

DOI: 10.5846/stxb201811132456

陈登帅, 李晶, 张渝萌, 张城, 周自翔. 延河流域水供给服务供需平衡与服务流研究. 生态学报, 2020, 40(1): 112-122.

Chen D S, Li J, Zhang Y M, Zhang C, Zhou Z X. Quantification and simulation of supply, demand and flow of water provision service in the Yanhe watershed, China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1): 112-122.

延河流域水供给服务供需平衡与服务流研究

陈登帅^{1,2}, 李晶^{1,*}, 张渝萌¹, 张城¹, 周自翔³

1 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119

2 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

3 西安科技大学测绘科学与技术学院, 西安 710054

摘要: 水供给服务的供需定量评估与空间制图是当前研究的核心与前沿议题, 然而耦合人类需求与自然过程进行供需时空关联分析和模拟仍需进一步加强。以延河流域为研究区, 基于 GIS 手段和 SWAT 模型, 融合多源数据构建了水供给服务供需平衡与空间流动模型, 从子流域尺度探究了延河流域水供给服务的供需空间匹配特征与流动规律, 明确流域供给区和受益区的空间范围与流量。研究结果表明: 1) 2005—2015 年延河流域水供给量先增多后减少, 水需求量则逐年增多, 供需平衡状况在逐年恶化。到 2015 年, 流域的水资源安全指数 (Freshwater Security Index, FSI) 仅为 0.095。2) 延河流域水供给服务的供给与需求在空间分布上呈现显著的不匹配特征, 尤其是位于延河中游的延安市区及周边地区, 水资源供需矛盾突出。3) 在水供给服务流研究的框架下, 本文明确了流域内 4 个主要受益区的空间范围及其接受的相应上游子流域 (供给区) 提供的服务流量, 分别为安塞城区、延安市区、青化砭镇、延长县城区及其附近城镇。本评估模型与研究结果不仅可以为实现延河流域水资源的合理配置和保障流域用水安全提供科学依据, 也可以为其他流域的水资源管理提供参考。

关键词: 水供给服务; 供需平衡; 水供给服务流; SWAT 模型; 延河流域

Quantification and simulation of supply, demand and flow of water provision service in the Yanhe watershed, China

CHEN Dengshuai^{1,2}, LI Jing^{1,*}, ZHANG Yumeng¹, ZHANG Cheng¹, ZHOU Zixiang³

1 School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

2 School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

3 College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

Abstract: Quantitative assessment and spatial mapping of supply and demand of water provision service are frontier issues of current research. However, the spatial-temporal connections of supply and demand and the space flow of water provision service still need to be further strengthened. In this study, the Yanhe watershed was selected as the study area. Based on GIS technology and SWAT model, the supply-demand balance and spatial flow models of the water provision service were proposed by integrating multi-source data. According to the proposed methods, the spatial matching characteristics and flow laws of the water provision service in Yanhe watershed were explored at the sub-basin scale. Moreover, the spatial scope of the provisioning and benefitting areas of the basin were determined. The results showed that, from 2005 to 2015, the water supply first increased and then decreased, while the water demand increased year by year. The supply-demand balance of the water provision service deteriorated year by year, and the freshwater security index (FSI) was reported to be 0.095 in 2015. Significant mismatch in the spatial distribution was observed in terms of the supply and demand of the water provision

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41771198, 41771576); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2018JM4010)

收稿日期: 2018-11-13; 网络出版日期: 2019-10-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lijing@snnu.edu.cn

service in Yanhe watershed. This was particularly evident in urban area and surrounding areas of Yan'an city, which is located in the middle reaches of Yanhe watershed, where the contradiction between supply and demand of the water resources was prominent. Under the framework of the water provision service flow, the study defined the spatial scope of the four main benefiting areas within the water basin and the service flow provided by the corresponding upstream sub-basins (provisioning areas), which included the urban areas of Ansai county and Yan'an city, Qinghuabian town, and Yanchang county. The framework and results presented in the study not only provide a scientific basis for realizing the rational allocation of water resources and ensuring water security in the Yanhe River basin, but also provide a reference for the management of water resources in other basins.

Key Words: water provision service; supply-demand balance; service flow; SWAT model; Yanhe watershed

水供给服务对流域的水循环和水量平衡,以及人类的生存和发展起到至关重要的作用^[1]。水供给服务研究已经成为是地理学、生态学、水文学等多个学科研究的重要课题。但由于生态系统具有强烈的空间异质性特征,往往会导致水供给服务的供给与需求在空间上的会发生错位,出现不匹配的问题^[2-3]。而水供给服务流作为连接提供各种生态系统服务与产品的自然生态系统与具有生态系统服务消费需求的人类社会的重要纽带,对于水供给服务的生产、转移和消费均具有重要的意义^[4]。因此,对水供给服务的供需平衡与空间流动进行空间制图与定量化研究,明确水供给服务所产生的效益在什么时间和地点被享用^[5],将成为辅助决策者进行水资源管理的重要依据。

水供给服务流研究的实质就是对水供给服务的供给与需求进行定量化评估,建立服务供给与需求之间的时空关系^[6](即供需平衡状况),明确服务流或水流的流动路径与流量大小。其中,对水资源的供给量与需求量进行定量评估及其空间特征研究是开展水供给服务空间流动研究的重要基础性工作^[7]。目前,国内外学者在地表径流^[8-9]、蒸散发^[10]、洪水调节^[11-12]等方面开展了大量的水资源评估工作,取得了丰富的研究成果。然而,有关水供给服务需求的模拟研究却相对不足,且大多数是基于土地利用数据^[13-14]、社会经济数据^[15]等,通过专家知识打分^[16]、调查问卷^[17-18]等方法量化与分析水供给服务需求的时空分布特征。徐洁等通过计算东江湖流域各个区县的农业灌溉、工业用水、牲畜用水和城乡居民生活用水等4类水资源消耗量,分析了流域1995—2010年的水供给服务需求量的时空变化^[19]。Boithias等基于人口密度分布图和土地利用类型分布图来计算和分配水资源使用情况的的空间位置,分析了地中海盆地水资源需求的空间分布特征^[20]。此外,关于生态系统服务流动的模型研究进展缓慢,大多处于概念模型阶段^[21-22]。美国佛蒙特大学在开展生态系统服务人工智能(Artificial Intelligence for Ecosystem Services, ARIES)项目研究时,提出了“服务路径属性网络”(The Service Path Attribution Networks, SPANs)模型^[23],进行生态服务在空间上动态流动的模拟过程。但多集中于生态系统服务供给区和使用区的空间制图分析,利用空间制图方法直观地显示生态系统服务空间流动路径和流量的研究还未有突破性进展。Serna-Chavez等试图构建一个通用的生态系统服务流框架,并运用该框架评估了全球尺度下水资源供给服务供给区和受益区的时空分布差异^[21]。Li等利用InVEST模型评估中国华北地区2000—2010年的淡水资源的供需平衡状况及水供给服务在行政区单元上的空间流动特征^[24]。在这些鲜有的研究中,由于缺乏对水供给服务空间流动过程的可视化表达以及对供给区与受益区的明确界定,导致不能发挥水供给服务流在水资源配置过程中的重要作用。因此,对水供给服务的供需平衡与空间流动进行定量化制图研究亟需进一步加强。

延河流域生态环境脆弱,水资源短缺问题非常严峻,供需矛盾突出,尤其在城市地区水资源缺口日益增大。随着“丝绸之路经济带”经济战略的实施,使流域面临着如何实现脆弱生态环境下的水资源均衡配置、实现区域资源-经济-生态合理高效发展的重大课题。鉴于此,本文利用SWAT水文模型以空间可视化的方式模拟了延河流域水供给服务从生产到使用的空间流动过程,从子流域尺度上综合自然水文过程和人类消费需求,揭示流域水供给服务的空间流转规律,以期为实现流域水资源的合理利用提供决策支持。

1 区域概况与数据来源

1.1 区域概况

延河流域地处陕西省北部,经度范围为 $104^{\circ}41'E-110^{\circ}29'E$, 纬度范围为 $36^{\circ}27'N-37^{\circ}58'N$ 。延河是黄河中游的一级支流,全长共计 286.9 km。坪桥川、杏子河、西川、蟠龙川等是构成延河流域的主要支流水系。延河被称为“中国革命母亲河”,流域总面积约 $7.68 \times 10^3 \text{ km}^2$,是滋养黄土高坡上万万人的最主要水源。延河发源于靖边县天赐湾乡周山,顺着地势由西北向东南,流经安塞区和志丹县后,向南进入宝塔区,贯穿延安市城区后向东流入延长县,在延长县凉水岸附近注入黄河,详见图 1。延河综合治理工程,是陕西省近几年正实施的进行水土保持、水资源配置、水环境治理、水生态建设等项目建设的重要举措。

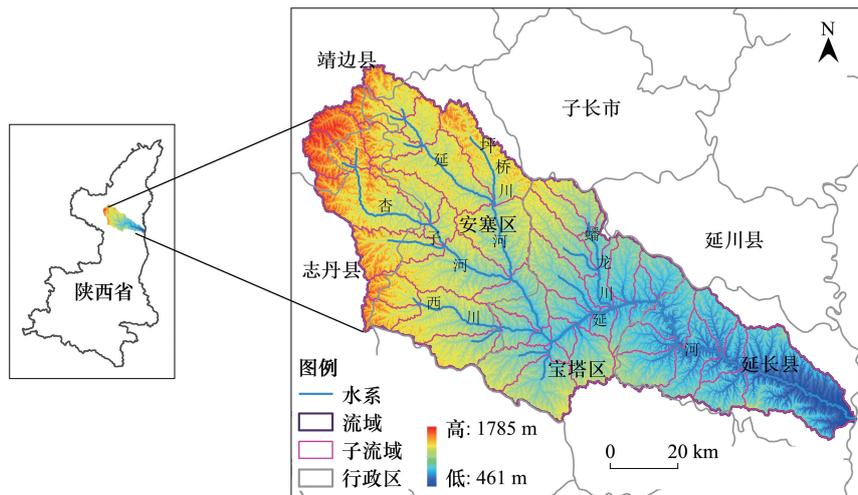


图 1 延河流域区划图

Fig.1 Location map of Yanhe watershed

1.2 数据来源

本研究中使用的数据主要包括:延河流域的基础地理数据(水系、行政区划等)、数字高程数据(DEM)、气象数据、土地利用数据、土壤数据、水文数据、社会经济统计数据等。其中土地利用数据(2005年、2010年、2015年)和DEM的分辨率均为30m,来源于中国科学院资源与环境数据中心;1970—2015年逐日观测气象要素数据来源于延安市气象局和气象数据共享服务网,包括降水、气温、风速、相对湿度、太阳辐射等;土壤数据为世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database, HWSD)的中国土壤数据集,第二次全国土地调查南京土壤所提供的1:100万土壤数据。水文数据来源于延安市黄河水利委员会,甘谷驿水文站1991—2006年的实测径流数据。此外,参考延安市地理志等地理文献和陕西省、延安市统计年鉴等,获得社会经济统计数据;主要包括人口数量、经济总值以及各部门用水量等。

2 研究方法

2.1 水供给服务供给模型

对延河流域的产水量进行计算是进行水供给服务水供给研究的基础。本文利用SWAT模型基于填注的DEM数据,计算水流的方向与汇流累积量,并以 10000 hm^2 作为流域最小集水面积阈值提取流域的水系河网,将整个流域划分为47个子流域。然后,根据水量平衡法计算流域内每个子流域的产水量,即在给定时段内从单位流域面积上所产生的注入河道的总水量。本文选择2005年、2010年和2015年共3期土地利用数据对延河流域水供给服务进行时空变化分析,通过在SWAT中输入不同时期的土地利用数据以模拟在不同时期不同土地利用变化下的产水量。

2.1.1 SWAT 模型算法

SWAT 模型美国农业部农业研究局 (Agricultural Research Service of United States Department of Agriculture, ARSUSDA) Jeff Arnold 博士开发的流域尺度模型,该模型具有很强的水文物理机制,在全球范围内被广泛用于预测与评估在不同的土壤条件、土地利用类型和管理措施下人类活动对流域水文过程、河道产输沙变化、农药化学污染在流域内的传播、迁移等的长期影响^[25-26]。模型中主要由水文模块、泥沙侵蚀模块、农作物生长、营养物质、杀虫剂等 8 个模块组成,可模拟流域的水文过程、泥沙侵蚀、农业管理和化学过程等^[27-28]。本文利用 SWAT 模型的水文模块,基于水量平衡对流域的产水量进行模拟,产水量的计算供给如下^[29]:

$$WYLD = SURQ + LATQ + GWQ - TLOSS - PA \quad (1)$$

式中, WYLD 为总产水量,是指主河道的总水量 (mm); SURQ 为主河道中的地表径流量 (mm); LATQ 为河道中的侧向流量 (mm); GWQ 为主河道中的地下径流量 (mm); TLOSS 为河床传输损失量 (mm); PA 为池塘截留量 (mm)。

2.1.2 模型的率定与验证

本文采用 SWAT-CUP 工具中的 SUFI-2 算法^[30] 执行延河流域 SWAT 模型的校准、验证、敏感性分析和不确定性分析。并参考前人在延河流域的相关研究结果^[31-32], 最终选择径流曲线系数 (CN2), 土壤蒸发补偿因子 (ESCO), 土壤湿容重 (SOL_BD), 河道水力传导率 (CH-K2) 等 12 个对流域径流较为敏感的参数。关于模型参数的敏感性分析结果、调参方法和最佳取值等详见表 1。

表 1 径流参数的敏感性分析

Table 1 Sensitivity analysis results for runoff in Yanhe watershed

调参方法 Change type	参数名称 Parameter	参数定义 Description	全局敏感性分析 Global sensitivity			最佳取值 Optimal value
			t-value	p-value	等级	
R	CN2	径流曲线系数	-17.26	0.000	1	↑10%
V	ESCO	土壤蒸发补偿因子	-9.398	0.000	2	0.63
R	SOL_BD	土壤湿容重/(g/cm ³)	-8.780	0.000	3	↓14%
V	CH_K2	河道水力传导率/(mm/h)	-8.775	0.000	4	10.75
V	SFTMP	降雪温度/°C	2.239	0.0253	5	-4.94
V	CH_N2	主河道曼宁系数	-2.153	0.5373	6	0.145
V	GW_REVAP	地下水再蒸发系数	1.408	0.159	7	0.12
V	ALPHA_BF	基流回归系数/(days)	1.332	0.257	8	0.49
R	SOL_K	土壤饱和和导水率/(mm/h)	-0.606	0.544	9	↓17%
V	EPCO	植物蒸发补偿因子	-0.598	0.550	10	0.48
R	SOL_AWC	土壤有效含水量	-0.456	0.648	11	↓11%
V	GW_DELAY	地下水延迟天数/(days)	0.138	0.889	12	168

调参方式 V 和 R 分别表示赋值和乘以 (1+设定值); CN2: 径流曲线系数 (soil conservation service runoff curve number); ESCO: 土壤蒸发补偿因子 (Soil evaporation compensation factor); SOL_BD: 土壤湿容重 (Moist bulk density); CH_K2: 河道水力传导率 (Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium); SFTMP: 降雪温度 (Snowfall temperature); CH_N2: 主河道曼宁系数 (Manning's roughness coefficient for main channel flow); GW_REVAP: 地下水再蒸发系数 (Groundwater "revap" coefficient); ALPHA_BF: 基流回归系数 (Base flow alpha constant); SOL_K: 土壤饱和和导水率 (Saturated hydraulic conductivity); EPCO: 植物蒸发补偿因子 (Plant uptake compensation factor); SOL_AWC: 土壤有效含水量 (Available soil water capacity); GW_DELAY: 地下水延迟天数 (Groundwater delay time)

在 SWAT-CUP 工具中, 我们分别选择甘谷驿水文站 1991—1998 年和 1999—2006 年的月径流实测值以月为时间步长对模型的模拟结果进行率定与验证 (图 2)。图中模拟的径流曲线与观测值变化趋势基本一致, 吻合程度较高; 通过计算模型适用性评价指标得出: 率定期模拟值与观测值之间的 R^2 和 Ens 分别为 0.76 和 0.75; 模型的不确定性程度指标 P -factor=0.6 和 R -factor=1.03。验证期模拟值与观测值之间的 R^2 和 Ens 分别达到了 0.68 和 0.64; 模型的不确定性程度指标 P -factor 和 R -factor 分别为 0.68 和 0.64。这表明本研究所构建

的 SWAT 模型在延河流域具有良好的适用性,可以准确模拟流域的水文过程。

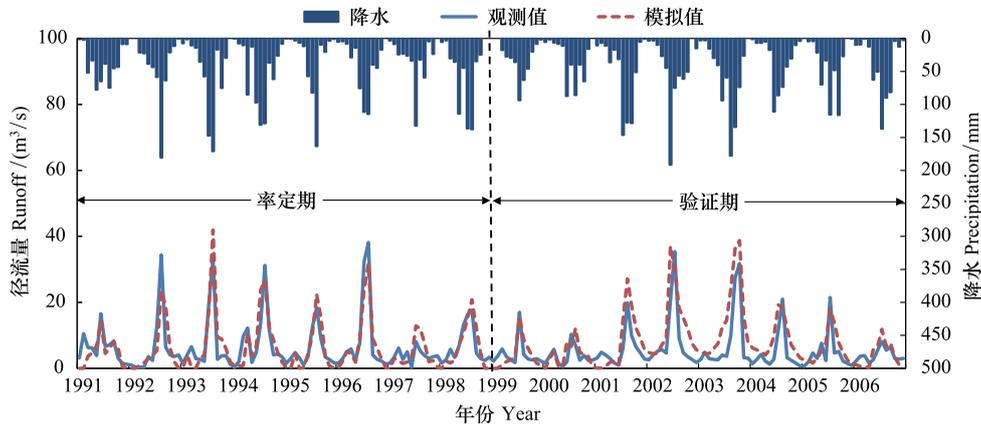


图 2 率定期(1991—1998)和验证期(1999—2006)逐月径流量模拟值与观测值对比图

Fig. 2 Simulated and observed monthly runoff yield in calibrate period (1991—1998) and validation period (1999—2006)

2.2 水需求服务模型

与自然过程不同的是,流域的水需求服务强调是人类从事于生活、生产等活动对水资源的需求与消耗,并探究需求服务的空间分布特征,不包括由于植被吸收利用、河流截留、下渗等自然过程因素所导致的地表水分的损失。根据 ARIES 模型中对水资源消耗的定义与分类^[33],本研究中水需求服务模型主要包括 4 大类:农业用水、工业用水、居民生活用水(又分为农村居民与城镇居民)、畜牧用水。我们根据延安市水资源公报获取流域内每个区县的各个部门的用水量数据,基于土地利用类型对流域的水需求进行空间分配^[23]。延河流域用水量的计算公式如下:

$$\begin{aligned} W_{U_x} &= W_{agr_x} + W_{ind_x} + W_{dom_x} + W_{Liv_x} \\ &= A_x \times Agr_x + G_x \times Ind_x + P_x \times Dom_x + M_x \times Liv_x \end{aligned} \quad (2)$$

式中, W_{agr_x} , W_{ind_x} , W_{dom_x} , W_{Liv_x} 分别指代 x 区县上的农业灌溉用水,工业用水,居民生活(城、乡)用水和牲畜用水; A_x 是 x 区县上的耕地面积(hm^2), Agr_x 是指 x 区县的每公顷耕地的年平均灌溉用水量(m^3/hm^2); G_x 是 x 区县上的工业 GDP 生产总值(亿元), Ind_x 是指 x 区县的生产每万元 GDP 所消耗的年平均用水量($\text{m}^3/\text{万元}$); P_x 是 x 区县上的人口总数(分城、乡人口), Dom_x 是指 x 区县的城乡居民的年平均生活用水量($\text{m}^3/\text{人}$); M_x 是 x 区县上的牲畜总数, Liv_x 是指 x 区县牲畜的年平均饮水量($\text{m}^3/\text{头}$)。

为了匹配前文水供给量的研究尺度,我们利用 ArcGIS 10.1 软件根据 SWAT 模型划分的子流域矢量图层对区县尺度的流域用水量进行空间统计分析,得到子流域尺度的水需求量。

2.3 供需平衡与空间流动模型

对生态系统服务的供需平衡格局进行分析时,一个地区的水资源供给量与需求量的比值(即供需比 $S:D$)是用来评估区域用水供需平衡状况的重要指标^[20, 34]。在本研究中,由于水资源服务流在不同河段的巨大差异性,我们采用水资源安全指数(Freshwater Security Index, FSI),即对供需比($S:D$)求常用对数,以增加供需矛盾差异在空间可视性与比较性^[24]。

$$FSI_i = \lg\left(\frac{S_i}{D_i}\right) \quad (3)$$

式中, i 为子流域号,本研究中一共划分了 47 个子流域; S_i 为 i 子流域的水资源供给量; D_i 为 i 子流域的水资源需求量。当 FSI 值大于 0,表示流域的水资源供给服务盈余,供给量大于需求量;当 FSI 值小 0,表示流域的水资源供给服务短缺,供给量小于需求量。

水供给服务是通过河道水流作为传递媒介,地势高低造成的重力差异而引起的“水往低处流”是形成的

空间流动的直接动力;同时,人类需求也是生态系统服务实现特定空间流动的动力条件,并会对生态系统服务的空间流动特征产生显著作用。本研究根据水文学的河流的水文连通性,将水供给服务流定义为径流及其作为载体携带的物质或能量从供给区经水系网络到流域出口注入受益区的空间位移,是一种有向性的生态系统服务流(图3)。我们利用 SWAT 模型将延河流域划分为 47 个子流域,以子流域为连通尺度,以延河水系网络为连通对象,进而探究延河流域的水供给服务的空间流动特征。

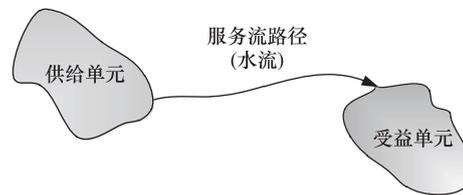


图3 水供给服务流的空间单元示意图

Fig.3 The space units of water in water supply service flow

3 结果与分析

3.1 水供给服务供给与需求的时空变化分析

2005—2015 年流域的供水量呈现出先增多后减少的趋势。2010 年流域的水供给总量最多,约为 $2.76 \times 10^8 \text{ m}^3$,所有子流域的供水量平均值约为 $59 \times 10^5 \text{ m}^3$;其中,平均供水量大于 $100 \times 10^5 \text{ m}^3$ 的子流域的总面积达到整个延河流域的 1/3。2005 年次之,整个流域的供水量总值约为 $2.25 \times 10^8 \text{ m}^3$,所有子流域的平均供水量约为 $48 \times 10^5 \text{ m}^3$;2015 年的流域的总供水量最小,约为 $1.98 \times 10^8 \text{ m}^3$,所有子流域的平均供水量约为 $42 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。气候变化是影响流域供水量的重要因素,同期降水量也呈现先增加后减少的趋势。2010 年各子流域的平均降水量为 463 mm。2005 和 2015 年的年平均降水量分别只有 446 mm 和 415 mm。从空间上分析,延河中上游的 7 号、8 号、9 号、17 号子流域和下游的 43 号子流域供水量较高,处于它们之间的中下游地区的众多子流域是供水低值区。2010 年相较于其他两个年份,各子流域供水量的分级明显偏高。每个子流域内的降水量、土地利用类型分布、土壤属性等均不相同,划分的子流域的集水面积也不一样,都会导致个子流域进入主河道的总水量也不相同,比如 47 号子流域的供水量较高除了降水、土地利用类型等因素外,与它拥有的最大积水面积也具有重要关系。除了积水面积较小外,子流域的产水量与其下垫面的结构组成、理化性质也具有显著的关系。比如,14 号子流域的水供给量明显少于积水面积、降水量大致相同的 17 号子流域和 29 号子流域。14 号子流域大部分是灌木丛、草地,约占子流域面积的 50%,城镇建设用地非常少,仅有 0.1% 左右。而 29 号子流域内的灌木丛从面积略微小于 14 号子流域,但城镇建设用地面积的 0.6% 远高于 14 号子流域。这充分证明了灌木、草地等植被覆盖类型的产流能力要弱于城镇建设用地^[8]。虽然城镇建设用地的产水量较高,但因其大量的不透水面阻止了水流的下渗,大部分的降水落到地面后就流入地下排水管道,水资源难以被利用。

延河流域 2005—2015 年的用水量呈现出逐年增多的趋势。到 2015 年,所有子流域的平均用水量值超过了 $300 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。这意味着流域的用水缺口会进一步在扩大,流域的水资源承载能力将难以满足现实的用水需求,成为严重制约流域经济发展的瓶颈。从空间格局上分析,延河中游地区城镇和工业分布密集,水需求量远远高于上游和下游地区。其中安塞县城区所在的 18 号子流域,延安市区及其周边地区所在的 33 号、34 号、39 号子流域,和延长县城区所在 41 号子流域均属于高用水区域。而用水量较低子流域主要分布在延河上游地区的 3 号、4 号、10 号、13 号子流域,中游地区的 22 号、23 号子流域,主要是因为这些区域主要土地利用类型是稀疏林地、草地,人口分布稀少,用于从事人类生产活动(人类生活、工农业生产等)的用水量较少。

3.2 水供给服务供需平衡的时空变化分析

为了更加清晰地表达出延河流域用水供需矛盾现状与空间变化特征,我们把水资源安全指数划分为 4 类,分别是 <-1 、 $-1-0$ 、 $0-1$ 、 >1 。如图 4 所示,2005—2015 年的大分子子流域的 FSI 取值范围在 $0-1$,并随着时间的推进呈现减少的趋势,2005 年延河流域的用水安全指数约为 0.269;2010 年水资源安全指数略有上升,约为 0.304;而到了 2015 年,延河流域的水资源安全指数得分只有 0.095。这表明延河流域水资源短缺问题日益严重,人们的生活、生产用水安全受到严重威胁。从供需平衡的空间格局分析,延安市城区所在的

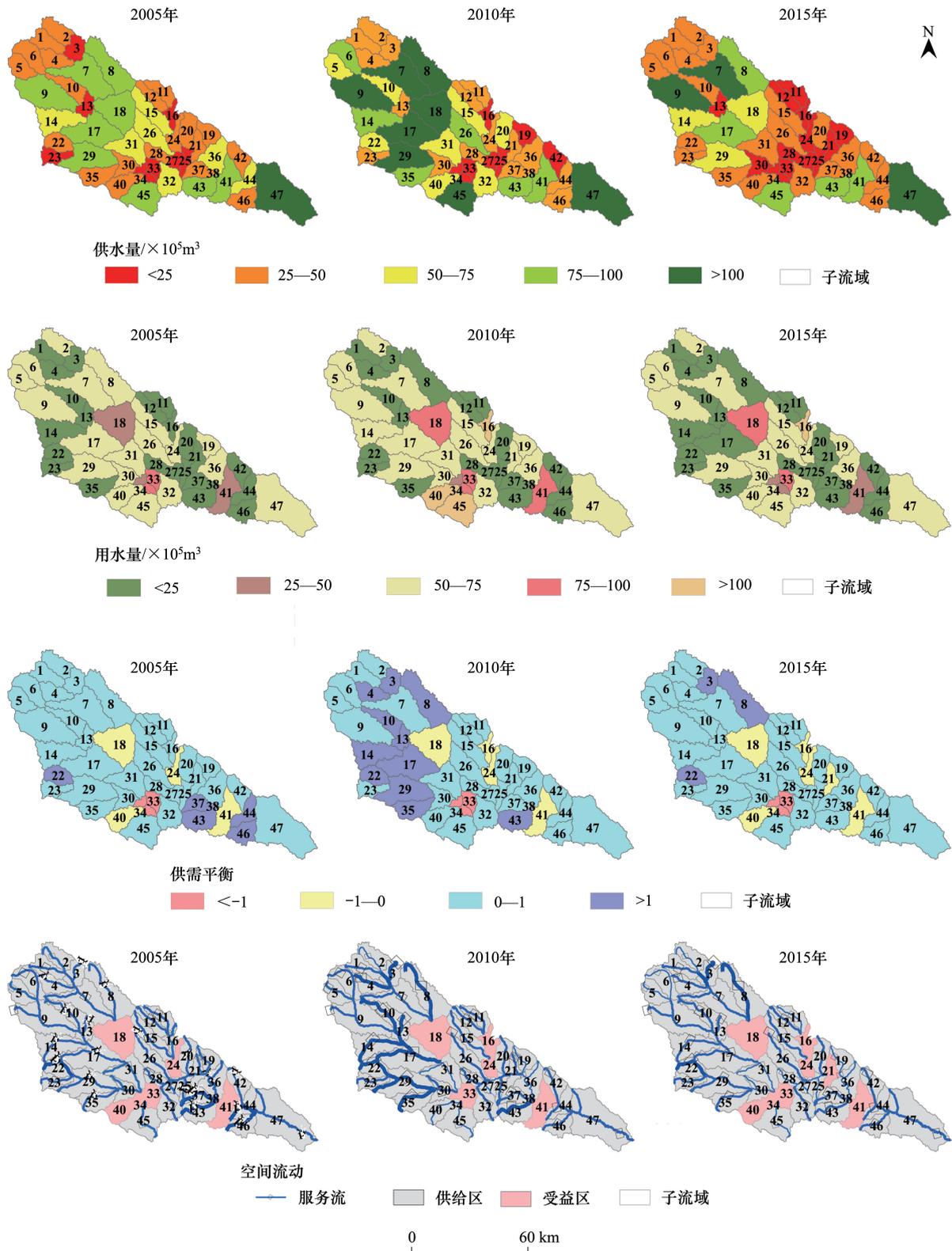


图 4 2005—2015 年延河流域水供给服务供给、需求、供需平衡与空间流动的空间分布图

Fig.4 The supply, demand, supply-demand balance and spatial flow of the water provision service in Yanhe watershed from 2005 to 2015

图中所示数字 1—47 代表延河流域每个子流域的编号

33号、34号、39号子流域是用水资源最短缺地区,水资源安全指数得分均低于-1。此外,除了这3个用水安全指数低于-1的子流域,安塞县城区和延长县城区所在的子流域也均属于用水安全指数低于0的缺水地区。2005年水资源安全指数相对较高的地区主要分布在延河流域下游的37号、43号、44号、46号子流域,这些子流域具有较高的水资源安全指数和它们较低的水资源消耗有紧密的关系。而2010年水资源严重短缺、用水安全指数低于0的区域,在空间分布上与2005年基本一致,主要集中在区县城区及其附近的子流域地区,这些子流域一般都有高耗水工业和水需求量巨大的城镇建设活动,并且多河漫滩和台地,具有大量的农田引水灌溉。但2010年用水安全指数大于0的子流域远多于2005年,主要分布于延河流域的上游地区的3号、4号、6号、14号、17号、29号等子流域的水资源安全指数均大于1。这是由于2010年具有相对充足的水资源供给量,与2005年相比降水量约增加了70 mm。到了2015年,由于用水量的大大增加,延河流域各子流域的水资源指数又出现了严重的锐减,处于缺水状态、水资源安全指数低于0的子流域的数目明显增多。安全指数大于1的子流域只剩下3号、6号和22号3个子流域,流域用水短缺问题非常严重。

3.3 水供给服务空间流动模拟与范围界定

根据水供给服务供需平衡特征,对其在不同子流域间的空间流动过程进行制图表达(图4)。我们将自身水供给量不能满足现实用水需求,需要接受上游子流域生产的水供给服务进行补给的子流域成为受益区;将能够受益区提供水供给服务的子流域称为供给区。水供给服务通过服务流从供给区流向受益区,服务流的箭头指示水供给服务在不同子流域之间的流动方向,而符号的等级与颜色象征水供给服务的流量大小。2005—2015年延河流域内需要接受水供给服务补给的子流域面积在逐年增多,水资源短缺问题加剧,尤其2010—2015年。结合现实中的自然水系与行政区划的空间分布,我们对延河流域水供给服务的空间流动格局划分为4个主要的供需流动关系,分别为安塞城区及其周边地区(18号子流域)与上游供给区的空间流动对应关系、延安市区及其周边地区(33、34、39和42号子流域)与上游供给区的空间流动对应关系、蟠龙镇或青化砭镇(16、24号子流域)与上游供给区的空间流动对应关系、延长县城区及其周边地区(41号子流域)与上游供给区的空间流动对应关系(图5)。

安塞城区及其周边地区,其所对应的供水区是延河上游干流经过的1号、2号、3号、4号、7号和坪桥川流经的8号子流域。这些子流域提供的水资源服务量比较多,超过了自身的需求,从而产生盈余,并且每个子流域产生的盈余量不尽相同,存在一定的空间差异性。其中7号和8号子流域的供给量在3个年份中均是最多的,2005年分别为 $643.25 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $681.15 \times 10^4 \text{ m}^3$,2010年分别为 $986.18 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $1194.09 \times 10^4 \text{ m}^3$,2015年分别为 $823.78 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $826.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。延安市区及其周边地区,其所对应的水供给服务的供给区范围主要是延河支流杏子河流经的5号、6号、9号、10号、14号、17号等子流域,还有支流西川流经的22号、23号、29号、35号等子流域。每个年份受益区所对应供给区范围及流量均有所差异。比如,40号子流域在2010年属于供给区。在2005年,延河流域供给区内水供给量较大的子流域分别为杏子河流域的9号子流域为 $750.33 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、17号子流域为 $706.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和14号子流域为 $522.48 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和西川流域的29号子流域为 $790.56 \times 10^4 \text{ m}^3$;与2005年相比,2010年流域供给区的子流域生产的水供给量明显增多,主要包括杏子河流域的9号子流域为 $1390.45 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、17号子流域为 $1198.72 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、14号子流域为 $871.13 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、6号子流域为 $677.64 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和西川流域的29号子流域为 $1194.42 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和35号子流域为 $726.03 \times 10^4 \text{ m}^3$;而到2015年,流域供给区的子流域生产的水供给量大幅减少,其中生产水供给量较多的几个子流域分别是杏子河流域的9号子流域为 $799.95 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、17号子流域为 $819.36 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、14号子流域为 $543.03 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和西川流域的29号子流域为 $565.64 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。蟠龙镇和青化砭镇地区,在2010年和2015年主要包括16号、24号子流域,其所对应的水供给服务供给区域主要为蟠龙川流域的11号、12号、15号和26号子流域。而2005年的供给区与受益区范围与空间位置略有不同,16号子流域在2005年为供给区,生产的供给量为 $111.54 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。延长县城区及其周边地区,其所对应的供水区是延河下游干流经过的36号、37号、43号子流域。2005年3个子流域生产的水供给量分别为 $507.63 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、 $420.96 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $830.85 \times 10^4 \text{ m}^3$;2010年3个子流域生产的水供给量分别为

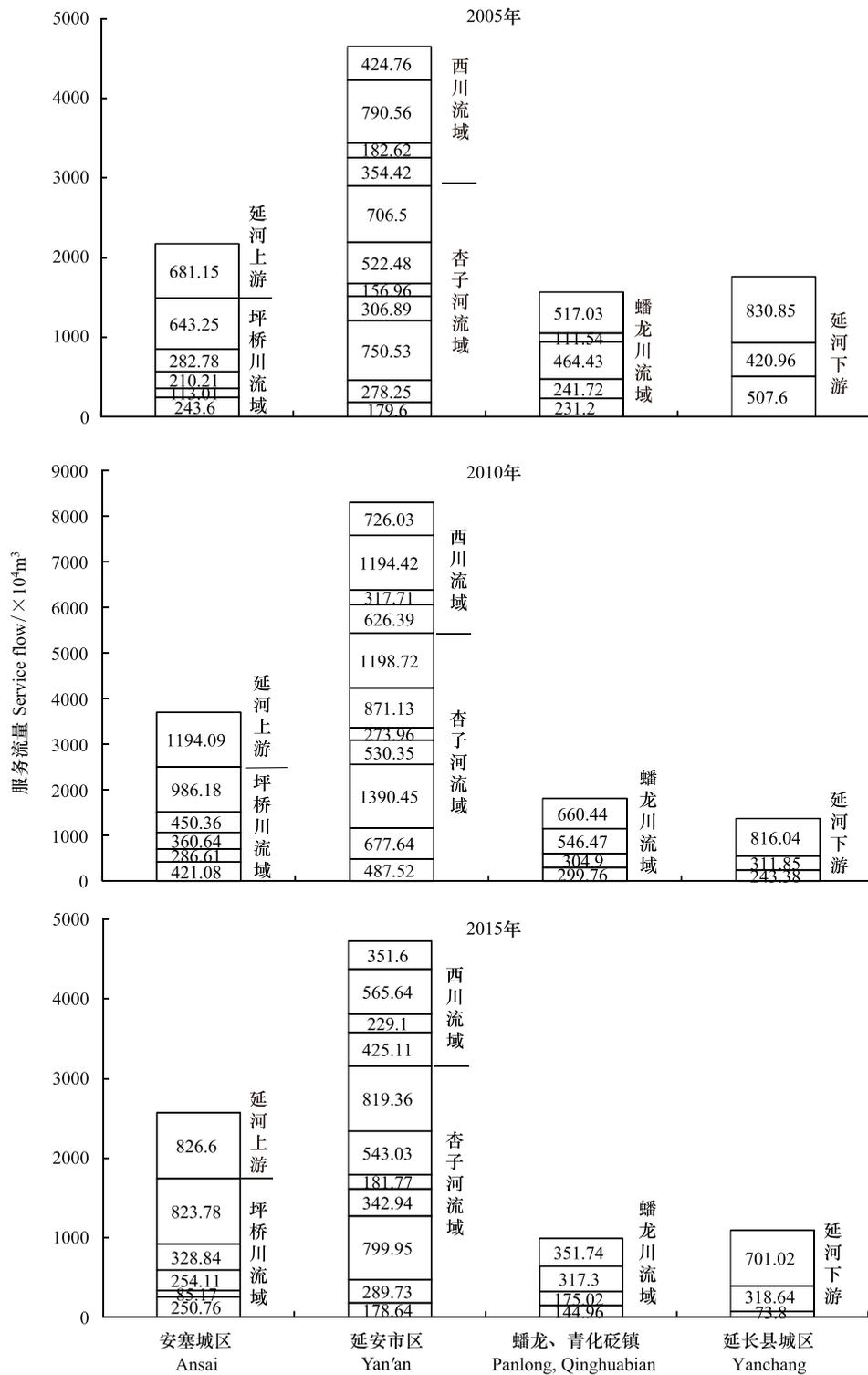


图 5 2005—2015 年延河流域主要受益区及其对应供给区的服务流量

Fig.5 The main benefiting areas and service flow produced from the corresponding provisioning areas from 2005 to 2015

243.38×10⁴ m³、311.85×10⁴ m³和 816.04×10⁴ m³;2015 年 3 个子流域生产的水供给量分别为 73.8×10⁴ m³、318.64×10⁴ m³和 701.02×10⁴ m³。除了上述的 4 个水供给服务的供给区与受益区对应关系外,2015 年延河流域水供给服务的空间流动格局中还存在着一个小范围的空间流动,即甘谷驿镇和元龙寺乡所处的 21 号子流域为水供给服务的受益区,五阳川流域的 20 号子流域为供给区,两者通过河道作为流动路径进行水供给服务的

空间流动,并具有明确的水供给服务流量。

4 讨论

本文创造性地在生态系统服务供需平衡与服务流的研究框架下,结合 SWAT 水文模型对流域水供给服务的供需平衡进行定量评估与空间制图,并对其空间流动过程与空间范围进行详细绘制,而不是仅仅停留在概念化的定性分析。SWAT 水文模型被广泛用于处理流域尺度的与水文过程相关的泥沙侵蚀、水量水质、杀虫剂的转移等一系列问题,并得到国际上一致认可。本文将 SWAT 水文模型的应用范围进一步拓展,并将其应用到生态系统服务评估与流动模拟研究。通过在延河流域建模 SWAT 水文模型,基于生态水文过程对流域水供给服务的物质质量进行评估量化,做到了将水供给服务与流域的生态水文系统过程结合起来,客观揭示了水供给服务产生的机理与动态变化,并能够对流域的水供给服务进行长时间段的可持续分析研究。但在研究区实际应用建模过程中,为了尽可能完美地模拟流域的现实,需要输入大量高精度的地形地貌、气候、土壤等自然环境数据与精准的本地化参数。一些研究表明,DEM 数据的精度或重采样方法会对径流、泥沙侵蚀、总氮等的模拟精度产生影响^[35-36]。今后的研究中需要加强模型的适用性研究及不确定性的定量化评估。

水供给服务需求是指人类从事生活、生产活动而消耗的各类水资源,强调的是发生在特定土地利用空间上的用水量。因此,本文通过将用水统计数据与土地利用类型之间建立对应关系,实现了流域用水量的空间化表达。但由于可以获取的数据有限,本文中只考虑了农田灌溉的用水量、工业生产用水量、居民生活用水量(分城乡)、部分牲畜的饲养用水、生态环境用水,并没有涵盖流域内所有的社会生产、生活用水和维持自然生态过程需要的水资源使用量,并且有的地区的数据不是很齐全,可能会造成部分区域的用水量被低估的情况。

在水供给服务的供需平衡关系及空间流动研究的过程中,往往伴随着非常重要而又复杂的时空尺度问题。由于水供给服务依赖于不同时空尺度上的自然生态和人类社会过程,因而不论是水供给服务的生产还是消费使用,均要受到尺度的制约与影响^[37]。在不同的时空尺度下,水供给服务的供需双方会呈现不同的空间关系特征和与空间流动格局。过往关于水供给服务的供需研究大多是在比较大的流域尺度开展的,本文尝试在子流域尺度对延河流域的水供给服务供需关系的时空格局展开分析,更详细地揭示了水供给服务的形成机理与空间流动规律,并将子流域尺度上研究结果与行政区划结合起来,确定了水供给服务的受益范围和流动路径与流量,以更好地辅助决策者进行水资源管理。

5 结论

本文利用 SWAT 水文模型在子流域尺度以空间可视化的方式探究了延河流域水供给服务的供给与需求的时空关联特征,并模拟了水供给服务从生产到使用的空间流动过程,明确了流域供给区和受益区的空间范围及服务流量。研究表明:(1)2005 年、2010 年和 2015 年延河流域水供给服务的供给量呈现先增多后减少的趋势,分别约为 $2.25 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $2.76 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1.98 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。延河上游和下游地区属于高水供给地区,中游地区水供给量不足。此外,灌木、草地等植被覆盖类型的产流能力较弱,而城镇建设用地的产水量较高;(2)2005—2015 年延河流域内的水需求量呈现逐年增多的趋势,在空间分布上整体一致。安塞区、延安市区、延长县城等城镇分布区域水需求量大;稀疏林地、草地广布人口分布稀少的流域上游和下游地区用水量较少;(3)2005—2015 年延河流域水供给服务的供需平衡逐年恶化,供需矛盾最为突出的区域是延安市区。还明确了流域内 4 个主要受益区的空间范围及流动流量,分别是安塞城区、延安市区、青化砭镇、延长县城区及其周边地区。这些有关流域水供给服务供需平衡及其空间流动规律的研究结果,为延河流域水资源管理提供了必要的科学依据。

参考文献 (References):

- [1] Fu B J, Wang S, Su C H, Forsius M. Linking ecosystem processes and ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(1): 4-10.

- [2] 马琳, 刘浩, 彭建, 吴健生. 生态系统服务供给和需求研究进展. 地理学报, 2017, 72(7): 1277-1289.
- [3] Wei H J, Fan W G, Wang X C, Lu N C, Dong X B, Zhao Y N, Ya X J, Zhao Y F. Integrating supply and social demand in ecosystem services assessment: a review. *Ecosystem Services*, 2017, 25: 15-27.
- [4] 刘慧敏, 刘绿怡, 丁圣彦. 人类活动对生态系统服务流的影响. 生态学报, 2017, 37(10): 3232-3242.
- [5] 肖玉, 谢高地, 鲁春霞, 徐洁. 基于供需关系的生态系统服务空间流动研究进展. 生态学报, 2016, 36(10): 3096-3102.
- [6] Fu B J, Zhang L W, Xu Z H, Zhao Y, Wei Y P, Skinner D. Ecosystem services in changing land use. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(4): 833-843.
- [7] 张立伟, 傅伯杰. 生态系统服务制图研究进展. 生态学报, 2014, 34(2): 316-325.
- [8] Chen D S, Li J, Zhou Z X, Liu Y, Li T, Liu J Y. Simulating and mapping the spatial and seasonal effects of future climate and land-use changes on ecosystem services in the Yanhe watershed, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(2): 1115-1131.
- [9] Zhang C Q, Li W H, Zhang B, Liu M C. Water yield of xitiaoqi river basin based on InVEST modeling. *Journal of Resources and Ecology*, 2012, 3(1): 50-54.
- [10] Yan R, Zhang X P, Yan S J, Zhang J J, Chen H. Spatial patterns of hydrological responses to land use/cover change in a catchment on the Loess Plateau, China. *Ecological Indicators*, 2018, 92: 151-160.
- [11] Stürck J, Schulp C J E, Verburg P H. Spatio-temporal dynamics of regulating ecosystem services in Europe-The role of past and future land use change. *Applied Geography*, 2015, 63: 121-135.
- [12] Nedkov S, Burkhard B. Flood regulating ecosystem services—Mapping supply and demand, in the Etropole municipality, Bulgaria. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 67-79.
- [13] Tao Y, Wang H N, Ou W X, Guo J. A land-cover-based approach to assessing ecosystem services supply and demand dynamics in the rapidly urbanizing Yangtze River Delta region. *Land Use Policy*, 2018, 72: 250-258.
- [14] Gao Y, Feng Z, Li Y, Li S C. Freshwater ecosystem service footprint model: a model to evaluate regional freshwater sustainable development—A case study in Beijing-Tianjin-Hebei, China. *Ecological Indicators*, 2014, 39: 1-9.
- [15] Vrebos D, Staes J, Vandenbroucke T, D'Haeyer T, Johnston R, Muhumuza M, Kasabeke C, Meire P. Mapping ecosystem service flows with land cover scoring maps for data-scarce regions. *Ecosystem Services*, 2015, 13: 28-40.
- [16] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17-29.
- [17] Uthes S, Matzdorf B. Budgeting for government-financed PES: does ecosystem service demand equal ecosystem service supply? *Ecosystem Services*, 2016, 17: 255-264.
- [18] Peña L, Casado-Arzuaga I, Onaindia M. Mapping recreation supply and demand using an ecological and a social evaluation approach. *Ecosystem Services*, 2015, 13: 108-118.
- [19] Xu J, Xiao Y, Li N, Wang H. Spatial and temporal patterns of supply and demand balance of water supply services in the dongjiang lake basin and its beneficiary areas. *Journal of Resources and Ecology*, 2015, 6(6): 386-396.
- [20] Boithias L, Acuña V, Vergoñós L, Ziv G, Marcé R, Sabater S. Assessment of the water supply: demand ratios in a Mediterranean basin under different global change scenarios and mitigation alternatives. *Science of the Total Environment*, 2014, 470-471: 567-577.
- [21] Serna-Chavez H M, Schulp C J E, Van Bodegom P M, Bouten W, Verburg P H, Davidson M D. A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2014, 39: 24-33.
- [22] Schröter M, Barton D N, Remme R P, Hein L. Accounting for capacity and flow of ecosystem services: a conceptual model and a case study for Telemark, Norway. *Ecological Indicators*, 2014, 36: 539-551.
- [23] Johnson G W, Bagstad K J, Snapp R R, Villa F. Service Path Attribution Networks (SPANs): spatially quantifying the flow of ecosystem services from landscapes to people//Proceedings of International Conference on Computational Science and Its Applications. Fukuoka, Japan: Springer, 2010: 238-253.
- [24] Li D L, Wu S Y, Liu L B, Liang Z, Li S C. Evaluating regional water security through a freshwater ecosystem service flow model: a case study in Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Ecological Indicators*, 2017, 81: 159-170.
- [25] Abbaspour K C, Rouholahnejad E, Vaghefi S, Srinivasan R, Yang H, Kløve B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 2015, 524: 733-752.
- [26] Awan U K, Ismael A. A new technique to map groundwater recharge in irrigated areas using a SWAT model under changing climate. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 1368-1382.
- [27] Havrylenko S B, Bodoque J M, Srinivasan R, Zucarelli G V, Mercuri P. Assessment of the soil water content in the Pampas region using SWAT. *Catena*, 2016, 137: 298-309.
- [28] Vigiak O, Malagó A, Bouraoui F, Vanmaercke M, Poesen J. Adapting SWAT hillslope erosion model to predict sediment concentrations and yields in large Basins. *Science of the Total Environment*, 2015, 538: 855-875.
- [29] 陈登帅, 李晶, 杨晓楠, 刘岩. 渭河流域生态系统服务权衡优化研究. 生态学报, 2018, 38(9): 3260-3271.
- [30] Khalid K, Ali M F, Rahman N F A, Mispan M R, Haron S H, Othman Z, Bachok M F. Sensitivity analysis in watershed model using SUFI-2 algorithm. *Procedia Engineering*, 2016, 162: 441-447.
- [31] Zuo D P, Xu Z X, Yao W Y, Jin S Y, Xiao P Q, Ran D C. Assessing the effects of changes in land use and climate on runoff and sediment yields from a watershed in the Loess Plateau of China. *Science of the Total Environment*, 2016, 544: 238-250.
- [32] 胡胜. 基于 SWAT 模型的北洛河流域生态水文过程模拟与预测研究[D]. 西安: 西北大学, 2015.
- [33] Bagstad K J, Villa F, Johnson G W, Voigt B. ARIES-ARTificial Intelligence for Ecosystem Services: A Guide to Models and Data, Version 1.0. Bilbao: The ARIES Consortium, 2011.
- [34] Chen J Y, Jiang B, Bai Y, Xu X B, Alatalo M J. Quantifying ecosystem services supply and demand shortfalls and mismatches for management optimisation. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 1426-1439.
- [35] Xu F, Dong G X, Wang Q R, Liu L M, Yu W W, Men C, Liu R M. Impacts of DEM uncertainties on critical source areas identification for non-point source pollution control based on SWAT model. *Journal of Hydrology*, 2016, 540: 355-367.
- [36] Zhang P P, Liu R M, Bao Y M, Wang J W, Yu W W, Shen Z Y. Uncertainty of SWAT model at different DEM resolutions in a large mountainous watershed. *Water Research*, 2014, 53: 132-144.
- [37] 李双成, 刘金龙, 张才玉, 赵志强. 生态系统服务研究动态及地理学研究范式. 地理学报, 2011, 66(12): 1618-1630.