宁夏南部地区水质形成机制研究

张发旺[1)], 陈立[1)], 余秋生[2)], 薛忠歧[2)]
1) 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄, 050061
2) 宁夏地质工程勘察院, 银川, 750021

内容提要: 宁夏南部地区是中国严重缺水地区之一, 该地区地下水类型可分为松散岩类孔隙水、碎屑岩类裂隙—孔隙水、基岩裂隙水和碳酸盐类岩溶水。受到当地特殊的气候条件、地貌特征、地层岩性和地质构造的影响, 各类地下水水质普遍比较差。含水介质中大量的石膏、芒硝等矿物成分进入地下水中是水质恶劣的根本原因; 封闭的蓄水构造使得当地地下水循环不畅, 蒸发浓缩作用使得浅层水中聚集高盐分, 也是水质变差的重要原因。

关键词: 地下水质; 水岩作用; 宁夏南部地区

本文所指宁夏南部地区是北纬37°40′以南的宁夏南部低山丘陵区, 面积3.2万平方千米。这里由于降水稀少, 蒸发强烈(平均降水量300mm/a, 蒸发量达3000mm/a), 水资源极度缺乏, 有"宁南缺水甲天下"之称。另外苦咸水分布广泛, 现有的地下水和地表水资源大部分为苦咸水, 致使淡水资源更为稀少, 这不仅影响着当地居民的日常生活, 而且阻碍着当地的经济发展。苦咸水的形成有多方面的原因, 如高含盐地层的影响、地层构造的影响以及蒸发浓缩作用等, 对其成因进行分析, 有助于发现地下水水化学演化的内在规律, 为该地区的找水工作提供借鉴、指导工作。

1 地下水赋存类型及其水化学特征

根据宁夏南部地区地下水含水介质的不同, 可以将地下水划分为4种类型: ① 松散岩类孔隙水、② 碎屑岩类裂隙—孔隙水、③ 基岩裂隙水和④碳酸盐类岩溶裂隙水, 各种含水岩组的分布见图1。

1.1 松散岩类孔隙水

根据含水层的岩性和地下水的水理性质, 可将该类地下水分为第四系松散岩类孔隙水和第四系黄土类土孔隙水。第四系松散岩类孔隙水主要分布于卫宁冲积平原、红寺堡盆地、兴仁堡洼地、清水河河谷平原、南西华山东北麓第四系沉降带和葫芦河河谷平原, 主要接受降雨渗入补给。如果盆地是相对封闭的, 盆地边缘地下水的矿化度一般在1g/L左右; 盆地中心是地下水的汇集区, 地下水蒸发作用明显, 盐分在地下水中聚集, 致使地下水的矿化度往往超过5g/L。水化学类型从四周向中心有明显变化: 大体沿$HCO_3^- — Ca^{2+} \cdot Mg^{2+} \longrightarrow HCO_3^- \cdot SO_4^{2-} — Ca^{2+} \cdot Mg^{2+} \longrightarrow SO_4^{2-} \cdot HCO_3^- — Na^+ \longrightarrow Cl^- \cdot SO_4^{2-} — Na^+$型水的路径转变。如果是开放型盆地或平原, 上游的地下水矿化度一般都小于2g/L, 而到出口时矿化度可达到4g/L, 个别地区都超过了8g/L; 从上游到下游排泄口的水化学类型的变化: $HCO_3^- — Ca^{2+} \cdot Mg^{2+} \rightarrow HCO_3^- \cdot SO_4^{2-} — Ca^{2+} \cdot Na^+ \longrightarrow SO_4^{2-} \cdot HCO_3^- — Na^+ \longrightarrow SO_4^{2-} \cdot Cl^- — Na^+$。黄土类土孔隙含水岩组主要分布在西吉西部的黄土丘陵洼地, 兴仁堡洼地和海原盆地之间的黄土丘陵区以及黑城以东黄土丘陵区。这类地下水主要接受大气降水补给, 水质复杂多变, 矿化度一般大于3g/L, 如果盆地中部地下水溢出地表, 往往形成盐湖, 盐湖水矿化度可达153g/L。

1.2 碎屑岩类裂隙—孔隙水

主要包括古近系—新近系碎屑岩类裂隙—孔隙水、白垩系碎屑岩类裂隙—孔隙水和前白垩系碎屑岩类裂隙—孔隙水。古近系—新近系碎屑岩类裂隙—孔隙水主要分布在马家滩断陷带内、清水河平原北东侧红岩丘陵区、西吉盆地、海原盆地和红寺堡盆地等地区, 部分古近系—新近系地层中含有大量可溶盐, 经过长期溶滤作用, 致使古近系—新近系地下水的矿化度普遍较高, 一般在3~5g/L左右; 白垩系

注: 本文为国土资源部地质调查项目"宁夏南部水资源综合评价与合理开发利用"(编号DKD2002005-1)的成果。
收稿日期: 2006-06-20; 改回日期: 2006-09-14; 责任编辑: 章雨旭。
作者简介: 张发旺, 男, 1965年生。研究员, 博士生导师。长期从事水文地质环境地质方面的研究工作。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

碎屑岩类裂隙—孔隙水在盐池南部矿化度超过了3g/L, 在彭阳县东部矿化度一般小于1g/L, 这两个地区是鄂尔多斯白垩系自流盆地的一部分, 含水层为白垩系保安群; 前白垩系碎屑岩类裂隙—孔隙水主要分布在青龙山、韦州以北地区, 含水层上部多为第四系、古近系—新近系覆盖, 含水岩层主要由二叠系、三叠系、侏罗系构成, 这类地下水的矿化度变化复杂, 从0.63g/L 到13.86g/L 不等。

1.3　基岩裂隙水

这类地下水主要分布在卫宁北山、香山、烟筒山、罗山、六盘山、月亮山、南西华山等基岩山地, 地下水主要赋存在由中、新元古界、古生界、中生界层状岩系组成的风化裂隙中, 局部为断裂裂隙脉状水, 富水性相对较弱。在宁中北山矿化度为1～3g/L, 个别地段达到10～50g/L, 水化学类型为$Cl^- \cdot SO_4^{2-} \cdot HCO_3^- — Na^+$ 和 $SO_4^{2-} \cdot Cl^- — Na^+ \cdot Mg^{2+} \cdot Ca^{2+}$ 水; 罗山、六盘山地区降水相对充沛, 达到500mm, 大部分通过裂隙直接补给地下水, 因此该地段地下水矿化度小于1g/L, 水化学类型属$HCO_3^- — Ca^{2+}$、$HCO_3^- \cdot SO_4^{2-} — Ca^{2+} \cdot Mg^{2+}$ 型。

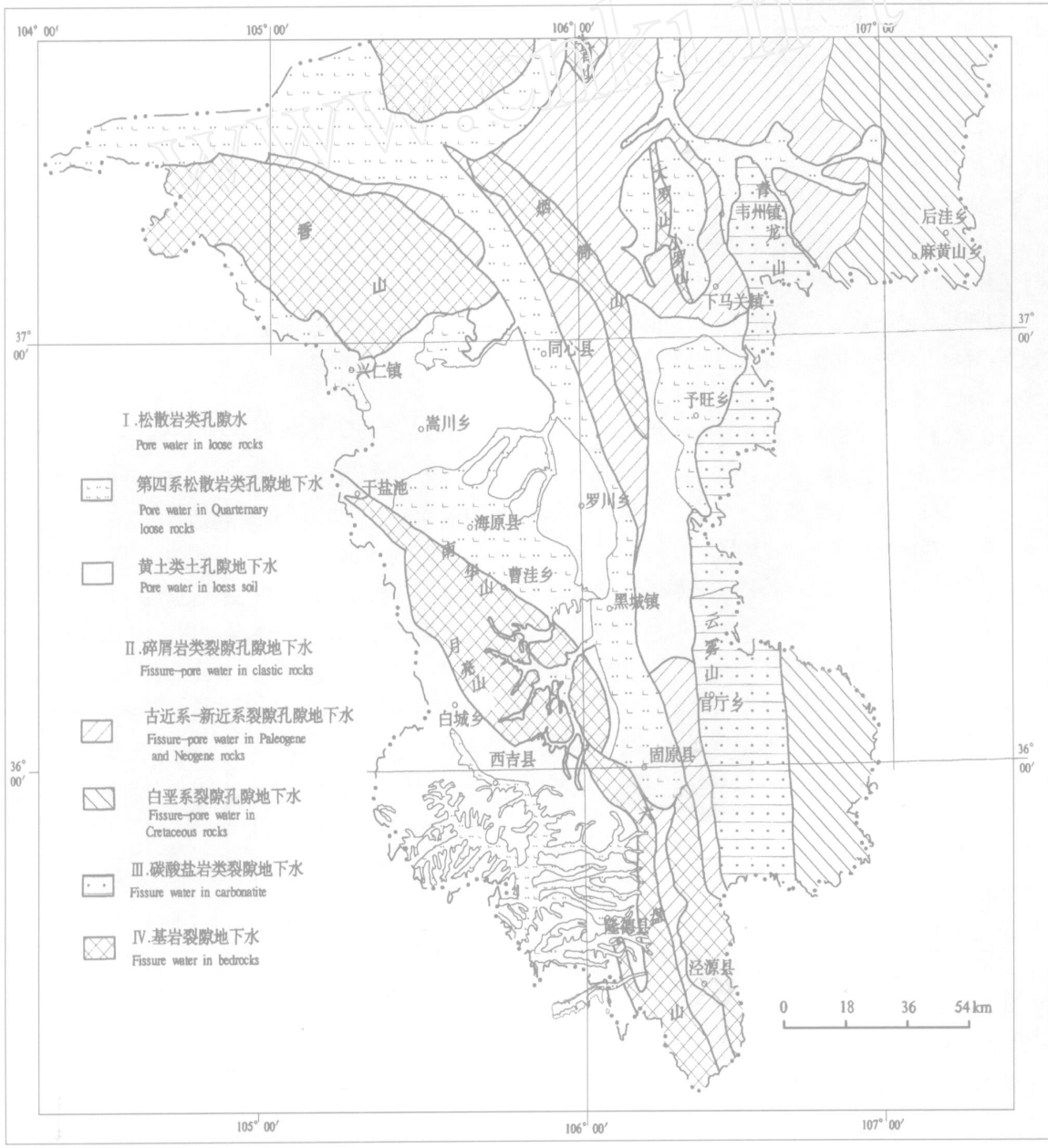


图1　宁夏南部地区主要含水岩组分布图

Fig. 1　Distribution of the main aquifers in the south of Ningxia

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1.4 碳酸盐类岩溶裂隙水

该类地下水主要分布在“南北古脊梁”地区，主要含水层为寒武系、奥陶系碳酸盐岩，含水层上部多被黄土覆盖，除青龙山、云雾山露出较大外，其他地区均为零星出露。地下水水质总的趋势是南淡北咸，云雾山—寨科的南部矿化度多小于1g/L，水化学类型多为HCO_3^-·SO_4^{2-}—Na^+、HCO_3^-·SO_4^{2-}—Na^+·Mg^{2+}水。稍沟湾以北大部分矿化度在4～6g/L之间，水化学类型为Cl^-·SO_4^{2-}—Na^+、Cl^-·SO_4^{2-}—Na^+·Mg^{2+}水。

2 影响地下水水化学特征的因素

宁夏南部地区淡水资源奇缺，水质普遍较差，造成当地水质恶劣的因素有地层、地貌、气候条件和地质构造等等，但主要是地层中可溶盐含量起决定性作用。

2.1 地层可溶盐

宁夏南部地区经历了四个主要的成盐期，即早石炭世、早白垩世、古近纪、新近纪和全新世(霍福臣等，1989)。其中古近纪早渐新世成盐作用最广泛、最强烈，对地下水的矿化最有影响。喜马拉雅运动使宁夏南部地区抬升，大面积遭到剥蚀，古近系—新近系红层裸露地表，甚至白垩系的红层也出露地表。红层中含有大量的可溶盐类，其中石膏($CaSO_4\cdot 2H_2O$)、芒硝($Na_2SO_4\cdot 10H_2O$)、菱镁矿($MgCO_3$)和岩盐为主要成分。径流或赋存于这种地层中的水，会由于这些盐类的溶解而矿化度很高。当这些高矿化度的地下水补给其他水质较好的地下水的时候，就会“污染”其他水资源。以清水河盆地为例，三营以南，第四系基底为白垩系砂岩页岩层，此岩层含盐量较少，故第四系地下水水质较好；而在三营以北，干、支流域的第四系地层基底变为古近系—新近系红层，为高含盐量地层，致使第四系地下水矿化度升高。因此，地层中的可溶盐含量从根本上决定着当地地下水的化学成分。

2.2 地质构造特征

地质构造对地下水水质的控制主要体现在其对含水介质控制作用上。构造对含水层的控制作用使宁夏南部地区形成了各种各样的蓄水构造。如果这些蓄水构造呈封闭状，如予旺盆地、滥泥河沿岸、下马关盆地和韦州盆地等等，使得地下径流呈滞缓停滞状态。水岩作用时间较长，地层中的盐分在地下水中积累，使地下水矿化度达到10g/L以上，个别甚至达到24g/L以上，如兴仁洼地。而一些开放型的蓄水构造，地下水有流出通道，水岩相互作用时间相对较短，地下水矿化度较低，这种类型的构造有海原盆地、葫芦河河谷平原、卫宁平原等，这些蓄水构造里的地下水矿化度在1g/L左右，一般不超过2g/L(张发旺等，2006)。

2.3 地貌特征

加里东旋回和喜马拉雅旋回造就了宁夏南部地区盆山相间的地貌类型，这种地貌类型对地下水的运移有重要的影响，特别是对当地水化学成分的迁移有很大影响作用。在基岩山区(如六盘山、罗山等地)和黄土丘陵区(如云雾山、固原东山等地)等地势较高的地带，由于处于地下水的补给区，长期淋滤使地层中大部分的盐分被带走，地下水的矿化度低，一般以小于1g/L或1～3g/L的HCO_3^-·SO_4^{2-}—Na^+型水或HCO_3^-·SO_4^{2-}—Na^+·Mg^{2+}型水为主。而在低洼区(如下马关盆地、韦州盆地、大水坑盆地等)等地，地下水径流滞缓，地下水排泄方式主要以蒸发作用为主，加之地层中可溶盐含量高，故水质较差，矿化度一般大于3g/L，局部达到10～24g/L，水化学类型以Cl^-·SO_4^{2-}—Na^+为主。

3 地下水化学成分的形成作用

宁夏南部地区水化学成分的形成作用主要受到溶滤沉析作用和蒸发浓缩作用的影响。

3.1 溶滤沉析作用

宁夏南部地区广泛分布着古近系—新近系或白垩系红层，局部地区大面积地裸露于地表，这些红层中含有大量的可溶盐类，其中以石膏($CaSO_4\cdot 2H_2O$)、芒硝($Na_2SO_4\cdot 10H_2O$)、菱镁矿($MgCO_3$)、岩盐等盐类最多(表1)，它们对地下水水质起着决定性的影响。当矿物发生溶解时，以分布最广的石盐和石膏为例：

$$NaCl \longrightarrow Na^+ + Cl^-$$

表1 各地层中可溶盐含盐统计表

Table 1 Statistics of the water soluble salts in different strata

地层时代		可溶盐含量(μg/g)	主要阴、阳离子
第四系	Q_p^3	南部：500～3000 北部：4000～10000	SO_4^{2-}、Cl^-、Na^+
	Q_p^2	一般小于5000，个别地段达30000	SO_4^{2-}、Cl^-、Na^+
新近系	N_2q	300～700	HCO_3^-、Ca^{2+}、Mg^{2+}
	N_1h	610～3100	SO_4^{2-}、Na^+
古近系	E_3q	1000～4500	Cl^-、SO_4^{2-}、Na^+
	E_2s	500～1100	SO_4^{2-}、Cl^-、Na^+
白垩系		含有石膏及石膏泥岩	

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$CaSO_4 \cdot 2H_2O \longrightarrow Ca^{2+} + SO_4^{2-} + H_2O$

其溶解部分全部进入地下水中, 从而水中相应的离子含量大大增加。

在水力坡度大的地方, 地下水径流条件好, 水岩相互作用强烈, 大气降水和地表水渗入补给地下水后径流速度快。在径流过程中溶解岩土中的可溶成分, 易溶盐首先被带走。经过长期的溶滤作用, 易溶盐分被大量淋失带走, 岩土中剩下的主要是难以迁移的碳酸盐类, 所以大气降水及地表水渗入后只能溶解岩土中的碳酸盐类矿物。一般来说岩石中的$CaCO_3$和$MgCO_3$只有当水中有足够的CO_2存在时, 两者才开始溶解于水中:

$CaCO_3 + H_2O + CO_2 \longrightarrow HCO_3^- + Ca^{2+}$

$MgCO_3 + H_2O + CO_2 \longrightarrow HCO_3^- + Mg^{2+}$

由于它们难溶于水, 其溶解只造成少量的Ca^{2+}、Mg^{2+}进入水中, 因此地下水中的矿化度较低, 水化学类型主要以$HCO_3^- — Ca^{2+} \cdot Mg^{2+}$水为主。

而在一些地势低洼的地方, 水力坡度较小, 是地下水的汇流中心, 地下水径流不畅甚至停滞, 易溶盐分在水中大量累积, 会沉淀析出大量盐类。因此, 在这些地区地下水矿化度较高, 水中阴离子主要是Cl^-、SO_4^{2-}, 阳离子主要是Na^+, 水化学类型以$Cl^- \cdot SO_4^{2-} — Na^+$或者$Cl^- \cdot SO_4^{2-} — Na^+ \cdot Mg^{2+}$水为主, 这种情况下溶滤作用起次要作用, 沉析占主导作用。

3.2　蒸发浓缩作用

宁夏南部地区属于干旱半干旱气候, 盆地或地势低洼的地区为地下水的排泄区和汇集区, 地下水埋深小, 径流滞缓, 非常有利于蒸发浓缩作用的发生。

未经蒸发浓缩前, 地下水为低矿化水, 阴离子以重碳酸根为主, 居第二位的是SO_4^{2-}, Cl^-的含量很小。阳离子以Ca^{2+}和Mg^{2+}为主。当地下水径流到平原或盆地的低洼处, 同时也将岩土中经淋滤作用进入地下水中的溶解物质带到了这些区域, 并且这些区域地下水位埋藏浅, 蒸发为地下水的主要排泄方式。由于蒸发作用只排走水分, 盐分仍保留在余下的地下水中, 地下水逐渐浓缩, 矿化度不断增大。随着蒸发浓缩, 溶解度较小的钙, 镁的重碳酸盐部分等盐类在水中相继达到饱和而沉淀析出, 易溶盐类的SO_4^{2-}及Na^+逐渐成为主要成分。继续浓缩, 水中硫酸盐达到饱和并开始析出, 便将形成以Cl^-、Na^+为主的高矿化水(汪珊等, 2004)。

3.3　水岩—混合作用

水岩—混合作用是指水岩相互作用环境中两种不同化学组分的地下水混合时发生的化学反应。在这种情况下, 不但水中化学组分的相互作用, 而且围岩中的可溶成分也会对地下水的水化学组成产生重要影响。

宁夏南部地区南北古脊梁深层存在着寒武系—奥陶系灰岩、白云岩地层的隆起, 其中赋存着比较丰富的岩溶裂隙水, 但其水质比较差, 为$SO_4^{2-} - Ca^{2+}$型水, 矿化度在4～5g/L 左右。对其补给机制分析认为, 在灰岩和白云岩地层中存在着石膏层, 来自上游灰岩地层的较高矿化度的$Cl^- — Na^+$型地下水与来自浅层第四系的低矿化度$HCO_3^- — Ca^{2+}$型地下水混合时, 又会有石膏的溶解, 伴随着碳酸钙的沉淀, 从而使硫酸根离子的浓度大大增加, 形成$SO_4^{2-} - Mg^{2+} \cdot Ca^{2+}$型或$SO_4^{2-} - Ca^{2+} \cdot Mg^{2+}$型的地下水, 反应式如下:

$CaSO_4 \cdot 2H_2O\ (s) + HCO_3^- + \longrightarrow CaCO_3\ (s) + SO_4^{2-}$

当深层地下水补给浅部含水层时, 两种地下水的混合可能造成某些溶解度较低组分的沉淀。例如月亮山前的地下水一方面接受第四系砂砾石层地下水补给, 水中离子以HCO_3^-、Ca^{2+}为主; 另一方面接受古近系—新近系裂隙孔隙水的侧向补给, 水中主要含有SO_4^{2-}、Na^+; 两种水混合时:

$Ca(HCO_3)_2 + Na_2SO_4 \longrightarrow HCO_3^- + Na^+ + CaSO_4 \downarrow$

石膏沉淀析出, 便形成以HCO_3^-及Na^+为主的碱性地下水。这种现象在南西华山、罗山和香山等山前都有类似的出现。

4　结论

(1) 宁夏南部地区地下水类型主要包括四种: 松散岩类孔隙水、碎屑岩类裂隙—孔隙水、基岩裂隙水和碳酸盐类岩溶裂隙水; 各类地下水水质普遍较差, 只是第四系松散岩类孔隙水水质相对好。

(2) 地层岩性、构造特征、地貌等共同导致了水质变化的结果, 地层岩性直接从根本上决定着当地地下水质的好坏, 地质构造特征是地下水质变化的重要控制因素。

(3) 地下水化学成分的形成作用主要是溶滤作用、蒸发浓缩作用和特殊地段的混合作用。

参 考 文 献 / References

霍福臣. 1989. 宁夏地质概论. 北京: 科学出版社.

汪珊, 孙继朝, 李政红. 2004. 西北地区地下水质量评价. 水文地质工

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

程地质 (4): 96～100.
张发旺, 杨会峰, 陈立, 等. 2006. 宁南地区构造对含水介质控制作用研究. 地球学报 27(Supp.): 37～42.

Research on the Forming Mechanism of the Ground Water Quality in the Southern Ningxia Autonoumous Region

ZHANG Fawang[1)], CHEN Li[1)], YU Qiusheng[2)], XUE Zhongqi[2)]

1) *The institute of hydrogeology and environmental geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang*, 050061

2) *Institute of Geo-engineering Investigation Ningxia, Yinchuan*, 750021

Abstract

The southern Ningxia Autonomous Region is one of the most arid areas in China, the groundwater in this area can be classified into four types: ① pore water in loose rocks, ② fissure—pore water in clastic rocks, ③ fissure water in bedrocks and ④ karstic water in carbonate rocks. Being influenced by the special climate, physiognomy, lithology and geological structure, the quality of all these types of groundwater are considerably bad. It is the fundamentally reason for the bad groundwater quality that great amounts of gypsum, mirabilite and other minerals are dissolved into the groundwater; those are the other two reason that the groundwater flows sluggish induced by the obturated water reserving structure, and the salt concentration is high in shallow groundwater resulted from the evaporation.

Key words: groundwater quality; water—rock reaction; southern Ningxia Autonomous Region

(上接第 792 页)

⑧ 图和表: 为了使论文清晰明了, 应多用图和表。注意, 首次发表的数据必须列表给出, 不得以图代替。**凡涉及国界的图件必须绘制在地图出版社公开出版的最新地理底图上。设计图的宽度时应优先选择以下 3 个尺寸**: 80mm (**单栏**)、170mm (**通栏**)、240mm (**卧排**), **最大尺寸为** 170mm ×235mm (**含图名和说明**)。图件应清绘, 激光纸样也可以。坐标图纵轴的标注置于纵轴之左, 平行纵轴, 字头朝左、居中放; 若右侧是另一刻度纵轴, 则标注放右纵轴之右, 字头仍朝左, 居中。横轴标注放横轴之下, 居中。顶线为另一刻度横轴时, 标注放顶线之上, 居中, 字头向上。图、表应有名称以及相应的英文, 图例注释应有相应英文。

⑨ 谢语: 组织创作、为创作提供帮助或咨询的人和单位可在谢语中表达。

10 参考文献: 本刊采用著者—年制, 文中用圆括号列出第一作者和年代, 例: "(李四光, 1945)"、"(黄汲清, 1978, 1984; 黄汲清等, 1983; Смирнов 1986; 李春昱, 1959; 李春昱等, 1980; Smith et al., 1990, 1992, 1996; Иванов и др, 1999)"(同时列出多篇文献时, 次序按年代先后)。

鉴于中文在国际上的影响越来越大, 且作者、编者的工作量太大, 《地质学报》(中文版) 和《地质论评》自 2006 年起取消非西文参考文献的英文翻译。所有文献均放在"参考文献/References"标题之下。文种按中文、日文、西文、俄文、其他文排列。中文按第一作者姓名汉语拼音字母顺序排列, 第一作者相同的按年代先后排列。其他文均按各自第一作者姓名字母顺序排列。

按著作权法和国际惯例, 所有作者均必须列全, 请列出全部作者。但专著可按原书封面样式给出, 论文集中的论文写"见: XXX 主编"项时, 指明主编一人即可("见: XXX 等主编")。

每一条文献的列出格式请参照我刊 2001 年以来的文章。

11 注释: 引用非公开出版物时可用脚注标出, 也可在文后单列注释一栏, 格式与参考文献相同。

12 英文摘要: 在《地质学报》中文版和《地质论评》上发表的论文必须提交英文摘要, 包括题名、作者、作者单位、内容提要和关键词。作者和作者单位均应为全名, 内容提要与相应中文提要一致, 最好更为详细。

13 作者简介: 主要介绍作者的学术经历, 自 1998 年起增加了电话、电子信箱、传真等, 以方便读者与作者直接联系, 请尽量提供。家庭电话和手机可提供给编辑部, 以便编审过程中联系。

14 图版: 本刊图版集中用铜版纸印刷, 放于书末, 图版尺寸为 170mm ×240mm (包括一行图版说明: XXX 等: 文章题目 图版 Ⅰ), 图版的分幅照片应用阿拉伯数码编号。每一图幅的说明集中列于论文的参考文献之后, 英文摘要之前; 也可直接放在图版的底部。一篇文章的图版一般不多于两个。

《地质论评》、《地质学报》编辑部

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net