

DOI: 10.5846/stxb201908101677

夏沛, 宋世雄, 刘志锋, 何春阳, 王一航. 中国内陆河流域城市景观过程对涉水生态系统服务的影响评价研究进展. 生态学报, 2020, 40(17): 5884-5893.

Xia P, Song S X, Liu Z F, He C Y, Wang Y H. Research progress of evaluation on the impacts of urban landscape dynamics on water-related ecosystem services in inland river basin, China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(17): 5884-5893.

中国内陆河流域城市景观过程对涉水生态系统服务的影响评价研究进展

夏 沛^{1,2}, 宋世雄^{1,2}, 刘志锋^{1,2,*}, 何春阳^{1,2}, 王一航^{1,2}

1 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 人与环境系统可持续研究中心, 北京 100875

2 北京师范大学地理科学学部自然资源学院, 土地资源与区域发展研究中心, 北京 100875

摘要: 掌握我国内陆河流域城市景观过程对涉水生态系统服务的影响评价研究现状, 对于提高内陆河流域人类福祉和促进区域城市可持续发展具有重要意义。系统综述了我国内陆河流域城市景观过程对涉水生态系统服务的影响评价。结果表明: 相关中英文论文数量与被引频次整体呈上升趋势, 研究对象侧重于水源涵养、水质净化和淡水供给服务, 研究方法主要包括价值量评价法和物质质量评价法, 研究结果则表明城市景观过程已造成涉水生态系统服务总量下降和空间异质性增加, 同时还加剧了服务间的权衡关系。相关研究为深入理解内陆河流域城市景观过程对涉水生态系统服务的影响奠定了良好基础, 但在揭示影响机理、模拟未来影响、分析服务权衡、协同与供需流关系以及探索可持续的内陆河流域综合优化管理等方面还存在不足。因此, 未来应基于“机理-过程-可持续性”的思路建立内陆河流域城市景观过程对涉水生态系统服务影响评价框架, 开展综合评价研究, 为我国内陆河流域城市与山水林田湖草综合优化管理提供帮助。

关键词: 内陆河流域; 城市景观过程; 涉水生态系统服务; 系统综述; 旱区

Research progress of evaluation on the impacts of urban landscape dynamics on water-related ecosystem services in inland river basin, China

XIA Pei^{1,2}, SONG Shixiong^{1,2}, LIU Zhifeng^{1,2,*}, HE Chunyang^{1,2}, WANG Yihang^{1,2}

1 Center for Human-Environment System Sustainability, State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 School of Natural Resources, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: To improve the human well-being and promote the sustainable development of cities in inland river basins (IRBs) in China, it is important to summarize the current progress of the impacts of urban landscape dynamics (ULD) on the water-related ecosystem services (WES) in the IRBs. This paper systematically reviewed the progress of relevant research. The results showed that, in general, the number of relevant papers and the citations increased. In terms of research objects, the existing research mainly focused on water retention, water quality purification and water supply. The methods mainly included value assessment methods and physical assessment methods. In addition, the current research released that the ULD has caused the decline of the total amount of WES and the increase of spatial heterogeneity of WES, as well as the intensification of the trade-offs of WES. These studies have laid a good foundation for understanding the impacts of ULD on WES in the IRBs. However, existing studies still have deficiencies in revealing the mechanism of

基金项目: 第二次青藏高原综合考察研究(2019QZKK0405); 国家自然科学基金面上项目(41871185, 41971270, 41971271)

收稿日期: 2019-08-10; **网络出版日期:** 2020-07-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Zhifeng.Liu@bnu.edu.cn

impacts, simulating future impacts, analyzing trade-offs, synergies and supply-demand flows of WES, and exploring sustainable management in the IRBs. Therefore, it is necessary to establish a framework based on the principle of “mechanism, process, and sustainability” for evaluating the impacts of ULD on WES in IRBs in the future, and carry out integrated evaluation research, which is beneficial to the comprehensive and optimized management of the cities, mountains, rivers, forests, farmlands, lakes and grasslands in IRBs, China.

Key Words: inland river basins; urban landscape dynamics; water-related ecosystem services; systematic review; drylands

内陆河是在陆地内部干燥地区,河水沿途消失于沙漠或注入内陆湖泊的河流^[1-2],内陆河流域是内陆河所在的流域。我国的内陆河流域主要分布于西北地区(图1),介于东经73°40′—120°03′,北纬33°09′—48°00′,覆盖面积约250万km²,约占全国陆地总面积的1/4^[3]。内陆河流域面临着水资源短缺、生态环境脆弱、对气候变化敏感和贫困人口集中等问题,是影响我国可持续发展的关键区域^[4-5]。涉水生态系统服务是指与水文过程密切相关的生态系统服务^[6-7],是维持区域人类福祉和促进内陆河流域可持续发展的重要基础^[8-11]。城市景观过程是指非城市土地转变为城市土地的过程,是城市化进程中主要的土地利用/覆盖变化过程^[12-13],它在促进社会经济发展和提高人类福祉的同时,也直接或间接地对涉水生态系统服务造成了严重的影响,为区域可持续发展带来了挑战^[14-15]。近年来,伴随着“西部大开发”和“国家新型城镇化规划”等战略以及“一带一路”倡议的提出和实施,我国内陆河流域正在并将经历快速的城市景观过程^[16-17],这会进一步加剧对区域涉水生态系统服务的影响。因此,全面认识我国内陆河流域城市景观过程对涉水生态系统服务的影响,对提高区域人类福祉和促进流域城市可持续发展具有重要的意义。综述相关研究有利于全面认识内陆河流域城市景观过程对涉水生态系统服务之间的影响关系,为内陆河流域城市可持续发展提供有效支撑。

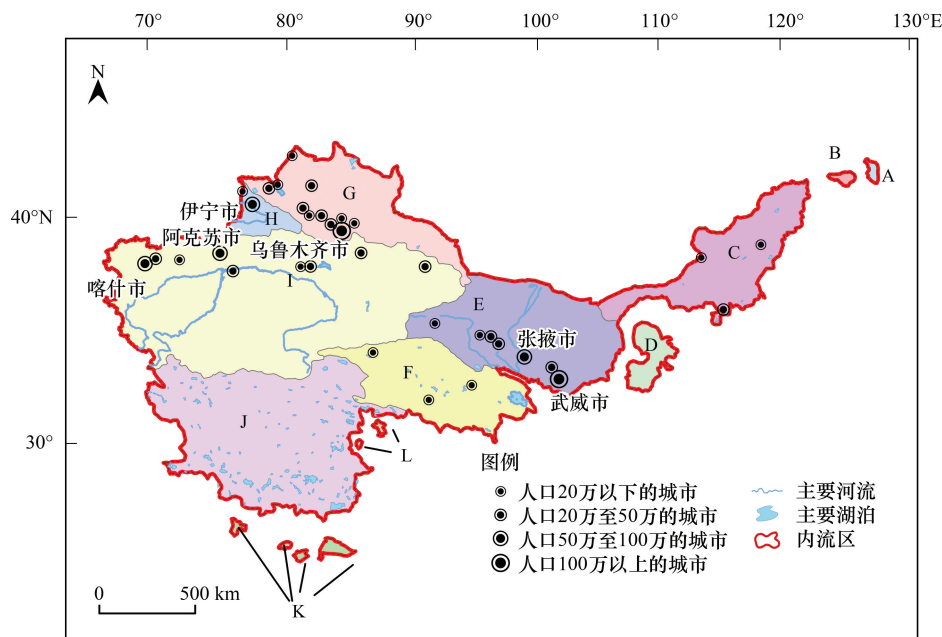


图1 我国内陆河流域的空间分布范围

Fig.1 The distribution of the inland river basins in China

A: 乌裕尔河内流区、B: 白城內流区、C: 内蒙古內流区、D: 鄂尔多斯內流区、E: 河西走廊-阿拉善內流区(包括石羊河流域、黑河流域和疏勒河流域)、F: 柴达木內流区(包括青海湖流域、柴达木河流域、格尔木河流域和哈拉湖流域)、G: 准噶尔內流区(包括额敏河流域、乌伦古河流域、玛纳斯河流域和艾比湖流域)、H: 伊犁河內流区(包括伊犁河流域)、I: 塔里木內流区(包括塔里木河流域、博斯腾湖流域和艾丁湖流域)、J: 羌塘高原內流区、K: 藏南內流区、L: 长江上游內流区。图中标识的城市为人口大于50万的城市

目前,已有学者综述了内陆河流域城市景观过程以及涉水生态系统服务的研究进展,为深入理解我国内陆河流域城市景观过程对涉水生态系统服务的影响奠定了良好基础。例如,巩杰等^[18]综述了黑河流域土地利用/覆盖变化的研究进展,发现城市景观过程是黑河流域土地利用/覆盖变化的重要形式,同时也是推动其他土地利用/覆盖变化的主要原因。程磊磊等^[19]综述了我国荒漠地区的生态系统服务价值评估研究,发现已有研究主要关注土壤保持和水源涵养这两类涉水生态系统服务,同时指出评价方法较为粗糙,亟需系统的评价方式。但目前仍缺乏内陆河流域城市景观过程对涉水生态系统服务影响评价研究的综述。

本文的研究目的是综述我国内陆河流域城市景观过程对涉水生态系统服务影响研究的进展。首先,基于系统综述法^[20]检索和筛选相关文献。然后,从论文数量、引用频次、发表期刊、研究区、采用的评价方法、评价对象和主要研究发现等方面对筛选出的文献进行综合分析。最后,归纳和总结现有研究不足和未来研究的方向,进而提出内陆河流域城市景观过程对涉水生态系统服务影响研究框架。

1 城市景观过程对涉水生态系统服务的影响机理

涉水生态系统服务是指与水文过程密切相关的生态系统服务,主要包括淡水供给、水源涵养、土壤保持、洪水调节、水质净化和近水休憩等服务^[6-7]。其中,淡水供给服务指生态系统对淡水资源的供给服务^[21],水源涵养服务指在一定时间和空间范围内,生态系统保持水分的过程和能力^[22],土壤保持服务指生态系统防止土壤流失的侵蚀调控能力以及对泥沙的储积保持能力^[23-24],洪水调节服务指通过生态系统影响洪水频率、强度和持续时间等,对可能造成人类损失的水文现象所发挥的预防和减缓等作用的服务^[25],水质净化服务是指生态系统通过自然生态过程及物质循环作用,对水体中的营养物质及有毒、有害物质进行吸附、沉淀和转移^[26],近水休憩服务指与水有关的自然风景欣赏和游憩^[21]。由于内陆河流域生态环境脆弱,涉水生态系统服务面临严重的威胁。研究表明,内陆河流域目前面临洪水风险增加、洪灾范围扩大^[27],干旱发生频率较高^[28-29],沙漠化严重、水土流失加剧^[30],水污染现象日益严重^[31]等问题,因此涉水生态系统服务对内陆河流域生态平衡维持与生态环境保护具有重要意义^[32-34](表1)。

我国内陆河流域地跨乌鲁木齐、吐鲁番、哈密、克拉玛依、武威、张掖、酒泉、金昌、嘉峪关和乌兰察布等10个地级市以及阿拉山口、铁门关、二连浩特、霍尔果斯、五家渠、格尔木、敦煌、塔城、奎屯、玉门、阜康、图木舒克、乌苏、阿拉尔、喀什、伊宁、阿克苏、库尔勒、石河子、和田、昌吉、阿图什、博乐、德令哈、锡林浩特和茫崖等26个县级市(图1)。其中,人口100万以上的城市有1个,人口50万至100万的城市有4个,人口20万至50万的城市有16个,人口20万以下的城市有15个。

内陆河流域正在经历快速城市景观过程。基于人口普查数据,内陆河流域城镇人口数量由2000年的966万增加到2010年的1413万,增加了45.2%;城镇化率从2000年的32.2%上升到2010年的42.0%。基于He等^[38]发布的城市土地数据,内陆河流域城市土地面积由2000年的1663km²增长到2016年的2545 km²,增长了53.0%。

研究表明,内陆河流域城市景观过程会通过改变土地利用/覆盖、改变水资源供需平衡以及增加污染物和温室气体排放量等方式改变生态水文过程,进而对涉水生态系统服务的总量、空间格局、权衡协同关系和供需流产生影响(图2)。首先,内陆河城市景观过程会通过改变流域内土地利用/覆盖影响涉水生态系统服务^[39]。城市景观过程造成的土地利用/覆盖变化会导致湿地、林地和草地等自然生态系统和农田生态系统的丧失和破碎化,同时影响当地生态系统的结构和功能,进而导致涉水生态系统服务总量、格局和供需流变化^[40]。其次,内陆河城市景观过程会引起人口增长和产业结构转变,进而导致水资源需求增加,对流域内涉水生态系统服务供需流产生影响^[41-43]。最后,内陆河城市景观过程会引起人类生活方式和生产方式的转变,加剧污染物和温室气体的产生和排放,进而影响区域气候和生物地球化学循环,并通过径流对流域内的涉水生态系统服务格局、权衡协同关系和供需流产生影响^[14,44-45]。

表 1 主要涉水生态系统服务的供需流及其与城市景观过程的关系

Table 1 The supplies, demands and flows of major water-related ecosystem services and their relationships with urban landscape dynamics

涉水生态系统服务 Water-related ecosystem services	生态系统服务类型 Types of ecosystem services	供给区位置 Supply area location	需求区位置 Demand area location	服务流 Flows	城市景观过程的影响 Effects of urban landscape dynamics	内陆河流域涉水生态系统服务的特点 Characteristics of water-related ecosystem services in inland river basins
淡水供给 Fresh water supply	供给服务	湿地(河流、湖泊、水库)、冰川、地下水	城市、农村、灌溉农田	取水	改变局地蒸散量,增加淡水需求,改变径流过程	区域干旱少雨,淡水供给服务是区域关键服务但总量较低 ^[32]
水源涵养 Water retention	调节服务	耕地、林地、草地、湿地、裸地	耕地、林地、草地、湿地	通过径流和下渗补充地下水	改变局地水循环,减少下渗,改变径流过程	区域水源涵养空间异质性大,对于补给地下水具有重要作用 ^[33]
土壤保持 Soil conservation	调节服务	耕地、林地、草地、湿地	湿地(河流、湖泊、水库)	减少径流中的泥沙含量	影响服务供给,改变径流过程	区域常受到水蚀、冻融和风蚀复合作用,上游土壤保持服务是维持中下游生活生产安全的重要保障 ^[34]
洪水调节 Flood regulation	调节服务	耕地、林地、草地、湿地	城市、农村	削减洪峰,控制流量	增加暴露性,改变径流过程	区域上游春季融雪和夏季降水常引发洪水,维持和改善洪水调节服务是保障中下游生产生活的关键 ^[35]
水质净化 Water purification	调节服务	湿地、林地、草地	湿地(河流、湖泊、水库)	径流过程中去除污染物	导致局地服务供给能力丧失,增加污染物排放量,改变径流过程	区域生物多样性和生产力低、生态系统对水质敏感,而且水流最终注入沙漠或内陆河,导致污染物持续累积 ^[36]
近水休憩 Water-related recreation	文化服务	湿地	旅游基础设施、城市、农村	游客来访	增加游客人数,改变径流过程	旅游业是区域重要的经济来源,但区域生态环境脆弱、易受到旅游的影响 ^[37]

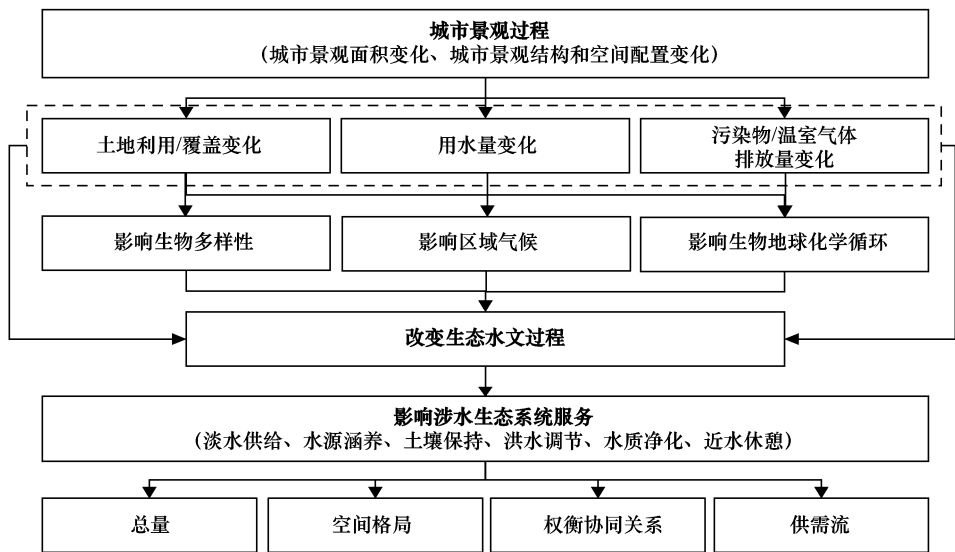


图 2 城市景观过程对涉水生态系统服务影响原理

Fig.2 The mechanisms of the impacts of urban landscape dynamics on water-related ecosystem services

2 文献基本特征

首先,分别在 Web of Science 的核心合集和中国知网的中文核心、CSSCI (Chinese Social Sciences Citation

Index)、CSCD (Chinese Science Citation Database) 数据库中,以主题检索方式,检索时间 2019 年 12 月 8 日检索内陆河流域城市景观过程的相关英文和中文论文,得到英文论文 114 篇,中文论文 590 篇,检索内陆河流域生态系统服务的相关英文和中文论文,得到英文论文 96 篇,中文论文 249 篇。通过阅读相关文献,按以下条件筛选文献:第一,研究区位于中国内陆河流域范围之内;第二,评价了城市景观过程对涉水生态系统服务的影响。最后得到英文文献 23 篇,中文文献 61 篇。

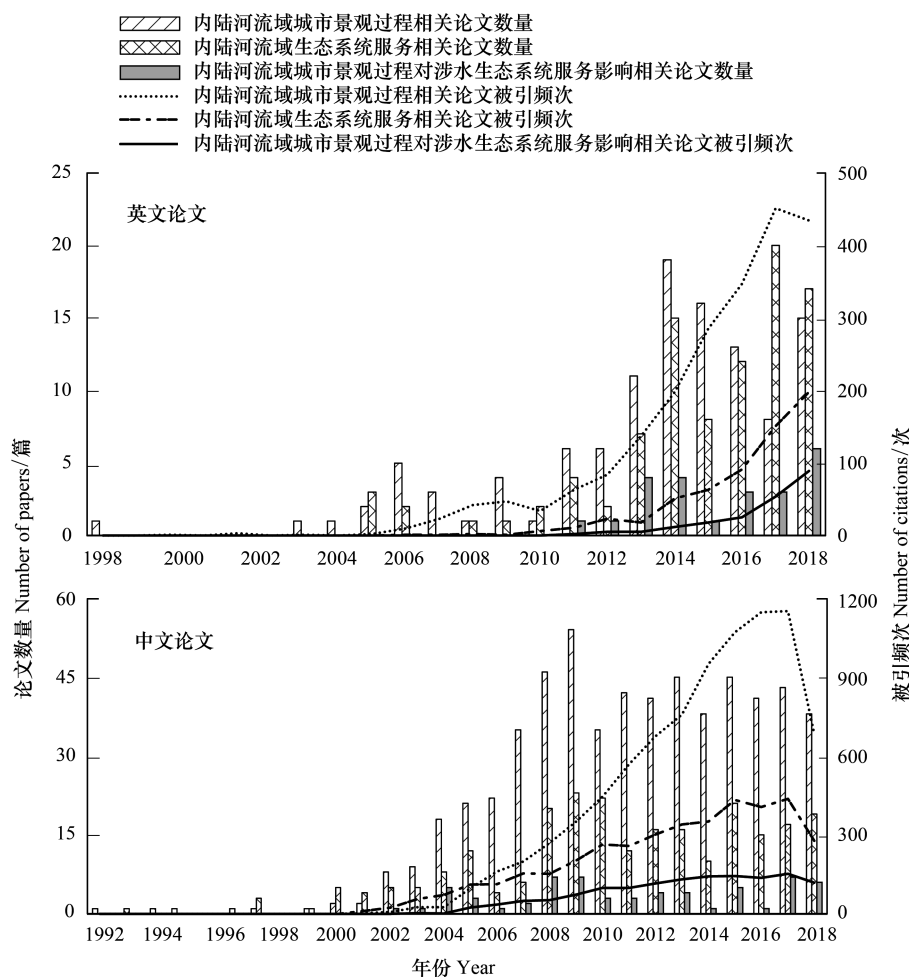


图3 相关论文发文数量与被引频次

Fig.3 Number and citation of relevant papers

我国内陆河流域城市景观过程对涉水生态系统服务影响的相关中英文论文数量和被引频次均呈上升趋势(图3)。相关英文论文主要发表在“*Physics and Chemistry of the Earth*”“*Sustainability*”和“*Ecosystem Services*”,相关中文论文主要发表在《生态学报》、《干旱区资源与环境》和《干旱区研究》。中国科学院地理科学与资源研究所相关论文发表数量最高,达到18篇,发文量超过10篇的还有西北师范大学、中国科学院新疆生态与地理研究所和中国科学院寒区旱区环境与工程研究所。相关研究关注的热点流域主要有黑河流域、石羊河流域、玛纳斯河流域和塔里木河流域,相关论文分别为33、13、10和9篇。

3 研究进展

3.1 主要评价方法

价值量法和物质质量法是评价内陆河流域城市景观过程对涉水生态系统服务影响的主要方法(表2)。价值量法指从货币价值量的角度对城市景观过程影响进行定量评价,进而评估城市景观过程对涉水生态系统服

务^[24]。例如,陈忠生等^[46]使用价值量评估法评估了和田河流域城市景观过程造成的土地利用变化和人口增长对水源涵养等服务价值的影响;崔志杰等^[47]使用价值量评估法评估了黑河流域酒泉-金塔盆地城市景观过程对水源涵养等服务价值量的影响;Eziz 等^[48]使用价值量法评估了塔里木河流域的克里雅绿洲城市景观过程对淡水供给和土壤保持等服务的影响。价值量评估法可以直观地体现城市景观过程对涉水生态系统服务的影响程度^[55]。但现有方法仅采用土地利用/覆盖数据来估算生态系统服务价值,难以有效反映同一地类不同生物物理特征导致的差异,采用的参数也未体现内陆河流域的特点,导致评价结果存在较高的不确定性^[56]。

表 2 城市景观过程对涉水生态系统服务影响的主要评价方法
Table 2 The major methods for assessing impacts of urban landscape dynamics on water-related ecosystem services

主要研究方法 Major methods		在内陆河流域的应用 Applications in inland river basins			参考文献 References
		原理 Principle	优点 Advantages	缺点 Disadvantages	
价值量法 Value assessment methods		基于各土地利用/覆盖类型的货币价值量评估城市景观过程对涉水生态系统服务的影响。	简单易行,可以直观地体现城市景观过程对涉水生态系统服务的影响程度。	采用的参数未体现内陆河流域的特点,也难以有效反映同一地类不同生物物理特征导致的差异。	[46-48]
物质质量法 Physical assessment methods	观测数据 评估法	基于生态系统服务物质质量的观测数据,评估城市景观过程对某项涉水生态系统服务的影响。	能够准确反映生态系统服务。	难以评价大尺度城市景观过程对涉水生态系统服务的影响。	[49-51]
	模型模拟 评估法	基于生态系统服务模型 InVEST (Integrate Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs Tool) 或生态水文模型 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 来评估城市景观过程对涉水生态系统服务的影响。	InVEST 模型可以很好地模拟区域生态系统服务供给,SWAT 模型在对城市景观过程影响水源涵养和淡水供给服务的模拟中有良好效果。	缺乏对模拟结果的验证,适用于内陆河流域的模型参数的获取比较困难。	[52-54]

物质质量法主要是从物质质量的角度对生态系统提供的服务进行整体评价,客观反映城市景观过程对涉水生态系统服务的影响^[57]。按照物质质量评估方式的不同,可以分为观测数据评价法和模型模拟评价法。

其中,观测数据评价法是基于生态系统服务物质质量的观测数据,评估城市景观过程对某项涉水生态系统服务的影响^[49]。例如,艾尼瓦尔·买买提等^[50]采用 1996 至 2000 年喀什市吐曼河水质观测数据,评估了城市景观过程带来的人口增长、工业化与土地利用变化对城市水质净化服务功能的影响;黄会平和张岑^[51]使用 1987 至 2002 年水文站观测数据,用物质质量评估方法评估了黑河流域甘州区城市景观过程和农业活动对流域淡水供给和水源涵养服务的影响。观测数据评价法能够比较准确客观地反映生态系统服务变化,但难以用于大尺度城市景观过程对涉水生态系统服务影响评估^[52]。

模型模拟评价法主要是基于生态系统服务模型或生态水文模型来评估城市景观过程对涉水生态系统服务的影响。例如,Geng 等^[58]使用 InVEST 模型模拟了黑河上游地区城市景观过程对淡水供给服务的影响;王蓓等^[53]使用 InVEST 模型模拟量化了黑河流域淡水供给和水质净化服务;张凌等^[54]耦合了土地利用/覆被变化模型 Dyna-CLUE (Dynamic Conversion of Land-Use and its Effects Model) 和水文模型 SWAT,评估了不同情境下城市景观过程对淡水供给服务的影响。InVEST 模型可以很好地模拟区域生态系统服务供给,SWAT 模型在对城市景观过程影响水源涵养和淡水供给服务的模拟中有良好效果^[59-61]。但是模型模拟法具有难以验证模拟结果、难以获取模型参数等问题。

3.2 主要研究发现

已有研究在内容上主要关注内陆河流域城市景观过程对涉水生态系统服务总量的影响,在研究对象上主

要侧重对水源涵养、水质净化和淡水供给服务的研究(图4)。

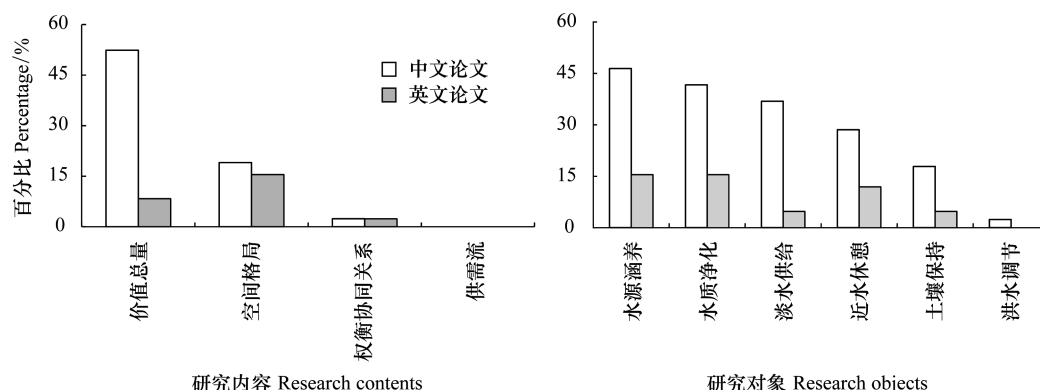


图4 主要研究内容和对象

Fig.4 The main research contents and objects

在涉水生态系统服务总量方面,内陆河流域城市景观过程会造成土壤保持、水质净化和水源涵养等服务的总量明显下降。例如,苏芳等^[62]分析了1980—2010年石羊河流域城市景观过程对生态系统服务价值总量的影响,发现石羊河水源涵养和土壤保持服务价值整体呈下降趋势;Li等^[63]对黑河流域中游1988—2008年的生态系统服务价值进行了评估,发现在城市景观过程影响下,耕地面积的增加与草地和林地面积的减少均使得水源涵养服务价值总量降低;王希义等^[64]对和田河流域1990—2010年生态系统服务价值总量变化进行了研究,结果表明流域内水源涵养服务价值总量受城市景观过程的影响不断降低。

在涉水生态系统服务空间格局方面,内陆河流域城市景观过程往往造成流域内涉水生态系统服务供给量高的地区面积逐渐缩小,供给量低的地区面积不断扩大,导致涉水生态系统服务的空间异质性增加。例如,梁友嘉等^[65]对黑河流域中游张掖市甘州区的研究发现,甘州区的城市景观过程造成区域内城市附近的涉水生态系统服务低值区增加,高值区破碎化;Zhang等^[66]对艾比湖流域城市景观过程对涉水生态系统服务的影响研究发现,水土保持服务的高值区域面积正在不断缩小。

在涉水生态系统服务权衡关系方面,内陆河流域城市景观过程往往通过改变土地利用/覆盖的方式,使得涉水生态系统服务间及涉水生态系统服务与其他生态系统服务间产生权衡关系。例如,Lu等^[67]发现黑河流域中游受快速城市景观过程影响,粮食供给服务与下游的水源涵养服务存在权衡关系,中游地区粮食生产越多,下游地区径流损失越大;王蓓等^[57]发现在城市景观过程影响下,石羊河流域的土壤保持服务与水源涵养服务呈权衡关系。

4 讨论

目前,相关研究在影响机理、影响的综合分析和影响评价结果应用等方面仍存在不足。首先,内陆河流域城市景观过程对涉水生态系统服务影响的机理还不清楚。已有研究还主要局限于遥感测量和空间统计,缺乏野外定位观测与控制试验,不能从机理上揭示城市景观过程与涉水生态系统服务之间的关系。其次,现有方法仅能评价历史城市景观过程对涉水生态系统服务总量的影响,在评价未来城市景观过程的影响以及涉水生态系统服务权衡、协同和供需流关系的响应时存在明显缺陷。而且,在评估内陆河流域城市景观过程对涉水生态系统服务影响的基础上开展流域系统管理以促进流域可持续发展的途径还不明确。

随着国家“西部大开发”和“新型城镇化”战略的推进,以及“一带一路”倡议的发起,内陆河流域城市景观过程还将持续进行。因此,未来亟需基于“机理-过程-服务-可持续性”的研究思路,综合利用野外调查、模型开发和情景模拟等方法,开展内陆河流域城市景观过程对涉水生态系统服务影响机理与模型模拟研究。一是应结合大数据分析、深度学习和过程模拟,揭示城市景观过程对涉水生态系统服务影响机理。二是需要

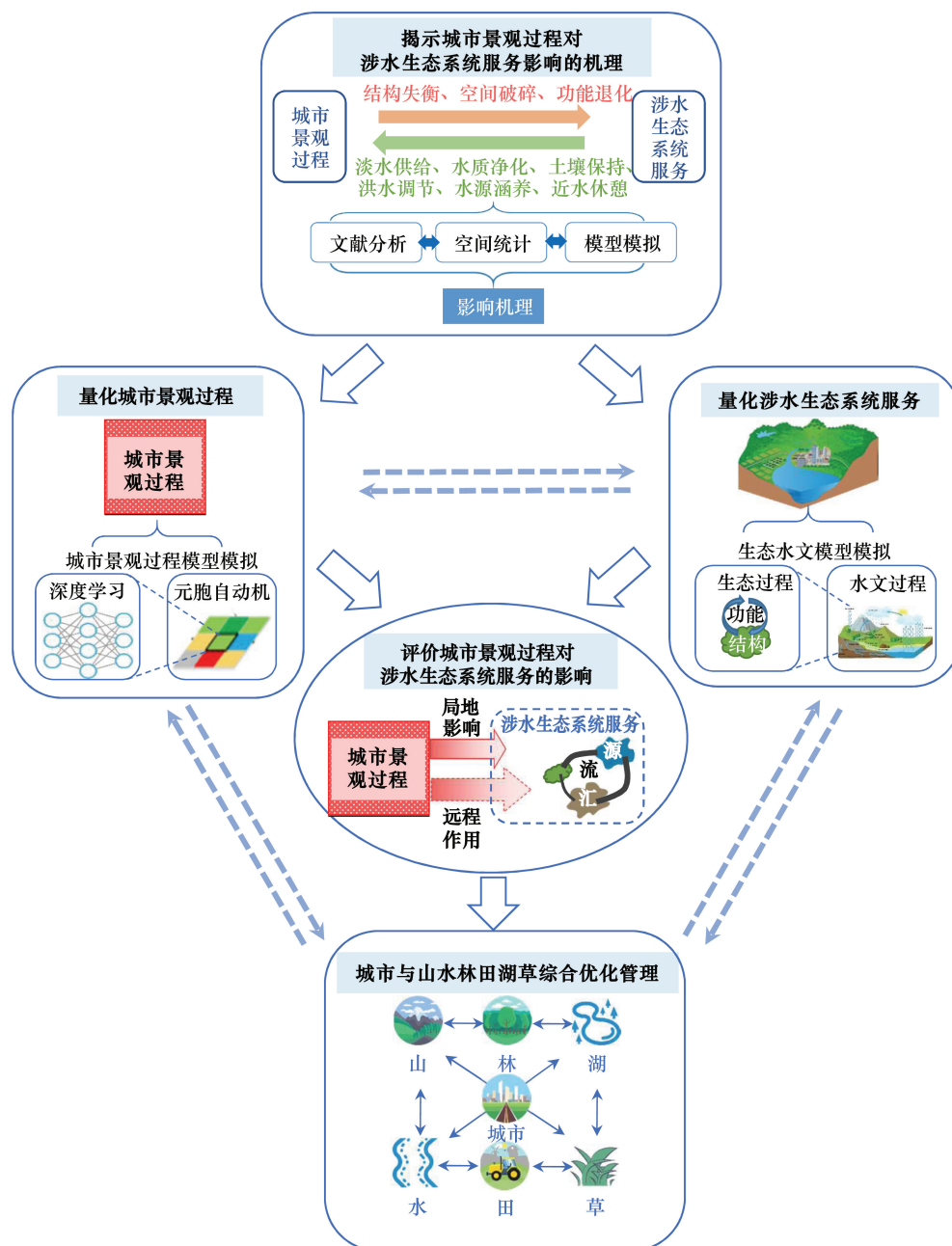


图5 城市景观过程对涉水生态系统服务影响研究框架

Fig.5 The comprehensive framework for assessing the impacts of urban landscape dynamics on water-related ecosystem services

综合城市景观过程模型和生态水文模型,发展城市景观过程与涉水生态系统服务耦合模型。三是建议模拟和评估城市景观过程对涉水生态系统服务的供给、需求和流的影响,并从城市 and 山水林田湖草结构调整、空间格局优化和功能提升这三个方面,提出流域系统管理方案(图5)。这对于落实“生态文明”建设和“一带一路”建设,促进我国内陆河流域可持续发展具有积极的现实意义。

5 结论

我国内陆河流域城市景观过程对涉水生态系统服务的影响已受到学者的广泛关注,相关论文数量与被引频次均呈上升趋势。价值量评价法和物质量评价法是评价我国内陆河流域城市景观过程对涉水生态系统服

务影响的两种主要方法,水源涵养、水质净化和淡水供给是主要评价对象。评价结果表明,内陆河流域城市景观过程不仅造成水源涵养、水质净化和土壤保持等涉水生态系统服务总量下降和空间异质性增加,而且还导致涉水生态系统服务间权衡关系加剧。相关研究为深入理解内陆河城市景观过程对涉水生态系统服务的影响奠定了良好基础,但在揭示影响机理、模拟未来影响、分析服务权衡、协同与供需流关系以及探索可持续的内陆河流域综合优化管理等方面还存在不足。因此,未来应基于“机理-过程-服务-可持续性”的思路,建立内陆河流域城市景观过程对涉水生态系统服务影响评价框架,深入开展综合评价研究,为内陆河流域城市与山水林田湖草综合优化管理提供帮助。

参考文献 (References):

- [1] 中国百科大辞典编委会. 中国百科大辞典. 北京: 华夏出版社, 1990: 745
- [2] 李新, 程国栋, 吴立宗. 数字黑河的思考与实践 1: 为流域科学服务的数字流域. 地球科学进展, 2010, 25(3): 297-305.
- [3] 蔡晓慧, 邹松兵, 陆志翔, 许宝荣, 龙爱华. TRMM 月降水产品在西北内陆河流域的适应性定量分析. 兰州大学学报: 自然科学版, 2013, 39(3): 291-298.
- [4] 陈亚宁, 郝兴明, 李卫红, 陈亚鹏, 叶朝霞, 赵锐锋. 干旱区内陆河流域的生态安全与生态需水量研究——兼谈塔里木河生态需水量问题. 地球科学进展, 2008, 23(7): 732-738.
- [5] 陈曦. 干旱区内陆河流域水文模型. 北京: 中国环境科学出版社, 2012: 1-7.
- [6] Maes W H, Heuvelmans G, Muys B. Assessment of land use impact on water-related ecosystem services capturing the integrated terrestrial-aquatic system. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(19): 7324-7330.
- [7] 李双成. 生态系统服务地理学. 北京: 科学出版社, 2014: 26-42.
- [8] Wu J G. Landscape sustainability science: ecosystem services and human well-being in changing landscapes. *Landscape Ecology*, 2013, 28(6): 999-1023.
- [9] 欧阳志云, 王如松. 生态系统服务功能、生态价值与可持续发展. 世界科技研究与发展, 2000, 22(5): 45-50.
- [10] 陈利顶, 李秀珍, 傅伯杰, 肖笃宁, 赵文武. 中国景观生态学发展历程与未来研究重点. 生态学报, 2014, 34(12): 3129-3141.
- [11] 傅伯杰. 新时代自然地理学发展的思考. 地理科学进展, 2018, 37(1): 1-7.
- [12] 何春阳, 史培军. 景观城市化与土地系统模拟. 北京: 科学出版社, 2009: 1-2.
- [13] 许学强, 周一星, 宁越敏. 城市地理学. 北京: 高等教育出版社, 2009: 36-37.
- [14] 方创琳, 周成虎, 顾朝林, 陈立顶, 李双成. 特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径. 地理学报, 2016, 71(4): 531-550.
- [15] 王雅, 蒙古军. 黑河中游土地利用变化对生态系统服务的影响. 干旱区研究, 2017, 34(1): 200-207.
- [16] Bai X M, Shi P J, Liu Y S. Society: realizing China's urban dream. *Nature*, 2014, 509(1799): 158-160.
- [17] 石培基, 杨雪梅, 宫继萍, 张光永, 魏伟. 基于水资源承载力的干旱内陆河流域城市适度规模研究——以石羊河流域凉州区为例. 干旱区地理, 2012, 35(4): 646-655.
- [18] 巩杰, 谢余初, 贾珍珍, 钱大文. 黑河流域土地利用/土地覆被变化研究新进展. 兰州大学学报: 自然科学版, 2014, 50(3): 390-397, 404-404.
- [19] 程磊磊, 郭浩, 卢琦. 荒漠生态系统服务价值评估研究进展. 中国沙漠, 2013, 33(1): 281-287.
- [20] Lortie C J. Formalized synthesis opportunities for ecology: systematic reviews and meta-analyses. *Oikos*, 2014, 123(8): 897-902.
- [21] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press, 2005: 27-29.
- [22] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 张立伟. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务. 生态学报, 2015, 35(15): 5191-5196.
- [23] 刘月, 赵文武, 贾立志. 土壤保持服务: 概念、评估与展望. 生态学报, 2019, 39(2): 432-440.
- [24] Costanza R, de Groot R, Braat L, Kubiszewski I, Fioramonti L, Sutton P, Farber S, Grasso M. Twenty years of ecosystem services: how far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, 2017, 28: 1-16.
- [25] de Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 393-408.
- [26] Ostroumov S A. On the biotic self-purification of aquatic ecosystems: elements of the theory. *Doklady Biological Sciences*, 2004, 396(1/6): 206-211.
- [27] 冯婧, 严登华, 秦天玲, 郑晓东, 耿思敏. 变化环境下我国西北内陆河区洪灾综合应对. 水资源保护, 2012, 28(4): 17-23.
- [28] 刘鹏, 杨涛, 师鹏飞, 周旭东. 塔里木河流域干旱态势时空变化规律分析. 水电能源科学, 2015, 33(5): 5-8, 29-29.
- [29] 王海青, 张勃. 黑河流域干旱化驱动力机制及其趋势预测. 干旱区资源与环境, 2007, 21(9): 68-72.
- [30] 宋艺, 孙培新, 郭凯. 塔里木河上中游的水土流失及防治对策. 中国水土保持, 2004, (7): 11-12.
- [31] 徐亮亮. 乌鲁木齐水污染现状与防治对策研究. 环境与可持续发展, 2014, 39(3): 138-139.
- [32] Yang P, Xia J, Zhang Y Y, Zhan C S, Sun S X. How is the risk of hydrological drought in the Tarim River Basin, Northwest China? *Science of the Total Environment*, 2019, 693: 133555.
- [33] 张福平, 李肖娟, 冯起, 王虎威, 魏永芬, 白皓. 基于 InVEST 模型的黑河流域上游水源涵养量. 中国沙漠, 2018, 38(6): 1321-1329.
- [34] 刘金巍, 靳甜甜, 刘国华, 李宗善, 杨荣金. 黑河中游地区 2000—2010 年土地利用变化及水土保持服务功能. 生态学报, 2014, 34

- (23): 7013-7025.
- [35] 商莉, 黄玉英, 毛伟峰. 2015 年夏季南疆地区高温冰雪洪水特征. 冰川冻土, 2016, 38(2): 480-487.
- [36] 郝兴明, 陈亚宁, 李卫红. 塔里木河流域近 50 年来生态环境变化的驱动力分析. 地理学报, 2006, 61(3): 262-272.
- [37] 郑晓英, 赵向豪, 陈彤. 塔里木河流域红柳生态旅游开发潜力评价. 新疆农业科学, 2018, 55(12): 2343-2350.
- [38] He C Y, Liu Z F, Gou S Y, Zhang Q F, Zhang J S, Xu L L. Detecting global urban expansion over the last three decades using a fully convolutional network. Environmental Research Letters, 2019, 14(3): 034008.
- [39] 柴仲平, 王雪梅, 蒋平安. 石河子市土地利用变化及其对绿洲生态系统服务功能影响分析. 干旱区资源与环境, 2010, 24(10): 19-24.
- [40] 欧维新, 王宏宁, 陶宇. 基于土地利用与土地覆被的长三角生态系统服务供需空间格局及热点区变化. 生态学报, 2018, 38(17): 6337-6347.
- [41] 王长建, 张小雷, 杜宏茹, 汪菲, 张新林, 倪天麒. 城市化与生态环境的动态计量分析——以新疆乌鲁木齐市为例. 干旱区地理, 2014, 37(3): 609-619.
- [42] 杨雪梅, 杨太保, 石培基, 吴文婕, 刘海猛. 西北干旱地区水资源-城市化复合系统耦合效应研究——以石羊河流域为例. 干旱区地理, 2014, 37(1): 19-30.
- [43] Liu Y Q, Song W, Mu F Y. Changes in ecosystem services associated with planting structures of cropland: a case study in Minle county in China. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2017, 102: 10-20.
- [44] Bateman I J, Harwood A R, Mace G M, Watson R T, Abson D J, Andrews B, Binner A, Crowe A, Day B H, Dugdale S, Fezzi C, Foden J, Hadley D, Haines-Young R, Hulme M, Kontoleon A, Lovett A A, Munday P, Pascual U, Paterson J, Perino G, Sen A, Siriwardena G, van Soest D, Termansen M. Bringing ecosystem services into economic decision-making: land use in the United Kingdom. Science, 2013, 341(6141): 45-50.
- [45] Bagstad K J, Villa F, Batker D, Harrison-Cox J, Voigt B, Johnson G W. From theoretical to actual ecosystem services: Mapping beneficiaries and spatial flows in ecosystem service assessments. Ecology and Society, 2013, 19(2): 64.
- [46] 陈忠升, 陈亚宁, 李卫红, 黄湘. 新疆和田河流域土地利用及其生态服务价值变化. 干旱区研究, 2009, 26(6): 832-839.
- [47] 崔志杰, 徐德钦, 高俊红, 孙朋, 巩杰. 酒泉-金塔盆地绿洲土地利用变化与生态系统服务价值评估. 水土保持通报, 2014, 34(1): 252-257, 272-272.
- [48] Eziz M, Yimit H, Tursun Z, Rusuli Y. Variations in ecosystem service value in response to oasis land-use change in Keriya Oasis, Tarim Basin, China. Natural Areas Journal, 2014, 34(3): 353-364.
- [49] Lü Y H, Ma Z M, Zhao Z J, Sun F X, Fu B J. Effects of land use change on soil carbon storage and water consumption in an oasis-desert ecotone. Environmental Management, 2014, 53(6): 1006-1076.
- [50] 艾尼瓦尔·买买提, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 海米提·依米提. 干旱区城市化对城市内河水质的影响研究——以吐曼河为例. 水土保持研究, 2007, 14(3): 188-191.
- [51] 黄会平, 张岑. 基于 3S 的干旱区土地利用/覆被变化及其对水资源的影响分析——以张掖市甘州区为例. 水土保持研究, 2009, 16(4): 270-274.
- [52] 赵景柱, 肖寒, 吴刚. 生态系统服务的物质质量与价值量评价方法的比较分析. 应用生态学报, 2000, 11(2): 290-292.
- [53] 王蓓, 赵军, 胡秀芳. 基于 InVEST 模型的黑河流域生态系统服务空间格局分析. 生态学杂志, 2016, 35(10): 2783-2792.
- [54] 张凌, 南卓铜, 余文君. 基于模型耦合的土地利用变化和水文响应多情景分析. 地球信息科学学报, 2013, 15(6): 829-839.
- [55] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [56] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [57] 唐玉芝, 邵全琴, 曹巍, 杨帆, 刘璐璐, 吴丹, 周书贵. 基于物质质量评估的贵州南部地区生态系统服务及其县域差异比较. 地理科学, 2018, 38(1): 122-134.
- [58] Geng X L, Wang X S, Yan H M, Zhang Q, Jin G. Land use/land cover change induced impacts on water supply service in the upper reach of Heihe River Basin. Sustainability, 2015, 7(1): 366-383.
- [59] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441-446.
- [60] 黄从红, 杨军, 张文娟. 生态系统服务功能评估模型研究进展. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3360-3367.
- [61] 侯文娟, 高江波, 戴尔阜, 彭韬, 吴绍洪, 王欢. 基于 SWAT 模型模拟乌江三岔河生态系统产流服务及其空间变异. 地理学报, 2018, 73(7): 1268-1282.
- [62] 苏芳, 尚海洋, 张志强. 1980-2010 年石羊河流域生态服务类型变化与分析. 冰川冻土, 2017, 39(4): 917-925.
- [63] Li H J, Li Z H, Li Z H, Yu J, Liu B. Evaluation of ecosystem services: a case study in the middle reach of the Heihe River Basin, Northwest China. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2015, 89-90: 40-45.
- [64] 王希义, 徐海量, 潘存德, 凌红波, 张广朋. 和田河流域土地生态系统服务价值变化及敏感性研究. 水土保持研究, 2017, 24(6): 334-340.
- [65] 梁友嘉, 徐中民, 钟方雷, 宋晓谕. 基于 LUCC 的生态系统服务空间化研究——以张掖市甘州区为例. 生态学报, 2013, 33(15): 4758-4766.
- [66] Zhang F, Yushanjiang A, Jing Y Q. Assessing and predicting changes of the ecosystem service values based on land use/cover change in Ebinur Lake wetland national nature reserve, Xinjiang, China. Science of the Total Environment, 2019, 656: 1133-1144.
- [67] Lu Z X, Wei Y P, Xiao H L, Zou S B, Ren J, Lyle C. Trade-offs between midstream agricultural production and downstream ecological sustainability in the Heihe River Basin in the past half century. Agricultural Water Management, 2015, 152, 233-242.