

地下水内排对南水北调中线干渠水质的影响

王兴伟, 陈家军

(北京师范大学 环境学院 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要: 基于 MIKE 11 模型的水动力模块、对流扩散模块建立南水北调中线输水干渠水质模型, 充分考虑了干渠两侧地下水内排段的影响, 以京石段为干渠水质模拟示范段, 针对内排段水质对干渠水质的风险特征, 选取氨氮作为典型污染组分, 结合实际工程设计, 计算在最不利工况下的内排量, 并依此设定情景模拟内排段水质对干渠水质的影响。模拟结果表明, 在假定的内排段污染风险达到极大的情况下(水质处于劣Ⅴ类), 排入干渠的地下水对干渠水质基本不构成影响。

关键词: 南水北调中线; 地下水; 京石段; 内排段; 氨氮; 水质模拟; 风险预测; MIKE 11

中图分类号: TV 68 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)05-0858-04

Impact of groundwater internal discharge on the water quality of open channel in the Middle Route of South to North Water Transfer Project

WANG Xing wei, CHEN Jia jun

(Key Laboratory of Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Guarantee of water quality in the Middle Route of South to North Water Transfer Project is key for successful operation of the project. In this study, a coupling model integrating water quality and quantity between channel water and groundwater along the channel was developed based on the hydrodynamic and advection diffusion modules of MIKE11. The model considered the impacts of groundwater internal discharge section along the channel and Beijing Shijiazhuang section was selected as the simulation demonstration section. In terms of the characteristics of water quality in the internal discharge section, $\text{NH}_3\text{-N}$ was selected as the typical pollutant composition. According to the actual engineering design, water quantity of the internal discharge section was calculated under the most disadvantage working conditions, and the impacts of water quality in the internal discharge section on the channel were simulated using the scenario analysis. The results indicated that there is no impact on the channel water quality under the most serious scenario in which groundwater in the internal discharge section is contaminated very seriously.

Key words: the Middle Route of South to North Water Transfer; groundwater; Beijing Shijiazhuang section; internal discharge section; $\text{NH}_3\text{-N}$; water quality simulation; risk forecast; MIKE 11

南水北调中线作为京津冀豫等受水地区的重要饮用水源,其水质状况关系到城市居民的用水安全,成为社会关注的焦点问题^[1-5]。

中线工程类型以明渠为主,并建有隧洞、管道、暗涵和渡槽等工程设施。总干渠全部为新开挖渠道,断面衬砌,与交叉河道全面立交,与沿线地表水体没有直接的水力联系,并在干渠两侧划定 15 m 的隔离带,这些措施在一定程度上解决了地表水污染进入干渠的问题,为中线干渠供水安全提供了重要保障^[6-8]。但是,中线干渠仍然存在着影响干渠供水

安全的潜在问题,其中包含部分渠段是地下水内排段(包括地下水水位高于渠底段及地下水水位高于设计水位段)^[9]。地下水污染物的渗漏给干渠水质和供水安全带来威胁^[10-11]。因此,进行地下水内排段水质对干渠水质的风险模拟对确保南水北调中线供水水质安全具有重要意义。本文选择南水北调中线工程京石段为示范模拟段,从水量和水质两个方面对示范段内内排段水质对干渠水质的影响进行分析,并模拟不同情景下内排段水质对干渠水质的风险,为南水北调中线工程的建设和管理提供技术、信息和政策支持。

收稿日期: 2014-07-24 修回日期: 2015-08-08 网络出版时间: 2015-09-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150924.2038.019.html>

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2001BAC12A B02)

作者简介: 王兴伟(1986-),男,河南洛阳人,博士,主要从事环境模拟与污染修复方向的研究。E-mail: wangxingwei0812@gmail.com

1 模拟段的选定及背景介绍

选定的示范段从河北省保定市曲阳县孟良河至河北省保定市涿州市北拒马渠段,全长 157 km,共分水头 10 17 m,该渠段含有中线干渠所有的水工构筑物类型,以及内排段,具有很强的代表性。模拟段沿途分水口、闸门及水工构筑物见图 1。

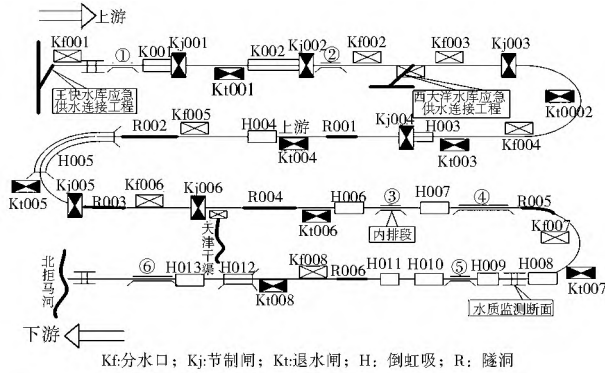


图 1 京石段干渠模拟段沿线各构筑物示意图

Fig. 1 Schematic diagram of various structures along the typical channel of Beijing Shijiazhuang section

模拟段中共有 27.05 km 的渠段属于内排段,即地下水位高于渠底段,占模拟段总长的 17.2%,共分为 6 段,见表 1。

表 1 模拟段内排段分布

Tab. 1 Distribution of internal discharge sections in the typical open channel

内排段	起始位置/m 起 止	长度/m	预测地下水水位高出渠底(最大值)/m	最大*内排量/(m ³ ·s ⁻¹)
1	0 8 660	8 660	2.00	0.635
2	23 200 33 600	10400	11.35	1.164
3	10 5050 105 970	920	5.50	0.130
4	10 8000 112 775	4775	7.00	0.350
5	12 7200 128 091	891	3.00	-- **
6	15 1440 152 840	1400	0.80	-- ***

注: * 表示最大内排量的计算见 2.2 节; ** 表示该内排段地下水外排入东留召沟; *** 表示该内排段归入河滩地排水。

2 地下水内排段

2.1 地下水排水方式及措施

地下水水位高于渠底段及地下水水位高于设计水位段,出于工程稳定安全的考虑,须排泄地下水,以降低地下水水位减少地下水对工程构筑物的扬压力。地下水排水有两种方式:一是外排,适应于总干渠附近有天然沟壑等可以自流外排条件的渠段或地下水水质差必须外排的渠段;二是内排,对地下水水质良好且不具备自流条件的渠段,可将地下水内排入总干渠。

在选定模拟段中的 6 个内排段中,内排段如图地下水外排入东留召沟,内排段如图归入河滩地排水,由于这两个排泄地下水段采用外排水方式,故与干渠无水力联系。内排段如图部分渠段(地下水水位高出干渠设计水位段)右侧地下水采用泵站内排的方式,其他渠段则通过暗管集水用逆止阀排入总干渠。

地下水排水措施可分为自流内排和泵站强排^[12]。(1)

自流内排。在总干渠两侧坡脚衬砌混凝土板下埋设透水混凝土集水暗管,每隔一定间距设一逆止式集水箱。当地下水位高于渠内水位时,地下水通过集水暗管汇入集水箱,逆止式阀门自动开启,由出水管排入渠内,使地下水位降低;当地下水位低于渠内水位时,逆止式阀门自动关闭,防止渠水外渗。(2) 泵站强排。在地下水水位高于渠内设计水位,为及时降低地下水水位保证衬砌板的安全稳定,总干渠右侧采用暗管、集水井、泵站排水体系,用强排的方式将地下水抽排入总干渠,渠坡左侧采用暗管集水、逆止阀内排措施。

2.2 内排段集水量计算

地下水向干渠的排入量取决于地下水水位与总干渠渠道水位之间的水位差的变化情况。本研究选择对工程最不利的水位组合,即地下水为预测水位,渠内无水(事故放空或完建期),此时内外水位差最大。在最不利工况下对内排段的地下水暗管集流量进行分析计算,并依此进行集水箱的布置^[13]。排水暗管集水流量计算公式

$$Q_1 = CqA \tag{1}$$

式中: Q_1 为排水暗管设计流量; C 为排水流量折减系数; A 为排水暗管控制面积; q 为地下水排水强度。

$$q = \frac{\mu\Omega(H_0 - H_t)}{t} \tag{2}$$

式(2)为 t 时段内地下水水位自 H_0 降落到 H_t , 地下水水位变动范围内的土层平均给水度为 μ 及地下水面积校正系数为 Ω (取 0.7 ~ 0.9) 时的平均排水强度。

内排集水箱出水管道的流量(按自由出流计算)如下:

$$Q_2 = \mu_c \sqrt{2gH} \tag{3}$$

式中: μ_c 为管道系统的流量系数; A 为出水管断面面积; H 为暗管水位与出水管出口中心之差。

通过计算:逆止式集水箱自由出流流量 $Q = 116 \text{ m}^3/\text{d}$ (约为 $0.00134 \text{ m}^3/\text{s}$)。根据各内排段布置集水箱的个数,计算可得各内排段最大内排量(见表 1)。对于内排段 2,其中 6 km 长渠段地下水水位高于渠道设计水位段,此段左侧自流内排(内排量 $0.731 \text{ m}^3/\text{s}$),右侧采用泵站强排(内排量 $0.433 \text{ m}^3/\text{s}$),总内排量为 $1.164 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[13]。

3 模型建立

3.1 水动力模型

MIKE 11 HD 是一维水动力模型,主要用于洪水预报及调度措施、河渠/灌溉系统的设计调度及河口风暴潮的研究。应用 MIKE 11 水动力模型(HD)模拟京石段干渠的水位和流量,水动力的模拟结果可作为后续对流扩散模拟的基础。

(1) 水动力模型的数据文件。MIKE 11 水动力模型主要包括的数据文件有:河网文件(.nwk11)、断面文件(.xns11)、边界条件(.bnd11)、模型参数文件(.hd11)。

(2) 水动力模型的率定。水动力模型的率定主要是调整河床糙率。率定年为 2009 年。

(3) 水动力模型的验证。采用 2009 年率定的模型结果,用 2010 年的数据做进一步的模型验证,模拟的流量与水位均与实测值比较吻合。因此 HD 模型总体上符合要求,可以作为后续水质模型的基础。

3.2 对流扩散模型建立

应用 MIKE 11 的对流扩散模型 (AD), 来模拟内排段水质对干渠水质的影响, MIKE 11 AD 采用的一维河流水质模型基本方程如下:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) - KC \quad (4)$$

式中: C 为模拟物质的浓度; u 为河流平均流速; E_x 为对流扩散系数; K 为模拟物质的一级衰减系数; x 为空间坐标; t 为时间坐标。

4 内排段的处理及模拟情景设定

本研究将计算得到的内排段集水量按分布式线源的方式作为内边界加入到 MIKE 11 模型中, 并参与模型的水动力计算, 在此基础上, 输入内排段三种情景下的水质数据, 并进行风险模拟, 分析内排段地下水水质对干渠水质的影响。由干渠水质模型率定最终的氨氮降解系数为 0.0067 d^{-1} 。对流扩散系数 E 借助于经验公式或者理论分析方法进行确定。朱德军^[4]采用回归方法得到了南水北调中线明渠梯形断面的纵向离散系数计算公式如下:

$$E = \frac{0.0373M^{-2.559}\beta_1^{3.524}B^2\bar{v}}{ahv_*} \quad (5)$$

式中: β_1 是反映侧壁对流速分布影响的主要参数, β_1 越大侧壁对断面流速分布的影响越大, 反之亦然; B 为干渠底宽; \bar{v} 为渠道平均流速; a 为粗糙系数, 取 0.015 ; h 为渠道中水深; v_* 为渠道剪切流速。

选取内排段内干渠附近民用潜水井, 进行采样测试, 选取氨氮、硝氮、硫酸盐、碘化物、锰 5 项指标进行测定。从水质监测结果来看, 所测的 5 个指标中, 氨氮、锰、碘化物、硫酸盐指标都达到 Ⅲ 类及以上水质, 硝酸盐指标除个别取样点 (卓家庄、西市村为 Ⅲ 类水质, 西留召为 Ⅳ 类) 外, 其余都达到 Ⅲ 类及以上水质, 总体上内排段水质状况良好。考虑到模拟段大多数处于中部欠发达地区, 农业非点源污染严重, 地下水中氨氮污染风险较大^[15], 本研究选取氨氮作为典型污染因子进行风险模拟预测。由南水北调中线工程总干渠供水水质要求可知, 干渠内水质应执行《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) Ⅲ 类标准, 即氨氮的浓度应不大于 0.5 mg/L 。主要考虑以下三种情景。

情景一: 不考虑内排段水质的影响, 内排段集水量仅参与干渠水动力计算;

情景二: 内排段水质良好, 达到《地下水环境质量标准》(GB/T 14848-93) Ⅲ 类标准, 符合设计工况, 准许排入干渠;

情景三: 内排段水质较差, 超出《地下水环境质量标准》(GB/T 14848-93) Ⅲ 类标准 5 倍, 按劣 Ⅲ 类水质考虑。

5 结果分析

5.1 各分水口流量变化分析

模拟示范段内各分水口的流量变化情况见图 2。模拟示范段内共有分水口 9 个, 各分水口分水量不一。模拟起始段设计流量为 $155 \text{ m}^3/\text{s}$, 经中管头分水口分水后流量恒定在 $135 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右。其中分水量最大的为天津分水口, 所分流量为 $60 \text{ m}^3/\text{s}$, 最后达到北京段的流量维持在 $60 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右。

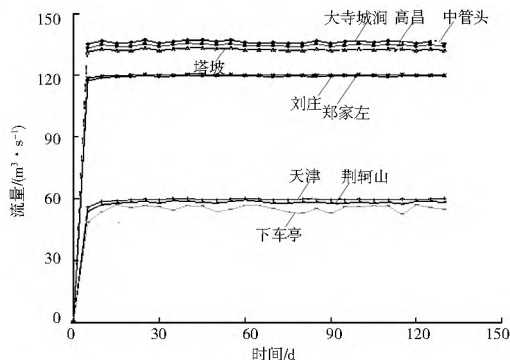


图 2 各分水口流量变化

Fig. 2 Variation of flow in various turnouts

5.2 基于不同模拟情景的内排段对干渠水质风险分析

5.2.1 内排段 1 对干渠水质的风险模拟

内排段 1 在情景三下即劣 Ⅲ 类水质情况下对干渠水质有一定的影响, 但影响较小, 见图 3。总体来看, 三种情景下 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度变化情况基本一致, 相对于情景一而言, 情景二和情景三条件下 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度虽有增大, 但仍在 Ⅲ 类标准值以下。具体来讲, 情景二与情景一相比, 最大污染物浓度增大了 0.25%, 情景三与情景二相比, 最大污染物浓度增大了 0.25%, 与情景一相比, 增大了 0.5%。但总体上干渠 $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标仍能达到《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) Ⅲ 类标准 (0.5 mg/L)。

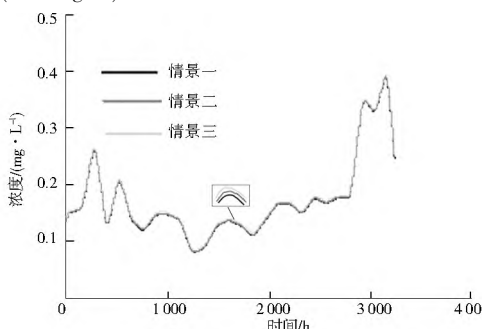


图 3 内排段 1 三种情景下干渠 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度变化

Fig. 3 Variation of $\text{NH}_3\text{-N}$ concentrations in the first internal discharge section under three scenarios

5.2.2 内排段 2 对干渠水质的风险模拟

图 4 显示了内排段 2 在三种模拟情景下 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度的变化情况。三种情景下 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的最大浓度分别为 0.358 mg/L 、 0.359 mg/L 、 0.363 mg/L 。相比情景一, 情景二、三对干渠水质的影响分别为 0.28%、1.40%, 但总体上三种情景下干渠 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度值仍在《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) Ⅲ 类标准值以下。

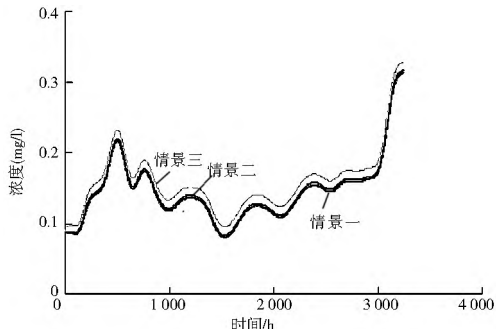


图 4 内排段 2 三种情景下干渠 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度变化

Fig. 4 Variation of $\text{NH}_3\text{-N}$ concentrations in the second internal discharge section under three scenarios

5.2.3 内排段»对干渠水质的风险模拟

图5显示了内排段»在三种模拟情景下 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度的变化情况。三种情景下 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度的最大值分别为0.1 mg/L、0.103 mg/L、0.113 mg/L。相比于情景一,情景二和三条件下 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度虽有增大,但仍远小于《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)Ⅲ类标准值0.5 mg/L。相比情景一,情景二、三对干渠水质的影响分别为3.0%、13.0%。

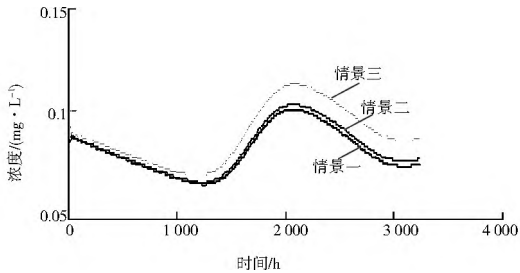


图5 内排段»三种情景下干渠 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度变化

Fig. 5 Variation of $\text{NH}_3\text{-N}$ concentrations in the third internal discharge section under three scenarios

5.2.4 内排段¼对干渠水质的风险模拟

图6显示了内排段¼在三种模拟情景下 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度的变化情况。与内排段¹、°、»相比,内排段¼在三种情景下的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度最小,其最大浓度分别为0.094 mg/L、0.097 mg/L、0.111 mg/L。相比于情景一和二,情景三条件下 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度变化较大。但总体上,三种情景下干渠内 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度远小于《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)Ⅲ类标准值。相对于情景一,情景二、三对干渠水质的影响分别为3.19%、18.09%。

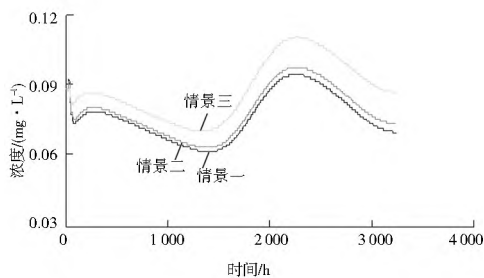


图6 内排段¼三种情景下干渠 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度变化

Fig. 6 Variation of $\text{NH}_3\text{-N}$ concentrations in the fourth internal discharge section under three scenarios

从上述4个内排段水质模拟结果可以看出,内排段¹和°在三种情景下的污染物浓度相应的要大于内排段»和¼,这是因为内排段¹和°较长,内排量较大(见表1),在污染物输入浓度条件一致的情况下,污染物总量大;随着离模拟初始端距离的增大,情景二和情景三条件下内排段对干渠水质的影响也在逐渐增大,这是由于污染物累积效应;各内排段在情景三的条件下污染物浓度最大,但都不超过地表水Ⅲ类水质标准值,这是因为进入干渠的内排段地下水量相对于干渠流量很小,污染物随内排段地下水进入干渠后,由于稀释扩散作用,浓度在短时间内即可降低到地表水Ⅲ类水质标准值以下。

6 结论

本文建立了南水北调中线输水干渠水质模型,充分考虑了地下水内排段对干渠水质的影响,针对内排段水质对干渠

水质的风险特征,选取氨氮作为典型污染组分,应用MIKE 11的水动力模块和对流扩散模块,结合实际工程设计,计算在最不利工况下的内排量,并依此设定情景模拟内排段水质对干渠水质的影响。模拟结果表明,在内排段污染风险达到极大的情况下(水质处于劣Ⅲ类),排入干渠的内排段地下水水质对干渠水质的影响控制在20%以下。进入干渠的内排段地下水水量相对于干渠流量很小,污染物随内排段地下水进入干渠后,由于稀释扩散作用,其浓度在短时间内即可降低到地表水Ⅲ类水质标准值以下。

参考文献(References):

- [1] 蒋云钟,赵红莉,董延军,等.南水北调中线水资源调度关键技术研究[J].南水北调与水利科技,2007,5(4):1-5.(JIANG Yunzhong,ZHAO Hongli,DONG Yanyun,et al. Key technology research of water resource operation for Middle Route Project of South to North Water Diversion [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2007, 5(4): 1-5. (in Chinese))
- [2] 左海风,黄跃飞,魏加华,等.南水北调中线沿线劣质地下水对输水水质的潜在风险分析[J].南水北调与水利科技,2008,6(5):1-3.(ZUO Haifeng,HUANG Yuefei,WEI Jiahua,et al. Potential risk analysis for impact of contaminated groundwater on water quality in Middle Route of the South to North Water Diversion Project [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(5): 1-3. (in Chinese))
- [3] 高永年,高俊峰.南水北调中线工程对汉江中下游流域生态环境影响的综合评价[J].地理科学进展,2010,29(1):59-64.(GAO Yongnian,GAO Junfeng. Comprehensive assessment of eco-environment impact of the South to North Water Transfer Middle Route Project on the Middle-Lower Hanjiang River Basin [J]. Progress in Geography, 2010, 29(1): 59-64. (in Chinese))
- [4] 王立辉,黄进良,杜耘.南水北调中线丹江口库区生态环境质量评价[J].长江流域资源与环境,2011,20(2):161-166.(WANG Lihui,HUANG Jinliang,DU Yun. Eco-environmental evaluation of Middle Route of the South to North Water Transfer Project [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(2): 161-166. (in Chinese))
- [5] 王文杰.南水北调中线工程对于京津冀一体化的地位和作用[J].中国水利,2014(12):31-33.(WANG Wenjie. Role and function of SNWDP on Beijing Tianjin Hebei integration [J]. China Water Resources, 2014(12): 31-33. (in Chinese))
- [6] 肖智和,李涛.南水北调中线天津干线工程对沿线地下水环境影响[J].南水北调与水利科技,2012,10(1):6-10.(XIAO Zhihe,LI Tao. Effects of Tianjin Trunk Route of the Middle Route of South to North Water Diversion Project on regional groundwater environment [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(1): 6-10. (in Chinese))
- [7] 赵蓉,李振海,祝秋梅.南水北调中线工程北京段总干渠地下水影响分析及保护对策[J].南水北调与水利科技,2010,8(4):17-22.(ZHAO Rong,LI Zhenhai,ZHU Qiumei. Environmental impact on groundwater and countermeasures of the Beijing Section of the Middle Route Project of the South to North Water Transfer [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(4): 17-22. (in Chinese))

(下转第887页)

- bles in Lake Chagan [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(6): 104-108. (in Chinese)
- [8] Chen S H, FANG L G, ZHANG L X, et al. Remote sensing of turbidity in seawater intrusion reaches of Pearl River Estuary: A case study in Modaomen Water Way, China [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2009, 82: 119-127.
- [9] 焦洪波, 查勇, 李云梅, 等. 基于高光谱遥感反射比的太湖水体叶绿素 a 含量估算模型 [J]. 遥感学报, 2006, 10(2): 242-248. (JIAO Hong bo, ZHA Yong, LI Yun mei, et al. Modeling chlorophyll a concentration in Taihu Lake from hyperspectral reflectance data [J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(2): 242-248. (in Chinese))
- [10] 巩彩兰, 尹球, 匡定波. 黄浦江水质指标与反射光谱特征的关系分析 [J]. 遥感学报, 2006, 10(6): 910-916. (Gong Cailan, YIN Qiu, KUANG Ding bo. Correlations between water quality indexes and reflectance spectra of Huangpujiang River [J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(6): 910-916. (in Chinese))
- [11] 杨婧茹, 臧淑英, 惠洪宽. 松花江哈尔滨段总悬浮物浓度高光谱估测模型研究 [J]. 安全与环境学, 2014, 14(2): 239-243. (YANG Jing ru, ZANG Shu ying, HUI Hong kuan. An hyperspectral estimation model for testing the total suspended solid concentration in Harbin section of Songhua River [J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(2): 239-243. (in Chinese))
- [12] 高玉蓉, 刘明亮, 吴志旭, 等. 应用实测光谱估算千岛湖夏季叶绿素 a 浓度 [J]. 湖泊科学, 2012, 24(4): 553-561. (GAO Yurong, LIU Ming liang, WU Zhi xu, et al. Chlorophyll a concentration estimation with field spectra of summer water body in Lake Qiandao [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(4): 553-561. (in Chinese))
- [13] 蒲瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. (PU Rui liang, GONG Peng. Hyperspectral remote sensing and its application [M]. Beijing: High Education Press, 2000. (in Chinese))
- [14] 王婷, 刘良云, 李存军, 等. 基于实测光谱估测密云水库水体叶绿素 a 浓度 [J]. 地理空间信息, 2007, 5(4): 64-66. (WANG Ting, LIU Liang yun, LI Cun jun, et al. Chlorophyll a concentration estimation with field spectra of water in Miyun Reservoir [J]. Geospatial Information, 2007, 5(4): 64-66. (in Chinese))
- [15] Pulliainen J, Kallio K, Eloheimo K, et al. A Semi-operative Approach to lake water quality retrieval from remote sensing data [J]. The Science of the Total Environment, 2001, 268: 79-93.
- [16] 刘英, 王珂, 周斌. 千岛湖水体叶绿素浓度高光谱遥感监测研究初报 [J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2003, 29(6): 621-626. (LIU Ying, WANG Ke, ZHOU Bin, et al. Preliminary study on hyperspectral remote sensing of Qiandao Lake chlorophyll a concentration [J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Sciences, 2003, 29(6): 621-626. (in Chinese))

(上接第 861 页)

- [8] 高安虎, 王明玉, 王慧芳. 南水北调中线总干渠焦作段两侧地下水六价铬污染风险研究 [J]. 中国科学院大学学报, 2013, 30(6): 763-769. (GAO An hu, WANG Ming yu, WANG Hui fang. Risk investigation of groundwater contamination of hexavalent chromium in Jiaozuo part of the Middle Route of South to North Water Transfer Project [J]. Journal of University of Chinese Academy of Science, 2013, 30(6): 763-769. (in Chinese))
- [9] 任仲宇, 陈鸿汉, 刘国华. 南水北调中线干渠水污染途径分析研究 [J]. 环境保护, 2008, 392(6): 65-67. (REN Zhong yu, CHEN Hong han, LIU Guo hua. Research on the pathway of water pollution of the Middle Route of South to North Water Transfer Project [J]. Environmental Protection, 2008, 392(6): 65-67. (in Chinese))
- [10] 张慧申. 南水北调中线焦作典型区地下水系统污染物迁移规律研究 [D]. 济南: 济南大学, 2012. (ZHANG Hui shen. South to North Water Transfer Jiaozuo typical contaminants migration characteristics of groundwater systems [D]. Jinan: Jinan University, 2012. (in Chinese))
- [11] 裴亮, 刘慧明, 莫家玉, 等. 南水北调中线工程农业非点源污染源及控制措施 [J]. 生态环境, 2011(6): 164-167. (PEI Liang, LIU Hui ming, MO Jia yu, et al. Countermeasures and origin against agricultural nonpoint pollution prevention in the Middle Route Project of the South to North Water Transfer [J]. Ecological Environment, 2011(6): 164-167. (in Chinese))
- [12] 任军. 南水北调中线总干渠两侧地下水风险源特征分析及保护 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2013. (REN Jun. Risk Sources Analysis and quality protection of groundwater on both sides in the Middle Route of the main canal in South to North Water Transfer Project [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013. (in Chinese))
- [13] 水利部河北水利水电勘测设计研究院. 南水北调中线京石段应急供水工程-初步设计报告 [R]. 2004. (Hebei Research Institute of Investigation & Design of Water Conservancy & Hydropower. Beijing Shijiazhuang Section of the Middle Route of South to North Emergency water supply project-The preliminary design report [R]. 2004. (in Chinese))
- [14] 朱德军. 南水北调中线明渠段事故污染特性模拟方法研究 [D]. 北京: 清华大学, 2007. (ZHU De Jun. Study on numerical methods for water pollution accidents in the Middle Route open channel of the South to North Water Transfer [D]. Beijing: Tsinghua University, 2007. (in Chinese))
- [15] 王世猛, 万宝春, 王路光, 等. 南水北调中线河北段水质保护风险分析研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 123-125. (WANG Shi meng, WAN Bao chun, Wang Lu guang, et al. Analysis on environmental risk of Hebei Section's water quality protection in the Middle Route of the South to North Transfer Project [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(6): 123-125. (in Chinese))