

郑诚蔚,邓晓红,李宗省,等.甘肃省河西地区水源涵养功能与人类活动强度演变[J].中国沙漠,2024,44(1):189-200.

甘肃省河西地区水源涵养功能与 人类活动强度演变

郑诚蔚^{1,2}, 邓晓红³, 李宗省^{1,2}, 薛健^{2,4}, 马利邦¹, 何娟⁵,
卢书祥⁵, 邵建雄⁵, 蔡世玉⁵, 赵佩一⁵

(1.西北师范大学地理与环境科学学院,甘肃兰州730070; 2.中国科学院西北生态环境资源研究院高寒山区同位素生态水文与国家公园观测研究站/甘肃省祁连山生态环境研究中心/干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室,甘肃兰州730000; 3.兰州大学县域经济发展研究院/乡村振兴战略研究院,甘肃兰州730000; 4.中国科学院大学,北京100049; 5.甘肃盐池湾国家级自然保护区管护中心,甘肃酒泉736300)

摘要:深入分析干旱半干旱区域的水源涵养功能和人类活动的时空格局及相关关系,是科学实现区域生态修复和水资源管理的必要前提。采用人类足迹指数与InVEST模型,对河西地区人类活动强度与水源涵养功能进行了定量评估,采用双变量Moran's I 指数分析了河西地区人类活动与水源涵养的空间相关关系。结果表明:2010—2020年人类活动水平呈增长趋势,整体表现为东南高、西北低的分布特征。2010—2020年单位面积水源涵养量平均值为8.64 mm,在2010—2015年呈上升趋势,在2015—2020年有所下降,整体空间分布表现为南高北低。2010、2015、2020年双变量Moran's I 指数分别为0.292、0.277、0.348,人类活动与水源涵养服务功能呈现出较为显著的空间正相关性。

关键词:人类活动;水源涵养;InVEST模型;空间自相关;河西地区

文章编号:1000-694X(2024)01-189-12

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00081

中图分类号:X143

文献标志码:A

0 引言

生态系统为人类提供多种关键服务功能,如气候调节、水源涵养、洪水控制和土壤保持等。然而,由于经济和社会的快速发展,人类需求与生态系统服务供给之间的差距正在不断扩大^[1]。近50年来,全球60%以上的生态系统服务因人口和经济增长而退化^[2-3],人类活动已经极大地改变了地球生态系统^[4]。此刻,生态系统正遭受着巨大的人类压力,人类活动对生态系统服务的影响已经成为人与自然研究的重要议题。影响生态系统服务功能的重要驱动因素主要包含自然因素和人为因素两方面,前者不可控,而人类活动迫使生态系统服务通过人类和生态系统之间的相互关系做出反应,可以被评估

和控制。因此,通过鼓励有益于生态系统的人类活动,抵制有害于生态系统的人类活动,可实现人类社会的可持续发展。同时,为实现人与自然和谐发展,对人类活动与生态系统服务变化的认知以及客观精准的影响评估至关重要。

近年来,学者们采用多种方法和技术,从不同的尺度和视角探究人类活动与生态系统服务的关系。一方面,有学者在研究人类活动对生态安全的影响时发现,城镇扩张等人类活动对生态安全的影响较大,而水源涵养能力的增强和生境稀缺性降低是提高生态安全的有效措施^[5]。柳冬青等^[6]研究水源涵养时空分布时发现,人类活动驱动的土地利用/覆被格局空间差异是影响水源涵养时空变化的重

收稿日期:2013-06-14; 改回日期:2023-09-11

资助项目:国家自然科学基金区域发展联合基金重点项目(U22A20592);国家重点研发计划项目专题(2020YFA0607702);第二次青藏高原综合科学考察研究项目专题(2019QZKK0405);国家自然科学基金面上项目(42271288);甘肃省自然科学基金项目(21JR7RA505)

作者简介:郑诚蔚(1997—),男,青海西宁人,硕士研究生,主要从事资源环境相关研究。E-mail: ZhengCW9732@Gmail.com

通信作者:马利邦(E-mail: malb0613@nwnu.edu.cn)

要因素。研究方法方面,水源涵养能力的量化过程,1800年至今,经历了从萌芽期到模型综合评估等4个阶段,发展出了一系列水源涵养综合评估模型^[7],例如,InVEST模型^[8]、SWAT模型、元胞自动机模型等。其中以InVEST模型为代表的新兴生态系统服务评估模型具有可视化、动态性强的特点^[9]。同时,人类活动强度的定量评估也逐渐被重视,主要评价方法大致可分为两类^[10]。第一类基于压力视角出发,侧重对人类活动本身进行刻画,例如人类足迹、生态足迹等方法。第二类基于状态视角的量化评估方法,基于人类活动产生的生态效应从不同状态因子的变化,侧面表现人类活动强度,主要包括净初级生产力的人类占用、全球干扰指数等。然而,基于压力视角量化人类活动的研究中,往往重点关注人类活动强度自身的刻画,缺乏对人类活动与生态系统之间作用机制的研究。基于状态视角的评价方法可以较好地描述人类活动对生态系统影响,但难以具体地阐述哪些人类活动行为对生态系统存在较大的影响。

当前,在资源匮乏的干旱地区,水资源短缺问题和敏感的生态系统,已经严重阻碍了当地社会经济的发展。在此背景下,揭示干旱区水源涵养服务和人类活动强度之间的时空分布,探讨人类活动与水源涵养功能之间的相互关系,对保障干旱区域可持续发展、制定水资源管理政策、提高生态系统服

务质量具有重要意义。因此,本文以干旱半干旱地区河西地区为研究区,利用人类足迹指数和InVEST模型分别测算人类活动强度和水源涵养量,分析2010—2020年河西地区人类活动的时空分布,评估2010—2020年河西地区水源涵养服务能力,并通过双变量Moran's I 和Local Moran's I 指数厘清水源涵养和人类活动之间的空间相关性,旨在为区域生态修复规划和水资源管理提供科学依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

河西地区(图1)处于青藏高原生态屏障区、黄河重点生态区、北部防沙带三大重点生态功能区交会处,是北方防沙带建设区、黄河重要水源涵养区、生物多样性保护优先区,同时包含了祁连山国家公园、安西极旱荒漠自然保护区和敦煌阳关自然保护区等,在全国稳定发展大局和生态安全战略格局中具有重要的地位。河西地区位于中国西北部,主要涉及甘肃省酒泉市、张掖市、武威市、金昌市、嘉峪关等7个地级市,涉及30个县域。该地区又属干旱半干旱地区,受到大陆性气候的影响,年降水量较小,蒸发量较大,气候干燥。地势西高东低、南高北低,海拔807~5 696 m。整体看,河西地区生态禀赋较差,生态敏感性较高,但拥有山地、绿洲和荒漠复合

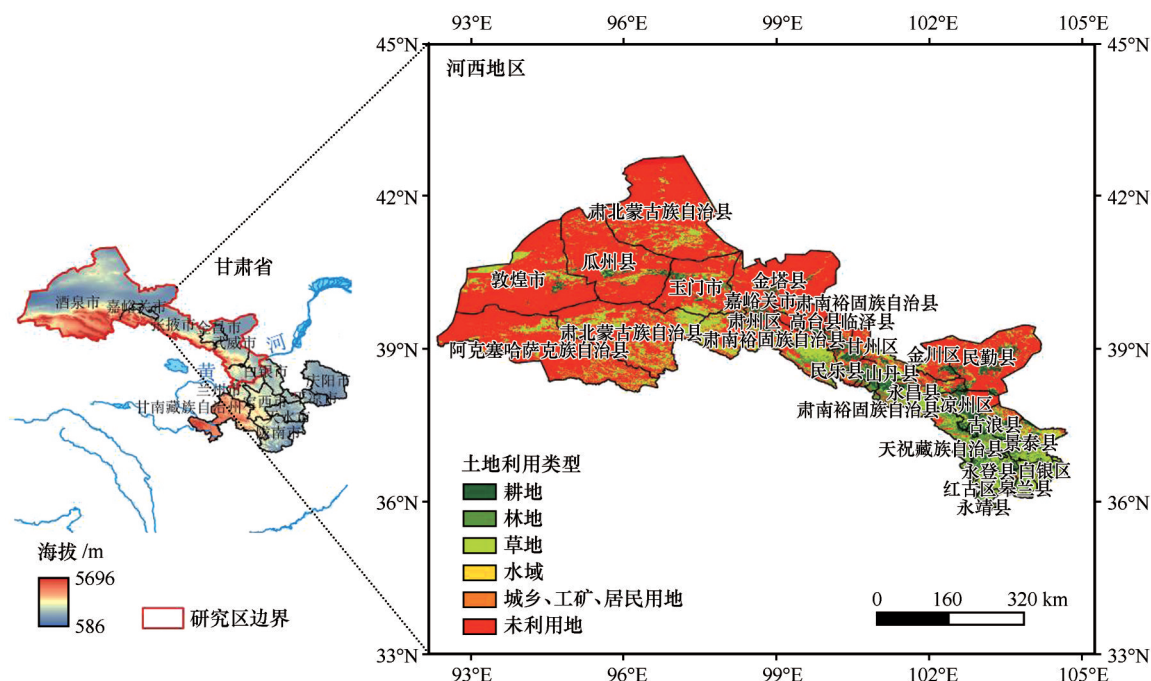


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

而成的完整内陆生态系统。近些年随着社会经济的发展,人类活动逐渐频繁,其生态问题已成为当地亟待解决的重要问题。深入探究河西地区生态系统服务功能变化,特别是在水源涵养方面,对水资源优化管理具有重要的理论和现实意义。

1.2 研究方法

1.2.1 人类足迹计算方法

人类足迹法指数评价人类活动对生态系统影响的指数,在定量评估人类活动方面具有广泛适用性^[11]。人类足迹作为促进保护规划的有用工具,对确保可持续发展也具有重要意义^[12-14]。本文选取土地利用、人口密度、夜间灯光、道路和铁路共 5 个指标来计算河西地区人类活动强度,人类足迹指数得分越高,意味着人类活动的影响越大。

$$HF = I_{Luc} + I_{Pop} + I_{Lig} + I_{Roa} + I_{Rai} \quad (1)$$

式中:HF 表示该像元范围内的人类足迹指数,值域为 0~50 分,分值越高代表人类活动强度越高; I_{Luc} 表示该像元范围内的土地利用类型影响强度,取值 0~10; I_{Pop} 表示该像元范围内的人口密度影响强度,取值 0~10; I_{Lig} 表示该像元范围内的夜间灯光影响强度,取值 0~10; I_{Roa} 表示该像元范围内道路的影响强度,取值 0~10; I_{Rai} 表示该像元范围内铁路的影响强度,取值 0~10^[15]。

1.2.2 人类活动强度评价赋值

土地利用变化是人类活动作用于陆地表层的重要方式和响应,同时也是反映人类活动强度最直接的因子。本文在参考文献的基础上^[16-17],对各土地利用类型(一级分类)所反映的人类活动强度大小进行赋值,赋值越高,代表人类活动强度越大(表 1)。

人口密度越高,对自然界的干扰就越大,即使在技术和交通落后的地区,人口密度的变化也是生态系统功能降低的重要原因^[18]。本文综合考虑河西地区多年人口波动,以河西地区 2010—2020 年人口密度为研究数据,对不同人口密度水平进行赋值^[19]。

夜间灯光强度是人类活动强度的表征,可作为间接的人类足迹指标,可以配合其他指标进一步解释人类活动强度。河西地区整体灯光强度较弱,主要在城镇和工厂等地,为了客观反映河西地区当前灯光强度大小,将 2010 年夜间灯光值为 0 的像素分配给得分为 0,其他夜间灯光值的区域被分成 10 个等级,然后每个等级中的值依次编码。为了使 3 年

表 1 土地利用类型、人口密度、夜间灯光赋值

Table 1 Assignment of Land use type, population density, nightlight

指标		赋值分数
土地利用类型	城乡、工矿、居民用地	10
	耕地	7
	林地	5
	水域	3
	草地	2
	未利用地	1
人口密度/(人·km ⁻²)	>1 400	10
	250~1 400	9
	70~250	7
	36~70	5
	30~36	3
	0~30	1
	0	0
夜间灯光值	69~150	10
	34~69	9
	16.6~34	8
	8.2~16.6	7
	4.1~8.2	6
	2.2~4.1	5
	1.2~2.2	4
	0.7~1.2	3
	0.5~0.7	2
	0.0~0.5	1

的夜间灯光可比较,使用 ArcGIS 10.2 中的分位数分类方法将 2010 年的数据分成 10 个等级,并使用 10 个阈值作为标准将 2015 年和 2020 年的夜间灯光数据赋值^[20]。

道路是区域经济社会发展中不可或缺的组成部分,对人类活动的范围和强度有着重要影响。然而,随着道路的开通,沿线产生的固体、液体和噪声污染也随之而来,对周边生态环境造成干扰。不仅破坏了动物的栖息环境,还导致了区域景观的破碎化程度加深,从而影响整个区域范围内的生态过程。为研究河西地区人类足迹水平,本文将道路分为 5 个等级进行影响评价,包括高速公路、国道、省道、县道和其他公路,将道路沿线的最大影响范围设置为 5.5 km。通过对沿线道路的分类和缓冲区分析,将不同道路的缓冲区到道路间距按照人类活动强度的强弱进行赋值。缓冲区到道路间距越小,所反映的人类活动强度越大,赋值越高;反之越弱,赋值就越低。通过这种方式,可以准确地反映不同道路的人类活动强度,从而分析道路对生态环境的影

响。运营过程中的大型铁路对生态干扰较小,干扰主要在3.5 km范围内,由于本章使用的是建设完成后正式开通运营的铁路数据,因此根据实际情况将铁路干扰范围集中在3.5 km内^[21]。具体赋值如表2。

表2 道路赋值
Table 2 Assignment of Road and railroad

道路类别	距离/km					
	0~0.5	0.5~1.5	1.5~2.5	2.5~3.5	3.5~4.5	4.5~5.5
高速公路	10	9	7	5	3	1
国道	10	8	5	3	1	0
省道	9	6	3	2	1	0
县道	8	5	3	1	0	0
其他道路	8	5	3	1	0	0
铁路	8	4	2	1	0	0

为深入分析河西地区人类活动强度时空变化特征,依据HF数值对人类活动强度进行如下划分:低值地区($0 < HF < 4$),较低值地区($4 \leq HF < 10$),中值地区($10 \leq HF < 16$),较高值地区($15 \leq HF < 20$)以及高强度地区($20 \leq HF < 50$)。

1.2.3 水源涵养功能量化评估

InVEST模型(生态系统服务和权衡的综合估值)由斯坦福大学、自然保护联盟和WWF共同开发。它为决策者提供了科学基础,通过模拟不同土地利用情景下生态系统产品变化的质量和价值,评估人类活动的好处和影响^[22]。通过InVEST模型中的产水量模块(Water Yield)来计算某一区域的产水量,某栅格单元上降雨量减去蒸散量的差值即为产水量,包括地表产流、壤中流、冠层截留量和枯落物持水量,再用地形指数、土壤饱和导水率和流速系数对产水量进行修正获得水源涵养量,具体计算过程如下:

$$Y_{xy} = \left(1 - \frac{AET_{sj}}{p_x}\right) \times p_x \quad (2)$$

式中: Y_{xy} 表示j类土地利用方式下栅格x的产水量; AET_{sj} 表示j类土地利用方式下栅格x的实际年蒸散量; p_x 是x单元的年降水量;

$$Retention = \min\left(1, \frac{249}{Velocity}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times TI}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K_{sat}}{300}\right) \times Yield \quad (3)$$

$$TI = \left(\frac{Drainage_Area}{Soil_Depth \times Percent_Slope}\right) \quad (4)$$

式中: $Retention$ 为水源涵养量(mm); $Velocity$ 为流速系数; K_{sat} 为土壤饱和导水率($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$),根据土壤的黏粒、粉粒和砂粒含量计算得到; TI 为地形指数, $Drainage_Area$ 为集水区栅格数量; $Soil_Depth$ 为土壤深度(mm); $Percent_Slope$ 为坡度百分比^[23]。

1.2.4 双变量空间自相关模型

空间自相关是反映区域单元上某种地理现象或某一属性值与邻近区域单元上同一现象或属性值相关程度的重要指标,包括全局空间自相关和局部空间自相关,多采用Moran's I和Local Moran's I指数描述^[24]。Moran's I指数计算公式为:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

式中: I 为双变量全局空间自相关指数; n 为格网数量; ω_{ij} 为空间权重; I_{ij} 为双变量局部空间自相关指数; I 取值为 $[-1, 1]$ 表征生态系统服务与人类活动强度的权衡与协同关系,其中 $I > 0$ 且越接近1,则说明生态系统服务与人类活动强度表现为协同关系且协同度越大; $I = 0$,则说明两者不表现为权衡协同关系; $I < 0$ 且越接近于-1,则说明两者权衡关系越显著。

1.3 数据来源

气象数据包括河西地区2020年的降水量、平均气温、平均风速、相对湿度与日照时数等数据(表3),主要来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),在ArcGIS中插值得到空间分布栅格图层。土地利用类型数据与高程数据均来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),土地利用类型数据包括2020年1期,主要用于分析河西地区不同土地利用类型下生态系统服务功能的差异。高程数据主要用于分析不同海拔、坡度与生态系统服务功能之间的关系。土壤数据主要包括土壤质地和土壤深度数据,来自于世界土壤数据库(HWSD)中的中国土壤信息,通过裁剪得到河西地区土壤质地与土壤深度的空间分布栅格图层,主要用于土壤保持量与水源涵养量的计算。人口密度数据来自中国科学院资源环境科学数据中心

表 3 数据来源与处理

Table 3 Data sources and processing

数据类型	数据来源	数据内容	数据处理
气象数据	中国气象数据网(http://data.cma.cn/)	降水量、平均气温、平均风速、相对湿度、日照时数	在 ArcGIS 中插值得到空间分布栅格图层
土地利用类型与高程数据	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)	土地利用类型、高程	
土壤数据	世界土壤数据库(HWSD)	土壤质地、土壤深度	通过裁剪得到河西地区土壤质地与土壤深度的空间分布栅格图层
人口数据	中国科学院资源环境科学数据中心	人口密度	
道路数据	Open Street Map (http://www.overpass-api.de/index.html)	道路数据、铁路	使用 GIS 制作道路缓冲区,并赋值
电力数据	NPP/VIIRS 夜间灯光数据(https://eogdata.mines.edu/products/dmsp/#monthly)	夜间灯光数据	对数据进行投影和裁剪,选择合适的坐标系和范围,得到区域灯光强度

(<http://www.resdc.cn/>)通过裁剪得到河西地区人口分布栅格数据图层,主要用于人类足迹的计算。道路数据主要来自 Open Street Map,使用 GIS 及其他软件打开道路数据,进行投影、分类、筛选、编辑等操作。夜间灯光数据采用 DMSP-OLS 和 NPP-VIIRS 两种夜间灯光遥感数据^[25]。

2 结果与分析

2.1 河西地区人类足迹时空分布特征

2010—2020 年,河西地区的人类活动强度呈显著上升趋势(图 2)。2010—2015 年人类活动增长较快,2015—2020 年增长放缓。从区域划分看,河西地区因存在大量荒漠和戈壁,历年来人类足迹低值区与较低值区域占比一直较高。高强度人类活动

的区域占比总体上较少。具体而言,该地区低值区的占比从 2010 年的 66.8% 下降至 2020 年的 50.9%,较低值区域呈现出先降低后又增高的趋势,从 2010 年的 18.0%,小幅下降至 17.7%,而后又上升至 19.9%,总体上对河西区地区人类活动强度的上升趋势没有影响。而人类足迹指数中值区、较高值区以及高值区都呈现出逐年增高的趋势,2010—2015 年中值区、较高值区和高值区的人类足迹指数分别增长了 4.6%、2.7% 和 3.1%,2015—2020 年中值区、较高值区和高值区的人类足迹指数分别增长了 2%、1% 和 0.7%,增速有所放缓。结果表明,过去 10 年间,河西地区的人类活动不仅在范围上呈现扩大趋势,人类活动的集聚性也逐年增强。因此,应高度关注人类活动的集聚性和迅速上升的问题,并采取及时的措施来调控人类活动对自然环境的不良影响,以确保生态系统和环境可持续发展。

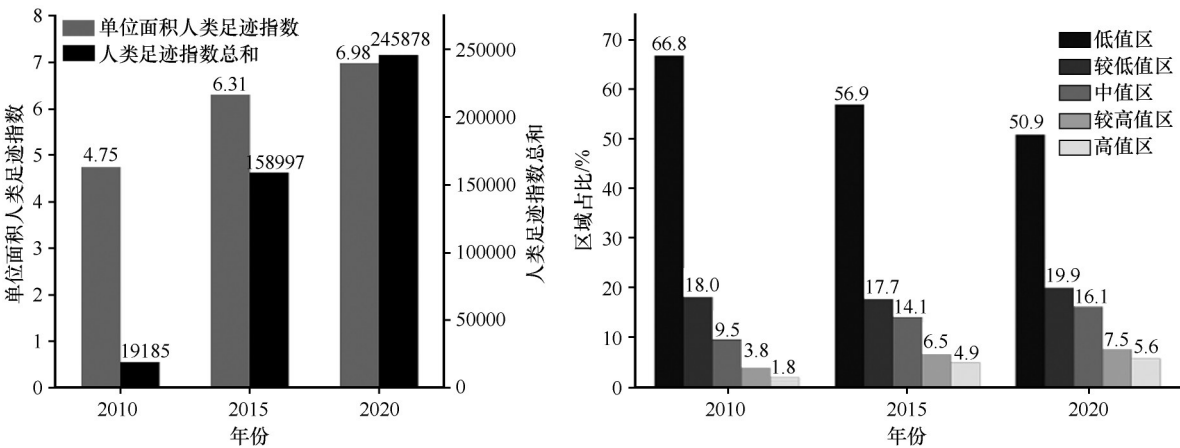


图 2 河西地区人类足迹指数及区域占比

Fig.2 Human footprint intensity and regional share in the Hexi region

河西地区人类活动强度较高的区域主要分布在河西走廊地区,呈现出东南部较高、西北部较低的分布格局(图3)。河西地区的西北部以及民勤一带的人类活动强度整体较低,这主要是由于气候条件较差,土地类型主要是荒漠、戈壁和裸地,开发难度大,开发成本高。相较于河西走廊地区及东南部人类活动强度较高区域,本身自然气候条件较好,交通状况也更为发达,这是导致地区差异的主要原因。从流域角度来看,黄河流域部分和石羊河流域的人类活动强度较高,生态水平受人类活

动影响较大,存在较多的生态问题,须不断加强改善生态系统服务功能的工作。相比之下,疏勒河流域和黑河流域的人类活动强度较低。但是从图3可以看出人类活动范围也随道路系统的完善在不断扩大。最后,从县域角度来看,人类足迹指数较高的地区主要在嘉峪关市、肃州区、甘州区、民乐县、凉州区以及兰州市、白银市各县级地区,这些地区也是整个河西走廊经济最为发达的区域。这些区域长期以来受到人类活动影响,需要更加关注其整体生态水平。

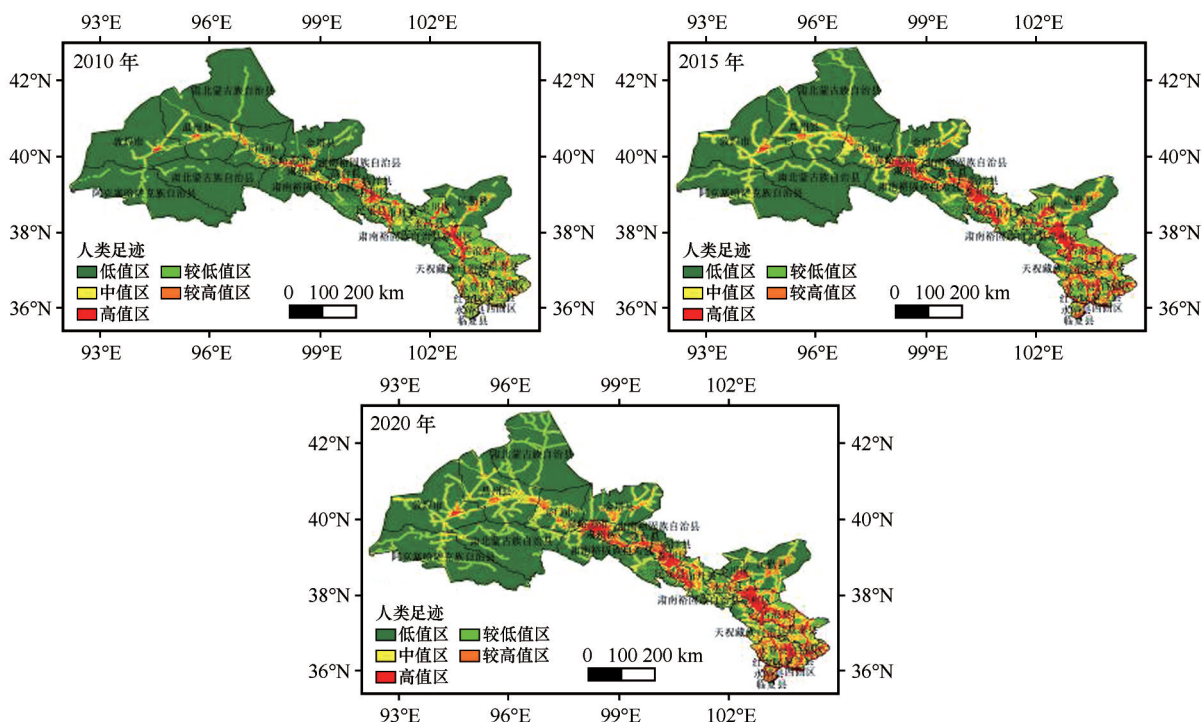


图3 河西地区人类足迹县域空间分布

Fig.3 Spatial distribution of human footprint counties in the Hexi region

2.2 河西地区水源涵养时空分布特征

2010—2020年河西地区单位面积水源涵养量平均值为8.64 mm,最大值在2015年(9.51 mm),最小值在2020年(7.59 mm)。在2010—2015年波动上升,2015—2020年有所下降。整体而言,河西地区的单位面积水源涵养量和水源涵养总量分别减少了1.24 mm和3.19亿 m^3 。2010—2015年,单位面积水源涵养量与水源涵养总量有所回升,分别增加了0.68 mm和1.81亿 m^3 ;2015—2020年河西地区水源涵养功能相比之前出现了明显变化,单位面积水源涵养量与水源涵养总量分别减少了1.92 mm和5.1亿 m^3 (图4)。水源涵养量的波动受到气候变化和人类

活动的影响。降水量的减少和潜在蒸散发的增加导致2020年更加干旱,水源涵养量下降。水源涵养量在2020年出现下跌的最大原因是河西地区2020年平均降水量仅为105.39 mm,相较于河西往年平均降水量152.01 mm有较大的下降。从区域划分的角度看,水源涵养的高值区域从2010年占比2.8%上升至2015年的4.4%,随后又下降到4.1%,虽然2020年降水量有明显下降,但水源涵养的高值区波动却相对稳定,这说明在水源涵养高值区除受到气候因素影响,人类活动因素也是区域水源涵养的主导因素。

研究区水源涵养量整体上表现出南高北低的空间分布特征(图5)。河西地区水源涵养量较高的地区主要分布在肃南裕固族自治县东部、山丹县南

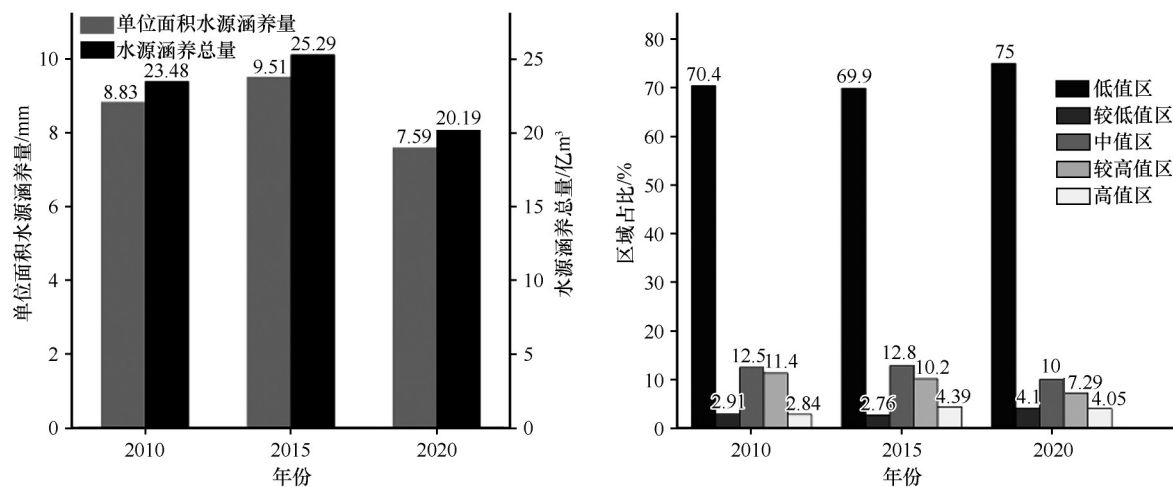


图 4 河西地区水源涵养量时间变化及区域占比

Fig.4 Changes in water conservation time and regional share of the Hexi region

部、永昌县西南部和天祝藏族自治县西北部地区，较低的地区主要分布在民勤县、金昌市金川区、临泽县、高台县、酒泉市肃州区、金塔县、瓜州县、肃北蒙古族自治县、玉门市与嘉峪关市等地区。为进一步了解水源涵养功能的空间变化情况，将单位面积水源涵养量分为 5 类：低值区（<5 mm）、较低值区（5~10 mm）、中值区（10~30 mm）、较高值区（30~50 mm）与高值区（>50 mm）。河西地区单位面积水

源涵养量属于低值区与较低值区的面积占比整体上呈先减少后增加的变化趋势，中值区与较高值区的区域面积占比逐渐减少，而高值区的面积占比则先增加后减少。受到人类活动和气候要素的影响，河西地区在 2020 年的水源涵养功能受到了很大影响，并且单位面积水源涵养量极低值区的占比仍然较大，应该继续加强生态修复工程的实施来稳固河西地区水源涵养功能。

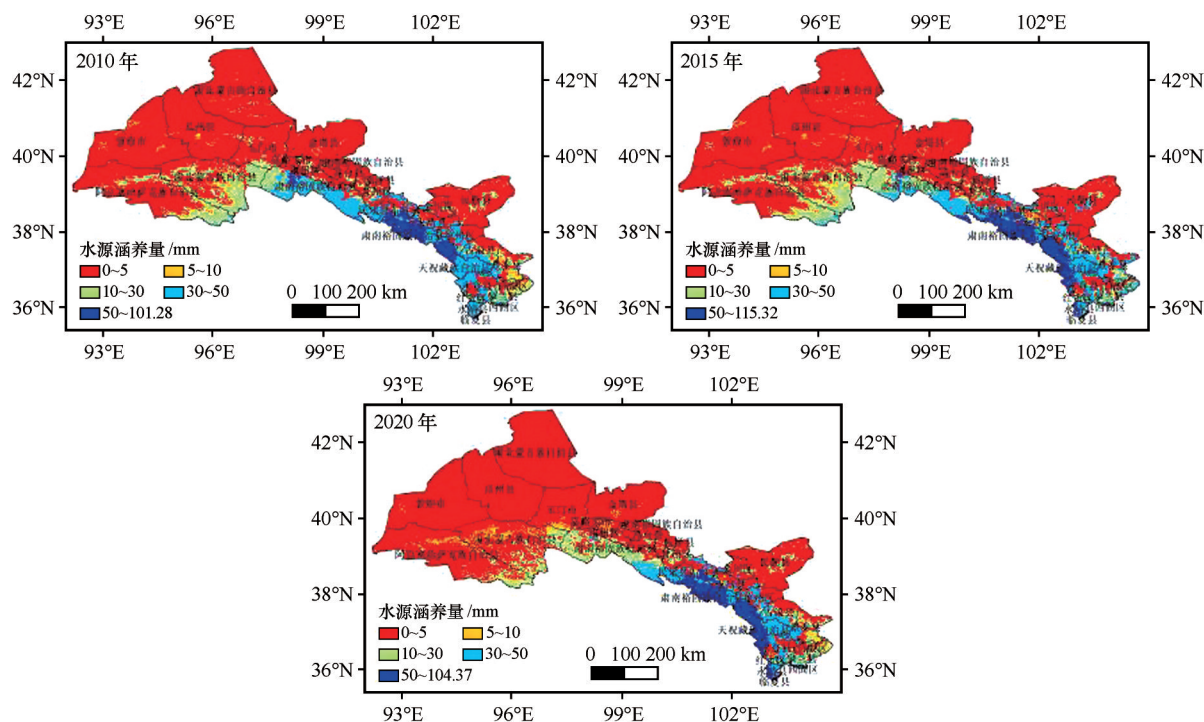


图 5 河西地区水源涵养量空间分布

Fig.5 Spatial distribution of water content in the Hexi region

2.3 人类足迹指数与水源涵养功能空间分析

2.3.1 河西地区全局 Moran's I 指数

河西地区的人类足迹与水源涵养 P 值达到了 0.001, z 值均大于 35, 意味着该区域的人类足迹与水源涵养在空间上均存在着较为显著的正空间自相关性(表 4), 呈现出明显的空间聚集性。即人类活动水平相似的区域往往集聚在一起, 水源涵养量在空间上也呈现出明显的区域集聚性。这也说明在河西地区人类活动水平相似的区域具有相似的社会经济背景和自然环境条件。因此, 在制定区域规划和发展策略时, 应该充分结合河西地区特殊的生态环境情况以及人类足迹的空间聚集性, 注重平衡经济发展和生态环境保护之间的关系。此外, 人类活动很可能对水源涵养量产生影响, 其内在机制, 值得进一步研究探讨。

2.3.2 人类活动与水源涵养的空间相关性

为进一步探究两项指标的聚集性是否存在关系, 进一步计算二者的双变量 Moran's I 指数(图 6)。人类足迹与水源涵养服务功能的全局 Moran's I 指数呈现出空间正相关的趋势。这说明河西地区人类足迹和水源涵养在空间上呈现出聚集分布的特

表 4 Moran's I 指数结果

Table 4 Moran's I index results

指标	年份		
	2010	2015	2020
人类足迹指数 Moran's I	0.770	0.723	0.773
Z 值	40.39	37.30	40.06
P 值	0.001	0.001	0.001
水源涵养 Moran's I	0.860	0.851	0.859
Z 值	44.67	43.83	45.35
P 值	0.001	0.001	0.001
人类足迹指数与水源涵养	0.292	0.277	0.348
Z 值	20.61	18.61	24.02
P 值	0.001	0.001	0.001

点, 数据点主要分布在第一象限。2010、2015、2020 年 Moran's I 指数分别是 0.292、0.277、0.348。2010—2020 年 Moran's I 指数变化为先减少后增加的波动状态, 造成这种波动原因可能是大气降水、生态本底值的作用。接着, 通过绘制双变量局部空间自相关 LISA 聚集图, 深入探讨河西地区人类足迹和 水源涵养服务功能的空间关系(图 7)。河西地区西北

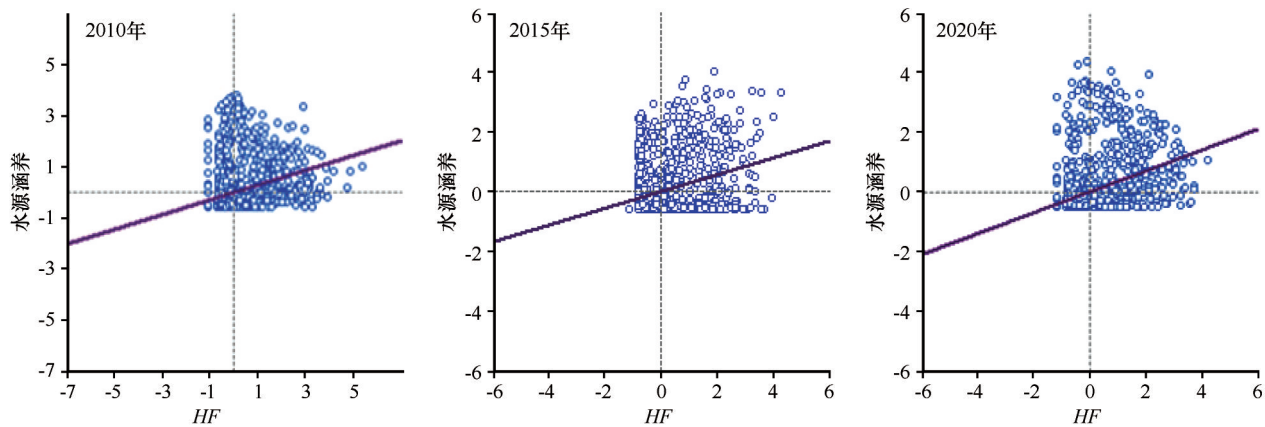


图 6 2010、2015 年和 2020 年人类足迹与水源涵养 Moran's I 散点图

Fig.6 Scatterplot of human footprint and water conservation Moran's I for 2010, 2015 and 2020

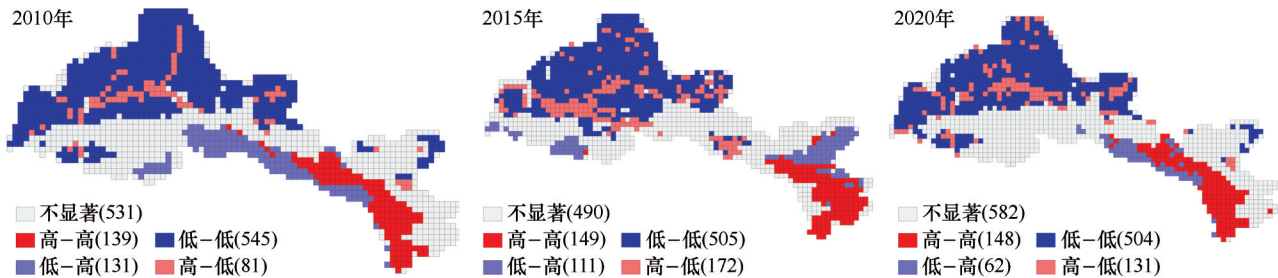


图 7 人类足迹与水源涵养聚集图

Fig.7 Map of human footprint and water-intensive aggregation

部地区,位于酒泉境内呈现出低-低的分布(即低人类足迹指数与低水源涵养分布)特点,这主要是由于河西西北部存在大量的戈壁和荒漠,本身的水源涵养量较低,且人迹罕至。即便在这些区域存在高-低分布情况,也可以推断出,该地区的水源涵养较低的主要原因是由于该地区本身的生态水平和气候条件导致,而非人类活动,并且可以看出人类活动的范围受气候及自然条件影响较小。而分布在河西地区东南部地区,兰州、白银、肃南裕固族自治县、天祝藏族自治县等地区呈现出高-高的分布特点。造成这一现象的原因,一方面是这些区域临近祁连山国家公园水源涵养重点保护区域,受到人类活动的积极影响较多,另一方面这些地区的水源涵养自然禀赋本身就较好,因此整体上来看,河西地区人类活动对水源涵养生态服务功能呈现出一定促进作用。

3 讨论

本研究中,人类活动的评价采用了人类足迹的方法,从指标选择来看,与水源涵养存在显著的生态学机制。首先,道路和铁路的选择可以很好地反映人类活动的范围和频率,且道路的发展产生了显著的生态效应。例如,改变景观的格局和过程,影响景观的连通性、稳定性和功能,影响生态系统的能量流动和物质循环等^[26]。道路还会改变地表的渗透性、蒸发性和反射性,影响降水的产生、径流的形成和地下水的补给,从而降低水源涵养能力^[27]。而夜间灯光影像记录的地表灯光强度信息不仅能直接反映人类活动差异,还会干扰植物的光周期,影响植物的生长、开花和结果等生理过程^[28],进而影响植物的蒸腾作用和水分利用效率。因此被广泛应用于城市化进程研究、生态环境评估等领域^[29]。土地利用则是一个把土地的自然生态系统变为人工生态系统的过程,是自然、经济、社会诸因素综合作用的复杂过程,其中社会生产方式往往起决定性的作用。它与人口密度均可以反映出人类活动水平。土地利用的变化会改变地表的能量平衡、渗透性、蒸发性和反射性,影响降水的产生、径流的形成和地下水的补给,进而影响水源涵养能力。它也改变植被的类型、结构和覆盖度,影响植被的生长、开花和结果等生理过程,进而影响水源涵养量。

河西地区人口集中、经济快速发展且有着悠久

的贸易文化,人类活动强度和范围不断扩大^[30],势必会对生态系统服务功能产生影响。本研究结果显示,河西地区人类足迹与水源涵养服务功能存在显著的空间自相关性,两者各自表现出了区域集聚的特征。位于河西地区的西部,人类足迹指数较低,水源涵养服务功能也相对较低,而在河西地区东南部和东北部,水源涵养服务功能较为良好,人类足迹密度也较高。这表明人类活动的扩张和集聚与当地的水源涵养服务功能的分布有着直接关联,水源涵养服务功能的水平不仅满足了当地居民的用水需求,还体现出人类“依水而生”、“依水而居”的关系。

从时间变化来看,水源涵养在2015—2020年有明显的下降趋势,同期人类足迹的增长却明显放缓。这反映出人类活动强度的增长,受到了水源涵养功能的约束。从空间上来看,三期的聚集特征中,高-高值区域都稳定分布在河西东南部区域,而这些区域本身临近祁连山国家公园,且始终处在人类活动强度较高值区域内。在2020年,虽然水源涵养因气候因素发生了明显的下降,但水源涵养高值区的占比并没有下降到2010年的水平,这说明除了气候因素,人类活动的影响起到了关键作用。这也反映出水源涵养服务功能和人类足迹之间存在显著相互作用的关系,即水源涵养服务功能的提升可以促进人类足迹的增长,同时人类活动的有序扩张和集聚也可以促进或者稳定水源涵养服务功能的水平。综上,河西地区的生态系统服务和人类活动之间存在着密不可分的联系。那么在未来进行地区的生态环境规划和资源利用方面,需要更加注重生态系统和人类活动之间的协调,以促进人类活动的可持续发展和生态系统的保护。

然而,本文仅考虑了人类活动与生态系统服务中的水源涵养功能,虽然结果可以较好地反映二者在空间上存在的关联,但是生态系统服务功能还与其他因素有着密切关系,例如结果中存在着较多二者不显著的区域,造成这种现象的主要原因可能是人类活动的具体行为并没有直接促进或者损害生态系统服务。其次,水源涵养功能的驱动因素不仅仅是人类活动,还受到气候因素、自然禀赋以及其他生态系统服务的综合作用^[31-32],而这一过程可以抵消人类活动对生态系统服务功能的影响,难以在空间上体现出来。最后,生态系统服务对人类的反馈也是有限的,二者之间的相互影响只有在综合因

素都符合条件的情况下才能呈现出明显的互馈效应,因此本文得出的结论可以为生态政策上提供新的思路。

4 结论

本文使用了人类足迹指数和InVEST模型,以河西地区为研究区域,分别量化了河西人类活动强度和水源涵养量,之后通过Moran's I 指数分析和LISA聚集图分析探讨了河西地区水源涵养与人类活动的空间关系,旨在探究2010—2020年河西地区人类活动的时空分布,评估2010—2020年河西地区水源涵养服务能力以及探讨水源涵养和人类活动之间的空间相关性。2010—2020年,河西地区水源涵养能力因气候因素呈现出先增长后下降的趋势,而人类活动呈现出不断增长的趋势。空间上河西地区人类活动和水源涵养均呈现出显著的集聚特征。河西地区水源涵养量整体上表现出南高北低的空间分布特征,说明在该地区南部的水资源比北部更为丰富。人类活动强度较高的区域主要分布在河西走廊地区,并且存在沿道路衍生的特征。这反映出河西区域内自然条件、环境因素差异较大,存在着明显的分布不均衡的情况。人类活动往往更倾向于朝较好生态服务水平的地区聚集。同时,二者在空间上也存在着较为显著的空间自相关性,说明人类活动与水源涵养的关系存在着“依水而生”的特点。这也说明需要通过合理规划和管理人类活动,来平衡经济发展和生态保护之间的关系,以保障水资源的可持续利用和生态的健康稳定。

本研究采用人类足迹指数能够较好地反映人类活动水平,但是从人类足迹指标层来看,人类足迹分析方法缺乏对人类活动的深入考虑,例如经济驱动因素、政策驱动因素以及生态驱动因素。如果能够进一步深入挖掘人类活动对水源涵养服务的内在驱动因素,则能更加清晰地反映出人类活动对生态系统服务功能的需求与互馈作用。另外,文中仅考虑了水源涵养一种生态服务功能,并不能全面地代表人类活动对生态系统服务功能的影响程度,如果能够更加深入地考虑气候防风固沙、水土保持、生物多样性等生态系统服务功能的综合影响,再结合人类活动强度与气候因素的影响,则能够更加深刻地反映出人类活动与生态系统服务之间的联系。

参考文献:

- [1] Qi Y, Lian X, Wang H, et al. Dynamic mechanism between human activities and ecosystem services: a case study of Qinghai Lake watershed, China [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106528.
- [2] Reid W V, Mooney H A. The millennium ecosystem assessment: testing the limits of interdisciplinary and multi-scale science [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2016, 19: 40–46.
- [3] Costanza R, De Groot R, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services [J]. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152–158.
- [4] Braat L C, De Groot R. The ecosystem services agenda: bridging the worlds of natural science and economics, conservation and development, and public and private policy [J]. *Ecosystem Services*, 2012, 1(1): 4–15.
- [5] 李冲, 张璇, 许杨, 等. 京津冀生态屏障区人类活动对生态安全的影响 [J]. *中国环境科学*, 2021, 41(7): 3324–3332.
- [6] 柳冬青, 曹二佳, 张金茜, 等. 甘肃白龙江流域水源涵养服务时空格局及其影响因素 [J]. *自然资源学报*, 2020, 35(7): 1728–1743.
- [7] 王云飞, 叶爱中, 乔飞, 等. 水源涵养内涵及估算方法综述 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(6): 1041–1071.
- [8] Redhead J W, Stratford C, Sharps K, et al. Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 569: 1418–1426.
- [9] 余新晓, 周彬, 吕锡芝, 等. 基于InVEST模型的北京山区森林水源涵养功能评估 [J]. *林业科学*, 2012, 48(10): 1–5.
- [10] 刘世梁, 刘芦萌, 武雪, 等. 区域生态效应研究中人类活动强度量化评价 [J]. *生态学报*, 2018, 38(19): 6797–6809.
- [11] Jianyong L, Yan Z, Qinghai X, et al. Human influence as a potential source of bias in pollen-based quantitative climate reconstructions [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 112: 77–91.
- [12] Camilo A C A, Manuel E M, Andres E, et al. Anthropogenic impact on habitat connectivity: a multidimensional human footprint index evaluated in a highly biodiverse landscape of Mexico [J]. *Ecological Indicators*, 2017, 72: 895–909.
- [13] Tapia-Armijos M F, Homeier J. Spatio-temporal analysis of the human footprint in South Ecuador: influence of human pressure on ecosystems and effectiveness of protected areas [J]. *Applied Geography*, 2017, 22: 43–62.
- [14] Sanderson E W, Jaiteh M, Levy M A, et al. The human footprint and the last of the wild: the human footprint is a global map of human influence on the land surface, which suggests that human beings are stewards of nature, whether we like it or not [J]. *BioScience*, 2002, 52(10): 891–904.
- [15] 段群滔, 罗立辉. 人类活动强度空间化方法综述与展望 [J]. *冰川冻土*, 2021, 43(5): 1582–1593.
- [16] Zhang X, Wang X, Zhou Z, et al. Spatial quantitative model of

- human activity disturbance intensity and land use intensity based on GF-6 image, empirical study in southwest mountainous county, China[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(18): 4574.
- [17] 吴琳娜, 杨胜天, 刘晓燕, 等. 1976年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应[J]. *地理学报*, 2014, 69(1): 54-63.
- [18] Cincotta R P, Wisnewski J, Engelman R. Human population in the biodiversity hotspots [J]. *Nature*, 2000, 404 (6781): 990-992.
- [19] Woolmer G, Trombulak S C, Ray J C, et al. Rescaling the human footprint: a tool for conservation planning at an ecoregional scale [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2008, 87 (1): 42-53.
- [20] 张晓宇, 宁晓刚, 王浩, 等. 人类足迹对东北虎豹国家公园景观破碎化的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(11): 4688-4702.
- [21] Li S, Zhang Y, Wang Z, et al. Mapping human influence intensity in the Tibetan Plateau for conservation of ecological service functions[J]. *Ecosystem Services*, 2018, 30: 276-286.
- [22] Junyu C, Gang L, Yang B. Evaluation of service value of water conservation in Taihu Lake basin based on InVEST model[J]. *Journal of Economics of Water Resources* [2023-06-14].
- [23] 黄从红, 杨军, 张文娟. 生态系统服务功能评估模型研究进展[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(12): 3360-3367.
- [24] 武彦珍, 王新闯, 王顺忠. 生态系统服务价值时空变化和权衡及其与人类活动强度关联性分析: 以慈利县为例[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(6): 311-321.
- [25] Chen Z, Yu B, Yang C, et al. An extended time series (2000-2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration [J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(3): 889-906.
- [26] 宗跃光, 周尚意, 彭萍, 等. 道路生态学研究进展[J]. *生态学报*, 2003, 23(11): 2396-2405.
- [27] 刘世梁, 杨志峰, 崔保山, 等. 道路对景观的影响及其生态风险评价: 以澜沧江流域为例[J]. *生态学杂志*, 2005(8): 897-901.
- [28] Liu Y, Speißer B, Knop E, et al. The Matthew effect: Common species become more common and rare ones become more rare in response to artificial light at night [J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(11): 3674-3682.
- [29] 陈颖彪, 郑子豪, 吴志峰, 等. 夜间灯光遥感数据应用综述和展望[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(2): 205-223.
- [30] 李建豹, 白永平, 罗君, 等. 甘肃省县域经济差异变动的空间分析[J]. *经济地理*, 2011, 31(3): 390-395.
- [31] 王治, 薛忠财, 王瑞丰, 等. 1990-2017年承德市水源涵养功能时空变化格局与影响因素研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(9): 1138-1146.
- [32] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 等. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2017, 37(7): 2455-2462.

Analysis of the spatial and temporal evolution of water resources conservation and human activity intensity in the Hexi region of Gansu Province

Zheng Chengwei^{1,2}, Deng Xiaohong³, Li Zongxing^{1,2}, Xue Jian^{2,4}, Ma Libang¹,

He Juan⁵, Lu Shuxiang⁵, Shao Jianxiong⁵, Cai Shiyu⁵, Zhao Peiyi⁵

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. Observation and Research Station of Eco-Hydrology and National Park by Stable Isotope Tracing in Alpine region / Gansu Qilian Mountains Ecology Research Center / Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Institute of County Economic Development / Institute of Rural Revitalization Strategy, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. Gansu Yanchiwan National Nature Reserve Management Center, Jiuquan 736300, Gansu, China)

Abstract: A thorough analysis of the spatiotemporal patterns and relationships between water conservation functions and human activities in arid and semi-arid regions is a necessary prerequisite for the scientific implementation of regional ecological restoration and water resource management. Employing a combination of the Human Footprint and InVEST models, quantitative assessments were conducted on the intensity of human activities and water conservation functions in the Hexi region. Additionally, spatial relationships between human activities and water conservation in the Hexi region were analyzed using bivariate Moran's I and other methods. The research findings indicate that there has been a trend of increasing human activity levels from 2010 to 2020, with an overall pattern showing higher activity in the southeast and lower activity in the northwest. The average water conservation capacity per unit area during the period from 2010 to 2020 was 8.64 mm. It showed an upward trend from 2010 to 2015 but declined from 2015 to 2020. The overall spatial distribution displayed a pattern of higher conservation capacity in the south and lower in the north. The bivariate Moran's I index for 2010, 2015, and 2020 were 0.292, 0.277, and 0.348, respectively, indicating a significant positive spatial correlation between human activities and water conservation service functions.

Key words: human activities; water conservation; InVEST model; spatial autocorrelation; Hexi region