

关中盆地浅层地下水水文地球化学分布规律研究

孙一博, 王文科, 段磊, 张春潮, 李慧, 张倩

(长安大学 环境科学与工程学院, 西安 710054)

摘要: 收集了关中盆地 162 个浅层地下水水化学分析数据, 采用描述性分析、相关性分析和主成分分析等数理统计方法, 对水化学成分分布特征与形成作用进行研究。结果表明: 研究区浅层地下水中阴离子以 HCO_3^- 为主, 渭河以南地下水中阳离子以 Ca^{2+} 为主, 渭河以北以 Na^+ 为主, 在地下水中, HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量比较稳定, Cl^- 、 SO_4^{2-} 含量变化较大, 属于随环境变化的敏感因子。渭河南北地区地下水水化学场的形成作用有所差异, 南部地区以风化-溶滤作用为主, 北部地区以矿物溶解和蒸发浓缩作用为主。该成果可为区域水资源的可持续利用及环境管理提供科学依据。

关键词: 关中盆地; 浅层地下水; 水文地球化学; 数理统计分析; 分布规律

中图分类号: P641.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)03-0142-05

Hydrochemical Distribution Characteristics of Shallow Groundwater in Guanzhong Basin

SUN Yi bo, WANG Wen ke, DUAN Lei, ZHANG Chun chao, LI Hui, ZHANG Qian

(School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The descriptive analysis, correlation analysis, and principal component analysis were used to investigate the distribution characteristics and formation function of groundwater chemical components in the Guanzhong Basin based on 162 groundwater samples. The results showed that the dominant cation is HCO_3^- of the shallow groundwater in the study area, and the dominant anion is Ca^{2+} in the south of Wei River, and Na^+ in the north of Wei River. The concentrations of HCO_3^- , Ca^{2+} , and Mg^{2+} were stable while the concentrations of Cl^- and SO_4^{2-} varied significantly and were sensitive to the environmental factors. The formation functions of hydrochemical field were different between the north and south of Wei River with the weathering and leaching functions in the south of Wei River and the mineral dissolution and evaporation concentration functions in the north of Wei River. The results in this study can provide scientific references for the sustainable utilization of water resources and environmental management in this area.

Key words: Guanzhong Basin; shallow groundwater; hydrogeochemistry; mathematical statistics method; distribution laws

地下水化学成分的时空分布、演变规律、形成作用和控制因素的研究, 是水文地球化学的基本研究任务^[1]。通常采用的研究方法有野外调查取样分析、数理统计、水文地球化学模拟等三大类^[2-10]。而对于大量数据的区域性规律总结, 数理统计方法具有独特的优势。本文针对关中盆地区域, 遵循突出重点区域原则, 采取水样 162 个, 运用描述性分析、相关性分析、主成分分析等数理统计方法, 对浅层地下水水化学成分特征及其形成作用进行了研究。

1 研究区概况

关中盆地位于陕西省中部, 西起宝鸡, 东至潼关, 南依秦

岭, 北靠北山, 是一个三面环山、东西敞开的盆地。盆地东西长约 360 km, 南北宽窄不等, 面积约 $1.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。地形自山区向盆地中心呈阶梯状降落, 西部海拔 700~800 m, 东部最低为 325 m。降水量由南向北递减, 年降雨量 530~1 000 mm, 蒸发量 1 000~1 200 mm。

关中盆地为新生代断陷盆地, 南侧以秦岭褶皱带为界, 北侧以北山为界, 东端受黄河排泄, 使地下水与汾河流域切断联系, 成为一个独立的水文地质单元^[11]。盆地内潜水主要受控于 3 个含水岩组: 冲积砂、砂砾卵石层孔隙含水岩组; 洪积砂、砂卵石、亚黏土孔隙含水岩组; 风积黄土孔隙裂隙含水岩组。由于地下水赋存、补给、径流、排泄条件的差异, 关

收稿日期: 2012-10-18 修回日期: 2013-04-22 网络出版时间: 2013-05-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130518.1744.023.html>

基金项目: 中国地质调查局地质大调查计划项目“地方病严重区地下水勘查与供水安全示范——渭河流域典型地方病区生态地球化学环境编图与饮水安全研究”(1212010634700); 国家自然科学基金资助项目(41102150)

作者简介: 孙一博(1983-), 女, 河南商丘人, 博士研究生, 主要从事水资源方面的研究。E-mail: sunyb67@163.com

通讯作者: 王文科(1963-), 男, 陕西岐山人, 教授, 博士, 主要从事水资源方面的研究。E-mail: 7649335381@qq.com

中盆地可划分为三个天然的水文地质分区:渭河以南山前洪积扇与黄土台塬水文地质区、渭河冲积平原水文地质区和渭河以北山前洪积扇与黄土台塬水文地质区^[11-12]。

2 样品采集与测试

2011年10月3日至11月27日在研究区进行了野外取样,共采取162组浅层地下水水样,取样位置见图1。对全部水样进行现场测试水温、pH和电导率,并在中国建筑材料工业地质勘查中心陕西测试研究所进行水质全分析。其中:Na⁺、K⁺采用火焰原子吸收分光光度法测试;Ca²⁺、Mg²⁺采用EDTA滴定法测试;SO₄²⁻、Cl⁻采用离子色谱法测定;HCO₃⁻、CO₃²⁻采用酸碱滴定法测定。

3 研究方法与分析结果

面对大量的水化学分析数据,数理统计方法相对其他方法具有更为快捷地认识地下水水化学成分特征及演化规律的优势。因此本文选择数理统计方法中的描述性分析、相关

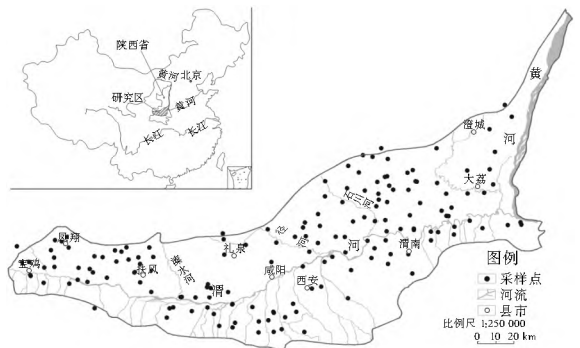


图1 关中盆地地下水取样位置分布

性分析、主成分分析,利用SPSS软件,对地下水中的常量离子进行统计分析。

3.1 描述性分析

对研究区162件水样的水化学成分进行统计特征值分析(表1)。

表1 关中盆地地下水水化学成分统计特征值

Table 1 The statistical characteristic values of hydrochemical components of the shallow groundwater in the Guanzhong Basin

项目	渭河以南				变异系数(%)	渭河以北				变异系数(%)
	特征值/(mg·L ⁻¹)					特征值/(mg·L ⁻¹)				
	最小值	最大值	平均值	标准差		最小值	最大值	平均值	标准差	
Na ⁺	11.69	246.78	71.89	64.24	0.894	15.7	2 194.99	291.89	397.23	1.361
Ca ²⁺	22.4	352.35	115.5	71.17	0.616	5.46	385.37	70.05	51.4	0.734
Mg ²⁺	2.29	108.36	37.25	22.69	0.609	13.45	533.66	78.57	78.05	0.993
Cl ⁻	9.28	502.34	72.48	84.89	1.171	7.84	2 965.35	237.06	405.49	1.71
SO ₄ ²⁻	4.76	1 040	132.24	162.89	1.232	3.42	3 631	347.78	553.61	1.592
HCO ₃ ⁻	171.67	841.95	431.57	136.28	0.316	202.32	1 140.36	548.83	197.92	0.361
TDS	208	1 784	658.45	351.08	0.533	278	9 652	1 292.81	1 411.12	1.092

分析结果表明,(1)渭河以南阳离子以Ca²⁺为主,平均值由大到小排序为Ca²⁺ > Na⁺ > Mg²⁺,渭河以北阳离子以Na⁺为主,平均值由大到小排序为Na⁺ > Mg²⁺ > Ca²⁺,整个研究区内阴离子都是以HCO₃⁻为主,平均值由大到小的排序为HCO₃⁻ > SO₄²⁻ > Cl⁻; (2)渭河以北水化学参数的变异系数都较渭河以南大,表明渭河以北地下水的水化学性质在空间上变异性大。由于渭河以南地区地形坡度大,水循环条件好,水交替积极,故水化学成分比较稳定,而渭河以北地区,地势相对比较低平,地下水径流缓慢,水循环条件差,水化学成分比较复杂。因此,渭河以北受地形地貌、含水层介质和人类活动等因素的影响较大,渭河以南地下水则受影响较少; (3)渭河以北和渭河以南地下水中的TDS平均值分别为1 292.81 mg/L和658.45 mg/L,渭河以北是渭河以南的1.96倍,渭河以北TDS绝对含量较高; (4)地下水中HCO₃⁻、Ca²⁺、Mg²⁺的变异系数相对较小,说明它们在地下水中的含量相对比较稳定。(5)地下水中Cl⁻、SO₄²⁻的变异系数比较大,说明它们在地下水中含量变化较大,是随着气候和人类活动变化的敏感性因子,是决定地下水盐化的主要变量。

3.2 相关性分析

相关分析是研究随机变量之间相关关系的一种统计方法,用于判断变量之间是否存在依存关系,并探讨具有依存

关系变量的相关方向以及相关程度,揭示各个变量相似相异度及来源的一致性、差异性。当相关系数r > 0时,呈正相关;r < 0时,呈负相关;当|r| = 1时,称为完全相关;当0.7 < |r| < 1时,称为高度线性相关或强线性相关;当0.4 < |r| < 0.7时,称为显著线性相关;0 < |r| < 0.4时,称为低度线性相关;当r = 0时,完全不相关。各个变量相关性显著,说明具有相似的形成机制或相同的来源方式^[13]。

本文利用SPSS统计软件,计算关中盆地浅层地下水的Person相关系数,相关系数均通过显著性双尾检验,结果见表2。

从表2可以看出,渭河以南地区Mg²⁺和HCO₃⁻有很好的相关性,Na⁺、Ca²⁺和Cl⁻、SO₄²⁻,Mg²⁺和Cl⁻有显著的相关性;渭河以北地区Na⁺、Mg²⁺和Cl⁻、SO₄²⁻具有很好的相关性,Ca²⁺和HCO₃⁻呈负相关关系。整个研究区地下水总溶解性固体TDS与Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻之间相关性较高,而在渭河以南TDS与Ca²⁺,渭河以北TDS与Na⁺高度线性相关。表明在渭河以南地区主要以风化-溶滤的物理化学作用为主,渭河以北地区主要是以蒸发浓缩作用为主。

3.3 主成分分析

主成分分析是将大量的彼此之间可能存在相关关系的变量,转换成比较少的彼此之间不相关的综合指标的多元统计方法^[10]。基本原理为利用降维的思想,将多个变量转化

表 2 关中盆地地下水水化学成分相关系数矩阵

Table 2 The correlation coefficient matrix of hydrochemical components of the shallow groundwater in the Guanzhong Basin

项目	渭河以南							渭河以北						
	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TDS	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TDS
Na ⁺	1							1						
Ca ²⁺	0.175	1						0.121	1					
Mg ²⁺	0.382	0.529	1					0.822	0.394	1				
Cl ⁻	0.502	0.695	0.573	1				0.935	0.37	0.924	1			
SO ₄ ²⁻	0.542	0.65	0.446	0.361	1			0.961	0.309	0.868	0.955	1		
HCO ₃ ⁻	0.471	0.299	0.74	0.328	0.198	1		0.586	-0.103	0.551	0.444	0.482	1	
TDS	0.674	0.813	0.735	0.75	0.823	0.559	1	0.975	0.303	0.908	0.979	0.986	0.555	1

为少数几个综合变量(主成分),其中每个主成分都是原始变量的线性组合,各主成分之间互不相关,从而这些主成分能够反映变量的绝大部分信息,且所含的信息互不重叠^[10]。

应用到水化学成分特征及形成机理的研究时,可在原始大量水化学成分数据的基础上,将多个变量综合转变为少数几个因子,然后再对这几个因子变量进行解释,赋予它们真正的

水文地质意义。本文通过对研究区 162 个水化学样本进行主成分分析,根据因子贡献率的百分比确定主因子个数(表 3)。以便可以从本质上抓住影响地下水水化学成分形成特征及机理的主要作用与因素。

本文利用统计软件 SPSS 计算关中盆地浅层地下水的因子贡献率、旋转后的因子载荷值,分析结果见表 3- 表 5。

表 3 关中盆地渭河以南地下水水化学成分因子贡献率

Table 3 The factor contributions of hydrochemical components of the groundwater in the south of Wei River in the Guanzhong Basin

成份	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	合计	方差(%)	累计(%)	合计	方差(%)	累计(%)	合计	方差(%)	累计(%)
1	3.315	55.258	55.258	3.315	55.258	55.258	2.246	37.431	37.431
2	1.036	17.261	72.519	1.036	17.261	72.519	2.105	35.088	72.519
3	0.829	13.819	86.338	0.829	13.819	86.338	1.373	22.878	86.338
4	0.585	9.751	96.09						
5	0.225	3.756	99.846						
6	0.009	0.154	100						

表 4 关中盆地渭河以北地下水水化学成分因子贡献率

Table 4 The factor contributions of hydrochemical components of the groundwater in the north of Wei River in the Guanzhong Basin

成份	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	合计	方差(%)	累计(%)	合计	方差(%)	累计(%)	合计	方差(%)	累计(%)
1	4.169	69.479	69.479	4.169	69.479	69.479	4.099	68.313	68.313
2	1.14	19.003	88.482	1.14	19.003	88.482	1.21	20.169	88.482
3	0.51	8.494	96.976						
4	0.146	2.432	99.408						
5	0.032	0.527	99.935						
6	0.004	0.065	100						

表 5 关中盆地地下水化学成分旋转后的因子载荷矩阵

Table 5 The factor loading matrix of hydrochemical components after rotation of the shallow groundwater in the Guanzhong Basin

分析指标	渭河以南			渭河以北	
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₁	F ₂
Ca ²⁺	0.956	0.169	0.052	0.967	-0.029
SO ₄ ²⁻	0.635	-0.032	0.648	0.951	0.179
Cl ⁻	0.707	0.355	0.231	0.945	0.256
HCO ₃ ⁻	0.071	0.932	0.201	0.92	0.23
Mg ²⁺	0.469	0.791	0.141	0.692	-0.473
Na ⁺	0.08	0.33	0.914	0.205	0.914

在进行主成分分析的过程中,根据特征值累积方差贡献率,在渭河以南和以北地区选取的主因子个数为 3 和 2,累积

方差贡献率分别为 86.338% 和 88.482%。

由表 3- 表 5 可知,渭河以南第一主因子 F₁ 的方差贡献率为 55.258%, 主要是由 Ca²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 和 Mg²⁺ 组成,反映了溶滤作用和镁盐溶解对地下水化学成分的影响。第二主因子 F₂ 的方差贡献率为 17.261%, 主要是由 HCO₃⁻ 和 Mg²⁺ 组成,反映了碳酸盐和硅酸盐溶解对地下水成分的影响。第三主因子 F₃ 的方差贡献率为 13.819%, 主要是由 Na⁺ 和 SO₄²⁻ 组成,反映了蒸发盐溶滤作用对地下水化学成分的影响。

渭河以北第一主因子 F₁ 的方差贡献率为 69.479%, 主要是由 Ca²⁺、SO₄²⁻、Cl⁻、HCO₃⁻ 组成,反映了碳酸盐、硅酸盐和蒸发盐溶解作用对地下水化学成分的影响。第二主因子 F₂ 的方差贡献率为 19.003%, 主要是 Na⁺ 和 Cl⁻ 组成,反

映了蒸发浓缩作用对地下水化学成分的影响。

3.4 地下水化学特征的水文地球化学机理

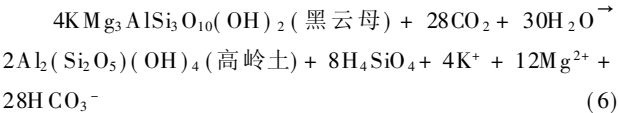
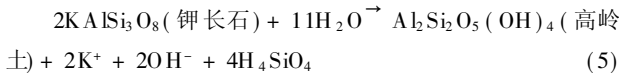
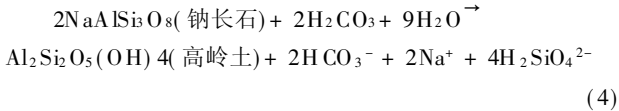
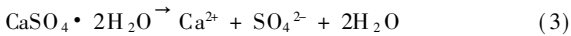
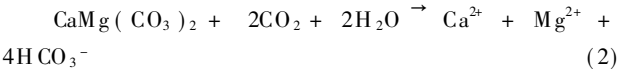
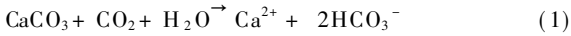
由描述性分析可知,地下水中的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 的含量受环境影响比较大,以蒸发浓缩作用影响为主,同时工农业生产、生活污水的排放也会引起 Cl^- 、 SO_4^{2-} 浓度升高;在渭河以北地区,地下水化学类型除受蒸发浓缩和人类活动影响外,渭北煤田水的补给,也会造成地下水中硫酸盐浓度的增加^[4]。

由相关性分析、主成分分析可知,渭河以南地区水文地球化学形成作用主要是以矿物溶解为主,渭河以北地区主要是以矿物溶解和蒸发作用为主。在渭河以南靠近秦岭山区,地下水还接受南部山区孔隙水的补给,加上本区含水层以砾岩为主,其中大量的方解石、白云石和硅酸盐等矿物的风化或水解使水中 Ca^{2+} 含量不断累积增加。渭河以北山前洪积扇前缘及塬区,含水层以砂岩为主,黏土含量比较高,有利于地下水中 Ca^{2+} 与黏土中的 Na^+ 发生阳离子交换,致使水中的 Na^+ 富集。

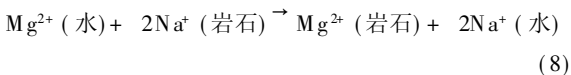
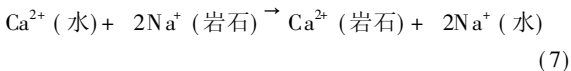
地下水在入渗、径流过程中,从补给区至排泄区,水文地球化学作用主要是以溶滤为主,与含水层中的碳酸盐、硅酸盐和硫酸盐等相互作用,发生溶解^[15]。

其主要作用机理可以用如下化学反应来解释。

(1) 水解。



(2) 阳离子交换。



4 结论

(1) 关中盆地浅层地下水中阴离子是以 HCO_3^- 为主,阳离子渭河以南以 Ca^{2+} 为主,渭河以北以 Na^+ 为主。 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 在地下水中的含量相对比较稳定。

(2) 因浅层地下水埋深较浅,水循环路径比较短,水化学特性受环境因素影响较高。其中, Cl^- 、 SO_4^{2-} 含量变化较大,是随环境因素变化的敏感性因子,是决定地下水盐化的主要变量。

(3) 渭河以南地区水文地球化学作用主要以风化-溶滤作用为主,渭河以北地区主要是以矿物溶解和蒸发浓缩作用为主。

参考文献(References):

- [1] 钱会,马致远.水文地球化学[M].北京:地质出版社,2005:1-2. (QIAN Hui, MA Zhiyuan. Hydrogeochemical[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005: 1-2. (in Chinese))
- [2] 李向全,侯新伟,周志超,等.太原盆地地下水系统水化学特征及形成演化机制[J].现代地质,2011,25(1):1-8. (LI Xiangquan, HOU Xinwei, ZHOU Zhichao, et al. Hydrogeochemical Characteristics and Formation Evolutional Mechanism of the Groundwater System in the Taiyuan Basin[J]. Geoscience, 2011, 25(1): 1-8. (in Chinese))
- [3] 邵艳莹,郑德凤,李莹.基于熵权-模糊物元的地下水环境健康评价模型研究[J].水电能源科学,2011,29(12):32-34. (SHAO Yanying, ZHENG Defeng, LI Ying. Study on Groundwater Environmental Health Assessment Model Based on Entropy Weight and Fuzzy Matter element[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(12): 32-34. (in Chinese))
- [4] Sung Kyr-Youl, Yun Seong-Taek, et al. Reaction path modeling of hydrogeochemical evolution of groundwater in granitic bed rocks, South Korea[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2012, 118: 90-97.
- [5] Oyebo, Stephanie Abonje, et al. Hydrogeochemical characteristics of some Cameroon bottled waters, investigated by multivariate statistical analyses[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2012, 112: 118-130.
- [6] 黄平华,陈建生,宁超,等.焦作矿区地下水化学特征及其地球化学模拟[J].现代地质,2010,24(2):369-376. (HUANG Pinghua, CHEN Jiansheng, NING Chao, et al. Hydrochemical Characteristics and Hydrogeochemical Modeling of Groundwater in the Jiaozuo Mining District[J]. Geoscience, 2010, 24(2): 369-376. (in Chinese))
- [7] Umar Rashid, Alam Fakhre. Assessment of hydrogeochemical characteristics of groundwater in parts of Hindon Yamuna interfluvial region, Baghpat District, Western Uttar Pradesh[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, 184: 2321-2336.
- [8] Odoh Bernard I, Utom Ahamefula U, et al. Hydrogeochemical properties of groundwater in parts of Abakaliki City, Southeastern Nigeria[J]. Environmental Geosciences, 2012, 19: 53-61.
- [9] 孙斌.多元统计方法在鄂尔多斯白垩系盆地都思图河地下水系统水化学空间分布规律研究中的应用[D].长春:吉林大学,2006:2-4,36-61. (SU Bin. Application of Multivariate Statistics Method into Research on Spatial Distribution Law of Hydrochemistry in Dustiue Groundwater System in Ordos Cretaceous Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2006: 2-4, 36-61. (in Chinese))
- [10] 张华,周训,沈晔,等.广西北海市地下水系统水化学特征的分析[J].现代地质,2007,21(4):613-618. (ZHANG Hua, ZHOU Xun, SHEN Ye, et al. Analyses of Hydrochemical Characteristics of the Groundwater System in Beihai, Guangxi[J]. Geoscience, 2007, 21(4): 613-618. (in Chinese))
- [11] 王文科,王雁林,段磊,等.关中盆地地下水环境演化与可再生维持途径[M].郑州:黄河水利出版社,2006:1-3. (WANG Wenke, WANG Yanlin, DUAN Lei, et al. Environmental E-

- volution and Renewable Way of Groundwater in Guanzhong Basin [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2006: 1-3. (in Chinese)
- [12] 田春声, 李云峰, 郑书彦, 等. 关中盆地环境水文地质问题 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1995. (TIAN Chunsheng, LI Yurfeng, ZHENG Shuyan, et al. Environmental Hydrological Geological Problems [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1995. (in Chinese)
- [13] 陈胜可. SPSS 统计分析从入门到精通 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 31-39, 63-72. (CHEN Shengke. SPSS Statistical Analysis Savvy [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010: 31-39, 63-72. (in Chinese)
- [14] 田春声, 王丽艳. 关中盆地潜水化学特征及其变化趋势 [J]. 西安地质学院学报, 1993, 15: 10-14. (TIAN Chunsheng, WANG Liyan. The Phreatic Chemical Characteristics and Its Developing Tendency in Guanzhong Basin [J]. Journal of Chang'an University Earth Science Edition, 1993, 15: 10-14. (in Chinese)
- [15] 段磊, 王文科, 曹玉清, 等. 天山北麓中段地下水水化学特征及其形成作用 [J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(9): 29-34. (DUAN Lei, WANG Wenke, CAO Yuqing, et al. Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanics Groundwater in the Middle of Northern Slope of Tianshan Mountains [J]. 2007, 21(9): 29-34. (in Chinese)

(上接第 141 页)

- [4] 熊发挥, 肖渊甫, 张林. 大渡河中游泸定—石棉阶段地特征及河谷发育史探讨 [J]. 四川地质学报, 2009(4): 379-383. (XIONG Fahui, XIAO Yuanfu, ZHANG Lin. An Approach to Developmental History of the Luding Shimian Sector of the Dadu River Valley [J]. ACTA Geologica Sichuan, 2009(4): 379-383. (in Chinese)
- [5] 王运生, 李文纲, 黄润太, 等. 大渡河谷底卸荷松弛现象及其形成机制 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2007(4): 379-383. (WANG Yunsheng, LI Wengang, HUANG Runtai, et al. The Unloaded and Relaxed Phenomena in the Valley Bottom of the Daduhe River and Its Genetic Mechanism [J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007(4): 379-383. (in Chinese)
- [6] Sarma S K. Stability analysis of embankment sand slopes [J]. Geotechnique, 1979, 105(12): 1511-1524.
- [7] 王瑞江, 吴树仁, 胡道功, 等. 滑坡稳定性三维数值模拟分析 [J]. 长春科技大学学报, 1999(3): 267-271, 27. (WANG Ruijiang, WU Shuren, HU Daogong, et al. Analysis on Landslide Stability by Using Three Dimensional Numerical Simulation [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 1999(3): 267-271, 27. (in Chinese)
- [8] Jaehong K, Sangseom J, Seongwan P, et al. Influence of Rainfall induced wetting on the stability of slopes in weathered soils [J]. Engineering Geology, 2004, 75: 251-262.
- [9] 张利洁, 黄正加, 雷菁. FLAG-3D 在边坡岩体稳定性分析中的应用 [J]. 岩土力学, 2005(S2): 61-64. (ZHANG Lijie, HUANG Zhengjia, LEI Jing. Application of FLAG-3D to Stability Analysis of Slope Rock Mass [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005(S2): 61-64. (in Chinese)
- [10] 孙书勤, 黄润秋, 丁秀美. 天台乡滑坡特征及稳定性的 FLAG-3D 分析 [J]. 水土保持研究, 2006(5): 30-32. (SUN Shuqin, HUANG Runqiu, DING Xiurui. Tiantai Landslide and Its Stability Analysis with FLAC(3D) [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006(5): 30-32. (in Chinese)
- [11] 张雪东, 陈剑平, 黄润秋, 等. 呷爬滑坡稳定性的 FLAG-3D 数值模拟分析 [J]. 岩土力学, 2003(S1): 113-116. (ZHANG Xuedong, CHEN Jianping, HUANG Runqiu, et al. FLAG-3D Numerical Simulation Analysis of Stability of Gapa Landslide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003(S1): 113-116. (in Chinese)