

基于情景模拟的东北地区产水服务供需响应特征研究

孙才志¹, 安志英²

(1. 辽宁师范大学海洋可持续发展研究院, 辽宁 大连 116029; 2. 辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁 大连 116029)

摘要: 基于“产水服务供需-土地覆被优化-发展情景模拟”一体化框架, 构建了社会经济发展与生态保护需求耦合的多目标优化模型, 评估了东北地区 2030 年在自然发展(S1)、经济优先(S2)、生态优先(S3)和经济-生态平衡(S4)4 种情景下的土地覆被演变及产水服务供需变化。结果表明: 2030 年东北地区土地覆盖类型变化较大, S2 情景下建设用地扩张最显著, S3 情景下林地显著增加、草地减少, S1 和 S4 情景下草地分布更广; 东北地区产水服务供给总体增长, 对情景变化敏感, S1 情景下东北平原部分区域水资源压力突出, S2 情景下供给增幅最大, 但因需求同步上升供需矛盾加剧, S3 情景供给稳定, 供需较为平衡但存在结构性风险, S4 情景通过生态与经济平衡, 有效缓解供需压力, 实现最佳协调; 2030 年东北地区产水服务高需求区集中于人口与产业密集区, 空间格局变化较小。

关键词: 水资源; 产水服务; 供需关系; 土地覆被; 东北地区

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2025)05-0196-09

Research on supply and demand response characteristics of water yield in Northeast China based on scenario simulation//SUN Caizhi¹, AN Zhiying² (1. Institute of Marine Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China; 2. School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: Based on an integrated framework of “water yield supply-demand-land cover optimization- development scenario simulation”, a multi-objective optimization model was developed to couple socioeconomic development with ecological protection needs. Land cover changes and water yield supply-demand variations in Northeast China under four scenarios of 2030, including natural development (S1), economic priority (S2), ecological priority (S3), and economic-ecological balance (S4), were evaluated. The results show that in 2030, there will be significant changes in land cover types in Northeast China. The expansion of construction land is most significant in scenario S2, while forest land increases significantly and grassland decreases in scenario S3. Grassland distribution is wider in scenarios S1 and S4. Overall, the water yield supply increases and is sensitive to scenario changes. Under scenario S1, some areas in the Northeast Plain face severe water resource pressure. Scenario S2 shows the most significant supply increase, but demand rises simultaneously, exacerbating supply-demand conflicts. Under scenario S3, although structural risks exist, water yield supply remains stable with relatively balanced supply and demand. Scenario S4 effectively alleviates supply-demand pressure by balancing ecological and economic goals and achieving the best coordination. In 2030, high-demand areas in Northeast China are concentrated in population- and industry-dense regions, with little change in spatial patterns.

Key words: water resources; water yield services; supply-demand relationship; land cover; Northeast China

在社会经济快速发展与生态环境保护矛盾日益突出的背景下,水资源作为支撑社会发展与生态安全的关键要素,其保障能力已成为区域高质量发展的核心前提。在资源承载力趋紧的形势下,协调经济增长与生态保护,实现二者协同优化,已成为全球关注的关键议题。作为水资源系统的重要生态功能,产水服务是生态系统通过水文过程向人类提供可用水资源的过程性服务,既体现了水资源的自然

供给能力,也反映了生态系统维系水循环稳定的综合功能^[1]。然而,在气候变化与人类活动的双重驱动下,产水服务的供需格局呈现显著的动态演化与空间异质性^[2-3]。在不同发展情景下对其开展系统模拟与空间调控,已成为提升区域水资源管理科学性与精准性的关键路径。

近年来,围绕未来情景下产水服务供需关系,已有研究从不同角度构建情景模拟方法并开展实证分

析^[4-9]。研究普遍表明,气候变化与土地利用变迁是影响产水服务空间格局与供需平衡的核心驱动因素。在方法集成方面,张岩^[10]采用人工神经网络与元胞自动机模拟人口和土地格局演变,间接预测了产水服务供需变化,发现服务响应机制集成方面具有优势,但对自然本底供给能力的刻画仍显不足;吴蒙^[11]基于系统动力学与 CLUE-S (conversion of land use and its effects at small regional extent) 模型,探讨了不同土地利用路径下水资源演变趋势,强调了土地利用决策对生态水文过程的调控作用;李兆碧等^[12]结合 SWAT (soil and water assessment tool) 模型与多种管理情景,评估了水量与水质协同调控对供需匹配的提升效应,尽管需求端刻画较为精细,但尚缺乏社会经济系统的动态耦合。随着极端气候频发与用水矛盾加剧,产水服务供需系统的稳定性与适应性面临更大挑战。Ding 等^[13-14]基于 SSP-RCP 情景,分析了 2030—2050 年华北与西南地区的区域脆弱性与空间差异,揭示了对复合气候背景的敏感响应特征。Wang 等^[15]构建了融合斑块级土地利用变化模拟 (patch-generating land use simulation, PLUS) 与生态系统服务和权衡的综合评估 (integrated valuation of ecosystem services and trade-offs, InVEST) 模型的分析框架,有效集成了土地利用变化与生态水文服务的空间响应过程。Jian 等^[16]结合 GeoSOS-FLUS 与 LUH2 数据,在流域尺度下模拟了多情景产水服务演变,提升了模型的适应性与空间精度。总体来看,当前研究已取得积极进展,逐步聚焦于土地利用、气候变化等多因子耦合下的供需调控机制。综上,当前的研究多数未能充分整合生态保护政策与经济发展路径,缺乏从区域战略层面出发的系统模拟框架。同时,已有成果多集中于黄河流域、长江上游等典型区域,针对东北地区的系统性研究仍明显不足。作为我国重要的水资源涵养区与生态安全屏障,东北地区面临水资源开发利用矛盾日益突出等严峻挑战,其产水服务的情景模拟与调控机制亟待深入研究,特别是在对区域发展战略与生态保护政策约束下的协同模拟方面,仍存在研究空缺。

鉴于此,本文以“产水服务供需-土地覆被优化-发展情景模拟”为核心分析框架,聚焦水资源保障能力提升,融合生态保护与经济发展目标,构建多情景模拟机制,综合模拟 2030 年不同发展路径下的土地覆被演变与水资源供需格局,识别空间失衡区域,探索精准调控路径,旨在提升生态-经济系统协调发展的建模能力,为未来流域水资源系统管理与空间优化提供科学支撑与决策依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

东北地区包括黑龙江、吉林和辽宁三省(图 1, 审图号 GS(2023)2763),不含内蒙古东部地区,地处温带季风气候区,水资源较为丰富,是我国北方重要的水源涵养区和生态安全屏障。区域内森林和耕地广布,具备良好的产水服务基础,在保障生态系统稳定和人类用水方面具有重要作用。东北地区拥有较完整的水系结构与丰富的地表径流资源,但也存在明显的时空分布不均、水资源开发利用矛盾突出等问题。近年来,受气候变化、人口流动和土地覆被变化等因素影响,区域产水服务供需格局发生明显变化,出现供需失衡和空间错配等问题,水资源保障能力面临挑战。特别是随着农业结构调整、工业用水增长与城镇化推进,该区域的产水服务供需压力日益增强,调控需求迫切。

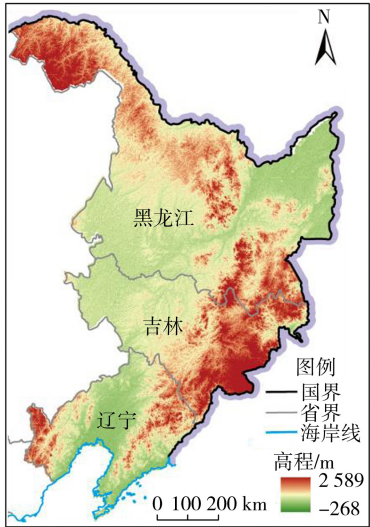


图 1 研究区概况
Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源

本文采用多源数据对东北地区的产水供需进行模拟分析,所有空间数据统一为 WGS_1984_Albers 坐标系。数据主要来源于中国科学院资源环境科学与数据中心、国家地球系统科学数据中心、WorldPop、《中国土壤数据集(V1.1)》、统计年鉴及水资源公报等,所需参数参考文献[17-20]确定。产水服务模拟所需的 2030 年降水与蒸散发数据来自国家青藏高原科学数据中心发布的 SSP245-MRI-ESM2-0 情景。人口密度采用欧盟委员会发布的 2030 年全球居住区人口空间分布数据。

2 研究方法

2.1 产水服务供需比计算

基于水量平衡原理,采用 InVEST 模型测算产

水服务供给量,利用 Annual Water Yield 模块计算每个栅格的年产水量;通过人口密度与人均需水量,估算人类活动对产水服务的需求量,具体计算方法参见文献[21-22],产水服务供需比计算公式为

$$I_{SD} = \frac{S - D}{S + D} \quad (1)$$

式中: I_{SD} 为产水服务供需比,通过将产水服务供给与人类需求相联系,揭示服务的盈余或赤字状态, $I_{SD}>0$ 表示盈余, $I_{SD}<0$ 表示赤字, $I_{SD}=0$ 表示供需平衡; S 、 D 分别为产水服务的供给量和需求量。

2.2 土地覆被结构多目标优化

多目标优化模型是一种用于处理多个目标之间冲突与权衡的数学工具,广泛应用于土地覆被结构优化、资源管理与环境保护等领域。土地覆被结构的多目标优化是在综合考虑多目标的基础上,通过数学方法确定相对最优的土地覆被格局,实现各目标之间的协调与均衡^[23]。

2.2.1 未来发展情景设定

a. 自然发展情景(S1)。假设现有发展政策和土地利用趋势持续延续,模拟在无新增重大干预措施和气候影响温和条件下的自然演化过程,主要用于评估维持现状路径下资源利用与生态系统服务的演化趋势。该情景基于 2010—2020 年东北地区土地覆被变化趋势,通过马尔科夫链预测 2030 年的土地覆被面积,并将其作为 PLUS 模型中土地需求的输入参数进行空间分布模拟,不设其他约束条件。该情景的设定依据为土地利用变化模拟中的常规基准路径,具有明确的理论支持,且东北地区部分区域发展惯性强,人口流动缓慢,经济增速有限,因此该情景能够较好反映区域实际状况。

b. 经济优先发展情景(S2)。将社会经济效益最大化作为核心目标,强调 GDP 增长、工业与农业扩张,相对弱化产水服务的保护要求。各土地覆被类型按单位面积 GDP 赋予经济效益系数,以此构建目标函数,模拟经济主导下的土地覆被优化格局。该情景的设定依据《东北振兴“十四五”实施方案》等区域政策,可反映当前东北地区当前以产业转型和经济复苏为导向的发展现实,具有明确的政策依据与区域适应性。

c. 生态优先发展情景(S3)。强调生态保护和气候适应能力,将生态系统服务价值最大化作为优化目标,优先考虑水资源的健康性与可持续性。依据各类土地覆被的单位面积生态系统服务价值赋予生态效益系数,构建生态导向的目标函数。该情景的设定参考《东北黑土地保护规划(2021—2030 年)》和“三北”工程攻坚战等政策文件,突出

生态屏障功能与自然资源保护,符合东北地区在国家生态安全格局中的战略定位,也契合当前区域生态治理不断加强的实际趋势。

d. 经济-生态平衡发展情景(S4)。在经济效益与生态效益目标函数的基础上,新增生态承载力目标函数。以流域最大生态承载力为约束,对各土地覆被类型赋予生态承载系数,实现经济、生态、承载 3 个目标约束下的多目标优化模拟,力图实现区域可持续发展。该情景的设定结合《国土空间生态修复规划》《双碳战略目标》等政策导向,体现绿色发展理念,符合东北地区协调推进生态保护与经济发展的实际需求。

选取经济价值系数、生态效益系数及生态承载系数,基于 GDP、产水服务及生态承载力为 S2、S3、S4 情景定义目标函数,表达式为

$$\max(F_{S2}) = \sum_{i=1}^6 a_i x_i \quad (2)$$

$$\max(F_{S3}) = \sum_{i=1}^6 b_i x_i \quad (3)$$

$$\max(F_{S4}) = \sum_{i=1}^6 c_i x_i \quad (4)$$

式中: F_{S2} 为 S2 情景的目标函数,表征不同土地覆被类型的经济价值; x_i 为决策变量,表示不同土地覆被类型的面积, i 为 1~6 分别对应耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地; a_i 为 S2 情景下第 i 个土地覆被类型的经济价值系数,用各土地覆被类型单位面积 GDP 来表示,其中耕地、林地、草地、水域分别以单位农业、林业、畜牧业、渔业的产值衡量^[17,23],建设用地用单位第二、三产业总产值衡量,未利用地因经济效益低且难以量化,设为 0; F_{S3} 为 S3 情景的目标函数,表征不同土地覆被类型的生态系统服务价值; b_i 为 S3 情景下第 i 个土地覆被用类型的生态效益系数,用不同土地覆被类型的单位面积的产水服务价值衡量,由于生态服务价值系数仅覆盖耕地、林地、草地、湿地、荒漠和水域,将建设用地的生态效益设为 0; F_{S4} 为 S4 情景的目标函数; c_i 为 S4 情景下第 i 个土地覆被类型的生态承载系数,用不同土地覆被类型的生态承载力衡量,其中将耕地、林地、草地和水域纳入计算,建设用地与未利用地的生态承载力设为 0。

参考谢高地等^[17]的单位面积生态系统服务价值当量表获取生态价值系数,将 2000—2020 年东北地区单位面积 GDP 数据作为各土地覆被类型的经济价值系数,结合 GM(1,1) 模型,预测东北地区 2030 年经济价值系数、生态价值系数和生态承载系数,结果见表 1。

表 1 2030 年东北地区不同土地覆被类型的经济价值系数、生态效益系数和生态承载系数

Table 1 Economic value coefficient, ecological benefit coefficient, and ecological carrying capacity coefficient of different land cover types in Northeast China in 2030

土地覆被类型	经济价值系数/(万元/km ²)	生态效益系数	生态承载系数
耕地	394.74	44.71	1.00
林地	15.83	207.36	0.84
草地	1659.78	63.53	2.06
水域	750.57	983.53	1.94
建设用地	17142.94	0	0
未利用地	0	0.25	0

2.2.2 多目标优化约束条件

a. 土地面积总量约束。研究区总面积应基本保持稳定,依据有效栅格数量确定为 790 642 km²。

b. 总人口约束。不同土地覆被类型对应的人口密度存在差异。基于历年数据,采用 GM(1,1) 灰色模型预测 2030 年耕地、林地、草地和建设用地的人口密度分别为 104.18、20.45、26.99 和 985.65 人/km²,预测总人口为 97 235 070 人。具体约束为

$$104.18x_1 + 20.45x_2 + 26.99x_3 + 985.65x_5 \leq 97\,235\,070 \quad (5)$$

c. S2 情景下用地类型面积约束。S2 情景下,各区域的经济价值不小于 S1 情景,具体约束为

$$\sum_{i=1}^6 a_i x_i \geq \sum_{i=1}^6 m_i x_{1i} \quad (6)$$

式中: m_i 为 S1 情景下第 i 个土地覆被类型的经济价值系数; x_{1i} 为 S1 情景下第 i 个土地覆被类型的面积。

d. S3 情景下用地类型面积约束。S3 情景下,各区域的生态价值不小于 S1 情景,具体约束为

$$\sum_{i=1}^6 b_i x_i \geq \sum_{i=1}^6 n_i x_{1i} \quad (7)$$

式中 n_i 为 S1 情景下第 i 个土地覆被类型的生态价值系数。

e. 耕地面积约束。研究期内,东北地区耕地面积虽呈增—减—增波动,但整体变幅较小。考虑耕地保护与粮食安全政策,参考郭鹏程^[18]的研究,在适宜区域适度扩增耕地,将耕地面积上下限分别设为当前面积的 120%和 80%,具体约束为

$$30.44\% \leq \frac{x_1}{790\,642} \leq 45.66\% \quad (8)$$

f. 森林覆盖面积约束。本文基于生态绿当量设定森林覆盖率约束,其中耕地、林地和草地的绿当量系数分别为 0.46、1.00 和 0.49^[18]。根据 2000—2020 年土地覆被数据,东北地区森林覆盖率为 87.14%~88.62%,最高值为 2005 年。为防止生态

退化,2030 年模拟结果中森林覆盖率设定不低于 88.62%,具体约束为

$$\frac{0.46x_1 + x_2 + 0.49x_3}{790\,642} \leq 88.62\% \quad (9)$$

g. 林地及草地的面积约束。根据 GM(1,1) 模型预测,2030 年林地和草地的面积占比分别为 43.45%和 5.41%。为确保合理变化,设定林地和草地面积的上下限分别为 2030 年比例的 120%和 80%,具体约束为

$$34.76\% \leq \frac{x_2}{790\,642} \leq 52.15\% \quad (10)$$

$$4.33\% \leq \frac{x_3}{790\,642} \leq 6.49\% \quad (11)$$

h. 水域及未利用地的面积约束。根据 GM(1,1) 模型预测,2030 年水域和未利用地的面积占比分别为 2.26%和 6.95%。水域的约束条件设定为 2030 年预测值的 120%和 80%作为上下限。为控制未利用地的扩张,将其最低值设为下限,最高值为上限,具体约束为

$$2.26\% \leq \frac{x_4}{790\,642} \leq 2.44\% \quad (12)$$

$$5.31\% \leq \frac{x_5}{790\,642} \leq 6.13\% \quad (13)$$

i. 建设用地面积约束。根据马尔科夫链预测,2030 年东北地区建设用地的占比为 4.46%。因此,建设用地的约束条件设定为 2030 年预测值的 80%和 120%作为上下限,具体约束为

$$3.57\% \leq \frac{x_6}{790\,642} \leq 5.35\% \quad (14)$$

j. 景观多样性约束。各发展情景下林地、草地、水域的总面积不低于 S1 情景,具体约束为

$$x_2 + x_3 + x_4 \geq x_{12} + x_{13} + x_{14} \quad (15)$$

k. 其他约束。耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地的面积均大于 0。

l. 模型精准性约束。各发展情景不同土地覆被类型面积以 S1 情景为基准,浮动范围为 20%,具体约束为

$$0.8x_{1i} \leq x_i \leq 1.2x_{1i} \quad (16)$$

2.2.3 多目标优化模型求解

土地覆被模拟基于 4 种发展情景设定,计算各类型用地面积并代入 PLUS 模型,模拟土地覆被空间分布。S1 情景根据 2000—2020 年数据,通过马尔科夫链预测 2030 年不同土地覆被类型面积。S2 情景和 S3 情景分别以经济效益最大化和生态效益最大化为目标,构建单目标优化模型,结合约束条件在 Lingo 中求解,获取预测面积。S4 情景为多目标

优化,考虑经济效益、生态效益及生态承载力最大化,通过遗传算法求解,设置约束容差为 0.001,帕累托集比例为 0.5,种群规模 500,最大迭代 500,最终选取 3 个目标函数和结果的最大值对应的解作为 S4 情景的最优解。

2.3 未来发展情景下的产水服务供需模拟方法

2.3.1 产水服务供需预测

在 S1 情景下,产水和固碳服务供给采用 InVEST 模型预测,粮食服务供给结合历史归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)数据与土地利用关系确定;需求量则基于张家其等^[19]的研究,并使用灰色预测 GM(1,1)模型对未来人均需求量进行预测。对于 S2、S3 和 S4 情景,参考张家其等^[19-20]的研究,选择不同预测方法。S2 情景优先考虑经济增长,导致水资源需求增加;S3 情景通过提高资源利用效率,减少环境压力;S4 情景平衡经济增长与生态保护,设置折中增速。基于此,使用回归分析建立人均用水量与经济发展变量之间的回归模型,根据不同情景进行调整,S2 情景下提高与经济增长相关的变量系数,S3 情景下降低增速,S4 情景下设置折中增速。相比于 2020 年,2030 年 S1、S2、S3 和 S4 情景下,人均用水量分别增长 10.20%、13.00%、-1.70% 和 2.80%。

2.3.2 PLUS 模型

PLUS 模型用于模拟和预测土地覆被变化,结合了地理信息系统和人工智能技术,以捕捉土地利用变化的驱动力和空间模式。该模型整合了地理环境、社会经济因素和土地利用政策等多方面的信息,适用于区域尺度的土地利用变化模拟和空间规划,具体计算方法参考文献^[18]。

2.3.3 GMMOP 模型

GMMOP 模型由 GM(1,1) 和 MOP (multi-objective programming)模型集成,是一种在复杂系统中结合时间序列预测与多目标优化的综合方法。本文利用 GM(1,1)模型对未来状态进行模拟,预测 2030 年不同土地覆被类型的价值系数,并将其用于目标函数的构建。MOP 模型通过设定决策变量、目

标函数和约束条件以求解不同情景下的最优解。

3 结果与分析

3.1 不同发展情景下的土地覆被预测结果

3.1.1 模型精度评价与土地利用转换成本矩阵

为验证土地覆被预测的科学性与合理性,本文基于 2010—2020 年土地覆被数据计算发展概率,并以 2020 年实际土地面积为输入,对东北地区不同发展情景下的土地覆被类型面积进行预测。采用 Kappa 系数与总体精度评估预测结果,Kappa 系数与总体精度分别为 0.788 1 与 0.844 7,表明模型具备较高模拟精度,预测结果可靠。

选取 2010 年与 2020 年东北地区土地覆被数据,提取变化部分用于 LEAS 模块分析。选取自然因子(高程、坡度、年均气温、年均降水量、NDVI、土壤类型)和社会经济因子(人口密度、GDP 网格、距河流的距离、距铁路的距离、距公路的距离)共 11 项作为驱动因子。基于 2000—2020 年土地利用转移矩阵计算扩张能力,具体转换矩阵如表 2 所示,其中 0 表示不可转化,1 表示可转化。最后得到各类用地的邻域权重:耕地 0.38、林地 0.45、草地 0.05、水域 0.02、建设用地 0.04、未利用地 0.06。

3.1.2 不同发展情景下的土地覆被特征

图 2 为 2020 年和 2030 年不同发展情景下东北地区土地覆被类型分布。由图 2 可见,相较于 2020 年,S2 情景下建设用地面积显著扩张,扩张区域以哈尔滨、长春、沈阳、大连等城市为中心,呈现明显的扩散态势。相比之下,S1、S3 和 S4 情景下建设用地变化较小。在 S3 情景下,林地面积明显增加,相较 2020 年及 S1 情景均呈扩张趋势;与此同时,草地面积明显减少。S4 情景下草地空间分布最为广泛。由于水域与未利用地覆盖面积较小,不同发展情景下的变化均不显著。

3.2 不同发展情景下的产水服务供需情况

表 3 为 2000 年和 2030 年不同发展情景下东北地区产水服务供需指标。由表 3 可见,2030 年 4 种发展情景下东北地区的产水服务供给量均显著高于

表 2 不同未来发展情景下东北地区土地利用转换矩阵

Table 2 Land use conversion matrix under different future development scenarios in Northeast China

土地覆被 类型	S1 情景						S2 情景						S3 情景						S4 情景					
	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0
B	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0
C	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0
D	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
E	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
F	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

注:A、B、C、D、E、F 分别表示耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。

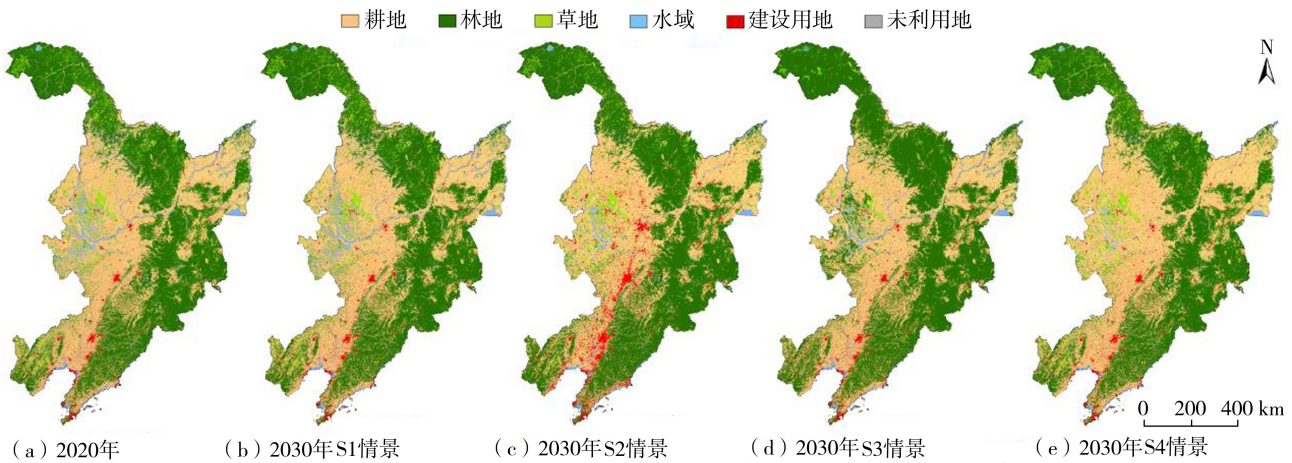


图 2 2020 年和 2030 年不同发展情景下东北地区土地覆被类型分布

Fig. 2 Land cover type distribution in Northeast China under different development scenarios of 2030 and in 2020

表 3 2020 年和 2030 年不同发展情景下东北地区产水服务供需指标

Table 3 Supply and demand indicators of water yield services in Northeast China under different development scenarios of 2030 and in 2020

年份	发展情景	产水服务		供需比
		供给量/ (m^3/hm^2)	需求量/ (m^3/hm^2)	
2020		2490.50	339.33	0.76
2030	S1	3348.91	473.94	0.44
2030	S2	3451.31	483.44	0.39
2030	S3	3404.98	433.56	0.41
2030	S4	3459.83	448.83	0.43

2020 年。其中, S2 和 S4 情景下供给量最高, 分别达 3451.31 和 $3459.83 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, S3 情景次之, S1 情景最低。产水服务需求量则在 S2 情景下最大, 反映出经济快速发展带来的用水压力; S3 情景需求最小, 表明生态优先路径有助于控制用水增长。尽管供给量提升, 供需比在 2030 年不同发展情景下均低于

2020 年, 尤其在 S2 情景下降至 0.39, 供需矛盾最为突出。相对而言, S3 和 S4 情景的供需关系更为协调, 具有较高的资源保障能力。

3.2.1 不同发展情景下的产水服务供给特征

图 3 为 2020 年和 2030 年不同发展情景下东北地区产水量的空间分布。由图 3 可见, 2030 年不同发展情景下的产水量的空间格局与 2020 年变化不大。产水供给主要受气候、地形、土地利用、土壤和植被等因素影响。2030 年不同发展情景下的供给差异主要源于土地覆被类型在截流和渗透能力上的差别, 而整体变化较小。具体表现为大兴安岭、辽西北和吉林东部产水量增加, 三江平原部分区域略有下降。吉林西部在 S4 情景下产水量略高于 S1 和 S3 情景, 主要因为该区域在 2020 年多为未利用地, 土地覆被类型变化影响了截流与渗透, 导致产水量差异。

3.2.2 不同发展情景下的产水服务需求特征

图 4 为 2020 年和 2030 年不同发展情景下东北

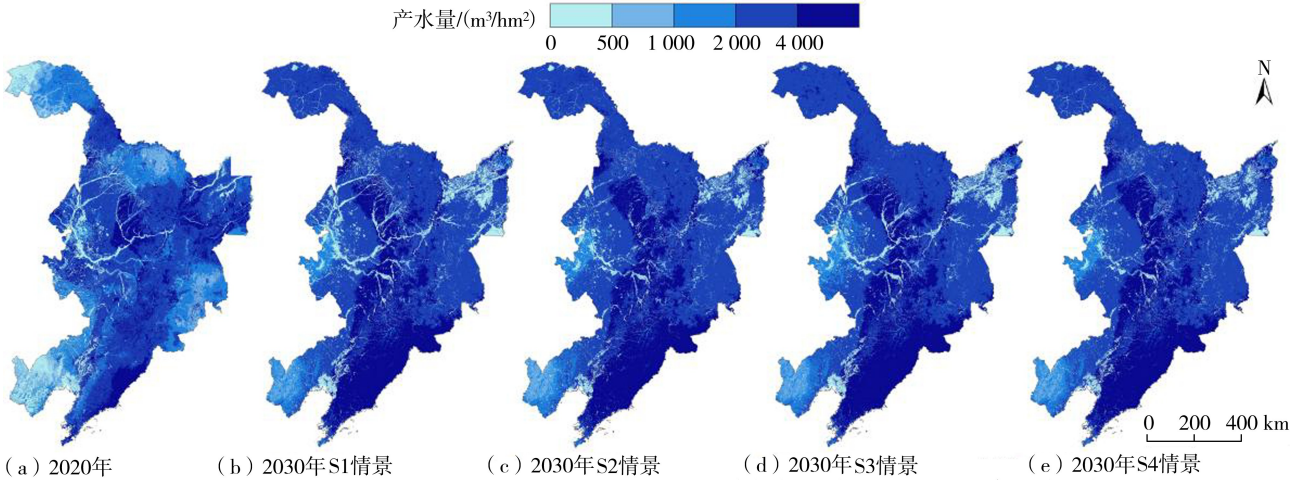


图 3 2020 年和 2030 年不同发展情景下东北地区产水量的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of water yield supply in Northeast China under different development scenarios of 2030 and in 2020

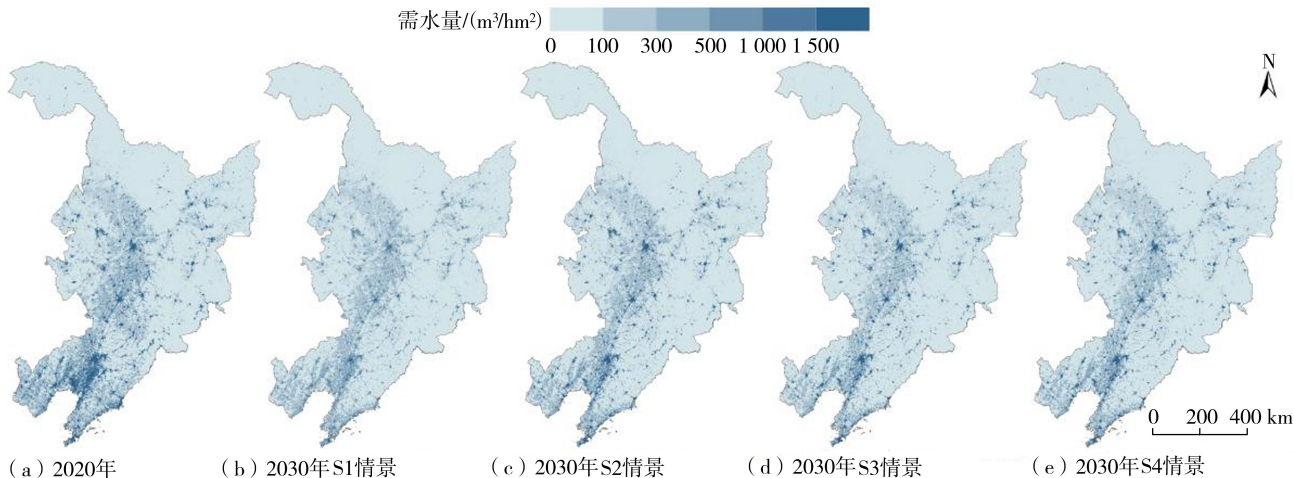


图4 2020年和2030年不同发展情景下东北地区需水量的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of water yield demand in Northeast China under different development scenarios of 2030 and in 2020

地区需水量的空间分布。由图4可见,2030年不同发展情景下,随着社会经济发展与人口变化,东北地区产水服务的需求呈现小幅空间波动,但整体分布格局保持稳定。具体而言,东北地区产水需求主要受人口规模、水资源利用效率及经济发展水平影响。其中长春、沈阳、大连等人口密集及工业集中的城市依然是产水服务需求的重点区域,其中心区域需水量超 $1500\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。尽管4种发展情景下总需求有所波动,这些城市的用水需求依然保持较高水平,反映出产业布局和城镇化进程对水资源需求的持续推动。同时,用水结构优化与节水技术推广在一定程度上缓解了需求增长压力,显示出东北地区在水资源管理方面取得的积极成效。

3.2.3 不同发展情景下的产水服务供需匹配格局

图5为2020年和2030年不同发展情景下东北地区产水服务供需比的空间分布。由图5可见,

2030年不同发展情景下东北地区产水服务的供需匹配格局发生了明显变化。相比2020年,辽西北地区供水压力普遍缓解,反映出水资源管理和土地覆被结构有所优化。吉林西部、三江平原及辽中部分区域供需比低于 -0.8 ,仍处严重供不应求状态,这与当地天然水资源禀赋较差及气候变化加剧有关。S1情景下供需失衡面积最大,显示缺乏有效调控时矛盾更为突出。S2和S4情景通过提升土地利用效率和水资源配置,显著缩小了供需失衡区域,缓解了水资源压力。整体来看,科学合理的发展路径,尤其是兼顾生态保护与经济发展的平衡策略,有助于提升东北地区产水服务的供给能力与供需匹配水平,增强生态系统调节水资源供需的功能。

4 讨论

4.1 不同发展情景下的产水服务供需差异性

不同发展情景下产水服务的供需关系存在显著

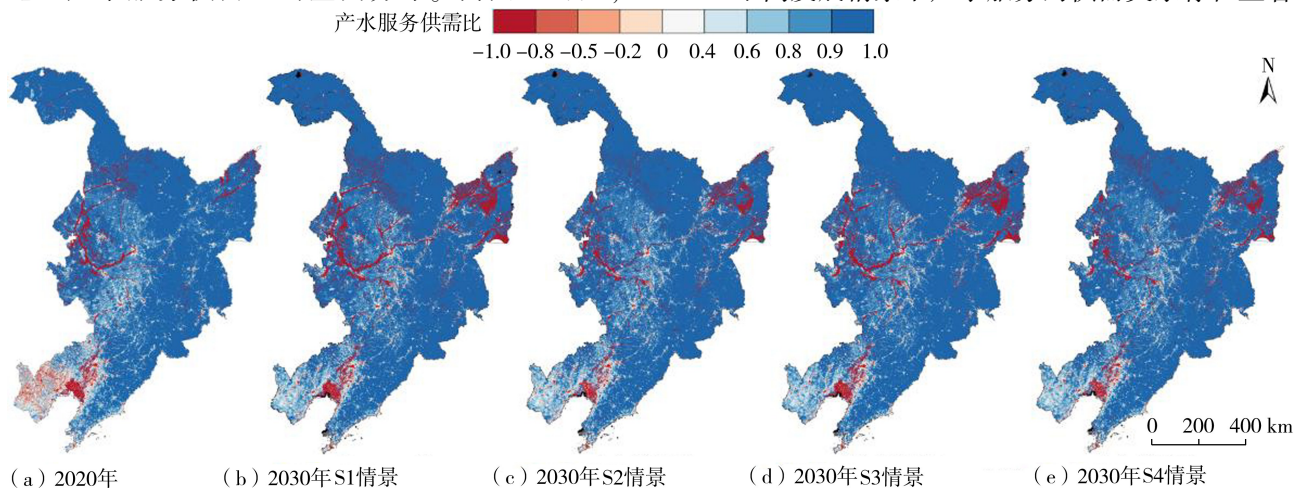


图5 2020年和2030年不同发展情景下东北地区产水服务供需比的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of supply and demand ratio of water yield services in Northeast China under different development scenarios of 2030 and in 2020

差异^[24]。S1 情景下,东北地区土地覆被格局变化较小,产水供给能力基本稳定,但经济活跃区用水需求显著增加,局部区域供需矛盾开始显现。在 S2 情景下,建设和工业用地快速扩张,生态用地被压缩,产水供给能力明显下降;用水需求同步增长,导致供需矛盾加剧,部分地区面临水资源短缺与生态风险。S3 情景通过扩大林地和湿地面积,增强了水源涵养功能,提高了产水供给能力,整体供需压力有所缓解;然而由于城市用地受限,人口与产业集聚区可能出现水资源过剩与利用效率偏低的问题^[25]。S4 情景则在保障较高供给能力的同时,通过调控用水需求,实现了相对协调的供需格局,其实施效果依赖于精细化空间管控与区域协同。

4.2 产水服务供需模拟的科学性

本文中 2030 年 SSP245-MRI-ESM2-0 情景下研究区的降水量与蒸散发数据来源于国家青藏高原科学数据中心,具有较高的科学性与可信度^[26]。SSP245 作为中等排放路径,反映了温室气体受控条件下的中性发展趋势,较符合东北地区未来气候的预期^[21-22]。MRI-ESM2-0 模型是国际公认的高精度地球系统模型,在东亚地区对降水与蒸散发等水文气候变量的模拟表现尤为突出,适用于本文。然而需要注意的是,任何模拟结果均存在一定偏差,尤其产水量高度依赖于降水与蒸散发的准确性,实际情况仍应依据实测气候数据加以验证。

4.3 政策建议

S1 情景下应强化水资源动态监测与风险预警,推进高耗水区域实施用水配额管理;提升区域生态系统在变化背景下的韧性与应对能力。S2 情景下需严控建设用地无序扩张,优化土地利用结构;加快节水型城市和绿色产业体系建设,缓解资源供需矛盾。S3 情景下则需要在扩大林地的同时,加强草地保护与恢复;防范生态服务功能单一化带来的系统性风险,提升生态系统多样性与稳定性。S4 情景下应构建“功能区+城市发展区”双核协同格局,推动分区分类精准调控;优化水资源空间配置,提升区域协同保障能力。

5 结 语

本文基于多目标优化模型、PLUS 模型和 GMMOP 模型,系统评估了 2030 年东北地区在 S1、S2、S3、S4 情景下的产水服务格局及供需关系。结果显示,不同发展情景下产水服务供需格局存在显著差异:S2 情景下建设用地快速扩张,虽产水供给有所增加,但需求增长更快,供需矛盾加剧;S3 情景通过扩大林地和湿地面积,有效提升了产水能力,缓解了供需压力;S1 和 S4 情景下产水服务较为稳定,

辽西北地区供水压力明显减轻,但部分区域仍存在紧张局面。总体来看,生态保护在缓解产水服务供需矛盾中发挥着关键作用。

参考文献:

[1] 阿里木江·于山,徐微,张国清. 面向全球的环境保护:一种兼顾多方利益的治理策略[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2024, 26(6): 91-100. (ALIMUJIANG Yushan, XU Wei, ZHANG Guoqing. Global environmental protection:a multi-agents governance strategy[J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2024, 26(6): 91-100. (in Chinese))

[2] 李金铠,孟慧红,魏伟. 人水和谐视角下黄河流域经济-文化-生态系统和谐发展水平评价[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2023, 44(6): 26-35. (LI Jinkai, MENG Huihong, WEI Wei. Evaluation of the harmonious development level of economic-cultural-ecological system in the Yellow River Basin from the perspective of human-water harmony[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2023, 44(6): 26-35. (in Chinese))

[3] ZHAI Xiaoqing, SUN Caizhi, ZOU Wei, et al. Spatiotemporal characteristic and evolution of China's marine economic resilience [J]. Ocean & Coastal Management, 2023, 238: 106562.

[4] 鞠琴,卜媛媛,申同庆,等. 黄河水源涵养区生态系统服务要素时空演变及权衡与协同分析[J]. 水资源保护, 2025, 41(2): 38-46. (JU Qin, BU Yuanyuan, SHEN Tongqing, et al. Spatiotemporal evolution and trade-off and synergy analysis of ecosystem service factors in the Yellow River water conservation area [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(2): 38-46. (in Chinese))

[5] 黄蕊,张连明,罗凯. 黄河沿线市域生态系统服务供需与人类活动强度的时空耦合关系[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2023, 44(6): 103-112. (HUANG Rui, ZHANG Lianming, LUO Kai. Spatial and temporal coupling relationship between ecosystem service supply and demand and human activity intensity in municipal areas along the Yellow River[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2023, 44(6): 103-112. (in Chinese))

[6] AN Zhiying, SUN Caizhi, HAO Shuai. Exploration of ecological compensation standard: based on ecosystem service flow path [J]. Applied Geography, 2025, 178: 103588.

[7] 韩宇,刘焱序,王晨旭. 基于水生态系统服务的黄河流域生态修复投资优先区识别[J]. 生态学报, 2024, 44(18): 8126-8137. (HAN Yu, LIU Yanxu, WANG Chenxu. Identification of priority areas for ecological

- p>restoration supported by investment based on water ecosystem services in the Yellow River Basin[J].
- Acta Ecologica Sinica*
- , 2024, 44 (18): 8126-8137. (in Chinese)
- [8] 郝帅,张洪波,杨佳雯,等. 未来气候情景下秦岭北麓水资源涵养区径流组分的结构性演化研究[J]. *水资源保护*, 2025, 41 (4): 169-179. (HAO Shuai, ZHANG Hongbo, YANG Jiawen, et al. Structural evolution of runoff components in the water resources conservation zone of the northern Qinling Mountains under future climate scenarios [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(4): 169-179. (in Chinese))
- [9] LIU Mengxue, DONG Xiaobin, WANG Xuechao, et al. Evaluating the future terrestrial ecosystem contributions to carbon neutrality in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 374: 133914.
- [10] 张岩. 基于生态系统服务的防洪供需评估与情景预测: 以厦门市为例[D]. 南京: 南京大学, 2021.
- [11] 吴蒙. 长三角地区土地利用变化的生态系统服务响应与可持续性情景模拟研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [12] 李兆碧, 陶宇, 欧维新, 等. 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[J]. *生态学报*, 2023, 43 (5): 2088-2100. (LI Zhaobi, TAO Yu, OU Weixin, et al. Supply and demand relationship and multi-scenario assessment of water ecological services related water quantity and quality in Taihu Lake Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(5): 2088-2100. (in Chinese))
- [13] DING Tonghui, CHEN Junfei, FANG Liping, et al. Urban ecosystem services supply-demand assessment from the perspective of the water-energy-food nexus[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 90: 104401.
- [14] 卢慧婷, STRINGER L C, 严岩, 等. 西南地区生态系统服务供需历史变化与 SSP-RCP 情景预测[J]. *生态学报*, 2023, 43(4): 1309-1325. (LU Huiting, STRINGER L C, YAN Yan, et al. Mapping ecosystem service supply and demand : historical changes and projections under SSP-RCP scenarios [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(4): 1309-1325. (in Chinese))
- [15] WANG Kai, LI Xiaobing, LYU Xin, et al. Unraveling the complex interconnections between food-energy-water nexus sustainability and the supply-demand of related ecosystem services[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 370: 122532.
- [16] JIAN Zhen, SUN Yingjun, WANG Fang, et al. Soil conservation ecosystem service supply-demand and multi scenario simulation in the Loess Plateau, China[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2024, 49: e02796.
- [17] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. *自然资源学报*, 2015, 30 (8): 1243-1254. (XIE Gaodi, ZHANG Caixia, ZHANG Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30 (8): 1243-1254. (in Chinese))
- [18] 郭鹏程. 耦合 MOP 与 PLUS 模型的土地利用/覆被结构与空间优化研究: 以合肥市为例[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [19] 张家其, 朱莉, 阳斌成. 洞庭湖流域生态系统服务供需时空演变与情景预测[J]. *长江流域资源与环境*, 2024, 33 (8): 1702-1714. (ZHANG Jiaqi, ZHU Li, YANG Bincheng. Temporal and spatial evolution and multi-scenario of ecosystem services supply and demand in Dongting Lake Basin[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33 (8): 1702-1714. (in Chinese))
- [20] 高晓玲, 高崇. 分布式用水计算方法在黄河流域未来用水情景分析中的应用[J]. *华北水利水电学院学报*, 2011, 32 (2): 40-43. (GAO Xiaoling, GAO Chong. Application of calculation method of distributed water use in scenarios analysis of future water use in Yellow River Basin [J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 2011, 32(2): 40-43. (in Chinese))
- [21] 孙才志, 安志英. 基于生态系统服务流的东北地区水安全格局[J]. *水资源保护*, 2024, 40 (3): 11-19. (SUN Caizhi, AN Zhiying. Water security pattern in Northeast China based on ecosystem service flow [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(3): 11-19. (in Chinese))
- [22] 安志英, 孙才志, 郝帅. 我国东北生态系统服务供需匹配关系: 基于水-能源-粮食纽带视角[J]. *生态学报*, 2024, 44 (10): 4170-4186. (AN Zhiying, SUN Caizhi, HAO Shuai. Matching relationship between supply and demand of ecosystem services from the perspective of water-energy-food nexus in Northeast China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44 (10): 4170-4186. (in Chinese))
- [23] LIU Wei, ZHAN Jinyan, ZHAO Fen, et al. The tradeoffs between food supply and demand from the perspective of ecosystem service flows: a case study in the Pearl River Delta, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 301: 113814.
- [24] GOMES E, INÁCIO M, BOGDZEVIC K, et al. Future land-use changes and its impacts on terrestrial ecosystem services: a review[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 781: 146716.
- [25] FANG Zhou, DING Tonghui, CHEN Junyu, et al. Impacts of land use/land cover changes on ecosystem services in ecologically fragile regions [J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 831: 154967.
- [26] XU Wenbo, XU Hengzhou, LI Xiaoyan, et al. Ecosystem services response to future land use/cover change (LUCC) under multiple scenarios: a case study of the Bei.
- (收稿日期: 2025 - 05 - 20 编辑: 王芳)