王岚，刘静，刘佳嘉，等. 基于WEP-L模型的兰西城市群蓝绿水水资源特征及影响因素分析[J]. 水利水电技术(中英文)，2026，57(9)：205-218. DOI：10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.016

WANG Lan，LIU Jing，LIU Jiajia，et al. Analysis of characteristics and influencing factors of blue and green water resources in Lanzhou-Xining urban agglomeration based on WEP-L Model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering，2026，57(9)：205-218. DOI：10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.016

基于WEP-L模型的兰西城市群蓝绿水水资源特征及影响因素分析

王　岚[1,2]，刘　静[1,2]，刘佳嘉[3]，李彬权[1,2]

(1. 河海大学 水灾害防御全国重点实验室，江苏 南京　210024；2. 河海大学 水文水资源学院，江苏 南京　210024；3. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室，北京　100038)

摘　要：【目的】兰西城市群为黄河流域上游重要的跨省市城市群，其本底环境脆弱且城市化发展迅速，因此有必要对其区域水资源情况进行深度解析。【方法】综合考虑自然侧与社会侧水循环，构建区域WEP-L模型，考虑不同水平年，基于广义水资源概念及水足迹理论，分别从行政区与子流域尺度，量化兰西城市群蓝绿水资源现状与耗用情况，并通过地理探测器方法分析其主要影响因素。【结果】结果表明：区域多年平均水资源量为1 764.73亿m^3，其中绿水资源量占79.14%。不同市农业水足迹占总水足迹的比例在58.45%~99.06%之间；兰州市工业水足迹最大，2009年时达6.61亿m^3；兰州市与西宁市生活水足迹较大，旅游业对海北个别子流域生活水足迹影响显著。海拔与供水总量分别是对区域蓝绿水资源量与总水足迹解释力最强的因素。【结论】兰西城市群上游区域水资源丰富且耗水较小，适宜设置水资源保护区，但要加强旅游业发展管理。下游各市应依据不同子流域的耗水特征制定发展策略，因地制宜提高水资源利用率。该研究结果可为区域水资源管理与配置提供科学依据。

关键词：蓝绿水；水足迹；WEP-L模型；地理探测器；城市群；多空间尺度；黄河流域；广义水资源

DOI：10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.016　　**开放科学(资源服务)标志码(OSID)：**

中图分类号：TV211.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-0860(2026)09-0205-14

听语音 聊科研 与作者互动

Analysis of characteristics and influencing factors of blue and green water resources in Lanzhou-Xining urban agglomeration based on WEP-L Model

WANG Lan[1,2]，LIU Jing[1,2]，LIU Jiajia[3]，LI Binquan[1,2]

(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention，Hohai University，Nanjing　210024，Jiangsu，China；2. College of Hydrology and Water Resources，Hohai University，Nanjing　210024，Jiangsu，China；3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin，China Institute of Water

收稿日期：2025-06-03；**修回日期：**2025-07-09；**录用日期：**2025-09-10；**网络出版日期：**2025-12-01

基金项目：国家自然科学基金项目(W2412160，42471049)

作者简介：王　岚(2001—)，女，硕士研究生，主要从事水资源规划与管理研究。E-mail：231301030019@hhu.edu.cn

通信作者：刘　静(1986—)，女，副教授，博士，主要从事水资源规划与管理研究。E-mail：liujing0027@hhu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Resources and Hydropower Research, Beijing　100038, China)

Abstract: [Objective] The Lanzhou-Xining urban agglomeration, an important cross-provincial urban agglomeration in the upper reaches of the Yellow River Basin, features a fragile underlying environment and rapid urbanization. Therefore, it is necessary to conduct an in-depth analysis of the regional water resources. [Methods] A regional WEP-L model was constructed by comprehensively considering the natural and social aspects of the water cycle. Considering different hydrological years, and based on the concept of generalized water resources and water footprint theory, the current status and consumption of blue and green water resources in the Lanzhou-Xining urban agglomeration were quantified at both administrative region and sub-basin scales. The main influencing factors were then analyzed using the geodetector method. [Results] The results showed that the multi-year average water resource amount in the region was 176.473 billion m^3, of which green water resources accounted for 79.14%. The proportion of agricultural water footprint to total water footprint in different cities ranged from 58.45% to 99.06%. Lanzhou had the largest industrial water footprint, reaching 0.661 billion m^3 in 2009. Lanzhou and Xining had relatively large domestic water footprints, and tourism significantly affected the domestic water footprint of individual sub-basins in Haibei. Altitude and total water supply were the factors with the strongest explanatory power for the regional blue and green water resource amount and the total water footprint, respectively. [Conclusion] The upstream area of the Lanzhou-Xining urban agglomeration is rich in water resources and has relatively low water consumption, making it suitable for establishing water resource protection areas, although tourism development management should be strengthened. Downstream cities should formulate development strategies based on the water consumption characteristics of different sub-basins and improve water resource utilization efficiency according to local conditions. The findings can provide a scientific basis for regional water resource management and allocation.

Keywords: blue and green water; water footprint; WEP-L model; geodetector; urban agglomeration; multi-spatial scale; Yellow River Basin; generalized water resources

0　引　言

水资源是人类生活的重要物质基础，对经济社会的发展至关重要[1]，但当前水资源配置不够合理、利用效率低下，导致水资源短缺等问题时有发生，使生态自然与人类社会的和谐发展面临巨大压力[2]。2006 年，FALKENMARK[3]提出水资源的评价与管理不该只考虑蓝水的耗用，植物在光合作用中通过蒸腾作用产生的生产性绿水流以及土壤中水蒸发产生的非生产性绿水流也十分重要，而传统的水资源评价往往仅关注蓝水资源的利用，忽视了绿水资源的重要性，无法反映真实情况下的水资源状况，尤其对雨养农业来说，蓝水流与绿水流的相互补充将为水资源的高效利用提供新的视角和思路。此后，我国学者进一步对广义水资源这一概念进行定义与分析[4]，并界定了降水的有效与无效、各水资源分量的高效与低效等关键性问题[5]，为区域水资源评价提供了新方法。除了概念上的进步，水文模型也逐渐被应用到水资源量的测算中，如 SWAT[6]、GLDAS-NOAH[7]、MPI-HM[8]等，其中 SWAT 模型使用最为广泛。HOEKSTRA[9]提出了水足迹理论，该方法将水足迹细分为蓝、绿、灰三种不同的类别，可以更加全面、精确地衡量某一区域水资源耗用情况，已经成为核算区域用水的重要工具[10-11]。尤其在农业生产方面，通过综合考量农作物生长周期内的降水与灌溉用水，以及农产品加工、运输环节的水资源消耗，可以精准量化农业水资源的需求与消耗，为水资源管理政策的制定提供科学支撑。但水足迹理论在工业、生活等领域的应用仍处于探索阶段，有待进一步加强。

传统的水资源管理研究多集中于自然水循环过程[12]，此类研究在自然水文规律的探究方面发挥了重要作用，但是随着城市化进程加速，这种仅考虑自然侧水循环的研究无法充分体现剧烈人类活动影响下城市区域的水循环特征，存在局限性。并且当前研究多关注作物生产耗水，对工业及居民生活等社会侧耗用水重视不足，部分研究虽然基于统计数据量化[13]或构建耦合协调度等指标类模型[14]对其进行评价，但未能充分考虑社会侧水资源利用中“取-输-耗-排”等过程的物理机制，也无法基于自然、社会统筹视角考虑区域水循环情况，不能充分展现区域水资源状况，无法为水资源的合理配置与高效利用提供全面而有效的决策。2003 年，基于 WEP 模型[15]，贾仰文等[16]耦合人工侧水循环，开发了 WEP-L 模型，为“自然-社会”二元水循环理论提供了模型基础：该模型弥补了传统研究的局限性，充分考虑自然侧水

循环、产汇流过程以及社会侧耗用水的物理机制，为流域蓝绿水资源量的核算以及工业、生活耗水的精细化模拟提供了新思路。模型的构建与运行需要大量高精度数据的支撑，如地形、气象、社会用水等数据，在实际应用过程中对数据的完整性与准确性提出较高要求。

当前，城市群逐渐成为区域高质量发展的重要空间载体[17]，综合考虑城市群自然、社会水循环，评价区域水资源现状及耗用情况，对当地水资源可持续发展及生态安全保障具有重要意义。兰西城市群为黄河流域上游的重要城市群，在我国对外开放、西部开发以及黄河流域生态保护和高质量发展中具有举足轻重的地位。近年来，西部城市工业化、城市化发展迅速，使得本就受高原气候及干旱气候制约的兰西城市群生态环境更为脆弱，水资源问题日益凸显。统筹考虑自然水循环与社会水循环，分析兰西城市群水资源现状与不同部门水资源耗用情况，并对其驱动因素进行解析，是解决兰西城市群水资源问题的基础。本文以兰西城市群为研究区域，通过构建黄河流域上游区域(兰西城市群段)WEP-L 模型，在充分考虑自然侧与社会侧水循环物理机制的基础上，分别从行政区尺度与子流域尺度对兰西城市群蓝绿水资源量及社会侧不同部门蓝绿水足迹进行量化，并探究其在不同代表年的时空分布情况，在此基础上，采用地理探测器方法，分别对蓝绿水资源与总水足迹进行驱动因子分析，为兰西城市群未来的水资源规划与管理提供参考依据，以期提升区域水资源利用效率，缓解区域水短缺问题。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

兰西城市群位于黄河流域上游，地处青藏高原、黄土高原与内蒙古高原的交界地带，地势呈西高东低特点，海拔大致在 1 300~5 000 m 之间(见图 1)。区域内大部分地区属于半干旱气候，干燥少雨，多年平均降水量为 300~500 mm，蒸发量较大，年均蒸发量达 1 300~1 500 mm。境内水系发达，除黄河干流外，还有湟水河、洮河、大通河等支流，是我国重要的水资源生态功能区。兰西城市群总面积为 9.75 万 km^2，包括甘肃省兰州市、定西市、白银市与临夏回族自治州以及青海省西宁市、海东市、海北藏族自治州、海南藏族自治州与黄南藏族自治州的全部或者部分区县(以下分别简称：兰州、定西、白银、临夏、西宁、海东、海北、海南与黄南)。受地理区位及自然环境制约，兰西城市群的人口、经济规模与其他城市群相比并不突出，但作为我国西北部重要的跨省城市群，其高质量发展对整个黄河流域生态安全的维护至关重要。在快速城市化的背景下，兰西城市群发展方式较为粗放，环境压力日益增强，对黄河上游地区生态-经济协同发展产生影响。

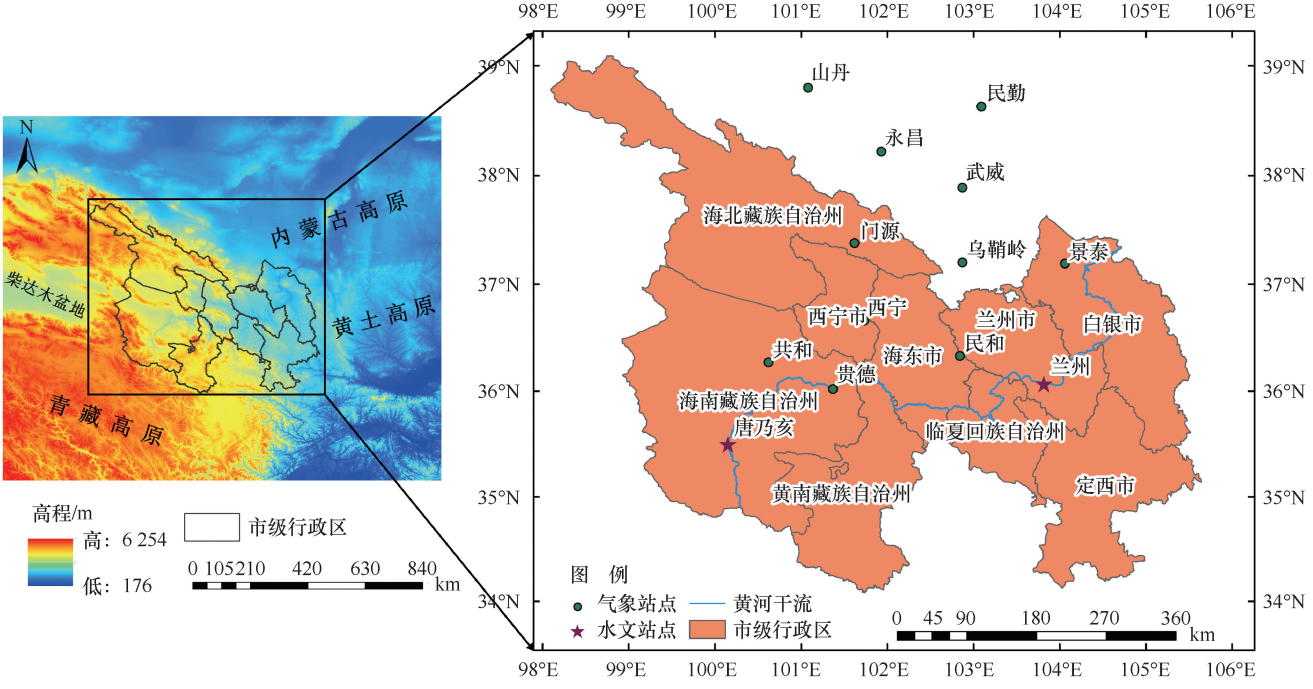


图 1　兰西城市群地理位置

Fig. 1　Geographical location of Lanzhou-Xining urban agglomeration

1.2　研究方法

1.2.1　WEP-L 模型构建

WEP-L 模型是以子流域套等高程带为基本计算单元的分布式水文模型，能综合考虑气象、下垫面、社会耗用水、水利工程等要素，对“自然-社会”二元水循环过程进行模拟和分析[18]。导入 DEM、河流水系、土地利用、水文气象、行政区划、供用水等要素，基于 Pfafstetter 编码规则生成模拟河网[19]，综合考虑实际河网分布、流域面积以及模型效率，以 200 km^2 为最小河网阈值，共划分 229 个子流域（见图 2），并对相关要素进行时空间尺度展布。以 2006—2020 年为率定期与验证期，时间步长为月，通过流量参数进行模型率定，采用 Nash-Sutcliffe 效率系数（*NSE*）、相对误差（*RE*）、相关系数（R^2）来评价模型模拟效果，当 $NSE>0.5$、$RE\leqslant\pm15\%$、$R^2>0.6$ 时，认为模拟结果可接受[20-21]。

1.2.2　蓝绿水资源量化

根据 WEP-L 模型模拟输出结果，对兰西城市群的蓝绿水资源量进行量化[22-23]。具体公式为

$$W_B=(W_Z+W_R)\times10^{-5}A \tag{1}$$

$$W_G=(ET+W_S)\times10^{-5}A \tag{2}$$

式中，W_B 为蓝水资源量（亿 m^3）；W_Z 为子流域产水量（mm），依据雨强大小使用超渗产流模型与水量平衡模型进行计算；W_R 为含水层补给量（mm），通过达西公式进行计算；W_G 为绿水资源量（亿 m^3）；ET 为总蒸散发量（mm），其中蒸发能力采用 Penman 公式计算，裸地蒸发量采用考虑含水率的修正 Penman 公式计算，植被蒸腾量采用 Penman-Monteith 公式计算；W_S 为土壤含水量（mm），用土壤体积含水率与土壤厚度的乘积表示；A 为区域面积（km^2）。

1.2.3　蓝绿水足迹量化

在水足迹理论中，灰水足迹为理论值，故本文仅对区域蓝绿水足迹进行量化。蓝水足迹为区域所消耗的地表与地下水资源，绿水足迹为区域内利用的有效降雨[24]。具体公式为

$$F_B=(W_{DU}+W_{DR}+W_I+W_A)\times10^{-5}A \tag{3}$$

$$F_G=(EI+ET_P+ED)\times10^{-5}A \tag{4}$$

式中，F_B 为蓝水足迹（亿 m^3），包括城镇生活耗水

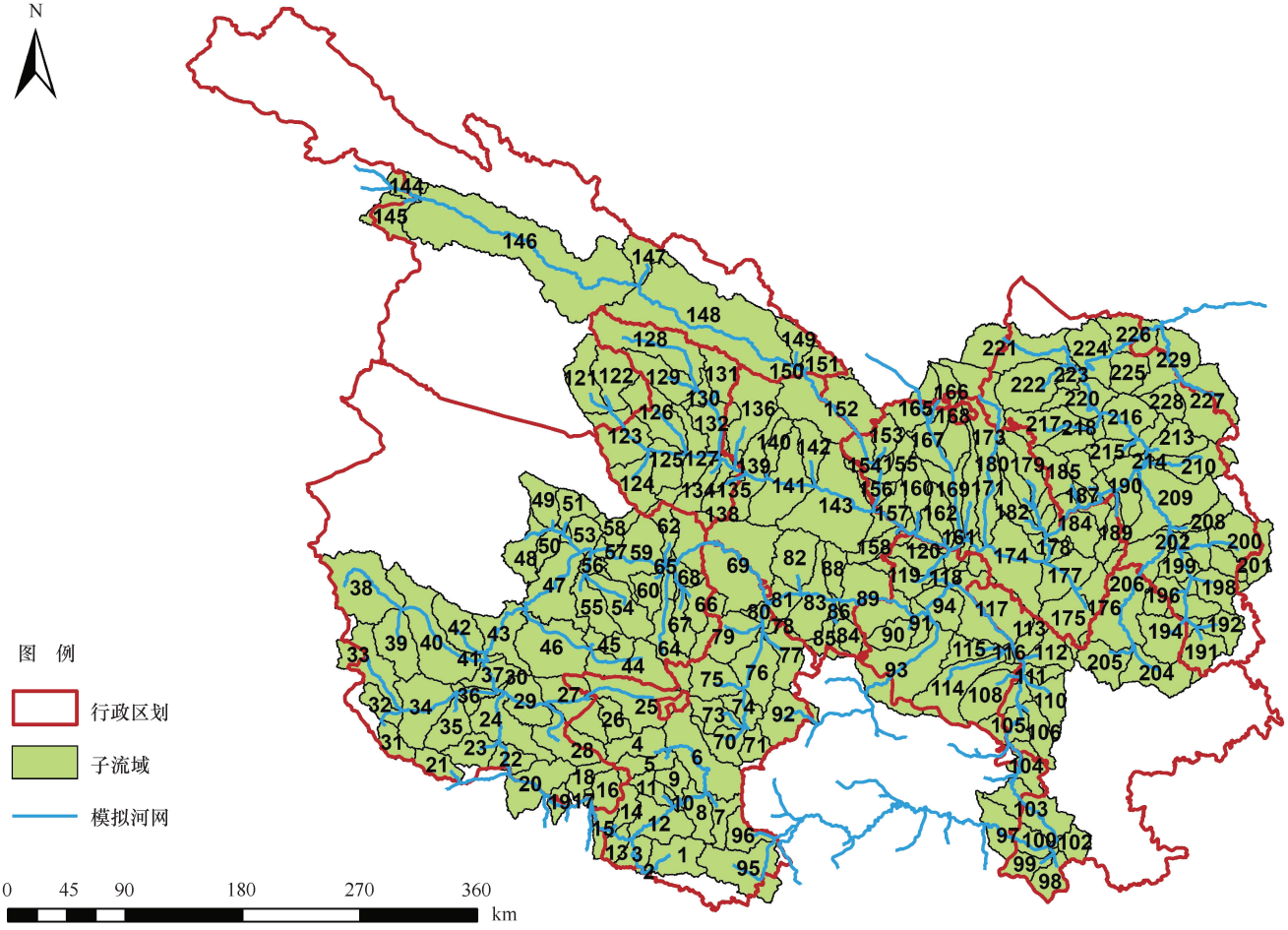


图 2　河网模拟及子流域划分结果

Fig. 2　Results of river network simulation and sub-basin division

W_{DU}（mm）、农村生活耗水 W_{DR}（mm）、工业耗水 W_I（mm）、农业耗水 W_A（mm）；F_G 为绿水足迹（亿 m^3），主要包括对植物生长有益的冠层截留蒸发量 EI（mm）、植物蒸腾量 ET_P（mm）以及在人类生活中可以起到降温、湿润作用的蒸散发 ED（mm）。

1.2.4　地理探测器

地理探测器是一种用于测量空间分异性并探究其驱动因子的统计方法，其核心理念为：如果某自变量对某因变量有重要影响，则二者的空间分布应当具有相似性，该方法已在多领域得到了广泛应用[25-27]。

本文使用地理探测器中的分异及因子探测器，利用自然断点法对各自变量因子进行离散化处理后，探测不同自变量因子对因变量空间分异性的解释力大小（q），q 值越大，说明该因子对因变量的影响力越大[28]。其公式为

$$q = 1 - \left(\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2 / N\sigma^2\right) \tag{5}$$

式中，q 为各因子对因变量因子的解释力大小，取值在 0 ~ 1 之间；h 为驱动因子的分层，$h = 1, \cdots, L$；N_h、σ_h^2 分别为层 h 的样本数与方差；N、σ^2 分别为全区域的样本数与方差。

1.3　数据来源

DEM 数据来自地理空间数据云（https：//www.gscloud.cn/），分辨率为 90 m；土地利用数据来自中国科学院环境资源数据中心（https：//www.resdc.cn/），分辨率为 1 km；植被覆盖度数据来自国家青藏高原科学数据中心（https：//data.tpdc.ac.cn/）；逐日气象数据（降水量、气温、风速、日照时数、相对湿度）来自国家气象科学数据中心（https：//data.cma.cn/）；水文数据（西宁站、兰州站逐日流量及水库特征参数、出流量等）来自《中华人民共和国水文年鉴》；用水数据（市级逐年农业、工业、生活用水量、输水损失系数、耗水系数）来自青海省与甘肃省《水资源公报》《统计年鉴》。研究时段为 2006—2020 年，参考相关研究[29]，依据降水量，分别确定 2018 年、2009 年和 2015 年为丰水年、平水年和枯水年进行相关分析。

2　结果与分析

2.1　WEP-L 模型率定与验证

结合研究区实际，选取唐乃亥与兰州水文站的实际月径流量数据，对模型进行率定、验证，结果如图 3 所示。唐乃亥与兰州水文站的 NSE 分别为 0.63 和 0.60，RE 分别为 -4.29% 和 -12.23%，R^2 均达 0.81，模型模拟结果符合要求，本文所构建的 WEP-L 分布式水文模型可用于兰西城市群水文模拟。

2.2　水资源量分析

兰西城市群 2006—2020 年水资源量时间演变趋势如图 4 所示。研究时段内，蓝水资源与水资源总量呈波动变化趋势，其年均变化速率分别为 23.48% 与 6.27%，绿水资源变化不显著。蓝水资源与绿水资源最大值分别为 472.31 亿 m^3（2007 年）和 1 445.41 亿 m^3（2019 年）。受降水量影响，流域产流量与地下水补给量分别减少 156.14 mm 与 751.68 mm，故 2015 年蓝水资源出现研究时段内最小值，较 2014 年下降 12.17%，区域可利用水量的减少对工、农业生产与居民生活产生影响。受蒸散发量影响，绿水资源最小值出现在 2015 年，为 1 342.62 亿 m^3，绿水资源量的减少加剧土地退化风险，并对雨养农业产生不利影响。研究时段内，兰西城市群水资源总量均值为 1 764.73 亿 m^3，其中绿水为主，占比为 79.14%，后续应优化蓝水资源配置，加大对绿水资源的开发利用。

2.2.1　蓝水资源量空间分布分析

不同尺度下兰西城市群蓝水资源分布情况如图 5 所示。由图 5 可知，海拔较高的上游区域蓝水资源量相对较大。从行政区尺度来看，兰西城市群蓝水资源量空间差异显著[见图 5（a）]，海北、海南与黄南蓝水资源量相对较大，兰州、白银与临夏蓝水资源量较小。平水年时各市蓝水资源量差异最大，蓝水资源量最大值（海南）可达最小值（临夏）的 7.13 倍。受大陆性气候影响，甘肃省蒸发较大，且其湖泊稀少，境内河流以内陆河为主，汇流能力有限，导致其蓝水资源量较小。黄南与西宁的蓝水资源深度（即区域单位面积蓝水资源量）相对较大，分别为 288.97 mm 与 252.88 mm；海南的蓝水资源深度最小，仅为黄南的 58.44%。不同水平年，各子流域的蓝水资源量分布在 0.00~11.00 亿 m^3 之间[见图 5（b）]。丰水年，全流域 41.48% 的子流域蓝水资源量在 0.00~1.00 亿 m^3 之间，平水年和枯水年该比例分别为 58.95% 及 73.80%，这与降水量变化密切相关。丰水年有 8 个子流域蓝水资源量处于 4.71 亿~11.00 亿 m^3 之间，在海北、黄南、海东、兰州等市均有分布；枯水年仅海北的 148 号子流域蓝水资源量大于 4.70 亿 m^3。可在上游蓝水资源量丰富的子流域设立水资源保护区，加强区域水源涵养能力；下游人口密度较大的子流域则要重点关注水资源的高效利用与协调发展。

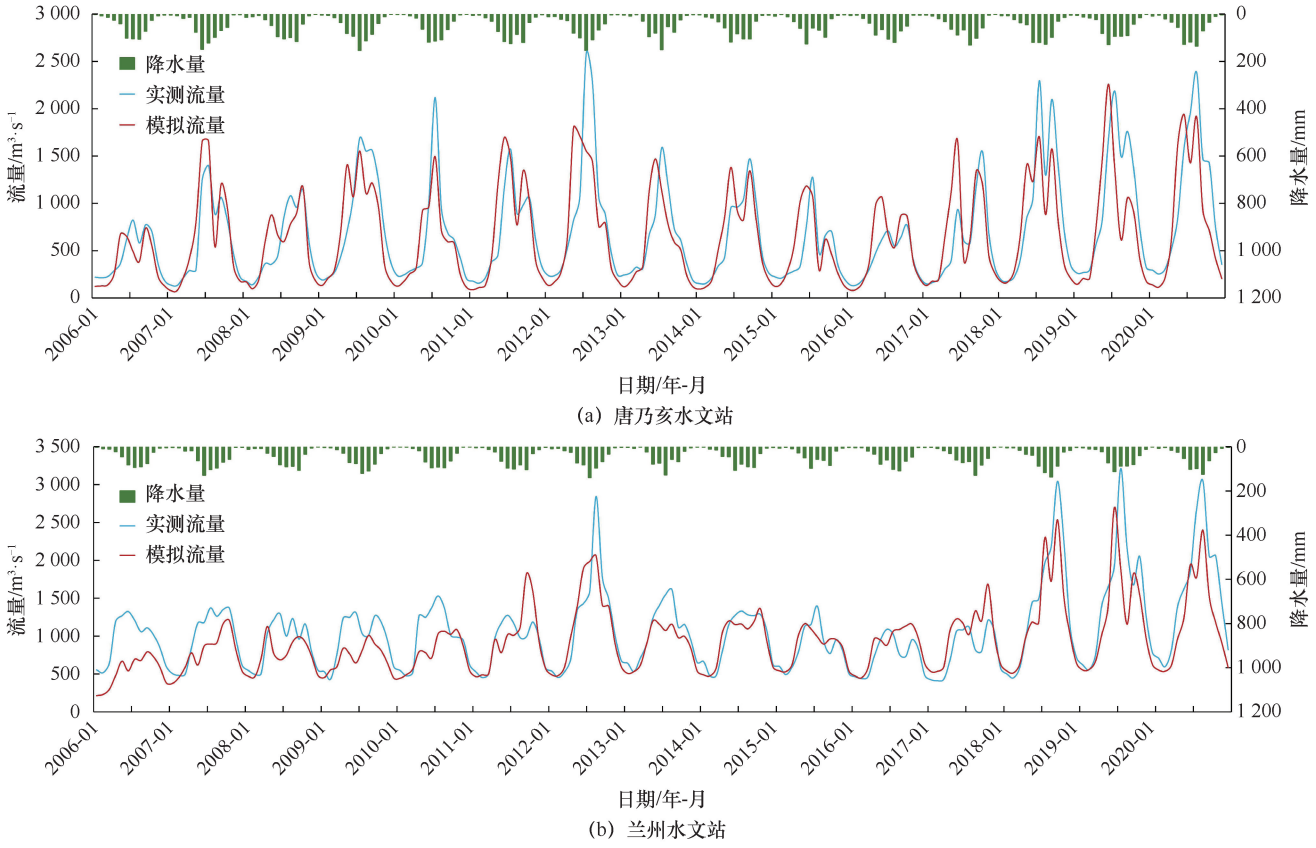


图 3　流量模拟与实测结果

Fig. 3　Simulated and measured results of flow

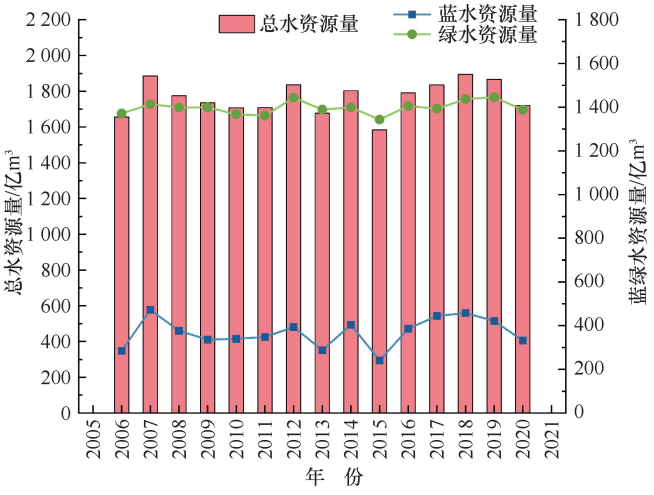
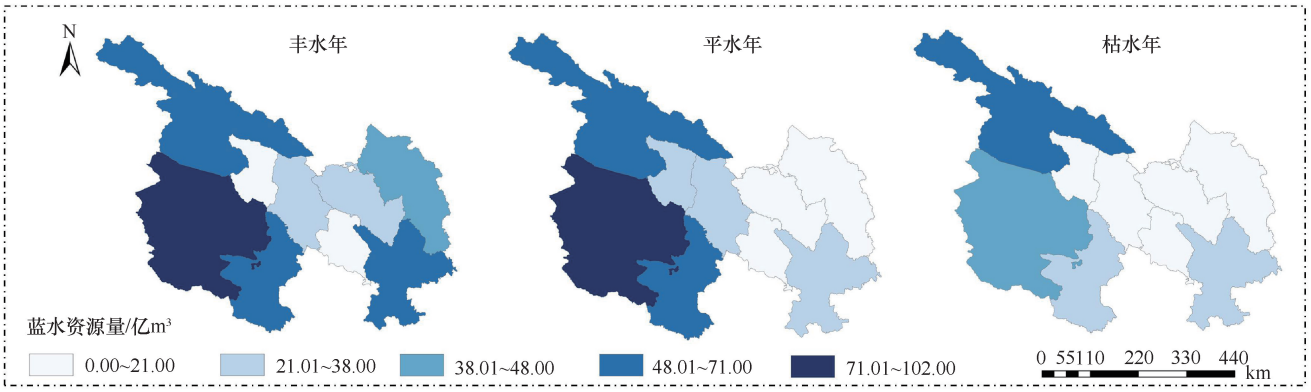


图 4　兰西城市群水资源量时间演变趋势

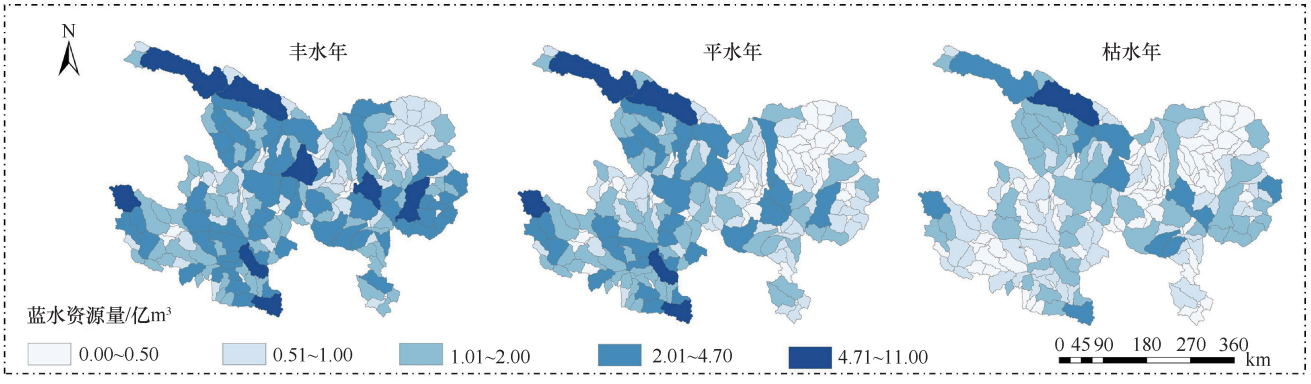
Fig. 4　Temporal evolution trend of water resources in Lanzhou-Xining urban agglomeration

2.2.2　绿水资源量空间分布分析

不同尺度下兰西城市群绿水资源分布情况如图 6 所示。由图 6 可知，兰西城市群绿水资源量在不同水平年变化不显著，但仍呈现出上游多，下游不同程度减少的分布特点。从行政区尺度来看，西部绿水资源量最大，其次为东部，中部绿水资源量最小[见图 6(a)]。不同水平年各市绿水资源量均保持在一定范围内，仅临夏与定西产生微弱变化，且黄南绿水资源量最大，西宁最小，仅占黄南的 15%左右。甘肃省 4 市绿水资源深度为全区域的前 4 位，其单位面积上绿水资源量相对丰富，西宁与海东的绿水资源则较为匮乏。这与两省农业产值结构差异有关，甘肃省农业产值以种植业为主导，青海则以农牧业为主导，植被覆盖的差异导致绿水资源量不同。不同水平年，子流域的绿水资源量分布在 0.00～40.31 亿 m^3 之间[见图 6(b)]。大部分子流域的绿水资源量处于 0.00～6.00 亿 m^3 之间，在丰、平、枯水年分别占全流域的 67.69%、69.00%、72.05%；仅海北的 146 号及 148 号子流域绿水资源量大于 24.00 亿 m^3。同一地区绿水资源量差异主要受蒸散发量与土壤含水量影响，不同水平年间这两个参数变动均不明显，故各水平年间绿水资源变化不大。绿水资源量丰富的子流域适宜推广雨养农业，种植耐旱作物，以减少对蓝水资源的消耗；而绿水资源量匮乏的子流域需通过铺设地膜、调整种植结构等方法提高绿水资源利用率。



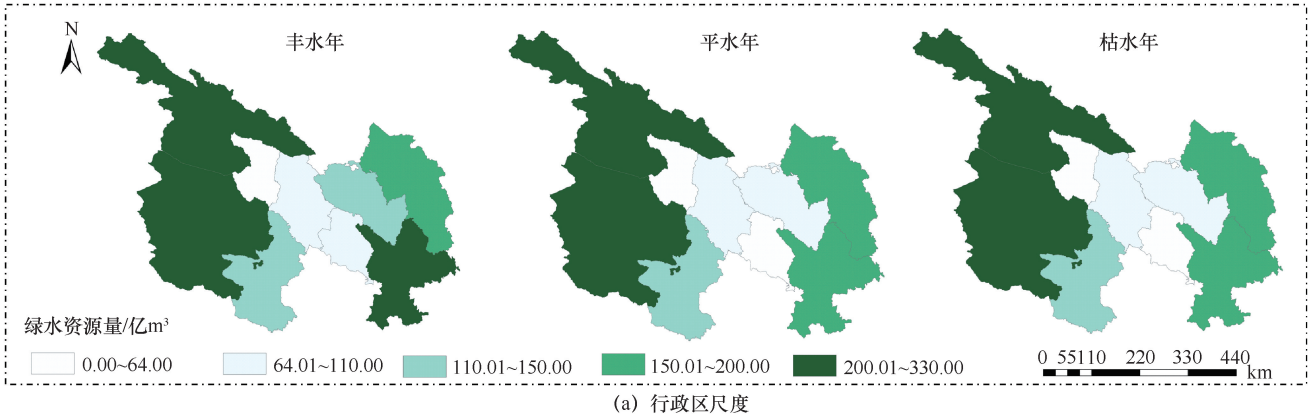
(a) 行政区尺度



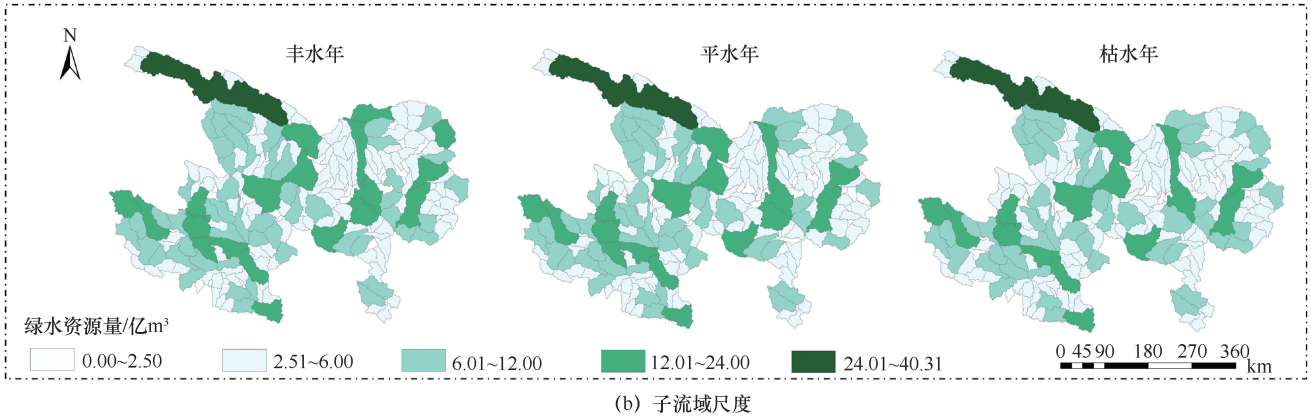
(b) 子流域尺度

图 5　不同尺度兰西城市群蓝水资源空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of blue water resources in Lanzhou-Xining urban agglomeration at different scales



(a) 行政区尺度



(b) 子流域尺度

图 6　不同尺度兰西城市群绿水资源空间分布

Fig. 6　Spatial distribution of green water resources in Lanzhou-Xining urban agglomeration at different scales

2.3　水足迹分析

兰西城市群 2006—2020 年水足迹时间演变趋势如图 7 所示。2006—2012 年，兰西城市群水足迹波动下降，2012 年后开始稳定下降，这可能与节水政策导向及居民用水习惯变化相关[30]。工业水足迹与农业水足迹在研究时段内降幅分别达 71.06% 与 33.80%，导致蓝水足迹大幅下降；而植被的蒸散发较为稳定，使绿水足迹降幅相对较小，为 12.08%。2012 年水足迹变幅最大，绿水足迹增长 12.38%，蓝水足迹下降 10.91%，出现了显著的互补现象，一定程度上体现了水资源与人类需求之间的动态平衡，绿水利用率提高时，蓝水的耗用量相对减小。研究时段内，兰西城市群的水足迹总量均值为 150.55 亿 m^3，其中以绿水足迹为主，占比为 65.64%，应进一步优化用水、耗水结构，充分利用蓝绿水互补特性，实现蓝绿水协同增效。

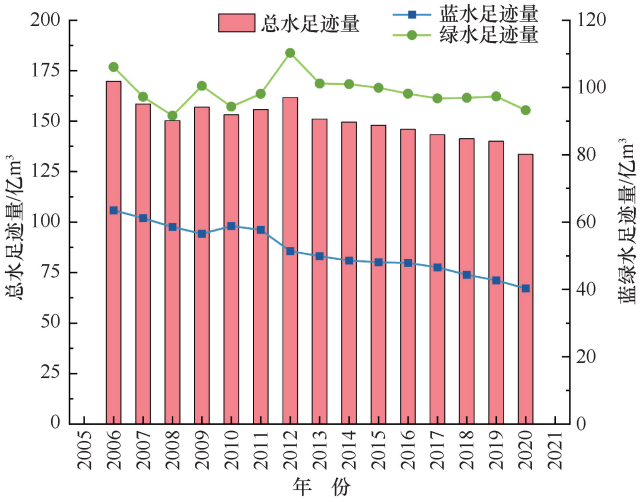


图 7　兰西城市群水足迹时间演变趋势

Fig. 7　Temporal evolution trend of water footprint in Lanzhou-Xining urban agglomeration

2.3.1　农业水足迹空间分布分析

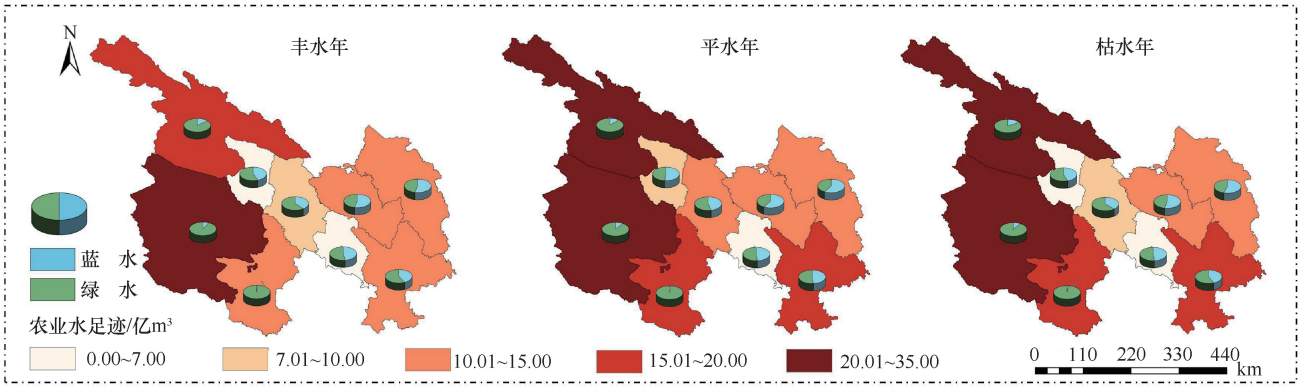
不同空间尺度下兰西城市群的农业水足迹如图 8 所示。行政区尺度下，区域的农业水足迹分布在 5.44 亿~32.35 亿 m^3 之间[见图 8(a)]，农业对水资源的高需求性导致农业水足迹空间分布与蓝绿水资源空间分布较为一致。不同水平年，兰西城市群西部三州及东部定西农业水足迹较大，而中部的西宁、临夏、海东则相对较小。丰水年时，兰西城市群农业水足迹差异最大，最大值(海南)为最小值(西宁)的 6 倍左右，枯水年时差异最小，降水量减少导致蓝绿水资源同步缩减，使区域农业用水差异缩小。除兰州与白银，各市农业绿水足迹均大于蓝水足迹，尤其在西部三州，绿水足迹占据主导地位。与丰、枯水年相比，平水年蓝水足迹占比略有增加。从子流域尺度来看，各子流域农业水足迹主要分布在 0.00~2.84 亿 m^3 之间[见图 8(b)]。不同水平年，大通河下游子流域农业水足迹最大；定西、兰州等市的部分子流域农业水足迹为 0。子流域与行政区尺度上农业水足迹呈现较为明显的对应关系，但农业水足迹较小市的子流域，其农业水足迹未必较低，如海东的 143 与 152 号子流域与临夏的 93 号子流域，部分年份农业水足迹大于 2.00 亿 m^3，达全流域高水平，原因是这些子流域分布有相对集中的耕地，需要大量灌溉用水，导致农业水足迹较大。

2.3.2　工业水足迹空间分布分析

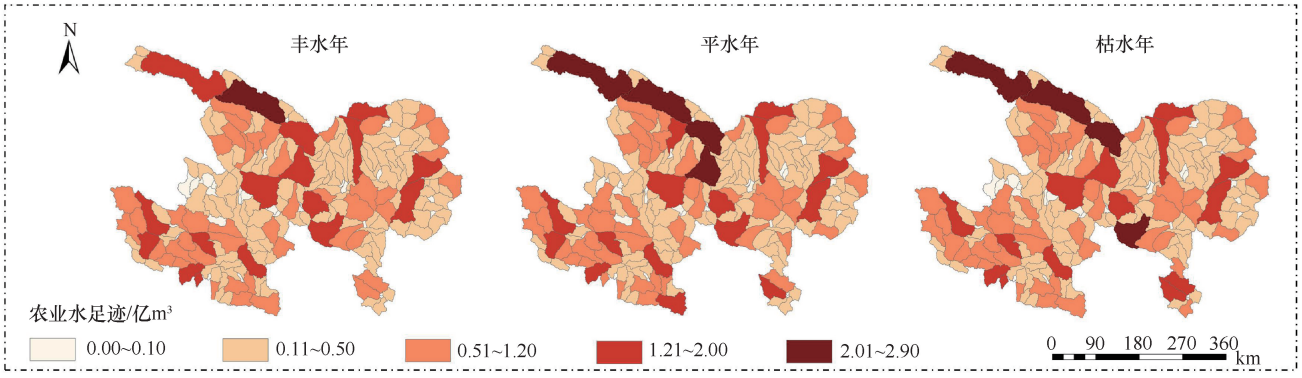
不同空间尺度下兰西城市群的工业水足迹如图 9 所示。工业部门不消耗绿水，故本节中不对其进行蓝绿水的区分。行政区尺度下，各市的工业水足迹主要分布在 0.01 亿 m^3~6.61 亿 m^3 之间[见图 9(a)]。兰西城市群东部地区工业水足迹明显大于西部，兰州的工业水足迹最大，其次为西宁，此二市分别占区域总量的 57.46%与 13.58%。从时间演变来看，兰西城市群的工业水足迹不断下降，由 2009 年的 10.47 亿 m^3 减少至 2018 年的 6.27 亿 m^3，降幅达 40.12%。研究时段内，我国工业发展完成了从以经济建设为中心到重视生态环保的重大转变，工业水足迹显著下降的变化趋势体现了我国不同发展阶段下的政策导向对水资源利用的调控作用。从子流域尺度来看，工业水足迹主要分布在 0.00~4.14 亿 m^3 之间[见图 9(b)]。位于兰州的 174 与 173 号子流域工业水足迹最大，2009 年时分别为 4.14 亿 m^3 与 1.03 亿 m^3，同时在西宁、白银等市的部分子流域也有集中分布；工业水足迹为 0 的子流域占比 63.32%，主要分布在海南、海北、黄南等欠发达地区。相较于农业水足迹，工业水足迹在空间分布上呈现出显著集聚性，且与人口密度、城市化程度、GDP 等社会经济因素紧密相关。

2.3.3　生活水足迹空间分布分析

不同空间尺度下兰西城市群的生活水足迹如图 10 所示。从行政区尺度来看，兰西城市群的生活水足迹分布在 0.12 亿~2.93 亿 m^3 之间[见图 10(a)]。不同水平年，各市生活水足迹变化不明显，甘肃省整体生活水足迹高于青海省，兰州与西宁两个核心城市的生活水足迹总量与深度相对较大，这与区域人口密度相关。随着可用水量的减少，兰西城市群生活水足迹逐步下降，与丰水年相比，枯水年时降幅达 12.95%。子流域尺度上，生活水足迹主要分布在



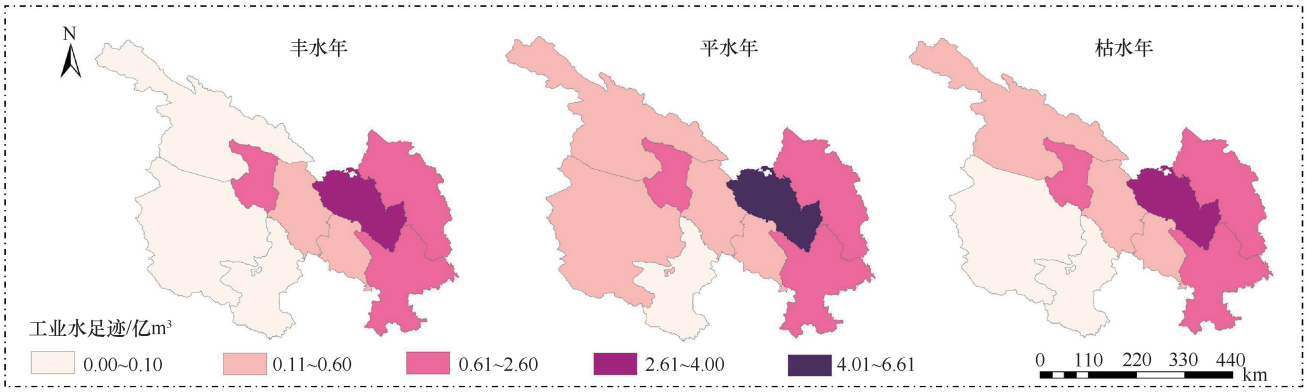
(a) 行政区尺度



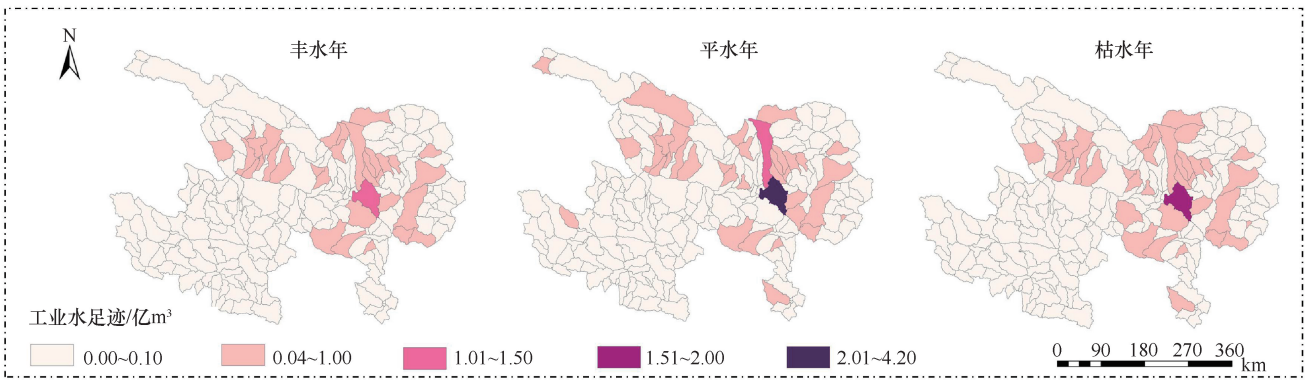
(b) 子流域尺度

图 8　不同尺度兰西城市群农业水足迹空间分布

Fig. 8　Spatial distribution of agricultural water footprint in Lanzhou-Xining urban agglomeration at different scales



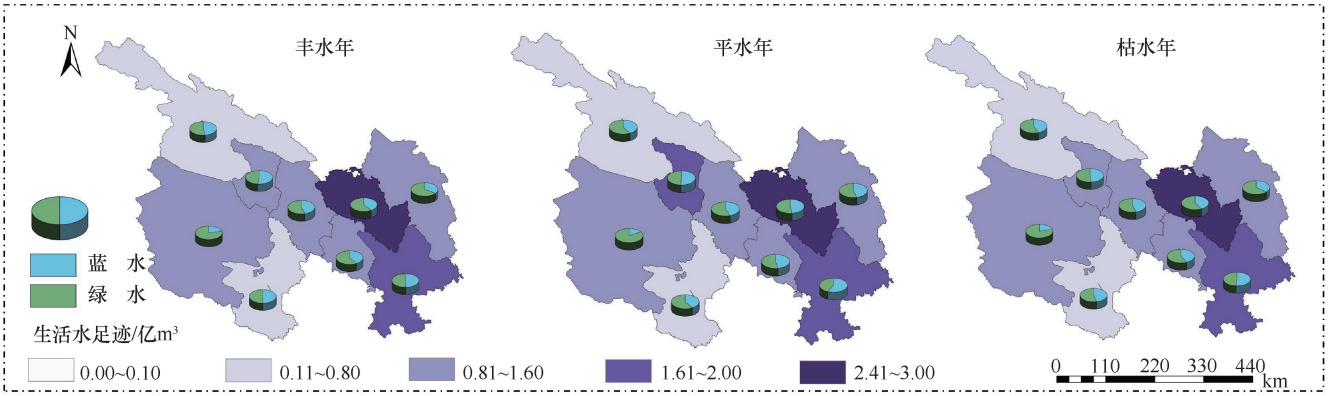
(a) 行政区尺度



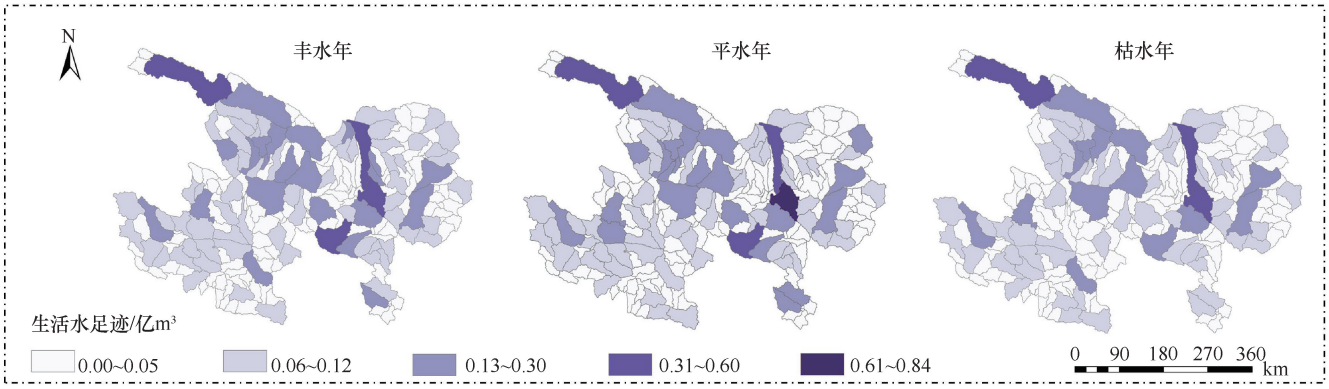
(b) 子流域尺度

图 9　不同尺度兰西城市群工业水足迹空间分布

Fig. 9　Spatial distribution of industrial water footprint in Lanzhou-Xining urban agglomeration at different scales



(a) 行政区尺度



(b) 子流域尺度

图 10　不同尺度兰西城市群生活水足迹空间分布

Fig. 10　Spatial distribution of domestic water footprint in Lanzhou-Xining urban agglomeration at different scales

0.00~0.83 亿 m^3 之间[见图 10(b)]。大部分子流域的生活水足迹处于 0.00~0.12 亿 m^3 之间，占比达 90.25%；西宁、海东以及白银东南部的部分子流域生活水足迹略高，处于0.13 亿~0.30 亿 m^3 之间；除了兰州的 173、174 号子流域、临夏的 93 号子流域外，海北的 146 号子流域的生活水足迹也较大，前者主要受人口密度影响，后者由于靠近青海湖景区，大量游客流通使酒店、餐饮等服务业用水增多，导致生活水足迹较大。

2.4　驱动因素分析

结合区域实际，本文选取降雨、蒸发、海拔、植被覆盖度、城市人口数量、人均 GDP、城市建成区面积、供水总量、灌溉面积 9 个指标对兰西城市群水资源及水足迹进行驱动因子分析[31-33]，结果如图 11 所示。海拔是对蓝水资源与绿水资源解释力最强的自然因素。兰西城市群各市海拔差异显著，靠近青藏高原的高海拔地区依赖冰川融水及较为原始的自然生态环境，蓝绿水资源相对丰富；随着海拔逐渐降低，径流产生能力变弱，且人类活动对城市群下游区域自然水文过程的影响程度逐渐增强，影响蓝绿水资源的产生。除海拔外，蓝水资源主要受降雨影响，绿水资源主要受蒸发影响，这与蓝绿水资源的组成相关。流域蓝绿水资源的产生主要受自然因子影响，社会因子具有一定的参考意义，供水总量、城市人口数量、人均 GDP 对蓝绿水资源解释力较强。

海拔与蒸发是对流域总水足迹解释力较强的两种自然因素，其次为降雨与植被覆盖度。在社会驱动因子中，供水总量对总水足迹的解释力最强，其在一定程度上能直观反映区域耗水情况；灌溉面积对总水足迹的解释力最弱，这是由于兰西城市群灌区面积较小，农业灌溉耗水占比低，削弱了灌溉面积对总水足迹的解释力。建议兰西城市群高海拔地区进一步加强对冰川高寒生态系统的保护，保证下游区域蓝绿水资源的供给；低海拔城市区则要优化水资源配置，减轻人类活动对自然水文过程的不利影响。

3　结果讨论

与黄河流域山东半岛、中原、关中平原等中下游城市群不同，兰西城市群地处高原，是典型的生态脆弱区，其人口稀少，经济发展落后，海拔落差导致区域发展不平衡，整体资源环境承载力较弱[34]。作为

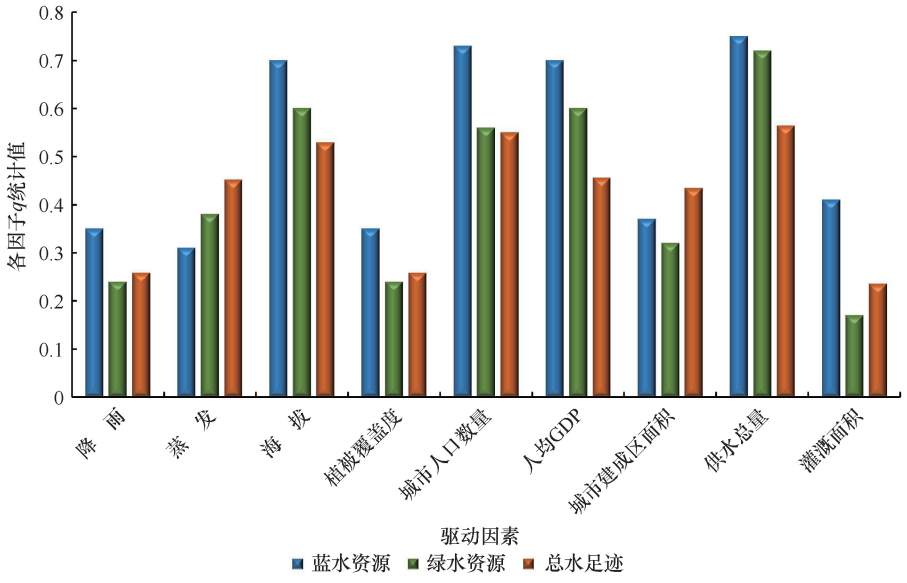


图 11　各驱动因素 q 统计值计算结果

Fig. 11　Calculation results of q statistical values for each driving factor

三江源生态保障区，兰西城市群具有保证下游水资源质量的责任，这对其兼顾生态与经济的协调发展能力提出了更高的要求。兰西城市群上游水资源丰富，海南、黄南与海北三个藏族自治州水资源量约占全区域总水资源量的 56%，这与柳海亮等[35]的研究结果一致，但该研究仅基于统计数据构建指标体系对兰西城市群水资源现状进行评价，缺少对流域水循环机制的考量，在评价结果的精确性方面有所欠缺。上游区域水资源富集与青藏高原“水塔效应”有关，冰川融水与降雨协同作用形成稳定的径流补给；此外，上游区域生态优势突出，大面积高寒草甸加强了区域水土保持能力。受上游截流与人类活动影响，兰西城市群下游水资源总量减少，各项水利工程的建设有助于缓解区域的用水矛盾，如“引大济湟”“引大入秦”等跨流域调水工程[36]，通过构建“蓄-调-配”体系，结合集雨节灌工程[37]、流域综合治理[38]等措施，推动流域水资源高效利用，促进区域可持续发展。

与杨雪荻等[39]的研究结果一致，兰西城市群西部为生态保护区，西宁与兰州两省会为城市群核心，向外辐射为农业发展区。在河流冲刷与地形因素的作用下，兰西城市群下游形成了河湟谷地等河谷盆地，肥沃的土壤层为种植业的发展提供了自然条件。徐牧天等[40]对兰西城市群土地利用结构进行模拟分析，结果显示，海东、临夏、定西等市耕地面积相对较大，对子流域农业耗水分布产生影响，此类地区要充分利用河谷盆地区位优势，提升农业用水效率[41]，促进绿色农业发展。兰西城市群工业耗水大部分来自甘肃省，孟祥瑞等[42]对黄河流域城市的工业用水及工业用水强度进行核算，其研究结果与本文一致。虽然兰西城市群工业耗水整体规模在黄河流域并不突出，但是其用水强度较大，工业用水效率仍具有巨大的提升潜力，可以通过优化产业结构[43]、提高工业水循环效率、加强工业废水管控，开展水权交易等[44]措施实现工业用水效率的提高。居民生活耗水的分布与人口密度紧密相关，宜从调整水价、节水宣传等柔性调控手段出发，激活居民的节水动力[30]，缓解区域水资源压力。

兰西城市群蓝绿水资源量受海拔影响显著，海拔越高，水资源量越丰富，这与张江科等[45]的研究结果一致；并且在高海拔地区，由于冰川对气温变化响应更敏感，故产水量的变化越复杂。除气候变化因素外，人类活动也是影响流域蓝绿水资源量的重要因素之一[46]。尽管植被覆盖度是黄河流域地下水的主要影响因素[47]，但本文中其对水资源量的解释力最弱，这可能是由于，高原植被根系较浅，与黄河中下游的植被相比，对地下水的影响相对较小。供水总量、城市人口数量及海拔对兰西城市群耗水的影响最为显著，建议兰州、西宁及其周边城市结合区域人口分布，优化水资源配置，加快完善城市基础设施建设，提高综合承载力。其次，要充分考虑兰西城市群海拔差异化，因地制宜制定发展策略。

针对以往研究多聚焦于自然水循环[48]，对城市群这一空间载体的水资源现状研究不足[49]等局限性，综合考虑自然侧与社会侧水循环，分别从行政区及子

流域两个尺度出发，系统解析了兰西城市群水资源现状与耗水情况，为黄河流域上游生态保障区水资源管理提供了理论支持与决策依据，有助于推动黄河流域生态保护和高质量发展。然而，受研究区域及数据可获取性影响，本文仍存在一定局限性。首先，对区域水污染情况与“水量-水质”耦合关系探讨不足，未能揭示区域的水污染现状；其次，对流域调水工程等内容考虑不够深入；此外，对蓝水资源的分类有待进一步细化，未来均需进一步研究，以构建更加完善的区域水资源管理体系。

4　结　论

本文基于黄河流域上游地区构建兰西城市群 WEP-L 模型，综合考虑区域自然侧与社会侧水循环，基于不同空间尺度，量化了兰西城市群水资源量与不同部门水足迹，并采用地理探测器方法分析了其驱动因素。主要结论如下。

(1)区域多年平均总水资源量达 1 764.73 亿 m^3，其中蓝水资源仅占约 1/5。区域上游蓝绿水资源量相对较大，下游水量不同程度减少。蓝水资源量受降雨量变化影响较大。区域水资源深度与水资源总量的空间分布差异显著，其中，西宁的蓝水资源深度最大；定西的绿水资源深度最大。

(2)兰西城市群各市农业水足迹占比最大，且在子流域尺度上分布相对均匀。甘肃省整体工业水足迹值较高，作为核心工业城市，兰州工业水足迹占区域总量的 57.46%，但其工业用水效率逐步提高。兰州与西宁两省会的生活水足迹较大；此外，受旅游业影响，靠近青海湖的子流域生活水足迹也较为突出。

(3)兰西城市群海拔分异性对区域蓝绿水资源的空间分布解释力最强。总水足迹受供水总量与城市人口数量影响最大，灌溉面积对其影响相对有限，这与区域产业结构紧密相关。

参考文献(References)：

[1] MENON G I. We need to talk about water[J]. Nature, 2023, 624(7991): S25-S25.

[2] 王熹, 王湛, 杨文涛, 等. 中国水资源现状及其未来发展方向展望[J]. 环境工程, 2014, 32(7): 1-5.
WANG X, WANG Z, YANG W T, et al. Shortage of water resources in China and countermeasures [J]. Environmental Engineering, 2014, 32(7): 1-5.

[3] FALKENMARK M., ROCKSTROM J. The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management [J]. Journal of Water Resources Planning and Management-Asce, 2006, 132(3): 129-132.

[4] 王浩, 仇亚琴, 贾仰文. 浅析变化环境下的水资源评价理论方法[J]. 水利发展研究, 2010, 10(8): 9-11.
WANG Hao, QIU Yaqin, JIA Yangwen. Analysis of theoretical methods for water resources evaluation under Changing Environments [J]. Water Resources Development Research, 2010, 10(8): 9-11.

[5] 贾仰文, 王浩, 仇亚琴, 等. 基于流域水循环模型的广义水资源评价(Ⅰ): 评价方法[J]. 水利学报, 2006, 37(9): 1051-1055.
JIA Y W, WANG H, QIU Y Q, et al. Generalized water resources assessment based on watershed hydrologic cycle model Ⅰ. Assessment approach [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(9): 1051-1055.

[6] CAI Y F, ZHANG F, GAO G, et al. Spatio-temporal variability and trend of blue-green water resources in the Kaidu River Basin, an arid region of China[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 51: 101640.

[7] 史孟琦, 袁喆, 史晓亮, 等. 基于 GLDAS-NOAH 的长江流域蓝绿水资源时空变化特征[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(10): 38-44.
SHI M Q, YUAN Z, SHI X L, et al. Spatial and temporal variation characteristics of blue and green water resources in the Yangtze River Basin based on GLDAS-NOAH [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(10): 38-44.

[8] CHEN C, HAGEMANN S, LIU J G. Assessment of impact of climate change on the blue and green water resources in large river basins in China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(8): 6381-6394.

[9] HOEKSTRA A Y. Water footprint assessment: Evolvement of a new research field[J]. Water Resources Management, 2017, 31(10): 3061-3081.

[10] LIU F, YUE C, MA J F, et al. Water resources evaluation and driving factor analysis in nine provinces of Western China based on water footprint theory [J]. Ecological Indicators, 2025, 174: 113457.

[11] YIN J L, WU N, ENGEL B A, et al. Multi-dimensional evaluation of water footprint and implication for crop production: A case study in Hetao Irrigation District, China[J]. Agricultural Water Management, 2022, 267: 107630.

[12] 刘璇, 杨明祥, 董宁澎, 等. 三江源区夏季降水水汽源地变化及其对降水影响[J]. 水力发电学报, 2025, 44(2): 38-49.
LIU X, YANG M X, DONG N P, et al. Study on changes in precipitation moisture sources in Three Rivers Sources region and its impact on summer precipitation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2025, 44(2): 38-49.

[13] 王艺霖, 洪昌红, 刘达, 等. 中国式现代化视域下保障高质量发展的用水总量管控路径研究[J]. 水利发展研究, 2026, 26(5): 31-40.
WANG Yilin, HONG Changhong, LIU Da, et al. Study on total water consumption management system under high-quality development demand during Chinese modernization process [J]. Water Resources Development Research, 2026, 26(5): 31-40.

[14] SUN F H, GUO J Y, HUANG X, et al. Spatio-temporal characteristics and coupling coordination relationship between

industrial green water efficiency and science and technology innovation: A case study in China[J]. Ecological Indicators, 2024, 159: 111651.

[15] JIA Y W, NI G H, KAWAHARA Y, et al. Development of WEP model and its application to an urban watershed[J]. Hydrological Processes, 2001, 15(11): 2175-2194.

[16] JIA Y W, WANG H, ZHOU Z H, et al. Development of the WEP-L distributed hydrological model and dynamic assessment of water resources in the Yellow River Basin[J]. Journal of Hydrology, 2006, 331(3/4): 606-629.

[17] DU X S, ZHOU J, XIAO C Y. Spatial effects and influencing factors of urban sustainable development: An analysis of urban agglomerations in China[J]. Economic Analysis and Policy, 2024, 81: 556-575.

[18] 周祖昊, 刘佳嘉, 严子奇, 等. 黄河流域天然河川径流量演变归因分析[J]. 水科学进展, 2022, 33(1): 27-37.
ZHOU Z H, LIU J J, YAN Z Q, et al. Attribution analysis of the natural runoff evolution in the Yellow River Basin[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(1): 27-37.

[19] 贾仰文, 王浩, 倪广恒, 等. 分布式流域水文模型原理与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
JIA Y W, WANG H, NI G H, et al. Principles and Practices of Distributed Watershed Hydrological Model[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2005.

[20] MORIASI D N, ARNOLD J G, VAN LIEW M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.

[21] 岁姚炳, 牛存稳, 刘佳嘉, 等. 基于 WEP 模型的黄河水源涵养区水源涵养量动态评估与关键驱动因素解析[J]. 水资源保护, 2025, 41(2): 65-76.
SUI Y B, NIU C W, LIU J J, et al. Dynamic assessment of water conservation and analysis of key driving factors in the Yellow River water conservation area based on WEP model[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(2): 65-76.

[22] 齐文华, 金艺华, 尹振浩, 等. 基于 SWAT 模型的图们江流域蓝绿水资源供需平衡分析[J]. 生态学报, 2023, 43(8): 3116-3127.
QI W H, JIN Y H, YIN Z H, et al. Analysis of blue and green water scarcity based on SWAT model in the Tumen River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(8): 3116-3127.

[23] 庞超, 周祖昊, 刘佳嘉, 等. 基于 GPU 加速的分布式水文模型并行计算性能[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(1): 33-38.
PANG Chao, ZHOU Zuhao, LIU Jiajia, et al. Parallel computing performance of distributed hydrological model accelerated by GPU[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(1): 33-38.

[24] 夏帆, 郭辉, 姜欣言, 等. 基于水足迹理论的河南省沿黄城市水资源短缺评价[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2025, 46(6): 76-83.
XIA F, GUO H, JIANG X Y, et al. Evaluation of water resource in cities of the Yellow River(Henan section) based on water footprint[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), , 2025, 46(6): 76-83.

[25] ZHAO R, ZHAN L P, YAO M X, et al. A geographically weighted regression model augmented by Geodetector analysis and principal component analysis for the spatial distribution of $PM_{2.5}$[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 56: 102106.

[26] LI Y Z, FAN W L, YUAN X W, et al. Spatial distribution characteristics and influencing factors of traditional villages based on geodetector: Jiarong Tibetan in Western Sichuan, China[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 11700.

[27] 冯榆晓, 何文, 王金叶, 等. 北部湾港口区生态环境质量时空演化特征及驱动因素分析[J]. 环境科学, 2025: 1-24.
FENG Y X, HE W, WANG J Y, et al. Temporal and spatial evolution characteristics and driving factors of ecological environment quality in Beibu Gulf port area[J]. Environmental Science, 2025: 1-24.

[28] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.

[29] 程琰, 左其亭, 邱曦. 基于 SWAT 模型的蓝绿水短缺指数计算与风险评价[J]. 人民黄河, 2024, 46(5): 91-97.
CHENG Y, ZUO Q T, QIU X. Calculation of blue and green water scarcity index and risk assessment based on SWAT model[J]. Yellow River, 2024, 46(5): 91-97.

[30] 胡继然, 姚娟. 居民节水行为的驱动因素研究: 基于拓展 TPB-NAM 的整合框架[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(8): 32-41.
HU J R, YAO J. Drivers of residents' water saving behavior: An expanded TPB-NAM based integration framework analysis[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(8): 32-41.

[31] 吕锡芝, 严登华, 秦天玲, 等. 百年尺度黄河流域水沙演变特征与气候-人类驱动机制解析[J]. 水科学进展, 2026, 37(5): 789-799.
LYU X Z, YAN D H, QIN T L, et al. Centennial-scale evolution of the runoff-sediment system and its climatic and anthropogenic drivers in the Yellow River Basin[J]. Advances in Water Science, 2026, 37(5): 789-799.

[32] 郑德凤, 王佳媛, 李钰, 等. 基于节水视角的中国水资源压力时空演变及影响因素分析[J]. 地理科学, 2021, 41(1): 157-166.
ZHENG D F, WANG J Y, LI Y, et al. Spatial-temporal variation of water resources stress and its influencing factors based on water-saving in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(1): 157-166.

[33] 黄治化, 赵军, 肖涵余, 等. 石羊河流域水服务供需状况及驱动因素[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 228-235.
HUANG Z H, ZHAO J, XIAO H Y, et al. Water service supply and demand situation and driving factors in Shiyang River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3): 228-235.

[34] 张韦萍, 石培基, 赵武生, 等. 黄河上游兰州-西宁城市群资源环境承载力时空分异及障碍因子诊断[J]. 应用生态学报, 2022, 33(9): 2501-2510.
ZHANG W P, SHI P J, ZHAO W S, et al. Spatiotemporal variation

and obstacle factor diagnosis of resource and environment carrying capacity of Lanzhou-Xining urban agglomeration in the upper Yellow River, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(9): 2501-2510.

[35] 柳海亮，于坤霞，李鹏，等. 兰州—西宁城市群水生态-经济协同发展评价研究[J]. 西安理工大学学报，2021，37(4)：451-459.
LIU H L, YU K X, LI P, et al. Study on the evaluation of the coordinated development of water ecology and economy in Lanzhou-Xining urban agglomeration[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2021, 37(4): 451-459.

[36] ROOZBAHANI A, GHANIAN T. Risk assessment of inter-basin water transfer plans through integration of Fault Tree Analysis and Bayesian Network modelling approaches[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 356: 120703.

[37] HU S R, DING Y T, CUI S B, et al. Assessing economic and hydrological effects of water-saving irrigation using a coupled SWAT-MODFLOW-AquaCrop model[J]. Agricultural Water Management, 2025, 314: 109516.

[38] 蓝楠. 协同治理视角下黄河流域综合治理机制研究[J]. 中国软科学，2024(12)：196-204.
LAN N. Research on the comprehensive management mechanism of the Yellow River Basin under the perspective of synergistic governance[J]. China Soft Science, 2024(12): 196-204.

[39] 杨雪荻，陈兴鹏，车磊，等. 融入生态安全的兰西城市群土地利用功能布局优化[J]. 生态学报，2023，43(7)：2583-2593.
YANG X D, CHEN X P, CHE L, et al. Optimizing the functional layout of land use integrated ecological security in Lanzhou-Xining Urban Agglomeration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(7): 2583-2593.

[40] 徐牧天，鲍超. 资源环境承载力弹性区间测度与未来情景分析：以兰西城市群为例[J]. 资源科学，2023，45(10)：1961-1976.
XU M T, BAO C. Elastic range measurement of resource and environmental carrying capacity and future scenario analysis: A case study of the Lanzhou-Xining urban agglomeration[J]. Resources Science, 2023, 45(10): 1961-1976.

[41] 王蕾，许嘉伟，张晟哲. 农业用水效率时空格局演化及驱动因素研究：基于长江经济带与黄河流域的比较[J]. 长江流域资源与环境，2024，33(11)：2391-2409.
WANG L, XU J W, ZHANG S Z. Spatial and temporal evolution and driving factors of agricultural water use efficiency: A comparison between the Yangtze River economic belt and the Yellow River Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(11): 2391-2409.

[42] 孟祥瑞，邵庆真，王向前. 黄河流域工业水资源利用与碳排放时空特征及脱钩分析[J]. 人民黄河，2024，46(9)：136-143.
MENG X R, SHAO Q Z, WANG X Q. Spatial-temporal characteristics and decoupling analysis of industrial water resources utilization and carbon emissions in the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2024, 46(9): 136-143.

[43] 刘波，张璐然，王文鹏，等. 我国城市工业用水效率与经济发展水平的秩匹配度原理及特征解析[J]. 水资源保护，2024，40(2)：64-71.
LIU B, ZHANG L R, WANG W P, et al. Principle and characteristic analysis of rank matching degree between urban industrial water use efficiency and economic development level in China[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 64-71.

[44] 苗峻瑜，张春英. 黄河流域工业水资源效率与经济协调发展特征及时空演变[J]. 环境科学研究，2024，37(1)：114-121.
MIAO J Y, ZHANG C Y. Characteristics and spatial-temporal evolution of industrial water resources efficiency and coordinated economic development in the Yellow River Basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(1): 114-121.

[45] 张江科，戴文渊，高彦婷，等. 2000—2020 年黄河流域甘肃段产水量的趋势演变[J]. 灌溉排水学报，2025，44(3)：104-112.
ZHANG J K, DAI W Y, GAO Y T, et al. Variation in water yield of Yellow River Basin in the Gansu section from 2000 to 2020[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2025, 44(3): 104-112.

[46] 高海燕，张悦. 黄河干流实测径流量演变特征及影响因素分析[J]. 水土保持研究，2025，32(2)：1-13.
GAO H Y, ZHANG Y. Evolution characteristics and influencing factors of the measured runoff in the main stream of the Yellow River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 1-13.

[47] 王希栋，孙文义，穆兴民，等. 黄河流域地下水储量变化特征及其驱动因素[J]. 人民黄河，2023，45(8)：96-100.
WANG X D, SUN W Y, MU X M, et al. Variation characteristics and driving factors of groundwater storage in the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2023, 45(8): 96-100.

[48] 赵汉文，张强华，黄清梅，等. 基于 SWAT 模型的葫芦河流域土地利用方式对径流的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版)，2025，61(3)：312-318.
ZHAO H W, ZHANG Q H, HUANG Q M, et al. Effects of land use patterns on runoff in the Hulu River Basin based on SWAT model[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2025, 61(3): 312-318.

[49] 丁相毅，罗增良，付含佳，等. 中国主要城市群人水和谐度及影响因素[J]. 资源科学，2025，47(3)：501-511.
DING X Y, LUO Z L, FU H J, et al. Human-water harmony degree of major urban agglomerations in China and influencing factors[J]. Resources Science, 2025, 47(3): 501-511.

（责任编辑　王　璐）