

基于线性规划模型的河流水环境容量分配研究

荆海晓¹, 李小宝², 房怀阳², 刘长根³

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 环境保护部华南环境科学研究所, 广东 广州 510535; 3. 天津大学 机械工程学院, 天津 300350)

摘要: 以北运河为例, 基于水动力及水质模型和年平均流量及排污数据, 选取污染物中所占比重较大的化学需氧量(COD)和氨氮(NH₃-N)两个污染物因子, 计算得到了北运河各支流及点源与控制断面之间的响应矩阵, 在此基础上, 采用线性规划模型对各点源或支流的水环境容量进行了优化分配。结果表明: 北运河干流各点源及支流分配容量均为负值, 需要采取措施进行削减, 其中 COD 的平均削减率在 30% ~ 50% 之间, 而 NH₃-N 的平均削减率在 40% ~ 70% 之间。在河流水环境容量分配问题的研究中, 线性规划模型具有较好的适用性, 是一种有效的优化方法。

关键词: 线性规划模型; 响应矩阵; 水环境容量; 北运河

中图分类号: X522; X26

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)03-0034-05

Investigation of the river water environment capacity allocation by using linear programming model

JING Haixiao¹, LI Xiaobao², FANG Huaiyang², LIU Changgen³

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulic in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048, China; 2. South China Institute of Environmental Science, MEP, Guangzhou 510535, China;

3. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: To investigate the allocation of water environment capacity in Northern Canal, based on hydrodynamic and water quality models and the collected annual averaged discharge and related pollutant data, two main pollutant factors, that is, COD and NH₃-N, are chosen to calculate the response matrix between the tributaries of the North Canal and point sources and control sections. Then, linear programming(LP) model is used to optimize the allocation of water environment capacity at each point sources or tributaries. The results indicate that the allocated amounts of capacity at all point sources or tributaries are negative, which need to be cut down by adopting appropriate measures. The average reduction rate of COD is about 30% ~ 50%, while this value is in the range of 40% ~ 70% for NH₃-N. Besides, linear programming method is proven to be suitable for the allocation of water environment capacity of rivers and can be one of useful tools for this problem.

Key words: linear programming model; response matrix; water environmental capacity; Beiyunhe River

1 研究背景

水环境容量是指水体在规定的目标下所能容纳的最大污染量^[1], 其反映了污染物在环境中的迁移及转化规律, 是衡量水体的水环境承载能力的一个重要指标。一般情况下, 某一水体的水环境容量的大小主要取决于水体特性、水质目标和污染

物的特性等因素^[2]。通过研究水体的水环境容量来实现对水体的水环境质量的控制已经成为现代水环境保护和规划的重要依据。目前, 对于水环境容量计算方法以及在不同水域的应用, 国内外学者已进行了很多研究, 并取得了一系列的成果^[1,3-6]。李珊等^[1]在一维稳态水质模型的基础上推导出了太子河水环境容量计算公式, 对不同频率年, 该河段 COD、氨氮的环境容量进行了计算评价, 并提出相应

收稿日期: 2017-11-06; 修回日期: 2018-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579206); 国家科技重大专项(2009ZX07209-001)

作者简介: 荆海晓(1986-), 男, 山西运城人, 博士, 讲师, 主要研究方向为计算水力学。

通讯作者: 房怀阳(1974-), 男, 山东聊城人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为环境水力学。

的排污措施。王子轩等^[4]通过建立淀山湖流域一维平原河网水量水质模型,对该流域的COD、氨氮环境容量进行了计算评估,设计了相应的断面水质达标方案。熊鸿斌等^[5]基于MIKE11模型研究了引江济淮工程涡河段水环境容量。韩梓流等^[6]采用一维水量水质数学模型研究了京杭运河五牧河断面达标时各概化排污口的允许排污量,得到了该研究区域的水环境容量,为改善京杭运河水环境质量提供了科学依据。阎非等^[7]研究了综合考虑多个点源排污口、支流、取水口以及面源污染,并结合排污口权重,提出了一种实用化的水环境容量计算方法和排污控制方案。李兵等^[8]通过对苏南运河苏锡常段沿岸的工业污染源、农业污染源和城镇生活污水排污分布情况进行调查,对污染源进行了评价,并根据水质目标,计算出了各段水体的水环境容量、排污控制量和削减率。董一博等^[9]采用一维水动力水质模型并结合线性规划模型研究了太子河辽河段水环境容量。

北运河是海河北系四大河流之一,发源于北京市昌平区燕山南麓,先后流经北京市海淀区、昌平、顺义、通州各区、河北省廊坊地区、天津市武清区、北辰区和红桥区。其流域面积为6 166 km²,其中山区面积为952 km²,平原面积为5 214 km²。多年平均径流量为4.81 × 10⁸ m³,其中山区年均净流量为1.29 × 10⁸ m³、平原为3.52 × 10⁸ m³。通州区北关闸以上称温榆河,北关闸以下称北运河,沿途的支流包括通惠河、凉水河、凤港减河等平原河道。温榆河主要支流包括蔺沟河、清河、坝河、小中河等。北运河主要支流包括通惠河、凉水河、凤港减河等,其中通惠河主要负担北京市城区、西郊地区及东郊部分地区的排水任务。北运河(含温榆河)作为北京市最重要的排水河道,承担着北京城区90%的排洪任务,此外,还负责天津部分地区的排洪排污任务,其水质的好坏直接关系到这些地区社会经济的发展,对沿岸地区实施可持续发展的重要性不言而喻。由于城市工业的发展及人口的增加,与日俱增的污水排入温榆河、北运河,其干支流水体已受到严重污染^[10-13],这已经成为制约京津地区社会发展的重要因素之一。因此,对于北运河水环境容量的研究可为该河流域水质污染治理提供科学的依据,对于京津地区的经济、社会和生态环境可持续发展也有着重要的意义。

本文以北运河为例,基于控制断面达标的原则,采用水动力及水质模型建立该河段各支流及点源与控制断面之间的响应关系,在此基础上,考虑各点源

及支流排污或水质现状,建立各支流及点源排放削减的线性规划优化模型,对该河段水环境容量进行优化分配,为北运河水环境规划治理决策的制定提供科学的依据。

2 研究方法

2.1 水动力及水质模型

河流水动力及水质模型的控制方程为Saint-Venant方程^[14-15]和一维对流扩散方程^[16-17],如下所示:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + \frac{Q|Q|}{K^2} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} - K_1 C + S \quad (3)$$

式中: t 为时间坐标,s; x 为空间坐标,m; Q 为断面流量,m³/s; z 为断面平均水位,m; q 为单位河长侧向入流量,m²/s,流入为正,流出为负; A 为过流断面面积,m²; B 为水面宽度(包括主流宽度及仅起调蓄作用的附加宽度),m; K 为流量模数,m³/s, $K = AC_1 \sqrt{R}$,其中 C_1 (m^{1/2}/s)、 R (m)分别为谢才系数和水力半径; K_1 为降解系数,d⁻¹; C 为水质浓度,mg/L; S 为源汇项,mg/(L·s); E_x 是纵向扩散系数,m²/s。

方程(1)~(2)描述了河道中水体的质量守恒和动量守恒,方程(3)表示水体中污染物量的守恒,其右边第一项为扩散项,反映了污染物在水中随着水分子的扩散而发生的变化;右边第二项为对流项,反映了水中污染物随着水体运动发生的浓度变化;右边第三项为污染物的降解项,主要反映污染物本身随时间变化的降解等作用。通过综合考虑水中污染物在以上各种作用下的变化,得出水体中污染物浓度的变化规律。

对于上述方程的求解有很多方法,主要包括有限差分法、有限体积法等。本文采用有限差分法对上述方程进行求解,其中对水动力方程的求解采用Preissmann格式^[15],而对对流扩散方程的求解采用二阶隐式差分格式^[16]。

2.2 排放源与控制断面的响应矩阵

响应矩阵反映了在给定水动力条件下各控制断面对各支流或点源排污的响应关系,如对于一个 $M \times N$ 的矩阵 A ,其中的元素 A_{ij} 表示控制断面 i 对点源 j 的响应系数。控制断面浓度、响应矩阵和点源排放浓度的关系如下:

$$C_k = AC_p \quad (4)$$

式中： C_k 为控制断面的浓度，其为 $M \times 1$ 的矩阵； C_p 为支流或点源的排放污染物浓度，为 $N \times 1$ 的矩阵； M 、 N 分别表示河流控制断面和支流或点源的个数。

2.3 线性规划(LP)优化模型

为了对河段水环境容量进行优化，得到各支流及点源的排放量分配方案，需建立河段水环境容量分配优化模型，本文采用线性规划模型对河段水环境容量的分配进行优化，如下。

目标函数(总纳污量最大原则)：

$$\max TC = \sum_{i=1}^N Q_i C_{pi} \quad (5)$$

约束条件：

$$\sum_{j=1}^N A_{ij} C_{pj} \leq C_{si} \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

$$C_{pj} \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

式中： TC 为排入干流的污染物的总量， mg ； Q_i 为点源 i 的流量值， m^3/s ； C_{pj} 为点源 j 的排放污染物浓度值， mg/L 。 A_{ij} 为响应矩阵； C_{si} 为控制断面 i 的水质目标浓度值， mg/L 。

上述线性规划模型中目标函数，即方程(5)为所有点源和支流排放污染物量总量最大原则下的优化目标函数，在实际的优化过程中也可根据实际情况建立此函数，如总经济效益最大原则等。此外，约束条件(6)、(7)分别表示每个控制断面都必须达到水质标准和各点源的排放浓度不能为负数，和目标函数一样，若实际问题中有其他对点源或控制断面的约束条件，均可添加。

3 计算条件

采用本文所建模型研究北运河环境容量及分配，需给定相关水动力条件、点源及支流水质现状、河段地表水功能区划、控制断面选取等资料，本节将分别介绍。

3.1 计算区域

研究区域为北运河沙河闸至老米店闸之间河段，河道总长 151 km，如图 1 所示。本文研究中，共考虑概化点源或支流共 12 个。其中包括沙河闸上游河道(P_1)和 6 条一级支流，从上游到下游依次为

清河(P_4)、坝河(P_7)、小中河(P_9)、通惠河(P_{10})、凉水河(P_{11})和龙凤河(P_{12})。此外，经调查沙河闸上游河段共有 5 个点源，其中沙河闸至清河之间有 2 个点源(P_2 和 P_3)，清河至坝河之间有 2 个点源(P_5 和 P_6)，坝河到小中河之间有 1 个点源(P_8)。

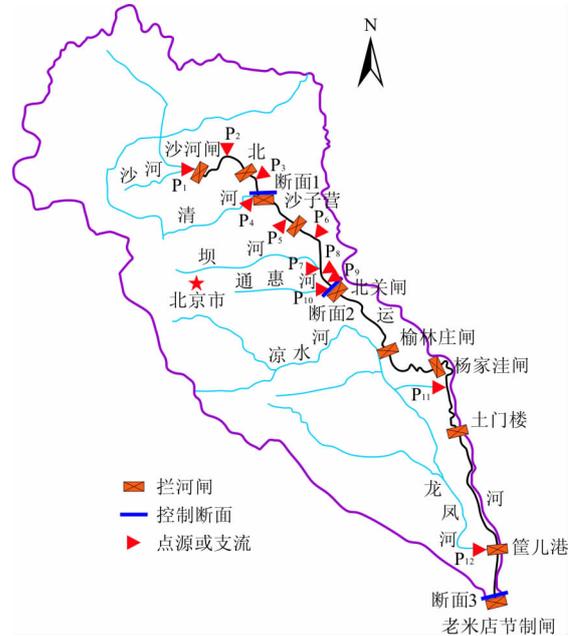


图 1 北运河干、支流及控制断面分布图

3.2 水环境功能区划及控制断面的选取

水功能区划是指根据流域区域的水资源状况，并考虑水资源开发利用现状和经济社会发展对水量和水质的需求，在响应的水域划定的具有特定功能，有利于水资源的合理开发利用和保护，能够发挥最佳效益的区域。根据北京市和天津市的水功能区划，北运河干流段的水质目标如表 1 所示。

本文以化学需氧量(COD)和氨氮(NH_3-N)两个代表性污染物指标为例，研究其水环境容量分配，表 2 为国家地表水环境质量标准规定两个指标的浓度值。

对于控制断面的划分，本文中综合考虑了水环境功能区划和行政区划，设置了 3 个控制断面，见图 1，控制断面位置及水质标准见表 3。其中断面 1 为不同水功能区交界断面，断面 2 为北京市和天津市的分界断面，断面 3 为研究区域边界断面。

表 1 北运河干流水功能区段划分

编号	水功能区	起始断面	终止断面	水质目标
1	工业用水区及人体非直接接触的娱乐用水区	沙河闸	沙子营	IV
2	农业用水区及一般景观要求水域	沙子营	老米店	V

表 2 地表水环境质量标准^[18] mg/L

水质类型	化学需氧量(COD)	氨氮(NH ₃ -N)
I类	≤15	≤0.15
II类	≤15	≤0.5
III类	≤20	≤1.0
IV类	≤30	≤1.5
V类	≤40	≤2.0

表 3 控制断面位置及水质标准

控制断面编号	距离首断面位置/km	COD 标准浓度/(mg·L ⁻¹)	NH ₃ -N 标准浓度/(mg·L ⁻¹)
1	17.3	30	1.5
2	62.7	30	2.0
3	151.0	40	2.0

3.3 水动力条件和污染物降解系数的确定

本文主要计算年平均情况下(设计条件下)北运河各支流及点源排入干流的污染物水环境容量优化分配,其中水动力条件包括计算边界条件及支流或点源的入流量等,本文利用流域产汇污模型,根据北运河流域典型年(2008年)的降水等水文资料,计算出了北运

河流域各支流及点源的入河流量及污染物的量。

污染物降解系数是河流水质模型中的一个关键参数,该参数取值直接影响到水质模型的准确性。该系数的确定采用实测值,实验测得北运河不同河段四个季度的 COD 和 NH₃-N 降解系数,其中 COD 降解系数取值范围为 0.1145~0.2076 d⁻¹,NH₃-N 降解系数取值范围为 0.0369~0.2232 d⁻¹。

4 计算结果及分析

采用本文所建立的水动力及水质模型,计算得 COD 和 NH₃-N 的响应系数,如图 2~3 所示。其中,第 1 个点源为上游边界,即沙河闸。从图中可以发现,响应矩阵中控制断面 1 对点源 4~12 的响应系数为零,控制断面 2 对点源 11、12 的响应系数为零,表明这些点源的排放污染物量对对应的控制断面浓度没有影响,其原因是点源位于控制断面的下游,而北运河属于非感潮河流,其水流不会从下游流向上游。其次,通过对比发现,相同水动力条件下,两种污染物浓度的响应矩阵差别不大,由于污染物降解时间较长,因此,控制断面对点源或支流的水质响应主要由水动力过程决定。

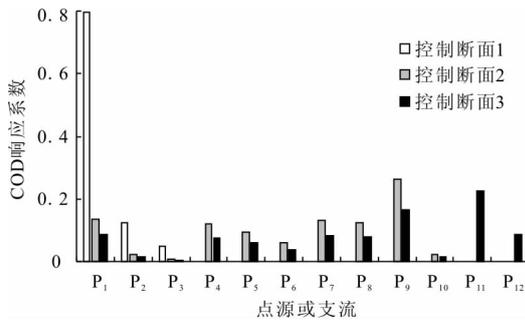


图 2 COD 响应系数

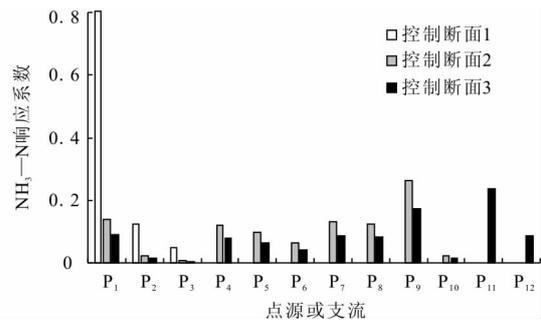


图 3 NH₃-N 响应系数

根据前期监测及水文模型结果,现状情况下北运河 3 个控制断面的浓度均不能满足水功能区划标准要求,因此,本文采用所建立线性规划模型对点源、支流排污削减量进行了分配,结合现状排污情况,设置两种排污优化方案,如表 4 所示。其中,优化目标函数为所有支流、点源排放量总和最大。3 个约束条件,分别为各控制断面满足水功能区划要求的水质浓度;各点源、支流最大排放量不超过现状;各支流、点源的最大削减量。两种方案的不同之处在于其对点源或支流的削减量要求不同,方案一最大削减量为现状的 50%,方案二最大削减量为现状的 70%。

图 4~5 分别给出了两种方案下 12 个支流及点

源 COD 和 NH₃-N 的年分配容量。从图 4~5 中可以看出,方案 1 情况下,各支流及点源的 COD 的分配容量均为负值,表明均需要削减。而方案 2 情况下,支流 3 和支流 8 的分配容量为正值,表明还有一定的容量,而其他支流及点源仍需削减。两种方案下,点源 12 的 COD 年削减量较大,均超过 15 000 t。结合调查统计 COD 年排放量,可进一步计算出各断面的 COD 削减率,两种方案情况下,北运河各支流的 COD 平均削减率在 30%~50% 之间。两种方案情况下,NH₃-N 的容量并没有很明显的变化,均为负值,需要进一步削减。这表明点源最大削减量的变化对其优化分配没有产生明显的影响。其中,点源 11、12 的年削减量最大,均超过 3 000 t。结合现

调查统计排放量,两种方案情况下,各点源或支流 $\text{NH}_3\text{—N}$ 平均削减率在 40% ~ 70% 之间。若要达到

水环境功能区划要求,仍需进一步提高各支流及点源的最大削减量比例。

表 4 两种排污优化方案

方案编号	目标函数	约束条件 1	约束条件 2	约束条件 3
1	总排放量最大	各控制断面满足水环境功能区划	各支流及点源最大排放量不超过现状	各支流及点源最大削减量为现状的 50%
2	总排放量最大	各控制断面满足水环境功能区划	各支流及点源最大排放量不超过现状	各支流及点源最大削减量为现状的 70%

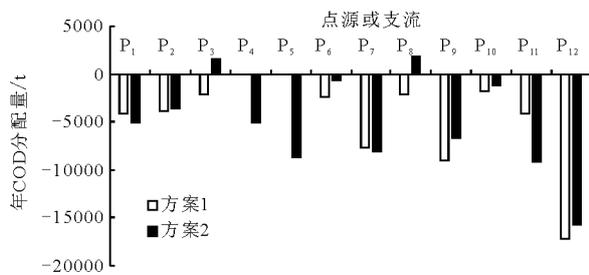


图 4 两种方案下各点源或支流的 COD 年分配量

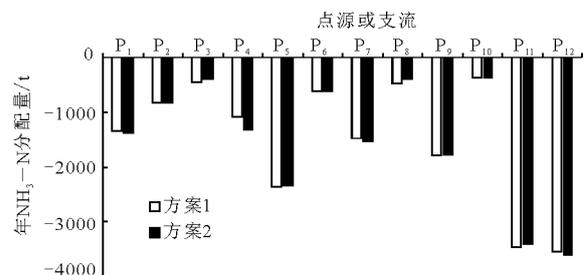


图 5 两种方案下各点源或支流的 $\text{NH}_3\text{—N}$ 年分配量

5 结 论

水环境容量分配的合理性对实现水系水环境规划治理有着非常重要的作用,本文通过水动力水质模型计算得到了点源与控制断面水质响应矩阵,在此基础上,建立了水环境容量分配的线性规划优化模型。采用所建立的模型对北运河干流段水环境容量分配进行了研究,得出以下结论:

(1) 除个别支流或点源外(点源 3 和 8),两种方案下北运河各支流及点源的 COD 和 $\text{NH}_3\text{—N}$ 分配容量均为负值。与监测统计排放量比较,各点源或支流 COD 平均削减率为 30% ~ 50%, $\text{NH}_3\text{—N}$ 平均削减率在 40% ~ 70% 之间。

(2) 线性规划模型作为一种有效的优化方法可以用于水环境容量的分配研究中,通过改变不同的优化约束条件,实现对不同影响因素影响的考虑,最终达到对水环境容量的优化分配。

(3) 在水环境容量优化分配中,可能会无法找到最优结果,这时就需要对约束条件进行修改,比如,考虑到经济效益等影响,一些支流或点源无法实现削减,会导致优化模型找不到最优解。

参考文献:

[1] 李珊,周孝德,李靖. 太子河流域水环境容量研究[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(5): 111 - 114.

- [2] 逢勇,陆桂华. 水环境容量计算理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [3] 杨杰军,王琳,王成见,等. 中国北方河流环境容量核算方法研究[J]. 水利学报, 2009, 40(2): 194 - 200.
- [4] 王子轩,逢勇,罗缙,等. 淀山湖流域平原河网水环境容量及控制断面水质达标方案研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(6): 61 - 65.
- [5] 熊鸿斌,张斯思,匡武,等. 基于 MIKE11 模型的引江济淮工程涡河段动态水环境容量研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(8): 1422 - 1432.
- [6] 韩梓流,逢勇. 基于京杭运河五牧断面水质达标的水环境容量计算研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(4): 81 - 87.
- [7] 阎非,苏保林,贾海峰. 基于排污口权重的一维河流水环境容量计算[J]. 水资源保护, 2006, 22(2): 16 - 18 + 22.
- [8] 李兵,张建强,张绍修. 苏南运河苏锡常段水环境容量和排污控制量研究[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(5): 61 - 63 + 66.
- [9] 董一博,张海行,李振伟. 基于线性规划法的太子河辽河段水环境容量研究[J]. 水利科技与经济, 2016, 22(1): 12 - 14.
- [10] 郭婧,荆红卫,李金香,等. 北运河系地表水近 10 年来水质变化及影响因素分析[J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1511 - 1518.

(下转第 44 页)

- 源效益的时空格局演变[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2):452-463.
- [2] 杨宇, 刘毅, 金凤君, 等. 天山北坡城镇化进程中的水土资源效益及其时空分异[J]. 地理研究, 2012, 31(7):1185-1198.
- [3] 王慧娟, 孙中良, 余芳梅, 等. 统筹城乡发展背景下的城乡生活供水用户满意度实证分析——以镇江市为例[J]. 技术经济与管理研究, 2009(4):96-98+108.
- [4] 周斌. 国家重点研发计划“水资源高效开发利用”重点专项解析[J]. 水科学进展, 2017, 28(3):472-478.
- [5] 周维博. 干旱半干旱地域提高灌区水资源综合效益研究进展与思考[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(5):91-96.
- [6] 王效琴, 王启山, 王志文, 等. 城市水资源开发利用措施综合效益评价模型研究[J]. 水利学报, 2008, 39(4):466-471.
- [7] GADANAKIS Y, BENNETT R, PARK J, et al. Improving productivity and water use efficiency: a case study of farms in England [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 160:22-32.
- [8] 彭曦, 叶斌. 鄂州市城乡供水一体化模式探索[J]. 中国水利, 2010(3):46-47.
- [9] 陈涛, 张永丽, 刘志勇, 等. 西南地区E县城乡供水一体化方案设计与实践[J]. 中国农村水利水电, 2011(3):156-159.
- [10] 朱永明, 赵丽. 石家庄市耕地资源数量与经济发展关系研究——基于脉冲响应函数的实证分析[J]. 水土保持研究, 2013, 20(3):211-217+225.
- [11] 苏建军, 孙根年. 中国旅游投资与旅游经济发展的时空演变与差异分析[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(1):185-191.
- [12] 张凤太, 苏维词. 贵州省水资源—经济—生态环境—社会系统耦合协调演化特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(6):44-49.
- [13] 张胜武, 石培基, 王祖静. 干旱区内陆河流域城镇化与水资源环境系统耦合分析——以石羊河流域为例[J]. 经济地理, 2012, 32(8):142-148.
- [14] 文倩, 孟天醒, 范慧平, 等. 河南省水土资源与经济发展耦合效应及其时空分异[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3):234-240.
- [15] 王永明, 马耀峰. 城市旅游经济与交通发展耦合协调度分析——以西安市为例[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2011, 39(1):86-90.
- [16] 董雯, 杨宇, 张豫芳. 绿洲城镇发展与水土资源开发的耦合效应及其时空分异[J]. 资源科学, 2013, 35(7):1355-1362.
- [17] 徐卫红, 于福亮, 张双虎, 等. 县域水资源可持续利用评价研究——以安塞县为例[J]. 水力发电学报, 2014, 33(3):81-87+97.
- [18] 白洁芳, 李洋洋, 周维博. 榆林市农业水土资源匹配与承载力[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(7):609-615+626.

(上接第38页)

- [11] 王刚, 齐珺, 潘涛, 等. 北运河流域(北京段)主要污染物减排措施效果评估[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(6):39-45.
- [12] 刘洋, 于洋, 王晓燕, 等. 北运河闸坝区水体氨氧化微生物及硝化活性特征研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(11):4044-4052.
- [13] 高晓薇, 刘培斌, 王国青, 等. 北运河(北京段)水污染特征时空变化模拟[J]. 水利水电技术, 2016, 47(12):73-77.
- [14] 詹杰民, 吕满英, 李毓湘, 等. 一种高效实用的河网水动力数学模型研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2006, 21(6):685-692.
- [15] 朱德军, 陈永灿, 王智勇, 等. 复杂河网水动力数值模型[J]. 水科学进展, 2011, 22(2):203-207.
- [16] 褚君达. 河网对流输移问题的求解及应用[J]. 水利学报, 1994(10):14-23+35.
- [17] 赵琰鑫, 张万顺, 汤怡, 等. 湖泊—河网耦合水动力水质模型研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2011, 9(1):53-58.
- [18] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. GB3838-2002 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.