

DOI: 10.20103/j.stxb.202301290141

王健, 曹巍, 黄麟. 基于水供需服务流及外溢价值核算的太湖流域横向生态补偿机制. 生态学报, 2024, 44(3): 955-965.

Wang J, Cao W, Huang L. Horizontal payment for ecosystem services mechanism in Taihu Lake basin based on water supply and demand service flow and spillover value accounting. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(3): 955-965.

基于水供需服务流及外溢价值核算的太湖流域横向生态补偿机制

王 健^{1,2}, 曹 巍¹, 黄 麟^{1,*}

1 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 通过生态补偿协调流域内经济发展与生态保护的关系, 缓解上下游利益相关者之间的矛盾是保障流域经济社会可持续发展的关键措施, 而流域生态补偿核定的关键在于两点: 一是如何模拟并量化水供需服务流动的流向、流量、流速及路径以明确供需双方及其空间关系; 二是如何实现栅格尺度-地理单元-行政单元的尺度推演以实现不同行政单元之间生态系统服务的盈余、占用、外溢核算。整合卫星遥感、经济社会统计、水文气象观测等多源异构数据, 集成水量平衡、水供需服务流动、生态价值核算等方法, 构建了基于水供需流动及其外溢价值核算的流域横向生态补偿标准核定框架, 利用 D8 流向法解决了水供需服务流动的流向、流量、流速及路径模拟与量化, 实现了“栅格尺度-地形单元-行政单元”空间尺度推演的外溢价值核算, 形成了流域内横向水生态补偿资金收取与分配方案。以太湖流域为例, 在全面分析水资源外溢、占用及其价值的基础上, 解析了县域尺度的水供需时空关系、流动路径及属性特征, 辅以水质指标进而明确界定了责任方与补偿对象, 形成了补偿资金收取与分配方案。结果表明, 太湖流域水供需双方界线清晰、服务流近似于自然汇流过程, 供给方以流域西部、西南部、中部县域为主, 特别是西部至中部的县域, 应受偿资金较多, 平均各县应受偿资金比例超过 2%/a, 应受偿资金最多的嘉善区, 比例超过 19.66%/a; 需求方聚集于流域中部、东部, 特别是黄浦江自然汇流沿岸县域, 应收取补偿资金较多, 平均各县应收取资金比例超过 5%/a, 应收取最多的浦东新区, 比例超过 15.48%/a; 净补偿资金基本呈现西高东低的分布特征, 流域的大部分城市核心区的县域净补偿资金为负值。研究的核定框架、量化核算方法、资金统筹方案可应用到其他流域的横向生态补偿机制构建, 实现流域内部与流域之间生态保护和经济发展的整体协调。

关键词: 水供需服务流; 外溢价值核算; 横向生态补偿; 补偿标准核定; 太湖流域

Horizontal payment for ecosystem services mechanism in Taihu Lake basin based on water supply and demand service flow and spillover value accounting

WANG Jian^{1,2}, CAO Wei¹, HUANG Lin^{1,*}

1 Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Coordinating the relationship between economic development and ecological protection in the basin and alleviating the conflicts between upstream and downstream stakeholders through Payment for Ecosystem Services (PES) is a key measure to ensure the sustainable economic and social development of the basin. The key of the basin PES accounting lies in two points: firstly, how to simulate and quantify the flow direction, flow rate, flow velocity, and path of water supply and demand service flow for clarifying the supply and demand sides and their spatial relationship; Secondly, how to realize

基金项目: 美丽中国生态文明建设科技工程专项(XDA23020202)

收稿日期: 2023-01-29; 网络出版日期: 2023-11-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huanglin@igsrr.ac.cn

the raster scale-geographic unit-administrative unit scale derivation, to achieve the surplus, occupation, and spillover accounting of ecosystem services between different administrative units. In this study, we integrated various heterogeneous data sources, such as satellite remote sensing, economic and social statistics, and hydro-meteorological observations. We employed methods including water balance, water supply and demand service flow, and ecological value accounting. We constructed an accounting framework for horizontal PES standard in the basin based on water supply and demand flow and its spillover value accounting; The flow direction, flow rate, flow velocity and path of water supply and demand service flow were simulated and quantified by using D8 flow direction method. The accounting of spillover value was realized from the spatial scale of "raster scale-topographic unit-administrative unit". Finally, we designed a scheme for collecting and distributing horizontal water PES funds in the basin. Taking Taihu Lake basin as an example, based on a comprehensive analysis of water resources spillover, occupation, and their values, the spatial and temporal relationship between water supply and demand, flow paths, and attribute characteristics at the county scale were analyzed. The responsible parties and payment targets were defined in combination with water quality indicators and a scheme for collecting and distributing payment funds was formed. The results showed that the boundary between water supply and demand in Taihu Lake basin was clear. The service flow was similar to the natural confluence process. The supply side was dominated by the western, southwestern and central counties of the basin, especially the western to central counties, which should receive more payment funds, and the average proportion of each county should receive funds over 2%/a, and Jiashan District, which should receive the most funds, had a proportion of more than 19.66%/a. The demand side gathered in the central and eastern parts of the basin, especially in the counties along the natural confluence of the Huangpu River, which should pay more payment funds, with the average proportion of funds payable by each county exceeding 5%/a, and the largest proportion payable was Pudong New District, with more than 15.48%/a. The net received payment funds basically showed the distribution characteristics of high in the west and low in the east, and most of the counties in the urban core area of the basin had negative net received funds. The accounting framework, quantitative accounting method, and fund coordination scheme of this study could be applied to the construction of horizontal PES mechanisms in other basins to achieve the overall coordination of ecological protection and economic development within and between basins.

Key Words: water supply and demand service flow; accounting for spillover value; horizontal payment for ecosystem services; accounting for compensation standards; Taihu Lake basin

生态系统服务是人类直接或间接从生态系统中获得的各种产品与惠益^[1-2],包括物质产品以及清新的空气、清洁的水源等。相关研究在量化制图、价值评估、形成机制、权衡协同关系等方面取得了较大进展^[3-5]。生态系统服务的实现依赖于生态系统与社会经济系统的相互作用与反馈^[6],受城市化等高强度人类活动的影响,生态系统结构和功能退化严重,提供服务的能力下降,对生态安全及人类可持续发展产生了重要影响^[7-8]。然而,目前较多聚焦于生态系统服务的潜在供给,较少考虑人类社会对于生态系统服务的需求即实际供给^[9-10],导致供需匹配失衡。

近年来,生态系统服务流的探讨逐渐成为热点^[11],即生态系统提供且为人类所需并实际获得的生态系统服务从供给区、连接区到需求区的传递转移过程^[6,12-13],可明晰生态系统对人类生存与发展需求的供给能力和满足程度,识别生态系统服务在自然生态系统与人类社会经济系统之间的传递路径和关键区位^[14]。明确空间关系是研究生态系统服务流的基础,生态系统服务供给与需求的多尺度研究揭示了供需的时空异质性,其空间关系有原位服务流、全向服务流和定向服务流^[15]等。生态系统服务流通过水体、空气、交通工具等传递转移过程,从而具有流向、流速与流量等特征,其中流速是生态系统服务传递距离与传递时间的比值,流量是需求区实际接收到的生态系统服务量,一般遵循距离衰减规律^[14,16]。

已有研究通过人工智能模型、水文模型、大气扩散模型等研究了碳固定、水供给、防风固沙、洪水调蓄、文化娱乐等服务的传递与流动^[16-19],直观反映生态系统服务从供给区到需求区的传递路径、流向、流量等^[20]。同时,利用供需比、供需平衡状况等指标量化人类实际利用生态系统服务的供给-需求关系^[12,21-22]。综上所述

述,生态系统服务流的时空转移受自然生态系统与人类社会经济等多种因素的影响,机理与规律不明晰、量化方法不成熟,需要理清传递过程、识别关键节点、揭示变化规律^[14],从而为生态系统管理、生态恢复与保护、生态补偿方案、区域与城市景观规划、构建生态安全格局等提供科学依据,对实现可持续发展与保障区域生态安全具有重要的意义。

生态系统的空间异质性导致水供给与需求的空间错位^[23-24]。开展水供给服务供需平衡与空间流动的空间制图与定量化研究,明确水的供给区、连接区、受益区,服务流或水流的流动路径与流量大小,是水资源管理的重要依据^[25-26]。水需求多数基于土地利用、社会经济等数据,通过专家知识、调查问卷等方法进行量化^[27-28],或利用人口密度分布进行空间分配^[29]。关于服务流动研究多集中在供给区、受益区的空间制图^[30],缺少直观显示服务空间流动路径和流量的研究,难以发挥水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研究亟需进一步加强^[26]。

近几十年来,生态补偿项目大幅增加,全球生态补偿项目估计每年的交易额为 36 亿至 42 亿美元。生态补偿是最近的一种政策工具,在地方、区域和国家各级运作的方案往往大不相同。尽管这些方案有所增长,但事实证明很难找到完整和可靠的数据。由于独特的政治和中央集权我国能够以其他国家根本无法实现的规模和速度实施生态补偿战略,这使得我国能在很短时间内重塑政策和生态景观^[31]。但当前在我国生态补偿实施过程中依然面临以下三大难题:一是如何界定生态受益方和受损方;二是如何评估生态补偿相关利益主体受益和受损的程度,如何确定生态补偿的标准;三是如何优化生态补偿方式^[32]。

流域是实施水资源管理、生态保护修复的典型地理单元,如何协调经济发展与环境保护的关系、缓解上下游利益相关者之间的矛盾成为流域可持续发展的关键,而流域生态补偿作为重要的经济、社会、环境政策,是保障流域经济社会可持续发展的关键措施^[33]。太湖流域是我国经济最为发达、最有活力的地区之一,城市化超过发达国家水平。上游植被覆盖下降导致水量调蓄功能下降,加剧下游洪涝风险,中下游受城市化、围垦等影响,消减洪峰、滞蓄洪水等能力降低^[34-35]。2022 年,国家发布推动建立太湖流域生态保护补偿机制的指导意见^[36],以改善流域水环境和保障供水安全为重点,如何落实流域内横向生态补偿亟待研究。本研究试图解决两个问题:一是如何模拟并量化水供需服务流动的流向、流量、流速及路径;二是如何实现从栅格尺度-地理单元-行政单元的尺度推演。本文基于生态学、经济学、地理学、遥感与 GIS 等理论知识,解析太湖流域县域尺度水供给服务的供需关系、流动路径及其属性特征,揭示其近 20 年的时空演化规律,应用于流域生态补偿资金筹措、量化分配等机制构建。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

太湖流域是长三角核心地区,面积 3.69 万 km²,涉及江苏省南部、上海市大部、浙江省湖州市及嘉兴市和杭州市、安徽省宣城市部分县域。河网密布、湖泊众多,水域面积占比达 17%。耕地面积约占 52.42%,林地约占 13.37%,城镇约占 20.55%(图 1)。2020 年,太湖流域总人口 6755 万人,占全国总人口的 4.8%;地区生产总值 99978 亿元,占我国 GDP 的 9.8%;人均 GDP 14.8 万元,是全国人均 GDP 的 2.1 倍。流域水资源总量为 313.1 亿 m³,其中地表水资源量 292.3 亿 m³,地下水资源量 54.5 亿 m³。

1.2 流域横向生态补偿标准核定框架

流域间横向生态补偿的标准核算,一般考虑上游的保护成本、生态系统服务价值以及下游的生态系统服务受益程度、下游地方政府的支付能力、中央政府的综合支付,或区域定位、资源稀缺度等要素^[37]。大部分研究基于生态系统服务价值核算,得到非常大的价值量往往超出补偿者的承受能力,在实际情况下很难实现^[38]。然而,生态系统服务价值的盈余或赤字情况^[39],反映区域生态系统服务的外溢或占用现状,外溢生态价值更具有生态补偿合理性与实际可操作性,是区域生态补偿的根本原因。因此,区域生态补偿依据的关键在于如何计算生态系统服务价值的盈余和占用量,某一区域的生态承载力盈余则可能外溢,若超载则表现为

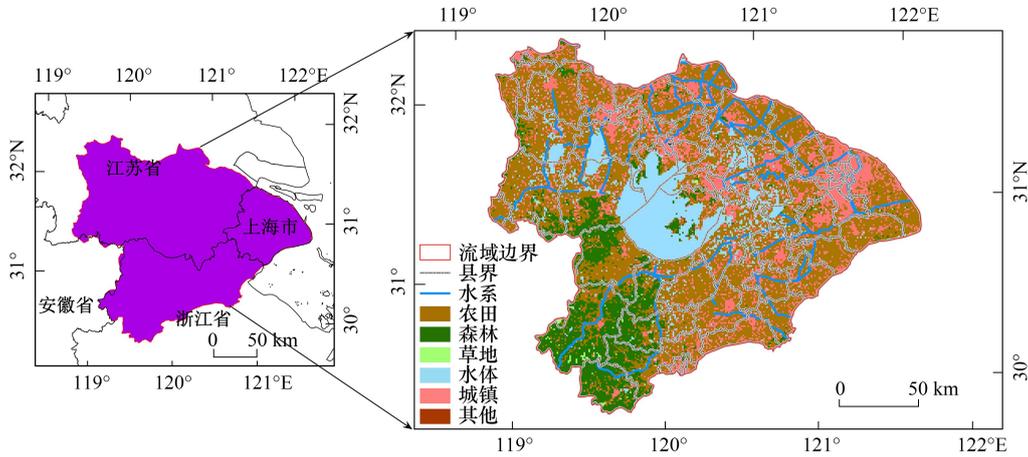


图1 太湖流域区位与生态系统类型分布图

Fig.1 Taihu Lake basin location and its ecosystem type distribution

占用,因此扣除本区域所需生态服务之后的外溢或占用价值则可作为生态补偿的合理范畴^[38]。

本研究通过整合卫星遥感监测、经济社会统计、水文气象观测等多源异构数据,集成应用地表水量平衡方法、水资源供给-需求及其服务流动、水生态价值核算等方法,构建了流域横向生态补偿标准核定框架(图2),该框架基于水资源供给-需求的流动及其外溢价值核算,通过解决本研究提出的两个关键技术问题,利用D8流向法实现水供需服务流动的流向、流量、流速及路径的模拟与量化,基于1km空间格网、DEM坡面和小流

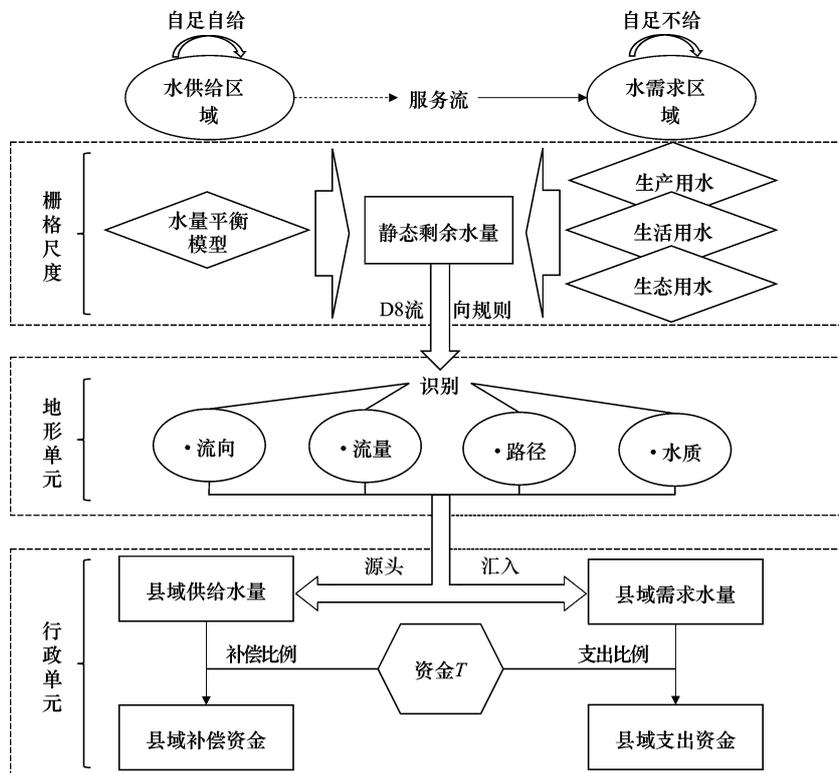


图2 流域横向生态补偿标准核定框架

Fig.2 Accounting framework for horizontal ecological compensation standards in Basins

D8:代表8个不同方向,D8流向法是一种单流向算法,利用最陡坡度法确定水流的方向;T:流域横向水生态补偿资金总量假定值,变量,单位为元

域、县域行政单元的外溢价值“栅格尺度-地形单元-行政单元”空间尺度推演,全面分析太湖流域县域尺度的水资源外溢和占用情况,依据李佳慧等^[40]的生态资产方法核算水生态流量价值,根据服务流动方向明确界定补偿对象和责任方,统筹分配补偿资金,形成了流域内横向水生态补偿资金收取与分配方案。

1.3 数据收集与处理

本研究使用的数据主要包括:

(1)水文水资源数据:依据太湖流域管理局水资源公报,主要包括总供水量、总用水量、万元 GDP 用水量、GDP 总量等;参考太湖流域管理局水质健康报告,矢量化流域河流水质等级。

(2)基础地理数据:水系、行政区划、流域边界等,空间分辨率为 90m 的数字高程数据(DEM),来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。

(3)空间统计数据:太湖流域县域 GDP 公里网格数据集来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>),是考虑 GDP 与人类活动密切相关的土地利用类型、夜间灯光亮度、居民点密度数据等的空间互动规律,利用多因子权重分配法将县域 GDP 统计数据空间插值而成,空间分辨率为 1km×1km。

(4)气象观测数据:2000—2020 年降水量逐年观测数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)的国家台站数据,采用 ANUSPLIN 插值软件处理得到 1km 网格数据。

(5)遥感产品数据:2000、2020 年生态系统类型数据是从土地利用类型数据(<http://www.resdc.cn/>)转换而来,包括农田、森林、草地、水体、城镇、其他等类型,空间分辨率为 1km×1km。蒸散量数据来源于年尺度 MOD16/ET 产品,空间分辨率为 500m,利用气压、气温、相对湿度等实测气象数据以及植被覆盖率、反照率等遥感数据,计算得到净辐射量,再基于 Penman-Monteith 方程计算得到。

1.4 研究方法

1.4.1 水供需量化方法

基于水量平衡法通过计算降水量(P , mm)与蒸散量(ET , mm)之差,换算单位得到水供给服务量即供水量(W , m^3/km^2)。通过用水量来反映水需求量,采用水资源公报中各行政单元的用水量,包括生活用水、生产用水(农业用水、工业用水)等。基于水资源公报中的万元 GDP 用水量和 GDP 栅格数据实现水需求量的公里网格空间化^[25]。

1.4.2 水供需服务流模拟

基于 D8 流向法^[41-42]开展水供需服务流向、流量、路径的模拟和量化(图 3)。D8 流向法是目前应用最广的单流向方法,该法假设某个栅格的水只能流入与之相邻的 8 个栅格。利用最陡坡度法来确定水流的方向,即在 3×3 个 DEM 栅格上,计算中心栅格与各相邻栅格间的距离权重差(即栅格中心点落差除以栅格中心点之间的距离),取距离权重差最大的栅格为中心栅格的流出栅格。

静态剩余水量为水供给服务供给与需求的差值。基于水供给服务的供给矩阵与需求矩阵得到静态剩余水量,负值区域表示本地水供给量不能满足其用水需求,存在静态需水缺口,需要依靠其他区域的流动水量弥补该静态需水缺口,即为水供给服务的实际受益区。空间流动路径是指每个像元到其最陡下坡相邻点的流向栅格,采用 D8 流向法基于 DEM 获得空间流动路径。

动态剩余水量是栅格尺度水供给服务流动的结果。在流动模拟的过程中,水供给静态剩余水量会优先按照上下游关系进行流动,在流经用水需求的栅格单元时,流动剩余水量会减少,反之,流动剩余水量会不断累积,继续向下游流动,最终得到流动之后的动态剩余水量。动态剩余水量仍为负值的区域,表示在自然状态下的汇流过程后,仍存在需水缺口。利用 IDL 模拟动态剩余水量。在栅格水量的基础上,以县域为单元计算行政区之间的水供给服务流向与流量。

1.4.3 补偿资金统筹分配方法

在以水量供给服务流动方向初步界定补偿对象和责任方的基础上,结合水质矢量数据最终确定补偿对象和责任方,即根据水供给服务流动方向暂定为补偿对象的县域,若其供给水质不达标,则将之划定为责任方,

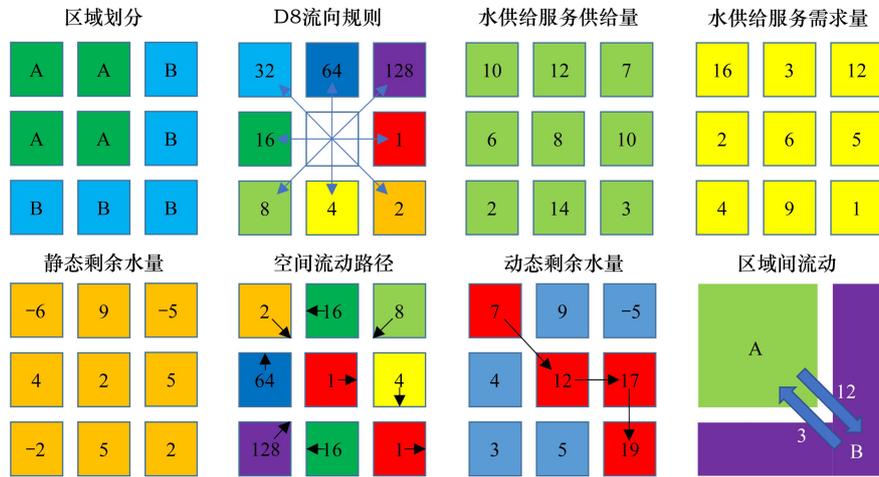


图 3 水供给服务流动模拟过程

Fig.3 Simulation the flow of the water supply service

区域划分:每个栅格上的字母表示栅格所属的区域代码;D8 流向规则:每个栅格上的数字表示潜在的水流方向,基于 D8 规则,每个数字表示一个方向;水供给服务供给量:每个栅格上的数字表示该栅格的水供给服务量;水供给服务需求量:每个栅格上的数字表示该栅格的水需求量,即用水量;静态剩余水量:静态剩余水量表示不考虑流动情况下,该栅格水供给服务量与需求量的差值,正值表示该栅格具有向下游供水的能力,属于供给单元,负值表示该栅格不具有向下游供水的能力,存在需水缺口,属于需求单元;空间流动路径:每个栅格上的数字表示研究区基于 DEM 高程计算的每个栅格的水流方向,属于自然流动方向;动态剩余水量:在自然流动情况下,各个栅格水供给服务的动态剩余水量;区域间流动:在自然流动情况下区域 A 与区域 B 之间的水供给服务流量^[22]。

这部分供给水量被反向定义为需求水量参与之后的资金计算。

流域横向水生态补偿资金总量为 T , 根据流域内县域水需求量与流域水需求总量的比例 (Pa) 确定各县域需要支出的生态补偿资金量 OUT_x , 则

$$OUT_x = T \times Pa \tag{1}$$

生态补偿资金的分配则根据流域内各县域水供给量与流域水供给总量的比例 (Pb) 来确定。各县域可获得的生态补偿资金量 IN_x 则表示为:

$$IN_x = T \times Pb \tag{2}$$

最后,依据 OUT_x 和 IN_x 之差得到县域的净生态补偿资金。

2 结果与分析

2.1 流域水供需的时空分异特征

2000—2020 年,太湖流域多年平均水供给量为 $240.23 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 水需求量为 $211.47 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。水供给量呈现南部及西南部较高、中部湖区及北部较低的空间特征(图 4)。南部水供给量超过 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 西北部不足 $90 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 而中部湖区不足 $80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。水需求量的空间分布呈东北部高、西南部低,流域东北部多年平均水需求量超过 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 而西南部的的水需求量不足 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ (图 4)。

2.2 水供需服务流动特征及变化

2000—2020 年,太湖流域多年平均静态剩余水量约 $132.81 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 单位面积静态剩余水量 $36.93 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。静态剩余水量呈现西南部高、东北部低的分布态势。流域西南部浙西区多年平均静态剩余水量超过 $80 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 中央的太湖区及东北部的武澄锡虞区、浦东浦西区小于 $20 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 城镇等非植被分布区域甚至呈缺水状态(图 5)。动态剩余水量的高值区集中在陆地水面,空间分布与自然汇流过程一致。动态需水缺口是动态剩余水量为负值的区域,主要分布在太湖流域东北部及北部。

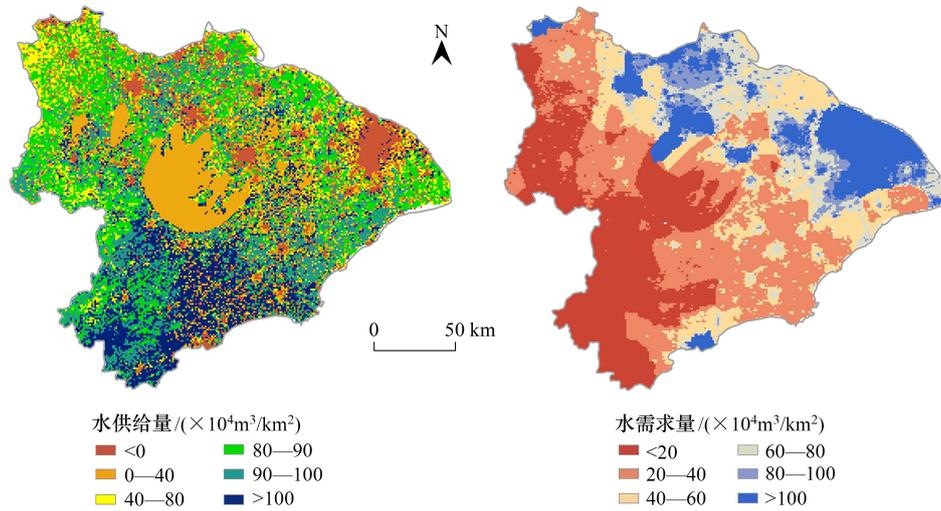


图 4 2000—2020 年太湖流域多年平均生态系统水供给量与需求量空间分布

Fig.4 Spatial distribution of multi-year average ecosystem water supply and demand in Taihu Lake basin, 2000—2020

不同于栅格尺度清晰的流动关系,流域内县域之间水供给服务流的流向、流量可见图 5,每个县域皆与周边多个县域之间存在多个流入、流出的相互关系。以溧阳市为例,其与宜兴市呈现流出量($8.9 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)远大于流入量($0.33 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$),与金坛区是流出量($1.52 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)大于流入量($0.08 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$),与广德市为流出量($0.17 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)略大于流入量($0.09 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$),与高淳区呈现流出量($0.91 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)小于流入量($1.42 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$),与郎溪县仅表现为流入($0.36 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)。

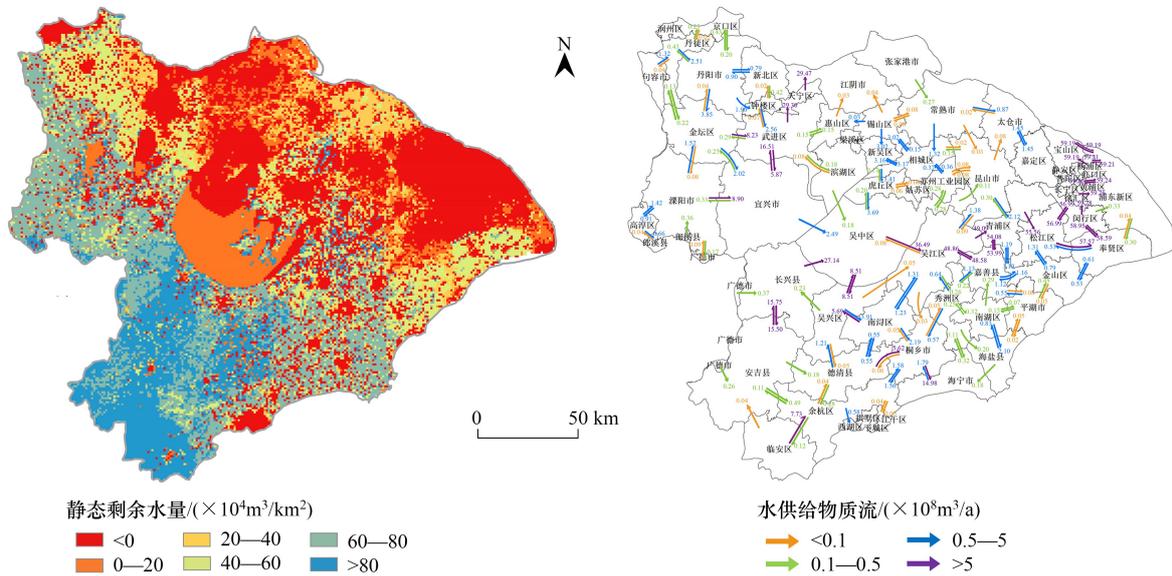


图 5 2000—2020 年太湖流域多年平均静态剩余水量与县域水供给物质流空间分布

Fig.5 Spatial distribution of multi-year average static surplus water and water supply material flow among counties in Taihu Lake basin, 2000—2020

从县域尺度上看,流域太湖区、阳澄淀泖区南部、湖西区、浙西区的县域水供给量较多,多年平均水供给量超过 $10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,部分县域甚至超过 $50 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$;水供给量较少的县域主要分布于流域东部浦东浦西区、北部武澄锡虞区、杭嘉湖区南部的中心城区,特别是上海市、杭州市、苏州市的部分县域,多年平均水供给量不足

1×10⁸ m³/a(图 6)。水受益量高的县域沿自然汇水过程集中分布,尤其是浦东浦西区、阳澄淀泖区南部,受益水量超过 50×10⁸ m³/a,杭州市、上海市的部分县域不足 1×10⁸ m³/a(图 6)。

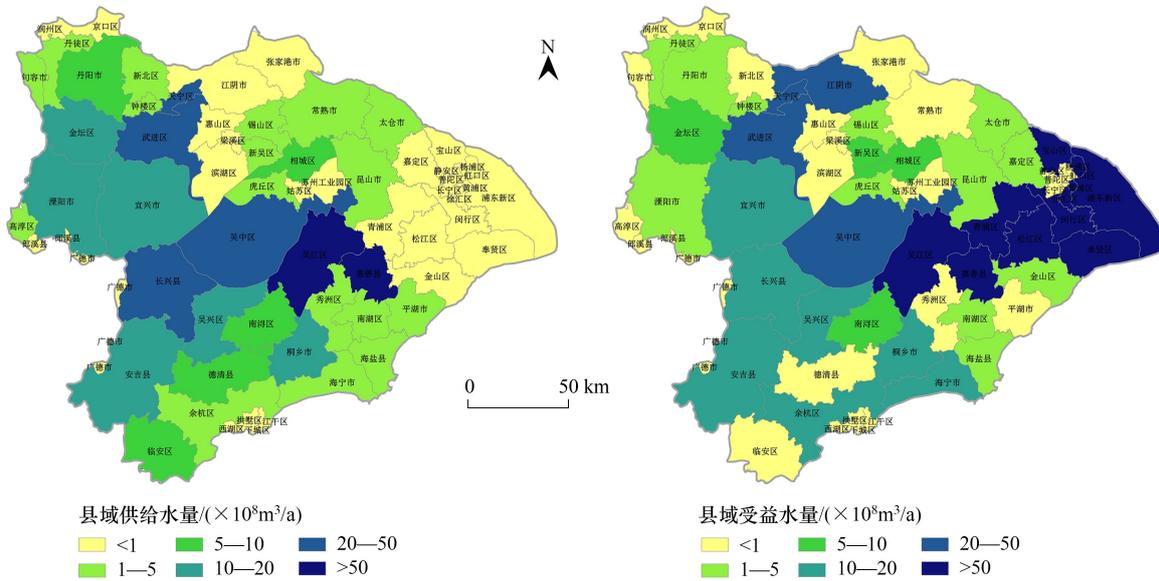


图 6 太湖流域县域尺度水供给与受益空间分布

Fig.6 Spatial distribution of water supply and benefits among counties in the Taihu Lake basin

2.3 太湖流域横向水生态补偿方案

基于上述县域尺度水供给水量与受益水量,初步确定需要收取和受偿的资金额度,从各县域支出和收入的生态补偿资金空间差异可以看出(图 7),支出补偿资金较多的县域与受益水量县域分布一致,集中在太湖流出的阳澄淀泖区南部以及进入黄浦江的浦东浦西区一带,支出额度比例超过 5%/a,支出比例最多的浦东新区,超过 15.48%;环流域南部、北部县域支出比例不足 0.5%/a。从资金受偿方面看(图 7),获得补偿最多

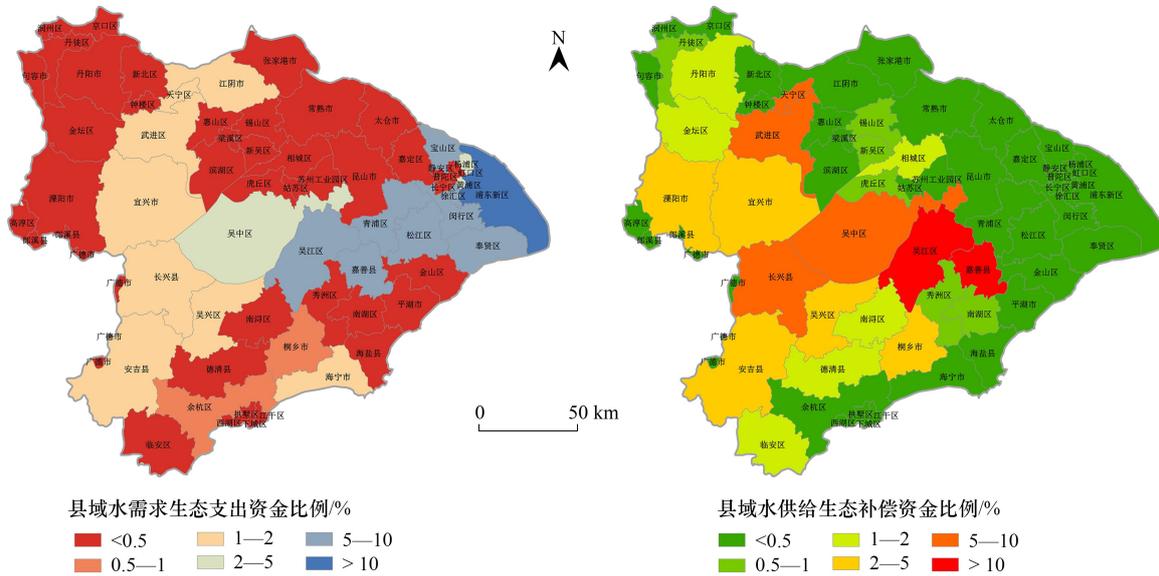


图 7 太湖流域县域水生态补偿资金支出与分配方案的空间分异

Fig.7 Spatial differentiation of expenditure and distribution schemes of water ecological compensation funds among counties in Taihu Lake basin

的县域分布在流域西部至中部,受偿资金比例超过 2%/a,受偿比例最多的嘉善区,超过 19.66%/a;而受偿资金少的县域主要分布在浦东浦西区、阳澄淀泖区、杭州市、苏州市,各县受偿资金比例不足 0.5%/a。

通过平衡县域支出与收入的补偿资金额度,假定横向水生态补偿资金总量为 10 亿元,分析县域的净生态补偿资金可以看出(图 8),太湖流域湖西区、浙西区、太湖区、杭嘉湖区北部的源头县域,净补偿资金超过 1000 万元/a,特别是太湖区的吴江区、吴中区以及浙西区的长兴县等部分县域净补偿资金超过 5000 万元/a;然而,环流域北部、东南部的县域则不足 500 万元/a。相反地,浦东浦西区、杭州市等城市核心区的净补偿资金为负值(图 8)。

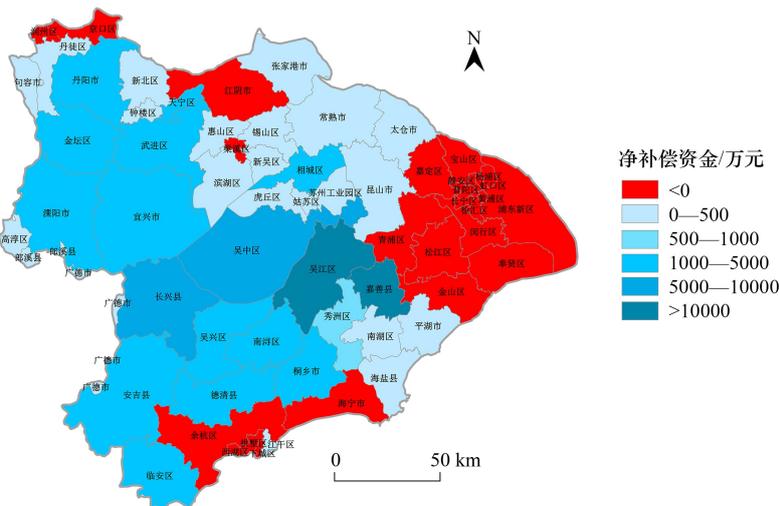


图 8 太湖流域县域水生态净补偿资金空间分布

Fig.8 Spatial distribution of water ecological net compensation funds in counties of Taihu Lake basin

3 结论与讨论

3.1 结论

本研究整合多源异构数据并集成水量、水质的量化核算方法,构建了基于水供需流动及其外溢价值核算的流域横向生态补偿标准核定框架,解决了如何模拟并量化水供需服务流动的流向、流量、流速及路径,以及如何实现从栅格尺度-地理单元-行政单元的尺度推演这两个问题,并将之应用到太湖流域的生态补偿方案构建。得到主要结论:

(1) 利用 D8 流向法可以实现水供需服务流动的流向、流量及路径的模拟与量化,通过分析县域与其邻近县域的流入流出关系,采用“栅格尺度-地形单元-行政单元”空间尺度推演可以实现外溢价值核算;

(2) 通过分析水资源外溢与占用解析县域尺度的水供需时空关系、流动路径及属性特征,辅以水质指标,界定责任方与补偿对象,可形成流域内生态补偿资金收取与分配方案;

(3) 太湖流域水供需双方界线清晰、服务流近似于自然汇流过程,供给方以流域西部、西南部、中部县域为主,特别是西部至中部的县域,应受偿资金较多,平均各县应受偿资金比例超过 2%/a,应受偿资金最多的嘉善区,比例超过 19.66%/a;需求方聚集于流域中部、东部,特别是黄浦江自然汇流沿岸县域,应收取补偿资金较多,平均各县应收取资金比例超过 5%/a,应收取最多的浦东新区,比例超过 15.48%/a;净补偿资金基本呈现西高东低的分布特征,流域的大部分城市核心区的县域净补偿资金为负值。

3.2 讨论

本研究存在几个方面的不确定性:首先,在采用水量平衡法模拟水供给量时,结果准确性主要取决于降水量与蒸散量空间数据的精确度,降水量空间插值数据、蒸散量遥感反演产品的精度受站点观测精度、插值方

法、遥感反演算法影响;其次,由于公里格网的空间分辨率限制,城镇地区绿地的蒸散发量难以估算,全部作为不透水面来考虑;第三,由于蒸散发量遥感反演产品未涵盖大面积水体,而大面积水体的水供给量取决于蒸散发量,水面蒸散发量基于站点蒸发皿观测数据,未考虑其空间差异性从而导致估算结果不确定。第四,关于水需求量及其空间分布的确定,本研究采用 GDP 栅格数据结合万元 GDP 用水量数据实现栅格化,因此,GDP 栅格数据精度,县域为统计单元的 GDP 用水量难以栅格化,便会产生系统误差。第五,在刻画水供需服务流时,基于 DEM 数据确定流动方向和路径,对太湖流域的诸多人工河渠考虑不足;另外,流域或小流域边界与县域边界不一致,因此既有 A 县域向 B 县域流动,亦有 B 县域向 A 县域流动,故而将县域作为一个整体采用净收支方式。

从可行性方面看,本研究提及的生态补偿仅考虑资金补偿,补偿资金总量为假设值,并未考虑区域经济体量以及生态保护和修复成本,补偿标准及其县域分配皆以水量为主、水质为辅进行核算,以水量作为衡量指标较为明确,然而以水质为考核指标一般应用于河流上下游,流域尺度如何以水质作为辅助指标仍有待深入研究。其次,从可行性角度出发,是否需要考虑县域的经济社会发展水平,即生态补偿在实践中还应考虑区域的经济水平是否亟需补偿或者是否有能力提供补偿,确定补偿额度、优先程度和补偿方式。此外,本研究以水供给的外溢量或占用量为依据,但并非所有的外溢区都需要接受补偿资金,也并非所有的占用区需要提供补偿资金。实践过程中会存在各地区经济水平差异从而影响生态补偿工作的落实效果,尤其在当前生态补偿工作尚未广泛成熟开展的局势下,因此,需要结合生态和经济的实际情况明晰补偿对象和范围^[41]。

从生态补偿机制完整性方面来看,实际中不可能完全依靠区域间的横向转移支付达到补偿资金的供需平衡,核算对象越微观越难以实现,因为总会发生与其他生态系统之间的服务交流;同时,由于生态服务具有不定向流动的特点,外溢与占用并非一一对应关系,因此生态补偿的补偿方和受偿方也无法追踪其明确的对应关系,所以在各行政区域之间进行补偿资金的横向转移需要在流域跨省进行统筹和保障^[38]。理论上探讨,对于水供给而言,需求方支付的是消耗费用而不是生态补偿,多源需求反映了无论付费还是补偿,都是多对多的关系,本研究考虑的流域横向生态补偿只由政府参与,存在补偿资金来源单一、总量不足且持续性较差、补偿方式较为单一等弊端。因此,需要引导社会资本积极参与太湖流域生态补偿^[43],以促进上述问题的解决。

参考文献(References):

- [1] Costanza R, d'Arge R, deGroot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill RV, Paruelo J, Raskin RG, Sutton P, vandenBelt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [2] Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Anderson SJ, Kubiszewski I, Farber S, Turner RK. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 2014, 26: 152-158.
- [3] 白杨,王敏,李晖,黄沈发, Juha M. Alatalo. 生态系统服务供给与需求的理论与管理方法. *生态学报*, 2017, 37(17): 5846-5852.
- [4] Maes J, Egoh B, Willemens L, Liqueste C, Vihervaara P, Schägner J P, Grizzetti B, Drakou E G, La Notte A, Zulian G, Bouraoui F, Luisa Paracchini M, Braat L, Bidoglio G. Mapping ecosystem services for policy support and decision making in the European Union. *Ecosystem Services*, 2012, 1(1): 31-39.
- [5] Jia X Q, Fu B J, Feng X M, Hou G H, Liu Y, Wang X F. The tradeoff and synergy between ecosystem services in the Grain-for-Green areas in Northern Shaanxi, China. *Ecological Indicators*, 2014, 43: 103-113.
- [6] Villamagna A M, Angermeier P L, Bennett E M. Capacity, pressure, demand, and flow: a conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery. *Ecological Complexity*, 2013, 15: 114-121.
- [7] 傅伯杰,周国逸,白永飞,宋长春,刘纪远,张惠远,吕一河,郑华,谢高地. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全. *地球科学进展*, 2009, 24(6): 571-576.
- [8] Wood S L R, Jones S K, Johnson J A, Brauman K A, Chaplin-Kramer R, Fremier A, Girvetz E, Gordon L J, Kappel C V, Mandle L, Mulligan M, O'Farrell P, Smith W K, Willemens L, Zhang W, DeClerck F A. Distilling the role of ecosystem services in the Sustainable Development Goals. *Ecosystem Services*, 2018, 29: 70-82.
- [9] Yahdjian L, Sala O, Havstad K. Rangeland ecosystem services: shifting focus from supply to reconciling supply and demand. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2016, 13(1): 44-51.
- [10] Castro A J, Verburg P H, Martín-López B, García-Llorente M, Cabello J, Vaughn C C, López E. Ecosystem service trade-offs from supply to social demand: a landscape-scale spatial analysis. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 132: 102-110.

- [11] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17-29.
- [12] Serma-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.
- [13] 刘慧敏, 范玉龙, 丁圣彦. 生态系统服务流研究进展. *应用生态学报*, 2016, 27(7): 2161-2171.
- [14] 王嘉丽, 周伟奇. 生态系统服务流研究进展. *生态学报*, 2019, 39(12): 4213-4222.
- [15] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 2009, 68(3): 643-653.
- [16] Bagstad K J, Johnson G W, Voigt B, Villa F. Spatial dynamics of ecosystem service flows: a comprehensive approach to quantifying actual services. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 117-125.
- [17] 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-Tianjian-Hebei region, China. *Ecological Indicators*, 2017, 81: 159-170.
- [18] Goldenberg R, Kalantari Z, Cvetkovic V, Mörtberg U, Deal B, Destouni G. Distinction, quantification and mapping of potential and realized supply-demand of flow-dependent ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2017, 593: 599-609.
- [19] Egarter Vigl L, Depellegrin D, Pereira P, de Groot R, Tappeiner U. Mapping the ecosystem service delivery chain: capacity, flow, and demand pertaining to aesthetic experiences in mountain landscapes. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 422-436.
- [20] 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.
- [21] Palomo I, Martín-López B, Potschin M, Haines-Young R, Montes C. National Parks, buffer zones and surrounding lands: mapping ecosystem service flows. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 104-116.
- [22] Baró F, Palomo I, Zuilian G, Vizcaino P, Haase D, Gómez-Baggethun E. Mapping ecosystem service capacity, flow and demand for landscape and urban planning: a case study in the Barcelona metropolitan region. *Land Use Policy*, 2016, 57: 405-417.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Uthes S, Matzdorf B. Budgeting for government-financed PES: does ecosystem service demand equal ecosystem service supply?. *Ecosystem Services*, 2016, 17: 255-264.
- [29] 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: 567-577.
- [30] Immerzeel W W, Lutz A F, Andrade M, Bahl A, Biemans H, Bolch T, Hyde S, Brumby S, Davies B J, Elmore A C, Emmer A, Feng M, Fernández A, Haritashya U, Kargel J S, Koppes M, Kraaijenbrink P D A, Kulkarni A V, Mayewski P A, Nepal S, Pacheco P, Painter T H, Pellicciotti F, Rajaram H, Rupper S, Sinisalo A, Shrestha A B, Viviroli D, Wada Y, Xiao C, Yao T, Baillie J E M. Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature*, 2020, 577(7790): 364-+.
- [31] Salzman J, Bennett G, Carroll N, Goldstein A, Jenkins M. The global status and trends of Payments for Ecosystem Services. *Nature Sustainability*, 2018, 1(3): 136-144.
- [32] 成德宁, 侯伟丽. 我国生态补偿机制实施面临的主要难题及解决对策. *南都学坛*, 2022, 42(6): 89-96.
- [33] 任以胜, 陆林, 虞虎, 朱道才. 尺度政治视角下的新安江流域生态补偿政府主体博弈. *地理学报*, 2020, 75(8): 1667-1679.
- [34] 刘洋, 毕军, 吕建树. 生态系统服务权衡与协同关系及驱动力——以江苏省太湖流域为例. *生态学报*, 2019, 39(19): 7067-7078.
- [35] 苏伟忠, 汝静静, 杨桂山. 流域尺度土地利用调蓄视角的雨洪管理探析. *地理学报*, 2019, 74(5): 948-961.
- [36] 国家发展改革委, 生态环境部, 水利部. 关于推动建立太湖流域生态保护补偿机制的指导意见(发改振兴[2022]101号).北京: 中国标准出版社, 2022.
- [37] 杨海乐, 危起伟, 陈家宽. 基于选择容量价值的生态补偿标准与自然资源资产价值核算——以珠江水资源供应为例. *生态学报*, 2020, 40(10): 3218-3228.
- [38] 黄晶晶, 李玲徐, 徐琳瑜. 基于外溢生态系统服务价值的区域生态补偿机制研究. *生态学报*, 2021, 41(17): 6994-7001.
- [39] 曹世雄, 刘玉洁, 苏蔚, 郑鑫怡, 余中淇. 中国陆地生态系统服务净价值评估. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(3): 331-339.
- [40] 李佳慧, 黄麟, 曹巍. 中国县域生态资产损益的影响机制及优化提升路径. *地理学报*, 2022, 77(5): 1260-1274.
- [41] O'Callaghan J F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1984, 28(3): 323-344.
- [42] 李丽, 郝振纯. 基于 DEM 的流域特征提取综述. *地球科学进展*, 2003, 18(2): 251-256.
- [43] 张丛林, 黄洲, 郑诗豪, 陈劭锋, 董磊华, 乔海娟. 基于赤水河流域生态补偿的政府和社会资本合作项目风险识别与分担. *生态学报*, 2021, 41(17): 7015-7025.