

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2014.01.004

典型暴雨农业面源总磷入库水质影响过程

孙 杨,韩龙喜

(河海大学环境学院,江苏 南京 210098)

摘要:以东北大伙房水库为典型研究案例,根据典型暴雨情况下农业面源中总磷入库的时间变化特征,建立考虑入库水流影响的库区三维水动力数学模型及相应的三维水质模型,模拟分析 1 次典型暴雨入库过程中库区总磷三维空间分布及随时间变化的特征。模拟结果表明,受入库流量和丰水期主导风向东北风的影响,总体上总磷随着水流主要沿西南岸线向坝址方向扩散,总磷浓度超标面积逐渐增大,随着流程增加,其浓度逐渐减小。对面源入库过程的模拟分析可以为面源污染的预报及治理提供相关的技术依据。

关键词:典型暴雨;农业面源污染;总磷;三维数值模拟;大伙房水库

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2014)01-0018-05

Water quality effects of agricultural non-point source total phosphorus input into reservoir in a typical rainstorm

SUN Yang, HAN Longxi

(College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: According to the time-varying characteristics of agricultural non-point source total phosphorus (TP) input into the Dahuofang Reservoir, in the northeastern area of China, for a typical rainstorm case, we established a three-dimensional hydrodynamic mathematical model and the corresponding three-dimensional water quality model, taking into account the influence of the flow into the reservoir, in order to simulate and analyze the three-dimensional spatial distribution and time-varying characteristics of TP in the reservoir area during a typical rainstorm storage process. The simulation results show that, under the influence of the inflow and the northeasterly wind direction, which was the dominant wind direction in the wet period, TP diffused towards the dam site along the southwest coastline, the TP-exceeded area increased gradually, and the concentration of TP decreased with the flow process. The simulation analysis of this process can provide a relevant technical basis for the forecast and control of non-point source pollution.

Key words: typical rainstorm; agricultural non-point source pollution; total phosphorus; three-dimensional numerical simulation; Dahuofang Reservoir

随着经济发展和城镇规模的扩大,通过点源治理,水体污染已得到明显控制。但由于城镇垃圾、农田化肥、农药等随雨水产生的地表径流进入了水体,其面源污染治理没有得到重视,使得面源污染在环境污染中所占的比例越来越大^[1]。水体面源污染一般是晴天积累,雨天排放,没有固定的发生源。而

降水径流则是其发生的主要动力,因此当一场暴雨发生时,面源污染随之发生。面源入库源强及库区水质响应是一个动态过程。对这一过程的进行模拟分析可为面源污染的预报及治理提供相关的技术依据。

目前,针对农业面源污染的预报工作,国内外取得了一系列研究成果。范丽丽等^[2]应用 SWAT 模

基金项目:水利部公益性行业科研专项(201101031)
作者简介:孙杨(1989—),女,硕士研究生,研究方向为环境水力学。E-mail:sunyang817@126.com

型计算分析了大宁河流域不同降雨径流条件下非点源污染的产输出特性。美国国家环保局开发出SWMM暴雨径流管理模型模拟城市降雨面源污染情况^[3-4]。蒋金等^[5]通过分析降雨径流的水文过程、其与非点源污染物的作用机理及其对非点源污染的影响,探讨如何有效地减少非点源污染。程红光等^[6]以黑河流域为研究区对不同降水条件下农田、城镇、草地、灌木及森林等土地利用类型的各亚流域氮的入河系数进行了研究。吕兴娜^[7]利用铁岭市柴河堡水文站降雨时节实测的暴雨径流数据、泥沙数据、污染物浓度数据研究降雨时节暴雨径流量与主要污染物浓度及污染物瞬时流失量之间的关系。总体而言,目前研究成果主要集中于分析面源污染物浓度与不同降雨径流条件的关系。由于水库有防洪、蓄水灌溉、发电、养鱼等作用,甚至可作为当地的饮用水水源,因此研究暴雨情况下面源污染对水库水质的影响有其特殊意义。本文以大伙房水库为例,分析典型暴雨发生后,面源污染团进入水库对水库水质的影响。

1 研究区域概况

大伙房水库是一座大型水利枢纽工程,位于辽宁省东部山区,是辽宁省两个重要工业城市——沈阳市、抚顺市的饮用水水源地。其控制流域面积5437 km²,流域内多山地。平均海拔高度175 m,水库最大库容21.87 亿 m³,最大水深41.5 m,平均水深20 m,最大水面长30 km,平均水面宽1 000 m,最大水面面积110 km²^[8]。其所处流域为暖温带大陆性季风气候,冬季漫长寒冷,夏季炎热多雨,全年日照时数在2 280~2 670 h。流域多年平均年降水量为650~800 mm,降水量主要集中在7月、8月,占全年降水量的50%左右。流域内多年平均年水面蒸发约为1 100~1 600 mm,多年平均相对湿度为60%~70%,多年平均风速为1.5~3.8 m/s^[9]。

社河是距离大伙房水库最近的一条入库河流,流经抚顺县多个村镇,农业面源污染较为严重。目前社河周边地区农田已呈酸化趋势,由于作物对化肥的吸收一般只有20%~30%,其余大部分营养元素通过地表径流和淋溶进入水体,导致藻类等生物大量繁殖。水体溶解氧的急剧下降,使水质恶化,导致鱼虾大量死亡。近年来,当地的牛、生猪、羊、鸡、鸭等畜禽养殖数量比前几年已有了明显增长,而畜禽粪尿总体流失率在10%左右,社河流域由畜禽粪尿的流失而排入水环境中的污染物总量已超过该地区居民生活污染物总量^[10]。因此,本文选取社河流入大伙房水库区域为典型研究区域,见图1所示。

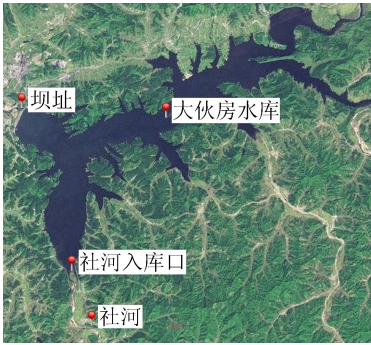


图1 社河入库流域

大伙房水库最大水深为41.5 m,平均水深20 m,属于深水水库,其流速、污染物浓度沿垂向分布差异较大。笔者根据典型暴雨发生时的入库河流的水文、水质及污染物浓度变化过程的监测数据,建立水库三维水动力、水质模型,模拟分析典型暴雨入库过程中库区总磷三维空间分布及随时间变化的特征。

2 数学模型

2.1 三维水动力数学模型

用笛卡尔坐标系下描述水库三维水流运动的控制方程组^[11]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = \\ - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(2A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left[A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = \\ - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \tag{3}$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho_0 g \tag{4}$$

式中: u 、 v 、 w 分别为坐标 x 、 y 、 z 方向上的流速分量; t 为时间坐标; ρ_0 为水体密度; p 为压强; g 为重力加速度; A_M 为水平涡黏系数; v_z 为垂向涡黏系数; f 为柯氏力系数, $f=2\Omega\sin\Phi$,其中, $\Omega=2\pi/86\,184$ 为地球自转频率, Φ 为当地纬度。

2.2 三维水质数学模型

在笛卡尔坐标系下,污染物三维输运方程描述如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u\rho}{\partial x} + \frac{\partial v\rho}{\partial y} + \frac{\partial w\rho}{\partial z} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(D_k \frac{\partial \rho}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_k \frac{\partial \rho}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_v \frac{\partial \rho}{\partial z}\right) - K\rho \quad (5)$$

式中: ρ 为污染物质质量浓度; K 为污染物降解系数; D_v 为垂向扩散系数; D_k 为水平扩散系数。

2.3 模型验证

选用明渠垂向流速分布的经验公式来验证数值模拟的结果^[12]。试验选取的计算区域为东西开边界的矩形明渠水槽,长 1000 m,宽 400 m。其他参数见表 1。

空间步长	时间步长	空间步长	Cr 数	静止水深	粗糙高度	上边界流量 Q	下边界水位
$\Delta x/\text{m}$	$\Delta t/\text{s}$	$\Delta y/\text{m}$		h/m	k_s/m	$(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	ζ/m
35	0.25	35	0.13	10	0.05	20000	0

选用明渠垂向浓度分布的指数律来验证数值计算结果,得出的数值模拟结果与垂向流速指数律分布公式所得的流速分布对比见图 2、图 3。可以看出,模型较好地模拟了明渠水流的流速分布。

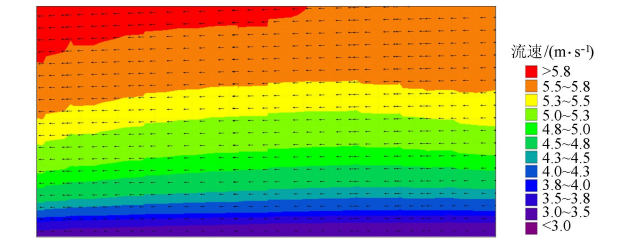


图 2 明渠垂向流速分布示意图

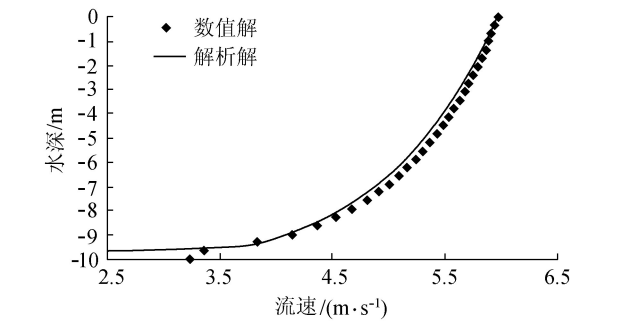


图 3 明渠垂向流速分布解析解与数值解比较

3 面源入库库区 TP 质量浓度变化特征分析

3.1 库区三维水动力特征分析

a. 网格布置。水动力模拟采用无结构三角网格划分计算区域,在社河入库区域适当加密。平面共布置 2082 个节点,3652 个网格单元,垂向上采用等距离分层进行剖分,共分为 10 层。

b. 定解条件及模拟参数取值。垂向涡黏系数 ν_z 采用 Kolmogorov-Prandtl 方程求解,水平涡黏系数 A_M 采用 Smagorinsky 亚网格尺度紊动模型计算。入流边界中的苏子河和浑河边界采用丰水期实测平均入库流量,分别是 $138.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $100.6 \text{ m}^3/\text{s}$,面源入库的社河边界取的是流量时间序列。模拟参数取值:粗糙

高度 $k_s=0.01 \text{ m}$,水平扩散系数 $D_k=1 \text{ m}^2/\text{s}$,垂向扩散系数 $D_v=1 \text{ m}^2/\text{s}$,TP 降解系数为 0.0018 d^{-1} ;定解条件:初始流速为 0 m/s ,初始水位为 129.85 m ,出流边界水位为 129.85 m ,岸边界法向流速为 0 m/s 。

c. 模拟时段。由图 4 可知,8 月 4—8 日这段时间内有 1 场暴雨发生,因此选择此时段作为农业面源污染的研究时段。社河最大入库流量 $478 \text{ m}^3/\text{s}$ 发生在 8 月 4 日 12:00,总磷的入库质量浓度也在 8 月 4 日 20:00 时达到最大值 0.72 mg/L 。

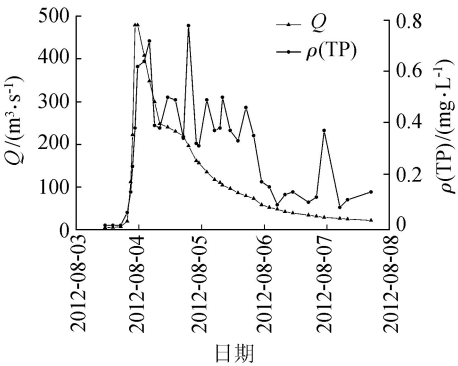


图 4 社河入库流量、TP 质量浓度随时间变化曲线

以丰水期平均风速 2.3 m/s 和主导风向(东北风)作为自由表面条件,模拟水库丰水期三维水动力流场。当模拟时间为 12 h,即社河入库流量达到最大值时,吞吐流对水库流场的影响也达到最大。由图 5(a)可知,大伙房水库社河入库口水域水流结构呈现受吞吐流支配的水动力特征和显著的顺岸流特征。当模拟时间为 72 h,此时入库流量逐渐减小到最小值而主导风向东北风的大小为 2.3 m/s 时,风应力对水库流场影响最大。由图 5(b)可知,表层流场受风场的作用比较大,从社河流入水库的水流形成顺时针的大环流,入库口水域水流结构呈现以风生流为支配的水动力特征。

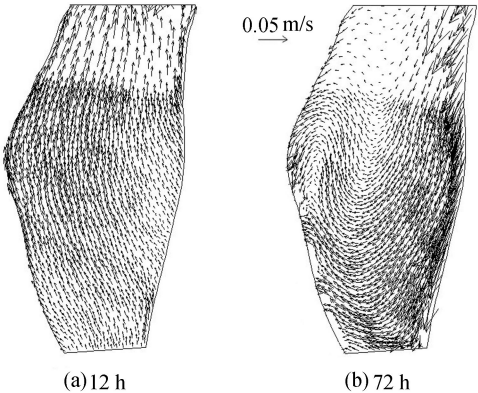


图 5 三维水动力模拟表层流速

3.2 库区浓度平面分布特征

大伙房水库富营养化综合指标已接近富营养化水平,总磷等污染物因子呈增加趋势,因此选取总磷

作为污染因子研究^[13]。大伙房水库年均总磷质量浓度为 0.02 mg/L,湖库Ⅱ类水 TP 质量水平方向上,取表层的 TP 质量浓度分布状态进行特征分析。图 6 为 TP 入库后不同时间表层水体水平分布浓度场。TP 以面源污染形式入库形成污染团,在东北向水流输移作用下,污染团主要沿西南岸线向坝址方向扩散。如图 6 所示,污染物入库 16 h、20 h、24 h 后,社河入库流量较大,此时吞吐流对水库流场的影响较大,污染团随着水流方向向下游扩散。污染物入库 42 h、60 h、78 h 后,社河入库流量逐步减小,风生流对水库流场的影响越来越大,污染团向下游扩散的同时受到东北风向的影响,有一部分污染团流向西南岸或入库口,因此污染团偏西南岸线向下游

扩散。随着流程的增加,由于扩散作用,污染物质量浓度逐渐减小。

随着时间推移,污染团质量浓度 ($\rho(\text{TP}) > 0.025 \text{ mg/L}$) 超标面积不断增大,即对于受纳水体,影响范围不断增加。面源入库 16 h、20 h、24 h、42 h、60 h、78 h 后,TP 质量浓度最大超标面积分别为 1.92 km²、3.19 km²、3.48 km²、4.32 km²、4.47 km²、5.92 km²,TP 污染团扩散最远处到社河入库口的距离依次是 1.14 km、2.09 km、2.21 km、3.52 km、4.59 km 和 5.19 km。

3.3 库区 TP 质量浓度纵向分布特征分析
垂向方向上,取如图 7 所示垂线断面浓度分布进行分析。由于污染物在社河中垂向扩散达到稳定,因此在进入大伙房水库后,TP 质量浓度在垂向

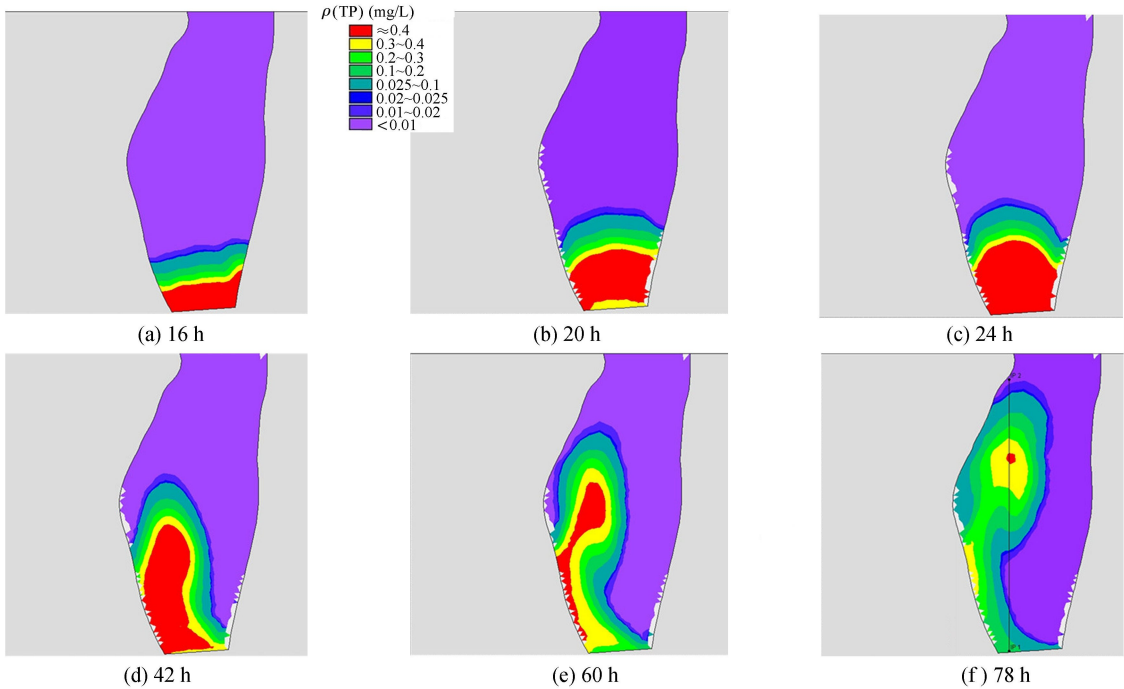


图 6 表层水体 TP 质量浓度场水平分布

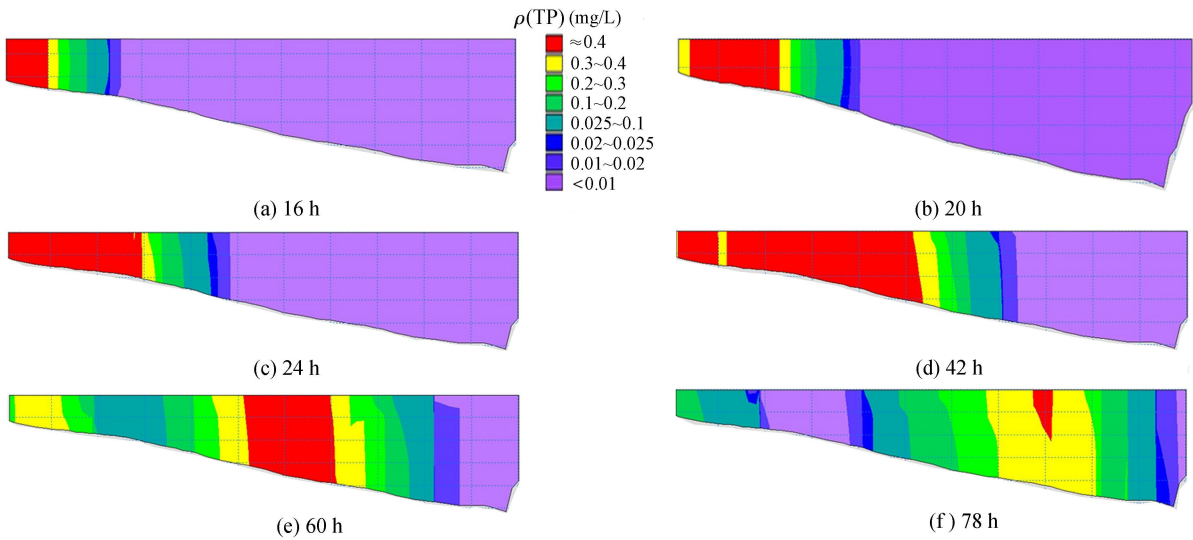


图 7 TP 质量浓度场纵向分布

上的扩散也达到稳定。如图 7 所示,面源入库 16 h、20 h、24 h、42 h、60 h、78 h 时,TP 质量浓度污染团中心处到社河入库口的距离依次是 0.25 km、0.73 km、1.09 km、1.40 km、2.96 km 和 3.93 km,沿着水流方向,污染团中心不断向下游迁移,TP 污染物质量浓度沿流程逐渐减小。

4 结 语

以大伙房水库为典型研究区域,建立三维水动力、水质模型。该模型有效地模拟了在一次典型暴雨发生的情况下,农业面源污染因子总磷进入水库后的迁移特征。模拟结果表明,受入库流量和丰水期主导风向东北风的影响,总体上污染物随着水流主要沿西南岸线向坝址方向扩散,对于库区受纳水体,总磷的超标面积逐渐增大,但随着流程增加,污染物浓度逐渐减小。面源入库过程对库区水质的影响是一个动态过程,对这一过程的模拟分析可以为水库面源污染的预报及治理提供相关的技术依据,在一定程度上提高了面源污染事故处理的水平,能够有效地控制和减轻事故危害。

参考文献:

[1] 李国斌,王焰新,程胜高. 基于暴雨径流过程监测的非点源污染负荷定量研究[J]. 环境保护,2002(5):46-48. (LI Guobin, WANG Yanxin, CHENG Shenggao. A quantitative study on non-point source pollutant loading based on storm runoff monitoring results [J]. Environmental Protection, 2002 (5): 46-48. (in Chinese))

[2] 范丽丽,沈珍瑶,刘瑞民. 不同降雨-径流过程中农业非点源污染研究[J]. 环境科学与技术,2008,31(10):5-8. (FAN Lili, SHEN Zhenyao, LIU Ruimin. Agricultural non-point source pollution in different rainfall runoff[J]. Environmental Science & Technology,2008,31(10):5-8. (in Chinese))

[3] CHANG C H, WEN C G, LEE C S. Use of intercepted runoff depth for stormwater runoff management in industrial parks in Taiwan [J]. Water Resources Management,2008,22:1609-1623.

[4] PARK S Y, LEE K W, PARK I H, et al. Effect of the aggregation level of surface runoff fields and sewer network for a SWMM simulation [J]. Desalination,2008,226(1/3):328-337.

[5] 蒋金,安娜,张义,等. 水文过程中降雨径流对非点源污染的影响[J]. 安徽农业科学,2012,40(6):3529-3531. (JIANG Jin, AN Na, ZHANG Yi, et al. Influence of rainfall run-off in hydrologic process on non-point pollution [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40

(6):3529-3531. (in Chinese))

[6] 程红光,郝芳华,任希岩,等. 不同降雨条件下非点源污染氮负荷入河系数研究[J]. 环境科学学报,2006,26(3):392-397. (CHENG Hongguang, HAO Fanghua, REN Xiyan, et al. The study of the rate loss of nitrogenous non-point source pollution loads in different precipitation levels [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26 (3): 392-397. (in Chinese))

[7] 吕兴娜. 降雨-径流与非点源污染物浓度及流失量关系分析[J]. 环境保护科学,2010,36(2):46-49. (LV Xingna. Analysis on relations of rainfall-runoff and non-point pollution concentration and loss amount [J]. Environmental Protection Science, 2010, 36 (2): 46-49. (in Chinese))

[8] 白玉良,贺国静,吴玉禾. 大伙房水库环境水文气象效应[J]. 水利管理技术,1994(3):35-37. (BAI Yuliang, HE Guojing, WU Yuhe. The environment hydrometeorological effects of Dahuofang reservoir [J]. Water Resources Development & Management, 1994 (3): 35-37. (in Chinese))

[9] 张静,何俊仕. 大伙房水库汛期气象水文特征分析[J]. 人民黄河,2012,34(11):45-47. (ZHANG Jing, HE Junshi. Study on hydro-meteorology characteristics in flood season of Dahuofang reservoir [J]. Yellow River, 2012, 34 (11): 45-47. (in Chinese))

[10] 卢雯. 大伙房水库上游地区农业面源污染现状及防治措施[J]. 环境保护与循环经济,2010(6):72-73. (LU Wen. The status of agricultural nonpoint source pollution and the control measures of the upstream area of Dahuofang reservoir [J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2010 (6): 72-73. (in Chinese))

[11] 韩龙喜,陆东燕,李洪晶,等. 高盐度湖泊艾比湖风生流三维数值模拟[J]. 水科学进展,2011,22(1):97-103. (HAN Longxi, LU Dongyan, LI Hongjing, et al. 3D numerical modeling of wind-driven flow in the high salinity Aibi Lake [J]. Advances in Water Science, 2011, 22 (1): 97-103. (in Chinese))

[12] 黄才安. 明渠流速分布指数律与对数律的统一及转换[J]. 人民长江,1994,25(1):42-44. (HUANG Caian. The unification and conversion of open channel flow distribution exponential law and logarithmic law [J]. Yangtze River, 1994, 25 (1): 42-44. (in Chinese))

[13] 王利佳,凤颀,白艳丽. 大伙房水库水质污染和富营养化问题[J]. 辽宁城乡环境科技,2001(6):45-47. (WANG Lijia, FENG Qi, BAI Yanli. The water quality pollution and eutrophication problem of Dahuofang reservoir [J]. Liaoning Urban and Rural Environmental Science & Technology, 2001 (6): 45-47. (in Chinese))

(收稿日期:2013-04-28 编辑:高渭文)