石羊河流域水服务供需状况及驱动因素

黄治化，赵 军，肖涵余，郭文博，杨志辉，刘家良
（西北师范大学地理与环境科学学院，兰州 730070）

摘要：以 2010—2018 年为时间序列，基于 InVEST 模型和水足迹理论，对石羊河流域水服务供需特征及其匹配状况进行分析，最后采用地理探测器对水服务供需状况空间异质性及其主要驱动力因子进行了探究。结果表明：(1)2010—2018 年石羊河流域水服务供给能力有所提高，空间上呈现出南高北低的态势；水服务需求总量呈显著的上升趋势，流域中部灌溉农业区和工业地带的水服务需求较大；(2)研究时段内石羊河流域水服务供需匹配状况有明显的改善，2018 年能完全满足水服务供给需求的区域较 2010 年增长了 24.9%；(3)石羊河流域土地利用类型和其他影响因子的交互作用最为明显，在不同的分区中，各因子的解释能力存在着显著的差异。在地形平坦的中下游干旱区，土地利用类型对 ESDR 空间分异的解释力最强；而在地表起伏度较大的上游高寒半干旱半湿润地区，年降水和潜在蒸散发的解释能力不断增强，成为主导驱动力因子。研究成果为石羊河流域水资源研究和利用规划提供了参考。

关键词：水服务；供需；地理探测器；石羊河流域
中图分类号：X171.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2021)03-0228-08
DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.03.032

Water Service Supply and Demand Situation and Driving Factors in Shiyang River Basin

HUANG Zhihua, ZHAO Jun, XIAO Hanyu, GUO Wenbo, YANG Zhihui, LIU Jialiang
(*College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou* 730070)

Abstract: Based on the InVEST model and water footprint theory, the characteristics and matching status of water service supply and demand in Shiyang River Basin were analyzed, and the spatial heterogeneity of water service supply and demand status and its main driving factors were explored by using geographical detector. The results showed that: (1) From 2010 to 2018, the water service supply capacity was improved, showing a spatial trend of high in the south and low in the north. The total demand for water service showed a significant rising trend, and the demand for water service in irrigated agricultural areas and industrial areas in the middle of the basin was large. (2) The water service supply and demand matching situation was significantly improved during the study period. In 2018, the area that could fully meet the water service supply and demand was increased by 24.9% compared with that in 2010. (3) The interaction between land use types and other influencing factors was the most obvious. In different regions, the explanatory ability of each factor was significantly different. Land use types had the strongest explanatory power for ESDR spatial differentiation in the middle and lower reaches of arid regions with flat topography. However, in the upper reaches of the high and cold semi-arid and semi-humid regions with large surface fluctuations, the explanatory ability of annual precipitation and potential evapotranspiration was constantly enhanced, which became the key driving factor.

Keywords: water services; supply and demand; geographic detector; Shiyang River basin

生态系统服务指生态系统所形成和维持的人类赖以生存和发展的环境条件与效用[1]，为人类直接或间接从生态系统得到的所有收益[2]。从生产与使用的角度来看，生态系统服务可以分为生态系统服务供给与生态系统服务需求[3]，分别指某区域在特定时间内为人类提供或消费的生态系统产品和服务。随着

收稿日期：2020-12-14
资助项目：国家自然科学基金项目(41661084)
第一作者：黄治化(1997—)，男，在读硕士研究生，主要从事环境遥感与 GIS 应用研究。E-mail：scrhzh@163.com
通信作者：赵军(1963—)，男，教授，主要从事环境遥感与 GIS 应用研究。E-mail：zhaojun@nwnu.edu.cn

人类社会和经济的不断进步,生态系统提供服务的能力正在下降,而对这些服务的需求正在迅速增加[4]。因此,对区域生态系统服务的供需状况进行可视化、定量的评价与制图逐渐成为当前生态系统服务研究的一大热点[5-7]。

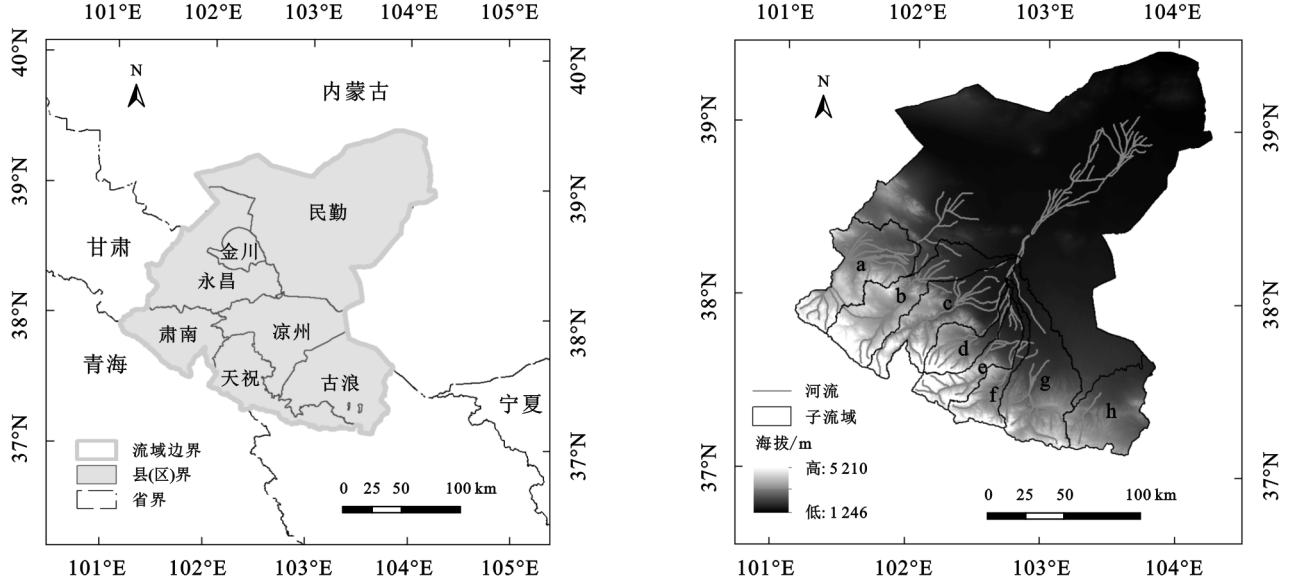
产水服务作为一种重要的生态系统服务,尤其在干旱半干旱地区对区域生态系统稳定和可持续发展具有至关重要的作用。近年来,对产水服务的评估以 InVEST (integrated valuation of environmental services and tradeoffs)模型应用最为广泛,该模型由美国斯坦福大学、明尼苏达大学、大自然保护协会和世界自然基金会共同开发,能够对区域产水服务进行不同尺度的综合、动态、可视化的评估,从而为相关决策提供科学有效的支持,但该模型需要进行有针对性的改进和完善才能适用于特定研究区域[8-9]。国内学者[10]利用 InVEST 模型对不同区域的生态系统服务进行了定量评估研究。对于水服务需求,往往都直接采用水资源公报中的用水数据[11],这与区域实际用水量存在一定的误差。水足迹指任何已知人口(国家、地区或个人)在某一段时间内消费的所有产品和服务所需要的水资源总量[12]。水足迹概念的提出为定量核算产品或服务的潜在水资源占用状况提供了科学的理论依据[13]。因此利用水足迹理论对区域水服务需求进行评估,有利于更加全面合理地对区域用水状况进行定量评估。

当前对区域生态系统服务供需状况的研究多集中于某一类生态系统服务供给、需求以及二者匹配程度的定量化评估与可视化制图[14]。石羊河流域处于河西走廊东部,具有悠久的农业灌溉历史,是人口最多的内陆河流域,也是开发较早、生态环境恶化最严重的地区之一,多年的开发利用使得石羊河流域水资源利用率已超过 150%[15]。流域水资源供需矛盾极为突出,水资源成为制约其社会经济发展的最重要因子,对石羊河流域水服务供需匹配程度及其影响因子进行定量评估具有重要意义。故本文以石羊河流域为研究区域,通过对 InVEST 模型的相关参数进行修正来增强该模型的区域适用性,同时引入水足迹相关理论和方法,对区域水服务供需状况进行评估,利用地理探测器方法分析水服务供需状况空间分异的主要驱动力因子,为石羊河流域水资源研究和利用规划提供参考。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

石羊河流域位于河西走廊东部,乌鞘岭以西,祁连山北麓(100°57′—104°12′E,37°02′—39°17′N),流域面积 4.16 万 km^2,地势南高北低,自西南向东北倾斜[16]。行政区包括凉州区、古浪县、民勤县、永昌县、金川区全部及天祝县、肃南裕固族自治县部分(图 1)。石羊河流域属于典型的温带大陆性气候,上、中、下游气候特征具有明显分异,上游为高寒半干旱半湿润区,年降水量 300～600 mm,年均蒸发量为 700～1 200 mm,为流域主要水源供给地;中游为平原温凉干旱区,年降水量 150～300 mm,年蒸发量 1 300～2 000 mm,为流域主要的农业灌溉区;下游为温暖干旱区,年降水量不足 150 mm,年蒸发量 2 000～2 600 mm,属于重度缺水区[17]。石羊河流域是我国人口比较密集的地区之一,生态用水的短缺导致了流域内生态环境的恶化,严重威胁着流域的可持续发展[18]。



注:a～h 分别为西大河、东大河、西营河、金塔河、杂木河、黄羊河、古浪河和大靖河流域。

图 1　石羊河流域概况

1.2 数据来源

本文的主要数据来源见表 1。

1.3 研究方法

1.3.1 水服务需求 水足迹可定量评估水资源利用状况,计算公式为:

$$WFP=IWFP+EWFP$$

式中:WFP 为某个区域的总水足迹;IWFP 为区域内部水足迹,即区域内供给本地人口所消费的全部产品与服务的水资源总量;EWFP 为外部水足迹,即从外部区域进口的虚拟水总量。其中:

$$IWFP=AWU+IWW+DWW+EWW-VWE_{dom}$$

$$EWFP=VWI-VWE_{re-export}$$

式中:AWU 为该地区的农业生产需水量,包括农作物产品和动物产品生产用水量;IWW 为该区域的工业生产需水量;DWW 为本地居民生活用水量;EWW 为本地生态环境用水量;VWE_{dom} 为本地出口虚拟水量。VWI 为从区域外进口的虚拟水总量;$VWE_{re-export}$ 为向其他国家或地区输出的进口产品再出口的虚拟水总量。水足迹的空间化参考相关研究[7],先根据水足迹类型将对应的土地利用重新划分为农业用地、绿地、水域、居民用地、工业用地和未利用地,然后再把用水量分配到各个像元。

表 1 主要数据类型及来源

数据	来源
土地利用	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)
土层深度及有效含水量	国家冰川冻土沙漠科学数据中心 1∶100 万土壤数据库(http://www.ncdc.ac.cn/portal/),土壤有效含水量为田间持水量和永久萎蔫系数两者之差,由经验公式 Gupta 等[19]计算
年降水量	中国气象科学数据共享服务网(http://data.cma.cn/)
太阳大气顶层辐射数据	太阳大气顶层辐射数据来源于全球潜在蒸散和全球干旱指数数据集(https://cgiarcsi.community/data/global-aridity-and-pet-database/)
Z	将各子流域的产水模拟量与 Z 值之间建立相关关系,与相应子流域的水资源量进行对比,最终确定 Z 值为 2.1[9]
数字高程模型	国家青藏高原科学数据中心《石羊河流域基础数据集》(http://westdc.westgis.ac.cn/zh-hans/)
农畜产品单位虚拟水含量	参考 Hoekstra 等[20]
农畜产品产量、工业、居民生活、生态用水量	《甘肃发展年鉴 2011—2019》[21]《甘肃省水资源公报 2010—2018》[22]

1.3.2 水服务供给 本文利用 InVEST 模型的产水模块评估石羊河流域的水供给服务的水平。InVEST 产水量评估模块是基于 Budyko 水热耦合平衡假设(1974 年)和年平均降水量数据,用各栅格降水量减去实际蒸散发后进而得到该栅格产水量。计算公式为:

$$Y_{x,j}=(1-\frac{AET_{x,j}}{P_x})\cdot P_x$$

式中:$Y_{x,j}$ 为 j 类土地利用类型上栅格单元 x 的产水量;$AET_{x,j}$ 为 j 类土地利用类型上栅格单元 x 的年实际蒸散量;P_x 为栅格 x 的年降水量。计算公式为:

$$\frac{AET_{x,j}}{P_x}=\frac{1+\omega_x R_{x,j}}{1+\omega_x R_{x,j}+\frac{1}{R_{x,j}}}$$

$$\omega_x=Z\frac{AWC_x}{P_x},R_{x,j}=\frac{k_{x,j}\cdot ETo_x}{P_x}$$

式中:$R_{x,j}$ 为土地利用类型 j 上栅格 x 处的布德科干燥指数;ω_x 为植被可利用含水量与年预期降水量的比值;AWC_x 为植物可利用含水量;Z 为 Zhang 系数;ETo_x 为栅格 x 内的潜在蒸散量;$k_{x,j}$ 为植被的蒸散系数。

1.3.3 生态供需比率 生态供需比率 ESDR(ecological supply-demand ratio)将生态系统服务供给与人类需求相联系,以反映生态系统服务的赤字或盈余状态。公式为:

$$ESDR=\frac{S-D}{(S_{max}+D_{max})/2}$$

式中:S 和 D 分别为各栅格单元水服务的实际供给和需求;S_{max} 和 D_{max} 为水服务供给和需求的最大值。参考前人[5]研究并结合研究区实际状况,本文将水服务生态供需比率划分为 5 个等级,采用罗马数字Ⅰ到Ⅴ表示(表 2)。

表 2 水服务生态供需比率等级划分

项目	参数				
供需比率	<−0.5	−0.5~0	0~0.5	0.5~1	>1
供需比率等级	严重不足	供给不足	脆弱	平衡	安全
等级代码	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ

1.3.4 地理探测器 地理探测器是探测空间分异性,以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法。其核心思想是如果某个自变量对某个因变量有重要影响,那么自变量和因变量的空间分布应该具有相似性[23]。本文以石羊河流域 ESDR 指数为因变量(Y),分别在不同的分区中采用地理探测器来揭示影响其

空间分异的主要因子。综合考虑流域实际状况,最终选取了 7 个因子为自变量(X),包括年降水量、年均温、高程、坡度、土地利用类型、土壤类型、潜在蒸散发。地理探测器中自变量必须为类型量,故需对其进行分类,分类效果可通过地理探测器的 q 统计量来评价,基于"q 值越大分区效果越好"的思想,自变量除土地利用外均采用自然断点法划分为 13 级分类效果最为明显。按照 2.5 km 间距共生成 6 399 个点,用于将 Y 和 X 匹配起来。

地理探测器包括因子探测器、生态探测器、风险探测器和交互作用探测器 4 个模块,分别从不同方面探测研究要素的空间分异性。

因子探测器探测 Y 的空间分异性以及自变量 X 对因变量 Y 的解释程度,用 q 值表示:

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2}=1-\frac{\mathrm{SSW}}{\mathrm{SST}}$$

$$\mathrm{SSW}=\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2,\ \mathrm{SST}=N\sigma^2$$

式中:$h=1,2,\cdots,h$;L 为变量 Y 或因子 X 的分层(strata),即分类或分区;N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数;σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差。SSW 和 SST 分别为层内方差之和以及全区总方差。q 的值域为[0,1],表示自变量 X 对因变量 Y 空间异质性的解释程度,其值越大解释能力越强,其显著性可以使用地理探测器软件来进行检验。

生态探测器比较两因子 $X1$ 和 $X2$ 对因变量 Y 的空间分布的影响是否有显著的差异,用统计量 F 来衡量:

$$F=\frac{N_{X1}(N_{X2}-1)\mathrm{SSW}_{X1}}{N_{X2}(N_{X1}-1)\mathrm{SSW}_{X2}}$$

$$\mathrm{SSW}_{X1}=\sum_{h=1}^{L1}N_h\sigma_h^2,\ \mathrm{SSW}_{X2}=\sum_{h=1}^{L2}N_h\sigma_h^2$$

风险探测器通过 t 统计量检验判断 2 个子区域间的属性均值是否有显著的差异。

$$t_{\bar{y}h=1-\bar{y}h=2}=\frac{\overline{Y}_{h=1}-\overline{Y}_{h=2}}{\left(\frac{\mathrm{Var}(\overline{Y}_{h=1})}{n_{h=1}}+\frac{\mathrm{Var}(\overline{Y}_{h=2})}{n_{h=2}}\right)^{1/2}}$$

式中:$\overline{Y}_h$ 为子区域 h 内的属性均值;Var 为方差。

交互作用探测器识别不同风险因子 Xs 之间的交互作用。交互作用类型为:若 $q(X1\cap X2)<\min(q(X1),q(X2))$,表现为非线性减弱;$\min(q(X1),q(X2))<q(X1\cap X2)<\max(q(X1),q(X2))$,表现为单因子非线性减弱;$q(X1\cap X2)>\max(q(X1),q(X2))$,表现为双因子增强;若 $q(X1\cap X2)=q(X1)+q(X2)$,2 个自变量则为独立关系;若 $q(X1\cap X2)>q(X1)+q(X2)$,则表现为非线性增强。

2　结果与分析

2.1　水服务供给与需求演变特征

2.1.1　水服务供给时空演变特征　由图 2 可知,2010—2018 年石羊河流域水服务供给在空间上呈现南高北低的变化趋势,总体来看,水服务供给能力有所提高。就时间而言,2010 年、2015 年、2018 年水服务供给总量分别为 40.49 亿,30.88 亿,49.12 亿 m^3;研究区单元平均水服务供给量分别为 99.79,76.09,121.06 m^3/km^2。分区域来看,研究时段内水服务供给的空间变化较为明显,上游水服务供给区域差异有所减小。在各子流域中,2010 年水服务供给总量由大到小排序依次为:东大河流域、西营河流域、西大河流域、古浪河流域、杂木河流域、金塔河流域、大靖河流域和黄羊河流域;2018 年,古浪河流域成为产水最大的子流域,在水服务供给总量中的占比从 2010 年的 12.6%上升至 2018 年的 16.35%,大靖河流域从 7.51%上升至 10.99%,表明各子流域水服务供给差异在研究时段内缩小明显。

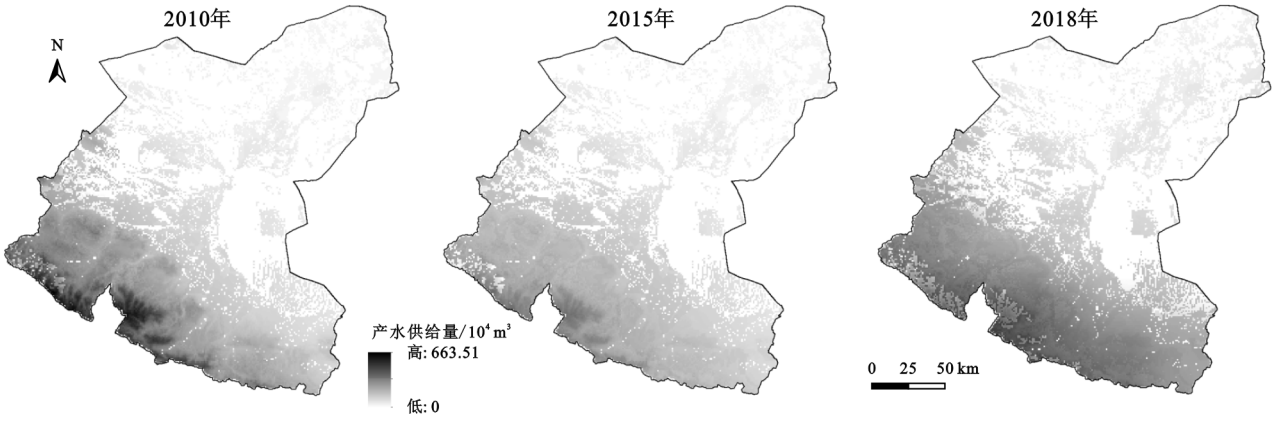


图 2　石羊河流域水服务供给空间分布

2.1.2　水服务需求时空演变特征　由表 3 可知,2010—2018 年石羊河流域水足迹总量和人均水足迹呈明显的上升趋势,表明石羊河流域水服务需求总量亦呈上升趋势。水足迹由 2010 年的 31.81 亿 m^3 增

加至 2018 年的 38.76 亿 m^3，人均水足迹由 2010 年的 1 449.88 m^3 增加到 2018 年的 1 763.91 m^3，但仍低于全国 2 340 m^3 的人均水足迹量[24]，表明石羊河流域水资源利用状况较为紧张。在各部门水足迹中，农业用水量在水足迹账户中所占比例最高，研究时段内均高于 84%，远超全国平均水平(70%)，表明流域用水结构不太合理。

在空间分布上，石羊河流域水服务需求的空间格局比较稳定，单位面积水服务需求量最高的是工业用地，其次为居民用地和农业用地，但各土地利用类型的单位面积水服务需求量均有明显减少，表明流域内的水资源利用率有所优化。水服务需求较大的地区集中在中游走廊灌溉农业区以及金川区和凉州区的工业地带。

表 3 石羊河流域各部门水足迹及人均水足迹

年份	农业水足迹/10^8 m^3	工业水足迹/10^8 m^3	生活水足迹/10^8 m^3	生态水足迹/10^8 m^3	产品虚拟水出口/10^8 m^3	产品虚拟水进口/10^8 m^3	水足迹总量/10^8 m^3	人均水足迹/m^3
2010	26.798	1.471	0.688	0.620	0.127	2.359	31.809	1449.880
2015	31.753	2.136	0.477	0.416	0.359	2.330	36.753	1661.729
2018	32.922	1.296	0.510	0.644	0.367	3.754	38.758	1763.910

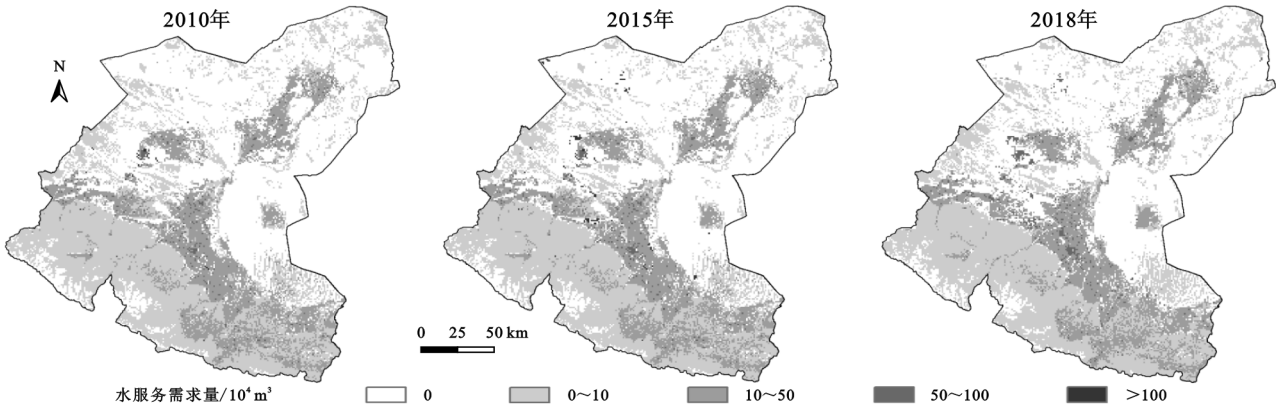


图 3 石羊河流域水服务需求空间分布

2.2 水服务供需比率时空演变特征

由 ESDR 公式计算出石羊河流域水服务供需比率空间分布(图 4)，据此统计出各 ESDR 等级所占比重(表 4)。

2010—2018 年石羊河流域水服务供给与需求的空间匹配有较大改善。分区来看，ESDR 供给不足和严重不足的区域主要位于石羊河流域中下游的民勤县以及金川区和凉州区部分区域，研究时段内以上区域供需状况都比较恶劣，且未得到有效改善；位于上游的肃南县和天祝县水服务供需状况表现良好；中游农业灌溉区 2010 年 ESDR 等级基本都表现为脆弱，至 2018 年 ESDR 逐渐好转为平衡和安全。从时间变化看，2010—2018 年石羊河流域 ESDR 等级为脆弱的区域明显减少，从 43.63%减少到 21.12%，8 年间共减少了 22.51%；ESDR 为第Ⅰ，Ⅱ级的区域也有一定减少，Ⅳ，Ⅴ级的区域不断增加，增减部分集中分布在中上游耕地，表明这些地区农业用水和水服务供需状况均有所优化。

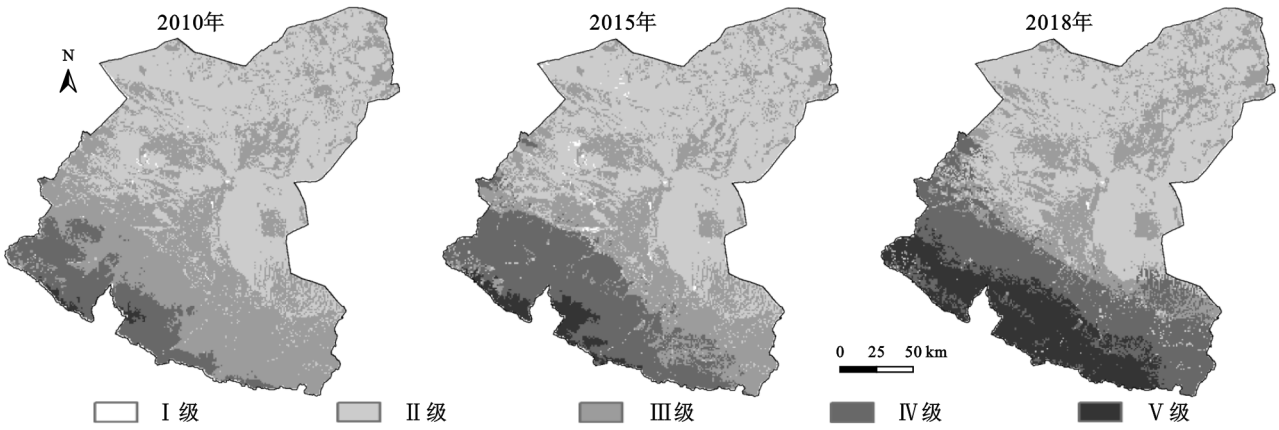


图 4 石羊河流域水服务供需比率 ESDR 空间分布

总体来看,2010—2018 年石羊河流域水服务供需状况有所改善,水服务供给能完全满足需求的区域面积占比从 2010 年的 10.85%增加到 2018 年的 35.75%,尤其是中上游地区水服务供需状况为脆弱的区域面积大幅减少,供需状况好转。而中下游区域,如民勤和金川等地,水服务供给无法满足需求的区域并未得到有效改善,供需状况仍然比较恶劣。

表 4　石羊河流域水服务供需状况等级占比

单位:%

年份	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
2010	0.07	45.44	43.63	10.37	0.48
2015	0.01	46.89	30.65	19.92	2.54
2018	0.00	43.13	21.12	21.70	14.05

2.3　水服务供需比率空间分异驱动因子分析

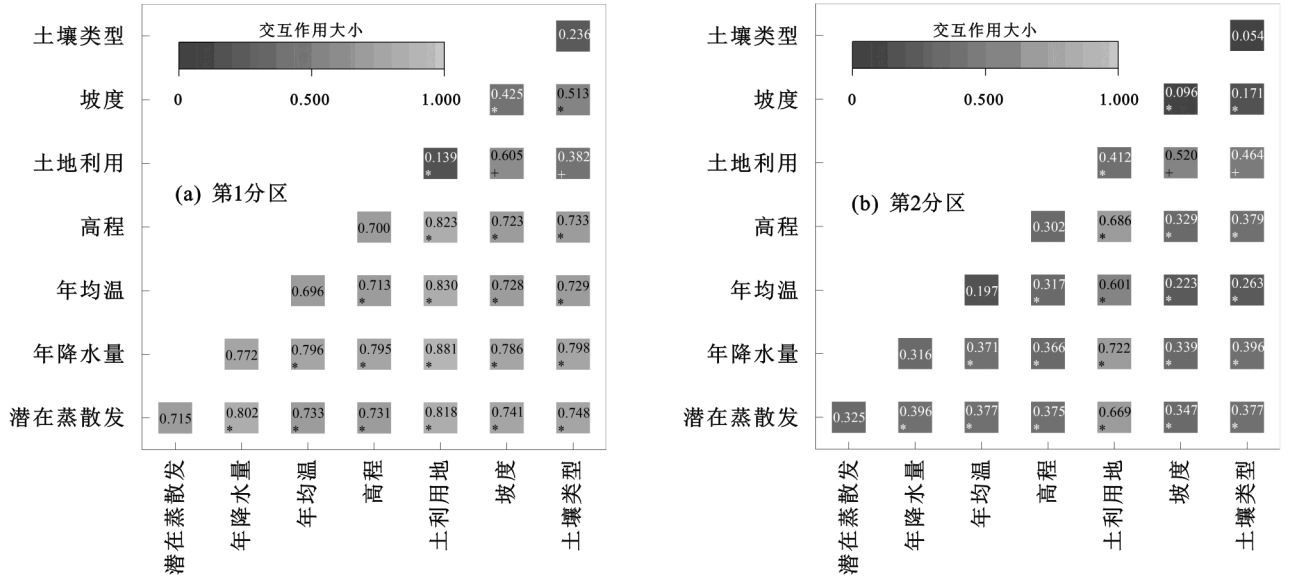
由于石羊河流域中下游地理特征具有典型的空间分异,因此本文利用 SWAT 模型进行流域划分,并将上游 8 个子流域和流域其余部分各作为 1 个子分区,记为第 1 分区和第 2 分区。由表 5 可知,从全流域来看,年降水和潜在蒸散发对 ESDR 空间分异的解释力最高,且两者对 ESDR 空间分异的影响具有明显差异。

在不同的分区中,各因子的解释力产生了显著的差异。第 1 分区主要为中上游高寒半干旱半湿润地区,因子解释力(q 值)从大到小依次为年降水>潜在蒸散发>高程>年均温>坡度>土壤类型>土地利用类型,其中年降水量解释能力最高,q 值达 0.772。该区背靠祁连山脉,海拔从 5 210 m 下降到 1 430 m,地势起伏极大,年降水量越过祁连山脉后迅速减少,潜在蒸散发和年均温等受高程变化影响又有所增加,故年降水量、潜在蒸散发、高程和年均温成为中上游地区 ESDR 变化的主要驱动力因子,而该区土地利用面积的变化相对稳定,解释力相对较低。在以干旱区为主的第 2 分区中,对 ESDR 空间分布的影响因子和解释力与第 1 分区相比存在着显著差异,因子解释力(q 值)从大到小依次为土地利用类型>潜在蒸散发>年降水>高程>坡度>土壤类型。土地利用类型 q 值超过年降水、潜在蒸散发、年均温和高程,成为解释能力最强的因子。该区地形比较平坦,蒸发量远大于降水量,年降水、潜在蒸散发、年均温和高程等因子空间变化较小,土地利用类型成为引起 ESDR 空间变化的主导驱动力。

由图 5 可知,两两因子交互作用均高于单因子对 ESDR 空间分异的影响程度,在 2 个子分区中,年降水量与土地利用类型因子之间的交互作用解释力均为最强,分别达 0.881,0.722,说明无论属于哪一种分区,只要降水量或土地利用类型具有明显的空间分异也会显著增强 ESDR 的空间异质性。从因子交互作用结果来看,土地利用类型和其他影响因子的交互作用最为明显,解释力在 0.601～0.881,表明土地利用类型结构的变化对水服务供需比率具有极为重要的影响,随着流域内人口的增长,建设用地和耕地不断扩张,导致用水需求不断上升,加重了流域内的生态压力。

表 5　子分区各因子解释力(q)程度

分区	潜在蒸散发	年降水量	年均温	高程	土地利用	坡度	土壤类型
第 1 分区	0.715	0.772	0.696	0.700	0.139	0.425	0.236
第 2 分区	0.325	0.316	0.197	0.302	0.412	0.096	0.054



注:+表示非线性增强;* 表示双因子增强。

图 5　子分区 ESDR 交互作用探测结果

3 讨 论

石羊河流域是西北地区水资源供需矛盾最为突出的干旱区内陆河流域之一,明确其水服务供需匹配程度处于何种状态,哪些因子对区域水服务供需状况产生了多大的影响,对该区域水资源可持续利用具有重要意义。

本文通过引入水足迹概念作为区域水服务需求,与传统的使用居民生活用水、工业用水和农业用水等实体水相比,水足迹把各种"颜色"(蓝水、绿水、灰水)的水整合在一起,弥补了传统水资源核算中只重视蓝水的缺点[25]。在水足迹核算中,采用自上而下与自下而上相结合的计算方法,与单一计算方法相比,水足迹计算数值的精度有所提高。另外,本文进出口贸易产品的虚拟水采用间接的方法获取,自上而下的计算方法虽然可能导致水足迹结果出现一定偏差,但石羊河流域产品进出口贸易数量极低,故这一误差可以忽略不计。水足迹为人类对水资源占用情况提供了明确的时空信息,利用这一概念有利于更加全面地对区域水服务供需状况进行评估,尤其是在水资源相对匮乏的西北干旱半干旱地区。尽管当前已有许多对区域水资源的研究,但大多都停留在空间定量化评估,而针对其供需匹配状况影响因素的研究较少。本文在对水足迹核算完成后,根据水足迹类型进行了相应的空间化,并与产水量空间分辨率一致,以便进行合理的匹配,从而为石羊河流域水服务供需状况研究提供了科学合理的保障。由于水资源统计数据的局限性,本文仅选取了气温、降水等相对平稳的 2010 年、2015 年、2018 年为研究时段,这可能会增加研究结果的不确定性。地理探测器作为驱动力和因子分析的有力工具,通过空间异质性来探测因变量与自变量的空间分布格局的一致性,据此可以度量自变量对因变量的解释度以及变量间的相互关系[26]。石羊河流域作为西北干旱区内陆河流域,地势南高北低,垂直地带性明显,上中下游具有典型的气候分异。对于不同的地貌、气候类型,其水服务供需特征的空间异质性更为显著,本文利用 SWAT 模型将石羊河流域划分为 8 个子流域和流域其他部分,在此基础上分为 2 个子分区,使其空间分异更为明显。地理探测器的结果表明,水服务供需比率主要控制因子在不同分区间产生了显著的差异。在上游地势起伏较大的高寒半湿润半干旱区,降水量和蒸散发为主要驱动力因子,而在地形起伏较小的中下游干旱区,土地利用类型成为主要影响因子。本文尝试结合水足迹概念和 InVEST 产水量模型对区域水服务供需特征进行研究,在此基础上对其空间分异的驱动因素进行了探讨,可为该区域水资源管理和规划以及相关学术研究提供一定参考。

4 结 论

(1)2010—2018 年石羊河流域水服务供给空间上呈现南高北低的状态,水服务供给能力有所提高,上游水服务供给的区域差异有所减小;水服务需求总量显著上升,各类土地利用单位面积水服务需求明显减少,流域中部的灌溉农业区和工业区水服务需求较大。

(2)石羊河流域水服务供需状况有明显的改善,研究时段内水服务供给能完全满足需求的区域增加了 24.9%,水服务供需状况比较脆弱的区域减少了 22.51%,但中下游供需状况仍比较恶劣。

(3)在不同的分区中,各驱动因子对空间分异的解释力存在着显著的差异。在地势起伏较大的上游高寒半干半湿地区,年降水和潜在蒸散发对 ESDR 空间分异的解释力最强;在中下游地区土地利用类型成为主要驱动力因子。从石羊河流域整体来看,年降水量与土地利用类型因子之间的交互作用解释能力最强,土地利用类型和其他影响因子的交互作用最为明显。

参考文献:

[1] Loomes R, O'Neill K. Nature's Services: Societal dependence on natural ecosystems [J]. Pacific Conservation Biology, 1997, 6(2): 220-221.

[2] Costanza R, Arge R, Groot R, et al. The value of the world' ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.

[3] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, et al. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets [J]. Ecological Indicators, 2012, 21: 17-29.

[4] Wei Y P, Wu S, Jiang C L, et al. Managing supply and demand of ecosystem services in dryland catchments [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2020, 48: 10-16.

[5] Chen J Y, Jiang B, Bai Y, et al. Quantifying ecosystem services supply and demand shortfalls and mismatches for management optimization [J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 1426-1439.

[6] Xu Q, Yang R, Zhuang D C, et al. Spatial gradient differences of ecosystem services supply and demand in the Pearl River Delta region [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 279: e123849.

[7] Li D L, Wu S Y, Liu L B, et al. Evaluating regional water security through a freshwater ecosystem service flow model: A case study in Beijing-Tianjian-Hebei region, China [J]. Ecological Indicators, 2017, 81: 159-170.

[8] 黄博强,黄金良,李迅,等.基于 GIS 和 InVEST 模型的海岸带生态系统服务价值时空动态变化分析:以龙海市为例[J].海洋环境科学,2015,34(6):916-924.

[9] 王玉纯,赵军,付杰文,等.石羊河流域水源涵养功能定量评估及空间差异[J].生态学报,2018,38(13):4637-4648.

[10] Wang Y C, Zhao J, Fu J W, et al. Effects of the Grain for Green Program on the water ecosystem services in an arid area of China-Using the Shiyang River Basin as an example [J]. Ecological Indicators, 2019, 104: 659-668.

[11] 刘立程,刘春芳,王川,等.黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究:以兰州市为例[J].地理学报,2019,74(9):1921-1937.

[12] Chapagain A K, Hoekstra A Y. Water footprints of nations[M]. Delft, Netherlands: Unesco-Ihe Institute for Water Education, 2004:80.

[13] 马晶,彭建.水足迹研究进展[J].生态学报,2013,33(18):5458-5466.

[14] 章维鑫,吴秀芹,于洋,等.2005—2015 年小江流域生态系统服务供需变化及对石漠化的响应[J].水土保持学报,2019,33(5):139-150.

[15] 贾焰,张军,张仁陟.2001—2011 年石羊河流域水资源生态足迹研究[J].草业学报,2016,25(2):10-17.

[16] 甘肃省水利厅石羊河流域水资源管理局.2017 年石羊河流域水资源公报[EB/OL]. [2020-10-19]. http://slt.gansu.gov.cn/syhglj/lygl/szygl/202004/t20200407_126322.html.

[17] 高超,赵军,李传华,等.石羊河流域草地覆盖与其生态服务功能变化[J].草业科学,2019,36(1):27-36.

[18] 徐晓宇,郭萍,张帆,等.政策驱动下石羊河流域生态效应变化分析[J].水土保持学报,2020,34(6):187-193.

[19] Gupta S C, Larson W E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density [J]. Water Resources Research, 1979, 15(6):1633-1635.

[20] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern [J]. Water Resources Management, 2007, 21(1):35-48.

[21] 甘肃省统计局.甘肃发展年鉴[M].北京:中国统计局出版社,2011—2019.

[22] 甘肃省水利厅.2010—2018 年甘肃省水资源公报[EB/OL]. [2019-11-11]. http://slt.gansu.gov.cn/xxgk/gkml/nbgb/szygb/.

[23] Wang J F, Hu Y. Environmental health risk detection with GeogDetector [J]. Environmental Modelling and Software, 2012, 33: 114-115.

[24] 孙才志,张灿灿.中国人均水足迹驱动效应分解与空间聚类分析[J].华北水利水电大学学报,2018,39(2):1-11.

[25] 周玲玲,王琳,王晋.水足迹理论研究综述[J].水资源与水工程学报,2013,24(5):106-111.

[26] 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.

(上接第 227 页)

[22] 高江波,周巧富,常青,等.基于 GIS 和土壤侵蚀方程的农业生态系统土壤保持价值评估:以京津冀地区为例[J].北京大学学报,2009,45(1):151-157.

[23] 林聪杰,乔光建.水土保持治理经济效益计算方法探讨[J].水科学与工程技术,2014(2):82-85.

[24] 李辉丹,叶长盛,华吉庆.南昌市土地利用变化对生态系统服务价值影响[J].水土保持研究,2020,27(3):277-285,293.

[25] 刘斌,何进荣,李远成,等.基于分布式神经网络的苹果价格预测方法[J].计算机应用,2020(2):369-374.

[26] 黄元仿,张世文,张立平,等.露天煤矿土地复垦生物多样性保护与恢复研究进展[J].农业机械学报,2015,46(8):72-82.

[27] 徐文秀,王海燕,鲍玉海,等.湖南省永顺县水土保持功能服务价值评价[J].水土保持研究,2019,26(5):243-248.

[28] Minor E S, Tessel S M, Engelhardt K A M. The role of landscape connectivity in assembling plant communities: A network analysis [J]. Ecology, 2009, 90(7):1802-1809.

[29] Lautenbach S, Volk M, Strauch M, et al. Optimization-based trade-off analysis of biodiesel crop production for managing an agricultural catchment [J]. Environmental Modelling and Software, 2013, 48(10):98-112.

[30] 何长高,董增川,陈卫宾,等.基于水资源合理配置的流域水土保持结构优化模型研究[J].岩土工程学报,2008,30(11):1738-1742.