

文章编号: 1000-7598 (2009) 10-3053-05

云南东川蒋家沟泥石流形成内因初探

陈中学, 汪 稔, 胡明鉴, 魏厚振, 王新志

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 泥石流形成的因素众多, 不仅与地形地貌、降雨特征、地震、人类活动等外部因素有关, 还与泥石流岩土体自身的黏土矿物成分、颗粒级配、化学成分、土体分散性、地下水环境等内部因素密切相关。在室内对蒋家沟泥石流源区土体进行黏土矿物分析、颗粒分析、化学成分定量分析、分散度和 ESP 值测试、地下水分析, 初步探讨了蒋家沟泥石流形成的内在原因, 得到: 蒋家沟泥流体的黏土矿物成分以伊利石为主, 占 30%, 其化学成分也与伊利石接近; ESP 值、分散度平均值分别达到 24.6%、59.1%, 属于高分散性土, 且土壤贫瘠; 地下水矿化度高, 硬度大, 破坏了岩土体自身的结构和稳定性, 形成大量松散物质, 为泥石流的形成提供丰富的物源。

关 键 词: 泥石流; 黏土矿物; 化学成分; ESP 值; 分散度

中图分类号: P 642

文献标识码: A

Study of internal factors for debris flow occurrence in Jianjia Ravine, Dongchun of Yunnan

CHEN Zhong-xue, WANG Ren, HU Ming-jian, WEI Hou-zhen, WANG Xin-zhi

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Debris flow is caused by many factors; it is not only related to external factors such as topographical features, characteristics of rainfall, earthquake and human activity, but also to internal factors; for example, clay minerals, grain size distribution, chemical composition, soil dispersion degree and groundwater. Indoor experiments are carried out including clay minerals analysis, grain size distribution analysis, chemical composition quantitative analysis, dispersion degree and exchangeable sodium percentage (ESP) test, ground water analysis. As a result, it is found that the Illite is the main clay mineral in the soil mass of Jianjia Ravine (occupied 30 percent of the soil mass); the chemical composition of soil mass in Jianjia Ravine is similar to Illite, it's average value of ESP and dispersion degree are 24.6% and 59.1%, respectively; it is high dispersive soil and barren; the structure and stability of rock and soil mass in Jianjia Ravine is destroyed by the high salinity and high hardness groundwater; a large number of loose material is produced and a wealth of source material for debris flow is provided.

Key words: debris flow; clay mineral; chemical composition; ESP; dispersion degree

1 引 言

泥石流形成原因非常复杂, 影响因素众多, 其形成必须同时具备 3 个基本条件: 地形条件、地质条件和气象水文条件。除上述 3 个基本条件外, 土壤、植被和人类活动等对泥石流的形成也有一定的影响。将泥石流形成的众多因素分为外因和内因, 则泥石流的形成既与诸如地形地貌、降雨特征、地震、人类活动等外部因素有关外, 也与泥石流体自身的黏土矿物成分、颗粒级配、化学成分、土体分

散性、地下水环境等内部因素关系密切。国内外学者们对泥石流形成的外因开展了大量的研究工作^[1-5], 其中对于降雨和滑坡引起泥石流的研究较多, 但对泥石流形成的内因研究相对较少。

云南东川蒋家沟(图 1)是我国著名的泥石流沟, 暴发频繁, 规模巨大, 被誉为“泥石流的天然博物馆”, 因此, 蒋家沟的泥石流土的黏土矿物成分、化学成分、颗粒级配、分散性、地下水环境必有其特殊性, 正是由于这些特殊性的存在, 使得蒋家沟流域泥石流频发。

收稿日期: 2009-02-26

第一作者简介: 陈中学, 男, 1978 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程与地质灾害研究。E-mail: chenzxwhyts@yahoo.cn

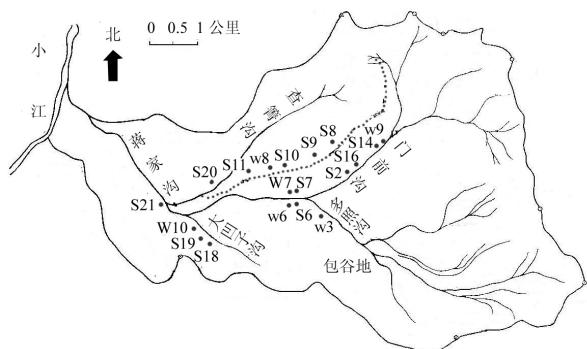


图1 蒋家沟道分布及取样点分布图

Fig.1 Offset hitch distribution map and sampling spot of Jiangjia Ravine

2 试验及结果分析

2.1 黏土矿物分析试验

取蒋家沟泥石流源区土体(试样 S2)分析黏土矿物成分。试验衍射图谱如图 2 所示,主要矿物成分及百分含量见表 1。

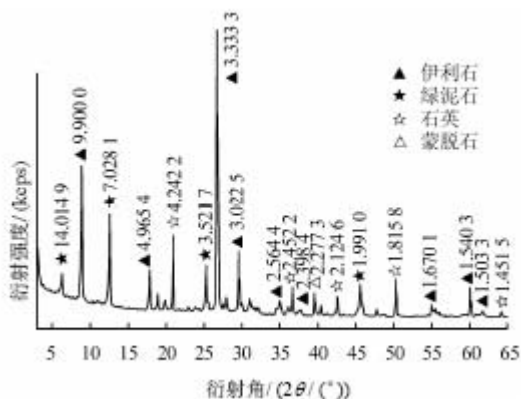


图2 泥石流试样 X 射线衍射图谱

Fig.2 Diagrams of diffraction X-ray of debris flow samples

表 1 S2 主要矿物成分

Table 1 The main mineral composition of sample S2

样品编号	百分含量/%			
	石英	伊利石	绿泥石	蒙脱石
S2	34	30	20	2

分析结果表明,蒋家沟泥石流流体黏土矿物成分以伊利石为主,其次为绿泥石,蒙脱石含量较少,石英含量较高。伊利石是一种富含钾的云母类黏土矿物,其集合体一般呈黄绿色、灰绿色、灰黄色、灰白色、灰黑色等,且多数硬度低。伊利石粒度小,比表面积大^[6],富含钾,并且具有释钾特性^[7],表面光滑而无膨胀性能,但经长期风化淋滤而产生脱钾作用后,吸水膨胀性增强,因此会大大减少泥石流源地土石体及泥石流体内的摩阻力,并使其产生滑动,有利于泥石流的形成和发展。

前苏联学者伏列斯曼指出: 1 m³ 的泥浆中的 10 % 的黏粒表面积比 90 % 的沙颗粒的表面积大 100 倍。黏土颗粒由于它的巨大表面积和亲水性, 与水和沙粒组成高浓度浆体, 使其具有宾汉流体的特性^[8]。因此, 黏土颗粒的存在对泥石流形成和运动中起着十分积极和重要的作用。蒋家沟泥石流流体的颗粒级配如图 3 (S2、S7 位于蒋家沟右岸坡脚处, S10、S11 位于蒋家沟右岸坡顶) 所示。

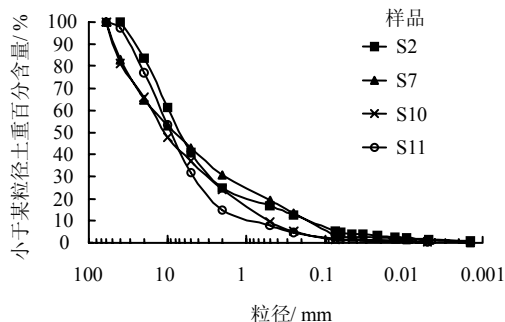


图3 试样原始级配曲线

Fig.3 Grain size distribution curve of original sample

从颗粒曲线上可以看出, 蒋家沟泥石流流体中细粒含量较少, 而粗颗粒含量较多, 这为雨水入渗到土体内部并形成泥石流提供了良好的条件。曲线上 S10、S11 两条曲线在粒径小于 2 mm 时位于 S2、S7 下方, 蒋家沟主沟右岸坡顶 (S10、S11) 黏粒含量远低于坡脚 (S2、S7), 说明坡顶的土体长期接受雨水冲刷, 细颗粒被带走, 而坡脚土体由于有冲沟汇水, 坡顶冲刷土体保护, 冲刷相对较小, 致使细颗粒的含量从坡顶到坡脚呈现逐步增加的趋势。

2.2 化学全分析

在蒋家沟内分别取样 (S6~S9) 进行化学成分定量分析试验, 并与三大黏土矿物进行比较, 结果见表 2。为研究样品的化学成分特点, 引入表中高岭石、蒙脱石、伊利石的 3 个纯样品的数据^[9]进行比较, 其中 S6 位于蒋家沟主沟左岸坡角, S7 位于主沟右岸坡角, S8、S9 位于主沟右岸坡顶。化学蚀变指数 $CIA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO) \times 100$, 均为分子数比。分析表 2 可知, 样品 S6~S9 的黏粒分子率平均值为 2.11, 二氧化硅与倍半氧化物的比值的平均值为 1.67, 均与三大黏土矿物中的伊利石最为接近, 说明蒋家沟泥石流流体的化学成分与伊利石最为接近, 进一步证明了本文黏土矿物分析结果的正确性。

通过取样的位置与化学全分析的结果比较可知, 坡顶 (S8、S9) 的 Na₂O、MgO 和 CaO 含量

均比坡脚 (S7) 低, 特别是 Na₂O 低了近 10 倍, 说明在长期的自然风化作用下, 坡顶土体的钠、钙、镁逐渐损失, 其中钠损失较多。化学蚀变指数坡顶

大于坡脚, 说明坡顶土体的风化程度高于坡脚, 容易在坡顶形成大量松散物质, 为泥石流的形成提供丰富的物源。

表 2 蒋家沟泥石流体的化学成分(质量百分含量)
Table 2 Chemical composition of debris flow mass in Jangjia Ravine(quality percentage)

样品	二氧化硅 SiO ₂ /%	氧化铝 Al ₂ O ₃ /%	氧化铁 Fe ₂ O ₃ /%	氧化镁 MgO /%	氧化钙 CaO /%	氧化钾 K ₂ O /%	氧化钠 Na ₂ O /%	黏粒分子率 SiO ₂ Al ₂ O ₃	SiO ₂ R ₂ O ₃	化学蚀变 指数 CIA
高岭石	46.35	37.62	0.53	0.009	0.33	0.08	0.03	1.23	1.21	
蒙脱石	52.07	18.98	0.06	3.80	3.28	0.08	0.03	2.74	2.73	
伊利石	52.23	25.85	4.04	2.69	0.60	6.56	0.33	2.02	1.75	
蒋家沟 S6	45.87	23.99	5.96	3.02	5.90	3.58	0.44	1.91	1.53	0.71
S7	52.47	25.97	6.99	2.40	1.26	4.22	0.51	2.02	1.59	0.81
S8	57.29	23.99	6.98	1.30	0.16	3.36	0.066	2.39	1.85	0.87
S9	54.63	25.93	6.42	1.67	0.16	4.31	0.055	2.11	1.69	0.85

2.3 ESP 值和分散度试验

自然界存在一种易侵蚀性土壤, 即高分散性土^[7], 这类土的 ESP (可代换性阳离子 Na⁺和 K⁺占阳离子代换总量的百分率) 大于 15 %, 分散度大于 50 %, 故它遇水极易分散或触变、液化。对蒋家沟泥石流风干土 (样品粒径小于 0.5 mm) 进行 ESP 值和分散度测试, 结果见表 3。表 3 中, S4 位于多照沟, S8、S9 位于蒋家沟主沟右岸坡顶, 土样呈红褐色, 有红土化现象; S14、S16 位于门前沟内右岸坡脚, S18、S19 位于大凹子沟内, S20、S21 位于查箐沟内。土样分散性判断标准^[10]: ①双比重计试验, 非分散土, SCS < 30 %; 过渡性土, SCS = 530 %~0 %; 分散性土, SCS > 50 %。②交换性钠百分比 (ESP) 试验。ESP = 7~10, 属中等分散性土; ESP ≥ 15, 属高分散土, 即有严重管涌的可能性。通过表 3 分析可知, 蒋家沟泥石流土的物理性质极差 (ESP 值、分散度平均值分别为 24.6 %和 59.1 %), ESP 值和分散度均高于分散性土的判定值, 故是极易侵蚀性土壤, Na⁺、K⁺为一价离子, 水化半径大, 则胶粒间的静电斥力大, 胶粒易于分散, 不易凝聚, 因此易受侵蚀而处于悬浮状态, 易触变液化被水带走。从酸碱性来看, 除 S8、S9 (图 4) 有红土化现象土体呈酸性外, 其余均呈碱性, 也证明蒋家沟的岩石风化是在碱性条件下进行的, 这有利于岩石的风化和黏土矿物的形成^[7], 为蒋家沟泥石流的形成提供了极为有利的环境。

根据现场观测的情况和取样的位置并对照表中的数据可知, 主沟右岸坡顶土体 (S8、S9) 的 ESP 值和分散度均大大低于坡脚土体, 说明因位置的差别, 坡顶土体在雨水冲刷后土体中的钠离子和细颗

粒容易被雨水带走, 导致坡顶形成大量松散物质, 为泥石流的形成提供丰富的物源, 同时 Na⁺被雨水带走的过程也是土体分散的过程, 易使土体强度降低, 并触变液化形成泥石流。

表 3 蒋家沟泥石流体风干土阳离子代换性及物理特性
Table 3 Cation exchangeability and physical properties of debris flow mass air-dried soil in Jangjia Ravine

项目 样品	阳离子代换 总量 (CEC) /(mol/kg)	Na ⁺ +K ⁺ /(mol/kg)	ESP /%	分散度 /%	pH
S4	0.028 1	0.005 4	19.2	61.23	8.50
S8	0.093 2	0.008 8	9.4	37.80	5.40
S9	0.095 2	0.008 9	9.3	34.40	6.40
S14	0.022 8	0.006 5	28.5	63.21	9.06
S16	0.023 7	0.007 3	30.8	60.12	9.01
S18	0.026 1	0.005 6	21.5	63.14	8.46
S19	0.054 4	0.011 0	20.2	65.36	9.25
S20	0.027 9	0.014 0	50.2	71.23	9.13
S21	0.034 1	0.011 0	32.3	75.46	8.64



(a) 试样 S8 (b) 试样 S9

图 4 蒋家沟主沟右岸坡顶红壤
Fig.4 Laterite on the top of right slope bank in Jiangjia Ravine

土壤阳离子交换量 (CEC) 是指土壤所能吸附和交换的阳离子总量, 用 mol(+)/kg 表示。一般认

为阳离子交换量在 20 mol(+)/kg 以上为保肥力强的土壤；20~10 mol(+)/kg 为保肥力中等的土壤；< 10 mol(+)/kg 保肥力弱的土壤。从表中可知，蒋家沟泥石流土体均属于保肥力弱的土壤，再加上土壤呈碱性，只有少数植物才能在如此恶劣的环境中生存，比如仙人掌、剑麻等。这也是蒋家沟流域生态环境脆弱，植被稀少，易于产生崩塌、滑坡并形成泥石流的原因之一。

2.4 地下水分析

在蒋家沟流域内地下水出露较多，取蒋家沟主沟及支沟地下水进行可溶盐成分分析，结果见表 4。根据表中数据并结合取样点的位置分析可知，门前沟(w9)境内地下水中的阳离子和阴离子中的 SO_4^{2-} 、

矿化度、总硬度比多照沟(w3)都要高，特别是 K^+Na^+ 要高出 3 倍多，门前沟流域内的岩土体长期遭受这种高矿化水的作用，破坏了岩土体自身的结构和稳定性，造成岩石破碎、土质松散、滑坡、崩塌丛生，从而为泥石流形成提供了大量的松散固体物质，这也是门前沟泥石流暴发频率高于多照沟的原因之一。蒋家沟右岸(w7)除 Mg^{2+} 、 HCO_3^{2-} 外均比左岸(w6)要高，从现场观测的结果看，右岸山体比左岸更破烂，更容易形成滑坡、崩塌及泥石流就不难理解了。从总硬度指标来看，除 w8 外，其余水样总硬度均超过了《生活饮用水卫生标准》^[11] 规定的 450 mg/L，可见蒋家沟地下水特别是坡脚地下水不宜直接饮用。

表 4 蒋家沟地下水中可溶盐成分含量表
Table 4 Soluble salt composition in groundwater of Jiangjia Ravine

样品	Ca^{2+} /(mg/L)	Mg^{2+} /(mg/L)	K^+Na^+ /(mg/L)	Cl^- /(mg/L)	SO_4^{2-} /(mg/L)	HCO_3^{2-} /(mg/L)	pH 值	矿化度 /(mg/L)	总硬度 /(mg/L)
w3	55.31	86.53	50.25	3.19	297.79	341.71	7.12	834.78	494.49
w6	76.95	136.11	45.50	2.84	556.38	317.30	7.04	1 135.08	752.75
w7	188.38	128.82	127.25	4.61	1 054.74	183.06	7.02	1 686.86	1 001.00
w8	68.94	25.28	25.75	2.48	147.93	207.47	6.97	477.85	276.28
w9	224.45	106.95	183.50	2.84	1 141.19	213.57	7.04	1 872.50	1 001.00
w10	52.10	142.19	133.25	2.48	656.09	360.02	7.13	1 346.13	715.72

注：w3 位于多照沟左岸坡脚地下水；w6 位于蒋家沟主沟左岸坡脚地下水；w7 位于蒋家沟右岸坡脚地下水；w8 位于蒋家沟主沟右岸坡顶地下水；w7 源头；w9 门前沟右岸坡脚地下水；w10 位于大凹子沟。

3 结 论

(1) 蒋家沟泥石流体的黏土矿物成分以伊利石为主，颗粒级配中粗颗粒含量高，细粒含量少，这些特征为泥石流的形成提供了有利条件。

(2) 蒋家沟泥石流土体的化学成分与三大黏土矿物中的伊利石最接近。山体的风化过程伴随着土体中钠和钙、镁等元素的流失，其中钠元素损失较多。

(3) 蒋家沟泥石流土属高分散性土，保肥力弱及碱性环境使得植被难以生长，生态环境脆弱，加剧了滑坡，崩塌和泥石流的形成。

(4) 蒋家沟流域内地下水矿化度高，总硬度大，使得山体破碎，容易暴发泥石流且频率高。

致谢：中国科学院成都山地所东川泥石流观测站在本次试验取样中给予了大力帮助，在此表示感谢！

参 考 文 献

[1] IVERSON R M, REID M E, LAHUSEN R R G, et al. Debris-flow mobilization from landslides[J]. *Annu. Rev.*

Earth Planet. Sci., 1997, 25: 85—138.

- [2] ANDERSON S A, SITAR N. Analysis of rainfall-induced debris flows[J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1995, 121(7): 544—552.
- [3] OKURA Y, MAJOR J J. Fluidization in dry landslides[J]. *Engineering Geology*, 2000, 56: 347—360.
- [4] HE Si-ming, WU Yong, LI Xin-po. Research on eroded start mechanism of channel debris flow[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(Supp.): 155—159
- [5] 王纯祥, 白世伟, 江崎哲郎, 等. 泥石流的二维数学模型[J]. *岩土力学*, 2007, 28(6): 1237—1241.
- WANG Chun-xiang, BAI Shi-wei, JIANG Qizhe-lang, et al. Two-dimensional mathematical model of debris flow[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(6): 1237—1241.
- [6] 徐敬尧. 伊利石的开发利用现状[J]. *有色矿冶*, 2005, 21(4): 13—14.
- XU Jing-yao. Status of exploitation and application of Illite[J]. *Non-Ferrous Mining and Metallurgy*, 2005, 21(4): 13—14.

在衬砌内边界透水低频入射波作用时, 增加衬砌的厚度对降低动应力和孔压的最大值不但不起作用, 反而有害。当椭圆衬砌结构内边界不透水时, 无论低频还是高频, 当增大衬砌厚度时, 都可有效地降低衬砌外边界动应力和孔压的最大值。

6 结 语

在 Biot 波动理论的基础上, 借助复变函数保角映射的方法, 本文分别对饱和土中任意形状的衬砌结构的对压缩波的散射进行解析求解。以饱和土中椭圆形衬砌为例, 对衬砌内外边界半轴比值、饱和土与椭圆衬砌孔隙率比值、饱和土和衬砌力学参数在不同的入射波频率和边界条件下的衬砌外边界处动应力和孔压集中系数进行计算, 得出相应的规律。

本文重点研究了在稳态压缩波作用下无限饱和土空间中任意衬砌的散射问题, 并以椭圆衬砌为例, 求解相关的衬砌外边界的动应力和孔压集中系数。以该方法为基础, 还可以研究任意形状衬砌在压缩慢波和剪切波等入射波形, 并且可以讨论研究介质参数变化时, 椭圆内边界在透水和不透水下的动应力和孔压的变化规律。

参 考 文 献

- [1] 鲍亦兴, 毛昭宙. 弹性波的衍射与动应力集中[M]. 刘殿魁、苏先榭译. 北京: 科学出版社, 1993.
- [2] ANTONIO J B, TADEU JULIETA M P, EDUARDO KAUSEL. 3D scattering of waves by a cylindrical irregular cavity of infinite length in a homogeneous elastic medium[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 2002, 191: 3015—3033.
- [3] LIU D K, GAI B Z, TAO G Y. Applications of the method of complex functions to dynamic stress concentrations[J]. **Wave Motion**, 1982, 4: 293—304.
- [4] BIOT M A. General solutions of the equation of elasticity and consolidation for a porous material[J]. **Journal of Applied Mechanics**, 1956, 78: 91—95.
- [5] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid. I. Low frequency range[J]. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 1956, 28(2): 168—178.
- [6] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid. II. Higher frequency range[J]. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 1956, 28(2): 179—191.
- [7] MEI C C, SI B I, CAI D. Scattering of simple harmonic waves by a circular cavity in a fluid-infiltrated poroelastic medium[J]. **Wave Motion**, 1984, 6: 265—278.
- [8] HASHEMINEJAD S M, BADSAR S A. Elastic wave scattering by two spherical inclusions in a poroelastic medium[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2005, 131(9): 953—965.
- [9] 陆建飞, 王建华. 饱和土中任意形状孔洞对弹性波的散射[J]. **力学学报**, 2002, 34(6): 904—913.
LU Jian-fei, WANG Jian-hua. The scattering of elastic waves by holes of arbitrary shapes in saturated soil[J]. **Acta Mechanica Sinica**, 2002, 34(6): 904—913.
- [10] 李伟华, 赵成刚. 饱和土半空间中圆柱形孔洞对平面 P 波的散射[J]. **岩土力学**, 2004, 25(12): 1867—1872.
LI Wei-hua, ZHAO Cheng-gang. An analytical solution for diffraction of plane P-waves by cylindrical cavity in a fluid-saturated porous media semi-space[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(12): 1867—1872.
- [11] 姜领发, 王建华, 周香莲. 半空间饱和土中圆形衬砌对弹性压缩波的散射[J]. **岩土力学**, 2008, 29(2): 315—320.
JIANG Ling-fa, WANG Jian-hua, ZHOU Xian-lian. Scattering around a circular lining in saturated poroelastic half-space under dilatational waves[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(2): 315—320.
- [7] 王德强, 王辅亚, 张惠芬, 等. 白云母、绢云母和伊利石的释钾性能[J]. **土壤学报**, 2000, 4(5): 12—15.
WANG De-qiang, WANG Fu-ya, ZHANG Hui-fen. Potassium release characteristics of muscovite, sericite and Illite[J]. **Acta Pedologica Sinica**, 2000, 4(5): 12—15.
- [8] 吴积善, 康志成, 田连权, 等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 69—70.
- [9] B. E. 格里姆. 黏土矿物学[M]. 北京: 地质出版社, 1960: 108—192.
- [10] 巨娟丽, 严宝文, 樊恒辉, 等. 某大坝防渗土料分散性试验研究[J]. **人民长江**, 2007, 38(6): 133—134.
JU Li-juan, YAN Bao-wen, FAN Heng-hui, et al. Dispersion test study on Impermeable soil of a dam[J]. **Yangtze River**, 2007, 38(6): 133—134.
- [11] 中国国家标准化管理委员会. GB5749—2006 生活饮用水卫生标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

上接第 3056 页