河水的负载能力·····               | (177) |
| 三、元素从水相转入沉积相的地球化学因素·····     | (187) |
| 四、风化壳表层元素的迁移·····            | (191) |
| 五、河流元素迁移转化动因综合分析·····        | (197) |
| 结束语·····                     | (199) |

# 第一章 长江河源区环境特征

## 一、自然环境

### 1. 位置与范围

长江发源于青藏公路以西的昆仑山和唐古拉山之间的广阔地区,青海省的西南隅。处于青藏高原中央部位,大致位于北纬  $32^{\circ}40'$  至  $35^{\circ}40'$ ,东经  $91^{\circ}$  至  $94^{\circ}$  间。

长江正源沱沱河及其他数条河源水系楚玛尔河、尕儿曲(通天河正源)、布曲(曲——藏语即河流之意)都发源于这地区。此外,自北向南的重要河流还有楚玛尔河支流,源于昆仑山的青岗欠龙巴(蒙语“巴”即河流之意;不冻泉),注入通天河的北麓河、敦宰加龙曲,注入布曲的班杂曲等河系(图 1-1)。注入布曲,发源于唐古拉山东段的当曲从河流位置看,通常也划为长江河源水系。因此,长江河源区是长江源头一系列河流水系水域的集合区。

长江是我国第一大河,全长 6300km,流域面积多达 180 余万  $\text{km}^2$ ,年径流总量近万亿立方米,因此它应有与之相适应的广阔面积。

从长江河源区水系结构的天然界线看,通天河直门达以上,巴颜喀拉山(长江与黄河分水岭)以南,昆仑山和唐古拉山间的狭长盆地属长江河源的一个完整体系,应划做长江河源区,它与水电部长江流域规划办公室对长江水资源分区中的

河源区<sup>①</sup>相一致,它的流域面积约 14 万 km<sup>2</sup>,占长江水系流域面积的 8%。由于它的面积较大,南北宽 1000 多 km,东西长约 2000km,自然环境条件也有一定的区域分异。为探索长江河源区水环境元素的发生、形成与分异的地球化学过程,在本书中将长江河源区分为西部源头区和河源东部区。

## 2. 地形地貌

形成和控制长江河源区地形地貌的主导因素是高海拔的地质基础。长江河源区地处青藏高原的中央部位。青藏高原经历了地球上最近一次强烈的、大规模地壳变动——喜马拉雅造山运动,于晚第三纪后期隆起形成的世界上面积最大、海拔最高的大陆高原,隆起高度海拔在 4200~4700m 以上,但高原面上相对高差不大,为低山丘陵与宽谷相间形成的波状起伏地形,山地如相对高差较大的凤火山、开心岭的相对高度都不超过 500m。

长江河源区地貌受寒冻干旱气候的影响,热力胀缩过程和岩隙水分反复冻胀所形成的剥裂作用较强,以高原内部的高原面为基准,进行着旺盛的夷平化过程。山麓堆积发育,湖盆河谷宽阔,多山地,石海、倒石堆地形发育,成为各种雪蚀融冻地貌的物质基础。

高原面上地形起伏较小,坡度平缓,滩洼地多,排水不畅,湖泊、沼地、河谷发育,地貌上的这些特点,成为影响河流水体化学组分的重要因素,特别是对地表元素的迁移累积作用的影响尤为显著。

---

① 水电部长江流域规划办公室水文局,长江流域水资源评价水资源特征值统计表,1986 年 5 月。

### 3. 气候

长江河源区尽管所处纬度较低,但地势高是形成其独特气候的主要因素,低温寒冷是其气候的主要特征,年均气温一般只有 $-3^{\circ}\text{C}\sim+3^{\circ}\text{C}$ ,最暖的7月份,月均气温也仅在 $3\sim 12^{\circ}\text{C}$ , $>10^{\circ}\text{C}$ 的积温仅 $240\sim 1000^{\circ}\text{C}$ ,部分地区甚至不出现稳定 $>10^{\circ}\text{C}$ 积温。1987年当地水文站对气温的实测值基本上能反映长江河源区气温的特征(表1-1),最热月7月气温均值仅有 $3.0\sim 4.6^{\circ}\text{C}$ ,最暖的夏季(6~8月)平均温度仅为 $2.6^{\circ}\text{C}$ ,是我国夏季温度最低的地区。

长江河源区降水量不是很低的,但是存在一定的区域分异,以沱沱河(沿)为界,沱沱河以北广阔的河源地区,年降水量较低,年均降水量为 $221.5\sim 243.7\text{mm}$ (楚玛尔河沿)。沱沱河向南至唐古拉山北麓地区,降水量逐渐增加,年均降水量在 $278.1\sim 319.1\text{mm}$ 。河源区降水季节较集中,6~9月占全年降水量的86~90%。长江河源区的东南部降水量较西部地区大,通天河下游地区(直门达)年均降水量达 $384.2\text{mm}$ ,各曲流域地区年均降水量达 $365.0\text{mm}$ (玉树),降水季节集中程度也有所缓和,6~9月占全年降水量的75%左右。长江河源区降水量年际变化较显著,年均降水量相差可达2倍以上。降水量的变化对河流的影响十分显著,例如1987年7~8月由于降水丰富,河水流势澎湃,而翌年的同期适逢干旱年份,象楚玛尔河、北麓河等河源区水量较大的河流,河床干涸。

1987年长江河源区的年降水总量,除近唐古拉山麓布曲流域(雁石坪)地区略高于多年降水量均值外,其他地区的年

表 1-1 1987 年长江河源区水系实测气温(°C)统计值

| 月份 | 河流      | 上旬均值 | 中旬均值 | 下旬均值  | 月均值  |
|----|---------|------|------|-------|------|
| 5  | 楚玛尔河(沿) | -6.4 | -3.9 | -2.4  | -4.2 |
|    | 沱沱河(沿)  | -3.4 | -3.4 | -3.9  | -4.1 |
|    | 布曲(雁石坪) | -3.7 | -3.7 | -1.3  | -3.2 |
| 6  | 楚玛尔河(沿) | -0.1 | 0.8  | 3.1   | 1.3  |
|    | 沱沱河(沿)  | 0.3  | 2.3  | 5.5   | 2.5  |
|    | 布曲(雁石坪) | 1.9  | 1.8  | 8.6   | 4.1  |
| 7  | 楚玛尔河(沿) | 1.3  | 3.9  | 3.6   | 3.0  |
|    | 沱沱河(沿)  | 4.0  | 5.5  | 4.2   | 4.6  |
|    | 布曲(雁石坪) | 2.6  | 4.3  | 3.2   | 3.4  |
| 8  | 楚玛尔河(沿) | 2.6  | -0.9 | -1.0  | 0.2  |
|    | 沱沱河(沿)  | 4.2  | 1.2  | 1.0   | 2.1  |
|    | 布曲(雁石坪) | 4.5  | 0.2  | 1.7   | 2.1  |
| 9  | 楚玛尔河(沿) | -2.2 | -1.9 | -2.8  | -2.3 |
|    | 沱沱河(沿)  | -0.8 | -0.5 | -0.4  | -0.6 |
|    | 布曲(雁石坪) | 1.0  | -0.1 | -1.2  | -0.1 |
| 10 | 楚玛尔河(沿) | -6.1 | -7.9 | -12.6 | -9.0 |
|    | 沱沱河(沿)  | -6.0 | -6.3 | -15.6 | -9.4 |
|    | 布曲(雁石坪) | -5.5 | -4.3 | -10.9 | -7.0 |

年最高(日期) 楚玛尔河(沿)14.6(6月22日),沱沱河(沿)20.4(6月24日),布曲(雁石坪)18.2(6月16日)。

年最低(日期) 楚玛尔河(沿)-17.1(10月23日),沱沱河(沿)-19.2(10月28日),布曲(雁石坪)-17.8(10月24日)。

降水量均接近多年均值(表 1-2)。从表 1-2 还可以看出,长江河源区每次的降水量一般是较小的,降水日数多占年日数的 1/3~1/5,即降水日数较多,但每次降水量均值仅 3mm 左右。

表 1-2 1987 年长江河源区沱沱河、楚玛尔河、布曲降水量统计值(mm/d)

| 量<br>与<br>日<br>数<br>河 流 | 月 份 | 5    | 6    | 7     | 8    | 9    | 10   | 年总量   | 年日数 |
|-------------------------|-----|------|------|-------|------|------|------|-------|-----|
| 楚玛尔河<br>(沿)             | 降水量 | 20.0 | 22.9 | 116.8 | 26.9 | 39.8 | 3.0  | 229.4 | 76  |
|                         | 日数  | 13   | 17   | 21    | 6    | 16   | 3    |       |     |
| 沱沱河<br>(沿)              | 降水量 | 5.7  | 16.2 | 93.9  | 33.4 | 70.1 | 15.1 | 234.7 | 86  |
|                         | 日数  | 10   | 12   | 24    | 12   | 20   | 6    |       |     |
| 布曲<br>(雁石坪)             | 降水量 | 19.3 | 19.2 | 197.6 | 70.8 | 83.1 | 25.3 | 421.4 | 102 |
|                         | 日数  | 12   | 16   | 29    | 15   | 21   | 5    |       |     |

表 1-3 长江河源区河流流域蒸发量统计值(mm)

| 月 份<br>河 流      | 楚玛尔河            | 沱沱河             | 布曲              |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 5               | 185.3           | 178.2           | 188.3           |
| 6               | 234.7           | 269.5           | 269.4           |
| 7               | 157.1           | 187.3           | 145.2           |
| 8               | 202.7           | 180.2           | 152.0           |
| 9               | 127.7           | 156.6           | 111.0           |
| 10              | 146.4           | 89.7            | 116.6           |
| 年总量             | 1053.9          | 1134.2          | 1031.1          |
| 年最大日蒸发量<br>(日期) | 11.9<br>(6月11日) | 14.9<br>(7月20日) | 12.5<br>(6月19日) |
| 年最小日蒸发量<br>(日期) | 1.1<br>(7月11日)  | 0.6<br>(7月27日)  | 0.0<br>(5月18日)  |

长江河源区由于常年低温,蒸发量相对而言不是很高的,河源西部地区(青藏公路沿线)年均蒸发量值在 1545.6~1928.7mm。1987 年因布曲流域年降水量较常年略偏高,故年蒸发量低于年均值(表 1-3)。

长江河源区气候因素上的这些特点,如常年低温、寒冷,并有长时间处于融冻交替状态,使地表岩石、矿物发生热力胀缩,反复冻胀,物理机械风化作用强烈进行,产生大量机械碎屑物。降水量低,强度小,且季节非常集中,使河流物质输送主要集中在年内很短的 7~8 月份的汛期。

#### 4. 水系组成与水文状况

从自然格局看,长江河源区水系由一系列的河系组成,从北向南主要有楚玛尔河、北麓河、沱沱河、尕儿曲、布曲和当曲 6 条水系组成。发源于格拉丹东冰川、流程长的沱沱河一般认为是正源;按河势尕儿曲最顺,被看做通天河正源。

由于长江河源区的自然环境非常恶劣,台站设置和水文工作受到很大限制,有关的水文资料是不足的。据实测和推算多年平均总径流量(表 1-4)以沱沱河为最大,年平均总径流量为 8.28 亿  $\text{m}^3$ 。布曲次之,年均总径流量(雁石坪)为 7.52 亿  $\text{m}^3$ 。尕儿曲年均总径流量为 6.03 亿  $\text{m}^3$ 。楚玛尔河流域面积虽很大,但处地气候较干旱,年总径流量仅 2.46 亿  $\text{m}^3$ 。当曲流域因环境条件所限,没有实测水文资料。当曲的流域面积为 31024 $\text{km}^2$ ,沱沱河流域面积为 15924 $\text{km}^2$ ,当曲流域面积是沱沱河的 2 倍,推算当曲流域地区的降水量比沱沱河丰富,当曲的总径流量应超过 17 亿  $\text{m}^3$ 。

长江河源区通天河干流两岸多小支流,从东部直门达段

表 1-4 长江河源区主要河源支流降水量与径流量多年均值

| 河流           | 月份<br>分 类 | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 全年    |
|--------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|              |           | 降水    | 降水    | 降水    | 降水    | 降水    | 降水    | 降水    | 降水    | 降水    | 降水    | 降水    | 降水    | 降水    |
| 楚玛尔河         | 降水        | 0.7   | 1.0   | 1.5   | 3.1   | 12.9  | 39.4  | 80.2  | 68.7  | 33.2  | 5.6   | 0.8   | 0.5   | 247.6 |
|              | 径流量       | 0.012 | 0.002 | 0.002 | 0.031 | 0.092 | 0.112 | 0.316 | 0.611 | 0.695 | 0.396 | 0.129 | 0.057 | 2.46  |
| 沱沱河          | 降水        | 0.7   | 1.4   | 1.7   | 4.4   | 15.6  | 47.9  | 87.6  | 68.4  | 39.8  | 9.8   | 0.4   | 0.6   | 279.6 |
|              | 径流量       | 0.013 | 0.006 | 0.008 | 0.158 | 0.396 | 0.879 | 1.93  | 2.70  | 1.60  | 0.461 | 0.093 | 0.036 | 8.28  |
| 布曲<br>(雁石坪)  | 降水        | 1.0   | 1.6   | 2.4   | 9.3   | 24.1  | 70.1  | 110.3 | 86.8  | 51.9  | 11.4  | 1.3   | 1.2   | 371.4 |
|              | 径流量       | 0.149 | 0.138 | 0.157 | 0.183 | 0.242 | 0.635 | 1.67  | 2.18  | 1.35  | 0.461 | 0.215 | 0.142 | 7.52  |
| 通天河<br>(直门达) | 降水        | 4.7   | 5.0   | 7.4   | 17.7  | 61.4  | 101.3 | 110.6 | 95.9  | 76.4  | 28.6  | 2.8   | 1.3   | 513.1 |
|              | 径流量       | 1.74  | 1.57  | 1.89  | 3.89  | 6.80  | 13.5  | 25.7  | 25.0  | 21.5  | 11.0  | 2.17  | 2.07  | 119   |

降水量以毫米计

径流量以亿立方米计

表 1-5 长江河源区河流平均流量统计值(m<sup>3</sup>/s)  
(1987 年)

| 月份 | 河流      | 上旬<br>均值 | 中旬<br>均值 | 下旬<br>均值 | 月<br>均值 | 日最高值              |    | 日最低值              |    |
|----|---------|----------|----------|----------|---------|-------------------|----|-------------------|----|
|    |         |          |          |          |         | m <sup>3</sup> /s | 日期 | m <sup>3</sup> /s | 日期 |
| 5  | 楚玛尔河    | 0.48     | 0.83     | 1.46     | 0.94    | 3.69              | 26 | 0.011             | 2  |
|    | 沱沱河     | 9.09     | 7.33     | 99.52    | 9.32    | 15.4              | 5  | 5.5               | 2  |
|    | 布曲(雁石坪) | 7.40     | 7.48     | 7.44     | 7.44    | 14.1              | 10 | 4.03              | 13 |
| 6  | 楚玛尔河    | 0.15     | 0        | 0        | 0.052   | 0.41              | 1  | 0                 | 8  |
|    | 沱沱河     | 12.3     | 19.0     | 52.0     | 27.8    | 101               | 30 | 8.82              | 1  |
|    | 布曲(雁石坪) | 7.62     | 11.8     | 40.9     | 20.1    | 69.4              | 28 | 5.92              | 7  |
| 7  | 楚玛尔河    | 0.027    | 9.45     | 10.6     | 6.82    | 51.6              | 30 | 0                 | 1  |
|    | 沱沱河     | 63.1     | 128      | 86.7     | 92.4    | 159               | 13 | 35.0              | 7  |
|    | 布曲(雁石坪) | 50.0     | 141      | 105      | 99      | 241               | 19 | 22.6              | 3  |

续表

| 月份 | 河流      | 上旬<br>均值 | 中旬<br>均值 | 下旬<br>均值 | 月<br>均值 | 日最高值              |    | 日最低值              |    |
|----|---------|----------|----------|----------|---------|-------------------|----|-------------------|----|
|    |         |          |          |          |         | m <sup>3</sup> /s | 日期 | m <sup>3</sup> /s | 日期 |
| 8  | 楚玛尔河    | 9.05     | 2.07     | 0.32     | 3.70    | 32.3              | 4  | 0.16              | 27 |
|    | 沱沱河     | 111      | 86.8     | 40.3     | 78.1    | 159               | 12 | 31.3              | 30 |
|    | 布曲(雁石坪) | 134      | 95.0     | 61.6     | 95.8    | 218               | 8  | 43.1              | 29 |
| 9  | 楚玛尔河    | 1.10     | 3.56     | 2.95     | 2.54    | 437               | 12 | 0.21              | 1  |
|    | 沱沱河     | 26.1     | 23.6     | 26.1     | 25.3    | 33.0              | 3  | 18.3              | 9  |
|    | 布曲(雁石坪) | 66.0     | 89.1     | 69.3     | 74.8    | 116               | 5  | 46.8              | 1  |
| 10 | 楚玛尔河    | 1.33     | 0.34     | 0        | 0.54    | 2.11              | 1  | 0                 | 18 |
|    | 沱沱河     | 20.2     | 11.5     | 4.65     | 11.9    | 23.9              | 1  | 3.85              | 21 |
|    | 布曲(雁石坪) | 39.0     | 24.5     | 17.5     | 26.7    | 59.8              | 1  | 11.1              | 31 |