

河流潜流带中胶体迁移的研究进展

杨小全^{1,2} 金光球¹ 李 凌¹ 曹 森¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 贵阳铝镁设计研究院, 贵州 贵阳 550081)

摘要 分析潜流带中形成胶体的物理、化学机理, 以及胶体在潜流带中泵吸交换、冲淤交换、沉降、过滤和截留的各种迁移机理。阐述影响胶体在潜流带中迁移的因素、胶体对污染物在河流中迁移的影响以及胶体对潜流带生态环境的影响, 并给出了胶体在河流中迁移的定量模型。最后对胶体在潜流带中的迁移研究现存的主要问题及未来研究方向提出了看法。

关键词 潜流带 潜流交换 胶体沉降 胶体堵塞

中图分类号 :O648.12⁺1 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2010)06-0078-06

Advances in researches on colloid transport in hyporheic zone//YANG Xiao-quan^{1,2}, JIN Guang-qiu¹, LI Ling¹, CAO Miao¹
(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Guiyang Aluminium Magnesium Design and Research Institute, Guiyang 550081, China)

Abstract: The physical and chemical mechanisms of colloid formation and transport in the hyporheic zone were analyzed, including pumping exchange, turnover exchange, sedimentation and filtering effect. The key factors for the colloid transport in the hyporheic zone and the influences of the colloids on the transport of pollutants in rivers as well as their influences on the ecological environment in the hyporheic zone were discussed. A quantitative model for the colloid transport in rivers was proposed. Some recommendations were put forward with regard to the main problems and future research directions of colloid transport in the hyporheic zone.

Key words: hyporheic zone; hyporheic exchange; colloid sedimentation; colloid blockage

胶体是指颗粒粒径在 1.0 nm 到 10.0 μm 之间的悬浮分散体系^[1]。胶体广泛存在于河流系统中, 河流中的胶体可分为有机胶体和无机胶体两大类。无机胶体主要包括金属氧化物、矿物黏土、硅酸盐、碳酸盐等; 有机胶体主要包括腐蚀物质、病毒、细菌、人工合成的有机大分子等^[2]。越来越多的研究表明: 河流中的胶体本身对河流生态系统来说是污染物, 但同时它还可以吸附其他污染物。胶体的存在是影响吸附性污染物迁移的重要因素, 是吸附性污染物的携带者^[3-6]。Buddemeier 等^[7]通过实地研究发现, 在危险废弃物处或者临近天然铀堆积处由于移动性胶体的存在促使阳离子金属和放射核的迁移。Kan 等^[8]发现溶解的有机物质或者胶体可以增强 DDT 的迁移。由于胶体颗粒很小, 具有较大的特殊性表面, 对污染物(如重金属、有机复合物与放射性核)具有较强的吸附能力, 同时促进了这些污染物在河流地表水和地下水交混区域——潜流带中的移动。迁移到河床中的胶体会破坏潜流带的水环境, 影响潜

流带中水生生物的栖息场所, 损害潜流水生态系统的功能和结构。因此, 研究胶体在河流潜流带中的迁移具有非常重要的意义。

1 胶体在潜流带中的形成机理

潜流带是指河流河床内水分饱和的沉积物层, 是河流地表水和地下水相互作用的区域, 也是河床中能与河流存在物质和能量交换的区域^[9-10]。图 1 是潜流带位置示意图。潜流带中有很多因素可以促使胶体的形成, 归纳起来主要有物理扰动和化学条件变化^[11]。例如, 人工抽水或注水试验、快速降雨入渗、裂隙介质中的地下水流动、潜流带中水溶液离子摩尔浓度(简称浓度, 下同)或 pH 值的变化、矿物表面吸附离子或大分子会造成表面电荷电性的改变, 这些都可以促使胶体的形成。

1.1 物理扰动促使胶体形成

在潜流带中, 促使胶体形成的物理扰动主要是通过增大流速来实现, 这种增大流速的方法主要有

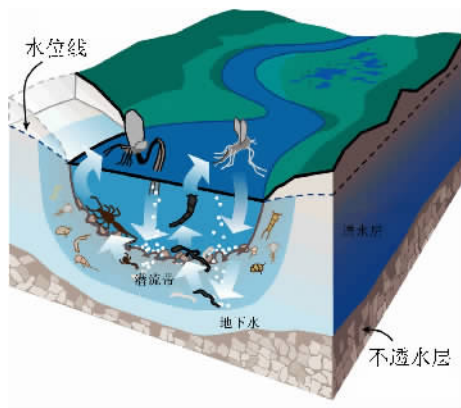


图1 潜流带位置示意图

人工抽水或注水试验、快速降雨入渗、裂隙介质中的地下水流动。当潜流带中水的流速超过正常流速时,粒径在胶体范围内的颗粒就可能受水动力剪切作用而转化为胶体态物质。Puls等^[12]将泵吸速度从0.6 L/min增大到92 L/min,发现在金属污染区的地下水取样收集到的胶体粒径随之增大。对于因大气降水入渗所形成的胶体,其浓度不仅与降水入渗速度有关,而且与降水时间也有关系。Kaplan等^[13]观测出在3 m×3 m×1.5 m的土柱中水流速度和胶体浓度的简单关系。在裂隙中,矿物风化后可以形成胶体粒径范围内的颗粒,在高速水流的作用下,这些颗粒可以转化为胶体态物质。Degueudre等^[14]在瑞士的Grimsel测试点探测出花岗岩中的断裂处有大量粒径为40~1 000 nm的胶体存在。

1.2 化学条件变化促使胶体形成

潜流带中,化学条件的变化同样是促使胶体形成的重要因素,化学扰动主要包括以下2个方面。①潜流带中水溶液pH值的变化,以及为治理含水层污染问题加入表面活性剂,都可能促使潜流带中胶体的形成。Muecke^[15]发现引入表面活性剂可以促进石油的储存和胶体的形成。②离子浓度的降低也可以促进胶体的形成。降雨渗透、淡水灌溉农田、人工注水试验、二次石油开采等事件均可造成潜流带中离子浓度的降低,这将进一步引发潜流带中的矿物微粒转化为胶体态物质,致使潜流带中的胶体浓度增大。扩散双电层理论认为:由于双电层的厚度会随着水化学条件的改变而改变,从而使双电层斥力受到水化学条件变化的影响。当潜流带中离子浓度降低时,双电层厚度变大,双电层斥力随之增加,导致矿物颗粒脱离含水层表面从而形成胶体^[11]。

1.3 胶体与污染物的结合

相对于预测胶体迁移,目前对于胶体与污染物结合程度和范围的预测要精确得多。由于胶体粒径小,比表面积大,大多数胶体是低溶解态污染物的有

效吸附剂^[11]。许多潜流带中的无机胶体(如腐蚀物、金属氧化物、碳酸盐)在离子交换和表面络合的作用下对放射性物质和金属的吸附非常有效。污染物和胶体之间结合力的强弱对胶体携带污染物的迁移有着重要的影响,当吸附态的污染物与胶体之间的相互作用弱于吸附态和溶解态污染物之间的平衡时,吸附态污染物将从胶体中脱附出来,重新建立新的平衡。随着吸附质和胶体之间作用的增强,吸附质从胶体表面脱附出来的时间将会增加,导致胶体携带污染物的距离增加。如果胶体和污染物的结合力不是很强,这将不能保证移动性胶体有效地促进污染物的迁移。Vilks等^[16]基于放射性同位素的不平衡吸附特性,预测从加拿大Cigar湖中的沉积物中释放出被胶体吸附的金属铀将长达8 000年。

2 胶体在潜流带中的迁移机理

胶体在潜流带中的迁移主要受3种作用影响:①泵吸交换和冲淤交换作用;②沉降作用;③过滤作用^[17-18]。过滤主要是由化学和静电作用引起的,由于沉降和过滤的作用,胶体颗粒的潜流交换速率比保守性溶质的潜流交换速率快。同时,由于与河床之间的长期相互作用,胶体颗粒很容易堵塞河床。

2.1 泵吸交换和冲淤交换作用

泵吸交换主要是由河床形态或者其他不规则性引起河床表面的压力变化,这些压力变化诱导了对流传输,促使胶体向河床中迁移^[19]。冲淤交换是指当河床形态发生改变时,河床的上游迎风面受到水流冲刷,泥沙被冲走,释放孔隙水^[8];冲走的泥沙在河床的下游避风坡处沉降,截留河道水充当河床新位置的孔隙水,这个释放和截留孔隙水的过程引起河床与河流间的胶体交换,称为冲淤交换^[20]。冲淤交换主要发生在河床冲刷区或者河床形态改变区。图2是泵吸交换和冲淤交换示意图。

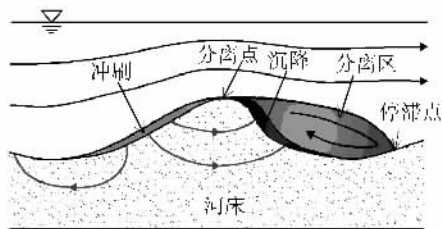


图2 典型河床形态引起的泵吸交换和冲淤交换示意图^[10]

2.2 沉降作用

在河床中迁移的胶体,当颗粒粒径小于2 μm时,将不会沉降到河床下面,这是由于布朗力使他们悬浮在水中,因此被称为布朗胶体。这些布朗胶体会沿着孔隙水流动方向迁移并回到河流中^[21]。但是,

大多数的胶体(非布朗胶体)受自身重力作用的影响有一个沉积率。这样泵吸作用将不能带动颗粒在河床中向上移动,颗粒将偏离流线而有下沉的趋势,进入河床中的颗粒可能会被河床吸附或过滤掉。Rodier 等^[22]应用短脉冲技术研究胶体在充满小玻璃颗粒的圆柱中迁移,进而确定胶体的沉积率。Yan 等^[23]分析了短脉冲穿透试验曲线,确定了胶体在土柱中的沉积率和释放率,同时,短脉冲穿透试验也可应用在研究污染物在土壤中的迁移模拟中,McCaulou 等^[24]运用这种技术研究细菌在多孔介质中的迁移。

2.3 过滤作用

与胶体的沉积作用一样,胶体的过滤作用在泵吸模型中同样也是必须考虑的重要因素,主要包括移动性胶体在河床介质附近的物理过程以及颗粒之间的静电和化学作用。一般利用过滤系数来描述胶体在河床中的过滤程度^[25],这种方法已经比较成熟,并且在许多理论预测和试验测量文献中被大量提及^[26-27],确定过滤系数的模型为

$$\frac{dC}{ds} = -\lambda_f C \quad (1)$$

式中: C 为胶体在孔隙水中的摩尔浓度; s 为胶体在河床中的迁移距离; λ_f 为河床对胶体的过滤系数。

2.4 堵塞现象

悬浮水体中的胶体沉积到河床颗粒表面是一个水动力现象,表现为一个短暂的、时间独立的沉积过程。当胶体堆积在颗粒表面时,颗粒种类和颗粒之间的相互作用决定了沉积率是降低还是升高,当颗粒之间相互排斥时,沉积率降低,这种表面排斥现象称为堵塞现象^[28]。Johnson 等^[29]研究了胶体在河床中的堵塞现象,他们建立了动力堵塞函数模型来描述颗粒的沉积作用,模型包括线性模型和非线性模型。Saiers 等^[30]采用一阶和二阶堵塞动力方法模拟了胶体锐钛矿、水软铝石以及硅石在含沙圆柱中的迁移和沉积;Abdel-Salam 等^[31]考虑了胶体是否渗透到河床介质中的2种条件,给出胶体在同一介质中迁移的一维解析解;Rehg 等^[28]通过不同粒径胶体在循环水槽中迁移的对比试验发现,胶体的粒径大小是影响胶体在河床中迁移和河床淤堵的重要因素。大颗粒胶体随着时间的增加在河床中的沉降量比小颗粒的沉降量多,而小颗粒的胶体迁移进入河床的深度比大颗粒的要深。

3 影响胶体迁移的因素

发生在潜流带中的胶体迁移受多种因素的影响,过程十分复杂。某些影响因素可能通过影响潜

流交换,进而影响胶体在潜流带中的迁移。概括起来主要包括3个方面的影响:①河流上覆水的流速、深度以及河流形态。②河床沉积物本身的颗粒粒径大小、粒径分布的均匀性、水力传导系数和渗透系数,以及河床表面形状。③河流的背景条件,这主要是指河流中离子浓度和pH值大小的影响。

3.1 河流上覆水

很多试验证实河流上覆水的流速、深度以及河流形态是影响潜流交换的重要因素。Packman 等^[32]通过多组水槽试验分析得出:河流上覆水与河床之间的交换率与河流流速的平方成正比,与河床的深度成反比。随着河流流量的增大,相应的湿周增大,从而增大了河流上覆水与河床的接触面积,进而增大了胶体迁移进入河床的几率;河岸浸润的季节性变化对潜流交换势的影响远小于河流流速对潜流交换势的影响^[33]。同时潜流交换对胶体在潜流带中的迁移有重要的作用,因此河流上覆水特性对胶体迁移具有显著的影响。

3.2 河床介质

河床介质本身的颗粒级配、颗粒分布情况以及河床表面沙丘的形状是影响胶体迁移的重要因素。胶体迁移速度与河床介质的渗透性成正比,与沉积物的孔隙率成反比。胶体在高渗透性的砂砾中迁移的速度非常快,致使河床孔隙水和河流地表水经过几个小时后基本上达到完全的混合。胶体迁移的侧向程度和垂向深度是由包括泥沙颗粒大小和渗透性在内的表面河道地形以及河道特征决定的^[34]。Bradford 等^[35]做了饱和土壤圆柱试验,探测出胶体颗粒大小与土壤颗粒分布对多孔介质中胶体迁移的影响。结果表明:出口处胶体浓度和胶体吸附在多孔介质中的空间分布主要依赖于胶体颗粒的大小与土壤颗粒分布。Marion 等^[36]发现各种形态的河床对应的交换量关系为:平整河床形态、自然形成的河床形态、正弦波形河床以及三角形河床对应的交换量依次增大。

3.3 河流背景条件

影响悬沙或者胶体在河床中沉积的背景因素主要包括河流中离子浓度和pH值的大小。随着离子浓度的增加,胶体与河床介质之间的相互排斥作用减弱,使更多的胶体在迁移过程中被过滤在河床介质中,导致河流上覆水中的悬浮泥沙减少,从而引起过滤系数的增加。同时,腐蚀性酸、钙离子以及示踪金属等对胶体迁移也有着重要的影响。腐蚀性酸对高岭土的吸附增加了高岭土胶体表面负电荷,从而降低了胶体沉积量。不同流速下的对比试验表明,表层具有腐蚀性涂层的高岭土胶体的沉积率服从一

阶动力率规律,其沉积率系数随着悬浮液中钙离子浓度的增加而增加。Rachid 等^[37]通过注入 2 种不同离子(Pb^{2+} 、 Cu^{2+})浓度的悬浮液来确定金属离子对胶体迁移的影响,结果表明离子浓度越高,高岭土胶体沉积率越大,这是因为阳离子对表层具有腐蚀性涂层的高岭土胶体具有较强的吸附力。

4 胶体对污染物在河流中迁移的影响及其定量模型

4.1 胶体对污染物在河流中迁移的影响

近些年来,很多研究都证实了胶体的存在在一定程度上改变了污染物在河流中的迁移。目前主要是通过 2 个方面来研究:①胶体本身与河床的相互作用,包括对流扩散、沉积释放,其中沉积部分可能堵塞孔隙从而影响到胶体和污染物向河床介质中迁移。②胶体对污染物在河流潜流带中迁移的促进或阻碍作用。传统对于污染物在潜流带中迁移的研究主要是通过对流扩散理论来进行,主要考虑潜流带为液-固两相系统,但这样得出的迁移距离是有限的。而实测的结果表明,污染物实际迁移的距离远大于预测结果,这主要是由于胶体具有较大的吸附性表面,能吸附污染物并携带污染物一起迁移,胶体的吸附特性对低溶解度污染物的迁移有着明显的促进作用^[38-40]。Ren 等^[41]试验得出在存在高岭土胶体的情况下,锌在河床中的滞留时间比存在硅胶体的情况下要长。这主要是因为高岭土对锌的吸附能力强于硅胶体对锌的吸附能力,而且高岭土更容易沉积在河床中。赤铁矿的浓度会影响锌或铜的迁移,浓度高的赤铁矿在河床中沉降得多,被其吸附的锌或铜更多地滞留在河床中,从而河流上覆水中锌或铜的浓度下降得更快。某些胶体和污染物的结合力不是很强,则该类胶体的移动将不能有效地促进污染物的迁移,例如苯酚、西玛津除草剂和杀虫剂等。

4.2 胶体在河床中迁移的定量模型

在潜流带中,胶体的聚沉与迁移规律对污染物的迁移和归宿有着至关重要的影响,因此,采用模型进行模拟预测是很有必要的。Corapcioglu 等^[42]建立了胶体在非饱和介质中迁移的一维均质数学模型,他们以四相(水相、气相、介质固体相和胶体相)多孔介质模拟地下水环境。Johnson 等^[43]建立了胶体在异质多孔介质中迁移的一维数学模型。Sun 等^[44]建立胶体在异质多孔介质中迁移的二维数学模型,并使用有限元方法得到方程的数值解。Packman 等^[25]做了多组循环水槽试验,通过泵吸-沉积模型模拟胶体的迁移过程,取得了较好的成果。总体来讲目前存在的迁移模型主要是基于对流扩散模型建立起来

的二维对流-弥散-沉降-释放模型。目前存在的模型已经能够很好地反映潜流带中胶体的迁移过程。

在多孔介质中,胶体颗粒迁移过程可通过二维对流-弥散-沉降-释放模型来模拟:

$$\frac{\partial C_c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C_c}{\partial x_j} - u_i C_c \right) - K_1 C_c + \frac{K_2}{\theta} S_c \quad (2)$$

$$\frac{1}{\theta} \frac{\partial S_c}{\partial t} = K_1 C_c - \frac{K_2}{\theta} S_c \quad (3)$$

式中: C_c 为孔隙水污染物的摩尔浓度; t 为时间; x_i 和 x_j 分别为 i 方向和 j 方向的传输距离; D_{ij} 为水动力弥散系数张量分量; u_i 为孔隙水的速度; K_1 为胶体的沉积系数; K_2 为胶体的释放系数; θ 为介质孔隙率; S_c 为沉积在河床中的胶体摩尔浓度。

5 目前存在的问题

近年来,胶体对污染物迁移的促进作用已经引起了人们的广泛关注。因此,胶体研究所涉及的范围越来越广,深度也越来越大。但是,由于开展胶体在潜流带中迁移研究的时间还不是很长,在胶体研究领域内尚有不少问题需要解决:①在对潜流带中胶体的研究过程中,处理胶体的絮凝仍然是一个棘手的问题,目前尚未有合理的方法可以解决。②对胶体在潜流带中迁移的具体过程研究不足,这主要受到抽样胶体技术和测量技术的限制,因此需要提高孔隙水中胶体的检测手段,以进一步认识胶体在多孔介质的迁移机理和过程。③目前很多研究是在小尺度上研究和估计胶体的迁移,如何对自然河流中大尺度的胶体迁移进行量化或者估计,将是一个很重要的研究方向。④河床结构不均匀介质对胶体在潜流带的影响研究不足,自然河床中大多是不均匀的各向异性沉积物,对胶体在其中的迁移机理以及模拟方式有待于进一步研究。⑤胶体在河床中的迁移对潜流带生态环境影响的研究尚显不足,包括胶体对微生物的影响、对生物栖息地的影响、对潜流带生态结构和生态群落的影响。⑥缺乏对胶体在潜流带中迁移和沉积过程的模拟。前人虽然建立了简单的概化理论模型——胶体的泵吸交换模型,但是这些模型主要分析潜流带的净交换量和界面通量,不能对整个过程进行有效的模拟。

参考文献:

- [1] HESHAM M B, AHMED E H. Two-dimensional modeling of contaminant transport in porous media in the presence of colloids[J]. *Advances in Water Resources*, 2005, 28(12): 1320-1335.
- [2] KRETZSCHMAR R, STICHER H. Colloid transport in natural porous media: influence of surface chemistry and flow velocity

- [J]. Physics and Chemistry of the Earth ,1998 ,23(2) :133-139.
- [3] JARVIS N J , VILLHOLTH K G , ULEN B. Modeling particle mobilization and leaching in macroporous soil [J]. European Journal of Soil Science , 1999 , 50 : 621-632.
- [4] WEERD H , LEIJNSE A , RIEMSDIJK W H. Transport of reactive colloids and contaminants in groundwater : effect of nonlinear kinetic interactions [J]. Journal of Contaminant Hydrology ,1998 ,33(3/4) 313-331.
- [5] 马晓轩,冉勇. 浅析环境科学中胶体分离的切向超滤技术 [J]. 水资源保护 , 2009 , 25(3) : 57-65.
- [6] KRETZSCHMAR R , BARMETTLER K , GROLIMUND D , et al. Experimental determination of colloid deposition rates and collision efficiencies in natural porous media [J]. Water Resources Research ,1997 ,33(5) :1129-1137.
- [7] BUDEMEIER R W , HUNT J R. Transport of colloidal contaminants in groundwater : radionuclide migration at the Nevada test site [J]. Applied Geochemistry , 1988 , 3(5) : 535-548.
- [8] KAN A T , TOMSON M B. Groundwater transport of hydrophobic organic compounds in the presence of dissolved organic matter [J]. Environmental Toxicology and Chemistry , 1990 , 9 : 256-263.
- [9] MALCOLM I A , SOULSBY C , YOUNGSON A F , et al. Hydrological influences on hyporheic water quality : implications for salmon egg survival [J]. Hydrological Processes , 2004 , 18(9) : 1543-1560.
- [10] 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.
- [11] RYAN J N , ELIMELECH M. Colloid mobilization and transport in groundwater [J]. Colloid and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects ,1996 , 107 : 1-56.
- [12] PULS R W , POWELL T R M. Transport of inorganic colloids through natural aquifer material : implications for contaminant transport [J]. Environmental Science and Technology , 1992 , 26(3) : 614-621.
- [13] KAPLAN D I , BERTSCH P M , ADRIANO D C , et al. Soil-borne mobile colloids as influenced by water flow and organic carbon [J]. Environmental Science and Technology , 1993 , 27(6) : 1193-1200.
- [14] DEGUELDRE C , BAEYENS B , GOERLICH W , et al. Colloids in water from a subsurface fracture in granitic rock , Grimsel Test Site , Switzerland [J]. Geochemical Society and the Meteoritical Society , 1989 , 53(3) : 603-610.
- [15] MUECKE T W. Formation fines and factors controlling their movement in porous media [J]. Journal of Petroleum Technology , 1979 , 31(2) : 144-150.
- [16] VILKS P , CRAMER J J , BACHINSKI D B , et al. Studies of colloids and suspended particles , Cigar Lake uranium deposit , Saskatchewan [J]. Applied Geochemistry ,1993 ,8(6) :605-616.
- [17] TUFENKJI N , MILLER G F , RYAN J N , et al. Transport of cryosporidium oocysts in porous media : role of straining and physicochemical filtration [J]. Environmental Science and Technology , 2004 , 38(22) : 5932-5938.
- [18] PACKMAN A I , BROOKS N H , MORGAN J J. Experimental techniques for laboratory investigation of clay colloid transport and filtration in a stream with a sand bed [J]. Water , Air , and Soil Pollution , 1997 , 99 : 113-122.
- [19] PACKMAN A I , SALEHIN M , ZARAMELLA M. Hyporheic exchange with gravel beds : basic hydrodynamic interactions and bedform-induced advective flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering , 2004 , 130(7) : 647-651.
- [20] ELLIOTT A H , BROOKS N H. Transfer of nonsorbing solutes to a streambed with bed forms : theory [J]. Water Resources Research , 1997 , 33(1) : 123-136.
- [21] PACKMAN A I , MACKAY J S. Interplay of stream-subsurface exchange , clay particle deposition , and streambed evolution [J]. Water Resources Research , 2003 , 39(4) : 1097.
- [22] RODIER E , DODDS J. An experimental study of the transport and capture of colloids in porous media by a chromatographic technique [J]. Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects ,1993 ,73(10) :77-87.
- [23] YAN C , DADOO R , ZHAO H , et al. Capillary electrochromatography : analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Analytical Chemistry , 1995 , 67(13) : 2026-2029.
- [24] McCAULOU D R , BALES R C , McCarthy J F. Use of short-pulse experiments to study bacteria transport through porous media [J]. Journal of Contaminant Hydrology ,1994 ,15(1/2) :1-14.
- [25] PACKMAN A I , BROOKS N H , MORGAN J J. A physicochemical model for colloid exchange between a stream and a sand streambed with bed forms [J]. Water Resources Research , 2000 , 36(8) : 2351-2362.
- [26] McDOWELL-BOYER L M , HUNT J R , SITAR N. Particle transport through porous media [J]. Water Resources Research , 1986 , 22(13) : 1901-1921.
- [27] SONG L , ELIMELECH M. Theory of concentration polarization in crossflow filtration [J]. Journal of the Chemical Society , Faraday Transactions , 1995 , 91(19) : 3389-3398.
- [28] REHG K J , PACKMAN A I , REN J , et al. Effects of suspended sediment characteristics and bed sediment transport on streambed clogging [J]. Hydrological Processes , 2005 , 19(2) : 413-427.
- [29] JOHNSON P R , ELIMELECH M. Dynamics of colloid deposition in porous media : blocking based on random sequential adsorption [J]. Langmuir , 1995 , 11(3) : 801-812.
- [30] SAIERS J E , HORNBERGER G M , HARVEY C F. Colloidal silica transport through structured , heterogeneous media [J].

Journal of Hydrology ,1994 ,163 :271-288.

[31] ABDEL-SALAM A , CHRYSIKOPOULOS C V. Analytical solutions for one-dimensional colloid transport in saturated fractures [J]. Advances in Water Resources ,1994 ,17(5) :283-296.

[32] PACKMAN A I , BROOKS N H , MORGAN J J. Kaolinite exchange between a stream and streambed : laboratory experiments and validation of a colloid transport model [J]. Water Resources Research ,2000 ,36(8) :2363-2372.

[33] REIDY C A. Variability of hyporheic zones in puget sound lowland streams [D]. Washington D. C. : University of Washington ,2004.

[34] ZARAMELLA M , MARION A , PACKMAN A I. Applicability of the transient storage model to the hyporheic exchange of metals [J]. Journal of Contaminant Hydrology ,2006 ,84(1/ 2) :21-35.

[35] BRADFORD S A , YATES S R , BETTAHAR M , et al. Physical factors affecting the transport and fate of colloids in saturated porous media [J]. Water Resources Research ,2002 ,38(12) :1329-1340.

[36] MARION A , BELLINELLO M , GUYMER I , et al. Effect of bedform geometry on the penetration of nonreactive solutes into a streambed [J]. Water Resources Research ,2002 ,38(10) :1-12.

[37] RACHID A A , JAMMAA D , MOHAMED H. Transport of kaolinite colloids through quartz sand : influence of humic acid , Ca^{2+} , and trace metals [J]. Colloid and Interface Science ,2002 ,253 :1-8.

[38] REN J , PACKMAN A I. Effects of background water composition on stream-subsurface exchange of submicron exchange of submicron colloids [J]. Journal of Environmental Engineering ,2002 ,128(7) :624-634.

[39] REN J. Exchange of adsorbing contaminants between streams and streambeds in the presence of colloidal particle [D]. Illionis : Northwestern University ,2003.

[40] REN J , PACKMAN A I. Coupled stream-subsurface exchange of colloidal hematite and dissolved zinc , copper , and phosphate [J]. Environmental Science and Technology ,2005 ,39(17) :6387-6394.

[41] REN J , PACKMAN A I. Stream-subsurface exchange of zinc in the presence of silica and kaolinite [J]. Environmental Science and Technology ,2004 ,38(24) :6571-6581.

[42] CORAPCIOGLU M Y , CHOI H. Modeling colloid transport in unsaturated porous media and validation with laboratory column data [J]. Water Resources Research ,1996 ,32(12) :3437-3449.

[43] JOHNSON P R , SUN N , ELIMELECH M. Colloid transport in geochemically heterogeneous porous media : modeling and measurements [J]. Environmental Science and Technology ,1996 ,30(11) :3284-3293.

[44] SUN N , ELIMELECH M , SUN N Z. A novel two dimensional model for colloid transport in physically and geochemically heterogeneous porous media [J]. Journal of Contaminant Hydrology ,2001 ,49(3/4) :173-199.

(收稿日期 2009-12-23 编辑 骆超)

(上接第 73 页)

b. 为了验证动态规划逐次渐近法所得解的最优性 ,选取不同的起始廊道 ,观察程序目标值是否收敛到同一值。采用了 2 种途径改善初始轨迹 ,一是直接改变某一决策变量的初始赋值 ;二是改变叶片安放角度和开机台数的决策次序。

c. 动态规划逐次渐近法同样适用于站内多机组变频变速优化运行、叶片全调节变频变速组合优化运行问题的求解 ,丰富了站内多机组变工况优化运行理论 ,同时为并联泵站、梯级泵站子系统优化模型计算方法的选择提供了参考。

参考文献 :

[1] 马文正 ,丘传忻 ,贺贵明.泵站运行的优化调度 [J].水利学报 ,1993(3) 35-41.

[2] 陈守伦 ,芮钧 ,徐青 ,等.泵站日优化运行调度研究 [J].

水电能源科学 ,2003 ,21(3) 82-83.

[3] 陆一忠.大型泵站优化调度及其经济问题探讨 [D].南京 :河海大学 ,2003.

[4] 冯晓莉 ,仇宝云 ,黄海田 ,等.南水北调东线江都排灌站优化运行研究 [J].水力发电学报 ,2008 ,27(4) :130-134.

[5] 程吉林.大系统试验选优理论和应用 [M].上海 :上海科学技术出版社 ,2002.

[6] COOPER L , COOPER M W. Introduction to dynamic programming [M]. 张有为 ,译.北京 :国防工业出版社 ,1985.

[7] BELLMAN R E. Introduction to the mathematical theory of control processes [M]. New York :Academic Press ,1967.

[8] BELLMAN R E , DREYFUS S E. Applied dynamic programming [M]. Princeton :Princeton University Press ,1962.

[9] 仇锦先 ,程吉林 ,张仁田 ,等.江都站不同型号机组叶片全调节优化运行效果分析 [J].南水北调与水利科技 ,2009(6) 85-89.

(收稿日期 2010-03-02 编辑 骆超)