

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0026

单保庆 张洪 唐文忠 等. 2015. 河流污染治理任务路线图制定方法及其在海河流域的应用[J]. 环境科学学报, 35(8): 2297-2305

Shan B Q, Zhang H, Tang W Z, et al. 2015. Methodology for road map enacting of river pollution mitigation and its application in the Haihe River Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 35(8): 2297-2305

# 河流污染治理任务路线图制定方法及其在海河流域的应用

单保庆\* 张洪 唐文忠 雷沛

中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085

收稿日期: 2014-08-26 修回日期: 2014-10-15 录用日期: 2015-01-19

**摘要:** 针对河流水污染治理的长期性、复杂性和系统性要求,参考技术路线图的制定原则和一般步骤,吸纳制定重要领域科技路线图的系统方法,从需求分析、任务布局、特征目标界定、实施阶段和技术重点等方面,建立了制定河流治理路线图的一般方法,并在海河流域开展应用研究,分析了海河流域河流水污染治理的问题和需求,确定了治理的战略任务,确立了水污染治理的特征目标,提出了海河流域河流水污染治理的路线图,为流域河流水污染治理和生态修复提供前瞻性的战略指导和支撑。

**关键词:** 水污染治理; 路线图; 方法学; 海河流域

文章编号: 0253-2468(2015)08-2297-09 中图分类号: X522 文献标识码: A

## Methodology for road map enacting of river pollution mitigation and its application in the Haihe River Basin

SHAN Baoqing\*, ZHANG Hong, TANG Wenzhong, LEI Pei

State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085

Received 26 August 2014; received in revised form 15 October 2014; accepted 19 January 2015

**Abstract:** On the basis of generic principles and procedure for road map, and taking well consideration of the long-range, complicated, and systematic requirements, a set of methodologies for road map enacting of river water pollution mitigation were established, including demand analysis, task collocation, target defining for water quality, time schedule for implementation, and key technology of water pollution mitigation screening. And then the Haihe Water System was selected as a case study for application research. Following the methodology, road map of river water pollution mitigation for the Haihe River Basin was finally prompted, which would act a core role for river pollution control and ecological restoration in the next 10 years.

**Keywords:** water pollution mitigation; road map; methodology; the Haihe River Basin

### 1 引言 (Introduction)

路线图是指应用简洁的图形、表格、文字等形式描述技术变化的步骤或技术相关环节之间的逻辑关系,具有高度概括、高度综合和前瞻性的基本特征(李雪凤等, 2005)。它作为一种结构化的规划方法,可以综合各种利益相关者的观点,并将其统一到预期目标上来,并明确目标、资源及市场之间的关系和属性,在横向上将过去、现在和未来统一

起来。因此,技术路线图广泛应用于技术规划管理、行业未来预测、国家宏观管理等方面(李雪凤等, 2008)。

路线图最早出现在美国汽车行业,汽车企业为降低成本要求供应商提供他们产品的技术发展和规划路线图。20世纪70年代,路线图的奠基人 Robert Galvin(摩托罗拉公司时任 CEO)采用绘制路线图的管理方法对产品开发任务进行规划(Phaal et al., 2004; 曾路和孙永明, 2007; 李栋等,

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项( No. 2012ZX07203-006)

Supported by the Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment ( No. 2012ZX07203-006)

作者简介: 单保庆(1969—)男,研究员(博士),E-mail: bqshan@rcees.ac.cn; \* 通讯作者(责任作者)

Biography: SHAN Baoqing (1969—), male, professor( Ph. D. ), E-mail: bqshan@rcees.ac.cn; \* Corresponding author

2009) ,之后诸多国际大公司 ,如微软、三星、朗讯和飞利普公司陆续跟进 ,逐渐广泛应用这项管理技术 ( Garcia and Bray , 1997; 丁云龙和谭超 , 2006; 仪德刚等 , 2007) . 20 世纪 90 年代后 , 路线图被迅速应用到各个领域 , 美国、加拿大、英国等国家开始绘制产业层面的技术和任务路线图 , 日本、韩国和中国等国家也开展了国家任务路线图研究 . 中国科学院作为国家科学思想库 , 率先借鉴并采用国际上科技路线图的制定方法 , 于 2008 年启动并组织开展了中国至 2050 年生态与环境、能源、水资源等 18 个重要领域科技发展路线图战略研究 , 为国家科技战略决策提供科学依据、引领中国科学技术的发展 . 经过一年多的努力 , 基本理清了至 2050 年中国现代化建设对重要科技领域的战略需求 , 提出了若干核心科学问题与关键技术问题 , 从中国国情出发设计了相应的科技发展路线图 , 形成了中国至 2050 年在 18 个领域的科技发展路线图的战略研究报告 ( 路甬祥 , 2009) .

在生态与环境领域 , 我国大多数河流由于水资源开发利用、水污染和河流连续性破坏而发生根本性演变 , 河流整体生态环境状况已进入大范围生态退化和复合污染的新阶段 ( 孟伟等 , 2004) . 我国河流水污染成因过程复杂多样、流域土地利用和水资源利用过程高度耦合 , 区域经济社会发展进程中的水资源安全和生物多样性恢复之间存在矛盾 , 河流水污染治理是一项长期复杂的系统工程 . 如何综合考虑各方利益 , 统筹过去、现在和未来的治理行动 , 是开展水污染急需破解的难题 . 针对流域水污染问题 , 流域管理机构及各级地方政府也制定了相应的规划方案 , 然而 , 一般规划仅提出 5 年科技发展重点 , 对需求、目标、任务和技术重点的阶段性的考虑不足 , 其“重大需求 - 战略任务”关系是隐性的; 此外 , 规划一般只提出技术研发重点 , 缺乏对实现时间步骤和研发可行性分析 . 而任务路线图作为规划战略决策的有效工具 , 可以弥补科技规划的不足 , 并提高其科学性、系统性、权威性和指导性 . 因此 , 针对河流水污染治理的长期性、复杂性和系统性要求 , 参考路线图的制定原则和方法 , 吸纳了中国科学院在进行战略科技规划的成功经验 , 以及制定重要领域科技路线图的系统方法 , 从需求分析、任务布局、特征目标界定、实施阶段等方面 , 建立制定河流治理任务路线图的一般方法 , 并在海河流域开展应用研究 , 为流域河流污染治理和生态修复提供前瞻性

的战略指导和科技支撑 .

## 2 河流污染治理任务路线图制定的方法学构建 ( Methodology for road map enacting of river water pollution mitigation)

### 2.1 任务路线图及其制定方法

路线图可以用数据图表、文字报告等形式表现 , 常用的是图表形式 . Robert Phaal ( Phaal *et al.* , 2001) 认为不管用哪种形式 , 都要回答 3 个问题: 在充分考虑技术、产品、市场等因素发展前景的情况下 , 我们计划到哪里去? 我们现在在哪里? 我们如何达到那里? 为回答这些基本问题 , 技术路线图一般在结构上采用多层结构格式 , 在横坐标上 ( 时间维度) 反映技术随时间的演变 , 在纵坐标 ( 空间维度) 上反映技术发展与研发活动、产业、基础设施、市场前景等不同层面的社会条件的联动关系 . 根据制定技术路线图不同的目的、不同的应用领域 , 在纵坐标上表示的内容 ( 层面) 也会有所不同 .

任务路线图包括时间轴和重大需求、战略任务等要素 , 其制定过程是按照时间段建立各要素之间的有机联系和发展顺序 . 制定技术路线图的过程是组织利益相关者对未来领域发展形成共识并表达出来的过程 , 其制定方法的基本框架如下:

(1) 建立时间轴: 技术路线图是一个基于时间的规划图 , 它强调重大需求、战略任务及其目标的阶段性 , 重大技术系统和关键技术实现的阶段性以及它们之间内在的有机联系 .

(2) 确定重大需求: 技术路线图主要是从经济社会发展需求出发 , 收集相关方面的文献 , 形成对技术发展和市场现状的初步分析 , 并通过愿景分析确定不同阶段的需求 .

(3) 明确战略任务: 分析技术现状和各种社会条件及面临的障碍 , 确定未来发展的大致目标和时间框架 , 提出满足不同阶段需求的科技发展任务 , 凝练关键目标 .

(4) 形成任务路线图: 将战略任务从时间维度上的演变过程通过图形形式展现 , 形成任务路线图 .

### 2.2 河流治理任务路线图制定方法

河流治理任务路线图以河流治理重大需求为导向 , 基于河流生态完整性提出河流治理和生态恢复的战略任务 , 突出“重大需求 - 战略任务”之间的整体性和相互关联性 , 并通过任务路线图把战略研究的主要内容按照结构化方式表示出来 , 使河流治理战略研究思路更加清晰 . 河流治理任务路线图制

定的基本思路是突出河流治理的前瞻性计划, 强调从河流治理重大需求开始, 确定河流治理的特征目标, 凝练河流治理阶段战略任务安排, 制定河流治理路线图的具体流程见图 1.

首先, 确立河流治理的总体战略目标, 即优先恢复和保障河流生态系统服务功能、兼顾生物多样性恢复, 确立水资源安全和水生态健康两大基本目标. 结合文献资料调查和实地监测数据, 根据其地表水标准要求以及水功能区划分标准, 选择相应的水质参数, 开展河流水环境问题诊断和评估, 明确河流的难点问题和治理的重大需求.

其次, 从上述需求出发, 确立河流化学完整性恢复、物理完整性恢复和生物完整性恢复方面的重大战略任务; 河流化学完整性恢复即河流水污染的控制, 包括常规的耗氧污染(如 COD、NH<sub>3</sub>-N 等)控制和毒害污染(如重金属、毒害有机物等)的控制. 物理完整性恢复即河流生境恢复, 包括河流水质水量联合调度和河流生态基流保障等方面. 在河流化学完整性和物理完整性得到初步恢复的基础上, 再开展河流生物完整性恢复(河流水生态恢复), 主要包括河流指示种出现和河流生物多样性恢复.

然后, 根据上述河流污染控制目标和治理目标, 结合流域社会经济发展过程和趋势, 综合考虑污染治理的复杂性和阶段性, 分近期和中远期两个时间尺度, 在时间轴上划分河流污染治理的耗氧污染控制、毒害污染控制与河流生态修复/恢复和保护实施阶段, 明确各阶段的起点和终点, 并布局河流治理战略任务.

然后, 根据上述河流污染控制目标和治理目标, 结合流域社会经济发展过程和趋势, 综合考虑污染治理的复杂性和阶段性, 分近期和中远期两个时间尺度, 在时间轴上划分河流污染治理的耗氧污染控制、毒害污染控制与河流生态修复/恢复和保护实施阶段, 明确各阶段的起点和终点, 并布局河流治理战略任务.

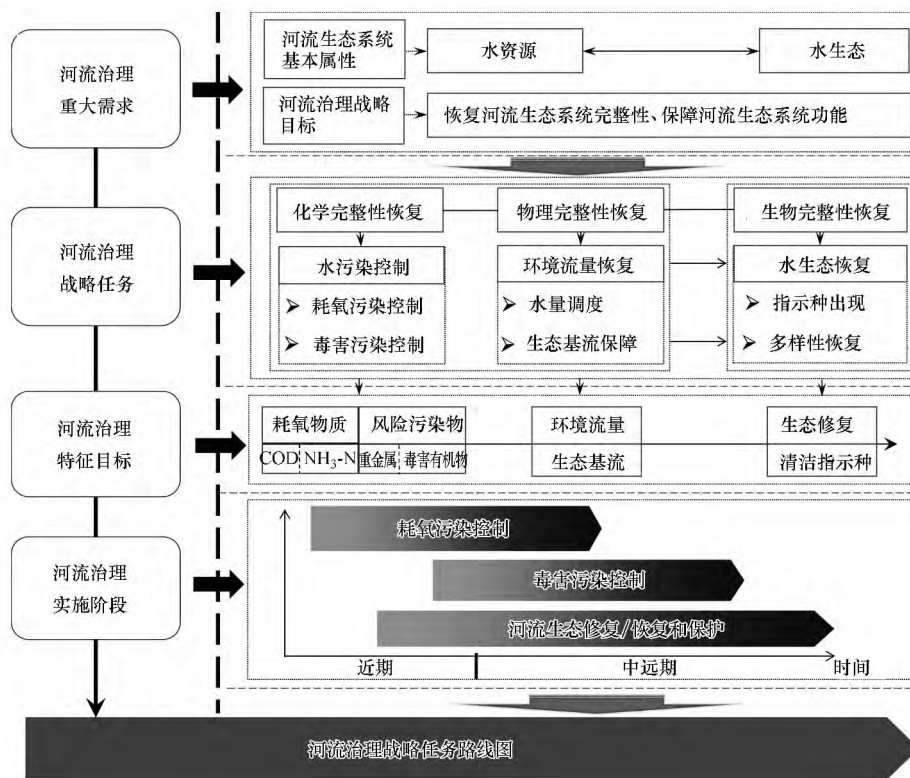


图 1 河流水污染治理路线图的制定流程框图

Fig. 1 Flowchart of road map enacting for river pollution mitigation

### 3 海河流域河流污染治理路线图 (Road map of river water pollution mitigation for the Haihe River Basin)

#### 3.1 研究区域概况

海河流域位于东经 112° ~ 120°, 北纬 35° ~ 43°, 流域涵盖京、津、冀等 8 省(直辖市、自治区)、20 多座大中型城市, 是我国经济发达地区( 范兰池

等, 2013). 流域总面积 31.8 万 km<sup>2</sup>, 流域的河流众多, 总长度超过 1.61 万 km, 其中集水面积超过 500 km<sup>2</sup> 的河流有 113 条( 图 2). 流域由滦河、北三河( 北运河、潮白河、蓟运河)、永定河、大清河、海河干流、子牙河、黑龙港运东、漳卫河以及徒骇马颊河等九大水系构成, 其中滦河水系和徒骇马颊河水系独流入海, 其它水系通过海河干流入海( 赵钰等, 2013).

空间上各水系呈三段式分布,按照地貌条件可以将水系划分为上游山区段、中部平原段和下游滨海段(盖美等,2005)。

海河流域是我国水资源最贫乏地区之一,流域人均水资源量只有  $270 \text{ m}^3$ ,远低于国际通用的人均  $1000 \text{ m}^3$  紧缺标准和  $500 \text{ m}^3$  极度紧缺标准(王中根等,2013)。与此同时,工农业生产和城镇生活需水量增加带来了大量工业废水和生活污水的排放。1980年至2007年,工业与城镇生活污水排放量也由31.4亿t增加到47.5亿t(刘静玲等,2012)。海河流域河流自然水源补给极少,工业废水与城市退水的激增,使得非常规水源成为河流的主要来源(王伟等,2011)。大量未经处理的污水排放给河流带来高的污径比,加之水资源贫乏,无足够的清洁河水对其进行稀释净化,河流稀释能力和自净能力极弱。非常规水源补给导致河流水质重污染、水质高风险、河流生态系统极度退化等典型症状,水污染类型多样(耗氧污染、富营养化和毒害污染并存),并呈现较强的复合型特征。



图2 海河流域主要河流水系分布图

Fig. 2 Main rivers and river systems of the Haihe River Basin

### 3.2 海河流域河流污染治理任务路线图制定过程

#### 3.2.1 海河流域河流水污染治理的问题和需求

#### (1) 海河流域河流水污染问题

海河流域水资源禀赋不足,区域经济发展迅猛,河流废污水等非常规水源补给特点十分明显。非常规水源补给带来大量污染物输入,改变了河流原有的物质平衡,破坏了河流生态系统结构组成,引发一系列严重的水污染和水生态问题,具体包括以下方面。

1) 平原河流污径比高,河流稀释能力极弱,耗氧污染是主要污染类型。海河流域平原地区自然水源补给极少,水资源总量不足加上上游山区段水库闸坝的截留,工业废水与城市退水的激增,使得非常规水源成为河流的主要来源,河流稀释能力和自净能力极弱。尽管非常规水源补给导致海河流域多种污染并存,耗氧污染仍然是河流污染的主要类型,主要污染物为  $\text{NH}_3\text{-N}$  和 COD。

2) 污水来源复杂,河流多种污染并存,河流水质风险问题突出。行业废水是海河流域河流非常规水源补给的主导来源,废污水排放的区域差异性与行业差异性,导致海河流域各水系河流污染来源复杂,河流呈现多种污染并存的特点。河流中检出了非离子氨、重金属、有毒有机物等毒害污染物,严重威胁河流水生生物,给河流带来了突出的水质风险问题。

3) 河流物种结构单一,生物贫化,耐污种为主,自净能力弱。海河流域河流水生生物贫化,生物多样性指数较低,生物贫化导致海河流域底栖动物结构组成失衡,多样性相对较低且以耐污种为主(占到50%以上)。由于非常规水源带来的耗氧污染问题,导致河流溶解氧被急剧消耗而出现氧亏,加之非常规水源中非离子铵、重金属和有机物的毒害作用,使得海河流域生态系统急剧退化,加之水污染胁迫,河流生物自净能力丧失殆尽。

#### (2) 海河流域河流污染的流域驱动机制

流域是污染问题产生的基本单元,流域驱动机制分析可了解人类活动对河流水污染的影响范围和程度。海河流域河流水污染的流域驱动因子可以归纳为水资源开发利用、河流连续性破坏、废污水排放、污染驱动的河流退化等四个方面,并呈现较强的复合型特征。

1) 流域水资源禀赋严重不足,开发利用过度,经济社会发展与流域水资源关系严重失衡是海河流域水污染的根本原因。海河流域水资源总量持续减少与水资源的过度开发,导致河流天然径流大幅

减少甚至出现断流现象。经济社会发展与流域水资源关系严重失衡是海河流域水污染问题的根源, 废污水等非常规水源作为补给源, 导致河流污径比增高、河流稀释能力降低, 部分河段水体自净能力消失殆尽, 造成海河“有河皆枯, 有水皆污”。

2) 闸坝、农业灌渠等水利工程建设是驱动流域水系统格局演变的主要动力。人口增长和社会经济发展对水资源的需求加大, 推动了海河流域水系格局的变化, 成为影响河流水环境的主要原因。水利工程建设, 海河流域上游山区水库密布, 中下游平原闸坝林立, 形成“水库-闸坝-灌区”的水系统格局。在水库及闸坝的共同作用下, 海河流域水系统流动性下降、连通性差、河流严重片段化, 形成不连续的水系格局, 对流域水资源分配与水资源开发利用带来重大影响。

3) 废污水排放量逐年增加, 河流非常规水源补给特征突出是河流污染的直接原因。海河流域城镇化发展迅猛, 污水排放量逐年增加, 河流“社会-自然”二元循环系统以社会水循环系统为主(王浩等, 2013), 城市化带来的河流非常规水源补给特征突出。城镇化发展对水资源的利用已成为影响河流水循环的主要因素, 河流的“社会”水循环过程已成为海河流域河流水循环的主导因素。城市化效应、流域社会水系统强化、自然水系统弱化, 城市非常规水源补给是海河流域河流污染治理需要考虑的首要问题。

4) 污染类型多样, 复合类型突出, 氧亏和毒害效应叠加, 导致河流生态系统退化。以  $\text{NH}_3\text{-N}$  和 COD 为特征污染物的耗氧污染, 导致河流氧亏效应, 直接影响水生生物的呼吸作用, 对河流生态系统健康造成损伤。另一方面, 非常规水源补给带来的非离子氨、重金属、有毒有机物对水生生物的生命及生活史产生危害, 导致生物体致残、致疾、甚至致死。非常规水源补给带来氧亏效应和毒害效应叠加, 造成河流生态系统严重退化、污染物消纳和净化能力极弱, 是海河流域河流水污染加剧的重要驱动机制。

### (3) 河流水污染治理需求

海河流域河流常规水源不足而非常规水源补给明显, 其水污染治理的重大需求是协同解决非常规水源补给带来的水质/水量问题。非常规水源补给导致的河流重污染、水质高风险、河流生态系统退化等 3 个典型症状, 并呈现较强的复合型特征, 而

其根本症结在于极度缺水背景下的经济社会发展与流域水资源关系严重失衡。如何降低非常规水源带来的水环境风险, 实现非常规水源向正常水源转化, 其面临的具体需求包括以下几方面。

1) 非常规水源溶解氧提升需求。溶解氧水平对于维护河流水体基本功能至关重要。非常规水源中 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  等大宗耗氧污染物导致其溶解氧水平极低, 河流的非常规水源补给进一步消耗河流原有水中溶解氧, 进而对水生生物产生毒害作用。因此, 耗氧污染物控制对扭转河流黑臭的态势, 改善河流水体质量起到决定性作用。欲解决河流水质水量问题, 恢复河流功能, 首要需求是削减耗氧污染物以恢复河流溶解氧。

2) 非常规水源的水质风险控制和管理需求。行业废水和生活污水含有多种类型的有毒有害污染物, 包括有毒有害有机污染物、重金属、非离子氨等, 氧亏和毒害效应叠加, 导致河流生态系统退化。如何立足非常规水源的水量特点, 改变目前的非常规水源直接补给河流的状况, 降低其补给的水质风险, 以扭转河流水污染、水质风险和河流退化的态势, 面临急迫的水质风险控制和管理需求。

### 3.2.2 战略任务和实施阶段划分

非常规水源在相当长的时期内将是海河流域河流的主要补给水源, 由水质污染和环境风险问题引发的河流水生态退化问题是海河流域河流治理过程中需要解决的问题。海河流域河流治理重点任务以河流面临的水环境问题为依据, 结合水环境问题的紧迫性以及河流服务功能的紧密程度, 从时间尺度和空间尺度对河流治理进行总体布局 and 任务安排。海河流域河流水污染治理应重点解决非常规水源补给带来的水质问题, 并兼顾河流生态系统的恢复。具体而言, 应从河流污染控制与治理、河流风险管理、河流生态修复三个方面展开。河流污染控制主要针对非常规水源补给带来的耗氧污染控制问题, 重点削减耗氧污染物负荷, 提升河流水体溶解氧含量; 河流风险管理主要针对非常规水源补给带来的毒害风险的控制和管理, 重点解决河流毒害污染重, 水资源安全风险高的问题; 河流生态治理则是在河流耗氧污染控制和风险管理初步实现的基础上, 针对环境流量保障和生态功能的恢复, 以非常规水源的水质水量协同为基本手段, 重点解决河流退化严重, 自净能力弱的问题。

三大重点任务的实施按照耗氧污染治理、毒害

风险控制 and 河流生态修复的优先顺序进行布局. 海河流域河流治理实施划分为 3 个阶段: 第一阶段(—2010 年)为耗氧污染控制与负荷消减阶段, 主要治理污染类型为耗氧污染; 第二阶段(2011—2015 年)为毒害风险控制和管理阶段, 主要治理污染类型河流毒害污染, 兼顾富营养化风险; 第三阶段(2016—2020 年), 为水质改善阶段, 主要重点任务为河流生态修复.

### 3.2.3 特征目标确立

特征目标和主治对象是河流治理重点任务具体实施的基本要素. 根据重点任务部署, 海河流域河流治理耗氧污染控制的主控对象为 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$ ; 毒害风险主要控制毒害有机物, 兼顾重金属; 河流生态退化的主控对象为环境流量和典型水生生物种.

溶解氧(DO)是研究水体自净能力的重要依据. 基于我国水环境质量标准、参考美国 EPA 水中溶解氧标准, 确定河流生态修复推荐溶解氧限值为: 1) 严重污染水体:  $\text{DO} < 2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 基本无水生生物活动迹象; 2) 轻微污染水体:  $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} < \text{DO} < 5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 水体出现鲤鱼、鲫鱼等养殖鱼种; 清洁水体:  $\text{DO} > 6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  或平均饱和率达到 90% 以上, 具有良好自净能力, 达到生态系统功能维护要求(谢小军和孙儒泳, 1989; USEPA, 2000).

为实现河流水体达到轻微污染水体目标, 并为河流生态修复提供基础, 水体中溶解氧质量浓度需保持  $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右. 基于流域耗氧污染物 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  的削减, “十二五”末流域主要河流水体溶解氧恢复至  $3 \sim 5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  切实可行. 到“十三五”末溶解氧量化指标为恢复至  $5 \sim 8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 实现主要河流水体 DO 指标优于地表水环境质量标准 III 类为最终目标.

COD 控制阈值的确定重点考虑 COD 组分对其耗氧能力的影响, 兼顾 COD 浓度与 DO 水平的对应关系. 研究表明, COD 由难降解成分和易降解成分构成, 当 COD 浓度降至  $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右时, 易降解成分基本消耗殆尽, 难降解物质称为 COD 主要成分, 耗氧效应不再明显(卢培利等, 2012). 另外, 当 COD 浓度为  $30 \sim 40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 溶解氧水平能维持在  $2 \sim 3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 当 COD 在  $20 \sim 30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 溶解氧能维持在  $3 \sim 5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 综合考虑 COD 的组分效应和与 DO 对应关系, “十二五”阶段 COD 量化指标为  $40 \sim 50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 基于“十二五”期间的河流治理

工作, COD 负荷消减和河流水体自净能力不断提高, “十三五”末主要河流水体 COD 指标达到地表水环境质量标准 III ~ V 类 ( $20 \sim 40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 具备可行性. 据此“十三五”阶段 COD 量化指标降至  $20 \sim 40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

$\text{NH}_3\text{-N}$  特征目标阈值确定则综合考虑非离子氨的毒害效应和氨氮耗氧效应. 氨氮在水体中以离子态和非离子态存在, 其中非离子态氨对水生生物具有显著的毒害效应. 非离子态氨占  $\text{NH}_3\text{-N}$  总量的比例由温度和水体的 pH 决定(王文琪等, 2007). 硝化作用加强会导致水体溶解氧消耗, 根据二者的对应关系, 要维持水体溶解氧在  $3 \sim 5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度需要降到  $2 \sim 3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 因此“十二五”期间,  $\text{NH}_3\text{-N}$  量化指标降至  $3 \sim 5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 基于“十二五” $\text{NH}_3\text{-N}$  负荷消减和河流水体自净能力的提高, “十三五”阶段要进一步保障溶解氧水平和降低毒害风险,  $\text{NH}_3\text{-N}$  量化指标为优于地表水环境质量标准 III ~ V 类 ( $0.7 \sim 2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ).

河流毒害污染控制是河流水质改善的重要方面, 也是开展退化河流生态修复的基础. 非常规水源补给在长期范围内仍是海河流域河流的主要补给来源, 实现河流毒害污染控制首先要实现入河废水重金属达标排放. 到“十二五”期间, 开始逐步实施毒害有机物的控制. 建立流域毒害有机物优控清单是实施河流毒害污染控制和风险管理的基础和有效手段. “十二五”期间, 加强流域河流毒害有机物的监测分析, 结合流域优控污染物筛选技术, 建立流域毒害有机物优控清单. “十三五”阶段确定排水毒性控制阈值, 实施海河流域河流的生态风险管理. 参考国际标准组织(ISO)工业废水等级划分标准确定海河河流毒害有机物控制阈值(Persoon *et al.*, 2003). “十三五”期间对排水毒性的控制阈值进行确定, 确保行业排水毒性为“无毒”级别(急性毒性小于  $0.3 \text{ TU}_a$ 、慢性毒性  $1.0 \sim 1.25 \text{ TU}_c$ ).

生态修复的理念是修复河流的生态完整性, 核心是实现生物完整性, 增加河流生态系统生产力, 增加土著种的生物多样性. “十一五”末海河流域河流污染得到初步遏制, 水生动物仍以中度—重度底栖耐污种为主; 而到了“十二五”末, 底栖动物以轻—中度耐污种为主, 将出现一般性鱼类, 即在“十二五”末将具备河流生态修复的条件; 河流生态修复的基本定位是: 优先保障河流生态服务功能, 兼顾生物多样性恢复, 前者主要指实现水资源安全

(量、质、节律) 后者指恢复河流生物群落的关键生态过程. 预计在“十三五”末, 底栖动物将以轻度耐污和清污种为主, 土著鱼类出现.

综上所述, 耗氧污染控制的特征目标为溶解氧

恢复以及 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  的下降, 环境风险控制特征目标为毒害物质排放清单、阈值确定和排水毒性标准管理. 河流生态治理的特征目标为水生生物类型转变, 具体目标阈值和标准的设定见表 1.

表 1 海河流域河流治理特征目标

Table 1 Targets of water pollution mitigation in the Haihe River Basin

时间节点	耗氧污染治理			环境风险控制 毒害物质	河流生态治理 水生生物
	COD/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\text{NH}_3\text{-N}/$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	DO/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )		
“十二五”末	40~50	3~5	3~5	达标排放, 建立优控清单	重污种向中污种转变
“十三五”末	30~40	0.7~2	5~8	排水毒性阈值(急性毒性小于 0.3 $\text{TU}_a$ 、慢性毒性 1.0~1.25 $\text{TU}_c$ )	中污种向轻污种转变

### 3.3 海河流域河流污染治理任务路线图

非常规水源是海河流域河流补给的主要来源, 河流治理面临非常规水源生态水源化的重大治理需求. 以城市排水为主的非常规水源存在污染负荷高、环境风险大的基本特征, 导致了补给河流的生态退化. 因此海河流域河流治理的重点任务主要针对非常补给水源的污染负荷削减、环境风险控制以及补给河流的生态治理进行布设和安排.

针对非常规水源补给造成的耗氧污染问题, 海河流域河流水污染治理的重点任务为 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  负荷的削减. 针对复杂补给水源造成的毒害风险问题, 海河流域河流风险控制和管理的重点任务为毒害有机物的减排减毒和排水毒性标准管理. 在非常规水源补给长期存在的背景下, 从行业生产过程入手, 实施毒害有机物的减毒减排, 是短期内河流水质风险控制的有效途径. 由于有毒有机物成分复杂, 其生物毒性数据缺失是开展风险管理的瓶颈. 从长期来看, 实现排水毒性标准风险管理将是非常规水源补给河流毒害物质管理的终极目标. 针对非常规水源补给河流的生态极度退化问题, 海河流域河流生态治理的重点任务为河流非常规补给水源的水质水量保障. 对于解决像海河流域这类极度缺水河流水污染问题, 关键在于实现河流的生态补水. 通过大型补水工程(如南水北调工程)带来河流优质水源补给, 以及非常规水源(污水处理厂出水)经过生态净化达到满足水生态水质的生态水源补给, 保障河流环境流量, 恢复河流生态系统的自我调节能力, 是解决河流生态退化基本途径.

海河流域河流治理的重点任务实施将分阶段实施. 根据“水专项”河流治理总体布局, “十一五”期间我国河流治理主要任务为污染治理, “十二五”期间进入水质改善阶段, “十三五”全面开展河流生

态治理工作. 环保部制定了对我国重点流域水污染防治规划, “十一五”期间以污染负荷总量减排为主, “十二五”逐渐过渡到治理单元的水质改善(环境保护部, 2012). 基于“水专项”以及环保部的实施阶段布局, 结合海河治理重点任务的实施阶段安排, 对海河流域河流治理重点任务的实施阶段安排如下: “十一五”期间开展 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  负荷削减工作, 并实现水体 COD 的基本控制. “十二五”期间重点开展以毒害有机物为代表的河流毒害风险控制, 同时加强  $\text{NH}_3\text{-N}$  负荷的削减. “十三五”期间重点开展河流环境流量的工作, 主要通过河流湿地等河道生态工程保障河流非常规水源的出水水质. 根据重点任务布局以及实施阶段安排, 以及重点任务、实施阶段以及特征目标设定, 绘制海河流域河流污染治理任务路线图(图 3).

海河流域是我国典型的极度缺水河流, 并将长期维持着河流极度缺水和非常规水源补给特征, 其河流污染特点在全国和区域尺度上都具有代表性. 非常规水源补给导致河流污染类型多样(如耗氧污染、富营养化、毒害污染等)并呈现较强的复合特征, 进而导致河流的水质重污染、水质高风险、河流生态系统极度退化等典型症状. 分析海河流域河流水污染治理的问题和需求, 确定海河流域水污染治理的重点为“河流污染控制与治理、河流风险管理、河流生态修复”, 重点从“提升溶解氧含量”、“毒害风险控制”、“水生态修复”三方面确立了水污染治理特征目标, 提出海河流域河流水污染治理的路线图, 为国家层面上极度缺水河流提供新的污染治理思路和方法.

我国河流水污染控制是一项长期的系统工程. 河流污染治理任务路线图的推广和应用的关键在于如何准确地认识和识别不同流域河流水污染问

题和成因过程. 各流域由于区域发展差异导致河流 呈现不同水污染特点, 如海河流域河流极度缺水和

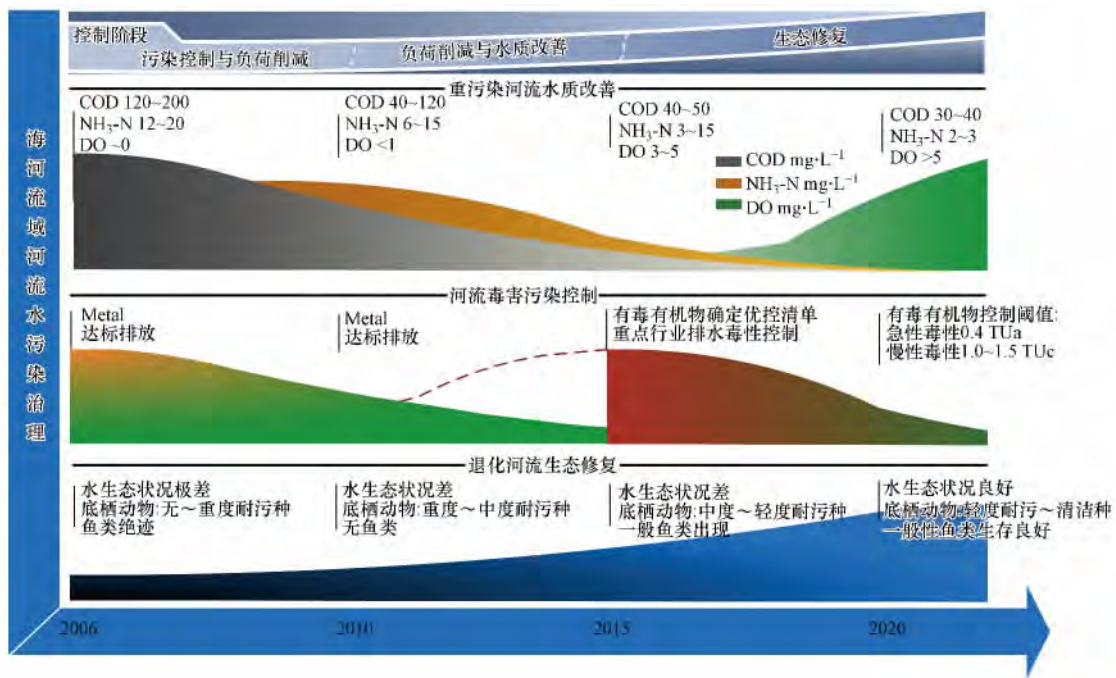


图3 海河流域河流水污染治理路线图

Fig. 3 Road map of river water pollution mitigation for Haihe Water System

非常规水源补给, 淮河流域多闸坝、河流连续性破坏, 辽河流域河流的重化工行业污染, 松花江流域河流的高环境风险等. 针对不同流域河流水污染治理的问题和需求, 按照河流治理任务路线图制定的思路和方案, 形成具有流域针对性的河流污染防治和综合治理的技术体系, 为我国河流水污染治理阶段任务安排提供前瞻性的战略指导和支撑.

责任作者简介: 单保庆(1969—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为河流过程和污染控制、湿地和水土界面物质迁移过程研究. E-mail: bqshan@rcees.ac.cn.

#### 参考文献(References):

- 丁云龙, 谭超. 2006. 作为技术预见工具的技术路线图及其应用前景[J]. 公共管理学报, 3(4): 40-45
- 范兰池, 朱龙基, 戴乙. 2013. 海河流域入河排污口变化及对策分析[J]. 海河水利, (1): 13-15; 22
- 盖美, 耿雅冬, 张鑫. 2005. 海河流域地下水生态水位研究[J]. 地域研究与开发, 24(1): 119-124
- Garcia M L, Bray O H. 1997. Fundamentals of Technology Roadmapping [M]. Albuquerque: Sandia National Laboratories
- 环境保护部. 2012. 重点流域水污染防治规划(2011—2015年) [OL]. <http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201206/W020120601534091604205.pdf>

- 李雪凤, 全允桓, 谈毅. 2005. 技术路线图和技术路线图思维[J]. 科学学与科学技术管理, (8): 26-28; 59
- 李雪凤, 全允桓, 谈毅. 2008. 技术路线图——一种新型技术管理工具[J]. 科学研究, 22(21): 89-94
- 李栋, 张志强, 安培浚. 2009. 技术路线图的发展与应用分析[J]. 图书与情报, (3): 8-13
- 刘静玲, 杨志峰, 曾维华, 等. 2012. 海河流域水环境变化规律及风险评估[M]. 北京: 科学出版社
- 卢培利, 艾海男, 张代钧, 等. 2012. 废水 COD 组分表征方法体系构建及其应用[M]. 北京: 科学出版社
- 路甬祥. 2009. 前瞻世界发展大势 谋划中国科技战略——中国科学院发布《创新 2050: 科学技术与中国的未来》战略研究系列报告[J]. 中国科学院院刊, 24(4): 333-337
- 孟伟, 苏一兵, 郑丙辉. 2004. 中国流域水污染现状与控制策略的探讨[J]. 中国水利水电科学研究院学报 2(4): 242-246
- Persoone G, Marsalek B, Blinova I, et al. 2003. A practical and user-friendly toxicity classification system with microbioassays for natural waters and wastewaters [J]. Environmental Toxicology, 18(6): 395-402
- Phaal R, Farrukh C, Probert D. 2001. T-plan: The Fast Start to Technology Roadmapping: Planning Your Route to Success [M]. Cambridge: Institute for Manufacturing University of Cambridge
- Phaal R, Farrukh C J P, Probert D R. 2004. Technology roadmapping — A planning framework for evolution and revolution [J].



- Technological Forecasting and Social Change, 71(1/2): 5-26
- U. S. Environmental Protection Agency ( USEPA ). 2000. Aquatic Life Criteria for Dissolved Oxygen - ( Saltwater) Cape Cod to Cape Hatteras. [ OL ]. <http://water.epa.gov/scitech/swguidance/standards/criteria/aqlife/dissolved/dofacts.cfm>
- 王浩, 贾仰文, 杨贵羽, 等. 2013. 海河流域二元水循环及其伴生过程综合模拟 [J]. 科学通报, 58(12): 1064-1077
- 王伟, 冯海波, 臧志雪, 等. 2011. 河北省海河流域污染防治优先控制单元研究 [J]. 南水北调与水利科技, 9(5): 59-62
- 王文琪, 姜令绪, 杨宁, 等. 2007. 氨氮对菲律宾蛤仔免疫力的影响 [J]. 海洋科学, 31(1): 23-27
- 王中根, 罗焯翰, 吴梦莹, 等. 2013. 近 50a 海河流域降水丰枯遭遇分析 [J]. 自然资源学报, 28(10): 1685-1693
- 谢小军, 孙儒泳. 1989. 影响鱼类代谢的主要生态因素的研究进展 [J]. 西南师范大学学报, 14(4): 141-149
- 仪德刚, 齐中英, 赵新力. 2007. 企业提升核心竞争力的重要手段——技术路线图 [J]. 科技管理研究, 27(1): 98-100
- 曾路, 孙永明. 2007. 产业技术路线图原理与制定 [M]. 广州: 华南理工大学出版社
- 赵钰, 单保庆, 唐文忠. 2013. 海河流域重污染河流表层沉积物氨基酸组成特征 [J]. 环境科学学报, 33(11): 3075-3082