

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.05.010

用于大规模区域供冷的地下含水层输运海洋冷量技术模拟

夏冬莺,马 捷

(上海交通大学海洋工程国家重点实验室,上海 200030)

摘要 利用沿海地下含水层结构输运冷媒水,传递来自海洋的冷量,以构筑大中型城市地区性节能的建筑空调系统,从而实现大规模区域的廉价空调供冷。应用控制容积法和交替方向隐式求解方法,对含水层中的热量运移进行数值模拟,研究分析热弥散系数、岩层比热容及水力传导系数对热量运移过程的影响。研究证明,该方案有效降低了含水层中的地下水温度,借助大流量、大扬程的抽水并将冷媒水过量注入地下,能够有效控制地面沉降,促成已沉降地面的微量回升。此技术是一项符合可持续发展原则的地区性空调技术,具有节约能源、保护环境的积极意义。

关键词 地下含水层;海洋冷量;冷媒水;热量运移

中图分类号 :TU831 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2009)05-0037-05

Simulation of technology for transferring cooling capacity of the sea through an underground aquifer for large-scale district cooling//XIA Dong-ying, MA Jie(*State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China*)

Abstract : Chilled water that carries the cooling capacity of the sea through underground aquifers can be used to construct regional energy-saving air-conditioning systems for districts in coastal cities. Thus, a large-scale economic air-conditioning system can be realized. The thermal transport of an underground aquifer was simulated with the control volume method (CVM) and the alternating direction implicit method (ADI). The influence of the thermal dispersion coefficient, the rock heat capacity and the hydraulic conductivity on thermal transport was investigated. The results indicate that the temperature of groundwater will decrease effectively. When the chilled water is injected into the underground aquifer through large-flowing and high-lifting injecting wells, land subsidence will be effectively controlled, and the subsided land will lift to a certain extent. This regional air conditioning technology accords with principles of sustainable development, and it provides meaningful energy saving and environmental protection.

Key words : underground aquifer ; cooling capacity of the sea ; chilled water ; thermal transport

区域供冷供热(district heating and cooling system, DHC)逐步推广为商业化的供冷技术。较成熟的方式有:以电力为能源的冰蓄冷技术;以天然气等燃气为能源的 DHC 方式;以废热为能源的 DHC 技术,包括垃圾焚烧热利用、城市污水废热利用;以大型水源热泵为冷源的 DHC 工程,类似瑞典的由低温深层海水或湖水、地下水提供廉价冷量的区域供冷工程^[1-3]。在进入“海洋世纪”之后,人们更是将目光投向浩瀚的海洋以寻找符合可持续发展战略的冷源,国外早已有人^[4]尝试将冷海水引入城市的冷却系统,海水空调^[5]应运而生。但是,海水空调直接提取海水作为冷源,面临海水腐蚀的困难。此外,因冷量有限,不适用于远距离传送和大面积耗用。国内也

有人提出了新型海中换热提取海洋冷量的新方案^[6],却只局限于紧靠海边的地区适用,如果要设置庞大的管路系统进行输送,同样面临管道腐蚀、海洋生物阻塞及海水释冷后回排入海等诸多问题。

笔者提出一种用于大规模区域供冷的地下含水层输运海洋冷量技术并进行模拟,采取海中换热方式,即利用沿海地区蕴藏丰富的海洋冷量冷却自来水以制取冷媒水^[6],再通过地下含水层将冷媒水输运至中心城区等用冷区域进行大规模供冷。设置注水井和大流量大扬程抽水井以实现人工灌注,并采取过量注入的原则,建立结合水流运动的热量运移模型,然后应用控制容积法和交替方向隐式法进行离散求解,对含水层中的热量运移过程进行数值模

1 含水层中热量运移模型的建立与数值解法

当利用地下含水层作为输水通道输运海洋冷量时,势必关乎热量在运移过程中的变化情况。假设含水层厚度远远小于水流传输的距离,可采用二维模型进行数值模拟。

1.1 模型的建立

为了模拟冷媒水在 10 km 长度范围内含水层中的热量运移过程,设注水总量为 72 000 m³/h,为了防止过量抽取地下水而导致地面沉降的后果及影响力更广的次生效果^[7],此处采取过量注入水量的方法,取抽注比为 0.95。

为尽可能地满足边界对讨论区域变化情况无影响的条件,考虑到注水井和大流量大扬程抽水井的设置,建立合适的物理模型:以 $x = 0$ 取为海岸边界线, x 正方向表示向内陆区域延伸,取一矩形范围 (12 000 m × 6 400 m),注、抽水井位置排布如图 1 所示。1'号注水井:(1 000,1 000) 2'号注水井:(1 000,-1 000);1号抽水井:(10 000,1 800),2号抽水井:(11 000,0),3号抽水井:(10 000,-1 800)。

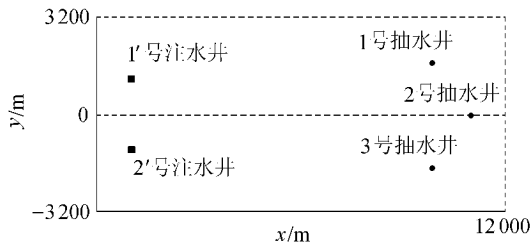


图 1 研究区域

参照相关方法^[8]得到流线分布图,如图 2 所示。根据流线分布图,可将二维的热量运移模型以一维流线的形式显示结果,以 1 号和 2 号抽水井为分析目标,从边缘地带向中间地带分别选取较具有代表性的流线为分析单元,以简化分析对象,因所有参数取为关于 $y = 0$ 对称,故只对 50% 的流线进行标注。势函数求导^[9]可得到速度分布图,如图 3 所示。通过速度分布图,能清楚地看出在抽水井和注水井共

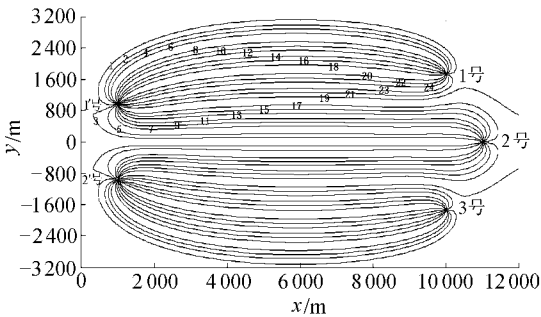


图 2 流线示意图及流线编号

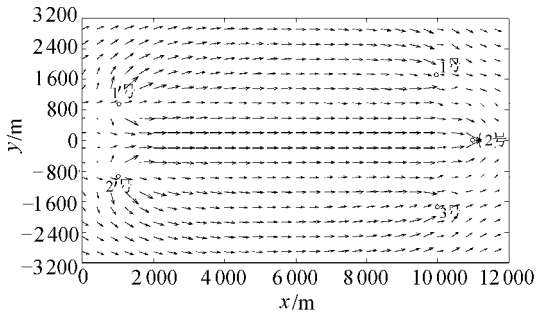


图 3 流场中的速度分布

同作用下整个流域范围内的速度分布情况:在注水井附近,水流速度较大,且变化较快;远离水井的中间地带水流呈层流状态。

1.2 热量运移方程的数值求解

假设承压含水层水平等厚、均质且各向同性;水-岩之间的热量交换瞬时完成,不考虑含水层岩层的储水能力,忽略水体密度随温度的变化情况,通过耦合水流运动方程与能量守恒方程,将源汇项作为内部条件处理^[10],推导得热量运移方程:

$$\rho c' \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda' \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] - \rho_w c_w \left[\frac{\partial (v_x T)}{\partial x} + \frac{\partial (v_y T)}{\partial y} \right] \quad (1)$$

式中: ρ 为多孔介质的密度,根据水和岩共同性质决定; c' 为比热容,根据水和岩共同性质决定,此处取 $\rho c' = 3\,448 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$; λ' 为热动力弥散系数,同样根据水和岩共同性质决定,取 $\lambda' = 1.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; ρ_w 为水的密度,取 $\rho_w = 1\,000 \text{ kg}/\text{m}^3$; c_w 为水的比热容,取 $c_w = 4.2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; τ 为时间; w_x, v_y 为水流在 x 和 y 方向的达西渗透流速。

初始条件:原地下水温度和骨架温度相同,且分布均匀。边界条件:边界温度与初始温度始终相同,不随时间发生变化;注水井周壁的温度与注入的冷媒水温度始终相同。取均匀时间步长进行温度计算,时间节点分别为 0.33 月(1 个月按 30 d 计),5.3 月,10.3 月,15.3 月,20.3 月,25.3 月,30.3 月,35.3 月,40.3 月,45.3 月,50.3 月。

在计算过程中,先利用控制容积法(control volume method,CVM)对二维的热量运移方程进行离散,采取如图 4 所示的划分网格系统。其中, $\Delta x, \Delta y$ 分别表示中心网格在 x, y 方向上的步长; $(\delta x)_w, (\delta x)_e, (\delta y)_s, (\delta y)_n$ 分别表示待求中心点 P 到相邻 4 个方向的控制点(W, E, S, N)的微距离; e, s, w, n 分别表示东、南、西、北 4 个方位的控制面。

方程左边项用控制容积进行积分,方程右边各分项采用中心差分与迎风差分格式进行离散,以上标 0 表示迭代初值,推导整理得下式:

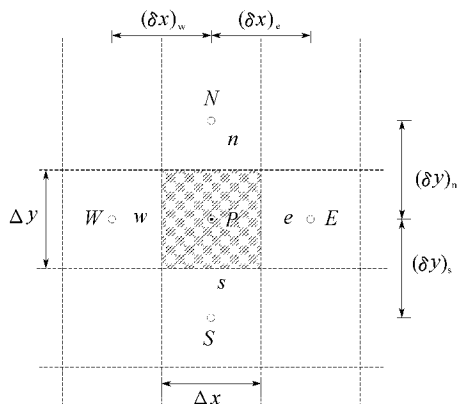


图4 直角坐标的网格划分

$$C'(T_P - T_P^0)\Delta x \Delta y = \lambda' \left(\frac{T_E - T_P}{(\delta x)_e} - \frac{T_P - T_W}{(\delta x)_w} \right) \Delta y \Delta t + \left(\frac{T_N - T_P}{(\delta y)_n} - \frac{T_P - T_S}{(\delta y)_s} \right) \Delta x \Delta t - \rho_w c_w [(T_e v_{xe} - T_w v_{xw}) \Delta y + (T_n v_{yn} - T_s v_{ys}) \Delta x] \Delta t \quad (2)$$

在具体求解过程中,式(2)涉及表示4个控制面 (e, w, s, n) 及4个控制点 (E, W, S, N) 联合作用系数 $(\alpha_E, \alpha_S, \alpha_W, \alpha_N)$ 及待求中心点 P 上的系数 (α_P^0, α_P) ,这些值需事先确定,为了简练表达形式,取相应的格式进行代换^[11],式(2)简化整理可得

$$\alpha_P T_P = \alpha_E T_E + \alpha_W T_W + \alpha_N T_N + \alpha_S T_S + \alpha_P^0 T_P^0 \quad (3)$$

当代数方程从一维到多维,其阶数会随之增加一两个数量级,当采用显式条件求解时,稳定性条件受时间步长的限制。为了减轻工作量和提高计算精度,采用交替方向隐式算法(alternating direction implicit method, ADI),即在每个坐标方向上分别采用三对角阵算法(tridiagonal matrix algorithm, TDMA)直接求解。TDMA是求解有限差分代数方程的基本算法,通过消元和回代的过程使三元方程化为二元方程,且该格式不受时间步长限制,是无条件稳定的^[12]。

现采用2次TDMA完成1次迭代过程,迭代格式如下:

$$\alpha_P T_P^{t+\Delta t/2} = \alpha_E T_E^{t+\Delta t/2} + \alpha_W T_W^{t+\Delta t/2} + \alpha_N T_N^t + \alpha_S T_S^t + \alpha_P^0 T_P^t \quad (4)$$

$$\alpha_P T_P^{t+\Delta t} = \alpha_N T_N^{t+\Delta t} + \alpha_S T_S^{t+\Delta t} + \alpha_E T_E^{t+\Delta t/2} + \alpha_W T_W^{t+\Delta t/2} + \alpha_P^0 T_P^{t+\Delta t/2} \quad (5)$$

2 结果分析与讨论

2.1 冷媒水运移过程中的温度分布

模型计算中,初始含水层的温度取 22°C ,因中央空调冷水机组供水温度为 7°C ^[6],故注入水的温度取 7°C 。到达1号抽水井流线上的温度随时间的变化情况见表1。

表1 到达1号抽水井流线上的温度随时间的变化情况

k 值	初始温度/ $^\circ\text{C}$	终点温度/ $^\circ\text{C}$	降温/ $^\circ\text{C}$	降温比例/%
2	22.0	9.41	12.59	57.2
10	22.0	8.80	13.20	60.0
16	22.0	8.76	13.24	60.2
24	22.0	8.78	13.22	60.1

由表1数据可得,经过4年的时间,边缘地带的流线 $k=2$ 在抽水井处的出水温度是所取4条流线中最高的,比初始温度下降了57.2%;从边缘地带逐渐向中部地带推进的过程中,各流线在抽水井处的出水温度基本是持平的,最大下降幅度达60.2%。

到达2号抽水井流线上的温度随时间的变化情况见表2。由表2数据可知,经过4年的时间,在所选到达2号抽水井的4条代表流线中,流线 $k=3$ 是其中温度下降幅度最小的,下降幅度达57.5%;流线 $k=13$ 的温度下降幅度最大,达59.9%。

表2 到达2号抽水井流线上的温度随时间的变化情况

k 值	初始温度/ $^\circ\text{C}$	终点温度/ $^\circ\text{C}$	降温/ $^\circ\text{C}$	降温比例/%
3	22.0	9.35	12.65	57.5
9	22.0	8.91	13.09	59.5
13	22.0	8.83	13.17	59.9
17	22.0	8.96	13.04	59.3

通过以上模拟可知 ①随着时间的推移,温度变化曲线间隔越来越小,地下水温度下降速度越来越慢。这是因为冷媒水与岩层的接触面积随时间逐渐变大,导致冷媒水与地下水之间的温差越来越小。②边缘地带温度下降的速度比中间地带慢。这是由于边缘地带较中部地带受抽、注水井的影响较小,流经边缘地带的水流流径较长,与其交换热量的地下水水量较大,故而耗散在流动过程中的冷量也较多;此外,边缘地带处于边界,受到周围环境岩层热量的影响也要强于中间地带。③在抽、注水量相同的情况下,2号抽水井处的出水温度普遍略高于1号抽水井处的出水温度,这是因为运移的距离越长,耗散在运输途中的冷量也越多。

随着输运过程的持续进行,抽水井的出水温度与冷媒水温度之间的温差会越来越小,温度曲线也越平坦,直到两者达到热量动态平衡状态,那时,冷媒水的冷量就能得以较好地保存,直到运达用冷区域。

由此可见,此地下含水层运输海洋冷量技术能够

有效降低含水层中的地下水温度。随着时间的推移,地下水温度下降速度越来越慢,且边缘地带温度下降的速度比中间地带要慢;离注水点较近的抽水井,其出水温度低于离注水点较远的抽水井出水温度。

2.2 热动力弥散系数对热量运移过程的影响

热动力弥散系数表征介质传递热量的能力,温度场的分布与其密切相关。下面以流线 $k = 2, k = 16, k = 3, k = 13$ 为分析单元,以 1 倍热动力弥散系数下温度随时间的变化曲线为基准,选取 0.5 倍和 2 倍热动力弥散系数的情况分别与其进行对比分析(图 5)。

由图 5 可知,热动力弥散作用对于热量运移过程影响极小。无论热动力弥散系数是增加 1 倍还是减少 50%,同一流线在同一时刻的温度基本一致。这是因为热动力弥散速度远远小于强迫径流的达西渗透速度,故其对热量运移过程影响甚微。

2.3 岩层比热容对热量运移过程的影响

除热动力弥散作用外,岩层比热容也是影响温度场分布的因素之一。下面以流线 $k = 24$ 和 $k = 17$ 为分析单元,以 1 倍岩层比热容下温度随时间的变化曲线为基准,分别选取 0.5 倍和 1.5 倍岩层比热容情况与其进行对比分析(图 6)。

由图 6 可以看出,当岩层比热容减少 50% 时,其温度变化曲线较基准比热容曲线低;反之则反。因此,岩层比热容越大,地下水温度降幅越小。这是因为随着岩层比热容的增加,含水层储热能力增强,

减缓了含水层与冷媒水的热交换速度,从而导致地下水温度下降变慢。

2.4 水力传导系数对热量运移过程的影响

水力传导系数是表征含水层透水能力的参数,对含水层的温度变化具有重要的影响。下面以流线 $k = 10$ 和 $k = 9$ 为分析单元,以 1 倍水力传导系数下温度随时间的变化曲线为基准,分别选取 0.8 倍和 1.2 倍水力传导系数的情况与其进行对比分析(图 7)。

由图 7 可以看出,水力传导系数下降 20% 时,其温度变化曲线较基准水力传导系数曲线高。因此,水力传导系数越大,相同时间内的温度降幅也越大。这是因为水力传导系数越大,水流更易通过孔隙,流速越快,所以在单位时间内通过含水层单位体积的冷媒水流量增大,冷却的效果也越明显。

3 结 语

以吸收了海洋冷量的自来水作为冷媒水,借助地下含水层将冷媒水便捷地传输到用冷地域的这一“用作大规模区域供冷的地下含水层输运海洋冷量技术”方案的提出,能够实现大规模区域供冷循环经济模式的可持续发展;利用地下含水层这一天然输运通道,能节省人工管网系统的耗材、耗资及维护保养开支;以人工灌注替代地面水的自然补给,借助过量注入水量,能有效控制地面沉降等问题的出现,甚至还能起到逐步抬升地面的效果。

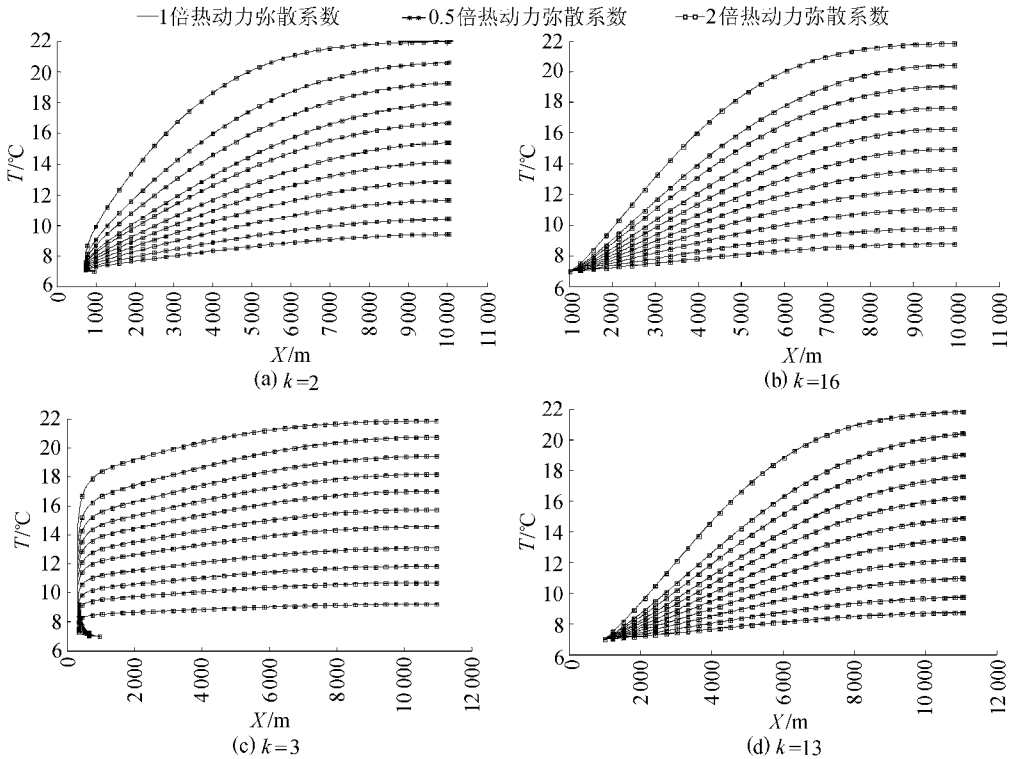


图 5 热动力弥散系数对热量运移过程的影响

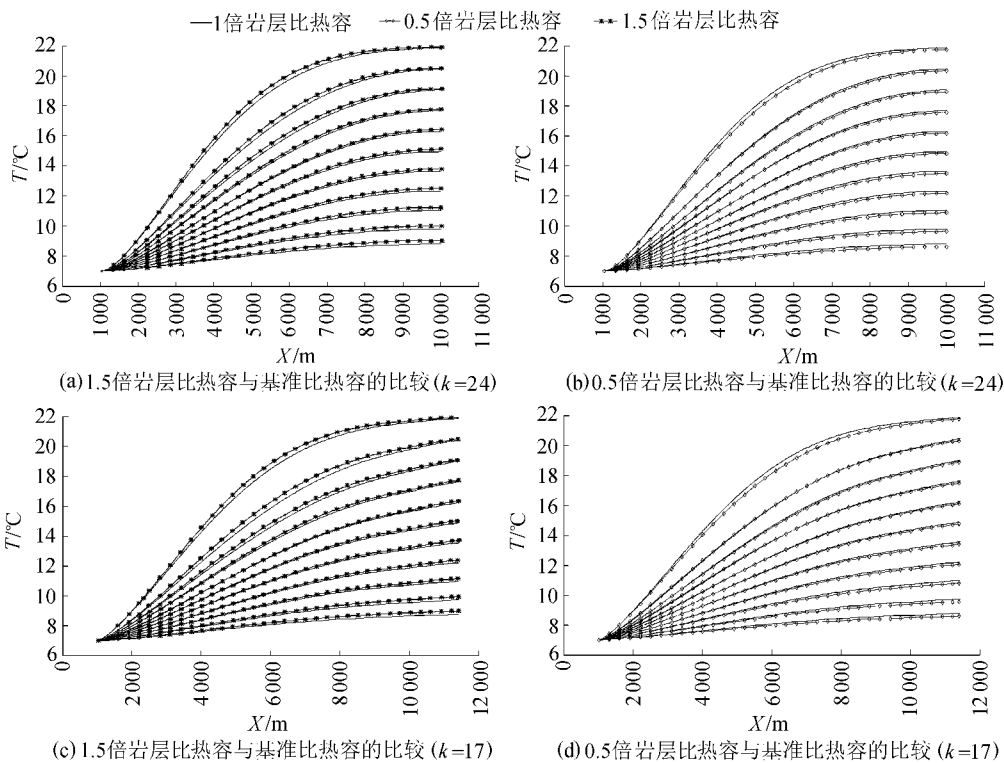


图6 岩层比热容对热量运移过程的影响

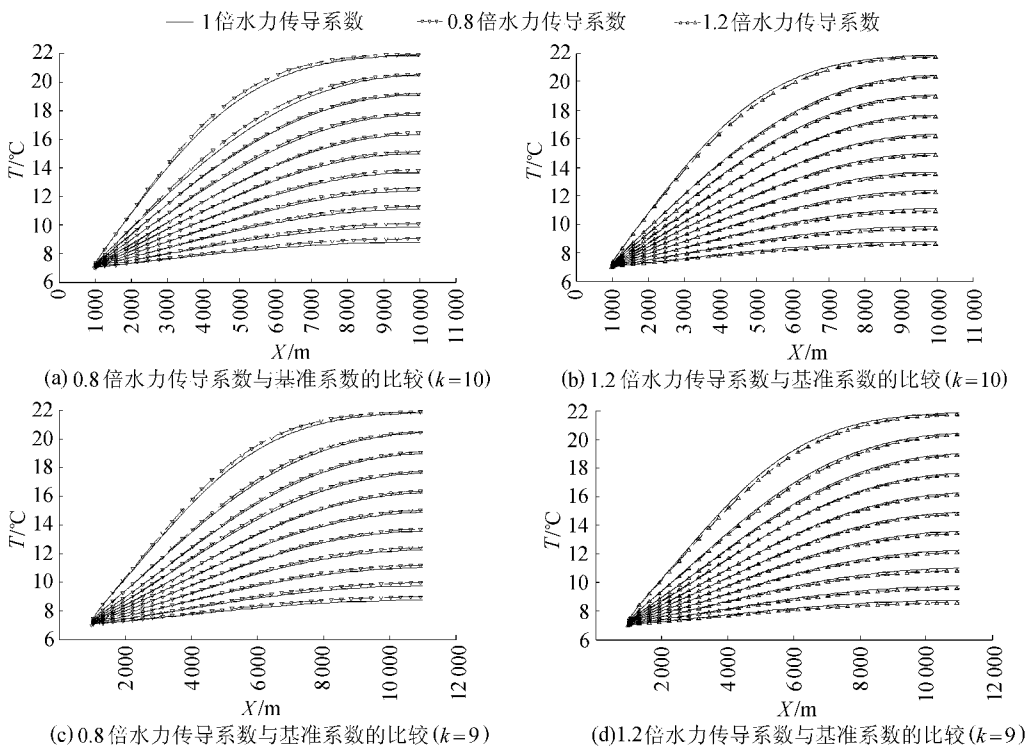


图7 水力传导系数对热量运移过程的影响

笔者尝试性地对蕴藏了海洋冷量的冷媒水在地下含水层中的运移过程进行研究。研究表明,地下含水层输运海洋冷量技术能够有效降低含水层中的地下水温度,且随着时间的推移,地下水温度下降速度越来越慢。在强迫径流作用下,岩层比热容越大,地下水温度降幅越小;水力传导系数越大,相同

时间内的温度降幅越大,但热动力弥散对热量运移过程影响甚微。

提出了一种可持续发展的技术,理论上是可行的。人类只有不断探索与实践,才能将总量丰富的海洋冷量充分利用起来,达到新能源可持续发展利用的目标。
(下转第70页)

化提供了丰富的表现形式。渠道丘陵侧内坡以固坡护土为主,平原则在护坡的同时可强调景观效果,灌草结合,利用灌木的色彩多样性形成不同的平面构图。防洪堤由不同类型的小乔木搭配形成防护林,增加林地渗透、减小径流量,涵养水源。缓冲带则可以构建狭长的经济林带或削污滞污带。三者组合在一起,在护坡、削污的同时充分利用了地形,形成色彩斑斓、错落有致的风景带,强调两岸风光的对比。

平原挖方堆堤段:平原区地形微微起伏,渠道两侧的坡缓较对称,宜营造开阔的视野。该渠段以削减农田面源污染为主,缓冲带可种植对氮磷吸收、固持效果较好的植物,降低农田边界土壤污染的影响。渠道内坡相对较短,可以参考平原丘陵段的植物进行设计。

渠道堤岸带不同区域可根据需要选择种植下列植物类型。

a. 乔木类。107 欧美杨,毛白杨,黄杨,旱柳,杞柳,垂柳,国槐,刺槐,紫穗槐,梓树,榆树,榆叶梅,龙柏,桧柏,砂地柏,铺地柏,金球桧,白皮松,北京栎,合欢,七叶树,圆蜡一号,泡桐,法桐,白腊,臭椿,白玉兰,大叶女贞,五角枫,日本晚樱,花椒,银杏,柿树,核桃,枣树,苹果,山楂,石榴,梨树,桃树,枸橼等。

b. 灌/花类。小龙柏,紫叶李,矮紫杉金叶女贞,紫叶小檗,冬青卫矛,大叶黄杨,小叶黄杨,栀子,花,红刺玫,黄棘,酸枣,宁夏枸杞,金银花,四季玫瑰,迎春,紫薇,棣棠,锦带花,月季,丁香,连翘,石岩杜鹃,夹竹桃,淡竹,南天竹等。

c. 草/地被类。常春藤,三叶地锦,直立扶芳藤,狗牙根,中华结缕草,地毯草,草木犀,白刺,马蔺,苏丹草,高羊茅,麦冬草,百喜草,紫花苜蓿,黑麦草,小冠花,狗尾草,白草等。

3 结 语

大型输水渠道工程不仅对周边的生态环境造成

了影响,也受到边界水土流失和污染物的影响,为保障调水质量,实现南水北调工程‘清水长廊’的目标,笔者以济平干渠为例,在考察渠道沿线综合因素的基础上,遵循师法自然、统筹规划和实用性原则,依据景观生态学原理,分区域、分目标研究,从而形成济平干渠点、线、面相结合的生态修复系统,达到减少水土流失,保护水质和非输水断面的生态环境,保证生态系统结构稳定性、景观协调性、生态健康性和生态安全性的目的,实现人水和谐以及工程建设与自然景观、生态景观的有机结合。

参考文献:

[1] DOU E,FOX R H,TOTH J D. Seasonal soil nitrate dynamics in corn as affected by tillage and nitrogen source[J]. Soil Science Society of America Journal, 1995,59 358-864.

[2] FRANCIS G S, HAYNES R J, WILLIAMS P H. Nitrogen minralization,nitrate leaching and crop growth after ploughing in leguminous and non-leguminous grain crop residues[J]. Journal of Agricultural Science, 1994,123 81-87.

[3] KEENEY D R. Nitrogen management for maximum efficiency and minimum pollution [C]//STEVENSON F J. Nitrogen in Agricultural Soila 22:Medison. Wis: American Society of Agronomy,1982 605-649.

[4] KEENEY D R. Nitrogen-availability indices [C]//PAGE A L. Methods of Soil Anaiysis, Part 2:Madison. Wis: American Society of Agronomy,1982 711-733.

[5] 张建春,彭补拙. 河岸带及其生态重建研究[J]. 地理研究,2002,21(3) 373-383.

[6] 王文野,王德成. 城市河道生态护坡技术探讨[J]. 吉林水利,2002(11) 24-26.

[7] 张华君,吴曙光. 边坡生态防护方法和植物选择[J]. 公路交通技术,2004(2) 84-86

[8] SCHAEFER J W,NAETH A. Live staking with willows fails to protect eroded lakeshore slop (Alberta) [J]. Ecol Restoration,2000,18(4) 267-268.

[9] 常秋玲. 南水北调中线水源区-南阳市-生态环境综合研究[D]. 北京:中国地质大学,2007 6.

(收稿日期 2008-10-14 编辑 高建群)

(上接第 41 页)

参考文献:

[1] 寿青云,陈汝东. 借鉴国外经验积极发展我国的区域供冷供热[J]. 流体机械,2003,31(11) 247-50.

[2] 王刚. 瑞典区域供冷技术对中国的启示[J]. 建筑热能通风空调,2004,23(3) 24-29.

[3] 惠荣娜,徐奇,李德英,等. 我国区域供冷的现状及发展[J]. 建筑节能,2007,35(3) 247-50.

[4] FERNBACK G. Seawater plays key role in stockholm cooling system[J]. Fuel and Energy,1996,37(2) 133.

[5] 蒋爽,李震,端木琳,等. 海水热泵系统的应用及发展前景[J]. 节能与环保,2005,23(10) 11-14.

[6] 杜乐乐,马捷,王俊雄. 一种提取次表层海水冷量的新

型换热方案[J]. 太阳能学报,2008,29(9) 1057-1062.

[7] 方生,陈秀玲. 地下水开发引起的环境问题与治理[J]. 地下水,2001,23(1) 8-11.

[8] 侯建,王玉斗,陈月明. 复杂边界条件下渗流场流线分布研究[J]. 计算力学学报,2003,20(3) 335-338,345.

[9] 薛禹群. 地下水水动力学[M]. 2 版. 北京:地质出版社,1997 24.

[10] 张志辉,薛禹,谢春红. 含水层热量运移中自然热对流作用的数值模拟[J]. 水科学进展,1996,7(2) 99-104.

[11] 查金荣. 传递过程原理及应用[M]. 北京:冶金工业出版社,1997 324-325.

[12] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安:西安交通大学出版社,2001 77-79.

(收稿日期 2008-12-05 编辑 方宇彤)