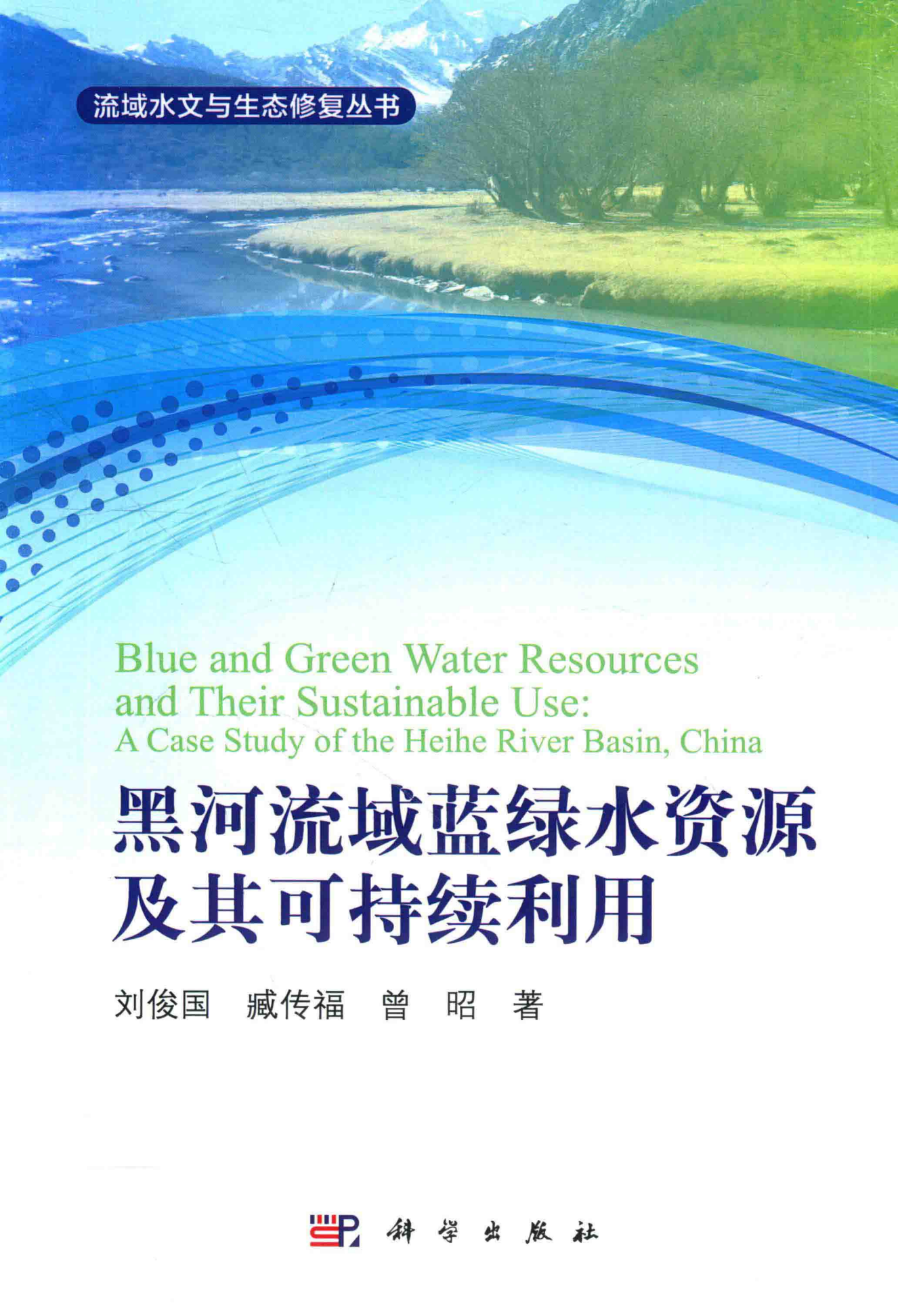




流域水文与生态修复丛书

Blue and Green Water Resources
and Their Sustainable Use:
A Case Study of the Heihe River Basin, China

黑河流域蓝绿水资源 及其可持续利用

刘俊国 臧传福 曾 昭 著



科学出版社

黑河流域蓝绿水资源 及其可持续利用

刘俊国 臧传富 曾 昭 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

黑河流域是典型的干旱区内陆河流域,本书从黑河流域蓝绿水的时空动态分布和水资源利用的可持续性出发,详细介绍黑河流域近 30 年来蓝绿水的时空动态分布格局变化,并引入了水足迹的概念,对该流域蓝绿水的利用的可持续性进行了评价。第 1 章介绍了黑河流域水资源评价,引入水足迹的概念。第 2 章介绍了本书研究方法。第 3 章介绍了黑河流域蓝绿水资源时空分布格局。第 4 章介绍了人类活动的影响。第 5 章介绍了典型年份的时空差异。第 6 章介绍了黑河蓝绿水历史演变趋势。第 7 章介绍了黑河水资源短缺评价。第 8 章提出了结论与展望。

本书可供水资源管理与规划等相关专业人员阅读,特别为以黑河流域及中国内陆干旱半干旱流域的水资源管理和社会经济发展规划为研究内容的人员提供理论参考。

图书在版编目(CIP)数据

黑河流域蓝绿水资源及其可持续利用/刘俊国,臧传富,曾昭著. —北京:科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-047827-6

I. ①黑… II. ①刘…②臧…③曾 III. ①黑河—流域—水资源利用—研究 IV. ①TV213.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 056140 号

责任编辑:韦 沁 焦 健/责任校对:张小霞

责任印制:张 伟/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016年3月第一次印刷 印张:6 3/4

字数:166 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

保证充足的淡水资源供给,不仅对人类是必不可少的,对生态系统也是极其必要的。水资源可以分为蓝水和绿水。蓝水主要指江、河、湖水及浅层地下水;绿水是指源于降水,储藏于非饱和土壤中并被植物以蒸散发的形式吸收利用的那部分水。以往,人们往往更多的关注蓝水而忽视绿水。但是绿水在保障粮食生产和维持生态系统平衡方面发挥着非常重要的作用。绿水支撑着雨养农业。同时,它也是维持陆地生态系统景观协调和平衡的重要水源,在保持生态系统健康中具有重要作用。近年来,蓝、绿水研究引发了科学界对水资源概念及评价的重新思考,逐步影响着人类对水资源管理的思维方式,已经成为水文水资源研究领域的热点问题。

同时,随着社会经济的快速发展,水资源短缺已成为许多国家和地区可持续发展的“瓶颈”。在气候变化和人类活动的双重影响下,缺水问题在世界各国发生的范围及其影响的程度进一步增加。水资源短缺已经成为全球经济社会可持续发展的重大障碍性因素之一。研究蓝绿水资源时空分布特征,阐明变化环境下蓝绿水资源演变规律及驱动机制,揭示水资源利用的可持续性,准确识别水资源短缺程度、成因及应对策略,已受到政府部门、社会公众和科研人员的广泛关注。

本书围绕变化环境下蓝绿水资源评价的重大科学问题以及水资源短缺综合应对的重大实践需求,提出了蓝绿水资源定量化评价的理论框架和方法,形成了结合水量水质综合评价水资源短缺的思想;结合水文与用水集成模型,评价流域蓝绿水空间分布格局,揭示变化环境下蓝绿水资源演变规律及驱动机制;基于水足迹理念,结合流域水量水质情况,评价流域的水量型和水质型缺水状况,并分析流域水资源利用的可持续性。选取干旱区典型内陆河黑河为研究区,进行蓝绿水和水资源短缺评价的实证研究。本研究发展了变化环境下蓝绿水资源评价的理论与方法,并为黑河流域水资源短缺综合应对提供了科学依据。

本书的学术思路和写作框架是在刘俊国教授的主持下完成的,程国栋院士给予了很多指导,并提出了宝贵的意见。本书是刘俊国教授的科研团队集体努力的结晶,也是其所指导的硕博研究生多年来辛勤工作的成果。其中有关黑河流域蓝绿水评价的章节主要是由臧传富博士完成;黑河流域水资源短缺与可持续评价章节主要由曾昭完成。全书的通稿由刘俊国教授完成,文字编校和出版事宜由刘俊国和臧传富共同完成。

本书研究工作得到了国家自然科学基金重大研究计划集成项目“黑河流域水-生态-经济系统的集成模拟与预测”(项目编号:91425303)、集成项目“黑河流域水资源管理决策支持系统集成研究”(项目编号:91325302)、培育项目“黑河流域蓝绿水研究”(项目编号:91025009)的资助。同时也得到了国家自然科学基金面上项目“京津冀水资源短缺演变规律及驱动机制”(项目编号:41571022)、北京市自然科学基金重点项目“京津冀水足迹演变驱动机制及水资源调控分析”(项目编号:20140505)以及中组部首批“青

年拔尖人才”的部分资助。在上述研究中，中国科学院寒区旱区环境与工程研究所程国栋院士、中国科学院生态环境研究中心傅伯杰院士、中国农业大学康绍忠院士、中国科学院地理科学与资源研究所李秀彬研究员、中国科学院寒区旱区环境与工程研究所肖洪浪研究员、中国科学院南京土壤研究所张甘霖研究员等给与了诸多指导和帮助，特此致以衷心的感谢。此外，我们还要特别感谢国家自然科学基金委员会，尤其是地学部宋长青副主任、冷疏影处长以及国际合作局张英兰处长、张永涛处长等领导的关心和支持。本书的完成得到了有关专家同仁和领导的大量支持，在此我们特别感谢程国栋院士和傅伯杰院士对我们工作的指导和帮助。也感谢张英兰教授、李秀斌教授、肖洪浪研究员、张甘霖研究员在项目执行和科研工作中的指导和帮助。此外，我们特别感谢北京林业大学自然保护区学院、南方科技大学环境科学与工程学院、中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、内蒙古农业大学林学院、内蒙古大兴安岭国家森林公园生态系统野外科学研究所、内蒙古根河林业局等单位对我们的大力支持和帮助。

由于著者水平有限，加上水资源研究本身的复杂性，书中不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2016年3月于北京

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景的意义	1
1.2 蓝绿水的国内外研究现状	2
1.3 黑河流域水资源评价的研究状况	3
1.4 水文模型模拟蓝绿水研究进展	5
1.5 水资源短缺评价方法	6
1.6 基于水足迹理念评价水资源短缺评价	8
1.7 研究内容和技术路线	10
1.7.1 研究内容	10
1.7.2 技术路线	10
第 2 章 研究区概况与研究方法	12
2.1 研究区概况	12
2.1.1 气候水文特征	12
2.1.2 土壤植被状况	13
2.1.3 流域社会经济及水资源利用状况	13
2.2 研究方法	14
2.2.1 概念介绍	14
2.2.2 数据资料收集及处理方法	14
2.2.3 SWAT 模型模拟方法	16
2.2.4 统计分析方法	18
2.2.5 蓝绿水研究的时间范围和空间尺度	21
2.2.6 蓝绿水的计算方法	21
2.2.7 水足迹评价方法	22
第 3 章 自然条件下黑河流域蓝绿水的时空动态分布格局研究	28
3.1 研究背景	28
3.2 研究方法	28
3.3 自然条件下的蓝绿水时空分布格局	29
3.3.1 模型的率定和验证结果	29
3.3.2 黑河流域总的蓝绿水的变化	30
3.3.3 黑河流域上中下游蓝绿水动态	30
3.3.4 黑河流域绿水系数的时空分布	35
3.4 讨论与小结	36

第4章 人类活动影响下黑河流域蓝绿水的时空动态分布格局	37
4.1 研究背景	37
4.2 研究方法	38
4.3 人类活动对蓝绿水时空分布格局的影响	39
4.3.1 人类活动影响下黑河流域蓝绿水流的总体变化	39
4.3.2 不同情景下黑河流域蓝水流的变化	40
4.3.3 不同情景下黑河流域绿水流及绿水系数的变化	42
4.4 讨论与小结	45
第5章 黑河流域蓝绿水在典型年份的时空差异研究	48
5.1 典型年的确定方法	48
5.2 数据来源	50
5.3 不同典型年份蓝绿水时空差异	50
5.3.1 黑河流域典型干湿年份	50
5.3.2 典型年份的蓝绿水深度时空差异	53
5.3.3 典型年份绿水系数时空差异及蓝绿水总量变化	54
5.4 讨论与小结	57
第6章 黑河流域蓝绿水历史演变趋势分析	58
6.1 研究背景	58
6.2 研究方法	58
6.2.1 数据来源	59
6.2.2 趋势分析方法	59
6.3 蓝绿水历史演变趋势分析	60
6.3.1 黑河流域蓝绿水的变化趋势	60
6.3.2 黑河流域上中下游流域的蓝绿水变化趋势	60
6.3.3 黑河流域蓝绿水变化趋势的空间分布	62
6.3.4 未来变化趋势的预测	64
6.4 本章讨论与小结	65
第7章 黑河流域水资源短缺评价及可持续分析	69
7.1 研究背景	69
7.2 黑河流域水足迹评价	70
7.2.1 作物蓝绿水足迹	70
7.2.2 牲畜产品蓝绿水足迹	71
7.2.3 黑河流域蓝绿水足迹	72
7.2.4 黑河流域灰水足迹	73
7.3 黑河流域水资源短缺评价	74
7.4 黑河流域水资源可持续分析	74
7.5 本章讨论与小结	75
第8章 结论与展望	78

8.1 自然条件下黑河流域蓝绿水的时空分布.....	78
8.2 人类活动影响下的黑河流域蓝绿水的时空变化研究.....	78
8.3 黑河流域蓝绿水历史演变趋势分析.....	79
8.4 黑河流域蓝绿水在典型年份的时空差异.....	80
8.5 黑河流域蓝绿水资源的可持续性.....	80
8.6 蓝绿水研究的未来展望.....	81
8.7 政策建议.....	81
参考文献.....	83
附录 A 国家最新土地利用分类.....	95
附录 B 中国科学院土地利用分类.....	99

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景的意义

在自然界,所有有机体都需要淡水资源来保证其生存 (Oki and Kanae, 2006)。保证足够的淡水资源供给不仅对人类是必不可少的,对生态系统也是极其必要的。一般意义上的水资源是指水循环中能够被生态环境和人类社会所利用的淡水,其补给来源主要为大气降水,储存形式为地表水、地下水和土壤水,可通过水循环逐年得到更新 (程国栋等, 2006)。可更新淡水资源是保持陆地生态系统健康、人类粮食安全和生态系统安全的基础性自然资源和战略性资源。在 20 世纪,由降水形成的可再生的淡水资源总量基本保持不变,而人类用水需求却激增了 6 倍。因此出现了人类生活和生产用水与生态系统争水的情况,这一状况在中国尤为严峻 (Liu et al., 2013; 徐宗学、左德鹏, 2013)。人类生产生活用水挤占生态系统用水的现象频发,部分生态系统已发生严重退化。

水资源可以分为蓝水和绿水。蓝水主要是江、河、湖水及浅层地下水,绿水是指源于降水,储藏于非饱和土壤中并被植物吸收利用蒸腾的那部分水 (Falkenmark, 1995, 2003)。近年来,蓝绿水研究引发了科学界对水资源概念及评价的重新思考,逐步影响着人类对水资源管理的思维方式,已经成为水文水资源领域研究热点 (程国栋等, 2006)。Falkenmark (1995) 率先介绍了绿水的概念,并综述了绿水在陆地生态系统中的作用、绿水评价研究的进展、影响绿水流的因素、全球绿水资源状况和水安全等,提出应将绿水资源纳入水资源评价之中,重点开展蓝绿水资源综合评价、自然生态系统与粮食生产绿水均衡等研究,并重视绿水管理。蓝绿水的概念被提出以后,得到了水文学家、生态学家、农学家、环境学家以及诸多国际机构的广泛关注。综合评价绿水流和蓝水流也成为水资源研究的重要方向 (Falkenmark and Rockström, 2006; Schuol et al., 2008)。绿水流被定义为实际蒸散发,即流向大气圈的水汽流,包括农田、湿地、水面蒸发、植被截留等水汽流;蓝水流包括地表径流、壤中流 (坡向流)、地下径流三部分 (Schuol et al., 2008; Zang et al., 2012)。从全球水循环的角度来看,全球尺度上总降水的 65% 通过森林、草地、湿地、农田的蒸散返回到大气中,成为绿水流;仅有 35% 的降水储存于河流、湖泊以及含水层中,成为蓝水 (Falkenmark, 1995; 程国栋等, 2006)。

蓝水和绿水资源概念的出现不仅拓宽了水资源的内涵,而且为水资源管理提供了新的理论和思路 (程国栋等, 2006; 徐宗学、左德鹏, 2013)。如何定量评估蓝水和绿水资源成为水文资源研究领域最前治的科学问题之一。以往人们对流域或区域水循环的认识主要是以蓝水为主,而对流域生态系统和对人类极其重要的绿水却了解甚少。本研究拟选择干旱区典型内陆河流黑河为研究对象,以蓝绿水研究为核心,在流域尺度上分析蓝绿水空间分布格局、演变规律及驱动机制;基于水足迹理念,分析流域水资源短缺状况及水资源利用的可持续性,为国家内陆河流域综合管理、水安全、生态安全以及经济

可持续发展提供理论基础和科技支撑。

1.2 蓝绿水的国内外研究现状

传统的水资源评价与管理侧重于地表水和地下水,也就是“蓝水”,却忽略了生态系统和雨养农业的重要水源“绿水”(Falkenmark, 1995)。蓝绿水概念的提出,使水循环与生态学过程紧密联系起来,体现了植被与水文过程相互影响的关系。在国际上,蓝绿水的概念体系和评价方法仍处于初期发展阶段,但蓝绿水评价已在水文水资源领域逐渐得到高度重视(Rockström et al., 2010)。斯德哥尔摩国际水资源研究中心(Stockholm International Water Institute, SIWI)、联合国粮食农业组织(Food and Agriculture Organization, FAO)、国际水资源管理研究所(International Water Management Institute, IWMI)、国际农业发展基金(International Fund for Agricultural Development, IFAD)、全球水系统项目组(Globe Water System Project, GWSP)等国际机构和组织已经开始致力于绿水研究。

目前有关绿水的评价主要集中在全球或区域尺度上,重点评价绿水资源及其时空分布(Falkenmark Rockström, 2006; Rost et al., 2008; Liu Y. et al., 2009; Liu J. et al., 2010, 2013)。在全球尺度上,通过森林、草地、湿地等自然生态系统和农田生态系统蒸散返回到大气中的绿水流占陆地生态系统总降水的 61.1%,仅有不到 40%的降水储存在河流、湖泊以及浅层地下水层中,成为蓝水(Schiermeier, 2008)。绿水在全球生态系统和粮食生产中有着不可替代的作用,Liu 等(2009a)通过估算发现全球超过 80%的粮食生产依赖于绿水。而草地和森林生态系统的水的供给主要还是依赖于绿水。土地利用类型改变所导致的蓝绿水演变也成为研究热点(Jewitt et al., 2004; Gerten et al., 2005; Liu X. et al., 2009)。

目前,估算绿水资源量的方法基本可以分成以下三类:① 利用主要生态系统生产单位干物质所需要的蒸散量乘以初级生产力来评估绿水资源量。Postel 等(1996)采用净初级生产力数据,估算了全球雨养植被(天然森林、草地、人工林和雨养作物)蒸散量,并获得各主要土地利用类型的蒸散量,称其为绿水资源。② 采用水文或生态环境模型评估绿水流,将水资源划分为蓝水和绿水两部分。Jewitt 等(2004)采用农业集水区研究单元(ACRU)模型和水文土地利用变化(HYLUC)模型,估算了非洲南部 Mutale 流域九种土地利用情景下的蓝水绿水资源量。Schuol 等(2008)采用 ArcSWAT 模型并结合 SWAT-CUP 不确定性分析算法估算了非洲大陆的尺度蓝水绿水资源量。Faramarzi 等(2009)在估算了伊朗在水库运行条件下,模拟了月尺度蓝水绿水资源量,并考虑了不同灌溉措施对小麦产量的影响。Liu J.等(2009, 2010)采用生态系统过程模型(GEPIC),以高空间分辨率对全球农业生产所消耗的蓝绿水以及各种管理方式对蓝绿水消耗的影响进行评价。Rost 等(2008)将水文模型与生物地理学以及生物地球化学相耦合,从而估算绿水流,并开发出全球植被动态模型(Dynamic Global Vegetation Model, DGVM)。吴洪涛等(2009)使用 AvSWAT 模型在碧流河流域估算了绿水资源量。③根据典型生态系统实际蒸散量及空间信息估算绿水资源量。Rockström 和 Gordon(2001)采用林地、

草地以及湿地中各生物群系的覆盖面积乘以蒸散量,以及水分利用效率与作物产量之积来估算绿水流。在以上三种方法中,模型评价的方法由于成本低、易于进行大尺度高空分辨率研究、能进行情景分析等诸多原因而受到国际科学界越来越多的关注。

在国内,蓝绿水研究才刚刚起步,相关研究还十分匮乏。程国栋和赵文智(2006)率先详尽介绍了绿水的概念及其在陆地生态系统中的作用,并倡导我国科学家加强绿水相关研究。刘昌明和李云成(2006)基于绿水、蓝水及广义水资源的概念,阐明了绿水与生态系统用水、绿水与节水农业的关系。以上文献发表以后,绿水的概念逐步被国内学者所熟悉,绿水的评价方法和关键科学问题也逐步得到阐述(李小雁, 2008; 邱国玉, 2008)。最近,我国学者也开始在蓝绿水评价方面进行了一些探讨性的研究。Liu Y.等(2009)应用 GEPIC 模型,采用 0.5 弧度的空间分辨率(每个栅格大约为 50km×50km),对全球农田生态系统的蓝绿水进行了评价,得出全球农田生态系统 80% 以上的水分消耗源于绿水的结论;在此基础上, Liu Y.等(2009)将中国农田的绿水流分解为生产性绿水(植被蒸腾)和非生产性绿水(土壤蒸发),研究表明农田生态系统中生产性绿水约占总绿水流的 2/3。吴洪涛等(2009)使用 SWAT 水文模型在碧流河上游地区评估了绿水的时空分布。Liu X.等(2009)量化了中国北部老哈河流域由于土地利用及覆被变化所导致的蓝流水变化情况。吴锦奎(2005)、程玉菲(2007)、田辉(2009)、金晓媚(2009)、高洋洋(2009)、Li 等(2010)等利用卫星遥感做了对黑河流域蒸散发的影响研究,温志群等(2010)做了典型植被类型下的绿水循环过程模拟。目前国内外蓝绿水评估主要集中在全球或区域尺度上,精度不高且难以直接应用于实际流域水资源管理。在流域尺度上,蓝绿水资源及用水模式的集成研究还很少见。而且, Liu J.等(2009)、Liu Y.等(2009)研究发现人类活动(如灌溉)对蓝绿水演变存在很大的影响。

尽管学者们在蓝绿水演变与土地使用方面做过一些初步探讨性研究(Gerten et al., 2005; Liu Y. et al., 2009; 赵微, 2011)。但在流域尺度上,综合考虑变化环境下蓝绿水演变规律和机制的研究还不多见。总之,目前有关蓝绿水的研究无法在流域尺度上全面揭示气候-水文-生态-人类的相互关系,应用蓝绿水概念进行流域水资源管理尚缺乏充足的科学依据。

1.3 黑河流域水资源评价的研究状况

中国被联合国列为 13 个贫水国之一,占国土面积 1/3 的西北干旱内陆河地区由于先天性水资源短缺,加上不合理的水资源使用,使得水问题已经成为当地经济发展和生态保护的关键性问题(程国栋等, 2006)。人类活动对于干旱区水文循环和生态系统的影响相当突出,生态退化问题也比较严重。充分认识流域水循环过程是流域水资源管理的基础(夏军等, 2009)。但是目前对于干旱区内陆河流域水循环的认识仍然是以地表水为主,兼顾地下水,对流域生态系统及人类极其重要的绿水资源及其用水模式却了解甚少,急需形成流域尺度相对完整的蓝绿水综合评价的理论框架以支撑流域科学的研究。

黑河流域是典型的干旱区内陆河流域,具有干旱地区内陆河流域的典型特征(程国栋等, 2006)。黑河流域南部祁连山区至北部荒漠地带,形成了以水循环过程为纽带、

由高到低、从东南向西北的链状山地-绿洲-荒漠复合生态系统,呈现出西北地区内陆河流域典型的景观格局特征(程国栋等, 2006)。由于黑河中下游地区严重荒漠化,居延海干枯,并成为沙尘暴的主要来源地,由此形成了波及中国北方甚至东亚地区的强大沙尘暴,引起了中国政府的高度重视和国内外社会各界的广泛关注(程国栋等, 2006)。

黑河流域水文水资源研究在此背景下也取得了很大的进展。程国栋等(2006)估算了黑河流域的出山径流量、冰川融水径流量等蓝水水资源量。陈仁升等(2003)、韩杰等(2004)使用 TOPMODEL 对黑河上游山区流域的径流量进行了逐日模拟。王中根等(2003)、黄清华和张万昌(2004)尝试将分布式水文模型 SWAT 模型应用在黑河上游山区流域,并取得了较好的模拟效果。贾仰文等(2006a, 2006b)从水循环的机理着手,在考虑人工对水循环影响的基础上,以 ArcGIS 为处理平台,开发了黑河流域水循环系统的分布式模拟模型 WEP-HeiHe,将其应用于黑河上游模拟预测。李弘毅和王根绪(2008)应用融雪径流模型对黑河上游融雪期间径流量进行了模拟。杨明金等(2009)以黑河流域出山口莺落峡水文监测站 55 年天然径流序列为基础分析了流域出山径流年内变化规律。赵映东等(2009)使用统计方法分析了黑河产流区气温、降雨、蒸发、径流变化规律。王录仓等(2010)和郭巧玲等(2011)利用典型气象站近 50 年气温降雨资料,分析了黑河流域气候变化对地表径流的影响。周剑等(2009)应用遥感、地理信息系统和地统计学方法,分析了黑河流域中游土地利用变化对地下水位时空变异性的响应。张应华、仵彦卿(2009)做了黑河中游地区地下水补给机理的研究。赵建忠等(2010)对黑河中游地区地表地下水的转换做了总结和分析。贺缠生等(2009)应用分布式大流域径流模型评估气候变化对水文的影响和冰川退缩对中游和下游来水量的影响。Li 等(2011)通过对西北四河冰川冻土的退化研究表明,黑河流域的衰退系数达到了 58%,从而对该流域的水文过程产生了显著的影响。Wang(2011)运用遥感技术,结合 AIEM 模型,研究了黑河流域的土壤水和地表粗糙程度对水文的影响。Zhou 等(2011)利用遥感技术,结合 FEFLOW/MIKE11 模型,做了黑河中游地表地下水的转换研究。Li 等(2010)用四种气候模型,在三种不同情景下,结合 SWAT 模型,做了气候变化对黑河水资源的影响,并对黑河流域 2010~2039 年的水文气候变化做了预测。其结果表明,该流域的径流将有 -19.8%~37% 的变化,土壤水将有 -5.5%~17.2% 的变化,而蒸散发将增加 0.1%~5.9%。Li 等(2009, 2010)利用 SWAT 模型在黑河流域上游进行了模拟,并对模型的不确定性进行了分析。

总的来说,在黑河流域,蓝水依然是学者们研究的重点,而对于生态系统与人类极为重要的绿水研究还很匮乏。目前有关蓝绿水的研究无法在流域尺度上全面揭示气候-水文-生态-人类的相互关系,应用蓝绿水概念进行流域水资源管理尚缺乏充足的科学依据。在流域尺度上以蓝绿水研究为核心,认识干旱区内陆河流域蓝绿水空间分布格局,探讨蓝水、绿水的转化规律,对于解决干旱区关键水循环及生态系统科学问题,探讨流域水资源可持续利用和管理对策,实现流域可持续发展具有重要的理论和现实意义。

自 2010 年开始,国家自然科学基金委员会开始立项资助“黑河流域生态-水文过程集成研究”重大研究计划项目。本重大研究计划以我国黑河流域为典型研究区,从系统思路出发,通过建立我国内陆河流域科学观测-试验、数据-模拟研究平台,认识内陆河

流域生态系统与水文系统相互作用的过程和机理,建立流域生态-水文过程模型和水资源管理决策支持系统,提高内陆河流域水-生态-经济系统演变的综合分析预测预报能力,为国家内陆河流域水安全、生态安全以及经济的可持续发展提供基础理论和科技支撑。该计划共立项重大项目、重点项目和培育项目近百项,经过数百位学者的辛苦努力,在水文模型开发、水资源评估、地下水勘探、冰川和冻土水文过程、河岸林耗水的监测与保护、降水的来源与核算、生态-水文过程监测等方面产生了大量高水平的研究成果。“黑河流域蓝绿水评价”是在该重大研究计划框架下资助的一个项目,旨在综合考虑蓝水和绿水两种水源,更全面的评价水资源及其可持续利用情况。

1.4 水文模型模拟蓝绿水研究进展

为了在流域尺度上研究蓝绿水时空演变规律,需要应用水文模型对黑河流域的水文过程进行模拟。从目前掌握的情况来看,由美国农业部开发的半分布式水文模型 SWAT (Arnold et al., 2005) 能够用于流域水文循环的模拟与预测,近年来在国内外得到广泛应用(庞靖鹏等, 2007; Zhang et al., 2008)。SWAT 模型是目前世界上应用较为广泛的模型之一,主要用于对水资源分布及其变化进行评价,也可以对关键区非点源污染进行识别和模拟,其设计模块较为全面和成熟,能够较好地满足使用者的需要(Gassman et al., 2010)。SWAT 模型在流域尺度进行水量评价、地表径流模拟等方面得到了广泛应用(郝芳华等, 2003)。目前国内大量研究采用 SWAT 模型模拟气候条件和土地利用类型变化对流域水文循环过程的影响,如海河流域(王中根等, 2008; 李建新等, 2010), 黄河流域(程磊等, 2009; 李志等, 2010), 淮河流域(竹磊磊等, 2010), 潮河流域(郭军庭, 2012)。SWAT 模型可以结合其他模型或者模型的模块来模拟和评价气候变化和人类活动对某一流域水文过程的影响。Stonefelt 等(2000)和 Fontaine (2001)采用 SWAT 模型耦合气候变化情景,模拟研究 CO_2 等浓度变化对植被生长以及径流量的影响。SWAT 模型在河流产沙量、农田农药输移、流域和灌区非点源污染等方面也得到了广泛应用(王晓燕等, 2008; 张永勇等, 2009; 孙永亮等, 2010)。

SWAT 模型输入参数的率定与验证的过程会直接影响到模型模拟结果优劣。评价 SWAT 模型模拟的精确程度通常采用决定系数(R^2)和纳什系数(E_{ns})。国内外大量研究对 SWAT 模型的参数敏感性分析和参数率定进行了改善,并获得了较为理想的结果(黄清华、张万昌, 2010)。Gassman 等(2007)在总结 37 个应用 SWAT 模型模拟污染物损失的研究案例后指出:大部分 SWAT 模型的模拟研究都是对水文过程模拟的精度好于对污染物模拟的精度。同时,该模型对日尺度模拟并不理想,主要原因是日尺度的输入数据不能充分代表这些流域特征。SWAT 模型在实践应用过程中不断得到改进和完善。从 20 世纪 90 年代的 SWAT 94.2 到 SWAT 2009, SWAT 模型经历了多次修改,每次修改都进行了完善或者增加了新功能。Eckhardt 等(2002)针对德国中部山区坡陡、基岩厚、土壤浅及地下水占径流的比例较小等特点,修正 SWAT 模型中渗透和壤中流的计算公式,较好模拟了该地区以壤中流为主的产流过程。SWAT 模型基结合 ArcviewGIS 平台的 AvSWAT-2000 和 AvSWAT-2005,还有基于 ArcGIS 平台的 ArcSWAT 都是在同

样结构下运行 SWAT 模型,使其具备了非常强大的空间分析与处理功能。综上所述, SWAT 模型经过国内外科学家 30 多年的发展与应用,模型的实用性和精确性已经在世界的不同流域和地区得到推广和验证。

国际和国内都存在专门针对蓝绿水评价的应用案例 (Schuol et al., 2008; Faramarzi et al., 2009; 吴洪涛等, 2009)。SWAT 模型首先根据地形将流域分成若干子流域,然后根据土壤特性 (魏怀斌等, 2007) 与土地利用情况将子流域分成若干水文响应单元 (Hydrologic Response Unit, HRU)。SWAT 以日为时间步长,以水文响应单元土壤水平衡为基础,模拟地表径流、土壤蒸发、植被蒸腾、浅层与深层地下水渗漏等水文过程。地表径流采用修正的径流曲线法计算 (SCS curve number method), 潜在蒸发量可根据数据获取情况选择 Penman、Penman-Monteith 或 Hargreaves 等方法计算 (Arnold et al., 1998)。其他水文过程的计算方法在 Arnold 等 (2005) 著作中有详细介绍。本研究的重点是将 SWAT 模型应用到干旱区的内陆河黑河流域,并进行蓝绿水时空分布格局分析 (包括蓝绿水资源的空间分布和不同典型年份蓝绿水特征分析)。SWAT 模型能够通过产水量 (特定时间内进入河道的水量) 和地下径流之和来评价蓝水流量,通过实际植被蒸腾和土壤蒸发来评价绿水流量,通过一段时间后贮存在土壤层中的水量来评价绿水贮存量。地形、土壤、气象、土地利用、管理方式、水利工程等的空间异质性决定了蓝绿水空间分布,不同历史时期的气象参数等决定了蓝绿水在不同典型年份的特征差异。通过收集黑河流域以上信息,建立黑河流域基础数据库,并将其应用 SWAT 模型作为输入数据,以此为基础分析蓝绿水空间分布格局及不同典型年份蓝绿水特征。

1.5 水资源短缺评价依法

国际上水资源短缺评价方法通常以当地水资源数量和用水量为基础,主要有四类评价方法。

第一种方法为 Falkenmark 指标法,由瑞典科学家 Falkenmark 教授 (1995) 首先提出。该方法在核算人均水资源需求量的基础上,设定几个水资源短缺的阈值:人均水资源量小于 $1700 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 为水资源紧缺;小于 $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 为水资源短缺;小于 $500 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 为绝对水资源短缺。此方法易于理解,所需数据也容易获得,因此在水资源评价初期得到了广泛的应用。但该方法只考虑到地区的水资源量,并不能反映水利基础设施对水资源短缺的缓解能力,也不能反映不同地区由于气候条件、生活方式等因素差异导致的水资源需求量的变化。

第二种方法是將水资源量与用水情况相比较以评价水资源短缺。典型代表为 Alcamo 等 (2000, 2003) 采用的紧迫系数 (criticality ratio) 法,即用水量与可更新水资源总量的比值。这类方法在水资源评价中得到广泛的应用,如 Vörösmarty 等 (2000) 在 Science 上发表文章,以此种方法为基础,采用 0.5 弧度的空间分辨率评价了全球水资源量及水资源短缺情况。Oki 和 Kanae (2006) 在 Science 上发表文章,采用类似的方法评价了全球水资源现状及未来水资源短缺情况,并预测在最坏的情境下,未来会有 2/3 的人口面

临不同程度的水资源短缺。但是,该方法仍然存在很大的局限性,如没有考虑在现有水资源条件下,有多少水是可以给人类利用的;计算采取的用水量数据并不代表水消耗量数据;没有考虑社会压力等因素。

第三种方法由国际水资源管理研究所(IWMI)提出,在评价水资源短缺时考虑人类需水量与水资源量的比重以及实际供水能力,将水资源短缺分为物理型缺水(physical water scarcity)和经济型缺水(economic water scarcity)。物理型缺水指当地的水资源量少,无法满足和适应经济发展而造成的水资源紧张。经济型缺水指当地水资源量充沛,但是需要进行水利设施的投资建设,才能够开发和利用水资源。该评价方法较为复杂,难以获得全面的数据,且这种方法只适用于国家层面的评价,难以进行小尺度的水资源评价。

第四种方法是 Sullivan 等(2003)开发的水贫穷指标法(water poverty index),既反映水资源数量和实际供水能力,又考虑用水的生态效应(Sullivan, 2002)。指标考虑了水的可获取性、水资源量、用水、水资源管理能力、环境影响等因素。同样,这种方法较为复杂,适合于国家尺度的评价。

在水资源短缺评价体系中,无论是国际还是国内,都很少把水质型水资源短缺,即水污染作为评价体系中的一项重要参考指标(Falkenmark et al., 1995; Vörösmarty et al., 2000; Oki and Kanae, 2006)。水资源短缺评价往往只重视数量上的短缺,而将水质问题单独考虑,水量水质联合评价方法尚未成熟。然而,水量短缺和水质恶化已经同时成为了许多地区和国家可持续发展的制约性因素(Vörösmarty et al., 2000; Oki and Kanae, 2006)。例如,中国被联合国列为13个贫水国之一,先天性水资源短缺。随着人口增长和社会经济的发展,水资源受到各种污染,致使水质恶化。水污染导致的水质型缺水与资源性缺水彼此影响,使我国缺水状况更加严重。单纯的水量评价和不考虑水质的水资源短缺评价无法识别水质污染对可利用水资源量的影响。我国传统的水污染评价指标往往通过划分不同水质类型,以国家环境保护总局(现中华人民共和国环境保护部)颁布的《地表水环境质量标准》作为依据,评价水资源质量的状况。如在各地的水资源公报中,最常用的方法是评价满足不同水质标准的河流长度、湖泊面积、水库座数、地下水监测井数等。这种方法能够评价水体水质的状况,但不能够反映不同人类活动对于湿地水质恶化的影响程度。水生态环境承载力是另一项反映水体纳污能力的指标,旨在量化一定的环境目标和水文条件下,水体能够容纳的最大排放负荷或污染物量。环境承载力能够反映湿地水质净化能力,但不能够定量的解释一定排污量对水质净化能力的影响。除此之外,我国传统的水污染评价方法还有综合污染指数法、模糊数学法、人工神经网络分析法和热力学方法等(付国伟、程声通, 1985; 李相虎等, 2004),同样,这些方法也主要是评价受污染水体的污染程度,而对于水资源数量与质量相互影响的关系研究不多。

国际上越来越重视水质水量相结合的研究,我国在这方面的工作也逐渐展开。例如,夏军等(2006)构建了水量水质的联合评价方法,用以评价地表来用水情况。方法的主

要特色是以单元和复合系统的水量水质过程对应关系及空间分布对应关系为基础,评价总水资源中水质的分布情况。夏星辉等(2005)建立了流域的水量与水质联合评价方法,并应用在黄河流域上,提出了水资源功能容量与水资源功能亏缺的概念。研究将河流的天然径流量分为三类,从河道中抽取用于工业、农业和生活的水,流向海洋或其他外流域的水,储存于河道的水。若实际水质高于水资源功能要求的水质标准,表明水体还能够满足更高的水资源功能要求,具有水资源功能容量;若实际的水质低于水资源功能要求的水质标准,表明水体存在水资源功能亏缺。该评价方法以社会经济系统对水资源的需求为基础,评价水资源总量中能够被社会利用的水量,难以反映河道生态需水的状况。王西琴等(2006)从自然和社会水循环,以及河流水量水质(如污径比)出发,建立了生态需水综合评价方法,并应用在辽河流域。这些方法虽然较为简单,但是需要获取非常全面的数据量,张永勇等(2009)以 SWAT 模型为基础,采用分布式水量水质耦合模型,提出了基于水循环过程的水量水质联合评价方法,并应用在海河流域地区。但是,这些方法主要应用在流域尺度,尚未形成能够适用于多尺度水资源短缺评价的普遍方法。尽管国内外在水量水质联合评价方面有了很大的进展,目前水资源短缺的评价仍然是以蓝水资源量为主,水质型缺水往往停留在定性评价上,无法满足同时考虑水量及水质的综合性缺水定量评价的需求。

1.6 基于水足迹理念评价水资源短缺评价

水足迹是由荷兰屯特大学 Hoekstra 教授等人于 2002 年提出的一个关于水资源消耗指标的概念(Hoekstra et al., 2003),定义为人类生产和消费过程中消耗的淡水资源总量,包括直接用水量 and 间接用水量(Hoekstra and Hung, 2002)水足迹评价作为一种分析工具,能够很好地描述人类活动和水资源短缺间的紧密关系,同时也为综合性的水资源管理提供了一种创新的方法(Hoekstra et al., 2011)。它是一个体现消耗的水量、水源类型以及污染量和污染类型的多层面指标,其所有组成部分都明确了水消耗和污染发生的时间和地点。

水足迹分为蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹。蓝水足迹指生产产品或服务过程中消耗的蓝水资源,即地表水和地下水量。绿水足迹指人类生产过程中消耗的绿水资源。灰水指人类生产过程中吸纳了污染物的水(Hoekstra et al., 2011)。灰水足迹的概念由 Hoekstra 和 Chapagain (2008) 于 2008 年首次提出,经过水足迹网络的灰水足迹工作小组(Zarate et al., 2010)的不断完善,定义为以自然本底浓度和现有的水质环境标准为基准,将一定的污染负荷吸收同化所需的淡水体积。灰水足迹实现了从水量的角度评价水污染程度的目的,能够更直观的反映水污染对可用水资源量的影响。

国内外的水足迹研究主要集中在以下五个层面:过程、产品、部门、行政区域以及全球。在过程层面,Chapagain 等(2006)计算了棉花在不同生产过程中的水足迹。在产品层面,Mekonnen 和 Hoekstra (2011)评价了 1996~2005 年间全球 126 种作物的蓝、绿和灰水足迹;比萨(Aldaya and Hoekstra, 2009)、咖啡和茶叶(Chapagain and Hoekstra, 2007)等产品的水足迹也都有学者进行了核算。在部门层面,Aldaya 等(2010)计算了

西班牙农业、工业和生活部门的水足迹, 并发现西班牙水资源短缺的主要原因是农业部门中水资源的不合理分配和管理。在国家层面, 中国 (Ma et al., 2006; Liu and Savenije, 2008)、印度 (Kampman et al., 2008)、印度尼西亚 (Bulsink et al., 2010)、荷兰 (Van Oel et al., 2009)、英国 (Chapagain and Orr, 2008) 及法国 (Ercin et al., 2012) 等国家也都有相关的水足迹评价研究。在全球层面, Hoekstra 和 Chapagain (2007), Hoekstra 和 Mekonnen (2012a) 等对人类活动消耗的产品和服务的水足迹进行了核算和评价。尽管目前来看, 越来越多的学者都在开展水足迹的相关研究, 但是, 因为流域尺度统计数据的短缺, 在流域层面进行的水足迹研究还相对较少 (Zhao et al., 2010; UNEP, 2011), 尤其是处于干旱、半干旱区域的流域。评价流域尺度的水足迹是非常必要的, 它不仅是理解人类活动对自然水循环影响的重要步骤和过程, 同时也是进行水资源综合管理和有效利用的基础。

在水足迹方法中, 灰水足迹为定量评价水质型水资源短缺提供了新的方法。在国际上, 灰水足迹的概念体系和评价方法仍处于初期发展阶段, 但灰水足迹理念已在水文水资源和环境科学领域得到了高度重视, 并引起包括国际水足迹网络、联合国环境署、联合国粮农组织等多个国际组织的广泛关注。目前国内外的灰水足迹研究主要集中在两个方面, 一是评价农业产品的灰水足迹, 如 Chapagain 和 Hoekstra (2007) 计算了 2000~2004 年全球稻谷的蓝、绿和灰水足迹, 从生产和消费的角度对其进行了评价, 结果表明降低灰水足迹的途径主要是减少田间作物的化肥和杀虫剂的施用量、提高水资源的有效使用等。二是评价工业产品的灰水足迹, 如 Ercin 等 (2011) 研究了一种盛在 0.5L PET (聚对苯二甲酸乙二醇酯) 瓶中的假想的含糖碳酸饮料的水足迹, 研究发现, 影响该假想产品水足迹的主要因素是产品的蓝水足迹和灰水足迹。由于产品的原材料 (如糖、咖啡因等) 在生产过程中也会由于使用化肥和杀虫剂而造成水体污染, 因此选用的原材料的生产地和生产方式的差异, 导致了最终产品的灰水足迹的差异。我国学者在灰水足迹方面已经开始尝试一些探索性的研究。盖力强等 (2010) 借鉴灰水足迹的概念计算和评价了华北平原小麦和玉米两种作物的灰水足迹, 并提出在评价一个国家和地区的水资源利用状况时, 需要考虑肥料和农药对水资源污染的影响。何浩等 (2010) 研究了 1960~2008 年湖南省水稻的水足迹变化, 结果显示水稻灰水足迹比重呈现明显上升趋势, 污染正在加剧。目前我国有关灰水足迹的研究, 还处于学习模仿国外先进理念与计算方法的初级阶段, 有关灰水足迹的研究尚未形成完整的科学体系, 更不具备以灰水足迹指导水资源合理利用和可持续管理的条件。整体来看, 在区域和流域尺度, 基于灰水足迹, 定量评价水污染引起的水质型水资源短缺的研究尚不存在。

水足迹作为一种分析和评价工具, 能够很好地将人类活动与淡水资源相联系, 定量评价人类用水、耗水、需水以及水污染状况。但是, 水足迹作为一个新概念被引入水资源短缺评价体系的时间还非常短, 采用水足迹评价工具来综合分析当地水量型水资源短缺和水质型水资源短缺的研究还非常少。