

基于元胞自动机模型的洱海水体 TN · TP 净化模拟

高杰¹, 赵继东², 杜庆治¹, 龙华^{1*}

(1. 昆明理工大学信息工程与自动化学院, 云南昆明 650500; 2. 云南省大理州洱海流域保护局, 云南大理 671000)

摘要 [目的]探讨基于元胞自动机模型模拟洱海水体演化的可行性。[方法]以洱海水体为例,根据入湖河流的径流量和入湖口的地理位置,进行聚类分析,构建入湖河流模型;基于元胞自动机模型构建洱海水体的演化模型,模拟对洱海水体 TN、TP 的净化能力。[结果]春末到秋初,对洱海水体 TN、TP 的净化能力较强;秋末到春初,对洱海水体 TN、TP 的净化能力较弱;对洱海水体 TN、TP 的全年净化总量分别为 1 158.76、287.73 t,净化效率分别为 79.94% 和 93.63%。[结论]元胞自动机模型对洱海水体 TN、TP 的净化效果良好,且对洱海自身的水质改善、水资源保护和利用具有积极作用。

关键词 元胞自动机;洱海;净化能力

中图分类号 S181 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)12-071-04

Purifying Capacity of Erhai Water Body to TN and TP Based on Cellular Automaton

GAO Jie¹, ZHAO Ji-dong², DU Qing-zhi¹, LONG Hua^{1*} (1. School of Automation and Information Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500; 2. Dali Erhai Drainage Basin Protection Bureau, Dali, Yunnan 671000)

Abstract [Objective] To research the purifying capacity of Erhai water body to TN and TP, and to discuss the feasibility of simulating Erhai water body evolution based on cellular automata model. [Method] Erhai water body was used as the research material. According to the runoff volume of inflowing rivers and the geographical position of lake inlet, cluster analysis was carried out, so as to establish the model of inflowing rivers. Evolution model of Erhai water body was established based on cellular automata model. Purifying capacity of Erhai water body to TN and TP was researched. [Result] From late spring to early autumn, Erhai water body had relatively strong purifying capacity to TN and TP. From late autumn and early spring, Erhai water body had relatively weak purifying capacity to TN and TP. The total purifying quantities of Erhai water body to TN and TP were 1 158.76 and 287.73 t, respectively. Their purification efficiencies were 79.94% and 93.63%, respectively. [Conclusion] The model has relatively good overall purifying capacity of Erhai water body to TN and TP, and has positive action to the water quality improvement and water resource protection of Erhai.

Key words Cellular automaton; Erhai; Purification ability

近年来,随着经济、社会的快速发展,我国湖泊水资源污染加剧,湖泊水质及自净能力严重下降,呈现富营养化状态的湖泊数量及面积呈逐年递增的趋势。随着洱海流域社会经济的发展,污染负荷不断增加,洱海入湖水质及水量有所下降^[1],但由于洱海湖滨工程的不断建设和完善,洱海水体净化能力有所提高,目前,洱海整体水质总体处于Ⅱ~Ⅲ类[(GB 3838—2002)《地表水环境质量标准》]水平。水体净化能力是维护和管理水质状况的重要依据,可以及时了解水质演变趋势,从而发现水质恶化原因,并制订相应的治理措施。因此,研究洱海的水体净化能力,对洱海水资源保护及洱海流域的生物多样性保护具有重要意义。目前,国内外对水体净化进行了一些研究,主要集中于污染水体的净化技术。潘继征等^[2]采用人工增氧的方式对人工湿地的污染净化效果进行了研究;王沛芳等^[3]针对湖荡湿地对水体中总磷、总溶解磷、颗粒磷以及正磷酸盐的截留净化作用和影响因素进行了分析;Skinner 等^[4]、高阳俊等^[5]研究了生态浮床技术的净化效果;郭萧等^[6]以梯级河滩湿地对贾鲁河水的净化效果为例,研究了缓冲带技术的净化效果。在污染水体的净化过程中,水体的净化效果受地形、地质、气候、植被等自然因素及人类生产、生活等人因素多层次和多尺度的综合

影响^[7],涉及时间、空间及相关状态的转变。因此,笔者以元胞自动机模型为框架构建了洱海水体演化模型,综合考虑物理沉降、生物降解吸收等水体净化影响因素,模拟了该模型对洱海水体 TN、TP 的净化能力,旨在为洱海的生态保护及政治决策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 洱海,位于云南省大理白族自治州,是云南省第二大高原淡水湖泊,地处 100°05′~100°17′ E, 25°35′~25°58′ N。洱海形似耳状,略呈狭长形,其北起洱源县,南北长 42.58 km,东西最宽 9.0 km,湖面面积 256.5 km²,流域面积 2 565.0 km²,平均湖深约 10 m,最大湖深达 20 m,蓄水量为 28 亿 m³。洱海地跨大理市和洱源县,是沿湖居民生活、农业灌溉、工业用水的主要水源,同时也是大理“风花雪月”四景之一“洱海月”的所在地。洱海是典型的内陆断陷湖泊,属于澜沧江水系,且属于国家重点保护水域之一。

洱海的水质污染物主要来源于城镇农村生活污水、农用化肥农药及水土流失。洱海周边的污染物主要经由排污口及降水形成的地表径流汇入入湖河流,并通过入湖河流将污染物注入洱海^[8]。洱海的入湖河流主要包括洱海北部的弥苴河、罗时江、永安江,洱海西部的苍山十八溪,洱海南部的波罗江及洱海东部的凤尾河。洱海的出湖河流为洱海南部的西洱河和洱海南部的引洱入宾隧洞^[9]。

1.2 数据来源 数据来源于 2013 年 3 月至 2014 年 2 月大理白族自治州环境监测站点的水质实测数据,所辖范围内的洱海水质监测站点主要设置在洱海各入湖河流的入湖口、洱海南部、中部及北部。为了有效消除异常数据的影响,在引

基金项目 2014 云南省科技厅基金项目(2014RA051);2013 云南省科技厅基金项目(2013FZ010)。

作者简介 高杰(1991-),男,安徽安庆人,硕士研究生,研究方向:信息处理。* 通讯作者,教授,博士,硕士生导师,从事信息处理研究。

收稿日期 2016-03-21

用数据之前对数据进行了中值滤波处理。

1.3 研究方法

1.3.1 研究思路。在前人的研究基础上,笔者提出了基于元胞自动机模型的洱海水体净化能力研究,步骤见下:①根据入湖河流的年径流量及入湖河流入湖口的位置,对洱海的人湖河流进行聚类分析,并将聚类分析结果作为该研究的入湖河流模型;②针对洱海水体,将洱海抽象成1个40 km×7 km×4 km的长方体;并将该长方体划分成1 120个1 km×1 km×1 km的三维网格,将每1个网格视为元胞自动机模型的中元胞;③确定元胞状态的转化规则,即采用三维摩尔型邻居模型,并考虑风速、风向因素的影响,确定元胞内水质指标(TN、TP)下一个状态转化的计算公式;④模拟洱海水体演化过程,即基于元胞自动机模型,模拟入湖河流的水体进入洱海后,其所携带的污染物在洱海水体内部进行扩散演化的过程;⑤计算洱海水体的净化能力,即计算模拟仿真与当前实测数据中洱海水体水质指标(TN、TP)含量之间的差值。

1.3.2 模型构建。①将所构建的入湖河流模型视为点污染源;②鉴于洱海是典型的内陆断陷湖泊,不考虑水动力因素对元胞状态转化的影响;③鉴于洱海深层次的水体之间交互比较慢,只考虑距离水面4 m以下的水体。

1.3.2.1 基于聚类分析的入湖河流模型构建。洱海的水源补给主要依赖于入湖河流,目前洱海的入湖河流为117条。在这诸多河流中,洱海北部为洱海提供主要来水的河流是弥苴河、罗时江、永安江,分别占入湖总量的48.50%、8.00%、7.60%;洱海西部为洱海提供主要来水量的河流是苍山十八溪,占入湖总量的27.20%;洱海南部为洱海提供主要来水量的河流是波罗江,占入湖总量的7.00%;洱海东部为洱海提供主要来水量的河流是凤尾河,占入湖总量的0.74%^[10](图1)。笔者通过对以上23条河流的径流量及入湖口的地理位置进行聚类分析,建立入湖河流模型。

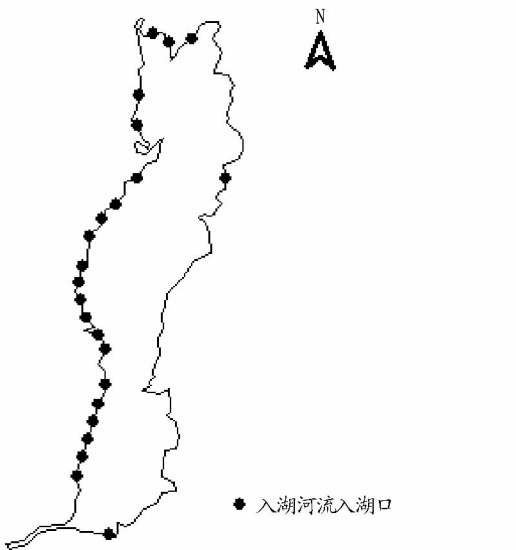


图1 洱海23个入湖河流入湖口位置示意

Fig.1 Lake inlet position of 23 inflowing rivers

1.3.2.2 基于元胞自动机的洱海水体演化模型构建。元胞

自动机模型(Cellular Automation Model, CA)是一种时间、空间、状态离散,空间相互作用和时间因果关系为局部的网格动力学模型^[11],具有模拟离散动力系统内部单元之间因强烈的非线性作用而导致系统自组织演化过程的能力,其主要特点是时空离散化及规则的局部性^[12]。元胞自动机模型通过简单的局部转换规则模拟出复杂的空间结构。元胞之间相互离散,任一时刻元胞只为一种状态,且元胞的状态为有限集合;元胞状态的改变与元胞的邻居及规则有关。

根据水体演化的实际特点,基于元胞自动机模型,通过构建三维元胞对洱海水体的演化过程进行模拟。将洱海水体抽象离散成 $M \times N \times S$ 个 $n \times n \times n$ 大小的正方体网格,每个网格代表1个元胞,所有元胞构成三维元胞空间。以某一元胞为中心元胞,采用三维空间的摩尔型邻居,即以 $3 \times 3 \times 3$ 三维空间内包裹中心元胞的26个元胞为邻居。考虑到每个元胞中污染物含量 $M_{i,j,k}^q$ 的迁入、迁出及大小与元胞的邻居和元胞转化规则关系密切,以及洱海的实际情况,结合前人研究,引入风速、风向影响系数,设置元胞转化规则^[13]:

$$M_{i,j,k}^q(t+1) = M_{i,j,k}^q(t) + W_{I,J,K} m [(M_{I,J,K}^q(t) - M_{i,j,k}^q(t))]$$

$$\begin{cases} I \in [i-1, i, i+1] \\ J \in [j-1, j, j+1] \\ K \in [k-1, k, k+1] \\ I, J, K \neq i, j, k \end{cases} \quad (1)$$

式中, M 为各项水质指标含量; q 为污染物类别; m 为静态扩散系数。考虑到元胞内污染物的流出量不能大于元胞内污染物总量,因此由式(1)可得, m 需满足 $m \leq 0.0385$;通过试验得出 $m = 0.0360$,可得最佳模拟效果。

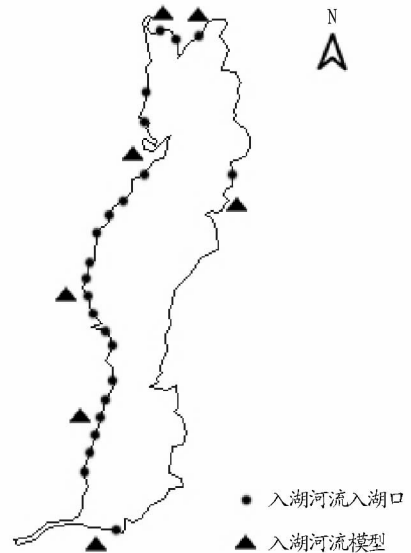


图2 入湖河流模型

Fig.2 Model of 23 inflowing rivers

$$W_{I,J,K} = \alpha_{I,J,K} \cos \theta \quad (2)$$

式中, $\alpha_{I,J,K}$ 为风漂移因子,其与风速、水面宽度成正比,与水深成反比; θ 为风向与迁移方向之间的夹角。 β 取值常采用式(3)、(4)^[14]:

$$\alpha_{I,J,K} = \beta^2 v^2 \delta \quad (3)$$

式中, v 为距离水面上方 10 m 的风速; $\delta = B/h$, 为宽深比; $\beta = 0.03$, 为经验常数。

$$\theta = \begin{cases} \theta & 0 \leq \theta < \pi \\ \theta - \pi & \pi \leq \theta < 2\pi \end{cases} \quad (4)$$

1.4 技术实现

(1) 运用 SPSS 20 软件, 对洱海 23 条主要入湖河流的径流量及入湖河流入湖口的地理位置进行聚类分析, 并将聚类分析结果作为入湖河流模型(图 2、3)。

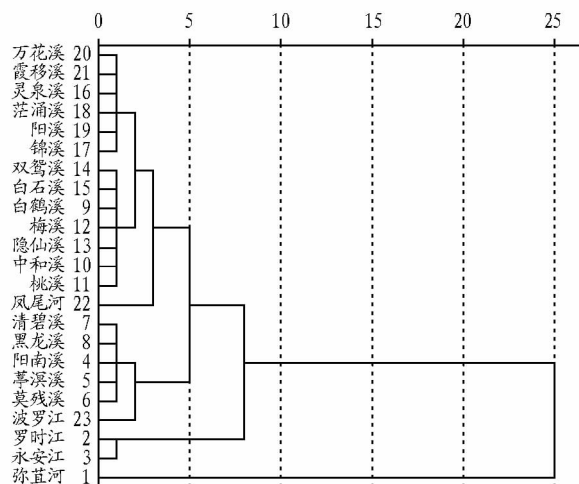
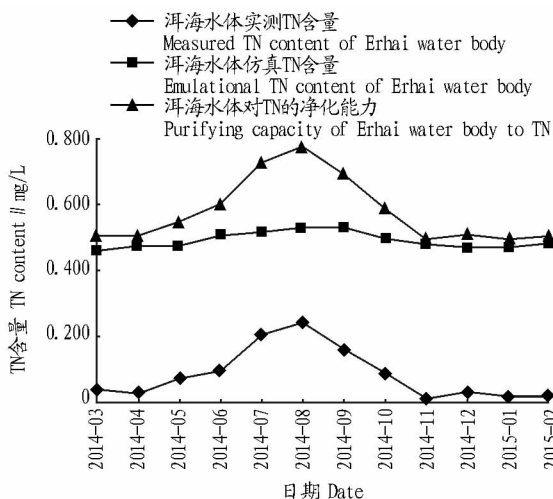


图 3 聚类分析结果

Fig. 3 Results of cluster analysis

(2) 通过在中国气象数据网上查阅洱海所在区域上方 10 m 风场的风向、风速数据, 并将其作为影响因素纳入元胞转化规则的计算。



(3) 基于 Matlab 软件平台, 编程实现元胞自动机模型, 并将入湖河流作为点污染源, 模拟入湖河流所携带的污染物在注入洱海水体后, 在洱海水体内部进行扩散演化。

2 结果与分析

从图 4 可以看出, 夏季洱海水体 TN、TP 净化能力较强, 平均分别为 0.185、0.049 mg/L, 这是由于夏季至秋初, 气温偏高, 洱海湖滨湿地的植物生长旺盛, 自身吸收及向水中输氧能力都较强, 且洱海水体中的动物、微生物活性较高; 秋季洱海水体对 TN、TP 净化能力减弱, 平均分别为 0.089、0.041 mg/L, 这是由于秋末以后, 气温降低, 植物生长停滞, 且动物、微生物活性降低; 冬季洱海水体对 TN、TP 净化能力降至最低, 平均分别为 0.026、0.005 mg/L, 这是由于入冬以后, 气温降至最低, 植物开始衰败, 且微生物活性降至最低; 春季对洱海水体 TN、TP 净化能力较冬季有所提高, 平均分别为 0.050、0.010 mg/L, 这是由于春季气温升高, 植物开始生长。

春末夏初, 随着雨季来临, 入湖 TN、TP 总量逐渐增加, 洱海水体的 TN、TP 含量逐渐升高, 8 月份达到最大值, 分别为 0.534、0.033 mg/L; 入秋以后, 降雨量减少, 入湖 TN、TP 总量呈现递减趋势, 洱海水体的净化效率有所提升, 因此, 洱海水体的 TN、TP 含量开始降低; 入冬到春初, 洱海水体的 TN、TP 含量相对比较稳定, 平均分别为 0.477、0.018 mg/L。

由表 1 可知, 洱海水体 TN、TP 的净化总量与洱海水体 TN、TP 的净化能力呈正相关。夏、秋季节, 洱海水体 TN、TP 净化能力较强, 因此, 洱海水体 TN、TP 的净化总量较多, 分别为 621.94、165.09 t 和 300.05 和 72.24 t; 冬、春季节, 洱海水体 TN、TP 净化能力减弱, 因此, 洱海水体 TN、TP 的净化总量偏少, 分别为 70.34、17.36 t 和 166.43、33.04 t。

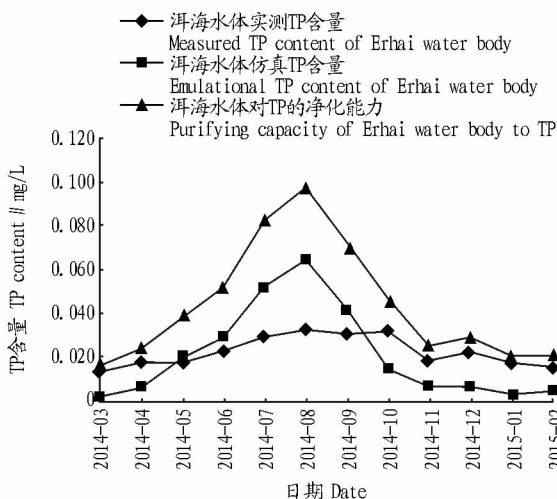


图 4 洱海水体 TN、TP 的净化效果

Fig. 4 Purifying effects of TP and TN in Erhai water body

春末至秋初季节, 降雨频繁, 在雨水的冲刷下洱海周边农田中的 TN、TP 等污染物很容易通过地表径流注入到入湖河流并汇入洱海, 又由于此时正是大理的旅游旺季, 生活污水排出增多, 因此, 入湖 TN、TP 总量占全年入湖总量的 80.90%、82.90%; 该阶段, 洱海水体的净化能力较强, 净化总

量占全年净化总量的 76.50%、81.70%。秋末到春初属于大理的旱季, 降雨量明显减小, 入湖河流流量减少且农业生产行为减缓, 农田污染物流失量减少, 因此, 入湖的 TN、TP 总量占全年入湖总量的 19.10%、17.10%; 该阶段, 洱海水体的净化能力较弱, 净化的总量占全年净化总量的 23.50%、18.30%。

表1 洱海水体入湖总量和净化总量
Table 1 Water inlet and purifying volume of Erhai Lake

指标 Index	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn		冬季 Winter		全年合计 Total of the whole year	
	入湖总量 Water inlet volume	净化总量 Purifying volume	入湖总量 Water inlet volume	净化总量 Purifying volume	入湖总量 Water inlet volume	净化总量 Purifying volume	入湖总量 Water inlet volume	净化总量 Purifying volume	入湖总量 Water inlet volume	净化总量 Purifying volume
TN	186.81	166.43	840.10	621.94	339.32	300.05	83.29	70.34	1 449.52	1 158.76
TP	38.37	33.04	182.12	165.09	70.24	72.24	16.59	17.36	307.32	287.73
有效去除率 Effective rem- oval rate//%	89.09	86.12	74.03	90.65	88.56	102.84	84.45	104.67	79.94	93.63

3 结论

该研究基于元胞自动机模型对洱海水体 TN、TP 的净化能力进行模拟研究,结果表明:洱海水体 TN、TP 的净化效果良好,且对洱海自身的水质改善、水资源保护和利用具有积极作用,具体表现为:①对洱海水体入湖河流所携带的 TN、TP 具有良好的净化能力。春末到秋初,对洱海水体 TN、TP 的净化能力较强;秋末到春初,对洱海水体 TN、TP 的净化能力较弱。②对洱海水体入湖河流所携带的 TN、TP 具有良好的净化效果。对 TN、TP 的全年净化总量分别为 1 158.76、287.73 t,净化效率分别为 79.94% 和 93.63%;③洱海水质净化、控制效果明显,对洱海水体的外源污染具有屏障作用。

参考文献

- [1] 卫志宏,杨振祥,吕兴菊,等.洱海动态水环境容量模拟研究[J].生态科学,2013,32(3):282-289.
- [2] 潘继征,李文朝,李海英,等.人工增氧型复合湿地污染物净化效果[J].生态与农村环境学报,2010,26(5):482-486.
- [3] 王沛芳,胡斌,王超,等.湖荡湿地对输水河道磷的截留净化作用[J].水资源保护,2013,29(1):665-673.

- [4] SKINNER K, WRIGHT N, PORTER-GOFF E. Mercury uptake and accumulation by four species of aquatic plants[J]. Environmental pollution, 2007, 145(1):234-237.
- [5] 高阳俊,阮仁良,孙从军,等.淀山湖千墩浦河口生态浮床试验工程净化效果[J].水资源保护,2011,27(6):28-31.
- [6] 郭萧,柯凡,赵安娜,等.梯级河滩湿地对贾鲁河水的净化效果研究[J].中国给水排水,2010,26(9):41-45.
- [7] 任泽,杨顺益,汪兴中,等.洱海流域水质时空变化特征[J].生态与农村环境学报,2011,27(4):14-20.
- [8] 孙伟华,徐长城,严谷芬,等.洱海总磷、总氮时空变化规律分析[J].环境科学导刊,2013,32(S1):46-48.
- [9] 卫志宏,唐雄飞,杨振祥,等.洱海主要污染物允许排放总量的控制分配[J].湖泊科学,2013,25(5):665-673.
- [10] 李维斗,钟益民,徐力进,等.洱海北部“两江一河”水污染治理调研报告[J].大理学院学报,2014,13(11):22-27.
- [11] 周成虎,孙胜利,谢一春.地理元胞自动机研究[M].北京:科学出版社,2001.
- [12] 马志涛,谭云亮.岩石破坏演化细观非均质物理元胞自动机模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(15):2704-2708.
- [13] 王璐,谢能刚,李锐,等.基于元胞自动机的水体污染带扩散模拟[J].水利学报,2009,40(4):481-485.
- [14] 韩龙喜,周毅,朱党生.小浪底水库水环境质量预测模拟研究[J].水资源保护,2002(1):23-25.

(上接第 58 页)

表4 2020年研究区偏枯年灌溉用水量分配情况

Table 4 Distribution of 23 irrigation water capacity in dry year in 2020

乡镇 Villages and towns	总需水量 Total water demand	万 m ³ /a	
		地表水 利用量 Utilized quantity of surface water	孔隙潜水 利用量 Utilized quantity of porous unconfined groundwater
篱笆镇 Liba Town	577.47	323.00	254.47
楚村镇 Chucun Town	1 181.18	518.00	663.18
三义镇 Sanyi Town	866.20	351.00	515.20
乐土镇 Letu Town	1 102.43	557.00	545.43
小辛集乡 Xiaoxinji Village	710.02	384.00	326.02
合计 Total	4 437.30	2 133.00	2 304.30

水量上能够得到满足。

表5 2020年研究区特枯年灌溉用水量分配情况

Table 5 Distribution of irrigation water capacity in extraordinary dry year in 2020

乡镇 Villages and towns	总需水量 Total water demand	万 m ³ /a	
		地表水 利用量 Utilized quantity of surface water	孔隙潜水 利用量 Utilized quantity of porous unconfined groundwater
篱笆镇 Liba Town	577.47	108.00	469.47
楚村镇 Chucun Town	1 181.18	145.00	1 036.18
三义镇 Sanyi Town	866.20	90.00	776.20
乐土镇 Letu Town	1 102.43	165.00	937.43
小辛集乡 Xiaoxinji Village	710.02	98.00	612.02
合计 Total	4 437.30	606.00	3 831.30

3.2.3 特枯年水源利用方案($P_w = 95\%$)。遭遇特枯年,2020年5个乡镇的农田灌溉水量配置情况见表5。由表5可知,2020年特枯年研究区用于农田灌溉的地表水资源量为606.00万 m³/a,2020年孔隙潜水利用量3 831.30万 m³/a,

参考文献

- [1] 孙从军,韩振波,赵振,等.地下水数值模拟的研究与应用进展[J].环境工程,2013(5):9-13.
- [2] 薛禹群.中国地下水数值模拟的现状与展望[J].高校地质学报,2010(1):1-6.