

国外河流潜流层研究的发展过程及研究方法

夏继红^{1,2},林俊强¹,陈永明³,韩玉玲³,王为木¹,胡玲³

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098;

2. 密西西比大学国家水科学计算与工程中心,密西西比 牛津 38655; 3. 浙江省河道管理总站,浙江 杭州 310009)

摘要:国外关于河流潜流层的研究经历了初始认识、概念完善、理论发展、体系形成等4个阶段,采用了现场监测、数值模拟和室内试验等方法,建立了较为完整的潜流层理论体系,取得了丰富的研究成果。我国应在借鉴国外研究成果的基础上,针对我国河流的特点,综合应用传统技术与现代技术,从多学科、多方向、多尺度等方面开展河流潜流层水动力机理、溶质迁移、生态过程、健康诊断、生态修复等方面的研究。

关键词:河流;河岸带;潜流层;潜流交换;潜流水文学

中图分类号:TV121⁺.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)04-0073-05

Advancing processes and methods of abroad research on hyporheic zone//XIA Jihong^{1,2}, LIN Junqiang¹, CHEN Yongming³, HAN Yuling³, WANG Weimu¹, HU Ling³ (1. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. National Center for Computational Hydroscience and Engineering, University of Mississippi, Oxford 38655, USA; 3. Department of River Management of Zhejiang Province, Hangzhou 310009, China)

Abstract: The abroad research on hyporheic zone could be divided into four phases: original process, concept enriching, theory researching, and integration development. The theoretical system of hyporheic zone beneath of river bed was established using field observations, numerical computations and laboratory experiments methods during the four phases. Based on the theoretical system and characteristics of rivers in our country, dynamics mechanisms, solute transport, ecological processes, health diagnosis and ecological restoration of hyporheic zone in our country should be studied on the aspects of multi-disciplinary, multi-direction, and multi-scale using traditional techniques and integration new techniques.

Key words: rivers; riparian zone; hyporheic zone; hyporheic exchange; hyporheic hydrology

河流周边存在两个重要的邻河区域:一是河岸带;二是潜流层。河流潜流层是地表水与地下水相互混合的饱和区域,是这两个系统之间的过渡带,同时也是水域与河岸带陆地栖息地之间的过渡带(生态交错带)^[1]。由于独特的水文作用机理,河流潜流层具有重要的水文调节、环境缓冲、生态保护等功能。近20年来,河流潜流层的重要性越来越受到人们的重视,它已成为河流系统研究领域的重要内容,而且河流潜流层的保护和修复也已成为河流生态系统保护、管理和生态修复的重要对象之一。国外对河流潜流层已经开展了大量的研究,取得了丰富的成果。我国已有部分学者对潜流层研究进行了归纳整理,如袁兴中等^[2]探讨了溪流潜流带的定义、生态特征以及干扰响应;吴健等^[3]归纳总结了河流潜流带在影响地表水水质和生态过程的重要作用;金

光球等^[4]归纳了潜流带和潜流交换的定义、机理、影响因素以及物质运移的规律。这些总结为我国开展河流潜流层研究提供了较好的指引。本文将重点评述国外关于河流潜流层研究的发展阶段,归纳各阶段的主要成果及研究方法,并提出几点认识,希望为我国相关领域的研究提供借鉴。

1 潜流层研究发展历程

自20世纪30年代以来,国外学者对河流潜流层开展了大量的研究,其研究发展过程可分为初始认识、概念完善、理论发展、体系形成4个阶段。

a. 初始认识阶段(1959—1979年):潜流层基本概念的形成。人们对潜流层的认识开始于对该区域生物的认识。早在20世纪30年代,人们就认识到河床以下一定区域内生活着一些特殊的生物物

基金项目:国家自然科学基金(40871050);浙江省水利科技重大项目(RA1104)

作者简介:夏继红(1970—),男,江苏如皋人,副教授,博士,主要从事河岸带及河流生态修复研究。E-mail: syjhxia@hhu.edu.cn

种。1959 年罗马尼亚动物学家 Orghidan 在德国期刊《Archiv für Hydrobiologie》上发表了《Ein neuer Lebensraum des unterirdischen Wassers: der Hyporheische Biotop》一文,用 hypo-(地下)和 rheos-(流动)这两个希腊语词根构造首次提出了“潜流”一词,并系统地提出了潜流层生态学的基本概念、涵盖内容等,该文被认为是潜流层研究的奠基性成果^[5-6]。20 世纪 70 年代初,人们开始关注潜流层生物的栖息条件,发现潜流层是生物的良好躲避场所,潜流层生物能生活于离河道几百米远的地方^[7]。20 世纪 70 年代中后期,随着水文学、河底生态学的发展,人们逐渐认识到潜流层生物的生活过程与水文过程密切相关。Hynes^[8]于 1975 年提出了“潜流水文连接性(hypoheic hydrological links)”的概念,指出潜流层通过水文过程与河流、峡谷、地下水等相连,并发生着复杂的生物和化学作用。这一概念的提出,为潜流层生物学的研究提供了新的思路,很大程度上促进了潜流生物学的发展。这一阶段主要以潜流层生物为对象,建立了潜流、潜流层生物圈的基本概念,初步引入水文学理论,形成了潜流水文学的概念。

b. 概念完善阶段(1980—1993 年):潜流层基本概念完善。很多学者认为水文学是潜流层研究的基础。从 20 世纪 80 年代开始,“潜流水文连接性”概念逐渐在潜流层研究中得到了应用,如基于潜流水文连接性概念,Hynes^[9]研究了潜流层水量与新陈代谢过程之间的关系;Trisk 等^[10]应用水量平衡法对潜流层区域范围进行了界定。至此,有关潜流层的概念大都是静态性的,在解释实际水文、生物、物化现象时具有很大的局限性。自 20 世纪 90 年代开始,引入水文动态过程的思想,形成了潜流层动态性概念。Gibert 等^[11-12]提出潜流层是“动态生态交错带(dynamic ecotone)”,指出潜流层是对泥沙特性和水文交换的动态响应结果,具有可变性、渗透性、生物多样性以及连接性。随着对潜流层认识程度的深入,1991 年北美底栖生物学会(North American Benthological Society, NABS)专门召开了潜流层学术研讨会,研讨成果于 1993 年以潜流层学术专辑出版。本次研讨会上,很多学者用生态水文方法提出了“潜流横向和纵向模型”、“潜流廊道”等概念模型,指出潜流水文过程是沿着河道多流路相互作用的双向连接过程^[5,13-15]。本次研讨会的成果是对潜流层概念的丰富和拓展,对潜流层理论的发展具有很重要的影响和推动作用,是潜流层研究的重要里程碑。

c. 理论发展阶段(1994—2000 年):生态学、水文学的应用与潜流层基本理论的发展。1993 年

NABS 潜流层专辑出版后,很多学者开始探索应用水文学和生态学的理论及方法研究潜流层的生态、水文机理,形成了两个重要的研究方向:潜流水文学和潜流生态学。在潜流水文学方面,形成了潜流交换的概念模型和数学模型等理论。Stanford 等^[14]研究建立了适应不同尺度的潜流交换过程的概念模型;Valett 等^[16]针对不同的地理条件和水力传导性,研究建立了潜流层对营养物质的滞留作用理论;Wondzell 等^[17]利用现场数据和地下水模型定量研究了山区河流沙砾坎中潜流对流和地下水入流量,建立了潜流交换的基本理论。在潜流生态学方面,以潜流层生物基本概念为基础,研究了潜流层物理要素和水文要素对生态过程的影响,形成了潜流生态学基本理论。Findlay^[18]提出了潜流层对河流系统新陈代谢贡献率理论;Fisher 等^[19]基于河流新陈代谢两层概念模型,提出了伸缩性生态系统模型(telescoping ecosystem model, TEM);Boulton 等^[20]应用 TEM 模型提出了泥沙、河流、流域等不同尺度下不同变量对潜流层生态功效的影响理论;Jones 等^[21]在《Stream and Ground Waters》一书中研究了潜流垂向交换量和潜流带大小对潜流层生态机制的影响,提出了生态学、水文学方法综合应用于潜流层研究的思想。在这个阶段构建了潜流层理论的基本构架,初步形成了生态学与水文学交叉综合应用的研究思想,为潜流层研究奠定了较好的理论和方法基础。

d. 体系形成阶段(2001 年至今):多尺度、多技术、多学科交叉集成应用。在过去的几十年中,尽管水文学、生态学、地理学等学科理论已经在潜流带研究中得到了较好的应用,但是由于各学科研究尺度不太一致,现有的方法和技术无法解决尺度变化和融合问题,如泥沙尺度或更小尺度的研究成果很难外推到河流尺度或流域尺度。自 21 世纪初以来,不少学者针对这一问题研究了适用于尺度变化的理论方法。Malard 等^[22]在 TEM 模型基础上研究建立了潜流层功能与不同景观尺度的关系模型;Stanford 等^[23]在 Boulton 提出的潜流层生态功效概念的基础上,研究建立了不同时间尺度和空间尺度的潜流层生态功效模型。另外,在研究技术手段上,针对不同的尺度要求,传统技术和现代技术相互结合,多技术集成,实现多尺度问题的有机兼容。对于河段尺度或更小尺度的问题,通过野外监测和室内试验,集成应用示踪法和化学分析法进行定量研究。对于大尺度或多尺度融合的问题,在野外监测和室内试验的基础上,集成应用数值模拟技术进行定量研究。如 Poole 等^[24-25]应用数值模拟方法描述了不同时段潜流层三维空间的交流过程。由此可见,自 21 世纪以

来,多学科理论的交叉融合、多技术的集成应用,使不同尺度河流潜流层理论得到很大的丰富和完善,形成了较为完整的河流潜流层理论体系^[26]。

2 主要研究手段和方法

2.1 现场监测

现场监测主要有示踪法和地下测量法:①示踪法选用一定的化学试剂或参照指标,研究潜流交换速率、交换量大小以及潜流层地化反应、生化反应和生物特性等^[27]。常用的示踪剂有盐、若丹明等惰性试剂,常用的参照指标有机碳、氮素、水温等。②地下测量法是研究潜流带特性的最直接方法。通常是沿河流方向在河床或河岸布置一系列的的压力计、渗透计或测井,测量地下水头分布、渗透系数等水文地质参数,研究潜流流经、流速、流量、溶解氧、区域面积等的分布规律以及潜流交换对生物栖息地的影响等^[28-29]。

另外,也可以在不同位置直接抽取孔隙水,化验其化学成分或生物组成,研究潜流交换或溶质迁移情况^[30]。虽然地下测量法能够准确掌握现场实际情况,但是监测获得的水头、渗透系数等参数只能代表局部的条件。为了克服空间异质性的问题,就必须布置大量的测点,即便这样做也难以充分刻画空间异质性和累积效应。

2.2 数值模拟

数值模拟是利用现场数据和数学模型定量研究潜流交换的方法。目前比较成熟的数学模型有瞬时存储模型(transient storage model)和孔隙介质模型(porous media model)。

a. 瞬时存储模型。瞬时存储模型是将潜流层看成瞬时存储介质,模拟潜流交换和溶质扩散规律的模型。该模型最初是 Harvey 等^[31]应用一维对流扩散方程并耦合一阶质量通量方程建立的;Chol 等^[32-33]考虑非恒定流交换条件,耦合多阶过渡存储带以及河道与潜流带之间的溶质扩散方程,建立了非恒定二维、三维交换通量模型;Poole^[25]应用瞬时存储模型模拟了在不同时间的三维空间上的潜流交换规律。瞬时存储模型较好地解决了潜流层复杂非线性问题。

b. 孔隙介质模型。孔隙介质模型是将潜流交换看作孔隙介质内的地下水流。该模型最初是 Zaramella 等^[34]应用二维数学模型修正达西模型得到的,用于估计沙质河床的潜流交换量,后来在耦合河床压力场模型的基础上,开发了三维数学模型,用于模拟潜流流速场、压力场和交换量;Tonina 等^[35-37]耦合地下水运动、地表水运动、泥沙输运、污染物运移等方程,建立了浅滩-深潭性河床下三维潜流交换

模型以及河床地表水-地下水系统中水动力-泥沙输运-污染迁移三维数学模型,较好地模拟了河床潜流层压力场、流速场、泥沙输运、污染物等的变化规律。

2.3 室内试验

目前只有少量研究采用了室内试验探讨潜流层问题,通常是以水槽试验为主,选择砂或砾石作为填料塑造河床形态,研究平底、沙波或浅滩-深潭相间等不同形态对潜流交换的影响。另外,Sawyer 等^[38]利用水槽试验并结合数值模拟,研究了大型枯木对潜流温度场动态变化和热交换过程。

3 结论与展望

自 1959 年正式提出“潜流”一词以来,很多学者对潜流交换问题开展了大量研究,重点研究了河流潜流层潜流垂向交换的影响因素、交换过程等,取得了丰富的成果,这对我国相关领域的研究具有重要的借鉴意义。笔者认为,我国应在现有研究的基础上,针对我国河流的特点,借鉴国外研究成果,深入研究河流潜流层作用机理和动态过程,为我国河流保护提供理论依据。

a. 研究内容。①深入研究河岸带区域潜流交换机理。现有的研究大多是针对河床区域潜流层,研究了垂向交换的相关问题,而潜流交换不仅仅会发生在河床区域,也同样会出生在河岸带区域;并且由于河岸带自身独特的位置、地貌特点、纵向形态、覆盖物条件、人为扰动方式等因素,其潜流交换机制与河床区域潜流交换机制有较大差异,尤其是在交换方向上,不仅有垂向和纵向交换,还有侧向交换。因此,应借鉴已有的河床潜流交换理论,探索不同尺度河岸带下边缘区潜流层的边缘效应,研究河岸带潜流交换的水动力学机理、溶质迁移、生态过程,建立能准确描述河岸带潜流运动、泥沙输运、溶质迁移、生态响应等动态过程的数学模型。②探索研究潜流层健康机制,加强潜流层生态修复研究。潜流层具有重要的水文调蓄、环境缓冲、生态保护等功能,是地下水和地表水系统的重要屏障,所以保持潜流层的健康状态对维护河流系统和地下水系统的健康运行具有十分重要的意义。但目前还未开展潜流层健康机制的研究,因此应深入研究不同条件下潜流层生态过程和响应机制,研究潜流层生物适宜生存的生境条件和区域大小,探索诊断潜流层健康的指标、标准和方法。在潜流层机理研究的基础上,针对退化原因,加强潜流层生态修复机理和方法的研究。

b. 研究方法。潜流层作为地表水与地下水的交界区域,同时受河流流量、水深、地形、地貌、沉积物渗透系数、地下水位、土地利用、覆盖物条件等诸

多因素的影响,其水动力学过程、水文交换及其物理、化学、生物进程极其复杂,在未来的研究中应着眼于基本动力学方法的应用和拓展,集成应用现代水文学、河流动力学、地理学、生态学、生物学、环境学、数学等学科理论开展研究。

c. 研究手段。河流潜流层动态过程涉及多因素、多尺度和大数据量,研究中应着眼于传统技术与现代技术的综合应用与拓展,加强新技术的开发。在现场监测、室内试验和数值模拟的基础上,集成数字仿真技术、GIS 技术、网络技术等现代计算机技术,开发三维实时动态仿真系统,为用户准确、直观、实时地提供模拟、预测和决策信息,有效指导实际应用。

参考文献:

[1] BUTTURINI A, BERNAL S, SABATER S, et al. The influence of riparian-hyporheic zone on the hydrological responses in an intermittent stream [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2002, 6(3) : 515-525.

[2] 袁兴中, 罗固源. 溪流生态系统潜流带生态学研究概述 [J]. *生态学报*, 2003, 23(5) : 133-139. (YUAN Xinzhong, LUO Guyuan. A brief review for ecological studies on hyporheic zone of stream ecosystem [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5) : 133-139. (in Chinese))

[3] 吴健, 黄沈发, 唐浩, 等. 河流潜流带的生态系统健康研究进展 [J]. *水资源保护*, 2006, 22(5) : 5-8. (WU Jian, HUANG Shenfa, TANG Hao, et al. Review of research on ecosystem health in riverine phreatic zones [J]. *Water Resource Protection*, 2006, 22(5) : 5-8. (in Chinese))

[4] 金光球, 李凌. 河流中潜流交换研究进展 [J]. *水科学进展*, 2008, 19(2) : 285-293. (JIN Guangqiu, LI Ling. Advancement in the hyporheic exchange in rivers [J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(2) : 285-293. (in Chinese))

[5] BOULTON A J, DATRY T, KASAHARA T, et al. Ecology and management of the hyporheic zone: stream-groundwater interactions of running waters and their floodplains [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2010, 29(1) : 26-40.

[6] ROBERTSON A L, WOOD P J. Ecology of the hyporheic zone: origins, current knowledge and future directions [J]. *Fundamental Applied Limnology*, 2010, 176(4) : 279-289.

[7] STANDFORD J A, GAUFIN A R. Hyporheic communities of two montana rivers [J]. *Science*, 1974, 185 : 700-702.

[8] HYNES H B N. The stream and its valley [J]. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für theoretische und Angewandte Limnologie*, 1975, 19 : 1-15.

[9] HYNES H B N. Groundwater and stream ecology [J]. *Hydrobiologia*, 1983, 100(1) : 93-99.

[10] TRISK F J, KENNED Y, AVANZINO R J. Retention and

transport of nutrients in a third-order stream in northwestern California: hyporheic processes [J]. *Ecology*, 1989, 70(6) : 1893-1905.

[11] GIBERT J, DOLE-OLIVIER M J, MARMONIER P, et al. Surface water-groundwater ecotones [C] // NAIMAN R J, DECAMPS H. *The ecology and management of aquatic-terrestrial ecotones*. Carnforth UK: United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization, Paris and Parthenon Publishers, 1990 : 199-226.

[12] VERVERIER P, GIBERT J, MARMONIER P, et al. A perspective on the permeability of the surface freshwater groundwater ecotone [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1992, 11(1) : 93-102.

[13] BENCALA K E. A perspective on stream-catchment connections [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1993, 12(1) : 44-47.

[14] STANFORD J A, WARD J V. An ecosystem perspective of alluvial rivers: connectivity and the hyporheic corridor [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1993, 12(1) : 48-60.

[15] STANLEY E H, BOULTON J. Hydrology and the distribution of hyporheos: perspectives from a mesic river and a desert stream [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1993, 12(1) : 79-83.

[16] VALETT H M, MORICE J A, DAHM C N, et al. Parent lithology, surface-groundwater exchange, and nitrate retention in headwater streams [J]. *Limnology and Oceanography*, 1996, 41(2) : 333-345.

[17] WONDZELL S M, SWANSON F J. Seasonal and storm dynamics of the hyporheic zone of a 4th-order mountain stream II: nutrient cycling [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1996, 15(1) : 20-34.

[18] FINDLAY S. Importance of surface-subsurface exchange in stream ecosystems: the hyporheic zone [J]. *Limnology and Oceanography*, 1995, 40(1) : 159-164.

[19] FISHER S G, GRIMM N B, MARTI E, et al. Material spiralling in stream corridors: a telescoping ecosystem model [J]. *Ecosystems* 1998, 1(1) : 19-34.

[20] BOULTON A J, FOSTER J G. Effects of buried leaf litter and vertical hydrologic exchange on hyporheic water chemistry and fauna in a gravel-bed river in northern New South Wales, Australia [J]. *Freshwater Biology*, 1998, 40(2) : 229-243.

[21] JONES J B, MULHOLLAND P J. *Streams and ground waters* [M]. San Diego: Academic Press, 2000.

[22] MALARD F, TOCKENER K, DOLE-OLIVER M J, et al. A landscape perspective of surface-subsurface hydrological exchanges in river corridors [J]. *Freshwater Biology*, 2002, 47(4) : 621-640.

[23] STANFORD J A, LORANG M S, HAUER F R. The shifting habitat mosaic of river ecosystems [J]. *Verhandlungen der*

- Internationalen Vereinigung für Limnologie, 2005, 29: 123-136.
- [24] POOLE G C, STANFORD J A, RUNNING S W, et al. Multiscale geomorphic drivers of groundwater flow paths: subsurface hydrologic dynamics and hyporheic habitat diversity[J]. Journal of the North American Benthological Society, 2006, 25(2): 288-303.
- [25] POOLE G C. Stream hydrogeomorphology as a physical science basis for advances in stream ecology[J]. Journal of the North American Benthological Society, 2010, 29(1): 12-25.
- [26] KRAUSE S, HANNAH D M, FLECKENSTEIN J H, et al. Inter-disciplinary perspectives on processes in the hyporheic zone[J]. Ecohydrology, 2011, 4(4): 481-499.
- [27] ZARNETSKIE J P, GOOSEFF M N, BOWDEN W B, et al. Influence of morphology and permafrost dynamics on hyporheic exchange in arctic headwater streams under warming climate conditions [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(2): L02501.
- [28] HARVEY J W, BENCALA K E. The effect of streambed topography on surface-subsurface water interactions in mountain catchments [J]. Water Resources Research, 1993, 29(1): 89-98.
- [29] SLIVA L, WILLIAMS D D. Responses of hyporheic meiofauna to habitat manipulation [J]. Hydrobiologia, 2005, 548(1): 217-232.
- [30] FRANKEN R J M, STOREY R G, WILLIAMS D D. Biological, chemical and physical characteristics of downwelling and upwelling zones in the hyporheic zone of a north-temperate stream [J]. Hydrobiologia, 2001, 444(1/2/3): 183-195.
- [31] HARVEY C, GORELICK S M. Rate-limited mass transfer or macrodispersion: which dominates plume evolution at the macrodispersion experiment (MADE) site? [J]. Water Resources Research, 2000, 36(3): 637-650.
- [32] CHOL J, HARVEY J D, CONKLIN M H. Characterizing multiple timescales of stream and storage zone interactions that affect solute fate and transport in streams[J]. Water Resources Research, 2000, 36(6): 1511-1518.
- [33] de SMED T F. Analytical solution and analysis of solute transport in rivers affected by diffusive transfer in the hyporheic zone[J]. Journal of Hydrology, 2007, 339(1/2): 29-38.
- [34] ZARAMELLA M, PACKMAN A I, MARION A. Application of the transient storage model to analyze advective hyporheic exchange with deep and shallow sediment beds [J]. Water Resources Research, 2003, 39(7): 1173-1200.
- [35] TONINA D, BUFFINGTON J M. Hyporheic exchange in gravel-bed rivers with poolriffle morphology: laboratory experiments and three-dimensional modeling [J]. Water Resources Research, 2007, 43: W01421.
- [36] HE Z. Numerical simulation of flow, sediment, and contaminant transport in integrated surface-subsurface systems [D]. Oxford: University of Mississippi, 2007.
- [37] HE Z, WU W, WANG S S Y. An integrated 2D surface and 3D subsurface contaminant transport model considering soil erosion and sorption[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2009, 135(12): 1028-1040.
- [38] SAWYER A H, CARDENAS B M, BUTTLES J. Hyporheic temperature dynamics and heat exchange near channel-spanning logs[J]. Water Resources Research, 2012, 48: W01529.

(收稿日期: 2012-09-10 编辑: 周红梅)

(上接第 56 页)

- [2] 张雷. 超前钻探在隧道施工中的应用[J]. 科技传播, 2012(2): 58-59. ((ZHANG Len. Drilling ahead in tunnel construction [J]. Public Communication of Science & Technology, 2012(2): 58-59. (in Chinese))
- [3] 姚宁平. 我国煤矿井下近水平定向钻进技术的发展[J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(4): 78-80. (YAO Ningbin. Development trend of nearly horizontal directional drilling technology in coal mines of China [J]. Coal Geology & Exploration, 2008, 36(4): 78-80. (in Chinese))
- [4] 王爱国, 王敏生, 唐志军, 等. 深部薄油层双阶梯水平井钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(3): 13-15. (WANG Aiguo, WANG Minsheng, TANG Zhijie, et al. Double staircase horizontal drilling technology in deep thin reservoirs [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003 31(3): 13-15. (in Chinese))
- [5] 王建强, 李国民, 赵洪波, 等. 流固耦合作用下水平定向孔壁稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(4): 796-801. (WANG Jianqiang, LI Guomin, ZHAO Hongbo, et al. Stability analysis of a borehole wall during horizontal directional drilling in fluid-solid coupling condition [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(4): 796-801. (in Chinese))
- [6] 闫振来, 韩来聚, 李作会, 等. 胜利油田水平井地质导向钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(1): 4-8. (YAN Zhenlai, HAN Laiju, LI Zuohui, et al. Geo-steering drilling technique of horizontal wells in Shengli oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(1): 4-8. (in Chinese))
- [7] 邵明利, 乌效鸣. 非开挖水平孔的孔壁稳定性分析[J]. 非开挖技术, 2008(5): 5-7. (ZHAO Mingli, WU Xiaoming. Trenchless horizontal bore hole wall stability analysis [J]. Trenchless Technology, 2008(5): 5-7. (in Chinese))

(收稿日期: 2012-11-29 编辑: 熊水斌)