

DOI: 10.5846/stxb202112223632

李兆碧, 陶宇, 欧维新, 宋奇海. 基于水量与水质的太湖流域水生态服务供需关系及多情景评估. 生态学报, 2023, 43(5): 2088-2100.

Li Z B, Tao Y, Ou W X, Song Q H. Supply and demand relationship and multi-scenario assessment of water ecological services related water quantity and quality in Taihu Lake Basin. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 2088-2100.

基于水量与水质的太湖流域水生态服务供需关系及多情景评估

李兆碧¹, 陶宇^{1,2}, 欧维新^{1,2,*}, 宋奇海^{1,2}

1 南京农业大学土地管理学院, 南京 210095

2 农村土地资源利用与整治国家地方联合工程研究中心, 南京 210095

摘要:耦合水量供给与水质净化的水生态服务供需关系的多尺度空间量化评估,有助于刻画和识别丰水区水质性缺水问题,并丰富水生态服务研究。在构建水量供给和水质净化服务供需评估方法的基础上,利用空间分析方法在现状情景基础上分别设置提升用水效率、改善土地管理方式和优化土地利用空间配置三种优化情景,并在栅格、子流域和县域三个尺度上开展基于水量供给和水质净化的水生态服务供需关系的定量评估,分别探讨了不同情景不同尺度下的水生态服务供需变化、空间响应及其机制特征。研究结果表明:(1)太湖流域的水量供需状况显著优于水质供需状况,节水能够有效改善流域内的水量赤字,而减量施肥和优化土地利用配置能够显著改善流域内的水质赤字。(2)多尺度的水量供给与水质净化服务供需解析,有助于精准识别不同尺度下亟需治理的关键区域。(3)水量赤字区主要集中在建设用地分布区域,耕地仍是引致水质赤字的主要原因,但随着尺度的逐渐增大,水质赤字区建设用地面积也在不断增加。(4)优化土地利用结构方案是解决水质性缺水的最有效方法,但需要突破现有政策尤其是耕地保护政策的刚性约束,故耦合提升用水效率等方法是当前治理太湖流域“水质性缺水”问题首选措施。

关键词:水量与水质;水生态服务供需关系;多情景模拟;多尺度评估;太湖流域

Supply and demand relationship and multi-scenario assessment of water ecological services related water quantity and quality in Taihu Lake Basin

LI Zhaobi¹, TAO Yu^{1,2}, OU Weixin^{1,2,*}, SONG Qihai^{1,2}

1 College of Land Management, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210095, China

2 National & Local Joint Engineering Research Center for Rural Land Resources Use and Consolidation, Nanjing 210095, China

Abstract: It is essential to conduct supply and demand assessment of water ecological services across multiple spatial scales by integrating water quantity and quality for identifying water shortage issues caused by water pollution in humid regions. This study developed a comprehensive model that integrated water quantity and quality for quantifying the supply-demand relationships of water ecological services for the Taihu Lake Basin (TLB). This study also constructed three optimized scenarios (Water Efficiency Improvement, Fertilization Reduction, and Land Use Structure Optimization) to explore the spatial variations and key driving factors of water resources supply and demand on the grid, sub-basin, and county levels. We got the following conclusions: (1) The TLB was sufficient in water quantity, but it was deficient in water quality. Water efficiency improvement significantly reduced the demand for water resources in the TLB. Fertilization reduction and land use optimization greatly improved water quality. (2) The supply and demand assessment of water ecological services across the three spatial scales could help in identifying key areas for promoting sustainable water use in the TLB. (3) Urban land was

基金项目:国家自然科学基金项目(41971230);中国科学院“美丽中国生态文明建设科技工程”专项(XDA23020201);国家自然科学基金青年项目(41701211)

收稿日期:2021-12-22; **网络出版日期:**2022-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: owx@njau.edu.cn

primarily located in the regions with deficient water quantity. In comparison, croplands dominated the regions with deficient water quality, while these regions of deficient water quality were also comprised of large areas of urban land when assessed at the county level. (4) Land use optimization such as grain for green and riparian conservation was the most effective in improving water quality for the TLB, but it was at the huge cost of cropland losses. Therefore, coupling other optimization ways such as water efficiency improvement that would be the best measurement for solving pollution-caused water shortage issues in the TLB.

Key Words: water quantity and quality; supply and demand relationship of water ecological services; multi-scenario simulation; multi-scale evaluation; Taihu Lake Basin

水是生命之源,水生态服务作为支撑人地系统生产、生活和生态子系统健康有序发展的基础性服务^[1],其供给能力与经济社会发展对它的需求的匹配程度,直接影响着区域高质量发展与可持续性水平^[2-3]。彭建等^[4]、俞孔坚等^[5]结合不同水生态服务提出了构建水生态安全格局和水生态空间红线的概念;Zhang^[6]将生态系统服务流模型纳入水安全模拟中,为区域水资源可持续发展以及生态补偿政策的制定提供了科学参考;Naderj^[7]基于水-能-粮(FEW)关联视角应用系统动力学模型量化在替代管理情景下 FEW 关联系统变化对供水的能量影响,提出基于 FEW 关联的政策以减轻地下水消耗与水的能源足迹,这些理论都为系统性的保障水生态安全提供了宝贵依据。生态系统服务供需理论起源于欧美,生态系统服务供给是指生态系统为人类生存和发展所提供的产品或服务,而生态系统服务需求则是指人类对于生态系统服务的实际或期望消耗量^[8]。由于人与自然系统之间的复杂关系以及数据的可获得性差异,国内外对于供需评估的案例也主要集中在供给服务^[9]。水量供给服务和水质净化服务作为水生态服务中最重要的两项生态系统服务,其满足经济社会发展需求程度的供需匹配评估和优化研究,在支持区域土地规划、决策实施和水生态管理实践中具有重要作用^[10-12],因而其研究也备受关注^[13-15]。

当前,对水资源供需服务评估主要通过量化区域产水量和实际用水量来刻画和识别水资源供需关系^[16-17],如基于 InVEST 模型测算产水量,将农业、工业和生活用水分配到常住人口并结合人口密度数据得到空间上的用水需求的方式来评估其供需关系^[18-19];或采用线性和非线性方程拟合对区域农业、工业、生态和城市生活用水需求进行了模拟和预测,探究不同供水方案下未来用水量的时空匹配^[20];亦或基于 SWAT 模型,融合多元数据构建了水供需平衡模型,探究了流域水供给服务的供需匹配特征等^[21]。目前少有研究对水质净化服务的供需进行深入讨论,关注点仍在其供给服务趋势变化或与其他服务的权衡协同关系分析等方面^[22-24],并且对于水净化服务需求评估研究较为缺乏,水质净化服务供需评估指标的构建还不够准确。大多研究均在特定尺度(流域、行政区)上对生态系统服务的供需进行研究,然而这种方法会造成信息的遗漏和丢失,从而无法从复合视角对其准确衡量^[25]。识别不同尺度下生态系统服务供需之间的关系,对于生态系统服务的可持续管理至关重要,现有研究对于生态系统服务供需匹配的多尺度、跨尺度研究仍然有限^[26]。孙泽祥^[27]、余玉洋^[28]和张静静^[29]等学者,在多尺度下分析了不同生态系统服务之间的权衡协同关系,以期识别由于尺度效应引起的权衡协同关系变化,这为研究尺度效应与生态系统服务之间的关系奠定了一定基础。

围绕水量和水质的水生态服务供需关系已有不少探索,为区域水生态服务调控提供了有益的理论和方法借鉴,但耦合水量和水质的水生态服务供需研究仍鲜有报告。现有研究在刻画区域水资源供需状况时,多从水资源供给和需求出发,缺乏对水环境质量的考量。这些方法在研究我国北方干旱和半干旱地区水生态服务供需关系上具有较好的适应性,但不适应南方湿润地区存在水质性缺水区域的水生态服务研究^[30-31]。基于此,本文以水量丰沛但水质污染较严重的太湖流域为例,利用空间分析和生态系统服务评估方法,对太湖流域三种优化情景下的水量供给服务和水质净化服务进行了供需定量评估,在栅格、子流域和行政区尺度上的供需匹配展开分析,以识别不同尺度上水质性缺水的分布特征及变化,以期进一步深化水生态服务供需研究,为不同尺度下的流域水资源管理或国土空间优化布局提供可资借鉴的参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

太湖流域位于长江平原中下游地区(106°7′—121°47′E, 24°30′—33°54′N), 总面积 36900 km², 涉及上海、江苏、浙江和安徽 4 个省市, 约 62 个区县, 是我国经济发展和城市化最快的地区之一(图 1)。太湖流域雨量丰沛, 多年平均达 1181 mm, 流域内水系丰富, 湖泊众多。太湖流域人口密度 978 人/km², 是全国平均人口密度的 7 倍, 流域内工农业均很发达, 生产、生活用水需求量大; 但太湖流域水污染问题自 1990s 开始就备受关注, 水污染及其水质性缺水问题已成为制约该流域可持续发展的限制性因素。

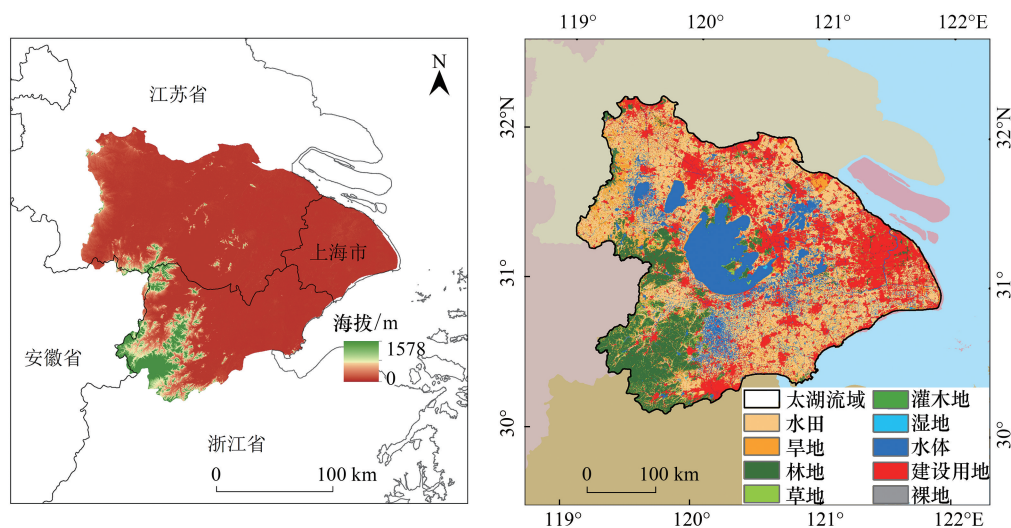


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

1.2 数据来源及处理

本研究中 InVEST 3.8.0 的产水模块和水质净化模块所需数据分别为土地利用数据、高程数据、降水数据、土壤数据、多年平均蒸散发数据、生物物理参数表以及流域、子流域边界等数据。其中, 土地利用数据源自中国科学院资源环境数据中心 2018 年 30 m 分辨率土地利用数据, 经过数据预处理、重分类划分出: 水田、旱地、林地、草地、灌木地、湿地、水体、建设用地和裸地等 9 种类型; 30 m 数字高程模型 (DEM) 数据来源于地理空间数据云; 降水数据来自于中科院资源环境数据中心 1980—2018 年 39 个年份的 1 km 分辨率降水数据, 利用 ArcGIS 10.2 进行多年平均降雨量计算, 并重采样至 30 m 分辨率; 土壤数据来源于寒区旱区科学数据中心的 中国土壤数据集, 利用土壤数据属性表中的土壤深度、土壤质地等数据计算得到植物有效含水量^[32]; 流域、子流域边界数据来源于中科院地理与湖泊研究所, 其中太湖流域划分出了 490 个子流域单元。

2018 年太湖流域各省市生活用水、农业用水和工业用水来源于中国经济社会大数据研究平台。

1.3 水量供给服务供需模型构建

(1) 水量供给模型

利用 InVEST 模型的产水模块计算产水量得到水量的供给(图 2), 其主要原理是利用 Budyko 水量平衡算法, 将降雨量去除实际蒸散发量作为其水资源供给量^[33—34]。为保证产水量不受降雨量和实际蒸散量的年际变化影响, 采用近 39 年多年平均降雨数据和多年平均蒸散发数据进行产水量测算。其中土壤有效含水量数据依据世界土壤数据库中国土壤数据集中的土壤质地与有机质数据, 采用土壤有效含水量 (AWC) 估算模型计算得到太湖流域土壤有效含水量。依据土地利用覆被类型确定的植物根深、蒸散系数和植被系数如表 1 所示。太湖流域子流域数据基于 30 m 格网的 DEM 数据, 参考相关水系图, 运用 SWAT 模型凹陷算法对 DEM 数

据进行修正,依据圩堤闸坝具体位置进行人为调整,得到 490 个子流域单元。当前已有许多学者利用该算法实现产水量计算从而得到水资源供给量,具体计算方法详见相关参考文献^[35-37]。

现实情况下区域的总水量受到上游来水或调水的影响。根据水利部太湖流域管理局 2018 年太湖流域“引江济太”工程的调水数据,太湖流域通过望虞河常熟水利枢纽从长江引水总量为 11.71 亿 m^3 ,其中有 5.44 亿 m^3 引水由望亭水利枢纽进入太湖。考虑到主要调水的路径仅由望虞河水利工程和太湖组成,且调水主要在子流域间进行利用,故将调水量在望虞河和太湖所处子流域进行空间栅格分配,将子流域所分配水量与原产水量相加,得到太湖流域水供给总量(图 2)。

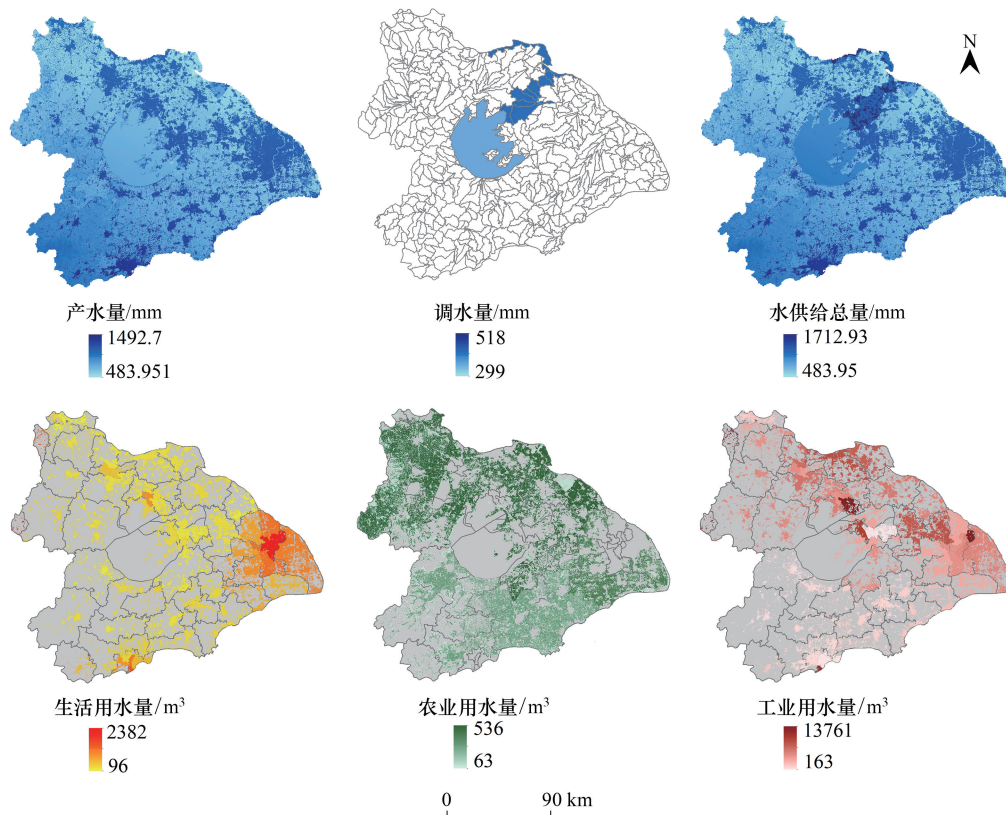


图 2 太湖流域水供给总量与生活、农业和工业需水量分布

Fig.2 Distribution of total water supply and domestic, agricultural and industrial water demand in the TLB

(2) 水量需求模型

用水需求量可划分为生活用水量、农业用水量和工业用水量和生态用水量这四部分,其中,生态用水量指的是植物蒸散发或满足自身生长所需的用水量,本研究在计算产水量时已经扣除,所以在计算需求时,将太湖流域的用水需求量化为其他三个部分之和(图 2)。由于无法获得栅格尺度上的生活、农业和工业用水数据,这里采用空间离散分配的方法,将现有数据分配至每个栅格,本研究分别用 D_{domestic} 、 $D_{\text{agricultural}}$ 和 $D_{\text{industrial}}$ 表示每个栅格单元的生活用水量、农业用水量和工业用水量,其测算方法如下:

$$D_{\text{domestic}} = \frac{P_{\text{distract}}}{P_{\text{province}}} \times \frac{D_{\text{province}}}{N_{\text{distract}}} \quad (1)$$

式中, P_{distract} 、 P_{province} 分别表示区县行政单元和省级行政单元的人口数量, D_{province} 表示各省市的生活用水总量, N_{distract} 表示各区县的建设用地栅格总数。

$$D_{\text{agricultural}} = \frac{A_{\text{province}}}{A_{\text{area}}} \times \left(\frac{5}{6N_{\text{paddy}}} + \frac{1}{6N_{\text{dry}}} \right) \quad (2)$$

式中, A_{province} 、 A_{area} 分别为各省市的农业用水总量和农业用地面积, N_{paddy} 、 N_{dry} 分别为各省市水田和旱地的栅格数量。已有文献表明, 单位面积的水田用水量是旱地的 5 倍^[38], 故将单位面积的农业用水量按 5:1 分配给水田和旱地。

$$D_{\text{industrial}} = \frac{V_{\text{distract}}}{V_{\text{province}}} \times \frac{T_{\text{province}}}{N_{\text{distract}}} \quad (3)$$

式中, V_{distract} 、 V_{province} 分别表示区县行政单元和省级行政单元的二产增加值, T_{province} 表示各省市的二产增加值总量, N_{distract} 表示各区县的建设用地栅格数。

1.4 水质净化服务供需模型构建

(1) 水质净化服务供给模型

许多研究直接将污染物的截留量作为水质净化的供给能力在空间上进行刻画。然而, 由于不同子流域的土地覆被类型有差异, 其实际产生的氮、磷(本研究以氮为例)污染负荷量也不同, 故其截留量的大小在一定程度上无法表征其实际的水质净化能力。本研究将总氮污染物的环境容量作为水质净化服务的供给, 其中环境容量用允许排放到流域中的氮含量来表征, 允许氮排放量采用国家地表水质标准中的Ⅲ类水质标准 (1mg/L)^[39] 与产水量的乘积得到, 其中允许氮排放量与实际氮排放量均不考虑客水带来的影响, 计算公式如下:

$$WP_c = Q_{\text{III grade}} \times V_{\text{water}} \quad (4)$$

式中, WP_c 表示水质净化的供给, $Q_{\text{III grade}}$ 是Ⅲ类水质标准下允许排放的氮输出量 (mg/L), V_{water} 是流域的实际产水量 (m^3)。

(2) 水质净化服务需求模型

利用 InVEST 模型的水质净化模块能够评估生态系统对于氮等营养物质的净化能力, 可以估算流域单位栅格的氮输出率和最终输出量^[40]。本研究中的水质净化服务需求用实际输出到水体中的氮含量表征:

$$WP_d = X_{\text{exp}} = \sum_i \text{modifiedload}(x, i) \times \text{NDR}_i \quad (5)$$

式中, WP_d 表示水质净化需求, X_{exp} 表示输出到水体中的氮含量, $\text{modifiedload}(x, i)$ 表示根据当地条件调整后栅格 i 的氮负荷量, NDR_i 表示氮输出率。

1.5 参数校验

利用产水模块计算产水量时需要要对 Z 常数(季节常数)进行修正, 本研究充分考虑太湖流域河湖水系的复杂性, 利用公式 $Z = 0.2 \times N$ 计算太湖流域地区季节常数, 其中 N 为研究年份年均降雨事件 ($>1\text{ mm}$) 的降雨事件, 最终计算得到太湖流域地区的 Z 值为 19.3 ^[41]。通过查阅相关文献得到产水模块中的植物根深系数、植物蒸散系数和植被系数以及水质净化模块中的氮负荷系数、氮截留率等相关参数(表 1)。

表 1 生物物理属性表

Table 1 Biophysical table

土地类型 Landuse types	植物根深 Root depth/mm	植物蒸散系数 Vegetation evapotranspiration	植被系数 Vegetation	氮负荷系数 load_n	氮截留率 eff_n
水田 Paddy field	2000	1.1	0	33.6	0.25
旱地 Non-irrigated field	2000	0.7	1	21.8	0.25
林地 Woodland	7000	1	1	3.57	0.8
草地 Grassland	2000	0.6	1	5.33	0.4
灌木地 Shrubland	4500	0.8	1	4.45	0.6
湿地 Wetlands	2000	1.2	0	2.35	0.5
水体 Water bodies	1000	1	0	0.01	0.05
建设用地 Construction land	100	0.1	0	9.87	0.05
裸地 Bare land	300	0.3	0	6.81	0.05

1.6 优化情景设定

在现状情景(BA)基础上,分别增设提升用水效率(SE)、改善土地管理方式(SM)和优化土地利用(SL)这三种情景。(1)SE是考虑科技进步背景下,工农业高效用水节水效率提升,设定用水需求削减20%作为提升用水效率情景来评估水量供需变化^[42-44]。(2)有研究表明在减量施肥20%的条件下,既能够保证粮食生产,又能够大幅减少氮、磷的流失,SM是通过设置水田、旱地的氮初始负荷系数,以实现以减氮施肥20%为主导的改善土地管理方式情景^[45-46]。(3)考虑到太湖流域大范围的土地利用结构调整比较困难的现实,仅考虑将河岸带、湖岸带的耕地和一定坡度以上的耕地转化为林地的土地利用布局优化情况;SL根据已有研究,对河湖岸带设置30 m缓冲区,在缓冲区内进行地类变更;同时根据国际地理学联合会将耕地坡度划分规定($\leq 2^\circ$ 、 $2^\circ-6^\circ$ 、 $6^\circ-15^\circ$ 、 $15^\circ-25^\circ$ 、大于 25° ,其中 $\leq 2^\circ$ 视为平地),结合太湖流域的实际地形高差,将坡度大于 6° 以上的耕地进行林地转化。

2 结果与分析

基于现状情景和以上优化情景,分别得到太湖流域四种情景下的水量与水质需求,分别用需水量和氮输出量表征。不同情景下水量供给服务和水质净化服务需求在数量和空间分布上存在差异,水量需求高值区主要集中在上海及苏锡常等高密度建设用地,水质净化需求(氮输出量)在流域南部和中部的太湖较低而在东南部 and 西北部较高,其中SM情景和SL情景下水质净化服务需求相较于BA情景其输出量和范围都由明显下降(图3)。在BA情景下太湖流域氮输出总量为 4.22×10^7 kg,而SM情景和SL情景氮输出量为 3.53×10^7 kg和 2.62×10^7 kg,分别下降了16.35%和37.91%,SL情景通过对土地利用的优化对污染物输出起到了有效削弱。

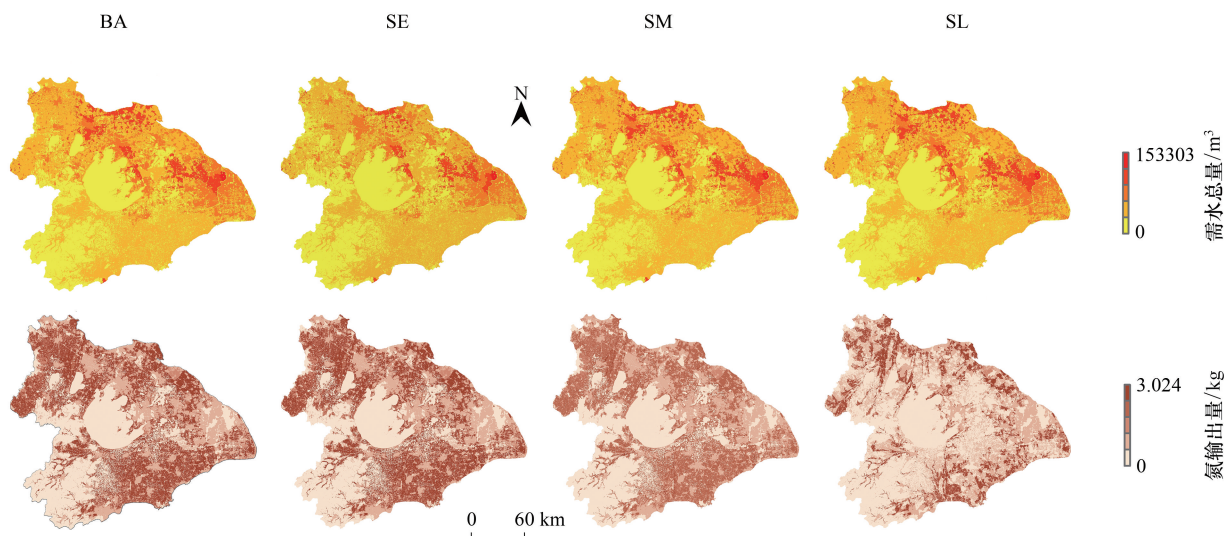


图3 四种情景下的需水量与氮输出量空间分布

Fig.3 Changes in the distribution of water demand and nitrogen export under four scenarios

基于水量与水质的水生态服务供需关系的测度方法分别得到太湖流域现状(BA)、提升用水效率(SE)、改善土地管理方式(SM)和优化土地利用(SL)等四种情景下的水量供给与水质净化服务供需空间分布。为更好的刻画水量供给与水质净化服务在空间上的供需状况,将单项服务供给大于需求的区域表征为供需盈余区,反之则为供需赤字区;综合两项服务供需关系空间分布得到水量赤字-水质赤字、水量赤字-水质盈余、水量盈余-水质赤字和水量盈余-水质盈余这四种综合供需类型。

太湖流域整体在四种情景的水量供需均处于盈余状态,四种情景下盈余水量变化不大,约为78亿 m^3 ;水

质供需在 BA 和 SE 情景下处于赤字状态,赤字量均为 6.80×10^6 kg,而在 SM 和 SL 情景下处于盈余状态,并且在 SL 情景下达到最大盈余,最大盈余量为 9.09×10^6 kg。可以看出,目前整个流域为水量盈余-水质赤字状态,为进一步识别出水量和水质供需冲突尤其是水质性缺水的具体区域,以便地方政府制定科学合理的调控措施,本研究从栅格、小流域和县域等三个尺度上展开了分析。

2.1 栅格尺度下水量供给与水质净化服务供需空间分布

栅格尺度下,太湖流域的水量供需状况要明显优于水质供需状况,水量赤字区域主要集中在太湖流域东部和北部区域,这些区域包含了上海和苏锡常等高度城市化区域,人口稠密与集中连片的建设用地使得这些区域的用水需求大于其实际供给。水质赤字区域主要集中在流域的西北部 and 东南部,相较于其他区域,这些区域的耕地面积占比较高,土地覆被类型更加破碎化,从而使其水质需求难以得到满足。SE 情景明显改善了流域内的水量赤字状况,SM 情景使流域西北部 and 东南部水质赤字程度大幅降低,SL 情景则在此基础上进一步缩小流域内的赤字范围。栅格尺度下,除 SE 情景外其他情景的水量赤字-水质赤字的范围主要集中在流域北部小范围内,而东部主要呈现出水量赤字-水质盈余的状态,而在 SL 情景下由于水质赤字区范围的缩小,流域南部和中部的的水量盈余-水质盈余区范围显著扩大(图 4)。

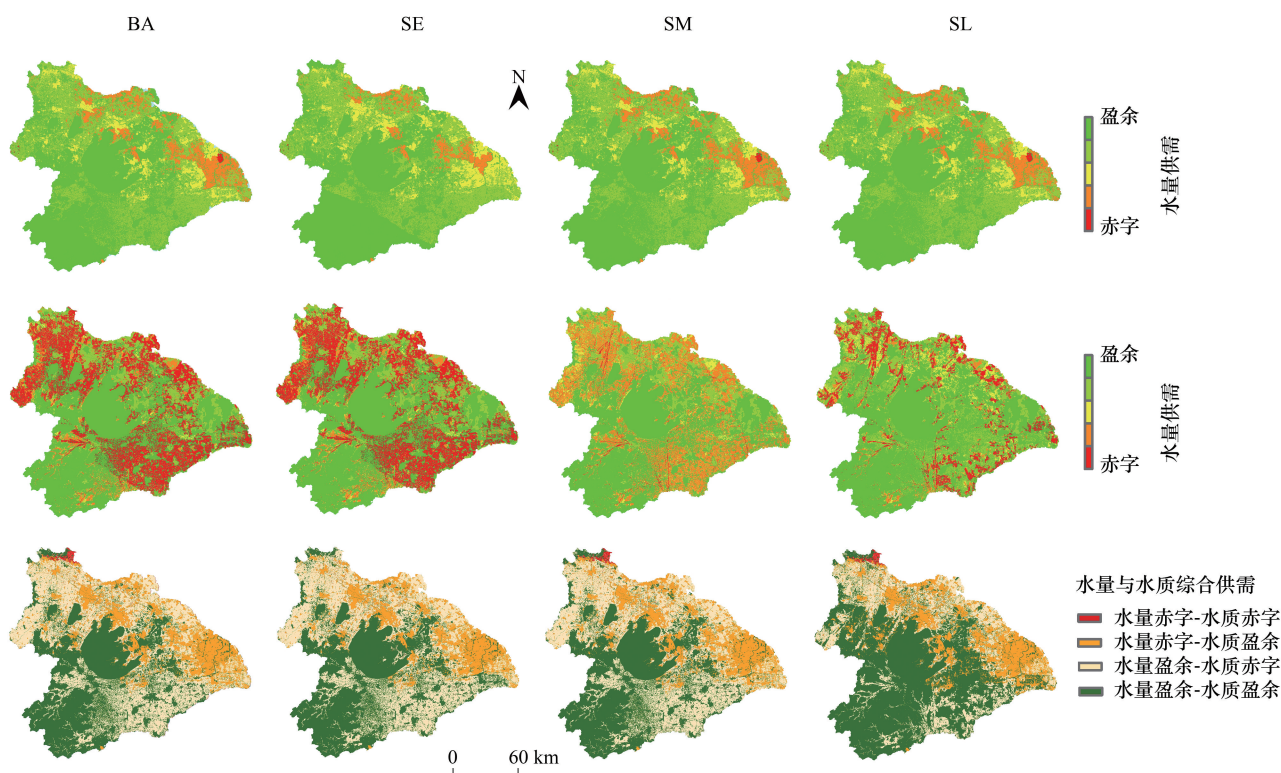


图 4 栅格尺度下四种情景水量与水质供需空间分布

Fig.4 The spatial distribution of water quantity and water quality supply and demand in four scenarios at the pixel scale

2.2 子流域尺度下水量供给与水质净化服务供需匹配分析

在子流域尺度下,水量赤字区域在太湖流域北部集中连片分布,水质赤字区域在北部片和东南片集中分布。子流域尺度下各情景的水量与水质的供需状况分布范围大致与栅格尺度相同,其中望虞河所处子流域水量供需状况有所改善。在 SM 情景和 SL 情景下,水质供需赤字、盈余状况的变化较为显著,通过改善土地管理方式使得原处于较低赤字程度的子流域转变为了盈余状态,而通过优化土地利用,处于水质赤字状态的子流域在范围和程度上都有明显改善,仅有太湖流域北部和东南部地等边缘子流域处于水质赤字状态。在综合考虑子流域尺度下的水量与水质综合供需情况下:相较于栅格尺度,子流域尺度的水量赤字-水质赤字区范围

明显增加,其范围逐渐扩大到了北部及东北部地区,而水量盈余-水质盈余的子流域依旧分布在南部和中部区域,并在 SL 情景下该供需状态的范围达到最大(图 5)。

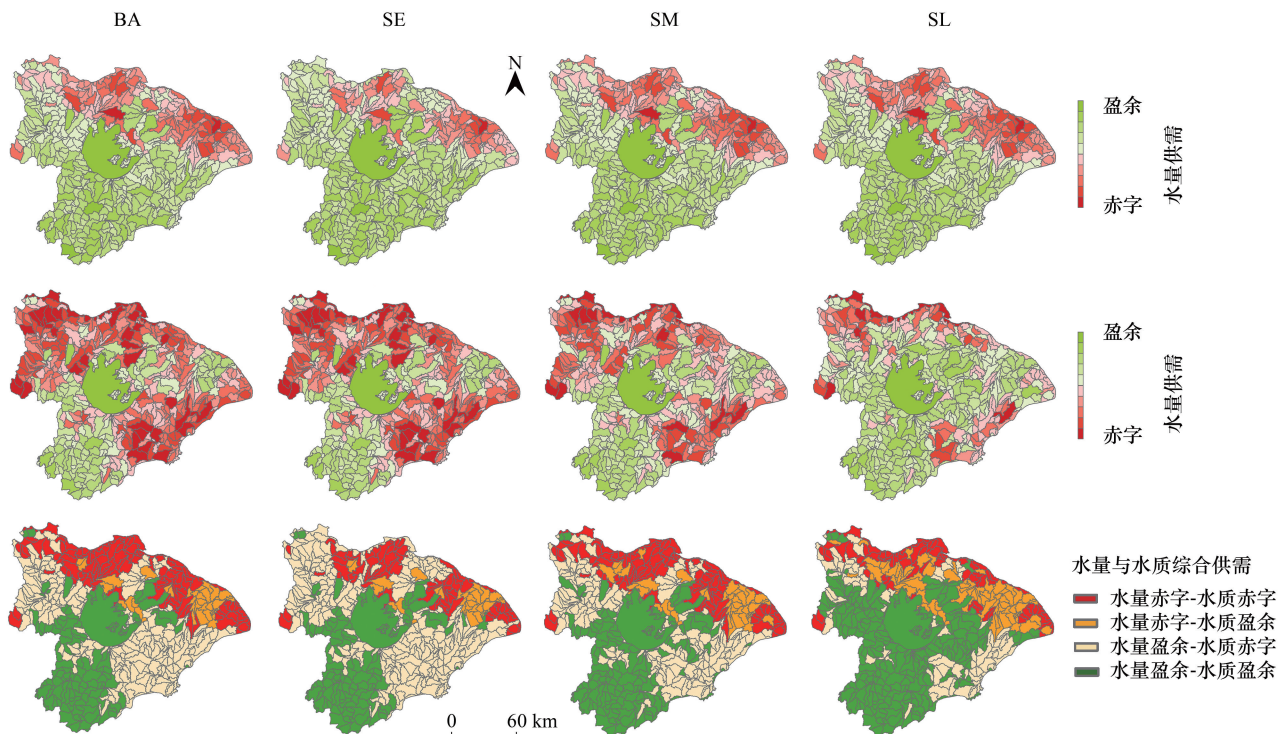


图 5 子流域尺度下四种情景水量与水质供需空间分布

Fig.5 The spatial distribution of water quantity and water quality supply and demand in the four scenarios at the sub-basin scale

2.3 县级尺度下水量供给与水质净化服务供需空间匹配分析

县级尺度下的水量供给与水质净化服务供需空间分布在空间上更加集聚。BA 情景下,上海(浦东新区、嘉定区、松江区)、苏州(太仓市、昆山市)、常州(武进区、钟楼区、天宁区、新北区)、无锡(惠山区、新吴区)部分地区以及张家港市、江阴市和句容市处于水量赤字-水质赤字状态。SM 情景下,上海浦东新区、嘉定区的水质状况有所改善,该区域转变为了水量赤字-水质盈余区。SL 情景下,苏州昆山市、常州和无锡部分地区也进一步转变为了水量赤字-水质盈余区域。流域的东南部和西北部等区域正处于快速城市化的发展阶段,生态本底也相对较弱,并且还承担着粮食供给的压力,尽管在水量上满足需求,但却面临着水质赤字的风险。SM 和 SL 情景在现状基础上有效的改善了西北部 and 东南部的水质赤字状况,使得水量盈余-水质盈余范围进一步扩大(图 6)。

3 讨论

3.1 不同情景下水量供给与水质净化服务的供需变化响应

从两种服务的供给、需求和供需关系的空间变化差异出发来讨论 SE、SM 和 SL 等三种不同优化方案的改善效果,结果表明各优化情景下的水质供需均有明显的空间响应。在栅格尺度下 SM 情景均能有效降低流域西北部 and 东南部的水质赤字情况,水质赤字面积在三个尺度下分别减少了 0.66%、8.31% 和 20.43%。在 SL 情景下,水量供需状况未有明显变化,但其水质赤字面积进一步减少了 15.32%、31.37% 和 45.15%。SM 情景和 SL 情景下水量盈余-水质赤字和水量赤字-水质赤字的面积在三个尺度中也均呈减少趋势,SM 情景水量赤字-水质赤字(水量盈余-水质赤字)面积分别减少了 3.95%(1.57%)、9.45%(15.75%) 和 19.87%(33.34%),SL 情景中的减幅更大,分别减少了 20.11%(39.00%)、41.35%(56.11%) 和 58.20%(66.87%),这也说明优化土

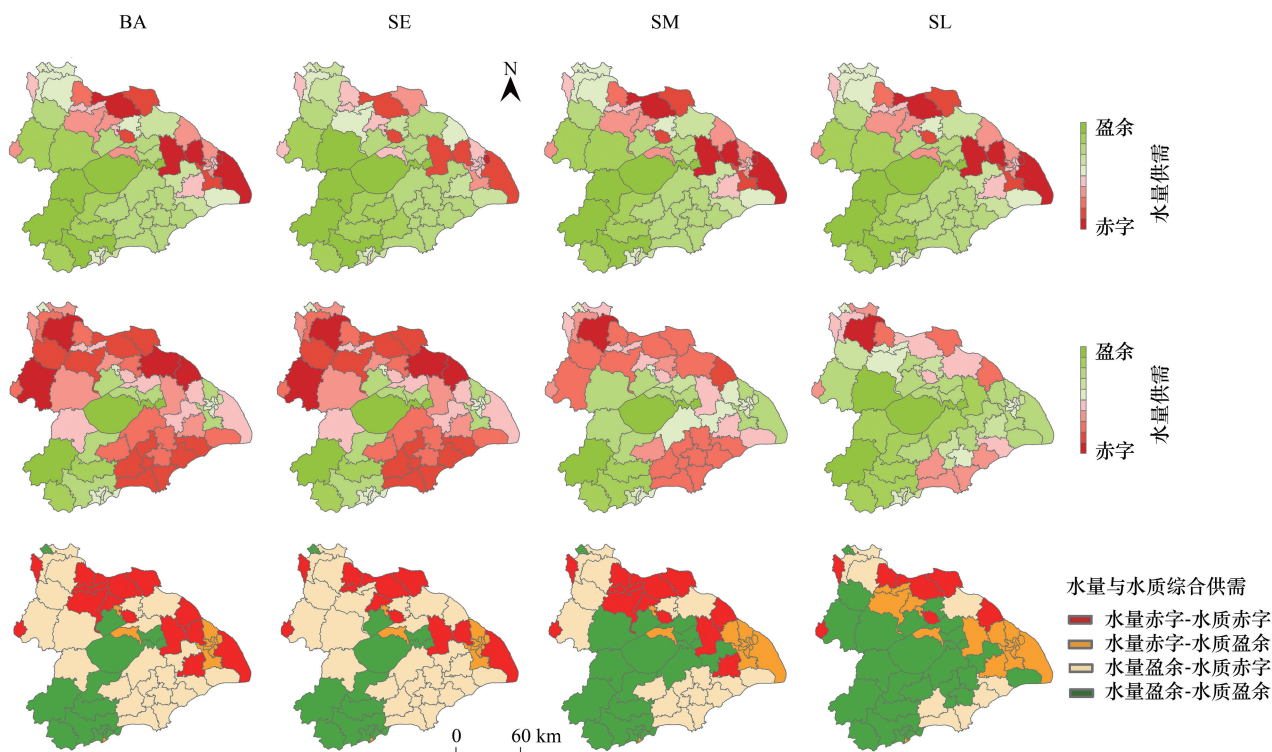


图6 县级尺度下四种情景水量与水质供需空间分布

Fig.6 The spatial distribution of water quantity and water quality supply and demand in the four scenarios at the county scale

地利用布局的方式最能有效减轻水质赤字程度并使赤字范围大幅缩小,是一种源头控制的优化方案。

不同情景下两种服务供需综合响应可为“水量型缺水”和“水质性缺水”的治理提供方向^[47]:如在水量赤字-水质赤字区可通过提升用水效率和实施污染源治理(减量施肥或优化土地利用配置方式)等方式来实现水量与水质的协同治理;在水量赤字-水质盈余区采取相关节水减耗措施;以及在水量盈余-水质赤字区加大污染源治理以增加可利用水资源。

3.2 不同尺度下的水量供给与水质净化服务供需空间分异

本研究在传统水资源供需评估的基础上考虑水质净化服务供需状况,并在多尺度下进行供需状况空间变化及其匹配分析。不同尺度下的水量盈余-水质盈余区均集中在太湖流域南部和中部区域,随着尺度增大,各供需类型的分布更加集聚,流域西北部和东南部的水质赤字状况也愈加明晰。栅格尺度下流域东部的上海和苏锡常地区整体处于水量赤字-水质盈余区。在子流域和县级行政区尺度下,水量赤字-水质赤字范围进一步扩大,范围进一步涵盖了上海浦东新区、太仓市、昆山市、江阴市和张家港市以及无锡和常州部分市区。不同尺度下的各供需类型占比在不同情景均存在一定的差异,其中子流域尺度和县级尺度的占比变化尽管有差异但整体具有相同变化趋势,这两种尺度下的水量与水质双赤字面积占比远高于栅格尺度。四种情景下,各个尺度上的水量盈余-水质盈余面积均显著增长,且均在SL情景达到最大。相比栅格尺度,子流域和县级尺度下的SM和SL情景各供需类型面积占比呈现出更显著的下降和上升趋势,表明不同尺度采用同一优化情景对综合缓解水量与水质赤字程度的效果存在一定差异(图7)。

以上分析表明,随着评价单元尺度的增大,水量供给与水质净化服务供需在空间上的失衡状况逐渐显现,水量赤字-水质赤字和水量盈余-水质赤字两种缺水型空间在不同情景下呈现出不同的变化趋势。这充分说明基于多尺度的水量供给与水质净化服务供需解析,可以克服单一尺度评估无法明确区域的水量与水质供需的真实状况的问题,有助于不同尺度下亟需治理的关键区域精准识别,以防止对潜在风险区的忽视。

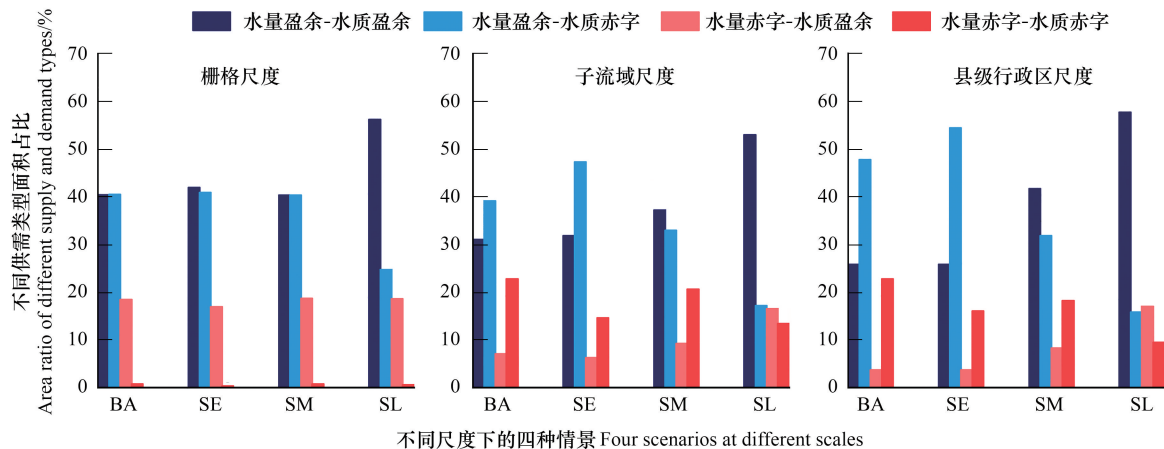


图7 不同尺度四种情景下各供需类型面积占比

Fig.7 Changes in the area proportions of different supply and demand types under four scenarios at the sub-basin

BA: 现状情景 Business As Usual; SE: 提升用水效率 Scenario of Improving Water Use Efficiency; SM 改善土地管理方式 Scenario of Changing Land Use Management; SL: 优化土地利用 Scenario of Optimizing Land Use Configuration

3.3 不同尺度下的水量供给与水质净化服务供需变化机制分析

提取不同水量与水质供需状况下的土地利用覆被类型并就其面积占比进行统计分析。栅格尺度下,BA 情景中建设用地集中区面临着较为严重的水量赤字,建设用地面积占据水量赤字区域总面积的 95.63%,林地、草地、湿地和水体等地类则主要分布在水量盈余区域,而水质赤字区域几乎全部集中在耕地片区;在 SM 情景中,耕地区的水质赤字面积有所减少,但下降趋势不明显;而 SL 情景中,水质赤字情况有明显改观,耕地区的水质赤字占比由原先的 41.21%下降到 25.9%,赤字面积减少了 1/3。子流域尺度下,耕地区水量赤字面积和建设用地水质赤字面积相较于栅格尺度明显增大;BA 情景下,耕地区占据了水量赤字总面积的 44.39%,与建设用地占比(48.27%)相当,表明子流域尺度下耕地与建设用地面临着相同程度的水量缺水问题。相较于栅格尺度和子流域尺度,县级尺度 BA 情景下的建设用地水质赤字面积占比分别增长了 19.42%和 2.29%;在 SL 情景下,耕地区水质赤字面积占比由 38.5%下降到 16.5%,建设用地水质赤字面积也下降到了 7.62%,赤字面积均减少了 1/2 以上。

综合三个尺度不同情景下的水量与水质供需类型区的土地利用结构变化分析来看:水量赤字区主要集中在建设用地分布区域,但随着尺度的逐渐增大,水质赤字区的建设用地面积也在不断增加;耕地仍是引致水质赤字的主要原因,在三个尺度下均没有明显的变化;SE 和 SL 情景在三种尺度下均能明显改善耕地区和建设用地地区的水量赤字和水质赤字情况。

3.4 多情景耦合下的多尺度水量供给与水质净化服务供需响应

本研究将 SE、SM 和 SL 三种情景进行两两耦合和集成耦合分析,探讨不同尺度下的水量供给与水质净化服务供需响应特征。结果表明:三种尺度下的水量盈余-水质盈余区面积占比相较 BA 情景都呈现出波动上升趋势,而水量赤字-水质赤字区在子流域和县级尺度呈现出明显的下降趋势(图 8)。在三种尺度下 SE-SL 耦合情景能够最大限度的改善水量与水质供需状况,水量盈余-水质盈余区面积占比分别可达 57.66%、56.08%和 62.65%,相较于 BA 情景该供需类型面积分别提升了 42.9%、43.39%和 142.92%。总体来看,实行 SL 或 SE-SL 耦合情景能够在最大限度的避免水质赤字而尽可能扩大水量和水质共同盈余的范围。考虑到太湖流域自身的社会经济和生态本底,完全采取节水措施或大范围进行土地利用变更会在一定程度上限制工、农业运行以及社会经济发展,采用 SE-SL 耦合情景能够有效避免对当前水资源利用的较大限制并有效解决流域的水质污染问题,从而增加流域内的可利用水资源量。

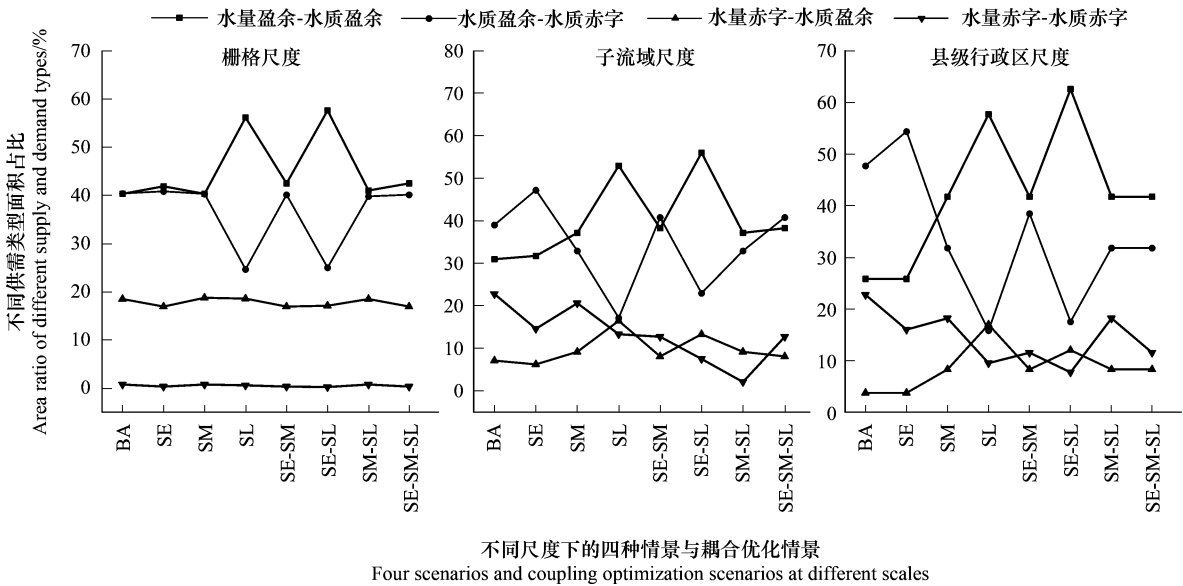


图 8 多情景耦合下的多尺度供需变化分析

Fig.8 Multi-scale supply and demand change analysis under multi-scenario coupling

SE-SM: 耦合提升用水效率与改善土地管理方式; SE-SL: 耦合提升用水效率与优化土地利用; SM-SL: 耦合改善土地管理方式与优化土地利用; SE-SM-SL: 耦合提升用水效率、改善土地管理方式和优化土地利用

考虑到县、区是水资源优化管理单元,本研究重点对县级尺度的水量与水质供需空间分布状况进行多情景耦合分析。总体来看 SE-SM 耦合情景和 SE-SL 耦合情景相对于其他耦合方式具有更优的实施效果(图 9)。对比 BA 情景,SE-SM 耦合情景和 SE-SL 耦合情景能够使上海市(浦东新区、嘉定区)、昆山市、常州市(武进区、天宁区)部分地区由水量赤字-水质赤字区转变为了水量赤字-水质盈余区,而 SE-SL 耦合情景在 SE-SM 耦合情景的基础上进一步将上海市(松江区、奉贤区)、无锡市(惠山区、)常州市(武进区、天宁区)部分地区由

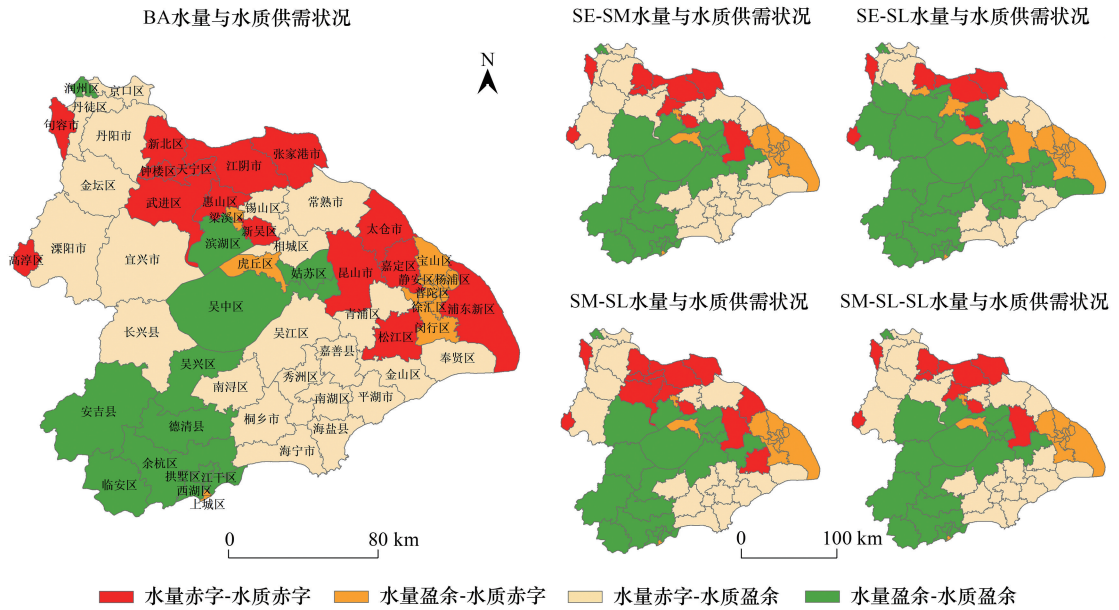


图 9 县级尺度下耦合多情景的水量与水质供需状况空间分布

Fig.9 The spatial distribution of water quantity and water quality supply and demand under multiple coupled scenarios at the county scale

水量盈余-水质赤字转化为了水量水质双盈余区域,这一结果表明这些区域进行土地利用优化能够更好的改善水质赤字状况。尽管通过耦合 SL 与其他情景能够得到较优的解决方案,但因当前耕地保护政策的刚性约束,将特定区域的耕地转化为林地具有一定的实现难度,故要考虑到区域的可实施程度从而选择合适的耦合优化方案,诸如在基本农田保护区要禁止耕地占用,生态保护红线内则可以采用退耕还林等方式进行土地利用的优化。尽管 SM 情景的效果相较 SL 情景要弱一些,但当前仍是最具现实可操作性的。

4 结论

通过对太湖流域水量与水质供需进行定量评估并探讨多尺度下多情景的水量与水质供需状况,本研究得出如下主要结论:

(1)太湖流域的水量供需状况显著优于水质供需状况,节水能够有效改善流域内的水量赤字,而减量施肥和优化土地利用配置能够显著改善流域内的水质赤字。

(2)随着评价单元尺度的增大,水量供给与水质净化服务供需在空间上的失衡状况逐渐显现,水量赤字-水质赤字和水量盈余-水质赤字两种缺水型空间在不同情景下呈现出不同的变化趋势。多尺度的水量供给与水质净化服务供需解析,有助于不同尺度下亟需治理的关键区域精准识别。

(3)水量赤字区主要集中在建设用地分布区域,耕地仍是引致水质赤字的主要原因;但随着尺度的逐渐增大,水质赤字区的建设用地面积也在不断增加。

(4)优化土地利用结构的方案是解决水质性缺水的最有效方法,但该方案的现实推广仍需要突破现有政策尤其是耕地保护政策的刚性约束,当前治理太湖流域“水质性缺水”问题,最具可行性的方法还是将减量施肥、优化土地利用结构与提高节水效率等多种措施综合搭配实施。

生活用水、农业用水和工业用水等不同用水服务间存在区别,故其水质应遵循具体水功能分区标准。不同水功能区体现了流域水生态功能在空间上的分布差异,水功能分区可以实现流域水质和水生态的差别化管理。在未来的研究中,还应加强对水功能分区的技术方法和理论实践的进一步探索,建立多级别、多层次的水功能分区及相应水质标准,从而基于不同水功能分区对流域水量与水质供需状况进行评估,以期为流域水生态提供更加精准的监测和保护管理。

参考文献(References):

- [1] 咎欣,张玉玲,贾晓宇,熊广森. 永定河上游流域水生态系统服务价值评估. 自然资源学报, 2020, 35(6): 1326-1337.
- [2] 刘春芳,王韦婷,刘立程,李鹏杰. 西北地区县域生态系统服务的供需匹配——以甘肃古浪县为例. 自然资源学报, 2020, 35(9): 2177-2190.
- [3] 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.
- [4] 彭建,赵会娟,刘焱序,杜悦悦. 区域水安全格局构建:研究进展及概念框架. 生态学报, 2016, 36(11): 3137-3145.
- [5] 俞孔坚,王春连,李迪华,袁弘,李文豪,洪敏. 水生态空间红线概念、划定方法及实证研究. 生态学报, 2019, 39(16): 5909-5921.
- [6] Zhang C, Li J, Zhou Z X, Sun Y J. Application of ecosystem service flows model in water security assessment: a case study in Weihe River Basin, China. *Ecological Indicators*, 2021, 120: 106974.
- [7] Naderi M M, Mirchi A, Bavani A R M, Goharian E, Madani K. System dynamics simulation of regional water supply and demand using a food-energy-water nexus approach: application to Qazvin Plain, Iran. *Journal of Environmental Management*, 2021, 280: 111843.
- [8] 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.
- [9] 郭朝琼,徐昔保,舒强. 生态系统服务供需评估方法研究进展. 生态学杂志, 2020, 39(6): 2086-2096.
- [10] 彭建,胡晓旭,赵明月,刘焱序,田璐. 生态系统服务权衡研究进展:从认知到决策. 地理学报, 2017, 72(6): 960-973.
- [11] 王萌辉,白中科,董潇楠. 基于生态系统服务供需的陕西省土地整治空间分区. 中国土地科学, 2018, 32(11): 73-80.
- [12] Wei Y P, Wu S L, Jiang C, Feng X M. Managing supply and demand of ecosystem services in dryland catchments. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2021, 48: 10-16.
- [13] Aznar-Sánchez J A, Velasco-Muñoz J F, Belmonte-Ureña L J, Manzano-Agugliaro F. The worldwide research trends on water ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 310-323.
- [14] 潘翔,石培基,吴娜. 基于生态系统服务均衡性视角的生态风险评估及管控优先区识别——以兰州市为例. 环境科学学报, 2020, 40(2): 724-733.

- [15] 张建, 雷刚, 漆良华. 南水北调中线水源区丹江口市域景观格局变化及氮磷净化能力. 生态学报, 2021, 41(6): 2261-2271.
- [16] 欧维新, 刘翠, 陶宇. 太湖流域水供给服务供需时空演变分析. 长江流域资源与环境, 2020, 29(3): 623-633.
- [17] 张萌雪, 鲁春霞, 吴燕红, 夏建新. 基于水量供需平衡的河北省张家口市崇礼区水资源承载力分析. 水土保持通报, 2020, 40(1): 276-282.
- [18] 刘立程, 刘春芳, 王川, 李鹏杰. 黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究——以兰州市为例. 地理学报, 2019, 74(9): 1921-1937.
- [19] 陈骏宇, 王慧敏, 刘钢, 白杨. “水-能-粮”视角下杭嘉湖区域生态系统服务供需测度及政策研究. 长江流域资源与环境, 2019, 28(3): 542-553.
- [20] 王旻, 尹少华, 卢丽帆. 缺水型城市水资源供需匹配的模拟和预测——以甘肃省兰州市为例. 经济地理, 2020, 40(2): 89-96.
- [21] 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.
- [22] Jorda-Capdevila D, Gampe D, García V H, Ludwig R, Sabater S, Vergoñós L, Acuña V. Impact and mitigation of global change on freshwater-related ecosystem services in Southern Europe. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 895-908.
- [23] Chen T Q, Feng Z, Zhao H F, Wu K N. Identification of ecosystem service bundles and driving factors in Beijing and its surrounding areas. *Science of the Total Environment*, 2020, 711: 134687.
- [24] Guan Q C, Hao J M, Ren G P, Li M, Chen A Q, Duan W K, Chen H. Ecological indexes for the analysis of the spatial-temporal characteristics of ecosystem service supply and demand: a case study of the major grain-producing regions in Quzhou, China. *Ecological Indicators*, 2020, 108: 105748.
- [25] Raudsepp-Hearne C, Peterson G D. Scale and ecosystem services: how do observation, management, and analysis shift with scale—lessons from Québec. *Ecology & Society*, 2016, 21(3): 16.
- [26] Cui F Q, Tang H P, Zhang Q, Wang B J, Dai L W. Integrating ecosystem services supply and demand into optimized management at different scales: a case study in Hulunbuir, China. *Ecosystem Services*, 2019, 39: 100984.
- [27] 孙泽祥, 刘志锋, 何春阳, 邬建国. 中国快速城市化干燥地区的生态系统服务权衡关系多尺度分析——以呼包鄂榆地区为例. 生态学报, 2016, 36(15): 4881-4891.
- [28] 余玉洋, 李晶, 周自翔, 马新萍, 张城. 基于多尺度秦巴山区生态系统服务权衡协同关系的表达. 生态学报, 2020, 40(16): 5465-5477.
- [29] 张静静, 朱文博, 朱连奇, 李艳红. 伏牛山地区森林生态系统服务权衡/协同效应多尺度分析. 地理学报, 2020, 75(5): 975-988.
- [30] Wei H J, Liu H M, Xu Z H, Ren J H, Lu N C, Fan W G, Zhang P, Dong X B. Linking ecosystem services supply, social demand and human well-being in a typical mountain-oasis-desert area, Xinjiang, China. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 44-57.
- [31] Ma W J, Opp C, Yang D W. Spatiotemporal supply-demand characteristics and economic benefits of crop water footprint in the semi-arid region. *Science of the Total Environment*, 2020, 738: 139502.
- [32] 周文佐, 刘高焕, 潘剑君. 土壤有效含水量的经验估算研究——以东北黑土为例. 干旱区资源与环境, 2003, 17(4): 88-95.
- [33] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算. 大气科学, 1981, 5(1): 23-31.
- [34] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 2001, 37(3): 701-708.
- [35] 陈心盟, 王晓峰, 冯晓明, 张欣蓉, 罗广祥. 青藏高原生态系统服务权衡与协同关系. 地理研究, 2021, 40(1): 18-34.
- [36] Ma S, Wang L J, Zhu D Z, Zhang J C. Spatiotemporal changes in ecosystem services in the conservation priorities of the southern hill and mountain belt, China. *Ecological Indicators*, 2021, 122: 107225.
- [37] 戴尔阜, 王亚慧. 横断山区产水服务空间异质性及归因分析. 地理学报, 2020, 75(3): 607-619.
- [38] 许剑勇, 张兵. 旱稻作物系数研究//推进气象科技创新加快气象事业发展——中国气象学会 2004 年年会论文集. 安徽: 中国气象学会, 2004: 457-458.
- [39] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. GB 3838—2002 地表水环境质量标准. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [40] Wang Y Y, Atallah S, Shao G F. Spatially explicit return on investment to private forest conservation for water purification in Indiana, USA. *Ecosystem Services*, 2017, 26: 45-57.
- [41] Donohue R J, Roderick M L, McVicar T R. Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model. *Journal of Hydrology*, 2012, 436-437: 35-50.
- [42] 巩灿娟, 徐成龙, 张晓青. 黄河中下游沿线城市水资源利用效率的时空演变及影响因素. 地理科学, 2020, 40(11): 1930-1939.
- [43] Burszta-Adamiak E, Sychalski P. Water savings and reduction of costs through the use of a dual water supply system in a sports facility. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 66: 102620.
- [44] Fathollahi-Fard A M, Ahmadi A, Al-E-Hashem S M J M. Sustainable closed-loop supply chain network for an integrated water supply and wastewater collection system under uncertainty. *Journal of Environmental Management*, 2020, 275: 111277.
- [45] 谢真越, 卓慕宁, 李定强, 廖义善, 韦高玲. 不同施肥水平下菜地径流氮磷流失特征. 生态环境学报, 2013, 22(8): 1423-1427.
- [46] 李恩尧, 邱亚群, 彭佩钦, 侯红波, 李裕元, 任可爱. 洞庭湖红壤坡地减氮控磷对玉米产量和径流氮磷的影响. 水土保持学报, 2011, 25(4): 32-35.
- [47] 刘俊国, 赵丹丹. “量-质-生”三维水资源短缺评价: 评述及展望. 科学通报, 2020, 65(36): 4251-4261.