

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.03.013

基于渗透系数序贯高斯模拟的 水库渗漏量不确定性分析

张飞¹, 温忠辉¹, 戴凤君², 李伟³

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098; 2. 江苏水文水资源勘测局镇江分局, 江苏镇江 212003;
3. 江苏省地质调查研究院, 江苏南京 210018)

摘要: 水库库底地层渗透系数是影响水库渗漏量的主要因素之一, 研究渗透系数的空间变异特征可为水库渗漏量计算结果的可靠性分析提供科学依据。以天津市北塘水库库底地层渗透系数为研究对象, 先利用克里金插值对该参数系列进行了插补, 再对插补后的渗透系数系列进行了500次序贯高斯模拟, 最后分析了其空间变异性对库区渗漏量计算值不确定性的影响。结果表明: 库底地层垂向渗透系数空间结构可用球状模型描述, 在变程1210 m范围内具有高度空间相关性。以2005年7月16日渗漏量计算值总体为例, 最小值与最大值分别为1389.49 m³/d、1897.30 m³/d, 且落在区间1600~1850 m³/d的频率高达77.6%。

关键词: 渗透系数; 条件模拟; 空间变异性; 水库渗漏量; 不确定性

中图分类号: P641.2 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2016)03-0069-05

Uncertainty analysis of reservoir leakage based on sequential Gaussian simulation of hydraulic conductivity

ZHANG Fei¹, WEN Zhonghui¹, DAI Fengjun², LI Wei³

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Zhenjiang Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation
Bureau, Zhenjiang 212003, China;
3. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China)

Abstract: Hydraulic conductivity of the reservoir bottom stratum is one of the main factors affecting reservoir leakage. Studying the spatial variability of hydraulic conductivity can provide a scientific basis for the reliability analysis of the calculation results of reservoir leakage. Using the bottom stratum of the Beitang Reservoir as a case study, the parameter series were extended through Kriging interpolation. Then, the interpolated hydraulic conductivity was estimated by sequential Gaussian simulation which was carried out 500 times. Finally, the effect of the spatial variability of hydraulic conductivity on the uncertainty of calculated leakage was analyzed. The results show that the spatial structure of vertical hydraulic conductivity can be described by a spherical model, and it has a high spatial correlation within 1210 m. As for the leakage calculated on July 16, 2005, the smallest value was 1389.49 m³/d, the largest value was 1897.30 m³/d, and the frequency of the calculated value falling into the range of 1600 to 1850 m³/d reached 77.6%.

Key words: hydraulic conductivity; conditional simulation; spatial variability; reservoir leakage; uncertainty

基金项目: 国家自然科学基金(41172203, 41201029, 41301017); 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金(IWHR-SKL-201502)

作者简介: 张飞(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为地下水数值模拟及开发利用。E-mail: jeff91214@sina.com

通信作者: 温忠辉, 副教授。E-mail: wenzh2812@sina.com.cn

地表水和地下水的相互作用是自然界中普遍存在的一种现象。正确认识地表水与地下水之间的相互作用,尤其是水量和水质的时空变化规律研究及交换水量的准确计算,对水资源的综合管理及合理开发利用具有重要的科学意义^[1]。进入 21 世纪,国内外许多组织和机构都将两者的相互作用作为水文学及水文地质学方面研究的热点问题^[2]。

水文地质参数的空间变异性是影响地表水与地下水相互作用强度的主要因素之一。其中,渗透系数在野外实际条件下的空间变异性较其他水文地质参数要大得多,最大值与最小值相差可达 13 个数量级^[3]。这就决定了渗透系数必须作为随机变量处理。同时渗透系数又具有一定程度上的结构性,比如,含水介质是在特定地质条件下沉积形成的,具有一定成层性^[4]。因此,地表水与地下水之间交换量计算的可靠度在很大程度上依赖于参数随机场的模拟是否反映出实际地区参数的空间变异性。

胡伏生等^[5]利用条件模拟对内蒙古霍林河市主要含水层渗透系数的分布特征进行了分析;陈彦等^[4]采用 Monte Carlo 法来研究含水介质渗透系数空间变异性对地下水数值模拟的影响;彭伟等^[6]进行了渗透系数的序贯高斯模拟对污染物运移的不确定性研究;束龙仓等^[7]在对北塘水库库底地层渗透系数进行 Monte Carlo 模拟的基础上,进行了地表水与地下水交换量的不确定性研究。综合前人研究的成果,与 Monte Carlo 法相比,条件模拟既考虑了参数的随机性,又考虑了参数的结构性,更能客观地反映参数实际变化特征^[6]。笔者在文献^[7]研究的基础上,运用地质统计学的原理和方法,分析参数的随机性和空间相关性,进一步探讨参数条件模拟对交换量不确定性的影响。

1 序贯高斯模拟法

对于某一特定的含水层而言,其空间上每一点的渗透系数都是确定的。但由于渗透系数难于准确获取,并且获取所有点的渗透系数也不太现实,因此如何合理利用有限个参数样本来推断含水层参数在空间上的分布特征成为难点之一。条件模拟是地质统计学一个重要的随机模拟手段,它是以区域化变量为基础、借助变异函数来研究既具有随机性又具有结构性的自然现象的手段。20 世纪 90 年代我国在水土资源领域开始引入条件模拟进行应用研究,并受到广泛关注^[8]。在条件模拟的多种方法中,序贯高斯模拟法由于灵活、简单、高效,成为条件模拟最常用的方法之一。

顾名思义,序贯高斯模拟就是将顺序模拟和高

斯模拟相结合的一种随机模拟方法。序贯高斯模拟的适用前提是模拟变量必须符合正态分布,若不符合,则须先将其进行正态变换。该方法前人已作了大量的叙述,限于篇幅,这里不再赘述。序贯高斯模拟方法原理及算法的实现可参见文献^[6]。

2 地表水与地下水交换量计算方法

天津市北塘水库库区垂向渗漏过程中,渗漏水量受下伏相对隔水层的阻挡,库水先垂向渗漏补给库底含水层,之后在侧向水力梯度作用下以侧向渗流为主。因此,在渗漏量计算过程中,可以将上述过程概化为侧向渗流。

库区渗漏量按照式(1)~(3)进行计算:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (1)$$

其中 $Q_i = K_i A_i J_i \quad (2)$

$$J_i = \frac{\Delta H_i}{L_i} \quad (3)$$

式中: Q 为地下水与地表水交换量; Q_i 为各个分区的交换量; n 为分区个数; K_i 为各分区水量交换层渗透系数; A_i 为各分区的面积; J_i 为地下水与地表水之间的水力梯度,无量纲; L_i 为各分区的形心到对应地下水水位观测井的距离; ΔH_i 为库水位与地下水的水位差。

利用序贯高斯模拟法生成渗透系数随机场,渗流方向的确定仍沿用文献^[7]提出的 D8 算法。主要计算步骤如下:

- a. 将库底地层在平面上剖分成多个大小相同的正方形网格,逐一计算每个网格中心点到周围所有观测井的水力梯度,取其最大值作为该点渗流方向,得到任一网格的 J_i ;
- b. 将序贯高斯模拟法生成的参数模拟值分别赋值到相应的网格上,得到任一网格所代表的 K_i ;
- c. 根据式(2)计算得到任一网格 A_i 上地表水与地下水交换量 Q_i ;
- d. 将所有网格各自的 Q_i 相加即得水库渗漏总量 Q ;
- e. 重复步骤 a~c,得到水库渗漏量 Q 的多次模拟值。

3 实例研究

3.1 研究区概况

北塘水库位于天津市塘沽区北塘镇西北约 2 km,是一座已建成的中型平原水库。地理坐标为 117°38'E ~ 117°41'E, 39°06'N ~ 39°08'N。2003 年 12 月北塘水库增容扩建后,总库容达到 3 977 万

m³,设计水位 7.00 m,蓄水面积 7.31 km²,围堤总长约 10.40 km。库底地层岩性以黏土、粉质黏土为主,夹粉砂、粉土透镜体,整体上含水不丰富,埋藏较浅,地下径流微弱。库区地下水为孔隙潜水和微承压水,分别分布于上部陆相层和第一海相层上部的粉砂、粉土层中。库区周边地下水埋深 0.55~2.56 m,平均 1.42 m,北侧和东北侧地下水水位较高。北塘水库地理位置、平面形状及库底地层岩芯采样点位置见图 1。

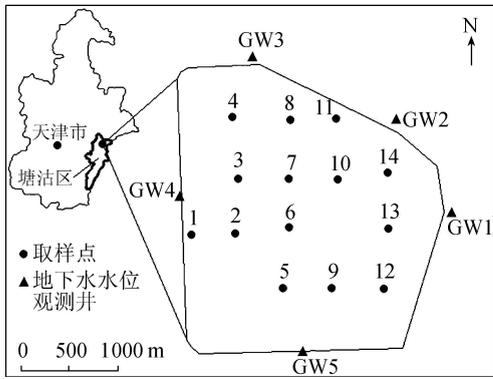


图 1 北塘水库地理位置、平面形状及库底地层岩芯采样点位置

库区共布置了岩芯采样点 14 个,在对土样进行室内颗粒分析试验后,选取 ALYAMANI&SEN 公式最终计算得到这 14 个测点的渗透系数。

本文选取 2005 年 7 月 16 日,8 月 31 日,9 月 15 日地表水与地下水水位动态观测资料进行分析计算,地表水、地下水水位动态资料见表 1。

表 1 地表水、地下水水位动态观测资料 m

日期	库水位	各观测井水位				
		GW1	GW2	GW3	GW4	GW5
2005-07-16	5.900	2.14	1.923	3.348	1.78	1.57
2005-08-31	7.046	2.41	4.743	3.878	2.60	2.22
2005-09-15	7.011	2.26	4.513	4.138	2.55	1.94

3.2 序贯高斯模拟

渗透系数半方差函数分析及序贯高斯模拟均用 GS⁺9.0 软件进行计算和模拟,研究区参数模拟的空间分布图用 ArcMap10.2 软件绘制,参数统计和 P-P 图在 SPSS12.0 软件中进行。

3.2.1 渗透系数统计特征分析

为了对研究区渗透系数分布有个总体的认识,对这 14 个测点样本进行了统计分析及非参数检验^[9],结果表明:样本分布类型为对数正态,均值为 4.56 cm/d,标准差为 8.67,最大值为 24.71 cm/d,最小值为 8.35×10^{-5} cm/d,变异系数为 190%,属高强度变异^[10]。插值精度在很大程度上受到数据变异性的影响,在相同的插值精度条件下,数据变异性越大所需的样本数越多。若仅对这 14 个测点样本进

行地质统计分析,则资料不够充分,并且库岸处布设点数较少。为了解决此问题,可以利用这 14 个样本进行克里金插值,得到如图 2 所示的库区库底地层渗透系数等值线,然后在图中较均匀地取点,并结合库底地层地质勘探资料,最终获得 20 个点来插补资料系列^[11]。根据国外相关研究成果^[12],虽然该方法获取的数据有一定近似性,但对数据的半定量及定性分析不会产生明显影响。

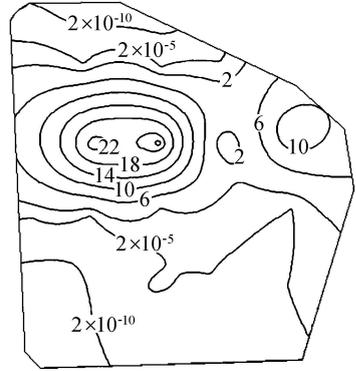


图 2 库区库底地层渗透系数等值线(单位:cm/d)

对插补后的 34 个参数样本分别绘制正态(图 3(a))和对数正态(图 3(b)) P-P 概率图,相对于正态分布而言,该渗透系数系列更接近对数正态分布。将该系列取自然对数后,再对该参数系列进行 K-S 检验^[13]。检验结果表明,在 0.05 显著性水平下,lnK 系列的 $P > 0.05$,接受正态分布的原假设,故 lnK 系列服从正态分布,满足了序贯高斯模拟需以数据场呈正态分布的前提^[14]。

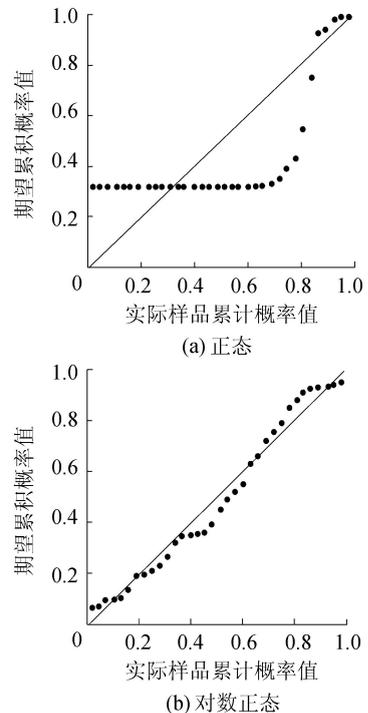


图 3 K 系列的正态及对数正态 P-P 概率图

3.2.2 半方差函数的结构分析

半方差函数是研究含水层渗透系数空间变异的一种有效方法。利用 GS+9.0 软件可以很方便地获得库底地层渗透系数的最佳理论半方差函数(图 4)。

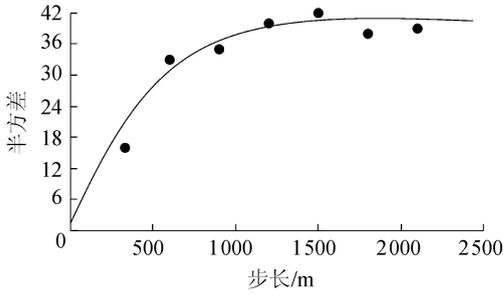


图 4 含水层渗透系数半方差函数

图 4 中半方差函数为球状模型, $C_0 = 2.12$, $C_0 + C = 39.52$, $a = 1210$ m, $R^2 = 0.879$, $R_{SS} = 29.53$ 。其中: C_0 表示块金效应; $C_0 + C$ 表示基台值; $C_0 / (C_0 + C)$ 表示参数空间变异性程度, 研究区渗透系数 $C_0 / (C_0 + C)$ 值为 0.05%, 属高度空间相关性^[10]。 a 表示参数变程, 即在该值范围内, 观测值之间存在一定的相关性, 观测值之间的距离超过该值时则相互独立。研究区参数变程为 1210 m, 大于采样距离。综合以上分析, 研究区渗透系数在变程 1210 m 范围内具有高度的空间相关性。

3.2.3 渗透系数条件模拟

利用图 4 半方差函数理论模型对库底地层渗透系数进行了 500 次序贯高斯模拟。为避免模拟过程中模拟值出现负值^[15], 在 GS+9.0 软件中将模拟值的上限和下限分别设为参数实测值的最大值和最小值。设定剖分网格大小为 20 m×20 m, 即每个网格面积为 400 m²。将模拟的参数随机场导入 ArcMap 中转换成点位图, 剔除研究区外的数据。最终得到插值数据 18048 个, 用于渗漏量的计算。图 5 列出模拟中随机抽取的两次条件模拟的参数空间分布图。

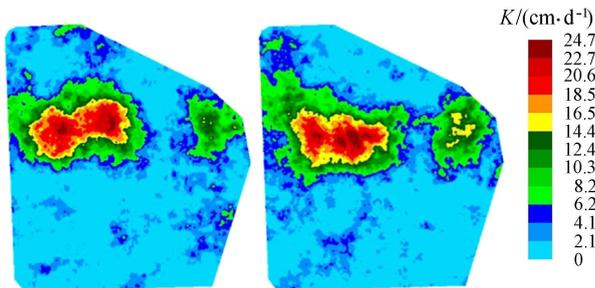


图 5 渗透系数条件模拟实现

由图 5 可知, 渗透系数具有明显的空间变异性, 渗透系数较大的区域位于库区中北部, 也是水库渗漏风险最大的区域, 其他区域渗透系数较小。这是

由于库区中北部第四系全新统上部陆相层在水库增容扩建期间破坏较为严重, 下伏的粉砂和粉土层出露库底, 而其他区域地层多为黏土类沉积物, 透水性差^[16]。

3.3 渗流方向的确定

依据文献[7]提出的 D8 算法, 分别计算每个网格中心点到周边 5 口观测井的水力梯度, 取其最大值作为渗流方向, 最终得到每个网格的 J_i 。图 6 为不同时刻渗流方向示意图。

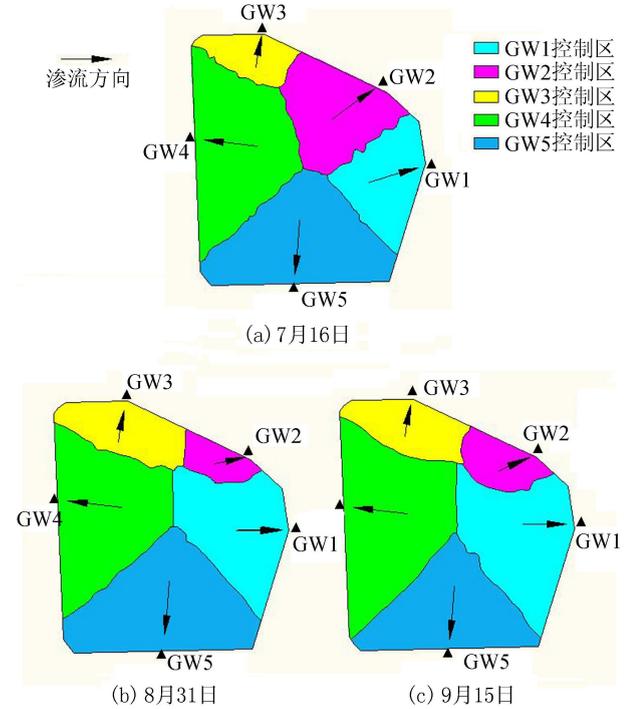


图 6 不同时刻渗流方向示意图

3.4 计算渗流量

在给每一网格 J_i, K_i 赋值的基础上, 根据式(1)~(3)分别计算 3 个时刻的渗流量, 这就得到每个时刻一次渗透量模拟值。按照一共模拟 500 次渗透系数随机场计算, 可得到每个时刻样本容量为 500 的渗流量总体。渗流量计算结果见表 2, 其频率分布见图 7。

表 2 水库渗流量计算结果 m³/d

日期	渗流量最小值	不同频率渗流量					渗流量最大值
		p = 10%	p = 30%	p = 50%	p = 80%	p = 90%	
2005-07-16	1389.49	1560.64	1658.83	1720.65	1795.84	1842.83	1897.30
2005-08-31	1441.41	1629.53	1721.40	1787.94	1872.72	1922.42	1986.30
2005-09-15	1453.45	1648.44	1740.88	1815.95	1900.16	1946.86	2023.23

综合表 2 及图 7 分析, 基于渗透系数序贯高斯模拟的渗流量计算结果, 最大值与最小值相差约 1.4 倍, 频率分布呈偏右型。以 7 月 16 日计算的渗流量总体为例, 最小值与最大值分别为 1389.49 m³/d、1897.30 m³/d, 且落在区间 1600 ~ 1850 m³/d 的频率较高, 其频率高达 77.6%。

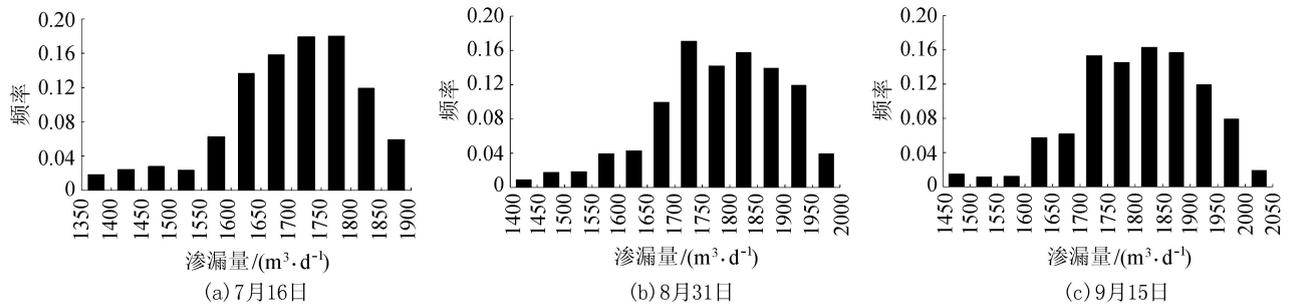


图7 2005年渗漏量频率分布

4 结论

a. 库区渗透系数较大的区域位于中北部,也是水库渗漏风险最大的区域,其他区域渗透系数较小。与 Monte Carlo 法相比,基于序贯高斯模拟的渗透系数随机场既考虑了参数空间随机性,又考虑了参数的结构性,其模拟结果更能反映出实际库底地层地质条件。

b. 影响渗漏量的主要因素是渗透系数的空间变异性,同一时刻基于不同渗透系数随机计算出的渗漏量相差约 1.4 倍。此外,不同时刻空间渗流方向的变化也会对渗漏量的计算产生影响。

c. 针对其他的水文地质参数,如孔隙度、给水度、导水系数等,在对其进行正态检验或正态变换后,均可以通过多次序贯高斯模拟,产生大量不同插值结果的参数随机场,进而进行不确定性分析。若参数样本偏少,利用克里金插值来插补资料不失为一种有效的方法。

参考文献:

[1] 胡立堂,王忠静,赵建世,等. 地表水和地下水相互作用及集成模型研究[J]. 水利学报,2007,38(1):54-59. (HU Litang, WANG Zhongjing, ZHAO Jianshi, et al. Advances in the interactions and integrated model between surface water and groundwater [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2007,38(1):54-59. (in Chinese))

[2] 胡俊锋,王金生,滕彦国. 地下水与河水相互作用的研究进展[J]. 水文地质工程地质,2004(1):108-113. (HU Junfeng, WANG Jinsheng, TENG Yanguo. Study progress of interaction between stream and groundwater [J]. Hydrogeology and Engineering Geology,2004(1):108-113. (in Chinese))

[3] FREEZE R A, CHERRY J A. Groundwater [M]. Upper Saddle River, NJ:Prentice-Hall, 1979.

[4] 陈彦,吴吉春. 含水层渗透系数空间变异性对地下水数值模拟的影响[J]. 水科学进展,2005,16(4):482-487. (CHEN Yan, WU Jichun. Effect of the spatial variability of hydraulic conductivity in aquifer on the numerical

simulation of groundwater [J]. Advances in Water Science,2005,16(4):482-487. (in Chinese))

[5] 胡伏生,陈连竹,万力,等. 含水层参数不确定性与地下水开采量可靠性评价[J]. 南京大学学报(自然科学版),1999,35(6):675-682. (HU Fusheng, CHEN Lianzhu, WAN Li, et al. Uncertainty of aquifer property and assessment of groundwater yield reliability [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 1999, 35(6):675-682. (in Chinese))

[6] 彭伟,吴剑锋,阎婷婷. 渗透系数的条件模拟对污染物运移的不确定性分析[J]. 南京大学学报(自然科学版),2008,44(3):280-288. (PENG Wei, WU Jianfeng, YAN Tingting. Uncertainty analysis of the contaminant transport fate using conditional simulation of hydraulic conductivity [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences),2008,44(3):280-288. (in Chinese))

[7] 束龙仓,鲁程鹏,李伟. 考虑参数不确定性的地表水与地下水交换量的计算方法[J]. 水文地质工程地质,2008(5):68-71. (SHU longcang, LU Chengpeng, LI Wei. Calculation method of the exchange volume between surface water and groundwater based on uncertainty of parameters [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008(5):68-71. (in Chinese))

[8] 陈亚新,徐英,史海滨,等. 条件模拟原理和技术进展及在水资源系统中的应用[J]. 水科学进展,2002,13(2):246-252. (CHEN Yaxin, XU Ying, SHI Haibin, et al. Theory, development and application of the conditional simulation in water resources system [J]. Advances in Water Science,2002,13(2):246-252. (in Chinese))

[9] 陈元芳. 统计试验方法及应用[M]. 哈尔滨:黑龙江人民出版社,2000:25-65.

[10] 杨奇勇,杨劲松,姚荣江,等. 耕地土壤有机质空间变异性的随机模拟[J]. 农业工程学报,2010,26(12):324-329. (YANG Qiyong, YANG Jinsong, YAO Rongjiang, et al. Stochastic simulation of cultivated soil organic matter spatial variability [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2010,26(12):324-329. (in Chinese))

(下转第 152 页)

的污染控制管理体系,明确了分阶段治理目标,提出了控源、截污、引流、清淤、生态修复以及调整产业结构、工业布局、城乡布局等综合性措施,全面规划了需要实施的项目和工程。国务院批复的《太湖流域水功能区划》明确了流域不同水域的功能定位和水质目标。江苏、浙江、上海 2 省 1 市在《总体方案》基础上,分别制订了具体的实施方案,并加强了工程项目的科学论证和前期工作,使流域综合治理工作建立在科学的基础上。

3.3 有效的协调机制是做好流域水环境综合治理的保障

国务院 2008 年批复成立了由国家发展改革委牵头的太湖流域水环境综合治理省部际联席会议,2 省 1 市人民政府以及水利部、环境保护部等 13 个部门每年召开会议,统筹协调太湖流域水环境综合治理的各项工作。2 省 1 市和有关部门也相应建立了完善了区域和行业协调工作机制。水利部成立了太湖流域水环境综合治理水利工作协调小组,并召开 2 省 1 市分管省领导和水利部门参加的协调会议。流域治理形成了合力,促进了各项治理工作的开展。

3.4 依法治水是做好流域水环境综合治理的保证

太湖流域立法工作取得重大突破。2011 年 9 月 16 日国务院第 604 号令公布的《太湖流域管理条例》,开创了我国流域性综合立法的先河,将实践中行之有效的各项措施规范化、制度化。通过立法加强了太湖流域的水资源保护和水污染防治工作,推动了经济发展方式转变,维护了流域生态安全。地方政府修订或制定的《江苏省太湖水污染防治条例》《浙江省城镇污水集中处理管理办法》等一批法规文件,为规范流域水环境治理奠定了基础。同时,各有关方面加大了对水事违法案件的查处力度和环境执法力度,不断加强重要水功能区和入河排污口的监督管理,有效防范了突发水污染事件和破坏水环境违法行为的发生。

例》,开创了我国流域性综合立法的先河,将实践中行之有效的各项措施规范化、制度化。通过立法加强了太湖流域的水资源保护和水污染防治工作,推动了经济发展方式转变,维护了流域生态安全。地方政府修订或制定的《江苏省太湖水污染防治条例》《浙江省城镇污水集中处理管理办法》等一批法规文件,为规范流域水环境治理奠定了基础。同时,各有关方面加大了对水事违法案件的查处力度和环境执法力度,不断加强重要水功能区和入河排污口的监督管理,有效防范了突发水污染事件和破坏水环境违法行为的发生。

参考文献:

- [1] 水利部太湖流域管理局. 太湖流域及东南诸河水资源公报[R]. 上海:水利部太湖流域管理局,2013.
- [2] 国家发展和改革委员会. 关于印发太湖流域水环境综合治理总体方案(2013 年修编)的通知[EB/OL]. [2013-12-30]. http://www.sdpc.gov.cn/fzgggz/dqjj/zhd/201401/t2014011_575733.html.
- [3] 水利部太湖流域管理局. 主要入太湖河道控制断面水质信息[R]. 上海:水利部太湖流域管理局,2014.
- [4] 水利部太湖流域管理局. 太湖健康状况报告[R]. 上海:水利部太湖流域管理局,2008.

(收稿日期:2015-05-17 编辑:彭桃英)

(上接第 68 页)

- [18] 李乃炜. 南京市可持续发展评价指标体系研究[J]. 上海环境科学,1999,18(6):249-251. (LI Naiwei. Study on evaluation index system of sustainable development in Nanjing City[J]. Shanghai Environmental Sciences,1999,18(6):249-251. (in Chinese))
- [19] 李悦,李平. 产业经济学[M]. 大连:东北财经大学出版社,2002.

(上接第 73 页)

- [11] 郭建清,母敏霞,郑丽萍,等. 浅层含水层水文地质参数的统计分析与时空相关性[J]. 勘察科学技术,2002(4):9-12. (GUO Jianqing, MU Minxia, ZHENG Liping, et al. Analysis on statistic distribution and spatial correlativity of hydrogeological parameters of shallow aquifer [J]. Site Investigation Science and Technology, 2002(4):9-12. (in Chinese))
- [12] ROBERT J H, PETER K K. An application of geostatistical approach to the inverse problem in two-dimensional groundwater modeling [J]. Water Resource Research, 1984,20(7):1003-1020.
- [13] 束龙仓,李伟. 北塘水库库底地层渗透系数的随机特性分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2007,37(2):216-220. (SHU Longcang, LI Wei. Analysis on the stochastic characteristic of the hydraulic conductivity of bottom stratum, Beitang Reservoir, Tianjin City [J].

- [20] 李祚泳,沈仁伦. 社会,经济与环境协调发展指数评价模型[J]. 上海环境科学,2000,19(5):201-204. (LI Zuoyong, SHEN Renlun. Assessment model of community, economy and environment coordinative development index [J]. Shanghai Environmental Sciences,2000,19(5):201-204. (in Chinese))

(收稿日期:2015-05-10 编辑:王芳)

- [14] 李保国,胡克林,陈德立,等. 农田土壤表层饱和导水率的条件模拟[J]. 水利学报,2002(2):36-46. (LI Baoguo, HU Kelin, CHEN Deli, et al. Conditional simulation of soil surface saturated hydraulic conductivity at field scale [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2002(2):36-46. (in Chinese))
- [15] 张泽谱,王学军. 土壤微量元素含量空间分布的条件模拟[J]. 土壤学报,1998,35(3):424-429. (ZHANG Zepu, WANG Xuejun. Conditional simulation for spatial distribution of trace elements in soils [J]. Acta Pedologica Sinica,1998,35(3):424-429. (in Chinese))
- [16] 李伟. 北塘水库对地下水的渗漏补给特性研究[D]. 南京:河海大学,2007.

(收稿日期:2015-06-02 编辑:徐娟)