

DOI: 10.5846/stxb201903220541

王壮壮, 张立伟, 李旭谱, 李英杰, 王鹏涛, 延军平. 区域生态系统服务供需风险时空演变特征——以陕西省产水服务为例. 生态学报, 2020, 40(6): 1887-1900.

Wang Z Z, Zhang L W, Li X P, Li Y J, Wang P T, Yan J P. Spatio-temporal pattern of supply-demand risk of ecosystem services at regional scale: a case study of water yield service in Shaanxi province. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(6): 1887-1900.

区域生态系统服务供需风险时空演变特征 ——以陕西省产水服务为例

王壮壮¹, 张立伟^{1,*}, 李旭谱¹, 李英杰², 王鹏涛³, 延军平¹

1 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119

2 密歇根州立大学系统综合与可持续发展研究中心, 美国 东兰辛 48823

3 西安外国语大学旅游学院·人文地理研究所, 西安 710128

摘要: 生态系统服务评估是地理学与生态学研究的重要议题。目前的生态系统服务评估研究主要着眼于服务供给能力的退化风险评估, 缺乏将服务的供需匹配特征、供需动态变化趋势以及服务之间的权衡协同关系综合考虑的生态系统服务风险评估框架及案例研究。首先通过系统地梳理生态系统服务供需风险评估研究进展, 提出了区域尺度的生态系统服务供需风险评估研究框架, 并以陕西省产水服务为例进行案例分析, 揭示其供需风险时空格局变化特征。讨论了生态系统服务供需风险评估的影响因素、研究意义和未来研究方向。结果显示: ①在产水服务供需时空格局方面, 2000—2010 年陕西省产水服务供给与需求总量均有所增加。陕南地区是主要的产水服务供给区, 而产水服务需求量较大的地区主要分布在关中地区和汉中盆地。②在产水服务供需匹配方面, 2010 年陕西省产水服务供给不能满足需求的区域相对于 2000 年减少 3.93%, 供需空间匹配状况整体有所改善。③在产水服务供需风险方面, 2000—2010 年陕西省产水服务供需高风险区域占全省的 13.37%, 主要分布在关中地区和榆林市; 低风险区域占全省的 86.63%, 主要分布在陕南地区以及延安市和宝鸡市。与 2000—2005 年相比, 2005—2010 年陕西省产水服务供需风险水平明显降低, 高风险区域比重减少 1.63%。研究结果以期为生态系统服务风险评估研究与管理应用提供理论支撑。

关键词: 生态系统服务; 供给与需求; 供需风险; 产水服务; 陕西省

Spatio-temporal pattern of supply-demand risk of ecosystem services at regional scale: a case study of water yield service in Shaanxi province

WANG Zhuangzhuang¹, ZHANG Liwei^{1,*}, LI Xupu¹, LI Yingjie², WANG Pengtao³, YAN Junping¹

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

2 Center for Systems Integration and Sustainability, Michigan State University, East Lansing, MI 48823, USA

3 Institute of Human Geography, Tourism College of Xi'an International Studies University, Xi'an 710128, China

Abstract: Ecosystem services assessment is an important topic in geography and ecology. Current studies on ecosystem services assessment mainly focus on the degradation risk assessment of ecosystem service supply capacity. There are still lacking a risk assessment framework for ecosystem services and related case studies that comprehensively take into account the supply-demand matching characteristics, the changing trends of supply and demand of ecosystem services, and relationships of trade-offs and synergies among ecosystem services. In this paper, we proposed a regional-scale framework for supply-demand risk assessment of ecosystem services by systematical literature review. Then, we applied the framework to

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871187, 41601182); 陕西省自然科学基金基础研究计划青年项目(2018JQ4025)

收稿日期: 2019-03-22; **网络出版日期:** 2019-12-17

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

water yield service in Shaanxi province to reveal its spatial-temporal patterns of supply-demand risk. Finally, we discussed the influencing factors, significance, and future research directions of supply-demand risk assessment of ecosystem services. The results showed that: (1) in terms of the spatio-temporal pattern of water yield service, the total of water yield supply and demand in Shaanxi province increased from 2000 to 2010. The southern Shaanxi was the main area of water yield service supply, and the regions with massive demand for water yield service mainly distributed in Guanzhong Plain and Hanzhong basin. (2) In terms of supply-demand matching of water yield service, compared with 2000, the areas where water yield supply could not meet the demand in 2010 decreased by 3.93%. Therefore, the supply-demand matching situation improved as a whole. (3) In terms of supply-demand risk of water yield service, the high-risk areas accounted for 13.37% of the whole province from 2000 to 2010, which mainly distributed in Guanzhong Plain and Yulin city. The low-risk regions accounted for 86.83%, which mainly distributed in southern Shaanxi, Yan'an city, and Baoji city. Compared with 2000 to 2005, the supply-demand risk grade of water yield service in Shaanxi province decreased from 2005 to 2010, and the proportion of high-risk areas decreased by 1.63%. The results of the study are expected to provide the theoretical support for the research and management of risk assessment of ecosystem services.

Key Words: ecosystem services; supply and demand; supply-demand risk; water yield; Shaanxi Province

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惠益,包括有形的物质产品和无形的服务,主要分为供给服务、调节服务、文化服务和支持服务四种类型^[1-3]。从生态系统服务生产与使用的角度可以分为生态系统服务供给和需求两个方面^[4]。前者是指生态系统在特定时空尺度范围内为人类提供生态系统产品和服务的能力;后者是指在特定时空尺度范围内人类使用或消费的生态系统产品和服务的总和^[4-5]。生态系统服务与人类福祉息息相关,是人类赖以生存和发展的基础^[3]。然而,千年生态系统评估(MA, Millennium Ecosystem Assessment)综合指出全球 24 项生态系统服务功能中有 15 项(约占总数的 60%)正在退化或者正在被不可持续地利用着,严重影响着人类的福祉,威胁全球和区域的生态安全^[3,6]。而且,随着社会经济快速发展和城市化的推进,一方面人们对生态系统服务的需求不断增加^[7],比如对粮食、水源和清洁空气等的需求^[8-9];另一方面,多种生态系统服务的可持续供给也面临着威胁^[3,10],例如,河流干涸造成的水资源短缺以及伴随的一系列生态问题等。这些人地矛盾逐渐加剧了区域生态系统服务供需风险,即在特定时空尺度内生态系统服务供给不能满足需求的状况^[10]。因此,对生态系统服务的供需风险进行量化评估,有效识别生态系统服务供需高风险区,有利于为生态系统服务风险管控提供决策依据,提升区域内居民生活福祉。

近年来,生态系统服务的风险评估研究已经获得了众多学者的广泛关注^[10-26]。从生态系统服务供给与需求的角度看,目前的生态系统服务的风险评估研究主要包括 2 种方法:①基于生态系统服务供给的风险评估方法^[19-24]。该方法提出的背景是人类赖以生存的生态系统服务正在退化,供给量正在减少^[3],因此往往以供给量减少的程度作为划分风险等级的依据^[21-24]。然而,由于缺少对人类需求的考虑,使得该方法的研究成果很难在实际管理中应用。例如,Xu 等^[21]采用生态风险分级评估流程对太湖流域 4 种生态系统服务退化风险进行了评估,将风险划分为严重退化(供给量减少 30%或更多)、中度退化(减少 15%—30%)、轻微退化(减少 5%—15%)和无风险(减少小于 5%或者增加)4 个等级。Abson 等^[22]提出了基于生态系统服务供给风险与回报之间关系的启发式概念框架。Partl 等^[23]基于提出的生态系统服务供给综合风险指数,研究了捷克共和国在多种自然灾害影响下的生态系统服务供给风险。Dong 等^[24]提出了基于生态系统服务供给的区域生态风险预警框架,将风险划分为无风险、轻度、中度、高度和极高风险 5 个等级,评估了长江上游甘孜地区土壤保持和风沙防护 2 种生态系统服务的供给风险,其中各风险等级的阈值参考《土壤侵蚀分类标准》等间隔划定。②基于生态系统服务供给与需求关系的风险评估方法^[4,10-11,25-26]。该方法提出的背景是生态系统服务研究更加强调供给与需求的耦合关系^[27-30]。该风险评估方法的优势是综合考虑了供给与需求两个方面,但是由于对服务需求者识别比较困难限制了该方法的应用,而且目前大多以概念框架为主,缺乏相关的案例研

究。例如, Burkhard 等^[4]采用专家打分法对生态系统服务供给与需求进行空间制图, 然后通过供给与需求的差值评估生态系统服务的收支状况。Chen 等^[25]采用生态供需比率评估了上海市 4 种生态系统服务的赤字和盈余状态。Li 等^[26]以产水服务供需比值构建了水资源安全指数, 评估了京津冀地区产水服务供需风险状况。Maron 等^[10]在参考世界自然保护联盟(IUCN, International Union for Conservation of Nature)物种和生态系统红色名单分类标准的基础上, 提出了生态系统服务威胁评估概念框架, 考虑服务的供给、需求以及两者预期的趋势三个方面, 以供需比和供需趋势为指标, 将生态系统服务威胁划分为安全、存在风险、供给不足和丧失, 从这 4 个大等级中又细化分出了 7 个小的等级。Mace 等^[11]以自然资本的状态(数量、质量和空间结构)为横坐标, 收益价值为纵坐标建立资本-收益关系, 根据政策目标设定可接受的收益临界值, 提出了自然资本风险登记方法, 将风险划分为高度、中度和低度 3 个等级, 并依此建立了生态系统-生态系统服务二维风险矩阵。

综合来看, 生态系统服务的风险评估研究主要以服务供给量作为衡量指标, 目前还缺少一种将服务的供需匹配特征、供需动态变化趋势以及服务之间的权衡协同关系综合考虑的风险评价框架, 并且相关的案例研究还比较少见。因此, 本文通过系统地梳理基于生态系统服务供给与需求的风险评估研究发展脉络, 提出了区域尺度的生态系统服务供需风险研究框架。并以陕西省产水服务为例, 首先采用水量平衡法和用水定额方法对陕西省 2000、2005、2010 年产水服务供给与需求进行空间制图, 其次利用构建的生态系统服务供需风险评估指标体系, 分析了陕西省产水服务供需风险时空演变特征。最后讨论了生态系统服务供需风险评估的影响因素、研究意义和未来研究方向。研究结果以期为生态系统服务风险评估相关研究与管理应用提供理论支撑。

1 研究框架、数据与方法

1.1 研究框架

通过以上分析, 在参考 Maron 等^[10]提出的生态系统服务威胁概念框架和 Chen 等^[25]、Li 等^[26]、Boithias 等^[29]相关研究成果的基础上, 定量化表达相关概念指标, 并加入生态系统服务间权衡协同关系指标, 以及供需风险未来情景模拟的相关内容, 提出了区域尺度的生态系统服务供需风险评估框架(图 1)。在此框架中, 生态系统服务供需比值作为其中一个指标, 以 0 和 1 作为临界值, 表示服务的供需空间匹配状况^[10, 25-26, 29-30]。由于生态系统服务供给与需求都随时间动态变化, 因此将供需比趋势作为划分风险的指标, 以 0 作为临界值, 用来表达生态系统服务供需双方随时间的相对变化趋势^[9]。以供给和需求各自变化趋势为指标, 0 作为临界值, 用来表达生态系统服务供给和需求随时间的绝对变化趋势。考虑到多种生态系统服务之间可能存在权衡协同关系^[31-33], 会对生态系统服务供需风险产生影响, 因此将多种服务之间的权衡协同关系作为划分服务供需风险的指标。

对以上四项指标取交集后可以将生态系统服务供需风险划分为 7 个等级(图 1)。各风险等级名称参考 Maron 等^[10]提出的生态系统服务威胁概念框架。其中, 如果供需比为 0, 则说明此时生态系统不再提供相应的服务, 根据该种服务是否可恢复, 将风险类型划分为消失(不可恢复)或者休眠(可恢复)^[9]。极度濒危是指生态系统服务供给不能满足需求, 供需比值和供给均在下降, 而需求没有下降, 且存在其他生态系统服务与该服务是权衡关系。濒危是指生态系统服务供给不能满足需求, 供需比在下降, 而供给和需求呈现相同的上升或下降趋势, 且该种服务与其他服务之间存在协同关系或无关系。危险是指生态系统服务供给不能满足需求, 供需比没有下降, 供给和需求呈现相同的上升或下降趋势, 且存在其他生态系统服务与该种服务是协同关系或无关系。供给不足是指生态系统服务供给不能满足需求, 供需比和供给均没有下降, 而需求呈下降趋势, 且该种服务与其他服务之间存在协同关系。脆弱是指生态系统服务供给能够满足需求, 但供需比呈下降趋势, 且该种服务与其他服务之间存在权衡关系。安全是指供给能够满足需求, 供需比没有下降, 且该种服务与其他服务之间存在协同关系或者无关系。

1.2 研究区概况

在全球变化背景下, 可利用的水资源是满足人类未来粮食和能源需求的一个主要限制性因素^[8]。产水

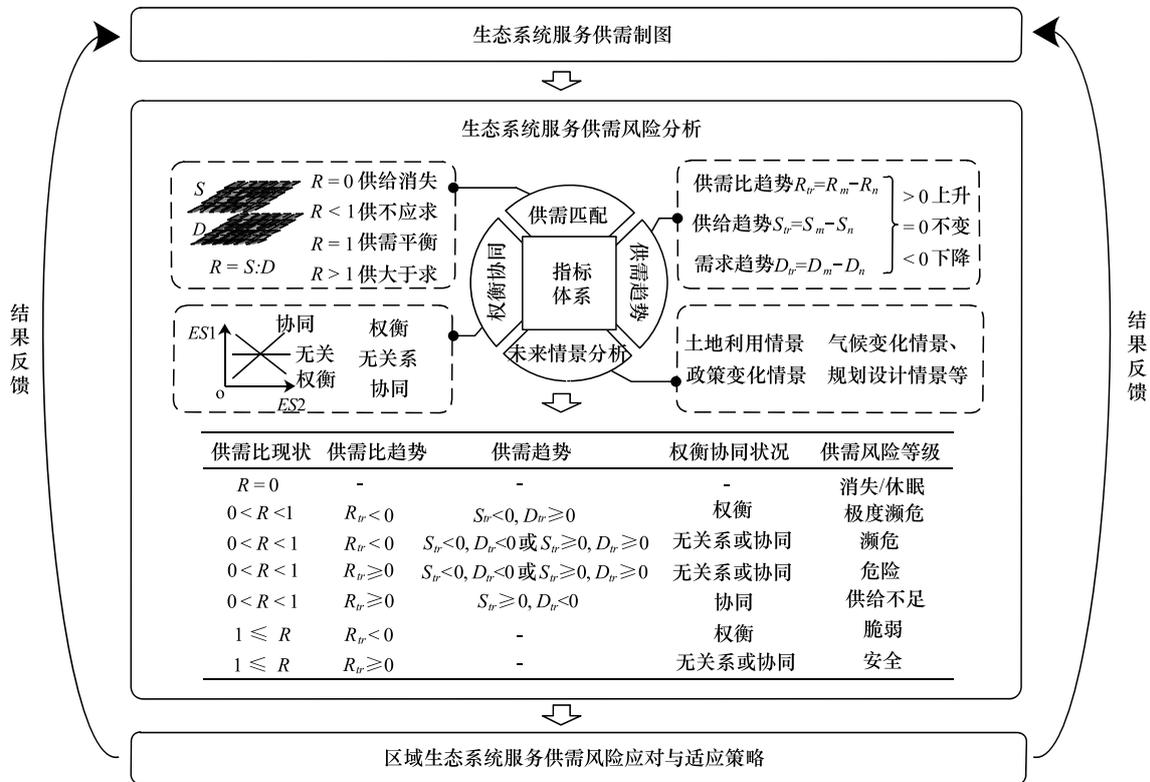


图1 区域生态系统服务供需风险评估框架

Fig.1 A regional-scale framework for supply-demand risk assessment of ecosystem services

ES1:第1种生态系统服务,1st Ecosystem Service(ES1与ES2命名规则一致);S:供给量,Supply;D:需求量,Demand;R:供给量与需求量的比值,Ratio;m与n:时间; R_r :供需比之间的差值; S_r :供给量之间的差值; D_r :需求量之间的差值

服务直接关系到水资源供给量,是关键的生态系统服务之一^[9]。陕西省地跨黄河和长江两大流域,包括陕北、关中、陕南3大区域,辖10个地级市(图2)。陕西省从南到北跨越亚热带、暖温带和中温带季风气候区,年降水量的60%—70%集中在7—10月份^[34],而且呈现从南到北递减的趋势。全省水资源总量的71.1%集中在陕南地区,关中地区占19.4%,陕北仅占9.5%^[35]。然而,陕西省人口和产业60%以上分布在关中平原地区。特殊的地理位置和气候条件,使得水资源分布极不均衡。因此,陕西省水资源供给不足和供需时空不匹配问题成为众多学者关注的焦点。大多数研究选取与水资源密切相关的多种指标,采用统计分析方法,建立水资源评价指数^[34-36]。综合来看,陕西省水资源研究还存在空间可视化表达不足,供需耦合研究较少的问题,从生态系统服务供需角度对产水服务进行供需风险评价的研究还比较少见。

1.3 数据来源

本文数据在属性上主要包括社会经济数据和自然背景数据,在用途上主要包括两个部分:第一部分用于产水服务供给制图,具体包括:气象观测数据、DEM高程数据、土地利用数据、NDVI数据和土壤类型数据;第二部分用于产水服务需求制图,具体包括:人口空间化数据、GDP空间化数据、土地利用数据、单位用水数据(表1)。气象降水采用Auspline工具插值成250 m分辨率的降水栅格数据。利用ArcGIS 10.2工具箱中的重采样(resample)工具,采用最邻近法(NEAREST)将所有栅格数据重采样为1 km分辨率。

1.4 研究方法

1.4.1 产水服务供给制图

采用区域水量平衡法对产水服务 (Water Yield, 简称 WY) 进行空间制图, 即通过区域水分的输入量降水和输出量蒸散量的差值计算得到^[33,37-38]。计算公式如下^[33,37]:

$$WY = P - ET \quad (1)$$

$$ET = \frac{P(1 + \omega \frac{PET}{P})}{1 + \omega \frac{PET}{P} + (\frac{PET}{P})^{-1}} \quad (2)$$

式中, WY 为产水量 (mm); P 为年降水量 (mm); PET 为年潜在蒸散量 (mm), 可采用 Hamon 公式求得^[39]; ET 为年实际蒸散量 (mm), 其中植被蒸散量由公式 (2) 求得^[40], 水体蒸散量由降水与潜在蒸散量的最小值求得^[41]。ω 为植被可利用水系数, 代表植被在蒸腾过程中利用土壤水分的能力, 将覆盖率大于 30% 的林地设定为 2.0, 覆盖率小于 30% 的林地设为 1.0, 草地和耕地设为 0.5, 人工表面和裸地设为 0.1^[33,37,40-41]。

1.4.2 产水服务需求制图

采用用水定额方法对产水服务需求量进行空间制图, 将陕西省用水需求分为居民生活用水、经济发展用水和农田灌溉用水 3 个部分。其中, 人均生活用水量、万元 GDP 用水量和亩均灌溉用水量通过查阅陕西省

2000、2005 和 2010 年水资源公报获取^[42]。陕西省人口和 GDP 空间分布数据采用中国科学院资源环境科学数据中心的中国人人口和 GDP 空间分布公里网格数据集^[43-44], 该数据集综合考虑了土地利用类型、夜间灯光度、居民点密度等多因素, 利用多因子权重分配法将以行政区为基本统计单元的人口和 GDP 数据展布到空间格网上^[43-44]。为了降低误差, 将该数据集归一化, 并分别乘以陕西省统计年鉴上各地级市对应年份的实际人

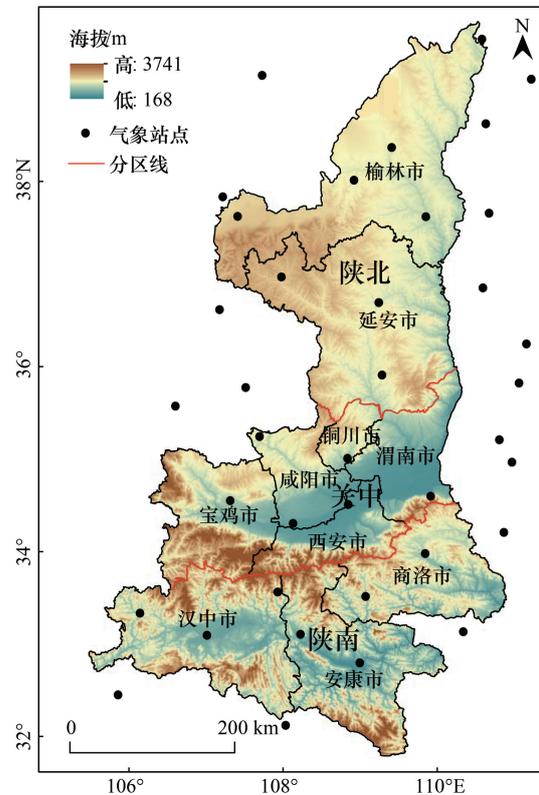


图 2 研究区概况与气象站点分布

Fig. 2 The profile of the study area and the distribution of meteorological stations

表 1 数据源汇总

Table 1 Data source summary

数据名称 Data name	数据类型 Data type	时间 Time	分辨率 Resolution	数据来源 Data source
气象数据 Meteorological data	矢量点	2000, 2005, 2010	—	http://data.cma.cn/
DEM 数据 DEM data	栅格	2004	90 m	http://gdem.ersdac.jp/spacestems.or.jp/
LULC 数据 LULC data	栅格	2000, 2005, 2010	1 km	http://www.resdc.cn/
NDVI 数据 NDVI data	栅格	2000, 2005, 2010	1 km	http://www.resdc.cn/
土壤类型 Soil type	栅格	2001	1 km	http://westdc.westgis.ac.cn
人口数据 Population data	栅格	2000, 2005, 2010	1 km	http://www.resdc.cn/
GDP 数据 GDP data	栅格	2000, 2005, 2010	1 km	http://www.resdc.cn/
单位用水量 Water consumption per unit	—	2000, 2005, 2010	—	http://www.sxmwr.gov.cn/sxmwr/

DEM: 数字高程模型, Digital Elevation Model; LULC: 土地利用和土地覆盖, Land Use and Land Cover; NDVI: 归一化植被指数, Normalized Difference Vegetation Index; GDP: 国内生产总值, Gross Domestic Product

口数和 GDP,公式(3)和(4)。根据陕西省土地利用数据集,利用 ArcGIS 中的属性提取工具(Extract by attributes),提取陕西省 2000、2005 和 2010 年农田空间分布数据。最后,将居民生活用水、经济发展用水和农田灌溉用水加和,可以得到陕西省用水需求数据,公式(5)。计算公式如下:

$$\text{pop}_{(i,j)} = \frac{P_{(i,j)}}{\sum_{j=1}^n P_{(i,j)}} \times PS_i \quad (3)$$

$$\text{gdp}_{(i,j)} = \frac{g_{(i,j)}}{\sum_{j=1}^n g_{(i,j)}} \times GS_i \quad (4)$$

$$WD_{(i,j)} = \text{pop}_{(i,j)} \times l_i + \text{gdp}_{(i,j)} \times m_i + \text{agr}_{(i,j)} \times n_i \quad (5)$$

式中, $\text{pop}_{(i,j)}$ 为按照统计年鉴数据纠正后的*i*地级市*j*栅格人口数, $p_{(i,j)}$ 为原始的*i*地级市*j*栅格人口数, PS_i 为统计年鉴数据的*i*地级市人口总量。 $\text{gdp}_{(i,j)}$ 为按照统计年鉴数据纠正后的*i*地级市*j*栅格 GDP, $g_{(i,j)}$ 为原始的*i*地级市*j*栅格 GDP, GS_i 为统计年鉴数据的*i*地级市 GDP 量。 $\text{agr}_{(i,j)}$ 为*i*地级市*j*农田栅格单元。 l_i 为*i*地级市人均生活用水量, m_i 为*i*地级市万元 GDP 用水量, n_i 为*i*地级市亩均农田灌溉用水量。

1.4.3 产水服务供需比与供需比趋势

生态系统服务供给与需求的比值可以表达某一时空范围内供给与需求的空间匹配状况^[25-26,29-30],而供需比趋势可以表达在某一时空范围内供给与需求的相对变化情况。在本文中,产水服务供需比通过同一栅格单元上产水服务供给量与需求量的比值计算得到,公式(6)。计算结果主要有 2 个关键阈值 0 和 1。如果供需比为 0,说明该地区不再提供产水服务;如果供需比处于 0 到 1 之间,说明产水服务供给无法满足需求;如果供需比大于等于 1,说明产水服务供给能够满足需求。产水服务供需比趋势通过两个年份的供需比值相减计算得到,公式(7)。计算结果主要有 1 个关键阈值 0。如果供需比差值小于 0,说明供需比呈下降趋势;如果供需比差值大于等于 0,说明供需比不变或呈上升趋势。计算公式如下:

$$R_{(j,k)} = WY_{(j,k)} / WD_{(j,k)} \quad (6)$$

$$R_{tr} = R_m - R_n \quad (7)$$

式中, $R_{(j,k)}$ 指*j*行*k*列产水服务需求量与供给量的比值, $WY_{(j,k)}$ 指*j*行*k*列产水服务供给量, $WD_{(j,k)}$ 指*j*行*k*列产水服务需求量。 R_{tr} 指供需比差值, R_m 和 R_n 分别指*m*年和*n*年产水服务供需比值。

1.4.4 产水服务供给与需求趋势

生态系统服务供给与需求趋势可以表达供给与需求的绝对变化情况,可以作为供需比趋势的辅助判断指标。在本文中,产水服务供给趋势通过两个年份的产水服务供给量相减计算得到,公式(8);产水服务需求趋势通过两个年份的产水服务需求量相减计算得到,公式(9)。计算结果主要有 1 个关键阈值 0。如果差值小于 0,说明产水服务供给或需求呈下降趋势;如果差值大于或等于 0,则说明产水服务供给或需求呈上升趋势或不变。计算公式如下:

$$S_{tr} = WY_m - WY_n \quad (8)$$

$$D_{tr} = WD_m - WD_n \quad (9)$$

式中, S_{tr} 和 D_{tr} 分别指产水服务供给量差值和需求差值, WY_m 和 WY_n 分别指*m*年和*n*年产水服务供给量, WD_m 和 WD_n 分别指*m*年和*n*年产水服务需求量。

1.4.5 产水服务供需风险指标体系

本文选择陕西省产水服务作为生态系统服务供需风险研究的案例,把前文研究框架中的生态系统服务供需风险等级稍作简化,不再考虑生态系统服务间的权衡协同关系。结合生态系统服务供需比和供需比趋势以及供给与需求趋势 3 项指标,把生态系统服务供需风险划分为 7 个等级。为了空间制图的方便,将 7 种风险等级采用大写罗马数字 I 到 VII 来表示(表 2)。

表 2 生态系统服务供需风险等级

Table 2 The supply-demand risk grade of ecosystem services

供需比 Supply-demand ratio	供需比趋势 Trend of supply- demand ratio	供给与需求趋势 Trend of supply and demand	风险等级 Risk grade	等级代码 Grade code
$R=0$	—	—	消失/休眠	I 级
$0<R<1$	$R_{tr}<0$	$S_{tr}<0, D_{tr}\geq 0$	极度濒危	II 级
$0<R<1$	$R_{tr}<0$	$S_{tr}<0, D_{tr}<0$ 或 $S_{tr}\geq 0, D_{tr}\geq 0$	濒危	III 级
$0<R<1$	$R_{tr}\geq 0$	$S_{tr}<0, D_{tr}<0$ 或 $S_{tr}\geq 0, D_{tr}\geq 0$	危险	IV 级
$0<R<1$	$R_{tr}\geq 0$	$S_{tr}\geq 0, D_{tr}<0$	供给不足	V 级
$R\geq 1$	$R_{tr}<0$	—	脆弱	VI 级
$R\geq 1$	$R_{tr}\geq 0$	—	安全	VII 级

2 结果分析

2.1 产水服务供给与需求时空演变特征

2.1.1 产水服务供给时空演变特征

2000—2010 年陕西省产水服务供给的空间格局基本稳定,总体呈现从南到北降低的变化趋势,陕南地区产水服务供给能力较强(图 3)。总体来看,陕西省产水供给总量呈上升趋势,2010 年相对于 2000 年产水总量增加 $77.65\times 10^8 \text{ m}^3$;产水服务供给能力总体有所提升,产水量最小值由 2000 年的 $0.03\times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 增长为 2010 年的 $0.11\times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。分区域来看,2000—2010 年陕西省产水服务供给的区域差异十分明显。在 3 大区域中,产水供给总量从大到小依次是陕南、关中和陕北。其中,关中和陕北地区的产水总量在研究时段内均有不同程度的增加,陕南地区产水供给量在 2005 年有所增长,而在 2010 年有所下降(图 4)。各区域的产水量占全省产水总量的比重有所变化,陕南地区由 2000 年的 65.5% 下降为 2010 年的 59.0%;关中地区由 2000 年的 20.3% 上升为 2010 年的 25.3%;陕北地区产水量占全省的比重在 2000 年为 14.2%,2005 年下降为 11.9%,而 2010 年上升为 15.7%。在 10 个地级市中,虽然在不同年份产水量有所波动,但整体上看 2010 年相对于 2000 年产水量均有不同程度的增加。

2.1.2 产水服务需求时空演变特征

2000—2010 年陕西省产水服务需求的空间格局基本稳定,关中平原和汉中盆地是主要的产水服务需求区(图 3)。总体来看,陕西省产水服务需求总量呈上升趋势,由 2000 年的 $76.74\times 10^8 \text{ m}^3$ 上升到 2010 年的 $85.13\times 10^8 \text{ m}^3$ 。陕西省产水服务需求的空间差异也十分明显。在 3 大区域中,产水服务需求量从大到小依次是关中、陕南和陕北,并且 2010 年产水服务需求量相对于 2000 年均有所增加(图 4)。但不同区域的产水量在全省的比重有所变化。其中,关中地区产水服务需求量占全省总量的比重由 2000 年的 62.53% 下降为 2010 年的 59.1%;而陕北地区由 2000 年的 16.6% 上升为 2010 年的 17.9%;陕南地区由 2000 年的 20.9% 上升为 2010 年的 23%。在 10 个地级市中,产水服务需求量较高的地级市主要为西安、咸阳、渭南和汉中。其中,西安、咸阳和渭南 3 个地级市的产水服务需求量超过全省总量的 50%。除了西安和宝鸡 2010 年的产水服务需求量相对于 2000 年有所下降外,其余地级市的产水服务需求量在研究期内均有不同程度的增加。

2.2 产水服务供需风险分析

2.2.1 产水服务供需匹配分析

从产水服务供需比来看,2000—2010 年陕西省产水服务供给与需求的匹配状况整体有所改善(图 5)。2010 年陕西省产水服务供给不足的区域面积占全省总面积的比值相对于 2000 年减少 3.93%。分区域来看,产水服务供给不足的区域主要位于关中地区的西安、咸阳、渭南、宝鸡以及陕北地区的榆林,2000 年产水供给不足的区域在这些地级市中的面积占比分别为 45.82%、52.58%、51.42% 和 38.3%,但是该占比在 2005 年和 2010 年均有所下降。汉中、安康、商洛、铜川和延安的大部分地区产水服务供给基本能够满足需求。

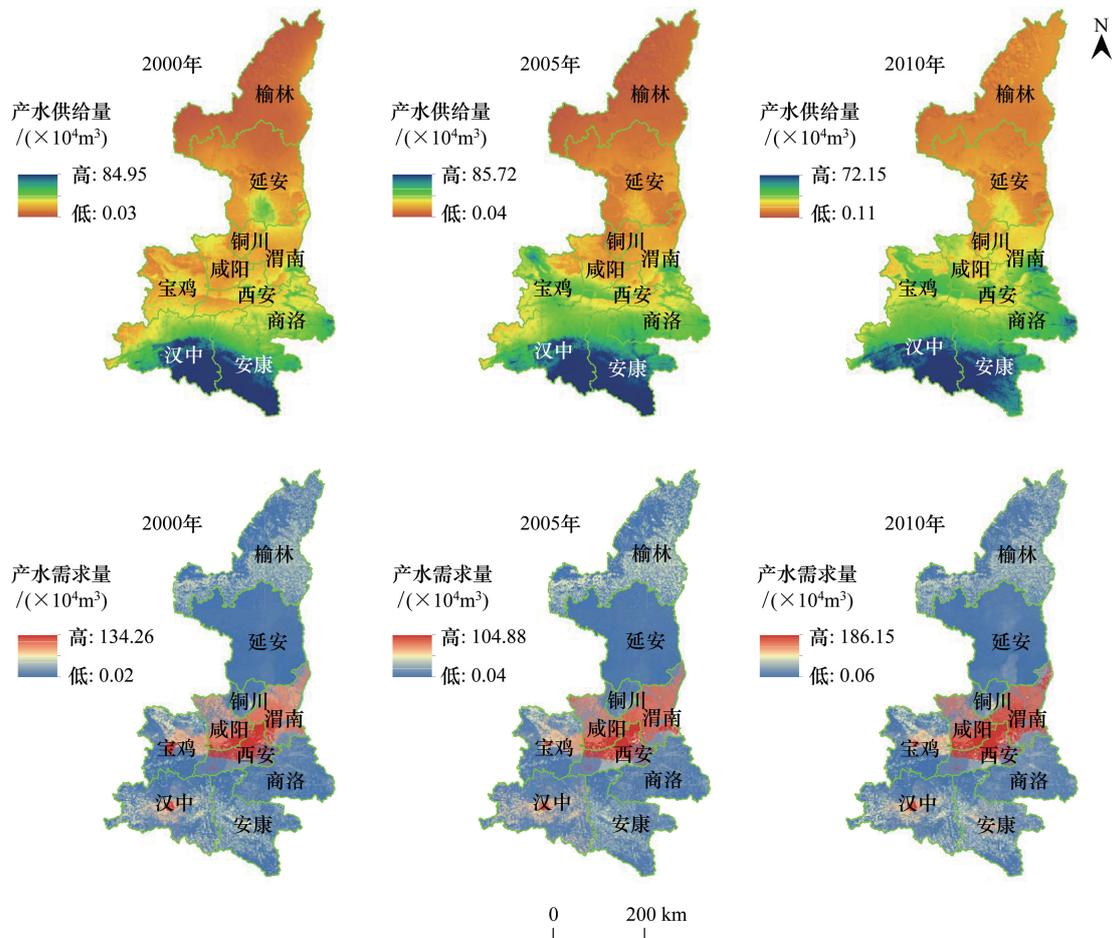


图3 2000—2010年陕西省产水服务供给与需求空间分布

Fig.3 Spatial distribution of water yield supply and demand in Shaanxi province from 2000 to 2010

从产水服务供需比趋势来看,2000—2010年陕西省产水服务供需比减小的区域占全省总面积的比重为48.87%。与2000—2005年相比,2005—2010年陕西省产水服务供需比减小的区域降低7.6%,达到44.25%,因此陕西省产水服务供需状况整体有所好转。2000—2010年陕西省产水服务供需比减小的地区主要位于陕南地区的安康和商洛以及陕北地区的延安,面积占各市的比重分别为92.83%、78.06%和78.28%,说明这三个地级市的产水供需状况有所恶化。产水服务供需比增大的地区主要位于关中地区以及榆林和汉中的部分地区,说明该地区的供需状况有所好转(图5)。分时段来看,与2000—2005年相比,西安、安康和商洛在2005—2010年产水服务供需比减小的区域有所增加,供需状况有所恶化;而其余地市的供需比增大的区域有所增加,供需状况好转。

综合来看,2000—2010年陕西省产水服务供给不足的区域总体有所减少,供需状况有所改善。其中,关中地区和榆林产水服务供给不足的区域面积有所减少,供需状况好转。而延安和安康等产水服务供给满足需求的区域,供需比下降严重,供需状况有所恶化。

2.2.2 产水服务供需风险时空演变特征

结合供需比、供需比趋势和供需趋势3项指标,分2000—2005、2005—2010和2000—2010三个时间段,对陕西省产水服务供需风险区进行划分。通过分析发现,2000—2010年陕西省产水服务供需高风险等级(Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ)区域面积占全省总面积的13.37%,主要集中在关中地区和榆林市(图6),该地区存在的主要问题是产水服务供给无法满足需求。低风险等级(Ⅵ和Ⅶ)区域面积占全省总面积的86.63%(图6),主要集

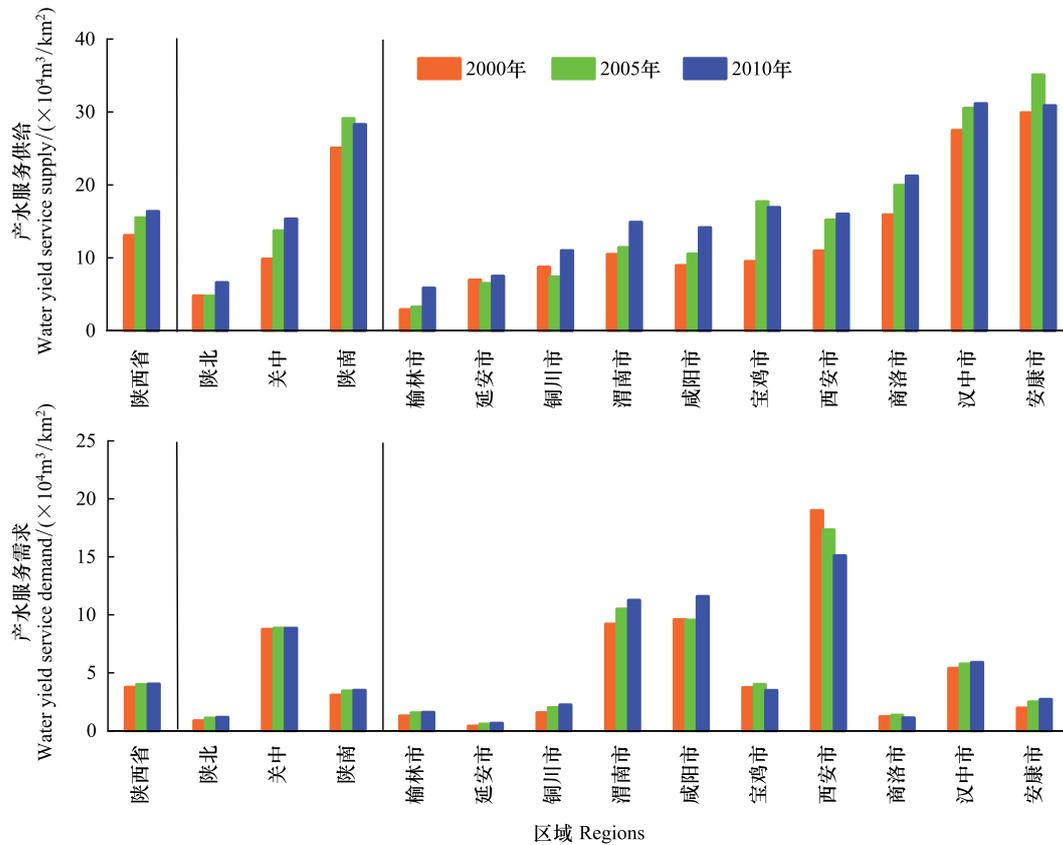


图4 2000—2010年陕西省不同区域单位面积产水服务供给量与需求量

Fig.4 Water yield supply and demand per unit area in different regions of Shaanxi province from 2000 to 2010

中在陕南地区、宝鸡市和延安市,这些地区的产水服务供给基本能够满足需求。在高风险等级中,Ⅱ级和Ⅲ级所占比例较低,约占全省的1.18%,并且主要集中在西安市的小部分地区,因此陕西省产水供给不足且供需状况恶化的区域在全省的比重较小;Ⅳ级所占比例最高,约占全省的10.56%,主要分布在咸阳市、渭南市和榆林市,因此这3个地级市虽然产水服务供给无法满足需求,但是供需比增大,供需状况有所好转;Ⅴ级约占全省的1.63%,主要集中在西安市东北部地区,该地区不但供需状况有所好转,而且产水供给量有所增加,需求量有所减少。在低风险等级中,Ⅵ级约占全省的47.69%,主要分布在延安市、铜川市、安康市、商洛市和汉中市的部分地区,这些地区虽然产水服务供给能够满足需求,但是供需比减小,供需状况有所恶化,产水服务存在供给不足的风险;Ⅶ级约占全省的38.94%,主要分布在宝鸡市、汉中市大部分地区,以及渭南东南部、西安西南部、延安和榆林的北部的小部分地区,这些区域不但产水服务供给能够满足需求,而且供需比增大,产水服务供需较为安全。

分时段来看,高风险等级由2000—2005年的17.3%减少为2005—2010年的15.67%。在高风险等级中,Ⅱ级的区域面积明显减少,其面积占全省的比重由2000—2005年的3.77%减少为2005—2010年的0.05%;Ⅲ和Ⅳ级的面积比重变化不大;而Ⅴ级的面积比重由2000—2005年的4.73%增长为2005—2010年的6.75%。因此,与2000—2005年相比,2005—2010年陕西省产水服务供需风险水平明显降低。在低风险等级中,Ⅵ级所占面积减少3.77%,而Ⅶ级所占面积增加5.4%,说明与2000—2005年相比,2005—2010年陕西省产水服务供给满足需求的区域供需状况也得到明显改善。

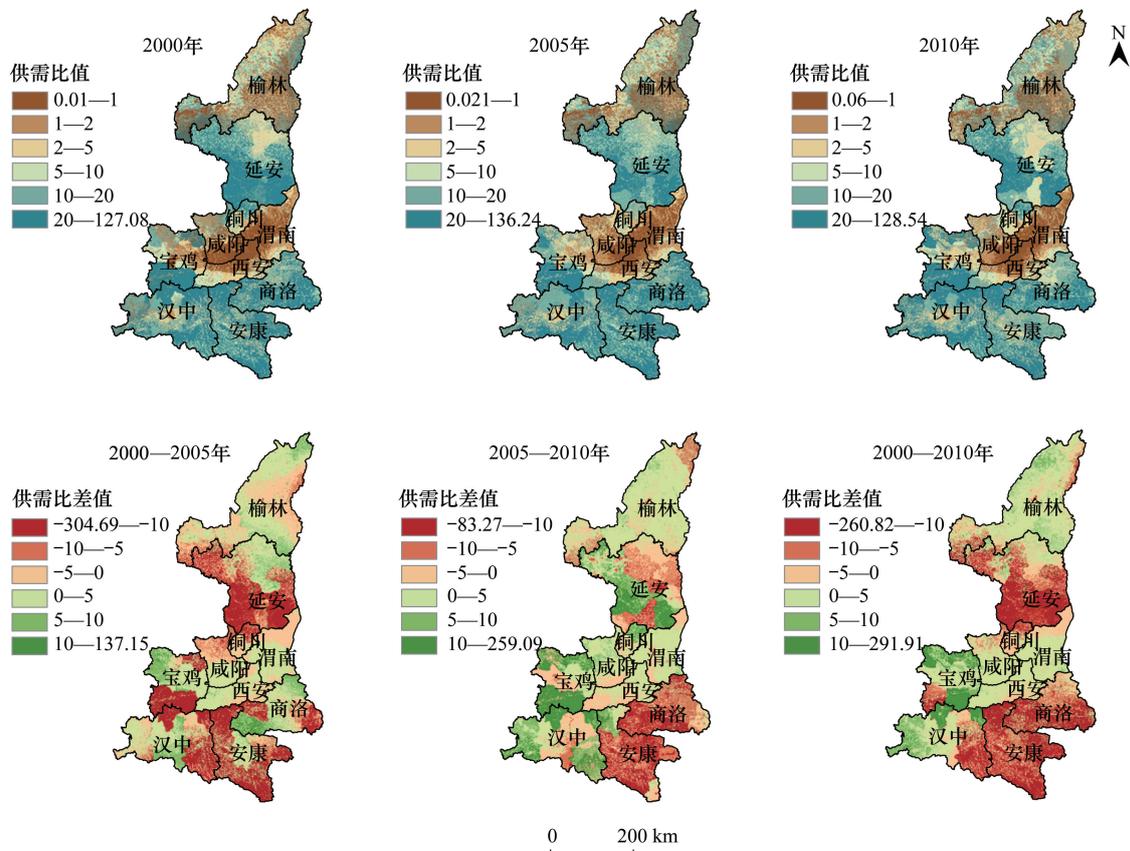


图5 2000—2010年陕西省产水服务供需比与供需比趋势

Fig.5 The supply-demand ratio and the trend of the supply-demand ratio of water yield in Shaanxi province from 2000 to 2010

3 讨论

3.1 生态系统服务供需风险评估的影响因素分析

陕西省是中国缺水最严重的省份之一^[34-36]。本文利用构建的生态系统服务供需风险指标体系,评估了陕西省产水服务供需风险。对生态系统服务供给与需求合理量化制图是生态系统服务供需风险评估的关键。本文在产水服务需求制图中,综合考虑了陕西省的居民生活用水、经济发展用水和农田灌溉用水,并且根据统计年鉴的实际人口和GDP数量对原始数据进行纠正,提高了数据的精度。通过ArcGIS工具中的区域统计工具,按照地级市对产水服务需求进行空间统计,统计结果与陕西省水资源公报中的各地级市用水总量基本一致。此外,通过查阅相关文献^[26,29,44-45],发现空间尺度的差别和生态系统服务流动可能会对评估结果产生影响,进而产生一定程度的不确定性。

首先,选择较大的空间尺度进行生态系统服务供需制图可能会弱化生态系统服务供需风险的严重性。生态系统服务供需比是生态系统服务供需风险评估的核心指标。Boithias等^[29]分析了地中海盆地不同空间尺度的产水服务供需比,研究发现从整个区域水资源供需比来看,所有的用水需求都得到了满足,但是局部来看,区域内一些子流域却水资源供给严重不足,因此选择较大的空间尺度进行评估可能会弱化水资源缺乏的严重性。本文选取1 km空间分辨率评估陕西省产水服务供需风险,空间尺度较大,可能会造成产水服务供给不足的区域面积缩小。特别是陕北等人口密度较小的地区,也许会遗漏某些产水服务供需高风险区。如何根据评估目的和决策需求选择恰当的空间尺度,是未来研究需要强化的地方。

生态系统服务具有空间流动的特性,在自然和人为作用的驱动下,从供给区到使用区发生时空转移,形成

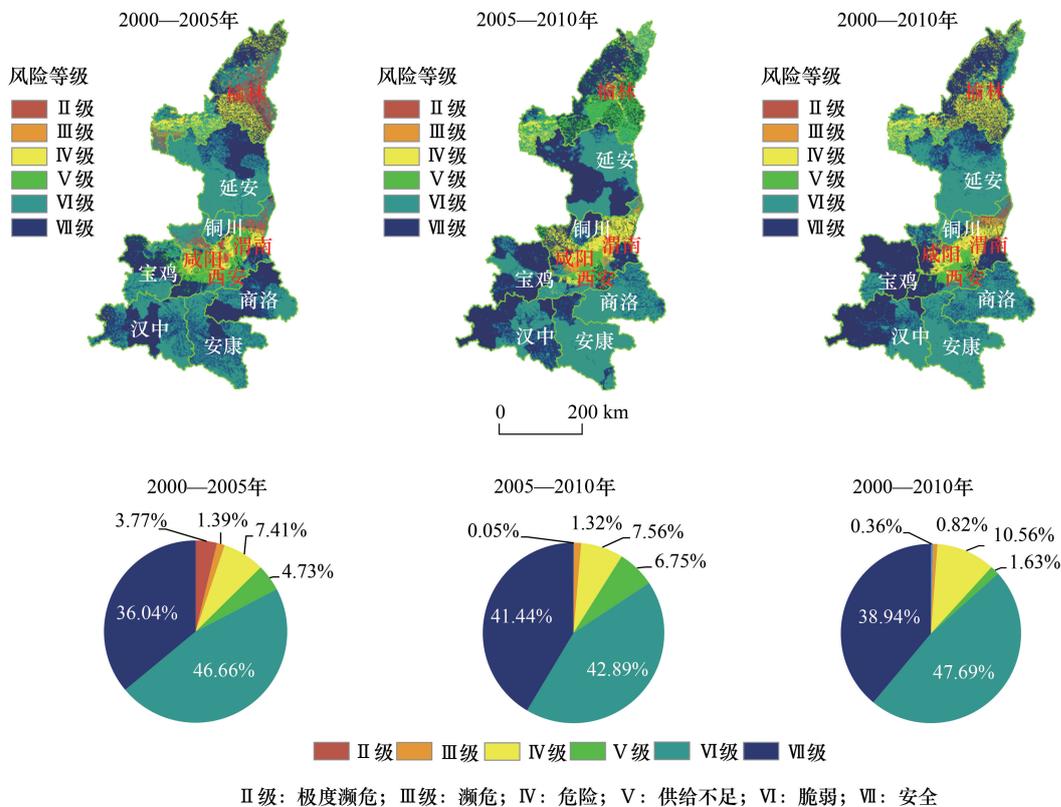


图 6 2000—2010 年陕西省产水服务供需风险及各风险等级占比

Fig.6 The supply-demand risk of water yield and the proportion of each risk grade in Shaanxi province from 2000 to 2010

生态系统服务流^[45]。由于生态系统服务流动,生态系统服务供给区与受益区可能会发生空间错位,从而影响供需风险评估结果^[28-30]。例如,Li 等^[26]分析了京津冀地区产水服务的空间流动,结果显示京津冀北部、西部和西南部的山区和植被覆盖率较高的地区从上游水供给服务中获益较大,并有盈余的水资源流向下游,而在北京、天津、石家庄和保定等大城市的中心地带,水供给服务不能满足需求,没有多余的水源流向下游。而且,为了缓解关中地区的水资源缺乏状况,陕西省启动了南水北调工程,主要包括引汉济渭工程、引乾济石工程和引红济石工程三条线路^[46]。这些水利工程的建设可能会缓解关中地区水资源的紧缺状况,降低供需风险,但也可能会使得陕南地区的水资源供需状况有所恶化。本文在评估陕西省产水服务供需风险时没有衡量产水服务的自然流动特性和调水工程措施对产水服务供需风险的影响,可能会对评估结果产生一定程度的影响。

3.2 生态系统服务供需风险评估的意义

生态系统服务是人类社会生存和发展的基础^[3]。怎样确定人们是否面临生态系统服务供给不足的风险?这种风险的程度如何?又存在怎样的演变趋势?回答这些问题有利于为生态系统服务风险管理和相关政策制定提供依据^[13-14,17]。生态系统服务供需风险评估耦合了供给与需求两个方面,从风险的角度对生态系统服务进行供需风险等级划分,为生态系统服务管理提供了一个新的视角^[10]。生态系统服务供需风险的识别有利于对区域生态系统服务的供需状况有一个整体的把握,重点关注并将有限的人力和物质资源投入到风险等级高的地区,有利于资源的优化配置^[10-11]。与国内外相关研究相比,本文提出的区域生态系统服务供需风险评估框架的优点主要体现在以下 3 个方面:①在风险评估中,耦合了生态系统服务供给与需求。基于生态系统服务供给的风险评估方法仅仅考虑了服务的退化风险^[21-24]。生态系统服务是自然界为人类提供的各种惠益^[1-3],人类作为服务的受众应当作为一个重要的参考因素。单纯考虑生态系统服务的退化风险,将会使得风险评估的目标不明确,政策指导性较差^[10]。例如,虽然某一地区的生态系统服务在退化(供给减少),

但是如果供给能够满足需求(供需比大于或等于1),那么仍然可以认为该种生态系统服务的供需风险较小^[9]。②在考虑生态系统服务供给与需求的空间匹配性(供需比)的基础上,融合了生态系统服务供需双方的相对变化趋势(供需比趋势)和绝对变化趋势(供给与需求趋势)。近期,一些学者已经开始利用生态系统服务供给与需求比值进行风险评估研究^[25-26,28-30]。例如,Li等^[26]采用调整后的淡水服务供给与需求比值定义了淡水安全指数,并对京津冀地区的淡水安全进行了定量分析。然而,生态系统服务供需双方都随时间在动态变化,这种变化趋势将会影响生态系统服务的供需风险水平。比如,某种服务的供给无法满足需求(供需比小于1),如果供需比呈下降趋势,而且这种下降是由于生态系统服务退化(供给减少)和服务需求量增加引起的,这时应该将这种生态系统服务供需风险赋予较高水平;而如果供需比呈上升趋势,而且这种上升是由于服务供给量的增加和需求量的减少引起的,那么应该将这种生态系统服务供需风险赋予相对低的水平^[10]。③将生态系统服务间的权衡协同关系融合到生态系统服务供需风险评估中。生态系统服务间存在此消彼长的权衡关系和相互增益的协同关系^[31-33]。显然,如果某种生态系统服务与其他服务之间存在权衡或协同关系,可能会影响该种服务的供给水平,进而提高或降低该种服务的供需风险水平。

3.3 未来研究展望

本文通过综述前人研究成果构建了区域生态系统服务供需风险研究框架,并结合案例分析对区域尺度的生态系统服务供需风险研究进行了有益的探索。针对本文案例分析来说,案例中由于受到数据获得性的限制,仅对陕西省2000、2005、2010年3个年份的产水服务供给与需求进行空间制图。空间尺度的选择和生态系统服务流动可能会对服务的供需风险评估结果产生一定程度的不确定性影响。此外,在案例分析中没有考虑生态系统服务间的权衡协同关系。因此,以后的研究工作应聚焦在以下几个方面:①在生态系统服务供给与需求制图中综合考虑生态系统服务流动特性和尺度效应,并在案例分析中纳入多种生态系统服务类型间的权衡与协同关系指标,对生态系统服务的供需风险进行判断。②通过分析生态系统服务供需变化的主要影响因素,探索生态系统服务供需风险格局演变的驱动机制。③综合集成多种自然和人文驱动情景,对未来生态系统服务供需风险趋势进行预测模拟,进而探讨环境变化与管理决策对生态系统服务供需风险的影响。④在生态系统服务供需风险分析的基础上,探索区域生态系统服务供需风险的应对与适应策略。

4 结论

本文通过系统梳理基于生态系统服务供给与需求的风险评估研究,提出了区域尺度的生态系统服务供需风险评估框架。依据此框架,以陕西省产水服务为例,进行了案例分析。结果显示:

(1)在产水服务供需时空格局方面,2000—2010年陕西省产水服务供给与需求总量均有所增加。产水服务供给能力总体呈现从南到北降低的趋势,陕南地区是主要的产水服务供给区。产水服务需求量较大的地区主要分布在关中地区和汉中盆地。

(2)在产水服务供需匹配方面,2010年陕西省产水服务供给不能满足需求的区域相对于2000年减少3.93%,产水服务供给与需求的空间匹配状况整体有所改善。其中,产水服务供给不足的区域主要分布在关中地区和榆林市,但是供需匹配状况有所好转;而延安市、安康市和商洛市的供需匹配状况有所恶化。

(3)在产水服务供需风险方面,2000—2010年陕西省产水服务供需高风险区域占全省的13.37%,主要分布在关中地区和榆林市;低风险区域占全省的86.63%,主要分布在陕南地区以及延安市和宝鸡市。与2000—2005年相比,2005—2010年陕西省产水服务供需风险水平明显降低,高风险等级的区域面积占全省的比重减少1.63%。

参考文献(References):

- [1] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington, DC: Island Press, 1997.
- [2] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.

- [3] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being; Synthesis*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [4] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17-29.
- [5] 张立伟, 傅伯杰. 生态系统服务制图研究进展. *生态学报*, 2014, 34(2): 316-325.
- [6] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 441-446.
- [7] Li J, Zhou Z X. Natural and human impacts on ecosystem services in Guanzhong - Tianshui economic region of China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(7): 6803-6815.
- [8] D'Odorico P, Davis K F, Rosa L, Carr J A, Chiarelli D, Dell'Angelo J, Gephart J, MacDonald G K, Seekell D A, Suweis S, Rulli M C. The global food-energy-water nexus. *Reviews of Geophysics*, 2018, 56(3): 456-531.
- [9] Sahle M, Saito O, fürst C, Yeshitela K. Quantifying and mapping of water-related ecosystem services for enhancing the security of the food-water-energy nexus in tropical data-sparse catchment. *Science of the Total Environment*, 2019, 646: 573-586.
- [10] Maron M, Mitchell M G E, Runtting R K, Rhodes J R, Mace G M, Keith D A, Watson J E M. Towards a threat assessment framework for ecosystem services. *Trends in Ecology & Evolution*, 2017, 32(4): 240-248.
- [11] Mace G M, Hails R S, Cryle P, Harlow J, Clarke S J. REVIEW: towards a risk register for natural capital. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 52(3): 641-653.
- [12] 曹祺文, 张曦文, 马洪坤, 吴健生. 景观生态风险研究进展及基于生态系统服务的评价框架: ESRISK. *地理学报*, 2018, 73(5): 843-855.
- [13] Munns W R Jr, Poulsen V, Gala W R, Marshall S J, Rea A W, Sorensen M T, von Stackelberg K. Ecosystem services in risk assessment and management. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2017, 13(1): 62-73.
- [14] von Stackelberg K E. Decision analytic strategies for integrating ecosystem services and risk assessment. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2013, 9(2): 260-268.
- [15] Faber J H, van Wensem J. Elaborations on the use of the ecosystem services concept for application in ecological risk assessment for soils. *Science of the Total Environment*, 2012, 415: 3-8.
- [16] Faber J H, Marshall S, van den Brink P J, Maltby L. Priorities and opportunities in the application of the ecosystem services concept in risk assessment for chemicals in the environment. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 1067-1077.
- [17] Deacon S, Norman S, Nicolette J, Reub G, Greene G, Osborn R, Andrews P. Integrating ecosystem services into risk management decisions: case study with Spanish citrus and the insecticide chlorpyrifos. *Science of the Total Environment*, 2015, 505: 732-739.
- [18] Blennow K, Persson J, Wallin A, Vareman N, Persson E. Understanding risk in forest ecosystem services: implications for effective risk management, communication and planning. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2014, 87(2): 219-228.
- [19] Kang P, Chen W P, Hou Y, Li Y Z. Linking ecosystem services and ecosystem health to ecological risk assessment: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 1442-1454.
- [20] Forbes V E, Calow P. Use of the ecosystem services concept in ecological risk assessment of chemicals. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2013, 9(2): 269-275.
- [21] Xu X B, Yang G S, Tan Y, Zhuang Q L, Li H P, Wan R R, Su W Z, Zhang J. Ecological risk assessment of ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China from 1985 to 2020. *Science of the Total Environment*, 2016, 554-555: 7-16.
- [22] Abson D J, Termansen M. Valuing ecosystem services in terms of ecological risks and returns. *Conservation Biology*, 2011, 25(2): 250-258.
- [23] Pártl A, Vačkář D, Loučková B, Lorencová E K. A spatial analysis of integrated risk: vulnerability of ecosystem services provisioning to different hazards in the Czech Republic. *Natural Hazards*, 2017, 89(3): 1185-1204.
- [24] Dong T, Xu W H, Zheng H, Xiao Y, Kong L Q, Ouyang Z Y. A framework for regional ecological risk warning based on ecosystem service approach: a case study in Ganzi, China. *Sustainability*, 2018, 10(8): 2699.
- [25] Chen J Y, Jiang B, Bai Y, Xu X B, Alatalo J M. Quantifying ecosystem services supply and demand shortfalls and mismatches for management optimisation. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 1426-1439.
- [26] Li D L, Wu S Y, Liu L B, Liang Z, Li S C. Evaluating regional water security through a freshwater ecosystem service flow model: a case study in Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Ecological Indicators*, 2017, 81: 159-170.
- [27] 赵文武, 刘月, 冯强, 王亚萍, 杨思琪. 人地系统耦合框架下的生态系统服务. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 139-151.
- [28] 白杨, 王敏, 李晖, 黄沈发, Alatalo J M. 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.
- [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, 470-471: 567-577.
- [30] Baró F, Haase D, Gómez-Baggethun E, Frantzeskaki N. Mismatches between ecosystem services supply and demand in urban areas: a quantitative assessment in five European cities. *Ecological Indicators*, 2015, 55: 146-158.
- [31] Li Y J, Zhang L W, Qiu J X, Yan J P, Wan L W, Wang P T, Hu N K, Cheng W, Fu B J. Spatially explicit quantification of the interactions

- among ecosystem services. *Landscape Ecology*, 2017, 32(6): 1181-1199.
- [32] 李双成, 张才玉, 刘金龙, 朱文博, 马程, 王珏. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题. *地理研究*, 2013, 32(8): 1379-1390.
- [33] 王鹏涛, 张立伟, 李英杰, 焦磊, 王浩, 延军平, 吕一河, 傅伯杰. 汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征. *地理学报*, 2017, 72(11): 2064-2078.
- [34] 屈小娥. 陕西省水资源承载力综合评价研究. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(2): 91-97.
- [35] 陈爱侠. 陕西省水资源利用效率及其影响因素分析. *西北林学院学报*, 2007, 22(1): 178-182.
- [36] 任怡, 王义民, 畅建霞, 黄强. 陕西省水资源供求指数和综合干旱指数及其时空分布. *自然资源学报*, 2017, 32(1): 137-151.
- [37] Zhang L W, Fu B J, Lü Y H, Zeng Y. Balancing multiple ecosystem services in conservation priority setting. *Landscape Ecology*, 2015, 30(3): 535-546.
- [38] 王壮壮, 张立伟, 李旭谱, 王鹏涛, 李英杰, 吕一河, 延军平. 流域生态系统服务热点与冷点时空格局特征. *生态学报*, 2019, 39(3): 823-834.
- [39] Hamon W R. Computation of direct runoff amounts from storm rainfall. *International Association of Hydrological Sciences Publication*, 1963: 52-62.
- [40] 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.
- [41] Lu N, Sun G, Feng X M, Fu B J. Water yield responses to climate change and variability across the North-South Transect of Eastern China (NSTEC). *Journal of Hydrology*, 2013, 481: 96-105.
- [42] 陕西省水利厅. 2000—2010 年陕西省水资源公报. (2010-04-17) [2019-06-28]. <http://slt.shaanxi.gov.cn/xmwr-zxfw-dfkj-1-list-175>.
- [43] 徐新良. 中国人口空间分布公里网格数据集(2000, 2005, 2010). 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统. [2019-06-28]. <http://www.resdc.cn>, DOI:10.12078/2017121101.
- [44] 徐新良. 中国 GDP 空间分布公里网格数据集(2000, 2005, 2010). 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统. [2019-06-28]. <http://www.resdc.cn>, DOI:10.12078/2017121102.
- [45] 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.
- [46] 张永永, 黄文政, 黄强, 刘招, 张洪波, 吴成国. 陕西省南水北调工程受水区水资源供水情势综合评价. *资源科学*, 2010, 32(8): 1499-1504.