

# 欧洲罗纳河和中国几条主要河流 悬浮物的矿物学组成分析\*

王文正

(青岛海洋大学测试中心, 青岛 266003)

张 经

(青岛海洋大学海洋化学系, 青岛 266003)

**提要** 于 1989 年 5 月—1990 年 4 月间在罗纳河下游按月采集悬浮物样品,并用 X-射线衍射法分析其中的矿物学组成。结果表明,石英、长石、方解石是碎屑矿物的主要成分,在粘土中伊利石、绿泥石及高岭石是常见的矿物。这种矿物学组成特点与流域盆地中占主体的花岗岩与碳酸盐岩风化相适应;同中国的黄河、长江及大辽河相比较,发现它们在矿物组合方面比较相似,尽管河流之间在矿物绝对含量上会有显著的差别。这种情况表明,流域盆地的风化特点是影响悬浮物矿物学组成的最重要因素。作为一种模式,世界上大河流的风化作用指数随着降雨量而增加;随着从寒冷干燥向热带湿润的气候带过渡,河流悬浮物的化学成熟度逐渐增加。

**关键词** 罗纳河 黄河 长江 大辽河 矿物组成

就大尺度而言,陆地对于海洋的物质输送,其中 90%以上是通过河流完成的。如果仅考虑固体物质,那么 70%—80%是由河流携带的碎屑物质。它们主要是天然风化过程加上人类活动的产物。本文报告欧洲罗纳河,河流悬浮物的矿物学组成及其与流域盆地的风化作用特点间的关联。作为一种尝试,我们将世界上若干河流的研究成果加以归纳,以便探索风化过程的地球化学平衡和处于不同构造格局的河流之间在物质组成上的协调性。

## 1 采样及实验方法

采样点位于法国阿尔勒城下游 15km,距河口约 30km 的布约水泵站附近的主河道(罗纳河)(图 1)。样品从 1989 年 5 月—1990 年 4 月每月采集一次。水样用预称过的 0.45 $\mu\text{m}$  Sartorius 滤膜现场减压过滤。实验室中悬浮物样品在 50 $^{\circ}\text{C}$  下烘干,然后将干样分为两份,一份在 50—60 $^{\circ}\text{C}$  的乙二醇蒸汽中放置一昼夜;另一份为原干样保存。样品用日本 D/max-rB 型 X-射线衍射仪进行分析。工作条件为:  $\text{CuK}\alpha = 1.5406 \text{ \AA}$ , 在  $2\theta = 3\text{—}40^{\circ}$  范围连续扫描,速度 10 $^{\circ}/\text{min}$ ,管电压为 50 kV,管电流为 100 mA。然后对原数据进行计算机处理和矿物成分的定性分析。粘土矿物的百分含量用 Biscay 法估算,石英、长石等碎屑矿物的含量为积分强度比率。

## 2 结果

**2.1 罗纳河悬浮物的矿物学组成** 图 2 和表 1 给出罗纳河悬浮物的 X-射线衍射图谱

\* 国家自然科学基金资助,49000061 号。

野外及实验室工作承蒙 Drs. L. Godin 和于庆的帮助,成文过程中杨作升教授提出修改意见,谨志谢忱。

收稿日期: 1992 年 2 月 28 日,接受日期: 1993 年 5 月 18 日。

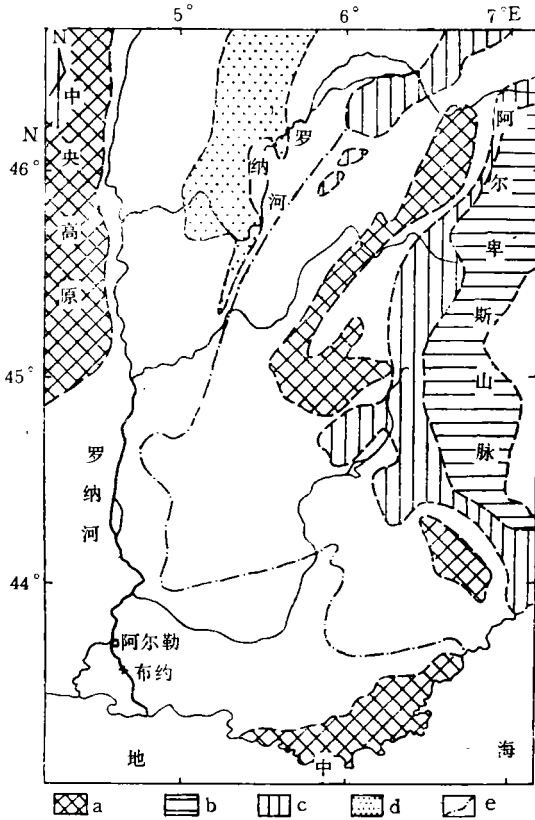


图 1 罗纳河流域盆地地质特征及采样位置

Fig. 1 Geological characteristics and sample locations in the drainage basin of the Rhône River

a. 结晶岩(花岗岩、片麻岩); b. 片岩; c. 碳酸盐岩; d. 碎屑沉积岩; e. 阿尔卑斯山余脉。

表 1 罗纳河悬浮物中碎屑矿物组分(%)和粘土矿物的相对含量(%)<sup>1)</sup>

Tab. 1 Mineral compositions of suspended matter and clay mineral concentrations (%) from the Rhône River (%)

月 份		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
碎屑矿物	石 英	35	54	52	31	35	35	28	28	44	31	27	36
	方 解 石	26	35	29	32	28	25	33	33	28	29	36	37
	长 石	nd	2	3	4	10	2	3	7	11	2	6	3
	粘土类矿物	39	9	16	33	27	38	36	32	17	38	31	24
粘土矿物	伊 利 石	72	47	53	58	58	68	63	49	60	64	70	68
	绿 泥 石	19	34	47	42	42	25	31	51	40	36	25	19
	高 岭 石	9	19	nd	nd	nd	7	6	nd	nd	nd	5	13

1) nd 未检出。表 2 同。

和矿物组成。悬浮物中的粘土矿物以伊利石 (Il) 为主, 其次为绿泥石 (Ch) 及小量的高岭石 (Kao), 而蒙皂石 (Sm) 与蛭石 (Ver) 等的含量甚微。碎屑矿物以石英 (Q)、

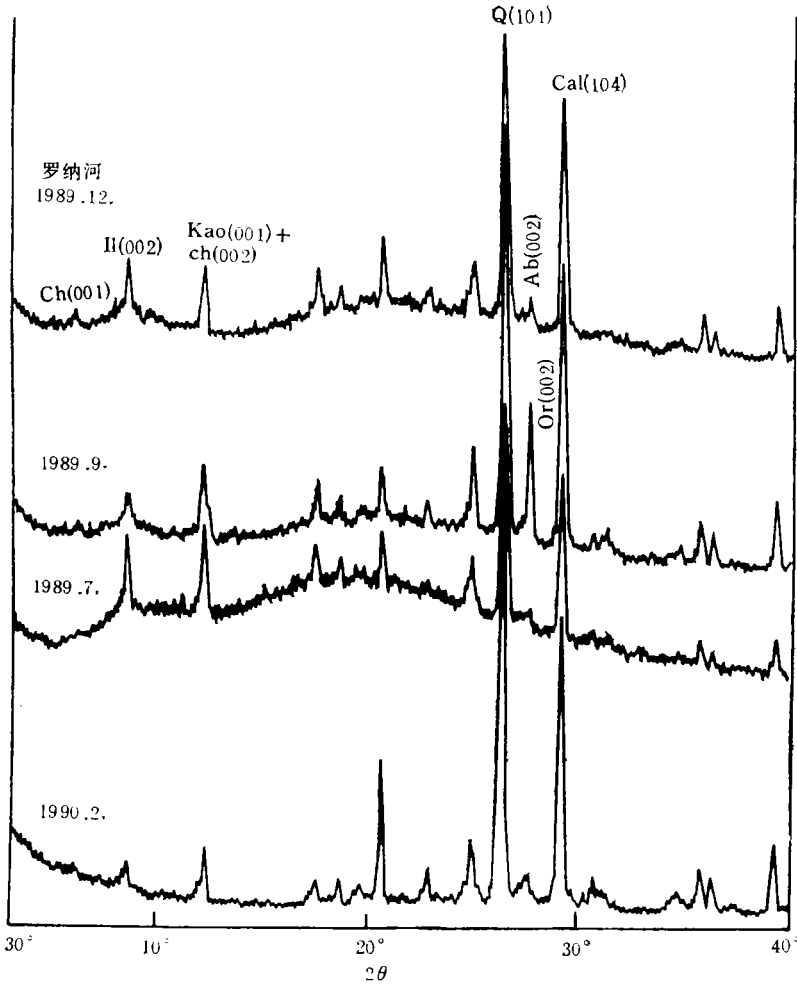


图 2 罗纳河不同月份悬浮物的 X-射线衍射图谱对比

Fig. 2 X-ray diffraction graph showing the variation of suspended matter with the change of different month from the Rhône River

钾长石 (Or)、酸性斜长石 (Ab) 和方解石 (Cal) 为主。此外也发现少量暗色矿物, 如金云母, 而角闪石类矿物极少 (图 2)。不同季节降水在流域盆地各个部分的分配以及河流水/沙量都有显著变化。这种时空上的不均一性影响悬浮物的矿物组成, 使其相对含量出现差异 (表 2)。例如枯水期, 当罗纳河主要受来自阿尔卑斯山支流补给时 (7—8 月), 悬浮物中的方解石的含量显著增加; 与此相反, 若降水集中于中下游的中央高原时 (9 月), 悬浮物中则出现较多的长石; 2—3 月出现汛情, 河水在下游漫出河床, 甚至淹没了高速公路和下游的部分城市, 悬浮物中出现大量的石英 (>50%), 而粘土矿物的含量较枯水期显著减少。

观测期间, 石英的含量在多数月份 >30%; 方解石含量较高, 在全年各月份基本上都 >20%, 成为罗纳河矿物组成的显著特点; 长石含量相对较低, 一般 <10%。罗纳河悬浮

物中细粒组分比例较低,粘土中伊利石/云母的结晶度较差,衍射本底较厚,绿泥石的衍射峰清晰。高岭石在罗纳河中不是主要的粘土矿物,一般 $<5\%$ ,而且各月份差别较大;蒙皂石类矿物在罗纳河中几乎未检出,只是在10月份样品中见到弱的衍射峰,而且与绿泥石成混层出现。

采用乙二醇处理后的样品与原样之间在衍射峰位置和强度上均未有明显的差别。由于样品量较少,不允许实施更多的化学与物理处理,其矿物组成和结构上的细微特征目前还不十分清楚。

罗纳河悬浮物的矿物组成和相对比例在很大程度上受制于流域盆地的物质组成与降水特征。

在地质学上,流域盆地的右侧为中央高原的花岗岩及片麻岩,上覆玄武岩;左侧为阿尔卑斯山的碳酸盐岩和碎屑沉积岩(图1)。它们在地质年代、构造特征和风化特点上都有明显差异,这可通过悬浮物的组成得到反映。特别是,当流域盆地各部分降水不同时更为显著。

**2.2 河流间矿物组成的异同** 将不同河流的悬浮物采用相同的样品制备方法和仪器分析程序,其结果,矿物的X-射线衍射图谱更多的提供了物质成分与结构信息(表2、图3)。显然,在罗纳河和中国的主要河流中悬浮物的衍射图谱表现出敏锐的峰形和较高的结晶度,无定形物质组分较少。罗纳河中的主要矿物组分在中国主要河流中亦是常见的。

碎屑矿物中,黄河、长江和大辽河的石英(101)及长石(002)(钠长石或钾长石)衍射峰较强,而在罗纳河中出现非常强的方解石(104)衍射峰,甚至高于黄河。

粘土矿物在长江和罗纳河中衍射峰较强,这表明其中粘土矿物含量较多。例如,在这两条河流中  $II(001)/Q(101)$  和  $Kao(001)+Ch(002)/Q(101)$  强度比率高于黄河和大辽河。此外,在黄河和长江中有一定数量的蒙皂石,而罗纳河中含量甚微,大辽河中则未检出。

### 3 讨论

**3.1 风化过程中的地球化学平衡** 罗纳河与中国河流间在矿物成分上的异同,与流域

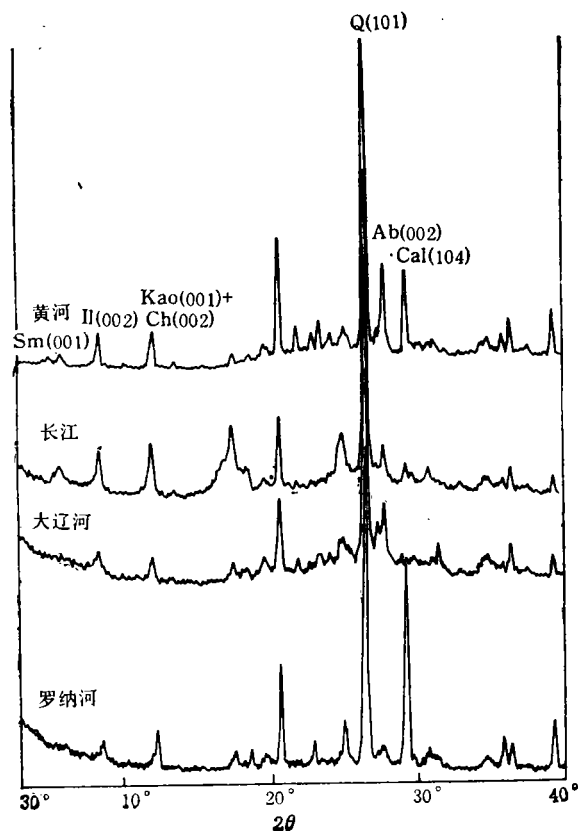


图3 不同河流悬浮物的X-射线衍射图谱对比

Fig. 3. Comparison of suspended matter among Huanghe River, Changjiang River, Daliaohe River and Rhône River X-ray diffraction graphs

表 2 不同河流之间悬浮物的矿物组含量对比(%)

Tab. 2 Comparison of mineral compositions of suspended matter from the Rhône River, Huanghe River, Changjiang River and Daliaohe River

矿 物	罗纳河	黄 河	长 江	大辽河
石 英	>20	>20	>20	>20
长 石	<5	5—10	<5	5—10
方解石	>20	10—20	<5	nd
伊利石	10—20	10—20	10—20	10—20
绿泥石	5—10	5—10	5—10	5—10
高岭石	5—10	5—10	5—10	5—10
蒙皂石	nd	5—10	<5	nd

盆地的岩石/土壤成分及风化类型有直接的联系。简言之,从气候条件考虑,中国大陆,尤其是北方,主要受北温带陆地气候制约,流域盆地中岩石类型复杂,特别是广泛发育第四纪沉积物。其次,中国河流的含沙量大都高于罗纳河。但是,由于流域盆地中广泛出露碳酸盐岩,使得罗纳河中碱土金属高于世界上许多大的河流。例如,罗纳河中颗粒态 Ca 的浓度约为黄河的 2 倍、长江的 5 倍,并且远远高于世界上其它著名的热带与北温带河流(约一个数量级),象亚马逊、扎伊尔、奥里诺科、圣·劳伦斯以及纪龙德、卢瓦尔和赛纳等河流。相反,碱金属(例如 Na) 的浓度则较中国的河流低(图 4)。这表明:在罗纳河流域盆地中碳酸盐的溶蚀是控制河流悬浮物成分的重要过程,硅酸盐的风化和无机盐的溶解可能是次要的。

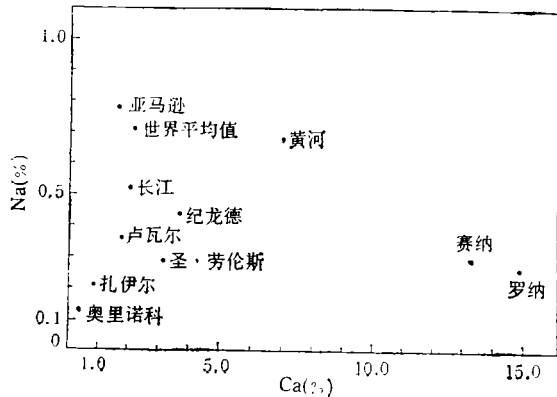
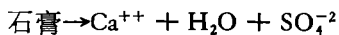
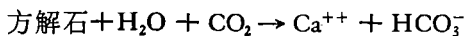


图 4 世界上一些主要河流悬浮物的化学组成 (Na-Ca) 比较

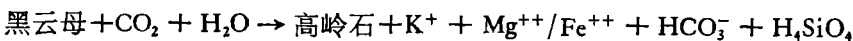
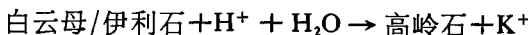
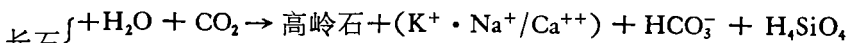
Fig. 4 Comparison of major element (Na and Ca) concentrations of suspended matter of some large rivers

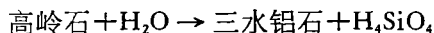
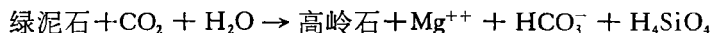
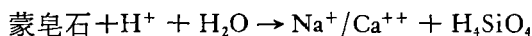
根据上述 4 条河流悬浮物矿物学成分特征分析,并结合前人所做的化学分析资料(杨作升, 1988; Thomas et al., 1982; Zhang Jing et al., 1990), 流域盆地中矿物/岩石的主要风化过程及反应可归纳为:

(1) 碳酸盐和其它无机盐类



(2) 硅酸盐和铝硅酸盐





显然,碳酸盐和其它无机盐类等 在风化过程中的行为主要是在  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  及  $\text{H}_3\text{O}^+$  的作用下的溶解过程,其风化是协调性的,溶液(产物)与反应物之间的阴阳离子浓度基本符合化学计量关系和质量平衡。相反,硅酸盐和铝硅酸盐类在外动力过程中的行为属非协调性的,风化常常不彻底,在释放出阳粒子 ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  等)的同时伴有硅、铝及铁的氧化物/氢氧化物(次生矿物)的形成。这时阴阳离子之间在反应物前后不符合化学计量关系和质量平衡。石英、长石及云母类等矿物是地表岩石中最常见的造岩矿物,在酸性风化条件下,铝硅酸盐分解形成的产物为伊利石与高岭石,进一步变为三水铝石及蛋白石,而阴离子则大量淋失,只有在碱性风化条件下,蒙皂石和绿泥石才是稳定的次生矿物。

通常,悬浮物中出现大量的不稳定碎屑矿物(例如暗色造岩矿物和碳酸盐矿物等),这与流域盆地中广泛的母岩出露、大的地势起伏和干燥的环境有关,这些都是处于温带的河流的特征,象中国的珠江、长江和黄河,欧洲的罗纳河,亚洲的印度河、恒河/布拉玛普特拉河及北美洲的圣·劳伦斯河、马更歇河 (Kanta, 1985)。相对热带地区,当化学风化能量较高时,例如在巴拉那、怀卡托、奥里诺科、扎伊尔和亚马逊等河流中悬浮物的不稳定组分几乎绝迹,浅色矿物占据了整个碎屑部分,同时出现大量的蛋白石 ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) 和三水铝石 ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) (van der Gaast et al., 1984)。

就粘土矿物而言,热带河流中,例如扎伊尔、奥里诺科、巴拉那、尼日尔等河流,通常含有较多的高岭石,它是热带雨林中火成岩的风化产物,充沛的降雨与繁茂的植被为其创造了良好的形成环境。当母岩风化形成高岭石时,伴随有蛋白石与三水铝石。但是,在干燥环境条件下,而且风化环境偏碱性时,取而代之的将是蒙皂石或绿泥石。特别是当考虑到这种环境与气候分带的影响时,对比中国的南方和北方河流之间在矿物成分的异同时,得到与上述十分相似的认识(杨作升,1988; Qu Cuihui et al., 1990)。

**3.2 河流悬浮物的化学成分与流域盆地风化类型的关联** 流域盆地所处的地理位置和气候分带对地表岩石的风化过程具有十分重要的影响。具体地说,前者决定了流域盆地接受太阳辐射能量的强度和平均温度,后者在很大程度上影响流域盆地内的大气降水量和湿度,两者恰恰构成了制约风化过程的最重要的外界强度因素(传递物质的媒介与能量标识)。如果就具体的流域盆地考虑,地表物质遭受风化的强度,是通过风化壳或土壤成熟度来描述的,特别是随着气候分带由极地的寒带→温带→热带,温度与降水量递增,土壤成熟度亦逐渐提高。在早期的研究中,我们曾讨论了中国主要河流流域盆地中风化类型及特点与河流化学成分间的关联 (Zhang Jing et al., 1990)。类似的这种关联在世界上的其它地区也应有所表现。

在此,我们引入风化作用指数 ( $WI$ ) 来描述流域盆地中的化学成熟度,并将其与影响风化过程的外部因素(如降水量及平均温度)结合讨论全球性的气候分带对流域盆地化学风化的制约。风化作用指数表示为悬浮物中难风化的化学组分 ( $\text{Al}$ ,  $\text{Fe}$  和  $\text{Si}$ ) 与那些易淋失的组分 ( $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Na}$  和  $\text{K}$ ) 的摩尔数比值,亦即:

$$WI = \frac{\sum(Al + Fe + Si)}{\sum(Ca + Mg + Na + K)}$$

我们选择了罗纳河和中国的黄河、长江及珠江为例，并与世界上十几条主要河流作了对比，这些河流分布于北纬 70° 到南纬 40° 之间，跨越了从极地到赤道之间的寒、温、亚热带与赤道热带，以及从寒带冻土苔藓高原到热带的雨林植物分带，若将风化作用指数对流域盆地年降水量作图 5，从其中各点的分布可以看出，流域盆地中的土壤化学成熟度随降水量的增加而逐步提高。这与矿物学的研究温带河流中不稳定的矿物较多，而热带河流中出现大量的蛋白石与三水铝石(例如扎伊尔河)是颇为吻合的。

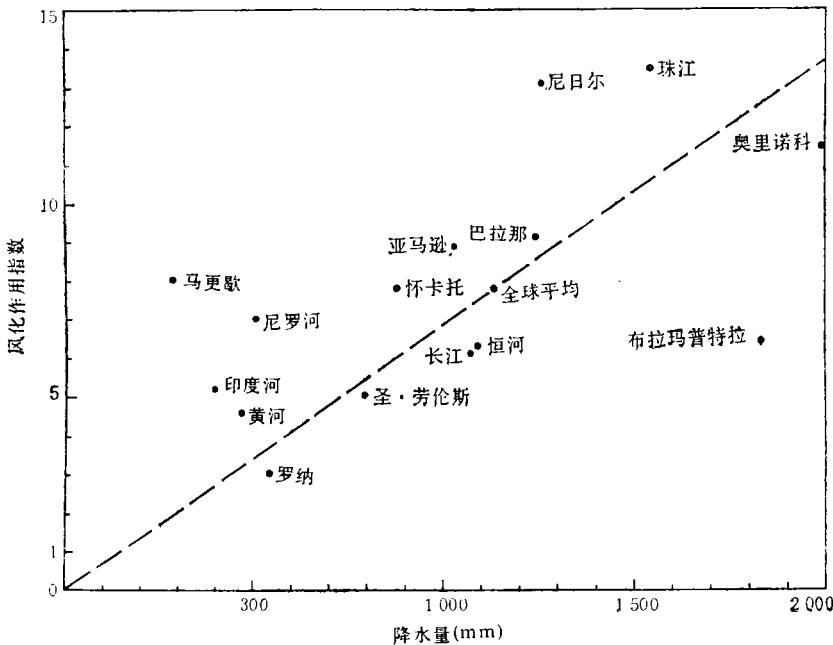


图 5 世界上一些大河流的风化作用指数 (WI) 与流域盆地降水量的关系 (据 Konta, 1985; Qu Cuihui, 1990 编制)

Fig. 5 Plot of weathering index (WI) against rainfall for some large world rivers

作为一种模式，从图 5 的比较结果还可看出，全球性的气候分带是如何控制地表岩石/土壤的风化程度/类型的。然而图 5 中风化作用指数与降水量之间并非存在严格的线性关系，这是由于除了温度与降水外，风化作用指数尚受制于流域盆地所处的大地构造分区位置、风化母质的成分、结构及流域盆地的地貌学特点(如地势起伏程度)。简言之，在构造稳定区，流域盆地处于长期构造稳定状态或亚稳定状态，形成具一定厚度的风化壳。河流中的离子量主要取决于地表水/地下水的搬运能力(搬运控制)，而那些发育在造山带的河流，由于流域盆地的快速上升(构造回返)，剥蚀加剧，风化壳发育较差，河流的离子量更多地依存于流域盆地的风化速度(风化控制)。前者如黄河，而长江的若干支流及华南地区的河流则归为后者 (Zhang Jing et al., 1990)。Konta (1985) 的研究表明，对于流域盆地中地形变化剧烈的河流，物理剥蚀的程度加剧，物质在流域盆地中的存留时间缩

短,土壤的化学成熟度下降,河流中的悬浮物含量显著增加。作为补充,气候分带/风化环境不仅制约着土壤成熟度——风化作用指数和悬浮物的组成,而且对于溶解态的组分亦有显著的影响。温带河流常具有高的矿化度和氧离子浓度,而那些较大的热带河流中总的矿化度不高,但却具有高浓度的难溶组分(例如 Si),相应的热带河流对于溶解态  $\text{SiO}_2$  的输送约占全球入海通量的 70%—80%。

#### 4 结语

通过对采自罗纳河及中国几条主要河流的悬浮物的成分与结构分析,结果表明,这些河流的主要矿物组分是十分相似的。地表岩石中的主要矿物组分几乎无所不在,所占比例在很大程度上取决于地表岩石的类型及分布。不同河流间在矿物组成与结构上的差别主要受控于母质的组成与风化程度及特点。这在对比了处于不同气候分带的河流之后愈加清楚。通常,地处寒带与温带河流中的不稳定矿物组分较多,含有相当数量的蒙皂石与绿泥石;而热带河流中矿物成分较单一,以稳定矿物为主,粘土矿物以高岭石为主,并伴有蛋白石及三水铝石。作为一种模式,河流中的风化作用指数随降水量的增加而增加,表明流域盆地中的土壤化学成熟度明显受全球气候分带的制约。尽管气候分带可能不是影响母质风化的决定性因素,但降水在很大程度上影响着风化过程中物质与能量的传递和交换,起着媒介的作用;温度则可以反应太阳辐射能量。考虑到这些,可以说本文提出的模式反映了流域盆地风化作用的共性。

#### 参 考 文 献

- 杨作升, 1988, 黄河、长江、珠江沉积物中粘土矿物组合、化学特征及其与物源区气候环境的关系, *海洋与湖沼*, **19**: 336—346.
- Konta J., 1985, Mineralogy and chemical maturity of suspended matter in major rivers sampled under the Scope/Unep Project, *SCOPE/UNEP Sonderband*, **58**: 569—592.
- Qu Cuihui et al., 1990, Chemical composition and factors controlling suspended matter in three major chinese rivers, *Sci. Total Environ.*, **97/98**: 335—346.
- Thomas A. J. et al., 1982, Chemical composition of river suspended sediment *SCOPE/UNEP Sonderband*, **52**: 555—564.
- Van der Gaast S. J. et al., 1984, Mineralogy, opal and manganese of middle and late Quaternary sediments of the Zaire (Congo) deep-sea fan, *J. Sea Res.*, **17**: 313—341.
- Zhang Jing et al., 1990, Drainage basin weathering and major element transport of two large Chinese rivers (Huanghe and Changjiang), *J. Geophys. Res.*, **95**: 13 277—13 288.



# ANALYSIS ON THE MINERAL COMPOSITIONS OF SUSPENDED MATTER FROM RHÔNE AND SOME MAIN CHINESE RIVERS

Wang Wenzheng

(*Centre of Analysis, Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003*)

Zhang Jing

(*Department of Marine Chemistry, Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003*)

## ABSTRACT

Suspended matter from the lower reaches of the Rhône River were taken monthly between May 1989 and April 1990. Samples were analysed with X-ray diffraction method to determine mineral compositions for comparison with data from some large Chinese rivers (Huanghe, Changjiang and Daliaohe Rivers et al.) in order to better understand the control of weathering features from individual drainage areas over riverine sediment compositions. Quartz, feldspar and calcite are major components of coarse sediments in the Rhône, while illite, chlorite and kaolinite are quite common in calys. The mineral assemblage of the Rhône and Chinese rivers are similar, although the absolute contents of minerals from individual rivers are highly variable. This implies the general control of weathering features in watersheds over the river sediment compositions. As an example, the weathering indices (*WI*) of rivers are closely related to the rainfall over the drainage areas, which indicates the increase of chemical maturity of soils along with the transition from cold and arid to tropical climates.

**Key words** Rhône River Huanghe River Changjiang River Daliaohe River Mineral composition