

文章编号: 1000-7598-(2008)01-0135-05

矢量井网改善平面非均质油藏水驱开发效果研究

周涌沂¹, 李 阳², 王端平³

(1. 中国石化 胜利油田地质科学研究所, 山东 东营 257015; 2. 中国石化 油田部, 北京 100029; 3. 中国石化 胜利油田, 山东 东营 257015)

摘 要: 平面非均质是河流相沉积的重要特征。如果采用常规等井距五点井网开发该类油藏, 往往会导致注入水在高渗透方向的突进, 造成部分生产井见水时间早, 含水上升快, 而渗透率较低方向上的生产井注水受效不明显, 当井组内的综合含水达到 98 % 时, 注入水在该方向上还没有突破, 即注水驱替往往不平衡, 开发效果差。在渗流力学基础上, 推导了平面非均质油藏矢量井网的井距设计公式。根据矢量井网的井距设计公式, 建造了物理模型, 开展了水驱油对比试验研究, 检验了用矢量井网开发平面非均质油藏的有效性。试验结果表明: 矢量井网能增大平面非均质油藏的波及系数, 提高注入水的利用率, 大大改善油藏开发效果。

关 键 词: 平面; 非均质; 矢量; 井距; 驱替; 均衡

中图分类号: TE 324

文献标识码: A

Research on water flooding effect improved by vectorial well arrangement for reservoirs with permeability heterogeneity in plane

ZHOU Yong-yi¹, LI Yang², WANG Duan-ping³

(1. Geological Science Research Institute of Shengli Oil Field for Sinopec, Dongying 257015, China;

2. Oil Field Department of Sinopec, Beijing 100029, China; 3. Shengli Oil Field for Sinopec, Dongying 257015, China)

Abstract: Permeability heterogeneity in plane is an important characteristic of fluvial facies formation. If it is developed using conventional five-spot well arrangement with equal-well-space, the injection water often fingers along high permeability strip quickly, which results in early water-breakthrough and quick water-cut increase for parts of the wells, while wells in relatively low permeability strips can not be flooded effectively; water does not break through as total water-cut for a well group reaches 98 %. That is, the reservoir can not be flooded in equilibrium, and the developing result is not good. The design formula for well space of vectorial well arrangement for permeability heterogeneity in plane is derived based on porous flow theory. According to the well space formula of vectorial well arrangement, the physical models are made to carry out the contrastive water flooding experiments which are used to check the validity of vectorial well arrangement. The results indicate that the vectorial well arrangement can improve the plane sweep factor for reservoirs with permeability heterogeneity, and raise the efficiency of injection water; moreover, it could improve the developing effect greatly.

Key words: plane; heterogeneity; vector; well space; flooding; balance

1 引 言

中国陆上石油储层大多数属于河流相沉积, 有主河道、边滩、心滩、漫滩等多种沉积形式, 非均质性较强, 岩石渗透率的各向异性现象比较显著^[1-5]。在井网部署时, 如果忽略渗透率的平面非均质性而采用常规井网(如正方形井网)进行开发, 往往会导致注入水沿着高渗透的主河道快速突进, 而渗透率低的河道两侧水淹程度低。在生产中表现为波及

不均衡, 严重影响了平面非均质油藏的开发效果^[6, 7]。如何确定合理的井网, 提高油藏井组控制储量的水驱程度, 是改善平面非均质油藏开发效果的关键。

在矢量井网^[8]中, 往往在不同的方向上采用不同的井距进行井网部署, 该类井网可以有效地改善平面非均质储层的驱替效果, 但关于矢量井网中的井距设计方法, 目前并不多见。本文在渗流力学基础上, 推导了平面非均质油藏中实现均衡驱替的一种井距设计模型。通过改变井距设计方式, 即部署

收稿日期: 2006-09-14

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科技攻关项目“非均质砂岩油藏矢量开发技术研究”(No. P03054) 部分成果。

作者简介: 周涌沂, 男, 1972 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事油气田开发研究工作。E-mail: zyykfrji@slof.com

矢量井网,使不同方向上的生产井见水时间一致,从而达到提高井组控制储量和采出程度的目的。最后通过试验对矢量井网开发效果进行了验证,试验结果表明,按照文中方法进行井距设计后,在井组控制面积内实现了均衡驱替,提高了采出程度,改善了开发效果。

2 地质模型及矢量井网井距公式

考虑到河流相沉积基本上沿主河道对称分布的特征,简化的地质模型如图 1 所示。主河道和其他沉积体的渗透率为 K_1 , K_2 , K_3 , 注采井的分布形式为:主河道中 2 口生产井,1 口注水井,在主河道两侧对称分布 2 口生产井。由于主河道渗透率较高,注水主要沿高渗透方向突进,因此,控制渗流的渗透率为主河道的渗透率,表示为 K_x ,而注水井向生产井渗流的沿程阻力为各个渗透带的渗流阻力之和,其渗流能力即渗透率采用以下的平均渗透率替代: $K_y = \Sigma k_i h_i / \Sigma h_i$ 。要使 x 和 y 方向生产井注入水同时突破,那么井距应调整,根据渗流力学推导如下:令井距为 L ,对任意 (x 或 y) 方向,当油水界面距离注水井为 x 时,界面上压力为 P_x ,水井井底压力为 P_1 ,油井压力为 P_2 。假设水驱油过程为活塞式驱替, A 为驱替方向上的渗流面积, μ_o , μ_w 分别为油水黏度; Q_o , Q_w 分别为驱替方向上的油水体积流量;油水界面两侧的渗透率为 $K_w = K_x K_{rwx}$, $K_o = K_x K_{rosi}$,其中 K_{rwx} , K_{rosi} 分别为油水前沿处的水相相对渗透率和束缚水条件下的油相相对渗透率。

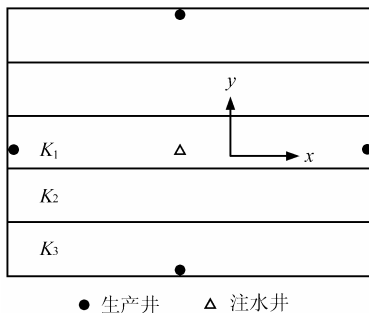


图 1 平面非均质模型示意图

Fig.1 Model chart for permeability heterogeneous in plane

根据达西定律^[9],并稍作变换可得

$$\text{对水相渗流: } P_1 - P_x = \frac{Q_w \mu_w x}{AK_w} \quad (1)$$

$$\text{对油相渗流: } P_x - P_2 = \frac{Q_o \mu_o (L - x)}{AK_o} \quad (2)$$

对于定压差生产, $\Delta P = P_1 - P_2 = \text{Const.}$, 式 (1) 与式 (2) 两端相加得

$$\Delta P = \frac{Q_w \mu_w x}{AK_w} + \frac{Q_o \mu_o (L - x)}{AK_o} \quad (3)$$

根据物质守恒,油水界面渗流速度为^[10]

$$V_x = \frac{Q_w}{A_{cw}} = \frac{Q_o}{A_{co}} \quad (4)$$

$$A_{cw} = A(1 - S_{wi} - S_{or}), A_{co} = A(1 - S_{wi}) \quad (5)$$

式中: S_{wi} 为束缚水饱和度; S_{or} 为残余油饱和度。

将式 (4)、式 (5) 代入式 (3) 得到:

$$V_x = \frac{\Delta P}{\frac{(1 - S_{wi} - S_{or}) \mu_w x}{K_w} + \frac{(1 - S_{wi}) \mu_o (L - x)}{K_o}} \quad (6)$$

由物理学可知,位于 x 处的油水界面的平均孔隙速度为该界面位置在单位时间内的变化量,即

$$u_x = \frac{dx}{dt} \quad (7)$$

而渗流速度与平均孔隙速度(即真实运动速度)之间存在以下关系^[11]:

$$V_x = \phi_x \mu_x = \phi_x \frac{dx}{dt} \quad (8)$$

式中: ϕ_x 为孔隙度。

将式 (8) 代入式 (6) 得到:

$$\phi_x \frac{dx}{dt} = \frac{\Delta P}{\frac{(1 - S_{wi} - S_{or}) \mu_w x}{K_w} + \frac{(1 - S_{wi}) \mu_o (L - x)}{K_o}} \quad (9)$$

对 x 从 0 到 L 积分得到见水时间 T :

$$\begin{aligned} \int_0^T \Delta P dt &= \int_0^L \phi_x \left[\frac{(1 - S_{wi} - S_{or}) \mu_w x}{K_w} + \frac{(1 - S_{wi}) \mu_o (L - x)}{K_o} \right] dx \\ T &= \frac{\phi_x \mu_w L^2}{2K_w \Delta P} [(1 - S_{wi} - S_{or}) + (1 - S_{wi}) M] \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $M = (K_w / \mu_w) / (K_o / \mu_o)$ 为流度比。式 (10) 表明,见水时间除了受渗透率、孔隙度、生产压差和注采井距控制外,还受流度比和驱油效率的影响。由式 (10) 可知, x 方向生产井见水时间为

$$T_x = \frac{\phi_x \mu_w L_x^2}{2K_{xw} \Delta P} [(1 - S_{wi} - S_{or})|_x + (1 - S_{wi})|_x M_x] \quad (11)$$

y 方向生产井见水时间为

$$T_y = \frac{\phi_y \mu_w L_y^2}{2K_{yw} \Delta P} [(1 - S_{wi} - S_{or})|_y + (1 - S_{wi})|_y M_y] \quad (12)$$

调整方向井距的目的是使 x 和 y 方向生产井见水时间相等, 即在相同的生产压差下 $T_x = T_y$, 经整理得到:

$$\frac{L_x}{L_y} = \sqrt{\frac{K_x \phi_y K_{rwyx} [(1-S_{wi}-S_{or})|_y + (1-S_{wi})|_y M_y]}{K_y \phi_x K_{rwyf} [(1-S_{wi}-S_{or})|_x + (1-S_{wi})|_x M_x]}} \quad (13)$$

在实际应用中, 如果同一个油藏中, 不同方向上的油、水黏度分别都是相等的 (即 $u_{wx} = u_{wy}$, $u_{ox} = u_{oy}$), 其束缚水饱和度、残余油饱和度以及流度比也基本接近, 那么式 (13) 可以简化为

$$\frac{L_x}{L_y} = \sqrt{\frac{K_x \phi_y}{K_y \phi_x}} \quad (14)$$

如果同一油藏中不同方向上的孔隙度近似相同 (即 $\phi_x = \phi_y$), 那么式 (14) 可进一步简化为

$$\frac{L_x}{L_y} = \sqrt{\frac{K_x}{K_y}} \quad (15)$$

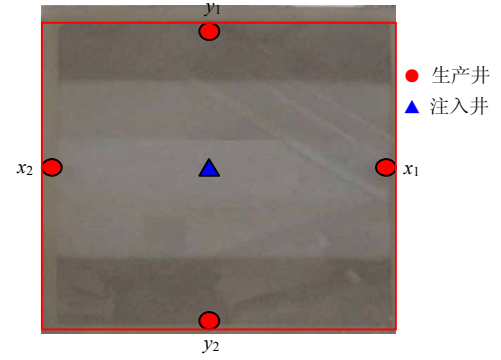
3 平面非均质油藏矢量井网开发结果对比模拟

3.1 试验模型和方法

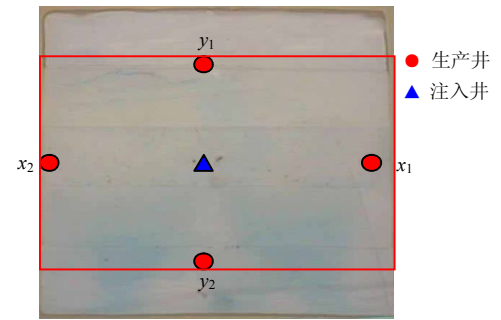
试验模型为一个平面上有 5 个渗透带的非均质模型, 渗透率分别为 $5\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $2\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 且呈对称分布, 注采井间距离为 12 cm。调整井距后的井距为 x 方向井距不变, 为 12 cm; y 方向井距用式 (15) 计算后为 8.5 cm。试验模型制作方法见文献[7]。模型如图 2 所示, 左边为常规 5 点井网开采模型, 右边为调整井距后的试验模型, 线条圈定的区域为井组控制面积。试验方法为: 模型制作完毕后抽真空饱和地层水, 油驱水建立束缚水, 最后采用定压水驱油 (注入水为蓝色), 试验过程中记录生产井的产量, 并进行实时录像, 观察油水界面在 x 和 y 方向的运动情况。试验模型为同一个模型, 先在模型上开展常规 5 点井网下的水驱油试验, 然后调整井距, 重新饱和相同黏度的原油, 开展矢量井网下的水驱油试验。

3.2 试验结果与分析

图 3 为水驱油初期图片。图 3(a)表明, 采用等井距 5 点井网开发, 注入水一开始就呈现沿高渗透条带突进的问题, 油水界面在平面上呈椭圆形。图 3(b)表明, 采用矢量井网后注水初期油水界面沿着 x 和 y 方向上推进距离几乎相等, 呈圆形, 说明注入水在各个方向上均衡推进, 有效地抑制了平面非均质造成的方向性突进。图 4 为生产井见水时刻油水界面, 图 4(a)是常规 5 点井网开发结果, 该图表明



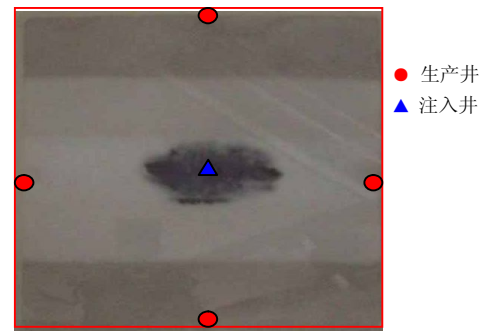
(a) 等井距 5 点井网



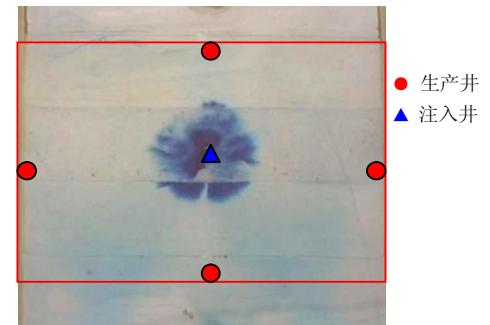
(b) 矢量井网

图 2 试验模型及井位分布图

Fig.2 Sketch map of model and wells distribution



(a) 等井距 5 点井网



(b) 矢量井网

图 3 等井距 5 点井网和矢量井网注水初期油水界面

Fig.3 Oil and water interface at early flooding period for five dots well and vector network

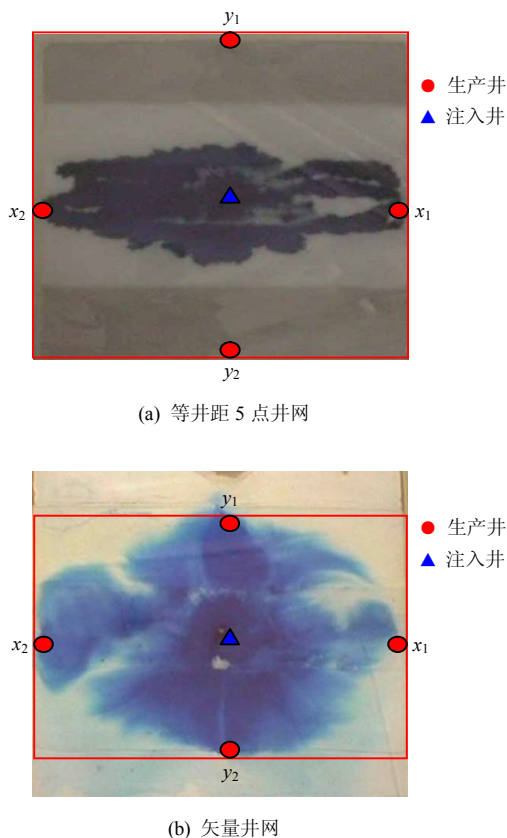
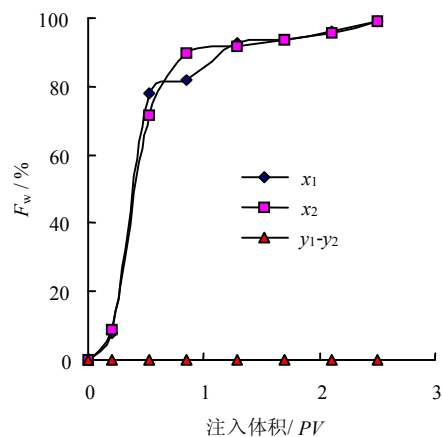


图4 等井距5点井网和矢量井网见水时刻油水界面
Fig.4 Oil and water interface at breakthrough time for five dots well network with equal well space and vector network

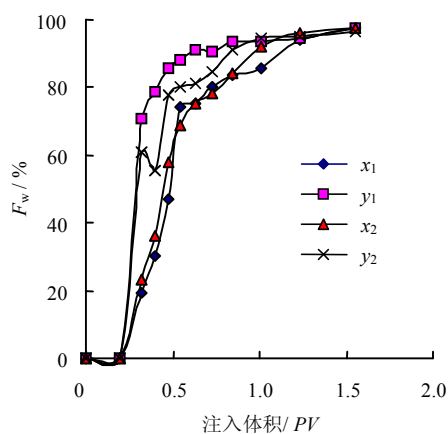
位于 x 方向的生产井最先突破, 生产井见水时刻 y 方向的油水界面处于渗透率 $2\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的条带内。图 4(b)清楚地表明 4 口生产井几乎同时见水, 表明井组控制面积内的储层在平面上得到了均衡驱替, 减小了平面非均质油藏水驱平面控制程度低的影响。图 5 为 5 点井网和矢量井网含水率变化曲线, x_1 表示注水井右侧的生产井, 逆时针方向的生产井分布为 y_1 , x_2 , y_2 。常规 5 点井网开发方式中 y 方向的生产井在综合含水率达到 98 % 时均不见水。矢量井网开发模式下, 不同方向 4 口生产井的含水率变化趋势相近, 表现为见水时间相近, 含水率上升趋势相近, 达到极限含水率的时间相近, 体现出平面非均质油藏采用矢量井网的开发优势。

表 1 为常规 5 点井网和矢量井网开发模式下的综合数据表, 第 1 列中采用矢量井网的见水时间晚于常规 5 点井网, 表明矢量井网延缓了见水时间, 延长了无水采油时间。矢量井网见水时刻的无水采收率是常规 5 点井网的 2 倍。一般而言, 无水采收率越大, 油田注水开发效果越好。矢量井网的无水采收率达到 50 %, 是主要的采油阶段。当井组综

合含水率为 98 % 时, 常规 5 点井网开采模式的最终采出程度为井组控制储量的 44.1 %, 而矢量井网最终采出程度为 74.0 %。矢量井网的平面波及率为 87.3 %, 比常规 5 点井网高 33.9 %, 表明矢量井网极大地提高了波及效率, 从而达到提高采出程度的目的。开发结束时, 常规 5 点井网的累计注水量为 2.5 PV (即为试验模型孔隙体积的 2.5 倍), 其中, 96.9 % 的水进入高渗透储层, 造成 x 方向生产井长期处于含水率较高的状态, 减小了注水的有效性。矢量井网的累计注水量为 1.6 PV , 比 5 点井网少 0.9 PV , 因为含水率化规律接近, 无效注水量少, 因此, 矢量井网提高了注入水的利用率, 极大地增强了矢量井网注水的经济效益。常规 5 点井网中, x 方向生产井吸水量是 y 方向生产井的 30.8 倍, 而矢量井网 x 方向的吸水量是 y 方向的 1.5 倍, 由此可见, 驱替不均衡的现象得到了很大的改善。



(a) 等井距 5 点井网



(b) 矢量井网

图5 常规5点井网和矢量井网含水率随注水体积变化曲线
Fig.5 Water cut vs. water-injection volume curve for five-spot well arrangement with equal-well-space and vectorial well arrangement

表1 等井距5点井网和矢量井网试验数据表

Table 1 Experiment results for five-spot well arrangement with equal-well-space and vectorial well arrangement

模型	T_i (见水时间) / min	R_o (见水) / %	I_{pv} (见水) (剑水时注入孔体积数)	波及率(见水) / %	最终 R_o / %	I_{pv} (注入孔体积数)	$\frac{\sum Q_s}{\sum Q_y + \sum Q_s}$	$\frac{\sum Q_s}{\sum Q_y}$
5点井网	15	25	0.2	43.4	44.1	2.5	96.9	30.8
矢量井网	23	50	0.3	87.3	74.0	1.6	59.5	1.5

4 结 论

(1) 在渗流力学基础上, 提出了一种矢量井网的井距设计模型, 并分析了影响油藏注水突破的主要因素。分析结果表明: 除了渗透率级差、注采井距大小和生产压差之外, 注水突破时间还与流度比和驱油效率有关。

(2) 通过试验模型对比了常规五点井网和矢量井网开发效果, 验证了矢量井网克服平面非均质油藏水驱不均衡的能力。

(3) 试验模拟结果表明, 矢量井网能明显地增大平面波及系数, 提高注水效率, 改善油藏开发效果, 不失为一种有效改善平面非均质驱替效果的开发模式。

参 考 文 献

- [1] 陈永生. 油田非均质对策论[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993: 5—6.
- [2] WALTER ROSE. Permeability Anisotropy in low permeability formations(SPE 10810)[M]. Texas: SPE Technical Publications, 1982: 195—201.
- [3] RAMEY H J. Interference analysis for anisotropic formations—a case history[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1975, 27(10): 1 290—1 298.
- [4] GATENS J M, LEE W J. The effects of permeability anisotropy on the evaluation and design of hydraulic fracture treatments and well performance(SPE 21501)[M].

Texas: SPE Technical Publications, 1991: 211—222.

- [5] LARRY W LAKE. The origins of anisotropy[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1988, 40(3): 395—396.
- [6] 常学军, 郝建明, 熊伟, 等. 平面非均质油藏来水方向诊断和调整[J]. 石油学报, 2004, 25(4): 58—61.
CHANG Xue-jun, HAO Jian-ming, XIONG Wei. Diagnosis and adjustment of edge water direction in plane heterogeneous reservoir[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(4): 58—61.
- [7] 王家禄, 沈平平, 李振泉, 等. 胶联聚合物封堵平面非均质油藏物理模拟[J]. 石油学报, 2002, 23(3): 60—64.
WANG Jia-lu, SHEN Ping-ping, LI Zhen-quan. Experimental investigation of crosslink polymer plugging in horizontal heterogeneous reservoir[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2002, 23(3): 60—64.
- [8] 李阳, 王端平, 李传亮. 各向异性油藏的矢量井网[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(2): 225—227.
LI Yang, WANG Duan-ping, LI Chuan-liang. Vectorial well arrangement in anisotropic reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(2): 225—227.
- [9] DAKE L P. Fundamentals of reservoir engineering[M]. [S. L.]: Elsevier Scientific Publishing Company, 1978: 107—108.
- [10] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999: 303.
- [11] 叶庆全, 袁敏. 油气田开发常用名词解释[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 118—119.

上接第134页

参 考 文 献

- [1] 王思敬, 杨志法, 刘竹华. 地下工程岩体稳定性分析[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [2] 浙江交通设计院. JTJ 026—90公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1990: 52—56.
- [3] 杨志法, 张路青, 尚彦军, 等. 边坡工程加固需求度评价及其应用[J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 12—20.
YANG Zhi-fa, ZHANG Lu-qing, SHANG Yan-jun, et al. Assessment of the degree of reinforcement demand (DRD) for rock slope projects—principles and a case example application[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2004,

12(1): 12—20.

- [4] 杨志法, 柯天河, 肖竹生, 等. 五强溪水电站左岸船闸边坡开挖监控设计的理论与实践[J]. 工程地质学报, 1995, 3(2): 1—11.
YANG Zhi-fa, KE Tian-he, XIAO Zhu-sheng, et al. Theory and practice on monitoring design for excavation of shiplock slope at left bank of Wuqiangxi Hydreletic Power Station[J]. *Journal of Engineering Geology*, 1995, 3(2): 1—11.
- [5] 杨志法. 系统科学在工程地质力学中的应用[C]//中国科学院地质研究所工程地质力学开放研究实验室1992年年报. 北京: 地质出版社, 1993: 127—136.