

辽河流域岩石风化速率及碳汇计算

彭弋倪^{1,2}, 陈 旻^{1,2,3}, 李石磊^{1,2}

(1. 南京大学 表生地球化学教育部重点实验室, 江苏 南京 210023; 2. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 3. 江苏省气候变化协同创新中心, 江苏 南京 210023)

摘 要: 岩石风化是全球碳循环的重要碳汇过程。以辽河流域为研究对象, 采用水化学与元素地球化学方法, 从河流水化学角度对整个辽河流域的岩石风化过程进行研究。在对流域干流和主要支流河水以及水库水的水化学特征进行统计分析后, 通过正演方法计算发现, 辽河流域河水化学组成主要由岩石风化主导, 岩石风化以碳酸盐岩风化为主, 但受到人类活动(畜牧业、农业、工业等)的影响很大。辽河流域碳酸盐岩风化速率为每年 $12.99 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$, 硅酸盐岩风化速率为每年 $2.27 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$, 岩石风化速率小于大陆河流平均水平。辽河流域碳酸盐岩风化 CO_2 消耗通量为每年 $14.66 \times 10^9 \text{ mol}$, 硅酸盐岩风化 CO_2 消耗通量为每年 $6.40 \times 10^9 \text{ mol}$, 都小于世界大部分大陆河流。

关键词: 地表风化; 水化学; 元素地球化学; 正演方法; 人类活动; 风化速率; CO_2 消耗通量; 辽河流域
中图分类号: P594 **文献标志码:** A

Rock Weathering Rates and Carbon Sink Calculation in Liaohe River Watershed, China

PENG Yi-ni^{1,2}, CHEN Yang^{1,2,3}, LI Shi-lei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Surficial Geochemistry of Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China; 2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China; 3. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Climate Change, Nanjing 210023, Jiangsu, China)

Abstract: Rock weathering is an important carbon sink process in global carbon cycle. The rock weathering process in Liaohe river watershed was studied with the methods of water chemistry and element geochemistry. The hydrochemical characteristics of main river and reservoir waters in Liaohe river watershed were analyzed. Based on the forward method model, the chemical composition of river water in Liaohe river watershed is dominated by rock weathering, which is mainly affected by carbonate weathering and human activities (livestock breeding, agriculture, industry, etc.). The carbonate weathering rate in Liaohe river watershed is $12.99 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ per year, The silicate weathering rate is $2.27 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ per year, and the rock weathering rate is less than the average of global main river watersheds. The CO_2 consumption by carbonate weathering is $14.66 \times 10^9 \text{ mol}$ per year, and that by silicate weathering is $6.40 \times 10^9 \text{ mol}$ per year, which both are lower than that of global most river watersheds.

Key words: weathering; water chemistry; element geochemistry; forward modeling method; human activity; weathering rate; flux of CO_2 consumption; Liaohe river watershed

收稿日期: 2016-12-26

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(12120113005400); 国家自然科学基金项目(41321062)

作者简介: 彭弋倪(1993-), 女, 湖南岳阳人, 理学硕士研究生, E-mail: 452984150@qq.com。

通讯作者: 陈 旻(1973-), 女, 浙江永康人, 副教授, 理学博士, E-mail: chenyang@nju.edu.cn。

0 引言

岩石风化和有机碳埋藏是全球碳循环的两个主要消耗大气 CO_2 (即碳汇) 过程, 并且能在短尺度 (100 ka 之内) 到长尺度 (超过 1 Ma) 上对地球环境产生影响^[1-5]。在短尺度上, 所有岩石风化都有碳汇作用; 而在长尺度上, 只有硅酸盐岩风化消耗大气 CO_2 形成 HCO_3^- , 并通过河流运输到海洋, 形成 Ca-CO_3 沉积, 由此可以调节全球大气 CO_2 含量与全球气候^[1]。流域水文地球化学性质可以反映流域岩石或土壤的化学风化特征, 因此, 河流地球化学研究的主要目的之一就是估算现今大陆无机化学和有机化学剥蚀状况以及它们相应的大气 CO_2 消耗^[4, 6-8]。

自从 Caillardet 等的工作^[4]之后, 许多研究开始关注河流地球化学。前人主要采用两种方法: 一是在单一岩性小流域的研究中, 重点在于风化控制因素影响研究, 比如岩性、气候等^[9]; 二是对多岩性大流域研究, 主要关注于风化对碳循环的贡献等^[10]。到目前为止, 全球范围内有许多学者对大河流域的化学风化与其碳汇效应进行了研究^[1, 4, 10-11]。比如, 世界第二长河流亚马逊河与美国最大河流密西西比河的 CO_2 消耗速率分别为每年 509.49×10^3 、 $128.71 \times 10^3 \text{ mol} \cdot \text{km}^{-2}$ ^[11]。而中国目前的研究主要集中在长江、黄河等发源于青藏高原的河流^[12-23], 黄河流域 CO_2 消耗速率为每年 $144 \times 10^3 \text{ mol} \cdot \text{km}^{-2}$ ^[13] 或 $130.75 \times 10^3 \text{ mol} \cdot \text{km}^{-2}$ ^[21], 长江流域在汶川地震后溶质通量显著增加^[22]; 对于其他区域河流的研究则关注较少^[24-34]。

辽河作为中国七大河流之一, 其整个流域的水化学特征、成分来源与岩石风化速率以及通量等并没有进行针对性地、完整地、详细地研究。因此, 本文选取了辽河作为研究对象, 通过测定水样的主要阴、阳离子的浓度、摩尔分数、质量浓度来研究辽河流域河水的化学成分特征与来源, 岩石风化速率以及大气 CO_2 消耗速率与通量。

1 研究区概况

辽河位于中国东北地区南部 (图 1), 全长 1 345 km, 流域面积为 $21.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。辽河发源于河北省平泉市七老图山脉的光头山, 流经河北、内蒙古、吉林、辽宁等省区, 最后注入辽东湾。辽河流域多年平均气温 $4^\circ\text{C} \sim 9^\circ\text{C}$, 年平均降雨量 $350 \sim 1\,000 \text{ mm}$, 自东南向西北递减。

辽河流域岩石分布 (图 2) 种类复杂。西辽河上

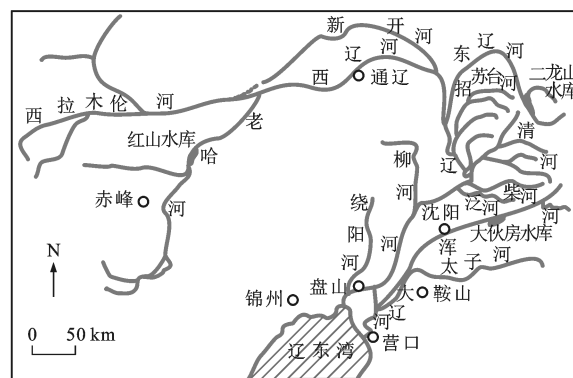


图 1 辽河流域主要水系分布

Fig. 1 Distribution of Main River System of Liaohe River Watershed

游主要为花岗岩类等中酸性岩石以及火山碎屑岩, 其中在内蒙古自治区赤峰市西北部出露大面积玄武岩; 东辽河上游主要为花岗岩类岩石; 东、西辽河中下游及汇合后辽河主要为第四纪沉积物。

2 样品采集与分析

2014 年 6 月, 笔者在辽河全流域各主要支流汇流处采集了干流与支流的样品, 另外在主要水库都进行了水样采集 (图 2)。每件样品用预先酸洗清洁的聚乙烯瓶采集 300 mL, 并在现场测定了水温、pH 值及 HCO_3^- 浓度。水样在实验室经过孔径 $0.22 \mu\text{m}$ 醋酸纤维膜过滤后, 将所得清液分成 3 份: 一份在南京大学表生地球化学研究所等离子发射光谱仪 (ICP-AES) 中测定主要阳离子 (Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Sr^{2+}) 以及 Si 溶解量, 误差为 5%; 第二份在南京大学表生地球化学教育部重点实验室离子色谱仪 (ICS) 中测定主要阴离子 (F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-}) 浓度, 误差为 5%; 第三份留下冷藏保存。

3 分析方法

为了对辽河流域河水化学成分的各个端元贡献进行定量分析, 采用正演方法^[35-36]。河水的 5 个端元分别是大气输入、人类活动、碳酸盐岩风化、硅酸盐岩风化以及蒸发岩风化。溶质元素的质量平衡等式为^[35-36]

$$c(\cdot)_r = c(\cdot)_{at} + c(\cdot)_{an} + c(\cdot)_c + c(\cdot)_s + c(\cdot)_e \quad (1)$$

式中: $c(\cdot)_r$ 为河水中离子浓度; $c(\cdot)_{at}$ 、 $c(\cdot)_{an}$ 、 $c(\cdot)_c$ 、 $c(\cdot)_s$ 、 $c(\cdot)_e$ 分别为大气输入、人类活动、碳酸盐岩风化、硅酸盐岩风化和蒸发岩风化 5 个端元离子浓度; 离子主要有 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、

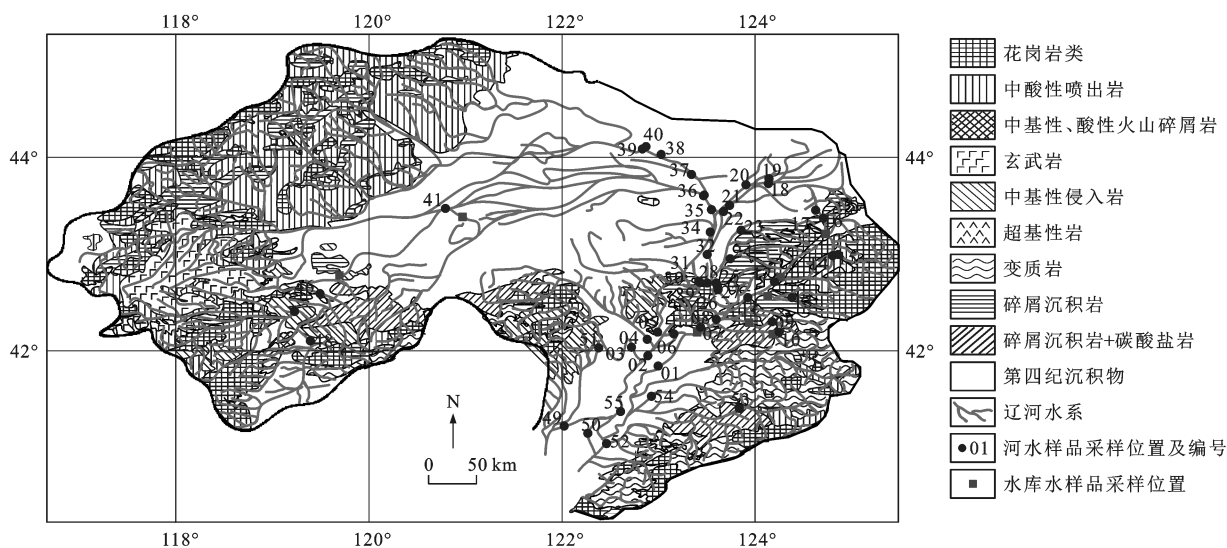


图2 辽河流域地质概况及采样位置

Fig. 2 Geological Map of Liaoh River Watershed and Location of Samples

Cl^- 和 SO_4^{2-} 。

假设条件有^[35,37-38]:①大气输入可用雨水数据^[39-41]计算;② SO_4^{2-} 主要来源于大气输入、蒸发岩风化和硫化物氧化;③人类活动对 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 没有影响^[36],另外采用 Li 等研究的人类活动端元 $c(\text{Na}^+)_{\text{an}}/c(\text{Cl}^-)_{\text{an}}=0.5$ ^[42];④碳酸盐岩风化对 Na^+ 和 K^+ 贡献极小;⑤ K^+ 主要由大气输入和硅酸盐岩风化贡献;⑥根据长江^[43]、红河^[44]以及恒河—雅鲁藏布江^[35]等大河流域研究数据,采用硅酸盐岩风化端元 $c(\text{Ca}^{2+})_{\text{s}}/c(\text{Na}^+)_{\text{s}}=0.3$ 以及 $c(\text{Mg}^{2+})_{\text{s}}/c(\text{K}^+)_{\text{s}}=0.5$ ^[35-36];⑦蒸发岩风化端元值是进行大气输入校正后的区域最小值(样品 46)^[36]。

基于上述假设,式(1)简化为

$$c(\text{Ca}^{2+})_{\text{r}}=c(\text{Ca}^{2+})_{\text{at}}+c(\text{Ca}^{2+})_{\text{e}}+c(\text{Ca}^{2+})_{\text{c}}+c(\text{Ca}^{2+})_{\text{s}} \quad (2)$$

$$c(\text{Na}^+)_{\text{r}}=c(\text{Na}^+)_{\text{at}}+c(\text{Na}^+)_{\text{an}}+c(\text{Na}^+)_{\text{s}}+c(\text{Na}^+)_{\text{e}} \quad (3)$$

$$c(\text{Mg}^{2+})_{\text{r}}=c(\text{Mg}^{2+})_{\text{at}}+c(\text{Mg}^{2+})_{\text{c}}+c(\text{Mg}^{2+})_{\text{s}} \quad (4)$$

$$c(\text{K}^+)_{\text{r}}=c(\text{K}^+)_{\text{at}}+c(\text{K}^+)_{\text{s}} \quad (5)$$

$$c(\text{Cl}^-)_{\text{r}}=c(\text{Cl}^-)_{\text{at}}+c(\text{Cl}^-)_{\text{an}}+c(\text{Cl}^-)_{\text{e}} \quad (6)$$

$$c(\text{SO}_4^{2-})_{\text{r}}=c(\text{SO}_4^{2-})_{\text{at}}+c(\text{SO}_4^{2-})_{\text{e}}+c(\text{SO}_4^{2-})_{\text{sulfide}} \quad (7)$$

$$c(\text{Na}^+)_{\text{an}}=0.5c(\text{Cl}^-)_{\text{an}} \quad (8)$$

$$c(\text{Ca}^{2+})_{\text{s}}=0.3c(\text{Na}^+)_{\text{s}} \quad (9)$$

$$c(\text{Mg}^{2+})_{\text{s}}=0.5c(\text{K}^+)_{\text{s}} \quad (10)$$

$$x(\cdot)_i=c(\cdot)_i/c(\cdot)_r \times 100\% \quad (11)$$

式中: $c(\text{SO}_4^{2-})_{\text{sulfide}}$ 为硫化物氧化端元 SO_4^{2-} 浓度; $x(\cdot)_i$ 为第 i 个端元对离子的贡献率, i 对应大气输

入、人类活动、碳酸盐岩风化、硅酸盐岩风化、蒸发岩风化端元; $c(\cdot)_i$ 为第 i 个端元离子浓度。

大气输入端元 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 浓度分别为 48.88、15.09、20.71、32.80、20.71、32.80、25.40、74.95 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$;蒸发岩风化端元 Na^+ 、 Cl^- 浓度都为 30.50 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度都为 9.19 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

对于气候干旱区域的河水样品,由于蒸发量大造成其受到蒸发结晶作用控制^[45],使得该区域水样在进行大气输入校正后, $c(\text{Ca}^{2+})_{\text{r}}/c(\text{Na}^+)_{\text{r}}$ 值远小于其他端元,导致端元分析无法进行,所以正演方法不适用于气候干旱区域水样。

4 结果分析与讨论

4.1 水样离子组成

辽河流域水化学参数和主量元素组成显示,河水 pH 值在 7.36~9.71 之间,水体偏弱碱性(表 1)。流域水化学组成变化很大,总溶解固体(TDS)在 117.87~1 695.80 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 533.70 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,比长江^[46]、黄河^[47]、恒河^[35]、雅鲁藏布江^[35]等大部分青藏高原发源河流以及世界河流平均值^[4]都要高。辽河流域干流总溶解固体在空间上从上游到下游呈递减的趋势,这主要是因为西辽河中上游区域气候干旱(年降雨量低于 400 mm)、蒸发量大形成浓缩作用。

从图 3 可以看出,河水主要阳离子中浓度最高的是 Ca^{2+} 和 Na^+ , Mg^{2+} 次之, K^+ 最低,主要阴离子中 HCO_3^- 浓度高于 Cl^- , SO_4^{2-} 高于溶解总 Si。阳离子

表 1 辽河流域河水 and 水库水主要化学组成

Tab. 1 Major Chemical Compositions of River and Reservoir Waters in Liaohe River Watershed

参数	范围		均值		中位值		标准偏差	
	河水	水库水	河水	水库水	河水	水库水	河水	水库水
水温/℃	18.7~30.5	23.9~30.2	24.8	25.7	25.2	25.3	3.0	1.8
pH	7.15~9.71	8.20~9.85	8.21	8.84	8.15	8.71	0.52	0.47
$c(\text{Ca}^{2+})/(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	242.23~3 690.30	724.09~2 076.83	1 334.13	1 103.79	1 303.83	958.69	570.68	464.34
$c(\text{K}^{+})/(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	17.69~259.09	71.31~139.19	123.27	105.82	117.46	100.31	53.64	26.34
$c(\text{Mg}^{2+})/(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	146.88~1 846.53	268.85~1 528.08	614.27	563.42	535.90	439.19	342.69	403.07
$c(\text{Na}^{+})/(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	139.76~2 0039.32	519.36~4 389.99	3 295.88	1 418.21	1 845.38	994.46	4 329.73	1 287.91
Si 离子浓度/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	21.59~210.33	1.57~124.31	107.71	44.93	96.39	20.72	45.50	46.55
Sr 离子浓度/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	1.53~9.16	1.63~9.53	4.33	3.71	4.30	3.19	1.54	2.50
$c(\text{F}^{-})/(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	6.48~183.15	19.32~53.03	51.74	27.24	38.01	21.24	39.88	12.15
$c(\text{Cl}^{-})/(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	55.90~11 890.71	231.10~1 596.50	2 109.07	691.42	1414.58	502.01	2303.12	561.54
$c(\text{NO}_3^{-})/(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	16.23~912.71	60.32~296.37	212.25	196.95	183.25	194.46	163.61	81.52
$c(\text{SO}_4^{2-})/(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	84.14~5 099.30	286.68~996.76	822.31	648.32	716.43	644.41	677.46	211.63
$c(\text{HCO}_3^{-})/(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	980.00~14 560.00	1 377.36~3 510.00	3 872.60	2 160.84	3 203.11	2 139.62	2 760.94	794.96
总溶解固体/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	177.85~1 695.80	208.51~343.61	531.44	267.78	462.14	237.62	325.96	58.85

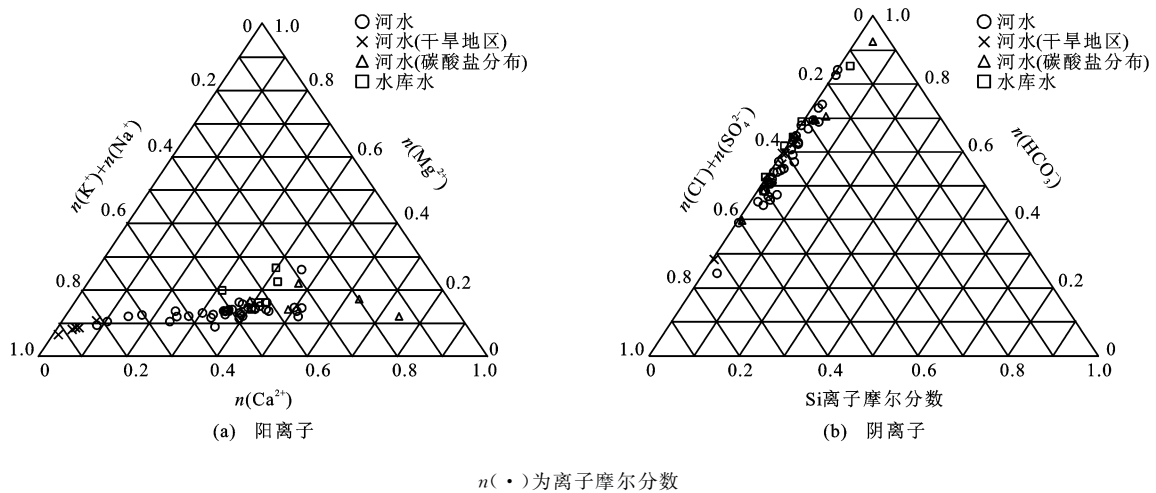


图 3 辽河流域河水 and 水库水主要阴、阳离子分布样三角图

Fig. 3 Triangle Diagrams of Distributions of Main Anions and Cations of River and Reservoir Waters in Liaohe River Watershed

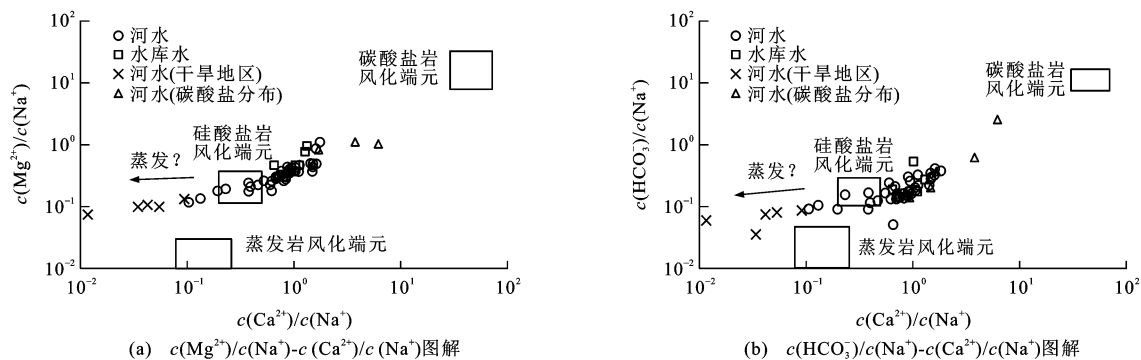
三角图[图 3(a)]显示大部分水样的阳离子组成大致与总体情况相同,而结合离子数据可看到西辽河水样品中出现了以 K^{+} 、 Na^{+} 为主, Mg^{2+} 次之,而 Ca^{2+} 浓度非常低的情况。这些水样可能处于干旱气候带(年降雨量低于 400 mm),因蒸发量大受到蒸发结晶作用的控制^[45],造成 Ca^{2+} 过饱和而大量沉淀,从而导致河水中 Ca^{2+} 浓度很低。但是,有流经碳酸盐岩出露区域的水样 Ca^{2+} 浓度相对较高。

4.2 水样离子浓度相关性

从图 4 可以看出:河水溶质来源与硅酸盐岩风化、碳酸盐岩风化有关,其中有流经碳酸盐岩出露区

域的水样最靠近碳酸盐岩风化端元;少量水样数据落在了硅酸盐岩风化端元、碳酸盐岩风化端元及蒸发岩风化端元三者圈定范围之外 $c(\text{Ca}^{2+})/c(\text{Na}^{+})$ 值较小的区域上,可能也是因为这些水样处于干旱气候带,蒸发量大,受到蒸发结晶作用的控制。

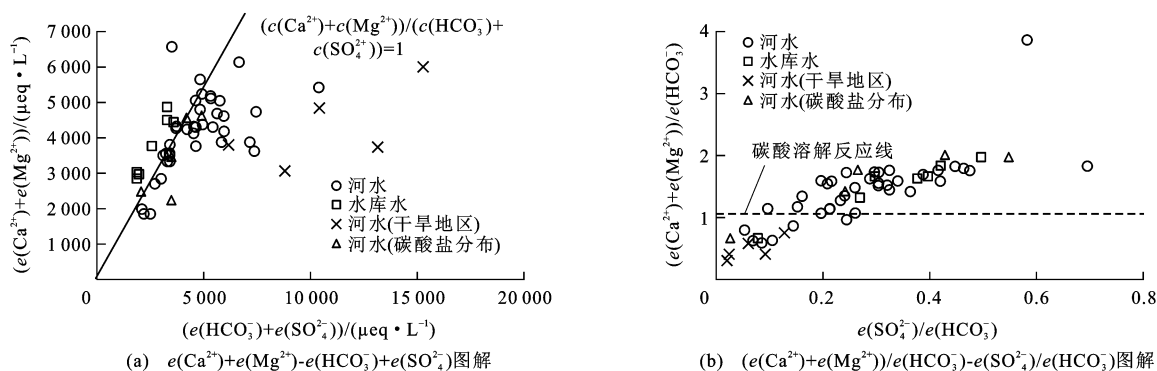
从图 5(a) 可以看出,落在 $(e(\text{Ca}^{2+}) + e(\text{Mg}^{2+})) / (e(\text{HCO}_3^{-}) + e(\text{SO}_4^{2-}))$ 值接近 1 的部分水样表明碳酸盐溶解是硫酸和碳酸两者共同作用的结果,而 $e(\text{HCO}_3^{-}) + e(\text{SO}_4^{2-})$ 值偏离部分代表了碳酸盐溶解以外的来源可能是钾钠硅酸盐风化。其中,干旱气候区域的水样相对偏离很大,而有流经碳



碳酸盐岩风化端元、硅酸盐岩风化端元、蒸发岩风化端元数据引自文献[4]、[11]、[48]~[50]

图4 辽河流域河水 and 水库水 $c(\text{Mg}^{2+})/c(\text{Na}^+)-c(\text{Ca}^{2+})/c(\text{Na}^+)$ 及 $c(\text{HCO}_3^-)/c(\text{Na}^+)-c(\text{Ca}^{2+})/c(\text{Na}^+)$ 图解

Fig. 4 Diagrams of $c(\text{Mg}^{2+})/c(\text{Na}^+)-c(\text{Ca}^{2+})/c(\text{Na}^+)$ and $c(\text{HCO}_3^-)/c(\text{Na}^+)-c(\text{Ca}^{2+})/c(\text{Na}^+)$ of River and Reservoir Waters in Liaohe River Watershed



$e(\cdot)$ 为离子当量浓度

图5 辽河流域河水 and 水库水 $e(\text{Ca}^{2+})+e(\text{Mg}^{2+})-e(\text{HCO}_3^-)+e(\text{SO}_4^{2-})$ 及 $(e(\text{Ca}^{2+})+e(\text{Mg}^{2+}))/e(\text{HCO}_3^-)-e(\text{SO}_4^{2-})/e(\text{HCO}_3^-)$ 图解

Fig. 5 Diagrams of $e(\text{Ca}^{2+})+e(\text{Mg}^{2+})-e(\text{HCO}_3^-)+e(\text{SO}_4^{2-})$ and $(e(\text{Ca}^{2+})+e(\text{Mg}^{2+}))/e(\text{HCO}_3^-)-e(\text{SO}_4^{2-})/e(\text{HCO}_3^-)$ of River and Reservoir Waters in Liaohe River Watershed

酸盐岩出露区域的水样基本落在 $(e(\text{Ca}^{2+})+e(\text{Mg}^{2+}))/e(\text{HCO}_3^-)+e(\text{SO}_4^{2-})$ 值接近 1 的位置。图 5(b) 中的碳酸溶解反应线^[36]代表了碳酸盐在碳酸溶解时的趋势线,辽河流域的水样 $(e(\text{Ca}^{2+})+e(\text{Mg}^{2+}))/e(\text{HCO}_3^-)$ 值在 0.28~3.61 之间,平均值为 1.27(>1.00),且与碳酸溶解反应线的相关性不太强,而 $e(\text{SO}_4^{2-})/e(\text{HCO}_3^-)$ 值在 0.02~0.70 之间,平均值为 0.27,再次表明对于碳酸盐的溶解除了碳酸之外,硫酸的作用也不可忽视。

4.3 端元分析

除去几个气候干旱区域水样,利用式(2)~(11)可计算出各端元对河水 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 的贡献率(表 2)及各端元对水样阳离子总溶解量组成的贡献分布(图 6)。

对于 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 来说,最大贡献都来自碳酸盐岩风化(76.87%和 84.08%),第二大贡献也都是硅酸盐岩风化(18.53%和 11.16%)。硅酸盐岩风化对 K^+ 的贡献最大(84.67%),其次是大气输入

(15.33%)。与 K^+ 相同, Na^+ 也主要来源于硅酸盐岩风化(57.49%);但与 K^+ 不同的是, Na^+ 受到人类活动影响很大(38.96%)。

辽河流域以碳酸盐岩风化为主(7.46%~82.09%),贡献最大水样(样品 46)位于内蒙古自治区赤峰市境内西辽河干流上游。对于整个流域来说(样品 55),碳酸盐岩风化贡献为 65.74%。其次是硅酸盐岩风化(6.55%~83.98%),贡献最大水样位于吉林省四平市境内东辽河干流中上游旁的小溪流(样品 20)。对于整个流域,硅酸盐岩风化贡献为 17.69%。在辽河流域(特别是中下游区域)受到人类活动的影响较大(0.00%~26.08%),最大贡献水样位于辽宁省新民市西辽河支流蒲河(样品 01),即城市群的中心,对于流域贡献为 10.90%。大气输入的贡献较小(1.75%~8.87%),对流域贡献为 4.42%。与大气输入相比,蒸发岩风化贡献更小(0.49%~2.49%),对流域贡献为 1.24%,流域中 Na^+ 与 Cl^- 浓度较高可能来源于人类活动的影响。

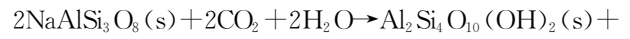
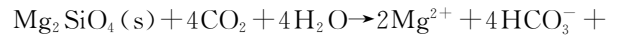
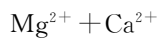
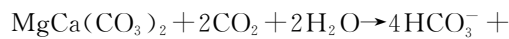
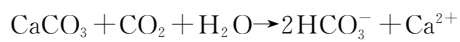
表 2 辽河流域河水阳离子组成贡献率

Tab. 2 Contribution Rates of Different End Members of River Water to Cations in Liaohe River Watershed

贡献端元	参数类型	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
大气输入	范围	1.32%~8.20%	5.82%~85.30%	2.13%~14.10%	0.56%~30.02%
	平均值	3.87%	15.33%	4.76%	3.55%
人类活动	范围	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%~76.93%
	平均值				38.96%
碳酸盐岩风化	范围	42.7%~94.9%	0.00%	70.14%~92.83%	0.00%
	平均值	76.87%		84.08%	
硅酸盐岩风化	范围	2.59%~52.29%	14.70%~94.13%	0.89%~20.98%	33.75%~90.16%
	平均值	18.53%	84.67%	11.16%	57.49%
蒸发岩风化	范围	0.25%~1.54%	0.00%	0.00%	0.52%~27.92%
	平均值	0.73%			3.3%

4.4 岩石化学风化速率与碳汇计算

碳酸盐岩与硅酸盐岩典型风化反应为



流域岩石风化速率与 CO₂ 消耗通量计算公式为

$$Q_{\text{CWR}} = (m(\text{Ca}^{2+})_c + m(\text{Mg}^{2+})_c +$$

$$0.5m(\text{HCO}_3^-)_c)Q_a/A \quad (12)$$

其中 $m(\text{HCO}_3^-)_c = 2m(\text{Ca}^{2+})_c + 2m(\text{Mg}^{2+})_c$

$$Q_{\text{SWR}} = (m(\text{Ca}^{2+})_s + m(\text{K}^+)_s + m(\text{Ca}^{2+})_s +$$

$$m(\text{Mg}^{2+})_s + m(\text{Si})_s)Q_a/A \quad (13)$$

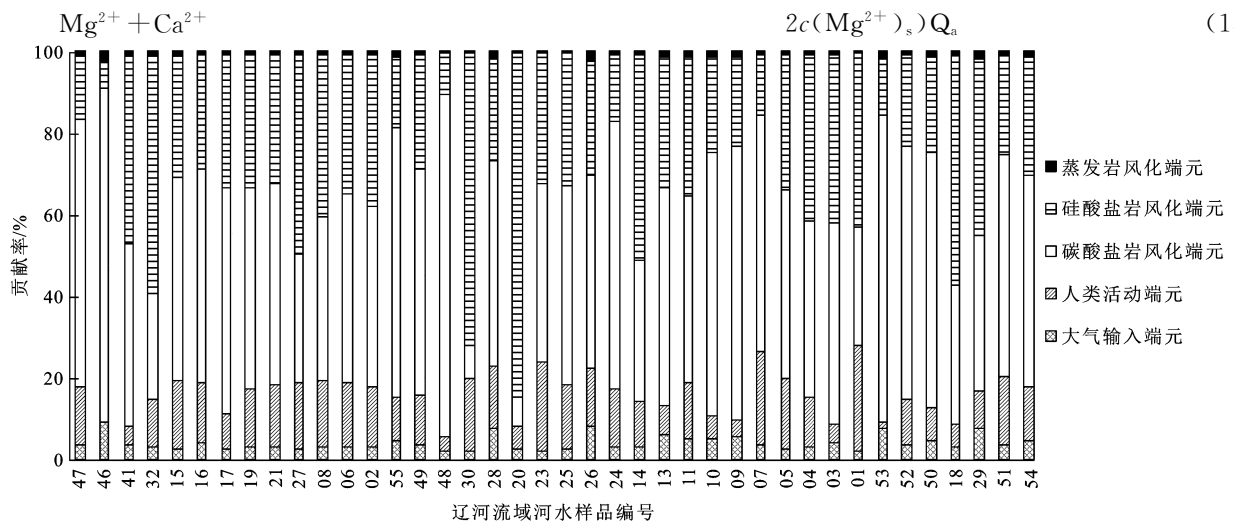
式中: Q_{CWR} 为碳酸盐岩风化速率; Q_{SWR} 为硅酸盐岩风化速率; Q_a 为多年平均径流量; A 为流域面积; $m(\cdot)_c$ 和 $m(\cdot)_s$ 分别为碳酸盐岩风化端元和硅酸盐岩风化端元离子质量浓度。

硫酸溶解岩石与碳酸不同,溶解过程中并不消耗大气中的 CO₂^[17-18],所产生的阳离子在计算 CO₂ 消耗通量时应扣除。碳酸盐岩风化端元与硅酸盐岩风化端元贡献的阳离子当量浓度与 HCO₃⁻ 当量浓度的差值被认为是硫酸溶解所贡献的部分,由此进行硫酸校正。

碳酸盐岩风化端元与硅酸盐岩风化端元 CO₂ 消耗通量计算公式为

$$\phi_c = (c(\text{Ca}^{2+})_c + c(\text{Mg}^{2+})_c)Q_a \quad (14)$$

$$\phi_s = (c(\text{Ca}^{2+})_s + c(\text{K}^+)_s + 2c(\text{Ca}^{2+})_s + 2c(\text{Mg}^{2+})_s)Q_a \quad (15)$$



样品 47、46、41、32 采自西辽河干流,样品排列顺序为从上游到下游;样品 15、16、17、19、21 采自东辽河干流,样品排列顺序为从上游到下游;样品 27、08、06、02、55、49 采自东、西辽河汇合后干流,样品排列顺序为从上游到下游;样品 48 采自老哈河上游;样品 30 采自铁岭康平支流;样品 28 采自铁岭齐家屯支流;样品 20 采自东辽河旁小溪流;样品 23 采自招苏台河上游;样品 25 采自招苏台河下游;样品 24 采自二道河;样品 14 采自开原平岗支流;样品 13 采自清河上游;样品 11 采自清河下游;样品 10 采自柴河;样品 09 采自泛河;样品 07 采自拉马河;样品 05 采自秀水河;样品 04 采自养息牧河;样品 03 采自柳河;样品 01 采自蒲河;样品 53 采自本溪市支流;样品 52 采自太子河;样品 50 采自盘锦史家村支流;样品 18、29、51、54 采自浑河

图 6 辽河流域河水组成端元贡献率

Fig. 6 Diagram Showing the Contribution Rates of Different End Members of River Water in Liaohe River Watershed

式中： ϕ_c 为碳酸盐岩 CO_2 消耗通量； ϕ_s 为硅酸盐岩 CO_2 消耗通量。

辽河流域总面积为 $21.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，流域径流量为 $21.4 \times 10^9 \text{ m}^3$ ^[51]，但由于西辽河因人为原因截断，所以在计算过程中需排除西辽河（流域面积为 $13.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，流域径流量为 $7.016 \times 10^9 \text{ m}^3$ ）

的影响^[52]，故采用流域面积为 $8.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ （占全球大陆面积的 0.084%），流域径流量为 $14.384 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。运用式(12)~(15)即可计算出辽河流域的岩石风化速率和 CO_2 消耗通量、速率(表 3)，同时与前人研究所得的辽河^[24]及世界其他大河流域相应数据^[4,53]比较。

表 3 全球大河流域岩石风化速率及碳汇计算结果
Tab. 3 Results of Rocks Weathering Rates and Carbon Sink Calculation in Global Main River Watersheds

河流名称	岩石风化速率/($\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{年}^{-1}$)			碳酸盐岩 CO_2	碳酸盐岩 CO_2	硅酸盐岩 CO_2	硅酸盐岩 CO_2
	碳酸盐岩	硅酸盐岩	总和	消耗通量/ ($10^9 \text{ mol} \cdot \text{年}^{-1}$)	消耗速率/ ($10^5 \text{ mol} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{年}^{-1}$)	消耗通量/ ($10^9 \text{ mol} \cdot \text{年}^{-1}$)	消耗速率/ ($10^5 \text{ mol} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{年}^{-1}$)
辽河	12.99	2.27	15.26	14.66	1.77	6.40	0.77
辽河 ^[24]	0.24	0.06	0.30	1.22	0.08	0.26	0.02
黄河	4.65	3.46	8.11	30.00	0.40	62.00	0.82
印度河	7.20	3.82	11.02	59.00	0.64	54.00	0.59
恒河	23.05	14.00	37.05	236.00	2.25	471.00	4.48
长江	55.86	5.25	61.11	997.00	5.51	107.00	0.59
湄公河	55.70	14.34	70.04	409.00	5.14	194.00	2.44
雅鲁藏布江	35.34	10.34	45.68	199.00	3.43	87.00	1.50
巴拉那河	1.51	4.99	6.50	51.00	0.18	263.00	0.94
乌拉圭河	5.00	13.33	18.33	11.00	0.46	38.90	1.62
亚马逊河	11.08	13.04	24.12	644.00	1.05	320.00	0.52
马更些河	14.94	1.79	16.73	242.00	1.35	61.00	0.34
密西西比河	16.14	3.83	19.97	436.00	1.46	199.00	0.67
圣劳伦斯河	25.98	1.86	27.84	251.00	2.46	28.00	0.27
尼罗河	0.42	1.01	1.43	11.00	0.04	64.00	0.22
尼日尔河	2.08	2.25	4.33	25.00	0.21	35.50	0.30
刚果河	1.68	4.22	5.90	51.00	0.14	201.00	0.54
塞纳河	33.08	1.27	34.35	17.00	2.16	1.00	0.13
莱茵河	45.98	3.12	49.10	108.00	4.82	14.00	8.62
罗纳河	87.87	4.18	92.05	74.00	7.74	4.70	0.49
鄂毕河	7.32	0.80	8.12	217.00	0.72	57.00	0.19
阿穆尔河	3.88	1.18	5.06	64.00	0.34	33.00	0.18
叶尼塞河	8.53	3.74	12.27	207.00	0.80	169.00	0.65
大陆河流平均	13.00	5.54	18.54	12 300.00	1.24		

注：发源于青藏高原的大河有黄河、印度河、恒河、长江、湄公河、雅鲁藏布江；南美洲大河有巴拉那河、乌拉圭河、亚马逊河；北美洲大河有马更些河、密西西比河、圣劳伦斯河；非洲大河有尼罗河、尼日尔河、刚果河；欧洲大河有塞纳河、莱茵河、罗纳河；西伯利亚大河有鄂毕河、阿穆尔河、叶尼塞河。

本次研究所得岩石风化与碳汇数据是前人研究^[24]的十几到数十倍，其主要原因是前人研究中采用的多年平均径流量与流域面积包括西辽河。本次数据更符合实际速率与通量。辽河流域碳酸盐岩风化速率为每年 $12.99 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ ，硅酸盐岩风化速率为每年 $2.27 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ ，即岩石风化速率为每年

$15.26 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ ，都远小于全球平均水平（分别为每年 $26 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 、 $24 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ ）^[4]，并且低于大部分世界大河流域，仅仅高于黄河、印度河、一部分西伯利亚河、大部分非洲大河等。其中辽河流域碳酸盐岩风化速率与大陆河流平均值相当，高于大部分非洲、南美洲、西伯利亚大河，黄河，印度河等，但远小于长

江、湄公河、雅鲁藏布江、密西西比河、莱茵河等大河。而辽河流域硅酸盐岩风化速率是大陆河流平均值的 0.4 倍,与非洲尼日尔河相当,但小于大部分世界大河,特别是发源于青藏高原的河流。

辽河流域碳酸盐岩风化 CO_2 消耗通量为每年 $14.66 \times 10^9 \text{ mol}$, 小于大部分大陆河流; 硅酸盐岩 CO_2 消耗通量为每年 $6.40 \times 10^9 \text{ mol}$, 依然远小于世界大部分大河。流域岩石风化 CO_2 消耗速率为每年 $2.54 \times 10^5 \text{ mol} \cdot \text{km}^{-2}$, 大致与大陆河流平均值 (每年 $2.46 \times 10^5 \text{ mol} \cdot \text{km}^{-2}$ [4]) 相当。碳酸盐岩 CO_2 消耗速率为每年 $1.77 \times 10^5 \text{ mol} \cdot \text{km}^{-2}$, 大于大陆河流平均值, 但发源于青藏高原的河流中也仅高于印度河与黄河; 硅酸盐岩 CO_2 消耗速率为每年 $0.77 \times 10^5 \text{ mol} \cdot \text{km}^{-2}$, 接近大陆河流平均值的 0.9 倍, 与发源于青藏高原的河流相比较, 辽河流域硅酸盐岩 CO_2 消耗速率仅高于印度河与长江, 比其他河流要小得多。

图 7 显示出径流深度与包括辽河流域在内的世界大河流域硅酸盐岩风化速率之间具有很好的正相关性 (判定系数为 0.611)。这种相关性虽不能证明径流深度与硅酸盐岩风化速率之间的逻辑关系, 但可直观地看出相比较大陆河流平均值及部分其他大河流域, 辽河流域径流深度与硅酸盐岩风化速率都处于中等偏下水平。

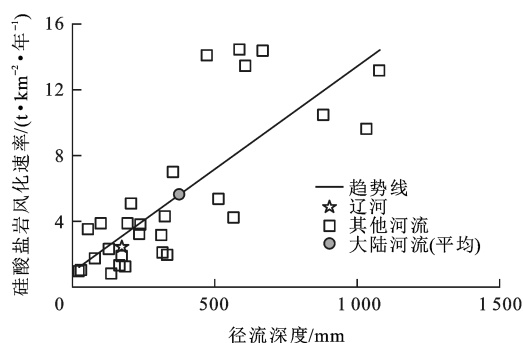


图 7 全球主要大河流域硅酸盐岩风化速率与径流深度的关系

Fig. 7 Relationship Between Silicate Weathering Rate and Runoff Depth in Global Main River Watersheds

5 结 语

(1) 辽河流域水体偏碱性, 河水化学成分以 Ca^{2+} 、 Na^{+} 及 HCO_3^{-} 为主, 在整个空间上变化很大, 总溶解固体平均值高于大部分发源于青藏高原的河流。

(2) 辽河流域河水化学组成主要以碳酸盐岩风

化端元贡献为主。整个流域岩石风化贡献为 83.43%, 其中碳酸盐岩风化端元为 65.74%, 硅酸盐岩风化端元为 17.69%, 人类活动贡献达到 10.90%, 这说明其受到人类活动 (畜牧业、工业、农业、城市活动等) 影响很大。

(3) 辽河流域碳酸盐岩风化速率为每年 $12.99 \text{ mol} \cdot \text{km}^{-2}$, 大致与大陆河流平均值相当; 流域硅酸盐岩风化速率为每年 $2.27 \text{ mol} \cdot \text{km}^{-2}$, 是大陆河流平均值的 0.4 倍。岩石风化速率为每年 $15.26 \text{ mol} \cdot \text{km}^{-2}$, 接近大陆河流平均水平。流域岩石风化 CO_2 消耗速率为每年 $2.54 \times 10^5 \text{ mol} \cdot \text{km}^{-2}$, 大致与大陆河流平均值相当。碳酸盐岩风化 CO_2 消耗速率为每年 $1.77 \times 10^5 \text{ mol} \cdot \text{km}^{-2}$, 硅酸盐岩风化 CO_2 消耗速率 (每年 $0.77 \times 10^5 \text{ mol} \cdot \text{km}^{-2}$) 接近大陆河流平均值的 0.9 倍, 相比较于大部分发源于青藏高原的河流要小, 但高于印度河与长江。岩石风化 CO_2 消耗通量为每年 $21.06 \times 10^9 \text{ mol}$, 其中碳酸盐岩风化 CO_2 消耗通量为每年 $14.66 \times 10^9 \text{ mol}$, 硅酸盐岩风化 CO_2 消耗通量为每年 $6.40 \times 10^9 \text{ mol}$, 都小于世界大部分大陆河流。

(4) 辽河流域位于构造稳定区域, 物理剥蚀较弱, 因此, 岩石风化速率及相应碳汇通量也较小。对于这种构造稳定、物理剥蚀作用很弱的区域, 岩石风化及碳汇作用虽不如发源于青藏高原的河流显著, 但是辽河流域约 70% 被泛滥平原覆盖这一特点值得进一步对其泛滥平原的风化特征与机制进行研究。

南京大学地球科学与工程学院孟先强博士与曹少华博士在样品采集中提供了帮助, 李来峰硕士在实验分析中给予了帮助, 在此一并致谢。

参考文献:

References:

- [1] BERNER R A, LASAGA A C, GARRELS R M. The Carbonate-silicate Geochemical Cycle and Its Effect on Atmospheric Carbon-dioxide over the Past 100 Million Years[J]. American Journal of Science, 1983, 283(7): 641-683.
- [2] FRANCE-LANORD C, DERRY L A. Organic Carbon Burial Forcing of the Carbon Cycle from Himalayan Erosion[J]. Nature, 1997, 390: 65-67.
- [3] LUDWIG W, AMIOTTE-SUCHET P, MUNHOVEN G, et al. Atmospheric CO_2 Consumption by Continental Erosion: Present-day Controls and Implications for the Last Glacial Maximum[J]. Global and Planetary

- Change, 1998, 16/17: 107-120.
- [4] GAILLARDET J, DUPRE B, LOUVAT P, et al. Global Silicate Weathering and CO₂ Consumption Rates Deduced from the Chemistry of Large Rivers[J]. Chemical Geology, 1999, 159(1/2/3/4): 3-30.
- [5] COLE J J, PRAIRIE Y T, CARACO N F, et al. Plumbing the Global Carbon Cycle: Integrating Inland Waters into the Terrestrial Carbon Budget[J]. Ecosystems, 2007, 10(1): 172-185.
- [6] HU M H, STALLARD R F, EDMOND J M. Major Ion Chemistry of Some Large Chinese Rivers[J]. Nature, 1982, 298: 550-553.
- [7] STALLARD R F, EDMOND J M. Geochemistry of Amazon; 2. The Influence of Geology and Weathering Environment on the Dissolved Load[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 1983, 88: 9671-9688.
- [8] RYU J S, LEE K S, CHANG H W, et al. Chemical Weathering of Carbonates and Silicates in the Han River Basin, South Korea[J]. Chemical Geology, 2008, 247(1/2): 66-80.
- [9] WEST A J, GALY A, BICKLE M. Tectonic and Climatic Controls on Silicate Weathering[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 235(1/2): 211-228.
- [10] AMIOTTE-SUCHET P, PROBST J L, LUDWIG W. Worldwide Distribution of Continental Rock Lithology: Implications for the Atmospheric/Soil CO₂ Uptake by Continental Weathering and Alkalinity River Transport to the Oceans[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2003, 17(2): 1038.
- [11] MEYBECK M. Global Chemical Weathering of Surficial Rocks Estimated from River Dissolved Loads[J]. American Journal of Science, 1987, 287(5): 401-428.
- [12] 陈静生, 夏星辉, 张利田, 等. 长江、黄河、松花江 60~80 年代水质变化趋势与社会经济发展的关系[J]. 环境科学学报, 1999, 19(5): 500-505.
- CHEN Jing-sheng, XIA Xing-hui, ZHANG Li-tian, et al. Relationship Between Water Quality Changes in the Yangtze, Yellow and Songhua Rivers and the Economic Development in the River Basins[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1999, 19(5): 500-505.
- [13] 李晶莹, 张 经. 黄河流域化学风化作用与大气 CO₂ 的消耗[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(2): 43-49.
- LI Jing-ying, ZHANG Jing. Chemical Weathering Processes and Atmospheric CO₂ Consumption in the Yellow River Drainage Basin[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2003, 23(2): 43-49.
- [14] 赵继昌, 耿冬青, 彭建华, 等. 长江河源区的河水主要元素与 Sr 同位素来源[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(2): 89-93.
- ZHAO Ji-chang, GENG Dong-qing, PENG Jian-hua, et al. Origin of Major Elements and Sr Isotope for River Water in Yangtze River Source Area [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2003, 30(2): 89-93.
- [15] 秦建华, 冉 敬, 杜 谷. 青藏高原东部长江流域盆地陆地化学风化研究[J]. 沉积与特提斯地质, 2007, 27(4): 1-6.
- QIN Jian-hua, RAN Jing, DU Gu. Subaerial Chemical Weathering in the Changjiang Drainage Systems on Eastern Qinghai-Xizang Plateau[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2007, 27(4): 1-6.
- [16] 翟大兴, 杨忠芳, 柳青青, 等. 鄱阳湖流域岩石化学风化特征及 CO₂ 消耗量估算[J]. 地学前缘, 2011, 18(6): 169-181.
- ZHAI Da-xing, YANG Zhong-fang, LIU Qing-qing, et al. Chemical Weathering and CO₂ Consumptions in Poyang Lake Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(6): 169-181.
- [17] 张 东, 黄兴宇, 李成杰. 硫和氧同位素示踪黄河及支流河水硫酸盐来源[J]. 水科学进展, 2013, 24(3): 418-426.
- ZHANG Dong, HUANG Xing-yu, LI Cheng-jie. Sources of Riverine Sulfate in Yellow River and Its Tributaries Determined by Sulfur and Oxygen Isotopes[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(3): 418-426.
- [18] 李小倩, 刘运德, 周爱国, 等. 长江干流丰水期河水硫酸盐同位素组成特征及其来源解析[J]. 地球科学, 2014, 39(11): 1547-1554.
- LI Xiao-qian, LIU Yun-de, ZHOU Ai-guo, et al. Sulfur and Oxygen Isotope Compositions of Dissolved Sulfate in the Yangtze River During High Water Period and Its Sulfate Source Tracing[J]. Earth Science, 2014, 39(11): 1547-1554.
- [19] 罗 超, 郑洪波, 吴卫华, 等. 长江河水 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值的季节性变化及其指示意义: 以长江大通站为例[J]. 地球科学进展, 2014, 29(7): 835-843.
- LUO Chao, ZHENG Hong-bo, WU Wei-hua, et al. Temporal Variation in Sr and ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr of Yangtze River: An Example from Datong Hydrological Station [J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(7): 835-843.
- [20] 王 健, 王 亮, 张龙军. 地下水灌溉回水对黄河流域化学风化 CO₂ 消耗估算的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2014, 44(9): 89-97.
- WANG Jian, WANG Liang, ZHANG Long-jun. Contribution of Returned Irrigation Groundwater to Chemical Weathering CO₂ Consumption in the Yellow

- River Basin[J]. Periodical of Ocean University of China, 2014, 44(9): 89-97.
- [21] WANG L, ZHANG L J, CAI W J, et al. Consumption of Atmospheric CO₂ via Chemical Weathering in the Yellow River Basin: The Qinghai-Tibet Plateau Is the Main Contributor to the High Dissolved Inorganic Carbon in the Yellow River[J]. Chemical Geology, 2016, 430: 34-44.
- [22] JIN Z D, WEST A J, ZHANG F, et al. Seismically Enhanced Solute Fluxes in the Yangtze River Headwaters Following the A. D. 2008 Wenchuan Earthquake[J]. Geology, 2015, 44(1): 47-50.
- [23] DAS P, SARMA K P, JHA P K, et al. Understanding the Cyclicity of Chemical Weathering and Associated CO₂ Consumption in the Brahmaputra River Basin (India): The Role of Major Rivers in Climate Change Mitigation Perspective[J]. Aquatic Geochemistry, 2016, 22(3): 225-251.
- [24] 吴卫华, 郑洪波, 杨杰东, 等. 中国河流域化学风化和全球碳循环[J]. 第四纪研究, 2011, 31(3): 397-407.
- WU Wei-hua, ZHENG Hong-bo, YANG Jie-dong, et al. Chemical Weathering of Large River Catchments in China and the Global Carbon Cycle[J]. Quaternary Sciences, 2011, 31(3): 397-407.
- [25] 刘宝剑, 赵志琦, 李思亮, 等. 寒温带流域硅酸盐岩的风化特征: 以嫩江为例[J]. 生态学杂志, 2013, 32(4): 1006-1016.
- LIU Bao-jian, ZHAO Zhi-qi, LI Si-liang, et al. Characteristics of Silicate Rock Weathering in Cold Temperate Zone: A Case Study of Nenjiang River, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(4): 1006-1016.
- [26] 王冬. 松花江典型小流域水化学的时空分异研究[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2013, 38(11): 142-149.
- WANG Dong. On Spatio-temporal Variation of Water Chemistry in Typical Watershed of Songhua River[J]. Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition, 2013, 38(11): 142-149.
- [27] 覃小群, 蒋忠诚, 张连凯, 等. 珠江流域碳酸盐岩与硅酸盐岩风化对大气 CO₂ 汇的效应[J]. 地质通报, 2015, 34(9): 1749-1757.
- QIN Xiao-qun, JIANG Zhong-cheng, ZHANG Lian-kai, et al. The Difference of the Weathering Rate Between Carbonate Rocks and Silicate Rocks and Its Effects on the Atmospheric CO₂ Consumption in the Pearl River Basin[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(9): 1749-1757.
- [28] 于爽, 孙平安, 杜文越, 等. 人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域为例[J]. 环境科学, 2015, 36(1): 72-79.
- YU Shi, SUN Ping-an, DU Wen-yue, et al. Effect of Hydrochemistry Characteristics Under Impact of Human Activity: A Case Study in the Upper Reaches of the Xijiang River Basin[J]. Environmental Science, 2015, 36(1): 72-79.
- [29] 黄露, 刘丛强, CHETELAT B, 等. 中国西南三江流域风化的季节性变化特征[J]. 地球与环境, 2015, 43(5): 512-521.
- HUANG Lu, LIU Cong-qiang, CHETELAT B, et al. Seasonal Variation Characteristics of Weathering in the Three Rivers Basin, Southwestern China[J]. Earth and Environment, 2015, 43(5): 512-521.
- [30] 原雅琼, 何师意, 于爽, 等. 柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析[J]. 环境科学, 2015, 36(7): 2437-2445.
- YUAN Ya-qiong, HE Shi-yi, YU Shi, et al. Hydrochemical Characteristics and the Dissolved Inorganic Carbon Flux in Liuzhou Section of Liujiang Basin[J]. Environmental Science, 2015, 36(7): 2437-2445.
- [31] 吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 等. 贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析[J]. 环境科学, 2015, 36(5): 1565-1572.
- LU Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, et al. Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province[J]. Environmental Science, 2015, 36(5): 1565-1572.
- [32] 孙海龙, 刘再华, 杨睿, 等. 珠江流域水化学组成的时空变化特征及对岩石风化碳汇估算的意义[J]. 地球与环境, 2017, 45(1): 57-65.
- SUN Hai-long, LIU Zai-hua, YANG Rui, et al. Spatial and Seasonal Variations of Hydrochemistry of the Peral River and Implications for Estimating the Rock Weathering-related Carbon Sink[J]. Earth and Environment, 2017, 45(1): 57-65.
- [33] 吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 等. 清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应[J]. 环境科学, 2016, 37(12): 4671-4679.
- LU Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, et al. Rock Weathering Characteristics and the Atmospheric Carbon Sink in the Chemical Weathering Processes of Qingshuijiang River Basin[J]. Environmental Science, 2016, 37(12): 4671-4679.
- [34] 何若雪, 孙平安, 何师意, 等. 漓江流域中下游无机碳通量动态变化及影响因素[J]. 中国岩溶, 2017, 36(1): 109-118.

- HE Ruo-xue, SUN Ping-an, HE Shi-yi, et al. Variation of Inorganic Carbon Flux in the Middle and Downstream of the Lijiang River[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(1):109-118.
- [35] GALY A, FRANCE-LANORD C. Weathering Processes in the Ganges-Brahmaputra Basin and the Riverine Alkalinity Budget[J]. *Chemical Geology*, 1999, 159(1/2/3/4):31-60.
- [36] LI S Y, LU X X, BUSH R T. Chemical Weathering and CO₂ Consumption in the Lower Mekong River[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 472:162-177.
- [37] HAN G L, TANG Y, XU Z F. Fluvial Geochemistry of Rivers Draining Karst Terrain in Southwest China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 38(1/2):65-75.
- [38] XU Z F, LIU C Q. Water Geochemistry of the Xijiang Basin Rivers, South China: Chemical Weathering and CO₂ Consumption[J]. *Applied Geochemistry*, 2010, 25(10):1603-1614.
- [39] LI Y, YU X L, CHENG H B, et al. Chemical Characteristics of Precipitation at Three Chinese Regional Background Stations from 2006 to 2007[J]. *Atmospheric Research*, 2010, 96(1):173-183.
- [40] 赵 岩. 鞍山市近四年降水组分分析[J]. *中国化工贸易*, 2015(8):196.
- ZHAO Yan. Analysis of Precipitation Composition in Anshan in Recent Four Years[J]. *China Chemical Trade*, 2015(8):196.
- [41] 刘厚凤, 汪凯庆. 辽宁农村代表区域降水离子组成及与气态污染物相关性[J]. *气象与环境学报*, 2011, 27(2):62-68.
- LIU Hou-feng, WANG Kai-qing. Ion Composition in Precipitation and Its Correlation with Gaseous Pollutants in Representative Rural Area in Liaoning Province[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2011, 27(2):62-68.
- [42] LI S L, CHETELAT B, YUE F J, et al. Chemical Weathering Processes in the Yalong River Draining the Eastern Tibetan Plateau, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 88:74-84.
- [43] CHETELAT B, LIU C Q, ZHAO Z Q, et al. Geochemistry of the Dissolved Load of the Changjiang Basin Rivers: Anthropogenic Impacts and Chemical Weathering[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(17):4254-4277.
- [44] MOON S, HUH Y, QIN J H, et al. Chemical Weathering in the Hong (Red) River Basin: Rates of Silicate Weathering and Their Controlling Factors[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(6):1411-1430.
- [45] 朱秉启, 杨小平. 塔克拉玛干沙漠天然水体的化学特征及其成因[J]. *科学通报*, 2007, 52(13):1561-1566.
- ZHU Bing-qi, YANG Xiao-ping. The Ion Chemistry of Surface and Ground Waters in the Taklimakan Desert of Tarim Basin, Western China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(13):1561-1566.
- [46] CHEN J S, WANG F Y, XIA X H, et al. Major Element Chemistry of the Changjiang (Yangtze River) [J]. *Chemical Geology*, 2002, 187(3/4):231-255.
- [47] CHEN J S, WANG F Y, MEYBECK M, et al. Spatial and Temporal Analysis of Water Chemistry Records (1958-2000) in the Huanghe (Yellow River) Basin [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, DOI: 10.1029/2004GB002325.
- [48] REEDER S W. Hydrogeochemistry of the Surface Waters of the Mackenzie River Drainage Basin, Canada: 1 Factors Controlling Inorganic Compositions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1972, 36(8):825-865.
- [49] EDMOND J M, PALMER M R, MEASURES C I, et al. The Fluvial Geochemistry and Denudation Rate of Guyana Shield in Venezuela, Colombia, and Brazil[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 59(16):3301-3325.
- [50] WHITE A F, BLUM A E. Effects of Climate on Chemical Weathering in Watersheds[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(9):1729-1747.
- [51] 《中国水利百科全书》编辑委员会. 中国水利百科全书[M]. 2版. 北京:中国水利水电出版社, 2006.
- The Editorial Board of *China Water Conservancy Encyclopedia*. *China Water Conservancy Encyclopedia* [M]. 2nd ed. Beijing: China Water and Power Press, 2006.
- [52] 梁团豪, 谢新民, 崔新颖, 等. 西辽河流域水资源合理配置研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2009, 7(4):291-295.
- LIANG Tuan-hao, XIE Xin-min, CUI Xin-ying, et al. Study on Water Resources Rational Allocation in West Liao River Basin[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2009, 7(4):291-295.
- [53] PANDE K, SARIN M M, TRIVEDI J R, et al. The Indus River System (India-Pakistan): Major-ion Chemistry, Uranium and Strontium Isotopes [J]. *Chemical Geology*, 1994, 116(3/4):245-259.